

다중 위성 관측을 이용한 CME 전파 과정에 대한 연구

성숙경 · 이동훈

경희대학교 우주과학과

PROPAGATION OF CME IN MULTI-SATELLITE OBSERVATIONS

Suk-Kyung Sung and Dong-Hun Lee

Department of Astronomy and Space Science, Kyung Hee University

e-mail: sksung@space.kyunghee.ac.kr

(Received October 15, 1998; Accepted November 6, 1998)

요 약

다중 위성 관측을 이용하여 지구 근처에서의 태양물질 방출현상(CME: Coronal Mass Ejection)의 전파 속도와 방향에 대하여 조사하였다. 이를 위해 1994년 11월부터 1997년 11월까지 지구에 영향을 미친 CME 중에서 세 개 이상의 위성에서 관측되고 각 위성들이 충분한 거리를 두고 떨어져 있는 1997년 1월 6-11일과 1997년 11월 4-7일의 두 CME 자료를 선택하였다. 위성들의 위치를 공통 좌표계로 전환하여 위성간의 거리와 CME에 의한 물리량의 변화 시간을 조사하여 CME의 전파 방향과 속도를 계산하였다. 선택된 자료에 대한 조사 결과 지구 자기권 내부에서 CME 전파 속도가 급격히 줄어들었으며 또한 자기권 외부에서의 CME 전파 방향이 GSE 좌표계상의 -x 방향과 일치함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

We investigate the propagation of Coronal Mass Ejections(CMEs) near the earth with multi-satellite observations. Among the CMEs observed in the near-earth between Nov. 1994 and Nov. 1997, we select two events of Jan. 6-11, 1997 and Nov. 4-7, 1997 which were observed by more than 3 satellites when these satellites were located apart with a sufficient distance from each other. We determine the speed and propagation of the two CMEs by calculating the position of each satellite in various coordinates and the onset time of each event. The results show that the speed of CMEs becomes significantly reduced when the perturbation arrives in the magnetosphere. It is also suggested that the propagation of the CMEs is approximated as the -x direction in GSE coordinates in the near-earth space.

1. 서 론

태양 활동은 흑점과 플레어(flare), 태양 물질 방출(Coronal Mass Ejection, CME), 전파 폭발(radio burst), 분출 홍염(eruptive prominence) 등 여러 가지 현상으로 구분되며, 이러한 현상들은 지구뿐만 아니라 태양계 내의 다른 행성 및 행성간 공간에 영향을 미친다. 높은 에너지를 방출하는 태양 활동은 지구 자기권을 크게 섭동시키고 위성 및 전기, 전파, 통신 등의 기기의 작동에 여러 가지 영향을 끼치기도 한다. 1859년 플레어와 지자기 폭풍의 관계에 대한 Carrington의 발표 이후, 태양 활동 중 플레어에 대한 연구가 많은 학자들에 의해 이루어졌다. 그러나 최근 Gosling(1993, 1995a,b)은 1978년 8월과 1982년 10월 사이 관측된 플레어, CME, shock과 지자기 폭풍 자료를 비교하여 지구 주변 환경 변화의 원인으로 CME의 역할이 지배적이라는 사실을 주장하였다. 관측적으로 충격파를 동반한 CME가 지구 자기권의 섭동과 밀접한 관계가 있는 것은 잘 알려진 사실이다.

표 1. Characteristics of Coronal Mass Ejection Events Near the Sun.
(Gosling 1995a)

Characteristic	Value
Mass ejected	$10^{15} - 10^{16}$ g
Speed of leading edge	$< 50\text{km s}^{-1}$ to $> 1200\text{km s}^{-1}$
Average speed of leading edge	400 km s^{-1}
Average heliocentric width	45 deg
Occurrence frequency	3.5 events d^{-1} (solar activity maximum) 0.2 events d^{-1} (solar activity minimum)
Site of origin	closed field regions in corona (typically underlying heliospheric current sheet) eruptive prominences (common)
Associated solar activity	long duration soft X ray events (1/3 of all events) impulsive X ray events and optical flares (some of the time) type II and IV radio bursts (the faster events) nothing (some of the time)

표 2. Characteristics of Coronal Mass Ejection in the Solar Wind at 1AU.
(Gosling 1995b)

Characteristic	Value
Average radial thickness	0.2 AU
Range of speeds	300 - 1000km s^{-1}
Single point occurrence frequency	$\sim 72 \text{ events year}^{-1}$ (solar activity maximum) $\sim 8 \text{ events year}^{-1}$ (solar activity minimum)
Magnetic field topology	predominantly closed magnetic loops, $\sim 1/3$ are twisted flux ropes
Fraction of events driving shocks	$\sim 1/3$
Fraction of earthward directed events producing large geomagnetic storms	$\sim 1/6$

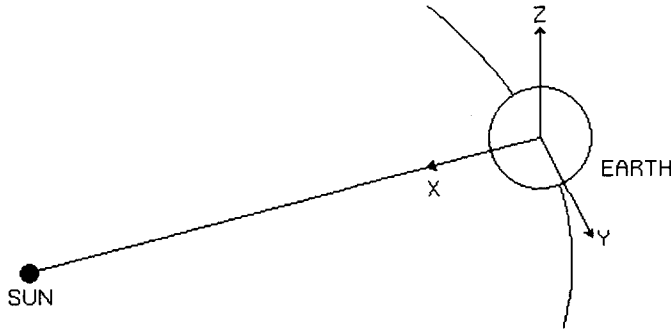


그림 1. GSE 좌표계 (Geocentric Solar Ecliptic Coordinates)

태양이 물질을 방출하는 여러 가지 현상 중에서 CME는 그 규모에 있어서 다른 현상들과 많은 차이를 가진다 (Hundhausen 1993). 일반적인 CME에 대한 특성은 표 1, 2와 같다.

