

SAWTOOTH 진동 중에 발생한 바깥 방사선 벨트 외경계면 진동

김재훈¹, 김경찬¹, 이대영¹, 김희정^{2†}

¹충북대학교 천문우주학과, ²충북대학교 기초과학연구소

OSCILLATIONS OF THE OUTER BOUNDARY OF THE OUTER RADIATION BELT DURING SAWTOOTH OSCILLATIONS

Jae-Hun Kim¹, Kyung-Chan Kim¹, Dae-Young Lee¹, and Hee-Jeong Kim^{2†}

¹Department of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

²Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

E-mail: heekim@chungbuk.ac.kr

(Received July 4, 2006; Accepted August 7, 2006)

요 약

이 논문에서는 먼저 정지궤도에서 관측된 세 개의 Sawtooth 진동 이벤트를 보고한다. Sawtooth 진동에서는 수십에서 수백 keV 에너지대의 자기권 대전입자 플럭스가 평균 2 ~ 3시간의 주기로 반복적으로(10여 차례 내외) 증감한다. 플럭스가 증가 할 때는 매우 급격히 증가하고 그 후 다음 증가 때까지 서서히 감소하는 특징을 보이는데 이러한 반복적 플럭스 증감을 시간에 대한 그래프로 나타내면 마치 톱니 모양을 갖는다. 다음으로 이러한 각 Sawtooth 진동 이벤트 기간에 대해 바깥 방사선 벨트 외경계면의 변화를 연구하였다. 이를 위해 SAMPEX 극 저궤도 위성이 관측한 상대론적 전자 플럭스 자료를 이용하였다. 이 관측 자료를 이용하여 바깥 방사선 벨트 외경계면 위치의 L값을 결정하고 각 Sawtooth 진동 이벤트 기간 동안의 경계면 L값의 변화를 분석하였다. 분석 결과로서 바깥 방사선 벨트 외경계면이 Sawtooth 진동 각 톱니 주기에 맞추어 팽창과 수축을 반복하는 진동을 발견하였다. 구체적으로, Sawtooth 입자 플럭스가 증가 한 직후에는 바깥 방사선 벨트 외경계면이 더 밖으로 팽창하고, 그 후 Sawtooth 입자 플럭스가 다음 주기 전까지 서서히 감소하는 동안에는 다시 방사선 벨트 외경계면이 수축하는 것을 발견하였다. 한편 Sawtooth 입자 플럭스 증가 시에는 주야간 지역간의 자기권 자기장 비대칭 정도가 감소하고, 반대로 입자 플럭스 감소 시에는 주야간 지역간의 자기권 자기장 비대칭 정도가 증가하는 특징이 반복적으로 나타났다. 이로 인해 바깥 방사선 벨트 외경계면도 주기적으로 변하는 것으로 생각된다.

ABSTRACT

We report three sawtooth oscillation events observed at geosynchronous orbit where we find quasi-periodic (every 2-3 hours) sudden flux increases followed by slow flux decreases at the energy levels of $\sim 50 - 400$ keV. For these three sawtooth events, we have examined variations of the outer boundary of the outer radiation belt. In order to determine L values of the outer boundary, we have used data of relativistic electron flux observed by the SAMPEX satellite. We find that the outer boundary of the outer radiation belt oscillates periodically being consistent with sawtooth oscillation

[†]corresponding author

phases. Specifically, the outer boundary of the outer radiation belt expands (namely, the boundary L value increases) following the sawtooth particle flux enhancement of each tooth, and then contracts (namely, the boundary L value decreases) while the sawtooth flux decreases gradually until the next flux enhancement. On the other hand, it is repeatedly seen that the asymmetry of the magnetic field intensity between dayside and nightside decreases (increases) due to the dipolarization (the stretching) on the nightside as the sawtooth flux increases (decreases). This implies that the periodic magnetic field variations during the sawtooth oscillations are likely responsible for the expansion-contraction oscillations of the outer boundary of the outer radiation belt.

