

# QZSS-CLAS의 Compact SSR을 이용한 다중 위성항법 기반의 Code-PPP 개발

## Development of Code-PPP Based on Multi-GNSS Using Compact SSR of QZSS-CLAS

이해창<sup>1)</sup> · 박관동<sup>2)</sup>

Lee, Hae Chang · Park, Kwan Dong

### Abstract

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) provides the CLAS (Centimeter Level Augmentation Service) through the satellite's L6 band. CLAS provides correction messages called C-SSR (Compact - State Space Representation) for GPS (Global Positioning System), Galileo and QZSS. In this study, CLAS messages were received by using the AsteRx4 of Septentrio which is a GPS receiver capable of receiving L6 bands, and the messages were decoded to acquire C-SSR. In addition, Multi-GNSS (Global Navigation Satellite System) Code-PPP (Precise Point Positioning) was developed to compensate for GNSS errors by using C-SSR to pseudo-range measurements of GPS, Galileo and QZSS. And non-linear least squares estimation was used to estimate the three-dimensional position of the receiver and the receiver time errors of the GNSS constellations. To evaluate the accuracy of the algorithms developed, static positioning was performed on TSK2 (Tsukuba), one of the IGS (International GNSS Service) sites, and kinematic positioning was performed while driving around the Ina River in Kawanishi. As a result, for the static positioning, the mean RMSE (Root Mean Square Error) for all data sets was 0.35 m in the horizontal direction and 0.57 m in the vertical direction. And for the kinematic positioning, the accuracy was approximately 0.82 m in horizontal direction and 3.56 m in vertical direction compared to the RTK-FIX values of VRS.

Keywords : pseudorange, PPP, QZSS, CLAS, Compact SSR, Multi-GNSS

### 초 록

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)는 위성의 L6 밴드를 통해서 CLAS (Centimeter Level Augmentation Service)를 제공한다. CLAS는 현재 GPS (Global Positioning System), Galileo 그리고, QZSS 위성군에 대한 보정정보를 제공하며, 이러한 보정정보를 C-SSR (Compact - Space State Representation)라고 한다. 본 연구에서는 L6 밴드를 수신할 수 있는 GPS 수신기인 Septentrio의 AsteRx4를 이용하여 CLAS 메시지를 수신하고, 그 메시지를 디코딩하여 C-SSR을 획득하였다. 그리고, GPS, Galileo, QZSS의 코드의사거리 관측치에 Compact SSR을 적용하여 GNSS (Global Navigation Satellite System) 오차를 보정하고, 비선형 최소제곱법으로 수신기의 3차원 위치 및 위성군의 시계오차들을 추정하는 다중 위성항법 기반의 Code-PPP (Precise Point Positioning)를 개발하였다. 개발한 알고리즘의 정확도를 평가하기 위해서 IGS (International GNSS Service) 사이트 중 하나인 TSK2 (Tsukuba)를 대상으로 정지측위를 수행하고, 일본의 가와니시(Kawanishi)시의 이나강(Ina river) 주변을 주행하며 이동측위를 수행하였다. 그 결과, 정지측위의 경우 모든 데이터셋의 평균 RMSE (Root Mean Squared Error)는 수평방향으로 0.35 m, 수직방향으로 0.57 m의 정확도를 나타냈다. 그리고 이동측위의 경우 VRS의 RTK-FIX 값과 비교해 봤을 때 수평방향은 약 0.82 m, 수직방향은 약 3.56 m의 정확도를 나타냈다.

핵심어 : 코드의사거리, PPP, QZSS, CLAS, Compact SSR, 다중 위성항법

Received 2020. 09. 28, Revised 2020. 10. 18, Accepted 2020. 11. 10

1) Dept. of Future Vehicle Engineering, Inha University (E-mail: gockdd1677@gmail.com)

2) Member, Professor, Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University (E-mail: kdpark@inha.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

최근 몇 년간 자율 주행 자동차나 드론(drones) 혹은 UAV (Unmanned Aerial Vehicles)의 상용화 및 대중 시장의 수요 등으로 인해서 이동체의 절대적 위치를 정확하게 구하는 것이 매우 중요해지고 있다. 특히, 안전이 중요한 자율 주행에서는 GNSS로 얻은 좌표의 수평 정확도가 20 cm 수준으로 확보되어야 하고(GSA, 2019), UAV는 활용 목적에 따라 2~30 cm 수준의 정확도가 필요하게 된다(Aleks, 2017). 또한, 현대인들에게 스마트폰은 익숙한 내비게이션으로 사용되는데, 현재 스마트폰의 정확도는 개활지에서는 1~4 m 수준의 성능을 내지만, 주변 환경에 의해 10 m 이상의 오차가 발생하기도 한다(Merry and Bettinger, 2019).

단일주파수를 지원하는 저가의 수신기의 경우, 방송궤도력을 이용한 이동 측위는 수평방향으로 약 6~7 m 수준의 오차가 발생하기 때문에(Satirapod *et al.*, 2001) 사용자의 위치를 보다 정밀하게 결정하기 위해서는 위성 항법의 보정정보를 사용하는 것이 필수적이다. 보정정보란, 위성항법에서 위성의 신호가 위성에서 발사되어 GPS 수신기에 도달하기까지 위성이나 주변 환경 등에 영향을 받아 다양한 오차가 발생하는데, 이러한 오차를 위성 기준국에서 얻은 데이터로 모델링한 값이다. 보정정보는 그 형태에 따라 GNSS의 여러 오차의 합을 전달하는 OSR (Observation Space Representation)과 오차를 구분하여 전달하는 SSR (State Space Representation)으로 구분할 수 있다.

OSR은 사용자와 기준국의 오차 상관성을 이용하여 보정정보를 생성하여 측위의 정확도를 향상할 수 있다. 하지만 OSR 사용자는 필요에 따라 기준국과 양방향 통신을 해야 하고 사용자에게 보정정보를 제공하는 기준국에 따라 정확도가 달라지는 등의 문제점이 있다. 이러한 OSR을 사용하는 대표적인 예로 DGNS (Differential GNSS), Network-RTK (Real Time Kinematic)을 들 수 있다. 반면, SSR은 GNSS 오차 성분을 분리하여 기준국의 네트워크에서 사용자의 위치에 상관없이 위성이나 인터넷을 통하여 보정정보를 전송하며, 특히 위성을 통한 SSR 서비스를 사용할 경우 SSR 네트워크 내부에서 인터넷 연결 없이 SSR을 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한, SSR 사용자는 보정정보를 개별적으로 사용하기 때문에 기준국의 위치에 상관없이 오차 요소를 조합하여 사용할 수 있으며, 이상이 있는 보정정보를 쉽게 검출하여 측위의 오류를 줄일 수 있다. 이러한 SSR을 사용하는 대표적인 예로 SBAS (Satellite-Based Augmentation System), PPP, PPP-RTK, Code-PPP 등이 있다.