본 논문에서는 위성 관측 자료를 이용하여 지구 근처에서, 특히 지구 자기권 외부와 내부에서 의 속도 변화를 중심으로 CME의 속도와 진행방향에 대하여 조사해 보았다. 논문에 사용된 위성 들은 WIND, GEOTAIL, INTERBALL-TAIL, IMP-8, GOES Series, LANL Series로서 대부분 1990년대에 발사된 것들이다. 이 위성들은 지구와 지구 자기권, 지구 주변의 우주환경, 태양으로부터 야기되는 우주 공간의 여러 현상들을 연구하기 위한 목적을 가지고 있다. 각 위성들의 관측 자료는 NASA(National Aeronautics & Space Administration)의 SPDF(Space Physics Data Facility)와 LANL(Los Alamos National Laboratory)의 고에너지 입자 연구팀으로부터 제공받다. 본 연구에는 WIND 위성과 GEOTAIL, INTERBALL-TAIL, IMP-8 위성은 자기장과 이온, 전자 의 밀도, 온도, 압력 자료를, GOES 위성들은 자기장, LANL 위성들은 프로톤 플럭스 자료를 이 용하였다.

2. GSE 좌표계

태양과 지구를 연결하는 선을 x 축으로 하는 GSE 좌표계(Geocentric Solar Ecliptic Coordinates)는 태양에서 지구로 향하는 CME의 전파 방향을 나타내기 에 가장 적합한 좌표계이다. GSE 좌표계의 각 축은 다음과 같이 결정된다. 지구에서 태양을 향하는 방향이 +x 이고, y 축은 황도면 위에 있으며 지구가 공전하는 방향이 -y 가 된다. z 축은 x 축과 y 축으로부터 결정된다(그림 1). 지구에서 CME가 관측되면 이 CME는 GSE 좌표계의 -x 방향으로 진행한 것으로 볼 수 있다. 따라서 지구를 향해 진행한 CME의 전파 속도는 위성들의 GSE-x 위치와 관측 시간차이를 이용하여 구할 수 있게 된다. 결국 위성들 사이에서의 CME 전파 속도를 구하기 위해서는 물리량 변화의 측정 시간과 위성의 GSE-x 위

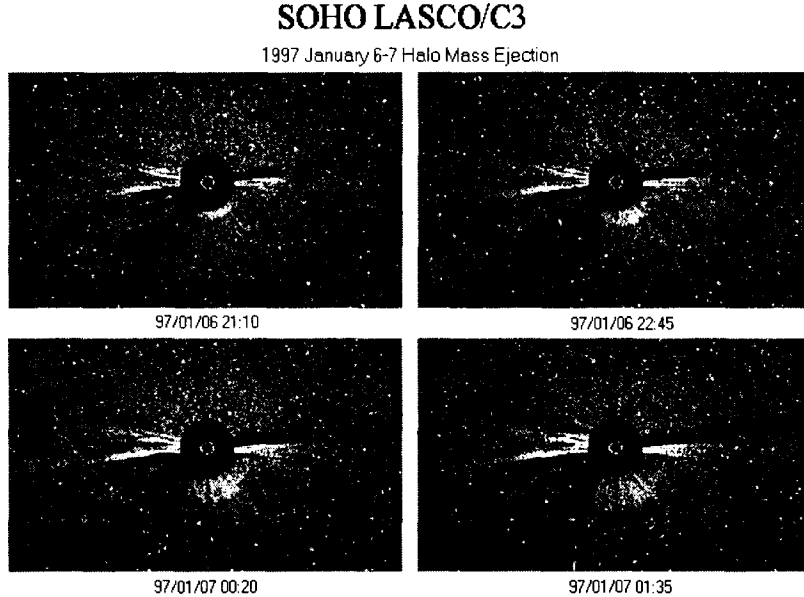


그림 2. 1997년 1월 6-7일 SOHO 위성의 LASCO-C3로 관측한 CME의 분출 모습. 태양의 오른쪽 아래로 풍선 모양의 물질이 방출되고 있는 것이 보인다.

치를 알아야 한다.

3. 1997년 1월 6일 발생한 CME

UT 1997년 1월 6일 태양 표면에서 CME의 방출이 관측되었다. 그림 2는 SOHO 위성이 LASCO(Large Angle and Spectrometric COronagraph)-C3로 관측한 CME의 방출 모습이다. 이 CME가 지구 근처에서 관측된 것은 10일과 11일 사이이며 WIND를 포함한 일곱 개의 위성들에서 물리량의 변화가 측정되었다. 그림 3은 9일 12시에서 11일 12시까지 WIND 위성이 측정한 자기장, 이온, 전자의 밀도, 온도 변화를 그린 것이다. 10일 새벽 shock이 지난 후 바로 자기장 및 이온, 전자의 밀도와 온도의 변화가 측정되었고, 11일 새벽 이온의 밀도가 매우 급격히 변화한 것을 볼 수 있다. WIND 위성에서 관측된 물리량들 중 가장 두드러지게 변화한 이온의 밀도 변화 측정 시간을 전후로 하여 다른 위성들의 물리량 변화 모습과 비교하여 보았다. 비슷한 시간에 급격한 물리량의 변화를 측정한 나머지 위성들은 GEOTAIL, INTERBALL-TAIL, GOES-8, GOES-9, LANL-1991, LANL-1994의 여섯 개 위성이다. 이 위성들 중 하나인 GEOTAIL 위성이 측정한 물리량 변화를 그림 4에 보였다. GEOTAIL 위성이 측정한 물리량들의 변화 모습을 살펴보면 WIND 위성에서와 같이 이온의 밀도가 가장 두드러지게 변

