JANT 한국항행학회논문지
Journal of Advanced Navigation Technology

항행 및 항법

J. Adv. Navig. Technol. 23(6): 535-541, Dec. 2019

GIPSY-OASIS기반 GPS 정밀 궤도 추정

Precise Orbit Estimation of GPS using GIPSY-OASIS

하 지 현[1] · 천 세 범[2] · 박 관 동[3*]
[1]주식회사 피피솔
[2]한국항공우주연구원 항법기술연구실
[3]인하대학교 공간정보공학과

Jihyun Ha[1] · Sebum Chun[2] · Kwan-Dong Park[3*]

[1]PP-Solution Corporation, Seoul 08504, Korea

[2]Navigation Research and Development Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

[3]Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

[요 약]

이 논문에서는 한국형 GPS 정밀궤도 결정 기술 개발을 위한 기반 연구로써 항법위성의 기준궤도 추정을 위한 스크립트를 개발하고 성능을 분석하였다. 이를 위해 JPL Flinn AC의 자료처리 전략을 적용하였으며, GIPSY-OASIS를 이용하여 리눅스기반 스크립트를 개발하였다. 추정된 기준궤도의 정확도 분석을 위해 국제 데이터센터에서 제공되고 있는 정밀궤도력과 비교하였다. 그 결과 추정된 기준궤도와 정밀궤도력 간 위성좌표가 거의 동일한 경향을 보였으며, 분석 시작 및 종료 시점에서 일부 위성의 오차가 비교적 큰 것으로 나타났으나 대부분의 위성이 ±2 cm 범위에서 수렴하는 것으로 나타났다. 두 궤도력 간 평균오차는 모든 방향으로 1 cm 이하로 나타났으며, 표준편차 역시 1 cm 수준으로 나타나 기준궤도 추정성능이 우수한 것을 알 수 있었다.

[Abstract]

In this paper, scripts for estimating the reference orbits of navigation satellites were developed and their performance was analyzed as a preliminary study for the development of the Korean GPS precise orbit determination technology. The JPL Flinn AC's data processing strategy was applied and Linux-based scripts were developed using GIPSY-OASIS. For the analysis of the accuracy of the estimated reference orbit, the precise orbit provided by the international GNSS data center was used as the truth. As a result, estimated satellite coordinates showed almost exactly same patterns and trends with the reference precise orbits, and their differences are in the range of ±2 cm. The average error between the two orbits was less than 1 cm in the 3D direction, while the standard deviation was also at 1 cm. From these, we found that the developed scripts have excellent performance in precise orbit determination.

Key word : Global navigation satellite system, Global positioning system, Precise orbit determination, Reference orbit estimation, GIPSY-OASIS.

https://doi.org/10.12673/jant.2016.23.6.535

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 28 November 2019; **Revised** 30 November 2019
Accepted (Publication) 27 December 2019 (30 December 2019)

***Corresponding Author**

Tel: +82-2-6925-1516
E-mail: kdpark@inha.ac.kr

Ⅰ. 서 론

한국항공우주연구원에서는 "위성항법시스템 (GNSS; global navigation satellite system) 임무제어 기술 및 항법 성능 민감도 분석 연구"를 수행하고 있으며, 이 과제를 통해 한국형 위성항법시스템 운용을 위한 임무제어 기술을 개발하고 있다. 일반적으로 위성항법시스템은 우주부분, 지상부분, 그리고 사용자 부분으로 나누며, 임무제어 기술은 지상부분에 해당한다. 임무제어 기술에는 위성 모니터링 및 제어 기술, 유지보수, 궤도 수정, 그리고 시각 조정 등에 관한 기술이 포함된다. 지상 관측소에서 수집된 자료는 실시간으로 제어국에 수집되며, 제어국에서는 수집된 자료를 정밀 분석하여 위성 정밀궤도 결정, 항법자료 업데이트 및 업로드, 그리고 위성 상태정보 생성 등의 임무를 수행한다. 제어국에서 생성된 정보는 안테나를 통해 위성에게 전송되며, 또한 위성에서 재 송출되는 신호와 온라인 통신 등을 통해 지상사용자에게 배포된다. 임무제어 기술 중, 항법위성의 정밀 궤도 결정(POD; precise orbit determination) 기술은 위성항법시스템 운용에 있어 핵심적인 기술 중 하나이다. 이 논문에서는 한국형 위성항법시스템의 정밀궤도 결정을 위하여 현존하는 프로그램과 시스템을 이용하여 기준궤도를 생성하고 이를 정밀궤도력과 비교하여 정확도를 분석하였다.

