

코로나질량방출의 방향지시 매개인수 비교

노수련, 장현영[†]
경북대학교 천문대기과학과

Comparing Directional Parameters of Very Fast Halo CMEs

Su-Lyun Rho and Heon-Young Chang[†]

Dept. of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
E-mail: yuadoczon@knu.ac.kr, hyc@knu.ac.kr

(Received September 2, 2008; Accepted October 15, 2008)

요 약

코로나질량방출(CMEs)의 지구영향도를 효율적으로 예측하기 위해 속도가 빠른 CMEs의 방향 지시 매개인수(parameter)를 조사하여 Dst 지수 최소값과의 상관관계를 비교하였다. 그리고 이 매개인수 중 어떤 매개인수가 예측 효율성이 높은지 알아보았다. 이를 위해 SOHO/LASCO 목록에서 CMEs의 속도가 1000km/s 이상, CMEs 발생 위치가 태양 중심에서 $\pm 30^\circ$ 이내에 위치한 헤일로(halo) CMEs를 사용하였다. 이 CMEs가 태양에서 발생하여 지구에 도착하는 시각을 모델을 이용하여 예측한 뒤 이 시각에 가장 가까운(24시간 이내) Dst 지수 최소값을 구하였다. 이를 통해 CMEs의 지구 영향도를 판별하였다. 전체 30개의 사건 중 22개(73%)가 지자기 폭풍을 일으켰다. 우리는 CMEs의 지구 영향도를 예측하기 위해 기존의 방향 매개인수와 이번 연구에서 새롭게 제안한 이심률, 이동거리, 중심각 매개인수를 사용하였다. 이들 매개인수와 Dst 지수 최소값의 상관관계 분석을 통해 상관계수 값을 알아보고 그 결과를 통해 어떤 매개인수가 CMEs의 지구 영향도 예측 효율이 높은지 비교하였다. 그 결과 이심률 매개인수가 가장 좋은 상관관계를 보였고, 방향 매개인수는 비교적 좋은 상관관계를 보였다. 이동거리와 중심각 매개인수는 이심률과 방향 매개인수보다 낮은 상관관계를 보였다. 하지만 이들 역시 강한 지자기 폭풍(Dst 지수 $\leq -200\text{nT}$)의 경우에는 좋은 상관관계를 보였다. 방향 매개인수 값이 0.6 이상이고 이심률 매개인수 값이 0.4 이하이며 이동거리, 중심각 매개인수 값이 0.2 이하인 경우에는 강한 지자기 폭풍(Dst 지수 $\leq -200\text{nT}$)이 일어날 확률이 아주 높음을 알 수 있었다. CMEs의 방향을 지시하는 매개인수는 CMEs의 지구 영향도를 판별하는데 유용하고 이를 복합적으로 고려한다면 예측의 효율성을 높일 수 있다.

ABSTRACT

We examine geoeffective directional parameters of coronal mass ejections (CMEs). We select 30 front-side halo CMEs from SOHO LASCO CMEs whose speed is larger than 1000km/s and longitude is less than $\pm 30^\circ$. These are thought to be the most plausible candidate of geoeffective CMEs. We examine the relation between CMEs directional parameters (Earthward direction, eccentricity, Δ distance and central angle parameter) and the minimum value of the Dst index. We have found that the

[†]corresponding author

Earthward direction parameter has a good correlation with the Dst index, the eccentricity parameter has a much better correlation with the Dst index. The Δ distance and central angle parameter has a poor correlation with the Dst index. It's, however, well correlated with the Dst index in very strong geomagnetic storms. Most of CMEs causing very strong storms ($Dst \leq -200nT$) are found to have large Earthward direction parameter (≥ 0.6), small eccentricity, Δ distance and central angle parameters ($E \leq 0.4, \Delta X$ and $\sin \theta \leq 0.2$). These directional parameters are very important parameters that control the geoeffectiveness of very fast front-side halo CMEs.

Keywords: solar-terrestrial relations, coronal mass ejections (CMEs), solar activity

1. 서 론

코로나질량방출(Coronal Mass Ejections; CMEs)은 태양 표면에서 발생한 강한 폭발에 의해 빠른 속도로 분출되는 거대한 플라즈마 덩어리이다. CMEs는 코로나그래프(coronagraph) 관측에서 밝은 덩어리가 태양에서 빠져 나오는 형태로 보인다. CMEs는 직접적으로 플라즈마를 방출하는 태양 활동 중에 하나이다. 태양에서 직접 방출한 플라즈마가 지구 자기권 안으로 들어오게 되면 지구 자기장 교란이 일어난다. 지구 자기장 교란이 일어나면 전파를 이용한 통신기기의 장애가 생긴다. 이러한 자기교란에 대처하기 위해 태양표면에서 일어나는 현상을 예측하고 예보하는 것은 아주 중요하다.

CMEs가 발생하면 한번에 많은 플라즈마가 방출되고 이것이 지구에 들어오게 되면 지자기 폭풍을 일으키게 되므로 이에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 CMEs 매개인수(parameter)를 이용하여 CMEs가 지구에 영향을 미칠지의 여부를 알아보는 연구가 활발히 진행되고 있다. CMEs 매개인수에는 속도, 위치, 밀도, 질량, 방향 매개인수 등이 있다. 이 매개인수들에 대한 연구결과를 살펴보면 다음과 같다. 첫번째로 속도 매개인수는 CMEs가 발생한 후 관측 영상 상의 CMEs중심의 이동으로 추정한다. Srivastava & Venkatakrishnan(2004)는 CMEs의 속도가 지자기 폭풍의 세기와 연관이 있고 지자기 폭풍을 일으킨 CMEs 중 62%의 CMEs가 700km/s 이상의 속도를 가진다는 것을 보였다. 몇몇 연구에서 속도가 빠른 CMEs가 지구에 더 강하게 영향을 미치는 것을 확인하였다(Moon et al. 2002, Venkatakrishnan & Ravindra 2003, Srivastava 2005). 둘째, 위치 매개인수는 CMEs를 일으킨 원인이 되는 태양 표면 활동이 발생한 지역으로 정의한다. 지구 쪽을 향하는 태양 표면에서 발생한 헤일로(Halo) CMEs가 지구에 더 많은 영향을 미쳤다(Wang et al. 2002, Zhang et al. 2003, Moon et al. 2005, Kim et al. 2005). Wang et al.(2002)는 지구 쪽을 향하는 태양 표면에서 발생한 헤일로 CMEs가 지구에 도달하여 $K_p \geq 5$ 인 지자기 폭풍을 일으킨 것 중 83%가 태양의 중앙 자오선에서 $\pm 30^\circ$ 이내에 위치한 것임을 보였다. 그리고 태양의 동쪽에서 발생한 CMEs보다 서쪽에서 발생한 CMEs가 더 강한 지자기 폭풍을 유발하였음을 보였다(Wang et al. 2002, Moon et al. 2005, Kim et al. 2005). 셋째, 밀도와 질량 매개인수는 CMEs로 인해 방출되는 물질의 단위 부피당 평균 개수 밀도와 전체 질량이다. Moon et al.(2005)는 이 두 매개인수와 Dst 지수값과의 상관관계 분석을 통해 질량보다 밀도와의 상관관계가 더 좋게 나타났음을 보였다. 넷째, 방향 매개인수는 태양 근처에서 CMEs로 인해 방출된 물질들이 향하는 방향을 나타낸다. Dst 지수 최소값과의 상관관계 분석에서

