

지자기폭풍 기간 동안의 태양풍 동압력 펄스에 관한 통계적 분석

백지혜¹, 이대영^{2†}, 김경찬², 최정림², 문용재¹, 조경석¹, 박영득¹

¹한국천문연구원

²충북대학교 자연과학대학 천문우주학과 및 기초과학연구소

A STATISTICAL ANALYSIS OF SOLAR WIND DYNAMIC PRESSURE PULSES DURING GEOMAGNETIC STORMS

J.-H. Baek¹, D.-Y. Lee^{2†}, K. C. Kim², C. R. Choi², Y.-J. Moon¹,
K.-S. Cho¹, and Y.-D. Park¹

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Whaamdong, Yooseong, Daejeon 305-348, Korea

²Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

E-mail: ralphfiennes@hanmail.net, dylee@chungbuk.ac.kr

(Received July 15, 2005; Accepted November 22, 2005)

요 약

이 연구에서는 지자기 폭풍의 주상 기간 동안 발생하는 태양풍 동압력 펄스에 대한 통계적 분석을 하였다. 이를 위해 먼저 1997년부터 2001년까지 5년간의 기간으로 부터 지자기 폭풍 지수인 Dst 값이 -50nT 이하인 지자기 폭풍을 모두 111개 얻었다. 이러한 지자기 폭풍의 주상기간 동안에 발생한 태양풍 동압력 펄스를 정확히 조사하기 위해 태양풍 자료 뿐만 아니라 지구 저위도 여러 관측소에서 관측된 지자기 수평 성분 H값을 이용하였다. 즉 동압력 펄스가 자기권에 충돌하면 저위도 H 값이 전 지구적인 증가를 보여야 한다는 사실을 이용하였다. 이러한 과정을 통해 얻은 통계적 결과는 다음과 같다. 첫째, 자기 폭풍 중에 발생하는 H의 증가는 평균적으로 그 크기가 자기 폭풍의 강도와 비례하는 경향을 보인다. 이는 강한 자기폭풍일 수록 강한 태양풍 펄스를 동반한다는 것이다. 둘째로 자기폭풍 중에 발생하는 동압력 펄스의 발생 빈도 역시 자기 폭풍의 강도와 비례한다. 셋째, 동압력 펄스 발생 빈도가 0.4회/hr 이상인, 즉 2.5시간에 1회 이상의 동압력 펄스를 동반하는, 지자기 폭풍은 여기서 다루어진 전체 지자기 폭풍 중 약 30%를 차지한다. 2.5시간은 서비스톱의 평균 지속 시간으로 볼 수 있으며, 따라서 자기 폭풍중에 서비스톱이 연속적으로 발생하는 것 만큼 자주 동압력 펄스가 나타나는 자기폭풍이 전체의 30%라는 것이다. 한편 이러한 동압력 펄스의 기원을 이해하기 위해 먼저 지자기 폭풍 유도체에 대해 조사 하였다. 그 결과 여기서 다루어진 지자기 폭풍의 약 65%가 CME(Coronal Mass Ejection)에 의해 발생되었고 CIR(Corotating Interaction Regions)과 Type II bursts에 의해 발생한 것이 각각 6.3, 7.2%인 것으로 나타났다. 그런데 CME에 의해 발생된 지자기폭풍 중에서 70% 이상이 그 주상기간이 CME와 충격파 사이의 공간인 sheath 영역 혹은 CME 앞부분에 해당되는 것으로 나타났다. 따라서 이들 지자기폭풍 주상기간에 빈번히 발생하는 동압력 펄스는 CME와 충격파 사이의 sheath 영역, 그리고 CME 앞부분 영역에서의 빈번한 태양풍 밀도 증가에 기인하는 것으로 보인다.

ABSTRACT

We have carried out a statistical analysis on solar wind dynamic pressure pulses during geomagnetic storms. The Dst index was used to identify 111 geomagnetic

[†]corresponding author

storms that occurred in the time interval from 1997 through 2001. We have selected only the events having the minimum Dst value less than -50 nT. In order to identify the pressure impact precisely, we have used the horizontal component data of the magnetic field H (northward) at low latitudes as well as the solar wind pressure data themselves. Our analysis leads to the following results: (1) The enhancement of H due to a pressure pulse tends to be proportional to the magnitude of minimum Dst value; (2) The occurrence frequency of pressure pulses also increases with storm intensity. (3) For about 30% of our storms, the occurrence frequency of pressure pulses is greater than 0.4 \#/hr , implying that for those storms the pressure pulses occur more frequently than do periodic substorms with an average substorm duration of 2.5 hrs. In order to understand the origin of these pressure pulses, we have first examined responsible storm drivers. It turns out that 65% of the studied storms are driven by coronal mass ejections (CMEs) while others are associated with corotating interaction regions (6.3%) or Type II bursts (7.2%). Out of the storms that are driven by CMEs, over 70% show that the main phase interval overlaps with the sheath, namely, the region between CME body and the shock, and with the leading region of a CME. This suggests that the origin of the frequent pressure pulses is often due to density fluctuations in the sheath region and the leading edge of the CME body.

