

QZSS SLAS 보정정보 정확도의 장기간 성능분석

김용래¹, 김희섭², 김정래^{1†}

Long-term Evaluation of QZSS SLAS Correction Accuracy

Yongrae Kim¹, Heeseob Kim², Jeongrae Kim^{1†}

¹Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Korea Aerospace University Gyeonggi-do 10540, South Korea

²Satellite Application Division at Korea Aerospace Research Institute (KARI), Daejeon 34133, South Korea

ABSTRACT

The quasi-zenith satellite system (QZSS) provides sub-meter level augmentation service (SLAS) to improve the positioning accuracy of single-frequency GPS L1 receiver users. The SLAS correction consists of differential GPS information (DGPS) and the corrections are transmitted via quasi-zenith satellites (QZS). The DGPS correction reduces the effect of pseudo-range errors due to satellite orbit, clock and atmospheric delay errors. Thirteen SLAS reference stations in Japan generate the correction data. The performance of the DGPS correction depends on several factors, including location of reference stations, distance between the user and reference station, etc. The long-term performance of the SLAS corrections was evaluated by processing data over a five-year period (2019-2023). The SLAS corrections were applied to GPS observations at the IGS stations in Japan and the positioning accuracy was evaluated. The correlation with the ionospheric activity and the latitude of the SLAS reference stations was also evaluated.

Keywords: GPS, GNSS, QZSS, SLAS, DGPS

주요어: GPS, 위성항법시스템, 준천정위성시스템, 서브미터급 보정서비스, 차분보정

1. INTRODUCTION

최근 정밀한 위치 정보가 요구되는 다양한 응용 분야가 증가함에 따라, 위성항법의 정확도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 위성항법에서 발생하는 주요 오차 요인은 전리층 및 대류층 지연, 위성 궤도 및 시계 오차, 다중 경로 오차 등이 있으며, 이러한 오차를 효과적으로 제거하면 항법 오차를 줄이고 정확한 위치추정을 가능하게 한다. 이러한 오차 제거 방법 중 하나는 위치를 정확히 알고 있는 지상관측소에서 계산한 보정값을 실시간으로 적용하는 방식으로, 이를 통해 항법 위성에 대한 보정정보를 제공하여 위치정확도를 높이는 것이 가능하다.

Differential GPS (DGPS)는 정확한 위치를 알고 있는 기준국에서 GPS 의사거리 신호의 오차를 계산하고 이를 실시간으로 주변 수신기에 전송하여 위치정확도를 개선하는 보정 시스템으로,

위성 궤도 및 시계 오차, 전리층 및 대류층 지연 등 다양한 오차 요소를 보정하여 서브미터 수준의 위치정확도를 제공한다. 그러나 DGPS의 보정 효과는 기준국과의 거리와 비례하여 감소하는 특성이 있으며, 장거리 지역에서는 보정 성능이 제한될 수 있다. 일본은 이러한 DGPS와 유사한 개념으로 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)을 통해 Sub-meter Level Augmentation Service (SLAS)를 제공한다. 2017년부터 서비스 제공을 시작한 SLAS는 L1 주파수 대역 (1575.42 MHz)에서 송신되며 서브미터급 정확도를 지원한다. 특히, SLAS는 위성의 L1 대역을 통해 보정값을 방송하여 네트워크 연결 없이도 지상 단말기의 위치정확도를 높일 수 있으며, 전리층 및 대류층 지연을 포함한 오차를 효과적으로 보정하여 GPS와의 호환성을 유지하면서도 독립적으로 높은 정확도를 제공할 수 있다. QZSS의 보정 시스템은 일본 내 위치 기반 서비스의 신뢰성을 높이며, 네트워크 의존성을 줄여 실시간 보정이

Received Nov 14, 2024 Revised Nov 22, 2024 Accepted Dec 03, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: jrkim@kau.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

어려운 환경에서도 정확한 위치 정보를 제공하는 역할을 한다.

SLAS 보정정보를 사용한 선행 연구로 성능 평가 및 국내 가용성 확인에 관한 연구가 진행된 바 있다. Matsumoto et al. (2019)는 일본 전역에서 SLAS의 성능을 평가하여, SLAS가 단일 주파수 기반 DGPS 보정정보를 제공함으로써 전리층 및 위성 시계 오차와 같은 주요 오차 요소를 줄여 서브미터급 위치정확도 달성성을 확인하였다. 다만, 이 연구는 SLAS의 성능 확인 영역이 일본 지역으로 한정된다는 한계를 가진다. 한편 SLAS의 성능을 국내에서도 검토하기 위하여 SLAS 보정정보를 사용한 후처리 항법 결과를 GPS 단독 및 MTSAT Satellite Augmentation System (MSAS) 보강 항법과 비교하였으며, SLAS가 일본 내에서는 높은 성능을 제공하나 한국과의 거리에서는 수평위치추정 성능이 저하됨을 발견하였다. 이로써 SLAS의 적용 범위와 성능이 일본 인근에 한정되는 한계가 있음을 확인하였다 (Hwang et al. 2021). 이러한 선행 연구들은 주로 단기간의 성능 확인에 초점을 맞추었으나, SLAS는 2017년부터 운영을 시작하여 이미 상당한 시간이 경과하였기 때문에, 장기간에 걸친 위치추정 성능을 확인할 필요가 있다. 운영 초기와 달리 다양한 환경 변화와 시간적 요인이 SLAS의 성능에 어떤 영향을 미치는지 평가하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 QZSS SLAS 보정정보가 장기간에 걸쳐 일본 내 GPS 위치정확도 향상에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 5년간의 SLAS 및 GPS 데이터를 이용하여 위치추정 성능을 평가하였다. SLAS 보정정보를 후처리 방식으로 적용하여 일본 내 IGS 지상국에서 수집된 GPS 데이터를 처리하였으며, 위치정확도 향상 효과를 체계적으로 분석하였다. 2장에서는 SLAS 보정정보와 적용 방법에 대해 설명하고, 3장에서는 위치추정에 사용된 SLAS 기준국과 IGS 지상국에 대해 설명한다. 4장에서는 장기간에 걸친 위치추정 결과를 기반으로 수평 및 수직위치오차 감소 효과를 분석하고, 거리 및 위도에 따른 성능 변화를 확인하였다.

2. SLAS 신호 구성

2.1 QZSS 운용 현황

일본의 준정위성시스템 (QZSS)은 아시아-오세아니아 지역에서 높은 정확도의 위성항법서비스를 제공하기 위해 설계된 시스템으로, GPS와의 높은 호환성을 통해 일본 전역에서 안정적이고 정확한 위치 정보를 제공한다. QZSS는 위성 상태를 지속적으로 관리하고 고정밀 보정 데이터를 제공할 수 있는 지상 인프라를 갖추고 있는데, 2개의 중앙제어센터 (Master Control Center, MCC)와 7개의 추적, 원격측정 및 명령 (Tracking, Telemetry & Command, TT&C) 스테이션, 그리고 30개 이상의 모니터링 스테이션을 운영하고 있다. 현재 QZSS는 3기의 경사지구동기궤도 (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) 위성과 1기의 지구정지궤도 (Geostationary Orbit, GEO) 위성으로 구성되어 있으며, 이러한 배치는 일본과 그 인근 지역에 안정적인 위치추정서비스를 제공하기 위해 설계되었다 (Sakai 2020). IGSO 위성들은 일본 상공에 위치하여 8자 형태의 궤도를 형성함으로써 도시 지역, 산악 지형과 같은 다양한 환경에서도 신호 가시성과 위치정확도를 향

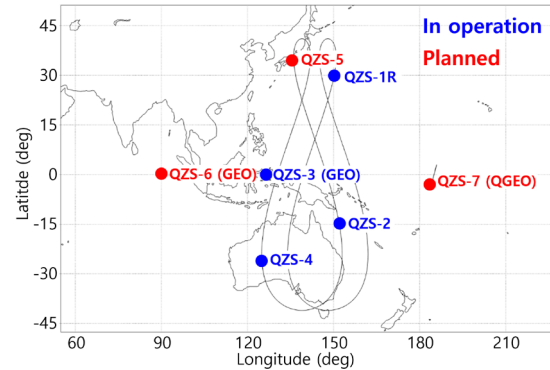


Fig. 1. QZSS 7SV constellation ground track.

