

GPS 관측자료에 나타난 초대형 지자기 폭풍 기간 동안 한반도 상공 전리층 양상

정종균^{1†}, 최병규¹, 백정호^{1,2}, 지건화³, 조정호¹

¹한국천문연구원 우주측지연구그룹

²과학기술연합대학원대학교

³극지연구소 극지기후연구센터

Ionospheric Behaviors Over Korea Peninsula During the Super Geomagnetic Storm Using GPS Measurements

Jong-Kyun Chung^{1†}, Byung-Kyu Choi¹, Jungho Baek^{1,2}, Geonhwa Jee³,
and Jungho Cho¹

¹Space Geodesy Research Group, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²University of Science & Technology, Daejeon 305-333, Korea

³Center of Climate Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

E-mail: jkchung@kasi.re.kr

(Received September 2, 2009; Accepted November 1, 2009)

요 약

2003년 10월 28일에 X18 급의 태양 플레어가 발생한 다음날인 10월 29일부터 10월 31일까지 할로윈 이벤트로 불리는 초대형 지자기 폭풍이 전 지구적으로 발생하였다. 할로윈 이벤트 기간 동안 한반도 상공 전리층 양상을 살펴보기 위해서 GPS 신틸레이션 S4 지수와 GPS 토모그래피 기법을 사용한 최대 전자밀도(NmF₂)의 변화를 날짜별로 분석하였다. GPS 신호손실과 신틸레이션의 총 발생 횟수는 10월 28일과 29일이 각각 1,094회와 1,387회로 30일과 31일의 604회와 897회에 비해 높게 나타났다. 이는 지자기 폭풍이 반드시 전리층 교란을 발생하지 않음을 의미한다. 그러므로 지자기 폭풍이 아닌 전리층 교란을 감지하기 위해서는 지자기 교란 지수보다 S4 지수가 유용할 것이다. 전리층 전자밀도 변화 양상은 GPS 토모그래피 기법으로 산출된 전리층 최대전자밀도(NmF₂) 값을 날짜별로 분석하였다. 10월 28일에 가장 높은 NmF₂ 값을 보이고 있다. 이는 안양 이온존데에서 관측된 NmF₂ 값의 변화와 일치되는 경향을 보이며, 전자밀도가 낮은 30일과 31일에 GPS 신틸레이션과 신호손실 총 발생회수가 낮게 나타나는 양상을 보이고 있다. 결론적으로 지자기 폭풍과 GPS 신호 품질의 상관성은 나타나지 않고 있으나 전자밀도가 감소할수록 GPS 신호품질은 양호한 것으로 나타나고 있다. 향후 장기관측 자료 분석을 통해 평상시와 지자기 폭풍 기간 동안의 GPS 신호품질과 전자밀도 변화에 대해 연구가 진행될 것이다.

Abstract

The super-geomagnetic storms called 2003 Halloween event globally occurred during the period of 29 through 31 which are the following days when the solar flares of X18 class exploded on 28 October 2003. The S4 index from GPS signal strength and the peak electron density (NmF₂) from GPS tomography method are analyzed according to the date. The occurrences of the cycle slip and scintillation in the GPS signals are

[†]corresponding author

1,094 and 1,387 on 28 and 29 October, respectively and these values are higher than 604 and 897 on 30 and 31 October. These mean the ionospheric disturbances are not always generated by the period of geomagnetic storm. Therefore, GPS S4 index is useful to monitor the ionospheric disturbances. Behaviors of ionospheric electron density estimated from GPS tomography method are analyzed with the date. At UT = 18 hr, the maximum NmF₂ is shown on 28 October. It agrees with NmF₂ variation measured from Anyang ionosonde, and the GPS signal are better condition on 30 and 31 October than 28 October. In conclusion, GPS signal condition is relation with geomagnetic activities, and depend upon the variation of the electron density. We will study the long-term data to examine the relationship between the GPS signal quality and the electron density as the further works.

Keywords: geomagnetic storm, scintillation, GPS, S4

1. 서 론

전리권 전자는 열권과 중간권의 주요 성분인 산소원자 및 분자 그리고 질소분자 등의 중성입자가 태양 극자외선/자외선 및 X-선 복사 흡수(radiative absorption)와 지자기력선을 따라 유입되는 고에너지 입자와의 충돌에 의해 이온화되면서 주로 생성된다. 그러므로, 전리권 전자밀도는 태양 및 지자기 활동 그리고 위도와 경도에 따라 특징적인 양상을 보인다. 시간과 공간에 따른 전리권 전자밀도의 변화는 GPS(Global Positioning System)를 이용한 고정밀 위치결정에 있어 매우 중요한 오차요인이다. 고도 약 20,200km 상공의 GPS 위성에서 송신되는 L1($f_1 = 1575.42\text{MHz}$)과 L2($f_2 = 1227.60\text{MHz}$) 전자기파 신호는 전리권을 통과할 때 고도에 따른 전자밀도 분포 차이로 굴절이 되어 실제 지상의 GPS 수신기에서 인식하는 GPS 위성까지의 거리가 증가한다. 이를 GPS 전리권 신호 지연 효과 또는 GPS 전리권 오차로 불리며 현재까지 GPS를 이용한 위치결정에서 가장 높은 오차로 알려져 있다. GPS 위치결정에서 전리권 전자밀도 영향을 최대도 감소하기 위해 Klobuchar 방송모델이나 총전자량(Total Electron Content, TEC)을 이용한 전지구적 혹은 지역 전리권 맵 모델을 이용하고 있다. 그러나, GPS 위성으로부터 방송파 신호를 수신받지 못하게 되면 총전자량을 산출하지 못하게 되고 결국 GPS 전리권 모델의 정밀도가 낮아진다. GPS 전리권 모델 정밀도의 감소는 GPS 위치결정에서 오차로 남게 된다. GPS 전리권 모델 정밀도에 영향을 미치는 GPS L1/L2 방송파의 신호 강도 감쇄나 손실은 일반적으로 전리권 전자밀도 불균질성에 의한 전파신호의 진폭감소와 위상편이에 의한 것으로 알려져 있다.

