

헬기시험을 통한 UAM 실증 항로상 실시간 SBAS, RTK 동적 성능 평가

박용희¹, 박성현^{1†}, 오경륜², 최은주²

Evaluation of Real-Time Dynamic Performance of SBAS and RTK along the K-UAM Demonstration Route Based on Helicopter Flight Tests

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

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

²Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 34133, Korea

ABSTRACT

This study evaluates the dynamic real-time navigation performance of the Satellite-Based Augmentation System (SBAS) and Real-Time Kinematic (RTK) positioning through helicopter flight tests conducted along the K-UAM Grand Challenge 2nd phase (GC 2-1) demonstration route. In previous studies, flight tests were conducted. However, it was not possible to transmit or receive real-time RTK correction data. Consequently, the RTK performance was analyzed using post-processed raw measurements. In contrast, this study conducted thirteen helicopter flight missions along the Ara Waterway section (GC 2-1 demonstration route) connecting the Geyang Vertiport and the KIAST Drone Certification Center. During these missions real-time correction data were received and applied. The flight tests covered all operational phases, including take-off, cruise, and landing. Due to aircraft safety regulations and electromagnetic interference management standards, the GNSS antenna was installed inside the aircraft cabin (beneath the canopy). Although this configuration could cause signal attenuation and multipath effects, both navigation modes (SBAS and RTK) were operated under identical conditions to ensure a reliable comparison of relative performance. The results show that the mean horizontal and vertical position errors of SBAS were approximately 1.94 m and 1.62 m, respectively, while those of RTK were about 0.07 m and 0.09 m. This study experimentally demonstrates the dynamic performance characteristics of real-time SBAS and RTK navigation in K-UAM flight environments and is expected to contribute to the establishment of Navigation System Error (NSE) and Total System Error (TSE) standards for navigation systems within UAM corridors and vertiports.

Keywords: UAM, SBAS, RTK, dynamic performance, flight test, NSE

주요어: 도심항공모빌리티, 보정항법, 동적성능, 비행시험, 항법시스템 오차

1. 서론

도심항공모빌리티(Urban Air Mobility, UAM)는 도심 내 단거리 구간을 신속하고 효율적으로 연결하기 위한 차세대 항공교통 시스템으로, 전기식 수직이착륙기(eVTOL) 운항을 기반으로 교통 혼잡 완화와 이동 효율성 향상을 목표로 하고 있다. 특히 한국형 도심항공모빌리티(K-UAM)는 국토교통부 주도로 상용화를

위한 ‘저밀도 도심항공모빌리티 교통관리 CNSi 획득·활용 체계 신뢰성 검증 기술 개발 과제(이하 CNSi R&D)’ 및 실증(GC: Grand Challenge 1, 2-1)이 진행되고 있다. 현재 대부분의 UAM 플랫폼은 Global Navigation Satellite System (GNSS)을 기반으로 항법 정보를 산출하며, 보정정보를 통해 항법 정확도 및 신뢰성을 향상시키는 다양한 기술이 적용되고 있다. 대표적으로 위성 기반보정시스템(Satellite-Based Augmentation System, SBAS)

Received Nov 11, 2025 Revised Nov 20, 2025 Accepted Dec 05, 2025

[†]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.

은 광역 범위의 위성 궤도 및 시계 오차, 전리층 지연 등을 보정함으로써 수 미터급 정확도와 무결성을 확보할 수 있다.

또한 Real-Time Kinematic (RTK)은 기준국에서 전송되는 반송파 기반의 실시간 보정데이터를 이용하여 센티미터 수준의 정확도를 제공할 수 있어 UAM의 이·착륙 및 정밀 접근 단계에서 고정밀 이·착륙 항법 기술로 주목받고 있다. 그러나 이러한 고정밀 GNSS 보정기술은 실제 운항환경에서는 통신 지연, 데이터 손실, 전파 간섭 등으로 인해 후처리 기반 분석 결과와는 상이한 성능 특성을 보일 수 있다. 특히 UAM과 같이 실시간 항법 정확도 및 무결성이 직접적인 안전성과 연계되는 시스템은 실시간 보정데이터를 적용한 항법 성능을 실제 운항 조건에서 검증하는 것이 필요하다. 한국형 도심항공교통(K-UAM) 운용개념서에서는 GNSS 기반 항법시스템을 활용하며, 항로상 SBAS와 이·착륙 시 RTK를 적용하는 방안을 고려하고 있다 (UAM Team Korea 2021). 또한 (Park et al. 2024)에서는 K-UAM 실증 노선인 계양 버티포트-드론인증센터 구간을 대상으로 항로상 SBAS 및 버티포트 주변 정적 RTK 기반의 항법 성능을 평가한 바 있다. 하지만 해당 연구에서는 실시간 RTK 보정데이터 송수신이 불가능하여 비행시험 중 수집된 원시데이터와 기준국 데이터를 후처리 방식으로 분석하는 데 한정되었다.

이에 본 연구에서는 K-UAM 실증 노선(GC 2-1)에 실시간 보정데이터 송수신 환경을 구축하고, 2025년 8월 26일부터 9월 5일까지 헬기를 이용하여 총 13회의 비행시험을 통해 보정데이터 기반 실시간 항법 성능을 평가했다. 이를 통해 SBAS 및 RTK 항법의 실시간 동적 성능을 평가하고, 선행 연구의 후처리 결과와 비교함으로써 실시간 운항환경에서의 성능 차이 및 성능 열화 요인을 규명하였다.