PPP는 전 지구 혹은 광범위한 범위를 대상으로 하는 기술로써 GNSS 기준국으로부터 위성의 위치와 시계에 대한 보정정보를 받아 수신기의 위치를 정확하게 구하는 기술이다(Zumberge *et al.*, 1997). PPP에서 위성 궤도 오차, 위성 시계 오차, 위성 신호의 바이어스 오차는 수신기의 위치에 상관없이 전 지구를 대상으로 고정된 값을 나타내고, ZTD (Zenith Total Delay)는 수신기 위치와 함께 추정한다(Zumberge *et al.*, 1997). PPP에서 전리층 오차의 경우 대개 이중주파수를 이용한 무전리층 조합으로 제거한다. PPP의 대표적인 예인 IGS-RTS (International GNSS Service – Real Time Service)는 위성의 궤도와 시계 보정정보를 사용하여 오차를 보정하고, 필요에 따라 ZTD를 추정하여 대류권 오차를 보정하며, 무전리층 조합으로 전리층 오차를 보정한다. Seepersad and Bisnath(2014)는 IGS 상시관측소를 대상으로 PPP를 구현했으며, 모든 결과의 95%가 수평 정확도 20 cm 이상에 도달하는 데 약 20분이 걸렸다.

PPP-RTK는 정밀 측위의 한 분야로써 오차의 보정정보를 수신하여 센티미터 수준의 정확도를 획득하는 방법으로 지역적이거나 전 지구적인 영역을 대상으로 한다. 특히, PPP-RTK는 PPP에 비해 수렴 시간이 짧고 정확도 측면에서 더 우수하며, AR (Ambiguity Resolution) 문제를 해결할 수 있다(Wubbena *et al.*, 2005). 현재, PPP-RTK를 위한 SSR은 RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) 표준으로 정해져 있지 않다. 독일의 Geo++는 GNSMART를 통해 독자적인 SSR 표준인 SSRG를 서비스하고 있으며, SSRG를 이용한 PPP-RTK의 성능은 정지 측위의 경우 수십 초의 수렴 시간 동안 수평방향으로 1~3 cm 수준인 것으로 알려져 있다(Wubbena *et al.*, 2001). 일본의 CLAS는 C-SSR을 서비스하고 있으며, C-SSR을 사용한 PPP-RTK는 정지 측위의 경우 수평방향으로 6 cm(95%) 수준의 정확도를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다(Miya *et al.*, 2016).

Code-PPP는 SSR 보정정보를 제공받아 수행하는 코드의 사거리 기반의 정밀 단독 측위 기법이다. PPP와 PPP-RTK는 위성의 방송파 위상 관측치를 이용해 정밀한 위치를 구하는 방법이지만, Code-PPP는 코드의사거리를 이용한 측위 방법이기 때문에 시스템 측면에서 간단하다. 하지만 PPP나 PPP-RTK에 비해 측정치 자체의 오차로 인하여 정확도가 조금 떨어진다 단점이 있다. Kim *et al.*(2017)은 20개의 기준국과 GNSMART 서버로 만든 SBS (Seoul Broadcasting System)의 GPS 단독의 SSR을 이용한 정지 측위에서 수평방향으로 0.22~0.95 m 수준의 정확도를 얻었다.

한편, 일본의 QZSS는 위성의 L6D를 통해서 CLAS 메시

지를 제공하며, 이 메시지에 해당하는 보정정보를 Compact SSR (이하 C-SSR)이라고 하며 이것은 SSR의 한 종류이다. C-SSR에는 위성의 궤도, 시계, 바이어스 보정정보 및 CLAS 격자점에서 연직 방향의 대류권 보정정보와 각 격자점에서 개별 위성들의 STEC 보정정보를 제공한다. 현재 CLAS는 GPS, Galileo, QZSS 위성군에 대한 보정정보를 제공한다. QZSS 위성에서 L6-밴드를 방송한 이후로 최근 몇 년간 CLAS를 이용한 다양한 연구들이 진행되어왔다(Hao *et al.*, 2019; Choy *et al.*, 2015). 그러나 아직 코드 측정치와 C-SSR을 활용한 측위 기술에 관한 연구 사례는 전혀 없다. 단일주파수를 사용한 코드 측정치와 C-SSR을 활용하게 된다면 위상 관측치와 OSR 보정정보를 사용하여 측위하는 것에 비해 다소 정확도는 떨어지지만, 훨씬 저렴하고 통신 측면에서 안정적이며, 계산 속도와 정확도 측면에서 좋은 성능을 보일 것으로 기대된다. 그래서, 본 연구에서는 위성의 의사거리 관측치와 C-SSR을 활용하여 측위 성능을 향상시킬 방법을 다음과 같이 고안하였다. 위성항법 보정정보 중에서 C-SSR을 사용하기 위해서 QZSS 위성으로부터 CLAS 메시지를 수신하고 디코딩한 뒤 보정정보 형태로 저장했다. 그리고 그 보정정보를 이용하여 GPS, Galileo 그리고 QZSS의 코드 의사거리 측정치에 기반을 둔 후처리 다중 위성항법 Code-PPP를 구현하였다.

먼저, 2장에서는 다중 위성항법 기반의 Code-PPP의 근간이 되는 관측방정식과 오차 모델링에 대해서 논한다. 3장에서는 본 논문의 핵심이 되는 C-SSR의 오차 모델링 기법과 CLAS의 전체적인 격자 및 구성에 대해 논한다. 그리고 4장에서는 일본을 대상으로 다중 위성항법 기반의 Code-PPP를 실험하고 결과를 분석했으며, 5장의 결론을 통해 논문을 마무리하였다.

## 2. 코드의사거리 기반 측위

### 2.1 관측방정식과 GNSS 오차

위성 신호가 위성으로부터 사용자에게 도달할 때까지 발생하는 대표적인 GNSS 오차를 포함하는 코드의사거리 관측방정식은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다(Misra and Enge, 2011).

