태양풍 매개변수를 이용한 Dst 예측

박윤경^{1†}, 안병호²

¹경북대학교 과학교육학과

²경북대학교 사범대학 과학교육학부

Dst Prediction Based on Solar Wind Parameters

Yoon-Kyung Park^{1†} and Byung-Ho Ahn²

¹Department of Science Education, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

²Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

E-mail: parkyoonkyung@hanmail.net

(Received September 10, 2009; Accepted October 23, 2009)

요 약

ACE 위성에서 제공되는 1998년에서 2006년까지 9년간 관측된 양질의 1시간 평균 태양풍 매개변수를 이용하여 Burton et al.(1975)의 Dst 예측식을 재검토했다. 이 기간 동안 60개의 단순 발달형 자기폭풍을 골랐다. Burton et al.(1975)의 Dst 예측식의 에너지 공급항(Q)과 소멸 시간(τ)을 추정하기 위해 상기 자기폭풍 기간 동안 Dst^* 와 VB_s , ΔDst^* 와 VB_s 그리고 ΔDst^* 와 Dst^* 의 상관관계를 구했다. 이 때 *ACE* 위성으로부터 지구까지 전파 시간(1시간)과 태양풍과 지구 자기권 사이의 지연 시간(0.5시간)을 고려했다. 그 결과 $VB_s > 0.5\text{mV/m}$ 일 때 $Q(\text{nT/h}) = -3.56VB_s$ 이었고, $VB_s \leq 0.5\text{mV/m}$ 일 때는 $Q(\text{nT/h}) = 0$ 으로 두었다(Burton et al., 1975). 그리고 Dst^* 가 -175nT 보다 작은 음의 값을 가질 때 $\tau(h) = 0.060Dst^* + 16.65$ 이고, Dst^* 가 -175nT 보다 큰 음의 값을 가질 때 $\tau(h) = 6.15$ 로 추정됐다. 이 연구에서 얻은 Q 와 τ 를 Burton et al.(1975)의 Dst 예측식에 대입하고 이를 이용하여 상기 60개 자기폭풍을 예측한 결과, 관측된 Dst^* 와 예측된 Dst^* 의 상관계수는 0.88이었다. 이를 다른 연구 결과와 비교하기 위해 Burton et al.(1975)과 O'Brien & McPherron(2000a)의 Dst^* 예측 방법을 같은 자기폭풍에 적용한 결과, 관측된 Dst^* 와 예측된 Dst^* 의 상관계수는 각각 0.85였다. 이 연구는 기존 연구보다 다소 개선된 결과를 나타냈으며, 특히 $Dst^* \lesssim -200\text{nT}$ 의 강한 자기폭풍의 예측에 효과적이었다.

Abstract

We reevaluate the Burton equation (Burton et al. 1975) of predicting Dst index using high quality hourly solar wind data supplied by the *ACE* satellite for the period from 1998 to 2006. Sixty magnetic storms with monotonously decreasing main phase are selected. In order to determine the injection term (Q) and the decay time (τ) of the equation, we examine the relationships between Dst^* and VB_s , ΔDst^* and VB_s , and ΔDst^* and Dst^* during the magnetic storms. For this analysis, we take into account one hour of the propagation time from the *ACE* satellite to the magnetopause, and a half hour of the response time of the magnetosphere/ring current

[†]corresponding author

to the solar wind forcing. The injection term is found to be $Q(\text{nT}/h) = -3.56VB_s$ for $VB_s > 0.5\text{mV/m}$ and $Q(\text{nT}/h) = 0$ for $VB_s \leq 0.5\text{mV/m}$. The τ (hour) is estimated as $0.060Dst^* + 16.65$ for $Dst^* > -175\text{nT}$ and 6.15 hours for $Dst^* \leq -175\text{nT}$. Based on these empirical relationships, we predict the 60 magnetic storms and find that the correlation coefficient between the observed and predicted Dst^* is 0.88 . To evaluate the performance of our prediction scheme, the 60 magnetic storms are predicted again using the models by Burton et al. (1975) and O'Brien & McPherron (2000a). The correlation coefficients thus obtained are 0.85 , the same value for both of the two models. In this respect, our model is slightly improved over the other two models as far as the correlation coefficients is concerned. Particularly our model does a better job than the other two models in predicting intense magnetic storms ($Dst^* \lesssim -200\text{nT}$).

Keywords: magnetic storm, Dst index, solar wind, storm prediction

1. 서 론

태양풍에 수반된 행성간 자기장(interplanetary magnetic field, IMF)이 남쪽을 향한 채 지구에 도달하게 되면 지구 자기력선과 자기력선 재결합을 일으킨다. 그 결과 자기권 내부에는 자기권 대류(magnetospheric convection)가 발생하고, 하전입자가 내부 자기권으로 유입된다. 이로 인해 적도면상 지구 주위에는 서쪽으로 흐르는 환전류(ring current)가 형성된다. 그 결과 지상에서 수일 간에 걸친 지자기 H 성분의 감소현상이 발생하는데, 이를 자기폭풍(magnetic storm)이라 한다(e.g., Chapman & Bartels 1940). 자기폭풍은 태양과 지구 사이 상호작용의 결과이자 우주 기상의 중요한 현상 중에 하나이다. 최근 인간의 생활권 확대로 우주 기상이 인간 생활에 직접적인 영향을 주게 되었다. 이로 인해 많은 과학자들이 우주 기상 특히, 자기폭풍과 그것의 예측에 대해 더욱 관심을 가지게 되었다.