특히 항공기 안전규정 및 전자파 간섭관리 기준에 따라 GNSS 안테나를 기체 내부에 설치할 수밖에 없었으며, 이로 인해 신호 감쇠와 다중경로 영향이 불가피하게 포함된 조건에서 시험이 수행되었다. 본 논문은 이러한 비행시험 결과를 바탕으로 SBAS 및 RTK 항법의 실시간 동적 성능을 비교평가하고, 향후 UAM 회랑 및 버티포트 내 항법 성능 기준(Navigation System Error, NSE)과 총시스템오차(Total System Error, TSE) 산출 기준 마련에 기여하고자 한다.

2. GNSS, SBAS, RTK 개요

2.1 GNSS 운용 현황

2025년 현재 Global Positioning System (GPS)은 총 32기, Global Navigation Satellite System (GLONASS)은 총 24기, European Global Navigation Satellite System (Galileo)은 총 27기, BeiDou Navigation Satellite System (BeiDou)은 총 44기, Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)은 5기가 운용 중에 있다 (GLONASS OS PS 2020, BeiDou OS PS 2021, Galileo OS SDD 2023, GPS GOV 2025, European GNSS Service Centre 2025). GPS 및 GLONASS는 3개 (GPS ICD 2025, GLONASS ICD 2008), Galileo는 5개 (Galileo ICD 2023), BeiDou는 4개

(BeiDou ICD 2019)의 주파수 밴드로 항법신호를 송출한다. GPS, GLONASS, Galileo 위성은 Medium Earth Orbit (MEO), BeiDou 같은 경우에는 MEO 27기, Geostationary (GEO)에 7기, Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO)에 10기가 배치되어 운용되고 있다. 앞서 언급한 각 항법시스템의 운용정보는 각각 공식 웹사이트 및 ICD 문서에 공개되어 있다 (Park et al. 2022).

2.2 GNSS 단독 측위 (Single Point Positioning)

본 연구에서는 GPS L1/L2, GLONASS L1/L2, Galileo E1/E5, BeiDou B1/B2 신호를 사용하여 Multi-GNSS 관측데이터를 이용한 결합항법 위치 계산을 수행하였다. 위성부터 수신기 간의 거리는 수신기 시간과 위성 시간의 차이에 빛의 속도를 곱한 것과 같고 이를 의사거리라고 하며 의사거리 측정치 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$PR_i = c(T_{rcv} - T_{svi}) \\ = \rho_i + c(\Delta t_{svi} - \Delta t_{rcv}) + d_{ion_i} + d_{trop_i} + c \cdot b_{rcv} + \varepsilon_i \quad (1)$$

본 연구에서는 단일주파수 GNSS(GPS L1 C/A, GLONASS L1, Galileo E1, BeiDou B1, QZSS L1) 및 이중주파수(GPS: L1&L2, GLONASS: L1&L2, Galileo: E1&E5a, BeiDou: B1I & B2I) 관측데이터를 이용하였다.

위성부터 수신기 간의 거리 PR_i 는 수신기 시간과 위성 시간의 차이에 빛의 속도를 곱한값이다. 여기에서 아래첨자 i 는 i 번째 GNSS 위성을 나타낸다. T_{rcv} 는 수신기 시간, T_{svi} 는 i 번째 위성의 시간을 나타내고 c 는 빛의 속도이다. ρ_i 는 실제거리, Δt_{svi} 는 위성 clock bias, Δt_{rcv} 는 수신기 clock bias를 나타낸다. d_{ion_i} 는 i 번째 위성의 ionospheric delay, d_{trop_i} 는 i 번째 위성의 tropospheric delay를 나타내고, b_{rcv} 는 수신기 bias, ε_i 는 multipath를 포함한 다른 잡음오차를 나타낸다. 본 연구에서 ionospheric delay는 Klobuchar 모델을 사용하여 계산하였다. Klobuchar 모델은 GPS 전리층 오차를 위성과 수신기 사이의 자유전자밀도를 계산하여 전리층 지연을 추정하는 방식이며 이 모델을 적용시 대략 50% 정도의 오차를 제거할 수 있다고 알려져 있다 (Park et al. 2022). Klobuchar 모델의 계수는 GPS subframe 4번 및 BeiDou subframe 1 메시지에 포함되어 있다.

이중주파수를 이용한 위치계산에서의 전리층 지연 보정은 Ionosphere-Free linear combination 방식을 사용하였다. BeiDou의 경우 Eq. (3), 나머지 위성군의 경우 Eq. (2)의 식을 이용하여 전리층지연을 제거하였다.

$$PR = \frac{PR_{L2} - \gamma \cdot PR_{L1}}{1 - \gamma} \quad (2)$$

$$PR = \frac{PR_{B2I} - \gamma \cdot PR_{B1I}}{1 - \gamma} - \frac{C \cdot (T_{GD2} - \gamma \cdot T_{GD1})}{1 - \gamma} \quad (3)$$

Eq. (2)의 식에서 GPS의 경우 PR 은 보정된 의사거리, PR_{L1} 은 L1 의사거리, PR_{L2} 는 L2 의사거리, $\gamma = (f_{L1}/f_{L2})^2$ 이고, f_{L1} 은 L1 주파수, f_{L2} 는 L2 주파수이다. Eq. (3)은 BeiDou 전리층지연 보정 식으로 PR_{B1I} 는 B1I 의사거리, PR_{B2I} 은 B2I 의사거리, C =Speed of Light, T_{GD1} 은 B1 group delay, T_{GD2} 은 B2 group delay이다. Tropospheric delay는 Saastamoinen 모델을 사용하여 대류층 오차를 계산하였

Table 1. Meteorological parameters for tropospheric delay.