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

Eq. (1)에 나타난 여러 오차 중에서 위성 시계, 궤도, 바이어스와 대류권, 전리층 오차를 제거하기 위해 C-SSR 보정정보를 사용하였다. 각 오차에 관한 내용은 3장에서 오차별로 설명하며, 자세한 내용은 참고문헌으로 대체한다(Misra and

Enge, 2011).

where,

$p$ : pseudorange measurement

$\rho$ : 3D distance between receiver and satellite

$c$ : velocity of light

$\delta t_r$ : receiver clock error

$\delta t^s$ : satellite clock error

$I$ : ionosphere error

$T$ : troposphere error

$B$ : satellite signal bias error

$M$ : multipath error

$\epsilon$ : random error

### 2.2 측위 모델

본 연구의 측위에 사용한 위성군은 GPS, Galileo, QZSS이다. 이에 따른 미지수는 수신기의 위치 ( $x_r, y_r, z_r$ )와 수신기 시계오차인  $\delta t_r$ , 그리고 GPS와 Galileo 시스템 간에 존재하는 시계오차인  $\delta t_r^{GPS/GAL}$ 과 GPS와 QZSS 시스템 간에 존재하는 시계오차인  $\delta t_r^{GPS/QZS}$ 가 있다. 이에 따른 추정 대상인 상태벡터  $x$ 는 Eq. (2)과 같다.

$$x = [x_r, y_r, z_r, \delta t_r, \delta t_r^{GPS/GAL}, \delta t_r^{GPS/QZS}]^T \quad (2)$$

$x$ 는 최소제곱법을 사용하여 Eq.(3)와 같이 구할 수 있다.

$$x = (H^T W H)^{-1} H^T W y \quad (3)$$

이때,  $W$ 는 가중치 행렬로써, 관측값의 신뢰도가 높을 때 가중치를 높게 설정하고, 반대로 관측값의 신뢰도가 낮을 때 가중치를 낮게 설정할 수 있다. Tay and Marais(2013)은 고도 각과 위성의 SNR (Signal to Noise Ratio)을 이용한 모델을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 위성의 고도각에 비례하는 가중치 행렬을 사용하였다.  $H$ 는 시스템 행렬로써 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 미지수 각각에 대해 관측방정식을 편미분한 것이다.

$$H = \left[ \frac{\partial p}{\partial x_r}, \frac{\partial p}{\partial y_r}, \frac{\partial p}{\partial z_r}, \frac{\partial p}{\partial t_r}, \frac{\partial p}{\partial t_r^{GPS/GAL}}, \frac{\partial p}{\partial t_r^{GPS/QZS}} \right] \quad (4)$$

이때,  $H$ 의 행의 크기는 측위에 사용되는 위성의 개수에 따라 달라진다.  $H$ 의 4~6열은 시계오차를 계산하는 부분이다. 4열은 GPS 수신기 시계오차, 5열은 GPS와 Galileo의 시스템

간에 존재하는 시계오차, 6월은 GPS와 QZSS의 시스템 간에 존재하는 시계오차 부분을 나타낸다.

### 3. Centimeter Level Augmentation Service

CLAS는 센티미터 수준의 정확도를 구할 수 있는 보정서비스로써, RTCM STANDARD 10403.2 Section 3.5.12 “State Space Messages”에 기술된 방법을 사용한다(Japan Cabinet Office, 2020). CLAS는 현재 GPS, Galileo 그리고 QZSS 시스템에 대한 보정정보를 제공하고 있다. CLAS 메시지를 전송하는 L6 밴드의 주파수는 1278.75 MHz이며, 1초당 전송하는 메시지가 많은 편이다. 이러한 이유로 넓은 지역을 대상으로 하는 다중 위성항법 기반의 PPP-RTK 서비스를 진행할 때 CLAS에서 제공하는 C-SSR의 bps가 RTCM SSR 대비 약 72.3% 감소하여 데이터 전송 측면에서 매우 효율적이다(Hirokawa *et al.*, 2016).

CLAS는 1초 동안 2,000 bit를 전송하며, 49 bit의 헤더 부분, 1,695 bit의 데이터 부분 그리고 256 bit의 Reed Solomon Code 부분으로 구성되어 있다. 본 연구에서는, MATLAB을 이용하여 CLAS 메시지를 디코딩하는 프로그램을 독자적으로 구현하여 C-SSR 보정정보를 추출한 뒤 Code-PPP에 사용하였으며 디코딩을 하는 방법은 참고문헌으로 대체한다(Japan Cabinet Office, 2020).

#### 3.1 CLAS 격자점

C-SSR 중에서 대기와 관련된 보정정보는 CLAS의 네트워크와 네트워크에 속한 격자점을 바탕으로 제공한다. CLAS 네트워크는 총 19개이고, 각각의 네트워크는 최소 1개에서 최대 32개의 격자점을 가진다. CLAS 격자점은 총 231개이다.

현재, 1~12번 네트워크에 속한 총 212개의 격자점은 대기에 관련된 보정정보인 전리층과 대류권 보정정보를 사용할 수 있다. 반면, 13~19번 네트워크는 격자점이 총 19개이고, 해당 격자점에서의 대기에 관련된 보정정보를 사용할 수 없다. Fig. 1에서 대기와 관련된 보정정보를 사용할 수 있는 격자점은 파란 동그라미로 표시하였고, 불가능한 격자점은 빨간색 세모로 표시하였다.

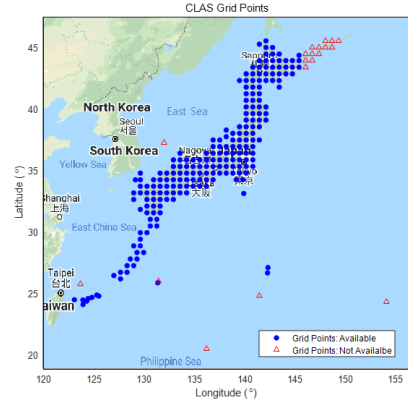


Fig. 1. CLAS grid points

CLAS 네트워크 중에서 1~13번 네트워크는 2개 이상의 격자점으로 구성되어 있고, 나머지 14~19번 네트워크는 단 하나의 격자점으로 구성되어 있다.

#### 3.2 위성 궤도 보정

위성 항법 시스템에서 위성의 위치를 방송궤도력으로 구하면 Radial, Along-track, Cross-track은 각각 0.15 m, 0.71 m, 0.34 m 수준의 오차를 나타내는 것으로 알려져 있다(Caporali and Nicolini, 2017). CLAS의 C-SSR은 방송궤도력의 오차를 보정하기 위해 위성별  $\delta O_{radial}$  (delta Radial),  $\delta O_{along}$  (delta Along Track),  $\delta O_{cross}$  (delta Cross Track) 그리고 IODE (Issue Of Data Ephemeris)를 제공한다.

