

Preliminary Analysis of Precise Point Positioning Performance Using Correction of Tropospheric Delay Gradient

Bu-Gyeom Kim, Changdon kee[†]

Department of Aerospace Engineering and SNU-IAMD, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

ABSTRACT

In this paper, impacts of tropospheric delay gradient correction on PPP positioning performance were analyzed. A correction for tropospheric delay error due to the gradient was created and applied using external data, and reference station data were collected on a sunny day and a rainy day to analyze the GPS only dual-frequency PPP positioning results. As a result, on the sunny day, the convergence time was about 35 minutes and the final 3D position error was 10 cm, regardless of whether the correction for the tropospheric delay error by the gradient was applied. On the other hand, on the rainy day, the 3D position error converges only when the correction was applied, and the convergence time was about 34 minutes. Furthermore, the final 3D position error was improved from 30 cm to 10 cm. In addition, the analysis of the PPP by reference station location on the rainy day showed that the PPP positioning performance was improved when the correction was applied to a user located in an area where the weather changes.

Keywords: GNSS, PPP, tropospheric delay, tropospheric delay gradient

1. INTRODUCTION

Precise Point Positioning (PPP)는 Global Navigation Satellite System (GNSS)의 반송파 위상 측정치를 사용하는 정밀 항법 알고리즘이다 (Zumberge et al. 1997). 다른 정밀 항법 알고리즘인 Real Time Kinematics (RTK)와 달리 차분 하지 않은 측정치를 사용하기 때문에, RTK에서 차분을 통해 제거되는 측정치 오차를 별도로 제거할 필요가 있다. 대류층 지연 오차가 그러한 오차에 해당한다.

전통적인 PPP에서는 대류층 지연 오차를 사용자 위치와 함께 추정한다 (Kouba & Heroux 2001). 대류층 지연 오차는 건조 지연 오차와 습윤 지연 오차로 나눌 수 있는데, 건조 지연 오차는 Saastamoinen 모델을 통해 높은 정확도로 보상이 가능하다. 반면에 모델을 통한 습윤 지연 오차의 보상에는 한계가 있기 때문에, 사용자 위치와 함께 추정할 필요가 있다. 이때 수직 지연 오차와

사상 함수를 통해 위성별 오차를 계산할 수 있기 때문에, 사용자 위치에서의 수직 습윤 지연 오차를 추정한다. 이러한 방식은 동일 양각 위성이 동일 크기의 대류층 지연 오차를 갖는다는 수평 비대칭성을 가정한다. 그러나 실제로는 동일 양각 위성이라도 다른 크기의 오차를 갖기 때문에, PPP 필터에서 수직 지연 오차만 추정할 경우 위성별 수 cm의 잔여 오차가 발생할 수 있어 사용자 위치 정확도에 영향을 준다 (Chen & Herring 1997, Du et al. 2021). 따라서 PPP의 사용자 위치 정확도 개선을 위해선 대류층의 수평 비대칭성에 의한 추가적인 오차를 고려할 필요가 있다.

대류층의 수평 비대칭성에 의한 추가적인 오차를 고려하기 위해 수직 지연 오차와 기울기 성분에 의한 오차를 함께 사용하는 모델이 제안되었다 (Chen & Herring 1997, Bar-Sever et al. 1998). 기울기 성분은 남북, 동서 방향으로 구분되는데, PPP 필터에서 수직 습윤 지연 오차와 함께 두 방향의 기울기 성분을 추가로 추정한 결과 사용자 위치 정확도가 cm 수준으로 개선되었음을 선행 연구에서 확인할 수 있었다 (Miyazaki et al. 2003, Meindl et al. 2004, Li et al. 2015, Xu et al. 2015). 그러나 기울기 성분을 추가로 추정하기 위해선 필요한 가시 위성 수가 증가하여 GPS와 같은 단일 위성 항법 시스템으로는 PPP 적용에 어려움이 있다 (Du et al. 2021). 그리고 사용자 위치 정확도는 향상되지만, 수렴 시간이 길어질 수 있다 (Lu et al. 2017). 이러한 상황에서 기울기 성분에 의한 오차에 대한 보정정보가 외부로부터 제공되어 오차

Received May 03, 2023 Revised May 16, 2023 Accepted May 25, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: kee@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-1912 Fax: +82-2-878-0559

Bu-Gyeom Kim <https://orcid.org/0000-0001-7769-1493>

Changdon Kee <https://orcid.org/0000-0002-8691-7068>

를 사전에 제거할 수 있다면, 필터의 구조를 변경하지 않고 PPP 측위 성능 향상을 기대할 수 있다. 대류층 지연 오차의 기울기 성분은 대류층 지연 오차의 공간 변화율이기 때문에, 오차의 공간 분포를 통해 산출할 수 있다 (Zus et al. 2019). 따라서 PPP-RTK와 같이 광역의 대류층 지연 오차의 보정정보를 제공하는 시스템이라면 추가로 기울기 성분에 의한 오차에 대한 보정정보 또한 제공할 수 있을 것이라 예상된다. 본 논문은 기초 연구로 기울기 성분에 의한 오차의 외부 데이터에 의한 제거를 통해 PPP 정확도 개선 가능성을 분석한다. 이를 위해 International GNSS Service (IGS)에서 제공하는 Zenith Path Delay (ZPD) 데이터를 사용한다. ZPD 데이터에는 IGS 운영 기준국에서 추정된 대류층 수직 지연 오차와 남북, 동서 방향의 기울기 성분이 포함되어 있다 (Byun & Bar-Sever 2009, Teke et al. 2011). IGS 기준국의 GNSS 데이터를 수집하여 기울기 성분에 의한 오차 제거 후 전통적인 이중주파수 PPP를 사용하여 추정된 기준국 위치 오차를 분석한다.

