

태양 흑점활동이 측위오차에 미치는 영향: 태양폭풍 사례연구

† 유윤자 · 조득재* · 박상현**

†,*,** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

How sun spot activity affects on positioning accuracy?: Case study of solar storm

† Yunja Yoo · Deuk-Jae Cho* · Sang-Hyun Park**

†,*,**Korea Ocean Research & Development Institute, Daejeon 305-343, Korea

요 약 : 태양 흑점수의 증감주기 (약 11년)에 따른 태양폭발 (태양에서의 플레어 현상)은 태양 코로나 물질을 대방출하는 태양폭풍을 야기한다. 미국해양대기청 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)은 태양 흑점활동이 2013년과 2014년 사이에 극대화 될 것이라고 예상했다. 강력한 태양폭풍의 영향이 지구에 미쳤을 경우 인공위성을 이용한 전 세계 측위시스템의 교란, 각종 통신수단 및 TV, 라디오 방송 등이 영향을 받을 것으로 예상된다. 실제로 1989년 태양폭풍은 캐나다에서 정전사태를 일으켜 9시간동안 약 600만 명이 정전으로 인한 피해를 입은 사례가 있다. 이와 같은 초강력 태양폭풍은 인공위성의 수명을 약 5~10년 정도 단축시키며 이로 인한 경제적 손실 및 파급효과를 고려하면 액수는 수십조 원에 달할 것으로 예상된다. 최근 2011년 2월 15일 10시 45분경 (01:30 - UTC)에 발생했던 X급 태양폭발에 의해 발생한 태양폭풍의 영향이 2011년 2월 18일 오전 10시 30분경 우리나라 (보현산 관측소)에서 관측되었다. 본 논문에서는 현재 흑점수가 증가하고 있는 시점에서 2월 18일의 태양폭발 일주일 전후 지자기 데이터를 비교하고, 또한 대전과 서울지역에서 관측한 RINEX 데이터를 이용하여 측위결과를 비교 분석하였다. 태양폭풍이 지구에 도달한 2011년 2월 18일의 지자기 관측값은 일주일 전후 데이터와 비교하여 양자 (Proton) 자력계 관측결과가 요동하였고, 대전과 서울지역에서의 측위결과도 태양폭풍 일주일 전후와 비교하여 2월 18일에 가장 큰 측위오차를 보였다.

핵심용어 : 태양 흑점활동, 태양폭발, 태양폭풍, RINEX 데이터, 측위 정확도

Abstract : Solar flares have the 11-year cycle and release a large energy which may produce coronal mass ejections (CME). The NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) predicted that the sun spot activity will be maximized in 2013-2014. A strong solar flare can cause the disturbance of global positioning system including various communication of TV, radio broadcasting. The actual solar storm in 1989 caused power outages in Canada during 9 hours and about 600 million people had experienced a blackout. Such a solar storm can shorten the GPS satellite's life span about 5 to 10 years which can result in economic loss considering the amount of multi-billion won. This paper analyzed the influence of recent X-class solar storm occurred on 15th of February about 10:45 this year that was reached Korea (Bohyun observatory) on 18th of February about 10:30 (01:30 - UTC), and compared with the data before and after a week. The proton data of 18th of February considered that the solar storm reached on earth showed a fluctuation compared to the data before and after a week. The positioning results at Daejeon and Seoul of Korea also showed higher positioning error compared to the data before and after a week results.

Key words : sun spot activity, solar flares, solar storm, RINEX data, positioning accuracy

1. 서 론

태양 흑점의 주기적인 활동은 약 11년마다 정점에 달하며 이때 발생하는 태양 플레어 (Solar flares)는 코로나 물질을 대방출하며 (CME: Coronal Mass Ejections) 이로 인한 태양폭풍 (Solar storm)은 지구 자기장 (지자기) 교란을 일으킨다. 지자기 교란이 발생하면 보통 전리층의 TEC (Total Electron Contents)값이 변하게 되는데 이는 GPS신호의 전리층 지연 변화를 일으키는 요인이 된다(Dehel, 2005; Pi 등, 2005). 또한 GPS신호가 전리층에 산란되는 경우 신호의 세기가 줄어들어 위

치정보 오차로 나타나기도 한다. 미국 해양대기청 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)은 태양의 흑점활동이 2013년과 2014년 사이에 정점에 달할 것이라고 예측했고(NOAA, 2011), 최근에는 X급 태양폭발이 2011년 2월 15일에 발생했다. X급 태양폭발의 영향은 2011년 2월 18일 10시 30분경 (지역시, 이하 우리나라 시간) 보현산 소재의 한국천문연구원 지자기 관측소에서 관측되었다.