위치 매개인수보다 방향 매개인수가 더 높은 상관관계를 보였다(Moon et al. 2005). 방향 매개인수 값이 0.6 이상인 경우 -200nT 보다 더 낮은 Dst 지수 최소값을 가지는 지자기 폭풍이 일어났다(Kim et al. 2008). 또한 이 연구에서 방향 매개인수와 위치, 속도 매개인수를 함께 고려할 경우 각각 따로 고려한 경우보다 CMEs 예측에 효율적임을 보였다.

지금까지 발생한 모든 CMEs가 지구에 영향을 미치지 않았다. CMEs 중에서 어떠한 특성을 가진 것이 지구에 영향을 미치는지 알아낼 필요성이 있다. 앞선 연구 결과에서 보았듯이 태양 중앙 자오선 근처에서 발생한 속도가 비교적 빠른 CMEs가 지구에 영향을 미칠 확률이 높다(Venkatakavishnan & Ravindra 2003, Srivastava & Venkatakavishnan 2004, Srivastava 2005, Moon et al. 2005, Kim et al. 2005, Kim et al. 2008). 이를 토대로 태양 앞쪽 표면에서 발생한 CMEs 중 그 원인이 된 태양 활동의 위치가 태양 중심에서 $\pm 30^\circ$ 이내인 것을 선택하였다. 그리고 속도가 1000km/s 이상인 빠른 헤일로 CMEs를 골라내었다. 이 CMEs의 초기 방출 속도를 기초로 CMEs 전파 모델을 사용하여 지구에 도달하는 시각을 알아내었다(Gopalswamy et al. 2001). 계산된 도착시각에서 가장 가까운 때(24시간 이내)의 Dst 지수 최소값으로 CMEs의 지구 영향 여부를 판별하였다. Dst 지수 최소값이 -50nT 이하인 경우에 지자기 폭풍이 발생하였다고 정의하였다(Gonzalez et al. 1994).

앞서 수행되었던 CMEs 매개인수에 관련한 연구의 결과를 보면 각각의 매개인수들을 이용하여 CMEs의 지구 영향도를 정확하게 예측하는 것은 어렵다. 이 연구는 앞서 연구된 CMEs의 방향 매개인수와 방향을 지시할 수 있는 다른 매개인수와 Dst 지수 최소값과의 상관관계를 알아보고 그 결과의 비교를 통해 CMEs의 지구 영향도 예측의 효율성을 높이는데 초점을 두었다.

2장에서는 사용된 자료에 대해 소개하고 3장에서 기존의 방향 매개인수와 새롭게 제시한 매개인수에 대해 설명하겠다. 4장에서 매개인수와 Dst 지수 최소값과의 상관관계 분석결과, 5장에서 결론에 대해 이야기 하겠다.

2. 자 료

이번 연구에서는 1996년 1월 1일부터 2007년 12월 31일 사이에 발생한 총 12913개의 SOHO/LASCO 목록¹의 CMEs 중 속도가 1000km/s 이상인 헤일로 CMEs를 사용하였다. 여기 해당하는 CMEs가 발생하기 전 시간의 EUV Imaging Telescope(EIT)의 코로나의 태양분광단색영상(spectro heliogram)을 사용하여 앞쪽을 향하는 CMEs를 찾아내었다. 그리고 이 관측을 통해 CMEs의 원인이 되는 플레어의 위치도 알아내었다(National Geophysical Data Center; NGDC²). 이렇게 알아낸 위치정보를 이용하여 태양 중심에서 $\pm 30^\circ$ 이내에 위치한 태양 활동에 의해 발생한 CMEs를 선택하였다. 최종적으로 우리는 30개의 CMEs를 선택하였다.

위의 선택된 30개 CMEs의 지구 영향도 판별을 위해 Dst 지수를 사용하였다. 먼저 Gopalswamy et al.(2001)에서 제안한 CMEs 전파 모델을 이용하여 CMEs가 지구에 도착하는 시간을 계산하였다. 각 CMEs의 예상된 도착시간에 가장 가까운 때(24시간 이내)의 Dst 지수 값 중 가장 낮은 값을 선택하였다(National Space Science Data Center; NSSDC³). 이렇게 선택된 Dst 지수 최소값이 -50nT 이하인 경우에 지구에 영향을 미친 CMEs, 즉 지자기 폭풍을 일으킨 것으로 정하였다(Gonzalez et

¹See http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

²See <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarflares.html>

³See <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

표 1. CMEs 기본 정보와 Dst 지수.

