

한반도에서 GPS 측위를 위한 GIM과 SBAS 전리층 모델링 성능 분석

이형석¹, 박관동^{1,2†}

Performance Analysis of GIM and SBAS Ionosphere Modeling for GPS Positioning in the Korean Peninsula

Hyung-Seok Lee¹, Kwan-Dong Park^{1,2†}

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

²PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

ABSTRACT

The performance of the Korea Augmentation Satellite System (KASS), MTSAT Satellite-Based Augmentation System (MSAS), and BeiDou Satellite Augmentation System (BDSBAS) is respectively analyzed in the Korean Peninsula and its surrounding regions. The analysis is focused on comparing ionospheric vertical delay values based on the Grid Ionospheric Vertical Error (GIVE) provided by the Satellite-Based Augmentation System (SBAS), considering regional and seasonal characteristics. The results, assuming users located in Korea, indicate that KASS provides high consistency across seasons, regions, and Ionospheric Pierce Point (IPP) inclusion rates, exhibiting excellent performance based on precise positional accuracy. MSAS shows comparable performance to KASS in low-latitude regions but displays a tendency of decreased accuracy with increasing latitude. BDSBAS provides modeling of the ionospheric vertical delay that most closely resembles the Global Ionospheric Map (GIM). However, it has the lowest IPP inclusion rate within the Korean Peninsula, indicating limited availability. Additionally, analysis of data from the DAEJ (Daejeon) and CHAN (Changchun) sites shows that ionospheric delay corrections based on GIVE provided by SBAS yield results very similar to those obtained using GIM. Notably, at the DAEJ site, SBAS outperformed GIM, and at the CHAN site, SBAS proved to be a sufficient replacement for GIM.

Keywords: SBAS, GIVE, GIM, ionospheric delay, GPS

주요어: 위성기반 보강시스템, GIVE, GIM, 전리층 지연, 위성항법 시스템

1. 서론

Global Navigation Satellite System (GNSS)는 사용자의 위치, 항법 및 시간 정보를 제공하는 위성 기반 측위 시스템으로, 다양한 위치기반 서비스의 핵심 기술 중 하나로 자리 잡고 있다. 특히, 스마트폰, 웨어러블 기기와 같은 GNSS 기반 제품의 양산화로 인해 시장 규모가 꾸준히 성장하고 있다. 그러나 단독으로 수행되는 GNSS 측위의 정확도는 수 미터 수준에 머물러 다양한 정밀 측위 응용 분야의 요구사항을 충족시키기에는 한계가 있다 (Kim 2021). 이는 위성 신호가 사용자에게 도달하는 과정에서 발생하

는 다양한 오차 요인 때문으로, 대표적인 오차 요인으로는 전리층 지연 및 대류권 지연 등이 있다. 오차 요인 중 전리층 지연은 GNSS 신호전달 과정에서 가장 큰 오차 요인으로 작용한다 (Misra & Enge 2006).

이와 같은 문제를 보완하려는 방법의 하나로 Satellite-Based Augmentation System (SBAS)가 있다. SBAS는 정지궤도위성을 통해 오차 보정 정보를 방송함으로써 GNSS의 측위 정확도 및 신뢰도를 향상하는 시스템이다. 현재 SBAS는 미국의 Wide Area Augmentation System (WAAS), 유럽의 European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS), 일본의 MTSAT Satellite-

Received Jan 21, 2025 Revised Feb 10, 2025 Accepted Feb 18, 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.

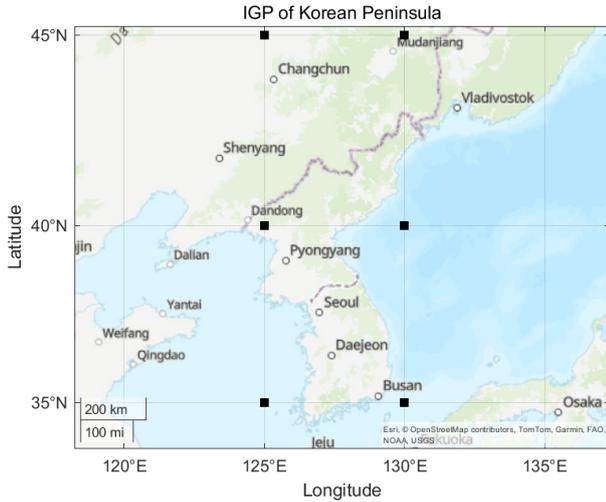


Fig. 1. Six IGP locations in and around the Korean Peninsula.

Based Augmentation System (MSAS), 인도의 GPS Aided Geo Augmentation Navigation (GAGAN) 등이 운영 중이며, 비교적 최근에 중국의 BeiDou Satellite Augmentation System (BDSBAS)와 한국의 Korea Augmentation Satellite System (KASS)도 서비스 운영을 시작하여 현재 정상적으로 운영 중이다.

한반도는 동아시아 SBAS(KASS, MSAS, BDSBAS) 서비스의 교차 영역에 위치하므로, 각 시스템의 보정 성능을 활용하여 측위 정확도를 높일 수 있다는 가능성이 있다. 이를 위해 한반도에서 가용한 동아시아 SBAS의 전리층 오차 보정 성능을 평가할 필요성이 제기되었다. 한국에서 MSAS와 BDSBAS의 가용성에 관한 선행 연구는 Noh et al. (2020)에서 확인할 수 있다. 해당 연구에서는 한국 내에서 MSAS와 BDSBAS 보정 정보 활용 시에 의사거리 및 위치 정확도 성능 분석을 수행하였다. 연구 당시를 기준으로 BDSBAS는 International Civil Aviation Organization (ICAO) 표준을 기반으로 하는 보강시스템의 형태를 갖추고 있지 않기 때문에 한국과 중국에서 모두 위치 정확도 개선에 큰 효과가 없다는 것을 확인하였다.

