

Performance Expectation of Single Station PPP-RTK using Dual-frequency GPS Measurement in Korea

Junho Ong¹, Sul Gee Park¹, Sang Hyun Park¹, Chansik Park^{2*}

¹Maritime PNT Research Office, Daejeon 34103, Korea

²Dept. of Intelligent Systems & Robotics/ Research Institute for Computer and Information Communication, Chungbuk National University, Cheongju 362-763, Korea

ABSTRACT

Precise Point Positioning-Real Time Kinematic (PPP-RTK) is an improved PPP method that provides the user receiver with satellite code and phase bias correction information in addition to the satellite orbit and clock, thus enabling single-receiver ambiguity resolution. Single station PPP-RTK concept is special case of PPP-RTK in that corrections are computed, instead of a network, by only one single GNSS receiver. This study is performed to experimentally verify the positioning accuracy performance of single baseline RTK level by a user who utilizes correction for a single station PPP-RTK using dual frequencies. As an experimental result, the horizontal and vertical 95% accuracy was 2.2 cm, 4.4 cm, respectively, which verify the same performance as the single baseline RTK.

Keywords: GNSS, single station PPP-RTK, integer ambiguity resolution, estimable parameter

1. INTRODUCTION

전지구 위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 기반의 고정밀 항법에 대한 수요는 최근 자율 운항 선박, 자율주행 차량 등을 개발하기 위한 연구와 군집 드론 산업의 시장 증가로 늘어나고 있는 추세이다. 실시간 고정밀 위치를 구하기 위해 GNSS에 보정 정보를 이용하는 Real Time Kinematic (RTK) 기법과 Precise Point Positioning (PPP) 기법이 대표적으로 사용되고 있다 (Teunissen & Montenbruck 2017). 실시간으로 센티미터 수준의 측위 정확도를 보장하는 대표적인 측위 기법인 RTK 기술은 기준국과 사용자 간의 이중차분 측정치를 통해 공통 오차 요인을 제거하여 수평 2 cm, 수직 5 cm 수준의 항법이 가능하다 (Retscher 2002). 하지만 전리층과 대류권 지연의 공간 이격 특성으로 기준국과 사용자의 기선거리가 멀어질수록 오차가

증가하여 센티미터급 정확도를 보장하기 위해서는 사용자는 기준국 반경 20 km 이내에 위치해야 한다. 이러한 RTK의 단점을 극복하기 위한 기술로 제안된 PPP는 별도의 기준국에서 보정정보를 제공받지 않고 전세계 Continuously Operating Reference Station (CORS) 망에서 계산하여 제공하는 GNSS 위성 시계나 궤도 보정정보만을 이용하여 정밀한 위치를 구한다. PPP는 기준국과의 기선거리와 비종속이며, 10 cm 이내의 정확도를 가지는 장점이 있지만, 보정정보에 포함되지 않은 전리층, 대류권 오차, 다중경로 및 위성의 배치 등에 의한 바이어스를 추정하므로, 일반적으로 15~30분 정도의 긴 수렴시간이 요구되는 단점이 있다. RTK의 짧은 기선거리와 PPP의 긴 수렴시간이라는 단점을 극복한 PPP-RTK는 CORS 망에서 계산한 전리층, 대류권 지연 보정정보를 추가로 제공하여 수렴시간을 단축시키고, 단일 수신기의 미지정수 결정 성능을 높여 기선이 긴 경우에도 정밀한 위치를 계산할 수 있는 방법이다 (Heroux & Kouda 1995, Zumberge et al. 1997, Wubben et al. 2005, Teunissen et al. 2010). PPP와 PPP-RTK에서는 State Space Representation (SSR) 형식으로 양방향 통신이 아닌 단방향 통신으로 보정정보를 전송하므로 서비스 영역내의 모든 사용자가 보정정보를 이용할 수 있는 장점을 추가로 가진다.

RTK와 PPP의 단점을 극복하는 PPP-RTK 기술은 최근 10여년간 꾸준히 기술개발 되었다 (Mervart et al. 2008, Collins 2008,

Received Jul 31, 2021 Revised Aug 11, 2021 Accepted Aug 19, 2021

*Corresponding Author

E-mail: chansp@cnu.ac.kr

Tel: +82-43-261-3259 Fax: +82-43-268-2386

Junho Ong <https://orcid.org/0000-0003-1338-160X>

Sul Gee Park <https://orcid.org/0000-0002-8620-8413>

Sang Hyun Park <https://orcid.org/0000-0003-0113-891X>

Chansik Park <https://orcid.org/0000-0003-2650-4947>

Ge et al. 2008, Bertiger et al. 2010, Teunissen et al. 2010, Geng et al. 2012, Lannes & Prieur 2013). 그 동안 제안한 PPP-RTK 기술 중, 위성간 차분 측정치 기반의 보정정보를 생성하는 것은 Common Clock (CC), Distinct Clock (DC), Integer Recovery Clock (IRC), Decoupled SV Clock (DSC), Uncalibrated Phase Delay (UPD)/Fractional Cycle Bias (FCB) 모델들을 이용하는 것이다. 이들 기법들은 사용된 모델, 보정 정보 및 추정 방식의 차이로 구분할 수 있지만, 최종적으로는 모델 간 보정정보의 변환이 가능하며 수학적으로 동일한 성능을 제공하는 것으로 증명되었다 (Bisnath & Collins 2012, Shi 2012, Li et al. 2013, Zhang & Li 2013). 그러나 해당 기술에 대한 표준화가 미비하며, 현재 상용화된 서비스로는 측정치 기반 보정정보를 사용하는 기술인 Geo++ 사의 GNSMART와 QZSS Centimeter Level Augmentation System (CLAS)가 대표적이다 (Wabben et al. 2005, European Global Navigation Satellite Systems Agency 2019, Japan Cabinet Office 2020). 두 기술은 각각 SSRG, Compact-SSR형식으로 보정정보를 전송하며 위성궤도, 위성 시계 오차 및 코드, 위상 바이어스, 전리층 지연, 대류층 지연 보정정보를 제공한다 (Kim et al. 2020).

Khodabandeh & Teunissen (2015)은 단일 기준국 PPP-RTK 개념을 제안하였으며, 3개 이상의 주파수를 사용하여 기준국에서 위성시계 및 반송파 위상, 코드 바이어스를 추정한다. 해당 기술의 보정정보를 사용자 수신기에 적용할 경우, 기준국과 사용자 간의 이중 차분 미지정수를 포함한 측정 방정식을 획득하게 되며 전리층 지연 파라미터를 제외하고 단일기선 RTK와 동일한 측정 방정식을 보인다. 또한 단일 기준국 PPP-RTK는 기존 단일기선 RTK에 비해 적은 양의 보정정보와 각 보정정보의 고유한 전송 속도로 사용자에게 전송되어 전송 지연 상황에서 사용자 수신기의 미지정수 결정 성능을 향상시키는 것을 실험적으로 보였다 (Khodabandeh 2021).

현재까지 PPP-RTK에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지만, 대부분의 경우 기술의 방법론에 대해 초점을 맞추고 있다. 또한 단일 기준국 PPP-RTK 기법에 대한 구현과 그 위치오차에 대한 분석은 많지 않으며, 특히 국내에서는 진행되고 있지 않다. 단일 기준국 PPP-RTK의 경우 기준국이 많지 않은 국내의 해상 환경에서 정밀 측위를 위해 사용될 수 있으며, 향후 이동 기준국을 사용하여 응용이 될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 한국의 기준국 환경에서의 단일 기준국 PPP-RTK 기법에 대한 분석을 제안하였다. 2장에서는 단일 기준국 기반의 PPP-RTK 기법에 대하여 설명하였고, 3장에서는 한국의 기준국 환경에서 이중주파수를 이용한 단일 기준국에서 PPP-RTK 보정정보를 생성하였다. 그리고 생성한 보정정보를 RTK 성능을 만족시키는 20 km 이내의 기선거리 내의 사용자에게 적용하여 위치 오차를 분석하였다. 4장에서는 본 논문의 결과를 고찰하고, 향후 연구과제에 대하여 설명하였다.