기준궤도 생성을 위하여 GIPSY-OASIS(GNSS inferred positioning system-orbit analysis and simulation software, 이하 GIPSY라 칭함)를 이용하였다. GIPSY는 미항공우주국 제트추진연구소(JPL; jet propulsion laboratory)에서 개발된 고정밀 GNSS 자료처리 프로그램이다. GIPSY라는 이름에서 알 수 있듯이 항법위성의 위치결정과 궤도분석, 그리고 시뮬레이션을 수행하는 고정밀 자료 처리 프로그램이다. 현존하는 대표적인 위성항법시스템인 미국의 GPS(global positioning system)도 GIPSY를 이용하여 정밀궤도를 결정하고 있으며, JPL Flinn AC(analysis center)에서 이를 담당하고 있다. 이 논문에서는 JPL Flinn AC의 자료처리 전략을 바탕으로 GIPSY기반 항법위성의 기준궤도 생성 스크립트를 개발하였으며, 추정된 기준궤도의 성능 분석을 위하여 IGS(international GNSS service) 등 국제 데이터센터에서 배포하는 정밀궤도력과 비교하였다. 2장에서 GIPSY와 JPL 궤도력에 대해 소개하고 기준궤도 추정 방법에 대해 기술한다. 3장에서는 GIPSY기반 기준궤도 생성 스크립트 개발 및 성능 분석 결과를 기술한다.

Ⅱ. GIPSY기반 GPS POD 방법

2-1 GIPSY-OASIS

위성항법 고정밀 자료처리 프로그램으로는 GIPSY, Bernese, 그리고 GAMIT-GLOBK가 있다. 이 중 GIPSY는 현재 JPL Flinn AC에서 항법위성의 정밀궤도 결정에 활용하고 있는 프로그램으로, 주요 기능은 지구상에 위치하는 대상물의 정밀 위치결정, 항법위성의 궤도와 시간 결정, 저궤도 위성(low earth orbiters) 궤도 결정, 항공기 등 이동체 위치결정, 정지측위 및 이동측위, 위성 고도계(satellite altimetry) 궤도 결정, 위성 중력계(gravity recovery) 궤도 결정 등이다[1]. GIPSY의 이러한 기능은 지구물리 연구를 위한 지상위치 결정, 지구 변형, 지각변동, GNSS 네트워크 운영, 빙하 모니터링, 대기 관측, 지구 자전, 항공기 모니터링, 그리고 위성의 정밀궤도 결정에 활용되고 있다. GIPSY를 이용하여 궤도결정이 가능한 위성은 항법위성 이외에도 Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2/OSTM, GRACE, Champ, SAC-C, COSMIC, Space Shuttle(예: SRTM) 및 정지궤도 위성과 상업위성(commercial satellites)까지 포함된다. 국내에서는 GIPSY를 이용한 위성궤도 결정 연구는 전무한 실정이며, 대부분 기준국을 포함하여 대상물의 정확한 위치 결정, 오차요인 분석, GNSS 네트워크 운영, 기상 및 지각변동 모니터링 등의 연구에 활용되어 왔다.

위성항법 자료처리방법에는 단독측위와 상대측위가 있다. GIPSY는 단독측위(standalone positioning)기법을 사용하며, Bernese와 GAMIT-GLOBK의 경우 기본적으로 상대측위(relative positioning)기법을 사용한다. 상대측위는 두 대 이상의 GPS 수신기를 이용하여 두 개 이상의 위성을 동시에 관측하고, 이로부터 공통 오차를 제거함으로써 정밀도를 향상시키는 기법이다. 이 경우 위성 및 수신기의 시계오차, 궤도력 오차 등을 공통오차로서 제거할 수 있으며, 수신기간 거리가 가까울 경우 이온층 및 대류층의 신호지연 효과도 거의 동일하다고 가정하여 제거할 수 있다. 이와 같이 상대측위의 경우 관측소간 기선거리(baseline)를 반드시 고려하여야 하며, 관측소간 기선거리가 증가할 경우 정확도가 낮아질 수도 있다. 또한 관측소 수가 증가할 경우 기선 수가 증가하여 자료 처리시간이 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 Bernese의 경우 관측소간 기선 수를 선택할 수 있도록 하고 있으며, 기선 수를 네트워크 개념으로 묶어 최소한의 기선을 사용하도록 하고 있다.

반면 단독측위는 한 대의 수신기를 이용하여 위치를 알고자 하는 관측소 자료만 처리하는 방법으로 기선거리를 고려하지 않아도 되므로 자료 처리 시간이 단축된다. GIPSY는 PPP(precise point positioning)라는 정밀단독측위 기법을 사용함으로써 정확도를 향상시킨다[2]. GIPSY의 경우 1개 관측소에서 30초 간격, 24시간 관측 자료를 처리할 경우 자료처리 시간이 10초 이하로 매우 신속하다. 이때 이온층 오차는 주파수 선형조합으로 제거하며, 대류층 신호지연 오차는 AHD(a priori hydrostatic delay)와 AWD(a priori wet delay)를 기준으로 random walk process로 가정하고 추정한다[3]. 수신기 시계오차의 경우 세슘이나 수소 원자시계가 연결되어 있는 관측소를 이용하거나, 백색잡음(white noise)으로 가정하고 추정한다[2]. GIPSY를 이용한 기준궤도 결정 방법은 일반적인 자료처리 방법과 유사하며 궤도 추정을 위한 과정이 추가된다. 이에 대한 자세한 내용은 2-3절에서 기술한다.