Average					
Latitude (°)	$P_0(\text{mbar})$	$T_0(\text{k})$	$e_0(\text{mbar})$	$\beta_0(\text{k/m})$	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 (°)	$\Delta P(\text{mbar})$	$\Delta T(\text{k})$	$\Delta e(\text{mbar})$	$\Delta \beta(\text{k/m})$	$\Delta \lambda$
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

다. 본 연구에서는 Multi-GNSS 위치 정확도 평가를 위하여 결합 항법 위치 계산을 수행하여야 하므로 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou의 시스템간 시간오차에 의해 Geometry 행렬 G 의 clock bias 항을 각 항법시스템 별로 각각 분리하여 계산하도록 Eq. (4)과 같이 구성하였다.

$$G = \begin{bmatrix} \alpha_{x_1}^{gps} & \alpha_{y_1}^{gps} & \alpha_{z_1}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{x_2}^{gps} & \alpha_{y_2}^{gps} & \alpha_{z_2}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{gps} & \alpha_{y_n}^{gps} & \alpha_{z_n}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{x_1}^{glo} & \alpha_{y_1}^{glo} & \alpha_{z_1}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \alpha_{x_2}^{glo} & \alpha_{y_2}^{glo} & \alpha_{z_2}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{glo} & \alpha_{y_n}^{glo} & \alpha_{z_n}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \alpha_{x_1}^{bds} & \alpha_{y_1}^{bds} & \alpha_{z_1}^{bds} & 0 & 0 & 1 \\ \alpha_{x_2}^{bds} & \alpha_{y_2}^{bds} & \alpha_{z_2}^{bds} & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{bds} & \alpha_{y_n}^{bds} & \alpha_{z_n}^{bds} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

또한, GNSS 위성의 위치 및 양각, 수신기 시계 오차, 시스템 간 편향을 반영하여 계산하도록 Eq. (5)와 같이 Weighted Least Squares 방식을 사용하였다 (Tarrío et al. 2011).

$$X = (H^T W H)^{-1} H^T W v \quad (5)$$

여기서, X 는 수신기 3차원 위치, H 는 관측행렬, W 는 가중치 행렬, v 는 측정치 잡음이다.

2.3 위성기반보정항법 (SBAS)

SBAS보정을 위하여 사용되는 정보에는 fast correction, long term correction, ionospheric correction 등이 있다. 이는 일반적으로 위치결정의 실시간 성능을 개선하는데 사용되며, 이를 이용하여 pseudo-range, ionospheric delay, tropospheric delay, clock error를 보정한다. SBAS보정 메시지 중 급격하게 변하는 오차나 지연요소의 보정을 위하여 고속 보정치를 사용하며 데이터를 사용하기 전, 사용 가능한 PRN 마스크가 수신되어 저장되었는지 확인해야 한다. 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. IODP

가 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. (6)을 이용하여 고속 보정치를 계산한다.

$$\begin{aligned} PRC_{corrected}(t) &= PRC(t_{of}) + RRC(t_{of}) * (t - t_{of}) \\ RRC(t_{of}) &= \frac{PRC_{current} - PRC_{previous}}{\Delta t} \\ \Delta t &= (t_{of} - t_{of,previous}) \end{aligned} \quad (6)$$

Range rate correction (PRC)는 거리변화를 보정함을 뜻하며, 위 Eq. (6)에서 $PRC_{corrected}$ 는 가장 최근에 받은 고속 보정치를 뜻하며 $PRC_{previous}$ 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, IALA의 권고에 따르면 PRC를 0으로 설정하면 오히려 측위 성능이 향상된다는 것을 감안하여 PRC를 0으로 설정하여 보정 값을 계산한다 (Kee et al. 2010).

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.

대류층 지연 오차 모델은 일반적으로 GNSS 신호의 지연을 추정하고, 상수 및 가변 요소를 고려한 Saastamoinen (1972a, 1972b) 모델과 대류층의 수직 및 수평 분포에 대한 가정을 사용하며, 전파 경로에서의 대류층 지연을 추정하는 Hopfield 모델을 사용한다 (Lee 2002). 그러나 일반적으로 GNSS 수신기에 기상 정보를 실시간으로 제공할 수 없기에 따라 기준국이 아닌 사용자가 오차를 보정하는데 한계가 있다. 이러한 한계를 해결하기 위하여 SBAS는 별도의 기상 정보 제공이 없이 상대적으로 정확한 수준에서 대류층 지연을 보정할 수 있는 새로운 모델인 University of New Brunswick version 3 (UNB3)를 제안하고 사용하고 있다 (Kim et al. 2016). 미국의 Wide Area Augmentation System (WAAS)도 이 모델을 기반으로 사용하고 있으며 이 모델은 기상 정보 없이도 SBAS 사용자의 오차를 효과적으로 제거할 수 있다 (El-Arini et al. 2008). UNB3 모델은 위도와 날짜에 따른 보간을 통해, 전 지구의 대류층 지연을 계산하는 데 사용된다.

Table 1은 UNB3 모델을 사용하기 위한 대류층 지연을 위한



Fig. 1. K-UAM demonstration route (CNSi R&D project) (Specialized Map. 2024).

위도 별 기상 파라미터의 평균값 및 계절적 변화량을 나타낸다 (RTCA DO-229D 2006). 이 절에서 언급한 내용을 이용하여 Park et al. (2023)에서는 Korea Augmentation Satellite System (KASS) 및 Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS)를 이용한 SBAS 성능을 평가하기 위한 SBAS 보정 알고리즘을 구현하여 검증한바 있다.

