

<http://www.ipnt.or.kr>

Print ISSN : 2288-8187 Online ISSN : 2289-0866

 **iThenticate**[®]
Professional Plagiarism Prevention

JOURNAL OF POSITIONING, NAVIGATION, and TIMING

Vol. 14. No. 3 September 2025



The Institute of Positioning, Navigation, and Timing

■ ■ **JOURNAL OF POSITIONING, NAVIGATION, AND TIMING**

Volume 14 Number 3 September 2025

- **Published by** The Institute of Positioning, Navigation, and Timing
- **Published on 15 September 2025**

- **Year of launching (history)** October 2012
- **Frequency** Quarterly
- **Quality of a text paper** Acid-free paper

- **Office Address**

The Institute of Positioning, Navigation, and Timing
#709 Twin City Namsan, 366, Hangang-daero, Yongsan-gu, Seoul 04323, Republic of Korea
TEL. +82-2-704-5681 / FAX. +82-2-790-5681 / <http://www.ipnt.or.kr>

- **Manuscript Editor** Nam Hae Jeong
- **Design & Printing** BTN Published Co.

- **Copyright © The Institute of Positioning, Navigation, and Timing**

Copyright 2025. The Institute of Positioning, Navigation, and Timing All Rights Reserved

- ⊞ This paper meets the requirements of KS X ISO 9706, ISO 9706-1994 and ANSI/NSIO Z39.48-1992 (Permanence of paper).

This work is supported by the 'Lottery Fund' of the 'Ministry of Strategy and Finance' and the 'Science and Technology Promotion Fund' of the 'Ministry of Science and ICT', contributing to the realization of social value and the development of national science and technology.



JPNT

JOURNAL OF POSITIONING, NAVIGATION, AND TIMING

Journal of Positioning, Navigation, and Timing (JPNT) is the official publication of the Institute of Positioning, Navigation, and Timing published quarterly. The purpose of the journal is to establish a high quality archival periodical presenting state of the art, recent advances and practical applications of Global Navigation Satellite System. Topics suitable for publication include Position, Navigation and Time (PNT) system architecture, signal structure, signal processing algorithms, receiver technologies, augmentation systems, complementary systems, and all applications such as scientific, geodesy, surveying, military and land, maritime, aero and space vehicles. Each article published is assigned a unique DOI to identify the article in a digital environment.

Contacting the JPNT ■

All manuscripts must be submitted online through the JPNT homepage <http://ipnt.jams.or.kr>
Items pertaining to manuscripts submitted for publication, as well as letters or other forms of communication regarding the editorial management of the JPNT, can be sent to Editor in Chief.

Editor in Chief Jeongrae Kim ■

E-mail : jrkim@kau.ac.kr **Tel :** +82 2 300 0110 **Fax :** +82 2 3158 2191

■ **Editorial Board (2025-2026)**

Editor-in-Chief

Jeongrae Kim

Korea Aerospace University, Goyang, Korea

Associate Editors-in-Chief

Heon Ho Choi
Suk-seung Hwang
Jiwon Seo
Kiyeol Seo

Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Korea
Chosun University, Gwangju, Korea
Yonsei University, Incheon, Korea
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

Editors

Jae Min Ahn
Horng-Yue Chen
Seong Yun Cho
Byung-Kyu Choi
Dongwook Choi
Sebum Chun
Tae Hyun Fang
Kwangjin Kim
Sunwoo Kim
Hungkyu Lee
Hyung Keun Lee
Jiyun Lee
Seungwoo Lee
Soyeon Lee
Taikjin Lee
Jose A. Lopez-Salcedo
Thomas Pany
Byungwoon Park
Jihye Park
Kwan-Dong Park
Chalermchon Satirapod
Hyoungmin So
Jin Woo Song
Ben K. H. Soon
Toshiaki Tsujii
Daehee Won
Jong-Hoon Won
Sung-hoon Yang
Xingqun Zhan

Chungnam National University, Daejeon, Korea
Academia Sinica, Taiwan
Kyungil University, Gyeongsan, Korea
Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, Korea
KT Corporation, Seongnam, Korea
Intergravity Technologies Inc., Daejeon, Korea
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea
Navigation System Business Group, Hanwha Aerospace, Seoul, Korea
Hanyang University, Seoul, Korea
Changwon National University, Changwon, Korea
Korea Aerospace University, Goyang, Korea
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea
University of Texas at Austin, USA
Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Korea
Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea
Universitat Autònoma de Barcelona, Spain
University of Federal Armed Forces Munich, Germany
Sejong University, Seoul, Korea
Oregon State University, USA
Inha University, Incheon, Korea
Chulalongkorn University, Thailand
Agency for Defense Development, Daejeon, Korea
Sejong University, Seoul, Korea
Home Team Science & Technology Agency, Singapore
Osaka Prefecture University, Japan
Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Korea
Inha University, Incheon, Korea
Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea
School of Aeronautics & Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China

Contents

Research Papers

- 195** Performance Analysis and Compensation Methods According to PDR Drift and Radio Map Resolution
Jaewi Kim, Boseong Kim, Beomju Shin
- 203** Improved Z-Matrix Search Algorithm for Enhanced Integer Ambiguity Estimation and Fix Reliability in RTK
Noah Minchan Kim, Dongchan Min, Jiyun Lee
- 211** Real-Time Estimation of GPS Satellite Clock Offsets Using a Global Tracking Network and Analysis of GPS Block-Dependent Clock Biases
Yunhwan Seol, Hyung-Jin Rim, Yeong-Guk Kim, Kwan-Dong Park
- 221** Instability Analysis of TWSTFT and GPS Time Comparison using a Double Difference Three-Cornered Hat
Juhyun Lee, Youn-Jeong Heo, Ju-Ik Oh, Joon Hyo Rhee, Gyeong Won Choi, Jong Koo Lee, Sung-hoon Yang, Young Kyu Lee, Dai-Hyuk Yu, Myoung-Sun Heo
- 231** A Constrained Optimization Framework for Camera Intrinsic Parameters Based on Camera-IMU Calibration
Hyun-Seup Cho, Tae-Dong Ahn, Sang-Chan Moon, Kang-Hyun Hwang, Tae-Hoon Lee, Hyun-Wook Hong, Juhyun Oh, Chang-Ky Sung
- 241** EKF-Based Orbit Determination Simulation for a Lunar Satellite Using Multi-GNSS Observables
Sungik Kim, Jisung Oh, Byungwoon Park, Hyewon Park, Jung-Min Joo
- 259** GNN-based Localization with Beam RSRP in 5G Systems
Hasom Seo, Hongseok Jung, Duhui Yang, Sunwoo Kim
- 265** Simulation of Orbit, Clock, and Ionospheric Corrections for a Regional Navigation Satellite System
Yongrae Kim, Heeseob Kim, Jeongrae Kim
- 275** 3D Location Estimation Algorithm Based on the Combined TDOA and FDOA for Fast Moving Object
Seul-Bi Jeon, Suk-seung Hwang
- 281** Prediction Method of Zenith Wet Tropospheric Delay with LSTM Model
Soyoon Yoon, Yongrae Kim, Heeseob Kim, Jeongrae Kim
- 291** GNSS-Synchronized Surface Buoy Network TDOA for Underwater Target Localization
Chul Hyun, Hyunseung Kim, Dong Geon Kim, Sungkyun Lee

Technical Papers

- 299** Design of Regional Ionosphere/Differential Code Bias Simulator Based on RINEX/IONEX Files
Hyung Keun Lee, Jeongrae Kim, Kwan-Dong Park, Dong-Hyo Sohn, Junseok Hong, Jong-Kyun Chung, Byung-Kyu Choi
- 313** Comparison of Clock Drift Modeling Methods for Maintaining Time Synchronization Between GNSS Receivers
Halim Lee, Seunghyeon Park, Joon Hyo Rhee, Gyeongmin Kim, Chulsoo Lee, Jiwon Seo
- 321** Comparison of Static and Kinematic GNSS Positioning Performance Using Qinertia Software
Nam-Woo Noh, Kwan-Dong Park

PDR Drift 및 Radio Map Resolution 변화가 SC 기반 위치 추정에 미치는 영향 분석

김재위, 김보성, 신범주[†]

Performance Analysis and Compensation Methods According to PDR Drift and Radio Map Resolution

Jaewi Kim¹, Boseong Kim¹, Beomju Shin^{†1}

Division of Software, Hallym University, Chuncheon, Gangwon-do 24252, Republic of Korea

ABSTRACT

This study investigates the effect of Pedestrian Dead Reckoning (PDR) drift and radio map resolution on the performance of Surface Correlation (SC)-based indoor positioning. SC utilizes spatially accumulated Received Signal Strength Indicator (RSSI) sequences to improve localization accuracy, but its performance is sensitive to PDR errors and radio map granularity. To mitigate the impact of drift-induced misalignment, a $\pm 10^\circ$ rotation-based correction method is proposed. Simulations are conducted under varying resolutions (1 m, 2 m, 3 m) and drift levels (0.1° , 0.3° , 0.5°) to evaluate positioning accuracy and computational efficiency. The proposed method demonstrates consistent performance improvement under all drift conditions and is especially effective with high-resolution radio maps. The findings provide practical guidance for designing SC-based positioning systems with optimized trade-offs between accuracy and efficiency.

Keywords: indoor localization, PDR, drift, RSSI, surface correlation

주요어: 실내항법, 보행자추측항법, 드리프트, 수신신호세기, surface correlation

1. 서론

최근 스마트폰의 보급 확대와 함께 위치 기반 서비스에 대한 수요가 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 실내 환경에서도 높은 정확도의 위치 정보를 제공할 수 있는 기술에 대한 관심이 커지고 있다. 실외에서는 Global Navigation Satellite System를 통해 정밀한 위치 파악이 가능하지만, 실내나 도심 환경에서는 신호 차단 및 multipath 등의 문제로 정확도가 크게 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 실내 위치 추정 기술이 제안되어 왔으며, 그 중에서도 fingerprinting 기법은 널리 사용되는 대표적인 방식이다. 이 기법은 사용자가 특정 위치에서 측정된 Received Signal Strength Indicator (RSSI) 벡터를 사전에 구축된 radio map과 비교하여 사용자의 위치를 추정한다 (Bahl &

Padmanabhan 2000).

Fingerprinting 기법은 구현이 비교적 간단하고, Wi-Fi와 같은 기존 무선 인프라를 활용할 수 있다는 장점으로 인해 다양한 연구가 진행되어 왔다 (Noh et al. 2021). 그러나 RSSI 기반 방식은 실내 환경 변화나 장애물로 인해 측정값이 불안정해지고, 단일 시점의 RSSI 벡터에만 의존하기 때문에 정확도 측면에서 한계가 존재한다 (Shin & Lee 2024). 또한 fingerprinting 방식은 대규모 환경에서는 계산량이 증가하여 실시간 위치 추정에 어려움을 겪는다는 점도 지적되고 있다 (Tran & Zhang 2012). 이러한 문제점을 보완하기 위한 대안으로는 Pedestrian Dead Reckoning (PDR) 기반 경로 정보와 누적 RSSI 패턴을 활용하는 Surface Correlation (SC) 기법이 제안되었다. SC는 사용자가 이동 중 수신한 RSSI를 누적하여 User RSSI Surface (URS)를 생성하고, 이

Received May 24, 2025 Revised Jun 16, 2025 Accepted Jul 12, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: bjshin@hallym.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

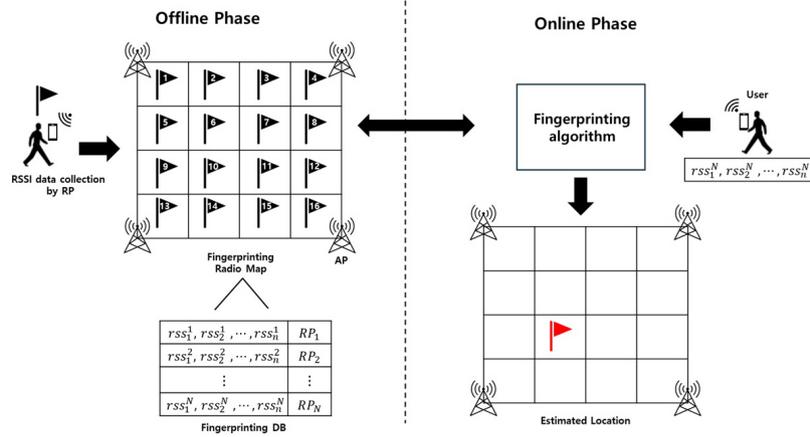


Fig. 1. Overview of the fingerprinting localization process.

를 사전에 구축된 radio map 전체와 비교하여 가장 유사한 위치를 추정한다 (Shin & Lee 2024). 이 방식은 단일 RSSI 벡터보다 공간적 RSSI 패턴을 정보를 반영할 수 있어 더욱 정밀한 위치 추정이 가능하다. 그러나 SC 기법은 URS가 PDR 경로에 기반하기 때문에, 보행자의 PDR 누적 오차가 증가할 경우 URS가 공간적으로 왜곡되고, 이로 인해 위치 정합 정확도가 저하될 수 있다 (Shin & Lee 2024). 또한 radio map의 해상도에 따라 위치 표현의 정밀도와 계산 효율성 간 trade-off 문제가 발생하는데, 고해상도는 정밀한 위치 표현이 가능하지만 계산량이 증가하며, 저해상도는 계산 효율성이 향상되나 정확도가 저하되는 경향이 있다. 기존 연구들은 SC 기법의 정확도나 경로 정합 성능을 개별적으로 분석하거나, PDR 누적 오차 또는 radio map 해상도 변화 중 하나의 요소에 국한된 영향을 평가하는 데 그친 경우가 많다 (Shin & Lee 2024). 그러나 두 요소가 결합될 때 발생하는 상호작용 효과, 즉 PDR 오차와 해상도 변화가 함께 위치 추정 성능에 어떤 복합적인 영향을 미치는지에 대한 분석은 부족한 실정이다.

본 논문에서는 SC 기반 실내 위치 추정에서 발생하는 PDR 경로의 누적 오차와 radio map 해상도 변화가 위치 추정 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이로 인한 성능 저하를 보완하기 위한 $\pm 10^\circ$ 회전 탐색 기반의 누적 오차 보정 기법을 제안한다. 기존 SC 방식은 PDR 경로에 기반한 URS를 radio map과 비교하여 위치를 추정하지만, PDR 경로에 오차가 누적되면서 URS가 왜곡되어 정합성이 저하된다. 이를 해결하기 위해, 최근 PDR 경로의 일정 구간에 대해 총 3개의 후보 경로($+10^\circ, 0^\circ, -10^\circ$)를 생성하고, 각각 URS를 구성하여 radio map과의 상관도를 계산한 뒤, 가장 높은 상관도를 보이는 URS를 선택하여 해당 회전 각도를 누적 보정 각도로 반영하는 방법을 제안한다 (Shin et al. 2024). 이와 함께, SC 기법의 성능에 영향을 미치는 두 가지 핵심 요소인 PDR 누적 오차(0.1, 0.3, 0.5) 및 radio map 해상도(1 m, 2 m, 3 m)의 변화에 따른 위치 추정 정확도를 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 성능 평가는 평균 위치 오차, RMSE, 최대 오차, 그리고 CDF 기반의 오차 분포를 통해 수행하였으며, 정확도와 계산 효율성 간의 trade-off 관계를 고찰하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 fingerprinting, PDR,

SC 등 주요 실내 위치 추정 기법의 이론적 배경과 기존 방식의 한계를 다룬다. 3장에서는 제안된 보정 기법의 알고리즘 구조와 실험 환경, 시뮬레이션 결과를 설명하며, 마지막 4장에서는 연구 결과를 요약하고 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 제안 기법 및 이론적 배경

2.1 Fingerprinting 기반 실내 위치 추정

Fingerprinting은 실내 위치 추정을 위해 널리 활용되는 대표적인 기법으로, 사용자가 특정 지점에서 측정된 RSSI 벡터를 사전에 구축된 radio map과 비교하여 가장 유사한 위치를 추정하는 방식이다 (Bahl & Padmanabhan 2000). Fig. 1은 이러한 fingerprinting 방식의 기본 절차를 시각적으로 나타낸다.

일반적으로 radio map은 실내 공간을 일정 간격의 Reference Point (RP)로 나누고, 각 RP에서의 RSSI 값을 수집하여 구축된다. 이 방식은 Wi-Fi AP, BLE beacon 등 기존 무선 인프라를 활용할 수 있어, 별도의 추가 하드웨어 없이 구현이 가능하다는 장점이 있다 (He & Chan 2016). 그러나 실내 구조나 사용자 밀도, AP 배치 변화 등에 민감하게 반응하여 신호의 변동성이 크고, multipath 현상이 위치 정확도에 부정적인 영향을 줄 수 있다 (Kotaru et al. 2015). 또한 위치 추정 성능은 radio map의 해상도에 크게 영향을 받는다. 해상도란 RP 간의 간격을 의미하며, 간격이 좁을수록 위치 표현이 정밀해지는 반면 연산량과 메모리 요구가 증가한다. 반면 간격이 넓어지면 계산 효율은 향상되지만 정확도는 감소하는 경향이 있다.

2.2 PDR과 누적오차 문제

PDR은 스마트폰에 내장된 가속도계 및 자이로스코프 센서를 활용하여 걸을 수, 이동 거리, 방향 등을 기반으로 사용자의 경로를 추정하는 기술이다. PDR은 무선 인프라 없이도 실시간으로 위치를 추정할 수 있다는 장점을 지니며, Wi-Fi 신호 수신에 불안정

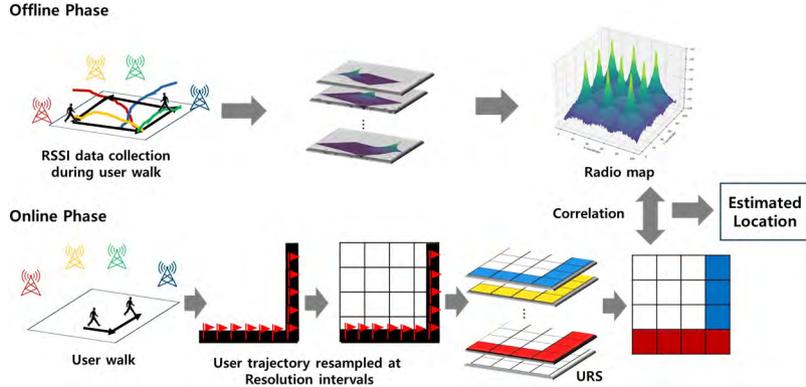


Fig. 2. Workflow of SC-based indoor localization (offline and online phases).

하거나 환경 변화가 잦은 실내 공간에서도 위치 추정이 가능하게 한다. 그러나 PDR은 센서 오차가 누적되면서 시간이 지남에 따라 실제 경로와 추정 경로 간의 차이가 점점 커지는 PDR 누적오차 문제가 발생한다 (Jung 2024). 이러한 PDR 누적오차는 보행자의 보행 패턴, 스마트폰의 위치 변화, 센서 노이즈 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 결과적으로, 장시간 이동하거나 방향 변화가 많은 환경에서는 오차가 크게 누적될 수 있다. 따라서 PDR 기반의 경로를 활용하는 SC에서도, PDR 누적오차에 의한 경로 왜곡은 위치 정확도의 성능을 낮추는 주요 요인이 된다. 이를 보정하기 위해 최근 연구들은 PDR 경로의 회전, 이동, 필터링 등의 보정 기법을 적용하거나 무선 신호 기반 기법과의 융합을 통해 누적오차의 영향을 최소화하려는 시도를 진행하고 있다 (Mansour et al. 2021).

2.3 SC와 누적오차 보정

기존 fingerprinting 방식은 단일 지점에서 측정한 RSSI 벡터만을 활용하기 때문에 신호의 순간적인 변동성이나 환경 변화에 취약하며, 정확한 위치 추정에 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 제안된 SC 기법은 사용자의 이동 중 수신된 RSSI 시퀀스를 PDR 기반 경로를 따라 누적하여 2차원 URS를 생성하고, 이를 사전에 구축된 radio map과 비교함으로써 위치를 추정한다 (Shin et al. 2023). URS는 사용자의 위치가 걸음이 검출된 시점에서만 업데이트되며, 걸음 간의 중간 구간이나 사용자가 정지한 상태에서는 추가적인 URS 생성이나 SC 위치 추정을 수행하지 않는다. 따라서 걸음이 검출되지 않은 시점에서의 사용자의 위치는 가장 최근에 추정된 SC 위치로 유지된다.

SC는 이처럼 RSSI의 누적 패턴을 반영함으로써, 기존 fingerprinting 방식에 비해 더 높은 위치 추정 정밀도를 제공한다 (Shin & Lee 2024). SC의 구조는 1) Radio map 생성, 2) URS 생성, 3) 상관도 계산, 4) 최적 위치 선택의 4단계로 구성되며, 이 절차는 Fig. 2에 시각적으로 제시하였다. Offline 단계에서는 사용자가 각 RP에서 수집한 RSSI 데이터를 기반으로 radio map을 구축하고, 이는 위치별 신호 강도를 층별로 구성한 2차원 행렬로 저장된다. Online 단계에서는 사용자의 PDR 기반 경로가 주어졌을 때, 해당 경로를 해상도 간격에 따라 URS를 생성하고, 이후 URS

와 radio map을 비교하여 상관도를 계산함으로써 최종 위치를 추정한다. URS와 radio map 간의 상관도 계산에는 평균 절대 오차를 사용하였으며, 유효한 RSSI 값들을 기준으로 평균 절대 오차를 계산하고, 해당 오차가 최소가 되는 위치를 사용자 위치로 추정하였다. 이 과정은 식 (1, 2)와 같이 표현된다.

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \underset{(m,n)}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{m=1}^{M-I+1} \sum_{n=1}^{N-J+1} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |URS_{i,j,k} - RM_{(m+i-1, n+j-1, k)}| \right) \quad (1)$$

여기서 URS와 radio map 전 영역에 걸친 correlation 계산과정을 보여준다. (\hat{x}, \hat{y}) 는 radio map 상에서 URS와 가장 매칭이 잘된 위치를 의미한다. $URS_{i,j,k}$ 는 URS의 (i, j) 위치에서 k 번째 AP의 RSSI 값이며, $RM_{(m+i-1, n+j-1, k)}$ 은 radio map의 (m, n) 을 시작점으로 하는 영역 내의 (i, j, k) 좌표의 RSSI 값이다. I, J, K 는 각각 URS의 세로, 가로 AP 개수를 의미하며, M, N 은 radio map의 세로, 가로 크기를 의미한다. 이후, 식 (1)에서 correlation 계산을 통해 얻어진 (\hat{x}, \hat{y}) 는 URS가 radio map 상에서 가장 높은 유사도를 보인 영역의 좌측 하단 좌표이며, 이는 URS 내부 좌표계에서 기준점 $(0, 0)$ 에 해당한다. URS는 PDR 경로를 따라 누적된 이동 정보를 포함하고 있으며, 마지막 걸음의 상대 좌표 (x_m^p, y_n^p) 를 기준점에 더함으로써 식 (2)와 같이 최종 사용자 위치 (\hat{x}, \hat{y}) 를 계산한다.

$$(\hat{x}, \hat{y}) = (\hat{x} + x_m^p, \hat{y} + y_n^p) \quad (2)$$

URS가 PDR 경로에 기반하여 생성되기 때문에, PDR 누적오차가 지속적으로 누적되면 URS의 공간 정렬이 실제 이동 경로와 어긋나게 되고, 이에 따라 radio map과의 상관도 계산 정확도 역시 저하된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 일정 범위의 회전 탐색을 통해 누적오차를 보정하는 방식을 적용하였다. PDR의 방향오차가 누적되는 부호를 모르기 때문에 양방향으로 보정을 진행한다. Fig. 3은 이러한 $\pm 10^\circ$ 회전 탐색 기반 보정 방식의 개념을 시각적으로 설명한다. 왼쪽은 누적된 PDR 오차로 인해 실제 경로와 어긋난 PDR 경로를 보여주며, 이를 $-10^\circ, 0^\circ, +10^\circ$ 로 각각 회전한 뒤 URS를 생성하고 radio map과의 상관도 비교를 수행하는 과정을 나타낸다. 이 과정에서 각 회전 각도 θ 에 대해, PDR 경로는 식 (3)과 같이 2차원 회전 행렬, $R(\theta)$ 을 사용하여 회전된다.

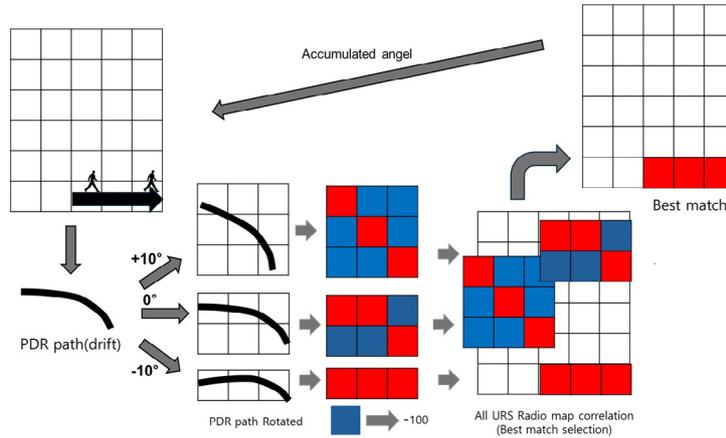


Fig. 3. ±10° angle-based correction process for PDR drift in SC localization.

$$\begin{bmatrix} x_n^R \\ y_n^R \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 x_n, y_n 는 각각 회전하기 전의 n번째 PDR 좌표를 의미하며, x_n^R, y_n^R 는 각각 회전된 PDR 좌표를 나타낸다. Fig. 3의 오른쪽 구조는 각 회전 각도에 따른 상관도 계산 결과 중 가장 높은 유사도를 가지는 위치를 선택하는 과정을 보여준다. 이를 통해 URS와 radio map 간의 정렬 오차를 완화하고, 위치 추정의 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 SC 기법의 성능에 영향을 미치는 radio map 해상도 변화(1 m, 2 m, 3 m)에 따른 성능 차이도 분석하였다. 해상도가 낮을수록 정밀한 위치 표현이 가능하지만 연산량이 증가하고, 반대로 해상도가 높을수록 계산 효율은 향상되나 위치 정확도는 저하되는 경향이 있다. 따라서 해상도(1 m, 2 m, 3 m)와 PDR의 스텝당 방향오차 크기 조합에 따른 위치 추정 성능을 시뮬레이션을 통해 평가하고, 평균 위치 오차 및 RMSE를 기준으로 정확도와 연산 효율 간의 trade-off를 분석하였다. 누적 RSSI 패턴 기반 상관도 방식은 기존 연구에서도 높은 정확도와 빠른 수렴 속도를 입증한 바 있다 (Lee et al. 2019). 이러한 PDR 누적오차 보정 기법과 해상도 설정이 위치 추정 정확도에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해, 3장에서는 다양한 조건의 시뮬레이션 분석 결과를 제시하였다.

3. 시뮬레이션 환경 및 결과

3.1 시뮬레이션 환경

SC 기법의 PDR 누적오차 보정 효과와 radio map 해상도에 따른 성능 차이를 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 RSSI 모델은 식 (4)와 같다.

$$RSSI(d) = RSS_{d_0} - n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + N(0, \sigma^2) \quad (4)$$

여기서 d 는 AP와의 거리, RSS_{d_0} 는 기준 거리에서의 RSSI (-40

Table 1. Simulation parameters.

| Parameter | Value |
|----------------------------|--|
| Grid size (m) | 100* 100, 50*50, 33*33 |
| AP positions | (20, 20), (50, 20), (80, 20) (20, 50), (50, 50), (80, 50) (20, 80), (50, 80), (80, 80) |
| Max RSSI distance (m) | 40 |
| RSSI (dBm) | -40 |
| Radio map RSSI noise (dBm) | 1 |
| User RSSI noise (dBm) | 3 |
| Step length (m) | 0.6 |
| Turn interval (steps) | 100 |
| Turn angle (°) | 90 |
| Drift per step (°) | 0.5, 0.3, 0.1 |
| URS buffer size | 50 |

dBm), n 은 경로 손실 계수이며, $N(0, \sigma^2)$ 은 평균 0, 분산 σ^2 인 노이즈 항이다. 위치 오차는 식 (5)를 통해 산출하였는데, (x_t, y_t) 는 true 위치를 나타낸다.

$$E = \sqrt{(\hat{x} - x_t)^2 + (\hat{y} - y_t)^2} \quad (5)$$

주요 시뮬레이션 파라미터는 Table 1에 정리하였다.

3.2 시뮬레이션 시나리오 구성

시뮬레이션은 radio map 해상도(1 m, 2 m, 3 m)와 PDR 누적 오차(0.1, 0.3, 0.5)를 변수로 하여 구성되었다. 고해상도는 정밀한 URS 구성을 가능하게 하나 연산량이 크고, 저해상도는 계산 효율은 높지만 위치 정확도는 떨어지는 trade-off가 존재한다. 또한 PDR 누적오차가 클수록 URS의 정렬이 왜곡되어 radio map과의 상관도 계산이 부정확 해진다. 그렇기 때문에 결과적으로 위치 추정 성능이 저하된다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 차량 환경에서 제안된 기존 SC 기법의 ±10° 회전 탐색 방식을 참고하였다 (Shin et al. 2024). 차량과 보행자의 경로 생성 방식은 DR과 PDR로 차이가 있으나, SC 알고리즘 구조는 동일하므로 보정 방식 또한 동일하게 적용된다. 다만, 보행자의 경우 더 빈번한 방향 전환과 짧은 이동 단위를 갖는 PDR 특성상, 적용하는 회전 보

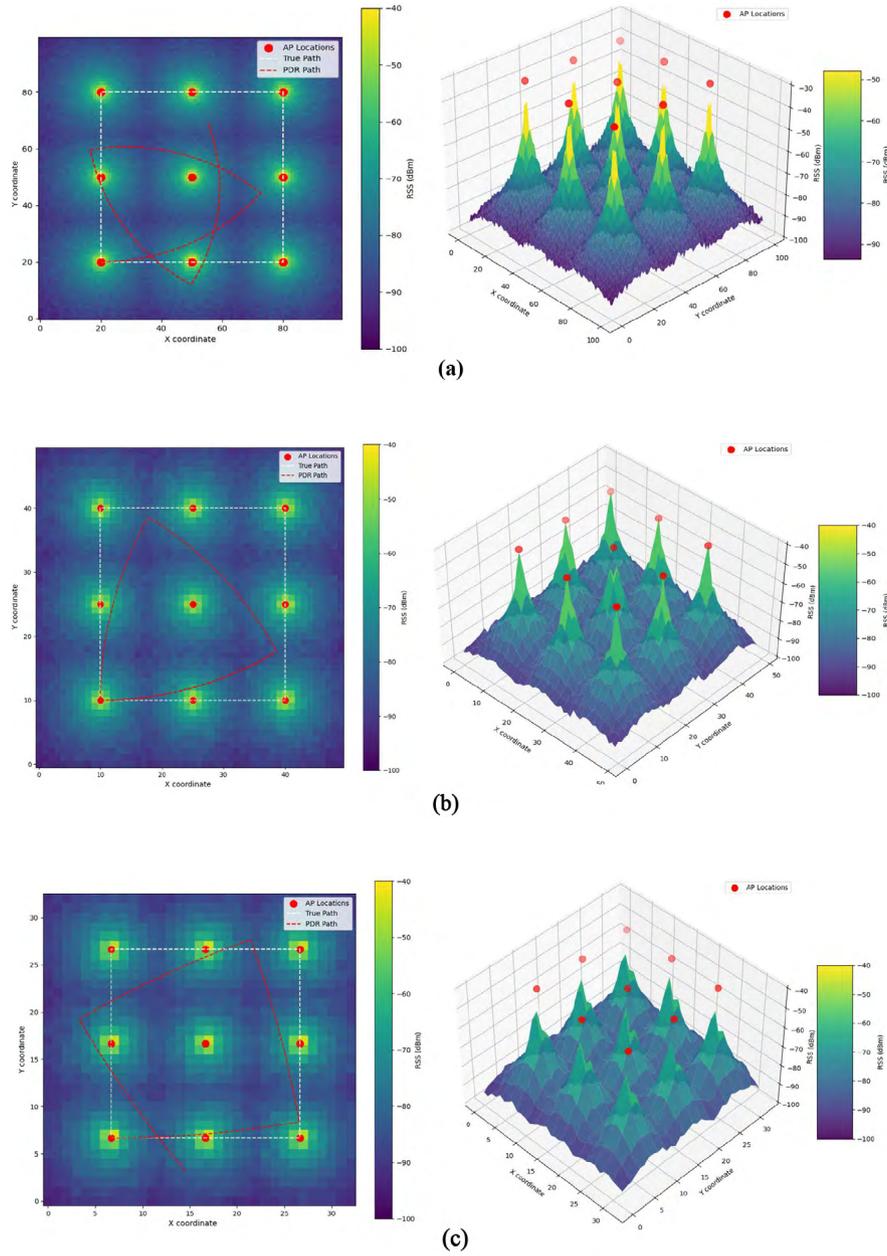


Fig. 4. AP placement and simulation path. (a) 1 m PDR drift 0.5, (b) 2 m PDR drift 0.3 (c) 3 m PDR drift 0.1.

Table 2. Localization performance analysis under various radio map resolutions.

| Resolution (m) | Drift=0.5 | | | Drift=0.3 | | | Drift=0.1 | | |
|----------------|----------------|----------|---------------|----------------|----------|---------------|----------------|----------|---------------|
| | Mean error (m) | RMSE (m) | Max error (m) | Mean error (m) | RMSE (m) | Max error (m) | Mean error (m) | RMSE (m) | Max error (m) |
| 1 | 2.119 | 2.699 | 9.265 | 1.915 | 2.568 | 9.108 | 1.851 | 2.472 | 8.352 |
| 2 | 2.758 | 3.453 | 12.781 | 2.606 | 3.192 | 9.035 | 2.946 | 3.756 | 11.873 |
| 3 | 3.163 | 3.555 | 8.857 | 3.449 | 3.924 | 8.857 | 3.635 | 4.251 | 12.343 |

정 범위는 환경에 따라 조정될 수 있다. Fig. 4는 해상도와 누적오차 조합에 따라 구성된 시뮬레이션 환경을 시각적으로 보여준다. 각 그림은 좌측에 2D RSSI radio map과 사용자 이동 경로를, 우측에는 RSSI 분포의 3D surface를 나타낸다.

3.3 시뮬레이션 결과

Tables 2는 각각 PDR 누적오차가 각각 0.5, 0.3, 0.1일 때의 위치 추정 성능(Mean, RMSE, Max error)을 보여준다. 해상도가 낮을수록 전반적인 정확도가 향상되며, PDR 누적오차가 증가할수

Table 3. Computation time by radio map resolution.

| Resolution | Time |
|------------|-------|
| 1 m (s) | 107.8 |
| 2 m (s) | 42.6 |
| 3 m (s) | 37.9 |

Table 4. 90% CDF-based position error under various resolutions and drift conditions.

| Resolution | CDF | | |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| | Drift=0.5 | Drift=0.3 | Drift=0.1 |
| 1 m | 4.4 m | 3.8 m | 3.5 m |
| 2 m | 5.9 m | 5.2 m | 4.9 m |
| 3 m | 7.1 m | 6.6 m | 6.3 m |

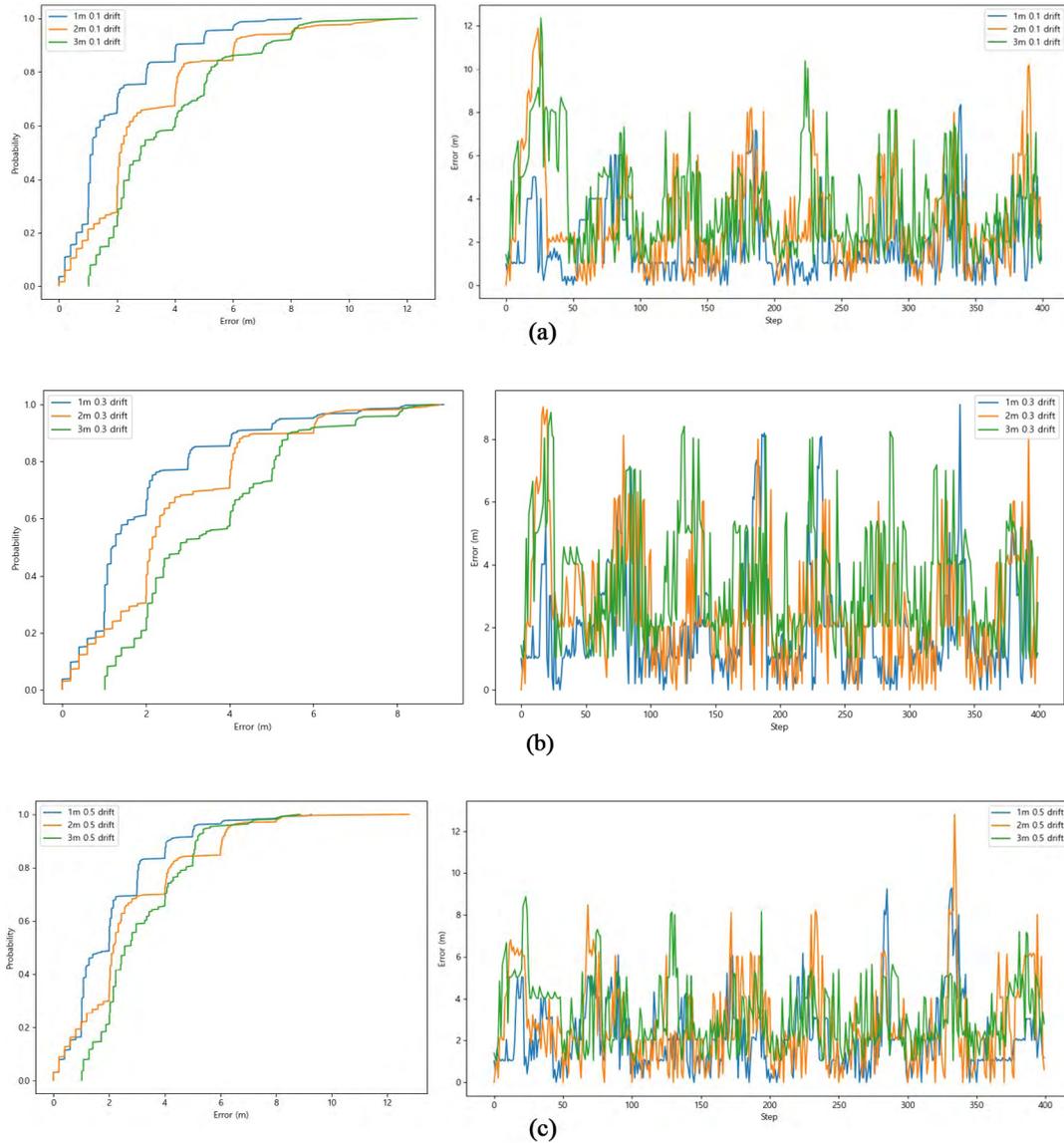


Fig. 5. CDF and stepwise error comparison under different drift and resolution settings. (a) 0.5° Drift: CDF and stepwise error for 1 m, 2 m, 3 m resolutions, (b) 0.3° Drift: CDF and stepwise error for 1 m, 2 m, 3 m resolutions, (c) 0.1° Drift: CDF and stepwise error for 1 m, 2 m, 3 m resolutions.

록 모든 오차 지표가 악화된다. Table 3은 해상도에 따른 연산 시간 비교 결과를 보여주며, 1 m 해상도의 경우 가장 높은 정확도를 보였으나 연산 소요 시간은 가장 길었다.

Fig. 5는 해상도와 PDR 누적오차 조건에 따른 CDF 및 step별 위치 오차 분포를 시각화한 결과이다. CDF 분석 결과, PDR 누적 오차가 증가할수록 누적 오차가 우측으로 이동하는 경향을 보였

으며, 해상도 1 m의 경우 가장 안정적인 분포를 나타냈다. 특히 Table 4의 90% CDF 누적 오차 기준에서도 해상도 1 m가 항상 가장 낮은 오차 값을 기록하였다. 예를 들어, PDR 누적오차가 0.5인 경우 1 m 해상도에서는 90% 누적 오차가 4.4 m인 반면, 3 m 해상도에서는 7.1 m로 나타나 성능 차이가 확인되었다. 또한 step별 오차 분석에서는 해상도 3 m에서 오차 분산이 크고 결과가 불안

정한 양상을 보였지만, 해상도 1 m에서는 누적오차 변화에도 불구하고 비교적 일정한 오차 분포를 유지하여 높은 안정성을 나타냈다.

4. 결론 및 향후 연구 주제

이 논문은 SC 기반 실내 위치 추정에서 PDR 누적오차 및 radio map 해상도가 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. $\pm 10^\circ$ 회전 탐색 기반 PDR 누적오차 보정 기법은 모든 실험 조건에서 위치 오차를 감소시키는 효과를 보였으며, 특히 고해상도 radio map 환경에서 그 효과가 두드러지게 나타났다. 또한 해상도와 PDR 누적오차는 독립적인 성능 요소가 아닌, 서로 영향을 주는 상호작용 변수로 확인되었다. 예를 들어, PDR 누적오차가 큰 환경에서는 저해상도 radio map이 오히려 정렬 오차를 민감하게 반영하여 성능이 저하되었고, 고해상도의 경우 상대적으로 더 낮은 평균 위치 오차와 RMSE를 기록하였다. 반대로, PDR 오차가 작을 경우, 고해상도 radio map은 정밀한 URS 매칭을 가능하게 하여 90% 누적오차 기준이 가장 낮은 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 PDR 오차 수준에 따라 radio map 해상도를 전략적으로 조정해야 함을 시사하며, 정확도와 연산 효율성 간의 trade-off를 고려한 위치 추정 시스템 설계 기준을 제공한다. 향후 연구에서는 회전 탐색 각도의 자동 최적화, URS 버퍼 크기의 동적 조절, 그리고 다양한 실제 실내 환경에서의 실험적 검증 등을 통해 본 연구 결과의 실용성과 확장 가능성을 더욱 강화할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the MSIT (Ministry of Science and ICT), Korea, under the National Program for Excellence in SW supervised by the IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation) in 2025 (2024-0-00064).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J.K. and B.S.; methodology, J.K. and B.S.; software, J.K.; validation, B.K and B.S.; investigation, J.K. and B.S.; writing—original draft preparation, J.K.; writing—review and editing, B.K. and B.S.; visualization, J.K.; supervision, B.S.; project administration, B.S.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bahl, P. & Padmanabhan, V. N. 2000, RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, In Proceedings IEEE INFOCOM 2000, Tel Aviv, Israel, 26-30 March 2000, pp.775-784. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2000.832252>
- He, S. & Chan, S.-H. G. 2016, Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18, 466-490. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2464084>
- Jung, Y. 2024, A study on PDR and sparse UWB based stochastic indoor localization, Master's Thesis, Hanyang University, Department of Electrical and Biomedical Engineering.
- Kotaru, M., Joshi, K., Bharadia, D., & Katti, S. 2015, SpotFi: Decimeter level localization using WiFi, In Proceedings of ACM SIGCOMM, London, UK, August 2015, pp.269-282. <https://doi.org/10.1145/2785956.2787487>
- Lee, J. H., Shin, B., Shin, D., Park, J., Ryu, Y. S., et al. 2019, Surface correlation-based fingerprinting method using LTE signal for localization in urban canyon, Sensors, 19, 3325. <https://doi.org/10.3390/s19153325>
- Mansour, A., Chen, W., Luo, H., Li, Y., Wang, J., et al. 2021, Drift control of pedestrian dead reckoning (PDR) for long period navigation under different smartphone poses, Eng. Proc., 10, 21. <https://doi.org/10.3390/ecsa-8-11302>
- Noh, H.-M., Oh, Y.-J., Lee, N.-Y., & Shin, W.-J. 2021, A survey of deep learning-assisted indoor localization with Wi-Fi fingerprinting: Current status and research challenges, Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 46, 848-862. <https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.5.848>
- Shin, B., Kim, T., Kyung, H., Yu, C., Shin, D., et al. 2024, Vehicle tracking system in underground parking lots using smartphone, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 25, 16938-16952. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3435523>
- Shin, B., Lee, J. H., & Lee, T. 2023, Novel indoor fingerprinting method based on RSS sequence matching, Measurement, 223, 113719. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113719>
- Shin, B. & Lee, T. 2024, Analysis of localization technology performance based on accumulated RSSI signal using simulation, JPNT, 13, 331-339. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.3.331>
- Tran, D. A. & Zhang, T. 2015, An online algorithm for fingerprint-based location tracking, In Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Mobile

Ad Hoc and Sensor Systems, 28-30 October 2014, Philadelphia, PA, USA, pp.389-397. <https://doi.org/10.1109/MASS.2014.123>



Jaewi Kim is pursuing a B.S. degree in the Division of Software at Hallym University, Chuncheon, South Korea. His research interests are indoor localization, fingerprinting, surface correlation and pedestrian dead reckoning.



Boseong Kim is pursuing a B.S. degree in the Division of Software at Hallym University, Chuncheon, South Korea. His research interests are machine learning, pedestrian dead reckoning and indoor localization.



Beomju Shin received the B.S. and M.S. degrees in Information and Communication Engineering from Sejong University, Seoul, South Korea in 2010 and 2012, respectively. From 2012 to 2014, he was a researcher at the Sensor System Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul. In 2020, he received his Ph.D. degree in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University. From 2020 to 2023, he has been working as a postdoctoral fellow at the Korea Institute of Science and Technology. He is currently an Assistant Professor in College of Information Science, Hallym University, Chuncheon, South Korea. His current research interests include pattern recognition, machine learning, and indoor navigation systems.

미지정수 추정 성능 및 신뢰도 향상을 위한 Z-행렬 탐색 알고리즘 개선 기법

김민찬, 민동찬, 이지윤*

Improved Z-Matrix Search Algorithm for Enhanced Integer Ambiguity Estimation and Fix Reliability in RTK

Noah Minchan Kim¹, Dongchan Min¹, Jiyun Lee¹

Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

ABSTRACT

Reliable integer ambiguity resolution is essential for high-precision, high-integrity Real Time Kinematic (RTK) positioning. The probability of correct fix (P(CF)) provides a key metric for assessing ambiguity resolution reliability and is directly influenced by the integer decorrelation matrix (Z-matrix) performance. This paper proposes an enhanced Z-matrix search method to improve the reliability of integer ambiguity estimation. The method extends the conventional LAMBDA algorithm by generating multiple Z-matrix candidates through systematic linear transformations and expands the search space to select the most reliable candidate based on P(CF). Simulation results from 24-hour single-epoch RTK show the proposed method improves P(CF) in over 97.5% of epochs, reduces the average 1-P(CF) value by approximately 64.1%, and increases fixed solution availability from 85.7% to 95.3%. Although the validation was performed using single-epoch RTK, the proposed method applies to general RTK architectures, including Kalman filter-based systems, and should contribute to faster convergence and more robust ambiguity resolution.

Keywords: global navigation satellite system, RTK, Z-matrix, probability of correct fix

주요어: 위성 항법 시스템, 실시간 이동 측위, 미지정수 고정, 항법 무결성

1. INTRODUCTION

민간 항공에서 항법 무결성은 항법 시스템의 가용성에 영향을 미치는 중요한 성능 지표이다. 글로벌 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)에서 무결성 위험은 위치 오차가 미리 정의된 경보 한계(Alert Limit, AL)를 초과할 확률로 정의된다. 예를 들어, 지상 기반 보강 항법 시스템(Ground-Based Augmentation System, GBAS)을 사용한 민간 항공기 착륙의 경우 카테고리 III 정밀 접근을 위해 수직 경보 한계(Vertical Alert Limit, VAL) 10 m에서 접근당 10^{-9} 의 극도로 낮은 무결성 위험 수준이 요구된다 (Enge 1999). GBAS 응용 분야에 대한 이러한 무결성 요구사항은 정확도 요구사항(예: 수직 95% 정확도 2.5 m (Enge 1999))보다 훨씬 더 엄격한 수준이다. 그러나 미래 도심에

서 운용될 자율주행 자동차나 무인 항공기와 같은 자율 운항체는 높은 수준의 무결성과 정확도가 모두 필수적으로 요구될 것이라 전망된다. Reid et al. (2019)은 자율주행 자동차의 운용을 위한 항법 요구사항을 제안했는데, 고속도로 운행을 위해 수직 정확도 0.44 m와 수직 경보 한계 1.3 m에서 시간당 10^{-8} 의 무결성 위험 요구사항을 포함한다. 이러한 항법 정확도를 안정적으로 만족하기 위해서는 기존 코드 측정치 기반 항법 시스템만으로는 한계가 있다. 그에 따라 반송파 측정치를 활용하여 cm 레벨 항법 정확도를 나타내는 실시간 이동 측위(Real Time Kinematic, RTK) 항법 시스템에 대한 수요가 높아지고 있다.

RTK는 기준국과 유저 간 이중 차분 측정치를 활용하여 상대 위치를 고정밀로 추정하는 기법이다. 이 과정에서 반송파 측정치 내 미지정수를 정확히 참값과 일치하는 정수해로 고정해야 높

Received Aug 10, 2025 Revised Aug 18, 2025 Accepted Aug 19, 2025

*Corresponding Author E-mail: jiyunlee@kaist.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 정확도의 RTK 고정 위치해를 산출할 수 있다. 여기서 고정 위치해란 미지정수를 정수값으로 고정한 후 산출되는 위치해를 의미하며, 미지정수를 실수값으로 추정하는 실수 위치해와 구별된다. 미지정수가 잘못 고정될 경우, 크기를 알 수 없는 위치 바이어스를 유발하고, 이는 자율주행 및 항공 분야에서 치명적인 무결성 위협이 될 수 있다. 따라서 RTK 항법 시스템의 무결성 보장을 위해서는 고정된 정수해가 참값과 일치할 확률(Probability of Correct Fix, P(CF))을 사전에 평가하고, 무결성 위협 확률 산출 과정에 반영해야 한다.

P(CF)는 미지정수를 정수로 고정하는 과정에서 산출되며, 대표적인 미지정수 고정 알고리즘으로 정수 반올림법(Integer Rounding, IR), 정수 부트스트래핑법(Integer Bootstrapping, IB), 그리고 정수 최소자승법(Integer Least Squares, ILS)이 있다. 이론적으로 ILS는 최적의 미지정수 고정 성능을 보이며 (Teunissen 1999), 오픈소스로 공개되어 있는 미지정수 고정 알고리즘인 Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment (LAMBDA) 기법에서도 이를 채택하고 있다. 그러나 ILS 기법은 복잡한 정수 탐색 영역을 가지고 있어, P(CF) 값을 정확히 산출하는 것이 불가능하다는 한계점이 있다. 반면, IB 기법은 ILS 기법에 비해 미지정수 추정 성능은 다소 저하되지만, P(CF) 값을 직관적으로 계산할 수 있다는 장점이 있다 (Teunissen 1998). RTK 항법 해의 무결성 위협 확률 산출을 위해서는 P(CF) 값이 필수적이므로, 일반적으로 다음과 같은 두 가지 접근 방법이 가능하다: (1) IB 기법을 사용하여 미지정수 고정과 P(CF) 산출을 수행하거나, (2) ILS 기법으로 미지정수를 고정한 후 IB 기반 P(CF) 값을 보수적인 하한값으로 적용하는 방법이다.

결과적으로 RTK 항법 시스템의 무결성 보장을 위해서는 IB 기법 기반 P(CF) 값을 산출해야 한다. IB 기법의 미지정수 고정 및 P(CF) 산출 과정은 크게 세 단계로 구성된다 (Teunissen 1998). 먼저, Least-Squares 또는 Kalman Filter 기반으로 미지정수 실수해(float ambiguity)와 그 공분산 행렬을 산출한다. 다음으로, 정수 고정 과정에서 성분 간 상관관계를 줄이기 위해 Z-변환(Z-transformation)을 적용하여 공분산 행렬을 역상관화(decorrelation)한다. 마지막으로, 변환된 공분산 행렬과 미지정수 실수해에 IB 기법을 적용하여 미지정수 정수해 및 P(CF) 값을 산출한다. 이 과정에서 P(CF)는 미지정수 실수해의 공분산 행렬과 역상관화를 위해 적용된 Z-행렬의 성능에 의존한다. 위 과정에 대한 자세한 설명은 본 논문의 2.1절에 기술되어 있다.

Z-변환은 미지정수 간 상관관계를 줄이는 선형 변환이며, 이때 변환에 사용되는 Z-행렬은 모든 성분이 정수이고 행렬식의 절댓값이 1인 가역 행렬이어야 한다 (Teunissen 1995). LAMBDA 기법은 특정 공분산 행렬에 대하여 이러한 조건을 만족하는 Z-행렬을 탐색하기 위한 알고리즘을 포함하고 있으며, 이는 현재 공개된 LAMBDA 오픈소스 라이브러리에도 구현되어 있다. 본 연구에서는 해당 오픈소스 Z-행렬 탐색 알고리즘을 적용했을 때, 미지정수의 수가 많아질수록 Z-행렬 탐색이 조기 종료되어 P(CF) 성능이 저하되는 현상을 발견하였다. 이는 Z-행렬 탐색 알고리즘이 탐색 과정에서 지역 최적해(local optimum)에 수렴하기 때문이다. 그 결과 P(CF)가 감소하고 RTK 고정 위치해의 무결성을 보장하지 못해 가용성이 저하되는 현상이 발생하였다.

이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 기존의 Z-행렬 탐색 알고리즘의 종료 시점을 개선하여 Z-행렬의 성능을 개선할 수 있는 Z-행렬 후보군 생성 알고리즘을 제안한다. 구체적으로는 기존 알고리즘에서 산출한 Z-행렬에 대해 선형 변환을 적용하고 미지정수 순서를 재조정하여 후보군을 생성하며, 각 후보에 대해 최종 P(CF)를 산출한 후 가장 높은 값을 갖는 Z-행렬을 선택하는 방식이다. 이와 같은 Z-행렬 후보군 생성 기법은 기존 방식 대비 Z-행렬의 최적성 및 P(CF) 성능을 향상시키고, 최종적으로 RTK 고정 위치해의 가용성을 높일 수 있다. 본 논문에서는 제안한 기법의 실용성을 검증하기 위해 GNSS 측정치 모델링 및 RTK 항법 시뮬레이션을 수행하고, 제안한 Z-행렬 후보군 생성 기법 적용에 따른 RTK 고정 위치해의 가용성 개선폭을 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IB 기법 기반 P(CF) 산출 방법론과 RTK 고정 위치해의 보호 수준 산출 방법론에 대해 기술한다. 3장에서는 LAMBDA 기법 내 기존 Z-행렬 탐색 기법과 제안된 후보군 생성 기법에 대해 상세히 설명하고, 4장에서는 시뮬레이션 기반의 성능 분석 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

2. BACKGROUND

이번 장에서는 IB 기법 기반 P(CF) 산출 방법론과 정상 상황에서 RTK 고정 위치해의 보호 수준 산출 방법론에 대해 설명한다. 2.1절에서는 RTK 항법 알고리즘과 IB 기법 기반 P(CF) 산출 방법론을 설명하고, 2.2절에서는 산출된 P(CF) 값을 활용한 RTK 고정 위치해의 무결성 위협 확률 및 보호 수준 산출 방법론에 대해 기술하였다.

2.1 Computation of the Probability of Correct Fix

P(CF) 값은 미지정수 실수해를 정수해로 고정하는 과정에서 산출된다. 미지정수 고정 과정은 일반적으로 다음 세 단계로 구성된다 (Teunissen 1998). 첫 단계에서는 이중 차분된 GNSS 코드 및 반송파 측정치를 활용하여 미지정수의 정수 조건을 무시하고, 칼만 필터(Kalman filter) 또는 최소자승법(Least squares) 등을 적용하여 Eq. (1)과 같이 실수 위치해(\hat{b}) 및 미지정수 실수해(\hat{N})를 산출한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{N} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Q_{\hat{b}} & Q_{\hat{b}\hat{N}} \\ Q_{\hat{N}\hat{b}} & Q_{\hat{N}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $Q_{\hat{b}}$ 와 $Q_{\hat{N}}$ 은 각각 실수 위치해와 미지정수 실수해의 공분산 행렬을 나타내고, $Q_{\hat{b}\hat{N}}$ 과 $Q_{\hat{N}\hat{b}}$ 는 두 해의 상관 행렬을 나타낸다. 측정치에 고장이 발생하지 않은 정상 상황에서 측정치의 오차가 영평균 정규분포를 따른다는 가정 하에, 최소자승법 또는 칼만 필터를 통해 산출되는 실수해의 오차는 마찬가지로 영평균 정규분포를 따른다.

두 번째 단계에서는 산출한 미지정수 실수해(\hat{N})를 정수해(\check{N})로 변환한다. 이전 단계에서 이중 차분된 GNSS 측정치를 기반으로 미지정수 실수해를 산출하였고, 각 이중 차분 측정치는 공통

된 기준 위성 측정치를 포함하고 있기 때문에 미지정수 간 강한 상관관계를 나타낸다. 이러한 강한 상관관계는 미지정수 실수해를 정수로 고정하는 과정을 방해하는 주요 요소 중 하나이다. 따라서 LAMBDA 기법에서는 미지정수 실수해의 각 성분 간 상관관계를 최소화하는 Z-변환을 선행한다 (Teunissen 1995). Z-변환을 통해 미지정수 실수해 및 공분산 행렬은 Eq. (2)와 같이 Z-도메인으로 변환된다.

$$\hat{z} = Z^T \hat{N}, Q_{\hat{z}} = Z^T Q_N Z. \quad (2)$$

여기서 Z는 Z-변환 행렬을 나타내고, \hat{z} 및 $Q_{\hat{z}}$ 는 Z-변환된 미지정수 실수해와 공분산 행렬을 의미한다. Z-변환 전후에 미지정수의 정수 성질이 유지되어야 하므로, Z-행렬은 모든 성분이 정수이고 역행렬이 존재해야 한다. 미지정수 성분 간 상관관계를 완전히 제거하면서 위 제한 조건을 만족하는 Z-행렬은 존재하지 않는다. 따라서 제한 조건을 만족하면서 상관관계를 최대한 완화시킬 수 있는 Z-행렬을 탐색해야 한다. 일반적으로 미지정수 고정에 활용되는 LAMBDA 기법은 독자적인 Z-행렬 탐색 알고리즘을 포함하고 있으며, 해당 알고리즘에 대한 자세한 설명은 3.1 절에 기술하였다.

Z-변환된 미지정수 실수해는 Z-도메인의 탐색 영역 내에서 정수해로 고정된다. 대표적인 미지정수 고정 기법으로 IR, IB, ILS와 같은 고정 기법이 지난 수십 년간 개발되었다 (Teunissen 1999). 본 연구에서는 P(CF) 산출에 용이한 IB 기법을 활용하여 미지정수를 고정하였다. IB 기법은 순차적 조건부 최소자승법을 기반으로 하며, 고정하려는 미지정수의 수를 n이라 정의할 때 다음과 같이 세 단계로 구성된다 (Teunissen 1998). 1) 미지정수 실수해의 k번째 성분을 반올림하여 고정한다. 2) 고정된 k번째 성분을 기반으로 k+1번째부터 n번째까지의 실수해 성분을 보정한다. 3) k=1부터 n까지 위의 과정을 반복해서 수행한다. IB 기법을 통해 보정 및 역상관화된 미지정수 실수해 각 성분의 분산 값은 $Q_{\hat{z}}$ 의 LDL 분해를 통해 산출되는 대각 행렬 D의 성분과 일치한다 (Teunissen 1998). 그에 따라 P(CF) 값은 D 행렬의 성분 값을 활용하여 Eq. (4)와 같이 산출된다.

$$Q_{\hat{z}} = L D L^T \quad (3)$$

$$P_{CF}(Q_N, Z) = \prod_{i=1}^n \left(2\Phi \left(\frac{1}{2\sqrt{D_{ii}}} \right) - 1 \right) \quad (4)$$

여기서 Φ 는 표준정규분포의 누적분포함수를 나타내고, $P_{CF}(Q_N, Z)$ 는 미지정수 실수해의 공분산 행렬과 Z-행렬을 입력값으로 산출된 P(CF)를 나타낸다. 이때 미지정수 실수해의 공분산 행렬은 GNSS 가시 위성 수 및 위성 기하, 측위 기법에 따라 결정되는 값이고, Z-행렬 탐색 알고리즘에서 산출된 Z-행렬의 성능에 따라 최종 P(CF) 값이 변화하게 된다.

2.2 Vertical Protection Level of RTK Fixed Position Under Nominal Conditions

이번 절에서는 측정치에 고장이 발생하지 않은 정상 상황(H_0)

에서 RTK 항법해의 보호수준 산출 방법론에 대해 기술한다. 일반적으로 GNSS 항법 시스템에서는 위성 배치의 기하학적 특성 상 수직 방향의 정밀도 저하계수(VDOP)가 수평 방향(HDOP)보다 크므로, 본 절에서는 수직 방향 보호수준(Vertical Protection Level, VPL)을 기준으로 설명한다. 보호수준은 주어진 무결성 위협 확률 요구조건에 대응하는 통계적 위치 오차 한계를 의미하며, 사전 정의된 경보 한계와 비교하여 시스템의 가용성을 판단하는 기준이 된다. 정상 상황에서 RTK 고정 위치해의 무결성 위협 확률 산출 식은 Eq. (5)와 같이 정의된다 (Pervan & Chan 2001).

$$I_{H_0} = P\{|b_v - \hat{b}_v| > VPL_{H_0}\} \quad (5)$$

여기서 \hat{b}_v 는 RTK 고정 위치해의 수직 방향 성분을 의미하고, b_v 는 실제 위치의 수직 방향 성분을 의미한다. 그리고 I_{H_0} 및 VPL_{H_0} 는 각각 정상 상황에서의 무결성 요구조건 및 수직 방향 보호수준을 의미한다. RTK 고정 위치해는 미지정수가 잘못 고정될 경우 위치 항법해에 바이어스가 발생할 수 있다. 따라서 RTK 고정 위치해의 무결성 위협 확률은 Eq. (6)과 같이 미지정수가 올바르게 결정되었을 경우(Correct Fix, CF)와 잘못 고정되었을 경우(Incorrect Fix, IF)로 나누어 계산되어야 한다.

$$I_{H_0} = P\{|b_v - \hat{b}_v| > VPL_{H_0}|CF\}P_{CF}(Q_N, Z) + P\{|b_v - \hat{b}_v| > VPL_{H_0}|IF\}(1 - P_{CF}(Q_N, Z)) \quad (6)$$

미지정수가 잘못 고정된 상황에서 RTK 고정 위치해의 분포를 정확히 추정하는 것은 불가능하다. 따라서 Pervan & Chan (2001)에서는 보수적으로 미지정수가 잘못 고정되면 위치 오차가 보호수준을 초과한다는 가정을 적용하였고 ($P\{|b_v - \hat{b}_v| > VPL_{H_0}|IF\} \approx 1$), 그에 따라 무결성 위협 확률 산출 식은 Eq. (7)과 같이 전개된다.

$$I_{H_0} = P\{|b_v - \hat{b}_v| > VPL_{H_0}|CF\}P_{CF}(Q_N, Z) + (1 - P_{CF}(Q_N, Z)) \quad (7)$$

최종적으로 주어진 무결성 위협 요구조건에 대응하는 RTK 고정 위치해의 VPL은 Eq. (8)과 같이 산출된다.

$$VPL_{H_0} = \Phi^{-1} \left(1 - \frac{I_{H_0,v} - (1 - P_{CF}(Q_N, Z))}{2P_{CF}(Q_N, Z)} \right) \sigma_v \quad (8)$$

여기서 σ_v 는 RTK 고정 위치해의 수직 방향 표준 편차를 의미한다. Eq. (8)을 기반으로 RTK 고정 위치해의 VPL을 산출하기 위해서는 $P_{CF}(Q_N, Z)$ 값이 Eq. (9)의 부등식을 반드시 만족해야 한다.

$$1 - I_{H_0,v} < P_{CF}(Q_N, Z) \quad (9)$$

Eq. (9)의 조건을 만족하면 RTK 고정 위치해의 VPL 산출이 가능하고 경보 한계와 비교하여 가용성 평가가 가능하다. 그렇지 않을 경우, 고정 위치해의 보호수준을 산출할 수 없고 상대적으로 정확도가 낮은 실수 위치해(\hat{b})의 VPL을 Eq. (10)과 같이 산출할 수 있다.

$$VPL_{H_0} = \Phi^{-1} \left(1 - \frac{I_{H_0,v}}{2} \right) \sigma_v \quad (10)$$

여기서 σ_v 는 실수 위치해의 수직 방향 표준편차를 나타낸다. 이러한 시스템에서 고정 위치해의 가용률은 전체 에포크 중 Eq. (9)를 만족하여 고정 위치해를 사용할 수 있는 에포크의 비율을 의미하며, 미지정수 고정 과정에서 산출되는 $P_{CF}(Q_N, Z)$ 값에 의존

한다.

3. Z-MATRIX SEARCH ALGORITHM ENHANCEMENT

이번 장에서는 LAMBDA 기법에 구현된 기존 Z-행렬 탐색 알고리즘과, 이를 확장하여 탐색 영역 및 성능을 향상시키기 위한 후보군 생성 기법을 기술한다. 3.1절에서는 Teunissen (1995)에 제시된 기존 Z-행렬 탐색 알고리즘의 구조와 작동 원리를 설명하고, 3.2절에서는 본 연구에서 제안하는 Z-행렬 후보군 생성 알고리즘의 구성과 절차를 기술하였다.

3.1 Existing Z-matrix Search Algorithm

Teunissen (1995)에 기술되어 있는 Z-행렬 탐색 알고리즘은 주어진 미지정수 실수해의 공분산 행렬을 입력값으로, 미지정수 간 상관관계를 최소화하고 P(CF) 값을 최대화하는 Z-행렬을 탐색한다. 이때, Z-변환된 실수해를 정수해로 고정하고 정수 성질을 유지하면서 원래 도메인으로 역변환해야 하므로, Z-행렬은 다음의 제약 조건을 모두 만족해야 한다.

- 1) 모든 성분이 정수로 구성되어야 한다
- 2) 미지정수의 수가 n일 때 n×n 크기의 정방 행렬이어야 한다.
- 3) 행렬식의 절댓값이 1이어야 한다.

최종적으로 산출되는 P(CF) 값은 Z-변환 및 LDL 분해 이후 도출되는 D 행렬의 대각 성분이 작을수록 높게 산출된다. 위 조건을 만족하여 Z-변환 행렬의 행렬식이 1인 경우, 변환 전후의 실수해 공분산 행렬의 행렬식은 동일하게 유지된다. 이는 LDL 분해 시에도 동일하게 적용되어, 어떤 Z-행렬을 사용하더라도 D 행렬의 대각 성분 곱은 실수해 공분산 행렬의 행렬식과 같고 변하지 않는다. 이와 같이 D 행렬 대각 성분의 곱이 일정하게 유지되는 상황에서, P(CF)가 최대화되는 조건은 D 행렬의 대각 성분들이 모두 동일한 경우이다. 이 케이스는 Eq. (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{11}^* = D_{22}^* = \dots = D_{nn}^* = \sqrt[n]{Q_z}, \quad P_{CF}^*(Q_N, Z^*) = \prod_{i=1}^n \left(2\Phi\left(\frac{1}{2\sqrt{D_{ii}^*}}\right) - 1 \right) \quad (11)$$

여기서 D^* 는 모든 대각 성분이 동일한 이상적인 D 행렬을 의미하며, Z^* 는 해당 D^* 를 생성하는 Z-변환 행렬을 나타낸다. $P_{CF}^*(Q_N, Z^*)$ 는 입력값인 미지정수 실수해 공분산 행렬 Q_N 에 대해 이론적으로 달성 가능한 P(CF)의 최대값을 나타낸다. 이론적으로는 위 조건을 만족하는 Z^* 행렬을 역으로 계산하는 것이 가능하다. 하지만 미지정수 고정에 적용하기 위해서는 모든 성분이 정수이어야 하기 때문에 미지정수 고정 과정에 Z^* 행렬을 적용할 수 없다. 따라서 기존 Z-행렬 탐색 알고리즘에서는, 정수 제약을 만족하면서도 D 행렬의 대각 성분들이 최대한 균일하게 분포하도록 하는 Z-행렬을 수치적으로 탐색한다.

기존 Z-행렬 탐색 알고리즘에서는 행 순서 재정렬(reordering)

및 정수 가우스 변환(integer Gauss transformation)의 조합을 통해 정수형 Z-행렬을 산출하였다 (Teunissen 1995). 일반적으로 Z-변환 전의 미지정수 실수해 공분산 행렬에 대해 LDL 분해를 수행하면, D 행렬의 대각 성분들 간에 심한 불균형이 존재하며, 특히 뒤쪽 성분일수록 상대적으로 큰 값을 가지는 경향이 나타난다 (Teunissen 1995). 이때 행 순서 재정렬을 통해 i번째와 i+1번째 성분의 순서를 교환하면, L 행렬에 포함된 두 성분 간 상관관계의 크기에 따라 D 행렬의 대각 성분들이 변경된다. 이러한 교환은 조건부 분산에 영향을 주며, 경우에 따라 i+1번째 성분의 D 값이 감소하여 전체 P(CF)의 향상으로 이어질 수 있다. Eq. (12)는 i번째와 i+1번째 성분을 교환했을 때 D 행렬 대각 성분의 변화를 정리한 결과를 나타낸다 (Teunissen 1995).

$$D'_{i:i+1} = \begin{bmatrix} d'_i & 0 \\ 0 & d'_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{i+1} - \frac{l_{i+1,i}^2 d_{i+1}^2}{d_i + l_{i+1,i}^2 d_{i+1}} & 0 \\ 0 & d_i + l_{i+1,i}^2 d_{i+1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 $D'_{i:i+1}$ 는 순서 교환 이후 변환된 부분 행렬을 나타낸다. d'_i , d'_{i+1} 은 순서 교환 이후 i번째 및 i+1번째 대각 성분을 의미하며, d_i , d_{i+1} 은 변환 이전의 대각 성분이다. $l_{i+1,i}$ 는 변환 전 L 행렬의 성분이다. 위 수식에 따르면, 두 성분 간의 순서 교환 이후에도 두 성분의 곱은 Eq. (13)과 같이 동일하게 유지됨을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, Z-변환 이후에도 D 행렬의 대각 성분 곱이 불변함을 의미한다.

$$d_i \times d_{i+1} = d'_i \times d'_{i+1} \quad (13)$$

일반적으로 LDL 분해의 특성상, D 행렬의 뒤쪽 성분일수록 값이 더 크게 나타난다 (Teunissen 1995). 따라서 $l_{i+1,i}$ 의 값이 작을수록 d'_{i+1} 값이 작아지게 되어, P(CF) 관점에서 이득을 극대화할 수 있다. 이러한 구조적 특성에 기반하여, Z-행렬 탐색 알고리즘에서는 L 행렬의 비대각 성분을 최소화하기 위해 순서 교환 이전에 정수 가우스 선형 변환을 수행한다 (Teunissen 1995). 기존 Z-행렬 탐색 알고리즘에서는 이러한 두 선형 변환의 조합을 반복적으로 수행하여 D 행렬 성분의 균일화를 수행하고 더 이상 순서 조정을 통해 이득을 볼 수 있는 경우가 존재하지 않으면 알고리즘을 종료한다 (Teunissen 1995). 이때 수행되었던 모든 정수 선형 변환 행렬의 곱의 형태로 Z-행렬이 정의되며, 총 t번의 순서 조정 이후 Z-행렬은 Eq. (14)와 같이 표현된다.

$$Z = (\alpha_t \cdot \beta_t) \cdot (\alpha_{t-1} \cdot \beta_{t-1}) \cdot \dots \cdot (\alpha_2 \cdot \beta_2) \cdot (\alpha_1 \cdot \beta_1) \quad (14)$$

여기서 α_k, β_k 는 각각 k-1번째 조정 이후 수행한 순서 재정렬 변환 및 정수 가우스 선형 변환 행렬을 나타낸다. 이때 각 선형 변환 행렬의 성분은 모두 정수이고 행렬식의 절댓값이 1이기 때문에 최종 산출되는 Z-행렬 또한 정수 제약 조건을 만족하게 된다.

3.2 Proposed Z-Matrix Candidate Generation Method

기존 Z-행렬 탐색 알고리즘은 정수 가우스 변환과 순서 재정렬을 반복 수행한 뒤, 더 이상 개선 가능한 순서 교환이 존재하지 않으면 알고리즘을 종료한다 (Teunissen 1995). 하지만 이와 같은

종료 조건은 구조적으로 국소 최적해(local optimum)에 수렴할 가능성이 높아, 탐색되지 않은 더 우수한 Z-행렬이 존재하더라도 이를 탐색하지 못하는 한계가 있다.

이에 이 연구에서는 탐색 영역을 체계적으로 확장함으로써, 산출되는 Z-행렬의 최적성(optimality)을 개선할 수 있는 후보군 생성 기법을 제안한다. 제안된 기법은 기존 탐색 알고리즘 종료 이후, P(CF) 관점에서 의도적으로 손해를 감수하더라도 새로운 탐색 지점을 생성하고 결과적으로 더 나은 해를 발견할 가능성을 높이는 방향으로 설계되었다. 구체적인 알고리즘 구성은 다음과 같다.

미지정수의 수가 n개일 경우, 기존 알고리즘은 (1, 2), (2, 3), ..., (n-1, n)의 순서 교환 쌍에 대해 P(CF)가 개선되지 않음을 확인한 시점에서 탐색을 종료하고 Z-행렬을 결정한다. 본 연구에서는 이 종료 조건 이후, n-1개의 교환에 대해 일시적으로 P(CF) 손해가 발생하더라도 강제로 순서 교환을 수행하고 새로운 n-1개의 탐색 지점을 생성한다.

예를 들어, (1, 2) 교환을 추가로 수행할 경우 새로운 초기 Z-행렬 $Z_{(1,2)}^0$ 가 설정되며, 이 경우 기존 알고리즘과 동일한 재탐색 절차를 통해 종료 조건을 만족하는 $Z_{(1,2)}^i$ 및 $P_{CF,(1,2)}^i$ 를 산출한다. 이를 n-1개의 순서 교환 쌍에 대해 반복 수행하면 Eq. (15)와 같이 총 n-1개의 Z-행렬 및 P(CF) 후보군이 생성된다.

$$\{Z_{(i,i+1)}^i, P_{CF,(i,i+1)}^i\}_{i=1}^{n-1} \quad (15)$$

위 후보군들 중에서 가장 큰 P(CF) 값을 가지는 해가 선택되며, 만약 해당 해가 기존 해보다 우수한 경우에는 이를 새로운 기준 해로 설정하고 동일한 후보군 생성 및 비교 절차를 반복 수행한다. 반대로, 더 이상 개선된 후보군이 존재하지 않으면 알고리즘은 종료된다. 위 절차를 통해, 본 알고리즘은 기존 종료 조건의 한계를 극복하고 더 높은 탐색 최적성을 달성할 수 있다. 이와 같은 반복적 구조를 통해 제안한 알고리즘은 기존 방법이 탐색하지 못했던 해를 추가로 고려함으로써, 전역 최적해(global optimum)에 도달할 가능성을 높일 수 있다. 특히 미지정수의 수가 많아서 공분산 행렬의 차원이 높은 환경에서는 더욱 효과적인 성능 향상이 기대된다. 다음 절에서는 RTK 항법 시뮬레이션 기반으로 제안하는 Z-행렬 후보군 생성 알고리즘의 성능 평가를 제시한다.

4. PERFORMANCE EVALUATION OF THE PROPOSED Z-MATRIX CANDIDATE GENERATION METHOD

이번 장에서는 제안한 Z-행렬 후보군 생성 기법의 성능을 정량적으로 평가하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 성능 평가는 기존 LAMBDA 기법 내 Z-행렬 탐색 알고리즘과의 비교를 통해 이루어지며, P(CF) 및 VPL 산출 결과를 중심으로 기법의 유효성을 검증한다.

이 연구에서는 제안한 Z-행렬 후보군 생성 기법의 성능을 정량적으로 평가하기 위해, Table 1에 요약된 파라미터를 기반으로 24시간 단일 에포크 RTK 시뮬레이션을 수행하였다. 단일 에포크 RTK는 각 에포크에서 수신된 GNSS 측정치에 최소자승 필

Table 1. Integrity requirements and sensor parameters.

| Parameter | Value |
|--------------|--|
| Requirements | $I_{H0,req}$ 10^{-7} / hour |
| Environments | Constellations 24 GPS satellites / 24 Galileo satellites |
| | Frequency GPS: L1 & L5 Galileo: E1 & E5 |
| | Mask angle 10 degrees |
| | Simulation time 24 hours |
| | Time interval 1 seconds |
| | Location KAIST N 7-2 Bldg., Daejeon, South Korea |
| | σ_p 30 cm |
| | σ_b 6 mm |
| | Time interval 1 Hz |

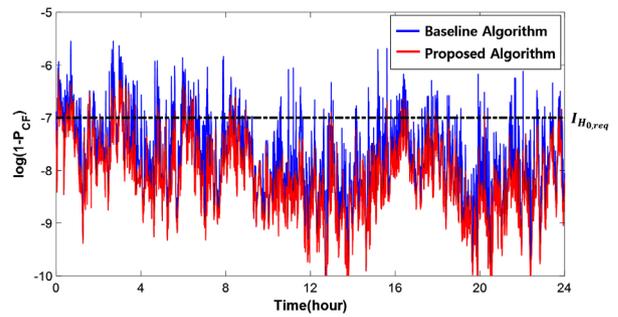


Fig. 1. Time series of log-scaled 1-P(CF) values over 24 hours. The red and blue lines represent results from the proposed and baseline Z-matrix search algorithms, respectively. The dashed line indicates the integrity requirement threshold of 10^{-7} .

터를 적용하여, 미지정수 실수해 및 실수 위치해를 산출하는 항법 시스템이다. 이중 위성군 이중 주파수 (GPS L1/L5, Galileo E1/E5) 환경에서 KAIST N 7-2 건물에 설치된 수신기 위치를 기준으로 GNSS 코드 및 반송파 측정치를 생성하였다. 시뮬레이션 간격은 1초로 설정하였으며, 24시간 동안 P(CF) 및 RTK 고정 위치해 산출을 통해 제안하는 기법의 성능을 평가하였다. 무결성 요구 조건은 ICAO (1996)에서 정의된 고신뢰 항법 시스템 기준에 따라 시간당 10^{-7} 수준으로 설정하였다. 코드 및 반송파 GNSS 측정치의 멀티패스 오차 노이즈 수준은 Khanafseh et al. (2018)에서 제시한 도심 환경 멀티패스 오차 모델링 결과를 기반으로 설정하였다.

4.1 P(CF) Simulation Results under Single-Epoch RTK Assumptions

Fig. 1은 24시간 동안 단일 에포크 RTK 가용 환경에서, 기존 Z-행렬 탐색 알고리즘과 본 연구에서 제안한 Z-행렬 후보군 생성 기법을 적용하여 산출한 P(CF) 결과를 나타낸다. 그래프의 가독성을 높이기 위해 P(CF)의 보완지표인 1-P(CF)를 로그 스케일로 도시하였다. 1-P(CF) 값이 무결성 요구조건을 초과할 경우, 해당 에포크에서는 RTK 고정 위치해에 대한 보호수준 산출이 불가능하다. 기존 Z-행렬 탐색 알고리즘 적용 시, 평균 1-P(CF) 값은 6.05×10^{-8} 로 기준 이내였으나, 전체 에포크 중 약 14.3%에서 무결성 요구조건을 만족하지 못하였다. 이에 따라 최종 RTK 고정 위치해의 가용률은 85.7%로 나타났다. 반면, 제안한 Z-행렬 후보

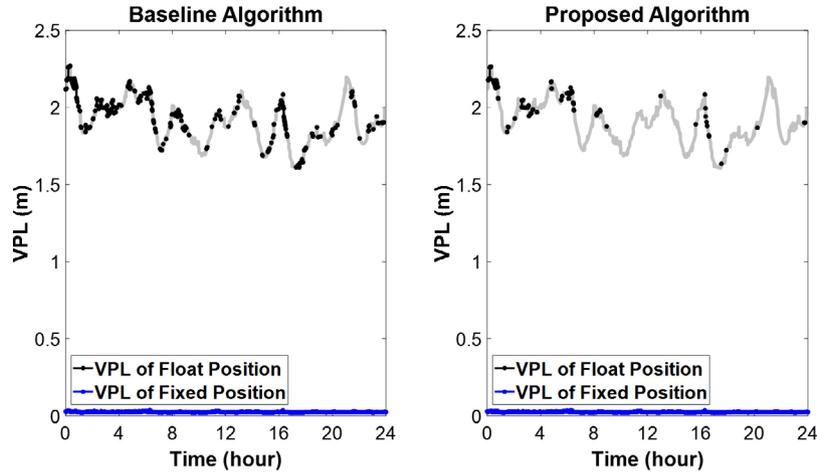


Fig. 2. VPL simulation results of float and fixed position solutions under nominal conditions. The left panel shows the results using the baseline algorithm, while the right panel presents those using the proposed Z-matrix candidate generation method. Improvements in P(CF) lead to higher availability of fixed solutions.

Table 2. Quantitative comparison between baseline and proposed Z-matrix search algorithms.

| Metric | Baseline algorithm | Proposed algorithm | Improvement |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| Mean 1 - P(CF) | 6.05×10^{-8} | 2.17×10^{-8} | 64.1% |
| Fixed position availability | 85.7% | 95.3% | 9.6% |
| Mean fixed VPL | 2.47 cm | 2.47 cm | - |
| Mean float VPL | 1.91 m | 1.91 m | - |

군 생성 기법을 적용한 경우 전체 에포크의 97.5%에서 P(CF) 값이 개선되었고, 1-P(CF)의 평균은 2.17×10^{-8} 로 기존 기법 대비 약 64.1% 개선되었다. 이로 인해 무결성 요구조건을 만족하는 에포크 비율 및 RTK 고정 위치해의 가용률은 95.3%로 향상되었다.

4.2 VPL Simulation Results under Nominal Conditions

Fig. 2는 기존 Z-행렬 탐색 알고리즘(baseline algorithm)과 본 연구에서 제안한 Z-행렬 후보군 생성 알고리즘(proposed algorithm)을 적용하였을 때 VPL 산출 결과를 나타낸다. 각 에포크에서 산출된 P(CF) 값에 따라, 무결성 요구조건을 만족하는 경우에는 고정 위치해 VPL을, 만족하지 않는 경우에는 실수 위치해 VPL을 산출하여 각각 도시하였다. 각 그래프에서 검은색 선은 실수 위치해 VPL을, 파란색 선은 고정 위치해 VPL을 나타낸다. 추가적으로, 회색 선은 전체 에포크에서 산출한 실수 위치해 VPL을 예시로 나타낸 것이다. Table 2는 두 알고리즘의 P(CF), 고정 위치해 가용률, 그리고 VPL 평균값에 대한 정량적 비교 결과를 요약한 것으로, 제안 기법의 성능 향상을 보다 명확히 확인할 수 있다.

제안한 Z-행렬 후보군 생성 기법을 적용함으로써 P(CF) 값이 기존 기법 대비 전반적으로 향상되었고, 이에 따라 고정 위치해 VPL의 가용률이 95.3%로 증가하였다. VPL 산출 시뮬레이션 결과, 실수 위치해 VPL의 평균값은 1.91 m로 나타났으며, 고정 위치해 VPL의 평균값은 약 2.47 cm로 매우 작게 나타났다. Reid et al.

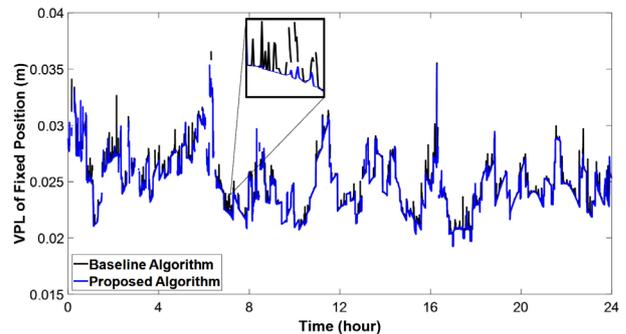


Fig. 3. Comparison of fixed-position VPL results between the baseline and proposed Z-matrix algorithms. The proposed method maintains more stable VPL values by generating Z-matrices with improved consistency and optimality.

(2019)에서는 고성능 자율주행 항법시스템의 안정성 요구 조건으로 1.3 m의 VAL을 제시하였으며, 위 결과에 대하여 이를 만족하기 위해서는 고정 위치해 VPL 산출이 필수적임을 알 수 있다. 따라서, 제안한 기법을 통해 Z-행렬 성능과 P(CF) 값을 개선하고 고정 위치해의 가용률을 향상시키는 것은, 향후 RTK 항법 시스템의 높은 가용성 확보에 중요한 기여를 할 수 있을 것이다.

Fig. 3은 두 알고리즘을 적용하여 산출한 고정 위치해 VPL 결과를 비교한 것이다. 본 그래프는 Eq. (8)에 따라 산출된 고정 위치해 VPL의 시간 변화 양상을 나타내며, 해당 값은 고정 위치해의 수직 방향 표준편차와 P(CF)에 의해 결정된다. 시뮬레이션 결

과, 기존 Z-행렬 탐색 알고리즘을 적용한 경우 일부 구간에서 고정 위치해 VPL 값에 비정상적으로 큰 분산이 나타나는 등, 국부적인 불안정성이 관측되었다. 반면, 제안한 후보군 생성 기법을 적용한 경우 VPL 값이 안정적으로 유지되는 양상을 보였다. 두 기법 모두 동일한 GNSS 측정치를 기반으로 하므로, 고정 위치해의 수직 방향 표준편차나 미지정수 실수해의 공분산 행렬에는 차이가 없다. 따라서 관측된 VPL 변화는 Z-행렬의 성능 차이에 기인한다고 해석할 수 있다. 이와 같은 결과는 기존 기법의 경우 탐색 종료 조건에 의해 비최적 Z-행렬이 산출되는 경우가 많아 VPL이 불안정하게 변동하는 반면, 제안 기법은 후보군 기반 탐색을 통해 보다 최적성이 높은 Z-행렬을 선택함으로써 VPL의 안정성과 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 시사한다.

5. CONCLUSIONS

본 연구에서는 RTK 항법 시스템의 미지정수 고정 과정에서 활용되는 Z-행렬의 성능을 개선하기 위해, Z-행렬 후보군 생성 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 기존 탐색 알고리즘으로부터 산출된 Z-행렬에 대해 추가적인 선형 변환을 수행함으로써 후보군을 생성하고, 이 중 P(CF) 성능이 가장 우수한 Z-행렬을 선택함으로써 보다 최적화된 결과를 도출하는 방식이다. 24시간 단일 에포크 RTK 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 성능을 정량적으로 평가한 결과, 전체 에포크의 97.5%에서 P(CF) 값이 향상되었으며, 1-P(CF)의 평균 개선폭은 64.1%로 나타났다. 그 결과, RTK 고정 위치해의 가용률은 기존 기법의 85.7%에서 제안 기법 적용 시 95.3%로 크게 개선되었다. 본 연구는 단일 에포크 기반의 간략화된 시뮬레이션 환경에서 제안 기법의 유효성을 검증하였으나, 해당 기법은 기존 칼만 필터 기반의 멀티 에포크 RTK 구조에도 적용 가능하다. 특히 Z-행렬 성능의 향상을 통해 미지정수 추정치의 신뢰도가 개선되며, 결과적으로 RTK 시스템의 초기 수렴 시간 단축에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체미래선도핵심기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었음 (No.2020M3C1C1A01086407).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, N. M.-C. Kim, methodology, N. M.-C. Kim, software, N. M.-C. Kim and D.-C. Min, validation, N. M.-C. Kim., D.-C. Min, and J.-Y. Lee, formal analysis, N. M.-C. Kim and D.-C. Min, investigation, N. M.-C. Kim., D.-C. Min, resources, N. M.-C. Kim., D.-C. Min, data curation, N. M.-C. Kim, writing—original draft preparation, N. M.-C. Kim., D.-C. Min, writing—review and editing, N. M.-C. Kim.,

D.-C. Min, visualization, N. M.-C. Kim, supervision, J.-Y. Lee, project administration, J.-Y. Lee, funding acquisition, J.-Y. Lee.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Enge, P. 1999, Local area augmentation of GPS for the precision approach of aircraft, *Proceedings of the IEEE*, 87, 111-132. <https://doi.org/10.1109/5.736345>
- ICAO 1996, International Standards and Recommended Practices, Annex 10, July 1996. (Montreal: International Civil Aviation Organization).
- Khanafseh, S., Kujur, B., Joerger, M., Walter, T., Pullen, S., et al. 2018, GNSS multipath error modeling for automotive applications, *Proc. of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+)*, Miami, FL, 24-28 Sept. 2018, pp.1573-1589. <https://doi.org/10.33012/2018.16107>
- Pervan, B. & Chan, F. C. 2001, System concepts for cycle ambiguity resolution and verification for aircraft carrier landings, *Proc. of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS)*, Salt Lake City, UT, 11-14 Sept. 2001, pp.1228-1237. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=1801>
- Reid, T. G. R., Houts, S. E., Cammarata, R., Mills, G., Agarwal, S., et al. 2019, Localization requirements for autonomous vehicles, *SAE Int. J. Connect. Autom. Veh.*, 2, 173-190. <https://doi.org/10.4271/12-02-03-0012>
- Teunissen, P. J. G. 1995, The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation, *J. Geodesy*, 70, 65-82. <https://doi.org/10.1007/BF00863419>
- Teunissen, P. J. G. 1998, Success probability of integer GPS ambiguity rounding and bootstrapping, *J. Geodesy*, 72, 606-612. <https://doi.org/10.1007/s001900050199>
- Teunissen, P. J. G. 1999, An optimality property of the integer least-squares estimator, *J. Geodesy*, 73, 587-593. <https://doi.org/10.1007/s001900050269>



Noah Minchan Kim received his B.S. degree in Aerospace Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in Daejeon, Republic of Korea, in 2019. He is currently a combined M.S./ Ph.D. student in the Department of Aerospace Engineering at KAIST. His research interests include carrier phase differential global navigation satellite systems, multi-sensor integration, and navigation integrity.



