

## 우주선 Intensity 조정자로서 자기구름과 그 주위의 행성간 충격파 sheath 영역의 역할

오수연  
충남대학교 천문우주과학과

## Magnetic Cloud and its Interplanetary Shock Sheath as a Modulator of the Cosmic Ray Intensity

Su Yeon Oh

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

(Received April 17, 2008; Accepted May 21, 2008)

### 요 약

우주선 intensity가 갑작스럽게 감소하는 대표적인 현상인 Forbush Decrease(FD)는 행성간 충격파(Interplanetary shock), 자기 구름(Magnetic cloud)과 같은 태양풍 이벤트와 밀접한 관련성을 가지고 있다. FD 현상에 대해 태양풍 이벤트 중 자기구름이 어느 정도 효과적으로 작용하는 지에 대해 알아보기 위해 1998-1999년의 2년 동안 발생한 44개의 자기 구름을 분석하였다. 그 결과 44개 중 11개의 자기 구름이 FD 현상과 관련이 있었으며, 자기 구름 영역이나 자기구름과 관계된 행성간 충격파의 sheath 영역의 평균 자기장 세기, 자기장 교란도 그리고 태양풍 속도와 같은 행성간 자기장 및 태양풍의 물리적 특성이 FD 현상과의 관련성을 대표해준다는 것을 밝혀냈다. 특히, 행성간 충격파 sheath 영역의 자기장 및 태양풍의 물리량이 자기장 세기가 13nT, 자기장 교란도는 3nT, 및 태양풍 속도가 평균 550km/s 이상의 태양풍 이벤트에서 FD 발생에 효과적으로 작용하는 것으로 분석되었다.

### Abstract

Forbush Decreases (FDs) are representative events of abrupt decrease in galactic cosmic ray intensity. They are known to be strongly associated with solar wind events such as interplanetary shock (IP shock) and magnetic cloud (MC). In order to examine effectiveness of the MC on FDs, I studied the 44 MCs that occurred during the 2 years from 1998 to 1999 and investigated the properties of interplanetary magnetic field (IMF) and solar wind. As a result, I found that 11 out of 44 MCs are associated with the FDs. In particular, it is noted that the FDs are driven by the IP shock sheaths which are associated with over 13 nT of IMF magnitude, 3 nT of IMF turbulence, and 550 km/s of solar wind speed. This result indicates that magnetic cloud and its interplanetary shock sheath work as a modulator of the cosmic ray intensity.

*Keywords:* forbush decrease, cosmic ray, magnetic cloud, interplanetary shock

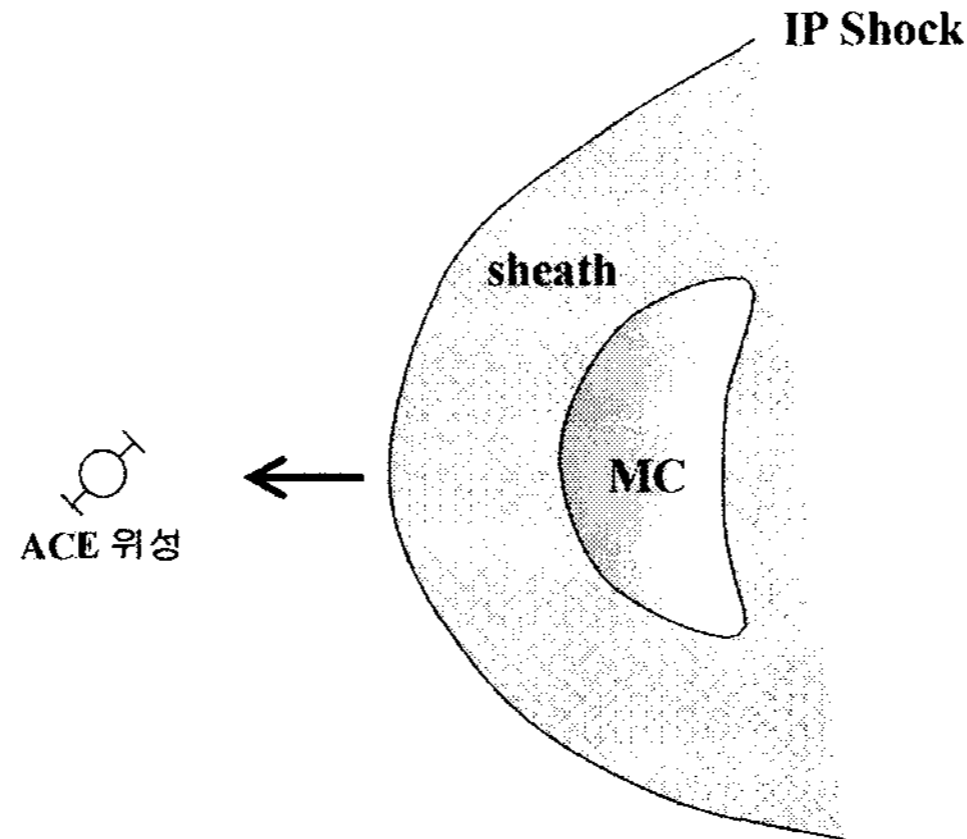


그림 1. 행성간 충격파와 자기 구름 사이의 sheath 영역의 구조.