GIM을 사용하여 전리층 오차를 모델링하면 높은 정확도를 얻을 수 있지만, 실시간으로 보정 정보를 처리하는 것에는 어려움이 있다. 이를 개선하기 위해 SBAS의 Grid Ionospheric Vertical Error (GIVE)에서 제공하는 전리층 수직 지연 정보를 활용하는 방안을 검토하는 것이 중요하다고 판단하였다. 대류권 지연을 보정할 때, Global Pressure and Temperature (GPT) 모델을 사용한 경우와 SBAS 보정 정보를 활용한 경우의 성능 비교는 이미 연구된 바 있다 (Park et al. 2018). 그러나 전리층 오차 보정 성능 비교에 대한 연구는 부족하며, 특히 동아시아 지역에서 사용되는 SBAS와 GIM의 성능을 체계적으로 비교한 사례는 전무하다. 이는 몇 가지 이유로 설명될 수 있는데, 우선 SBAS는 지역 특화 시스템으로 설계되었기 때문에 각 시스템의 성능 분석이 주로 해당 시스템의 서비스 지역 내에서만 이루어진 경우가 많다. 앞서 기술한 대로, 한국에서 MSAS와 BDSBAS의 가용성을 다룬 선행 연구 (Noh et al. 2020)가 있지만, 연구가 진행될 당시 BDSBAS는 정식 서비스 기간이 아니었기에 비교에 부적합하였다. 또한

KASS와 BDSBAS의 경우 서비스가 시작된 지 얼마 되지 않아서 관련된 연구 사례가 충분히 축적되지 않았다. 특히, 새로운 시스템의 초기 데이터는 검증 및 비교 연구를 수행하기 위해 요구되는 안정성과 일관성이 부족할 가능성이 있어 연구에 제약으로 작용하였다.

본 연구에서는 한반도와 인접 지역을 중심으로 KASS, MSAS, BDSBAS 세 가지 SBAS 시스템의 성능을 비교 분석하였다. 2장에서는 계절 별로 6개 Ionosphere Grid Point (IGP) 지역에서 전리층 수직 지연을 비교하였고, 3장에서는 International GNSS Service (IGS) 상시 관측소인 대전 관측소와 중국의 창춘 관측소의 데이터를 기반으로, SBAS 전리층 지연 보정 정보를 실제 GNSS 측위에 적용하여 Standard Point Positioning (SPP) 방식과 비교하였다.

2. 전리층 수직 지연 모델링 성능 분석

이번 장에서는 동아시아에서 운용 중인 SBAS 시스템 현황과 전리층 수직 지연 모델링 성능을 비교한다. 비교 날짜는 춘분, 하지, 추분, 동지로 설정하였는데, 전리층 오차 변화와 Total Electron Content (TEC) 변화량이 계절에 따라 뚜렷하게 나타나기 때문에, 전리층 수직 지연 모델링 성능 평가에 중요한 근거를 제공한다는 점에 착안하여 설정하였다 (Kim & Kim 2016). 또한, 전리층 수직 지연 모델링 성능을 계절적으로 비교하기 위해서는 지자기 활동이 상대적으로 적은 날짜를 선정해야 계절적 효과만을 분석할 수 있다. 따라서 계절별로 선택한 날짜의 Kp-지수 (Kp-index)를 GFZ-Potsdam에서 운영하는 FTP 서버를 통해 확보하였고, Kp-지수의 평균과 표준 편차를 계산하여 지자기 활동이 균일한지 확인하였다. 춘분, 하지, 추분, 동지에서 Kp-지수 평균 및 표준 편차는 각각 0.996 ± 0.714 , 0.833 ± 0.416 , 1.208 ± 0.593 , 2.916 ± 0.509 로 나타났다.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서는 Kp-지수 5 이상을 지자기 활동이 심한 경우로 정의하는데 (NOAA 2025), 본 연구에서 선택한 날짜들은 Kp-지수가 5 미만이며, 계절 간 편차도 비교적 크지 않아 지자기 활동에 따른 영향이 크지 않은 것으로 판단하였다. 따라서, 본 연구에서 선정된 날짜들이 계절적 효과를 분석하기에 적합하다고 볼 수 있다.

비교 지역은 한반도라고 식별할 수 있는 위도와 경도로 설정하였으며, 각각 북위 35°에서 경도 125°, 130°, 북위 40°에서 경도 125°, 130°, 북위 45°에서 경도 125°, 130°이고, Fig. 1에 이를 표시하였다. 한반도 주변 6개의 IGP 지역을 대상으로, 2024년 DOY(Day Of Year) 080(춘분), 173(하지), 266(추분), 356(동지)에 해당하는 데이터를 이용해 전리층 수직 지연을 비교하였다.

2.1 SBAS

한국형 SBAS인 KASS는 2022년부터 Approach with Vertical guidance I (APV-I) 수준의 서비스를 시작했으며, 정지궤도위성을 활용해 보정 정보를 방송한다. KASS는 전 세계 SBAS 표준을 준수하여 5°×5° 간격의 전리층 그리드 포인트(IGP)를 설정하