| Date | Time | Width | V(km/s) | A(km/s ²) | Position(deg) | Dst(min) |
|-------------|----------|-------|---------|-----------------------|---------------|----------|
| 1998 Apr 29 | 16:58:54 | Halo | 1374 | -44.8 | S18E20 | -24 |
| 1998 Nov 05 | 20:44:02 | Halo | 1118 | -24 | N22W18 | -142 |
| 1999 Jun 23 | 07:31:24 | Halo | 1006 | -3.1 | N25E00 | -15 |
| 2000 Jun 06 | 15:54:05 | Halo | 1119 | 1.5 | N20E18 | -90 |
| 2000 Jul 14 | 10:54:07 | Halo | 1674 | -96.1 | N22W07 | -301 |
| 2000 Sep 12 | 11:54:05 | Halo | 1550 | 58.2 | S17W09 | -51 |
| 2000 Sep 16 | 05:18:14 | Halo | 1215 | -12.3 | N14W07 | -201 |
| 2000 Nov 24 | 05:30:05 | Halo | 1289 | 2.1 | N20W05 | -80 |
| 2000 Nov 24 | 15:30:05 | Halo | 1245 | -3.3 | N22W07 | -20 |
| 2000 Nov 24 | 22:06:05 | Halo | 1005 | -0.8 | N21W14 | -53 |
| 2001 Apr 09 | 15:54:02 | Halo | 1192 | 1.3 | S21W04 | -271 |
| 2001 Apr 10 | 05:30:00 | Halo | 2411 | 211.6 | S23W09 | -105 |
| 2001 Jun 20 | 19:54:05 | Halo | 1407 | -33.1 | N08W17 | -30 |
| 2001 Jun 24 | 07:31:52 | Halo | 1094 | -45.8 | N10E11 | -21 |
| 2001 Aug 15 | 23:54:05 | Halo | 1575 | -31.7 | S28W09 | -105 |
| 2001 Sep 24 | 10:30:59 | Halo | 2405 | 54.1 | S16E23 | -102 |
| 2001 Oct 22 | 15:06:05 | Halo | 1336 | -8 | S21E18 | -57 |
| 2001 Oct 25 | 15:26:05 | Halo | 1092 | -1.4 | S16W21 | -27 |
| 2001 Nov 04 | 16:35:06 | Halo | 1810 | -63.4 | N06W18 | -292 |
| 2002 Jul 15 | 20:30:05 | Halo | 1151 | -25.6 | N19W01 | -13 |
| 2002 Aug 16 | 12:30:05 | Halo | 1585 | -67.1 | S14E20 | -37 |
| 2002 Sep 05 | 16:54:06 | Halo | 1748 | 43 | N09E28 | -148 |
| 2003 May 28 | 00:50:05 | Halo | 1366 | 25.9 | S11W12 | -144 |
| 2003 Oct 28 | 11:30:05 | Halo | 2459 | -105.2 | S16E08 | -353 |
| 2003 Oct 29 | 20:54:05 | Halo | 2029 | -146.5 | S15W02 | -401 |
| 2003 Nov 18 | 08:50:05 | Halo | 1660 | -3.3 | N00E18 | -471 |
| 2004 Nov 07 | 16:54:05 | Halo | 1759 | -19.7 | N09W17 | -289 |
| 2005 Jun 15 | 06:30:05 | Halo | 2049 | -30.7 | N16E04 | -121 |
| 2005 Jun 15 | 23:06:50 | Halo | 2861 | -127.4 | N16W05 | -121 |
| 2005 May 13 | 17:12:05 | Halo | 1689 | - | N12E12 | -263 |

al. 1994).

표 1에 이 30개의 CMEs 기본 정보(발생시각, 속도, 가속도, 위치)와 해당 CMEs의 Dst 지수 값을 나타내었다.

3. 매개인수

이번 연구에서는 Moon et al.(2005)에서 제안된 방향 매개인수와 이번 연구에서 처음 제기하는 이심율, 이동거리, 중심각 매개인수를 사용하였다.

3.1 방향 매개인수(b/a)

방향 매개인수(Earthward direction parameter)는 CMEs가 태양 표면 근처에서 전파되는 방향을 나타내는 매개인수이다. 이는 행성간 공간에서 CMEs 전파방향의 중심각을 지시한다. CMEs가 나아가는 방향이 지구 쪽으로 향할수록 지구에 영향을 미칠 확률이 커지므로 이의 방향을 간접적으로 지시하는 값인 방향 매개인수로 지구에 미치는 영향정도를 알 수 있다. 방향 매개인수를 구하는 방

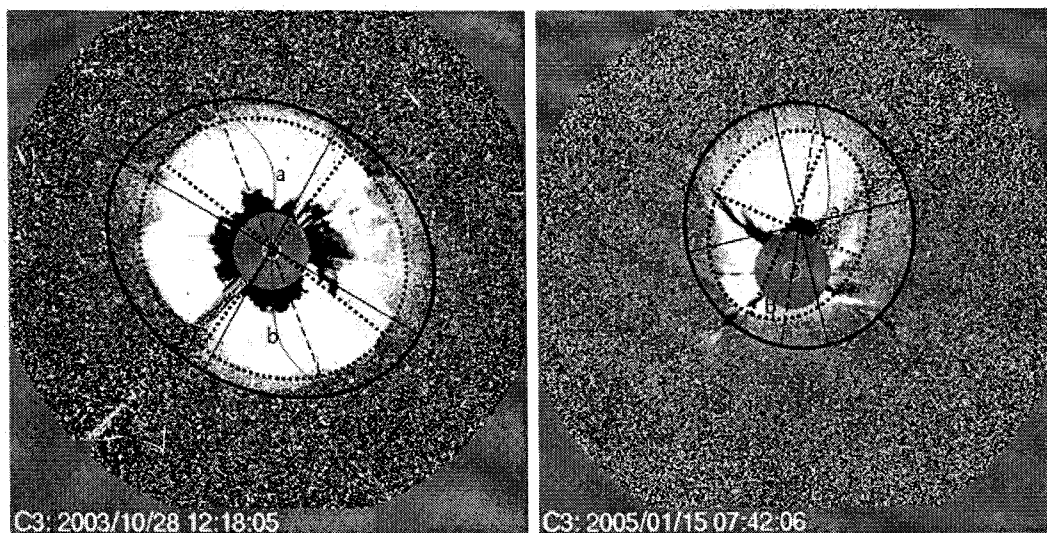


그림 1. 방향, 이심을 매개인수를 구하기 위한 LASCO C3 영상(2003년 10월 28일, 2005년 1월 15일). 방향 매개인수(실선 타원)는 영상의 a 와 b 를 이용하여 b/a 로 구한다. 이심을 매개인수는 점선 타원의 이심을 값이다 (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_movies/2003/10/28/, http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_movies/2005/1/15/).

