

Analyzing Characteristics of GPS Dual-frequency SPP Techniques by Introducing the L2C Signal

Seonghyeon Yun¹, Hungkyu Lee²

¹Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

²Department of Civil Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

ABSTRACT

Several experiments were carried out to analyze the impact of the modernized Global Positioning System (GPS) L2C signal on pseudorange-based point positioning. Three dual-frequency positioning algorithms, ionosphere-free linear combination, ionospheric error estimation, and simple integration, were used, and the results were compared with those of Standard Point Positioning (SPP). An analysis was conducted to determine the characteristics of each dual-frequency positioning method, the impact of the magnitude of ionospheric error, and receiver grade. Ionosphere-free and ionospheric error estimation methods can provide improved positioning accuracy relative to SPP because they are able to significantly reduce the ionospheric error. However, this result was possible only when the ionospheric error reduction effect was greater than the disadvantage of these dual-frequency positioning algorithms such as the increment of multipath and noise, impact of uncertainty of unknown parameter estimation. The RMSE of the simple integration algorithm was larger than that of SPP, because of the remaining ionospheric error. Even though the receiver grade was different, similar results were observed.

Keywords: L2C, GPS modernization, dual-frequency, point positioning, accuracy

1. INTRODUCTION

대표적인 위성항법시스템 Global Positioning System (GPS)은 높은 정확도의 Positioning, Navigation, Timing (PNT) 정보를 신속하고 효율적으로 제공하여 전세계의 다양한 응용분야에서 널리 활용되고 있다. 특히, 스마트폰 대중화, 위치기반 서비스 다양화 등으로 그 활용이 꾸준히 증가하는 추세이다 (GSA 2019). 미 정부는 GPS의 측위 정확도, 연속성, 강건성 등 전반적인 성능 향상을 위해 위성 기능 개선, 제어부문 고도화 등 시스템 현대화(modernization)를 진행하고 있다 (NOAA 2023). GPS 서비스 민간 사용자 입장에서 현대화의 주요 사항은 L2C, L5, L1C와 같은 민간 대상 신규 측위 신호를 추가 수신 가능하다는 것이다. 특히, L2C는 L2 대역 (1227.60 MHz) 반송파에 변조되어 민간에게 제공

되는 첫번째 현대화 신호이다. 해당 신호 송출 위성은 2023년 5월 기준 25기로 전체 31기의 약 80%에 달하며 (NAVCEN 2023), 이는 L2C를 측위에 활용하기 충분한 수만큼 상시 확보할 수 있는 수준이다. 이에 따라 단일주파수 신호만 수신하던 저가의 항법용 수신기도 이중주파수 관측데이터를 취득하여 더욱 정확한 PNT 정보를 확보할 수 있을 것으로 기대된다 (Inside GNSS 2006, Cameron 2015). 따라서, 모든 위성이 현대화 위성으로 대체되어 L2C를 본격적으로 측위에 활용하기 전 해당 신호를 활용한 이중주파수 측위 특징에 대하여 살펴볼 필요가 있다.

O'Keefe et al. (2009)은 L2C 송출 위성이 3기에 불과하던 당시 수신할 수 있는 현대화 신호로 전리층 오차 보정 정보를 생성하고, 이를 L1 C/A 관측데이터에 포함된 전리층 오차 축소에 활용하여 Standard Point Positioning (SPP) 정확도를 효율적으로 향상시키는 방법에 대해 연구하였다. 실험 결과 측위 정확도가 Klobuchar 모형 적용 시와 비교할 때 약간 향상되기도 하나 그 차이가 크지 않으며, 불량한 관측 값을 전리층 오차 보정 값 생성에 포함하는 경우 오히려 측위 정확도가 하락하기도 함을 보였다.

Hai et al. (2015)은 L2C의 이론적 특징을 고찰하고, 해당 신호 취득이 가능한 소프트웨어 수신기 구현 및 측위 정확도 분석을

Received May 08, 2023 Revised May 26, 2023 Accepted June 03, 2023

†Corresponding Author

E-mail: hkyulee@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3777 Fax: +82-55-285-9491

Seonghyeon Yun <https://orcid.org/0000-0002-7135-0046>

Hungkyu Lee <https://orcid.org/0000-0002-7127-9702>

수행하였다. 저자는 L2C가 L1 C/A에 비해 더욱 강한 추적 가능성이 가능하며, 약 신호 환경에서 보다 신속한 취득이 가능하다고 강조하였다. 해당 연구에서 수행한 L2C 포함 이중주파수 의사거리 기반 측위 알고리즘에 대하여 구체적인 언급이 없으나, 무전리층 선형결합이 아닌 현대화 신호를 단순히 추가 관측데이터로만 고려한 것으로 보인다. 실험 결과로부터 측위 정확도 향상을 관찰할 수 없었으며, 그 이유로 L2C를 추가 송출하는 이유가 정확도 향상이 아니라 주장하였다.

Marques et al. (2016)은 전리층 교란 정도에 따른 L2C 활용 효과를 살펴보고자 의사거리 다중경로 크기, 신호의 Lock time을 L1 C/A, L2 P(Y)에 대한 것과 비교하고, Precise Point Positioning (PPP) 수행 후 그 정확도를 분석하였다. 전리층 교란이 약할 때 L2C 다중경로 크기는 L1 C/A와 유사하고 L2 P(Y)에 비해 작으나 교란이 보통 혹은 강할 경우 현대화 신호의 다중경로가 다른 두 신호에 비해 커지는 것을 보였다. Lock time은 L2C와 C/A가 모든 조건에서 유사하였고, 교란이 심할수록 loss of lock이 빈번히 발생함을 확인하였다. 전리층 교란이 약한 경우 L2C를 활용한 PPP 정확도는 P2(Y) 사용 시에 비해 높았으나, 교란이 심해짐에 따라 현대화 신호 다중경로 크기가 커져 그 측위 정확도가 균용 신호 활용 결과에 비해 낮아지는 것을 보였다.