Keywords: dynamic pressure, storm, solar wind

1. 서론

지자기 폭풍은 보통 태양-행성간 자기장 IMF(Interplanetary magnetic field)가 남쪽 방향으로 향하고 있는 조건에서 발생하는 거시적 자기권 교란 현상이다. 지자기 폭풍의 강도와 지속 시간은 보통 남쪽 방향 IMF 성분의 크기와 지속 시간에 비례하는데, 많은 경우 태양 코로나 물질 방출, 즉 CME가 위와 같은 조건을 제공해 줄 수 있으며, 이것이 지구 자기권에 충돌할 때 지자기 폭풍이 발생한다. 한편 자기권 교란에 영향을 주는 또 다른 태양풍 물리 변수로서 태양풍 동압력(dynamic pressure)을 생각할 수 있다. 태양풍 동압력은 태양풍 질량 밀도와 속력의 제곱의 곱으로 정의 되는데, 대개 질량 밀도의 변화가 동압력 변화를 결정한다. 실제로 질량 밀도는 수시로 증감의 변화를 보이곤 하는데, 물론 지자기 폭풍 기간 중에도 동압력의 증감이 나타난다.

태양풍 동압력의 급증, 즉 펄스에 대한 지구 자기권의 반응은 IMF의 방향에 따라 민감하다(Lukianova 2003). 북쪽 방향의 IMF 조건하에서의 태양풍 동압력 펄스는 자기권 전체를 단순히 압축하는 반면, 남쪽 방향의 IMF 조건하에서의 태양풍 동압력 펄스는 야간지역 지구 근접 자기권 자기장의 쌍극자화(dipolarization)를 일으키고 서브스톰과 유사한 강력한 입자속(Energetic particle flux)의 증가를 야기한다(Lee & Lyons 2004). 그런데 어느 경우든 공통적으로 저위도 지상 자기장 H 값의 전 지구적 증가를 볼 수 있다. 또한 Lee et al.(2004)에 의하면 태양풍 동압력 펄스는 고에너지 입자속 증가가 연속적으로 발생하는 sawtooth 진동의 원인이 되기도 한다. 이러한 sawtooth 진동은 보통 지자

표 1. 이 연구에서 사용된 지자기폭풍의 연도별 개수.

구분	1997	1998	1999	2000	2001	총
개수	14	24	15	37	21	111

표 2. 이 연구에서 사용된 중,저위도 지자기 관측소의 이름과 위치.

저위도 지자기 관측소 이름	위도	경도
BNG (Bangui)*	4.4	18.6
ABG (Alibag)*	18.6	72.9
LNP (Lunping)*	25.0	121.2
KNY (Kanoya)	31.4	130.9
CBI (Chichjima)	27.1	142.2
GUA (Guam)*	13.6	144.9
HON (Honolulu)*	21.3	202.0
PPT (Palpeete)*	-17.6	210.4
TUC (Tucson)	32.3	249.2
DLR (Del Rio)	29.5	259.1
HUA (Huancayo)*	-12.0	284.7
SJG (San Juan)	18.4	293.9
MBO (MBour)*	14.4	343.0

*이 관측소 8곳의 자료를 주로 이용하였고 자료가 없는 경우에는 그 곳에서 가장 가까운 곳에 위치한 관측소의 자료를 대신 사용함.

기폭풍 기간 동안 나타난다. Shi et al.(2003)에 의하면 지자기폭풍 기간 동안의 태양풍 동압력의 증가는 채프만-페라로 전류, 환전류, 그리고 다른 자기권 전류계를 증가 시킬 수 있다. 따라서 태양풍 동압력은 지자기권의 동력학 및 진화의 주요 제어 요인이 될 수 있다(Yang et al. 2003).

그렇다면 태양풍 동압력 펄스는 지자기 폭풍 기간 동안 얼마나 자주 발생하며, 이러한 동압력 펄스의 기원은 어디에 있는가라는 의문이 생긴다. 여기에 대한 답은 태양풍 동압력 펄스가 지자기 폭풍의 역학적 진화에 미치는 영향력이 어느정도나 되는지를 가늠하는데 많은 힌트를 줄 것이다. 이 연구에서는 바로 이러한 의문에 대한 답을 구하는 것을 연구 목표로 한다. 2장에서는 이 연구에서 사용된 자료의 수집 및 처리 방법에 대해 간단히 설명하였다. 3장에서는 지자기 수평 성분 H에 대한 분석 결과를 설명하였다. 4장에서는 펄스의 발생 빈도에 대해 설명하였다. 그리고 5장에서는 펄스의 기원에 대해 논하였다. 마지막으로 6장에서는 이 논문의 결과를 간단히 요약하고 결과에 대해 토의하였다.

2. 관측자료 수집 및 처리

먼저 Dst 지수를 이용하여 1997년에서 2001년 사이의 5년 동안 발생한 지자기 폭풍을 수집하였다. 이때 Dst 지수의 최소값이 -50nT 이하인 경우로 제한하였고, 비교적 주상(main phase)이 잘 정의된 경우만 골랐다. 이러한 방법으로 총 111개의 지자기 폭풍을 얻을 수 있었고 표 1에 연도별 갯수를 정리하였다.

다음으로 Dst 지수의 주상 기간 동안 나타난 태양풍 동압력 펄스를 조사하였다. 이를 위해 먼저 지구 저위도 지역에서의 자기장 수평 성분 H 값의 변화를 보았다. 이 논문에서 태양풍 동압력 증가를 확인하기 위해서 H 값을 이용하는 이유는 매우 중요하며 다음과 같다. 동압력 등과 같은 태양풍