Dongchan Min is a postdoctoral researcher in Aerospace Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea. He received the B.S. degree in mechanical engineering from Sungkyunkwan University, Republic of Korea, and the M.S. and Ph.D. degrees in Aerospace Engineering from KAIST, Republic of Korea. His research interests include the integrity architecture for carrier-based GNSS systems, and advanced receiver autonomous integrity monitoring.



Jiyun Lee received the Ph.D. degree in Aeronautics and Astronautics from Stanford University, Stanford, CA, USA, in 2005. She is a full professor with the Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST). She has authored over 100 research papers in the field of GNSS applications and safety critical systems.

전 지구 관측망을 이용한 GPS 위성 시계 오프셋 실시간 추정 및 GPS 위성 블록에 따른 오프셋 특성 분석

설윤환¹, 림형진², 김영국^{1,2}, 박관동^{1,2†}

Real-Time Estimation of GPS Satellite Clock Offsets Using a Global Tracking Network and Analysis of GPS Block-Dependent Clock Biases

Yunhwan Seol¹, Hyung-Jin Rim², Yeong-Guk Kim^{1,2}, Kwan-Dong Park^{1,2†}

¹Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

ABSTRACT

Centimeter-level precise positioning based on satellite navigation requires satellite clock offset accuracy at the nanosecond level, which is more precise than the time information provided by broadcast ephemeris. The development of precise real-time clock error estimation technology is therefore essential. This study developed a real-time Global Positioning System (GPS) satellite clock offset estimation algorithm based on a sequential filter. The algorithm estimates satellite clock offsets using data acquired from a global network of stations. The algorithm estimates the satellite clock offset, drift, receiver clock error, tropospheric zenith delay correction, and ambiguity parameters as state variables. The observation model uses un-differenced observations with an ionosphere-free combination technique. To improve the numerical stability of the Kalman filter, Cholesky decomposition and the Joseph stabilized form of the covariance update method were introduced. For validation, the results were compared with the final clock offset product from the Jet Propulsion Laboratory (JPL). The root mean square error (RMSE) was found to be 1.47 ns when using only carrier phase and 1.56 ns when using a combination of carrier phase and code. Additionally, a bias was observed depending on the GPS satellite block, with a magnitude reaching up to 2.5 ns.

Keywords: : GNSS, realtime estimation, satellite clock estimation, sequential filter

주요어: 위성항법시스템, 실시간 추정, 위성 시계 추정, 순차 필터

1. 서론

위성항법을 이용한 측위는 위치와 시각을 결정하는 핵심 요소로 궤도정보와 위성 시계 오프셋 정보가 활용된다. 궤도와 시각 정보의 정확도는 측위 정확도에 직접적으로 영향을 미치므로, 위성항법시스템이나 보강시스템의 성능은 정밀한 궤도 및 시각 정보를 제공하는 능력에 의해 결정된다.

위성에서 제공하는 방송궤도력의 궤도 정확도는 약 1D 평균 RMS 1 m 수준이며, 위성 시계 오프셋의 정확도는 약 Root Mean Square Error (RMSE) 5 ns(거리 환산 시 약 1.5 m)이다 (IGS,

orbit and clock product 2025). 이러한 한계를 극복하기 위해 보다 정밀한 항법 정보를 제공하는 다양한 방법론이 제시되어 왔으며, 그중 State Space Representation (SSR) 방식이 널리 활용되고 있다. SSR은 위성 궤도오차, 위성 시계 오프셋, 전리층 대류층 지연 및 바이어스에 대한 오차항을 각각 보정정보로 제공하는 방식이다 (Lee & Park 2020, Shin et al. 2024).

SSR 보정 메시지 생성을 위해서는 단기간의 궤도를 정확히 예측하고 이를 기반으로 시계 오차를 실시간으로 추정하여야 한다. 전리층, 대류권을 비롯한 기타 오차항들은 앞서 생성한 궤도와 시각정보에 기반하여 추정된다.

Received Aug 08, 2025 Revised Aug 25, 2025 Accepted Sep 05, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: kdpark@inha.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

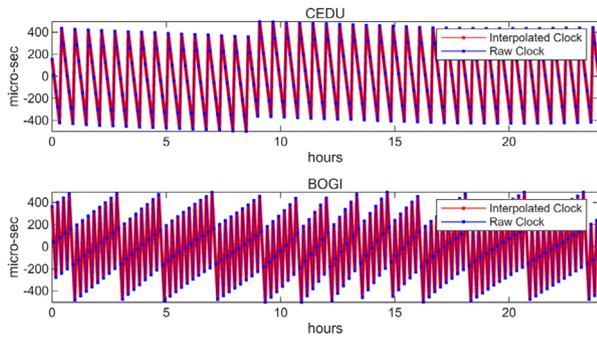


Fig. 1. Time series of receiver clock offsets for BOGI (2025 DOY 005) and CEDU (2025 DOY 005–007), obtained from the CODE final clock product and interpolated at 1-second intervals.

국외에서는 이와 관련된 광범위한 선행 연구가 진행되어 왔다. Han & Jekeli (1998)는 위성과 시간에 대해 차분한 GPS 관측치를 사용하여 관측 모델을 단순화하여 30초 간격의 실시간 시각 추정을 수행하였다. 그리고 생성된 시각 정보를 이용한 측위 성능을 검증하여, 절대적인 GPS 시각 정보가 아닌 상대적인 시각 정보로도 고정밀 측위가 가능함을 증명하였다.

Hauschild (2011)는 차분되지 않은 관측을 활용한 실시간 시각 추정의 기본 원리를 제시하였다. 제시한 연구에서는 위성 탑재 시계에서 발생하는 불연속성(clock jump) 및 궤도 오차가 시계 오차 추정에 미치는 영향을 분석하였다. 이후 Galileo의 프로토타입인 Galileo In-Orbit Validation Element (GIOVE) 위성과 GPS 위성의 시계 오차를 동시에 추정하여 Precise Point Positioning (PPP)에 적용하고 Signal-in-Space Ranging Error (SISRE)를 분석함으로써 Galileo 위성 초기 단계의 시각 체계 구성에 기여하였다.

또다른 연구 동향으로는 다양한 위성군간의 호환성과 계산 효율성을 고려한 시각 추정 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Chen et al. (2021)은 Inter System Clock Bias (ISCB)를 시계 오차와 함께 추정하였다. 이 과정에서 에포크간 차분 관측치를 도입하여 계산의 복잡도와 모호정수에 의한 불확실성을 감소시켜 계산 효율성과 정확도가 개선되는 결과를 보였다.

실시간 시각 추정을 위한 추정기의 수치적 최적화 연구도 활발히 진행되고 있다. Zuo et al. (2021)은 실시간 정밀 시각 추정 과정에 Square Root Information Filter (SRIF)를 기반으로 추정 잔차와 민감도 벡터에 기반한 이상값의 순차적 선택 및 제거 알고리즘을 적용하여 추정 결과의 정밀도와 계산 효율성이 개선됨을 보였다.

국내의 경우, GPS 위성의 정밀 궤도 결정에 대한 연구는 이루어졌지만 (Kim et al. 2024) 위성 시계 오프셋의 실시간 추정을 수행한 연구 사례는 확인되지 않는다. 그러나, 한국형 위성항법시스템의 개발 및 고정밀 보정정보의 국산화가 시도됨에 따라 실시간으로 정밀한 시각 정보를 생성하는 연구 또한 이루어져야 한다. 따라서, 본 연구는 실시간 시각 추정기의 프로토타입을 설계하는 것을 목적으로 한다. 제안하는 알고리즘은 전 지구 GNSS 관측망을 구성하여 IGS Real-time Service (RTS)를 이용해 관측 데이터를 실시간으로 제공한다. 위성과 수신기의 좌표는 IGS와 Jet Propulsion Laboratory (JPL)의 최종 산출물을 이용해 고정밀

다. 이후, 데이터가 입력되는 매 에포크마다 비차분 관측치를 이용하여 GPS 위성 시계 오차를 순차적으로 추정한다.

이어지는 2장에서는 특정 조건에 따라 전 지구 관측망을 형성하고, 각 위성을 안정적으로 추적할 수 있는지 검증한다. 또한 본 알고리즘에서 사용되는 관측 모델과 추정하고자 하는 상태 변수를 정의한다. 3장에서는 GPS 위성 시계 오프셋의 오차 특성을 분석하고, 선형 칼만 필터의 설계와 자료처리 전략에 대해 설명한다. 4장에서는 처리 결과를 JPL 시계 오프셋 최종 산출물과 비교하며 위성 블록에 따른 오차 특성을 관측치의 종류와 연관 지어 분석한다. 마지막으로 5장에서는 4장의 결과로부터 결론을 도출하고, 향후 연구의 방향성에 대해 논의한다.

2. 관측 데이터 및 모델

이번 장에서는 실시간 위성 시계 오프셋 추정을 위한 관측 정보 수집 과정과 추정 매개변수의 설계에 대해 다룬다. 2.1절에서는 전 지구 관측 데이터를 체계적으로 확보하기 위한 관측소 선정 전략과 데이터 수집 방법론을 제시한다. 2.2절에서는 시계 오프셋을 포함한 추정 매개변수의 설계 과정과 각 매개변수의 특성을 분석한다. 마지막으로 2.3절에서는 본 연구에서 사용되는 관측 방정식과 이론적 배경을 제시하고, 실제 추정 과정에서의 적용 방식을 상세히 설명한다.

2.1 전 지구 관측망

GPS 32기 위성의 시계 오프셋을 연속적으로 추정하기 위해서는 전 지구에 균등하게 분포된 관측망 구축이 필수적이다. IGS 네트워크 (IGS, network 2025)에 따르면 2025년 5월 1일 기준 전 세계에 522개의 관측소가 운용 중이며, 이 중, 다음 단락에서 기술하는 선정 기준을 적용하여 66개의 관측소를 최종 선정하였다.

관측소 선정 기준은 다음과 같다. 첫째, 안정적인 시각 추정을 위해 H-maser, Cesium 또는 Rubidium 외부 원자시계를 장착한 관측소를 우선적으로 선정하였다. 이러한 조건을 만족하는 관측소는 전체 522개소 중 139개소이다. 둘째, 첫 번째 기준을 만족한 139개소 중에서 데이터 수집 기간인 2025년 DOY 005~007일(3일간) 동안 관측소가 정상 운영 상태를 유지하고 관측 파일이 안정적으로 제공된 관측소로 범위를 축소하였다. 셋째, 수신기 시계의 안정성을 고려하였다. 일부 수신기 시계는 Fig. 1과 같이 급격한 시계 조정을 보인다. 이러한 불연속적인 시계 패턴은 순차 필터 기반 추정 과정에서 필터의 수렴성과 추정 성능을 저해할 수 있으므로 이러한 패턴을 보이는 관측소는 제외하였다.

그 결과 59개의 관측소가 조건을 만족하였다. 마지막으로, GPS 위성이 궤도상에서 이동하는 동안 항상 최소 5개 이상의 관측소에서 관측될 수 있도록 하는 조건을 만족해야 한다. 하지만, 원자시계 위주로 선정된 관측망은 유럽과 북미 대륙에 편중되어 분포하고 있으며, 남태평양과 인도양 일대에는 관측소가 희소하게 분포하는 공간적 불균형이 존재한다. 이러한 지역적 관측 공백을 보완하기 위해 외부로 연결된 원자시계가 없지만 안정적인 내부 시계를 가진 7개소의 관측소를 추가하였으며, 최종적으로

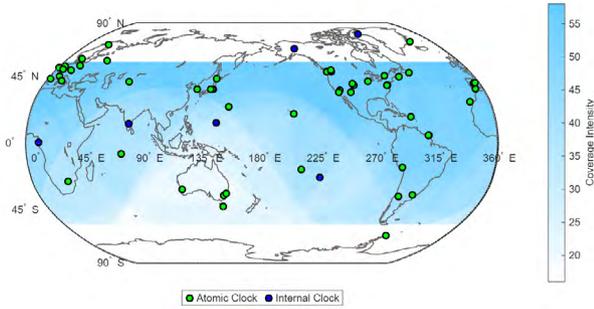


Fig. 2. Distribution of the observation network. The markers indicate the type of clock. The color bar represents the number of stations that can simultaneously observe a satellite at any position satisfying the GPS orbital conditions (elevation mask 10° is adopted).

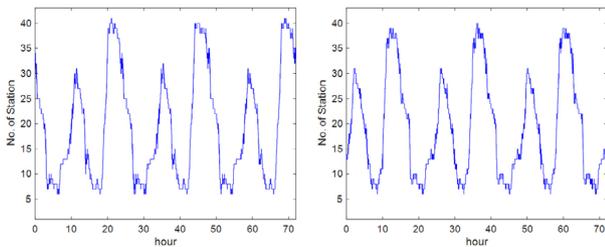


Fig. 3. Time series of the number of ground stations in contact with GPS satellite PRN02 (left) and PRN25 (right) over a 72-hour period (2025 DOY 005-007).

66개소의 관측소를 선정하였다.

Fig. 2는 선정한 66개 관측소의 분포를 나타내고 있다. 컬러바는 궤도 반경 26,578,137 km, 경사각 55°의 원궤도를 가정한 GPS 위성이 위치할 수 있는 구면상의 모든 점에서 몇 개의 관측소에 동시에 관측될 수 있는지를 나타낸 것이다. Fig. 3은 단일 위성이 72시간 동안의 궤도 운동 과정에서 위성을 관측하는 관측소 수의 변화를 시간에 따라 보여준다. Figs. 2, 3에 따르면, 각 위성은 통과하는 지역의 관측소 분포에 따라 가시성의 편차가 확인되나 남인도양과 남태평양 상공과 같이 관측소가 희박하게 분포된 지역을 통과할 때도 최소 6개 이상의 관측소에 의해 관측되도록 관측망을 구성하였다.

2.2 매개변수 모델

GPS 항법 메시지는 위성 시계 오프셋을 a_0, a_1, a_2 3개의 매개변수를 통해 2차 다항식으로 모델링 하고 있다. 이는 GPS 위성 시계 오프셋의 시간에 따른 변화 양상이 2차함수에 근사함을 의미한다. 이러한 특성은 GPS 위성 시계 오프셋에서 2차 추세를 제거한 결과를 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 4는 GPS 위성의 시계 오프셋을 1차 및 2차 다항식에 접합하여 시간적 추세를 제거한 후의 잔차를 나타낸 것이다. 위성 블록별로 차이가 확인되지만 2차 추세 제거 후의 잔차가 백색 잡음에 가까운 결과를 보이며 이는 2차 함수에 근사함을 의미한다.

Eq. (1)은 GPS 항법 메시지를 이용해 위성 시계 오프셋을 계산하는 방법이다 (Anthony 2022). Eq. (1)에서 dt_s 는 항법 메시지를

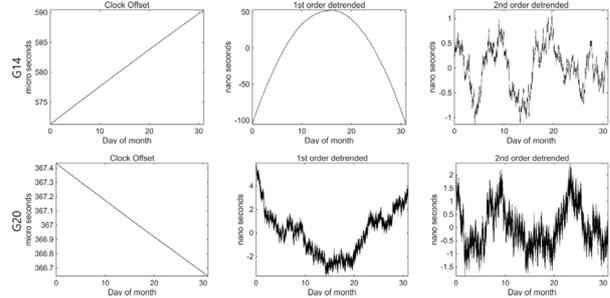


Fig. 4. First- and second-order detrended clock offsets of GPS satellites PRN14 (Block III) and PRN20 (Block IIR) during May 2025.

이용해 계산한 위성 시계 오프셋을, t 는 사용자의 시각을, t_{oe} 는 궤도력 기준 시각을 나타내며 a_0, a_1, a_2 는 각각 위성 시계의 오프셋, 드리프트, 드리프트 변화율을 의미한다.

$$dt_s = a_0 + a_1(t - t_{oe}) + a_2(t - t_{oe})^2 \tag{1}$$

여기서, 드리프트 변화율의 크기는 0에 근사한다. 그러므로 본 연구에서는 추정기의 복잡도를 낮추고자 2차 항, 즉, 드리프트 변화율을 생략하였고, 오프셋 및 드리프트만을 추정하였다. 따라서 위성 시계 오프셋은 Eq. (2)와 같이 모델링 된다.

$$\delta t_s^{t+1} = \delta t_s^t + \tau \cdot \dot{\delta} t_s^t \tag{2}$$

여기서 $\delta t_s, \dot{\delta} t_s$ 는 본 연구에서 추정하는 위성시계 오프셋 및 드리프트를, τ 는 순차 필터의 시간 간격을 의미하며, 본 연구에서는 30초 간격 관측 데이터를 사용하였기에 이를 30초로 설정하였다 ($\tau=30s$). 위성 시계 오프셋을 제외한 나머지 상태 변수(수신기 시계 오프셋, 천정방향 대류권 지연량, 모호정수)는 각 하나의 항으로 모델링 하였다.

2.3 관측 모델

본 연구에서는 이온층에 의한 1차 오차를 제거하기 위해 Eq. (3)과 같이 무전리층 조합을 적용하였다 (ESA Navipedia 2025).

$$\begin{aligned} \rho_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \rho_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \rho_2 \\ \Phi_{IF} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_2 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, ρ, Φ, f 는 각각 코드 의사거리 및 반송파 위상 관측치, 그리고 주파수를 의미하며 아래 첨자는 신호의 종류를 의미한다. 또한, IGS를 비롯한 여러 GNSS 처리기관은 산출물을 생성할 때, P1 및 P2 신호의 무전리층 조합 관측치를 기준으로 한다. 따라서, 본 연구 또한 GPS의 P1(C1W/L1W) 및 P2(C2W/L2W) 신호를 무전리층 조합하여 JPL 시계 오프셋 최종 산출물과 정렬하였다.

그러나, 관측망에서 사용되는 수신기 중 Trimble과 Leica의 일부 기종은 P2 신호를 수신하지 않는다. 15개 관측소가 이에 해당하며, Eq. (4)와 같이 C1 코드 의사거리(C1C) 관측에 Differential Code Bias (DCB)를 적용하여 사용하였다. 따라서, 코드의사거리 및 반송파 위상 관측 방정식은 Eqs. (5, 6)과 같이 유도된다.

$$\rho_{P1} = \rho_{C1} + DCB_{(P1-C1)} \tag{4}$$

$$\rho_{IF} = |\mathbf{r}_n - \mathbf{r}^s| + c(\delta t_r - \delta t_s) + c \cdot \delta_{rel} + \delta_{trop} \tag{5}$$

$$\Phi_{IF} = |\mathbf{r}_n - \mathbf{r}^s| + c(\delta t_r - \delta t_s) + c \cdot \delta_{rel} + \delta_{trop} + PWU + \lambda_{IF} \cdot N_{IF} \tag{6}$$

여기서, \mathbf{r}_n 과 \mathbf{r}^s 는 각각 수신기와 위성의 위치 벡터이며, δ_{rel} 은 상대성 효과에 의한 보정, δ_{trop} 은 대류권에 의한 총 지연량, PWU는 phase wind up effect를 의미한다. 이 때, 관측 방정식의 일부 요소는 Eqs. (7-11)과 같이 세분하여 표현할 수 있다. Eq. (7)은 수신기 시계 오프셋 항의 구성이다.

$$dt_r = \widetilde{dt}_r + b_{rcv} \tag{7}$$

여기서 \widetilde{dt}_r 은 바이어스가 포함되지 않은 수신기 시계 오프셋을, b_{rcv} 는 수신기 DCB를 의미한다. 수신기 또한 위성과 동일하게 채널에 따른 DCB가 존재한다. 본 연구에서는 Eq. (7)과 같이 바이어스를 포함한 수신기 시계 오프셋을 추정하였다.

수신기와 위성의 위치 벡터($\mathbf{r}_n, \mathbf{r}^s$) 또한 여러 보정항으로 구성 되어 있으며 Eqs. (8, 9)와 같다.

$$\mathbf{r}_n = \widetilde{\mathbf{r}}_n + \Delta \mathbf{r}_{ecc} + \Delta \mathbf{r}_{ET} + \Delta \mathbf{r}_{ant}^{rcv} \tag{8}$$

$$\mathbf{r}^s = \widetilde{\mathbf{r}}^s + \Delta \mathbf{r}_{ant}^{sat} \tag{9}$$

여기서, $\widetilde{\mathbf{r}}_n$ 은 Solution (software/technique) Independent Exchange format (SINEX)에서 제공되는 마커의 좌표, $\widetilde{\mathbf{r}}^s$ 는 SP3에서 제공되는 위성 질량중심의 좌표를 의미하며 $\Delta \mathbf{r}_{ecc}$ 는 수신기 좌표의 이심(eccentricity), $\Delta \mathbf{r}_{ET}$ 은 지구 조석에 의한 효과, $\Delta \mathbf{r}_{ant}^{rcv}$ 및 $\Delta \mathbf{r}_{ant}^{sat}$ 은 위성과 수신기 안테나의 위상 중심 오프셋을 뜻한다.

대류권 총 지연량은, 경험적 모델을 통해 계산할 수 있는 오차와 추정되어야 하는 오차로 구성되어 있다. Eq. (10)은 그 구성을 나타낸다.

$$\delta_{trop} = \delta_{ZHD} \cdot mf_h + \delta_{ZWD} \cdot mf_w \quad \text{where, } \delta_{ZHD} = \widetilde{\delta}_{ZHD} + \varepsilon \tag{10}$$

여기서, δ_{ZHD} 및 δ_{ZWD} 는 각각 천정방향 건조 및 습윤 대기에 의한 지연량을 의미하며, mf_h 및 mf_w 는 이에 대한 사상함수이다. $\widetilde{\delta}_{ZHD}$ 는 경험적 모델인 Saastamoinen 모델 (Saastamoinen 1972)을 통해서 모델링 할 수 있는 부분($\widetilde{\delta}_{ZHD}$)과, 잔여 오차(ε)로 나뉜다. 따라서 δ_{trop} 은 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{trop} = (\widetilde{\delta}_{ZHD} + \varepsilon) \cdot mf_h + \delta_{ZWD} \cdot mf_w \tag{11}$$

여기서, mf_h 와 mf_w 는 Global mapping function (Boehm et al. 2006)을 통하여 계산할 수 있으며, 두 사상함수는 모두 위성의 고도각에 따라 천정방향 성분을 사선방향 성분으로 투영시키는 역할을 한다. 그러므로 ε 를 추정할 때 mf_h 대신 mf_w 를 적용하여도 δ_{trop} 을 복원하는데 영향을 미치지 않는다. 따라서, Eq. (11)은 Eq. (12)와 같이 정리된다.

$$\delta_{trop} = \widetilde{\delta}_{ZHD} \cdot mf_h + (\delta_{ZWD} + \varepsilon) \cdot mf_w \tag{12}$$

본 연구에서는 상태벡터의 차원을 줄이고 추정기의 효율성을 높이기 위해 δ_{ZWD} 와 ε 를 합하여 수직방향 지연 보정량 (tropospheric zenith delay correction)으로 추정하였다. 최종적으로, δ_{trop} 은 Eq. (13)과 같이 모델링된다.

Table 1. The total number of estimated unknowns.

| Unknowns | n (number of satellites) = 32 | |
|--|---------------------------------|------|
| | m (number of stations) = 66 | |
| δt_s (Sat. clock offset) | n | 32 |
| $\dot{\delta} t_s$ (Sat. clock drift) | n | 32 |
| δt_r (Rcv. clock offset) | m | 66 |
| ZDC (Tropospheric zenith delay correction) | m | 66 |
| N_{IF} (Ambiguity) | $n \times m$ | 2112 |
| Total | | 2308 |

$$\delta_{trop} = \widetilde{\delta}_{ZHD} \cdot mf_h + \delta_{ZDC} \cdot mf_w \quad \text{where, } \delta_{ZDC} = \delta_{ZWD} + \varepsilon \tag{13}$$

여기서, δ_{ZDC} 는 수직방향 지연 보정량을 의미하며, 이는 각 관측소에 대해 추정된다.

마지막으로, Eq. (14)는 반송파 위상 관측에 무전리층 조합을 적용하였을 때 모호정수 항의 구성이다.

$$\lambda_{IF} \cdot N_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \lambda_1 N_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \lambda_2 N_2 \tag{14}$$

여기서, λ, f_n 는 각각 파장과 주파수를 의미하고 N 은 모호정수를 뜻하며, 아래 첨자는 무전리층 조합에 사용하는 밴드를 나타낸다. 이 때, N_1 과 N_2 는 정수성을 띠고 있으나, 무전리층 조합 과정을 거친 N_{IF} 는 정수성을 잃게 된다. 따라서 본 연구에서는 모호정수를 고정하지 않고 실수 상태로 추정하였다.

3. 필터 구성

이번 장은 선형 칼만 필터(이하 ‘칼만 필터’)의 구성에 대한 내용을 담고 있다. 3.1절에서는 칼만 필터가 추정하고자 하는 미지수인 상태변수를 어떻게 설정하였으며 각 변수들 간에 확률적 특성을 부여하였는지 기술한다. 3.2절은 시각 데이터 설정과 이를 위한 제약 조건에 대해 설명한다. 이후 3.3절에서는 칼만 필터의 일부 과정을 변형하여 고차원 실시간 구동 환경에서의 안정성을 향상시킨 방법을 소개한다.

3.1 상태변수 설계

본 알고리즘에서 상태 변수로서 추정되는 항은 Eqs. (2, 5, 6)의 $\delta t_s, \dot{\delta} t_s, \delta t_r, ZDC, N_{IF}$ 에 해당된다. 이 때, 32기의 GPS 위성과, 66개소의 관측소를 사용하였다. 따라서, 총 미지수의 개수는 Table 1과 같이 총 2308개로 결정된다.

또한, 상태 벡터 X 는 Eq. (15)와 같이 설계할 수 있으며, 위 첨자 n, m 은 위성과 관측소에 각각 할당된 번호이다. 이 때, 위성 시계 오프셋 항과 위성 시계 드리프트 항은 1차 미분 관계를 가지며, 상태전이 행렬은 이를 반영해야 한다. Eq. (16)은 상태전이 행렬의 구성과 순차 필터의 예측 단계이다.

$$X = [\delta t_s^1 \dots \delta t_s^n, \dot{\delta} t_s^1 \dots \dot{\delta} t_s^n, \delta t_r^1 \dots \delta t_r^m, ZDC^1 \dots ZDC^m, N_{IF}^1 \dots N_{IF}^{n \times m}]^T \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} \delta t_s^n \\ \dot{\delta} t_s^n \end{bmatrix}^{t+1} = A_{\delta t_s} \begin{bmatrix} \delta t_s^n \\ \dot{\delta} t_s^n \end{bmatrix}^t \quad \text{where } A_{\delta t_s} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

여기서, $A_{\delta t_s}$ 는 상태변수 δt_s 와 $\dot{\delta} t_s$ 에 대한 상태전이행렬을 의미하며, 위 첨자는 각 에포크를 의미한다. 순차 필터의 시간 간격을 고

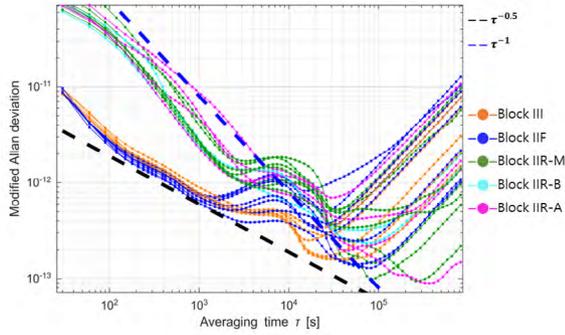


Fig. 5. Modified Allan deviation of the satellite clock offset collected during May 2025. Each line represents an individual GPS satellite, and the color indicates the satellite block type. The dashed reference lines correspond to slopes of $\tau^{0.5}$ and τ^{-1} , respectively.

려하여 비대각 성분을 설계하였으며, 이외의 상태변수들에 대한 상태전이행렬은 단위행렬(I)로 구성된다.

상태변수가 실제 변수의 변화 특성을 정확히 반영하고, 추정 성능과 신뢰성을 극대화하기 위해서는 상태 변수에 대해 적절한 잡음 모델을 정의해야 한다. 본 연구에서는 위성 시계 오프셋이 장 단기적으로 어떠한 종류의 잡음 특성을 가지는지 분석하기 위해 Modified Allan Deviation을 사용하였다. Fig. 5는 GPS 위성의 시계 오프셋의 Averaging time에 따른 Modified Allan Deviation을 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 GPS 위성 시계는 블록별로 서로 다른 잡음 특성이 확인된다. 블록 III와 IIF는 단기 구간 간($\tau < 10^3$ s)에서 $\tau^{-0.5}$ 기울기를 나타내어 random walk phase noise가 지배적임을 확인하였으며 블록 IIR 계열(IIR-A, IIR-B, IIR-M)은 동일 구간에서 τ^{-1} 기울기를 보여 flicker phase noise가 우세하게 나타났다 (IEEE 1998). 따라서, 블록 III와 IIF에는 random walk phase 모델을, IIR 계열에 대해서는 flicker phase와 random walk의 혼합 모델을 적용하는 것이 물리적으로 정확하나 본 연구에서는 계산 복잡도와 효율성을 고려하여 모든 GPS 위성 시계 오프셋 및 드리프트를 random walk로 모델링하였다. 이 때, 오프셋과 드리프트는 1차 미분 관계로 완전히 독립적이지 않으며 실제 시계는 물리적인 장치이기 때문에, 온도, 진동, 드리프트 변화율에 따라 오차 특성의 상관성이 발생할 수 있다 (Fernández et al. 2017). 따라서 이를 고려하여 process noise variance-covariance 행렬 Q 를 Eq. (17)과 같이 모델링 하였다 (Swift 1987). 각 상태변수에 대해 부여한 process noise variance-covariance는 Hauschild (2011)에서 제시한 수치를 참고하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \Delta t + q_2 \frac{\Delta t^3}{3} & q_2 \frac{\Delta t^2}{2} \\ q_2 \frac{\Delta t^2}{2} & q_2 \Delta t \end{bmatrix} \text{ where } q_1 = \sigma^2_{\text{offset}}, q_2 = \sigma^2_{\text{drift}} \quad (17)$$

Liu et al. (2019)와 Zhang et al. (2011)의 실시간 시각 추정 및 PPP에 대한 선행 연구는 수신기 시계 오프셋을 white noise로 모델링 하였다. 그러나 본 연구에서 사용한 전 지구 관측망은 대부분 외부 원자시계를 장착한 관측소로 구성되어 있으며, 시계의 상태가 안정적인 관측소만을 사용하였기에 위성 시계 오

프셋 및 드리프트와 동일하게 random walk로 모델링 하였다. ZDC는 시간에 따른 변화율이 매우 작은 값이기에 1시간 단위의 piecewise-constant로 모델링 하였다. 마지막으로, 모호정수는 위성-수신기간 각 관측쌍에 대해 constant로 모델링 하였고, set-rise 또는 사이클 슬립 이벤트가 발생하였을 때 초기화 하였다.

3.2 시각 데이터 및 제약조건

위성 시계 오프셋을 추정하기 위해서는 기준 시각과, 특이성 (singularity) 문제를 고려해야 한다. 이 문제는 위성 및 수신기 시계 오프셋이 상대적으로만 결정되는 관측 방정식의 구조에서 발생한다. 따라서 시각의 절대적인 영점이 결정되지 않을 경우, 각 시각과 관련된 파라미터들은 무한한 상관관계를 갖게 되므로 랭크 결손(rank deficiency)이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 기준 시계를 도입하여 그 값을 0 또는 임의의 상수로 고정하는 제약 조건을 부여해야 한다. 선행 연구에서 사용해진 방법으로는 GPS time과 근사한 한 개의 지상 시계를 고정하거나, 한 개의 위성 시계를 고정 후 방송궤도력 시각 정보를 통해 복원하는 기법이 제시되어 왔으며 (Maciuk & Lewińska 2019), zero-mean condition을 부여하는 방법 또한 제시되어 왔다 (Huang et al. 2021). 이로써 모든 시계 오프셋들은 설정한 기준에 대해 상대적으로 정의되며, 파라미터 간 일관성이 확보된다. 만약 지상 시계 1기를 기준 시계로 고정한다면, 필터의 추정 안정성은 연결된 수신기의 수신 안정성에 영향을 받는다. 따라서, 더욱 안정적으로 유지되는 위성 시계를 이용해 제약을 주는 방식이 권장된다 (Rovira-Garcia et al. 2021). 본 연구는 zero-mean condition을 응용하여, Eq. (18)과 같이 추정한 위성 시계 오프셋의 평균이 방송궤도력을 통해 제공되는 시계 오프셋의 평균과 일치하도록 제약을 하였다.

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta t_k^s = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n dt_k^s \quad (18)$$

여기서, n 은 사용 가능한 위성의 수, dt_k^s 는 Eq. (1)과 같이 방송궤도력을 통해 산출한 위성 k 의 시계 오프셋을 의미한다.

3.3 필터 설계 전략 및 최적화

본 연구에서는 추정기로서 칼만 필터를 사용하였다. GNSS 측정치가 노이즈를 포함하거나 불완전한 경우에도 예측과 갱신 단계를 통해 추정하고자 하는 변수들을 실시간으로 추정할 수 있다. 특히, 칼만 필터는 낮은 지연 시간으로 작동하며 일시적인 수신 불량 등의 이유로 관측 간격이 불규칙해지는 상황에서도 강건한 추정 성능을 보장하므로 GNSS 데이터의 실시간 처리에 적합하다. 칼만 필터가 상태 벡터와 분산-공분산 행렬에 대해 예측 및 갱신을 수행하는 과정은 Eqs. (19–22)과 같다 (Grewal & Andrews 2015).

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= A \hat{x}_{k-1} \\ P_k^- &= A P_{k-1} A^T + Q \end{aligned} \quad (19)$$

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (20)$$

Table 2. Detailed Estimation Strategies for real-time clock estimation.

| | Items | Strategies |
|---------------------|--|--|
| Data editing | Cut-off | Elevation angle (EL) < 7°; Signal to noise ratio (SNR) < 25 dB |
| | Weights | 1.00 m and 0.03 m prior accuracy for code and phase observation respectively; Elevation-dependent weighting was applied for EL < 45°; SNR-dependent weighting was applied for signals with SNR < 32 dB |
| Observation model | Observations | IF combination with undifferenced pseudo-range and carrier phase |
| | Frequency and channel | C1W(C1C), C2W, L1W(L1C), L2W |
| | Differential code bias | CODE monthly P1C1 product |
| | Tidal effect | Solid Earth Tide (IERS Convention 2010) |
| | Earth Orientation Parameter (EOP) | IERS C04 |
| | Orbital motion of the Sun and Moon | JPL DE405 |
| | Receiver and satellite phase center offset and variation | IGS20_2335.atx |
| | Relativistic effect | Corrected |
| | Phase wind-up effect | Corrected (Wu et al. 1993) |
| | Clock Datum | Aligned to the mean of broadcast clock offset (Section 3.2) |
| Orbit | Fixed to JPL Final SP3 | |
| Station coordinates | Fixed to IGS SINEX | |

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \tag{21}$$

$$P_k = P_k^- - K_kHP_k^- \tag{22}$$

여기서, \hat{x}_k 는 시간 k 에서 추정된 상태벡터를 의미하며, \hat{x}_k^- 는 관측 값이 반영되기 전의 예측 상태 벡터를 의미한다. A 는 상태전이 행렬을, P_k 는 k 에서의 상태 추정 오차 공분산 행렬을 나타내며 P_k^- 는 관측이 반영되기 전의 예측된 공분산 행렬이다. Q 는 시스템 잡음의 공분산 행렬을 나타내고, K_k 는 칼만 이득을, H 는 설계 행렬을 나타낸다. z_k 는 시간 k 에서의 실제 관측값을 의미한다. 마지막으로 R 은 관측 잡음의 공분산 행렬에 해당된다.

칼만 필터는 고차원의 공분산 행렬을 처리하는 경우 음의 고유값이 발생하거나, 대칭성 및 양의 정부호성을 이탈하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구는 칼만필터의 일부 연산 과정을 개선하였다. Eq. (20)은 칼만 이득을 계산하는 방법이다. 그러나 본 연구에서는 Cholesky 분해를 활용한 Eq. (23)과 같은 형태로 칼만 이득을 계산하였다.

$$S = HP_k^-H^T + R$$

$$S = L^T L \text{ (where } S = \text{upper triangular matrix)}$$

$$K_k = P_k^-H^T L^{-1} L^{-T} \tag{23}$$

Cholesky 분해는 양의 정부호(positive-definite) 대칭 행렬에 대해 효율적으로 작동하며, 역행렬을 직접 계산하는 과정에서 발생할 수 있는 수치 불안정성을 크게 줄여준다 (Alexandros & David 2020). 특히, 공분산 행렬을 항상 삼각 행렬의 곱의 형태로 유지하기에 round-off error에 강인하여 계산과정에서 누적되는 수치오차를 줄여줄 뿐 만 아니라, 연산 과정에서 행렬이 항상 양의 정부호성과 대칭성을 유지하도록 한다는 장점이 있다 (Chandrasekar et al. 2001).

공분산 행렬을 갱신하는 과정 또한 Eq. (24)의 Joseph’s 안정화 형태 (Bucy & Joseph 1968)를 도입하여, Eq. (22)의 공분산 행렬 갱신 과정을 대체하였다.

$$P_k = (I - K_kH)P_k^-(I - K_kH)^T + K_kRK_k^T \tag{24}$$

이 또한, Eq. (23)의 Cholesky 분해와 같이 공분산 행렬의 양의 정부호성과 대칭성을 보장하여 상태공간의 차원 또는 조건수가

큰 환경에서 발생할 수 있는 수치적 불안정성을 해결할 수 있다.

Table 2는 자료처리 전략에 대해 상세히 나타낸 표이며, 각종 오차를 보정하는 과정에서 참조한 외부 산출물과, 데이터를 전처리하고 가중치를 부여한 방법을 나타낸다.

4. 추정 결과

이번 장에서는, 추정 결과를 참값과 비교하고 그 특성을 분석한다. 본 연구에서는 30초 간격으로 제공되는 JPL 시계오프셋 최종 산출물을 참값으로 설정하였으며, 드리프트의 참값은 오프셋의 참값을 시간에 대해 중심 차분하여 획득하였다. 또한, 추정을 진행한 기간(2025/DOY005-007) 동안 PRN G01 및 G22는 불가용 상태였으므로 추정 대상에서 제외하였다. 4.1절에서는 반송파 위상 관측을 단독으로 사용하여 위성 시계 오프셋을 추정한 결과를, 4.2절에서는 반송파 위상 관측과 코드역사거리 관측을 결합하여 추정한 결과를 설명한다. 마지막으로 4.3절은 앞선 두 경우에서 위성 시계 드리프트를 추정한 결과를 설명한다.

4.1 반송파 위상 단독 사용

우선, 반송파 위상 관측치만을 이용하여 위성 시계 오프셋을 추정한 결과. 반송파 위상만 사용할 경우 모호정수의 영향으로 시스템의 자유도가 감소한다. 이러한 환경에서도 안정적으로 추정 과정을 진행하고 수렴시키기 위해서는 필터의 적절한 조정뿐만 아니라, 사이클 슬립에 대한 정확한 탐지 및 초기화 절차가 필요하다. 본 연구에서는 geometry-free combination (Hofmann-Wellenhof et al. 2008)과 Melbourne-Wübbena combination 관측치에 기반하여 사이클 슬립 발생 여부를 검출하고, 대응하였다 (Blewitt 1990). Fig. 6은 반송파 위상을 단독으로 사용하여 순방향 추정한 GPS 위성 시계 오프셋 오차의 시계열을 나타내며, Fig. 7은 각 블록에 대한 시계열 RMSE를 나타낸다. 본 연구에서 RMSE를 산출한 방식은 Eq. (25)와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \tag{25}$$

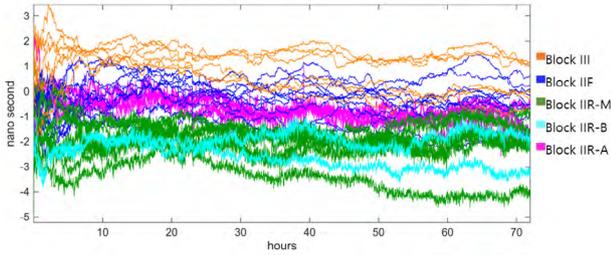


Fig. 6. A time series of the error between the estimated satellite clock offset and the true value during 2025/005-007, using carrier-phase only. Each color represents a GPS satellite block. Each line corresponds to an individual satellite.

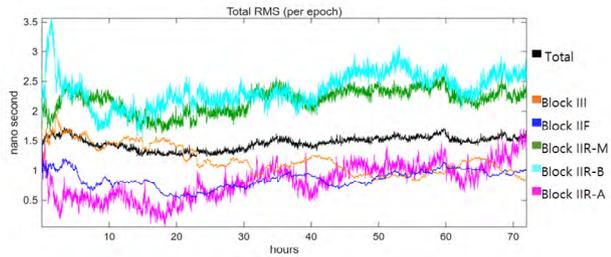


Fig. 7. Time series of the RMSE between the estimated satellite clock offset and the true value, using carrier-phase only. Each color and line represent a different GPS satellite block during 2025/005-007.

Table 3. Summary statistics of satellite clock offsets by GPS satellite block over all epochs in case of carrier phase observation.

| Block | # of sat. | RMSE (ns) | Standard deviation (ns) | Mean error (ns) |
|-------|------------|-----------|-------------------------|-----------------|
| III | 6 (of 7) | 1.20 | 0.77 | 0.93 |
| IIF | 11 | 0.87 | 0.77 | -0.40 |
| IIR-M | 7 | 2.19 | 0.77 | -2.05 |
| IIR-B | 2 | 2.38 | 0.55 | -2.31 |
| IIR-A | 4 (of 5) | 0.87 | 0.46 | -0.74 |
| Total | 30 (of 32) | 1.47 | 1.30 | -0.69 |

여기서 n 은 데이터의 개수를 의미하며, \hat{y}_i 는 추정된 값을 y_i 이에 대응하는 참값을 뜻한다.

모든 위성에서 추정된 시계 오프셋은 참값 대비 ± 3 ns 이내의 정확도를 보이며 블록별로 뚜렷한 클러스터링 패턴을 확인할 수 있다. Table 3에 제시된 블록별 통계 분석 결과는 이러한 패턴을 정량적으로 나타낸다. Table 3의 RMSE와 표준편차는 각 블록에 해당하는 위성 또는 전체 위성과 모든 에포크에 대해 산출하였다.

전체 위성에 대한 RMSE (1.47 ns) 대비 각 블록별 표준편차는 현저히 작은 값을 보인다. 각 블록의 RMSE 대비 표준편차 또한 작은 값을 보이며 블록 IIF의 표준편차 (0.77 ns)는 RMSE (0.87 ns)에 비해 약 90%, 블록 IIR-B의 표준편차 (0.55 ns)는 RMSE (2.38 ns)에 비해 약 23% 수준이다. 또한, 블록 III (0.93 ns), 블록 IIR-M (-2.05 ns), 블록 IIR-B (-2.31 ns) 등 다수 블록에서 평균 오차가 0에서 유의미하게 벗어나 있다. 이는 블록 내 위성들이 유사한 오차 특성을 공유하는 반면, 블록 간에는 큰 차이가 존재함을 의미한다.

4.2 코드 의사거리 및 반송파 위상 결합 사용

코드 의사거리는 반송파 위상 관측치에 비해 약 100배에 달하

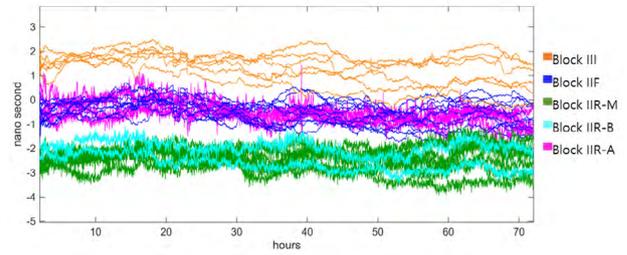


Fig. 8. A time series of the error between the estimated satellite clock offset and the true value during 2025/005-007, using both carrier-phase and pseudo range observations. Each color represents a GPS satellite block. Each line corresponds to an individual satellite.

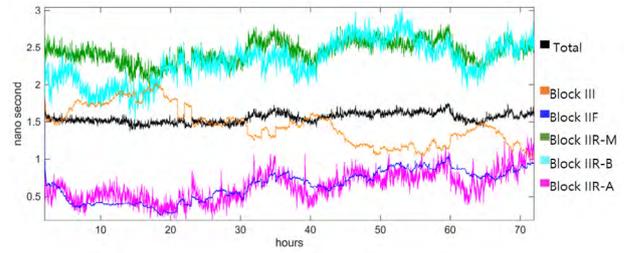


Fig. 9. Time series of the RMSE between the estimated satellite clock offset and the true value, using carrier-phase and pseudo range observations. Each color and line represent a different GPS satellite block during 2025/005-007.

는 높은 관측 잡음을 가진다. 따라서 후처리에서 정밀한 추정 결과를 도출할 때는 코드 의사거리를 제외해도 무방하다. 그러나 실시간 처리 환경에서는 반송파 위상 관측치만으로도 필터의 안정성을 확보하기 어렵다. 특히, 반송파 위상 관측치만 사용할 경우 자유도가 낮아 수렴 시간이 증가하며, 여러 에포크를 누적하여 후처리 하지 않으면 모호정수를 다른 변수와 엄밀히 분리하기 어렵다. 순차 필터에서는 적절한 초기값과 오차 특성 부여를 통해 이를 극복할 수 있지만, 시계의 불연속성 발생이나 사이클 슬립으로 인해 이상 관측치가 발생하면 필터 수렴에 부정적인 영향을 미쳐 안정성이 저해될 수 있다 (Mazher et al. 2016). 이러한 이유로, 실시간성을 중요시하는 선행 연구에서는 코드 의사거리를 반드시 반영하여 알고리즘을 설계하였으며, 본 연구 또한 최종적으로 코드 의사거리를 포함하여 결과를 도출하였다. Fig. 8은 반송파 위상과 코드 의사거리를 결합하여 사용한 GPS 위성 시계 오프셋 추정 오차의 시계열을 나타내며, Fig. 9는 블록 별 RMSE에 대한 시계열을 나타낸다.

반송파 위상만을 사용한 이전 결과와 마찬가지로 블록별 클러스터링 현상이 관찰되나, 그 분리 정도가 더욱 뚜렷하게 관찰된다. 블록 III는 약 1.5 ns 수준에서, Block IIF는 0 ns 부근에서, 블록 IIR-M과 IIR-B는 각각 -2.5 ns와 -2.0 ns 수준에서, Block IIR-A는 -0.5 ns 수준에서 명확히 구분되는 클러스터를 형성하였다. Table 4의 통계 분석 결과는 이러한 클러스터링의 심화를 정량적으로 보여준다.

Table 3과 비교하였을 때 전체 RMSE는 1.47 ns에서 1.56 ns로, 전체 표준편차는 1.30 ns에서 1.40 ns로 변화하였다. 블록별 표준편차는 모든 블록에서 감소하였으며, 감소폭은 블록 IIR-M에서 최대 42% 수준을, 블록 IIR-A에서 최소 13% 수준을 나타냈다. 이

Table 4. Summary statistics of satellite clock offsets by GPS satellite block over all epochs in case of carrier phase + pseudo range.

| Block | # of sat. | RMSE (ns) | Standard deviation (ns) | Mean error (ns) |
|-------|------------|-----------|-------------------------|-----------------|
| III | 6 (of 7) | 1.48 | 0.60 | 1.35 |
| IIF | 11 | 0.68 | 0.48 | -0.49 |
| IIR-M | 7 | 2.41 | 0.45 | -2.40 |
| IIR-B | 2 | 2.30 | 0.48 | -2.28 |
| IIR-A | 4 (of 5) | 0.66 | 0.40 | -0.53 |
| Total | 30 (of 32) | 1.56 | 1.40 | -0.69 |

Table 5. Comparison of satellite clock drift RMSE across GPS satellite blocks and observation types.

| Block | # of sat. | RMSE (ps/s) | |
|-------|------------|-------------|-------|
| | | CP | CP+PR |
| III | 6 (of 7) | 0.75 | 0.79 |
| IIF | 11 | 0.65 | 0.79 |
| IIR-M | 7 | 3.33 | 3.34 |
| IIR-B | 2 | 2.63 | 2.68 |
| IIR-A | 4 (of 5) | 3.04 | 3.05 |
| Total | 30 (of 32) | 2.13 | 2.16 |

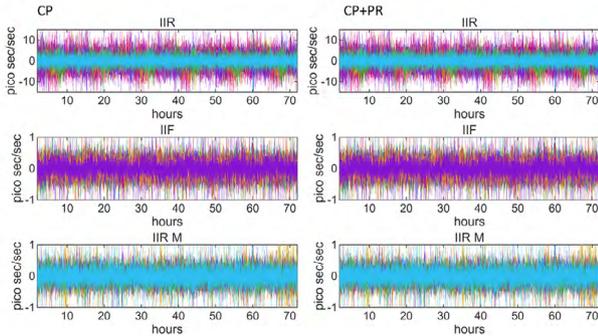


Fig. 10. Time series of satellite clock drift estimation errors for different GPS satellite. The left column shows the results obtained using carrier-phase-only observations, while the right column presents the results obtained using both carrier-phase and pseudo range observations.

는 블록 별 클러스터링이 더욱 명확해짐을 의미한다. 평균 오차 (mean error)의 변화 또한 블록 간 체계적 차이의 심화를 보여 준다. 절댓값 기준으로 가장 큰 변화를 보인 블록 III은 0.93 ns에서 1.35 ns로 0.42 ns 변화하였으며, 가장 작은 변화를 보인 블록 IIR-B는 -2.31 ns에서 -2.28 ns로 0.03 ns 변화하였다. 이러한 평균 오차의 변화는 코드의사거리 추가 사용이 블록별 클러스터를 더욱 뚜렷하게 분리시키고 더욱 극명한 바이어스를 발생시킴을 의미한다.

4.3 위성 시계 드리프트

위성 시계 드리프트 추정 결과는 관측치의 종류에 따른 차이는 크지 않았지만, 추정 정확도에 있어 블록에 따라 큰 차이를 보였다. Fig. 10은 반송파 위상만을 사용한 경우(좌측)와 반송파 위상 및 코드의사거리를 결합한 경우(우측)의 위성 시계 드리프트 추정 오차를 블록별로 나타낸 것이고, Table 5는 이를 수치적으로 분석한 결과이다.

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 반송파 위상만을 단독으로 사용하였을 때와 코드의사거리와 함께 사용하였을 때의 드리프트 추정 양상은 유사함을 알 수 있다. Table 5를 참고하면, 반송파 위상을 단독으로 사용하였을 때 전체 RMSE 2.13 ps로 결합 관측(2.16 ps) 대비 약간 우수한 성능을 보였으나, 그 차이는 매우 작은 수준이다. 블록별로는 블록 III과 IIF가 각각 0.75 ps와 0.65 ps의 낮은 RMSE를 보인 반면, 블록 IIR 계열(IIR-M: 3.33 ps, IIR-B: 2.63 ps, IIR-A: 3.04 ps)은 높은 오차 수준을 나타냈다.

이러한 블록 IIR 계열의 낮은 정확도의 드리프트 추정 결과와, Figs. 6과 8에서 관찰되는 시계 오프셋 추정 시계열 오차의 높은 변동성은 Fig. 5의 Modified Allan Deviation 분석과 Fig. 4의 추

세 제거 결과를 통해 설명할 수 있다. Fig. 5의 $\tau < 10^3$ s 범위에서, 블록 IIR 계열의 위성은 flicker phase noise가 우세하며 Modified Allan Deviation 값 또한 다른 블록에 비해 높다. 또한, Fig. 4를 참고하면 블록 IIR 계열은 블록 III에 비해 2차 추세 제거 후의 높은 잡음을 보이고 있다. 이는 블록 IIR 계열의 시계에 선형 모델에서 벗어난 잡음이 비교적 많이 포함되어 있으며 이것이 추정 결과에 나타난 것으로 판단된다.

5. 논의와 결론

본 연구에서는 정밀 시각정보 생성을 위해 GPS 위성의 시계 오프셋과 드리프트를 실시간으로 추정하는 알고리즘 설계하였으며, 반송파 위상을 단독으로 사용한 결과와 반송파 위상과 코드 의사거리를 결합하여 사용한 결과를 도출하였다. 또한, 추정 결과를 JPL 시계 오프셋 최종 산출물과 비교하여, 블록에 따른 평균 오차, 오차의 표준 편차, 평균 오차를 산출하고 분석하였다. 그 결과, 반송파 위상 단독 사용 시 추정 오차의 RMSE는 1.47 ns로 나타났으며, 반송파 위상과 코드 관측치를 결합했을 때는 1.56 ns의 RMSE를 보였다. 모든 위성에서 추정된 시계 오프셋은 참값 대비 ± 3 ns 이내의 정확도를 유지하였다. 특히, 추정 오차는 GPS 위성 블록에 따라 뚜렷한 클러스터링 패턴을 형성했으며, 그 규모는 최대 2.5 ns에 이르는 바이어스로 나타났다. 코드 관측치를 결합했을 때, 오차의 표준편차가 모든 블록에서 감소하여 블록별 클러스터링이 더욱 명확해지는 현상을 확인하였다. 이는 코드 관측치에 포함된 체계적인 오차 성분이 블록별 바이어스를 더욱 두드러지게 만들었음을 의미한다.

본 연구 결과는 블록에 따른 바이어스가 코드 의사거리 관측치에 주로 존재하며, 반송파 위상 단독 사용 시에는 모호정수 초기화 과정에서 코드 의사거리가 사용되어 바이어스가 일부 유입되었을 가능성을 제시한다. 또한, 반송파 위상에도 유사한 바이어스가 포함되어 있으나 모호정수에 의해 희석되어 그 규모가 상대적으로 작게 나타났을 가능성도 있다.

실시간 추정된 시계 오프셋 정보를 이용해 센티미터급 측위 정확도를 달성하기 위해서는 RMSE를 1 ns 이하로 낮추어야 하므로, 이를 위하여 블록별 바이어스의 발생 원인을 규명하고 이를 보정해야 한다. 향후의 연구는 앞서 언급한 두 가지 가능성에 대해 검증하고, 위성의 하드웨어 특성으로부터 발생하는 오차에 대한 분석이 이루어져야 한다. 더 나아가, 사용하는 위성군과 신호 대역을 확대하고 바이어스의 발생 유무와 블록 별 오차 특성을 분석하여야 한다. 또한, 정확도 향상과 더불어 추정기의 실시간

안정성에 대한 개선 또한 이루어져야 하며 수신기 및 위성 시계의 불연속 발생에 대응할 수 있는 알고리즘을 개발하고 적용하는 연구가 진행되어야 한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (RS2022-00141819, Development of Advanced Technology for Absolute, Relative, and Continuous Complex Positioning to Acquire Ultra-precise Digital Land Information).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

K.P. and H.R. proposed the research topic. Y.S. was responsible for the core research and algorithm development, with H.R. and K.P. providing guidance on the overall research direction, identifying relevant references, and specifying the required algorithmic functionalities. Y.K. directly contributed to the algorithm development and validation.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Alexandros, E. & David, P. 2020, Quantitative Verification of Numerical Stability for Kalman Filters, University of Birmingham, UK.
- Anthony, T. 2022, NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces, U.S. Space Force, IRN-IS-200M-001.
- Blewitt, G. 1990, An automatic editing algorithm for GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 199-202. <https://doi.org/10.1029/GL017i003p00199>
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. 2006, Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07304. <https://doi.org/10.1029/2005GL025546>
- Bucy, S. & Joseph, D. 1968, *Filtering for Stochastic Processes with Applications to Guidance*, Pure and Applied Mathematics, vol.23, Interscience Publishers (New York: AMS Chelsea Publishing).
- Chandrasekar, J., Michels, J. H., & Hero, A. O. 2001, Cholesky-Based Reduced-Rank Square-Root Kalman Filter, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Michigan.
- Chen, L., Li, M., Zhao, Y., Hu, Z., Zheng, F., et al. 2021, Multi-GNSS real-time precise clock estimation considering the correction of inter-satellite code biases, *GPS Solut.*, 25, 32. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01065-z>
- European Space Agency Navipedia, combination of GNSS measurements [Internet], cited 2025 Sep 5, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Combination_of_GNSS_Measurements
- Fernández, E., Calero, D., & Parés, M. E. 2017, CSAC characterization and its impact on GNSS clock augmentation performance, *Sensors*, 17, 370. <https://doi.org/10.3390/s17020370>
- Grewal, M. S. & Andrews, A. P. 2015, *Kalman filtering: Theory and practice with MATLAB*, 4th ed. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons).
- Han, S.-C. & Jekeli, C. 1998, GPS satellite clock estimation every 30 seconds and application to accurate absolute positioning, Ohio State University Research Foundation Technical Report, August 1998.
- Hauschild, A. 2011, Precise GNSS clock-estimation for real-time navigation and precise point positioning, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Forschungsberichte, 1-145.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. 2008, *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More* (Vienna: Springer).
- Huang, G., Xie, W., Fu, W., Li, P., Wang, H., et al. 2021, BDS Real-time Satellite Clock Offsets Estimation with Three Different Datum Constraints, *JGPS*, 17, 34-47. <https://doi.org/10.5081/jgps.13.1.34>
- IEEE 1998, IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyros, IEEE Std 952-1997, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- International GNSS Service, orbit and clock product [Internet], cited 2025 Jul 15, available from: https://igs.org/products/#orbits_clocks
- International GNSS Service, network [Internet], cited 2025 Jul 15, available <https://network.igs.org/>
- Kim, Y.-G., Rim, H.-J., Ha, J., Sung, H.-J., & Park, K.-D. 2024, Study on Precise Orbit Determination of GPS Satellites Using Batch Filter, in *Proceedings of the 2024 IPNT Conference*, Jeju, Korea, 6-8 November 2024, pp.55-58. <https://ipnt.or.kr/2024proc/160>
- Lee, H.-C. & Park, K.-D. 2020, Development of code-PPP based on multi-GNSS using compact SSR of QZSS-

CLAS, *J. Korean Soc. Surv. Geod. Photogramm. Cartogr.*, 38, 521-531. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.6.521>

Liu, T., Zhang, B., Yuan, Y., Zha, J., & Zhao, C. 2019, An efficient undifferenced method for estimating multi-GNSS high-rate clock corrections with data streams in real time, *J. Geod.*, 93, 1435-1456. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01255-9>

Maciuk, K. & Lewińska, P. 2019, High-Rate Monitoring of Satellite Clocks Using Two Methods of Averaging Time, *Remote Sens.*, 11, 2754. <https://doi.org/10.3390/rs11232754>

Mazher, K., Tahir, M. & Ali, K. 2016, GNSS pseudorange smoothing: linear vs non-linear filtering paradigm, in *Proc. IEEE Aerospace Conf., Big Sky, MT, March 2016*, pp.1-10. Available from: <https://web.lums.edu.pk/~spnav/khurram/Aero.pdf>

Rovira-Garcia, A., Juan, J. M., Sanz, J., González-Casado, G., Ventura-Traveset, J., et al. 2021, A multi-frequency method to improve the long-term estimation of GNSS clock corrections and phase biases, *NAVIGATION*, 68, 815-828. <https://doi.org/10.1002/navi.453>

Saastamoinen, J. 1972, Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites, in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union, pp.247-251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>

Shin, S.-Y., Han, J.-M., & Park, K.-D. 2024, Analysis of the differences between CLAS L6 message from the QZSS public archives and CLAS correction messages received by actual GNSS receivers, *J. Positioning Navig. Timing*, 13, 485-495. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.4.485>

Swift, E. R. 1987, Mathematical description of the GPS multi satellite filter/smoothing, NSWC TR 87-187, Naval Surface Warfare Center, Dahlgren, VA.

Wu, J. T., Wu, S. C., Hajj, G., Bertiger, W. I., & Lichten, S. M. 1993, Effects of antenna orientation on GPS carrier phase, *Manuscr. Geod.* 18, 91-98. <https://doi.org/10.1007/BF03655303>

Zhang, X., Li, X., & Guo, F. 2011, Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications, *GPS Solut.*, 15, 315-324. <https://doi.org/10.1007/s10291-010-0191-7>

Zuo, X., Jiang, X., Li, P., Wang, J., Ge, M., et al. 2021, A square root information filter for multi-GNSS real-time precise clock estimation, *Satellite Navig.*, 2, 28. <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00060-0>



Yunhwan Seol is an M.S. student in the Department of Geoinformatic Engineering at Inha University, Korea. He received a B.S. degree from the same university. His research focuses on GNSS clock analysis, global data processing, and parameter estimation.



Hyung-Jin Rim received his Ph.D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently the CTO at PP-Solution Inc. His research interests include KPOP algorithm development and POD.



Yeong-Guk Kim is a Ph.D. candidate in the Department of Geoinformatic Engineering at Inha University, and he is currently working at the Research Institute of PP-Solution Inc. His research interests include PPP-RTK algorithm development and POD research.



Kwan-Dong Park received his Ph.D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.

이중 차분 TCH 기반 TWSTFT 및 GPS 시각비교 성능분석

이주현, 허윤정, 오주익, 이준호, 최경원, 이종구, 양성훈, 이영규, 유대혁, 허명선[†]

Instability Analysis of TWSTFT and GPS Time Comparison using a Double Difference Three-Cornered Hat

Juhyun Lee^{ID}, Youn-Jeong Heo^{ID}, Ju-Ik Oh^{ID}, Joon Hyo Rhee^{ID}, Gyeong Won Choi^{ID}, Jong Koo Lee^{ID}, Sung-hoon Yang^{ID}, Young Kyu Lee^{ID}, Dai-Hyuk Yu^{ID}, Myoung-Sun Heo^{† ID}

Time and Frequency Group, Strategic Technology Research Institute, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon 34113, Korea

ABSTRACT

Precise time synchronization is crucial for modern infrastructure but objectively evaluating the intrinsic performance of technologies such as Global Positioning System (GPS) Precise Point Positioning (PPP), Integer Precise Point Positioning (IPPP), P3, and Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) is challenging due to the influence of local time source stability. This paper proposes a Double Difference-based Three-Cornered Hat (TCH) method to overcome this limitation. By applying this technique to analyze TWSTFT and GPS links between Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) and Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), we confirmed a stability of mid 10^{-17} for averaging times over 2×10^6 seconds, consistent with similar research by the National Institute of Standards and Technology (NIST). Our findings provide an important standard for evaluating high-precision links and offers a practical foundation for technology selection and system design in fields such as national time standards and defense.

Keywords: TWSTFT, GPS, instabilities analysis, double difference three-cornered hat, TDEV, MDEV

주요어: 위성이용양방향시각주파수전송기, 범지구위치결정시스템, 불확도 분석, 이중 차분 쓰리-코너드 햇, 시각편차, 수정알란편차

1. 서론

현대 사회의 정밀 시각 동기 기술은 통신, 금융, 항법, 전력망, 과학 연구 등 다양한 분야의 핵심 인프라 운영에 필수적인 요소이며, 충분하지 않은 성능으로 시각 동기가 이루어질 경우 전체 시스템의 안정성과 신뢰성이 심각하게 저하될 수 있다. 예를 들어, 금융 거래 시스템에서는 거래 요청과 처리 시각이 ms 이하로 동기되지 않으면 거래에 오류가 발생할 수 있으며, 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)에서는 시각 동기 오차가 의사거리 측정 오차로 직접 전이되어 수 ns 수준의 시각 동기가 요구된다.

이러한 요구를 충족하기 위해 다양한 시각 동기 기술을 활용

할 수 있다. 대표적으로 Global Positioning System (GPS) 기반의 Precise Point Positioning (PPP), Integer Precise Point Positioning (IPPP), P3 코드 조합 방식과 위성 기반 양방향 시각 및 주파수 전송(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 기술이 있다. 각 기술은 전파 형식, 관측 방식, 보정 처리 방식이 상이하여 고유한 성능 특성을 가지며, 실제 적용 환경과 목적에 따라 장단점이 다르게 나타난다.

이러한 기술들을 활용하여 수행한 시각 비교 결과는 기준지 및 원격지의 시각원의 안정도와 시각 비교 기술 자체의 성능이 반영되어 있다. 즉, 측정 결과에는 시각 비교 기술 자체의 성능 뿐만 아니라 시각원의 성능이 포함되어 있어, 단순 비교만으로는 시각 동기 기술 간의 본질적인 성능 비교를 수행하기 어렵다.

Received Aug 08, 2025 Revised Aug 22, 2025 Accepted Aug 25, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: hms1005@kriss.re.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 이중 차분(double difference, DD) 기반 Three-Cornered Hat (TCH) 기법을 적용한다. 이 방법은 세 개 이상의 독립적인 시각 비교 결과를 조합하여 시각원의 영향을 제거하고, 각 시각 비교 기술 고유의 성능을 분리하여 정량화 할 수 있다 (Parker et al. 2022).

본 논문에서는 먼저 2장에서 GPS PPP, GPS IPPP, GPS P3, TWSTFT의 원리와 개념을 설명하고, 3장에서는 이중 차분 TCH 기법의 수학적 원리와 적용 절차를 기술한다. 4장에서는 실제 측정 데이터를 이용하여 각 기술의 성능을 비교 분석한 결과를 제시하며, 마지막으로 5장에서는 결론과 함께 활용 방안을 제시한다.

2. TWSTFT 및 GPS 기반 시각비교 개념

원거리에 위치한 두 지점의 시각을 정밀하게 비교하기 위해 다양한 기술이 개발되었으며, 그중 위성 시각비교 기술은 위성에 탑재된 시계 또는 중계기를 매개체로 하여 지상의 두 시계 간의 시간 차이를 측정하는 원리이다. 본 장에서는 대표적인 기술인 TWSTFT 방식과 GPS 기반 시각비교 기술에 대해 설명한다.

2.1 TWSTFT

TWSTFT는 시각비교를 수행하려는 두 지점의 기준국에서 동시에 동일한 통신위성을 향해 시각 신호를 송신하고, 동시에 상대방 기준국에서 송신한 신호를 수신하는 방식이다. 각 기준국은 자신이 송신한 신호가 위성을 거쳐 되돌아오는 시간과 상대방 관측소에서 보낸 신호가 도착하는 시간을 정밀하게 측정한다. 각 기준국에서는 원자시계로부터 발생한 신호에 Binary Phase-Shift Keying (BPSK) 및 Pseudo-Random Noise (PRN) 코드 변조를 수행하며, 위성을 통해 이 RF 신호를 각 기준국 간에 송수신하여 시각 비교를 수행한다. 위성을 통한 신호 송수신 시 전리층, 대류층, 지구 자전 효과 등 다양한 오차 요인들이 존재하지만, 각 기준국에서 측정된 측정치 간 차분을 통해 이들 중 상당 부분이 제거된다. 이러한 특성 덕분에 TWSTFT는 현재 운용되는 시각비교 기술 중 가장 높은 정확도(수 나노초 이하)를 제공하는 한 가지 방법이며, 전 세계 국가표준기관 간의 국제 시각비교 및 UTC 생성에 핵심적인 역할을 수행하고 있다 (ITU-R TF.1153 2015, Cheng et al. 2022).

2.2 GNSS 기반 시각비교

GNSS 기반 시각비교는 국제표준시(UTC) 구축, 국가 표준시 운영 및 국제 원자시(International Atomic Time, TAI) 조정 등에 적용되고 있다 (BIPM 2020). GNSS 기반 시각비교는 대표적으로 P3 코드 결합법, PPP, 그리고 integer ambiguity resolution을 포함한 IPPP 기법이 있다 (Jiang et al. 2005). P3 시각비교기법은 GPS 위성의 두 주요 주파수 대역(L1, L2)에서 수신되는 P1 및 P2코드 측정치를 선형 조합하여 시각비교 정확도를 저해하는 가장 큰 오차 요소인 전리층 지연을 효과적으로 제거(ionospheric free)하는 고전적이면서도 안정적인 방법으로, 국제 표준규격 Common

Generic GNSS Time and Frequency (CGGTTS)으로 채택되어 국가 간 시각비교 수단으로 널리 활용되고 있다 (Defraigne & Petit 2015). 또한, 국제도량형국(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)은 2009년 9월부터 TAI 계산을 위해 GNSS를 활용한 PPP 기법을 적용하고 있다 (Petit & Jiang 2008). PPP는 International GNSS Service (IGS) 등에서 제공하는 고정밀 위성 궤도 및 시계 보정 정보를 활용하여 GNSS 관측 모델에 포함된 모든 오차 요인을 개별적으로 정밀하게 모델링하고 제거한다. 수신기 위치, 수신기 시계 오차, 대류층 지연, 반송파 위상 미지정수 등을 미지수(unknown parameter)로 설정하고, 칼만 필터(Kalman filter)와 같은 추정 기법을 통해 해를 구한다. 일반적으로 반송파 위상 미지정수(carrier phase ambiguity)를 실수(real number)로 추정하며, 이를 'PPP 플롯(Float) 해'라고 부른다. 여기서 추정된 '수신기 시계 오차' 항이 바로 GNSS 기준 시각 대비 수신기 시계의 정밀한 오프셋 값이 된다. 시각비교기법에서는 GNSS 수신기마다 독립적으로 산출한 PPP 해로부터 구한 '수신기 시계 오프셋' 차이를 통해 지점 간 정밀한 시각비교가 이루어진다. 하지만 반송파 위상 미지정수를 실수로 추정하기 때문에, 안정적인 해를 얻기까지 일정 수준 이상의 수렴 시간이 요구되고, 반송파 위상 측정치 사용을 위한 Float형 미지정수 추정 시 적용된 코드 측정치 사용으로 주파수 안정도의 한계를 갖는다. PPP 기법의 한계인 긴 수렴 시간을 극복하고 정확도를 향상시키기 위한 방법으로 실수로 추정하던 반송파 위상 미지정수를 본래의 값인 정수(integer)로 고정하는 IPPP 기법이 있다. 미지정수 결정이 성공하면 매우 빠르고 정확한 해를 얻을 수 있어, 나노초 이하 수준의 시각비교가 가능하다.

3. 이중 차분 TCH 및 시각비교 데이터 전처리

3.1 일반적인 TCH 개념

TCH은 시계 간 성능 비교 및 이를 활용한 각 시각원의 안정도를 평가하는 대표적인 알고리즘이다. 3개의 독립적이고 유사한 안정도를 가지는 서로 다른 시각원이 존재하는 경우를 가정하며, 서로 다른 3개의 시각원 위상이 $x_a(t)$, $x_b(t)$, $x_c(t)$ 인 경우, 각 시각원 간의 시각 차 측정치 $x_a(t)-x_b(t)$, $x_b(t)-x_c(t)$, $x_c(t)-x_a(t)$ 간 관계를 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_a(t) - x_b(t) &= -[x_c(t) - x_a(t)] - [x_b(t) - x_c(t)] \\ x_b(t) - x_c(t) &= -[x_a(t) - x_b(t)] - [x_c(t) - x_a(t)] \\ x_c(t) - x_a(t) &= -[x_b(t) - x_c(t)] - [x_a(t) - x_b(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

Eq. (1)의 관계를 활용하여, 각 시각원의 안정도를 σ_a , σ_b , σ_c 로 정의하고, 각 시각원 간의 시각 차 측정치 $x_a(t)-x_b(t)$, $x_b(t)-x_c(t)$, $x_c(t)-x_a(t)$ 에 대한 안정도를 $\sigma_{a,b}$, $\sigma_{b,c}$, $\sigma_{c,a}$ 라고 한다면, 2개의 시각원 간 시각 차 측정치 안정도와 각 시각원의 안정도의 관계는 Eq. (2)와 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \sigma_{a,b}^2 &= \sigma_a^2 + \sigma_b^2 \\ \sigma_{b,c}^2 &= \sigma_b^2 + \sigma_c^2 \\ \sigma_{c,a}^2 &= \sigma_c^2 + \sigma_a^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Eq. (2)로부터 개별 시각원의 안정도를 Eq. (3)과 같이 도출할

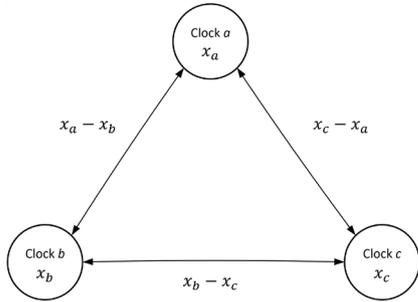


Fig. 1. Basic principle of the three-cornered hat method.

수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{a,b}^2 + \sigma_{c,a}^2 - \sigma_{b,c}^2)} \\ \sigma_b &= \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{a,b}^2 + \sigma_{b,c}^2 - \sigma_{c,a}^2)} \\ \sigma_c &= \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{c,a}^2 + \sigma_{b,c}^2 - \sigma_{a,b}^2)} \end{aligned} \quad (3)$$

단 Eqs. (2, 3)과 같은 관계를 갖기 위해서는 각 시각 원의 위상 간에 상관성이 없어야 하며, 각 시각원 간의 상관성이 존재할 경우, TCH 기반 안정도 평가 결과가 음수 값을 갖는 등의 정확한 추정치가 어려운 한계를 갖는다. TCH 알고리즘의 시각 차 측정치들과 시계 간 관계는 Fig. 1과 같다 (Vernotte et al. 2004, Sjoberg et al. 2021).

TCH 분석방법은 시계 간 성능을 평가하기 위해 활용되는 대표적인 알고리즘이나, 다양한 대상을 평가하는데 활용할 수 있으며, 대기환경 데이터, 원격탐사 데이터, 수자원 및 에너지 분야 데이터들 간의 품질 및 성능 평가에 활용되고 있다 (He et al. 2020, Sjoberg et al. 2021, Fang & Ma 2025).

3.2 시각비교 시스템의 평가를 위한 이중 차분 TCH

3.1절에서 소개한 TCH 분석 방법을 활용하여, 2개의 동일한 시각원을 대상으로 구축되어 있는 시각비교 시스템 간 성능 분석을 수행할 수 있다. 미국 표준기관인 National Institute of Standards and Technology (NIST)에서 2019년 11월부터 2021년 5월까지 수집한 데이터를 활용하여 2개의 TWSTFT 기반 시각비교 시스템과 GPS 기반 시각비교 시스템의 시각비교 성능평가를 수행한 바 있다. NIST의 연구에서는 미국내에 위치한 두 기준 시각원인 UTC(NIST)와 UTC(USNO) 간 구축된 TWSTFT Direct Two-Way (DTW), TWSTFT Indirect Two-Way (ITW), GPS 반송파 기반 IPPP 시각비교 링크를 분석하였다. 미국 연구 사례에서는 TWSTFT DTW 링크로 코드율(code rate) 1 Mchip/s의 Ku 대역 신호를 활용하였으며, TWSTFT ITW 링크로는 EU-USA 간 국제 시각비교 채널 중 독일의 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)를 매개로 UTC(NIST)-UTC(PTB), UTC(PTB)-UTC(USNO) 간 시각 차 측정치를 차분하여 활용하였고, 해당 링

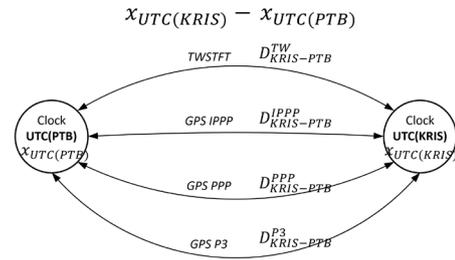


Fig. 2. Time transfer links between UTC(KRIS) and UTC(PTB).

크는 코드율 2.5 Mchip/s의 Ku 대역 신호가 사용되었다. 또한 시각비교용 GPS 수신기로는 Novatel GPS 수신기를 활용하였다. NIST의 주파수 안정도 평가 결과 링크 별 소폭의 차이는 있으나, 평균시간 20일에 대해 1×10^{-16} 수준의 Modified Allan Deviation (MDEV)과 총 분석구간 85일에 대해서 mid 10^{-17} 수준의 MDEV을 도출하였다 (Parker et al. 2022).

본 논문에서는 UTC(KRIS)와 UTC(PTB) 간 시각비교 링크들을 대상으로 UTC(KRIS)와 UTC(PTB) 간 시각비교 링크의 측정치에 대해 이중 차분 TCH 분석기법을 활용하여 평가하였다. TWSTFT의 경우, 러시아의 Express-80 위성을 활용하여 코드율 2.5 Mchip/s Ku 대역 신호로 운용되고 있는 EU-Asia 링크 중 UTC(KRIS)와 UTC(PTB) 간 시각비교 채널을 활용하였다. GPS 시각비교 링크의 경우, 한국표준과학연구원과 PTB에서 각각 UTC 생성에 기여하고 있는 국제 시각비교용 GNSS 수신기를 활용하였으며, GPS IPPP, PPP, P3 기반 시각비교 링크를 성능 평가 대상으로 선정하였다.

소개한 UTC(KRIS)와 UTC(PTB) 간의 시각비교 링크들의 관계는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 UTC(PTB)와 UTC(KRIS)의 위상이 각각 $x_{UTC(PTB)}$ 와 $x_{UTC(KRIS)}$ 이고, 각 시각비교 기술을 n 으로 정의할 경우, 시각비교 링크를 통해 두 시각원의 시각차를 측정할 수 있으며 측정된 시각차는 Eq. (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$D_{KRIS-PTB}^n = x_{UTC(KRIS)} - x_{UTC(PTB)} + e_{KRIS-PTB}^n \quad (4)$$

여기서 $e_{KRIS-PTB}^n$ 는 시각비교 기술 n 이 가지는 두 시각원의 시각 차 성분을 제외한 잔차이며, Eq. (4)에서 서로 다른 시각비교 기술 n 과 m 에 대해 한번 더 차분을 수행하면 Eq. (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$DD_{KRIS-PTB}^{n,m} = D_{KRIS-PTB}^n - D_{KRIS-PTB}^m \quad (5)$$

Eq. (5)에 Eq. (4)의 관계를 적용하여 UTC(PTB)와 UTC(KRIS)의 위상차를 배제하고 시각비교 기술의 잔차 간의 관계를 정의할 수 있으며, 이는 Eq. (6)과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} DD_{KRIS-PTB}^{n,m} &= [x_{UTC(KRIS)} - x_{UTC(PTB)} + e_{KRIS-PTB}^n] \\ &\quad - [x_{UTC(KRIS)} - x_{UTC(PTB)} + e_{KRIS-PTB}^m] \\ &= e_{KRIS-PTB}^n - e_{KRIS-PTB}^m \end{aligned} \quad (6)$$

Eq. (6)과 같이 이중 차분한 결과를 활용하여, 3.1절에서 소개한 TCH를 수행할 수 있으며, 서로 다른 $DD_{KRIS-PTB}^{n,m}$ 간 TCH 조합을 통하여 시각비교 링크 간 성능평가를 수행할 수 있다. 본 논문에서는 TWSTFT(TW), GPS IPPP, PPP, P3 시각비교 기술을 대상으로

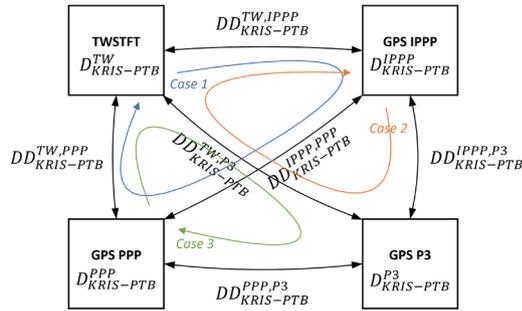


Fig. 3. Time transfer links and double difference measurements between UTC(KRIS) and UTC(PTB).

이중 차분 TCH 성능평가를 수행하였으며, n 및 m 이 상기 서술한 4가지 시각비교 기술일 경우, 모든 경우의 수에 대해 Eq. (7)과 같이 표현 가능하다. 이중 차분 측정치와 시각비교 기술 간의 관계는 Fig. 3과 같다.

$$\begin{bmatrix} DD_{KRIS-PTB}^{TW,IPPP} \\ DD_{KRIS-PTB}^{TW,PPP} \\ DD_{KRIS-PTB}^{IPPP,PPP} \\ DD_{KRIS-PTB}^{TW,P3} \\ DD_{KRIS-PTB}^{IPPP,P3} \\ DD_{KRIS-PTB}^{PPP,P3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & & \\ 1 & & -1 & & & \\ & 1 & & -1 & & \\ 1 & & & & -1 & \\ & 1 & & & & -1 \\ & & 1 & & & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{KRIS-PTB}^{TW} \\ D_{KRIS-PTB}^{IPPP} \\ D_{KRIS-PTB}^{PPP} \\ D_{KRIS-PTB}^{P3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Eq. (7)에서 표현된 6가지 이중 차분 측정치를 활용하여 모든 경우에 대하여 TCH를 수행한다면 총 4가지 경우를 정의할 수 있으나, GPS IPPP, PPP, P3 시각비교 링크 간에는 높은 상관성을 갖으며, 모든 경우가 GPS 시각비교 기술 기반인 경우, Time Deviation (TDEV) 및 Modified Allan Deviation (MDEV) 이 많은 평균시간 구간에 대하여 음수로 평가되어 성능평가 경우의 수에서 제외하였다.

이에 따라 TWSTFT 링크 평가 시 3가지 경우, GPS IPPP, PPP, P3 평가 시 각각 2가지 경우의 수를 얻을 수 있다. TWSTFT, GPS IPPP, PPP 조합에 대해 Case 1, TWSTFT, GPS IPPP, P3 조합에 대해 Case 2, TWSTFT, GPS PPP, P3 조합에 대해 Case 3으로 정의하고, 시각비교 기술 n 에 대해 각 Case를 k 로 정의하여, 시각비교 링크의 안정도를 $\sigma_{n(k)}$ 로 시각비교 기술 n 및 m 에 대한 이중 차분 측정치의 안정도를 $\sigma_{n,m}$ 으로 표현한다면, Eq. (3)의 관계로부터 이중 차분 TCH를 통해 얻을 수 있는 모든 평가 결과를 Eq. (8)과 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{TW(1)}^2 \\ \sigma_{TW(2)}^2 \\ \sigma_{TW(3)}^2 \\ \sigma_{IPPP(1)}^2 \\ \sigma_{IPPP(2)}^2 \\ \sigma_{PPP(1)}^2 \\ \sigma_{PPP(2)}^2 \\ \sigma_{P3(2)}^2 \\ \sigma_{P3(3)}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & & & & & & \\ 1 & & & 1 & -1 & & & & \\ & 1 & & & & -1 & & & \\ 1 & -1 & 1 & & & & & & \\ 1 & & & -1 & 1 & & & & \\ -1 & 1 & 1 & & & & & & \\ & 1 & & -1 & & 1 & & & \\ -1 & & & 1 & 1 & & 1 & & \\ & -1 & & & & 1 & & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{TW,IPPP}^2 \\ \sigma_{TW,PPP}^2 \\ \sigma_{PPP,IPPP}^2 \\ \sigma_{TW,P3}^2 \\ \sigma_{IPPP,P3}^2 \\ \sigma_{PPP,P3}^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

4. 이중 차분 TCH를 활용한 TDEV 및 MDEV 성능 분석

4.1 단일 차분 및 이중 차분 측정치

본 논문에서는 3.2절에서 서술한 이중 차분 TCH 기반 시각비교 링크 별 성능 분석을 위해, BIPM 서버의 국제시각비교 측정치 데이터를 활용하였으며, 시각비교 측정치 간 급격한 위상천이 없는 비교적 정상상태로 운영된 구간을 대상 분석 구간으로 선정하였다. 분석 대상으로 선정한 구간은 UTC 2021년 12월 01일 (Modified Julian Date, MJD 59549)에서 UTC 2022년 6월 7일 (MJD 59737)로 188일이며, TDEV 및 MDEV 평가 시 평균시간 약 3×10^6 초까지 분석이 가능하도록 구성하였다. TDEV은 시각 오차의 편차로 시계 혹은 시각비교 시스템의 단기 및 중기 안정도를 평가할 수 있으며, 특정 관측 평균시간(τ)동안 시계 오차가 얼마나 크게 변동하는지를 나타내는 지표이다. MDEV은 주파수 안정도를 평가하는 대표적인 방법으로, MDEV를 활용하여 관측 평균시간에 따른 주파수 안정도를 확인할 수 있으며, 다양한 잡음 특성들과 주파수 drift 성분을 평가할 수 있다. 논문에서는 TDEV과 MDEV를 활용하여, 각 시각비교 링크의 시각 편차와 주파수 안정도를 분석하였다.

서로 다른 시각비교 시스템을 기반으로 한 측정치를 활용함에 따라, 몇 가지 측정치 전처리를 수행하였다. BIPM에서 제공한 데이터의 이전 월말 및 다음 월초에 중복된 MJD를 가지는 구간의 offset을 다음 월초 데이터를 기준으로 보정하였고, 이중 차분 데이터가 동일한 time tag를 가지도록 구성하기 위해 상대적으로 raw 데이터 측정주기가 긴 TWSTFT 시각비교 데이터를 기준으로, GPS IPPP, PPP, P3 데이터를 보간하여 동일 time tag를 갖는 데이터셋을 도출하였다. 또한 운용 과정에서 발생하는 큰 수치의 outlier를 제거하여, 안정도 분석 과정에서 낮은 평균시간에 대해 발생할 수 있는 spurious를 방지하였다. 본 논문에서 활용한 전처리 과정을 거친 링크 별 UTC(KRIS)와 UTC(PTB) 간 시각비교 측정치는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 시각비교 링크에 따라 서로 다른 단기적인 시각비교 오차 수준을 갖으나, 장기적인 위상변화 추이는 유사함을 확인할 수 있다. 이는 UTC(KRIS)와 UTC(PTB) 간 발생하는 시각 원 간 위상 차 변화로 인한 것으로, 시각 원 간 위상 차를 배제하기 위해 Eq. 7과 같이 한번 더 차분하여 Fig. 5와 같은 이중 차분 측정치를 산출하였다.

Fig. 5와 같이 각 시각비교 링크 간의 특성에 의해, 차분 시 다른 오차 수준을 갖으며, GPS P3가 포함된 이중 차분 측정치의 경우 P3가 가지는 상대적으로 큰 오차 수준에 의해 약 4 ns 정도의 편차가 산출됨을 확인할 수 있다. TWSTFT와 GPS IPPP, PPP 간에는 약 1 ns 수준, 가장 유사한 오차 특성을 갖는 GPS IPPP와 PPP 간에는 약 0.5 ns 수준의 편차가 산출되었다. Eq. 8을 적용하고, 이중 차분 측정치의 시각 편이를 분석하기위해 TDEV을 산출하였으며, 산출 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6과 같이, 약 4×10^3 초의 상대적으로 단기(short-term) TDEV의 경우, GPS P3가 포함된 $\sigma_{TW,P3}$, $\sigma_{IPPP,P3}$, $\sigma_{PPP,P3}$ 가 약 5×10^{-10} , $\sigma_{TW,IPPP}$, $\sigma_{TW,PPP}$ 가 약 1×10^{-10} , $\sigma_{PPP,IPPP}$ 가 약 2×10^{-11} 으로 서로 다른 시

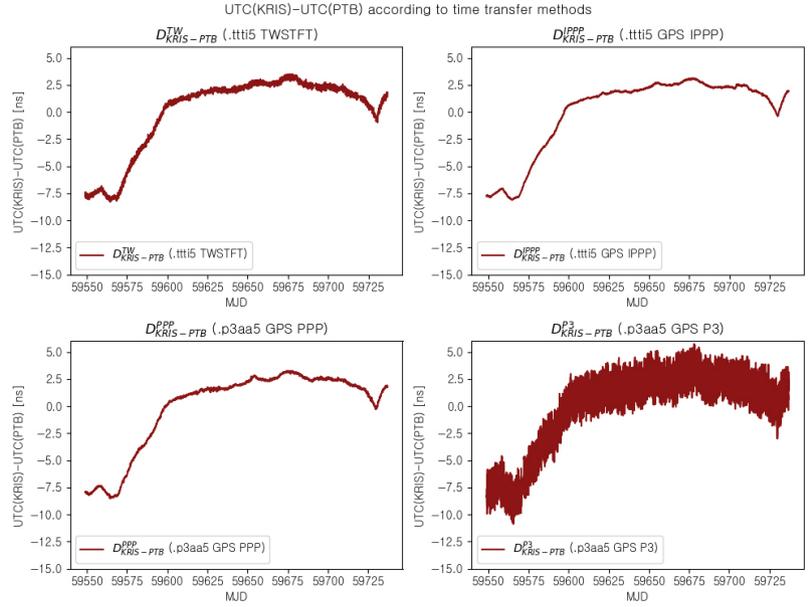


Fig. 4. BIPM TWSTFT, GPS IPPP, PPP, P3 time comparison measurements from *p3aa5, *titi5 files between UTC(KRIS) and UTC(PTB).

