

Performance Analysis of Local Network PPP-RTK using GPS Measurements in Korea

TaeHyeong Jeon, Sang Hyun Park, Sul Gee Park[†]

Maritime PNT Research Office, Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

Precise Point Positioning-Real Time Kinematic (PPP-RTK) is a high accuracy positioning method that combines RTK and PPP to overcome the limitations on service coverage of RTK and convergence time of PPP. PPP-RTK provides correction data in the form of State Space Representation (SSR), unlike RTK, which provides measurement-based Observation Space Representation (OSR). Due to this, PPP-RTK has an advantage that it can transmit less data than RTK. So, recently, several techniques for PPP-RTK have been proposed. However, in order to utilize PPP-RTK techniques, performance analysis of these in a real environment is essential. In this paper, we implement the local network PPP-RTK and analyze the positioning performance according to the distance within 100 km from the reference station in Korea. As results of experiment, the horizontal and vertical 95% errors of local network PPP-RTK were 6.25 cm and 5.86 cm or less, respectively.

Keywords: GPS, high accuracy positioning, network PPP-RTK

1. INTRODUCTION

4차 산업혁명으로 자율주행, 무인선박, 드론 산업, 항공기 등 다양한 분야에서 정밀 측위 기법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Global Navigation Satellite System (GNSS) 반송파 측정치 기반 정밀측위 기법으로 Real-Time Kinematic (RTK)과 Precise Point Positioning (PPP)이 현재 대표적으로 사용되고 있다. RTK 기법은 이중 주파수의 반송파를 활용하며, 상대측위를 이용하여 공통오차를 제거함으로써 수 초 이내에 2~3 cm의 측위 정확도를 획득할 수 있다 (Retscher 2002). 하지만, 기준국과의 공통오차 수준을 유지하기 위해서는 기준국과 사용자의 거리가 10~20 km 이내여야 하며, 거리가 멀어질수록 전리층과 대류권 지연의 상관성이 낮아지면서 공통오차가 줄어들어 정확도가 낮아진다는 한계점을 가진다 (Saastamoinen 1972). 절대 정밀측위 기법인 PPP는 이중 주파수의 반송파를 활용하여 제거하기 어려운 전리층 지연오차를 측정치 조합으로 제거하고, 정밀한 위성

궤도와 위성시계 보정정보를 이용하여 기준국과의 거리와 관계 없이 높은 정확도를 얻을 수 있다 (Kouba & Héroux 2001). 그러나 지각운동 오차, 안테나 옵셋 등과 같은 오차를 계산하고, 대류권 지연 오차와 수신기 시계오차를 추정하여 제거해야 하므로 센티미터급의 정확도를 얻기까지 수 분에서 수십 분이 소요된다는 한계가 있다 (Collins & Bisnath 2011).

최근에는 RTK와 PPP의 장점을 이용한 PPP-RTK 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Teunissen et al. 2010, Zhang et al. 2011, Nadarajah et al. 2018, Darugna et al. 2019). PPP-RTK는 기준국에 의존하는 측정치 기반의 Observation Space Representation (OSR)이 아닌 오차요소별로 보정정보를 제공하는 State Space Representation (SSR) 형태로 제공한다. 이로 인해 PPP-RTK는 데이터 대역폭을 줄일 수 있는 장점을 가질 수 있고, 위성궤도, 위성시계, 대류권, 전리층 지연오차 등 오차요소별로 보정정보를 제공하여 RTK보다 서비스 커버리지가 넓어지는 장점을 가진다. 그리고 위성신호 바이어스 보정정보를 제공하여 PPP 보다 빠른 수렴시간을 갖고, RTK 수준의 정확도를 얻을 수 있다. 현재 PPP-RTK 기법을 기반으로 보정정보를 제공하고 있는 대표적인 상용 서비스로는 일본의 QZSS Centimeter Level Augmentation System (CLAS)와 Geo++ 사의 GNSMART가 있다 (Wabben et al. 2005, Japan Cabinet Office 2020). 두 가지 서비스 모두 다중 위성군 (Multi-Constellation) 기반이며, CLAS는 Global Positioning System (GPS), Galileo 그리고 QZSS 위성

Received Nov 15, 2022 Revised Dec 01, 2022 Accepted Dec 04, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: sgpark@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3685 Fax: +82-42-866-3689

