

자기폭풍 기간 중 정지궤도 공간에서의 입자 유입률과 Dst 지수 사이의 상관관계

문가희^{1†}, 안병호²

¹경북대학교 천문대기학과, ²경북대학교 과학교육학부

THE RELATIONSHIP BETWEEN PARTICLE INJECTION RATE OBSERVED AT GEOSYNCHRONOUS ORBIT AND DST INDEX DURING GEOMAGNETIC STORMS

Ga-Hee Moon^{1†}, Byung-Ho Ahn²

¹Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University,
Daegu 702-701, Korea

²Department of Earth Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
E-mail: kafemoon@hanmail.net

(Received January 16, 2003; Accepted March 17, 2003)

요 약

자기폭풍(magnetic storm)과 서브스톰(substorm)의 인과관계를 규명하기 위하여 서브스톰 확장기 활동(substorm expansive activity)의 전형적인 지시자로 알려진 정지궤도 위성에서 관측된 양성자 플럭스(proton flux)의 무분산 입자유입률(dispersionless particle injection rate)과 Dst 지수와의 상관관계를 조사하였다. 본 연구에 이용된 자기폭풍은 1996년에서 2000년까지 5년 동안에 일어난 것으로 자기폭풍 기간 중 Dst의 최소값인 Dst_{min} 의 크기에 따라 대규모($-200nT \leq Dst_{min} \leq -100nT$), 중규모($-100nT \leq Dst_{min} \leq -50nT$), 소규모 자기폭풍($-50nT \leq Dst_{min} \leq -30nT$)의 3단계로 구분하였다. 양성자 플럭스는 LANL의 정지궤도 위성에서 관측된 자료 중에서 주로 환전류(ring current)를 구성하는 입자의 에너지에 해당하는 50keV에서 670keV 범위의 6개 에너지 채널의 자료를 이용하였다. 그리고 입자유입은 자정 부근에서 주로 일어나므로 18:00~04:00MLT 구간에서 관측된 자료만을 이용하였다. 한편 내부 자기권으로 유입되는 입자에너지를 추정하기 위하여 양성자 플럭스 비(f_{max}/f_{ave})를 조사하였다. 여기서, f_{ave} 및 f_{max} 는 각각 입자유입이 일어나기 전 후의 양성자 플럭스의 양을 나타낸다. 한편 자기폭풍 기간 동안에 1~2개의 인공위성 관측으로부터 내부 자기권으로 유입되는 총 에너지량을 추정하는 것이 불가능하다는 것이 알려졌다. 그러나 총 에너지 유입량은 적어도 플럭스 비와 유입횟수에 비례할 것이다. 따라서 내부 자기권으로 유입되는 에너지의 양을 간접적으로 추정하기 위해서 이들의 곱으로 정의되는 총 에너지 유입률 지수(total energy injection parameter, TEIP)를 제안하였다. 특히 서브스톰이 자기폭풍의 발달에 기여하는 정도를 알기 위하여 자기폭풍을 두 구간, 즉 주상(main phase)과 회복기(recovery phase)로 나누어 조사하였다. 양성자의 무분산 유입자료와 자기폭풍 기간 중 Dst_{min} 값을 비교해 본 결과 다음과 같은 특성이 확인되었다. 첫째, 주상기간 중 입자들의 평균 유입횟수는 자기폭풍의 크기에 비례하여 증가하는 경향을 나타내며 유입횟수와 Dst_{min} 사이에는 높은 상관관계(0.83)가 있었다. 둘째, 주상기간 중 자기폭풍의 크기가 클수록 플럭스 비(f_{max}/f_{ave})는 대체로 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 75~113keV 에너지 채널에서의 Dst_{min} 값과 플럭스 비의 상관계수는 0.74로서 가장 높았으며 나머지 에너지 채널 역시 비교적 높은 상관관계를 나타냈다. 셋째, 주상기간 중 총 에너지 유입률 지수와 Dst_{min}

[†]corresponding author

사이에 높은 상관관계가 확인되었다. 특히 환전류를 구성하는 주요 입자의 에너지 영역(75~113 keV)에서 가장 높은(0.80) 상관계수를 기록했다. 셋째, 회복기 중에 일어나는 입자들의 유입은 자기폭풍의 지속시간을 연장시키는 경향을 보이며 큰 자기폭풍일수록 현저했다. 주상에서 관측된 이러한 특성은 서브스톰 확장기 활동이 자기폭풍의 발달과 밀접한 관계가 있음을 시사한다.

ABSTRACT

To examine the causal relationship between geomagnetic storm and substorm, we investigate the correlation between dispersionless particle injection rate of proton flux observed from geosynchronous satellites, which is known to be a typical indicator of the substorm expansion activity, and Dst index during magnetic storms. We utilize geomagnetic storms occurred during the period of 1996 ~ 2000 and categorize them into three classes in terms of the minimum value of the Dst index (Dst_{min}); intense ($-200 \text{ nT} \leq Dst_{min} \leq -100 \text{ nT}$), moderate ($-100 \text{ nT} \leq Dst_{min} \leq -50 \text{ nT}$), and small ($-50 \text{ nT} \leq Dst_{min} \leq -30 \text{ nT}$) storms. We use the proton flux of the energy range from 50 keV to 670 keV, the major constituents of the ring current particles, observed from the LANL geosynchronous satellites located within the local time sector from 18:00 MLT to 04:00 MLT. We also examine the flux ratio (f_{max}/f_{ave}) to estimate particle energy injection rate into the inner magnetosphere, with f_{ave} and f_{max} being the flux levels during quiet and onset levels, respectively. The total energy injection rate into the inner magnetosphere can not be estimated from particle measurements by one or two satellites. However, the total energy injection rate should be at least proportional to the flux ratio and the injection frequency. Thus we propose a quantity, "total energy injection parameter (TEIP)", defined by the product of the flux ratio and the injection frequency as an indicator of the injected energy into the inner magnetosphere. To investigate the phase dependence of the substorm contribution to the development of magnetic storm, we examine the correlations during the two intervals, main and recovery phase of storm separately. Several interesting tendencies are noted particularly during the main phase of storm. First, the average particle injection frequency tends to increase with the storm size with the correlation coefficient being 0.83. Second, the flux ratio (f_{max}/f_{ave}) tends to be higher during large storms. The correlation coefficient between Dst_{min} and the flux ratio is generally high, for example, 0.74 for the 75~113 keV energy channel. Third, it is also worth mentioning that there is a high correlation between the TEIP and Dst_{min} with the highest coefficient (0.80) being recorded for the energy channel of 75~113 keV, the typical particle energies of the ring current belt. Fourth, the particle injection during the recovery phase tends to make the storms longer. It is particularly the case for intense storms. These characteristics observed during the main phase of the magnetic storm indicate that substorm expansion activity is closely associated with the development

of magnetic storm.