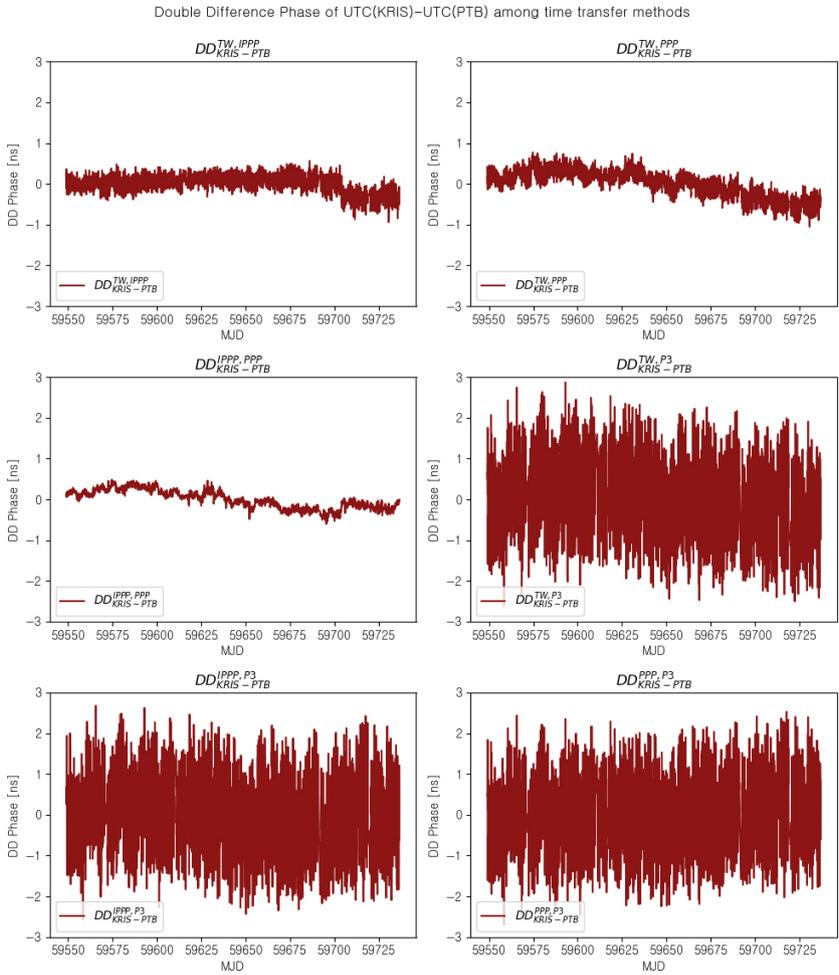


Fig. 5. Double difference time comparison measurements among TWSTFT, GPS IPPP, PPP and P3 of UTC(KRIS)-UTC(PTB) after pre-processing.

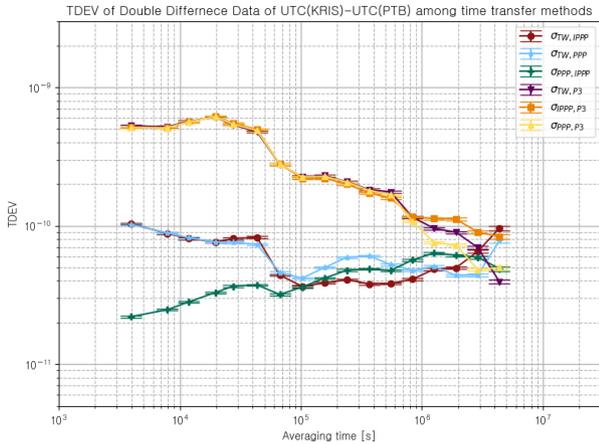


Fig. 6. Time deviation (TDEV) of UTC(KRIS)-UTC(PTB) according to double difference time comparison data.

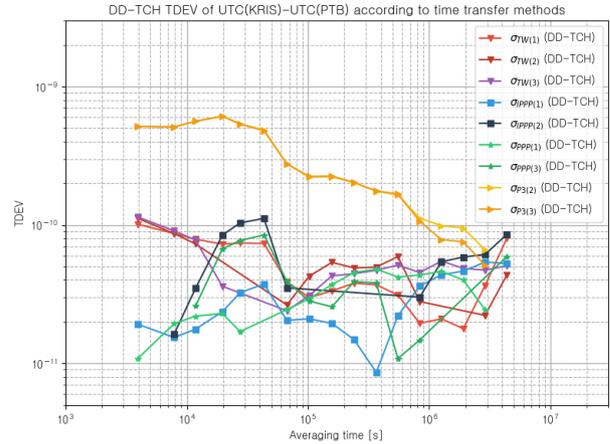


Fig. 7. DD-TCH TDEV of UTC(KRIS)-UTC(PTB) according to time transfer methods.

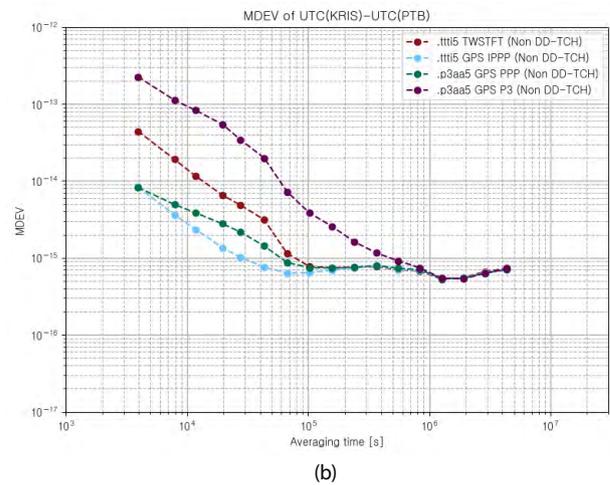
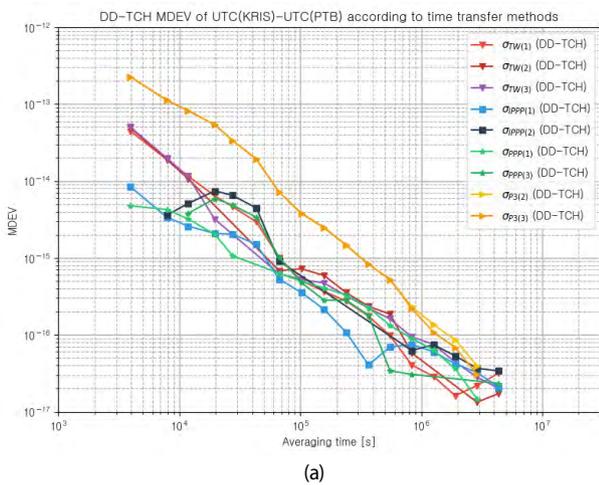


Fig. 8. DD-TCH Modified Allan Deviation (MDEV) of UTC(KRIS)-UTC(PTB) according to time transfer methods. (a) DD-TCH MDEV of UTC(KRIS)-UTC(PTB) as time transfer methods and TCH cases (b) MDEV of UTC(KRIS)-UTC(PTB) as time transfer methods using *ttti5 and *p3aa5 data.

각 편이 수준 차이를 보였으나, 1×10^6 초의 상대적으로 장기(long-term) TDEV은 3.8×10^{-11} 에서 1.1×10^{-10} 사이 수준으로 상대적으로 유사한 것을 확인하였다. 이는 시각 원간 시각차가 포함된 시각 비교 측정치의 분석 시, Flicker Frequency Modulation (FFM)에 의해 일반적으로 1×10^6 초 이후에 평균시간 τ 에 대해 τ^{-1} 기울기를 보이는 것과 대조되며, 이를 통해 시각비교 측정치를 이중 차분함으로써, 시각비교 측정치간 공통 시각 원 성분이 소거되었음을 확인할 수 있다.

4.2 이중 차분 TCH기반 시각비교 링크의 TDEV 및 MDEV 성능분석

본 논문에서는 이중 차분 TCH를 통해 시각비교 링크에 따른 성능 분석을 수행하였으며, 이를 통해 시각비교 링크 간 TDEV 및 MDEV 성능을 비교하였다. 4.1절에서 산출한 이중 차분 측정치를 활용하여 Eq. 8을 적용하였으며, TDEV 산출 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7을 통해 TWSTFT, GPS IPPP, PPP, P3의 시각비교 링크

에 대한 TDEV 수준을 확인할 수 있으며, TCH Case 별 평가 결과의 편차가 존재함을 확인하였다. TWSTFT, GPS P3의 경우 TCH Case 간 평가 결과의 차이가 상대적으로 낮으나, GPS IPPP와 GPS PPP의 경우 TCH Case 간 높은 편차를 보였다. TCH Case 2번과 3번의 경우, GPS P3가 포함되어 있어, 이중 차분 TCH 산출 시 상대적으로 열화된 TDEV 수준을 갖는 $-\sigma_{TW,P3}^2$ 성분이, 단기 TDEV이 상대적으로 우수한 GPS IPPP와 PPP의 평가에 활용되어, 약 1×10^{-10} 수준의 범프(bump)가 도출된 것으로 추정된다. 이는 TCH 분석 시 유사한 안정도를 가지는 데이터를 대상으로 수행하여 기대하는 평가결과를 도출하는 특성 때문이며, TWSTFT와 GPS IPPP, PPP 대비 GPS P3가 상대적으로 큰 불안정성을 갖기 때문인 것으로 판단된다.

또한 동일하게 Eq. 8을 활용하여 이중 차분 TCH 기반의 MDEV 평가를 수행하였으며, 이에 대한 결과는 Fig. 8a와 같다. 이중 차분 TCH 기반 MDEV 평가를 통해 시각원의 영향을 배제한 시각비교 링크의 주파수 안정도를 평가할 수 있으며, 각 시각비교 링크에 따라 서로 다른 단기 MDEV 수준을 보이나, 2×10^6 초

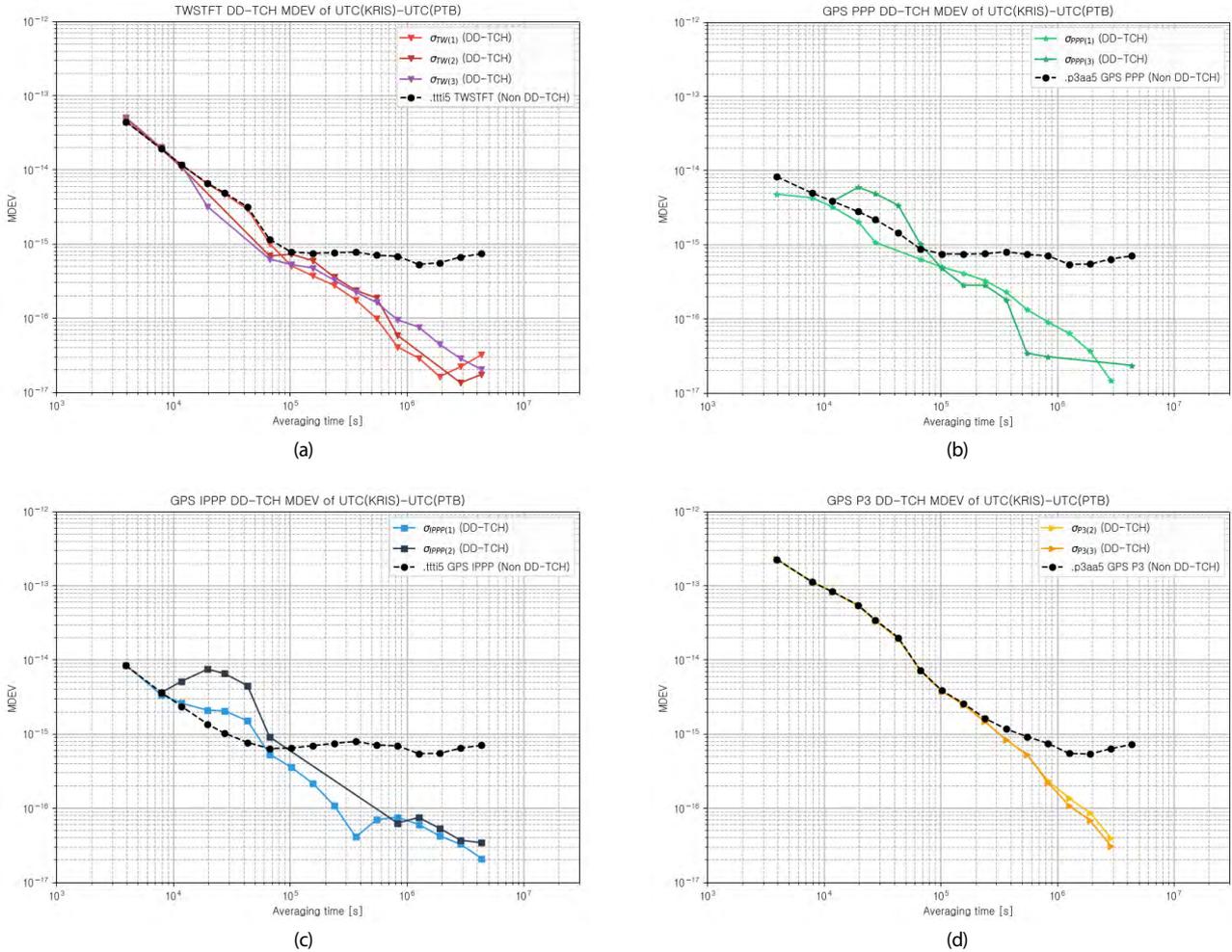


Fig. 9. DD-TCH MDEV of UTC(KRIS)-UTC(PTB) according to time transfer methods (compare with Non DD-TCH Results). All results are compared with and without DD-TCH: (a) TWSTFT MDEV, (b) GPS PPP MDEV, (c) GPS IPPP MDEV, and (d) GPS P3 MDEV.

이후에는 1.4×10^{-17} 에서 8.5×10^{-17} 범위의 MDEV로 유사한 성능을 보임을 확인하였다. 이와 대조하여, Fig. 8b와 같이 시각원 간 영향이 포함된 MDEV의 경우, 시각원의 FFM 성분에 의해 2×10^5 초 이후는 8×10^{-16} 수준의 τ^0 기울기가 나타남을 확인하였다.

Fig. 8의 이중 차분 TCH 기반의 MDEV 평가 결과를 Fig. 9와 같이 시각비교 링크 종류에 따라 재 분류 하여 도시하였으며, 비교를 위해 시각원의 영향 포함된 MDEV 분석 결과를 각 시각비교 링크에 따라 포함하였다.

TWSTFT 링크는 Fig. 9a와 같이, 이중 차분 TCH 기반 분석이 아닌 경우, 1×10^5 초 이후에서 FFM 성분이 관찰되나, 이중 차분 TCH 기반 분석 결과는 동일 시점 이후에도 τ^{-1} 기울기를 유지하는 것을 확인하였다. GPS IPPP와 PPP의 경우, TWSTFT의 경우에 비하여 단기 MDEV 및 기울기가 미세한 차이를 보이나, Figs. 9b,c와 같이 TWSTFT와 유사한 추이를 보였고, 이중 차분 TCH 분석 시 시각원 성분이 배제된 평가가 이루어 졌음을 확인하였다. 또한 Fig. 9d의 GPS P3 결과에서는 4×10^3 초에서 1×10^{-13} 수준의 상대적으로 열화된 주파수 단기 안정도를 가짐에 따라, 1×10^6 초 이후에 FFM이 관찰되나, 이중 차분 TCH 분석의 경우 이전 시점과 동일한 수준의 기울기가 유지됨을 확인하였다.

결과적으로 이중 차분 TCH 기반의 TDEV 및 MDEV 평가를 통해 시각원의 영향이 배제된 객관적인 시각비교 링크의 평가가 가능함을 확인하였으며, 한국표준과학연구원과 독일의 PTB 간의 시각비교 링크가 NIST에서 수행한 UTC(USNO)와 UTC(NIST) 간 시각비교 링크의 성능과 유사한 mid 10^{-17} 수준의 MDEV 성능을 가짐을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 한국표준과학연구원에서 운용 중인 TWSTFT, GPS IPPP, PPP, P3 기반 시각비교 기술을 소개하고, 일반적인 TCH 및 본 논문에서 활용한 이중 차분 측정치 기반 TCH 분석 방법을 제시하였다. 각 시각비교 시스템은 서로 다른 RF 활용, 측정치 생성 방식 및 보정 처리 방식을 갖으며 이에 따라 서로 다른 오차 특성을 갖는다. 또한 일반적으로 시각비교 측정치의 성능 분석은 시각비교 시스템의 특성과 시각원 간 시각 차 영향이 포함된 상태로 수행되며, 시각비교 링크의 객관적인 성능평가가 어려운 한계를 갖는다. 이러한 시각비교 측정치 특성을 고려하고 기

존의 성능평가 방법의 한계를 극복하여 시각비교 링크만의 객관적인 안정도를 도출하기 위해, 미국 NIST에서는 이중 차분 TCH 평가 방법을 활용한 바 있으며, 이를 통해 미국 내 시각비교 링크의 mid 10^{-17} 수준의 MDEV 성능을 가짐을 확인하였다.

본 논문에서는 한국표준과학연구원과 독일 PTB 간 운용되고 있는 TWSTFT, GPS IPPP, PPP, P3 기반 시각비교 링크에 대해 이중 차분 TCH 기반의 TDEV 및 MDEV의 안정도 평가를 수행하였으며, 시각 원 특성이 포함된 전통적인 시각비교 성능분석 결과와 대조하였다. 분석 결과, 이중 차분 TCH 기반의 TWSTFT, GPS IPPP, PPP, P3의 모든 MDEV 결과에서 전체 평균시간에 대해 시각원의 영향이 배제된 τ^{-1} 에 근접한 기울기를 확인하였으며, 2×10^6 초 이후에 mid 10^{-17} 수준으로 NIST의 시각비교 링크 성능과 유사한 성능을 가짐을 확인하였다.

본 논문에서 분석한 이중 차분 TCH 기반의 시각비교 링크의 성능분석 결과는 고 정밀 시각비교 및 동기를 요구하는 국가표준시, 금융, 국방, 전력, 지상파항법시스템, 위성항법시스템 등의 시각비교 기술 우선순위 설계 및 시각비교 링크 구축에 따른 성능평가 등에 활용 가능할 것으로 기대되며, 객관적인 시각비교 링크의 성능평가를 통해 기존 링크의 유지보수에도 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00407003, 지상파항법시스템 고도화 기술개발사업).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization & methodology & software, J. Lee; formal analysis & investigation, J. K. Lee; writing, J. Lee, J.-I. Oh, Y.-J. Heo; review and editing, J. H. Rhee, G. W. Choi, D.-H. Yu, M.-S. Heo; supervision, S.-h. Yang, M.-S. Heo; project administration, Y. K. Lee.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- BIPM 2020, Establishment of International Atomic Time and Coordinated Universal Time, https://www.bipm.org/documents/20126/59466374/6_establishment_TAR20.pdf
- Cheng, P., Shen, W., Sun, X., Cai, C., Wu, K., et al. 2022, Measuring Height Difference Using Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, *Remote Sensing*, 14, 451. <https://doi.org/10.3390/rs14030451>
- Defraigne, P. & Petit, G. 2015, CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS time transfer, *Metrologia*, 52, G1. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/6/G1>
- Fang, M. & Ma, C. 2025, Uncertainty and quality assessment of satellite-based precipitation products using three-cornered hat method, *Proceedings of SPIE, International Conference on Remote Sensing, Surveying, and Mapping (RSSM 2025)*, Xi'an, China, 25 June 2025, <https://doi.org/10.1117/12.3066605>
- He, X., Xu, T., Xia, Y., Bateni, S. M., Guo, Z., et al. 2020, A Bayesian Three-Cornered Hat (BTCH) Method: Improving the Terrestrial Evapotranspiration Estimation, *Remote Sensing*, 12, 878. <https://doi.org/10.3390/rs12050878>
- ITU-R TF.1153 2015, Technical document of ITU-R (The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing pseudorandom noise codes), ITU-R TF.1153-4. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/tf/R-REC-TF.1153-4-201508-!#!PDF-E.pdf
- Jiang, Z., Lewandowski, W., & Matsakis, D. 2005, UTC time transfer by IPPP, *Proceedings of the 36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, Washington D.C., USA, 7-9 December 2004, pp.91-102.
- Parker, T. E., Zhang, V., Petit, G., Yao, J., Brown, R. C., et al. 2022, A three-cornered hat analysis of instabilities in two-way and GPS carrier phase time transfer systems, *Metrologia*, 59, 035007. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac6a95>
- Petit, G. & Jiang, Z. 2008, Precise point positioning for TAI computation, *International Journal of Navigation and Observation*, 2008, Article ID 562878. <https://doi.org/10.1155/2008/562878>
- Sjoberg, J. P., Anthes, R. A., & Rieckh, T. 2021, The Three-Cornered Hat Method for Estimating Error Variances of Three or More Atmospheric Datasets. Part I: Overview and Evaluation, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38, 555-572. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0217.1>
- Vernotte, F., Addouche, M., Delporte, J., & Brunet, M. 2004, The Three Cornered Hat Method: An Attempt to identify some Clock Correlations, 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, Montreal, QC, Canada, 23-27 August 2004, pp.482-485. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2004.1418506>



Juhyun Lee received the Ph.D. degree in Electronics Engineering at Chungnam National University, Daejeon, South Korea, in 2018. He was a senior research engineer of DSNavcours Co., Ltd., Daejeon, South Korea from 2017 to 2022. He is currently a researcher with the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, South Korea. He is now working at the Time and Frequency Group in KRISS.



Youn-Jeong Heo received the Ph.D. degree in space science from Chungbuk National University, Cheongju, South Korea, in 2010. She was a senior researcher of Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, South Korea from 2008 to 2019. She is currently working on time and frequency transfer using satellites at Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS).



Ju-Ik Oh received the Ph.D. degree in electrical engineering from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea, in 2023. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 2023. His current research interests include time transfer using satellites, millimeter-wave antennas, antenna array systems, and RF front-end design.



Joon Hyo Rhee received the B.S. degree in electrical and electronic engineering and Ph.D. degree in integrated technology at Yonsei University, Incheon, South Korea in 2019. Presently, he is a researcher at the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, South Korea. Within KRISS, he is actively engaged in the Time and Frequency Group, contributing to research on precise timing systems using GNSS and TWSTFT technologies.



Gyeong Won Choi received the M.S. degree in Physics from the Chonnam National University, Gwangju, Korea, in 2016. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 2023.



Jong Koo Lee graduated from the Department of Statistics and Data Science at Cheongju University, in 1989. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 1990. His interesting fields are calibration of timing systems and statistical estimation.



Sung-hoon Yang received the Ph.D. degree in electronic engineering from Chungnam National University, Daejeon, Korea, in 2012. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 1984. He has worked on the development of a primary atomic clock and standard time keeping. His current activity is research on time transfer using satellites.



Young Kyu Lee received the Ph.D. degree in information and communications engineering from Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea, in 2002. In 2002, he joined the Time and Frequency group of the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Korea. He has been engaged in the research and development work field in precise time comparison via satellites and time distribution using ground-waves, since he participated in the satellite applications laboratory.



Dai-Hyuk Yu received the Ph.D. degree in physics from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2000. He has been working on precision optical frequency metrology including optical frequency standards and optical frequency transfer at Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) from 2002.



Myoung-Sun Heo received the Ph.D. degree in physics from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2007. He has been working on atomic frequency standards including microwave and optical frequency standards, optical fiber frequency transfer at Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) since 2013.

카메라-IMU 캘리브레이션 기반 카메라 내부 파라미터의 제약조건 최적화 및 검증

조현승^{1†}, 안태동¹, 문상찬¹, 황강현¹, 이태훈¹, 홍현욱¹, 오주현², 성장기²

A Constrained Optimization Framework for Camera Intrinsic Parameters Based on Camera-IMU Calibration

Hyun-Seup Cho^{1†}, Tae-Dong Ahn¹, Sang-Chan Moon¹, Kang-Hyun Hwang¹, Tae-Hoon Lee¹,
Hyun-Wook Hong¹, Juhyun Oh², Chang-Ky Sung²

¹Navigation/Weapon Data Link R&D (inertial navigation), LIG Nex1, Seongnam Gyeonggi-do 13488, Korea

²The 4th R&D Institute - The 6th Directorate, Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

ABSTRACT

In aerial vision-based navigation systems, accurately estimating the misalignment between the camera and the inertial measurement unit (IMU) is critical. However, uncertainty in the camera's intrinsic parameters can propagate to misalignment estimation and result in geometric errors. This can lead to significant degradation of vision-based navigation performance during high-altitude operations. To address this, we propose a reversal calibration method that leverages extrinsic parameters information to determine the effective range of intrinsic parameters. Based on the results of extrinsic calibration, we define an effective correction region for intrinsic parameters with respect to the physical centers of both sensors. This relationship is then integrated into a constrained optimization framework to refine the intrinsic parameters within physically valid bounds. Experiments were conducted using a camera with a focal length of 35 mm. The results demonstrate that incorporating physical constraints into the optimization process leads to more stable parameter correction, and reduced reprojection errors by up to 60.73%.

Keywords: camera intrinsic parameters, constrained optimization, misalignment, Kalibr, lever-arm

주요어: 카메라 내부 파라미터, 제약조건 최적화, 외부 파라미터, 캘리비알, 레버암

1. INTRODUCTION

항공기와 같은 이동체에서는 Global Positioning System (GPS)와 Inertial Navigation System (INS)를 결합한 복합항법 시스템을 통해 이동체의 위치와 자세를 추정한다. 하지만 전파 교란 (jamming)이나 스푸핑 (spoofing)과 같은 환경에서는 GPS의 신호 수신에 제한됨에 따라 복합 항법 시스템의 정상적인 운용이 불가능해지는 치명적인 한계가 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 카메라로부터 얻어지는 영상을 기반으로 한 영상 기반 항법 (Vision-based Navigation)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 영상항법 시스템은 영상을 이용하는 방식에

따라 실시간 영상과 저장된 참조 영상을 매칭하여 위치를 추정하는 장면 매칭 항법 (Digital Scene Matching Area Correlation, DSMAC) (Carr & Sobek 1980), 연속된 영상 프레임 간의 특징점의 이동을 추적하여 상대적인 이동 거리와 방향을 추정하는 특징점 추적 항법 (Visual Odometry, VO) (Nistér et al. 2004), VO의 개념을 기반으로 IMU 데이터를 추가적으로 이용하며 자세를 보정하는 영상-관성 항법 시스템 (Visual-Inertial Navigation System, VINS) 등이 대표적인 방식이다 (Qin et al. 2018). 이로 인해 입력으로 사용되는 영상의 품질과 기하학적 정확도가 전체 영상 항법 시스템의 성능에 결정적인 영향을 미친다. 특히 카메라의 내부 파라미터 (intrinsic parameters)는 3차원 세계의 물체가

Received Aug 10, 2025 Revised Aug 17, 2025 Accepted Aug 23, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: hyunseup.cho@lignex1.com



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

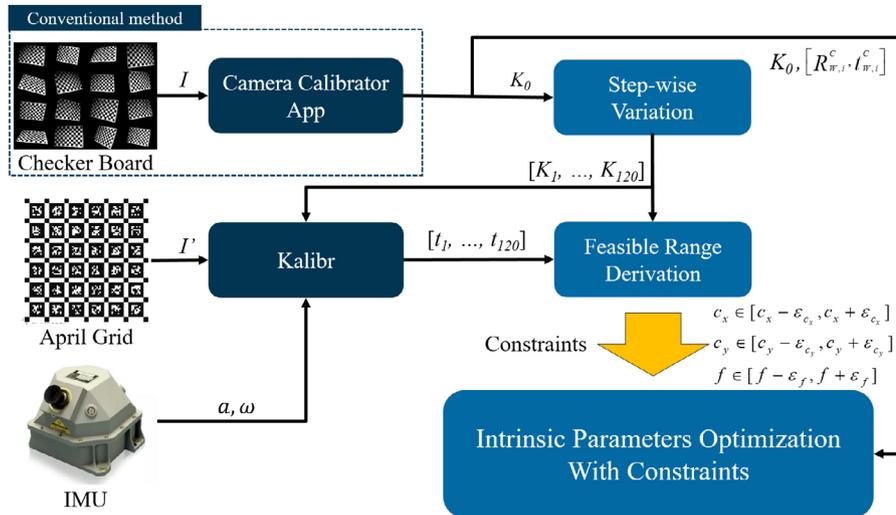


Fig. 1. Overall block diagram of the proposed approach in detail.

2차원 영상으로 투영되는 과정을 정의하며 이는 곧 카메라 좌표계와 세계 좌표계 간의 대응관계를 나타낸다. 이러한 내부 파라미터가 정확하게 보정되지 않을 경우 위치 추정과 지도 정합 과정에서 기하학적 오차를 발생시킨다. 이러한 현상은 항공기와 같이 고도가 높아질수록 더욱 두드러지는데 이는 동일한 내부 파라미터 오차가 지면 상의 물체 투영 위치에 더 큰 기하학적 오차를 유도하기 때문이다.

본 논문은 카메라 캘리브레이션을 위한 내부 파라미터 추정의 새로운 방식을 제안하며 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 카메라 캘리브레이션의 기존 연구를 소개하고 3장에서는 카메라 캘리브레이션을 위한 유효 범위 도출 및 제약조건 최적화 방법에 대해 소개한다. 4장에서는 실제 실험을 통해 얻어진 데이터 셋을 이용하여 기존 방식과 본 논문에서 제안하는 방식의 성능을 재투영 오차 (reprojection error) 값으로 비교한다. 마지막으로 5장에서는 결과를 요약하고 결론을 맺는다.

2. RELATED RESEARCH

카메라 캘리브레이션은 컴퓨터 비전 및 영상합성 시스템에서 필수적인 전처리 과정으로 일반적으로 체커보드와 같은 패턴을 활용하여 내부 파라미터를 추정하는 과정을 말한다. 대표적으로 Zhang (2000)은 3D 기준점을 이용하는 대신 2D 평면상의 체커보드 패턴을 이용하여 각 영상에서 2D 호모그래피 행렬을 추정하였다. 각 영상에서 추정된 호모그래피 행렬은 비선형 Maximum Likelihood Estimation (MLE) 함수의 최적화를 위한 초기값으로 활용되는 방식이 제안되었다. 이후 이러한 방식은 대표적인 컴퓨터 비전 오픈소스 라이브러리인 OpenCV와 MATLAB 등에서 구현되어 카메라 캘리브레이션을 위한 대표적인 표준방식으로 사용되고 있다. 이러한 방식과 유사하면서 대표적인 선행 연구로는 Tsai (2003)와 Heikkilä & Silvén (1997)가 존재한다. 두 방식 모두 핀홀 카메라 모델을 사용한다는 점에서 동일하지만 렌즈의 왜곡 계수를 다르게 표현한다는 점에 있어 차

이점을 가진다 (Sun & Cooperstock 2006). Tsai (2003)는 영상 좌표계 기반의 방사 왜곡 (radial distortion) 모델과 2단계 선형 추정 구조를 사용하여 간단한 구조를 가지는 보정 방식을 제안하였다. 반면, Heikkilä & Silvén (1997)은 방사 및 접선 왜곡까지 포함하는 확장된 렌즈 왜곡 모델을 활용함과 동시에 Direct Linear Transformation (DLT)를 이용하여 카메라의 자세를 구한 뒤 내부 파라미터를 순차적으로 최적화하는 방식을 제안하였다.

방사형 왜곡 (radial distortion)을 보다 정밀하게 모델링하거나 변형하는 방식도 다수 연구되어 왔다. Ma et al. (2006)은 기존의 다항식 기반 왜곡 보정법이 저품질 렌즈나 심한 비선형 왜곡 환경 문제가 있음을 제기하고 piecewise 모델을 제안하였다. 이 모델은 픽셀 반경의 길이를 기준으로 왜곡을 표현하는 함수를 2개의 구간으로 나누어 고도화하는 방식이다. Hartley & Kang (2007)은 방사 왜곡 모델의 계수를 사전 정의하지 않고 정규화된 좌표계에서 직접 추정하는 방법을 제안하였으며 방사 왜곡 중심을 주점과 별개로 추정하여 함으로써 기존 다항식 기반의 모델보다 더 높은 보정 성능을 얻었다. 마지막으로 Zhou et al. (2020)은 Unmanned Aerial Vehicle 기반 항공사진 촬영에서 카메라 내부 파라미터의 보정 오류가 3차원 재구성 과 자세 추정에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 특히 내부 파라미터 중 초점 거리의 잘못된 초기값을 선정할 경우 누적 오차로 이어진다는 점을 통해 정확한 카메라 캘리브레이션은 높은 신뢰성과 정밀도를 확보하는데 필수적이다.

3. PROPOSED METHOD

본 논문에서는 Kalibr (ETH Zurich Autonomous Systems Lab 2022)을 활용하여 카메라-IMU 간의 외부 파라미터 값을 기반으로 제약조건을 구성하여 내부 파라미터를 재보정하는 새로운 방식을 제안한다. 이에 대한 전체 다이어그램은 Fig. 1에 시각적으로 나타내었다. 가장 먼저 카메라에서 얻어진 체커보드 영상을 이용하여 Camera Calibrator App (CCA)으로 내부 파라미터를 추

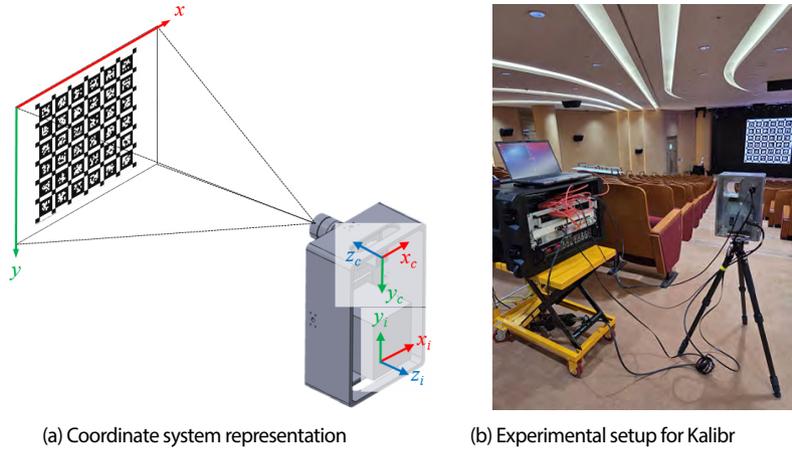


Fig. 2. Experimental setup for obtaining camera-IMU extrinsic parameter using Kalibr.

정한다. 이후 Kalibr에서 외부 파라미터 정보를 얻기 위해 별도의 April Grid 영상 (Olson 2011)과 Inertial Measurement Unit (IMU) 데이터를 활용하여 결과를 획득한다. 특히 Kalibr을 수행할 때는 앞서 CCA를 통해 얻어진 내부 파라미터 값을 다양하게 조정하면서 이 값이 외부 파라미터 추정 결과에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 실험 결과 주점의 변화는 X , Y 축, 초점의 변화는 Z 축 레버암과 선형적인 관계를 가지고 있음을 확인하였다. 이와 동시에 실제 도면 상에서 레버암의 유효한 범위를 물리적으로 측정하였을 때 CCA에서 추정된 내부 파라미터는 이 유효 범위를 역으로 이용하여 카메라 캘리브레이션을 위한 부등식 제약조건으로 구성될 수 있다.

3.1 Kalibr with Stepwise Variation of Intrinsic Parameters

Kalibr은 카메라의 재투영 오차와 IMU의 가속도/각속도 오차를 동시에 최소화하는 비선형 최적화 기반 프레임워크로 카메라-IMU 간 위치 및 자세 관계, 즉 외부 파라미터 값을 추정하는 대표적인 오픈소스 도구이다 (Rehder et al. 2016). 이러한 최적화 과정에서 Kalibr은 카메라 내부 파라미터 외에도 IMU의 동적 특성인 잡음 noise density와 바이어스 랜덤워크 (bias random walk)에 대한 사전 정보가 필수적으로 입력되어야 한다. IMU의 경우, 대부분 제조사에서 제공하는 데이터 시트를 통하여 입력에 필요한 동적 특성 값을 비교적 쉽게 얻을 수 있는데 반해, 카메라 내부 파라미터의 경우 영상을 획득한 시점의 렌즈 세팅, 조도 환경 등에 따라 값이 상이하므로 툴을 이용하여 직접 카메라를 보정하는 것이 필수적이다. 특히 초점거리나 주점 위치의 미세한 차이가 외부 파라미터 추정에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 신뢰할 수 있는 내부 파라미터가 외부 파라미터 추정에 있어 중요한 요소로 작용한다.

가장 먼저 카메라에 대한 내부 파라미터를 획득하기 위해 MATLAB에서 제공하는 CCA를 활용하였다. CCA는 체커보드 영상을 이용하여 카메라의 초점거리, 주점, 왜곡 계수 등의 여러 내부 파라미터를 동시에 추정할 수 있다. 그러나 선택된 영상의 개수, 촬영된 거리 및 각도에 따라 내부 파라미터의 표준 편차가 크

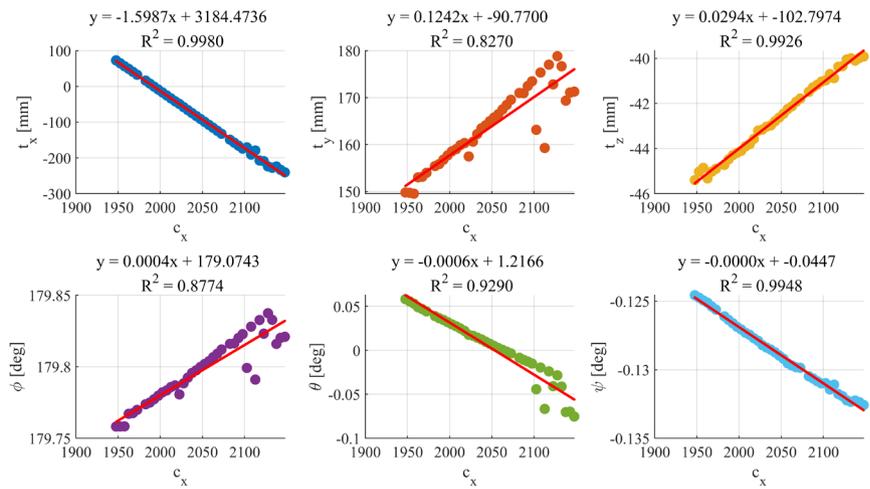
Table 1. Regression coefficients representing the relationship between intrinsic parameters and extrinsic parameters.

| | t_x [mm] | t_y [mm] | t_z [mm] | ϕ [deg] | θ [deg] | ψ [deg] |
|------------|------------|------------|------------|--------------|----------------|--------------|
| c_x [px] | -1.5987 | 0.1242 | 0.0294 | 0.0004 | -0.0006 | 0.0000 |
| c_y [px] | 0.1205 | -1.8306 | -0.0139 | 0.0000 | -0.0003 | 0.0000 |
| f [px] | -0.0629 | 0.0502 | 1.7792 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0000 |

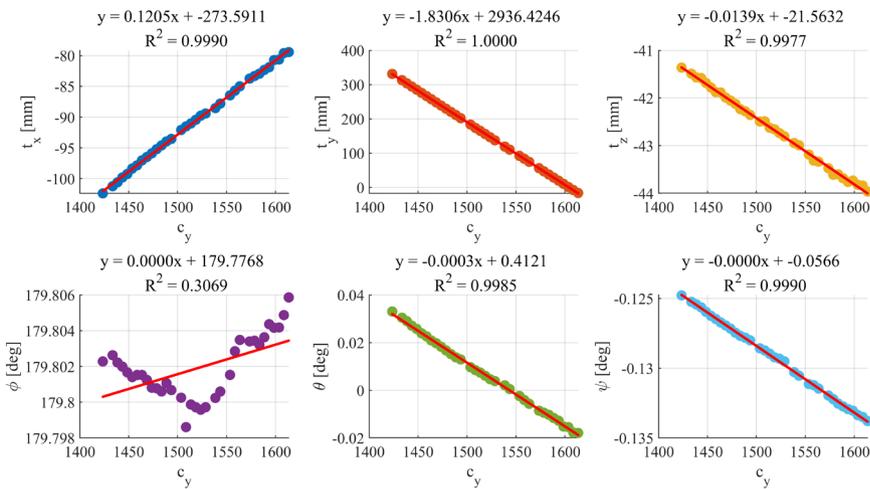
게 나타나는 경향을 보이기 때문에 신뢰성에 대한 문제점이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 추정된 내부 파라미터 값이 카메라-IMU 간의 외부 파라미터에 미치는 영향을 분석하였다. 앞서 CCA에서 얻어진 내부 파라미터를 기준 값으로 설정한 후 x 축 주점 c_x , y 축 주점 c_y , 초점 거리 f 를 각각 ± 5 픽셀 간격으로 최대 ± 100 픽셀까지 인위적으로 변화시켜 총 120개의 변경된 내부 파라미터 조합을 생성하였다. 이후 Figs. 2a,b와 같은 환경에서 카메라-IMU 데이터를 획득한 후 생성된 내부 파라미터 조합을 입력하여 Kalibr을 실행했을 때 마찬가지로 120개의 외부 파라미터 결과를 얻을 수 있다. 이때 3개의 내부 파라미터 변화가 6-자유도로 표현되는 외부 파라미터에 미치는 영향은 Fig. 3에 표현하였다. Figs. 3a,b,c는 각각 c_x , c_y , f 를 변화시켰을 때 외부 파라미터가 변화하는 결과를 나타내며 빨간색 직선은 1차 선형 회귀 결과를 나타낸다. 여기서 6-자유도 외부 파라미터는 각각 x 축 방향 레버암 t_x , y 축 방향 레버암 t_y , z 축 방향 레버암 t_z , roll 각도 ϕ , pitch 각도 θ , yaw 각도 ψ 로 나타내었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 내부 파라미터의 변화는 회전 성분(ϕ, θ, ψ)에는 영향을 미치지 않는 반면 레버암 성분(t_x, t_y, t_z)에는 큰 영향을 주는 것으로 나타났고, 이때의 $c_x - t_x, c_y - t_y, f - t_z$ 간의 결정 계수(R-Squared)를 계산결과는 각각 0.9980, 1.0000, 1.0000으로 나타났다. 따라서 고정된 위치에서 특정 치구에 장착된 카메라와 IMU 간의 레버암은 변하지 않는 상수 값이라고 가정했을 때 이러한 결과는 Eq. (1)과 같이 간단한 선형 모델로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 a_2 a_3 \\ a_4 a_5 a_6 \\ a_7 a_8 a_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

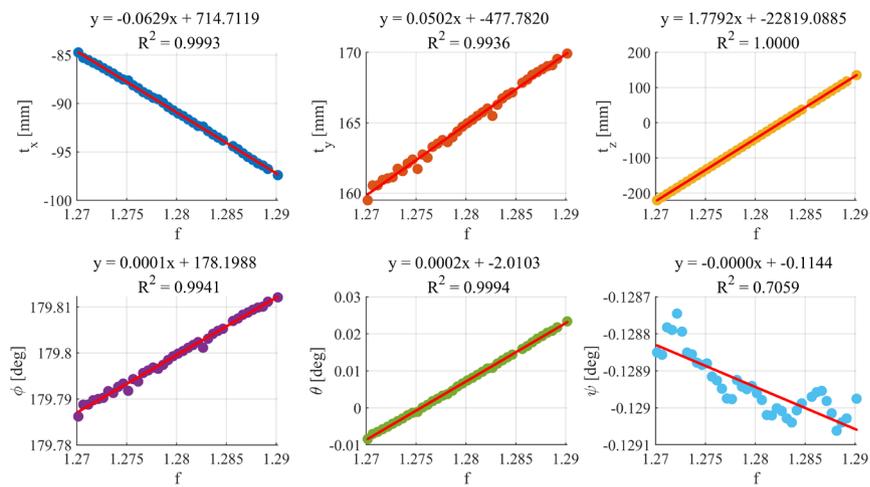
여기서 A 는 변화율을 나타내는 행렬, B 는 바이어스를 나타내는 벡터이다. Table 1에서 나타내었듯이 A 의 대각 성분을 제외한 나머지 항들은 대부분 0에 가까운 근사치로 수렴한다. 따라서 각 내



(a) Effect of x-axis principal point variation



(b) Effect of y-axis principal point variation



(c) Effect of focal length variation

Fig. 3. Relationship between intrinsic parameters and the extrinsic parameters, along with the linear regression results.

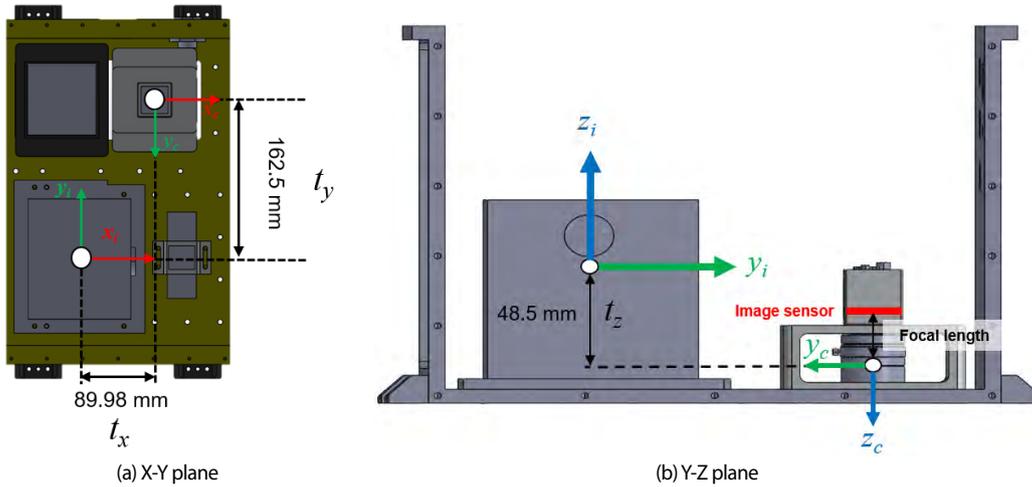


Fig. 4. Measurement results illustrating the lever arm between the camera and IMU on the system layout diagram.

부 파라미터의 변화는 특정한 축 방향의 레버암에만 영향을 미친다. 이로 인하여 A 는 대각 행렬이면서 동시에 선형 독립 특성을 가지고 있기 때문에 ± 100 픽셀 범위 내에서 A 는 non-singular임을 보장할 수 있고 역행렬인 A^{-1} 가 항상 존재한다.

3.2 Derivation of the Feasible Range

A 의 대각 성분을 제외한 모든 성분을 0으로 가정하고 카메라-IMU 간의 물리적으로 유효한 레버암의 범위를 설정하기 위해 허용 오차 벡터 $[\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$ 를 추가하면 역으로 카메라 내부 파라미터의 유효 범위를 Eq. (2)와 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} c_x \pm \varepsilon_{c_x} \\ c_y \pm \varepsilon_{c_y} \\ f \pm \varepsilon_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_5 & 0 \\ 0 & 0 & a_9 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} t_x \pm \varepsilon_x \\ t_y \pm \varepsilon_y \\ t_z \pm \varepsilon_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

여기서 t_x, t_y 는 Fig. 4a와 같이 카메라의 주점 포인트와 IMU의 Computational Center (CC) 간의 거리에 나타내어지므로 도면 상에서 쉽게 거리를 측정할 수 있다. 하지만, t_z 는 Fig. 4b에서 나타낸 바와 같이 카메라 렌즈 내부의 광학 중심 (optical center)과 IMU CC 사이의 높이 차를 나타내므로 실제 물리적인 위치를 외부에서 정확히 특정하기 어렵다. 그러나 초점 거리는 이미지 센서의 중점인 광학 중심에서 영상 센서까지의 거리로 정의되므로 카메라의 도면상 렌즈 구조가 제공되는 경우 t_z 를 대략적으로 추정할 수 있다. 본 논문에서는 카메라 제조사에서 제공하는 도면을 활용하여 광학 중심의 위치를 설정하고 전체 레버암 벡터 $[[t_x, t_y, t_z]^T = [-89.98 \text{ mm}, 162.5 \text{ mm}, -48.5 \text{ mm}]^T$ 를 구성하였다.

$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$ 의 값을 설정하기 위해서는 실제 센서 시스템에서 발생할 수 있는 다양한 오차 요소가 고려되어야 한다. 주요 요인으로는 센서 장착 오차, 구조적 공차 등이 대표적으로 존재한다. 하지만 다양한 불확실성 요소를 식별하고 반영하기 위해서는 명백한 한계가 존재한다. 이를 감안하였을 때 영상의 주점과 IMU의 X, Y축 CC로 결정되는 t_x, t_y 는 대부분 고정된 위치에서 작은 편차를 가지기 때문에 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 는 10 mm로 설정하였다. 반면, ε_z 의 경우 카메라의 초점을 조절함으로써 큰 편차를 가질 수 있기 때문에 X, Y

축 허용오차 보다 2배 큰 값인 20 mm로 설정하였고, 이후 적절한 ε 값을 설정하기 위해 추가적인 실험을 진행하였다. 결론적으로 적절한 ε 값을 결정되었을 때 Eq. (2)를 활용하면 역으로 내부 파라미터의 허용오차 $[\varepsilon_{c_x}, \varepsilon_{c_y}, \varepsilon_f]^T$ 를 결정할 수 있다. CCA 등을 이용하여 추정된 카메라 내부 파라미터는 이 범위 내에서 추정된 경우에만 의미 있는 결과로 해석될 수 있을 뿐만 아니라 추후 내부 파라미터 재보정을 위한 제약 조건으로도 활용될 수 있다.

3.3 Constrained Optimization for Intrinsic Parameters

이번절에서는 3.2절에서 도출된 카메라 내부 파라미터의 유효 범위를 기반으로 제약조건 기반 최적화 문제의 구성 방법을 구체적으로 설명한다. 설계 변수에 대한 초기값의 설정은 Zhang (2000)의 방식처럼 호모그래피 행렬을 계산하는 것이 아닌 CCA를 통해 얻어진 초기 내부 파라미터(K_0)와 체커보드에서 카메라 좌표계로의 변환 관계를 나타내는 외부 파라미터 ($[R_{w,i}^c, t_{w,i}^c]$)를 다시 한번 최적화하는 것을 목표로 하였다. 여기서 외부 파라미터는 Rodrigues 벡터 형식의 3차원 회전 요소와 3개의 레버암 요소로 구성되며 각 영상의 인덱스 i 마다 독립적으로 추정된다. 따라서 전체 영상의 수를 N 이라 할 때, 외부 파라미터와 관련된 설계 변수의 개수는 총 $6N$ 개가 된다. 여기에 모든 영상에서 공통적으로 적용되는 내부 파라미터와 왜곡 계수를 포함하면 내부 파라미터 재최적화를 위한 전체 설계 변수의 개수는 $6N+5$ 개로 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$x = [r_{1,1}, r_{2,1}, r_{3,1}, \dots, r_{1,N}, r_{2,N}, r_{3,N}, t_{x,1}, t_{y,1}, t_{z,1}, \dots, t_{x,N}, t_{y,N}, t_{z,N}, k_1, k_2, c_x, c_y, f] \quad (3)$$

여기서 $[r_1, r_2, r_3]$ 은 Rodrigues 회전 요소, $[t_x, t_y, t_z]$ 는 각 축에 대응하는 레버암, k_1, k_2 는 방사형 왜곡 계수, c_x, c_y, f 는 카메라 내부 파라미터를 나타낸다. 이때의 내부 파라미터의 유효 범위를 고려한 비선형 최적화 문제는 Eq. (4)와 같이 재투영 오차를 최소화하는 방식으로 정의하였다.

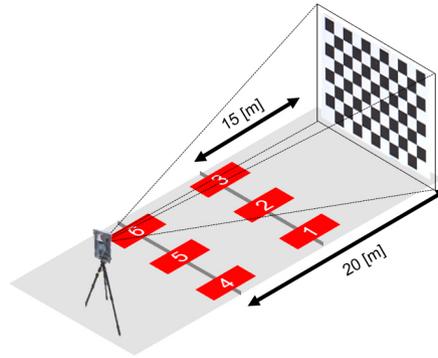


Fig. 5. Configuration of acquisition location and distances for the camera calibration.

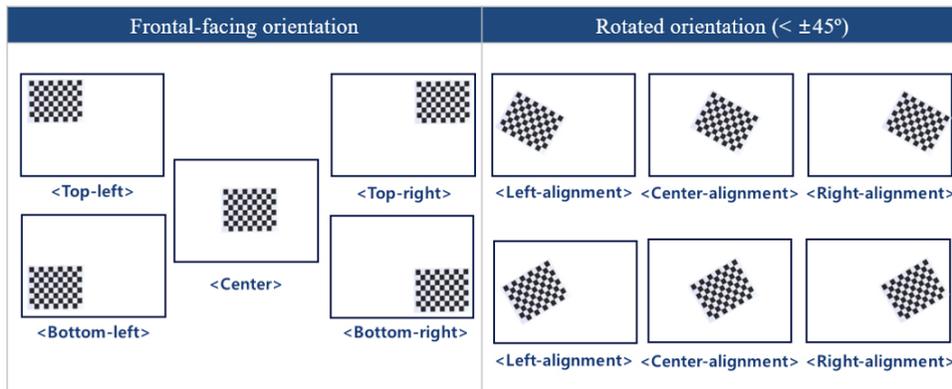


Fig. 6. Image acquisition method for camera calibration dataset configuration, which includes both frontal and tilted (approximately 45 degree) camera views.

$$\min \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \|p_j - K \cdot h(R_{w,i}^c P_{w,j} + t_{w,i}^c)\|^2 \right) \tag{4}$$

Subject to $c_x \in [c_x - \varepsilon_{c_x}, c_x + \varepsilon_{c_x}]$
 $c_y \in [c_y - \varepsilon_{c_y}, c_y + \varepsilon_{c_y}]$
 $f \in [f - \varepsilon_f, f + \varepsilon_f]$

$$[c_x, c_y, f] = \begin{cases} l, & \text{if } x' < l \\ x', & \text{if } l \leq x' \leq u \\ u, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

여기서 아랫 첨자 j 는 영상 1장에 존재하는 특징점의 개수를 의미하며, p 는 영상에서 추출된 2D 특징점, P_w 는 체커보드에서 검출되는 3D 특징점을 의미한다. 또한, 비선형 함수 $h(\cdot)$ 는 방사형 왜곡을 보정하기 위한 함수로 왜곡되지 않은 정규화 영상 좌표를 입력 받아 왜곡된 영상 평면상의 위치를 Eq. (5)와 같이 계산한다.

$$h(\cdot) = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \begin{bmatrix} \frac{X_c}{Z_c} \\ \frac{Y_c}{Z_c} \end{bmatrix}, \text{ where } r = \sqrt{\left(\frac{X_c}{Z_c}\right)^2 + \left(\frac{Y_c}{Z_c}\right)^2} \tag{5}$$

여기서 $[X_c, Y_c, Z_c]^T$ 는 각각 카메라 좌표계에서 정의된 3차원 좌표, 정규화된 이미지 평면 상의 점은 $[X_c/Z_c, Y_c/Z_c]^T$, r 은 영상 중점으로 부터 정규화된 거리를 나타낸다. Eq. (4)의 전체 최적화 과정은 Levenberg-Marquardt (LM) 알고리즘을 이용하여 진행하였으며 만약 초기 내부 파라미터가 설정된 제약조건 범위를 벗어나는 경우를 방지하기 위해 전체 설계 변수 중 내부 파라미터에 대해서만 Eq. (6)과 같이 전처리 과정을 추가하였다.

여기서 l 은 하한 값, u 는 상한 값을 의미한다. 이를 통해 초기값이 상한 또는 하한을 초과하는 경우 자동으로 허용 범위 내 값으로 조정하여 제약조건을 위반하지 않도록 하였다.

4. EXPERIMENT

이번 장에서는 카메라 캘리브레이션 위한 실험 데이터셋의 구성과 수집 방법을 소개하고 이를 바탕으로 수행된 실험 결과를 제시한다. 실험은 Eq. (7)의 렌즈 방정식에 의해 카메라가 센서 평면에 적절하게 상이 맺힐 수 있는 거리를 고려하였다.

$$d_i = \frac{f \cdot d_o}{d_o - f} \tag{7}$$

여기서 d_o 는 물체와 렌즈 사이 거리, d_i 는 상이 맺히는 이미지 센서까지의 거리를 의미한다. 일반적으로 $d_o \gg f$ 인 경우, 영상 거리는 $d_i \approx f$ 로 근사할 수 있다. 본 논문에서는 $f = 35$ mm를 이용하여 실험을 진행하고 d_o 는 실험 공간의 물리적 제약을 고려하였을 때 Fig. 5와 같이 체커보드 영상으로부터 15 m와 20 m 만큼 떨어진 위치 6곳을 선정하였다. 이에 따라 d_i 는 거리가 15 m일 경우 35.06, 20 m일 경우 35.08 mm로 계산되어 $d_i \approx f$ 조건을 만족하는 위치

Table 2. Camera specifications, target patterns, and number of images per location for camera calibration.

| Pos. | Camera specifications | Target patterns | Distance [m] | # of images |
|------|------------------------------------|-----------------------|--------------|-------------|
| 1 | | | 15 | 691 |
| 2 | Width: 4096 | Square size: 335 [mm] | 15 | 551 |
| 3 | Height: 3000 | Type: Checkerboard | 15 | 602 |
| 4 | Focal length: 35 [mm] | Rows: 7 | 20 | 223 |
| 5 | Pixel size: 2.74 [μm] | Cols: 5 | 20 | 170 |
| 6 | | | 20 | 509 |

Table 3. Range of intrinsic parameters based on lever arm tolerance vectors.

| | 0.5 ϵ | ϵ | 2 ϵ |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|
| c_x | [2045.08, 2051.33] | [2041.95, 2054.46] | [2035.69, 2060.7154] |
| c_y | [1512.56, 1518.03] | [1509.83, 1520.75] | [1504.37, 1526.22] |
| f | [12792.71, 12803.96] | [12787.09, 12809.57] | [12775.85, 12820.81] |

Table 4. Comparison of initial parameters from camera calibrator app and optimized parameters using the proposed method, along with their standard deviation values.

| Position | c_x [px] | | c_y [px] | | f [px] | | k_1 | | k_2 | |
|----------|------------|---------------------|------------|---------------------|----------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|
| | Init | Opt (2 ϵ) | Init | Opt (2 ϵ) | Init | Opt (2 ϵ) | Init | Opt (2 ϵ) | Init | Opt (2 ϵ) |
| 1 | 2083.53 | 2060.72 | 1527.53 | 1526.22 | 12720.85 | 12789.42 | -0.011 | -0.010 | 0.438 | 0.535 |
| 2 | 2033.46 | 2035.70 | 1537.28 | 1525.54 | 12965.60 | 12820.82 | 0.003 | -0.003 | 0.288 | 0.340 |
| 3 | 2075.88 | 2036.52 | 1502.08 | 1504.40 | 12998.50 | 12820.82 | 0.002 | -0.005 | 0.441 | 0.366 |
| 4 | 2108.36 | 2040.68 | 1476.93 | 1504.37 | 12926.54 | 12820.82 | 0.003 | 0.001 | 0.238 | 0.182 |
| 5 | 2037.24 | 2052.59 | 1544.40 | 1526.17 | 13768.59 | 12820.82 | 0.041 | 0.007 | -0.103 | 0.197 |
| 6 | 2088.44 | 2046.82 | 1554.48 | 1526.22 | 12825.23 | 12820.82 | 0.007 | -0.002 | 0.423 | 0.296 |
| STD | 29.76 | 9.83 | 29.09 | 11.18 | 373.83 | 12.82 | 0.02 | 0.01 | 0.21 | 0.13 |

Table 5. Comparison of reprojection errors and reduction rates. Best reprojection error results are highlighted in bold.

| Position | Init | | 0.5 ϵ | | ϵ | | 2 ϵ | |
|----------|---------------|-----------|----------------|-----------|------------|---------------|--------------|-----------|
| | Error [px] | Rates [%] | Error [px] | Rates [%] | Error [px] | Rates [%] | Error [px] | Rates [%] |
| 1 | 0.2231 | 0.2094 | 6.14 | 0.2093 | 6.19 | 0.2090 | 6.32 | |
| 2 | 0.2269 | 0.2241 | 1.24 | 0.2239 | 1.32 | 0.2238 | 1.37 | |
| 3 | 0.2444 | 0.2195 | 10.19 | 0.2191 | 10.35 | 0.2186 | 10.56 | |
| 4 | 0.3513 | 0.2067 | 41.16 | 0.2054 | 41.53 | 0.2036 | 42.04 | |
| 5 | 0.1896 | 0.1938 | -2.22 | 0.1952 | -2.95 | 0.1946 | -2.63 | |
| 6 | 0.6081 | 0.2391 | 60.68 | 0.2387 | 60.73 | 0.2381 | 60.84 | |

에서 데이터를 획득할 수 있도록 하였다. 또한, 카메라 캘리브레이션에 의한 영상을 획득할 때 Fig. 6에서 표현한 바와 같이 단순한 정면뿐만 아니라 약 45도 정도의 기울인 자세를 추가하여 다양한 시점의 체커보드 영상이 데이터 셋에 포함될 수 있도록 하였다. 데이터 셋을 획득하기 위한 카메라의 특성, 타겟 패턴, 각 위치마다 얻은 영상의 개수는 Table 2에 정리하였고 Position은 각 영상이 촬영된 카메라의 위치를 나타낸다.

앞서 설정된 레버암 허용오차 벡터($\epsilon=[\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_f]^T$)의 경우 유효한 내부 파라미터의 범위를 직접적으로 결정하기 때문에 추가적으로 다음과 같은 3가지의 케이스를 고려하여 내부 파라미터 재 최적화 과정에 미치는 영향성을 확인하였다.

- 1) $\epsilon=[10 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 20 \text{ mm}]^T$
- 2) $0.5\epsilon=[5 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}]^T$
- 3) $2\epsilon=[20 \text{ mm}, 20 \text{ mm}, 40 \text{ mm}]^T$

레버암 허용오차 벡터의 3가지 케이스에 따른 내부 파라미터의 유효 범위는 Table 3에 나타내었다. 3가지 케이스 중 모든 데이터셋에 대한 평균 재투영 오차를 측정할 결과 2 ϵ 일 때 가장 낮은 값을 보였고, CCA에서 얻어진 초기 내부 파라미터 결과 (Init)와 이에 대한 최적화 결과 (Opt)는 Table 4에 나타내었다. 실험 결과 초점거리 f 에 대해 Init에서 추정된 값은 최소 12720.85에서 최대 13768.59까지 분포하며 표준편차가 373.83으로 계산되어 불확실성이 높은 것으로 나타났다. 반면 Opt에서 추정된 f 값은 최소

12805.77부터 최대 12820.82까지 분포한다. 특히 12820.82 경우 상한 바운드 값과 일치하므로 제약조건이 활성화되어 f 값의 추정에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 Table 5에서 나타난 바와 같이 제안한 방식이 대부분의 데이터 셋에서 제약조건을 효과적으로 활용함으로써 재투영 오차를 전반적으로 감소시키는 효과를 보였다. 특히, Position 6에서는 재투영 오차가 기존 방식 대비 60.84% 만큼 개선되어 가장 큰 개선 효과를 보였다. 하지만, Position 5에서는 예외적으로 2.63% 만큼 증가하였는데 무엇보다도 왜곡 계수 k_1 이 다른 데이터셋과 비교하여 가장 크게 추정되었다. 이는 전체 설계변수에 걸쳐 k_1 이 왜곡 보정 방향에 큰 영향을 주었기 때문으로 해석된다.

5. CONCLUSION

본 논문에서는 카메라-IMU 캘리브레이션 도구인 Kalibr을 통해 얻은 외부 파라미터 정보를 활용하여 카메라 내부 파라미터의 물리적으로 유효한 범위를 도출하고 이를 바탕으로 제약조건 기반 비선형 최적화 방식을 제안하였다. 기존의 카메라 캘리브레이션 방법은 영상 데이터와 환경에 따라 내부 파라미터 추정 값이 데이터 획득 환경에 따라 불확실성이 크다는 한계가 있는 반면, 본 논문에서 제안한 방식은 초점 거리, 주점의 변화가 레버암에 미치는 영향을 분석함으로써 실제 센서 시스템의 특성을 반영한 유효 범위를 설정하였다. 실험 결과 제안된 방식은 대부분의 데

이더 셋에서 재투영 오차를 효과적으로 감소시켰지만 예외적으로 발생된 왜곡 계수의 영향은 영상에 대한 전처리 과정을 추가함으로써 개선될 것으로 기대된다. 더 나아가 Kalibr을 통해 추정되는 레버암은 모두 센서의 물리적 특성으로부터 결정되므로 이를 활용한다면 본 논문에서 제안한 접근법은 특정 장비나 환경에 관계없이 카메라-IMU 시스템에 일관적으로 적용될 수 있다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H. Cho, T. Ahn, S. Moon and K. Hwang; methodology, H. Cho, S. Moon, K. Hwang and T. Lee; software, H. Cho, K. Hwang and T. Lee; validation, S. Moon and H. Hong; formal analysis, S. Moon and H. Hong; investigation, H. Cho, T. Ahn, S. Moon, K. Hwang, T. Lee and H. Hong; resources, H. Cho, T. Ahn, S. Moon, K. Hwang, T. Lee and H. Hong; data curation, H. Cho and K. Hwang; writing—original draft preparation, H. Cho, S. Moon, K. Hwang; writing—review and editing, S. Moon and H. Hong; visualization, H. Cho and K. Hwang and T. Lee; supervision, T. Ahn, S. Moon, J. Oh. and C. Sung; project administration, S. Moon, J. Oh and C. Sung; funding acquisition, J. Oh and C. Sung.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Carr, J. R. & Sobek, J. S. 1980, Digital scene matching area correlator (DSMAC), Proc. SPIE 0238, Image Processing for Missile Guidance, San Diego, United States, 23 December 1980, pp.36-41. <https://doi.org/10.1117/12.959130>
- ETH Zurich Autonomous Systems Lab, Calibration Targets – Kalibr Wiki, 2022, [Internet], Cited 2022 Apr 28, available from: <https://github.com/ethz-asl/kalibr/wiki/calibration-targets>
- Hartley, R. & Kang, S. B. 2007, Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 29, 1309-1321. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1147>
- Heikkilä, J. & Silvén, O. 1997, A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, in Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, PR, USA, 17-19 June 1997, pp.1106-1112. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1997.609468>
- Ma, L., Chen, Y., & Moore, K. L. 2006, Analytical piecewise radial distortion model for precision camera calibration, IEE Proceedings – Vision, Image and Signal Processing, 153, 468-474. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0307051>
- Nistér, D., Naroditsky, O., & Bergen, J. 2004, Visual odometry, in Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2004), Washington, DC, USA, 27 June 2004 - 02 July 2004. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2004.1315094>
- Olson, E. 2011, AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system, in 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 09-13 May 2011, pp.3400-3407. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979561>
- Qin, T., Li, P., & Shen, S. 2018, VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator, IEEE Transactions on Robotics, 34, 1004-1020. <https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2853729>
- Rehder, J., Nikolic, J., Schneider, T., Hinzmann, T., & Siegwart, R. 2016, Extending Kalibr: Calibrating the extrinsics of multiple IMUs and of individual axes, in 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden, 16-21 May 2016, pp.4304-4311. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487628>
- Sun, W. & Cooperstock, J. R. 2006, An empirical evaluation of factors influencing camera calibration accuracy using three publicly available techniques, Machine Vision and Applications, 17, 51-67. <https://doi.org/10.1007/s00138-006-0014-6>
- Tsai, R. 2003, A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, IEEE Journal on Robotics and Automation, 3, 323-344. <https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087109>
- Zhang, Z. 2000, A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22, 1330-1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>
- Zhou, Y., Rupnik, E., Meynard, C., Thom, C., & Pierrot-Deseilligny, M. 2020, Simulation and analysis of photogrammetric UAV image blocks—Influence of camera calibration error, Remote Sensing, 12, 22. <https://doi.org/10.3390/rs12010022>



Hyun-Seup Cho received the B.S. degree in electronics engineering from Tech University of Korea, South Korea in 2023, and the M.S. degree in automotive engineering from Hanyang University, South Korea, in 2025. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a research engineer. His research interests include inertial navigation and vision based-navigation systems.



Tae-Dong Ahn received the B.S. and M.S. degrees in electrical and computer engineering from Seoul National University, South Korea in 2006 and 2009, respectively. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a chief research engineer. His research interests include inertial navigation and vision based-navigation systems.



Sang-Chan Moon received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in mechanical engineering from KyungHee University, South Korea, in 2010, 2012, and 2016, respectively. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a chief research engineer. His research interests include inertial navigation and vision based-navigation systems.



Kang-Hyun Hwang received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Pusan National University, South Korea in 2017 and 2019, respectively. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a senior research engineer. His research focus on vision based-navigation systems.



Tae-Hoon Lee received the B.S. and M.S. degrees in mechanical and aerospace engineering from Konkuk University, South Korea in 2022 and 2024, respectively. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a research engineer. His research interests include inertial navigation and vision based-navigation systems.



Hyun-Wook Hong received the B.S. degree in electronics engineering from KyungHee University, South Korea in 2011. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a senior research engineer. His research interests include inertial navigation and vision based-navigation systems.



Juhyun Oh received the B.S. and M.S. degrees in electrical engineering from Korea University, South Korea in 2007 and 2011, respectively. He is currently working for Agency for Defense Development, Daejeon, South Korea, as a senior research engineer. His research interests include inertial navigation system and DB-referenced navigation.



Chang-Ky Sung received the B.S. degree in electrical engineering from Jeonbuk National University, South Korea, in 2000, M.S. degree in electrical engineering and computer science from Gwangju Institute of Science and Technology, South Korea, in 2002, and the Ph.D. degree in electrical engineering from Chungnam National University, South Korea, in 2021. He is currently working for Agency for Defense Development, Daejeon, South Korea, as a chief research engineer. His research interests include nonlinear filter theory, terrain association navigation, and hybrid navigation.

다중 GNSS 위성군 측정치를 활용한 EKF 기반 달 위성 궤도 결정 시뮬레이션

김성익¹, 오지성¹, 박병운^{1†}, 박혜원², 주정민²

EKF-Based Orbit Determination Simulation for a Lunar Satellite Using Multi-GNSS Observables

Sungik Kim¹, Jisung Oh¹, Byungwoon Park^{1†}, Hyewon Park², Jung-Min Joo²

¹Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul 05006, Korea

²Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

The Moon is increasingly recognized as a strategic waypoint for future Mars and deep space missions and this is driving demand for reliable Position, Navigation, and Timing (PNT) services. Traditional reliance on the Deep Space Network (DSN) provides high post-processed accuracy but limited real-time performance and may not scale with rising mission numbers. To address this, space agencies are exploring Global Navigation Satellite System (GNSS)-based and dedicated lunar navigation systems. Recent demonstrations, such as the Lunar GNSS Receiver Experiment (LuGRE) mission, have validated GNSS positioning at the Moon with kilometer-level accuracy. This study extends these efforts by simulating lunar orbit determination using multi-GNSS constellations. An Extended Kalman Filter (EKF) approach, integrating GNSS observations with orbital dynamics, is employed. The simulation results show significantly improved position accuracy and underscore EKF's potential for future lunar navigation systems.

Keywords: Lunar PNT, GNSS, EKF, orbit determination

주요어: 달 항법, 위성항법시스템, 확장칼만필터, 궤도 결정

1. INTRODUCTION

달은 미래 유인 화성 탐사 및 심우주 탐사의 중간 거점으로써 주목받고 있으며, 향후 10년간 400건 이상의 달 관련 임무가 예상되고 있다 (ISECG 2024, Kawade & Christodouloupoulou 2024). 이처럼 급격히 증가하는 임무들의 수요에 맞춰 안정적인 임무 수행과 성공을 위한 달에서의 Position, Navigation, and Timing (PNT) 서비스 제공의 중요성도 함께 증가하고 있다. 현재까지 오랜 기간 사용된 가장 보편적인 심우주 항법 기술로는 지상 안테나와의 양방향 통신 기반으로 위치를 결정하는 Deep Space Network (DSN)이며, 후처리 과정을 통해 수 m 수준의 위치 정확도를 가지는 것으로 알려져 있다 (Delépaut et al. 2022). 하지만

앞으로 계속 증가하는 임무 수요를 인프라 공급이 따라가지 못할 것으로 전망하고 있으며, 수 m 수준의 정확도는 후처리로만 가능할 뿐, 실시간으로 처리를 하는 경우 위치 오차는 수 km 수준으로 떨어지게 된다 (Giordano et al. 2021a, 2021b).

전세계적으로 National Aeronautics and Space Administration (NASA), European Space Agency (ESA) 그리고 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)와 같은 주요 우주국들은 달에서의 안정적인 항법 서비스 제공을 위한 계획을 수립하고 있으며, 지구 Global Navigation Satellite System (GNSS) 항법 신호를 달에서 획득하여 사용하는 방법과 지구 GNSS와 같이 달에서 독자적으로 운영할 수 있는 위성 항법 시스템을 구축하고자 하는 방법에 대해 활발히 연구하고 있다. GNSS를 달 임무에서 활

Received Aug 10, 2025 Revised Aug 24, 2025 Accepted Aug 25, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: byungwoon@sejong.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

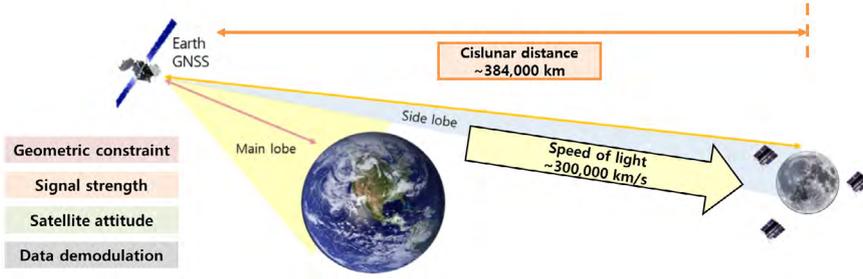


Fig. 1. GNSS-Lunar satellite relative geometry and visibility.

용하는 것은 기존 존재하는 시스템을 활용하는 것이므로 시스템 구성이 비교적 단순하고 큰 수정 없이 사용할 수 있기 때문에 운영 복잡성과 비용 절감 측면에서 장점이 있는 것으로 여겨진다 (Giordano et al. 2021b). 또한 NASA Artemis 프로그램의 일환으로 NASA는 달에서 통신과 항법 서비스 제공을 위한 인프라 체계 이른바 LunaNet을 제안하고 이를 구축하기 위해 노력하고 있다 (Israel et al. 2020). 그리고 미래에 LunaNet에 참여하게 될 여러 서비스 제공자들 사이의 상호운영성을 보장하기 위해 NASA, ESA, JAXA 주도하에 LunaNet Interoperability Specification과 같이 LunaNet 통신, 항법 서비스와 관련 표준을 명시하는 기술 문서 작성을 지속하고 있다 (Giordano et al. 2023, Dafesh et al. 2025).

이러한 과정 속에서 2025년 2월 NASA의 Commercial Lunar Payload Service 프로그램의 일환으로 Firefly사의 Blue Ghost Mission 1 탑재체로 선정된 Lunar GNSS Receiver Experiment (LuGRE) 수신기가 최초로 달에서 지구 GPS, Galileo 신호를 수신하여 위치 결정까지 성공하였다 (ASI 2025). 명확한 궤도 결정 방식이 설명되지는 않았지만 위치 정확도는 약 1.5 km 정도로 나온 것으로 확인이 되었다. 이는 GPS, Galileo 측정치로 Least square 기반 단독 측위를 수행했을 때 수 km 위치 오차가 도출된 다른 시뮬레이션 결과와 일맥상통한다 (Capuano et al. 2016).

본 논문에서는 GPS, Galileo 위성군만 고려한 기존 연구와 대비해서 현존하는 모든 위성군을 달 위성 궤도 결정에 활용하는 시뮬레이션 구성 방식에 대해 구체적으로 논의한다. 그리고 GNSS 측정치를 활용한 궤도 결정에서 지구와 달 사이의 편향된 기하학적 분포로 인해 측정치의 작은 오차 성분도 위치 정확도에 큰 영향을 줄 수 있는 Least square 기반 측정치 단독 측위 방식 대신에 측정치 모델과 위성 궤도 동역학 모델을 결합한 Extended Kalman Filter (EKF) 방식으로 궤도 결정 시뮬레이션을 진행하였다. EKF 기반 궤도 결정으로 수 km 오차 수준인 LuGRE 결과 대비 크게 향상된 위치 정확도를 얻었다.

2. SATELLITE VISIBILITY ASSESSMENT

2.1 Link Budget Calculation

궤도 결정을 위한 지구 GNSS 위성 측정치 생성을 하려면 우선 달 궤도에 위치한 위성에서 가시 GNSS 위성을 판별할 필요가

Table 1. Considered constellations and signal types.

| System | Signal 1 | Signal 2 |
|---------|----------|----------|
| GPS | L1CA | L5-I |
| GLONASS | G1CA | G2CA |
| Galileo | E1-B | E5a-I |
| BDS | B1I | B3I |
| QZSS | L1CA | L5-I |
| IRNSS | L5-SPS | - |

있다. Fig. 1과 같이 지구와 달 사이는 약 400,000 km 떨어져 있어 지구 GNSS 위성 신호가 모두 같은 방향에서 도달하게 되며, Main lobe에 해당하는 강한 신호는 대부분 지구에 가려지고 일부 main lobe 신호와 상대적으로 세기가 약한 Side lobe 영역의 신호가 달 위성에 도달할 수 있다. 시뮬레이션 측정치 생성에서 가시 위성 판별을 위해 link budget 수식으로부터 위성 신호의 반송파 대 잡음비를 계산하여 활용하며, Eq. (1)과 같다 (Parker et al. 2022).

$$\frac{C}{N_0} = P_T + G_T(\varphi, \theta) + G_R(\varphi, \theta) - 10 \log(kT_{sys}) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda_f}\right) - LM \quad (1)$$

여기서 P_T , $G_T(\varphi, \theta)$, $G_R(\varphi, \theta)$ 는 각각 GNSS 위성의 신호 출력 세기와 신호의 시선 방향 벡터가 GNSS 안테나 그리고 수신기 안테나와 이루는 각도에 따른 안테나 이득이다. φ, θ 는 시선 방향 벡터가 안테나 좌표축과 이루는 방위각과 Off-boresight angle이다. Off-boresight angle은 안테나가 지향하는 쪽 방향의 축과 시선 방향 벡터가 이루는 각도이다. d, λ_f 는 GNSS 위성 안테나와 수신기 안테나 사이의 기하학적인 거리와 f 주파수 신호의 파장 길이이다. k, T_{sys} 는 볼츠만 상수와 system noise temperature이며, system noise temperature는 Eq. (2)와 같이 신호를 수신하는 안테나와 수신기의 noise temperature의 합으로 나타난다 (Popescu 2017, Donaldson et al. 2020).

$$T_{sys} = T_{ant} + T_r \quad (2)$$

여기서 LM 은 polarization losses, receiver implementation losses 등을 포함한 마진이다.

Link budget을 계산하여 가시 위성을 판단할 때 기하학적 제약조건, 신호 세기, 위성의 상대적인 자세 그리고 신호 복조 이렇게 네가지 사항을 고려하였다. 기하학적 제약조건은 신호가 지구나 달에 의해 물리적으로 차폐되지는 않는지 판단하고, 신호 세기는 link budget으로 계산된 신호의 세기가 수신기가 감지할 수 있는 최소 수신 세기인지를 판단한다. 그리고 신호가 단순히 다

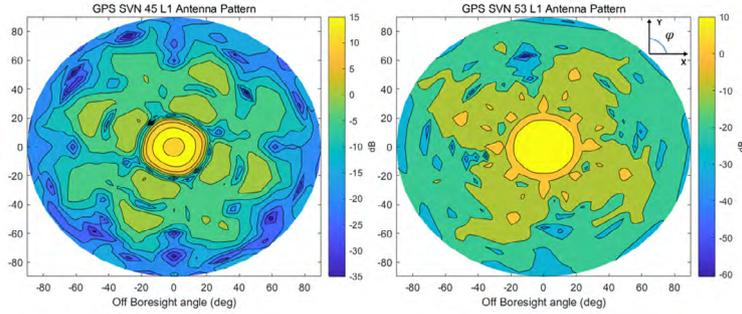


Fig. 2. GPS Block IIR, IIR-M L1 antenna gain pattern.

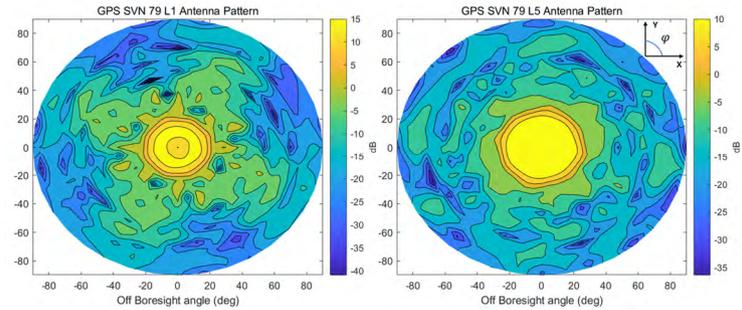


Fig. 3. GPS Block III L1/L5 antenna gain pattern.

른 행성에 의해 차폐되는 경우 외에도 지구 GNSS 위성의 송출 안테나와 달 위성의 수신 안테나가 지향하는 상대적인 방향에 따라 안테나 이득 패턴이 다르므로 위성 자세에 따른 안테나 이득 패턴의 영향도 link budget 계산에서 고려해야 한다. 마지막으로 GNSS 위성 신호로부터 위치 결정을 수행하기 위해서는 신호를 송출하는 위성에 대한 Clock & Ephemeris Data (CED)를 최소한 가지고 있어야 하며 이를 항법 신호로부터 직접 복조 하여 얻는 상황을 고려한다. 본 논문에서 시뮬레이션 시 고려한 위성군과 위성군별 신호 종류는 Table 1과 같다.

2.2 Signal Strength

P_T 와 G_T 의 합을 Equivalent Isotropic Radiated Power (EIRP)라고 정의하며, EIRP는 GNSS 위성에서 송출된 신호의 세기와 관련된 값이다. GPS, Galileo, QZSS 위성군은 EIRP와 관련한 정보를 공식적으로 공개하고 있다 (Marquis & Reigh 2015, Cabinet Office 2023, Menzione et al. 2024).

GPS Block IIR, IIR-M, III는 록히드 마틴사에서 제작하였으며, 해당 위성군에 대한 안테나 이득 패턴 정보를 전체 Off-boresight angle 영역에 걸쳐 제공하지만 보잉사에서 제작한 GPS Block IIF 위성군에 대한 안테나 이득 패턴 정보는 제한된 영역의 일부 Off-boresight angle에 대해서만 제공된다 (Navigation Center 2022). NASA에서는 GPS L1에 대한 안테나 이득 패턴 복원 프로젝트인 Antenna Characterization Experiment (ACE)를 진행한 바 있으며, GPS Block IIF 위성군까지 전체 Off-boresight angle 영역에 대한 안테나 이득 패턴 정보를 제공한다 (Donaldson et

al. 2020). L5 신호의 경우, GPS Block III는 L1과 마찬가지로 전체 Off-boresight angle 영역에 대해 정보가 공개되어 있으며, GPS Block IIF의 경우에는 L1 안테나 이득 패턴 정보 스케일링을 통해 활용할 수 있다 (Delépaut et al. 2020). Figs. 2와 3은 각각 GPS Block IIR, IIR-M L1 안테나 이득 패턴과 GPS Block III L1/L5 안테나 이득 패턴을 시각화한 것이다.

GPS 위성군별 P_T 값은 ACE 프로젝트나 다른 달 위성 궤도 결정 시뮬레이션 연구에서 사용한 값들을 참조할 수 있다 (Winternitz et al. 2019, Donaldson et al. 2020, Parker et al. 2022). 본 논문에서 GPS LICA 신호의 출력 값은 실제 지상 안테나에서 측정된 반송파 대 잡음비로부터 위성별로 도출한 연구 결과를 활용한다 (Wang et al. 2018). Wang et al. (2018)은 GPS Block IIR부터 IIF까지 LICA 신호에 대한 P_T 값을 측정하였으며, 각 GPS 위성군별 평균값을 시뮬레이션에서 적용하였다. 이때 GPS Block III의 신호 출력 세기는 GPS Block IIR-M과 동일하다고 가정하였다. L5 신호 출력의 경우 GPS Interface Control Document (ICD)에서 L5-I 신호의 최소 수신 세기를 LICA 보다 GPS Block IIF는 0.6 dBW 높게 그리고 GPS Block III는 1.5 dBW 높게 명시하고 있으므로 해당 차이만큼 더해진 값을 출력 신호 세기로 사용한다 (SAIC 2022).

Galileo는 Full Operational Capability (FOC) 위성군에 대한 EIRP 패턴 정보가 각 측정치 주파수 대역에 대해 공개되어 있다 (Menzione et al. 2024). Fig. 4는 Galileo E1과 E5a 신호에 대한 EIRP 패턴 정보를 시각화한 것이다. 또한 E1, E5a 신호의 E1-B 신호와 E5a-I 측정치 신호는 각각의 전체 신호 출력 세기에서 50%에 해당하는 Power sharing으로 인한 신호 손실을 고려해야 한다

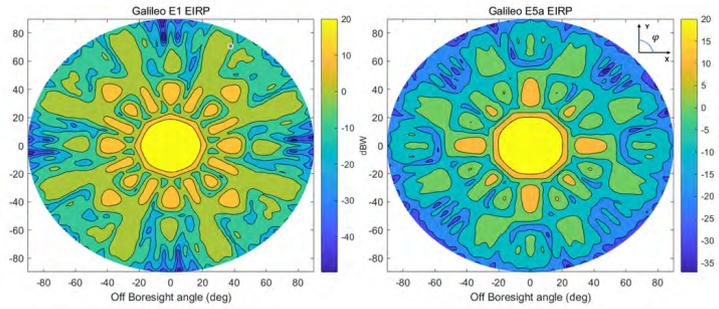


Fig. 4. Galileo FOC E1/E5a EIRP.

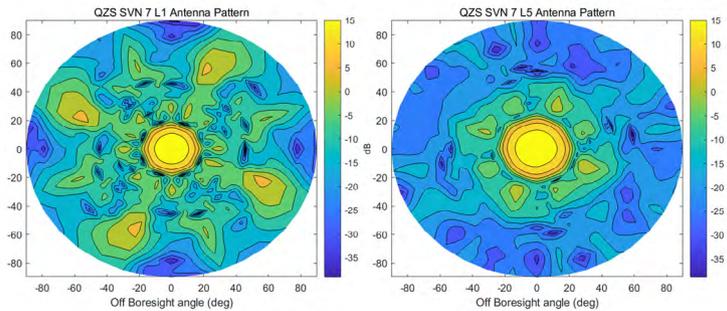


Fig. 5. QZSS L1/L5 antenna gain pattern.

Table 2. Signal transmission power per signal.

| System | Signal 1 | Power (dBW) | Power share (dBW) | Signal 2 | Power (dBW) | Power share (dBW) | Note |
|---------|----------|-------------|-------------------|----------|-------------|-------------------|---------------|
| GPS | L1CA | 16.53 | 0 | L5-I | 18.03 | 0 | GPS Block III |
| GLONASS | G1CA | 16.53 | 0 | G2CA | 18.03 | 0 | GPS Block III |
| Galileo | E1-B | EIRP | 3 | E5a-I | EIRP | 3 | FOC |
| BDS | B1I | 15 | 0 | B3I | 15 | 0 | BDS3 |
| QZSS | L1CA | 14.1 | 0 | L5-I | 15.6 | 0 | - |
| IRNSS | L5-SPS | 14.1 | 0 | - | - | - | QZSS L1CA |

(Teunissen & Montenbruck 2017).