자기폭풍의 강도는 환전류의 세기로 측정되며, 이는 Dst 지수로 대변된다(e.g., Sugiura 1964, Kamide et al. 1998, Daglis et al. 1999). 따라서 자기폭풍을 일으키는 환전류의 발달을 예측하기 위해서는 그것의 강도를 나타내는 Dst 지수의 예측이 필수적이다. Burton et al.(1975)은 다음과 같은 방법으로 Dst 지수를 처음 예측했다.

$$\frac{dDst^*(t)}{dt} = Q(t) - \frac{Dst^*(t)}{\tau} \quad (1)$$

Dst^* 는 Dst 지수에서 태양풍의 동압(solar wind dynamic pressure, P_{dyn}) 효과를 제거한 것으로 식 (2)와 같다(Burton et al. 1975).

$$Dst^* = Dst - 0.2\sqrt{P_{dyn}} + 20 \quad (2)$$

여기서 $P_{dyn} = nV^2 10^{-2}(\text{eV}/\text{cm}^3)$ 이고, $n(\text{cm}^{-3})$ 과 $V(\text{km/s})$ 는 태양풍의 수밀도와 속도를 의미한다. Q 는 자기권으로의 에너지 공급항(injection term)이다. 태양풍에 수반된 행성간 전기장(interplanetary electric field, E_y)이 강해지면 자기권 대류의 증가로 자기권 꼬리로부터 다량의 플라스마가 내부 자

표 1. 여러 연구에서 제시된 Dst^* 예측식의 Q 와 τ .

Model	$Q(\text{nT/h})$ $VB_s(\text{mV/m}), P_{dyn}(\text{nPa})$	$\tau(\text{h})$ $VB_s(\text{mV/m}), P_{dyn}(\text{nPa}), Dst(\text{nT})$
A	$Q = \begin{cases} 0 & VB_s \leq 0.5 \\ -2.47VB_s & VB_s > 0.5 \end{cases}$	$\tau = 17.0$
B	$Q = \begin{cases} 0 & VB_s \leq 0.5 \\ -4.32(VB_s - 0.5)P_{dyn}^{1/3} & VB_s > 0.5 \end{cases}$	$\tau = \begin{cases} 7.7 & VB_s \leq 4 \\ 3 & VB_s > 4 \end{cases}$
C	$Q = \begin{cases} 0 & VB_s \leq 0.49 \\ -4.4(VB_s - 0.5) & VB_s > 0.49 \end{cases}$	$\tau = 2.40 \exp(9.74/(4.69 + VB_s))$
D	$Q = \begin{cases} 0 & VB_s \leq 0.49 \\ -4.4(VB_s - 0.49)(P_{dyn}/3.0)^{0.2} & VB_s > 0.49 \end{cases}$	$\tau = \begin{cases} 8.70 \exp(6.66/(6.04 + P_{dyn})) & B_z \geq 0 \\ 2.40 \exp(9.74/(4.69 + VB_s)) & B_z < 0 \end{cases}$
E	$Q = \begin{cases} 0 & VB_s \leq 0.5 \\ -3.56VB_s & VB_s > 0.5 \end{cases}$	$\tau = \begin{cases} 0.060Dst^* + 16.65 & Dst > -175 \\ 6.15 & Dst \leq -175 \end{cases}$

A: Burton et al.(1975), B: Fenrich & Luhmann(1998), C: O'Brien & McPherron(2000a), D: Wang et al.(2003), E: Park & Ahn(2009)

기권으로 유입된다. 따라서 Q 는 E_y 의 세기와 관계가 있으며, E_y 는 VB_z 로 정의된다. 이 때 V 는 태양풍의 속도, B_z 는 GSM(Geocentric Solar Magnetospheric) 좌표계에서 IMF 의 z 축 성분을 나타낸다. $B_z < 0$ 일 때 즉, IMF 가 남쪽을 향할 때만 자기력선 재결합이 일어나 태양풍으로부터 지구 자기권으로의 에너지 공급이 있다. 이 때 E_y 를 특히 VB_s 라 한다. 반면 $B_z \geq 0$ 일 때 즉, IMF 가 북쪽을 향할 때는 $VB_s = 0$ 으로 에너지 공급이 없다. 따라서 VB_s 는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$VB_s = \begin{cases} |VB_z| & B_z < 0 \\ 0 & B_z \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Burton et al.(1975)은 동압이 일정하게 유지되는 경우의 환전류 변화율과 VB_s 의 상관관계를 이용하여 VB_s 의 함수로 Q 를 구했다. 그러나 O'Brien & McPherron(2000a)은 VB_s 의 범위에 따른 ΔDst^* 와 Dst^* 의 상관관계로부터 얻은 회귀선의 절편값을 이용하여 VB_s 의 함수로 Q 를 결정했다. 한편 Fenrich & Luhmann(1998)와 Wang et al.(2003)은 동압의 변화를 고려하여 VB_s 와 동압의 함수로써 Q 를 제안했다.

환전류의 소멸시간(decay time, τ)은 주로 환전류를 구성하는 입자들이 중성대기와의 충돌로 에너지를 잃게 되는 비율로 결정되며(e.g., Burton et al. 1975, Daglis et al. 1999, O'Brien & McPherron 2000a), 소멸시간을 결정하기 위한 많은 연구가 수행되었다. 먼저 Burton et al.(1975)이 회복기(recovery phase)의 경우 $B_z \geq 0$ 이므로 $Q = 0$ 임을 이용하여 τ 를 상수로 정한 것을 비롯하여, Per-rault & Akasofu(1987)와 Murayama(1982) 역시 τ 가 일정한 값을 제안했다. 이 후 큰 음의 Dst 를 가지는 강한 자기폭풍의 경우 초기 회복기 동안 소멸시간이 더 짧아진다는 관측 결과로부터 τ 를 Dst 의 함수로 표현하려는 시도가 있었다(e.g., Valdivia et al. 1996, MacMahon & Gonzalez 1997, MacMahon & Llop-Romero 2008).

