

자기폭풍 기간 동안의 월별 누적 오로라 제트전류 지수, Dst 지수 및 행성간 전기장 사이의 상관관계

박윤경^{1†}, 안병호², 문가희³
¹경북대학교 천문대기과학과
²경북대학교 사범대학 과학교육학부
³경북여자고등학교

CORRELATION BETWEEN MONTHLY CUMULATIVE AURORAL ELECTROJET INDICES, DST INDEX AND INTERPLANETARY ELECTRIC FIELD DURING MAGNETIC STORMS

Yoon-Kyung Park^{1†}, Byung-Ho Ahn², and Ga-Hee Moon³

¹Dept. of Astronomy and Atmospheric Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

²Dept. of Earth Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

³Gyungbuk girls' high school, Daegu 700-803, Korea

E-mail: parkyoonkyung@hanmail.net

(Received August 15, 2005; Accepted November 20, 2005)

요 약

자기폭풍 기간 중에는 서브스톰이 빈번히 발생한다. 그리고 서브스톰이 진행될 때 극지방에는 오로라 제트 전류가 발생하며, 이는 AU 및 AL 지수로 그 강도를 규정할 수 있다. 따라서 AU 및 AL 지수와 자기폭풍의 정도를 나타내는 Dst 지수와의 상관관계를 구해봄으로써 서브스톰이 자기폭풍의 형성에 어떻게 기여하는지 조사할 수 있다. 이를 위하여 월별 누적 AU 지수, 월별 누적 |AL| 지수 값을 구한 뒤, 월별 누적 |Dst| 지수와의 상관관계를 구하였다. 그 결과 월별 누적 |AL| 지수와 월별 누적 |Dst| 지수의 상관관계는 0.60으로 월별 누적 AU 지수와 월별 누적 |Dst| 지수의 상관관계 0.28보다 비교적 높게 나타났다. 이는 서브스톰이 자기폭풍의 발달에 기여하고 있음을 의미한다. 한편 IMF가 남쪽을 향할 때 자기권에는 강력한 대류가 형성되어 하전입자를 내부 자기권으로 가속시키므로 자기폭풍을 야기한다는 견해가 있다. 대류를 야기하는 행성간 전기장은 $\vec{E} = -\vec{V}$ (태양풍 속도) $\times \vec{B}_Z$ (GSM에서 IMF의 Z축 성분)으로 주어지며, 이로부터 월별 누적 행성간 전기장과 월별 누적 Dst 지수 값을 비교해 봄으로써 행성간 전기장의 강화로 인한 자기권 대류가 자기폭풍 형성에 어느 정도 기여하는지를 조사할 수 있다. 여기서 Dst 지수는 태양풍에 의한 동압을 고려한 값이며, 월별 누적 행성간 전기장은 행성간 전기장이 양일 때와 음일 때를 구분한 뒤 월별 누적 Dst 지수와의 상관관계를 알아보았다. 그 결과 행성간 전기장이 음의 값을 나타낼 때 구한 월별 누적 행성간 전기장과 월별 누적 Dst 지수와의 상관관계는 0.83이고, 양일 때 월별 누적 행성간 전기장과 월별 누적 Dst 지수와의 상관관계는 0.39로 나타났다. 이것은 IMF가 남쪽으로 향할 때 발생하는 자기권 대류의 강화 역시 자기폭풍의 발달에 중요한 역할을 하고 있음을 보여준다.

ABSTRACT

Magnetospheric substorms occur frequently during magnetic storms, suggesting that the two phenomena are closely associated. We can investigate the relation between

[†]corresponding author

magnetospheric substorms and magnetic storms by examining the correlation between AE and Dst indices. For this purpose, we calculated the monthly cumulative AU, $|AL|$ and $|Dst|$ indices. The correlation coefficient between the monthly cumulative $|AL|$ and $|Dst|$ index is found to be 0.60, while that between monthly cumulative AU and $|Dst|$ index is 0.28. This result indicates that substorms seem to contribute to the development of magnetic storms. On the other hand, it has been reported that the interplanetary electric field associated with southward IMF intensifies the magnetospheric convection, which injects charged particles into the inner magnetosphere, thus developing the ring current. To evaluate the contribution of the interplanetary electric field to the development of the storm time ring current belt, we compared the monthly cumulative interplanetary electric field and the monthly cumulative Dst index. The correlation coefficient between the two cumulative indices is 0.83 for southward IMF and 0.39 for northward IMF. It indicates that magnetospheric convection induced by southward IMF is also important in developing magnetic storms. Therefore, both magnetospheric substorm and enhanced magnetospheric convection seem to contribute to the buildup of magnetic storm.