Key words: Dst index, magnetic storm, dispersionless particle injection

1. 서론

지구 자기장의 교란인 서브스톰과 자기폭풍은 태양풍과 자기권의 상호작용의 결과이며 이들 사이의 인과관계를 규명하려는 노력이 있었다(e.g. Kamide et al. 1998). 이러한 자기폭풍과 서브스톰의 관계를 보는 견해에는 두 가지가 있다. 그 중 하나는 자기폭풍은 서브스톰의 확장기 활동을 통한 에너지의 축적으로 형성된다는 이론(Akasofu 1968)이며 다른 하나는 자기폭풍과 서브스톰은 근본적으로 별개이며 행성간 자기장(Bz)이 장시간에 걸쳐 남쪽을 향할 때 야기되는 자기권 대류에 의한 에너지의 축적이라는 생각이다(Gonzalez et al. 1994, McPherron 1997).

Reeves & Handerson(2001)은 자기폭풍이 진행중인 경우와 그렇지 않은 경우에 정지궤도 위성의 입자자료와 ENA(Energetic Neutral Atom) 자료를 비교해 본 결과 입자유입의 양상에 근본적인 차이가 있다는 점을 보고한 바 있다. 이러한 연구 결과로부터 그들은 보다 강력한 대류전기장이 입자들을 유입시켜 자기폭풍을 야기한다고 주장했다.

한편, 서브스톰 확장기 개시의 전형적인 지시자로 지구 자기권 꼬리 근처에서의 고에너지 입자 플럭스의 갑작스런 증가를 들 수 있다(Deforest & McIlwain 1971, Sauvaud & Winckler 1980). 그림 1에서 보는 바와 같이 1분 이내에 입자유입의 갑작스런 증가가 모든 에너지 채널에서 동시에 일어날 때를 무분산 입자유입(dispersionless particle injection)이라 부르며 서브스톰 확장기 활동이 그 원인인 것으로 알려져 있다(Reeves & Handerson 2001). 그리고 이러한 현상은 대체로 자정 이전(premidnight) 영역에서 관측된다(Lopez et al. 1990).

Ahn et al.(2002)은 Dst 지수의 세계시(UT)에 따른 변화를 분석함으로써 부분 환전류(partial ring current)와 서브스톰 썬기전류(substorm wedge current)는 주로 자기폭풍의 주상(main phase) 기간 중에 발달한다는 사실을 확인하였다. 이것은 자기폭풍의 발달에 서브스톰 확장기 활동이 밀접하게 관련되어 있음을 의미한다. 또한, 자기폭풍의 주상기간 동안 서브스톰 활동이 회복기보다 훨씬 강하다는 사실도 확인하였다.

본 연구에서는 이러한 Ahn et al.(2002)의 연구결과를 정지궤도 위성의 고에너지 입자자료를 이용하여 보다 물리적인 측면에서 검증해 보고자 한다. 먼저 자기폭풍 기간 중 서브스톰의 기여도를 알아보기 위하여 Ahn et al.(2002)의 연구에서처럼 자기폭풍을 주상과 회복기로 구분하였다. 그리고 각 기간 중 정지궤도 위성에서 관측된 무분산 입자의 유입 횟수와 자기폭풍의 크기를 규정하는 Dst 지수 사이의 상관관계를 조사하였다. 그리고 입자유입이 일어나는 동안 지구 자기권 내부로 유입되는 에너지량을 추정하기 위하여 서브스톰 개시(onset) 이전 3시간 동안의 플럭스의 평균값을 f_{ave} 라 하고, 개시이후 플럭스가 최대가 되었을 때의 값을 f_{max} 라 했을 때, 이들 사이의 플럭스 비(f_{max}/f_{ave})를 구하였다. 비록 고에너지 입자의 유입과 자기폭풍 발달사이의 정량적인 관계를 수립하기는 어렵지만(Kamide et al. 1998) 내부 자기권으로 유입된 총 에너지량은 적어도 플럭스 비와 유입횟수에 비례할 것이다. 따라서 본 연구에서는 자기폭풍 기간 중 환전류에 기여하는 총 에너지의 양을 유추하기 위해서 플럭스 비×유입횟수로 정의되는 “총 에너지 유입률 지수(total energy injection parameter, TEIP)”라는 새로운 변수를 제안하였다. 그리고 자기폭풍 회복기 동안의 물리적 과정에 대한 정보를

