

2024년 5월 11일 강한 지자기 폭풍에 의한 GNSS PPP 측위 오차 분석

최병규^{1†}, 홍준석¹, 손동효¹, 박슬기², 박상현²

Analysis of GNSS PPP Positioning Errors Due to Strong Geomagnetic Storm on May 11, 2024

Byung-Kyu Choi^{1†}, Junseok Hong¹, Dong-Hyo Sohn¹, Sul Gee Park², Sang Hyun Park²

¹Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

²Maritime PNT Research Office, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

On May 11, 2024, there was a strong solar flare explosion. A powerful geomagnetic storm triggered by a solar flare caused a major ionospheric disturbance over the Korean Peninsula. When a geomagnetic storm occurred, an abnormal change in vertical total electron content (VTEC) values was detected at all Global Navigation Satellite System (GNSS) stations in the Korean Peninsula. In addition, we performed GNSS precise point positioning (PPP) processing using observations from the SBAO and MKPO stations. We found that the up-directional position error increased significantly in both stations at around 17:00 UT on the day of year (DOY) 132, 2024. At that point, the root mean square (RMS) values for all position errors (East, North, and Up) increased compared to other dates. Due to very high noise, the L1 signal-to-noise ratio (SNR) values of QZSS pseudo-random noise (PRN) 07 dropped to about 25 dB. As a result, we suggest that the strong geomagnetic storm increased the GNSS PPP position errors in the Korean Peninsula.

Keywords: geomagnetic storm, GNSS, PPP, TEC

주요어: 지자기 폭풍, 전지구위성항법시스템, 고정밀 단독측위, 총전자량

1. INTRODUCTION

2024년 5월 11일에 발생한 태양의 강한 플레어 폭발로 인해 태양 폭풍이 지구에 도달했다. 태양 표면에서 방출되는 막대한 양의 에너지를 갖는 플라즈마 입자들은 지구 자기장과 충돌하여 교란을 일으킨다. 이렇게 형성된 지자기 폭풍(geomagnetic storm)은 방송, 전력, 통신, 항법시스템 등의 분야에 장애를 발생시킬 수 있다. 미국 우주기상예보센터는 이번 지자기 폭풍은 가장 강력한 5등급에 해당되며, 이것은 지난 2003년 10월 이후 21년만이라 보고했다 (<https://www.weather.gov/byz/May2024G4Watch>).

일반적으로 지자기 폭풍은 전리층 전자밀도의 불규칙한 변화 및 전리층 총전자량(total electron content, TEC)의 급격한 증가 등 전리층 교란을 야기할 수 있다. 또한, 전리층 교란은

Global Navigation Satellite System (GNSS) 정밀측위 성능에 영향을 줄 수 있다 (Astafyeva et al. 2014, Berdermann et al. 2018, Zakharenkova & Cherniak 2021). Odijk (2001)는 실시간 이동측위에서 지자기 폭풍에 의한 영향을 조사한 바 있다. 그는 기선 거리가 4 km 이내일지라도 강한 지자기 폭풍기간에는 상대적인 전리층 지연을 무시할 수 없다고 보고했다. 또한 Astafyeva et al. (2014)은 지자기 폭풍 기간동안 발생한 대부분의 GNSS 사이클 슬립(cycle slip)이 전리층 불균일과 관련이 있다고 보고했다. 지자기 폭풍 기간동안 급격한 TEC의 변화는 GNSS 수신기의 신호 수신 방해로 유발시킬 수 있고, 결국에는 모호정수 결정율(Integer ambiguity fixing-rate)과 real-time kinematic (RTK)의 측위 성능을 저하시킨다 (Odolinski & Teunissen 2019). Lu et al. (2020)은 2015년 St. Patrick's 지자기 폭풍기간 동안 multi-GNSS

Received Aug 05, 2024 Revised Aug 20, 2024 Accepted Aug 21, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: bkchoi@kasi.re.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

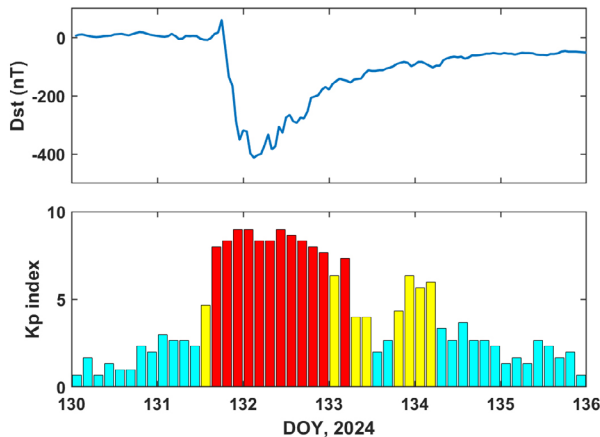


Fig. 1. The variation of the Dst and Kp indices from DOY 130 to 135, 2024.