2장에서는 기울기 성분에 의한 오차를 추가한 오차 모델에 대해 소개하고, 본 연구에서 활용한 PPP 알고리즘에 대해 설명하였다. 3장에서는 IGS에서 제공한 데이터를 통한 기울기 성분에 의한 오차 보상 여부에 따른 PPP 사용자 위치 정확도를 비교 분석하였다. 4장에서는 결론 및 향후 계획에 대해 서술하였다.

2. TROPOSPHERIC DELAY CORRECTION AND PPP ALGORITHM

2.1 Tropospheric Delay Correction

기울기 성분을 고려한 대류층 지연 오차 모델은 Eq. (1)과 같다 (Chen & Herring 1997).

$$T^j = m_{dry}^j \cdot ZHD + m_{wet}^j \cdot ZWD + m_{gradient}^j \cdot (G_N \cdot \cos Az^j + G_E \cdot \sin Az^j) \quad (1)$$

여기서 T 는 대류층 지연 오차를 의미하고 위첨자 j 는 j 번째 위성을 의미한다. ZHD 와 ZWD 는 수직 건조 지연 오차와 수직 습윤 지연 오차를 의미하고, m_{dry}^j 과 m_{wet}^j 은 건조 지연 오차와 습윤 지연 오차의 사상 함수를 의미한다. $m_{gradient}^j$ 는 기울기 성분의 사상 함수를 의미하고 G_N 과 G_E 은 남북 방향, 동서 방향 기울기 성분을 의미한다. Az 는 위성의 방위각을 의미한다. Eq. (1)에서 확인할 수 있듯이 전체 대류층 지연 오차는 건조 지연 오차와 습윤 지연 오차, 그리고 기울기 성분에 의한 오차의 합이다.

전통적인 PPP에서는 전체 대류층 지연 오차 중 건조 지연 오차를 모델로 통해 보상한다. 본 연구에서는 기울기 성분에 의한 오차를 외부 데이터를 통해 추가로 보상하기 때문에, 제안하는 대류층 지연 오차 보정정보는 Eq. (2)와 같다.

$$T_{corr}^j = m_{dry}^j \cdot ZHD + m_{gradient}^j \cdot (G_N \cdot \cos Az^j + G_E \cdot \sin Az^j) \quad (2)$$

여기서 T_{corr} 은 대류층 지연 오차 보정정보를 의미한다. 건조 지연 오차는 GPT3 모델을 통해 경험적으로 획득한 기상 정보에 Saastamoinen 모델을 적용하여 수직 지연 오차를 계산하고, Niell

사상 함수를 사용한다. 기울기 성분의 사상 함수는 Eq. (3)과 같다 (Chen & Herring 1997).

$$m_{gradient}^j = \frac{1}{\sin(EU^j)\tan(EU^j)+0.0032} \quad (3)$$

여기서 EU 는 위성 양각을 의미한다.

2.2 PPP Algorithm

본 연구에서는 GPS 단독의 L1/L2 이중주파수 PPP의 측위 성능을 분석하였다. Eqs. (4-7)은 의사거리 측정치와 반송파 위상 측정치에 대한 식이다.

$$\rho_{L1}^j = (\bar{R}^j - \bar{R}_u) \hat{e}^j - b^j + B + T^j + I^j + \varepsilon_{\rho_{L1}}^j + \delta_{\rho_{L1}}^j \quad (4)$$

$$\rho_{L2}^j = (\bar{R}^j - \bar{R}_u) \hat{e}^j - b^j + B + T^j + \gamma I^j + \varepsilon_{\rho_{L2}}^j + \delta_{\rho_{L2}}^j \quad (5)$$

$$\phi_{L1}^j = (\bar{R}^j - \bar{R}_u) \hat{e}^j - b^j + B + T^j - I^j + N_{L1}^j \lambda_{L1} + \varepsilon_{\phi_{L1}}^j + \delta_{\phi_{L1}}^j \quad (6)$$

$$\phi_{L2}^j = (\bar{R}^j - \bar{R}_u) \hat{e}^j - b^j + B + T^j - \gamma I^j + N_{L2}^j \lambda_{L2} + \varepsilon_{\phi_{L2}}^j + \delta_{\phi_{L2}}^j \quad (7)$$

