

The Latest Performance of Galileo Kinematic PPP at DAEJ Reference Station in South Korea

Byung-Kyu Choi[†], Sung-Moon Yoo, Kyoung-Min Roh, Pilho Park, Jong-Uk Park

Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

ABSTRACT

In October 2019, the European Galileo navigation system operates a total of 24 satellites, two of them are in the testing phase. There are enough satellites in operation to enable precise point positioning (PPP) using Galileo signals. The number of visible satellites for Galileo in South Korea is investigated. In addition, to assess the latest performance of the Galileo kinematic PPP, data received at DAEJ reference station from October 1 to October 7, 2019, are analyzed. Galileo kinematic PPP presents some results in two categories, single-frequency PPP (SPPP) and dual-frequency PPP (DPPP). The positioning accuracy for Galileo kinematic SPPP solutions is less than 1 m root mean square (RMS) in all direction components. The Galileo kinematic DPPP achieves the positioning accuracy with an RMS value of less than 7 cm in all direction components. The results show that the latest performance of Galileo kinematic PPP at DAEJ station in South Korea is still relatively poor compared to GPS kinematic PPP. However, the residuals of Galileo code measurements are smaller than those of GPS code measurements.

Keywords: Galileo, SPPP, DPPP, residuals

1. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite System (GNSS)의 관측자료를 이용하여 수신기 단독으로 매우 정밀한 위치를 결정하는 방법 중의 하나가 Precise Point Positioning (PPP)이다 (Zumberge et al. 1997, Kouba & Héroux 2001). PPP는 후처리 고정밀 자료처리를 위해 사용되었으나, 최근에는 실시간 응용에 활용이 증가하고 있다. PPP에 의해 결정되는 사용자의 위치정확도는 GNSS 위성 궤도와 위성시각 정보에 의존한다 (Zumberge et al. 1997, Lou et al. 2014). International GNSS Service (IGS)는 GNSS위성의 궤도와 위성시각에 대한 산출물 (Products)을 제공한다. 현재 IGS에서 제공하는 GPS 위성궤도와 시각정보에 대한 최종산출물의 정밀도는 각각 root mean square (RMS)로 약 2.5 cm와 75 pico-

seconds이다 (Dow et al. 2009). IGS는 또한 2013년 4월부터 실시간으로 GPS 위성궤도와 위성시각을 제공하기 시작했고, 위성 궤도는 약 5 cm의 정밀도를 갖고 있고, 위성시각은 약 0.3 nano-seconds의 정밀도를 갖는다 (Hadas & Bosy 2015).

유럽연합(European Union)이 개발하고 있는 Galileo 위성 항법시스템은 2005년 12월 'GIOVE-A'라는 첫 번째 실험위성이 발사된 이후 2019년 10월 현재시점에서는 24기의 Galileo 위성이 운영 중이며, 이 중에서 2기의 위성은 테스트 단계에 있다. Galileo 위성항법시스템은 총 30기의 위성 배치를 목표로 하고 있고, 2020년에는 완전운영서비스(Fully Operation Capability)를 기대하고 있다 (Pan et al. 2019). Galileo 위성항법시스템은 3개의 궤도면으로 설계되어 있으며, 모든 위성들은 Medium Earth Orbit으로 운영된다. 그리고 Galileo 위성들은 고도 약 23,200 km의 상공에서 운영되고, 궤도경사각은 약 56도를 갖는다 (Montenbruck et al. 2017).

최근 Galileo를 이용한 kinematic PPP 측위성능을 분석한 연구가 보고되었다. Katsigianni et al. (2019)은 유럽에 위치하고 있는 BRUX GNSS 기준국에서 수신된 Galileo 이중주파수 관측자료를 이용하여 kinematic PPP 자료처리를 수행하였다. 그들은 7 일간 수집된 이중주파수의 Galileo 관측자료를 처리했고, 실수 모호수(Float ambiguities)와 함께 1σ의 신뢰구간 내에서 BRUX 기준국의 동-서, 남-북, 그리고 고도 방향의 위치정밀도가 각각

Received Jan 09, 2020 Revised Jan 31, 2020 Accepted Feb 10, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: bkchoi@kasi.re.kr