본 논문에서는 태양폭풍이 관측된 2월 18일을 기준으로 보현산 관측소의 일주일 전후 지자기 데이터를 비교하고, 일주일 전후에 비해 태양폭풍의 영향이 있었던 2월 18일의 지자기

† 교신저자 : 연희원, yyoo@moeri.re.kr 042)866-3661

* 연희원, djcho@moeri.re.kr 042)866-3683

** 종신회원, shpark@moeri.re.kr 042)866-3681

관측데이터가 불안정한 측정치를 나타냈음을 보였다. 또한 RINEX (Receiver INdependent EXchange format) 관측데이터와 항법데이터를 이용하여 대전과 서울지역의 의사거리 오차와 측위오차 결과를 지역간, 날짜간 비교 분석하였으며, 비교 결과로 부터 불안정한 지자기 측정치가 의사거리 오차와 측위오차에도 또한 영향을 미쳤음을 보였다.

2. 태양폭풍 분석결과

태양폭발이 측위오차에 미치는 영향을 알아보기 위해 태양폭풍이 관측된 2011년 2월 18일을 기준으로 일주일 전후의 지자기 데이터를 비교하고(한국천문연구원, 2011), IGS (International GNSS Service)에서 제공하는 RINEX 관측데이터, RINEX 항법데이터, 초신속 기상 데이터 (Ultra-Rapid meteorological data), 신속 전리층 TEC 데이터 (Rapid ionospheric TEC data)를 이용하여 오차항을 보상해준 의사거리 계산치와 관측된 의사거리의 차이 (PRE: Pseudo Range Error), 대전과 서울지역에서의 측위오차 결과를 각각 비교 분석하였다.

2.1 지자기 관측결과

그림 1은 한국천문연구원의 지자기 관측소 (보현산 관측소)에서 관측된 지자기 측정치 결과이며(한국천문연구원, 2011), 그림 1의 (a)는 자북을 가리키는 지자기 성분을, (b)는 동서방향을 가리키는 지자기 성분을, (c)는 지면에 대해 수직한 성분의 지자기 값을 나타내고 단위는 nT (nano-Tesla) 이다.

그림 2는 양자 (Proton) 자력계를 사용한 지자기 절대값을 나타내며, 계측기에서 발생한 노이즈로 인해 계측값이 불안정한 시간대를 제외한 9시간 동안의 결과만을 보였다.

그림 1, 2의 결과로부터 지자기 관측 결과는 일주일 전후 데이터와 비교하였을 때 태양폭풍이 도달한 2월 18일의 데이터가 약 01:30 (UTC)경 부터 요동하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 현상은 특히 그림 1-(a)의 수평성분 (Horizontal component) 결과, 그림 2의 지자기 절대값 결과에서 두드러진다.

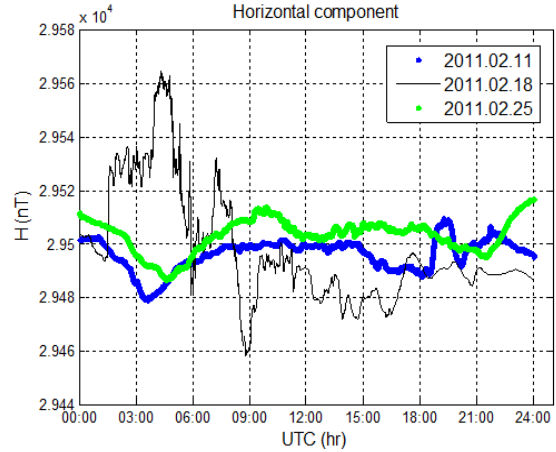
표 1은 그림 1-(a)~(c) 각각의 지자기 성분의 관측일자별 표준편차를 나타낸다. H, D, Z의 모든 지자기 성분 관측값은 태양폭풍 일주일 전후 데이터와 비교하여 태양폭풍의 영향이 미친 2월 18일에 각각 20.74 (nT), 13.13 (nT), 8.8 (nT)로 가장 크게 나타났으며, 특히 H 지자기 성분은 일주일 전후와 비교하여 약 3배 정도 큰 표준편차를 보였다.