전리권 전자밀도 불균질성에 의한 전파신호의 진폭 및 위상의 빠른 변화를 전리권 전파 신틸레이션(Ionospheric Radio Scintillation)이라 한다. 우리나라는 지자기적 위도로 30° 내외에 위치하고 있기 때문에 지자기 폭풍에 의한 전자밀도 변화가 크지 않는 안정된 전리권 상태를 유지하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 2003년 할로윈 이벤트 기간인 10월 29일 새벽에 보현산 전천카메라에 적색 오로라가 관측된 사실로부터 강한 지자기 폭풍이 발생할 경우 한반도 상공 전리권 전자밀도에도 상당한 변화가 있음을 알 수 있다(Chung et al. 2007). 중위도 적색 오로라는 지자기 폭풍기간 동안 위도

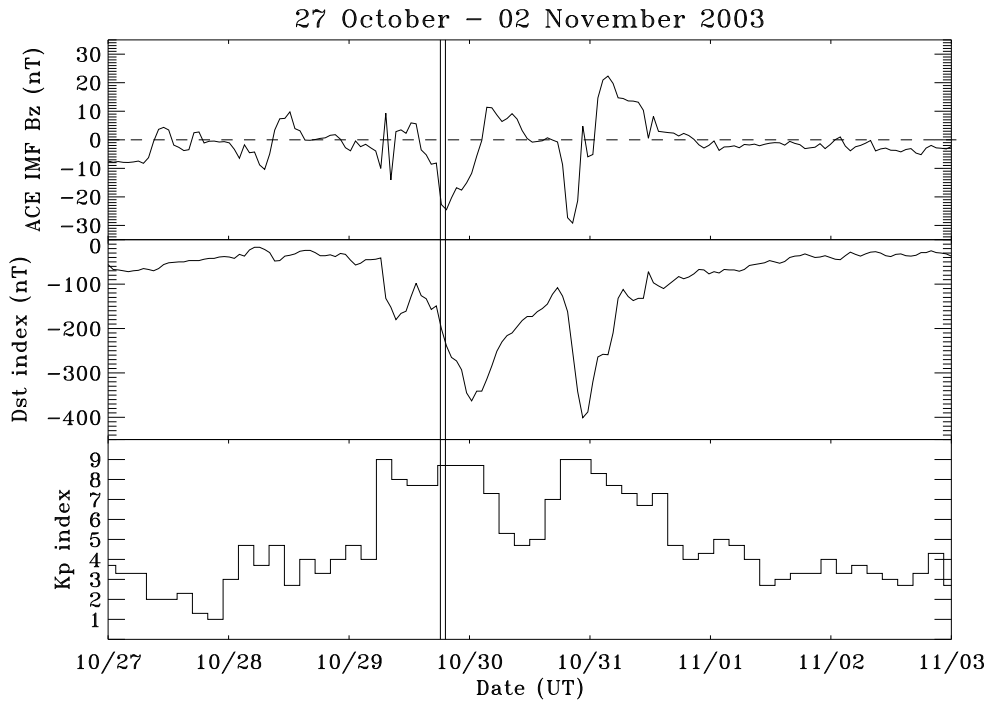


그림 1. 2003년 10월 28~31일 동안 ACE 위성에서 측정된 행성간 자기장(IMF B_z) 세기 및 지자기 활동 지수(Dst와 K_p) 변화.

40° 이하의 지역에서 관측되는 OI 630.0nm 밤대기광의 갑작스런 밝기 증가로 정의될 수 있는데 현재까지 알려진 기작으로는 플라즈마권으로부터 유입된 전자와 열권 산소원자와의 충돌에 의해 발생되는 것으로 알려져 있다(Shiokawa 1997).

이 논문은 2003년 10월 28일부터 31일까지 발생한 초대형 지자기 폭풍 동안 한반도 상공 전리권 신틸레이션 및 신호손실 발생 횟수와 최대전자밀도를 날짜별로 분석한 것이다. 분석 기간 동안 전자 밀도의 변화 양상을 알아보기 위해 한국천문연구원의 9개 GPS 상시관측망으로부터 관측된 총전자량에 기반한 전리권 토모그래피 모델 결과와 전파연구소 이온존데에서 관측된 최대전자밀도(NmF_2) 자료를 이용하였다.

2. 초대형 전리층 폭풍, 할로윈 이벤트

2003년 10월 28일에 초대형 X18 등급 태양 플레어 폭발이 발생하였다. 태양 플레어 폭발에 의해 지구는 다량의 고에너지 입자와 극지외선/자외선 그리고 X-선 복사 영향을 받게 되어 10월 29일부터 31일까지 지구 전역에 걸쳐 지자기 폭풍이 발생하였다. 그림 1은 10월 28일부터 31일까지 태양 및 지자기 활동 지수의 변화를 나타낸 것이다. ACE 위성에서 관측된 행성간 자기장(Interplanetary Magnetic Field, IMF)의 지구 남북방향의 세기인 B_z 성분 변화를 살펴보면 10월 29일과 30일에 매

