

Accuracy Evaluation of KASS Augmented Navigation by Utilizing Commercial Receivers

Sung-Hyun Park, Yong-Hui Park[†], Jin-Ho Jeong, Jin-Mo Park



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.

Accuracy Evaluation of KASS Augmented Navigation by Utilizing Commercial Receivers

Sung-Hyun Park, Yong-Hui Park[†], Jin-Ho Jeong, Jin-Mo Park

Research and Development Center, Dusitech Inc, Daejeon 34027, Korea

ABSTRACT

The Satellite-Based Augmentation System (SBAS) plays a significant role in the fields of aviation and navigation: it corrects signal errors of the Global Navigation Satellite System (GNSS) and provides integrity information to facilitate precise positioning. These SBAS systems have been adopted as international standards by the International Civil Aviation Organization (ICAO). In recent SBAS system design, the Minimum Operational Performance Standards (MOPS) defined by the Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) must be followed. In October 2014, South Korea embarked on the development of a Korean GPS precision position correction system, referred to as Korea Augmentation Satellite System (KASS). The goal is to achieve APV-1 Standard of Service Level (SoL) service level and acquisition of CAT-1 test operating technology. The first satellite of KASS, KASS Prototype 1, was successfully launched from the Guiana Space Centre in South America on June 23, 2020. In December 2022 and June 2023, the first and second service signals of KASS were broadcasted, and full-scale KASS correction signal broadcasting is scheduled to start at the end of 2023. The aim of this study is to analyze the precision of both the GNSS system and KASS system by comparing them. KASS is also compared with Japan's Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS), which is available in Korea. The final objective of this work is to validate the usefulness of KASS correction navigation in the South Korean operational environment.

Keywords: GNSS, SBAS, KASS, positioning accuracy

1. 서론

항공 및 항법 분야에서 Global Navigation Satellite System (GNSS)와 같은 위성기반 시스템은 정확한 위치정보를 요구하는 서비스 분야의 안전과 효율성에 중대한 역할을 한다. 그러나 GNSS 신호는 대기 환경 및 전파 환경 등 여러 요인으로 인해 오차가 발생할 수 있으며, 이러한 오차를 보정하여 정밀한 위치 결정을 도와주는 시스템 중 하나가 위성기반 보정시스템인 Satellite-Based Augmentation System (SBAS)이다. 이 SBAS는 항공기의 안전 운항을 위해 GNSS의 신호 오차에 대한 보정정보

와 무결성 정보를 정지궤도 위성을 통해 제공해주는 국제 민간항공기구 (International Civil Aviation Organization, ICAO)에서 국제 표준으로 정한 시스템이다. 이러한 보정항법의 중요성과 필요성에 따라 한국항공우주연구원 (Korea Aerospace Research Institute)에서는 한국 정부가 구축한 한국형 SBAS인 Korea Augmentation Satellite System (KASS)에 대해 지속적인 성능개선 및 활용방안을 연구하고 있다. KASS는 2023년 6월 기준으로 1개의 위성을 통하여 테스트 메시지에 항공용 무결성 정보를 제외한 보정 메시지를 송출하는 시험 방송을 하고 있다. 본 연구에서는 GNSS 및 KASS 보정정보를 이용한 Differential GNSS (DGNSS) 항법의 위치 정확도를 비교 분석하고, 일본의 Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS)와 한국의 KASS 보정 성능을 비교하여 국내 환경에서의 유용성을 검토하고자 한다.

Received Oct 26, 2023 Revised Nov 09, 2023 Accepted Nov 13, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: pyh@dusi.co.kr

Tel: +82-42-280-1410 Fax: +82-42-280-1459

Sung-Hyun Park <https://orcid.org/0000-0002-1921-520X>

Yong-Hui Park <https://orcid.org/0000-0003-4896-8195>

Jin-Ho Jeong <https://orcid.org/0000-0003-1018-5355>

Jin-Mo Park <https://orcid.org/0000-0002-1632-7257>

2. 시험 구성

현재 전 세계에서 다양한 종류의 수신기가 출시되어 있으

Table 1. Comparison of receivable frequencies.

GNSS system	Signal	OEM7700	BD-990	ZED-F9P	Neo-M9N
GPS	L1 C/A, L1C	●	●	● (only L1 C/A)	● (only L1 C/A)
	L2C, L2P	●	●		● (only L2C)
	L5	●	●		
GLONASS	L1 C/A	●	●	●	●
	L2 C/A, L2P	●	●		●
	L3	●	●		
Galileo	E1	●	●	●	●
	E5a, b	●	●		● (only E5b)
	E6	●	●		
BeiDou	B1, B1C	●	●	●	● (only B1)
	B2I, B2A, B2B	●	●		● (only B2I)
	B3	●	●		
QZSS	L1 C/A, L1C	●	●	●	● (only L1 C/A)
	L2C	●	●		●
	L5	●	●		
NAVIC	L5	●	●		
SBAS	L1 C/A	●	●	●	●
	L5	●	●		

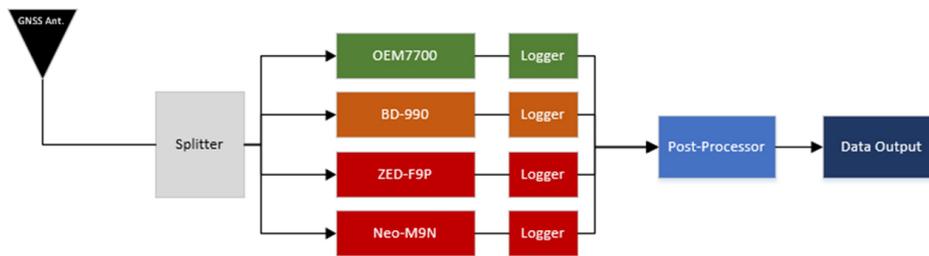


Fig. 1. Test environment configuration.



Fig. 2. GNSS & SBAS (KASS) signal test bed setup using commercial receiver.