상시키는 데 기여한다. GEO 위성은 고정된 위치에서 일정한 가시성을 유지하며, 이러한 위성 배치는 항상 최소 두 개의 위성이 일본 상공에 위치하도록 보장하여 신호가 차단될 가능성을 최소화한다. QZSS는 현재 4기의 위성으로 운영되고 있으나, 2026년까지 3기의 추가 위성 발사를 통해 총 7기의 위성 (4기의 IGSO와 3기의 GEO 위성)으로 Full Operational Capability (FOC)를 달성할 예정이다 (Kenji 2023). 이를 통해 QZSS는 GPS 없이 단독으로도 고정밀 위치추정 서비스를 제공할 수 있는 체계를 강화할 예정이며, 아시아-오세아니아 지역 전반에서 더욱 향상된 위치추정 성능을 지원할 계획이다. FOC를 달성했을 때의 각 위성의 지상궤적은 Fig. 1과 같은데, 현재 운용 중인 위성들과 2026년까지 추가로 발사될 위성들을 구분하여 표기하였다.

QZSS는 다양한 주파수 대역에서 위치 및 보정 신호를 송출하여 GPS 신호를 보완하고, SLAS를 통해 약 1~2 m 수준의 위치정확도를 제공한다 (Matsumoto et al. 2019). SLAS는 QZSS의 LIS 신호 (1575.42 MHz)를 활용하여 보정 정보를 사용자에게 전달하며, 이를 통해 GPS 단독으로는 어려운 높은 수준의 위치정확도를 확보할 수 있다. QZSS의 LIS 주파수 대역은 일본 내륙 및 근처 지역에 보정 신호를 전달하기 위해 설계되었으며, IGSO 위성 3기와 GEO 위성 1기에서 동시에 지원되어, 일본 전역에 걸쳐 일관성 있는 보정 서비스를 제공할 수 있다는 장점을 보인다. SLAS는 기존의 위성기반 보정 시스템 (Satellite-Based Augmentation System, SBAS)과는 달리, IGSO 위성에서도 보정정보를 송신할 수 있어 지형적 장애물이나 기후 조건으로 인한 신호 차단 가능성을 크게 줄인다. 이를 통해 SLAS는 특히 복잡한 지형적 특성을 가진 일본의 도시 및 산악 지역에서 신뢰성 있는 위치 보정정보를 제공하며, 이는 자율주행, 항공, 해양 및 측량 등의 다양한 분야에서 중요한 역할을 한다 (Kenji 2023).

SLAS를 비롯한 QZSS의 고정밀 보정 서비스는 2024년부터 더욱 발전된 형태로 제공되고 있다. Multi-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation Precise Point Positioning (MADOCA-PPP)와 같은 정밀 위치 보정 서비스는 10 cm 수준의 높은 위치정확도를 달성할 수 있으며, 특히 해양 및 산악 지형과 같은 GPS의 정확도가 떨어지는 지역에서도 뛰어난 성능을 제공한다 (Japan Cabinet Office 2022). QZSS는 또한 신호 인증 서비스 (QZSS Navigation Message Authentication, QZNMA)를 통해 스푸핑 공격에 대한 저항성을 강화하였으며, 향후 응급 경보 위성 서비스

Table 1. QZSS signal and service according to satellite (Sakai 2024).

| Frequency (MHz) | Signal | Service | QZS-1R | QZS-2/4 | QZS-3 | QZS-5 | QZS-6 | QZS-7 |
|-----------------|--------|-------------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | | | IGSO | IGSO | GEO | IGSO | GEO | QGE0 |
| 1575.42 | L1C/A | Positioning | 0 | 0 | 0 | - | - | - |
| | | QZNMA | 0 | 0 | 0 | - | - | - |
| | L1C/B | Positioning | 0 | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | | QZNMA | 0 | - | - | 0 | 0 | 0 |
| | L1C | Positioning | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | QZNMA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| L1S | SLAS | 0 | 0 | 0 | - | - | - | |
| | EWSS | 0 | 0 | 0 | - | - | - | |
| | SBAS | - | - | 0 | - | 0 | 0 | |
| 1227.60 | L2C | Positioning | 0 | 0 | 0 | - | - | |
| 1176.45 | L5 I/Q | Positioning | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | | QZNMA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | L5S | DFMC SBAS | 0 | 0 | 0 | - | 0 | |
| 1278.75 | L6D | CLAS | 0 | 0 | 0 | 0 | - | |
| | | MADOCA | - | - | - | - | 0 | |
| | L6E | MADOCA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | | QZNMA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 2 GHz-band | S | Q-ANPI | - | - | 0 | - | - | |

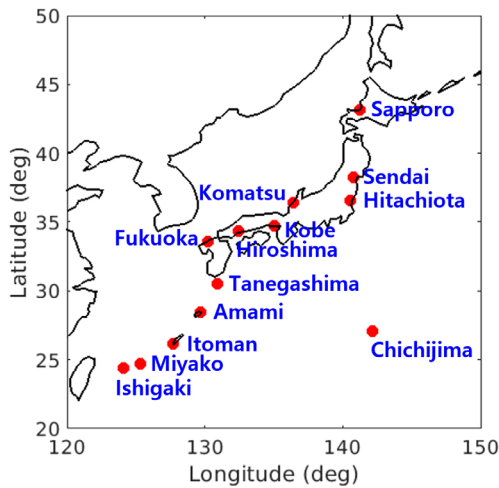


Fig. 2. Location of SLAS reference stations.

(Emergency Warning Satellite Service, EWSS)를 추가하여 아시아-오세아니아 지역의 재난 관리와 안전 확보에도 기여할 예정이다. 이러한 QZSS의 다양한 서비스 확장은 고정밀 위치 정보 제공의 안정성과 신뢰성을 높이는데 기여한다. Table 1에는 QZSS의 FOC 달성 후 제공할 신호에 따른 서비스를 정리하였다 (Sakai 2024).

2.2 SLAS 신호 개요

QZSS SLAS는 DGPS 방식의 의사거리 보정을 통해 서브미터 급의 높은 위치정확도를 제공하는 시스템이다. 이 서비스는 일본의 준천정 위성 (Qausi-Zenith Satellite, QZS)을 통해 보정정보를 사용자에게 직접 전송하여 위치오차를 줄이는 역할을 한다 (Japan Cabinet Office 2024a). GPS 또는 QZS 신호는 대기권 지연 오차와 궤도 및 시계 오차에 의해 왜곡될 수 있으며, 이러한 오차는 일본 전역에 분포된 SLAS 기준국을 통해 보정된다. 이 보정 데이터는 QZS 위성을 통해 사용자에게 전송되며, 이를 통해

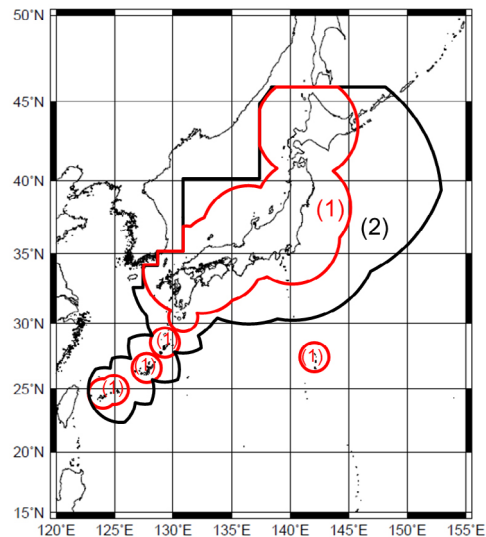


Fig. 3. Service area of the SLAS (Japan Cabinet Office 2022).