precise point positioning (PPP) 자료처리를 수행했고, 그들은 해당기간 동안 GNSS 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)와 다중경로 오차가 급격하게 변해서 GNSS PPP의 측위 성능이 저하되었다고 보고했다. Yasyukevich et al. (2020)은 2018년 8월 25일과 26일 지자기 폭풍기간 동안 PPP의 측위 성능 저하기간이 St. Patrick's 지자기 폭풍기간보다 더 길었다고 보고했다.

2024년 5월 11일 강력한 지자기 폭풍으로 인해서 한반도 상공에서는 큰 전리층 교란이 발생했다. 따라서, 본 연구에서는 해당기간 동안 전리층 TEC 변화 특성과 지자기 폭풍이 GNSS PPP 측위 성능에 어떠한 영향을 주었는지 분석 결과를 제시한다.

2. DATA DESCRIPTION

2.1 Geomagnetic Activity Index

지구 자기장의 교란정도를 나타내는 대표적인 지표로는 Disturbance storm-time (Dst) 지수와 Kp 지수가 있다. Dst 지수는 지상에 위치한 4곳의 지자기센서로부터 계속이 되고, 지구 주변 고리 전류(ring current)의 세기를 결정한다. 통상적으로 지자기 폭풍이 발생하면, Dst 지수는 음수 값(negative value)을 갖는다. Kp 지수는 중위도(mid-latitude)에서 자기권의 상태를 식별하는데 사용되며, 13개 중위도 관측소의 K 지수 값을 평균한다 (Davis & Sugiura 1966, Burton et al. 1975).

Fig. 1은 2024년 day of year (DOY)로 130일(5월 9일)부터 135일(5월 14일)까지 Dst 지수와 Kp 지수의 변화를 보여주고 있다. Dst 값은 5월 11일 universal time (UT) 03시경에 -412 nano-Tesla (nT)에 도달했고, 이 값은 지난 2003년 10월 'Halloween event' 때의 -422 nT 값과 거의 비슷한 수준이다. Dst 값은 5월 11일 UT 03시를 기점으로 점점 회복되는 경향을 보인다. Kp 지수는 5월 10일과 11일에 매우 강한 지자기 교란을 의미하는 9 값을 보이고 있다. Kp 값은 5월 10일 UT 21시부터 24시, 5월 11일 UT 0시부터 3시, 그리고 UT 10시부터 12시에 각각 9 값에 도달했다.

2024년 5월 10일 UT 6시 54분과 11일 UT 0시 39분에는 두 번의 강력한 태양 플레어 폭발(solar flare explosion)이 있었다. 플

레어는 각각 X3.9와 X5.8로 분류될 정도로 매우 강했다. 플레어 폭발은 태양 표면으로부터 엄청난 에너지를 갖는 코로나 질량 방출(coronal mass ejection, CME)을 유도한다. 5월 11일에 발생한 CME는 UT 기준으로 5월 11일 17시쯤(한국시간 기준으로는 5월 12일 2시)에 지구에 도달하여 강한 지자기 폭풍을 발생시켰다 (<https://www.slsc.org/night-sky-update-may-11-19-2024/>). 또한 CME가 지구 방향으로 진행하여 막대한 고에너지 입자가 지구 자기장에 직접 영향을 주는 경우와 지구 방향이 아닌 경우에 따라서 지자기 폭풍의 영향이 달라질 수 있다.

2.2 GNSS Data

강력한 지자기 교란에 의한 한반도 상공의 전리층 TEC 변화를 분석하기 위해 한국천문연구원에서 운영하는 9개의 GNSS 기준국 자료를 이용하였다. 기준국 관측자료는 매 30초 간격으로 저장되어 있고, 전리층 TEC 값은 GPS와 QZSS 이중주파수(L1과 L2) 자료만을 이용하여 계산한다.

지자기 교란기간 동안 지상의 GNSS 기준국에서 수신된 관측 자료를 이용해서 고정밀 GNSS PPP 자료처리를 수행한다. PPP 자료처리에는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, 그리고 QZSS 관측자료가 함께 사용된다. 또한 PPP에 영향을 줄 수 있는 기준국 주변 다중경로 오차 등 수신환경의 영향을 최소화하기 위해 관측환경이 상대적으로 좋은 목포(MKPO)와 소백산(SBAO) 기준국 관측자료를 이용한다.