여기서 ρ 는 의사거리 측정치를, ϕ 는 반송파 위상 측정치를 의미하며, 아래 첨자는 주파수를 의미한다. \bar{R} 는 위성의 궤도를 의미하고 \bar{R}_u 는 사용자 위치 벡터를 의미한다. \hat{e}^j 는 위성과 사용자의 시선 벡터를 의미한다. b 와 B 는 위성과 사용자 시계 오차, I 는 전리층 지연 오차를 의미한다. γ 는 L1 주파수를 L2 주파수로 나눈 것의 제곱이다. ε 는 측정치 잡음을 의미하고, N 은 반송파 위상 측정치의 미지 정수를 의미한다. 위 식에서 δ 는 특수 오차를 의미하는데, 안테나 위상 오프셋, 위상 말림 현상 (phase wind up) 등의 오차를 포함한다. RTK에서는 측정치 차분 시 특수 오차가 제거되어 고려할 필요가 없지만, PPP에서는 차분되지 않은 측정치를 사용하기 때문에 사전에 제거할 필요가 있다. 특수 오차를 제거하고 IGS와 같은 기관에서 제공하는 정밀 궤도 데이터의 시계 오차 보정정보를 활용하여 위성 시계 오차를 제거한 후, 대류층 지연 오차의 보정정보를 적용한 L1 주파수의 측정치는 Eqs. (8-9)와 같다.

$$\tilde{\rho}_{L1}^j = (\bar{R}^j - \bar{R}_u) \hat{e}^j + B + m_{wet}^j ZWD + I^j + \varepsilon_{\rho_{L1}}^j \quad (8)$$

$$\tilde{\phi}_{L1}^j = (\bar{R}^j - \bar{R}_u) \hat{e}^j + B + m_{wet}^j ZWD - I^j + N_{L1}^j \lambda_{L1} + \varepsilon_{\phi_{L1}}^j \quad (9)$$

각 주파수 측정치 오차 제거 이후 전리층 지연 오차를 제거하기 위해 Eqs. (10-11)과 같은 무전리층 선형 조합을 사용하였다 (Kaplan & Hegarty 2006).

$$\rho_{IF}^j = \frac{\gamma \tilde{\rho}_{L1}^j - \tilde{\rho}_{L2}^j}{\gamma - 1} = (\bar{R}^j - \bar{R}_u) \hat{e}^j + B + m_{wet}^j ZWD + \varepsilon_{\rho_{IF}}^j \quad (10)$$

$$\phi_{IF}^j = \frac{\gamma \tilde{\phi}_{L1}^j - \tilde{\phi}_{L2}^j}{\gamma - 1} = (\bar{R}^j - \bar{R}_u) \hat{e}^j + B + m_{wet}^j ZWD + N_{IF}^j \lambda_{IF} + \varepsilon_{\phi_{IF}}^j \quad (11)$$

Eq. (11)을 통해 알 수 있듯이 전리층이 제거된 반송파 위상 측정치의 미지 정수는 L1/L2 주파수의 조합이다. Eq. (12)는 무전리층 선형 조합 측정치의 미지 정수에 대한 식이다.

$$N_{IF}^j = \frac{f_{L1} N_{L1}^j - f_{L2} N_{L2}^j}{f_{L1} - f_{L2}} \quad (12)$$

여기서 f 는 측정치의 주파수를 의미한다. Eqs. (10-11)의 의사거

Table 1. Processing strategies.

Items	Strategies
Observations	GPS L1/L2 ionospheric-free combination
Sampling rate	1 sec
Elevation cutoff	8°
Satellite orbit	IGS final orbit
Satellite clock	IGS final orbit
Satellite antenna phase center correction	IGS ANTEX file (IGS14.atx)
Receiver antenna phase center correction	IGS ANTEX file (IGS14.atx)
Solid tide	IERS2010
Ocean loading	FES2004
Phase windup	IGS model
Ionospheric delay	Ionospheric-free combination
Tropospheric delay	Dry: GPT3 + Saastamoinen model

Table 2. Filter setting.

State	Model	Initial uncertainty	Process noise
User position vector (XYZ)	Constant	100 m	0 m/√sec
Integer ambiguity	Constant	20000 cycle	0 m/√sec
Receiver clock error	Random walk	10 ⁵ m	10 ⁵ m/√sec
Zenith tropospheric wet delay	Random walk	0.5 m	5 × 10 ⁻⁵ m/√sec

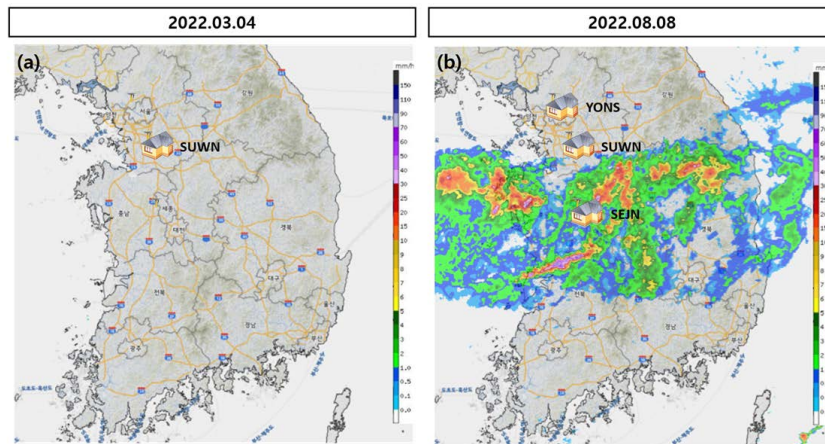


Fig. 1. Weather condition of analysis date, (a) sunny day (b) rainy day.

리 측정치와 반송파 위상 측정치를 같이 사용하여 사용자의 위치 벡터인 \bar{r}_u 를 추정한다. 동시에 수직 습윤 지연 오차와 사용자의 수신기 시계 오차를 추정한다. 본 연구에서는 Extended Kalman Filter (EKF)를 활용한 자체 프로그램 구현하여 PPP를 통해 사용자 위치를 추정하였다. Table 1은 오차 제거를 위해 사용한 모델 및 데이터 처리 방식을 정리한 것이다. Table 2는 Kalman filter의 설정을 정리한 것이다 (Lu et al. 2017, Bahadur & Nohutcu 2018).