2-2 JPL 궤도력

JPL Flinn AC에서는 GIPSY를 이용하여 항법위성의 정밀궤도를 결정하고 이를 JPL 데이터 센터와 IGS 데이터 센터를 통해 전 세계 사용자에게 제공하고 있다[1,4]. JPL 위성궤도력은 2시간~14일 주기로 초신속(ultra-rapid), 신속(rapid), 그리고 정밀(final 혹은 precise)궤도력으로 나누어 생산·배포되며, 특히 JPL 데이터 센터에서 제공하는 궤도력의 경우 GIPSY에 최적화된 형식으로 생성된다. 각 궤도력의 생성 주기와 정확도를 표 1에 나타내었다. JPL 신속 및 정밀궤도력은 해당일의 정오(UTC 12:00)를 기준으로 이전과 이후 각각 15시간씩, 총 30시간의 궤도 및 시간정보를 제공하며, 초신속 궤도력은 업데이트 시간을 기준으로 전후 15시간씩 총 30시간의 정보를 제공한다. 따라서 해당일에 마지막으로 업데이트된 초신속궤도력은 같은 날 신속 및 정밀궤도력과 동일한 시간의 궤도 정보가 제공된다. IGS를 통해 수집 가능한 JPL 궤도력은 신속궤도력과 정밀궤도력으로 IGS 표준 형식을 따른다. 본 논문에서는 JPL 데이터 센터를 통해 정밀궤도력을 수집하고 GIPSY를 이용하여 생성된 기준궤도와 비교함으로써 정확도를 분석하였다.

2-3 GIPSY기반 POD 방법

JPL Flinn AC에서는 GIPSY를 이용하여 위성궤도를 생성하고 있으며, 관측모델, 궤도모델 등 자료처리를 위한 전략을 수립하고 있다. 표 2에 Flinn AC의 자료처리 전략을 요약하였다. 표 2에 나타낸 각 모델에 대한 자세한 설명은 참고문헌으로 대체한다[5]-[9]. 표 2를 살펴보면, JPL Flinn AC에서는 GNSS 자료처리를 위해 GIPSY 6.3을 이용하고 있으며, 전처리 단계에서 임계고도각은 7°로 설정하고 관측자료의 생성 간격, 사이클슬립 등 이상치를 검출한다. 또한 관측자료는 5분 간격으로 샘플링한다. 다음으로 IGS atx를 활용하여 위성 및 지상 안테나 위상중심 변동량을 모델하며, GPT2 모델을 이용하여 대류층 오차를 추정한다. 이온층은 이중주파수 조합으로 제거하며, IERS 2010 조석 모델과 GYM95 GPS 자세모델을 적용한다. 궤도모델은 EGM2008 지오포텐셜 모델, JPL empirical SRP 모델과 GSPM-13을 이용한 태양복사압 모델을 적용한다. 고체지구조석과 극조석은 IERS 2010, 해양조석은 GOT4.8a를 이용하고 있다. 해당일의 정오 12:00(UTC기준)으로 30시간 길이로 처리한다. 산출물의 기준계는 J2000이며, 관측소 좌표와 속도는 IGS08 기준계를 적용한다.

표 1. JPL 궤도력 종류
Table 1. Latency and accuracy of JPL orbits.

Type	Latency	Accuracy (cm)
Ultra-rapid	< 2 hours	5
Rapid	16:00 of next day	3.5
Precise	< 14 days	2.5

표 2. JPL Flinn AC의 GNSS 자료처리 전략
Table 2. GNSS Data processing strategies at JPL Flinn AC.

