

상대론적 전자 이벤트와 자기 폭풍 및 자기 부폭풍 사이의 상관관계

황정아^{1†}, 이대영², 이은상¹, 민경욱¹

¹ 한국과학기술원, 물리학과

² 충북대학교, 천문우주학과

RELATIONSHIP BETWEEN RELATIVISTIC ELECTRON EVENTS, MAGNETIC STORMS, AND MAGNETIC SUBSTORMS

Jung-A Hwang^{1†}, Dae-Young Lee², Ensang Lee¹, Kyoung Wook Min¹

¹ Department of Physics, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

² Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
E-mail: jahwang@space.kaist.ac.kr

(Received October 31, 2002; Accepted November 19, 2002)

요약

본 논문에서는 수 MeV 이상의 에너지를 갖는 전자들(electrons)의 비정상적인 증가 현상 즉 Relativistic Electron Events(REE)와 자기 폭풍(magnetic storm) 및 자기 부폭풍(magnetic substorm) 사이의 상관 관계에 대해 연구하였다. 이를 위해 먼저 1996-1998년의 3년 동안 일어난 자기 폭풍을 조사하여 REE를 동반하는 자기 폭풍과 동반하지 않는 자기 폭풍의 두 그룹으로 분류하여 분석하였고, 두 그룹 각각의 자기 폭풍이 일어나는 동안 발생한 자기 부폭풍들의 특성을 살펴보았다. 특히 수십에서 수백 keV 에너지대의 고에너지 입자 수 증가(energetic particle injection) 현상과 자기장 쌍극자화(magnetic dipolarization) 현상을 분석한 결과, REE를 동반하는 자기 폭풍 동안에 발생한 자기 부폭풍이, REE를 동반하지 않는 자기 폭풍이 일어나는 동안 발생한 자기 부폭풍보다 더 강하게 나타난다.

ABSTRACT

This paper reports a statistical study on the relationship between relativistic electron events(REE), magnetic storms, and substorms. We have used magnetic storm events that occurred between 1996 and 1998, and have classified them into two groups, (i) magnetic storms with REE and (ii) magnetic storms without REE, according to whether or not the magnetic storm is accompanied by REE. Then we have examined the characteristics of substorms that occurred during the main phase of each of the magnetic storms, and compared them between the two groups of the storms. In particular, we have made some quantitative estimations on the intensities of the energetic particle injections and magnetic dipolarizations during the substorm. We find that the injection intensity ratio and the magnetic dipolarization of the storm-time substorms are bigger for substorms with REE than for those without REE.

Keywords: REE, substorm, storm, particle injection, dipolarization

[†]corresponding author

1. 서 론

지구자기권 내부에서 나타나는 상대론적 전자($\geq 0.5\text{MeV}$)의 증가는 우주환경 교란의 대표적 예로서 최근 많은 전문가들의 관심을 끌고 있는 현상이다. 특히 이 현상(relativistic electrons events; REE)의 원인에 대한 연구가 매우 활발하다. 그 동안 자기 폭풍과의 관계(Reeves 1998a,b, Rostoker et al. 1998, O'Brien et al. 2001) 혹은 태양풍 및 ULF 파동과의 연관성 등이 중점 논의되어 왔다(Green & Kivelson 2001). 가령 REE의 발생은 태양풍 속도가 매우 크고, 자기 폭풍의 회복단계(recovery phase)에서 IMF의 남쪽 방향 성분이 강하게 나타날 때 활발한 것으로 보고 되었다(O'Brien et al. 2001, Obara et al. 2000a). 또한 ULF 파동이 현저히 나타날 때 발생하는 것으로 보고되기도 하였다(Liu et al. 1999, Elkington et al. 1999). 그러나 이러한 REE는 자기 폭풍동안 나타나기도 하고 그렇지 않기도 하여 다소 혼란스러운 상태이다.

