

태양 주기 23 기간 동안 태양 고에너지 양성자 이벤트와 코로나 물질 방출 사이의 상관관계

황정아^{1†}, 이재진¹, 김연한¹, 조경석¹, 김록순^{1,2}, 문용재³, 박영득¹

¹한국천문연구원 태양우주환경연구그룹

²충남대학교 천문우주과학과

³경희대학교 천문우주과학과

Relationship Between Solar Proton Events and Corona Mass Ejection Over the Solar Cycle 23

Junga Hwang^{1†}, Jaejin Lee¹, Yeon-Han Kim¹, Kyung-Suk Cho¹, Rok-Sun Kim^{1,2},
Yong-Jae Moon³, and Young-Deuk Park¹

¹Solar and Space Weather Research Group, KASI, Daejeon 305-348, Korea

²Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³Dept. of Astronomy and Space Science, Kyung Hee University, Yongin-si, Gyeong-do 446-701, Korea

E-mail: jahwang@kasi.re.kr

(Received November 16, 2009; Accepted November 23, 2009)

요 약

태양 주기 23 기간 동안 발생한 태양 고에너지 양성자 이벤트(Solar Proton Events, SPE)와 그와 연관된 코로나 물질 방출(Corona Mass Ejection, CME) 사이의 상관관계를 통계적으로 살펴 보았다. 1997-2006년 동안 일어난 63개의 SPE-CME 데이터 쌍을 조사해 본 결과, CME의 속도는 SPE의 상승 시간(rise time) 및 지속 시간(duration time) 등과 상관 계수가 높게 나타났다. 특별히 CME의 지구방향 인자(earthward direction parameter)는 SPE의 최대 플럭스와 높은 상관 계수를 보여 주었다. 기존의 태양 플레어 세기가 SPE의 세기에 미치는 영향은 CME의 지구방향 인자가 SPE의 플럭스의 세기에 미치는 영향과 그 상관계수가 유사하게 나타났다. 특히 SPE와 CME 지구 방향 인자와의 상관관계가 좋은 데이터들의 공통적인 특성은 모두 매우 빠름(>1400km/s) halo CME인 것으로 나타났다.

Abstract

We studied the solar proton events (SPEs) associated with coronal mass ejections (CMEs) during the solar cycle 23 (1997-2006). Using 63 SPE dataset, we investigated the relationship among SPE, flare, and CME, and found that (1) SPE rise time and duration time depend on CME speed and the earthward direction parameter of the CME, and (2) the SPE peak intensity depends on CME speed and X-ray Flare intensity. While inspecting the relation between SPE peak intensity and the direction parameter, we found there are two groups: first group consists of large six SPEs (> 10,000 pfu at > 10 MeV proton channel of GOES satellite) and shows strong correlation ($cc = 0.65$) between SPE peak intensity and CME direction parameter.

[†]corresponding author

The second group has a weak intensity and shows poor correlation between SPE peak intensity and the direction parameter ($cc = 0.01$). By investigating characteristics of the first group, we found that all the SPEs are associated with very fast halo CME ($> 1400\text{km/s}$) and also they are mostly located at central region and within $\pm 20^\circ$ latitude and $\pm 30^\circ$ longitude strip.

Keywords: solar proton events, corona mass ejection, solar flare, CME direction parameter

1. 서 론

태양 고에너지 입자(Solar Energetic Particle, SEP) 이벤트 또는 태양 양성자 이벤트(Solar Proton Events, SPE)의 생성에 있어서 코로나 물질 방출(Corona Mass Ejection, CME)의 역할이 중요하다는 것을 Kahler et al.(1978)이 처음 제기하였다. Kahler et al.(1978)는 CME 앞에 오는 shock에 의해서 태양 고에너지 입자들이 가속된다고 처음 제안하였다. 그 이후에 점진적이고 큰, 오래 지속되는 SPE는 CME에 의해서 유도된 shock에 기인한다는 보고는 꾸준히 있어 왔다(Reames 1999, Stolpovskii et al. 1998). 이러한 이론에 의하면, 빠른 속도의 CME는 오랜 시간 동안 shock을 유도하여 결과적으로 SPE 이벤트의 지속 시간과 상승 시간을 길게 만든다는 것이다. Kahler & Reames(2003)는 속도가 $< 900\text{km/s}$ 이고 각 폭이 $\leq 60^\circ$ 인 CME들은 SEP와 관련이 없다고도 보고하였다. Gopalswamy et al.(2004)는 주요 CME에 선행하는 작은 CME의 존재가 SPE의 최대량에 변화를 준다고 기술하였다. 즉, 선행하는 CME가 있는 경우에 뒤에 따라오는 CME에 의해서 생성된 SPE의 최대값이 높아진다는 것이다.