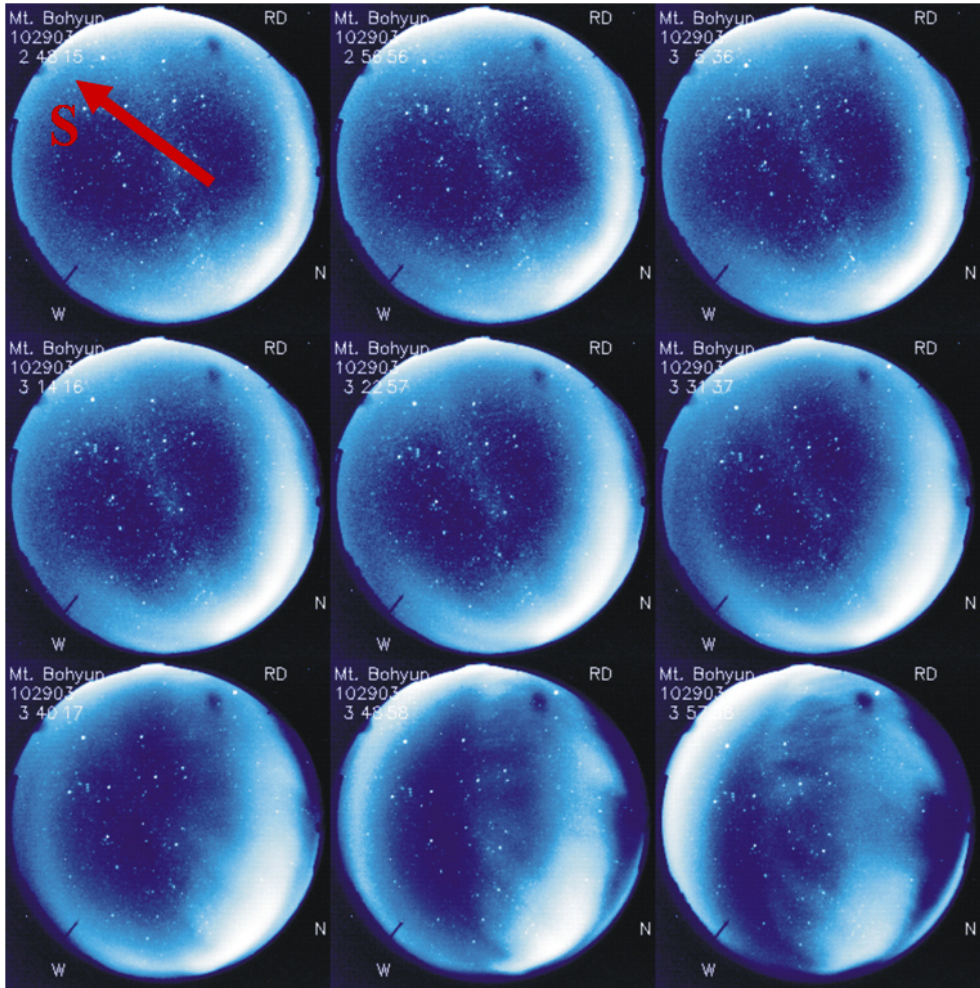


그림 2. 2003년 10월 29일에 경상북도 보현산 전천카메라로 관측된 적색 오로라.

우 큰 음수 값을 알 수 있다. 이는 IMF B_z 성분이 남쪽방향으로 향하고 있음을 의미하며 지구 자기력선과 행성간 자기력선 재결합(magnetic reconnection)의 조건이 충족되는 것이다. 지구 자기력선과 행성간 자기력선의 재결합이 이루어지면 다량의 플라즈마 입자가 지구로 유입되어 지자기 폭풍이 발생할 조건이 된다. 적도 부근의 지자기력선 세기를 나타내는 Dst(Disturbance Strom Time) 지수를 통해 지구 적도 주위의 환전류(ring current) 영역에 존재하는 전자의 지구 전리권으로의 유입을 유추할 수 있다. 10월 29일과 30일의 Dst 지수의 음수값은 환전류가 강하게 발생하여 이로부터 유도된 자기장이 원래의 지구 자기장의 세기를 감소시키고 있음을 보여준다. Dst가 양수 값으로 올라가는 것은 환전류의 세기가 감소되고 있는 것을 의미하며, 이는 환전류를 형성하는 전자가 지구로 유입되고 있는 것으로 해석될 수 있다. 지자기장의 교란 정도를 나타내는 K_p 지수는 10월 29일부터

31일 동안 대부분 심한 지자기 교란이 발생하고 있음을 보여준다. 일반적으로 K_p 지수가 5 이상인 경우를 지자기 폭풍으로 정의하는데, 할로윈 이벤트 기간 동안에는 K_p 지수 최대값인 9가 상당 기간 동안 유지됨을 볼 수 있다.

그림 2는 10월 29일 17시 48분부터 18시 58분(UT)에 경상북도 보현산에서 전천 카메라(all-sky camera) 로 관측된 OI 630.0nm 밤대기광의 급격한 밝기 증가를 보여준다. 그림 2에서 하얀색은 밝기가 높은 것을 의미한다. 붉은 색 화살표는 OI 630.0nm 밤대기광 밝기 변화의 공간적 이동 방향을 나타낸 것이다. 그림 1에 OI 630.0nm 밤대기광의 급작스런 밝기 증가가 나타난 시간대를 실선으로 표시하였다. 고위도의 오로라는 지자기력선을 따라 유입되는 고에너지 입자와 지구 고층대기 입자 사이의 충돌에 의해 발생하는 반면에, 중위도 적색 오로라는 환전류대의 전자가 플라즈마권을 거쳐 중위도로 유입되면서 발생하는 것으로 제시된다(Rassoul et al. 1992, Chung et al. 2007). 관측 자료의 부족으로 인해 현재까지는 중위도 오로라의 발생 기작에 관해 여러 가지 논란이 있으나, OI 630.0nm 밤대기광의 밝기 증가는 전리권 전자밀도의 증가와 밀접한 관계가 있음은 일치된 연구결과이다(Tinsley et al. 1984, Rassoul et al. 1993, Shiokawa et al. 1997).

