

Sawtooth 진동 현상과 지자기 폭풍의 통계적 관계

김재훈^{1†}, 이대영¹, 최정림¹, 허영태², 한진욱², 홍순학²

¹충북대학교 천문우주학과

²전파연구소

Statistical Relationship between Sawtooth Oscillations and Geomagnetic Storms

Jae-Hun Kim^{1†}, Dae-Young Lee¹, Cheong-Rim Choi¹, Young-Tae Her²,
Jin-Wook Han², and Sun-Hak Hong²

¹Dept. of Astronomy & Space Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

²Radio Research Laboratory

E-mail: camacsky@hanmail.net

(Received April 21, 2008; Accepted May 4, 2008)

요 약

이 논문에서는 2000년부터 2004년까지 발생한 지자기 폭풍과 Sawtooth 진동 현상의 통계적 관계에 대해 연구하였다. 먼저 이 시기에 발생한 154건의 지자기 폭풍을 Dst 지수를 이용하여 선별하였으며 특히 선별된 지자기 폭풍이 코로나 물질 분출(Coronal Mass Ejection; CME), Co-rotating Interaction Region(CIR) 등 어떤 유도체에 의해 발생되었는지 구분하였다. 또한 같은 2000~2004년 기간에 대해 정지궤도 고에너지 대전 입자 플럭스 자료를 통해 Sawtooth 진동 현상 사례 48건을 선별하였다. 이 두 종류의 현상에 대한 통계적 상관관계를 분석한 결과, 총 154건의 지자기 폭풍 중에서 47건(약 30%)이 Sawtooth 진동 현상을 동반하는 지자기 폭풍이었다. 또한 총 48건의 Sawtooth 진동 현상 사건 중 단 1건의 경우를 제외하고 모든 Sawtooth 현상이 지자기 폭풍 기간 동안 발견되었다. 그리고 Sawtooth 진동을 동반하는 지자기 폭풍은 그 유도체가 CIR인 경우(약 30%) 보다는 CME인 경우(약 62%)가 더 많았다. 이외에도 Sawtooth 진동 현상은 CME에 의한 지자기 폭풍의 경우에는 주로(약 82%) 주상기간(Main Phase)에 발생하였지만 CIR에 의한 지자기 폭풍의 경우에는 주로(약 78%) 회복기간(Recovery Phase)에 발생하였다. 다음으로 지자기 폭풍을 유발하는데 중요한 요소인 행성간 자기장 IMF (Interplanetary Magnetic Field)의 남쪽 방향 성분 Bz 및 태양풍의 속도가 Sawtooth 진동 발생 기간 중 어떤 평균적인 특징을 갖는지 조사하였다. 대부분의 Sawtooth 진동 현상은 IMF Bz가 -15nT에서 0 사이이고, 태양풍 속도가 400~700km/s인 상태에 해당한다. 또한 IMF Bz의 강도는 Sawtooth 진동 기간 동안에 대전 입자 플럭스 증가의 횟수와 약한 상관관계가 있음을 발견하였다.

Abstract

We have investigated a statistical relationship between sawtooth oscillations and geomagnetic storms during 2000-2004. First of all we selected a total of 154 geomagnetic storms based on the Dst index, and distinguished between different drivers such as Coronal Mass Ejection (CME) and Co-rotating Interaction Region (CIR). Also, we identified a total of 48 sawtooth oscillation events based on geosynchronous energetic

[†]corresponding author

particle data for the same 2000-2004 period. We found that out of the 154 storms identified, 47 storms indicated the presence of sawtooth oscillations. Also, all but one sawtooth event identified occurred during a geomagnetic storm interval. It was also found that sawtooth oscillation events occur more frequently for storms driven by CME (~62%) than for storms driven by CIR (~30%). In addition, sawtooth oscillations occurred mainly (~82%) in the main phase of storms for CME-driven storms while they occurred mostly (~78%) during the storm recovery phase for CIR-driven storms. Next we have examined the average characteristics of the Bz component of IMF, and solar wind speed, which were the main components for driving geomagnetic storm. We found that for most of the sawtooth events, the IMF Bz corresponds to -15 to 0 nT and the solar wind speed was in the range of 400~700 km/s. We found that there was a weak tendency that the number of teeth for a given sawtooth event interval was proportional to the southward IMF Bz magnitude.

Keywords: sawtooth oscillation, CME-driven storm, CIR-driven storm

1. 서 론

행성간 자기장(Interplanetary Magnetic Field; IMF) 및 태양풍의 변화는 지구 자기권에 직접적인 영향을 준다(Kamide et al. 1998). 특히 IMF가 강하게 남쪽으로 향하는 조건일 경우에는 지구 자기권에 지자기 폭풍이 빈번하게 발생한다. 지자기 폭풍은 태양풍에서 지구 자기권 내부로 전달된 에너지가 전기적 전류 형태로 지구 자기권과 이온층에 재분배 되는 현상이라고 볼 수 있다(Gonzalez et al. 1994). 이때 주로 지구를 둘러싸고 있는 환전류의 세기가 증가하여 지자기 폭풍이 발생하는 것으로 알려져 있는데, IMF가 남쪽을 유지하는 시간이 길수록 그리고 그러한 자기장의 세기가 클수록 환전류가 더욱 강화되어, 더 강한 지자기 폭풍을 만들어 낸다(Gonzalez & Tsurutani 1987). 지자기 폭풍을 발생시키는 가장 대표적인 현상은 행성간 충격파를 동반하는 CME(Coronal Mass Ejection)와 CIR(Corotating Interaction Region)이 있다. CME는 자기 구름(Magnetic Cloud)과 Ejecta로 분류되기도 한다. CIR은 태양 코로나 홀에서 방출된 고속의 High-Speed Stream(HSS)이 배경의 느린 태양풍을 압축하면서 만들어낸 영역이라고 알려져 있다. 이들은 일반적인 태양풍과는 달리 몇 시간씩 IMF를 남쪽으로 유지시킬 수 있으며, 자기장세기 또한 강하다. 그러므로 이들이 지구 자기권에 충돌하면 지구 자기권 및 고층대기권의 물리적 상태를 크게 변화시키기 때문에 우주환경을 연구하는 학자들에게 아주 중요한 연구대상이 되고 있다.

한편, Sawtooth 진동 현상은 지구 자기권에 분포하는 수십에서 수백 keV 에너지 영역의 대전 입자 플럭스가 서서히 감소하다가 갑자기 동시에 증가하는 현상이 대략 2시간에서 4시간 간격 주기로 나타나는 것이다(Belian et al. 1995, Reeves et al. 2004, Henderson et al. 2006). 이러한 현상은 그림 4에서 확인할 수 있으며, 또한 김재훈 등(2006)의 그림 1에서도 볼 수 있다. Sawtooth 진동은 Los Alamos National Laboratory(LANL) 정지궤도위성 관측에서 처음 발견하였다. Sawtooth 진동 현상은 그 발생의 원인 및 원리가 아직까지 확립되어 있지 못하여 현재 학자들 사이에 논쟁의 중심이 되

