

Accuracy Assessment of IGSO and GEO of BDS and QZSS Broadcast Ephemeris using MGEX Products

Eunseong Son^{1†}, Heonho Choi¹, Jungmin Joo¹, Moon Beom Heo²

¹Korean Positioning System (KPS) Technology Team, Korea Aerospace Research Institute (KARI), Daejeon 34133, Korea

²Global Navigation Satellite System (GNSS) R&D Division, KARI, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

In this study, Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) and Geostationary Orbit (GEO) of BeiDou System (BDS) and Quasi Zenith Satellite System (QZSS) satellites positions and clock errors calculated by broadcast ephemeris and compared with Multi-GNSS Experiment (MGEX) products provided by five Analysis Centers (ACs). Root Mean Square Errors (RMSE) calculated for satellite position error. The IGSO results showed that 1.82 m, 0.91 m, 1.28 m in BDS and 1.34 m 0.36 m 0.49 m in QZSS and the GEO results showed that 2.85 m, 6.34 m, 6.42 m in BDS and 0.47 m, 4.79 m, 5.82 m in QZSS in the direction of radial, along-track and cross-track respectively. RMS calculated for satellite clock error. The IGSO result showed that 2.08 ns and 1.24 ns and the GEO result showed that 1.28 ns and 1.12 ns in BDS and QZSS respectively.

Keywords: KPS, BDS, QZSS, broadcast ephemeris, accuracy

1. 서론

2018년 2월 대한민국 정부는 제3차 우주개발진흥기본계획 (안)을 발표하였으며, 한국형 위성항법시스템 (KPS, Korean Positioning System)은 6대 전략 중 하나이다. KPS는 Shin et al. (2019)에 의하면 지구경사동기궤도 (IGSO, Inclined Geosynchronous Orbit) 위성과 정지궤도 (GEO, Geostationary Orbit) 위성을 포함하며 주요 서비스 범위가 대한민국을 포함한 한반도 주변으로 하는 지역위성항법시스템 (RNSS, Regional Navigation Satellite System)이다.

대표적인 RNSS로 인도의 Navigation Indian Constellation (NAVIC)과 일본의 준천정위성시스템 (QZSS, Quasi Zenith Satellite System)이 있으며 중국은 RNSS구축을 시작으로 전지구 위성항법시스템 (GNSS, Global Navigation Satellite System)을 구축하여 RNSS와 동시에 운영하고 있다.

국제 위성항법시스템 서비스 (IGS, International GNSS Service)는 1994년부터 미국의 전지구위치결정시스템 (GPS, Global Positioning System)과 관련된 고품질의 정밀위치, 정밀 시각 등의 자료를 무료로 제공하기 시작하였으며, 이후 러시아의 GLObal Navigation Satellite System (GLONASS)까지 서비스를 확장하였다 (IGS About 2020). 세계 각국의 위성항법시스템이 개발되면서 IGS는 Multi-GNSS Experiment (MGEX) 프로젝트를 2016년부터 시작하였으며 Center for Orbit Determination in Europe (CODE), Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) 등의 GNSS 분석기관 (AC, Analysis Center) 들은 그들이 개발한 소프트웨어를 이용하여 정밀궤도와 시각 정보 등을 제공하고 있다 (MGEX 2020).

MGEX에서 제공하고 있는 정밀궤도와 시각과 관련하여 Li et al. (2020)는 유럽의 갈릴레오 (Galileo), 중국의 북두 (BDS, BeiDou System), QZSS의 AC간 산출물 (Products) 비교 평가를 수행하였으며 Jiao et al. (2020)은 MGEX products를 이용하여 BDS 방송궤도력 (Broadcast ephemeris)의 정확도 평가를 수행하였으나 궤도의 경우 정확한 비교 수치보다 BDS-3의 결과가 BDS-2 보다 상대적으로 향상되었다는 점을 강조하였다. Ma et al. (2018)은 QZSS 방송궤도력과 MGEX products 비교를 수행하였으나 당시 QZSS 위성이 1개만 운용되고 있어 하나의 IGSO 위성에 대해서만 분석을 수행하였다.

이 논문에서는 BDS와 QZSS의 방송궤도력을 이용하여 위성

Received Aug 21, 2020 Revised Sep 15, 2020 Accepted Sep 16, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: gpsyusa@kari.re.kr

Tel: +82-42-870-3989 Fax: +82-42-870-4467

Eunseong Son <https://orcid.org/0000-0002-0701-9965>

Heonho Choi <https://orcid.org/0000-0003-0584-9698>

Jungmin Joo <https://orcid.org/0000-001-6826-1010>

Moon Beom Heo <https://orcid.org/0000-0001-9674-9937>

Table 1. Broadcast ephemeris difference between BDS and QZSS.

	BDS	QZSS
Geocentric gravitational constant	$3.986004418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$	$3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$
Rate of earth rotation	$7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$	$7.2921151467 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$
Coordinate system	CGCS2000	JGS (IGb08)
Time system	BDT (GPST-14 second)	QZSS (same with GPST)
Subframe frequency	6 second for D1 (IGSO, MEO) 0.6 second for D2 (GEO)	6 second
Broadcast ephemeris update	1 hour	1 hour
Time of ephemeris	Updated time	After 1 hour from updated time
Ephemeris update parameters	AODE/AODC	IODE/IODC
Group delay parameters	Tgd1 (B1/B3) Tgd2 (B2/B3)	Tgd (L1)
Satellite status parameter	SatH1	SV health

위치 및 시계 오차를 계산하고, 이를 MGEX products와 비교를 통해 각 시스템의 방송궤도력 정확도를 분석하였다. 비교 대상은 KPS와 유사한 지상 궤적 (Ground track)과 서비스 범위를 가진 각 시스템의 IGSO와 GEO 위성이며 위성의 위치와 시계 오차 비교를 위해 Standard Product 3 (SP3)와 CLK 파일을 사용하였다.

2. BDS와 QZSS의 방송궤도력 차이

Cabinet Office (2018)와 China Satellite Navigation Office (2013)에 따르면 BDS, QZSS 모두 5개의 서브프레임 (Subframe)으로 구성되어 있으며 1개의 서브프레임은 10개의 워드 (Word)로 구성되어 있다. BDS는 D1, D2 NAV 두개로 구분하여 방송하고 있으며 D1은 IGSO와 Medium Earth Orbit (MEO)를 D2는 GEO의 정보를 담고 있다. QZSS는 따로 구분하지 않고 방송하고 있으며 Legacy Navigation (LNAV)로 명명하고 있다. GPS 현대화에 따라 QZSS는 Civil Navigation (CNAV)도 방송하는 것으로 Interface Control Document (ICD)에 나타나 있으나 Gurtner & Estey (2018)는 CNAV와 관련된 표준 (RINEX, Receiver Independent Exchange)을 표기하지 않았고 아직 테스트 중인 것으로 판단되어 이 연구에서는 제외하였다.