위치추정의 정밀도가 크게 향상된다. SLAS는 일본의 전국적인 커버리지를 위해 총 13개의 기준국을 운영하고 있으며, 이 기준국들은 일본의 고위도와 저위도 지역을 모두 포함하도록 배치되어 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, Sapporo, Fukuoka, Kobe와 같은 주요 도시에 기준국이 위치하고 있으며, Miyako, Chichijima 등 외곽 지역에도 기준국이 설치되어 일본 전역에 걸쳐 균형 잡힌 보정 서비스를 제공한다. 이러한 기준국 배치는 사용자가 어느 위치에 있든지 안정적인 보정 신호를 수신할 수 있도록 하여, SLAS를 이용한 위치 측정의 정확성과 신뢰성을 보장한다 (Japan Cabinet Office 2024b).

SLAS는 일본 전역에 걸쳐 안정적인 위치 보정 서비스를 제공하며, Fig. 3에 표시된 것과 같이 Zone 1과 Zone 2로 구분된 서비스 영역에서 각각 수평 1m, 수직 2m 이내와 수평 2m, 수직 3m 이내의 95% Circular Error Probability (CEP) 오차를 보장한다. SLAS 보정 데이터는 2017년 3월부터 QZSS Public Archive를 통

Table 2. SLAS message type information (Japan Cabinet Office 2024b).

| Message type | Message data |
|--------------|--------------------------------|
| 0 | Test mode |
| 43 | DC report |
| 44 | DCX message |
| 47 | Monitoring station information |
| 48 | PRN mask |
| 49 | IOD information |
| 50 | DGPS correction |
| 51 | Satellite health |

해 제공되고 있으며, 2022년 3월에 QZS-1 위성이 QZS-1R로 대체되어 지속적인 보정 데이터 제공이 이루어지고 있다.

SLAS의 신호 구조는 GPS와 동일한 L1 대역을 사용하여 모든 QZSS 위성에서 동일한 데이터를 송신함으로써 GPS 수신기와 의 호환성을 유지한다. 보정정보는 2초 간격으로 전송되며, 기준국별 정보는 30초마다 갱신된다. SLAS 데이터는 week number, time of week, LIS 메시지 등의 정보를 포함한 16진수 바이너리 형식으로 제공되며, 이를 해석하여 보정정보를 추출할 수 있다.

SLAS는 위치 보정과 관련된 다양한 메시지 타입 (Message Type, MT)을 통해 사용자에게 필요한 정보를 제공한다. MT 0은 SLAS 신호를 송신하는 위성이 테스트 상태임을 나타내며, 이 메시지를 수신할 경우 60초간 해당 위성은 위치추정 과정에서 제외된다. MT 47은 일본 내 13개 기준국 중 5개의 위치 정보를 포함하여 보정정보를 생성하는 지상 기준국의 정보를 제공한다. MT 48은 가시위성의 Pseudo Random Noise (PRN) 마스크 정보를 제공하여 현재 보정 데이터를 송신하는 위성을 식별한다. MT 49는 가시위성의 Issue of Data (IOD)를 포함하여 보정정보의 최신성을 확인한다. MT 50은 DGPS 보정값을 포함한 의사거리 보정정보를 제공하여 전리층과 대류층의 신호 지연을 보정한다. MT 51은 위성의 상태 정보를 제공하며, 고장 상태의 위성을 계산에서 제외하도록 한다. Table 2에 SLAS 보정정보의 메시지 종류를 정리하였다.

SLAS 보정정보를 활용한 위치 추정에서는, 가중치 행렬 W 를 계산하여 신호 품질에 따른 가중치를 반영함으로써 정확도를 높인다. 이때 가중치 행렬의 각 원소는 특정 위성 신호의 오차공분산 σ_i^2 의 역수로 설정되며, 위치오차 벡터 dX 는 최소자승법 (Least Square Solution)을 통해 식 (1)과 같이 구한다 (Japan Cabinet Office 2024b).

$$dX = (H^T W H)^{-1} H^T W y \tag{1}$$

여기서 dX 는 위치오차 벡터, H 는 기하 행렬, y 는 보정된 의사거리 벡터를 나타내며, W 는 가중치 행렬이다. 오차공분산 σ_i^2 는 의사거리 보정값, 전리층 지연 오차, 다중경로 오차, 수신기 노이즈 오차 공분산의 합으로 계산되며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{pr.corr,i}^2 + \sigma_{iono,i}^2 + \sigma_{multipath,i}^2 + \sigma_{noise}^2 \tag{2}$$

의사거리 보정값의 오차공분산 $\sigma_{pr.corr,i}^2$ 는 SLAS가 제공하는 의사거리 보정정보의 정확성을 나타내며, 보정 신호의 품질에 따라 달라진다. 이 값은 식 (3)을 통해 계산되며, EL_i 는 위성의 고도각을 나타낸다.

$$\sigma_{pr.corr,i}^2 = \frac{\left(a_0 + a_1 e^{-\frac{EL_i}{Th_0}}\right)^2}{n} + a_2^2 \tag{3}$$

여기서 $a_0=0.16$, $a_1=1.07$, $a_2=0.08$, $Th_0=15.5$, $n=1$ 의 값을 사용한다 (Japan Cabinet Office 2024b). 전리층 지연 오차의 오차공분산 $\sigma_{iono,i}^2$ 는 전리층의 전자밀도 변화에 따라 발생하는 신호 지연을 반영하며, 사용자의 고도와 전리층의 특성을 고려하여 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\sigma_{iono,i}^2 = F_{pp,i} \times \sigma_{vig}(dist + 2\tau v_{air}) \tag{4}$$

여기서 $F_{pp,i}$ 는 경사계수이고, $\sigma_{vig}=0.004$, $dist$ 는 기준국-사용자 간 거리이며 $r=100$, $v_{air}=0.07$ 이다 (Japan Cabinet Office 2024b). 다중경로 오차의 오차공분산 $\sigma_{multipath,i}^2$ 는 신호가 반사 경로를 통해 수신기에 도달하면서 발생하는 오차를 반영하며, 도심과 같은 반사체가 많은 환경에서 중요하다. 이는 식 (5)를 통해 계산된다.

$$\sigma_{multipath,i}^2 = 0.13 + 0.53e^{\frac{EL_i}{10}} \tag{5}$$

마지막으로, 수신기 노이즈의 오차공분산 σ_{noise}^2 는 수신기 자체의 내부 노이즈로 인한 오차를 나타내며, 시스템의 고정값으로 $\sigma_{noise}=0.11$ 로 설정된다 (Japan Cabinet Office 2024b).

이와 같이 개별 오차 공분산을 구한 후, 이를 통해 가중치 행렬을 구성하여 각 신호의 품질에 따라 위치 추정 시 가중치를 반영한다. 이를 통해 SLAS는 오차가 큰 신호의 영향을 줄이고, 오차가 적은 신호에 높은 가중치를 부여함으로써 보다 정밀한 위치 추정을 가능하게 한다. 추가로, 거리 기반 가중치 행렬을 통해 각 기준국과의 거리 차이에 따라 가중치를 차등 적용하는 방법을 고려할 수 있다. 기존의 역거리 가중치 방식은 기준국과 사용자 간 거리가 짧을수록 높은 가중치를 부여하는데, 이를 개선한 방법으로 거리에 기반한 지수 함수를 사용하여 기준국과의 거리 차이에 따른 가중치를 더욱 세밀하게 설정할 수 있다 (Tae et al. 2015).