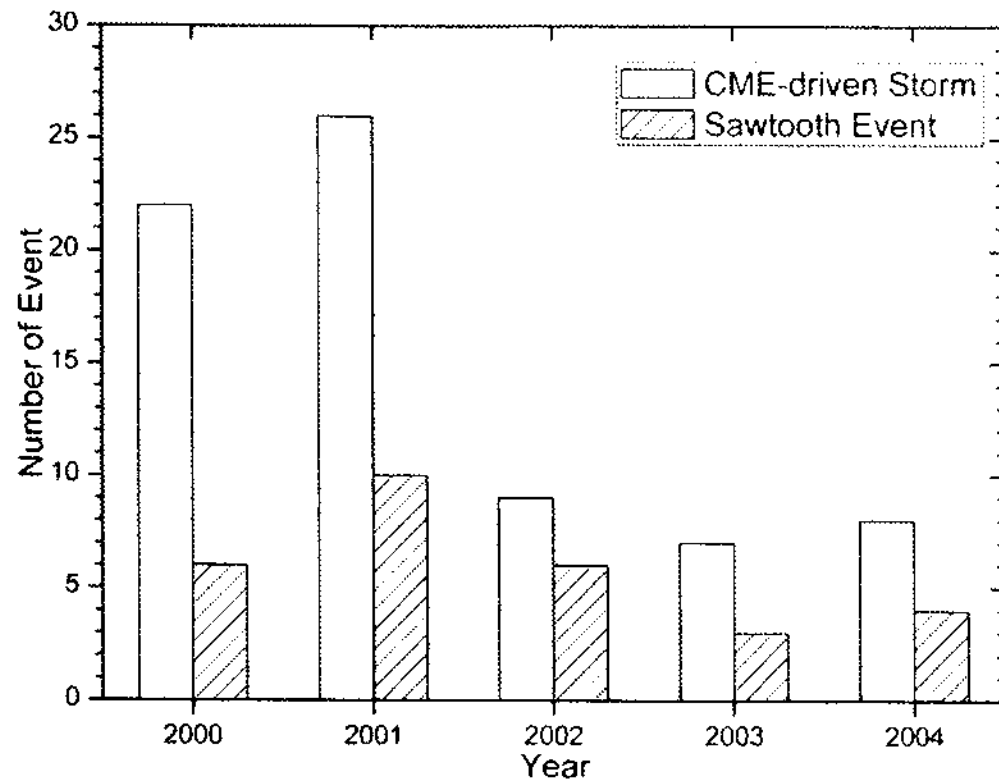


그림 1. 연도별 CME에 의한 지자기 폭풍 및 Sawtooth 진동 현상의 발생 횟수.

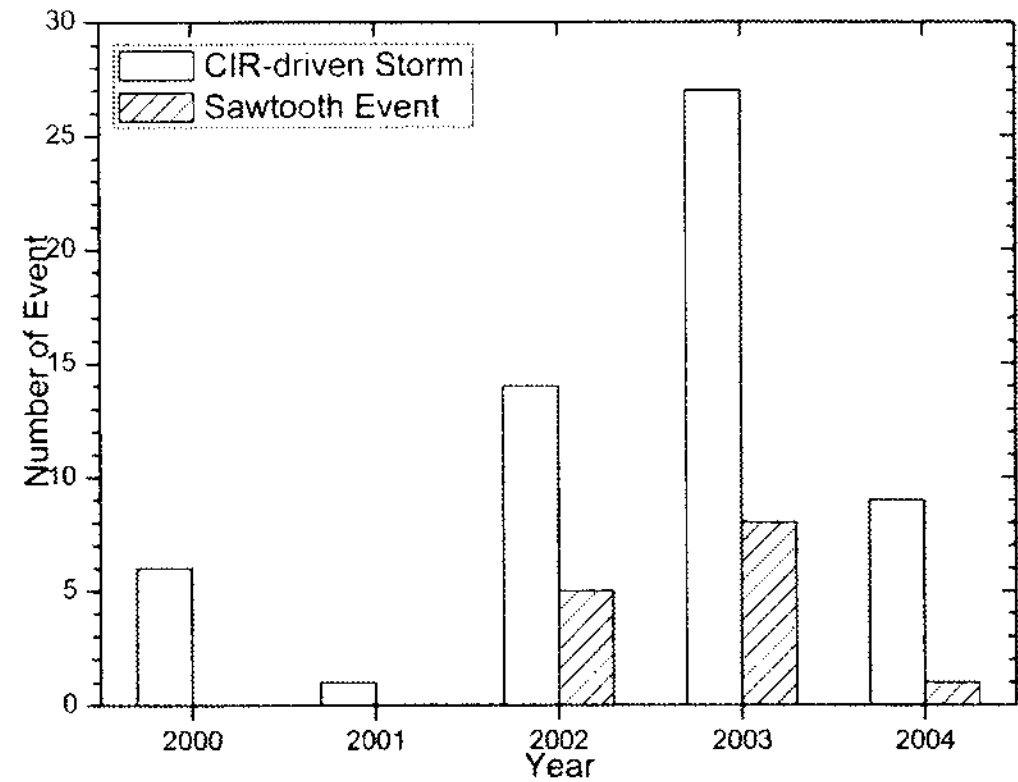


그림 2. 연도별 CIR에 의한 지자기 폭풍 및 Sawtooth 진동 현상의 발생 횟수.

고 있다. 지금까지의 연구 결과에 의하면 Sawtooth 진동 현상은 높은 에너지의 양성자에서 잘 정의되며(Henderson 2004), 대전 입자의 플럭스 변화와 지구 자기장의 수평 성분(H-component)의 변화가 서로 연관성이 있다(Lee & Lyons 2004). 또한 IMF가 강하게 남쪽으로 향하는 조건과 태양풍의 속도에 따라 발생빈도가 달라진다(Borovsky & Denton 2006). 특히 Sawtooth 진동 현상은 지자기 폭풍 기간에 환전류가 강화되면서 발생하며, 자기 구름과 같이 IMF가 강하게 남쪽으로 향하는 조건을 만족할 때 발생한다고 보고되기도 하였다(Clauer et al. 2006). 이외에도 Sawtooth 진동 현상을 일으키는 요인으로 태양풍 동압력이 크게 작용한다는 주장도 있다(Lee et al. 2004, Pulkkinen et al. 2007). 그리고 이 기간에는 지구 자기장과 바깥 방사선 벨트 외경계면이 낮지역과 밤지역에서 Sawtooth 진동 주기에 따라 변하게 된다(김재훈 등 2006).

Sawtooth 진동 현상의 여러 특징이 서브스톰과 유사하기 때문에 Sawtooth 진동 현상을 단순히 주기적인 서브스톰이라 주장하는 학자들도 있다. 이들은 Sawtooth 진동이 2~4시간 간격으로 발생한다는 점, 이 기간 동안에 오로라가 관측되고 밤지역에서 지구 자기장의 늘어짐(stretching)과 쌍극자화(dipolarization) 현상이 있다는 점을 증거로 제시하고 있다(McPherron et al. 1973). Henderson et al.(2006)은 Sawtooth 진동 기간 동안에 지구 정지궤도 자기장의 경사각을 측정한 자료를 이용하여 자기권 자기장의 늘어짐과 쌍극자화 현상이 늦은 오후 MLT 지역까지도 나타난다는 결과를 발견했지만, 일반적으로 보통의 서브스톰 쌍극자화 현상은 자정 근처지역에서 관측된다. Pulkkinen et al.(2007)은 오로라 활동을 나타내는 AL 지수의 비교 및 분석 결과 AL 지수가 주기적 서브스톰보다는 Sawtooth 진동에서 더 낮은 분포를 보인다고 했다.

