

Galileo HAS와 IGS RTS의 보정정보 비교 및 Galileo HAS 기반 GNSS 측위 알고리즘 개발

한원석¹, 박관동^{1,2†}

Comparison of Galileo HAS and IGS RTS Corrections and Development of a Galileo HAS Based GNSS Positioning Algorithm

Won-Seok Han¹, Kwan-Dong Park^{1,2†}

¹Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

ABSTRACT

The International GNSS Service (IGS) provides real-time satellite orbit, clock, and bias corrections through its Real-Time Service (RTS). In addition, Galileo has offered the Galileo High Accuracy Service (HAS) since January 24, 2023, further improving positioning accuracy for GPS and Galileo satellites. HAS data are available through Galileo's E6 signal and Ntrip, enhancing positioning accuracy for GPS and Galileo satellites. This study compared Galileo HAS corrections data and IGS RTS corrections data obtained from the BKG Ntrip client (BNC) on February 1 and June 23, 2024. The orbit, clock, and bias corrections of each satellite were analyzed, revealing that HAS and IGS RTS correction values followed similar trends for most satellites. Additionally, satellite position and clock values computed from these corrections were compared with SP3 and CLK data for accuracy. To perform positioning using HAS, a Code-PPP algorithm was developed, and positioning accuracy was evaluated for GPS-only, Galileo-only, and multi-constellation modes using both GPS and Galileo. Tropospheric errors were mitigated using the Global Model of Pressure and Temperature (GPT) with the Global Mapping Function (GMF), and ionospheric corrections were applied using the Global Ionospheric Map (GIM). As a result, sub-meter level positioning accuracy was achieved. Among the correction types, IGS RTS corrections provided better accuracy for GPS-only measurements, while Galileo HAS corrections yielded superior accuracy for Galileo-only positioning.

Keywords: pseudorange, GNSS, Galileo high accuracy service, IGS real-time service

주요어: 코드위사거리, GNSS, Galileo high accuracy service, IGS real-time service

1. 서론

위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)은 측위, 항법, 정밀시간 정보 제공 등에 활용되고 있다. 하지만 위성의 신호가 위성에서 송출되어 수신기에 도달하기까지 여러 다양한 오차가 발생하게 되고, 정밀 측위를 위하여 GNSS 오차 보정은 필수적이다. GNSS 오차 보정은 여러 오차의 합을 전달하는 Observation Space Representation (OSR) 방식과 개별의 오

차를 구분하여 전달하는 State Space Representation (SSR) 방식이 있다. OSR 방식은 정확한 위치를 알고 있는 기준국에서의 관측값을 기반으로 사용자와의 오차 상관성을 이용하여 보정정보를 생성하고 이를 통해 측위 정확도를 향상시킨다. 그러나 OSR 사용자는 기준국과 양방향 통신이 필요한 경우가 있고, 기준국에 따라 정확도가 달라지는 문제점이 있다. 반면 SSR 방식은 기준국의 네트워크에서 수집된 데이터를 중앙제어국에서 처리하고, 생성된 보정정보를 위성이나 인터넷을 통해 전송한다. 보정정보를

Received Oct 07, 2024 Revised Oct 27, 2024 Accepted Nov 01, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: kdpark@inha.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.

개별적으로 사용하기 때문에 사용자의 위치에 상관없이 오차요소를 조합하여 사용할 수 있고, 이상이 있는 보정정보를 쉽게 검출하여 측위의 오류를 줄일 수 있다 (Lee & Park 2020).

대표적인 SSR 방식으로는 Satellite-Based Augmentation System (SBAS), Precise Point Positioning (PPP), Precise Point Positioning Real-Time Kinematic (PPP-RTK), Code-PPP 등을 예로 들 수 있다 (Lee & Park 2020). SBAS는 GNSS 신호 오차에 대한 보정 및 무결성 정보를 제공하는 광역보강 시스템으로 정지 궤도 위성을 통해 GNSS 오차의 보정정보와 무결성 정보 등으로 구성된 상태공간 보정정보를 제공한다. 특히 항공기의 안전운항을 위해 1991년 국제민간항공기구 (ICAO)에서는 서비스를 활용할 것을 권고하고 있으며, 현재 미국의 WAAS, 유럽의 EGNOS, 일본의 MSAS, 인도의 GAGAN, 러시아의 SDCM, 한국의 KASS 등이 운영 중이다. PPP는 전 지구 혹은 광범위한 범위를 대상으로 위성의 위치 및 시계에 대한 보정정보를 통해 사용자의 위치를 구하는 정밀 측위 방법이다 (Zumberge et al. 1997). PPP-RTK는 PPP와 Network RTK를 조합한 방법으로 위성 단 보정정보와 이온층과 대류권 오차에 대한 보정정보를 제공한다. PPP-RTK는 PPP에 비하여 정확도 측면에서 우수하며 수렴 시간이 짧고 Ambiguity Resolution (AR) 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있다. Code-PPP는 코드의사거리를 기반으로 측위 오차 요소에 대한 보정정보를 제공받아 수행하는 정밀 측위 방법으로 본 논문에서는 기존의 PPP 방식과 구분을 위하여 SSR 보정정보를 통해 위성의 궤도 (orbit), 시계 (clock), 바이어스 (bias) 오차를 보정한 코드의사거리 기반의 PPP 측위 알고리즘을 Code-PPP라 정의하였다. Code-PPP는 코드의사거리 관측치를 사용하기 때문에 PPP나 PPP-RTK에 비하여 측정치 자체의 오차로 정확도가 조금 떨어지는 단점이 있으나, 측위 알고리즘 구현 측면에서 간단하다는 장점이 있다.

International GNSS Service (IGS)에서는 Real-Time Service (RTS)를 통하여 항법메시지에 적용할 수 있는 위성의 궤도, 시계, 바이어스 보정정보 등을 제공하고 있다. 또한 Galileo는 2023년 1월 24일부터 Galileo High Accuracy Service (HAS) 데이터를 제공하고 있으며, HAS 데이터는 Galileo의 E6 시그널과 Ntrip을 통하여 제공받을 수 있다. HAS는 현재 초기 서비스 단계로 GPS 위성과 Galileo 위성의 궤도, 시계, 바이어스 보정정보만 제공하며, 위상 바이어스 (phase bias) 보정정보와 대류권 오차, 전리층 오차 보정정보는 제공하지 않고 있다.