Keywords: sawtooth oscillation, outer boundary, outer radiation belt, L value

1. 서 론

지구 자기권 내에 갇혀 존재하는 고에너지 대전 입자의 플럭스(Flux)는 여러 이유에 의해 수시로 변한다. 이러한 대전 입자는 여러 위성들이 상시 운용되고 있는 지구정지궤도에서 쉽게 관측된다. 특히 수심에서 수백 keV 정도의 에너지를 갖는 대전 입자는 자기권의 가장 중요한 현상인 서브스톰(Substorm)과 관련하여 최근까지도 많은 관측이 이루어지고 있다. 이 에너지대의 대전 입자 플럭스 변화는 때때로 증가와 감소를 수차례 이상 연속적으로 반복한다. 이때 플럭스 변화의 모양이 마치 톱니와 흡사하여 이러한 이벤트를 Sawtooth 진동이라고 부른다(예: Belian et al. 1995). Sawtooth 진동의 예를 그림 1에 보았는데, 이 자료는 Los Alamos 국립연구소(LANL) 정지궤도 위성이 50-400keV 사이의 다섯 에너지 채널에서 관측한 것이다. 그림 1에 대해서는 본문에서 더 자세히 논할 것이다. 한편 Sawtooth 진동 동안에는 Dst 지수, 지상 자기장 수평성분, 그리고 PC 지수의 연속적인 변화가 관측되며, 오로라 활동과 자기권 고에너지 중성입자 플럭스 증가도 나타난다(Belian et al. 1995, Henderson 2004, Henderson et al. 2006, Lee et al. 2004). 이러한 Sawtooth 진동은 오래 전 Los Alamos 국립연구소 연구그룹에 의해 처음 발견되어 그 이름이 붙여졌다. 이것은 주로 자기폭풍과 같이 태양-행성간 자기장이 강하게 남쪽을 향하고 있는 조건에서 주로 발생한다. 그러나 모든 자기폭풍이 Sawtooth 진동 현상을 보이는 것은 아니어서, 왜 어떤 자기폭풍에서만 Sawtooth 진동이 나타나는지, 구체적으로 무엇이 Sawtooth 진동을 야기하는지 등은 현재 논란의 대상이 되고 있다(Henderson 2004, Henderson et al. 2006, Lee et al. 2004). 또한 이러한 Sawtooth 진동의 성격이 기존의 보통 서브스톰 현상과 어떤 부분이 유사하고 다른지도 풀어야 할 숙제로 남아있다. 또한 Sawtooth 진동의 이해는 자기폭풍과 서브스톰 사이의 관계를 규명하는데도 중요한 문제이다.

Sawtooth 진동이 쉽게 관측되는 지구정지궤도는 잘 알려진 지구의 바깥 방사선 벨트(Outer Radiation Belt)의 외경계면(Outer Boundary)과 근접한 지역이다. 보통 바깥 방사선 벨트는 0.5MeV 이상의 에너지를 갖는 상대론적 전자들이 대략 반경 $4R_E$ 에서부터 $6-7R_E$ (R_E 는 지구 반경) 사이에 벨트 모양으로 자리 잡고 있는 것으로 알려져 있으나, 벨트의 외경계면은 $6-7R_E$ 에 고정되어 있지 않고 자기권 상태에 따라 수시로 바뀔 수 있다. 상대론적 전자들은 인공위성들에게 막대한 피해를 줄

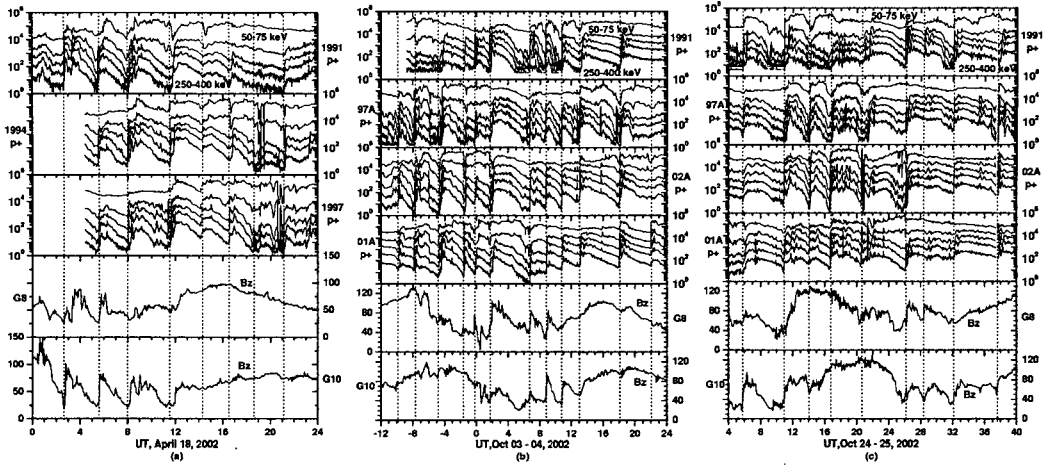


그림 1. LANL 위성에서 측정된 양성자 플럭스($\#/cm^2/s/sr/keV$)와 GOES 위성에서 측정된 자기장(nT)(각 그림에서 아래 두 패널). (a) 2002년 04월 18일, (b) 2002년 10월 03일-04일, (c) 2002년 10월 24-25일. 각 위성들의 LT(local time) 정보: 1991(UT-11), 1994(UT+9.6), 1997(UT+6.8), 97A(UT+6.8), 01A(UT+0.5), 02A(UT+4.6), G8(UT-5), G10(UT-9)

수 있기 때문에 “Killer Electron”이라 불리며 이들 입자의 생성과 유실에 대한 물리 연구가 현재도 활발하게 진행되고 있다.