Tel: +82-42-865-3237 Fax: +82-42-861-5610

Byung-Kyu Choi <https://orcid.org/0000-0003-2560-6714>

Sung-Moon Yoo <https://orcid.org/0000-0001-6280-8222>

Kyoung-Min Roh <https://orcid.org/0000-0001-5208-9041>

Pilho Park <https://orcid.org/0000-0003-3778-426X>

Jong-Uk Park <https://orcid.org/0000-0001-8060-6050>

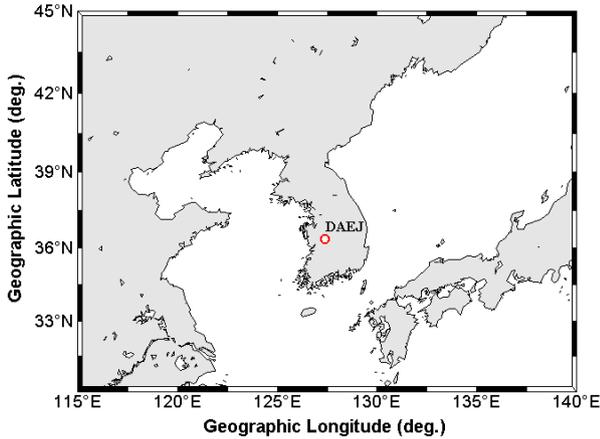


Fig. 1. A location of DAEJ reference station, which is marked by the red circle.

10, 7, 33 mm임을 보였다. 또한 Xia et al. (2019)은 Galileo-only kinematic PPP의 예비 성능을 분석하였고, 수렴단계에서 수평과 수직방향 성분오차가 수 cm에서 10 cm까지 도달할 수 있다고 설명했다. 이외에도 Pan et al. (2019)은 11기의 Galileo 위성을 이용해서 전지구적인 관점에서 position dilution of precision (PDOP)과 가시위성 수(the number of visible satellites)에 대한 기여도를 분석했다.

본 연구에서는 최근 한반도 내에서의 Galileo kinematic PPP에 대한 성능을 분석을 분석한다. 먼저 특정 기준국에서의 Galileo 위성에 대한 가시성을 분석하고 Galileo kinematic PPP는 single-frequency PPP (SPPP)와 dual-frequency PPP (DPPP)로 나누어 분석이 수행된다. Galileo kinematic PPP에 대한 성능 수준은 GPS kinematic PPP와 비교하여 결과를 제시한다.

2. STRATEGY FOR GALILEO PPP

본 연구에서는 최근 한반도에서 수신된 Galileo 항법위성의 kinematic PPP 측위성능을 분석하기 위해 DAEJ 기준국의 관측자료를 활용한다. DAEJ 기준국의 위치는 Fig. 1에 붉은색 원으로 표시하였다. DAEJ 기준국은 정밀 측지용 GNSS 수신기인 Trimble NetR9과 고성능 초크링 안테나인 TRM59800.00가 설치되어 있다. 그리고 Trimble NetR9 수신기는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS 등 multi-GNSS 위성 신호의 수신 가능하다.

Galileo kinematic SPPP를 위해서는 E1 (1575.42 MHz) 신호를 사용하고, DPPP를 위해 E1과 E5a (1176.45 MHz) 주파수를 사용한다.

2.1 Galileo SPPP 관측방정식

Galileo SPPP를 위한 코드(code)와 반송파(phase)의 관측방정식은 각각 식 (1~2)와 같다 (Odijk et al. 2016).

$$P^E = \rho^E + c \cdot dT - c \cdot dt^E + d_{trop}^E + d_{iono}^E + \varepsilon_P^E \quad (1)$$

$$L^E = \rho^E + c \cdot dT - c \cdot dt^E + d_{trop}^E - d_{iono}^E + \lambda^E \cdot N^E + \varepsilon_L^E \quad (2)$$

여기서 P 와 L 은 각각 코드와 반송파의 관측값이고, ρ 는 위성파 수신기의 기하학적인 거리이다. c 는 빛의 속도를 의미하고, dT 는 수신기 시계오차, 그리고 dt 는 위성 시계오차이다. d_{trop} 와 d_{iono} 는 각각 대류권과 전리권 지연오차이고, ε_P 와 ε_L 는 각각 코드와 반송파의 관측잡음을 의미한다. λ 는 E1주파수의 파장이고, N 은 반송파의 모호수(Ambiguities)이다. 그리고 윗첨자 E 는 Galileo항법 시스템을 의미한다.