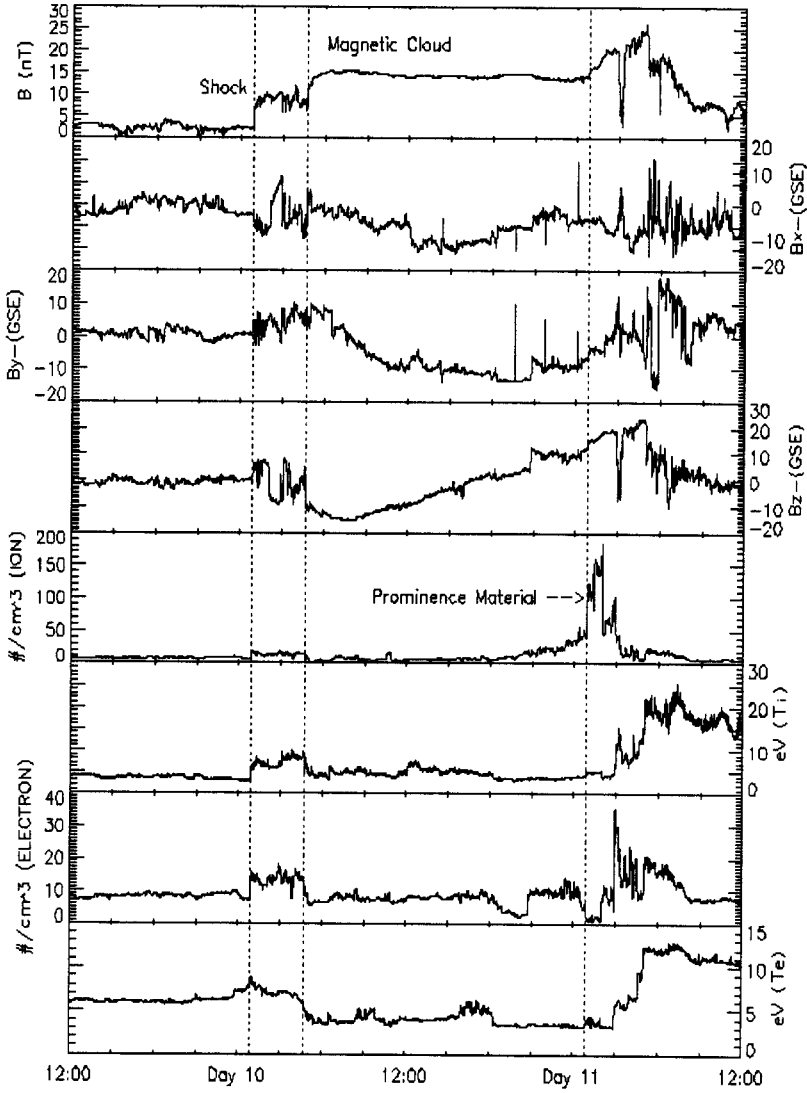


그림 3. 1997년 1월 9일 12시부터 11일 12시까지 WIND 위성이 측정 한 여러 물리량 변화.