한편 자기 부폭풍과의 연관성에 대한 가능성도 제시된 적이 있으나 이 역시 확실한 답이 없는 실정이다(Li et al. 1998a,b, Ingraham et al. 2001). 자기 부폭풍이 발생하면 보통 수십-수백 keV 에너지대의 대전 입자들의 수가 급증하게 된다. 이러한 입자들은 적절한 가속 메카니즘이 추가로 작동한다면 MeV 에너지대의, 즉 상대론적 에너지의 입자로 전환될 수 있을 것이다(Kim et al. 2000). 즉, 자기 부폭풍이 만드는 고에너지 전자가 나중에 REE를 만드는 씨앗 전자(seed electrons)의 역할을 할 수 있을 것이다(Obara et al. 2000b). 그렇다면 왜 자기 부폭풍을 동반하는 모든 자기 폭풍에서 REE가 나타나지 않는 것일까?

본 논문은 바로 이러한 의문에서 출발하였으며, REE의 발생과 자기 폭풍 동안 발생한 자기 부폭풍 사이의 관계를 관측 자료 분석을 통해 연구하였다. 이를 위해 먼저 1996-1998년 사이에 나타난 자기 폭풍의 다수를 조사하여 REE를 동반하는 자기 폭풍과 그렇지 않은 자기 폭풍의 두 그룹으로 분류하였다. 그런 뒤 각각의 자기 폭풍동안 발생한 자기 부폭풍이 두 그룹에 따라 어떻게 다른지 연구하였다. 자기 부폭풍의 특성을 분석하기 위해서는 정지궤도에서의 수십 keV~수백 keV의 전자속(flux) 증가 현상과 자기장 쌍극자화(dipolarization) 현상을 이용하였다.

여기에서 자기 부폭풍 지수(예를 들면, AE, K_p 등)를 같이 나타내지 않은 것은, 이 논문에서는 직접적인 자기 폭풍과 자기 부폭풍 지수의 비교에 목적을 둈 것이 아니기 때문이다. 이 논문의 의도는 REE와 storm의 인과 관계에 자기 부폭풍이 어떤 식으로든 역할을 담당하지 않을까 하는 의문에서 출발한 것이기 때문에 직접 비교는 의미가 없다고 생각한다.

2. REE와 자기 폭풍

먼저 자기 폭풍과 REE의 연관성을 알아보기 위해서 1996-1998 동안 있었던 많은 수의 자기 폭풍을 조사하여 REE의 발생 빈도와 그 특성을 알아보았다. 여기서 자기 폭풍의 기준은 $Dst < -30\text{nT}$ 이면서 Dst 의 변화 모습이 충분히 매끄러운 것들로 한정하였다. REE는 정지궤도 GOES-8과 9 위성의 3개 전자 에너지 채널(채널 1: $>0.6\text{MeV}$, 채널 2: $>2\text{MeV}$, 채널 3: $>4\text{MeV}$) 중 1개 이상의 채널에서 전자 입자속(flux)의 증가가 10배 이상 나타나는 것을 REE로 선택하였다. 한 예로 그림 1은 1996년 1월 11일에 발생한 자기 폭풍 동안 관측된 GOES-8의 각 전자 에너지 채널 별 전자속의 증가를 보여주고 있다.

1996-1998 동안 있었던 자기 폭풍들 중에서 42개의 경우를 얻었고 그 중에서 REE가 있는 자기

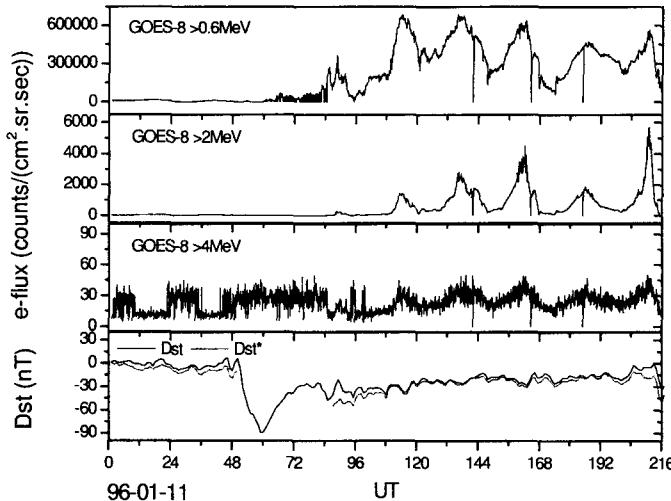


그림 1. 1996년 1월 11일 발생한 자기 폭풍 동안 관측한 GOES-8의 에너지 채널별(채널 1: >0.6MeV(첫째 단), 채널 2: >2MeV(둘째 단), 채널 3: >4 MeV(세째 단)) 전자 플럭스와 Dst 지수(네째 단)의 시간에 따른 변화.