방사선 벨트 경계면 안쪽에 존재하는 입자는 벨트 안에 완전히 갇힌(Trapped) 상태이지만, 경계면 밖에 놓인 입자는 수분 이내에 자기권계면(Magnetopause)을 통해 자기권 밖으로 탈출하게 된다(Kim et al. 2005). 즉, 바깥 방사선 벨트 외경계면은 입자가 갇힌 궤적(Closed path)을 가질 수 있는 영역과 열린 궤적(Open path)을 가질 수 있는 영역 사이의 경계면을 의미한다. 그런데 주어진 공간에서 특정 입자의 궤적이 갇힌 것이 될지 열린 궤적이 될지는 자기장의 상태에 따라 결정되며, 따라서 방사선 벨트 외경계면도 자기권 자기장의 상태 변화에 따라 변할 수 있다. 가령 경계면은 자기권 자기장의 상태에 따라 때로는 정지궤도 보다 더 안쪽에 때로는 그 반대로 바깥쪽에 놓일 수도 있다.

한편 Sawtooth 진동 동안 발생하는 수십-수백 keV 대전 입자의 증감은 필연적으로 자기권 자기장의 변화와 밀접히 연관되어 있다(Lee & Lyons 2004). 실제로 Sawtooth 진동 동안 관측된 정지궤도 야간지역 자기장은 주기적인 변화를 보인다(그림 1 참조. 아래에서 더 자세히 논의됨). 따라서 Sawtooth 진동 동안의 자기권 자기장 변화는 바깥 방사선 벨트 외경계면의 변화를 시사한다. 이 논문에서는 바로 이러한 가능성을 연구하였는데, Sawtooth 진동에 맞추어 바깥 방사선 벨트 외경계면이 일관되게 변화함을 발견하였다. 이 논문에서는 먼저 세 개의 Sawtooth 이벤트를 소개하고 각각의 Sawtooth 기간동안 발생한 바깥 방사선 벨트 외경계면 변화를 분석한 결과를 보고한다.

2. SAWTOOTH 진동 이벤트

그림 1은 세 개의 Sawtooth 진동 이벤트에 대해 LANL 위성에서 측정된 양성자의 플럭스 변화와 GOES 위성에서 측정된 지구 주위 공간의 자기장 변화를 나타낸 것이다. 두 위성은 모두 정지궤도 위성이다. 먼저 LANL 위성 자료는 50keV에서 400keV 사이의 다섯 에너지 채널에서의 양성자의 플럭스 변화를 보여주고 있는데, 세 개의 이벤트에서 공통적으로 급격한 플럭스 증가가 여러 차례 반복됨을 알 수 있다. 급격한 증가의 시작 시점을 수직선으로 표시 하였다. 이러한 양성자의 급격한 플럭스 증가는 그 이전에 모든 에너지채널에 걸쳐서 천천히 감소한 후 나타난다. 플럭스 변화의 모습이 전체적으로 톱니 모양에 유사함을 볼 수 있다. 또한 급격한 플럭스 증가가 대략 평균적으로 2~4시간 간격으로 반복적으로 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 이것들은 모두 Sawtooth 이벤트의 전형적인 특징이다. 다음으로 GOES 위성에서 측정된 정지궤도에서의 자기장 Bz의 변화를 보면, 처음에는 완만한 감소를 보이다가 수직선을 기점으로 급격하게 증가하는 변화를 반복적으로 보인다. 이러한 변화는 주로 야간지역에서만 반복적으로 나타나며, 자기장이 길게 늘어진(Stretching) 후 쌍극자화(Dipolarization)되는 것을 의미한다. 결국 Sawtooth 입자 플럭스 진동과 야간지역 자기장의 변화는 밀접한 관계가 있다고 생각할 수 있다. 야간지역 자기장의 변화가 입자 가속과 구체적으로 어떻게 관련 되는지는 매우 중요한 문제이나 이 논문에서는 다루지 않았다. 한편 주간지역에서는 자기장의 변화가 상대적으로 약함을 주지하여야 한다.

3. 바깥 방사선 벨트 외경계면 변화

이 연구의 주 목적은 위에서 소개한 Sawtooth 진동 기간에 대해 바깥 방사선 벨트 외경계면의 위치 변화를 고찰하는 것이다. 이를 위해서는 적도면상의 여러 L 지역에서 관측된 입자 플럭스 자료로부터 바깥 방사선 벨트 외경계면의 위치를 추정하는 것이 이상적이다. 하지만, 현재 그런 관측이 가능한 위성들이 없으므로, SAMPEX(Solar, Anomalous and Magnetospheric Particle EXplorer) 위성에서 관측한 상대론적 전자 플럭스 자료를 사용하였다. LANL 위성이 적도면에 대해 pitch angle이 90도인 입자들을 주로 관측하는 반면, 극궤도 위성인 SAMPEX는 적도면에 대해 pitch angle이 90도보다 작은 입자들만 관측할 수 있다. 따라서 SAMPEX 자료로부터 추정한 외경계면의 위치는 적도궤도 위성으로부터 추정한 값과 다를 수 있다. 그러나 지구자기장 변화에 따른 외경계면 위치 변화의 양상은 정성적으로 같을 것이므로, 본 연구에서는 SAMPEX 자료를 사용하여 Sawtooth 진동 기간 동안의 외경계면의 변화에 대해서 살펴보았다.