TaeHyeong Jeon <https://orcid.org/0000-0003-2599-1739>

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

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

에 대한 보정정보를 제공하며, GNSMART는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, SBAS 위성에 대한 보정정보를 제공하고 있다. Ong et al. (2021)은 국내 기준국 환경에서 GPS 이중 주파수 측정치를 사용한 단일 네트워크 기반 PPP-RTK 기법을 구현하고, 기준국으로부터 15 km 이내에서의 측위 성능을 분석한 결과를 제시하였다. 하지만, 실제 국내 환경에서 PPP-RTK 기법을 활용하여 보정정보를 생성하기 위해서는 국내 기준국 네트워크 기반의 PPP-RTK 기법을 구현하고 성능 분석이 필요하다.

본 논문에서는 네트워크 기반의 PPP-RTK를 설계하고, 이를 분석하기 위하여 국내 로컬 네트워크 기반으로 구현하여, 사용자와 기준국 간 기저선 거리에 따른 측위 성능을 분석하였다. 본 논문의 2장에서는 국내 로컬 네트워크 기반 PPP-RTK를 설계하였고, 3장에서는 실험환경과 거리에 따른 사용자의 측위 결과를 분석하였으며, 4장에서는 결론 및 추후 연구 내용을 제시하였다.

2. NETWORK PPP-RTK

Teunissen & Khodabandeh (2015)가 제시한 PPP-RTK 기법은 International GNSS Service의 Ultra-rapid product (IGU)와 위성 간 차분을 통하여 위성궤도와 수신기 오차를 제거하고, Common-Clock (CC) 모델을 이용하여 보정정보를 생성하는 방식이다. 본 논문에서는 PPP-RTK 기법을 Ong et al. (2021)이 구현한 단일 네트워크 기반에서 네트워크 환경으로 확장하여 설계하였다.

2.1 보정정보 생성단

보정정보 생성을 위해 위성 간 단일차분한 GPS의 L1과 L2 주파수 대역의 반송파 및 코드 측정치는 식 (1)과 같이 모델링할 수 있다 (Ong et al. 2021).

$$\begin{aligned}\Delta\phi_r^{ps} &= e\Delta\rho_r^{ps} - \mu\tilde{t}_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps} + \Lambda(N_r^{ps} - \delta^{ps}) \\ \Delta p_r^{ps} &= e\Delta\rho_r^{ps} + \mu\tilde{t}_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps} - b^{ps}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서, 아래첨자 r 은 기준국 수신기, 위첨자 ps 는 피벗 위성 p 를 기준으로 나머지 관측된 위성 s 의 측정치를 단일차분한 것을 나타낸다. $\Delta\phi_r^{ps}$ 와 Δp_r^{ps} 는 각각 단일차분된 GPS의 이중 주파수 대역의 반송파 및 코드 측정치를 나타낸다. $e=[1 \ 1]^T$ 이며, Δp_r^{ps} 는 기준국의 정확한 위치를 알고 있으므로 대류권 지연 오차를 나타낸다. μ 는 주파수 종속 상수, $\tilde{t}_r^{ps}$ 는 단일차분된 전리층 지연 오차를 나타낸다. $d\tilde{t}^{ps}$ 는 단일차분된 위성시계 오차, Λ 는 주파수의 파장, N_r^{ps} 은 단일차분된 미지정수를 나타낸다. δ^{ps} 와 b^{ps} 는 각각 단일차분된 반송파와 코드를 나타낸다.

식 (1)은 GPS 이중 주파수에 대한 측정치 모델링이므로 관측된 위성별로 측정치는 4개, 미지수는 9개로 rank 부족 문제가 발생하기 때문에, 이를 해결하기 위해 코드 바이어스를 Geometry-Free (GF)와 Ionosphere-Free (IF) 조합을 사용하여 분해하면 식 (2)와 같다 (Khodabandeh & Teunissen 2015, Ong et al. 2021).

$$b^{ps} = [\mu \ e] \begin{bmatrix} b_{GF}^{ps} \\ b_{IF}^{ps} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $[\mu \ e]^T = \begin{bmatrix} \mu_{GF}^T \\ \mu_{IF}^T \end{bmatrix}$ 로 나타낼 수 있으며, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta\phi_r^{ps} &= e\Delta\rho_r^{ps} - \mu\tilde{t}_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps} + \Lambda(N_r^{ps} - \delta^{ps} - Mb^{ps}) \\ \Delta p_r^{ps} &= e\Delta\rho_r^{ps} + \mu\tilde{t}_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps}\end{aligned}\quad (3)$$