표 1. GOES-8과 9의 3개의 전자 에너지 채널에서 REE의 발생 빈도.

e-flux	채널 1(>0.6MeV)	채널 2(>2MeV)	채널 3(>4MeV)	# of events
REE	O	O	O	3
	O	O	X	19
	O	X	X	3
Total	25	22	3	25

폭풍은 25개로 전체의 약 60%에 해당하고 나머지 17개의 자기 폭풍 동안에는 REE 현상이 관측되지 않았다. 통계를 내어 표 1에 정리한 바와 같이 채널 1에서 REE가 보인 경우가 25개, 채널 2에서 보인 경우가 22개, 채널 3에서 보인 경우가 3개로 나타나 주로 에너지가 상대적으로 낮은 영역에서 전자 수의 증가가 더 뚜렷함을 알 수 있었다. 또한, 3개의 에너지 채널에서 모두 REE가 보인 경우가 3개, 낮은 두 에너지 채널에서만 REE가 나타난 경우가 19개로 가장 많게 나타났고, 가장 낮은 에너지 채널에서만 나타난 경우도 3개로 나타났다.

한편 REE는 주로 자기 폭풍의 회복 단계(recovery phase)의 시작 즈음에 발생하고, REE의 지속 시간도 회복단계가 지속되는 시간과 거의 유사하게 나타났다. 이와 더불어 자기 폭풍의 주요 단계(main phase)가 끝날 무렵, 즉 Dst 값의 최소 근처에서 전자 수가 갑자기 줄어들었다가 증가하고, 또한 큰 진동을 나타낸을 볼 수 있었다.

또한 REE가 있는 23개의 자기 폭풍에서 Dst 최소값의 평균은 $-91.6(\pm 41.9)$, REE가 없는 16개의 경우에 대한 평균값은 $-80.56(\pm 36.7)$ 으로 REE가 있는 자기 폭풍의 강도가 약간 더 강하게 나타나고 있다. 하지만, 그 차이가 그다지 크지 않다는 사실로부터 자기 폭풍의 강도와 REE 사이에 직접적인 관련성을 작은 것으로 추측된다.

표 2. 정지 궤도 위성들의 위치.

Satellite	Longitude(°)	Local Time
1990-095	-37.4	LT=UT-2.5
1991-080	70.8	LT=UT+4.7
1994-084	103.8	LT=UT+6.9
GOES-8	-74.7	LT=UT-5.0
GOES-9	-135.1	LT=UT-9.0

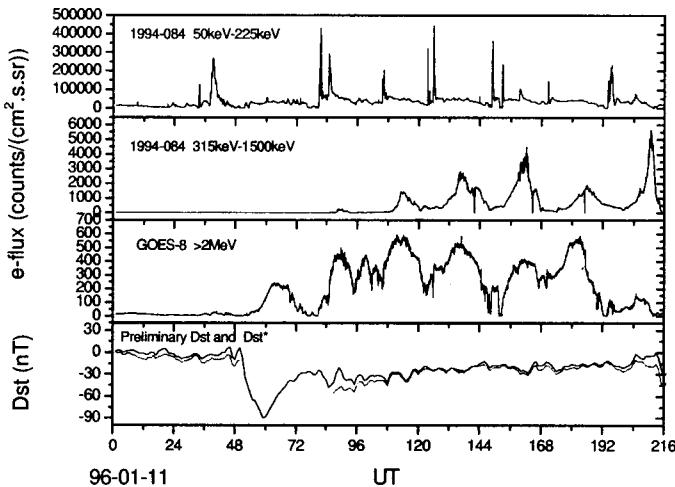


그림 2. 1996년 1월 11일에 있었던 자기 폭풍 동안 자기 부폭풍에 의한 injections과 REE.