Wang et al. (2019)은 현대화 항법메시지 (CNAV) 성능을 고찰하고자 Signal-In-Space Range Error (SISRE)를 기존 항법메시지 (LNAV)에 대한 것과 비교하였고, CNAV에 새롭게 추가된 파라미터 Inter Signal Correction (ISC) 갱신 주기와 정확도를 분석하였다. 그리고 이 파라미터를 적용한 단일 및 이중주파수 의사거리 기반 절대측위를 수행하고 그 영향을 살펴보았으며, 이때 이중주파수 측위는 L2C 활용 무전리층 선형결합을 수행한 것이다. 실험 결과를 통해 CNAV의 SISRE가 과거에 비해 향상되어 LNAV에 대한 것과 유사해졌음을 보였다. 또한, ISC 적용이 단일 주파수 측위 정확도에는 큰 영향을 미치지 않으나 이중주파수 측위 정확도는 약 19% 수준 향상시킬 수 있다고 보고하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 L2C 신호를 측위에 활용한 연구가 수행된 바 있으나 그 수가 제한적이며, 위치 결정 관점에서 해당 현대화 신호 활용의 큰 장점으로 꼽히는 효과적인 전리층 오차 축소에 관한 연구는 일부에 불과하였다. 또한, 이중주파수 신호 확보로 다양한 측위 알고리즘 적용이 가능하나 기존 연구에서는 측위 방식 사이 특징을 비교하지 않았다. 이는 L2C를 측위에 활용할 수 있을 정도로 충분히 확보할 수 있게 된 시점이 얼마되지 않았기 때문으로 보인다. 따라서, 본 연구에서는 L2C를 활용한 이중주파수 의사거리 기반 절대측위 방법 3가지에 대해 고찰하고, 이를 적용한 측위 결과를 Degree Of Freedom (DOF), Dilution Of Precision (DOP), 좌표 시계열 형상, 측위 정밀도와 정확도 측면에서 SPP에 대한 것과 비교 분석하였다. 이와 함께 관측데이터에 포함된 전리층 오차 크기, 수신기 등급에 따른 측위 결과를 살펴보고자 하였다.

2. MATHEMATICAL MODELS FOR DUAL-FREQUENCY POSITIONING

GPS에 의한 3차원 좌표 추정 알고리즘 중 의사거리 기반 절대측위에는 일반적으로 최소제곱법을 적용하며 (Hofmann-Wellenhof et al. 2001), 해당 방법은 함수모형 (functional model) 과 통계모형 (stochastic model)으로 이루어진 수학적 모형 (mathematical model)을 필요로 한다. 함수모형은 관측데이터와 미지수의 수학적 관계, 즉 관측방정식을 의미하며 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다. 통계모형은 관측데이터의 불확실성과 상관성을 나타내는 분산-공분산 행렬로 보다 현실적인 미지수 추정을 위해 필요하며, Eq. (2)와 같이 위성 고도각에 대한 삼각함수로 표현 가능하다 (Dach et al. 2007). 각 관측데이터 사이 상관성이 없는 것으로 가정하면, 분산-공분산 행렬의 비대각선 요소는 모두 0이 된다. 최종적으로 3차원 좌표 추정은 Eq. (3)에 의해 이루어진다 (Strang & Borre 1997, Leick et al. 2015).

$$L = Ax + v \tag{1}$$

$$Q = P^{-1} = \sigma^2 \begin{bmatrix} csc^2(\theta^{s1}) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & csc^2(\theta^{s2}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & csc^2(\theta^{sn}) \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P L \tag{3}$$

여기서, L 은 관측벡터, A 는 계수행렬, x 와 \hat{x} 는 미지수와 그 추정치 벡터, v 는 잔차 벡터이다. Q , P 는 각각 분산-공분산행렬과 가중행렬이며, θ^n 은 n 번째 위성의 고도각을 의미한다.

2.1 Ionosphere-free Linear Combination

무전리층 선형결합 측위는 Eq. (4)와 같이 주파수와 전리층 오차의 관계를 이용하여 관측데이터에 포함된 전리층 오차를 대폭 축소시킨 새로운 관측데이터를 만들어 위치 결정에 활용하는 방식이다 (Flores 2021). Eqs. (1, 3)의 관측벡터에 선형결합으로 생성한 데이터를 입력하는 것을 제외하면 수학적 모형은 기존 SPP에 대한 것과 동일하며, 이에 따라 DOF, DOP도 이론적으로 SPP와 같다. 또한, 선형결합을 수행함에 따라 의사거리에 포함된 다중경로와 잡음 크기가 증가하는 특징이 있다 (Wanninger & May 2001, Salos et al. 2010). 의사거리의 다중경로와 잡음 크기를 고려할 때, 이들의 증가가 측위 결과에 미치는 영향에 유의할 필요가 있을 것이다.

$$PR_{IF} = \frac{f_{L1}^2 \cdot PR_{C/A} - f_{L2}^2 \cdot PR_{L2C}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} + c \cdot \frac{ISC_{L2C} - ISC_{C/A} \cdot (f_{L1}^2/f_{L2}^2)^2}{1 - (f_{L1}^2/f_{L2}^2)^2} \tag{4}$$

여기서, PR 는 의사거리 관측데이터로 아래 첨자 IF 는 무전리층 선형결합, C/A 와 $L2C$ 는 각각에 대한 원시 데이터임을 의미한다. f 는 주파수, ISC 는 코드 사이 편의 보정 정보로 아래 첨자를 통해서도 다른 신호에 대한 것임을 나타냈다.

2.2 Estimation of Ionospheric Error

이중주파수 신호를 수신함에 따라 측위에 활용할 수 있는 관

Table 1. Positioning algorithms used for the experiment.

Positioning algorithm	Description	Remarks
I	Single point positioning	Single frequency
II	Ionosphere-free linear combination	
III	Ionospheric error estimation	Dual frequency
IV	Simple integration	

Table 2. Observation data sets for experiment.

Set	Type	Station	Receiver	Antenna	Date	Duration (hours)	Interval (sec)
A	Permanent	DOND, PUSN, SEJN, WULJ JUNG, SONC, YECH, YONK	Trimble NETR9	TRM59800.00	2020.05.05.	24	1
			Leica GR50	LEIAR25.R4	2021.05.05. 2022.05.05		
B	Temporary		Leica GS10 Javad Alpha U-blox ZED-F9P	LEIAS11 JAV_GRANT-G3T ANN-MB-00-00	2022.05.05.	6 (02:12:00 ~ 08:11:59 GPST)	

측데이터 수가 증가하여 3차원 좌표, 수신기 시계오차와 함께 전리층 오차도 미지수로 고려하여 동시 추정할 수 있다. 해당 방식의 측위를 수행하기 위해 수학적 모형 중 계수행렬에는 Eq. (5)와 같이 L2C 의사거리와 각 신호 주파수에 대한 전리층 오차 관련 항을 추가해야 한다. L1 주파수에 대한 전리층 오차를 추정하고자 하므로 해당 부분 ($Iono_{L1}$)은 단위행렬 I , L2 반송파의 전리층 오차 부분은 주파수와와의 관계를 이용하여 L1에 대한 것으로 표현할 수 있다. 관측벡터에는 L2C 관측데이터 관련 항, 미지수벡터에는 추정하고자 하는 전리층 오차에 대한 것이 각각 Eqs. (6, 7)과 같이 추가되어야 한다. 통계모형에도 Eq. (8)과 같이 L2C 관측데이터에 대한 불확실성 항을 추가한다. 위성에서 송출한 C/A와 L2C 신호를 모두 수신한다면 미지수 개수 증가만큼 관측데이터 수도 증가하기 때문에 자유도는 SPP와 동일하나, DOP는 미지수로 추가된 전리층 오차 항의 영향으로 그 결과가 SPP에 대한 것과 차이가 있다 (Yun 2023).

