

K-UAM 실증 노선에서의 비행측정을 통한 SBAS 및 이착륙을 위한 RTK의 항법 성능 평가

박용희¹, 박성현^{1†}, 오경륜², 최은주²

Evaluating the Navigation Performance of RTK for Take-off and Landing and SBAS with Flight Measurements on the K-UAM Demonstration Route

Yong-Hui Park¹, Sung-Hyun Park^{1†}, Kyung Ryoan Oh², Eunju Choi²

¹Research and Development Center, Dusitech, Inc, Daejeon 34027, Korea

²Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the performance of navigation during take-off and landing by conducting Satellite-Based Augmentation System (SBAS) flight tests equipped with various SBAS enabled GNSS receivers on the Korea Urban Air Mobility (K-UAM) demonstration routes to measure the positional accuracy and to assess the Real-Time Kinematic (RTK) positional accuracy near Vertiports. The flight tests were conducted by repeatedly traveling along the Ara Waterway route between Gaeyang vertiport and the Drone Certification Center of KIASI, designated as the GC 2-1 demonstration route. During the flight tests, SBAS navigation positions and raw observational data were recorded, while RTK positions and raw observational data were recorded near vertiports. Using the stored data, dynamic reference position data were generated through post-processed RTK, and the positional accuracy of SBAS on the demonstration route and RTK near vertiports were evaluated. The results indicated that the SBAS performance on the route ranged between 1.5 to 2.6 meters, while RTK demonstrated highly precise accuracy of under 10 cm. This study provides essential foundational data for evaluating the performance of navigation systems related to K-UAM initial commercialization. By statistically calculating and analyzing the Navigation System Errors (NSE) within corridors and at vertiports, this study is expected to contribute to establishing Total System Error (TSE) evaluation criteria. Additionally, it is anticipated to play a significant role in future GC Phase 2 demonstration trials and technical development.

Keywords: K-UAM, SBAS, RTK, vertiport, NSE

주요어: 도심항공모빌리티, 위성기반보정항법, 버티포트, 항법시스템 오차

1. 서론

최근 도심항공모빌리티(Urban Air Mobility, UAM)는 대도시 교통 혼잡 해소와 효율적인 도심내 이동을 위한 항공 교통으로서 전 세계적으로 많은 관심을 받고 있다. 특히 한국형 도심항공모빌리티(K-UAM)는 국토교통부 주도로 2025년 말 초기 상용화를

목표로 활발한 연구개발이 이루어지고 있으며, 이를 위한 실증과 기술 개발이 진행 중이다. K-UAM의 상용화를 위해서는 안전하고 신뢰할 수 있는 항법 시스템의 확보가 필수적이다. 이러한 항법 시스템은 항로상 정확한 위치 계산과 이착륙 과정에서의 안정성과 신뢰성도 확보해야 한다. 따라서, 정확한 위치 추적 기술은 K-UAM의 안전운항을 위한 핵심적인 기술 요소이다.

Received Nov 12, 2024 Revised Nov 20, 2024 Accepted Nov 27, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: psh@dusi.co.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.

Table 1. GNSS constellation status.

Item	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	QZSS
Country	USA	RUSSIA	EU	CHINA	JAPAN
Year of IOC/FOC	1995 [FOC]	2011 [FOC]	2016 [IOC]	2020 [FOC]	2018 [IOC]
Orbit	MEO	MEO	MEO	IGSO/MEO/GEO	ICSO/GEO
Time scale	GPST UTC (USNO)	UTC (SU)	GST UTC	BDT UTC	GPST UTC
Circle	11h 58m	11h 16m	14h 04m	12h 50m (MEO)	
Incline angle	55 deg.	64.8 deg.	56 deg.	-	
Coord. system	WGS84	PZ.90	GTRF	CGCS2000	WGS84
Frequency (MHz)	3	3	5	4	5
	L1:1575.42 L2:1227.6 L5:1176.45	G1:1598.0625 ~1609.3125 G2:1242.9375-1251.6875 G3:1202.025	E1:1575.42 E5a:1176.45 E5b:1207.14 E5:1191.795 E6:1278.75	B1C:1575.42 B1:1561.098 B2:1207.14 B2a:1176.45 B2b:1207.14 B3:1268.52	L1:1575.42 L2:1227.6 L5:1176.45 L6:1178.75
Modulation	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA	CDMA

현재 K-UAM 시스템의 항법 위치 계산은 위성항법시스템을 기반으로 하며 이를 보완하는 다양한 기술들이 제시되고 있다. 그 중 Satellite Based Augmentation System (SBAS)와 Real Time Kinematic (RTK)는 항공기 운항에 있어 실시간으로 정밀한 위치 정보를 제공하는 기술로서 SBAS는 위성기반 보정항법 기술로 비행 항로상 Global Navigation Satellite System (GNSS)의 오차를 보정하여 더 나은 위치 정확도를 제공하며, RTK는 센티미터 급의 정밀한 위치 정확도를 제공하여 항공기 이착륙과 같은 중요한 구간에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 그러나 실제 운용 환경에서는 이러한 시스템들이 다양한 기상 조건, 지형적 특성 및 도심 환경에 따라 다르게 작용할 수 있기 때문에 이를 검증하는 과정이 필요하다.