Flare와 관련된 SEP는 비교적 그 지속시간이 짧고 수 시간동안 지속되며, type III radio burst와 관련되고, 전자가 많게 나타나는 반면, CME와 관련된 SEP는 수 일 동안 지속되며, type II 또는 type IV radio burst와 같이 관측되며, 양성자가 많게 나타나는 특성을 가지고 있다고 알려져 있다. 그러나 아직 Flare와 CME 관련한 SPE의 명확한 설명은 분명하지 않아 학계의 논쟁거리가 되고 있다.

이 논문에서는 CME의 여러 가지 매개 변수들 중에서 SPE의 상승 시간, 지속 시간 및 감소 시간 등의 시간 변수들과 SPE의 최대 플럭스의 세기에 직접적인 영향을 미치는 변수는 무엇이 있는지 알아보았다.

2. 데이터

이 연구는 NOAA의 우주 환경 예보 센터(Space Weather Prediction Center)의 SPE 목록에서 1997-2006년 동안 일어난 모든 SPE를 찾는 것에서부터 출발하였다¹⁾. NOAA의 우주 환경 예보 센터에서 SPE를 판별하는 기준은, GOES 위성의 양성자 측정기기의 $>10\text{MeV}$ 에너지 채널에서 10pfu (particle flux unit, $1\text{pfu} = 1\text{proton/cm}^2/\text{s/sr}$) 이상의 양성자가 검출되는 것이다. 1997-2006년 동안 발생한 총 SPE의 개수는 94개였다. 이 중에서 CME의 각종 변수와의 상관관계를 조사하기 위해서, CME의 모든 필요한 정보가 가용한 이벤트들을 선별하였고, 명확하게 CME-SPE의 쌍을 이루는 이벤트들을 변별하여 63개의 이벤트들이 선정되었다. 총 94개 중에서 63개의 이벤트를 사용하였

¹⁾<http://sen.noaa.gov>

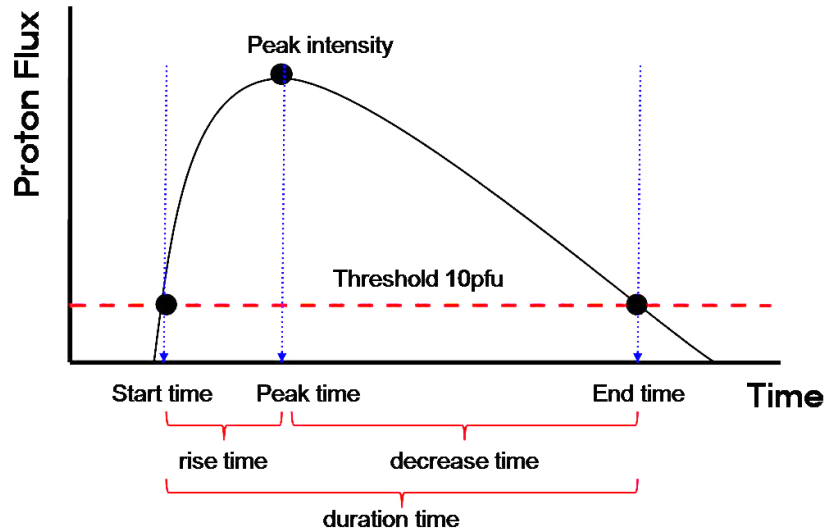


그림 1. Solar proton 플럭스의 일반적인 모양에서 시간과 최대값, 문턱 플럭스값.

표 1. 통계에 사용된 매개 변수들.

	SPE	CME	Flare
parameters	rise time	CME speed	X-ray intensity
	decrease time	acceleration	solar source
	duration time	direction parameter	longitude
	peak intensity		

으므로, 같은 기간 동안 일어난 모든 SPE의 약 70% 정도를 선정하여 분석한 셈이다. 이 이벤트들은 각각의 SPE의 원인이 되는 CME가 NOAA의 우주 환경 예보 센터의 SPE 목록에서도 잘 규정되어 있는 이벤트들이다. CME의 각 특성들, 특별히 지구 방향 인자 값을 계산하기 위해, 이 연구에서 사용된 CME들은 모두 halo CME이거나 각폭이 > 260° 이상인 CME들이다. SPE의 각각의 이벤트들의 데이터는 GOES 위성의 데이터를 사용하였고, CME 데이터는 SOHO 위성의 LASCO CME catalog를 참조하였다²⁾. 또한 Solar Flare 정보는 GOES SXI 데이터를 사용하였다³⁾.