## 1. 서 론

지구를 향해 날아오는 우주선(Galactic Cosmic Ray; GCR) 입자의 변화 경향 중에서 Forbush Decrease(Forbush 1938; 이하 FD)현상은 갑작스런 우주선 intensity 감소와 함께 점차적으로 수일 내지 1주일에 걸쳐서 평소의 수준으로 회복되는 프로파일을 보여준다. FD는 주로 지구 근처에서 행성간 충격파(Interplanetary shock; IP shock)와 자기구름(Magnetic cloud; MC)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 태양풍 활동들이 우주선 입자를 차단하는 효과적인 방패 역할을 수행하기 때문이다. 대체적으로 우주선 intensity의 기저(base line)가 되는 월평균 값의 약 2% 이상 감소하면 FD 현상으로 볼 수 있다(Lockwood 1971).

그림 1은 행성간 충격파와 행성간 충격파 유도체 자기구름 사이에 형성되는 sheath 영역을 나타낸다. 이 sheath 영역은 행성간 충격파 통과 후 행성간 자기장 및 태양풍의 교란으로 다양한 태양풍 효과를 만들어 내는 역할을 한다. 행성간 충격파 유도체 중 자기구름이 효과적이고 빈번한 행성간 충격파 유도체임이 Oh et al.(2002, 2007a,b)에 의해 밝혀진 바 있다.

그림 2는 Moscow Neutron Monitor Station에서 1998년 11월 8일에 관측된 FD 현상으로 약 7% 이상의 우주선 intensity 감소 경향을 보여 준다.

앞서 언급한 것처럼 행성간 충격파(sheath 영역)나 자기구름(자기구름 영역)이 우주선 intensity 감소와 밀접한 연관이 있다. 이와 같은 태양풍 활동과 우주선 intensity 감소에 대한 선행연구를 살펴보면, Badruddin et al.(1986)은 우주선 intensity 변화 영역으로 교란되고 세기가 강한 자기장을 가진 플라즈마 sheath 영역을 수반하는 행성간 충격파를 제안하였다. Lockwood et al.(1991)은 강한 행성간 충격파 도착 약 2-5시간 후 FD의 주상(main phase)이 시작된다고 설명하면서 sheath 영역의 강한 자기장 교란이 발생기작이라고 주장하였다.

반면에, Zhang & Burlaga(1988)은 변화 크기가 약 2.5% 이상의 상대적으로 큰 우주선 intensity 이벤트는 진행 전면에 충격파를 동반하는 자기구름과 관련되어 있다고 설명하였다. 이들 자기구름은 행성간 충격파와 자기구름 사이 sheath 영역에 교란된 자기장을 가진 negative clouds라고 제안하였다.

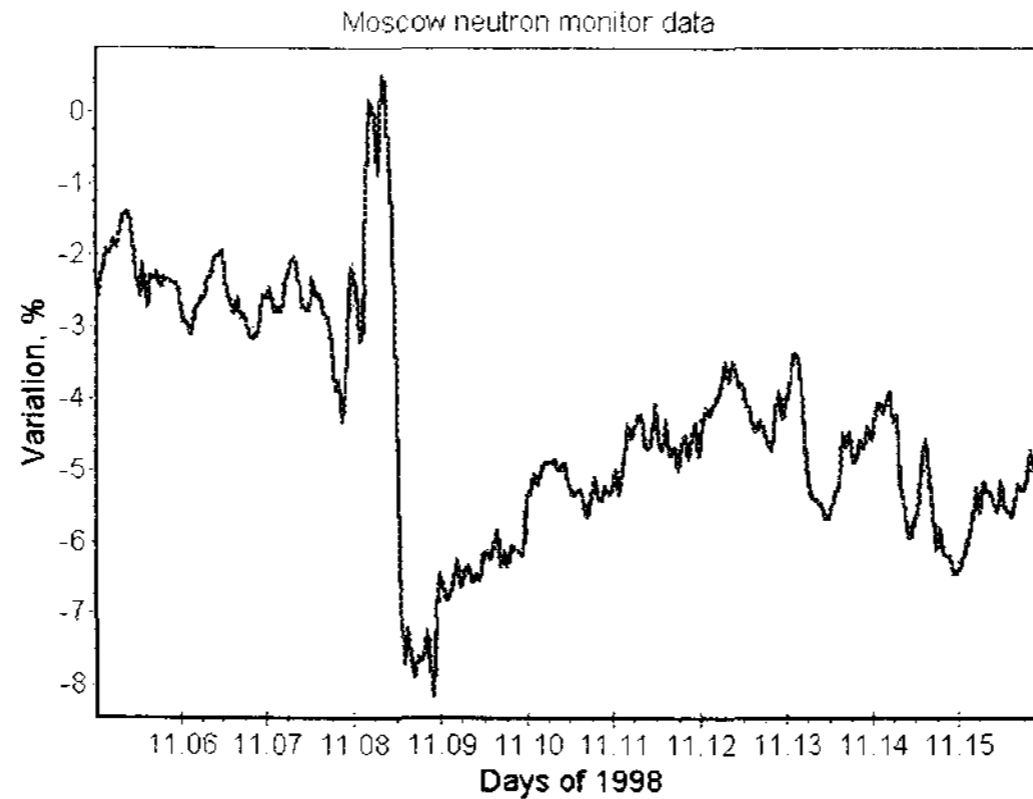


그림 2. 1998년 11월 8일에 발생한 FD 현상(Moscow Neutron Monitor).

