

Performance Analysis of BDSBAS and MSAS in Korea

Jae Hee Noh¹, Deok Won Lim², Ju Hyun Lee³, Gwang Hee Jo¹, Sang Jeong Lee^{1†}

¹Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Satellite Navigation Team, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

³Navcours Co., Ltd., Daejeon 34014, Korea

ABSTRACT

China has deployed BDS along with the service of SBAS by 2020. Currently, the correction information for testing BDSBAS is provided through the BDS BII signal. Many research on SBAS other than BDSBAS has been conducted in Korea. However, studies on BDSBAS are insufficient although Korea is included in both the coverage area of MSAS and BDSBAS. Therefore, it is necessary to continuously analyze the performance of MSAS and BDSBAS. In this paper, the performance of MSAS and BDSBAS in Korea, China, and Japan is analyzed in the aspect of positioning accuracy using the GNSS RINEX data provided by IGS. A Software platform is designed to analyze the performance of GPS-only, BDS-only, GPS/MSAS and BDS/BDSBAS. From the result, it can be concluded that the accuracy enhancement can be hardly seen when using the correction information of MSAS and BDSBAS in Korea

Keywords: BDS, BDSBAS, MSAS

1. 서론

중국의 위성항법시스템인 Beidou Navigation Satellite System (BDS)는 2012년 2월부터 중국을 중심으로 주변 지역에 위성 항법서비스를 시작했으며, 2020년까지 BDS의 Global 서비스와 함께 Satellite Augmentation System (SBAS)가 동시에 제공 되도록 BDS를 구축하고 있다. BDS의 SBAS인 Beidou Satellite Augmentation System (BDSBAS)는 International Civil Aviation Organization (ICAO) 표준을 기반으로 설계 및 시험을 완료했다 (Lu 2018). BDSBAS는 2020년까지 총 3기의 정지궤도 위성을 발사하고 이를 이용하여 BDS B1C (1575.42 MHz) 신호와 BDS B2a (1176.45 MHz) 신호를 통해 2020년 6월부터 BDSBAS 공개서비스를 제공할 예정이다 (CSNO 2019). 현재까지 총 2기의 정지궤도

위성이 발사되었으며, 2020년 5월에 나머지 1기의 위성이 발사될 예정이다. 중국은 BDSBAS가 타 위성항법시스템의 보정 정보도 함께 제공할 수 있도록 하기 위해 Global Navigation Satellite System (GNSS) 신호를 처리할 수 있는 감시국을 중국 내에 30개를 구축하고, 주변국에 20개를 구축할 예정이다. BDSBAS는 다른 국가의 SBAS 서비스 수준보다 한 단계 높은 CAT-I 급 서비스를 목표로 개발되고 있으며, 공개서비스에 앞서 시험 및 검증을 위해 BDS-2의 정지궤도 위성의 BDS BII (1561.098 MHz) 신호를 통해 시험용 신호를 송출하고 있다. BDSBAS 시험용 신호는 BII 신호에 대한 보정 정보를 제공하며 이는 BDS BII Interface Control Document (ICD)에서 “Augmentation service information”으로 서술되어 있다 (BeiDou ICD 2016). 한국은 중국과 인접한 국가이기 때문에 BDSBAS의 서비스 영역에 한국을 포함하고 있어 국내에서 BDSBAS 보정 정보의 활용 가능성이 높다. 국내에서 미국의 Wide Area Augmentation System (WAAS), 유럽의 European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), 일본의 MTSAT Satellite based Augmentation System (MSAS)의 보강시스템에 대한 연구는 활발하지만, 중국의 BDSBAS에 대한 연구는 미비한 상태이다 (Lim & Ji 2010, Lim et al. 2016, Lim & Park 2017, Son et al. 2017, Ko & Choi 2017). 한국은 MSAS 서비스 지역과 BDSBAS의 서비스 지역이 겹치는 영역에 위치하기 때문에 2개의 보강시스템에 대한 지속적인 분석이 필요하다. Fig. 1에

Received Apr 24, 2020 Revised Jun 03, 2020 Accepted Jul 07, 2020

†Corresponding Author

E-mail: eesjl@cnu.ac.kr

Tel: +82-42-825-3991 Fax: +82-42-823-5436

Jae Hee Noh <https://orcid.org/0000-0002-6314-738X>

Deok Won Lim <https://orcid.org/0000-0002-5154-8063>

Ju Hyun Lee <https://orcid.org/0000-0001-9921-6300>

Gwang Hee Jo <https://orcid.org/0000-0001-8732-9770>

Sang Jeong Lee <https://orcid.org/0000-0002-9400-5157>

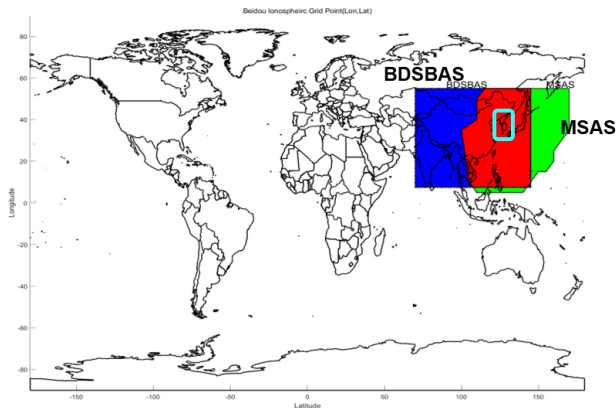


Fig. 1. The coverage area of MSAS and BDSBAS.

MSAS와 BDSBAS의 서비스 영역을 도시했다. Fig. 1에서 초록색 부분이 MSAS의 서비스 영역이고, 파란색 부분이 BDSBAS 서비스 영역이고, 빨간색 부분이 MSAS와 BDSBAS의 서비스 영역이 겹치는 곳이다.

본 논문에서는 한국 내에서 MSAS와 BDSBAS 보정 정보 활용 시에 의사거리 및 위치 정확도 성능 분석을 수행했다. 중국, 한국, 일본 내에서의 정확도를 비교를 위해 위성의 방송 궤도력 정보 및 의사거리 정보는 각 국가의 International GNSS Service (IGS) 사이트에서 제공하는 데이터를 활용했다. MSAS 보정 정보와 BDSBAS 보정 정보 정확도 분석을 위해 GPS 단독, BDS 단독, GPS/MSAS 통합, BDS/BDSBAS 통합 방법의 의사거리 및 위치 정확도를 비교하였다. 본 논문은 2장에서 MSAS와 BDSBAS의 보정 정보 및 보정 절차를 서술하고, 3장에서 IGS 데이터를 활용하여 의사거리 및 위치 정확도를 분석하고, 4장에서 논문의 결론을 제시하였다.

2. MSAS와 BDSBAS의 보정 정보

SBAS는 정지궤도 위성을 통해 항법 신호의 전파경로상의 오차, 위성시계 오차 등의 보정 정보와 무결성 정보를 제공하며, 항공을 주목적으로 하는 국제표준 시스템이다 (ICAO 2006). MSAS와 BDSBAS는 이와 같은 목적으로 구축되었거나 구축중인 SBAS이다. 현재는 BDSBAS가 공개서비스를 제공하고 있지 않기 때문에 보정 정보 처리 절차가 서로 다르며 본 절에서는 이 차이점을 요약한다.