2.4 실시간정밀측위 (RTK)

RTK는 기준국과 이동국 간의 의사거리(pseudorange) 및 반송파 위상(carrier phase) 정보를 이용하여 실시간으로 상대 위치를 계산하는 고정밀 측위 기법이다. 기준국은 정확히 알려진 위치에서 각 위성별 관측데이터를 측정하고, 기준국 3차원 좌표, antenna reference point 및 위성별 반송파 위상 및 의사거리 측정값 등을 보정 메시지로 생성하여 이동국으로 실시간 전송한다. 이동국은 수신된 보정데이터를 이용해 기준국과의 차분 연산을 통한 전리층·대류층 지연, 위성 시계 및 궤도 오차 등 공통 오차 성분을 제거하고, 반송파에 포함된 모호정수를 결정함으로써 수 센티미터 수준의 정밀 위치를 계산한다.

본 연구에서는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou 보정정보를 사용하기 위하여 지상기준국에서 생성된 RTCM V3 MSM4 메시지를 Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) 방식으로 이동국에 실시간 전송하였다. 지상기준국과 이동국의 데이터 송수신을 위하여 자체적으로 NTRIP Caster 소프트웨어를 개발하여 시험에 사용하였다.

3. 비행시험 환경 및 절차

3.1 시험 개요

본 연구의 실시간 항법 성능 평가는 K-UAM 실증 노선 중 계양 버티포트와 KIAS 드론인증센터를 연결하는 아라뱃길 구간인 'GC 2-1 실증 노선'을 대상으로 수행되었다. 비행시험은 2025년 8월 26일부터 9월 5일까지 총 13회에 걸쳐 진행되었으며, 각 시험은 버티포트 이륙, 순항, 복행, 착륙의 다양한 운항 시나리오로 구

성되었다. 비행시간은 각 시험당 약 1시간 내외로 수행되었다.

시험비행 항로는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 구성되었으며, 비행체는 헬기를 사용하였다. 시험은 초기 상용화 단계의 UAM 운항통제시스템 절차에 따라 수행되었다. 운항 경로의 총 길이는 왕복 약 30 km이며, UAM 운항 환경을 모사하기 위해 헬기는 고도 약 1400-1500 ft, 속도 80-90 kt로 운항하였다.

3.2 SBAS, RTK 시험 장비 구성

비행시험에서는 SBAS 및 RTK 항법 모드에 대한 동일 관측치 기반으로 성능을 비교·분석하기 위해 Fig. 2와 같이 시스템 및 장비를 구성하였고, GC2 CNSi 탑재장비에 장착된 GNSS 수신기(NovAtel OEM-7700)를 사용하였다. SBAS의 경우 본 시험에서는 MSAS 기반의 보정정보만을 적용하였다. 안테나는 GNSS 전 주파수 대역을 수신할 수 있는 안테나 (Trimble Zephyr 3)를 사용하였으며, 항공기 안전기준 및 전자파 간섭관리 기준을 적용하여 Fig. 2의 우측 하단 장비를 기체 내부에 부착하였다.

이와 같은 내부 부착 방식은 탄소섬유강화 복합재료를 사용한 헬기 동체로 인한 신호 감쇠 및 다중경로 오차의 발생 가능성을 수반한다. 이에 본 연구에서는 이러한 환경적 요인을 별도로 보정하지 않고 그대로 반영하여 실제 도심 운항 환경에서의 항법 성능 저하 상황에서의 항법 정확도를 평가하였다. RTK 기준국은 김포공항 북쪽에 위치한 별말 지역의 GC2 지상레이더 설치지점에 구축하였다. 기준국 시스템은 RTK 보정데이터 생성이 가능한 GNSS 수신기(NovAtel OEM7700), 데이터 처리 및 저장을 위한 Linux 모듈, 보정정보 전송을 위한 이더넷 인터페이스로 구성하였고 기선 보정이 완료된 고정밀 기준좌표를 기준으로 RTCM V3 형식의 보정 메시지를 생성하도록 구성하였다.

3.3 실시간 데이터 처리 및 저장

기준국은 RTCM Standard 10403.3 표준의 Multi-GNSS RTK 보정정보를 생성하고 송신한다. Fig. 3의 구성에서 나타난 바와 같이 RTK 보정정보 중계용으로 본 연구에서 개발된 NTRIP Caster를 실행하여 RTK Server로 지정되어 있는 지상기준국 GNSS 수신기로부터 연결 요청을 대기한다. 또한 RTK Client로

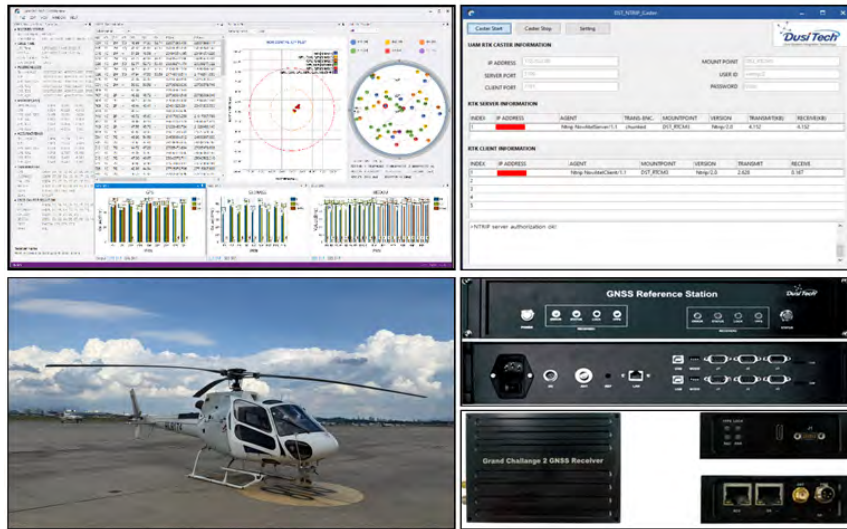


Fig. 2. RTK reference and onboard equipment configuration.

