

남쪽방향 행성간 자기장에 의해 발생한 자기 폭풍 동안 한반도 상공의 총 전자수 함유량 변화[†]

지은영^{1†}, 최병규², 김관혁², 이동훈¹, 조정호², 정종균², 박종욱²

¹경희대학교 우주과학과

²한국천문연구원

TEC VARIATIONS OVER KOREAN PENINSULA DURING MAGNETIC STORM[†]

E.-Y. Ji^{1†}, B.-K. Choi², K.-H. Kim², D.-H. Lee¹, J.-H. Cho²,
J.-K. Chung², and J.-U. Park²

¹Dept. of Astronomy and Space Science, Kyung Hee Univ., Kyunggi 449-701, Korea

²Korea Astronomy and Space Science Institute, Yusong, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: eyji@khu.ac.kr

(Received October 09, 2007; Accepted December 17, 2007)

요 약

행성간 자기장(Interplanetary Magnetic Field)이 남쪽방향으로 전환되면서 발생한 2003년 자기 폭풍 동안 한반도 상공 전리층의 총 전자수 함유량(Total Electron Content, TEC) 변화에 대해 알아보았다. 남쪽방향의 행성간 자기장과 지구 자기장의 상호작용에 의해 고위도에서 유도된 전기장과 저위도 전리층으로 전파된 전기장이 저위도 지역의 TEC 증가와 관련 있는 것으로 생각된다. 데이터 분석결과 2003년 6월 16일에 발생한 이벤트 동안에는 낮 지역 TEC 값이 약 15% 증가하였다. F2층의 최대 높이를 나타내는 hmF2는 300km 까지 상승되었으며, 수직방향 E×B 표류운동은 아랫방향으로 나타났다. 이것은 남쪽방향의 행성간 자기장 동안 고위도 지역으로 유입된 에너지에 의해 발생한 전리층의 교란된 다이나모 전기장이 TEC을 증가시킨 것으로 추정된다. 그러나 11월 20일에 발생한 이벤트 동안에는 전리층으로 전파된 서쪽방향 전기장에 의해 밤 지역 TEC 값이 약 10% 증가한 것으로 보여 진다. 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환됨과 동시에 hmF2 높이는 200km까지 감소되었으며, 아랫방향 E×B 표류운동이 나타났다. 또한 행성간 전기장 y성분과 수직방향 TEC 값이 거의 비슷하게 변화하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과들은 서로 다른 원인에 의해 발생하였지만 전리층의 교란된 전기장이 한반도 상공의 순간적인 TEC 값 증가에 중요한 요인으로 작용함을 보여 준다.

ABSTRACT

By analyzing the observations from a number of ground- and space-based instruments, including ionosonde, magnetometers, and ACE interplanetary data, we examine the response of the ionospheric TEC over Korea during 2003 magnetic storms. We found that the variation of vertical TEC is correlated with the southward turning of the interplanetary magnetic field B_z . It is suggested that the electric fields produced by

[†]이 연구는 BK21의 연구지원을 받아 수행되었습니다.

[‡]corresponding author

the dynamo process in the high-latitude region and the prompt penetration in the low-latitude region are responsible for TEC increases. During the June 16 event, dayside TEC values increase more than 15%. And the ionospheric F2-layer peak height (h_mF_2) was ~ 300 km higher and the vertical $E \times B$ drift (estimated from ground-based magnetometer equatorial electrojet ΔH) showed downward drift, which may be due to the ionospheric disturbance dynamo electric field produced by the large amount of energy dissipation into high-latitude regions. In contrast, during November 20 event, the nightside TEC increases may be due to the prompt penetration westward electric field. The ionospheric F2-layer peak height was below 200km and the vertical $E \times B$ drift showed downward drift. Also, a strong correlation is observed between enhanced vertical TEC and enhanced interplanetary electric field. It is shown that, even though TEC increases are caused by the different processes, the electric field disturbances in the ionosphere play an important role in the variation of TEC over Korea.

Keywords: southward IMF, ionosphere, ionospheric electric field, magnetic storm

1. 서 론

행성간 자기장(interplanetary magnetic field)과 지구 자기장의 결합은 자기권, 열권 그리고 전리층에 여러 가지 역학적인 변화를 발생시킨다. 지난 수십 년 동안 중, 저위도 전리층 지역의 물리적 변화 현상을 이해 하기위해 많은 연구가 수행 되어 왔지만 행성간 자기장 변화에 의한 전리층 교란 연구는 최근 “태양-지구계” 공간의 물리적 인과관계를 이해 하기위해 관심을 모으고 있는 가장 중요한 연구 주제중의 하나이다. 현재까지의 연구에 따르면 고위도 지역에서는 남쪽방향의 행성간 자기장과 지구 자기장의 결합에 의해 새벽에서 밤 지역으로 향하는 행성간 전기장(dawn-to-dusk interplanetary electric field)이 유도되어 전리층에 영향을 주며, 또한 유도된 행성간 전기장이 지구 자력선을 따라 고위도 전리층까지 이동하여 Joule 가열(Joule heating)을 통하여 다이نام오 전기장을 교란하는 것으로 알려져 있다(Blanc & Richmond 1980, Yizengaw et al. 2006). 저위도 지역에서는 고위도 지역에서 유도된 행성간 전기장이 저위도 전리층으로 전파되어 전기역학적인 변화를 발생시킨다(Sastri 1988, Kelly et al. 2003, Tsurutani et al. 2004). 중, 저위도 전리층의 전기장은 그 지역의 수직방향 총 전자수(Vertical Total Electron Content, VTEC)에 변화를 주는 것으로 알려져 있다(Blanc & Richmond 1980).

