JPNT 12(3), 215-228 (2023)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.3.215

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

Performance Analysis of GNSS Residual Error Bounding for QZSS CLAS

Yebin Lee[1], Cheolsoon Lim[2], Yunho Cha[1], Byungwoon Park[1†], Sul Gee Park[3], Sang Hyun Park[3]

[1]Department of Aerospace Engineering and Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul 05006, Korea
[2]Department of Aerospace Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea
[3]Maritime PNT Research Office, Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

The State Space Representation (SSR) method provides individual corrections for each Global Navigation Satellite System (GNSS) error components. This method can lead to less bandwidth for transmission and allows selective use of each correction. Precise Point Positioning (PPP) - Real-Time Kinematic (RTK) is one of the carrier-based precise positioning techniques using SSR correction. This technique enables high-precision positioning with a fast convergence time by providing atmospheric correction as well as satellite orbit and clock correction. Currently, the positioning service that supports PPP-RTK technology is the Quazi-Zenith Satellite System Centimeter Level Augmentation System (QZSS CLAS) in Japan. A system that provides correction for each GNSS error component, such as QZSS CLAS, requires monitoring of each error component to provide reliable correction and integrity information to the user. In this study, we conducted an analysis of the performance of residual error bounding for each error component. To assess this performance, we utilized the correction and quality indicators provided by QZSS CLAS. Performance analyses included the range domain, dispersive part, non-dispersive part, and satellite orbit/clock part. The residual root mean square (RMS) of CLAS correction for the range domain approximated 0.0369 m, and the residual RMS for both dispersive and non-dispersive components is around 0.0363 m. It has also been confirmed that the residual errors are properly bounded by the integrity parameters. However, the satellite orbit and clock part have a larger residual of about 0.6508 m, and it was confirmed that this residual was not bounded by the integrity parameters. Users who rely solely on satellite orbit and clock correction, particularly maritime users, thus should exercise caution when utilizing QZSS CLAS.

Keywords: GNSS, SSR, QZSS, CLAS, monitoring system

1. INTRODUCTION

위성항법시스템은 사용자 위치 정보를 확보하기 위한 핵심 기술로, 4차 산업 혁명 시대가 도래함에 따라 그 활용 분야가 점차 확산되고 있다. 특히 4차 산업혁명의 핵심 분야인 자율이동체의 경우 주요 항법센서인 위성항법시스템의 성능이 사용자의 안전과 직결되므로 매우 정밀하고 신뢰성 있는 위치 정보가 요구된다 (Park & Seo 2021, Kim et al. 2022). 따라서 이러한 사용자 안전지향 시스템 (safety critical system)에서 요구되는 정밀 항법 성능을 확보하기 위하여 다양한 반송파 기반의 고정밀, 고신뢰 위성항법 보강시스템이 구축되어 왔다 (Park et al. 2014, Yoon et al. 2020). 위성항법 보강시스템은 사용자에게 보강정보를 제공하는 시스템으로, 보강정보는 보정정보와 무결성 정보를 의미한다. 보정정보는 Global Navigation Satellite System (GNSS) 오차를 보정하기 위하여 제공되는 값을 의미하며, 무결성정보는 시스템의 신뢰성을 나타내는 정보로 시스템 고장 시 경보 기능 및 보정정보의 잔여오차 수준을 예측할 수 있는 값을 포함한다. 자율이동체와 같은 동적시스템의 경우 높은 정확도뿐만 아니라 추정된 위치 정보의 신뢰성을 판단하기 위하여 무결성 정보가 필수적으로 요구되며 신뢰성 보장을 위해 무결성 정보는 보정정보의 잔여 오차 수준을

Received May 11, 2023 **Revised** Aug 15, 2023 **Accepted** Aug 26, 2023
†**Corresponding Author**
E-mail: byungwoon@sejong.ac.kr
Tel: +82-2-3408-4385 Fax: +82-2-3408-4333
Yebin Lee https://orcid.org/0000-0002-8929-9103
Cheolsoon Lim https://orcid.org/0000-0003-4437-8999
Yunho Cha https://orcid.org/0000-0002-3789-7881
Byungwoon Park https://orcid.org/0000-0001-8635-1773
Sul Gee Park https://orcid.org/0000-0002-8620-8413
Sang Hyun Park https://orcid.org/0000-0003-0113-891X

Copyright © The Institute of Positioning, Navigation, and Timing

충분히 bound 할 수 있는 값이 제공되어야 한다 (Lee et al. 2009).

사용자에게 고정밀 측위 서비스를 제공하기 위한 반송파 기반 보강시스템은 Observation Space Representation (OSR) 방식과 State Space Representation (SSR) 방식으로 구분할 수 있다. OSR 방식 보정정보 서비스의 경우 Real-Time Kinematic (RTK), Network RTK 기법이 있다 (Park & Kee 2010, Lim & Park 2020). 해당 기법은 빠른 수렴 시간 이내에 센티미터 수준의 고정밀 측위가 가능하다는 장점이 있으나 서비스 범위가 제한적이며, 막대한 양의 대역폭이 요구되므로 위성 기반 광역 서비스가 어렵다는 한계가 있다 (Lim 2022). 따라서, OSR 방식의 한계를 극복하기 위하여 GNSS 오차 요소별로 보정정보를 모델링하여 제공하는 SSR 방식 보정정보 서비스에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 오고 있다 (Trimble 2022, U-blox 2022). SSR 방식 보정정보를 이용한 고정밀 측위 서비스는 대표적으로 Precise Point Positioning (PPP) 기술 및 PPP-Real-Time Kinematic (RTK) 기술이 있다. PPP 측위 기술의 경우 SSR 보정정보인 위성 궤도 및 위성 시계, 코드 바이어스 보정정보를 이용한 정밀 측위 기술로 기준국과의 거리에 영향을 받지 않고, 위성 기반 서비스가 가능하다는 장점이 있으나 상당한 수렴시간이 소요된다는 단점이 있다 (Hirokawa et al. 2021). PPP-RTK 기술은 이러한 단점을 보완하기 위해 제안된 기술로, 기준국 네트워크에서 취득한 데이터를 이용해 모델링된 위성 궤도 및 시계, 위성 코드 및 반송파 바이어스, 전리층 및 대류권 오차의 SSR 보정정보를 이용하여 측위를 수행한다 (European GNSS Agency 2019, Lim et al. 2022a). 해당 기술의 경우 GNSS 내에 포함된 오차 정보들을 제거하기 위한 대부분의 보정정보들을 보강시스템에서 제공하므로 수렴시간이 빠르다는 장점이 있다. 또한, 각 오차 성분 별 특성에 따라 전송 주기를 모델링함으로써 전체 데이터 량을 감소시킬 수 있으므로 위성 기반 서비스에 적합하다.

현재 PPP-RTK 기술을 지원하는 위성 기반 고정밀 보강시스템은 일본의 Quazi-Zenith Satellite system (QZSS) Centimeter Level Augmentation Service (CLAS)가 있다. CLAS는 QZSS L6 위성을 통해 보정정보 및 무결성 정보를 방송하는 시스템으로 반송파 측정치 기반의 센티미터급 측위 정확도 성능을 제공한다 (Miya et al. 2014). CLAS와 같이 SSR기반 보정정보를 제공하는 시스템의 경우 사용자의 측위 환경에 따라 제공되는 보정정보를 선택적으로 사용할 수 있도록 보정정보 오차 요소별 감시 수행이 필요하다. 특히, 기준국 네트워크 외곽에 위치한 해양 사용자의 경우 내륙 기준국 데이터를 이용해 모델링된 대기권 오차를 사용할 수 없으므로 위성 궤도 및 시계 등 위성 관련 보정정보를 이용한 PPP 기반의 정밀 측위를 수행해야 하며, 이를 위하여 보강시스템에서는 오차 요소별 보정정보 뿐만 아니라 실제 잔여오차를 충분히 bound 할 수 있는 무결성 정보를 각 오차 요소별로 제공해야 한다.

따라서, 본 논문에서는 실제 GNSS 반송파 측정치에 QZSS CLAS 보정정보를 적용함으로써 산출한 잔여오차와, QZSS CLAS 무결성 정보를 기반으로 산출된 임계값을 비교함으로써 각 오차요소별 무결성정보의 잔여오차 한계 수준 추정 성능을 분석하였다. 성능 분석의 경우 QZSS CLAS L6 보정정보 및 일본 내 네트워크 중심부에 위치한 International GNSS Service (IGS) 기준국을 통해 취득된 GNSS 관측치를 이용하여 수행되었다. 본 논문은 2장에서 QZSS CLAS의 시스템 및 제공되는 보강정보에 대하여 설명하였으며, 3장에서는 잔여오차 한계 수준 추정 성능 분석 알고리즘의 개념을 설명하였다. 4장에서는 각 오차 요소별 상세한 알고리즘을 기재하였으며, 5장에서는 제안된 알고리즘을 이용한 오차요소별 잔여오차 한계 수준 추정 결과를 분석하였다. 6장은 본 논문에서 제시한 알고리즘 및 검증 결과에 대한 결론이다.

Table 1. Compact SSR messages.

Group name	Sub-group name	SubType ID
Common correction	CSSR mask	1
	CSSR orbit correction	2
	CSSR clock correction	3
	CSSR satellite code bias	4
	CSSR satellite phase bias	5
	CSSR satellite code and phase bias	6
	CSSR URA	7
	CSSR Combined correction	11
Local correction	CSSR STEC correction	8
	CSSR gridded correction	9
	CSSR atmospheric correction	12
Service	CSSR service information	10

2. CENTIMETER LEVEL AUGMENTATION SERVICE (CLAS)

CLAS는 QZSS 위성의 L6 신호를 통해 일본 전역에 SSR 형태의 보정정보 및 무결성 정보를 제공하는 위성 기반 오픈 PPP-RTK 서비스이다. CLAS는 보정정보 및 무결성 정보 생성을 위하여 약 1,200개소로 구성된 일본 내 상시 기준국 (GNSS Earth Observation NETwork)에서 GNSS 관측 데이터를 수집하여 해당 데이터를 중앙 처리국으로 전송한다 (Miya et al. 2014). 중앙처리국은 일본 전역에서 수신된 GNSS 관측 데이터를 이용해 보정정보 및 무결성 정보를 생성하고 이를 QZSS 위성을 통해 사용자에게 방송한다 (Miya et al. 2016, Lim et al. 2022b). 2023년 현재 CLAS에서는 GPS, Galileo, QZSS를 포함한 다중위성군을 지원하며, 각 위성군에 대한 위성 궤도 및 시계, 위성 코드 및 반송파 바이어스, 대류층 및 전리층 오차의 보정정보, 무결성 정보를 제공한다. 해당 정보들은 사전에 정의된 일본 전역 12개의 네트워크 및 121개의 가상 격자점을 기준으로 제공되며 사용자는 보정정보를 이용하여 PPP-RTK 기반의 정밀 측위를 수행할 수 있다 (Cabinet Office 2021).