2.1 MSAS

일본의 MSAS는 초기에 MTSAT-1R(PRN 129)와 MTSAT-2(PRN 137) 2기의 정지궤도(Geostationary Orbit, GEO) 위성을 활용하여 보정 정보를 방송하였다. 현재는 MTSAT-1R 위성이 사용이 중단되어 MTSAT-2에서 Dual PRN 방식으로 보정 정보를 방송하고 있으며, NPA급 서비스를 제공하고 있다. 그러나, 2020년에 MTSAT-2 위성의 수명까지 종료되기 때문에 2020년 이후에는 QZSS의 GEO 위성을 이용하여 보정 정보를 제공할 계획이

Table 1. SBAS message types.

Type	Contents
0	Don't use for safety applications (for SBAS testing)
1	PRN mask assignments, set up to 51 of 210 bits
2-5	Fast corrections
6	Integrity information
7	Fast correction degradation factor
9	GEO navigation message
10	Degradation parameters
12	SBAS network time/UTC offset parameters
17	GEO satellite almanacs
18	Ionospheric grid point masks
24	Mixed fast corrections/long term satellite error corrections
25	Long term satellite error corrections
26	Ionospheric delay corrections
27	SBAS service message
28	Clock-ephemeris covariance matrix message

다 (Tashiro 2016). 또한, 기준국을 확장하고 전리층 모델 관련 알고리즘을 개선하여 현재보다 한단계 높은 APV-1급 서비스를 제공하는 것을 목표로 하고 있다. MSAS에서 제공하고 있는 메시지 타입별 보정정보 내용은 Table 1에 정리하였다 (RTCA 2006). Table 1에 정리한 각각의 메시지 타입들을 통해 제공되는 보정 정보를 이용하여 의사거리 보정 및 사용자 위치 추정을 수행할 수 있으며, 그 절차는 Fig. 2에 정리하였다. MSAS에서 제공하는 Long-term correction을 이용하여 위성 위치 및 시각을 보정하고, Fast correction과 Ionospheric correction을 이용하여 의사거리를 보정한다. 보정된 위성 위치와 의사거리를 이용하여 사용자의 위치를 추정한다.

2.1.1 의사거리 보정 정보

Type 2-5에서는 의사거리 보정 정보인 Pseudorange Correction (PRC)를 제공하며, 이는 12 bits 크기를 가지고 0.125 m의 분해능을 가진다. 사용자는 제공받은 PRC와 PRC의 변화율 정보인 Range-Rate Correction (RRC)를 이용하여 의사거리를 보정한다 (RTCA 2006).

2.1.2 위성궤도 및 시계 보정 정보

Type 24 또는 Type 25에서는 GNSS 위성의 ECEF 좌표계에 서의 위성 위치 오차와 위성 시계 오차에 대한 보정 정보를 제공한다. Type 25는 Velocity Code가 0인지 1인지에 따라 형식이 달라진다. Velocity Code가 0인 경우 2개 위성에 해당하는 위성 위치 오차 및 위성 시계 오차에 대한 보정 정보를 제공하고, Velocity Code가 1인 경우 하나의 위성에 해당하는 위성 위치 오차 및 변화율, 위성 시계 오차 및 변화율에 대한 보정 정보를 제공하고 있다 (RTCA 2006).

2.1.3 전리층 보정 정보

MSAS는 전리층을 일정 고도에 위치한 단일층으로 가정하여 이를 모델링하기 위한 보정 정보를 제공해준다. SBAS 규격에서는 전 세계 지역을 5°의 Ionospheric Grid Point (IGP)로 나누어

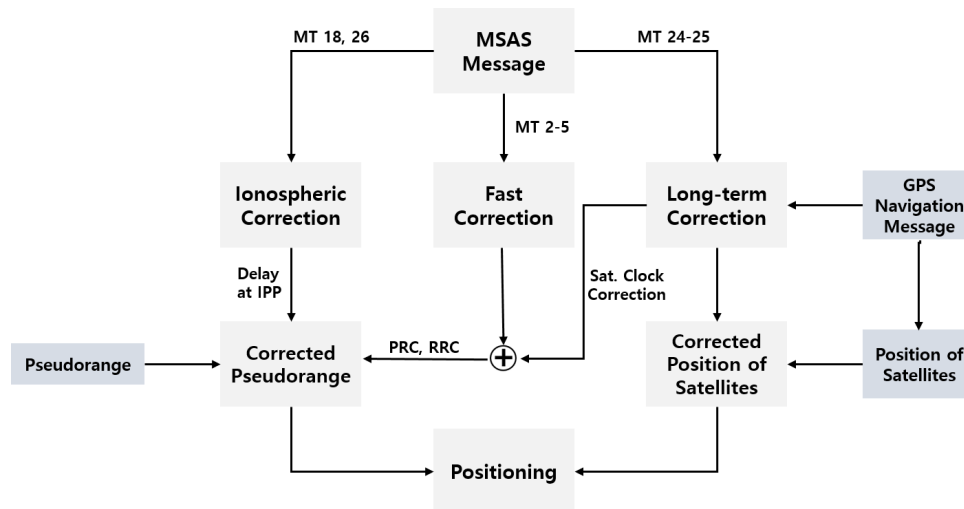


Fig. 2. Positioning procedure using MSAS correction information.

각 IGP에 대한 전리층 정보를 제공하고 있다. 현재는 전리층 보정 정보를 메시지 Type 18과 Type 26을 통해 제공하고 있다. Type 18에서는 전 세계에 정의된 격자점 중에서 시스템에서 제공하는 격자점이 어떤 점들인지 알려주는 메시지이다. Type 26은 각 격자점에 대한 보정 정보 값과 무결성 정보를 알려주는 메시지이다. 전리층 지연값은 0-63.875 m까지 0.125 m 간격으로 표현되며, Grid Ionospheric Vertical Error (GIVE)는 0부터 14까지 15 단계로 나누어 제공된다. 사용자는 전리층 통과점 주변의 격자점을 찾고, 그 격자점들이 유효한 값을 갖는지 GIVE를 통해 확인한다. 유효한 격자점이 3개 이상이면 주변의 유효한 격자점을 이용하여 사용자 의사거리 보정 값 및 무결성 정보 계산을 수행한다 (RTCA 2006).

2.2 BDSBAS

중국의 BDSBAS는 2012년부터 BDSBAS의 개발, 시험 및 검증을 위해 BII 신호에 대한 보정 정보를 GEO 위성을 통해 송출 중이다. BDSBAS는 총 3 기의 GEO 위성을 이용하여 BDS BIC, BDS B2a 신호와 타 위성항법시스템에 대한 보정 정보를 제공하고, 일본의 MSAS보다 높은 수준의 CAT-1 급 서비스를 제공하는 것을 목표로 구축 중이다. 2020년에 공개서비스를 제공하는 것을 목표로 하며, 2030년부터는 CAT-1급의 BDSBAS 서비스를 제공할 계획이다 (Li 2019). 현재 시험용으로 제공되고 있는 BDSBAS 보정 정보는 BDS BII 신호의 D2 항법메시지를 통해 제공된다. BDS BII의 ICD에서는 BDSBAS 보정 정보를 “Augmentation Service Information”으로 언급하고 있다. 제공하는 보정 정보는 중국 상공에 대한 전리층 수직 지연 오차 및 무결성 정보, 의사거리 보정 정보 무결성 정보이다 (BeiDou ICD 2016). Fig. 3은 BDSBAS로부터 제공받은 보정 정보를 이용하여 위치를 추정하는 과정을 나타낸다. BDSBAS에서 제공하는 Equivalent Clock correction과 Ionospheric correction을 이용하여 의사거리를 보정하고, 보정된 의사거리를 이용하여 수신기의 위치를 추정한다.