2. SINGLE STATION PPP-RTK CORRECTION GENERATION

본 논문에서는 Khodabandeh & Teunissen (2015)에서 제시한

기법을 기반으로 단일 기준국 PPP-RTK 기법을 구현하고 그 성능을 확인하였다.

2.1 측정치 모델

PPP-RTK에서 사용되는 관측 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}\phi_{r,j}^{ps} &= r_r^{ps} + (\psi^{ps})^T \tau_r - \mu_j t_r^{ps} - dT^{ps} + \lambda_j (N_{r,j}^{ps} - \delta b_{r,j}^{ps}) \\ p_{r,j}^{ps} &= r_r^{ps} + (\psi^{ps})^T \tau_r + \mu_j t_r^{ps} - dT^{ps} - \delta b_{p,j}^{ps}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 하첨자 r 과 j 는 각각 수신기와 주파수를 나타낸다. 만약 수신기에 무관하거나 주파수에 무관한 경우는 빈칸으로 나타낸다. 상첨자 s 와 p 는 위성을 나타낸다. 따라서 $\phi_{u,j}^{ps} = \phi_{u,j}^s - \phi_{u,j}^p$ 와 $p_{u,j}^{ps} = p_{u,j}^s - p_{u,j}^p$ 는 수신기 u 에서 주파수 j 에 대한 위성 p 를 기준으로 단일차분된 반송파 위상과 코드 측정치를 나타내며, r_r^{ps} 는 단일차분된 위성과 수신기간 거리를 나타낸다. r_r 는 천정 대류권 지연(ZTD: Zenith Troposphere Delay), ψ^{ps} 는 대류권 사상함수(Mapping Function), t_r^{ps} 는 단일차분된 전리층 지연, $\mu_j = \lambda_j^2 / \lambda_1^2$ 는 주파수 종속 상수로 L1 주파수에 대한 비, λ_j 는 j 주파수에 대한 파장의 길이, dT^{ps} 는 단일차분된 위성시계 오차, $N_{r,j}^{ps}$ 는 단일차분된 미지정수, $\delta b_{r,j}^{ps}$ 는 단일차분된 위성의 위상 바이어스, $\delta b_{p,j}^{ps}$ 는 단일차분된 위성의 코드 바이어스를 각각 나타낸다.

식 (1)에서 수신기 시계오차는 위성간 공통이라 상쇄되었고, 안테나 위상 중심 오차, 지각 이동 오차, 위상 말뚝 오차, 상대성 오차, 대류권 지연은 사전에 모델링을 통해 적절히 제거되었다고 가정한다.

식 (1)을 기준점 r_0 에서 선형화하면 정밀궤도력으로 구한 위성의 위치와 기준점 사이의 계산된 거리 r_0^{ps} 와 대류권 지연오차의 합은 식 (2)로 나타낼 수 있다. 여기서 h^{ps} 는 단일차분된 위성과 선형화 기준점 사이의 시선벡터 (Line of Sight)를 δx_r 는 위치오차를 나타낸다.

$$r_0^{ps} + (h^{ps})^T \delta x_r + (\psi^{ps})^T \tau_r = r_0^{ps} + \left[(h^{ps})^T \quad (\psi^{ps})^T \right] \begin{bmatrix} \delta x_r \\ \tau_r \end{bmatrix} = r_0^{ps} + (g^{ps})^T \Delta x_r \quad (2)$$

여기서 대류권 지연 오차를 무시하는 응용에서는 $\Delta x_r \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 의 위치오차 벡터로, 위치를 알고 있는 기준국에서 대류권만 측정하는 응용에서는 $\Delta x_r \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 으로 처리한다. $\Delta x_r \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 인 경우는 기준국의 정확한 위치를 알고 있어 위치오차 δx_r 가 0인 경우로 $g^{ps} = \psi^{ps}$ 가 된다.

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)의 선형화된 측정치 모델을 얻는다. 여기서 $\Delta \phi_{r,j}^{ps} = \phi_{r,j}^{ps} - r_0^{ps}$ 와 $\Delta p_{r,j}^{ps} = p_{r,j}^{ps} - r_0^{ps}$ 는 선형화된 단일 차분 반송파 위상 측정치와 코드 측정치이다.

$$\begin{aligned}\Delta \phi_{r,j}^{ps} &= (g^{ps})^T \Delta x_r - \mu_j t_r^{ps} - dT^{ps} + \lambda_j (N_{r,j}^{ps} - \delta b_{r,j}^{ps}) \\ \Delta p_{r,j}^{ps} &= (g^{ps})^T \Delta x_r + \mu_j t_r^{ps} - dT^{ps} - \delta b_{p,j}^{ps}\end{aligned}\quad (3)$$

식 (3)을 이중주파수에 대한 위상 측정치로 나타내면 식 (4)가 되고, 식 (5)로 간단히 나타낼 수 있다. 식 (5)에는 식 (4)와 같은 방법으로 구한 코드 측정치도 같이 나타내었으며, 편의를 위해 $\Delta \rho_r^{ps} = (g^{ps})^T \Delta x_r$ 로 표현하였다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta\phi_{r,1}^{ps} \\ \Delta\phi_{r,2}^{ps} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (g^{ps})^T \Delta x_r \\ (g^{ps})^T \Delta x_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} t_r^{ps} - \begin{bmatrix} dT^{ps} \\ dT^{ps} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{r,1}^{ps} \\ N_{r,2}^{ps} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta b_{\phi,1}^{ps} \\ \delta b_{\phi,2}^{ps} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} (g^{ps})^T \Delta x_r - \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} t_r^{ps} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} dT^{ps} + \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{r,1}^{ps} \\ N_{r,2}^{ps} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta b_{\phi,1}^{ps} \\ \delta b_{\phi,2}^{ps} \end{bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_r^{ps} &= e\Delta\rho_r^{ps} - \mu_r^{ps} - edT^{ps} + \Lambda(N_r^{ps} - \delta b_{\phi}^{ps}) \\ \Delta p_r^{ps} &= e\Delta\rho_r^{ps} + \mu_r^{ps} - edT^{ps} - \delta b_{p,p}^{ps} \quad (5) \end{aligned}$$

2.2 단일 기준국에서 PPP-RTK 보정치 생성

이중 주파수를 사용하는 단일 기준국에서 위상, 코드 관측 방정식 식 (5)는 식 (6)으로 정리할 수 있다. 이 때, $\Delta\rho_r^{ps}$ 는 기준국의 위치를 정확히 알고 있다면 대류권 지연 오차만 남길 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi_r^{ps} &= e(\Delta\rho_r^{ps} - dT^{ps}) - \mu_r^{ps} + \Lambda(N_r^{ps} - \delta b_{\phi}^{ps}) \\ \Delta p_r^{ps} &= e(\Delta\rho_r^{ps} - dT^{ps}) + \mu_r^{ps} - \delta b_{p,p}^{ps} \quad (6) \end{aligned}$$

여기서 2f개의 측정치 ($\Delta\phi_r^{ps}$, Δp_r^{ps})에 3f개의 미지수 (N_r^{ps} , δb_{ϕ}^{ps} , $\delta b_{p,p}^{ps}$)와 3개의 미지수 ($\Delta\rho_r^{ps}$, dT^{ps} , t_r^{ps})를 가지므로 측정치에 비하여 미지수가 많은 부정(Underdetermined) 문제이다.