Code-PPP 알고리즘 개발에 대한 선행연구로 Kim (2016)은 실시간 SSR 보정정보 적용을 통한 GPS Code-PPP (SSR) 알고리즘을 개발하여 Standard Point Positioning (SPP)보다 수평에서 약 77%, 수직에서 약 84%의 정확도 향상을 확인하였고, Lee (2021)는 QZSS-CLAS 보정정보를 이용하여 Code-PPP 알고리즘을 구현하고, 정지 측위에서 수평 약 0.2 m, 수직 약 0.3 m 수준의 정확도를 확보하였다.

IGS RTS 데이터를 이용한 선행 연구로 Hadas & Bosy (2015)는 IGS RTS의 품질 평가를 위하여 2013년 DOY 208부터 DOY 214까지 IGC01 스트림과 IGS03 스트림의 보정정보 정확도를 평가하였다. 그 결과 GPS 위성의 경우 5 cm의 궤도 오차와 0.28 ns의 시계 오차를 확인하였고, GLONASS 위성의 경우 13 cm의 궤

도 오차와 0.82 ns의 시계 오차를 확인하였다. Kang et al. (2016)은 IGS RTS의 정확도를 분석하고, IGS RTS를 측위에 적용하였을 때 측위 성능을 평가 하였다. 그 결과 정밀궤도력과 비교하였을 때 IGS RTS의 경우 5 cm의 위성 궤도 오차와 0.5 ns의 위성 시계 오차를 확인하였고, IGS RTS를 측위에 적용한 결과 방송궤도력을 사용한 경우보다 약 8.5%의 정확도 향상을 확인하였다.

Galileo HAS에 대한 선행 연구로 Naciri et al. (2023)는 HAS의 초기 테스트 데이터를 이용하여 측위 성능을 평가하였다. 보정정보의 가용률은 GPS 위성의 경우 90.7%, Galileo 위성의 경우 96.5%를 나타내었고, 수렴시간은 정지 측위에서 6분, 이동 측위에서 7.5분이 소요되었다. 측위 테스트 결과 수평 20 cm, 수직 40 cm의 오차를 확인하였다. Hauschild et al. (2022)는 2021년 9월 실시된 초기 테스트 데이터를 기반으로 저궤도 위성의 실시간 및 준실시간 Precise Orbit Determination (POD)에서 HAS 사용에 대하여 연구하였다. HAS를 이용하여 GPS 및 Galileo 위성에 대한 보정 가용성과 품질을 분석하고, 방송궤도력을 이용한 실시간 POD와 HAS를 활용한 준실시간 POD 데이터 비교를 통하여 HAS 보정을 통한 POD 성능에 대한 연구를 진행하였다. Martini et al. (2022)는 Galileo HAS 데이터를 활용하여 Galileo E01-GSAT-0210 위성의 이상현상을 확인하고 이상점 제거를 통하여 이상현상 완화 효과를 확인하는 연구를 진행하였다.

앞서 기술한 선행 연구들은 IGS RTS에 대한 정확도 평가에 대한 연구들과 HAS 데이터 활용에 대한 연구들이다. 하지만 아직 국내에서는 HAS 데이터와 IGS RTS의 보정정보를 비교 및 분석하거나 GNSS 측위에 적용하였을 때 그 정확도를 비교한 연구는 없다.

따라서 본 연구에서는 현재 서비스 중인 Galileo HAS와 IGS RTS 보정정보를 비교하고, Code-PPP 기반 HAS 측위 알고리즘을 개발하여 측위 정확도를 평가해보고자 한다. 먼저 IGS RTS와 HAS 데이터의 보정량을 비교하고, 각 보정정보를 통해 위성의 궤도와 시계 오프셋을 보정하였을 때의 위성의 위치 및 시계 오차가 IGS의 SP3, CLK를 기준으로 어느 정도 나타내는지 그 정확도를 비교 및 확인하였다. 그 후 IGS RTS 보정정보와 HAS 보정정보를 적용한 GNSS 측위를 진행하여 측위 알고리즘의 정확도를 평가하고 보정정보에 따른 측위 결과 차이를 분석하였다.

이 연구의 2장에서는 HAS 데이터 및 IGS RTS에 대한 설명과 실험의 구성에 대하여 설명한다. 3장에서는 코드의사거리 기반 관측방정식과 오차 모델링에 대하여 설명한다. 4장에서는 HAS와 IGS RTS의 보정량 비교와 각 보정정보를 통해 위성의 궤도와 시계 오프셋을 보정하였을 때의 위성의 위치 및 시계 값을 SP3와 CLK 값과 비교 분석하고, 5장에서 Code-PPP 기반 측위 알고리즘의 정확도 분석을 수행한다. 마지막으로 6장에서 결론에 대하여 기술한다.

2. 보정정보 및 실험 구성

이번 장에서는 HAS 데이터 및 IGS RTS에 대한 설명과 실험의 구성에 대하여 기술한다. 2.1절에서는 HAS 데이터 및 보정정보에 대하여 설명하고, 2.2절에서는 IGS RTS 보정정보에 대하여

Table 1. Galileo HAS main characteristics for Service level 1 and Service level 2.

HAS	Service level 1	Service level 2
Coverage	Global	European coverage area (ECA)
Type of corrections	PPP - orbit, clock, biases (code and phase)	PPP - orbit, clock, biases (code and phase) + atmospheric corrections
Format of corrections	Open format similar to compact-SSR	
Dissemination of corrections	Galileo E6B using 448 bits per satellite per second / terrestrial (internet)	
Supported constellations	Galileo, GPS	
Supported frequencies	Galileo E1/E5a/E5b/E6/E5 AltBOC GPS L1/L5/L2C	
Horizontal accuracy (95%)	< 20 cm	
Vertical accuracy (95%)	< 40 cm	
Convergence time	< 300s	< 100s
Availability	99%	
User helpdesk	24/7	

설명한다. 2.3절에서는 실험의 구성 및 실험 데이터에 대하여 기술한다.