나 이러한 수신기들은 가격에 따라 항법성능, 수신 가능한 위성의 종류 및 채널 수, 그리고 기타 옵션들이 다양하다. 고가의 수신기는 저가 수신기에 비해 정확한 위치 정보를 제공할 수 있으며 DGNSS 및 Real Time Kinematic 보정정보를 활용할 때 이 효과는 보다 더 커질 수 있다. 본 연구에서는 국내 시험 서비스 중인 KASS 보정정보를 활용하여, 고가의 수신기부터 저가의 수신기까지 다양한 유형의 수신기에 대한 실험을 통해 수신기의 성능에 따른 위치 정확도 성능을 비교 평가하였다. SBAS 보정정보를 이용한 DGNSS 성능평가를 위하여, Novatel사의 OEM 7700, Trimble사의 BD-990, Ublox사의 ZED-F9P 및 Neo-M9N 수신기를 사용하였다. Novatel사와 Trimble사의 수신기는 고가(약 1500만원 ~ 2000만원) 수신기에 속하며, Ublox 수신기는 상대적으로 저가(약 5만원 ~ 20만원) 수신기로 분류된다. 시험에 사용된 각 수신기가 지원하는 항법시스템 및 수신가능 주파수는 Table 1과

같으며, 시험 구성은 Fig. 1과 같다.

실험에는 Fig. 2와 같이 Novatel사의 OEM 7700, Ublox사의 ZED-F9P 및 Neo-M9N 수신기를 포함한 세 개의 다른 제조사의 4종류 수신기 모델을 활용하여 보정정보의 정밀도 시험을 진행하였다. 이 중 Novatel사의 OEM 7700, Ublox사의 ZED-F9P, 그리고 Neo-M9N 수신기는 SBAS 테스트 모드 활성화 설정을 통해 KASS 보정을 수행이 가능하였다. 반면, Trimble사의 BD-990 수신기는 SBAS 테스트 모드 활성화가 불가능하여 수신기 자체에서 KASS 보정을 수행할 수 없었다. 이러한 이유로 Trimble 수신기의 경우에는 원시 관측치와 SBAS 메시지를 수신하고 자체적으로 SBAS 보정항법 알고리즘을 구현하여 위치계산을 수행하였다. 또한, Ublox사의 Neo-M9N 수신기의 경우 GLONASS, Galileo, BeiDou 등 다양한 위성 신호 수신이 가능한 모델이나, 저렴한 가격대의 수신기로, 신호 추적 채널 부족으로 인하여 KASS 신호의 추적이 불규칙하게 이루어지는 문제가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Neo-M9N 수신기의 설정에서 GLONASS 위성의 신호 추적을 비활성화하여 연속적으로 KASS 위성 신호를 안정적으로 추적할 수 있도록 설정을 변경하였다.

3. SBAS 보정 알고리즘

SBAS 보정을 위하여 사용되는 정보에는 고속 보정치(Fast correction), 장기 보정치(Long term correction), 전리층 지연 보

Table 2. SBAS & using KASS message type.

Type	Contents	Using KASS
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	●
8	Reserved for future messages	
9	GEO navigation message (X, Y, Z, time, etc.)	●
10	Degradation parameters	●
11	Reserved for future messages	
12	SBAS network time/UTC offset parameters	
13-16	Reserved for future messages	
17	GEO satellite almanacs	●
18	Ionospheric grid point masks	●
19-23	Reserved for future messages	
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	
29-61	Reserved for future messages	
62	Internal test message	
63	Null message	●

정치(Ionospheric correction) 등이 있다. 이는 일반적으로 위치 결정의 실시간 성능을 개선하는데 사용되며, 이를 이용하여 의사 거리, 이온층 지연, 대류층 지연, 시계 오차 등을 보정한다.

SBAS 및 KASS에서 사용되는 메시지는 Table 2와 같다 (KASS ICD 2022). 이 중 급격하게 변하는 오차나 지연요소의 보정을 위하여 고속 보정치를 사용하며 데이터를 사용하기 전, 사용 가능한 PRN 마스크가 수신되어 저장되었는지 확인해야 한다. Table 2의 SBAS 메시지 중 1, 2, 5, 24번을 이용하여 계산을 진행한다. 사용 가능한 PRN 마스크가 수신되지 않은 경우, 고속 보정치를 계산할 수 없다. 그러나 사용 가능한 PRN 마스크가 있는 경우, 각 위성에 대한 고속 보정치의 Injection Order of Data Page (IODP)와 PRN 마스크의 IODP를 비교한다. IODP가 서로 다를 경우 마찬가지로 Fast correction을 계산할 수 없다. 그러나 IODP가 동일한 경우, 최근의 고속 보정치가 적용된 시간과 현재 시간을 비교하여 6초 이상의 차이가 나면 고속 보정치를 계산할 수 없고, 6초 이내의 정보일 때에만 Eq. (1)을 이용하여 고속 보정치를 계산한다.

$$PRC_{corrected}(t) = PRC(t_{of}) + RRC(t_{of}) * (t - t_{of})$$

$$RRC(t_{of}) = \frac{PRC_{current} - PRC_{previous}}{\Delta t}$$

$$\Delta t = (t_{of} - t_{of,previous}) \quad (1)$$

여기서 $PRC_{corrected}$ 는 가장 최근에 받은 고속 보정치, $PRC_{previous}$ 는 이전에 받은 고속 보정치, Range rate correction (RRC)는 PRC 변화율, t_{of} 는 고속 보정치의 유효 시간, $t_{of,previous}$ 는 이전에 받은 고속 보정치의 유효시간을 나타낸다. 일반적으로 PRC 값은 직접적으로 방송되지 않기 때문에 PRC 값을 차분으로 적용해야 하지만, IALA의 권고에 따르면 PRC를 0으로 설정 시 오히려 측위 성능이 향상된다는 것을 감안하여 PRC를 0으로 설정하여 보정 값을 계산하였다 (Kee et al. 2010).