3. REE와 자기 부폭풍

2장에서 확인한 대로 REE를 동반하는 자기 폭풍과 동반하지 않는 자기 폭풍은 그 절대적인 크기에 있어서는 별반 차이가 드러나지 않았다. 이 두 그룹의 차이를 알아보기 위해서 각각의 자기 폭풍 동안 발생한 자기 부폭풍이 보이는 특성의 차이점을 알아보았다. 자기 부폭풍의 특징으로서 먼저, 수십~수백 keV 입자수의 증가 현상을 분석하였는데, 정지궤도의 LANL 위성들의 SOPA(The Synchronous Orbit Particle Analyzer)에서 관측된 전자속 데이터를 사용하였다. 그런데 LANL 위성이들이 밤 영역(18:00-06:00 UT)에 위치하지 않아서 자기 부폭풍을 관찰할 수 없을 때는 대체로 GOES 정지궤도 위성들이 밤 영역에 위치하므로, 이때 관측된 자기장 데이터를 이용하여 자기장 쌍극자화(dipolarization) 현상을 분석하였다. 표 2는 이번 연구에 사용한 정지 궤도 위성들의 위치와 지역 시간을 나타내고 있다.

3.1 전자속 관측 결과

그림 2는 그림 1에서 REE를 관측한 날과 같은 날짜의 LANL 1994-084 위성의 전자속의 변화를 보여 주고 있다. SOPA는 50keV-1.5MeV까지의 9개의 전자 에너지 채널로 이루어져 있으나, 이 그림에서는 상대적으로 저에너지 쪽인 50keV-225keV와 고에너지 쪽인 315keV-1.5MeV의 에너지 채널을

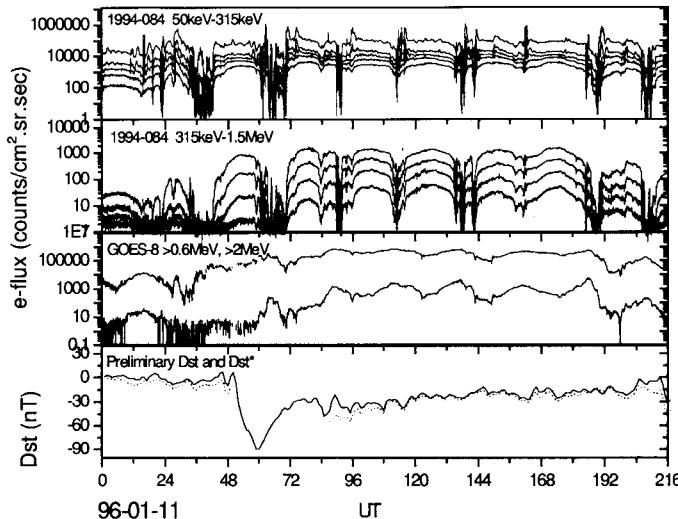


그림 3. 1996년 1월 11일 자기 폭풍 시 LANL 1994-084(첫째, 둘째 단)와 GOES-8(세째 단)에서 관측한 전자 플럭스와 Dst 지수(네째 단)의 시간에 따른 변화.

평균하여 먼저 전자속의 대강의 변화를 관찰하였다. 이 때 그림 2의 첫 번째 단에 나타나는 저에너지 영역의 간헐적인 전자속의 증가(뾰족한 봉우리들)는 자기 부폭풍에 의한 현상이라고 할 수 있다. 반면 세 번째 단은, \sim MeV 전자들의 증가인 REE를 나타내고 있고, 두 번째 단은 전형적인 자기 부폭풍 에너지 대로부터 REE 에너지 대로의 전환을 나타내는 중간 에너지 영역으로 볼 수 있다. 또한, 둘째, 셋째 단에서 주목할 만한 점은 전자속의 증가 시점이다. 즉, 저에너지 전자속의 증가가 나타나고, 어느 정도 시간 지연 후에 REE가 나타남을 볼 수 있다. 이는 REE 발생 전 자기 부폭풍에 의한 씨앗 전자의 제공에 관한 가능성을 추측케 하는 한 징후라고 보여진다.