$$\begin{bmatrix} A_{C/A} & Iono_{L1} \\ A_{L2C} & Iono_{L2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{C/A} & Iono_{L1} \\ A_{L2C} & (f_{L1}/f_{L2})^2 \cdot Iono_{L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{C/A} & I \\ A_{L2C} & (f_{L1}/f_{L2})^2 \cdot I \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L = [L_{C/A} \quad L_{L2C}]^T \quad (6)$$

$$x = [dX \quad dY \quad dZ \quad dT_r \quad dion_{L1}^1 \quad dion_{L1}^2 \quad \dots \quad dion_{L1}^n]^T \quad (7)$$

$$Q = \sigma^2 \begin{bmatrix} Q_{C/A} & \emptyset \\ \emptyset & Q_{L2C} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, dX, dY, dZ, dT_r 는 각 좌표성분과 수신기 시계오차에 관한 미지수, $dion_{L1}^n$ 은 n 번째 위성의 L1 주파수에 대한 경사방향 전리층 오차 관련 미지수 항이다.

2.3 Simple Integration

L2C 의사거리를 단순히 추가 관측데이터로만 고려하여 위치 결정이 가능하며, 본 연구에서는 이를 단순통합 측위라 명명하였다. L2C 관측데이터를 추가함에 따라 함수모형 중 계수행렬은 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다. 미지수 벡터는 SPP, 관측벡터와 분산-공분산행렬은 각각 Eqs. (6, 8)과 같다. 해당 방식의 경우 전리층 오차 보정은 SPP와 동일하게 Klobuchar 모형을 활용하였으

며, 각 관측데이터 주파수에 따라 적절히 적용하였다. 해당 측위 방식의 미지수는 4개이나 관측데이터 수가 증가하여 SPP에 비해 자유도가 높으며, DOP 계산 시 각 위성이 2회씩 고려되므로 그 값은 SPP에 비해 $1/\sqrt{2}$ 배 낮은 특징이 있다 (Yun 2023).

$$A = \begin{bmatrix} A_{C/A} \\ A_{L2C} \end{bmatrix} \quad (9)$$

앞서 소개한 세 가지 이중주파수 측위 방식의 경우 서로 다른 의사거리 관측데이터를 위치 추정에 사용하기 때문에 Differential Code Bias (DCB)를 적절히 보정할 필요가 있으며, 이를 위해 CNAV의 ISC 파라미터를 활용하였다 (Flores 2021). 이후 본문에서는 측위 알고리즘 언급의 편의를 위해 Table 1에 나타난 바와 같이 SPP, 무전리층 선형결합, 전리층 오차 추정, 단순통합 측위 각각 Positioning Algorithm (PA) I ~ IV라 하였다.

3. METHODOLOGY

3.1 Observation Data

L2C 현대화 신호를 활용한 세가지 이중주파수 의사거리 기반 절대측위 방식의 특징을 살펴보고자 Table 2와 같이 두 가지 관측데이터 세트를 확보하였다. 세트 A는 국토지리정보원 상시관측점으로부터 취득한 GPS 신호로 수신기 Trimble NETR9, Leica GR50이 설치된 관측점 각각 4개소에 대한 것이며, 이들 상시관측점 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 이중주파수 측위 알고리즘 종류의 특징과 더불어 전리층 오차 크기에 따른 영향을 살펴보고자 동일 관측점에 대하여 2020 ~ 2022년 각 연도의 5월 5일 관측데이터를 확보하였고, 이들은 1초 간격으로 24시간 분량이다.

세트 B는 Fig. 2와 같이 양호한 다중경로 환경 아래에 임시 설치한 각기 다른 등급의 수신기 (이하 임시관측점)로 취득한 데이터이며, 이를 활용하여 수신기 등급에 따른 영향을 분석하고자 하였다. 임시관측점의 수신기는 Leica GS10, Javad Alpha, 그리고 U-blox의 ZED-F9P 모듈을 부착한 C099-F9P 어플리케이션 보드 (이하 ZED-F9P)이며, 전자 두 가지는 측지측량용, 마지막은 저가의 항법용으로 그 등급을 구분할 수 있다. 해당 관측데이터 세트는 2022년 5월 5일 6시간 동안 1초 간격으로 취득한 것이다.

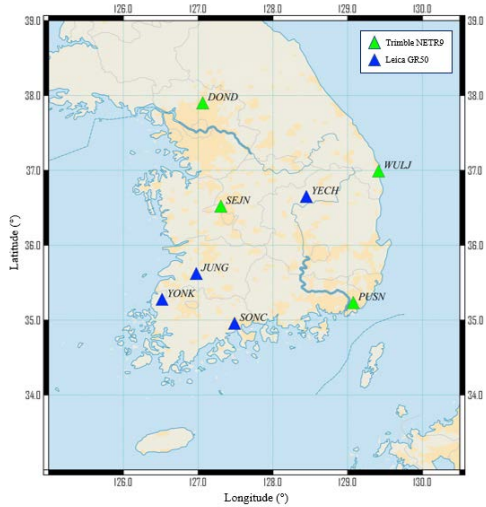


Fig. 1. Layout of permanent stations to obtain data set A.

본 연구에서의 측위 실험은 L2C 신호의 최대 사용자일 것으로 예상되는 스마트폰, 차량 등의 실시간 위치결정 상황을 고려해 수행하였다. 해당 사용자들은 다중경로와 잡음을 감소시킬 수 있는 Hatch Filter Smoothing 등의 처리를 수행하지 않을 것으로 사료되는 바, 이러한 전처리 기법을 적용하지 않은 원 관측데이터로 측위를 수행하였다.

3.2 Data Processing Method

2장에서 기술한 3가지 방식의 이중주파수 의사거리 기반 절대측위 결과를 분석하여 현대화 신호 L2C가 측위에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 태국의 Communication, Signal Processing and Storage Research Group (CSSRG)에서 단일주파수 의사거리 기반 절대측위 수행을 목적으로 개발한 Matlab 스크립트를 수정하여 앞서 소개한 두 가지 관측데이터 세트를 처리하였다 (KMITL 2023). 해당 스크립트는 RINEX 버전 2.11 형식의 관측데이터와 항법메시지를 입력으로 최소제곱법에 의해 측위해를 산출하며, 수신기 시계오차, DOF, DOP, 전리층과 대류권 오차 보정량 등을 함께 출력한다. 실험 결과는 DOF, DOP, 시계열 형상 및 편이 수준, 측위 정밀도와 정확도 측면에서 SPP에 대한 것과 비교 분석하였다. 정확도 계산의 기준은 데이터 세트 A의 경우 해당 상시관측점의 고시좌표, 세트 B는 취득한 관측데이터의 Post-Processed Kinematic (PPK) 측위 결과이다. 후자는 오픈 소프트웨어 패키지 RIKLIB의 후처리 전용 소프트웨어 RTKPOST로 결정하였다 (Takasu 2013). 이때, 기준점은 임시관측점에서 약 800 m 떨어진 국토지리정보원 상시관측점 CHWN으로 하였다.