극관지역(polar cap)에서는 새벽에서 밤 지역으로 흐르는 행성간 전기장의 영향으로 태양반대방향으로 $E \times B$ 표류운동이 유도되어 대규모의 플라스마 대류와 강한 전류가 발생한다. 이것에 의해 오로라 지역에서는 극관지역과 반대로 밤 지역에서 새벽지역으로 흐르는 전기장(dusk-to-dawn electric field)이 유도되는데, 이것이 바로 교란된 다이نام오 전기장(disturbance dynamo electric field)이다(Kelley 1989). 교란된 다이نام오 전기장은 낮 지역에서는 서쪽방향(westward), 밤 지역에서는 동쪽방향(eastward)으로 흐르게 된다. 다이نام오 전기장은 수직방향 플라스마의 표류운동 방향에 영향

을 주어 서쪽방향 전기장은 아랫방향(downward) 플라즈마 표류운동을, 동쪽방향 전기장은 위쪽방향(upward) 플라즈마 표류운동을 유도하여 전리층의 전자밀도에 영향을 주는 것이다(Scherliess & Fejer 1997). Yizengaw et al.(2006)은 북반구와 남반구에 위치한 GPS 위성의 지상 관측소에서 추정된 TEC와 CHAMP 위성에 탑재된 GPS 수신기에서 측정된 플라즈마권 밀도 데이터를 비교한 결과 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환되었을 때 고위도 지역으로 유입된 에너지에 의해 발생된 교란된 다이나모 전기장이 저위도 전리층의 TEC을 증가시킨다고 말하고 있다.

자기권의 “shielding”이 형성되기 전 새벽에서 밤 지역으로 흐르는 행성간 전기장이 저위도 전리층으로 전파되면, 적도지역과 저위도 전리층에서는 전기역학적인 변화가 발생한다. 이때 교란된 전기장을 ‘prompt penetrated’ 전기장이라 한다. 전리층으로 전파된 전기장은 앞의 고위도 Joule 가열에 의해 발생된 다이나모 전기장과는 반대로 낮 지역에서는 동쪽방향, 밤 지역에서는 서쪽방향으로 흐르게 된다. 이것에 의해 낮 지역에서는 위쪽방향 $E \times B$ 플라즈마 표류운동 유도하여 더 높은 고도로 전리층의 플라즈마를 상승시키며, 밤 지역에서는 아랫방향 $E \times B$ 표류운동을 유도하여 플라즈마를 전달한다. Huang et al.(2005)은 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환되어 지구에 자기폭풍이 발생하였을 때 WIND와 ACE(Advanced Composition Explorer) 위성에서 관측한 행성간 전기장 y 성분과 Jicamarca 레이더에서 관측한 전리층 전기장 y 성분의 변화를 비교하였다. 그 결과 행성간 전기장과 전리층의 전기장이 비슷하게 변화하는 것을 알 수 있었으며, Millstone Hill 레이더에서 측정된 TEC은 조용한날과 비교하였을 때 약 20TECU(1TECU $\cong 10^{16} \text{el/m}^{-2}$) 정도 증가한 것을 보였다. 또한 Mannucci et al.(2005)도 ACE 위성에서 관측한 전기장 y 성분과 GPS 위성 신호로부터 추정된 수직방향 TEC의 변화를 비교한 결과 두 변화 사이에 큰 상관관계가 있다고 기술하였다.