이처럼 Sawtooth 진동과 서브스톰 사이에 유사성과 차이점이 있는 것이 분명하며, 이에 대한 해석을 놓고 학자들 사이에 서로 다른 주장들이 계속해서 제기되고 있다. 심지어 Sawtooth 진동 현상과 지자기 폭풍 사이의 단순한 통계적 상관관계에 대한 연구조차 의견이 다소 다르다. 따라서 이 논문에서는 2000년부터 2004년까지 발생한 모든 Sawtooth 진동 현상과 지자기 폭풍을 조사하여 이들 사이의 통계적 상관관계를 알아보고자 한다. 이를 통해 Sawtooth 진동 현상의 발생에 대한 작은 실마리를 제공하기를 희망한다.

2. 자료 수집 및 사례 선별

2.1 지자기 폭풍 사례 선별

이 논문에서는 태양 활동이 가장 컸던 2000년부터 극대기에서 극소기로 바뀌는 시기 2004년까지를 대상으로 지자기 폭풍을 선별하였다. 선별된 지자기 폭풍은 유도체에 따라 CME에 의한 지자기 폭풍, CIR에 의한 지자기 폭풍, 그리고 두 부류에 속하지 않거나 분류하기에 어려움이 있는(Undetermined) 지자기 폭풍 세 가지로 분류하였다.

지자기 폭풍의 선별 기준은 Dst 지수가 최저 -50nT 이하(Gonzalez et al. 1994)로 떨어지는 경우로 하였는데 이때부터 최소로 떨어지는 시점을 지자기 폭풍의 주상기간으로 판단하고, 그 후 회복기간이 끝나는 시점은 Dst 지수가 -40nT 이상으로 최소 3시간 동안 유지하는 경우로 제한하였다. 그리고 여기서 사용된 Dst 지수는 Kyoto에 위치한 World Data Center에서 제공하는 1시간 평균치 자료를 이용하였다.

또한 각각의 지자기 폭풍을 발생시키는 유도체를 확인하기 위해 이 논문에서는 ACE 위성에서 관측한 태양풍의 물리량(태양풍 속도, 양성자 밀도, 양성자 열적 온도) 및 IMF 자료를 이용하였다. 이 자료는 Coordinated Data Analysis Web(CDAWeb)에서 1분 평균치의 자료를 얻어 사용하였다. 이외에도 SOHO LASCO CME Catalog에서 제공하는 CME 사례와 Magnetic Clouds의 자기 구름 목록을 이용하여 지자기 폭풍의 유도체를 선별하였다. 이와 같은 방법으로 얻은 지자기 폭풍 사례와 2.2절에 기술된 Sawtooth 진동 사례의 통계적 관계를 분석하였다.

2.2 Sawtooth 진동 사례 선별

2.1절에서 지자기 폭풍을 선별한 기간과 같은 2000년부터 2004년까지의 기간 중 발생한 Sawtooth 진동 현상을 다음과 같은 기준으로 선별하였다. 첫째, 최소 세 번의 대전 입자 플럭스 증가 현상이 4시간 이내의 주기로 연이어 발생한다. 둘째, 세 번 중 적어도 한번의 대전 입자 플럭스 증가 현상에 대해 정오근처지역과 자정근처지역에 정지궤도 위성(LANL 위성 이용)이 있어야 한다. 이때 정오근처지역이라 함은 Magnetic Local Time(MLT) 12시를 기준으로 전후 세 시간 지역을, 자정근처지역은 MLT 24시를 기준으로 전후 세 시간 지역으로 각각 정의하였다. 셋째, 정오근처지역에 위치한 위성이 관측한 플럭스 변화와 자정근처지역에서의 플럭스 변화 사이에 시간차가 5분 이내인 경우로 제한한다. 다시 말해 대낮지역과 자정지역 사이에 플럭스 증가가 거의 동시에 발생하는 사례를 선별한다는 것이다. 이와 같은 조건을 설정함으로써 우리의 Sawtooth 진동 현상은 상당히 전지구적(global) 현상으로 정의하게 되는 것이다. 또한 여기서 사용된 플럭스 자료는 지구정지궤도에 위치한 LANL 위성(1990-095, 1991-080, 1994-084, LANL-97A, LANL-01A, LANL-02)에서 측정된 것으로 양성자의 에너지가 50keV 부터 400keV 사이의 다섯 채널을 이용하였다.

3. 통계적 분석

3.1 Sawtooth 진동 현상 발생 빈도와 지자기 폭풍 발생 빈도의 통계적 관계

앞에서 제시한 기준과 방법을 통해 총 154건의 지자기 폭풍 사례와 총 48건의 Sawtooth 진동 현상 사례를 얻었다. 총 154건의 지자기 폭풍 중에서 72건(약 47%)이 CME에 의한, 그리고 57건(약 37%)이 CIR에 의한 지자기 폭풍이며, 나머지 25건에 대한 유도체는 불분명 하다. 또한 48건의 Sawtooth 진