QZSS CLAS 보정정보 및 무결성 정보는 대역폭 효율을 위해 2000 bps 이하로 설계된 Compact SSR (CSSR) 메시지 형태로 제공되며, RTCM 3 Proprietary Message 4073번에 할당되어 방송되고 있다 (Hirokawa et al. 2016). CSSR 메시지는 Table 1과 같이 12개의 SubType 메시지를 이용하여 GNSS 측정치 오차 보정정보 및 무결성 정보를 제공하고 있으며 일본 전역에 동일하게 제공되는 common correction과 각 네트워크 또는 격자점마다 정보가 제공되는 local correction으로 구분할 수 있다. Common correction은 위성 궤도, 위성 시계, 위성 코드 및 반송파 바이어스, User Range Accuracy (URA) 정보를 포함하며,

local correction은 전리층 및 대류층 오차 관련 정보를 포함한다 (Hirokawa et al. 2019). 해당 정보들은 대역폭 효율을 위하여 오차 요소별 시간 변화율을 반영한 전송주기에 따라 전송되며, 위성 시계 오차는 5초, 다른 오차 요소들은 30초 마다 새로운 정보가 업데이트 된다. 각 오차 요소별 보정정보 및 무결성 정보가 제공되는 형태는 다음과 같다.

2.1 GNSS Error Correction

2.1.1 Satellite orbit and clock corrections

CLAS에서 위성 궤도 보정정보는 SubType 2, 위성 시계 보정정보는 SubType 3 메시지로 제공되고 있으며, SubType 11 메시지는 위성 궤도 및 시계 보정정보를 함께 제공한다. 위성 관련 보정정보의 경우 common correction으로 제공되나, 필요한 경우 사용자가 위치한 Local network에 대한 보정정보가 SubType 11을 통해 제공된다. 각 위성 궤도 및 시계 오차에 대한 Local network 보정정보의 제공 여부는 SubType 11에 포함된 flag를 통해 확인할 수 있으며 flag가 1일 경우 사용자는 SubType 11에서 제공되는 정보를 이용해 사용자의 오차를 보정해야 한다.

위성 궤도 보정정보는 Broadcast Ephemeris로 계산된 위성 궤도의 오차에 대한 보정값을 제공한다. 해당 값은 위성의 Radial, Along-Track, Cross-Track 방향으로 제공되므로 사용자가 적용 시 Eq. (1)과 같이 해당 보정정보를 지구중심고정좌표계 (Earth-centered Earth-fixed coordinate system)로 변환하는 과정이 필요하다. Eq. (1)에서 $\delta \boldsymbol{O}$는 위성의 Radial, Along-Track, Cross-track 방향으로 제공되는 CSSR 위성 궤도 보정정보를 의미하며 $\boldsymbol{e}_{radial}$, $\boldsymbol{e}_{along}$, $\boldsymbol{e}_{cross}$는 각 방향의 단위벡터, $\delta \boldsymbol{X}$는 지구중심고정좌표계로 변환된 위성궤도 보정정보를 나타낸다 (Cabinet Office 2021).

$$\delta \boldsymbol{O} = \begin{bmatrix} \delta O_{radial} \\ \delta O_{along} \\ \delta O_{cross} \end{bmatrix}, \ \delta \boldsymbol{X} = [\boldsymbol{e}_{radial} \quad \boldsymbol{e}_{along} \quad \boldsymbol{e}_{cross}] \cdot \delta \boldsymbol{O} \quad (1)$$

위성 시계 보정정보는 항법 메시지를 기반으로 산출된 위성 시계에 대한 보정 값을 상수항으로 제공한다. 해당 보정정보는 측정치 영역에서의 오차항으로 제공되며, 사용자가 항법 메시지를 이용해 산출된 위성 시계 오차 값에 반영할 경우, CLAS에서 제공된 보정정보를 빛의 속도로 나누어 적용해 주어야 한다.

2.1.2 Satellite code and phase biases

CLAS에서는 위성 신호 주파수가 상이함에 따라 발생하는 바이어스를 보상하기 위한 위성 코드 및 반송파 바이어스 보정정보를 제공한다. 위성 코드 바이어스는 SubType 4, 위성 반송파 바이어스는 SubType 5에서 제공하며, Subtype 6는 위성 코드 및 반송파 바이어스를 함께 제공한다. SubType 6 메시지는 local network에 대한 보정정보를 제공하며, SubType 6에 포함된 flag를 통해 각 위성 코드 및 반송파 바이어스의 local network 보정정보 포함 여부를 확인할 수 있다. 각 flag가 1일 경우 사용자는 SubType 4 또는 SubType 5에서 제공되는 바이어스 보정정보에 SubType 6에서 제공되는 네트워크 별 보정정보를 합하여 적용해 주어야 한다.

2.1.3 Ionosphere slant delay correction

CSSR 전리층 보정정보는 Slant Total Electron Content (STEC) 형태 (Park et al. 2022, Yoon & Lee 2014)로 제공되며, 네트워크 별로 제공되는 STEC polynomial 보정정보와 각 grid별로 제공되는 STEC residual 보정정보로 정의된다. STEC polynomial 보정정보를 계산하기 위한 계수는 SubType 8, STEC residual 정보는 Subtype 9에 포함되어 있으며, SubType 12 메시지는 polynomial 계수와 residual 보정정보를 함께 제공한다. STEC polynomial 보정정보를 계산하기 위한 계수는 SubType 8 또는 SubType 12 메시지에 포함된 “STEC Correction Type”에 따라 결정되며, IS-QZSS에서 정의된 위도, 경도에 대한 함수를 이용하여 각 grid에 대한 STEC 보정정보를 계산할 수 있다 (Cabinet Office 2021). CLAS 사용자의 경우, 사용자 인근의 3개 또는 4개 격자점에서의 전리층 보정정보 가중치 합을 이용해 보정정보를 생성할 수 있다.

2.1.4 Troposphere delay correction

대류층 보정정보는 각 격자점에 대한 수직 건조 지연 (hydrostatic) 항과 수직 습윤 지연 (wet) 항으로 정의되며 SubType 9, SubType 12 메시지에 포함되어 제공된다. 각 수직 지연 오차 보정정보는 상수 (constant) 값과 변동 (variation) 값으로 구분된다. CLAS에서 정의된 수직 건조 지연의 상수 값은 2.3 m이며, 습윤 건조 지연의 상수 값은 0.252 m 또는 SubType 12번에서 제공되는 “Troposphere residual offset” 값을 사용한다 (Cabinet Office 2021). 각 격자점에서의 수직지연오차 정보는 상수 값과 변동 값을 합하여 계산한다. CLAS 사용자의 경우, 전리층 보정정보와 동일하게 사용자 인근의 3개 또는 4개 격자점에서의 대류층 보정정보 가중치 합을 이용해 보정정보를 생성할 수 있다.

2.1.5 User dependent errors

CLAS에서 제공되는 CSSR 보정정보 파라미터들은 지각 변위, 수신기 안테나 오프셋 등 기준국 사이트에 따라 발생하는 오차 성분들에 대한 값은 포함하고 있지 않다. 따라서, CLAS의 측위 정확도를 만족하기 위하여 사용자는 하단의 오차 성분들에 대한 보정정보를 추가적으로 보상해야 한다.

- solid earth tides
- ocean loading
- pole tide
- phase wind up
- receiver antenna phase center offset and variation (PCO, PCV)
- receiver inter system bias (ISB)
- receiver quarter cycle carrier phase shifts

2.2 Integrity Information

항법시스템의 성능이 사용자의 안전과 직결되는 사용자 안전지향 시스템의 경우, GNSS 측정치 오차 보정정보 뿐만 아니라 시스템의 신뢰성을 보장하기 위한 무결성 정보가 요구된다. CLAS에서 제공하는 무결성 정보는 flag type 기반 방식의 alert flag와 message type 기반 방식의 quality indicator로 구성된다. CLAS alert flag는 CLAS의 상태 정보 (health status)를 나타내는 값으로, 시스템이 사용되어서는 안 된다고 판단될 때 사용자에게 적시 경고를 제공하는 기능을 수행한다. Alert flag는 L6 메시지의 header 부분에 포함되어 있으며, 1-bit로 구성된다. 제공되는 alert flag가 1일 경우, CLAS를 사용하지 않는 것이 권고되며 L6 신호는 사용자의 책임 하에 사용되어야 한다.

CLAS quality indicator는 CSSR 보정정보의 잔여오차 수준을 나타내는 지표로, 사용자가 무결성 검사를 수행할 수 있도록 지원한다. 보정정보의 오차요소별 잔여오차 수준의 경우 위성 궤도 및 위성 시계, 위성 바이어스를 포함한 위성관련 보정정보에 대한 User Range Accuracy (URA) 값과 대류층, 전리층 보정정보에 대한 quality indicator 정보로 나누어 제공되며 각 정보는 3-bit의 CLASS와 3-bit의 VALUE 값으로 제공된다. CLASS는 0-7 범위의 값으로 6-bit의 CLAS quality indicator 중 3비트의 최상위 비트 (most significant bit)로 정의되며, VALUE는 0-7 범위의 값으로 3비트의 최하위 비트 (least significant bit)로 정의된다. 따라서 시스템에서는 CLASS 및 VALUE 값과 각 보정정보 잔여오차의 관계식을 통해 보정정보의 잔여 오차 수준을 63개의 범위로 나누어 정의할 수 있으며, 사용자는 시스템에서 제공되는 6-bit의 정보를 변환하여 보정정보 오차 수준을 계산할 수 있다.

CLAS에서 제공되는 quality indicator를 이용하여 사용자는 Eq. (2)와 같이 각 위성 별 측정치 영역에서의 잔여오차 수준을 추정할 수 있다 (Fujita et al. 2016).

$$\left(\sigma^i\right)^2 = \left(\sigma^i_{user}\right)^2 + \left(\sigma^i_{sis}/10\right)^2 + \left(\frac{40.3\times10^{16}}{f^2}\sigma^i_{iono}\times 100\right)^2 + \left((\sigma^i_{trop})/10/\sin(E^i)\right)^2 \quad (2)$$

여기서 i는 각 위성을 의미하며, σ^i_{user}는 다중경로오차와 같은 수신기 관련 오차 항 (cm), σ^i_{sis}는 SSR URA 값을 이용해 계산된 SIS 오차항 (mm)을 의미한다. 또한, σ^i_{iono}, σ^i_{trop}는 각 대기권 quality indicator 값을 이용해 계산된 전리층 오차항 (TECU) 및 대류층 수직지연 오차항 (mm)을 의미하며, E는 위성의 앙각 (rad)을 의미한다. Eq. (2)를 이용하여 사용자는 QZSS CLAS 보정정보 적용 시, 측정치 영역에서의 잔여오차 수준을 추정할 수 있으며 이를 이용해 응용 분야 별 요구조건에 따른 무결성 검사를 수행할 수 있다. QZSS CLAS에서 제공되는 각 오차 요소별 잔여오차 한계 수준 생성 과정은 2.2.1 – 2.2.3절에서 다루었다.