2.2 전리층 TEC 결과

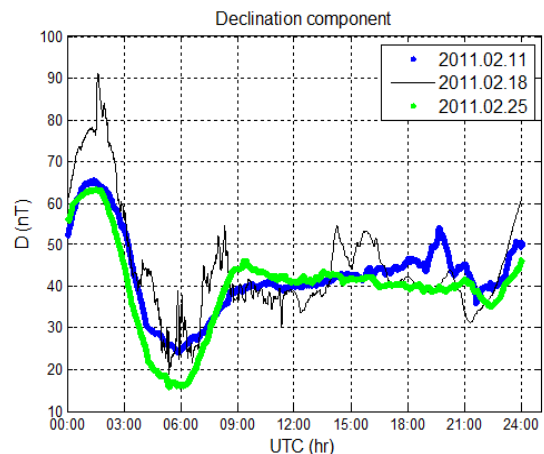
태양폭풍으로 인한 지자기 교란은 전리층의 TEC (Total Electron Contents) 변화를 일으키며 이는 GPS신호의 전리층 지연을 일으키는 요인이 된다. TEC 값은 IGS에서 제공하는 신속 전리층 TEC 결과를 이용했다(IGS, 2011).

그림 3은 태양폭풍이 도달한 날짜와 일주일 전후 데이터의

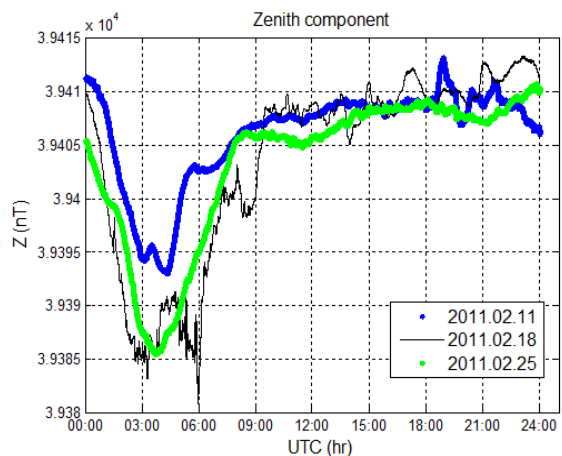
IGS 신속 전리층 TEC 천정방향 데이터이며 원모양으로 나타났다. 또한 RINEX 관측데이터와 항법데이터가 30초 단위로 되어있기 때문에 IGS 신속 전리층 TEC 데이터를 스플라인 보간하여 사용했다. 태양폭풍이 도달한 2011년 2월 18일은 약



(a) Horizontal component of magnetometer



(b) Declination component of magnetometer



(c) Zenith component of magnetometer

Fig. 1 Flux gate magnetometer results at Bohyun observatory of Korea

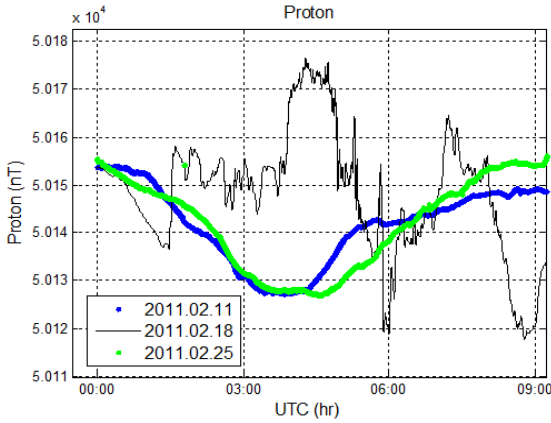


Fig. 2 Proton magnetometer results at Bohyun observatory of Korea

Table 1 Standard deviation of flux gate magnetometer results (std)

지자기성분 \ 관측일	2011-02-11	2011-02-18	2011-02-25
H(nT)	5.9	20.74	6.33
D(nT)	9.43	13.13	10.68
Z(nT)	4.56	8.8	6.92

4시경 (UTC) 최대 약 28 TECU를 나타냈고, 태양폭풍이 지나간 후인 2월 25일 4시경에는 최대 약 16 TECU를 나타냈다. 18일과 25일 4시경의 TEC 차이는 천정방향으로 전리층 지연을 고려했을 때 약 2m의 지연을 발생하게 되며, 양각을 고려한 slant 방향으로의 지연값을 계산할 경우 그 이상의 전리층 지연을 일으키게 된다. TEC에 따른 전리층 지연 D_{iono} 는 다음과 같이 계산할 수 있다(Kaplan · Hegarty, 2006; Misra · Enge, 2006).