3. SLAS 보정정보 분석

3.1 1일 보정정보 분석 결과

2023년 1월 1일에 일본의 Hitachiota 기준국에서 수신된 SLAS 의사거리 보정정보를 분석하여, 경사각과 방위각에 따른 보정값의 분포 특성을 파악하였다. SLAS는 사용자 위치에 따른 전리층과 대류층의 신호 지연을 보정하여 높은 위치정확도를 제공하는데, 본 분석에서는 한반도와 비슷한 위도에 위치한 기준국에서 이러한 보정값이 경사각에 따라 어떻게 변하는지, 특히 낮은 경사각에서의 보정값이 커지는 경향을 확인하였다. 분석을 위해 경사각 제한을 10° 로 설정하여 그 이상의 경사각을 갖는 신호만을 평가 대상으로 하였으며, skyplot을 활용하여 방위각과 경사각에 따른 보정값의 분포를 시각화하였다.

Skyplot을 통해 방위각과 경사각에 따른 Hitachiota 기준국에서 수신된 의사거리 보정값의 분포를 시각화한 결과, 경사각이 낮아질수록 의사거리 보정값이 급격히 증가하는 특징이 나타났다. Fig. 4는 Hitachiota 기준국에서의 1일간 보정값 크기 평균을

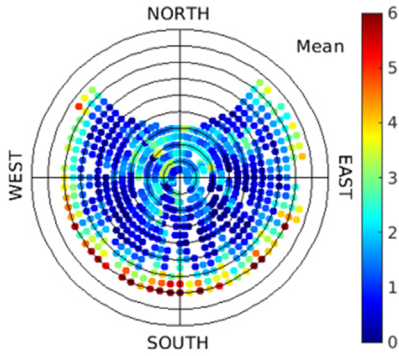


Fig. 4. SLAS correction magnitude skyplot at Hitachiota station (unit: m).

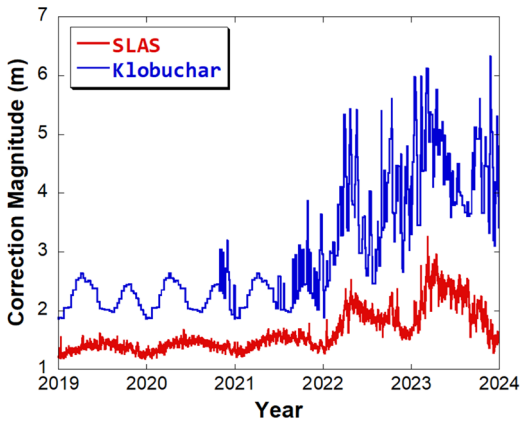


Fig. 5. Daily variation of SLAS correction magnitude and GPS ionospheric delay at Hitachiota station (2019-2023).

나타내는데, 낮은 경사각에서 전파가 전리층과 대류층을 거치는 거리가 길어지며, 그에 따라 신호가 더 많은 지연을 겪기 때문에 의사거리 보정값이 커지는 것으로 해석된다.

3.2 장기간 보정정보 분석 결과

전리층 지연과 SLAS 보정정보의 상관관계를 확인하기 위해, 2019년부터 2023년까지 5년간의 Hitachiota 기준국 보정정보를 분석하였다. 전리층 지연 크기는 기준국 위치에서의 Klobuchar model 수직 전리층 지연값을 사용하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 SLAS 보정값과 전리층 지연 크기를 시간에 따라 비교한 결과, 2022년부터 2023년까지 전리층 지연이 매우 큰 기간에도 두 값의 변화 양상이 매우 유사하게 나타났다. 이러한 유사성은 Fig. 6에서 더 명확하게 확인할 수 있고, 두 값 사이의 상관계수는 0.81로 매우 높게 나타났다. 이러한 결과는 SLAS 보정정보가 전리층 지연의 영향을 크게 받고 있으며, SLAS 보정값에 포함된 오차 요소 중 계절적 변동성을 가장 강하게 반영하는 것이 전리층 지연임을 보여준다 (Kim et al. 2024).

위도에 따른 SLAS 보정정보를 분석한 결과, SLAS 보정정보는 전리층의 주기적 변동과 유사한 패턴을 보이며, 특히 저위도 지역에서 보정값의 크기와 변동폭이 크게 증가하는 경향이 확인되었다. 이번 분석에는 일본 내 경도는 유사하지만 서로 다른 위도

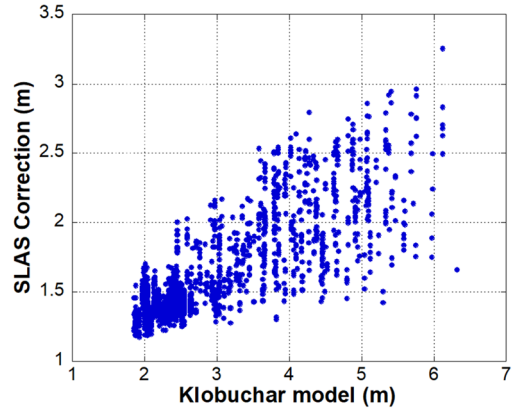


Fig. 6. The correlation between GPS ionospheric delay and SLAS correction at Hitachiota station (2019-2023).

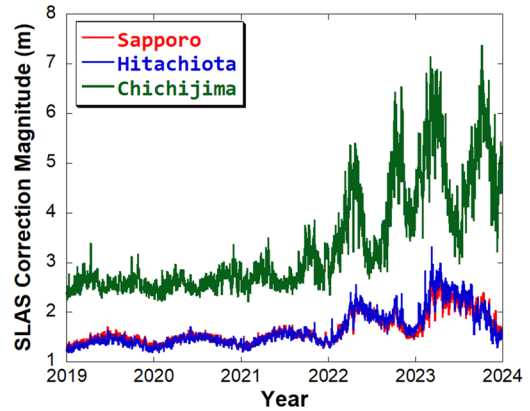


Fig. 7. Daily variation of SLAS correction magnitude at three reference stations.

에 위치한 세 개의 기준국, 즉 북위 43.2°의 Sapporo, 북위 36.6°의 Hitachiota, 그리고 북위 27.1°의 Chichijima 기준국의 보정값 데이터를 사용하였다. 분석 결과, 저위도에 위치한 Chichijima 기준국의 보정값은 고위도에 위치한 Sapporo 기준국보다 평균적으로 약 103% 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이는 저위도 지역에서 전리층의 영향이 더 크게 작용하기 때문으로 해석된다. Fig. 7은 각 기준국에서의 보정값 크기를 나타내고 있으며, 이를 통해 저위도에 위치한 Chichijima가 다른 두 지역에 비해 지속적으로 높은 보정값을 기록하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 전리층의 영향이 위도에 따라 다르게 나타나며, 특히 저위도에서 전리층 지연에 의해 SLAS 보정값이 더 높은 수준으로 유지되는 것을 보여준다.