2.1 Galileo HAS

Galileo HAS 데이터는 개방형 서비스로 무료로 제공된다. HAS 데이터는 Galileo E6-B 신호를 통하여 전송하는 것을 기반으로 하고, 인터넷을 통하여 GPS와 Galileo 위성의 궤도, 시계, 바이어스 보정 값을 전송한다. HAS 데이터는 두 단계로 배포될 예정으로 Service Level 1 (SL1)에서는 전 세계를 대상으로 Galileo E1/E5a/E5b/E6/E5AltBOC와 GPS L1/L5/L2C 신호에 대한 보정정보를 제공하고 300초 이내로 수렴하는 것을 목표로 한다 (EUSPA 2023). Service Level 2 (SL2)는 European Coverage Area (ECA)에 대하여 대류권 및 전리층 보정을 포함하고 100초 이내로 수렴하는 것을 목표로 하고 있다. 구체적인 서비스 단계에 따른 HAS 보정정보는 Table 1에 나타내었다.

현재 HAS는 초기 서비스 단계로 SL1의 일부 보정정보를 제공하고 있다. Galileo E1/E5a/E5b/E6 와 GPS L1/L2C신호에 대하여 10초 간격의 궤도, 시계, 바이어스 보정정보를 제공하고 있으며, 그 중 궤도 보정정보는 위성 중심의 NTW 좌표계를 기반으로 위성의 위치와 속도에 대한 Radial, Along-track, Cross-track 보정정보를 안테나 위상 중심 (Antenna Phase Center, APC) 기준으로 제공한다. 시계 보정정보는 시계 오차 보정을 위하여 추가되어야 하는 오프셋 계산을 위한 계수들을 제공하고, 바이어스 보정정보는 현재 코드의사거리에 대한 편향의 보정 값을 제공한다.

2.2 IGS RTS

IGS는 2001년 IGS Real Time Working Group을 설립하고 개발과 검토 과정을 거쳐 2013년부터 IGS RTS 서비스를 시작하였다. IGS RTS 데이터는 Radio Technical Commission for Maritime Service 형식으로 제공되며, 사용자는 원하는 스트림 (stream)을 선택하고 Ntrip을 통하여 보정정보 수신이 가능하다. IGS 분석 센터 (Analysis Center, AC)는 고유의 스트림을 가지고 5초 간격의 위성 궤도, 시계, 바이어스 보정정보를 생성하며, AC마다 생성하는 보정정보의 위성 종류 및 궤도 기준이 다르다. 본 연구에서는 GPS와 Galileo 위성에 대한 궤도, 시계 오차 및 바이어스 보정정보를 생성하는 Center National d'Etudes Spatiales (CNES)의 보정정보를 이용하였다. IGS 조합 보정정보는 IGS 분석 센터의 개

별 보정정보를 조합하여 생성한다. 보정정보는 스트림에 따라 안테나 위상 중심 기준으로 생성되는 보정정보와 질량 중심(center of mass) 기준으로 생성되는 보정정보로 나뉘며, 질량 중심을 기준으로 하는 경우 IGS에서 제공하는 ANTEX 파일을 이용하여 phase center offset 보정 적용이 필요하다. SSRA02/SSRC02는 갈만필터로 조합된 보정정보로 GPS, GLONASS, Galileo 위성에 대한 보정정보를 제공한다. SSRA03/SSRC03은 SSRA02/SSRC02 보정정보에 BeiDou 위성의 보정정보를 추가한 것이다. IGS RTS의 궤도 보정정보는 HAS와 마찬가지로 Radial, Along-track, Cross-track 보정정보를 제공한다. 시계 보정정보는 HAS와 마찬가지로 시계 오차 보정을 위하여 추가되어야 하는 오프셋 계산을 위한 계수들을 제공하고, 바이어스 보정정보는 의사거리에 대한 편향의 보정 값을 제공한다.

2.3 Test Processing

Galileo HAS 보정정보와 IGS RTS 보정정보 비교를 위한 SSR 데이터는 BKG Ntrip Client (BNC)를 통하여 수집하였다. 두 보정정보의 궤도와 시계 보정량을 비교하였으며, 궤도 보정량은 Radial, Along-track, Cross-track 값을 비교하였다. 그 후 각 보정정보를 통해 보정한 위성의 궤도 보정 결과는 SP3 데이터를 기준으로, 시계 오프셋을 보정하였을 때의 결과는 CLK 데이터를 기준으로 어느 정도의 오차를 나타내는 지 그 정확도를 비교하였다. GNSS 측위 알고리즘에 대한 정확도 평가는 2024년 2월 1일과 6월 23일 (DOY 032, 175) IGS 기준국 사이트 중 한 곳인 유럽의 BRUX 사이트 데이터를 이용하여 GPS 단독, Galileo 단독, GPS와 Galileo 다중위성항법 측위 결과를 확인하였다.

3. 코드의사거리 기반 측위

3.1 관측방정식 및 측위 모델

코드의사거리 관측치는 위성과 수신기 안테나 사이의 거리의 값으로 위성에서 송출된 신호가 수신기에 도달하는 데까지의 신호전달 시간을 이용하여 결정한다. 위성으로부터 송출된 신호가 사용자에게 도달할 때까지 다양한 GNSS 오차가 발생하며, 이를 포함하는 코드의사거리 관측방정식은 Eq. (1)과 같다 (Misra & Enge 2006).

$$p = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + I + T + B + M + \epsilon \quad (1)$$

여기서 ρ 는 위성 수신기간의 기하학적 거리를 나타내고, δt_r 과 δt^s 는 각각 수신기 시계오차와 위성 시계오차 값을 나타낸다. c 는 빛의 속도이고, I 는 전리층 지연에 의한 오차, T 는 대류권 지연에 의한 오차, B 는 위성 수신기의 하드웨어 지연오차, M 은 다중경로에 의한 오차, ϵ 는 그 외 기타 오차를 나타낸다. 본 연구의 측위에 사용한 위성군은 GPS와 Galileo이다. GPS 단독 측위와 Galileo 단독 측위의 경우 미지수는 수신기의 위치 (x_r, y_r, z_r) 와 수신기 시계 오차인 δt_r 이고, 이에 따른 추정 대상인 상태벡터 x 는 Eq. (2)와 같다. GPS와 Galileo 다중위성항법 측위의 경우 GPS와 Galileo 시스템 간에 존재하는 시계 오차인 $\delta t_r^{GPS/GAL}$ 가 미지수로 추가되며 이에 따른 상태벡터 x 는 Eq. (3)과 같다.