여기서, $\tilde{t}_r^{ps} = t_r^{ps} - b_{GF}^{ps}$, $d\tilde{t}^{ps} = d\tilde{t}^{ps} + b_{IF}^{ps}$ 그리고 $M = \Lambda^{-1}[\mu\mu_{GF}^T - e\mu_{IF}^T]$ 이다. 추가적으로, 미지수의 개수를 줄이기 위해 CC 모델을 기반으로 코드 바이어스와 네트워크의 첫 번째 기준국의 대류권 지연 오차와 미지정수를 이용한 S-basis 변환을 통해 식 (4)를 얻는다 (Teunissen & Khodabandeh 2015).

$$\begin{aligned}\Delta\phi_r^{ps} &= e(\Delta\rho_r^{ps} - \Delta\rho_1^{ps}) - \mu\tilde{t}_r^{ps} - e(d\tilde{t}^{ps} - \Delta\rho_1^{ps}) \\ &\quad + \Lambda(N_r^{ps} - N_1^{ps} - \delta^{ps} - Mb^{ps} + N_1^{ps}) \\ \Delta p_r^{ps} &= e(\Delta\rho_r^{ps} - \Delta\rho_1^{ps}) + \mu\tilde{t}_r^{ps} - e(d\tilde{t}^{ps} - \Delta\rho_1^{ps})\end{aligned}\quad (4)$$

식 (4)를 정리하면, 보정정보 생성을 위해 사용되는 방정식인 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\phi_r^{ps} &= e\Delta\tilde{\rho}_r^{ps} - \mu\tilde{t}_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps} + \Lambda(\tilde{N}_r^{ps} - \tilde{\delta}^{ps}) \\ \Delta p_r^{ps} &= e\Delta\tilde{\rho}_r^{ps} + \mu\tilde{t}_r^{ps} - ed\tilde{t}^{ps}\end{aligned}\quad (5)$$

여기서, $\Delta\tilde{\rho}_r^{ps} = \Delta\rho_r^{ps} - \Delta\rho_1^{ps}$, $\tilde{N}_r^{ps} = N_r^{ps} - N_1^{ps}$ 그리고 $\tilde{\delta}^{ps} = \delta^{ps} + Mb^{ps} - N_1^{ps}$ 이다. 최종적으로 추정되는 파라미터는 대류권 지연 오차 ($\Delta\tilde{\rho}_r^{ps}$), 전리층 지연 오차($\tilde{t}_r^{ps}$), 위성시계($d\tilde{t}^{ps}$), 미지정수($\tilde{N}_r^{ps}$) 그리고 반송파 위상 바이어스($\tilde{\delta}^{ps}$)이다. 이때, 미지정수와 대류권 지연 오차를 제외한 나머지 파라미터들은 코드 바이어스 성분을 포함하고 있어 편향된 형태로 각 오차 요소의 실질적인 값과는 동일하지 않다. 네트워크의 첫 번째 기준국의 경우 미지정수를 추정하지 않는다는 특징이 있다. 또한, 네트워크 기준국 수를 n , 관측된 위성 수를 m 이라고 할 때 측정치는 $4n(m-1)$ 개, 미지수는 $n-1+(4+2(n-1))(m-1)$ 개이므로 기준국 개수와 관계없이 보정정보 생성이 가능하다.

2.2 사용자단

네트워크 PPP-RTK 사용자는 보정정보 생성단과 동일하게 GPS의 이중 주파수 측정치를 사용하며, IGU product의 위성궤도와 보정정보 생성단에서 제공된 위성시계, 전리층 지연 오차 그리고 반송파 위상 바이어스에 대한 보정정보를 적용하여 사용자의 위치를 추정한다. 이때, 위성시계와 반송파 위상 바이어스의 적용 방식은 Ong et al. (2021)과 동일하다. 하지만, 네트워크 PPP-RTK에서의 전리층 지연 오차에 대한 보정정보는 보정정보 생성단에서 사용된 기준국별로 생성되므로, 사용자의 위치에서 인접한 위치에 있는 2개 이상의 기준국들의 전리층 지연 오차 보정정보를 보간 (interpolation) 또는 외삽 (extrapolation)하여 적용한다.