2.2 Galileo DPPP 관측방정식

Galileo DPPP를 위한 코드와 반송파의 관측방정식은 각각 식 (3~4)와 같다. 이중 주파수를 이용할 경우에는 항법신호의 전달 과정에서 가장 큰 오차로 작용하는 전리권 오차를 Ionosphere-free linear combination (IFLC)을 적용해서 대부분 제거할 수 있는 장점이 있다 (Odijk et al. 2016). 식 (3~4)는 식 (1~2)와 유사하지만 IFLC가 적용되었기 때문에 전리권 지연오차 (d_{iono}^E)가 상쇄되어 있다.

$$P_{IF}^E = \rho^E + c \cdot dT - c \cdot dt^E + d_{trop}^E + \varepsilon_P^E \\ = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot P_1^E - \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot P_2^E \quad (3)$$

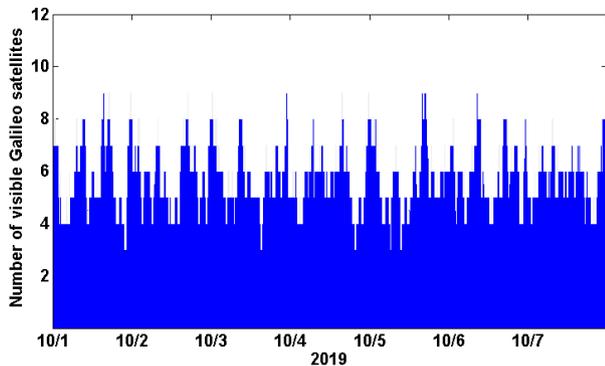
$$L_{IF}^E = \rho^E + c \cdot dT - c \cdot dt^E + d_{trop}^E + \lambda^E \cdot N_{IF}^E + \varepsilon_L^E \\ = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot L_1^E - \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot L_2^E \quad (4)$$

여기서 P_{IF} 와 L_{IF} 는 IFLC가 적용된 관측값을 의미하고, N_{IF} 는 IFLC가 적용된 반송파의 모호수이다. f_1 와 f_2 는 각각 E1과 E5a의 주파수이다.

Table 1은 Galileo PPP를 위한 관측모델과 방법에 대한 정보를 나타낸 것이다. PPP 자료처리에는 한국천문연구원(Korea Astronomy and Space Science Institute, KASI)에서 개발한 Multi-GNSS Analysis Software를 사용한다. Galileo SPPP 자료처리에서는 전리권의 지연오차가 사용자의 위치 정확도에 큰 영향을 준다. 본 연구에서는 전리권의 지연오차를 보정하기 위해 IGS에서 제공하는 Global Ionosphere Maps의 vertical TEC값을 이용한다. 반면에 DPPP 자료처리에서는 IFLC를 적용해 전리권 지연오차를 제거한다. PPP에서 가장 핵심이 되는 위성의 궤도와 시각정보, 그리고 지구회전계수(Earth rotation parameters, ERP)는 독일 지구물리연구소(GeoForschungs Zentrum, GFZ)에서 추정된 최종산출물을 사용한다. 또한 Galileo 위성파 수신기의 위상중심오프셋(phase center offset, PCO)과 위상중심변화(phase center variation)는 igs14.atx 파일에서 제공하는 값을 적용한다. 그리고 phase wind-up에 대한 보정은 Wu et al. (1993)이 제시한 방법을 사용한다. 지구, 해양 그리고 극 조석에 의한 효과는 International Earth Rotation Service (IERS) conventions 2010에서 권고하는 모델을 적용한다. PPP에서는 대류권의 Zenith Wet Delay (ZWD)를 함께 추정하는데, 본 자료처리에서는 ZWD 추정을 위한 사상함수(Mapping Function)로

Table 1. Strategy for Galileo kinematic PPP.

Item	Models / Methods
Software	Multi-GNSS Analysis Software developed by KASI
Observations	Un-differenced ionospheric free linear combination (IFLC)
Signals	Galileo E1 (SPPP) and E1/E5a (DPPP)
Elevation cutoff	7°
Sampling rate	30 sec
Satellite orbit and clock, ERP parameters	GeoForschungs Zentrum products
Satellite phase center offset (PCO)	igs14.atx
Satellite differential code biases (DCB)	CODE monthly products
Receiver PCO/phase center variation	igs14.atx
Phase wind-up	Wu et al. (1993)
Solid tide, ocean tide, pole tide	IERS conventions 2010
Receiver clock	Estimated by Gauss-Markov process
Ionosphere	Estimated by GIM or eliminated by IFLC
Troposphere	ZWD estimation with gradients
Mapping function	GMF/GPT2
Ambiguity	Float solutions
Estimator	Extended Kalman filter