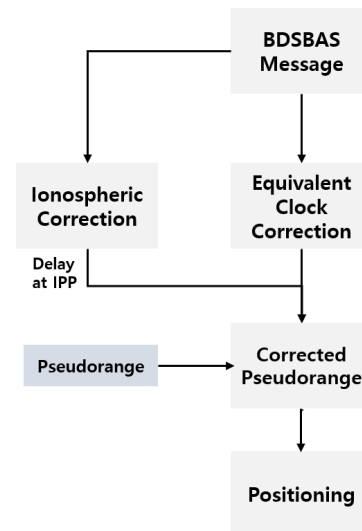


Fig. 3. Positioning procedure using BDSBAS correction information.

2.2.1 의사거리 보정 정보

현재 제공되고 있는 BDSBAS의 보정 정보는 MSAS처럼 Fast Correction, Long-term Correction으로 구분되어 있지 않고 13 bits 크기를 가지는 Equivalent Clock Correction이라는 파라미터를 통해 의사거리 보정 정보를 제공하고 있다. Equivalent Clock Correction은 0.1 m의 scale factor를 가지는 스칼라 값을 제공해주며, 18초마다 갱신된다. 만약 보정 정보의 값이 -4096이 나타나면 사용불가 상태를 의미한다. Equivalent Clock Correction와 함께 무결성 정보도 제공하고 있으며, User Differential Range Error Index (UDREI)는 0부터 15까지 16단계로 나누어 제공된다. UDREI가 14이상일 때는 의사거리 보정 정보를 사용하지 않는 것을 권장하고 있다 (BeiDou ICD 2016).

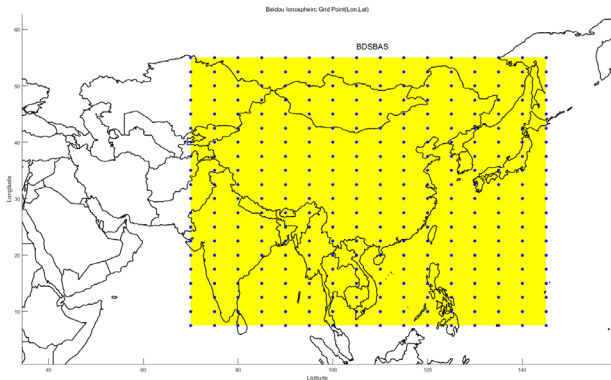


Fig. 4. The IGP of BDSBAS.

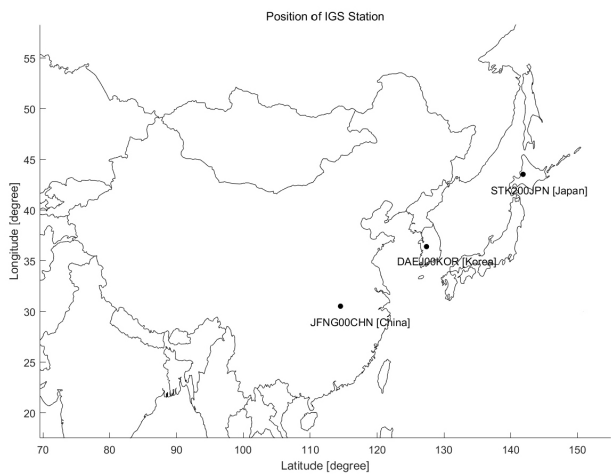


Fig. 5. The position of the IGS station.

2.2.2 전리층 보정 정보

BDSBAS는 중국 상공에 대해서 경도를 5° , 위도를 2.5° 의 IGP로 나누어 각 IGP에 대한 전리층 정보를 제공하고 있으며, Fig. 4에 그 분포를 보였다.

BDSBAS는 각 격자점에 대한 수직 지연 값(dt)과 무결성 정보를 제공한다. 전리층 지연값은 0-63.875 m까지 0.125 m 간격으로 표현되며, GIVE는 0부터 15까지 16 단계로 나누어 제공된다 (BeiDou ICD 2016).

3. 성능 분석

3.1 실험 구성

본 논문에서는 한국, 중국, 일본에서의 MSAS 및 BDSBAS 보정 정보 성능 분석을 위해 IGS에서 제공하는 GNSS 신호 데이터, 위성의 방송 궤도력 데이터 및 위성의 정밀 궤도 정보를 활용했다. NASA에서 개발한 Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS)의 FTP 서버 (<ftp://cddis.nasa.gov/gnss/data/>)

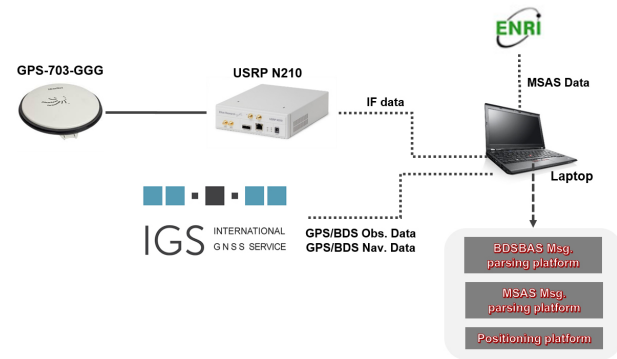


Fig. 6. The structure of collecting data.

daily/)를 통해 전세계의 IGS 사이트에서 관측한 30초 간격의 24시간 GNSS 신호 데이터를 제공받을 수 있다. 논문에서 사용한 GNSS 신호 데이터는 한국의 대전(DAEJ00OR), 중국의 우한(JFNG00CHN), 일본의 홋카이도(STK200JPN) 내에 설치된 IGS 사이트에서 UTC 기준 2019년 10월 8일 오전 1시부터 2019년 10월 9일 오전 1시까지 수신된 신호이다. 각 사이트의 위치는 Fig. 5에 보였다.

BDSBAS 보정 정보는 공개서비스가 제공되지 않은 상황이기 때문에 USRP N210과 LabView를 이용해 RF Front-end를 구성하여 BDS BII 신호를 수집하고, 수집한 신호로부터 BDSBAS 보정 정보를 추출하여 사용하였다. MSAS 데이터는 일본의 Electronic Navigation Research Institute (ENRI)에서 제공하는 것을 사용했다. Fig. 6에 성능 분석을 위해 활용한 데이터 획득 구조를 보였다.

그리고 한국 내에서 MSAS와 BDSBAS의 성능 분석을 위해 GPS 단독, BDS 단독, GPS/MSAS 통합, BDS/BDSBAS통합 항법에 대한 의사거리 및 위치 정확도를 분석하기 위한 플랫폼을 설계하였다. Fig. 7은 의사거리 및 위치 정확도 분석을 위해 GNSS 신호 데이터와 보정 정보를 이용하여 사용자 위치 추정을 수행하는 플랫폼의 구성도이다. 플랫폼 내에서 기본적으로 사용자 위치를 추정할 때 Least Square Estimation (LSE)을 이용한다. 하지만, GPS/MSAS 통합 항법 모드를 사용할 때는 MSAS에서 제공하는 정보를 이용해 가중치를 계산하여 Weighted Least Square Estimation (WLSE)을 이용한다. 현재 활용 가능한 BDSBAS의 경우 ICD 내에 가중치를 계산하는 방법이 언급이 되어 있지 않기 때문에 LSE를 이용하여 사용자 위치를 추정하도록 설계했다.

