

행성간 충격파 발생 코로나 영역의 물리적 특성

오수연, 이유[†]
충남대학교 천문우주과학과

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF CORONAL REGION DRIVING OUT THE INTERPLANETARY SHOCK

Su Yeon Oh and Yu Yi[†]

Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea
E-mail: osy1999@cnu.ac.kr, euyiyu@cnu.ac.kr

(Received November 5, 2007; Accepted January 12, 2008)

요 약

태양활동 극대기인 2000년의 ACE 위성 태양풍 관측자료를 이용한 행성간 충격파의 목록에서 충격파 유도체 따라 행성간 충격파를 분류하고 충격파 유도체별 물리적 특성을 조사하였다. 51개의 행성간 충격파 중에서 대부분은 자기구름 및 Ejecta로 대표되는 ICME와 고속풍(HSS)에 의해서 유도되었다. 산소이온비(O7/O6)로부터 유도된 온도 및 Thermal index(I_{th} 지수) 값 분석에 따르면, ICME는 태양 코로나의 고온물질 영역으로부터 생성됨을 알 수 있다.

ABSTRACT

Using the solar wind data of 2000 observed by ACE, We classified the interplanetary shock on basis of shock driver. We examined the physical properties of shock drivers such as the ratio of charge states(O7/O6) and thermal index(I_{th}). Most of 51 interplanetary shocks are driven by interplanetary coronal mass ejections(ICME; magnetic cloud and ejecta) and high speed streams. According to the test of temperature(O7/O6) and I_{th} , we found that ICMEs originated from region with hot source in corona.

Keywords: ACE, Interplanetary shock, ICME

1. 서 론

지상의 태양전파망원경, 우주공간에서 코로나그래프(coronagraph)나 인공위성 등의 태양 관측 자료를 이용하여 행성간 충격파(interplanetary shock)에 대한 정보로부터 행성간 충격파를 유도하는 물질방출의 근원을 규정 및 분류할 수 있다. 행성간 충격파가 지구에 도달했을 때 행성간 충격파의 유도 물질에 따라 태양풍 속도 및 행성간 자기장 등의 태양풍의 프로파일을 분류하여 그 형태에

[†]corresponding author

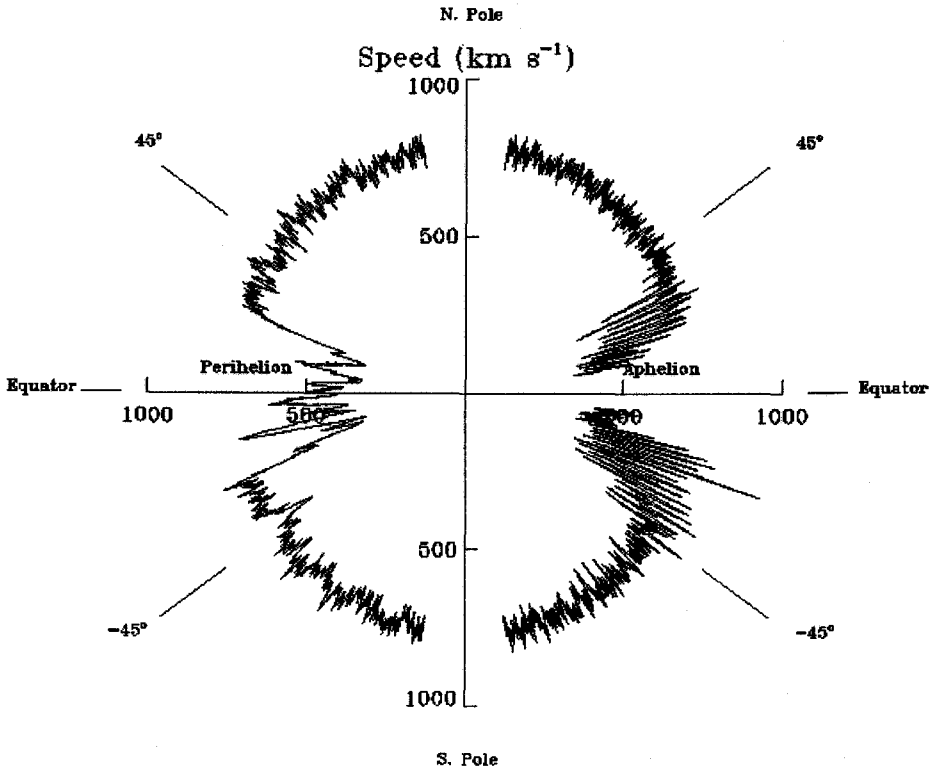


그림 1. Ulysses의 SWOOPS가 관측한 태양의 위도에 따른 태양풍 속도 프로파일(McComas et al. 1998).