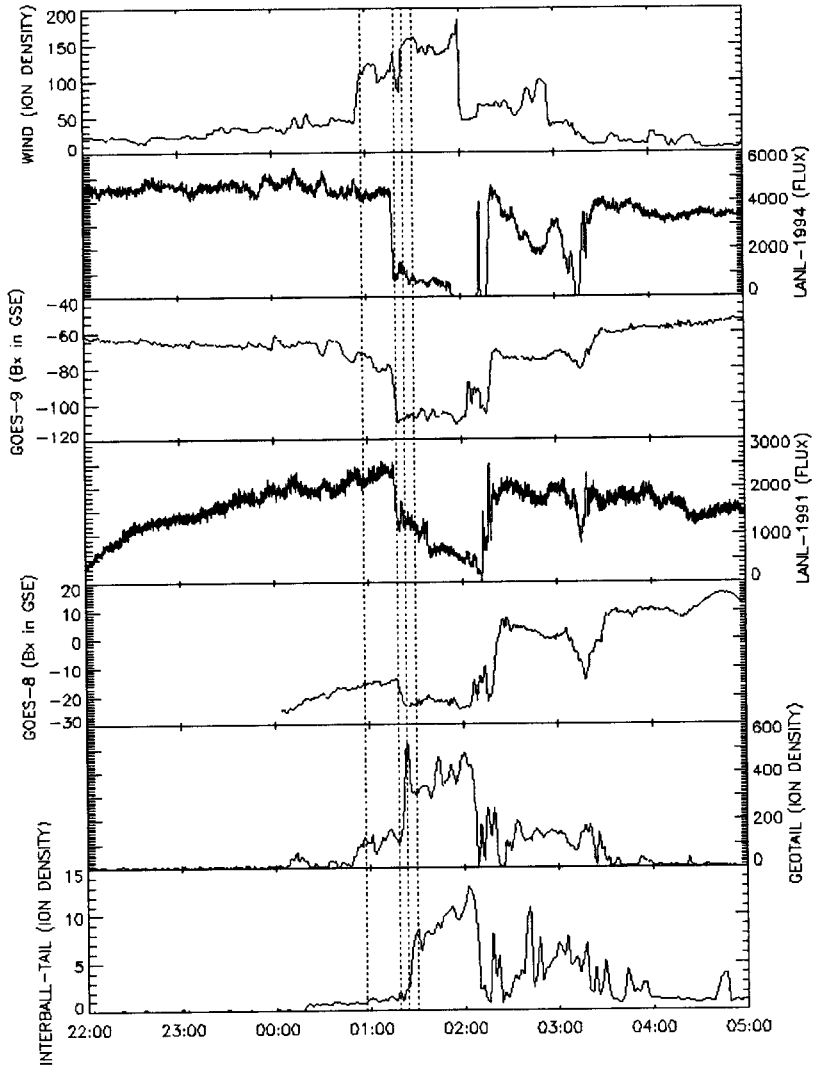


그림 4. 1997년 1월 10일 22시부터 11일 05시까지의 일곱 위성에서 측정된 이온 밀도와 자기장의 변화 모습.

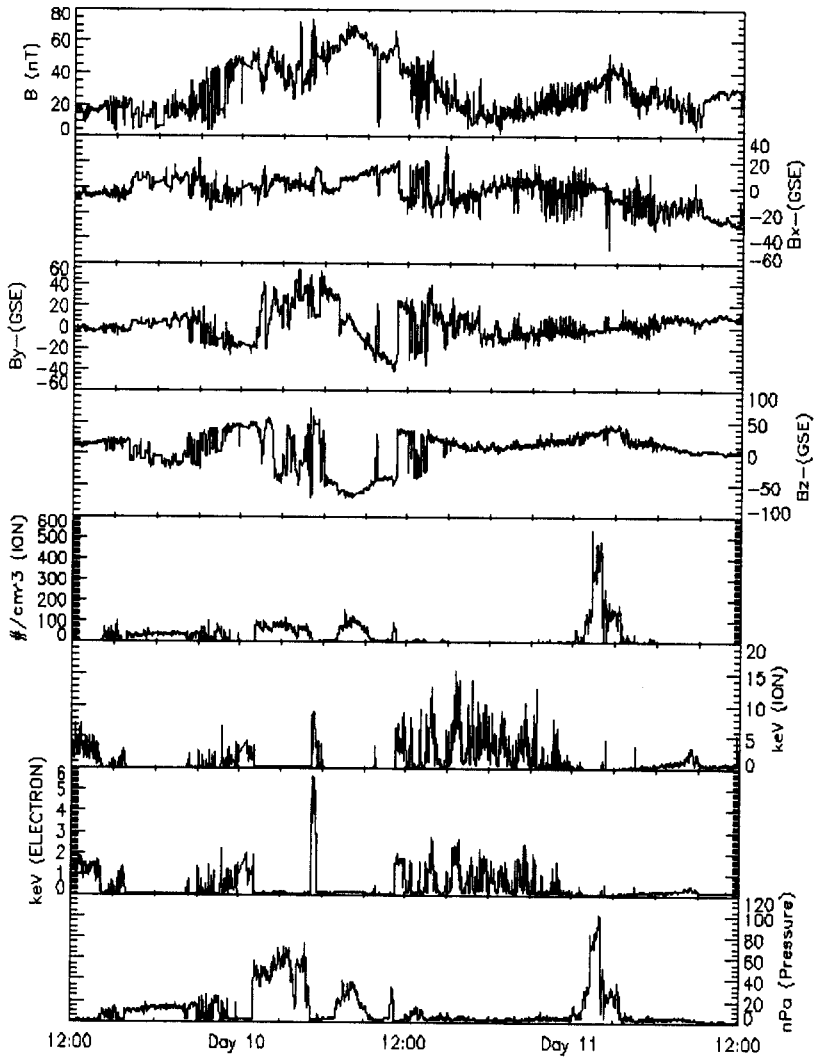


그림 5. 1997년 1월 9일 12시부터 11일 12시까지 GEOTAIL 위성이 측정한 여러 물리량 변화.

화하였음을 알 수 있다. INTERBALL-TAIL 위성 또한 앞의 두 위성과 같이 이온의 밀도증가를 측정하였고, GOES Series 위성과 LANL Series 위성은 각각 자기장의 x 성분(GSE 좌표계)의 감소와 프로톤 플럭스의 감소를 측정하였다. 대략적인 위성들의 위치와 관측 시간으로부터 정지궤도 위성들에서 측정된 자기장과 프로톤 플럭스의 변화는 앞의 세 위성들에서 측정된 이온 밀도의 변화를 일으킨 현상과 동일한 것에 의해 발생한 것으로 볼 수 있다.

우선 물리량 변화 시간을 정하기 위해 일곱 개의 위성에서 측정된 물리량들의 변화 모습을 10 일 22시부터 11일 05시까지 7시간 간격으로 그려보았다(그림 5). 물리량 변화 시간은 급격히 증가할 때는 가장 먼저 나타나는 극대점을, 감소할 때는 가장 먼저 나타나는 극소점을 기준으로 정하였다. 이 물리량의 변화 시간으로부터 CME의 도착 시간을 결정하면 WIND, GOES-8, LANL-1991, GOES-9, LANL-1994, GEOTAIL, INTERBALL-TAIL의 순서로 CME가 전파되었음을 알 수 있다. GOES-8 위성의 물리량 변화 모습을 보면 자기장의 x 성분이 감소하지만 뚜렷하게 극소점이 보이지 않는다. 따라서 CME의 속도를 계산할 때에는 GOES-8 위성의 자료는 제외하였다.