장기 보정치를 이용하여 느리게 변하는 오차나 지연을 보정하며, SBAS 메시지 중 1, 24, 25번을 이용하여 계산을 진행한다. 25번 메시지는 느린 속도로 변화하는 위성 관련 오차를 다룬다. 이 메시지에는 위성의 궤도 오차와 시계 오차 정보가 포함된다. 이 메시지에는 1개 또는 2개의 위성의 속도에 따라 장기 보정 정보가 제공된다. 1개의 위성에 대한 정보가 제공될 때 해당 위성의 위치 오차, 위치 오차의 변화율, 위성 시계 오차, 그리고 위성 시계 오차의 변화율 정보가 포함된다. 2개의 위성에 대한 정보가 제공될 때에는 변화율 정보 없이 해당 위성들의 위치 오차와 시계 오차 정보만이 포함된다. 장기 보정을 계산할 때, PRN 마스크의 IODP와 비교하여 일치할 경우에만 보정 정보가 계산된다. 그러나 240초 이상의 정보는 사용할 수 없음에 유의해야 한다. Eq. (2)는 위성 시계 오차 계산식이다.

$$\Delta t_{sv}(t) = \delta a_{f0} + \delta a_{f1}(t - t_0)$$

$$(\Delta t_{sv})_{L1} = \Delta t_{sv} - T_{GD} \quad (2)$$

여기서 $\Delta t_{sv}(t)$ 는 *time of day* (t)의 시계 오차 추정 값이며, δa_{f0} 는 시계 오차 보정치, δa_{f1} 는 시계 오차 변화율의 보정치, T_{GD} 는 그룹 지연 시간을 뜻한다. 위성 궤도 오차는 위성의 위치 오차 벡터와 해당 위치 오차의 변화율 벡터를 선형적으로 결합하여 Eq. (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta R_k = \begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta y_k \\ \delta z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\delta x} \\ \dot{\delta y} \\ \dot{\delta z} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (3)$$

위성의 위치 오차를 벡터 형식으로 계산할 때, 가상 기준국에서 해당 위성까지의 시선 벡터를 계산하고, 이 시선 벡터와 위치 오차 벡터를 내적 한다. 이러한 연산을 통해 시선 벡터 방향으로

Table 3. Meteorological parameters for tropospheric delay.

Latitude (°)	Average					Seasonal variation				
	P_0 (mbar)	T_0 (K)	e_0 (mbar)	β_0 (k/m)	λ_0	ΔP (mbar)	ΔT (K)	Δe (mbar)	$\Delta\beta$ (k/m)	$\Delta\lambda$
15 or less	1013.25	299.65	26.31	6.30e-3	2.77	0.00	0.00	0.00	0.00e-3	0.00
30	1017.25	294.15	21.79	6.05e-3	3.15	-3.75	7.00	8.85	0.25e-3	0.33
45	1015.75	283.15	11.66	5.58e-3	2.57	-2.25	11.00	7.24	0.32e-3	0.46
60	1011.75	272.15	6.78	5.39e-3	1.81	-1.75	15.00	5.36	0.81e-3	0.74
75 or greater	1013.00	263.65	4.11	4.53e-3	1.55	-0.50	14.50	3.39	0.62e-3	0.30

의 스칼라 형태의 위치 오차 정보를 얻게 된다. 이 위치 오차 정보는 시계 오차와 결합되어 Eq. (4)와 같이 계산하면 최종 장기 보정치(LC)를 얻게 된다. 여기서 c 는 빛의 속도를 뜻한다.

$$LC = e^i \cdot \delta R_k + c \cdot \Delta t_{sv} \tag{4}$$

전리층 지연 오차의 계산을 위하여 18, 26번 메시지를 사용한다. 18번 메시지는 현재 어떤 전리층 격자점에서 서비스가 제공 중인지를 나타내며, 전리층 격자점은 세로 9개의 밴드와 가로 11개의 밴드로 이루어져 있다. 각 밴드에는 약 200개의 격자점이 있으며, 18번 메시지는 어떤 격자점의 정보를 전달하는지를 나타낸다. 26번 메시지는 18번 메시지에서 정의된 격자점의 수직 전리층 지연값 및 해당 값의 분산을 제공하며, 하나의 메시지에 15개의 동일한 정보가 포함된다. 이 정보는 일반적으로 다른 보정치 중에서 가장 늦게 제공된다. 정의된 격자점에 대한 Ionospheric Grid Point Vertical Delay Estimator (IGP VDE)와, Grid Ionospheric Vertical Error Indicator (GIVEI)의 사용 가능 여부를 확인한다. 이 과정에서 600초 이상 된 정보는 유효 기간이 지났으므로 사용할 수 없으며, GIVEI 값이 15인 경우 해당 격자점에 대한 IGP VDE 값은 관측되지 않은 값으로 간주되므로 제외해야 한다. 전리층 통과점과 격자점 사이의 거리를 기반으로 아래의 식을 사용하여 가중치를 계산한다. 이 가중치를 활용하여 격자점의 수직 전리층 지연값의 가중합을 통해 전리층 통과점의 수직 전리층 지연 값을 추정한다. 사용 가능한 격자점의 수가 세 개일 때 Eq. (5)와 같이 계산하며, 네 개일 때의 보간 방법은 Eq. (6)과 같다.

$$\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^3 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \tau_{vi} \tag{5}$$

$$\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^4 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \tau_{vi} \tag{6}$$

여기서 τ_{vpp} 는 전리층 통과점의 수직 전리층 지연값을 의미하고 i 는 각 전리층 격자점에 대한 인덱스, W_1 은 x_{pp}, y_{pp} , W_2 는 $(1-x_{pp}), y_{pp}$, W_3 은 $(1-x_{pp})(1-y_{pp})$, W_4 는 $x_{pp}(1-y_{pp})$ 을 뜻한다. 각 계수는 Eq. (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{pp} &= \lambda_{pp} - \lambda_1 \\ \Delta\lambda_{pp} &= \phi_{pp} - \phi_1 \\ x_{pp} &= \frac{\Delta\lambda_{pp}}{\lambda_2 - \lambda_1} \\ y_{pp} &= \frac{\Delta\phi_{pp}}{\phi_2 - \phi_1} \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 격자점의 정보에 해당하는 λ_1 은 전리층 통과점의 서쪽 격자점의 경도, λ_2 는 동쪽 격자점의 경도, ϕ_1 은 남쪽 격자점의 경도, ϕ_2 는 북쪽 격자점의 경도를 뜻한다. Eqs. (5)와 (6)에서 계산된 전

리층 통과점의 수직 전리층 지연 값에 Eq. (8)과 같이 경사 계수를 곱하여 경사 전리층 지연 값을 계산하고, 이를 통합하여 최종적으로 전리층 지연 보정 정보를 얻을 수 있다. 여기서 IC는 전리층 보정정보(Ionospheric delay correction)를 의미한다.

$$\begin{aligned} IC_i &= \tau_{spp}(\lambda_{pp}, \phi_{pp}) = -F_{pp} \tau_{vpp}(\lambda_{pp}, \phi_{pp}) \\ F_{pp} &= \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + h_1} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{8}$$