C-SSR의 위성 궤도 보정정보를 사용하기 위하여 C-SSR과 방송궤도력의 IODE가 일치하는 시점의 보정정보를 획득한다. 그다음 Eq. (5)과 같이 위성의 위치인  $r(t)$ 와 속도인  $\dot{r}(t)$ 를 이용하여 위성의 Radial, Along track, Cross track의 단위 벡터인  $e_{radial}$ ,  $e_{along}$ ,  $e_{cross}$ 를 구한다.

$$e_{along} = \frac{\dot{r}(t)}{|\dot{r}(t)|}, \quad e_{cross} = \frac{r(t) \times \dot{r}(t)}{|r(t) \times \dot{r}(t)|}, \quad e_{radial} = e_{along}(t) \times e_{cross}(t) \quad (5)$$

그리고 Eq. (6)과 같이 C-SSR 보정정보에서 제공하는 위성의  $\delta O_{radial}$ ,  $\delta O_{along}$ ,  $\delta O_{cross}$  과 앞서 구한 단위 벡터를 이용하여 위성의 궤도 보정 값인  $\delta X$ 를 구한다.

$$\delta X = [e_{radial} \quad e_{along} \quad e_{cross}] \begin{bmatrix} \delta O_{radial} \\ \delta O_{along} \\ \delta O_{cross} \end{bmatrix} \quad (6)$$

마지막으로 Eq. (7)과 같이 위성 위치  $(x^s, y^s, z^s)$ 에서  $\delta X$ 를 빼는 것으로 위성의 궤도에 대한 오차를 보정한다.



$$X_{orbit} = (x^s, y^s, z^s) - \delta X^T \quad (7)$$

### 3.3 위성 시계 보정

위성 시계 오차는 위성항법시스템에서 동기 시각에 따라 발생하는 오차로써 방송궤도력을 통하여 구할 수 있으며, C-SSR은 방송궤도력으로 구한 위성 시계 오차를 보정하는 파라미터를 제공한다.

C-SSR의 위성 시계에 관한 보정정보인  $\delta C$ 를 Eq. (8)에 대입하여 위성 시계 오차를 보정한다. 여기서  $\delta t_{brdc}^s$ 는 방송궤도력으로 모델링하여 구한 위성의 시계 오차이고,  $\delta t^s$ 은 보정된 위성 시계 오차이며,  $C$ 는 빛의 속도이며 상수로 정의된다.

$$\delta t^s = \delta t_{brdc}^s - \frac{\delta C}{C} \quad (8)$$

### 3.4 위성 바이어스 보정

위성 신호가 전달되는 과정에서 위성 시계 동기화에 의한 바이어스, 위성 하드웨어 및 신호의 지연 현상 등의 이유로 위성 신호의 바이어스가 발생하게 된다. C-SSR은 이러한 바이어스를 보정하기 위해 코드 관측치와 위상 관측치의 바이어스에 대한 보정정보를 제공한다.

C-SSR 바이어스 보정정보는 CLAS 네트워크에 따라 위성 별로 제공되며, Eq. (9)를 통해 바이어스 보정정보를 구한다.

$$B_k^i = B^i + \delta B_k^i \quad (9)$$

여기서  $B^i$ 는  $i$ 번째 PRN위성의 코드나 위상의 바이어스를 나타내며 CLAS 네트워크 전역에 대해 모두 같은 값을 갖는다.  $\delta B_k^i$ 는  $k$ 번째 네트워크에서  $i$ 번째 PRN위성의 바이어스 변화량을 나타낸다. 최종적으로  $B$ 와  $\delta B_k^i$ 를 더해서  $k$ 번째 네트워크에서  $i$ 번째 PRN위성의 코드 혹은 위상 바이어스 보정 값인  $B_k^i$ 를 구할 수 있다. 이때 네트워크와 보정정보 수신 시간에 의하여 발생하는 오차 불연속성은 시간에 따른 바이어스 오차 보정량 LoS (Line-of-Sight)과 수신기

와 위성 간의 시선벡터를 이용하여 보정한다 (Japan Cabinet Office, 2020).

### 3.5 전리층 보정

위성 신호는 전리층에서 자유 전자 간의 간섭 현상에 의해서 오차가 발생하며 코드 측정치에서는 지연, 반송파 위상 측정치에서는 앞서서 형태로 발생한다.

C-SSR은 전리층 오차를 보정하기 위해 STEC 보정 타입에 따라 네트워크별 STEC 보정정보 파라미터인  $C_{00}, C_{01}, C_{10}, C_{11}$ 를 제공하며 Table 1은 STEC 보정 타입별 STEC 보정정보 파라미터를 이용하여 STEC을 구하는 수식을 나열한 것이다. 이때  $\delta STEC$ 은 각 격자점에서 특정 위성의 STEC 변화량 파라미터이며,  $\phi, \lambda$ 는 각각 사용자 위치의 대략적인 위도와 경도를 나타낸다.  $\phi_0, \lambda_0$ 는 특정 네트워크의 기준격자점으로, 그 네트워크의 첫 번째 격자점의 위도와 경도를 나타낸다.

STEC을 사용자 위치에 적용하기 위해 사용자 위치 주변의 격자점 3곳 혹은 4곳을 선별하고 각 격자점의 STEC을 구한 뒤 쌍일차 근사법(Bi-Linear method) 등의 보간법을 이용하여 사용자 위치의 STEC을 구한다. 마지막으로 코드의 사거리의 전리층 지연 효과를 고려한 Eq. (10)으로 전리층 지연 오차를 구할 수 있으며, 여기서  $f_{GNSS}$ 는 GNSS 위성군 신호의 주파수이다.

$$I = \frac{40.3}{f_{GNSS}^2} STEC \quad (10)$$

### 3.6 대류권 보정

CLAS에서 대류권 오차는, 추정하는 방법으로 구하지 않고 격자 보정정보를 통해 제공하는 격자점에서 천정방향의 건조지연량과 습윤지연량을 이용해서 구한다. 이때 격자점마다 위도와 경도가 정해져 있으며 고도는 0 m로 고정되어 있다.