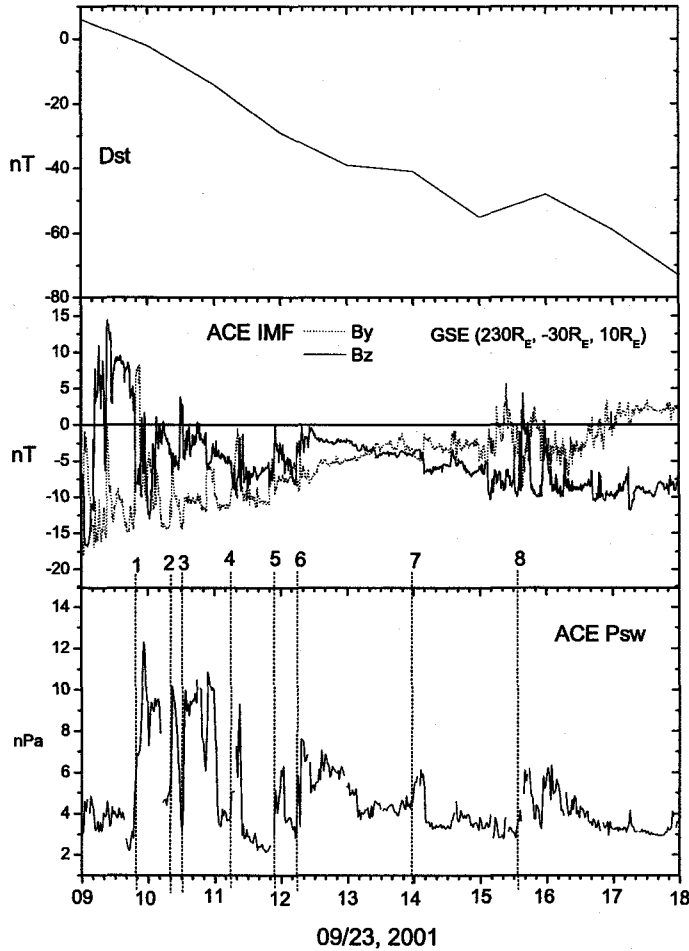


그림 1. Dst 지수와 태양풍 자료.

변화를 분석하기 위해서는 보통 태양풍내에 위치한 위성을 이용하게 되는데 이때 위성의 위치가 태양-지구 사이를 연결하는 축으로부터 충분히 가깝지 않을 때가 종종 있다. 이런 경우 특정 위성에서 관측한 태양풍 상태가 실제 지구자기권에 도달하여 충돌한 것과 동일한 것인지 불확실 하며, 따라서 이러한 위성에서 제공 받은 동압력에 대한 정보도 불완전 할 수 밖에 없다. 이에 비해 저위도 H 값의 전지구적 증가는 동압력이 지구에 충돌했다는 명백한 직접적 증거이므로 이에 의존하면 지구 자기권에 충돌한 동압력 펄스의 존재 여부에 더욱 정확할 수 있다(Russell et al. 1992). 즉, 지구를 하나의 또다른 인공위성으로 간주하는 것과 같다.

여기서는 지구 저위도에 고르게 분포해 있는 8개 관측소에서 제공하는 H 값을 이용하였는데, 이는 WDC(web.dmi.dk/projects/wdcc1)에서 얻었고, 자료의 시간 분해 간격은 1분이다. 표 2는 여기서 사용된 저위도에 위치한 지자기 관측소의 이름과 위도, 경도를 나타낸 것이다.

지상자기장 H와 더불어 ACE 태양풍 위성이 태양풍에서 직접 관측한 동압력 자료도 동시에 확인

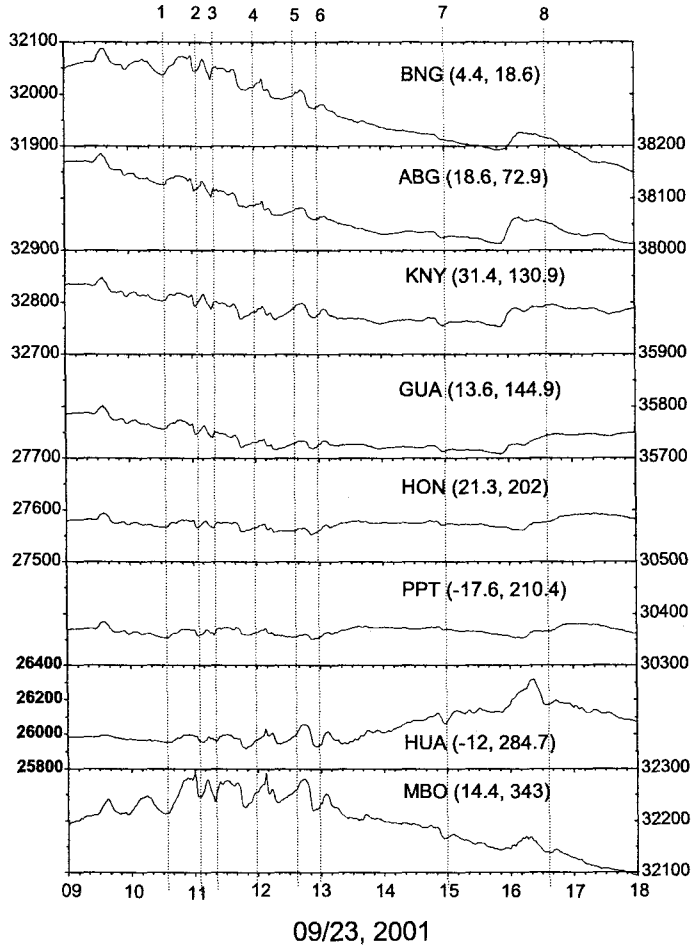


그림 2. 지구 저위도 자기장 수평 성분 H.