이 논문에서는 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환되면서 발생된 자기 폭풍 동안 전리층 안에서 교란된 전기장과 관련하여 한반도 상공의 전리층 TEC 변화를 살펴보고자 한다. 최근 지방시(local time)와 자기폭풍 발생 시간에 따라 교란된 전기장과 관련하여 적도를 포함한 저위도 지역에서는 전리층 TEC 변화에 대한 연구가 활발해지고 있지만, 중위도 즉, 한반도 상공의 TEC 변화에 대한 연구는 기초단계에 머물고 있다. 그래서 이 연구에서는 F층의 최대 높이 변화를 알 수 있는 hmF2 데이터와 GPS 기준국망으로부터 산출된 격자기반 수직방향 TEC 데이터를 이용하여 한반도 상공의 전리층 TEC 변화를 조사하였다. 이번 연구에서는 전파연구소 안양관측소의 전리층 측정기(Ionosonde)에서 관측된 hmF2 데이터를 사용하였으며, 수직방향 TEC 데이터는 한반도 전역에 고르게 분포된 9개의 GPS 기준국 관측정보를 이용한 한국천문연구원의 지역적 모델(Regional Ionosphere Model, RIM)로부터 추정된 데이터를 사용하였다. 태양풍과 행성간 자기장 및 전기장의 변화는 ACE 위성에서 관측된 데이터를 사용하였다. 자기 적도지역 전리층에서 동서방향 전기장(zonal electric field)에 직접적으로 영향을 받는 수직방향 플라즈마 표류운동 방향은 지상 지자기 관측소의 H 성분을 사용하였다. 수직방향 $E \times B$ 표류속도의 일변화는 ΔH 로부터 추정할 수 있다. H 성분은 지자기의 수평세기로서 자기적도지역에서 관측된 H 성분(H_{equator}) 변화는 적도지역의 ‘Plasma fountain’ 변화를 나타낸다. 만약 적도지역에서 멀리 떨어진 관측소의 H 성분($H_{\text{non-equator}}$) 데이터를 빼주면($\Delta H = H_{\text{equator}} - H_{\text{non-equator}}$) ΔH 데이터로부터 전리층의 영향에 의한 변화가 아닌 다른 성분들의 변화를 추정할 수 있다. 그러므로 ΔH 는 수직방향 $E \times B$ 표류속도를 나타낼 수 있다(Horvath & Essex 2003). 이번 연구에서는 한반도와 비슷한 경도상에 있는 Guam(144.8°E, 13.5°N geographic;

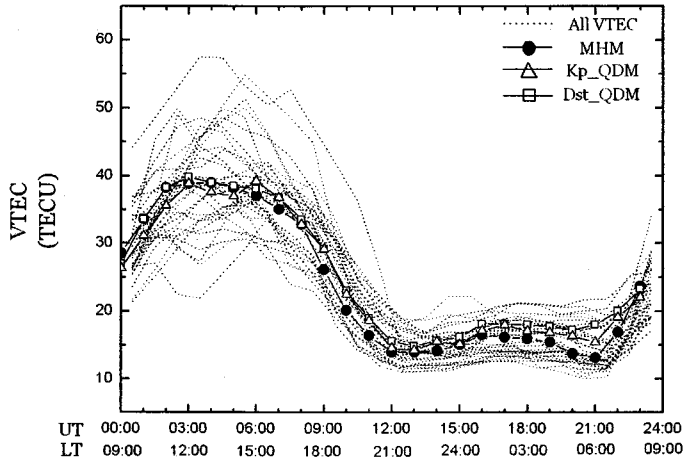


그림 1. 2003년 10월 동안 VTEC, MHM, Kp_QDM, Dst_QDM의 일변화.

215.5°E, 5.6°N geomagnetic)과 Kakioka(140.2°E, 36.2°N geographic; 208.3°E, 26.9°N geomagnetic) 지자기 관측소에서 관측된 H 성분으로부터 ΔH 를 추정하여 사용하였다.

2. 사용자료

전리층 총 전자수 함유량은 지상 GPS 기준국에서 수신된 GPS 관측정보로부터 구할 수 있다. 최병규 외(2005)는 GPS 관측정보로부터 TEC 값을 측정하는 방법을 설명하였다. 천문연구원에서는 9개의 GPS 관측망 데이터를 사용하여 한반도 상공의 위, 경도를 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 공간해상도로 분할하여 각 격자점의 TEC 값을 추정하는 격자기반(Grid based)의 지역적 모델을 개발하였다. 전리층의 정밀도 향상을 위해 IDW(Inverse Distance Weight) 내삽법과 칼만 필터를 적용하여 위도 $32^\circ \sim 40^\circ$, 경도 $123^\circ \sim 131^\circ$ 에 해당하는 각 격자점의 수직방향 총 전자수 함유량 값을 매 30초 간격으로 얻는다. 남쪽방향 행성간 자기장 이벤트동안 한반도 상공의 전리층 TEC 변화를 알아보기 위해서는 일변화, 계절변화 그리고 태양자전에 의한 TEC 변화를 제거해야 하며, 오직 지자기활동만을 고려한 TEC 변화량은 다음과 같이 정의하였다. (1) KASI의 지역적 모델로부터 계산된 $1^\circ \times 1^\circ$ 로 분할된 각 격자점의 VTEC 값들 중에서 중간값(median value)을 찾아 그 시간대의 한반도 상공의 대표값으로 결정 한다. 순간적인 지자기 변화에 의해 갑자기 증가한 데이터들은 대표값 결정에 영향을 준다. 그러므로 부정확한 데이터의 영향을 피하기 위해 평균값 대신 중간값을 사용하였다(Takahashi & Bruce 2001); (2) 1시간 분해능으로 제공되는 지자기 활동 지수인 Dst를 TEC 변화와 비교하기 위해 1시간 간격으로 TEC 데이터의 중간값을 구한다. 이 값은 DHM(a day hourly median value)로 정의 한다; (3) (2)과정에서 구한 DHM 데이터를 한 달 간격으로 모아 다시 중간값을 찾고 MHM(a month hourly median value)으로 정의 한다; (4) Forster et al.(2000)은 Kp지수가 2보다 작을 경우 지자기 활동이 조용한 날의 값으로 정의하고 TEC의 편차값을 계산하여 일변화를 제거하는데 사용하였다. 이와 비슷하게 우리는 Kp와 Dst 지수값을 사용하여 앞의 (3) 과정에서 구한 값들 중에서 지자기 활동이 조용한 날(Kp < 2, Dst > -50nT) 만을 찾는다. 이것을 QDM(quiet day median value)로 정의 한다; (5) 앞의 (3)과