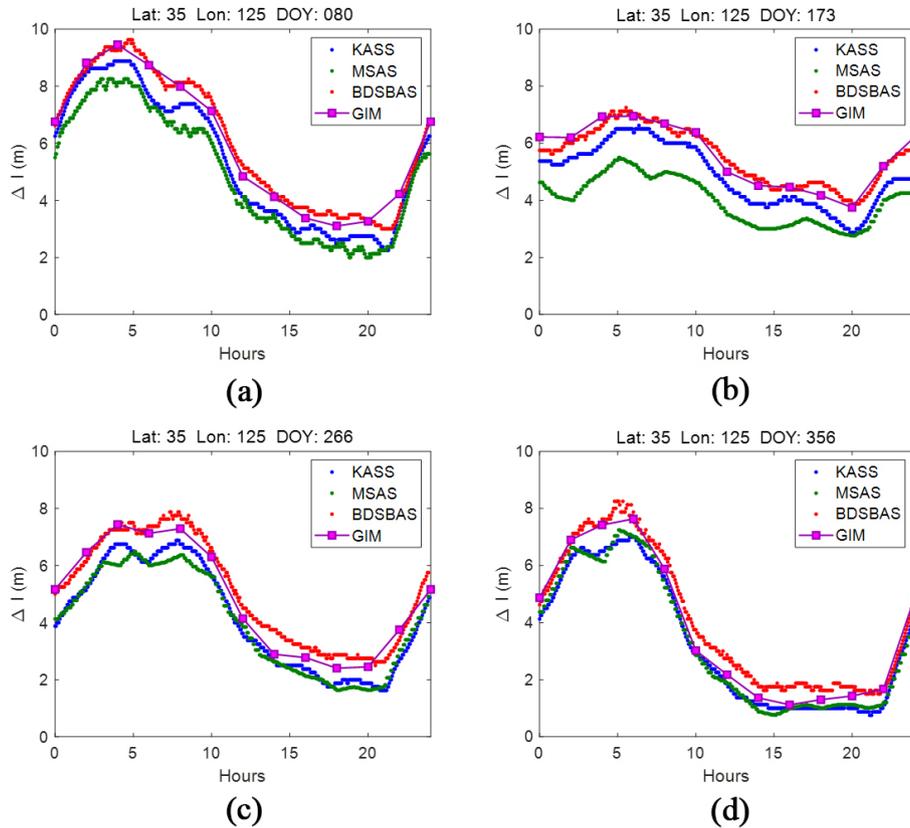


Fig. 2. Ionospheric delays for four seasons computed from three different SBAS systems and GIM.

고, Message type 18과 Message type 26을 통해 각 IGP에 대한 전리층 지연 보정 값과 무결성 정보를 제공한다 (SBAS Program Office 2022).

일본의 MSAS는 현재 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)의 정지궤도위성을 통해 Dual PRN 방식으로 Non-Precision Approach (NPA) 서비스를 제공하고 있다. MSAS는 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 간격의 IGP를 기준으로 전리층 지연 값을 모델링하며, Message type 18과 Message type 26을 사용해 전리층 지연 보정 정보와 무결성 정보를 방송한다 (Noh et al. 2020).

중국의 BDSBAS는 2020년 7월부터 국제 기준에 따라 APV-I 수준의 BDSBAS의 단일 주파수(SF) 및 이중 주파수 다중 위성 항법(DFMC) 서비스를 제공하고 있다. $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 간격으로 설정된 IGP를 기반으로 Message type 18과 Message type 26 메시지 형식을 사용하여 전리층 지연 보정 정보 및 무결성 정보를 제공한다 (Xin et al. 2023).

세 SBAS 시스템 모두 Message Type 27 또는 Message Type 28을 통해 유효 서비스 범위를 방송하지만, 전리층 보정 정보의 서비스 범위는 이보다 넓다. 예를 들어 KASS의 유효 서비스 범위에는 남한 지역만 포함되지만, 전리층 보정 정보 서비스 지역은 중국 지역 일부와 일본 지역이 포함된다. 따라서 본 연구는 유효 서비스 범위 밖에서도 전리층 보정 정보가 활용될 수 있음을 고려하며, 그에 따른 모델링 성능을 분석하는 데 중점을 둔다. 본 연구는 유효 서비스 지역 내에서의 비교가 아닌 특수한 상황을 다루고 있음을 유의해야 한다.

2.2 GIM

GIM은 전 세계의 상시 관측소에서 수집된 데이터를 바탕으로 후처리 되어 생성된다. 격자의 공간해상도는 위도 2.5° 와 경도 5° 로 되어 있으며, 각 IGP에서의 수직 방향 총전자자수(Vertical Total Electron Content, VTEC)를 TEC Unit (TECU) 단위로 제공된다. 현재 여러 IGS 분석센터가 전리층 VTEC 격자 모델을 생성하고 있으며, 그 결과물을 Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS)에 업로드하여 GIM 산출물을 제공하고 있다. 그러나 분석센터와 산출물 종류에 따라 업로드 되는 시간에는 차이가 있다. 일반적으로 최종 모델(final GIM)은 1~2주 후에 제공되며, 신속 모델(rapid GIM)은 약 1주 후, 예측 모델(predicted GIM)은 1일 전과 2일 전에 업로드 된다 (Sim et al. 2023). 이 중 최종 모델은 2~8 TECU의 정확도를 가지며 (Chen & Gao 2023), 다른 GIM 모델들보다 성능이 뛰어나기 때문에 IGS final GIM을 비교군으로 선정하였다.

2.3 성능 비교

GIM은 CDDIS에서 운영하는 File Transfer Protocol (FTP)를 통해 취득하였으며, 앞서 설정한 4개의 DOY에서 데이터를 취득하였다 (CDDIS 2025). SBAS 보정 정보 취득 방법은 다음과 같다. Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)의 FTP 서버에서 원하는 연도의 DOY 파일에 접속하면 각각 KASS, MSAS, BDSBAS

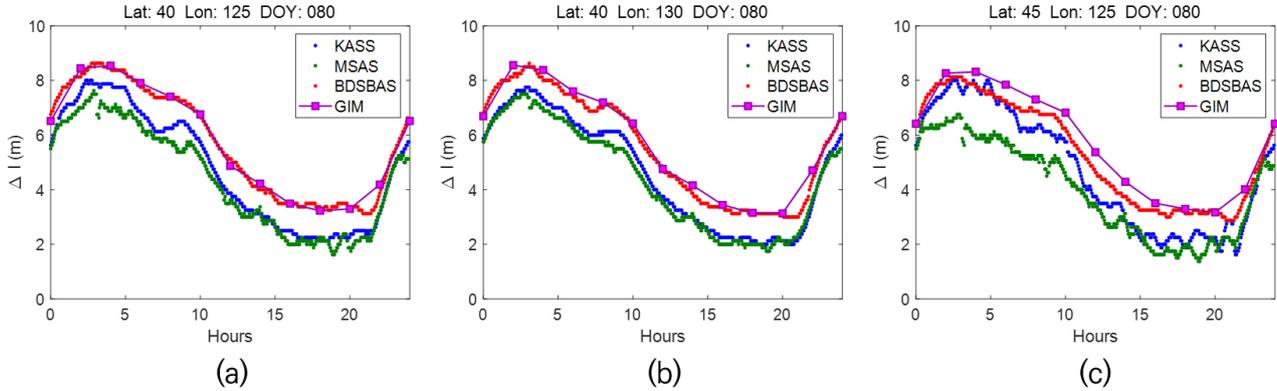


Fig. 3. Ionospheric delays for three different longitudes at 40°N on DOY 080.