$$x = [x_r, y_r, z_r, \delta t_r]^T \quad (2)$$

$$x = [x_r, y_r, z_r, \delta t_r, \delta t_r^{GPS/GAL}]^T \quad (3)$$

x 는 Eq. (4)와 같이 가중치 기반의 최소제곱법을 이용하여 구할 수 있다.

$$x = (H^T W H)^{-1} H^T W y \quad (4)$$

여기서 W 는 가중치 행렬로, 관측 값의 신뢰도에 따라 가중치를 설정한다. 이 연구에서는 위성의 고도각 함수에 비례하는 가중치 행렬을 설정하여 반영하였다. H 는 시스템 행렬로 미지수 각각에 대하여 관측방정식을 편미분 한 것으로 Eqs. (5-6)과 같이 나타낸다. GPS 또는 Galileo 단독 측위의 경우 Eq. (5)와 같이 시스템 행렬을 구성하고 GPS와 Galileo 다중위성항법 측위의 경우 Eq. (6)과 같이 시스템 행렬을 구성한다.

$$H = \left[\frac{\partial p}{\partial x_r}, \frac{\partial p}{\partial y_r}, \frac{\partial p}{\partial z_r}, \frac{\partial p}{\partial t_r} \right] \quad (5)$$

$$H = \left[\frac{\partial p}{\partial x_r}, \frac{\partial p}{\partial y_r}, \frac{\partial p}{\partial z_r}, \frac{\partial p}{\partial t_r}, \frac{\partial p}{\partial t_r^{GPS/GAL}} \right] \quad (6)$$

3.2 Galileo HAS 오차 보정

3.2.1 위성 궤도 보정

HAS를 이용한 위성의 궤도 보정은 방송궤도력으로 구한 위성의 위치에 HAS 보정정보를 적용하여 오차를 보정한다. HAS 궤도 보정정보는 위성별 δO_{radial} , δO_{along} , δO_{cross} 값과 $\delta \dot{O}_{radial}$, $\delta \dot{O}_{along}$, $\delta \dot{O}_{cross}$ 값 및 Issue Of Data Ephemeris (IODE)를 제공하며, HAS 보정정보를 적용하기 위하여 방송궤도력의 IODE와 보정정보의 IODE가 일치하는 보정정보를 획득한다. HAS 보정정보는 NTW 좌표계로 제공되기 때문에 ECEF 좌표계로 회전해야 하며, Eqs. (7-8)과 같이 위성의 위치 x^s 와 속도 \dot{x}^s 를 이용하여 회전행렬 R_{NTW}^{ECEF} 를 계산한다.

$$e_t = \begin{bmatrix} x_s \\ |x_s| \end{bmatrix}, e_w = \begin{bmatrix} x^s \times \dot{x}_s \\ |x^s \times \dot{x}_s| \end{bmatrix}, e_n = e_t \times e_w \quad (7)$$

$$R_{NTW}^{ECEF} = [e_n \ e_t \ e_w] \quad (8)$$

그리고 Eqs. (9-10)과 같이 HAS의 보정정보와 앞서 구한 회전행렬을 이용하여 보정 값 δX^s 를 구한다. 여기서 t 는 시간, t_0 는 HAS 메시지의 기준 시간을 나타낸다.

$$\delta O = \begin{bmatrix} \delta O_{radial} \\ \delta O_{along} \\ \delta O_{cross} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{O}_{radial} \\ \delta \dot{O}_{along} \\ \delta \dot{O}_{cross} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (9)$$

$$\delta X^s = R_{NTW}^{ECEF} \delta O \quad (10)$$

마지막으로 Eq. (11)와 같이 방송궤도력으로 계산한 위성위치 $X_{Broadcast}$ 에 δX^s 를 더하여 위성 궤도에 대한 오차를 보정한다.

$$X_{Orbit} = X_{Broadcast} + \delta X^s \quad (11)$$

3.2.2 위성 시계 보정

위성에는 원자시계가 탑재되어 있으며, 원자시계는 원자의 고유한 진동을 이용하여 높은 정확도 수준으로 시각을 측정한다. 그러나 원자시계는 일정 수준의 부정확성을 가지며 이로 인해 위성 시계오차가 발생한다 (Kim 2016). 이러한 시계 오차는 방송궤도력으로 구한 위성 시계에 HAS의 위성 시계 보정정보를 적용하여 보정한다. HAS 시계 보정정보는 C_0 , C_1 , C_2 값을 제공하고 이에 따른 보정 방법은 Eqs. (12-13)과 같다.

$$\delta C = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2 \quad (12)$$

$$\overline{\delta t^s} = dt^s + \Delta t_r^s + \frac{\delta C}{c} \quad (13)$$

여기서 $d t^s$ 는 방송궤도력으로 구한 위성 시계 값이고, Δt_r^s 는 상대성 보정 항으로 Eq. (14)와 같이 계산이 가능하다. C 는 빛의 속도이다.