대류층 지연 오차 모델은 일반적으로 GPS 신호의 대류층 지연을 추정하고, 상수 및 가변 요소를 고려한 Saastamoinen 모델과 대류층의 수직 및 수평 분포에 대한 가정을 사용하며, 전파 경로에서의 대류층 지연을 추정하는 Hopfiled 모델을 사용한다 (Lee 2002). 그러나, 기상 정보를 사용자가 직접 제공해야 한다는 한계로 인하여 기준국이 아닌 보통의 GPS 사용자가 대류층 지연 오차를 보정하기에는 어려움이 있다. 이로 인해 SBAS에서는 사용자가 기상 정보를 별도로 제공받지 않아도, 상대적으로 정확한 수준에서 대류층 지연 효과를 보정할 수 있는 새로운 UNB3 모델을 제안하고 사용하고 있다 (Kim et al. 2016). 이에 따라, 본 연구에서는 UNB3 모델을 사용하였으며, 이는 미국의 SBAS 시스템인 Wide Area Augmentation System도 이 모델을 기반으로 오차를 제거한다. 이 모델은 기상 정보 없이도 SBAS 사용자의 대류층 지연 오차를 효과적으로 제거할 수 있다 (El-Arini et al. 2008). UNB3 모델은 대기압력 (P), 대기온도 (T), 수증기 압력 (e), 온도 변화율 (β), 그리고 수증기압 변화율 (λ_0)과 같은 다섯 가지 정보를 활용하여 대류층 지연을 추정한다. 이 모델은 위도와 날짜에 따른 보간을 통해, 전 지구의 대류층 지연량을 계산하는 데 사용된다. Table 3은 UNB3 모델을 사용하기 위한 대류층 지연을 위한 위도 별 기상 파라미터의 평균값 및 계절적 변화량을 나타낸다 (RTCA DO-229D 2006).

각 인자 ξ 는 Eq. (9)와 같이 계산되며, D_{min} 은 day of year (D), 해당 위도 (ϕ)를 뜻하며, 여기서 D_{min} 은 북위 28, 남위 211이다. 해당 파라미터의 평균 및 계절적 변동 값이 수신기의 위도에 따라 계산된다.

$$\xi(\phi, D) = \xi_0(\phi) - \Delta\xi(\phi) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(D-D_{min})}{365.25}\right) \tag{9}$$

수신기의 위도에 따른 기상 파라미터는 Eqs. (10), (11)과 같이 선형 보간을 통해 계산한다. 위도가 $|\phi| \leq 15^\circ$ 및 $|\phi| \geq 75^\circ$ 인 경우, ξ_0 및 $\Delta\xi$ 는 Table 3과 같으며, 위도가 $15^\circ < |\phi| < 75^\circ$ 범위에 있는 경우, ξ_0 및 $\Delta\xi$ 의 값은 수신기의 위도에서 가장 가까운 두 위도(ϕ_i, ϕ_{i+1})의 값 사이에서 선형 보간을 사용하여 미리 계산된다.

$$\xi_0(\phi) = \xi_0(\phi_i) + [\xi_0(\phi_{i+1}) - \xi_0(\phi_i)] \frac{(\phi - \phi_i)}{(\phi_{i+1} - \phi_i)} \tag{10}$$

Table 4. Novatel single frequency solution error (m).

Positioning solution	Avg. SVs	Avg. PDOP	Horizontal (RMS)	Vertical (RMS)	Horizontal (2DRMS)	3D accuracy (90%)
GPS Only	9.1	1.804	1.038	2.370	2.076	3.899
GPS + Galileo	16.3	1.271	0.904	2.210	1.808	3.662
GPS + BeiDou	29.2	0.960	0.822	2.339	1.643	3.238
GPS + Galileo + BeiDou	43.2	0.757	0.820	2.347	1.640	3.381
Average	24.4	1.198	0.896	2.316	1.792	3.545

$$\Delta \xi(\phi) = \Delta \xi(\phi_i) + [\Delta \xi(\phi_{i+1}) - \Delta \xi(\phi_i)] \frac{(\phi - \phi_i)}{(\phi_{i+1} - \phi_i)} \quad (11)$$

기상 파라미터를 해당 날짜와 위치로 선형 보간 한 후, 사용자 고도에 대한 천정건조지연량 (d_{hyd}) 및 천정습윤지연량 (d_{wet})을 계산한다. 마지막으로, 위성 각도에 대한 매핑 함수 ($m(EI_i)$)를 사용하여 Eq. (12)에 따라 SBAS 사용자의 대류층 경사 지연 (TC)을 추정하고 제거한다.

$$TC_i = -(d_{hyd} + d_{wet}) \cdot m(EI_i) \quad (12)$$

앞에서 계산된 네 가지의 오차 요소 별 보정 정보가 모두 계산되면, 각 보정치를 이용하여 Eq. (13)과 같이 PRC를 계산할 수 있다.

$$PRC_i = FC_i + LC_i + IC_i + TC_i \quad (13)$$

본 연구에서는 KASS에 대한 SBAS 보정항법 성능 비교를 위하여 단일 시스템 항법 위치 계산과 다중 시스템 결합 항법 위치 계산을 수행하였다. 이를 위하여 Geometry 행렬 G 의 시계 오차 부분을 각 항법 시스템 별로 분리하여 계산하는 알고리즘을 구성하였고 Eq. (14)와 같이 정의된다.

$$G = \begin{bmatrix} \alpha_{x_1}^{gps} & \alpha_{y_1}^{gps} & \alpha_{z_1}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{x_2}^{gps} & \alpha_{y_2}^{gps} & \alpha_{z_2}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{gps} & \alpha_{y_n}^{gps} & \alpha_{z_n}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{x_1}^{glo} & \alpha_{y_1}^{glo} & \alpha_{z_1}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \alpha_{x_2}^{glo} & \alpha_{y_2}^{glo} & \alpha_{z_2}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{glo} & \alpha_{y_n}^{glo} & \alpha_{z_n}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \alpha_{x_1}^{bds} & \alpha_{y_1}^{bds} & \alpha_{z_1}^{bds} & 0 & 0 & 1 \\ \alpha_{x_2}^{bds} & \alpha_{y_2}^{bds} & \alpha_{z_2}^{bds} & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{bds} & \alpha_{y_n}^{bds} & \alpha_{z_n}^{bds} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