2.2.1 Generation of CLAS quality indicator using SIR-URE

Fujita et al. (2016)에 따르면, CLAS에서 제공하는 SSR URA 및 대기권 보정정보 quality indicator의 경우 일본 내에 있는 상시 기준국 중 선정된 평가 지점에서 취득한 GNSS 데이터에 CSSR 보정정보를 적용하여 산출한 잔여오차 (SIR-URE; Signal In Reference User Range Error) 를 기반으로 생성된다. 반송파 측정치 잔여오차는 Eq. (3)를 이용해 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}\nabla\delta\Phi^s_{rj}(t) &= \nabla\Phi^s_{rj}(t) - \nabla CPC^s_{rj}(t) - \nabla\rho^s_{rj}\left(X_r, X^{broadcast}(t)\right)\\ &\cong -\nabla los^s_r\cdot[\delta x,\delta y,\delta z]^T + MF^s_r\cdot resT - \frac{40.3\times10^{16}}{f_j^2}\nabla resI^s + \lambda_j\nabla N^s_j \quad (3)\end{aligned}$$

여기서 하첨자 r은 각 평가 지점의 수신기를 의미하며, j는 각 측정치의 주파수, 상첨자인 s는 각 위성을 나타낸다. 잔여오차 산출 시 수신기 관련오차 항 제거를 위하여 기준 위성에 대한 위성 간 차분이 수행되었으며, ∇는 위성 간 차분을 의미한다. 또한, CPC는 CSSR 보정정보를 이용해 계산된 반송파 측정치 보정정보를 의미하며 ρ는 평가 지점 (X_r)과 방송궤도력을 이용해 산출된 위성 ($X^{broadcast}$) 위치 간 거리를 의미한다. 해당 식을 이용하여 잔여 오차를 산출할 경우, $\nabla\delta\Phi^s_{rj}(t)$ 내에는 Eq. (3)의 하단 식과 같이 각 오차항에 대한 잔여오차 및 위성 간 차분된 미지정수 항이 남는다. los는 평가 지점에서 위성 방향으로의 시선 방향 벡터, $[\delta x,\delta y,\delta z]$는 평가 지점에서의 위치 잔여오차를 의미하며, $resT$는 대류층 보정정보 잔여오차, MF는 대류층 오차의 mapping function, $resI$는 전리층 보정정보 잔여오차를 나타낸다. λ와 N은 각 주파수에 대한 파장의 길이와 미지정수를 의미한다. 반송파 측정치의 경우 보정정보 잔여오차 계산을 위해 식에 포함된 미지정수 추정 및 제거가 필요하며, Fujita et al. (2016)에서는 Least squares AMBiguity Decorrelation Adjustment (LAMBDA) 기법을 이용해 미지정수를 추정하여 이를 반영하였다.

추정된 미지정수가 반영된 보정정보 잔여오차는 이중 주파수 선형 조합을 이용해 비전리층항 (non-dispersive part)과 전리층항 (dispersive part) 형태로 분리할 수 있으며 CLAS에서는 두 형태로 분리된 잔여오차 항을 이용하여 SSR URA 및 전리층 quality indicator 값을 모델링 한다 (Fujita et al. 2016).

2.2.2 SSR URA

CLAS SSR URA는 위성 궤도 및 위성 시계, 위성 신호 바이어스와 같은 Signal-in-Space (SIS) 오차에 대한 SSR 보정정보의 quality indicator를 나타낸다. SSR URA 값은 Eq. (3)를 통해 계산된 잔여오차의 비전리층 항을 기반으로 생성되며, 잔여오차 비전리층 항의 경우 Eq. (4)과 같이 Ionosphere-Free 선형 조합을 이용하여 계산된다 (Fujita et al. 2016).

$$\nabla res^s_{r,nonDisp} \approx \frac{f^2_{L1}\nabla\delta\Phi^s_{rL1} - f^2_{L2}\nabla\delta\Phi^s_{rL2}}{f^2_{L1}-f^2_{L2}} \quad (4)$$

Ionosphere-Free 선형조합은 신호 주파수에 영향을 받지 않는 오차 성분들을 신호 주파수에 따라 다른 값을 갖는 전리층 오차항과 분리하기 위한 수식이다. 따라서 Eq. (4)와 같이 각 측정치 잔여오차를 선형 조합할 경우, 전리층 잔여오차는 제거되며 나머지 오차항에 대한 잔여오차 값을 얻을 수 있다. Eq. (4)를 통해 계산된 보정정보 잔여오차에는 위성관련 보정정보 잔여오차 뿐만 아니라 대류층 보정정보 잔여오차 또한 포함되기는 하지만, 두 잔여오차를 구분하는 것은 불가능하다. 그럼에도 불구하고 Fujita et al. (2016)에 따르면 SSR URA 값은 Eq. (4)를 이용해 산출된 값의 전지역 평균치를 그대로 이용하여 모델링한다. 따라서 IS-

QZSS 표준문서에서는 SSR URA를 위성관련 보정정보에 대한 오차항으로 정의하고 있으나, 실제로는 대류층 보정정보의 잔여오차 항을 포함하여 모델링 되고 있음을 간접적으로 알 수 있다 (Cabinet Office 2021).

SSR URA는 모든 네트워크에 대하여 총 60개의 평가 지점 (1개의 네트워크 당 5개의 평가지점)에서 얻은 비전리층 항 잔여오차 값을 이용해 매 5초마다 생성된다. 위 과정을 통해 생성된 SSR URA 값은 SubType 7번에 포함되어 있으며 서비스 영역 전체에 위성 별 정보가 동일한 값으로 제공된다. 사용자는 SSR URA 메시지에 포함된 6-bit의 CLASS 와 VALUE 값을 이용하여 Eq. (5)와 같이 SSR URA 오차항에 대한 불확실성을 계산할 수 있다 (Fujita et al. 2016).

$$\text{SSR URA [mm]} < 3^{\text{CLASS}}\left(1+\frac{\text{VALUE}}{4}\right)-1\ \text{[mm]} \quad (5)$$

2.2.3 Atmosphere correction quality indicator

CLAS에서는 SSR URA 외에 전리층 보정정보 및 대류층 보정정보에 대한 quality indicator를 제공하고 있다. 대기권 보정정보의 경우 네트워크별로 그 값이 추정되므로 네트워크 별 quality indicator 값이 제공되며, 전리층 보정정보에 대한 quality indicator의 경우 네트워크 및 각 위성에 대한 값이 제공되는 반면 대류층 보정정보에 대한 quality indicator는 네트워크 별 정보만이 제공된다.

전리층 보정정보 quality indicator는 잔여오차의 전리층 항을 기반으로 생성되며, 해당 항의 경우 Eq. (6)과 같이 잔여오차의 Geometry-Free 선형조합을 이용해 계산된다.

$$\nabla res^{s}_{r,Disp} \approx \frac{1}{\frac{40.3\times10^{16}}{f_{L1}^{2}}-\frac{40.3\times10^{16}}{f_{L2}^{2}}}\left(\nabla\delta\Phi^{s}_{rL1}-\nabla\delta\Phi^{s}_{rL2}\right) \quad (6)$$

Geometry-Free 선형 조합은 Ionosphere-Free 선형 조합과 반대되는 개념으로, 신호 주파수에 영향을 받는 오차항을 산출하기 위한 수식이다. Eq. (6)과 같이 계산할 경우, 위성과 수신기 간 거리, 대류층 오차 등 각 주파수 측정치 별 공통오차들이 소거되며, 전리층 보정정보 잔여 오차 항 및 위성 바이어스의 Geometry-Free 조합을 포함하는 값을 얻을 수 있다. 전리층 보정정보의 quality indicator 값은 Geometry-Free 조합을 이용해 산출된 보정정보 잔여오차 뿐만 아니라, Eq. (7)과 같이 공간 비상관 오차 (spatial decorrelation error)에 해당하는 공간 압축 오차항 (spatial compression error)을 더한 값을 이용하여 생성된다.

$$a_{ij}^{STEC} \approx \nabla res^{s}_{r,Disp}(t_{obs}) + \{iono^{s}_{ip}(t^{target}) - iono^{s}_{r}(t^{target})\} \quad (7)$$

여기서 $iono^{s}_{ip}$는 평가 지점에서 보간된 전리층 경사 지연 오차를 의미하며 $iono^{s}_{r}$은 기준 격자점에서 다항식 모델을 이용해 계산된 경사 지연 오차를 의미한다. Fujita et al. (2016)에서는 두 값 사이의 차이를 공간 압축 오차항으로 정의하였다. t_{obs}와 t^{target}은 각 observation 데이터의 시각과 제공되는 보정정보의 기준 시각을 의미한다.

전리층 보정정보의 quality indicator 값은 네트워크 별로 5개의 평가 지점에서 계산된 잔여오차의 통계 값을 이용해 매 30초마다 생성된다 (Fujita et al. 2016). 상단의 과정을 통해 생성된 전리층 보정정보 관련 quality indicator는 SubType 8 및 SubType 12에서 제공되며 SSR URA 정보와 동일하게 3-bit의 CLASS 및 VALUE 값으로 제공된다. 해당 값의 경우 IS-QZSS 문서에 정의된 quality indicator와 STEC 불확실성 간의 표를 활용하여 제공된 값에 따른 불확실성 값을 산출할 수 있다 (Cabinet Office 2021). 전리층 잔여오차 불확실성은 보정정보와 동일하게 TECU 단위로 제공되므로 사용자가 이용 시 거리 영역 단위로 변환이 필요하다.

