2006년 발생한 고속 태양풍과 관련된 정지궤도에서의 상대론적 전자 증가 이벤트

이성은^{1,4}, 황정아^{1†}, 이재진¹, 조경석¹, 김관혁², 이유³

¹한국천문연구원 태양우주환경연구그룹

²경희대학교 우주탐사학과

³충남대학교 천문우주과학과

⁴now at STELab, Nagoya University, Japan

Geosynchronous Relativistic Electron Events Associated with High-Speed Solar Wind Streams in 2006

Sungeun Lee^{1,4}, Junga Hwang^{1†}, Jae-Jin Lee¹, Kyung-Suk Cho¹,
Khan-Hyuk Kim², and Yu Yi³

¹Solar and Space Weather Research Group, KASI, Daejeon 305-348, Korea

²School of Space Research, Kyung Hee University, Gyeonggi-do 446-701, Korea

³Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

⁴now at STELab, Nagoya University, Japan

E-mail: jahwang@kasi.re.kr

(Received September 9, 2009; Accepted November 23, 2009)

요 약

2006년 상반기동안 GOES 10에 의해 관측된 $> 2\text{MeV}$ 의 전자에너지 채널에서 반복되는 상대론적 전자 증가 이벤트(GREE, Geosynchronous Relativistic Electron Event)가 4회 있었다. 이 현상들은 모두 코로나 구멍(Coronal hole)에서부터 나온 고속 태양풍(HSS, High Speed Solar Wind Stream)과 관련된 것으로 여겨진다. 약 27일 주기를 갖는 이 4회의 전자 증가 현상은 플럭스가 점점 증가하는 형태를 보인다. 현재까지 알려진 상대론적 전자 증가 현상의 주요 원인으로서는 다음의 요소들이 언급되어 왔다: (1) 코로나 구멍과 관련된 태양풍 속도, (2) Pc5 ULF 파동, (3) 행성간 자기장(IMF, Interplanetary Magnetic Field) Bz의 남쪽 성분, (4) 자기 부폭풍(substorm)의 발생, (5) 증가된 휘슬러 모드 코러스 파동(whistler mode chorus wave)과 (6) 동압력(dynamic pressure). 따라서 이 논문에서는 2006년 상반기 동안 앞에서 언급한 6가지 현상들을 분석하여 어느 요소가 상대론적 전자 증가 현상의 플럭스와 가장 가까운 연관성이 있는지 알아보고자 한다.

Abstract

Recurrent enhancements of relativistic electron events at geosynchronous orbit (GREGs) were observed in 2006. These GREG enhancements were associated with high-speed solar wind streams coming from the same coronal hole. For the first six months of 2006, the occurrence of GREGs has 27 day periodicity and the GREGs were enhanced with various flux levels. Several factors have been studied to be related to GREGs: (1) High speed stream, (2) Pc5 ULF wave activity, (3) Southward IMF Bz, (4) substorm

[†]corresponding author

occurrence, (5) Whistler mode chorus wave, and (6) Dynamic pressure. In this paper, we have examined the effectiveness about those parameters in selected periods.

Keywords: high-speed solar wind stream, relativistic electron event

1. 서 론

정지궤도에서의 상대론적 전자 증가 이벤트(GREE, Geosynchronous Relativistic Electron Event)는 코로나 구멍(Coronal hole)에서부터 나오는 고속 태양풍(HSS, High Speed Stream)과 연관된 현상으로 연구되어 왔다(Blake et al. 1997). Kataoka & Miyoshi(2006)는 코로나 물질 방출(CME, Corona Mass Ejection)보다 고속 태양풍에 의해 방사선 외대에서 상대론적 전자 증가 현상이 더 잘 발생한다는 것을 통계적인 분석을 통해 보였다. GREE는 인공위성과 우주인에게 막대한 피해를 줄 수 있기 때문에, 우주환경에 있어서 상당히 중요한 현상으로 인식되었고, 많은 논문들에 의해 꾸준히 연구되고 있다. GREE에 의한 피해를 최소화하기 위한 예보를 하려면 지금까지 GREE를 발생시킨 원인과 메커니즘에 대해 정확히 분석하고 이해할 필요가 있다.