그림 1에서 제시한 2003년 10월 29일부터 31일까지의 강한 지자기 폭풍의 발생과 이로 인한 그림 2의 한반도 상공의 오로라 발생으로부터 한반도 상공 전리층 전자밀도의 교란이 발생할 가능성이 높다. 따라서, 동일 기간동안 전리권 전자밀도 교란에 의한 전리권 교란을 분석하기 위해 대전 IGS GPS 관측소에 측정된 L2 SNR 값을 이용하여 전리층 신틸레이션 변화를 분석하였다.

3. GPS 전리권 신틸레이션

전리권 신틸레이션은 수 cm 부터 수 백 km의 다양한 크기를 갖는 전자밀도의 불균질에 의한 전파 신호의 위상과 진폭의 빠른 변화로 정의된다. 전파가 전리권을 통과할 때 그것의 진폭과 위상은 전자밀도 교란에 의해 영향을 받게 된다. 태양활동 극대기 동안 전리권 신틸레이션에 의해 GPS 신호 대역인 L 대역은 약 20dB까지 신호세기가 감소하여 GPS 위치정밀도를 낮추는 역할을 한다(Kintner et al. 2001). 또한 노경민 외(2009)는 고도 약 450km GRACE 위성 K 대역의 전리권 신틸레이션과 GRACE 두 위성간의 거리오차를 분석하였다. 그 결과 전리권 신틸레이션이 빈번히 발생하는 적도 지역에서 거리오차가 증가함을 보였다.

대전 IGS GPS 상시 관측소(36.4°N, 127.4°E, 116.8m)의 Trimble 4000SSi 수신기에서 측정된 L2 신호의 SNR(Signal to Noise Ratio) 값을 1초 간격으로 측정하여 태양 플레어가 폭발한 2003년 10월 28일과 전리층 폭풍이 발생한 2003년 10월 29일부터 31일까지 전리권 신틸레이션을 측정하였다. L2 신호는 L1보다 신호세기가 약하기 때문에 전리권 교란에 의한 영향이 상대적으로 크게 받는다. GPS 수신기에서 측정된 SNR 값은 관측누적시간, 관측고도각, 수신기 신호 감응도, 안테나 형태 및 관측소 주변환경 등에 따라 다르게 결정되는 특정 시간에서의 GPS 관측소 특성값이다. 그러므로 어느 GPS 관측소에서 측정된 SNR 값을 다른 GPS 관측소에서 측정된 SNR과 비교하거나, 같은 GPS 관측소에서 다른 시간에 측정된 SNR 값을 비교할 수는 없다. GPS SNR 값을 이용하여 전리권 신틸레이션을 보기 위해서는 일반적으로 식 (1)로 계산되는 S4 지수값을 이용한다. 여기서 $\langle I \rangle$ 는 전파 신호강도, 즉 GPS SNR 값을 의미하며 60초 동안 수집된 자료를 1초 간격의 슬라이딩 윈도우 방식

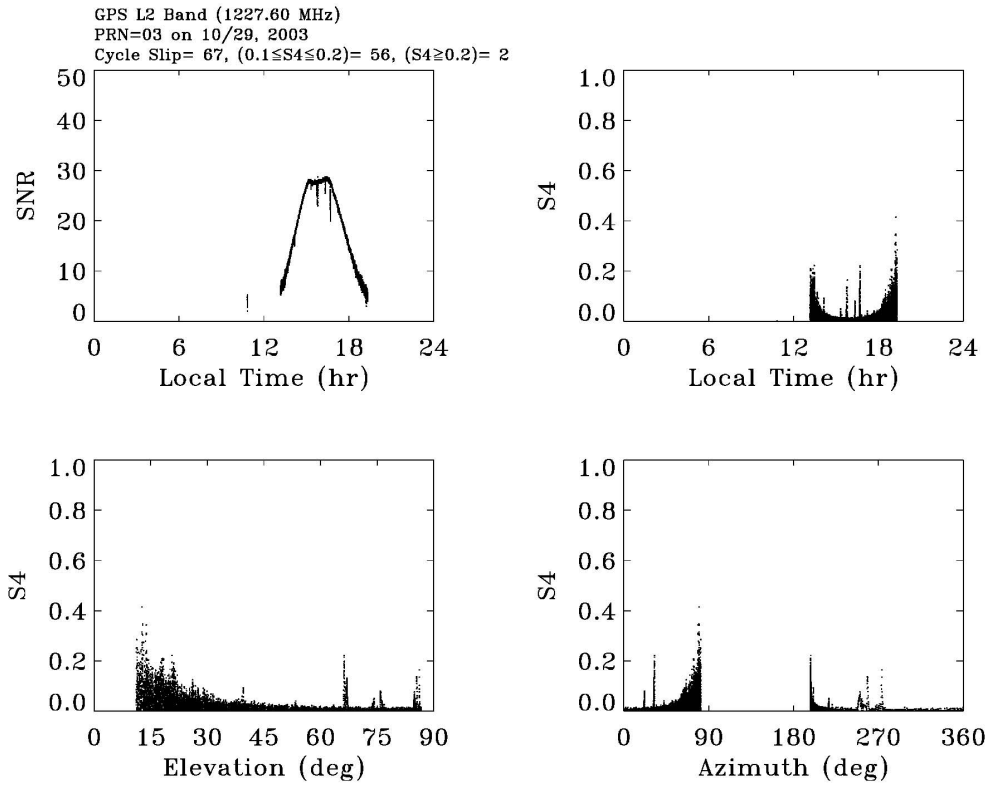


그림 3. 2003년 10월 29일에 대전 GPS IGS 관측소에서 PRN=3 위성으로부터 수신된 L2 신호 SNR의 시간에 따른 변화 및 S4 지수의 지역시간, 고도, 방위각에 따른 변화.