법은 Moon et al.(2005)에서 처음 제안한 방법을 그대로 사용하였다. CMEs가 일어나기 전과 후의 LASCO 영상의 밝기차이를 이용하여 CMEs로 인해 밝아진 부분만을 남긴 영상을 구한다. 그 나머지 영상에서 밝은 부분이 안쪽으로 다 들어오도록 그 경계부분에 타원을 그린다. 그 타원의 중심과 태양면의 중심을 연결한 뒤 이를 타원 경계까지 연장한다. 이 선에서 태양면 중심을 기점으로 가까운 타원 경계까지를 b , 먼 타원경계까지를 a 로 정의한다. 이 둘의 비(b/a)이 방향 매개인수이다. b/a 값이 1에 가까우면 지구쪽을 향하여 전파되는 것을 의미한다. 그림 1은 방향 매개인수를 구하기 위한 타원을 나타낸 것이다. 여기서 태양중심과 타원중심을 연결한 선을 연장하여 직선을 그리고 태양중심에서 먼 타원 경계까지 길이를 a , 가까운 길이를 b 라고 한다. 이 둘의 비(b/a)가 방향 매개인수이다.

3.2 이심을 매개인수(E)

이심을 매개인수(Eccentricity parameter)는 방향 매개인수와 마찬가지로 행성간 공간에서의 CMEs 전파방향의 중심각을 간접적으로 알 수 있는 매개인수이다. CMEs가 처음 일어난 후 태양에서 빠져나오는 모양이 원뿔(cone)형태라고 가정한다. 이 원뿔을 관측하면 평면에 투영되어 타원으로 보인다. 이 원뿔의 앞쪽을 CMEs의 앞쪽 표면이라고 생각하고 이 원뿔이 향하는 방향의 정면에서 바라보게 되면 그 모양은 원의 형태를 가지게 된다. 하지만 조금이라도 옆으로 벗어나게 되면 그 모양은 타원이 된다. 태양에서 CMEs가 발생하여 정확히 지구 방향으로 전파되면 원으로 보이고 옆으로 벗어나면 타원으로 관측된다. 옆으로 많이 벗어나날수록 타원의 찌그러진 정도는 심해진다. 타원의 찌그러진 정도는 이심율로 알 수 있다. 원뿔 앞쪽의 원에서 그 반지름을 a 라고 하고 직접 관측한 타

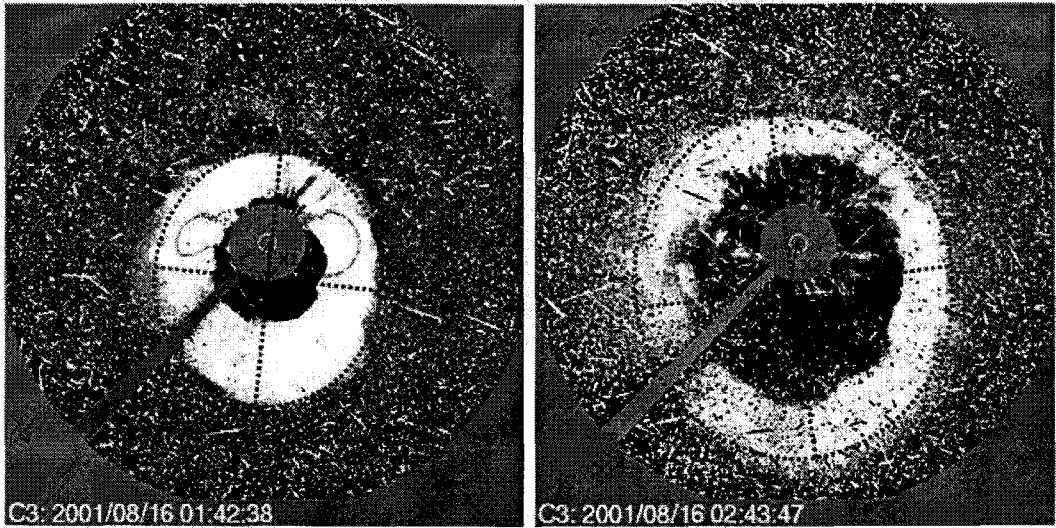


그림 2. 이동거리, 중심각 매개인수를 구하기 위한 LASCO C3 영상(2001년 8월 16일). 점선 타원은 이심을 매개인수를 구할 때 사용한 타원이다. 태양의 중심과 타원의 중심까지의 거리 X_1 , X_2 를 구한다. 이동거리 매개인수는 $|X_2 - X_1|$ 이다. 중심각 매개인수는 이동거리 매개인수를 실제 거리로 환산하고 이를 속도와 사이 시간의 곱으로 나눈 값이다(http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME.list/daily_movies/2003/10/28/).

원의 단반경을 b 라고 정의한다. 장반경은 a 가 된다.

$$e^2 = (a^2 - b^2)/a^2 = (a^2 - a^2 \cos^2 \theta)/a^2 = \sin^2 \theta \tag{1}$$

식 (1)은 타원의 이심율을 구하는 것이다. 여기서 a 는 타원의 장반경, b 는 단반경, θ 는 원뿔이 퍼져나가는 중심과 태양중심, 지구중심을 이어서 나오는 그 사이 각이다. 이 식에서 $e = \sin \theta$ 라는 결과가 나온다. 즉 이심율이 지구와 태양 중심을 이은 가상의 선에서 얼마나 벗어나서 퍼져나가는지를 지시하는 것이다. 식 (1)에 우리가 정의한 a 와 b 를 대입하면 e 를 구할 수 있다. 이 이심율은 CMEs가 발생하기 전과 후의 영상을 빼서 남은 부분의 영상을 이용하여 구한다. 이 나머지 영상에서 CMEs의 진행방향으로 밝아진 부분(가장 밝은 부분)의 경계와 최대한 맞게 타원을 그려 이의 이심율을 구한 것이다. 그림 1에서 점선 타원을 이용하여 이 타원의 이심율을 구한다. 이 이심율이 이심율 매개인수이다. 이 경우 주변광을 제외하고 CMEs로 인해 물질이 직접 방출되어 밝아진 것을 이용하므로 방향 매개인수의 타원(실선 타원)과 다른 형태를 보인다. 이심율 매개인수 값이 0에 가까운 경우 CMEs가 지구 쪽을 향하여 전파되는 것을 의미한다.