QZSS는 GPS와 유사하게 안테나 이득 패턴 정보를 공개하고 있다 (Cabinet Office 2023). Fig. 5는 QZSS L1과 L5 신호의 안테나 이득 패턴을 나타낸다. QZSS 위성의 L1CA 신호 출력 세기는 QZSS 기반 Geostationary Earth Orbit (GEO) 궤도 결정 시뮬레이션 연구에서 사용된 값을 참조하였다 (Nakajima & Yamamoto 2024). GPS, Galileo, QZSS를 제외한 나머지 위성군에 대한 EIRP 관련 시뮬레이션 설정 파라미터는 위성 궤도 형상에 따라 GPS, QZSS 위성군의 데이터를 활용하였다. GLONASS의 위성 신호 출력 세기와 안테나 이득 정보는 GPS Block III 정보를 활용하였고 BDS 위성군의 신호 출력 세기는 BDS3 Medium Earth Orbit (MEO) 위성의 B3I 신호 출력 세기를 일괄적으로 적용하였다 (Wang et al. 2022). BDS 위성군은 MEO, Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO), GEO로 구성되어 있으므로 MEO는 GPS Block III, IGSO와 GEO는 QZSS Block II와 Block III 위성 안테나 정보를 각각 활용하였다. 마지막으로 IRNSS의 출력 세기는 QZSS L1CA와 동일하다고 가정하였으며, IRNSS는 IGSO와 GEO로 구성되어 BDS와 마찬가지로 안테나 이득 정보는 QZSS

Table 3. Antenna gain pattern per signal.

| System | Signal 1 | ANT | Signal 2 | ANT | Note |
|----------|----------|---------|----------|---------|---------------------|
| GPS | L1CA | GPS L1 | L5-I | GPS L5 | GPS Block III |
| GLONASS | G1CA | GPS L1 | G2CA | GPS L5 | GPS Block III |
| Galileo | E1-B | EIRP | E5a-I | EIRP | FOC |
| BDS MEO | B1I | GPS L1 | B3I | GPS L5 | GPS Block III |
| BDS IGSO | B1I | QZSS L1 | B3I | QZSS L5 | QZSS Block II & III |
| BDS GEO | B1I | QZSS L1 | B3I | QZSS L5 | QZSS Block II & III |
| QZSS | L1CA | QZSS L1 | L5-I | QZSS L5 | QZSS Block II & III |
| IRNSS | L5-SPS | QZSS L5 | - | - | QZSS Block II & III |

Block II와 Block III 정보를 각각 활용하였다. 상세한 내용은 Tables 2와 3에 정리하였다.

2.3 Satellite Attitude

지구 GNSS 위성의 위성 자세 모델은 일반적으로 Yaw-steering 자세 모델과 Orbit-normal으로 분류된다 (Montenbruck et al. 2015). Yaw-steering 자세 모델은 Fig. 6과 같이 GNSS 위성의 방송용 안테나가 항상 지구 중심을 향한 상태로 안테나

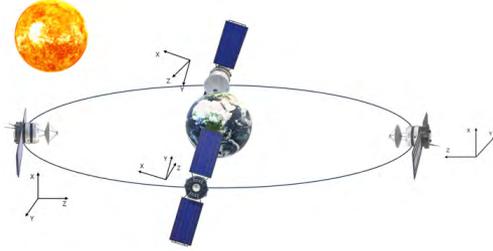


Fig. 6. Yaw-steering attitude model.

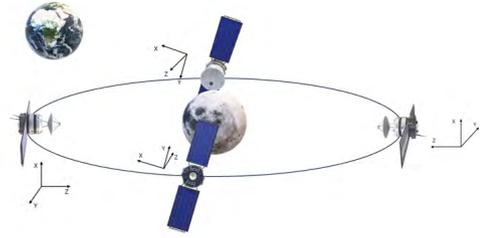


Fig. 7. GNSS-like yaw-steering attitude model.

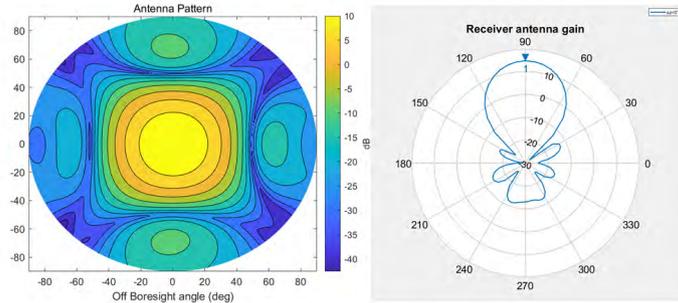


Fig. 8. Receiver L1 antenna gain pattern.

Boresight 방향을 회전축으로 회전하는 자세 모델이다. Yaw-steering 자세 모델에 있는 위성은 태양 전지판의 회전축이 태양 방향과 수직이 되도록 안테나 Boresight 방향에 대해 회전한다. International GNSS Service (IGS)에서 정의하는 위성 동체 좌표계는 Z축을 안테나 Boresight 방향, Y축을 위성 태양 전지판의 회전축으로 정의한다 (Montenbruck et al. 2015). Yaw-steering 자세 모델은 일반적으로 MEO, IGSO 위성에서 평상시 자세 모델로 사용한다. 또한 태양이 가려지는 특수한 상황에서는 위성별로 특별한 기동을 수행하는데, 본 논문에서는 모든 MEO, IGSO 위성은 Yaw-steering 자세 모델을 유지한다고 가정하였다.

Orbit-normal 자세 모델은 태양의 위치와 상관없이 IGS에서 정의하는 위성 동체의 좌표계상 Y축이 위성 궤도면과 항상 수직인 상태로 고정되어 있다. 일반적으로 GEO 위성이 해당 자세 모델을 사용하므로, 본 논문에서도 GEO 위성은 orbit-normal 자세 모델을 적용하였다.

달 환경에서 지구 GNSS 신호를 활용하는 방안에 대해 분석하는 많은 문헌에서 GNSS 신호 수신 안테나를 항상 지구 중심을 향하는 상황을 가정한다 (Winternitz et al. 2019, Delépaut et al. 2020, Giordano et al. 2021b). 지구 GNSS 신호 가용성을 확인하고 정확한 위치 결정을 수행하는 목적으로는 안테나가 항상 지구 중심을 향하는 것이 가장 적합하다. 하지만 지구 GNSS 위성과 같이 달 위성이 항법 위성으로 역할을 수행한다면 앞서 설명한 두 가지 자세 모델과 유사한 자세 모델을 가질 가능성이 있으며, 이 경우 GNSS 안테나가 항상 지구 중심을 향하는 것은 제한이 있을 수 있다. 본 논문에서는 지구 GNSS 가시성 확보와 달 위성 항법 서비스 제공이라는 두 가지 측면을 고려하여, 지구 GNSS 위성의 Yaw-steering 자세 모델과 유사한 자세 모델을 정의하여 시뮬레이션에 적용하였다. Fig. 6에서 지구 위성의 Yaw-steering 자세

모델의 경우, 위성 동체 X 축의 + 방향이 YZ 평면을 기준으로 태양이 있는 방향으로 향하게 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성에서 착안하여 태양 대신 지구 방향과 위성 동체의 Y축이 수직이 되도록 하는 Yaw-steering 자세 모델을 정의하였고 Eqs. (3-5)와 같다.

$$\vec{e}_z = -\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (3)$$

$$\vec{e}_y = \frac{\vec{e}_{Sat \rightarrow Earth} \times \vec{r}}{|\vec{e}_{Sat \rightarrow Earth} \times \vec{r}|} \quad (4)$$

$$\vec{e}_x = \vec{e}_y \times \vec{e}_z \quad (5)$$

여기서 \vec{r} 는 달에 대한 달 위성의 상대 벡터이고 $\vec{e}_{Sat \rightarrow Earth}$ 는 달 위성에서 지구로의 단위 벡터를 의미한다. Fig. 7은 달 위성의 달 주변 지점별 위성 자세를 시각적으로 나타낸다. 이러한 자세 모델을 가지는 달 위성의 지구 GNSS 수신 안테나는 위성 동체의 +X 방향을 Boresight 방향으로 부착되어 있다고 설정하였다. 수신 안테나는 2x2 Microstrip patch antenna array를 사용한다고 가정하였으며, Fig. 8은 L1 신호의 수신 안테나 이득 패턴을 시각화한 것이다.

2.4 Data Demodulation

GNSS 항법 신호를 측정치로 활용하기 위해서는 해당 신호를 송신한 위성에 대한 위치 및 위성 시계에 대한 정보를 알고 있어야 한다. Fig. 9는 달 위성이 지구 GNSS 항법 신호로부터 측정치를 얻는 과정을 간략하게 나타낸다. GNSS 반송파 신호에는 위성의 위치정보와 시계오차 정보와 같이 항법에 반드시 필요한 정보와 알마낙과 같이 항법에 반드시 필요하지는 않지만 도움이 되

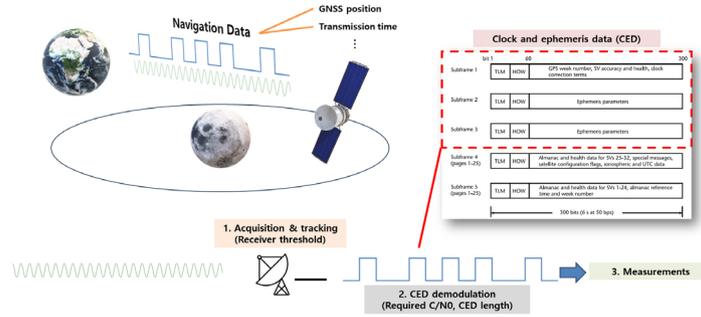


Fig. 9. Acquisition of signals and CED demodulation.

Table 4. Robustness of each navigation message.

| System | Ephemeris | Required C/N0 (dB-Hz) | Note | Ephemeris | Required C/N0 (dB-Hz) | Note |
|---------|-----------|-----------------------|------|-----------|-----------------------|------|
| GPS | LNAV | 24.9 | - | CNAV | 23.6 | - |
| GLONASS | NAV | 26.36 | - | - | - | - |
| Galileo | INAV | 27.4 | - | FNAV | 20.6 | - |
| BDS | D1 | 24.7 | - | D2 | 34.7 | - |
| QZSS | LNAV | 24.9 | GPS | CNAV | 23.6 | GPS |
| IRNSS | SPS | 21.1 | - | - | - | - |

는 정보가 항법 메시지 형태로 함께 포함되어 있다. 전체 항법 메시지를 수신하는 데에는 GPS LICA에서 제공하는 LNAV의 경우 12.5분이 필요하며, 대부분의 항법 메시지가 전체 데이터를 받기 위해서는 상당한 시간이 필요하다. 그러나 항법에 필요한 CED 정보를 수신하기 위해 전체 항법 메시지를 모두 받을 필요는 없으며, 모든 항법 메시지가 CED 정보를 효율적으로 제공하기 위해 일정한 주기를 가지고 방송된다 (Kim et al. 2024a).

달 위성에 탑재된 GNSS 수신기가 감지할 수 있는 세기보다 높아 GNSS 신호 획득에 성공한 후에는 복조 과정을 통해 반송파에 실려 있는 항법 메시지를 획득한다. 복조 과정에서 CED에 오류가 발생할 수 있으며, 이 경우 해당 CED는 위치 결정에 사용할 수 없다. 항법 메시지의 성능 평가 지표 중 하나로 CED error rate을 사용하는데, 이로부터 특정 항법 메시지의 CED를 복조하는데 필요한 최소 신호 수신 세기를 판단할 수 있다 (Anghileri et al. 2013, Noh et al. 2022, Dafesh et al. 2025). CED error rate은 CED를 수신하는 동안 CED 데이터에서 오류가 발생할 확률을 의미하며, 이 확률이 일정 수준 이하가 되는 수신 세기를 항법 메시지 수신을 위한 최소 수신 세기로 사용한다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 CED 데이터는 주기적으로 반복 방송되며, 항법 메시지 종류별로 정해진 데이터 길이가 있지만 메시지 종류별로 조금씩 다른 길이를 가지고 있고 데이터를 수신하는 데에 걸리는 시간은 신호를 수신한 시점에 영향을 받으므로 시뮬레이션에서 CED 데이터를 수신하는데 필요한 최소 시간에 대한 분석이 필요하다. Noh et al. (2022)는 Anghileri et al. (2013)의 연구를 참고하여 주요 GNSS 위성군 신호의 항법 메시지별 CED error rate에 따른 최소 신호 수신 세기와 최소 수신 시간을 각각 Robustness와 Time-to-first-fix-data (TTFFD) 지표로 분석하였다. Tables 4와 5에 시뮬레이션에서 가시 위성 판별을 위해 적용한 항법 메시지 종류별 최소 수신 세기 및 최소 수신 시간을 정리하였다.

Noh et al. (2022)의 연구에서 분석되지 않은 GLONASS와 QZSS 위성군 신호에 대해서 GLONASS의 경우 최소 수신 신호

Table 5. TTFFD of each navigation message.

| System | Ephemeris | TTFFD (s) | Note | Ephemeris | TTFFD (s) | Note |
|---------|-----------|-----------|------|-----------|-----------|------|
| GPS | LNAV | 35.5 | - | CNAV | 29.6 | - |
| GLONASS | NAV | 30 | - | - | - | - |
| Galileo | INAV | 31.6 | - | FNAV | 59.4 | - |
| BDS | D1 | 35.5 | - | D2 | 35.5 | - |
| QZSS | LNAV | 35.5 | GPS | CNAV | 29.6 | GPS |
| IRNSS | SPS | 59.2 | - | - | - | - |

세기를 Dafesh et al. (2025)에서 항법 메시지 및 신호 설계 과정에서 사용한 수식으로 부터 Bit Error Rate (BER)을 계산하였으며, TTFFD는 GLONASS NAV 메시지의 CED 길이와 같다고 가정하였다. QZSS의 LICA LNAV, L5-I CNAV는 구조와 형태가 GPS와 유사하므로 GPS와 같다고 가정하였다. 마지막으로 BDS는 BII와 B3I 신호에서 D1, D2 항법 메시지를 제공하는데 MEO, IGSO 위성은 D1 항법 메시지를 방송하며, GEO 위성은 D2 항법 메시지를 제공한다 (CSNO 2019). BDS GEO 위성의 D2 전송 속도는 500 bps로 50 bps인 D1 보다 10배 빠른 속도로 제공된다. 전송 속도가 더 빠른 D2에 대해서는 Noh et al. (2022)에서 분석한 D1 최소 수신 세기 결과에서 전송 속도 증가에 따른 BER 증가 영향을 반영하여 산정하였다 (Anghileri et al. 2013). D1과 D2의 CED 구조와 방송 주기는 유사하므로 D1 TTFFD 결과를 D2에 동일하게 적용하였다. 시뮬레이션에서 가시 위성을 판단하기 위해 수신된 신호가 수신기 최소 수신 세기 보다 높으며, 동시에 유효한 항법 메시지가 있는지 확인한다. 수신기가 신호를 획득하였으나 유효한 항법 메시지가 없는 경우 앞서 설명한 기준을 통해 CED 복조 가능성을 판단하여 최종적으로 가시성을 결정한다. CED 복조 가능성은 수신된 신호의 세기가 수신되고 있는 신호가 제공하는 항법 메시지의 Robustness를 만족하는 최소 수신 세기보다 같거나 높은 최초의 시점에서 연속적으로 TTFFD 시간 동안 유지되는지를 확인한다. 다시 말해서 항법 메시지의 Robustness를 만족하는 최소 수신 세기이상의 신호 세기가 TTFFD 동안 유지되면 해당 신

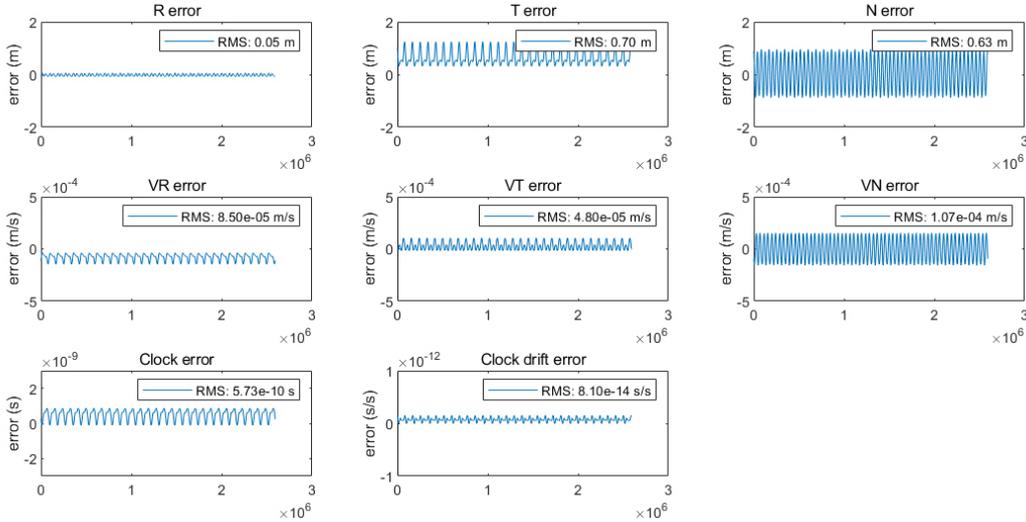


Fig. 10. Modeled ephemeris errors of GPS Block III.

호는 항법 메시지를 수신한 것으로 간주한다. 그 이후로 해당 항법 메시지의 유효 기간 동안 신호의 세기가 수신기 민감도 보다 높다면 해당 신호를 송신한 위성은 가시 위성으로 판단한다.

3. MEASUREMENT ERROR MODELING

3.1 Satellite CED Error

가시위성에 대한 측정치 생성에서 고려된 오차 성분은 GNSS 위성의 방송궤도력 또는 CED 오차, 전리층 지연, 사용자 시계 오차 그리고 측정치 잡음이다. 이 중에서 GNSS 위성의 방송궤도력 오차는 실제 방송궤도력으로 구한 위성 위치 및 시계 정보와 정밀궤도력으로 구한 위성 위치 및 시계 정보의 오차를 주기 함수 형태로 모델링하여 사용하였다. Eq. (6)은 방송궤도력 위성 위치 오차와 위성 시계 오차를 모델링하기 위해 Curve fitting에 사용된 주기 함수이다 (Long & Stacey 2025).

$$e(t) = A(0) + \sum_{i=1}^N \left[A(2i - 1) \cos\left(\frac{2\pi}{T_i} t\right) + A(2i) \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} t\right) \right] \quad (6)$$

여기서 $A(i)$ 는 주기 함수에서 curve fitting을 통해 얻는 계수이고, T_i 는 모델링하고자 하는 함수의 주기이다. 하루 간격의 데이터를 curve fitting하여 계수 정보를 처리하고, 계수 정보를 여러 날짜에 대해 저장하여 궤도 결정 시뮬레이션에서 임의의 날짜의 계수 정보를 사용하도록 설정해 GNSS 위성의 방송궤도력 오차를 반영하였다. Fig. 10은 GPS Block III 위성의 방송궤도력 오차를 계수로 도출한 뒤에 이를 다시 주기 함수를 통해 계산한 결과이다.

3.2 Ionospheric Error

지구 GNSS 위성에서 달 위성으로 도달하는 신호가 전리층을 통과하는 비율이 상대적으로 작을 수 있으나 신호가 전리층을 2

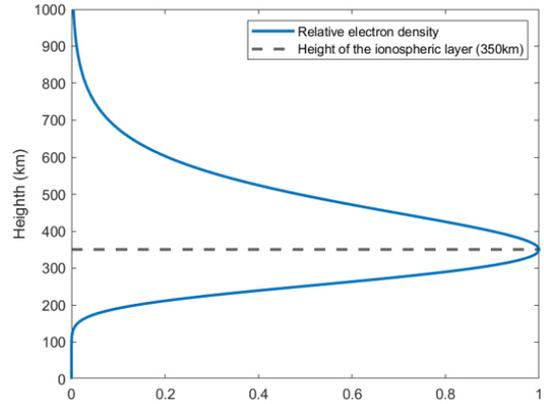


Fig. 11. Relative electron density from modified Chapman profile.

번 통과하게 된다면 그 오차는 지상 사용자의 경우보다 훨씬 큰 값을 가질 수 있다. 일반적으로 지상 사용자는 전리층을 특정 고도에 위치한 얇은 하나의 막형태로 모델링하여 값을 산출할 수 있지만, 다음과 같이 전리층을 2번 통과하는 경우 해당 모델로 전리층을 모델링하는 것은 불가능하다. 그러므로 본 논문에서는 특정 고도에 위치한 전리층의 최고 전자 밀도 값으로 전체 고도 영역으로 모델링하는 Modified Chapman profile로 고도에 따른 전자 밀도를 모델링하여 GNSS 위성 신호 벡터가 통과하는 전리층 영역의 전자 밀도를 계산하고 이를 수치적으로 적분하는 방식으로 전리층 지연을 측정치 생성에 포함하였다 (Long & Stacey 2025). Fig. 11은 modified Chapman profile로 고도 350 km를 기준으로 고도 1000 km까지 전자 밀도 비율을 모델링한 예시를 나타낸다. 최대 전자 밀도의 고도와 전리층 영역은 사용자 입력으로 변경할 수 있다. Fig. 12는 전리층 지연 계산 결과의 예시를 나타낸다. 적계는 수십 m에서 크계는 수백 m 수준까지 전리층 지연의 영향이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전리층 지연에 의한 오차 포함시 가시위성의 극단적인 치우침으로 인해 측위오차가 매

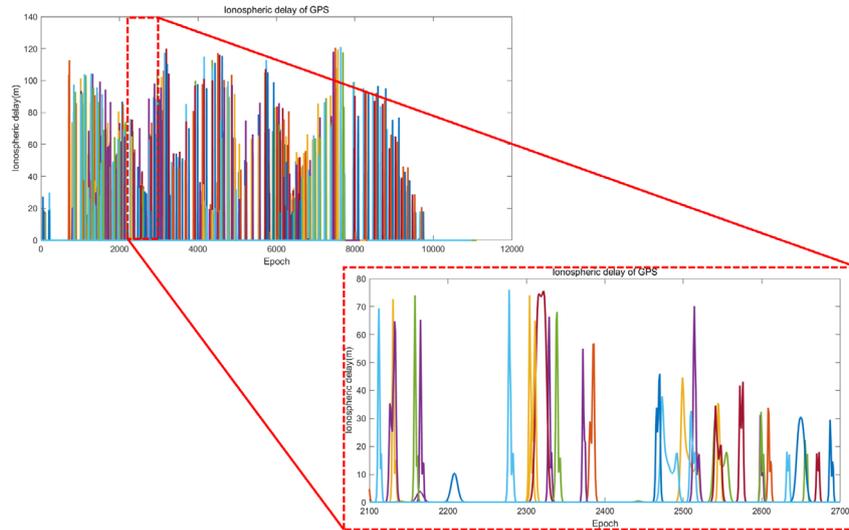


Fig. 12. Ionospheric delay calculation result.

우 커질 가능성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 궤도 결정시 방송 궤도력으로 구한 지구 GNSS 위성 위치와 추정된 달 위성의 위치로부터 지구 고도 500 km 이내 영역을 통과하는 신호는 배제함으로써 전리층 지연이 포함된 측정치는 제외하도록 하였다.

3.3 User Clock Error

사용자 시계 오차는 2차 방정식 형태 모델에 시계 오차의 랜덤 특성을 반영하도록 Eq. (7) 형태로 모델링하였다 (Long & Stacey 2025).

$$\begin{bmatrix} \delta t(t_{k+1}) \\ \delta \dot{t}(t_{k+1}) \\ \delta \ddot{t}(t_{k+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & \frac{\Delta T^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta t(t_k) \\ \delta \dot{t}(t_k) \\ \delta \ddot{t}(t_k) \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 δt , $\delta \dot{t}$, $\delta \ddot{t}$ 는 시계 오차, 시계 오차의 변화율 그리고 시계 오차 가속도 항이다. ΔT 시간 간격 뒤에 시계 오차 상태 벡터는 기본적으로 2차 방정식 형태로 구성되며, 랜덤 특성은 표준 정규 분포를 따르는 랜덤 변수로 이루어진 벡터 $[\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3]^T$ 와 process noise 공분산 행렬 P 로부터 얻어진다. L 은 대칭인 행렬 P 가 있을 때, P 행렬을 Eq. (8)과 같이 Cholesky 분해하여 얻어지는 상삼각 행렬이다 (Bhattarai 2015, Long & Stacey 2025).

$$P = LL^T = \begin{bmatrix} q_1 \Delta T + q_2 \frac{\Delta T^3}{3} + q_3 \frac{\Delta T^5}{20} & q_2 \frac{\Delta T^2}{2} + q_3 \frac{\Delta T^4}{8} & q_3 \frac{\Delta T^3}{6} \\ q_2 \frac{\Delta T^2}{2} + q_3 \frac{\Delta T^4}{8} & q_2 \Delta T + q_3 \frac{\Delta T^3}{3} & q_3 \frac{\Delta T^2}{2} \\ q_3 \frac{\Delta T^3}{6} & q_3 \frac{\Delta T^2}{2} & q_3 \Delta T \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 q_1 은 시계 오차의 process noise 분산의 변화율, q_2 는 시계 오차 변화율 process noise 분산의 변화율 그리고 q_3 는 시계 오차 가속도 process noise 분산의 변화율이다. 순서대로 시계의 랜덤 특성 중에서 frequency white noise, frequency random walk 그리고 frequency random run과 관련되어 있다. 본 논문에서 달 위

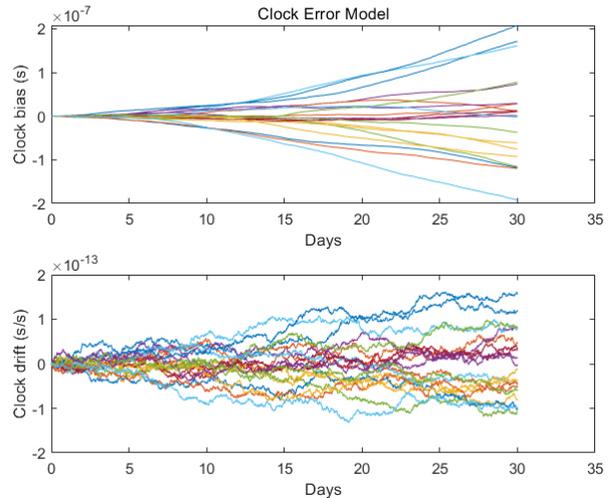


Fig. 13. Result of rubidium atomic clock error modeling.

성은 루비듐 원자 시계를 사용한다고 가정한다. Fig. 13은 루비듐 원자 시계를 가정하고 시계 오차 상태 벡터를 시간에 대해 전파한 예시 결과를 도시한다.

3.4 Measurement Noise Error

가시 위성에 대한 측정치 생성 부분에서 의사거리 측정치 그리고 의사거리 변화율 또는 도플러 측정치를 고려한다. 의사거리 측정치의 측정치 잡음은 의사거리 측정치 복조 방법별 Delay Lock Loop (DLL) thermal noise jitter로 모델링한다. DLL thermal noise jitter 모델로 얻은 표준편차 정규분포를 따르는 잡음을 측정치에 포함한다. GPS LICA와 같이 Binary Phase-Shift Keying (BPSK) 복조 방식을 사용하는 측정치는 Eq. (9)와 같이 모델링할 수 있다 (Kaplan & Hegarty 2017).

Table 6. Receiver parameters.

| Parameter | Value |
|-------------|----------------------|
| B_n | 0.5 Hz |
| T | 0.02 s |
| D | 0.3 chips |
| $B_{fc,L1}$ | $2 \cdot 12.276$ MHz |
| $B_{fc,L5}$ | $2 \cdot 10.23$ MHz |

$$\sigma_{DLL,BPSK} = \begin{cases} c \cdot T_c \sqrt{\frac{B_n}{2 \frac{C}{N_0}} D \left[1 + \frac{2}{T \frac{C}{N_0} (2-D)} \right]}, D \geq \frac{\pi R_c}{B_{fe}} \\ c \cdot T_c \sqrt{\frac{B_n}{2 \frac{C}{N_0}} \left(\frac{1}{B_{fe} T_c} + \frac{B_{fe} T_c}{\pi - 1} \left(D - \frac{1}{B_{fe} T_c} \right)^2 \right) \left[1 + \frac{2}{T \frac{C}{N_0} (2-D)} \right]}, \frac{R_c}{B_{fe}} < D < \frac{\pi R_c}{B_{fe}} \\ c \cdot T_c \sqrt{\frac{B_n}{2 \frac{C}{N_0}} \left(\frac{1}{B_{fe} T_c} \right) \left[1 + \frac{1}{T \frac{C}{N_0}} \right]}, D \leq \frac{R_c}{B_{fe}} \end{cases} \quad (9)$$

BPSK 방식 이외에 Binary Offset Carrier (BOC), Composite Binary Offset Carrier (CBOC) 방식을 사용하는 측정치의 잡음 모델은 모두 BOC thermal noise jitter를 사용한다 (Julien et al. 2010, Jin et al. 2012, Teunissen & Montenbruck 2017). BOC의 thermal noise jitter는 Eq. (10)과 같다.

$$\sigma_{DLL,BOC(n,m)} = c \cdot T_c \sqrt{\frac{B_n}{2 \left(4 \frac{n}{m} - 1 \right) \frac{C}{N_0}} D \left[1 + \frac{1}{T \frac{C}{N_0}} \right]} \quad (10)$$

마지막으로 도플러 측정치 생성에서는 측정치 잡음 모델로 Frequency Lock Loop (FLL) thermal noise jitter를 사용하였으며, Eq. (11)과 같다 (Kaplan & Hegarty 2017).

$$\sigma_{FLL} = \frac{\lambda_L}{2\pi T} \sqrt{\frac{4FB_n}{\frac{C}{N_0}} \left[1 + \frac{1}{T \frac{C}{N_0}} \right]} \quad (11)$$

여기서 B_n 은 Loop noise bandwidth, $\frac{C}{N_0}$ 는 Hz 단위로 표시된 측정치 대 잡음비, T 는 predetection integration time, D 는 early-to-late correlator spacing, λ_L 은 반송파 파장 길이, B_n 은 double-sided front-end bandwidth, T_c 는 chip period, R_c 는 chipping rate 그리고 c 는 빛의 속도이다. 본 논문의 시뮬레이션에서 설정한 달 위성의 GNSS 수신기는 WeakHEO 그리고 LuGRE 수신기 파라미터를 참조하였으며, Table 6에 정리하였다 (Capuano et al. 2016, Parker et al. 2022). 본 논문에서 L5와 같이 Data 신호인 I와 Pilot 신호인 Q를 모두 제공하는 신호에 대해서는 I 신호만 사용한다고 가정하였으며, Pilot 신호 사용에 따른 predilection integration time 증가는 구분 없이 Table 6에서 제시한 값을 모두

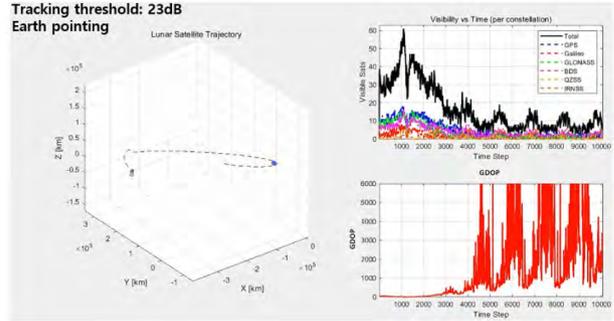


Fig. 14. Satellite visibility and GDOP variation during Lunar transfer.

동일하게 적용하였다. 또한 Table 6에서 double-sided front-end bandwidth는 L1과 L5에 대해서만 제시하였으나 실제 시뮬레이션에서 B1, B3, G1, G2와 같이 다른 주파수 영역의 신호에 대한 값도 따로 지정하여 진행하였다.

4. EKF BASED ORBIT DETERMINATION

Fig. 14는 지구에서 달로 이동하는 과정 동안 지구 GNSS 위성 가시성과 가시 위성수에 따른 Geometric Dilution of Precision (GDOP)를 시뮬레이션한 것이다. 본 시뮬레이션은 궤도 결정과는 무관하게 지구에서 달까지 이동하는 동안 달 위성이 경험하는 지구 GNSS 신호 수신 환경을 도시하기 위해 진행하였다. 그러므로 해당 시뮬레이션에서 항법 메시지 복조는 고려하지 않았으며, 신호의 수신 세기가 수신기 민감도 이상인 경우 가시 위성으로 판단하였다. 수신기 민감도는 23 dB-Hz로 설정하였고, 지구 GNSS 수신 안테나는 항상 지구 중심을 향하는 상황으로 진행하였다. 결과 그래프로부터 알 수 있는 바와 같이 위성의 위치가 달 근처에 도달한 지점에서 가시 위성수가 희박하고, GDOP는 수천 정도의 값을 가진다. 이러한 GDOP로부터 측정치에 포함된 m 수준의 오차가 위성의 위치 오차에서는 km 수준으로 영향을 미칠 수도 있다. 측정치 단독으로 least square 기반 위치 결정을 달 궤도 결정에서 사용하기에는 정확도가 심각하게 떨어질 수 있다 (Capuano et al. 2016).

그러므로 측정치 단독 least square 기반 위성 궤도 결정 방식 대신 측정치와 위성 역학 모델을 함께 결합하는 EKF 기반 궤도 결정 방식을 사용한다. 달 궤도 환경과 같이 위성 가시성이 열악 하면서 신호의 기하학적 분포가 좋지 않은 상황에서도 역학 모델 기반 궤도 예측 과정으로 안정적으로 궤도 결정을 수행한다.

궤도 추정에서 추정하고자 하는 상태 벡터는 Eq. (12)와 같이 정의한다.

$$\vec{X} = [x \ y \ z \ v_x \ v_y \ v_z \ C_r \ \delta t_1 \ \dots \ \delta t_n \ \delta t]^T \quad (12)$$

순서대로 위성 위치, 위성 속도이며, C_r 은 태양 복사압 계수이다. δt_i 은 GPS L1CA 측정치 바이어스가 동화된 사용자 시계 오차를 나타내며, δt_n 까지 Table 1에 정리한 측정치 종류만큼 측정치 바이어스가 동화된 사용자 시계 오차가 추정 변수로 정의된다. 이러

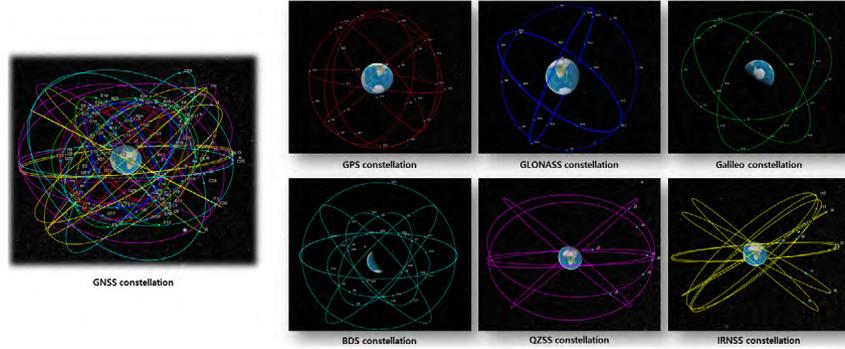


Fig. 15. GNSS constellation in simulation.

한 이유로는 측정치 종류별로 위성고 수신기 모두 고유한 하드웨어 바이어스를 가지게 되는데, 이러한 바이어스는 직접적인 추정 이 어렵고 수신기 바이어스는 추정 과정에서 사용자 시계 오차에 동화된다 (Teunissen & Montenbruck 2017). 또한 위성군 시스템 사이에도 시계오차에 동화된 측정치 바이어스가 존재한다. 마지막 으로 δt 는 사용자 시계 오차 변화율이다.

EKF는 time update 과정과 measurement update 과정을 반복적으로 수행하며, time update 과정에서 궤도 예측을 진행하고 time update에서 발생한 예측 오차를 measurements update 과정에서 측정치를 통해 보상한다. EKF time update에서 위성 위치와 속도는 수치 적분으로 계산하고 상태 벡터에 대한 공분산 행렬을 함께 예측하며 Eqs. (13, 14)와 같다.

$$\hat{X}_{k+1}^- = f(\hat{X}_k) \tag{13}$$

$$P_{k+1}^- = \Phi(k+1, k)P_k\Phi(k+1, k)^T + Q \tag{14}$$

여기서 상첨자 -는 예측 과정으로 얻어진 값을 의미한다. P 는 상태 벡터의 공분산 행렬이며, Q 는 프로세스 잡음 행렬이다. $\Phi(k+1, k)$ 는 이전 시점에서 다음 시점에서의 상태 천이 행렬이며, Eq. (15)와 같이 궤도 역학 부분과 시계 오차 부분으로 분류할 수 있다.

$$\Phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} \Phi(k+1, k)_{dynamics} & 0 \\ 0 & \Phi(k+1, k)_{clock} \end{bmatrix} \tag{15}$$

상태 천이 행렬 계산에서 위성 궤도 역학 부분은 비선형이므로 수치적 미분 방식을 통해 계산하였으며, 시계 오차 부분은 상태 벡터의 미분 방정식 계수 행렬을 선형화해서 계산하였다.

Measurement update 과정에서 사용된 측정치는 의사거리 및 도플러 측정치이며, Eqs. (16, 17)과 같이 모델링하여 관측 행렬 계산에 사용하였다.

$$\rho_{r,f}^s = d_r^s - \delta t_f^s + \delta t_{r,f} + \varepsilon \tag{16}$$

$$\dot{\rho}_{r,f}^s = \dot{d}_r^s - \dot{\delta} t^s + \dot{\delta} t_{r,f} + \epsilon \tag{17}$$

여기서 d_r^s 와 \dot{d}_r^s 는 각각 GNSS 위성과 달 위성 사이의 기하학적 거리와 거리의 변화율이며, δt_f^s 와 $\delta t_{r,f}$ 는 각각 GNSS 위성 시계 오차와 달 위성 시계 오차이다. 하첨자 r, f 는 각각 달 위성과 사용자 측

정치 종류를 의미한다. 상첨자 s 는 지구 GNSS 위성을 의미한다. 측정치 생성에서 전리층 지연에 의한 오차를 포함하였으나 궤도 결정 시뮬레이션에서는 이를 별도로 추정하거나 보상하지 않는다. 대신에 계산된 GNSS 위성 위치와 달 위성 위치로부터 신호 벡터가 전리층을 통과한다고 판단되는 측정치는 measurement update 과정에서 제외하고 관측행렬과 칼만 이득을 계산하였다. Measurement update 과정에서 칼만 이득 계산, 상태 벡터 업데이트 그리고 공분산 행렬 업데이트 일련의 과정은 Eqs. (18-20)과 같다.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \tag{18}$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (z_k - h(\hat{X}_k^-)) \tag{19}$$

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \tag{20}$$

여기서 K_k 는 칼만 이득, H 는 측정치 선형화를 수행한 관측 행렬, R 은 측정치 잡음 행렬 마지막으로 z_k 와 $h(\hat{X}_k^-)$ 는 각각 측정치 벡터와 측정치 모델링식으로부터 이를 예측 계산한 측정치 모델 벡터이다.

5. SIMULATION SETUP

Fig. 15는 시뮬레이션에서 가시성 분석과 궤도 결정을 위한 측정치 생성에 활용한 지구 GNSS 위성군 구성을 나타낸다. 위성군은 GPS, GLONASS, Galileo, BDS, QZSS, IRNSS 총 6개로 구성되어 있으며, 궤도 파라미터는 International Committee on GNSS (ICG) booklet에 기재되어 있는 위성군별 궤도 파라미터를 참조하였다(United Nations Office for Outer Space Affairs 2021). 총 위성수는 123개이며, 위성군별로 GPS 27개, GLONASS 24개, Galileo 24개, BDS 30개, QZSS 7개, IRNSS 11개로 구성된다.

마찬가지로 Fig. 16은 시뮬레이션에서 사용자에게 해당하는 달 위성의 두가지 궤도 형상을 나타낸다. Fig. 16의 왼쪽은 Elliptical Lunar Frozen Orbit (ELFO), 오른쪽은 Near Rectilinear Halo Orbit (NRHO)로 두 궤도 모두 큰 이심률을 가진다. ELFO는 JAXA에서 실제로 계획중인 LNSS 위성군의 후보 궤도 파라미터 중 하나를 참조하였으며, NRHO는 Lunar gateway의 임무 궤

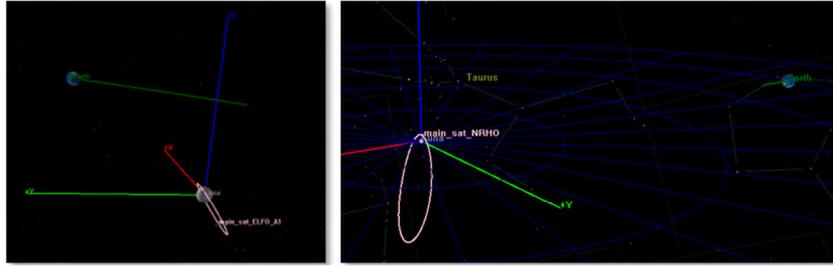


Fig. 16. Lunar satellite in ELFO (left) and in NRHO (right).

Table 7. Dynamic model.

| Parameter | True trajectory | Prediction |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Gravitational potential | 10 Degree 10 Order LP165P | 4 Degree 4 Order LP165P |
| Third body attraction | Sun, Earth, Jupiter, Mars, Venus | Sun, Earth |
| Solar radiation pressure | Yes | Yes |

도 후보 중 하나를 선택하여 활용하였다 (Williams et al. 2017, Murata et al. 2024). 궤도 주기는 ELFO가 약 12시간, NRHO가 약 7일을 가진다.

시뮬레이션은 총 30일의 기간에 대해 진행하였으며, 위성의 자세 모델은 앞서 설명했던 것과 같이 지구 GNSS와 유사한 Yaw-steering 모델을 가지는 것으로 가정하였으며, 지구 GNSS 위성 신호 수신 안테나는 위성 동체의 +X축 방향으로 부착되어 있는 것으로 가정하였다. 달에서 운영되는 위성이라는 특수성과 기술 적용 시점에 따른 진화를 고려하여 위성의 수신기 민감도는 앞선 지구-달 이동 시뮬레이션과 달리 15 dB-Hz로 설정하였으며, 측정치 생성시 앞서 설명한 기준에 따라 항법 메시지 복조를 추가적으로 고려하였다. Table 7은 측정치 생성에서 사용한 달 위성의 실제 궤적을 전파하는데 적용한 역학 모델과 궤도 결정 시뮬레이션에서 EKF time update 때 궤도 예측으로 적용한 역학 모델의 차이를 도시한다. 실제 궤도의 궤적을 전파하는데 적용한 역학 모델보다 궤도 예측에서 적용한 역학 모델을 의도적으로 열하시켜 모델의 부정확성에 의한 영향을 고려할 수 있도록 하였다.

6. SIMULATION RESULTS

6.1 Satellite Visibility Results

먼저 Figs. 17과 18은 각각 NRHO에서 30일 시뮬레이션 기간 동안 위성군별 신호 종류별 평균 가시 위성수와 전체 위성군에 대한 평균 가시 위성수를 나타낸다. 마찬가지로 Figs. 19와 20은 같은 결과를 ELFO에 대해 도시한 것이다. 시뮬레이션 결과, NRHO에서의 평균 가시 위성 수는 6.401개로 나타났으며, ELFO에서는 3.596개로 나타나, NRHO가 ELFO에 비해서 약 2,805개(약 78%) 더 많은 가시 위성수를 가진다. 다시 말해, NRHO는 ELFO 대비 GNSS 위성 가시성이 약 1.78배 향상된 결과를 나타낸다. 이러한 이유는 궤도 형상에서 알 수 있으며 Fig. 16에서 ELFO는 지구의 위치와 관계없이 궤도면이 달 관성 좌표계에서 항상 일정한 방향

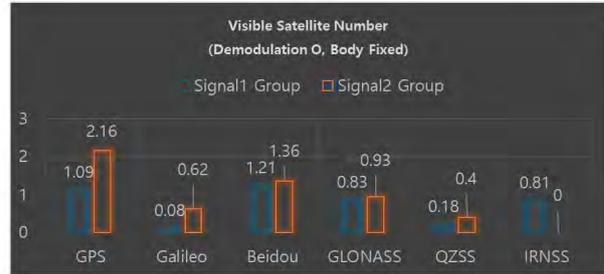


Fig. 17. Satellite visibility from NRHO for each GNSS constellation.

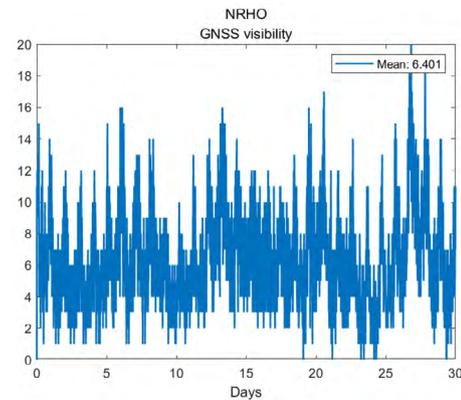


Fig. 18. Mean satellite visibility from NRHO.

을 향하고 있다. 그에 반해 NRHO는 궤도면이 항상 지구 방향을 향하게 되는데, 이러한 특성으로 NRHO는 ELFO보다 상대적으로 지구 GNSS 위성 가시성 확보에 있어 유리하다고 볼 수 있다.

그리고 두 궤도 형상에서 공통적으로 Signal 2에 포함된 측정치가 Signal 1에 포함된 측정치 보다 상대적으로 높은 가시성을 나타낸다. Table 2에서 GPS L1, QZSS L1 신호의 출력 보다 L5 신호의 출력이 1.5 dBW 높게 설정되어 있는데, 최소 수신 세기가 L5에 대해 높게 설정되어 있는 ICD 문서의 내용을 따른 것이다. 이는 나중에 공개된 L5의 신호의 세기가 L1보다 높은 특성을 반영한다 (Hrbek et al. 2016). GPS, Galileo, QZSS를 제외한 나머지 위성군은 GPS, QZSS 위성군의 데이터를 활용하였기 때문에, 전반적으로 GPS 결과와 유사한 경향성을 나타내고, 위성 궤도의 상이성에 따른 기하학적인 차이만 반영된 결과라고 할 수 있다. 또한 Galileo에 비해 상대적으로 높은 가시성을 나타내는 것도 신

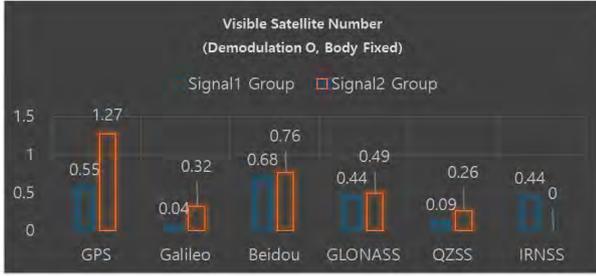


Fig. 19. Mean satellite visibility from ELFO.

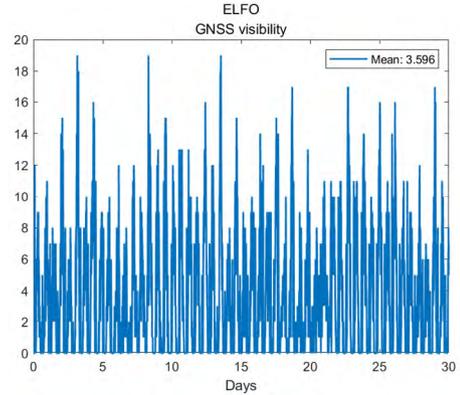


Fig. 20. Mean satellite visibility from ELFO.

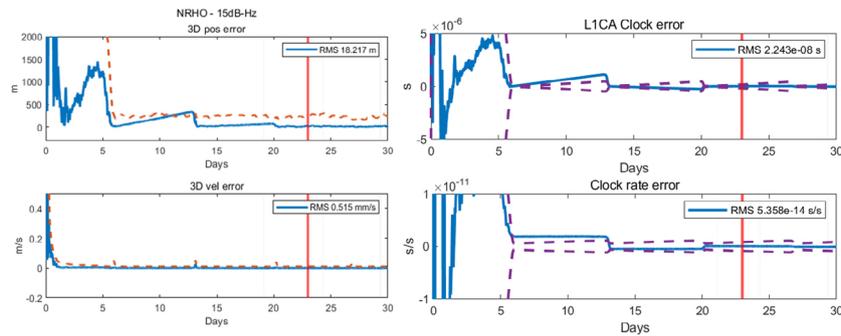


Fig. 21. Position and velocity errors (left) and clock errors (right) of NRHO.

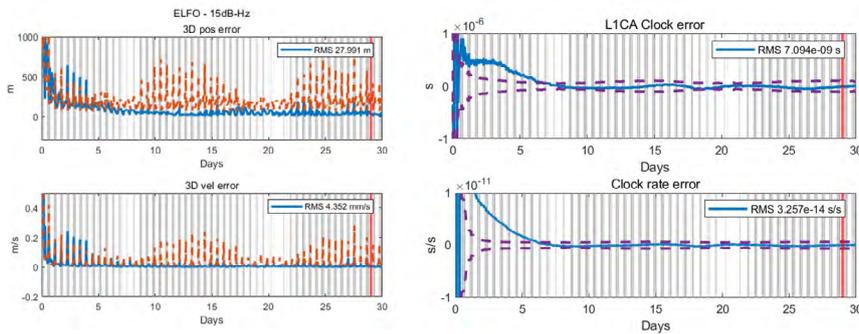


Fig. 22. Position and velocity errors (left) and clock errors (right) of ELFO.

호 출력과 관련한 파라미터를 GPS와 동일한 데이터를 적용하였기 때문이지, 실제 결과는 상이할 수 있다. 그리고 Eq. (1)에서 $20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda_f}\right)$ 는 자유 공간 신호 전파에 따른 신호 세기 감소를 나타내는데, 파장이 길수록 상대적으로 손실이 적게 나타난다. 그러므로 L1 보다 상대적으로 파장이 긴 L5 신호는 가시성 확보 측면에서 이점이 있다. 마지막으로 Table 4를 보면 Galileo의 경우 항법 메시지 복조를 고려하는 상황에서 E1-B로 방송되는 INAV보다 E5a-I로 방송되는 FNAV를 수신하기 위해 요구되는 최소 수신 신호 세기가 무려 7 dB-Hz 낮다. 그러므로 Galileo 역시 Signal 1 신호인 E1-B보다 Signal 2 신호인 E5a-I의 가시성이 상대적으로 높게 나타난다.

6.2 Orbit Determination Results

앞서 얻은 위성 가시성 환경을 가진 측정치 데이터를 가지고 EKF 기반 궤도 결정 시뮬레이션을 수행하였으며, Figs. 21과 22는 각각 NRHO와 ELFO의 궤도 결정 결과를 나타낸다. 각각의 그래프에서 왼쪽은 위성의 위치와 속도 오차를 도시하고, 오른쪽은 여러 위성 시계 오차 변수 중에서 GPS L1CA에 해당하는 시계 오차 결과와 시계 오차의 변화를 결과이다. 그래프에서 회색 음영은 위성의 가시성이 0인 구간을 의미하며, 파란 실선은 실제 오차 그리고 주황색, 보라색 점선은 공분산 행렬에서 얻은 표준편차 값의 3배인 3σ를 나타낸다. 마지막으로 붉은 세로 실선은 시뮬레

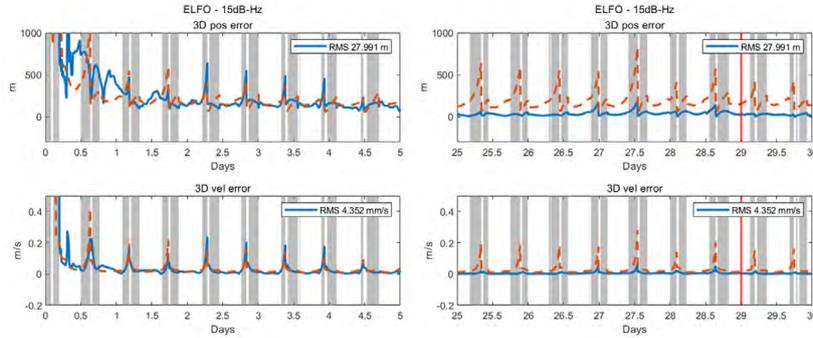


Fig. 23. Zoomed-in view of position and velocity errors of ELFO.

Table 8. Simulation results in RMS.

| Orbit | Position (m) | Velocity (mm/s) | Radial (m) | Along-track (m) | Cross-track (m) | LICA clock (ns) |
|-------|--------------|-----------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| NRHO | 18.22 | 0.52 | 11.90 | 12.33 | 6.19 | 22.43 |
| ELFO | 27.99 | 4.35 | 13.53 | 13.24 | 20.62 | 7.09 |

이선이 종료되는 시점에서 Root Mean Square (RMS) 값을 계산하기 시작한 시점을 나타내며, NRHO는 시뮬레이션 종료 7일 전 구간에 대해 RMS 값을 계산하였고, ELFO는 시뮬레이션 종료 1일 전 구간에 대해 RMS 값을 계산하였다. 두 궤도 형상에 대해 모두 위치는 50 m 이하 그리고 시계 오차는 30 ns 이하의 정확도를 보였다.

NRHO, ELFO 모두 이심률이 큰 궤도이며, 두 궤도 형상에 대한 위치 오차 결과를 보면 공통적인 특징이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 궤도 주기가 상대적으로 긴 NRHO의 결과 그래프인 Fig. 21을 보면 위치 오차가 궤도의 주기마다 계단 형태로 급격히 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 구체적으로 Fig. 21의 왼쪽 상단 그래프에서 시뮬레이션 시작 13일 부근에서 위치 오차가 약 330 m에서 6.5 m까지 급격히 줄어든다. 주기가 상대적으로 짧은 ELFO의 결과인 Fig. 22를 보면 시뮬레이션 초반 궤도 주기마다 NRHO와 동일하게 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 23은 ELFO의 결과 그래프를 확대한 것이며, ELFO에서는 위치와 속도 오차가 급격히 증가하는 지점 전후로 측정치가 아예 들어오지 못하다가 잠깐 측정치가 들어올 때 NRHO와 유사하게 오차가 빠르게 줄어든다. NRHO, ELFO 두 궤도에서 이러한 현상이 나타나는 지점은 달과 위성 사이의 거리가 가장 가까워지는 근월점 부근이며, 근월점 부근에서 위성의 기동이 빨라지면서 동시에 위성의 동역학적 특성도 빠르게 변하게 되고 이것이 필터의 빠른 수렴을 야기한다 (Winternitz et al. 2019). 하지만 반대로 속도 오차는 근월점 부근에서 크게 튀는 현상이 있는데, 이는 근월점 부근에서의 빠른 동역학적 특성으로 궤도 예측 오차가 오히려 크게 발생하는 영향으로 볼 수 있다. 만일 근월점 부근에서 측정치가 들어오지 않아 궤도 예측만 지속하는 상황이라면 해당 지점에서 큰 위치 오차가 발생하게 될 것이다. 반면에 원월점 부근에서는 위성의 동역학적 특성이 낮은 탓에 측정치가 들어오더라도 위치 오차 개선에 큰 영향을 미치지 못하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 이심률이 큰 NRHO, ELFO 두 궤도 형상에 대해 동일하게 나타났다.

Table 8은 시뮬레이션 위치 오차 결과를 Radial, along-track, cross-track 방향을 포함하여 도시한 것이다. Radial은 달 중심에

서 위성 방향, Along-track은 위성 진행 방향, Cross-track은 궤도면과 수직인 방향이며, 위성의 위치 오차를 사용자 측정치 시선 방향 벡터로 사영하였을 때, 큰 영향을 미치는 위성 위치 오차는 Radial 방향이다 (Montenbruck et al. 2018, Kim et al. 2024b). 향후 달 항법 위성의 궤도 오차 모델링이나 달 항법 위성의 궤도 오차가 사용자에게 미치는 영향을 분석하기 위해서는 관성 좌표계 좌표축 방향 오차 성분 보다는 radial, along-track, cross-track 방향으로 오차를 확인하는 것이 바람직하다. Winternitz et al. (2019)의 연구에서는 달과 지구의 편향된 기하학적 배치 구조가 위치와 속도에 미치는 영향을 분석하기 위해서 지구 중심에서 위성 쪽으로의 range 방향 오차, range 방향과 수직인 평면에 포함되는 lateral 방향에서의 오차로 나누어 결과를 제시하였다. Winternitz et al. (2019)의 연구에서 측정치가 들어오는 방향인 range 방향에서의 위성 위치 오차가 Lateral 방향보다 훨씬 작게 나타났다. Table 8에서 ELFO는 세 방향에서 뚜렷한 오차 경향이 나타나지는 않는 반면에, NRHO는 Cross-track 방향의 오차가 가장 작게 나타났다. Fig. 16의 NRHO 형상에서 궤도면과 지구 방향이 서로 수직인 모습인 것을 알 수 있는데, Winternitz et al. (2019)의 연구에서 range 방향 오차가 lateral 방향에 비해 작은 오차를 가진 것과 같이 NRHO에서는 측정치가 들어오는 방향인 Cross-track 방향의 오차가 가장 작게 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

마지막으로 Fig. 24는 LuGRE 미션과 유사하게 GPS L1, L5 그리고 Galileo E1, E5a 측정치만 사용하여 EKF 기반 궤도 결정을 수행한 결과를 NRHO에 대해 나타내며, Figs. 25와 26은 같은 조건으로 진행한 ELFO 결과 그래프이다. 이전 시뮬레이션 보다 측정치 종류와 가시 위성수가 상대적으로 부족하기 때문에 위치 오차가 비교적 크게 나타나지만, 이전 시뮬레이션에서 확인한 현상은 동일하게 관측된다. 측정치가 상대적으로 더 열악한 환경임에도 불구하고 두 궤도 형상에 대해 모두 위치는 50 m 이하 그리고 시계 오차는 50 ns 이하의 정확도를 보였다. 이는 현재까지 보고된 LuGRE 위치 오차인 1.5 km의 1/10 수준의 오차로, 그 정확도가 10배 이상 향상될 수 있음을 제시하였다.

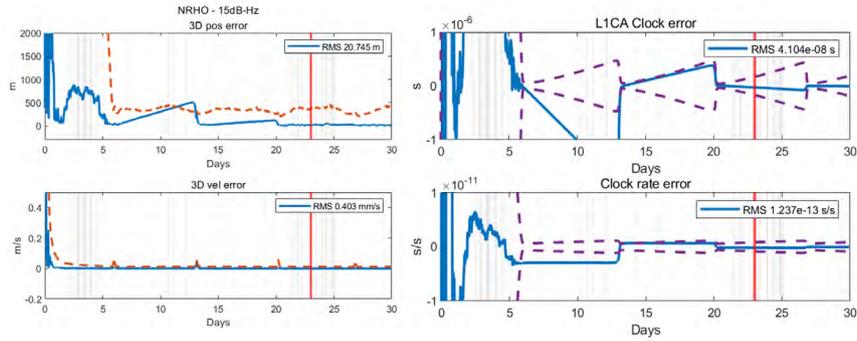


Fig. 24. Position and velocity errors (left) and clock errors (right) of NRHO with GPS and Galileo.

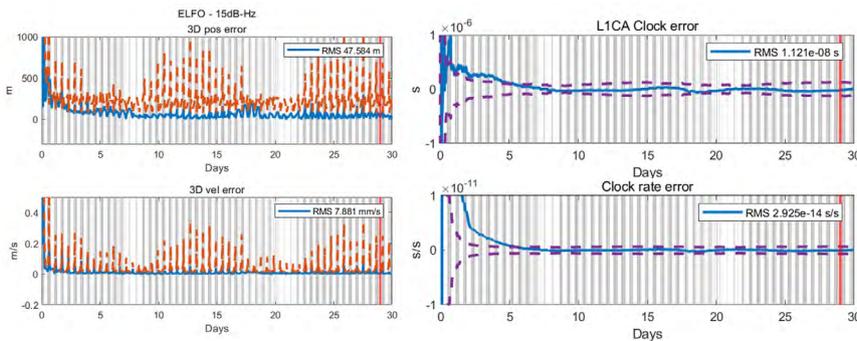


Fig. 25. Position and velocity errors (left) and clock errors (right) of ELFO with GPS and Galileo.

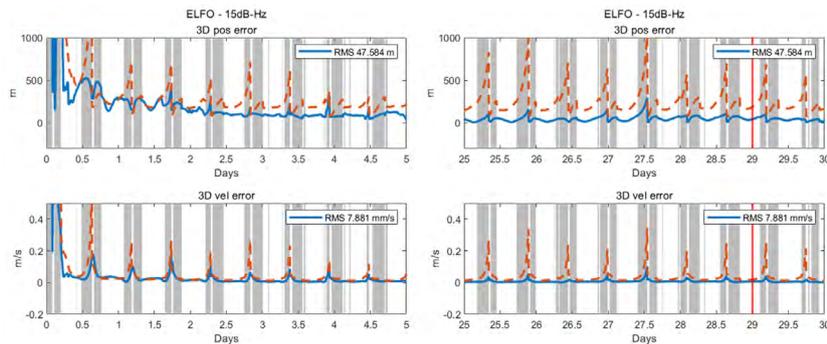


Fig. 26. Zoomed-in view of position and velocity errors of ELFO with GPS and Galileo.

7. CONCLUSIONS

본 논문에서는 지구 GNSS 위성 신호를 사용하여 달 위성의 궤도 결정을 시뮬레이션을 통해 진행하였다. GNSS 위성 신호 가시성 분석을 통해 L1 주파수 영역 신호보다 L5 주파수 영역 신호의 가시성이 더 높음을 확인하였다. 이는 L1보다 L5 신호가 나중에 설계된 신호이고, L5 신호 출력이 L1보다 높기 때문에 나타난 결과이다. 궤도 형상 별로는 궤도면에 관성 좌표계에 대해 일정한 방향을 가지는 ELFO 보다 궤도면에 지구 방향을 향하는 NRHO에서 더 높은 가시성의 신호 수신 환경을 보여주었다.

궤도 결정 시뮬레이션에서 NRHO, ELFO 두 가지 경우에 대해 모두 위치 정확도가 RMS 기준 50 m 이하로 달성할 수 있음을 확

인하였다. 이는 평균 가시 위성수가 3~6개로 상대적으로 열악하고 GDOP가 최대 수천까지 나타나는 달 환경에서 유의미한 결과라고 볼 수 있다. 또한 이심률이 큰 궤도에서 근점에서의 높은 동역학적 특성이 궤도 예측과정에서 큰 오차를 야기할 수 있으나 측정치가 있는 경우 오히려 높은 동역학적 특성이 필터의 빠른 수렴을 이끌어내고, 원점에서는 반대로 낮은 동역학적 특성이 궤도 예측과정에서는 작은 오차를 가지더라도 필터의 수렴에는 큰 영향이 없는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 달에서 지구 GNSS 신호를 사용하여 궤도 결정을 수행하는 가능성에 대해 확인하였다. GPS, Galileo, QZSS를 제외한 다른 위성군에 대해 Link budget 계산과 위성군 방송궤도력 오차 모델링에서 정보가 존재하지 않거나 데이터 처리가 모두

이루어지지 않은 경우 궤도 형상이 유사한 GPS, Galileo, QZSS 위성군의 정보를 대신 가정하여 사용하였다. 추후 시뮬레이션 연구의 발전도 및 신뢰성 확보를 위해서는 본 연구에서 가정한 다른 위성군의 특성을 정확히 반영할 필요가 있다. 이를 위해 Kim et al. (2024b)에서 GPS, Galileo, QZSS, BDS 위성군에 대해 방송 궤도력 오차를 통계적으로 분석한 것과 같이 GLONASS, IRNSS에 대한 방송궤도력 오차를 분석하여 모델링에 활용할 수 있을 것이며, Link budget 계산에 필요한 물리적 파라미터는 오픈 소스로 공개된 시뮬레이션 툴의 소스코드나 각 위성군별 ICD 문서 또는 IGS에서 제공하는 위성군 Metadata 문서 정보를 결합하여 개선할 수 있을 것이다 (Iiyama et al. 2023). 본 시뮬레이션 연구 내용을 바탕으로 향후 양방향 측정치와 결합하여 궤도 결정 기능을 확장할 수 있을 것으로 생각한다. 또한 달 지상 사용자의 위치 결정 성능 평가에도 향후에는 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partly supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP)-ITRC (Information Technology Research Center) grant funded by the Korea government (MSIT) (IITP-2025-RS-2024-00437494, 50%), and funding from Korea government (Korea AeroSpace Administration, KASA) (grant number RS-2022-NR067078, 25% and RS-2022-00165802, 25%).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All the authors have contributed to the presented work. The first author, S.K. wrote and edited this based on the analysis results. J.O. performed verification of the analysis algorithm and confirmed the results. B.P. suggested the original concept of this research and supervised the direction of the research. H.P. and J-M.J have administered the project.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Anghileri, M., Paonni, M., Fontanella, D., & Eissfeller, B. 2013, GNSS Data Message Performance: A New Methodology for its Understanding and Ideas for its Improvement, In 2013 International Technical Meeting

- of The Institute of Navigation, San Diego, California, 28-30 January 2013, pp.638-650. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10839>
- ASI 2025, LuGRE sets another record: first GNSS signals detected in lunar orbit [internet], cited 2025 Aug 8, available from: <https://www.asi.it/en/2025/02/lugre-sets-another-record-first-gnss-signals-detected-in-lunar-orbit/>
- Bhattarai, S. 2015, Satellite clock time offset prediction in global navigation satellite systems, Doctoral dissertation, University College London.
- Cabinet Office 2023, QZSS Antenna Patterns [Internet], cited 2025 Aug 8, available from: <https://qzss.go.jp/en/technical/antenna-patterns.html>
- Capuano, V., Basile, F., Botteron, C., & Farine, P. A. 2016, GNSS-based Orbital Filter for Earth Moon Transfer Orbits, *The Journal of Navigation*, 69, 745-764. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000843>
- CSNO 2019, BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 3.0) [Internet], cited 2025 Aug 8, available from: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201902/P020190227702348791891.pdf>
- Dafesh, P. A., Wong, N., Khadge, G. K., Djuknic, G., Crenshaw, J., et al. 2025, The Design of a Flexible, Interoperable Navigation Signal for Future Lunar Missions, In *Proceedings of the 2025 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Long Beach, California, 27-30 January 2025, pp.712-731. <https://doi.org/10.33012/2025.19961>
- Delépaut, A., Giordano, P., Ventura-Traveset, J., Blonski, D., Schönfeldt, M., et al. 2020, Use of GNSS for lunar missions and plans for lunar in-orbit development, *Advances in Space Research*, 66, 2739-2756. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.018>
- Delépaut, A., Minetto, A., Dovis, F., Melman, F., Giordano, P., et al. 2022, Enhanced GNSS-based Positioning in space exploiting Inter-Spacecraft Cooperation, in 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Long Beach, California, 25-27 January 2022, pp.530-544. <https://doi.org/10.33012/2022.18214>
- Donaldson, J. E., Parker, J. J., Moreau, M. C., Highsmith, D. E., & Martzen, P. D. 2020, Characterization of on-orbit GPS transmit antenna patterns for space users, *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 67, 411-438. <https://doi.org/10.1002/navi.361>
- Giordano, P., Grenier, A., Zoccarato, P., Bucci, L., Cropp, A., et al. 2021a, Moonlight navigation service - how to land on peaks of eternal light. In 72nd international astronomical congress, Dubai, United Arab Emirates,

- 25-29 October 2021.
- Giordano, P., Grenier, A., Zoccarato, P., Swinden, R., Trenta, D., et al. 2021b, Orbit determination and time synchronisation in lunar orbit with GNSS - Lunar Pathfinder experiment, In 72nd international astronomical congress, Dubai, United Arab Emirates, 25-29 October 2021.
- Giordano, P., Swinden, R., Gramling, C., Crenshaw, J., & Ventura-Traveset, J. 2023, LunaNet Position, Navigation, and Timing Services and Signals, Enabling the Future of Lunar Exploration, in 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Denver, Colorado, 11-15 September 2023, pp.3577-3588. <https://doi.org/10.33012/2023.19345>
- Hrbek, S. J., Won, D. H., & Akos, D. M. 2016, Power Characterization for L1 and L5 Transmissions, In Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California, 25-28, January 2016, pp.873-880. <https://doi.org/10.33012/2016.13468>
- Iiyama, K., Vila, G. C., & Gao, G. 2023, LuPNT: Open-Source Simulator for Lunar Positioning, Navigation, and Timing, In Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2023), Denver, Colorado, 11-15 September 2023, pp.1499-1510. <https://doi.org/10.33012/2023.19373>
- ISECG 2024, GLOBAL EXPLORATION ROADMAP [Internet], cited 2025 Aug 8, available from: <https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/isecg/GER2024.pdf>
- Israel, D. J., Mauldin, K. D., Roberts, C. J., Mitchell, J. W., Pulkkinen, A. A., et al. 2020, LunaNet: a Flexible and Extensible Lunar Exploration Communications and Navigation Infrastructure, In 2020 IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, 07-14 March 2020, pp.1-14. <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172509>
- Jin, M., Choi, H., Kim, K., Park, C., Ahn, J., et al. 2012, The Design Method of GNSS Signal Using the Analysis Result of Receiver Performance, The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 37, 502-511. <https://doi.org/10.7840/KICS.2012.37.6C.502>
- Julien, O., Macabiau, C., & Bertrand, E. 2010, Analysis of Galileo E1 OS unbiased BOC/CBOC tracking techniques for mass market applications, In 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, Netherlands, 08-10 December 2010, pp.1-8. <https://doi.org/10.1109/NAVITEC.2010.5708070>
- Kaplan, E. D., & Hegarty, C. 2017, Understanding GPS/GNSS: principles and applications. 3rd ed. (Boston: Artech house).
- Kawade, P. & Christodouloupoulou, D. 2024, Lunar markets 4th edition [Internet], cited 2025 Aug 8, available from: <https://www.analysismason.com/research/content/reports/lunar-markets-nsi015>
- Kim, K., Jo, Y., Park, B., & Kim, O.-J. 2024a, An Experimental Investigation on Broadcast Intervals and Sequences of GPS CNAV, QZSS LNAV/CNAV, and BDS CNAV/CNAV-2, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 13, 319-329. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.3.319>
- Kim, S., Lee, Y., Jo, Y., Cha, Y., Park, B., et al. 2024b, Analysis of Spatial Correlation and Linear Modeling of GNSS Error Components in South Korea. Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 13, 221-235. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.3.221>
- Long, A. C. & Stacey, N. 2025, Goddard Enhanced Onboard Navigation System (GEONS) 3.1 Mathematical Specifications, NASA Goddard Space Flight Center Technical Report, NASA/TP-20250006484
- Marquis, W. A. & Reigh, D. L. 2015, The GPS Block IIR and IIR-M Broadcast L-band Antenna Panel: Its Pattern and Performance, NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 62, 329-347. <https://doi.org/10.1002/navi.123>
- Menzione, F., Sgammini, M., & Paonni, M. 2024, Reconstruction of Galileo Constellation Antenna Pattern for Space Service Volume Applications, Publications Office of the European Union Technical Report, JRC135110. <https://doi.org/doi:10.2760/765842>
- Montenbruck, O., Schmid, R., Mercier, F., Steigenberger, P., Noll, C., et al. 2015, GNSS satellite geometry and attitude models, Advances in Space Research, 56, 1015-1029. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.019>
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., & Hauschild, A. 2018, Multi-GNSS signal-in-space range error assessment - Methodology and results, Advances in Space Research, 61, 3020-3038. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.03.041>
- Murata, M., Akiyama, K., & Naoki, S. 2024, Lunar Navigation Satellite System for Entire Moon Surface: HDOP and SISE Evaluation, In 2024 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Long Beach, California, January 23-25 2024, pp.778-786. <https://doi.org/10.33012/2024.19495>
- Nakajima, Y. & Yamamoto, T. 2024, Enhancing Navigation Accuracy in a Geostationary Orbit by Utilizing a Regional Navigation Satellite System, NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 71. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2025.14.3.241>

org/10.33012/navi.641

Navigation Center 2022, GPS Technical References [Internet], cited 2025 Aug 8, available from: <https://www.navcen.uscg.gov/gps-technical-references>

Noh, J. H., Jo, G. H., Lee, J. Y., & Lee, S. J. 2022, Performance Analysis of GNSS Navigation Messages in the Structure Viewpoint, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 11, 135-146. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.2.135>

Parker, J. J., DAVIS, F., Anderson, B., Ansalone, L., Ashman, B., et al. 2022, The Lunar GNSS Receiver Experiment (LuGRE), In 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Long Beach, California, 25-27 January 2022, pp.420-437. <https://doi.org/10.33012/2022.18199>

Popescu, O. 2017, Power Budgets for CubeSat Radios to Support Ground Communications and Inter-Satellite Links, *IEEE Access*, 5, 12618-12625. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2721948>

SAIC 2022, Navstar GPS Space Segment/ User Segment L5 Interfaces (IS-GPS-705J) [Internet], cited 2025 Aug 8, available from: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705J.pdf>

Teunissen, P. J. & Montenbruck, O. 2017, *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems* (Cham: Springer International Publishing).

United Nations Office for Outer Space Affairs 2021, *The Interoperable Global Navigation Satellite Systems Space Service Volume Second Edition* [Internet], cited 2025 Aug 8, available from: https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2021/stspace/stspace75rev_1_0_html/st_space_75rev01E.pdf

Wang, M., Shan, T., Liu, L., Huan, H., & Tao, R. 2022, On-orbit BDS signals and transmit antenna gain analysis for a geostationary satellite, *Advances in Space Research*, 69, 2711-2723. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.01.022>

Wang, T., Ruf, C., Block, B., McKague, D., & Gleason, S. 2018, Characterization of GPS L1 EIRP: Transmit Power and Antenna Gasin Pattern, In 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), Miami, Florida, 24-28 September 2018, pp.2879-2890. <https://doi.org/10.33012/2018.16101>

Williams, J., Lee, D. E., Whitley, R. J., Bokelmann, K. A., Davis, D. C., et al. 2017, Targeting Cislunar Near Rectilinear Halo Orbits for Human Space Exploration. In *AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, San Antonio, Texas, 5-9 February 2017.

Winternitz, L. B., Bamford, W. A., Long, A. C., & Hassouneh, M. 2019, GPS Based Autonomous Navigation Study for

the Lunar Gateway, In *Annual American Astronautical Society (AAS) Guidance, Navigation, and Control Conference*, Breckenridge, Colorado, 1-6 February 2019.



Sungik Kim is a Ph.D. student of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong University in Republic of Korea. He received B.S. and M.S. degree in aerospace engineering from Sejong University, Seoul, Korea. His research interests include orbit determination, inter satellite-link, Network RTK, Homogeneous Network RTK.



Jisung Oh is a graduate student at the Department of Aerospace Engineering at Sejong University in Republic of Korea. He received B.S degree from Sejong University. His research interests include Lunar PNT, orbit determination, inter satellite-link.



Byungwoon Park is an associate professor of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong university. He received the B.S., M.S., and Ph.D. degree from Seoul National University. He worked as a principal researcher at Spatial Information Research



Hyewon Park received the M.S. degree in Aerospace Engineering from Sejong University, Korea, in 2024. She is currently a researcher at the Korea Aerospace Research Institute. Her research interests include GNSS, lunar PNT, and CubeSat systems.



Jung-Min Joo received Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 2015. He has been working at the Korea Aerospace Research Institute since 2004. His research interests include GNSS, Lunar PNT, LEO PNT, SBAS, GBAS, and Ionosphere monitoring.

5G 시스템에서 Beam RSRP를 활용한 GNN 기반 측위 기법

서하숨, 정흥석, 양두희, 김선우[†]

GNN-based Localization with Beam RSRP in 5G Systems

Hasom Seo^{id}, Hongseok Jung^{id}, Duhui Yang^{id}, Sunwoo Kim^{† id}

Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, South Korea

ABSTRACT

In this study, we propose a Graph Neural Network (GNN)-based localization approach utilizing beam Reference Signal Received Power (RSRP) measurements in 5G networks. Existing GNN-based localization approaches have mainly targeted indoor environments with dense Base Station (BS) deployments and are less effective in outdoor scenarios where the number of BSs is limited. To overcome this limitation, we construct an expanded graph extracted by features such as RSRP, angle, and Line of Sight/None-Line of Sight (LoS/NLoS) indicators, assuming that such information is available at the User Equipment (UE). We validate the proposed approach through ray-tracing simulations in a realistic outdoor 5G environment and evaluate its localization accuracy compared to the triangulation approach.

Keywords: 5G localization, outdoor localization, beam RSRP, GNN, AI-based localization

주요어: 5G 측위, 실외 측위, beam RSRP, GNN, AI 기반 측위

1. 서론

최근 위치 정보는 산업 자동화, 자율주행, 긴급 구조와 같이 다양한 분야에서 활용되며, 높은 정밀도의 측위 기술은 서비스 품질을 보장하기 위해 필수적이다 (Laoudias et al. 2018). 기존의 실외 환경에서는 Global Navigation Service System (GNSS) 기반의 측위 기술이 핵심적인 기술로 사용되어 왔으며, 자동차 네비게이션 등 다양한 위치 기반 서비스에 효과적으로 적용되어 왔다. 그러나 GNSS 기반의 측위 기술은 도심의 고층 건물 밀집 지역과 같이 위성과의 Line of Sight (LoS)가 보장되지 않는 환경에서는 성능이 현저히 저하되는 한계가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 무선 통신 신호를 이용한 측위 기술이 대안으로 주목받고 있으며, 특히 5G 이동통신 기술의 발전과 함께 그 중요성이 더욱 부각되고 있다 (Mogyorósi et al. 2022). 이에 따라 무선 이동통신 국제 표준화 단체 3rd Generation Partnership Project (3GPP)에서는 5G New Radio (NR) 규격에 측위를 위한 전용 신호를 새롭게 도입하였으며, 3GPP Release 16에서는 시행

횡수의 80%에 대하여 실외 환경에서 수평 10 m, 수직 3 m 이내의 높은 측위 정확도를 요구하고 있다 (3GPP 2019).

하지만, 무선 통신 환경에서는 장애물에 의하여 신호가 차단되거나 반사되는 Non-Line of Sight (NLoS) 특징으로 인해 Time of Arrival (ToA), Angle of Arrival (AoA)과 같은 측위에 활용되는 측정값 에러가 크게 증가하여 측위 성능이 크게 저하되는 문제점이 있다 (Kirmaz et al. 2023). 이러한 무선 통신 신호 환경을 효과적으로 모델링하기 위해 최근에는 데이터 기반의 Artificial Intelligence (AI) 기법을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 대표적인 사례로는 Convolutional Neural Network (CNN)와 Multi-Layer Perceptron (MLP)을 기반으로 한 무선 통신 측위 기법이 다수 제안되었다. 그러나 이러한 기존 AI 기법들은 무선 통신 환경의 특성을 충분히 반영하지 못하는 근본적인 한계를 지닌다. 예를 들어, CNN의 경우 격자 형태로 구조화된 데이터를 유클리드 공간에서 처리하는 것에 특화되어 있어 NLoS 및 다중 경로의 영향으로 송수신기 간의 관계가 단순한 거리 기반으로 표현되기 어려운 비유클리드적 공간 구조에서는 적합하지 않다. 또한

Received Aug 12, 2025 Revised Aug 23, 2025 Accepted Aug 29, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: remero@hanyang.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

MLP는 입력 특징들을 독립적으로 처리하기 때문에 무선 채널에서 발생하는 송수신기 간의 복잡한 공간적 관계에 대한 효과적인 학습이 어렵다 (Shen et al. 2023).

이러한 기존 AI 기법들의 한계를 극복하고, 무선 통신 환경의 비유클리드 공간적 특성을 보다 정밀히 모델링하기 위한 대안으로 최근에는 Graph Neural Network (GNN) 기반의 측위 연구가 등장하였다. 그래프 기반의 모델링 기법은 데이터의 형태가 유클리드 공간에 국한되지 않고, 그래프를 구성하는 노드들의 연결 관계를 엣지로 표현하여 송수신기 간의 기하학적 관계와 네트워크 토폴로지를 현실적으로 반영할 수 있다는 장점을 갖는다 (Kipf & Welling 2017, Wu et al. 2020). 이러한 GNN의 구조적 강점을 활용한 무선 통신 기반 측위 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어, Wang et al. (2024)과 Zhang et al. (2025)은 Wi-Fi 신호를 기반으로 복잡한 실내 환경에서도 높은 정확도와 Wi-Fi 기반의 적은 비용으로 효율성을 갖는 위치 추정이 가능함을 입증하였다. 이러한 실내 환경에서는 수십에서 수백 개의 Base Station (BS)을 그래프의 노드로 설정함으로써 노드 간 message passing을 기반으로 학습하는 GNN에 적합한 그래프를 구성하여 높은 위치 추정 정확도를 보일 수 있다. Liang & Meyer (2021), Jung et al. (2024, 2025)의 연구는 BS의 수가 제한되는 상황임에도 다중 단말을 노드로 추가하여 BS 및 다중 단말 간의 협력을 활용한 높은 위치 추정 정확도를 보였다.

그러나 실외 환경에서는 3GPP 38.901 (2025)에서 정의한 바와 같이 Urban Macro cell (UMa)의 셀 간 간격은 500 m, Urban Micro cell (UMi)의 셀 간 간격은 200 m에 이르며, 수십에서 수백 개의 BS가 밀집되는 실내 환경에 비하여 드문 간격의 BS 배치를 보인다. 이러한 특성은 실내 환경에서 가능했던 다수의 BS를 활용한 그래프 구성을 실외 환경에 적용하기에 현실적으로 불가능하게 만든다. 또한 단말 간의 협력 정보를 이용한 측위는 참여하는 다중 단말 간의 동기화 수준에 의해 성능이 크게 좌우되며, 단말 간 측정 정보 공유 과정에서 프라이버시 침해 및 보안 위협이 발생할 수 있다 (Şahin et al. 2023, Yu et al. 2023). 이와 같은 요인들로 인하여 BS의 수가 제한된 실외 환경에서 단일 단말을 이용한 위치 추정은 적은 수의 노드를 갖게 되며, 이는 message passing 기반의 GNN 학습 구조에 적합하지 않은 그래프를 조성한다 (Jung et al. 2025). 또한 노드 간의 연결성이 부족할 경우 GNN이 송수신기 간의 공간적 관계나 무선 통신 환경의 전역적인 환경 정보를 학습하지 못하여 측위 성능이 크게 저하될 수 있다. 따라서 실외의 제한된 BS 환경에서도 무선 통신 신호에 내재된 공간적 특성을 효과적으로 표현하고 활용할 수 있는 새로운 그래프 구조 모델링 기법의 개발이 필수적이다.

이에 따라 본 논문에서는 5G 네트워크의 multi-beam 특성을 활용하여, 실외 환경에서의 BS 수 제한 문제를 해결할 수 있는 새로운 GNN 기반 측위 기법을 제안한다. 제안 기법의 핵심은 beam Reference Signal Received Power (RSRP) 측정값에 포함된 각도 정보 및 NLoS 경로 특성을 그래프 노드의 feature로 활용함으로써 그래프의 규모를 확장하고, 이를 통해 실외 환경에서 BS 수 제약을 극복하는 데 있다. 단말과 beam 간의 LoS/NLoS 관계를 기반으로 그래프의 엣지를 구성하여 공간적 연관성을 모델링하고, Graph Attention Network (GAT)를 적용하여 각 노드의 특징

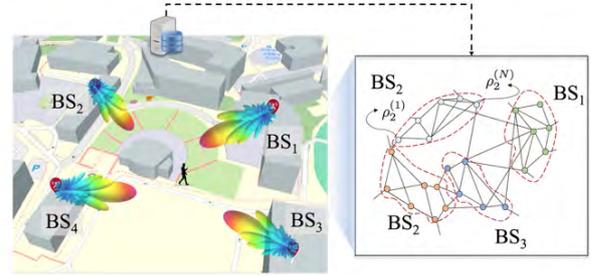


Fig. 1. The 5G MIMO scenario in an outdoor environment, with a graph representation.

벡터를 이웃 노드로부터 전달받은 정보를 이용해 갱신함으로써 LoS 환경에서의 주요 beam 정보에 높은 중요도가 반영되도록 한다 (Veličković et al. 2018). 특히, attention 메커니즘을 통해 이웃 노드의 중요도를 학습 과정에서 동적으로 반영함으로써, 환경 변화나 NLoS 환경에서도 강건성을 확보한다. 이러한 GAT의 구조적 특성은 각 beam의 기여도를 적응적으로 반영하여 측위 정확도를 향상시키는 중요한 역할을 한다. 이를 통해 제한된 수의 BS 환경에서도 충분한 그래프 복잡성을 확보함으로써 높은 측위 정확도를 달성할 수 있다. 마지막으로 실제 환경을 반영한 무선 채널 모델을 기반의 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 성능을 정량적으로 분석하고 우수성을 입증한다.

서론에 이어 2장에서는 시스템 모델에 대해 서술하고 3장에서는 beam ID를 활용한 그래프 구성과 GAT 기반 측위 기법에 대해 서술한다. 4장에서 시뮬레이션 환경과 측위 결과 및 분석에 대해 서술하고 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 시나리오를 따르며, 5G의 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 기반 Multiple Input Multiple Output (MIMO) 시스템을 고려하여 총 N_{tx} 개의 송신 안테나와 N_{rx} 개의 수신 안테나를 사용하는 구조를 가정한다. 시간 슬롯 기반의 블록 페이딩 채널을 적용하여 각 OFDM 심볼 내에서 채널 응답이 고정되며, 최대 지연은 cyclic prefix의 길이 T_{cp} 이내로 제한된다. 이때, 심볼 시간 T_s 간격으로 샘플링된 이산 시간 $t=1,2,\dots,T$ 에서 수신된 신호 $\mathbf{r}_t \in \mathbb{C}^{N_{rx} \times 1}$ 는 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r}_t = \sum_{\tau=0}^{T_{cp}} \mathbf{H}_\tau \mathbf{y}_{t-\tau} + \mathbf{N}_t \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{H}_\tau \in \mathbb{C}^{N_{rx} \times N_{tx}}$ 는 베이스밴드 MIMO 채널에서 신호가 수신기에 도달하는 다양한 경로들을 표현하는 단위인 τ -th tap에 대한 행렬이며, $\mathbf{y}_t \in \mathbb{C}^{N_{tx} \times 1}$ 는 송신 신호, $\mathbf{N}_t \in \mathbb{C}^{N_{rx} \times 1}$ 는 가우시안 백색 잡음으로 가정한다.

일반적인 OFDM 심볼 시간 내에서 MIMO 채널 \mathbf{H}_τ 은 여러 경로로 구성된 모델로 표현될 수 있으며, 각각의 경로 $p=1,2,\dots,P$ 는 Eq. (2)와 같이 모델링 된다.

$$\mathbf{H}_\tau = \sum_{p=0}^P m_p \mathbf{a}_{\text{rx}}(\phi_{\text{rx},p}, \psi_{\text{rx},p}) \mathbf{a}_{\text{tx}}^\top(\phi_{\text{tx},p}, \psi_{\text{tx},p}) g(\tau - \tau_p) \quad (2)$$

각 경로는 다음과 같은 요소들로 정의된다. 먼저, 복소 페이딩 계수 m_p 는 해당 경로의 세기를 나타내며, 송신 안테나 어레이 응답 $\mathbf{a}_{\text{tx}}(\cdot) \in \mathbb{C}^{N_{\text{tx}} \times 1}$ 은 Angle of Departure (AoD)인 방위각 $\phi_{\text{tx},p}$ 및 고도각 $\psi_{\text{tx},p}$ 에 따른 송신 방향성을 나타낸다. 마찬가지로 수신 안테나 어레이 응답 $\mathbf{a}_{\text{rx}}(\cdot) \in \mathbb{C}^{N_{\text{rx}} \times 1}$ 은 AoA인 방위각 $\phi_{\text{rx},p}$ 및 고도각 $\psi_{\text{rx},p}$ 에 따라 수신 방향성이 정의된다. 신호는 각 경로 지연 τ_p 만큼 지연된 펄스 파형 $g(\cdot)$ 과 함께 전달되며, 모든 경로의 지연은 $\max(\tau_p) \leq T_{\text{cp}}$ 를 만족한다고 가정한다 (Italiano et al. 2024).

본 연구에서는 측위를 위한 beam 별 RSRP 측정을 위해, 3GPP 표준에서 정의된 Positioning Reference Signal (PRS)을 활용한다. 앞서 정의한 OFDM 기반 MIMO 수신 신호 모델에 따라, 단말은 시간 t 에서 수신된 신호 \mathbf{r} , 중 PRS가 할당된 자원 요소에 대해 각 beam의 수신 전력을 계산한다. BS는 초기 beam 설정 단계에서 선택된 넓은 각도 범위 내에서 보다 정밀한 송신 beam으로 PRS를 전송하고, 단말은 고정된 수신 beam을 통해 이를 신호를 수신한다. 이후 단말은 각 방향에 대해 수신된 PRS 심볼의 평균 전력을 계산하여 $m=1,2,\dots,M$ 개 BS에 대해 $n=1,2,\dots,N$ 개의 PRS beam RSRP 값 $\rho_m^{(n)}$ 을 추정한다. 해당 값은 수신 복소 신호의 절댓값 제곱을 모든 안테나에 대해 합산한 후 평균한 값으로 Eq. (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_m^{(n)} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \|\mathbf{c}_s^{(m,n)}\|^2 \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{c}_s^{(m,n)} \in \mathbb{C}^{N_{\text{rx}} \times 1}$ 은 수신 신호 \mathbf{r}_i 중 PRS가 할당된 m 번째 BS의 n 번째 beam 방향의 복소수 샘플이며, S 는 해당 beam 방향에 대해 수신된 총 PRS 심볼의 수를 의미한다.