또한 GNSS 위성의 위치 및 양각, 수신기 시계 오차 및 시스템 간 편향을 추정하고 계산하기 위하여 가중치 최소 자승법을 활용하였다 (Tarrío et al. 2011). 가중치 최소 자승법은 다양한 관측치와 모델 예측 간의 오차를 최소화하고, Eq. (15)와 같이 이를 통해 GNSS 위성의 위치와 양각, 수신기 시계 오차, 그리고 시스템 간 편향을 추정하여 가중치를 계산한다.

$$X = (H^T W H)^{-1} H^T W v \quad (15)$$

4. 단일항법 및 복합항법 정확도 평가

정확도 시험을 위하여 (주)두시텍 사옥 옥상에 안테나를 설치하였으며, 맑은 날씨 조건에서 UTC 2023년 6월 23일 오전 5시부터

6월 24일 오전 5시까지 24시간의 데이터를 수집하였고, 1 Hz 주기로 원시 데이터를 수집하였다. GNSS 안테나는 Trimble zephyr 3를 사용하였으며, 이는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, OmniSTAR, Trimble RTX 및 SBAS를 수신할 수 있는 고성능 안테나이다. GNSS 수신기는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS를 수신할 수 있고 GPS L1, L2, L5 및 대부분의 항법신호를 동시에 처리할 수 있는 Novatel OEM-7700 모델을 이용하여, 시험용 기준점에서 원시 관측치 및 방송 궤도력 데이터를 수신하여 30초 간격으로 항법 위치오차를 산출하였다. 기준점에 대한 정보는 고정밀 GNSS 후처리 소프트웨어로 계산된 좌표를 참조로 사용하였다. 단일 시스템의 위치 정확도 시험에서는 Elevation mask angle과, 최소 C/No 값은 이전 시험과 동일하게 Elevation mask angle은 10 degree, Minimum C/No 값은 35 dBHz 이상으로 제한하였다. 또한 국내에서의 GLONASS는 관측위성의 개수가 다른 위성에 비해 적어 가용성이 떨어지고 위치오차도 커지는 경향을 보여 이번 시험에서는 제외하였다 (Park et al. 2022).

이번 시험을 통해 Table 4와 같이 KASS의 정확도 비교를 위한 단일 항법 및 복합 항법의 정확도를 도출하였다. GPS only 조건에서 2DRMS 2.076 m, 3D 정확도 3.899 m, GPS + Galileo는 2DRMS 1.808 m, 3D 정확도 3.662 m, GPS + BeiDou는 2DRMS 1.643 m, 3D 정확도 3.238 m, GPS + Galileo + BeiDou는 2DRMS 1.640 m, 3D 정확도 3.381 m로 평가되었다. Fig. 3은 Table 4에서 평가된 결과값에 대한 East-North-Up error이며, 각 그래프의 청색 실선은 East, 적색 실선은 North, 황색 실선은 Up error를 나타낸다.

5. KASS 정확도 및 MSAS 비교 평가

한국형 SBAS인 KASS를 이용한 보정항법 위치 정확도를 평가하기 위하여 테스트 서비스 중인 KASS 보정메시지를 수신하도록 설정하였다. 각 수신기 별 KASS SBAS 위치 정확도 평가를 위하여 수신기를 테스트모드로 전환하여 Fig. 4와 같이 KASS (PRN: 134) 위성의 신호 추적 상태를 지속적으로 모니터링하였다.

네 종류의 상용 수신기를 사용하여 KASS 보정항법 시험을 수행한 결과, Table 5와 같은 정확도의 결과를 얻었다. Ublox Neo-M9N 수신기를 이용한 2DRMS 오차와 3D 정확도는 각각 1.237 m, 1.592 m로 산출되었으며, ZED-F9P 수신기는 0.951 m, 1.412 m로 산출되었다. 또한, Novatel OEM-7700 수신기는 1.292 m, 1.616 m, Trimble BD-990 수신기는 1.346 m, 1.547 m로 각각 산출되었다.

Fig. 5는 실험에 사용된 수신기의 KASS 보정항법에 대한 East-North-Up 방향 오차이며 각 그래프의 청색 실선은 East, 적색 실선은 North, 황색 실선은 Up 방향 오차를 나타낸다. 각 수신

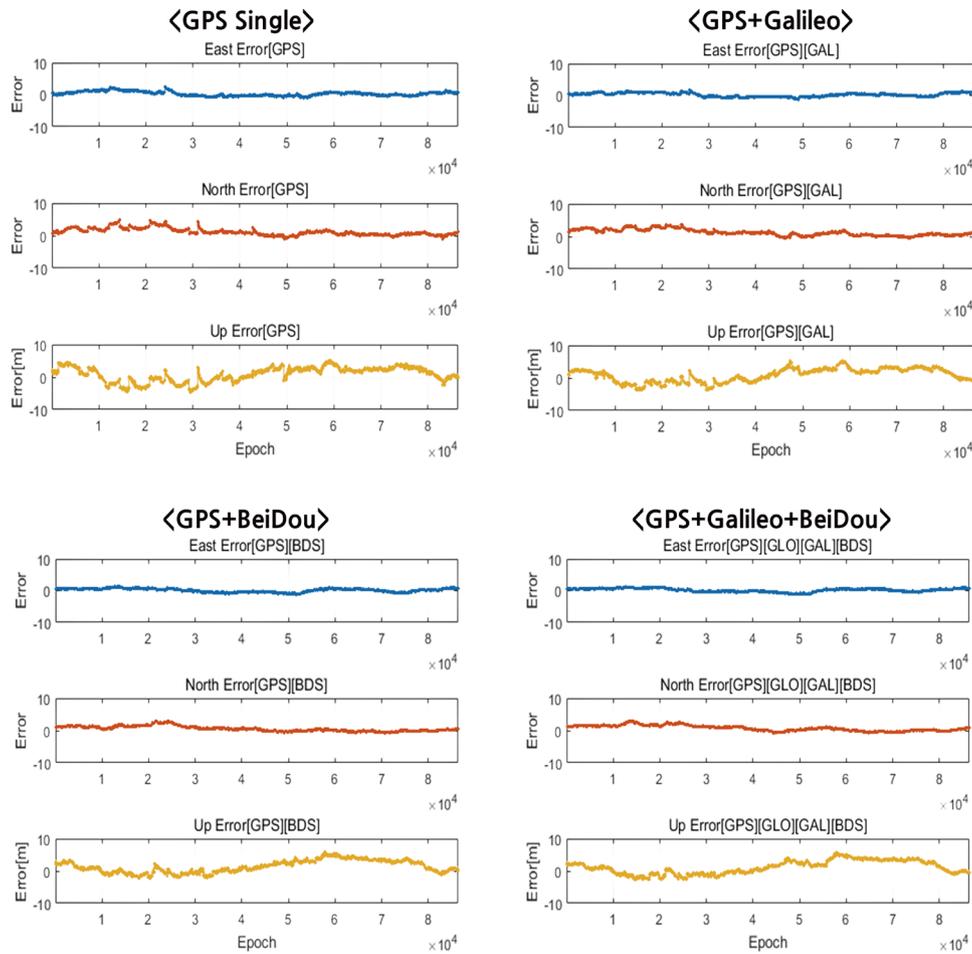


Fig. 3. Single & Integrated navigation East-North-Up error.