다음으로 물리량 변화 시간에 대한 위성들의 위치를 GSE 좌표계로 나타내었다. 위성들의 위치는 그림 6, 7과 같으며 WIND 위성을 제외한 나머지 여섯 위성들은 지구 자기권 내부에 위치하고 있다. 각각의 위성들에 대한 물리량 변화 시간과 GSE 좌표계상의 위치, 물리량 측정 시간 간격이 표 3에 정리되어 있다.

CME가 GSE 좌표계의 $-x$ 방향으로 전파한다는 가정 하에 각 위성들 사이에서의 $-x$ 방향 전파 속도 v_x 를 구하였다(표 4). WIND 위성과 나머지 위성과의 사이에서 구해진 속도를 보면 $-x$ 방향으로 진행할수록 속도가 줄어드는 것을 볼 수 있으나 LANL-1991 위성과의 사이에서 구해진 속도는 GOES 위성과의 사이에서 구해진 속도보다 큰 것으로 나타났다. 또한 정지궤도 위성들 사이에서 구해진 속도는 다른 값들에 비해 비정상적인 수치를 보였다(표 4의 *). 이것은 이들 위성 사이의 거리가 3 Re 내의 정도로 가까이 위치하고 있고 물리량 측정 시간 간격이 짧아서 나타난 결과이다. 따라서 이 정지 궤도 위성들 사이에서 구해지는 CME 전파 속도는 무의미하다. 본 논문에서는 정지 궤도 위성들 사이에서 구해지는 속도는 제외하고 이들 위성 중 하나만을 선택하여 나머지 WIND, GEOTAIL, INTERBALL-TAIL 위성과의 사이에서 구해진 속도들을 서로 비교하였다.

먼저 LANL-1994 위성을 포함한 비교를 살펴보면, WIND 위성과 LANL-1994 위성 사이에서의 CME 전파 속도는 462.33 km/sec 이고, LANL-1994 위성과 GEOTAIL 위성 사이에서의 전파 속도는 240.60 km/sec, LANL-1994 위성과 INTERBALL-TAIL 위성 사이에서의 전파 속도는 150.87 km/sec 로서 자기권 내부에서 CME의 전파 속도가 외부에서보다 현저히 감소하였으며 자기권 내부를 통과해 갈수록 점차 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 다음으로 GOES-9 위성을 포함한 경우를 보면 WIND 위성과 GOES-9 위성 사이에서의 속도는 430.29 km/sec, GOES-9 위성과 GEOTAIL 위성과의 사이에서는 325.22 km/sec, GOES-9 위성과 INTERBALL-TAIL 위성과의 사이에서는 170.85 km/sec 로 앞의 경우와 같은 속도 감소를 볼 수 있다. 마지막으로 LANL-1991 위성을 포함한 경우에서도 WIND 위성과 LANL-1991 위성 사이에서 442.84 km/sec, LANL-1991 위성과 GEOTAIL 위성 사이에서 252.03

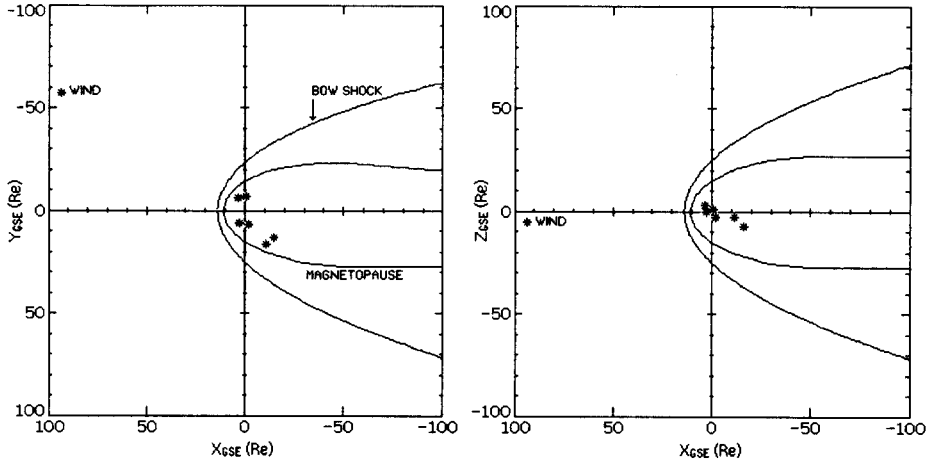


그림 6. UT 1997년 1월 6일의 CME를 관측한 일곱 위성의 위치. WIND 위성을 제외한 나머지 여섯 위성은 지구 자기권 내부에 위치하고 있다.

표 3. 1997년 1월 6일의 CME에 대한 여섯 개 위성의 물리량 변화 관측 시간과 위치, 측정 시간 간격.