SLAS 기준국별 5년간의 절댓값 평균을 통해 보정정보 수준을 분석한 결과, SLAS 보정정보는 위도에 따라 차이가 있으며, 특히 위도 30° 부근에서 보정값이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 예를 들어, 북위 33.6°에 위치한 Fukuoka에서는 보정값이 비교적 낮은 수준을 유지하였으나, 남쪽의 Tanegashima (북위 30.6°)로 이동하면서 보정값이 크게 증가하는 모습을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 저위도 지역으로 갈수록 전리층의 영향이 더 크게 작용하기 때문으로 해석된다. Fig. 8에 나타난 기준국별 보정값

Table 3. Distance between SLAS reference stations and IGS ground stations (unit: km).

| Location | STK2 | MIZU | ISHI | MSSA | USUD | TSK2 | TSKB | TKBG | MTKA | CHOF | SMST | AIRA | GMSD | CCJ2 | MCIL |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sapporo | 66 | 446 | 775 | 816 | 817 | 788 | 788 | 792 | 842 | 843 | 1158 | 1566 | 1665 | 1786 | 2397 |
| Sendai | 591 | 102 | 233 | 317 | 317 | 247 | 247 | 250 | 306 | 307 | 677 | 1168 | 1236 | 1250 | 1993 |
| Hitachiota | 779 | 288 | 51 | 203 | 203 | 67 | 67 | 68 | 134 | 136 | 536 | 1057 | 1108 | 1066 | 1872 |
| Komatsu | 917 | 515 | 343 | 177 | 178 | 332 | 332 | 337 | 295 | 293 | 316 | 738 | 819 | 1170 | 2151 |
| Kobe | 1141 | 732 | 499 | 340 | 340 | 484 | 484 | 486 | 426 | 423 | 150 | 523 | 596 | 1088 | 2164 |
| Hiroshima | 1303 | 939 | 736 | 573 | 573 | 722 | 722 | 725 | 665 | 663 | 333 | 329 | 442 | 1233 | 2363 |
| Fukuoka | 1494 | 1154 | 957 | 794 | 795 | 943 | 943 | 946 | 886 | 883 | 530 | 200 | 346 | 1358 | 2527 |
| Tanegashima | 1733 | 1331 | 1067 | 927 | 927 | 1050 | 1050 | 1051 | 985 | 982 | 579 | 145 | 7 | 1164 | 2376 |
| Amami | 1998 | 1590 | 1313 | 1182 | 1182 | 1297 | 1297 | 1297 | 1230 | 1228 | 826 | 387 | 269 | 1241 | 2463 |
| Chichijima | 1824 | 1340 | 1028 | 1067 | 1066 | 1019 | 1019 | 1014 | 985 | 985 | 937 | 1240 | 1156 | 2 | 1223 |
| Itoman | 2315 | 1910 | 1631 | 1501 | 1502 | 1615 | 1615 | 1615 | 1548 | 1546 | 1145 | 690 | 587 | 1447 | 2653 |
| Miyako | 2571 | 2179 | 1908 | 1774 | 1774 | 1892 | 1892 | 1892 | 1825 | 1823 | 1421 | 940 | 854 | 1706 | 2897 |
| Ishigaki | 2671 | 2289 | 2024 | 1887 | 1887 | 2008 | 2008 | 2008 | 1942 | 1939 | 1536 | 1042 | 966 | 1836 | 3023 |

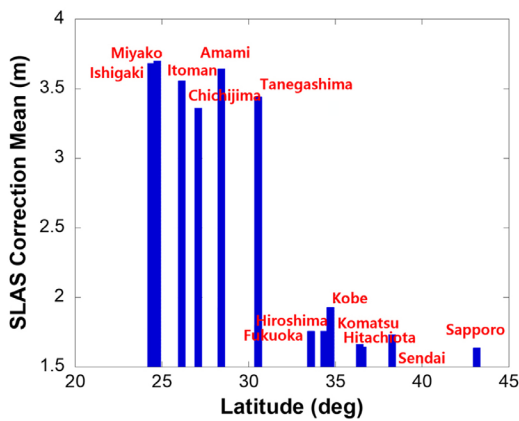


Fig. 8. Five year mean of SLAS correction magnitude along latitude (2019-2023).

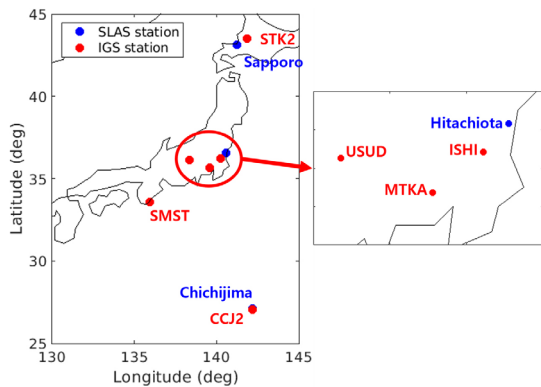


Fig. 9. Locations of SLAS reference stations and IGS ground stations.

크기의 평균을 통해, 북쪽의 기준국들에 비해 남쪽의 기준국들이 더 높은 보정값을 제공하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 위치추정 설정 및 결과

SLAS 보정정보를 이용하여 위치추정을 수행하기 위해서는 우선 MT 50에 포함된 의사거리 보정값을 C/A 코드 의사거리에 더

해주어 식 (6)과 같이 계산한다.

$$PSR_i^{corr} = PSR_i^{meas} + PRC_i \quad (6)$$

여기서 PSR_i^{meas} 은 i 번째 위성의 의사거리 관측값, PRC_i 는 해당 위성의 의사거리 보정값이고, 두 값을 이용해 보정된 의사거리 PSR_i^{corr} 을 계산한다. GPS 단독 운영 시에는 의사거리 관측값인 PSR_i^{meas} 를 그대로 사용한다. 이후 방송궤도력 (broadcast ephemeris)을 통해 위성의 위치를 계산하고, 기하학적 거리 (geometric range)를 구하여 식 (1)과 같이 최소자승법을 통해 수신기의 위치를 추정한다.

2019년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지 총 5년간 GPS 단독 운영과 SLAS 보정정보 사용 시 위치정확도를 비교하기 위해 위치추정 시험을 진행하였다. 이 시험은 GPS를 단독으로 사용할 때와 SLAS 보정정보를 추가로 활용할 때의 위치정확도를 비교하고, SLAS 보정정보의 성능을 체계적으로 분석하고자 하는 목적을 가지고 있다. 이번 시험에서는 위성항법시스템으로 GPS를 사용하였으며, 총 32기의 위성 데이터를 활용하였다. 또한 SLAS 보정정보의 품질과 성능을 평가하기 위해 Fig. 9와 같이 SLAS 기준국 3곳과 IGS 지상국 6곳이 함께 사용되었다. 경사각 제한을 10° 로 설정하였으며, L1 C/A 코드 의사거리를 통해 위치추정을 수행하였다.

SLAS 기준국은 일본 내 위도에 따라 서로 다른 환경에서 보정정보를 수집할 수 있도록 Sapporo, Hitachiota, Chichijima의 3곳이 선정되었다. Sapporo는 일본의 고위도 지역에, Hitachiota는 중위도 지역에, Chichijima는 저위도 지역에 위치해 있어 위도별 보정 성능 차이를 평가하는 데 적합하다. 이러한 위도별 기준국 배치를 통해 SLAS 보정정보가 위도에 따라 어떻게 변화하는지, 그리고 전리층 지연의 영향을 어떻게 반영하는지를 구체적으로 분석할 수 있다.

IGS 지상국은 SLAS 기준국과의 거리 차이를 고려하여 총 6곳이 선정되었다. Sapporo 기준국은 인근 STK2 지상국 데이터를 사용하였고, Hitachiota 기준국은 주변의 ISHI, USUD, MTKA와 SMST 지상국 데이터를 사용하였다. 저위도의 Chichijima 기준국은 가장 가까운 CCJ2 지상국의 데이터를 사용하여, 위도 및 기준국과의 거리 차이에 따른 보정 성능의 변화를 확인할 수 있도록 하였다. IGS 지상국 위치의 참값으로는 SINEX 형식의 IGS

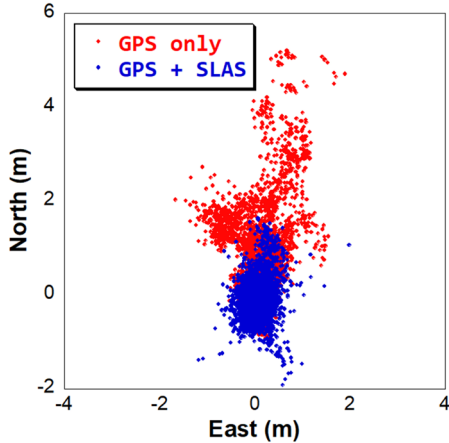


Fig. 10. Horizontal positioning error at ISHI ground station on January 1, 2023.