3. ANALYSIS RESULTS

3.1 Data Set

기울기 성분 에 의한 대류층 지연 오차는 대류층이 수평 불균형 상태가 심할수록 크기가 증가한다. 사용자 위치 주위 공간적으로 날씨의 변화가 있으면 기울기 성분 에 의한 오차가 증가한다. 이러한 이유로 특정 지역에 집중 호우가 있는 날에는 보정정보의 영향이 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 서로 다

Table 3. Data set for two tests.

Test	Date	Weather	Time (UTC)	Station
1	2023.03.04	Sunny	13:00 ~ 17:00	SUWN
	2023.08.08	Rainy	01:00 ~ 05:00	
2	2023.08.08	Rainy	01:00 ~ 05:00	YONS
				SUWN
				SEJN

른 기상 환경의 두 날을 선정하였고, IGS ZPD 데이터 사용을 위해 IGS의 국내 기준국을 사용자로 선정하였다. Fig. 1은 분석일과 기상 상황을 나타낸 그림으로 기상레이더 센터의 레이더 영상이다. Table 3은 분석일과 분석에 사용된 시간을 정리한 것이다.

2가지 분석을 진행하였는데, 첫번째는 맑은 날과 호우가 있는 날의 SUWN 기준국 데이터를 수집하고 PPP 적용 결과를 비교 분석하였다. 이때 기울기 성분 에 의한 영향만을 분석하기 위해 시간을 조정하여 위성 배치가 동일한 분석 시간을 선정하였다. 두 번째는 호우가 있는 날 기준국 위치에 따른 차이를 비교하기 위해 YONS과 SUWN, SEJN 기준국 데이터를 수집하고 PPP 적용 결과를 비교 분석하였다.

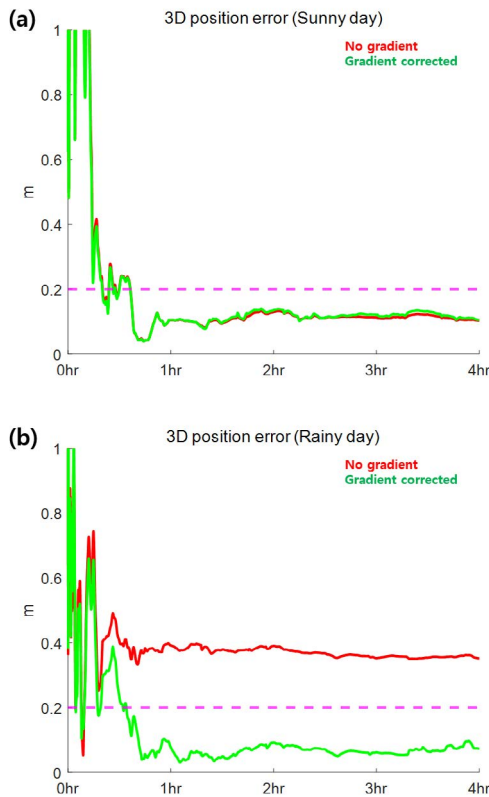


Fig. 2. 3D position error for test 1, (a) sunny day (b) rainy day.

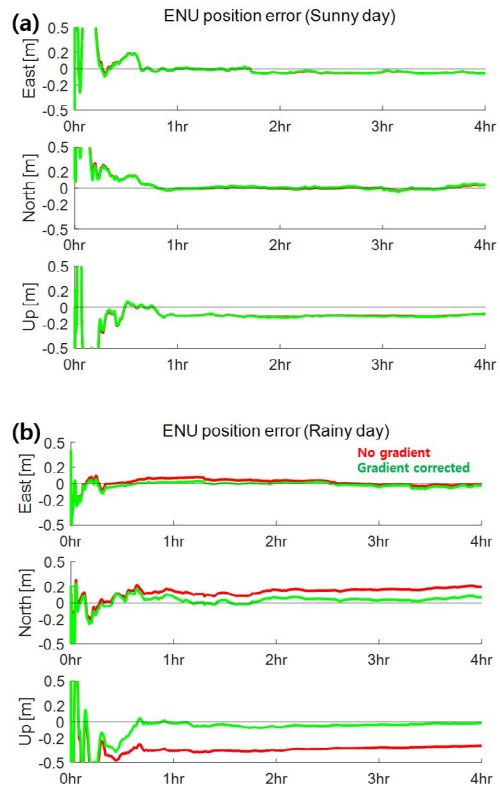


Fig. 3. ENU position error for test 1, (a) sunny day (b) rainy day.