3. METHODOLOGY

다중위성 항법자료를 이용한 GNSS PPP는 한국천문연구원 에서 개발한 Multi-GNSS analysis software (MGAS)를 사용한다. MGAS는 GNSS 기준국에서 수신되는 모든 위성항법시스템 (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, 그리고 NavIC)의 항법 신호 처리가 가능하도록 설계되어 있다.

GNSS PPP 자료처리를 위해서는 정밀한 항법위성의 궤도와 위성의 정밀시각 정보가 반드시 필요하다 (Zumberge et al. 1997). 다중위성 항법시스템의 궤도와 시각 산출물을 제공하는 GNSS 분석센터는 총 7곳이 있다. 그러나, 독일 지구물리연구소 (GeoForschungsZentrum Potsdam, GFZ)와 중국 Wuhan 대학만이 앞서 설명한 모든 항법위성에 대한 궤도와 시각 산출물을 제공한다. 본 연구에서는 독일 GFZ에서 제공하는 궤도, 위성 시각, 그리고 지구자전계수(earth rotation parameters) 등의 산출물을 사용한다. 본 산출물은 GFZ 데이터센터 (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/GNSS/products/mgex>)와 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration)의 GNSS 데이터센터 (<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/mgex/>)에서 다운로드 할 수 있다.

GNSS PPP는 기본적으로 이중주파수의 관측자료를 함께 이용한다. 이것은 1차 전리층 지연 오차를 99% 제거하기 위한 목적이다. 식 (1)과 (2)는 전리층 지연 오차 제거를 위한 Ionospheric-Free 선형조합을 표현한 것이다.

Table 1. Processing strategy for multi-GNSS PPP.

Item	Models / Methods
Estimator	Extended Kalman filter (EKF) smoother
Observations	Un-differenced ionosphere-free linear combination
Signals	GPS L1/L2, GLONASS G1/G2, Galileo E1/E5a, BeiDou B1/B3, QZSS L1/L5
Elevation cutoff	7°
Sampling rate	300 sec
Satellite orbit and clock	GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) products
Phase center offset	igs20.atx
Phase center variation	igs20.atx
Satellite differential code biases (DCB)	CODE P1-C1 monthly products
Inter-system biases	Estimated as white noise, GPS as a reference
Phase wind-up	Wu et al. (1993) & nominal yaw-steering mode
Solid tide, ocean tide, pole tide	IERS conventions 2010
Receiver clock	Random walk model
Ionospheric error	Eliminated
Tropospheric error	Zenith wet delay estimation with gradient parameters
Mapping function	Vienna mapping function1 (VMF1)/GPT2
Atmospheric pressure loading	VMF data center products
Ambiguity	Float

$$P_{IF}^{gnss} = \rho^{gnss} + cdt - cdT^{gnss} + d_{trop}^{gnss} + ISB^{gnss} + \varepsilon_{P_{IF}}^{gnss} \quad (1)$$

$$\Phi_{IF}^{gnss} = \rho^{gnss} + cdt - cdT^{gnss} + d_{trop}^{gnss} + ISB^{gnss} + \lambda N_{IF}^{gnss} + \varepsilon_{\Phi_{IF}}^{gnss} \quad (2)$$

여기에서 P_{IF} 과 Φ_{IF} 는 각각 ionospheric-free 선형 조합된 코드와 반송파 위상의 관측 값이다. 윗첨자 gnss는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, 그리고 QZSS 위성을 의미한다. ρ 는 위성에서 수신기까지의 기하학적인 거리, c 는 빛의 속도, dt 는 수신기 시계오차, dT 는 위성의 시계오차, 그리고 d_{trop} 는 대류층 지연 오차이다. Inter-system bias (ISB)는 시스템간 바이어스이고, 본 연구에서는 기준 시스템을 GPS라 설정하고, GPS-GLONASS, GPS-Galileo, GPS-BeiDou, GPS-QZSS간 ISB를 추정한다. λ 는 Ionospheric-free 조합의 주파수 파장, N_{IF} 는 모호수, $\varepsilon_{P_{IF}}$ 와 $\varepsilon_{\Phi_{IF}}$ 는 각각 Ionospheric-free 조합된 코드와 반송파 위상의 관측잡음이다.

본 연구에서는 신호간 선형조합을 위해 Table 1에 기술한 것처럼 GPS는 L1과 L2, GLONASS는 G1과 G2, Galileo는 E1과 E5a, BeiDou는 B1과 B3, 그리고 QZSS는 L1과 L5 신호를 사용한다.