대류층 보정정보의 quality indicator는 Eq. (8)과 같이 대류층 습윤 지연 및 건조 지연 오차의 천정방향 보정정보에 대한 공간 압축 오차항을 기반으로 생성된다.

$$\begin{aligned} a_{j}^{Trop} \approx\ & \left\{trop^{s}_{hs,ip}(t^{target}) - trop^{s}_{hs,r}(t^{target})\right\} \\ & + \left\{trop^{s}_{wet,ip}(t^{target}) - trop^{s}_{wet,r}(t^{target})\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $trop^{s}_{wet,ip}$와 $trop^{s}_{hs,ip}$는 평가 지점에서 보간된 대류층 습윤 지연 및 건조 지연의 천정방향 오차를 의미하며 $trop^{s}_{wet,r}$와 $trop^{s}_{hs,r}$는 기준 격자점에서 다항식 모델을 이용해 계산된 대류층 습윤 지연 및 건조 지연의 천정방향 오차를 의미한다. 해당 값은 전리층 보정정보 quality indicator 생성시 SIR-URE의 전리층 항에 추가적으로 더해지는 공간 압축 오차 항에만 해당하는 부분으로, SSR URA 및 전리층 quality indicator 와는 다르게 SIR-URE 값이 반영되지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 실측 측정치를 이용해 산출한 대류층 보정정보 오차값을 포함하고 있지 않으므로 사용자가 대류층 보정정보만을 적용할 경우, 신뢰할 수 있는 오차 수준을 추정하기 어려울 것으로 판단된다. 그러나 대류층 보정정보의 경우 2.2.1절에서 언급한바와 같이 SSR URA 값에 대류층 보정정보 오차 값이 포함되어 있으므로, 비전리층항 보정정보 또는 전체 보정정보 사용 시에는 SSR URA 값과 대류층 quality indicator 값을 함께 이용해 그 오차 수준을 추정할 수 있다.

대류층 보정정보의 quality indicator의 값은 네트워크 별로 5개의 평가 지점에서 계산된 공간 압축 오차에 대한 통계 값을 이용해 매 30초마다 생성된다. 해당 값은 SubType 9 및 SubType 12에 포함되며, 3-bit의 CLASS 및 VALUE 값으로 제공된다. 대류층 quality indicator의 경우 SSR URA와 동일하게 Eq. (5)의 관계식을 이용하여 잔여 오차항에 대한 불확실성을 계산할 수 있다 (Fujita et al. 2016).

3. MONITORING CONCEPT

CLAS와 같은 SSR 방식의 보강정보를 제공하는 시스템의 경우, 전통적인 위치 영역과 측정치 영역의 감시뿐 아니라, 필요시 오차 성분별 보강정보를 선택적으로 사용할 수 있으므로, 오차 요소별 감시도 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 각 오차 요소별로 제공되는 CLAS quality indicator 값이 충분히 보수적으로 제공되고 있는지 성능을 분석하였으며 해당 값을 이용한 오차 요소별 사용자 무결성 감시 가능 여부를 확인하였다. 잔여오차 추정 성능의 경우 각 오차요소별 보정정보의 잔여오차가 CLAS에서 방송된 잔여오차 수준에 의하여 잘 bound 되는지 검증을 수행한다.

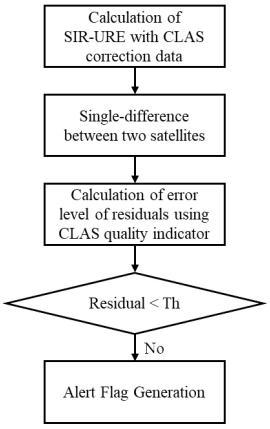

Fig. 1. Monitoring algorithm flow chart.

Fig. 1은 오차 요소별로 공통적으로 적용되는 CLAS 잔여오차 추정 성능 분석 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 먼저, 분석 수행 시 각 보정정보 적용 후 잔여오차의 bound 여부를 확인해야 하므로 각 오차요소별 보정정보 적용 및 잔여오차 산출이 필요하다. 본 논문에서는 실측 측정치에 대한 보정정보 적용 및 잔여오차를 산출하기 위하여 안테나의 정밀 위치 정보를 확보하고 있는 감시국 측정치를 이용하였다. 또한, 측정치에 포함된 수신기 관련 오차를 제거하기 위하여 위성 간 차분을 수행하였다. 검증하고자 하는 각 오차요소별 잔여오차 수준 값은 QZSS CLAS에서 제공하는 quality indicator를 2.2절에서 언급된 바와 같이 Eq. (5) 및 IS-QZSS 문서의 Table 5.4.3-1을 이용해 재 조합하여 산출할 수 있다. Bound 여부를 판단할 임계 값은 quality indicator를 이용해 산출한 각 오차 요소별 1σ 값과 오경보율 (probability of false alarm)을 기반으로 산출하도록 한다 (Fairbanks et al. 2004, Yun et al. 2012). 사용자가 신뢰성 있는 측위를 수행하기 위해서는 제공되는 잔여오차 추정 값 및 실제 잔여오차 값이 Eq. (9)를 만족해야 하며, Eq. (9)와 같이 잔여오차가 임계 값 내에 적절히 bound 될 경우 제공되는 quality indicator가 실제 보정정보 적용 시 발생할 수 있는 오차 수준을 충분히 보수적으로 추정하는 것으로 판단할 수 있다.

$$residual < Threshold\ (k\sigma) \tag{9}$$

4. MONITORING ALGORITHM

본 논문에서는 CLAS에서 제공하는 CSSR 보정정보를 기반으로 측정치 영역 및 전리층 오차 보정정보 (dispersive part), 비전리층 오차 보정정보 (non-dispersive part), 위성 관련 보정정보 및 무결성 정보에 대한 검증을 수행하였다.

4.1 Range Error

위성 별 측정치 영역 검증을 수행하기 위해는 먼저 측정치 영역에서의 잔여오차를 계산해야 한다. Lim et al. (2022b)에서는 잔여오차 계산을 위하여 Eq. (10)과 같이 CSSR에서 제공되는 보정정보를 재조합 하여 Carrier Phase Correction (CPC) (Yun et al. 2022, Lee & Park 2022, Lee et al. 2023a,b)을 생성한 다음, 사용자 반송파 측정치에 그 값을 보상한 후 위성 간 차분 (∇)을 수행하였다.

$$\nabla\Phi_f - \nabla CPC_f - \nabla d = \nabla\left(\delta T - \delta I_f + \varepsilon_{\Phi_f}\right) + \lambda_f \nabla N_f \tag{10}$$

여기서 하첨자 f는 각 측정치의 주파수를 의미한다. CLAS CPC에 대한 잔여오차를 산출하기 위해서는 Eq. (10)에 포함된 단일 차분 미지정수 항을 제거해야 한다. Eq. (10)에서 대류층 지연오차의 잔여오차 (δT) 및 전리층 지연오차의 잔여오차 (δI_f), 반송파 측정치 잡음 (ε_{Φ_f}) 이 Gaussian 분포를 따른다고 가정하면, cycle slip이 발생하지 않은 구간에 대하여 평균을 취한 후, 반올림하여 미지정수를 결정할 수 있다. 추정된 미지정수 ($\nabla\hat{N}_f$)를 Eq. (10)에서 차분해주면 Eq. (11)과 같이 CSSR 보정정보 적용에 따른 반송파 측정치 잔여오차를 산출할 수 있다.

$$\nabla res_{\Phi_f} = \left(\nabla\Phi_f - \nabla CPC_f - \nabla d\right) - \lambda_f \nabla\hat{N}_f \tag{11}$$

2장에서 언급한 바와 같이, CSSR 보정정보 적용 후 측정치에 남아 있는 잔여오차의 오차수준은 CLAS에서 제공되는 quality indicator를 이용하여 Eq. (2) 및 Eq. (12)와 같이 모델링 할 수 있다.

$$\sigma_{\nabla res_{\Phi_f}} = \sqrt{(\sigma^i)^2 + (\sigma^{ref})^2} \tag{12}$$

Eq. (2)는 IS-QZSS 표준 문서에 명시된 모델로, CSSR 보정정보 적용 시 사용자가 추정할 수 있는 측정치 영역에서의 오차 수준을 나타낸다. 따라서, Eq. (2)를 이용해 Eq. (12)와 같이 위성 간 차분된 잔여오차의 오차수준을 계산할 수 있으며 Eq. (12)를 통해 산출한 오차수준과 시스템에서 요구되는 오검출율을 기반으로 임계 값 ($k\sigma_{\nabla res_{\Phi_f}}$)을 계산할 수 있다. 임계 값을 기준으로 반송파 측정치 잔여오차 값이 Eq. (13)을 만족하지 못할 경우, 제공되는 무결성 정보가 실제 잔여오차 수준을 적절히 추정하지 못하고 있음을 의미한다.

$$\nabla res_{\Phi_f} < k \cdot \sigma_{\nabla res_{\Phi_f}} \tag{13}$$

4.2 Dispersive Parts Error

전리층 오차항은 반송파 이중 주파수 측정치의 Geometry-Free 선형 조합을 이용하여 추정할 수 있다. Eq. (14)는 L1, L2 반송파 측정치의 Geometry-Free 선형 조합을 나타낸다.

$$\Phi^i_{r,GF} = \frac{\Phi^i_{r,1} - \Phi^i_{r,2}}{\gamma - 1} = I^i_r - IFB^i_{\Phi_{GF}} + IFB_{\Phi_{GF},r} + \left(\frac{\lambda_1 N^i_{r,1} - \lambda_2 N^i_{r,2}}{\gamma - 1}\right) + \varepsilon_{\Phi^i_{r,GF}} \tag{14}$$

where

$$IFB^i_{\Phi_{GF}} = \frac{Bias^i_1 - Bias^i_2}{\gamma - 1}, IFB_{\Phi_{GF},r} = \frac{Bias_{r,1} - Bias_{r,2}}{\gamma - 1}, \gamma = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2$$

Eq. (14)에서 $\Phi^i_{r,1}$과 $\Phi^i_{r,2}$는 각 L1, L2 주파수 반송파 측정치를 의미하며 상첨자 i는 위성 PRN, 하첨자 r은 수신기를 나타낸다. 또한, I는 L1 주파수 전리층 지연 오차를 의미하며 γ는 두 주파수 제곱 간 비율, $Bias^i$와 $Bias_r$은 각 위성 및 수신기의 주파수 간 편이오차, λ는 파장의 길이, N은 미지정수, ε은 수신기 잡음을 의미한다. Geometry-Free 선형 조합을 활용하면 신호 주파수에 따라 달라

지는 오차 항들을 제외한 공통 오차 성분들을 효과적으로 제거할 수 있다. Geometry-Free 수식 내에 포함된 수신기 관련 시계 오차항은 위성 간 차분을 이용하여 제거할 수 있으며 측정치 내에 남아있는 미지정수는 측정치 영역 잔여오차 계산 시 추정된 위성 간 차분 미지정수를 이용해 제거할 수 있다. 위 과정을 이용하여 산출한 측정치 기반 전리층 오차 추정식의 위성간 차분식은 Eq. (15)와 같다.

$$\nabla\hat{I}_{\mathrm{r}}^{i} = \nabla\Phi_{r,GF}^{i} - \frac{\lambda_1\nabla\hat{N}_{r,1}^{i} - \lambda_2\nabla\hat{N}_{r,2}^{i}}{\gamma-1} = \nabla I_{r}^{i} - \nabla IFB_{\Phi_{\mathrm{GF}}}^{i} + \varepsilon_{\nabla\Phi_{r,GF}^{i}} \quad (15)$$