3.2 PPP Positioning Results

이번 절에서는 이중주파수 PPP 측위 결과를 제시하였다. PPP 적용 시 기울기 성분을 처리하는 방법에 따라 각 데이터별 2가지 결과를 비교하였다. PPP의 경우 위치 결정을 위한 기준점 역할을 위성이 수행하며, 본 연구에서는 위성의 위치를 IGS의 정밀 궤도 데이터로 계산하였다. 이에 따라 PPP에 의해 추정된 위치는 IGS의 좌표체계를 따르며, 이는 동적좌표체계이다. 실험에 활용한 기준국의 고시좌표는 특정 시점에 고정된 정적좌표체계 상의 성과이기 때문에, 이를 위치 참값으로 활용하기 어렵다. 따라서, 위치 참값은 정확도가 cm 수준이라고 알려진 National Resources Canada (NRCAN)의 online-PPP 결과를 사용하여 획득하였다 (Guo 2015). PPP 적용 시 초기 위치 추정에 의한 영향을 제거하기 위해 국토지리정보원에서 제공하는 고시좌표를 초기 위치로 사용하였다. 수렴 시간은 위치 오차가 특정 정확도를 달성하여 안정화될 때까지 걸리는 시간을 의미한다. 본 연구에서는 미지 정수를 실수로 추정하기 때문에, 3차원 위치 오차가 10 cm 수준일 것으로 예상된다. 이러한 이유로 3차원 위치 오차가 20 cm 이하가 될 때를 수렴 판단 기준으로 설정하였다.

3.2.1 Test1 results

Test1에서는 SUWN 기준국에 대해서 기상 환경에 따른 PPP 측위 성능을 비교하였다. Fig. 2는 3차원 위치 오차를 시간에 따라 도시한 그래프이며, 여기서 붉은색 실선은 기울기 성분에 의한

Table 4. Test1 3D positioning error.

Weather	Method	Convergence time	Final position error
Sunny	No gradient	36.4 min	10.3 cm
	Gradient corrected	36.3 min	10.6 cm
Rainy	No gradient	-	35.2 cm
	Gradient corrected	34.1 min	7.3 cm

오차를 보상하지 않았을 때의 결과이고, 녹색 실선은 기울기 성분에 의한 오차를 IGS ZPD 데이터를 통해 보상했을 때의 결과이다. 분홍색 파선은 수렴 판단 기준인 20 cm을 나타낸 것이다. 그래프를 통해 확인할 수 있듯이 맑은 날에는 기울기 성분에 의한 오차의 보상 여부에 관계없이 측위 성능에서 차이가 없다. PPP 적용 후 약 35분에 위치 오차가 수렴하며, PPP를 4시간 적용한 후 위치 오차인 최종 위치 오차가 10 cm 수준이다. 반면에 호우가 있는 날에는 기울기 성분에 의한 오차를 보상했을 때만 분석 시간인 4시간 이내에 위치 오차가 수렴하였고, 맑은 날일 때와 측위 성능이 유사한 것을 확인할 수 있었다. Table 4는 3차원 위치 오차 결과에 대해 수렴 시간과 최종 위치 오차를 정리한 것이다.

Fig. 2와 Table 4의 결과를 통해 확인할 수 있듯이 기울기 성분에 의한 대류층 지연 오차의 영향을 무시할 수 없는 경우 보정정보를 통해 오차를 선행 제거하면 수렴 시간과 위치 오차 감소 효과를 확인할 수 있었다. 3차원 위치 오차에 대한 분석 후 East-North-Up (ENU) 방향 오차를 분석하였다. Fig. 3은 각 방향의 위치 오차를 시간에 따라 도시한 것이고, Fig. 4는 두 측위 방식의 시간별 위치 오차의 추세를 비교하기 위해 30분 간격으로 구간을 나누어 각 방향 위치 오차를 도시한 그래프이다.

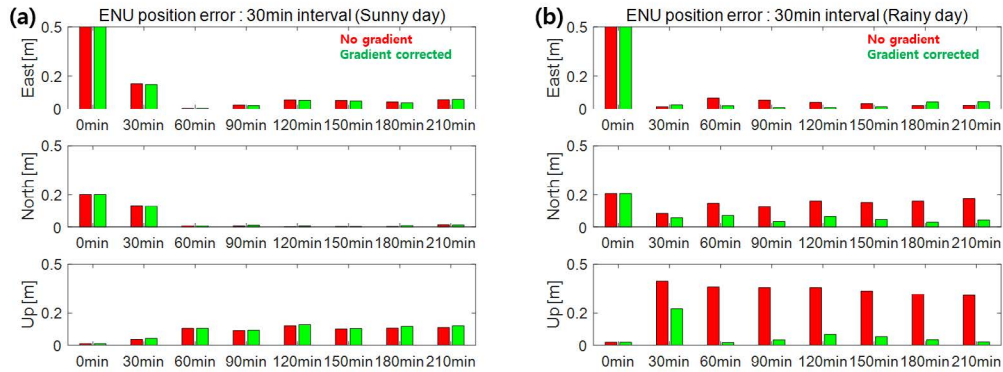


Fig. 4. ENU position error for test 1, (a) sunny day (b) rainy day.