3.2 GPS 단독 및 GPS/MSAS 통합 항법 의사거리 정확도 및 위치 추정 성능 분석

본 논문에서는 GPS 단독 항법과 GPS/MSAS 통합 항법의 위치 추정 성능 분석에 앞서 의사거리 정확도를 분석했다. 보강시스템에서 제공해주는 보정 정보는 대부분 의사거리를 보정하기 위한 정보이기 때문에 보정 전/후에 대한 의사거리 정확도를 통해 보정 정보의 성능을 분석할 수 있다. 의사거리 정확도 분석을 위해 GPS, BDS 위성의 정밀 궤도 정보를 제공하고 있는 기관인 GeoForschungsZentrum (GFZ)에서 SP3 형식으로 제공하는 정밀 궤도 정보와 Clock RINEX 형식(*.CLK)으로 제공하는

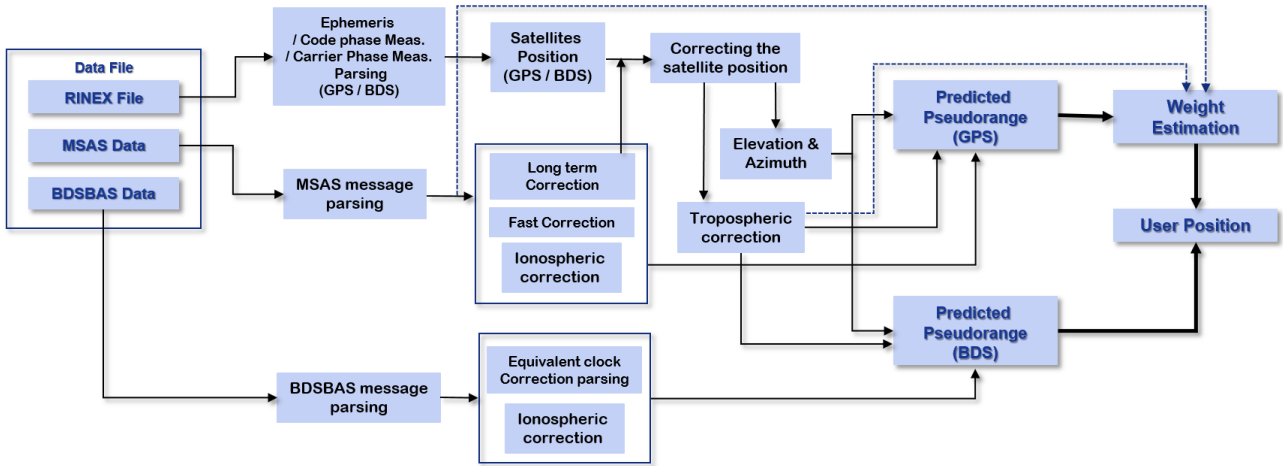


Fig. 7. Block diagram of the test platform.

각 사이트의 수신기 클럭 바이어스 정보, IGS 사이트의 위치 좌표를 이용하여 실제 의사거리를 계산했다. 이 거리를 기준으로 DAEJ00KOR과 STK200JPN에서 MSAS 보정 정보 적용 전과 후에 대한 의사거리 정확도를 분석하였다. 식 (1)은 GPS 신호의 의사거리 측정치를 나타낸다.

$$\rho_{meas,i}^{GPS} = \rho_i + cB_i - cb_i + T_i + I_i + n_i \quad (1)$$

$$\rho_{true,i}^{GPS} = \sqrt{(x_{true,i}^{GPS} - x_{usr})^2 + (y_{true,i}^{GPS} - y_{usr})^2 + (z_{true,i}^{GPS} - z_{usr})^2} \quad (2)$$

$$\Delta\rho^{GPS} = \rho_{true,i}^{GPS} - \rho_{meas,i}^{GPS} \quad (3)$$

식 (1)에서 i 는 위성 PRN을 의미하고, $\rho_{meas,i}^{GPS}$ 는 GPS 의사거리 측정치, c 는 빛의 속도, B_i 는 수신기 클럭 바이어스, b_i 는 위성 시계 바이어스, T_i 는 대류층 지연, I_i 는 전리층 지연, n_i 는 잡음을 의미한다. MSAS 보정 정보를 이용하면 식 (1)에서 $\rho_{meas,i}^{GPS}$ 을 Fast Correction으로 보정하고, cb_i 를 Long-term Correction으로 보정하고, I_i 를 Ionospheric Correction으로 보정한다. 식 (2)는 위성의 정밀 궤도 정보로부터 얻은 위성 위치에서 수신기까지의 실제 거리를 의미하며, 여기서 $(x_{true,i}^{GPS}, y_{true,i}^{GPS}, z_{true,i}^{GPS})$ 는 실제 위성의 위치, $(x_{usr}, y_{usr}, z_{usr})$ 는 사용자의 위치를 의미한다. 식 (3)은 실제 거리와 측정된 의사거리 사이의 오차를 의미한다. Table 2에 DAEJ00KOR과 STK200JPN에서 MSAS 보정 정보 적용 전과 후에 대한 24시간 동안의 PRN 별 의사거리 Root Mean Square (RMS) 오차를 보였다. MSAS 보정 정보 적용을 하지 않은 GPS 단독 항법에서는 전리층 보정을 Klobuchar 모델을 이용하였고 대류층 오차는 GPS 단독, GPS/MSAS 통합 항법에서 모두 Saastamoinen 모델을 이용하였다.

24시간 동안의 의사거리 RMS 오차를 정리한 Table 2를 보면 총 32개의 GPS 위성 중 한국에서는 8개 위성 (PRN 1, PRN 11, PRN 12, PRN 14, PRN 18, PRN 19, PRN 25, PRN 32)의 RMS 오차가 감소하였다. 반면, 일본에서는 16개 위성 (PRN 2, PRN 5, PRN 6, PRN 7, PRN 10, PRN 14, PRN 15, PRN 17, PRN 19, PRN 20, PRN 21, PRN 24, PRN 25, PRN 29, PRN 30, PRN 32)의 RMS 오차가 감

Table 2. The accuracy of the pseudorange at DAEJ00KOR and STK200JPN - GPS, GPS/MSAS.

	DAEJ00KOR		STK200JPN	
	GPS only RMS [m]	GPS/MSAS RMS [m]	GPS only RMS [m]	GPS/MSAS RMS [m]
PRN 1	0.73	0.70	0.73	0.93
PRN 2	1.46	1.49	3.37	3.28
PRN 3	0.84	0.93	1.25	1.39
PRN 4	-	-	-	-
PRN 5	0.62	0.65	2.45	2.30
PRN 6	0.88	0.93	1.74	1.71
PRN 7	0.81	1.06	2.16	2.08
PRN 8	0.53	0.82	0.48	0.84
PRN 9	0.91	1.08	1.77	1.88
PRN 10	1.15	1.22	1.04	0.94
PRN 11	0.93	0.83	0.77	0.97
PRN 12	1.24	1.08	1.67	1.69
PRN 13	0.97	0.99	1.79	1.79
PRN 14	0.81	0.57	0.54	0.43
PRN 15	1.14	1.17	2.33	2.13
PRN 16	0.68	0.75	0.33	0.66
PRN 17	0.86	0.93	1.53	1.45
PRN 18	0.87	0.82	-	-
PRN 19	0.98	0.90	1.89	1.76
PRN 20	0.90	0.93	1.23	1.11
PRN 21	0.82	1.01	1.83	1.70
PRN 22	0.58	0.85	1.41	1.70
PRN 23	0.64	0.72	1.45	1.84
PRN 24	0.62	0.63	1.65	1.57
PRN 25	1.08	0.78	0.61	0.58
PRN 26	0.69	0.71	0.35	0.64
PRN 27	0.53	0.73	0.31	0.77
PRN 28	0.61	0.70	0.68	0.68
PRN 29	0.76	0.99	2.60	2.30
PRN 30	0.85	1.00	2.11	2.05
PRN 31	0.46	0.62	0.31	0.42
PRN 32	1.18	0.77	0.83	0.77

소하는 것을 확인했다. 한국과 비교했을 때, 일본에서는 관측 가능한 위성의 절반 이상이 의사거리 정확도 개선 효과가 있다는 것을 보여준다.