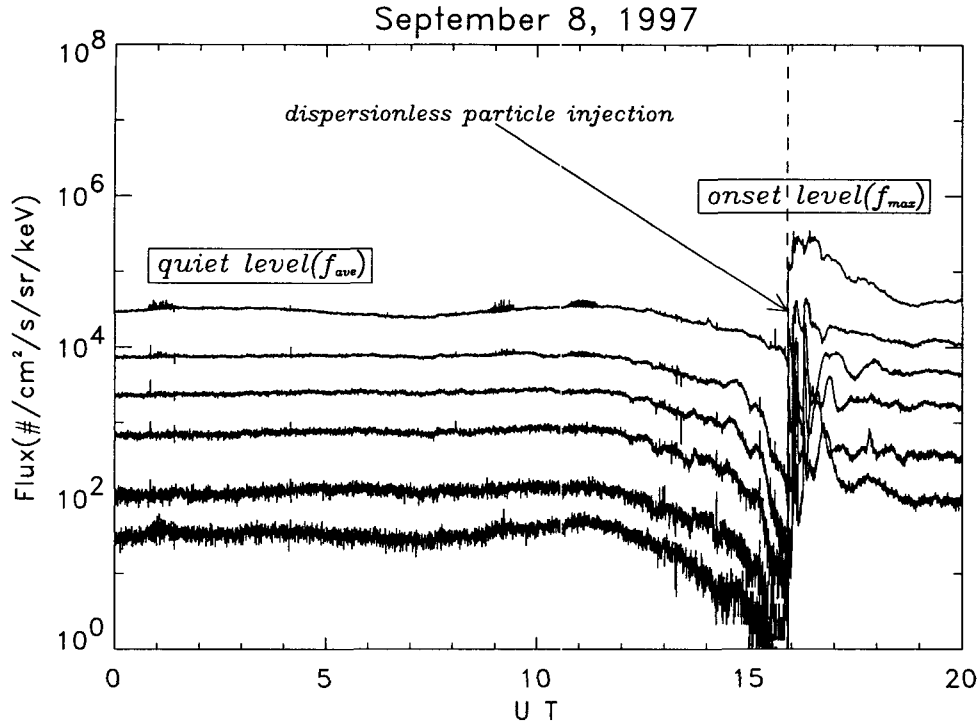


그림 1. 6개 에너지 채널에서의 부분산 입자유입을 보여주는 양성자 플럭스 자료의 예이다. 또한, 입자유입 전 플럭스의 변화가 없는 수준(quiet level)과 개시 수준(onset level)을 함께 나타냈다.

얻기 위해서 회복기에서의 지속시간과 입자유입 사이의 상관관계도 조사하였다.

2. 자료

2.1 양성자 플럭스 자료

본 연구에 사용된 양성자 플럭스 자료는 Los Alamos 국립 연구소(LANL)가 운용하는 정지궤도 위성에서 관측된 것이다. 현재 운용되고 있는 위성들은 1989-046, 1990-095, 1991-080, 1994-084, LANL-97A이다. 1994-084 위성의 경도는 약 104°E 이므로 이 위성이 위치하는 곳의 지방시(Local Time)는 세계시에 6시간 54분을 더하여 얻는다. 이 위성들은 50 keV~수십 MeV에 걸친 에너지 영역을 측정할 수 있는 다중채널로 구성된 SOPA(Synchronous Orbit Particle Analyzer)라는 입자 감지기를 탑재하고 있다(Belian et al. 1992). 물론 SOPA는 전자와 양성자 모두 측정할 수 있지만 자기 폭풍 기간 환전류에 기여하는 입자들은 주로 양성자이므로 본 연구에서는 양성자 에너지 채널만을 이용하였다. 특히 환전류 입자의 평균 에너지는 20~200 keV 정도이므로 이 중 50~75 keV, 75~113 keV, 113~170 keV, 170~250 keV, 250~400 keV, 그리고 400~670 keV 영역에 해당하는 6개 에너지 채널에서 측정된 양성자 플럭스만을 이용하였다.

1분 이내 모든 에너지 채널에서 동시에 플럭스가 증가하는 무분산 입자유입은 하루에도 평균 수 차례 발생하지만 본 연구에서는 자기폭풍과의 상관관계를 조사하기 위하여 자기폭풍 기간 중에 발생한 무분산 입자유입만을 조사하였다. 물론 무분산 입자유입이 반드시 자기폭풍의 발달로 이어지지 않을 수도 있다.

Liou et al.(2001)은 무분산 입자유입은 대체로 20:00~01:00MLT에서 일어나고 22:00MLT에서 최대값을 나타낸다고 하였다. 또 Friedel et al.(1996)에 의하면 입자유입은 자정을 중심으로 대체로 ± 5 시간 사이에 일어나며 입자유입의 약 83%가 18:00~04:00MLT 구간에서 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이 범위에서 관측된 무분산 입자유입 자료를 이용하였다. 그리고 주상에서의 Dst 지수의 최소값(Dst_{min})과 플럭스 비(f_{max}/f_{ave})와의 상관관계를 구할 때는 5개 위성 중 관측자료가 가장 풍부한 1994-084 위성의 자료를 이용하였다.

한편, Kamide & McIlwain(1974)은 ATS 5 위성과 AE 지수를 이용하여 서브스톰과 입자유입 사이에 일대일 관계(one-to-one correspondence)가 있음을 밝혔다. 또한, Borovsky et al.(1993) 역시 1982~1983년 사이 정지궤도 위성에서의 입자유입의 확인으로 얻어진 한해 동안의 서브스톰 발생률이 Kamide(1982)가 AL 지수를 이용하여 얻어진 서브스톰의 수와 비슷함을 확인하였다. 본 연구에서도 2000년 한 해 동안에 발생한 자기폭풍의 기간 중 정지궤도 위성에서 관측한 입자유입과 서브스톰의 일대일 관계를 조사해 보니 104회의 입자유입에 대해 98회의 서브스톰이 확인되어 95.2%라는 좋은 결과가 나왔다. 한편, 하루 이상 진행되는 회복기 동안 여러 위성의 관측으로도 무분산 입자유입 자료를 확인하기 어려운 시간대도 있다. 예를 들면 1998년 10월 3일의 자기폭풍의 경우 회복기는 04:00UT에 시작되어 10월 4일 21:00UT에 끝난다. 이 기간 중 저녁 영역에 위치한 위성들이 관측 가능한 시간대가 각각 1991-080 위성은 18:00~04:00UT, LANL-97A 위성은 13:00~23:00UT, 그리고 1994-084 위성은 11:00~21:00UT이었다. 따라서 04:00~11:00UT 사이의 7시간 자료는 얻을 수 없으므로 이 때 일어났을 것으로 예상되는 무분산 입자유입은 AL 지수를 참고하여 결정하였다. 또한, 짧은 시간에 연속적으로 나타나는 입자유입일 경우 각각을 확인하기 어려울 때는 위성의 전자 플럭스 자료와 AL 지수를 함께 고려하였다. 그 결과 본 연구에 이용된 무분산 입자유입 횟수는 주상과 회복기에서 각각 96 및 90회가 확인되었다.