4. ANALYSIS OF RESULTS

4.1 Impact of Positioning Algorithm

L2C 확보로 수행할 수 있게 된 이중주파수 절대측위 알고리즘



Fig. 2. Set up of temporary station with different grades of receiver to obtain data set B.

종류에 따른 위치 결정 결과를 비교하고자 데이터 세트 A의 2020년 관측데이터를 활용하였다. Fig. 3은 네 가지 측위 수행 결과 중 DOF와 DOP를 도시한 것으로, 실험 대상 상시관측점 중 DOND에 대한 결과를 예시로 나타냈다. 그림은 무전리층 선형결합 (PA II)의 DOF와 DOP가 SPP (PA I) 결과와 거의 동일한 것을 보여준다. 전리층 오차 추정 방식 (PA III)의 DOF는 PA I과 동일하나 DOP가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있으며, 이는 추가된 미지수의 추정 불확실성이 측위 결과에 영향을 미치는 것이라 이해할 수 있다. 단순통합 측위 (PA IV)의 DOF는 SPP에 비해 크며, 이에 따라 DOP가 PA I에 비해 작은 것을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 데이터 세트 A의 다른 모든 관측점에서 동일하게 나타났다.

Fig. 4는 데이터 세트 A의 8개 상시관측점 중 DOND 취득 관측데이터를 네 가지 측위 방법으로 처리해 산출한 좌표와 고시좌표의 차이를 시각화한 것이다. PA I의 시계열과 비교할 때 PA II, III 결과의 좌표 변동 폭이 비교적 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 선형결합에 따른 의사거리 다중경로와 잡음 증가, 그리고 미지수 추정 불확실성이 측위 결과에 영향을 미쳤기 때문으로 보인다. 반면, PA IV의 시계열 좌표 변동 폭은 PA I과 비교할 때 약간 작으며, 이는 관측데이터 수의 증가 효과로 이해할 수 있다.

데이터 세트 A 중 2020년에 대한 8개 상시관측점의 측위 정밀도와 정확도 평균을 수평과 수직으로 구분해 Fig. 5에 나타내었다. 해당 통계 값을 포함하여 이후 언급하는 모든 통계 값은 1σ에 대한 것이다. 그림을 보면 PA II, III의 수평 및 수직 방향 표준편차가 PA I에 비해 큰 것을 관찰할 수 있으며, 이는 앞서 시계열에서 확인한 바와 같이 두 이중주파수 측위 방식의 좌표 변동 폭이 SPP에 비해 크기 때문이다. PA IV의 정밀도는 PA I과 큰 차이를 보이지 않으며, 그 이유는 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 두 측위 결과의 좌표 변동 수준이 유사하기 때문이라 할 수 있다. 측위 정확도를 살펴보면 세 가지 이중주파수 측위 모두 RMSE가 SPP에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. PA II, III의 경우에는 각각 증가한 의사거리 다중경로와 잡음, 그리고 추가된 미지수 추정 불확실성의 영향이 그 원인으로 보인다. PA IV의 경우는 Klobuchar 모형으로

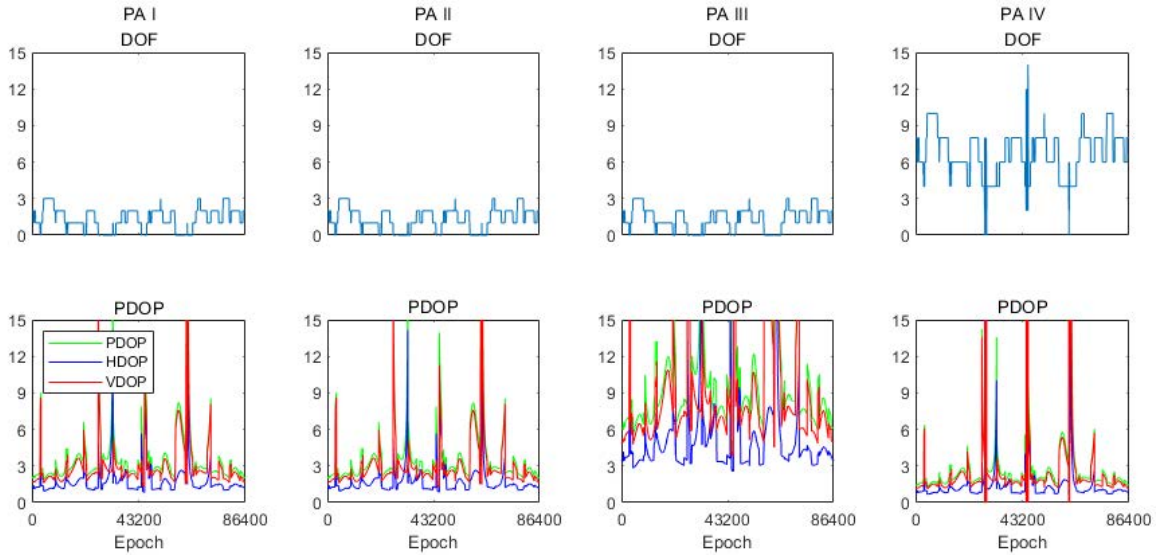


Fig. 3. DOF and DOP of four positioning algorithms with DOND station in data set A (year 2020).