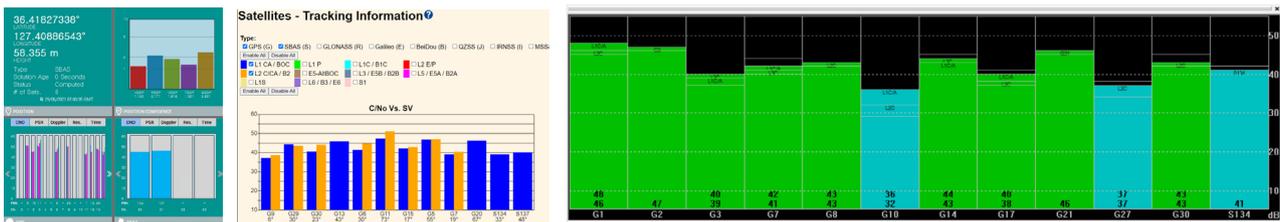


Fig. 4. KASS PRN 134 tracking information

Table 5. Four different commercial receivers KASS (SBAS) solution error (m).

Receiver	Avg. SVs	Avg. PDOP	Horizontal (RMS)	Vertical (RMS)	Horizontal (2DRMS)	3D accuracy (90%)
Ublox Neo-M9N	8.0	2.200	0.619	0.941	1.237	1.592
Ublox ZED-F9P	8.7	2.129	0.476	0.952	0.951	1.412
Novatel OEM-7700	8.0	2.191	0.646	1.120	1.292	1.616
Trimble BD-990	8.0	2.191	0.673	0.972	1.346	1.547
Average	8.2		0.603	0.996	1.206	1.541

기의 평균 오차는 2DRMS 1.206 m, 3D 정확도 1.541 m로 단일 및 복합 항법과 KASS 보정항법을 비교했을 때 더 나은 결과를 도출할 수 있었다. KASS 보정정보를 사용한 위치 정확도는 GNSS 위치 정확도에 비해 개선된 결과를 얻을 수 있음이 확인되었으며, 위치오차는 현재 시험 서비스중인 KASS의 오차 기준치인 1.6 m

이내에 해당하는 결과로 평가되었다 (KASS Press Release 2022). Table 6과 같이 KASS와 단일 및 결합 항법 위치 정확도와 비교했을 때 Neo-M9N은 2DRMS 27.9%, 3D 정확도 54.4%, ZED-F9P는 2DRMS 46.9%, 3D 정확도 60.2%, Novatel OEM-7700 2DRMS 27.9%, 3D 정확도 54.4%, Trimble BD-990은 2DRMS

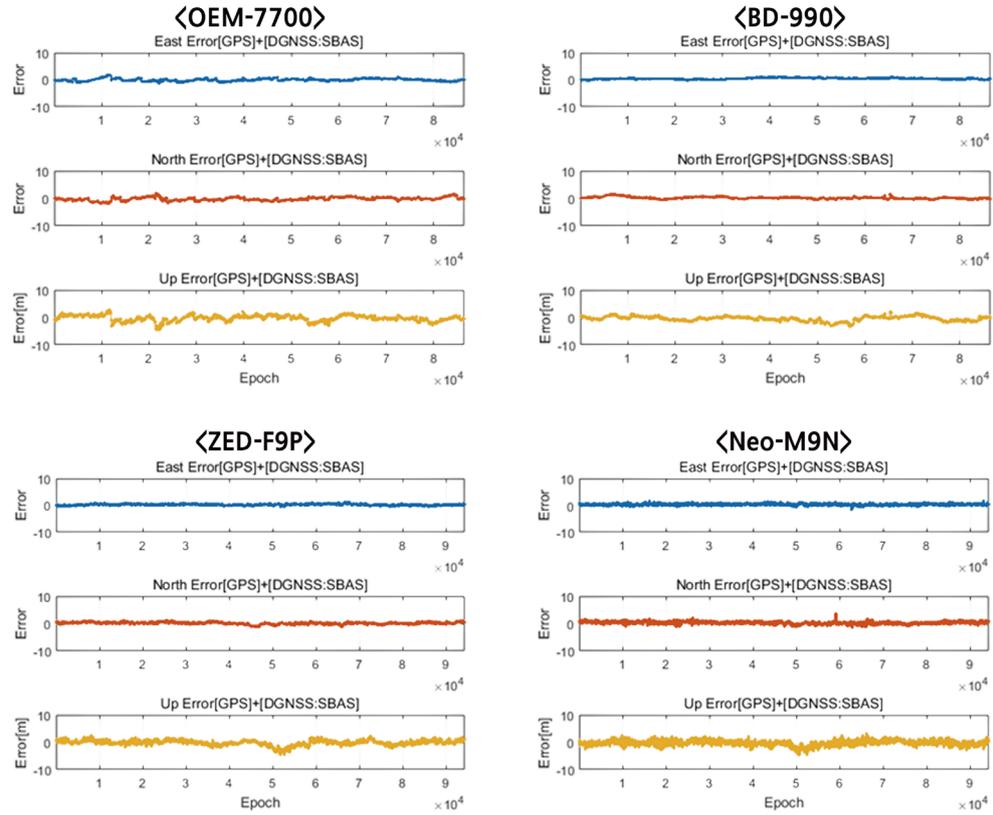


Fig. 5. Four different commercial receivers KASS (SBAS) East-North-Up error.

Table 6. Improvement ratio of KASS and GNSS single navigation (%).

Receiver	Neo-M9N	ZED-F9P	OEM-7700	BD-990	Avg.
Horizontal (2DRMS)	27.9	46.9	27.9	24.9	32.7
3D accuracy (90%)	54.4	60.2	54.4	56.4	56.5

Table 7. KASS & MSAS navigation test result (m).