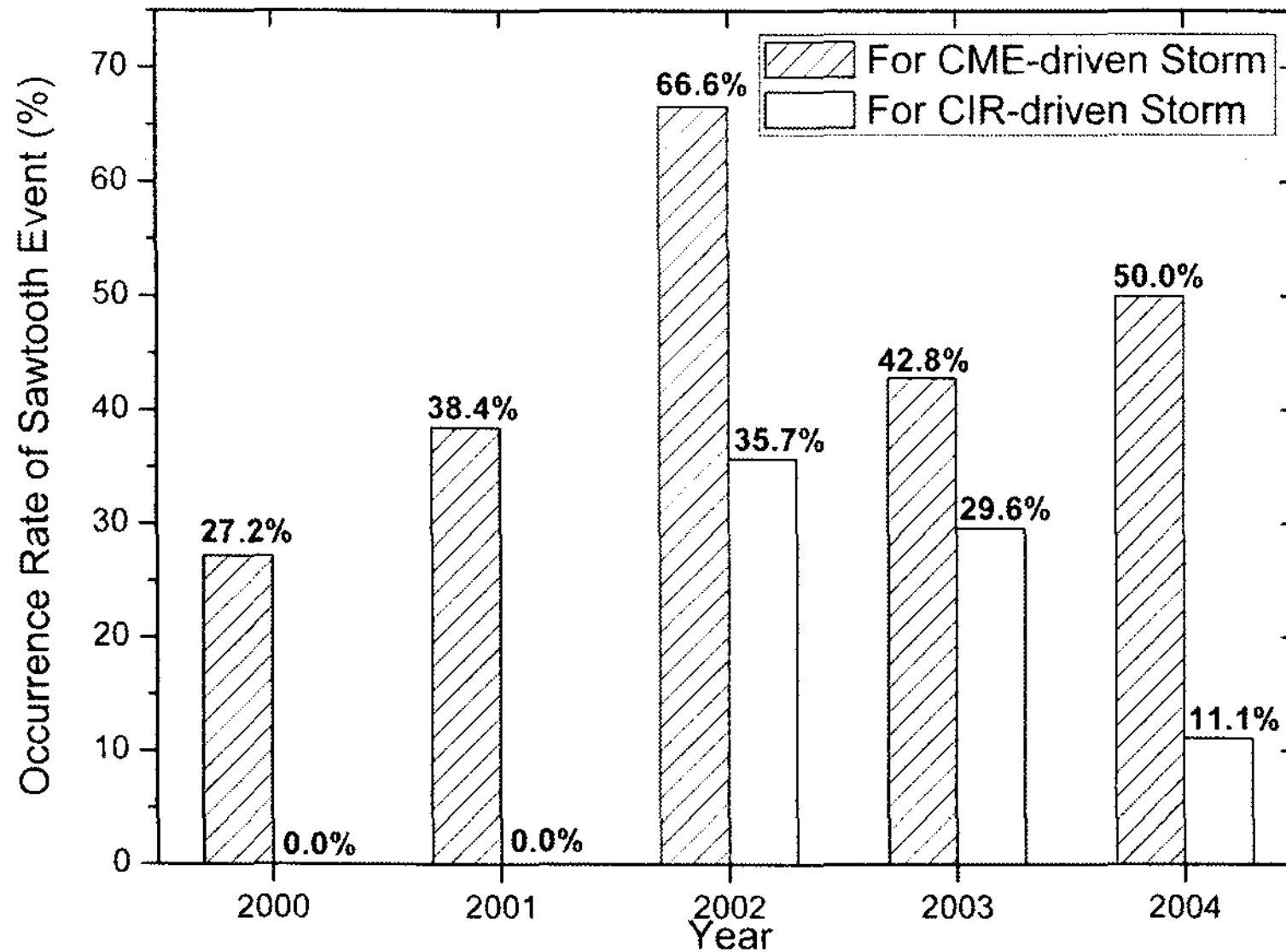


그림 3. 연도별 지자기 폭풍 발생건수 대비 Sawtooth 진동 현상의 발생 비율.

동 현상 사례 중에서 1건을 제외한 47건의 사례는 지자기 폭풍 중에 발생 하였다. 이 중에서 CME에 의한 지자기 폭풍 기간 동안에 발생한 Sawtooth 진동 현상은 29건(약 62%), CIR에 의한 지자기 폭풍 기간 동안에 발생한 Sawtooth 진동 현상은 14건(약 30%)로 나타났다. 나머지 4건은 어느 유도체에도 속하지 않는 Sawtooth 진동 현상이었다. 이들 47건의 Sawtooth 진동 현상과 129건의 지자기 폭풍 사례 사이의 통계적 관계를 그림 1에서 3에 정리하였다. 먼저 그림 1은 2000년부터 2004년까지 CME에 의한 지자기 폭풍의 발생 횟수와 그리고 그러한 CME에 의한 지자기 폭풍 중에 발생한 Sawtooth 진동 현상 횟수를 나타낸 그림이며, 그림 2도 그림 1과 같은 방법으로 CIR에 의한 지자기 폭풍과 Sawtooth 진동 횟수를 나타낸 것이다. 2000년과 2001년에 발생한 지자기 폭풍은 주로 CME에 의한 것으로 태양 활동 극대기에 따른 결과라고 할 수 있다. 또한 태양 활동 극대기라도 CIR에 의한 지자기 폭풍이 발생할 수 있음을 그림 2로부터 확인 할 수 있다. 하지만 태양 활동이 극대기를 벗어나기 시작하는 2002년부터는 오히려 CIR에 의한 지자기 폭풍 발생 횟수가 뚜렷하게 증가하며 CME에 의한 지자기 폭풍은 크게 감소하는 특징을 보이고 있다.

한편 태양 활동 극대기에는 모든 Sawtooth 진동 현상이 CME에 의한 지자기 폭풍기간에만 발생했고, 극대기를 벗어나기 시작하여 CIR에 의한 지자기 폭풍이 급격히 증가한 2002년부터는 두 가지 유도체에 의한 지자기 폭풍에서 모두 Sawtooth 진동 현상이 발생했다. 또한 CME에 의한 Sawtooth 진동 현상은 주로(약 82%가) 지자기 폭풍의 주상기간에서 발생했으며 CIR에 의한 Sawtooth 진동 현상은 주로(약 78%가) 회복기간에서 발생하였음을 확인하였다.

그림 3에서 가로축은 년도를 나타내며 세로축은 연도별 CME 및 CIR에 의한 지자기 폭풍 수에 대한 Sawtooth 진동 현상 발생 빈도를 백분율로 나타낸 것이다. 2000년부터 2004년까지 CME에 의한 지자기 폭풍기간 동안 Sawtooth 발생률은 최소 27.2%에서 최대 66.6%까지 보인 반면에 CIR에 의한 지자기 폭풍기간 동안 Sawtooth 발생률은 최소 0.0%에서 최대 35.7%의 분포를 보이고 있다.

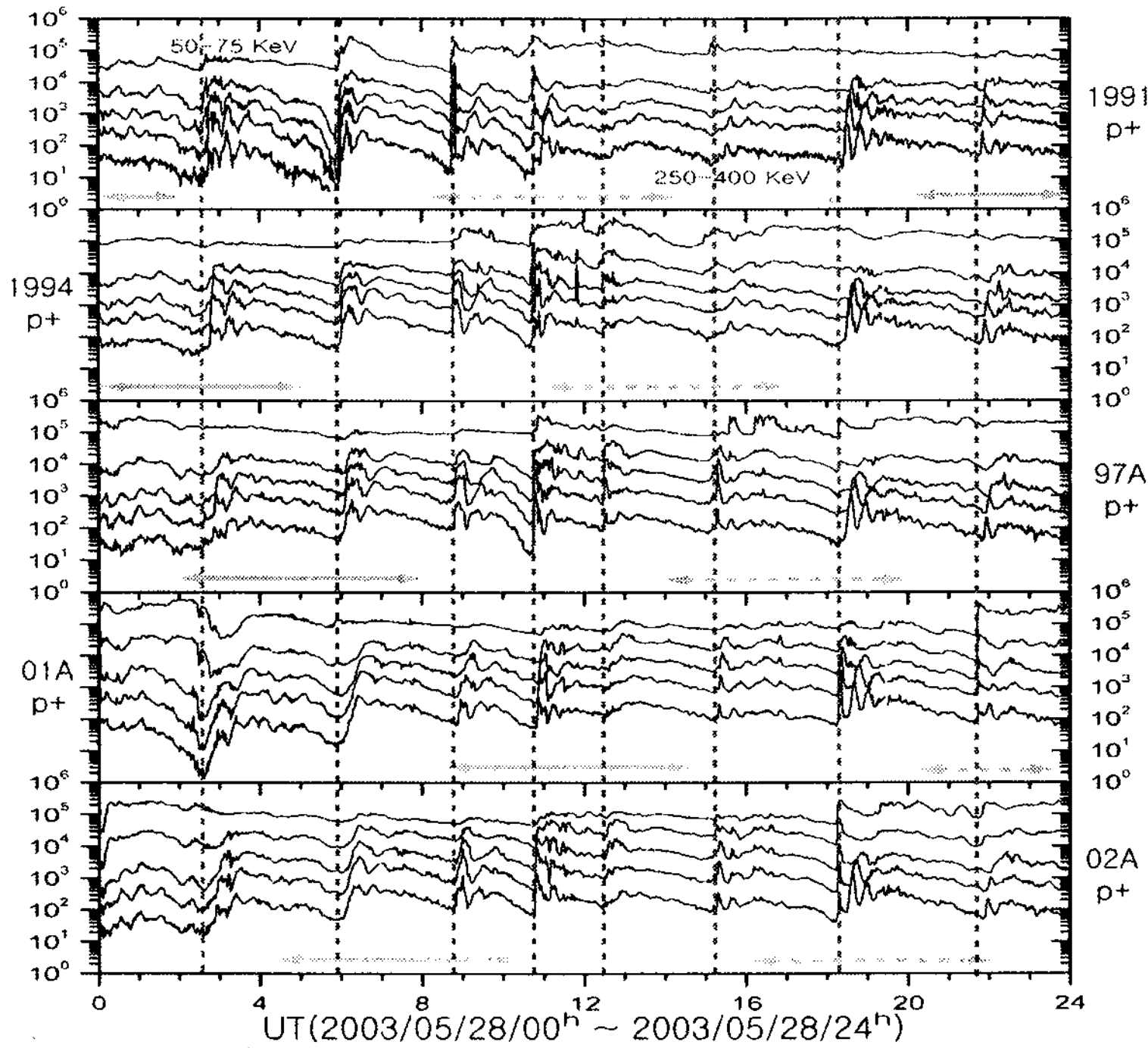


그림 4. LANL 위성에서 관측한 2003년 5월 28일 Sawtooth 진동 현상.