Description	Processing strategy
Software	GIPSY-OASIS 6.3
Measurement models	
Preprocessing	Outliers and cycle slip detection Screened for data gaps, Reference sites chosen Decimated to 5 minutes, Smoothing to 5 minutes
Basic Observable	Undifferenced ionosphere-free carrier phase, LC Undifferenced ionosphere-free pseudorange, PC Elevation cutoff angle: 7° Sampling rate: 5minutes Data weight, LC: 1 cm Data weight, PC: 1 m Weighting: sigma2=1/sin(e)
Modeled observable	Undifferenced LC, PC combination CA-P1 biases from CODE applied
Phase rotation correction	Applied
ARP eccentricity	dN, dE, dU eccentricities from IGS sinex file
ground antenna phase center calibration	PCV model from igs08_wwww.atx applied receicver antenna and radome types from IGS sinex
Troposphere	A priori model: wet and dry from GPT2 model Mapping function: GPT2 Estimation: zenith delay and horizontal gradients
Ionosphere	1st order effect: removed by LC and PC combinations 2nd order effect: modeled
Plate motions	Sation velocity model applied for a priori positions
Tidal	Solid earth tide: IERS 2010 Conventions Permanent tide: not removed from model, so not in estimated site coordinates Pole tide: IERS 2010 Conventions Ocean tide loading: diurnal, semidiurnal, MF, and MM model: GOT4.8ac semidiurnal: IERS2010 Self-consistent equilibrium model Ocean pole tide loading: applied
Non-tidal loading	Atmospheric pressure, ocean botton pressure, surface hydrology: not applied
Earth orientation Parameter	IERS 2010 Conventions
Satellite center of mass correction	Phase conters offsets from igs08_wwww.atx applied
Satellite antenna phase variations	igs08_www.atx PCV model applied
Relativistic corrections	Periodic clock corrections and gravity bending applied
GPS 자세 모델	GYM95 nominal yaw rate model and yaw rates estimated form Block II satellites
Orbit models	
Geopotiontial	EGM2008 12x12 C20, C30, C40, C21, S21 from IERS2010 standards
3-body	JPL DE421
Solar radiation pressure	Block II/IIA/IIR: JPL empirical SRP, GSPM13 model Earth shadow model: conic model Earth albedo: applied Attitude model: GYM95 yaw motel
Tidal forces	Solid earth tides: IERS 2010 Conventions Ocean tides: GOT4.8ac Solide earth pole tide: IERS 2010 conventions Ocean pole tide: IERS 2010 conventions
Relativity	Point mass of earth, geodesic precession, lens-thirring precession: applied
Numerical Integration	Variable hagh order Adams predictor-corrector arc length: 30 hours centered at 12:00 of each day

Ⅲ. GPS POD기준궤도 생성 및 성능 비교

3-1 POD 스크립트 개발

이 논문에서는 2-3절에서 살펴본 Flinn AC의 자료처리 방법을 바탕으로 GIPSY기반 기준궤도 생성 스크립트를 개발하였다. 이를 위해 리눅스 CentOS7.6.1810_x86_64를 설치하고 현재 서비스 중인 GIPSY 버전 중 JPL Flinn AC와 가장 유사한 GIPSY 6.4을 이용하였다. 또한 GNSS 자료 편집 및 변환 등을 위해 TEQC[10] 등의 프로그램을 설치하였다. 스크립트 개발 및 검증을 위해 IGS와 JPL에서 제공하는 관측자료와 궤도 및 오차 정보 등을 수집하여 별도의 데이터베이스(DB)를 구성하였으며, 이를 통해 자료처리 속도 증가 및 불필요한 자료 중복 수집 등을 방지할 수 있도록 하였다. 또한 분석대상 관측소, 분석 대상시간, 분석대상 위성 등 각종 분석에 필요한 정보를 입력할 수 있도록 하였다(그림 1). 또한 Flinn AC의 자료처리 전략을 바탕으로 본 연구의 개발 조건에 맞춰 자료처리 전략을 일부 변경, 적용하였다.

구체적으로 자료 처리 전처리 단계에서 임계고도각은 7°로 설정하였으며, TEQC, clockprep, ninja를 이용하여 사이클슬립을 검출하고 관측치 생성간격 및 이상치 검출 등을 수행한 후 5분 간격으로 관측자료를 샘플링하였다. 이때, GIPSY의 기본 설정은 GPS-only로 관측자료를 편집하도록 되어 있으나, 이를 Mulit-GNSS로 변경하였다(그림 2). 다음으로 IGS 데이터 센터에서 제공하는 atx 파일을 수집하여 위성 및 지상 안테나 위상중심 변동량을 보정하였으며, 대류층 및 이온층 오차모델, 그리고 궤도모델 등은 표 2의 방법을 적용하였다.

분석대상 관측소는 현재 한국형 위성항법시스템 기준국이 설치되어 있지 않은 관계로 Flinn AC에서 활용중인 관측소 정보를 이용하였다. JPL Flinn AC에서는 전세계 IGS 관측소 및 자체 관측소 중 자료 분석에 선호하는 80여 개소의 관측소 후보군을 확보하고 있으며, 이를 활용하여 궤도력을 생성하고 있다. 관측소에 대한 ID, 초기 좌표, 수신장비 사양 등은 IGS에서 제공하는 SINEX를 이용하였다[4]. 기준궤도 산출 결과는 JPL 궤도력 형식인 POS 파일 이외에도 IGS 궤도력 형식인 SP3 포맷으로도 출력할 수 있도록 하였다. POS 파일에는 0~15번 열에 순서대로 좌표계(0번 열), 위성번호(1번 열), 시간(2~3번 열),