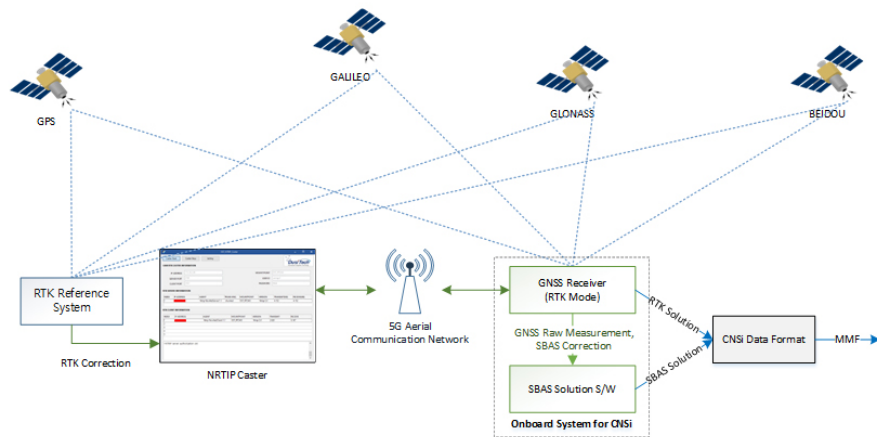


Fig. 3. Navigation configuration of reference and rover stations for SBAS and RTK.

지정되어 있는 CNSi 통합장치 탑재용 GNSS 수신기의 연결 요청을 대기한다. NTRIP Caster는 RTK Server로부터 연결 요청 발생 시, NTRIP 프로토콜 시퀀스에 따라 연결에 필요한 Mount point 및 user id, password 등의 정보를 확인하고 모든 내용이 정확히 일치할 경우 연결을 수립하고 통신을 시작한다.

Client로부터 연결 요청이 발생하면, NTRIP 프로토콜 시퀀스에 따라 연결에 필요한 Mount point, 사용자 ID, 비밀번호 등의 정보를 확인하며, 모든 항목이 일치할 경우 연결을 승인하고 통신을 시작한다. RTK Server와 연결이 시작되면 RTCM 정보를 수신하며 수신된 보정정보는 연결이 완료된 RTK Client에게 RTCM 정보를 전송한다.

SBAS 항법은 비행시험에서 수집된 GNSS 관측데이터와 MSAS 보정정보를 활용하여 탑재 컴퓨터에서 SBAS 보정 알고리즘을 구현함으로써 항법 결과를 산출하였다. RTK 항법의 경우, 수신기를 RTCM V3 메시지를 수신하도록 설정하고 수신기 내부 연산을 통해 산출된 RTK 위치결과를 출력하도록 구성하였다. 이를 통해 동일 시각의 동일 관측데이터로부터 SBAS 및 RTK 항법

결과를 Mission Monitoring Facility(MMF)로 송출하였다. 탑재 장비 및 기준국은 전원 인가 시, Fig. 3에 나타난 바와 같이 MMF에 설치된 NTRIP Caster에 자동 접속하여 RTK 보정정보를 실시간으로 송수신하도록 구성하였다.

본 연구개발에서 사용된 무선 통신은 실험국으로 허가된 5G 상공망 모델을 이용하여 통신하도록 구성되어 있다. 또한, CNSi 탑재장비와 기준국은 각각 후처리를 위한 관측데이터 및 항법 결과를 내부에 저장하도록 구성하였다

4. GNSS, SBAS, RTK 비행시험 및 분석

4.1 실시간 SBAS, RTK 비행시험 및 후처리 Multi-GNSS 정확도

비행시험 중 수집된 SBAS 및 RTK 실시간 항법 데이터는 1Hz 주기로 기록되었으며, 모든 로그는 GPS Time을 기준으로 시간

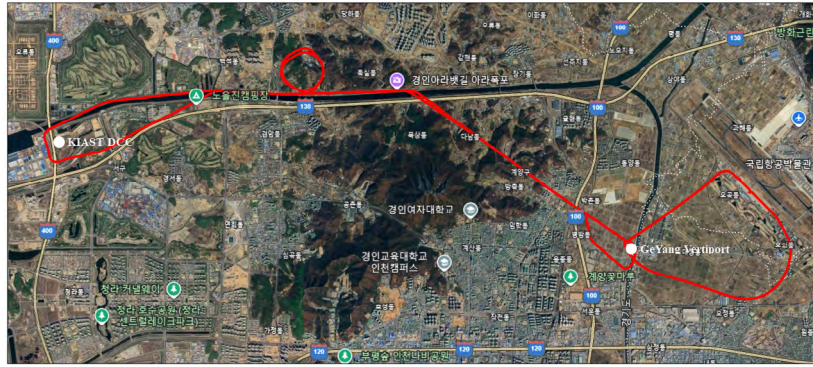


Fig. 4. 2025/08/26 16:00 flight trajectory from flight tests.

Table 2. GNSS, SBAS, RTK flight test result.