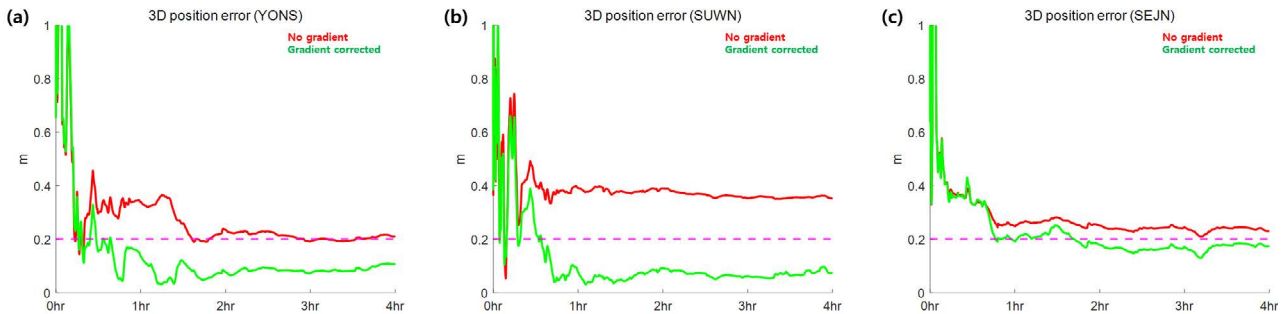


Fig. 5. 3D position error for test 2, (a) YONS (b) SUWN (c) SEJN.

Table 5. Test2 3D positioning error.

Station	Method	Convergence time	Final position error
YONS	No gradient	-	20.8 cm
	Gradient corrected	38.8 min	10.6 cm
SUWN	No gradient	-	35.2 cm
	Gradient corrected	34.1 min	7.3 cm
SEJN	No gradient	-	23.0 cm
	Gradient corrected	101.9 min	17.3 cm

방향별 오차 분석 결과 호우가 있는 날 기울기 성분에 의한 오차를 보상한 경우 모든 방향에서 위치 오차가 감소하고, 특히 up 방향 위치 오차가 크게 감소함을 확인할 수 있었다.

3.2.2 Test2 results

Test2에서는 호우가 있는 날 기준국 위치에 따른 PPP 측위 성능을 비교하였다. 앞서 test1에서 분석한 SUWN 기준국에 더해 YONS와 SEJN 기준국을 분석하였고, 분석결과는 Fig. 5와 Table 5에서 확인할 수 있다.

Test1 분석 결과와 동일하게 호우가 있는 날 3기준국 모두 기울기 성분에 의한 오차를 보상했을 때 측위 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 YONS, SUWN, SEJN 순으로 장마 전선에 가까워지는데, YONS와 SUWN 기준국은 장마 전선 외부에 위치하고 SEJN 기준국은 장마 전선 내부에 위치한다. 기울기 성분은 대류층 지연 오차의 공간 변화율이기 때문에, YONS와 SUWN 기준국에서는 남북 방향으로 큰 기울기 성분이 발생했을 것으로 예상된다. 반면에, SEJN 기준국의 경

우 장마 전선 내부에 위치하기 때문에 주변 기상 환경이 유사하여 기울기 성분이 작을 것으로 예상된다. Fig. 6은 IGS ZPD 데이터의 기울기 성분을 방향별로 도시한 것으로 예상과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 YONS와 SUWN 기준국의 남북 방향 기울기 성분은 SEJN 기준국의 것에 비해 약 10배 큰 것으로 확인된다. 그에 따라 SEJN 기준국에 비해 YONS와 SUWN 기준국에서 PPP를 적용할 때 기울기 성분의 보정정보에 의한 효과가 더 큰 것으로 분석된다. 이때 기울기 성분이 작음에도 SEJN 기준국에서 기울기 성분에 의한 오차를 보상하지 않고 PPP를 적용한 결과 4시간 이내에 수렴이 불가능하였고, 위치 오차가 20 cm 수준이다. 이는 기준국이 대기가 불안정한 장마 전선 내부에 위치하여 시간에 따른 수직 습윤 지연 오차의 변화 큰 것을 PPP 필터에서 반영하지 못해 발생한 위치 오차라고 추측된다.

Figs. 7과 8은 ENU 각 방향의 위치 오차를 시간에 따라 도시한 것과, 30분 간격 구간으로 위치 오차를 도시한 그래프이다. Test1과 동일하게 기울기 성분이 큰 환경인 경우 기울기 성분에 의한 오차를 보상 시 모든 방향에서 위치 오차가 감소함을 확인할 수 있었다.

4. CONCLUSIONS

본 연구에서는 기울기 성분에 의한 대류층 지연 오차를 외부 데이터를 통해 보상 시 PPP 측위 성능 개선 가능성을 분석하였다. GPS 단독의 이중주파수 PPP 알고리즘을 사용하였고 기울기 성

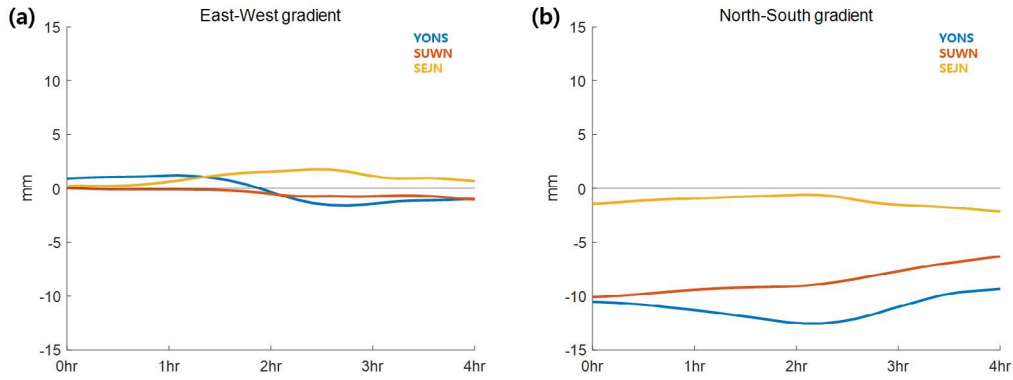


Fig. 6. Tropospheric delay gradient from IGS ZPD, (a) East-West (b) North-South.