위성 위상 바이어스 편차 (∇IFB_{Φ}^{i})의 경우 CLAS에서 제공되는 보정정보 값을 이용해 보정 가능하다. 전리층 잔여오차 산출식은 Eq. (16)과 같다.

$$\begin{aligned}\nabla res_{dispersive}^{i} &= \nabla I_{r}^{i} - \nabla IFB_{\Phi_{\mathrm{GF}}}^{i} + \varepsilon_{\nabla\Phi_{r,GF}^{i}} - \nabla\left\{I_{corr}^{i} - IFB_{corr,\Phi_{\mathrm{GF}}}^{i}\right\} \\ &= \nabla res_{iono}^{i} + \nabla res_{bias}^{i} + \varepsilon_{\Delta\Phi_{\mathrm{GF}}}\end{aligned} \quad (16)$$

Eq. (16)을 이용하여 산출된 전리층 보정정보 잔여오차의 오차 수준은 Eqs. (17, 18)과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{dispersive}^{i} = \sqrt{\left(\frac{40.3\times10^{16}}{f^2}\sigma_{iono}^{i}\times 100\right)^2 + \left(\sigma_{user,GF}^{i}\right)^2} \quad (17)$$

$$\sigma_{\nabla res_{dispersive}}^{i} = \sqrt{\left(\sigma_{dispersive}^{i}\right)^2 + \left(\sigma_{dispersive}^{ref}\right)^2} \quad (18)$$

Eq. (17)에서 σ_{iono}^{i}은 CLAS에서 제공되는 quality Indicator를 이용하여 산출한 전리층 항의 오차 수준을 의미하며, $\sigma_{user,GF}$는 Geometry-Free 측정치에 대한 사용자 관련 오차를 의미한다. 따라서 Eq. (16)에서 계산된 잔여오차에 대한 오차 수준은 Eq. (18)과 같다. Eq. (16)에서 산출된 잔여오차는 Eq. (19)을 만족할 경우 보정정보 및 무결성정보가 적절히 생성되고 있음을 판단할 수 있다.

$$\nabla res_{dispersive}^{i} < k\cdot\sigma_{\nabla res_{dispersive}} \quad (19)$$

4.3 Non-Dispersive Parts Error

비전리층 오차항은 반송파 이중 주파수 측정치의 Ionosphere-Free 선형 조합을 이용하여 추정할 수 있다. Eq. (20)은 L1, L2 반송파 측정치의 Ionosphere-Free 선형 조합을 나타낸다.

$$\Phi_{r,IF}^{i} = \frac{\gamma\Phi_{r,1}^{i} - \Phi_{r,2}^{i}}{\gamma-1} = g - IFB_{\Phi_{\mathrm{IF}}}^{i} + IFB_{\Phi_{\mathrm{IF}},r} + \left(\frac{\gamma\lambda_1 N_{r,1}^{i} - \lambda_2 N_{r,2}^{i}}{\gamma-1}\right) + \varepsilon_{\Phi_{r,IF}^{i}} \quad (20)$$

$$where, \qquad IFB_{\Phi_{\mathrm{IF}}}^{i} = \frac{\gamma Bias_{1}^{i} - Bias_{2}^{i}}{\gamma-1}, \qquad IFB_{\Phi_{\mathrm{GF}},r} = \frac{\gamma Bias_{r,1} - Bias_{r,2}}{\gamma-1}$$

여기서 g는 위성과 수신기 간 거리 및 대류층 오차와 같이 모든 주파수 측정치에서 같은 값을 갖는 geometry 항을 의미한다. 전리층 감시 알고리즘과 동일하게, 측정치 내에 남아있는 미지정수는 측정치 영역 잔여오차 계산 시 추정된 값을 이용해 제거할 수 있다. 해당 과정을 활용하여 산출한 비전리층 오차 추정식은 Eq. (21)과 같다.

$$\nabla\hat{g}_{\mathrm{r}}^{i} = \nabla\Phi_{r,IF}^{i} - \frac{\gamma\lambda_1\nabla\hat{N}_{r,1}^{i} - \lambda_2\nabla\hat{N}_{r,2}^{i}}{\gamma-1} = \nabla g_{r}^{i} - \nabla IFB_{\Phi_{\mathrm{IF}}}^{i} + \varepsilon_{\nabla\Phi_{r,IF}^{i}} \quad (21)$$

보정정보를 이용해 산출된 비전리층 오차 항의 잔여오차는 Eq. (22)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}\nabla res_{non-disp}^{i} &= \nabla g_{r}^{i} - \nabla IFB_{\Phi_{\mathrm{IF}}}^{i} + \varepsilon_{\nabla\Phi_{r,GF}^{i}} - \nabla\left\{g_{corr}^{i} - IFB_{corr,\Phi_{\mathrm{IF}}}^{i}\right\} \\ &= \nabla res_{g}^{i} + \varepsilon_{\Delta\Phi_{\mathrm{GF}}}\end{aligned} \quad (22)$$

Eq. (22)를 이용하여 산출된 비전리층 보정정보 잔여오차의 오차 수준은 Eqs. (23, 24)와 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{non-disp}^{i} = \sqrt{\left(\sigma_{sis}^{i}/10\right)^2 + \left(\left(\sigma_{trop}^{i}/10\right)/sinE^{i}\right)^2 + \left(\sigma_{user,IF}^{i}\right)^2} \quad (23)$$

$$\sigma_{\nabla res_{non-disp}}^{i} = \sqrt{\left(\sigma_{non-disp}^{i}\right)^2 + \left(\sigma_{non-disp}^{ref}\right)^2} \quad (24)$$

Eq. (23)에서 상첨자 i는 각 위성을 나타내며, σ_{sis}^{i}은 CLAS에서 제공되는 SSR URA 값을 이용하여 산출한 비전리층 항의 오차 수준을 나타낸다. 또한, σ_{trop}^{i}는 대류층 천정 방향 보정정보 오차 수준을 나타내며 $\sigma_{user,IF}^{i}$는 Ionosphere-Free 측정치에 대한 사용자 관련 오차를 의미한다. 따라서 Eq. (22)에서 계산된 잔여오차에 대한 오차 수준은 Eq. (24)와 같다. 산출된 잔여오차가 Eq. (25)를 만족할 경우 해당 오차 요소에 대한 보정정보 및 무결성정보가 적절히 생성되고 있다고 판단할 수 있다.

$$\nabla res_{non-disp}^{i} < k\cdot\sigma_{\nabla res_{non-disp}} \quad (25)$$

4.4 Satellite Orbit and Clock Error

위성 관련 보정정보 알고리즘은 각 위성별 위성 궤도 및 위성 시계 보정정보에 대한 감시를 수행한다. 위성 보정정보 감시 알고리즘의 경우 IGS에서 제공하는 정밀 궤도력 데이터를 참 값으로 가정하였으며, 보정정보를 이용해 보정된 방송궤도력 위성 궤도 및 시계 정보와의 비교를 통해 잔여오차를 산출하였다. 잔여오차 산출 수식은 Eq. (26)과 같다.

$$res_{orbit/clk}^{i} = H\cdot\delta X_{orbit}^{i} + c\cdot\left(\delta dt^{i} + \Delta time_{ref}\right) \quad (26)$$

IGS에서 제공하는 데이터의 경우 IGS Time을 기준으로 생성되므로 해당 식을 위성 간 차분 할 경우 시계 기준 차이로 인한 오차는 소거된다. 따라서 잔여오차 식은 Eq. (27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla res_{orbit/clk}^{i} = H\cdot\nabla\delta X_{orbit}^{i} + c\cdot\left(\nabla\delta dt^{i}\right) \quad (27)$$

위성 관련 보정정보 잔여오차의 표준편차 값의 경우 Eqs. (28, 29)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{orbit/clk} = \sqrt{\left(\sigma_{sis}^{i}/10\right)^2 + \left(\sigma_{prec}^{i}\right)^2} \quad (28)$$

$$\sigma_{\nabla res_{orbit/clk}} = \sqrt{\left(\sigma_{orbit/clk}^{i}\right)^2 + \left(\sigma_{orbit/clk}^{ref}\right)^2} \quad (29)$$

Eq. (28)에서 σ_{sis}^{i}는 CLAS에서 제공되는 SSR URA 값을 이용해 계산한 오차 수준을 나타내며, σ_{prec}^{i}는 정밀궤도력을 이용해 산출된 위성 궤도 및 시계 오차의 오차 수준을 의미한다. Fujita et al. (2016)에 따르면, SSR URA 값의 경우, 위성 관련 오차뿐만 아니

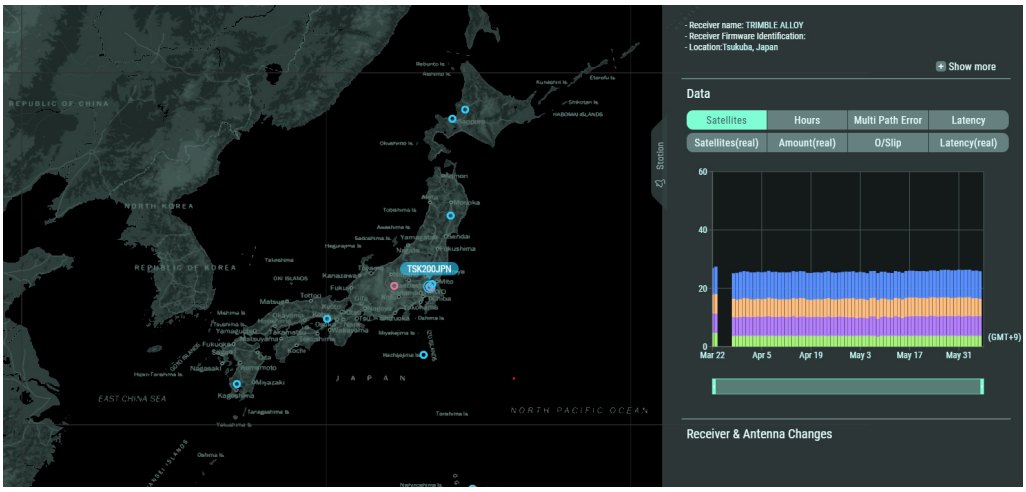

Fig. 2. QZSS CLAS monitoring station selection.