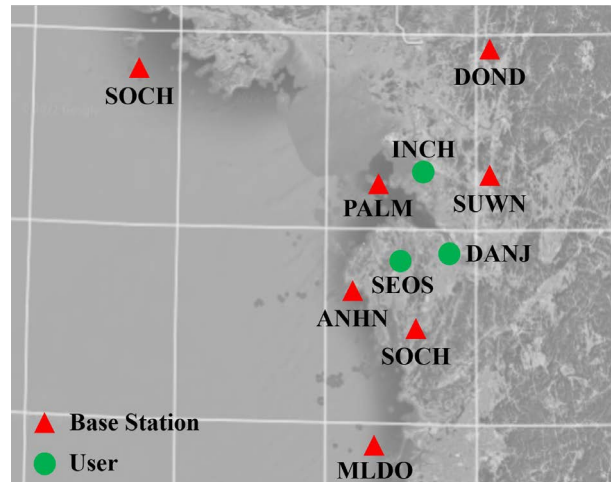


Fig. 1. Test environment for performance analysis of network PPP-RTK.

3. PERFORMANCE ANALYSIS OF LOCAL NETWORK PPP-RTK

3.1 실험 환경

2장에서 설계한 네트워크 기반의 PPP-RTK를 국내 환경에서 분석하기 위하여, 국내 로컬 네트워크 기반 PPP-RTK를 구현하였다. 보정정보 생성을 위한 국내 로컬 네트워크는 국립해양측위정보원의 안흥 (ANHN), 말도 (MLDO), 소청도 (SOCH) 그리고 팔미도 (PALM) 4개소와 국토지리정보원의 동두천 (DOND), 수원 (SUWN) 그리고 청양 (CHYG) 3개소, 총 7개소의 서해 북부지역의 기준국으로 구성하였으며, 기준국의 배치는 Fig. 1과 같다. 이때, 기준국의 측정치는 15도 절사각과 안흥 기준국을 피벗 기준국으로 설정하였다. 사용자 단에서는 생성한 위성궤도, 위성시계, 반송파 위상 바이어스와 안흥 기준국의 전리층 지연 보정정보를 적용하였고, 전리층 보정정보는 기존 RTK 기법과의 측위 성능을 비교하기 위하여 보간 또는 외삽하여 사용하지 않고 특정 기준국의 보정정보를 사용하였다. 사용자는 국토지리원의 서산 (SEOS), 당진 (DANJ) 그리고 인천 (INCH) 총 3개소의 기준국을 선정하여, 기준국과 사용자 간 거리에 따른 측위 성능을 분석하였다. 이때, 사용자로 선정된 기준국은 안흥 기준국으로부터 기저선 거리가 각각 34 km, 66 km 그리고 96 km이다.

구현한 로컬 네트워크 기반 PPP-RTK (이하 Proposed)에서 Ambiguity Resolution (AR)은 'Fix and Hold'와 'Continuous'중에서 'Continuous' 방식을 사용하였다. 'Fix and Hold'의 경우 미지정수가 결정된 이후에 가시위성의 조합이 변하기 전까지 고정된 미지정수 값을 기반으로 측위해를 도출하며, 이로 인해 미지정수가 잘못 결정될 경우 측위 결과가 편향될 수 있다는 단점을 지닌다 (Lim et al. 2021). single RTK는 오픈 소스인 RTKLIB 프로그램에서 제공하는 RTK 솔루션을 사용하였다 (RTKLIB 2022). 이때, RTKLIB의 Ambiguity Resolution (AR) 설정은 'Continuous' (이하 Method 1)와 'Fix and Hold' (이하 Method 2)를 사용하였다. 반송파 측정치의 미지정수 결정은 Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment (LAMBDA) 기법을 사용하였으며, 미

지정수가 제대로 추정되었는지 판별하기 위해 비율 테스트 (ratio test)는 임계값을 3으로 설정하여 진행하였다.

3.2 로컬 네트워크 PPP-RTK 측위 성능 분석

측위성능은 GPS 측정치와 보정정보를 모두 수신하였을 때를 가정하여, 실수해와 고정해를 모두 고려하였다. Figs. 2-4는 각각 로컬 네트워크 기반 PPP-RTK와 single RTK 기법에 따른 서산, 당진 그리고 인천의 수평 및 수직 측위 오차에 대한 그래프이다. Table 1은 안흥 기준국의 전리층 보정정보를 사용할 경우의 서산, 당진 그리고 인천 기준국의 측위 결과에 대한 수평 및 수직 오차의 R95 값과 미지정수 결정율에 대한 표이다.

