IGSO/GEO 항법위성 궤도 전파 정확도에 대한 섭동력 영향 분석

박재욱[1], 김부겸[1], 기창돈[1*], 김동욱[2]
[1]서울대학교 항공우주공학과, 정밀기계설계공동연구소
[2]국방과학연구소

지역 위성항법시스템은 특정 지역에 고정적으로 서비스를 제공할 수 있는 경사지구동기궤도 (Inclined Geosynchronous Orbit. IGSO)와 지구정지궤도 (Geostationary Orbit, GEO)의 항법위성을 활용한다. 이러한 궤도의 항법위성은 기존의 지구중궤도 (Medium Earth Orbit, MEO)의 항법위성과 마찬가지로 지구 중력 이외의 섭동력에 영향을 받는다. 하지만, IGSO/GEO는 MEO보다 고도가 높기 때문에, 각 섭동력의 영향이 다르게 나타난다. 지역 위성항법시스템 사용자에게 정밀 궤도를 제공하기 위해서는, 궤도 결정을 위한 동역학 모델에서 IGSO/GEO에서의 각 섭동력의 영향이 고려되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 German Center for Geosciences (GFZ)의 정밀 궤도를 활용하여 IGSO/GEO에서의 각 섭동력의 궤도 전파 정확도에 대한 영향을 분석하였다. 그 결과, 지구중력 퍼텐셜, 천체 인력, 태양 복사압의 영향이 우세적이어서 수십 cm 정확도의 궤도 전파 모델을 구현하기 위해서는 필수적으로 고려되어야 함을 확인할 수 있었다.

Influence of Perturbations on the Accuracy of Orbit Propagation for IGSO/GEO Navigation Satellites

Jaeuk Park[1], Bu-Gyeom Kim[1], Changdon Kee[1*], Donguk Kim[2]
[1]Department of Aerospace Engineering and the Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University
[2]Agency for Defense Development

Regional Navigation Satellite System (RNSS) employs a constellation of navigation satellites in Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) and Geostationary Orbit (GEO) because they can provide constant coverage over specific area. Navigation satellites in these orbits, as well as conventional ones in Medium Earth Orbit (MEO), are affected by perturbations other than the gravitational pull of the Earth. However, the influence of each perturbation on IGSO/GEO is different from that of MEO because of their higher altitude. In order to provide precise orbit to RNSS users, the influence of each perturbation on IGSO/GEO must be considered in the dynamic model for orbit determination. Therefore, in this study, we analyzed the influence of each perturbation on the accuracy of orbit propagation model using precise orbit from German Research Centre for Geosciences (GFZ). As a result of the analysis, it was confirmed that geopotential, third body gravity, and solar radiation pressure have such dominant impact that they must be considered to achieve decimeter-level orbit propagation accuracy.

Keywords: IGSO, GEO, orbit propagation, perturbation

1. 서론

최근 자율 주행, 드론 편대 비행 등의 정밀 위치 서비스의 수요가 증가하면서 위성항법시스템의 항법위성의 정밀 궤도를 제공하기 위한 정밀 궤도 결정 연구가 활발히 진행되고 있다 (Song et al. 2018). 위성의 궤도를 정밀하게 결정하려면 위성에 영향을 미치는 다양한 섭동력을 고려해 정밀한 궤도 전파 모델이 필수적이다 (Yu 2020). 항법위성에 영향을 미치는 섭동력으로는 지구중력 퍼텐셜, 천체 인력, 태양 복사압, 조석 효과, 일반 상대성 효과 등이 있는데, 이러한 섭동력들은 궤도 별로 그 영향이 다르게 나타난다.