격자점의  $T$ (Zenith Total Delay)는 Eq. (11)로 구할 수 있으

Table 1. Equations to obtain STEC correction by STEC correction Type

STEC Correction Type	STEC Correction
0	$STEC = C_{00} + \delta STEC$
1	$STEC = C_{00} + C_{01}(\phi - \phi_0) + C_{10}(\lambda - \lambda_0) + \delta STEC$
2	$STEC = C_{00} + C_{01}(\phi - \phi_0) + C_{10}(\lambda - \lambda_0) + C_{11}(\phi - \phi_0)(\lambda - \lambda_0) + \delta STEC$
3	Reserved

며, 여기서 더해지는  $T_{hs}$ ,  $T_{wet}$  는 각각 수식 Eq.(12)과 Eq.(13)로 구한다.

$$T = T_{hs} + T_{wet} \tag{11}$$

$$T_{hs} = \Delta T_{hs} + \delta_{hs0} \tag{12}$$

$$T_{wet} = \Delta T_{wet} + \delta_{wet0} \tag{13}$$

여기서  $\Delta T_{hs}$ ,  $\Delta T_{wet}$ 는 각각 C-SSR의 대류권 건조지연량과 습윤지연량을 나타내고  $\delta_{hs0}$ ,  $\delta_{wet0}$ 는 각각 2.3 m, 0.252 m로 정의된다.

### 4. 다중 위성항법 기반의 Code-PPP

#### 4.1 정지 측위

정지측위의 대상 지역은 IGS 사이트 중 한 곳인 TSK2 (Tsukuba)로 선택했다. TSK2는 주변에 건물이나 높은 산이 없고 5m 철탑(monument) 위에 안테나가 설치되어 있으므로 가시 환경이 매우 우수한 편이다. TSK2는 Trimble NetR9 수신기와 TRM59800.00+NONE 안테나를 사용한다. TSK2는 Fig. 2와 같이 CLAS 7번째 네트워크의 17, 18, 20, 21번째 격자점에 둘러싸여 있다.

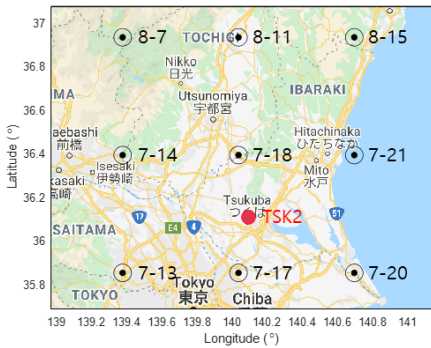


Fig. 2. TSK2 location (red) and CLAS grid points (black)

Code-PPP의 성능을 테스트하기 위해서 임의로 선택한 4개의 데이터셋은 2020년 4월 8일(DOY 099) A시간(00:00:00~00:59:59), J시간(09:00:00~09:59:59) 그리고 2020년 5월 29일(DOY 150) M시간(12:00:00~12:59:59), S시간(18:00:00~18:59:59)이고 각각 DS#1~4로 명명하였다. 여기서 DS는 데이터셋(Data Set)을 의미한다. 데이터셋은 모두 1초 간격으로 기록한 1시간 동안의 데이터이다. 관측데이터의 경우 IGS 상시관측소의 관측데이터 등을 제공하는 CDDIS

(Crustal Dynamics Data Information System)를 통하여 취득하였다. CDDIS에서는 1초 간격의 데이터의 경우 GPS 정밀 규격인 하타나카(Hatanaka) 형태의 데이터를 15분 단위로 제공한다. 본 연구에서는 4개의 하타나카 데이터를 통합하여 1초 간격으로 기록한 1시간 동안의 관측데이터를 구성하였다. 이렇게 구성된 TSK2의 관측데이터에는 GPS, GLONASS (GLObal Navigation Satellite System), Galileo, QZSS 위성군에 대한 관측치가 기록되어 있다. 이 관측데이터 중에서 GPS 단독의 경우와 GPS, Galileo, QZSS를 통합한 경우를 선별하여 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 다중 위성항법 기반의 Code-PPP의 성능을 분석하기 위해서 4개의 데이터셋의 GPS 단독의 SPP, GPS 단독의 PPP, 그리고 다중 위성항법의 PPP로 구분하여 연구를 진행했으며 각각의 알고리즘에 사용된 오차 모델은 Table 2에 정리했다. PPP의 경우 가시 위성 중에서 C-SSR 보정정보가 없거나 사용 불가능한 정보가 들어있는 위성의 경우, 해당하는 위성은 제외하고 사용할 수 있는 위성만 선택하여 측위를 진행하였다.

그리고 연구 결과를 Table 3와 Fig. 3에 나타냈다. Table 3에서 GPS 단독의 SPP는 SPP(G), GPS 단독의 Code-PPP는 PPP(G), GPS, Galileo, QZSS를 통합한 다중 위성항법 기반의 Code-PPP는 PPP(GEJ)로 표현하여 각 측위 모드별 평균 제공근오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 나타냈다. Fig. 3(a)는 DS#1(DOY099A), Fig. 3(b)는 DS#2(DOY099J), Fig. 3(c)는 DS#3(DOY150M), 그리고, Fig. 3(d)는 DS#4(DOY150S)의 수평 오차를 각각 그린 것이다.

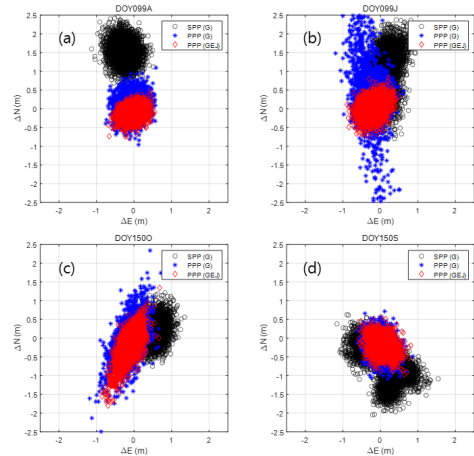


Fig. 3. Horizontal accuracy according to static positioning mode in TSK2. (a) is the result of DS#1(DOY099A), (b) is the result of the DS#2(DOY099J), (c) is the result of the DS#3(DOY150M) and (d) is the result of DS#4(DOY150S)