서산 기준국 측위 결과, Proposed의 수평 및 수직 R95 오차는 각각 2.58 cm, 3.53 cm로, Method 1, 2의 결과와 비교하여 수평 오차는 1 cm 내외의 차이를 보였으며, 수직 오차는 각각 1.64 cm, 2.18 cm 감소하였다. 당진 기준국의 경우 Proposed의 수평 및 수직 R95 오차는 각각 3.95 cm, 5.07 cm로, 서산과 비교하여 오차가 증가하였으나, 수평과 수직 R95 오차가 모두 5 cm 내외의 측위 성능을 보였다. 또한 Method 1, 2 대비 수평 측위 오차가 각각 2.5 cm, 1 cm, 수직 측위 오차가 각각 2.5 cm, 2 cm가량 감소하였다. 인천 기준국의 경우 Proposed의 수평 및 수직 R95 오차는 6.25 cm, 5.86 cm로, 수평 측위 정확도에 있어 오차가 Method 1 대비 1.02 cm 감소하였으나 Method 2 대비 0.97 cm 증가하였다. 수직 측위 오차는 Proposed가 Method 1, 2 대비 2.34 cm 이상 감소하였다.

측위 방법에 따른 미지정수 결정율은 서산의 경우 Proposed 66.9%, Method 1 92.7% 그리고 Method 2 94.9%, 당진의 경우 서산의 경우 Proposed 39.6%, Method 1 74.0% 그리고 Method 2 77.3%, 인천의 경우 Proposed 25.1%, Method 1 32.3% 그리고 Method 2 33.2%였다. 전반적으로 거리가 증가함에 따라 세 가지 방법 모두 미지정수 결정율이 감소하였으며, 모든 실험에서 Method 2 > Method 1 > Proposed 순으로 미지정수 결정율이 높았다. PPP-RTK가 RTK 대비 미지정수 결정율이 낮았으며, RTK에서도 AR 방식에 따라 'Fix and Hold' 방식이 'Continuous' 대비

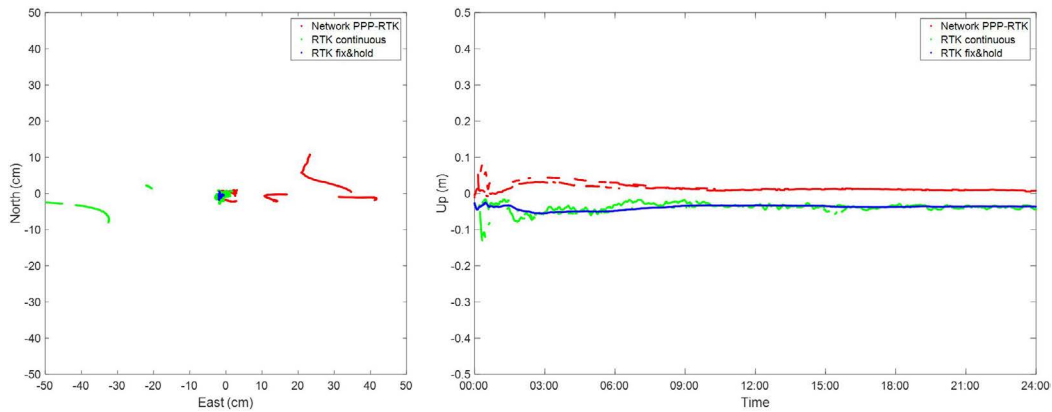


Fig. 2. Positioning errors of PPP-RTK and RTK for SEOS user: (left) horizontal, (right) vertical.