SAMPEX 위성은 0.4MeV 이상의 에너지를 갖는 다양한 종류의 입자들을 측정하기 위해 1992년 7월 NASA의 Western Test Range에서 발사되었다. SAMPEX 위성의 궤도는 극 저궤도 위성으로 궤도 경사각은 82°, 원지점까지의 거리는 670km이며 근지점까지의 거리는 520km이다. 또한 이 위성에는 Low Energy Ion Composition Analyzer(LEICA), Heavy Ion Large Telescope(HILT), Mass Spectrometer Telescope(MAST), Proton/Electron Telescope(PET) 등 네 가지의 관측기가 장착되어 지구주위를 약 2시간 주기로 공전하면서 다양한 종류의 입자 플럭스를 측정한다(Baker et al. 1993). 이 연구에서는 HILT의 관측 자료를 사용하였는데 HILT는 4-250MeV/nucleon의 에너지를 갖는 이온을 측정하도록 되어 있다. 그러나 HILT Solid State Detector는 SAMPEX 위성이 방사선 벨트 영역을 통과 할 때 1MeV 이상의 에너지를 갖는 상대론적 전자에 더 활발하게 반응하기 때문에 HILT

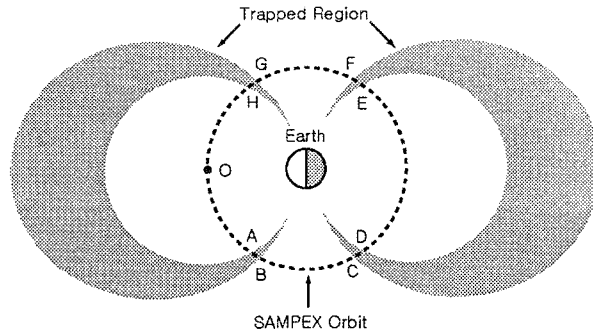


그림 2. SAMPEX 위성의 궤도와 바깥 방사선 벨트의 스케치.

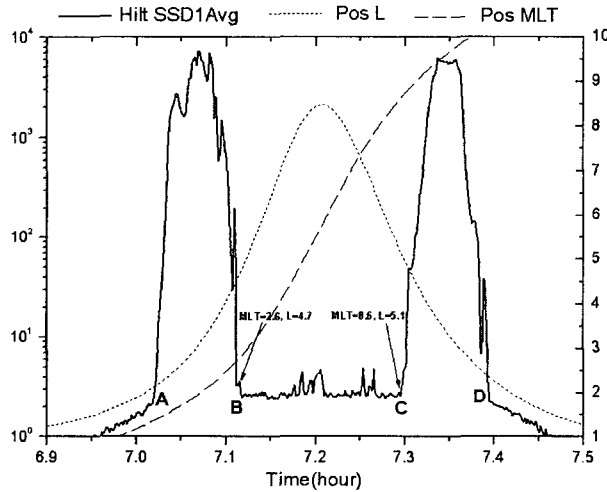


그림 3. SAMPEX 위성에 장착된 HLIT SSD1에서 2002년 10월 04일에 측정된 자료 예.

의 수집 자료는 사실상 전자 플럭스를 의미한다(Nakamura et al. 2000).

그림 2는 지구 자기권의 모습을 정오-자정 단면상에 나타낸 그림으로 회색의 두꺼운 부분은 입자들이 갇혀 있는 바깥 방사선 벨트 영역을 나타낸다. 점선은 SAMPEX 위성의 궤도를 대략 표현한 것이다. 그림 3은 HILT SSD1에서 관측된 상대론적 전자 플럭스 자료의 한 예를 보여주고 있다. 또한 위성 위치의 MLT(Magnetic Local Time)와 L값도 점선으로 같이 표시하였다. 그림 2에서 SAMPEX 위성이 점 O에서 출발하여 A지점을 통과하게 되면 방사선 벨트 안으로 진입하게 되고 위성에서 측정된 플럭스는 그림 3의 A지점 이후부터 급격한 증가를 보이게 된다. 이렇게 증가된 플럭스는 위성이 그림 2에서 B지점을 통과하기 전까지 유지된다. B지점을 통과하면 방사선 벨트 영역을 벗어나 극지방 위를 지나게 되며 반대편 방사선 벨트 영역인 C지점에 이를 때 까지 플럭스가 급감한 상태를 보이게 된다. 위성이 방사선 벨트에 다시 들어감에 따라 플럭스는 D지점까지 증가상태를 유지한다. 그