그림 1은 일반적인 SPE의 시간-플럭스 형태를 보여 준다. SPE가 발생하기 수 시간 전에 발생하는 태양 폭발과, GOES 위성에서 관측한 양성자 플럭스가 10pfu를 지나면서 증가하기 시작하는 시점부터 최대 플럭스에 도달한 시간까지가 상승 시간(rise time)이다. 또한 최대 플럭스에 도달한 시간부터 감소하면서 다시 한 번 10pfu를 지나치면서 이벤트가 끝나는 지점까지의 시간을 감소 시간이라고 한다. SPE의 문턱값인 10pfu보다 플럭스가 크게 지속된 시간 동안을 지속 시간(duration time)이라고 한다.

표 1은 CME, Flare, SPE에 대해서 사용한 각 변수들을 정리한 것이다. SPE에서는 상승 시간, 지

²⁾http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

³⁾<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarflares.html#xray>

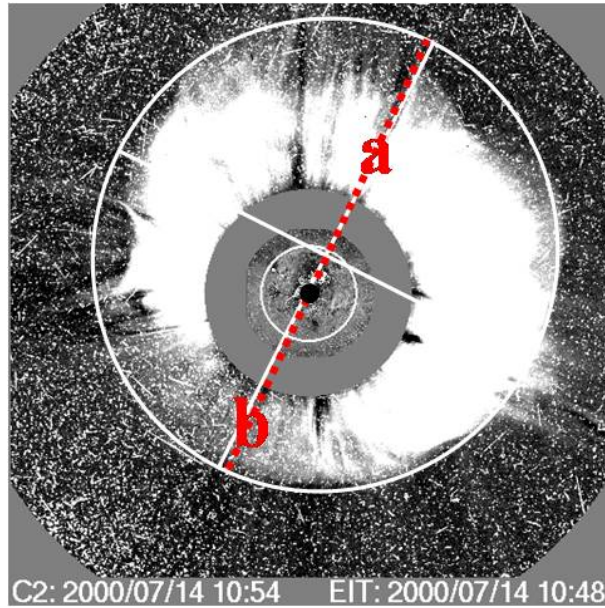


그림 2. CME 지구방향인자(direction parameter) 계산 예, b/a .

속시간, 감소 시간, 최대 플럭스의 크기를 사용하였고, CME에서는 CME 선형 속도, 가속도, 지구 방향 인자를 사용하였다. 또한 Flare에서는 xray의 세기와 태양 폭발 위치 등을 매개 변수로 사용하였다.

그림 2는 LASCO C2 영상에서 CME 지구 방향 인자를 계산하는 예를 보여주는 그림이다. Halo CME의 외곽 경계선을 그림 2와 같이 타원으로 결정했을 때, 장축과 단축을 그릴 수 있다. 이때 장축이 태양 중심과 만나는 길이에서 짧은 쪽(b)과 긴 쪽(a)의 비율 (b/a)로 CME의 지구방향 인자를 계산할 수 있다. 이 값이 1에 가까울수록 타원은 원에 가까워지고, 지구 방향으로 더 향한다고 말할 수 있다(Moon et al. 2005). 또한 CME가 지구 방향으로 향하는 정도가 클수록 태양 폭발이 지구에 미치는 영향력이 강해진다. 실제로 그림 2에서 발생한 CME는 2000년 7월 14일 Bastille Day 이벤트로써, 이때 지구에서는 $Dst = -300nT$ 에 이르는 강한 지자기 폭풍이 발생하였다.

3. 분석

그림 3은 CME 속도와 SPE 지속 시간의 상관관계를 보여준다. 데이터의 개수는 63개였고, 이때의 선형 상관 계수는 0.53, 표준 편차는 29.99로 나타났다. 이 상관계수 값은 Kahler(2005)에서 보여준 두 매개 변수의 상관계수 값과 일치한다. 그들이 사용한 SPE 데이터가 우리가 사용한 것과는 완전히 다른 1998-2002 기간 동안 WIND의 EPACT(the Energetic Particles: Acceleration, Composition, and Transport experiment)의 20MeV 양성자 데이터를 기준으로 판별한 것을 감안해 본다면 매우 흥미로운 결과라고 할 수 있다. 이와 유사한 방식으로 모든 데이터들에 대한 CME/Flare 매개 변수들과 SPE 매개 변수들 사이의 상관 계수들을 정리한 것이 표 2이다.