한편, Venkatesan et al.(1992)은 자기구름 및 행성간 충격파 통과시 모두 우주선 intensity의 감소 현상이 발생하는데, 행성간 충격파 통과 시에는 교란이 강한 sheath와 관련된 빠른 우주선 intensity 감소현상이 발생하고, 자기구름 통과 시에는 확장된 강한 자기장 영역과 관련된 느린 우주선 intensity 감소현상이 발생한다고 설명하였다. Bavassano et al.(1994)은 행성간 충격파와 관련된 자기구름이 존재시 우주선 intensity 감소현상이 발생한다고 제안했다. Badruddin(2002)은 자기장 강화에 대한 기본적인 생각으로 자기장의 정렬성, 즉 정렬되어 있거나 교란된 자기장이라고 설명하였다. FD 현상은 강화된 자기적 교란 영역에서 입자의 산란(scattering)에 의한 것이라고 주장하였다. 교란 상호작용 영역(Turbulent Interaction Region; TIR)이라고 명명한 지역은 자기구름과 주변 자기장의 상호작용에 의해 형성된 자기적으로 교란된 지역을 말하는 데, 행성간 충격파의 sheath 영역 내에서는 강화되고 교란된 자기장을 지니며, 이 교란된 자기장에서 산란에 의해 우주선이 감소한다고 하였다. 또, 자기구름은 자기적으로 평온한 지역으로 강하지만 완만한 자기장 증가를 보이며 이 강한 정렬된 자기장 영역 내에서 표류(drifting)에 의해 우주선이 감소한다고 설명하였다.

기존의 연구에서는 FD 현상의 사례연구를 통해 FD 현상 발생기작은 태양풍의 행성간 충격파와 자기구름과 관련하여 자기장 강화현상에 의한 표류와 교란된 자기장에 의한 산란에 의한 것으로 논의되고 있다. 이와 더불어, FD 현상의 전지구적 규모로서 동시 및 비동시성을 결정하는 데 있어서 우주선 입자와 상호작용하는 행성간 충격파 sheath 영역의 태양풍 및 행성간 자기장 환경 조건이 중요한 요소임이 제시되었다(Oh et al. 2008). 따라서, 이 연구에서는 행성간 충격파와 자기구름이 어느 정도로 효과적으로 우주선 intensity 감소 현상에 기여하고 있는지 통계적으로 분석하는데 그 목적이 있다.

## 2. 자료분석

그림 3은 FD 현상과 관련된 태양풍 구조를 도식화한 것이다. 그림 3a는 행성간 충격파와 관련된 FD 현상을 표현한 것이고, 그림 3b는 자기 구름과 관련된 FD 현상을 표현한 것이다. 한편, 행성간 충격파와 유도체인 자기 구름 간의 상호관련성을 결정하는 것은 행성간 충격파와 자기 구름 간의 시