국토교통부의 한국형 도심항공교통(K-UAM) 운용개념서에서 운항을 위한 항법시스템은 GNSS를 기반으로 항로상에서는 SBAS를, 버티포트 이착륙시에는 RTK를 활용하는 것으로 제시되어 있다 (UAM Team Korea 2021). 따라서 본 연구에서는 K-UAM 실증항로에서의 비행측정을 통해 실제 운용환경에서의 SBAS 및 RTK의 위치 정확도 성능을 평가하고자 한다. 본 연구의 주요 목표는 SBAS 항법이 실제 비행 환경에서 얼마나 효과적으로 위치 정확도를 향상시키는지 평가하고, 특히 이착륙과 같은 중요한 단계에서의 RTK 성능을 평가하는 것이다. 본 연구에서는 K-UAM Grand Challenge (GC) 2-1 실증 항로인 계양 버티포트-드론인 증시험센터 구간(아라랫길)을 시험 항로로 설정하고, 2024년 10월 29일~31일, 11월 01일 등 총 3일간 비행 시험을 진행하여 SBAS와 RTK 시스템의 성능을 평가하였다. 이를 통하여 K-UAM 상용화를 위한 다양한 GNSS 수신기의 성능을 실증적으로 평가하는 중요한 기초 자료를 제공하고, 향후 기술 개발과 K-UAM 실증 시험에서 참고자료로 활용될 것으로 기대한다.

2. 시험환경 구성

2.1 GNSS 운용 현황

2024년 현재 미국의 Global Positioning System (GPS)은 총 31기, 러시아의 Global Navigation Satellite System (GLONASS)

은 총 26기, 유럽연합의 European Navigation Satellite System (Galileo)은 총 27기, 중국의 BeiDou Navigation Satellite System (BeiDou)은 총 44기의 항법위성 시스템을 구축하여 운용하고 있다. 또한 일본의 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)은 총 5기의 지역위성항법시스템을 운용하고 있다. GPS 및 GLONASS는 3개 (GPS ICD 2000, GLONASS ICD 2008), Galileo는 5개 (Galileo ICD 2021), BeiDou는 4개 (BeiDou ICD 2013)의 주파수 밴드로 항법신호를 송출한다. Table 1에 기술한 바와 같이 GPS, GLONASS, Galileo 위성은 Medium Earth Orbit (MEO)에 배치되어 있고 BeiDou 같은 경우에는 MEO에 27기, Geostationary (GEO)에 7기, Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO)에 10기가 배치되어 운용되고 있다. Table 1의 내용은 각각 공식 웹사이트 (GLONASS OS PS 2020, Galileo OS SDD 2021, BeiDou OS PS 2021, GPS GOV 2022, European GNSS Service Centre 2022) 및 ICD 문서에 공개되어 있다 (Park et al. 2022).

2.2 항로상 SBAS 비행측정 구성

현재 전 세계에서 다양한 종류의 GNSS 수신기가 출시되어 있으며 이러한 수신기들은 가격에 따라 항법성능, 수신 가능한 위성의 종류 및 채널 수, 그리고 기타 옵션들이 다양하다. 고가의 수신기는 저가 수신기에 비해 보다 정확한 위치 정보를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 SBAS 위치 정확도 성능 시험을 위하여 수신기 설정에 일본의 MSAS와 시험서비스 중인 KASS 신호를 함께 추적하여 KASS 보정 메시지를 이용하여 항공기 위치를 계산하였다.

또한 고가의 수신기부터 저가의 수신기까지 다양한 유형의 수신기에 대한 실험을 통해 수신기의 성능에 따른 위치 정확도 성능을 비교 평가하였다. 실증 항로상 비행 측정에 사용된 수신기는 Novatel OEM-7700, Trimble BD-990, Hemisphere Phantom 40 및 Ublox ZED-F9P를 사용하였다. OEM-7700, BD-990 수신기는 고가 수신기에 속하며, Phantom 40 수신기는 중고가 ZED-F9P 수신기는 상대적으로 저가 수신기로 분류된다. 시험에 사용된 각 수신기가 지원하는 항법시스템 및 수신가능 주파수는 Table 2와 같으며, 시험 구성은 Fig. 1과 같다.

본 연구에서는 비행시험 시 여러 종류의 GNSS 수신기를 이

Table 2. GNSS receiver frequency specification.

GNSS system	Signal	OEM-7700	BD-990	Phantom 40	ZED-F9P
GPS	L1 C/A, L1C	•	•	•	•(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	•	•	•	
SBAS	L1 C/A	•	•	•	•
	L5	•	•	•	



Fig. 1. Cessna flight & GNSS receiver for test.



Fig. 2. K-UAM vertiport candidate sites (Ministry of Land, Infrastructure and Transport).