활발히 연구되고 있는 분야인 만큼, 여러 요소들이 GREE를 발생시킬 것으로 제안되었다. 450km/s 이상의 빠른 속도를 가진 태양풍은 O'Brien et al.(2001)에 의해 전자 가속과 상당히 밀접한 관련이 있음이 보여 졌다. 또한, Elkington, Hudson, & Chan(1999), Mathie & Mann(2000)과 Kim et al.(2006) 등은 전자 증가 현상이 Pc5 ULF wave power와도 관계가 있음을 보였다. 그리고 IMF Bz가 또 다른 중요한 요인이 된다는 결과는 여러 논문들에서도 언급되어 왔다(Blake et al. 1997, Miyoshi et al. 2007). 최근 Miyoshi & Kataoka(2008)는 HSS 뿐만 아니라, 강한 Southward IMF의 Bz 성분도 GREE 발생에 있어서 상당히 중요한 요소임을 보였다. 이들은 코로나 홀이 봄에 음의 극성, 가을에 양의 극성을 가질 때, IMF Bz 성분은 Southward를 보인다는 STFA(Spring - Toward, Fall - Away) 법칙을 적용하였다.

또 다른 가속 요소로 자기 부폭풍(substorm)이 제기되어 왔는데, Lyons et al.(2005)와 Hwang et al.(2007) 등은 새벽 지역의 휘슬러 파동을 발생시키는 자기 부폭풍이 전자의 가속과 관련되어 있음을 보였다. 휘슬러 모드 코러스 파동은 수 십 keV의 전자를 수 MeV 대로 가속시키는 중요한 요인 중 하나로 연구되어 왔다(Meredith et al. 2003, Smith, Horne, & Meredith 2004, Smith, Meredith, & O'Brien 2004, Iles et al. 2006). Meredith et al.(2002)은 전자의 가속이 진폭이 증가된 휘슬러 모드 코러스 파동과 관련되어 있음을 제안하였고, Smith, Horne & Meredith(2004)는 상대론적 전자 증가 기간 동안의 휘슬러 모드 코러스 파동을 분석하였다. 그리고 Tsurutani et al.(2006)은 상대론적인 에너지를 가진 전자의 가속은 Pc5 파동과 연관된 방사형 확산(radial diffusion)과 코러스 파동에 의한 에너지 확산(energy diffusion)에 초점을 두어야 한다고 언급했다.

마지막 요소는 Kataoka & Miyoshi(2008a)에 의해 제안된 동압력이다. 2004년의 복잡한 구조의 전자 증가 현상은 CME에 의해 압축된 자기권이 뒤따라 온 저밀도의 HSS에 의해 다시 팽창되면서 가속된 전자의 플럭스가 증가하였다고 해석 되었다. 이어 Kataoka & Miyoshi(2008b)는 23번째 태양 순환기 동안 발생한 플럭스가 가장 큰 10회의 전자 증가현상을 통계적으로 분석하였고, 모두 동압력이 1.0nPa 아래로 떨어짐을 보였다. Kim et al.(2006) 역시 GREE가 발생한 때의 태양풍 밀도는

그림 1. 2006년 상반기의 태양풍 속도와 정지 궤도에서의 > 2 MeV 전자 플럭스와 IMF Bx, By, Bz.

5cm^{-3} 보다 낮았음을 보였다.

이 논문은 위에서 언급된 6개의 요소들을 분석하여, 어느 요소가 2006년 상반기 동안의 상대론적 전자 증가 현상의 플럭스 변화량과 가장 밀접한 관련이 있는지를 알아보려고 하는 데에 목적이 있다.

2. 자료분석

관측 자료로는 OMNI-2¹⁾의 태양풍과 IMF 관측 자료를 사용하였고, Pc5 wave는 핀란드 기상 연구소(Finnish Meteorological Institute)²⁾, Pi2는 나고야 대학의 STELab³⁾, 휘슬러 모드 코러스 파동은 Halley station의 VLF/ELF Logger Experiment(VELOX)로부터 얻었으며, $> 2\text{MeV}$ 전자는 GOES 10을 이용하였다.