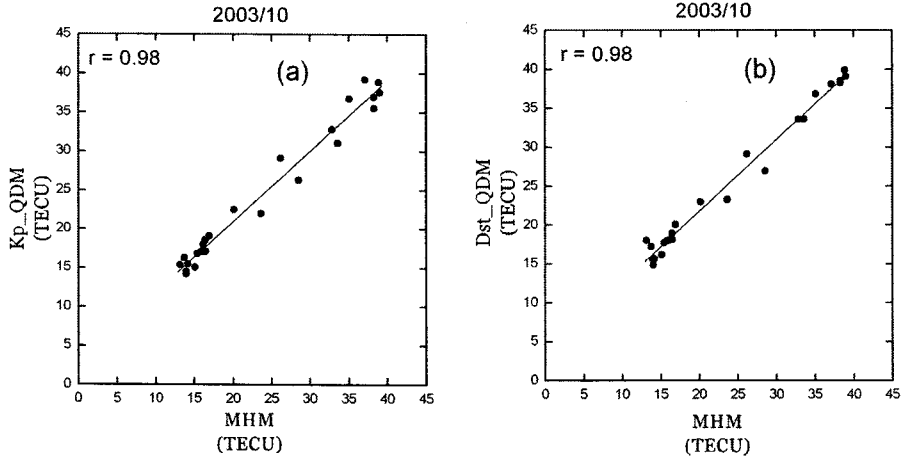


그림 2. QDM 데이터와 MHM 데이터의 상관관계. (a)의 세로축은 Kp 지수를 사용한 Kp-QDM, (b)의 세로축은 Dst 지수를 사용한 Dst-QDM.

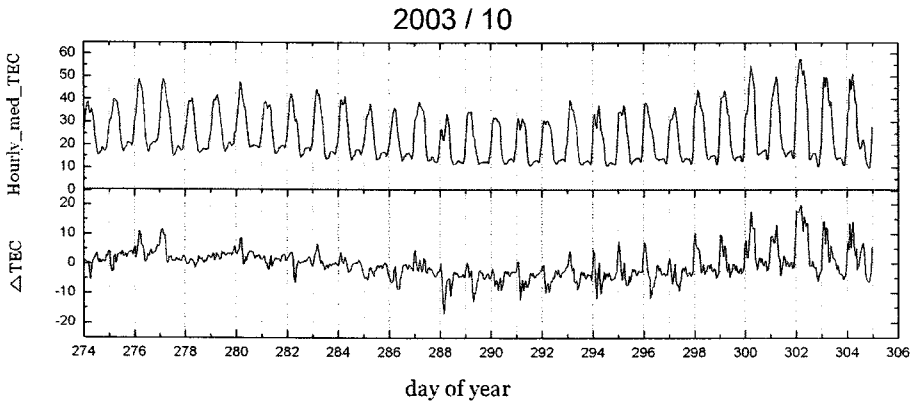


그림 3. 일변화가 제거되지 않은 1시간 간격의 DHM 데이터와 ΔTEC 데이터의 변화비교.

(4)에서 얻은 MHM와 QDM 데이터를 비교한다. 그림 1은 큰 지자기 폭풍인 ‘Halloween storm’이 있었던 2003년 10월 동안 관측된 모든 VTEC 값과 위의 과정들로부터 얻은 MHM, Kp-QDM, Dst-QDM의 데이터를 보여주고 있다. 그림 1에서 보듯이 MHM, Kp-QDM, Dst-QDM의 값은 큰 차이를 보이지 않으며, 변화 양상도 비슷한 것을 볼 수 있다. 그림 2는 2003년 10월 동안 두 데이터의 상관관계를 나타내는 그래프로서 그림 2a,b의 세로축은 각각 Kp-QDM(Kp < 2)와 Dst-QDM(Dst > -50nT)의 데이터를 나타낸다. 그림 2에서 두 데이터는 높은 상관관계(r=0.98)를 나타내는 것을 볼 수 있다. 그림 1과 2로부터 일변화를 제거할 때 Kp와 Dst 지수를 사용하지 않고 지자기활동이 조용한 날 TEC 변화의 대표값으로 MHM 데이터를 사용할 수 있다는 것을 보여준다. 이러한 과정을 통해 일변화가 제거된 ΔTEC은 식 (1)과 같이 정의 한다.