하였다. 지자기폭풍 111개에 대해 얻은 모든 관측 자료들을 그림 1과 그림 2와 같은 방식으로 정리 및 분석하였다. 두 그림은 2001년 9월 23일에 발생한 지자기폭풍으로 태양풍 자료와 지구 자기장 자료를 지자기폭풍의 주상 기간을 가로축으로 하여 나타낸 것이다. 그림 1의 최상단에 Dst 지수를 보여주고 있으며, 지자기폭풍이 시작하기 1시간 전부터 주상이 끝날 때까지를 나타낸다. 두 번째에는 ACE(Advanced Composition Explorer) 위성에서 관측된 IMF By와 Bz를 나타내는 그림으로 점선은 By, 실선은 Bz를 나타낸다. 가로 실선은 IMF 값이 0인 지점을 표시한다. 세 번째 그림 역시 ACE에서 관측된 태양풍 동압력을 보여주는 그림이며, 세로로 그어진 파선들은 태양풍 동압력의 주요 펄스를 표시한 것이다. 보통 ACE 위성은 지구에서 약 30분에서 1시간 거리에 떨어져 있기 때문에 그림 1의 세 번째 그림에 표시한 세로 파선들은 대략 30분에서 1시간 후에 나타나는 그림 2의 세로 파선들에 대응하여 짝을 이루게 된다. 예를 들어 그림 2의 1번 파선으로 나타낸 H의 증가는 그림 1의 1번 파선으로 표시된 태양풍 동압력 펄스에 의한 것으로 생각하면 된다.

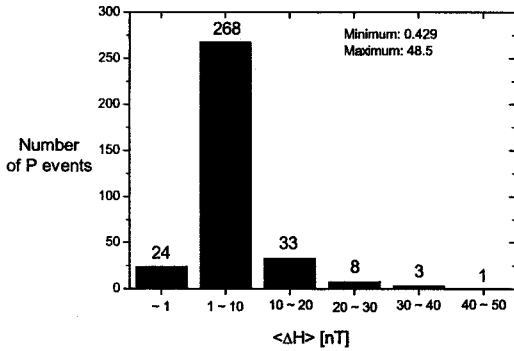


그림 3. $\langle \Delta H \rangle$ 의 값과 P 이벤트 개수의 관계.

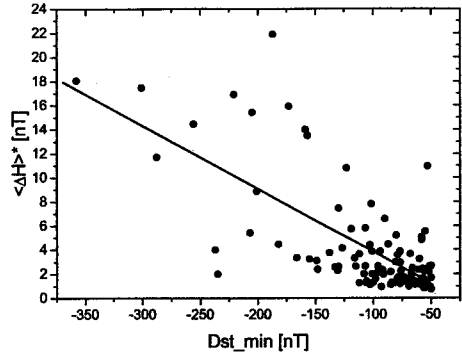


그림 4. $\langle \Delta H \rangle^*$ 와 Dst_{min} 의 관계.

그림 2는 지구의 저위도에서 관측한 자기장 수평 성분인 H 값을 관측소의 경도에 따라 차례대로 나타낸 것이다. 각 패널들의 세로축 눈금 간격은 7번째 그림(HUA)을 제외하고는 모두 100nT로 통일하여 관측소에 따른 H 값의 증가를 쉽게 비교할 수 있게 하였다. 그림 2의 우측에는 각각의 관측소 이름(표 2 참조)과 지리적 위도, 경도를 표시하여 관측소의 위치를 알 수 있게 하였다. 세로로 표시된 파선들은 태양풍 동압력 펄스에 의한 것으로 믿어지는 H 값의 증가를 나타낸다. 이 연구에서는 8개의 관측소 중 최소 6개 이상의 관측소에서 H 값의 증가가 동시에 나타날 경우, 이것을 태양풍 동압력 펄스에 의한 전지구적 증가로 정하였다. 그림 2에 표시된 모든 H 증가가 전지구적 증가로 나타남을 볼 수 있다. 이런 방법으로 찾은 H 값의 증가는 뒤에서 자세히 설명할 $\langle \Delta H \rangle$ 와 발생 빈도(occurrence frequency) f 를 구하거나 분석하는데 중요한 자료가 된다.

3. 지구 자기장 수평 성분 H 자료 분석 결과

이제부터 태양풍 동압력 펄스에 의해 H 값이 증가하면 이것을 P 이벤트로 정의하고 동압력 펄스에 의해 증가하는 H의 양을 ΔH 로 부르기로 하자.

지자기폭풍 111개에서 총 337개의 P 이벤트가 나타났는데, 하나의 지자기폭풍 주상기간 동안 발생한 P 이벤트의 개수는 0-9개로 다양하게 나타났다. 이때 다음과 같은 기준을 가지고 하였다. 이웃한 두 P 이벤트가 나타난 시간 간격이 30분 이상인 경우는 서로 독립된 태양풍 동압력 펄스에 의한 증가로 생각했지만 30분 미만인 경우에는 연속하는 하나의 펄스군에 의한 증가로 보고 이를 하나로 취급했다. 그림 2에서도 11시나 13시 부근에 30분 미만의 시간 간격을 두고 두 개가 연속적으로 나타난 것을 볼 수 있는데 이러한 것은 한 이벤트로 취급하였다.