식 (6)에서 미지수의 개수를 줄이기 위해 S-basis 변환을 이용한다 (Teunissen 1985). 식 (7)과 같이 미지수를 치환하면 식 (8)의 변형된 측정치를 얻는다. 이 치환에 따라 미지수가 2f+2개로 줄어들지만 여전히 2개의 rank가 부족하다. 또한 정수 영역의 $N_r^{ps} \in \mathbf{R}$ 가 실수영역의 $a_r^{ps} \in \mathbf{R}$ 로 바뀐다.

$$\rho_r^{ps} \equiv \Delta\rho_r^{ps} - dT^{ps}, \quad a_r^{ps} = N_r^{ps} - \delta b_{\phi}^{ps} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_r^{ps} &= e\rho_r^{ps} - \mu_r^{ps} + \Lambda a_r^{ps} \\ \Delta p_r^{ps} &= e\rho_r^{ps} + \mu_r^{ps} - \delta b_{p,p}^{ps} \quad (8) \end{aligned}$$

식 (8)의 rank 부족 문제를 해결하기 위해 코드 바이어스 δb_{ϕ}^{ps} 를 Iono. Free/Geometry Free (IF/GF) 조합으로 분해하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 $\mu_{IF} = \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} \begin{bmatrix} \mu_2 \\ -\mu_1 \end{bmatrix}$, $\mu_{GF} = \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ 이고, $[e \quad \mu]^{-1} = \begin{bmatrix} \mu_{IF}^T \\ \mu_{GF}^T \end{bmatrix}$ 의 관계가 성립한다.

$$\delta b_{p,p}^{ps} = [e \quad \mu] \begin{bmatrix} \delta b_{p,IF}^{ps} \\ \delta b_{p,GF}^{ps} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (8)의 측정식에 IF/GF 조합으로 분해된 식 (9)의 코드 바이어스를 대입하면 식 (10)의 full rank 측정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi_r^{ps} &= e(\rho_r^{ps} - \delta b_{p,IF}^{ps}) - \mu_r^{ps} + \Lambda a_r^{ps} + e\delta b_{p,GF}^{ps} - \mu\delta b_{p,GF}^{ps} \\ \Delta p_r^{ps} &= e(\rho_r^{ps} - \delta b_{p,IF}^{ps}) + \mu_r^{ps} - \delta b_{p,GF}^{ps} \quad (10) \end{aligned}$$

식 (10)에서 추정가능 파라미터(estimable parameter)를 $\tilde{\rho}_r^{ps} = \rho_r^{ps} - \delta b_{p,IF}^{ps}$, $\tilde{t}_r^{ps} = t_r^{ps} - \delta b_{p,GF}^{ps}$, $\tilde{a}_r^{ps} = a_r^{ps} + \Lambda^{-1}(e\delta b_{p,IF}^{ps} - \mu\delta b_{p,GF}^{ps})$ 로 정의하면 이들은 각각 biased range, biased ionospheric

Table 1. Single-station PPP-RTK correction.

	$d\hat{T}^{ps} = -\mu_{IF}^T \Delta p_r^{ps}$
Equation for generating estimable parameter	$\hat{\delta}^{ps} = \Lambda^{-1}[\Delta\phi_r^{ps} + (\mu\mu_{GF}^T - e\mu_{IF}^T)\Delta p_r^{ps}]$ $\hat{t}_r^{ps} = \mu_{GF}^T \Delta p_r^{ps}$
Interpretation of user applied correction	$d\tilde{T}^{ps} = -\Delta\rho_r^{ps} + dT^{ps} + \delta b_{p,IF}^{ps}$ $\tilde{\delta}^{ps} = -N_r^{ps} + \delta b_{\phi}^{ps} - \Lambda^{-1}(e\delta b_{p,IF}^{ps} - \mu\delta b_{p,GF}^{ps})$ $\tilde{t}_r^{ps} = t_r^{ps} - \delta b_{p,GF}^{ps}$

delay, biased ambiguity로 해석할 수 있으며, 이를 이용하면 식 (10)은 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi_r^{ps} &= e\tilde{\rho}_r^{ps} - \mu\tilde{t}_r^{ps} + \Lambda\tilde{a}_r^{ps} \\ \Delta p_r^{ps} &= e\tilde{\rho}_r^{ps} + \mu\tilde{t}_r^{ps} \quad (11) \end{aligned}$$

식 (11)에서 추정가능 파라미터를 $d\tilde{T}^{ps} \equiv -\tilde{\rho}_r^{ps}$, $\tilde{\delta}^{ps} \equiv -\tilde{a}_r^{ps}$ 로 정의하면 식 (12)로 변형되며 이 경우 거리는 biased clock으로, 미지정수는 biased phase bias로 해석된다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi_r^{ps} &= -ed\tilde{T}^{ps} - \mu\tilde{t}_r^{ps} - \Lambda\tilde{\delta}^{ps} \\ \Delta p_r^{ps} &= -e\tilde{d}T^{ps} + \mu\tilde{t}_r^{ps} \quad (12) \end{aligned}$$

식 (12)는 2개의 측정식과 2개의 미지수를 가지는 full rank 측정식이며, 식 (13)을 이용하여 매 epoch 추정가능 파라미터를 구할 수 있다. 여기서 $E(\cdot)$ 는 기대 값을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} d\hat{\tilde{T}}^{ps} \\ \hat{\tilde{t}}_r^{ps} \\ \hat{\tilde{\delta}}^{ps} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e & -\mu & \Lambda \\ -e & \mu & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E(\Delta\phi_r^{ps}) \\ E(\Delta p_r^{ps}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Table 1에 기준국에서의 식 (13)으로 구한 추정가능한 파라미터 생성 식과 사용자 측정식에 적용되는 오차 보정정보의 해석을 나타내었다.

2.3 사용자에서의 PPP-RTK 보정치 적용

PPP-RTK 사용자는 기준국에서 계산하여 전송한 보정치 ($d\hat{\tilde{T}}^{ps}$, $\hat{\tilde{t}}_r^{ps}$, $\hat{\tilde{\delta}}^{ps}$)를 식 (14)의 사용자 측정치에 적용하여 해를 구한다.

$$\begin{aligned} E(\Delta\phi_u^{ps}) &= e\tilde{\rho}_u^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda\tilde{a}_u^{ps} \\ E(\Delta p_u^{ps}) &= e\tilde{\rho}_u^{ps} + \mu\tilde{t}_u^{ps} \quad (14) \end{aligned}$$

사용자 수신기에서 보정치는 한꺼번에 적용되지만 이 절에서는 PPP-RTK의 보정치를 식 (14)에 차례로 적용하여 보정치의 영향을 알아본다.

2.3.1 위성시계 보정정보 $d\hat{\tilde{T}}^{ps}$ 의 역할

사용자 측정식에 위성시계 오차 보정정보 $E(d\hat{\tilde{T}}^{ps}) = d\tilde{T}^{ps} = -\Delta\rho_r^{ps} + dT^{ps} + \delta b_{p,IF}^{ps}$ 를 식 (14)에 적용하면 식 (15)를 얻는다.