용하여 동시에 위치 정확도 성능을 측정하기 위하여 4 종류의 OEM-Board 형태의 수신기를 사용하였다. 또한, 위치계산 결과 및 원시 관측데이터를 저장하기 위하여 Fig. 1의 우측과 같이 통합 저장 장치를 설계 제작하여 비행시험을 수행하였다. 다만, 별도의 안테나는 항공기 외부에 장착하기 어려운 여러 제약 조건이 있어, 항공기에 설치된 GPS L1/L2 안테나를 사용하였다. 이로 인해 GPS L5, Galileo E5b, BeiDou B3 신호는 수신할 수 없었다. 비행시험에는 본 연구에서 비행시험 지원을 담당하는 AeroDJs사의 Cessna 항공기를 이용하였고 정확도를 계산할 기준 위치 데이터는 비행시 함께 저장된 OEM-7700 관측 데이터를 이용하여

후처리 RTK 이후 SBAS 위치 정확도를 계산하였다. 또한, SBAS 위치 정확도 성능을 Multi-GNSS와 비교하기 위해, Multi-GNSS의 항법 위치 계산에서는 GPS, GLONASS, QZSS L1, Galileo E1, BeiDou B1 단일 주파수 신호만을 사용하였다. 전리층 지연 보정에는 Klobuchar 모델을, 대류층 지연 보정에는 Saastamoinen 모델을 적용하여 수신기 위치를 계산하였다.

2.3 버티포트 주변 RTK 시험 구성

K-UAM 초기 상용화를 위하여 국토교통부는 7개 지역의 버티

Table 3. Near vertiport RTK test point.

Name	Latitude (dms)	Longitude (dms)	Altitude (m)	Ref. station / Baseline (km)
Gimpo Airport	37 32 30.92921	126 48 05.65440	40.973	GANS/3.25
Drone testing & Certification center	37 33 51.29705	126 37 29.12715	31.3182	GANS/ 19.03
Gyeyang New Town	37 32 38.96101	126 45 43.77571	33.7072	GANS/ 6.73
Goyang KINTEX	37 40 02.23454	126 44 26.42699	35.9356	GANS/ 16.31
Yeouido Park	37 31 20.44699	126 55 01.21966	41.6937	GANS/ 7.31
Suseo Station	37 29 15.48823	127 06 01.53674	45.1686	SONP/ 3.78

포트 예정지를 발표하였고 (Specialized map 2024), 본 연구에서는 이 중 잠실 헬기장을 제외한 6개 지역의 예정지 주변에서 시험을 수행하였다. 각 시험지의 위치는 Fig. 2와 같고 측정된 주변 시험 기준 좌표는 Table 3과 같다.

버티포트 주변 RTK 위치 정확도 성능 시험을 위해 Novatel사의 OEM-7700 수신기와 Trimble사의 Zephyr 3 안테나를 사용해 GNSS 원시 관측 데이터를 수신하고, 서울시에서 운용하는 강서 기준점(GANS)과 송파 기준점(SONP) 데이터를 활용해 후처리 RTK를 진행했다. 실시간 RTK 성능 평가를 수행할 예정이었으나, 김포공항 내 기준국 설치 및 실시간 보정 정보 무선 전송 허가 문제로 인해 RTK 정확도 성능 평가는 기준점 기선 처리 소프트웨어(Waypoint GrafNet)를 통해 기준 위치를 측지하고, RTK 후처리 소프트웨어(Waypoint GrafNav)를 사용해 위치 정확도를 계산하였다.

3. SBAS 보정알고리즘

본 논문 이전 연구에서는 KASS를 이용한 SBAS 성능을 평가하기 위하여 SBAS 보정 알고리즘을 구현한바 있다 (Park et al. 2023). SBAS에서는 급격하게 변하는 오차나 지연요소의 보정을 위하여 고속 보정치를 사용하며 데이터를 사용하기 전, 사용 가능한 PRN 마스크가 수신되어 저장되었는지 확인해야 한다. SBAS 메시지 중 1, 2, 5, 24번을 이용하여 계산을 수행하는데 사용 가능한 PRN mask가 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 차이 발생 시 고속 보정치를 계산할 수 없고, 6초 이내의 정보일 때에만 Eq. (1)을 이용하여 고속 보정치를 계산한다.

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

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

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

Pseudorange Correction (PRC)는 거리변화율 보정항을 뜻하며, Eq. (1)에서 $PRC_{corrected}$ 는 가장 최근에 받은 고속 보정치를 뜻하고 $PRC_{previous}$ 는 이전에 받은 고속 보정치, 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, International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities의 권고에 따르면 PRC를 0으로 설정하면 오히려 측위 성능이 향상된다는 것을 감안하여 PRC를 0으로 설정하여 보정 값을 계산한다.

장기보정치를 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 없음을 유의해야 한다. Eq. (2)는 위성 시계 오차 계산식이다.

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

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

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.

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

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 방향으로의 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 C는 빛의 속도를 뜻한다.

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

전리층 지연 오차의 계산을 위해 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 전달하는지

를 나타낸다. 26번 메시지는 18번 메시지에서 정의된 격자점의 수직 전리층 지연값 및 해당 값의 분산을 제공하며, 하나의 메시지에는 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 지연 값의 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.

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

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

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 계수를 구하는 식은 Eq. (7)과 같다.