PPP는 측위 정확도에 영향을 줄 수 있는 작은 오차 요인까지도 고려를 한다. 예를 들면, 모든 항법위성과 수신기 안테나의 위상중심오프셋 (phase center offset)과 위상중심변화 (phase center variation) 계산, 위상말림효과 (phase wind-up) 보정, 지구 조석 효과 보정, 그리고 대류층 지연오차 추정 등이 포함된다. 이에 대한 구체적인 모델과 방법은 Table 1에서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 또한 전리층 TEC 교란에 따른 측위 영향을 효과적으로 보기 위해 동적 측위(kinematic positioning) 방법을 고려한다.

4. RESULTS AND ANALYSIS

4.1 Ionospheric TEC Changes

전리층의 국부적인 TEC는 지자기 폭풍에 의해 급격한 변화를 겪을 수 있다 (Ho et al. 1996, Jakowski et al. 1999, Maruyama et al. 2004). 특히 지자기 활동에 대한 TEC값은 오랜 시간 증가 또

는 감소하는 특징을 보이기도 하고, 순간 급격한 변화를 보이기도 한다.

전리층 조건을 특성화 하는데 사용되는 매개변수 중 하나는 수직방향 총 전자량(vertical total electron content, VTEC)이다. 일반적으로 TEC는 GNSS 위성과 지상 수신기 사이의 경로를 따라 통합된 총 자유전자 수를 의미한다. TEC는 TEC unit (TECU) 단위로 표기되며, 1 TECU는 약 10^{16} electrons/m²이다. VTEC 값이 크면 항법신호는 큰 전리층 지연을 유발하며, VTEC 값의 급격한 변화는 GNSS 신호세기에 영향을 주어 GNSS 관측신호 품질 저하 및 사이클 슬립 등을 발생시킬 수 있다.

Fig. 2는 2024년 DOY 130일부터 135일까지 한반도 주변에서의 VTEC 변화를 보여주고 있다. VTEC 값은 MKPO 기준국에서 수신된 QZSS 정지궤도 pseudo random noise (PRN) 07번 위성의 관측자료를 이용해서 추정한 것이다. QZSS 정지궤도 위성의 VTEC 값을 사용한 이유는 24시간동안 특정 위·경도에서 연속적인 관측이 가능하기 때문이다. 이것은 전리층 TEC 변화연구에 매우 유용하다.

지자기 폭풍이 있었던 DOY 132일(파란색 사각형으로 표시된 지역)은 VTEC 값의 순간 변화가 상대적으로 빈번하게 발생했다. 특히 해당일 UT 17시경에는 짧은 시간에 25 TECU 이상의 급격한 변화가 감지되기도 했다. 또한, 흥미로운 것은 지자기 폭풍이 있었던 다음날인 DOY 133일에는 최대 VTEC 값이 자료처리 기간 동안 절반 이하의 값을 보이고 있다.

Fig. 3은 시간에 따른 VTEC 값의 변화율을 보여주고 있다. 먼저 9개의 GNSS 기준국에서 수신된 QZSS 위성의 관측자료를 이용하여 VTEC 값을 매 30초 간격으로 산출하였다. Fig. 3에서 제시된 VTEC 변화율은 QZSS PRN07번 위성에 해당된다. 지자기 폭풍이 있었던 DOY 132일에는 모든 기준국에서 순간 매우 큰 VTEC 값의 이상변화가 감지되었다. Fig. 2와 마찬가지로 그러한 이상변화는 해당일 UT 17시경에 발생했다.

4.2 GNSS PPP Results

강한 지자기 폭풍에 의한 전리층 TEC 교란과 PPP 측위 영향

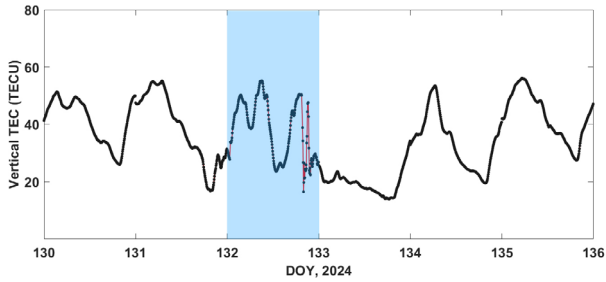


Fig. 2. Time series of the VTEC variations for QZSS PRN07 at MKPO reference station from DOY 130 to 135, 2024. The blue rectangular box denotes the disturbed day geomagnetically.