$$\Delta\text{TEC} = \text{TEC}_{\text{DHM}} - \text{TEC}_{\text{MHM}} \tag{1}$$

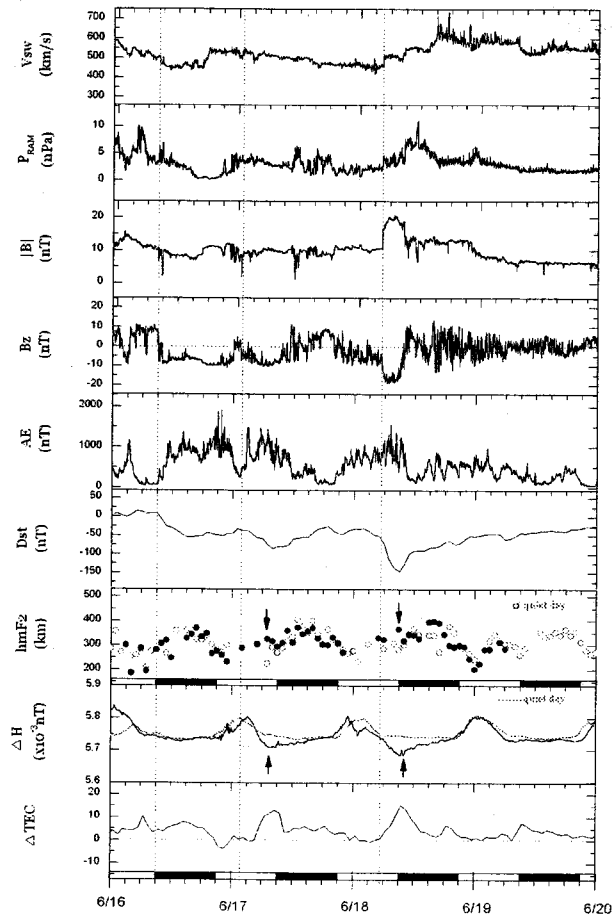


그림 4. 2003년 6월 16일~20일 동안 발생한 남쪽방향 행성간 자기장 이벤트. 그림 위쪽부터 ACE 위성에서 관측한 태양풍 속도(V_{sw}), 태양풍 동압력(P_{RAM}), 행성간 자기장크기($|B|$), 행성간 자기장 Z성분(B_z), 그리고 AE와 Dst 지수. 안양 이오노존데에서 관측된 hmF2, ΔH , ΔTEC . 그림에서 직사각형은 지상 관측소의 위치에 따른 지방시를 나타내며 점선은 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환된 시간.

그림 3은 2003년 10월 동안 VTEC 변화를 나타내는 것으로 위쪽 자료처리 결과는 일변화가 제거되지 않은 1시간 간격의 DHM 데이터이며, 아래쪽 자료처리 결과는 일변화가 제거된 ΔTEC 데이터이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 ΔTEC 은 주기적인 일변화가 거의 제거된 것으로 나타났다.

3. 관측결과

그림 4는 2003년 6월 16일부터 19일까지 발생한 행성간 이벤트의 태양풍 자료와 지자기지수 변화를 보여주고 있다. 그림 4의 위쪽부터 차례로 ACE 위성에서 관측된 태양풍속도(V_{sw}), 태양풍 동압력(P_{RAM}), GSM(Geocentric Solar Magnetospheric) 좌표계에서의 행성간 자기장 세기($|B|$)와 남북성분(B_z)성분, AE와 Dst 지수, 안양 이오노존데 관측소에서 관측된 hmF2, Guam과 Kakioka 데이

터로부터 추정된 ΔH 그리고 한반도 상공에서의 ΔTEC 데이터이다. 그림 4에서 흰색과 검은색 직사각형은 지상 관측소(hmF2, ΔH , ΔTEC)가 지방시에 따라 낮 지역과 밤 지역에 위치하고 있는지를 나타내는 것이다. ACE 위성과 지상사이의 시간지연은 ACE 위성 위치와 태양풍 속도를 500km/s로 하여 약 53분으로 추정하였다. 그림 4의 위성데이터는 53분 이동하여 지상 데이터와 일치시켰다. 이 이벤트 동안 태양풍 속도는 크게 증가하지 않았지만 B_z 성분 변화로부터 행성간 자기장이 남쪽방향으로 3번 전환된 것을 볼 수 있으며 이러한 자기장의 변화는 그림 4에서 수직 점선으로 표시하였다. 행성간 자기장의 남쪽방향의 값을 가질 때 지상에서는 자기 폭풍이 발생하였다. 또한 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환된 동안 AE 지수가 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 자기권의 대류 현상이 향상되는 것을 의미한다. 이러한 자기권 교란은 고위도로 전달된 전기장과 관련된 것으로 볼 수 있다.