Table 2. GNSS error consideration method according to positioning mode

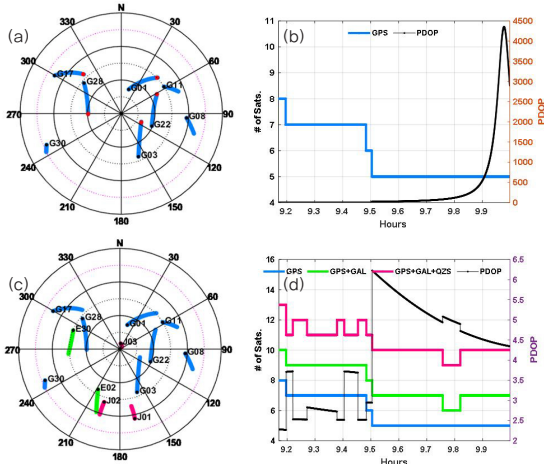
GNSS Error Consideration	SPP	PPP
Satellite clock error	· Broadcast ephemeris · Signal transmission time	· C-SSR clock correction with SPP
Satellite orbit error	· Broadcast ephemeris · Earth rotation effect	· C-SSR orbit correction with SPP
Satellite bias error	· $T_{gd}$ (by Broadcast)	· C-SSR bias correction instead of SPP
Troposphere error	· Saastamoinen Model (Saastamoinen, 1973)	· C-SSR troposphere correction instead of SPP
Ionosphere error	· Klobuchar Model (Klobuchar, 1996)	· C-SSR ionosphere correction instead of SPP
Relativity effect	· Broadcast ephemeris	· same as SPP
Elevation cutoff angle	· $15^\circ$	· same as SPP

Table 3. RMS errors according to positioning mode in static positioning

DS	Test date	RMSE according to positioning mode					
		SPP (G)		PPP (G)		PPP (GEJ)	
		H (m)	V (m)	H (m)	V (m)	H (m)	V (m)
#1	DOY 099A (00:00:00~00:59:59)	1.60	1.16	0.34	0.77	0.29	0.49
#2	DOY 099J (09:00:00~09:59:59)	1.86	2.55	1.36	3.53	0.36	0.71
#3	DOY 150M (12:00:00~12:59:59)	1.03	1.61	0.42	0.57	0.40	0.48
#4	DOY 150S (18:00:00~18:59:59)	1.46	4.17	0.40	0.76	0.35	0.60
Average		1.49	2.37	0.63	1.41	0.35	0.57

Table 3을 보면, 전체적으로 SPP에 비해 PPP의 성능이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 수평방향 정확도의 경우 SPP(G)는 1.03~1.86 m 수준으로 나타나고, PPP는 DS#2의 PPP(G)를 제외하면 모두 1 m 미만으로 나타난다. 수직방향 정확도의 경우, SPP(G)는 1.16~4.17 m 수준으로 나타나고, PPP는 DS#2의 PPP(G)를 제외하면 모두 1 m 미만으로 나타난다. PPP(GEJ)의 경우 수평방향 정확도의 평균은 0.35 m, 수직방향 정확도의 평균은 0.57 m이고, 이는 SPP(G) 대비 수평과 수직방향으로 각각 1.14 m, 1.8 m 정확도가 상승한 결과이다. 모든 데이터셋의 결과들에 대해 PPP(GEJ)의 정확도가 가장 높았다. 각각의 데이터셋의 수평방향 정확도를 그림으로 표현한 Fig. 3에서 SPP(G)는 검은색, PPP(G)는 파란색, 그리고, PPP(GEJ)는 빨간색으로 표현하였다. Figs. 3(a),(b),(c)의 경우 참값 대비 SPP(G)에서 수평방향의 바이어스 오차가

발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 3(d)에서 SPP(G)는 바이어스 오차 외에도 잡음 오차의 성분이 많아서 산포도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그에 반해, PPP(G) 혹은 PPP(GEJ)를 사용할 경우 위성마다 오차를 개별적으로 보정해주기 때문에 바이어스나 잡음 요소가 많이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 3의 모든 데이터셋에 대해 PPP(GEJ)의 정확도와 정밀도가 가장 우수하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 그런데, Fig. 3(b)를 보면 PPP(G)의 수평방향 오차가 N-S 방향으로 길게 퍼지는 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상을 분석하기 위해서 DS#2의 위성 스카이플롯(Sky-plot)과 위성 개수 및 PDOP (Position Dilution Of Precision)를 Fig. 4에 나타내었다.

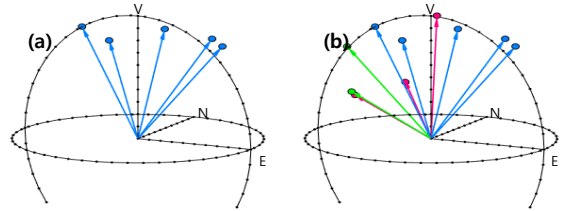


**Fig. 4. Sky-plot, number of satellites and PDOP of DS#2. (a) and (c) are sky-plot. (b) and (d) show the number of satellite and PDOP over time**

먼저, Figs.4(a) and (c)는 각각 DS#2의 PPP(G), PPP(GEJ)에서 측위에 사용된 위성의 스카이플롯을 나타낸 것이다. 그리고, Figs. 4(b) and (d)는 각각 DS#2에서 측위에 사용된 위성의 개수와 PDOP를 시간에 따라 나타낸 것이다. Figs. 4(b) and (d)에서 왼쪽 Y-축은 위성의 개수를 나타내고, 오른쪽 Y-축은 PDOP 수치를 나타낸다. Fig. 4에서 GPS 위성군은 하늘색으로 표현하고, Galileo 위성군은 초록색으로 표현하였으며, QZSS 위성군은 마젠타색으로 표현하였다.

먼저, Fig. 4(a)를 보면 DS#2의 PPP(G)에 사용된 위성의 현황을 파악할 수 있다. 여기서, 검은색 점은 해당 위성이 최초로 측위에 사용된 시점의 위치를 표현한 것이다. Fig. 4(a)를 통해 1시간 동안 측위에 사용된 GPS 위성은 총 8개임을 알 수 있다. Fig. 4(b)를 통해 측위가 시작된 9시 부근에서 위성의 개수는 8개로 최대 수치를 나타냈으며, 시간이 흐름에 따라 위성의 고도각이 낮아지거나 보정정보 부재 등의 이유로 위성의 개수가 4개로 감소한다. 위성의 개수가 5개가 되는 약 9.5시부터 PDOP가 서서히 증가하더니 9.96시 부근에서는 PDOP가 최대 약 4365까지 증가한다. 이때 PDOP가 최고점인 지점을 Fig. 4(a)에서 빨간색 점으로 나타냈으며, 이때 사용 중인 위성은 G1, G3, G17, G22, G28이다. Fig. 4(b)에서 PDOP가 3.5 이하로 안정적인 구간은 676 에포크(epoch)이다. 이에 해당하는 PPP(G)의 결과를 별도로 추출하여 사용자 중심의 평균계급 근오차를 구한 결과 수평은 0.46 m, 수직은 0.58 m로 나타났다. 이는 Table 3의 다른 데이터셋의 결과와 유사한 수치이다. Fig. 5는 PDOP가 최고인 2908 에포크에서 TSK2를 중심으로

위성의 3차원 위치를 그린 것이다. 이때 표현된 모든 벡터를 단위벡터로 변환하여 표현하였다.