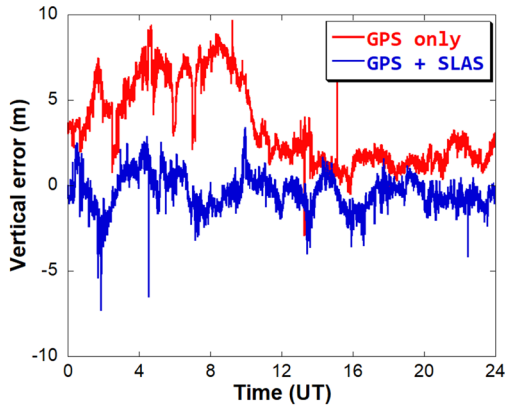


Fig. 11. Vertical positioning error at ISHI ground station on January 1, 2023.

지상국 위치솔루션 데이터를 사용하였다. Table 3은 일본 내 13개 SLAS 기준국과 15개 IGS 지상국 사이의 거리를 계산한 결과이다. 선정된 SLAS 기준국 및 IGS 지상국 사이의 거리도 표시하였다.

2023년 1월 1일, ISHI 지상국의 위치추정 결과를 분석한 결과, SLAS 보정정보의 적용이 위치정확도 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 이번 실험에서는 ISHI 지상국에서 약 50.8 km 떨어진 Hitachiota 기준국의 보정정보를 사용하여 GPS 단독 운영과 비교하였다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 GPS 단독 운영 시 CEP (95%)는 3.2 m였으나, SLAS 보정정보를 적용했을 때 1.1 m로 감소하여, 위치오차가 크게 줄어든 것으로 확인되었다. 이는 SLAS 보정정보가 GPS 신호의 오차 요소를 보정하여 위치정확도를 높이는 데 효과적임을 보여준다.

또한, Fig. 11에 나타난 수직위치오차를 분석한 결과 SLAS 보정정보를 적용했을 때 특정 시간대 (Local time 기준 14시 전후)에서 GPS 단독 운영 대비 수직 오차가 현저히 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 전리층 지연의 변화에 대해 SLAS 보정정보가 보다 정밀하게 대응함으로써 GPS 신호의 높이 오차를 안정화하는 역할을 수행하고 있음을 나타낸다.

평균 Root Mean Square (RMS) 오차 역시 SLAS 보정정보를 적용한 경우 수평 방향에서 0.5 m, 수직 방향에서 1.1 m로 측정되

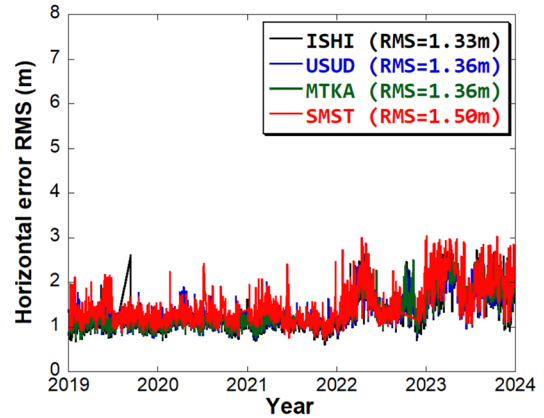


Fig. 12. Horizontal positioning error RMS with GPS-only operation at four ground stations.

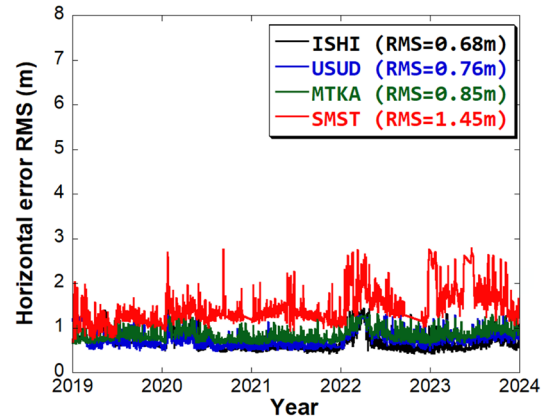


Fig. 13. Horizontal positioning error RMS with SLAS corrections at four ground stations.

어 GPS 단독 운영 대비 전반적인 오차가 감소하였다. 이러한 결과는 SLAS 보정정보가 수평 및 수직 위치정확도를 모두 향상시키며, 특히 전리층 지연과 같은 변수에 의한 수직 오차의 변동을 줄이는 데 효과적임을 보여준다 (Kim et al. 2024).

장기간에 걸쳐 수평위치오차를 기준국과의 거리별로 분석한 결과, SLAS 보정정보가 기준국과 지상국 간의 거리 차이에 따라 위치정확도에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. Hitachiota 기준국을 기준으로 다양한 거리에 위치한 4개의 IGS 지상국 (ISHI, USUD, MTKA, SMST)을 대상으로 위치를 추정한 결과, 기준국과의 거리가 가까운 지상국인 ISHI, USUD, MTKA에서는 Fig. 12에 나타난 것과 같이 GPS 단독 운영 시 일일 수평위치오차 RMS가 최대 3 m까지 발생하였다. 하지만 SLAS 보정정보를 적용한 경우 Fig. 13과 같이 일일 수평위치오차 RMS가 대부분 1 m 이하로 유지되었으며, GPS 단독 운영에 비해 위치오차가 눈에 띄게 감소하였다. 특히, ISHI의 경우 기준국에 가장 인접해 있어, 5년간 수평위치오차의 RMS의 평균 값이 가장 낮은 0.68 m로 측정되었으며, USUD와 MTKA 역시 각각 0.76 m와 0.85 m의 낮은 오차를 나타내었다. 반면, 기준국과의 거리가 상대적으로 먼 SMST 지상국에서는 SLAS 보정정보를 적용하더라도 위치오차가 다소 높게 나타났으며, 5년간 수평위치오차 RMS의 평균 값은 1.45 m로 확인되

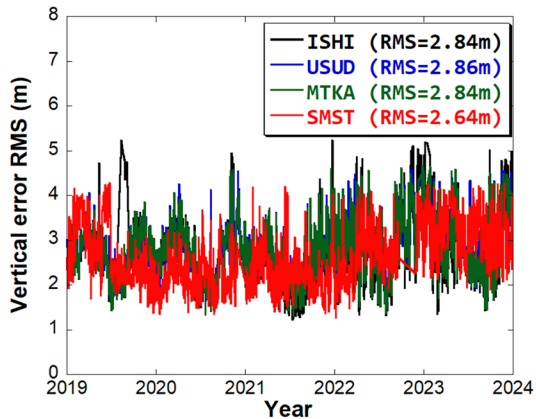


Fig. 14. Vertical positioning error RMS with GPS-only operation at four ground stations.

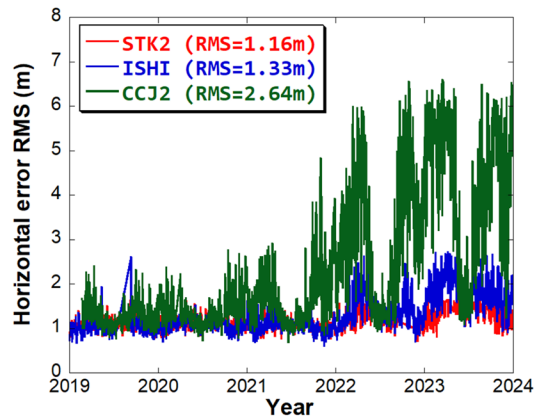


Fig. 16. Horizontal positioning error RMS with GPS-only operation at three ground stations.