항법위성은 지구중궤도(Medium Earth Orbit, MEO), 지구정지궤도(Geostationary Orbit, GEO), 경사지구동기궤도(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) 등의 궤도에서 운용되는데, 이 중 GEO와 IGSO는 궤도 주기가 24시간이므로 항법위성을 배치했을 때 특정 지역에 고정적인 서비스를 제공할 수 있다는 이점이 있다. 궤도 주기가 더 긴 만큼 IGSO/GEO는 전지구 위성항법시스템에서 주로 사용하는 MEO의 고도 20,000 km보다 높은 고도 32,000 ~ 39,000 km에 위치하지만, 이러한 이점으로 인해 IGSO/GEO 항법위성은 일본의 QZSS와 같은 지역 위성항법시스템에서 주로 사용되며, 중국의 BeiDou와 같이 전지구 위성항법시스템에서 추가적으로 활용되기도 한다.

이러한 항법위성 운용 궤도에서의 섭동력의 궤도 전파 정확도에 대한 영향을 평가하기 위한 연구들도 진행되었다. Bae et al. (2012)는 지구 중력, 천체 인력, 태양 복사압을 모두 모델링해 MEO, GEO, IGSO에 대해 72시간 궤도 전파 결과, 섭동력이 없을 경우의 궤도에서 수십 km 수준의 위치 차이를 얻었다. Yu et al. (2018)은 지구 중력, 천체 인력, 태양 복사압, 조석 효과, 일반 상대성 효과를 모두 고려하되 이 중 태양 복사압 모델들의 성능을 비교하였고, Empirical CODE Orbit Model (ECOM)의 태양 복사압 모델을 활용하여 MEO의 GPS 위성에 대해 24시간동안 수 cm 수준으로 일치할 수 있는 궤도 전파 모델을 구현한 바 있다.

본 논문에서는 Yu et al. (2018)을 참고하여 섭동력 모델과 궤도 전파 모델을 구성하고, 각 섭동력을 배제하고 궤도를 전파한 결과와 정밀 궤도의 오차를 통해 IGSO/GEO에서의 각 섭동력의 궤도 전파 정확도에 대한 영향을 비교하였다. IGSO/GEO에서 섭동력이 누적된 영향만이 아닌 각 섭동력이 개별적으로 미치는 영향을 분석함으로써, 원하는 궤도 전파 정확도에 대응되어 고려해야 할 섭동력을 선별하고자 하였다.

2. 섭동력 모델 및 궤도 전파 기법

2.1. 섭동력 모델

Fig. 1과 식 (1)은 항법위성에 작용하는 섭동력들을 각각 개념적으로, 수식적으로 나타낸 것이다. 식 (1)의 좌변은 항법위성에 작용하는 총 가속도, 우변은 차례대로 이체 문제 지구 중력, 지구중력 퍼텐셜, 천체 인력, 태양 복사압, 조석 효과, 일반 상대성 효과를 나타낸다. 본 논문에서는 Yu et al. (2018)을 참고하여 지구중력 퍼텐셜, 천체 인력, 태양 복사압, 조석 효과, 일반 상대성 효과 모델을 Table 1에 나열한 것과 같이 구성하였다. 이 중 태양 복사압은 위성의 형상, 표면 소재 등의 다양한 변수로 인해 모델링이 어려운데, 본 논문에서는 Yu (2020)를 참고하여 위성의 그러한 물성치 없이 태양 복사압 계수 추정을 통해 섭동력을 모델링할 수 있는 ECOM 모델과 지구와 달의 그림자에 대한 conical shadow 모델을 결합하여 모델링하였다.

$$\vec{a} = -\mu\frac{\vec{r}}{r^3} + \vec{a}_{\text{Geopotential}} + \vec{a}_{\text{Third Body}} + \vec{a}_{\text{SRP}} + \vec{a}_{\text{Tidal}} + \vec{a}_{\text{General relativistics}} + \cdots \tag{1}$$

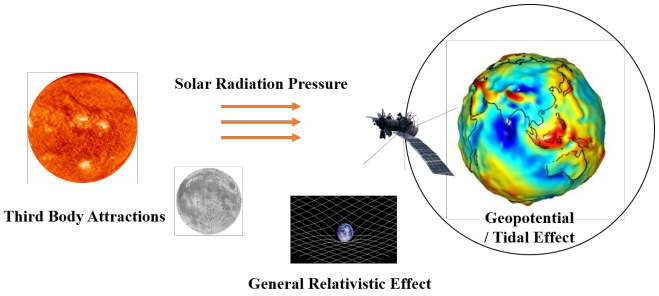

Fig. 1. Perturbations acting on navigation satellites.