한편 O'Brien & McPherron(2000b)은 τ 가 VB_s 에 의해 결정된다고 주장했다. 그 근거로 VB_s 의 강화가 하전입자의 표류 운동 궤도(drift motion orbit)를 낮은 고도로 이동시키면 그곳의 높은 중성대기 밀도로 인해 환전류의 소멸률이 커진다는 것이다. Fenrich & Luhmann(1998)도 VB_s 를 이용하여 τ 를 구한 바 있다. 뿐만 아니라 Wang et al.(2003)은 $B_z \geq 0$ 일 때 태양풍 동압이 증가하면 환전류

의 위치 변화로 τ 가 달라질 수 있음을 주장했다. 참고로 표 1은 여러 연구에서 제시된 Dst^* 예측식의 Q 와 τ 를 소개한 것이다.

우주 기상의 중요성이 날로 부각됨에 따라 이들을 정확히 추정하려는 노력은 계속될 것이다. 다행히 최근 ACE 위성의 발사로 보다 질 높은 방대한 양의 태양풍 자료가 공급되었다. 그래서 이를 이용하여 Q 와 τ 를 재검토해 볼 수 있는 좋은 기회가 마련되었다. 이 연구에서는 1998 ~ 2006년 동안 ACE 위성에서 관측된 양질의 태양풍 자료를 이용하여 자기폭풍의 발달과 관련된 VB_s 를 구했다. 그리고 이것과 자기폭풍을 대변하는 Dst^* 및 ΔDst^* 의 상관관계를 통해 식 (1)의 Q 와 τ 를 개선하고자 한다.

2. 자 료

이 연구를 위해 ACE 위성이 활동을 시작한 1998년부터 잠정 Dst (provisional Dst) 지수가 제공되는 2006년까지 9년 간의 자료를 이용했다. 1시간 평균 VB_s 는 ACE 위성의 MAG와 SWEPAM에서 제공하는 B_z 와 태양풍의 속도를 이용하여 구했다. 1시간 평균 Dst 지수는 일본 교토 대학 부설 지자기 세계 자료 센터에서 제공되었고, 2003년까지는 Dst 지수를 그 이후는 잠정 Dst 지수를 사용했다. 이 때 Dst 지수는 Burton et al.(1975)의 방법으로 태양풍의 동압 효과를 제거한 Dst^* 를 이용했다. 그리고 1시간 평균 Dst^* 를 이용할 경우 ΔDst^* 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\Delta Dst^*(t) = Dst^*(t) - Dst^*(t - 1) \quad (4)$$

Gonzalez et al.(1994)은 Dst 지수의 세기(nT)에 따라 $Dst \leq -100$ 이면 강한(intense), $-100 < Dst \leq -50$ 이면 보통(moderate) 그리고 $-50 < Dst \leq -30$ 은 약한(small) 자기폭풍으로 세분했다. 이 연구에서는 Dst 의 최소치가 -50 nT이하인 자기폭풍만을 취급하며, Dst 가 -15 nT이하로 떨어질 때를 시작으로 Dst 가 최소치에 도달했다가 다시 -15 nT 이상으로 회복될 때까지를 자기폭풍 기간으로 간주했다. 그 결과 연구 기간 중 상기 조건을 만족하는 99개의 자기폭풍을 확인했다.

Dst^* 및 ΔDst^* 와 VB_s 의 상관관계를 구할 때, ACE 위성이 존재하는 $L1$ 지점에서 지구까지의 태양풍의 전파 시간을 1시간으로 고려했다. 이외에 Burton et al.(1975)은 VB_s 과 Dst 지수 사이에 0 ~ 40분 사이의 지연 시간(delay time) 혹은 반응 시간(response time)이 존재하며 그 평균값이 25분임을 제안했다. 그리고 Akasofu(1981)는 자기권과 환전류 사이에 1시간의 지연 시간이 있다고 했다. 한편 Baker et al.(1983)은 행성간 매개변수(ϵ , VB_s , V^2B_s)와 AE 지수 사이에 25(disturbed time)~40(quiet time)분 사이의 지연 시간이 있으며, 30분의 지연 시간이 주어질 때 가장 높은 상관관계를 가진다고 주장했다. 또한 Gonzalez & Echer(2005)에 의하면 B_s 의 최대치와 Dst 의 최소치 사이에는 0 ~ 4시간에 걸친 지연 시간이 있다고 하였다.

이 연구에서도 태양풍 매개변수와 지구 자기권 사이의 평균 지연 시간을 알아보기 위하여 주상(main phase) 동안 0, 0.5, 1, 2 시간의 지연 시간을 가정하고 Dst^* 와 VB_s 의 상관관계를 구했다. 그 결과 상관계수가 각각 -0.69 , -0.77 , -0.82 , -0.84 로 비교적 비슷하게 나타나 태양풍과 지자기 지수 사이에 지연 시간이 일정하지 않음을 알 수 있었다. 한편 상기 지연 시간을 이용해서 ΔDst^* 와 VB_s 의 상관관계를 구해본 결과 상관계수는 각각 -0.74 , -0.73 , -0.59 , -0.47 로 나타났다. 이 연구에서는 두 경우를 모두 고려하여 태양풍의 효과가 자기권에 나타나는데 걸리는 지연 시간을 0.5시간으로 설정했다.