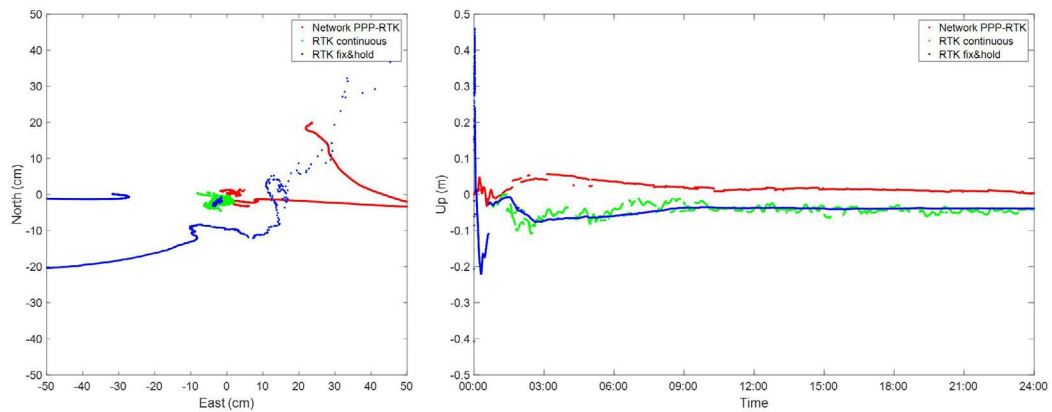


Fig. 3. Positioning errors of PPP-RTK and RTK for DANJ user: (left) horizontal, (right) vertical.

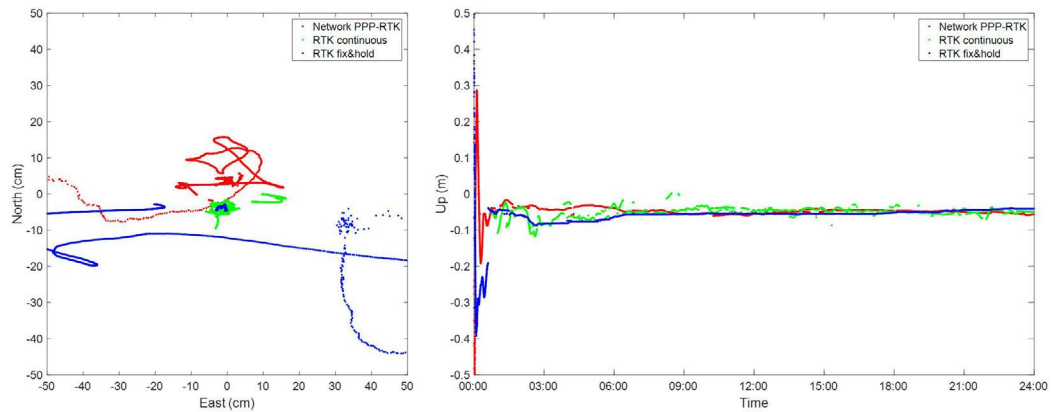


Fig. 4. Positioning errors of PPP-RTK and RTK for INCH user: (left) horizontal, (right) vertical.

Table 1. Results of position estimation using dual-frequency GPS measurements.

Method	Ambiguity resolution	SEOS			DANJ			INCH		
		Horiz. (cm)	Vert. (cm)	Fix rate (%)	Horiz. (cm)	Vert. (cm)	Fix rate (%)	Horiz. (cm)	Vert. (cm)	Fix rate (%)
Network PPP-RTK	Continuous	2.58	3.53	66.9	3.95	5.07	39.6	6.25	5.86	25.1
RTK	Continuous	2.50	5.71	92.7	6.40	7.58	74.0	7.27	8.58	32.3
	Fix and hold	1.87	5.17	94.9	4.91	6.96	77.3	5.28	8.20	33.2

측위 성능과 미지정수 결정율이 모두 높았다.

로컬 네트워크 PPP-RTK의 측위 성능은 기저선 거리가 증가함에 따라 측위 오차가 증가하는 경향을 보이지만, 약 100 km 이내에서 센티미터급에 정확도를 보였다. RTKLIB 기반 RTK의 측위 결과도 세 가지 실험에서 모두 센티미터급에 측위 정확도를 보였다. 미지정수 결정에 있어 로컬 네트워크 기반 PPP-RTK가 single RTK 대비 낮은 결정율을 보였으나, 20 km 이상 기저거리에서 로컬 네트워크 기반 PPP-RTK가 single RTK보다 수평 측위 성능은 유사하였고, 수직 측위 성능이 평균 29%가량 향상하였다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 네트워크 기반의 PPP-RTK를 설계하였고, 국내 환경에서 PPP-RTK의 성능 분석을 위해 국내 로컬 네트워크를 기반으로 구현하였고, 사용자와 기준국 간 기저선 거리에 따른 측위 성능을 single RTK와 비교 분석하였다. single RTK와 성능 비교를 하기 위하여, 전리층 지연오차를 사용한 기준국으로부터 20 km ~ 100 km 이내에서 약 30 km 간격으로 위치한 서산, 당진, 인천 기준국으로 선정하였다. 기저선 거리에 따른 측위 성능을 분석한 결과, single RTK와 PPP-RTK 모두 센티미터급의 성능을 보였으나, 기저 거리가 증가함에 따라 오차가 증가하였다. 특히, 기저 거리가 가장 긴 인천 기준국에서는 로컬 네트워크 기반 PPP-RTK가 RTK 대비 수평 측위 정확도는 유사하였으며, 수직 측위 정확도는 약 29% 높았지만, 미지정수 결정율이 낮았다.