첫 번째 남쪽방향 행성간 자기장 동안 전리층에는 큰 변화가 발생하지 않은 것을 볼 수 있다. 하지만 두 번째와 세 번째 남쪽방향 행성간 자기장 동안에는 hmF2, ΔH 그리고 ΔTEC 에 변화가 있는 것을 볼 수 있다. 6월 17일~0200(UT)에 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환되었으며 동시에 hmF2 높이는 조용한날(225km)보다 100km 증가하였고(검은색 화살표, 325km), 1020(UT)에 행성간 자기장 방향이 북쪽방향으로 전환된 동안에는 hmF2 높이는 조용한 날과 거의 비슷한 높이를 유지하였다. 6월 18일 1959(UT)에 행성간 자기장이 다시 남쪽방향으로 전환되었을 때 hmF2 높이는 약간 증가(검은색 화살표)한 것을 볼 수 있다. 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환되고 hmF2 높이가 증가되었을 때 ΔH 변화도 조용한날 보다 감소하는 경향을 보여주고 있는데, 이것은 서쪽방향 다이내모 전기장(westward dynamo electric field)에 의한 아랫방향 $E \times B$ 표류운동(downward $E \times B$ drift)을 나타내고 있는 것이다. 6월 17일과 18일 hmF2와 ΔH 가 변화할 때 ΔTEC 도 조용한날 보다 약 15% 이상 증가한 것을 볼 수 있다. 6월 17일 0200(UT)~0853(UT)(지방시: 1100~1753(LT))과 18일 1959(UT)~0842(UT)(지방시: 0459~1742(LT)) 지상 관측소가 낮 지역에 위치하는 동안 hmF2 높이 증가, 아랫방향 $E \times B$ 표류운동 그리고 ΔTEC 증가는 서쪽방향 다이내모 전기장의 영향을 받은 것으로 보여 진다. 즉, 이 이벤트동안 한반도 상공의 TEC 변화는 고위도에서 발생한 Joule 가열에 의해 발생한 교란된 다이내모 전기장과 관련되어 있는 것으로 볼 수 있다(Yizengaw et al. 2006).

2003년 11월 18일 태양 코로나 질량방출(Corona Mass Ejection, CME)이 발생하고 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환되면서 11월 20일 지구에서는 큰 자기폭풍이 발생하였다. 그림 5는 태양풍 자료, 지자기지수 그리고 지상 데이터의 변화를 보여준다. 여기서 ACE 위성과 지상 사이의 시간지연은 ACE 위성 위치와 태양풍 속도를 700km/s로 하여 약 34분으로 추정하였고 ACE 위성 데이터는 34분 이동하여 표시하였다. 그림 5에서 점선은 태양 코로나 질량방출에 의한 행성간 충격파의 시간으로서 11월 20일 0803(UT)이다. 같은 시간 태양풍 속도는 ~ 450 km/s에서 750km/s, 태양풍 동압력은 0.5nPa에서 10nPa으로 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 행성간 자기장의 크기는 5nT에서 60nT까지 증가하였으며, B_z 성분은 -51nT까지 감소하였다. 자기폭풍동안 Dst 지수의 최소값은 11월 20일 1930(UT)에 -472nT로 관측되었다.

행성간 충격파 후 행성간 자기장 방향이 북쪽방향으로 전환되었을 때는 AE 지수가 순간 2000nT까지 증가하였고, hmF2의 높이는 조용한 날보다 약 100km 상승하였는데, ΔH 에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 하지만 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환되면서 동시에 AE 지수는 갑자기 2000nT

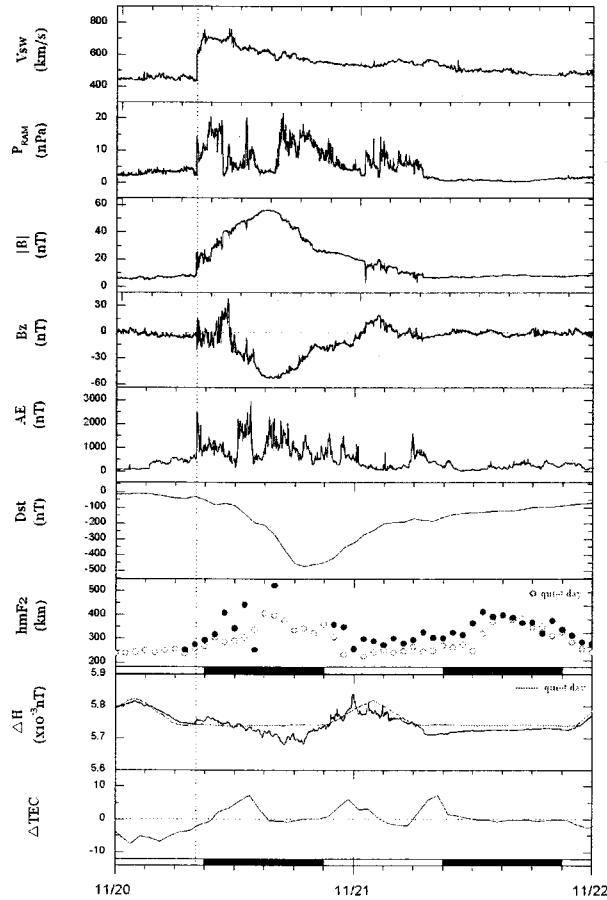


그림 5. 2003년 11월 20일~22일 동안 발생한 남쪽방향 행성간 자기장 이벤트. 그림에서 점선은 행성간 충격파 시간.