3. 연구 방법

3.1 자기권으로의 에너지 공급항(Q)

Burton et al.(1975)에 의하면 Dst^* 의 변화는 Q 와 소멸항(decay term)으로 결정된다. VB_s 의 강화는 자기권 대류를 활성화시키고 이로 인해 환전류가 발달하여 자기폭풍이 발생한다(Kamide et al. 1998). 따라서 VB_s 와 자기폭풍 발달 즉, Dst^* 의 변화를 나타내는 ΔDst^* 의 상관관계를 통해서 Q 를 추정할 수 있다. 특히 자기폭풍이 발달하는 주상 기간은 주로 VB_s 가 양이면서 Q 가 소멸항보다 훨씬 우세하다. 따라서 근사적으로 소멸항을 무시할 수 있으므로 식 (1)은 $dDst^*/dt \simeq Q$ 로 쓸 수 있다. 여기서 1시간 평균값을 사용하면 식 (1)은 다시 $\Delta Dst^* = Q$ 가 된다. 그러므로 주상 동안 VB_s 와 ΔDst^* 의 상관관계를 이용하여 효과적인 Q 를 얻을 수 있다. 그러나 주상 기간이라도 일시적으로 IMF가 북쪽을 향할 때는 $\Delta Dst > 0$ 이 되어 에너지 공급보다 소멸이 더 큰 경우가 발생한다. 이 구간에서는 효과적인 Q 를 추정하기 어렵다. 따라서 1998 ~ 2006년 동안의 99개의 자기폭풍 중 주상 동안 일시적으로 $\Delta Dst > 0$ 이 되는 구간이 존재하는 경우를 제외한 60개의 자기폭풍만을 선택했다. 그리고 이들 60개의 단순 발달형 자기폭풍(monotonously developing magnetic storms) 동안의 VB_s 와 ΔDst^* 의 상관관계를 이용하여 Q 를 구했다.

그림 1은 상기 60개 자기폭풍의 주상 기간의 E_y 와 ΔDst^* 의 관계를 나타낸 것이다. 관측치 속에 포함된 오차의 영향을 최소화하기 위해 E_y 와 ΔDst^* 가 $-0.5 \leq E_y(\text{mV/m}) \leq 0.5$ 및 $-3 \leq \Delta Dst^*(\text{nT}) \leq 3$ 에 속하는 경우는 이 연구에 포함시키지 않았다. 점선 사이에 자료가 없는 것은 이 때문이다. 또한 단순 발달형 자기폭풍을 이용하였으나 Dst 지수로부터 Dst^* 를 구하는 과정에서 $\Delta Dst^* > 0$ 인 값이 일부 포함되었다. 오차를 제거한 효과적인 Q 를 구하기 위해서 그림 1의 1상한($VB_s > 0.5\text{mV/m}$, $\Delta Dst^* < -3\text{nT}$)일 때의 VB_s 와 ΔDst^* 의 상관관계만 이 연구에 이용하였다. 그 결과 상관계수는 -0.69 로 나타났다. 또한 태양풍에 의한 자기권으로의 에너지 공급은 $E_y > 0$ 일 때 즉, IMF가 남쪽을 향할 때($= VB_s > 0$)만 가능하다. 따라서 y절편을 0으로 두고 1상한의 VB_s 와 ΔDst^* 를 선형 근사한 결과를 바탕으로 Q 를 식 (5)와 같이 구했다.

$$Q(\text{nT/h}) = -3.56VB_s \quad (5)$$

회복기는 IMF가 북쪽을 향하여 소멸항이 Q 보다 우세하므로 자기폭풍이 회복되는 시기이다. 그러나 회복기 동안에도 $VB_s > 0$ 인 경우가 존재할 수 있다. 따라서 주상뿐 아니라 회복기 중의 $VB_s > 0$ 의 역할도 고려해야 한다. 그림 2는 60개 자기폭풍의 회복기 기간의 E_y 와 ΔDst^* 의 관계를 나타낸 것이다. 점선은 그림 1과 같이 설정된 오차의 범위를 나타낸 것이다. $VB_s > 0.5\text{mV/m}$, $\Delta Dst^* < -3\text{nT}$ 인 1상한은 회복기 중 자기권으로 에너지 공급이 있어 Dst^* 가 음으로 다시 발달한 경우이다. 이 구간의 평균 VB_s 는 2.26mV/m , 평균 ΔDst^* 는 -7.43nT 이며 전체 자료의 19%가 존재했다. 반면 $VB_s > 0.5\text{mV/m}$, $\Delta Dst^* > 3\text{nT}$ 인 4상한은 회복기 중 자기권으로 에너지 공급이 있음에도 불구하고 Dst^* 가 회복되는 경우이다. 이 구간의 평균 VB_s 는 4.75mV/m , 평균 ΔDst^* 는 9.47nT 로 전체의 34%가 존재했다. 이는 그림 1의 주상에서 전체 자료의 88%가 1상한에, 4%가 4상한에 존재하는 것과 대조적이다. 이처럼 회복기에서 1상한에 비해 4상한의 자료 수가 약 2배 정도 더 많은 뿐 아니라, 평균 $VB_{s(4상한)} > \text{평균 } VB_{s(1상한)}$ 임에도 불구하고 평균 $|\Delta Dst^*_{(4상한)}| > \text{평균 } |\Delta Dst^*_{(1상한)}|$ 이라는 점은 회복기에는 $VB_s > 0$ 로 에너지 공급이 있더라도 주상에 비해 Q 에 효과적으로 반영되

그림 1. 1998 ~ 2006년 동안 60개 자기폭풍의 주상 기간의 E_y 와 ΔDst^* 의 관계. 점선은 $-0.5 \leq E_y (\text{mV/m}) \leq 0.5$ 와 $-3 \leq \Delta Dst^* (\text{nT}) \leq 3$ 인 구간을 나타낸다. $VB_s > 0.5 \text{ mV/m}$, $\Delta Dst^* < -3 \text{ nT}$ (1상한)일 때 VB_s 와 ΔDst^* 의 상관계수는 -0.69 이며, 이 때 원점을 지나는 회귀선 방정식은 $\Delta Dst^* = -3.56VB_s$ 이다.