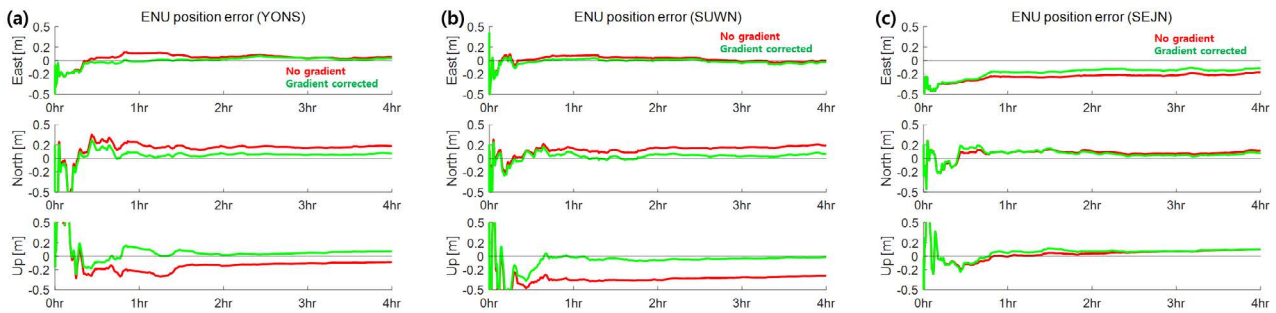


Fig. 7. ENU position error for test 2, (a) YONS (b) SUWN (c) SEJN.

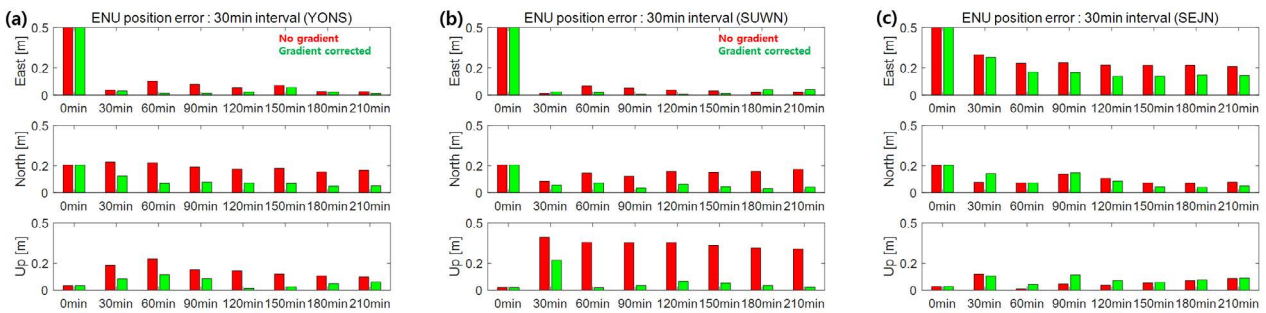


Fig. 8. ENU position error for test 2, (a) YONS (b) SUWN (c) SEJN.

분에 의한 오차의 보정정보로 IGS ZPD 데이터를 사용하였다. 맑은 날과 호우가 있는 날을 분석일로 선정하였고, IGS의 국내 기준국을 사용자로 사용하였다. 2가지 분석을 진행하였는데, 첫 번째는 SUWN 기준국에 대해 맑은 날과 호우가 있는 날 PPP 측위 성능을 분석하였다. 두 번째는 호우가 있는 날 YONS, SUWN, 그리고 SEJN 기준국의 데이터를 분석하였다.

첫번째 분석 결과 맑은 날에는 기울기 성분에 의한 오차의 보상 무무에 관계없이 수렴 시간이 약 35분이었으며, 최종 위치 오차가 10 cm 수준으로 확인되었다. 반면에 호우가 있는 날에는 기울기 성분에 의한 오차를 보정한 경우에만 분석 시간인 4시간 이내에 위치 오차가 수렴하였다. 오차를 보상하는 방식의 수렴 시간은 약 35분이고 최종 위치 오차는 10 cm 수준으로 맑은 날일 때 분석한 PPP 측위 성능과 유사하였다. 그리고 호우가 있는 날 기울기 성분에 의한 오차 보상을 통해 ENU 방향 중 up 방향의 위치

오차가 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.

두 번째 분석 결과 장마 전선 외부에 있던 YONS과 SUWN 기준국의 기울기 성분이 장마 전선 내부에 있던 SEJN 기준국의 기울기 성분보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 그리고 그에 따라 기울기 성분에 의한 오차가 큰 YONS 기준국에서도 기울기 성분의 보정정보 적용에 의한 PPP 측위 성능 개선 효과가 큰 것으로 확인되었다. YONS 기준국의 데이터 분석 결과 기울기 성분 보상 시 약 40분에 오차가 수렴하고 최종 위치 오차는 10 cm 수준이다. SEJN 기준국의 결과에서도 기울기 성분을 보상 시 약 100분에 오차가 수렴하고 최종 위치 오차가 10 cm 수준으로 개선되지만, 그 효과가 다른 기준국에 비해 크지 않았다.