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

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, 6)에서 계산된 전리층 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 Ionospheric delay correction (IC)는 전리층 보정정보를 의미한다.

$$\begin{aligned} IC_i &= \tau_{spp}(\lambda_{pp}, \phi_{pp}) = -F_{pp} \tau_{vpp}(\lambda_{pp}, \phi_{pp}) \\ \Delta t &= (t_{of} - t_{of,previous}) \end{aligned} \quad (8)$$

GPS 신호의 대류권 지연 오차 모델은 대류권 내에서 발생하는 신호 지연을 추정하는 데 널리 활용된다. Saastamoinen 모델 (Saastamoinen 1972a, 1972b)은 대류권의 수직 및 수평 분포에 대한 가정을 바탕으로 상수와 가변 요소를 모두 고려한 방식으로 설계되었다. 또한, 전파 경로에서의 대류권 지연을 추정하기 위해 Hopfield 모델도 함께 사용된다 (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

Table 4. Meteorological parameters for tropospheric delay.

Average					
Latitude (°)	$P_0(mbar)$	$T_0(K)$	$e_0(mbar)$	$\beta_0(K/m)$	λ_0
15° or less	1013.25	299.65	26.31	6.30e-3	2.77
30	1017.25	294.15	21.79	6.05e-3	3.15
45	1015.75	283.15	11.66	5.58e-3	2.57
60	1011.75	272.15	6.78	5.39e-3	1.81
75° or greater	1013.00	263.65	4.11	4.53e-3	1.55
Seasonal variation					
Latitude (°)	$\Delta P(mbar)$	$\Delta T(K)$	$\Delta e(mbar)$	$\Delta\beta(K/m)$	$\Delta\lambda$
15° or less	0.00	0.00	0.00	0.00e-3	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	0.25e-3	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	0.32e-3	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	0.81e-3	0.74
75° or greater	-0.50	14.50	3.39	0.62e-3	0.30

기상 정보를 별도로 제공받지 않아도, 상대적으로 정확한 수준에서 대류층 지연 효과를 보정할 수 있는 새로운 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. UNB3 모델은 압력 P (mbar), 온도 T (K), 수증기 압력 e (mbar), 온도 변화율 β (mbar), 그리고 수증기 압 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 4는 University of New Brunswick 3 (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, 본 식의 D_{min} 은 북위 28, 남위 211이다. 해당 파라미터의 평균 및 계절적 변동 값이 수신기의 위도에 따라 계산된다 (El-Arini 2008).

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

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 4와 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.

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

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

기상 파라미터를 해당 날짜와 위치로 선형 보간한 후, 사용자 고도에 대한 천정건조지연량 (d_{hyd}) 및 천정습윤지연량(d_{wet})을 계산한다. 마지막으로, 위성 각도에 대한 매핑 함수 $m(EI)$ 를 사용하여 Eq. (11)에 따라 Eq. (12)와 같이 SBAS 사용자의 대류층 경사 지연(TC)을 추정하고 제거한다.

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

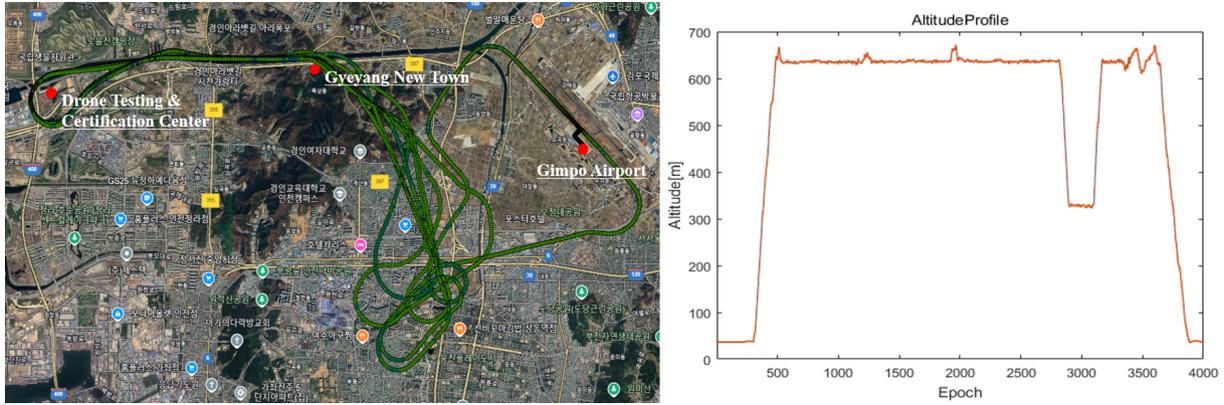


Fig. 3. Flight track & Altitude profile (10-29-2024).