지 않음을 의미한다. 또한 회복기에는 전체 자료의 47%가 $E_y < -0.5 \text{ mV/m}$ (2, 3상한)에, 53%가 $E_y > 0.5 \text{ mV/m}$ (1, 4상한)에 나타나 E_y 가 양과 음의 값이 될 확률이 비슷함에도 불구하고, 전체의 76%가 양의 ΔDst^* 를 나타낸 것 역시 이 사실을 뒷받침한다. 따라서 이 연구에서 Q 를 구할 때 회복기의 $VB_s > 0$ 인 경우는 고려하지 않았다.

3.2 소멸시간(τ)

ΔDst^* 가 양일 때는 그림 1과 2의 3, 4상한에서 볼 수 있듯이 E_y 가 양이든, 음이든 상관없다. 이는 에너지 공급량보다 소멸량이 우세하기 때문이다. 이 경우 Q 를 근사적으로 무시할 수 있으므로 식 (1)은 $dDst^*/dt \simeq -Dst^*/\tau$ 로 쓸 수 있다. 여기서 1시간 평균값을 쓰면 $\Delta Dst^* = -Dst^*/\tau$ 가 된다. 따라서 ΔDst^* 가 양일 때의 ΔDst^* 와 Dst^* 의 상관관계를 이용하면 τ 를 추정할 수 있다. 이 때 역시 관측치 속에 포함된 오차의 영향을 최소화하기 위해 $0 < \Delta Dst^* \leq 3 \text{ nT}$ 인 경우는 제외했다.

인공위성의 관측에 의하면 자기폭풍 기간 중 발달하는 환전류는 지구 중심으로부터 주로 $4 \sim 6R_E$ 에 분포하는데, 태양풍에서 공급된 H^+ 이온이 대부분이나 전리층에서 공급된 O^+ 도 상당량 확인되었다. 특히 강한 자기폭풍의 경우 O^+ 이온이 전체 환전류의 에너지 밀도에 기여하는 바가 때때로 50%가 넘기도 한다(e.g., Hamilton et al. 1988, Daglis 1997). O^+ 이온의 전하교환의 수명은 H^+ 이

그림 2. 1998 ~ 2006년 동안 60개 자기폭풍의 회복기 기간의 E_y 와 ΔDst^* 의 관계. 점선은 $-0.5 \leq E_y(\text{mV/m}) \leq 0.5$ 와 $-3 \leq \Delta Dst^*(\text{nT}) \leq 3$ 인 구간을 나타낸다.

온에 비해 훨씬 짧으므로 강한 자기폭풍은 O^+ 이온의 밀도가 높은 만큼 환전류의 소멸률이 크다. 따라서 자기폭풍의 강도에 따라 소멸률이 달라질 수 있다. 자기폭풍의 강도는 Dst^* 의 세기로 대변될 수 있으므로 Dst^* 를 $-50 < Dst^* \leq 0\text{nT}$, $-100 < Dst^* \leq -50\text{nT}$, $-150 < Dst^* \leq -100\text{nT}$, $-200 < Dst^* \leq -150\text{nT}$, $Dst^* \leq -200\text{nT}$ 의 다섯 구간으로 나눴다. 그리고 각 구간에 따른 ΔDst^* 와 Dst^* 의 상관관계를 이용하여 자기폭풍의 강도에 따른 τ 를 각각 구했다. 그런데 $-50 < Dst^* \leq 0\text{nT}$ 인 구간은 이 연구에 이용된 자기폭풍의 시작과 끝이 $Dst^* = -15\text{nT}$ 이기 때문에 이 부근의 값이 많아 상관계수가 -0.11 로 낮았다. 또한 60개의 자기폭풍 중 $Dst^* \leq -200\text{nT}$ 인 구간은 자료 수가 적어 역시 상관계수가 -0.13 으로 낮았다. 따라서 두 구간에서 구한 τ 는 신뢰하기 어려우므로 소멸항을 구할 때 제외했다. 그림 3은 상기 두 구간을 제외한 나머지 구간에 대한 Dst^* 와 ΔDst^* 의 상관관계를 나타낸 것이다. 회귀선의 방정식은 각각 $\Delta Dst^* = -0.078Dst^* + 2.12$, $\Delta Dst^* = -0.129Dst^* - 4.05$, $\Delta Dst^* = -0.147Dst^* - 12.29$ 이며, 여기서 회귀선 기울기의 역수는 τ 를 의미한다.

각 구간의 Dst^* 중간값과 τ 를 이용하여 그림 3으로부터 $-100 < Dst^* \leq -50\text{nT}$ 인 구간은 $(-75, 1/0.078)$, $-150 < Dst^* \leq -100\text{nT}$ 인 구간은 $(-125, 1/0.129)$, $-200 < Dst^* \leq -150\text{nT}$ 인 구간은 $(-175, 1/0.147)$ 를 얻었다. 그림 4는 이들을 이용하여 Dst^* 에 대한 τ 의 상관관계를 구한 것이다. 이

그림 3. Dst^* 의 구간에 따른 Dst^* 와 ΔDst^* 의 상관관계. 여기서 회귀선 기울기의 역수는 τ 를 의미한다.