추후 연구에서는 국내 전국망 네트워크기반으로 PPP-RTK의 측위 성능 분석할 예정이다. 이때, 단일 기준국이 아닌 네트워크 기반의 대류권 및 전리층 보정정보를 사용하여 네트워크 내외부의 사용자 측위 성능과 단일 기준국 및 네트워크 RTK 기법과의 측위 성능 및 미지정수 결정 방식에 따른 분석도 진행할 예정이다. 또한, 효율성 측면에 대한 분석을 위해 보정정보 전송 방식에 따른 데이터 양을 비교분석 할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부 재원으로 국가연구개발사업인 “지상기반 센티미터급 해양 정밀 PNT 기술개발”에 의해 수행되었습니다 (1525012253).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, T. H. Jeon, and S. G. Park; methodology, T. H. Jeon, and S. G. Park; software, T. H. Jeon; validation, T. H. Jeon, and S. G. Park; formal analysis, T. H. Jeon; writing—original draft preparation, T. H. Jeon; writing—review and editing, T. H. Jeon, S. G. Park, S. H. Park; project administration, S. H. Park.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Collins, P. & Bisnath, S. 2011, Issues in ambiguity resolution for precise point positioning, Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011), September 20-23, 2011, Portland, OR, pp.679-687.
- Darugna, F., Wübbena, J., Ito, A., Wübbena, T., Wübbena, G., et al. 2019, RTK and PPP-RTK using smartphones: from short-baseline to long-baseline applications, Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), September 16-20, 2019, Miami, Florida, pp.3932-3945. <https://doi.org/10.33012/2019.17078>
- Japan Cabinet Office 2020, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service (IS-QZSS-L6-003).
- 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>
- Kouba, J. & Héroux, P. 2001, Precise point positioning using IGS orbit and clock products, GPS Solutions, 5, 12-28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Lim, C. S., Lee, Y. J., Cho, A., & Park, B. W. 2021, A review on the usage of RTKLIB for precise navigation of unmanned vehicles, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 10, 243-251. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.4.243>
- Nadarajah, N., Khodabandeh, A., Wang, K., Choudhury, M., & Teunissen, P. J. G. 2018, Multi-GNSS PPP-RTK: from large- to small-scale networks, Sensors, 18, 1078. <https://doi.org/10.3390/s18041078>
- Ong, J., Park, S. G., Park, S. H., & Park, C. 2021, Performance expectation of single station PPP-RTK using dual-frequency GPS measurement in Korea, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 10, 159-168. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.3.159>
- Retscher, G. 2002, Accuracy performance of virtual reference station (VRS) networks, Journal of Global Positioning Systems, 1, 40-47.
- RTKLIB 2022, RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning [Internet], cited 2022 Sep 14, available from: <http://www.rtklib.com>

- Saastamoinen, J. 1972, Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites, Geophysical Monograph, 15, 247-251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>
- Teunissen, P. J. G. & Khodabandeh, A. 2015, Review and principles of PPP-RTK methods, Journal of Geodesy, 89, 217-240. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0771-3>
- Teunissen, P. J. G., Odijk, D., & Zhang, B. 2010, PPP-RTK: results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution, 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.
- Zhang, B., Teunissen, P. J. G., & Odijk, D. 2011, A novel un-differenced PPP-RTK concept, The Journal of Navigation, 64, 180-191. <https://doi.org/10.1017/S0373463311000361>



TaeHyeong Jeon is researcher of maritime PNT research office. He received B.S. and M.S. degrees from Hankyong National University, Republic of Korea. His current research interests include PPP-RTK and GNSS/IMU fusion.



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.



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.