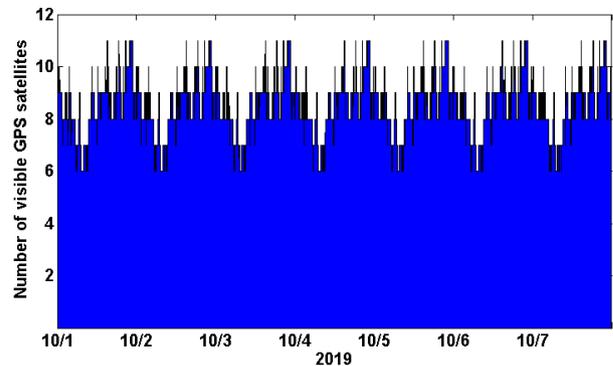
**Fig. 2.** The number of visible Galileo satellites at DAEJ from October 1 to October 7, 2019.

Global Mapping Function (GMF)를 사용한다. 또한 대류층 오차 추정엔 필요한 온도(temperature in Celsius)와 압력(Pressure in hPa) 값은 Global Pressure and Temperature 2 (GPT2) 모델로부터 얻는다. 그리고 Saastamoinen 모델을 적용해서 대류층 건조지연 값을 계산한다. IFLC가 적용된 반송파에 대한 모호수는 정수(Integer)가 아닌 실수(Float) 값이 적용된다. 그리고 사용자의 위치, 수신기 시계오차, 모호수 등 모든 상태변수를 추정하기 위한 방법으로 Extended Kalman filter를 사용한다.

3. RESULTS AND ANALYSIS

Galileo kinematic PPP에 대한 성능분석을 위해 2019년 10월 1일부터 10월 7일까지 DAEJ 기준국에서 수신된 자료를 처리하였다. 그리고 위치를 포함한 모든 상태 변수들은 매 30초 간격으로 생성되도록 설정하였다.

Fig. 2는 2019년 10월 1일부터 10월 7일까지 DAEJ 기준국에서 수신된 Galileo의 가시 위성수의 변화를 보여주고 있다. Galileo 위성신호는 중위도에 위치하고 있는 DAEJ 기준국에서 최소 3기에서 최대 9기까지 관측되는 것을 알 수 있다. 그리고 Galileo의 가시위성 수가 평균적으로 약 6기 이기 때문에 PPP 자료처리가

**Fig. 3.** The number of visible GPS satellites at DAEJ from October 1 to October 7, 2019.

가능하다는 것을 알 수 있다. 하지만 특정시점에서는 가시 위성수가 3기까지 감소하기 때문에 위치결정에 문제가 발생할 수 있다.

Fig. 3은 2019년 10월 1일부터 10월 7일까지 GPS의 일일 가시 위성 수의 변화를 보여주고 있다. GPS 위성신호는 DAEJ 기준국에서 최소 6기에서 최대 11기까지 관측이 되었다. GPS의 가시 위성 수는 평균 약 8기이기 때문에, 안정적인 PPP 자료처리가 가능하다. 그리고 GPS 가시 위성 수의 일일변화 패턴은 Galileo와는 달리 매우 유사함을 알 수 있다.

자료처리 기간동안 DAEJ 기준국에서 GPS와 Galileo의 평균 가시위성 수는 약 2기의 차이가 있고, GPS 위성의 신호가 더 많이 관측이 된다.

3.1 Galileo Kinematic SPPP 성능분석

Fig. 4는 Galileo kinematic SPPP와 GPS kinematic SPPP에 의해 계산된 위치오차의 시계열을 보여주고 있다. 자료처리 기간은 2019년 10월 1일부터 10월 7일까지이고, 30초 간격으로 위치를 계산했다. 그리고 Galileo kinematic SPPP에 대한 성능검증을 위해 DAEJ 기준국의 정밀위치는 IGS의 Software INdependent Exchange (igs19P2073x.snx) 파일에서 제공하는 것을 참값(True value)이라 가정하였다. SPPP에 대한 위치오차는 항법좌

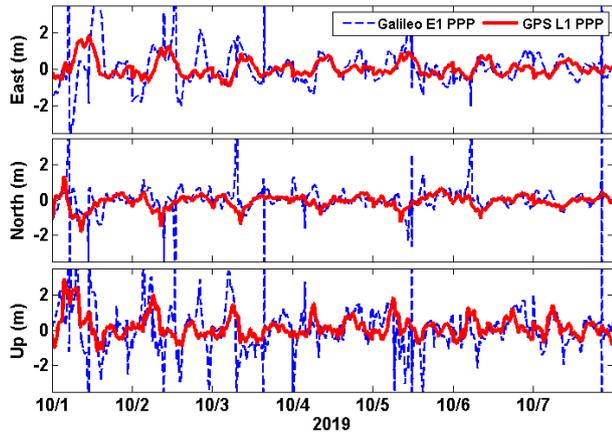


Fig. 4. Time series in the positioning error for the Galileo E1 PPP and GPS L1 PPP during a period from October 1 to October 7, 2019. The blue dotted line and the red solid line represent the positioning error by the Galileo E1 PPP and the GPS L1 PPP, respectively.