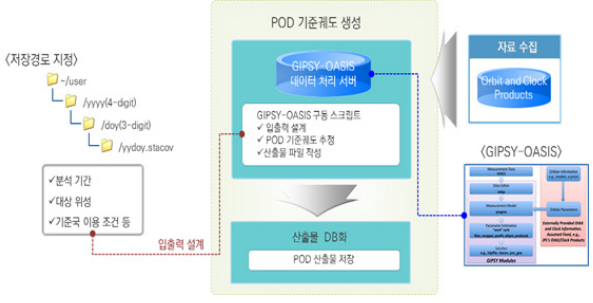

그림 1. GIPSY기반 GPS POD 시스템 구성도
Fig. 1. GPS POD system configuration using GIPSY.

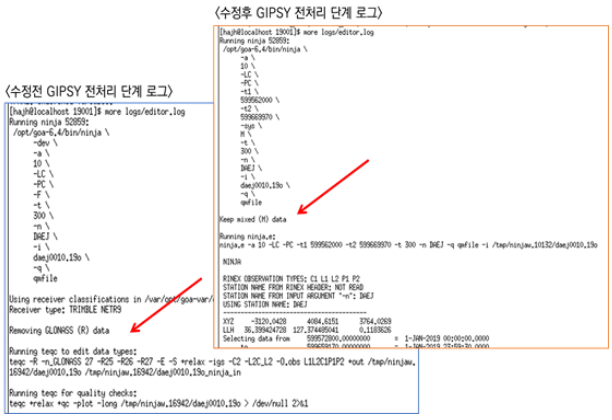

그림 2. GIPSY 전처리 단계 로그
Fig. 2. Logs generated during preprocessing of GIPSY.

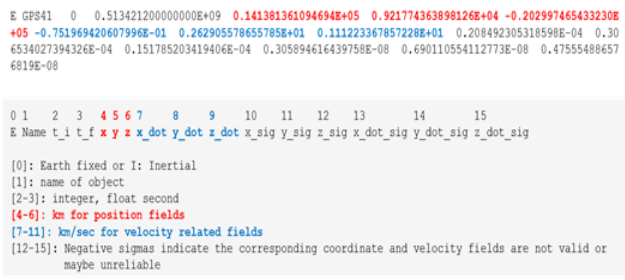

그림 3. POS 파일 형식
Fig. 3. POS file format.

위성 좌표(4~6번 열), 위성속도(7~9번 열), 위치오차(10~11)와 속도오차(12~15)가 기록된다. POS 결과파일 형식을 그림 3에 나타내었다.

3-2 성능 분석

본 연구에서는 2016~2019년 중 임의의 날짜를 선택하여 해당 관측소들 중 IGS 국제데이터 센터를 통해 수집이 가능한 관측자료를 모두 활용하였다. 기준궤도 결과에 대한 성능분석을 위해 JPL에서 제공하는 정밀궤도력을 수집하였으며, 수집된 정밀궤도력과 개발 스크립트를 이용하여 추정된 기준궤도의 위성 좌표를 상호 비교하였다. 그림 4와 그림 5에 2019년 1월 1일의 41번 위성의 기준궤도 생성 결과와 JPL 정밀궤도력과의 좌표차이를 각각 나타내었다. 그림 5의 가로축은 시간

그림 4. 2019년 1월 1일 41번 위성의 기준궤도 추정 결과
Fig. 4. Estimated reference orbit of SVN 41 on Jan. 1, 2019.

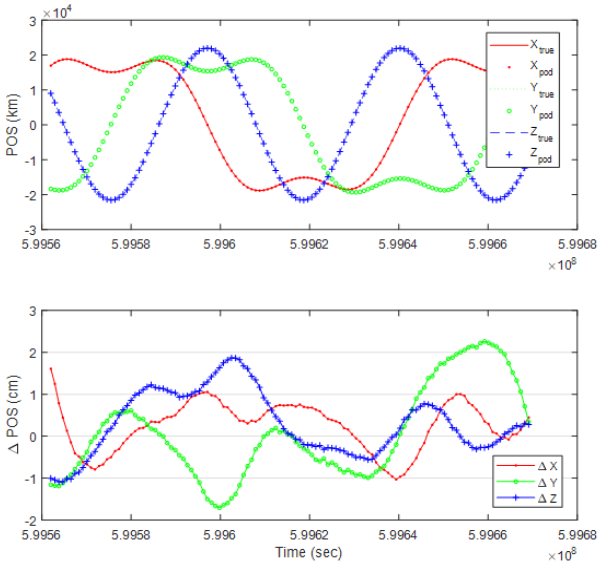

그림 5. 2019년 1월 1일 41번 위성의 (위)기준궤도 추정결과와 (아래) JPL 정밀궤도력과의 좌표 차이

Fig. 5. (Up) Reference orbit estimation results of SVN 41 on Jan. 1, 2019, and (Down) coordinate differences between the estimated reference orbit and JPL precise orbit.