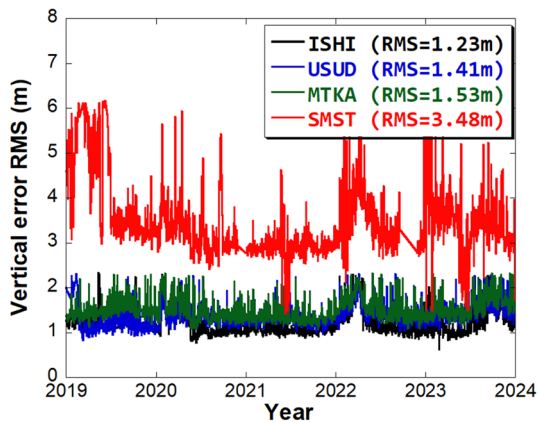


Fig. 15. Vertical positioning error RMS with SLAS corrections at four ground stations.

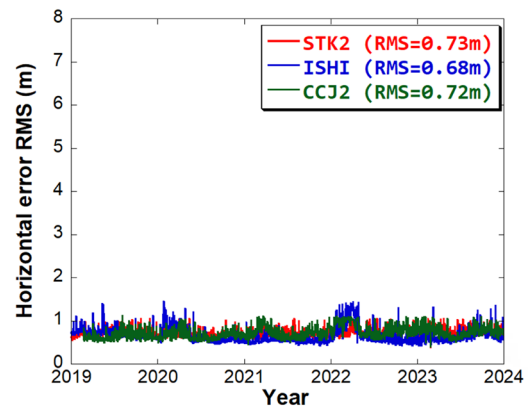


Fig. 17. Horizontal positioning error RMS with SLAS corrections at three ground stations.

었다. 이는 GPS 단독 운영 시 나타나는 RMS 평균 값인 1.50 m에 비해 약 3% 감소한 수치로, 기준국과의 거리가 멀어질수록 SLAS 보정 효과가 감소함을 보여준다.

기준국과의 거리에 따른 수직위치오차를 분석한 결과, GPS 단독 운영 시 수직위치오차가 수평위치오차보다 2배가량 큰 수준을 보였으며, SLAS 보정정보를 적용하면 수직오차가 현저히 감소하는 경향이 나타났다. Hitachiota 기준국에 가까운 ISHI, USUD, MTKA 지상국의 경우, GPS 단독 운영 시의 일일 수직위치오차 RMS 값이 Fig. 14와 같이 측정되었다. 5년간의 수직위치오차 RMS 평균의 경우 GPS 단독 운영 시 ISHI 지상국은 2.84 m, USUD 지상국은 2.86 m, MTKA 지상국은 2.84 m이고, SLAS 보정정보를 적용한 후에는 각각 1.23 m, 1.41 m, 1.53 m로 Fig. 15에 나타난 것과 같이 GPS 단독 운영 시 대비 절반 수준으로 오차가 감소하였다. 이러한 결과는 SLAS 보정정보가 기준국과의 거리가 가까운 지역에서 매우 효과적으로 작용하여 수직위치오차를 줄이는 데 기여했음을 보여준다. 반면, 기준국으로부터의 거리가 536.45 km로 먼 SMST 지상국에서는 SLAS 보정정보를 적용하였을 때에도 수직위치오차가 크게 줄어들지 않았으며, 오히려 5년간 오차 RMS의 평균 값이 GPS 단독 운영 시 2.64 m에서 SLAS

적용 후 3.48 m로 약 40%가량 증가하는 현상을 보였다. 이는 먼 거리에서 SLAS 보정 효과가 약화될 수 있음을 시사하며, 특히 수직 위치정확도가 기준국으로부터의 거리가 증가할수록 낮아질 가능성을 보여준다.

위도에 따른 수평위치오차를 분석한 결과, GPS 단독 운영 시 Fig. 16에 나타난 것과 같이 저위도 지역에 위치한 CCJ2 지상국은 전리층 지연의 영향을 크게 받아 다른 위도의 지상국에 비해 수평위치오차가 상대적으로 크게 나타났다. CCJ2 지상국의 5년간 수평위치오차 RMS의 평균 값은 2.64 m로, 중위도에 위치한 ISHI 지상국 (1.33 m) 및 고위도에 위치한 STK2 지상국 (1.16 m)보다 현저히 높은 값을 기록하였다. 이러한 차이는 저위도 지역에서 전리층의 밀도가 상대적으로 높아 신호 지연의 영향이 커지기 때문으로 해석된다. 그러나 SLAS 보정정보를 적용한 후 CCJ2 지상국의 5년간 수평위치오차 RMS의 평균 값은 0.72 m로 감소하여, 중위도 지역의 ISHI 지상국 (0.68 m) 및 고위도 지역의 STK2 지상국 (0.73 m)과 유사한 수준으로 오차가 줄어들은 것을 Fig. 17에서 확인할 수 있다. 이는 SLAS 보정정보가 전리층의 영향을 효과적으로 보정하여 저위도에서도 안정적인 위치정확도를 제공할 수 있음을 나타낸다.

위도에 따른 수직위치오차를 분석한 결과, GPS 단독 운영 시

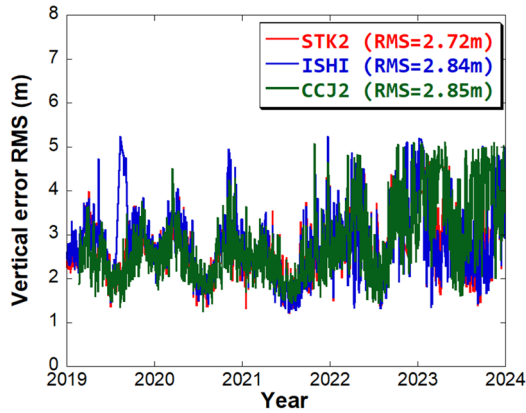


Fig. 18. Vertical positioning error RMS with GPS-only operation at three ground stations.

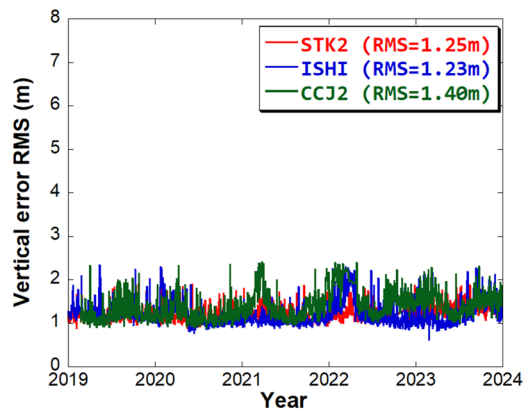


Fig. 19. Vertical positioning error RMS with SLAS corrections at three ground stations.

STK2, ISHI, CCJ2 지상국의 5년간 수직위치오차 RMS의 평균 값은 각각 2.72 m, 2.84 m, 2.85 m로 측정되었으며, 위도에 따른 차이는 크지 않은 것을 Fig. 18을 통해 확인할 수 있다. 수직위치오차가 수평위치오차와 달리 위도에 따른 차별적 영향을 덜 받는 이유는, 수직오차가 전리층과 대류층에 의한 신호 지연보다 기타 요인에 의한 영향을 더 크게 받기 때문이다. 이는 전리층 지연 세기가 상대적으로 높은 저위도에서도 수직위치오차가 크게 증가하지 않는 결과로 나타났다. SLAS 보정정보를 적용한 후엔 Fig. 19에 나타난 것과 같이 모든 지상국에서 일일 수직위치오차 RMS가 대부분 2 m 이하로 감소하였다. STK2, ISHI, CCJ2 지상국의 5년간 수직위치오차 RMS의 평균 값은 각각 1.25 m, 1.23 m, 1.40 m로 줄어들었으며, 이는 SLAS 보정정보가 의사거리 오차를 효과적으로 보정하여, 기준국의 위도에 상관없이 일관된 수직 위치정확도 개선을 제공함을 보여준다.