다른 우주환경 변화에 대한 규모 및 현상을 지표화한다면 더욱 정확한 우주환경 예보를 제공할 수 있을 것이다.

그림 1은 SWOOPS/Ulysses가 관측한 태양 위도에 따른 태양풍 속도 프로파일로서 Ulysses 위성은 극궤도 위성으로 극지방 태양풍 측정이 가능해져 태양풍 지도를 완성하였다. 코로나 구멍(coronal hole)과 연결되어 있는 극지방은 약 800km/s 정도의 고속풍이 지속적으로 흘러나온다. 적도 부근에서는 코로나홀로부터 흘러나오는 밀도가 낮은 고속풍과 코로나 스트리머 벨트(streamer belt)로부터 흘러나오는 밀도가 높은 저속풍이 존재하여 태양 자전에 의해서 주기적으로 속도가 변하는 영역이 형성되며, 특히, 적도 부근의 고속풍은 극지방의 코로나 구멍이 연장된 부분으로 해석된다.

그림 2는 지구 공전 궤도면에서 태양이 1.5회 자전하는 동안의 태양풍 속도, 온도(O^{7+}/O^{6+}), 원소비(Mg/O)의 관계를 나타낸 것이다. 태양풍 속도는 코로나홀 흘러나오는 고속풍에서 저속풍으로 주기적으로 바뀌는 경향을 보여주고 있다(Geiss et al. 1995). Mg와 O의 중원소비는 저속풍에서 큰 값을 가져, 태양풍 속도와 반상관관계(anticorrelation)를 가지고 있다. O^{7+} 와 O^{6+} 의 상대적인 함량으로부터 계산된 온도도 역시 저속풍에서 높다.

이 연구에서는 태양풍 속도, 온도 등을 포함한 ACE 관측자료를 활용하여 유도 물질에 따른 행성간 충격파의 물리적 특성을 규정하고 분류해 보고자 한다.

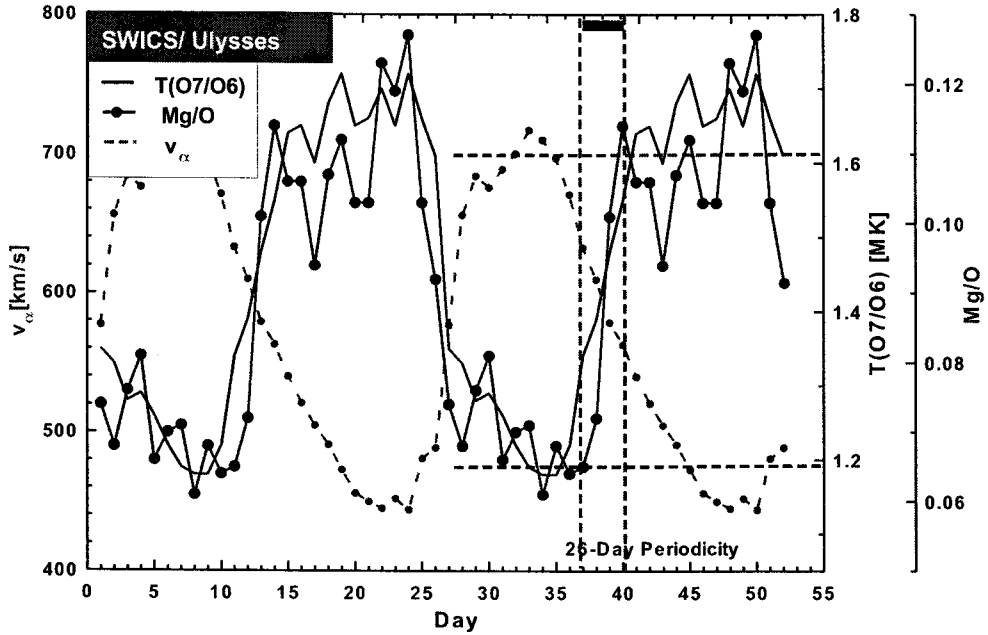


그림 2. 고속 및 저속 태양풍의 특성(파선은 He^{2+} 로부터 측정된 태양풍 속도, 실선은 O^{7+}/O^{6+} 에서 추정된 태양풍의 온도, 원으로 연결된 실선은 Mg와 O 원소비(Zurbuchen et al. 1999).