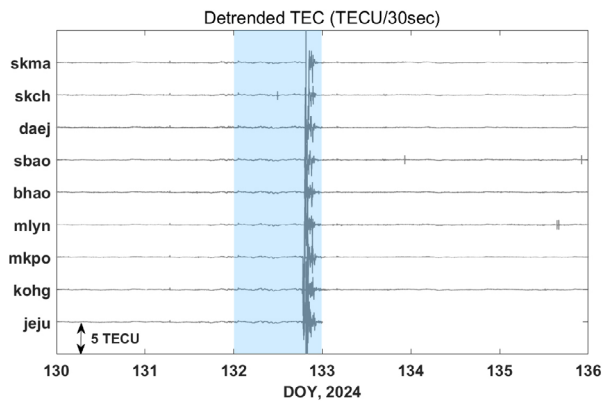


Fig. 3. Time series of the VTEC difference (TECU/30 sec) for QZSS PRN07 at 9 GNSS reference stations from DOY 130 to 135, 2024. The blue rectangular box denotes the disturbed day geomagnetically.

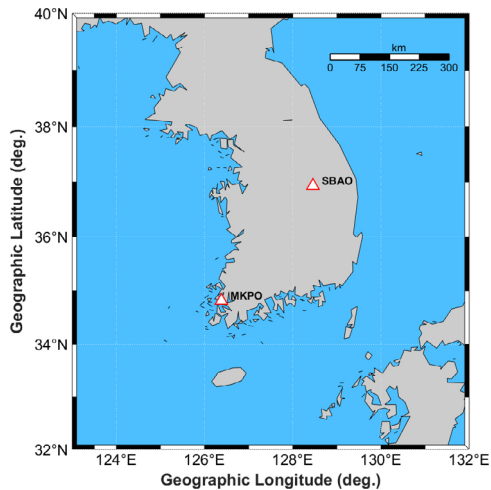
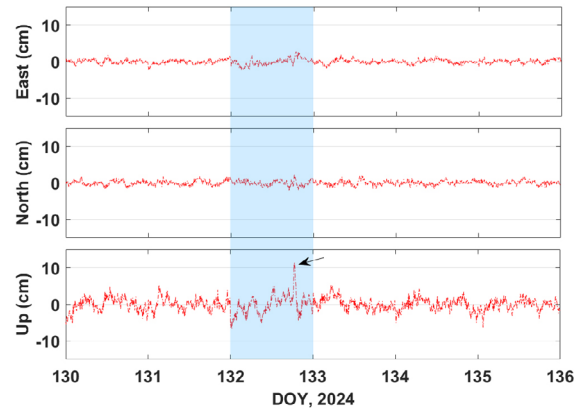


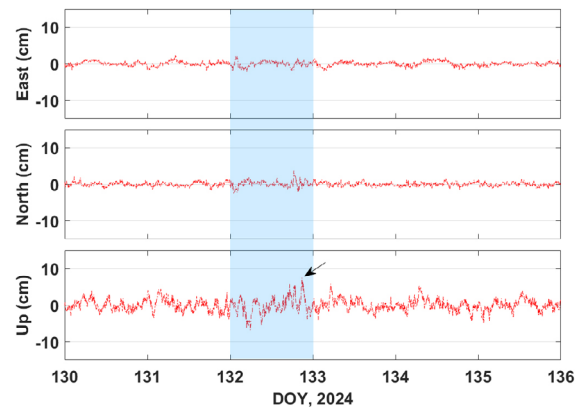
Fig. 4. The distribution of two GNSS stations.

을 분석하기 위해 2024년 DOY 130일부터 135일까지 GNSS PPP 자료처리를 수행하였다. PPP 자료처리에서 다중경로 오차 등의 영향을 줄이기 위해 관측환경이 좋은 2곳 SBAO와 MKPO의 기준국을 선정하였다.

Fig. 4는 SBAO와 MKPO 기준국의 위치 분포를 보여주고 있다. 두 기준국간의 거리는 약 300 km 정도 떨어져 있고, SBAO 기준



(a)



(b)

Fig. 5. Time series for GNSS PPP position errors from DOY 130 to 135, 2024: (a) SBAO, (b) MKPO. The blue rectangular box denotes the disturbed day geomagnetically.

국은 북쪽, MKPO 기준국은 남쪽에 위치하고 있다.