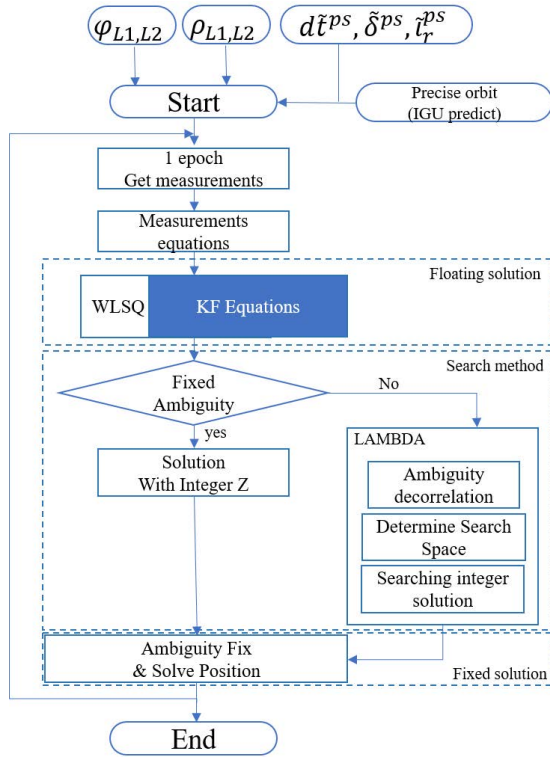


Fig. 1. PPP-RTK user algorithm flowchart.

$$\begin{aligned}
 E(\Delta\phi_u^{ps} + ed\hat{T}^{ps}) &= e\tilde{\rho}_u^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda\tilde{a}_u^{ps} + e(-\Delta\rho_r^{ps} + dT^{ps} + \delta b_{p,IF}^{ps}) \\
 &= e(\tilde{\rho}_u^{ps} - \Delta\rho_r^{ps} + dT^{ps} + \delta b_{p,IF}^{ps}) - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda\tilde{a}_u^{ps} \\
 &= e(\rho_u^{ps} - \delta b_{p,IF}^{ps} - \Delta\rho_r^{ps} + dT^{ps} + \delta b_{p,IF}^{ps}) - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda\tilde{a}_u^{ps} \\
 &= e(\Delta\rho_u^{ps} - dT^{ps} - \Delta\rho_r^{ps} + dT^{ps}) - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda\tilde{a}_u^{ps} \\
 &= e(\Delta\rho_u^{ps} - \Delta\rho_r^{ps}) - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda\tilde{a}_u^{ps} \\
 &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda\tilde{a}_u^{ps} \\
 E(\Delta\rho_u^{ps} + ed\hat{T}^{ps}) &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} + \mu\tilde{t}_u^{ps} \quad (15)
 \end{aligned}$$

여기서 $\Delta\rho_{ru}^{ps} = \Delta\rho_u^{ps} - \Delta\rho_r^{ps}$ 는 이중차분된 위치와 ZTD를 나타내며, 이는 위성시계 보정정보 $d\hat{T}^{ps}$ 의 적용이 기준국과 사용자의 위치를 결합시킴을 보여준다.

2.3.2 위성 바이어스 보정정보 $\hat{\delta}^{ps}$ 의 역할

식 (15)에 위성 바이어스 보정정보 $E(\hat{\delta}^{ps}) = \delta^{ps} = -N_r^{ps} + \delta b_{\phi}^{ps} - \Lambda^{-1}(e\delta b_{p,IF}^{ps} - \mu\delta b_{p,GF}^{ps})$ 를 적용하면 식 (16)을 얻는다. 코드 측정치에는 위성 바이어스가 포함되지 않으므로 변화가 없다.

$$\begin{aligned}
 E(\Delta\phi_u^{ps} + ed\hat{T}^{ps} + \Lambda\hat{\delta}^{ps}) &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda\tilde{a}_u^{ps} + \Lambda(-N_r^{ps} + \delta b_{\phi}^{ps} + \Lambda^{-1}(\mu\delta b_{p,GF}^{ps} - e\delta b_{p,IF}^{ps})) \\
 &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda(N_u^{ps} - \delta b_{\phi}^{ps} - \Lambda^{-1}(\mu\delta b_{p,GF}^{ps} - e\delta b_{p,IF}^{ps})) \\
 &\quad + \Lambda(-N_r^{ps} + \delta b_{\phi}^{ps} + \Lambda^{-1}(\mu\delta b_{p,GF}^{ps} - e\delta b_{p,IF}^{ps})) \\
 &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda(N_u^{ps} - N_r^{ps}) \\
 &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda N_{ru}^{ps} \\
 E(\Delta\rho_u^{ps} + ed\hat{T}^{ps}) &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} + \mu\tilde{t}_u^{ps} \quad (16)
 \end{aligned}$$

여기서 $N_{ru}^{ps} = N_u^{ps} - N_r^{ps} = \tilde{a}_u^{ps} - \tilde{a}_r^{ps}$ 는 이중차분된 미지정수이다. 보정되기전 미지정수 $\tilde{a}_u^{ps} \in \mathbf{R}^1$ 는 정수 성질을 유지하지 못하지만, 보정된 미지정수 $N_{ru}^{ps} \in \mathbf{R}^1$ 는 정수 성질을 유지하므로 Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment (LAMBDA) 기법 등 정수 최소자승법(ILS: Integer Least Square)을 적용하여 정밀한 위치의 결정이 가능하다. 따라서 위상 바이어스 보정치 $\hat{\delta}_r^{ps}$ 는 미지정수를 결합시킴을 볼 수 있다.

2.3.3 전리층 지연 보정정보 $\hat{t}_r^{ps}$

식 (16)에 기준국의 전리층 지연 오차 보정정보 $E(\hat{t}_r^{ps}) = \hat{t}_r^{ps} = t_r^{ps} - \delta b_{p,IF}^{ps}$ 를 적용하면 식 (17)을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 E(\Delta\phi_u^{ps} + ed\hat{T}^{ps} + \Lambda\hat{\delta}^{ps} + \mu\hat{t}_r^{ps}) &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} - \mu(\tilde{t}_u^{ps} - \tilde{t}_r^{ps}) + \Lambda N_{ru}^{ps} \\
 &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda N_{ru}^{ps} \\
 E(\Delta\rho_u^{ps} + ed\hat{T}^{ps} - \mu\hat{t}_r^{ps}) &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} + \mu(\tilde{t}_u^{ps} - \tilde{t}_r^{ps}) \\
 &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} + \mu\tilde{t}_u^{ps} \quad (17)
 \end{aligned}$$

여기서 $t_r^{ps} = \tilde{t}_u^{ps} - \tilde{t}_r^{ps} = t_u^{ps} - t_r^{ps}$ 는 이중차분된 전리층 지연오차이며 코드 바이어스 오차 $\delta b_{p,GF}^{ps}$ 가 보정을 통해 제거된다 (Schaer 1999). 전리층 지연오차 보정치는 전리층의 공간 이격 특성으로 인해 20 km까지 유효하다.

2.4 단일 기준국 PPP-RTK와 표준 RTK의 비교

단일 기선 RTK 사용자의 이중차분 측정식은 식 (18)과 같다. 이 식과 식 (17)을 비교하면 완전히 일치하며 이는 단일 기준국 PPP-RTK와 표준 RTK가 같은 항법해를 제공함을 나타낸다. 이는 실수해 (floating solution), 고정해 (fixed solution) 뿐 아니라 미지정수 결정 성능까지 같음을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 \Delta\phi_{ru}^{ps} &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} - \mu\tilde{t}_u^{ps} + \Lambda N_{ru}^{ps} \\
 \Delta\rho_{ru}^{ps} &= e\Delta\rho_{ru}^{ps} + \mu\tilde{t}_u^{ps} \quad (18)
 \end{aligned}$$

3. PERFORMANCE EVALUATION OF PROPOSED SINGLE STATION PPP-RTK

3.1 PPP-RTK User Algorithm

실험에 사용된 PPP-RTK 사용자 알고리즘은 Fig. 1과 같다. 기준국과 사용자에서 공통으로 관측되는 GPS 위성을 이용하여 L1, L2 이중주파수의 코드 및 반송파 위상 측정치를 이용한다. 획득된 측정치는 기준국과 동일한 pivot 위성으로 단일 차분 후 보정정보를 적용한다. 식 (17)의 코드와 반송파 위상을 이용하여 Weighted Least Square(WLSQ) 방법으로 1 epoch에서의 실수 미지정수와 측위 해를 구한 뒤 칼만 필터를 구성하여 이후 epoch에 대한 실수 미지정수와 측위 해를 구한다 (Yun 2009). 이후 LAMBDA 기법을 이용하여 정수 미지정수가 결정되면 Integer WLSQ 방식을 통해 정밀한 측위 해를 구한다 (Teunissen 1993, 1994).