Beam RSRP를 포함한 m 번째 BS의 n 번째 beam에서 얻어지는 측정값 벡터 $\mathbf{z}_m^{(n)} \in \mathbb{R}^{N \times 4}$ 은 Eq. (4)와 같다.

$$\mathbf{z}_m^{(n)} = [b_m, c_m, l_m, \rho_m^{(n)}] \quad (4)$$

여기서 b_m 은 BS의 인덱스, c_m 은 단말과 연결된 BS cell의 인덱스이며, l_m 은 해당 BS와 단말 간의 LoS/NLoS 상태를 나타내는 지표이다. 측정값 벡터 $\mathbf{z}_m^{(n)}$ 는 m 번째 BS에 대해 행렬 $\mathbf{Z}_m \in \mathbb{R}^{N \times 4}$ 로 나타낸다.

$$\mathbf{Z}_m = [\mathbf{z}_m^{(1)}, \dots, \mathbf{z}_m^{(N)}]^\top \quad (5)$$

3. GAT 기반 측위 모델

BS의 beam과 단말 사이의 무선 통신 환경을 그래프 $g = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 형태로 모델링한다. 여기서 집합 $\mathcal{V} = (\nu_1, \dots, \nu_I)$ 는 BS에 속하는 beam으로 구성되는 총 $i=\{1,2,\dots,I\}$ 개 노드의 집합이며, 각 노드는 Eq. (4)와 같은 측정값 벡터를 노드의 특징으로 갖는다. 집합 \mathcal{E} 는 노드 간의 연결성을 나타내는 엣지의 집합이다. 노드 간의 연결성은 무선 신호의 전파 특성을 반영하여 차별적으로 설정된다. LoS 환경에서는 BS와 단말이 직접적인 신호 전달이 가능하므로 노드 간 강한 연관성을 가정하여 노드 i,j 에 대하여

$e_{ij}=1$ 로 연결성을 부여하는 반면, 장애물도 인한 신호 감쇠와 다중 경로 전파가 존재하는 NLoS 환경에서는 $e_{ij}=0$ 으로 노드 간의 연관성을 제거한다.

각 BS의 beam으로 구성된 초기의 노드 특징 행렬 $\mathbf{H}^{(0)} \in \mathbb{R}^{(M \times N) \times 4}$ 는 Eq. (6)과 같이 구성된다.

$$\mathbf{H}^{(0)} = [\mathbf{Z}_1, \dots, \mathbf{Z}_M]^\top \quad (6)$$

여기서, GAT 기반 측위 모델의 입력으로 주어지는 노드의 초기 특징은 각 BS의 beam에 대한 측정값 벡터 $\mathbf{z}_m^{(n)}$ 을 결합하여 구성된다. 따라서, 총 $I=M \times N$ 개 노드에 대해 $\mathbf{H}^{(0)} = [\mathbf{h}_1^{(0)}, \mathbf{h}_2^{(0)}, \dots, \mathbf{h}_I^{(0)}]^\top$, $\mathbf{h}_i^{(0)} \in \mathbb{R}^{N \times 4}$ 와 같이 정의된다.

앞서 서술한 바와 같이, 그래프를 기반으로 모델링 된 무선 통신 환경에서의 측위를 위해 GAT 모델을 사용한다. GAT는 이웃 노드의 상대적 중요도를 동적으로 조정함으로써, 다양한 환경에서도 위치 추정의 강건성을 보일 수 있다. 노드 i 에 대한 j 의 중요도를 나타내는 attention 계수 α_{ij} 는 Eq. (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp(\text{LeakyReLU}(\mathbf{v}^\top [\mathbf{W}\mathbf{h}_i \parallel \mathbf{W}\mathbf{h}_j]))}{\sum_{j,k \in \mathcal{N}(i)} \exp(\text{LeakyReLU}(\mathbf{v}^\top [\mathbf{W}\mathbf{h}_i \parallel \mathbf{W}\mathbf{h}_k]))} \quad (7)$$

여기서, $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{2(k+1)}$ 는 attention score 생성을 위한 가중치 벡터로 f 는 $k=\{0,1,\dots,K\}$ 번째 레이어의 노드 특징의 차원을 나타낸다. $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{2(f+1) \times f}$ 는 각 노드의 특징을 고차원으로 표현하기 위한 학습 가능한 가중치 행렬이며, $\mathcal{N}(i)$ 는 노드 i 의 이웃 노드를 의미한다. LeakyReLU는 음수 영역에 기울기 $\alpha=0.2$ 를 갖는 비선형 함수이며, \parallel 는 concatenation 연산을 의미한다.

GAT의 k 번째 레이어에서의 노드 특징 $\mathbf{h}_i^{(k)}$ 은 Eq. (8)과 같이 이웃 노드 간의 정보를 가중치를 이용하여 갱신된다.

$$\mathbf{h}_i^{(k)} = \sigma \left(\sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \alpha_{ij} \mathbf{W}^{(k)} \mathbf{h}_j^{(k-1)} \right) \quad (8)$$

여기서 σ 는 activation function이며, 주로 ReLU, Leaky ReLU가 사용된다.

최종 K 번째 레이어를 통과한 후 얻어진 노드 임베딩 $\mathbf{h}_i^{(K)}$ 은 위치 추정을 위한 입력으로 사용된다. 이를 MLP에 입력하여 단말의 추정 위치 $\hat{\mathbf{u}}$ 를 Eq. (9)와 같이 계산한다.

$$\hat{\mathbf{u}} = \text{MLP}(\mathbf{h}_i^{(K)}) \quad (9)$$

이후 모델은 추정된 위치 $\hat{\mathbf{u}}$ 와 실제 위치 \mathbf{u} 간의 평균 제곱 오차 (Mean Squared Error, MSE)를 최소화하도록 학습된다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1. 시뮬레이션 환경

본 논문에서는 한양대학교 캠퍼스를 배경으로 5G 기반 측위 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 환경은 MATLAB의 ray-tracing을 활용하였으며, 총 4개의 BS를 약 133 m × 133 m 크기의 환경에 배치하였다. 각 BS당 3개의 cell을 구성하여, 총 12개의 cell이 단말을 중심으로 다양한 방향에서 신호를 송수신할 수

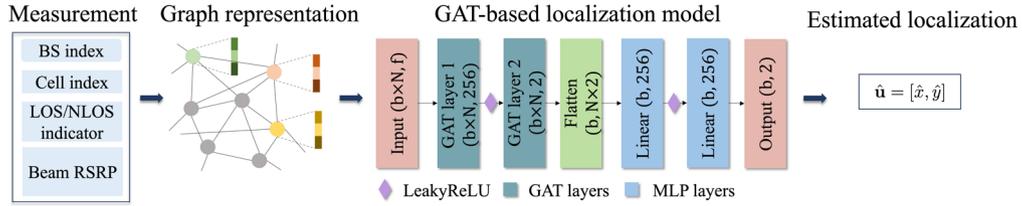


Fig. 2. Architecture of the proposed GAT-based localization approach.

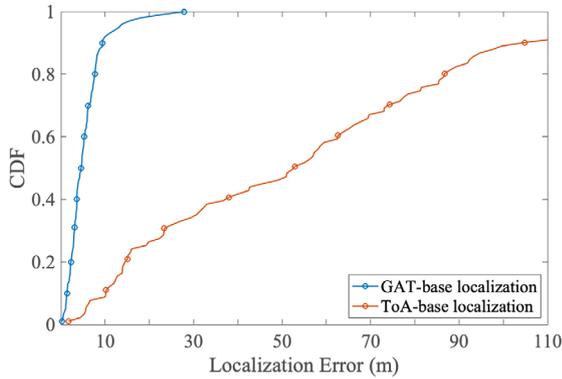


Fig. 3. CDF of localization error for proposed vs. triangulation.

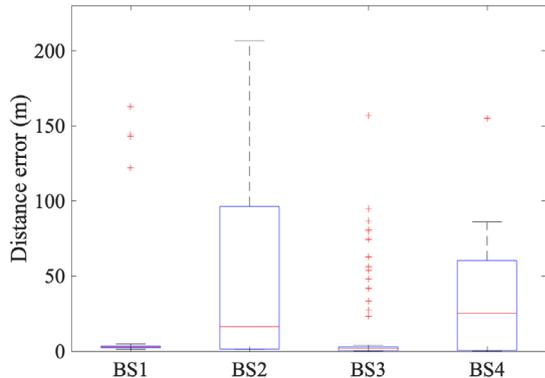


Fig. 4. ToA measurement error between the actual ToA and the measured ToA for each BS in Ray-tracing.

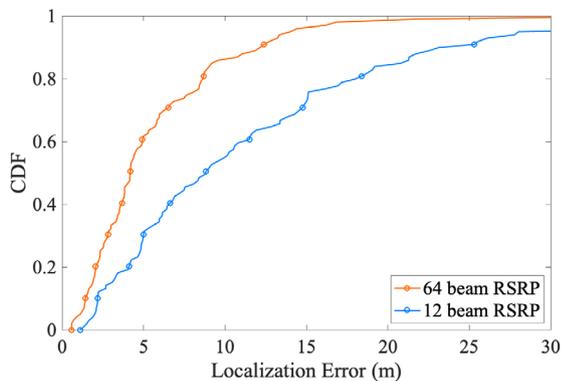


Fig. 5. Comparison of the proposed approach with different numbers of beam-RSRP.

있도록 설정하였다. 각 BS는 8 × 8 Uniform Planar Array (UPA) 구조의 송신 안테나 배열을 갖고, 단말은 2 × 2 안테나 배열을 적용하였다. 각 위치에서 하향링크 PRS 신호의 beam RSRP를 측정하여 측위에 사용하였으며, 채널 모델은 2차 반사를 포함하는 Shooting and Bouncing Rays (SBR) 기반으로 구성되어 NLoS에서도 다중 경로 특성을 반영하였다. GAT 기반 위치 추정 모델의 구성은 Fig. 2와 같다. 여기서의 b는 배치 사이즈, N는 그래프 노드의 크기이다.

본 논문에서는 상기 시뮬레이션 환경을 기반으로, GNN 구조를 활용하여 단말 위치 추정 성능을 다양한 조건에서 정량적으로 평가한다. 특히 제안하는 GAT 기반의 위치 추정 모델의 효과를 입증하기 위하여, 직접 경로 신호의 도착 시간인 ToA 기반의 삼변측량 측위 기법과의 비교 실험을 수행한다. 이를 통하여 GNN이 무선 채널에서의 공간적 관계와 신호 세기 정보를 얼마나 효과적으로 학습하고 활용할 수 있는지를 분석한다. 실험에서는 동일한 PRS 기반 시뮬레이션 데이터를 활용하되, 각 모델에 맞는 입력 형식으로 변환하여 학습 및 평가를 진행하며, 예측된 위치와 실제 위치 간의 평균 제곱 오차와 누적 분포 함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 기반으로 정확도를 측정한다.

4.2. 시뮬레이션 결과 분석

첫번째로, GAT 기반 위치 추정 기법과 전통적인 ToA 기반 삼변측량 위치 추정 기법의 성능 차이를 분석하기 위한 시뮬레이션을 진행하였으며 이를 통해 얻어진 위치 추정 오차의 누적 CDF를 Fig. 3에 나타낸다. Fig. 3에 따르면 CDF 80%를 기준으로 보았을 때 GAT 기반 기법은 약 7.68 m의 성능을 보이는 반면, ToA 기반 삼변측량 기법은 약 85.32 m의 위치 추정 오차가 발생하는 등 전체적으로 낮은 추정 성능을 보였다. Fig. 4는 각 BS로부터 측정된 ToA의 거리 오차를 분석한 결과이며 2, 4번 BS에서 상당히 큰 거리 오차를 볼 수 있다. 이러한 특정 BS에서의 상당한 거리 추정 오차가 누적되어 전체 ToA 기반 삼변측량 기법 성능 저하의 주요 원인으로 작용되었다. 이는 본 시뮬레이션 환경이 NLoS 및 다중 경로 특성이 복합적으로 존재하는 복잡한 외부 환경임을 반영하여 ToA 기반 삼변측량 기법이 이러한 NLoS 환경에서 오차에 민감하다는 기존 연구의 결과와도 일치한다. 반면, GAT는 beam 별 공간 정보와 관계를 학습하여 노드 간 유사성을 기반으로 비선형적인 공간 구조를 파악할 수 있으므로, 복잡한 채널 조건에서도 안정적인 위치 추정이 가능함을 수치적으로 증명하였다.

두번째로는 beam 수의 변화에 따른 GAT 기반 위치 추정 성능의 민감도를 확인하기 위해 동일한 학습 조건 하에 입력되는

beam RSRP 수를 64개와 12개로 구성하여 실험을 수행하였고 위치 추정 오차의 CDF를 Fig. 5에 나타내었다. CDF의 80% 지점에서 64개 beam 사용 시 위치 오차는 약 7.68 m, 12개 beam 사용 시 약 15.1 m로 약 49.13%의 성능 향상이 있었으며, CDF의 50% 지점에서도 각각 4.67 m, 8.83 m로 약 48.24% 오차 차이를 보였다. 이러한 성능 차이는 beam 수가 증가함에 따라 그래프 내 노드 수가 증가하고, 각 노드는 세밀한 방향성 정보를 가지게 되어 보다 풍부한 공간 정보를 제공하게 된다. 결과적으로 GAT의 message passing 과정에서 노드 간의 유의미한 관계성이 보다 명확히 학습되고, attention 기반의 가중치 학습을 통해 위치 결정에 중요한 정보가 강조되므로 위치 추정 정확도가 향상된 것으로 판단된다. 다만 beam 수의 증가는 그래프 내 노드 수 확대에 이어지며, 이는 곧 message passing 과정에서 고려해야 할 엣지의 수도 함께 증가시킨다. 본 논문에서 사용한 GAT의 연산 시간 복잡도는 그래프의 엣지 수 $|E|$ 에 비례하는 $O(|E|)$ 로 표현되며, 이를 고려하였을 때 beam 수가 많아질수록 위치 추정 성능은 증가하지만 연산 복잡도가 커지는 trade-off가 발생한다 (Wu et al. 2020). 이러한 점은 성능 향상과 더불어 실시간 서비스 적용 가능성을 논의할 때 반드시 고려되어야 할 요소이다.

5. 결론

본 논문에서는 실외 환경에서 BS 수가 제한된 상황에서도 효과적인 위치 추정을 가능하게 하는 GAT 기반 측위 기법을 제안하였다. 제안 기법은 5G 네트워크에서 수신되는 beam RSRP LoS/NLoS 정보 등을 노드 feature로 활용하고, 단말과 beam의 공간적 관계를 기반으로 그래프를 구성한 후, GAT를 적용하여 중요한 beam 정보에 가중치를 부여함으로써 단말의 위치를 추정하였다. 시뮬레이션을 통하여 GAT 기반 위치 추정 기법이 기존의 ToA 기반 삼변측량 기법에 비해 NLoS 환경에서 우수한 성능을 보임을 확인하였고, beam 수 확장을 통해 공간 정보의 세밀함이 증가할수록 위치 추정 정확도가 향상됨을 수치적으로 검증하였다. 하지만, beam 수에 따라 그래프의 노드 수 및 엣지의 수가 증가하고 이는 GAT의 연산 시간 복잡도를 증가시키므로 실시간 위치 추정 서비스에 적용하기 위해서는 성능 향상과 연산 부담 간의 균형을 고려한 beam 수 선택이 중요하다. 향후에는 다양한 환경 조건과 시간 변화에 따른 단말 이동성까지 고려할 수 있는 확장된 GNN 기반 측위 기법에 대한 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 연구 성과는 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술과제를 통해 수행된 연구임 (No.915087201).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H. Seo, H. Jung, and D. Yang;

software, H. Seo, and H. Jung; validation, H. Seo, H. Jung, and D. Yang; formal analysis, H. Seo, H. Jung, D. Yang, and S. Kim; data curation H. Seo, H. Jung, D. Yang, and S. Kim; writing—original draft preparation, H. Seo; writing—review and editing, H. Seo, H. Jung, D. Yang, and S. Kim; visualization, H. Seo, H. Jung, D. Yang, and S. Kim; supervision, S. Kim; project administration, S. Kim; funding acquisition, S. Kim.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- 3GPP 2019, Study on NR positioning support, TR 38.855. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3501>
- 3GPP 2025, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, TR 38.901. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3317>
- Italiano, L., Tedeschini, B. C., Brambilla, M., Huang, H., Nicoli, M., et al. 2024, A Tutorial on 5G Positioning, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27, 1488-1535. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3449031>
- Jung, H., Jeong, M., Hameed, I., & Kim, S. 2024, GCN-based Cooperative Localization using Sidelink Communication in 3GPP Urban Environment, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Washington DC, USA, 07-10 October 2024, pp.1-6. <https://doi.org/10.1109/VTC2024-Fall63153.2024.10758057>
- Jung, H., Ko, S.-W., & Kim, S. 2025, Towards cooperative localization with implicit connectivity: graph neural network approach, *IEEE Wireless Communications Letters*, Early access, 1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2025.3588339>
- Kirmaz, A., Şahin, T., Michalopoulos, D. S., & Gerstacker, W. 2023, ToA and TDoA estimation using artificial neural networks for high-accuracy ranging, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 41, 3816-3830. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3322803>
- Kipf, T. N. & Welling, M. 2017, Semi-supervised classification with graph convolutional networks (ICLR 2017), arXiv:1609.02907. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.02907>
- Laoudias, C., Moreira, A., Kim, S., Lee, S., Wirola, L., et al. 2018, A Survey of Enabling Technologies for Network Localization, Tracking, and Navigation, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20, 3607-3644.

<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2855063>

Liang, M. & Meyer, F. 2021, Neural Enhanced Belief Propagation for Cooperative Localization, IEEE Statistical Signal Processing Workshop, Rio de Janeiro, Brazil, 11-14 July 2021, pp.326-330. <https://doi.org/10.1109/SSP49050.2021.9513853>

Mogyorósi, F., Revisnyei, P., Pašić, A., Papp, Z., Törös, I., et al. 2022, Positioning in 5G and 6G networks-a survey, Sensors, 22, 4757. <https://doi.org/10.3390/s22134757>

Şahin, T., Chiarello, L., Michalopoulos, D., S., & Panzner, B. 2023, Performance Evaluation of 5G Sidelink Positioning, IEEE Conference on Standards for Communications and Networking, Munich, Germany, 6-8 November 2023, pp.177-182. <https://doi.org/10.1109/CSCN60443.2023.10453141>

Shen, Y., Zhang, J., Song, S. H., & Letaief, K. B. 2023, Graph neural network for wireless communications: from theory to practice, IEEE Transactions on Wireless Communications, 22, 3554-3569. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3219840>

Veličković, P., Cucurull, G., Casanova, A., Romero, A., Liò, P., et al. 2018, Graph attention networks, in Proc. of International Conference on Learning Representations, arXiv:1710.10903. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.10903>

Wang, S., Zhang, S., Ma, J., & Dobre, O. A. 2024, Graph-neural-network-based WiFi indoor localization system with access point selection, IEEE Internet of Things Journal, 11, 33550-33564. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3430087>

Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C., et al. 2020, A Comprehensive Survey on Graph Neural Networks, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 32, 4-24. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>

Yu, D., Shi, X., Chai, L., Zhang, W., & Chen, J. 2023, Balancing Localization Accuracy and Location Privacy in Mobile Cooperative Localization, IEEE Transactions on Signal Processing, 71, 2804-2818. <https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3292505>

Zhang, W., Shen, X., & Xia, S. 2025, GLoc: GNN in indoor localization, IEEE Internet of Things Journal, 12, 15090-15100. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3529901>



Hasom Seo received the B.S. degree in electronic engineering from Hanyang University ERICA campus, Ansan, South Korea. She is currently pursuing the M.S. degree with the Department of Electronic Engineering. Her current research interests include next-generation wireless commun-

ication systems and their applications in positioning, utilizing artificial intelligence (AI) and machine learning (ML).



Hongseok Jung received the B.S. degree from Hanyang University ERICA, Ansan, South Korea, in 2020. He is currently pursuing a Ph.D. degree in the Department of Electronic Engineering at Hanyang University, Seoul, South Korea, since 2021. His research interests include 5G/6G localization, cooperative localization, and communication systems utilizing artificial intelligence.



Duhui Yang received the B.S. degree and M.S. degree in electronic engineering from Kyonggi University, Suwon, South Korea, respectively. He is currently pursuing the Ph.D. degree with the Department of Electronic Engineering. His current research interests include LEO-PNT, NTN, 5G and Beyond 5G communication systems, machine learning, and deep learning.



Sunwoo Kim received the B.S. degree from Hanyang University, Seoul, South Korea, in 1999, and the Ph.D. degree from the Department of Electrical and Computer Engineering, University of California at Santa Barbara, in 2005. Since 2005, he has been with the Department of Electronic Engineering, Hanyang University, where he is currently a professor. He is also the Director of the Beyond-G Global Innovation Center, Hanyang University. From 2017 to 2022, he was the Director of the 5G/Unmanned Vehicle Research Center, funded by the Ministry of Science and ICT, South Korea. His research interests include wireless communication, sensing, and localization for 6G and beyond. He served as an Associate Editor for IEEE Transactions on Vehicular Technology.

지역 위성항법시스템의 궤도, 시계 및 전리층 보정정보 시뮬레이션

김용래¹, 김희섭², 김정래^{1*}

Simulation of Orbit, Clock, and Ionospheric Corrections for a Regional Navigation Satellite System

Yongrae Kim¹, Heeseob Kim², Jeongrae Kim^{1*}

¹Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, South Korea

²Satellite Application Research Team at Korea Aerospace Research Institute (KARI), Daejeon 34133, South Korea

ABSTRACT

Global navigation satellite system (GNSS) provides position, velocity, and timing information globally, but single-frequency receivers are limited by errors such as satellite orbit, clock, and especially ionospheric delay. While satellite-based augmentation system (SBAS) improves accuracy by supplying orbit, clock, and ionospheric corrections, realistic simulation tools are required to effectively develop and validate such systems. This study presents a MATLAB-based simulator that generates GNSS observations, computes corrections via precise orbit determination using extended Kalman filtering (EKF), and constructs grid-based ionospheric maps from dual-frequency measurements. The simulator, focused on positioning accuracy rather than integrity, is evaluated using a virtual quasi-zenith satellite system (QZSS) constellation with global positioning system (GPS) under intense ionospheric conditions in Japan. The performance of the simulator was analyzed at the MIZU ground station and further assessed across 36 virtual stations to demonstrate the spatial effectiveness of the correction information.

Keywords: RNSS, GNSS simulation, pseudorange, orbit determination, ionospheric delay correction

주요어: 지역 위성항법시스템, GNSS 시뮬레이션, 의사거리, 궤도결정, 전리층 지연 보정

1. 서론

전지구 위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)의 측위정확도는 항법위성의 궤도 및 시계오차, 대기에 의한 신호지연에 의해 제한되는데, 별도의 보정정보를 사용하면 이러한 제한요소를 완화하고 정확도를 향상시킬 수 있다. 주로 사용되는 보정정보는 궤도 및 시계오차 보정정보이며, 단주파 수신기 사용자를 위한 전리층 보정정보도 사용된다. 보정정보 전송 방법으로는 위성신호를 이용한 방법과 인터넷 및 기타 통신망을 이용한 방법으로 나뉘는데, Satellite-Based Augmentation System (SBAS)는 지구정지궤도위성을 이용하고, International GNSS Service (IGS) Real-Time Service (RTS)는 인터넷을 이

용한다. SBAS는 코드의사거리를 이용하는 사용자를 위한 서비스로 Global Positioning System (GPS) L1 단주파 수신기를 사용하는 항공기를 대상으로 하는 서비스로 시작하였으나, 최근 이중주파수와 다중 GNSS를 사용하는 서비스로 진화하고 있다 (Kim et al. 2024b). SBAS는 궤도, 시계 및 전리층 정보 외에 항공기 정밀접근에 필요한 무결성정보도 제공하여 항법신호의 안정성을 유지할 수 있도록 하고 있다. 항공기 이외에 일반 사용자들도 SBAS 보정정보를 이용하면 측위정확도와 안정성을 향상시킬 수 있다. 2003년 미국의 Wide Area Augmentation System (WAAS)를 시작으로 유럽의 European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), 일본의 Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS) 및 한국의 Korea Augmentation

Received Aug 11, 2025 Revised Aug 22, 2025 Accepted Aug 24, 2025

*Corresponding Author E-mail: jrkim@kau.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Satellite System (KASS) 등이 운영 중이다 (SBAS IWG 2021, Ahn 2023, EGNOS User Support 2025, FAA 2025, NEC 2025). SBAS 보정정보 정확도는 궤도오차의 경우 수십 cm 수준으로 반송파 사용자를 위한 RTS의 수 센티미터에 비해서는 낮은 정확도를 가진다.

지역 위성항법시스템 (Regional Navigation Satellite System, RNSS)은 특정한 지역만을 서비스하기 위하여 지구동기궤도 위성 (Geo-Synchronous Orbit, GSO)이나 지구정지궤도 위성 (Geostationary Orbit, GEO)을 사용하는 항법시스템으로 일본의 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)나 인도의 Navigation with Indian Constellation (NavIC) 등이 있다. QZSS는 4기의 Inclined GSO (IGSO) 위성과 3기의 GEO 위성으로 구성되는데, 2025년 8월 현재 5기 위성이 운영되고 있으며, 2026년까지 위성 배치를 완료하는 것을 목표로 하고 있다. IGSO 위성을 이용하면 높은 경사각으로 수신하는 의사거리 신호가 증가하여, 가시성이 제한되는 도심 지역에서의 항법성능을 높일 수 있다는 장점이 있으며, RNSS는 GNSS 이상 발생 시 대체 항법으로 사용 가능하다. 일본은 MSAS를 QZSS에 통합하기 위한 시도를 하고 있는데, 현재 QZS-3 위성을 이용하여 MSAS 보정정보를 송신하고 있으며, 향후 2기의 QZSS 위성에서 MSAS 보정정보를 송신할 계획이다 (Sakai 2018, Saito 2019). MSAS는 일본 내에 위치한 제한된 지상국 분포와 낮은 지자기위도로 인한 높은 전리층 지연 효과로 인해 WAAS에 비해서는 보정정보 성능이 높지 않지만, 위치정확도 향상 및 안전성 향상에 기여하고 있다 (Jeong & Kim 2008). MSAS 신호는 국내에서도 수신이 가능하므로 국내 연구자들에 의해 MSAS 보정정보의 일본 내륙에서의 성능 및 국내에서의 성능에 관한 연구가 수행되었다 (Jeong & Kim 2009, Lim & Park 2017, Hwang et al. 2021, Kim et al. 2024a). GNSS나 RNSS 단독 사용 시 위치정확도나 GPS에 SBAS 결합 시 위치정확도에 관한 연구결과는 어느 정도 제시되었으나, GNSS와 RNSS를 동시에 사용하면서 SBAS 보정정보를 적용한 연구는 찾기 어렵다.

본 연구에서는 GNSS와 RNSS 동시 사용 시 항법위성 궤도/시계 및 전리층 보정정보를 적용할 경우 예상되는 위치정확도 향상 효과를 S/W 시뮬레이션 기법을 이용하여 분석하였다. GPS와 QZSS L1 단주파 코드 의사거리 신호를 사용하는 저가형 수신기를 가정하고, 자체 생성한 보정정보를 적용하여 위치정확도 향상 효과를 예측하였다. 보정정보는 위성 궤도결정 모듈 및 전리층 지연 추정 모듈을 통해 생성하였으며, 생성된 보정정보의 성능은 MSAS 보정정보와 비교를 통해 유사한 성능을 나타내도록 조정하였다. 또한 실제 GPS 위성 궤도와 전리층 분포 데이터를 활용하여 의사거리 정확도를 구현함으로써 가능한 실제 환경에 근접하도록 하였다. 다만 본 연구는 보정정보에 의한 위치정확도 향상 효과를 중점적으로 분석하였으며, SBAS에서 제공되는 무결성 기능은 고려하지 않았고, QZSS는 현재 배치 단계임을 감안하여 시뮬레이션 궤도를 적용하였다. 이러한 환경에서 시뮬레이터를 활용해 육지가 아닌 해상 등 가상의 지점에 위치한 지상사용자에게 예상되는 위치정확도를 파악할 수 있으며, 지상감시국 배치에 따른 보정정보 성능 변화 등도 분석할 수 있다.

2장에서는 시뮬레이터 구조에 대해 설명하고, 3장에서는 항법 위성 궤도/시계 및 전리층 보정정보 생성기법에 대해 설명한다. 4

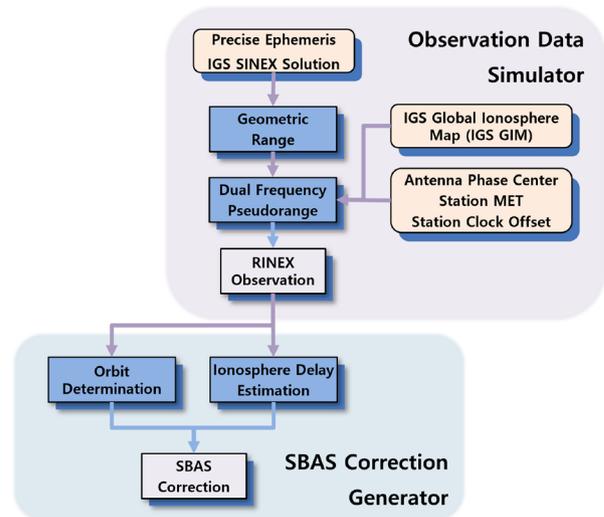


Fig. 1. Block diagram of the correction performance analysis simulator.

장에서는 시뮬레이션으로 생성한 신호 및 보정정보를 기존 GPS/MSAS의 오차 수준과 비교, 분석한 결과를 제시하였다. 5장에서는 시뮬레이터를 이용하여 분석한 일본 내 지상사용자의 위치정확도를 분석하였다.

2. 시뮬레이터 구조 및 의사거리 시뮬레이션

2.1 시뮬레이터 구조

MATLAB 기반의 시뮬레이터는 3개 모듈로 구성되는데, 이는 (1) GPS 및 QZSS 코드의 의사거리 생성모듈, (2) 궤도 및 전리층 보정정보 생성모듈 및 (3) 사용자 위치추정모듈이다. 코드의 의사거리는 Receiver Independent Exchange Format (RINEX) 형식의 관측데이터 파일로 저장되어 일반 GNSS S/W에서도 사용할 수 있게 하였으며, 관측데이터 이외에 항법메시지도 생성하여 위치추정모듈에서 사용한다. 보정정보 생성모듈은 실제 GPS 데이터 처리도 가능한 추정모듈을 사용하였는데, SBAS 무결성정보는 생성하지 않았다. 코드의 의사거리 관측데이터에 보정정보를 적용하여 사용자 위치해를 추정하게 된다.

실제 환경을 유사하게 재현하기 위하여 가용 가능한 실제 데이터를 최대한 사용하였다. 시뮬레이션 날짜의 실제 IGS GPS 정밀궤도력 (final product)과 IGS 전리층 지도 (Global Ionosphere Map, GIM)를 사용하여 의사거리 신호를 생성하였다. 단, QZSS는 7개 위성 배치가 완료되지 않은 상황이므로 시뮬레이션 궤도를 사용하였다. 위치해 계산 시에는 SBAS와 유사하게 항법메시지의 방송궤도력의 궤도 및 시계정보에 보정정보를 가하는 방법을 사용하였는데, GPS의 경우 실제 항법메시지를 사용하여 방송궤도력 오차를 재현하였다. QZSS는 실제 방송궤도력 오차 수준을 가지는 시뮬레이션 방송궤도력을 사용하였다. Fig. 1은 시뮬레이터 구조를 나타내고 있다.

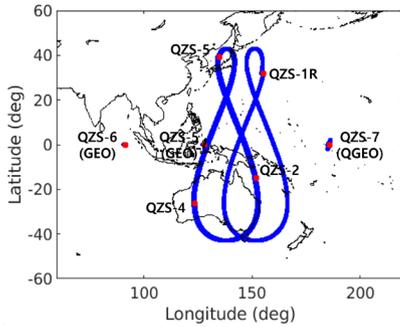


Fig. 2. Ground tracks of simulated 7 QZSS satellite orbits on August 7, 2024.

2.2 GPS 궤도 및 QZSS 궤도 시뮬레이션

GNSS 의사거리를 시뮬레이션하기 위해서는 항법위성의 위치 정보와 수신기 위치정보를 이용하여 기하학적 거리 (geometric range)를 계산한 뒤, 대기오차 및 노이즈 등을 추가하는 과정을 거치게 된다. 이러한 이유로 실제에 근접한 위성 궤도정보를 사용하는 것은 시뮬레이션 의사거리의 사실성을 높이는 데 중요하다. 또한, 시뮬레이션 의사거리를 이용하여 궤도결정을 수행하기 때문에, 실제궤도와 유사할수록 의사거리에 포함된 위성 궤도정보를 추정하는 궤도결정필터의 충실도를 확인하는데 적합하다.

GPS 궤도는 IGS 정밀궤도력을 사용하였는데, Root Mean Square (RMS) 3 cm 정확도를 가지므로 실제 궤도에 매우 가깝다고 할 수 있다. IGS 정밀궤도력은 15분 단위로 제공되므로 시뮬레이션 시에는 내삽을 사용하여 궤도 정보를 추출하였다. GPS 위성 시계오프셋도 IGS 정밀궤도력을 사용하였는데, 궤도에 비해 변화가 완만하므로 낮은 차수의 내삽을 이용하여 시계오프셋 정보를 추출하였다.

위성 배치가 진행 중인 QZSS는 시뮬레이션 궤도를 사용하였다. 향후 QZSS 운용 계획에 맞추어 IGSO, GEO, Quasi-Geostationary Orbit (QGEO) 궤도를 포함한 7기 위성 기반의 가상 궤도 모델을 구현하였다. 위성동역학모델을 사용하여 위성궤도를 수치적분 기법을 이용하여 계산하였다. QZS-7 위성의 경우 경사각이 2°로 지구동기궤도에 속하지만 정지궤도에 근접하므로 QGEO라는 명칭으로 불린다 (Kenji 2023). Fig. 2는 QZSS 위성 7기의 지상궤적을 나타내고 있다.

시뮬레이션에서 사용하는 궤도는 두 가지가 있는데, 의사거리 생성 시에 사용하는 궤도와 사용자 위치해 추정 시에 사용하는 궤도가 있다. 시뮬레이션에서는 전자를 truth 궤도, 후자를 nominal 궤도라 지칭한다. 두 개 궤도의 차이가 위치해 오차를 유발하는 주요 요인이므로 정교한 모델링이 필요하다. GPS의 경우 실제 항법메시지의 방송궤도력을 그대로 위치해 추정에 사용하여 위성궤도 오차 수준을 달성하였다. QZSS의 경우 시뮬레이션 궤도를 truth 궤도로 사용하기 때문에 적절한 노이즈를 가하여 nominal 궤도를 생성하게 된다. 운용 중인 QZSS 방송궤도력의 오차 수준은 약 2 m 수준이므로 이에 해당하는 노이즈를 truth 궤도에 더하여 nominal 궤도를 생성하였다.

2.3 의사거리 시뮬레이션

시뮬레이터에서 생성한 코드의사거리는 수신기와 위성 간의 기하학적 거리 ρ 에 다양한 오차 항을 합산하여 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$P = \rho + (\Delta t^{rcv} - \Delta t_{sat}) \times c + I + T + \Delta_{rel} + (b^{rcv} + b_{sat}) + \Delta_{ant} + \epsilon \quad (1)$$

여기서 Δt^{rcv} 와 Δt_{sat} 는 각각 수신기 및 위성 시계오프셋을 의미하고, I 와 T 는 전리층 및 대류층 지연을 의미한다. Δ_{rel} 은 상대성 효과에 따른 보정값을 나타내고 b^{rcv}, b_{sat} 은 각각 수신기와 위성의 differential code bias (DCB)를 의미한다. ρ 는 위성 질량중심과 수신기 안테나 위상중심까지의 거리인데, Δ_{ant} 항은 위성 질량중심과 위성 안테나 위상중심까지의 거리차를 보정해주는 항이다. c 는 광속을 의미하며, ϵ 은 수신기 노이즈 및 다중경로 오차 등 모델링 되지 않은 오차를 포함한다.

GPS 위성궤도는 IGS 정밀궤도력 데이터를 보간하여 생성하였으며, QZSS 위성궤도는 시뮬레이션 궤도를 사용하여 생성하였다. 데이터 기준시점은 의사거리 수신시점인데, 의사거리 전송 시점의 위성위치와 차이가 발생하므로 time of flight (TOF)를 고려하여 보정된 궤도정보를 사용하였다. GPS 위성 시계오프셋은 IGS 정밀궤도력을 사용하였으며, QZSS 위성 시계오프셋은 사용자가 입력할 수 있도록 설정하였다. 수신기 시계오프셋 역시 사용자가 입력할 수 있는데, IGS 기준국의 경우 IGS에서 정밀 시계오프셋 추정값을 제공하기 때문에 IGS 기준국을 수신기로 설정하는 경우 해당 시계오프셋값을 사용할 수도 있다.

전리층 지연값은 IGS GIM 데이터를 사용하여 생성하였다. 수신기와 위성의 위치로부터 ionospheric pierce point (IPP)를 계산한 뒤, 전리층 지도의 주변 4개 격자점 데이터를 보간하는 방식으로 전리층 지연값을 계산하였다. 대류층 지연값은 여러 가지 모델을 선택할 수 있는데, Modified Hopfield 모델에 온도, 압력 등 실제 기상 관측데이터를 사용하여 생성하는 것도 가능하다. DCB는 전리층 보정정보 생성 시 중요한 값이므로 실제값을 적용하였다. GPS 위성 DCB의 경우 IGS GIM에서 제공하는 값을 사용하고, QZSS 위성 DCB의 경우 사용자가 상수값을 설정하도록 하였다. 수신기 DCB의 경우 사용자가 설정한 값을 적용하는데, IGS 기준국은 IGS GIM의 수신기 DCB를 사용할 수도 있다.

의사거리는 위성안테나 위상중심과 수신기안테나 위상중심 사이의 거리인데, IGS 정밀궤도력은 위성질량중심 좌표를 제공하므로 이를 이용하여 의사거리를 생성할 경우 변환이 필요하다. IGS Antenna Exchange Format (ANTEX) 파일의 태양방향벡터를 적용하여 위성의 안테나 위상중심과 질량중심 차이에 의한 의사거리 차이를 계산하여 Δ_{ant} 항에 적용하였다. IGS 기준국을 사용하는 경우 기준점 좌표와 안테나 위상중심이 상이한 경우 이를 보정해주어야 하는데, 이러한 보정값도 Δ_{ant} 항에 적용된다.

코드의사거리 노이즈 ϵ 의 표준편차는 약 30 cm이며, 시뮬레이션에서는 경사함수 (slant factor)를 적용하여 경사각이 낮은 위성의 경우 노이즈 크기가 증가하도록 모델링하였다. 이는 수신기 노이즈뿐만 아니라 저경사각에서 발생하는 다중경로 오차를 반영한 것이다. 궤도결정을 위해서는 반송파를 이용하는데, 이를

Table 1. Data source and simulation parameters.

| Item | Truth | Nominal |
|------------------------|--|---|
| Date | 2024. 08. 04 ~ 2024. 08. 10 | - |
| Timestep | 30 seconds | - |
| Satellite orbit | IGS final (GPS), Simulated truth orbit (QZSS) | Broadcast (GPS), Simulated nominal orbit (QZSS), Orbit correction |
| Satellite clock offset | IGS final (GPS), Simulated truth clock (QZSS) | Broadcast (GPS), Simulated nominal clock (QZSS), Clock correction |
| Receiver clock offset | IGS clock estimation | (estimate) |
| Ionospheric delay | IGS global ionosphere map | Klobuchar model |
| Tropospheric delay | Modified Hopfield model (with meteorological data) | MOPS |
| Satellite DCB | IGS GIM/GPS TGD | GPS TGD |
| Receiver DCB | IGS GIM | - |
| Satellite ANT offset | IGS ANTEX | IGS ANTEX |
| Maskangle | 10° | Input |
| Pseudorange noise | 0.3 m | - |

위해서 본 시뮬레이터에서는 노이즈 수준이 매우 낮은 의사거리 신호도 별도로 생성하여 궤도결정에 사용하였다. 이는 노이즈 ϵ 의 크기를 반송파와 유사한 cm 수준으로 설정한 것으로 다른 오차 성분은 코드 의사거리와 유사하며, 모호정수는 적용하지 않았다. 전리층 보정정보 생성을 위해서는 이중주파수 관측값이 필요하므로 L2 코드 관측값도 생성하며, 이는 궤도결정 시에도 사용된다.

2.4 수신기 위치추정 모듈

의사거리 시뮬레이터에서 생성한 코드 의사거리 관측값에 보정정보 모듈에서 생성한 궤도, 시계 및 전리층 보정정보를 적용하여 사용자 위치해를 추정하는 기능을 수행한다. 위치추정은 최소자승법을 사용하여 매 관측시점마다 수행하였다. RINEX 형식의 관측데이터와 항법메시지를 입력데이터로 사용하여 실제 관측데이터도 처리 가능하다. 단, 보정정보는 시뮬레이터 고유형식을 사용하였다. 시뮬레이션에서는 의사거리 관측데이터 생성 시 적용되는 truth 환경과, 위치추정 시 적용되는 nominal 환경을 구분하였다. Truth 환경은 다양한 오차 요인을 포함해 의사거리를 생성하는데 활용되며, nominal 환경은 보정정보 적용 후 위치해를 추정하는 기준 환경으로 사용된다. 따라서 nominal 환경에는 별도의 의사거리 잡음 모델을 적용하지 않는다. Table 1은 이러한 truth 환경과 nominal 환경의 차이를 정리한 것이다.

3. 보정정보 생성 알고리즘

3.1 궤도 및 시계 보정정보 생성기법

위성동역학모델과 확장칼만필터를 결합한 궤도결정 모듈을 사용하여 GPS와 QZSS 위성의 궤도와 시계오프셋을 추정하였다. 위성동역학모델은 중력모델, 비중력모델 및 정밀좌표변화 모델을 포함한다 (Kim et al. 2022). 중력모델은 조화함수 (spherical harmonics) 기반의 중력장모델을 사용하여 비구면 중력장효과를 모사하였고, 달과 태양의 3체 중력모델도 포함하였다. Grace Gravity Model 03 (GGM-03) 중력장 모델은 degree와 order를 각각 12차까지 사용하였다. 조석에 의한 중력변화모델 (tide model)도 적용하였다. 비중력모델은 태양복사압 모델을 포함하

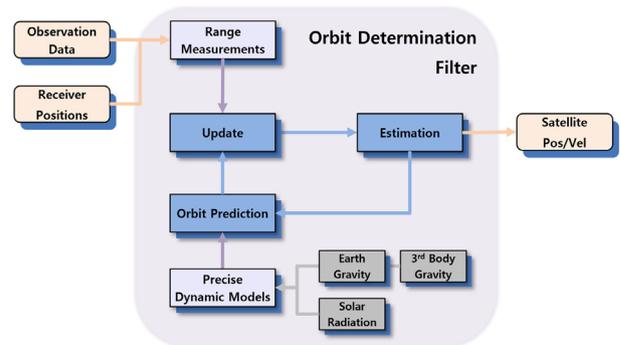


Fig. 3. Block diagram of the orbit determination filter.

는데, 간단한 cannon-ball 모델을 사용하였다. cm 정확도의 정밀 궤도결정은 정교한 box 모델 등을 사용해야 하지만, 본 연구에서는 수십 cm 정도의 정확도수준을 요구하므로 비교적 간단한 모델을 사용하였다.

동역학 모델을 이용하여 궤도전파를 수행한 후, 관측데이터를 이용해 보정하는 칼만 필터 방식을 적용하였다. 시뮬레이션에서는 의사거리 관측값을 사용하였으며, 이는 반송파 의사거리 수준의 노이즈를 가지지만 모호정수를 포함하지 않는다. 필터의 추정 변수는 Eq. (2)와 같이 구성하였다.

$$\hat{x} = [r_x, r_y, r_z, v_x, v_y, v_z, \Delta t^{sat}, C_r, E_R, E_A, E_C]^T \quad (2)$$

추정변수는 Earth-Centered Inertial (ECI) 위치 r_i 및 속도 v_i 이외에 위성의 시계오프셋 Δt^{sat} 을 추정한다. 태양복사압 모델의 경우 태양복사압상수 C_r 를 추정하고, 모델링되지 않은 비중력가속도를 모델링하기 위하여 radial, along track, cross track 방향으로 경험가속도 (empirical parameter) 모델을 적용하고 각 성분 E_i 를 추정하였다.

Fig. 3은 궤도결정 모듈의 전체적인 구조를 나타내고 있다. 현재 구현된 코드는 다중 지상국에서 수신된 의사거리신호를 이용하여 1개 항법위성의 궤도결정을 수행하는 방법으로 복수의 위성궤도결정은 궤도결정필터를 반복하여 실행하는 방법으로 수행한다. 이는 각 위성의 궤도결정 시 병렬처리가 가능하여 연산 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 추정된 궤도오차는 수십 cm 수준으로 SBAS와 유사한 수준이다. 궤도 및 시계 보정정보는 SBAS와 유사하게 항법메시지와 차이 형태로 생성한다. 이

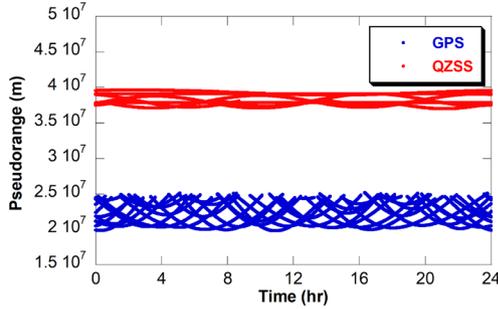


Fig. 4. Simulated pseudoranges of GPS and QZSS satellites on August 7, 2024.

를 위해 nominal GPS 및 QZSS 궤도를 읽은 뒤 궤도결정결과와의 차이를 보정정보 값으로 출력하게 된다. 보정정보 생성 간격은 입력값으로 지정 가능하며, 긴 생성 간격 사용 시 보정정보 시간경과 (message time-out)에 의한 효과 등도 파악할 수 있다.

3.2 전리층 보정정보 생성기법

다수의 지상감시국을 기준으로 생성한 이중주파수 의사거리 시뮬레이션 값을 이용하여 GPS 이중주파수 코드 의사거리로부터 전리층 지연값을 추정하였다. 전리층 지연 추정에는 GPS 관측값만을 사용하였는데, 이는 GPS가 QZSS에 비해 IPP의 범위가 넓어 QZSS 관측값을 추가로 사용할 필요가 없기 때문이다. 전리층 지연은 위도, 경도 및 시간을 변수로 하는 다변수 다항식 함수모델을 통해 추정하였다 (Han 2004). 하지만 함수모델은 지역 전리층 전체를 평균한 형태로 표현하므로 특정 지역에서 발생하는 국지적 특이값을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 반면, 격자점 지도는 관측치에 기반해 국지적 변화를 보다 정밀하게 반영할 수 있어, 함수모델의 보완적 역할을 수행한다. 따라서 함수모델에서 추정된 전리층 지연값을 보간하여 전리층 격자점 지도 (grid map)를 생성하였다. 한편, 지역 전리층 분포 모델은 수직 전리층 지연값 (vertical ionospheric delay)을 나타내는 모델이므로 입력 데이터인 경사 전리층 지연값 (slant ionospheric delay)을 경사함수를 통해 변환한 뒤 사용하였다.

의사거리로 계산한 전리층 지연값에는 항법위성의 L1/L2 DCB와 수신기의 DCB가 포함되어 있으므로 전리층분포 함수모델과 동시에 추정을 해야 하는데, 위성 DCB와 수신기 DCB 개별값이 아닌 합의 형태로만 추정 가능하다. 이를 분리하기 위해서 모든 항법위성 DCB의 합은 0이라는 가정을 사용한다 (Han 2004). 이를 이용하여 수신기별 DCB를 먼저 계산한 후 각 DCB 합에서 수신기 DCB를 빼는 방법으로 위성 DCB를 계산한다. DCB는 1일 단위로 추정하는데, 이는 입력값으로 변경 가능하다.

보정정보로 생성하는 전리층 지연값은 전리층분포 함수모델을 사용하지 않고, 관측된 전리층 지연값을 IPP 위치 및 시간별로 정리한 뒤 인근 격자점에 적용하는 방식으로 진행된다. 전단계에서 추정한 위성 DCB와 수신기 DCB는 전리층 지연값을 보정하는데 사용된다. 격자점에서의 전리층 지연값은 동일한 시각에 해당 격자점 100 km 정도의 일정 반경 내에 위치하는 모든 IPP에서 관측된 전리층 지연값을 거리에 따라 가중 평균하여 산출한다.

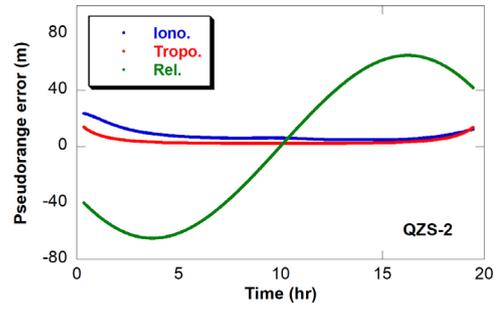


Fig. 5. Pseudorange error components of the QZS-2 on August 7, 2024.

가중치는 IPP와 격자점 간의 거리에 반비례하도록 설정하였다. 격자점의 간격은 위도 5° 및 경도 5°로 설정하였는데, 사용자 입력에 따라 조정 가능하다. 전리층 지연값의 생성주기 역시 입력값으로 조정 가능한데, 긴 생성주기를 적용하여 message time-out에 의한 효과도 파악할 수 있다.

4. 시뮬레이터 출력값 및 정확도 조정

4.1 시뮬레이션 의사거리

일본 내 1개 지점을 수신기 위치로 설정한 후 GPS와 QZSS 위성에서 수신한 신호를 시뮬레이션하였다. 일본 중북부에 위치한 IGS MIZU 지상국을 선정하였는데, 이는 IGS 지상국으로 수신기 시계오프셋 추정값이나 수신기 DCB 추정값 등을 획득하기 용이하여 신호 검증에 유리하기 때문이다. 가상 지점을 설정할 경우 시뮬레이션 절차는 동일하지만, 비교할 실제 관측값이 없어서 검증을 수행할 수 없다.

2024년 8월 7일의 GPS 궤도와 전리층 정보를 사용하였는데, 이는 2024년 중 해당 기간의 태양활동지수 F10.7이 293 SFU 정도로 가장 높은 값을 나타내었기 때문에 전리층 지연값이 극대화되고, 전리층 지연값 보정에 의한 성능 향상 효과를 파악하기 유리하기 때문이다. QZSS 궤도는 시뮬레이션 궤도를 사용하였으므로, 시뮬레이션 날짜와는 관계가 없다.

Fig. 4는 시뮬레이터로 생성한 2024년 8월 7일 GPS와 QZSS 위성의 의사거리를 나타내고 있다. 높은 궤도로 인하여 QZSS의 의사거리가 훨씬 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 호주 상공까지 비행하는 QZS-2 IGSO 위성의 경우 의사거리가 37,109 km에서 38,884 km까지 변화한다.

Fig. 5는 2024년 8월 7일 MIZU 지상국에서 생성된 QZS-2 위성의 의사거리에 가해진 각종 오차 성분을 나타내고 있다. 수신기 노이즈는 표시에서 제외하였으며, 표준편차가 30 cm인 Gaussian 노이즈로 설정하였다. 시뮬레이션에서 설정한 위성 시계오프셋은 100 km 정도로, 다른 오차와 많은 차이가 나므로 그래프에 같이 표시하지 않았다. QZSS IGSO 위성의 경우 호주 남부 지역 상공을 지나갈 때 가시성이 확보되지 않으므로 하루에 20시간가량 관측된다.

생성된 의사거리 데이터의 정확도는 실제 지상국 관측데이터와의 직접 비교를 통해 평가하였다. MIZU 지상국에서 하루 동안

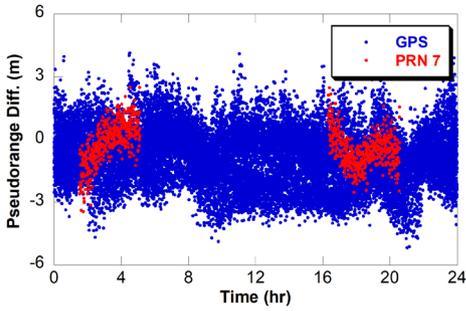


Fig. 6. Pseudorange simulation errors for GPS satellites on August 7, 2024.

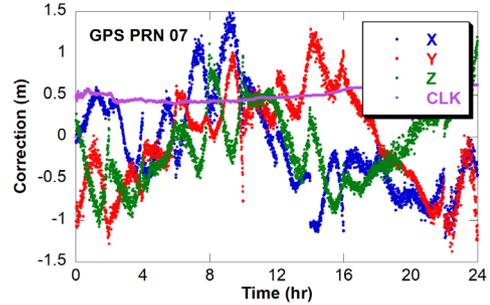


Fig. 9. Orbit and clock corrections for GPS PRN 07 on August 7, 2024.

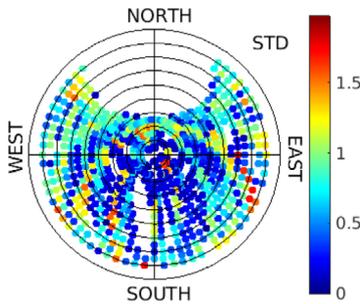


Fig. 7. Skyplot of pseudorange error STD on August 7, 2024.

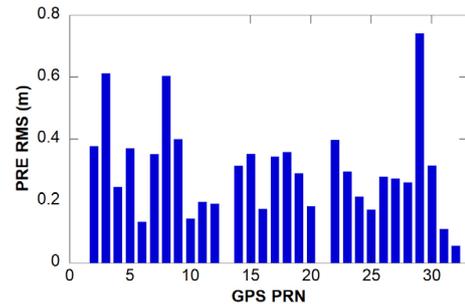


Fig. 10. PRE RMS of GPS satellites estimated by orbit determination on August 7, 2024.

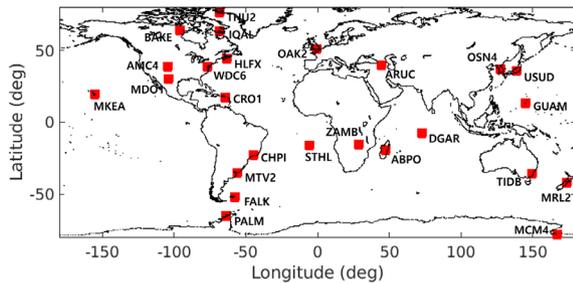


Fig. 8. Location of ground stations for orbit determination.

가시위성에 대해 시뮬레이션과 실제 의사거리의 차이를 비교한 결과, GPS 위성의 경우 평균 오차 -0.8 m, 표준편차 1.3 m, RMS 1.5 m로 실제 관측데이터와 유사한 수준의 결과가 도출되었으며, 이 결과는 Fig. 6에 나타나 있다. 또한, Fig. 7에 나타낸 것과 같이 경사각과 방위각을 격자화하여 분석한 결과 경사각이 낮은 구간에서 의사거리 오차의 표준편차가 증가하는 특성을 확인할 수 있었으며, 이는 전리층 및 대류층 모델의 한계와 경사각에 따른 오차 특성을 반영한다.

4.2 궤도 및 시계 보정정보

GPS 및 QZSS 위성의 궤도 및 시계오차 보정정보 생성을 위해, 궤도결정에 사용되는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 전 세계 26개 지상국의 위치에서 시뮬레이션 기반 관측데이터를 생성하였다. 각 지상국은 GPS 및 QZSS 위성의 지상궤적 및 가시성을 고려하여 분포되었으며, 일정 수준의 노이즈를 가한 의사거리를 사용하

였다. 이는 실제 의사거리 사용 시 전리층 및 대류층 지연 오차 등의 의사거리 오차요소가 제거되고 남은 오차를 상정한 것이다.

위성의 궤도 및 시계 보정정보는 X, Y, Z 세 방향의 궤도 보정값과 시계오프셋 보정값으로 구성되며, 30초 간격으로 생성된다. 하루 동안 GPS PRN 07의 궤도 및 시계오차 보정값의 평균은 각각 0.9 m, 0.5 m로 나타났으며, 이는 항법메시지의 궤도 및 시계 오차와 궤도결정을 통해 추정된 궤도 및 시계오차 사이의 차이에 해당한다. Fig. 9는 2024년 8월 7일, GPS Pseudo-Random Noise (PRN) 07의 궤도 및 시계 보정정보를 보여준다.

보정정보의 검증은 실제 MSAS의 궤도 및 시계 보정정보를 적용했을 때의 Pseudorange Error (PRE) 수준 비교를 통해 진행하였다. PRE는 위성 궤도 및 시계오차를 의사거리 방향으로 투영하여 사용자와 위성 사이의 거리오차로 나타낸 것을 의미한다. PRE는 궤도오차를 가시선 (Line of Sight, LOS) 방향으로 투영하고, 시계오차의 오차를 더하여 Eq. (3)과 같이 계산된다.

$$PRE = \frac{\epsilon_{r_{sat}}(r_{sat} - r^{rcv})}{|r_{sat} - r^{rcv}|} + \epsilon_{\Delta t_{sat}} \quad (3)$$

여기서 r_{sat} 과 r^{rcv} 는 각각 위성과 수신기의 실제 위치를 나타내고, $\epsilon_{r_{sat}}$ 과 $\epsilon_{\Delta t_{sat}}$ 은 위성의 궤도 및 시계오프셋의 오차를 의미한다 (Park & Suk 2014).

2007년 10월 27일 MSAS 보정 후 전체 GPS 위성 PRE의 RMS는 0.26 m로 나타난 바 있다 (Jeong & Kim 2009). 이를 검증하기 위해 2024년 8월 7일을 기준으로, 3 cm 수준의 노이즈를 적용하여 산출한 GPS 위성의 궤도결정 PRE의 RMS는 0.34 m로, 기존 연구 결과와 유사한 수준임을 확인하였다. Fig. 10은 궤도결정을 통해 얻은 GPS 위성별 PRE의 RMS를 나타낸다.

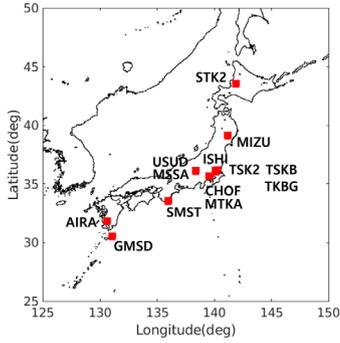


Fig. 11. Locations of ground stations used for ionospheric delay estimation.

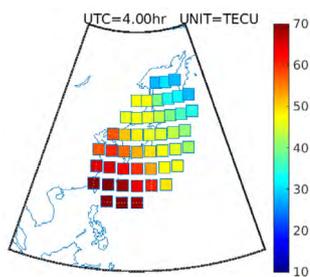


Fig. 12. Ionospheric delay correction on August 7, 2024.

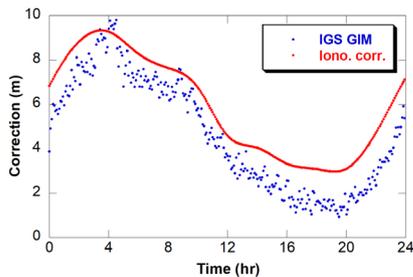


Fig. 13. Ionospheric delay correction on March 20, 2024.

4.3 전리층 보정정보

전리층 보정정보 생성 시 일본 내륙에 위치한 13개 IGS 지상국에서 생성한 GPS 위성의 이중주파수 관측데이터를 사용하였으며, 각 지상국의 위치는 Fig. 11에 도시하였다. 전리층 지도 생성 범위는 위도 0°~70°, 경도 100°~170°로 설정하였으며, 이는 일본 지역에서의 IPP 분포를 충분히 포함한다. 전리층 보정정보의 생성 간격은 5분으로 설정하였다.

특정 시점에 전리층 보정정보의 공간 분포를 분석한 결과, 저위도 지역으로 갈수록 전리층 보정값이 현저히 증가하는 양상이 확인되었다. 이러한 경향은 낮 시간대에 위도가 낮을수록 전리층 지연 오차가 커지는 특성과 일치한다. Fig. 12는 2024년 8월 7일 4시 (LT 13시)의 전리층 보정정보를 보여주는데, 공간적 범위가 일본 인근 지역으로 한정된 것을 볼 수 있다. 이것은 전리층 보정정보 생성 시 일본 지상국 내 IPP에서 산출된 전리층 지연 추정값만

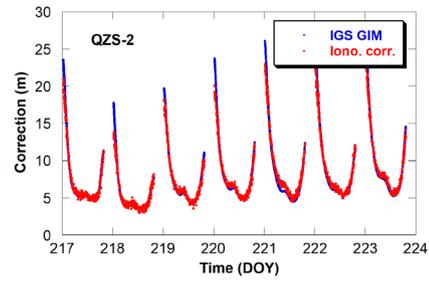


Fig. 14. Ionospheric delay applied to QZS-2 from IGS GIM and simulated corrections from August 4 to August 10 in 2024.

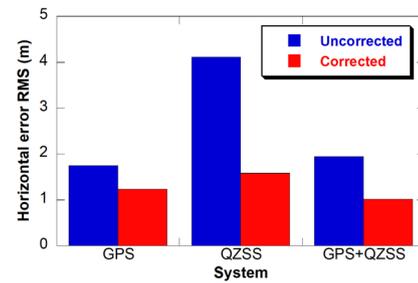


Fig. 15. Horizontal positioning errors for different systems and application of corrections from August 4 to August 10 in 2024.

을 사용했기 때문이다.

전리층 보정정보 검증을 위해 MSAS 전리층 보정정보와의 비교를 수행하였다. Lee & Park (2025)은 2024년 3월 20일, [40°, 130°]를 포함한 여러 지점에서 IGS GIM과 MSAS를 비롯한 SBAS 전리층 보정정보를 비교하였으며, 그 결과 MSAS의 전리층 보정정보는 IGS GIM 대비 약 2 m 이하의 차이를 나타냈다. 본 연구에서는 일본에서 가장 가까운 [40°, 130°] 지점을 대상으로 동일한 수준의 전리층 보정정보를 확보하기 위해 이중주파수 관측값 생성 시 45 cm의 노이즈를 적용하였다. Fig. 13은 2024년 3월 20일의 IGS GIM과 전리층 보정정보를 나타내며, IGS GIM과의 전체적인 차이 수준은 실제 MSAS와 유사하였다.

2024년 8월 4일부터 10일까지 코드의사거리 생성 및 위치추정에 사용된 전리층 보정정보를 비교하였다. QZS-2의 경우 IGS GIM과 시뮬레이션 보정정보의 차이가 저경사각에서 최대 4.3 m 까지 증가했으며, RMS는 0.7 m였다. 전체 GPS 및 QZSS 위성에 대한 차이의 RMS는 2.5 m로 나타났고, 저경사각 관측 비중이 상대적으로 큰 GPS 위성에서 차이가 더 크게 분포하였다. Fig. 14는 QZS-2에 적용된 전리층 지연 보정값의 시간 변화를 나타낸다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 단일 지상국 기반 성능 분석

2024년 8월 4일 (DOY 217)부터 8월 10일 (DOY 223)까지 일주일간, 일본 MIZU 지상국의 위치에서 시뮬레이션을 수행하였다. 보정정보 적용 여부에 따른 위치정확도를 평가하였으며, GPS와

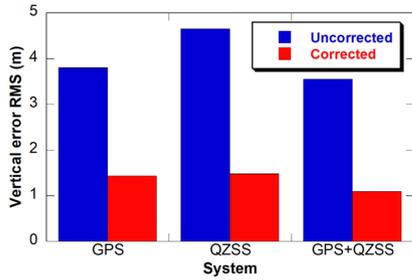


Fig. 16. Vertical positioning errors for different systems and application of corrections from August 4 to August 10 in 2024.

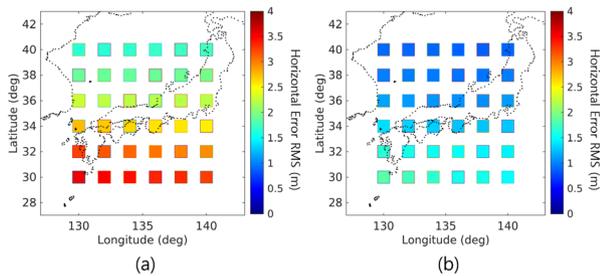


Fig. 17. Horizontal positioning error RMS in Japan by correction application on August 7, 2024 (a) without correction, (b) with correction.

QZSS 위성을 각각 단독으로 사용하는 경우와 두 시스템을 통합 운영하는 경우를 모두 고려하여 분석을 진행하였다.

Fig. 15는 시스템 운용에 따른 일주일간의 수평위치오차 RMS를 나타낸다. GPS 단독 운용 시엔 보정정보 적용하지 않았을 때 수평위치오차가 1.8 m였고, 보정정보를 적용했을 때 1.2 m까지 감소하였다. QZSS만 사용할 경우 4.1 m에서 1.6 m로 감소하여 가장 큰 개선 폭을 보였으며, GPS와 QZSS를 통합 운용 시 1.9 m에서 1.0 m로 감소하여 GPS 단독 운용 대비 높은 성능을 확보하였다. GPS는 낮은 경사각으로 인해 전리층 보정정보의 효과가 컸고, QZSS는 궤도 및 시계 보정정보의 효과가 큰 것을 확인하였다.

Fig. 16은 시스템 운용에 따른 일주일간의 수직위치오차 RMS를 나타낸다. GPS 단독 운용을 고려한 경우 보정정보 미적용 시 수직위치오차가 3.8 m였고, 보정정보를 적용했을 때 1.4 m로 감소하였다. QZSS만 사용할 경우 4.7 m에서 1.5 m로 줄어들었으며, GPS와 QZSS를 통합 운용할 경우 3.6 m에서 1.1 m로 감소하여 가장 낮은 수직위치오차를 보였다. GPS는 낮은 경사각 관측 비율이 높아 전리층 보정정보의 효과가 지배적이었으며, QZSS는 궤도 및 시계 보정정보만으로도 개선이 있었지만 전리층 보정정보를 함께 적용했을 때 추가적인 향상이 나타났다.

5.2 다중 가상 지상국 기반 성능 분석

일본 내 지상사용자의 보정정보 효과를 정량적으로 분석하기 위하여, 위도 30°~40°, 경도 130°~140°의 범위 내에 2° 간격으로 총 36개의 격자점을 설정하고, 해당 위치에 가상 지상국을 구성하였다. 이러한 구성은 일본 본토 전역을 고르게 포함하는 공간적 분포를 고려한 것이며, 지역적 정확도 차이를 체계적으로 분

석하기 위한 기반이 된다.

Fig. 17은 2024년 8월 7일 하루 동안 GPS와 QZSS를 동시에 운용할 때 보정정보 적용 여부에 따른 수평위치오차 RMS 분포를 비교한 결과이다. 보정정보를 적용하지 않은 경우, 저위도 지역에서 전리층 지연의 영향으로 오차가 최대 3.6 m까지 크게 증가하였다. 반면, 보정정보를 적용하면 전 지역에서 오차가 크게 줄어 저위도 지역의 최대 오차가 1.8 m, 전 지역 평균이 1.2 m로 감소하였다. 이는 전리층 보정이 공간적 편차를 완화하고, 일본 전역에서 안정적인 수평 위치정확도를 확보하는 데 기여함을 보여준다. 다만, 일반적인 SBAS 서비스 영역 감시 결과에서는 보정정보 생성 지점과 사용자의 시공간 이격에 따라 비상관 오차가 증가하는 경향이 나타나지만, Fig. 17b에서는 이러한 특성이 두드러지지 않았다. 이는 본 연구에서 전리층 보정정보 생성을 위해 일본 내 13개 IGS 지상국을 사용하였기 때문에, 사용자와 보정정보 생성 지점 간 공간적 이격이 상대적으로 작아 SBAS 사용 시 관측되는 일반적인 비상관 오차 증가 경향이 나타나지 않은 것으로 해석된다.

6. 결론

본 연구에서는 GPS와 QZSS 통합 운용 환경에서 실제 관측데이터 수준의 GNSS 의사거리와 MSAS 수준의 궤도 및 전리층 보정정보를 생성할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터는 IGS 정밀궤도력, IGS 전리층 지도 등 가용한 실제 데이터를 사용하여 실제 환경과 유사한 조건을 구현하였으며, 이를 통해 다양한 운용 시나리오에서 보정정보의 효과를 분석할 수 있도록 설계하였다. 보정정보 생성 방식은 기존 SBAS와 달리 궤도 및 시계는 전지구 지상국을 기반으로, 전리층은 일본 지역 지상국을 기반으로 산출하여 일본 내륙 성능 분석에 적합하며 노이즈 수준 조절을 통해 성능을 맞출 수 있다. 따라서 개발된 시뮬레이터는 의사거리, 궤도 및 시계 보정정보, 전리층 보정정보의 정확도를 각각 실제 데이터 또는 기존 서비스 수준과 비교하여 검증하였다. 이를 활용한 분석 결과, 보정정보 적용 시 GPS와 QZSS 각각의 특성에 따라 위치정확도가 개선되는 경향이 확인되었으며, 두 시스템을 통합 운용할 경우 전반적인 위치정확도가 향상되는 효과가 나타났다. 또한 일본 전역을 대상으로 한 다중 지상국 시뮬레이션을 통해 지역별 보정정보의 기여도를 평가하고, 서비스 영역 전반에서의 수평 위치정확도 성능 변화를 확인하였다. 본 연구는 RNSS 운용 시 SBAS 보정정보의 성능 분석을 위한 시뮬레이션 기반 검증체계를 제시하였으며, 향후 지역위성항법 보강시스템의 설계와 성능평가 연구에 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 RS-2022-00207459).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J.K.; formal analysis, Y.K. and J.K.; data curation, Y.K.; writing—original draft preparation, Y.K.; writing—review and editing, J.K.; project administration, J.K., H.K.; funding acquisition, H.K.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Ahn, J. 2023, KPS & KASS Status Update, United Nations/Finland Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems, Helsinki, Finland, 23-26 October 2023.
- EGNOS User Support, EGNOS SYSTEM [Internet], cited 2025 July 25, available from: <https://egnos-user-support.esspas.eu/egnos-system>
- FAA, Global SBAS Status [Internet], cited 2025 July 25, available from: <https://www.faa.gov/ato/navigation-programs/global-sbas-status>
- Han, J. 2004, A Study on Ionospheric Corrections for Accuracy Improvement of Stand-alone GPS, Master's Thesis, Inha University.
- Hwang, N. E., Lee, J. H., & Kim, I. K. 2021, Examination of Availability on QZSS SLAS in Korea, Institute of Control, Robotics and Systems, 27, 168-175. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2021.20.0163>
- Jeong, M. S. & Kim, J. 2008, Analysis of MSAS Ionosphere Correction Messages and the Effect of Equatorial Anomaly, Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 16, 12-20.
- Jeong, M. S. & Kim, J. 2009, Analysis of MSAS Correction Information and Performance in Korea, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 37, 372-382. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2009.37.4.372>
- Kenji, N. 2023, QZSS System and Service Updates, in 2023 ICG Annual Meeting, Madrid, Spain, 15-20 Oct 2023. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG-17/icg17.01.06.pdf>
- Kim, B., Kim, J., Bu, S., & Lee, C. 2022, Performance Analysis of GPS and QZSS Orbit Determination using Pseudo Ranges and Precise Dynamic Model, Journal of Advanced Navigation Technology, 26, 404-411. <https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.6.404>
- Kim, I. K., Lee, J. H., Choi, Y. S., & Seo, H. S. 2024a, Comparative Analysis of Correction Information Between KASS and MSAS Services, In Proceedings of the 2024 IPNT Conference, Jeju, Korea, 6-8 Nov 2024. <https://ipnt.or.kr/2024proc/85>
- Kim, J., Kim, Y., & Kim, J. 2024b, Technology Trends of Satellite Based Augmentation Systems, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 13, 25-34. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.1.25>
- Lee, H. S. & Park, K. D. 2025, Performance Analysis of GIM and SBAS Ionosphere Modeling for GPS Positioning in the Korean Peninsula, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 14, 91-99. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2025.14.1.91>
- Lim, C. S. & Park, B. W. 2017, Comparative Analysis of Performance for DGPS and SBAS in Korea Region, Journal of Advanced Navigation Technology, 21, 279-286. <https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.3.279>
- NEC, MSAS: Michibiki-Satellite-based Augmentation System [Internet], cited 2025 July 25, available from: <https://www.nec.com/en/global/solutions/cns-atm/navigation/msas.html>
- Park, J. P. & Suk, J. 2014, A Study on Navigation Performance Analysis Technique of Pseudolite Navigation Systems, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 42, 947-957. <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.11.947>
- Saito, S. 2019, GBAS/SBAS Implementation Perspective – Japan, in GBAS/SBAS International Workshop, Seoul, Korea, 3-5 June 2019.
- Sakai, T. 2018, The IGSO SBAS: DFMC Seamless and Robust Navigation, in 2018 ICG Annual Meeting, Xi'an, China, 5-9 Nov 2018. https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/icg13/wgb/wgb_23.pdf
- SBAS IWG 2021, Global SBAS Status, Satellite Based Augmentation System, SBAS Interoperability Working Group



and navigation.

Yongrae Kim received the B.S. and M.S. degrees from the Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea, in 2023 and 2025, respectively. He is currently pursuing the Ph.D. degree at Korea Aerospace University. His research interests include GNSS applications



Heeseob Kim is a principal researcher in the satellite application research team at Korea Aerospace Research Institute (KARI). He received Ph.D. in aerospace engineering from Seoul National University in 2000. He contributed to KOMPSAT development,

operation and applications for 25 years. His recent research topics are GNSS applications and artificial intelligence.



Jeongrae Kim is a professor in the Department of Aeronautical and Astronautical Engineering at Korea Aerospace University, Korea. He received his Ph.D. in Aerospace Engineering from the University of Texas at Austin in 2000. His research interest includes satellite instrument simulations, orbit determination, GNSS ionosphere, SBAS, and GNSS applications.

TDOA와 FDOA가 결합된 3차원 고속 이동체 위치추정 알고리즘

전슬비, 황석승[†]

3D Location Estimation Algorithm Based on the Combined TDOA and FDOA for Fast Moving Object

Seul-Bi Jeon^{id}, Suk-seung Hwang^{† id}

Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

ABSTRACT

In various aerospace and military applications, precise location estimation techniques are essential to accurately determine the location of objects at specific points in real time. In particular, when estimating the location of a Fast-Moving Object (FMO) with rapid location changes in a short period of time, such as a high-speed aircraft or a train, an algorithm that satisfies both high accuracy and fast processing speed is required. The representative location estimation techniques include Time Difference of Arrival (TDOA) and Frequency Difference of Arrival (FDOA). TDOA provides high accuracy but it does not consider the object's travel distance during the processing time, which causes serious location errors in the FMO environment. Although FDOA efficiently estimates both location and velocity, it has the disadvantage of being extremely sensitive to the initial location estimate. In this paper, we propose a combined location estimation algorithm with TDOA and FDOA in three-dimensional space that efficiently estimates the location of FMOs and compensates the above limitations of both techniques. The proposed algorithm first estimates the initial location of a FMO employing TDOA and then calculates its velocity employing FDOA to predict the FMO's trajectory. The location estimation performance of the proposed algorithm is evaluated through computer simulations under various scenarios, including different sensors, FMO placement, speed, etc.

Keywords: localization, TDOA, FDOA, fast-moving object

주요어: 위치추정, 시간 도달 차이, 주파수 도달 차이, 고속 이동체

1. 서론

항공우주 및 군수 분야에서 고속 이동체(Fast-Moving Object, FMO)의 특정 시점에서의 정확한 위치를 추정하는 기술은 핵심적인 기술로 자리 잡고 있다 (Zhou et al. 2025). 특히, 항공기나 미사일 등 FMO의 경우 짧은 시간 동안에도 위치가 크게 변동되므로, 높은 정확도를 유지하면서 빠른 처리 속도를 보유하는 알고리즘 개발이 필수적이다 (Zou et al. 2018, Wang & Li 2021).

대표적인 위치 추정 기법인 Time Difference of Arrival (TDOA)는 센서들에 도달하는 신호간 도착 시간 차이를 기반으로 신호원의 위치를 추정하는 기법으로 높은 위치 정확도를 제

공한다 (Qu et al. 2017, Yang 2024). 하지만, TDOA를 통해 위치를 추정하는 시간 동안 FMO는 이미 상당한 거리를 이동하게 되어, 실시간으로 정확한 위치를 추정하기에는 한계가 있다. 또 다른 대표적인 방법인 Frequency Difference of Arrival (FDOA)는 도플러 주파수 차이를 이용하여 이동 신호원의 위치 및 속도를 동시에 추정할 수 있는 장점이 있다 (Hmam 2017). 그러나, 초기 위치 추정 값에 민감하여 단독으로 사용할 경우 안정적인 성능을 보장하기 어렵다.

이를 극복하기 위해 TDOA와 FDOA를 이용하여 이동체의 위치를 추정하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있으며, Jia et al. (2020)와 Wu et al. (2023)는 TDOA와 FDOA를 이용한 이동체

Received Aug 11, 2025 Revised Sep 01, 2025 Accepted Sep 03, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: hwangss@chosun.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 위치추정 알고리즘을 제안하였고, Seo et al. (2019)는 TDOA, FDOA, Angel of Arrival (AOA)와 Particle Filter (PF)를 적용하여 정확도를 향상시켰다. 또한, Jo et al. (2023)는 2차원 환경을 고려한 FMO 위치추정 알고리즘을 제안하였다. 그러나, 선행연구 대부분은 2차원 환경이나 저속 이동체에 특화되어 있고, 추가적인 보조 기법에 의존하기 때문에 3차원 환경에서 빠르게 이동하는 FMO의 특정 시점 위치 추정에는 한계가 있다. 본 논문은 이러한 한계를 개선하기 위해, TDOA와 FDOA를 결합한 위치추정 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 먼저 TDOA를 통해 FMO의 3차원 초기 위치를 추정한 후, FDOA를 통해 계산된 속도 추정치를 해당 위치에 적용하여 FMO의 위치 추정 정확도를 개선한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 TDOA와 FDOA 추정 방법을 본 논문에 적합하게 설명하고, 3장에서 제안된 3차원 FMO 위치추정 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 평가하고, 5장은 결론이다.

2. 3차원 TDOA/FDOA 위치추정

본 장에서는 제안된 3차원 TDOA/FDOA 결합 알고리즘의 설명을 위해, 3차원 TDOA와 FDOA의 기본 개념을 소개한다.

2.1 3차원 TDOA 위치추정

결합된 TDOA/FDOA 알고리즘의 3차원 FMO 초기 위치를 추정하기 위해 TDOA를 활용한다. $R_i(\mathbf{x})$ 는 FMO의 위치 $\mathbf{x}=[x, y, z]^T$ 와 i 번째 센서의 위치 $\mathbf{x}_i=[x_i, y_i, z_i]^T$ 간의 거리로 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$R_i(\mathbf{x}) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}, \quad i=1,2,3,4 \quad (1)$$

FMO의 위치로부터 기준 센서인 첫 번째 센서까지의 거리 $R_1(\mathbf{x})$ 와 j 번째 센서까지의 거리 $R_j(\mathbf{x})$ 의 차이인 $R_{j,1}(\mathbf{x})$ 는 Eq. (2)로 정의할 수 있다.

$$R_{j,1}(\mathbf{x}) = R_j(\mathbf{x}) - R_1(\mathbf{x}), \quad j=2,3,4 \quad (2)$$

4개의 센서로부터 얻은 TDOA 측정값은 Eq. (3)과 같이 벡터 형태로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}_t(\mathbf{x}) = [R_{2,1}, R_{3,1}, R_{4,1}]^T \quad (3)$$

평균이 0이고 가우시안 분포를 갖는 잡음 (\mathbf{n}_t)을 고려하여, TDOA 측정 오차가 포함된 TDOA 관측값 ($\boldsymbol{\rho}_t$)은 Eq. (4)로 정의할 수 있다.

$$\boldsymbol{\rho}_t = \mathbf{r}_t(\mathbf{x}) + \mathbf{n}_t \quad (4)$$

계산된 $\mathbf{r}_t(\mathbf{x})$ 와 $\boldsymbol{\rho}_t$ 는 FMO의 초기 위치를 추정하기 위해 Iterative Least Squares (ILS) 알고리즘 (O'Donoghue 2019)의 입력 값으로 사용된다. ILS는 반복적으로 추정위치를 개선하는 방법이며, k 번 반복을 통해 얻은 추정된 위치는 Eq. (5)와 같다.

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \Delta \mathbf{x}_k \quad (5)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 은 $k-1$ 번째 추정된 위치를 의미하며, $\Delta \mathbf{x}_k$ 는 k 번째 위치 보정 값으로 Eq. (6)과 같다.

$$\Delta \mathbf{x}_k = [\mathbf{J}(\mathbf{x}_k) \mathbf{C}_t^{-1} \mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k)]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) \mathbf{C}_t^{-1}(\mathbf{x}_k) \mathbf{T}(\mathbf{x}_k) \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)$ 는 k 번째 반복에서 추정된 위치 \mathbf{x}_k 에 대한 자코비안 행렬이며, \mathbf{C}_t 는 $\boldsymbol{\rho}_t$ 의 오차 공분산 행렬이다 (O'Donoghue 2019). $\mathbf{T}(\mathbf{x}_k)$ 는 관측된 TDOA 측정값 ($\boldsymbol{\rho}_t$)과 k 번째 반복에서 예측된 TDOA 측정값 ($\mathbf{r}_t(\mathbf{x}_k)$)간의 차이이다. 이와 같은 과정을 반복하여 FMO의 초기 위치 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 를 결정한다.

2.2 3차원 FDOA 속도추정

결합된 TDOA/FDOA 알고리즘의 3차원 FMO 속도(이동방향 포함)를 추정하기 위해 FDOA를 활용한다. FMO의 속도 $\mathbf{v}=[v_x, v_y, v_z]^T$, i 번째 센서의 속도 $\mathbf{v}_i=[v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}]^T$, $R_i(\mathbf{x})$ 를 이용하여 거리 변화율 $\dot{R}_i(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 를 구할 수 있으며, Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{R}_i(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \frac{(v_{xi} - v_x)(x - x_i) + (v_{yi} - v_y)(y - y_i) + (v_{zi} - v_z)(z - z_i)}{R_i} \quad (7)$$

기준 센서인 첫 번째 센서의 거리 변화율 $\dot{R}_1(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 와 j 번째 센서의 거리 변화율 $\dot{R}_j(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 의 차이는 Eq. (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$\dot{R}_{j,1}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \dot{R}_j(\mathbf{x}, \mathbf{v}) - \dot{R}_1(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \quad (8)$$

4개의 센서로부터 얻은 FDOA 측정값은 Eq. (9)와 같은 벡터 형태로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}_f(\mathbf{v}) = [\dot{R}_{2,1}, \dot{R}_{3,1}, \dot{R}_{4,1}]^T \quad (9)$$

평균이 0이고 가우시안 분포를 따르는 잡음 (\mathbf{n}_f)을 고려하여, FDOA 측정 오차가 포함된 FDOA 관측값 ($\dot{\boldsymbol{\rho}}_f$)은 Eq. (10)으로 정의할 수 있다.

$$\dot{\boldsymbol{\rho}}_f = \mathbf{r}_f(\mathbf{v}) + \mathbf{n}_f \quad (10)$$

계산된 $\mathbf{r}_f(\mathbf{v})$ 와 $\dot{\boldsymbol{\rho}}_f$ 는 ILS 알고리즘의 입력 값으로 사용되며, k 번째 반복에서 얻은 속도 추정치는 Eq. (11)과 같다.

$$\hat{\mathbf{v}}_k = \hat{\mathbf{v}}_{k-1} + \Delta \mathbf{v}_k \quad (11)$$

여기서 $\hat{\mathbf{v}}_{k-1}$ 은 $k-1$ 번째 추정된 속도를 의미하며, $\Delta \mathbf{v}_k$ 는 k 번째 속도 보정 값으로 Eq. (12)와 같다.

$$\Delta \mathbf{v}_k = [\mathbf{J}(\mathbf{v}_k) \mathbf{C}_f^{-1} \mathbf{J}^T(\mathbf{v}_k)]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{v}_k) \mathbf{C}_f^{-1}(\mathbf{v}_k) \mathbf{F}(\mathbf{v}_k) \quad (12)$$

여기서 $\mathbf{J}(\mathbf{v}_k)$ 는 k 번째 반복에서 추정속도 값 \mathbf{v}_k 에 대한 자코비안 행렬이며, \mathbf{C}_f 는 $\dot{\boldsymbol{\rho}}_f$ 의 오차 공분산 행렬이다 (O'Donoghue 2019). $\mathbf{F}(\mathbf{v}_k)$ 는 관측된 FDOA 측정값 ($\dot{\boldsymbol{\rho}}_f$)과 k 번째 반복에서 예측한 FDOA 측정값 ($\mathbf{r}_f(\mathbf{v}_k)$)간의 차이이다. 이와 같은 과정을 반복하여 속도 $\hat{\mathbf{v}}_k$ 를 추정한다.

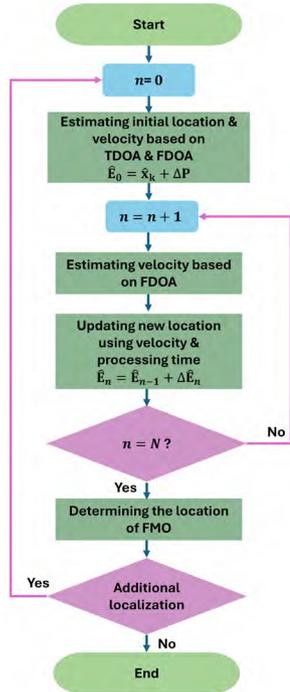


Fig. 1. The proposed FMO location estimation algorithm.

3. FMO를 위한 결합된 3차원 위치추정 알고리즘

이번 장은 TDOA와 FDOA를 결합한 3차원 FMO 위치추정 알고리즘에 대해 설명한다. 고속으로 이동하는 FMO의 경우, TDOA와 FDOA 프로세싱 시간과 같이 매우 짧은 시간에도 상당한 위치 변화가 생겨 심각한 위치추정 오차가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해, 본 논문은 두 위치추정 기술의 장점을 활용한 결합된 3차원 위치추정 알고리즘을 제안한다. TDOA를 활용하여 FMO의 초기 위치를 추정하고, FDOA를 활용하여 FMO의 속도와 이동방향을 계산하여 TDOA와 FDOA의 프로세싱 시간 동안 이동한 위치를 예측한다.

TDOA 프로세싱 시간(t_T) 동안 FMO가 이동한 거리를 고려한 위치 예측 값은 Eq. (13)과 같다.

$$\Delta \mathbf{P} = \hat{\mathbf{v}}_k \times t_T \quad (13)$$

FDOA 프로세싱 시간(t_F) 동안 FMO가 이동한 위치 예측 값은 Eq. (14)와 같다.

$$\Delta \mathbf{E}_n = \hat{\mathbf{v}}_k \times t_F \quad (14)$$

최종적으로 FMO의 예상 위치는 Eq. (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{E}}_n &= \hat{\mathbf{E}}_{n-1} + \Delta \hat{\mathbf{E}}_n \quad (n \geq 1) \\ \hat{\mathbf{E}}_0 &= \hat{\mathbf{x}}_k + \Delta \mathbf{P} \end{aligned} \quad (15)$$

설정된 임의의 시간($n=N$) 이후, 추가적인 위치 추정이 필요한 경우, Eq. (5)를 이용하여 다시 초기 위치를 추정하고 Eqs. (11-15)를 반복하여 FMO의 위치를 추정한다. Fig. 1은 3차원 환경에서 FMO의 위치를 정밀하게 추정하기 위해 제안된 위치추정 알고리

Table 1. Parameters for the first scenario.

| | Location (km) | Velocity (km/s) |
|----------------------|---------------------|----------------------|
| Satellite 1 | (800, 2000, 1500) | (4, 6, 5) |
| Satellite 2 | (-1500, -700, 1750) | (3, 7, 4) |
| Satellite 3 | (1800, 600, 1950) | (2, 5, 2) |
| Satellite 4 | (-550, 1250, 1600) | (2, 6, 3) |
| FMO | (200, 50, 8) | (0.25, 0.156, 0.264) |
| Center frequency | 400 MHz | |
| Timing error | 100 ns | |
| Frequency error | 4 Hz | |
| TDOA processing time | 0.1 sec | |
| FDOA processing time | 0.04 sec | |

Table 2. Parameters for the second scenario.

| | Location (km) | Velocity (km/s) |
|----------------------|---------------------|---------------------|
| Satellite 1 | (-1590, 1390, 1900) | (3, 2, 2) |
| Satellite 2 | (4610, 1450, 1850) | (4, 1, 3) |
| Satellite 3 | (900, 800, 2000) | (2, 3, 4) |
| Satellite 4 | (1000, 1250, 1700) | (5, 1, 1.5) |
| FMO | (1100, 1050, 11) | (0.113, -0.09, 0.2) |
| Center frequency | 500 MHz | |
| Timing error | 50 ns | |
| Frequency error | 5 Hz | |
| TDOA processing time | 0.1 sec | |
| FDOA processing time | 0.04 sec | |

즘의 순서도를 나타낸다. 제안된 알고리즘은 TDOA를 통해 초기 위치를 추정함으로써 FDOA가 갖는 초기 민감성을 상쇄시킨다. 또한, FDOA를 통해 FMO의 속도를 추정하여, 이를 최종 위치 결정에 반영하여 TDOA 및 FDOA 프로세싱 시간으로 인해 발생하는 위치 오차를 보정하여 최종 위치를 결정한다.

