

Navigation Performance Analysis of KASS Test Signals

Daehee Won[†], Eunsung Lee, Chulhee Choi



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.

Navigation Performance Analysis of KASS Test Signals

Daehee Won[†], Eunsung Lee, Chulhee Choi

Satellite Ground Station R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

This paper presents the analysis results of navigation performance of Korea Augmentation Satellite System (KASS) test signals. Performance analysis was performed with Global Positioning System (GPS) and Satellite Based Augmentation System (SBAS) signals received from 7 KASS reference stations. And the performances were analyzed in terms of the signal strength, statistics for each SBAS message, coverage of ionospheric correction, accuracy, integrity, continuity, and availability. In addition, the navigation solutions provided by commercial receiver was analyzed and the performance experienced by general users was presented. Lastly, directions for further improvement of the KASS system were addressed. These performance analysis results can be used to confirm the feasibility of utilizing KASS in user applications.

Keywords: KASS, SBAS, navigation, performance, analysis

1. INTRODUCTION

국제민간항공기구 (International Civil Aviation Organization, ICAO)는 항공용 위성항법시스템으로 Satellite Based Augmentation System (SBAS)를 표준화하여 전 세계에 확대 운용을 추진하고 있다. 세계 각국은 이러한 흐름에 맞추어 SBAS를 운용하거나 개발 중에 있다. 가장 앞선 미국은 Wide Area Augmentation System (WAAS)를 개발하여 2003년부터 Localizer Performance with Vertical Guidance (LPV) 서비스 중이며, 2023년 6월 기준 1239개 공항에 4127건의 LPV 접근 절차 제공하고 있다 (FAA 2023). 유럽연합은 2011년부터 European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)로 Safety of Life (SoL) 서비스 중이며, 2023년 8월 기준 LPV 접근 절차 959건을 제공하고 있다 (EUSPA 2023). 이외에도 일본 MTSAT Satellite Based Augmentation System (MSAS), 인도 GPS Aided GEO Augmented Navigation (GAGAN), 러시아 System for Differential Corrections and Monitoring (SDCM), 중국 BeiDou Satellite-Based Augmentation System (BDSBAS) 등이 서비스

중이다.

우리나라 국토교통부도 2014년부터 한국형 SBAS인 Korea Augmentation Satellite System (KASS) 개발에 착수하였으며, 항공용 인증 과정을 거쳐 2023년 말부터 대한민국 영토에 위성항법 보정정보를 제공할 계획이다. KASS가 제공하는 정밀 항법 서비스로 항공기의 유연한 접근 및 착륙이 가능하며, 정확하고 정밀도 높은 항공교통 관리를 통해 항공기 지연 및 결항을 감소시키고 안전도를 향상하는 효과를 기대할 수 있다. 더불어 계기착륙 시설을 설치할 수 없는 지방 공항에 KASS를 활용한 접근 절차를 제공하여 안전한 항공기 운항이 가능할 것이다 (MOLIT 2023). KASS는 공개된 서비스로 누구나 사용 가능하므로 차량용 네비



Fig. 1. Site location of KASS subsystems.

Received Nov 11, 2023 Revised Nov 16, 2023 Accepted Nov 17, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: dhw@kari.re.kr

Tel: +82-42-860-2709 Fax: +82-42-879-4465

Daehee Won <https://orcid.org/0000-0003-3183-1352>

Eunsung Lee <https://orcid.org/0000-0003-4565-5863>

Chulhee Choi <https://orcid.org/0009-0004-7098-4874>

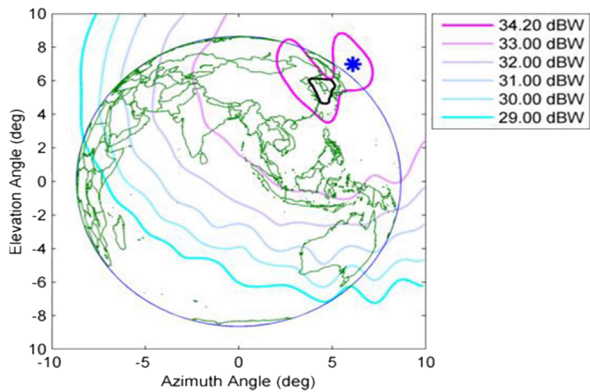


Fig. 2. Downlink footprint and EIRP of KASS satellite (SPO 2023).

게이션, 드론, 자율주행차 등의 위치정보에 기반한 다양한 응용 분야에서 활용이 가능하다.

KASS 지상시스템은 기준국 (KASS Reference Station, KRS), 위성통신국 (KASS Uplink Station), 통합운영국 (KASS Control Station, KCS)과 중앙처리국 (KASS Processing Station)를 포함하는 임무제어국 (Mission Control Center)로 구성된다. Fig. 1은 KASS 하위시스템의 배치를 나타낸다. 기준국 7식은 양주, 광주, 제주(2식), 영도, 도동, 양양에 위치하며, 위성통신국은 금산과 영주, 임무제어국은 청주와 인천에 위치한다. KASS 지상 시스템은 2022년 현장 설치를 완료하였다.

KASS 신호를 송출하는 위성은 총 2기로 구성되며, 1호기는 궤도 상에서 운영 중이고 2호기는 개발 중에 있다. 1호 위성은 2022년 6월에 발사되어 궤도내 시험 (In Orbit Test) 및 위성통신국 연동시험을 완료한 후 2022년 12월 15일부터 KASS 시험 신호를 방송 중이다 (MOLIT 2022). 위성은 동경 91.5°, 고도 35,800 km에 위치하고 있으며, 위성항법 신호의 식별번호 (Pseudo-Random Noise, PRN)는 134번을 사용한다. 지상으로부터 KASS 데이터를 C 대역으로 수신한 후 L 대역으로 변환하여 Bent-pipe 방식으로 신호를 송출한다. Fig. 2는 1호 위성의 실효등방성복사전력 (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)을 나타낸다.

KASS는 위성을 통해 시험방송 신호를 송출하고 있다. 시험방송은 KASS 하위시스템 간의 연동을 점검하고 목표 성능이 달성되는지 확인하며, 안정적 운영을 준비하는 단계이다. 일반 사용자도 KASS 위성의 항법신호를 수신하여 보정정보를 사용할 수 있으나, 공식 SoL 서비스 선언하기 전에는 성능 및 품질을 보장하지 않는다.