Table 1. RMSE comparison of SBAS and GIM for different seasons.

Case	RMSE (m)		
	KASS	MSAS	BDSBAS
(a)	0.60	1.17	0.29
(b)	0.77	1.61	0.28
(c)	0.78	0.85	0.42
(d)	0.53	0.59	0.42

의 보정 정보 파일을 취득할 수 있다 (CNES 2025). 해당 파일들의 데이터는 이진수로 구성되어 있기 때문에, 디코딩 과정 (Kim 2021)을 통해 GIVE에서 제공하는 전리층 수직 지연 오차 정보를 취득하였다.

GIM은 2시간 간격으로 데이터를 제공하는 반면, SBAS 보정 정보는 시스템마다 다른 초 단위 간격으로 데이터를 제공한다. KASS, MSAS, BDSBAS의 보정 정보 제공 시간 간격은 각각 216 초, 155초, 240초이다. KASS를 파란색, MSAS를 초록색, BDSBAS를 빨간색, GIM을 보라색으로 표시하여 제공하는 모든 데이터를 비교할 수 있도록 Figs. 2와 3에 정리하였다.

Fig. 2에서는 계절적 특징에 따라 나타나는 차이를 비교하였는데, 위도 35°N, 경도 125°E 지역에서 Fig. 2a는 춘분, Fig. 2b는 하지, Fig. 2c는 추분, Fig. 2d는 동지에서의 양상을 나타낸다. 또한, 위 분석에 대한 뒷받침 자료로 GIM과 SBAS별 차이 값을 2시간 간격으로 계산하여 Table 1에 RMSE를 비교하였다.

Fig. 2와 Table 1을 보면 전반적인 양상은 BDSBAS가 모든 DOY에서 GIM과 가장 유사하였고, 전리층 수직 지연 모델링 성능이 가장 우수하였다. KASS와 MSAS는 전반적으로 비슷한 성능을 보이는 듯하나, Fig. 2b를 보면 여름에는 MSAS의 성능이 눈에 띄게 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 MSAS가 계절에 따른 전리층 보정 정보 모델링 성능 차이를 가진다고 볼 수 있으나, SBAS 시스템별 기준국의 위치 제약을 고려한다면 경도 125°E 부근에서 GIVE 추정값 정확도의 차이가 발생했을 가능성도 존재한다.

Fig. 3에서는 위도 및 경도에 따른 차이를 비교하였는데, DOY 080을 기준으로 Fig. 3a는 위도 40°N에서 경도 125°E, Fig. 3b는 위도 40°N에서 경도 130°E 지역을 나타내며, Fig. 3c는 위도 45°N에서 경도 125°E 지역을 나타낸다. Figs. 3a와 b는 경도 차이에 따른 비교를, Figs. 3a와 c는 위도 차이에 따른 비교를 수행하였다. 또한, 위 분석에 대한 뒷받침 자료로 GIM과 SBAS별 차이 값을 2

Table 2. RMSE comparison of SBAS and GIM for different latitudes and longitudes.

Case	RMSE (m)		
	KASS	MSAS	BDSBAS
(a)	0.99	1.36	0.18
(b)	1.07	1.25	0.22
(c)	1.07	1.74	0.43

시간 간격으로 계산하여 Table 2에 RMSE를 비교하였다.

먼저 Figs. 3a와 b, Table 2a와 b를 비교해 보면, 모든 SBAS 시스템에서 경도에 따른 성능 차이는 비교적 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 반면, Figs. 3a와 c, Table 2a와 c를 비교해 보면, 위도가 높아짐에 따라 대부분 SBAS 시스템의 모델링 성능이 더욱 낮아지는 것을 볼 수 있다. 특히, MSAS의 경우에는 위도 변화에 따른 성능 차이가 상당히 큰 것으로 나타났다.

이를 통해, SBAS 별 모델링 성능은 전반적으로 GIM과 유사하며, DOY와 위도에 따른 차이가 크지만, 경도에 따른 차이는 작은 것을 확인할 수 있다.

3. 측위 성능 분석

이번 장에서는 한국의 대전(DAEJ), 중국의 창춘(CHAN) 관측소에서 전리층 오차 보정을 하지 않은 경우, GIM을 이용해 보정한 경우와 SBAS가 제공하는 GIVE의 전리층 수직 지연 정보를 이용해 보정한 경우의 측위 결과를 비교한다.

관측 Receiver Independent Exchange Format (RINEX)는 CDDIS에서 운영하는 FTP를 통해 취득하였으며, 2024년 3월 22일(DOY 080)의 30초 간격으로 기록된 24시간 관측 데이터를 사용하였다. 대전 관측소의 기준 좌표는 동일한 날짜(DOY 080)에 CDDIS에서 제공한 Solution INdependent EXchange (SINEX) 파일의 좌표값으로 설정하였다 (CDDIS 2025). 창춘 관측소 기준 좌표는 SINEX 파일에 포함되지 않은 관계로, AUSPOS 웹사이트에 관측 RINEX 파일을 업로드하여 계산하였다 (Geoscience Australia 2025). AUSPOS는 호주 Geoscience Australia에서 제공하는 온라인 Global Positioning System (GPS) 데이터 처리 서비스로, 사용자가 업로드한 RINEX 형식의 GPS 관측 데이터를 활

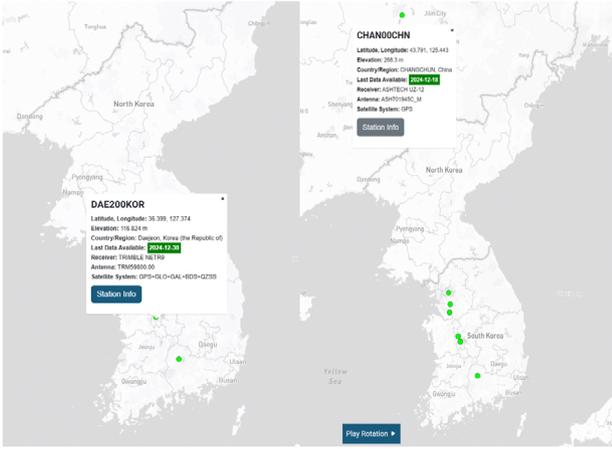


Fig. 4. Locations of DAEJ and CHAN sites from the IGS network view.