Date/Time	GNSS (1-Freq.)		GNSS (2-Freq.)		SBAS		RTK	
	Hori. (m)	Vert. (m)	Hori. (m)	Vert. (m)	Hori. (m)	Vert. (m)	Hori. (m)	Vert. (m)
2025/08/26 16:00	4.398	4.574	1.631	2.393	1.610	1.449	0.065	0.105
2025/08/27 12:00	2.551	3.152	2.787	2.199	1.712	1.269	0.074	0.082
2025/08/27 16:00	2.580	3.682	1.191	2.014	1.400	1.572	0.051	0.048
2025/08/28 12:00	2.486	3.522	3.144	3.572	2.874	2.530	0.045	0.076
2025/08/28 16:00	3.232	4.655	1.998	2.917	1.975	1.465	0.065	0.104
2025/08/29 12:00	1.672	3.894	1.354	2.001	1.691	1.506	0.112	0.151
2025/09/02 12:00	2.284	3.687	1.929	2.560	2.422	1.555	0.062	0.077
2025/09/02 16:00	3.061	6.516	2.041	3.449	1.545	2.563	0.061	0.089
2025/09/03 12:00	6.827	6.907	2.343	4.257	2.853	1.594	0.113	0.149
2025/09/03 16:00	4.343	4.367	1.426	2.531	1.940	1.512	0.061	0.068
2025/09/04 12:00	2.942	3.975	2.225	3.905	2.030	1.181	0.049	0.099
2025/09/04 16:00	2.393	6.389	1.635	5.341	1.134	2.182	0.075	0.107
2025/09/05 12:00	1.880	2.051	1.844	1.008	2.054	0.718	0.038	0.057

Table 3. Number of satellites for solution & availability.

Positioning solution	Avg. SVs	Num. of Obs.	Availability (%)	Remark
GNSS only (1 Freq.)	22.6	24607	100	C/No ≥ 40
GNSS only (2 Freq.)	14.9	16937	68.8	C/No ≥ 40 , SV ≥ 10
SBAS	5.6	13288	54.0	C/No ≥ 40 , SV ≥ 5
RTK	42.2	24269	98.6	-

동기화하였다. 각 Epoch의 참값 산출을 위해 Waypoint GrafNav 소프트웨어를 사용하여 후처리 RTK 방식으로 기준 궤적을 생성하였다. 해당 소프트웨어는 후처리 기반의 센티미터급 정확도를 제공한다고 제작사에서 명시하고 있으며, 실제로 국내외 여러 연구에서 기준 궤적 산출 목적으로 활용되고 있다 (NovAtel 2025). 또한 별도로 수행한 정적 환경 실험에서 mm 수준의 위치 정확도를 확인하였다.

후처리로 산출된 기준 궤적 좌표를 이용하여 각 항법 모드 별 수평 및 수직 위치 오차를 계산하였다. 탑재 수신기에 저장된 데이터를 이용하여 Multi-GNSS 단일 주파수 및 이중주파수 위치 정확도를 산출하였으며 SBAS, RTK 보정항법의 개선 효과를 비교·분석하였다. Fig. 4는 2025년 8월 26일 16시 비행시험 궤적, Table 2에는 전체 비행시험에서 산출된 각 항법 모드 및 시험 날짜별 수평·수직 오차를 제시하였다. 정확도 평가는 2DRMS (95%) 기준으로 수행하였으며, 단위는 미터(meter)로 표시하였다.

4.2 시험 결과 분석

총 13회의 실시간 비행시험 및 후처리를 통해 GNSS 단일주파

수(1-Freq.), GNSS 이중주파수(2-Freq.), SBAS, RTK 항법 모드의 실시간 동적 정확도 및 가용성을 평가하였다. 각 비행의 기준 좌표는 후처리 RTK 방식으로 산출된 기준 궤적 값을 사용하였으며, 이를 기반으로 각 항법 모드별 측위 결과와의 오차를 산출하였다. 각 항법 모드의 실시간 관측 가능 epoch 수를 기준으로 가용성을 산출한 결과는 Table 3에 제시하였다. 비행 중 헬기 기동에 따른 급격한 자세 변화와 헤딩 변동으로 인해 신호 세기 약화 및 일부 위성 신호 단절이 발생하였으며, 이러한 시험 환경의 제약을 이유로 관측 데이터 품질 기준을 강화하여 신호 세기 및 가시 위성 수에 대한 제한 조건을 적용하고 데이터 전처리 과정을 통해 항법 결과의 신뢰성과 비교 분석의 일관성을 확보하였다. 다만, 각 항법 방식별 제한 조건(신호세기, 위성 개수)의 차이로 인해 사용 가능한 epoch 수가 상이하였으며, 이로 인해 DOP 및 위성 수의 시계열 비교에는 일부 한계가 있었다.

Figs. 5, 6과 Table 4에 제시된 바와 같이 실시간 동적 RTK 오차는 수평 0.067 m, 수직 0.093 m로 나타났으며, 센티미터 수준의 정밀도를 일관되게 유지하였다. 이는 2024년도 시험에서의 정적 RTK 오차(수평 0.033 m, 수직 0.036 m)를 참값(기준 궤적)의 오차성분으로 고려하더라도 약 10 cm 내외의 정확도로 UAM 운항

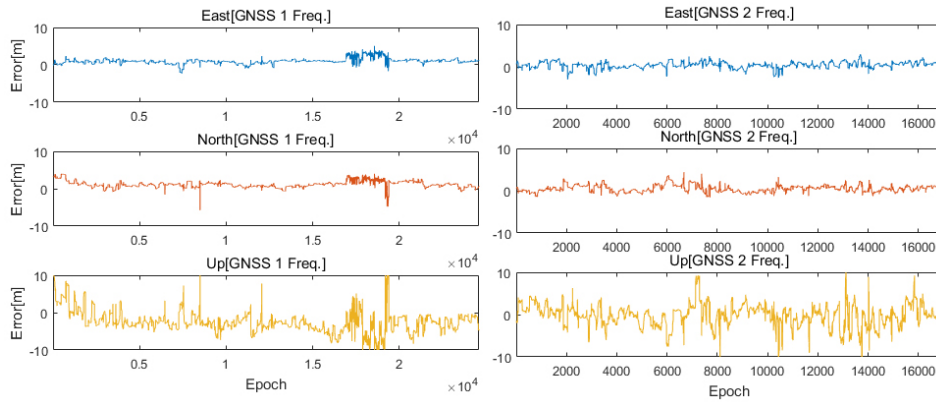


Fig. 5. 1-Freq., 2-Freq. GNSS East/North/Up error.