위에서 P 이벤트는 단순히 주관적 시력에 의존하여 얻은 것이기 때문에 정량적으로 정리하여 표현할 필요가 있다. 따라서 주어진 시간에 8개의 지자기 관측소에서 나타나는 ΔH 를 평균한 값인 $\langle \Delta H \rangle$ 를 구하였다. 위와 같은 방법으로 337개의 P 이벤트에 대해 얻은 $\langle \Delta H \rangle$ 의 최소값은 0.429nT였고 최대값은 48.5nT로 나타났다. 그림 3에 $\langle \Delta H \rangle$ 별 P 이벤트 통계를 나타내었다. 가로축은 $\langle \Delta H \rangle$ 값의 범위를, 세로축은 P 이벤트의 개수를 나타낸다. 막대 위의 숫자는 해당 범위에 있는 P 이벤트의 개수를 보여준다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 $\langle \Delta H \rangle$ 값이 1보다 크거나 같고 10보다 작은 경

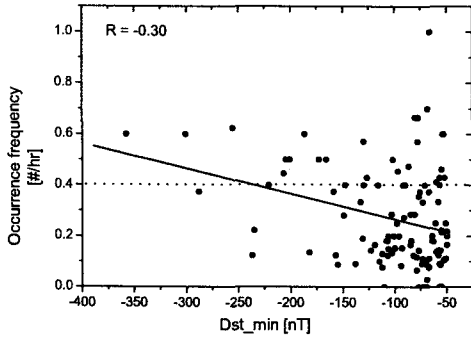


그림 5. 발생빈도 f 와 Dst_{min} 의 관계.

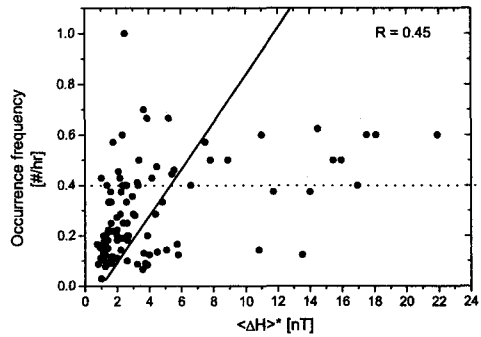


그림 6. 발생빈도 f 와 $\langle \Delta H \rangle^*$ 의 관계.

우($1 \leq \langle \Delta H \rangle < 10$)가 268개로 가장 많았다.

하나의 지자기폭풍 주상기간 동안에 나타난 모든 P 이벤트에 대해 평균한 $\langle \Delta H \rangle$ 를 $\langle \Delta H \rangle^*$ 로 나타내자. 즉, 이것은 각각의 지자기폭풍 주상기간 동안의 평균 동압력 펄스로 생각될 수 있는 것이다. 그림 4는 $\langle \Delta H \rangle^*$ 와 Dst_{min} (이하 Dst_{min})의 관계를 보여주는데 각 점은 각각의 지자기폭풍을 나타낸다. 여기서 Dst_{min} 값이 작아질수록 $\langle \Delta H \rangle^*$ 값이 커지는 경향을 볼 수 있다. 즉, 강한 지자기폭풍 일수록 태양풍 동압력 펄스에 의한 지구의 자기장 수평 성분 H가 평균적으로 크게 증가한다는 것을 알 수 있다. 따라서 강한 폭풍일 수록 동반되는 태양풍 동압력 펄스의 평균 세기가 비교적 강하다는 것을 알 수 있다.

4. 발생 빈도(Occurrence frequency) f

지자기폭풍의 주상 기간 동안 태양풍 동압력 펄스가 얼마나 자주 발생하였는지를 알아보기 위해 발생 빈도(Occurrence frequency, 이하 f)를 계산하였다. f 는 식 (1)에 의해 정의 된다.

$$f = \frac{\text{The number of P events of each storm's main phase}}{\text{main phase interval of each storm}} \quad [\#/hr] \quad (1)$$

111개의 지자기폭풍 각각에 대해 f 를 계산하였는데 그 값은 0에서 대략 1까지 사이에 분포하였다. 몇몇 폭풍들에 대해서는 태양풍 동압력 펄스에 의한 지구 자기장 H 값의 뚜렷한 변화를 찾을 수 없었기 때문에 f 가 0인 경우도 있었다.

f 를 Dst_{min} 의 함수로서 그림 5와 같이 나타내었다. 가로축은 Dst_{min} , 세로축은 발생 빈도 f 를 나타내고 가운데에 있는 가로 점선은 발생 빈도 f 가 0.4#/hr인 부분을 표시한 것이다. 따라서 점선 위는 f 가 0.4#/hr 이상인 부분, 점선 아래는 f 가 0.4#/hr 이하인 부분을 나타낸다. 이 그림을 보면 Dst_{min} 이 상당히 작아지는 부분으로 갈수록 f 와 비례하는 경향을 보이기는 하나, Dst_{min} 값이 큰 영역에서는 f 와의 비례 관계가 명확치 않아 전체적인 비례관계가 명확치 않다. 그런데 이보다 더 의미 있는 것은, 약 30%의 지자기폭풍들이 f 가 0.4#/hr(즉, 2.5 시간당 1회)이상의 값을 갖는다는 것이다. 여기서 2.5시간은 대략 서브스톰의 평균 지속 시간에 해당된다. 따라서 지자기폭풍 기간 동안 발생 할 수 있는 연속적인 서브스톰 만큼, 혹은 그 보다 더 자주 태양풍 동압력 펄스가 발생하는 지자기 폭풍이 30%나 된다는 것을 의미한다.

표 3. 충격파 유도체의 분류.

유도체	CMEs		CIRs	Type II bursts	미분류	계
	MCs	Ejecta				
개수	32 (12)	40 (16)	7(1)	8 (1)	17 (3)	104 ¹ (33) ²

¹ 충격파를 동반하지 않은 지자기 폭풍 7개를 제외한 폭풍의 개수

² $f \geq 0.4 \text{ \#}/\text{hr}$ 인 폭풍의 개수

그림 6은 발생 빈도 f 와 $\langle \Delta H \rangle^*$ 의 관계를 보여주는 것으로 가로축은 $\langle \Delta H \rangle^*$, 세로축은 f 를 나타내고 그림 5와 마찬가지로 가로 방향 점선은 $0.4 \text{ \#}/\text{hr}$ 를 표시한다. 이 그림에서도 역시 f 가 $0.4 \text{ \#}/\text{hr}$ 보다 큰 자기폭풍이 30%임을 쉽게 확인할 수 있는데, 이러한 자기폭풍 이벤트의 발생은 $\langle \Delta H \rangle^*$ 의 크기에 크게 상관없음을 볼 수 있다.