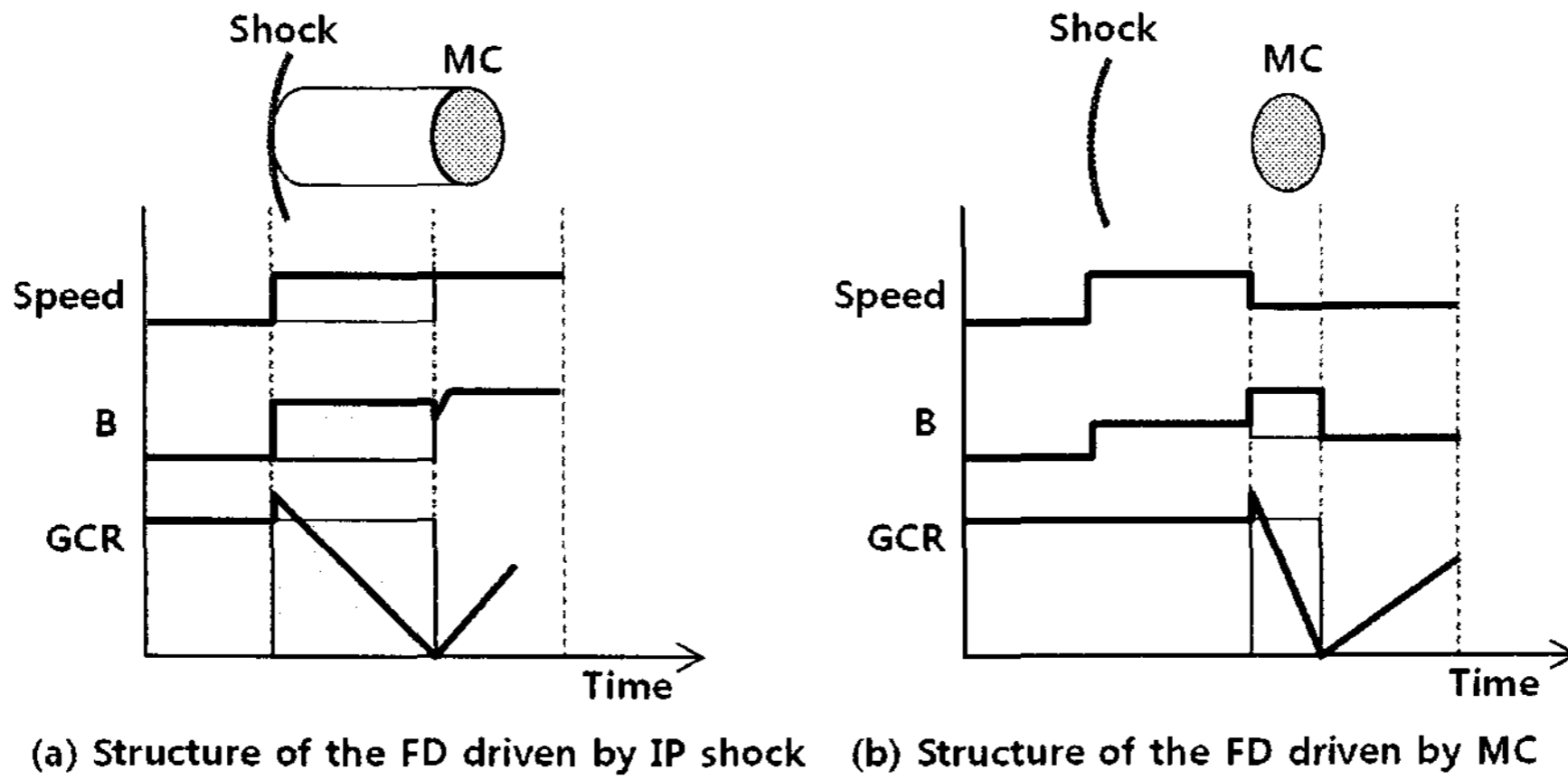


그림 3. FD 현상과 관련된 행성간 충격파 (a) 및 자기 구름 (b)의 구조.

간 간격을 하루 미만으로 판단한다(Lepping et al. 1997, Oh et al. 2002, 2007a).

행성간 충격파와 자기구름의 효과적인 우주선 intensity 감소 조절에 대한 이 연구는 Moscow Neutron Monitor Station의 1시간 평균 우주선 자료를 활용하여 1998년부터 1999년까지 2년 동안 우주선 intensity가 약 3% 이상 감소된 FD 현상을 대상으로 하였다. WIND([http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag\\_cloud\\_pub1.html](http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html))와 ACE([http://www.bartol.udel.edu/~chuck/ace/ACElists/obs\\_list.html](http://www.bartol.udel.edu/~chuck/ace/ACElists/obs_list.html)) 위성의 자기 구름 목록에서 같은 기간 동안에 발생한 44개의 자기구름 및 72개의 Forward 행성간 충격파를 선별하였다. ACE 위성의 4분 평균 태양풍(SWEPAM) 및 행성간 자기장(MAG) 자료를 활용하여 자기 구름 및 행성간 충격파의 태양풍 물리량과 행성간 자기장 특성을 도출하였다.

표 1은 1998년부터 1999년까지 2년 동안 발생한 자기구름 이벤트의 목록으로 발생시각, 자기구름의 동압력(dynamic pressure,  $P_{dyn}$ ), 행성간 자기장 세기(B), 최소  $B_z$ ( $B_{zmin}$ ), 자기장 회전(R), 자기구름의 양호도(quality, Q), FD 현상과 관련성, 관련된 행성간 충격파 및 행성간 충격파의 동압력이 표시되어 있다. 선별된 11개의 FD 현상의 평균 우주선 intensity 감소 세기는 6.82%였다. 44개의 자기구름 중에서 11개만이 FD 현상과 연관되어 있으며, 11개의 FD 현상 중에서 9개가 행성간 충격파의 sheath 영역에서, 2개는 자기구름 영역에서 발생한 것으로 분석되었다. 또, 행성간 충격파의 sheath 영역이나 자기 구름 영역의 동압력은 FD 현상 발생과 어떤 뚜렷한 관련이 없음을 알 수 있다.

### 3. 분석결과

표 2는 FD 현상 발생여부에 따른 자기구름의 물리적 특성으로, B는 평균 행성간 자기장의 세기,  $\sigma B$ 와  $\sigma B/B$ 는 자기구름 영역 내의 B의 변화 정도, 즉 교란도를 나타낸다.  $\sigma B$ 는 자기구름 내의 행성간 자기장 세기의 표준편차를 나타내며,  $\sigma B/B$ 는  $\sigma B$ 를 평균 행성간 자기장 세기로 나눈 값을 뜻한다.  $N_p$ 와  $V_p$ 는 자기구름 영역 내의 태양풍의 평균 수밀도와 속도를 나타낸다. 이 연구의 자기구름의 물리적 특성 분석에 의하면 FD와 관련 있는 자기구름(MC w/ FD)이 관련 없는 자기구름(MC w/o FD)에 비해 자기장의 세기, 교란도, 태양풍의 속도가 큰 것을 알 수 있고, 상대적으로 수밀도는 낮음을 알 수 있다.

표 1. 자기 구름 목록 (1998-1999).