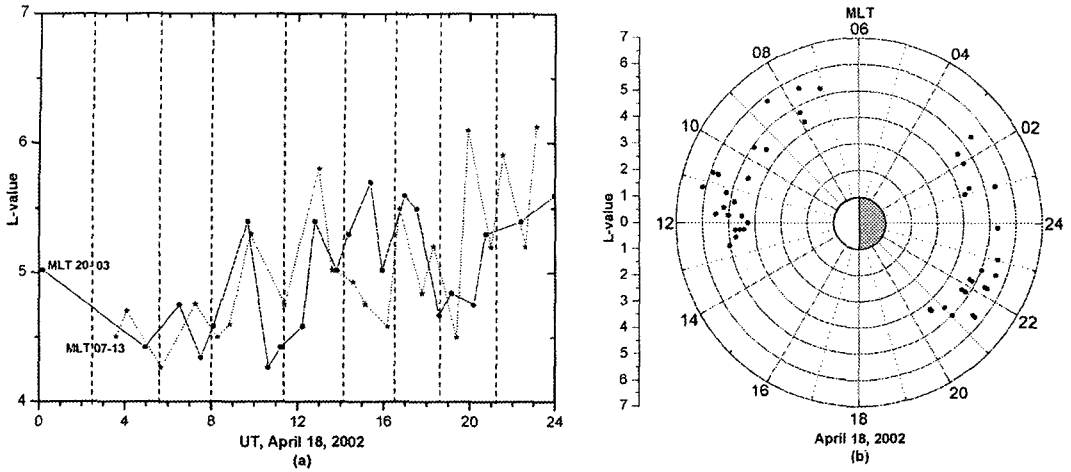


그림 4. (a) 2002년 04월 18일 Sawtooth 진동 이벤트에 대해 SAMPEX 위성에서 측정된 방사선 벨트 외경계면 L vs. UT. (b) 이때 MLT와 L 사이의 극좌표계로 나타낸 SAMPEX 위성의 위치.

림 2를 보면 이러한 변화는 위성이 북반구를 통과하면서 다시 반복적으로 일어나게 되며 따라서 위성이 지구를 한 번 공전할 때마다 네 번 방사선 벨트 영역을 지나가게 된다. 이 때 B, C, F, 그리고 G가 방사선 벨트 외경계면이 되며, 그림 3에 경계면 B, C를 지나는 시간을 화살표로 표시하였다. 또한 그림 3에 위성의 MLT와 L값 그래프가 주어지 있으므로, 각각의 경계면 통과 시점에서 위성의 MLT와 L값을 결정 할 수 있다. 이러한 방법을 이용하면 Sawtooth 진동 기간 중에 SAMPEX 위성이 관측한 방사선 벨트 경계면의 위치 변화를 알 수 있다.

그림 4a는 2002년 04월 18일에 발생한 Sawtooth 진동 이벤트 기간에 대해 위에서 설명한 경계면 결정 방법을 이용하여 얻은 방사선 벨트 외경계면의 L값을 나타낸 것이다. 여기서 경계면 L값들은 위성이 대체로 야간 지역을 지나는 경우(실선)와 대체로 대낮 지역을 지나는 경우(점선)로 나누어 제시하였다. 그림 4b에 2002년 04월 18일 Sawtooth 진동 기간 동안의 SAMPEX 위성이 경계면을 지날 때의 위치를 MLT와 L 극좌표계에서 표시한 것이다. 즉, 중앙은 지구를 나타내며 지구를 중심으로 여러 개의 동심원들은 L값, 방사 모양의 직선들은 MLT를 나타낸다. 그림에서 보듯이 위성의 위치를 나타내는 점의 분포가 MLT에 따라 다양한 것을 알 수 있는데 이것은 SAMPEX 위성의 궤도면이 실시간으로 변화하고 있음을 말해 준다. 이러한 위성 위치의 L 분포를 MLT에 따라 크게 대낮지역(대략 07시부터 13시까지)과 야간지역(대략 20시부터 03시까지)으로 나누어 그림 4a에 각각 점선과 실선으로 나타낸 것이다.

그림 4a의 각 수직선은 그림 1에서 결정하였던 Sawtooth 진동의 각 톱니 주기 시작 시간을 나타낸다. 즉, Sawtooth 입자 플럭스의 증가 시작 시점을 나타낸다. Sawtooth 입자 플럭스의 증가 시작 후 방사선 벨트 외경계면 L값이 증가하는 경향을 대부분의 톱니 주기에서 볼 수 있다. 그런 후 다음 주기가 시작하기 전까지 L값이 다시 감소함을 볼 수 있다. 이러한 L값의 진동은 야간지역과 대낮지역 모두에서 대체로 명확하지만, 그렇지 않은 부분도 일부 존재한다. 가령 UT 02시와 03시 사이에서