그림 3은 그림 2를 보충하여 LANL의 전자속 데이터를 각 채널 별로 그려본 것이다. 이것은 에너지 채널별로의 변화를 더 확실하게 보여주고 있다. GOES의 에너지 채널도 두 채널을 구분하여 본 결과 REE가 채널 1의 0.6MeV 이상에서 먼저 시작되고 채널 2의 2MeV 이상에서는 좀 더 시간 지연이 있은 후에 나타남을 확인하였다.

전자속 변화 분석에서 가장 흥미로운 결과는 자기 부폭풍에 의한 전자속 증가 강도를 표 3과 같이 정량적으로 나타냄으로써 얻을 수 있었다. 이를 위해서 먼저 자기 폭풍의 주요단계에서 일어나는 자기 부폭풍 전자속 증가 현상을 찾아 정리하였다. 앞서 언급했듯이 REE는 대체로 자기 폭풍의 회복단계부터 시작되는 경향을 보이므로 자기 폭풍의 그 전 단계인 주요단계에서의 자기 부폭풍 전자속 증가를 분석함으로써 REE와의 연관성을 찾는 시도를 하였다. 또한, 자기 부폭풍 전자속 증가 현상 중 소위 “dispersionless injection”이라 부르는 경우만 선택하였다(Reeves 1994). 이는 전체 전자에너지 채널에서 거의 동시에 전자속의 증가가 일어나는 것을 의미한다. 그림 4는 이러한 전형적인 dispersionless injections의 예를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 모든 채널에서 거의 동시에 전자속이 증가하고 있다. 여기서 증가 시점을 중심으로 그 전후의 약 30분간에 걸친 각 채널별 전자속의 평

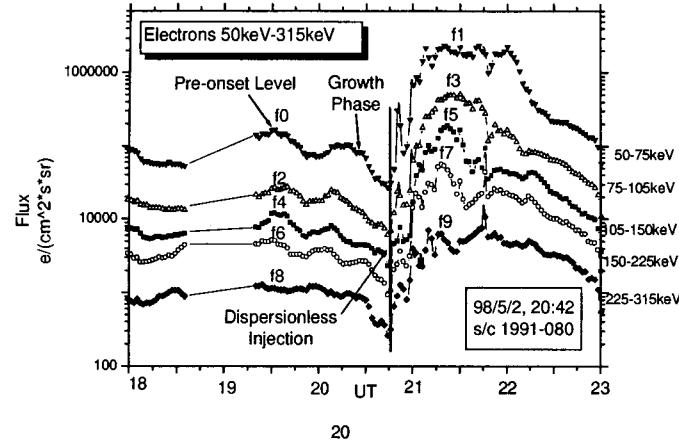


그림 4. 1998년 5월 2일 발생한 자기 부폭풍 동안 LANL 1991-080에서 측정한 각 에너지 채널별 전자 플럭스의 시간에 따른 변화.

표 3. Injection 전, 후 각 채널별 전자 입자속의 비(REE를 동반하는 경우와 그렇지 않은 경우).

Energy Range(keV)	with REE(27)	without REE(12)
50-75	19.5(± 13.3)	3.9(± 3.6)
75-105	16.7(± 10.5)	3.6(± 4.0)
105-150	13.5(± 9.7)	3.7(± 4.7)
150-225	10.9(± 4.9)	4.3(± 8.8)
225-315	8.6(± 5.6)	0.2(± 0.9)

균치를 계산할 수 있는데, 이 때 각 채널별 전자속의 변화비, 즉 f_1/f_{10} , f_3/f_2 , f_5/f_4 , f_7/f_6 , f_9/f_8 를 계산하였다. 그런데 전자속 증가 시작전 30분에 대한 평균에서는 소위 “dropout(즉, growth phase)” 기간 전을 전자속 증가 발생전의 값으로 정의하였다. 마지막으로 위와 같은 채널별 전자속 증가비를 REE를 동반하는 자기 폭풍의 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 평균하였으며, 그 결과를 표 3에 정리하였다.