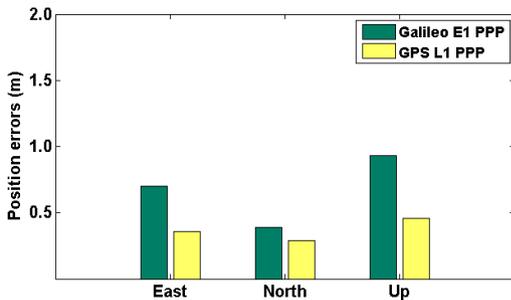


Fig. 5. Comparison of the position RMS errors between Galileo E1 PPP and GPS L1 PPP. The green and yellow bars denote the position errors for Galileo E1 PPP and GPS L1 PPP, respectively.

표계 상에서 성분별(East, North, and Up)로 분류하여 제시를 하였다. Fig. 4에서 파란색 점선과 빨간색 실선은 각각 Galileo kinematic SPPP와 GPS kinematic SPPP의 위치오차를 의미한다. Galileo SPPP 성능은 몇몇 구간을 제외하고는 각 성분별 오차가 3 m 이내에서 결정이 되었다. Fig. 2에서처럼 Galileo의 가시 위성 수가 3기로 줄어드는 시점에서 위치오차가 순간 급격하게 증가한 것을 알 수가 있다. 그리고 이것들 이외에도 일부 시점에 위치오차가 증가한 것으로 나타났다. 이것은 Galileo의 가시 위성 수가 4기라 하더라도 특정위성이 자료처리 과정에서 설정한 잔차의(post-residuals) 기준을 초과해서 나타난 현상이다. 추가적으로 Galileo SPPP의 성능검증을 위해 GPS SPPP와 비교를 하였다. Fig. 4에 보여지는 것처럼 GPS SPPP는 자료처리 기간동안 안정적인 측위성능을 보이고 있다. 동서와 남북방향 성분의 위치오차는 모두 2 m 이내에서 결정이 되었고, 남북방향 성분의 위치가 동서방향 성분에 비해 상대적으로 안정적인 결과를 보인다. 그리고 고도방향 성분은 10월 1일의 특정시점을 제외하고 모두 2 m 이내에서 결정이 되었다.

Fig. 5는 Galileo SPPP와 GPS SPPP에 의해 산출된 위치오차를 각 성분별 막대그래프로 나타낸 것이다. 각 성분별 위치오차에 대한 RMS값은 95% 신뢰구간(Certainty level)을 고려하여

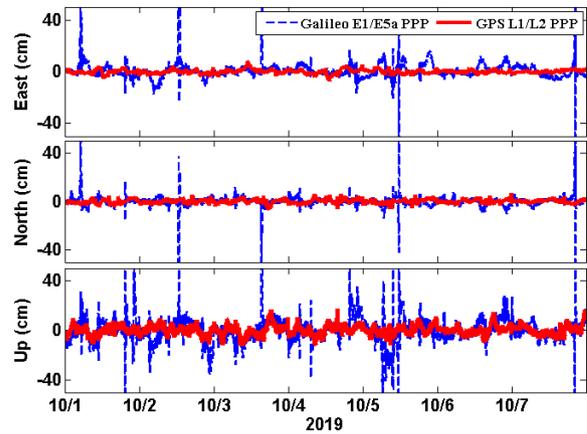


Fig. 6. Time series in the positioning error for the Galileo E1/E5a PPP and GPS L1/L2 PPP during a period from October 1 to October 7, 2019. The blue dotted line and the red solid line represent the positioning error by the Galileo E1/E5a PPP and the GPS L1/L2 PPP, respectively.