$$\Delta t_r^s = -\frac{2x^s \cdot \dot{x}^s}{c^2} \quad (14)$$

3.2.3 위성 바이어스 보정

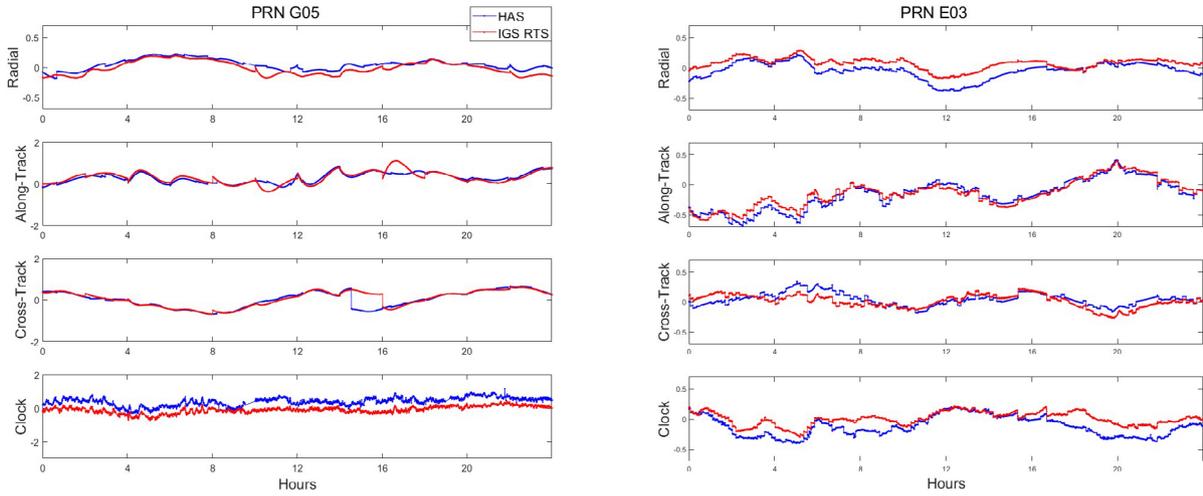
위성 신호가 위성에서 송출되어 사용자에게 전달되는 과정에서 위성 신호의 지연, 위성시계 동기화 등의 이유로 바이어스가 발생한다. 이러한 위성 신호의 바이어스 보정을 위하여 HAS는 코드 관측치에 대한 바이어스 보정정보를 제공하고 이에 따른 보정방법은 Eq. (15)와 같다.

$$\tilde{P}_{U,j}^s = P_{U,j}^s - \tilde{d}_j^s \quad (15)$$

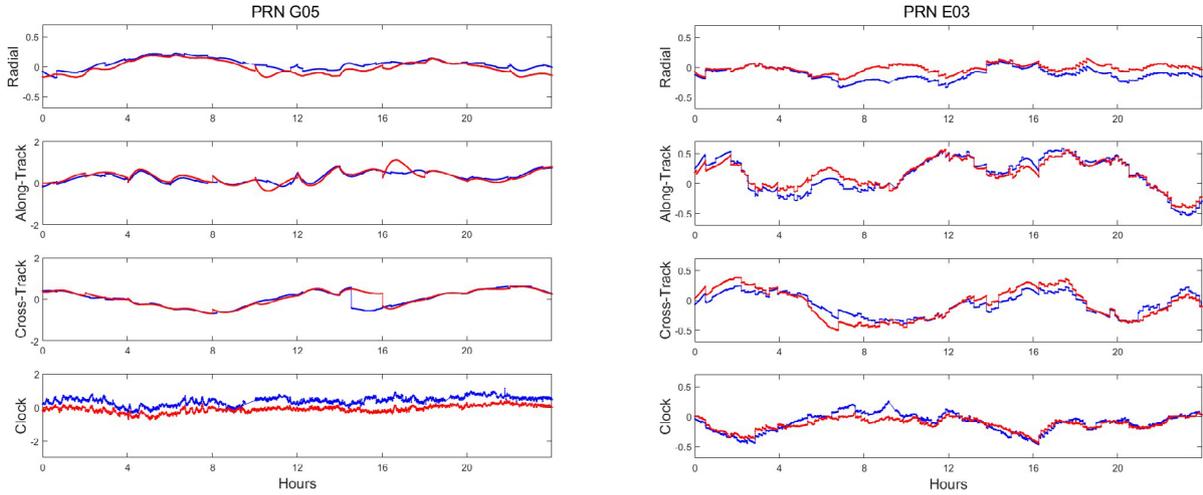
여기서 $P_{U,j}^s$ 는 의사거리 관측 값을 말하며, \tilde{d}_j^s 는 Broadcast group delays와 Timing group delays를 대신한다.

3.2.4 전리층 보정

위성 신호가 지표로부터 약 60 km에서 1,000 km에 존재하는 전리층을 지날 때 전리층에 존재하는 전자에 충돌하여 신호의 굴절에 따른 전리층 오차를 유발한다. 이러한 전리층 오차는 코드 관측치에서는 지연, 위상 관측치에서는 앞서는 형태로 발생한다. 현재 HAS에서는 전리층 지연 오차에 대한 보정정보를 제



(a)



(b)

Fig. 1. Comparison of HAS corrections and IGS RTS corrections: (a) DOY 032, (b) DOY 175.

공하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 전리층 오차를 Global Ionospheric Map (GIM)을 이용하여 보정하였다. GIM은 IGS에서 제공하는 Ionosphere Exchange 포맷으로 전 지구를 2.5° × 5.0° 간격의 격자로 구축된 2시간 간격의 전리층 총 전자수 (Total Electron Contents, TEC) 정보를 포함한다. 주어진 TEC 값은 Vertical TEC 값으로 사용자 위치의 Slant TEC를 구한 뒤 Eq. (16) 과 같이 전리층 지연 오차를 구하여 전리층 오차를 보정하며, 여기서 f 는 주파수이다.

$$I = \frac{40.3}{f_{GNSS}^2} STEC \tag{16}$$

3.2.5 대류권 보정

대류권은 대기의 최하층으로 지표면에서 높이 약 10 km까지이며, 대류권 내부에 존재하는 건조공기 및 수증기에 의한 굴절에 의하여 발생하는 오차이다. 대류권 오차는 전체 대류권 오차의 90%를 차지하는 건조지연 (ZHD)과 10%를 차지하는 습윤지연

(ZWD)으로 나뉜다. 대류권 오차는 보통 경험적, 실험적 모델을 이용하여 제거하며, 본 연구에서는 Boehm et al. (2007)의 Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications (GPT) 모델을 이용하여 천정방향 지연량을 구하고, 이를 Global Mapping Function (GMF) 사상함수를 이용해 대류권 오차를 보정하였다.