2. 자료분석

ACE(Advanced Composition Explorer) 위성은 1997년 8월 25일에 발사되어 지구반경 230배 떨어진 지구-태양의 사이의 L1 point 주위에 위치하고 있다. ACE 위성에는 MAG(Magnetometer), SWEPAM(Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor), SWICS(Solar Wind Ionic Composition Spectrometer)를 포함하여 9개 관측기구가 장착되어 있다. ACE 위성은 태양코로나, 행성간 물질, 태양 우주선, 은하우주선 등 태양계 안과 밖의 물질들의 동위원소와 성분을 분석, 비교하여 그 기원을 밝히는 임무를 수행하고 있다. 태양풍 내에서 평균자유비행경로(mean free path)가 1AU 정도이기 때문에 지구근방 1AU에 관측되는 동위원소비는 태양풍이 태양을 출발할 때 값을 유지하고 있다는 가정하에 1AU에서 관측되는 자기구름 같은 태양풍 특이영역의 태양근방 발생지역의 특성을 추적해 볼 수가 있다.

온라인 상에 공개된 행성간 충격파 목록(<http://www.bartol.udel.edu/~chuck/ace/ACELists/obs.list.html>)으로부터 2000년에 발생한 행성간 충격파 68개 중에서 reverse 충격파를 제외한 51개의 forward 충격파를 대상으로 하여 행성간 충격파의 물리적 특성을 조사하였다. 산소이온비(O7/O6), 행성간 자기장 세기, 양성자의 수밀도, 온도, 속도 등을 분석하였다.

행성간 충격파 유도체의 물리적 특징 및 결정은 Oh et al.(2002, 2007a)에 제시된 기준을 적용하여, 태양활동 극대기인 2000년에 발생한 51개의 행성간 충격파를 크게 ICME(interplanetary CME)의 동반 유무에 따라 구분하고 다시 ICME를 동반한(w/ICME) 행성간 충격파는 행성간 충격파 유도

표 1. ICME 동반 유무 및 충격파 유도체에 따른 행성간 충격파의 분류(2000년).

classification	IP shock driving source	Number of	IP shock
w/ ICME	w/ MC	25	40
	w/ Ejecta	15	
w/o ICME	w/ HSS	10	11
	w/o HSS	1	

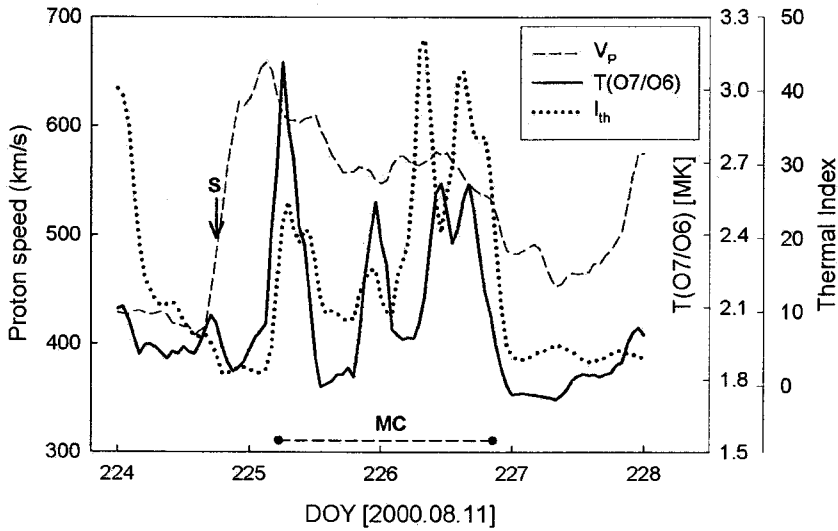


그림 3. ICME(MC)에 유도된 행성간 충격파(2000년 8월 11일 18:10 UT).

체(driver)에 따라 MC(자기구름, magnetic cloud), Ejecta로 분류하였다. ICME를 동반하지 않은(w/o ICME) 행성간 충격파는 HSS(고속풍, high speed stream)를 중심으로 충격파 유도체를 구분하였다. 표 1은 충격파 유도체에 따른 행성간 충격파의 분류로서 40개의 행성간 충격파가 ICME를 동반하였고, ICME를 동반하지 않은 11개의 행성간 충격파 중에서 10개가 HSS에 의해 유도된 것으로 분석되었다.