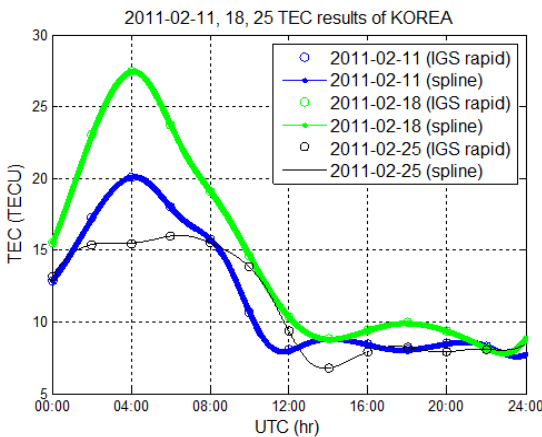


Fig. 3 IGS rapid ionospheric TEC results of Korea

$$D_{iono} = \frac{1}{\sin E} \times \frac{40.3}{f^2} \times TEC \quad (1)$$

여기서, E 는 양각 (degree), f 는 L1 주파수를 나타내며, 1

TECU는 10^{16} electrons/m²이다.

3. 측위오차 분석결과

태양폭풍으로 인한 지자기 교란은 전리층의 TEC 변화의 요인이 되며, 이는 GPS신호의 전리층에 의한 지연을 일으키는 요인이 되고 측위 오차로 나타나기도 한다.

의사거리 오차 PRE (Pseudo Range Error)는 IGS에서 제공하는 RINEX 관측데이터와 항법데이터, 신속 전리층 TEC 데이터, 초신속 기상 데이터를 이용하여 계산한 의사거리 계산치 PR_{cal} 와 RINEX 관측데이터의 의사거리 관측치 PR_{obs} 의 차이로 식 (2)와 같고(SMC/GP, 2004), 코드를 이용한 의사거리 측정방정식은 식 (3)과 같다(Misra · Enge, 2006).

$$PRE = PR_{cal} - PR_{obs} \quad (2)$$

$$\Psi_R^j = r_R^j + c(B_R - B^j) + I^j + T^j + \epsilon_\Psi \quad (3)$$

여기서, Ψ 는 코드 의사거리 측정치 (m), r 은 위성과 수신기 간 거리 (m), c 는 진공에서의 광속 (m/s), B 는 시계 바이어스 (s), I 는 이온층 지연 (m), T 는 대류층 지연 (m), ϵ_Ψ 는 수신기 측정잡음 (m), j 는 위성 번호, R 은 수신기 번호를 나타낸다.

식(3)의 위성의 위치, 위성 시계오차, 수신기 시계오차는 IGS에서 제공하는 RINEX 관측데이터와 항법데이터를 이용하여 했고, 전리층 지연은 IGS 신속 전리층 TEC 데이터를 이용하여 식(1)

로부터 계산했다. 또한 대류층 지연은 IGS의 초신속 기상 데이터에서 제공하는 온도, 기압, 습도 파라미터를 이용하여 계산했으며, 대류층 지연은 다음 식으로 계산할 수 있다(하 · 박 · 허, 2006; 한국해양연구원, 2009).

$$D_{tropo} = \frac{2.277 \times 10^{-3}}{\cos(90^\circ - E)} \left(P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) e_0 - 1.16 \times \tan^2(90^\circ - E) \right) \quad (4)$$

여기서, P_0 는 해면기압 (hPa), e_0 는 증기압 (hPa), T_0 는 온도 (K), E 는 양각 (degree)이다. 증기압 e_0 는 다음 식으로 구해진다(하 · 박 · 허, 2006).

$$e_0 = HR \times e_{ws} \quad (5)$$

여기서, HR 은 습도 (%), e_{ws} 는 포화수증기압 (hPa)이다. 또한, 대류층 시선방향 신호 지연량을 산출하기 위해서 Niell 사상함수를 적용하여 대류층 총 지연량을 건조 지연량으로 간략화 하였다(Niell, 1996).