으로 1분동안 평균한 값이다(Zernov et al. 2009).

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}} \tag{1}$$

그림 3은 2003년 10월 29일 PRN 3번 GPS 위성으로부터 수신된 L2 신호의 SNR 값과 S4 지수를 시간, 고도각, 방위각과의 관계를 나타낸 것이다. 그림 3에서 고도각과 S4 지수값을 살펴보면 고도각이 낮은 곳에서 높은 S4 값을 나타내고 있다. GPS 관측소에 대한 GPS 위성 고도가 낮을 경우 대류권 수증기량에 의한 전파 신틸레이션 발생할 가능성이 높아진다. 그러므로 대류층 수증기량에 의한 신틸레이션 효과를 배제하기 위해 GPS 위성 고도각이 20° 이상인 경우에 대해서 신호손실(Cycle Slip) 및 S4 지수를 산출하였다. 전리권 교란 정도에 따른 신틸레이션 발생빈도를 분석하기 위해 S4 지수는 값의 크기에 따라 $S_4 < 0.1$, $0.1 < S_4 < 0.2$, $S_4 > 0.2$ 구분하였다. 우리는 이 중에서 $S_4 > 0.1$ 보다 큰 경우를 전리권 교란 상태로 정의하였다.

표 1은 2003년 10월 28일부터 31일까지 대전 IGS GPS 관측소에서 관측된 신호손실, $0.1 < S_4 < 0.2$, 그리고 $S_4 > 0.2$ 경우에 대한 발생 횟수를 정리한 것이다. 신호손실은 지자기 활동이 활발한 10월 29일과 31일이 각각 786회와 708회로 높게 나타난 반면에 지자기 활동이 낮은 10월 28일과

표 1. 2003년 10월 28일부터 31일까지 대전 IGS GPS 상시관측소에 관측된 신호손실 및 S4 지수변화.

	28 October	29 October	30 October	31 October
Cycle Slip	521	786	597	708
0.1 < S4 < 0.2	512	563	41	179
S4 > 0.2	61	38	6	10
Total	1,094	1,387	604	897

30일에는 각각 521회와 597회로 발생횟수가 상대적으로 낮게 나타나고 있다. $0.1 < S4 < 0.2$ 인 경우를 살펴보면 지자기 활동이 강한 10월 29일이 563회로 여전히 높게 나타났으나 지자기 폭풍이 시작되기 전인 10월 28일이 512회로 지자기 활동이 존재한 10월 31일의 179회보다 약 2.9배 높게 나타나고 있다. 신틸레이션이 강한 $S4 > 0.2$ 인 경우를 살펴보면 10월 28일이 61회 발생하여 지자기 폭풍인 시작된 10월 29일부터 31일보다 높게 나타나고 있다. 신호손실 및 $S4 > 0.1$ 이상인 총 발생 횟수는 10월 29일이 1,387회로 가장 높게 나타났으나, 지자기 폭풍이 시작되기 전인 10월 28일이 1,094회로 지자기 폭풍 기간 동안인 10월 30, 31일보다 높게 나타나고 있다.

4. GPS 전리층 토모그래피 모델

2003 할로윈 이벤트 기간동안 한반도 상공 최대 전자밀도 변화를 날짜별로 살펴보기 위해 한국 천문연구원 GPS 상시관측망으로부터 산출된 경로상 총전자량(Slant TEC) 값을 이용하여 전리권 토모그래피(Computerized Ionospheric Tomography, CIT) 모델을 구성하였다. 고도별 전리권 전자밀도를 관측하기 위한 전통적인 방법으로 비간섭성 산란 레이더(Incoherent Scattering Radar)나 이온존데(Ionosonde)와 같은 레이더 관측이 널리 사용되고 있으나 공간상으로 한 지점만을 관측하고 시간적으로 상시관측이 어렵다는 단점을 갖는다. 반면에 GPS CIT 모델에 의해 재구성된 전자밀도(Reconstructed Electron Density)는 넓은 지역을 2차원 혹은 3차원으로 30분 이내의 시간간격으로 상시적으로 관측할 수 있는 장점을 갖는다.

우리나라와 같은 작은 지역의 CIT 모델에 널리 사용되는 방법은 식 (2)와 같이 전리권을 격자기반으로 구성하는 것이다.

$$STEC_i = \int_{T_x}^{R_x} \sum_{j=1}^{N_b} x_j \cdot b_j(\lambda, \phi, h) ds \tag{2}$$

GPS 위성, T_x 로부터 GPS 수신기, R_x 사이의 경로 i 에 대해서 지상에서 관측된 총전자량 값은 $STEC_i$ 로 표현한다. 전리권 격자, j 에 대해 경로가 지나가는 격자는 1로 설정하고 그렇지 않은 격자는 0으로 설정한다. 식 (2)에서 b_j 는 경도(λ), 위도(ϕ), 그리고 고도(h)의 함수인 기본함수를 구성하는 격자이다. x_j 는 각 격자에 대한 가중치, 즉 격자내의 전자밀도를 의미한다. 기본함수는 식 (3)과 같이 정의하며, 이를 식 (2)에 대입하여 식 (4)로 정리할 수 있다.