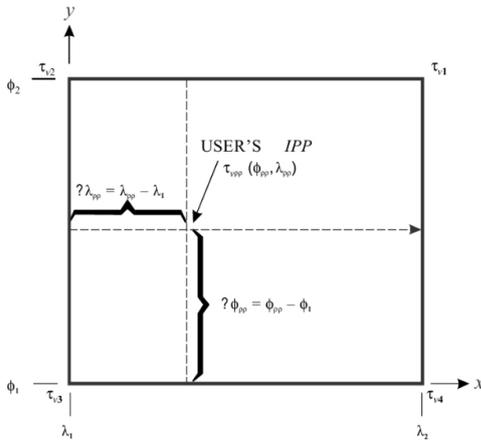


Fig. 5. IPP interpolation method (ICAO 2018).

용하여 전 세계 어느 위치에서든 정밀한 좌표를 계산하여 제공한다. 또한, IGS network view에서 제공하는 관측소의 위치를 Fig. 4에 표시하였다.

이렇게 취득한 좌표 참값과 관측 RINEX 파일을 활용하여 단독 측위 방식(standard point positioning)과 SBAS 보정 정보를 활용한 측위 방식을 비교하였다. 본 연구의 목적은 SBAS 자체의 측위 정확도를 평가하는 것이 아니고, 전리층 보정 성능을 확인하여 기존 GIM을 이용해 전리층 오차를 보정하는 방식과 다르게 SBAS에서 제공하는 전리층 수직 지연을 대안으로 적용하는 것에 있다. 이러한 이유로 궤도 오차, 위성 시계 오차, pseudo range correction 보정 정보는 사용하지 않고, 전리층 보정 정보만 사용하였다.

측위 과정에는 GPS 위성만 사용하였으며, 고도 각이 10도 이하인 관측치는 제외하였다. 또한 위성마다 고도 각에 따른 가중치를 부여하여 측위의 신뢰성을 높였으며, 최소제곱법(least squares method)을 이용해 측위를 수행하였다. 대류권 오차 보정은 지연량 계산에 효율적인 방식으로 알려진 GPT 모델을 사용하였으며, 전리층 오차는 보정을 하지 않은 경우와 GIM을 사용해 보정한 경우, SBAS 전리층 보정 정보를 사용하여 보정한

경우로 총 3가지를 비교하였다. 이때, 일반적으로 Code-Carrier Smoothing을 사용하면 측위 성능이 향상될 수 있지만, GIM과 SBAS가 제공하는 전리층 보정 정보의 특성만을 고려할 때, Code-Carrier Smoothing을 적용하지 않아도 충분히 유효한 분석이 가능하다고 판단하였다.

일반적으로 IPP는 격자점(IGP)과 정확히 일치하지 않고, 격자 내부에 위치한다. 이러한 특성을 반영하여, ICAO에서 IPP의 보정 값을 계산하기 위한 공간 보간 방식을 정의하였으며, 이는 격자 기반의 보간 방식을 따른다. Fig. 5는 이를 도식화한 것으로, 격자는 위도와 경도 간격이 각각 5°로 설정되어 있다.

보간 과정에서는 주변 IGP 수에 따라 최대 4개의 IGP를 사용하였으며, GIVE map에 포함되지 않는 지역이라면 2개 또는 3개를 활용하여 보간을 진행하였다. 주변 IGP가 1개이거나 아예 없는 경우는 발견되지 않았으므로 고려 사항에서 제외하였다. 보간 과정에 사용되는 식은 ICAO에서 Eqs. (1, 2)와 같이 정의하였다.

$$IC_i = -F_{pp}\tau_{vpp} \quad (1)$$

$$\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^4 W_i(x_{pp}, y_{pp})\tau_{vi} \quad (2)$$

Eq. (1)의 F_{pp} 는 obliquity factor이며, IC_i 는 최종 추정값이다. Eq. (2)의 τ_{vi} 는 IGP의 수직 전리층 지연 보정 값이고, τ_{vpp} 은 보간된 수직 전리층 지연 추정치로, 계산된 가중치를 IGP 보정 값에 곱해준 뒤 더하여 계산하는데, 이때 사용한 격자점이 2개라면 2개 지점의 값을 계산하여 더해준다. 가중치 계산은 Eqs. (3-7)과 같다.

$$W_1 = x_{pp}y_{pp} \quad (3)$$

$$W_2 = (1 - x_{pp})y_{pp} \quad (4)$$

$$W_3 = (1 - x_{pp})(1 - y_{pp}) \quad (5)$$

$$W_4 = x_{pp}(1 - y_{pp}) \quad (6)$$

$$x_{pp} = \frac{\lambda_{pp} - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad y_{pp} = \frac{\phi_{pp} - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1} \quad (7)$$

Eqs. (3-6)에서 W_i 는 IPP 인근 4개 IGP 각각의 거리에 비례하여 부여하는 가중치이다. Eq. (7)의 ϕ_{pp} , ϕ_1 , ϕ_2 는 각각 IPP의 위도, IPP 기준 남쪽 IGP의 위도, 북쪽 IGP의 위도이고, λ_{pp} , λ_1 , λ_2 는 각각 IPP의 경도, IPP 기준 서쪽 IGP의 경도, 동쪽 IGP의 경도를 나타낸다.