그림 1은 2006년 1일부터 120일까지의 태양풍과 전자의 플럭스, IMF Bx, By, Bz 성분을 보여준다. 600km/s 이상의 HSS가 약 27일 주기로 나타났고, 같은 시기에 전자의 플럭스가 $10^4/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}$ 을 넘었다. 또한 Bx는 양의 값을, By는 음의 값을 보이며 서론에서 언급된 STFA 법칙을 만족하고 있다. 따라서 우리는 전자의 증가 현상이 보이는 네 부분을 각각 이벤트로 정하였고, “Event A, B, C, D”로 이름을 붙였다. Event A의 최대 플럭스 값이 가장 작고, B, C, D 순으로 점차 증가하는 형태를 보인다.

¹⁾<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>

²⁾<http://www.ava.fmi.fi/image>

³⁾<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210/index.html>

그림 2. 일평균 태양풍과 낮 지역의 GREE 플럭스의 상관관계.

2.1 태양풍 속도

이전 연구에서는 태양풍의 속도를 GREE의 발생에 주된 요인으로 고려하였다(Paulikas & Blake 1979). GREE의 발생에 효율적인 태양풍의 속도는 600km/s 이상인 것으로 제안되었다(Weigel, Klimas, & Vassiliadis 2003). Event A, B, C, D 역시 태양풍의 속도가 600km/s 이상 되는 것을 볼 수 있다(그림 1).

GREE 플럭스는 정오 지역에서 가장 높은 값을 나타낸다. 각 이벤트의 일별 최대 플럭스 양을 비교하기 위해, 낮 지역(10 ~ 14MLT)을 평균하였고, 이 평균된 값과 태양풍 속도의 각 날에 대한 일 평균 값의 관계는 그림 2에서 볼 수 있다. 낮 지역의 플럭스 값만 평균한 이유는, GREE가 지역시간(local time)에 따라 다른 값을 갖기 때문에 일변화의 효과를 없애기 위해서 같은 지역의 지역시간의 데이터들만 분석한 것이다. 모든 점은 1일부터 120일까지의 값들을 나타내고, 각 이벤트 기간 동안의 태양풍의 속도는 원과 사각, 삼각, 다이아몬드 형으로 표시되었다. 태양풍의 속도가 빠를수록 GREE의 플럭스도 증가하는 형태의 상관관계를 보이지만, Event C가 가장 빠른 태양풍을 기록하였고, Event D는 가장 높은 GREE 플럭스에 위치하지만, 태양풍 속도가 다른 이벤트들에 비해 상대적으로 약간 느리다. 최근 Miyoshi & Kataoka(2005, 2008)은 빠른 속도의 태양풍이 플럭스 증가에 충분한 조건은 아님을 보였다.

2.2 Pc5 ULF 파동

Rostoker, Skone & Baker(1998)은 빠른 속도의 태양풍이 ULF 파동의 여기(excitation)와 연관성이 있음을 언급하였고, Pc5 ULF power와 GOES 7에서 관측된 상대론적 전자 플럭스가 상당한 관계가 있음을 보였다. 또한 Tsurutani et al.(2006)은 1998년에 발생한 두 번의 HSS 동안의 전자 플럭스

그림 3. 낮 지역의 Pc5 ULF wave power의 변화. 위에서부터 태양풍, GREE, Pc5 wave power.

를 보였고, 모두 큰 진폭의 Pc5 파동이 관측되었다.