표 3에서 보듯이 REE가 있는 경우가 없는 경우에 비해서 전 에너지 채널에서 전자속 증가비가 더 크게 나타났다. 따라서 REE를 동반하는 자기 폭풍동안 발생하는 자기 부폭풍에 의한 전자속의 증가가 REE를 만드는 데 어떠한 역할을 담당할 것으로 추측할 수 있을 것이다. 위의 전자속 증가비를 관찰했을 때의 위성의 위치를 나타내는 그림 5로부터 위의 결과가 밤 영역에 고르게 분포해 있음을 알 수 있다. 위의 전자속 증가비를 나타내는 표 3의 결과를 위성의 위치에 따라서 표 4와 5에 정리하였다.

3.2 자기장 쌍극자화 분석결과

전자속 증가를 관찰했던 시점과 동일하게, 자기장 쌍극자화도 자기 폭풍의 주요 단계에서 발생된 것만 조사하였다. 주어진 자기 폭풍에서 GOES-8과 9 위성이 밤 쪽(nightside)에 있을 때 자기장의 성분들을 분석하였다. 그림 6은 자기장 쌍극자화의 한 예를 보여주고 있다. 쌍극자화의 크기를 정

표 4. 23-01 LT(자정 근처)일 때, injection 전, 후 각 채널별 전자 입자속의 비(REE를 동반하는 경우와 그렇지 않은 경우).

Energy Range(keV)	with REE(4)	without REE(2)
50-75	11.3(± 9.4)	2.3(± 1.1)
75-105	7.9(± 6.3)	1.5(± 1.5)
105-150	9.7(± 14.8)	1.7(± 2.0)
150-225	4.5(± 5.8)	1.5(± 2.0)
225-315	2.1(± 1.7)	0.01(± 0.002)

표 5. 21-24 LT(자정 전)일 때, injection 전, 후 각 채널별 전자 입자속의 비(REE를 동반하는 경우와 그렇지 않은 경우).

Energy Range(keV)	with REE(10)	without REE(3)
50-75	16.7(± 16.8)	3.2(± 0.6)
75-105	16.5(± 16.8)	2.8(± 0.5)
105-150	14.2(± 15.3)	3.3(± 0.4)
150-225	8.5(± 10.7)	3.0(± 0.3)
225-315	4.5(± 6.4)	0.01(± 0.006)

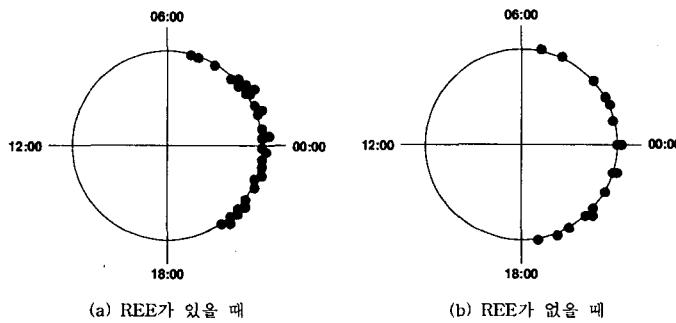


그림 5. 전자속 증가비를 관찰한 위성들의 위치.

량화하기 위해서 그림 6에 보인 바와 같이, 쌍극자화가 일어난 시점에서 자기장의 고도각(magnetic elevation angle) Θ 가 최소로 떨어졌을 때를 Θ_{\min} , 최대값을 Θ_{\max} 로 하여 그 차를 $\Delta\Theta$ 라 정의했다. 그런 뒤 REE가 있는 경우와 없는 경우를 구분하여 쌍극자화 $\Delta\Theta$ 의 평균적 크기를 비교하였다. Θ 는

$$\Theta = \arctan \left(\frac{B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \right), \quad \Delta\Theta = \Theta_{\max} - \Theta_{\min} \quad (1)$$

으로 표현 할 수 있는데, 여기서 B_x, B_y, B_z 는 GSM 좌표계에서 지구자기장의 x, y, z 성분값으로, GOES 위성의 측정값들이다.