때 회귀선의 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\tau(h) = 0.060 Dst^* + 16.65 \quad (6)$$

그런데 회귀선 방정식에 의하면 $Dst^* \leq -277.5 \text{ nT}$ 이면 소멸시간이 음수가 되어 식 (6)이 성립하지 않는다. 따라서 일정치보다 큰 음의 Dst^* 에서 τ 는 일정한 상수가 되어야 한다. 이를 위해 식 (6)의 Dst^* 에 -150 , -175 , -200 을 대입하여 각각 7.65 , 6.15 , 4.65 의 τ 를 구했다. 이것을 $Dst^* \leq -150 \text{ nT}$, $Dst^* \leq -175 \text{ nT}$, $Dst^* \leq -200 \text{ nT}$ 인 경우에 각각 대입하여 Dst^* 예측을 해본 결과, $Dst^* \leq -175 \text{ nT}$ 인 경우 τ 를 6.15 로 일정하게 했을 때 가장 잘 예측되었다. 그러므로 이 연구에서는 $Dst^* > -175 \text{ nT}$ 인 경우 $\tau(h) = 0.060 Dst^* + 16.65$ 로, $Dst^* \leq -175 \text{ nT}$ 인 경우 $\tau(h) = 6.15$ 로 τ 를 정의했다.

4. Dst^* 예측

앞 절에서 구한 Q 와 τ 를 식 (1)에 대입한 후, 이를 이용하여 자기폭풍을 예측했다. 그런데 Ahn

그림 4. 그림 3으로부터 얻은 Dst^* 에 대한 τ 의 관계. $\Delta Dst^* > -175\text{nT}$ 인 경우 $\tau(h) = 0.060Dst^* + 16.65$ 이며, $Dst^* \leq -175\text{nT}$ 인 경우 $\tau(h) = 6.15$ 로 일정하다.

& Park(2008)에 의하면 주어진 VB_s 에 대해 $|Dst^*|$ 는 최소치가 존재한다. 즉 주어진 VB_s 에 대해 Dst^* 가 $-15 \times VB_s + 50$ 보다 큰 음의 값을 가진다는 것이다. 따라서 이 연구에서는 Dst^* 를 예측하기 위해 앞 절에서 구한 Q 와 τ 를 이용하되, 예측된 Dst^* 가 상기 최소치보다 큰 음의 값이 되지 않을 경우, 예측된 Dst^* 대신 이 식의 최소치를 사용했다.

그림 5는 2001년 3월 31일에 발생한 자기폭풍에 대한 예측 결과를 나타낸 것이다. 그림 5의 (a), (b), (c), (d)는 각각 태양풍의 수밀도(n)와 속도(V), IMF 의 B_z 성분, 1시간 평균 E_y 를 보여준다. 그리고 그림 5의 (e), (f), (g)는 Burton et al.(1975), O'Brien & McPherron(2000a)과 이 연구 방법으로 얻은 Q 와 τ , 그리고 이를 바탕으로 구한 예측된 Dst^* 와 관측된 Dst^* 를 나타낸다. 자기폭풍 시작 후 6시간 만에 Dst^* 가 최소치에 도달했고, 그 때 B_z 는 -44.47nT , VB_s 는 23.40mV/m , Dst^* 는 -425.47nT 였다. 자기폭풍이 회복되던 중 B_z 가 음이 되어 에너지 공급이 있었고, 이로 인해 Dst^* 가 -301.67nT 로 다시 발달했다가 원래 상태로 회복되었다. 이 자기폭풍의 총 지속시간은 90시간이었다.

IMF 가 남쪽을 향할 때 주어진 VB_s 에 대해 Q 는 O'Brien & McPherron(2000a)이 가장 크고, 이 연구, Burton et al.(1975)의 순서로 작은 값을 보였다. 한편 τ 의 경우 Burton et al.(1975)은 7.7시간으로 일정했으나 O'Brien & McPherron(2000a)과 이 연구에서는 변하였다. 특히 이 연구의 τ 가 Dst^* 의 함수로 완만하게 변한 반면 O'Brien & McPherron(2000a)의 τ 는 VB_s 의 함수로 급격히 변하였다. 또한 이 연구가 O'Brien & McPherron(2000a)보다 $VB_s > 0$ 일 때 더 큰 τ 를, $VB_s = 0$ 일 때는 더 작은 τ 를 나타냈다.

이 연구, O'Brien & McPherron(2000a)과 Burton et al.(1975)의 Q 와 τ 를 이용해서 얻은 예측된 Dst^* 의 최소치는 각각 -456.61nT , -260.63nT , -188.57nT 로 이 연구가 관측된 Dst^* 의 최소치와 가장 근접했다. O'Brien & McPherron(2000a)은 이 연구보다 Q 가 컸으나 τ 가 작아 결과적으로 더 작은 음의 예측된 Dst^* 를 나타냈으며, Burton et al.(1975) 역시 τ 가 작은 값으로 일정하며 Q 또한 너

그림 5. 2001년 3월 31일 발생한 자기폭풍의 예측결과. 태양풍 매개변수(n , V , B_z , E_y)와 Burton et al.(1975), O'Brien & McPherron(2000a)과 이 연구 방법으로 얻은 Q 와 τ , 그리고 이를 바탕으로 구한 예측된 Dst^* 와 관측된 Dst^* 를 나타낸다.

무 작아 이 연구보다 작은 음의 예측된 Dst^* 를 나타냈다. 그리고 세 방법 모두 관측된 Dst^* 의 최소치보다 예측된 Dst^* 의 최소치가 1시간 늦게 나타났는데, 이는 Dst^* 예측 시 한 시간 전 값을 이용해서 다음 시간 값을 예측했기 때문으로 생각된다. 예측치가 관측치와 잘 일치하는가를 알아보기 위해 2001년 3월 31일에 발생한 자기폭풍에 대한 주상 동안 예측치의 평균 편차 즉, $((\text{관측된 } Dst^* - \text{예측된 } Dst^*) / \text{관측된 } Dst^*)^2$ 의 평균을 구했다. 그 결과 이 연구, O'Brien & McPherron(2000a) 그리고 Burton et al.(1975)의 연구가 각각 0.235, 0.423, 0.520로 나타났다.