본 논문에서는 KASS 초기 방송 신호의 항법성능 분석 결과를 제시한다. KASS 기준국에서 수신한 Global Positioning System (GPS) 신호와 SBAS 신호를 토대로 성능 분석을 수행하였으며, KASS 위성 신호의 수신 강도, 메시지 별 수신 통계치, 전리층 보정정보의 커버리지, 정확성/무결성/연속성/가용성을 분석하였다. 수신강도, 메시지 수신, 전리층 커버리지 분석 결과 SBAS 서비스에 충분함을 확인하였다. 항법성능 분석은 Won et al. (2023) 연구에서 개발된 KASS 성능감시도구를 활용하였다. 위치오차는 95% 확률 기준으로 수평 0.925 - 1.318 m, 수직 2.098 - 2.508 m를 나타냈다. 기준국 기준으로 가용성, 연속성은 1개 사이트를 제외하고 모두 99.9% 이상을 보였다. 더불어 상용 수신기에서의 KASS

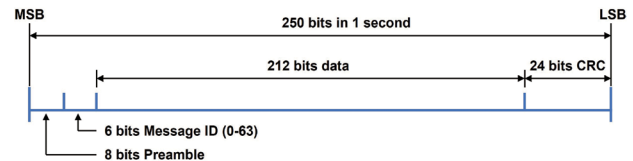


Fig. 3. SBAS message format (RTCA 2006).

항법 결과를 분석하였다. KASS 신호를 수신하고 수신기에서 자체 제공하는 위치 결과를 수집하여 일반 사용자가 경험하는 오차 수준에 대해 살펴보았다. 95% 확률 기준으로 수평 1.510 m, 수직 2.227 m의 오차를 보였으며, 기준국 데이터 보다 수평 오차가 높게 나타났다. 마지막으로 향후 KASS 시스템의 개선 및 발전 방향에 대하여 기술하였다.

KASS 서비스는 운영준비 및 안정화 과정을 거치며, 초기 방송 신호 보다 개선된 항법성능을 보일 것으로 예상된다. KASS 초기 방송신호의 성능분석 결과로 정식 서비스 시의 항법성능 수준을 예상할 수 있으며, 위성항법 응용 분야의 KASS 활용 가능성을 점검하는데 사용될 수 있다.

2. KASS 메시지 구성

KASS 신호는 ICAO (2006)와 RTCA (2006)에서 정의하고 있는 SBAS Message Type (MT)을 준수하여 송출된다. Fig. 3은 SBAS 메시지 구조를 보여준다. 1초 주기로 방송되는 메시지는 250 Bits 길이를 가지며 Preamble 8 Bits, 메시지 식별자 6 Bits, Cyclic Redundancy Check Parity 24 Bits를 포함한다. 메시지는 고정된 38 Bits를 제외하고 나머지 212 Bits로 SBAS 정보를 제공한다.

SBAS 운용에 필요한 모든 정보를 하나의 메시지로 구성할 수 없으므로, 복수의 메시지 형식을 정의하여 다양한 형태의 정보를 방송한다. 각각의 메시지는 탑재된 정보의 성질에 따라 사용 가능한 유효 시간 범위가 다르다. 따라서 유효시간이 만료되는 메시지가 없도록 메시지 별로 방송 주기를 달리하며, 시스템에서 정의된 스케줄에 의해 방송된다. 예를 들어, 의사거리 보정값 (Fast correction)은 다른 메시지에 비해 시간에 따른 변화량이 상대적으로 크므로 방송 빈도가 높으며, 이에 반해 위성의 궤도와 시각오차 보정 (Long-term correction)은 서서히 변화하므로 방송 빈도가 낮다. KASS에서 방송되는 메시지는 총 13종 (SPO 2023)으로, 메시지 별 세부 역할은 Table 1에 정리하였다.

현재 KASS는 시험방송 중이며, 지상시스템 및 위성 간의 유기적인 동작과 생성되는 보정정보를 시험하고 안정적인 운용을 준비하는 단계이다. 시험방송 신호는 일반 사용자도 제약없이 수신할 수 있으므로, 항법성능을 보장하지 않음을 알려야 한다. 이를 위해 “DO NOT USE”를 의미하는 MT0를 반복 방송(최대 6초 주기)하여 사용자의 잘못된 사용을 방지한다. 관련 표준(ICAO 2006)에 따라 MT0를 수신한 시점으로부터 60초 동안은 “DO NOT USE”의 의미가 유효하다. KASS 인증 완료 후 정식 서비스가 시작되면 MT0는 방송되지 않으며 시스템 고장이나 유지보수 등의 특정 경우에 한하여 방송될 것이다.

Table 1. SBAS message types in KASS signals.

MTID	Description
0	Do not use (SBAS test mode)
1	PRN mask
2-5	Fast correction and UDRE
6	UDRE
7	Fast correction degradation factor
9	GEO navigation message
10	Degradation parameters
17	GEO almanacs
18	Ionospheric grid point mask
25	Long-term correction
26	Ionospheric corrections
27	Service level
63	Null message

시험방송 중에 MT0는 MT0/0와 MT0/2의 2가지 유형으로 방송된다. MT0/0는 MT0 메시지를 방송하되, 내부의 데이터는 NULL 값으로 구성한다. 그 외의 다른 메시는 모두 정상적으로 방송한다. MT0/2는 MT0 메시지의 내부 데이터를 MT2의 내용으로 구성하며, MT2는 방송하지 않는다. MT0/0는 MT0와 MT2를 별도로 방송하므로, 매 6초마다 MT0를 위한 메시지 스케줄링이 필요하다. 이에 반해, MT0/2는 실제 정식 서비스와 동일한 메시지 스케줄링이 가능하다. KASS 시험방송은 일정 기간 MT0/0 방송 후 MT0/2로 전환되어 방송 중이다.

KASS의 PRN은 134번이며, L1 대역에 1575.42 MHz로 신호를 송출한다. ICAO (2006)와 RTCA (2006)에서 정의하는 표준 메시지 형식을 취하므로, 사용자는 해당 문서를 참조하여 SBAS 보정 정보를 계산하여 적용할 수 있다. 더불어 PRN 134를 처리할 수 있는 수신기를 사용할 경우 KASS의 정밀 항법 서비스를 바로 이용할 수 있다.

3. 성능 분석 기준 정의

본 연구에서 살펴보고자 하는 성능 지표는 KASS 수신 강도 및 메시지 수신 성능, 전리층 보정정보 커버리지, KASS 항법성능, 상용 수신기 제공 성능으로 정의하였다.