표 6의 결과에 따라, 이번에도 역시 REE를 동반할 때의 dipolarization이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이 결과를 위성의 위치가 완전히 자정 영역에 들어 있는지 그렇지 않은지를 구분해서 다시 살펴보면, 표 7, 8, 9에서 알 수 있듯이 위성이 자정 근처(23-01 LT)에 있을 때의 값이 자정 전이나 자정

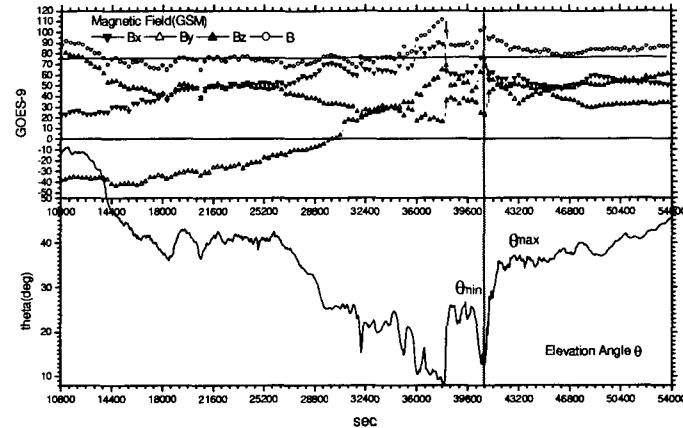


그림 6. 1997년 6월 7일 발생한 자기 부폭풍 동안 GOES-9에서 측정한 자기장과 자기장의 고도각의 시간에 따른 변화.

표 6. Dipolarization의 크기 비교(전체).

	with REE(126)	without REE(24)
$\Delta\theta$	$23.18(\pm 11.3)$	$18.56(\pm 9.1)$

표 7. midnight 근처에서의 dipolarization 크기 비교.

	with REE(35)	without REE(6)
$\Delta\theta(23-01 \text{ LT})$	$23.7(\pm 13.7)$	$16.7(\pm 4.8)$

표 8. pre-midnight 근처에서의 dipolarization의 크기 비교.

	with REE(30)	without REE(8)
$\Delta\theta(21-24 \text{ LT})$	$21.4(\pm 9.6)$	$18.7(\pm 8.5)$

표 9. post-midnight 근처에서의 dipolarization의 크기 비교.

	with REE(30)	without REE(8)
$\Delta\theta(01-04 \text{ LT})$	$21.6(\pm 10.1)$	$16.1(\pm 5.1)$

후에 있을 때보다 크게 나타난다. 이는 지극히 당연한 결과로서, 위성이 자정 근처에 있을 때 자기장의 B_z 성분의 증가를 더 잘 볼 수 있기 때문이다. REE를 동반할 때는 자정 전과 자정 후의 $\Delta\Theta$ 값이 비슷하게 나타났고, REE를 동반하지 않을 때는 자정 전에 있을 때, 더 큰 $\Delta\Theta$ 값을 가짐을 알 수 있다.

3.1절에서 전자속 증가비를 관찰했던 위성들의 위치가 밤 영역에 고르게 분포되어 있음을 보여 준 것과 마찬가지로, 자기장 쌍극자화를 관찰했을 때의 위성들의 위치가 REE를 동반했을 때와 그렇지 않을 때 모두, 밤 영역에서 고르게 분포되어 있음을 그림 7에서 알 수 있다. 따라서 표 6의 결과가 통계적인 타당성을 어느 정도는 갖춘 셈이라고 말할 수 있다.

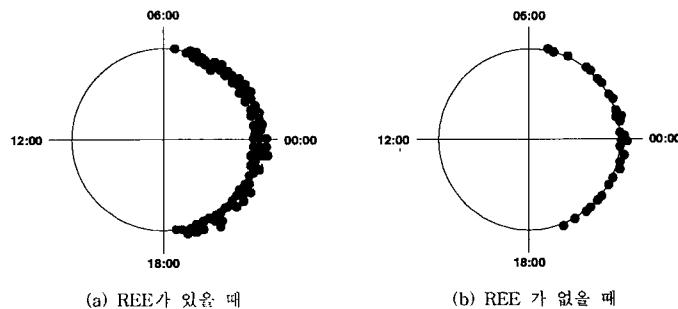


그림 7. 자기장 쌍극자화를 관찰한 위성들의 위치.