라 대류층 오차항을 포함한 비전리층 오차항에 대하여 산출된 값이나 현재 CLAS에서 제공되는 quality indicator 중 위성 궤도 및 시계오차 항을 포함하는 오차 수준을 나타내는 값은 SSR URA 값이 유일하므로, 위성 궤도 및 시계 오차 성능 감시 시 해당 값을 이용하여 오차 수준을 산출하도록 한다. Eq. (27)에서 산출된 잔여오차가 Eq. (30)을 만족할 경우 위성 관련 보정정보에 대하여 무결성정보가 충분히 보수적인 값을 제공하며 신뢰할 수 있는 값임을 판단할 수 있다.

$$\nabla res^{i}_{orbit/clk}(t) < k \cdot \Delta\sigma_{res_{orbit/clk}} \tag{30}$$

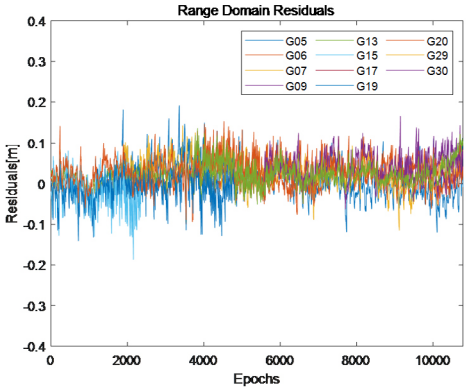

Fig. 3. Range domain residuals.

5. TEST RESULTS

5.1 Test Configuration

QZSS-CLAS 기반 GNSS 오차 요소 별 보정정보 및 무결성 정보의 성능 평가를 위해 Fig. 2와 같이 일본 네트워크 중앙부인 Tsukuba에 위치한 IGS 기준국 (TSK2)을 정적 사용자로 선정하였다 (IGS 2023). 선정된 TSK2 기준국 사이트의 사용 안테나는 TRM 159900.00이며, 수신기는 Trimble Alloy 모델이다. 실험에 사용할 사용자 GNSS 측정치는 UTC 기준 2022년 6월 15일 07시부터 약 3시간 동안 TSK2 기준국에서 수집된 관측 데이터를 이용하였다. 또한, 사용자 관측 데이터 날짜에 방송된 QZSS L6 메시지는 QZSS CLAS 웹사이트 (QZSS 2022)를 통해 취득하였다 (Go! GNSS 2022).

CLAS 무결성 정보의 잔여오차 추정 성능 검증을 위하여 보정정보 적용 후 잔여오차에 대한 통계 값을 분석하였으며, 해당 논문에서는 고장이 없는 환경에서 전체 시스템 성능이 요구되는 오검출율을 만족하는지 평가함으로써 제공되는 성능 검증을 위해 사용된 알고리즘이 적절하게 잔여 오차를 산출하고 해당 잔여오차들이 무결성 정보에 적절히 bound 되고 있는지 검증하였다. 감시 임계 값의 경우 앞서 언급한 바와 같이 오검출율 및 CLAS에서 제공되는 quality indicator를 이용해 산출한 잔여오차의 오차 수준(1σ)을 기반으로 선정하였다. CLAS의 경우 연속성에 대한 요구 성능이 공식적으로 정의된 바가 없으므로, 각 오차 요소별 보강정보 성능 분석 시 오검출율 요구성능은 현재 대한민국 해양수산부에서 연구 개발 수행 중에 있는 "지상기반 센티미터급 해양 정밀 PNT 기술개발 과제"의 이상현상 오검출율 요구 성능인 99% (k=2.5857)로 설정하였다.

5.2 Range Error Analysis

반송파 측정치의 전체 위성에 대한 측정치 영역 보정정보 적용 결과는 Fig. 3과 같다. 반송파 측정치 전체 보정정보 잔여오차의 경우 RMS 값은 약 0.0369 m로 CLAS에서 제공하는 보정정보를 이용하여 반송파 측정치 내의 오차 보정 시, 오차 수준이 센티미터 수준의 정밀한 값을 갖는 것을 확인하였다. Fig. 4는 GPS PRN 6번, PRN 20번의 측정치 잔여오차 및 임계 값을 도시한 그래프이다. Fig. 4에서 확인할 수 있는 것과 같이 측정치의 잔여 오차는 산출된 임계 값에 적절하게 Bounding 되는 것을 확인할 수 있으며 다른 위성 측정치 또한 전체 구간에서 잔여오차가 임계값 이내의 값을 갖는 것을 확인하였다. 그러나 Eq. (12)의 CLAS 무결성 정보를 이용해 계산된 표준편차의 평균 값은 약 0.3747 m 수준으로 센티미터 수준인 반송파 측정치의 잔여 오차 수준에 비

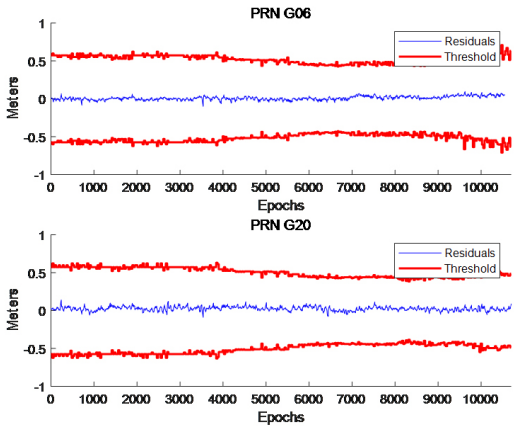

Fig. 4. Range domain monitoring results (red: threshold / blue: range domain residuals).

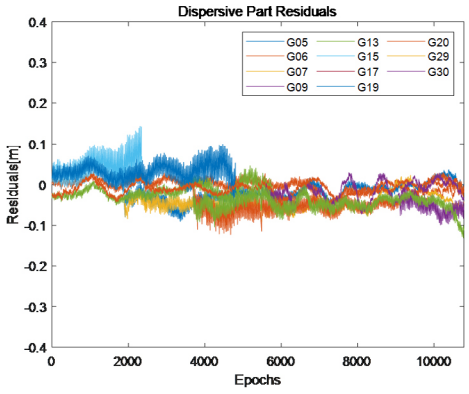

Fig. 5. Dispersive (ionosphere) correction residuals.

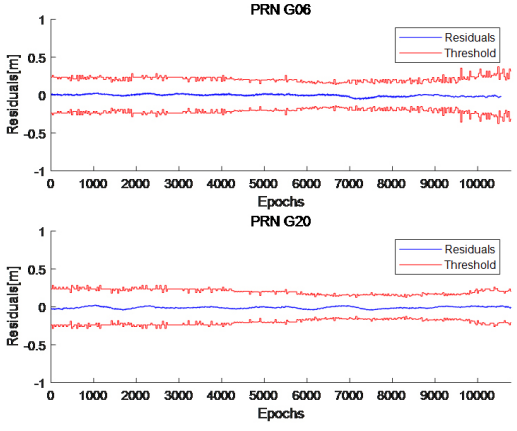

Fig. 6. Dispersive (ionosphere) error monitoring results (red: threshold / blue: dispersive correction residuals).

하여 큰 값을 갖는 것을 확인하였다.

5.3 Dispersive Parts Error Analysis

전리층 오차항에 대한 보정정보 적용 결과는 Fig. 5와 같다. 전리층 오차항에 대한 잔여오차의 경우 RMS 값은 약 0.0363 m로

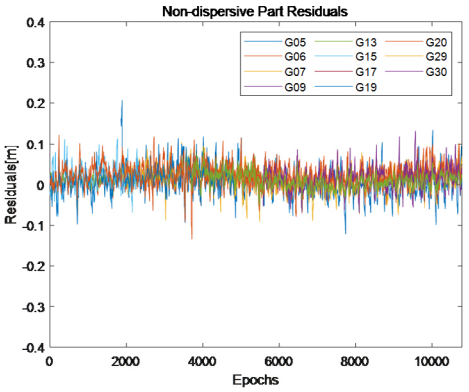

Fig. 7. Non-dispersive correction residuals.

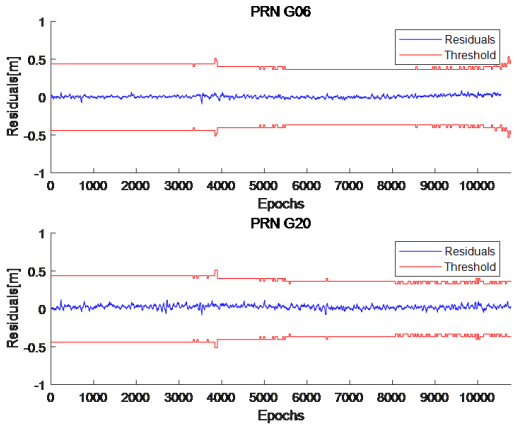

Fig. 8. Non-dispersive error monitoring results (red: threshold / blue: non-dispersive correction residuals).

보정정보의 오차 값이 센티미터 수준의 정밀한 값을 갖는 것을 확인하였다. Fig. 6은 GPS PRN 6번, PRN 20번의 보정정보 잔여오차 및 임계 값을 도시한 그래프이다. Fig. 6에서 확인할 수 있는 것과 같이 전리층 보정정보의 잔여 오차는 산출된 임계 값 이내의 값을 갖는 것을 확인할 수 있으며 전체 위성의 보정정보 잔여오차가 전 구간에서 임계 값 이내의 값을 갖는 것을 확인하였다. 그러나 Eq. (18)의 CLAS 전리층관련 무결성 정보를 이용해 계산된 표준편차의 평균 값은 0.3324 m 수준으로 센티미터 수준인 잔여오차에 비하여 큰 값을 갖는 것을 확인하였다.

5.4 Non-Dispersive Parts Error Analysis

비전리층 항에 대한 보정정보 적용 결과는 Fig. 7과 같다. 비전리층 오차항에 대한 잔여오차의 경우 RMS 값은 약 0.0356 m로 전리층 보정정보와 유사하게 센티미터 수준의 정밀한 값을 갖는 것을 확인하였다. Fig. 8은 GPS PRN 6번, PRN 20번 측정치의 잔여오차 및 임계 값을 도시한 그래프이다. 비전리층 오차항의 경우에도 산출된 잔여오차 값이 임계 값 이내의 값을 갖는 것을 확인할 수 있으며 전체 위성의 보정정보 잔여 오차가 전 구간에서 임계 값 이내의 값을 갖는 것을 확인하였다. 그러나 Eq. (24)와 같이 CLAS URA 및 대류층 무결성 정보를 이용해 계산된 표준편차

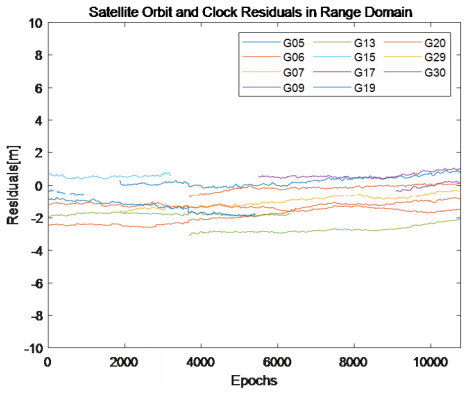

Fig. 9. Satellite orbit and clock correction residuals.