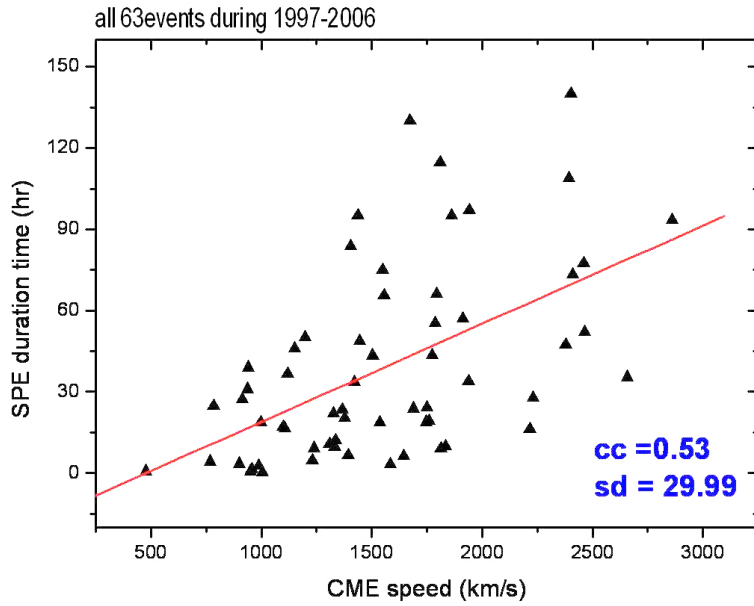


그림 3. CME speed와 SPE 지속시간 사이의 상관 계수.

표 2. SPE 변수들과 CME, Flare 변수들 사이의 상관 계수들.

	Trise	Tduration	Tdecrease	Ispe
Vcme	0.34	0.53	0.47	0.30
direction parameter	0.2	0.11	0.06	0.40
acceleration	-0.02	0.03	0.05	-0.08
X-ray intensity	0.2	0.32	0.33	0.37

표 2에서 굵은 글자체로 표시한 것은 가장 높은 상관 계수를 보여 주는 두 값이다. 가장 큰 상관 계수를 보여주는 것은 CME 속도와 SPE 지속 시간(cc = 0.53)이다. CME 속도는 SPE의 상승 시간(cc = 0.34)과 감소 시간(cc = 0.47)과의 상관관계도 상대적으로 좋게 나타났다. 이것은 CME의 속도가 SPE의 상승, 지속, 감소 시간 등의 타임 스케일을 결정하는데 역할을 한다는 것을 의미한다. 즉, CME의 속도가 크면 클수록, SPE 지속 시간이 길어진다는 의미이다. 지속 시간이 길어지면, 고에너지로 가속되는 입자들의 숫자들도 더욱 증가할 것이고, 따라서 SPE 최대 플럭스의 세기가 커지는데 기여할 수 있을 것이다. CME의 속도와 SPE의 최대 플럭스의 세기(ISPE)와의 상관관계는 0.30으로 나타났다. 한편, CME의 지구방향 인자와 SPE의 시간 변수들의 상관 계수는 양수이기는 하지만, 그렇게 높게 나타나진 않는 반면, SPE의 최대 플럭스와의 상관 계수는 상대적으로 매우 높은 상관계수를 나타 내었다(cc = 0.40). 이 값은 Flare의 세기가 SPE의 최대 플럭스의 세기에 미치는 상관계수(cc = 0.37)에 필적할 만큼 의미 있는 값이다. 즉, CME의 지구 방향 인자는 Flare의 세기가 SPE의 생성에 미치는 영향과 비교할 수 있을 정도의 역할을 수행한다고도 볼 수 있다. 즉, CME가 SPE에 미치는 영향을 고려할 때, CME의 속도 뿐 아니라, 지구 방향 인자도 함께 고려해야 할 인자라는 것을 알 수 있다. 상대적으로 CME의 가속도가 SPE의 생성에 미치는 상관관계를 매우 낮음을 알 수 있다. 또한 Flare의