4. COMPUTER SIMULATION

본 장은 FMO를 위한 TDOA와 FDOA가 결합된 3차원 위치추정 알고리즘의 성능평가를 위해 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션은 두 가지 시나리오를 고려하였으며, 알고리즘 평가를 위해 설정된 주요 파라미터들은 Tables 1과 2에 정리되어 있다. 시간 오차와 주파수 오차 (CaJacob et al. 2016, Kim et al. 2022)는 510 ns와 5 Hz 이하로 설정하였고, TDOA 및 FDOA 프로세싱 시간은 MATLAB의 Tic-Toc 함수를 사용하여 측정한 결과, TDOA 프로세싱 시간 0.1초와 FDOA 프로세싱 시간 0.04초로 설정하였다. 또한, 센서들은 서로 다른 궤도 및 고도(2,000 km 이하)로 운용되고 있는 위성 (Deng et al. 2023)들에 탑재되어 있고, FMO는 일정한 속도와 방향으로 이동한다고 가정한다.

Figs. 2와 3은 각 시나리오에서의 센서들과 FMO의 위치와 이동방향을 보여준다. Fig. 4는 첫 번째 시나리오에서 실제 FMO의 위치와 TDOA를 통해 추정된 FMO 위치를 나타낸다. 각 위치에서의 화살표는 FMO의 이동방향을 나타내며, TDOA 프로세싱 시간 동안 FMO는 빠르게 특정 방향으로 이동하여 실시간 위치를 특정하기 어려워진다. 이와 같은 이유로, Fig. 4는 TDOA 프로세싱 시간 동안 FMO가 위치할 수 있는 범위를 추정 위치를 중심으로 3차원 구의 형태로 표현하였다. Fig. 5는 총 0.5초(TDOA 1회, FDOA 10회)동안 FMO의 위치를 추정한 결과를 나타낸다.

Fig. 6은 두 번째 시나리오에서 실제 FMO의 위치와 TDOA

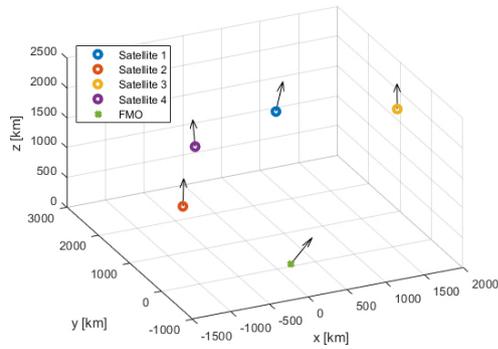


Fig. 2. Locations and moving directions of sensors and FMO for the first scenario.

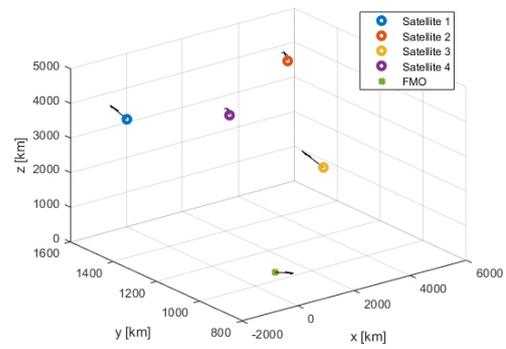


Fig. 3. Locations and moving directions of sensors and FMO for the second scenario.

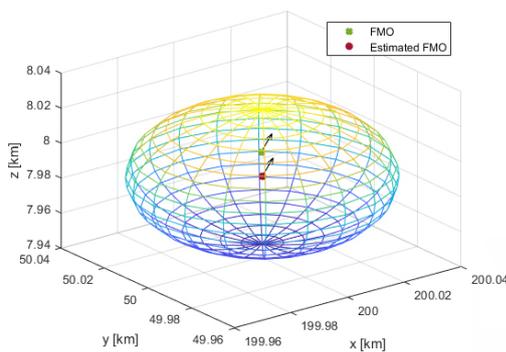


Fig. 4. The estimated FMO location and the expected range for the first scenario.

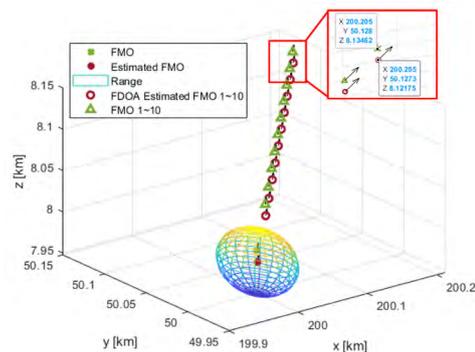


Fig. 5. The estimated result of FMO location for 0.5 second for the first scenario.

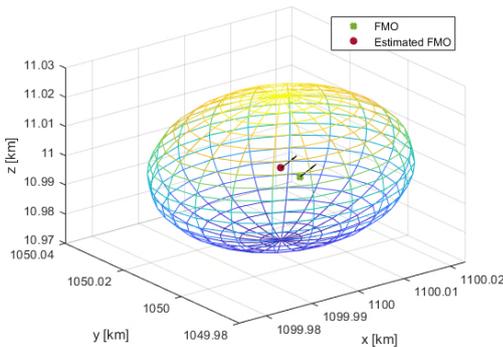


Fig. 6. The estimated FMO location and the expected range for the second scenario.

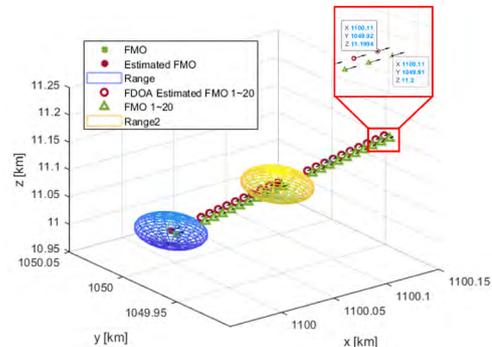


Fig. 7. The estimated result of FMO location for 1.0 second for the second scenario.

를 통해 추정된 FMO 위치를 나타내며, 각 위치에서의 화살표는 FMO의 이동방향을 나타낸다. Fig. 4와 마찬가지로, TDOA 프로세싱 시간동안 FMO의 위치를 특정할 수 없으므로, TDOA 프로세싱 시간 동안 FMO가 위치할 수 있는 범위를 구의 형태로 표현하였다. Fig. 7은 1초 동안(TDOA 2회, FDOA 20회) 2 사이클을 수행한 결과이다. 한 사이클 종료 후, TDOA를 다시 실행하여 두 번째 사이클의 초기 위치를 추정하고, 그 결과를 기반으로 FDOA를 실행하여 FMO의 최종 위치를 추정하였다. 두 시나리오에 대한 FMO의 최종 위치추정 결과를 비교한 결과, 두 번째 시나리오에

서 주파수 오차는 증가하였지만, 중심 주파수가 증가하였고 시간 오차가 감소되어 추정 오차가 줄어든 결과를 도출하였다.

두 시나리오에 대해 CaJacob et al. (2016)와 Kim et al. (2022)을 참고하여 0~500 ns의 가변 시간 오차, 0~5 Hz의 가변 주파수 오차를 고려하였으며, 위치추정 성능평가를 위해 Eq.(16)과 같이 정의되는 Root Mean Square Error (RMSE)를 활용하였다.

$$RMSE = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (z - \hat{z})^2]} \quad (16)$$

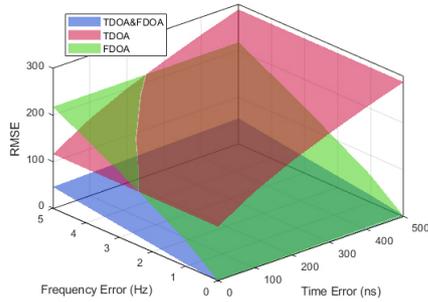


Fig. 8. RMSE results by time errors and frequency errors for the first scenario.

여기서 (x, y, z) 는 실제 FMO의 위치이며, $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 는 추정된 FMO의 위치이고, RMSE는 100번의 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 계산되었다. Figs. 8과 9는 각 시나리오에 대한 시간 및 주파수 오차별 위치추정 RMSE 그래프를 나타낸다. 단일 TDOA는 시간 오차만 고려하므로, 주파수 오차에 관계없이 시간 오차가 증가할수록 RMSE가 증가한다. 두 시나리오에서 TDOA 실행 후 0.5초가 지난 시점의 위치를 비교하므로, 상당한 추정 오차를 보인다. 단일 FDOA는 주파수 오차만 고려하므로, 시간 오차와 무관하게 주파수 오차가 증가할수록 RMSE가 증가한다. 반면, 제안된 알고리즘은 두 가지 오차를 모두 고려하지만, 일반적인 단일 TDOA나 FDOA 방법에 비해 우수한 FMO 위치추정 성능을 보유함을 두 그림으로부터 확인할 수 있다.

5. 결론

기존의 TDOA 및 FDOA 기반 위치추정 기법은 주로 저속 이동체 환경에 최적화되어 있어, 3차원 환경 FMO의 정밀한 위치추정이 어렵다는 한계가 있다. 본 논문은 FMO의 위치를 효율적으로 추정하기 위해 TDOA와 FDOA를 상호 보완적으로 결합한 3차원 FMO 위치추정 알고리즘을 제안하였다. TDOA와 FDOA 프로세싱 시간, FMO 초기 위치 및 속도를 고려한 제안된 위치추정 알고리즘은 TDOA를 이용하여 FMO의 3차원 초기 위치를 추정하고, 이를 기반으로 FDOA를 통해 이동 방향을 포함한 FMO의 속도를 추정하여, 3차원 환경에서의 FMO 위치를 효율적으로 계산한다. 다양한 환경 변수를 고려한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 3차원 환경에서 제안된 알고리즘의 FMO 위치추정 성능을 확인하였다. 또한, 다양한 시간 오차 및 주파수 오차를 고려한 경우에도 기존의 단일 TDOA와 FDOA 대비 우수한 위치 추정 성능을 보유하여, 항공 및 국방분야를 포함한 FMO의 정확한 위치가 요구되는 다양한 분야에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2024년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

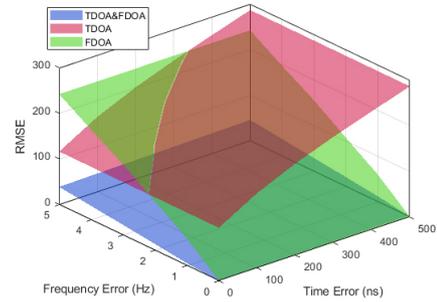


Fig. 9. RMSE results by time errors and frequency errors for the second scenario.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, S. B. Jeon. and S. Hwang.; methodology, S. B. Jeon. and S. Hwang.; software, S. B. Jeon.; validation, S. B. Jeon.; formal analysis, S. B. Jeon.; investigation, S. B. Jeon. and S. Hwang.; writing—original draft preparation, S. B. Jeon.; writing review and editing, S. Hwang.; supervision; S. Hwang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- CaJacob, D., McCarthy, N., O'Shea, T., & McGwier, R. 2016, Geolocation of RF emitters with a formation-flying cluster of three microsatellites, In Proceedings of the 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, UT, USA, 6-11 August 2016.
- Deng, X., Chang, L., Zeng, S., Cai, L., & Pan, J. 2023, Distance-based back-pressure routing for load-balancing LEO satellite networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72, 1240-1253. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3206616>
- Hmam, H. 2017, Optimal sensor velocity configuration for TDOA-FDOA geolocation, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65, 628-637. <http://doi.org/10.1109/TSP.2016.2621724>
- Jia, T., Ho, K. C., Wang, H., & Shen, X. 2020, Localization of a moving object with sensors in motion by time delays and Doppler shifts, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 68, 5824-5841. <http://doi.org/10.1109/TSP.2020.3023972>
- Jo, T. H., Park, J.-H., & Hwang, S. 2023, Combined Algorithm with TDOA/FDOA for Estimating Location of High-

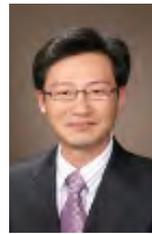
speed Moving Object, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 33, 563-569. <http://doi.org/10.5391/JKIS.2023.33.6.563>

- Kim, H., Lee, G. H., Cho, D., Park, J., Choi, D., et al. 2022, Mission and System Design of LEO Satellite-based Signal Acquisition, In *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Jeju, Korea, 16 November 2022, pp.1551-1553.
- O'Donoghue, N. 2019, *Emitter detection and geolocation for electronic warfare* (Boston: Artech House Inc.)
- Qu, X., Xie, L., & Tan, W. 2017, Iterative constrained weighted least squares source localization using TDOA and FDOA measurements, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65, 3990-4003. <http://doi.org/10.1109/TSP.2017.2703667>
- Seo, H., Kim, H., Kang, J., Jeong, I., Ahn, W., et al. 2019, 3D moving target tracking with measurement fusion of TDoA/FDoA/AoA, *ICT Express*, 5, 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2018.07.003>
- Wang, H. & Li, L. 2021, An effective localization algorithm for moving sources, *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 32. <https://doi.org/10.1186/s13634-021-00745-3>
- Wu, H., Wu, Z.-H., Shi, Z.-S., & Sun, S.-Y. 2023, Research on multi-moving target location algorithm based on improved TDOA/FDOA, *Measurement and Control*, 56, 938-952. <https://doi.org/10.1177/00202940221136246>
- Yang, X. 2024, Enhanced Moving Source Localization with Time and Frequency Difference of Arrival: Motion-Assisted Method for Sub-Dimensional Sensor Networks, *Applied Sciences*, 14, 3909. <http://doi.org/10.3390/app14093909>
- Zhou, X., Jia, W., He, R., & Sun, W. 2025, High-Precision Localization Tracking and Motion State Estimation of Ground-Based Moving Target Utilizing Unmanned Aerial Vehicle High-Altitude Reconnaissance, *Remote Sensing*, 17, 735. <http://doi.org/10.3390/rs17050735>
- Zou, Y., Liu, H., & Wan, Q. 2018, An iterative method for moving target localization using TDOA and FDOA measurements, *IEEE Access*, 6, 2746-2754. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2785182>



Seul-Bi Jeon received the B.S. and M.S. degrees in Electronic Engineering from Chosun University, Gwangju, Korea, in 2021 and 2023, where she is currently pursuing the Ph.D. degree with the Department of Electronic Engineering. Her current research interests include adaptive signal

processing for wireless communications and location detection technology (LDT).



Suk-seung Hwang was born in Seoul, Korea, and received the B.S. degree in Control and Instrumentation Engineering from Kwang Woon University, Seoul, in 1997, and the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical and Computer Engineering from the University of California, Santa Barbara (UCSB), in 2001 and 2006, respectively. At UCSB, his interests included adaptive signal processing applied to wireless communications, interference cancellation for GPS, and adaptive algorithms for an optical switch. He was a Teaching Assistant and a Graduate Student Researcher from 1999 to 2006. From 2006 to 2008, he was a Senior Engineer with the Telecommunication R&D Center, Samsung Electronics Company, Ltd., Suwon, Korea. At Samsung, his research interests included smart antennas and MIMO, channel estimation, and location-based service algorithms. From 2008 to 2014, he was with the Department of Mechatronics Engineering, and since 2014, he has been with the Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea, where he is currently a professor. His current research interests include adaptive signal processing for wireless communications and interference suppression, location detection technology (LDT) based on GPS and non-GPS, and wireless communications for a tire-pressure monitoring system (TPMS).

LSTM 모델을 이용한 대류층 천정 습윤지연 예측 기법

윤소윤¹, 김용래¹, 김희섭², 김정래^{1*}

Prediction Method of Zenith Wet Tropospheric Delay with LSTM Model

Soyoon Yoon¹, Yongrae Kim¹, Heeseob Kim², Jeongrae Kim^{1*}

¹Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, South Korea

²Satellite Application Research Team at Korea Aerospace Research Institute (KARI), Daejeon 34133, South Korea

ABSTRACT

Global navigation satellite system (GNSS) signal delay caused by the troposphere is a significant source of error for precision positioning. To mitigate this tropospheric delay effect, a precise point positioning (PPP) method estimates the tropospheric delay with carrier phase ambiguities. With accurately predicted tropospheric delay, this delay effect can be effectively minimized or the tropospheric delay estimation process can be improved. An artificial intelligence technique, Long Short-Term Memory (LSTM), was developed to predict the wet tropospheric delay using meteorological observations such as temperature, pressure, and relative humidity at GNSS monitoring stations. Five years of meteorological observation data from four GNSS measuring stations in the Korea were used to train the LSTM network model, which predicts one year of wet tropospheric delays at those stations. The predicted wet delays are compared with the wet delays estimated by the PPP method, and the forecast accuracy and geographical error differences are discussed.

Keywords: GNSS, tropospheric delay, zenith wet delay, LSTM, artificial intelligence, time series forecasting

주요어: 위성항법시스템, 대류층 지연, 수직습윤지연, LSTM, 인공지능, 시계열 예측

1. 서론

위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 신호는 대기를 통과하는 과정에서 전리층 및 대류층에 의한 신호지연이 발생하며, 이로 인해 적절한 보정 없이 GNSS를 활용할 경우 측위 정확도가 크게 저하될 수 있다. 특히 대류층 지연은 신호가 지표면에서 가까운 대류층을 통과할 때 발생하는 지역적 오차로, 대류층에 의한 신호지연은 수 미터 이상의 위치 오차를 유발하는 주요 요인 중 하나이다. 이 때문에 GNSS 기반 고정밀 위치결정에서는 대류층 지연의 정밀한 추정과 예측이 필수적이다 (Hofmann-Wellenhof et al. 2001).

대류층 천정 지연 (Zenith Total Delay, ZTD)은 건조지연 (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD) 및 습윤지연 (Zenith Wet Delay, ZWD)으로 구성된다. 건조지연은 대기압이나 온도처럼 변화가

비교적 적고 안정적인 대기 변수에 의해 결정되기 때문에, 다양한 경험적 대기 모델을 활용하여 높은 정확도로 추정 가능하다. 대표적으로 University of New Brunswick 3 modified (UNB3m) 모델이나 Saastamoinen 모델은 관측된 대기압, 기온, 수신기 위치 정보 등을 입력하여 ZHD를 산출하며, 이 값은 계절이나 위치에 따른 변화에도 비교적 정확하게 동작한다. 이에 비해 ZWD는 대기의 순간적인 변화와 국지적인 기상 조건에 크게 좌우되므로, 경험적 모델이나 단순한 보정 기법만으로는 충분한 정확도를 얻기 어렵다 (Bevis et al. 1992).

그렇기 때문에 ZWD 예측에 관한 연구가 최근 머신러닝과 딥러닝 기법을 중심으로 활발히 이루어지고 있다. Katsougiannopoulos & Pikridas (2009)는 GPS 상시관측소의 위치 정보와 시간 데이터를 입력 데이터로 사용하여 Multi-Layer Perceptron (MLP) 모델로 ZTD 예측을 수행하였다. Selbesoglu

Received Aug 12, 2025 Revised Aug 24, 2025 Accepted Aug 27, 2025

*Corresponding Author E-mail: jrkim@kau.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(2020)는 Artificial Neural Network (ANN)을 이용하여 최대 6 시간 후의 ZWD를 예측하였다. Bi et al. (2024)는 1차원 합성곱 신경망 (Convolution Neural Network, CNN)을 활용해 2018년 중국 기상관측소의 ZWD를 예측하였고, Global Pressure and Temperature (GPT) 3 등의 기존 모델 대비 Root Mean Squared Error (RMSE)가 감소함을 보고하였다. Chen & Gao (2024)는 Long Short-Term Memory (LSTM) 및 Feed Forward Neural Network (FFNN) 모델을 이용해 실시간 ZWD를 예측하였다. Wu et al. (2024)는 CNN-LSTM 모델을 통해 2022년 남미에서 ZWD를 예측하였고, Li et al. (2022)과 Li et al. (2023)은 LSTM, Back Propagation Neural Network (BPNN), Random Forest (RF) 등 다양한 머신러닝 기법을 적용해 각각 남극과 중국에서의 ZWD 예측 정확도를 개선하였다. 국내에서도 Lim & Bae (2021)은 기상 데이터를 입력으로 LSTM과 Multi-Layer Perceptron (MLP) 기반 ZWD 추정 모델을 제안하여 2015년 10월-11월 수원의 ZWD를 예측하였다.

본 연구에서는 시계열 데이터 예측에 강점을 가진 LSTM 모델을 적용하여 (Hochreiter & Schmidhuber 1997), 2017년부터 2022년까지 6년에 걸친 국내 GNSS 상시관측소의 관측데이터와 기상데이터를 활용해 2022년 한 해 동안의 ZWD 예측 성능을 분석하였다. European Space Agency (ESA)에서 만든 소프트웨어인 gLAB의 PPP 기능을 통해 ZTD를 추정하였으며, ZHD를 산정하기 위해서 캐나다의 University of New Brunswick (UNB)에서 개발한 UNB3 모델을 사용하였다. 예측 모델의 입력 변수로는 각 관측소에서 획득한 기압, 기온, 상대습도 등 주요 기상 자료와 시간에 대한 파라미터를 사용하였다. 본 연구의 가장 큰 특징은, 단기 데이터가 아니라 다양한 계절과 기상 조건, 그리고 실제 환경 변동성이 반영된 6년간의 장기간 실측 데이터를 바탕으로, LSTM 모델이 ZWD 예측에 있어 얼마나 안정적인지 신뢰성 있게 동작하는지를 체계적으로 평가했다는 데 있다.

본 논문의 2장에서는 ZWD 예측에 사용된 기법의 이론에 대해 설명하고, 3장에서는 예측에 사용한 데이터와 전처리 결과에 대해 설명하였다. 4장에서는 LSTM 모델의 구조와 최적화 결과를 제시하고 5장에서는 ZWD 예측 성능분석을 수행하였다.

2. 대류층 지연 추정 및 예측 기법

2.1 LSTM 추정기법

LSTM 모델은 Recurrent Neural Network (RNN)에서 발생하는 장기 종속성 문제를 해결하기 위한 딥러닝 기법이다 (Hochreiter & Schmidhuber 1997). RNN은 장기 데이터를 학습할 때 역전파 과정에서 기울기가 소실되어 가중치 갱신이 제대로 이루어지지 않는 문제를 가진다. 이것을 해결하기 위해 LSTM 네트워크는 입력 게이트, 망각 게이트 및 출력 게이트를 활용하여 RNN의 은닉 상태에서 셀 상태를 제어한다. LSTM 구조는 각 게이트가 현재 입력과 이전 네트워크 출력을 결합하여 게이트 출력을 계산하며, 이는 Eq. (1)과 같이 표현된다 (Cui et al. 2018).

Table 1. Input/Output data of LSTM model.

| Input/Output | Data type | Parameter |
|------------------------|--------------------|------------------------|
| Input | Time | Hour of day - cosine |
| | | Hour of day - sine |
| | | Day of year - cosine |
| | | Day of year - sine |
| | Metrological | Pressure (P) |
| Temperature (T) | | |
| Relative humidity (RH) | | |
| Output | Tropospheric delay | Zenith wet delay (ZWD) |

$$f_t = \sigma(W_x x_t + W_h h_{t-1} + b_f) \tag{1}$$

여기서 W_x 와 W_h 는 각각 현재 입력 x_t 와 이전 출력 h_{t-1} 에 곱해지는 가중치 행렬을 의미하며, b_f 는 각 게이트별 편향치에 해당한다. 망각 게이트 (forget gate)는 시그모이드 함수 값을 통해 이전 셀 상태 c_{t-1} 에서 어떤 정보를 보존할지 결정한다.

새로운 셀 상태 c_t 는 입력 게이트 (input gate)의 출력값과 새로운 후보 셀 상태 g_t 를 곱하여, 망각 게이트를 거친 이전 셀 상태와 합산함으로써 계산된다. 이 과정은 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$c_t = f_t * c_{t-1} + i_t * g_t \tag{2}$$

여기서 i_t 는 입력 게이트의 시그모이드 출력, g_t 는 입력값과 이전 출력에 대해 하이퍼볼릭 탄젠트 함수를 적용한 결과값이다. i_t 와 g_t 의 곱은 셀 상태에 새롭게 추가될 정보의 양을 결정한다.

마지막으로, 출력 게이트 (output gate)는 현재 셀 상태 c_t 에 하이퍼볼릭 탄젠트 함수를 적용한 결과에 출력 게이트의 시그모이드 값을 곱하여 최종 출력 h_t 를 생성한다. 이 연산은 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_t = o_t * \tanh(c_t) \tag{3}$$

여기서 o_t 는 출력 게이트의 활성화 값으로, 현재 입력 x_t , 직전 시점의 출력 h_{t-1} , 그리고 셀 상태와 결합되어 시그모이드 함수로 연산된다. LSTM 셀이 내부 상태의 정보를 얼마만큼 외부로 전달할지 조절하며, 이는 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$o_t = \sigma(W_{x_o} x_t + W_{h_o} h_{t-1} + b_o) \tag{4}$$

여기서 W_{x_o} 와 W_{h_o} 는 각각 출력 게이트에 대한 가중치 행렬이고, b_o 는 출력 게이트의 편향을 의미한다. LSTM 네트워크는 시계열 데이터의 분석 및 예측 문제에서 탁월한 성능을 보이는 순환 신경망 (RNN)의 대표적 구조이다.

본 연구에서 개발한 LSTM 기반 ZWD 예측 모델은 일일 시간, 계절 정보 및 기상관측값을 반영하여 ZWD를 예측하도록 구성되었다. Table 1은 LSTM 모델의 7개 입력 데이터 및 출력데이터를 정리한 것이다.

시간에 관한 입력 데이터로는 연중 날짜 (day of year, DOY) 과 일일중 시간 (hour of day, HOD)을 사용하였는데, 각각 cosine 및 sine 형태의 두 개씩 파라미터로 분리하여 사용하였다. 이는 해나 날짜가 변경되는 시점에서 입력 데이터의 연속성을 보전하기 위한 방법이다. 기상변수로는 대기압 (pressure), 기온 (temperature) 및 상대습도 (relative humidity)를 선정하였는데, 이는 다양한 반복시험 등을 통해 도출한 입력 파라미터 조합이다.

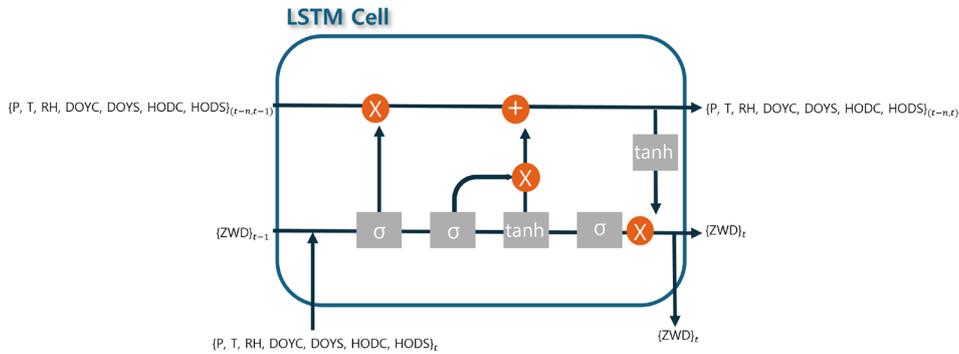


Fig. 1. The architecture and input/output of LSTM.

네트워크 구조는 입력층을 시작으로 두 개의 LSTM 계층을 순차적으로 지나도록 하였다. 첫 번째 LSTM 계층에서는 입력된 시계열 데이터의 low-level 단기 패턴을 학습하며, 그 출력을 두 번째 LSTM 계층에서 받아 장기적 의존성과 특징을 모델링한다. 이는 깊이가 얇은 단일 계층 구조보다 표현력과 학습 효율성에서 유리하며, 실제로 Sutskever et al. (2014)의 연구에서도 심층 LSTM 계층 구조가 더 우수한 성능을 보여준 바 있다. 이러한 Stacked LSTM은 상대적으로 더 적은 뉴런과 빠른 학습으로도 복잡한 함수 근사에 효과적인 반면, 계층 수가 과도하면 과적합, 학습 불안정성 및 계산 비용 증가 등의 문제를 초래할 수 있다 (Zaremba et al. 2014). 각 LSTM 계층에는 여러 개의 은닉 노드가 포함되어 있으며, 시계열 데이터의 시간적 연관성을 학습한다. 이후 완전연결 (Fully Connected, FC) 계층을 거쳐, 최종적으로 ZWD를 예측한다. 각 계층의 활성화 함수는 예측 성능을 극대화하기 위해 Rectified Linear Unit (ReLU)를 적용하였으며, 계층 및 노드 수는 최적화 과정을 통해 결정하였다. Fig. 1은 LSTM Cell 내부에서 ZWD 예측 모델의 과정과 데이터 입출력 과정을 보여준다.

2.2 Bayesian 최적화기법

Bayesian 최적화는 복잡한 하이퍼파라미터 조합에서 목적함수의 최적값을 효율적으로 탐색하는 확률론적 기법으로, 계산 비용이 높은 모델 (LSTM 등)의 하이퍼파라미터 튜닝에 특히 유리하다 (Brochu et al. 2010). 해당 기법은 관측된 목적 함수 값을 바탕으로 함수의 분포를 확률적으로 추정하고, 새로운 데이터가 추가될 때마다 사후분포를 갱신하여 탐색 효율을 높인다. 이 과정에서 이미 충분히 탐색된 영역은 피하고, 불확실성이 높은 영역을 우선적으로 탐색한다. 이러한 특성으로 인해 제한된 계산 자원이나 실험 횟수 내에서 높은 성능을 확보할 수 있다.

Bayesian 최적화의 절차는 초기 하이퍼파라미터 조합을 무작위로 평가한 뒤, Gaussian Process 등의 확률 모델로 사후분포를 추정 및 업데이트하고, 획득 함수 (acquisition function)를 최대화하는 지점을 다음 후보로 선정하는 순서로 진행된다. 획득 함수는 탐색과 활용 (exploration-exploitation)의 균형을 조절해 전역 최적해 탐색을 돕는다. 이로써 무작위 탐색이나 그리드 탐색보다 훨씬 적은 연산으로도 전역 최저점 (global minimum)에 도달할

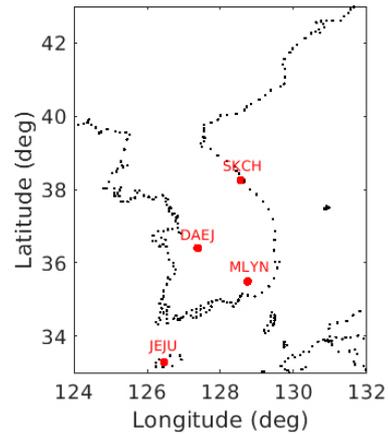


Fig. 2. Location of KASI GNSS monitoring stations used for processing.

가능성을 높일 수 있다 (Snoek et al. 2012).

3. 데이터 처리

3.1 한국천문연구원 관측데이터

한국천문연구원 (Korea Astronomy and Science Institute, KASI)은 전국에 9개 GNSS 상시관측소를 운영 중이며, 각 상시관측소별 기상관측데이터를 제공하고 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 대전 (DAEJ), 제주 (JEJU), 속초 (SKCH), 밀양 (MLYN) 4개 상시관측소의 기상데이터를 사용하였으며, 전국에 골고루 분포되어 있다.

각 상시관측소에서는 기상장비를 활용하여 온도, 압력 및 상대습도 등의 기상관측데이터를 수집하고 있다. KASI에서 제공하는 기상데이터는 1분 간격인데, 노이즈에 의한 영향을 완화시키고 ZWD 예측 간격과 맞추기 위하여 이동평균필터를 사용하여 5분 간격의 데이터로 변환하였다.

Fig. 3은 DAEJ 관측소에서 2017년부터 2022년까지 6년간 수집된 기상관측데이터를 나타내고 있다. 기상관측데이터의 노이즈를 줄이기 위하여 이동평균필터를 적용한 결과에 해당하며, 각각

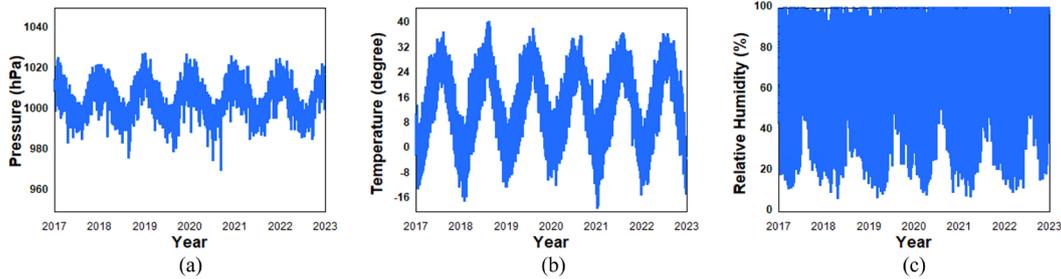


Fig. 3. Meteorological data of DAEJ from 2017 to 2022.

Table 2. Statistics of pressure, temperature, and relative humidity for each KASI ground stations in 2018.

| Station | Pressure (hpa) | | Temperature (°) | | Relative humidity (%) | |
|---------|----------------|-----|-----------------|------|-----------------------|------|
| | Mean | STD | Mean | STD | Mean | STD |
| DAEJ | 1005.9 | 8.1 | 12.7 | 11.8 | 69.8 | 21.7 |
| JEJU | 969.9 | 6.0 | 12.8 | 8.1 | 70.2 | 18.1 |
| SKCH | 1013.5 | 7.5 | 13.4 | 10.0 | 61.0 | 22.4 |
| MLYN | 1013.4 | 7.6 | 16.8 | 11.4 | 63.0 | 22.7 |

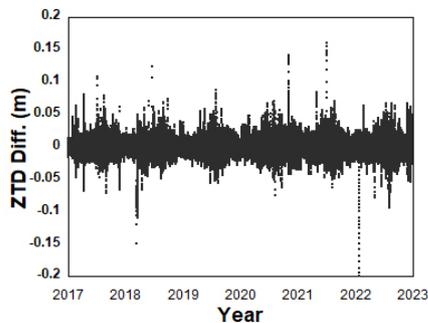


Fig. 4. Difference between IGS ZTD and PPP ZTD in DAEJ station from 2017 to 2022.

의 기상 데이터는 뚜렷한 계절별 변화 경향을 보이고 있다. Table 2에 제시된 2018년도 관측소별 기압, 기온, 상대습도의 통계량에서 볼 수 있듯이 지역적인 편차도 존재하는데, 최남단에 위치하고 도서지역인 JEJU의 경우 다른 관측소에 비해 기상변수의 변화량이 크지 않으며, 해양성기후 성격을 가지는 SKCH는 고기압의 영향으로 타 지역에 비해 습도가 약간 낮다 (KMA 2025a).

3.2 대류층 천정 지연

LSTM 기반 ZWD 예측 모델의 학습 및 평가를 위해서는 학습 기준값 또는 참값으로 사용할 정밀한 ZWD 값이 필요하다. 각 상시관측소별로 장기간 ZWD 값이 필요한데, 이는 상시관측소에서 수집한 GNSS 데이터를 이용하여 PPP를 수행하면 얻을 수 있다. PPP 과정에서 모호정수 추정을 위해서는 ZTD 추정이 필수적인데, ZTD 추정값에서 모델로 계산한 ZHD를 차감하면 ZWD를 계산할 수 있다. ZHD는 모델만을 사용하더라도 오차가 크지 않기 때문에 ZTD를 정밀하게 추정할 경우 ZWD도 정밀하게 추정하는 것이 가능하다. 한편, DAEJ 관측소는 IGS 기준국이므로 IGS에서 정밀한 ZTD 추정값을 제공한다. 이를 이용하여 본 연구에서 추정된 ZTD값의 정확도를 검증하였다. Fig. 4는 6년간 대전 IGS

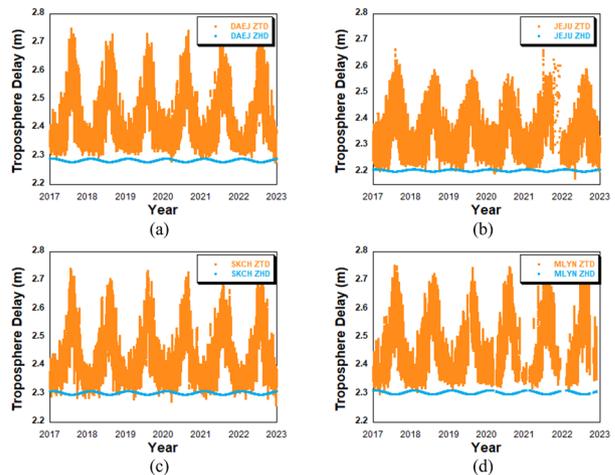


Fig. 5. Estimated KASI stations' ZTD and ZHD from 2017 to 2022.

와 PPP에서 추정된 ZTD의 차이를 나타낸다. 추정 결과, PPP 기반 ZTD와 IGS ZTD 추정 데이터 간의 평균 오차는 -0.004 m, 표준편차는 0.010 m, 최대 오차는 0.200 m로 산출되어, 장기간에 걸쳐 두 데이터가 전반적으로 매우 높은 정합성을 유지함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 본 연구에서 산출한 PPP 기반 ZTD 값이 IGS ZTD 추정 데이터와 비교해 장기적으로도 신뢰할 수 있는 수준임을 보여준다.

Fig. 5는 각각 DAEJ, JEJU, SKCH 및 MLYN 상시관측소에서 6년간 추정된 ZTD 및 ZHD를 나타내고 있다. ZTD는 gLAB 프로그램의 PPP를 사용하여 추정하였으며, ZHD는 UNB3m 모델을 사용하여 추정하였다. ZWD는 ZTD와 ZHD의 차이이다. 모든 관측소의 ZTD를 비교했을 때, 제주 상시관측소에서 ZTD 값이 가장 낮은 것을 확인할 수 있었는데, 이는 지리적 위치에 따른 기압, 기온 및 상대습도의 차이에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 6은 DAEJ 상시관측소에서 2017년 1월부터 2022년 12월까지 6년간 추정된 ZTD, ZHD 및 ZWD를 나타내고 있다. 기상데이

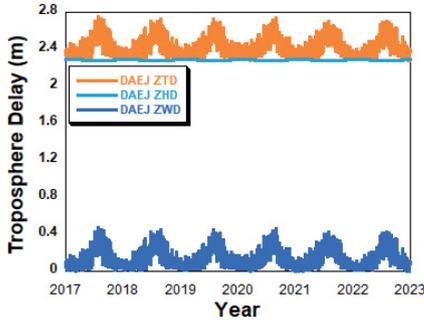


Fig. 6. Estimated and modeled zenith total delays at DAEJ from 2017 to 2022.

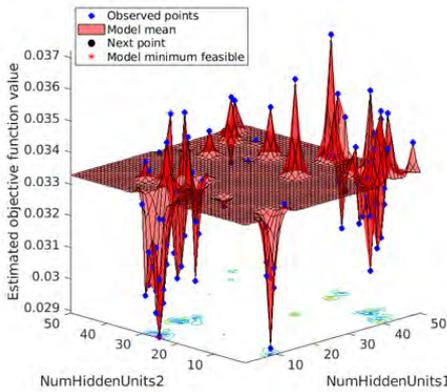


Fig. 7. Searching number of hidden units by Bayesian optimization.

터와 같이 뚜렷한 계절적 변화 경향을 보이고 있지만, 연도별 변화는 크지 않다. 이는 태양활동에 직접적인 영향을 받는 전리층 변화와 다른 점이다.

4. LSTM 모델 구성

4.1 LSTM 모델 최적화

LSTM 모델의 예측 성능을 최대화하기 위해 입/출력 데이터를 평균이 0이고 표준편차가 1인 정규분포를 가지도록 표준화를 수행하였으며, 모델의 파라미터를 탐색하기 위하여 Bayesian 최적화 기법을 적용하였다. LSTM 모델의 성능은 학습률 (learning rate), 반복횟수 (epoch), 미니배치 크기 (mini-batch size), 학습률 감소 주기 및 감소율 (learning rate drop period, factor), 은닉층 수와 노드 수, 활성화 함수 등 다양한 하이퍼 파라미터 조합에 따라 크게 달라진다. 하지만 이러한 파라미터의 조합이 매우 많기 때문에, 기존의 무작위 탐색 (random search)이나 그리드 탐색 (grid search) 방식은 계산 효율성과 최적 조합 도출 측면에서 한계가 있다 (Bergstra & Bengio 2012, Snoek et al. 2012). 이에 따라, 본 연구에서는 Bayesian 최적화 기법을 도입하여 적은 계산 횟수로도 효과적으로 최적 조합을 탐색할 수 있도록 하였다.

최적화는 총 2단계로 진행되었다. 먼저 1단계에서는 은닉층 노

Table 3. Optimized hyperparameters for the LSTM prediction.

| Hyperparameter | Value |
|------------------------|----------|
| Optimizer | Adam |
| Epoch | 50 |
| Mini batch size | 1000 |
| Learning rate | 0.005 |
| Learning rate schedule | Constant |
| Num hidden Unit 1 | 5 |
| Num hidden Unit 2 | 25 |

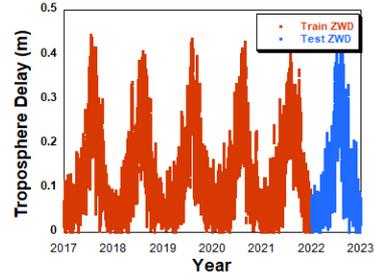


Fig. 8. Train and prediction data period of ZWD at SKCH station from 2017 to 2022.

드 수 제의 주요 하이퍼 파라미터의 초기 탐색 범위를 설정한 후, Bayesian 최적화로 100회의 탐색을 반복 수행하여 적합한 하이퍼 파라미터 조합을 도출하였다. 이어 2단계에서는 1단계 결과를 바탕으로 두 개 LSTM 계층의 은닉 노드 수를 집중적으로 탐색하였으며, 이 역시 100회의 탐색을 통해 최적의 구조를 결정하였다. 각 최적화 단계에서는 별도의 초기 종료 조건을 두지 않고, 사전에 설정한 100회의 탐색 반복을 종료 조건으로 하였다. 이는 예비 실험에서 약 50회 전후로 목적 함수 값이 수렴하는 경향을 확인하였으나, 탐색 안정성을 확보하기 위해 반복 횟수를 100회로 설정하였는데, 실제로 100회 반복 수행 결과, 탐색 후반부에서는 성능 개선 폭이 미미하여 탐색이 수렴하였음을 확인하였다. Fig. 7에는 Bayesian 최적화 과정에서 두 은닉층의 노드 수 조합에 따른 예측오차의 RMS 변화를 도시하였으며, 하단의 빨간색 점이 최적 조합일 때의 최소 RMS를 나타낸다. 각 단계별 최적화 결과 및 최종적으로 선정된 하이퍼 파라미터 조합은 Table 3에 정리하였다. 최적화에는 대전 상시관측소의 전체 기간 관측 데이터를 사용하였다.

4.2 LSTM 학습 데이터 분할

LSTM 모델 학습 시에는 가능한 많은 데이터를 사용하는 것이 유리하므로 2017년 1월부터 2021년 12월까지 5년간의 기상데이터와 ZWD 데이터를 학습에 활용하였고, ZWD 예측 기간은 2022년 1월부터 12월까지 1년으로 설정하였다. ZTD는 1년 주기를 가지므로, 5년간의 데이터는 총 다섯번의 변화 주기를 포함하여 ZTD의 계절별 변화 특성을 반영하기에 적합하다. 입력 데이터 간격은 5분으로 비교적 짧게 설정하였는데, 이는 출력데이터 ZWD 간격을 5분으로 설정하였으므로 입력 데이터 시간간격을 출력 데이터의 시간간격과 일치시켰다. Fig. 8은 SKCH 상시관측소의 ZWD 데이터 중 LSTM 모델 학습에 사용된 ZWD 데이터와 예측에 사

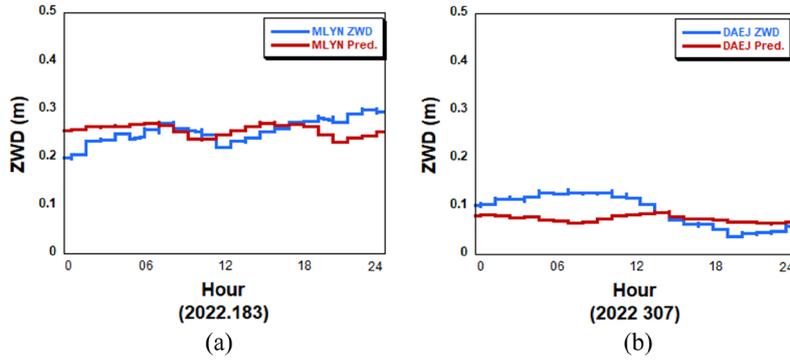


Fig. 9. ZWD prediction of (a) MLYN on July 2 and (b) DAEJ on November 2, 2022.

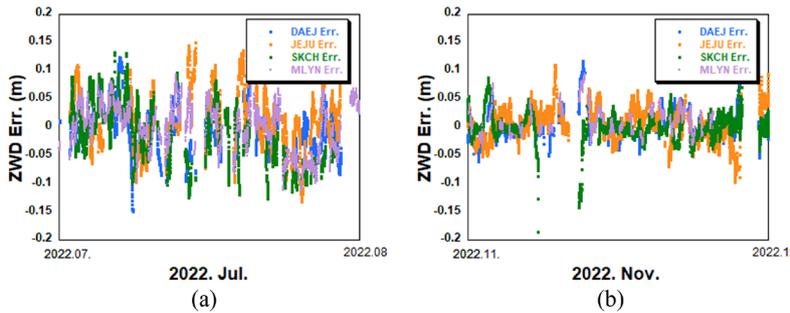


Fig. 10. ZWD prediction errors of four KASI stations in (a) July 2022 and (b) November 2022.

용된 ZWD 데이터 구간을 나타낸다.

본 연구에서는 학습데이터를 이용하여 LSTM 네트워크를 구성한 뒤 2022년 1년 동안의 ZWD를 네트워크 갱신없이 예측하였다. 이는 고정된 네트워크로 장기간 예측하는 경우의 예측성능 저하를 살펴보는 것을 목표로 하기 때문이다. 한편, 다음 시점의 ZWD를 예측하기 위하여 과거 1일 입력 데이터를 사용하여 학습하였다.

5. ZWD 예측 결과

4개 KASI 상시관측소의 5년간 기상데이터를 이용하여 LSTM 학습을 진행한 뒤, 2022년 1월부터 12월까지 1년간 ZWD 예측결과를 제시하였다. Fig. 9는 MLYN 및 DAEJ 상시관측소에서 2022년 7월 2일과 11월 2일의 ZWD 추정값 (PPP)과 예측 결과 (LSTM)을 비교한 것이다. 해당 날짜의 예측 결과는 PPP 추정 결과와 비슷한 수준을 유지하는 모습을 볼 수 있다. 여름철에는 고온 다습한 환경에서 ZWD의 절대값과 변동성이 모두 증가하기 때문에, ZWD 예측값 범위가 0.2 m 이상으로 그림에는 나타나지 않았지만 ZWD 범위가 0.1 m 근처인 겨울철의 예측보다 오차가 전반적으로 증가하는 경향이 나타났다 (KMA 2025b).

계절에 따른 예측 성능의 차이를 확인하기 위해 여름 (2022년 7월, DOY 182-212)과 겨울 (2022년 11월, DOY 305-334)을 대표 구간으로 선정하여 4개 KASI 상시관측소의 예측 결과를 비교하였다. Fig. 10은 4개 KASI 상시관측소의 2022년 7월과 11월, 각각 1

개월간 4개 KASI 상시관측소의 ZWD 예측 오차를 제시하고 있는데, 계절별 예측 오차 특성 및 실제 예측값의 시계열 변화를 확인할 수 있다. 각 KASI 상시관측소의 7월 예측 RMS 오차는 대전이 0.045 m, 속초와 제주가 각각 0.054 m, 0.055 m, 밀양이 0.041 m에 해당하는 반면, 11월 예측 RMS 오차는 대전과 속초가 각각 0.024 m, 0.025 m, 제주와 밀양이 0.029 m로 ZWD의 변화가 큰 여름철보다 ZWD의 변화가 작은 겨울철의 예측 성능이 더 좋다는 것을 확인하였다.

Fig. 11은 LSTM 모델을 활용하여 각각 대전, 제주, 속초, 밀양 상시관측소의 2022년 ZWD를 예측한 결과를 나타내고 있다. 파란색은 각 상시관측소의 ZWD 추정값이며, 빨간색은 본 연구에서 제안한 LSTM 모델로 예측한 결과이다. Fig. 12에서는 각 상시관측소의 예측 오차를 비교하고 있다. 모든 ZWD 시계열은 전반적으로 여름철에 큰 값을 나타낸다. DAEJ 상시관측소의 경우, 2022년 7월에는 평균 0.282 m, 표준편차 0.059 m로 관측되었다. 그러나 겨울철인 2022년 11월에는 평균 0.086 m, 표준편차 0.033 m로, 여름철에 비해 값이 작고 변동성이 낮은 양상을 보였다. 이러한 경향은 여름철에 고온다습한 우리나라 기후 특성상 ZWD가 대류권 내 수증기량에 민감하게 반응한다는 물리 특성과 일치하며, 이러한 환경에서는 ZWD의 절대값과 변동성이 모두 증가함을 나타낸다. 예측된 결과는 이러한 계절 변동성과 급격한 변화 패턴을 0.030 m 이내의 오차 수준으로 반영하고 있음을 알 수 있다. KASI 밀양 상시관측소의 경우, 데이터의 불연속성이 일부 존재하는데, 이는 PPP에 사용되는 KASI 관측 데이터의 누락 또는 입력 변수로 사용되는 기상 데이터의 누락과 관련이 있다.

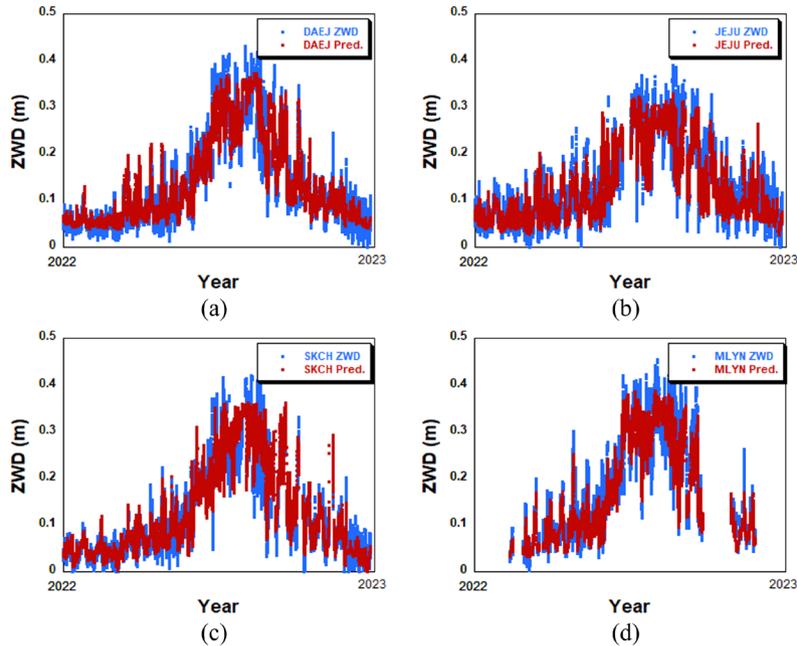


Fig. 11. Each KASI stations' prediction results in 2022.

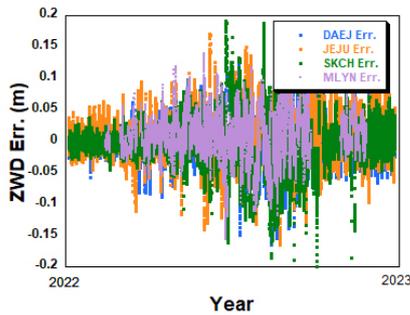


Fig. 12. Each KASI stations' prediction errors in 2022.

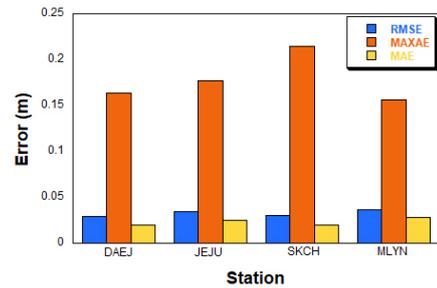


Fig. 13. ZWD prediction error for each KASI stations in 2022.

Table 4. Prediction error of ZWD for each KASI stations.

| Station | Mean (m) | STD (m) | RMS (m) | MAXAE (m) | MAE (m) |
|---------|----------|---------|---------|-----------|---------|
| DAEJ | -0.000 | 0.029 | 0.029 | 0.164 | 0.020 |
| JEJU | 0.006 | 0.034 | 0.034 | 0.177 | 0.025 |
| SKCH | -0.003 | 0.030 | 0.030 | 0.215 | 0.020 |
| MLYN | 0.008 | 0.036 | 0.037 | 0.156 | 0.028 |

Table 4는 2022년 1년간 KASI 대전 (DAEJ), 제주 (JEJU), 속초 (SKCH), 밀양 (MLYN) 4개 상시관측소의 ZWD 예측 결과에 대한 오차 통계를 비교한 것이다. 각 상시관측소에 대해 예측값과 실제 ZWD 간의 오차 평균, 오차에 대한 표준편차, 평균 제곱근 오차 (RMSE), 최대 절대 오차 (Maximum Absolute Error, MAXAE), 마지막으로 평균 절대 오차 (Mean Absolute Error, MAE)를 산출하였다. Fig. 13은 KASI 상시관측소별 ZWD 예측 오차를 비교하여 보여준다. 전체적으로 RMS 오차는 약 0.030 m, MAE는 약 0.020 m 수준으로 유지되었다. 이는 네 개 KASI 상시관측소에서 관측된 ZWD 범위 (0.05 m - 0.5 m)에 비해 약 5% 내외의 오차 수준에 해당한다. 모든 상시관측소에 대하여 평균 오차는 0.010 m

이하로 유지되었으며, 이러한 이유로 대부분 RMS 오차 결과는 오차의 표준편차 결과와 유사하다. 예측 오차는 대전과 속초 상시관측소에서 RMS 오차가 각각 0.029 m, 0.030 m, MAE가 0.020 m로 가장 좋은 예측 성능을 보였다. MAXAE는 대전이 0.164 m, 속초가 0.215 m로 대전의 예측 성능이 더 좋았다. 이는 Table 2에서 볼 수 있듯 내륙 중부에 위치한 대전의 상대습도가 평균적으로 더 높지만, 해양성 기후와 고기압의 영향을 받는 속초에 비해 전형적인 대륙 기후 특성을 보여 예측이 상대적으로 용이했기 때문이라고 판단하였다. Table 2에서 대전 (DAEJ)의 평균 상대습도는 69.8%로 속초 (SKCH)의 61.0%보다 높으나 변동성은 속초보다 작게 나타나는데, 이는 분지 지형을 기반으로 한 대륙성 기후 특성상 대전의 습도 변화가 계절적, 지역적 변동성에 의해 크게 요동치지 않고, 예측 안정성을 확보하는 데 유리했음을 시사한다. 반면 속초는 해양성 기후와 foehn 현상, 양간지풍 등 지역적 특수 기후 현상의 영향을 받아 고기압의 영향을 받는 동시에 상대습도의 변동성이 더 크며, 이에 따라 특정 시점에서 예측 성능이 저하되어 MAXAE가 상대적으로 크게 나타난 것으로 해석

할 수 있다 (KMA 2025a). 제주의 RMS 오차는 0.034 m, MAE는 0.025 m로 제주의 기상 변화량은 4개 상시관측소 중에서 가장 작지만, 쿠로시오 난류의 영향을 받아 연중 온난 습윤하며 가장 큰 평균 상대습도를 가진다 (KMA 2025c). 그러한 해양성 난류의 영향으로 습도 변동성이 크지 않아 극단적 오차가 상대적으로 적게 발생하였다. 이에 따라 예측 오차는 대전, 속초에 비하여 크게 나타났음에도 불구하고, MAXAE는 0.177 m로 속초보다 작은 값을 보였다. 최대 ZWD 오차는 밀양에서 RMS 오차가 0.037 m로 가장 크게 나타났으며 이는 지역적 특성으로 인한 여름철 급격한 ZWD 변화 혹은 입력 데이터의 부재와 관련된 것으로 판단된다.

본 연구와 유사한 기존 논문을 비교 대상으로 삼아, 동일 국가 또는 본 논문에서 사용한 한반도와 유사한 ZWD 범위를 가지는 지역의 예측 결과를 검토하였다. MLP와 LSTM을 사용한 Lim & Bae (2021) 연구의 경우 LSTM 모델에서 0.0262 m 수준까지 RMS 오차를 줄였다. BPNN과 RF 모델을 사용한 Li et al. (2023) 연구의 경우 RF 모델의 경우 RMS 오차는 0.0353 m, BPNN 모델의 경우 0.0365 m RMS 오차를 달성하였다. CNN 모델을 사용한 Bi et al. (2024) 연구는 대기 모델에 따라 각각 0.0389 m, 0.0421 m의 RMS 오차를 달성하였으며, CNN-LSTM 모델로 예측한 Wu et al. (2024)의 연구에서는 0.0440 m의 RMS 오차를 달성하였다. 예측 정확도는 기법뿐만 아니라 입력 변수와 최적화 방법에 따라 크게 달라지는데, 본 연구는 단기 예측에 최적화된 파라미터를 적용하여 계절과 지역을 불문하고 안정적인 성능을 확보하였다.

6. 결론

GNSS 신호 지연의 주요 원인인 대류층 지연은 기상 변수와 계절 변화에 큰 영향을 받으며, 특히 ZWD는 수증기량과 지역적 기상 조건에 따라 변동성이 커 높은 예측 정확도가 필요하다. 본 연구에서는 LSTM 기반 예측 모델을 통해 ZWD를 예측하였으며, 5년간의 기상변수 시계열 데이터를 학습한 뒤 1년간의 예측 성능을 분석하였다. 모델 성능 검증을 위한 ZWD 참값으로는 PPP를 통해 추정된 ZTD와 UNB3m 모델을 통해 추정된 ZHD의 차이를 사용하였다.

예측 결과, 국내 지상국들의 예측 오차 RMS의 평균은 여름 (2022년 7월)에 0.049 m로 높았고, 겨울 (2022년 11월)에는 0.027 m로 낮아졌다. 이는 건조한 계절일수록 예측 오차가 낮게 유지되고, 습한 날씨에서도 기상 변동성을 비교적 잘 추적함을 의미한다. 2022년 전체 예측에서 대전과 속초의 예측 오차 RMS는 각각 0.029 m와 0.030 m, 제주는 0.034 m, 밀양은 0.037 m로, 네 지점 모두 유사한 오차 수준을 보였다. 이러한 결과는 LSTM 모델이 계절 및 지역에 관계없이 안정적인 성능을 유지하며, GNSS 대류층 지연 예측에 충분히 활용 가능성을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 RS-2022-00207459).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J.K.; formal analysis, S.Y. and Y.K.; data curation, S.Y. and Y.K.; writing—original draft preparation, S.Y. and Y.K.; writing—review and editing, J.K.; project administration, J.K., H.K.; funding acquisition, H.K.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bergstra, J. & Bengio, Y. 2012, Random Search for Hyper-Parameter Optimization, *Journal of Machine Learning Research*, 13, 281-305.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., et al. 1992, GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92, 15787-15801. <https://doi.org/10.1029/92JD01517>
- Bi, H., Huang, L., Zhang, H., Xie, S., Zhou, L., et al. 2024, A deep learning-based model for tropospheric wet delay prediction based on multi-layer 1D convolution neural network, *Advances in Space Research*, 73, 5031-5042. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.02.039>
- Brochu, E., Cora, V. M., & de Freitas, N. 2010, A Tutorial on Bayesian Optimization of Expensive Cost Functions, with Application to Active User Modeling and Hierarchical Reinforcement Learning, arXiv:1012.2599. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1012.2599>
- Chen, J. & Gao, Y. 2024, A Machine Learning-Based Tropospheric Prediction Approach for High-Precision Real-Time GNSS Positioning, *Sensors*, 24, 2597. <https://doi.org/10.3390/s24102957>
- Cui, Z., Ke, R., Pu, Z., & Wang, Y. 2018, Deep Bidirectional and Unidirectional LSTM Recurrent Neural Network for Network-wide Traffic Speed Prediction, in *International Workshop on Urban Computing (UrbComp)*, Nova Scotia, Canada, 14 Aug. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.02143>
- Hochreiter, S. & Schmidhuber, J. 1997, Long Short-Term Memory, *Neural Computation*, 9, 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. 2001, *GPS Theory and Practice*, 5th ed. (New York: Springer-Verlag Wien).
- Katsougiannopoulos, S. & Pikridas, C. 2009, Prediction of zenith tropospheric delay by multi-layer perceptron, *Journal of Applied Geodesy*, 3, 223-229. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1811-1_11

org/10.1515/JAG.2009.022

Korea Meteorological Administration, Regional climate characteristics [Internet], cited 2025a Apr 28, available from: <https://www.weather.go.kr/w/climate/statistics/regional-char.do>

Korea Meteorological Administration, Korean climate characteristics [Internet], cited 2025b Apr 28, available from: <https://www.weather.go.kr/w/climate/statistics/korea-char.do>

Korea Meteorological Administration, Korean climate characteristics [Internet], cited 2025c Apr 28, available from: <https://www.weather.go.kr/w/climate/statistics/regional-char.do?area=9>

Li, Q., Yuan, L., & Jiang, Z. 2023, Modeling tropospheric zenith wet delays in the Chinese mainland based on machine learning, *GPS Solutions*, 27, 171. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01507-4>

Li, S., Xu, T., Xu, Y., Jiang, N., & Bastos, L. 2022, Forecasting GNSS Zenith Troposphere Delay by Improving GPT3 Model with Machine Learning in Antarctica, *Atmosphere*, 13, 78. <https://doi.org/10.3390/atmos13010078>

Lim, S.-H. & Bae, T.-S. 2021, Estimation of GNSS Zenith Tropospheric Wet Delay Using Deep Learning, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 39, 23-28. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2021.39.1.23>

Selbesoglu, M. O. 2020, Prediction of tropospheric wet delay by an artificial neural network model based on meteorological and GNSS data, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23, 967-972. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.11.006>

Snoek, J., Larochelle, H., & Adams, R. P. 2012, Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms, *Advanced in Neural Information Processing Systems*, 4. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1206.2944>

Sutskever, I., Vinyals, O., & Le, Q. V. 2014, Sequence to sequence learning with neural networks, arXiv:1409.3215. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.3215>

Wu, Y., Huang, L., Feng, W., & Tian, S. 2024, A Hybrid Deep Learning Algorithm for Tropospheric Zenith Wet Delay Modeling with the Spatiotemporal Variation Considered, *Atmosphere*, 15, 121. <https://doi.org/10.3390/atmos15010121>

Zaremba, W., Sutskever, I., & Vinyals, O. 2014, Recurrent neural network regularization, arXiv:1409.2329. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.2329>



Soyoon Yoon received the B.S. degree in Department of Software Engineering from Korea Aerospace University, Korea, in 2024. She is currently an M.S. student in Korea Aerospace University. Her research interests include GNSS applications and navigation.



Yongrae Kim received the B.S. and M.S. degrees from the Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea, in 2023 and 2025, respectively. He is currently pursuing the Ph.D. degree at Korea Aerospace University. His research interests include GNSS applications and navigation.



Heeseob Kim is a principal researcher in the satellite application research team at Korea Aerospace Research Institute (KARI). He received Ph.D. in aerospace engineering from Seoul National University in 2000. He contributed to KOMPSAT development, operation and applications for 25 years. His recent research topics are GNSS applications and artificial intelligence.



Jeongrae Kim is a professor in the Department of Aeronautical and Astronautical Engineering at Korea Aerospace University, Korea. He received his Ph.D. in Aerospace Engineering from the University of Texas at Austin in 2000. His research interest includes satellite instrument simulations, orbit determination, GNSS ionosphere, SBAS, and GNSS applications.

GNSS 동기 해상 부이 네트워크 기반 TDOA 수중 표적 위치 추정

현철^{1*}, 김현승², 김동건¹, 이성균¹

GNSS-Synchronized Surface Buoy Network TDOA for Underwater Target Localization

Chul Hyun^{1*}, Hyunseung Kim², Dong Geon Kim¹, Sungkyun Lee¹

¹Principal Researcher, Maritime R&D Center, LIG Nex1, Seongnam, Gyeonggi-do 13488, Korea

²Senior Researcher, Maritime R&D Center, LIG Nex1, Seongnam, Gyeonggi-do 13488, Korea

ABSTRACT

Time Difference of Arrival (TDOA) localization using GNSS-synchronized surface buoys offers a promising solution for underwater emitter tracking without direct cable or acoustic links. However, the achievable localization accuracy depends on the interplay of buoy geometry, time-synchronization errors, and dynamic tracking constraints. This paper presents a quantitative analysis of these trade-offs using both static and dynamic scenarios. For static localization, Geometric Dilution of Precision (GDOP) and Root Mean Square Error (RMSE) are evaluated under varying buoy formations and clock errors. For dynamic tracking, an Extended Kalman Filter (EKF) framework incorporating realistic ping update rates is applied to evaluate track persistence and accuracy over time. Simulation results show that the buoy geometry strongly influences GDOP patterns and error sensitivity, time-synchronization errors above the millisecond scale rapidly degrade localization performance, and in dynamic tracking, slower ping rates combined with unfavorable geometries can cause error plateaus even when filtering is applied. These findings provide practical guidelines for designing GNSS-synchronized buoy networks by balancing geometry selection, synchronization precision, and update rate according to operational requirements.

Keywords: GNSS synchronization, surface buoy network, time difference of arrival, underwater

주요어: GNSS 동기화, 해상 부이 네트워크, 도달시간차 측위, 수중 위치 추정, 확장 칼만 필터

1. 서론

수중에서 운용되는 자율무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)은 해양 탐사, 군사 작전, 환경 모니터링 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 그러나 수중 환경에서는 전파가 급격히 감쇠되어 글로벌 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)을 직접 수신할 수 없으므로, 정확한 위치 추정을 위해 별도의 항법·위치결정 기법이 요구된다. 전통적으로 사용되는 장거리측위(Long Baseline, LBL), 단거리측위(Short Baseline, SBL), 초단거리측위(Ultra Short Baseline, USBL) 방식은 각각의 장점에도 불구하고 설치·운용 비용, 기준점 고정 설

치에 따른 제약, 시야 제한 등 구조적 한계를 가진다 (Kilfoyle & Baggeroer 2000, Stojanovic & Preisig 2009, Paull et al. 2014).

이러한 한계를 극복하기 위해 GNSS 수신에 가능한 수상 플랫폼과 수중 음향 수신기를 결합하는 하이브리드 방식이 제안되어 왔다. 이 방식은 수상에서 고정밀 위치와 시간 기준을 확보한 뒤, 수중 표적과의 음향 신호 도달시간(Time of Arrival, TOA) 또는 도달시간차(Time Difference of Arrival, TDOA)를 계산하여 위치를 산출한다. GNSS 동기화 기반의 표면 노드 네트워크는 설치·회수의 편의성, 확장성, 시야 제약 완화 등의 장점이 있으며 (Han et al. 2015, Zhang et al. 2016), 특히 부이형 또는 소형 자율수상정(autonomous surface vehicle)을 활용할 경우 작전 환경에 맞춘

Received Aug 14, 2025 Revised Aug 21, 2025 Accepted Aug 23, 2025

*Corresponding Author E-mail: chul.hyun@gmail.com



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유연한 배치가 가능하다.

대표적인 관련 연구로 Otero et al. (2023)는 Global Positioning System (GPS)와 음향 모델을 결합한 표면 부이 네트워크를 제안하고, 부이 배치 기하와 채널 환경에 따른 성능 특성을 분석하였다. Aparicio et al. (2016)는 GPS 동기 표면 노드와 직접확산스펙트럼(direct sequence spread spectrum) 기반 양방향 음향 통신을 이용하여, 마스터 노드(예: 모선)에서 AUV 위치를 계산하는 방식을 제시하였다. 이러한 구조는 AUV가 부이 신호를 수신·응답하여 자율적으로 위치를 계산하거나 항로 계획을 갱신할 수 있다는 점에서 장점이 있다.

본 연구는 이에 비해 AUV가 단방향으로 송신하는 ping 신호를 다중 부이가 수신하고, 네트워크 상에서 TDOA를 계산한 뒤 중앙 처리 노드에서 위치를 추정하는 구조를 제안한다. 이 방식은 AUV 측의 하드웨어·연산 부담을 최소화하고, 부이 네트워크 확장성 및 멀티-AUV 지원 가능성을 높인다. 또한 운용 개념상, 외부에서 종합 위치 정보를 처리한 후 필요한 핵심 정보만 AUV에 재전송하거나 해상시험장에서 실시간 모니터링 용도로 활용하는 데 적합하다. GNSS 기반 동기화만 확보되면, 부이 간 RF 네트워크를 통해 실시간 위치 계산이 가능하므로, 운용 편의성과 비용 효율성 측면에서 이점을 가진다.

수중 위치결정의 정밀도는 부이 배치 기하학적 정밀도 희석(Geometry of Dilution of Precision, GDOP)과 시계 동기 오차(σ_t)에 크게 영향을 받으며, 여기에 표적의 속도와 위치 업데이트 주기 등이 복합적으로 작용한다 (Chan & Ho 1994, Zhang et al. 2016, Shaukat et al. 2021). 예를 들어 Shaukat et al. (2021)는 복수 센서와 필터 기반 융합기법을 통해 수중 플랫폼의 위치 정확도를 향상시킬 수 있음을 보였는데, 이는 본 연구에서 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)를 활용하여 동적 추적 정밀도를 개선하는 접근과도 맥락을 같이 한다.

본 논문에서는 우선 정적 시나리오에서 부이 간격, 형상, σ_t 조합에 따른 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 변화를 시뮬레이션으로 분석하여 최적 배치 지침을 도출한다. 이어 동적 시나리오에서는 Loosely Coupled EKF를 적용하여 표적 속도(v)와 ping 주기(T_{ping})의 조합이 추적 오차에 미치는 영향을 정량화한다. 분석 결과를 토대로, 위치 오차의 RMSE가 2 m 이하로 유지될 수 있는 v , T_{ping} , σ_t 조합 범위를 제시하고, GNSS-denied 환경에서 실용적인 설계 가이드를 제공한다.

2. 시스템 개요

2.1 전체 구조

본 연구에서 제안하는 수중 위치 추적 시스템은 GNSS 동기 기반의 해상 부이 네트워크를 중심으로 구성된다. AUV는 자체적으로 위치 계산이나 시간 동기화를 수행하지 않고, 일정 주기로 수중 음향 ping 신호만 송신한다. 수면에 배치된 다수의 부이는 GNSS 수신기를 통해 실시간 절대 위치와 Pulse Per Second (PPS) 신호를 확보하여 공통 시간 기준을 유지하며, AUV로부터 송신된 ping 신호의 TOA를 측정한다. 각 부이는 측정된 TOA 데

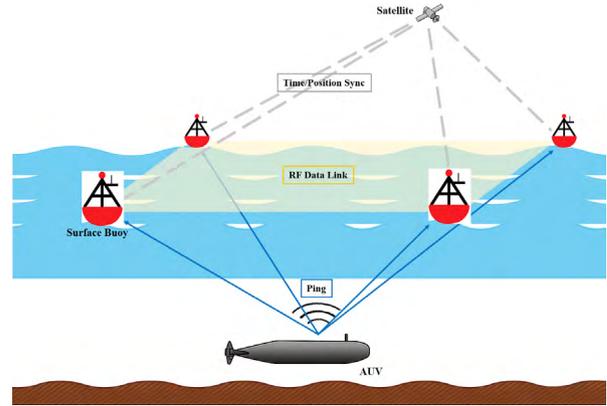


Fig. 1. Conceptual diagram of GNSS-synchronized buoy network for AUV localization.

이터를 RF 무선 링크를 통해 중앙 처리 노드로 전송하고, 중앙 처리 노드는 기준 부이(reference buoy)에 대한 TDOA를 계산하여 AUV의 위치를 추정한다.

Fig. 1은 이러한 시스템 구조와 신호 흐름을 개념적으로 나타낸 것이다. 회색 점선은 각 부이가 GNSS 위성으로부터 시간·위치 정보를 수신하여 동기화하는 과정을, 노란색 음영 박스는 부이와 중앙 노드가 동일 RF 네트워크에 연결되어 있음을 나타내며, 파란 실선은 AUV ping의 수중 음향 전파 경로를 나타낸다. 부이는 ping의 TOA를 측정하고 이를 RF 링크로 전송하며, 중앙 노드에서는 기준 부이에 대한 TDOA를 계산하여 위치를 산출한다.

이러한 구조는 전통적인 LBL 시스템과 달리, 부이 수량과 배치를 임무 환경에 맞추어 유연하게 변경할 수 있으며, 동일 네트워크에서 다수의 AUV를 동시에 추적할 수 있다. 또한 위치 연산과 시간 동기화가 부이 측에서 이루어지므로, AUV의 하드웨어·연산 부담이 크게 줄어든다. 더 나아가 해상 시험장과 같이 외부에서 전 과정의 데이터를 종합·분석한 후, 필요한 핵심 정보만을 AUV로 송신하는 운용 형태에도 적합하여, 운용 편의성과 확장성을 동시에 확보할 수 있다.

2.2 동기화 및 측정 모델

본 시스템의 모든 표면 부이는 GNSS 수신기를 통해 자신의 위치 좌표와 PPS 신호를 확보하여, 공통 기준 시각을 유지한다. 이를 통해 각 부이에서 측정된 TOA는 동일한 시간축 상에서 비교 가능하다.

본 연구에서는 AUV가 일정한 수심을 유지하며 수평면에서 이동한다고 가정하였다. 이에 따라 부이 i 의 좌표를 (x_i, y_i) , AUV의 실제 위치를 (x, y) , 그리고 수중 음속을 c 라 하면, 부이 i 와 AUV 사이의 실제 거리는 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \tag{1}$$

기준 부이 j 를 선택했을 때, 부이 i 와 j 간의 TDOA는 Eq. (2)와 같다.

$$\tau_{ij} = t_i - t_j \tag{2}$$

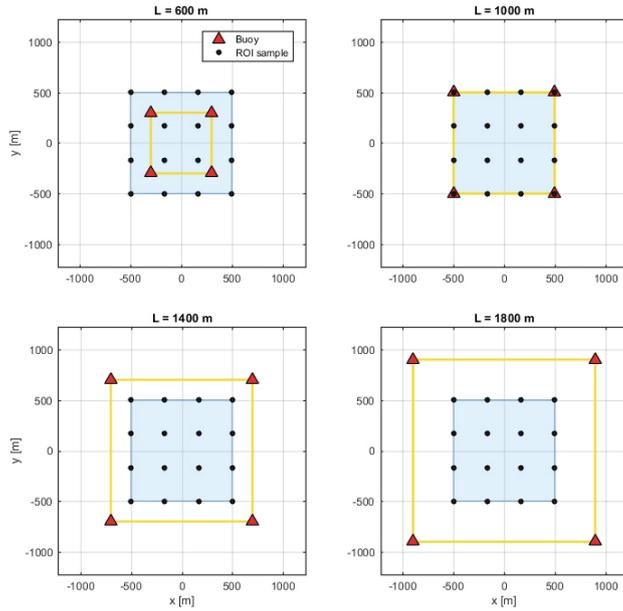


Fig. 2. Square buoy network configurations for selected spacing.

여기서 t_i 와 t_j 는 각각 부이 i 와 j 에서 측정한 ping 신호의 도착시간이다. TDOA는 등가 거리 차이로 변환될 수 있으며, Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$\Delta r_{ij} = r_i - r_j = c \cdot \tau_{ij} \tag{3}$$

이때, 실제 운용 환경에서는 도착시간 추정 과정의 불확실성은 σ_r 로 표현되며, 주요 원인은 PPS 동기화 지터(jitter)와 측정 잡음이다. 이 오차는 위치 추정 정확도에 직접적인 영향을 미치며, TDOA 기반의 하이퍼볼릭 측위식의 오차 전파(error propagation)에 선형적으로 반영된다.

수중에서의 음속은 대략 1410~1570 m/s 범위에서 온도, 염분, 압력 등의 환경 요소에 따라 변동한다. 그러나 본 연구에서는 음속 변화에 따른 영향보다는 부이의 기하학적 배치와 시계 동기 오차가 위치 추정 성능에 미치는 영향에 초점을 두었으므로, 시뮬레이션은 음속을 $c = 1500$ m/s로 고정하였다. 이 조건하에서 σ_r 를 0.5 ms와 1.0 ms로 설정한 두 가지 경우를 대표 시나리오로 하여 분석을 수행하였다. 이는 상용 GNSS 모듈과 수중 음향 수신기를 조합했을 때 해상 시험 환경에서 현실적으로 달성 가능한 수준이며, 이후 장에서 GDOP 분석 및 동적 추적 성능 평가의 기준값으로 사용된다.

2.3 위치 추정 알고리즘

AUV의 위치는 먼저 TDOA 측정값을 기반으로 한 비선형 최소자승법(Nonlinear Least Squares, NLS)으로 산출된다. NLS는 여러 부이에서 수신된 도착시간 차이를 바탕으로 AUV의 위치를 기하학적으로 계산하는 방식으로, 비교적 단순하면서도 정적 환경에서의 성능 평가에 유용하다.

정적 환경에서는 이러한 NLS 결과만으로도 부이 배치, 간격,

σ_r 의 영향을 명확히 파악할 수 있다. 반면, AUV가 움직이는 동적 환경에서는 단일 추정만으로는 시간에 따른 연속적인 궤적을 안정적으로 얻기 어렵다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 EKF를 적용하여, NLS 기반의 위치 추정값을 동역학 모델과 결합하고, 측정 잡음을 완화하며 추적 성능을 향상시켰다.

이러한 접근은 정적·동적 조건에서 각각의 강점을 살릴 수 있도록 설계되었으며, NLS와 EKF의 적용 과정과 성능 비교는 이후 장에서 구체적으로 다룬다.

3. 정적 기하 분석

본 절에서는 AUV가 정지한 상태에서 부이 네트워크의 기하 구조와 시각 동기 오차가 위치 추정 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 부이 간격 L 의 합리적인 범위를 도출하고, 이후 동적 분석에서 사용할 대표 σ_r 값을 설정한다. 분석은 2장에서 제시한 측정 모델과 추정 절차를 그대로 적용하였으며, 참조 부이는 최근접 부이(nearest reference) 방식으로 선택하고 Chan & Ho (1994)의 폐형 해를 초기값으로 한 NLS 추정기를 사용하였다.

3.1 시뮬레이션 설정

부이 네트워크는 해수면 위에 정사각형 형상으로 배치된 네 개의 부이로 구성하였다. 부이 간격 L 은 600 m에서 1800 m까지 50 m 간격으로 변화시키면서 성능을 비교하였다. 평가 영역은 네 부이로 형성된 면적 내부의 1000 m × 1000 m 정사각형 구역이며, 이를 균일 격자로 분할하여 각 지점에서 몬테카를로 시뮬레이션을 반복 수행하였다.

Fig. 2는 대표적인 네 가지 부이 간격($L = 600, 1000, 1400, 1800$

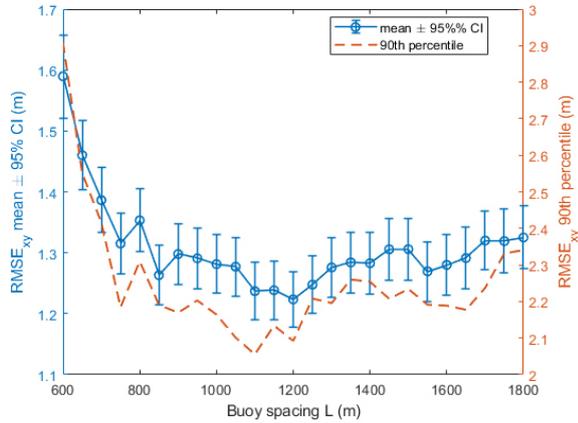


Fig. 3. Mean RMSExy and 90th percentile versus buoy spacing L.

m)에 대해 해수면에 정사각형으로 배치된 부이 네트워크 형상을 나타낸다. 붉은 삼각형은 부이의 위치를, 노란색 선은 부이 간 기하학적 형상(geometry)을, 청색 음영 영역은 성능 평가를 수행한 1000 m × 1000 m Region of Interest (ROI)를 나타낸다. 이를 통해 부이 간격 변화에 따른 배치 기하 구조와 ROI의 상대적 위치를 직관적으로 비교할 수 있다.

시뮬레이션에서는 σ_t 를 채널 전파 손실, 상관 대역폭, PPS 지터 등을 반영하여 모델링하였다. 거리에 따른 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR) 저하와 흡수 손실을 고려하였으며, TOA 추정 오차 분산은 SNR의 역비례 함수로 설정하였다. 본 논문에서는 실무적인 조건을 반영하기 위해 상관 대역폭 $B=500$ Hz, 동기화 지터 $\sigma_{sync} \approx 0.5$ ms, 확산지수 $n \approx 1.6$, 흡수계수 $a \approx 0.06$ dB/km를 대표 값으로 사용하였다. 음속은 전술한 바와 같이 $c = 1500$ m/s로 고정하였다.

TDOA 기반 위치 추정에서 σ_t 는 GDOP와 곱 형태로 RMSE에 기여한다. 이를 선형 근사하면 Eq. (4)와 같다.

$$RMSE_{xy} \approx c\sigma_t GDOP_{TDOA} \tag{4}$$

Eq. (4)에서 σ_t 를 고정하면 RMSE의 L의존성은 순수하게 기하학적 특성을 반영한다. 반대로 L을 고정하면 RMSE는 σ_t 와 거의 선형적으로 비례한다.

3.2 결과 및 분석

시뮬레이션 결과, 부이 간격 L이 지나치게 작을 경우에는 교차각이 줄어들어 위치 산출 성능이 저하되었고, 반대로 L이 지나치게 크면 거리 증가로 인한 SNR 저하와 TOA 측정 분산 증가가 누적되어 오차가 커졌다. 이 두 요인의 상반된 영향으로 인해 RMSE는 작은 L 영역에서 감소하다가 $L \approx 1$ km 전후에서 비교적 안정적인 값으로 유지되었고, 이후에는 완만하게 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 형태는 짧은 간격에서의 기하학적 불리함과 긴 간격에서의 거리 기반 오차 증가가 서로 다른 기술기로 작용한 결과로 해석된다.

Fig. 3은 이러한 경향을 정량적으로 나타낸 것으로, 파란색 실선은 평균 RMSE와 95% 신뢰구간(좌측 축), 빨간색 점선은 90백

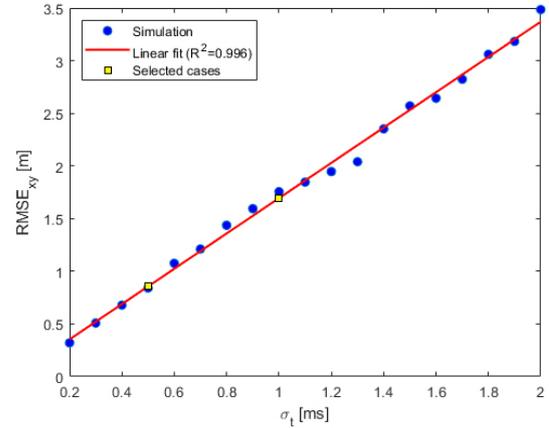


Fig. 4. RMSExy vs. σ_t at L = 1.0 km.

분위 값(우측 축)을 표시한다. 평균 RMSE는 600 m에서 약 1.6 m 수준에서 시작해 900~1200 m 구간에서 최소 약 1.2 m까지 낮아진 후, 다시 완만히 증가하는 모습을 보인다. 90백분위 값 역시 유사한 패턴을 따르며, 최소값은 약 2.1 m 수준으로 나타났다. 이를 통해, 기하학적 조건과 거리 의존 오차가 균형을 이루는 간격이 존재하며, 이 시뮬레이션에서는 약 1.0~1.2 km 부근이 해당 구간에 해당함을 확인할 수 있다.

대표 파라미터 조건에서 $L=1.2$ km일 때 평균 $RMSE_{xy}$ 는 1.22 m, 상위 10% 분위(p90)는 2.09 m로 나타났으며, 이 구간에서는 간격을 약간 줄이거나 늘려도 성능 저하가 거의 없었다. 이러한 결과는 기하학적 이득과 채널 열화 간의 절충점이 존재함을 보여준다. 이후 동적 분석에서는 $L=1.0$ km를 고정값으로 사용한다. 이 값은 평탄 최적대의 중앙에 해당하여 기하·채널·동기화 제약 간 균형을 이루며, 실제 운용 환경에서도 배치 유연성을 확보할 수 있다.

또한 Fig. 4는 $L=1.0$ km에서 σ_t 를 변화시켰을 때의 $RMSE_{xy}$ 변화를 나타낸다. 시뮬레이션 결과는 거의 완벽한 선형 관계($R^2 \approx 0.996$)를 보였으며, $\sigma_t=0.5$ ms와 1.0 ms 지점을 주석으로 표시하여 각각 정밀 동기화와 보급형 동기화 조건을 대표하도록 선정하였다. 이를 통해 이후 장에서 두 조건 간 성능 비교가 가능하도록 기준점을 확립하였다.

4. EKF 기반 동적 위치 추정

앞서 3장에서 정적 조건에서의 최적 부이 간격과 시계 동기화 조건을 도출하였다. 그러나 실제 운용 환경에서는 AUV가 이동하면서 위치를 갱신하게 되며, 이때 속도나 갱신 주기와 같은 동적 요인이 위치 정확도에 영향을 미친다. 본 장에서는 이러한 동적 상황에서의 위치 추정 성능을 살펴보고, 필터링 기법을 적용했을 때의 개선 효과를 분석한다.

특히, 부이 네트워크로부터 얻은 개별 위치 추정값을 기반으로 EKF를 적용하여 시계 동기화 오차와 측정 노이즈로 인한 순간적인 위치 변동을 줄이고, 이동 궤적을 보다 안정적으로 추적하는 방법을 다룬다. 분석 대상은 AUV의 이동 속도와 갱신 주기(T_{ping})

를 변화시키면서, 각 조건에서 필터 적용 전후의 위치 정확도를 비교하는 것이다.

4.1 상태 및 관측 모델

본 연구에서는 AUV의 수평 운동을 등속도(constant velocity) 모델로 근사하였다. 상태 벡터는 위치와 속도 성분으로 구성되며, k번째 시각의 상태는 Eq. (5)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}_k = [x_k \ y_k \ v_{x,k} \ v_{y,k}]^T \tag{5}$$

여기서 x_k, y_k 는 위치 좌표, $v_{x,k}, v_{y,k}$ 는 각각의 속도 성분이다.

상태 전이(state transition)는 ping 주기 Δt 에 따라 Eqs. (6, 7)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \tag{6}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

여기에서 $\mathbf{w}_{k-1} \sim N(0, Q)$ 는 프로세스 잡음(process noise)이다.

관측 모델은 각 ping 시점에서 NLS로 계산된 2D 위치 추정값 (x^k, y^k) 을 관측치로 사용한다. 이는 Eqs. (8, 9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{y}_k \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \tag{8}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

여기서 $\mathbf{v}_k \sim N(0, R)$ 이며, R 은 σ_r 와 GDOP를 기반으로 산출한 측정 공분산이다.

4.2 필터 알고리즘

본 연구에서 사용한 EKF는 등속도(constant velocity) 상태 모델과 2D 위치 관측모델을 기반으로 하는 표준 구조를 따른다 (Bar-Shalom et al. 2001). 각 ping 주기마다 예측(prediction)과 갱신(update) 단계를 수행하며, 관측치는 NLS로 계산된 2차원 위치 추정 결과를 사용한다. 관측 잡음 공분산은 시계 동기화 오차 σ_r 와 GDOP 값을 통해 산출하며, 관측 결측 시에는 예측 단계만 수행하여 연속적인 추정을 유지한다.