2.2 Dst 지수 자료

자기폭풍 기간 중 Dst 지수의 최소값을 Dst_{min} 이라 정의하고 이를 크기에 따라 대규모($-200nT \leq Dst_{min} \leq -100nT$), 중규모($-100nT \leq Dst_{min} \leq -50nT$), 소규모($-50nT \leq Dst_{min} \leq -30nT$)의 3단계로 구분하였다(Tsurutani & Gonzalez 1997). 그리고 잡음 수준(noise level)의 기여도를 최소화하기 위하여 |Dst|의 값이 30nT 보다 작은 자기폭풍은 본 연구에 포함시키지 않았다. 이렇게 해서 1996년에서 2000년까지 5년간에 걸쳐 발생한 10개의 대규모, 21개의 중규모, 그리고 8개의 소규모 자기폭풍 등 총 39개의 자기폭풍을 조사하였다. 특히 본 연구에서는 자기폭풍의 발달에 서브스톰이 기여하는 바를 알아보기 위하여 자기폭풍을 주상과 회복기 두 기간으로 구분한 후 무분산 입자유입과 상관관계를 각각 조사하였다. 여기서, 주상이란 Dst 지수가 $-15nT$ 보다 작아지기 시작하여 최소값에 이르는 기간을, 그리고 회복기란 최소값에서부터 Dst 지수가 다시 $-15nT$ 까지 회복되는 기간으로 설정하였다.

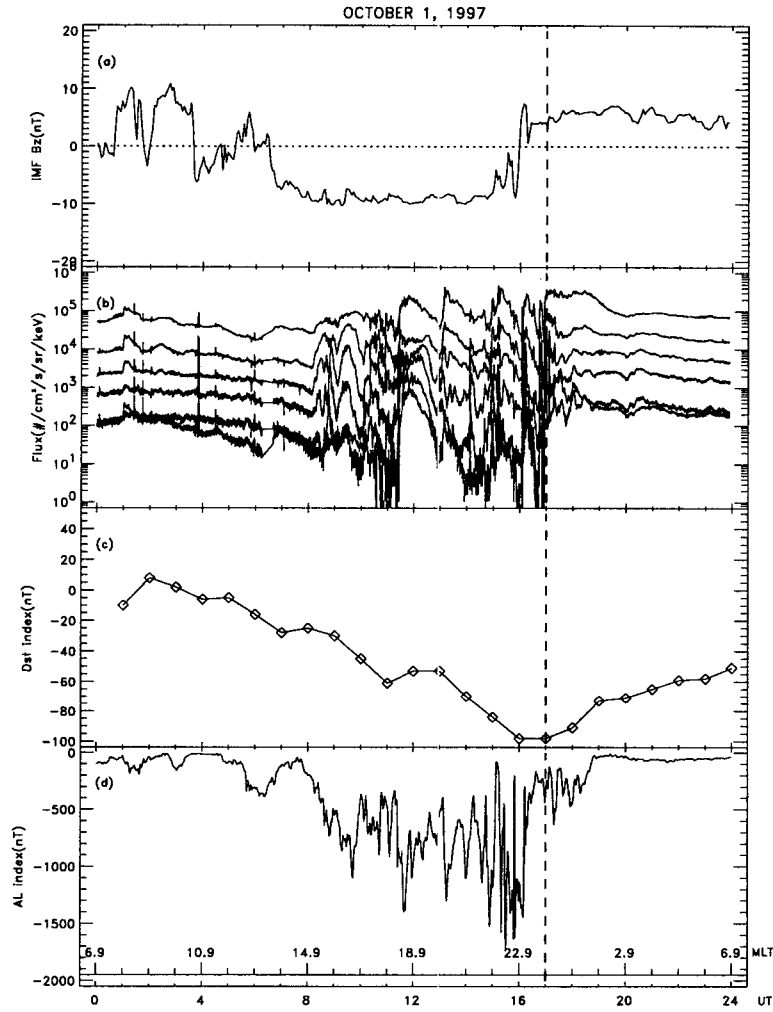


그림 2. 지자기 변화가 심한 날의 (a) IMF 남북성분(Bz), (b) 양성자 플럭스, (c) Dst 지수 및 (d) AL 지수의 시간에 따른 변화의 예. 횡축에 세계시와 지방시를 함께 나타내었다.

3. 연구결과 및 해석

3.1 주상과 회복기에서의 입자유입 횟수와 Dst_{rain} 값과의 관계

그림 2는 1997년 10월 1일의 행성간 자기장의 남북 성분(Bz), 양성자 플럭스, Dst 및 AL 지수의 변화를 보여주고 있다. 그림의 횡축은 시간으로 세계시(UT)와 지방시(MLT)를 함께 나타내었다. 그림 2a에서 보는 바와 같이 06:30UT 이후부터 행성간 자기장이 본격적으로 남쪽으로 향함을