계산했다. Fig. 5에서 녹색 막대로 표기된 Galileo SPPP의 동서, 남북, 고도방향 성분의 RMS값은 각각 0.70, 0.39, 0.93 m이다. 그리고 GPS SPPP는 노란색 막대로 표기되어 있고 각 성분별 RMS값은 각각 0.36, 0.29, 0.46 m로 산출되었다. 위의 결과로부터 SPPP의 측위성능은 GPS가 Galileo에 비해 우수한 것을 알 수 있다. 이것은 GPS의 평균 가시 위성 수가 Galileo에 비해 상대적으로 많기 때문에 측위성능에 영향을 주었을 수 있다. 또한 GFZ에서 산출한 GPS 위성과 Galileo 위성의 궤도와 위성시각의 정밀도 차이가 측위성능에 영향을 줄 수 있다.

3.2 Galileo Kinematic DPPP 성능분석

Galileo kinematic DPPP의 측위성능 분석을 위해 2019년 10월 1일부터 10월 7일까지 DAEJ 기준국에서 수신된 관측자료를 처리하였다. Fig. 6은 각각 Galileo와 GPS의 kinematic DPPP를 이용한 7일간의 위치오차를 시계열로 나타낸 것이다. Fig. 6에서 파란색 점선으로 표기된 것은 Galileo 위성을 이용한 kinematic DPPP의 위치오차이고, 붉은색 실선은 GPS를 이용한 kinematic DPPP 결과이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 GPS DPPP는 자료처리 기간동안 안정적인 위치정보를 산출했다. 반면 Galileo DPPP는 일부 특정시점에서 순간 급격하게 위치오차가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 위치오차의 증가는 가시 위성 수가 3기인 구간과 정확하게 일치한다. 또한 10월 7일의 특정시점에 가시 위성 수가 4기 임에도 불구하고 위치오차가 갑자기 증가한 것은 Fig. 4와 동일하게 특정위성의 큰 잔차로 인해 자료처리에서 배제되었기 때문이다. 위의결과로부터 한반도내에서 GPS DPPP가 Galileo PPP에 비해 상대적으로 측위성능이 안정적인 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Galileo kinematic DPPP와 GPS kinematic PPP에 의해 산출된 위치오차의 RMS값을 보여주고 있다. RMS값은 SPPP와 동일하게 95% 신뢰구간 내에서 계산이 되었다. Galileo DPPP는 동서, 남북, 고도방향 성분의 RMS값이 각각 3.46, 2.04, 6.08 cm로 산출되었다. 이것은 최근 한반도에서 Galileo 관측자료를

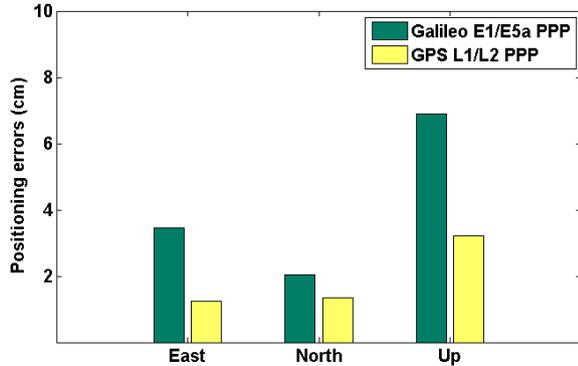


Fig. 7. Comparison of the position RMS errors between Galileo E1/E5a PPP and GPS L1/L2 PPP. The green and yellow bars denote the position errors for Galileo E1/E5a PPP and GPS L1/L2 PPP, respectively.

이용한 kinematic DPPP를 수행할 경우에 10 cm 이내에서 위치 정확도를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. GPS kinematic DPPP의 경우에는 자료처리 기간동안 각각 1.23, 1.34, 3.22 cm의 RMS 값이 산출되었다. 위치오차에 대한 RMS값의 비교를 통해서 GPS DPPP가 Galileo DPPP에 비해 측위성능이 여전히 우수한 것으로 나타났다.