4.3 시뮬레이션 조건

동적 분석에서는 3장에서 도출한 정적 최적 간격 $L=1.0$ km와 시계 동기화 오차 $\sigma_r=\{0.5, 1.0\}$ ms를 대표 조건으로 사용하였다. AUV의 수평 속도 v 는 1 m/s, 3 m/s, 5 m/s, 10 m/s의 네 가지 값을 고려하였으며, ping 주기 T_{ping} 은 0.5 s, 1.0 s, 2.0 s로 설정하여, 속도와 ping 주기 조합이 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

초기 속도는 첫 두 번의 관측 결과로부터 계산하였으며, 관측 불가 구간이 발생하면 해당 스텝은 예측 단계만 수행하였다. 성

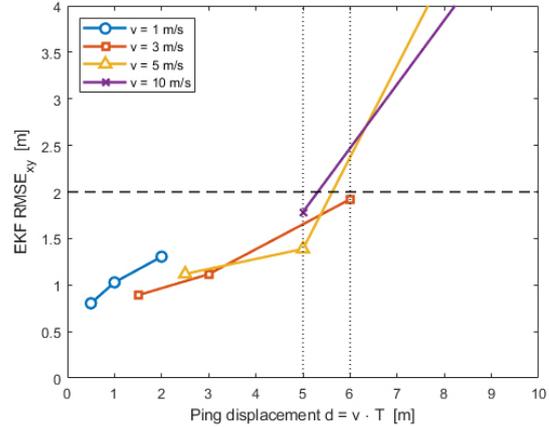


Fig. 5. EKF positioning vs. ping displacement.

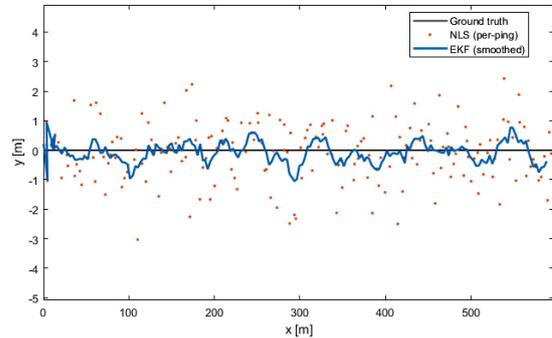


Fig. 6. Example EKF-smoothed trajectory vs. NLS estimates.

능 평가는 평균 RMSE_{xy}, CEP50, 그리고 EKF 적용 시 NLS 대비 오차 감소율(%)로 수행하였다.

4.4 시뮬레이션 결과 및 분석

동적 시나리오 시뮬레이션은 3장에서 도출된 정적 기하 최적화 조건($L=1.0$ km, 기준 부이=최근점, $\sigma_r=1.0$ ms)에서 수행되었다. AUV의 속도 v 와 ping 주기 T_{ping} 을 변화시키며, 속도-주기 조합에 따라 위치 추정 정확도가 어떻게 달라지는지를 분석하였다. 각 조건에서 AUV는 직선 등속 경로를 따라 이동하며, 매 ping 시점에서 NLS로 계산된 2D 위치를 EKF 관측치로 사용하였다. RMSE_{xy}는 시뮬레이션 전 구간에 대한 평균값으로 정의하였다.

Fig. 5는 EKF 기반 RMSE_{xy}를 ping 간 변위 $d=v \cdot T_{\text{ping}}$ [m]에 대해 나타낸 것이다. 네 가지 속도($v=1, 3, 5, 10$ m/s)에서 동일한 경향이 나타나며, d 가 작을수록 RMSE가 완만하게 유지되다가 약 $d \approx 5-6$ m 부근부터 급격히 증가한다. 예를 들어, $v=3$ m/s에서 $T_{\text{ping}}=1.0$ s ($d=3$ m)일 때 RMSE는 약 1.1 m이지만, $T_{\text{ping}}=2.0$ s ($d=6$ m)에서는 RMSE가 2 m에 근접한다. 이러한 경향은 속도와 ping 주기 변화에 따른 성능 저하가 ping 간 변위 증가에 직접적으로 기인함을 보여준다.

Fig. 6은 $v=3$ m/s, $T_{\text{ping}}=1.0$ s ($d=3$ m)의 대표 시나리오에서 참 궤적(검은 실선), NLS 추정치(붉은 점), 그리고 EKF 결과(파란 실

선)를 비교한 예시이다. NLS 결과에서는 측정 노이즈와 시계 동기화 오차($\sigma_t=1.0$ ms)로 인해 ping 간 위치 변동이 뚜렷하게 나타나지만, EKF 결과는 이러한 고주파 변동을 상당 부분 억제하여 궤적이 참값에 가깝고 부드럽게 재구성된다. 이는 EKF가 순간 오차를 줄이는 것뿐 아니라, 동적 일관성을 강화하여 궤적 품질을 향상시킴을 의미한다.

이러한 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) $v \cdot T_{\text{ping}} \leq 5-6$ m 구간에서는 EKF 적용 시 RMSE_{xy} 를 2 m 이하로 유지할 수 있다.

2) EKF의 상대적 이득은 저속-짧은 주기 조건에서 두드러지며, 이는 ping 간 변동이 작을수록 필터가 시간적 상관성을 효과적으로 활용하기 때문이다.

3) 운용 측면에서는 속도와 ping 주기를 적절히 조합해 d 를 관리하는 것이 중요하며, EKF는 이러한 제약 내에서 위치 추정 안정성을 크게 향상시킬 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 AUV의 위치 추정 정확도 향상을 위해 부이 네트워킹 기반 TDOA측위 시스템을 대상으로 정적 및 동적 환경에서의 성능을 분석하였다. 정적 기하 분석에서는 부이 간격 L 과 σ_t 가 위치 추정 정확도에 미치는 영향을 평가하였다. 시뮬레이션 결과, 간격이 지나치게 작으면 교차각 감소로 기하학적 성능이 저하되고, 반대로 간격이 지나치게 크면 거리 증가로 인한 SNR 저하 및 TOA 측정 분산 증가로 오차가 커졌다. 두 효과가 맞물리면서 $L \approx 1.0-1.2$ km 구간에서 평균 RMSE_{xy} 가 약 1.2 m 수준으로 유지되는 평탄 최적대가 형성됨을 확인하였다. 이를 바탕으로 이후 동적 분석에서는 $L=1.0$ km를 고정값으로 설정하였다.

동적 분석에서는 EKF를 적용하여 이동 중인 AUV의 위치 추정 성능을 평가하였다. EKF는 시계 동기화 오차와 측정 노이즈로 인한 순간적인 위치 변동을 효과적으로 억제하였으며, 속도-ping 주기($v \cdot T_{\text{ping}}$) 조합이 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 시뮬레이션 결과, $v \cdot T_{\text{ping}} \leq 5-6$ m 범위에서 RMSE_{xy} 가 2 m 이하로 유지되었으며, EKF 적용 시 NLS 대비 20-50%의 개선 효과를 확인하였다. 특히, 속도가 낮고 ping rate가 높은 조건에서 성능 향상이 가장 크게 나타났다.

정적-동적 통합 분석을 통해, 부이 간격 · 시계 동기화 정밀도 · 이동 속도 · ping 주기 등 주요 설계 및 운용 변수가 위치 정확도에 미치는 상관관계를 종합적으로 파악하였다. 이를 통해 실제 운용 환경에서 안정적인 성능을 유지할 수 있는 조건 범위를 확인하였으며, 이러한 결과는 시스템 배치와 운용 스케줄을 설계하는 데 참고가 될 수 있다. 또한, EKF 적용을 통해 다양한 시나리오에서 순간적인 위치 변동이 효과적으로 억제되고, 전반적인 위치 추정 정확도가 향상됨을 확인하였다.

향후에는 본 연구에서 제시한 분석 방법을 보다 다양한 해양 환경 조건에 확장하고, 해류 · 다중경로 · 음속 분포 변화와 같은 현실적인 해양 요소를 반영한 시뮬레이션을 수행할 예정이다. 이를 통해 다양한 운용 시나리오에서의 신뢰도를 높이고, 시스템 설계 및 최적화에 적용 가능한 범용성을 확보하고자 한다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, C.H.; methodology, C.H. and H.K.; software, C.H. and H.K.; validation, C.H., D.K., and S.L.; formal analysis, C.H. and H.K.; investigation, C.H. and D.K.; resources, D.K. and S.L.; data curation, C.H.; writing—original draft preparation, C.H.; writing—review and editing, C.H., H.K., and D.K.; visualization, C.H. and H.K.; supervision, C.H.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Aparicio, J., Jiménez, A., Álvarez, F. J., Ruiz, D., De Marziani, C. et al. 2016, Characterization of an underwater positioning system based on GPS surface nodes and encoded acoustic signals, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65, 1773-1784. <https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2552699>
- Bar-Shalom, Y., Li, X. R., & Kirubarajan, T. 2001, *Estimation with applications to tracking and navigation: theory, algorithms and software* (New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.).
- Chan, Y. T. & Ho, K. C. 1994, A simple and efficient estimator for hyperbolic location, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42, 1905-1915. <https://doi.org/10.1109/78.301830>
- Han, Y., Zheng, C., & Sun, D. 2015, Accurate underwater localization using LBL positioning system, In *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, Washington, DC, USA, 19-22 October 2015, pp.1-4. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2015.7401893>
- Kilfoyle, D. B. & Baggeroer, A. B. 2000, The state of the art in underwater acoustic telemetry, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25, 4-27. <https://doi.org/10.1109/48.820733>
- Otero, P., Hernández-Romero, Á., Luque-Nieto, M. Á., & Ariza, A. 2023, Underwater positioning system based on drifting buoys and acoustic modems, *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 682. <https://doi.org/10.3390/jmse11040682>
- Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., & Li, H. 2014, AUV navigation and localization: A review, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39, 131-149. <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2278891>
- Shaukat, N., Ali, A., Iqbal, M. J., Moinuddin, M., & Otero,

P. 2021, Multi-sensor fusion for underwater vehicle localization by augmentation of RBF neural network and error-state Kalman filter, *Sensors*, 21, 1149. <https://doi.org/10.3390/s21041149>

Stojanovic, M. & Preisig, J. 2009, Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization, *IEEE Communications Magazine*, 47, 84-89. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4752682>

Zhang, T., Chen, L., & Li, Y. 2016, AUV underwater positioning algorithm based on interactive assistance of SINS and LBL, *Sensors*, 16, 42. <https://doi.org/10.3390/s16010042>



Sungkyun Lee is a principal researcher of LIG Nex1 in the Republic of Korea. He received the B.S. degree in 2007 and the Ph.D degree in 2013 from the Department of Naval Architecture and Ocean Engineering of Seoul National University. He worked in the field of fluid dynamics and ship controllability in SNU laboratory. He has been working for the LIG Nex1 since Aug. 2016. His research interests include fluid dynamics, model experiments, modeling and simulation.



Chul Hyun is a principal researcher at LIG Nex1 in the Republic of Korea. He received his B.S. degree in 2001 and Ph.D. degree in 2011 from the Department of Electrical and Computer Engineering at Seoul National University, where he conducted research on navigation, guidance, and control systems.

Since joining LIG Nex1 in February 2011, he has been involved in R&D on GNC and modeling & simulation for underwater vehicles, as well as optical observation and tracking systems for space applications. His expertise also includes model-based system design, analysis, and performance evaluation.



Hyunseung Kim is a senior researcher of LIG Nex1 in the Republic of Korea. She received the B.S. degree in 2013 and the M.S. degree in 2016 from the Department of Aerospace Engineering of Inha University. She worked in the field of satellite navigation system and missile guidance in Inha ACSL laboratory.

She has been working for the LIG Nex1 since Jan. 2016. Her research interests include guidance, control, modeling and simulation and deep learning algorithm.



Dong Geon Kim is a principal researcher of LIG Nex1 in the Republic of Korea. He received the B.S. degree in 2009, M.S. degree in 2011 and the Ph.D degree in 2016 from the Department of Mechanical Engineering of Chung-Ang University. He worked in the field of IF and heat transfer analysis in

laboratory. He has been working for the LIG Nex1 since Jan. 2016. His research interests IR, Generative AI, EO and modeling and simulation.

RINEX/IONEX 기반 지역전리층/DCB 시뮬레이터의 설계

이형근^{1†}, 김정래², 박관동³, 손동효⁴, 홍준석⁴, 정종균⁴, 최병규⁴

Design of Regional Ionosphere/Differential Code Bias Simulator Based on RINEX/IONEX Files

Hyung Keun Lee^{1†}, Jeongrae Kim², Kwan-Dong Park³, Dong-Hyo Sohn⁴, Junseok Hong⁴, Jong-Kyun Chung⁴, Byung-Kyu Choi⁴

¹Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

²Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

³Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

⁴Center for Space Navigation and Geodesy, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

ABSTRACT

This paper proposes an efficient Regional Ionospheric Map (RIM) / Differential Code Bias (DCB) simulator based on Receiver Independent Exchange (RINEX) and IONosphere Map Exchange (IONEX) format files. Using the proposed simulator, we evaluated if it is possible to discriminate and estimate RIM and DCB variables based on a single regional satellite constellation and reference stations distributed in a restricted area. The proposed simulator embeds a recursive estimator that can discriminate and estimate RIM and DCB variables based on basic RINEX format navigation and observation files. It facilitates the evaluation of accuracy and precision by referencing the IONEX files generated by the estimator and International GNSS Service (IGS). Experiments were performed to evaluate the simulator under difficult environment by applying the RINEX data of the 4 regional satellites received by 11 reference stations distributed in Asia and Oceania region. By the experiment result, the average and the standard deviation of the vertical ionospheric delay (VID) difference were obtained as 0.35 m and 2.73 m, respectively. In the case of satellite DCB, the estimated values matched the group delay values in the broadcast ephemeris parameters with the standard deviation within 0.6 m if the unknown mean value were ignored.

Keywords: RIM, DCB, simulator, estimator, IGS, RINEX, IONEX

주요어: RIM, DCB, 시뮬레이터, 추정기, IGS, RINEX, IONEX

1. 서론

Global Navigation Satellite System (GNSS)의 정확도는 전리층 지연, 대류권 지연, 위성/수신기 시계오차, 궤도오차, 그리고 다중경로오차 등 다양한 오차 요인에 영향을 받는다. 이들 중 특히 전리층 지연은 위성으로부터 수신기까지 정상적인 항법신호의 송수신이 수행되어도 위치오차에 가장 크게 영향을 미치는 오차요인으로 알려져 있다. 그 중요성으로 인하여 전리층 지연에

대한 연구는 오랜 기간동안 다양한 기관과 연구자들에 의해 진행되어 왔다.

전리층 지연에 대한 연구는 크게 전리층 추정 방식 자체에 대한 연구와 추정된 전리층 정보를 활용하는 응용 성능 분석 연구로 나눌 수 있다. 전자에 해당하는 경우로서 International GNSS Service (IGS) Global Ionospheric Map (GIM), Space-Based Augmentation System (SBAS) 전리층 보정계수, M_GIM (Zhou et al. 2023) 등을 들 수 있으며, 후자는 주로 전리층 추정 방식에

Received Aug 07, 2025 Revised Aug 18, 2025 Accepted Aug 30, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: hyknlee@kau.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대한 연구의 결과물을 다양한 응용 분야에 적용했을 때 예상되는 성능을 분석하는 것에 해당된다.

전리층 추정에 대한 연구는 대상 분포 영역의 크기에 따라 전역 전리층과 지역 전리층에 대한 연구로 구분된다. 전역 전리층 추정은 모든 대륙에 분포된 상시관측소를 활용하여 전체 지구 영역 상공에 분포된 전리층 지연을 추정하는 것이며 (International GNSS Service 2005, Hernández-Pajares et al. 2009, Li et al. 2020, Zhou et al. 2023), 지역 전리층 추정은 국소 지역에 분포된 상시관측소를 활용하여 한정된 위경도 영역에 분포된 전리층 지연을 추정하는 것이다 (Choi et al. 2018, Natras et al. 2023, Choi et al. 2024).

항법신호에 사용되는 주파수에 따라 전리층 지연 값은 그 크기가 달라진다. 따라서, 전리층 지연값은 서로 다른 두 주파수에서 획득된 의사거리의 차에 해당되는 Geometry Free (GF) 결합을 하게 되면 손쉽게 추출할 수 있는 것으로 알려져 있다. 실제로는 GF 결합에 전리층 지연이 덧붙여져 Differential Code Bias (DCB)가 수반되므로 한 시점의 측정치들로 두 종류의 값을 분리하기 어렵고 다수 시점의 측정치를 누적하여 가관측성을 향상시키면 두 종류의 값을 분리할 수 있다 (Choi et al. 2012). DCB는 송신기 혹은 수신기 내부 회로의 주파수 의존성에 의하여 발생하며 좀 더 상세하게 분류하면 Satellite Differential Code Bias (SDCB)와 Receiver Differential Code Bias (RDCB)로 구분할 수 있다 (Choi et al. 2018, Choi et al. 2025).

전리층 지연의 추정과 관련된 대다수의 기존 연구는 전역 위성항법시스템을 한 개 이상 포함한 다중 위성항법시스템을 활용하여 전리층 지연과 DCB의 추정에 활용하고 있다. 반면, 지역 위성항법시스템만을 단독으로 활용하여 전리층 지연과 DCB를 분리 추정하는 연구 결과는 기존 문헌에서 찾기 어렵다.

지역 전리층 지연과 DCB의 분리 추정에 있어서 가장 어려운 상황은 정지궤도 위성을 포함하여 작은 수의 지역 가시 위성들만을 활용하는 상황이다. 정지궤도 위성은 관측소에서 위성으로의 가시선 방향이 항상 일정하게 유지된다. 따라서, Total Electron Content (TEC)와 DCB의 관측계수가 변화하지 않게 되어 가관측성이 결여되면 단일 관측소 측정 정보만으로는 두 주요변수의 분리가 불가능하게 된다.

지역 위성항법시스템에 포함된 정지궤도 위성의 경우에 위성, 전리층, 수신기 사이의 기하 개형에 변화가 없어 기술키 계수는 시간이 경과하여도 변화하지 않게 된다. 이와 같은 이유로, 정지궤도 위성을 포함한 지역 위성항법시스템을 단독으로 활용하여 전리층 지연과 DCB에 대한 분리 추정을 시도하면 난점이 발생할 것으로 예상된다.

동일한 한 개의 정지궤도 위성 신호에 대하여 충분히 넓게 분포하는 다수의 상시관측소를 활용하여 측정할 경우에는 기술키 계수와 전리층 통과 지점이 다양화되어 지역 전리층지연에 대한 가관측성 확보가 가능할 수 있다. 추정해야 할 전리층 지연 상태 변수들의 개수에 대비하여 충분히 많은 수의 관측소를 넓은 지역에 설치 활용하게 되면, 동일 위성에 대한 시선각 방향이 다양화되므로 전리층 지연에 대한 관측행렬이 가관측성을 확보하게 되어, 전리층 지연과 Combined DCB (CDCB)의 분리 추정이 가능하게 된다. SDCB와 RDCB가 결합된 CDCB가 전리층 지연으로

부터 분리되면, 이후에는 제한 조건을 적용하여 SDCB와 RDCB를 보다 상세하게 분리할 수 있다.

지역 전리층 추정과 관련하여 지역 위성항법시스템을 포함한 다양한 위성군과 상시관측소의 조합에 대하여 전리층 지연과 DCB의 분리 추정 가능성을 가늠하고, 이에 덧붙여 어느 정도의 정확도로 전리층지연, SDCB, 그리고 RDCB를 분리 추정할 수 있는지 가늠하기 위해서는 지역 전리층 지연 및 DCB 분리 추정기를 포함한 효율적인 성능분석 시뮬레이터가 필요하다.

본 논문에서는 Receiver Independent Exchange (RINEX)와 IONosphere Map Exchange (IONEX) (Schaer et al. 1998) 포맷의 파일들에 기반한 효율적인 지역전리층/DCB 시뮬레이터를 제안하고, 이를 활용하여 단일 지역 위성항법군과 국소 지역에 분포한 상시관측소를 활용할 경우 지역전리층과 DCB의 분리 추정이 어느 정도 가능한지를 평가하였다. 제안된 시뮬레이터는 기본적인 방송궤도력과 RINEX 관측 파일들을 입력으로 활용하여 지역 전리층과 DCB를 분리 추정할 수 있는 재귀적인 추정기를 포함하고 있으며, 추정기가 산출한 IONEX 파일을 IGS가 산출한 수직 전리층 정보가 정리되어 있는 IONEX 파일과 비교하여 (International GNSS Service 2005, Hernández-Pajares et al. 2009, Li et al. 2020) 분리 추정된 지역전리층과 DCB의 정확도 및 정밀도를 편리하게 분석할 수 있는 장점을 가진다.

시뮬레이터에 필요한 RINEX와 IONEX 파일들은 National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) 서버에 접속하면 획득이 가능하다. RINEX 파일의 경우에는 전지구 영역에 분포된 350개 이상의 다양한 상시관측소를 선별 활용할 수 있으며, IONEX 파일의 경우에는 JPL, CODE, ESA, NRCAN, 그리고 UPC 등의 개별 분석 센터들이 산출한 결과물과 이들을 전체적으로 취합한 결과물을 활용할 수 있다 (Li et al. 2020). 이와 같은 IONEX 데이터를 기준 값으로 활용할 경우에 추정된 전리층 지연 값과 DCB의 추정 오차의 평균 값과 분산 값을 다양한 시공간 해상도로 분석할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 지역전리층/DCB 분리 추정기를 설계함에 있어서 중점적으로 고려해야 할 사항을 정리하였다. 3장에서는 효율적인 시뮬레이터가 갖춰야 될 주요 기능, 제안된 지역 전리층 및 DCB 추정기의 상세 사항과 특징, 그리고 전체적인 시뮬레이터의 구성과 특징을 다루었다. 4장에서는 기존 문헌에서 찾기 어려운 두 종류 실험 결과를 다루었다. 첫 번째 실험은 지역 위성항법시스템을 단독으로 활용할 경우 얻을 수 있는 지역 전리층 지도의 정확도를 가늠하기 위한 것이고, 두 번째 실험은 지역 위성항법시스템을 단독으로 활용할 경우 얻을 수 있는 SDCB의 정밀도를 가늠하기 위한 것이다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺도록 한다.

2. 지역전리층/DCB 분리 추정의 고려사항

2.1 추정기 구조 및 상태변수 선정

이중 주파수 코드 및 위상 측정치를 각각 GF 결합하여 전리

층 지연 값을 추정하기 위하여 기존에 널리 쓰이는 방법은 크게 거리영역 평활화와 위상 평준화(phase leveling)가 있다. 이들 중 거리영역 평활화는 위상평활화 코드 필터를 구동하여 매 측정 시점과 측정시점 사이에서 코드와 위상 측정치를 결합하고 스무딩된 코드를 누적하는 방법이다 (Hatch 1983). 위상 평준화는 코드 측정치와 비교에 의하여 위상 측정치에 포함된 미지상수 (unknown constant ambiguity)를 추정 보상하여 평준화된 GF 위상 측정치를 보상하여 코드 측정치와 등가하게 활용하는 방법이다 (Ya'acob et al. 2007).

위의 두 대표적인 방법들은 측정치 자체의 정밀도를 향상시킬 수 있으나 정확도와 상태변수 분리에 관련된 가관측성 향상에 기여하지 않으므로, 주파수간/채널간 바이어스의 분리 추정에도 도움이 되지 않는다. 따라서, 위의 두 방법은 주로 장기간 측정치를 누적하여 한 번에 상태변수를 추정하는 batch 방식의 추정기와 결합하여 활용된다. Batch 방식 추정기는 정확도 관점에서 유리한 측면이 있으나 후처리에 적합하며 실시간 운영에는 난점이 발생할 확률이 있다.

제안된 추정기는 상태변수 영역의 위상평활화 코드 필터를 구동하면서 재귀적으로 전리층 지연과 CDCB를 분리 추정하여 batch 방식의 단점을 보완하면서 실시간성을 갖추도록 설계하였다. 또한, 위성군의 궤도 주기별로 한 번 정도의 빈도로 간단한 결합식에 의하여 CDCB를 SDCB와 RDCB로 분리 추정할 수 있도록 고려하였다.

제안된 추정기가 선형 활용하는 상태변수는 수직 전리층 지연 값인 Vertical Ionospheric Delay (VID)에 대한 공간 기저함수 계수, CDCB, 그리고 Differential Cycle Ambiguity (DCA)가 있다. 여기서 VID는 Vertical Total Electron Content (VTEC)을 거리 단위로 환산한 것이다. VID와 CDCB는 필수적인 상태변수에 해당되며, 실수 미지상수 DCA는 기존 기법에 있어서 위상 평준화와 유사한 효과를 내면서 재귀적인 방식으로 실시간 처리가 가능하도록 선정된 상태변수이다.

2.2 위성 및 수신기 DCB 시간 전달 특성 모델링

SDCB는 위성에 탑재된 송신기 내부 회로에서 다른 주파수의 신호를 만들어 내는 회로 및 소프트웨어가 동일하지 않음에 기인하는 것으로 알려져 있다 (Coco et al. 1991). SDCB 추정값의 변화 추이를 관찰한 기존 연구 결과에 의하면 SDCB의 변화는 신호 자체의 불연속과 변화에 덧붙여서 위성의 교체로 인해서도 발생하며 이는 1.8 ns에 이를 수 있다고 알려져 있다. 또한, 같은 위성군(constellation) 내 같은 세대의 위성들은 서로 비슷한 SDCB 값을 가짐을 확인하였다 (Xiang et al. 2020).

RDCB의 경우도 SDCB의 경우와 유사하게 수신기 내부 회로에서 다른 주파수의 신호를 만들어 내는 회로 및 소프트웨어가 동일하지 않음에 기인한다. 따라서, 하드웨어 및 소프트웨어가 변경되지 않고 온습도 등의 주변 환경이 유지되면 몇 주 정도의 장기간 동안에도 그 값이 크게 변화하지 않는다. 다만, 활용된 소자의 규격과 비용의 차이에 의해서 일반적으로 SDCB가 RDCB보다 바이어스나 랜덤 오차 관점에서 상대적으로 더 높은 정밀도를 가진다.

이와 같은 이유로, 하루 기간 이내의 자료를 처리하여 DCB를 추정하는 용도에는 시간에 따른 변화가 거의 없는 랜덤 상수 (random constant)로 모델링 하는 것이 가능하다. 몇 일 이상의 장기간 분석을 위해서는 필요에 따라 시간 경과에 따라 불확실성이 증가하는 랜덤워크(random walk)나 시상관성을 가지는 마코프 프로세스(Markov process)로 모델링 하는 것도 가능하리라 판단된다.

2.3 혼합 DCB로부터 위성 및 수신기 DCB 분리 추정 문제

수직 전리층 지연과는 달리 SDCB와 RDCB는 위성의 운동에 의한 위성별 가시선 방향 경사계수(slant factor)의 변화에 영향을 받지 않는다. 경사계수는 일반적으로 위성고도 수신기 사이의 기하학적 개형이 시간적으로 혹은 공간적으로 달라짐에 따라 다른 값을 가지게 된다. 따라서, 경사계수에 영향을 받는 수직 전리층과 영향을 받지 않는 CDCB의 분리 추정이 가능하게 된다.

한편, CDCB로부터 SDCB와 RDCB의 분리함에 있어서는 두 변수 모두가 시간에 따라 변화하지 않는 특성으로 인하여 난점이 발생하게 된다. 이와 같은 난점을 해결하기 위하여 (1) DCB 값들 사이에 제약 조건을 가하는 방법과 (2) 한 개의 기준을 설정하고 기준이 되는 DCB를 실제로 측정하는 방법이 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 (1)번 방식을 채택하였다.

2.4 전리층 지연 출력 빈도

전리층 지연 값의 산출 빈도를 정하기 위해서는 기존 위성항법 시스템의 전리층 지연 계수 서비스의 빈도를 참고할 필요가 있다. 다수의 위성항법시스템들 중에서 가장 최근의 지역 위성항법시스템에 해당되는 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)의 경우 일반 사용자들에 대한 전리층 계수는 720초에 한 번씩 방송된다 (Cabinet Office 2024). 전리층 지연 정보를 별도로 추출하여 방송하지는 않지만, L1 주파수를 활용하는 차분 위성항법 서비스에 포함되는 의사거리 보정정보는 30초에 한 번씩 방송된다 (Cabinet Office 2025a). 또한, L6 주파수 사용자에게 제공되는 경사 전리층 지연은 30초에 한 번씩 방송된다 (Cabinet Office 2025b).

방송 빈도와 추정 갱신 빈도는 다른 의미를 가지지만, 최대한 보수적인 관점에서 전리층 지연 값의 추정기의 상태변수 갱신 빈도가 가장 빈번한 방송 빈도를 수용할 수 있도록 설계하는 것이 바람직할 것이다. 따라서, 목표로 하는 전리층 지연 값의 산출 빈도는 30초로 하되 필요에 따라 1분 혹은 1시간 정도의 값들로 수정할 수 있도록 추정기를 설계하였다.

3. 지역전리층/DCB 시뮬레이터의 설계

3.1 지역 전리층 추정기

제안된 추정기는 재귀적인 구조의 칼만필터 알고리즘을 채용하고 있으며, 칼만필터의 상태변수는 식 (1)과 같이 구성된다.

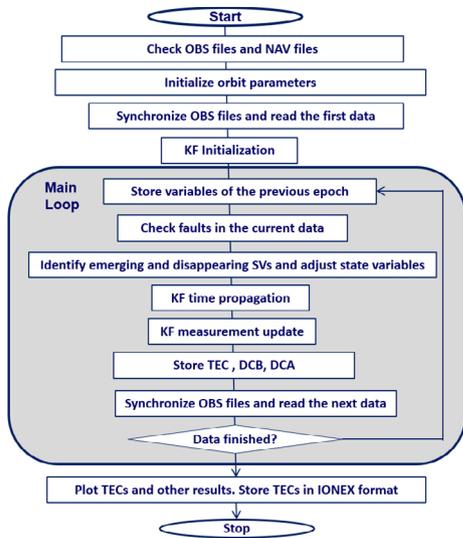


Fig. 1. Flow of the proposed Kalman filter algorithm for estimating regional ionospheric delay and combined differential code biases.

$$X = \begin{bmatrix} PC \\ CDCB \\ DCA \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 PC (Polynomial Coefficient)는 기저함수 계수 벡터, $CDCB$ 는 혼합 DCB (Differential Code Bias) 벡터, DCA 는 DCA (Differential Cycle Ambiguity) 벡터이다.

식 (1)에 나타난 바와 같이 제안된 추정기는 $CDCB$ 와 DCA 를 필수적인 상태변수로 활용하였다. $CDCB$ 는 GF 코드 측정치에 포함된 값이며 DCA 는 GF 위상 측정치에 포함된 미지 상수 값이다. $CDCB$ 와 DCA 는 위성과 상시관측소 조합 각각에 대하여 개별 상태변수가 할당된다. 예시로써, 공간기저함수의 차수가 9차, 전체 위성의 갯수가 50개, 활용 상시관측소의 개수가 11개라고 가정하면 공통 상태변수는 상수항 계수를 추가하여 10(=9+1)개가 되며, $CDCB$ 와 DCA 는 각각 50×11개가 개별 상태변수로 활용된다.

$CDCB$ 와 DCA 를 필수적인 상태변수에 포함시킴으로써 제안된 추정기는 기존의 TEC 추정 알고리즘이 채용하는 위상평활화 코드와 유사한 효과를 얻으며 동시에 위성 측정치에 발생하는 이상 현상에도 간단한 검출기를 활용하여 효율적으로 대처할 수 있다. 또한, 후처리 위상 평준화 방법과 유사한 정밀도의 향상을 실시간 알고리즘의 운용에서도 얻을 수 있는 장점을 가지게 된다.

식 (1)과 같이 구성된 상태변수에 대하여, 서로 다른 주파수의 코드 및 위상 측정치의 GF 조합은 식 (2)와 같이 모델링 된다.

$$\begin{aligned} \rho_2 - \rho_1 &= OF \cdot VID + CDCB + v_p \\ \phi_2 - \phi_1 &= -OF \cdot VID + DCA + v_\phi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 OF 는 경사 계수 (obliquity factor) 벡터, $VID=BF(\phi,\lambda)PC$ 는 수직 전리층 (vertical ionospheric delay) 벡터, $BF(\phi,\lambda)$ 는 위도 ϕ 와 경도 λ 에 영향을 받는 공간 기저함수 (basis function), v_p 는 코드 측정 오차, v_ϕ 는 위상 측정 오차이다.

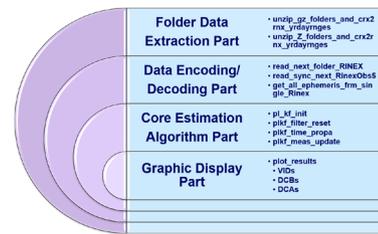


Fig. 2. Overall structure and main component software modules of the proposed algorithm for estimating regional ionospheric delay and differential code biases.

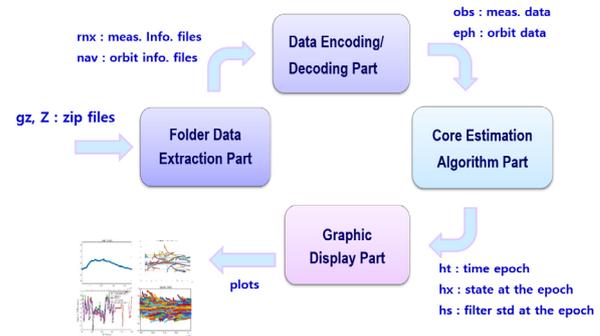


Fig. 3. Inputs and outputs between main component software modules.

식 (2)에 모델링 된 바와 같이 제안된 추정기는 지역 전리층 지연의 분포를 다루기 위하여 다항식 함수 혹은 구면 함수 (spherical harmonic function)를 유연성 있게 기저함수로 선택하여 활용할 수 있다. 칼만필터의 상태변수들은 식 (3)에 의하여 시간 전달된다.

$$\begin{aligned} PC(t_{k+1}) &= PC(t_k) + w_{PC}(t_k) \\ CDCB(t_{k+1}) &= CDCB(t_k) + w_{CDCB}(t_k) \\ DCA(t_{k+1}) &= DCA(t_k) + w_{DCA}(t_k) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 t_k 는 k -번째 상태변수 갱신 시점이다.

위에 설명된 칼만필터 알고리즘은 Fig. 1에 도시된 전체 추정기의 흐름도에 따라 지역전리층, $CDCB$, 그리고 DCA 를 매 시점 산출하게 된다. 추정기의 기능은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 폴더 자료 추출부, 자료 변환 해독부, 추정 알고리즘부, 결과 표시부 등 크게 네 부분으로 나눌 수 있다. 폴더 자료 추출부는 일자별로 저장되어 있는 압축 포맷 파일을 텍스트 파일로 추출하는 기능을, 자료 변환 해독부는 RINEX 포맷의 텍스트 파일을 측정치와 궤도정보로 변환하는 기능을, 추정 알고리즘부는 추정기의 초기화, 시간전달, 그리고 측정갱신 기능을, 그리고 결과 표시부는 다양한 형태의 그림을 도시하고 저장하는 기능을 수행한다. 네 가지 주요 부분 사이의 인터페이스는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 주로 gzip 혹은 zip 형식의 압축파일, RINEX 및 IONEX 포맷의 텍스트 파일, 그리고 지정된 형식의 데이터 구조체로 구성된다.

제안된 추정기는 기존에 널리 알려진 전리층 추정 소프트웨어와 유사한 기능을 수행한다. 최근에 발표된 전리층 추정 소프트웨어 M_GIM (Zhou et al. 2023)은 GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS 등의 측정 데이터를 모두 처리하여 GIM과 DCB를

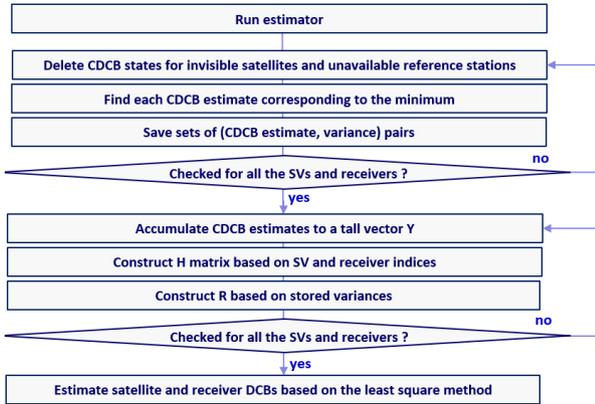


Fig. 4. Overall flow of the discriminated estimation of satellite and receiver differential code biases from accumulated combined differential code biases.

분리 추정할 수 있는 소프트웨어이다. M_GIM은 내부적으로 M_DCB (Jin et al. 2012) 알고리즘을 포함하고 있으며, 하루를 24등분하여 1시간 단위로 semi-batch 방식으로 전리층 TEC 추정치를 높은 정확도로 생성한다. 반면, 높은 정확도를 얻기 위하여 반드시 정밀궤도력과 IGS DCB 정보를 활용해야 하는 중속적 한계점을 가지고 있다. 또한, 시간 해상도를 일부 향상시킬 수 있지만 근본적으로 batch 방식을 채용하는 특성으로 인하여 시간 해상도의 향상에는 한계가 있을 것으로 분석된다.

이에 대비하여 제안된 추정기는 정밀궤도력과 IGS DCB 정보를 필수적으로 요구하지 않고, 재귀적인 방식으로 구동되며, 시간 해상도에 크게 제약이 없는 특징을 가진다. 또한, 지구 좌표계(earth coordinate system)와 태양 좌표계(solar coordinate system) 사이의 좌표 변환 모듈을 추가할 경우에 전역 전리층 지도의 추정에도 용이하게 확장 가능하도록 설계하였다.

3.2 DCB 분리 추정기

시간에 따라 변화하지 않는 공통된 특성으로 인하여 SDCB와 RDCB를 CDCB로부터 분리하는 데에는 난점이 발생하게 된다. 이와 같은 난점을 해결하기 위하여 제안된 추정기는 SDCB 값들 사이에 제약 조건을 가하는 방법을 적용하여 분리 추정하는 방식을 활용하고 있다. Fig. 4는 칼만필터로부터 선택된 모든 CDCB를 누적하고 SCB에 대한 제약 조건을 적용하여 SDCB와 RDCB를 분리 추정하는 과정을 요약한 순서도이다.

혼합 DCB로부터 SDCB와 RDCB의 분리 갱신 주기는 위성군에 소속된 모든 위성에 대한 측정치가 확보될 수 있는 위성군 궤도 주기보다 길어야 된다. 그러나, 지역에 분포된 감시국을 활용할 경우에는 모든 위성이 관측되지 않은 경우가 발생할 수 있다. 이와 같은 예시로서 2021년 3월 31일을 들 수 있다. Day Of Year (DOY) 090에 해당되는 하루 기간동안 10개의 감시국이 측정할 방법 데이터에는 PRN 11번 GPS 위성에 대한 적절한 측정값이 발견되지 않았다. 이와 관련된 사항은 향후 실험 부분에서 추가적으로 언급할 예정이다.

국소 지역에 분포된 모든 상시관측소를 활용하여도 가용하지

$$CDCB = \begin{bmatrix} h_{11} & O & h_{13} \\ h_{21} & O & h_{23} \\ h_{31} & O & h_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{M1} & O & h_{M3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SDCB_{visible} \\ SDCB_{invisible} \\ RDCB \end{bmatrix} \Rightarrow CDCB = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{13} \\ h_{21} & h_{23} \\ h_{31} & h_{33} \\ \vdots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SDCB_{visible} \\ RDCB \end{bmatrix}$$

Fig. 5. Elimination of satellite differential code bias corresponding to the invisible satellite from the estimator state variables.

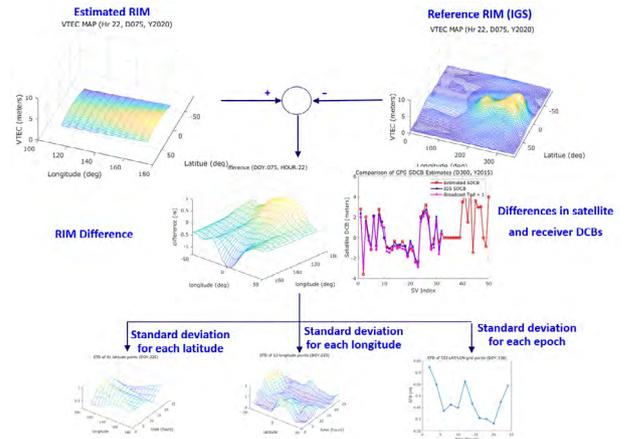


Fig. 6. Simulator structure to evaluate the accuracy of the regional ionospheric map/combined differential code bias estimator.

않는 위성이 존재하는 경우에 대비하기 위해서는, 해당 위성을 식별하고 추가적인 방법을 동원하여 SDCB와 RDCB를 분리 추정하는 방안이 필요하다. 제안된 추정기는 Fig. 5와 같이 가용하지 않은 위성에 해당하는 SDCB를 추정기의 상태변수에서 제외하고 추정하는 방법을 모듈화 하여 미관측 위성이 있는 경우를 대비하였다.

3.3 지역전리층/DCB 성능분석 시뮬레이터

지역전리층/DCB 추정기의 성능을 분석하고 미비점을 보완하기 위한 목적으로 Fig. 6에 도시된 구조의 시뮬레이터를 설계 및 구현하였다. 구현된 시뮬레이터는 활용하고자 하는 상시관측소를 텍스트 목록 형태로 유연하게 설정할 수 있으며, 항법위성군, 주파수, 기저함수의 종류(구면조화함수 혹은 다항함수) 및 차수, 지역전리층 갱신 주기, 지역전리층 추정값의 출력 주기 등을 텍스트 형태의 옵션 파일에서 설정 가능하도록 하였다.

시뮬레이터는 전리층 지도와 관련된 기능으로 (i) IONEX 포맷의 텍스트 데이터로부터 (시간, 위도, 경도) 별 전리층 지연 값을 읽는 기능, (ii) 매 시점 (위도, 경도)를 기반으로 3차원 전리층 지도를 현시하는 기능, 그리고 (iii) 산출된 (시간, 위도, 경도) 별 전리층 지연값을 IONEX 포맷의 텍스트 데이터로 저장하는 기능을 포함하고 있다.

시뮬레이터는 지역전리층 알고리즘이 추정된 지역전리층 지도와 IGS IONEX 파일에서 추출한 기준 전리층 지도를 비교하여 지역전리층 추정값의 차이를 우선 추출한다. 이를 기반으로 추정값 차이의 위도별 표준편차, 경도별 표준편차, 격자지점별 표준

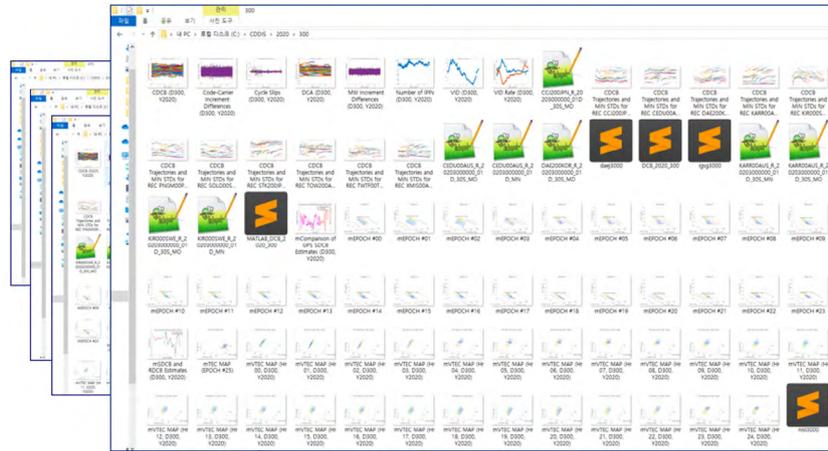


Fig. 7. Snapshot of various simulator-generated image files generated in each folder corresponding to a day of year.

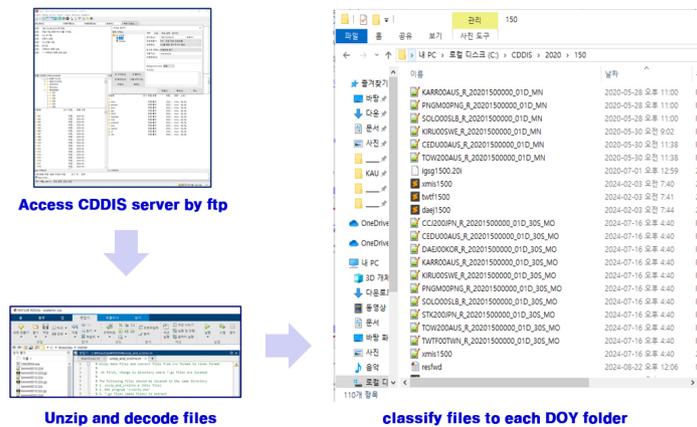


Fig. 8. Procedure to download compressed data files from NASA Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS 2025) server and extract text data files from them.

편차 그리고 시간별 표준편차를 추출할 수 있다. 이와는 별도로 추정된 SDCB와 RDCB를 기준 SDCB와 RDCB와 비교하여 일정 기간 동안의 차이 값의 평균과 표준편차를 구하는 기능도 시뮬레이터에 구현하였다.

각 일자별 추정기 알고리즘의 정상적인 동작상태 확인과 효율적인 디버깅을 위하여, Fig. 7에 도시된 바와 같이 각 DOY별 폴더에 고장 선별기의 잉여값, 상태변수(기저함수 계수, CDCB, 그리고 DCA) 추정치의 수렴 과정, 그리고 출력 주기별 시점별 3차원 지역전리층 지도 등 다양한 그림 파일 출력을 저장한다.

3.4 시뮬레이터 입력 데이터의 수집 및 준비

시뮬레이션에 필요한 전지구 영역 주요 상시관측소별 GNSS 측정 정보와 보조 정보는 CDDIS로부터 획득이 가능하다. CDDIS 서버에 접근하게 되면 Hatanaka Compressed RINEX (CRX) 포맷의 파일을 통하여 하루 단위의 GNSS 측정 정보를 내려 받을 수 있다. 동일한 폴더에 정리된 CRX 포맷의 파일은 미리 작성된 프로그램을 통하여 GNSS 데이터 교환에 가장 널리 활용되는

RINEX 포맷의 파일로 일괄 변환이 가능하다.

입력 폴더에 저장된 다양한 형식의 압축 파일을 인식하여 선택된 상시관측소들에 해당하는 압축파일을 풀어서 RINEX 포맷의 텍스트 파일의 형태로 별도로 지정된 작업 폴더에 자동 추출하는 기능을 수행할 수 있다. Fig. 8은 이와 같은 데이터 파일 수집 및 추출 과정을 예시한 것이다.

CDDIS에서 제공하는 데이터는 과거에는 RINEX Ver. 2가 주를 이루었다면 근래에는 RINEX Ver. 3 이후의 포맷이 주를 이루고 있다. RINEX Ver. 2에서 RINEX Ver. 3으로 변환하면서 다중위성군에 대한 고려가 추가되었다. RINEX Ver. 3과 최근 시작된 RINEX Ver. 4는 측정 정보에 해당하는 OBS 데이터 관점에서 QZSS L1 C/B 데이터의 정의가 추가된 것 이외에는 크게 다르지 않다. 다양한 RINEX version과 항법메시지를 저장한 방식에 따라 달리 인터페이스를 고려할 필요 있다. 특히 위성 궤도를 포함하는 항법 데이터와 관련해서는 위성군 별로 항법메시지 각각 저장하는 방식(*.GN/RN/EN/JN/CN)과 모든 위성군에 대한 궤도정보를 한 개의 파일에 모두 저장하는 방식(*.MN)으로 분류될 수 있다.

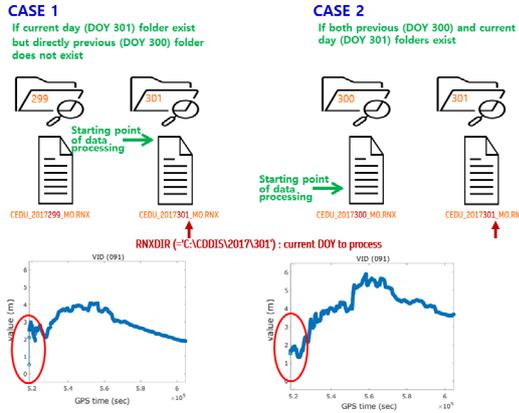


Fig. 9. An example to eliminate unnecessary transient errors of the current day (DOY 301) by pre-processing the observation file of the previous day (DOY 300).

제안된 시뮬레이터는 다양한 Version의 RINEX 항법/관측 데이터를 인식하여 각기 다른 decoding 기능을 수행할 수 있다. 따라서, 한 개의 작업 데이터 폴더에 위성군 별로 다수 파일에 분리된 항법 데이터와 한 개의 파일에 모두 저장된 항법데이터가 혼재하는 경우와, 상시관측소 별로 RINEX Ver. 2와 Ver. 3의 관측데이터가 혼재하는 경우에도 유연하게 지역전리층과 CDCB의 추정 기능을 수행할 수 있는 장점을 가진다.

3.5 성능평가 시뮬레이션에서 과도기 오차의 제거

한 개의 DOY 폴더를 지정하여 1일 동안의 데이터를 후처리용 batch 구조가 아닌 온라인 재귀 구조의 추정기에 적용하게 되면, 초기화 시점 이후에 천이 응답(transient response)에 해당하는 과도기 오차가 발생하게 된다 (Fig. 9의 좌측 하단 그림 참조). 과도기 오차는 추정기의 종류와 우수성에 관계없이 재귀적인 구조의 모든 추정기에서 발생하는 현상이다. 과도기 오차를 감소시키거나 제거하기 위해서는 미리 조사된 정확한 초기값과 상태변수 사이의 상관성까지 상세하게 고려된 공분산 값을 활용하거나, 관심 기간 직전의 준비 기간 데이터를 확보하여 추정기가 준비 기간 데이터만으로 충분히 천이 구간을 지나 관심 기간에는 정상 상태(steady-state)에 돌입하도록 조정하는 것이 필요하다.

제안된 시뮬레이터는 Fig. 9에 도시된 바와 같이 격리된 하루 폴더와 2일 이상의 연속 폴더를 자동 인식하여 분류 처리할 수 있도록 구현하였다. 격리된 하루 폴더에 대해서는 Fig. 9의 하단 좌측 부분에 도시된 바와 같이 천이 응답 특성인 큰 과도기 오차가 초기에 발생하게 되나, 2일 이상 연속 폴더의 경우에는 관심일(day of interest) 직전일(previous day) 데이터의 마지막 부분을 적용하여 천이 응답 특성을 지나 정상상태에 돌입하게 한 후에 관심일의 데이터를 처리하게 할 수 있다.

4. 통합 실험

시뮬레이터의 기능을 검증하고 추정기의 성능을 분석하기 위

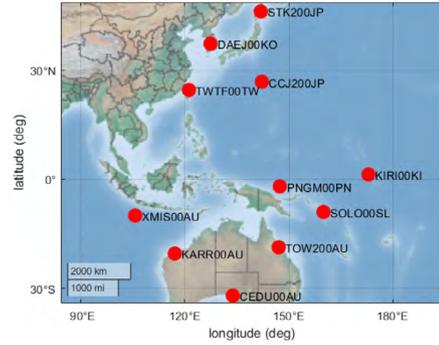


Fig. 10. Locations of Continuously Operating Reference Stations (CORSs) used in the experiment.

하여 실험을 수행하였다. 실험에 활용된 상시관측소는 기존 연구 (Joo et al. 2022)와의 연계성과 추후 궤도 및 시각동기오차 등 다른 분야로의 확장성을 감안하여 Fig. 10에 도시된 아시아 및 오세아니아 지역에 분포하는 11개 상시관측소이다. 이들은 다음의 세 가지 조건들을 참고하여 선정되었다.

- 빈도 높은 실시간 및 저장 데이터의 제공
- 시계 오차 보정을 위한 CLK 데이터 제공
- 지역 위성항법시스템에 대한 관측 데이터 제공

실험에는 태양활동 극대기의 초입 기간에 해당하여 전리층 활동의 상태가 과도하게 크거나 작지 않은 2021년 데이터를 활용하였다. 오차의 통계를 위하여 1년 내 10일 간격의 36개 측정 파일을 활용하였다.

지역 전리층 및 DCB 추정기의 성능을 분석하기 위하여 기존 연구에서 상세한 성능 분석을 찾기 어려운 다음의 두 종류 실험을 수행하였다. 첫번째 실험은 GPS와 QZSS를 동시에 활용한 경우와 QZSS만을 단독으로 활용한 경우의 지역 전리층 지도의 추정 성능을 비교하기 위한 것이고, 두번째 실험은 전역 및 지역 위성항법시스템의 신호를 모두 활용하여 추정한 SDCB의 정확도를 IGS 기준 정보와 비교하고, 지역 위성항법시스템의 신호만을 수신하여도 전리층 계수와 DCB를 명확하게 분리할 수 있는지를 확인하기 위한 것이다.

4.1 지역 위성항법시스템만을 활용한 경우의 지역전리층 추정 성능 평가

전역 및 지역 위성항법시스템 신호를 동시에 수신하는 경우와 지역 위성항법시스템 신호만을 수신한 경우의 지역전리층 추정 성능을 비교 평가하기 위하여 시뮬레이터를 활용한 실험을 수행하였다. 전역 및 지역 위성항법시스템인 GPS와 QZSS를 모두 활용하는 경우와 지역 위성항법시스템인 QZSS만을 단독으로 활용하는 경우의 IPP 분포들은 Fig. 11에 도시되어 있다. Fig. 11에 도시된 바와 같이 두 위성군을 모두 활용하는 경우와 지역 위성군을 단독으로 사용하는 경우 모두 IPP들이 다수의 그룹으로 군집하여 분포함을 확인할 수 있다. 반면, 두 위성군을 모두 활용하는 경우가 지역위성군을 단독으로 활용하는 경우에 비하여 몇 배 더 많은 IPP들을 수반하는 것을 알 수 있다. 하루 기간 중 매 시점에 두

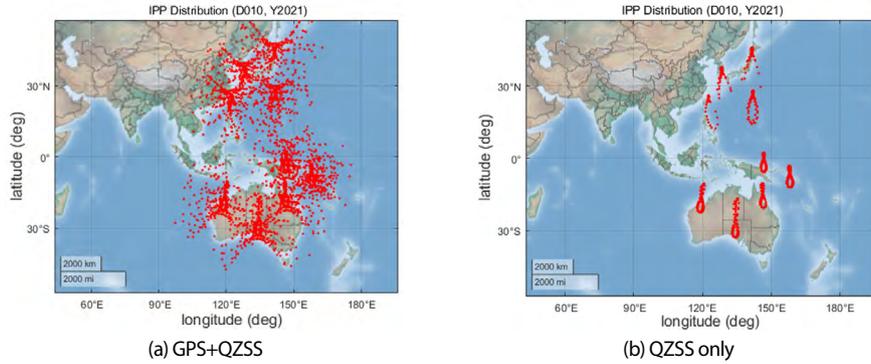


Fig. 11. Comparison of Ionospheric Pierce Point (IPP) distributions at DOY 010 of 2021.

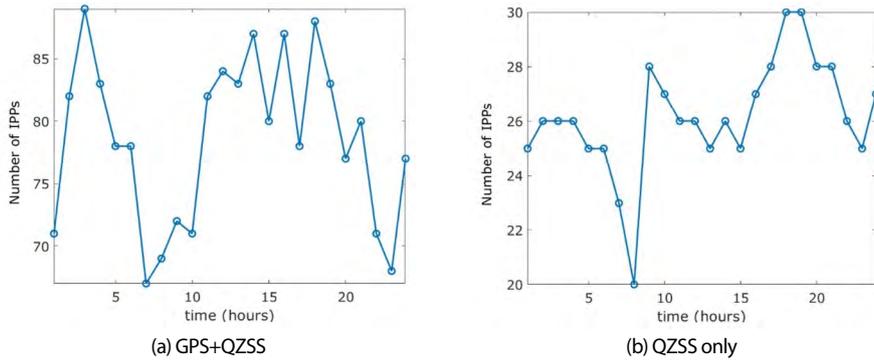


Fig. 12. Comparison of number of Ionospheric Pierce Points (IPPs) at DOY 010 of 2021.

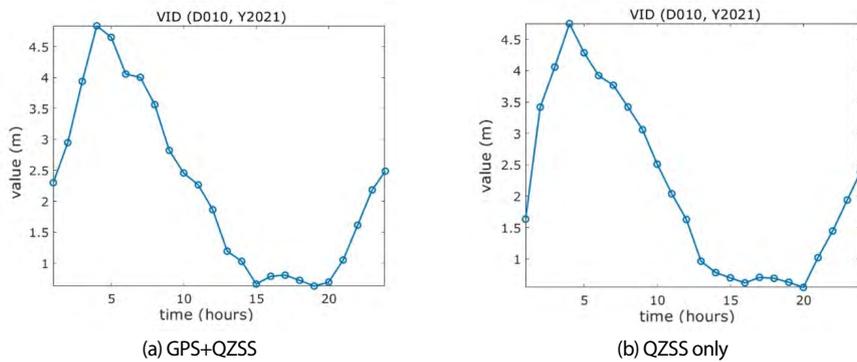


Fig. 13. Comparison of Vertical Ionospheric Delay (VID) estimates at DOY 010 of 2021.

위성군을 모두 활용하는 경우와 지역위성군을 단독으로 활용하는 경우의 가시위성 수는 Figs. 12a와 12b에 비교 도시된 바와 같이 전반적으로 3배 내외가 됨을 알 수 있다.

IPP 군집 그룹의 수를 고려하여 공간기저함수의 계수가 9 개 이내가 되도록 위도 차분에 대하여 최대 2차 함수로 경도 차분에 대해서 최대 2차 함수로 모델링하여 하루(DOY 010) 동안의 관측 데이터를 추정기에 입력하였을 때 산출된 수직 전리층 추정치의 변화 개형은 Fig. 13에 도시되어 있다. Fig. 13a는 두 위성군을 모두 활용하는 경우의 결과를 나타내며 Fig. 13b는 지역 위성항법시스템만을 단독으로 활용하는 경우의 결과를 각각 나타낸다. 두 결과를 비교해 보면 수직 전리층 추정치의 변화 개형은 두 위성군

을 모두 활용하는 경우와 한 개의 지역위성군을 단독으로 활용하는 경우에 대하여 크게 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이는 추정기의 상태변수가 상시관측소 개수보다 많지 않음으로써, 측정치를 누적할 경우에 기저함수 계수에 대한 가관측성이 문제없이 확보된 결과로 분석된다.

CDDIS에서 제공하는 하루 단위의 측정 파일은 전역 및 지역 위성항법시스템에 대한 다중 주파수 의사거리와 위상 측정치를 30초 간격으로 제공하고 있다. 따라서, 전리층 추정기를 30초 간격으로 측정 갱신하고 성능 분석을 위하여 추정기의 출력을 1분 간격으로 IONEX 포맷으로 저장하고 IGS 기준 데이터와 비교하게 되면 각각의 위경도 격자 지점에는 60분×24시간×36일 =

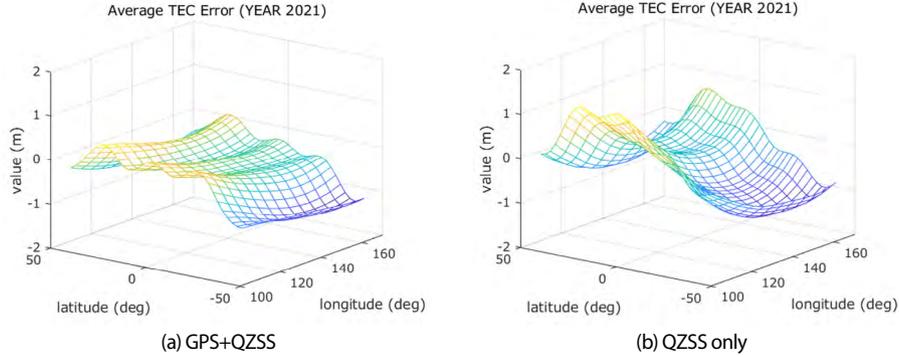


Fig. 14. Comparison of average Vertical Ionospheric Delay (VID) differences at each grid point for 36 different days of 2021 separated by 10 days.

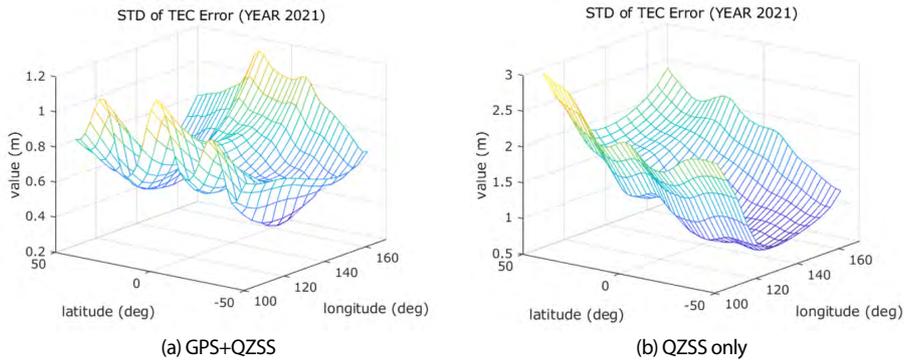


Fig. 15. Comparison of standard deviations of Vertical Ionospheric Delay (VID) differences at each grid point for 36 different days of 2021 separated by 10 days.

Table 1. Comparison of total error statistics counting all the epochs and the Ionospheric Grid Points (IGPs) referencing IGS Global Ionospheric map (GIM).

| | GPS+QZSS | QZSS only |
|------------------------------|----------|-----------|
| Total average error (m) | 0.5001 | 0.3541 |
| Total standard deviation (m) | 0.8070 | 2.7330 |

51,840개의 비교 데이터가 쌓이게 된다.

제안된 추정기는 추정된 함수 계수를 활용하여 위도 및 경도 방향으로 임의의 해상도로 조절하여 IONEX 파일을 산출할 수 있다. 본 실험을 위해서는 유효한 IPP 분포 지역을 고려하여 위도는 -50도에서 50도까지 2.5도 간격으로 경도는 110도에서 170도까지 5도 간격으로 분리하여 총 480개의 격자 지점(Ionospheric Grid Point; IGP)에 대하여 IONEX 파일을 생성하였다.

위에서 설명된 과정을 통하여 위경도 영역의 각 격자 지점별로 다른 방법으로 산출된 추정치 차이 값의 평균과 표준편차는 Figs. 14와 15에 각각 도시되어 있다. Figs. 14a와 15a는 두 위성군을 모두 활용한 결과를 나타내며, Figs. 14b와 15b는 지역위성군을 단독으로 활용한 결과를 나타낸다. 위도와 경도에 관계없이 추정치 차이 값 모두에 대하여 산출한 평균과 표준편차는 Table 1에 정리하였다. Figs. 14와 15, 그리고 Table 1에 도시된 결과들을 해석하면, 1년 기간 동안에 위도 경도 이내의 범위에서 두 위성군을 모두 사용한 결과와 지역위성군을 단독으로 사용하여 산출한 수직 전리층 추정치의 정확도는 총 표준편차 관점에서 0.80 m에서 2.73 m로 증가해 3~4배 정도 오차가 커질 수 있음을 확인하였다.

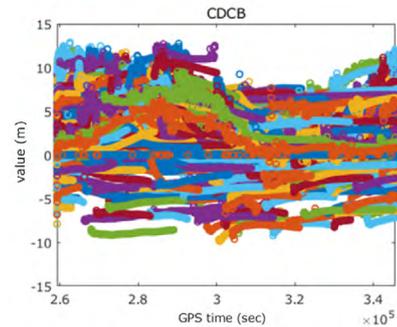


Fig. 16. Trajectories of Combined Differential Code Bias (CDCB) estimates during DOY 090 of 2021 by combined GPS and QZSS observations.

4.2 지역 위성항법군 단독 활용 DCB 분리 추정 가능성

GPS와 QZSS에 포함된 모든 위성의 측정치를 입력으로 활용하여 산출한 CDCB와 DCA의 추정치는 Figs. 16과 17에 각각 도시되어 있다. 두 그림은 모두 2021년 3월 31일 (DOY 090) 하루 동안의 결과에 해당된다.

Figs. 16과 17 모두에서 확인할 수 있듯이 각각 상수 값의 특성을 가지는 CDCB와 DCA는 해당되는 상태변수가 정상상태로 진입하면서 일정한 값에 적절하게 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 코드 측정치에 기반한 CDCB 추정치가 위상 측정치에 기반한 DCA 추정치에 비하여 천이 응답 구간에서의 변화량이나 정상

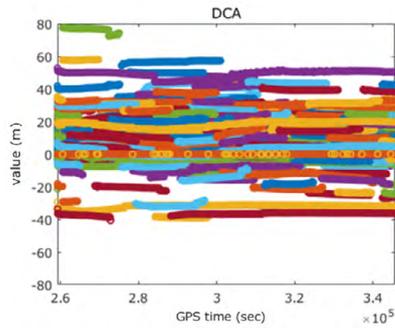


Fig. 17. Trajectories of Differential Cycle Ambiguity (DCA) estimates during DOY 090 of 2021 by combined GPS and QZSS observations.

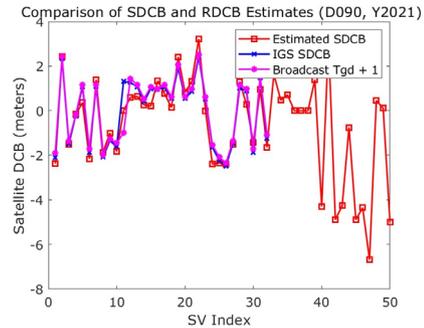


Fig. 18. Comparison of Satellite Differential Code Bias (SDCB) estimates from the proposed estimator, IGS IONEX file, and the shifted group delays contained in the broadcast ephemeris by GPS.

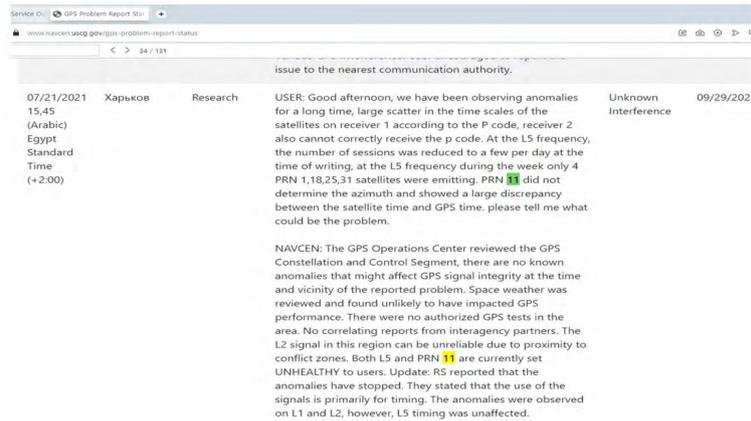


Fig. 19. GPS problem report regarding PRN 11 announced by Navigation Center, US Coast Guard (Navigation Center 2023).

상태에서 수렴 값을 기준으로 한 변화량이 상대적으로 더 큰 특성을 확인할 수 있다.

Fig. 18은 DOY 090에 제안된 추정기에 의하여 최종적으로 산출된 SDCB를 각기 다른 방법에 의하여 산출된 기준 값들과 비교한 것이다. 그림에서 x-축은 위성과 수신기의 인덱스를 나타내며 1에서 32까지는 GPS 위성을, 33에서 39까지는 QZSS 위성을, 그리고 40부터 50까지는 각기 다른 상시관측소 수신기를 각각 나타낸다. Fig. 18에 도시된 바와 같이 제안된 방법에 의해 추정된 DCB는 일반적으로 DCB 관련 연구에서 기준으로 많이 활용되는 IGS 산출 DCB와 비슷한 경향을 가지는 것으로 확인되므로 제안된 추정기는 적절하게 설계된 것으로 판단된다. 또한 방송궤도력에 포함된 군지연(group delay) Tgd 값들과 비교했을 때에도 평균값의 차이를 제외하면 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

Fig. 18에 도시된 바와 같이 GPS는 노후화에 따른 교체에 의하여 다양한 모델이 존재하므로 비교적 최근에 발사된 QZSS보다 SDCB 값들이 다양하게 존재하는 것을 볼 수 있으며, RDCB는 전체적으로 SDCB 보다 넓은 영역에 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 소자의 규격과 비용의 관점에서 수신기에 탑재된 회로와 위성 에 탑재된 회로가 차별화되는데 기인한 것으로 분석된다.

2021년 3월 31일 (DOY 090)의 특기할 만한 사항은 해당 일에 실험에 사용된 감시국들이 측정한 관측 데이터에서 GPS PRN 11번 위성에 대한 적절한 측정값이 발견되지 않은 점이다. 이와 같

은 특기 사항은 해당 일의 관측데이터들을 개별적으로 검사한 결과 확인되었다. 이의 결과로서 제안된 추정기는 11번 위성의 DCB를 산출하지 않고 영 값(zero value)으로 처리하였다.

또한, Fig. 18에 도시된 바와 같이 RINEX 항법데이터에 저장된 방송궤도력 내의 Tgd 값의 경우에도 11번 위성에 대한 값이 영 값으로 저장되어 있다. 이는 해당 위성이 관측되지 않거나 해당 위성의 궤도력이 방송되었지만 Tgd 값이 영 값으로 방송된 경우에 해당한다.

참고로 Fig. 19는 미국 해안경비대 항법센터의 홈페이지에 2021년 7월 21일에 게시된 problem report 화면을 나타낸다 (Navigation Center 2023). 그림에 나타난 바와 같이 PRN 11번 위성의 상태가 전반적으로 건전하지 않은(unhealthy) 것으로 안내되어 있다.

반면, IGS 산출 IONEX 파일에서는 GPS PRN 11번 위성에 대한 DCB 값이 산출되어 있는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과의 의미는, 제안된 방법이 활용한 11개의 상시관측소는 11번 위성의 신호를 수신하지 못했지만 IGS가 활용하는 전지구 영역에 분포한 감시국들 중 일부가 11번 위성의 신호를 수신한 것으로 해석될 수 있다.

앞서 설명된 DCB 관련 실험 결과의 전반적인 사항을 고려할 때, 제안된 추정기는 외부 기관에 의존하지 않고 추정 단계에서 문제가 있는 위성의 DCB를 효과적으로 식별하여 분리하고 있음

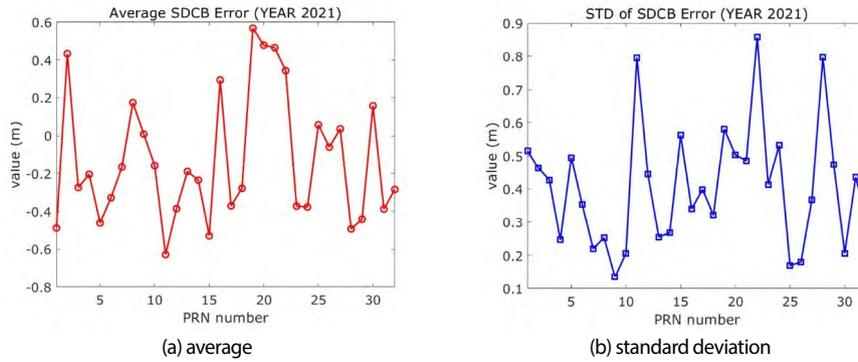


Fig. 20. Statistics of the Satellite Differential Code Bias (SDCB) estimate differences between the proposed method and the IGS IONEX for 36 different days of 2021 separated by 10 days.

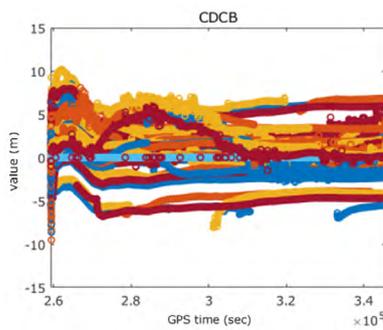


Fig. 21. Trajectories of Combined Differential Code Bias (CDCB) estimates during DOY 090 of 2021 by single constellation QZSS observations.

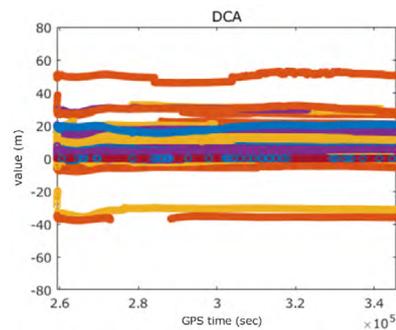


Fig. 22. Trajectories of Differential Cycle Ambiguity (DCA) estimates during DOY 090 of 2021 by single constellation QZSS observations.

을 알 수 있다.

Figs. 20과 21은 GPS와 QZSS를 모두 활용한 경우에 제안된 추정기와 IGS 기준 데이터가 각각 산출한 GPS SDCB의 추정치 차이 값의 평균과 표준편차를 나타낸다. 2021년 IGS가 산출한 IONEX에는 QZSS 위성의 DCB가 포함되어 있지 않으므로 통계 분석 결과를 도시하지 않았다. SDCB의 경우에는 하루에 한 번씩 두 추정치를 비교하므로 Figs. 20과 21은 각각 1년 내 10일 간격으로 활용된 36개(36일)의 데이터에 대한 차이 값의 평균과 표준편차에 해당된다. 두 그림에 도시된 바와 같이 GPS와 QZSS를 모두 활용한 경우에 제안된 방법과 IGS가 산출한 SDCB 차이 값의 평균과 표준편차는 전반적으로 1 m 이내에 존재함을 확인할 수 있다.

GPS와 QZSS를 동시에 활용한 앞선 결과들에 대비하여 QZSS만을 단독으로 활용한 결과는 Figs. 21-24에 도시되어 있다. Figs. 21과 22에 도시된 바와 같이 각각 상수 값의 특성을 가지는 혼합 DCB와 DCA는 QZSS만을 단독으로 활용하여도 정상상태로 진입하면서 일정한 값에 적절하게 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 반면 그림에 도시된 궤적의 가닥수가 상대적으로 작은 것을 알 수 있는데 이는 CDCB와 DCA에 해당되는 상태변수의 개수가 위성 수와 수신기의 개수의 곱에 해당되기 때문이다.

SDCB 추정치의 정밀도 분석을 위해서는 바이어스의 모호성에 대한 기준을 정할 필요가 있다. 이를 위하여, (i) GPS SDCB의 합을 영 값으로 한 제약사항을 적용하고 GPS와 QZSS 측정치를 모두 활용하여 QZSS SDCB의 추정값을 산출하고, (ii) QZSS 방

송 Tgd를 앞서 산출된 QZSS SDCB와의 평균 차이 값이 영 값이 되도록 바이어스 값을 구하여 적용한 변환 QZSS Tgd를 분석의 기준값으로 활용하였다. 앞선 경우와는 달리 비교 대상이 되는 기준 값이 다양하지 않은 이유는 방송궤도력을 제외하고 QZSS만을 단독으로 활용한 DCB는 기존 자료에서 찾기 어렵기 때문이다. 실험 전 구간에 걸쳐서 QZSS 4, 5, 6번 위성은 가용하지 않으므로 모두 영 값으로 처리하였다.

Figs. 23과 24는 제안된 방법에 의하여 분리 추정된 QZSS SDCB와 앞서 설명된 절차에 의하여 산출한 변환 QZSS Tgd 값을 비교한 평균과 표준편차를 각각 비교한 것이다. Figs. 23a와 24a는 GPS와 QZSS 측정치를 모두 활용하는 경우에 해당되며, Figs. 23b와 24b는 QZSS 측정치만을 단독으로 활용하는 경우에 해당된다. 두 그림에 도시된 바와 같이 QZSS SDCB를 추정하고자 할 경우, GPS와 QZSS를 모두 활용한 결과에 비해서 QZSS만을 단독으로 활용할 경우에 평균오차와 표준편차 모두 분포범위가 커지므로 QZSS SDCB 추정치의 정밀도가 눈에 띄게 열화됨을 확인할 수 있다. 그러나, 관측성 제약에 따른 평균오차를 제외하면 표준편차 0.6 m의 정밀도로 추정된 SDCB가 방송궤도력에 포함된 근지연 값들과 정합되는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 논문에서는 RINEX와 IONEX 포맷의 파일들에 기반한 효

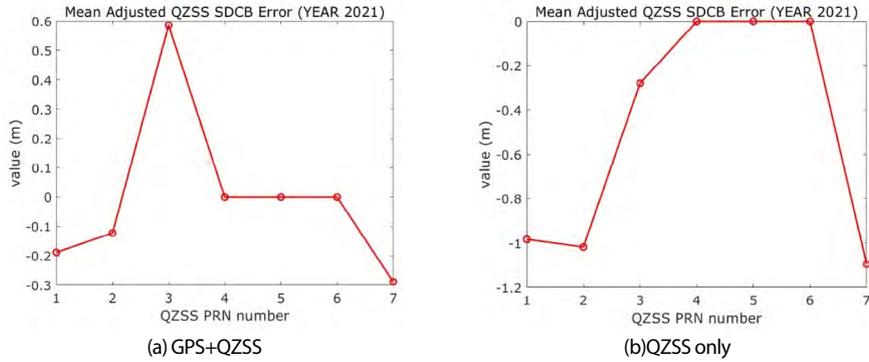


Fig. 23. Comparison of Satellite Differential Code Bias (SDCB) estimate differences between the proposed estimator and the shifted group delays contained in the broadcast ephemeris by QZSS for 36 different days of 2021 separated by 10 days (adjusting mean value: 0.7423).

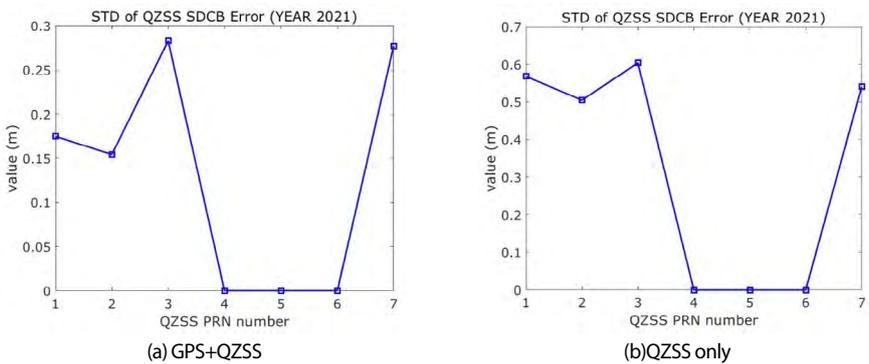


Fig. 24. Comparison of standard deviations of Satellite Differential Code Bias (SDCB) estimate differences between the proposed estimator and the shifted group delays contained in the broadcast ephemeris by QZSS for 36 different days of 2021 separated by 10 days.

울적인 지역전리층/DCB 시뮬레이터를 제안하였다. 제안된 시뮬레이터는 방송궤도력과 RINEX 관측 파일들을 입력으로 활용하여 지역 전리층과 DCB를 분리 추정할 수 있는 재귀적인 추정기를 포함하고 있으며, 추정기가 산출한 IONEX 파일을 IGS가 산출한 IONEX 파일과 비교하여 분리 추정된 지역전리층과 DCB의 정확도 및 정밀도를 편리하게 분석할 수 있는 장점을 가진다. 제안된 시뮬레이터를 활용하여 단일 지역 위성항법군과 국소 지역에 분포한 상시관측소를 활용할 경우 지역전리층과 DCB의 분리 추정이 어느 정도 가능한지 두 실험을 통하여 평가하였다.

실험의 결과에 의하면, 아시아 및 오세아니아 국소 지역에 분포한 11개의 기준국에서 지역 위성항법시스템에 대한 측정정보만을 수신하면 일부 전리층 통과 지점에서의 기울기 계수가 고정된 경우에도 지역 전리층과 DCB를 분리 추정할 수 있으며, 그 정확도는 IGS IONEX에 대비하여 수직 전리층 평균오차 0.35 m 및 표준편차 2.73 m 내외의 차이를 보임을 확인하였다.

SDCB의 경우에는 전역 및 지역 항법위성의 신호를 모두 수신하여 처리할 경우에는 GPS 위성들의 경우에는 IGS IONEX 결과에 대비하여 표준편차 0.9 m 이내의 평균적인 차이를 가짐을 확인하였으며, 한정된 단일 지역 위성항법군에 소속된 4개의 위성만을 활용할 경우에는 가관측성 제약에 따른 평균오차를 제외하면 SDCB는 표준편차 0.6 m의 정밀도로 방송궤도력(broadcast ephemeris)에 포함된 군지연 값들과 정합되는 것으로 분석되었다.

본 연구를 보완하기 위하여 향후에는 다수의 후보 공간기저함

수와 적용 가능한 상시관측소의 조합을 변화시키며 비교 분석하여 추정기의 성능과 상시관측소의 개수와 장소를 최적화하는 연구가 필요할 것으로 예상된다. 또한, 지역 위성항법시스템만을 활용할 경우에도 효율적으로 SDCB와 RDCB를 분리할 수 있는 제약식에 대한 연구도 추가적으로 필요하리라 예상된다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, H. K. Lee; software, H. K. Lee; data curation, J. Kim, K.-D. Park, B.-K. Choi; review, J. Hong, D.-H. Sohn, and J.-K. Chung; project administration, J. Hong, D.-H. Sohn, and J.-K. Chung, B.-K. Choi; funding acquisition, B.-K. Choi.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Cabinet Office, 2024, Quasi-Zenith Satellite System Interface

- Specification Satellite Positioning, Navigation and Timing Service (IS-QZSS-PNT-006). <https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-pnt-006.pdf?t=1755158607415>
- Cabinet Office, 2025a, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Sub-meter Level Augmentation Service (IS-QZSS-L1S-008). <https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-l1s-008.pdf?t=1755158432425>
- Cabinet Office, 2025b, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service (IS-QZSS-L6-007). <https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-l6-007.pdf?t=1755158645865>
- Coco, D. S., Coker, C., Dahlke, S. R., & Clynch, J. R. 1991, Variability of GPS satellite differential group delay biases, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 27, 931-938. <https://doi.org/10.1109/7.104264>
- Choi, B.-K., Sohn, D.-H., Hong, J., & Chung, J.-K. 2024, Regional Ionosphere Modeling using GPS, Galileo, and QZSS, *JPNT*, 13, 159-165. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.2.159>
- Choi, K. H., Lee, J. Y., Kim, H. S., Kim, J., & Lee, H. K. 2012, Simultaneous estimation of ionospheric delays and receiver differential code bias by a single GPS station, *Meas. Sci. Technol.*, 23, Article #065002. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/6/065002>
- Choi, K. H., Lim, J. H., Yoo, W. J., & Lee, H. K. 2018, Distributed processing of a GPS receiver network for a regional ionosphere map, *Measurement Science and Technology*, 29, Article #015104. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa89cc>
- Crustal Dynamics Data Information System [Internet], cited 2025 Aug 1, available from: <https://www.earthdata.nasa.gov/centers/cddis-daac>
- Hatch, R. 1983, The synergism of GPS code and carrier measurements, *International geodetic symposium on satellite doppler positioning*, Las Cruces, NM, February 8-12, 1982, vol.2, pp.1213-1231. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1983igss.conf.1213H>
- Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., Orús, R., Garcia-Rigo, A., et al. 2009, The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998, *J. Geod.*, 83, 263-275. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>
- International GNSS Service, Ionospheric Products [Internet], cited 2025 Aug 1, available from: <https://igs.org/products/#ionosphere>
- Jin, R., Jin, S., & Feng, G. 2012, M_DCB: Matlab Code for Estimating GNSS Satellite and Receiver Differential Code Biases, *GPS Solutions*, 16, 541-548. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0279-3>
- Joo, J. M., et al. 2022, *Fundamental Research for Korea Satellite Navigation System and Future Air Traffic Management*, Korea Aerospace Research Institute
- Li, Z., Wang, N., Hernández-Pajares, M., Yuan, Y., Krankowski, A., et al. 2020, IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling, *J. Geod.*, 94, 32. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01360-0>
- Natras, R., Goss, A., Halilovic, D., Magnet, N., Mulic, M., et al. 2023, Regional Ionosphere Delay Models Based on CORS Data and Machine Learning, *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 70, navi.577. <https://doi.org/10.33012/navi.577>
- Navigation Center, US Coast Guard [Internet], cited 2023 Dec 21, available from: <https://www.navcen.uscg.gov/gps-problem-report-status>
- Schaer, S., Gurtner, W., & Feltens, J. 1998, IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1, *Proceedings of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany.
- Xiang, Y., Xu, Z., Gao, Y., & Yu, W. 2020, Understanding long-term variations in GPS differential code biases, *GPS Solutions*, 24, 118. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01034-6>
- Ya'acob, N., Ismail, M., & Abdullah, M. 2007, Investigation of the GPS signals ionospheric correction: Ionospheric TEC prediction over equatorial, *IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications*, 294-298, doi: 10.1109/ICTMICC.2007.4448646.
- Zhou, C., Yang, L., Li, B., & Balz, T. 2023, M_GIM: a MATLAB-based software for multi-system global and regional ionospheric modeling, *GPS Solutions*, 27, 42. <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01370-9>



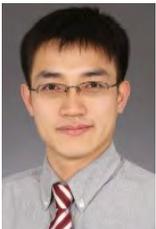
Hyung Keun Lee received B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Seoul National University, South Korea, in 1990, 1994, and 2002, respectively. He was at the Central Research Institute, Hyundai Space and Aircraft Corporation, South Korea, from 1994 to 1998. He has been with the School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, South Korea since 2002 as a professor. His research interests include positioning and navigation systems, SLAM systems, sensor networks, and avionics systems.



Jeongrae Kim is a professor in the Department of Aeronautical and Astronautical Engineering at Korea Aerospace University, Korea. He received his Ph.D. in Aerospace Engineering from the University of Texas at Austin in 2000. His research interest includes satellite instrument simulations, orbit determination, GNSS ionosphere, SBAS, and GNSS applications.



Kwan-Dong Park received his Ph.D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.



Dong-Hyo Sohn received the Ph.D. degree in Geoinformatic Engineering in Inha University in 2015. He is currently working for Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interests include crustal deformation, GNSS precipitable water vapor, and ionospheric variations.



Junseok Hong received his Ph.D. degree in Space Science and Geology in Chungnam National University in 2020. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2017. His research interests include GNSS TEC & DCB analysis and ionospheric phenomena.



Jong-Kyun Chung received his Ph.D. degree in Space Science in Chungnam National University in 2005. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2006. His research interests include GNSS TEC & scintillation on space weather and natural hazard.



Byung-Kyu Choi received his Ph.D. degree in Electronics in Chungnam National University in 2009. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2004. His research interests include multi-GNSS PPP, PPP-RTK, and GNSS TEC & DCB estimation.

GNSS 수신기 간 시각 동기 유지를 위한 시계 오차 모델링 기법 비교

이하림¹, 박승현¹, 이준호², 김경민³, 이철수³, 서지원^{1†}

Comparison of Clock Drift Modeling Methods for Maintaining Time Synchronization Between GNSS Receivers

Halim Lee¹, Seunghyeon Park¹, Joon Hyo Rhee², Gyeongmin Kim³, Chulsoo Lee³, Jiwon Seo^{1†}

¹School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon 21983, South Korea

²Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, South Korea

³Satellite System Laboratory, LIGNex1, Seongnam, Gyeonggi-do 13488, South Korea

ABSTRACT

Precise time synchronization among distributed infrastructure is essential for enhancing the performance of systems such as wireless sensor networks, cellular base stations, and terrestrial navigation systems. Global Navigation Satellite System (GNSS) time transfer is a widely used method for synchronizing remote receivers; however, due to communication or operational constraints, it is often performed only intermittently at periodic intervals. During these intervals, clock offsets between receivers may accumulate due to clock drift and can lead to degraded time synchronization accuracy. To address this issue, this study evaluates and compares three clock drift modeling methods—moving average, polynomial fitting, and Kalman filtering—for predicting and compensating clock offsets between GNSS receivers in the absence of continuous GNSS time transfer. Both 2-state and 3-state Kalman filter models are considered to examine how the number of state variables affects prediction performance. Experiments were conducted using real data collected from two GNSS receivers: one disciplined by an external rubidium atomic clock and the other steered to GPST. The results show that when the GNSS time transfer interval is less than 20 hours, the 2-state Kalman filter achieves the best performance, whereas the 3-state Kalman filter performs better for longer intervals. These findings provide practical guidelines for selecting appropriate clock drift compensation strategies and GNSS synchronization intervals based on timing accuracy requirements and system constraints.

Keywords: time synchronization, clock drift, GNSS time transfer, moving average, polynomial fitting, Kalman filtering
주요어: 시각 동기, 시계 오차, GNSS 시각전송, 이동 평균, 다항 회귀, 칼만 필터

1. 서론

정밀한 시각 동기의 유지는 현대 사회의 다양한 기술 인프라가 안정적이고 정확하게 작동하기 위한 핵심 요소 중 하나이다. 예를 들어, 이동통신, 지상 항법 시스템, 센서 네트워크와 같은 응용 분야에서는, 분산된 기지국 또는 노드 간의 시각을 정밀하게 동기화함으로써 보다 높은 수준의 서비스 품질을 제공할 수 있다 (Sivrikaya & Yener 2004, Johannessen 2004, Kim & Seo 2023,

Lee et al. 2024b, Kang et al. 2025).