(J2000, sec)이며, 세로축은 각각 추정된 POD 기준궤도와 정밀궤도력의 좌표의 차이이다. 그림 5를 보면 개발 스크립트를 이용하여 추정된 궤도와 정밀궤도력의 위성좌표가 서로 같은 경향을 보이며 X, Y, Z 좌표가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 두 궤도력 사이의 차이는 -2 cm~3 cm 범위에서 나타났으며, 평균 오차 X 0.2 cm, Y 0.1 cm, Z 0.3 cm로 매우 정확한 궤도 추정이 가능함을 알 수 있었다. 다음으로 전체위성에 대하여 각 방향 별로 정밀궤도력과의 기준궤도의 좌표차이를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 가로축은 시간이며, 세로축은 위에서부터 X, Y, Z방향 별 좌표오차를 cm 단위로 나타낸 것이다.

그림 6을 보면, 분석 시작 시점에서는 다소 오차가 크지만 시간이 지날수록 오차가 감소하여 분석시간 3시간 후 (5.9957×10^8초)에는 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이후 24시간 구간에서는 대부분 ±2 cm 이내에서 변동하며 안정적인 오차범위를 보이다가 분석 종료 시간에 가까워질수록 오차가 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 24시간 관측데이터를 이용하여 앞뒤 3시간씩 추가된 총 30시간의 궤도를 추정하기 때문이다. 따라서 실제 관측데이터가 없는 예측구간에서 오차가 크게 나타나는 것이다. 예측구간에서의 오차도 일부 위성만 최대 10 cm에 가까운 오차가 관측되지만 대부분 위성은 ±5 cm이내에서 비교적 정확한 궤도 추정성능을 보였다. 각 위성의 좌표오차 평균값과 표준편차를 표 3과 표 4에 각각 나타내었다. 표 3은 분석시작 시간부터 3시간까지의 평균오차와 최대오차를 나타낸 것이며, 표 4는 전체 30시간의 평균오차와 표준편차를 나타낸 것이다.

표 3과 표 4를 보면, 개발 스크립트를 이용해 추정한 기준궤

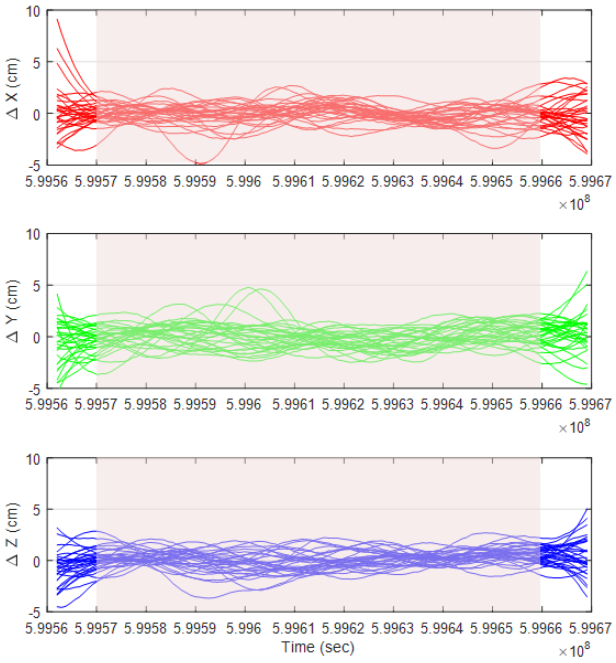

그림 6. 2019년 1월 1일 전체 위성에 대한 기준궤도와 JPL 정밀궤도력 좌표 차이

Fig. 6. Coordinate differences between the estimated reference orbit and JPL precise orbit of all observable satellites on January 1, 2019.

표 3. 분석 시작~3시간 구간의 기준궤도와 정밀궤도력 위성좌표 간 평균오차와 최대오차

Table 3. Mean and maximum coordinate errors between estimated and precise orbits for three hours from the start of analysis.