위성	극대(소)값 관측시간	위치(GSE-x) (Re)	위치(GSE-y) (Re)	위치(GSE-z) (Re)	물리량 측정시간 간격
WIND	00:57:02.083	93.93	-57.45	-4.61	~1분 23초
LANL-1994	01:17:52.260	3.23	-5.41	2.03	~10초
GOES-9	01:19:30.000	2.90	5.94	0.26	1분
LANL-1991	01:19:34.716	-0.20	-6.56	0.86	~10초
GEOTAIL	01:23:44.293	-10.08	16.56	-1.44	1분 4초
INTERBALL-TAIL	01:30:08.000	-14.23	14.34	-5.73	1분 59초

km/sec, LANL-1991 위성과 INTERBALL-TAIL 위성 사이에서 141.01 km/sec 로 CME의 전파 속도 감소를 볼 수 있다.

4. 1997년 11월 4일 발생한 CME

UT 1997년 11월 4일 발생한 CME는 6일과 7일 사이 WIND, GEOTAIL, IMP-8, GOES-9, LANL-1994의 다섯 개 위성에서 관측되었다. 이 자료에 대한 계산에는 WIND 위성과 GEOTAIL 위성의 이온 밀도, IMP-8 위성의 프로톤 밀도, GOES-9 위성의 자기장, LANL-1994 위성의 프로톤 플럭스를 사용하였다. 6일 20시부터 7일 새벽 02시까지의 시간 간격으로 그림을 그리고(그림 8) 첫 번째 자료 분석에서와 같이 물리량의 변화 측정 시간을 처음 나타나는 극대점으로 결정하였다. 그림 9, 10은 관측 시간에 따른 위성들의 위치를 GSE 좌표계로 그린 것이다. 위성들의 위치를 살펴보면 자기권 내

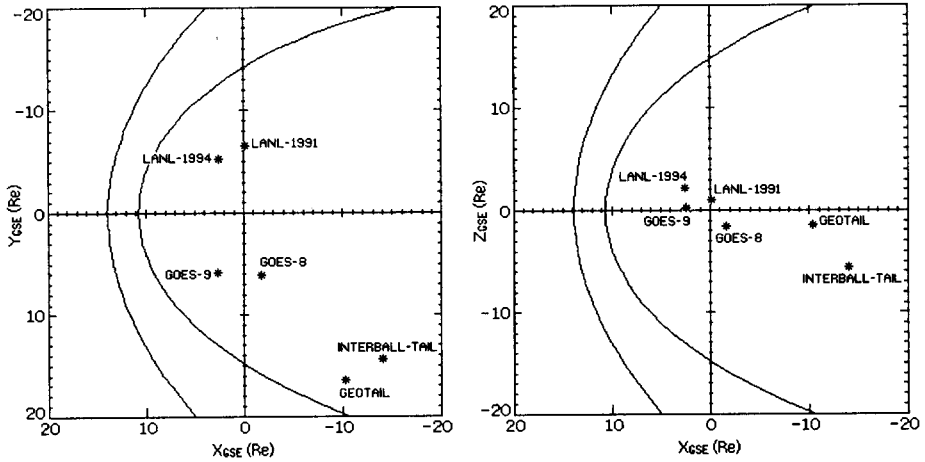


그림 7. UT 1997년 1월 6일의 CMD를 관측한 위성들 중 지구 자기권 내부의 위성들의 위치.

표 4. 1997년 1월 6일의 CME에 대한 결과.

	위성	거리차(GSE-x)(Km)	시간차(분:초)	속도(V_x)(km/sec)	비교
WIND	LANL-1994	5.78E5	20: 50.177	462.33	자기권 내의 위성으로 갈수록 전파속도 감소
	GOES-9	5.80E5	22: 27.917	430.29	
	LANL-1991	5.99E5	22:32.633	442.84	
	GEOTAIL	6.62E5	26:42.210	413.18	
	INTERBALL-TAIL	6.89E5	33:05.917	346.94	
LANL-1994	GOES-9	2.00E3	1:37.740	20.46*	전파속도 감소
	LANL-1991	2.18E4	1:42.456	21277.43*	
	GEOTAIL	8.47E4	5:52.033	240.60	
	INTERBALL-TAIL	1.11E5	12:15.740	150.87	
GOES-9	LANL-1991	1.98E4	4.716	4198.47*	전파속도 감소
	GEOTAIL	8.27E4	4:14.293	325.22	
	INTERBALL-TAIL	1.09E5	10:38.000	170.85	
LANL-1991	GEOTAIL	6.29E4	4:09.577	252.03	전파속도 감소
	INTERBALL-TAIL	8.93E4	10:33.284	141.01	
GEOTAIL	INTERBALL-TAIL	2.64E4	6:23.707	68.80	-

표 5. 1997년 11월 4일의 CME에 대한 결과.

위성	관측시간차 (분:초)	거리차 (GSE-x)(Km)	거리차 (GSE-y)(Km)	거리차 (GSE-z)(Km)	속도(v_x) (km/sec -x방향)	속도(v_y) (km/sec y 방향)	속도(v_z) (km/sec z방향)	
WIND	IMP-8	27:46.116	6.85E5	4.47E5	5.72E4	411.12	268.29	-34.33
	LANL-1991	32:08.383	8.25E5	2.75E5	1.21E5	427.82	142.47	-62.75
	GEOTAIL	37:46.116	9.29E5	1.83E5	1.28E5	409.95	80.76	-56.48
IMP-8	LANL-1994	4:22.267	1.40E5	1.72E5	6.48E4	533.81	-656.75	-247.08
	GEOTAIL	10:00.000	2.44E5	2.64E5	7.19E4	406.67	-439.95	-119.83
LANL-1994	GEOTAIL	5:37.733	1.04E5	9.17E4	7.01E3	307.94	-271.60	-17.62