Key words: magnetic storm, magnetospheric substorm, magnetospheric convection

1. 서 론

자기폭풍 기간 중에 서브스톰이 빈번히 발생하며 이 두 현상은 모두 태양풍과 지구 자기권의 상호작용의 결과로 이들 둘 사이의 인과 관계를 규명하려는 노력이 있었다(e.g. Kamide et al. 1998). 자기폭풍과 서브스톰은 둘 다 행성간 자기장(Interplanetary Magnetic Field; IMF)이 남쪽을 향할 때 발달하며, 자기폭풍이 일어날 때 서브스톰이 빈번히 발생한다는 점에서 밀접하게 연관되어 있을 것으로 생각된다. 그러나 자기폭풍과 서브스톰의 관계를 보는 견해에는 두 가지가 있는데 그 중 하나는 자기폭풍은 서브스톰의 확장기 활동을 통한 에너지의 축적으로 형성된다는 이론이다(Akasofu 1968). 그리고 다른 하나는 자기폭풍과 서브스톰은 근본적으로 별개이며 자기폭풍은 IMF의 Z축 성분이 장기간에 걸쳐 남쪽을 향할 때 야기되는 자기권 대류에 의한 에너지의 축적으로 형성된다는 이론이다(e.g. Burton et al. 1975, McPherron 1997).

전자는 서브스톰 확장기 동안 일어나는 자기장의 빠른 변화가 유도전기장을 발생시키고 하전입자를 내부 자기권으로 유입시켜서 자기폭풍이 일어난다는 견해이다. 서브스톰은 소규모의 자기폭풍이며, 따라서 자기폭풍은 수많은 서브스톰의 합 그 이상은 아니라는 것이다. 실제로 Mauk(1986)는 서브스톰 확장기 동안에 자기권 꼬리에 축적된 자기권에너지가 한계를 넘어서면서 하전입자들을 내부자기권으로 밀어 넣어 환전류가 강화됨을 보였다. 또한 Ahn et al.(2002)은 Dst 지수의 세계시(UT)에 따른 변화를 분석함으로써 부분 환전류와 서브스톰 쇄기전류는 주로 자기폭풍의 주상 기간 중에 발달한다는 사실을 확인하였다. 그리고 서브스톰의 활동이 자기폭풍의 주상기간 동안 회복기보다 훨씬 강하다는 사실도 확인하였다. 이것은 자기폭풍의 발달에 서브스톰 확장기 활동이 밀접하게 관련

되어 있음을 의미한다.

반면 후자의 경우는 IMF가 장시간 남쪽으로 향하면, 태양풍에 수반된 행성간 전기장이 자기권 플라스마 대류를 활성화 시켜서 하전입자를 내부 자기권으로 가속시키므로 자기폭풍을 일으킨다는 견해이다. 이 때 서브스톰은 단지 자기폭풍이 일어나는 동안 나타나는 부수적인 현상에 지나지 않으며, 서브스톰의 발생에 관계없이 자기폭풍이 일어난다는 것이다. Burton et al.(1975)은 IMF만으로 Dst 지수를 예보하였으며, Iyemori & Rao(1996)은 자기폭풍의 주상 기간 동안 서브스톰의 개시는 오히려 Dst 지수의 감소율을 완만하게 하며, 자기폭풍의 회복상 동안에는 그것이 실제로 Dst 지수를 증가시킴을 보였다. 그리고 McPherron(1997)은 1시간 평균의 Dst 지수에서 그 변화의 85% 이상이 태양풍으로만 설명될 수 있음을 보여줌으로써 IMF로 인한 자기권 대류가 자기폭풍을 형성함을 보였다. 또한 Tsurutani et al.(2004)는 뚜렷한 서브스톰 활동을 수반하지 않으면서 자기폭풍이 발생하는 예를 제시한 바 있다.