MC start-end time yy.mm.dd.hh.h	$P_{\text{dyn}}^a$	B [nT]	$B_{z\text{min}}$ [nT]	$R^b$	$Q^c$	FD associated	IP shock associated mm.dd.hh.h	$P_{\text{dyn}}^d$
98.01.07.03.0 - 01.08.10.0	*	15.44	-2.69	1	1 <sup>W</sup>		01.06.13.5	*
98.01.08.14.0 - 01.08.22.0	*	9.29	-3.69	2	3 <sup>W</sup>			
98.02.04.04.0 - 02.05.22.0	*	10.53	-8.32	1	2 <sup>W</sup>		02.03.12.5	*
98.02.28.22.0 - 03.01.19.0	38.8	6.40	-5.23	2	2			
98.03.04.14.0 - 03.06.06.0	28.9	10.36	-6.65	2	1 <sup>W</sup>		03.04.11.0	35.5
98.03.25.13.0 - 03.26.08.0	43.3	10.37	-6.96	2	1			
98.04.08.00.0 - 04.08.15.0	8.8	11.79	-3.46	2	2	yes		
98.05.02.12.0 - 05.03.17.0	34.3	9.13	-11.79	2	3 <sup>W</sup>	yes	05.01.21.4	59.8
98.06.02.10.5 - 06.02.15.9	23.8	10.09	-3.79	3	2 <sup>W</sup>			
98.06.24.16.8 - 06.25.21.8	50.0	13.33	-3.30	1	2 <sup>W</sup>		06.24.07.2	47.2
98.07.11.17.0 - 07.12.17.0	10.8	11.21	-5.66	1	2			
98.08.02.06.0 - 08.03.02.0	23.6	5.26	-0.46	1	3			
98.08.08.03.0 - 08.09.14.0	16.6	5.97	-2.58	1	2		08.08.01.5	19.1
98.08.20.10.0 - 08.21.19.0	14.1	13.11	-9.73	1	1 <sup>W</sup>		08.19.17.5	30.4
98.08.27.05.0 - 08.28.03.0	15.9	12.60	-14.49	2	2 <sup>W</sup>	yes	08.26.06.0	54.7
98.08.29.02.0 - 08.29.23.0	13.5	5.26	-3.94	2	3			
98.09.18.11.0 - 09.19.10.0	38.7	10.32	-13.15	2	3			
98.09.25.05.0 - 09.26.13.0	25.5	13.84	-13.75	1	2 <sup>W</sup>	yes	09.24.23.3	74.9
98.10.19.04.0 - 10.20.07.0	26.2	16.56	-17.19	1	3 <sup>W</sup>		10.18.19.0	132.4
98.11.08.19.0 - 11.10.01.0	39.0	16.08	-15.55	2	1 <sup>W</sup>	yes	11.05.04.0	98.1
98.11.10.06.0 - 11.10.20.0	18.1	4.25	-1.16	2	3			
98.11.13.02.0 - 11.14.13.0	41.7	18.01	-17.53	2	3			
98.12.10.15.0 - 12.11.16.0	29.8	11.45	-12.73	3	3			
99.01.13.15.0 - 01.14.17.0	46.7	14.51	-14.98	3	2		01.13.10.0	54.0
99.01.22.21.0 - 01.23.17.0	41.6	14.76	-5.08	2	2	yes	01.22.20.0	29.3
99.02.13.13.0 - 02.14.14.0	22.3	8.14	-4.58	3	2			
99.02.18.14.0 - 02.19.12.0	23.8	9.16	-6.63	2	3 <sup>W</sup>	yes	02.18.02.0	58.3
99.02.19.23.0 - 02.20.16.0	5.4	5.73	-0.75	1	2			
99.02.28.15.0 - 03.01.20.0	66.7	14.21	-14.03	3	1		02.28.21.0	
99.03.10.18.0 - 03.12.01.0	32.9	6.13	-4.36	3	2		03.10.00.8	53.6
99.04.16.20.0 - 04.17.21.0	40.5	17.18	-13.93	1	3 <sup>W</sup>		04.16.10.5	106.6
99.04.21.04.0 - 04.22.12.0	19.3	7.69	-4.58	1	1			
99.04.26.09.0 - 04.27.06.0	4.2	8.98	-5.14	2	1			
99.07.07.07.0 - 07.08.13.0	10.6	6.14	-5.48	2	2	yes	07.06.19.0	13.9
99.08.09.10.8 - 08.10.15.8	15.0	10.21	-3.28	1	1 <sup>W</sup>		08.08.17.8	19.6
99.08.22.14.0 - 08.23.19.0	18.3	9.45	-9.29	2	2	yes		
99.09.15.09.0 - 09.15.18.0	11.8	10.66	-7.41	2	1	yes	09.15.07.0	17.3
99.09.21.21.0 - 09.22.05.0	26.0	11.85	-7.40	2	3 <sup>W</sup>			
99.10.10.12.0 - 10.10.23.0	38.8	12.63	-8.39	2	2			
99.10.21.03.0 - 10.22.17.0	57.2	18.06	-30.42	2	3		10.21.01.5	101.8
99.11.12.13.0 - 11.13.18.0	11.1	7.06	-11.68	1	2			
99.11.23.06.0 - 11.24.04.0	17.7	9.75	-7.04	2	3			
99.12.13.06.0 - 12.13.15.0	26.8	14.15	-9.48	2	2	yes	12.12.15.0	28.3
99.12.14.04.0 - 12.14.17.0	7.5	11.04	0.89	3	2			

\*missing data, <sup>a</sup>dynamic pressure of MC( $10^{-10}$ kg/ms), <sup>b</sup>quality of magnetic rotation, <sup>c</sup>quality of magnetic cloud(1=excellent, 2=good, 3=poor), <sup>d</sup>dynamic pressure of sheath( $10^{-10}$ kg/ms), <sup>W</sup>quality from WIND.