3.1 KASS 수신 강도 및 메시지 수신 성능

기본적으로 KASS 위성 신호의 수신 강도와 메시지 수신 성능에 대하여 분석하였다. GPS L1 신호와 동일한 주파수로 수신되므로, 수신기 내에서 GPS와 유사한 수준의 신호 강도로 수신되는지 점검하였다. 또한 RTCA (2006)에서 요구하는 Message loss rate 이 10^{-3} 을 만족하는지 확인하였다. 이를 위해 최소 22500개의 메시지 수집이 필요하며, 본 연구에서는 7일 동안 KASS 메시지를 수신하여 Message loss가 발생하는지 점검하였다. 그리고 각 수신된 메시지의 통계치를 분석하였다.

3.2 전리층 보정정보 커버리지

SBAS의 전리층 보정정보는 전리층이 고도 350 km에 위치하는 것으로 가정하여 가상 격자점 형태로 제공된다 (ICAO 2006,

Table 2. SBAS performance for each service level.

Performance parameters	APV-I	NPA	OS
Service area	Korea mainland & Jeju airport	Incheon FIR	Incheon FIR Korea mainland & Jeju airport
Accuracy	16 m (H) 20 m (V)	220 m (H) N/A	220 m (H) N/A
Alert limit	40 m (H) 50 m (V)	0.3 NM (H) N/A	N/A N/A

RTCA 2006). 위성-사용자 시선 벡터를 기준으로 350 km 지점의 전리층 통과점을 찾고, 주변의 격자점에 해당하는 보정값으로 보간하여 수직방향의 전리층 보정값을 계산한다. 이후 수직방향 보정값을 사용자 시선벡터 방향으로 투영하여 보정정보를 얻는다. 이를 위해서는 전리층 통과점을 기준으로 인접한 격자점이 최소 3개 이상 확보되어야 하며, 3개 미만인 경우 보정값을 계산할 수 없다.

전리층 격자점 위치는 ICAO (2006)와 RTCA (2006)에서 정의하고 있으며, KASS 전리층 보정에 필요한 격자점이 MT18 (Ionospheric grid point mask)에서 충분하게 제공되는지 분석하였다. KASS 기준국 기준으로 고도 350 km, 위성 양각 5도에 해당하는 전리층 통과점을 식별하고, 이 지점의 전리층 보정에 필요한 격자점을 KASS가 적절히 방송하는지를 점검하였다.

3.3 KASS 항법성능

KASS에서 제공하는 보정정보를 적용하여 각 기준국의 정확성, 무결성, 연속성, 가용성에 대하여 분석하였다. 성능분석은 Won et al. (2023)의 연구에서 개발된 KASS 성능감시도구를 사용하였다. 측정값 전처리하는 사이클 슬립 검사와 의사거리-반송파 스무딩만 적용하였다. 과도한 전처리는 성능 수치를 왜곡하여 일반 사용자에게 오해를 불러올 수 있으며, 적용되는 전처리 기법에 따라 위성의 가용도가 달라지고 이에 따른 항법성능도 변화한다. 따라서 전처리는 최소화하였다. Table 2는 SBAS 서비스 별 성능 목표를 나타내며, 본 연구에서는 APV-I을 기준으로 항법성능을 분석하였다.

3.4 상용 수신기 제공 성능

이전 절에서는 KASS 기준국에서 수신한 GPS, SBAS 데이터 기준의 성능분석에 대하여 설명하였다. 추가적으로 실 사용자가 경험하는 성능을 확인하기 위하여, 상용 수신기에서 제공하는 항법해를 분석하였다. 한국항공우주연구원에 별도의 GPS 수신기를 설치하여, 수신기가 KASS 정보를 적용하여 제공하는 위치에 대해 24시간 동안의 위치 오차를 분석하였다.

4. 시험 환경 설정

본 장에서는 KASS 시험방송 신호를 분석하기 위한 데이터 수집 및 분석 환경에 대하여 정의한다. 분석을 위한 위성항법 데이터는 2종이며, 각각 KASS 기준국과 한국항공우주연구원에서 수

Table 3. Configuration for data acquisition on KRS sites.

Items	Descriptions	Remarks
Location	7 KASS reference stations	See Fig. 1
Receiver	Novatel WAAS G-III receiver	-
Antenna	Javad GrAnt-G2T-JS-HPO	-
Date	2023.1.1-7 for MT0/0 test,	7 days
	2023.5.23-29 for MT0/2 test	7 days

Table 5. Elevation angle and C/N0 at KRS sites.

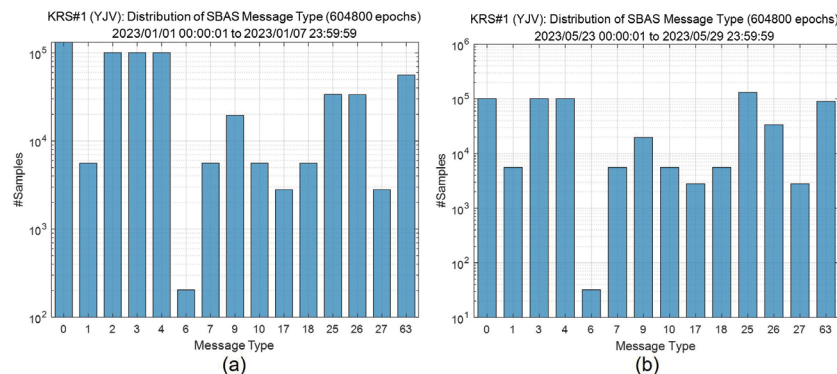
KRS site	Elevation angle (deg)	C/N0 (dB Hz)
YJV	32.8	45-47
GJL	35.0	45-47
JJA	36.1	45-47
JJT	35.9	45-47
YDN	33.2	45-47
DDL	30.3	45-47
YYA	31.5	45-47

Table 4. Configuration for data acquisition on commercial receiver.

Items	Descriptions	Remarks
Location	Korea Aerospace Research Institute	-
Receiver	Novatel Propak 6	-
Antenna	Novatel GPS-703	-
Date	2023.10.12-13	24 hours

Table 6. KASS message loss on May 23-29, 2023.

KRS site	# Message outages	Missed message type
YJV	0	-
GJL	0	-
JJA	0	-
JJT	1	0
YDN	0	-
DDL	1	63
YYA	0	-

**Fig. 4.** Histogram of KASS message types at KRS#1 (YJV): (a) January 1-7, 2023 and (b) May 23-29, 2023.

집되었다.

KASS 기준국 데이터는 2023년 1월 1~7일(7일), 2023년 5월 23~29일(7일) 동안에 7개의 기준국에서 수신한 GPS 및 SBAS 원시 데이터이다. Novatel 사의 WAAS G-III 수신기로 신호를 수신하였으며, 기준국 안테나의 참 위치는 사전에 정밀 측위를 통해 확보되었다. 세부 설정 정보는 Table 3에 나타났다.