$$B_{ij} = \int_{T_x}^{R_x} b_j(\lambda, \phi, h) ds \tag{3}$$

$$STEC_i = \sum_{j=1}^{N_b} B_{ij} \cdot x_j \quad i = 1, \dots, N_p \tag{4}$$

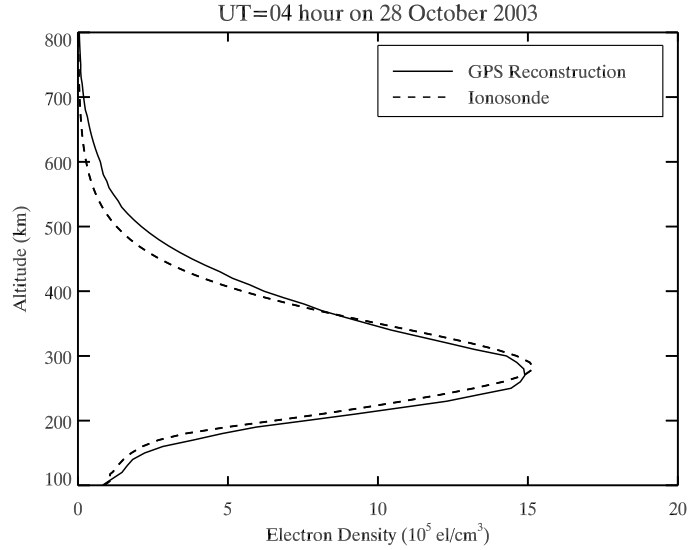


그림 4. 2003년 10월 28일 UT=4시의 전자밀도 수직분포. 실선은 GPS 토모그래피 모델에서 계산된 전자밀도, 점선은 안양 이온존데에서 관측된 전자밀도임.

식 (4)를 행렬식으로 다시 표현하면 식 (5)와 같다. 경로 i 가 통과하는 격자 d_{ij} 와 격자 내 전자밀도 n_j 합은 결국 수신기에 관측되는 총전자량 $STEC_i$ 로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} STEC_1 \\ STEC_2 \\ \dots \\ STEC_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

CIT 모델에서는 위도범위를 $32^\circ \sim 40^\circ$ 그리고 고도 1° 의 고도 해상도를 설정하고 고도 범위를 $100 \sim 800\text{km}$ 로 10km 해상도로 설정하여 총 540개의 격자로 구성하였다. 여기서 d_{ij} 는 전리권 각 격자로서 GPS 신호가 통과하면 1, 통과하지 않으면 0으로 설정된다. 식 (5)에서 각 격자의 전자밀도 n_j 를 구하기 위해 ART(Algebraic Reconstruction Technique)를 사용하였다(Kunisyn & Tereshchenko 2003). CIT에서 식 (6)의 ART 알고리즘은 전체적인 수직구조는 초기값에 의존하기 때문에, 초기값은 전파연구소 안양 이온존데 관측소에서 산출된 전자밀도 수직분포 자료를 사용하였다.

$$N^{k+1} = N^k + \lambda_k \frac{STEC_i - \sum_{j=1}^M d_{ij} n_j^k}{\sum_{j=1}^M d_{ij} d_{ij}} D_j \quad (6)$$

그림 4는 CIT에 의해 재구성된 2003년 10월 28일 UT=4시의 전자밀도 수직분포와 안양 이온존데로부터 관측된 전자밀도 수직분포를 비교한 것이다.

그림 5는 GPS CIT 모델에서 산출된 2003년 10월 28일부터 10월 31일까지 UT=18시의 한반도 상공 전리권 전자밀도 수직분포를 보여주고 있다. 지자기 폭풍이 발생하기 전인 10월 28일의 최대 전자 밀도가 지자기 폭풍 동안인 10월 29일부터 31일보다 높은 것을 볼 수 있다.

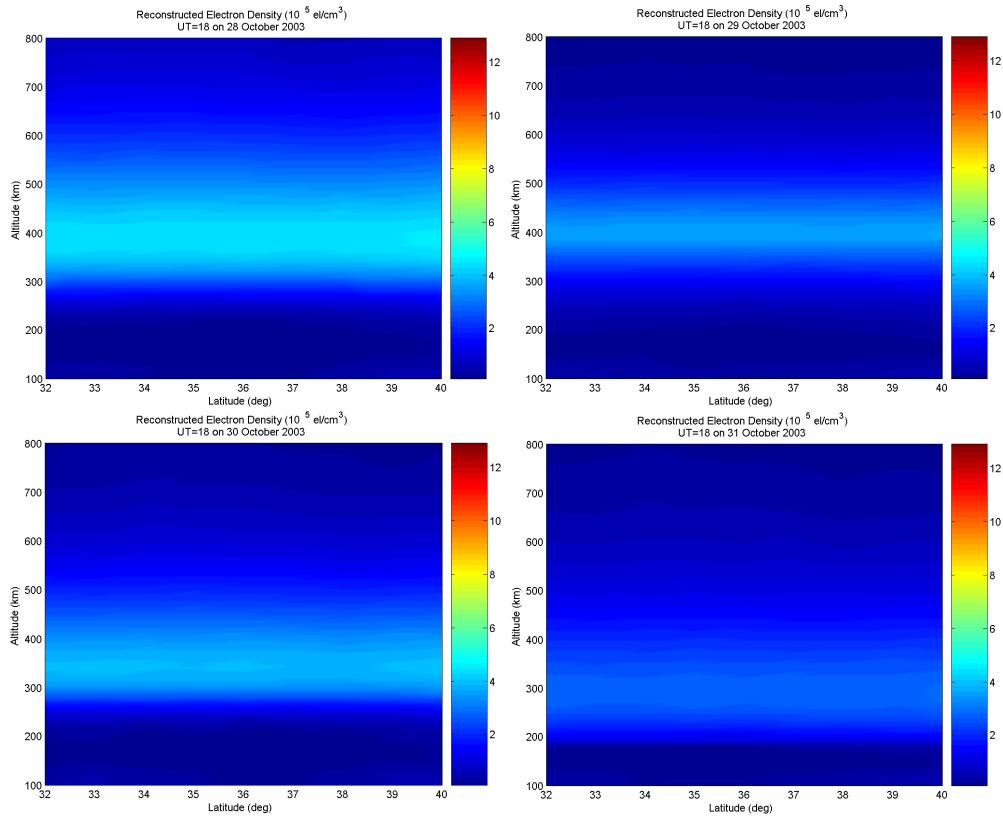


그림 5. 2003년 10월 28일부터 31일(UT=18시)까지 GPS 토모그래피에서 계산된 전자밀도 수직분포.