서브스톰이 진행될 때에 오로라 타원체를 따라 오로라 제트전류가 강화된다. 오후영역을 흐르는 동향제트전류의 경우 이곳의 전기전도도는 대부분 태양의 EUV 복사에 의해 결정되므로(Ahn et al. 1999) 동향제트전류에 주로 영향을 미치는 것은 플라스마 대류의 강화로 인한 행성간 전기장의 변화이다. 한편 주로 자정 및 아침영역을 흐르는 서향제트전류의 경우 태양의 EUV 복사에 의한 전기전도도가 매우 낮기 때문에 하강 오로라 입자에 의한 전기전도도 강화 즉 서브스톰의 활동이 그 세기를 결정한다고 할 수 있다. 따라서 자기권 대류에 기인한 행성간 전기장의 강화와 밀접한 관계가 있는 AU 지수와 서브스톰 활동과 밀접한 관계가 있는 AL 지수를 각각 Dst 지수와 비교해 봄으로써 자기폭풍의 발달에 서브스톰과 자기권 대류로 인한 행성간 전기장의 강화 중 어느 요인이 더 크게 작용하는지를 규명할 수 있을 것이다.

한편 IMF가 지속적으로 남쪽으로 향할 때에는 지구 자기력선과 IMF의 결합률이 증가하면서 행성간 전기장이 강화되어 자기권 대류가 활발해진다. 행성간 전기장 값을 구하여 그것을 자기폭풍의 정도를 나타내는 Dst 지수와 비교해 봄으로써 자기권 대류가 자기폭풍 형성에 어느 정도 영향을 끼치는지 조사할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해서 자기폭풍과 서브스톰, 행성간 전기장에 의한 자기권 대류 사이의 상관관계를 조사해 봄으로써 자기폭풍의 발달에 어떤 요인이 더 효과적으로 작용하는지 알아보고자 한다.

2. 자료 및 연구 방법

자기폭풍의 정도를 나타내는 Dst 지수와 AU, AL 지수를 비교하여 행성간 전기장의 강화와 서브스톰의 강화 중 어느 것이 자기폭풍의 발달에 큰 영향을 미치는지를 조사하였다. Ahn et al.(2002)은 1966년부터 1987년까지 20년간의 자료를 이용하여 $|Dst| > 50nT$ 일 때의 자기폭풍을 주상(main phase)과 회복상(recovery phase)으로 나누고, 각각에 대해서 누적 $|AL|$ 지수와 $|Dst|$ 지수의 상관관계가 매우 높게 나타남을 보였다. 본 연구에서는 연속적으로 발생하여 각각의 자기폭풍을 구분하기 어려운 경우나, 자기폭풍의 주상과 회복상 동안 Dst 지수의 변화가 심해서 자기폭풍의 시작이나 끝을 결정하기 어려운 경우를 모두 포함시키고, 자기권이 IMF에 반응하는 지연 시간(lag time)에 따른 오차를 최소화하기 위해서 월별 누적 지수를 구하였다. 지난 20년간의 AL, AU 지수와 Dst 지수를 월별로 적분하여 각각 240개의 월별 누적 지수를 얻었다. 월별 누적 AU 지수는 1시간 평균 AU 값을 한 달간

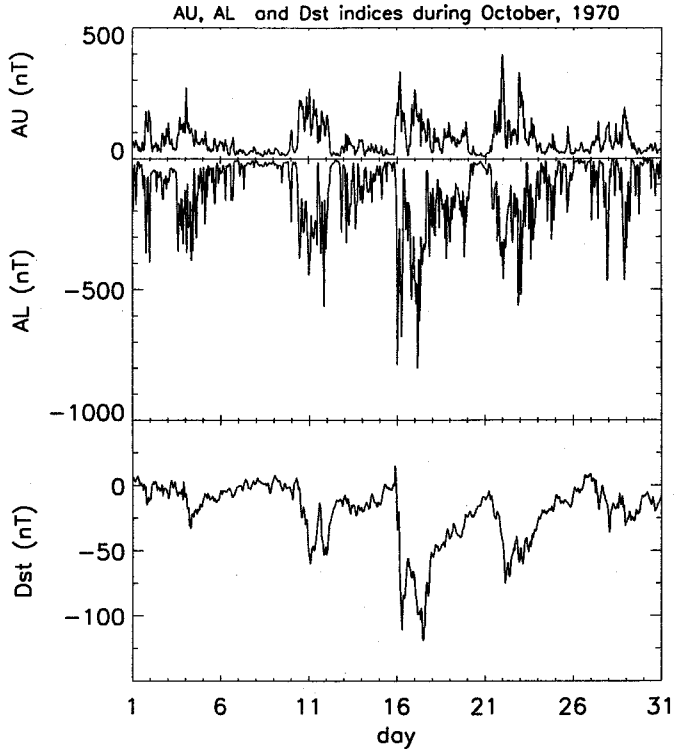


그림 1. 1970년 10월 중 AU, AL 및 Dst 지수의 변화를 나타낸다. 여기서 각 지수는 1시간 평균 지수 값을 이용하였다.