Fig. 5는 GNSS 기준국에서 수신한 multi-GNSS 관측자료를 이용하여 PPP 자료처리를 수행한 결과이고, 위치오차를 성분별로 나누어 시계열로 나타내었다. 자료처리 기간은 전리층 TEC 추정 기간과 동일한 DOY로 130부터 135일까지이다. PPP 자료처리에는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, 그리고 QZSS 관측자료를 함께 사용하였다. 전형적인 GNSS PPP는 초기 모호정수가 안정화되기까지 사용자의 위치정보가 수렴되는 시간이 필요하다. 수렴 시간은 자료처리 방법 및 사용자 수신환경 등에 따라 달라지지만 대략 10분에서 30분 정도 소요되며, 이 구간에서는 위치 오차가 상대적으로 크다. 수렴되는 구간에서 큰 위치오차를 보정하기 위해 본 연구에서는 Extended Kalman filter (EKF) smoother 기법을 적용했다. EKF smoother 방법은 Choi et al. (2021)에 자세히 기술되어 있다.

Figs. 5a와 5b는 GNSS PPP로 처리한 SBAO와 MKPO 기준국의 위치 오차를 동서(East), 남북(North), 그리고 고도(Up) 방향으로 각각 분리하여 나타낸 것이다. 그리고 강한 지자기 폭풍이 발생한 날은 파란색 사각형 박스로 표기를 했다. SBAO 기준국은 강한 지자기 교란이 있었던 DOY 132일, 특히 UT 17시경에 고도 방향 오차가 최대 약 11 cm에 도달하기도 했다. 동서와 남북방향

Table 2. The RMS values of GNSS PPP position errors in east, north, and up components during a geomagnetic storm.

Site	DOY, 2024	RMS		
		East	North	Up
SBAO	130	0.55	0.63	1.91
	131	0.59	0.65	1.58
	132	0.96	0.72	2.82
	133	0.57	0.67	1.61
	134	0.56	0.57	1.70
	135	0.51	0.54	1.42
MKPO	130	0.56	0.53	1.35
	131	0.68	0.69	1.81
	132	0.78	0.91	2.42
	133	0.63	0.55	1.60
	134	0.74	0.52	1.62
	135	0.44	0.51	1.48

오차는 해당시점에 조금 증가하는 특징을 보였지만 고도방향 성분에 비해서는 상대적으로 작았다. MKPO 기준국도 해당일에 위치 오차가 증가하는 경향을 보였고, 특히 해당일 UT 17시경에는 SBAO와 유사하게 고도방향 오차가 8 cm 이상까지 도달했다. 또한 남북방향 위치 오차는 순간 증가하는 경향성이 뚜렷하게 나타난 반면에 동서방향 위치 오차는 증가하는 현상이 뚜렷하지 않았다. 전반적으로 SBAO와 MKPO PPP 결과를 종합해 보면 DOY 132일 UT 17시경에 고도방향 오차가 크게 증가한 공통점이 있다. 또한, 동서와 남북방향 성분의 오차도 증가하는 특징을 보이지만 고도방향 성분만큼 크지 않았다. Jacobsen & Schäfer (2012)는 지자기 폭풍기간 동안 고위도 지역에서 TEC 변화에 따른 평균 위치오차를 분석했고, 그들은 고도방향 오차가 수평방향 오차에 비해 상대적으로 크게 산출되었다고 보고했다.

결과적으로 두 곳의 기준국에서 위치오차가 증가한 것은 앞서 전리층 TEC 교란시점과 일치하고 또한 Jacobsen & Schäfer (2012)가 제시한 결과와도 유사하다. 따라서 강한 지자기 폭풍으로 인한 한반도 주변 전리층 TEC 교란이 PPP 측위 오차를 증가시키는 것을 알 수 있다. 그러나, Dst/Kp 지수와 PPP 측위와의 상관성은 그리 높지 않아 보인다. 이것은 지자기 폭풍에 따른 전리층 TEC의 변화가 중요하다고 판단한다. 즉, 지자기 폭풍이 발생하더라도 TEC의 순간 큰 변화가 없다면 PPP가 영향을 받지 않고 안정적인 측위가 가능하다.

Table 2는 SBAO와 MKPO 기준국에서 PPP 측위 오차에 대한 root mean square (RMS) 값을 각 방향 성분별로 나타낸 것이다. 이것은 강한 지자기 폭풍에 의한 정밀위치의 안정성을 분석하기 위해 제시하였다. Table 2에 기술한 것처럼 DOY 132일에 두 곳의 기준국에서 모든 위치 오차에 대한 RMS 값이 다른 날짜와 비교하여 증가한 것을 알 수 있다. 특히 고도방향 오차의 RMS 값은 동서와 남북 방향에 비해 상대적으로 크게 증가했다. 그리고 SBAO의 경우에는 수평방향 오차 성분 중에서도 동서방향의 RMS 값이 남북방향의 RMS 값 보다 더 컸다. 이와는 반대로 MKPO는 남북방향의 RMS 값이 동서방향보다 RMS 값이 더 크게 증가했다. 결론적으로 PPP 위치 오차에 대한 RMS 값도 지자기 폭풍이 있었던 해당일에 크게 증가한 것으로 나타났다.