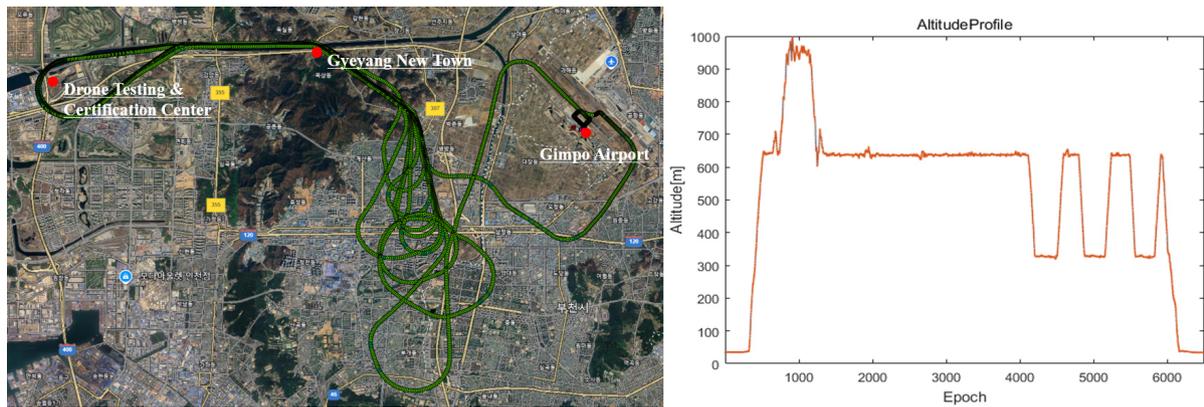


Fig. 4. Flight track & Altitude profile (10-31-2024).

Table 5. SBAS, GNSS position accuracy by receiver (10-29-2024).

	SBAS (MSAS) accuracy 2DRMS (95%)		SBAS (KASS) accuracy 2DRMS (95%)		Multi-GNSS SPP accuracy 2DRMS (95%)	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
OEM-7700	2.244	0.660	2.242	2.447	5.676	6.198
BD-990	2.877	1.415	2.587	2.502	5.968	5.737
ZED-F9P	2.028	1.878	2.869	1.070	5.757	5.872
Phantom40	2.736	0.795	-	-	-	-

4. 항로상 SBAS와 버티포트 RTK 위치 정확도 성능 평가

4.1 항로상 SBAS 비행측정

본 연구에서는 항로상 SBAS 항법 성능평가를 위하여 2024년 10월 29~31일, 11월 1일 3일간 비행시험을 진행하였다. 1차 시험은 10월 29일 오후 2시부터 시작하였으며 비행 시험 중 기상악화로 약 1시간 20분 시험 후 종료하였다. 비행시험 주요 노선은 김포에서 이륙하여 GC 2-1 실증 항로인 계양 버티포트와 인천 드론시험인증센터 버티포트를 왕복 비행하였고 그 궤적은 Fig. 3과 같다. 시험에 사용된 Hemisphere Phantom40 수신기는 수신기 자체의 SBAS (MSAS) 항법을 통해 위치 정확도를 계산하였다. 다른 수신기들은 MSAS와 KASS 메시지를 저장한 뒤, 구현된 SBAS 보정 항법 알고리즘을 이용해 항공기 위치를 계산하고, 이를 동

Table 6. Number of satellite for solution & GDOP (10-29-2024).

	MSAS		KASS		GNSS	
	SV's	GDOP	SV's	GDOP	SV's	GDOP
OEM-7700	6.7	2.868	6.2	3.016	23.9	1.787
BD-990	7.1	1.604	6.5	2.950	32.2	1.250
ZED-F9P	7.1	2.088	6.4	2.989	19.2	1.633

적 RTK 위치를 기준으로 위치 정확도를 평가하였다. 또한 Multi-GNSS 단일 주파수 항법 위치 정확도와 비교하였다.

1차 비행시험에서 항공기의 비행 궤적 및 고도 프로파일은 Fig. 3에 제시되어 있다. 분석 결과, Table 5와 같이 위치 정확도가 계산되었고 MSAS의 평균 수평/수직 정확도는 2.471 m, 1.187 m KASS의 경우는 2.566 m, 2.006 m, 단일주파수만을 이용한 Multi-GNSS의 경우는 5.800 m, 5.936 m로 MSAS, KASS 모두 Multi-GNSS 보다 우수한 성능을 보였다. MSAS의 수직 정확도가 KASS에 비하여 좋은 결과를 보이거나 Table 6에서 보듯이

Table 7. SBAS, GNSS position accuracy by receiver (10-31-2024).

	SBAS (MSAS) accuracy 2DRMS (95%)		SBAS (KASS) accuracy 2DRMS (95%)		Multi-GNSS SPP accuracy 2DRMS (95%)	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
OEM-7700	1.174	1.125	1.964	2.624	3.083	8.788
BD-990	1.406	1.315	2.023	2.740	2.951	7.606
ZED-F9P	1.810	1.106	2.026	1.631	3.057	6.542
Phantom40	1.981	0.947	-	-	-	-

Table 8. Number of satellite for solution & GDOP (10-31-2024).