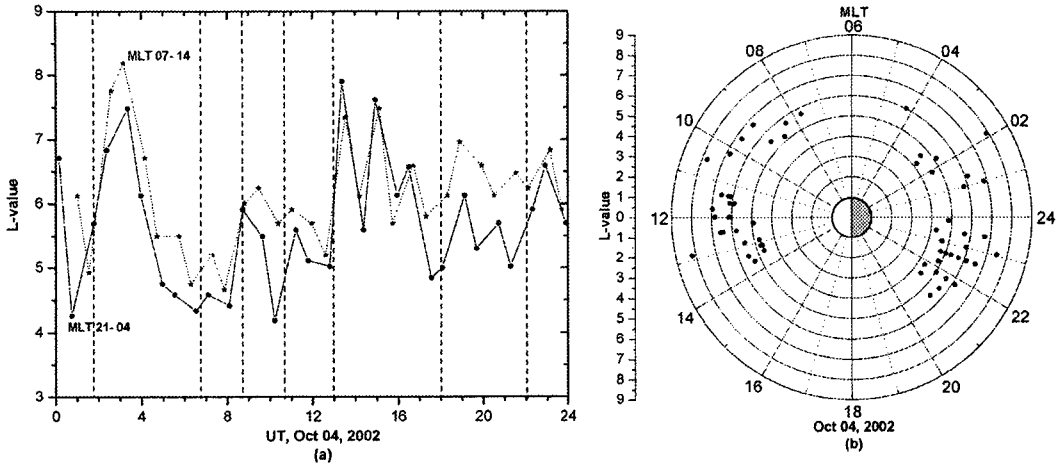


그림 5. 2002년 10월 04일 Sawtooth 진동 이벤트에 대해 그림 4와 같은 형식으로 나타낸 결과.

는 SAMPEX에서 관측한 자료가 불명확하여 L값 결정이 충분한 시간 분해능을 갖고 이루어지지 않았다. 또한 UT 21시에서 24시 사이에서도 야간지역에서의 L값 결정이 충분한 시간 분해능을 갖고 이루어 질 수 없었기 때문에 대낮지역에 비해 L값 진동 양상이 다소 다르게 보인다. UT 14시 근처와 18시 근처 이후에서는 대낮지역 L값 변화는 다소 다른 모습을 보이고 있다.

그림 5와 6은 2002년 10월 04일과 2002년 10월 24일의 두 Sawtooth 이벤트에 대한 방사선 벨트 외경계면 L값 결정 결과를 앞선 이벤트의 경우와 마찬가지로 보여주고 있다. 여기서도 대략 대낮지역과 야간지역으로 나누어 L값을 제시하였다. 이 두 경우에서도 Sawtooth 진동 각 톱니 주기 시작 후에 경계면 L값이 증가하고 그 후 다음 주기 전까지 감소하는 일반적 경향을 볼 수 있다. 예외적으로 2002년 10월 04일 UT 08시와 09시 사이에서는 L값 증가와 Sawtooth 진동 시간 사이에 시간적 일치가 다소 부정확하게 나타나고 있으며, 또한 14시부터 17시 사이와 19시부터 21시 사이에서는 명확한 Sawtooth 진동이 없는데도 L값의 변동이 나타나고 있다. 또한 2002년 10월 24일 UT 04시 부근에서는 명확한 Sawtooth 현상이 없는데도 L값의 증가가 나타나고 있고, UT 20:40에서는 대낮지역 L값 변화가 야간지역과 다름을 볼 수 있다.

앞에서 세 개의 이벤트에 대해 제시한 L값의 변화에는 원칙적으로 시간적 변화와 공간적 변화가 혼합되어 나타날 수 있는 가능성이 있다. L값의 공간적 변화 효과는 위성이 매번 공전 할 때마다 MLT상 상당히 다른 공전 궤도면을 가지면 더 중요할 것이다. 이런 경우에는 MLT 영역을 좀 더 세분하게 나눠 경계면 L값을 제시하여야 하지만, 이렇게 하면 각 영역별 얻어지는 자료 수가 매우 적어져 그 실효성이 없게 된다. 위에서는 결과를 크게 대낮지역과 야간지역으로 나누어 제시하였는데, 그럼에도 불구하고 대낮지역과 야간지역 모두에서 Sawtooth 진동과 일치하여 L값이 진동하는 일반적 경향이 나타났으므로 L값의 시간적 변화 효과가 공간적 변화 효과를 압도했음을 짐작 할 수 있다.

그림 4a에서 L값은 바깥 방사선 벨트 외경계면이 대부분 지구정지궤도보다 안쪽에 위치하고 있는 것으로 나타난다. 그러나 같은 시간에 LANL 위성에서 측정한 양성자의 플럭스는 그림 1a에서 알