한편 이 연구의 Dst^* 예측 효율성을 검증하기 위해 60개의 자기폭풍 전체를 예측해보았다. 또한 이를 다른 연구와 비교하기 위해 Burton et al.(1975)과 O'Brien & McPherron(2000a)의 Dst^* 예측 방법을 같은 자기폭풍에 적용해 보았다. 그 결과는 그림 6과 같다. 여기서 가로축은 관측된 Dst^* 를 세로축은 예측된 Dst^* 를 나타내며, (a)는 이 연구, (b)는 O'Brien & McPherron(2000a) 그리고 (c)는

그림 6. 1998 ~ 2006년의 60개 자기폭풍에 대한 Dst^* 예측결과. 가로축은 관측된 Dst^* 를 세로축은 예측된 Dst^* 를 나타낸다. (a)는 이 연구, (b)는 O'Brien & McPherron(2000a)의 연구, (c)는 Burton et al.(1975)의 연구 결과로 얻은 것이다. 이 때 상관 계수는 각각 0.88, 0.85, 0.85이다.

Burton et al.(1975)의 결과이다. 그림의 점선은 관측치와 예측치가 일치하는 경우를 나타낸다. 세 연구 결과 (a), (b), (c)의 상관 계수는 각각 0.88, 0.85, 0.85로 이 연구에서 가장 높게 나타났으며, RMS(root-mean-square) 오차는 각각 41.02nT, 56.39nT 및 97.47nT이었다. 뿐만 아니라 1998년 9월 25일과 2000년 9월 17일의 자기폭풍의 경우 관측된 Dst^* 의 최소치는 각각 -219.79nT, -235.81nT였고 예측된 Dst^* 의 최소치는 이 연구가 각각 -201.52nT, -223.63nT, O'Brien & McPherron(2000a)이 각각 -148.82nT, -104.53nT 그리고 Burton et al.(1975)이 각각 -106.01nT, -64.15nT로 나타났다. -200nT 이상의 관측치에 대한 예측치의 평균 편차를 구한 결과 이 연구, O'Brien & McPherron(2000a) 및 Burton et al.(1975)의 연구가 각각 0.086, 0.172, 0.332로 나타났다. 이와 같이 이 연구는 기존 연구보다 다소 개선된 결과를 나타냈으며, 특히 $Dst^* \lesssim -200$ nT의 강한 자기폭풍의 예측에 효과적이었다.

5. 토 의

ACE 위성에서 제공되는 질 높은 태양풍 매개변수를 이용하여 1998년부터 2006년까지 9년 간의 VB_s 를 구했다. VB_s 와 자기폭풍을 대변해주는 Dst^* 그리고 이것의 발달과정을 보여주는 ΔDst^* 의 상관관계를 통해 식 (1)의 Q 와 τ 를 다시 구했다. 그 결과를 선행 연구와 함께 표 1에 나타냈다. 그리고 이 연구의 Dst^* 예측 효율성을 알아보기 위해 Burton et al.(1975), O'Brien & McPherron(2000a)과 이 연구에서 얻은 Dst^* 예측식을 이용해서 60개의 단순 발달형 자기폭풍을 예측했다. 그 결과 상관계수는 각각 0.85, 0.85, 0.88이었다. 그런데 이 연구가 기존 연구에 비해 보다 완벽한 양질의 태양풍 자료를 이용했음에도 불구하고 상관계수가 획기적으로 개선되지 않는 것은 식 (1)을 이용한 Dst^* 예측에 어떤 한계가 있음을 암시한다. 따라서 더 나은 Dst^* 예측을 위해서는 다음 몇 가지 고려할 점이 있다.

첫째, 소멸시간을 결정하기 어렵다는 점이다. 그림 5의 (f)는 Burton et al.(1975), O'Brien & McPherron(2000a)과 이 연구 방법으로 얻은 τ 를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯 세 모델의 τ 는 매우 큰 차이가 있다. Burton et al.(1975)의 τ 는 7.7시간으로 일정한 반면 O'Brien & McPherron(2000a)의 τ 는 VB_s 의 함수로 급격히 변했으며, 이 연구의 τ 는 Dst^* 함수로 완만하게 변했다. 그러나 이렇듯 τ 가 다양함에도 불구하고 이를 바탕으로 한 세 모델의 Dst^* 예측치는 τ 의 변화만큼 큰 차이가 없었다. 이는 τ 가 Dst^* 예측에 중요한 역할을 하고 있지만 주어진 VB_s 와 Dst^* 에 대해 매우 다양하게 표현될 수 있음을 의미한다. 따라서 앞으로 정확한 Dst^* 예측을 위해서는 τ 에 대한 더 많은 연구가 요구된다.

둘째, Dst^* 자체가 불완전하다는 것이다. 일반적으로 환전류의 변화는 Dst^* 의 변화에 가장 큰 기여를 하는 것으로 알려져 있다(e.g., Hamilton et al. 1988, Roeder et al. 1996, Jordanova et al. 1998, Greenspan & Hamilton 2000). 그러나 많은 연구에 의하면 자기권이 활발히 활동하는 기간에는 자기권 꼬리전류, 서브스톰 전류 켜기, 자기권계면 전류, 지구 내부로부터 유도된 전류 등이 환전류와 함께 작용하여 전체 자기권과 지자기에 영향을 주며, 그 결과가 Dst^* 에 반영되는 것으로 알려져 있다(e.g., Langel & Estes 1985, Alexeev et al. 1996, Friedrich et al. 1999, Turner et al. 2000, Häkkinen et al. 2002). 그러므로 Dst^* 자체가 환전류에 의해서만 변화하는 것이 아니므로 완벽한 Dst^* 예측은 기대하기 어렵다.