서브프레임은 실시간으로 위성의 위치를 계산하고 위치결정에 적용하기 위한 정보를 담고 있다. BDS의 D1, D2 데이터는 각각 6초, 0.6초마다 제공되며 QZSS는 6초마다 제공된다. 두 궤도력은 1시간마다 업데이트가 되나 BDS의 경우 업데이트된 시간의 궤도력을 제공하는 반면 QZSS는 업데이트된 시간에서 1시간 이후의 궤도력을 제공한다. 현재 시간의 week second가 0이면 BDS의 Time of Ephemeris (TOE)는 0초의 궤도력을 QZSS는 7,200초의 궤도력을 제공한다.

좌표계의 경우 BDS는 China Geodetic Coordinate System (CGCS) 2000을 사용하며 QZSS의 경우 Japan Geodetic System (JGS)을 사용한다. Cheng et al. (2009), Ma et al. (2018), Malys (2018), QZS System Service Inc. (2017)에 따르면 International Terrestrial Reference Frame (ITRF), World Geodetic System (WGS)1984, CGCS2000, JGS 좌표계간의 차이는 cm 수준이다.

시간계의 경우 BDS는 BDS Time (BDT), QZSS는 QZSS Time (QZSST)을 사용하며 GPS와 동일하게 시스템 시간에 윤초를 고려하지 않는다. 그러나 QZSS는 GPS Time (GPST)을 그대로 사

용하지만 BDS는 시스템 시작 시간에 맞춰 있어 두 시스템간 week second 차이는 14초가 발생하며 week number는 1356주 차이가 발생한다 (Kong et al. 2016).

위성 위치와 시계 오차 계산을 위한 파라미터는 서브프레임 구조에는 차이가 있지만 계산을 위해 제공되는 파라미터는 큰 차이가 없다. 차이점으로는 궤도력의 업데이트를 확인할 수 있는 인자를 BDS는 Age of Data, Ephemeris/Clock (AODE/AODC)로 QZSS는 Issue of Data Ephemeris/Clock (IODE/IODC) 명명하여 사용하고 있고 위성시계 오차 보정을 위한 그룹 딜레이 (Group delay) 값을 BDS는 B1과 B2 신호에 대해 따로 제공하고 있는 반면 QZSS는 L1 신호에 대해서만 제공하고 있으며, 위성의 상태와 관련된 인자를 BDS는 SatH1으로 QZSS는 SV health로 명명하여 방송하고 있다 (China Satellite Navigation Office 2013, Cabinet Office 2018, Gurtner & Estey 2018). 두 시스템의 차이점을 요약하면 Table 1과 같다.

위성시계 오차를 계산하는 방법은 BDS, QZSS 모두 동일한 알고리즘을 사용하며 Eq. (1)과 같다.

$$t_{brdc}^{\epsilon} = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2 \quad (1)$$

여기서 t_{brdc}^{ϵ} 는 위성시계 오차, a_{f0} 는 위성시계 바이어스 (bias) 보정계수, a_{f1} 는 위성시계 드리프트 (drift) 보정계수, t 는 위성시계 오차를 계산하고자 하는 시간, t_{oc} 는 궤도요소의 기준 시간, a_{f2} 는 위성시계 드리프트 변화 보정계수이다.

위성 위치의 경우 BDS의 GEO 위성만 다른 알고리즘을 사용한다. 승교점 적경 (longitude of ascending node)을 계산할 때 위성의 위치를 계산하고자 하는 시간에 지구자전각속도 (rate of earth rotation)를 고려하지 않고 CGCS2000 좌표계로 계산할 때 회전 행렬을 이용하여 고려해준다. Eq. (2)는 BDS GEO 위성의 승교점 적경 계산식이다.

$$\Omega_k = \Omega_0 + \dot{\Omega}t_k - \dot{\Omega}_e t_{oe} \quad (2)$$

여기서 Ω_k 는 승교점 적경, Ω_0 는 기준시각에서의 승교점 적경, $\dot{\Omega}$ 은 적경 변화율로 다른 위성은 적경 변화율에서 지구자전각속도를 빼주고 t_k 를 곱한다. t_k 는 위성 위치를 계산할 시간, $\dot{\Omega}_e$ 는 지구회전 각속도, t_{oe} 는 궤도요소의 기준 시각으로 Eq. (1)의 t_{oc} 와는 다르나 대부분 동일한 값을 가진다.

Table 2. ACs of MGEX products from DOY166 to 172 in 2020.

AC	CODE	GFZ	JAXA	SAO	WHU
Precision	Final	Rapid	Final	Rapid	Final
Satellite position sampling rate (min)	5	5	5	5	15
Clock sampling rate (sec)	30	30	30	30	30
Frame	IGb14	IGS14	IGS14	IGS14	IGb14
BDS PRN	6, 7, 8, 9, 10, 13, 16 (IGSO)	1, 2, 3, 4, 5 (GEO)		1, 2, 3, 4, 5 (GEO)	1, 2, 3, 4, 5 (GEO)
QZSS PRN	1, 2, 3 (IGSO)	6, 7, 8, 9, 10, 13, 16, 38, 39, 40 (IGSO)	1 (IGSO)	6, 7, 8, 9, 10, 13, 16, 38, 39 (IGSO)	6, 7, 8, 9, 10, 13, 16 (IGSO)
		1, 2, 3 (IGSO) 7 (GEO)		-	1, 2, 3 (IGSO) 7 (GEO)

Eq. (3)은 궤도면 좌표에서 사용자가 정의한 관성좌표계로 계산하는 방법으로 다른 위성의 위치 계산과 동일하다.

$$\begin{aligned} X_{GK} &= x_k \cos \Omega_k - y_k \cos i_k \sin \Omega_k \\ Y_{GK} &= x_k \sin \Omega_k + y_k \cos i_k \cos \Omega_k \\ Z_{GK} &= y_k \sin i_k \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 X_{GK} 는 X 좌표, x_k 는 궤도면 상의 좌표, i_k 는 궤도 경사각이다.

CGCS2000 좌표계로 계산하는 식은 Eq. (4)와 같으며, 회전 행렬식은 Eq. (5)와 같다 (China Satellite Navigation Office 2013).

$$\begin{bmatrix} X_{GK} \\ Y_{GK} \\ Z_{GK} \end{bmatrix} = R_z(\hat{\Omega}_e t_k) R_x(-5^\circ) \begin{bmatrix} X_{GK} \\ Y_{GK} \\ Z_{GK} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, R_x(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 위성 위치 및 시계 오차 분석 방법

이 연구에서는 MGEX의 방송궤도력과 정밀궤도력 (Final product), 그리고 CLK 파일을 이용하여 위성의 위치와 시계 오차를 비교하였다. 방송궤도력은 RINEX 파일을 이용하였으며 분석 기간은 2020년 Day of Year (DOY) 166부터 172까지이다. Table 2는 분석된 기간의 AC별 데이터 제공현황으로 더 많은 항목들이 있지만 본 연구에 필요한 항목들만 나열하였다.