이것은 전체적으로 CME에 의한 지자기 폭풍기간에 Sawtooth 진동 현상 발생률이 높음을 보여주고 있는 것이다. 그리고 CME에 의한 지자기 폭풍의 경우 태양 활동 극대기인 2000년과 2001년에는 Sawtooth 발생 비율이 각각 27.2%와 38.4%이지만 태양 활동 극대기를 떠나기 시작하거나 극소기로 진입하기 시작하는 시기(2002년~2004년)에는 각각 66.6%, 42.8%, 50.0%을 보여 오히려 이 시기에 더 높게 나타나는 결과가 나온다. 즉, CME에 의한 지자기 폭풍이 가장 활발한 극대기라고 해서 Sawtooth 진동 현상 발생률 또한 높은 것은 아니라는 것으로 생각된다. 반면, CIR에 의한 지자기 폭풍 중 발생한 Sawtooth 진동 현상은 CIR에 의한 지자기 폭풍 발생이 현격히 증가하는 2002년 전까지는 단 한 건도 관측되지 않았으며, 그 후부터 눈에 띄게 증가함을 볼 수 있다.

이외에도 이번 연구에서는 1건의 Sawtooth 진동 현상이 지자기 폭풍이 아닌 기간에 발생하였다. 이 사례를 그림 4와 그림 5에 보여주고 있는데, 2003년 5월 28일에 있었던 Sawtooth 진동 현상으로서 그림 4는 5기의 LANL 위성에서 관측한 고에너지 양성자 플럭스 변화를 나타내며, 그림 5는 ACE위성에서 관측한 IMF 변화(B_x , B_y , B_z)와 태양풍 밀도 및 태양풍의 속도, 그리고 Dst 지수변화를 보여주고 있다. 그림에서 Dst 지수변화는 이번 연구에서 지자기 폭풍의 선별 기준인 -50nT 을 넘지 못하였다. 그럼에도 불구하고 정지궤도의 LANL 위성에서 관측된 고에너지 양성자 플럭스 변화를 보면 주기적으로 플럭스 증감 현상을 보이고 있다. 특히 UT 9시경에 나타난 플럭스 증가는 세 개의 LANL 위성(1991위성, 01A위성, 02A위성)이 각각 정오지역과 자정지역에 머물고 있었고 거의 동시에 플럭스 증가 현상이 나타났다. 이 예외적인 사례는 태양풍 속도가 상당히 크고 IMF가 Alfvénic 변화를 하는 HSS 기간 중에 발생하였다. 이 사례에 앞서 2003년 5월 22일 근처에 Dst가 -50nT 을 약간 밑도는

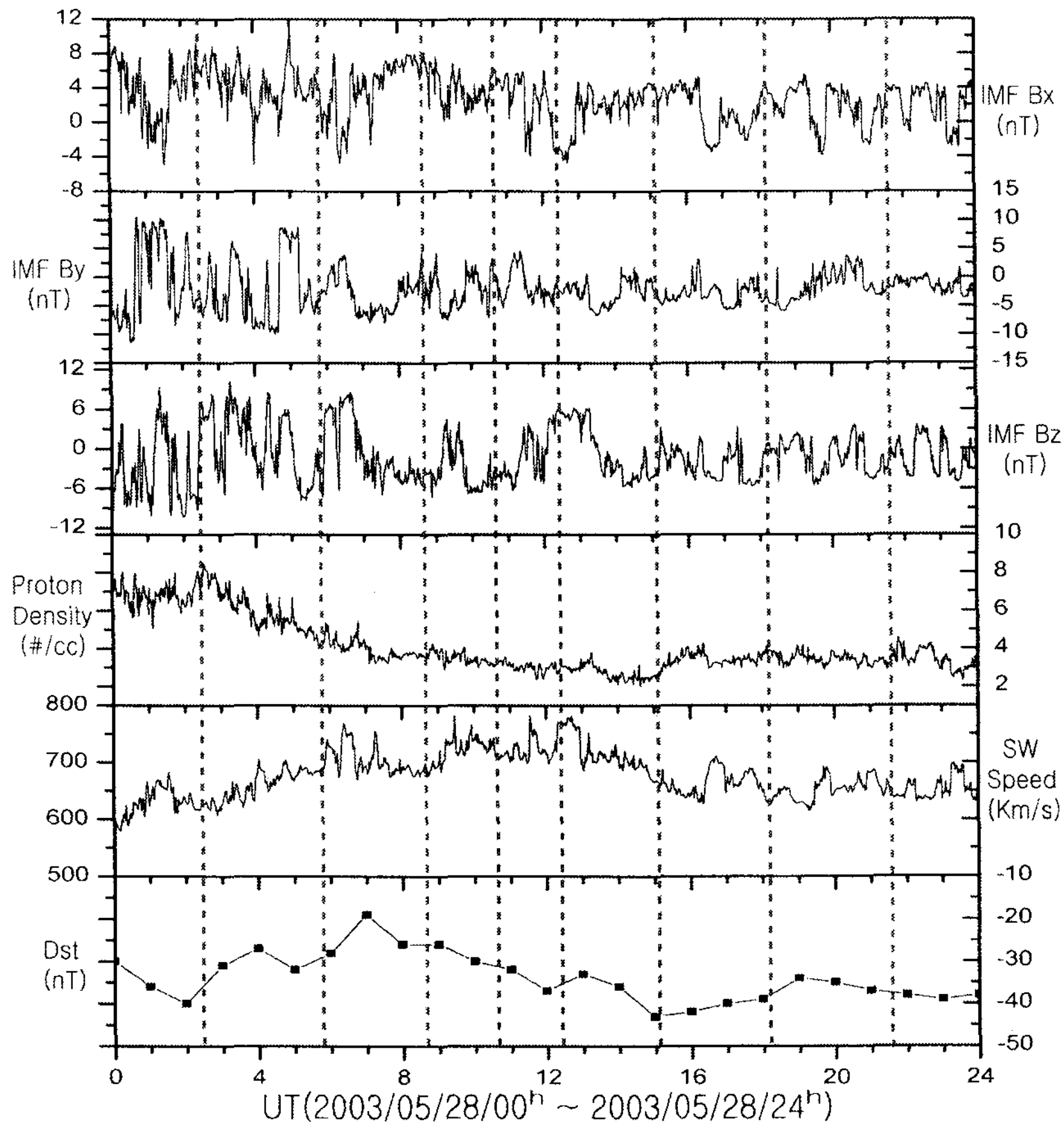


그림 5. 2003년 5월 28일 행성간 자기장 및 태양풍 속도와 밀도 그리고 Dst 지수.