지금까지 살펴본 결과를 정리 하면, 강한 지자기폭풍이 나타나는 기간 동안 태양풍 동압력 펄스가 자주, 또 비교적 세계 지구 자기장에 충돌하는 것을 알 수 있었다. 또한 동압력 펄스의 그 발생 빈도수가 연속적인 서브스톰 만큼 혹은 그 보다 큰 경우가 전체 지자기 폭풍의 30%나 된다는 것을 알 수 있었다.

5. 태양풍 동압력 펄스의 공간적 기원

앞 절에서 살펴 본 것처럼 지자기폭풍의 주상 기간 동안 나타나는 빈번한 태양풍 동압력 펄스는 어디서 기인하는 것일까? 여기에 대한 답을 얻기 위해서 자기폭풍 주상기간에 해당하는 태양풍 상태가 무엇인지를 조사하였다. 먼저 앞에서 찾은 지자기폭풍 대부분은 태양풍 충격파를 동반한다는 사실을 확인할 수 있었다. 지자기폭풍의 주상기간 시작 전후에 위치하는 이들 충격파들의 유도체는 다양한데, 주로 코로나 질량 방출 CME(Coronal Mass Ejections), CIR(Corotating Interaction Regions) 그리고 Type II bursts가 이에 해당 한다.

표 3은 지금까지 앞에서 살펴본 충격파 유도체의 분류에 따른 통계를 정리한 것이다. 가로 안에 있는 숫자는 발생 빈도 f 가 $0.4 \text{ \#}/\text{hr}$ 이상인 폭풍에 대한 통계를 나타낸다. 우리가 찾은 111개의 지자기폭풍 중 7개는 충격파를 동반하지 않았고, 나머지 104개 중에서 17개에 대해서는 충격파의 명확한 원인을 찾지 못하였다.

우리가 찾은 지자기폭풍 중에서 CME와 관련된 충격파를 동반한 경우는 총 72개로 전체 지자기폭풍 중 65%를 차지한다. CME 종류에 따라 보면, MC(magnetic clouds)는 32개, Ejecta는 40개로써 Ejecta가 더 많은 비율을 차지하고 있었다. 그리고 앞에서 구한 발생 빈도 f 가 $0.4 \text{ \#}/\text{hr}$ 이상으로 나타난 지자기폭풍 중에서는 약 85%가 CME에 해당된다. MC와 Ejecta로 구분하는 작업은 Berdichevsky et al.(2000), Cane & Richardson(2003), Gopalswamy et al.(2001)에 나온 목록과 http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html에서 찾은 MC 목록을 이용하였다.

Mullan(1984)에 의하면 태양이 적도 근처로부터 느린($300 \sim 400 \text{ km/s}$) 태양풍(이하 SW)을 내뿜는 동안 태양 코로나의 일정한 영역(주로 고위도 지역)에서는 태양풍 속력이 약 800 km/s 에 이르는 high speed streams(이하 HSS)을 내뿜는다. SW보다 HSS가 훨씬 더 빠르기 때문에 HSS는 SW를 따라잡게 되고 이 두 영역이 부딪히게 된다. SW와 HSS는 서로 다른 물리량과 기원을 갖기 때문에 바

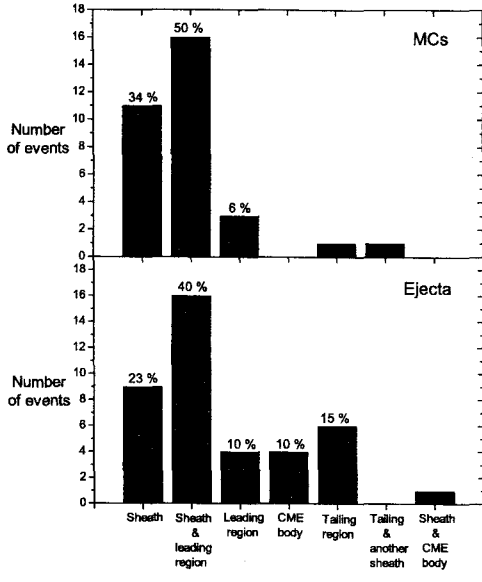


그림 7. CMEs와 지자기폭풍의 주상이 겹치는 영역.

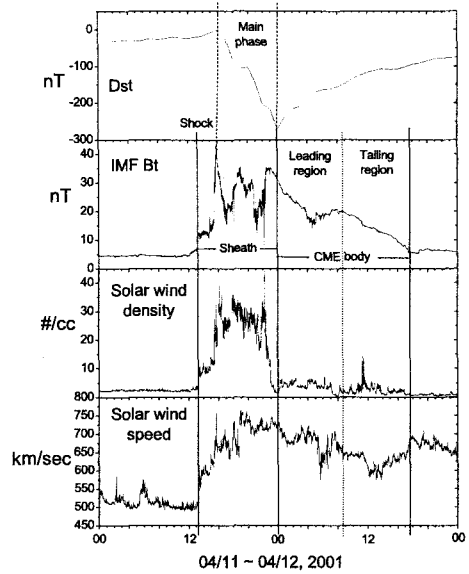


그림 8. MC의 sheath와 자기폭풍 주상이 겹치는 경우.