추가적으로 강한 지자기 폭풍이 GNSS 신호에 주는 영향을 분석하기 위해 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR) 값을 산

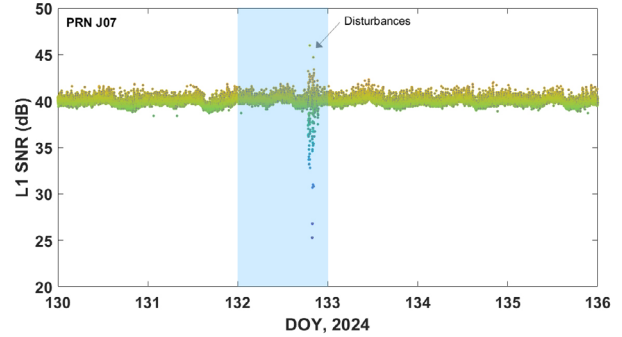


Fig. 6. Time series of L1 SNR for QZSS PRN 07 satellite from DOY 130 to 135, 2024 at MKPO. The blue rectangular box denotes the disturbed day geomagnetically.

출하였다. Fig. 6은 MKPO 기준국에서 측정된 QZSS PRN07번 위성의 L1 SNR 값의 변화를 보여주고 있다. QZSS PRN07번 위성은 DOY 130일부터 135일까지 평균 약 40 dB 값을 유지했다. 그러나 강한 지자기 폭풍이 발생했던 DOY 132일에는 순간 높은 잡음인가로 인해 L1 SNR 값이 25 dB까지 떨어지기도 했다. L1 SNR 값의 큰 변화시점은 UT 17시경으로 앞서 전리층 TEC 교란 시점 및 PPP 위치 오차의 증가 시점과 일치한다.

그러므로 2024년 5월 11일에 발생한 태양 플레어 폭발은 강한 지자기 폭풍을 유도하여 한반도 주변 전리층 TEC 교란 및 GNSS 신호에 영향을 주어 결국 PPP 측위 오차를 증가시킨 것으로 판단한다.

5. CONCLUSIONS

본 연구에서는 2024년 5월 11일 강한 지자기 폭풍으로 인한 한반도에서의 GNSS PPP 측위 영향을 분석하였다. 먼저 GPS와 QZSS 자료를 이용해서 전리층 VTEC 및 VTEC 변화율을 산출하였다. 지자기 폭풍이 있었던 DOY 132일에 모든 기준국에서 순간 매우 큰 VTEC 값의 이상변화가 감지된 것을 확인하였다.

한반도 내에 있는 SBAO와 MKPO 기준국에서 수신한 multi-GNSS 자료를 이용해서 PPP 자료처리를 수행하였고, DOY 132일 UT 17시경에 고도방향 위치 오차가 두 곳의 기준국에서 크게 증가(SBAO는 11 cm, MKPO는 8 cm)하였다. 또한 동서와 남북방향 성분의 위치 오차도 함께 증가한 것을 확인했지만, 고도방향 위치 오차 증가만큼 크지는 않았다. 그리고 해당시점에 모든 위치 오차(East, North, Up)에 대한 RMS 값이 다른 날짜에 비해 증가한 것을 알 수 있었다. 특히 고도방향 오차의 RMS값은 동서와 남북 방향에 비해 크게 증가했다.

지자기 폭풍과 GNSS 신호에 대한 영향을 분석하기 위해 L1 SNR 값을 산출하였다. QZSS PRN07번 위성은 자료분석 기간동안 L1 SNR 값이 평균 약 40 dB 값을 유지했지만 강한 지자기 폭풍이 발생했던 DOY 132일 UT 17시경에는 순간 높은 잡음인가로 인해 SNR 값이 25 dB까지 떨어지기도 했다.