이 연구의 네 이벤트에서도 역시 Pc5 파동이 관측되었다. 그림 3은 오전 부분(06-12 LT)의 총 Pc5 wave power를 보여준다. 앞에서 언급한 GREE의 플럭스는 10-14 LT의 시간을 사용하고, Pc5 wave에서는 06-12 LT의 데이터만 분석한 것은, 밤 지역의 Pc5 wave power도 GREE와 마찬가지로 일변화의 특성을 가지므로 지역시간에 따라서 달라지는 효과를 없애기 위해서 낮 시간만을 사용하였다. 또한 GREE에 영향을 미치는 ULF Pc5 wave가 낮 시간에 집중된다는 기존의 연구 결과에 기인한 것이다(Mathie & Mann 2000). 그림 3은 위에서부터 태양풍, 선형 스케일의 GREE, 총 Pc5 ULF power이다. Pc5 power는 네 이벤트에서 모두 보이지만, GREE의 플럭스에 따르는 관계를 보이지는 않는다. Event A의 최대 power는 Event B보다 더 크고, Event C 역시 Event D보다 더 크다.

2.3 IMF Bz의 남쪽 성분

Miyoshi & Kataoka(2005)는 고속 태양풍과 함께 오는 IMF Bz의 남쪽 성분이 상대론적 에너지의 전자 증가에 중요한 역할을 함을 제안했다. 남쪽 방향의 IMF Bz는 자기권 대류를 증가시키는 알맞은 조건이다. Miyoshi & Kataoka(2008)는 Superposed epoch analysis를 통해서 2nT 정도의 남쪽 방향의 IMF Bz도 자기권의 대류를 일으키기에 충분한 조건이 됨을 보였다. 증가된 자기권 대류는 전자를 상대론적 에너지로 가속시키는 새벽 지역의 코러스 파동과 연관된다(Lyons et al. 2005). 코로나 홀에서부터 불어 나오는 고속 태양풍에 수반된 IMF Bz 성분은 남, 북 방향으로의 요동이 심하기 때문에 평균된 값은 0에 근사하게 된다. 그러나 Russell-McPherron effect에 의해 지구는 남쪽 성분의 Bz 영향을 받게 된다(Tsurutani et al. 2006, Miyoshi & Kataoka 2008).

Miyoshi & Kataoka(2008)는 코로나 홀로부터 나오는 고속태양풍과 함께 회전하는 영역인 CIR

그림 4. HSS의 경계면으로부터 72시간 평균된 IMF Bz와 GREE 최대 플럭스와의 관계.

(Corotating Interaction Region)의 경계 면으로부터 이후의 IMF Bz의 72시간 평균값과 GREE 플럭스의 관계를 통계적으로 보였는데, 평균된 남쪽 성분의 Bz 값은 $0 \sim -3\text{nT}$ 내에 분포하며, 이는 $10^3/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}$ 이상의 전자 플럭스와 연관되어 있음을 보였다. 이 연구에서도 같은 방법을 사용하여 각각의 이벤트들을 비교한 결과, 그림 4에서 볼 수 있듯이, 가장 플럭스가 큰 Event D에서 가장 강한 남쪽 성분의 IMF Bz가 보였고, Event C, B, A 순으로 좋은 상관관계가 보였다. 세로축은 GREE 최대 플럭스 값을 나타낸다.

2.4 자기 부폭풍

Hwang et al.(2007)는 전자를 지구의 새벽 지역으로 유입시켜주는 자기 부폭풍이 발생하면서 자기권 대류가 찾아지고, 코러스 파동의 세기가 증가하여 유입된 전자가 상대론적 에너지로 가속이 된다고 제안하였다. Kim et al.(2006)은 또한 ULF power와 자기 부폭풍에 의한 입자의 유입이 있다면 태양풍에 의한 효과가 작아도 GREE가 발생할 수 있다고 언급하였다. 그러나 자기 부폭풍이 있다고 해서 항상 GREE가 발생하지는 않는다.

이 논문에서는 자기 부폭풍 발생의 척도로 Pi2를 사용하였다. 그림 5는 GREE와 Pi2의 시간별 변화를 보인다. 세로 점선은 각 이벤트가 발생한 시점을 나타낸다. GREE 시작 부근에서 여러 차례 Pi2가 발생하였고, 특히 Event D의 경우 가장 많이 보였으나, Event A, B, C에서의 Pi2 발생이 모두 같기 때문에 점차적으로 증가하는 GREE의 플럭스와 연관 지어 설명하기에는 부족해 보인다.