3.3 Galileo Kinematic DPPP의 잔차(residuals) 분석

Galileo 위성신호에 대한 관측자료 품질을 분석하기 위해 2019년 10월 1일 DAEJ 기준국에서 수신된 관측자료의 code와 phase의 잔차를 계산하였다. Fig. 8a와 8b는 각각 GPS와 Galileo 위성의 코드와 반송파의 잔차를 시계열로 나타낸 것이다. GPS 위성의 code와 phase 잔차에 대한 RMS는 각각 1.124 m와 0.007 m로 산출되었다. 즉, GPS phase 잔차는 code 잔차와 100배 이상의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 8b는 Galileo 위성의 code와 phase 잔차에 대한 RMS값이 각각 0.664 m와 0.007 m임을 보이고 있다. 주목할만한 것은 Galileo 위성의 code 잔차에 대한 RMS값이 GPS와 비교하여 상대적으로 큰 차이를 보이고 있다는 것이다. 반면에 Galileo와 GPS 위성의 phase 잔차에 대한 RMS값은 모두 0.007 m로 동일했다. 이렇게 두 위성군 간에 phase 잔차의 RMS값이 동일한 것은 Pan et al. (2019)이 제시한 결과와 잘 일치한다. 항법위성 신호의 code와 phase의 정밀도는 사용자의 위치정확도와 연관되어 있기 때문에 향후 Galileo 시스템의 완전한 전지구 서비스가 시작된다면 한반도에서도 Galileo의 PPP 성능이 GPS PPP와 유사하거나 그 이상이 될 것으로 판단된다.

4. CONCLUSIONS

본 연구에서는 한반도 내에서 Galileo kinematic PPP의 성능을 분석하기 위해 DAEJ 기준국에서 2019년 10월 1일부터 10월 7일까지 관측된 자료를 처리하였다. 먼저 Galileo와 GPS에 대한 가시 위성 수의 변화를 조사하였다. Galileo 위성은 한반도 내에

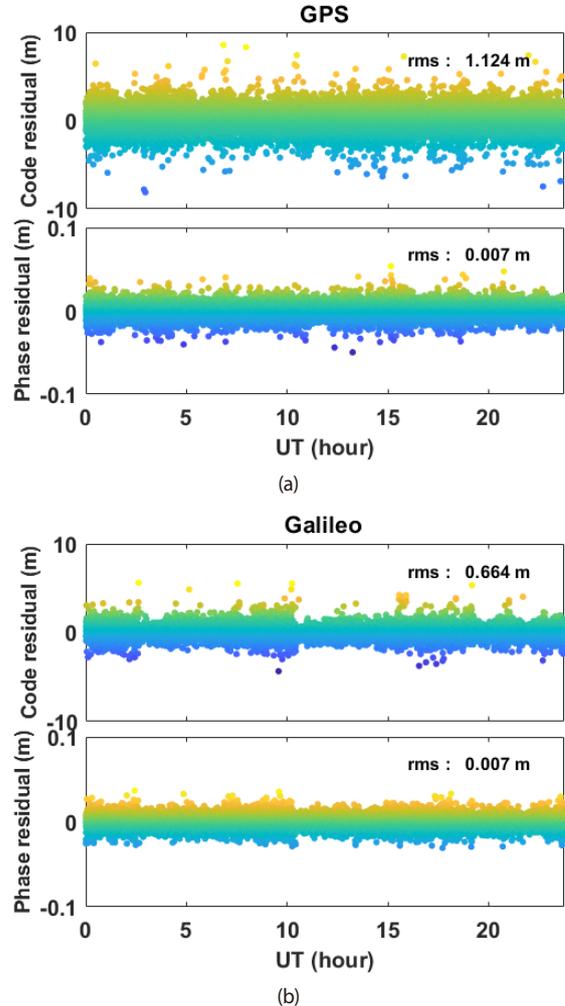


Fig. 8. The code and phase residuals at DAEJ station on October 1, 2019: (a) GPS, (b) Galileo.

위치하고 있는 DAEJ 기준국에서 평균 약 6기의 위성신호가 수신되고, 특정시점에는 최소 3기의 위성신호가 수신된다.

Galileo PPP에 대한 성능은 SPPP와 DPPP로 나누어 분석이 수행되었다. 그리고 Galileo PPP에 대한 비교검증을 위해 GPS SPPP와 DPPP를 동시에 수행하였다. Galileo kinematic SPPP는 95% 신뢰구간 내에서 위치오차에 대한 성분별 RMS값이 모두 1 m 이내로 산출되었고, GPS kinematic SPPP는 모든 방향의 성분 오차들이 0.5 m 이내의 RMS 값을 보였다. 이러한 결과로부터 Galileo SPPP의 측위성능이 GPS SPPP에 비해 여전히 떨어지는 것을 알 수 있다.

Galileo kinematic DPPP는 모든 방향성분에서 위치오차에 대한 RMS값이 7 cm 이내로 정밀하게 산출되었다. 그리고 GPS는 모든 성분의 RMS값이 각각 1.23, 1.34, 3.22 cm로 Galileo에 비해 성능이 우수한 것으로 나타났다.