약한 지자기 폭풍이 발생 하였으며, 그 후 며칠에 걸친 회복기가 진행되었다. 5월 30일 매우 늦은 밤에는 Dst가 -120nT 이하의 다소 강한 지자기 폭풍이 발생했다. 따라서 5월 28일의 Sawtooth 사례는 위 두 지자기 폭풍 사이에 놓인 것으로 보인다. 다만, 이 Sawtooth 사례가 5월 22일 근처에 시작한 지자기 폭풍의 긴 회복기의 끝에 해당 된다고 볼 수 있는 관점을 전혀 배제할 수 없으나, 이 논문의 저자들은 그 관계가 모호하다고 보고, 이 Sawtooth 사례는 지자기 폭풍 중이 아닌 것으로 분류하기로 하였다. 여기서 중요한 점은, 매우 드문 경우라고 생각되지만, 지자기 폭풍기간이 아닌 경우에도 Sawtooth 진동 현상이 발생 할 수 있다는 것이다. 통상적으로 Sawtooth 진동 현상은 지자기 폭풍 기간 동안에 발생하는 것으로 인식되어 왔고, 실제 이번 연구 결과에서도 그러하였다. 물론 Sawtooth 진동 현상이 지금까지 정확한 발생 원인과 과정이 밝혀지지 않아 이것을 선별하는 과정에서도 학자들마다 차이가 있기 때문에 선별 기준에 따라 그 결과도 다소 차이가 있을 수 있다. 하지만 이번 연구에서 Sawtooth 진동 현상을 선별 하기 위해 설정한 조건은 다른 어떤 논문에서 제시된 것보다 더 엄격하였음에도 불구하고 지자기 폭풍 기간이 아닌 기간에 Sawtooth 진동 현상이 발견되었다는 것은 의미가 있다.

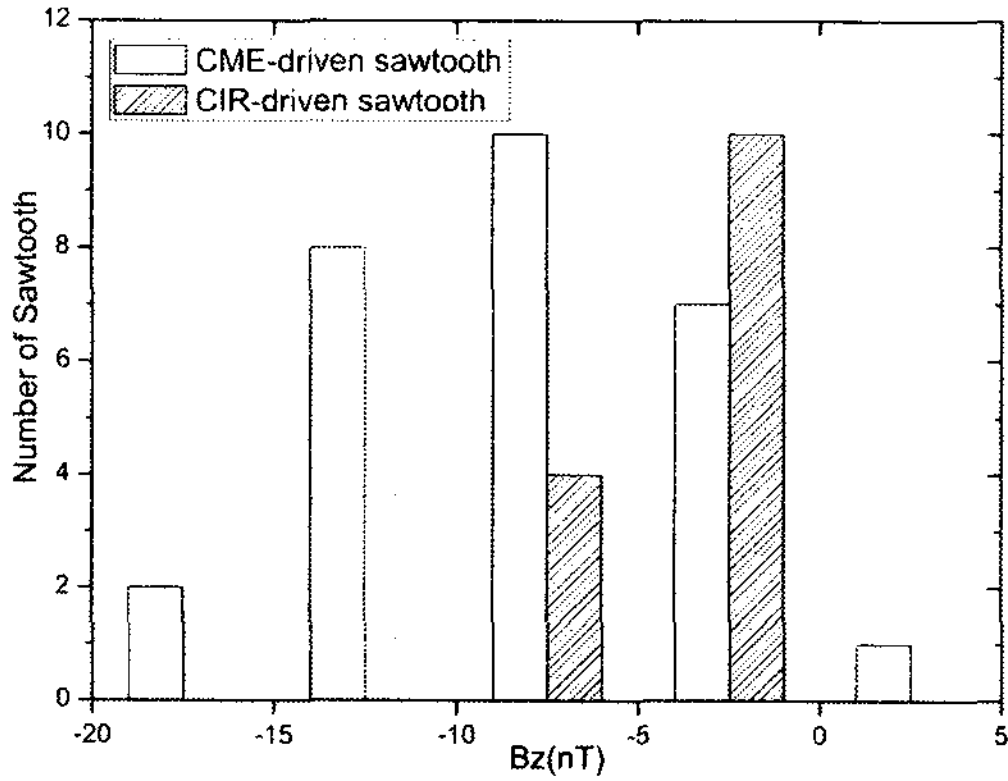


그림 6. 행성간 자기장 Bz 성분에 따른 Sawtooth 진동 현상의 발생 횟수.

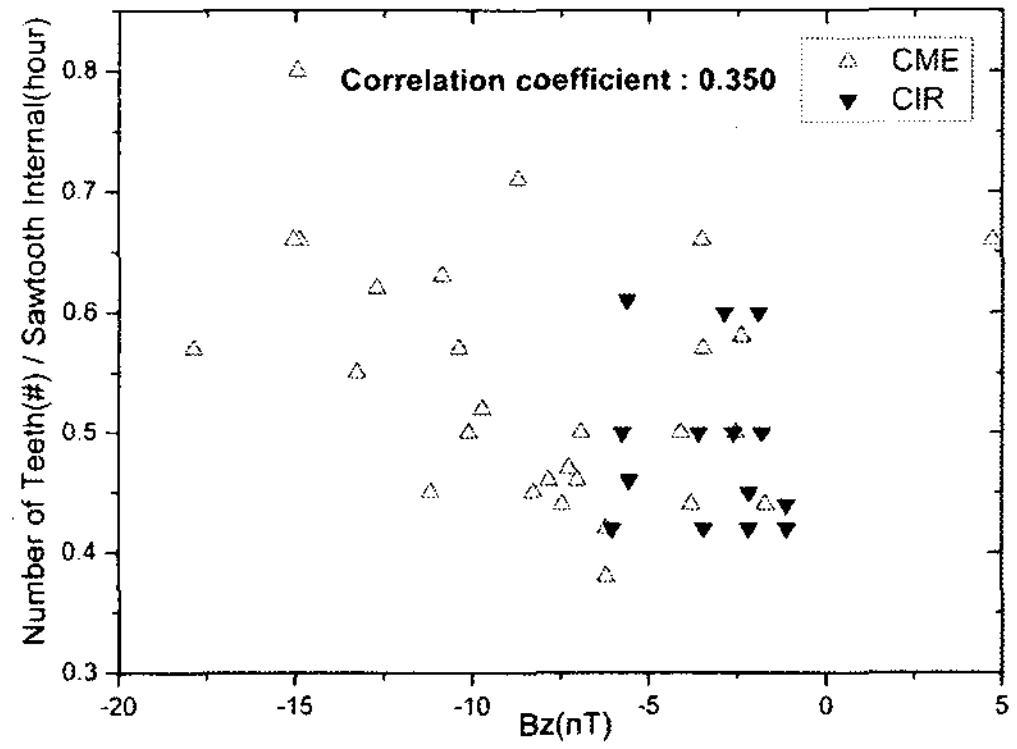


그림 7. 행성간 자기장 Bz 성분과 대전 입자의 플럭스 증가 횟수의 관계.