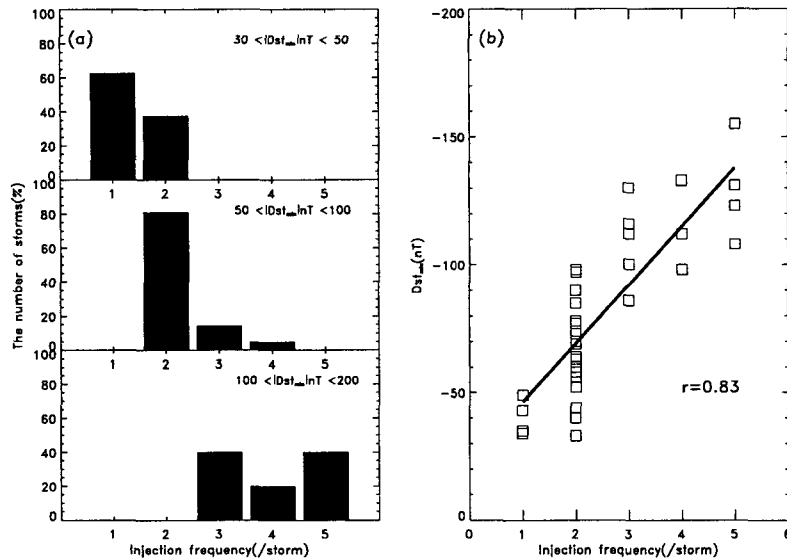


그림 3. (a) 주상이 진행되는 동안 자기폭풍의 규모에 따른 입자유입 횟수와 자기폭풍 발생빈도 분포. 여기서, 횡축은 유입횟수를, 그리고 종축은 표준화시킨 자기폭풍의 백분율을 나타낸다. (b) 주상기간 동안 자기폭풍의 규모와 입자유입과의 상관관계. r은 상관계수를 나타낸다.

알 수 있다. 한편, 그림 2b에서 약 08:00UT까지는 양성자 플럭스의 변화가 거의 없지만 그 이후 17:00UT까지 최소한 3회 즉 11:30, 16:00, 17:00UT 경에 무분산 입자유입이 관측되었다. Dst 지수(그림 2c)는 04:00UT부터 서서히 감소하여 17:00UT에서 -98nT로 최소값을 기록했다. 그리고 AL 지수(그림 2d)는 자기폭풍의 주상동안 10회 이상 -1000nT를 기록했으며 최소값은 -1712nT이었다. 그러나 회복기에는 입자유입이 거의 없으며 AL 지수 값 역시 큰 변화를 나타내지 않았다.

자기폭풍 기간 중 주상과 회복기에서의 입자유입의 기여를 알아보기 위하여 무분산 입자유입의 횟수를 조사하였다. 예를 들면, 1997년 8월 3일에 일어난 Dst 최소값인 Dst_{min}이 -49nT인 소규모 자기폭풍의 경우 주상에서의 입자유입 횟수는 1회였으나 1999년 1월 13일 -112nT의 대규모 자기폭풍의 경우 3회의 무분산 입자유입이 기록되었다. 이러한 방법으로 주상기간 동안 무분산 입자유입 횟수와 자기폭풍 발생횟수사이의 상관관계를 조사하여 그림 3a에 나타내었다. 여기서, 자기폭풍의 규모에 따라 일반적으로 발생빈도가 다르므로 자기폭풍 발생빈도를 백분율로 표준화하였다. 예를 들면 단 1회의 입자유입이 관측된 경우가 관측된 소규모 자기폭풍의 62.5%를 차지한다는 것을 의미한다. 나머지 37.5%의 경우 2회의 입자유입이 관측되었다. 반면 자기폭풍의 규모가 커질수록 유입 횟수도 점차 증가하는 경향을 나타낸다. 대규모 자기폭풍이 되기 위해선 보다 많은 입자유입이 필요하다는 것을 의미한다. 입자유입 횟수는 소규모, 중규모, 대규모 자기폭풍의 경우 평균적으로 1.4, 2.2, 그리고 4.0회로 기록되었다. 주상기간 중 입자유입 횟수와 Dst_{min} 사이에는 비교적 높은 상관관계(0.83)를 보여주고 있다(그림 3b).

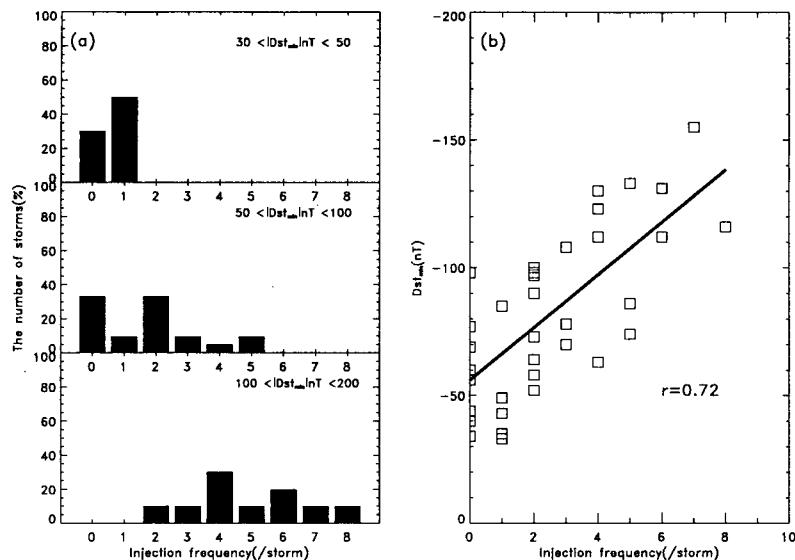


그림 4. (a) 회복기 동안 자기폭풍의 규모에 따른 입자유입 횟수와 자기폭풍 발생빈도 분포. 여기서, 횡축은 유입횟수를, 그리고 종축은 표준화시킨 자기폭풍의 백분율을 나타낸다. (b) 회복기 동안 자기폭풍의 규모와 입자유입과의 상관관계. r은 상관계수를 나타낸다.