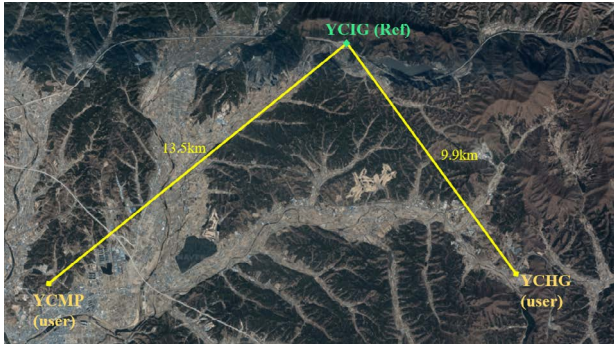


Fig. 2. Test configuration of the PPP-RTK performance validation.

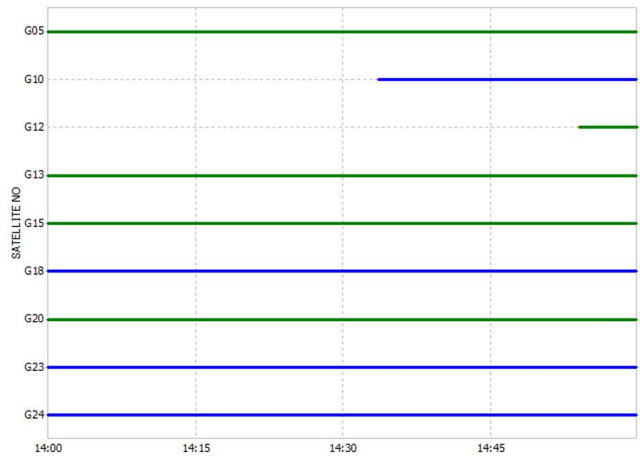
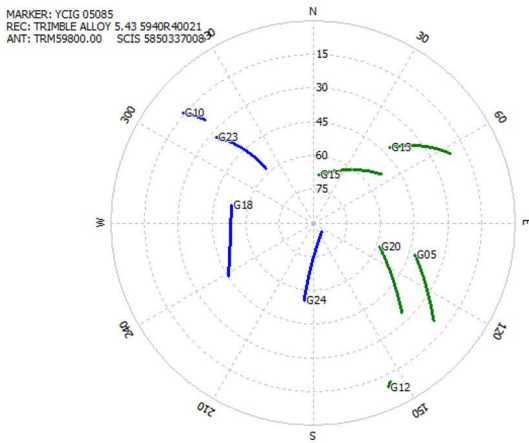


Fig. 3. Skyplot (left) and changes of number of visible satellites (right) at YCIG GNSS reference station on June 1, 2021.

3.2 Single Station PPP-RTK Test Environment

단일 기준국 PPP-RTK의 성능을 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 기준국과 사용자를 설정했다. 영천임고(YCIG) 상시관측소를 기준국으로, 영천호곡(YCHG), 영천(YCMP) 상시관측소를 사용자로 설정했다. 각 기준국에서 1시간 동안 발생된 다중경로 오차의 RMS는 Table 2와 같으며, 사이클 슬립은 발생하지 않았다. 기준국과 사용자 모두 국토지리정보원 상시관측소 RINEX 데이터를 사용했으며 각 관측소의 수신기와 안테나는 Table 3과 같다. 정밀 궤도의 경우 International GNSS Service (IGS)의 ultra-rapid (Predicted Half) product를 사용했다 (Kouba 2009). 2021년 6월 1일 14:00~15:00 (UTC), 1초 샘플링 시간의 데이터를 사용하여 실험을 수행하였으며 위성의 막음각(Mask Angle)은 기준국과 사용자 모두 15° 이며 위성의 개수와 배치는 Fig. 3과 같다. 위성간 단일 차분 시 pivot 위성의 경우 초기에 가장 높은 양각을 가지는 24번 위성을 사용하였다.

3.3 Performance of PPP-RTK

PPP-RTK의 성능 분석을 위해 기준국의 보정정보를 분석하고, 측위 해 영역에서의 PPP-RTK의 성능을 분석한다.

Table 2. Multipath error for each station.

	L1 multipath RMS [m]	L2 multipath RMS [m]
YCIG (Reference station)	0.2332	0.2493
YCHG (User)	0.2682	0.3712
YCMP (User)	0.2554	0.2554

Table 3. Station receiver and antenna.

	Receiver	Antenna
YCIG (Reference station)	Trimble alloy	TRM59800.00
YCHG (User)	Trimble alloy	TRM59800.00
YCMP (User)	Trimble alloy	TRM59800.00

3.3.1 Analysis of estimable parameter

기준국에서 생성한 보정정보 ($d\hat{T}^{ps}$, $\hat{i}_r^{ps}$, $\hat{\delta}^{ps}$)는 rank 부족으로 인해 S-basis 변환을 이용하여 다른 미지수가 포함된 형태이다. 먼저 위성 시계 오차 보정정보의 경우 Fig. 4에 도시하였으며 위성 시계 오차 외에 대류권 오차 $\Delta\rho_r^{ps}$, IF 분해된 코드 바이어스 오차 $\delta b_{p,IF}^{ps}$ 가 포함된 형태이다. 따라서 위성 시계 오차 보정정보에 위성 시계 오차를 차분하게 되면 나머지 미지수가 나타나게 된다. 위상 바이어스 보정정보는 Fig. 5와 같으며 미지정수 N_r^{ps} 와 코드 바이어스 조합 $e\delta b_{p,IF}^{ps} - \mu\delta b_{p,GF}^{ps}$ 이 포함된다. 마지막으로 전리층 지연 오차는 Fig. 6과 같으며 GF 분해된 코드 바이어스 오차 $\delta b_{p,GF}^{ps}$ 가 포함되어 있다.