4. 결론 및 논의

본 연구는 1996-1998년 동안 일어난 자기 폭풍 동안 REE가 나타난 경우와 그렇지 않은 경우를 구분해 주는 지표로써 자기 부폭풍의 역할에 착안하였다. 이 기간 동안 있었던 전체 자기 폭풍 39개 중에서 REE가 나타난 경우는 23개로 전체의 약 60%에 해당한다. 그리고, 이중 REE가 나타났을 때의 Dst 의 최소값의 평균은 -91.60nT 이고, REE가 나타나지 않았을 때는 -80.56nT 로 REE가 있는 경우의 자기 폭풍이 좀 더 강하게 나타났지만, 그 차이는 미미하게 나타났다. 또한, REE는 대략 자기 폭풍의 회복 단계에서 시작함을 확인했고, 에너지 채널별로 시가차를 두고 나타남을 알았다.

자기 부폭풍의 특성을 알아보기 위해서 전자속 증가 현상과 자기장 쌍극자화의 강도를 정량적으로 비교해 보았다. 이 결과 REE가 있는 경우의 전자속 증가비와 자기장 쌍극자화의 크기가 REE가 없는 경우보다 크게 나타났다. 특히 REE가 있을 때, 수십~수백 keV의 전자속의 증가비가 크다는 것은 저 에너지 전자들이 REE에 씨앗 역할을 담당할 수 있다는 이전의 연구 결과(Obara et al. 2000c)를 뒷받침하는 결과이다. 자기장 쌍극자화는 위성이 자정 근처에 있을 때가 자정 후나 자정 전에 있을 때보다 더 크게 나타남을 확인하였다.

전자속 증가의 상대적인 크기의 비교와 자기장 쌍극자화의 상대적인 크기의 비교가 자기 부폭풍의 크기를 대변할 수 있다는 근거를 바탕으로 하면, 전자속 증가와 자기장 쌍극자화의 크기가 REE 가 있는 자기 폭풍 때 강하게 나타났기 때문에, 이 때의 자기 부폭풍의 크기도 강하다고 말할 수 있다.

이상의 결과들로부터, REE를 동반한 자기 폭풍의 기간 동안 발생한 자기 부폭풍이 더 강하게 나타난다고 할 수 있다. 이 논문의 결과는 이를 바탕으로 보다 확장된 연구를 하기에 좋은 근거를 제시해 준다고 할 수 있다.

감사의 글: 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00100-0(2002)) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- Elkington, S. R., Hudson, M. K., & Chan, A. A. 1999, GRL, 26, 3273
Green, J. C., & Kivelson, M. G. 2001, JGR, 106, 25777

- Ingraham, J. C., Cayton, T. E., Belian, R. D., Chrustensen, R. A., Fridel, R. H. W., Meier, M. M., Reeves, G. D., & Tuszewski, M. 2001, JGR, 106, 25759
- Kim, H. J., Chan, A. A., Wolf, R. A., & Birn, J. 2000, JGR, 105, 7721
- Li, X., Baker, D. N., Temerin, M., Cayton, T., Reeves, G. D., Araki, T., Singer, H., Larson, D., Lin, R. P., & Kanekal, S. G. 1998a, GRL, 25, 2561
- Li, X., Baker, D. N., Temerin, M., Reeves, G. D., & Belian, R. D. 1998b, GRL, 25, 3763
- Liu, W. W., Rostoker, G., & Baker, D. N. 1999, JGR, 104, 17391
- O'Brien, T. P., McPherron, R. L., Sornette, D., Reeves, G. D., Friedel, R., & Singer, H. J. 2001, JGR, 106, 15533
- Obara, T., Den, M., Miyoshi, Y., & Morioka, A. 2000a, J. ASTP, 62, 1405
- Obara, T., Nagatsuma, T., Den, M., Sagawa, E., & Onsager, T. G. 2000b, Adv. Space Res., 26, 89
- Obara, T., Nagatsuma, T., Den, M., Miyoshi, Y., & Morioka, A. 2000c, Earth Planets Space, 52, 41
- Reeves, G. D. 1994, Proc. International Workshop on magnetic storms, Oct 6-8 (Rikubetsu, Japan)
- Reeves, G. D. 1998a, GRL, 25, 1817
- Reeves, G. D. 1998b, substorms-4, Proc. ICS-4, 785
- Rostoker, G., Skone, S., & Baker, D. N. 1998, GRL, 25, 3701