주상에서의 경우와 마찬가지로 회복기 동안에 일어나는 무분산 입자유입 횟수와 Dst_{min} 사이의 상관관계도 조사하였다. 자기폭풍의 규모에 따른 평균 유입횟수는 주상의 경우와 비슷한 정도인 0.6, 1.7, 그리고 4.9회로 나타났다. 하지만 주상의 평균 지속시간이 10.9시간이고 회복기의 평균 지속시간은 50.3시간으로 주상에 비해서 무려 4.6배나 길기 때문에 평균 유입횟수만을 단순 비교하는 것은 의미가 없다(Ahn et al. 2002). 그래서 소규모, 중규모, 대규모 자기폭풍의 경우 10시간당 평균 입자유입 횟수를 구하였으며, 그 결과 주상일 때는 각각 1.3, 2.0, 및 3.7회 그리고 회복기의 경우는 0.1, 0.3, 및 1회 정도로 나타났다. 즉, 대규모 자기폭풍의 경우 동일시간 동안에 유입되는 평균 입자유입 횟수는 주상의 경우 회복기보다 약 3.7배나 많다는 것을 뜻한다. 다시 말하면, 동일한 시간동안 회복기보다 주상에서 입자유입이 더 자주 발생한다는 것을 의미하며 이것은 주상에서의 입자유입이 자기폭풍의 발달과 밀접한 관계가 있음을 시사한다. 또한, 회복기의 경우 그림 4a에서 보여 주는 것처럼 소규모 자기폭풍인 경우는 유입횟수가 없거나 고작 한 번 뿐이지만 규모가 큰 자기폭풍의 경우는 다양한 분포의 유입횟수가 기록되었다. 그림 4b에서 보여주는 바와 같이 상관계수는 0.72이며 주상 보다는 상관관계가 다소 낮았다.

한편, 주상과 회복기 동안 입자유입 횟수와 Dst_{min} 사이의 관계식을 조사해 본 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$Dst_{min}(\text{nT}) = -22.8 \times (\text{주상기간 유입횟수}) - 23.6 \tag{1}$$

$$Dst_{min}(\text{nT}) = -10.3 \times (\text{회복기 유입횟수}) - 56.1 \tag{2}$$

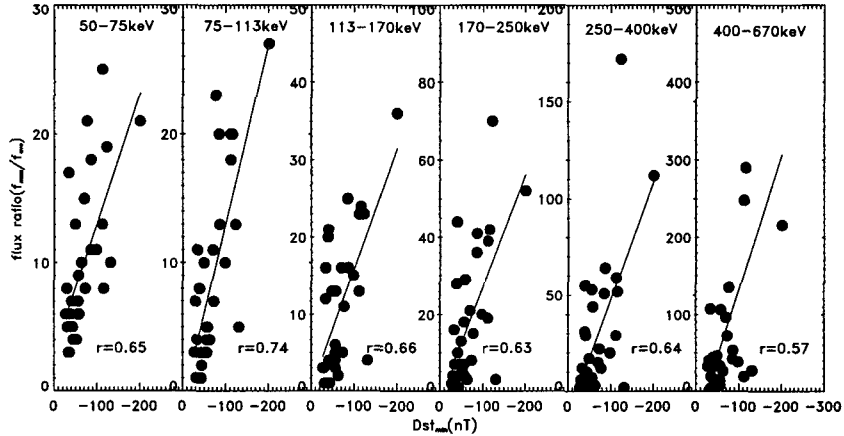


그림 5. 자기폭풍 주상기간 중 Dst의 최소값(Dst_{min})과 6개의 양성자 에너지 채널에서의 플럭스의 비와의 상관관계. 횡축은 자기폭풍의 크기를 나타내며 종축은 플럭스 비(f_{max}/f_{ave})를 나타낸다.

식 (1) 및 (2)의 기울기를 살펴보면 유입횟수가 같아도 주상에서의 입자유입은 회복기의 경우보다 2배 이상 $|Dst_{min}|$ 증가에 기여한다는 것을 알 수 있다. 즉, 자기폭풍의 발달에 서브스톰 확장기 활동이 중요함을 시사한다. 이는 부분 환전류 및 서브스톰 쇄기 전류의 발생이 주상에서 빈번하다는 Ahn et al.(2002)의 연구와 잘 부합된다.

3.2 주상에서의 Dst_{min} 과 총 에너지 유입량과의 관계

Nakamura et al.(1998)은 SAMPEX 위성의 전자 플럭스 자료를 이용하여 최대 플럭스/최소 플럭스로 정의되는 플럭스의 비가 자기폭풍의 강도에 양(+)의 상관관계가 있음을 보였다. 이것은 자기폭풍 시 플럭스의 증가가 내부 자기권으로의 유입에너지의 증가와 밀접한 관계가 있음을 의미한다. 따라서 서브스톰 확장기 활동이 자기폭풍 발달의 원인이 된다는 가정 하에 내부 자기권으로 유입되는 입자 에너지를 추정하기 위하여 양성자 플럭스 비(f_{max}/f_{ave})를 조사하였다. 그림 1에서 보여주듯이 무분산 입자유입이 일어나기 이전의 플럭스 수준(quiet level; f_{ave})과 이후의 플럭스 수준(onset level; f_{max})의 차이가 나므로 이를 이용하여 플럭스의 비를 계산하였다. 본 연구에서는 5개의 위성 중 자료가 가장 풍부한 1994-084 위성을 이용하였다. 그 중에서 주상기간에 서브스톰 개시 전후의 플럭스 비를 정량적으로 확인할 수 있는 33개의 자기폭풍을 본 연구에 이용하였다.

그림 5는 1994-084 위성의 6개의 양성자 에너지 채널에서 주상기간 동안 Dst 지수의 최소값과 플럭스 비와의 상관관계를 나타낸 것이다. 400~670 keV 에너지 채널을 제외한 5개의 경우 0.6보다 높은 상관관계가 기록되었다. 특히 75~113 keV 에너지 채널의 경우 0.74를 기록했다. 환전류를 구성하는 입자의 주 에너지 영역인 75~113 keV 채널에서 가장 높은 상관관계가 나타났다는 점이 흥미롭다. 또한, 입자들의 에너지가 클수록 플럭스 비(f_{max}/f_{ave}) 역시 커지는 것으로 조사되었다. 즉 50~75 keV 영역에서의 플럭스 비의 평균값은 9.7이지만 250~400 keV에서는 27.5, 400~670 keV의 영역에서는 73.4로 나타났다.