적분하여 구하였다. 월별 누적 $|AL|$ 지수 및 월별 누적 $|Dst|$ 지수도 같은 방법을 적용하여 구하였다. 그림 1은 1970년 10월 한 달 동안의 AU, AL 및 Dst 지수를 나타낸 한 예로, $|Dst| > 50\text{nT}$ 인 자기폭풍이 수차례 발생했으며, AU 및 AL 지수도 큰 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 기간의 월별 누적 AU, $|AL|$ 및 $|Dst|$ 지수를 계산한 결과 각각 $51,588\text{nT}\cdot\text{hr}$, $92,891\text{nT}\cdot\text{hr}$ 및 $14,944\text{nT}\cdot\text{hr}$ 를 얻었다. 이와 같은 방법으로 20년간의 자료를 분석하여 월별 누적 AU 및 $|Dst|$ 지수 사이 그리고 $|AL|$ 및 $|Dst|$ 지수의 상관관계를 구했다.

한편 IMF가 남쪽을 향할 때 행성간 전기장은 $\vec{E} = -\vec{V}$ (태양풍 속도) $\times \vec{B}_z$ (GSM에서 IMF의 Z 축 성분)로 나타낼 수 있다. 이것과 Dst 지수와의 상관관계를 살펴보고 행성간 전기장의 강화로 인한 자기권 대류가 자기폭풍의 형성에 어느 정도 기여하는지를 조사하였다. 이를 위해 OMNI website(<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/ow.html>)에서 제공하는 IMF 및 태양풍 속도 자료를 이용하여 1997년 1월부터 2001년 12월까지 5년간의 자료를 월별로 적분하여 월별 누적 행성간 전기장을 구하였다. 그리고 같은 기간 동안 얻은 월별 누적 Dst 지수와 비교해 보았다. 이 때 Dst 지수는 동압 효과를 제거한 Dst^* 지수를 이용하였다.

$$Dst^* = Dst - (0.02V\sqrt{n} - 20) \quad (1)$$

여기서 V 는 태양풍의 속도 그리고 n 은 수밀도를 나타낸다. IMF가 북쪽으로 향하는 경우($B_z > 0$)와

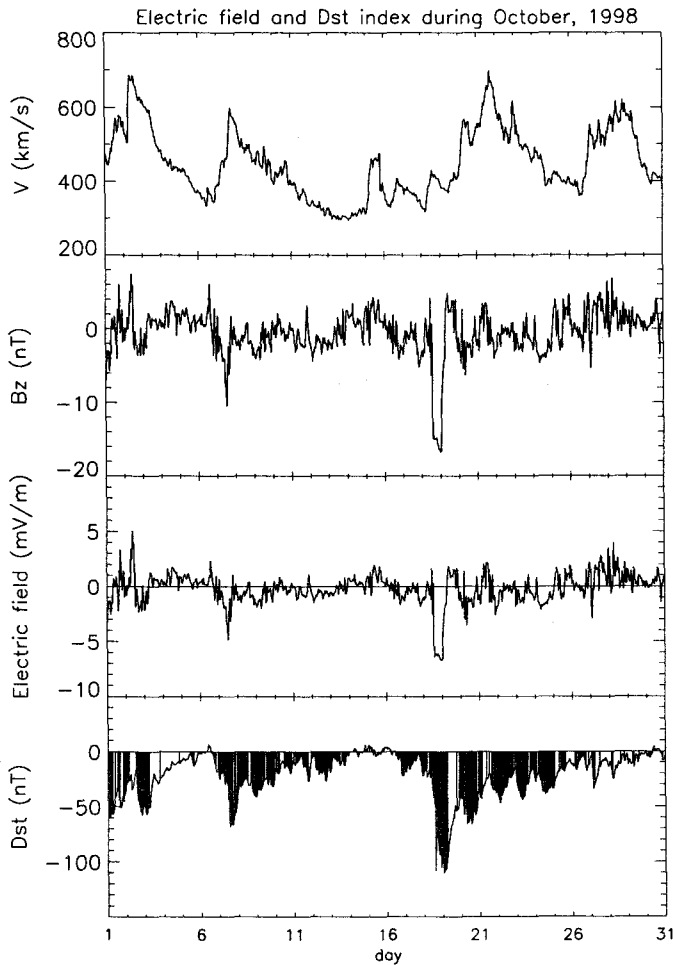


그림 2. 1998년 10월의 태양풍의 속도(V), IMF의 Z축 성분, 행성간 전기장 및 Dst* 지수의 변화를 나타낸 것이다. Dst* 지수에서 빗금친 부분은 음의 행성간 전기장을 나타내는 기간을 의미한다.