**Fig. 5. 3-D placement of satellites in the PDOP peak (2908 epoch). (a): GPS only, (b): GPS, Galileo, QZSS**

Fig. 5(a)를 보면 PPP(G)에서 위성들은 사용자 위치에서 수직인 상공에 집중적으로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이때, 5개의 위성은 고도각 41~70° 사이에 존재한다. Fig. 5(b)는 같은 에포크에서 PPP(GEJ)의 위성 배치를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에는 없던 방위각 180~270° 상공에 Galileo와 QZSS 위성들이 추가로 배치되었으며, 전체적인 배치가 Fig. 5(a)에 비해 위성들이 수직 부근에 몰리지 않고 널리 분포하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 5(a)는 위성이 천정 주변에 좁게 분포하여 PDOP가 급증하고, Fig. 5(b)는 보다 넓은 분포로 인해 PDOP가 다소 낮게 나타난다. Kim *et al* (2020)은 위성들의 기하적 배치 때문에 만들어지는 도형의 부피가 0에 가까워질 때, PDOP가 급격히 상승하고 이로 인해 측위 성능이 떨어지는 것에 관해서 연구한 바 있다. DS#2에서, PPP(G)의 경우 주변 환경이나 보정정보 이상 등의 문제로 가시 위성의 개수가 줄어들었고 PDOP가 나빠졌다. 결국, 측위의 오차가 수미터까지 발생하게 되었다. 그러나, PPP(GEJ)의 경우 PPP(G)의 PDOP가 가장 낮은 2908 에포크인 약 9.96 시간에 2기의 Galileo 위성과 3기의 QZSS 위성이 추가되면서 총 가시 위성의 개수는 10개, PDOP는 약 15로 나타났다. 비록, PDOP가 다소 높게 나왔지만, 이전의 4000 이상으로 급증하는 것에 비해 안정적인 수치로 파악할 수 있다.

**4.2 이동 측위**

다중 위성항법 기반 Code-PPP의 이동측위 성능을 테스트하기 위해서 일본 가와니시시의 이나강 근처를 주행하며 RINEX 관측데이터와 VRS 관측치를 획득하였다. 그리고 후처리 C-SSR과 RINEX 관측데이터를 이용하여 다중 위성항법 기반의 Code-PPP를 구현하였다. 테스트를 위한 GPS 안테나는 Septentrio의 PolaNT-x를 사용하고, 안테나 분배기를 이용해서 Septentrio의 AsteRx SB 수신기와 Ublox의 F9P 수신



기 두 대를 통해 동시에 GPS 신호를 취득하였다. AsteRx SB로는 VRS로 측위한 NMEA를 수신하고, F9P로는 RINEX 관측데이터를 수신하였다.

테스트는 2020년 3월 4일(DOY064)에 진행했으며, 약 01:50~03:20 (UT), 4726 epochs 동안 데이터를 수신했다. CLAS 네트워크 6번의 6번 격자점과 인접한 가와니시시의 이나강 근처에서 출발하여 반시계방향으로 주행하고 출발지점으로 돌아오는 방법으로 데이터를 획득하였으며(Fig. 6), 빨간색 점이 출발점이고 파란색 점이 이동 경로 중에서 FIX인 점이다. 4726 에포크 중에서 RTK-FIX인 점은 4172 에포크(약 86.7%)였다. RTK-FIX인 에포크를 대상으로 SPP(G), PPP(G), PPP(GEJ)를 구현하였고, VRS 좌표를 기준으로 RMS 오차를 구해서 Table 4를 통해 나타냈다.



Fig. 6. Driving path of kinematic positioning

Table 4를 통해 이동측위에 대해서 각 테스트 별로 수평, 수직방향의 RMS 오차를 나타내었다. 그리고 수평방향의 오차 그래프를 Fig. 7을 통해 나타냈다.

SPP(G)는 수평방향으로 3 m 이상의 오차가 발생하였고, PPP(G)나 PPP(GEJ)는 1 m 내외의 오차를 나타내었다. 이는 최소 2 m 이상 개선된 수치이다. 수직 오차의 경우 PPP(GEJ)는 SPP(G)에 비해 정확도가 약 3.24 m 개선되었다. 하지만 PPP(G)는 5.98 m, PPP(GEJ)는 3.56 m로 수평 정확도에 비해 다소 오차가 크게 나타났다. 이동측위의 수평방향 오차를

나타낸 Fig. 6를 통해 SPP(G)에서 5 m의 바이어스가 존재하고, 6 m 이상의 산발적인 오차들이 나타나는 것을 확인할 수 있다. PPP(G)의 경우 북쪽 방향에 분포하는 바이어스가 사라지는 현상이 두드러지게 나타난다. 이는 정지측위와 마찬가지로, PPP는 오차 요소를 구분하여 보정하기 때문에 SPP(G)에 비해 바이어스와 잡음 요소가 줄어든 것이다. 하지만 PPP(G)에는 여전히 산발적으로 오차가 나타나며, 크기는 북쪽으로 6 m까지 오차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. PPP(GEJ)는 바이어스나 오차가 충분히 제거되어 정확하고 가장 정밀한 모습을 보이며, 평균 RMS 오차는 약 82 cm이다.