까지 증가하였으며, 점점 증가되던 hmF₂의 높이는 1400UT(2300LT)에 순간적으로 200km까지 감소되었다. 이러한 순간적인 hmF₂의 높이 감소는 아마도 전리층으로 전파된 서쪽방향 전기장(westward penetration electric field)의 영향으로 F층의 최고 높이가 F3층에서 F2층으로 변화하여 순간적으로 감소하는 경향을 보인 것으로 추측된다. 그리고 ΔH는 조용한날보다 감소하는 경향을 보여주고 있는데, 이것은 밤 시간동안 아랫방향 E×B 표류운동을 나타내고 있는 것이다. 즉 1321UT~2053UT 동안 아랫방향 E×B 표류운동은 밤 지역 전리층으로 전파된 서쪽방향 전기장의 발생을 나타내는 것이다. 또한 우리나라가 저녁시간대에 위치하고 있음에도 불구하고 ΔTEC이 약 10% 증가한 것을 볼 수 있다.

저녁 시간대에 TEC 값이 증가하는 원인으로서는 다음과 같은 두 가지 원인이 알려져 있다. 첫 번째는 서쪽방향 전기장에 의해 조절되는 플라즈마권과 전리층 결합을 통하여 플라즈마권에서 전리층으로 흐르는 플라즈마에 의해 증가되는 것으로 추정된다(Zhao et al. 2005). 두 번째는 낮 시간동

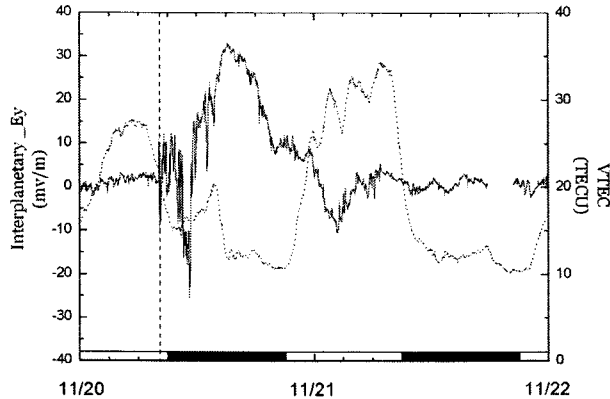


그림 6. 2003년 11월 20일~22일 동안 행성간 전기장 y성분(실선)과 일변화가 제거되지 않은 30초 간격의 수직방향 TEC 변화(점선). 행성간 전기장 y성분은 ACE 위성의 태양풍 속도 x성분(V_x)과 행성간 자기장 z성분(B_z)을 곱하여 계산된 데이터.

안 크게 교란된 동쪽방향 전기장이 확장하면서 TEC 값이 증가한 것으로 알려져 있다(Tsurutani et al. 2004).

그림 6은 앞의 이벤트동안 행성간 전기장 y성분과 일변화가 제거되지 않은 30초 간격의 수직방향 TEC 변화를 비교한 것이다. 여기서 행성간 전기장 y성분은 ACE 위성의 태양풍 속도 x성분(V_x)과 행성간 자기장 z성분(B_z)을 곱하여 계산된 데이터이며, 그림 5와 마찬가지로 ACE 위성 데이터를 34분 이동하여 수직방향 TEC 데이터와 맞추었다. 그림 6에서 실선은 행성간 전기장 y성분이며, 점선은 수직방향 TEC 데이터를 나타낸다. 점선은 행성과 충격파의 시간을 나타낸다. 11월 20일 1047(UT)에 증가하기 시작한 행성간 전기장 y성분은 1433(UT)에 최대값이 관측되었다. 행성간 전기장이 증가하는 동안 감소되었던 수직방향 TEC 값도 증가하기 시작하여 행성간 전기장의 최대값이 관측된 시간과 거의 동시에 수직방향 TEC 값이 최대로 상승한 것으로 나타났다. 이것은 전리층으로 전파된 행성간 전기장에 의해 순간적으로 TEC 값이 약 10TECU 증가한 것으로 파악된다. 즉 11월 20일에 관측된 순간적인 TEC 증가는 행성간 자기장이 남쪽방향 전환되면서 유도된 행성간 전기장이 저위도 전리층으로 전파되어 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환된 2003년 자기 폭풍 동안 전리층의 교란된 전기장과 관련하여 한반도 상공의 TEC 변화를 알아보았다. 지자기 활동에 의한 TEC 변화를 알아보기 위해 일변화가 제거된 Δ TEC 데이터를 사용하였으며, 전리층의 교란된 전기장의 변화를 알 수 있는 hmF2와 Δ H 데이터도 살펴보았다. 그 결과 2003년 6월 16일에 발생한 이벤트 동안에는 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환된 후 hmF2 높이는 100km 증가하였고, Δ H 변화에서는 아랫방향 E×B 표류운동이 관측되었다. 이러한 변화는 고위도에서 발생한 Joule 가열에 의해 유도된 서쪽방향 다이 나모 전기장이 중, 저위도로 확장되어 낮 시간동안 한반도 상공 TEC를 약 15% 증가시킨 것으로 판단된다. 2003년 11월 20일에 발생한 이벤트 동안에는 반대로 행성간 자기장이 남쪽방향으로 전환됨