3.3 이동거리 매개인수(ΔX)

이동거리 매개인수(Δ distance parameter)는 CMEs가 전파될 때 일정 시간 동안 그 중심이 이동하는 거리를 나타내는 매개인수이다. 이 매개인수는 지구 중심과 태양 중심을 연결한 가상의 선에서 옆으로 얼마나 이동하는지를 나타낸다. 만약 이 매개인수 값이 크면 옆으로 이동하는 성분이 크다는 것, 즉 지구에서 먼쪽을 향한다는 것을 의미한다. 이 이동거리 매개인수는 이심율 매개인수를 구할

때 쓴 타원의 중심이 시간에 따라 얼마나 이동하였는지를 잴 길이이다. LASCO 영상에서 CMEs가 발생한 후 밝아진 부분이 나타난 두 장의 영상을 구하여 각각 타원을 그린다. 그리고 그 타원의 중심과 태양면의 중심 사이의 거리를 구한다. 이렇게 구한 두 개의 길이의 차이를 구하고 두 영상의 관측 시간 차이를 나누어 준다. 이의 절대값이 이동거리 매개인수이다. 그 값이 작을수록 지구 쪽을 향하여 전파되는 것이다. 그림 2는 이동거리 매개인수를 구하기 위해 사용한 LASCO 영상이다. 왼쪽과 오른쪽은 하나의 CMEs 사건 영상 중 CMEs 전파 모양이 잘 나타난 시간이 다른 영상이다. 이 두 영상에 각각 이심을 매개인수를 구할 때와 같은 타원을 그린다. 이 타원의 중심과 태양 중심사이의 길이를 각각 X_1 , X_2 라고 한다. 이동거리 매개인수는 $|X_2 - X_1|/\Delta T$ 이다. 이 이동거리 매개인수 값이 작을수록 CMEs가 지구 쪽을 향하여 전파되는 것이다.

3.4 중심각 매개인수($\sin \theta$)

중심각 매개인수(Central angle parameter)는 지구 중심과 태양 중심 그리고 CMEs의 전파되는 중심 사이의 각을 의미하는 매개인수이다. 이는 사이 각의 값이 아닌 이 각에 사인 함수를 취한 것이다. 이 매개인수는 CMEs가 원뿔모양으로 퍼지는 것을 가정하여 정의한다. 이 각이 클수록 CMEs의 전파 방향이 지구를 향하지 않고 다른 쪽으로 향하는 것을 의미한다. 중심각 매개인수는 그림 1에서 점선 타원의 중심을 이용한다. 이 중심과 태양 중심 사이의 거리를 X 라고 정의한다. 하나의 사건에서 시간이 다른 두 영상의 X 를 구하고 이 둘의 차를 실제 거리로 환산한 것을 ΔX 라고 둔다. 그리고 이 두 영상의 시간차이를 ΔT 라고 둔다. 표 1에서 보여준 각 CMEs의 기본 정보 중에서 속도값을 이용한다(v).

$$\sin \theta = \Delta X/v\Delta T \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 중심각의 정보를 추정할 수 있다. 여기서 중심각 매개인수는 $\sin \theta$ 이다. 이 값이 작을수록 지구를 향하는 CMEs임을 의미한다. 그림 2는 중심각 매개인수를 구하기 위해 사용한 LASCO 영상이다. 이동거리 매개인수를 구할 때와 동일한 방법으로 $|X_1 - X_2|$ 를 구한 뒤 실제 거리로 환산하고 식 (2)를 이용하여 중심각 매개인수를 구한다. 이 매개인수 값이 작을수록 CMEs가 지구 쪽을 향하여 전파되는 것이다.

4. 결 과

이번 연구에서 30개의 CMEs의 방향지시 매개인수와 이와 연관된 Dst 지수 값을 사용하여 CMEs의 지구 영향도를 알아보았다. 30개의 CMEs는 모두 앞쪽을 향하는 헤일로 CMEs, 즉 퍼지는 각도가 360° 인 것이다. 속도는 $1005 \sim 2861 \text{ km/s}$ 사이에 분포한다. 이 모든 CMEs는 태양 표면 활동과 연관되어 있는데 대부분은 플레어로 인해 발생한 것이다. 이 플레어들의 위치는 태양 중앙 자오선에서 30° 이내 범위에 속한다. 전체 30개의 CMEs 중 40%(12/30)가 태양 중앙 자오선의 동쪽에서 발생하였고 60%(18/30)가 서쪽에서 발생하였다. 전체 30개중 지자기 폭풍이 발생한 경우(Dst 지수 최소값 $\leq -50 \text{ nT}$)는 22개로 약 73%였다. 이 22개의 사건 중 7건은 동쪽, 15건은 서쪽에서 발생하였다. 동쪽에서 발생한 전체 사건 중 지자기 폭풍이 발생한 경우는 58%(7/12)이고, 서쪽의 경우는 83%(15/18)로 동쪽보다 서쪽에서 발생한 CMEs가 지구에 더 많은 영향을 미쳤다. 지자기 폭풍을 일으킨 전체 사건 중 매우 강한 지자기 폭풍(Dst 지수 최소값 $\leq -200 \text{ nT}$)을 일으킨 CMEs는 9건으로 41%(9/22)였다.

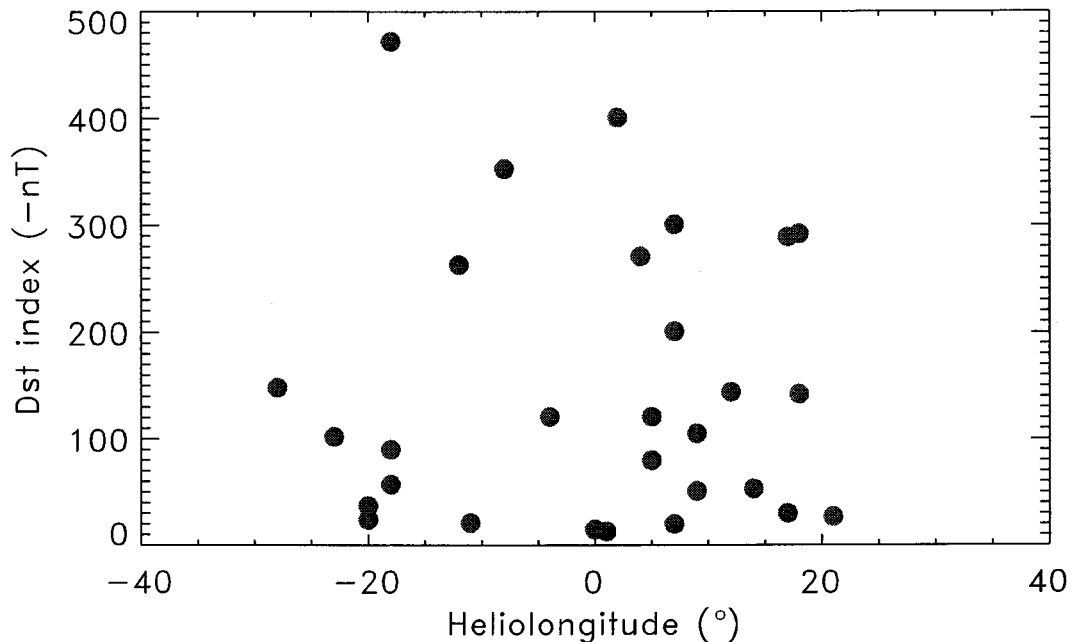


그림 3. CMEs 발생위치에 따른 Dst 지수 분포. X축은 위치, Y축은 Dst 지수이다. $\pm 30^\circ$ 이내에 분포하는 CMEs를 이용하였으므로 모두 그 안에 분포한다. 동쪽에서 일어난 CMEs는 총 12개이고, 서쪽에서 일어난 CMEs는 총 18개이다.