결과적으로 2024년 5월 11일에 발생한 태양 플레어 폭발은 강한 지자기 폭풍을 유도하였고, 이 지자기 폭풍은 한반도 상공의

전리층 TEC 교란과 GNSS 신호에 영향을 주어 결국 PPP 측위 오차가 증가한 것으로 판단한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from the National R&D Project “Development of ground-based centimeter-level maritime precise PNT technologies” funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (RS-2020-KS201371).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, B.-K. Choi, J. Hong, and D.-H. Sohn; software, B.-K. Choi; formal analysis, B.-K. Choi; investigation, S. G. Park, S. H. Park, J. Hong, and D.-H. Sohn.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

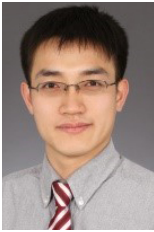
- Astafyeva, E., Yasyukevich, Y., Maksikov, A., & Zhivetiev, I. 2014, Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems, *Space Weather*, 12, 508-525. <https://doi.org/10.1002/2014SW001072>
- Berdermann, J., Kriegel, M., Banyś, D., Heymann, F., Hoque, M. M., et al. 2018, Ionospheric response to the X9.3 flare on 6 September 2017 and its implication for navigation services over Europe, *Space Weather*, 16, 1604-1615. <https://doi.org/10.1029/2018SW001933>
- Burton, R. K., McPherron, R. L., & Russell, C. T. 1975, An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst, *JGR*, 80, 4204-4214. <https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204>
- Choi, B. K., Sohn, D. H., & Lee, S. J. 2021, Accuracy Improvement of Multi-GNSS Kinematic PPP with EKF Smoother, *JPNT*, 10, 293-303. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.2.293>
- Davis, T. N. & Sugiura, M. 1966, Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations, *JGR*, 71, 785-801. <https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785>
- Ho, M. C., Mannucci, A. J., Lindqwister, U. J., Pi, X., & Tsurutani, T. T. 1996, Global ionosphere perturbations monitored by the worldwide GPS network, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3219-3222. <https://doi.org/10.1029/96GL02763>
- Jacobsen, K. S., & Schäfer, S. 2012, Observed effects of a geomagnetic storm on an RTK positioning network at high latitudes, *J. Space Weather Space Clim.*, 2, A13. <https://doi.org/10.1051/swsc/2012013>
- Jakowski, N, Schlüter, S., & Sardon, E., 1999, Total electron content of the ionosphere during the geomagnetic storm on 10 January 1997, *JASTP*, 61, 299-307. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(98\)00130-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00130-8)
- Lu, Y., Wang, Z., Ji, S., & Chen, W. 2020, Assessing the positioning performance under the effects of strong ionospheric anomalies with multi-GNSS in Hong Kong, *Radio Science*, 55, 1-18. <https://doi.org/10.1029/2019RS007004>
- Maruyama, T., Ma, G., & Nakamura, M. 2004, Signature of TEC storm on 6 November 2001 derived from dense GPS receiver network and ionosonde chain over Japan, *JGR*, 109, A10302. <https://doi.org/10.1029/2004JA010451>
- Odiijk, D. 2001, Instantaneous precise GPS positioning under geomagnetic storm conditions, *GPS Solutions*, 5, 29-42. <https://doi.org/10.1007/PL00012884>
- Odolinski, R. & Teunissen, P. J. G. 2019, An assessment of smartphone and low-cost multi-GNSS single-frequency RTK positioning for low, medium and high ionospheric disturbance periods, *Journal of Geodesy*, 93, 701-722. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1192-5>
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W., & Lichten, S. 1993, Effects of antenna orientation on GPS carrier phase, *Manuscripta Geodaetica*, 18, 91-98.
- Yasyukevich, A., Syrovatskii, S., & Yasyukevich, Y. 2020, Changes in the GNSS precise point positioning accuracy during a strong geomagnetic storm, *E3S Web of Conferences*, 196, Article Number: 01001, pp.1-5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019601001>
- Zakharenkova, I. & Cherniak, I. 2021, Effects of storm-induced equatorial plasma bubbles on GPS-based kinematic positioning at equatorial and middle latitudes during the September 7-8, 2017, geomagnetic storm, *GPS Solutions*, 25, 132. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01166-3>
- 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, *JGR*, 102, 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>



Byung-Kyu Choi received his Ph.D. degree in Electronics in Chungnam National University in 2009. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2004. His research interests include multi-GNSS PPP, PPP-RTK, and GNSS TEC modeling.



Junseok Hong received his Ph.D. degree in Space Science and Geology in Chungnam National University in 2020. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2017. His research interests include GNSS TEC & DCB analysis and ionospheric phenomena.



Dong-Hyo Sohn received the Ph.D. degree in Geoinformatic Engineering in Inha University in 2015. He is currently working for Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interests include crustal deformation, GNSS precipitable water vapor, and ionospheric

variations.



Sul Gee Park is the general management team leader, maritime PNT research office and senior engineer of the maritime PNT research centre at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). 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, DGNS reference stations and integrity monitors, eLoran system, etc. His current research interests focus on resilient PNT systems for e-Navigation.