Positioning solution	Avg. SVs	Horizontal (RMS)	Vertical (RMS)	Horizontal (2DRMS)	3D accuracy (90%)
GPS single	9.0	1.244	2.553	2.487	4.492
GPS+MSAS (PRN 137)	8.1	0.669	1.188	1.844	2.484
GPS+KASS (PRN 134)	7.7	0.568	0.804	1.136	1.307

24.9%, 3D 정확도 56.4%의 위치 정확도가 개선되었으며, 평균적으로 2DRMS 32.7%, 3D 정확도 56.5%의 개선효과를 확인할 수 있었다.

마지막으로 일본의 MSAS와 한국의 KASS를 비교하고 평가하였다. 현재 국내에서는 MSAS를 이용하여 항법 보정을 수행할 수 있으나, 국내 환경에 더 적합한 위치 서비스의 제공여부를 판단하기 위해 두 시스템에 대한 정확도를 비교하였다. 이를 위하여 2023년 6월 27일 UTC 00시 00분부터 2023년 6월 27일 23시 59분까지 24시간 동안 시험을 수행하였다. Table 2의 메시지 중 두 시스템의 서비스에 따라 MSAS는 0, 1, 3, 4, 7, 9, 10, 17, 18, 25, 26, 27, 63의 메시지를 사용하였고, KASS는 0, 1, 2, 3, 4, 7, 9, 10, 17, 18, 25, 26, 28, 63의 메시지를 활용하였다. KASS 및 MSAS의 보정 항법 성능 비교는 Novatel OEM-7700 모델을 이용하여 수행하였으며 결과는 Table 7과 같다.

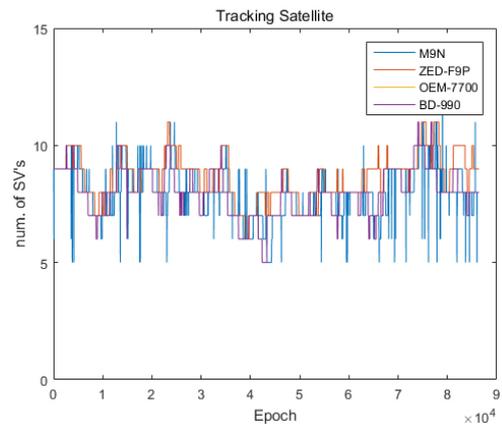


Fig. 6. GNSS receiver tracking satellite.

GPS + MSAS 사용 시 2DRMS 오차와 3D 정확도는 각각 1,844 m, 2,484 m를 얻었고, GPS + KASS를 사용 시 1,136 m, 1,307 m로 KASS가 MSAS에 비해 2DRMS는 38.4%, 3D 정확도 47.4%가 향상되었다. 이러한 결과가 국내 환경에서 MSAS 보다 KASS가 절대적으로 더 정확한 위치 정보를 보장한다고 할 순 없으나 적어도 동등 이상의 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

또한, ZED-F9P 수신기는 본 테스트에서 고가 수신기보다 더 나은 항법 정확도를 도출하였다. 이는 Fig. 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 위성 수를 비교한 결과, ZED-F9P가 OEM-7700 및 BD-990 보다 더 많은 위성을 추적하는 것으로 확인되었다. 이로

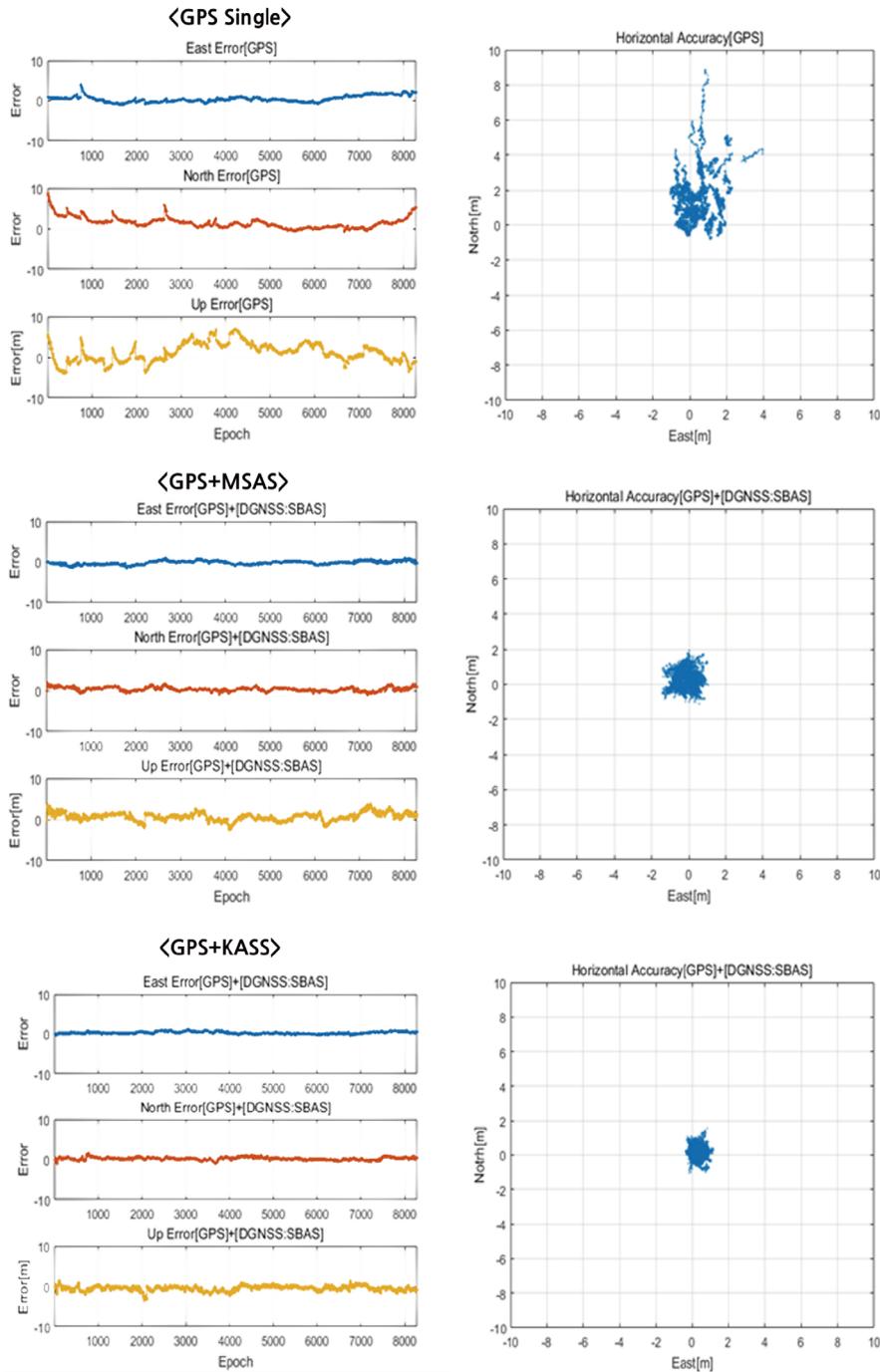


Fig. 7. KASS & MSASS navigation East-North-up error.