Figs. 8과 9에 도시한 그래프는 동일한 시점에서 PRN 14 위성 에 대한 전리층 보정 값, Fast Correction 정보의 보정 값, Long-term Correction 정보의 보정 값을 각각 계산하여 도시한 것이다.

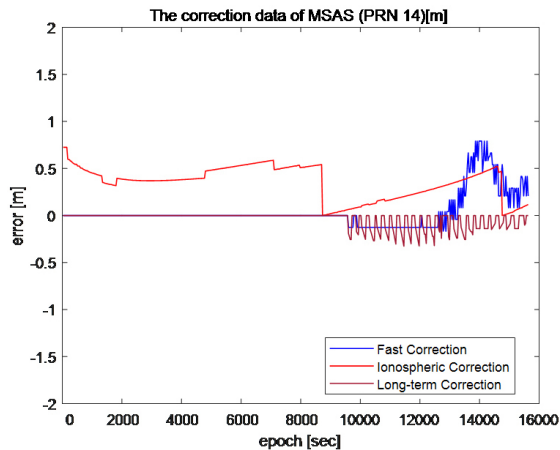


Fig. 8. MSAS correction data for PRN 14 (DAEJ00KOR).

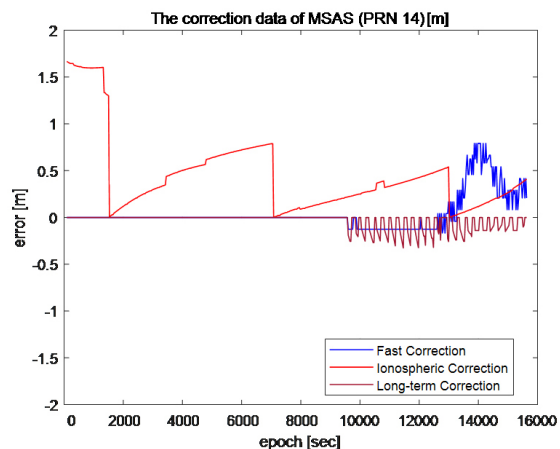


Fig. 9. MSAS correction data for PRN 14 (STK200JPN).

Figs. 8과 9의 그래프를 보면 MSAS 보정 정보 중 전리층 오차에 대한 보정 값이 다른 보정 정보에 비해 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 전리층 보정 정보가 의사거리 정확도 개선에 가장 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다.

의사거리 정확도 분석에 이어 MSAS 보정 정보를 활용했을 때의 한국과 일본 내에서 위치 추정 정확도를 분석을 위해 DAEJ00KOR과 STK200JPN에서의 GPS 단독 항법의 위치 추정 정확도와 GPS/MSAS 통합 항법의 위치 추정 정확도를 비교 및 분석하였다. Figs. 10과 11에 각각 DAEJ00KOR과 STK200JPN에서 수신한 신호 데이터 및 보정 정보를 이용한 수신기 위치 추정 결과를 보였다.

Table 3은 각 사이트에서 24시간동안 East (E), North (N), Up (U) 각 방향에 대한 평균 RMS 오차를 정리한 것이다. Figs. 10과 11 그리고 Table 3을 통해 한국에서는 E, N, U 각 방향에 대한 RMS 오차가 증가하는 것을 확인했다. 일본에서는 E, N 방향에 대한 RMS 오차는 증가하였지만, N 방향에 대한 RMS 오차는 감소하는 것을 확인했다. SBAS는 서비스 수준에 따라서 요구 성능이 각각 다르다. Table 4에 ICAO가 정의한 서비스 수준별 요구 성능에 대해 정리하였다. 현재 MSAS는 NPA급의 서비스를 제공하고

Table 3. Results of the positioning for 24 hours at DAEJ00KOR and STK200JPN.

Site	System	RMS (E) [m]	RMS (N) [m]	RMS (U) [m]
DAEJ00KOR	GPS only	0.56	0.62	1.47
	GPS/MSAS	0.63	0.82	1.48
STK200JPN	GPS only	0.58	0.76	1.67
	GPS/MSAS	0.64	0.91	1.57

Table 4. Performance requirements in ICAO SARPs.

Operation	Horizontal accuracy (95%)	Vertical accuracy (95%)
En-route (Oceanic/continental)	3.7 km (2.0 NM)	N/A
En-route (Continental)	3.7 km (2.0 NM)	N/A
En-route, terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A
NPA	220 m	N/A
APV-I	16 m	20 m
APV-II	16 m	8 m
CAT-II	16 m	4-6 m

있으며, NPA급 서비스의 수평 정확도 요구 성능은 220 m 이내이고 수직 정확도는 요구되지 않는다. Table 4를 통해 알 수 있듯이 이미 GPS 단독 항법에서 E, N 축의 위치 정확도가 1 m 이내이고 U축의 위치 정확도가 2 m 이내로서 충분히 정확한 상황이기 때문에 MSAS에서 제공하는 보정 정보가 위치 정확도 개선에 큰 영향을 주지 않는다고 판단한다.

3.3 BDS 단독 및 BDS/BDSBAS 통합 항법 의사거리 정확도 및 위치 추정 성능 분석

BDS 단독 항법과 BDS/BDSBAS 통합 항법 위치 추정 성능 분석에 앞서 의사거리 정확도를 분석하였다. 의사거리 정확도 분석을 위해 앞서 언급한 GFZ에서 제공하는 SP3 형식의 정밀 궤도 정보, Clock RINEX 형식의 IGS 사이트 클럭 바이어스 정보, 각 사이트의 위치 좌표를 이용하여 실제 의사거리를 계산했고, 이 거리를 기준으로 DAEJ00KOR과 JFNG00CHN에서 BDSBAS 보정 정보 적용 전과 후에 대한 의사거리 정확도를 분석했다. BDSBAS는 아직 공개 서비스를 시작하지 않았기 때문에 활용 가능한 보정 정보가 MSAS와 조금 다르다. 식 (4)는 BDS 신호의 의사거리 측정치를 나타낸다.

$$\rho_{meas,i}^{BDS} = \rho_i + cB_i - cb_i + T_i + I_i + n_i \quad (4)$$

$$\rho_{true,i}^{BDS} = \sqrt{(x_{true,i}^{BDS} - x_{usr})^2 + (y_{true,i}^{BDS} - y_{usr})^2 + (z_{true,i}^{BDS} - z_{usr})^2} \quad (5)$$

$$\Delta\rho^{BDS} = \rho_{true,i}^{BDS} - \rho_{meas,i}^{BDS} \quad (6)$$

식 (4)에서 i 는 위성 PRN을 의미하고, $\rho_{meas,i}^{BDS}$ 는 BDS 의사거리 측정치, c 는 빛의 속도, B_i 는 수신기 클럭 바이어스, b_i 는 위성 시계 바이어스, T_i 는 대류층 지연, I_i 는 전리층 지연, n_i 는 잡음을 의미한다. BDSBAS 보정 정보를 이용하면 식 (4)에서 $\rho_{meas,i}^{BDS}$ 를 Equivalent Clock Correction으로 보정하고, I_i 를 Ionospheric Correction으로 보정한다. 식 (5)는 위성의 정밀 궤도 정보로부터 얻은 위성 위치에서 수신기까지의 실제 거리를 의미하며, 여기서