정지궤도 위성에서 관측된 입자유입이 자기폭풍의 발달에 어떻게 기여하는지를 정량적으로 규명

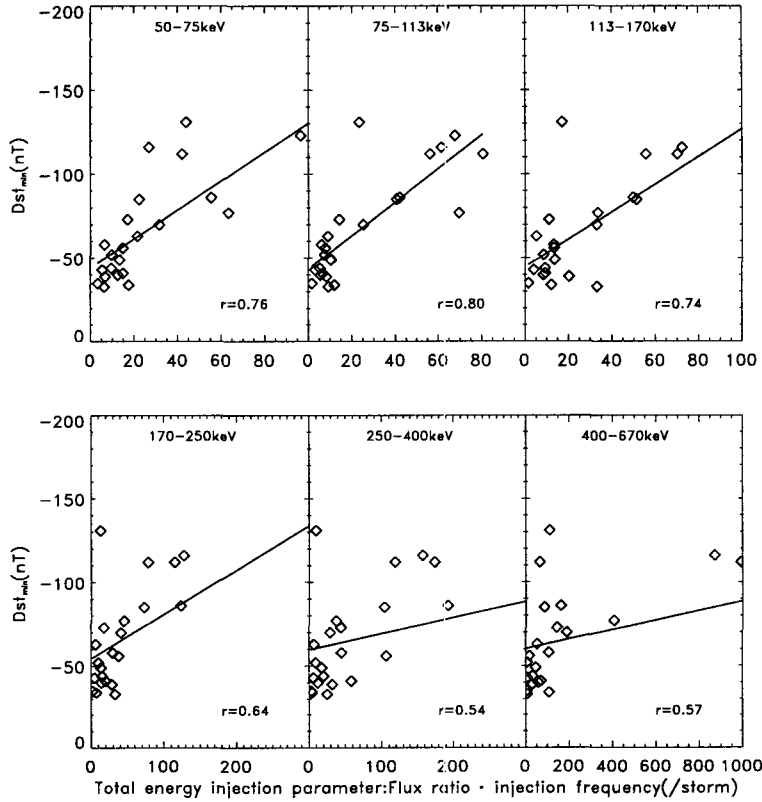


그림 6. 자기폭풍 주상기간 중 6개 에너지 채널에서의 총 에너지 유입률 지수와 Dst_{min} 과의 상관관계. \diamond 는 Dst_{min} 으로 나타낸 각 자기폭풍을 나타낸다.

하기란 비록 쉬운 일은 아니지만(Kamide et al. 1998) 자기폭풍의 발달은 적어도 플럭스 비(f_{max}/f_{ave})와 입자유입횟수에 비례할 것으로 예상된다. 한편, 자기폭풍 기간 중 주상에서의 지속시간과 Dst 지수의 최소값(Dst_{min})과의 상관관계를 조사해 본 결과 평균 0.51이라는 상관계수를 기록했다. 또한, 그림 3a에서 살펴 본 바와 같이 대규모 자기폭풍이 되기 위해선 더 많은 입자유입을 필요로 한다. 이는 대규모 자기폭풍의 경우 자기폭풍의 크기를 결정하는 것은 에너지 유입의 지속시간 뿐 아니라 유입강도 모두가 중요하다고 제안한 Yokoyama & Kamide(1997)의 연구와 대체로 일치한다. 따라서 자기폭풍이 일어날 때, 환전류로 유입되는 총 에너지 양을 추정하기 위하여 플럭스 비×유입횟수로 정의되는 “총 에너지 유입률 지수(total energy injection parameter, TEIP)”라는 물리량을 제안하였다. 즉, 다량의 에너지 유입을 위해선 높은 플럭스의 비(f_{max}/f_{ave})와 빈번한 입자유입이 요구될 것이다.

그림 6은 주상기간 동안 6개의 에너지 채널에서의 총 에너지 유입률 지수와 Dst_{min} 과의 관계를

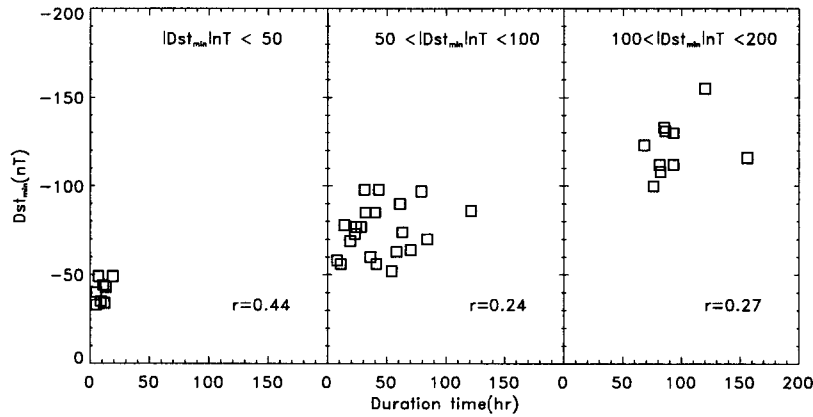


그림 7. 회복기 동안 규모별 자기폭풍의 크기와 지속시간과의 관계. 횡축은 회복기의 지속시간을 종축은 Dst_{min} 으로 표시한 자기폭풍의 크기를 나타낸다.

나타낸 것이다. 여기서, \diamond 는 각각의 자기폭풍을 나타내며 종축의 Dst_{min} 은 각 자기폭풍의 Dst의 최소값을 나타낸다. 단 플럭스 비와 유입횟수 자료가 모두 있는 23개의 자기폭풍에 대해서만 조사하였다. 자기폭풍의 주상동안 6개 에너지 채널에서의 총 에너지 유입률 지수와 Dst_{min} 과의 상관계수는 각각 0.76, 0.80, 0.74, 0.64, 0.54, 0.57로 나타났다. 그 중에서 환전류를 주로 구성하는 입자의 에너지 영역(75~113 keV)에서 가장 높은 상관계수를 기록했다는 점이 특이하다.