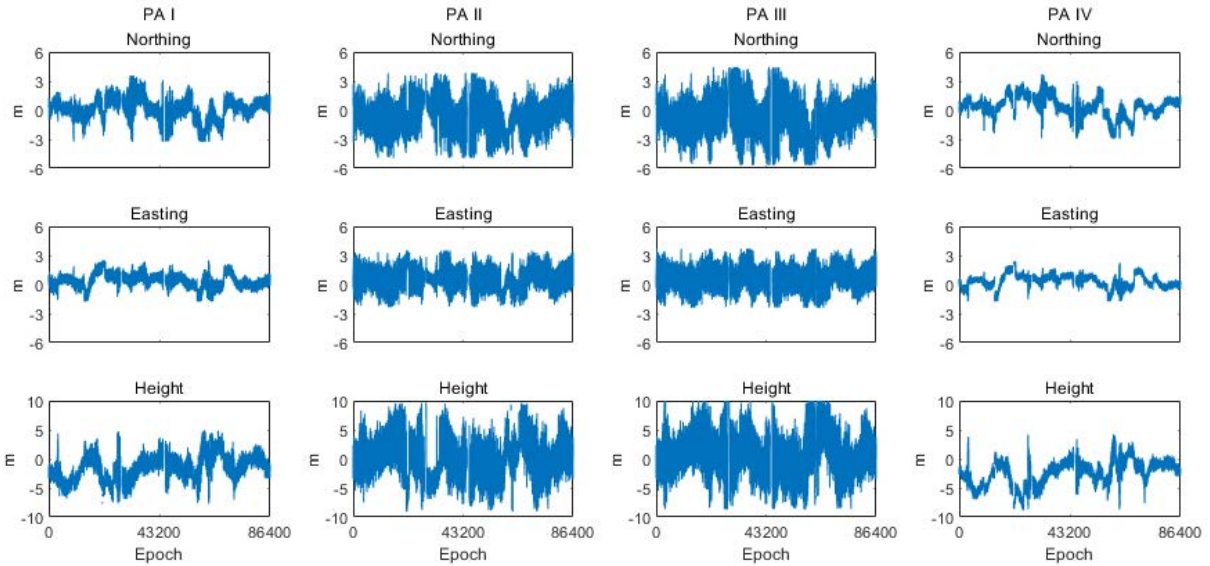


Fig. 4. Coordinate time series of four positioning algorithms with DOND station in data set A (year 2020).

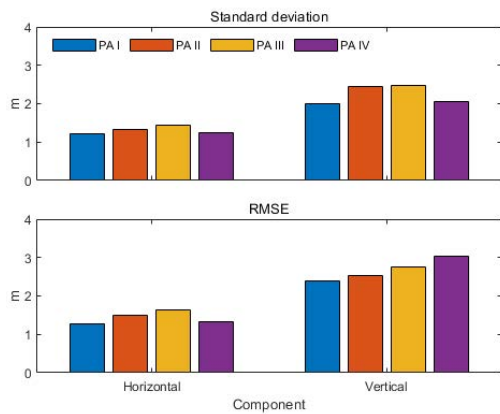


Fig. 5. Averaged values of standard deviation and RMSE of four positioning algorithms for data set A (year 2020).

축소한 후 잔존하는 전리층 오차 때문으로 의심되며, 특히, 주파수와 전리층 오차의 관계를 고려할 때 C/A에 비해 큰 전리층 오차를 포함하는 L2C가 측위에 활용되었기 때문으로 이해할 수 있을 것이다.

새로운 민간신호 추가로 이중주파수 절대측위가 가능해짐에 따라 기존 단일주파수 측위인 SPP에 비해 높은 정확도로 위치 결정이 가능할 것이라 기대하였으나, 데이터 세트 A의 2020년도 관측 자료를 활용한 실험결과에서는 오히려 이중주파수 절대측위 정확도가 SPP에 비해 낮다. 그 원인이 해당 데이터 취득 당시 태양 활동이 극소기로 관측데이터에 포함된 전리층 오차 크기가 작았기 때문으로 의심되는 바 (Langley 2000), 다음 절에서는 전리층 오차 크기가 다른 3개 연도에 대한 동일 관측점의 데이터를 4가지 측위 방식으로 처리하고 그 결과를 분석하였다.

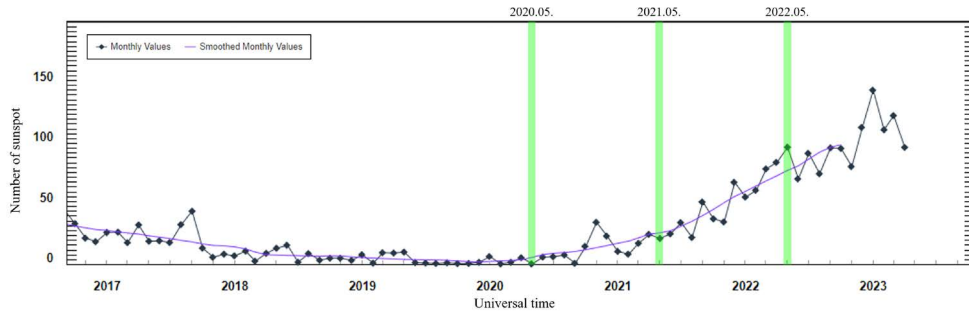


Fig. 6. Monthly averaged number of sunspot (SWPC 2023).

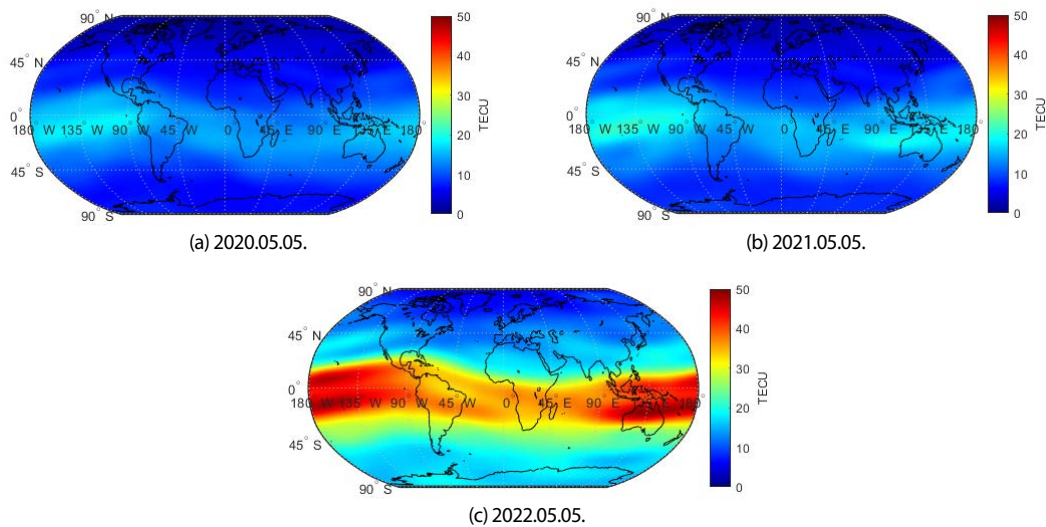


Fig. 7. Daily averaged VTEC from IONEX for the date in data set A.

Table 3. Averaged values of DOF and PDOP for data set A.