3. 연구결과

식 (1)은 Neugebauer et al.(1997)이 제시한 태양풍의 특성을 나타내기 위한 I_{th} (thermal index)로, V_p 는 태양풍 속도, T_p 는 태양풍의 온도를 나타낸다.

$$I_{th} = (500V_p + 1.75 * 10^5) / T_p \tag{1}$$

우리는 I_{th} 는 태양풍의 물리적 특성(속도와 온도)의 상관관계를 설명해 줄 수 있는 지표로서 ICME의 특성을 구분하는 활용하고자 한다. ACE 위성의 산소이온비(O7/O6)는 Mazzotta et al.(1998)가 제시한 방법에 의해 온도(O7/O6)로 환산하였다.

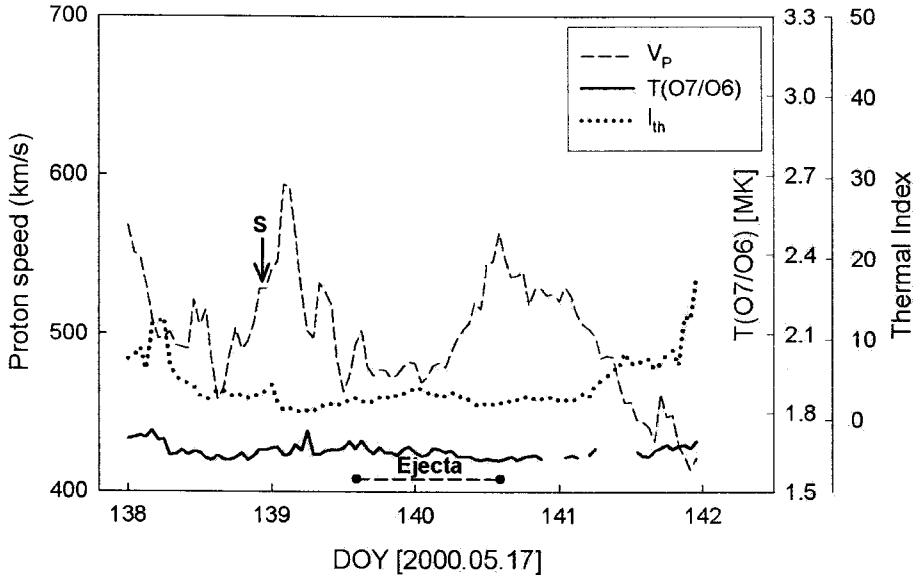


그림 4. ICME(Ejecta)에 유도된 행성간 충격파(2000년 5월 17일 21:40 UT).

이 연구에 선정된 행성간 충격파의 태양풍 물리량 프로파일은 Oh et al.(2002, 2007b)에서 제시되었던 관측자료를 적용하였다.

3.1 I_{th} of IP shock w/ICME

그림 3은 2000년 8월 11일에 관측된 ICME(MC)을 동반한 행성간 충격파로서 온도(O7/O6)가 ICME 통과 동안 높은 값을 유지하고 있으며, 평균적으로 2MK 이상이다. I_{th} 지수 역시 큰 값을 유지하고 그 변화 경향이 온도(O7/O6)와 비슷한 패턴으로 유지된다.

그림 4는 2000년 5월 17일에 관측된 ICME(Ejecta)을 동반한 행성간 충격파로서 MC처럼 강화된 자기장이 나타나지만 온도(O7/O6)가 ICME 통과 동안 1.8MK 이하의 값을 가지며, I_{th} 지수는 MC보다 낮은 값을 가지고 있다.

3.2 I_{th} of IP shock w/o ICME

그림 5는 2000년 1월 27일에 관측된 ICME를 동반하지 않고 HSS에 의해 유도된 행성간 충격파로서 온도(O7/O6)가 낮고, 약 1.5MK 수준으로 유지되고 있다. I_{th} 지수 역시 온도(O7/O6)의 변화 경향과 비슷하나 그 크기가 작다. Ejecta영역에서 I_{th} 및 온도(O7/O6)의 변화를 보이는 반면, HSS 영역에서는 변화가 거의 없이 일정한 수준을 보이고 있다.