3.3.2 Analysis of user position error

Table 4와 Figs. 7, 8은 각각 9.9 km, 13.5 km 기선을 가지는 YCHG, YCMP 기준국을 사용자로 PPP-RTK를 수행한 결과이다. Fig. 7은 YCHG 사용자의 실수해, 고정해를 수평, 수직으로 나타내었다. 실험 결과 갈만 필터의 수렴 시간으로 인해 미지정수가 결정되는 시간이 약 100초가량 필요했으며 초기 WLSQ 측위 해의 정밀성이 영향을 미치는 것으로 판단된다. PPP-RTK를 수행하

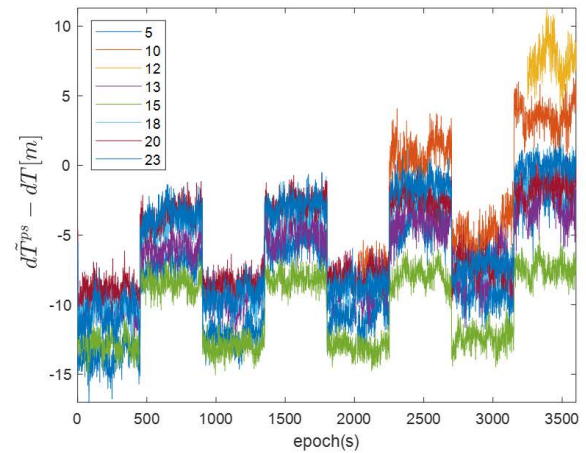
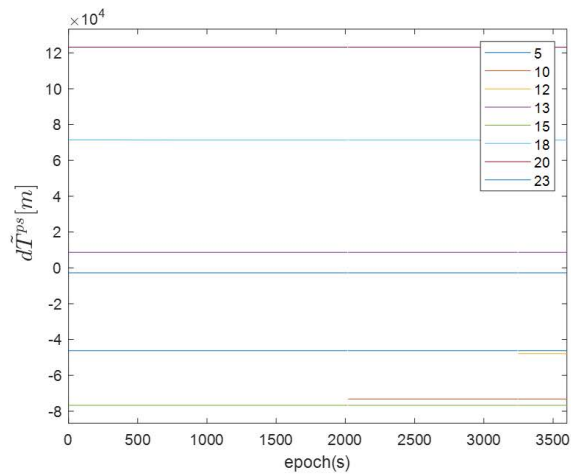


Fig. 4. PPP-RTK satellite clock correction (left) and difference between satellite clock correction and precise orbit satellite clock (right).

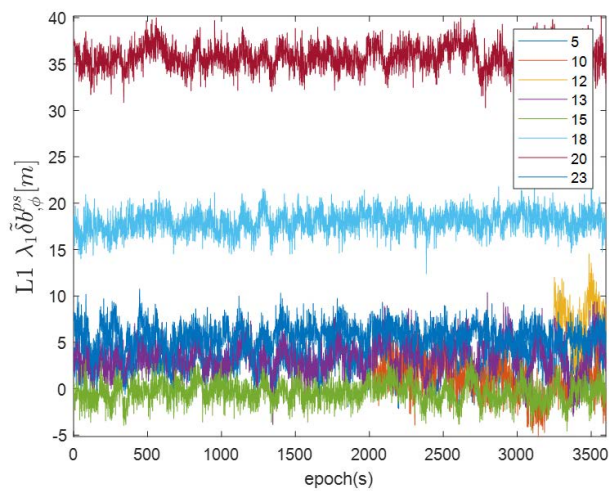


Fig. 5. PPP-RTK L1 frequency phase-bias correction.

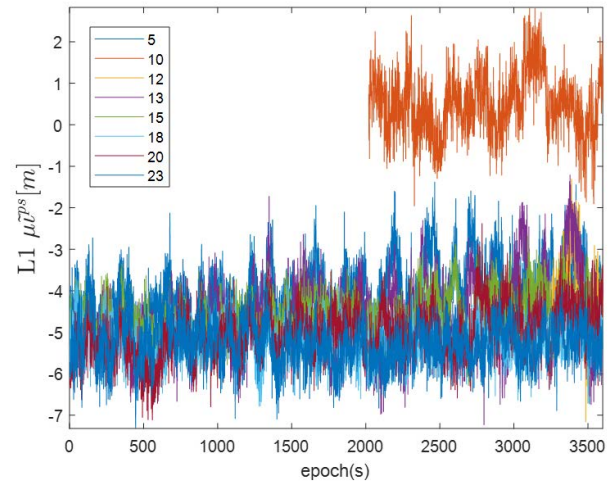


Fig. 6. PPP-RTK L1 frequency ionospheric delay correction.

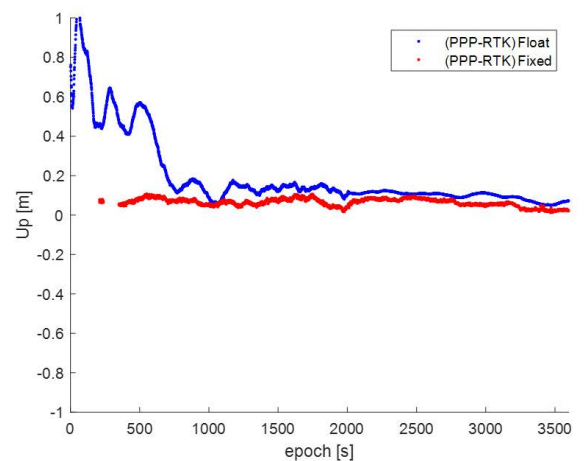
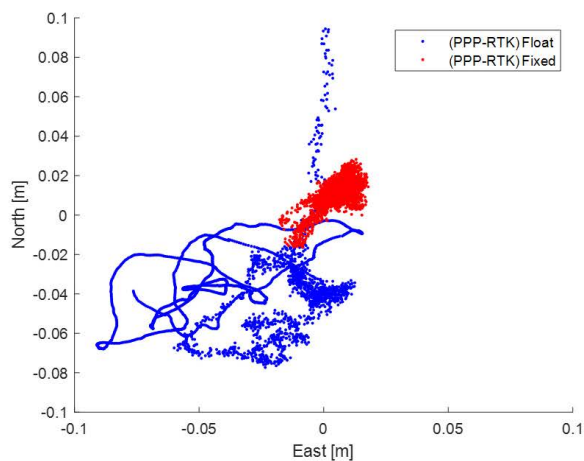


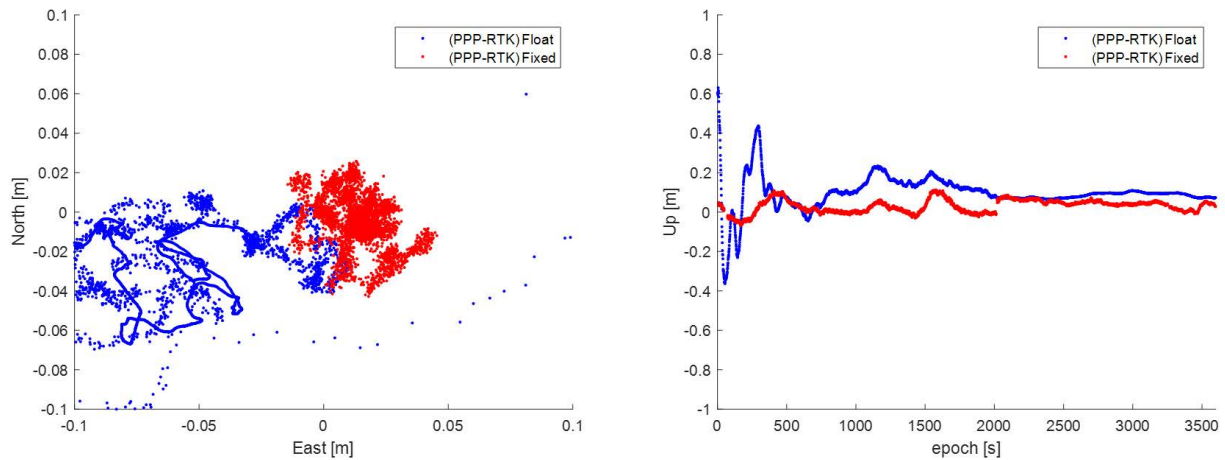
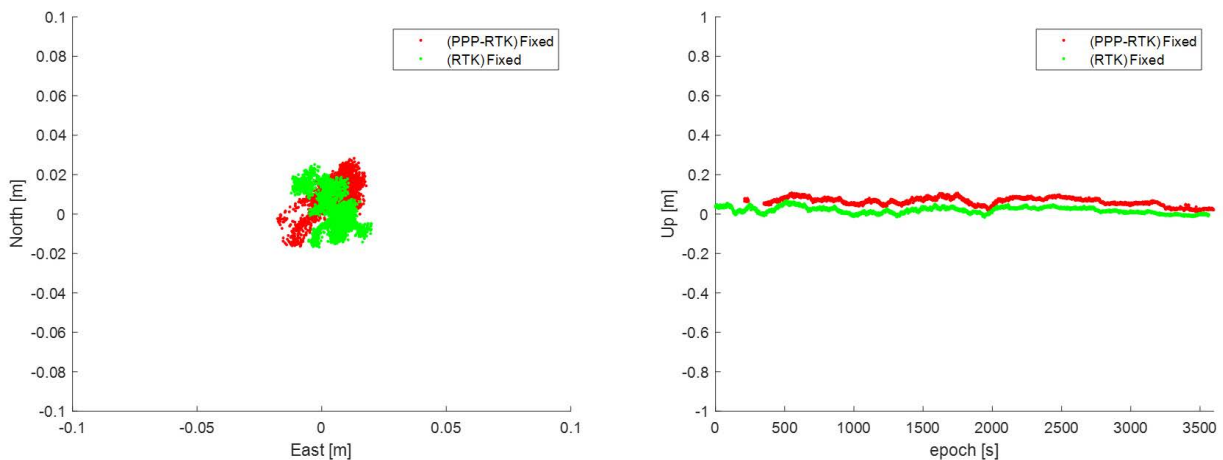
Fig. 7. Post-processing test result for YCHG user (left: horizontal, right: vertical), where blue dots mean PPP-RTK float position, red dots mean PPP-RTK fixed position.