Index	DOF			PDOP			
	Year	2020	2021	2022	2020	2021	2022
Positioning algorithm	I	1.39	1.37	1.37	3.81	3.58	3.67
	II	1.37	1.34	1.36	3.90	3.65	3.73
	III	1.39	1.36	1.37	11.01	10.64	10.91
	IV	6.74	6.71	6.73	2.72	2.53	2.61

4.2 Impact of Magnitude of Ionospheric Error

관측데이터에 포함된 전리층 오차 크기에 따른 4가지 측위 알고리즘 적용 결과를 비교하고자 데이터 세트 A의 2020 ~ 2022년 관측데이터를 활용하였다. 전리층 오차 크기는 태양 활동과 밀접한 관련이 있으며 (Leick et al. 2015), 이는 태양 흑점 개수를 통해 간접적으로 확인할 수 있다. Fig. 6은 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 태양 흑점 개수 월간 평균 시계열을 나타낸 것이다 (SWPC 2023). 해당 그림은 11년 주기의 태양활동이 2020년에 극소기, 2021년에서 2022년으로 시간이 지남에 따라 흑점 수가 증가, 즉 태양 활동이 활발해지고 있음을 보여준다. 특히, 2021년에 비해 2022년 흑점 수가 크게 증가한 것을 관찰할 수 있다. International GNSS Service (IGS)에서 제공하는 전리층 관련 해석 결과물인 IONEX를 활

용해 데이터 세트 A의 관측날짜에 대한 전 지구의 일간 평균 Vertical Total Electron Contents (VTEC)를 산출하고, 이를 Fig. 7에 도시하였다. 그림을 보면 2020년의 VTEC 크기는 상당히 작고, 2021년에는 그래프에서 명확히 확인할 수 있을 정도의 VTEC 증가가 관찰되지 않는 반면, 2022년에는 확연히 증가한 것을 확인할 수 있다.

2020년에서 2022년 사이 L2C를 송출하는 현대화 위성이 추가 발생되었으나, 전리층 오차 크기에 따른 영향만 살펴보고자 세 날짜에 대하여 공통으로 취득한 위성만 측위에 활용하였다. Table 3은 네 가지 측위 방식에 대한 연도별 평균 DOF와 PDOP를 요약한 것으로, Fig. 3에서 도식적으로 살펴본 측위 알고리즘에 따른 특징을 보여준다. 위치 결정에 활용한 위성 수가 동일하기 때문에 이들 값의 연도별 차이가 크지 않다.

Fig. 8은 DOND 관측점 취득 연도별 데이터를 네 가지 측위 방

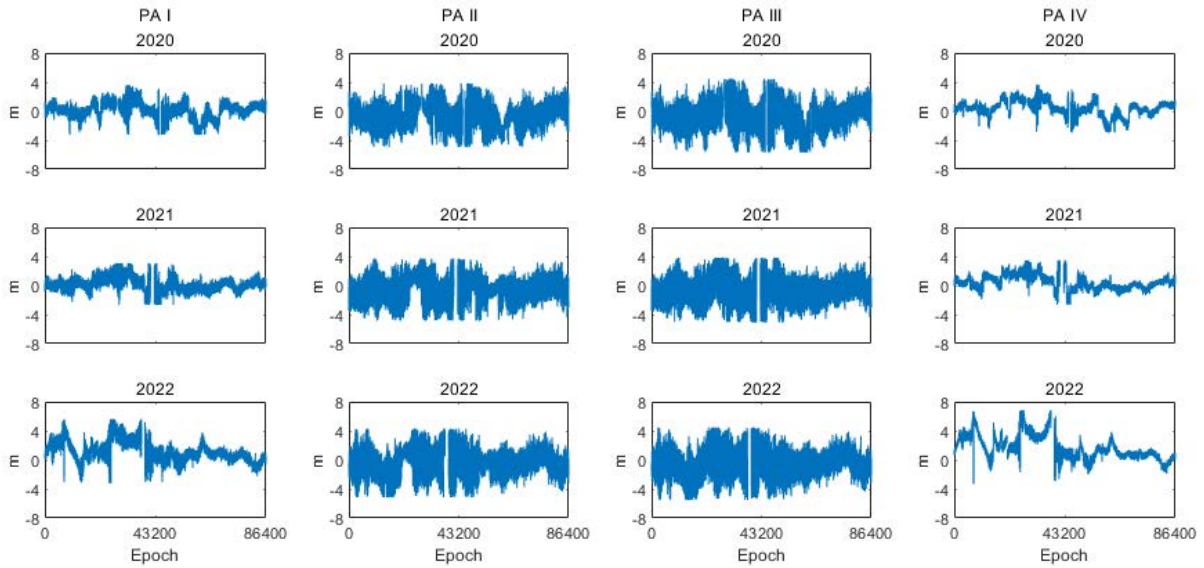


Fig. 8. Coordinate time series of northing for four positioning algorithms with DOND station in data set A.

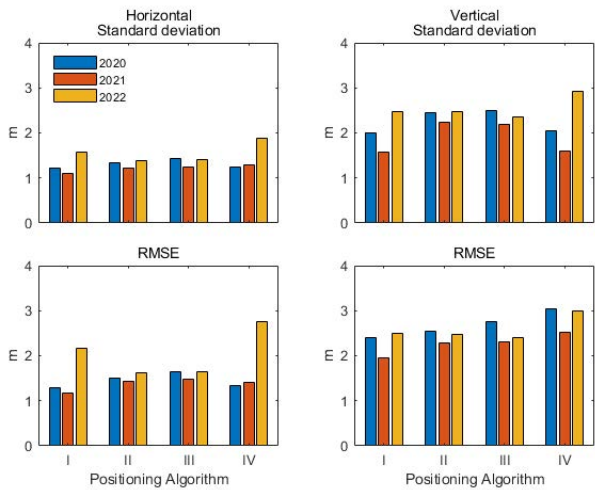


Fig. 9. Averaged values of standard deviation and RMSE of four positioning algorithms for data set A.

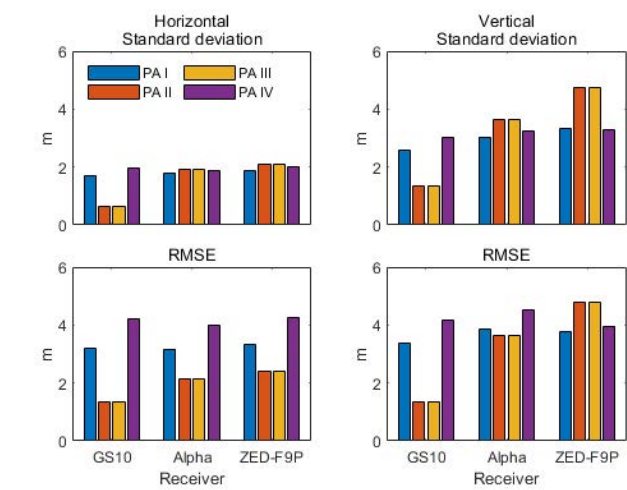


Fig. 10. Standard deviation and RMSE of four positioning algorithms for data set B.

식으로 처리한 결과 중 연도에 따른 변화가 큰 남북방향 좌표 시계열을 도기한 것이다. 그림은 앞서 살펴본 바와 같이 모든 연도에 대하여 PA II, III의 좌표 변동 폭이 PA I에 비해 크고, PA IV는 반대로 약간 작은 것을 보여준다. SPP 시계열을 연도별로 살펴보면 전리층 오차가 커짐에 따라 편이가 발생하고, 좌표 변화가 더 급격해지는 것을 관찰할 수 있다. 반면, PA II, III의 시계열은 연도가 달라지더라도 그 형상이 유사하며, 눈에 띄는 편이도 확인할 수 없다. 이는 절대측위에서 가장 큰 오차를 유발하는 전리층 효과를 대폭 축소하였기 때문으로 이해할 수 있을 것이다. PA IV의 시계열 형상은 PA I의 그것과 유사한 경향을 보이며, 이는 관측데이터에 전리층 오차가 잔존하기 때문일 것이다. 또한, C/A 보다 크기가 큰 L2C에 대한 잔존 전리층 오차를 포함하기 때문에 편이가 더욱 명확히 나타났다.