상용 수신기에서 제공하는 항법성능을 분석하기 위해, 한국항공우주연구원에 수신기를 설치하여 데이터를 수집하였다. 2023년 10월 12~13일(24 시간) 동안에 Novatel Propak 6 수신기로 계산된 자료로 성능을 분석하였다. 기준 좌표는 OPUS (<https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>)를 통해 확보하여 위치오차 분석에 사용하였다. Table 4는 세부 데이터 수집 환경을 나타낸다.

5. 성능 분석 결과

5.1 SBAS 신호 수신 성능

현재 KASS 신호를 방송 중인 1호 위성은 동경 91.5° , 고도 35,800 km에 위치하고 있다. 개별 기준국에서 수신한 KASS 신호의 위성 양각과 신호대잡음비 (Carrier-to-Noise Density Ratio, C/N0)를 계산하여 Table 5로 나타났다. 위성 양각은 최대 36.1° 로, 최소 30.3° 를 보이며, C/N0는 45~47의 양호한 수신 범위를 가졌

다. KASS 위성은 정지궤도위성이므로 GPS 위성과 달리 위성 양각 변화가 없으며, C/N0 변화량 또한 미미하다.

다음으로 Message loss rate 이 10^{-3} 을 만족하는지 확인하였다. MT0/0를 방송하는 2023년 1월 1~7일(604,800초), MT0/2를 방송하는 2023년 5월 23~29일(604,800초) 동안 각 기준국에서 KASS 메시지가 미 수신된 경우를 조사하여 Table 6에 나타났다. MT0/0 방송시기에 메시지 누락은 발생하지 않았으며, MT0/2 방송 시에 기준국 2개소에서 각각 1개의 메시지 누락이 탐지되었다. 해당 기준국의 Message loss rate은 최대 1.6534×10^{-6} 으로 요구도를 상회하는 성능을 보였다. 다른 사이트에서 정상 수신된 것을 고려하였을 때 사이트 의존적인 일시적 이슈로 판단된다. Fig. 4는 양주 (YJV) 기준국에서 수신한 KASS 메시지의 히스토그램이다. 방송되는 KASS 메시지 종류는 사이트 배치와 무관하므로 기준국 한곳만 분석하였다. 특히 사항으로는 NULL을 의미하는 MT63이 상당한 비중을 차지하고 있는 점이다. 이는, KASS의 정보량이 SBAS 메시지 스케줄링에 부하를 주는 수준이 아니며, 추가적인 정보를 방송할 수 있음을 의미한다.

5.2 전리층 보정정보 커버리지 분석

다음으로 KASS에서 제공하는 전리층 보정정보의 격자점 범위가 적절한지 분석하였다. Fig. 5는 기준국 7개소에서 수신된 GPS 신호의 전리층 통과점 (Ionosphere Pierce Point, IPP)을 파란색

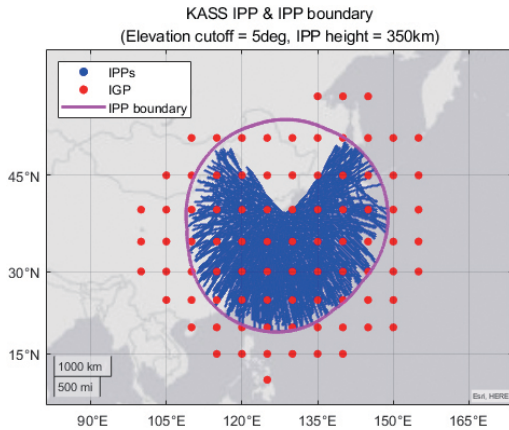


Fig. 5. Ionosphere pierce points and KASS ionosphere grid points.

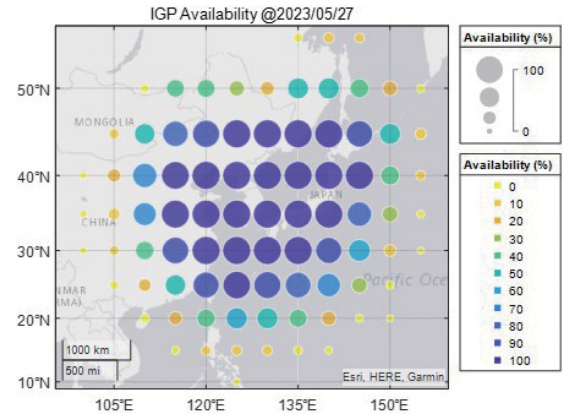


Fig. 6. KASS IGP availability.

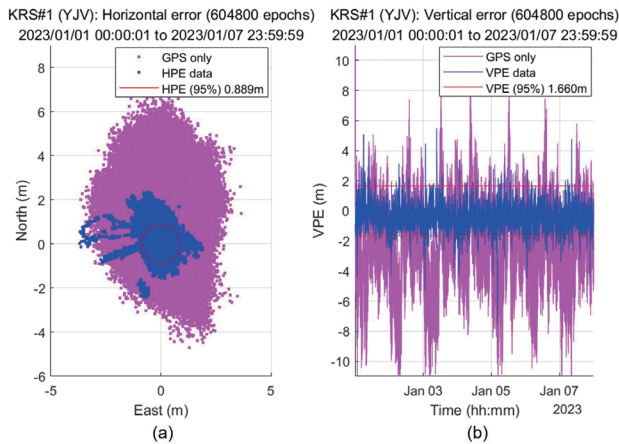


Fig. 7. Position errors on January 1-7, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

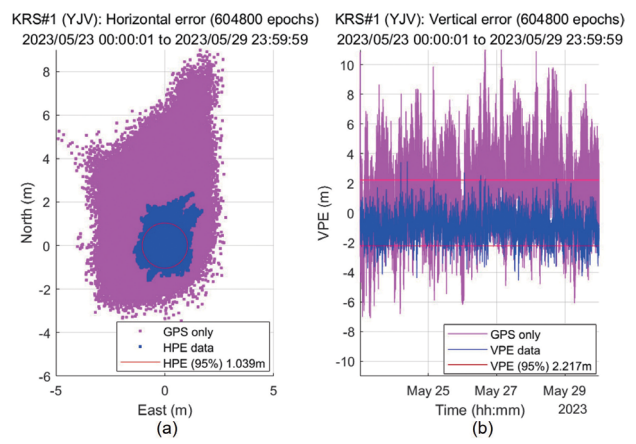


Fig. 8. Position errors on May 23-29, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

으로 나타냈으며, 기준국 기준으로 위성 양각 5도의 IPP 외곽 경계를 분홍색 실선으로 표시하였다. 이후 붉은색 점으로 KASS에서 제공하는 전리층 격자점 (Ionosphere Grid Pint, IGP)를 나타냈다. 전리층 보정정보를 계산하기 위해서는 IPP 주변으로 IGP가 3개 이상 확보되어야 하며, 그래프 분석 결과 IPP 외곽 경계를 모두 잘 포함하도록 IGP가 설정되었다.