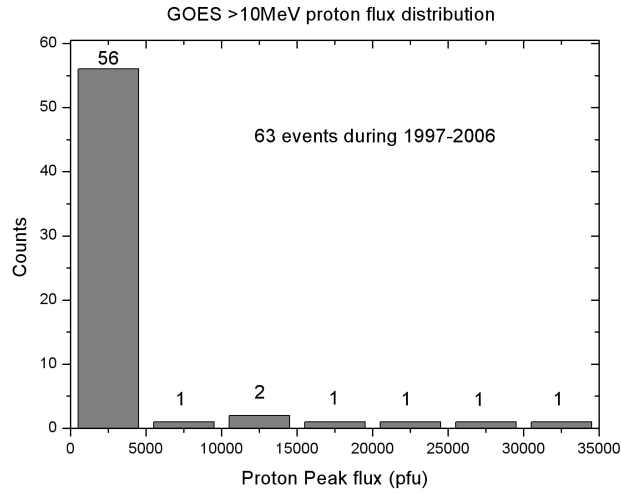


그림 4. SPE 최대 플럭스의 도수분포표.

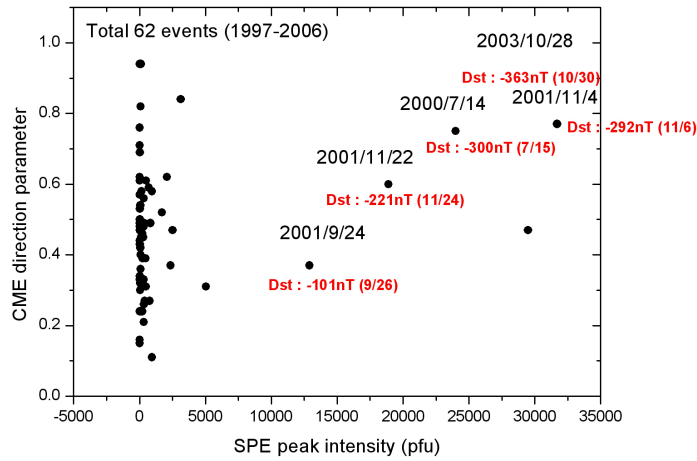


그림 5. SPE 최대 플럭스와 CME 지구방향인자의 관계.

x-ray 세기도 SPE의 상승, 지속, 감소 시간에 약하지만 영향을 끼치는 것으로 보인다.

그림 4는 이번 연구에서 사용한 63개의 SPE의 최대 플럭스 크기의 도수분포표이다. 그림 4에서 알 수 있듯이, 플럭스의 세기가 10000pfu 이상이 되는 매우 큰 SPE 6개의 이벤트를 제외하면, 대부분은 10000pfu 이하의 상대적으로 크기가 작은 이벤트임을 알 수 있다. 이 두 개의 SPE 집단은 CME의 지구 방향 인자와의 상관관계에서 매우 흥미로운 차이점을 나타낸다. 그림 5에서 그 차이를 명확하게 볼 수 있다. 즉, 10000pfu의 매우 큰 6개의 SPE 집단은 CME의 지구방향 인자와의 관계가 거의

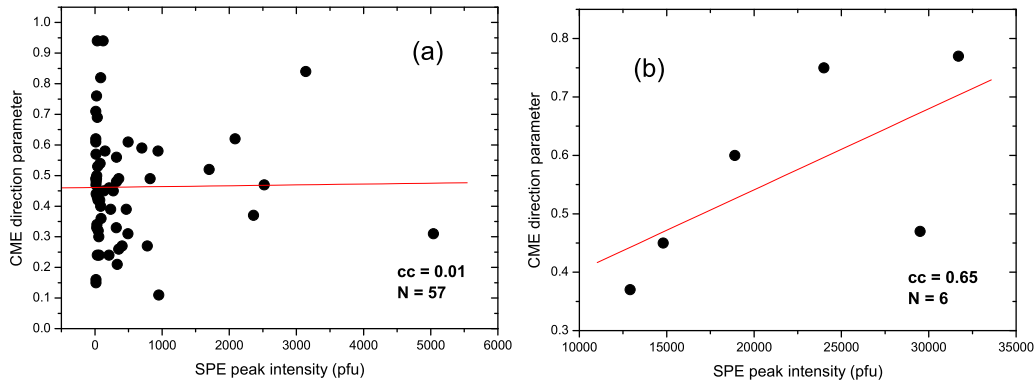


그림 6. SPE 최대플럭스와 CME 지구 방향인자 사이의 상관관계. (a) SPE의 최대 플럭스의 크기가 10000pfu 이하, (b) SPE의 최대 플럭스의 크기가 10000pfu 이상.

표 3. 큰(SPE의 최대 플럭스의 크기가 10000pfu 이상) SPE들의 특성.