남쪽으로 향하는 경우($B_Z < 0$) 행성간 전기장의 부호는 양(+)이 되거나 음(-)이 된다. 일반적으로 IMF가 남쪽으로 향할 때 지구 자기력선과 IMF가 결합하면서 많은 양의 에너지가 지구로 유입된다고 알려졌다. 그러므로 이 경우를 구분하기 위해 행성간 전기장이 양인지 음인지를 구분하여 월별로 적분하였다. 그림 2는 1998년 10월 한 달 동안의 태양풍의 속도(V), IMF의 Z축 성분, 행성간 전기장 및 Dst* 지수의 변화를 나타낸 것이다. 이 기간 동안 자기폭풍이 수차례 발생했으며 자기폭풍 기간 동안 행성간 전기장이 큰 음의 값을 보이고 있음을 알 수 있다. Dst* 지수에서 빗금친 부분은 음의 행성간 전기장을 나타내는 기간을 의미한다. 이 기간 동안의 월별 누적 행성간 전기장은 양과 음의 경우 각각 $290,359\text{mV}\cdot\text{m}\cdot\text{hr}$ 와 $-439,182\text{mV}\cdot\text{m}\cdot\text{hr}$ 였고, 각각에 해당하는 월별 누적 Dst* 지수 값은 $-5,309\text{nT}\cdot\text{hr}$ 와 $-11,177\text{nT}\cdot\text{hr}$ 였다. 이들을 이용하여 월별 누적 행성간 전기장과 해당 Dst 지수 사이의 어떤 상관관계를 가지는지를 조사하였다.

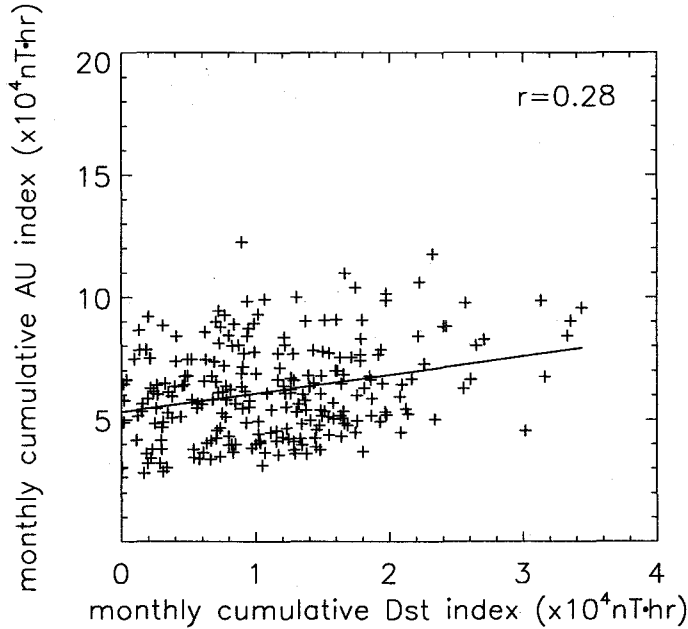


그림 3. 월별 누적 AU 지수와 Dst 지수의 상관관계를 나타낸다. 상관계수는 0.28이다.