데이터 세트 A의 8개 관측점에 대한 네 가지 측위 방식의 연도

별 정밀도와 정확도 평균을 Fig. 9에 나타내었다. 표준편차를 보면 관측데이터에 포함된 전리층 오차 크기가 작은 2020년과 2021년에는 PA II, III의 정밀도가 PA I에 비해 낮고 PA IV는 유사한 수준이며, 특히, 높이방향에서 이러한 경향이 두드러지게 나타난다. 비교적 큰 전리층 오차가 발생한 2022년에는 PA I, IV의 표준편차가 크게 증가하였으며, 수평 방향의 경우 PA II, III에 비해 더 크다. 여기서 주목할 점은 PA II, III 정밀도는 연도가 달라지더라도 다른 두 방식과 달리 정밀도 변화가 크지 않다는 것이다. 이는 해당 측위 방식이 관측데이터에 포함된 전리층 오차를 대폭 축소시킬 수 있기 때문으로 이해할 수 있다. 2021년의 표준편차가 2020년에 비해 작은 것은 Table 3에서 살펴본 바와 같이 2021년의 PDOP가 2020년에 비해 작기 때문으로 보인다.

RMSE를 살펴보면, 그 경향이 표준편차와 유사한 것을 알 수 있다. 주목할 점은 PA II와 III의 연도별 정확도가 유사하며, 특히,

2022년에 대한 수평방향 정확도가 PA I, IV에 비해 높다는 것이다. 이는 무전리층 선형결합과 전리층 오차 추정에 따른 다중경로 및 잡음 증가, 미지수 추정 불확실성이 측위에 미치는 영향에 비해 전리층 오차를 축소하여 편의를 제거하는 효과가 더 크기 때문으로 보인다. 높이방향 RMSE에서는 PA II, III의 전리층 오차 축소 효과가 크게 나타나지 않았는데, 이는 높이방향 불확실성이 수평 방향에 비해 크기 때문에 잡음 증가 및 미지수 추정 불확실성의 영향이 전리층 오차 축소 효과를 상쇄하였기 때문으로 이해할 수 있을 것이다. 그러나 태양 활동이 더 활발해져 관측데이터에 포함된 전리층 오차 크기가 더 증가한다면, 높이방향에서도 PA II, III에 의한 정확도 향상 효과를 취할 수 있을 것으로 예상된다.

4.3 Impact of Receiver Grades

L2C 활용 이중주파수 절대측위 결과에 수신기 등급이 영향을 미치는지 확인하고자 데이터 세트 B로 실험을 수행하였다. Fig. 10은 데이터 세트 B를 네 가지 측위 방식으로 처리하고, 그 정밀도와 정확도를 도시한 것이다. 표준편차를 보면 Leica GS10의 경우 수평과 수직방향 모두 PA II, III의 정밀도가 PA I에 비해 높으나 다른 두 수신기의 경우 그 결과가 반대이다. PA IV는 세 수신기 모두 PA I와 유사한 수준이나 약간 더 큰 것을 확인할 수 있다. Leica GS10의 정밀도가 다른 두 수신기와 다른 경향을 보이는 것은 RINEX 변환 과정에서 스무딩이 자동 수행되어 다중경로와 잡음 크기가 작아졌기 때문으로 보인다.

정확도를 살펴보면, 수평방향의 경우 등급이 다른 세가지 수신기 모두 PA II, III의 RMSE가 PA I에 비해 작고 PA IV의 정확도가 가장 낮은 것을 관찰할 수 있으며, 이는 앞서 상시관측점 데이터를 활용한 실험 결과에서 확인한 바 있다. 높이 방향의 결과에서는 세 수신기의 경향에 차이가 있으며, 특히, 저가형 수신기 ZED-F9P의 경우 PA II, III의 정확도가 SPP에 비해 낮다. 그 원인은 ZED-F9P 결과의 경우 다른 수신기와 달리 급격한 좌표 변동이 다수 발생하였기 때문으로 의심된다. 이는 위성에서 송출하는 C/A 혹은 L2C 중 하나라도 수신하지 못하는 경우 해당 위성으로부터 취득한 관측데이터가 이중주파수 절대측위에서 제외되어 유발되는 현상으로, 고성능 수신기에 비해 저가형에서 상대적으로 빈번히 발생하였다. 현대화 위성 송출 신호만으로 측위 실험을 수행하는 본 연구에서 관측데이터 수 감소가 그 결과에 큰 영향을 미친 것으로 이해할 수 있을 것이다.

5. CONCLUSIONS

GPS 현대화 신호 L2C를 위치 결정에 활용함에 따라 수행 가능한 이중주파수 의사거리 기반 절대측위 방식 3가지 (무전리층 선형결합, 전리층 오차 추정, 단순통합)에 대해 고찰하고, 그 특징을 DOF, DOP, 시계열, 측위 정밀도와 정확도 측면에서 기존 SPP에 대한 결과와 비교 분석하였다. 이와 함께 관측데이터에 포함된 전리층 오차 크기, 수신기 등급이 이들 측위 결과에 미치는 영향을 살펴보고, 그 결과를 아래와 같이 요약하였다.

무전리층 선형결합 (PA II)과 전리층 오차 추정 (PA III) 방식은

관측데이터에 포함된 전리층 오차를 대폭 축소시킬 수 있으나, 전자는 선형결합에 따른 잡음과 다중경로 크기 증가, 후자의 경우에는 추가된 미지수 추정 불확실성이 측위 정밀도 하락을 유발하였다. 따라서, 이들 두 측위 방식은 전리층 오차 축소에 의한 편위의 제거 효과가 다중경로와 잡음 증가, 미지수 추정 불확실성 영향보다 작을 때, 오히려 정확도가 SPP (PA I)에 비해 낮을 수 있음을 확인하였다. 단순통합 측위 (PA IV)의 경우 관측데이터 수가 상대적으로 많으나 Klobuchar 모형으로 보정한 후 잔존하는 전리층 오차의 영향으로 정밀도와 정확도가 SPP에 비해 낮았다.