3.1 대전 관측소

해당 관측소는 북위 36.399°, 동경 127.374°, 고도 116.824 m에 위치하며, 남한(북위 35° 지역)에서의 측위 양상을 확인하기 위하

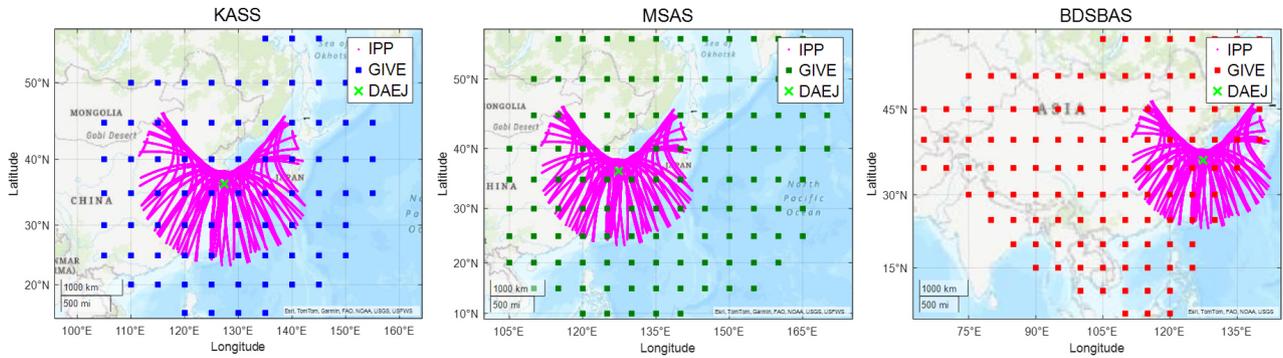


Fig. 6. GIVE map and IPP distribution map for each SBAS at the Daejeon site.

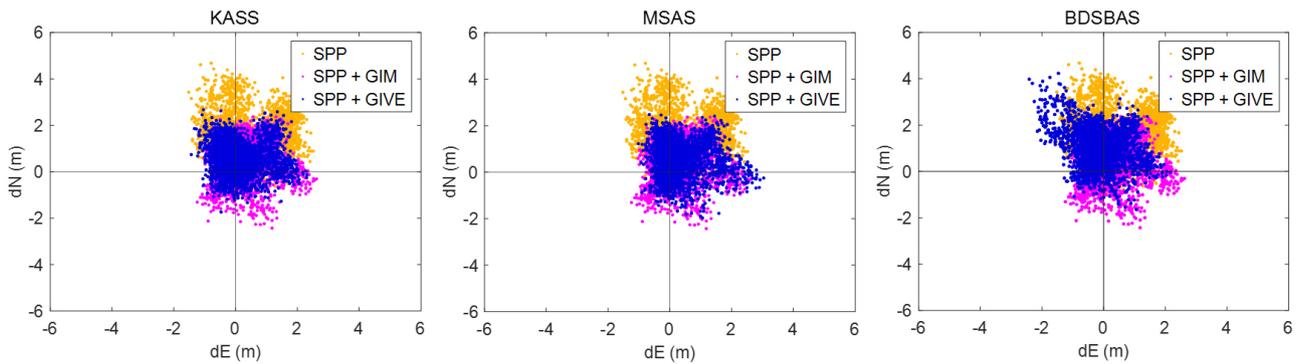


Fig. 7. Horizontal positioning errors from SPP, SPP with GIM, and SBAS at the Daejeon site.

Table 3. Positioning RMSE and improvement ratio for each positioning method at the Daejeon site.

Method	RMSE (m)			Improvement (%)
	ΔH	ΔV	$\Delta 3D$	
SPP	1.95	7.55±3.54	8.56	-
GIM	1.17	-1.53±1.34	2.35	73
KASS	1.12	-0.78±1.42	1.97	77
MSAS	1.18	0.12±1.40	1.84	79
BDSBAS	1.46	-0.99±1.42	2.27	73

여 선정하였다. 당일 SBAS가 제공하는 GIVE map과 관측에 사용된 위성들의 IPP 경로, 분포를 나타낸 IPP distribution map의 포함 정도를 Fig. 6에 표시하였으며, 그 비율을 계산하였다. 여기서 포함 비율은 위성의 IPP 분포가 GIVE map의 격자 내에 포함되어 4개의 IGP를 모두 사용하여 보간하는 비율을 의미한다. 100%에 가까울수록 4개 IGP를 사용하는 경우가 많은 것이며, 비율이 낮을수록 일부 IPP가 격자 범위 밖에 위치하여 2개 또는 3개의 IGP를 사용하여 보간하는 경우가 많은 것이다. 앞서 기술했듯이, IGP를 1개만 사용하거나 아예 사용하지 않는 경우는 존재하지 않았다. KASS, MSAS는 모두 100% 포함 비율을 보여주었고, BDSBAS는 85.27%의 포함 비율을 보이는 것을 확인하였다.

다음으로 각각 KASS, MSAS, BDSBAS에서 제공하는 전리층 지연 오차 보정을 활용한 측위 결과를 확인하여 수평 방향 오차 (dH)를 Fig. 7에 정리하였다. 전리층 지연 보정을 하지 않은 경우를 황색, GIM을 활용하여 전리층 지연을 보정한 경우를 자주색, SBAS를 활용하여 전리층 지연을 보정한 경우를 파란색으로

표시하였다. 또한 성능 평가의 지표로 RMSE를 사용하여 정확도 향상률과 함께 Table 3에 정리하였다. 정확도 향상률은 계산된 결과를 소수 첫째 자리에서 반올림하여 정수 형태로 나타내었다. 전리층 오차 보정 효과는 주로 수직 오차에서 눈에 띄게 나타나므로, 향상 정도를 명확히 보기 위하여 수직 방향 오차(dV)의 RMSE는 바이어스(bias) ± 표준편차로 정리하였다.

Table 3을 통해 확인할 수 있는 바와 같이, SBAS를 이용하여 전리층 오차를 보정한 경우 수직 오차의 바이어스가 현저히 낮아지는 것을 확인하였다. GIM을 사용해 보정한 경우보다 향상되었으며, 특히 MSAS를 사용하였을 때 보정 효과가 가장 우수하였다. 또한 KASS는 전리층 오차를 보정하지 않은 경우보다 약 77%의 정확도 향상을 보였고, MSAS와 BDSBAS는 각각 79%, 73%의 정확도 향상을 보였다. MSAS의 향상률이 가장 높았고, BDSBAS의 향상률이 가장 낮았다. BDSBAS는 IPP 포함 비율이 낮아 보간 과정에서 정확도가 저하된 것으로 추정된다. 그럼에도 모든 SBAS는 GIM을 사용한 경우보다 전부 높은 향상률을 보였으므로, 측위에 적합하다고 평가할 수 있다.