3. 연구 결과

3.1 서브스톰과 자기폭풍과의 관계

Kamide & Akasofu(1983)에 의하면 동향 제트 전류의 세기를 나타내는 AU 지수는 주로 행성간 전기장의 강화로 인한 자기권의 대류에 기인되는 반면 AL 지수로 대표되는 서향제트전류는 서브스톰과 대류 효과의 합인 결과이다. 따라서 이들 오로라 제트 전류 지수와 자기폭풍과의 상관관계를 구하기 위하여 20년간의 AL, AU 그리고 Dst 자료를 월별로 적분하여 각각 240개의 월별 누적 지수를 구하였다. 그리고 이렇게 구한 월별 누적 AU 및 |Dst| 지수 사이 그리고 |AL| 및 |Dst| 지수사이의 상관관계를 구하였다. 그림 3은 월별 누적 AU 지수와 |Dst| 지수의 상관관계를 나타낸 것이다. +표시는 각각의 월별 누적 지수 값을 나타내고 있다. 이 경우 상관계수는 0.28로 낮게 나타났다. 반면 그림 4는 월별 누적 |AL| 지수와 |Dst| 지수의 상관관계를 나타낸 것으로 상관계수가 0.60으로 비교적 높게 나타났다. 그림 3과 4에서 각각의 점들을 보면 월별 누적 AU 지수도 |Dst| 지수 증가함에 따라 함께 증가하고는 있지만 월별 누적 |AL| 지수의 경우가 더 높은 상관관계를 보이고 있으므로 자기폭풍은 AU 지수보다는 AL 지수와 더 상관관계가 높음을 알 수 있다. 다시 말하면 서브스톰 활동이 자기폭풍의 발달에 효과적으로 기여하고 있음을 알 수 있다.

3.2 자기권 대류와 자기폭풍과의 관계

Burton et al.(1975)과 McPherron(1997)은 IMF가 장기간에 걸쳐 남쪽을 향할 때, 자기권 대류가 증가되어 하전입자를 내부 자기권으로 가속시키므로 자기폭풍이 형성된다고 하였다. 그리고 자기폭

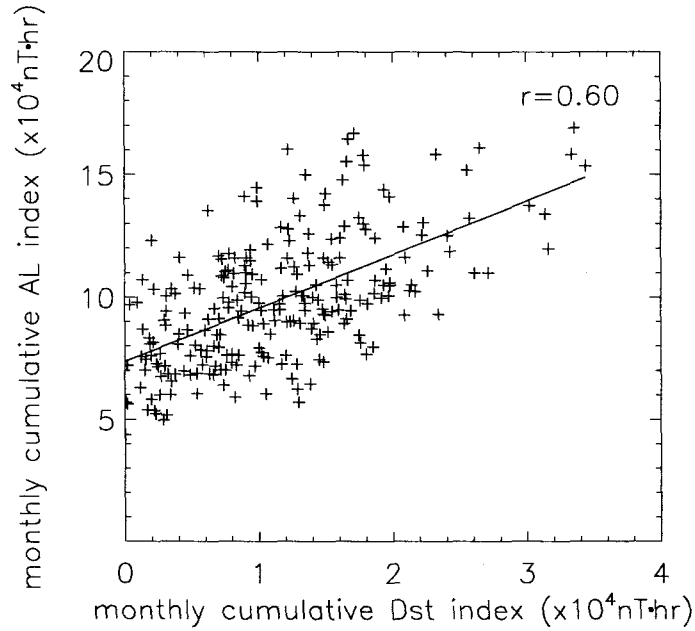


그림 4. 월별 누적 AL 지수와 Dst 지수의 상관관계를 나타낸다. 상관계수는 0.60이다.

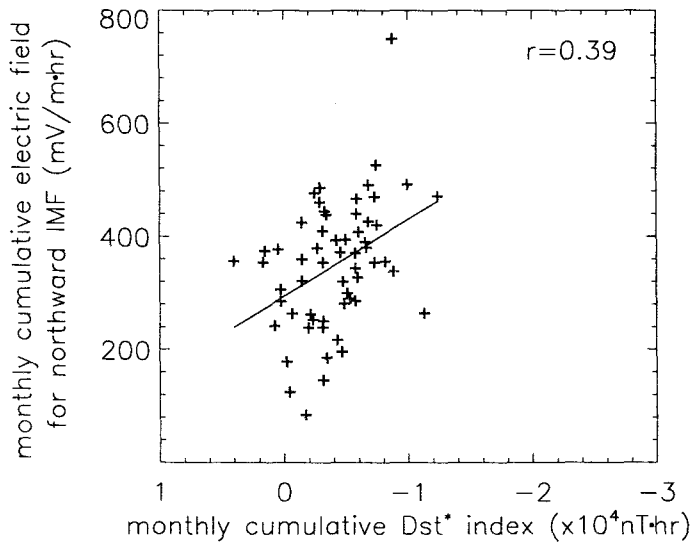


그림 5. IMF가 북쪽을 향하는 경우, 월별 누적 행성간 전기장과 Dst* 지수의 상관관계를 나타낸 것이다. 상관계수는 0.39이다.