표 2. Forbush Decrease 현상 발생 여부에 따른 자기 구름의 물리적 특성.

	event	B[nT]	$\sigma B$ [nT]	$\sigma B/B$	$N_p$ [cm <sup>-3</sup> ]	$V_p$ [km/s]
MC w/ FD	11	11.62	2.91	0.27	5.50	512.2
MC w/o FD	33	10.62	2.19	0.19	9.64	420.7
total	44	10.87	2.38	0.22	8.53	445.3

표 3. Forbush Decrease 현상 발생 여부에 따른 행성간 충격파의 물리적 특성.

	event	Ma	M	Ms	B[nT]	$\sigma B$ [nT]	$\sigma B/B$	$N_p$ [cm <sup>-3</sup> ]	$V_p$ [km/s]
w/ FD	9	2.69	7.05	2.43	16.65	3.03	0.19	7.65	606.4
w/o FD	13	1.79	3.65	1.53	10.09	1.87	0.18	21.14	418.6
total	22	2.22	5.26	1.96	12.90	2.33	0.18	14.75	507.6

한편, 44개의 자기구름 중에서 22개 이벤트가 행성간 충격파와 관련 있는 것으로 분석되었는데, 이들 22개 행성간 충격파 중 9개 이벤트만이 FD 현상과 관련이 있는 것으로 분석되었다. 표 3은 FD 현상 발생 여부에 따른 행성간 충격파의 물리적 특성을 나타내는 것으로, 행성간 자기장 및 태양풍 물리량은 표 3과 같다. 행성간 충격파의 규모와 세기를 나타내는 Ma, M, Ms는 각각 Alfvénic 마하수, Sonic 마하수, Magnetosonic 마하수를 나타낸다.

FD 현상과 관련 있는 행성간 충격파(w/ FD)의 평균 물리량이 FD 현상과 관련없는 행성간 충격파(w/o FD)의 평균 물리량에 비해 수밀도를 제외한 나머지 물리량 값이 커서 강한 행성간 충격파가 FD와 관련 있음을 알 수 있다.

그림 4는 자기구름과 관련된 행성간 충격파 sheath 영역의 물리적 특성(평균 자기장세기, 자기장 교란도, 평균 태양풍 속도)과 FD 우주선 intensity 감소 정도를 나타낸 것으로 직선은 각 물리량의 선형회귀 분석선을 나타낸다. FD와 관련된 행성간 충격파 sheath 영역의 평균 자기장 세기(그림 4a), 자기장 교란도(그림 4b), 및 평균 태양풍 속도(그림 4c)의 값이 클수록 우주선 intensity 감소 정도가 크게 됨을 알 수 있다. FD 현상과 관련없는 행성간 충격파 sheath 영역의 물리적 특성과 비교했을 때, 그림 4의 수직 점선에 표시된 통계적 분석 결과에 의하면 행성간 충격파 sheath 영역의 자기장 및 태양풍의 물리량이 자기장 세기가 13nT, 자기장 교란도는 3nT, 및 태양풍 속도가 평균 550km/s 이상의 태양풍 이벤트에서 FD 발생에 효과적으로 작용한다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 FD와 관련있는 sheath 영역의 평균 자기장 세기(B)와 교란도( $\sigma B$ )를 표현한 것으로, 큰 빈 원은 FD 발생과 관련 있는 sheath 영역을 나타낸 것이다. 원 안의 숫자는 FD의 우주선 intensity 감소 정도를 나타낸다. sheath 영역의 평균 자기장 세기와 교란도가 클수록 FD의 우주선 intensity 감소 정도가 크다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 정 리

태양풍 이벤트의 주요한 현상인 자기구름 및 행성간 충격파가 우주선 intensity 감소현상인 FD 이벤트에 어느 정도 효과적으로 작용하는가에 대한 연구를 1998-1999년 2년 간의 44개의 자기구름에 대해서 분석하였다. 11개의 자기구름이 FD 현상과 관련이 있으며, 이 중 행성간 충격파가 동반된