3.1 위성 위치

Table 2를 보면 CODE와 일본 우주항공연구개발기구 (JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency) 그리고 우한대학교 (WHU, Wuhan University)는 정밀궤도력을 제공하는 반면 GFZ와 상하이 천문대 (SAO, Shanghai Astronomical Observatory)는 신속궤도력 (Rapid product)을 제공한다. IGS Products (2020)

에 의하면 신속궤도력과 정밀궤도력의 차이는 거의 없다고 할 수 있으며 IGS 또한 AC들의 product를 가중 평균하여 산출 (Ray & Senior 2005)하므로 두 궤도력의 정확도는 큰 차이가 없다고 판단하였다.

좌표계와 관련하여 CODE와 WHU는 IGB14 좌표계로 다른 3개의 기관들은 IGS14 좌표계로 정보를 제공하며, IGSMail (2020)에 따르면 IGS14와 IGB14의 차이는 mm 수준이다. ITRF와 IGS (또는 IGB)는 동기화 (Aligned)되어 있고 각 위성항법시스템들은 ITRF와 cm 수준의 차이이며 선행연구들의 결과에서도 MGEX와 방송궤도력의 차이는 m 수준으로 나타났으므로 비교 결과에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되어 좌표계 일치를 위한 좌표변환은 따로 수행하지 않았다.

그러나 Kouba (2015)에 따르면 IGS의 정밀궤도력 위성 좌표는 위성의 질량중심 (Center of mass) 기준이고 실시간으로 방송되는 방송궤도력의 위성 좌표는 위성 안테나 (Satellite antenna phase center) 기준이므로 이에 대한 보정이 필요하다. IGS는 이와 관련된 표준 (ANTEX, Antenna Exchange)을 제공하고 있으므로 이 연구에서는 1.4 버전을 사용하였다. ANTEX는 위성별, 위성의 주파수별로 질량중심과 안테나와의 차이 값 (offset)을 제공하고 있으나 이 연구에서는 BDS의 경우 BI, QZSS의 경우 L1에 해당하는 값을 이용하여 보정하였다.

Offset을 보정하기 위해서는 태양의 위치가 필요하다 (Xu 2008). 태양의 위치는 천문알마낙 (Astronomical Almanac) 또는 미국의 제트추진연구소 (JPL, Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 궤도력 (DE, Development Ephemeris)을 이용하여 계산하는 방법이 있으나 JPL의 DE로 계산하는 것이 가장 정확하다 (Vallado & McClain 2013). JPL DE는 여러가지 버전이 있으나 이 연구에서는 GNSS 정밀궤도결정 (POD, Precise Orbit Determination)에 가장 많이 사용되는 405를 이용하였다. DE405는 천구기준좌표계 (ICRF, International Celestial Reference Frame)의 태양계 질량 중심 (Solar system barycentric position of the centers) 좌표를 제공 (JPL 2015)하므로 지구중심관성좌표계 (ECI, Earth Centered Inertial)로 변환한 뒤 지구중심지구 고정좌표계 (ECEF, Earth Centered, Earth Fixed)로 변환하였다. ECI에서 ECEF로 변환은 International Astronomical Union 76/Fundamental Katalog 5 (IAU76/FK5) Reduction을 사용하였으며 좌표 변환을 위해 필요한 지구회전계수 (EOP, Earth Orientation Parameter)는 IGS에서 제공하는 정밀 데이터 파일 (final ERP, Earth Rotation Parameter)을 사용하였다. ERP 파일은 하루단위로 값이 제공되므로 스플라인 보간법 (Spline interpolation)을 적용하여 ECEF 좌표계의 태양위치를 산출하였다.

방송궤도력으로 계산한 위성 위치는 실시간을 가정하여 계산하였고 MGEX product가 제공하는 시점에서만 비교를 수행하였으며 방송궤도력에서 위성의 상태 (Status)가 정상 (0)이 아닌 위성은 제외하였다.

XYZ로 표현되는 위치오차는 직관적인 판단이 어렵다. 수신기의 위치오차를 NEU (North, East, Up)로 변환하여 표현하는 것과 같이 위성의 위치오차도 이러한 변환이 가능하며 Radial, Along-track, Cross-track (RAC)로 표현한다. 위성의 위치오차를 RAC로 표현하기 위해서는 위성의 속도 정보가 필요하다 (Hofmann-

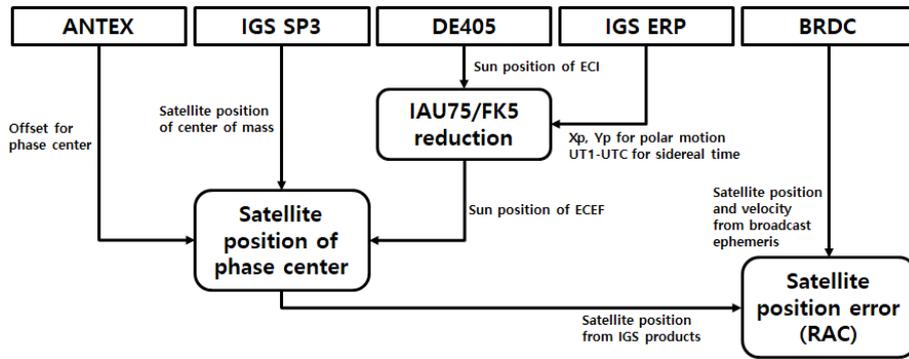


Fig. 1. Block diagram for satellite position error analysis.

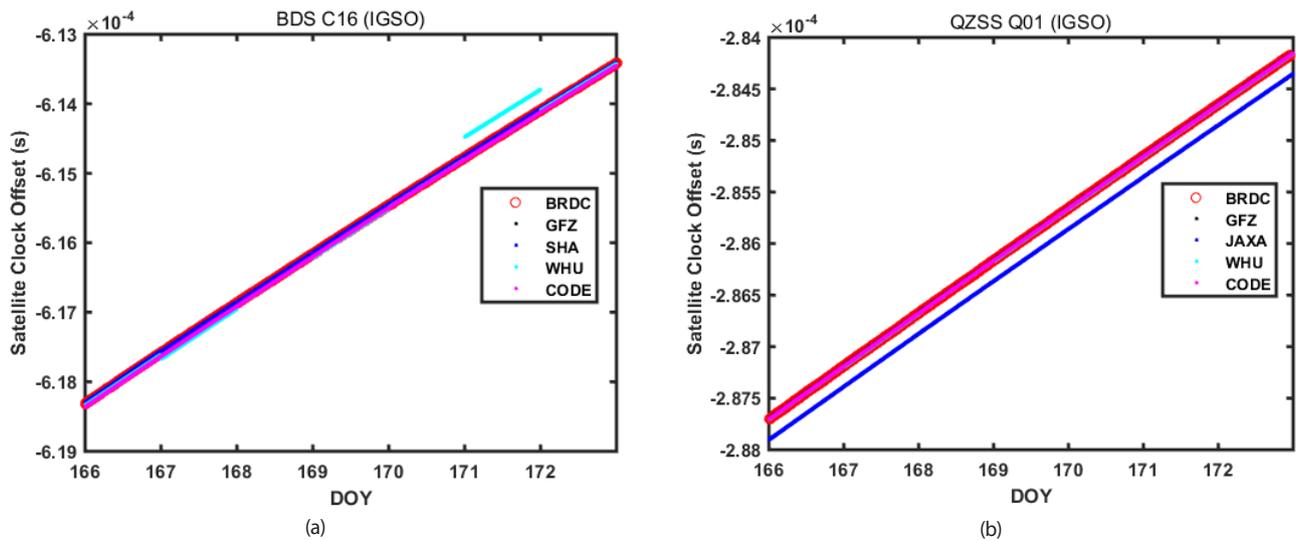


Fig. 2. Satellite clock errors. (a) discontinuity at DOY171 in WHU product, (b) biased in JAXA products.