지리적으로 떨어진 기지국 또는 노드 간의 시각을 동기화하는 대표적인 방법으로는 Global Navigation Satellite System (GNSS) 시각전송(time transfer) 기법이 있다 (Lewandowski et al. 1993, Lewandowski & Thomas 2002, De Lorenzo et al. 2010). 이 방식은 각 기지국에 GNSS 수신기를 설치하고, GNSS 위성 시각을 공통 기준으로 활용하여 수신기 간의 시각 차이를 추정 및 보정하는 방식이다. 대표적인 구현 방식으로는 두 수신기에 공통으로

Received Aug 10, 2025 Revised Aug 24, 2025 Accepted Aug 25, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: jiwon.seo@yonsei.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

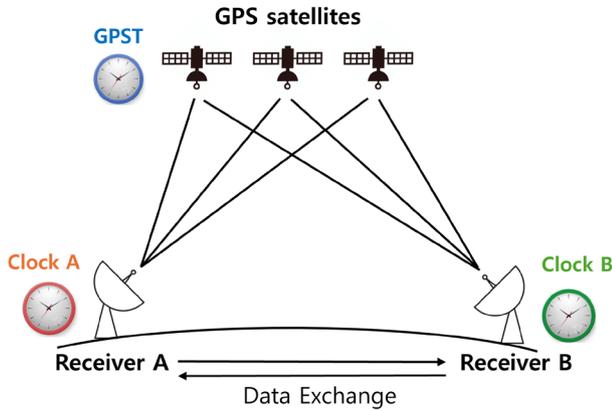


Fig. 1. Overview of the GPS time transfer between two remote receivers.

보이는 위성만을 활용하는 common-view (CV)와, 수신기별로 관측 가능한 모든 위성을 사용하는 all-in-view (AV) 방식이 있다 (Weiss et al. 2005, Lee et al. 2008). 그러나 실제 시스템 운용 환경에서는 통신 자원 등의 제약으로 인해 GNSS 시각전송을 연속적으로 수행하기 어려우며, 일반적으로 일정한 주기에 따라 제한적으로 수행된다. 이러한 경우, 마지막 시각전송 이후 시간이 경과함에 따라 수신기에 연결된 시계의 오차가 점진적으로 누적될 수 있다.

이러한 문제를 보완하기 위해, GNSS 시각전송이 이루어지지 않는 구간에서는 수신기 시계의 시각 오차 변화 추세를 예측하고 보정할 수 있는 시계 오차(clock drift) 모델링 기법이 활용될 수 있다. 대표적인 기법으로는 이동 평균(moving average) (Xiong et al. 2015), 다항 회귀(polynomial fitting) (Huang et al. 2014, Wu et al. 2015), 칼만 필터(Kalman filter) (Galleani & Tavella 2003, 2010, Hauschild & Montenbruck 2009) 등이 있으며, 이들은 시계 오차의 시간적 변화를 모델링하여 향후 오차를 예측하고 보정하는 데 활용된다.

시계 오차의 특성은 시계의 종류에 따라 상이하게 나타나며, 본 연구에서는 루비듐 원자 시계에 동기된 GNSS 수신기를 대상으로, GNSS 시각전송 이후의 시각 동기 상태를 유지하기 위한 다양한 시계 오차 모델링 기법의 성능을 비교하였다. 각 기법에 대해 시각전송 주기와 경과 시간에 따른 시계 오차 보정 정확도를 정량적으로 평가하였다.

본 논문의 2장에서는 GNSS 수신기 간 시각 동기 방법과, 본 연구에서 적용한 시계 오차 모델링 기법들을 소개한다. 3장에서는 실험 환경 및 세팅을 설명하고, 4장에서는 실험 결과에 기반하여 각 기법의 성능을 비교 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론을 제시한다.

2. 시계 오차 모델링을 통한 시각 동기 유지

Fig. 1은 지리적으로 떨어진 두 시계의 시각을 Global Positioning System (GPS) 시각전송을 통해 동기하는 과정을 개략적으로 나타낸다. 각 수신기(Fig. 1의 수신기 A와 B)는 GPS 위

성으로부터 수신한 의사거리(pseudorange) 측정치를 이용해 GPS 시각(GPST)과 수신기에 연결된 시계와의 시각 차이를 산출한다. 이후 두 수신기가 해당 결과를 교환하면, GPST 대비 시각 오차의 차분을 통해 시계 A와 B 간의 시각차(clock difference)를 계산할 수 있다. 이 과정에서 이중주파수 측정치를 통한 전리층 지연 보정 등 추가적인 보정을 적용하면 동기 정확도를 향상시킬 수 있다 (Seo & Walter 2014, Lee et al. 2024a, 2025, Zhang et al. 2024).

그러나 통신 자원 등 상황에 따라 시각 비교 데이터(CGTTs)는 실시간으로 전송되기 어려울 수 있으며, 시각전송이 이루어지지 않는 구간에서는 수신기에 연결된 시계의 오차가 누적된다. 이러한 구간에서도 안정적인 동기를 유지하기 위해, 시계 오차의 변화를 예측하는 모델링 기법이 필요하다. 본 연구에서는 이동 평균, 다항 회귀, 칼만 필터 기반 기법을 적용하여 시계 오차를 예측하고 보정하였다. 다음 절부터는 각 모델링 기법에 대해 서술하였다.

2.1 이동 평균 기반 시계 오차 모델링

이동 평균 (Xiong et al. 2015)은 시계열 예측에서 가장 단순하면서도 널리 사용되는 기법 중 하나이다. 이 방식은 과거 일정 구간의 값을 단순 평균하여 미래 시점을 예측하는 것으로, 복잡한 모델링 없이도 빠르게 추정값을 산출할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 과거 N 개의 시점에서 측정된 수신기 간 시각차 값을 기반으로, 다음 시점의 값을 Eq. (1)과 같이 예측하였다.

$$\hat{x}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{t-i} \quad (1)$$

여기서, \hat{x}_t 는 시점 t 에서의 시각차 예측값, x_{t-i} 는 과거 시각차 관측값이며, N 은 이동 평균 윈도우 길이를 의미한다 (본 논문에서는 $N=4$ 로 설정하였음). 이동 평균 방식은 구조가 단순하고 계산량이 적어 구현이 용이하며, 시각차 변화가 비교적 완만한 구간에서는 안정적인 예측 성능을 보인다. 그러나, 시계 오차에 급격한 추세 변화가 발생하거나, 이상치가 존재하는 경우에는 반응 속도가 느리다는 한계가 있다.

2.2 다항 회귀 기반 시계 오차 모델링

다항 회귀 (Huang et al. 2014, Wu et al. 2015)는 시간에 따라 변하는 데이터를 일정 차수의 다항식으로 근사하여 미래 값을 예측하는 방법이다. 특히, 데이터가 비교적 매끄러운 곡선 형태를 가질 경우 효과적으로 작동한다.

n 차 다항식의 계수를 추정하기 위해서는 최소 $n+1$ 개의 관측값이 필요하다. 본 연구에서는 다항식의 최대 차수를 5차로 설정하되, 사용 가능한 관측값의 수에 따라 차수를 자동으로 조정하였다. 예를 들어, 관측값이 2개만 존재하는 경우에는 1차 다항식을 이용해 시계 오차를 모델링하고, 관측값이 6개 이상 확보되는 시점부터는 5차 다항식 모델을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 5차 다항식 모델은 Eq. (2)와 같이 표현된다.

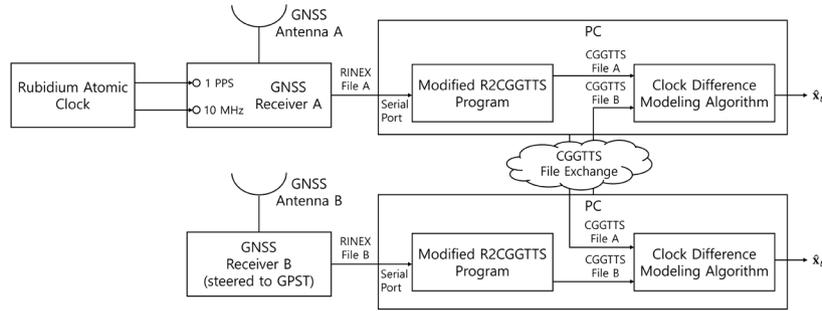


Fig. 2. Block diagram of the experimental setup and data processing flow.

$$\hat{x}_t = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (2)$$

여기서 다항식 계수인 a_i 는 최소제곱법을 통해 추정하였다. 다항 회귀는 계산량이 적고 구현이 간단하지만, 고차 다항식을 사용할 경우 모델 데이터의 노이즈까지 과도하게 학습하는 과적합(overfitting)이 발생할 수 있다는 단점이 있다.

2.3 칼만 필터 기반 시계 오차 모델링

칼만 필터 (Galleani & Tavella 2003, 2010, Hauschild & Montenbruck 2009)는 선형 동적 시스템(linear dynamic system)의 상태(state)를 관측값으로부터 재귀적으로 추정하는 필터이다. 본 연구에서는 두 수신기 간 시각차 데이터를 바탕으로 시간 경과에 따른 시계 오프셋(clock offset)의 변화를 칼만 필터로 추정하였다.

특히, 본 연구에서는 칼만 필터의 상태 공간 모델(state-space model)을 두 가지 방식으로 설정하고, 이들의 성능을 비교하였다. 첫번째는 2차원 상태 벡터(x_t, \dot{x}_t)를 사용하는 방식이며, 두번째는 3차원 상태 벡터($x_t, \dot{x}_t, \ddot{x}_t$)를 사용하는 방식이다. 두 경우의 상태 벡터는 각각 Eqs. (3, 4)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} x_t \\ \dot{x}_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} x_t \\ \dot{x}_t \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $x_t, \dot{x}_t, \ddot{x}_t$ 는 각각 시점 t 에서의 시각차 오프셋(offset), 드리프트(drift), 드리프트 변화율(drift rate)을 나타낸다. 다음으로, 칼만 필터의 시스템 모델은 Eq. (5)와 같이 정의된다 (Galleani & Tavella 2003, Khodarahmi & Maihami 2023).

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{A}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{w}_t \quad (5)$$

여기서, \mathbf{A} 는 상태 전이 행렬로, 2-state과 3-state 모델에 대해서 각각 Eqs. (6, 7)과 같이 정의된다 (Huang & Zhang 2012). $\mathbf{w}_t \sim N(0, \mathbf{Q})$ 는 시스템 잡음 벡터이며, \mathbf{Q} 는 시스템 잡음 공분산 행렬이다. 본 논문에서는 2-state과 3-state 모델에 대해서 각각 시스템 잡음 공분산 행렬을 $\mathbf{Q} = \text{diag}(10^{-3}, 10^{-3})$ 과 $\mathbf{Q} = \text{diag}(10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9})$ 로 설정하였다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

또한, 칼만 필터의 관측 모델은 Eq. (8)과 같이 정의된다 (Galleani & Tavella 2003, Khodarahmi & Maihami 2023).

$$z_t = \mathbf{H}\mathbf{x}_t + v_t \quad (8)$$

여기서, z_t 는 시점 t 에서 관측된 수신기 간 시각차이며, \mathbf{H} 는 관측 행렬로, 2-state과 3-state 모델의 경우에 대해 각각 $\mathbf{H} = [1 \ 0]$, $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]$ 으로 정의된다. $v_t \sim N(0, R)$ 은 관측 잡음이며, R 는 관측 잡음 분산으로, 관측 데이터를 바탕으로 추정하였다.

이러한 시스템 모델과 관측 모델을 바탕으로, 칼만 필터는 예측(prediction)과 업데이트(update) 단계를 반복 수행함으로써 시점 t 에서의 상태 벡터를 추정한다. 예측 및 업데이트의 수식과 알고리즘에 대한 세부 내용은 선행연구 (Galleani & Tavella 2003, 2010, Hauschild & Montenbruck 2009)에 서술되어 있다.

3. 실험 세팅

본 연구에서는 두 대의 GNSS 수신기를 활용하여 실험을 수행하였다. 전체 실험 구성 및 데이터 처리 과정은 Fig. 2에 나타나 있었다.

루비듐 원자 시계의 특성을 독립적으로 분석하기 위해, 두 GNSS 수신기 중 하나는 외부 기준 시계(external reference clock)로 루비듐 원자 시계를 사용하여 동작 시키고, 다른 하나는 GPST에 스티어링(steering) 되도록 운용하였다. 또한, 각 수신기에서 생성된 RINEX 파일은 직렬 포트(serial port)를 통해 PC로 전송되게 하였다. PC에서는 우선 R2CGGTS 프로그램을 이용하여 RINEX 파일을 시각 비교용 표준 형식인 CGGTS 파일로 변환하였다. 이때, R2CGGTS 프로그램의 데이터 생성 간격과 관련된 코드를 일부 수정하여 사용하였으며, 이에 대한 세부 내용은 본 절 후반부에서 설명한다.

생성된 CGGTS 파일은 두 PC 간에 교환이 가능하다고 가정하였다. 본 연구에서는 편의상 두 수신기를 동일한 PC에 연결하여 사용하였으며, 이에 따라 별도의 통신 과정을 거치지 않고 동일 PC에 CGGTS 파일을 기록하였다. 마지막으로, PC에서는 두 CGGTS 파일을 입력으로 하여, 파일 교환이 이루어지지 않은

시점의 시각차 δt 를 추정하는 알고리즘을 적용하였다.

실험 시 GNSS 수신기로는 Septentrio Polarx3eTR, 루비듐 원자 시계로는 SRS FS725를 사용하였다. 실험 기간 동안, 루비듐 원자 시계는 외부 동기 없이 자율적으로 운용하였다. GNSS 안테나로는 Leica AS10를 사용하였다. 수집된 데이터는 2025년 6월 27일 6시 30분부터 2025년 7월 6일 23시 54분까지 약 열흘 간의 데이터를 포함한다.

GNSS 시각전송을 수행하기 위해서, R2CGGTTS 소프트웨어를 활용하였다. R2CGGTTS 소프트웨어는 Royal Observatory of Belgium에서 개발한 시각 비교용 소프트웨어로, 전세계 주요 시각 표준 관련 기관에서 널리 활용되고 있다 (Defraigne & Martínez-Belda 2010, Jaldehag et al. 2019, Yu et al. 2015). R2CGGTTS 소프트웨어를 통해, GPS RINEX 파일로부터 CGGTTS 파일을 생성할 수 있으며, 이를 통해 GPST 기준 수신기 시계의 시각차를 획득할 수 있다. 본 연구에서는 GPS 이중주파수(L1, L2) 측정치를 이용하여 생성한 CGGTTS 파일을 사용하였다.

CGGTTS 표준 (Defraigne & Petit 2015)은 현재 16분 주기로 데이터를 생성하는 방식을 채택하고 있다. 구체적으로, 수신기 동기화를 위해 약 2분간 lock 과정을 수행한 후, 13분 동안 위성 신호 데이터를 저장하며, 마지막 1분은 데이터 처리 및 대기 시간으로 사용된다. 이러한 절차를 통해 1997년 10월 1일 00:02:00 (UTC)를 기준으로 하루에 총 89회의 데이터가 16분 간격으로 생성된다. 이 과정에서 데이터 저장 시작 시각은 매일 4분씩 앞당겨지며, 예를 들어 00:02:00, 00:14:00, 00:10:00, 00:06:00 순으로 조정된다.

본 연구에서는 15분 주기의 CGGTTS 출력을 가능하게 하기 위해 기존 스케줄링을 수정하였다. 구체적으로, R2CGGTTS Fortran 코드에서 수신기 lock 시간을 기존 2분에서 1분으로 단축하여 전체 주기를 16분에서 15분으로 조정하였으며, 위성 신호 데이터 저장 기간은 기존과 동일하게 13분으로 유지하였다. 또한, 항성일과의 정합을 위해 수행되던 저장 시작 시각의 4분 조정 절차를 제거함으로써 일정한 15분 간격의 데이터 생성을 보장하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 알고리즘별 성능 비교

본 연구에서는 GPS에 의한 시각 비교 데이터(CGGTTS) 전송을 15분 간격으로 수행한 결과를 기준으로 하여, 각 시계 오차 모델링 알고리즘의 성능을 평가하였다. Fig. 3a는 시간에 따른 두 수신기 시계 간의 상대적 변화를, Fig. 3b는 15분 간격 GPS 시각전송 결과(Fig. 3a의 'GPS CV (15-min Interval)')를 기준으로 각 모델링 기법의 시각차 추정값과의 차를 나타낸다. Table 1에는 GPS 시각전송으로 측정된 시각차 대비 각 알고리즘의 추정값에 대한 평균제곱오차(Mean Squared Error, MSE)를 정리하였다. Fig. 3과 Table 1에 제시된 실험에서는 GPS 시각 비교 데이터 활용이 1시간 주기로 이루어진다고 가정하였으며, 각 알고리즘은 시각전송 시점의 시각차 값을 기반으로, 그 이후 구간의 시각차를 예측

Table 1. MSE comparison of each algorithm at a GPS time transfer interval of 1 hour.

| Algorithm | Mean squared error (ns ²) |
|-----------------------|---------------------------------------|
| Moving average | 5313.02 |
| Polynomial fitting | 187.08 |
| 2-state Kalman filter | 122.94 |
| 3-state Kalman filter | 130.70 |

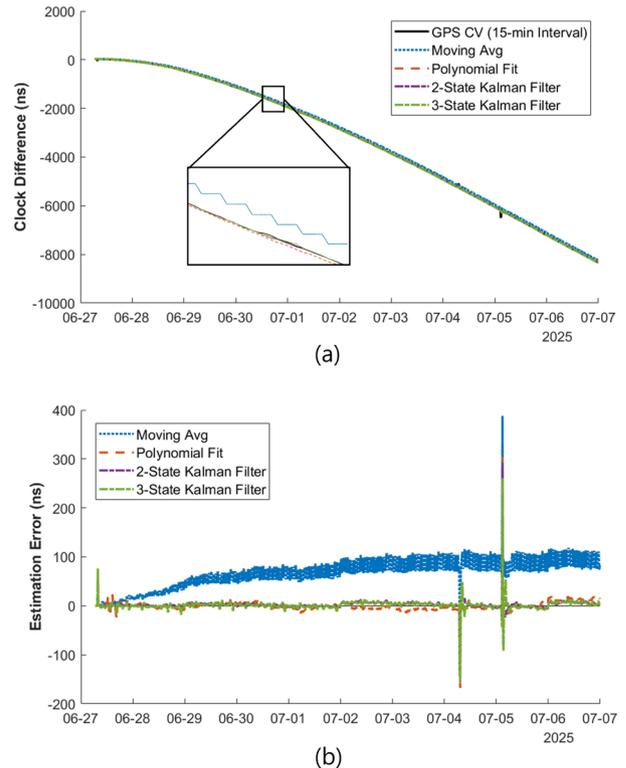


Fig. 3. (a) Predicted time difference between two receivers over time for each modeling algorithm, (b) Difference of each algorithm with respect to GPS common-view (CV) time transfer at 15-min intervals.

하였다.

Fig. 3과 Table 1의 결과에 따르면, GPS 시각전송 주기가 1시간 일 경우, 2-state 칼만 필터가 가장 우수한 추정 성능을 보였다. 3-state 칼만 필터의 경우, 추정하는 상태가 한 개 늘었음에도 불구하고, 2-state 칼만 필터에 비해 더 낮은 시각차 추정 정확도를 보였다. 시계의 drift rate까지 추정할 경우, 과적합이 발생하여 오히려 오차가 더 커진 것으로 판단된다.

4.2 GNSS 시각 전송 주기에 따른 성능 비교

본 연구에서는 GPS 시각 비교 데이터 전송 주기를 최소 30분에서 최대 30시간까지 설정한 뒤, 각 주기에 대한 각 알고리즘의 열흘 간의 평균제곱오차를 계산하였다. Fig. 4는 시각전송 주기에 따른 다항 회귀, 2-state 칼만 필터, 3-state 칼만 필터 기반 시계 오차 모델링 알고리즘의 평균제곱오차 변화를 나타낸다. 이동 평균 기반 시계 오차 모델링 기법은 Fig. 3과 Table 1에서 확인할 수 있듯이 다른 알고리즘에 비해 MSE가 현저히 크게 나타나

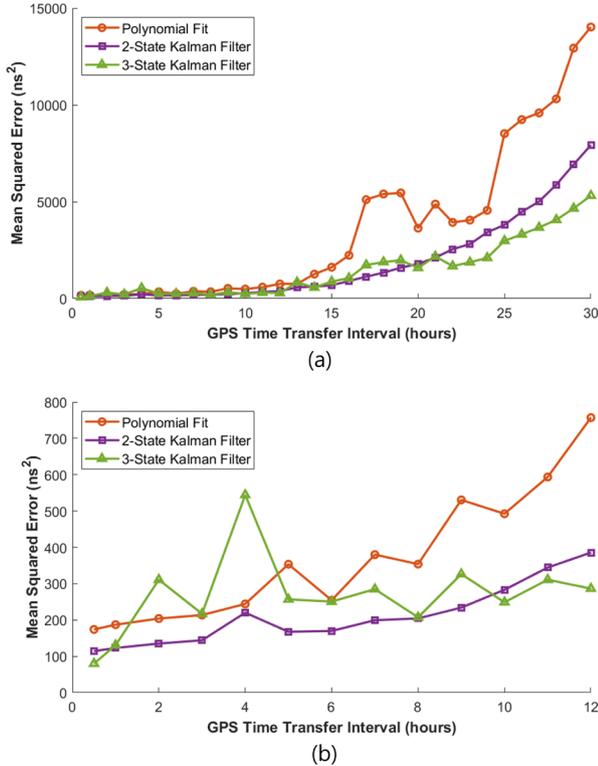


Fig. 4. (a) MSE of each algorithm as a function of the GPS time transfer interval, (b) Enlarged view of (a) for the interval range of 0–12 hours.

므로, GNSS 시각 비교 데이터 전송 주기에 따른 최적 알고리즘을 비교·평가하는 Fig. 4에서는 제외하였다. Fig. 4a는 전체 구간(0~30시간)을, Fig. 4b는 0~12시간 구간을 확대하여 보여준다. 전체적으로 시각전송 주기가 짧을수록 시각 동기 정확도가 높았으며, 이는 모든 알고리즘에서 일관되게 관찰되었다. 예를 들어, 2-state 칼만 필터의 시각차 추정 MSE는 시각전송 주기가 30분일 때 114.2 ns², 30시간일 때는 7931 ns²로, 주기가 길어질수록 오차가 점진적으로 증가하였다.

GPS 시각 비교 데이터 전송 주기가 20시간 미만인 경우에는 대체로 2-state 칼만 필터가 3-state 칼만 필터보다 우수한 성능을 보였으나, 주기가 20시간 이상으로 길어질 경우에는 3-state 칼만 필터가 상대적으로 더 나은 성능을 보였다. 일반적으로 3-state 칼만 필터는 시계 오차의 drift rate까지 추정하므로 과적합의 위험이 존재하지만, 시각전송 간격이 충분히 길어질 경우 시계의 고차원 동역학을 반영한 예측이 오히려 유리하게 작용할 수 있다. 따라서 장기 예측이 필요한 상황에서는 2-state 칼만 필터가 오히려 과소적합(underfitting)될 수 있으며, 이 경우 3-state 칼만 필터가 시계 오차를 더 정확하게 추정할 수 있는 것으로 분석된다.

실제 시스템 운용 시에는 요구되는 시각 동기 정확도와 통신 자원 제약 등을 고려하여 GNSS 시각전송 주기 및 예측 알고리즘을 적절히 선택할 필요가 있다. 예를 들어, 수십 나노초(ns) 수준의 정밀한 기지국 시각 동기가 필요한 경우에는 GPS 시각전송을 12시간 이내의 주기로 설정하고, 2-state 칼만 필터를 사용하

여 시각 동기를 유지할 수 있다. 반면, 수 밀리초(ms) 수준의 동기 정확도로도 충분한 경우에는 3-state 칼만 필터를 적용하고, GPS 시각전송 주기를 수일 단위로 설정하여 통신 자원을 절감할 수 있다.

5. 결론

이동통신, 항법 시스템, 센서 네트워크 등 현대 사회의 다양한 인프라가 안정적으로 운용되기 위해서는 정밀한 시각 동기가 필수적이다. 이러한 인프라 간 시각 동기를 위한 대표적인 방법으로 GNSS 시각전송이 활용되지만, 실제 시스템 운용 환경에서는 통신 자원 등의 제약으로 인해 GNSS 시각전송이 자주 이루어지지 못하는 경우가 많으며, 이로 인해 시각 동기 성능이 저하될 수 있다. GNSS 시각전송이 이루어지지 않는 구간에서는 다양한 시계 오차 모델링 기법을 활용하여 시계 오차를 추정하고 보정함으로써 시각 동기 상태를 유지할 수 있다.

본 연구에서는 이동 평균, 다항 회귀, 칼만 필터의 세 가지 시계 오차 모델링 기법을 구현하고, 그 성능을 비교하였다. 특히 칼만 필터의 경우, 2차원 상태 벡터를 사용하는 2-state 모델과 3차원 상태 벡터를 사용하는 3-state 모델을 각각 구현하여 성능을 분석하였다. 실험은 각각 루비듐 원자 시계와 GPST를 기준으로 동작하는 두 GNSS 수신기로부터 수집한 실측 데이터를 바탕으로 수행하였다. 실험 결과, GNSS 시각전송 주기가 20시간 미만일 경우에는 2-state 칼만 필터가 가장 우수한 성능을 보였고, 20시간 이상일 경우에는 3-state 칼만 필터가 더 효과적인 것으로 나타났다.

이러한 결과는 실제 시스템 운용 시 요구되는 시각 동기 정확도와 통신 자원 제약 등을 고려하여, GNSS 시각전송 주기 및 예측 알고리즘을 적절히 선택하는 데 활용될 수 있다. 예를 들어, 수십 ns 수준의 정밀한 동기가 필요한 경우에는 2-state 칼만 필터와 짧은 전송 주기를 적용하고, 수 ms 수준의 시각 동기만으로도 충분한 경우에는 3-state 칼만 필터와 긴 전송 주기를 적용함으로써 시각 동기 시스템의 효율적인 운용이 가능하다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었음 (2020M3C1C1A01086407). 또한, 본 연구는 2024년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었으며 (RS-2024-00407003, 지상파항법시스템 고도화 기술개발), 우주항공청의 재원으로 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: RS-2022-NR067078).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H. Lee, S. Park, J. H. Rhee, G. Kim, C.

Lee, and J. Seo; investigation, H. Lee, S. Park, and J. H. Rhee; resources, H. Lee and J. H. Rhee; writing—original draft preparation, H. Lee; writing—review and editing, H. Lee, S. Park, J. H. Rhee, G. Kim, C. Lee, and J. Seo; visualization, H. Lee; supervision, C. Lee and J. Seo; project administration, C. Lee and J. Seo; funding acquisition, J. Seo.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- De Lorenzo, D. S., Lo, S. C., Seo, J., Chen, Y. H., & Enge, P. K. 2010, The WAAS/L5 Signal for Robust Time Transfer: Adaptive Beamsteering Antennas for Satellite Time Synchronization, In Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010), Portland, Oregon, 21-24 September 2010, p.2106-2116. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=9325>
- Defraigne, P. & Martínez-Belda, M. C. 2010, Galileo Common View: Format, Processing, and Tests with GIOVE, In Proceedings of the 42nd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Reston, Virginia, 15-18 November 2010, pp.161-170. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10730>
- Defraigne, P. & Petit, G. 2015, CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS Time Transfer, *Metrologia*, 52, G1. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/6/G1>
- Galleani, L. & Tavella, P. 2003, On the Use of the Kalman Filter in Timescales, *Metrologia*, 40, S326. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/3/312>
- Galleani, L. & Tavella, P. 2010, Time and the Kalman Filter, *IEEE Control Systems Magazine*, 30, 44-65. <https://doi.org/10.1109/MCS.2009.935568>
- Hauschild, A. & Montenbruck, O. 2009, Kalman-Filter-Based GPS Clock Estimation for Near Real-Time Positioning, *GPS Solutions*, 13, 173-182. <https://doi.org/10.1007/s10291-008-0110-3>
- Huang, G. & Zhang, Q. 2012, Real-Time Estimation of Satellite Clock Offset Using Adaptively Robust Kalman Filter with Classified Adaptive Factors, *GPS Solutions*, 16, 531-539. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0254-z>
- Huang, G. W., Zhang, Q., & Xu, G. C. 2014, Real-Time Clock Offset Prediction with an Improved Model, *GPS Solutions*, 18, 95-104. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0313-0>
- Jaldehyag, K., Jarlemark, P., & Rieck, C. 2019, Further Evaluation of CGGTTS Time Transfer Software, In Proceedings of the 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), Orlando, FL, USA, 14-18 April 2019, pp.1-6. <https://doi.org/10.1109/FCS.2019.8856022>
- Johannessen, S. 2004, Time Synchronization in a Local Area Network, *IEEE Control Systems Magazine*, 24, 61-69. <https://doi.org/10.1109/MCS.2004.1275432>
- Kang, T., Park, S., Son, P.-W., & Seo, J. 2025, Enhancing eLoran Timing Accuracy via Machine Learning with Meteorological and Terrain Data, *IEEE Access*, 13, 112067-112080. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3581615>
- Khodarahmi, M. & Maihami, V. 2023, A Review on Kalman Filter Models, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30, 727-747. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09815-7>
- Kim, W. & Seo, J. 2023, Low-Cost GNSS Simulators With Wireless Clock Synchronization for Indoor Positioning, *IEEE Access*, 11, 55861-55874. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3282786>
- Lee, H., Kim, S., Park, J., Jeong, S., Park, S., et al. 2024a, A Survey on New Parameters of GPS CNAV/CNAV-2 and Their Roles, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 13, 45-52. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.1.45>
- Lee, H., Kim, S., Park, J., Jeong, S., Yu, J., et al. 2025, A Comparative Survey of GPS Mids and Reduced Almanacs, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 14, 101-108. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2025.14.2.101>
- Lee, J., Oh, J.-I., Rhee, J. H., Choi, G. W., Lee, J. K., et al. 2024b, Study on a Method for Performance Evaluation and Analysis of TWSTFT Modems, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 13, 355-363. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.3.355>
- Lee, S. W., Schutz, B. E., Lee, C.-B., & Yang, S. H. 2008, A Study on the Common-View and All-in-View GPS Time Transfer Using Carrier-Phase Measurements, *Metrologia*, 45, 156. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/2/005>
- Lewandowski, W., Petit, G., & Thomas, C. 1993, Precision and accuracy of GPS time transfer, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 42, 474-479. <https://doi.org/10.1109/19.278607>
- Lewandowski, W. & Thomas, C. 2002, GPS Time Transfer, *Proceedings of the IEEE*, 79, 991-1000. <https://doi.org/10.1109/5.84976>
- Seo, J. & Walter, T. 2014, Future Dual-Frequency GPS Navigation System for Intelligent Air Transportation

Under Strong Ionospheric Scintillation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15, 2224-2236. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2311590>

Sivrikaya, F. & Yener, B. 2004, Time Synchronization in Sensor Networks: A Survey, *IEEE Network*, 18, 45-50. <https://doi.org/10.1109/MNET.2004.1316761>

Weiss, M. A., Petit, G., & Jiang, Z. 2005, A Comparison of GPS Common-View Time Transfer to All-in-View, In *Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, Vancouver, BC, Canada, 29-31 August 2005, pp.324-328. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2005.1573953>

Wu, Y., Zhu, X., Huang, Y., Sun, G., & Ou, G. 2015, Uncertainty Derivation and Performance Analyses of Clock Prediction Based on Mathematical Model Method, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64, 2792-2801. <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2418683>

Xiong, L., Zhuo, F., Liu, X., Wang, F., & Chen, Y. 2015, Optimal Design of Moving Average Filter and Its Application in Distorted Grid Synchronization, In *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada, 20-24 September 2015, pp.3449-3454. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310147>

Yu, D., Hwang, S., Lee, Y., Yang, S., & Lee, C. 2015, Analysis of the Ionospheric Effect for Time Offsets per GPS Code Measurements, *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 9, 77-86. <https://www.earticle.net/Article/A252750>

Zhang, R., Tu, R., Lu, X., He, Z., Guang, W., et al. 2024, Initial and Comprehensive Analysis of PPP Time Transfer Based on Galileo High Accuracy Service, *GPS Solutions*, 28, 94. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01633-7>



Halim Lee is an M.S./Ph.D. student in the School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon, Korea. She received the B.S. degree in Integrated Technology from Yonsei University. Her research interests include localization and tracking, urban navigation, and navigation safety.



Seunghyeon Park is an M.S./Ph.D. student in the School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon, Korea. She received the B.S. degree in Integrated Technology from Yonsei University. Her research interests include localization, timing in GPS and eLoran, and seamless positioning in urban environments.



Joon Hyo Rhee received the B.S degree in electrical and electronic engineering and Ph.D. degree in integrated technology at Yonsei University, Incheon, South Korea in 2019. Presently, he is a researcher at the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, South Korea. Within KRISS, he is actively engaged in the Time and Frequency Group, contributing to research on precise timing systems using GNSS and TWSTFT technologies.



Gyeongmin Kim is a research engineer in LIG Nex1. She received B.S. and M.S. degrees in aerospace engineering from Sejong University in 2022 and 2024, respectively. Her research interests include relative precise positioning and GNSS applications.



Chulsoo Lee is a principal research engineer in LIG Nex1. He worked as a senior researcher at Agency for Defense Development. He received the Ph.D. degree from Chungnam National University. His research interests include GNSS, SBAS and Pseudolite system.



Jiwon Seo received the B.S. degree in mechanical engineering (division of aerospace engineering) from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea, in 2002, and the first M.S. degree in aeronautics and astronautics, the second M.S. degree in electrical engineering, and the Ph.D. degree in aeronautics and astronautics from Stanford University, Stanford, CA, USA, in 2004, 2008, and 2010, respectively. He is currently a Professor with the School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon, South Korea. He is also an Adjunct Professor with the Department of Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, South Korea. His research interests include GNSS anti-jamming technologies, complementary PNT systems, and intelligent unmanned systems. He is a member of the International Advisory Council of the Resilient Navigation and Timing Foundation, Alexandria, VA, USA; and the Advisory Committee on Defense of the Presidential Advisory Council on Science and Technology, South Korea.

Comparison of Static and Kinematic GNSS Positioning Performance Using Qinertia Software

Nam-Woo Noh¹ , Kwan-Dong Park^{1,2,3†} 

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

³PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

ABSTRACT

This study evaluates the performance of Global Navigation Satellite System (GNSS) data processing using the Qinertia software (SBG Systems). Three processing modes—Single Base Station (SBS) Post-Processing Kinematic (PPK), Virtual Base Station (VBS) PPK, and Precise Point Positioning (PPP)—were applied to both static and kinematic positioning scenarios. The results were compared against coordinates derived from the high-precision GipsyX scientific software as well as real-time high-accuracy methods including Real-Time Kinematic (RTK) and Virtual Reference Station (VRS) RTK. For static positioning, all three methods achieved high accuracy, with average horizontal and vertical root mean square error (RMSE) of 0.8 cm and 1.5 cm, respectively, relative to GipsyX and RTK reference solutions. Notably, VBS PPK maintained a fix rate of approximately 99% for baseline distances exceeding 30 km. In kinematic positioning, both SBS-PPK and VBS-PPK achieved centimeter-level accuracy compared to VRS-RTK. Under open-sky conditions, average horizontal and vertical RMSE were 3.5 cm and 2.5 cm, respectively, while in dense urban environments they were 3.0 cm and 5.8 cm. Performance differences between the two PPK methods under open-sky conditions were minimal, within about 1-2 cm.

Keywords: GNSS, Qinertia, PPK, PPP, RTK

1. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite System (GNSS) is widely used due to its capability of estimating a user's position with only four satellites (Hofmann-Wellenhof et al. 2001). GNSS is applied not only to various modes of transportation, such as ships, aircraft, and automobiles, but also to personal devices, including smartphones. Accordingly, many research institutes are actively developing GNSS-based positioning algorithms and validating their performance through comparative analyses with precise reference coordinates. These reference coordinates are obtained using high-precision positioning methods such as GipsyX, Real-Time Kinematic (RTK), and Virtual Reference Station (VRS) RTK.

GipsyX, developed by the Jet Propulsion Laboratory (JPL), is a high-precision GNSS data processing software that generates precise coordinates based on Precise Point Positioning (PPP) and is widely used for coordinate and velocity estimation (Ha et al. 2021). It computes precise positions by applying GNSS orbit and clock products from the International GNSS Service (IGS) or JPL—available in precise, rapid, and ultra-rapid forms—together with various error correction models. The accuracy depends on the product type, with the precise product providing the highest accuracy but requiring more than two weeks for availability. Meanwhile, the ultra-rapid product achieves accuracies of about 3-5 cm and is available within approximately two hours (Ha et al. 2012). Therefore, GipsyX has inherent limitations in providing precise coordinates in real time.

Received Aug 12, 2025 Revised Aug 23, 2025 Accepted Aug 28, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: kdpark@inha.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

RTK is a positioning technique that computes centimeter-level coordinates in real time by receiving correction data from a single reference station, typically via NTRIP or TCP/IP protocols. This approach is advantageous due to its simplicity and rapid connectivity. However, as the baseline distance from the reference station increases to several tens of kilometers, the spatial correlation of atmospheric errors (ionospheric and tropospheric) diminishes, resulting in longer times for integer ambiguity resolution (AR) and a reduced likelihood of obtaining fixed solutions. Furthermore, RTK is less applicable in areas with sparse or no reference station infrastructure (El-Mowafy 2012).

In contrast, VRS-RTK is a type of network RTK that utilizes data from multiple base stations to generate a virtual reference station near the user, thereby providing correction information. This method offers the advantage of maintaining high accuracy over wide areas without baseline distance limitations. However, it is highly dependent on communication networks such as LTE or Wi-Fi, and when the communication environment is unstable, correction information may not be received reliably, leading to failure to obtain a fixed solution or to meter-level positioning errors (No et al. 2012).

As an alternative to these limitations, Qinertia, developed by SBG Systems, has been attracting increasing attention. Qinertia is a tightly coupled post-processing software that integrates GNSS and Inertial Navigation System (INS) data (SBG SYSTEMS 2025). It is applicable to diverse mobile platforms, including vehicles, drones, ships, and aircraft. For GNSS applications, it offers centimeter-level positioning accuracy through three data processing modes: Single Base Station (SBS) Post-Processing Kinematic (PPK), Virtual Base Station (VBS) PPK, and Precise Point Positioning (PPP). Among these, the PPK method uses the Receiver INdependent Exchange (RINEX) data from reference stations, enabling precise position estimation without constraints in communication conditions or baseline length, and previous studies have reported that it can achieve accuracy within 1-10 cm compared with RTK (Saidani et al. 2020). However, there has been insufficient quantitative evaluation of Qinertia's data processing performance in Korea. In particular, empirical assessments are lacking on whether SBS-PPK and VBS-PPK results can serve as reference coordinates, providing a viable alternative to GipsyX or RTK.

This study evaluates the accuracy and applicability of three GNSS data processing modes in Qinertia—SBS-PPK, VBS-PPK, and PPP—applied to both static and kinematic positioning cases. Section 2 provides an overview of Qinertia along with a summary of the principles and technical

distinctions of each data processing method. Section 3 presents a quantitative accuracy assessment based on processing results obtained with Qinertia using RINEX data supplied by the domestic GNSS reference station service operated by PPSOL Co., Ltd. (PPSOL, <https://ppsol.com>). For static positioning, results processed using GNSS RINEX data collected at a fixed receiver were compared with reference coordinates from GipsyX and RTK. For kinematic positioning, results processed from RINEX data collected during vehicle operation were compared to reference coordinates from VRS-RTK. The performance of the three methods was evaluated using metrics such as root mean square error (RMSE), standard deviation (SD), and bias to assess the practical applicability and reliability of Qinertia's processing capabilities.

2. QINERTIA DATA PROCESSING METHOD

This section provides an overview of the Qinertia software, its data processing methods, and the data used for performance validation. In this study, only GNSS data were processed with Qinertia, which supports multiple GNSS processing modes, including SBS-PPK, VBS-PPK, and PPP. Qinertia also improves overall positioning accuracy by automatically selecting reliable data through quality control techniques such as Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) applied to the received GNSS signals. For rover data processing, users may either manually input reference station data or allow the software to automatically download data from nearby Continuously Operating Reference Stations (CORS).

Qinertia provides three types of data processing results: Forward, Backward, and Merged. The Forward solution processes GNSS data in the forward time direction, while the Backward solution processes it in the reverse direction. The Merged solution combines both results to minimize errors and achieve the highest accuracy. It is generally regarded as the most reliable reference among the data processing outputs. In addition, a fixed solution in Qinertia indicates that the integer ambiguity of the GNSS carrier phase has been successfully resolved through the AR technique, which serves as a key indicator of high-accuracy results. Conversely, failure of AR yields a float solution, which has relatively lower accuracy.

In this analysis, a total of seven permanent stations were used, including IHUA and IHUB located on the rooftop of Building 4 at Inha University, and PPHQ, PPHS, PPGH, PPCH, and PPYJ operated by PPSOL. The receiver and antenna specifications for each site, along with their

Table 1. Base stations used in Qinertia processing. All the antennas are fitted with SCIS radomes.

| Site | Receiver | Antenna | ECEF [m]: IGb 14 Coordinates @Sep 1 st 2023 | | |
|------|--------------------------|---------------|--|-------------|-------------|
| | | | X | Y | Z |
| IHUA | Septentrio AsteRx SB3 | TWIVC6150 | -3026676.332 | 4067187.742 | 3857246.827 |
| IHUB | Septentrio AsteRx SB3 | TWIVC6150 | -3026675.527 | 4067188.306 | 3857246.748 |
| PPHQ | Javad TRE_3L | TWIVC6050 | -3041232.493 | 4053906.693 | 3859927.421 |
| PPHS | Septentrio AsteRx SB | JAVRINGANT_DM | -3049045.924 | 4071455.693 | 3835250.836 |
| PPGH | Javad TRE_3DELTA | JAVRINGANT_DM | -3003051.620 | 4059905.969 | 3883100.055 |
| PPCH | Septentrio AsteRx SB Pro | JAVRINGANT_DM | -3047202.244 | 4014485.287 | 3895961.513 |
| PPYJ | Javad TRE_3S | JAVRINGANT_DM | -3102739.141 | 4023043.419 | 3843228.700 |



Fig. 1. SBS-PPK coverage map for the base station of IHUB.



Fig. 2. VBS-PPK coverage map for four base stations of PPHS, PPGH, PPCH, and PPYJ.



Fig. 3. VBS-PPK coverage map for four base stations of PPHS, IHUB, PPGH, and PPHQ.

coordinates as of September 1, 2023, are summarized in Table 1. The reference frame for these coordinates is IGb14 as defined by the IGS, and the coordinates of the antenna reference point (ARP) were calculated using GipsyX. Fig. 1 presents the geographical location of IHUB, where the baseline distance between IHUB and IHUA is very short at 0.983 m. Fig. 2 presents the locations of PPHS (Hwaseong), PPGH (Ganghwa), PPCH (Pocheon), and PPYJ (Yeoju). Finally, Fig. 3 presents the location of PPHQ (Seoul).

2.1 Single Base Station PPK (SBS-PPK)

SBS-PPK is a positioning method that post-processes RINEX data from a rover station using RINEX data from a specific base station. It assumes a short baseline distance between the base and rover, typically less than 20 km, and provides fixed solutions by performing AR with the double-difference technique to mitigate common errors such as satellite orbit, clock, and atmospheric effects. However, as the baseline distance increases, the similarity of atmospheric conditions between stations decreases, which reduces AR feasibility and increases positioning errors. Consequently, accuracy degrades and the likelihood of failing to obtain fixed solutions grows. Performance degradation generally begins when the baseline exceeds 20 km, and AR becomes fundamentally difficult beyond 60 km.

Fig. 1 illustrates the implementation of SBS-PPK with IHUB designated as the base station, highlighting the performance limitations based on baseline distance. The green circle, with a radius of approximately 20 km, indicates an area where stable fixed solutions are expected. The yellow circle, with a radius of about 40 km, marks a boundary zone where AR performance may become challenging and accuracy may deteriorate. The red circle, with a radius of approximately 60 km, represents a range where achieving AR is difficult.

2.2 Virtual Base Station PPK (VBS-PPK)

VBS-PPK is a positioning method that uses RINEX data from multiple base stations to generate a virtual base station

near the rover in post-processing. The core of this method is to precisely model the error characteristics around the rover, which requires at least three base stations to operate. Among these, one must be designated as the Master Base, serving as the reference point within the network. The Master Base calculates the ionospheric residuals between itself and the other base stations using long-baseline RTK. It then applies spatial interpolation with Least Squares Collocation (LSC) to estimate the ionospheric errors near the rover. By default, the Master Base is automatically selected based on Qinertia's quality control methods, but it can also be specified manually by the user. The virtual base station generated through these principles is configured to maintain a short baseline to the rover, which allows double-difference and AR to be performed more stably and enables precise positioning.

Due to its ability to accurately model ionospheric errors, VBS-PPK provides stable and highly accurate positioning results over wide areas without baseline constraints. As a result, it can maintain robust performance even in environments with widely spaced reference stations or where RTK is impractical. However, when the quality of the reference station data forming the network is low or observations at certain epochs are missing, the accuracy of error correction may degrade and fixed solutions may not be achieved.

Figs. 2 and 3 are examples of VBS-PPK implementation based on networks composed of four base stations in each case, with PPHS, PPGH, PPCH, and PPYJ in Fig. 2 and PPHS, IHUB, PPGH, and PPHQ in Fig. 3. The green area indicates the network center, where a rover station can be expected to achieve a stable fixed solution. The yellow area represents a boundary zone at a greater distance from the network, where AR performance may become difficult or accuracy may degrade. The red area represents the outer boundary of the network, where imbalances in baseline geometry make successful AR unlikely. These observations demonstrate that although VBS-PPK performance is influenced by the spatial configuration of the reference station network, it has the advantage of achieving centimeter-level positioning accuracy over wide areas.

2.3 Precise Point Positioning (PPP)

PPP is a positioning method that estimates the receiver position independently by utilizing precise orbit and clock correction information without relying on base station data (Lee & Park 2020). Precise positions are obtained by correcting for various error sources, including satellite orbit and clock errors, phase center offsets and variations of satellite and receiver antennas, and ionospheric and

Table 2. Details on test setups for four static (S) cases and two kinematic (K) cases.

| Case | Processing | Constellation | Data span (hours:mins) | Reference |
|------|------------|---------------|------------------------|---------------|
| S1 | SBS-PPK | G+R+E+C | 24:00 | GipsyX RTK |
| S2 | | G+E, G+R+E+C | 01:00 | |
| S3 | VBS-PPK | G+R+E+C | 24:00 | GipsyX |
| S4 | PPP | G+E+C | | |
| K1 | PPK | G+R+E+C | 00:15 | VRS-RTK |
| K2 | | | 00:45 | |

tropospheric delays. Qinertia performs PPP processing using precise correction products from the International GNSS Service (IGS) and other providers.

3. ANALYSIS OF QINERTIA DATA PROCESSING RESULTS

In this section, the data processing performance of Qinertia is quantitatively evaluated in both static (S) and kinematic (K) positioning environments. The static analysis consists of four cases. In S1, SBS-PPK is evaluated using 24-hour datasets from GPS, Global Navigation Satellite System (GLONASS), Galileo, and BeiDou constellations. In S2, under the same receiving conditions, 1-hour datasets are evaluated with two constellation configurations—GPS, Galileo (G+E) and GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou (G+R+E+C)—to assess the effect of constellation expansion. In S3, the accuracy of VBS-PPK is evaluated when the network is configured with either three or four base stations. In S4, the performance of PPP in terms of fixed and float solutions is evaluated using 24-hour datasets from GPS, Galileo, and BeiDou (G+E+C). All static cases are evaluated against reference coordinates derived from GipsyX and RTK, with detailed configurations summarized in Table 2.

The final two cases in Table 2 correspond to kinematic analyses, in which the performance of SBS-PPK and VBS-PPK is evaluated using rover datasets of 15 minutes and 45 minutes for K1 and K2, respectively. Both cases use G+R+E+C constellations, and accuracy is evaluated against reference coordinates derived from VRS-RTK. Detailed descriptions of each test case, together with the positioning results, are provided in sub-sections 3.1 and 3.2.

3.1 Analysis of Static Positioning Results

For each case, GipsyX and RTK are taken as reference solutions, and dX , dY , dZ errors in the three-dimensional Cartesian coordinate system are computed by comparing them with the coordinates obtained from Qinertia. These errors are then converted into dN , dE , dV errors in the north-south, east-west, and vertical directions of the

topocentric coordinate system, which are subsequently used to calculate RMSE, SD, and bias.

3.1.1 Test case S1

Case S1 evaluates the results of processing 24 hours of RINEX data using the SBS-PPK method with the GipsyX reference coordinates in two configurations, one with IHUA as the rover station and IHUB as the base station, and the other with IHUB as the rover station and IHUA as the base station. As shown in Table 1, both IHUA and IHUB are permanent stations equipped with high-grade geodetic surveying instruments, including Septentrio AsteRx SB3 receivers and Tallysman choke-ring antennas. The ARP distance between the two stations is only 0.983 m. Thus, this experiment evaluates the accuracy of data processing with a baseline shorter than 1m and assesses Qinertia’s ability to deliver precise results over such short baselines.

The 24-hour dataset collected on June 12, 2025, at 30-second intervals is processed, and the differences between the SBS-PPK results and the GipsyX reference coordinates are less than 0.3 cm in terms of RMSE in the three directions, with the horizontal RMSE as small as 0.1 cm. These results indicate that SBS-PPK provides highly reliable performance for static positioning over short baselines. While PPK generally produces coordinates at each sampling epoch, Qinertia also provides a batch-processing mode that generates a single coordinate estimate for the entire duration of the RINEX file. According to the batch-processing results, the rover station coordinates, regardless of the base station, differ by 0.06 cm in the north-south direction, 0.01-0.02 cm in the east-west direction, and 0.27-0.34 cm in the vertical direction, corresponding to horizontal differences of less than 1 mm and approximately 3 mm vertically. Overall, these findings confirm that the SBS-PPK approach is capable of achieving millimeter-level positioning accuracy when applied to geodetic-grade receivers over very short baselines.

3.1.2 Test case S2

In Case S2, a tripod and tribrach were temporarily installed on the rooftop of Building 4 at Inha University, and a Javad G5T antenna was connected to an RTAP2U receiver (Kim et al. 2021) to collect RINEX data at 1-second intervals. This dataset represents observations obtained with a lower-cost receiver compared to the S1 case. The experiment was conducted for one hour, from UT 07:43:00 to 08:42:59 on May 19, 2025. As shown in Fig. 4, this temporary dataset was designated CAMP, and the baseline to each of the two

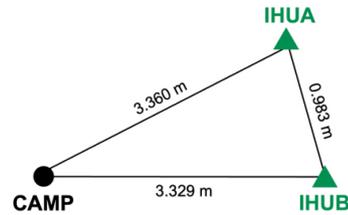


Fig. 4. Geometry and baseline distances of the campaign site CAMP with respect to the base stations of IHUA and IHUB.

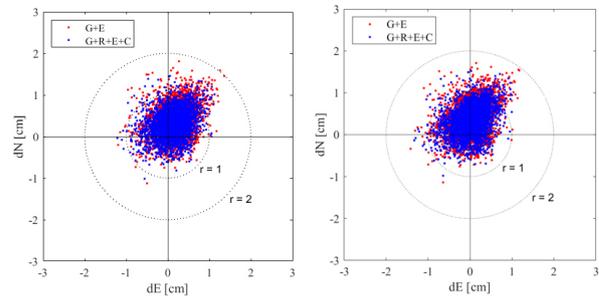


Fig. 5. Horizontal errors for the S2 case: (left) positioning errors of CAMP with IHUA as a single base; (right) positioning errors of CAMP with IHUB as a single base.

Table 3. RMSE, SD and bias for each dN, dE, dV direction for the S2 case.

| Metric [cm] | Direction | IHUA as single base | | IHUB as single base | |
|-------------|-----------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| | | G+E | G+R+E+C | G+E | G+R+E+C |
| RMSE | dN | 0.55 → | 0.45 | 0.55 → | 0.48 |
| | dE | 0.37 → | 0.34 | 0.33 → | 0.32 |
| | dV | 0.97 → | 0.83 | 0.92 → | 0.77 |
| SD | dN | 0.38 → | 0.32 | 0.39 → | 0.34 |
| | dE | 0.33 → | 0.32 | 0.33 → | 0.32 |
| | dV | 0.75 → | 0.73 | 0.74 → | 0.71 |
| bias | dN | 0.39 → | 0.31 | 0.38 → | 0.34 |
| | dE | 0.16 → | 0.12 | 0.03 → | 0.02 |
| | dV | 0.61 → | 0.39 | 0.55 → | 0.30 |

reference stations was shorter than 3.4 m.

The latest version of Qinertia is capable of processing data from all four global navigation satellite constellations, G+R+E+C. However, at some GNSS stations, the receivers are capable of receiving all four types of satellite navigation signals, but only G+E data are available. Thus, the objective of the S2 experiment is to compare positioning performance with respect to constellation expansion. The collected 1-hour dataset is processed using both the G+E and G+R+E+C configurations, and the results are compared with RTK reference coordinates from IHUA. The horizontal errors are presented in Fig. 5, and the RMSE, SD, and bias in the three coordinate directions are summarized in Table 3.

As shown in Fig. 5, in the G+E constellation, most horizontal errors fall within a circle of approximately 2 cm in radius, whereas in the G+R+E+C constellation, they are more tightly concentrated within about 1 cm.

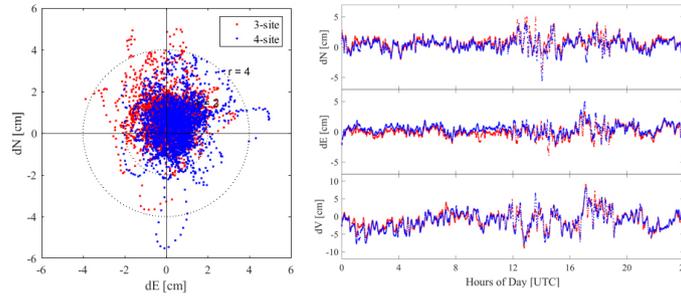


Fig. 6. Scatters of horizontal errors (left) and time series of dN, dE, and dV for the case of S3 (right).

The horizontal RMSE is 0.65 cm for G+E and 0.57 cm for G+R+E+C. As shown in Table 3, the three metrics—RMSE, SD, and bias—consistently show better performance for G+R+E+C, regardless of the base station or coordinate direction. Notably, consistent results were obtained for both IHUA and IHUB, confirming that the G+R+E+C based SBS-PPK method can provide stable sub-centimeter accuracy under favorable observation conditions.

3.1.3 Test case S3

The S3 case evaluates 24-hour RINEX data using the VBS-PPK method, which applies a network-based approach. The analysis focuses on the permanent station PPHQ, located on the rooftop of the PPSOL headquarters, with its equipment specifications summarized in Table 1. The 24-hour dataset collected on June 14, 2025, at 30-second intervals is processed using Qinertia's VBS-PPK mode, and the results are compared with reference coordinates from GipsyX. To assess the effect of the number of base stations on coordinate differences, the network is configured with either four or three stations. The four-station configuration corresponds to the layout shown in Fig. 2, while in the three-station configuration, PPYJ, the easternmost site with the longest baseline from PPHQ, is excluded. The baseline lengths from PPHQ are 31 km to PPHS, 45 km to PPGH, 54 km to PPCH, and 71 km to PPYJ.

The positioning errors from the S3 case are presented for each direction in Fig. 6, while Fig. 7 shows the RMSE values for different numbers of base stations as a bar chart. As shown in Fig. 6, the results indicate that, regardless of the number of base stations, the average horizontal RMSE remains within 2 cm and the vertical RMSE within 3 cm. In addition, the RMSE, SD, and bias for all directions are within 3 cm. However, increasing the number of base stations from three to four results in a slight increase in the vertical error. This is likely due to the inclusion of PPYJ, located about 71 km from the rover station, suggesting that incorporating a base station with an excessively long-baseline in VBS-

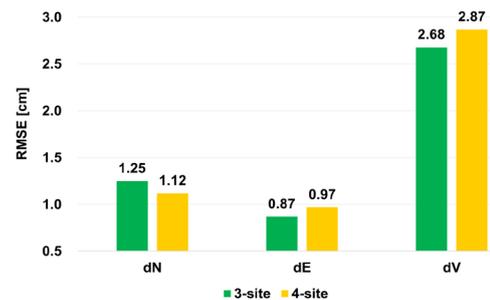


Fig. 7. RMSE comparison in each direction between 3-site vs 4-site VBS-PPP processing.

PPK processing can degrade accuracy in specific direction. Therefore, in VBS-PPK data processing, careful selection of base stations within an appropriate baseline range is essential to ensure reliable positioning accuracy.

3.1.4 Test case S4

In the S4 case, 24-hour RINEX data are processed in PPP mode to generate daily fixed and float solutions to evaluate which option provides higher accuracy. The analysis focuses on the permanent station PPHQ, located on the rooftop of PPSOL headquarters, with its equipment specifications summarized in Table 1. The 24-hour datasets collected between June 11 (DOY 162) and June 17 (DOY 168), 2025, at 30-second intervals are batch-processed using Qinertia's PPP mode, and the results are compared with coordinates from GipsyX. Fig. 8 presents the coordinate errors for each direction over the 7-day period. Based on the experimental results, the horizontal RMSE is 0.41 cm for the fixed solution and 0.84 cm for the float solution. In the east-west direction, however, the bias is 0.15 cm for the fixed solution, whereas the float solution shows a relatively large bias of -0.72 cm. This difference is also evident in the east-west time series of Fig. 8. Overall, the PPP fixed solution confirms that stable precision within 1 cm can be achieved in all three

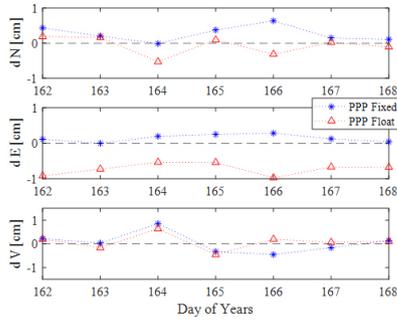


Fig. 8. Time series of dN, dE, and dV for the case of S4.

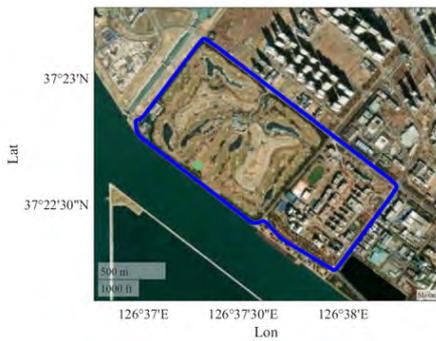


Fig. 9. Vehicle trajectory in the K1 case. The total length is about 5 km.

directions.

3.2 Analysis of Kinematic Positioning Results

For each case, the VRS-RTK coordinates are set as the reference, and the dX, dY, dZ errors are calculated by comparing them with the coordinates derived from Qinertia. These errors are then converted into dN, dE, dV errors, from which RMSE, SD, and bias are calculated. The analysis also compares the accuracy of the SBS-PPK method, which uses a base station located within about 10 km of the rover, with that of the VBS-PPK method employing four base stations. In both cases, either a single base station (IHUB) or a network consisting of IHUB, PPHQ, PPHS, and PPGH is used, with the station locations and network configuration shown in Fig. 3.

3.2.1 Test case K1

In the K1 case, RINEX data was collected at 1-second intervals during a 5 km vehicle drive for approximately 15 minutes, from 07:18 to 07:34 on April 25, 2025, in both open and semi-urban areas near Solchan Park in Songdo, Incheon. The trajectory is shown on Fig. 9. The data, acquired with an RTAP2U receiver and a Javad G5T antenna, are processed using both SBS-PPK and VBS-PPK methods, and the results

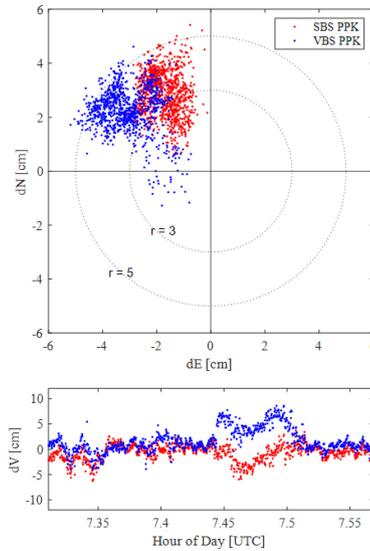


Fig. 10. Scatters of horizontal errors (up) and time series of dV for the case of K1 (down).

Table 4. RMSE, SD, and bias for each dN, dE, dV direction in the K1 case.

| Metric [cm] | Direction | Processing method | |
|-------------|-----------|-------------------|---------|
| | | SBS-PPK | VBS-PPK |
| RMSE | dN | 2.99 | 2.67 |
| | dE | 1.81 | 3.21 |
| | dV | 1.78 | 2.97 |
| SD | dN | 0.82 | 1.40 |
| | dE | 0.57 | 0.94 |
| | dV | 1.63 | 2.49 |
| bias | dN | 2.87 | 2.28 |
| | dE | -1.71 | -3.07 |
| | dV | -0.72 | 1.63 |

are compared with VRS-RTK reference coordinates. The average baseline distances between the rover and each base station are 8.2 km for IHUB, 25 km for PPHQ, 26 km for PPHS, and 43 km for PPGH.

As shown in Fig. 10 and Table 4, both methods achieve horizontal and vertical RMSE within 4 cm and 3 cm, respectively, with RMSE, SD, and bias for all directions remaining within 5 cm. Notably, SBS-PPK yields slightly lower errors than VBS-PPK, indicating that when observation conditions are favorable and a nearby base station is available, high accuracy can be achieved with SBS-PPK alone. Both methods achieved a fixed solution rate of approximately 99%.

However, during the 7.45-7.50 h interval in Fig. 10, when the trajectory transitions from an open-sky area to a semi-urban environment, both methods exhibit increased vertical errors due to AR failures for some satellites, reducing the number of fixed solutions. The increase is more pronounced in VBS-PPK, likely because changes in the observation environment weaken the spatial correlation of ionospheric

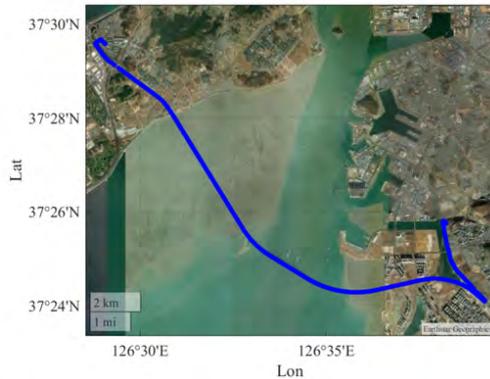


Fig. 11. Vehicle trajectory in the K2 case. The total length is about 25 km.

errors and degrade correction accuracy. These findings confirm that variations in observation conditions directly affect the positioning accuracy of VBS-PPK.

3.2.2 Test case K2

In the K2 case, RINEX data was collected at 1-second intervals during a 25 km drive lasting approximately 45 minutes, from 07:47 to 08:35 on June 12, 2025, along the route between Incheon International Airport and Inha University. The trajectory is shown on Fig. 11. The route includes open-sky areas, urban areas, and GNSS signal-blocked sections. RINEX data acquired with an RTAP2U receiver and a Javad G5T antenna are processed using both SBS-PPK and VBS-PPK methods, and the results are compared with VRS-RTK reference coordinates. The average baseline distances between the rover and each base station are 9.7 km for IHUB, 29 km for PPHQ, 34 km for PPGH, and 36 km for PPHS.

The K2 results, analyzed using the same procedure as in the K1 case, are presented in Fig. 12 and Table 5. In Fig. 12, the gap in the graph between 7.9 and 8.0 h corresponds to a period when the VRS-RTK solution remains in a float state while the vehicle passes near an overpass and the Incheon Bridge tollgate. This interval is excluded from the analysis. Abrupt variations in the positioning results at other times correspond to segments where the vehicle enters or exits dense urban areas or passes beneath elevated roadways.

As shown in Table 5, both processing methods achieve horizontal RMSE within 3 cm and vertical RMSE within 7 cm, with RMSE, SD, and bias for all directions remaining below 7 cm. Both methods also attain a fixed solution rate of approximately 90%. However, Fig. 12 shows that while the horizontal errors of SBS-PPK are distributed within a 5 cm radius, those of VBS-PPK are more tightly concentrated within 3 cm, indicating that VBS-PPK provides higher accuracy.

Table 5. RMSE, SD, and bias for each dN, dE, dV direction in the K2 case.

| Metric [cm] | Direction | Processing method | |
|-------------|-----------|-------------------|---------|
| | | SBS-PPK | VBS-PPK |
| RMSE | dN | 2.43 | 2.04 |
| | dE | 1.93 | 1.68 |
| | dV | 5.20 | 6.84 |
| SD | dN | 1.06 | 1.17 |
| | dE | 1.90 | 1.65 |
| | dV | 2.77 | 2.23 |
| bias | dN | 2.18 | 1.66 |
| | dE | 0.33 | -0.31 |
| | dV | -4.40 | -6.47 |

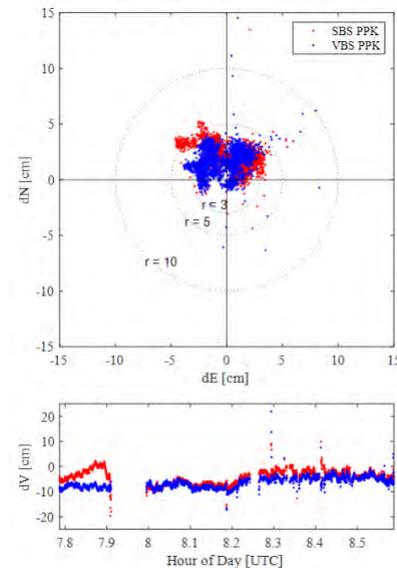


Fig. 12. Scatters of horizontal errors (up) and time series of dV for the case of K2 (down).

Taken together, these results suggest that under constrained observation conditions in kinematic environments, VBS-PPK delivers greater accuracy than SBS-PPK, in contrast to the K1 case.

4. CONCLUSIONS

In this study, the performance of three Qinertia processing methods was evaluated through a series of static and kinematic positioning cases, with accuracy assessed against reference coordinates from GipsyX, RTK, and VRS-RTK. In static cases, all methods achieved errors at most 3 cm. In Case S1 (SBS-PPK batch-processing), the results showed sub-millimeter-level accuracy in horizontal direction and approximately 3 mm in vertical. In Case S2 (SBS-PPK with the G+R+E+C constellation), the horizontal RMSE was 0.57 cm, demonstrating high accuracy. Case S3 (VBS-PPK) yielded horizontal and vertical RMSE values within 2 cm and 3 cm, respectively, while Case S4 (PPP) achieved a horizontal

RMSE of 0.41 cm in the fixed daily solution, demonstrating stable precision. These findings confirm that in static positioning, all evaluated methods can attain high accuracy and precision. Notably, high performance was maintained even with reference stations located 30-70 km from the rover, demonstrating the robustness of these methods over long baselines. In kinematic cases, both SBS-PPK and VBS-PPK achieved errors within 7 cm. In Case K1, where the baseline was short and observation conditions were favorable, SBS-PPK alone achieved sufficient accuracy. In contrast, in Case K2, which involved challenging environments such as dense urban areas, VBS-PPK produced more stable results. These findings highlight the importance of selecting the appropriate processing method according to the observation environment. Although this study was conducted using GNSS only data, the results demonstrated the high accuracy of Qinertia's processing across various cases. In future work, the integration of GNSS and INS data is expected to further enhance the performance validated in this study.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (RS-2022-00141819, Development of Advanced Technology for Absolute, Relative, and Continuous Complex Positioning to Acquire Ultra-precise Digital Land Information).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, N.N. and K.P.; software, N.N.; validation, N.N. and K.P.; formal analysis, N.N.; methodology, N.N. and K.P.; investigation, N.N.; resources, N.N. and K.P.; data curation, N.N.; writing—original draft preparation, N.N.; writing—review and editing, N.N. and K.P.; visualization, N.N. and K.P.; supervision, K.P.; project administration, K.P.; funding acquisition, K.P.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

El-Mowafy, A. 2012, Precise real-time positioning using

network RTK, *Global navigation satellite systems – signal, theory and applications*, ed. S. Jin (Rijeka, Croatia: InTech), pp.161-188.

Ha, J.-H., Heo, M.-B., & Nam, G.-W. 2012, Accuracy Analysis of Precise Point Positioning Using Predicted GPS Satellite Orbits, *Journal of Advanced Navigation Technology*, 16, 752-759. <https://doi.org/10.12673/jkoni.2012.16.5.752>

Ha, J.-H., Park, K.-D., & Kim, H.-I. 2021, Available analysis of precise positioning using the LX-PPS GNSS permanent stations, *Journal of Cadastre & Land Information*, 51, 23-38. <http://doi.org/10.22640/lxsiri.2021.51.1.23>

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. 2001, *Global positioning system – theory and practice* (Vienna: Springer-Verlag)

Kim, H.-I., Kim, Y.-G., & Park, K.-D, 2021, Performance Evaluation of the Low-cost, High-precision RTK Device RTAP2U for GPS-based Precise Localization, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 10, 67-73. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.1.67>

Lee, H.-C., & Park, K.-D. 2020, Development of Code-PPP Based on Multi-GNSS Using Compact SSR of QZSS-CLAS, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 38, 521-531. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.6.521>

No, S.-J., Han, J.-H., & Kwon, J.-H. 2012, Accuracy Analysis of Network-RTK(VRS) for Real Time Kinematic Positioning, *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 30, 389-396. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2012.30.4.389>

Saidani, M., Sarri, P., Guinamard, A., & Maya, D. G. 2020, Virtual Base Station algorithm and performance assessment, *Proceedings of the International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS+2020)*, online, 21-25 September 2020, pp.2696-2709. <https://doi.org/10.33012/2020.17533>

SBG SYSTEMS, Qinertia GNSS+INS Post-Processing Software (PPK) [Internet], cited 2025 Aug 5, available from: <https://www.sbg-systems.com/software/qinertia-gnss-ins-ppk/>



Nam-Woo Noh is M.S student at Department of Electrical and Computer Engineering at Inha University. He received B.S. degree in Smart Mobility Engineering from the same university. His research interests include High-Precision Navigation for Vehicles and GNSS geodesy.



Kwan-Dong Park received his Ph.D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.



Information for Authors

A Publication of The Institute of Positioning, Navigation, and Timing

Enacted on July 16, 2012
Revised on December 20, 2013
Revised on November 05, 2015
Revised on August 24, 2016
Revised on Jan 23, 2019
Revised on March 13, 2020
Revised on April 27, 2021
Revised on December 13, 2023

Aims and Scope

Journal of Positioning, Navigation, and Timing (JPNT) is a quarterly periodical. The purpose of the journal is to establish a high quality archival periodical presenting state of the art, recent advances and practical applications of Global Navigation Satellite System (GNSS). In the journal, the technical areas are not limited to GNSS, it includes other positioning, navigation and timing systems and applications also.

Two types of contributions are regularly considered:

- (1) Regular Papers: Presentation of significant research, development or applications of GNSS concepts and normally limited to ten printed pages in final form.
- (2) Technical Notes and Correspondences: Brief technical notes, comments on published areas or established GNSS topics, corrections to papers, and notes published in the Journal. Manuscripts up to four pages long are allowed in final form.

Conditions of Publication

Submission of a manuscript implies that it has not been copyrighted, published, submitted, nor accepted for publication elsewhere. All submitted manuscripts should be as concise as possible.

Submission by internet

Manuscripts can be submitted electronically via the IPNT website <https://ipnt.jams.or.kr>.

Manuscript Preparation

- (1) Manuscripts written in English and either printed or typewritten, double-spaced with wide margins, and on one side of white paper are recommended. Printouts with a font size of 12 are preferred.
- (2) Original illustrations should not be sent until requested, but authors should be ready to submit these immediately upon acceptance for publication.
- (3) Authors of an accepted manuscript will be required to provide the text of the final version of their manuscript on the website <https://ipnt.jams.or.kr>
- (4) The preferred formats for accepted papers are Word (.doc). The preferred formats for graphics are Postscript (.ps), Encapsulated Postscript (.eps), and Tagged Image File Format (.tif). The operating system and word processing software used to produce your document must be netted on your manuscript.
- (5) Brief biographies and either clear glossy photographs of the authors or TIF files of the figures should be submitted after the paper has been accepted.

Manuscript Style

- (1) First page must contain
 - a) Title of paper, author(s), and affiliation(s),
 - b) Abstract (not exceeding 300 words for Regular Papers or 75 words for Technical Notes and Correspondence, and without equations, references, or footnotes),
 - c) Keywords (at least four key words or phrases),
 - d) Complete mailing address, telephone and fax numbers, and the electronic mailing address,
 - e) Preferred address for correspondence and return of proofs,
 - f) Footnotes (if desired) containing acknowledgement of financial or other support.
- (2) Provide an introduction that includes a statement of the purpose and contribution of the paper.
- (3) Reference list entries should be alphabetized by the last name of the first author of each work. For multiple articles by the same author, or authors listed in the same order, list the entries in chronological order, from earliest to most recent. The reference citation should be enclosed in parenthesis, e.g., "It is proven in (Hong & Kim 2011 and Shiler et al. 2012). Young (1990) introduced another method".
- (4) References should appear at the end of the paper as following examples. Authors' names are inverted (last name first); give the last name and initials for all authors.

Hong, K. S. & Kim, C. S. 2011, Galileo system, IEEE Trans. on Automatic Control, 33, 1234-1245

Shiler, Z., Filter, S., & Dubowski, S. 2012, Design of GNSS receiver, Proc. of the 26th European Navigation Conference, pp.98-99

Young, M. 1989, The Technical Writer's Handbook (Seoul: Mill Valley)
- (5) The style files are available on the webpage at <http://www.ipnt.or.kr>

Copyright

It is the policy of the JPNT to own the copyright to the technical contributions that it publishes on behalf of the interests of the JPNT, its authors, and their employers, and to facilitate the appropriate reuse of this material to others.

Publication Fees

(Without Financial Support) The basic publication fee for general papers is KRW 200,000, and KRW 20,000 per page (example: a 10-page paper, KRW 200,000 + 10 pages x KRW 20,000/page = KRW 400,000).

(With Financial Support) The basic publication fee for general papers is KRW 200,000, and KRW 30,000 per page (example: a 10-page paper, KRW 200,000 + 10 pages x KRW 30,000/page = KRW 500,000).



Examination Guidelines

Enacted on July 16, 2012

Amended on December 20, 2013

Revised on November 05, 2015

- Article 1** The examination and approval of papers submitted to the Journal of Positioning, Navigation, and Timing (hereinafter referred to as the Journal) are to follow these guidelines. Technical papers and short papers are also regarded as papers.
- Article 2** The editors of submitted papers are recommended by the Editor-in-Chief, and the examiners are recommended by the relevant editors and appointed by the Editor-in-Chief.
- Article 3** The list of examiners are not to be announced.
- Article 4** Examination details are not to be announced officially to those other than the authors.
- Article 5** Publication of papers is determined by examination of at least 2 examiners.
- Article 6** Examination results are classified into 4 types: “suitable for publication”, “publication after revision”, “reexamination after revision”, and “not suitable for publication”.
- (1) Papers “suitable for publication” are approved without proofreading.
 - (2) Regarding papers for “publication after revision”, the authors make revisions to the matters pointed out by the examiners, the relevant editors check them and recommend approval, and the Editor-in-Chief finally confirms and determines whether the publish the papers or not.
 - (3) Regarding papers for “reexamination after revision”, the authors make revisions to the matters pointed out by the examiners and undergo the reexamination process.
 - (4) Regarding papers “not suitable for publication”, the Editor-in-Chief notifies the authors that the submitted papers cannot be published by the Journal.
- Article 7** If the examiners acknowledge that the contents of the papers are relevant to one of the following matters, the papers are labeled as “postponement of approval”, and the examiners specifically point out the relevant matters and demand revision or supplementation. The papers revised by the authors are subject to reexamination by the previous examiners.
- (1) If there is no clear difference between the author’s research findings and others’ research findings
 - (2) If the key research contents are unclear
 - (3) If indications or explanations about figures or tables are insufficient or unclear
 - (4) Other cases in which revisions are deemed necessary
- Article 8** If the examiners acknowledge that the contents of the papers are relevant to one of the following matters, the papers are labeled as “not suitable for publication” and must clarify the reason in detail.
- (1) If originality is unclear
 - (2) If the facts or ideas determined by the author are unclear in the content of the paper, or if it is unclear that a well-known fact is comprehensively analyzed or studied in angles different from the methods or perspectives used in cited literatures
 - (3) Other cases in which the paper is deemed inappropriate to publish in the Journal
- Article 9** If the views of the three examiners on whether to approve the paper or not are conflicting, the decision can be made by the relevant editor; and if difficult to make the decision, a fourth examiner will be determined and the relevant editor can make the decision with reference to this examiner’s view.
- Article 10** Papers may not be accepted if they are acknowledged by the Editor-in-Chief that they are not suitable for the writing techniques of the Society.
- Article 11** Regarding manuscripts written in foreign languages, the Editor-in-Chief may suggest the authors to revise or rewrite the papers for submission if the contexts are unclear or are grammatically incomprehensible.
- Article 12** The examiners must examine the assigned manuscripts within 3 weeks (21 days) by principle after the appointment, and submit their examination reviews to the Society.
- Article 13** This Society shall send the examination reviews to the authors within 1 week of receiving them from the examiners.
- Article 14** If the examiners do not submit their examination reviews within 3 weeks (21 days) after the request, the request may be withdrawn, in which case the manuscripts must be immediately destroyed.

Code of Ethics

Enacted on July 16, 2012
Amended on December 20, 2013

Article 1 (Purpose) This Code provides the basic ethical principles and directions that must be followed the members of the Institute of Positioning, Navigation, and Timing in conducting research activities, thereby intending to maintain the high level of the English journal of Position, Navigation, and Timing and contribute to the development of research on global navigation satellite systems.

Article 2 (Code of Ethics for Authors) Authors of submitted papers must comply with the following code of ethics in writing and submitting the papers.

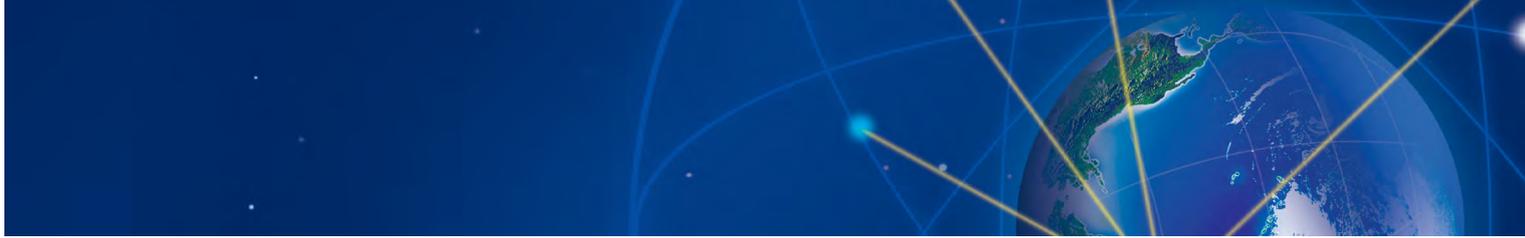
1. Authors must secure generality in the respect for human rights, compliance with bioethics and environmental protection in the research process, and conduct research on topics of sufficient academic value.
2. Authors must describe the research contents and findings completely, concisely and accurately in the submitted papers, and must not use the data of other researchers inappropriately (plagiarize) or distort the research findings.
3. Authors, when using open academic data that is closely related to the research contents of their papers, must include it in the references and clearly state the sources.
4. Authors, when citing undisclosed information obtained through personal contact, must use the information after obtaining the consent of the researcher who provided the information.
5. Submitting a paper to this Journal redundantly, even though it is already submitted to or published by another journal or is expected to be submitted, is an unjust behavior and thus not permitted.
6. All researchers that contributed significantly to the research process must be coauthors, and corresponding authors must be responsible for all parts of the papers.
7. For non-academic support such as administrative and financial support or simple academic advice, it is desirable to indicate the relevant details in the "Acknowledgements".
8. Authors must obtain approval from the relevant parties regarding copyright before submitting the papers when necessary, and confirm that no form of dispute may arise later.
9. If errors are found in submitted papers, it is the authors' duty to revise or withdraw the papers.

Article 3 (Code of Ethics for Examiners) Examiners must comply with the following code of ethics in examining the submitted papers.

1. Examiners must fairly and objectively examine the paper with a consistent standard without prejudice against the author's gender, age, race, organization or personal connections.
2. Examiners must avoid examination based on their personal academic beliefs or assumptions that are not perfectly verified.
3. Examiners must respect the personality of authors as specialized intellectuals, and clarify in detail their judgments, revisions and supplementations regarding the examined papers.

Article 4 (Code of Ethics for Editors) Editors (Editor-in-Chief, editors) must comply with the following code of ethics in examining and judging the submitted papers.

1. Editors must fairly and objectively judge the examined paper according to the fixed guidelines without prejudice against the author's gender, age, race, organization or personal connections.
2. Editors must determine whether to publish or reexamine the submitted papers with a consistent standard based on the examination results of the examiners.
3. Editors must not disclose or misuse information obtained in the process of examination.



Article 5 (Research Ethics Committee) The Research Ethics Committee may be temporarily operated for investigation of unethical behaviors, and investigative and disciplinary measures will be taken against unethical behaviors in the following procedures.

1. If unethical behaviors are exposed or there is an appeal in the examination process of submitted papers, the Editor-in-Chief determines the significance of the matter and organizes the Research Ethics Committee with a few editors and experts in the field when necessary.
2. The Research Ethics Committee performs a prompt, objective and fair investigation of the related matter, and must provide an opportunity for explanation via document within 30 days to the relevant party or organization, and ultimately submit a written report to the Editorial Board.
3. The Editorial Board determines the level of discipline for the relevant party based on the report written by the Research Ethics Committee, and submits to the Board of Directors.
4. The Board of Directors reviews the report of the Research Ethics Committee and decisions by the Editorial Board, and takes final measures. If it involves a paper that is already published, the publication of the relevant paper may be cancelled.

Article 6 (Others) Matters not included in this Code are decided based on related acts and subordinate statutes as well as social norms.

Ethics Charter

Enacted on July 16, 2012

All members of the Institute of Positioning, Navigation, and Timing shall give top priority to improving the quality of human life as the main agent of improving scientific knowledge and bringing technological innovation, and behave honestly and justly so that they can preserve honor, integrity and authority with high ethics as GNSS experts.

1. We shall give top priority to improving the quality of human life, and use and contribute to our knowledge and technology.
2. We shall contribute to developing GNSS technology and industry through our activities at the Society, and strive to enhance public safety, health and welfare.
3. We shall be honest and fair in education, research activities, publication of findings and participation in reality, and be faithful to ethicality and conscience as scientific technicians and scholars.
4. We shall conduct general activities according to the foundation purpose of The Institute of Positioning, Navigation, and Timing.
5. We shall not present in our papers or writings the research or arguments of others as if our own, and respect the research and development achievements of others.
6. We shall not pursue unjust or inadequate profits using information obtained in academic activities or research.
7. Members in charge of examination, advice and evaluation of papers and research must be fair in their activities only by their academic conscience.

The Institute of Positioning, Navigation, and Timing (2025-2026)

| | | |
|---------------------------|---|---|
| President | Junpyo Park | Agency for Defense Development, Daejeon, Korea |
| Vice-Presidents | Jeongrae Kim | Korea Aerospace University, Goyang, Korea |
| | Kwan-Dong Park | Inha University, Incheon, Korea |
| | Cheon Sig Sin | Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Korea |
| | Byungwoon Park | Sejong University, Seoul, Korea |
| General Affairs Secretary | Byungwoon Park | Sejong University, Seoul, Korea |
| Treasurer | Hyoungmin So | Agency for Defense Development, Daejeon, Korea |
| Directors | Seong Yun Cho | Kyungil University, Gyeongsan, Korea |
| | Byung-Kyu Choi | Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, Korea |
| | Kyu-Joo Choi | INSUNG International Co., Ltd., Seoul, Korea |
| | Suk-seung Hwang | Chosun University, Gwangju, Korea |
| | Yoola Hwang | Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Korea |
| | Jung-Min Joo | Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Korea |
| | Byunggi Jung | LIG Nex1 C4I Business Division, Seongnam, Korea |
| | Euiho Kim | Hongik University, Seoul, Korea |
| | Kwangjin Kim | Navigation System Business Group, Hanwha Aerospace, Seoul, Korea |
| | Sunwoo Kim | Hanyang University, Seoul, Korea |
| | ByungSeok Lee | Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Korea |
| | Eunsung Lee | Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Korea |
| | Jang Yong Lee | Agency for Defense Development, Daejeon, Korea |
| | Jiyun Lee | Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea |
| | Sanguk Lee | Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Korea |
| | Doo Kyung Park | MBC Co., Ltd., Seoul, Korea |
| | Sang Hyun Park | Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea |
| | Hung Seok Seo | Microinfinity Co., Ltd., Daejeon, Korea |
| | Jiwon Seo | Yonsei University, Incheon, Korea |
| | Kiyeol Seo | Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea |
| | Dong-Ho Shin | SUNGWHA Tech Co., Ltd., Daejeon, Korea |
| | Seok Bo Son | Duksan Navcours Co., Ltd., Daejeon, Korea |
| | Jong-Hoon Won | Inha University, Incheon, Korea |
| Sung-hoon Yang | Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea | |
| Auditors | Moon Beom Heo | Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Korea |
| | Hyung Keun Lee | Korea Aerospace University, Goyang, Korea |
| Advisers | Wan Sik Choi | CIPSYSTEM Co., Ltd., Seoul, Korea |
| | Gyu-In Jee | Konkuk University, Seoul, Korea |
| | Changdon Kee | Seoul National University, Seoul, Korea |
| | Sang Jeong Lee | Chungnam National University, Daejeon, Korea |
| | Chansik Park | Chungbuk National University, Cheongju, Korea |
| Secretary General | Mi-Ja Shin | The Institute of Positioning, Navigation, and Timing, Seoul, Korea |
| Managing Editor | Nam Hae Jeong | Yonsei University, Seoul, Korea |

Research Papers

Performance Analysis and Compensation Methods According to PDR Drift and Radio Map Resolution
Jaewi Kim, Boseong Kim, Beomju Shin / 195

Improved Z-Matrix Search Algorithm for Enhanced Integer Ambiguity Estimation and Fix Reliability in RTK
Noah Minchan Kim, Dongchan Min, Jiyun Lee / 203

Real-Time Estimation of GPS Satellite Clock Offsets Using a Global Tracking Network and Analysis of GPS Block-Dependent Clock Biases
Yunhwan Seol, Hyung-Jin Rim, Yeong-Guk Kim, Kwan-Dong Park / 211

Instability Analysis of TWSTFT and GPS Time Comparison using a Double Difference Three-Cornered Hat
Juhyun Lee, Youn-Jeong Heo, Ju-Ik Oh, Joon Hyo Rhee, Gyeong Won Choi, Jong Koo Lee, Sung-hoon Yang, Young Kyu Lee, Dai-Hyuk Yu, Myoung-Sun Heo / 221

A Constrained Optimization Framework for Camera Intrinsic Parameters Based on Camera-IMU Calibration
Hyun-Seup Cho, Tae-Dong Ahn, Sang-Chan Moon, Kang-Hyun Hwang, Tae-Hoon Lee, Hyun-Wook Hong, Juhyun Oh, Chang-Ky Sung / 231

EKF-Based Orbit Determination Simulation for a Lunar Satellite Using Multi-GNSS Observables
Sungik Kim, Jisung Oh, Byungwoon Park, Hyewon Park, Jung-Min Joo / 241

GNN-based Localization with Beam RSRP in 5G Systems
Hasom Seo, Hongseok Jung, Duhui Yang, Sunwoo Kim / 259

Simulation of Orbit, Clock, and Ionospheric Corrections for a Regional Navigation Satellite System
Yongrae Kim, Heeseob Kim, Jeongrae Kim / 265

3D Location Estimation Algorithm Based on the Combined TDOA and FDOA for Fast Moving Object
Seul-Bi Jeon, Suk-seung Hwang / 275

Prediction Method of Zenith Wet Tropospheric Delay with LSTM Model
Soyoon Yoon, Yongrae Kim, Heeseob Kim, Jeongrae Kim / 281

GNSS-Synchronized Surface Buoy Network TDOA for Underwater Target Localization
Chul Hyun, Hyunseung Kim, Dong Geon Kim, Sungkyun Lee / 291

Technical Papers

Design of Regional Ionosphere/Differential Code Bias Simulator Based on RINEX/IONEX Files
Hyung Keun Lee, Jeongrae Kim, Kwan-Dong Park, Dong-Hyo Sohn, Junseok Hong, Jong-Kyun Chung, Byung-Kyu Choi / 299

Comparison of Clock Drift Modeling Methods for Maintaining Time Synchronization Between GNSS Receivers
Halim Lee, Seunghyeon Park, Joon Hyo Rhee, Gyeongmin Kim, Chulsoo Lee, Jiwon Seo / 313

Comparison of Static and Kinematic GNSS Positioning Performance Using Qintertia Software
Nam-Woo Noh, Kwan-Dong Park / 321