그림 3은 여기서 사용한 30개의 CMEs와 연관된 태양활동의 발생 위치별 Dst 지수 최소값을 나타낸 것이다.

CMEs가 지구에 미치는 영향정도를 알아보기 위해 CMEs의 여러 매개인수들 중 CMEs의 진행 방향을 간접적으로 알려주는 매개인수를 가지고 연구를 수행하였다. 기존의 Moon et al.(2005)에서 제시한 방향 매개인수와 이번에 새롭게 제시한 이심율, 이동거리, 중심각 매개인수를 사용하였다. 30개의 사건에 대한 Dst 지수 최소값과 네가지 매개인수 값을 표 2에 나타내었다. 그림 4는 방향(b/a) 매개인수와 Dst 지수 최소값, 이심율(E) 매개인수와 Dst 지수 최소값의 상관관계를 나타낸 것이다. 방향 매개인수는 Dst 지수 최소값과의 선형상관계수(linear Pearson correlation coefficient) 값이 0.64로 Dst 지수 최소값과 비교적 좋은 상관관계를 보였다. 방향 매개인수 값이 0.6보다 큰 사건 중 세 사건을 제외한 8개의 CMEs는 Dst 지수 최소값이 -200nT 이하인 매우 강한 지자기 폭풍과 관련되었다. 방향 매개인수 값이 0.4 이상인 23개의 사건 중 78%인 18개가 지자기 폭풍을 일으켰다. 이는 방향 매개인수 값이 0.4보다 크면 지자기 폭풍이 일어날 확률이 커짐을 의미한다. 이심율 매개인수는 Dst 지수 최소값과의 선형상관계수 값이 0.81로 매우 좋은 상관관계를 보였다. 2002년 9월 5일에 일어난 CMEs의 경우 Dst 지수 최소값이 크게 작지 않은데 비해 이심율 매개인수 값이 작게 나왔다. 이 경우를 제외하면 전반적으로 아주 좋은 상관관계를 보이고 있다. 이심율 매개인수 값이 0.4보다 작은 경우 강한 지자기 폭풍이 일어났다. 그리고 이 매개인수 값이 0.6보다 작은 값을 가지는 경우 중 약 92%(22/24)가 지자기 폭풍을 일으켰다. 이심율 매개인수 값이 0.6보다 작은 값을 가지면 지

표 2. CMEs의 방향지시 매개인수.

| Date | Time | Dst(min) | Direction(D) | Eccentricity(E) | Δ distance(ΔX) | Central angle($\sin \theta$) |
|-------------|----------|----------|--------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1998 Apr 29 | 16:58:54 | -24 | 0.54 | 0.57 | 0.29 | 0.27 |
| 1998 Nov 05 | 20:44:02 | -142 | 0.48 | 0.51 | 0.23 | 0.26 |
| 1999 Jun 23 | 07:31:24 | -15 | 0.24 | 0.61 | 0.17 | 0.21 |
| 2000 Jun 06 | 15:54:05 | -90 | 0.88 | 0.60 | 0.00 | 0.00 |
| 2000 Jul 14 | 10:54:07 | -301 | 0.76 | 0.41 | 0.00 | 0.00 |
| 2000 Sep 12 | 11:54:05 | -51 | 0.56 | 0.57 | 0.35 | 0.29 |
| 2000 Sep 16 | 05:18:14 | -201 | 0.80 | 0.40 | 0.17 | 0.18 |
| 2000 Nov 24 | 05:30:05 | -80 | 0.61 | 0.57 | 0.20 | 0.20 |
| 2000 Nov 24 | 15:30:05 | -20 | 0.53 | 0.69 | 0.08 | 0.08 |
| 2000 Nov 24 | 22:06:05 | -53 | 0.4 | 0.59 | 0.08 | 0.11 |
| 2001 Apr 09 | 15:54:02 | -271 | 0.69 | 0.30 | 0.13 | 0.14 |
| 2001 Apr 10 | 05:30:00 | -105 | 0.60 | 0.44 | 0.38 | 0.20 |
| 2001 Jun 20 | 19:54:05 | -30 | 0.37 | 0.69 | 0.39 | 0.36 |
| 2001 Jun 24 | 07:31:52 | -21 | 0.59 | 0.59 | 0.00 | 0.00 |
| 2001 Aug 15 | 23:54:05 | -105 | 0.59 | 0.35 | 0.29 | 0.24 |
| 2001 Sep 24 | 10:30:59 | -102 | 0.39 | 0.43 | 0.55 | 0.29 |
| 2001 Oct 22 | 15:06:05 | -57 | 0.43 | 0.49 | 0.42 | 0.41 |
| 2001 Oct 25 | 15:26:05 | -27 | 0.42 | 0.75 | 0.40 | 0.47 |
| 2001 Nov 04 | 16:35:06 | -292 | 0.77 | 0.34 | 0.12 | 0.08 |
| 2002 Jul 15 | 20:30:05 | -13 | 0.39 | 0.70 | 0.21 | 0.23 |
| 2002 Aug 16 | 12:30:05 | -37 | 0.41 | 0.71 | 1.00 | 0.81 |
| 2002 Sep 05 | 16:54:06 | -148 | 0.24 | 0.20 | 0.88 | 0.64 |
| 2003 May 28 | 00:50:05 | -144 | 0.39 | 0.48 | 0.58 | 0.55 |
| 2003 Oct 28 | 11:30:05 | -353 | 0.97 | 0.33 | 0.00 | 0.00 |
| 2003 Oct 29 | 20:54:05 | -401 | 0.83 | 0.25 | 0.08 | 0.05 |
| 2003 Nov 18 | 08:50:05 | -471 | 0.67 | 0.23 | 0.13 | 0.10 |
| 2004 Nov 07 | 16:54:05 | -289 | 0.65 | 0.32 | 0.35 | 0.26 |
| 2005 Jun 15 | 06:30:05 | -121 | 0.40 | 0.53 | 0.32 | 0.20 |
| 2005 Jun 15 | 23:06:50 | -121 | 0.30 | 0.36 | 0.75 | 0.34 |
| 2005 May 13 | 17:12:05 | -263 | 0.81 | 0.37 | - | - |