풍 기간 중 일어나는 서브스톰은 자기폭풍의 원인이 아니라 자기폭풍의 부수적인 결과로 설명하였다. 따라서 태양풍의 정보로부터 행성간 전기장을 구하고, 그것과 Dst* 지수와의 상관관계를 알아봄으로써 행성간 전기장이 자기폭풍의 형성에 미치는 영향을 알 수 있을 것이다.

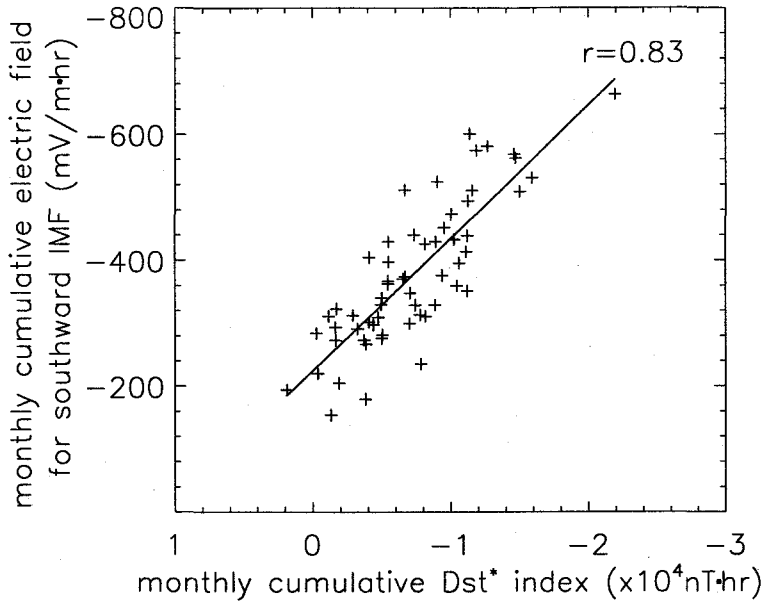


그림 6. IMF가 남쪽을 향하는 경우, 월별 누적 행성간 전기장과 Dst* 지수의 상관관계를 나타낸 것이다. 상관계수는 0.83이다.

그림 5는 양의 월별 누적 행성간 전기장과 Dst* 지수와와의 상관관계를 나타낸 것이고, 그림 6은 음의 월별 누적 행성간 전기장과 Dst* 지수와와의 관계를 나타낸 것이다. 역시 +표시는 각각 월별 누적 지수의 값을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 음의 월별 누적 행성간 전기장과 Dst* 지수의 상관관계가 0.83으로 양의 경우인 0.39보다 큰 것으로 보아 예상했던 대로 IMF가 남쪽으로 향할 때 주로 자기폭풍이 일어남을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 그림 6에서 상관관계가 0.83으로 매우 높게 나타난 것을 보아 자기폭풍의 발달에 행성간 전기장 강화에 의한 자기권 대류가 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 월별 누적 AE 지수와 Dst 지수의 상관관계를 살펴봄으로써 서브스톰이 자기폭풍에 어떻게 기여하는지를 알아보고자 하였다. 그 결과 누적 |AL| 지수와 |Dst| 지수와와의 상관관계가 0.60으로 월별 누적 AU 지수와 |Dst| 지수와와의 상관관계인 0.28보다 상대적으로 높게 나타났다. 이는 자기폭풍의 형성에 있어 서브스톰의 활동이 자기권 대류보다 더 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다. Ahn et al.(2002)은 Dst 지수의 세계시에 따른 변화를 분석하여 부분 환전류와 서브스톰 쇄기전류는 주로 자기폭풍의 주상 기간 중에 발달한다는 사실을 확인함으로써 자기폭풍의 발달에 서브스톰의 확장기 활동이 밀접한 상관관계가 있음을 밝힌 바 있다. 또한 Mauk(1986)는 서브스톰의 확장기 동안 자기권 꼬리에 축적된 에너지가 하전입자들을 내부 자기권으로 밀어 넣어 환전류를 강화시킴을 보여 이 결과를 뒷받침하고 있다. 그리고 자기폭풍 기간 중 발달하는 환전류는 Van Allen 방사선대를 구성하는 고에너지 하전입자들이 아니라 주로 평균에너지가 20 ~ 200keV 정도인 양성자들

에 기인하며, Daglis et al.(1996)은 CRRES-MICS의 측정으로부터 자기폭풍 기간 중 전리층에서 기인된 것으로 생각되는 O+가 환전류대에서 다량 관측되었음을 확인하였다. 이것은 서브스톰이 자기폭풍 기간 중 환전류의 발달에 기여했다는 것을 입증하는 것이다.