	MSAS		KASS		GNSS	
	SV's	GDOP	SV's	GDOP	SV's	GDOP
OEM-7700	7.0	3.181	6.9	3.088	23.3	1.693
BD-990	7.4	2.745	7.4	2.737	34.6	1.175
ZED-F9P	7.3	2.787	7.3	2.778	28.7	1.334

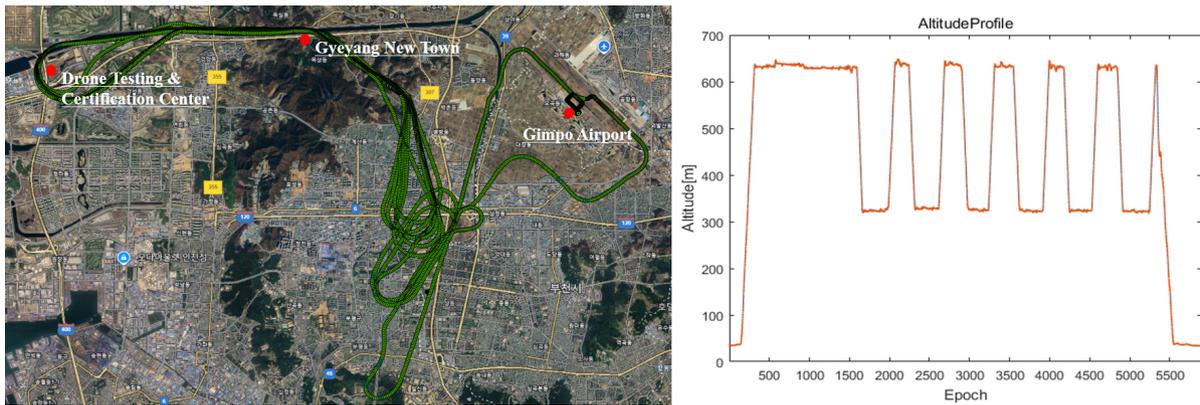


Fig. 5. Flight track & Altitude profile (11-01-2024).

Table 9. SBAS, GNSS position accuracy by receiver (11-01-2024).

	SBAS (MSAS) accuracy 2DRMS (95%)		SBAS (KASS) accuracy 2DRMS (95%)		Multi-GNSS SPP accuracy 2DRMS (95%)	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
OEM-7700	1.831	1.118	2.923	1.881	5.492	4.576
BD-990	2.454	1.604	2.999	2.666	5.823	3.470
ZED-F9P	2.152	2.088	2.587	2.052	5.237	3.450
Phantom40	2.408	1.242	-	-	-	-

SBAS 보정 항법에 사용한 공통위성의 개수가 KASS에 비하여 더 많은 위성을 이용함으로써 Ground Dilution of Precision (GDOP) 에도 영향을 미치며 이런 요인으로 인하여 정확도에 영향을 준 것으로 보인다. SBAS 보정 결과와 Multi-GNSS 정확도 비교결과 MSAS의 평균 오차 개선 효과는 수평/수직 57.4%, 80.0%, KASS 경우 수평/수직 55.8%, 66.2% 개선 효과가 확인되었다.

2차 비행시험의 비행 궤적과 고도 프로파일은 Fig. 4와 같으며, Table 7과 같이 위치 정확도가 계산되었고 MSAS의 평균 수평/수직 정확도는 1.593 m, 1.123 m KASS의 경우는 2.044 m, 2.332 m, 단일주파수만을 이용한 Multi-GNSS의 경우는 3.030 m, 7.645 m로 1차 시험과 마찬가지로 MSAS, KASS 모두 Multi-GNSS 보다 우수한 성능을 보였다. 2차 시험에서는 Table 8과 같이 MSAS, KASS의 사용위성 개수는 거의 동일함에도 불구하고 MSAS의 정확도가 좋아 보이는 이는 KASS를 이용한 위치 계산 시 특정 구간에 위성 수 부족으로 인한 위치 정확도 열화가 원인인 것으

Table 10. Number of satellite for solution & GDOP (10-31-2024).

	MSAS		KASS		GNSS	
	SV's	GDOP	SV's	GDOP	SV's	GDOP
OEM-7700	6.7	3.391	6.3	3.803	25.0	1.796
BD-990	7.4	2.793	6.5	3.507	36.1	1.211
ZED-F9P	7.3	2.810	6.5	3.511	22.1	1.623

로 파악되었다. SBAS 보정 결과와 Multi-GNSS 정확도 비교결과 MSAS의 평균 오차 개선 효과는 수평/수직 47.4%, 85.3%, KASS 경우 수평/수직 33.9%, 69.5% 개선 효과가 확인되었다.

3차 비행시험의 비행 궤적과 고도 프로파일은 Fig. 5와 같으며, Table 9와 같이 위치 정확도가 계산되었고 MSAS의 평균 수평/수직 정확도는 2.221 m, 1.513 m KASS의 경우는 2.836 m, 2.200 m, 단일주파수만을 이용한 Multi-GNSS의 경우는 5.517 m, 3.835 m로 1,2차 시험과 마찬가지로 MSAS, KASS 모두 Multi-GNSS 보다 우수한 성능을 보였다. Table 10에서 1차 시험과 같이 KASS의