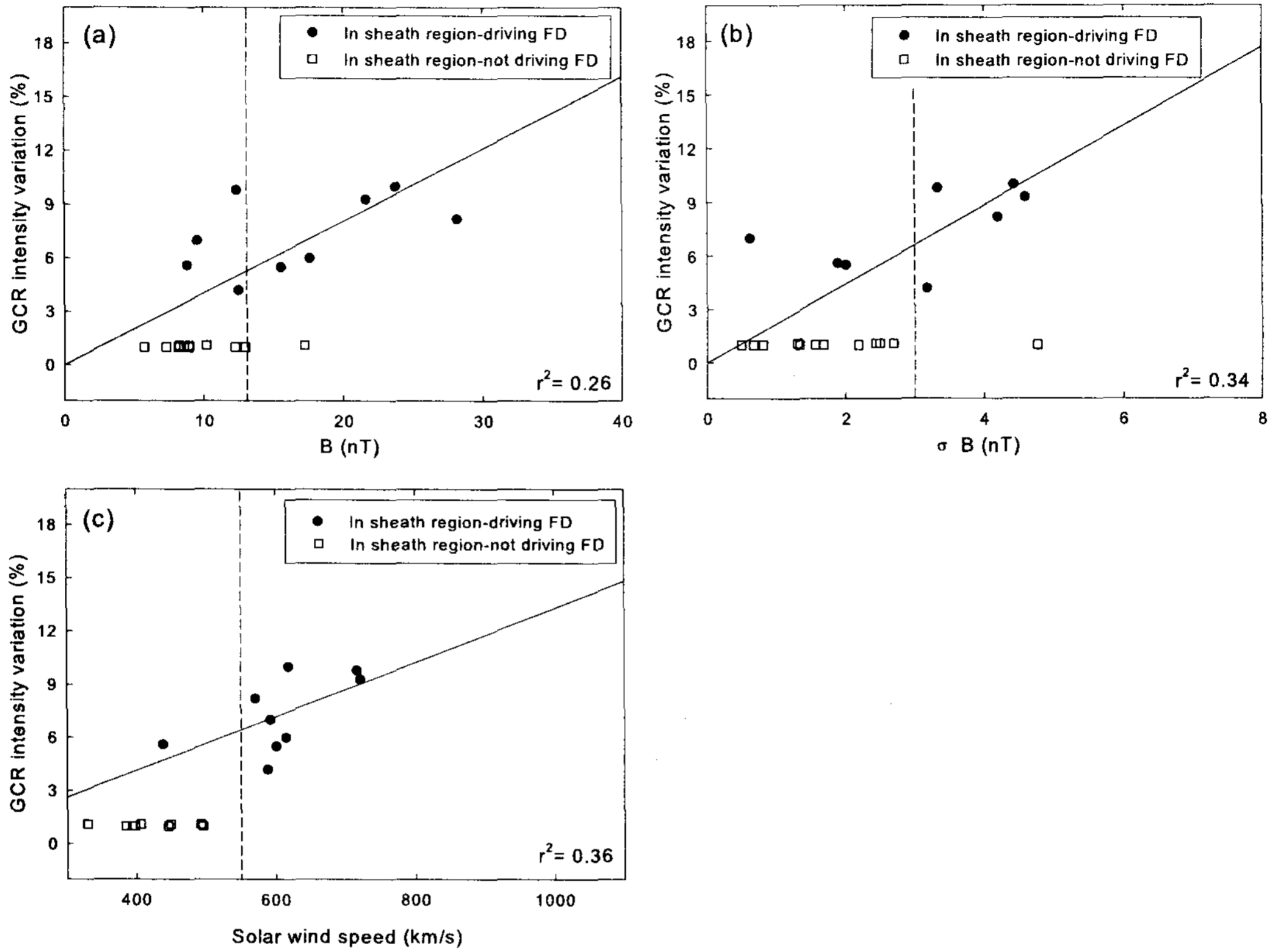


그림 4. 우주선 intensity 변화량과 MC와 관련된 sheath 영역의 평균 자기장 세기 (a), 평균 자기장 교란도 (b), 및 평균 태양풍 속도 (c)의 관계. 실선은 각 물리량의 선형회귀분석선을 의미한다. 수직 파선은 FD 발생을 결정하는 물리량의 대략적인 임계값을 나타낸다.

경우는 9개 이벤트였다.

FD 현상 발생에 관련된 행성간 충격파의 sheath 영역의 특성을 요약하면 다음과 같다. sheath 영역의 평균 자기장 세기, 자기장 교란도 및 평균 태양풍 속도가 클수록 FD 현상의 우주선 intensity 감소 정도가 커져 큰 규모의 FD 현상이 발생한다. 대략적인 통계값으로 표현하면, 자기장 세기가 13nT, 자기장 교란도는 3nT, 및 태양풍 속도가 평균 550km/s 이상의 태양풍 이벤트에서 FD 현상에 효과적으로 작용한다는 것을 알 수 있다. 한편, sheath 영역의 자기장 교란도는 자기장 세기의 강화(B)에 비례함을 알 수 있다.

FD 현상 발생기작은 태양풍 이벤트인 자기구름에 의해 유도된 행성간 충격파와 높은 상호 관련이 있고 sheath 영역의 자기적 교란도 및 자기장 세기에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 또한 어느 정도 큰 속도의 태양풍이 작용하여야 FD 현상이 확인되는 것으로 볼 수 있다. 이는 기존의 표류 및 확산 이론의 절충이론에 해당된다고 볼 수 있으며, 다시 말해 어느 하나가 다른 것보다 더 중요하다고 말할 수 없다는 것이다. 추가적으로 행성간 자기장의 역할 뿐만 아니라 태양풍 속도도 중요한 역할을 한다고 볼 수 있는 연구 결과이다.