3.2 측준 관측소

해당 관측소는 북위 43.791°, 동경 125.443°, 고도 268.3 m에 위치하며, 북한 및 중국(북위 40° 이상 지역)에서의 측위 양상을 확인하기 위하여 선정하였다. 당일 SBAS가 제공하는 GIVE map과 관측에 사용된 위성들의 IPP 경로, 분포를 나타낸 IPP distribution

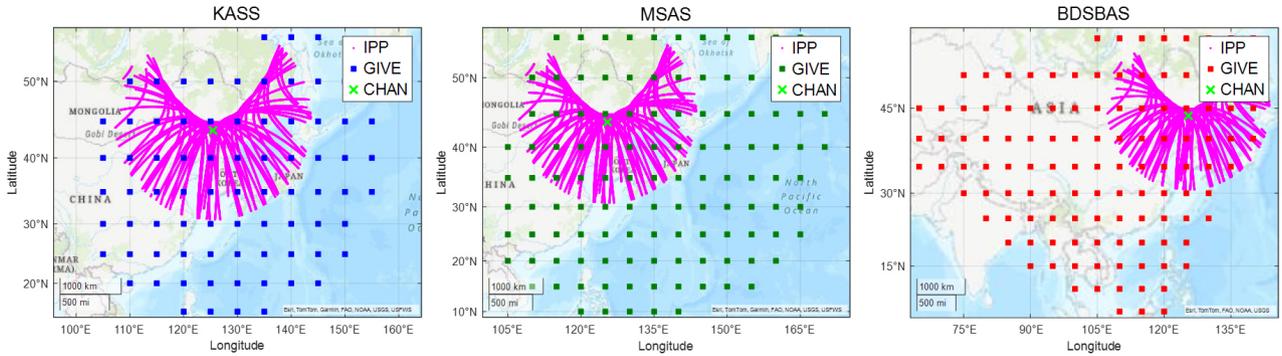


Fig. 8. GIVE map and IPP distribution map for each SBAS at the Changchun site.

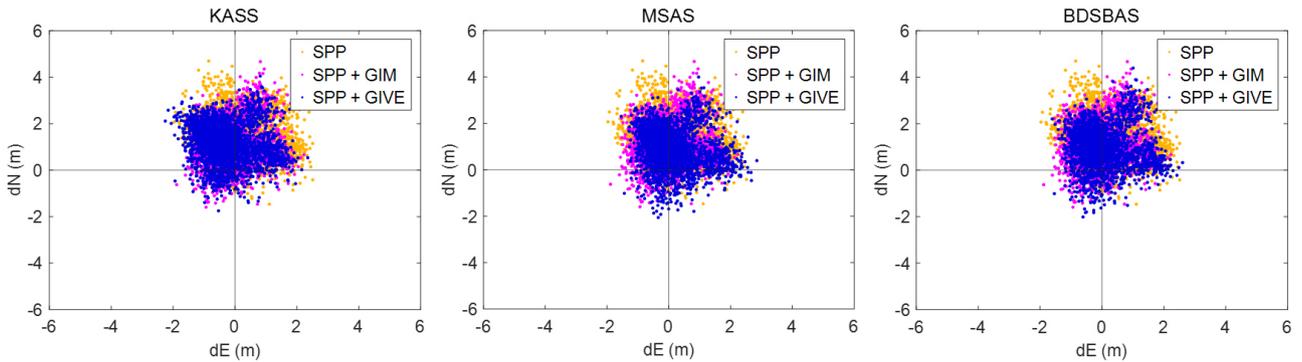


Fig. 9. Horizontal positioning errors from SPP, SPP with GIM, and SBAS at the Changchun site.

Table 4. Positioning RMSE and improvement ratio for each positioning method at the Changchun site.

Method	RMSE (m)			Improvement (%)
	ΔH	ΔV	$\Delta 3D$	
SPP	1.88	7.05±2.89	7.85	-
GIM	1.58	-0.54±1.36	2.15	73
KASS	1.63	0.09±1.50	2.22	72
MSAS	1.43	1.06±1.48	2.31	71
BDSBAS	1.49	-1.08±1.51	2.39	70

map의 포함 정도를 Fig. 8에 표시하였다. 앞서 기술한 바와 같이 포함 비율을 계산하였으며, KASS는 98.56%의 포함 비율을 나타내었고, MSAS는 98.70%, BDSBAS는 96.42%의 포함 비율을 보여주었다.

다음으로 각각 KASS, MSAS, BDSBAS에서 제공하는 전리층 지연 오차 보정을 활용한 측위 결과를 확인하여 수평 방향 오차 (dH)를 Fig. 9에 표시하였고, 성능 평가의 지표로 RMSE와 소수 첫째 자리에서 반올림하여 계산한 정확도 향상률을 Table 4에 정리하였다. 전리층 지연 보정을 하지 않은 경우를 황색, GIM을 활용하여 전리층 지연을 보정한 경우를 자주색, SBAS를 활용하여 전리층 지연을 보정한 경우를 파란색으로 표시하였다. 앞서 기술한 바와 같이, 전리층 오차 보정 효과는 주로 수직 오차에서 눈에 띄게 나타나므로, 향상 정도를 명확히 보기 위하여 수직 방향 오차 (dV)의 RMSE는 바이어스 ± 표준편차로 정리하였다.

창춘 관측소에서의 측위는 GIM을 사용할 때보다 SBAS를 사용할 경우 정확도 향상률이 낮게 나타났다. 그러나 Table 4를 통

해 확인할 수 있는 바와 같이, SBAS를 사용해 보정한 경우에도 수직 오차 바이어스는 현저히 낮아졌다. 또한 KASS는 전리층 오차를 보정하지 않은 경우에 비해 약 72%의 정확도 향상을 보였으며, MSAS와 BDSBAS는 각각 71%, 70%의 향상률을 기록하여 GIM과 유사한 수준으로 전리층 보정이 가능함을 확인하였다. 이는 측위 적용에 충분한 정확성과 신뢰성을 갖춘 결과라고 평가할 수 있다.