의 평균 값은 0.6424 m 수준으로 산출된 잔여오차에 비하여 상당히 큰 값을 갖는 것을 확인하였다.

5.5 Satellite Orbit and Clock Error Analysis

위성 궤도 및 시계 보정정보 적용 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 전체 위성에 대하여 위성 궤도 및 시계 보정정보의 잔여오차를 나타내며 RMS 값은 약 0.6508 m 수준으로 잔여오차가 센티미터 수준인 다른 오차 성분들에 비하여 상당히 큰 값을 갖는 것을 확인하였다. Fig. 10은 GPS 위성 PRN 6, 7, 9, 20에 대한 보정정보 잔여오차 및 임계 값을 도시한 그래프이다. Eq. (29)의 CLAS URA 정보를 이용해 계산된 표준편차의 평균 값은 약 0.4153 m 수준인데, 보정정보 잔여오차가 CLAS 위성 관련 무결성 정보를 이용해 산출된 임계 값보다 큰 값을 갖고 있으며, 임계 값이 잔여오차를 bound하지 못한다는 것을 확인할 수 있다. 해당 보정정보 오차 수준의 경우 Hao et al. (2020)에서 분석된 바 있으며, 기재된 Signal in Space-User Range Error의 평균 값은 약 0.64 m 수준이다. 해당 값은 본 논문에서 산출한 잔여 오차 수준과 매우 유사한 결과로 실제 CLAS 위성 궤도 및 시계 오차 수준이 다른 오차성분에 비하여 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 CLAS에서 제공하는 위성 궤도 및 시계 보정정보 값과 실제 IGS Final Product에서 제공되는 정밀 궤도력과 방송궤도력을 이용해 산출한 위성 궤도 및 시계 정보의 차이를 비교한 그래프이다. 위성 궤도 및 시계 보정정보는 방송궤도력을 이용해 산출된 위성 궤도 및 시계 보정정보의 오차를 보정하기 위한 값이므로, IGS에서 제공하는 위성 궤도 및 시계 정보가 참 값이라고 가정할 때, 두 그래프는 거의 동일한 값을 나타내야 한다. 그러나 Fig. 11에서 확인할 수 있는 것과 같이 두 그래프의 경향성은 유사하나 두 값 사이에 바이어스 오차가 있는 것을 확인할 수 있다. 앞서 분석되었던 측정치 영역 및 비전리층 보정정보의 잔여 오차 산출시에는 임계 값을 초과하는 수준의 오차의 영향이 보이지 않았던 것에 근거하면, CLAS의 위성 궤도 및 시계 보정정보 추정시 대류층 오차 성분을 적절히 분리하지 못하고, 위성 관련 보정정보 추정을 위한 지상 기준국의 기하학적 배치가 좋지 않아 관련 오차가 크게 반영된 것에 기인한 것으로 추정된다.

본 논문에서 사용된 QZSS CLAS 위성 궤도 및 시계 보정정

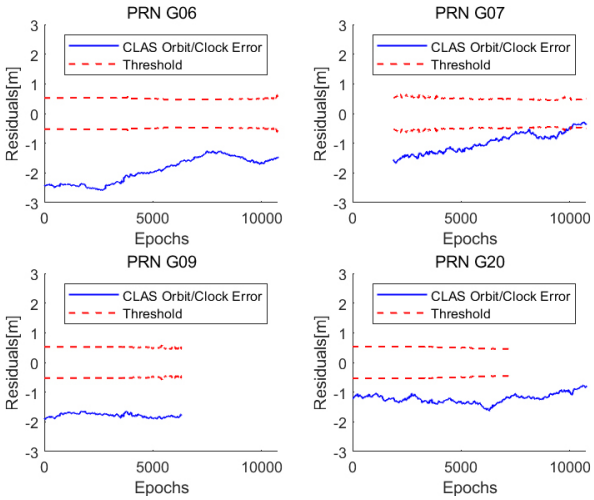

Fig. 10. Satellite orbit and clock error monitoring results (red: threshold / blue: satellite orbit and clock correction residuals).

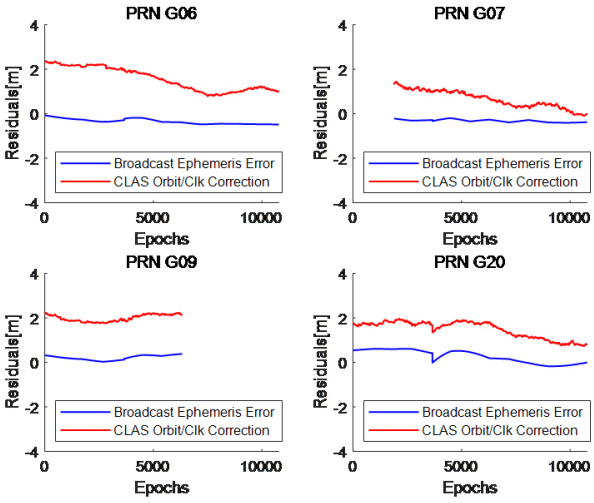

Fig. 11. Broadcast ephemeris error and satellite orbit/clock correction (blue: broadcast ephemeris error, red: satellite orbit/clock correction).

보 잔여오차 감시 알고리즘의 경우 Korea Augmentation Satellite System (KASS), Wide-Area Augmentation System (WAAS) 등 코드 기반의 Satellite-Based Augmentation System (SBAS)에서 생성되는 보정정보 및 무결성 정보 검증에 활용되고 있으며 코드 기반 보강시스템에서는 검증이 완료된 알고리즘이다. Lim & Park (2018)에서는 본 논문에서 위성 궤도 및 시계 보정정보 감시에 활용하였던 알고리즘과 동일하게 IGS 정밀 궤도력을 참 값으로 가정하여 SBAS의 위성 궤도 및 시계 보정정보 오차 수준을 분석하였다. Lim & Park (2018)에서 분석한 결과, 미국 WAAS의 경우 30초 간격의 24시간 위성 관련 잔여오차 평균 값은 -2.311×10^{-17} m, 표준편차 값은 약 0.1555 m이며, 일본 MSAS의 경우 평균 값이 -4.367×10^{-18} m, 표준편차 값이 약 0.3340 m 수준으로 계산되었다. 또한 SBAS의 경우 시스템에서 제공되는 잔여오차 추정 오차 수준이 충분히 보수적으로 제공되므로 계산된 잔여오차들이 임계값 내에 적절히 Bounding되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논

문에서 위성 궤도 및 시계 보정정보 성능 분석에 활용된 알고리즘은 문제가 없는 것을 알 수 있다.

다만 CLAS 서비스를 위해 추정한 위성 궤도 및 시계 보정정보의 추정오차가 상대적으로 크고, 함께 생성된 무결성 정보 등이 실제 오차 수준을 보수적으로 계산하기에 적절하지 않는 것으로 추정된다. 감시에 사용된 SSR URA 값의 경우 비전리층 보정정보 항에서 대류층 보정정보를 적절하게 분리하지 못하는 모델링 오차까지 고려가 되어 보수적으로 설정되어야 하나, 각 오차 요소 별 분리가 정확하지 않더라도 모든 보정정보가 OSR 영역에서 합산된 이후의 잔여오차는 비교적 작게 산출될 수 있다. 이 경우, 오차 성분별로 정보를 분리하는 SSR의 장점이 유지되기 위해서는 각 성분별 오차 수준을 적절히 bound 할 수 있어야 한다. 그러나 위성 관련 보정정보와 실제 위성 궤도 및 시계정보인 정밀 궤도력 정보를 비교시, SSR URA 값에 비해 매우 큰 값을 갖는 것을 확인하였다. 이는 앞서 언급하였듯이 CLAS 지상 기준국의 기하학적 배치가 좋지 않은 특성 상 위성 관련 보정정보와 대류층 보정정보가 적절히 분리되지 않고 위성 관련 보정정보에 대류층 보정정보 오차가 포함되어 있어 실제 값에 비하여 큰 오차를 갖는 것으로 추정된다.

위성 궤도 및 시계 보정정보만을 별도로 감시할 필요가 있는 활용 분야의 경우, 산출된 잔여오차가 임계 값 이내로 bound되지 않는 것을 대비하여 감시국은 사용자에게 위성 궤도 및 시계 보정정보에 대한 alert flag를 방송해야 한다. 이 경우, 위성 관련 오차와 대류층 오차의 완벽한 분리가 불가능하고, 지상인프라의 기하학적 배치에 따른 추정 오차로 매우 크므로, 위성 궤도 및 시계 보정정보 단독의 모니터링은 현재 CLAS 보정정보로는 불가능할 것으로 예상된다.

6. CONCLUSIONS

본 논문에서는 SSR 방식의 PPP-RTK 서비스를 지원하고 있는 QZSS CLAS를 기반으로 GNSS 오차 요소 별 보정정보에 대한 무결성 정보의 잔여오차 추정 성능 분석을 수행하였다. 보정정보 적용시 잔여오차를 산출하기 위하여 오차요소별 참 값과 보정정보를 비교하였으며, 위성 간 단일 차분을 통해 수신기 오차가 제거되어 효과적인 모니터링이 가능함을 확인하였다. 검출 임계 값은 CLAS에서 제공하는 quality indicator를 이용해 계산된 표준편차 및 오검출율 요구성능을 기반으로 결정할 수 있으며 측정치 영역 및 각 오차 요소별 성능 분석 수행 시 산출된 임계 값이 잔여오차를 적절하게 bound하는지 여부를 확인하였다. 성능 검증은 측정치 영역 및 전리층 오차, 비전리층 오차, 위성 궤도 및 시계오차에 대하여 수행되었다.

먼저, 위성별 측정치 영역의 경우 CSSR 보정정보를 이용해 CPC를 생성한 후 실제 반송파 측정치에 이를 적용하고 위성 간 단일 차분을 통해 잔여오차를 산출하였다. 산출된 잔여오차의 경우 전체 위성에 대하여 RMS 0.0369 m 수준으로 Open Sky 환경에서 측정치 잔여오차가 센티미터 수준의 정밀한 값을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 전 구간에서 잔여오차가 임계 값에 적절히 bound되는 것을 확인하였다. 그러나, CLAS에서 제공되는 무결성 파라미터를 기준으로 산출된 표준편차의 경우 평균 약 0.3747 m수준으로 산출된 잔여오차에 비하여 큰 값을 갖는 것이 확인되었다. 이는 오검출율 99% (k = 2.5857)에서 약 0.9688 m에 해당하는 값으로 잔여오차는 안정적으로 bound 하나, 설정된 표준편차가 매우 크기 때문에 이동체의 경우 cm 수준의 정밀 측위를 무결성 관점에서 보장하기는 어려울 것으로 판단된다.