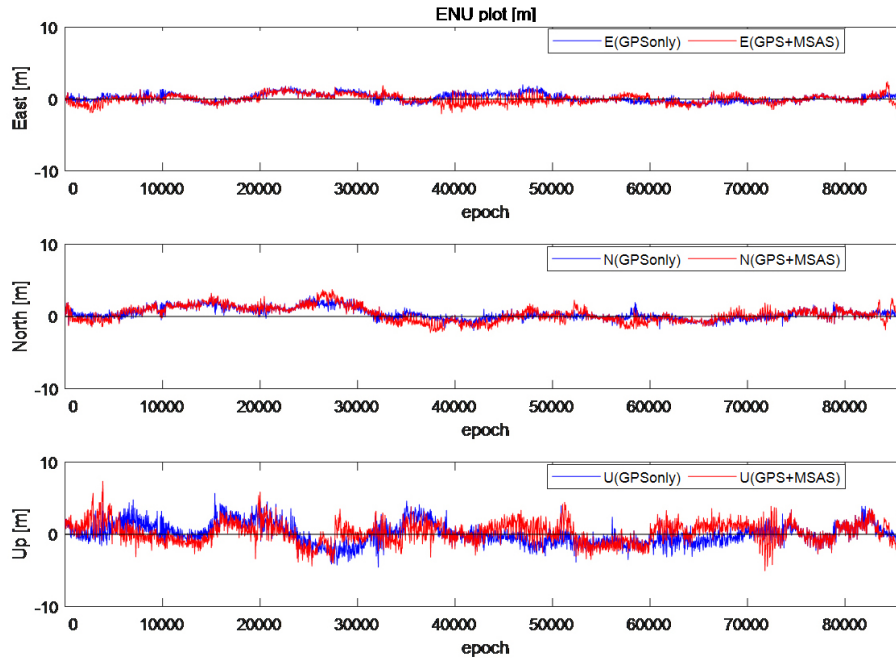


Fig. 10. The accuracy of the positioning (DAEJ00KOR) – GPS only, GPS/MSAS.

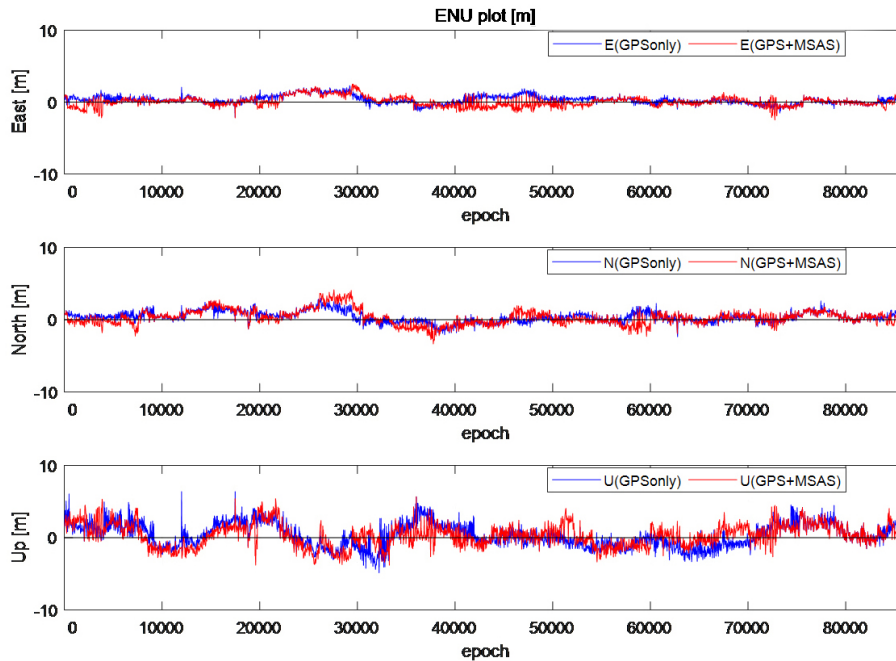


Fig. 11. The accuracy of the positioning (STK200JPN) – GPS only, GPS/MSAS.

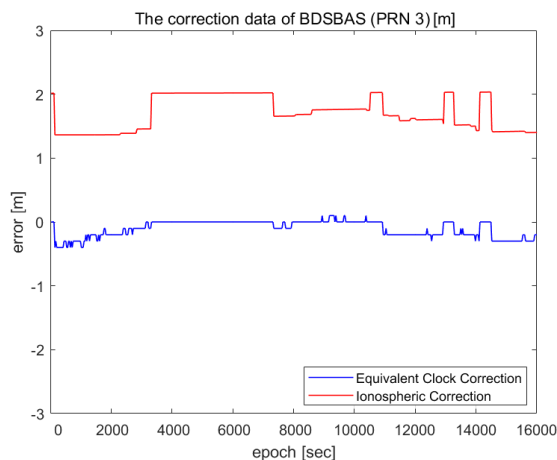
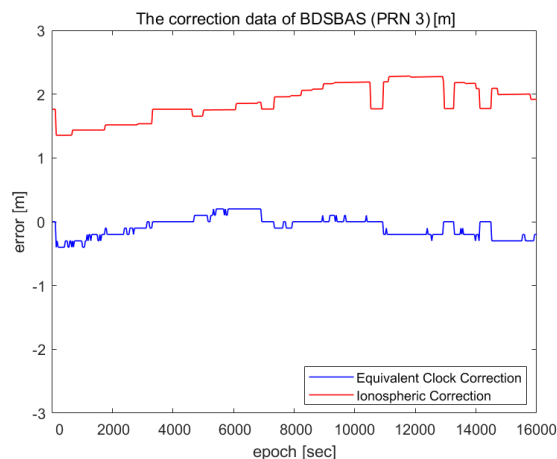
$(x_{true,i}^{BDS}, y_{true,i}^{BDS}, z_{true,i}^{BDS})$ 는 실제 BDS 위성의 위치, $(x_{usr}, y_{usr}, z_{usr})$ 는 사용자의 위치를 의미한다. 식 (6)은 실제 거리와 측정된 의사거리 사이의 오차를 의미한다. Table 5는 DAEJ00KOR과 JFNG00CHN에서 BDSBAS 보정 정보 적용 전과 후에 대한 24시간동안의 PRN 별 의사거리 RMS 오차를 보여준다. BDSBAS 보정 정보 적용을 하지 않은 BDS 단독 항법에서는 전리층 보정을 Klobuchar 모델을 이용하였고 대류층 오차는 BDS 단독, BDS/BDSBAS 통합 항

법에서 모두 Saastamoinen 모델을 이용하였다.

24시간동안의 RMS 오차를 정리한 Table 5를 통해 한국과 중국 모두에서 GEO 위성인 PRN 1~5의 의사거리 RMS 오차를 제외하고 대부분의 의사거리 RMS 오차가 증가하는 것을 알 수 있다. Figs. 12와 13에 도시한 그래프는 동일한 시점에서 PRN 3 위성에 대한 전리층 보정 값, Equivalent Clock Correction 정보의 보정 값을 각각 계산하여 도시한 것이다. 현재 BDSBAS에서 제공

Table 5. The accuracy of the pseudorange at DAEJ00KOR and JFNG00CHN - BDS, BDS/BDSBAS.