Table 4. Results of the positioning for 1 hour for single station PPP-RTK.

Site		Float RMS [m]	Fixed RMS [m]
YCHG (9.9 km)	Horizontal	0.127	0.015
	Vertical	0.275	0.067
YCMP (13.5 km)	Horizontal	0.075	0.022
	Vertical	0.133	0.044

Table 5. Comparison of the positioning for 1 hour for single station PPP-RTK and single baseline RTK.

Site		Single station PPP-RTK Fixed RMS [m]	Single baseline RTK Fixed RMS [m]
YCHG (9.9 km)	Horizontal	0.015	0.011
	Vertical	0.064	0.025
YCMP (13.5 km)	Horizontal	0.022	0.018
	Vertical	0.044	0.028

**Fig. 8.** Post-processing test result for YCMP user (left: horizontal, right: vertical), where blue dots mean PPP-RTK float position, red dots mean PPP-RTK fixed position.**Fig. 9.** Post-processing test result for YCHG user (left: horizontal, right: vertical), where green dots mean single baseline RTK fixed position, red dots mean single station PPP-RTK fixed position.

였을 때 고정해의 Root Mean Square (RMS)는 수평으로 1.5 cm, 수직으로 6.7 cm의 위치 오차가 발생하여 센티미터 급의 정밀한 측위가 가능함을 확인하였다. Fig. 8은 YCMP 사용자의 실수해와 고정해를 수평, 수직으로 나타낸 결과로 수평 2.2 cm (RMS), 수직 4.4 cm (RMS)의 위치오차가 발생하였으며 이로부터 10 km 급의 기선거리에서 정밀한 측위가 가능함을 확인하였다.

3.4 Performance Comparison of Single Baseline RTK and Single Station PPP-RTK

Table 5와 Figs. 9, 10은 단일 기선 표준 RTK와 단일 기준국 PPP-RTK의 측위 해를 비교한 결과이다. 단일 기선 RTK의 경우 RTKLIB 소프트웨어를 사용하였으며, 주요한 설정으로 L1, L2 주파수 사용, Static, Forward, Instantaneous를 사용했다 (Takasu

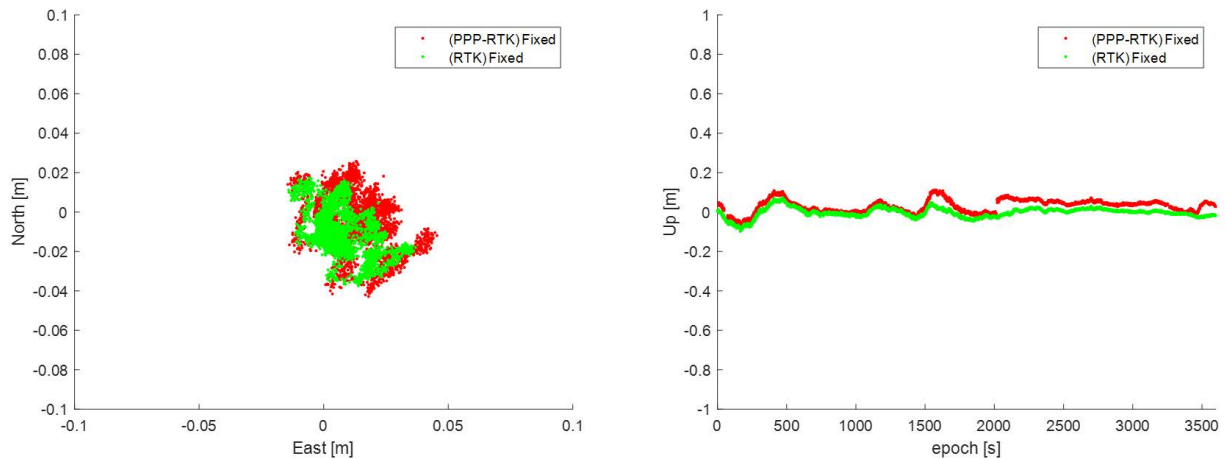


Fig. 10. Post-processing test result for YCMP user (left: horizontal, right: vertical), where green dots mean single baseline RTK fixed position, red dots mean single station PPP-RTK fixed position.

2013). 정밀 측위 및 항법 분야에서 미지정수의 정수성이 보장되지 않을 경우 불확실한 측위 해로 간주되어 RTK와 PPP-RTK 모두 미지정수가 정확히 결정된 이후의 측위 해에 대해서 도시하였다 (Cho et al. 2011, Lim et al. 2018). Fig. 9는 YCHG 사용자의 RTK, PPP-RTK 측위 해를 수평, 수직으로 나타내었다. 두 기법의 고정해의 차이는 수평으로 4 mm (RMS), 수직으로 3.9 cm (RMS)로 결과가 유사한 것으로 확인되었다. Fig. 10은 YCMP 사용자의 RTK, PPP-RTK 측위 해를 수평, 수직으로 나타내었다. 두 방법의 고정해는 수평으로 4 mm (RMS), 수직으로 1.6 cm (RMS) 차이로 나타났다. 실험 결과 표준 RTK와 SSR 형식의 보정정보를 방송하는 PPP-RTK의 측위 성능이 유사한 것을 확인하였다.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