4. HAS와 IGS RTS 비교

4.1 보정정보 비교

HAS 보정정보와 비교를 위하여 IGS AC는 CNES 보정정보를 이용하였다. 2024년 2월 1일과 6월 23일 (DOY 032, 175) GPS와 Galileo 보정정보 데이터를 비교하였고, 보정정보 데이터는 BNC를 통하여 취득하였다. HAS의 경우 보정정보를 10초 간격으로 제공하고, IGS RTS는 5초 간격으로 제공하여 두 보정정보의 궤도,

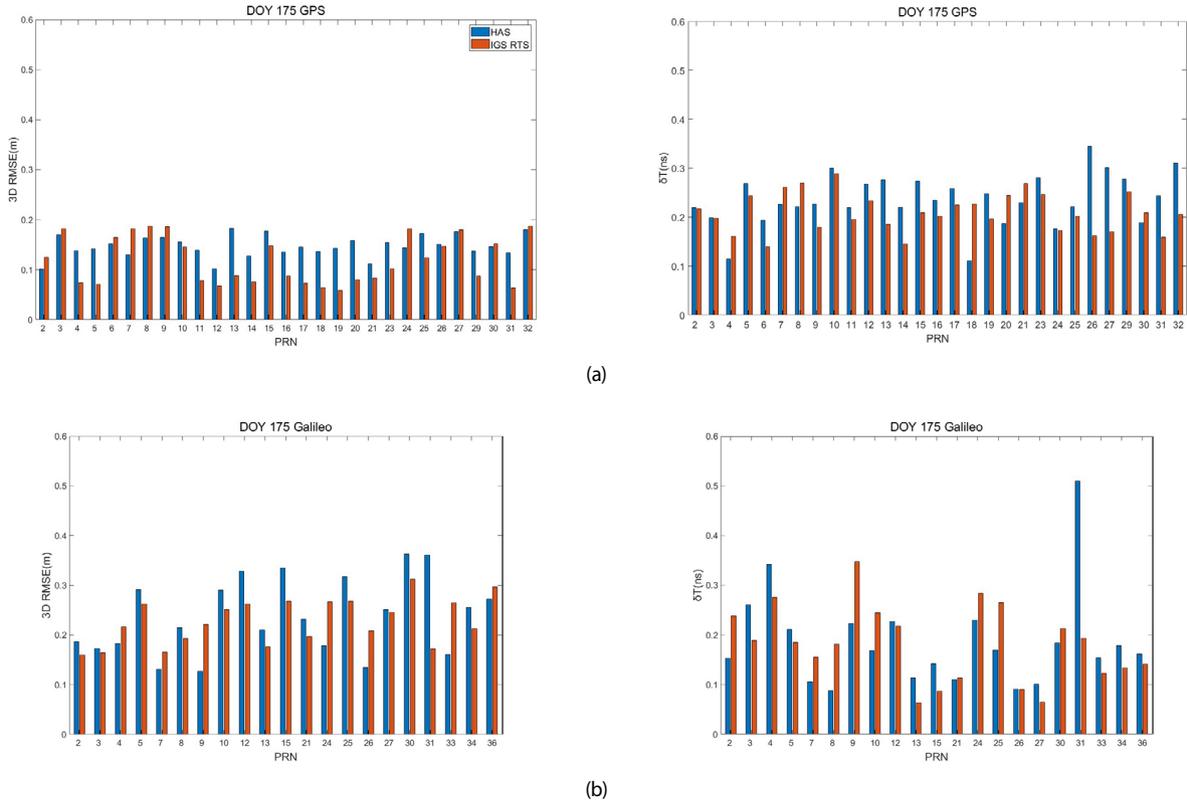


Fig. 2. Comparison of satellite positions and clocks using HAS corrections and IGS RTS corrections with SP3 and CLK data: (a) GPS; (b) Galileo.

시계 보정량을 10초 간격으로 비교하였다. 궤도 보정량의 경우 Radial, Along-track, Cross-track 값을 비교하였으며 그 결과는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1a는 DOY 032의 GPS PRN 05번 위성 보정량과 Galileo PRN 03번 위성의 보정량을 비교한 결과이고, Fig. 1b는 동일한 위성의 DOY 175 보정량을 비교한 결과이다. HAS의 보정량은 파란색, IGS RTS 보정량은 빨간색으로 표현하였다. 보정량 비교 결과 약간의 보정량 차이는 있었지만 비슷한 경향을 보였고 대부분의 위성이 유사한 결과를 나타내었다. Fig. 1을 보면 일부 구간에서 두 보정정보의 차이가 크게 발생하고 다른 경향을 보이다가, 다시 유사해지는 것을 볼 수 있다. 이는 두 보정정보의 IODE 차이가 발생하여, 이에 따라 보정정보 값이 달라지고, 다시 IODE가 동일하게 변경되었을 때 유사한 경향을 보이는 것으로 확인하였다.

다음으로 DOY 175일 HAS와 IGS RTS 보정정보를 통해 위성의 궤도와 시계 오프셋을 보정하였을 때의 위성의 위치 및 시계 값을 IGS Final SP3 데이터 및 IGS Final CLK 데이터와 비교하여 Fig. 2와 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2a는 GPS 위성의 위성별 위치 차이와 위성 시계 차이 값을 나타낸 결과이고, Fig. 2b는 Galileo 위성의 위성별 위치 차이와 위성 시계 차이 값을 나타낸다. 사용 불가능한 정보가 있거나 보정정보가 없는 위성의 경우, 해당 위성은 제외하고 비교하였다. 그래프의 좌측은 위성 위치의 3D RMSE 결과이고, 우측은 위성 시계 차이 δT 값 (ns)에 대한 그래프이다. HAS의 차이는 파란색, IGS RTS 차이는 주황색으로 표현하였다. 비교 결과 SP3와 CLK

Table 2. RMS errors according to HAS and IGS RTS correction.

Correction	Satellite	Orbit	Clock
		3D (m)	δT (ns)
HAS	GPS	0.15	0.22
	Galileo	0.24	0.20
IGS RTS	GPS	0.11	0.18
	Galileo	0.23	0.19

값과 비교했을 때 GPS 위성의 경우 약 11~15 cm의 위성 위치 오차와 약 0.18~0.22 ns의 시계 오차를 확인하였고, Galileo 위성의 경우 약 23~24 cm의 위성 위치 오차와 약 0.19~0.20 ns의 시계 오차를 확인하였다. 현재 IGS에서는 RTS의 실시간 모니터링을 제공하고 있다 (IGS 2024). 실시간 모니터링에서 CNES의 평균 오차가 GPS 위성의 경우 약 12 cm의 위성 위치 오차와 약 0.17 ns의 시계오차를 보이고, Galileo 위성의 경우 약 24 cm 수준의 위성 위치 오차와 약 0.20 ns의 시계 오차를 보여 본 논문에서 확인한 오차와 유사한 결과를 확인하였다.