Table 1. Perturbation model descriptions.

Perturbations	Models
Geopotential	EGM96 (degree: 12, order: 12)
Third body gravity	DE405 (Sun, Moon)
Solar radiation pressure	ECOM (9 coefficients) with conical shadow model
Tidal effect	IERS conventions 2010; FES2004 for ocean tides
General relativistic effect	IERS conventions 2010

2.2. 궤도 전파 기법

식 (2)는 궤도 전파에 사용되는 기본 식을 나타낸 것으로, Y, $\vec{r}$, $\vec{v}$, $\vec{a}$, t는 각각 궤도 전파 수행을 위한 state, 위성의 위치, 위성의 속도, 위성의 가속도, 시간을 의미한다. 위성의 속도와 가속도를 성분으로 가지는 state의 변화율을 시간에 대해 적분함으로써, 시간 t 이후의 위성의 위치와 속도를 계산한다.

$$\dot{Y} = f(t,Y) = \begin{bmatrix}\vec{v}\\ \vec{a}\end{bmatrix}, \qquad Y(t_0) = \begin{bmatrix}\vec{r}(t_0)\\ \vec{v}(t_0)\end{bmatrix} \tag{2}$$

식 (2)에 알 수 있듯이 궤도 전파를 수행하기 위해서는 위성의 초기 위치와 속도가 필요한데, 비교 대상인 정밀 궤도에서는 위성의 속도가 제공되지 않으므로 초기 속도에 대한 궤도 결정이 필요하다. 이를 위해서 본 논문에서는 Yu et al. (2018)을 참고하여 정밀 궤도를 관측값으로 사용하고 위성의 초기 위치, 속도와 태양 복사압 계수를 추정하여 궤도 전파 모델을 구성했다. 관측값으로 활용되는 정밀 궤도는 5분 간격으로 제공되어 하루 데이터는 총 288개이며, 모두 J2000으로 좌표 변환하여 활용하였다. 추정한 궤도요소로부터 24시간 궤도 전파를 위해 Runge-Kutta 56 적분기를 100초의 적분 간격으로 활용하였고, 그 결과를 정밀 궤도와 비교하였다. 이러한 방법으로 2018년 1월 15일의 QZSS PRN J01번 IGSO 위성과 BeiDou PRN C01번 GEO 위성의 정밀 궤도를 활용하여 IGSO/GEO 궤도 전파의 정확도를 분석하였다. 이 때

정밀 궤도로 BeiDou GEO 위성과 QZSS IGSO 위성에 대해 각각 SLR 잔차 오프셋 –45 cm, 15 cm 수준 정확도를 제공하는 German Research Centre for Geosciences (GFZ) 기관의 정밀 궤도를 사용하였다 (Montenbruck et al. 2017).

3. 각 섭동력 별 영향 분석

3.1 섭동력 크기 비교

Table 2는 QZSS PRN J01번 IGSO 위성과 BeiDou PRN C01번 GEO 위성의 2018년 1월 15일 섭동력의 크기를 비교하여 나타낸 것이다. 섭동력의 크기는 IGSO와 GEO 모두에서 이체 문제 중력, 지구중력 퍼텐셜, 달 중력, 태양 중력, 태양 복사압, 조석 효과, 일반 상대성 효과 순으로 큰 것을 확인할 수 있다. IGSO와 GEO 공통적으로 지구중력 퍼텐셜, 달 중력, 태양 중력의 크기는 10^{-6} m/s^2 수준으로, 태양 복사압 섭동력의 크기는 10^{-7} m/s^2 수준으로, 그 외의 섭동력의 크기는 10^{-10} m/s^2 이하 수준으로 나타났다.

Table 2. Acceleration forces perturbing the navigation satellite orbit.