Table 3. Reference clock station of AC's in CLK header file.

DOY	CODE	GFZ	JAXA	SAO	WHU
166	OPMT		BRUX		NIST
167	NIST		BRUX		NIST
168	MGUE	Aligned to	BRUX		NIST
169	MGUE	broadcast	BRUX	-	NIST
170	PTBB	GPS time	BRUX		NIST
171	BRUX		BRUX		NIST
172	OPMT		BRUX		NIST

Wellenhop et al. 2008). 위성의 속도 정보는 MGEX products에서 제공되지 않으나 방송궤도력을 이용하여 계산할 수 있으며 위성 위치를 계산하는 알고리즘에서 시간과 관련된 파라미터들을 편미분 함으로써 계산이 가능하다 (Remondi 2004, Zhang et al. 2006, Liu & Guo 2014). Fig. 1에 위 내용을 요약하여 위성 위치 분석을 위한 블록도를 나타내었다.

위성의 위치 정확도를 확인하기 위해 Root Mean Square Error (RMSE)를 산출하였으며 오차의 분포를 확인하기 위해 평균을 산출하고 비교하였다. RMSE와 평균은 AC, Pseudo Range Number (PRN) 별로 산출하였다. RMSE 계산식은 Eq. (6)과 같으며, $RAC_{brdc-AC}^s$ 는 방송궤도력과 AC 차이를 RAC로 변환한 값이며 n 은 데이터의 개수이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RAC_{brdc-AC}^s)^2}{n}} \tag{6}$$

3.2 위성시계 오차

AC들은 IGS 수신국을 이용하여 위성 위치와 시계 오차를 계산한다 (Wang et al. 2019). 위성시계 오차를 추정하는 방법으로는 여러가지가 있다. 대표적으로는 원자시계가 장착되어 있는 수신국을 기준으로 생성하는 방법, 모든 수신국 시계의 앙상블 (ensemble)을 위해 평균을 0으로 가정 (Zero-mean Condition) 하는 방법, 모든 위성을 선택하거나 또는 특정 위성만 선택하여 평균을 0으로 가정하는 방법 등이 있다 (Steigenberger & Montenbruck 2019).

Table 3은 AC들이 제공하는 CLK 파일 헤더 (header)에 나타나 있는 기준시계 (Reference clock) 수신국 정보이다. CODE는 매일 다른 수신국을 기준으로 CLK 파일을 생성하였으며 JAXA와 WHU는 동일한 수신국을 기준으로 CLK 파일을 생성하였다. GFZ와 SAO는 기준 수신국 정보가 없으나 GFZ는 GPS 방송궤도력 시각으로 동기시켰다.

Fig. 2는 방송궤도력과 AC의 위성시계 오차를 나타내었다.

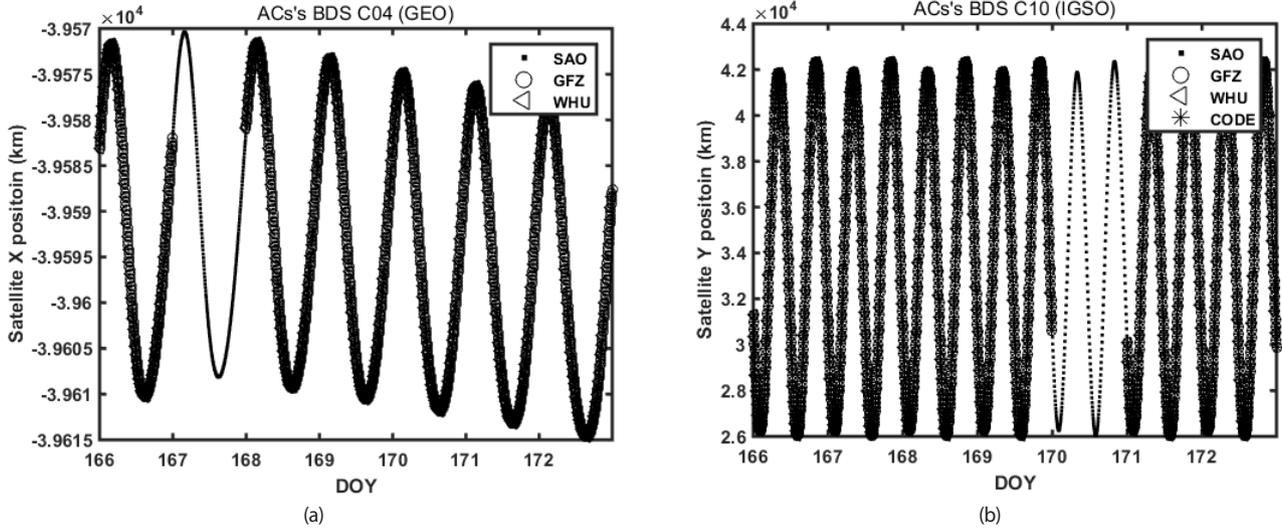


Fig. 3. BDS C04 data at DOY167. (a) and C10 data at DOY170, (b) in SAO products only.

Fig. 2a를 보면 DOY171에 WHU의 위성시계 오차의 불연속성이 가장 크게 나타났으며 Fig. 2b에는 JAXA의 위성시계 오차가 다른 AC와 비교하여 편차 (bias)가 매우 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이러한 불연속성은 모든 AC와 방송궤도력에서 나타났으며 편차 또한 AC별로 차이가 있음을 확인할 수 있었다. CODE는 DOY168과 169를 제외하고 매일 다른 수신국을 기준으로 위성시계 오차를 추정함에도 다른 AC들과 비교하여 상대적으로 작은 불연속성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. Table 3의 DOY171을 보면 CODE와 JAXA는 동일한 수신국을 기준으로 위성시계 오차를 추정하였지만 Fig. 2b에서는 다른 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 불연속성과 편차를 제거하기 위해 일별로 방송궤도력과 MGEX 차이의 평균을 방송궤도력에서 제거하고 RMS를 계산하였다. RMS 계산을 위한 식은 Eq. (7)과 같으며 t_{brdc}^s 는 방송궤도력의 위성시계 오차, t_{AC}^s 는 AC의 위성시계 오차, n 은 데이터의 개수이다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left(t_{brdc}^s - \frac{\sum_{i=1}^n (t_{brdc}^s - t_{AC}^s)}{n} \right) - t_{AC}^s \right\}^2}{n}} \quad (7)$$