로 동화되지 못하고 CIR을 만들게 된다. 이 영역은 태양이 자전을 몇 번이나 하는 동안 남아있고, 태양보다 몇 배나 더 넓은 영역에 퍼져 있다.

우리가 찾은 지자기폭풍 111개 중 CIR과 관련된 것은 7개로 불과 6.3%의 비율을 보이며, 이 7개 중 단 1개만이 발생 빈도가 0.4#/hr 이상인 폭풍에 해당된다. CIR로 구분할 때는 Berdichevsky et al.(2000)에 있는 목록을 참조 하였고, 일부는 CIRs의 특징을 이용해 직접 구분하였다.

Oh et al.(2002)에 따라, 만약 태양풍의 값들이 갑작스런 증가 후에 몇 시간 지나지 않아 즉시 다시 감소한다면 그것을 Blast-wave type의 충격파로 구분하였는데, 4가지 전파 방출 유형 중 Type II bursts는 Blast-wave type의 원인이 된다. 따라서 우리는 이 특징들에 근거하여 지자기폭풍들 중 8개의 Type II bursts와 관련된 Blast-wave type의 충격파를 찾을 수 있었다. 이것은 CIR과 마찬가지로 전체 지자기폭풍의 7.2%에 해당하는 비율이고, 발생 빈도 f 가 0.4#/hr 이상인 자기폭풍 중에서도 1개 밖에 없었다. 이는 Type II bursts도 CIR과 마찬가지로 때로는 지자기폭풍을 일으키는 원인이 되기는 하지만 CME만큼 자주 발생시키는 원인은 아니라는 것을 말해준다.

지금까지 살펴본 충격파와 유도체들을 전후로 하여 지자기폭풍이 시작되는 것으로 나타났다. 충격파의 원인 중 CME가 이 연구에서 지자기폭풍을 가장 많이 일으킨 유도체로 나타났으므로, CME의 어떤 영역이 자기폭풍 발생에 영향을 가장 많이 주고 또한 동 기간동안 발생하는 동압력 펄스 발생과 어떻게 연관되는지 조사하였다.

구체적으로, 전체 자기폭풍 중 CME와 관련된 72개의 자기폭풍에 대해 그 주상 기간과 겹치는 CME의 세부 영역을 조사하고 그림 7에 그 통계를 정리 하였다. 이 그림에서 가로축은 자기폭풍의 주상 기간과 겹치게 되는 CME의 영역을 세분하여 나타내고 있다. 여기서 “Sheath”는 충격파와

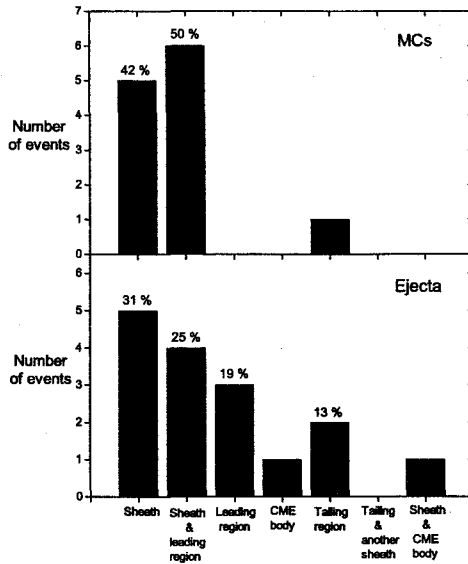


그림 9. $f \geq 0.4 \#/\text{hr}$ 인 폭풍과 겹쳐지는 영역.

CME 사이의 영역, “leading region”은 CME의 앞부분(즉, CME의 전체 구간을 반으로 나누었을 때 sheath와 가까운 앞부분), “tailing region”은 CME의 전체 구간을 반으로 나누었을 때 앞부분을 제외한 나머지 뒷부분, 그리고 “CME body”는 앞부분과 뒷부분 전체를 각각 나타낸다. 그리고 마지막 두 영역은 CME가 두 번 연이어 관측되는 경우, 두 번째 CME에 해당하는 세부영역을 의미한다. 이와 같이 세분된 각각의 영역과 겹치는 주상기간을 갖는 자기폭풍의 개수를 세로축에 나타내었다. 물론 자기폭풍의 주상기간이 sheath 앞쪽의(충격파가 도달하기 전의) 태양풍 영역과 겹쳐지는 경우도 있다. 즉, 충격파 도착 전에 이미 자기폭풍이 시작되는 경우였다. 하지만 그런 경우는 매우 드물어 전체 111개의 지자기폭풍 중 단 4개(약 3%)만 이에 해당된다. 그림 7의 위 패널은 MC의 경우에 해당되는데, 주상기간이 sheath와 겹쳐지는 자기폭풍의 개수는 11개(MC 중 34%), 주상기간이 sheath와 CME 앞부분에 걸쳐 겹쳐지는 자기폭풍의 개수는 16개(MC 중 50%)로 나타났다. 아래 패널은 Ejecta와 관련된 경우로 주상기간이 sheath와 겹쳐지는 자기폭풍의 개수는 9개(Ejecta 중 23%), 주상기간이 sheath와 CME 앞부분에 걸쳐 겹쳐지는 자기폭풍의 개수는 16개(Ejecta 중 40%)로 나타났다. 즉, CME에 의해 발생한 지자기 폭풍의 약 72%(72개 이벤트 중 52 이벤트)가 주상기간이 sheath 혹은 CME 앞 부분에 겹치는 경우에 해당한다. 그림 8은 2001년 4월 11일부터 12일까지 약 2일에 걸쳐 나타난 MC의 IMF B, 태양풍의 개수밀도와 속도 자료를 보여주고 있다. 이 그림은 MC의 sheath(shock과 두 번째 실선 사이 영역)가 지자기폭풍의 주상(첫 패널의 파선 부분)과 상당히 겹치는 좋은 예가 된다. 또한 이 그림에서 sheath를 비롯하여 CME body(두 번째 실선과 세 번째 실선 사이 영역) 부분도 확인할 수 있다.