2.5 휘슬러 모드 코러스 파동

상대론적 전자 플럭스의 상당한 증가는 장기간 지속된 자기 부폭풍과 유입된 전자의 플럭스 뿐만 아니라, 증가된 코러스 파동과 관계되어 있다는 것이 연구되어 왔다(Meredith et al. 2003, Hwang

그림 5. Pi2의 발생 횟수와 GREE 플럭스와의 비교. 위는 GREE, 아래는 Pi2, 세로 점선은 GREE가 발생한 날을 나타냄.

et al. 2007). Summers & Ma(2000)은 1 ~ 2일 지속된 휘슬러 모드 코러스 파동에 의해 전자의 가속이 야기될 수 있음을 보였다. Smith, Horne, & Meredith(2004) 역시 새벽 지역의 코러스 파동에 의해 상대론적 전자의 가속이 발생함을 언급하였다.

Event A, B, C, D 동안의 휘슬러 모드 코러스 파동의 진폭은 GREE가 발생하기 하루 전날부터 증가되기 시작하였고(그림 6), GREE가 끝날 때까지 지속되었다. 그러나 하루 종일 증가된 상태가 지속되는 것은 아니고, 12시(UT)를 기준으로 몇 시간 전부터 발생하였다가 얼마간 지속된 후 다시 조용해지는 상태가 GREE 동안 반복되었다. 그림 6에서 점선으로 표시된 영역이 휘슬러 모드 코러스 파동이 발달한 지역을 나타낸다. 이러한 현상은 지상 관측소의 위치가 지구 자전으로 인해 코러스 파동 발생 지역에서 멀어졌다가 다시 접근하기 때문인 것으로 생각된다. 코러스 파동 진폭의 증가된 시간을 알아보기 위해, 주파수 1.5kHz의 Mean log amplitude 기준점을 $30T^2\text{Hz}^{-1}$ 으로 잡고, 그 이상으로 증가되는 지속시간을 구하였다. 그 결과, GREE 발생 전날의 증가된 휘슬러 모드 코러스 파동의 진폭 지속시간은 GREE의 플럭스가 클수록 길었다. 그림 6의 세로 점선은 증가된 진폭의 기간을 나타낸다. Event B의 지속 시간이 Event A의 지속 시간보다 약 1시간 짧지만, 전체적인 상관관계는 상당히 좋은 것으로 보인다.

지속 시간에 대한 GREE 플럭스의 관계는 그림 7에서 보여 진다. 각 점은 그림 4에서와 같은 방식으로 표시 되었다. 그러나 증가된 부분의 적분된 값은 플럭스와 별다른 관계를 보이지 않았는데, 이는 증가된 진폭의 정도보다 지속 기간이 더 영향을 줄 것으로 여겨진다. Mean log amplitude 30 이상의 적분 값은 표 1에서 보여 진다. GREE의 최대 플럭스와 적분 값은 상관관계가 없어 보인다.

2.6 등압력

Kataoka & Miyoshi(2008a,b)에 의해 제안된 1.0nPa 이하의 등압력은 그림 8에서 볼 수 있다. L ~

그림 6. GREE 발생 하루 전 날의 휘슬러 파동. 각 이벤트의 위쪽은 1.5kHz의 값만을 나타내고, 아래쪽은 0kHz - 3kHz의 스펙트럼.

3 부근에 갇혀있던 전자들의 궤도가 자기권 팽창으로 인해 정지궤도 바깥쪽까지 확장되면서 가속된 전자의 플럭스가 증가한다고 설명되었다. 자기권은 약 $12R_E$ 이상까지 확장된 것이 위 논문에서 보여졌다. 그림 8의 윗부분은 선형 스케일의 $> 2\text{MeV}$ 전자의 플럭스, 아래가 밀도와 속도로부터 계산된 동압력이다. 각 이벤트 동안 동압력은 모두 1.0nPa 아래로 내려가서 Kataoka & Miyoshi(2008b)의 설명과 부합하는 결과를 볼 수 있었다. 그러나 가장 작은 동압력이 가장 큰 GREE 플럭스와 관련된 것은 아닌 것으로 보여 지고, 가장 큰 동압력이 가장 작은 GREE 플럭스에서 나타나지 않은 것으로 보아, 동압력이 얼마나 작아지는지의 여부는 GREE의 다양한 플럭스의 정도에 영향을 주는 요소는 아닌 것으로 보인다.