Fig. 6은 2023년 5월 27일의 IGP 가용도를 나타낸다. 한반도 중심으로 가용도가 높으며, 외곽으로 벗어날수록 가용도는 낮아졌다. 외곽 경계에 위치한 IGP의 경우, 관측 빈도가 낮아 전리층 보정정보를 제공하는 가용도가 0에 근접하게 나타났다. 저양각 위성이 새롭게 수신되는 경우 전리층 보정 정보가 적시에 제공되지 않을 가능성이 있다. KASS의 서비스 영역을 고려하였을 때, 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

5.3 항법성능 분석

사전에 정밀 측위로 확보된 기준국 안테나 위치와 KASS 보정정보를 적용한 위치를 비교하여 정확도를 분석하였다. 2023년 1월 1~7일(7일), 2023년 5월 23~29일(7일) 기간의 데이터를 기준으로 95%의 위치오차 범위를 추정하였다. 또한 KASS 보정정보

Table 7. Position error analysis (unit: meter).

Site	January 1-7, 2023		May 23-29, 2023	
	HPE (95%)	VPE (95%)	HPE (95%)	VPE (95%)
KRS#1 (YJV)	0.889	1.660	1.040	2.217
KRS#2 (GJL)	1.010	1.621	1.061	2.098
KRS#3 (JJA)	1.257	1.745	1.187	2.351
KRS#4 (JIT)	1.263	1.815	1.210	2.304
KRS#5 (YDN)	1.203	1.709	1.318	2.227
KRS#6 (DDL)	1.630	1.845	1.192	2.508
KRS#7 (YYA)	0.699	1.290	0.925	2.099

를 적용하지 않은 GPS 단독 위치 결정 결과를 그래프에 함께 표현하였다. Figs. 7과 8은 양주 (YJV) 기준국의 수평, 수직 방향 위치오차 그래프이고, Table 7은 기준국 전체에 대한 분석 결과이다. 2023년 1월의 추정 결과가 수치상으로 일부 우수해 보이나, Figs. 9와 10을 살펴보면 참 위치 주변에 집중되기 보다는 넓게 분포하였으며 최대 오차도 상대적으로 크게 나타났다. 2022년 12월 15일부터 KASS 시험방송을 시작하며 위성을 포함한 전체 시스템의 통합 시험을 수행하였다. 5월 중순까지 현장 시험 및 개선작업이 수행되었고, 관련 작업의 결과로 2023년 5월의 항법성능이 개선되었다. 5월의 결과를 살펴보면, 위치오차는 95% 확률 기준으로 수평 0.925 - 1.318 m, 수직 2.098 - 2.508 m의 오차를 보

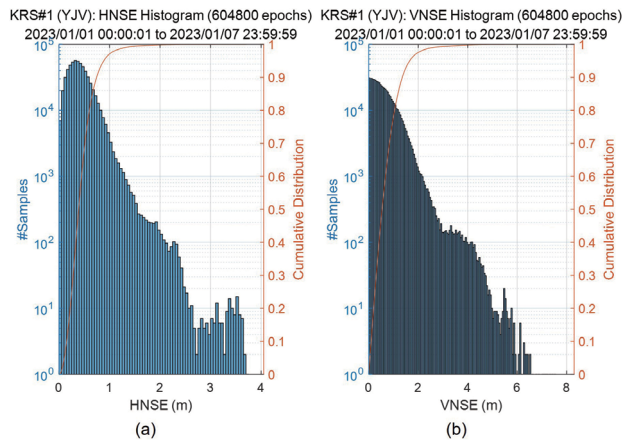


Fig. 9. Histogram of position errors on January 1-7, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

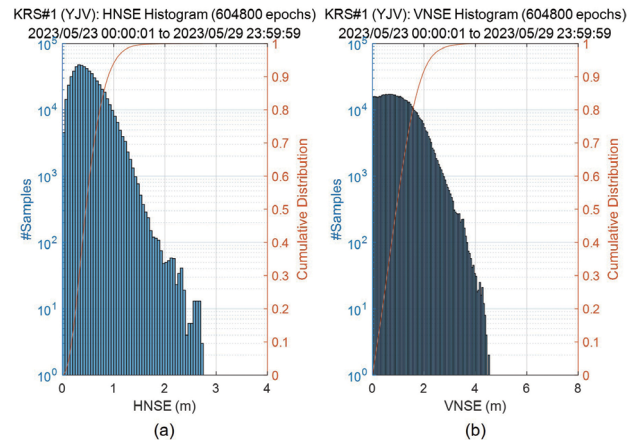


Fig. 10. Histogram of position errors on May 23-29, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

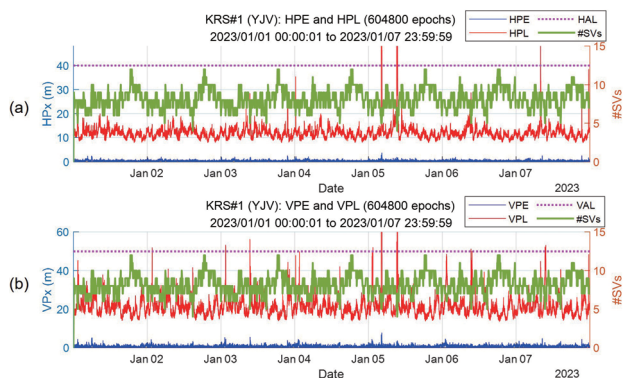


Fig. 11. Position error with protection level and number of visual satellites on January 1-7, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

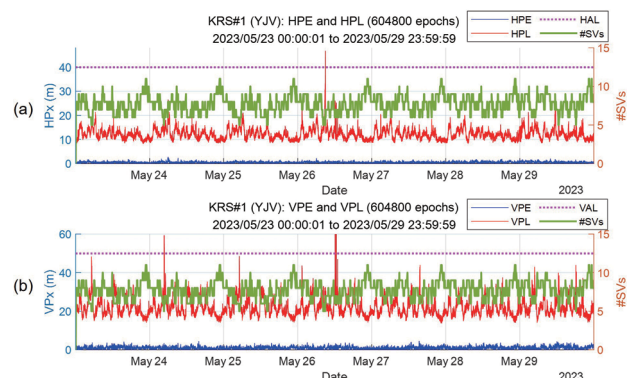


Fig. 12. Position error with protection level and number of visual satellites on May 23-29, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