네 개 이상의 위성으로부터 관측된 의사거리 ρ_j 와 대략적인 위치를 이용하여 구한 추정치 의사거리 $\hat{\rho}_j$ 의 차이 $\Delta\rho$ 벡터는 다음과 같음과 같다(Kaplan · Hegarty, 2006).

$$\Delta\rho = H\Delta x \quad (6)$$

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \Delta \boldsymbol{\rho} \quad (7)$$

최소자승법 (Least-squares solution)을 사용하여 벡터 $\Delta \boldsymbol{\rho}$ 를 최소로 하는 벡터 $\Delta \mathbf{x}$ 를 식(7)과 같이 구할 수 있다. 또한, 벡터 $\Delta \mathbf{x}$ 는 수신기의 위치 x_u, y_u, z_u, t_u 와 대략적인 위치의 초기치 $\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u, \hat{t}_u$ 와의 차를 최소로 하는 $\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u, -c\Delta t_u$ 로 이루어진다.

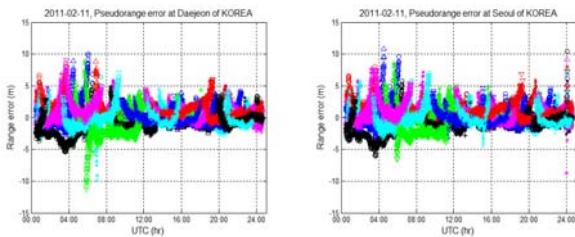
여기서, 벡터 $\Delta \boldsymbol{\rho}$, 벡터 \mathbf{H} , 벡터 $\Delta \mathbf{x}$ 는 다음과 같다.

$$\Delta \boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \Delta \rho_4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} & 1 \end{bmatrix} \quad \Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ -c\Delta t_u \end{bmatrix}$$

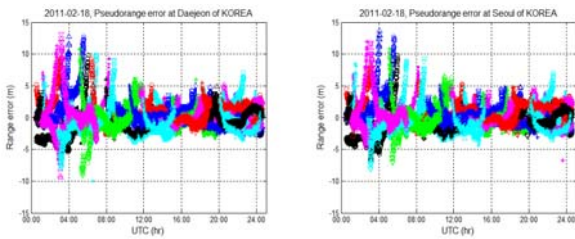
여기서, a_{xj}, a_{yj}, a_{zj} 는 수신기에서 위성 j 로의 단위 방향 벡터의 x, y, z 성분을 나타낸다.

3.1 의사거리 오차 결과

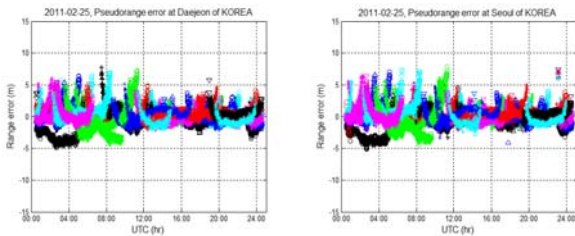
그림 4는 태양폭풍 발생일, 태양폭풍 발생 일주일 전후 대



(a) Pseudorange error at Daejeon (2011-02-11) (a-1) Pseudorange error at Seoul (2011-02-11)



(b) Pseudorange error at Daejeon (2011-02-18) (b-1) Pseudorange error at Seoul (2011-02-18)



(c) Pseudorange error at Daejeon (2011-02-25) (c-1) Pseudorange error at Seoul (2011-02-25)

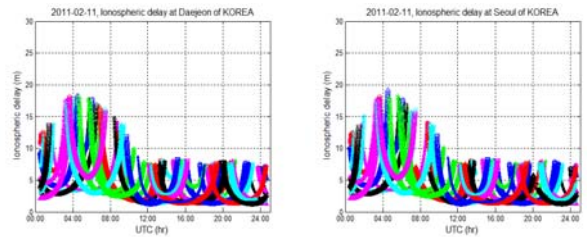
Fig. 4 Pseudorange error results at Daejeon (left) and Seoul (right) of Korea

전과 서울지역에서 의사거리 오차 결과를 나타낸다. 대전지역에서는 태양폭풍 영향이 미친 2011년 2월 18일에 최대 약 14m의 의사거리 오차가 발생했고, 일주일 전인 2월 11일에는 최대 약 12m, 일주일 후인 2월 25일에는 최대 약 8m로 나타났다. 서울지역에서의 의사거리 오차도 태양폭풍의 영향이 미친 2월 18일에 최대 약 14m로 가장 크게 나타났고, 일주일 후인 2월 25일에 최대 약 8m로 가장 작게 나타났다.