전리층 보정 정보 모델링 성능을 보면 BDSBAS를 사용한 측위 결과가 가장 좋을 것으로 예상되었지만, 실제 측위에서는 대전과 창춘 관측소 모두 BDSBAS의 측위 정확도가 낮게 나타났다. 따라서 IPP distribution 포함 비율이 측위에 매우 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 창춘 관측소에서는 세 SBAS 모두 IPP 포함 비율이 100%가 아니므로, 보간 방식에서 오는 정확도 차이는 대전 관측소에서 보다 크지 않았다. 창춘 관측소에서 측위에 영향을 줄 수 있는 요인은 유효 서비스 범위 또는 전리층 모델링 성능인데, 창춘 관측소는 BDSBAS의 유효 범위 가장자리에 위치하고, KASS 및 MSAS 또한 유효 서비스 범위 내에 존재하지 않는다. 따라서 온전히 전리층 모델링 성능에 의해 정확도가 달라졌기 때문에 모든 SBAS를 사용한 측위 결과가 유사하게 나타난 것으로 판단하였다. 반면 대전 관측소의 경우, BDSBAS는 IPP 포함 비율도 가장 낮을 뿐 아니라, 서비스 유효 지역에 포함이 안 되므로, KASS와 MSAS에 비하여 낮은 정확도가 계산된 것으로 판단하였다.

4. 결론

본 연구는 한반도 및 인접 지역에서 SBAS 전리층 지연 모델링 성능을 계절 및 지역별로 비교 분석하고, KASS, MSAS, BDSBAS의 전리층 보정 성능을 평가하였다.

계절 및 지역별 비교를 진행하였을 때, MSAS는 KASS에 비해 성능이 낮았고, 위도가 높을수록 성능 저하가 뚜렷하게 나타났다. 반면, BDSBAS와 KASS는 여름철과 같이 TEC 변동이 큰 상황에서도 우수한 성능을 보였으며, 특히 BDSBAS는 GIM과 가장 유사한 양상을 보였고 전리층 지연 모델링 성능이 가장 뛰어났다. 다만, BDSBAS는 IPP 포함 비율이 낮아 한반도에서의 활용에는 제한이 있다고 판단하였다. 관측 데이터를 활용한 분석에서는 대전 관측소에서 모든 SBAS 시스템이 GIM 대비 우수한 보정 성능을 보였으며, 창원 관측소에서도 SBAS 시스템의 보정 성능은 GIM과 유사하였다.

본 연구는 한반도 지역에서 SBAS 보정 정보의 성능을 분석하고, KASS의 고정밀 서비스 가능성을 입증함으로써, SBAS가 유효 서비스 범위 밖에서도 다양한 위치 기반 응용 분야에서 활용될 수 있음을 제시하였다. 향후 연구에서는 더욱 다양한 날씨에서의 데이터를 분석하고, 장기적인 관점에서 SBAS 보정 정보의 안정성과 신뢰성을 평가할 필요가 있다. 본 연구는 이러한 향후 SBAS 시스템 활용 연구에 중요한 기초 자료를 제공할 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 2025년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행된 연구임(RS-2022-00141819, 초정밀 디지털 국토정보 획득을 위한 절대, 상대, 연속복합 측위 고도화 기술 개발).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All the authors have contributed to the presented work. K.D. conceived the research idea, designed the research. H.S. collected the data, performed the analysis, and interpreted the results. H.S. also wrote the first draft of the manuscript. K.D. supervised this work and reviewed the manuscript.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Centre National d'Etudes Spatiales, SBAS Products [Internet], cited 2025 Jan 10, available from: <ftp://serenad-public.cnes.fr/SERENAD0/>
- Chen, J. & Gao, Y. 2023, Real-Time Ionosphere Prediction Based on IGS Rapid Products Using Long Short-Term Memory Deep Learning, *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, 70. <https://doi.org/10.33012/navi.581>
- Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS), IGS final GIM Products [Internet], cited 2025 Jan 10, available from: <https://cdsis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>
- Geoscience Australia, Reference Coordinate [Internet], cited 2025 Jan 10, available from: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>
- ICAO 2018, International Standards and Recommended Practices (SARPs): Aeronautical Telecommunications, Annex 10, vol.1, 7th edition
- Kim, M. & Kim, J. 2016, A Long-term Accuracy Analysis of the GPS Klobuchar Ionosphere Mode, *KSAA*, 24, 11-18. <https://doi.org/10.12985/ksaa.2016.24.2.011>
- Kim, Y.-G. 2021, Development of Global SBAS Positioning Algorithm and Performance Analysis in Signal Blockage Condition, M.S. Dissertation, Inha University. <http://inha.dcollection.net/common/orgView/200000366457>
- Misra, P. & Enge, P. 2006, Global positioning system: Signals, Measurements, and Performance, 2nd ed. (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press).
- National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA Space Weather Scales [Internet], cited 2025 Feb 6, available from: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
- Noh, J. H., Lim, D. W., Lee, J. H., Jo, G. H., & Lee, S. J. 2020, Performance Analysis of BDSBAS and MSAS in Korea, *JPNT*, 9, 249-259. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.3.249>
- Park, K.-D., Lee, H.-C., Kim, M.-S., Kim, Y.-G., Seo, S. W., et al. 2018, Accuracy Comparison of GPT and SBAS Troposphere Models for GNSS Data Processing, *JPNT*, 7, 183-188. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2018.7.3.183>
- SBAS Program Office 2022, KASS signal Interface Control Document, Korea Aerospace Research Institute, Technical Report No.K8M-22-220-001.
- Sim, E.-J., Park, K.-D., Park, J.-Y., & Park, B.-G. 2023, Accuracy Analysis of Predicted CODE GIM in the Korean Peninsula, *JPNT*, 12, 423-430. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.4.423>
- Xin, J., Guo, R., Chen, J., Tian, Y., Cao, Y., et al. 2023,

Performance analysis of the BDSBAS-B1C message in trial operation stage, Sci Rep 13, 6043. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32846-4>



Hyung-Seok Lee is a B.S. student in the Department of Geoinformatic Engineering at Inha University. His research interests include GNSS error analysis and SBAS system.



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.