SVN	Mean error (cm)			Maximum error (cm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
41	0.0	-0.7	-0.8	1.6	0.1	-0.2
43	-1.4	0.6	-0.1	0.1	1.8	0.5
44	-0.5	-0.2	0.4	0.2	0.5	1.1
45	0.8	1.4	0.1	1.3	2.1	0.4
46	0.0	-2.3	-0.4	0.9	-0.7	0.6
47	1.3	0.3	1.0	2.2	1.3	1.7
48	3.8	-0.3	-3.0	9.1	4.1	-1.1
50	0.4	-2.4	0.4	0.7	-2.0	1.2
51	0.3	1.6	0.5	2.4	2.8	0.7
52	1.2	0.5	-0.4	1.3	1.3	-0.2
53	0.6	0.4	0.0	0.8	0.9	0.1
55	-0.5	0.9	0.9	-0.2	1.5	1.5
56	-0.9	1.2	-1.6	-0.1	1.8	-0.6
57	-0.9	-1.4	-1.1	-0.3	-0.6	0.5
58	1.7	0.0	1.3	2.0	0.4	1.6
59	-0.1	0.2	-0.1	0.4	0.3	0.2
60	-3.1	-0.1	-2.3	-1.9	0.7	-1.4
61	0.1	-0.7	2.2	0.4	0.2	2.6
62	-0.3	-2.8	2.3	0.1	-0.9	2.9
63	-1.3	-1.0	-1.2	0.0	0.6	-0.1
64	2.7	-2.3	-0.3	6.3	0.9	0.2
65	0.0	-0.7	1.5	0.4	0.4	3.2
66	-0.5	-1.9	-1.3	0.5	0.2	-0.6
67	1.7	-0.8	-0.3	4.8	-0.3	0.3
68	-0.1	-2.2	-1.3	0.4	-1.6	-0.7
69	-1.2	-1.2	0.2	-0.4	0.2	0.5
70	0.0	1.2	-1.3	0.8	1.5	-0.7
71	-0.2	0.2	-1.5	0.8	0.9	-0.3
72	-1.5	0.2	-0.4	-0.1	0.5	0.2
73	0.6	1.8	0.2	1.8	2.3	0.6

표 4. 기준궤도와 정밀궤도력 위성좌표 간 평균오차와 최대오차
Table 4. Mean and maximum coordinate errors between estimated and precise orbits.

SVN	Mean error (cm)			Maximum error (cm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
41	0.2	0.1	0.3	0.6	1.1	0.8
43	-0.4	-0.2	-0.2	0.8	1.1	0.7
44	0.3	-0.3	0.2	1.2	1.5	0.9
45	-0.2	0.5	-0.4	1.8	1.6	1.7
46	0.1	0.0	0.3	1.4	1.4	0.9
47	0.7	0.5	0.9	1.2	1.4	0.8
48	0.4	0.4	0.1	1.7	1.7	1.5
50	-0.6	0.3	0.1	1.0	1.5	1.5
51	-0.3	-0.5	0.3	0.8	1.2	0.4
52	0.8	-0.2	0.4	0.6	1.0	0.8
53	-0.1	-0.1	0.1	0.8	1.0	0.9
55	-0.2	0.0	0.2	0.8	1.0	0.9
56	0.0	0.3	-0.1	0.7	0.9	0.7
57	-0.4	0.6	0.7	0.7	1.4	0.8
58	0.2	0.0	0.5	0.8	0.9	0.9
59	-0.4	0.0	-0.2	1.0	0.6	0.8
60	-0.3	0.1	0.0	1.5	0.5	1.2
61	-0.1	0.1	-0.1	0.6	0.8	1.4
62	-0.1	-0.2	0.3	0.5	1.4	1.1
63	0.1	-0.1	0.3	1.0	1.0	0.9
64	-0.1	-0.3	0.3	1.3	1.3	1.1
65	-0.5	-0.3	0.2	0.9	1.1	0.8
66	0.0	-0.3	-0.1	0.6	1.3	0.6
67	0.1	-0.1	-0.4	1.2	0.7	0.8
68	0.0	-0.4	-0.1	0.5	0.9	0.8
69	0.0	0.3	1.0	1.1	1.4	0.9
70	0.3	-0.1	0.1	0.7	1.0	0.8
71	-0.1	0.3	0.3	0.9	0.7	0.9
72	-0.5	-0.3	-0.4	1.0	1.1	0.4
73	-0.3	0.0	-0.2	1.1	1.4	0.7

도는 모두 평균 1 cm 이하의 좌표오차를 보이며, 표준편차도 최소 0.4 cm에서 최대 1.8 cm까지로 매우 정확한 궤도 추정이 가능함을 알 수 있다. 평균오차와 표준편차는 방향에 상관없이, 세 방향에서 유사한 수준을 보였으며, 모든 위성에 대한 평균값은 좌표차이 X -0.0 cm, Y 0.0 cm, Z 0.1 cm, 표준편차 X 1.0 cm, Y 1.1 cm, Z 0.9 cm로 나타났다. 따라서 이 논문에서 적용한 기준궤도 추정 전략은 적절했으며, 개발된 스크립트의 기준궤도 추정 성능도 우수함을 알 수 있었다.