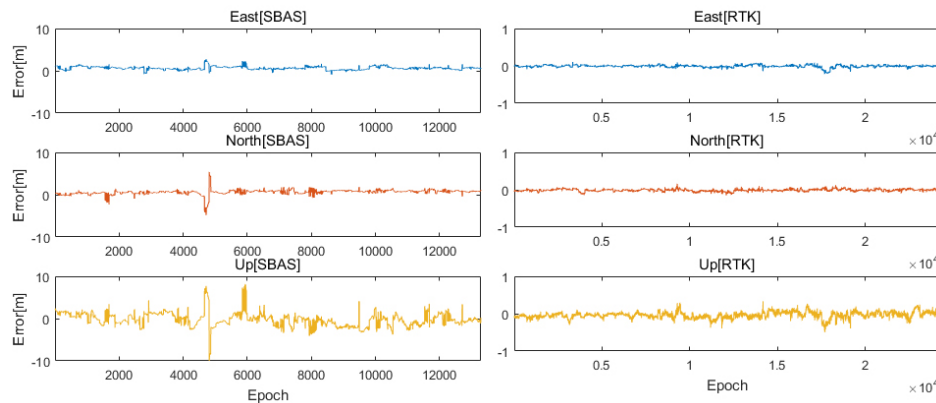


Fig. 6. SBAS/RTK East/North/Up error.

Table 4. Summary of dynamic navigation accuracy for each navigation mode.

Positioning solution	Horizontal CEP (50%)	Vertical PE (50%)	Horizontal 2DRMS (95%)	Vertical 2DRMS (95%)
GNSS only (1 Freq.)	1.303	2.207	3.127	4.413
GNSS only (2 Freq.)	0.819	1.467	1.965	2.934
SBAS	0.809	0.811	1.942	1.623
RTK	0.028	0.047	0.067	0.093

중 이 · 착륙 및 버티포트 정밀 접근과 같은 고정밀 항법 요구 조건에 적합한 성능 수준으로 판단된다. SBAS의 경우 알고리즘 검증 을 위하여 외부 안테나를 이용한 24시간 정적 시험을 실시하였 고 SBAS 2DRMS(95%) 정확도는 수신기 계산 결과 수평 1.350 m, 자체 알고리즘 계산 결과 수평 1.292 m로 제조사가 제시한 정확 도와 동등한 성능을 확인하였으며, 이를 통해 SBAS 수신 성능에 문제가 없음을 검증하였다.

본 비행 시험에서는 MSAS 보정정보 기반으로 산출한 결과 수 평 1.94 m, 수직 1.62 m의 정확도를 보여 GNSS 단독 측위 대비 약 40~60%의 정확도 향상을 확인하였다. 또한 2024년 수행된 3회 의 고정익 비행시험의 후처리 SBAS (MSAS, KASS) 결과(수평 1.648 m, 수직 0.967 m)와 비교하였을 때 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다 (Park et al. 2024).

반면, Table 2에 제시된 단일 주파수 항법 모드에서는 여러가 지 UAM 운용 시나리오에 따라 헬기 기동 시 헤딩 및 자세변화

로 인한 빈번한 신호 감쇠/정상 반복, 위성 신호의 단절/복구 등의 환경적 영향으로 수평 최대 6.8 m, 수직 6.9 m까지 오차가 증가 하였다. 이중 주파수 항법 모드의 경우, 전리층 보정 효과로 단일 주파수 대비 수평 및 수직 RMS가 각각 38%, 30% 향상되었으나, SBAS 수준에는 미치지 못하였다. Table 2의 결과를 바탕으로 각 항법 모드의 비행 시험 간 수평 RMS 변화는 Fig. 7과 같다. RTK 는 전 비행 구간에서 0.05~0.12 m 범위의 안정적인 RMS 값을 유 지하였으나, SBAS는 ± 1 m 수준의 변동이 관측되었다.

Table 3은 각 항법 모드의 데이터 품질 조건으로 전처리된 관 측 Epoch 수를 기반으로 계산된 가용성을 나타낸다. 가용성은 전 체 Epoch 중 위치해가 정상 산출된 Epoch 비율로 계산하였으며, Multi-GNSS 단일 주파수를 100% 기준으로 할 때, RTK는 98.6%, 이중 주파수는 68.8%, SBAS는 54.0%의 가용성을 보였다. 본 비 행시험에서는 전처리되지 않은 모든 위성을 이용한 이중주파수 항법의 경우에 단일주파수 항법 대비 의미있는 성능 향상을 보이

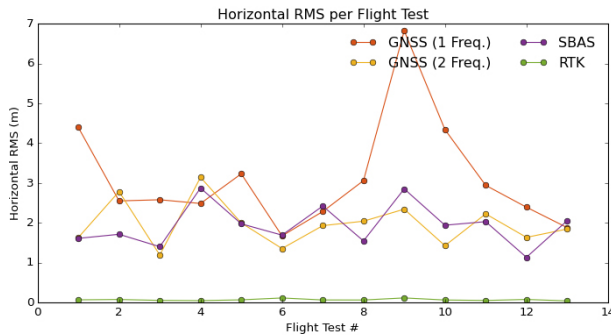


Fig. 7. Horizontal RMS variation per flight test for GNSS, SBAS, and RTK.