그림 7. Mean log amplitude > 30 이상 되는 휘슬러 파의 지속기간과 낮 부분의 GREE 최대 플럭스의 관계.

표 1. 1.5kHz 휘슬러 모드 코러스 파동의 > 30 Mean log amplitude의 적분 값과 GREE의 최대 플럭스의 비교.

	Integration ($T^2 \text{Hz}^{-1}$)	GREE max flux ($/\text{cm}^2/\text{s/sr}$)
Event A	3.72	13787.00
Event B	2.23	22390.20
Event C	3.41	50627.40
Event D	2.77	106734.00

3. 결론 및 토의

방사선 외대에서 주로 발생하는 HSS와 관련된 GREE는 2006년 1일부터 120일까지 약 27일 주기를 갖고 4회 발생하였다. 이들은 같은 코로나 구멍에서부터 나온 HSS에 의한 것으로 보여지며, 지금까지 GREE를 발생시키는 것으로 제안되어온 6가지 요소들 중에서 어느 것이 GREE 플럭스와 가장 직접적인 연관성이 있는지 알아보고자 하였다.

그림 9에서는 GREE의 최대 플럭스와 각 요소들의 상관계수를 정량적으로 비교하는 그래프이다. 가로축은 각각의 요소들을, 세로축은 상관계수를 의미한다. 여섯 요소들은 GREE가 발생할 때 모두 활발한 활동을 보였지만, GREE 플럭스와 관련 지어 보았을 때는 남쪽 성분의 IMF Bz와 오랫동안 지속된 증가된 진폭의 휘슬러 파가 가장 좋은 상관관계를 보였다. IMF Bz와 GREE 최대 플럭스의 상관계수는 -0.96으로, IMF Bz의 방향이 남쪽으로 강할수록 플럭스도 증가하였다. 또한 증가된 휘슬러파의 시간이 긴 경우 상관계수는 0.95로 IMF Bz만큼 좋은 관계를 보였다. IMF가 장시간 남쪽을 향할 때 자기권 대류가 강화되고, 휘슬러 모드 코러스 파동이 증가하기 때문에 전자의 가속에도 영향을 줄 수 있다. 그러나 태양풍의 속도는 GREE 플럭스와 좋은 상관관계를 보이지 못했다.

그림 8. GREE 플럭스, 태양풍 밀도, 동압력의 비교.

그림 9. GREE 최대 플럭스와 각 요소들의 상관계수 비교. IMF Bz의 남쪽 성분과 증가된 코러스 파동이 가장 좋은 상관관계를 보인다. 상관계수는 각각 -0.96, 0.95.

이에 대해, 선행 연구 중 Miyoshi & Kataoka(2005, 2008)은 태양풍의 속도만으로는 플럭스가 큰 증가현상을 만드는데 충분한 조건이 아니라는 것을 보였다. Pc5, Pi2, 동압력 모두 다양한 GREE 플럭스와의 연관성은 적은 듯하지만, GREE의 발생과는 상당한 관련성이 있는 것으로 보인다.

Miyoshi & Kataoka(2008)에서 사용된 STFA 법칙은 대부분의 GREE와 잘 들어맞기 때문에, GREE 발생을 예측하는데 좋은 척도로 사용될 수 있다. 이 논문에서의 네 이벤트들 역시 STFA 법칙과 잘 일치한다. 그러나 Event D에 앞서 Spring-Away(SA)인 극성인 상태에서도 최대 플럭스가 $10^4/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}$ 에 이르는 Event A와 비슷한 크기의 GREE가 발생하였다(그림 1). 태양풍의 속도가 다른 SA 극성에서보다 상당히 큰 것으로 보아, 빠른 태양풍의 영향을 받았을 것으로 생각되지만, 다른 요소들이 어떤 다른 현상을 보이는지가 더 분석되어야 한다. 예보 차원에서 이러한 예외적인 GREE의 원인을 이해하는 것이 중요할 것이다.