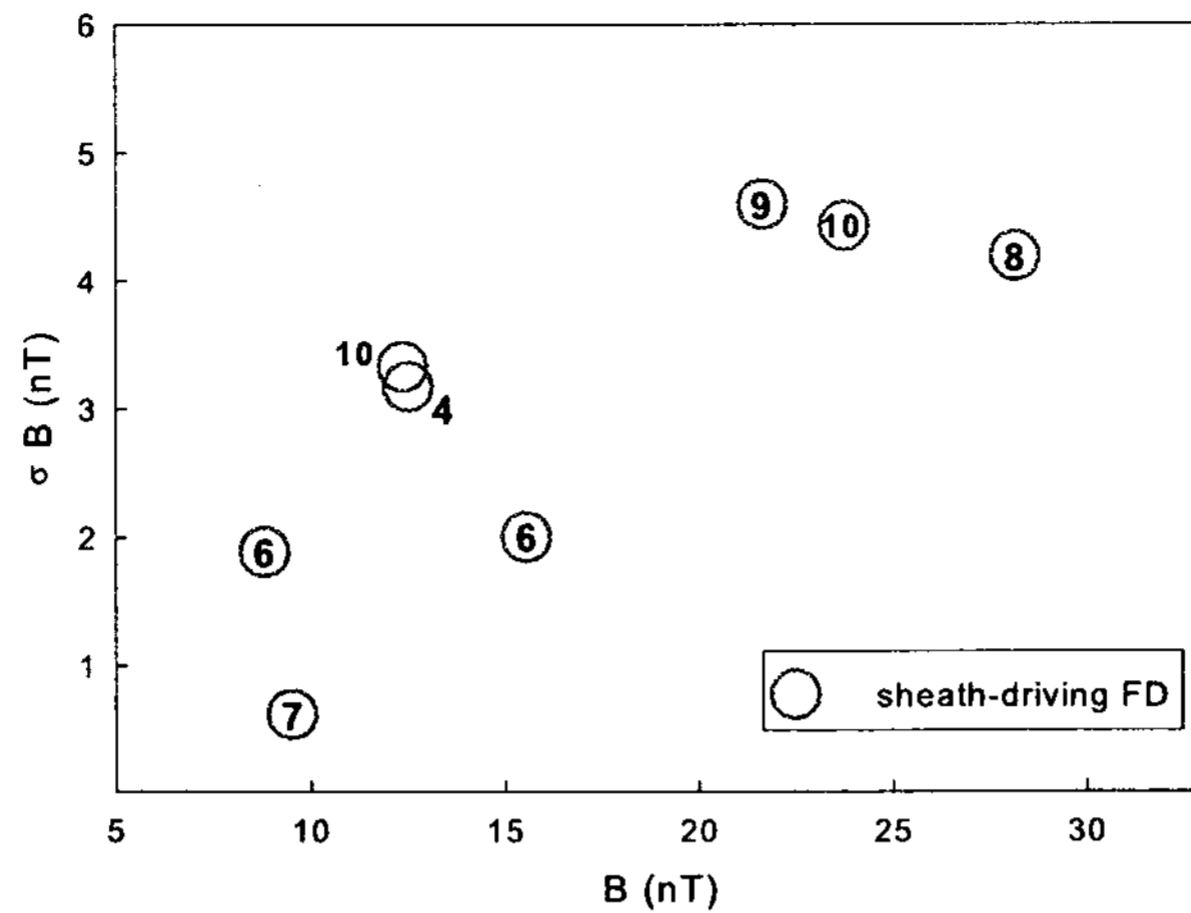


그림 5. FD 현상과 관련된 sheath 영역의 평균 자기장 세기와 평균 자기장 교란도.

**감사의 글:** 이 연구는 한국학술진흥재단 (KRF-2002-015-CP0154)의 지원을 받아 수행되었습니다. ACE MAG/SWEPAM 및 WIND MFI 과학 팀의 자기 구름 자료를 이 연구에 활용하였습니다. IZMIRAN의 Solar-Terrestrial 그룹의 지원으로 운영되고 있는 Moscow Neutron Monitor의 우주선 자료를 이 연구에 적용하였으며, 우주선 관측 자료의 연구자인 V. G. Yanke 박사께 감사드립니다.

### 참고문헌

- Badrudin, Yadav, R. S., & Yadav, N. R. 1986, Solar Physics, 105, 413  
 Badruddin, 2002, Solar Physics, 209, 195  
 Bavassano, B., Iucci, N., Lepping, R. P., Signorini, C., Smith, E. J., & Villaresi, G. 1994, JGR, 99, 4227  
 Forbush, S. E. 1938, Terr. Magn. Atmosph. Electr., 43, 203  
 Lepping, R. P., Burlaga, L. F., Szabo, A., Ogilvie, K. W., Mish, W., Vassiliadis, D., Lazarus, A. J., Steinberg, J. T., Farrugia, C. J., Janoo, J., & Mariani, F. 1997, JGR, 102, 14049  
 Lockwood, J. A. 1971, Space Science Reviews, 12, 658  
 Lockwood, J. A., Webber, W. R., & Debrunner, H. 1991, JGR, 96, 11587  
 Oh, S. Y., Yi, Y., & Kim, Y. H. 2007a, Solar Physics, 245, 391  
 Oh, S. Y., Yi, Y., & Kim, Y. H. 2008, JGR, 113, A01103  
 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  
 Venkatesan, D., Badruddin, Ananth, A. G., & Pillai, S. 1992, Solar Physics, 137, 345  
 Zhang, G. & Burlaga, L. F. 1988, JGR, 93, 2511