본 연구에서는 이중 주파수를 사용하는 단일 기준국 PPP-RTK의 성능을 확인하고자 PPP-RTK의 보정정보 생성 과정과 사용자가 보정정보 적용 시 각 측정치에 미치는 영향을 이론적으로 알아보고, 실험을 통해 단일 기선 RTK와 단일 기준국 PPP-RTK의 사용자 성능을 비교 분석하였다. 실험에 사용된 PPP-RTK 기법은 정밀 궤도력을 사용하여 위성 궤도 오차를 제거하고, 안테나 위상 중심 오차, 지각 이동 오차, 위상 말림 오차, 상대성 오차, 대류권 지연은 사전에 모델링을 통해 제거한 코드, 반송파 위상 측정치를 사용하여 보정정보를 생성한다. 보정정보는 총 세 가지로 위성 시계, 위상 바이어스, 코드 바이어스를 추정한다. 추정된 보정정보는 절대 오차 보정치와는 다른 값을 나타내지만 사용자 수신기에 적용했을 때 정수 미지정수를 보장하여 정밀한 측위가 가능하다. SSR 보정정보를 전송하는 단일 기준국 PPP-RTK의 성능은 표준 RTK와 이론상으로 동일한 이중차분 측정식을 획득하게 되어 실수해, 정수해 및 미지정수 결정 성능까지 동일하다. 우리나라에서 운영하고 있는 상시관측소의 측정치를 사용하여 9.9 km, 13.5 km의 기선을 가지는 사용자 수신기에 두 기법을 적용했을 때, 동일한 측위 성능을 가지는 것을 실험적으로 확인했다. 이 결과는 자율운항선박, 스마트 항만 등 해양에서의 센티미터급의 고정밀 PNT 정

보획득에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

후후 긴 시간 측정치와 넓은 범위의 전리층 지연 보정정보를 생성하여 20 km보다 먼 거리를 가지는 사용자에게 대한 실험을 진행하고, 전송 지연 시간을 고려한 측위 성능을 분석할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 2021년도 해양수산부 국가연구개발사업 “지상기반 센티미터급 해양 정밀 PNT 기술개발”로 수행된 연구결과입니다 (PMS4650).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J. Ong, C. Park, and S. G. Park; methodology, J. Ong, C. Park; software, J. Ong; formal analysis, J. Ong; writing-original draft preparation, J. Ong; writing-review and editing, J. Ong, C. Park, S. G. Park, S. H. Park; project administration, S. H. Park.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bertiger, W., Desai, S. D., Haines, B., Harvey, N., Moore, A. W., et al. 2010, Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data, *Journal of Geodesy*, 84, 327-337. <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0371-9>
- Bisnath, S. & Collins, P. 2012, Recent developments in precise point posi-

- tioning, *Geomatica*, 66, 103-111. <https://doi.org/10.5623/cig2012-023>
- Cho, S. L., Han, Y. H., Choi, H. H., Heo, M. B., Park, C. S., et al. 2011, Improving the Performance of CDGPS using the Shaping Filter on Multipath, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 60, 2318-2325. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2011.60.12.2318>
- Collins, P. 2008, Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities, *Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, January 28-30, 2008, pp.720-732.
- European Global Navigation Satellite Systems Agency 2019, PPP-RTK Market and Technology Report.
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., & Liu, J. 2008, Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations, *Journal of Geodesy*, 82, 389-399. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4>
- Geng, J., Shi, C., Ge, M., Dodson, A. H., Lou, Y., et al. 2012, Improving the estimation of fractional-cycle biases for ambiguity resolution in precise point positioning, *Journal of Geodesy*, 86, 579-589. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0537-0>
- Heroux, P. & Kouba, J. 1995, GPS precise point positioning with a difference, Paper presented at *Geomatics 95*, Ottawa, Ontario, Canada, June 13-15, 1995.
- Japan Cabinet Office 2020, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service (IS-QZSS-L6-003).
- Khodabandeh, A. 2021, Single-station PPP-RTK: correction latency and ambiguity resolution performance, *Journal of Geodesy*, 95, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01490-z>
- Khodabandeh, A. & Teunissen, P. J. G. 2015, An analytical study of PPP-RTK corrections: precision, correlation and user-impact, *Journal of Geodesy*, 89, 1109-1132. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0838-9>
- Kim, Y.-g., Lee, H.-c., Kim, M.-s., & Park, K.-d. 2020, Analysis and Positioning Performance Evaluation of Three SSR Specifications: SPARTN, Compact-SSR, and SSRG, in *Proceedings 2020 IPNT Conference*, Yeosu, Korea, 11-13 Nov 2020, pp.131-135. <http://ipnt.or.kr/2020proc/104>
- Kouba, J. 2009, A guide to using International GNSS Service (IGS) products. <https://www.researchgate.net/publication/228663800>
- Lannes, A. & Prieur, J.-L. 2013, Calibration of the clock-phase biases of GNSS networks: the closure-ambiguity approach, *Journal of Geodesy*, 87, 709-731. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0641-4>
- Li, X., Ge, M., Zhang, H., & Wickert, J. 2013, A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning, *Journal of Geodesy*, 87, 405-416. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0611-x>
- Lim, C.-s., Park, B.-w., & Heo, M.-b. 2018, Correlation between the Position Accuracy of the Network RTK Rover and Quality Indicator of Various Performance Analysis Method, *Journal of Advanced Navigation Technology*, 22, 375-383. <https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.5.375>
- Mervart, L., Lukes, Z., Rocken, C., & Iwabuchi, T. 2008, Precise point positioning with ambiguity resolution in real-time, *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, September 16-19, 2008, Savannah, GA, pp.397-405.
- Retscher, G. 2002, Accuracy Performance of Virtual Reference Station (VRS) Networks, *Journal of Global Positioning Systems*, 1, 40-47
- Schaer, S. 1999, Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System, PhD thesis, Astronomical Institute, University of Bern.
- Shi, J. 2012, Precise point positioning integer ambiguity resolution with decoupled clocks, Unpublished Doctoral Thesis, University of Calgary. <https://doi.org/10.11575/PRISM/27397>
- Takasu, T. 2013, RTKLIP v2.4.2 manual (Tokyo, Japan: University of Marine Science and Technology).
- Teunissen, P. J. 1985, Generalized inverses, adjustment, the datum problem and S-transformations Optimization of Geodetic Networks, eds. E. W. Grafarend & F. Sanso (Berlin: Springer), pp.11-55.
- Teunissen, P. J. 1993, Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities, Invited lecture, section IV theory and methodology, IAG general meeting, Beijing, China, pp.1-16.
- Teunissen, P. J. 1994, a new method for fast carrier phase ambiguity estimation, *Proceedings of 1994 IEEE Position, Location and Navigation Symposium-PLANS'94*, IEEE, Las Vegas, NV, USA, 11-15 April 1994, pp.562-573. <https://doi.org/10.1109/PLANS.1994.303362>
- Teunissen, P. J. & Montenbruck, O. 2017, *Springer handbook of global navigation satellite systems* (Switzerland: Springer).
- Teunissen, P. J., Odijk, D., & Zhang, B. 2010, PPP-RTK: results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution, *J Aeronaut Astronaut Aviat Ser A*, 42, 223-230.
- Wabben, G., Schmitz, M., & Bagge, A. 2005, PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks, *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005)*, September 13-16, 2005, Long Beach, CA, pp.2584-2594.
- Yun, H. H. 2009, Improving performance of ambiguity resolution in GPS carrier phase using Kalman filter, M.S Dissertation, Chungbuk University.

Zhang, X. & Li, P. 2013, Assessment of correct fixing rate for precise point positioning ambiguity resolution on a global scale, *Journal of Geodesy*, 87, 579-589. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0632-5>

Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., & Webb, F. 1997, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of geophysical research: solid earth*, 102, 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>

include GNSS, PNS, SDR, integer ambiguity resolution algorithm and Error Analysis.



Junho Ong is researcher of maritime PNT research office in Korea, Republic of. He received B.S. degree from Hannam University. He received M.S. degree in Weapon System Engineering at University of Science and Technology (UST). His research interests are GNSS receiver, anti-spoofing algorithm, and

WADGPS technologies.



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.



Chansik Park received B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Seoul National University in 1984, 1986 and 1997, respectively. He has been a Professor with the Dept. of Intelligent Systems & Robotics, Chungbuk National University, Cheongju, Korea, since 1997. His research interests