5. 토 의

2003년 10월 28일에 X18 급의 태양 플레어의 영향으로 10월 29일부터 31일까지 할로윈 이벤트로 불리는 초대형 지자기 폭풍이 전세계적으로 발생하였다. 우리나라는 10월 29일 새벽에 보현산 전천카메라에서 중위도 적색오로라의 특징을 갖는 OI 630.0nm 파장 밤대기광의 급격한 밝기 증가가 관측되었다. 중위도 적색 오로라는 전리권 전자와 산소 원자와의 충돌에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으므로, 이는 할로윈 이벤트 기간동안 우리나라 상공에 상당한 전자밀도의 교란이 있음을 제시한다.

2003년 10월 28일부터 31일까지 한반도 상공 전리권 교란 상태를 보기 위해 대전 IGS GPS 상시 관측소의 L2 대역의 SNR 값을 이용하여 전리권 신틸레이션 지수 S4 값을 계산하였다. 대기 수증기량에 의한 신호감쇄 효과를 배제하기 위해 고도각이 20° 이하에서 관측된 자료는 배제하였다. 상기 기간동안 GPS L 대역의 신호 손실은 10월 28일에 521회, 29일은 786회, 30일 597회, 그리고 31일은 708회가 발생하여 지자기 폭풍이 가장 강한 29일과 31일에 가장 많은 GPS 신호손실이 발생하였음을 확인하였다. 이는 지자기 위도로 중위도인 우리나라도 지자기 폭풍이 발생할 경우 GPS 신호손

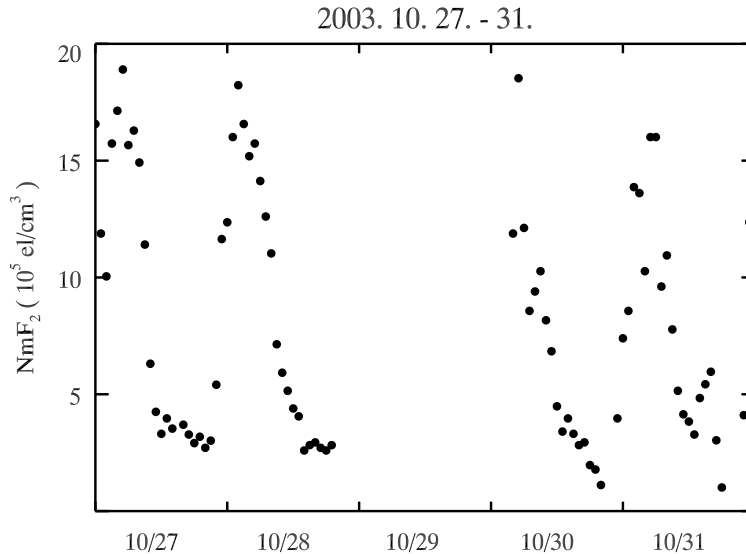


그림 6. 2003년 10월 27일부터 31일까지 안양 이온존데에서 관측된 최대전자밀도(NmF_2) 변화.

실이 빈번히 발생하고 있음을 나타낸다. 전리권 신틸레이션을 크기에 따라 구분하기 위해 $S_4 < 0.1$, $0.1 < S_4 < 0.2$, 그리고 $S_4 > 0.2$ 로 3단계로 구분하여 분석하였다. 10월 28일부터 31일까지 $0.1 < S_4 < 0.2$ 사이의 신틸레이션 발생횟수를 살펴보면 총 1,295회인데 10월 28일과 29일이 각각 512회와 563회로 할로윈 이벤트 기간 동안 전체 신틸레이션 발생횟수의 83%를 차지한다. 또한 $S_4 > 0.2$ 경우에 총 115회가 발생하였는데, 10월 28일과 29일에 각각 61회와 38회로 86%가 집중되고 있다. 특히 $S_4 > 0.2$ 경우에 지자기 폭풍이 시작되기 전인 28일이 오히려 더 높은 신틸레이션 발생횟수를 보이고 있다. 신호손실과 신틸레이션 발생총 회수를 살펴보면 중위도 적색 오로라가 발생한 10월 29일이 총 1,387회로 최대이고, 태양 플레어가 폭발한 10월 28일이 1,094회, 할로윈 이벤트 기간 동안 K_p 지수가 가장 낮은 30일이 604회, 그리고 두 번째 지자기 폭풍이 발생한 31일이 897회 기록되었다. K_p 나 Dst에 기록된 지자기 폭풍 기간 전인 10월 28일에 전리층 교란 정도가 지자기 폭풍 기간인 10월 30, 31일보다 더 높게 나타나고 있다. 즉, 한반도 상공 전리권의 경우에 K_p 나 Dst 지수에 의해 정의되는 지자기 폭풍과 전리권 교란이 발생한 기간이 일치하고 있지 않다. 중위도 전리권의 경우 고에너지 입자에 의한 지자기 교란에 의한 전리권 전자밀도 변화보다는 태양 극자외선 플럭스 변화에 의한 전리권 전자밀도의 변화가 발생할 수 있는 상황이라면, 지자기 폭풍이 발생전인 10월 28일부터 전리권 교란이 발생할 가능성이 높다. 그러므로, GPS를 비롯한 전파통신에 영향을 줄 수 있는 전리권 교란을 상시관측하기 위해서는 K_p 또는 Dst 지수와 같은 지자기 활동 지수보다는 실시간으로 관측 가능한 GPS S_4 지수가 더욱 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