이 연구에서 분석한 4회의 이벤트들과 연관된 고속 태양풍은 모두 같은 코로나 홀에서부터 나온 것이므로, GREE의 플럭스의 크기에 미치는 원인 현상을 비교하기에 좋은 이벤트들이라고 할 수 있다. 이번 연구의 결과를 확인하기 위해서 보다 많은 이벤트들을 다루는 통계적인 분석을 앞으로 더 할 예정이다.

감사의 글: 이 논문은 한국천문연구원의 “태양 및 우주환경 변화연구”의 지원으로 수행되었음. 논문 수정에 의견 주신 심사원분들께 감사드립니다.

참고문헌

- Blake, J. B., Baker, D. N., Turner, N., Ogilvie, K. W., & Lepping, R. P. 1997, GRL, 24, 927
- Elkington, S. R., Hudson, M. K., & Chan, A. A. 1999, GRL, 26, 3273
- Hwang, J. A., Lee, D.-Y., Lyons, L. R., Smith, A. J., Zou, S., Min, K. W., Kim, K.-H., Moon, Y.-J., & Park, Y. D. 2007, JGR, 112, A09213
- Iles, R. H. A., Meredith, N. P., Fazakerley, A. N., & Horne, R. B. 2006, JGR, 111, A03204
- Kataoka, R. & Miyoshi, Y. 2006, SW, 4, S09004
- Kataoka, R. & Miyoshi, Y. 2008a, GRL, 35, L06S09
- Kataoka, R. & Miyoshi, Y. 2008b, Ann. Geophys, 26, 1335
- Kim, H.-J., Kim, K. C., Lee, D.-Y., & Rostoker, G. 2006, JGR, 111, A03208
- Lyons, L. R., Lee, D.-Y., Thorne, R. M., Horne, R. B., & Smith, A. J. 2005, JGR, 110, A11202
- Mathie, R. A. & Mann, I. R. 2000, GRL, 27, 3261
- Meredith, N. P., Cain, M., Horne, R. B., Thorne, R. M., Summers, D., & Anderson, R. R. 2003, JGR, 108, 1248
- Meredith, N. P., Horne, R. B., Iles, R. H. A., Thorne, R. M., Heynderickx, D., & Anderson, R. R. 2002, JGR, 107, 1144
- Miyoshi, Y. & Kataoka, R. 2005, GRL, 32, L21105
- Miyoshi, Y. & Kataoka, R. 2008, JGR, 113, A03S09
- Miyoshi, Y., Morioka, A., Kataoka, R., Kasahara, Y., & Mukai, T. 2007, JGR, 112, A05210
- O'Brien, T. P., McPherron, R. L., Sornette, D., Reeves, G. D., Friedel, R., & Singer, H. J. 2001, JGR, 106, 15,533
- Paulikas, G. A. & Blake, J. B. 1979, Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in Quantitative Modeling of Magnetospheric Pro-

- cesses, Geophys. Monogr. Ser., vol.21, ed. W. P. Olson (Washington, DC: AGU), p.180
- Rostoker, G., Skone, S., & Baker, D. N. 1998, GRL, 25, 3701
- Smith, A. J., Horne, R. B., & Meredith, N. P. 2004, JGR, 109, A02205
- Smith, A. J., Meredith, N. P., & O'Brien, T. P. 2004, JGR, 109, A11204
- Summers, D. & Ma, C. 2000, JGR, 105, 2625
- Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Gonzalez, A. L. C., Guarnieri, F. L., Gopalswamy, N., Grande, M., Kamide, Y., Kasahara, Y., Lu, G., Mann, I., McPherron, R., Soraas, F., & Vasyliunas, V. 2006, JGR, 111, A07S01
- Weigel, R. S., Klimas, A. J., & Vassiliadis, D. 2003, JGR, 108, 1298