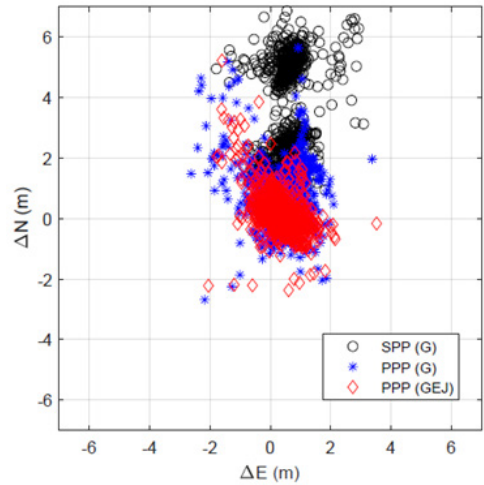


Fig. 7. Horizontal Errors in kinematic positioning

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 위성의 코드의사거리 관측치와 CLAS 메시지를 취득하고, C-SSR 보정정보를 적용하여 다중 위성항법 기반의 Code-PPP를 구현했다. 그리고 그것의 성능과 효율성을 평가하기 위해서 정지측위와 이동측위에 대한 연구와 GPS 단독 측위 및 다중 항법 위성을 사용할 때의 정확도를 비교하였다. 그 결과, 정지 측위에서 PPP(GEJ)의 경우 평균 0.35m 정확도를 확보하였다. 또한, PPP(G)에 비해 많은 가시

Table 4. RMS errors according to positioning mode in kinematic positioning

	RMSE according to positioning mode					
	SPP (G)		PPP (G)		PPP (GEJ)	
Error Direction	H (m)	V (m)	H (m)	V (m)	H (m)	V (m)
RMS	3.59	6.80	1.20	5.98	0.82	3.56

위성 개수를 확보하여 안정적인 PDOP와 측위 정확도를 확보할 수 있었다. 그리고 이동 측위에서 PPP(GEJ)를 이용하여 82 cm 수준의 수평 정확도를 확보하였으며, 이는 SPP(G)에 비해 약 2.7 m 개선된 수치이다.

C-SSR을 이용한 다중 위성항법 기반의 Code-PPP의 경우 정지 측위와 이동 측위에서 수평방향으로 1 m 이내의 정확도를 확보할 수 있었다. 향후 단방향 통신과 서버미터 수준의 수평 정확도를 요구하는 스마트폰의 위치 기반 서비스, 내비게이션, 재난-재해 등과 같은 분야에서 안정적이고 정확한 측위를 수행하는 방법의 하나가 될 것으로 기대된다.

추후 반송파 위상 관측치와 Compact SSR을 이용한 PPP-RTK를 구현하고 다양한 CLAS 네트워크 내부의 실험 등을 거쳐 더 정확하고 강건한 측위 모델을 개발할 예정이며, 이로 인해 민간의 편의와 안정 등에 이바지하길 기대한다.

### 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016R1D1A1B01009872, N0002428, 2020년 산업전문인력 양성사업)

### References

Aleks, B. (2017), *How Accurate is Your Drone Survey? Everything You Need to Know*, Geo awesomeness, July 4, 2017.

Caporali, A. and Nicolini, L. (2017), Comparison between broadcast and precise orbits: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou, *EUREF Analysis Centres Workshop*, Brussels, Belgium, 2017.

Choy, S., Harima, K., Li, Y., Choudhury, M., Rizos, C., Wakabayashi, Y. and Kogure, S. (2015), GPS Precise Point Positioning with the Japanese Quasi-Zenith Satellite System LEX Augmentation Corrections, *Journal of Navigation*, Vol. 68, No. 4, pp. 769-783. doi:10.1017/S0373463314000915.

GSA. (2019), *Report on road user needs and requirements: outcome of the European GNSS' user consultation platform*, GSA-MKD-RD-UREQ-250283 Issue/Revision: 2.0, January 7, 2019, pp. 10.

Hao, M. and Noguchi, N. (2019), Navigation of a robot tractor using the centimeter level augmentation information via Quasi-Zenith Satellite System, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, Elsevier, October 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 414-449.

Hirokawa, R., Sato, Y., Fujita, S., and Miya, M. (2016), Compact SSR Messages with Integrity Information for Satellite based PPP-RTK Service, *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*, Portland, Oregon, September 2016, pp. 3372-3376. <https://doi.org/10.33012/2016.14794>.

Japan Cabinet Office. (2020), *Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service(IS-QZSS-L6-003)*, August, 2020.

Kim, M.S. and Park, K.D. (2017), Development and positioning accuracy assessment of single-frequency precise point positioning algorithms by combining GPS code-pseudorange measurements with real-time SSR corrections, *Sensors (Basel)*, 2017 Jun; Vol. 17, No. 6 : 1347. Published online 2017 Jun 9. doi: 10.3390/s17061347.

Kim, Y.G., Park, K.D., Kim, M.S., Yoo, C.S., Bae, J.S. and Kim, J.O. (2020), Analysis on GPS PDOP peaks in signal-blockage simulations, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*. 2020. Jun, Vol. 9, No. 2, pp. 79-88, DOI : <http://dx.doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.2.79> (In Korean with English abstract).

Klobuchar, J.A. (1996), Ionospheric Effects of GPS, B. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., eds., *Global Positioning System: Theory And Applications*, Volume 1, Chapter 12. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington D.C., USA.

Merry, K. and Bettinger, P. (2019), Smartphone GPS accuracy study in an urban environment, *PLoS ONE*, Vol. 14, No. 7 : e0219890, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219890>, July 18, 2019.

Miya, M., Fujita, S., Sato, Y., Ota, K., Hirokawa, R. and Takiguchi, J. (2016), "Centimeter Level Augmentation Service (CLAS), in Japanese quasi-zenith satellite system, its user interface, detailed design, and plan," *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*,

- Portland, Oregon, September 2016, pp. 2864-2869, <https://doi.org/10.33012/2016.14644>.
- Misra, P. and Enge, P. (2011), *Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance*, Revised Second Edition, Ganga-Jamuna Press.
- Saastamoinen, J. (1973), Contribution to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Geodesique*, 107, pp.13-34, <https://doi.org/10.1007/BF02522083>
- Satirapod, C., Rizos, C., and Wang, J. (2001), GPS single point positioning with SA OFF: How accurate can we get?, *Survey Review*, July 19, 2013, Vol. 36, No. 282, pp. 255-262, <https://doi.org/10.1179/sre.2001.36.282.255>.
- Seepersad, G. and Bisnath, S. (2014), Challenges in assessing PPP performance, *J. Appl. Geod.* Vol. 8, No. 3, pp. 205–222.
- Tay, S. and Marais, J. (2013), Weighting models for GPS pseudorange observations for land transportation in urban canyons, *6th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing*, December 2013, Munich, Germany.
- Wubbena, G., Bagge, A. and Schmitz, M. (2001), Network-based techniques for RTK applications, *Proceedings the GPSJIN 2001 Symposium, GPS Society, Japan Institute of Navigation*, Tokyo, Japan, pp. 53-65.
- Wubbena, G., Schmits, M. and Bagge, A. (2005), PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK Network, *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute Of Navigation, ION GNSS 2005*, Long Beach, California, pp. 2584-2594.
- Zumberge, J., Heflin, M., B., Jefferson, D., C., Watkins, M., M. and Webb, F., H. (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B3, pp. 5005–5017.