Mazzotta et al.(1998)에 의하면 산소이온비(O7/O6)가 1인 경우의 온도는 약 2백만 K 정도로 코로나 온도와 비슷하다. 다시 말해서 충격파의 유도체는 코로나 영역의 특징(magnetic structure, 온도)을 그대로 가지고 온다고 설명할 수 있다. 이 산소이온비(O7/O6)에서 산출한 온도는 평상시 태양풍 양성자 온도(T_p)의 10^5 K와 비교해 볼 수 있다. I_{th} 지수와 산소이온비(O7/O6)의 분석에 따르면 MC는 고온 물질(hot source)에서 출발하고 그 외 유도체는 고온 물질이 아님을 추정할 수 있다.

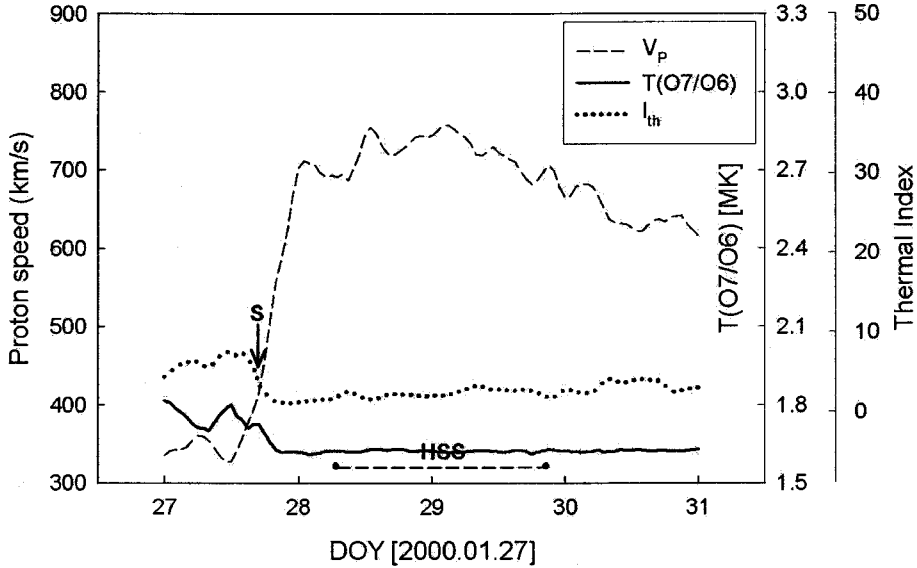


그림 5. ICME에 유도되지 않은 행성간 충격파(2000년 1월 27일 14:00 UT).

표 2. 충격파 유도체 종류에 따른 유도체의 물리량.

Driver	I_{th} (Thermal index)			O7/O6	V_p (km/s)	B(nT)
	maximum	mean	median			
HSS	5.66 ± 2.00	3.09 ± 0.74	2.91 ± 0.87	0.30 ± 0.27	566.54 ± 77.75	7.40 ± 2.18
Ejecta	13.90 ± 8.35	6.57 ± 2.76	5.81 ± 2.38	0.52 ± 0.51	451.88 ± 85.35	7.69 ± 2.50
MC	36.22 ± 16.58	17.17 ± 7.86	15.90 ± 7.76	1.05 ± 0.58	484.42 ± 101.64	10.61 ± 4.53

한편, 표 2는 충격파 유도체 종류에 따른 유도체의 물리량을 요약한 것이다. 유도체의 종류가 HSS, Ejecta, MC의 순으로 I_{th} 지수 및 산소이온비(O7/O6)의 값이 커짐을 잘 보여주어, ICME의 근원이 고온물질임을 설명해주고 있다.

그림 6은 표 2를 바탕으로 하여 나타낸 충격파 유도체 종류에 따른 유도체의 물리량을 표시한 것으로 유도체의 I_{th} 지수 및 산소이온비(O7/O6), 온도(O7/O6)를 나타낸다. 앞서 언급한 것처럼 ICME의 유도체가 고온물질로부터 출발하였음을 잘 보여주고 있다.

4. 정 리

ACE 위성 태양풍 관측자료를 적용하여 행성간 충격파 유도체의 종류에 따른 태양풍 속도, 산소이온비(O7/O6), 온도(O7/O6), I_{th} 지수의 물리적 특성을 비교해 본 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자기구름(MC) 및 Ejecta의 ICME로 전달되는 CME와 태양의 극으로부터 불어나오는 고속풍(High Speed Stream)은 행성간 충격파의 대표적인 유도체이다.