자기 폭풍이 일어날 확률이 매우 커지는 것을 찾아내었다. 반면 지자기 폭풍이 일어나지 않은 경우는 방향 매개인수 값은 작고 이심률 매개인수 값은 크게 나타난다. 이 두 매개인수와 Dst 지수 최소값과의 상관관계를 나타낸 그림 4를 보면 방향 매개인수의 경우는 양의 기울기를 가지고 이심률 매개인수의 경우는 음의 기울기를 가진다. 방향 매개인수의 경우 1에 가까운 값을 가질 수록 지구를 향해 진행하는 CME를 나타내고 이심률 매개인수의 경우 0에 가까운 값을 가질 수록 지구를 향해 진행하는 CME를 나타내기 때문에 서로 상반된 기울기를 가지는 것이다.

그림 5는 이동거리(ΔX) 매개인수와 Dst 지수 최소값, 중심각($\sin \theta$) 매개인수와 Dst 지수 최소값의 상관관계를 나타낸 것이다. 2005년 5월 13일에 발생한 CMEs의 경우 관측 기기 이상으로 인해 시간이 다른 두개의 영상을 구하지 못하여 이 사건의 이동거리, 중심각 매개인수는 구하지 못하였다. 총 29개의 사건에 대해 이 두 매개인수와 Dst 지수 최소값과의 상관관계를 알아 본 결과 앞서 살펴본 방향, 이심률 매개인수보다 낮은 상관관계를 보였다(선형상관계수 0.29, 0.38). 하지만 Dst 지수 최소값이 -200nT 이하로 떨어지는 지자기 폭풍의 원인이 되는 CMEs의 경우 하나를 제외하고 모두 0.2 이하의 값을 보였다. 즉 이 두 매개인수 값이 작으면 강한 지자기 폭풍이 일어날 수 있음을 보여

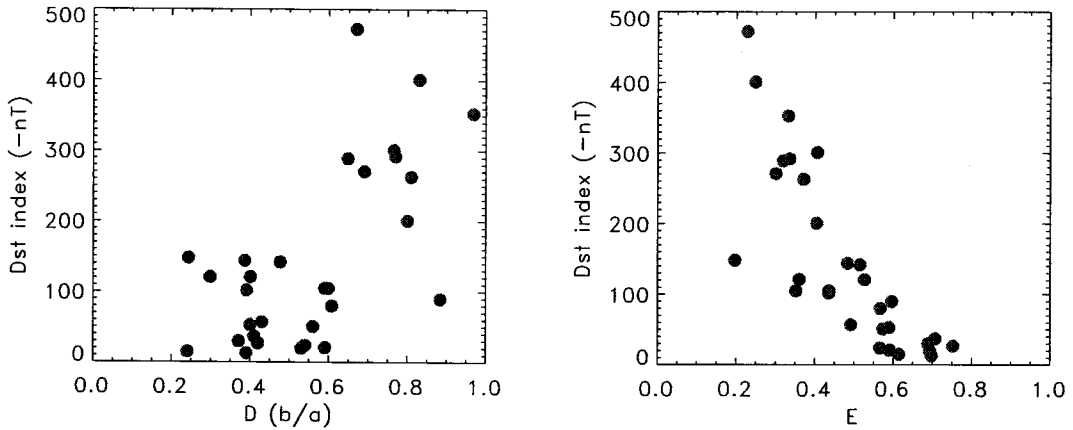


그림 4. CMEs 방향 매개인수 vs. Dst 지수(왼쪽), CMEs 이심률 매개인수 vs. Dst 지수(오른쪽). 선형상관계수의 값이 왼쪽 그림(D vs. Dst)의 경우 0.64, 오른쪽 그림(E vs. Dst)의 경우 0.81이다.

준것이다. 강한 지자기 폭풍을 보인 8개 사건(Dst 지수 최소값이 -200nT 이하인 경우)의 이동거리와 중심각 매개인수를 살펴 본 결과 그 값이 대부분 0.2 이하로 나왔다. 이 두개의 매개인수는 CMEs의 지구 영향도를 판별하기에 어려움이 있지만 강한 지자기 폭풍을 판별하는 경계값으로는 사용이 가능하리라 본다. 이 두 매개인수 값이 모두 0.2 이상의 값을 가지면 강한 지자기 폭풍이 일어날 확률이 희박하고 그 이하 값을 가지면 강한 지자기 폭풍이 일어날 확률이 높아진다. 이러한 관점에서 이 두 매개인수 역시 의미를 가진다.

각각의 매개인수의 상관관계를 낮추는 사건이 존재한다. 이러한 사건의 경우 네 개의 매개인수를 복합적으로 고려하면 이를 예측하는데 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. 방향 매개인수 값이 0.6 이상이고 이심률 매개인수 값이 0.4 이하, 이동거리, 중심각 매개인수가 0.2 이하의 값을 가지면 예외없이 모두 Dst 지수 최소값이 -200nT 보다 더 많이 떨어지는 강한 지자기 폭풍이 일어난 결과를 보였다.

5. 결론

이 연구에서는 속도가 매우 빠른 헤일로 CMEs의 관측 영상을 통해 알아낸 방향지시 매개인수와 Dst 지수 최소값과의 상관관계 분석을 통해 CMEs의 지구영향도를 알아보았다. 이를 위해 SOHO/LASCO CMEs 목록에서 속도가 1000km/s 이상이며 태양 중심에서 $\pm 30^\circ$ 이내에 위치한 CMEs를 선택하였다. 총 30개가 선택되어 이를 관측한 영상을 이용하여 방향, 이심률, 이동거리, 중심각 매개인수 값을 구하였다. 그리고 각 CMEs와 연관된 지자기 폭풍의 Dst 지수 최소값을 구하였다. 이 매개인수들과 Dst 지수 최소값의 상관관계를 알아보았다. 그 결과 이심률 매개인수가 Dst 지수와 가장 좋은 상관관계를 보였다.