부에서의 CME 전파 속도를 구할 수 있을 만큼 충분한 거리를 두고 있는 위성들이 존재하지 않는다. 위성들의 위치와 관측 시간, 세 방향으로의 전파 속도를 모두 구한 결과를 표 5에 나타냈다. 편의상 x축 속도는 -방향으로 y와 z축 속도는 +방향으로 표시하였다. 표 5에서 자기권 외부에 위치한 세 위성 WIND, IMP-8, GEOTAIL의 결과를 살펴보면 v_y, v_z 가 일정하지 않음을 볼 수 있다. 반면에 v_x 는 v_y, v_z 에 비해 411.12 km/sec, 409.95 km/sec, 406.67 km/sec로 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 자기권 외부의 우주공간에서는 전파 속도의 변화를 무시할 수 있으므로 이 결과는 CME의 진행 방향이 GSE 좌표계 상의 -x 방향임을 나타낸다.

5. 토의 및 결론

본 논문에서는 지구 자기권 외부와 내부에서의 CME 전파 속도를 비교하고 지구 근처에서의 전파 방향을 조사하기 위해 위성 관측 자료를 이용하여 각 위성들 사이에서의 전파 속도를 구하였다. 1997년 11월 6일의 event에서 위성들의 위치와 관측 시간으로부터 GSE 좌표계의 x성분 전파 속도가 지구 자기권 외부에 비해 내부에서 현저하게 감소하는 것을 보았으며, 1997년 11월 6일의 event에서 지구 자기권 외부에서 CME의 전파방향을 GSE 좌표계의 -x 방향으로 가정 할 수 있는 근거를 제시하였다.

첫 번째 event에서 나타난 지구 자기권 내에서의 CME 전파 속도 감소는 지구 자기권의 경계에 대해 경계 조건의 기본 방정식을 적용하면 간단히 설명할 수 있다. 일반적으로 충격파가 형성 되기까지 진행의 시간적 변화과정은 완전한 비선형 방정식을 고려해야 한다. 그러나 일단 충격파가 형성된 후 그 경계면의 진행이 자기권 내부와 외부에서 각각 일정하게 유지할 때 진행파면의 정지 좌표계에서는 동적평형 상태를 가정할 수 있다. 따라서 다음의 연속 방정식으로부터 시간에 대한 의존성을 무시하고 경계조건을 구할 수 있다 (Parks 1991).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{U} = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \rho \vec{U} = 0 \tag{2}$$

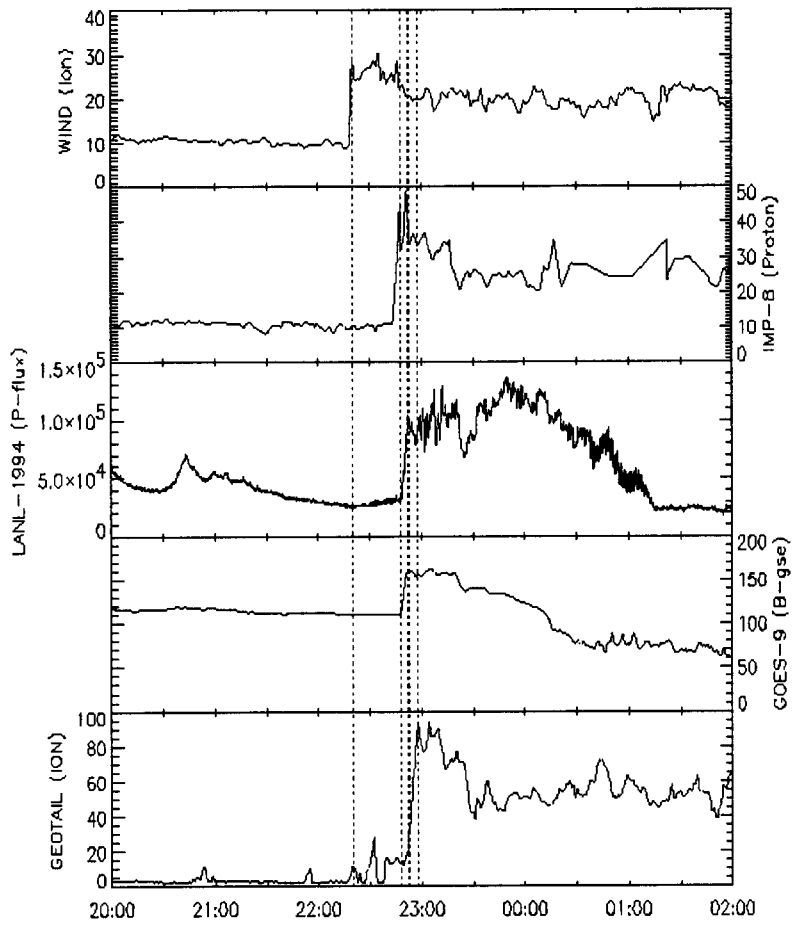


그림 8. 1997년 11월 6일 20시부터 7일 02시까지 다섯 위성에서 측정한 이온 밀도, 프로톤 밀도, 자기장의 변화 모습.