	Acceleration [m/s^2]	
	QZSS J01 (IGSO)	BeiDou C01 (GEO)
Two-body	0.19 ~ 0.26	0.22
Geopotential	6 ~ 10 × 10^{-6}	8 × 10^{-6}
Lunar gravity	3 ~ 5 × 10^{-6}	3 ~ 5 × 10^{-6}
Solar gravity	2 ~ 3 × 10^{-6}	2 ~ 3 × 10^{-6}
Solar radiation pressure	1.6 × 10^{-7}	10^{-7}
Tidal effect	1 ~ 2 × 10^{-10}	1 ~ 3 × 10^{-10}
General relativistic effect	6 ~ 8 × 10^{-11}	7 × 10^{-11}

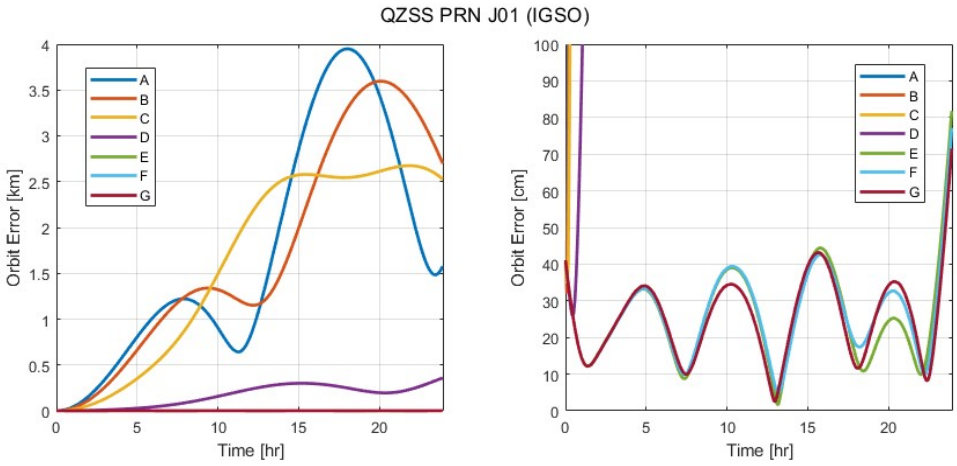

Fig. 2. Propagation model error time history for QZSS PRN J01 IGSO satellite.

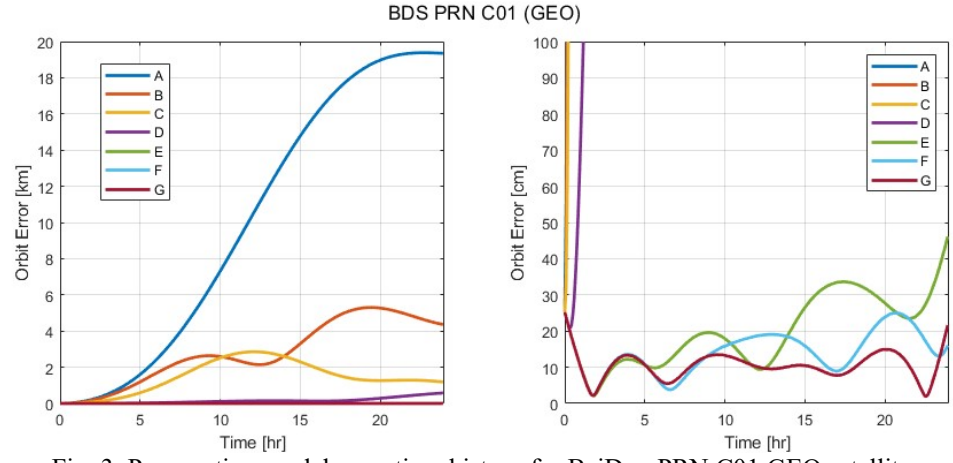

Fig. 3. Propagation model error time history for BeiDou PRN C01 GEO satellite.

Table 3. Maximum propagation error after 24 hours under each perturbation option.