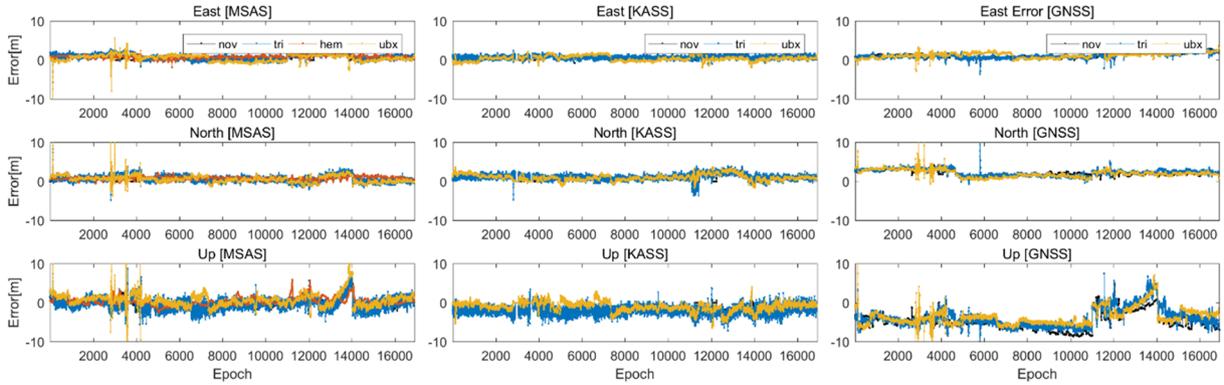


Fig. 6. MSAS, KASS, GNSS East/North/Up error.

Table 11. Near vertiport RTK accuracy (unit: m).

Test point	Horizontal CEP (50%)	Vertical PE (50%)	Horizontal 2DRMS (95%)	Vertical 2DRMS (95%)
Gimpo Airport	0.011	0.003	0.025	0.007
Drone testing & Certification center	0.029	0.074	0.071	0.148
Geyang New Town	0.020	0.005	0.049	0.011
Goyang KINTEX	0.005	0.011	0.012	0.022
Yeouido Park	0.006	0.008	0.015	0.017
Suseo Station	0.011	0.007	0.026	0.015

평균 위성 개수가 MSAS보다 적어 수평/수직 정확도 성능 열화를 보이는 것으로 분석되었다. 3차 시험에서 SBAS 보정 결과와 Multi-GNSS 정확도 비교결과 MSAS의 평균 오차 개선 효과는 수평/수직 59.9%, 60.5%, KASS 경우 수평/수직 48.6%, 42.6% 개선 효과를 보였다.

저가형 GNSS 모듈인 U-Blox ZED-F9P의 항법 성능을 분석한 결과, 평균적으로 고가 수신기와 동등한 수준의 성능을 보이는 것으로 확인되었다. 그러나 Fig. 6에 제시된 3차례의 비행시험에서 수신기별 ENU 오차 그래프를 분석한 결과, 간헐적으로 위치 오차가 발산하는 경향이 관찰되었다. 한편, KASS는 AVP-1급 서비스 성능 수준(수평: 16 m, 수직: 20 m, 2DRMS)을 제시하고 있으며, 시험 결과 동적 시험에서도 이 기준을 모두 충족하는 성능을 확인하였다. 그러나 본 시험에서는 MSAS가 KASS보다 더 나은 위치 정확도를 보였다. 이는 SBAS 보정을 위해 사용된 위성의 개수가 평균적으로 MSAS가 KASS보다 더 많았기 때문이며, 이로 인해 항법 위치 계산에 영향을 미친 것으로 파악되었다. 따라서, 본 시험 결과가 MSAS의 보정 정보가 KASS의 보정 정보보다 더 정확하다는 것을 의미하는 것은 아니다.

4.2 버티포트 주변 RTK 시험

버티포트 주변 RTK 위치 정확도 성능 시험은 2024년 10월 29일부터 11월 1일까지 Fig. 2에 표시된 7개 지점 중 잠실 헬기장을 제외한 6개 지점에서 GNSS 원시 관측 데이터를 수집하고, 강서 기준점(GANS)과 송파 기준점(SONP) 데이터를 이용해 후처리 RTK를 수행하여 위치 정확도를 산출하였다. 6개 시험 지점의 기준 좌표는 후처리 RTK를 위해 수집된 원시 관측 데이터와 GNSS 데이터 통합센터에서 제공하는 기준점 측지를 위한 3개 이상의

상시 관측소 RINEX 데이터를 활용하여 산출되었다. 기준점 측량 기선처리는 Waypoint GrafNet 소프트웨어를 사용하여 수행되었으며, 이를 통해 참값을 도출하였다. 해당 좌표는 Table 3과 같다. 후처리 RTK의 위치정확도는 Table 11과 같으며, 드론시험 인증센터를 제외한 모든 지점에서 수평 및 수직 정확도 모두 5 cm 미만의 정밀한 결과를 보여주었다. 드론시험인증센터의 경우 baseline 길이가 19 km로 길어 항법 위성의 오차 성분이 완전히 제거되지 않은 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 수직 오차는 약 15 cm로, 양호한 RTK 성능을 보이는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 K-UAM 안전운항을 위한 GNSS 항법시스템 SBAS와 RTK 기반의 항법 평가하고자 하였다. 계양-드론시험인증센터 구간(GC 2-1 실증 항로)에서 SBAS 비행시험을, 버티포트 예정지 인근 6개 지점에서 RTK 기반 위치 정확도 시험을 수행하였다. 비행 시험 결과, SBAS는 항로 상에서 1.5~2.6 m의 위치 정확도를 보였으며, RTK는 버티포트 인근에서 10 cm 이하의 높은 정밀도를 나타내었다. 이는 항공기 이착륙시 RTK 항법이 도심지 환경에서도 일정 수준 이상의 정밀도를 유지할 수 있음을 의미한다. 이러한 결과는 항로와 버티포트에서 요구되는 항법 정확도를 충족할 수 있는 가능성을 시사하며, 이는 K-UAM RNP 기준 마련에 중요한 자료로서 활용될 것이라고 생각된다. 또한, 다양한 GNSS 수신기의 성능 비교 결과, 고가형 수신기뿐만 아니라 저가형 수신기인 U-Blox ZED-F9P 또한 평균적으로 유사한 항법 성능을 보였으나 간헐적으로 오차가 발산하는 경향을 확인하였고, 이러한 결과는 UAM 항공기의 GNSS 수신기 선택 시 고려해야