분석 결과 기울기 성분에 의한 오차를 무시할 수 없는 환경의 사용자가 PPP를 통해 정밀 측위를 수행할 때, 기울기 성분에 의한 오차의 보정정보를 적용하면 수렴시간과 위치 정확도를 개선

할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 IGS의 ZPD 데이터를 기울기 성분의 보정정보로 사용하였다. 그러나 ZPD 데이터는 모든 날에 제공되지 않으며, 특정 IGS의 기준국에 대해서만 제공하기 때문에 분석일과 분석 대상이 제한된다. 향후 연구에서는 기울기 성분 자체적으로 추정하여 임의의 사용자가 사용 가능하도록 보정정보화 하여, 다양한 환경과 사용자에게 대해 정밀 측위 성능 개선 효과를 분석할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), Unmanned Vehicle Advanced Research Center (UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea, contracted through by SNU Future Innovation Institute (No. 2020M3C1C1A01086407). This research was supported (in part) by the Institute of Advanced Aerospace Technology at Seoul National University. The Institute of Engineering Research at Seoul National University provided research facilities for this work.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, B.G.; methodology, B.G.; software, B.G.; validation, B.G. and C.D.; formal analysis, B.G.; investigation, B.G.; resources, B.G.; data curation, B.G.; writing—original draft preparation, B.G.; writing—review and editing, B.G.; visualization, B.G.; supervision, C.D.; project administration, C.D.; funding acquisition, C.D.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bahadur, B. & Nohutcu, M. 2018, PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis, *GPS Solutions*, 22, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0777-z>
- Bar-Sever, Y. E., Kroger, P. M., & Borjesson, J. A. 1998, Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103, 5019-5035. <https://doi.org/10.1029/97jb03534>
- Byun, S. H. & Bar-Sever, Y. E. 2009, A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service, *Journal of Geodesy*, 83, 367-373. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0288-8>
- Chen, G. & Herring, T. A. 1997, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 20489-20502. <https://doi.org/10.1029/97jb01739>
- Du, Y., Wang, J., Rizos, C., & El-Mowafy, A. 2021, Vulnerabilities and integrity of precise point positioning for intelligent transport systems: overview and analysis, *Satellite Navigation*, 2, Article number: 3. <https://doi.org/10.1186/s43020-020-00034-8>
- Guo, Q. 2015, Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation, *GPS Solutions*, 19, 537-544. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0413-5>
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2006, *Understanding GPS: Principles and Applications*. 2nd ed. (Boston: Artech House Inc.)
- Kouba, J. & Heroux, P. 2001, Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5, 12-28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Li, X., Zus, F., Lu, C., Ning, T., Dick, G., et al. 2015, Retrieving high-resolution tropospheric gradients from multiconstellation GNSS observations, *Geophysical Research Letters*, 42, 4173-4181. <https://doi.org/10.1002/2015GL063856>
- Lu, C., Li, X., Zus, F., Heinkelmann, R., Dick, G., et al. 2017, Improving BeiDou real-time precise point positioning with numerical weather models, *Journal of Geodesy*, 91, 1019-1029. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1005-2>
- Meindl, M., Schaer, S., Hugentobler, U., & Beutler, G. 2004, Tropospheric gradient estimation at code: Results from global solutions, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 331-338. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2004.331>
- Miyazaki, S., Iwabuchi, T., Heki, K., & Naito, I. 2003, An impact of estimating tropospheric delay gradients on precise positioning in the summer using the Japanese nationwide GPS array, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108, 1-11. <https://doi.org/10.1029/2000jb000113>
- Teke, K., Böhm, J., Nilsson, T., Schuh, H., Steigenberger, P., et al. 2011, Multi-technique comparison of troposphere zenith delays and gradients during CONT08, *Journal of Geodesy*, 85, 395-413. <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0434-y>
- Xu, Y., Jiang, N., Xu, G., Yang, Y., & Schuh, H. 2015, Influence of meteorological data and horizontal gradient of tropospheric model on precise point positioning, *Advances in Space Research*, 56, 2374-2383. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0434-y>

[org/10.1016/j.asr.2015.09.027](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.09.027)

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, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96jb03860>

Zus, F., Douša, J., Kačmařík, M., Václavovic, P., Balidakis, K., et al. 2019, Improving GNSS zenith wet delay interpolation by utilizing tropospheric gradients: Experiments with a dense station network in central Europe in the warm season, *Remote Sensing*, 11, 674. <https://doi.org/10.3390/rs11060674>



Bu-Gyeom Kim is a Ph.D. student of the GNSS Laboratory in the Department of Aerospace Engineering at Seoul National University. He received B.S degree in aerospace engineering from the same university. His main research interest is precise navigation and ionospheric disturbances by earthquakes.



Changdon Kee is a Professor in Department of Aerospace Engineering at Seoul National University, South Korea and supervises SNU GNSS Laboratory. He received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University and a Ph.D. degree from Stanford University. He served as a Technical Advisor to the Federal Aviation Administration (FAA) on the Wide Area Augmentation System (WAAS) in 1994. Prof. Kee currently serves as a Technical Advisor for Incheon International Airport Corporation and Ministry of Oceans and Fisheries. He served as a President of the Institute of Position, Navigation, and Time (IPNT) and also president of the Korean Navigation Institute (KONI). He has more than 30 years of GNSS and flight control research experiences.