셋째, 자기권 대류 이외에 자기권으로 에너지를 공급하는 다른 요소들의 역할이다. Kamide(2001)는 VB_s 만으로 Dst^* 를 예측하는 것에 한계가 있음을 밝힌바 있으며, 이는 Dst^* 를 결정함에 있어 VB_s 외에 다른 요인이 존재함을 시사한다. Ahn & Park(2008)에 의하면 주어진 VB_s 에 대해 $|Dst^*|$ 의 최소치가 존재하며 이를 능가하는 다양한 크기의 값들이 존재하는 것이 확인되었다. 그리고 그 요인 중의 하나로 서브스톰의 역할을 고려할 수 있다(Kamide 2009). 자기폭풍의 주상 동안 강한 서브스톰이 자주 발생한다는 사실을 상기한다면, 서브스톰이 자기폭풍 형성 시 환전류에 어떤 형태로 얼마만큼 에너지를 공급하는지에 대한 정확한 규명 없이 더 나은 Dst^* 예측은 어려울 것이다. 이것은 자기폭풍 동안 자기권 대류와 서브스톰의 발생 모두가 환전류의 형성에 기여함을 주장한 Lui et al.(2001)의 연구와도 일치된다. 서브스톰 효과 이외에도 Temerin & Li(2002)에 의하면 계절에 따른 지자기축과 황도 사이의 각 변화, 태양풍의 속도 등도 Dst^* 를 변화시키는 요인으로 작용한다. 따라서 더 정확한 Dst^* 의 예측을 위해서는 이들 요인이 환전류의 발달에 미치는 영향을 고려해야 할 것이다.

감사의 글: 이 연구에 이용된 태양풍 자료와 지자기 자료는 각각 ACE 위성 센터와 일본 교토 대학 부설 지자기 세계 자료 센터에서 제공되었다. 그리고 원고를 꼼꼼히 읽어주신 문가희 박사님과 논문의 건설적인 조언을 해주신 두 분의 심사위원께 감사드린다.

참고문헌

- Ahn, B.-H. & Park, Y.-K. 2008, JA&SS, 25, 129
- Akasofu, S.-I. 1981, SSR, 28, 121
- Alexeev, I. I., Belenkaya, E. S., Kalegaev, V. V., Feldstein, Y. I., & Grafe, A. 1996, JGR, 101, 7737
- Baker, D. N., Zwickl, R. D., Bame, S. J., Hones, Jr. E. W., Tsurutani, B. T., Smith, E. J., & Akasofu, S.-I. 1983, JGR, 88, 6230
- Burton, R. K., McPherron, R. L., & Russell, C. T. 1975, JGR, 80, 4204
- Chapman, S. & Bartels, J. 1940, Geomagnetism (Clarendon: Oxford), pp.272-337
- Daglis, I. A. 1997, magnetic storms (AGU Monograph 98: Washington DC), pp.107-116
- Daglis, I. A., Thorne, R. M., Baumjohann, W., & Orsini, S. 1999, Rev. Geophys., 37, 407
- Fenrich, F. R. & Luhmann, J. G. 1998, GRL, 25, 2999
- Friedrich, E., Rostoker, G., Connors, M. G., & McPherron, R. L. 1999, JGR, 104, 4567
- Gonzalez, W. D. & Echer, E. 2005, GRL, 32, doi:10.1029/2005GL023486
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. 1994, JGR, 99, 5771
- Greenspan, M. E. & Hamilton, D. C. 2000, JGR, 105, 5419
- Häkkinen, L. V. T., Pulkkinen, T. I., Nevanlinna, H., Pirjola, R. J., & Tanskanen, E. I. 2002, JGR, 107, doi:10.1029/2001JA900130
- Hamilton, D. C., Gloeckler, G., Ipavich, F. M., Studemann, W., Wilken, B., & Kresmer, G. 1988, JGR, 93, 14,343
- Jordanova, V. K., Farrugia, C. J., Quinn, J. M., Thone, R. M., Ogilvie, K. W., Lepping, R. P., Lu, G., Lazarus, A. J., Thomsen, M. F., & Belian, R. D. 1998, GRL, 25, 2971
- Kamide, Y. 2001, JASTP, 63, 413
- Kamide, Y. 2009, 개인서신
- Kamide, Y., Baumjohann, W., Daglis, I. A., Gonzalez, W. D., Grande, M., Joselyn, J. A., McPherron, R. L., Phillips, J. L., Reeves, E. G. D., Rostoker, G., Sharma, A. S., Singer, H. J., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. 1998, JGR, 103, 17705
- Langel, R. A. & Estes, R. H. 1985, JGR, 90, 2487
- Lui, A. T. Y., McEntire, R. W., & Baker, K. B. 2001, JGR, 28, 3413
- MacMahon, R. M. & Gonzalez, W. D. 1997, JGR, 102, 14199
- MacMahon, R. M. & Llop-Romero, C. 2008, Ann. Geophys., 26, 2543
- Murayama, T. 1982, RGSP, 20, 623
- O'Brien, T. P. & McPherron, R. L. 2000a, JGR, 105, 7707

- O'Brien, T. P. & McPherron, R. L. 2000b, JASTP, 62, 1295
- Perrault, P. & Akasofu, S.-I. 1978, GJRAS, 54, 547
- Roeder, J. L., Fennell, J. F., Chen, M. W., Schultz, M., Grande, M., & Livi, S. 1996, ASR, 17, 17
- Sugiura, M. 1964, Ann. Int. Geophys. Year, 35, 9
- Temerin, M. & Li, Xinlin. 2002, JGR, 107, 1472
- Turner, N. E., Baker, D. N., Pulkkinen, T. I., & McPherron, R. L. 2000, JGR, 105, 5431
- Valdivia, J. A., Sharma, A. S., & Papadopoulos, K. 1996, GRL, 23, 2899
- Wang, C. B., Chao, J. K., & Lin, C.-H. 2003, JGR, 108, 1341