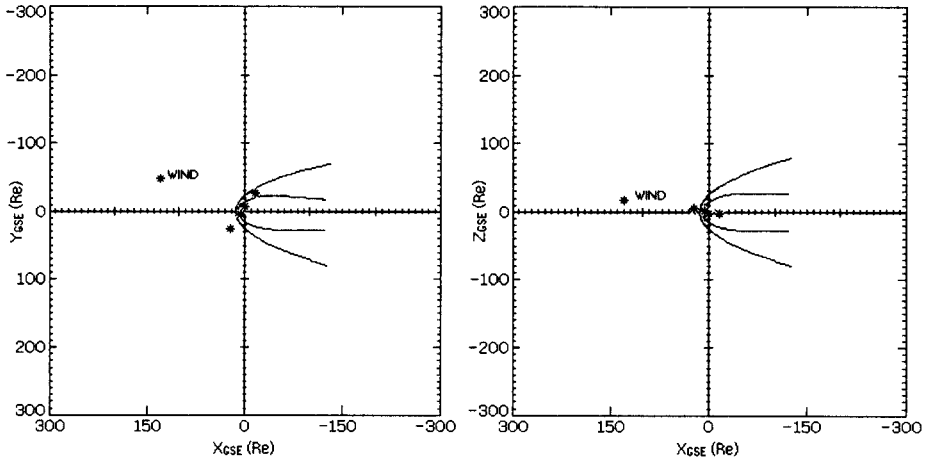


그림 9. 1997년 11월 4일의 CME를 관측한 위성들의 위치.

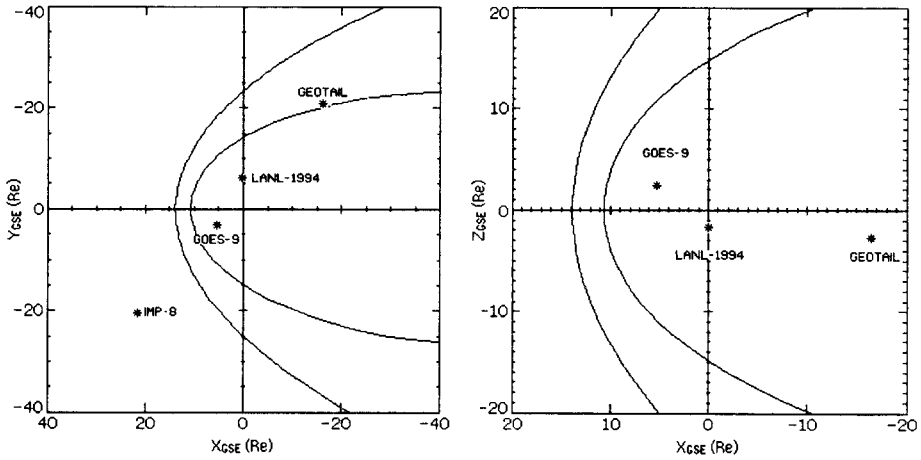


그림 10. 1997년 11월 4일의 CME를 관측한 지구 근처 위성들의 위치.

$$\rho_1 \vec{U}_1 \cdot \vec{n} = \rho_2 \vec{U}_2 \cdot \vec{n} \quad (3)$$

아래 첨자 1, 2는 경계를 중심으로 나뉘어진 공간을 나타내며, ρ 는 밀도, \vec{U} 는 속도, \vec{n} 은 경계면에 수직인 단위 벡터이다. 이 조건에 의하면 경계면에 수직인 속도 성분(GSE 좌표계의 x 축 성분)과 밀도의 곱은 항상 일정한 상수값을 가진다. 행성간 공간에서의 태양풍 개수 밀도는 $5 \sim 10^3$ 개 / cm^{-3} 이고, 지구 자기권 내의 입자 밀도는 $\sim 10^3$ 개 / cm^{-3} 이므로 위 경계 조건을 사용하면 자기권 외부에서의 전파 속도가 줄어든 이유를 설명할 수 있다.

이번 연구에서는 CME의 전파 속도 계산에 1997년 1월 6-11일과 1997년 11월 4-7일의 두 자료만을 이용하였다. 선택할 수 있는 위성 자료가 CME의 발생 빈도가 낮은 태양 활동의 극소기 기간의 것이었으며, 몇몇 CME에 대해서는 관측 자료가 존재하지 않았고, 또한 위성들 사이의 거리는 가깝고 물리량 측정 시간 간격이 길어 정확한 결과를 얻을 수 있는 자료가 적었기 때문이다. 정지 궤도 위성들의 물리량 측정 시간 간격이 짧은 자료를 사용한다면 자기권 내부에서의 CME 전파 속도를 보다 정확하게 구할 수 있어 자기권 내에서의 속도 감소 정도를 위치에 따라 알 수 있을 것이다. CME와 이에 따른 충격파의 경우 평형상태에 이르기 전까지 물리량들의 변화는 비선형 방정식으로 서술된다. 향후 행성간 공간과 지구 자기권에서의 파동 진행에 대하여 비선형 방정식을 자기유체역학적으로 해석하여 관측결과와 비교하는 보다 정량적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글: 본 연구에 사용된 위성 자료를 제공해 주신 LANL의 Energetic Particle 연구팀과 NASA의 Space Physics Data Facility에 감사드립니다. 이 논문은 과학재단 특정기초연구비(96-0702-0301-3)와 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(BSRI 97-5408) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Gosling, J. T. 1993, *J. Geophys. Res.*, 98, 18937
 Gosling, J. T. 1995a, *J. Geophys. Res.*, 100, 3479
 Gosling, J. T. 1995b, *J. Geophys. Res.*, 100, 7921
 Hundhausen, A. J. 1993, *J. Geophys. Res.*, 98, 13177
 Parks, G. K. 1991, in *Physics of Space Plasmas* (Addison-Wesley:Redwood), pp. 311-314