지 않았다. 이는 안테나가 기체 내부에 설치되어 비행 기동 시 신호 감쇠 및 빈번한 위성 신호 단절이 발생하였기 때문으로 분석된다. 이와 같은 환경적 제약을 고려하여 정상적인 이중주파 항법 성능을 산출하기 위하여 신호세기 및 위성 개수, locktime 등 양호한 관측 조건을 만족하는 구간을 기준으로 이중주파수 가용성을 산정하였다. 본 논문에서 제시한 이중주파수 항법 모드의 가용성은 통상적인 GNSS 가용성이 아니라 본 비행시험 환경조건에서 관측 데이터 품질 기준을 강화한 상태에서의 가용성을 제시한 것이다. 실제로 실시간 수신기 RTK 상태정보에서는 약 40기 위성이 RTK 처리에 사용된 것으로 표기되어 있으나, 이중주파수 항법과 동일한 품질 조건으로 후처리한 결과에서의 실제 활용된 위성 수는 평균 16기 수준에 가용성 또한 저하됨을 확인하였다. 다만, 실제 도심 운항 환경에서 위성 가시성과 신호품질, 통신 인프라의 제약이 실시간 보정항법 성능에 직접적인 영향을 미친다는 점을 이번 시험의 결과를 통해 간접적으로 유추해 볼 수 있다.

이 연구의 비행시험의 결과, RTK는 도심 저고도 환경에서도 정밀접근 및 UAM 이·착륙 시 실시간 정밀 항법 성능을 확보할 수 있는 수준의 정확도를 나타냈다. 반면 SBAS는 가용성이 확보되는 조건하에서는 항로 구간에서 안정적이며, 정확도 측면에서도 효과적인 항법 방식으로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 K-UAM 실증 노선에서 수행된 13회의 헬기 비행시험을 통해 SBAS 및 RTK 항법의 실시간 동적 항법 성능과 가용성을 평가하였다. 기존 연구가 후처리 기반 분석에 한정되었던 것과 달리, 본 연구는 실시간 보정데이터 송수신 환경을 구축하여 실제 운항조건에서의 항법 성능을 실험적으로 제시하였다.

분석 결과, RTK는 평균 수평 0.07 m, 수직 0.09 m 수준의 정밀도를 보였으며, 가용성은 98.6%로 도심 환경에서도 안정적인 실시간 정밀 측위 성능을 확인하였다. SBAS는 GNSS 단독 대비 약 50% 이상의 정확도 향상을 보였으나, 안테나 설치 위치의 한계 때문에 위성 가시성의 제약으로 가용성이 54% 수준으로 머물렀다. 또한 이중주파수 항법은 단일주파수 대비 정확도는 향상되었으나, 앞서 언급한 제약조건으로 인한 전리층 보정을 위한 위성 가시성 및 신호품질의 한계로 인해 가용성 측면에서는 제약이 있었다.

그럼에도 불구하고 실시간 RTK가 안정적인 항법을 유지한 것은 도심 저고도 운영 환경에서도 보정항법 기술의 실시간 적용 가능성을 실증한 결과라 할 수 있다. 이러한 분석을 통해 K-UAM 운항 환경에서 항로 구간은 SBAS, 이·착륙 구간은 RTK 기반 정밀 항법 운용이 가능함을 확인하였다. 향후 정확도 및 가용성에 대한 분석을 위해 외부 안테나를 이용한 추가 시험과 RTK 무결성(integrity)에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 향후 UAM 회랑 및 버티포트 내 항법시스템의 NSE 및 TSE 기준 수립, 그리고 K-UAM 운항을 위한 실시간 GNSS 보정 항법시스템 체계 마련에 기여할 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 2019, BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document (Version 3.0) 2019, China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201902/P020190227601370045731.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/icao/en/air/nav/2008/2008_04_14_16.pdf

- int/SAM/Documents/2008/IONOSFERASEMINAR/Tropospheric%20Corrections%20for%20GNSS%20Receivers.pdf
- European GNSS Service Centre 2025, [Internet], cited 2025, available from: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>
- Galileo ICD 2023, GALILEO Open Service, OS SIS ICD, Issue 2.1, 2023, European GNSS Service Centre. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.1.pdf
- Galileo OS SDD 2023, European GNSS (GALILEO) Open Service Definition Document, Issue 1.3, 2023, European GNSS Service Centre. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.3.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 2025, [Internet], cited 2025, available from: <https://prod-01-alb-www-gps.woc.noaa.gov/space-segment>
- GPS ICD 2025, Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces (IS-GPS-200N), GPS.GOV. <https://www.gps.gov/sites/default/files/2025-07/IS-GPS-200N.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>
- 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>
- 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>
- NovAtel 2025, Waypoint GrafNav User Manual, NovAtel Inc. <https://novatel.com/support>
- 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>
- Park, Y.-H., Park, S.-H., Oh, K. R., & Choi, E. 2024, Evaluating the Navigation Performance of RTK for Take-off and Landing and SBAS with Flight Measurements on the K-UAM Demonstration Route, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 13, 505-514. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.4.505>
- 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>
- Tarrío, P., Bernardos, A. M., & Casar, J. R. 2011, Weighted Least Squares Techniques for Improved Received Signal Strength Based Localization, Sensors, 11, 8569-8590. <https://doi.org/10.3390/s110908569>
- UAM Team Korea 2021, K-UAM Concept of Operations 1.0, Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Sejong, Republic of Korea.



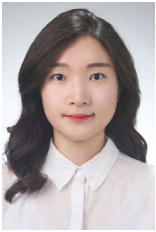
Yong-Hui Park received the Master's degree in Electronics from Hanbat National University in 2002. He has been working at R&D Center, Dusitech since 1999. His research interests include GNSS Receiver, GNSS positioning algorithm.



Sung-Hyun Park received the Ph.D. degree in Electronics from Paichai University in 2014. He has been working at R&D Center, Dusitech 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.