한편 월별 누적 행성간 전기장과 Dst* 지수와 비교해 본 결과 음의 월별 누적 행성간 전기장과 Dst* 지수 사이에 0.83의 높은 상관관계가 나타났다. 이것은 알려진 대로 IMF가 남쪽으로 향할 때 주로 자기폭풍이 일어남을 보여주는 것과 동시에 자기폭풍의 발달에 행성간 전기장의 강화로 인한 자기권대류가 중요한 역할을 하고 있음을 의미한다. 또한 Dst 지수는 단지 태양풍과 IMF의 남쪽 성분만으로 예측이 가능하다는 Burton et al.(1975)이나, 자기폭풍의 발달이 서브스톰의 빈번한 발생의 결과가 아니라 IMF의 Z축 성분에 의한 증강된 자기권 대류가 원인임을 보인 Iyemori & Rao(1996)의 주장과도 일치한다. 그리고 1시간 평균의 Dst 지수에서 그 변화의 85% 이상이 태양풍으로만 설명될 수 있음을 보여줌으로써 IMF로 인한 자기권 대류가 자기폭풍을 형성함을 보여준 McPherron(1997)의 주장을 뒷받침하고 있다.

본 연구를 통해서 AL 지수와 Dst 지수와의 상관관계, IMF와 Dst 지수의 상관관계가 높게 나타난 것으로 보아 자기폭풍의 발달에는 서브스톰과 자기권 대류가 모두 기여하는 것을 알 수 있었다. 최근 Daglis et al.(2004)의 연구가 이러한 견해를 뒷받침하고 있다. 그들에 의하면 환전류를 구성하는 하전입자를 가속시키는데 있어 서브스톰 활동과 대류의 두 요인이 모두 작용하고 있으며, 문제점은 오직 어느 것이 더 효율적으로 기여하는가 하는 상대적 중요성의 문제로 귀결된다는 점이다.

감사의 글: 본 논문은 한국해양연구원 위탁과제 PP03105의 지원으로 수행되었음. 연구에 필요한 Dst 지수와 AL, AU 지수는 일본 코토 대학 부설 지자기 세계 자료 센터(World Data Center for Geomagnetism)에서, IMF 자료는 OMNI website에서 제공되었음.

참 고 문 헌

- Ahn, B.-H., Emery, B. A., Kroehl, H. W., & Kamide, Y. 1999, JGR, 104, 10031
- Ahn, B.-H., Moon, G.-H., Sun, W., Akasofu, S.-I., Chen, G. X., & Park, Y. D. 2002, JGR, 107, 1409
- Akasofu, S.-I. 1968, Polar and Magnetospheric Substorm (D. Reidel: Norwell, Mass.), p.5
- Burton, R. K., McPherron, R. L., & Russell, C. T. 1975, JGR, 80, 4204
- Daglis, I. A., Axford, W. I., Livi, S., Wilken, B., Grande, M., & Soraas, F. 1996, JGG, 48, 729
- Daglis, I. A., Delcourt, D., Metallinu, F.-A., & Kamide, Y. 2004, in IEEE Plasma Sci., 32, 1449
- Iyemori, T. & Rao, D. R. K. 1996, Ann. Geophys., 14, 608
- Kamide, Y. & Akasofu, S.-I. 1983, Rev. Geophys. Space Phys., 21, 1647
- 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
- Mauk, B. H. 1986, JGR, 91, 13423
- McPherron, R. L. 1997, in Magnetic Storms, vol.98, Geophysical Monograph, eds. B. T. Tsurutani, W. D. Gonzales, Y. Kamide, & J. K. Arballo (Washington, D.C.: AGU), p.131

Tsurutani, B. T., Zhou, X.-Y., & Gonzalez, W. D. 2004, in *The Storm-Substorm Relationship* vol.142, *Geophysical Monograph*, eds. S. Sharma, Y. Kamide, & G. S. Lakhina (Washington D.C.: AGU), p.288