전리층 오차 크기에 따른 이중주파수 절대측위 방식의 특징을 살펴보고자 동일 관측점에 대한 연도별 위치 결정 결과를 비교하였다. 무전리층 선형결합과 전리층 오차 추정 방식은 관측데이터에 포함된 전리층 오차 크기 증가에 따라 이를 축소하여 편의를 제거하는 효과가 잡음과 다중경로 증가, 미지수 추정 불확실성의 영향보다 커져 RMSE가 SPP에 비해 작았으며, 특히, 수평방향 정확도 향상이 뚜렷이 나타났다. 반면, 단순통합 측위 정확도는 SPP에 비해 낮은 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 Klobuchar 모형에 의한 보정 후 잔존하는 전리층 오차 영향 때문으로 이해할 수 있다. 또 하나 주목할 점은 SPP와 단순통합측위의 정확도는 전리층 오차 크기 증가에 따라 정확도 하락이 뚜렷한 반면, 무전리층 선형결합과 전리층 오차 추정 방식의 경우 전리층 오차를 대폭 축소할 수 있기 때문에 일정 수준의 정확도를 유지한다는 것이다.

수신기 등급이 이중주파수 절대측위 결과에 미치는 영향을 살펴보고자 고성능 수신기 Leica GS10, Javad Alpha, 그리고 저가형 U-blox ZED-F9P를 활용한 실험을 수행하였다. 무전리층 선형결합과 전리층 오차 추정 방식의 수평방향 RMSE가 SPP에 비해 작은 것이 모든 등급의 수신기에 대해 동일하게 나타난 반면, 높이 방향에서는 수신기에 따라 다른 경향을 보였다. 단순통합 측위의 경우에는 서로 다른 세 수신기 모두 그 정확도가 SPP에 비해 낮은 공통점을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 전리층 오차 추정 방식은 개별 위성에 대한 STEC를 추정하는 것으로 SPP에 비해 많은 위성 신호를 취득함에도 불구하고 DOF가 SPP와 이론적으로 동일하다. 하지만 VTEC를 추정 후 사상합수를 적용하여 개별 위성에 대한 것으로 변환하면, 전리층 오차 보정과 함께 많은 관측데이터를 활용하는 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되는 바 추후 연구에서는 이에 대한 실험을 추가로 수행해볼 필요가 있다.

본 연구 결과는 특정 조건에서 수행한 실험에 기반한 것이므로 관측 위치, 수신기 종류, 태양 활동 정도, 현대화 위성 추가 발사에 의한 수신 L2C 신호 개수 증가 등에 따라 차이가 있을 수 있음에 유의할 필요가 있다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H.L. and S.Y.; methodology, H.L. and S.Y.; software, S.Y.; validation, H.L.; formal analysis, Y.S.; investigation, H.L. and Y.S.; data curation, Y.S.; writing-original draft preparation, Y.S.; writing-review and editing, H.L. and Y.S.; visualization, Y.S.; supervision, H.L.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Cameron, A. 2015, To L2C or Not to L2C? That is the Operational Question [Internet], cited 2023 Mar 29, available from: <https://www.gpsworld.com/to-l2c-or-not-to-l2c-that-is-the-operational-question/>
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., & Meindl, M. 2007, Bernese GPS Software Version 5.0, Manual (Bern: Astronomical Institute, University of Bern)
- Flores, A. 2021, NAVSTAR GPS space segment/navigation user interfaces (Rev. M), Technical Document (Interface Control Document), IS-GPS-200
- GSA 2019, GNSS Market Report, European Global Navigation Satellite Systems Agency Technical Report, GSA/Issue 6
- Hai, T. T., Dinh, T. N., Falco, C., Linty, N., Cristodaro, C., et al. 2015, Performance assessment of the new L2C CNAV GPS signal, In International Symposium on GNSS 2015, Kyoto, Japan, 16-19 Nov 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4558.5046>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. 2001, Global Positioning System: Theory and Practice, 5th rev. ed. (New York: Springer-Verlag/Wien)
- Inside GNSS 2006, The L2C Study: Benefits of the New GPS L2C Civil Signal [Internet], cited 2023 Mar 29, available from: <https://insidegnss.com/the-l2c-study-benefits-of-the-new-gps-civil-signal/>
- KMITL (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang), Software [Internet], cited 2023 Apr 11, available from: http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=3360
- Langley, R. B. 2000, GPS, the ionosphere, and the solar maximum, *GPS World*, 11, 44-49
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. 2015, *GPS Satellite Surveying*, 4th ed. (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.)
- Marques, H. A. S., Monico, J. F. G., & Marques, H. A. 2016, Performance of the L2C civil GPS signal under various ionospheric scintillation effects, *GPS Solutions*, 20, 139-149. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0472-2>
- NAVCEN (Navigation Center), GPS Constellation [Internet], cited 2023 May 01, available from: <https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), GPS Modernization [Internet], cited 2023 Apr 29, available from: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/>
- O'Keefe, K., Wang, D., Petovello, M. G., & Gernot, C. 2009, Benefit of partial L2C availability for correcting ionospheric error for standalone GPS, In Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Savannah, GA, 22-25 Sep 2009, pp.2530-2550.
- Salos, D., Macabiau, C., Martineau, A., Bonhoure, B., & Kubrak, D. 2010, Nominal GNSS pseudorange measurement model for vehicular urban application, In IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Indian Wells, CA, 04-06 May 2010, pp.806-815. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2010.5507319>
- Strang, G. & Borre, K. 1997, *Linear Algebra, Geodesy, and GPS* (Wellesley: Wellesley-Cambridge Press)
- SWPC (Space Weather Prediction Center), Solar Cycle Progression [Internet], cited 2023 May 24, available from: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- Takasu, T. 2013, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, Manual, version 2.4.2
- Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., Wang, J., & Wang, B. 2019, Performance evaluation of the CNAV broadcast ephemeris, *The Journal of Navigation*, 72, 1331-1344. <https://doi.org/10.1017/S037346331900016X>
- Wanninger, L. & May, M. 2001, Carrier-phase multipath calibration of GPS reference stations, *Navigation*, 48, 112-124. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2001.tb00233.x>
- Yun, S. 2023, A study on analyzing impact of the modernized L2C signal on pseudorange-based GPS point positioning, Ph.D. Dissertation, Changwon National University, Korea.



Seonghyeon Yun is a junior researcher at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, Republic of Korea. He received Ph.D. degree in satellite geodesy and navigation from the Changwon National University, Changwon, Republic of Korea in 2023. His experience and research interests include GNSS signals and modernization, satellite-based positioning and navigation, GPS/GNSS applications for geodetic science and engineering.



Hungkyu Lee is a professor at the department of civil engineering, Changwon National University, Republic of Korea, where he has been teaching and investigating subjects related to engineering geodesy and measurement systems since 2005. He obtained Ph.D. in satellite geodesy

and navigation from the school of surveying and spatial information systems, The University of New South Wales, Australia in 2004. His experience and research interests include statistical theories for high precision of satellite-based positioning and navigation systems, modernization of geodetic infrastructure, and GPS/GNSS applications for geodetic science and engineering.