과 동시에 hmF2 높이가 순간적으로 200km까지 감소되었으며, ΔH 변화도 아랫방향 $E \times B$ 표류운동이 나타난 것으로 보아 행성간 전기장이 저위도로 전파된 서쪽방향 전기장에 의해 저녁 시간에 한반도 상공 TEC 값을 약 10% 증가시킨 것으로 또한 판단된다. 위의 관측만으로는 판단할 수 없는 요소도 있지만, 행성간 이벤트 동안 한반도 상공의 순간적인 TEC 값 증가는 전리층의 교란된 전기장에 의해 영향을 받았음을 알 수 있었다.

한편 일반적으로 아랫방향의 플라즈마 표류 동안에는 TEC 값이 감소하는 경향이 나타났지만, 이 연구에서는 두 이벤트 모두 반대로 TEC 값이 증가한 것으로 나타났다. 평형상태에서 $[O^+]$, $[H^+]$, 전자들로 이루어진 전리층은 아랫방향 $E \times B$ 표류운동에 의해 더 낮은 고도로 하강하게 되어 O^+ 의 밀도가 감소된다. 즉 어떤 특정한 고도에서 $[O]$ 와 $[H]$ 는 유지되는 반면에 $[O^+]$ 는 감소되는 결과가 나타난다. 계속해서 발생하는 $[H^+]$ 의 감소는 비평형상태를 유발하고 $[H^+]$ 를 아랫방향으로 확산시킨다. 중위도에서 발생하는 플라즈마권에서 전리층으로 흐르는 아랫방향 $[H^+]$ 확산은 $[O]$ 와 전자 교환($H^+ + O \rightarrow H + O^+$)에 의해 $[O^+]$ 가 증가된다. 그 결과 전리층 F층의 하강은 전자와 TEC을 증가시키게 되는 것이다(Park 1971). 이러한 관측결과는 향후 플라즈마권과 전리층의 상호작용을 이해하는데 중요한 역할을 하리라 기대한다.

참고문헌

- 최병규, 박종욱, 정종균, 박필호 2005, 한국우주과학회지, 22, 283
- Blanc, M. & Richmond, A. D. 1980, JGR, 85, 1669
- Forster, M. & Jakowski, N. 2000, Surveys in Geophysics, 21, 47
- Horvath, I. & Essex, E. A. 2003, Ann. Geophys., 21, 1017
- Huang, C. S., Foster, J. C., Goncharenko, L. P., Erickson, P. J., Rideout, W., & Coster, A. J. 2005, JGR, 110, doi:10.1029/2004JA010865
- Kelley, M. C. 1989, in International Geophysics Series, vol.43, The Earth's Ionosphere, eds. R. Dmowska & J. R. Holton (New York: Elsevier), p.267
- Kelly, M. C., Makela, J. J., Chau, J. L., & Nicolls, M. J. 2003, GRL, 30, 1158
- Mannucci, A. J., Tsurutani, B. T., Iijima, B. A., Komjathy, A., Saito, A., Gonzalez, W. D., Guarnieri, F. L., Kozyra, J. U., & Skoug, R. 2005, GRL, 32, doi:10.1029/2004GL021467
- Park, C. G. 1971, JGR, 76, 4560
- Sastri, J. H. 1988, Ann. Geophys., 6, 635
- Scherliess, L. & Fejer, B. G. 1997, JGR, 102, 24037
- Takahashi, K. & Bruce, A. T. 2001, JGR, 106, 21017
- Tsurutani, B., Mannucci, A., Iijima, B., Abdu, M. A., Sobral, J. H. A., Gonzalez, W., Guarnieri, F., Tsuda, T., Saito, A., Yumoto K., Fejer, B., Fuller-Rowell, T. J., Kozyra, J., Foster, J. C., Coster, A., & Vasyliunas, V. M. 2004, JGR, 109, doi:10.1029/2003JA010342
- Yizengaw, E., Moldwin, M. B., Komjathy, A., & Mannucci, A. J. 2006, JGR, 111, doi:10.1029/2005JA011433
- Zhao, B., Wan, W., & Liu, L. 2005, Ann. Geophys., 23, 693