발생 빈도 f 가 $0.4 \#/\text{hr}$ 보다 큰 자기폭풍들에 대해서만 앞서와 같은 분석을 반복한 결과 그림 9과 같이 나타났다. 그림 9의 가로축은 그림 7의 경우와 마찬가지로 CME의 영역을 세분해 나타내

며, 세로축은 각 영역과 주상기간이 겹쳐지는 자기폭풍의 개수이다. 발생 빈도 f 가 $0.4\#/hr$ 보다 큰 지자기 폭풍의 경우에도 그 주상기간이 겹쳐지는 영역이 sheath와 CME 앞부분인 경우가 다수(약 71.4%) 임을 알수 있다. 이것은 자기폭풍의 주상 기간 동안 발견된 태양풍 동압력 펄스들이 sheath와 CME에서의 밀도 변화에 기인함을 시사한다.

6. 결론 및 토의

이 논문에서는 지자기폭풍의 주상 기간 동안 발생한 태양풍 동압력 펄스에 대한 통계적 연구를 하였다. 이를 위해 먼저 1997년부터 2001년까지의 5년 동안에 대해 Dst 지수가 $-50nT$ 이하인 지자기 폭풍 111개를 얻었다. 이 111개의 지자기폭풍 주상기간에 대해 지구의 저위도 지역에서 관측된 지자기 수평 성분 H 값을 이용하여 동압력 펄스에 대한 통계를 얻을 수 있었다. 그 결과는 첫째, 동압력 펄스의 지구자기권 충돌에 의한 H의 평균 증가량은 Dst 지수의 최소값과 비례 관계를 보여준다. 또한, 주상기간 동안의 동압력 발생 빈도 f 역시 Dst 지수의 최소값과 비례 관계를 보여준다. 즉, 강한 지자기폭풍 일수록 그 폭풍에 동반되는 동압력 펄스는 평균적으로 더 강하며 더 자주 발생한다. 전체 지자기폭풍 중 약 30%가 주상기간 중 동압력 발생빈도 f 가 $0.4\#/hr$ (즉, 2.5시간당 1회) 이상임을 보여준다. 여기서 2.5시간은 서브스톰의 평균 지속 시간과 대략 같은 값이므로, 지자기폭풍의 주상 기간 동안 태양풍 동압력 펄스가 서브스톰보다 더 자주 발생하는 경우가 30%나 된다는 것을 말해 준다. 이런 경우 동압력 펄스가 서브스톰 만큼 혹은 그 보다 더 지자기폭풍의 역학적 진화에 중요한 영향을 미칠 수도 있다는 것을 시사해 주는 결과이다.

앞에서 찾은 지자기폭풍들 대부분은 충격파를 동반하기 때문에 충격파와 유도체에 대해 조사하고 분류하였다. 충격파와 유도체는 크게 3가지로 CME와 CIR, 그리고 Type II bursts가 있다. 전체 111개의 지자기폭풍 중에서 약 65%인 72개가 CME와 그와 함께 동반된 충격파에 의해 발생된 것으로 나타났다. CIR과 Type II bursts에 의한 경우는 각각 6.3, 7.2%에 불과 하였다. 이 외에는 충격파 존재 여부가 불확실 하거나 존재 하지 않은 것으로 보인다. 또 동압력 발생 빈도 f 가 $0.4\#/hr$ 이상인 지자기폭풍 중에서는 CME가 원인인 경우가 85% 에 달하였다. 무엇보다 중요한 것은 지자기폭풍의 주상이 겹쳐지는 영역이 대부분 충격파 sheath와 CME 앞부분으로서, 빈번한 태양풍 동압력 펄스 발생이 이영역에서의 밀도 변화에 기인함을 추정할 수 있다. 이러한 밀도 변화의 구체적 물리가 무엇인지에 대한 추가 연구가 요구된다.

감사의 글: 이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Berdichevsky, D. B., Szabo, A., Lepping, R. P., Vinas, A. F., & Marini, F. 2000, JGR, 105(A12), 27289
- Cane, H. L. & Richardson, I. G. 2003, JGR, 108(A4), 1156
- Gopalswamy, N., Lara, A., Yashiro, S., Kaiser, M. L., & Howard, R. 2001, JGR, 106(A12), 29207
- Lee, D.-Y. & Lyons, L. R. 2004, JGR, 109, A04201, doi: 10.1029/2003JA010076
- Lee, D.-Y., Lyons, L. R., & Yumoto, K. 2004, JGR, 109, A04202, doi: 10.1029/2003JA010246

Lukianova, R. 2003, *JGR*, 108(A12), 1428

Mullan, D. J. 1984, *ApJS*, 283, 303

Oh, S. Y., Yi, Y., Nah, J.-K., & Cho, K.-S. 2002, *JKAS*, 35, 151

Russell, C. T., Ginskey, M., Petrnec, S., & Le, G. 1992, *GRL*, 19, 1227

Shi, Y., Zesta, E., & Lyons, L. 2003, AGU Fall meeting, SM32B-1150

Yang, Y. -H., Chao, J. K., Dmitriev, A. V., Lin, C.-H., & Ober, D. M. 2003, *JGR*, 108(A3), 1104