인해 DOP가 개선되어 항법 정확도 면에서 비교적 우수한 결과를 보였다. 이러한 결과는 24시간 동안의 시험을 기반으로 한 것이며, 추후 다수의 시험을 통해 결과를 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7을 통해 확인할 수 있듯이, 본 시험에서는 KASS를 이용한 보정항법의 오차가 MSAS에 비해 조금 더 향상된 정확성을 나타내었다. 또한 KASS가 국내 환경에서의 보정항법 위치 결정에서 기존 MSAS보다 좋은 위치 정확도를 제공할 가능성을 보여준다.

6. 결론

본 연구에서는 KASS 보정정보를 활용하여 다양한 상용 수신기의 위치 정확도에 미치는 영향을 평가하였다. 실험 결과, 모든 상용 수신기는 KASS 보정정보를 활용한 결과가 단일 주파수를 사용한 위치 오차와 비교해 2DRMS는 32%, 3D 정확도(90%)는 약 56%의 개선 효과를 보여주었다.

또한 MSAS와 KASS 보정항법의 위치 정확도 성능 비교실험

결과 KASS의 2DRMS는 38.4%, 3D 정확도(90%)에서는 47.4% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 이번 실험은 정적 상태에서 수행되었으며, 추가적으로 수신환경에 따른 저가/고가의 수신기 성능에 따른 멀티패스 영향을 크게 받는 지역에서의 실험이 필요할 것으로 보인다.

이번 연구 결과는 KASS를 활용한 보정방법이 저가 수신기와 고가 수신기 간의 성능 차이를 크게 줄일 수 있음을 시사한다. 따라서 저가의 수신기를 활용하여도 KASS 위성을 이용한 보정방법으로 신뢰할 수 있을만한 위치 정확도를 제공할 수 있으며, 이는 고가 수신기 대체에 따른 비용 절감 및 국내 항법 기술 발전에도 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다. 향후 동적 테스트와 다양한 환경에서의 실험을 통해 이러한 결과를 뒷받침하고 확장하는 노력이 필요할 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant RS-2022-00143625).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, Y.-H. Park.; methodology, S.-H. Park, and Y.-H. Park.; data acquisition S.-H. Park.; writing-original draft preparation, S.-H. Park.; writing-review and editing, S.-H. Park, and J.-M. Park.; project administration, J.-H. Jeong.; validation, Y.-H. Park.; formal analysis, Y.-H. Park.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- El-Arini, M. B. 2008, Tropospheric Corrections for GNSS Receivers, IONOSPHERESEMINAR, The Atmosphere and its Effect on GNSS Systems, 14-16 April 2008, Santiago, Chile. [https://www.icao.int/SAM/Documents/2008/IONOSPHERESEMINAR/Tropospheric Corrections for GNSS Receivers.pdf](https://www.icao.int/SAM/Documents/2008/IONOSPHERESEMINAR/Tropospheric%20Corrections%20for%20GNSS%20Receivers.pdf)
- KASS ICD 2022, KASS signal Interface Control Document, Korea Augmentation Satellite System. https://www.kass.re.kr/bbs/config/filedown.php?f_idx=258
- KASS Press Release 2022, Ministry of Land, Infrastructure and Transport [Internet], cited 2022 Dec 13, available from: <https://m.molit.go.kr/viewer/skin/doc.html?fn=e766590cf99a3e88a35a9d844a113330&rs=/viewer/result/20221213>
- Kee, C., Kim, D. Y., Yun, H., Park, B. W., Bae, D. H., et al. 2010, Development of National Satellite Navigation Augmentation System, Development of DGNSS using SBAS Integration Method, MOLIT/TRKO201400020073. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201400020073&dbt=TRKO>
- Kim, D. W., Han, D. H., Kee, C., Lee, C. S., & Lee, C. H. 2016, Accuracy Verification of the SBAS Tropospheric Delay Correction Model for the Korean Region, Journal of the Korea Navigation Institute, 20, 23-28. <https://doi.org/10.12673/jant.2016.20.1.23>
- Lee, Y. C. 2002, A Comparison of Correction Models for the Prediction of Tropospheric Propagation Delay of GPS Signals, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, 20, 283-291. <https://koreascience.kr/article/JAKO200211921798889.pdf>
- Park, Y.-H., Jeong, J.-H., Park, J.-M., & Park, S.-H. 2022, Evaluation of Navigation System Performance of GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou/QZSS System using High Performance GNSS Receiver, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 11, 333-339. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.4.333>
- RTCA DO-229D 2006, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System, DO-229D (Washington, D.C.: RTCA Inc.)
- Tarrío, P., Bernardos, A. M., & Casar, J. R. 2011, Weighted Least Squares Techniques for Improved Received Signal Strength Based Localization, Sensors, 11, 8569-8592. <https://doi.org/10.3390/s110908569>



Sung-Hyun Park received the Ph.D. degree in Electronics from Pai Chai University in 2014. He has been working at R&D Center, Dusitech Inc since 2014. His research interests include GNSS receiver test.



Yong-Hui Park received the Master's degree in Electronics from Hanbat National University in 2002. He has been working at R&D Center, Dusitech Inc since 1999. His research interests include GNSS Receiver, GNSS positioning algorithm.



Jin-Ho Jeong received the Doctor's degree in Electronics from Pai Chai University in 2017. He has been working at R&D Center, Dusitech Inc since 1998. His research interests include GNSS, UAV.



Jin-Mo Park received the Master's degree in Electronics from Hanbat National University in 2015. He has been working at R&D Center, Dusitech Inc since 2000. His research interests include GNSS receiver development.