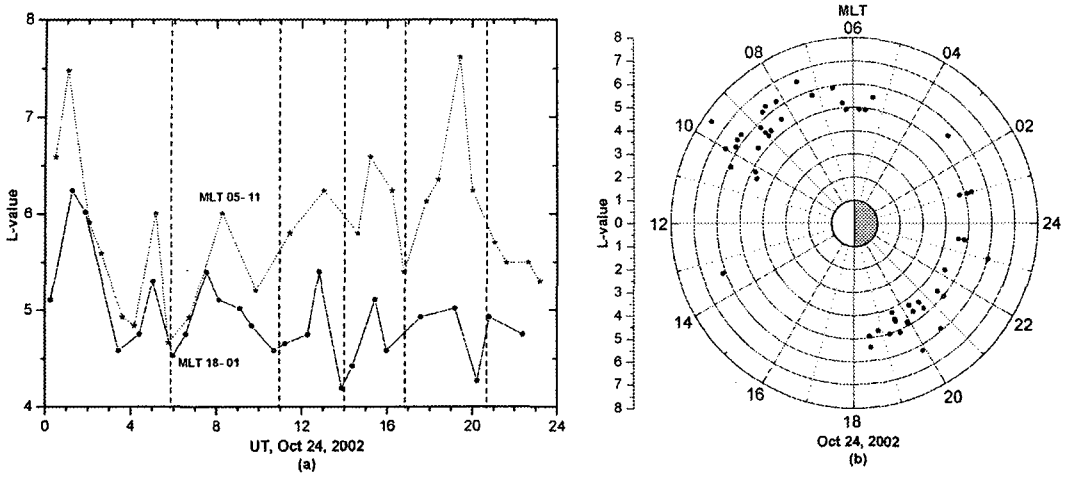


그림 6. 2002년 10월 24일 Sawtooth 진동 이벤트에 대해 그림 4와 같은 형식으로 나타낸 결과.

수 있듯이 상당한 값을 보여 준다. 또한 대낮지역의 자기장은 야간지역의 자기장보다 항상 밀집되어 있기 때문에 바깥 방사선 벨트 외경계면의 위치는 대낮지역에서 더 멀리 위치해야 한다. 그러나 그림 4a를 보면 바깥 방사선 벨트 외경계면의 위치가 때로는 야간지역에서 더 먼 곳에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 문제들은 아마도 SAMPEX에서 제공되는 L값들이 지구자기장을 단순 쌍극자 형태로 본 IGRF 1990 모델을 사용하여 구해졌기 때문일 것이다. 이 논문에서 다루는 Sawtooth 진동 이벤트는 자기 폭풍 기간에 해당하며 자기 폭풍 기간 중 자기권의 자기장은 매우 심하게 변형되기 쉽다. 따라서 만약 지구자기권 자기장을 더 잘 표현하는 자기장 모델, 즉 태양풍동압력(Solar Wind Dynamic Pressure)이나 행성간 자기장(Interplanetary Magnetic Field)에 의한 영향 등을 포함한 모델을 사용한다면 위와 같은 문제점들은 나타나지 않을 것이다. 그러나 이 문제는 차후 확장 연구의 숙제로 남기기로 한다. 무엇보다도 여기서 중요한 요점은 경계면 L값의 절대값 보다는 Sawtooth 진동 틱니 주기에 맞춰 방사선 벨트 외경계면 L값이 일관되게 증감한다는 것이다.

4. 토의와 결론

위 분석 결과로부터 Sawtooth 대전 입자 플럭스가 증가한 후 방사선 벨트 외경계면이 팽창하고, 그 후 입자 플럭스가 감소함에 따라 벨트 외경계면도 다시 수축하는 현상이 Sawtooth 진동 각 틱니 주기에 맞춰 반복됨을 발견하였다. 그런데 그림 1에서 GOES 위성 관측을 통해 설명하였듯이 Sawtooth 진동 기간 중 야간지역 자기권 자기장이 늘어짐과 쌍극자화 변화를 반복한다. 자기장 늘어짐은 Sawtooth 대전 입자 플럭스 감소와 일치하고, 쌍극자화는 대전 입자 플럭스 증가와 일치 한다. 야간지역 자기장의 늘어짐에 의한 자기장 세기의 감소는 대낮지역과 야간지역 사이 자기장 세기의 비대칭을 증가시키고, 반대로 쌍극자화 변화 시에는 밤낮 지역간의 자기장 세기의 비대칭 정도를 감소시킨다. 따라서 방사선 벨트 외경계면의 수축은 Sawtooth에서 자기장 세기 비대칭성이 증가할 때와, 팽창은 Sawtooth시 자기장 세기 비대칭성이 감소 할 때와 각각 연관이 있는 것으로 보인다. 실제

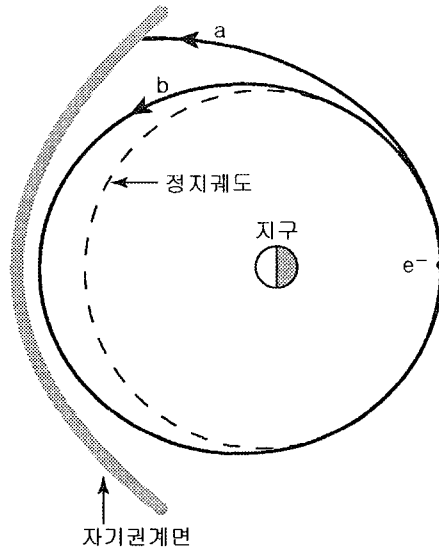


그림 7. 주야간 자기장 차이가 큰 경우(a)와 작은 경우(b)의 전자궤적 비교. 두 경우 모두 같은 지점에서 같은 초기 조건으로 출발한 입자이다.