한반도 내에서 Galileo 신호를 이용하는 경우에 kinematic SPPP와 DPPP 자료처리가 가능하고, 특정구간을 제외하고 안정적인 위치정보를 얻을 수 있다. 그러나 여전히 GPS kinematic PPP에 비해 측위성능은 떨어지는 경향을 보인다. 이것은

Galileo 가시 위성 수가 GPS에 비해 부족하기 때문에 분석된다. 그러나, GPS와 Galileo 위성의 code에 대한 잔차를 분석한 결과는 Galileo가 GPS에 비해 작기 때문에, 향후 Galileo의 완전운영 단계에서는 중위도 지역에 위치하고 있는 한반도에서는 Galileo PPP의 측위성능이 GPS와 유사하거나 그 이상이 될 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the 2020 Primary Project of the Korea Astronomy and Space Science Institute (Project: Development of GNSS based Terrestrial Reference Frame).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, B.K. Choi, and K.M. Roh; software, B.K. Choi; formal analysis, B.K. Choi, and S.M. Yoo; investigation, S.M. Yoo, K.M. Roh, P.H. Park, and J.U. Park.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Choi, B. K., Cho, C. H., & Lee, S. J. 2017, Multi-GNSS Kinematic Precise Point Positioning: Some Results in South Korea, *JPNT*, 6, 35-41. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2017.6.1.35>
- Dow, J. M., Neilan, R. E., & Rizos, C. 2009, The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *J. Geod.* 83, 191-198. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3>
- Hadas, T. & Bosy, J. 2015, IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time, *GPS Solut.*, 19, 93-105. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0369-5>
- Katsigianni, G., Perosanz, F., Loyer, S., & Gupta, M. 2019, Galileo millimeter-level kinematic precise point positioning with ambiguity resolution, *EPS*, 71, 76. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1055-1>
- Kouba, J., & Héroux, P. 2001, Precise point positioning using IGS orbit and clock products, *GPS Solut.*, 5, 12-28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Lou, Y., Zhang, W., Wang, C., Yao, X., Shi, C., et al. 2014, The impact of orbital errors on the estimation of satellite clock errors and PPP, *ASR*, 54, 1571-1580. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.012>
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., et al. 2017, The multi-GNSS experiment (MGEX) of the international GNSS service (IGS)-achievements, prospects and challenges, *ASR*, 59, 1671-1697. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.011>
- Odiijk, D., Zhang, B., Khodabandeh, A., Odolinski, R., & Teunissen, P. J. G. 2016, On the estimability of parameters in undifferenced, uncombined GNSS network and PPP-RTK user models by means of S-system theory, *J. Geod.*, 90, 15-44. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0854-9>
- Pan, L., Zhang, X., Li, X., Li, X., Lu, C., et al. 2019, Satellite availability and point positioning accuracy evaluation on a global scale for integration of GPS, GLONASS, BDS and Galileo, *ASR*, 63, 2696-2710. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.029>
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W., & Lichten, S. 1993, Effects of antenna orientation on GPS carrier phase, *Manuscripta Geodaetica*, 18, 91-98.
- Xia, F., Ye, S., Xia, P., Zhao, L., Jiang, N., et al. 2019, Assessing the latest performance of Galileo-only PPP and the contribution of Galileo to Multi-GNSS PPP, *ASR*, 63, 2784-2795. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.06.008>
- 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-Solid Earth*, 102, 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>



Byung-Kyu Choi received his Ph.D. degree in Electronics in Chungnam National University in 2009. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2004. His research interests include multi-GNSS PPP, PPP-RTK, and GNSS TEC & DCB analysis.



Sung-Moon Yoo received a Ph.D. degree in Astrodynamics from Yonsei University in 2009. Since 2009, he has been with the Korea Astronomy and Space Science Institute. His current research interests include orbit determination of GNSS satellites and Terrestrial Reference Frame.



Kyoung-Min Roh received his PhD in astronomy and space sciences from Yonsei University, Rep. of Korea, in 2006. From 2007 to 2008, he worked as a postdoctoral researcher at German Research Center for Geosciences. Since 2008, he has been with Korea Astronomy and Space Science Institute as a research staff. His research interests include satellite GNSS data processing, high precision orbit determination, and their applications to space geodesy.



Pilho Park received his Ph.D. degree in Astromy & Space Science in Yonsei University in 2002. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 1986. His research interests include Space Geodesy based on GNSS.



Jong-Uk Park received his Ph.D. degree in Space Science in Yonsei University in 1999. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 1993. His research interests include multi-GNSS system, precise data processing and applications of GNSS in land and space.