할 요인으로 보인다. 본 연구에서는 다양한 GNSS 수신기를 이용하여 항로상 SBAS와 버티포트 인근 RTK 위치 정확도 성능을 평가하였다. 향후 예정되어 있는 다양한 조건에서의 추가적인 비행 시험을 통한 데이터 축적으로 K-UAM 초기 상용화를 위한 총 시스템 오차(TSE) 기준을 확립하는 데 중요한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

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, and K. R. Oh; methodology, E. Choi, and Y.-H. Park.; data acquisition S.-H. Park.; writing-original draft preparation, Y.-H. Park.; writing-review and editing, S.-H. Park, and E. Choi; project administration, K. R. Oh.; validation, Y.-H. Park, and K. R. Oh; formal analysis, Y.-H. Park; investigation, E. Choi.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- BeiDou ICD 2013, BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 3.0) 2021, China Satellite Navigation Office. https://gge.ext.unb.ca/Resources/beidou_icd_english_ver2.0.pdf
- BeiDou OS PS 2021, BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document (Version 2.0) 2013, China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110/P020211014595952404052.pdf>
- El-Arini, M. B. 2008, Tropospheric Corrections for GNSS Receivers, The Atmosphere and its Effect on GNSS Systems, 14-16 April 2008, Santiago, Chile. <https://www.icao.int/SAM/Documents/2008/IONOSFERASEMINAR/Tropospheric Corrections for GNSS Receivers.pdf>
- European GNSS Service Centre 2022, [Internet], cited 2016, available from: <https://www.gsc-europa.eu/systemservice-status/constellation-information>
- Galileo ICD 2021, European GNSS (GALILEO) Open Service, OS SIS ICD, Issue 2.0, 2021, European GNSS Service Centre. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf
- Galileo OS SDD 2021, EUROPEAN GNSS (GALILEO) Open Service Service Definition Document Issue 1.2, May 2021, European GNSS Service Centre. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.2.pdf
- GLONASS ICD 2008, Navigational radio signal in bands L1, L2 (Edition 5.1) (Moscow: Russian Institute of Space Device Engineering). [https://www.unavco.org/help/glossary/docs/ICD_GLONASS_5.1_\(2008\)_en.pdf](https://www.unavco.org/help/glossary/docs/ICD_GLONASS_5.1_(2008)_en.pdf)
- GLONASS OS PS 2020, GLOBAL Open Service Performance Standard (OS PS) Edition 2.2 Korolev 2020. https://www.glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en.pdf
- GPS GOV 2022, [Internet], cited 2022, available from: <https://www.gps.gov/systems/gps/space>
- GPS ICD 2000, Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces, GPS.GOV. <https://www.gps.gov/technical/icwg/ICD-GPS-200C.pdf>
- Kim, D. U., Han, D. H., Kee, C. D., Lee, C. S., & Lee, C. H. 2016, Accuracy Verification of the SBAS Tropospheric Delay Correction Model for the Korean Region, The Korean 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, S.-H., Park, Y.-H., Jeong, J.-H., & Park, J.-M. 2023, Accuracy Evaluation of KASS Augmented Navigation by Utilizing Commercial Receivers, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 12, 349-358. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.4.349>
- 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.)
- Saastamoinen, J. 1972a, Contributions to the theory of atmospheric refraction, Bull. Geodesique, 105, 279-298. <https://doi.org/10.1007/BF02521844>

Saastamoinen, J. 1972b, Introduction to practical computation of astronomical refraction, Bull. Geodesique, 106, 383-397. <https://doi.org/10.1007/BF02522047>

Specialized map, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Aviation Data Room, [Internet], cited 2024, available from: <https://aim.koca.go.kr/aim/boardView.do?noticeSeq=47&gubun=2>

UAM Team Korea 2021, K-UAM Concept of Operations 1.0, Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Sejong, Republic of Korea.



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.



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



Kyung Ryooh Oh received Master's degree in Aerospace Engineering from Inha University in 1998. He has been working at Aeronautics Research Directorate, Korea Aerospace Research Institute since 2022. His research interests include CNS/ATM and CNSi environment for UAM.



Eunju Choi received the Master's degree of Aerospace Engineering from Inha University in 2019. She has been working at Korea Aerospace Research Institute since 2018. Her research interests include data exchange structure of Urban Air Mobility.