로 상대론적 전자의 궤적은 밤낮 사이의 자기장 세기의 비대칭성이 증가(감소) 할수록 자기권계면을 만나게 되어 열린 궤적이 될 가능성이 높아(낮아)진다. 그림 7에 이에 대한 간단한 설명을 하였다. 정지궤도 자정지역에서 같은 초기 조건으로 출발하는 전자의 두 상황을 생각해 봤을 때, 궤적 a는 주야간 자기장 세기의 차이가 충분히 커서 입자의 궤적이 자기권계면을 만나는 열린 궤적이 되는 경우이다. 따라서 이 경우 야간지역에서 방사선 벨트 외경계면은 정지궤도보다 가까운 L값에 해당 할 것이다. 반면 주야간 자기장 세기의 차이가 충분히 작으면 같은 지점에서 같은 조건으로 출발한 전자의 궤적은 b와 같이 닫힌 궤적이 될 수 있다. 이런 경우 야간지역에서 방사선 벨트 외경계면은 정지궤도 밖에 놓이게 될 것이다. 이에 대한 자세한 계산은 현재 수행중이며 다음 논문을 통해 발표 할 예정이다.

또한, 세 Sawtooth 이벤트 기간 중 결정된 방사선 벨트 외경계면이 대체로 정지궤도 L값 이내에 해당한 반면, 정지궤도 LANL 위성이 관측한 Sawtooth keV 에너지대의 대전 입자 플럭스는, 톱니 주기에 따라 증감을 보이지만, 여전히 상당한 플럭스 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 이것은 고위도 지역에서 결정된 L값이 적도면에서의 방사선 벨트 외경계면을 정확히 반영하지 못하고 있을 가능성이 있음을 시사한다. 혹은 대전 입자의 궤적이 에너지에 따라 상당히 다를 수 있어서, Sawtooth 현상을 정의하는데 의존하는 keV 에너지대의 입자에 대한 감금 경계면(Trapping Boundary)이 더 높은 에너지대(~MeV)의 입자에 대한 방사선 벨트 외경계면보다 더 바깥에 놓일 수 있다. 이 가능성 역시 보다 자세한 계산을 통해 연구 중에 있다.

정리하면, 이 논문에서는 먼저 2002년 04월 18일, 2002년 10월 03 ~ 04일, 그리고 2002년 10월 24 ~ 25일에 발생한 Sawtooth 이벤트를 보고하였다. Sawtooth 진동은 keV 에너지대의 대전 입자 플

력스가 서서히 감소하다가 급증하는 현상을 약 2~4시간 간격으로 수차례 보인다. 이 세 이벤트 기간에 대해 SAMPEX에서 얻어진 MeV 전자 관측자료를 이용하여 바깥 방사선 벨트 외경계면의 변화를 조사하였다. 외경계면은 Sawtooth 입자 플럭스가 급증 한 후 팽창하고, Sawtooth 입자 플럭스가 서서히 감소하는 기간에는 다시 수축하는 경향을 보였다. 이것은 Sawtooth 입자 플럭스 증감에 동반되는 야간 지역 자기장의 쌍극자화와 늘어짐에 따라 방사선 벨트 외경계면이 주기적으로 변하게 됨을 시사한다.

감사의 글: 이 논문은 2005년 정부 재원(교육인적자원부 학술연구조성 사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었다(KRF-2005-015-106206). SAMPEX 위성 관측 자료의 제공과 해석에 도움을 준 Aerospace Corporation의 Bern Blake 박사와 Los Alamos 위성 관측 자료를 제공한 Los Alamos 국립 연구소 G. Reeves 박사께 감사를 표하며, 또한 연구 과정에서 여러가지로 조언해 준 UCLA의 L. Lyons 교수께도 감사한다.

참고문헌

- Baker, D. N., Mason, G. M., Figueroa, O., Colon, G., Watzin, J. G., & Aleman, R. M. 1993, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 31, 531
- Belian, R. D., Cayton, T. E., & Reeves, G. D. 1995, in *Space Plasmas*, vol.89, eds. M. Ashour-Abdalla, T. Chang, & P. Dusenberry (Washington DC: AGU), p.143
- Henderson, M. G. 2004, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L11804
- Henderson, M. G., Reeves, G. D., Skoug, R., Thomsen, M. F., Denton, M. H., Mende, S. B., Immel, T. J., Brandt, P. C., & Singer, H. J. 2006, *JGR*, 111, A01S90
- Kim, K. C., Lee, D. Y., Lee, E. S., Choi, C. R., Kim, K. H., Moon, Y. J., Cho, K. S., Park, Y. D., & Han, W. Y. 2005, *JGR*, 110, A09223
- Lee, D. Y. & Lyons, L. R. 2004, *JGR*, 109, A04202
- Lee, D. Y., Lyons, L. R., & Yumoto, K. 2004, *JGR*, 109, A04201
- Nakamura, R., Isowa, M., Kamide, Y., Baker, D. N., Blake, J. B., & Looper, M. 2000, *JGR*, 105, 15875