4.2 GNSS 측위 결과 비교

본 연구에서는 측위 정확도 비교를 위하여 IGS 기준국 중 한 곳인 유럽의 BRUX에 대하여 측위를 실시하였다. 관측 데이터는 30초 간격의 RINEX 형태이며, 테스트 날짜는 2024년 2월 1일과 6월 23일(DOY 032, 175)이다. 해당 데이터를 Code-PPP 방식으로 GPS 단독, Galileo 단독, GPS와 Galileo 다중위성항법 측위를 진행하고 그 결과를 비교하였다. 측위를 진행하면서 사용 불가능

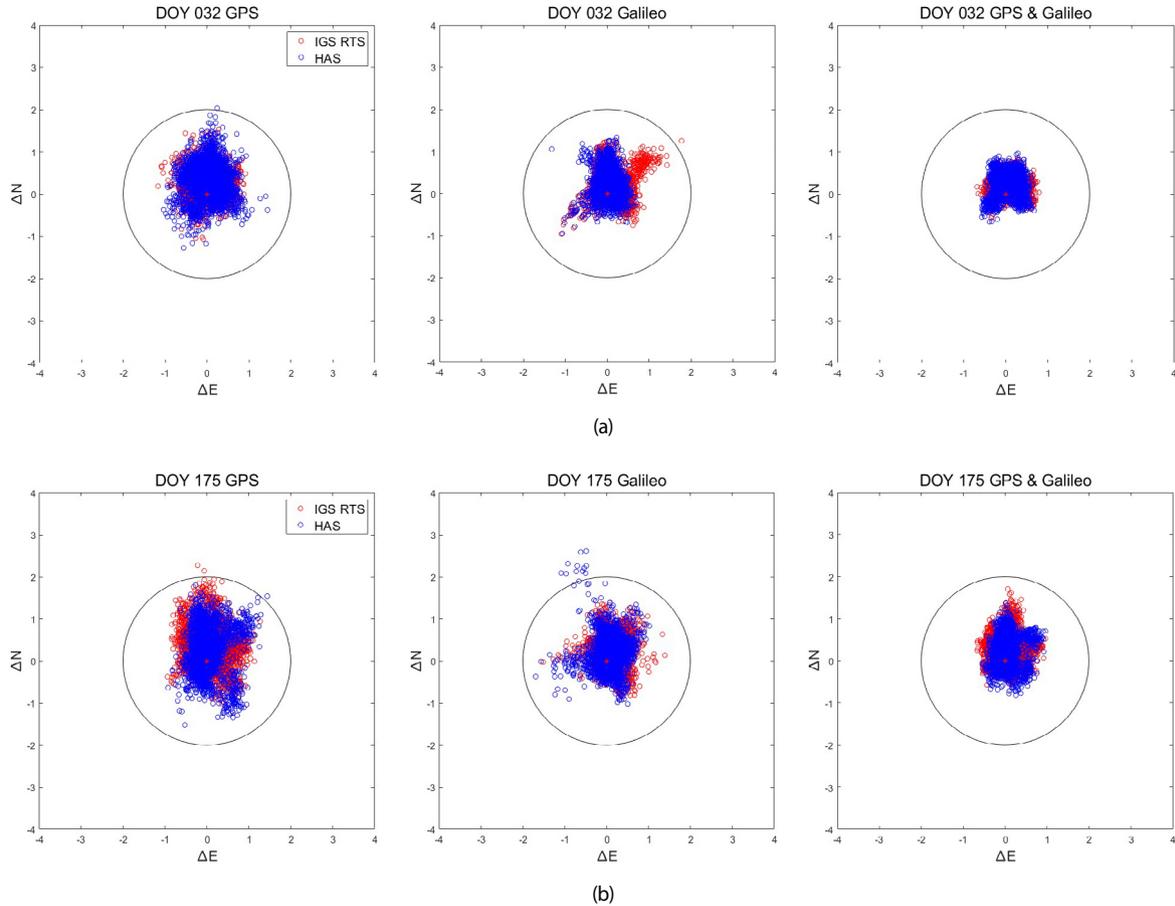


Fig. 3. Comparison of positioning result using HAS corrections and IGS RTS corrections: (a) DOY 032; (b) DOY 175.

Table 3. Positioning errors according to HAS and IGS RTS correction (RMSE).

DOY	RMSE	HAS (m)			IGS RTS (m)		
		GPS	Galileo	GPS+Galileo	GPS	Galileo	GPS+Galileo
032	Horizontal	0.63	0.45	0.44	0.50	0.52	0.39
	Vertical	0.67	0.64	0.50	0.57	0.65	0.47
	3D	0.92	0.78	0.67	0.76	0.84	0.61
175	Horizontal	0.68	0.50	0.48	0.69	0.53	0.53
	Vertical	0.72	0.64	0.53	0.67	0.74	0.58
	3D	0.99	0.81	0.71	0.96	0.91	0.78

Table 4. Positioning errors according to HAS and IGS RTS correction (95% percentile).

DOY	95% percentile	HAS (m)			IGS RTS (m)		
		GPS	Galileo	GPS+Galileo	GPS	Galileo	GPS+Galileo
032	Horizontal	0.97	0.85	0.68	0.86	0.99	0.64
	Vertical	1.23	1.13	0.95	0.98	1.11	0.89
	3D	1.56	1.29	1.08	1.28	1.54	1.02
175	Horizontal	1.24	0.90	0.90	1.28	0.91	0.94
	Vertical	1.07	0.88	0.77	0.67	0.93	0.49
	3D	1.73	1.43	1.23	1.68	1.50	1.31

한 정보가 있거나 보정정보가 없는 위성의 경우, 해당 위성은 제외하고 사용 가능한 위성만 사용하여 측위를 진행하였고, 그 결과는 Fig. 3과 Tables 3, 4에 나타내었다.