	DAEJ00KOR		JFNG00CHN	
	BDS only RMS [m]	BDS/BDSBAS RMS [m]	BDS only RMS [m]	BDS/BDSBAS RMS [m]
PRN 1	1.22	1.35	3.51	3.39
PRN 2	-	-	3.86	3.84
PRN 3	3.42	3.41	3.92	3.89
PRN 4	3.71	3.76	3.31	3.13
PRN 5	-	-	-	-
PRN 6	8.63	8.87	7.87	8.02
PRN 7	8.46	8.81	-	-
PRN 8	9.11	9.46	8.67	8.89
PRN 9	15.19	15.56	14.23	14.59
PRN 10	15.06	15.52	12.85	13.23
PRN 11	12.49	12.28	11.47	11.18
PRN 12	2.37	2.55	1.43	1.54
PRN 13	14.63	15.04	12.60	12.88
PRN 14	10.04	10.12	10.80	10.87
PRN 15	-	-	-	-
PRN 16	11.03	11.26	9.81	9.99

**Fig. 12.** BDSBAS correction data for PRN 3 (DAEJ00KOR)**Fig. 13.** BDSBAS correction data for PRN 3 (JFNG00CHN)

하는 보정 정보는 의사거리 오차를 보정하는 Equivalent Clock Correction과 전리층 보정 정보 2가지이다. Equivalent Clock Correction 정보는 1 m 미만의 의사거리 보정 값을 제공해주고

Table 6. Results of the positioning for 24 hours at DAEJ00KOR and JFNG00CHN.

Site	System	RMS (E) [m]	RMS (N) [m]	RMS (U) [m]
DAEJ00KOR	BDS only	0.38	0.44	2.04
	BDS/BDSBAS	0.53	0.74	2.47
JFNG00CHN	BDS only	0.51	0.44	2.33
	BDS/BDSBAS	0.63	0.64	2.37

있고, 이 값은 측정된 의사거리 정확도 개선에 큰 영향을 미치지 않는다. Figs. 12와 13의 그래프를 보면 BDSBAS 보정 정보 중 전리층 오차에 대한 보정 값이 다른 보정 정보에 비해 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 전리층 보정 정보가 의사거리 정확도 개선에 가장 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다.

의사거리 정확도 분석에 이어 BDSBAS 보정 정보를 활용했을 때의 한국과 중국 내에서 위치 추정 정확도를 분석을 위해 DAEJ00KOR과 JFNG00CHN에서의 BDS 단독 방법의 위치 추정 정확도와 BDS/BDSBAS 통합 방법의 위치 추정 정확도를 비교 및 분석하였다. Figs. 14와 15에 각각 DAEJ00KOR과 JFNG00CHN에서 수신한 신호 데이터 및 보정 정보를 이용한 수신기 위치 추정 결과를 보였다

Table 6은 각 사이트에서 24시간동안 E, N, U 각 방향에 대한 평균 RMS 오차를 정리한 것이다. Table 6을 보면 중국 사이트에서의 위치 정확도가 한국 사이트에서의 위치 정확도보다 낮게 나오는데 이는 적도로부터 남북 방향으로 각각 20°~30° 범위에서 전자밀도가 최대값을 가지기 때문에 한국에서보다 전리층이 두껍게 나타나 전리층 오차 영향이 더 크게 반영됐을 것으로 예상된다. Figs. 14와 15 그리고 Table 6을 통해 BDS BII를 통해 제공되고 있는 BDSBAS 보정 정보를 이용했을 때 한국과 중국에서 모두 방법 오차가 개선 되지 않았다는 것을 알 수 있다. 현재 BDS BII를 통해 제공하고 있는 BDSBAS 보정 정보는 시험용이고, 아직 ICAO 표준을 기반으로 하는 완벽한 SBAS 형태를 갖추고 있지 않기 때문에 MSAS 대비 수신기 위치 추정 정확도 개선 효과가 미비한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 IGS 사이트에서 제공하는 GNSS 데이터와 MSAS, BDSBAS 보정 정보를 활용하여 한국, 중국, 일본 내에서의 의사거리 및 위치 정확도를 비교 및 분석하였다. 실험을 통해 BDSBAS는 현재 ICAO 표준을 기반으로 하는 보강시스템의 형태를 갖추고 있지 않기 때문에 한국과 중국에서 모두 위치 정확도 개선에 큰 효과가 없다는 것을 확인했다. MSAS는 현재 보정 정보를 제공하는 위성이 하나 밖에 운용되지 않고 수명도 끝나는 상황이고, 제공하는 서비스 수준이 NPA 급이기 때문에 요구 정확도를 충분히 만족하는 상황에서는 위치 정확도에 대한 향상 효과가 나타나지 않았다. 각 시스템의 의사거리 정확도를 분석하면서 MSAS, BDSBAS 각각의 보정 정보들에 대해 함께 분석한 결과를 통해 보정된 의사거리 정확도에 가장 큰 영향을 주는 보정 정보는 전리층 보정 정보라고 판단할 수 있었다. 그러나 현재 한국 주변의 MSAS 전리층 격자점을 통해 제공되는 전리층 보정 정

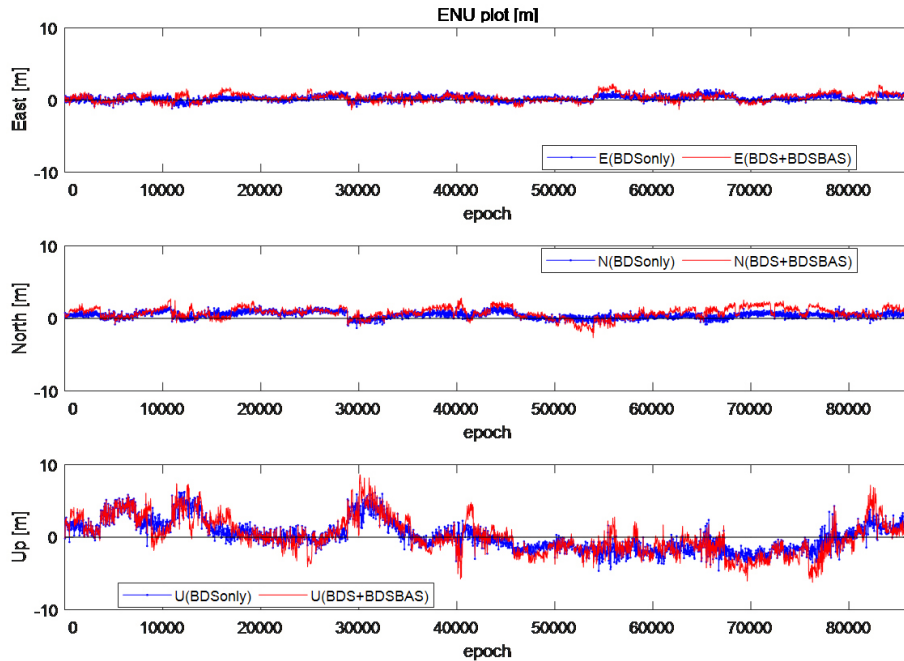


Fig. 14. The accuracy of the positioning (DAEJ00KOR) – BDS only, BDS/BDSBAS.