4. 분석 결과

4.1 위성 위치

BDS의 RMSE를 산출하는 과정에서 SAO의 C04, C10 오차가 다른 AC와 비교하여 다소 크게 나와 확인한 결과 Fig. 3과 같이 다른 AC에서 제공하지 않는 날짜에 SAO만 데이터를 제공하는 것으로 나타났다. DOY167에서 C04, DOY170에서 C10을 제거하고 다시 계산한 결과 Table 4와 같이 오차가 줄었으며 다른 AC와 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

BDS GEO의 결과는 Table 5와 같으며 모든 AC의 평균값으로 나타내었다. BDS GEO 위성은 radial 방향으로 RMSE 평균 2.85

Table 4. BDS C04 and C10's 3D RMSE of analysis period before and after data elimination using SAO products.

PRN	Before (m)	After (m)
C04	29.67	13.75
C10	139.52	4.72

Table 5. RMSE and mean of BDS GEO (unit of meter).

PRN	RMSE				Mean			Type
	R	A	C	3D	R	A	C	
C01	3.08	8.60	8.71	12.6	3.05	7.25	-0.78	BDS-2
C02	2.65	3.61	3.50	5.73	2.61	2.76	-0.35	BDS-2
C03	3.69	3.24	3.09	5.87	3.68	2.69	-0.46	BDS-2
C04	2.38	9.80	9.53	13.88	2.24	6.49	-0.35	BDS-2
C05	2.47	6.42	7.28	10.02	2.44	-5.60	-0.65	BDS-2
AVE.	2.85	6.34	6.42	9.63	2.80	2.72	-0.52	

m, along-track 방향으로 6.34 m, cross-track 방향으로 6.42 m로 나타났다. Radial 방향으로 평균의 크기가 양수인 것으로 보아 방송궤도력으로 산출한 위성 위치는 실제 궤도보다 큰 반경으로 움직이고 있는 것으로 판단된다.

Cross-track의 경우 평균 RMSE는 along-track과 유사하나 평균이 0에 가까운 것으로 보아 궤도면을 따라 오차가 고르게 분포되어 있는 것으로 판단되어 히스토그램으로 확인하였다. Fig. 4a는 C04의 히스토그램으로 위에서부터 radial, along-track, cross-track를 나타낸다. Along-track과 cross-track은 radial 보다 0에 중점적으로 분포되어 있는 것을 확인할 수 있으며 최대 약 30 m 이상 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 4b의 cross-track 방향과 같이 오차는 0을 중심으로 고르게 분포되어 있지만 오차의 크기가 0에 중점적으로 분포되어 있지 않은 경우도 있었다.

Table 6은 BDS GEO 위성이 발사된 날짜와 오차의 3D RMSE, 그리고 위성 배치 위치를 나타낸다. 분석된 기간의 BDS GEO 위성은 모두 BDS-2 타입으로 가장 최근에 발사된 C01의 경우 12년 도에 발사된 C02보다 오차가 크게 나타났으며 비슷한 위치에 있는 C03과도 오차가 약 2배 이상 크게 나타난 것을 확인할 수 있

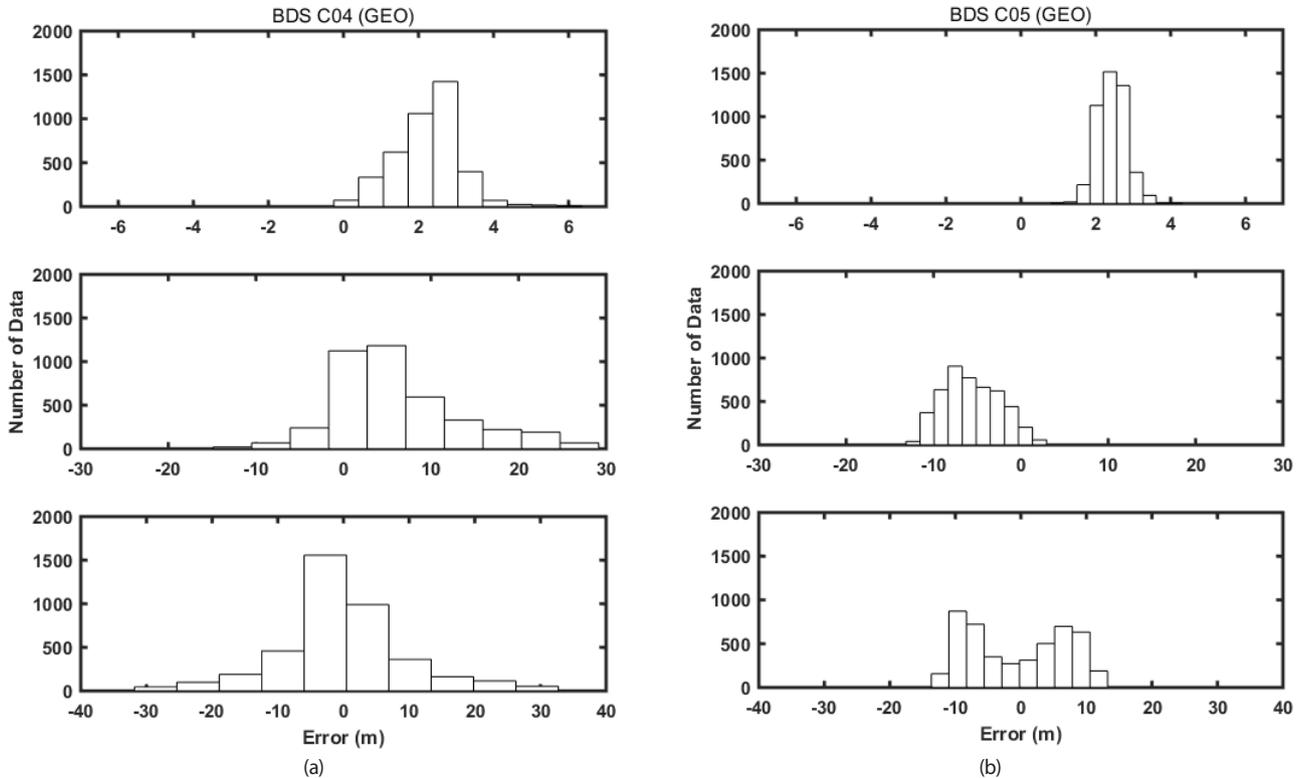


Fig. 4. Histogram of BDS C04 (a) and C05 (b) Radial (top), along-track (middle), cross-track (bottom) errors.

Table 6. Type, launch data, orbit, 3D RMSE of BDS GEO satellites.