No.	CME Date/UT	CME speed	CME direction parameter	Location	AR	Flare strength	Flare class	Proton flux
1	2000/07/14 10:54	1674	0.75	N22W07	9077	0.75	X05/3B	24000
2	2000/11/08 23:06	1738	0.45	N00-10W75-80	9690	0.21	M74/multiple	14800
3	2001/09/24 10:30	2402	0.37	S16E23	9632	0.63	X02/2B	12900
4	2001/11/04 16:35	1810	0.77	N06W18	9684	0.22	X01/3B	31700
5	2001/11/22 23:30	1437	0.77	S15W34	9704	0.31	M09/2N	18900
6	2003/10/28 11:30	2459	0.94	S16E08	10486	1.8	X17/4B	29500

선형적이어서, 그 상관 계수가 0.64에 이르는 반면, 크기가 10000pfu 이하의 상대적으로 크기가 작은 SPE 집단에서는 그 상관 계수가 0.01 밖에 되지 않는다(그림 6). CME의 지구방향 인자와의 상관관계가 매우 높게 나타나는 6개의 매우 큰 SPE들은 사실상, 태양 주기 23기간 동안 일어난 가장 큰 SPE 6개에 해당하기도 한다. 이들 6개의 SPE가 일어났을 때의 태양 폭발의 자세한 특징들을 표 3에 정리하였다. 표 3에서 알 수 있듯이, 이들의 CME 속도는 모두 1400km/s를 넘는 매우 빠른 CME들이었고, 모두 halo CME 이었다. 또한 이들이 발생한 태양 표면의 위치가 위도 $\pm 20^\circ$ 의 띠 안에 분포되어 있다는 것도 흥미로운 사실이다. 이들 태양 폭발의 위치는 한 경우를 제외하고(2000년 11월 8일) 대부분 태양 중심 지역($\pm 30^\circ$) 안에 위치해 있다는 점도 흥미롭다. CME의 속도가 매우 빠르고, 발생 위치가 중심 지역에 가까울수록, 태양의 지구 방향 인자와의 상관관계가 높게 나타난다는 것은, CME의 지구에 미치는 영향을 고려할 때, CME 속도와 더불어 CME 지구 방향 인자도 기하학적으로 살펴보아야 할 필요가 있음을 말해준다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 1997-2006년 동안 발생한 태양 고에너지 양성자 이벤트(SPEs)와 태양 코로나 물질 방출(CME) 및 태양 플레어와의 상관관계를 살펴보았다. 모두 63개의 SPE-CME 데이터 쌍을 비교해 본 결과, CME 속도는 SPE의 속도와 최대 플럭스에 영향을 미치고, CME 지구 방향 인자는

CME의 최대 플럭스의 크기에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 지금까지 CME-SPE 관련 선행 연구들이 모두 CME의 속도에만 주안점을 맞추었고, CME의 지구방향인자를 고려했던 적은 단 한번도 없었다는 것을 감안하면, 이 결과는 주목할 만하다고 할 수 있다. 또한 Flare의 세기도 SPE의 최대 플럭스에 어느 정도 영향을 미친다는 기존의 연구 결과와 일치하는 결과도 확인할 수 있었다. 특별히, 매우 큰 SPE 집단에서는 CME 지구 방향인자는 SPE의 최대 플럭스의 크기에 매우 큰 영향력을 가지는데, 이것은 이들 CME들이 매우 빠른(>1400km/s) halo CME이면서, 태양 중심에서 발생한 것이기에 가능한 것으로 보인다.

감사의 글: 이 논문은 한국천문연구원의 “우주환경예보센터구축사업”의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Gopalswamy, N., Yashiros, S., Krucker, S., Stenborg, G., & Howard, R. A. 2004, *JGR*, 109, A12105, doi:10.1029/2004JA010602
- Kahler, S. W. 2005, *ApJ*, 628, 1014
- Kahler, S. W., Hildner, E., & van Hollebeke, M. A. I. 1978, *Sol. Phys.*, 57, 429
- Kahler, S. W. & Reames, D. V. 2003, *ApJ*, 584, 1063
- Moon, Y.-J., Cho, K.-S., Dryer, M., Kim, Y.-H., Bong, S. C., Chae, J., & Park, Y. D. 2005, *ApJ*, 624, 414
- Reames, D. V. 1999, *Space Sci. Rev.*, 90, 413
- Stolpovskii, V. G., Daibog, E. I., Kahler, S. W., & Erdos, G. 1998, *Adv. Space Res.*, 21, 543