Ⅳ. 결 론

이 논문에서는 한국형 위성항법시스템의 정밀궤도 결정을 위하여 GIPSY를 이용하여 기준궤도를 생성하고 이를 정밀궤도력과 비교하여 정확도를 분석하였다. 기준궤도 생성을 위하여 미국 GPS의 정밀궤도력을 생산하고 있는 미항공우주국 JPL Flinn AC의 자료처리 전략을 바탕으로 GIPSY기반 항법위성의 기준궤도 생성 스크립트를 개발하였으며, 추정된 기준궤도의 성능 분석을 위하여 국제 데이터센터에서 배포하는 정밀궤도력과 비교하였다. 그 결과 분석 시작 시점에서는 다소 오차가 크지만 시간이 지날수록 오차가 감소하여 분석시간 3시간 후에는 수렴하였다. 이후 24시간 구간 동안 대부분 ±2 cm 이내에서 변동하며 안정적인 오차범위를 보이다가 분석 종료 시간에 가까워질수록 오차가 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이는 24시간 관측데이터를 이용하여 앞뒤 3시간씩 추가된 총 30시간의 궤도를 추정하기 때문이다. 따라서 실제 관측데이터가 없는 예측구간에서 오차가 크게 나타나는 것이다. 그러나 예측구간에서도 일부 위성만 최대 10 cm에 수준의 오차가 관측되었으며, 대부분 위성은 ±5 cm이내에서 비교적 정확한 궤도 추정성능을 보였다. 개발 스크립트를 이용해 추정한 기준궤도는 3차원 방향으로 평균 1 cm 이하의 좌표오차를 보이며, 표준편차도 1 cm 수준으로 매우 정확한 궤도 추정이 가능함을 알 수 있다. 따라서 이 논문에서 적용한 기준궤도 추정 전략은 적절했으며, 개발된 스크립트의 기준궤도 추정 성능도 우수함을 알 수 있었다.

Acknowledgments

본 연구는 2019년도 항공우주연구원의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

[1] GIPSY-OASIS. [Internet]. Available: https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov

[2] K. D. Park, Determination of glacial isostatic adjustment parameters based on precise point positioning using GPS, Ph.D. dissertation, University of Texas, Austin, USA, 2000.

[3] Y. E. Bar-Sever, P. A. Kroger, and J. A. Borjesson, "Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. B3, pp. 5019-5035, Mar. 1998.

[4] International GNSS Service. [Internet]. Available: http://www.igs.org

[5] S. Desai, D. Kuang, and W. Bertiger, "GIPSY/OASIS(GIPSY) overview and under and hood," in *GIPSY User Meeting*, San Francisco: CA, pp. 1-92, 2014.

[6] D. Kuang, W. Bertiger, S. Byun, and J. Zumberge, "Extending GPS orbit and clock products to high rate GPS satellite clock solution," in *PLANS 2016*, San Diego: CA, pp.1-12, 2006.

[7] P. Willis, W. Bertiger, and K. Miller, "DORIS/RINEX data processing with GIPSY/OASIS II and GIPSYX preliminary results and plans," in *DORIS AWG Meeting*, London: UK, pp.1-13, 2017.

[8] J. F. Zumberge, and F. H. Webb, "Precise post-processing of GPS data: products and services from JPL," in *Institute of Navigation National Technical Meeting*, Long Beach: CA, pp.1-17, 2001.

[9] S. D. Desai, W. Bertiger, B. Haines, C. Selle, A. Sibois, A. Sibthorpe, and J. P. Weiss, JPL analysis center strategy

Summary, JPL, Pasadena: CA, IGS Technical Report, pp. 1-6, 2012.

[10] UNAVCO. [Internet]. Available: https://www.unavco.org

하 지 현 (Jihyun Ha)
2005년 2월 : 충북대학교 천문우주학과 · 한국천문연구원 GPS연구그룹 (이학석사)
2009년 2월 : 인하대학교 지리정보공학과 (공학박사)
2009년 3월 ~ 2012년 10월 : 한국항공우주연구원 선임연구원
2012년 10월 ~ 2018년 11월 : 공간정보연구원 책임연구원
2019년 3월 ~ 현재 : ㈜피피솔 책임연구원
※ 관심분야 : 위성항법, 정밀측위, 항법오차모델링

천 세 범 (Sebum Chun)
2002년 2월 : 건국대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2008년 2월 : 건국대학교 항공우주공학과 (공학박사)
2008년 1월 ~ 2010년 4월 : 마이크로인피니티 부설연구소 책임연구원
2010년 4월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원
※관심분야 : 관성항법, 위성항법, 실내항법, 비선형 시스템 상태 추정

박 관 동 (Kwan-Dong Park)
2000년 12월 : University of Texas at Austin 항공우주공학과 (공학박사)
2001년 1월 ~ 2002년 6월 : Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics 박사후연구원
2002년 7월 ~ 2004년 2월 : 한국천문연구원 선임연구원
2004년 3월 ~ 2007년 2월 : 국민대학교 산림자원학과 조교수
2007년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 공간정보공학과 교수
※ 관심분야 : 위성항법, 실시간 정밀측위, 우주측지