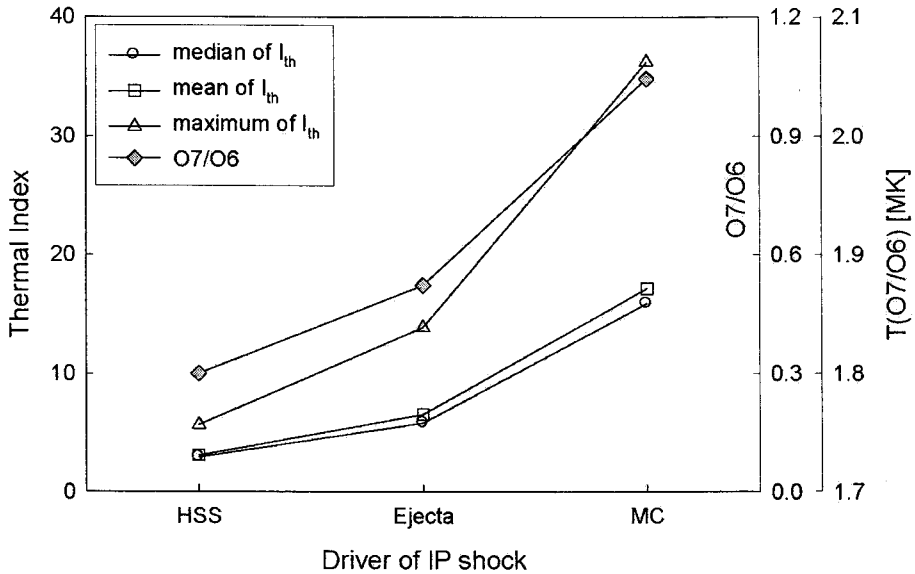


그림 6. 충격파 유도체의 물리량(I_{th} 지수, O7/O6 및 T(O7/O6)).

2. 산소이온비에서 산출된 온도를 고려해 볼 때 정상시의 태양풍과는 다르게 CME는 $T(O7/O6) = 2 \times 10^6 K$ 인 태양 코로나의 고온물질 영역으로부터 생성됨을 알 수 있다.

향후 이 연구의 응용방향으로는 행성간 충격파의 유도체인 ICME를 MC와 Ejecta로 세분해서 구분할 수 있는 지표로서 ICME 내의 자기장 세기나 자기장의 flux rope의 구조 외에 I_{th} 지수를 활용해 볼 수 있다.

행성간 충격파 발생 코로나 영역의 물리적 특성은 Hara et al.(1994)에 의해서 제시된 것처럼 태양풍 온도와 태양 코로나 구멍의 온도를 비교분석하거나, ICME와 관련된 CME가 발생한 활동영역에 온도와의 관련성 연구들을 통해 규명될 수 있을 것이다.

참고문헌

- Geiss, J., Gloeckler, G., & von Steiger, R. 1995, Space Sci. Rev., 72, 49
- Hara, H., Tsuneta, S., Acton, L. W., Bruner, M. E., Lemen, J. R., & Ogawara, Y. 1994, PASJ, 46, 493
- Mazzotta, P., Mazzitelli, G., Colafrancesco, S., & Vittorio, N. 1998, A&AS, 133, 403
- McComas, D. J., Bame, S. J., Barraclough, B. L., Feldman, W. C., Funsten, H. O., Gosling, J. T., Riley, P., Skoug, R., Balogh, A., Forsyth, R., Goldstein, B. E., & Neugebauer, M. 1998, Geophys. Res. Lett., 25, 1
- Neugebauer, M., Goldstein, R., & Goldstein, B. E. 1997, JGR, 102, 19743
- Oh, S. Y., Yi, Y., & Kim, Y. H. 2007a, Solar Physics, 245, 391
- Oh, S. Y., Yi, Y., Nah, J.-K., & Cho, K.-S. 2002, JKAS, 35, 151

Oh, S. Y., Yi, Y., Nah, J.-K., & Cho, K.-S. 2007b, JKAS, 40, 37

Zurbuchen, T. H., Hefti, S., Fisk, L. A., Gloeckler, G., & von Steiger, R. 1999, Space Sci. Rev., 87, 353