PRN	Type	Launch date	Orbit	3D RMSE (m)
C01	BDS-2	2019.05.17.	140.00° E	12.65
C02	BDS-2	2012.10.25.	80.30° E	5.73
C03	BDS-2	2016.06.12.	144.50° E	5.87
C04	BDS-2	2010.11.01.	160.00° E	13.88
C05	BDS-2	2012.02.25.	58.75° E	10.02

Table 7. RMSE and mean of BDS IGSO (unit of meter).

PRN	RMSE				Mean			Type
	R	A	C	3D	R	A	C	
C06	1.94	0.55	0.66	2.13	1.93	-0.30	0.23	BDS-2
C07	2.99	0.88	1.20	3.34	2.98	-0.40	0.02	BDS-2
C08	2.58	1.07	1.57	3.20	2.56	0.25	0.18	BDS-2
C09	2.04	0.82	1.43	2.62	2.03	-0.24	-0.10	BDS-2
C10	2.56	2.48	3.12	4.74	2.37	-0.54	0.43	BDS-2
C13	1.70	0.92	1.78	2.63	1.69	0.31	0.03	BDS-2
C16	3.14	0.78	1.23	3.46	3.13	-0.31	0.01	BDS-2
C38	0.36	0.80	0.73	1.15	0.31	0.49	-0.02	BDS-3
C39	0.42	0.49	0.57	0.87	0.40	0.37	0.09	BDS-3
C40	0.48	0.33	0.47	0.75	0.45	-0.03	-0.01	BDS-3
AVE. (all)	1.82	0.91	1.28	2.49	1.79	-0.04	0.09	
AVE.(BDS-2)	2.42	1.07	1.57	3.16	2.38	-0.18	0.11	
AVE.(BDS-3)	0.42	0.54	0.59	0.92	0.39	0.28	0.02	

다. 또한 같은 년도에 발사된 C02와 C05의 경우에도 오차의 차이가 비교적 크게 나타난 것으로 보아 BDS GEO 위성은 타입, 발사 시기, 위치에 따른 오차는 상관관계가 없는 것으로 판단된다.

BDS IGSO의 결과는 Table 7과 같으며 모든 AC의 평균값으로 나타내었다. BDS IGSO 위성은 radial 방향으로 RMSE 평균 1.82 m, along-track 방향으로 0.91 m, cross-track 방향으로 1.28 m로

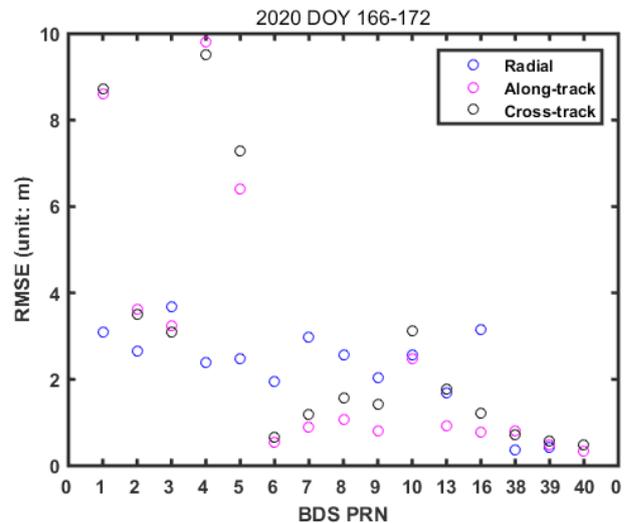


Fig. 5. Satellite position error RMSE averaged all AC in analysis period of BDS PRNs.

나타났다. IGSO 위성도 GEO 위성과 유사하게 radial 방향으로 평균의 크기가 양수로 나타났으며 cross-track 방향의 평균이 작게 나타났다. 분석 기간에 사용된 IGSO 위성은 C06부터 C16까지는 BDS-2 타입, C38부터 C40까지는 BDS-3 타입 위성이다. BDS-2 타입 위성은 C16이 2018년 7월 10일로 가장 늦게 발사되었고 BDS-3 타입 위성은 2019년도에 모두 발사되었다. BDS-2 타입의 평균 3D RMSE는 약 3.16 m이고 BDS-3 타입은 약 0.92 m로 위치

Table 8. RMSE and mean of QZSS (unit of meter).

PRN	RMSE				Mean			Type
	R	A	C	3D	R	A	C	
J01 (IGSO)	0.56	0.35	0.40	0.77	-0.37	-0.19	-0.13	IQ
J02 (IGSO)	1.87	0.39	0.66	2.02	1.74	-0.07	-0.13	IIQ
J03 (IGSO)	1.60	0.35	0.40	1.69	1.52	0.04	0.15	IIQ
J07 (GEO)	0.47	4.79	5.82	7.60	-0.25	0.17	-0.01	IIG
AVE/(IGSO)	1.34	0.36	0.49	1.49	0.97	-0.08	-0.03	

Table 9. Satellite clock error RMS of BDS (unit of nanosecond).

PRN	RMS (ns)	Orbit	Type
C01	1.26	GEO	BDS-2
C02	1.24	GEO	BDS-2
C03	1.01	GEO	BDS-2
C04	1.60	GEO	BDS-2
C05	1.29	GEO	BDS-2
C06	3.96	IGSO	BDS-2
C07	1.85	IGSO	BDS-2
C08	3.64	IGSO	BDS-2
C09	2.04	IGSO	BDS-2
C10	2.02	IGSO	BDS-2
C13	2.31	IGSO	BDS-2
C16	1.76	IGSO	BDS-2
C38	1.40	IGSO	BDS-3
C39	0.96	IGSO	BDS-3
C40	0.85	IGSO	BDS-3
AVE. (GEO)	1.28		
AVE. (IGSO)	2.08		
AVE. (BDS-2)	2.00		
AVE. (BDS-3)	1.07		

정확도가 기존 타입에 비해 매우 향상된 것으로 나타났다.

Fig. 5는 Tables 5와 6의 RMSE 결과를 도식화한 것이다. BDS-2의 경우 radial 방향의 오차는 GEO, IGSO 모두 유사한 크기를 나타내는 것을 확인할 수 있으나 GEO가 IGSO보다 상대적으로 along-track, cross-track 오차가 큰 것을 확인할 수 있다. BDS-3의 경우 BDS-2보다 모든 면에서 위치 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

QZSS의 결과는 Table 8과 같으며 모든 AC의 평균값으로 나타내었다. QZSS는 3개의 IGSO와 1개의 GEO 위성으로 구성되어 있어 따로 구분하여 나타내지 않았다. QZSS IGSO 위성은 radial 방향으로 평균 1.34 m, along-track 방향으로 0.36 m, cross-track 방향으로 0.49 m로 나타났다. BDS와 비교했을 때 QZSS가 IGSO, GEO 모두 상대적으로 작은 오차를 보이고 있으나 분석 기간에 MGEX에서 제공하는 데이터와 운용되고 있는 위성의 개수가 상대적으로 작아 직접적인 판단은 어려운 것으로 판단된다. 그러나 BDS의 경우 최근에 발사된 위성의 정확도가 향상된 반면 QZSS의 경우 2010년에 발사된 J01이 2017년에 발사된 J02, J03보다 더 나은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. J01의 위성 타입은 IQ, J02, J03의 위성 타입은 IIQ로 BDS의 분석 결과와 비교하여 위성 타입에 따라 위치 정확도가 차이나는 것으로 판단된다. Fig. 6은 Table 8의 RMSE 결과를 도식화한 것이다. BDS와 동일하게 IGSO가 GEO보다 along-track, cross-track 오차가 작은 것을 확인할 수 있으며 IIQ는 IQ보다 radial 방향으로 오차가 크게 나타난 것을 확인할 수 있다.