방향 매개인수 역시 비교적 좋은 상관관계를 보였다. 특히 매우 강한 지자기 폭풍(Dst 지수 최소값 $\leq -200\text{nT}$)을 일으킨 CMEs와의 상관관계가 높게 나타났다. 이동거리와 중심각 매개인수의 경우 Dst 지수 최소값과의 전체적인 상관관계는 낮게 나타났다. 하지만 이들 역시 매우 강한 지자기 폭풍의 경우에는 상관관계가 높은 결과를 보였다. 이 두 매개인수는 각각 하나의 매개인수 값만으

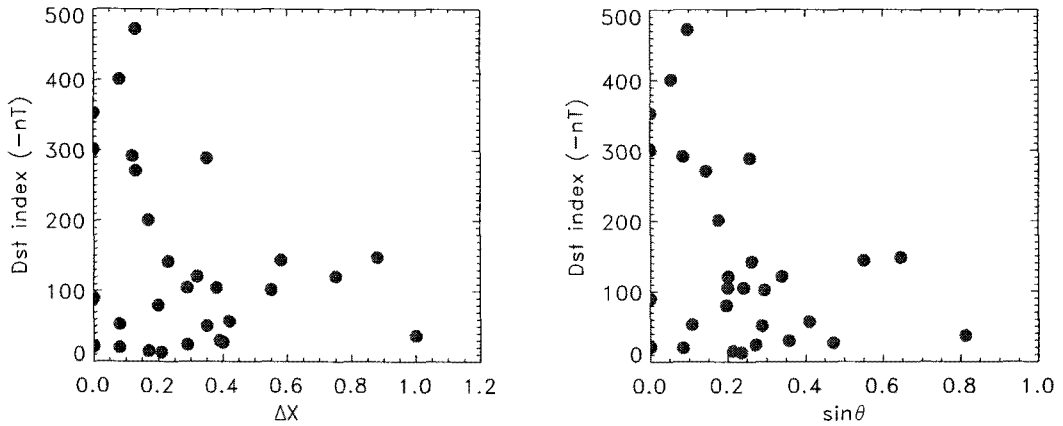


그림 5. CMEs 이동거리 매개인수 vs. Dst 지수(왼쪽), CMEs 중심각 매개인수 vs. Dst 지수(오른쪽). 선형상관계수의 값이 왼쪽 그림(ΔX vs. Dst)의 경우 0.29, 오른쪽 그림($\sin \theta$ vs. Dst)의 경우 0.38이다.

로 CMEs의 지구영향도를 판별하기에는 어려움이 있다. 하지만 이동거리와 중심각 매개인수 값을 CMEs가 지구에 크게 영향을 미칠 확률이 큰 무리와 그렇지 않은 무리를 구분 짓는 기준값으로 사용할 수 있으리라 판단된다. 만약 하나의 CMEs가 발생하여 이의 지구영향도를 판별하려면 이심을 매개인수가 가장 유용할 것으로 보인다. 하지만 이심을 매개인수도 잘 맞지 않는 경우가 있다. 이러한 경우를 대비하여 네 개의 매개인수를 복합적으로 고려하면 CMEs의 지구영향도를 판별하는데 있어 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

CMEs가 발생한 후 관측한 영상에서 방향 매개인수 값이 0.6 이상이고 이심을 매개인수 값이 0.4 이하이며 이동거리와 중심각 매개인수가 0.2 이하의 값을 가진 모든 경우에 Dst 지수 최소값이 -200nT 이하인 매우 강한 지자기 폭풍이 일어났다. 즉 앞으로 이 모두의 값이 위의 해당범위에 속하면 강한 지자기 폭풍이 일어날 확률이 높다는 것을 의미한다. 이 네 개의 매개인수는 모두 CMEs의 전파되는 방향을 지시한다. 그리고 이들 모두 CMEs 발생 직후 태양 주변을 관측한 영상을 통해 쉽게 알아낼 수 있다. CMEs가 지구를 향해 오는지 여부를 판별하기 위해 방향지시 매개인수가 매우 중요하지만 이를 정확히 알아내는 것은 어렵다. 이 네 개의 매개인수를 이용하면 CMEs의 전파방향을 간접적으로 알 수 있으므로 이들은 CMEs 예측에 있어 매우 중요하다. 만약 네 개의 매개인수를 구할 수 없는 경우에는 이심을 매개인수를 이용하면 다른 매개인수들에 비해 좀 더 효율적으로 CMEs의 지구영향도를 판별할 수 있다.

감사의 글: 이 논문은 학술진흥재단(KRF-2006-521-C00072)의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vaxylunas, V. M. 1994, *J. Geophys. Res.*, 99, 5771
 Gopalswamy, N., Lara, A., Yashiro, S., Kaiser, M. L., & Howard, R. A. 2001, *J. Geophys. Res.*,

106, 29207

Kim, R.-S., Cho, K.-S., Moon, Y.-J., Kim, Y.-H., Yi, Y., Dryer, M., Bong, S.-C., & Park, Y.-D. 2005, *J. Geophys. Res.*, 110, A11104, DOI:10.1029/2005JA011218

Kim, R.-S., Cho, K.-S., Moon, Y.-J., Kim, K.-H., Yi, Y., Dryer, M., Lee, J., Wang, H., Song, H., & Park, Y.-D. 2008, *ApJ*, 677, 1378

Moon, Y.-J., Cho, K.-S., Dryer, M., Kim, Y.-H., Bong, S.-C., Chae, J., & Park, Y.-D. 2005, *ApJ* 624, 414

Moon, Y.-J., Choe, G. S., Wang, H., Park, Y. D., Gopalswamy, N., Yang, G., & Yashiro, S. 2002, *ApJ*, 581, 694

Srivastava, N. 2005, *Ann. Geophys.*, 23, 2989

Srivastava, N. & Venkatakrisnan, P. 2004, *J. Geophys. Res.*, 109, A10103, DOI: 10.1029/2003JA010175

Venkatakrisnan, P. & Ravindra, B. 2003, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2181, DOI: 10.1029/2003GL018100

Wang, Y. M., Ye, P. Z., Wang, S., Zhau, G. P., & Wang, J. 2002, *J. Geophys. Res.*, 107, 1340, DOI: 10.1029/2002JA009244

Zhang, J., Dere, K. P., Howard, R. A., & Bothmer, V. 2003, *ApJ*, 582, 520