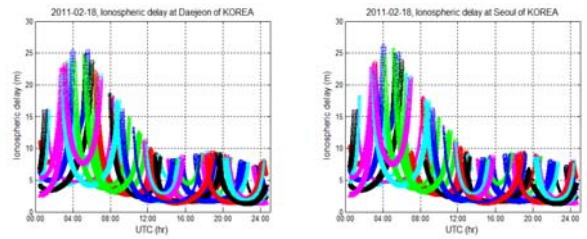
그림 5는 그림 3의 TEC를 이용하여 식 (1)로부터 구한 전리층 지연 결과를 나타낸다. 대전과 서울지역에서 관측되는 가시위성의 양각을 고려하여 전리층 지연을 구했으며, 결과로부터 그림 3의 TEC 경향이 그대로 나타났음을 알 수 있다. 또한 대전, 서울 간 거리 차이로 인한 양각의 차이는 전리층 지연에 큰 차이를 보이지 않았음을 알 수 있다.

3.2 측위오차 결과

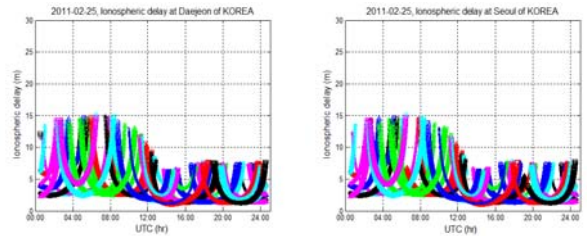
그림 6은 대전과 서울지역에서 태양폭풍이 도달한 2011년 2월 18일과 일주일 전후인 2월 11일, 2월 25일의 측위오차 결과를 나타낸다. 대전, 서울 두 지역 모두 태양폭풍의 영향이



(a) Ionospheric delay at Daejeon (2011-02-11) (a-1) Ionospheric delay at Seoul (2011-02-11)



(b) Ionospheric delay at Daejeon (2011-02-18) (b-1) Ionospheric delay at Seoul (2011-02-18)



(c) Ionospheric delay at Daejeon (2011-02-25) (c-1) Ionospheric delay at Seoul (2011-02-25)

Fig. 5 Ionospheric delay at Daejeon (left) and Seoul (right) of Korea

Table 2 Standard deviation of positioning error results

(std)

지역	관측일	2011-02-11	2011-02-18	2011-02-25
		대전	x(m) 1.63 y(m) 2.4 z(m) 2.53	2.29 2.42 3.37
서울	x(m) 1.8 y(m) 2.26 z(m) 2.35	2.3 2.32 3.08	1.55 1.83 1.93	

있었던 2011년 2월 18일에 측위오차가 가장 컸으며, 일주일 후인 2월 25일에 가장 작은 측위오차를 보였다.

표 2는 그림 6의 측위오차 표준편차 결과를 나타낸다. 측위 오차는 태양폭풍의 영향이 미친 2011년 2월 18일에 ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed) 좌표계 x, y, z축 모두 가장 크게 나타났다. 2월 18일의 z축 방향 측위오차는 대전지역에서 3.37m 서울지역에서 3.08m로 가장 크게 나타났으며, 일주일 후인 2월 25일 z축 방향 측위오차 결과와 비교했을 때 1m 이상 더 큰 측위오차가 발생했음을 알 수 있다. 대전 지역

2월 18일의 x축 측위오차도 2월 25일과 비교하여 약 80cm정도 크게 나타났다. 또한 2월 11일, 18일, 25일 중 태양폭풍 도달 후 일주일 뒤인 2월 25일에 x, y, z축 모두 2m 이하로 가장 작은 측위오차를 보였다.

4. 결 론

태양 흑점의 주기적인 활동에 의한 태양폭발은 지자기 교란을 일으키며, 이로 인한 전리층의 TEC 변화는 GPS 신호의 전리층 지연을 유발할 수 있다. 최근 2011년 2월 15일에 발생한 X급 태양폭발의 영향은 2월 18일 보현산 소재의 한국천문연구원 지자기 관측소에서 관측되었으며, 일주일 전후 지자기 데이터와 비교하여 우리나라 시간으로 10시 30분경 (01:30 - UTC)부터 지자기 측정치가 요동하였다.