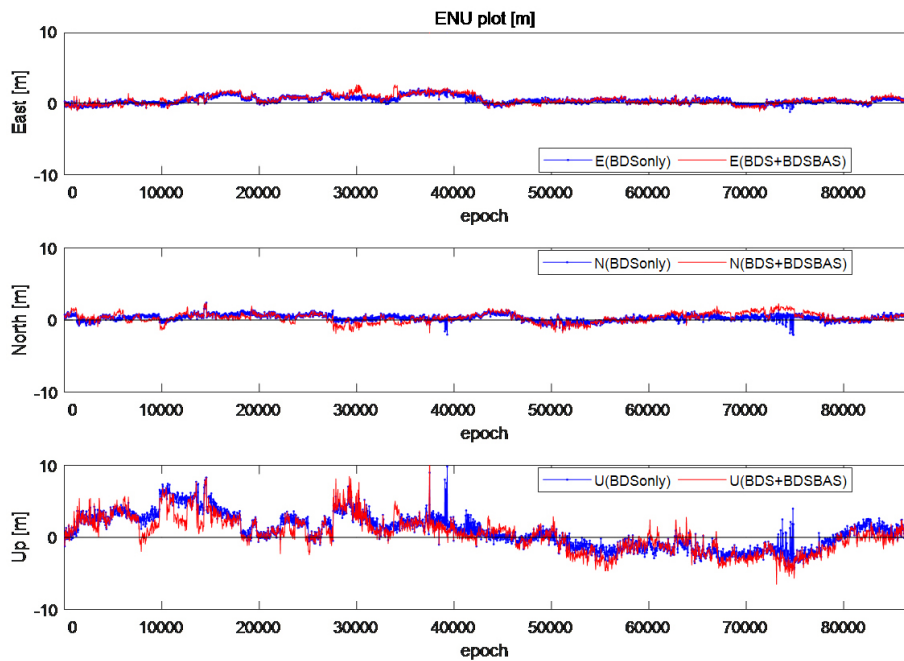


Fig. 15. The accuracy of the positioning (JFNG00CHN) – BDS only, BDS/BDSBAS.

보의 무결성 정보가 24시간동안 평균 14 수준의 값을 유지하며, 이는 ICAO 표준에서 보정 정보 사용을 권장하지 않는 수치이다. BDSBAS도 중국과 가까운 격자점을 제외한 동쪽의 2개의 격자점에서는 24시간동안 평균 14 수준의 무결성 정보를 제공하고 있으며, 이러한 사실을 통해 현재 MSAS와 BDSBAS를 통해 한국 주변 IGP에 제공되는 전리층 보정 정보의 신뢰 수준이 매우 낮음을 알 수 있다. 그렇기에 현재 한국에서 구축 중인 Korea Augmentation

Satellite System (KASS)는 구축 시에 격자점 기반의 전리층 수직 오차에 대한 정확한 정보가 제공될 수 있도록 설계 단계에서 충분히 고려가 되어야 한다. 그리고 한국은 주변국에 비해 영토가 작기 때문에 BDSBAS에서 도입한 것처럼 이미 운용중인 WAAS, EGNOS 및 MSAS와 같은 SBAS 보다 촘촘한 전리층 격자점을 구성하는 것에 대해서도 고려할 필요가 있다.

SBAS는 의사거리 및 위치 정확도 개선을 위한 보정 정보뿐

만 아니라 각 보정 정보에 대한 무결성 정보도 함께 제공하고 있다. 무결성 정보는 항공기 운항에 특정 보정 정보 또는 전체 보정 정보가 사용할 수 없는 상태일 때 경보를 제공하는 것이기 때문에 항공기 안전운항에 가장 중요한 정보이다. 그렇기에 추후 BDSBAS가 공개서비스를 시작하면 한국 내에서 관측할 수 있는 모든 SBAS에 대한 보정 정보 및 무결성 정보에 대한 분석을 함께 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by research fund of Chungnam National University.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The Manuscript with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “conceptualization, D.W. and Lee, J.; methodology, D.W.; software, Noh, J.; validation, Noh, J., Lee, J. and D.W.; formal analysis, Noh, J.; investigation, G.H.; resources, Noh, J.; data curation, G.H.; writing—original draft preparation, Noh, J.; writing review and editing, D.W.; visualization, Noh, J.; supervision, Lee, J.; project administration, D.W.; funding acquisition, S.J.”. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work reported.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- BeiDou ICD 2016, Beidou navigation satellite system signal in space interface Control Document, Open Service Signal (Version 2.1), China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608523308843290.pdf>
- CSNO 2019, Development of the Beidou Navigation Satellite System (Version 4.0), China Satellite Navigation Office. <http://m.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201912/P020191227430565455478.pdf>
- ICAO 2006, International Standards and Recommended Practices (SARPs): Aeronautical Telecommunications, Annex 10, vol.1, 6th edition
- Ko, K. S. & Choi, C. M. 2017, An Analysis of the Navigation

Parameters of Japanese DGNSS-MSAS, Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 21, 1619-1625. <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.8.1619>

- Li, X. 2019, GBAS/SBAS Implementation in China, in GBAS/SBAS Implementation Workshop, Seoul, Korea, 3-5 June 2019.
- Lim, C. S. & Park, B. W. 2017, Comparative Analysis of Performance for DGPS and SBAS in Korea Region, The Journal of Advanced Navigation Technology, 21, 279-286. <https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.3.279>
- Lim, C. S., Park, B. W., So, H. M., Jang, J. G., Seo, S. W., et al. 2016, Analysis on the Multi-Constellation SBAS Performance of SDCM in Korea, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 5, 181-191. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2016.5.4.181>
- Lim, S. H. & Ji, G. I. 2010, Analysis of Availability of MSAS Ranging Signal and Improvement of Navigation Performance in Korea Region, 25th Institute of Control, Robotics and Systems Conference, Chuncheon, Gangwon-do, pp.122-123
- Lu, X. 2018, Construction and Development of Beidou Navigation Satellite System, in Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, 61st session, Vienna, Austria, 20-29 Jun 2018
- RTCA 2006, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA DO-229, Rev. D, Dec. 2006.
- Son, S. J., Hong, G. Y., Hong, W. K., & Kim, K. T. 2017, Analysis of KASS Flight Test Requirements using the EGNOS, The Journal of Advanced Navigation Technology, 21, 579-584. <https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.6.579>
- Tashiro, H. 2016, Current MSAS Status and Future Plan, in EGNOS Service Provision Workshop 2016, Warsaw, Poland, 27-28 September 2016



Jae Hee Noh is a Ph.D candidate in the Department of Electronics Engineering at Chungnam National University in Korea. She received B.S and M.S degrees from Chungnam National University, Department of Electronic Engineering in 2017 and 2019. Her research interests include GNSS receiver, anti-spoofing techniques and message authentication.



Deok Won Lim is a senior research engineer of the Satellite Navigation Team at the Korea Aerospace Research Institute, Korea. He received B.S and Ph.D. degrees from Chungnam National University, Korea in 2004 and 2011, respectively. His current interests include multipath mitigation techniques and jammer localization system.



Ju Hyun Lee is a senior research engineer of Navcours Co., Ltd., Korea. He received B.S and Ph.D. degrees from Chungnam National University, Korea in 20011 and 2018, respectively. His research interests include GNSS, anti-jamming techniques and GNSS receiver.



Gwang Hee Jo is a Ph.D candidate in the Department of Electronics Engineering at Chungnam National University in Korea. He received B.S and M.S degrees from Chungnam National University, Department of Electronic Engineering in 2017 and 2019. His research interest includes GNSS receiver, digital signal processing.



Sang Jeong Lee is a professor in the Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Korea. He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Seoul National University, Korea, in 1979, 1981, and 1987, respectively. His research interests include GNSS receiver design and robust control.