그림 5의 GPS 토모그래피 모델에서 계산된 전자밀도 수직분포를 살펴보면 10월 28일이 지자기 폭풍 기간인 10월 29~31일 보다 최대 전자밀도가 높게 나타나고 있다. 총전자량으로 재구성된 전자밀도 수직분포보다 직접적으로 전자밀도 수직전자 밀도를 관측할 수 있는 안양 이온존데 자료를 이용하여 태양 플레어 폭발이 발생하기 전인 27일, 태양 플레어 폭발이 발생한 28일 그리고 지자기 폭풍

기간인 29일부터 31일까지의 NmF₂ 값을 살펴보았다. 그림 6의 안양 이온존데에서 관측된 NmF₂의 변화를 살펴보면, 10월 30일과 31일의 낮 시간과 밤 시간 모두 최대 전자밀도가 10월 27일과 28일보다 전반적으로 낮게 나타나고 있다. 10월 29일은 이온존데 관측 임계값을 초과된 상태로 관측값이 존재하지 않는다. Shiokawa et al.(2005)와 Prolss(2004)는 음 전리권 폭풍으로 정의한 지자기 폭풍 동안 전자밀도가 감소함을 발표하였다. 이는 최대전자밀도 고도에서의 질소분자 밀도 증가로 인한 전자소멸에 의한 것으로 제시된다. 10월 30일과 31일의 낮은 전자밀도 양상이 음 전리권 폭풍으로 규정하기 위해서는 O/N2 관측자료와의 비교가 필요할 것이다. 이에 대한 위성 대기광 관측자료는 향후 분석될 예정입니다.

6. 결 론

2003년 10월 29일부터 31일까지 지자기 폭풍 기간동안 한반도 상공 전자밀도 분포에 따른 GPS 신호의 신틸레이션과 신호손실 자료를 비교하여 전리권 교란을 분석하였다. 전자밀도 수직분포는 한국천문연구원 9개의 GPS 상시관측망에서 관측된 총전자량 자료로 구성된 토모그래피 모델 계산값과 전파연구소 안양 이온존데에서 관측된 자료를 사용하였다. 한반도 상공에서 OI 630.0nm의 갑작스런 밝기 증가가 나타난 10월 29일이 30일과 31일보다 높은 신틸레이션 및 신호손실 발생횟수를 보였다. 그러나 지자기 폭풍 발생전인 10월 28일이 10월 30일과 31일 보다 신틸레이션과 신호손실 총회수가 높게 나타났다. 안양 이온존데에서 관측된 최대전자밀도 변화를 살펴보면 10월 27일 및 28일이 10월 30일과 31일보다 높게 나타나고 있다. 결론적으로 지자기 폭풍과 GPS 신호 품질의 상관성은 나타나지 않으며, 전자밀도가 감소할수록 GPS 신호품질은 양호한 것으로 나타나고 있다.

향후 이번에 분석된 GPS 총전자량 기간을 확장하여 평상시와 전리권 폭풍 시의 차이점에 대해 분석할 예정이다. 더불어서 GPS 총전자량 장기자료를 이용한 전리권 전자밀도 변화에 따른 전파신호 신틸레이션에 관한 연구가 진행될 것이다.

감사의 글: 정중균, 최병규, 백정호, 조정호는 GPS 관측과 GPS S4 지수 산출 그리고 전체적인 논문 결과 도출에 관해서 “2009년도 교육과학기술부 기초기술연구회 협동연구사업비(과제명: GPS 기반 집중호우·전파장애·지각변동 상시감시기술 개발)” 지원을 받아 이 연구를 수행하였습니다. 지건화는 전리권 폭풍에 관한 해석을 “극지 대기 및 기후 변화 연구(PE09030)”의 부분적 지원을 받아 수행하였습니다. 안양 이온존데 자료를 제공해 주신 방송통신위원회 전파연구소에 감사드립니다.

참고문헌

- 노경민, Lueher, H., 박상영, 조정호 2009, 한국우주과학회지, in press
- Chung, J.-K., Wu, Q., Kim, Y. H., Won, Y.-I., Solomon, S., Park, J. U., & Choi, B. G., 2007, J. Atmos. and Solar-Terre. Phys., 69, 697
- Kintner, P. M., Kyosub, K., Theodore, B., Paula, D., & Eurico, R. 2001, Radio Sci., 36, 731
- Kunisyn, V. E. & Tereshchenko, E. D. 2003, Ionospheric Tomography (Berlin: Springer), pp.50-51
- Prolss, G. W. 2004, Physics of the Earth's Space Environment (Berlin: Springer), pp.429-431
- Rassoul, H. K., Rohrbaugh, R. P., & Tinsley, B. A. 1992, JGR, 97, 4041
- Rassoul, H. K., Rohrbaugh, R. P., Tinsley, B. A., & Slater, D. W. 1993, JGR, 98, 7695

Shiokawa, K. C., Ogawa, T., & Kamide, Y. 2005, *JGR*, 110, 10.1029/2004JA010706

Shiokawa, K. C., Ogawa, T., Oya, H., Rich, F. J., & Yumoto, K. 1997, *JGR*, 102, 14237

Tinsley, B. A., Rohrbaugh, R. P., Rassoul, H., Barker, E. S., Cochran, A. L., Cochran, W. D.,
Wills, B. J., Wills, D. W., & Slater, D. 1984, *GRL*, 11, 572

Zernov, N. N., Gherm, V. E., & Strangeways, H. J. 2009, *Radio Sci.*, 44, 10.1029/2008RS004074