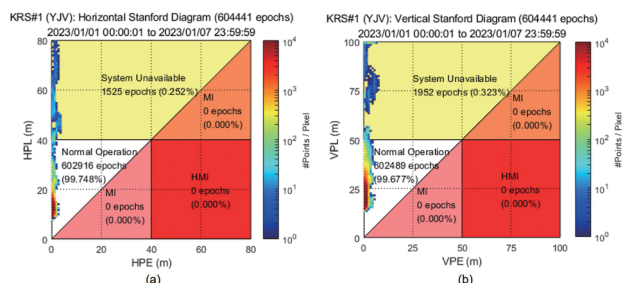


Fig. 13. Stanford diagram on January 1-7, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

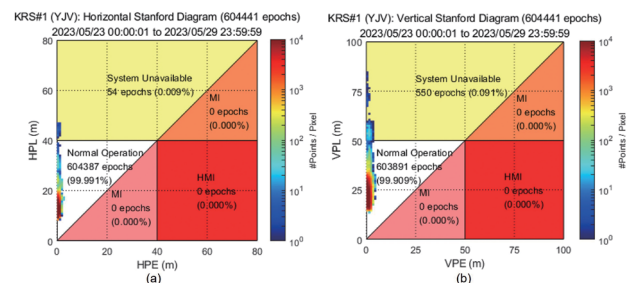


Fig. 14. Stanford diagram on May 23-29, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

였다. 수치적으로 수직 방향의 오차가 증가하였으나, 오차 히스토그램 분포가 상대적으로 안정적이며 최대/최소 오차의 범위가 감소하였다. 오차 분포 측면에서 안정적으로 개선된 점을 확인할 수 있다.

다음으로 무결성, 연속성, 가용성을 분석하였다. 분석한 데이터는 KASS 기준국에서 수신한 GPS, SBAS 정보이며, 주변 환경에 의존적인 환경오차가 포함되어 있음에 유의해야 한다. 특히 다중경로, 사이클 슬립 등의 환경 영향으로 GPS 위성 신호의 가용도가 달리 나타난다. 여기서 분석한 내용은 기준국 환경 특성이 반영된 결과로, 정확한 KASS 성능으로 간주하기에는 무리가

있다. 따라서 KASS 사업단의 공식 배포 자료로 KASS 성능 지표로 재확인하는 것이 필요하다.

Figs. 11과 12는 2023년 1월과 5월 시험 데이터의 보호수준 (Protection Level, PL) 분석 결과를 시간에 따른 위치 오차 (Position Error, PE) 및 가시위성 수와 함께 보여준다. Figs. 13과 14는 Stanford diagram이며, Figs. 15와 16은 PL과 PE의 비율을 의미하는 Safety Index (SI) 분포를 나타낸다. 1월 데이터에서는 PL이 빈번하게 임계치(Alert Limit, AL)를 초과하는 상황이 발생하였으나, 5월에는 'PL>AL'인 경우가 현저히 감소하였다. 시험 과정에서 성능이 개선되었으나 여전히 일부 시점에 PL이 AL을 초

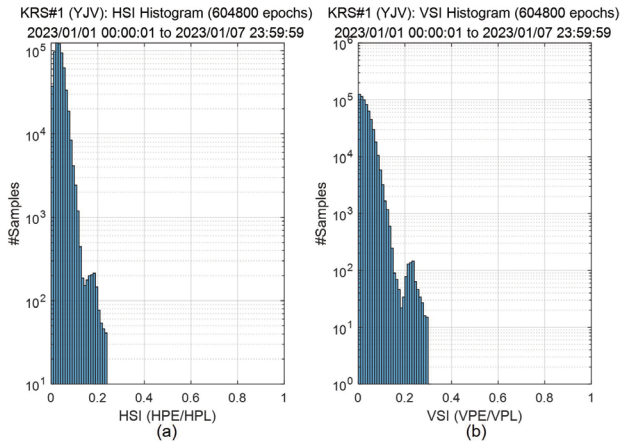


Fig. 15. Safety index on January 1-7, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

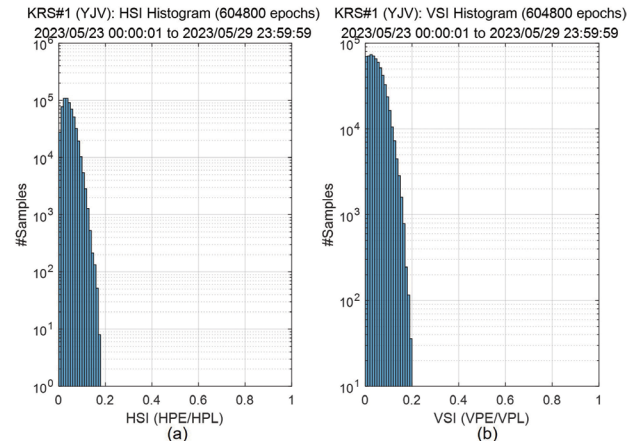


Fig. 16. Safety index on May 23-29, 2023 at KRS#1 (YJV): (a) horizontal and (b) vertical.

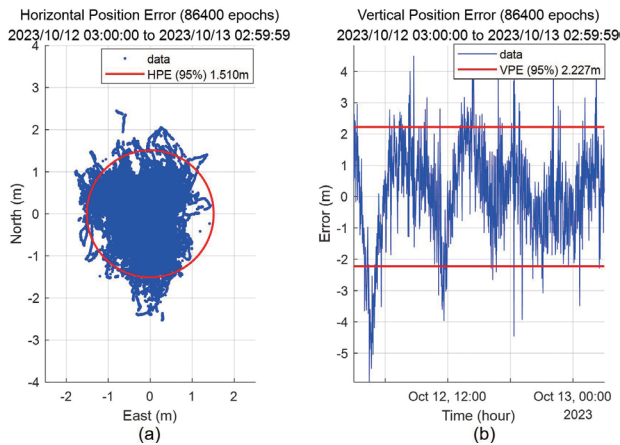


Fig. 17. Position errors with Novatel Propak 6 receiver: (a) horizontal and (b) vertical.