3.3 회복기의 지속시간과 입자유입과의 관계

주상기간 동안 자기폭풍의 지속시간과 Dst_{min} 값 사이의 상관관계를 구한 결과 소규모, 중규모, 대규모 자기폭풍의 경우 상관계수는 각각 0.63, 0.14 및 0.37로 나타났다. 한편, 회복기에서의 상관관계도 조사하였다. 그림 7이 보여주는 바와 같이 소규모 자기폭풍의 경우 지속시간은 모두 20시간 이내였지만 중규모 자기폭풍의 경우 지속시간은 8~121시간까지 넓은 범위에 걸쳐 나타났다. 회복기 동안 규모별 자기폭풍의 평균 지속시간은 10.1, 44.8 및 94.0시간이었다. 그리고 규모별 자기폭풍의 지속시간과 Dst_{min} 사이에는 각각 0.44, 0.24, 0.27로 정도로 낮은 상관관계를 나타냈다.

자기폭풍의 회복기에서는 주로 전하교환(charge exchange)으로 인해 환전류대가 소멸되는 과정이다. 그런데 그림 4(a)에서 살펴 본 것처럼 회복기에서도 입자유입이 일어나므로 환전류대의 소멸 속도를 지연시킬 수 있을 것이다. 그래서 비슷한 규모의 자기폭풍일 경우 지속시간을 결정하는 원인을 규명하기 위하여 회복기에서의 자기폭풍의 지속시간과 입자유입의 상관관계를 조사해 보았다. 그림 8은 동일 규모의 자기폭풍일 경우 회복기에서의 유입횟수와 지속시간과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 소규모 자기폭풍의 경우에는 뚜렷하게 두드러진 특징이 보이지 않으나 자기폭풍의 규모가 클수록 유입횟수와 지속시간 사이에 높은 상관관계가 있음을 보여준다. 규모별 자기폭풍의 입자유입 횟수와 지속시간과의 상관계수는 각각 0.14, 0.64, 0.77로 나타났다. 이는 회복기에서의 입자유입은 대체로 자기폭풍의 지속시간을 길게 하는 효과가 있음을 의미하며 자기폭풍의 크기가 클수록 그 효과는 더 크게 나타나는 경향이 있다.

넷째, 회복기 동안 규모별 자기폭풍의 지속시간과 Dst_{min} 사이에는 상관관계가 관측되지 않았다. 그러나 동일 규모의 자기폭풍일 때 유입횟수와 지속시간과의 상관관계는 소규모 자기폭풍의 경우는 별 두드러진 특징을 보이지 않으나 규모가 증가할수록 유입횟수와 지속시간 사이에 높은 상관관계가 나타났다. 이는 회복기의 입자유입은 대체로 자기폭풍의 지속시간을 길게 하는 효과가 있다는 것을 의미한다. 또한, 자기폭풍의 규모가 클수록 이러한 경향은 더 크게 나타났다. 이것은 비록 회복기라 하더라도 추가적인 입자유입으로 인하여 환전류대의 소멸이 지연된다는 뜻이다.

본 연구를 통하여 자기폭풍 기간 동안의 빈번한 입자유입, 즉 서브스톰의 확장기 활동을 통한 에너지 축적은 자기폭풍의 발달과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었으며 정지궤도 공간에서의 입자유입과 Dst_{min} 과의 높은 상관관계는 자기폭풍의 예측 연구에도 기여할 것으로 생각된다.

감사의 글: 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-00117-0) 지원으로 수행되었음. 본 연구를 위해 Dst 지수와 AL 지수는 일본 교토대학 부설 WDC-C2에 의해 제공되었으며 LANL 양성자 자료 이용에 적극적인 도움을 주신 Los Alamos 국립 연구소의 G. D. Reeves 박사께 감사드린다.

참고문헌

- Ahn, B.-H., Moon, G. H., Sun, W., Akasofu, S.-I., Chen, G. X., & Park, Y. D. 2002, JGR, in press
- Akasofu, S.-I. 1968, Polar and Magnetospheric Substorms (Dordrecht-Holland: D. Reidel, Publ. Co.)
- Belian, R. D., Gislis, G. R., Cayton, T. E., & Christensen, R. A. 1992, JGR, 16, 897
- Borovsky, J. E., Robert, J. N., & Belian, R. D. 1993, JGR, 98, 3807
- Deforest, S. E., & McIlwain, C. E. 1971, JGR, 76, 3587
- Friedel, R. H. W., Korth, A., & Kremser, G. 1996, JGR, 137, 13137
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. 1994, JGR, 99, 5771
- Kamide, Y. 1982, GRL, 9, 1175
- Kamide, Y., & McIlwain, C. E. 1974, JGR, 79, 4787
- Kamide, Y., Baumjohann, W., Daglis, I. A., Gonzales, W. D., Grande, M., Joselyn, J. A., McPherron, R. L., Phillips, J. L., Reeves, D. G. D., Rostoker, G., Sharma, A. S., Singer, H. J., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. 1998, JGR, 103, 17705
- Liou, K., Meng, C.-I., Newell, P. T., & Lui, A. T. Y. 2001, JGR, 106, 5873
- Lopez, R. E., Sibeck, D. G., McEntire, R. W., & Krimigis, S. M. 1990, JGR, 95, 109
- McPherron, R. L. 1997, in Magnetic Storms, Geophys. Monogr. Ser. vol.98, eds. B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, Y. Kamide, & J. K. Arballo (Washington, DC: AGU), pp.131-148
- Nakamura, R., Kamei, K., Kamide, Y., Baker, D. N., Blake, J. B., & Looper, M. 1998, JGR, 103, 26261
- Reeves, G. D., & Handerson, M. G. 2001, JGR, 106, 5833
- Sauvaud, J. A., & Winckler, J. R. 1980, JGR, 85, 2043

Tsurutani, B. T., & Gonzalez, W. D. 1997, in *Magnetic Storms*, Geophys. Monogr. Ser. vol.98, eds
B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, Y. Kamide, & J. K. Arballo (Washington, DC: AGU)
pp.77-90

Yokoyama, N., & Kamide, Y. 1997, *JGR*, 102, 14215