3.2 Sawtooth 진동 기간 중 IMF 및 태양풍 속도의 특성

IMF는 지자기 폭풍을 일으킬 수 있는 중요한 요소로 알려져 있다. 특히 IMF의 Bz 성분이 남쪽 방향으로 크면 클수록, 또한 지속시간이 길수록 강한 지자기 폭풍을 만들어 낸다. 그림 6은 각 Sawtooth 진동 현상 기간에 대해 평균한 IMF 남쪽 방향 Bz값에 따라 Sawtooth 진동 현상 발생 건을 정리 한 것이다. 더불어 이 결과를 CME와 CIR에 의한 자기폭풍 중 발생한 Sawtooth 경우로 각각 나누어 보았다. 그림에서 CME에 의한 Sawtooth 진동 현상의 경우 Bz 성분의 값이 -15nT부터 0nT 사이에 주로 분포되어 있다. CIR에 의한 Sawtooth 진동 현상의 경우에는 모든 사례가 Bz 값이 -10nT부터 0nT까지 일 때 분포되어 있지만, -5nT 이상 일 경우가 절반 이상을 차지하고 있다. 그림 7에서 가로축은 Sawtooth 진동 현상 기간 동안 IMF 남쪽 방향 Bz 성분의 평균 값을 나타낸 것이며 세로축은 각 Sawtooth 진동 기간 중 시간당 tooth의 수를 나타낸 것이다. 여기서 tooth란 정지궤도 LANL 위성이 관측한 고에너지 양성자 플럭스가 급격한 증가를 보인 후 서서히 다시 감소하고, 이러한 현상이 여러번 반복 됨에 따라 나타난 톱니 모양의 플럭스 변화 형태를 말한다. 즉, 시간당 tooth의 수란 단위시간(hr)당 양성자 플럭스 증가 건수를 말한다. 그림에서도 볼 수 있듯이 남쪽 방향의 Bz 성분이 증가 할수록 Sawtooth 진동 현상에서 단위시간(hr)당 양성자 플럭스 증가 건수가 증가하는 경향이 다소 약하지만 존재한다.

Bargatze et al.(1986)와 Borovsky & Denton(2006)에 의하면 지자기 폭풍에서 IMF의 남쪽 방향 Bz 성분뿐만 아니라 태양풍의 속도도 중요한 역할을 한다고 주장하고 있다. 그림 8은 앞서 보인 그림 6과 마찬가지로 Sawtooth 진동 현상 동안의 태양풍 평균 속도 통계를 나타낸 것이다. 대부분 400~700km/s의 태양풍 속도를 보이고 있다. CME의 경우 400~500km/s에서 가장 많은 분포를 보이지만 CIR의 경우 500~700km/s인 경우가 가장 많다. 이것은 CIR에 의한 지자기 폭풍기간에 발생한 Sawtooth 진동 현상은 대부분 지자기 폭풍 회복기에 해당하는 High Speed Stream 기간에 발생되었기 때문이다. 또한 CME의 경우 600~700km/s에서도 상당히 높은 발생을 보이는데 이것은 강한 행성간 충격파를 동반하는 빠른 속도의 CME에 의한 지자기 폭풍 기간에 발생한 Sawtooth 진동 현상에 해당한다. 반면, 단위시간당 tooth의 개수 변화를 나타낸 태양풍 속도의 증가와 단위 시간당

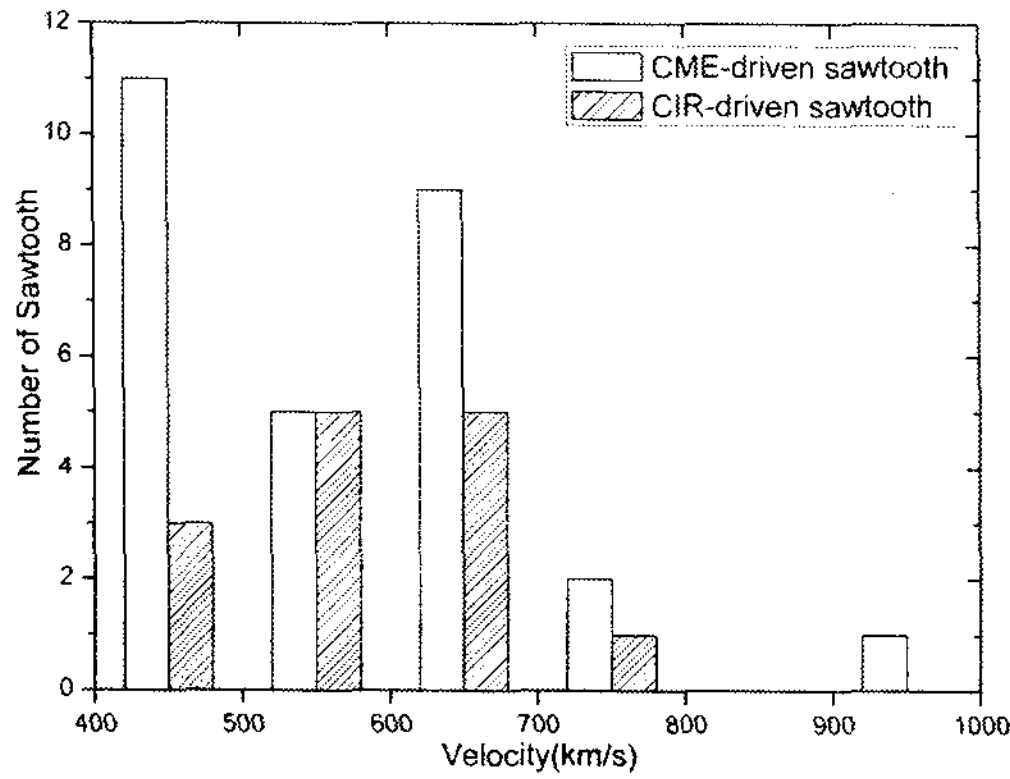


그림 8. 태양풍의 속도에 따른 Sawtooth 진동 현상의 발생 횟수.