	A	B	C	D	E	F	G
Two-body	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Geopotential	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lunar gravity	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓
Solar gravity	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓
Solar radiation pressure	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
Tidal effect	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
General relativistic effect	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Maximum propagation error of QZSS PRN J01 (IGSO) [m]	3949	3596	2675	359.4	0.82	0.77	0.72
Maximum propagation error of BeiDou PRN C01 (GEO) [m]	19383	5302	2854	578.3	0.46	0.25	0.25

3.2 궤도 전파 정확도 분석 결과

Figs. 2와 3은 각각 QZSS PRN J01번 IGSO 위성과 BeiDou PRN C01번 GEO 위성의 궤도 전파 결과와 정밀 궤도의 오차를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 좌측 그래프에선 km 수준의 궤도 오차를 나타냈고, 우측 그래프는 이를 확대해 cm 수준의 궤도 오차를 나타냈다. A~G 경우 별로 고려된 섭동력은 Table 3 상단을 통해 확인할 수 있으며, 해당 표 하단을 통해 각 경우에서의 QZSS PRN J01번 IGSO 위성, BeiDou PRN C01번 GEO 위성의 24시간 궤도 전파 최대 오차를 확인할 수 있다. IGSO와 GEO 모두에서 지구중력 퍼텐셜, 천체 인력이 배제되었을 때는 최대 오차가 수 km 이상 수준으로 나타났고, 태양 복사압이 배제되면 수백 m 수준의 최대 오차가 나타났다. 그보다 크기가 작은 조석 효과나 일반 상대성 효과가 배제되었을 경우에는 IGSO와 GEO 모두에서 수 십 cm 수준의 최대 오차가 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 IGSO/GEO 항법위성의 각 섭동력의 영향을 분석하기 위해 섭동력 모델과 궤도 전파 모델을 구성하였고, GFZ의 정밀 궤도와 비교하여 그 정확도를 분석하였다. IGSO/GEO에서 섭동력의 크기는 지구중력 퍼텐셜, 달 중력, 태양 중력, 태양 복사압, 조석 효과, 일반 상대성 효과 순서로 크게 나타났다. IGSO/GEO에서 섭동력 별 24시간 전파 최대 오차를 비교하면, 지구중력 퍼텐셜, 달 중력, 태양 중력은 배제 시 수 km 이상 수준이었고, 태양 복사압은 배제 시 수백 m 수준으로 궤도 전파 정확도에 대한 영향이 우세함을 확인할 수 있었다. 이외의 크기가 더 작은 섭동력은 배제 시 24시간 전파 최대 오차가 수십 cm 수준으로 영향이 미미함을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 IGSO/GEO에서 수십 cm 정확도의 궤도 전파 모델을 구현하기 위해서는, 지구중력 퍼텐셜, 천체 인력, 태양 복사압에 대한 고려가 필요함을 판단할 수 있다.

ACKNOLEDGMENTS

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소를 통해 계약된 과제로 국방과학연구소 연구개발사업의 연구비 지원(UD210006SD)에 의해 수행되었습니다. 그리고 서울대학교 공학연구원의 시설 지원에도 감사를 드립니다.

REFERENCES

Bae, J.-H., Yeo, J.-M., Kim, Y.-J., & Kim, Y.-D. 2012, Influences of Geopotential of Earth, N-body Gravitational, and Solar Radiation Pressure Perturbation on Satellites according to Satellite Orbits, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Conference Abstract, Jeongseon, Korea, April 2012, pp.1042-1047

Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., et al. 2017, The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges, Advances in Space Research, 59, 1671-1697. https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.011

Song, J., Park, B., & Kee, C. 2018, A Study on Compact Network RTK for Land Vehicles and Real-Time Test Results, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 7, 43-52. https://doi.org/10.11003/JPNT.2018.7.1.43

Yu, S. 2020, A Study on Real-time GPS Precise Orbit Determination System and Message Design for GPS Precise Orbit Covariance, Ph.D. Thesis, Seoul National University, South Korea

Yu, S., Kim, G., Kee, C., & Heo, M. 2018, Solar Radiation Pressure Model Comparison for GPS Satellites, Journal of Advanced Navigation Technology, 22, 585-590. https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.6.585