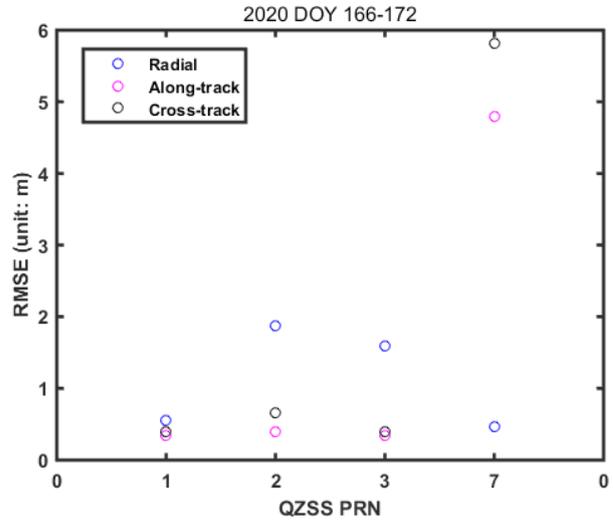


Fig. 6. Satellite position error RMSE averaged all AC in analysis period of QZSS PRNs.

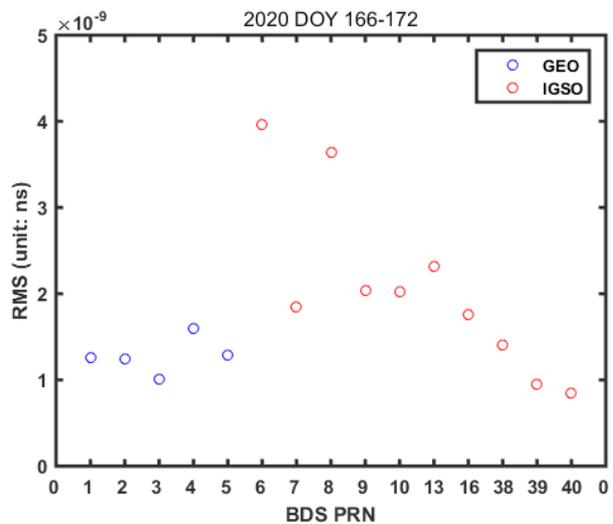


Fig. 7. Clock error RMS averaged all AC in analysis period of BDS PRNs.

4.2 위성시계 오차

BDS의 결과는 Table 9에 나타내었다. GEO 위성의 평균 RMS는 1.28 ns, IGSO 위성의 평균 RMS는 2.08 ns로 위성 위치와 다르게 GEO 위성의 RMS가 더 작게 나타났다. BDS-2와 BDS-3로 구분하면 BDS-2는 2 ns, BDS-3는 1.07 ns로 BDS-3 위성이 더 나은 결과를 나타내었다. Fig. 7은 Table 9를 도식화한 것으로 오차가 큰 C06, C08을 제외하더라도 같은 타입에서는 GEO가 IGSO보다 RMS가 작은 것을 확인할 수 있다.

QZSS 결과는 Table 10에 나타내었다. IGSO 위성의 평균 RMS는 1.24 ns로 BDS와 동일하게 GEO위성의 RMS가 IGSO 위성보다 작게 나타난 것으로 보이지만 Fig. 8을 보면 상대적으로 오차가 큰 J02로 인해 나타난 결과라 할 수 있다. 그러나 J02를 제외하더라도 IQ 위성이 위성 위치와 동일하게 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. BDS와 비교하였을 때 QZSS가 위성

Table 10. Satellite clock error RMS of QZSS (unit of nanosecond).

PRN	RMS (ns)	Orbit	Type
J01	1.04	IGSO	IQ
J02	1.55	IGSO	IIQ
J03	1.14	IGSO	IIQ
J07	1.12	GEO	IIQ
AVE. (IGSO)	1.24		
AVE. (IIQ)	1.35		

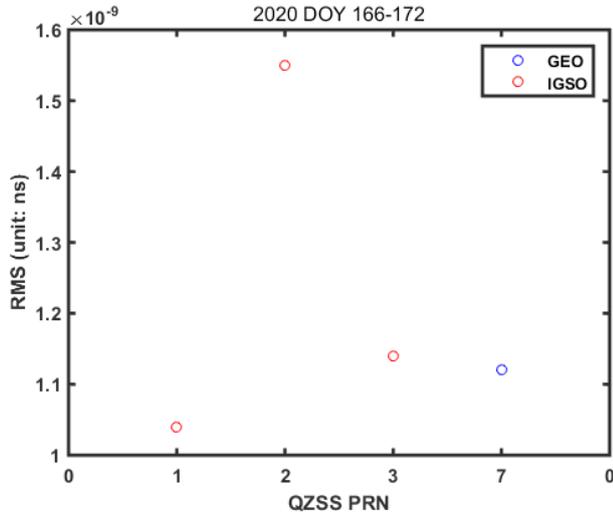


Fig. 8. Clock error RMS averaged all AC in analysis period of QZSS PRNs.

위치 분석 결과와 동일하게 위성시계 오차에서도 BDS 보다 좋게 나타났으나 위성의 궤도, 개수 등이 유사한 조건의 비교 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 BDS와 QZSS의 IGSO, GEO 위성 위치와 시계 오차를 방송궤도력으로 계산하고 MGEX에서 제공하는 AC들의 products와 비교하였다. 위성 위치는 radial, along-track, cross-track으로 구분하여 분석하였으며 GEO 위성의 경우 radial 방향의 RMSE가 along-track, cross-track 방향보다 작게 나타났으나 대부분의 IGSO 위성이 경우 radial 방향의 RMSE가 크게 나왔다. BDS의 경우 가장 최근에 궤도에 안착된 BDS-3 위성의 위치 정확도가 BDS-2와 비교하여 많이 향상되었으나 QZSS의 경우 반대로 최근에 발사된 IIQ 위성보다 가장 먼저 발사된 IQ 위성이 가장 좋은 결과를 나타내어 장시간의 데이터 분석과 같은 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. BDS, QZSS 모두 GEO 보다 IGSO 위성의 RMSE가 작게 나타났다. 위성시계 오차의 경우 AC의 일별 불연속성 그리고 서로 다른 기준 시계 선택으로 인한 편차가 발생하여 직접적인 비교가 불가능하였다. 불연속성, 편차를 제거하고 비교한 결과 BDS는 위성 위치와는 다르게 위성시계 오차는 GEO 위성에서 더 좋은 결과를 나타내었다. 또한 다른 PRN과 비교하여 상대적으로 위치 정확도가 좋은 BDS-3 위성에서 그리고 QZSS IQ 위성에서 가장 좋은 결과를 나타내었다. MGEX의 데이