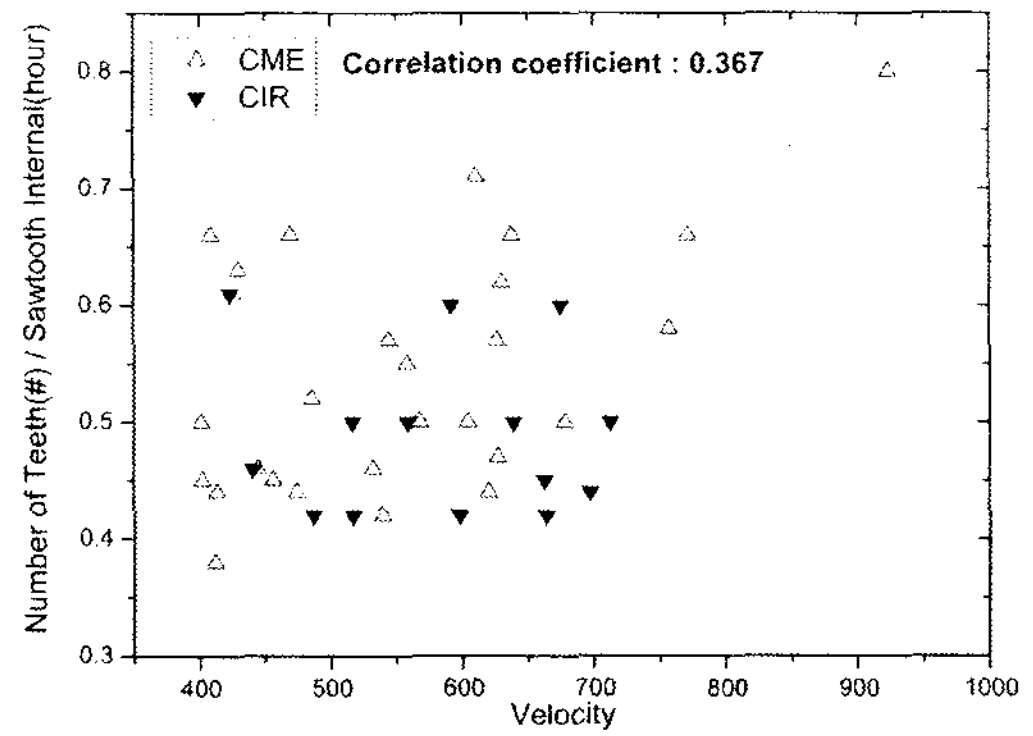


그림 9. 태양풍의 속도와 대전 입자의 플럭스 증가 횟수의 관계.

tooth의 변화에는 상관관계가 거의 없음을 볼 수 있다.

4. 결론 및 토의

Sawtooth 진동 현상과 지자기 폭풍의 발생에 대한 통계적 관계를 알아보기 위해 2000년부터 2004년까지 발생한 지자기 폭풍과 Sawtooth 진동 현상을 각각의 선별 조건을 정해 선별 한 뒤 상호 상관관계를 조사한 결과 총 154회의 지자기 폭풍을 발견하였으며, 이 중에서 Sawtooth 진동 현상을 동반한 지자기 폭풍은 47회(약 30%)였다. 이 중에서 CME에 의한 지자기 폭풍 기간 동안에 발생한 Sawtooth 진동 현상은 29회(약 62%), CIR에 의한 지자기 폭풍 기간 동안에 발생한 Sawtooth 진동 현상은 14회(약 30%)로 나타났다. 나머지 4건은 어느 유도체에도 속하지 않는 Sawtooth 진동 현상이었다. CME에 의한 Sawtooth 진동 현상은 주로(약 82%) 지자기 폭풍의 주상기간에서 발생했으며 CIR에 의한 Sawtooth 진동 현상은 주로(약 78%) 회복기간에서 발생하였다. 한편, 전체 48건의 Sawtooth 사례 중에서 지자기 폭풍 기간이 아닌 때 발생한 경우가 1건 있었다. 또한 대부분의 Sawtooth 진동 현상은 IMF Bz가 -15과 0nT 사이이고, 태양풍 속도가 400~700km/s인 상태에 해당한다. 또한 IMF Bz의 강도는 Sawtooth 진동 기간 동안에 대전 입자 플럭스 증가의 횟수와 약한 상관관계가 있음을 발견하였다.

결론적으로 Sawtooth 진동 현상은 거의 대부분 지자기 폭풍 기간 중에 발생 한다고 할 수 있으나, 불과 30% 정도의 지자기 폭풍 만이 Sawtooth 진동 현상을 보인다. 여기서 우리는 적어도 중요한 두 가지 의문점을 갖게 된다. 먼저, 왜 일부의 지자기 폭풍만 Sawtooth 진동 현상을 보이고, 나머지 다수의 지자기 폭풍은 Sawtooth 진동 현상을 만들지 않는가 라는 것이다. 이러한 의문점을 해결하기 위해서는 Sawtooth 진동 현상을 동반하는 지자기 폭풍과 그렇지 않은 지자기 폭풍을 여러 관점에서 상호 면밀히 비교 분석을 해야 할 것이다. 특히, 태양풍 상태뿐만 아니라 자기권 구조 및 물리적 상태 등의 측면에서 종합적이고 심도 깊은 분석이 요구된다. 두 번째로 어떻게 지자기 폭풍 기간이 아닌 경우에도 Sawtooth 진동 현상이 발생 하는가 라는 것이다. 물론 이러한 경우는 매우 드문 것으로 나타났다지만, 이러한 경우가 보통 지자기 폭풍 중에 발생한 Sawtooth 사례와 비교하여 어떤 물리적 차

이점을 보이는지 명확하지 않다. 이러한 근본적인 문제의 해결이 향후 과제이다.

감사의 글: 이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-10674-0).

참고 문헌

- 김재훈, 김경찬, 이대영, 김희정 2006, 한국우주과학회지, 23, 217
- Bargatze, L. F., McPherron, R. L., & Baker, D. N. 1986, in *Solar Wind-Magnetosphere Coupling*, eds. Y. Kamide & J. A. Slavin (Tokyo: Terra Sci.), p.101
- Belian, R. D., Cayton, T. E., & Reeves, G. D. 1995, in *Space Plasmas: Coupling Between Small and Medium Scale Processes*, vol.89, eds. M. Ashour-Abdalla, T. Chang, & P. Dusenberry (Washington DC: AGU), p.143
- Borovsky, J. E. & Denton, M. H. 2006, *JGR*, 111, A07S08, doi:10.1029/2005JA011447
- Clauer, R., C., Cai, X., Welling, D., Dejong, A., & Henderson, M. G. 2006, *JGR*, 111, A04S90, doi:10.1029/2005JA011099
- Henderson, M. G. 2004, *GRL*, 31, L11804, doi:10.1029/2004GL019941
- Henderson, M. G., Reeves, G. D., Skoug, R. M., Thomsen, M. F., Denton, M. H., Mende, S. B., Immel, T. J., Brandt, P. C., & Singer, H. J. 2006, *JGR*, 111, A01S90, doi:10.1029/2005JA011111
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M., 1994, *JGR*, 99, 5771
- Gonzalez, W. D. & Tsurutani, B. T. 1987, *PSS*, 35, 1101
- Kamide, Y., Baumjohann, W., Daglis, I. A., Gonzalez, W. D., Grande, M., Joselyn, J. A., McPherron, R. L., Phillips, J. L., Reeves, G. D., Rostoker, G., Sharma, A. S., Singer, H. J., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. 1998, *JGR*, 103, 17705
- Lee, D.-Y. & Lyons, L. R. 2004, *JGR*, 109, A04201, doi:10.1029/2003JA010076
- Lee, D.-Y., Lyons, L. R., & Yumoto, K. 2004, *JGR*, 109, A04202, doi:10.1029/2003JA010246
- McPherron, R. L., Russell, C. T., & Aubry, M, P. 1973, *JGR*, 78, 3131
- Pulkkinen, T. L., Partamies, N., McPherron, R. L., Henderson, M., Reeves, G. D., Thomsen, M. F., & Singer, H. J. 2007, *JGR*, 112, A01205, doi:10.1029/2006JA012024
- Reeves, G. D., Henderson, M. G., Skoug, R. M., Thomsen, M. F., Borovsky, J. E., Funsten, H. O., Brandt, P. C., Mitchell, D. J., Jahn, J. -M., Pollock, C. J., McComas, D. J., & Mende, S. B. 2004, in *Disturbances in Geospace: The Storm-Substorm Relationship*, vol.142, eds. A. S. Sharma, D. N. Baker, M. Grande, Y. Kamide, G. S. Lakhina, R. M. McPherron, G. D. Reeves, G. Rostoker, R. Vondrak, & L. Zelenyi (Washington DC: AGU), p.89