오차성분별 감시의 경우에도 전리층과 비전리층 잔여오차는 RMS 0.0363 m 수준이나, 측정치 영역과 마찬가지로 CLAS에서 제공되는 전리층 관련 무결성 파라미터를 기준으로 산출된 표준편차는 수십 cm 수준으로 실제 오차수준보다는 과도하게 bound를 하고 있는 것으로 확인되었다. 반면, 위성 궤도 및 시계 관련 보정정보의 경우에는 추정된 임계 값이 잔여오차를 적절하게 bound하지 못하기 때문에 단독 모니터링은 불가할 것으로 예상된다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, CLAS의 정밀 측위를 실시간 감시함에 있어 위치영역, 위성별 측정치 영역, dispersive/non-dispersive 성분 감시는 가능하나, 위성 궤도 및 시계의 실시간 감시는 불가능하고 판단된다. 특히, 네트워크 외각 사용자와 같이 위성 궤도 및 시계 보정정보만을 이용하는 application의 경우, 해당 SSR 보정정보의 유효성 검증이 불가능하므로 그 사용이 오히려 위험할 것으로 예상된다. 즉, 제공된 SSR 보정정보를 모두 조합하여 OSR 형태로 사용하는 경우에는 추정된 오차수준이 보정정보 잔여오차를 적절하게 bound하여 적절한 항법 및 감시에 활용될 수 있으나, 네트워크 외부에서 활용이나 사용자의 필요에 따라 SSR 보정정보의 선별적 사용 등과 같은 기존에 알려진 OSR 대비 SSR의 장점은 현존 기술로는 달성되지 못한 것으로 확인되었으므로, 그 사용에 유의해야한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from National R&D Project “Development of ground-based centimeter-level maritime precise PNT technologies” funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (1525013759).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All the authors have contributed to the presented work. The first author, Y.L. wrote and edited this based on the test results. C.L. and Y.C. prepared and performed the static test and algorithm verification. B.P. suggested the original concept of this research and supervised the direction of the research. SG.P. and SH.P. have administered the project.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Cabinet Office 2021, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification, Centimeter Level Augmentation Service (IS-QZSS-L6-005).

European GNSS Agency 2019, PPP-RTK Market and Technology Report

Fairbanks, M., Ward, N., Roberts, W., Dumville, M., & Ashkenazi, V. 2004, GNSS augmentation systems in the maritime sector, In Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 26-28 January 2004, pp.662-673. https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=5544

Fujita, S., Sato, Y., Miya, M., Ota, K., Hirokawa, R., et al. 2016, Design of Integrity Function on Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System, In Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, Oregon, 12-16 September 2016, pp.3258-3263. https://doi.org/10.33012/2016.14571

Go! GNSS, Go! GNSS Go! JAPAN - Unlimited Ways to GO with GNSS! [Internet], cited 2022 Aug 6, available from: https://go.gnss.go.jp/mirai/realtime/

Hao, M., Jiao, W., Jia, X., & Tao, Q. 2020, Precise point positioning performance evaluation of QZSS centimeter level augmentation service, In China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings: Volume III, pp.78-88. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3715-8_8

Hirokawa, R., Fernández-Hernández, I., & Reynolds, S. 2021, PPP/PPP-RTK open formats: Overview, comparison, and proposal for an interoperable message, NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 68, 759-778. https://doi.org/10.1002/navi.452

Hirokawa, R., Nakakuki, K., Fujita, S., Sato, Y., & Uehara, A. 2019, The operational phase performance of centimeter-level augmentation service (CLAS), In Proceedings of the ION 2019 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, 8-11 April 2019, pp.349-360. https://doi.org/10.33012/2019.16810

Hirokawa, R., Sato, Y., Fujita, S., & Miya, M. 2016, Compact SSR messages with integrity information for satellite based PPP-RTK service, In Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, Oregon, 12-16 September 2016, pp.3372-3376. https://doi.org/10.33012/2016.14794

IGS, IGS Network [Internet], cited 2023 May 9, available from: https://igs.org/network/

Kim, W., Son, P.-W., Park, S. G., Park S. H., & Seo, J. 2022, First Demonstration of the Korean eLoran Accuracy in a Narrow Waterway Using Improved ASF Maps, in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 58, 1492-1496. https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3114272

Lee, J., Pullen, S., & Enge, P. 2009, Sigma Overbounding using a Position Domain Method for the Local Area Augmentaion of GPS, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 45, 1262-1274. https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5310297

Lee, Y., Hwang, Y., Ahn J., Seo, J., & Park, B. 2023a, Seamless Accurate Positioning in Deep Urban Area Based on Mode Switching Between DGNSS and Multipath Mitigation Positioning, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24, 5856-5870. http://doi.org/10.1109/TITS.2023.3256040

Lee, Y. & Park, B. 2022, Nonlinear Regression-Based GNSS Multipath Modelling in Deep Urban Area, Mathematics, 10, 412. https://doi.org/10.3390/math10030412

Lee, Y., Wang, P., & Park, B. 2023b, Nonlinear Regression-Based GNSS Multipath Dynamic Map Construction and Its Application in Deep Urban Areas, in in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24, 5082-5093. http://doi.org/10.1109/TITS.2023.3246493

Lim, C. 2022, Study on Homogeneous Network RTK Method for Satellite Based Nationwide GNSS Precision Positioning Service, Ph.D. Dissertation, Sejong University

Lim, C., Jo, Y., Lee, Y., Cha, Y., Park, B., et al. 2022a, Trends of Open PPP/PPP-RTK Correction Services, Journal of Advanced Navigation Technology, 26, 418-426.

Lim, C., Lee, Y., Cha, Y., Park, B., Park, S. G., et al. 2022b, Monitoring QZSS CLAS -based VRS-RTK Positioning Performance, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 11, 251-261. https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.4.251

Lim, C. & Park, B. 2018, Performance Analysis on MSAS Satellite Orbit and Clock Corrections using Precise Orbit and Clock Products, 2018 IPNT Conference Proceedings, Nov 7-9 2018, Jeju, Korea, pp.246-248

Lim, C. & Park, B. 2020, Performance Comparison of VRS and FKP Network RTK User According to Baseline Length, Journal of Advanced Navigation Technology, 24, 540-548. https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.540

Miya, M., Fujita, S., Sato, Y., Ota, K., Hirokawa, R., et al. 2016, Centimeter level augmentation service (CLAS) in Japanese quasi-zenith satellite system, its user interface, detailed design, and plan, In Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016),

Portland, Oregon, 12-16 September 2016, pp.2864-2869. https://doi.org/10.33012/2016.14644

Miya, M., Sato, Y., Fujita, S., Motooka, N., Saito, M., et al. 2014, Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japaneses Quasi-Zenith Satellite System, Its Preliminary Design and Plan, In Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, 8-12 September 2014, pp.645-652.

Park, B. & Kee, C. 2010, The Compact Network RTK Method: An Effective Solution to Reduce GNSS Temporal and Spatial Decorrelation Error, The Journal of Navigation, 63, 343-362. http://doi.org/10.1017/S0373463309990440

Park, B., Lim, C., Wang, J., & Morton, Y. T. J. 2022, Horizontal Drift Velocity and Dimensions of Ionospheric Irregularities Using ROT from a GNSS Receiver Array, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, Art no.5803614. http://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3186839

Park, B., Yoon, D., Song, J., & Kee, C. 2014, Latency compensation by compact RTK under harsh communication environment of land transportation, in Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, 8-12 September 2014, pp.933-939. https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=12348

Park, K. & Seo, J. 2021, Single-antenna-based GPS antijamming method exploiting polarization diversity, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 57, 919-934. https://doi.org/10.1109/TAES.2020.3034025

Yoon, H., Seok, H., Lim, C., & Park, B. 2020, An Online SBAS Service to Improve Drone Navigation Performance in High-Elevation Masked Areas, Sensors, 20, 3047. https://doi.org/10.3390/s20113047

Yoon, M. & Lee, J. 2014, Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbances in the Korean Region on 10 November 2004: Potential Impact on GPS-Based Navigation Systems, Space Weather, 12, 173-186. https://doi.org/10.1002/2013SW001002

Yun, J., Lim, C., & Park, B. 2022, Inherent Limitations of Smartphone GNSS Positioning and Effective Methods to Increase the Accuracy Utilizing Dual-Frequency Measurements, Sensors, 22, 9879. https://doi.org/10.3390/s22249879

Yun, Y., Cho, J., & Heo, M.-B. 2012, Automated determination of fault detection thresholds for integrity monitoring algorithms of GNSS augmentation systems, In Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Myrtle Beach, SC, USA, 23-26 April 2012, pp.1141-1149. https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236969

Trimble, High Precision RTX Technology [Internet], cited 2022 Aug 6, available from: https://positioningservices.trimble.com/services/rtx/

U-blox, PointPerfect [Internet], cited 2022 Aug 6, available from: https://www.u-blox.com/en/product/pointperfect

Yebin Lee is doctoral student of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong University. She received the B.S., M.S. degree from Sejong University. Her research interests include RTK, PPP and GNSS monitoring system.

Cheolsoon Lim is a Ph.D. student at the Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone in Sejong University in Republic of Korea. He received the B.S. and M.S. degrees from Sejong University. His research interests include RTK/Network RTK, SBAS, PPP.

Yunho Cha is an master's students of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent drone at Sejong University. He received the B.S. degree from Sejong University. His research interests include SBAS, PPP, GNSS - SSR correction messages and monitoring system.

Byungwoon Park is an associate professor of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong university. He received the B.S., M.S., and Ph.D. degree from Seoul National University. He worked as a principal researcher at Spatial Information Research Institute in Korea Land and Geospatial Informatix Corporation and a visiting scholar of Aerospace Engineering Sciences Department at the University of Colorado (CU), Boulder. His research interests include GNSS-based safety-critical applications, Compact RTK/Network RTK, PPP, GNSS augmentation message generation and scheduling algorithms, and ionospheric irregularity detection.

Sul Gee Park is the general management team leader, maritime PNT research office and senior engineer of the maritime PNT research centre at Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. She received B.S. and M.S. degrees from Chungnam National University Republic of Korea. Her current research focus on PPP-RTK, eLoran system and integrity monitoring.

Sang Hyun Park is the head, maritime PNT research office and principal researcher the maritime PNT research centre at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Chungnam National University, Republic of Korea. He had worked as a senior research engineer at Automotive Electronic R&D Center for Hyundai-Kia Motors. He has been involved in lots of radio navigation-related research projects such as a vessel berthing system using GPS, DGNSS reference stations and integrity monitors, eLoran system, etc. His current research interests focus on resilient PNT systems for e-Navigation.

https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.3.215