터 제공 현황과 실제 운용되고 있는 위성 개수가 상이하여 직접적인 비교는 어렵지만 본 연구에서는 위성 위치와 위성시계 오차 모두 QZSS의 결과가 BDS보다 좋게 나온 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 알고리즘은 추후 KPS 개발에 필요한 소프트웨어 모듈의 일부로 사용될 수 있을 것으로 판단되며 연구결과는 KPS 개발의 기술적 베이스라인 (baseline) 설정을 위한 참고 자료 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H.Choi; methodology, E.Son; software, E.Son; validation, E.Son, H.Choi and J.Joo; formal analysis, E.Son, H.Choi and J.Joo; data curation, E.Son; writing—original draft preparation, E.Son; writing—review and editing, E.Son, H.Choi, J.Joo and M.B.Heo; visualization, E.Son; supervision, M.B.Heo; project administration, J.Joo;

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Cabinet Office 2018, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Satellite Positioning, Navigation and Timing Service (IS-QZSS-PNT-003)

Cheng, P., Wen, H., Cheng, Y., & Wang, H. 2009, Parameters of the CGCS 2000 ellipsoid and comparisons with GRS 80 and WGS 84, *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 38, 189-194

China Satellite Navigation Office 2013, BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.0)

Gurtner, W. & Estey, L. 2018, RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.04

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2008, GNSS: Global Navigation Satellite System: GPS, GLONASS & More (Wien: Springer-Verlag)

IGS About [Internet], cited 2020, available from: <http://www.igs.org/about>

IGS Products [Internet], cited 2020, available from: <http://www.igs.org/products>

IGSMail, Switch to IGB14 reference frame [Internet], cited 2020 Apr 14, available from: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>

Jiao, G., Song, S., Liu, Y., Su, K., Cheng, N., et al. 2020, Analysis and Assessment of BDS-2 and BDS-3 Broadcast

- Ephemeris: Accuracy, the Datum of Broadcast Clocks and Its Impact on Single Point Positioning, *Remote Sens*, 12, 2081-2104. <https://doi.org/10.3390/rs12132081>
- JPL, Ascii format [Internet], cited 2015, available from: ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/ascii/ascii_format.txt/
- Kong, J., Mao, X., & Li, S. 2016, BDS/GPS Dual Systems Positioning Based on the Modified SR-UKF Algorithm, *Sensors*, 16, 635. <https://doi.org/10.3390/s16050635>
- Kouba, J. 2015, A Guide to using International GNSS Service (IGS) Products, Natural Resources Canada
- Li, X., Zhu, Y., Zheng, K., Yuan, Y., Liu, G., et al. 2020, Precise Orbit and Clock Products of Galileo, BDS and QZSS from MGEX Since 2018: Comparison and PPP Validation, *Remote Sens*, 12, 1415-1436. <https://doi.org/10.3390/rs12091415>
- Liu, G. & Guo, J. 2014, Real-time Determination of a BDS Satellite's Velocity using the Broadcast Ephemeris, 2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, 18-20 Sept. 2014, Harbin, China, pp.478-483. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2014.104>
- Ma, X., Tang, C., Wang, X., Jin, C., & Ma, X. 2018, Accuracy Assessment of Broadcast Ephemerides for Quasi-Zenith Satellite System, in 2018 China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018 Proceedings, 23-25 May 2018, Harbin, China. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0029-5_1
- Malys, S. 2018, Evolution of the World Geodetic System 1984 (WGS 84) Terrestrial Reference Frame, International Committee on Global Navigation Satellite System Working Group Meeting, Xi'an, China, 6-8 Nov 2018
- MGEX, MGEX Home [Internet], cited 2020 July 6, available from: <http://mgex.igs.org/>
- QZS System Service Inc. (QSS) 2017, Time and Coordinate System for QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) PNT (Positioning, Navigation and Timing service), International Committee on Global Navigation Satellite System Working Group Meeting, Kyoto, Japan, 2-7 Dec 2017
- Ray, J. & Senior, K. 2005, Geodetic Techniques for Time and Frequency Comparisons using GPS Phase and Code Measurements, *Metrologia*, 42, 215-232. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/4/005>
- Remondi, B. W. 2004, Computing Satellite Velocity using the Broadcast Ephemeris, *GPS Solutions*, 8, 181-183. <https://doi.org/10.1007/s10291-004-0094-6>
- Shin, M., Lim, D. W., Chun, S., & Heo, M. B. 2019, A Study on the Satellite Orbit Design for KPS Requirements, *JPNT*, 8, 215-223. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2019.8.4.215>
- Steigenberger, P. & Montenbruck, O. 2019, Consistency of MGEX Orbit and Clock Products, *Engineering*, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.12.005>
- Vallado, D. A. & McClain, W. D. 2013, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, Fourth Edition (Hawthorne: Microcosm Press)
- Wang, B., Chen, J., & Wang, B. 2019, Analysis of Galileo Clock Products of MGEX-ACs, 2019 European Navigation Conference (ENC), Warsaw, Poland, 9-12 Apr 2019. <https://doi.org/10.1109/EURONAV.2019.8714186>
- Xu, G. 2008, *Orbits* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag)
- Zhang, J., Zhang, K., Grenfell, R., & Deakin, R. 2006, GPS Satellite Velocity and Acceleration Determination using the Broadcast Ephemeris, *The Journal of Navigation*, 59, 293-305. <https://doi.org/10.1017/S0373463306003638>



Eunseong Son received a M.S. degree from Inha University in 2013. He is a senior researcher in the KARI. He is interested in real-time GNSS carrier phase-based relative positioning, integer ambiguity resolution, quality monitoring, satellite orbit determination etc.



Heonho Choi received a B.S. and Ph.D. degree in the Department of Electronics Engineering from Chungnam National University, Korea in 2007 and 2015, respectively. He is now working in Korea Aerospace Research Institute. His research interests include Precise positioning system, SBAS system engineering & performance analysis technologies.



Jungmin Joo received his Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 2015. He has been working at the Korea Aerospace Research Institute since 2004. He is currently the head of the Korean Positioning System (KPS) Technology Team at the Korea Aerospace Research Institute. His research interests include GNSS, SBAS, GBAS and Ionosphere monitoring.



Moon Beom Heo received a B.S. degree in mechanical engineering from Kyung-Hee University, Korea, in 1992 as well as M.S. and Ph.D. degrees in mechanical and aerospace engineering from the Illinois Institute of Technology, Chicago, in 1997 and 2004, respectively. He is currently the director of the Global Navigation Satellite System (GNSS) R&D Division at the Korea Aerospace Research Institute. His work is focused on global navigation satellite systems and their augmentation.