Fig. 3a는 DOY 032일의 측위 결과를 나타내고, Fig. 3b는 DOY 175일의 측위 결과를 나타내며, 그래프는 좌측부터 GPS 단독 측

위, Galileo 단독 측위, GPS와 Galileo 다중위성항법 측위 결과를 나타내었다. 그래프에서 HAS를 이용하여 측위를 진행한 결과는 파란색, IGS RTS를 이용하여 측위를 진행한 결과는 빨간색으로 나타내었다.

Table 3을 보면 GPS와 Galileo 단독 측위, 다중위성항법 측위

결과 모두 1 m 미만의 수평방향 정확도와 수직 방향 정확도를 확보하였다. HAS와 IGS RTS 보정정보에 따른 측위 결과를 비교하면 GPS 단독 측위의 경우 IGS RTS의 보정정보를 이용하였을 때 조금 더 높은 측위 정확도를 확보하였고, Galileo 단독 측위의 경우 HAS 보정정보를 이용하였을 때 조금 더 높은 측위 정확도를 확보한 것을 확인하였다.

5. 결론 및 논의

본 연구에서는 IGS RTS의 보정정보와 HAS 보정정보를 비교하고, Code-PPP 기반의 측위 알고리즘을 개발하여 측위 정확도를 평가하였다. HAS의 보정정보와 IGS RTS의 보정정보를 비교한 결과 GPS와 Galileo 일부 위성을 제외한 대부분의 위성에서 약간의 보정량 차이는 있었지만 비슷한 경향을 보였다. 또한 각 보정정보를 이용하여 계산한 위성의 위치 오차를 SP3 데이터 기준으로, 시계 오차를 CLK 데이터 기준으로 비교한 결과 GPS 위성의 경우 약 11~15 cm의 위성 위치 오차와 약 0.2 ns의 시계 오차를 보였고, Galileo 위성의 경우 약 23~24 cm의 위성 위치 오차와 약 0.2 ns의 시계 오차를 보여 IGS RTS 사이트의 모니터링 결과와 비슷한 수준의 오차를 나타냈다.

Code-PPP 측위 알고리즘의 평가를 위하여 IGS의 BRUX 기준국의 DOY 032와 DOY 175 관측데이터를 이용하였다. 각 보정정보를 적용한 측위 결과 GPS와 Galileo 단독 측위, 다중위성항법 측위 결과 모두 1 m 이내의 측위 정확도를 확보할 수 있었다. 보정정보에 따른 측위 결과를 비교하였을 때 GPS 단독 측위의 경우 IGS RTS 보정정보를 이용하였을 때 더 낮은 측위 오차를 보였고, Galileo 단독 측위의 경우 HAS보정정보를 이용하였을 때 더 낮은 측위 오차를 보였다. 이에 따라 Galileo의 HAS 보정정보를 활용한 측위 성능이 기존의 IGS RTS 보정정보를 활용한 결과와 비슷한 성능을 보이며, Galileo 위성을 이용하였을 때 강점을 보이는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 Galileo HAS 보정정보의 유용성을 확인하였으며, 이를 바탕으로 국내에서 Galileo HAS를 이용한 다양한 연구의 기반이 될 것으로 기대된다. 그러나 본 연구는 유럽 지역을 대상으로 측위를 진행하여 국내 및 아시아 지역에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각되며, HAS와 IGS RTS 보정정보의 차이가 발생하는 원인에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (RS-2022-00141819, Development of Advanced Technology for Absolute, Relative, and Continuous Complex Positioning to Acquire Ultra-precise Digital Land Information).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, W.-S. Han and K.-D. Park.; Methodology, W.-S. Han and K.-D. Park.; Formal analysis, W.-S. Han.; Investigation, W.-S. Han; Writing – original draft preparation, W.-S. Han; Writing – review & editing, W.-S. Han and K.-D. Park.; Visualization, W.-S. Han.; Supervision, K.-D. Park.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Boehm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. 2007, Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications, *Journal of Geodesy*, 81, 679-683. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0135-3>
- European Union Agency for Space Programme, EUSPA 2023, Galileo high accuracy service (HAS). <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>
- Hadas, T. & Bosy, J. 2015, IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time, *GPS Solutions*, 19, 93-105. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0369-5>
- Hauschild, A., Montenbruck, O., Steigenberger, P., Martini, I., & Fernandez-Hernandez, I. 2022, Orbit determination of Sentinel-6A using the Galileo high accuracy service test signal, *GPS Solutions*, 26, 120. <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01312-5>
- International GNSS Service (IGS), RTS Monitoring [Internet], cited 2024 Oct 2, available from: <https://igs.org/rts/monitoring>
- Kang, M.-W., Won, J., Kim, M.-S., & Park, K.-D. 2016, Accuracy Evaluation of IGS-RTS Corrections to Stand-Alone Positioning Based on GPS Code-Pseudorange Measurements, *JPNT*, 5, 59-66. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2016.5.2.059>
- Kim, M. S. 2016, Development of PPP Algorithms based on GPS Code Pseudoranges by Applying Real-Time SSR Corrections, Master thesis, Inha University.
- Lee, H. C. 2021, Development of GNSS Precise Point Positioning Algorithm Based on Real-time CLAS Messages Provided by QZSS, Master thesis, Inha University.
- Lee, H. C. & Park, K. D. 2020, Development of Code-PPP Based on Multi-GNSS Using Compact SSR of QZSS-CLAS, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy,*

Photogrammetry and Cartography, 38, 521-531. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.6.521>

- Martini, I., Susi, M., Paonni, M., Sgammini, M., & Fernandez-Hernandez, I. 2022, Satellite Anomaly Detection with PPP Corrections: A Case Study with Galileo's High Accuracy Service, Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Long Beach, California, 25-27 January 2022, pp.1246-1262. <https://doi.org/10.33012/2022.18261>
- Misra, P. & Enge, P. 2006, Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance, 2nd ed. (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press).
- Naciri, N., Yi, D., Bisnath, S., de Blas, J., & Capua, R. 2023, Assessment of Galileo High Accuracy Service (HAS) test signals and preliminary positioning performance, GPS Solutions, 27, 73. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01410-y>
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. 1997, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, JGR, 102, 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>



Won-Seok Han received his B.S. degree from Cheongju University, Korea, and he is currently M.S. student at Department of Geoinformatics in Inha University. His research interests include GNSS Precise Point Positioning using Galileo HAS.



Kwan-Dong Park received his Ph.D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.