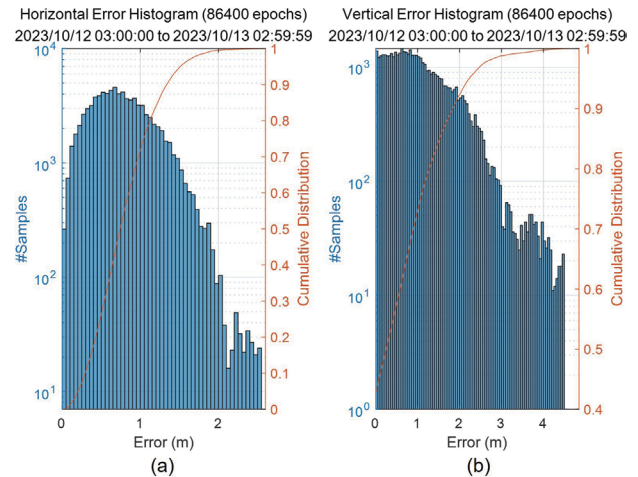


Fig. 18. Histogram of position errors with Novatel Propak 6 receiver: (a) horizontal and (b) vertical.

Table 8. Availability and continuity analysis.

Site	January 1-7, 2023		May 23-29, 2023	
	Availability [%] (#outages)	Continuity [%] (#risks)	Availability [%] (#outages)	Continuity [%] (#risks)
KRS#1 (YJV)	99.675 (1964)	99.918 (33)	99.900 (604)	99.960 (16)
KRS#2 (GJL)	99.396 (3653)	99.571 (173)	99.977 (138)	99.973 (11)
KRS#3 (JJA)	98.712 (7783)	99.563 (176)	99.938 (373)	99.975 (10)
KRS#4 (JTT)	99.656 (2082)	99.722 (112)	99.752 (1498)	99.809 (77)
KRS#5 (YDN)	99.322 (4101)	99.908 (37)	99.949 (310)	99.975 (10)
KRS#6 (DDL)	99.688 (1886)	99.849 (61)	99.976 (148)	99.978 (9)
KRS#7 (YYA)	99.697 (1829)	99.747 (102)	99.987 (134)	99.978 (9)

과하여 가용도가 저하되는 부분이 존재한다. 하지만 실제 위치 오차는 급격한 증가나 AL을 초과하지 않고 안정적인 경향을 보였다. PL이 AL을 초과하는 지점을 분석한 결과, 사용자 환경적인 요인으로 인해 SBAS 보정정보 적용 가능한 가시위성 수가 감소하여 DOP 불량이 발생한 것으로 판단된다. 예를 들어, 사이클 슬립이나 Loss of lock이 발생하면, 의사거리 스무딩 필터가 초기화되어 최소 360초 동안에 해당 위성의 신호는 비 가용한 상태가 된다. Fig. 12에서 해당 지점의 가시위성이 감소하고 가시위성 수가 변화하여 해당 위성의 의사거리 스무딩 필터가 초기화되었다. 궁극적으로 SBAS 위치해 도출에 가용한 위성이 감소하여 DOP

불량에 의한 PL 증가가 유발되었다. Figs. 15와 16의 SI 결과를 살펴보면, 1월 대비 성능이 개선되었으며 5월에 PE/PL 비율이 약 20% 이하로 안정적으로 분포하였다.

Table 8은 각 기준국 사이트에서의 비가용 시간과, 연속성 위협요인 발생 횟수를 보여준다. 앞서 무결성 분석 시 언급한 'PL>AL' 상황이 존재하여 가용성과 연속성을 저하시켰다. 사용자 환경적인 요인으로 인해 SBAS 보정정보 적용 가능한 가시위성 수가 감소하여 DOP 불량이 발생한 것으로 판단된다. 5월 데이터에서 KRS#4 (JTT)를 제외하고 가용성, 연속성이 모두 99.9% 이상을 보였다. Table 8의 가용성 및 연속성 수치는 개별 기준국에 대한 수치이며, KASS 시스템의 성능을 나타내는 것이 아님에 유의하여야 한다.

5.4 상용 수신기 항법성능

한국항공우주연구원에서 상용수신기를 사용하여 수집한 데이터를 분석하였다. Novatel사의 Propak 6 수신기에서 제공하는 위치해를 참 위치와 비교하여 위치오차를 추정하였다. 수신기는

기본적인 Factory reset 상태에서 SBAS 모드로 동작하도록 설정하였다. 2023년 10월 12-13일 24시간 동안의 위치 오차를 Fig. 17에 나타냈고, 위치 오차의 분포를 Fig. 18로 표현하였다. 위치오차는 95% 확률 기준으로 수평 1,510 m, 수직 2,227 m를 보였다. 오차 분포는 '0'에서 멀어지는 부분에 일부 이상 분포가 나타났다. 수신기 자체의 기본 설정으로 강한 스무딩이 적용되어 오차가 다소 크게 나타난 것으로 추정된다. 사이클 슬립이나 Loss of lock 발생한 경우의 신호처리 과정을 확인할 수 없어 정확한 분석이 제한된다.

6. DISCUSSION

6.1 연구 결과 해석의 유의점

분석한 데이터는 KASS 기준국에서 수신한 GPS 및 SBAS 원시 데이터이며, 주변 환경에 의존적인 환경오차가 포함되어 있음에 유의해야 한다. 특히 다중경로 및 사이클 슬립 등의 수신 환경적인 영향으로 GPS 위성 신호의 가용도가 달리 나타난다. 본 연구에서 분석한 내용은 기준국 환경 특성이 반영된 결과로 기준국 기준의 성능분석 결과이며, KASS의 시스템 성능으로 간주하기에는 무리가 있다. 따라서 KASS 사업단의 공식 배포 자료로 KASS 성능 지표로 재확인하는 것이 필요하다.

6.2 정확도 개선

KASS에서 제공하는 보정정보는 위성 궤도 및 시계 오차, 전리층 오차를 대상으로 한다. 대류층 오차는 보정정보가 제공되지 않고 SBAS 모델로 계산하여 보정한다. 다중경로는 사용자 환경 의존적인 독립 오차로 SBAS로 제공이 불가하며, 사용자 자체적으로 완화 수단을 강구해야 한다. 여기서, 대류층 오차는 관련 표준인 ICAO (2006)와 RTCA (2006)에서 정의한 SBAS 대류층 모델을 사용하며, 전세계에 범용으로 적용할 수 있는 모델이다. KASS 서비스 범위가 한반도 지역으로 제한되는 것을 고려하였을 때, 범용 모델 보다는 한국의 지역적 특성을 반영한 대류층 모델을 적용한다면 정확도가 개선할 수 있을 것이다. 이와 관련된 Kim et al. (2016)과 Park et al. (2018)의 선행 연구를 확장하여 개선 가능할 것으로 기대된다.