거리에 따른 GPS 단독 운용과 SLAS 보정정보 사용 시의 성능 분석 결과, SLAS 보정정보가 기준국과의 거리가 가까운 지상국에서 수평 및 수직위치오차 감소 효과가 두드러진 것으로 나타났다. Hitachiota 기준국과의 거리가 가까운 4개의 IGS 지상국의 위치추정 시 SLAS 보정정보를 적용한 경우 수평위치오차 감소율

Table 4. Positioning error reduction rate by SLAS corrections.

| SLAS station | IGS station | Range (km) | Positioning error reduce rate (%) | |
|--------------|-------------|------------|-----------------------------------|----------|
| | | | Horizontal | Vertical |
| Sapporo | STK2 | 65.9 | 36.0 | 50.7 |
| | ISHI | 50.8 | 44.6 | 53.2 |
| Hitachiota | USUD | 202.6 | 41.4 | 47.9 |
| | MTKA | 188.8 | 31.8 | 42.2 |
| | SMST | 536.5 | 3.5 | -40.0 |
| Chichijima | CCJ2 | 2.5 | 58.6 | 47.1 |

이 최대 44.6%로 나타났으며, 기준국에서 떨어진 지상국에서는 감소율이 상대적으로 감소하였다. 또한, 수직위치오차는 거리와의 상관성이 수평위치오차보다 강하게 나타났으며, 기준국과의 거리가 가까운 지상국에서 수직위치오차 감소율이 53.2%로 나타났으나 거리가 증가하였을 때 SMST 지상국에서 오차가 40.0%까지 증가하는 모습을 보였다.

위도에 따른 GPS 단독 운용과 SLAS 보정정보 사용 시의 성능 분석 결과, 저위도 지역에서 SLAS 보정정보 적용 시 수평위치오차 감소율이 높게 나타났다. 예를 들어, 저위도 지역의 CCJ2 지상국은 전리층의 영향을 크게 받아 GPS 단독 운용 시 수평위치오차가 크게 나타났으나, SLAS 보정정보를 적용한 후 위치오차 감소율이 58.6%로 계산되었다. 결과적으로 보정정보 적용 시 세 지상국은 모두 동일한 수준의 오차 수준을 보여주었고, 이는 SLAS 보정정보가 저위도에서는 수평위치오차를 보정하는 데 더 효과적임을 시사한다. SLAS 기준국과 IGS 지상국 사이의 거리 및 수평, 수직위치오차 감소율을 Table 4에 정리하였다.

5. 결론

본 연구에서는 QZSS SLAS 보정정보가 GPS L1 코드 의사거리의 차분 보정정보를 제공하여 위치정확도를 향상시키는 효과를 분석하였다. 일본 내 3개 SLAS 기준국과 6개 IGS 지상국의 5년간 데이터를 이용하였다. 다양한 거리 및 위도 조건에서 성능을 평가한 결과, SLAS 보정정보 적용 시 GPS 단독 운용 대비 수평위치오차가 최대 58.6%까지, 수직위치오차가 최대 53.2%까지 감소하였다. 기준국과 지상국 간의 거리가 가까울수록 수직위치오차의 감소 효과가 두드러졌으며, 수평위치오차 또한 동일한 양상을 나타내었다. 이는 근거리에서 SLAS 보정정보가 위치정확도를 효과적으로 향상시킬 수 있음을 시사한다. 또한, 저위도 지역에서는 전리층 지연의 영향을 효과적으로 보정하여 수평위치오차가 크게 감소하였고, 특히 전리층 지연이 큰 CCJ2 지상국에서도 안정적인 위치정확도를 제공하였다. 이러한 결과는 SLAS 보정정보가 위성항법의 위치정확도를 높이는 데 중요한 역할을 할 수 있으며, 특히 전리층의 영향을 많이 받는 저위도 지역이나 기준국과 가까운 지역에서 그 효과가 극대화될 수 있음을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로

수행되었음 (과제번호 RS-2022-00207459).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J.K.; formal analysis, Y.K. and J.K.; data curation, Y.K.; writing—original draft preparation, J.K.; writing—review and editing, J.K.; project administration, J.K., H.K.; funding acquisition, H.K.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Hwang, N. E., Lee, J. H., & Kim, I. K. 2021, Examination of Availability on QZSS SLAS in Korea, Institute of Control, Robotics and Systems, 27, 168-175. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2021.20.0163>
- Japan Cabinet Office 2022, Quasi-Zenith satellite system performance standard, Government of Japan National Space Policy Secretariat, PS-QZSS-003
- Japan Cabinet Office 2024b, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Sub-meter Level Augmentation Service, Government of Japan National Space Policy Secretariat, IS-QZSS-L1S-007
- Japan Cabinet Office, Sub-meter Level Augmentation Service (SLAS) [Internet], cited 2024a Jul. 26, available from: https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv05_slas.html
- Kenji, N. 2023, QZSS System and service Updates, in 2023 ICG Annual Meeting, Madrid, Spain. 15-20 Oct 2023. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG-17/icg17.01.06.pdf>
- Kim, Y., Kim, H. S., Kim, J. 2024, Analysis of Long-term Positioning Performance of QZSS SLAS Corrections, In Proceedings of the 2024 IPNT Conference, Jeju, Korea, 6-8 Nov 2024. <https://ipnt.or.kr/2024proc/14>
- Matsumoto, D., Kaneso, T., Urushido, T. & Owada, S. 2019, Evaluation of QZSS SLAS (Sub-meter Level Augmentation Service) Performance, Proceedings of the ION 2019 Pacific PNT Meeting, pp.361-366. <https://doi.org/10.33012/2019.16811>
- Sakai, T. 2020, Japanese GNSS Future System Evolution in the 2020-2030 Perspective, 2020 European Navigation Conference (ENC), Dresden, Germany, 23-24 November 2020, pp.1-10. <https://ieeexplore.ieee.org/>

document/9317528

Sakai, T. 2024, QZSS System and service Updates, in 2024 GNSS workshop, Manila, Philippines, 22-26 Apr 2024. https://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2024/GNSS2024/GNSS2024_01_05.pdf

Tae, H., Kim, H.-I., & Park, K.-D. 2015, Development of a Virtual Reference Station-based Correction Generation Technique Using Enhanced Inverse Distance Weighting, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 4, 79-85. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2015.4.2.079>



Yongrae Kim received the B.S. degree in School of Aerospace and Mechanical Engineering from Korea Aerospace University, Korea, in 2023. He is currently an M.S. student in Korea Aerospace University. His research interests include GNSS applications and navigation.



Heeseob Kim is a principal research in the satellite application division at Korea Aerospace Research Institute (KARI). He received Ph.D. in aerospace engineering from Seoul National University in 2000. He contributed to KOMPSAT development, operation and applications for 25 years. His recent research topics are GNSS applications and Artificial Intelligence.



Jeongrae Kim is a professor in the Department of Aeronautical and Astronautical Engineering at Korea Aerospace University, Korea. He received his Ph.D. in Aerospace Engineering from the University of Texas at Austin in 2000. His research interest includes satellite instrument simulations, orbit determination, GNSS ionosphere, SBAS, and GNSS applications.