IGS에서 제공하는 RINEX 관측데이터, RINEX 항법데이터, Ultra-rapid meteorological 데이터, Rapid ionospheric TEC 데이터를 이용한 의사거리 계산치와 의사거리 관측치의 차이 (의사거리 오차)는 대전과 서울지역에서 태양폭풍의 영향이 있었던 2월 18일에 일주일 전후 결과와 비교하여 가장 큰 결과를 나타냈다. 측위오차 결과 또한 두 지역에서 2월 18일에 일주일 후인 2월 25일 측위오차 결과와 비교했을 때 z축 방향으로 1m 이상 더 큰 측위오차가 발생했으며, x축 방향으로 80cm 정도 더 큰 측위오차가 발생했다.

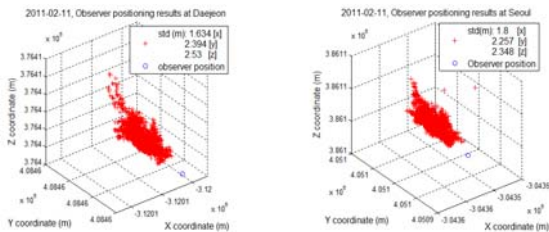
결과로부터 태양폭풍으로 인한 지자기 교란이 전리층의 TEC값 변화를 가져왔고, 이로 인해 전리층 지연오차가 측위 오차에도 영향을 미쳤음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비지원 (06 교통핵심A03; PMS2170)에 의해 수행되었습니다. 또한 지자기 관측데이터를 제공해 주신 한국천문연구원 우주과학연구본부 태양우주환경그룹에 감사드립니다.

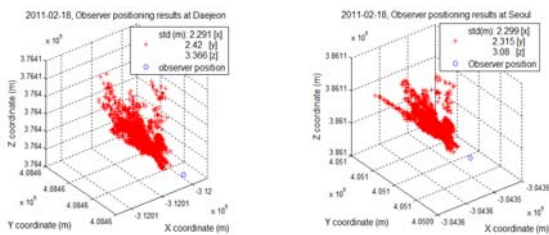
참 고 문 헌

- [1] 하지현, 박관동, 허복행(2006), "GPS 가강수량 결정을 위한 한국형 평균온도식 개발", 한국우주과학회지 23권 4호, pp. 373-384.
- [2] 한국천문연구원 우주과학연구본부 태양우주환경그룹 (2011), <http://www.kasi.re.kr/>
- [3] 한국해양연구원(2009), 수치해석 프로그램을 이용한 GNSS 신호 환경오차 및 시각정보 생성모듈 구현과 검증 보고서
- [4] Dehel, T.F.(2005), "Observations of Ionospheric Walls of TEC During Geomagnetic Storms", ION (Institute Of Navigation) 61st annual meeting, 27-29 June 2005.



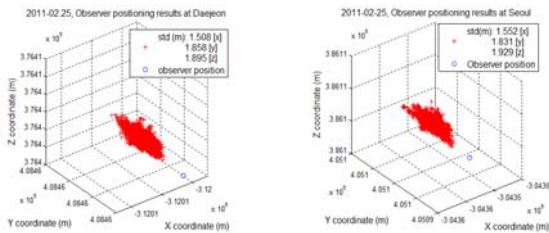
(a) Positioning error at Daejeon (2011-02-11)

(a-1) Positioning error at Seoul (2011-02-11)



(b) Positioning error at Daejeon (2011-02-18)

(b-1) Positioning error at Seoul (2011-02-18)



(c) Positioning error at Daejeon (2011-02-25)

(c-1) Positioning error at Seoul (2011-02-25)

Fig. 6 Positioning error results at Daejeon (left) and Seoul (right) of Korea

- [5] International GNSS Service (IGS)(2011), <http://www.igs.org/>
- [6] Kaplan, E.D., Hegarty, C.J.(2006), Understanding GPS -Principles and Applications-
- [7] Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP)(2004), Navstar Global Positioning System Interface Specification: Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces
- [8] Niell, A.E.(1996), "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths", Journal of geophysical research, Vol. 101, No. B2, pp. 3227-3246.
- [9] Misra, P. and Enge, P.(2006), Global Positioning System -Signals, Measurements, and Performance-
- [10] Pi, X., Mannucci, A.J., Komjathy, A., Sparks, L.(2005), "Ionospheric Super Storms (ISS) and Effects on WAAS", ION (Institute Of Navigation) 61st annual meeting, 27-29.
- [11] Space Weather Prediction Website of the US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2011), <http://www.swpc.noaa.gov/>

원고접수일 : 2011년 6월 13일
심사완료일 : 2011년 8월 11일
원고채택일 : 2011년 8월 12일