6.3 향후 KASS 개선 방향

KASS 사업 착수 시에는 GPS L1 신호를 대상으로 보정정보와 무결성 정보를 제공하는 것이 위성항법 활용에 충분하였다. 그러나 Galileo, Beidou의 Full Operation Capability 선언으로 가용한 위성항법 신호가 증가하였으며, 국내에서도 동시에 40개 이상의 항법 위성과 복수의 주파수 신호를 동시에 수신할 수 있는 다중 위성항법 시대가 열렸다. ICAO (2018a,b,c,d)는 다중 위성항법 환경에 부합하는 SBAS 운용 개념을 수립하고 SBAS 표준을 개정하고 있으며, 2018년 초안이 공개되었다. 우리나라도 시기 적절하게 다중 위성항법 환경에 대응하는 것이 필요하다.

이를 위해 KASS 서비스 범위를 GPS L1 신호에 머물지 않고, 다중 위성항법과 이중 주파수를 제공하는 Dual Frequency Multi Constellation (DFMC)로 확장하는 연구 및 개발이 조속히 착수되어야 한다.

7. CONCLUSIONS

한국형 SBAS인 KASS는 항공용 인증 과정을 거쳐 2023년 말부터 대한민국 영토에 SoL 서비스를 제공할 계획이다. KASS에서 제공하는 정밀 항법 서비스로 항공기의 유연한 접근 및 착륙이 가능하며, 정확하고 정밀도 높은 항공교통 관리를 통해 항공기 지연 및 결항을 감소시키고 안전도를 향상하는 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 KASS 초기 방송 신호의 항법성능 분석 결과를 제시하였다. KASS 기준국에서 수신한 GPS 신호와 SBAS 신호를 토대로 성능 분석을 수행하였으며, KASS 위성 신호의 수신 강도, 메시지 별 수신 통계치, 전리층 보정정보의 커버리지, 정확성, 무결성, 연속성, 가용성을 분석하였다. 수신강도, 메시지 수신, 전리층 커버리지를 분석한 결과, SBAS 서비스에 충분함을 확인하였다. 다음으로 항법성능 부분에서 위치오차는 95% 확률 기준으로 수평 0.925 - 1.318 m, 수직 2.098 - 2.508 m를 나타냈다. 가용성, 연속성은 기준국 1개 사이트를 제외하고 모두 99.9% 이상이었다. 더불어 상용 수신기의 KASS 항법 결과를 분석하여 일반 사용자가 경험하는 오차 수준에 대해 분석하였으며, 95% 확률 기준으로 수평 1,510 m, 수직 2,227 m를 보였다.

KASS 초기 방송신호의 성능분석을 통해 정식 서비스의 항법성능 수준을 예측할 수 있었다. 본 연구에서 수행한 KASS 초기 성능분석 자료를 통해 위성항법 응용 분야의 KASS 활용 가능성을 점검하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 항공안전기술개발사업 연구비지원 (RS-2014-KA087579)에 의해 수행되었습니다. KASS 성능 분석에 사용된 GPS 및 SBAS 데이터는 SBAS 사업단에서 제공되었으며 지원에 감사드립니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, D.Won, E.Lee and C.Choi; methodology, D.Won and C.Choi; software, D.Won; validation, D.Won and C.Choi; formal analysis, D.Won, E.Lee and C.Choi; investigation, D.Won and E.Lee; resources, D.Won; data curation, D.Won; writing—original draft preparation, D.Won and E.Lee; writing—review and editing, D.Won and E.Lee; visualization, D.Won; supervision, D.Won and E.Lee; project administration, E.Lee; funding acquisition, E.Lee.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- EUSAP, EGNOS User Support [Internet], cited 2023 Aug. 25, available from: <https://egnos-user-support.essp-sas.eu/>
- FAA, Satellite Navigation - GPS/WAAS Approaches [Internet], cited 2023 Aug. 25, available from: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/approaches
- ICAO 2006, International Standards and Recommended Practices - Annex 10: Aeronautical Telecommunications - Volume I Radio Navigation Aids: Vol. Annex 10 (6th edition), International Civil Aviation Organization
- ICAO 2018a, Concept of Operations for Dual Frequency Multi-Constellation Global Navigation Satellite System (CONOPS V6.4), ICAO Navigation Systems Panel
- ICAO 2018b, DFMC SBAS SARPs – Part A Version 2.2, ICAO Navigation Systems Panel
- ICAO 2018c, DFMC SBAS SARPs – Part B Version 2.0, ICAO Navigation Systems Panel
- ICAO 2018d, DFMC SBAS Key Concepts, ICAO Navigation Systems Panel
- Kim, D., Han, D., Kee, C., Lee, C., & Lee, C. 2016, Accuracy Verification of the SBAS Tropospheric Delay Correction Model for the Korean Region, *Journal of Advanced Navigation Technology*, 20, 23-28. <http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.1.23>
- MOLIT 2022, First KASS satellite launch [Internet], cited 2023 Aug. 25, available from: https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=2&id=95087612
- MOLIT 2023, First broadcasting KASS signal [Internet], cited 2023 Aug. 25, available from: https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_72/dtl.jsp?id=95086869
- 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, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 7, 183-188. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2018.7.3.183>
- RTCA 2006, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (RTCA DO-229D): Vol. Change 1, RTCA. <http://www.rtca.org>
- SPO 2023, KASS Signal Interface Control Document, SBAS Program Office (SPO). <http://www.kass.re.kr>
- Won, D., Kim, K., Lee, E., Kim, J., & Song, Y. 2023, Development of Real-time Mission Monitoring for

the Korea Augmentation Satellite System, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 12, 23-35. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.1.23>



Daehee Won is a senior researcher at Korea Aerospace Research Institute (KARI) and has been working on development of KASS Control Station since 2016. He received Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Konkuk University (Rep. of Korea) for the research on navigation sensor integration and its performance analysis. He was a postdoctoral researcher at University of Colorado at Boulder for the development of navigation algorithm for low earth orbit satellite. His research interests include GNSS augmentation and multi sensor integration.



Eunsung Lee received his Ph.D. degrees in Aerospace Engineering from Konkuk University, Korea in 2005. He is a principal researcher at the Korea Aerospace Research Institute and has been in charge of the development of KASS ground segments as well as SBAS satellite payload since 2014. His research areas include GNSS augmentation systems, fault detection of GNSS systems and orbit determination of satellites.



Chulhee Choi is a senior researcher in the Satellite Ground Station R&D Division at Korea Aerospace Research Institute (KARI). He received his B.S., and M.S. degrees in control and measurement engineering from Daegu University (South Korea), in 2009, and 2011, respectively. His current research interests include GBAS facility approval and SBAS ground system implementation and operation, the related precise positioning.

