

태양주기 23의 흑점, CME 및 지자기폭풍의 빈도간 상관관계 연구

노수련, 장현영[†]
경북대학교 천문대기과학과

Relations Among Sunspots, CMEs and Geomagnetic Storms in Solar Cycle 23

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 December 3, 2008; Accepted January 24, 2009)

요 약

태양주기 23의 태양흑점과 코로나질량방출(Coronal Mass Ejection, CME), 지자기폭풍과의 상호 연관성을 알아보기 위해 CME의 연도별 발생빈도 분포와 북-남 비대칭 분포, 태양흑점수와 면적의 연평균 분포와 북-남 비대칭 분포, 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포와의 상호 상관관계를 알아보았다. 1996년부터 2007년까지의 SOHO/LASCO 목록 CME의 위치정보를 이용하여 북쪽 반구에서 발생한 CME와 남쪽 반구에서 발생한 CME의 연도별 발생빈도 분포를 알아 내었다. 태양흑점수와 면적을 북쪽 반구와 남쪽 반구를 구분하여 그 연평균 분포를 구하였고 지자기 교란정도를 알 수 있는 Ap지수, Dst지수, aa지수를 이용하여 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포를 구하였다. 이렇게 구한 각각의 분포간의 상호 상관관계를 구하였다. 또한 CME를 각 너비(Angular Width)와 속도(Linear Speed)에 따라 분류하여 흑점 분포, 지자기폭풍의 발생빈도 분포와 상관관계도 알아보았다. 그 결과 CME의 전체 발생빈도는 흑점수와 면적의 전체 분포와의 상관관계가 높았고 흑점수와 면적의 북-남 비대칭 분포와는 상관관계가 낮았다. CME의 북-남 비대칭 분포는 흑점의 북-남 비대칭 분포와 상관관계가 높았다. CME와 지자기폭풍 발생빈도 분포와의 상관관계를 살펴 본 결과 CME 전체나 북-남 비대칭 분포와는 상관도가 낮게 나왔다. 그러나 CME를 규모별로 나누어 그 총 발생빈도와의 상관관계를 알아 본 결과 Ap지수와 aa지수는 속도가 빠른 경우, Dst지수는 각너비나 속도별로 나는 모든 경우에 상관도가 높게 나왔다. 흑점과 지자기폭풍 발생빈도의 경우 흑점수와 면적의 전체 분포와 지자기폭풍 사이의 상관관계가 높게 나타났다. 이 결과를 통해 CME의 발생빈도 분포는 흑점의 분포와 연관성이 높고 이들의 전체 분포와 지자기폭풍의 발생빈도 분포와의 연관성이 높은 것을 알 수 있다. 그리고 CME, 흑점의 북-남 비대칭 분포와 지자기폭풍의 발생빈도 분포의 경우 연관성이 낮은 것을 알 수 있다.

Abstract

We compare the relation among the annual distribution of sunspots, coronal mass ejections (CMEs) and geomagnetic storms and North-South asymmetry during solar cycle 23. For this purpose, we calculate correlation coefficients between (i) annual distribution and N-S asymmetry of CMEs - sunspots (ii) distribution of CMEs -

[†]corresponding author

occurrence number of geomagnetic storms (iii) distribution of sunspots – occurrence number of geomagnetic storms. We find that (i) the annual distribution of total CMEs has good correlation with distribution of annual average of sunspots but poor correlation with N-S asymmetry of sunspots, N-S asymmetry of CMEs has good correlation with N-S asymmetry of sunspots, (ii) total and N-S asymmetry of CMEs have poor correlation with occurrence number of geomagnetic storms, it's, however, well correlated with the classified groups of CMEs (Ap, Dst and aa indices vs. fast CMEs($v > 1000\text{kms}^{-1}$), Dst index vs. Halo CMEs), and (iii) sunspot numbers and area are correlated with occurrence number of geomagnetic storms. We conclude that annual distribution of CMEs and sunspots have well correlated with geomagnetic storms, N-S asymmetry of CMEs and sunspots have poor correlated with the geomagnetic storms.

Key words: solar–terrestrial relations, north–south asymmetry, coronal mass ejections (CMEs), solar activity

1. 서 론

태양의 흑점수와 면적이 시간에 따라 주기적으로 변화하는 것을 태양흑점주기(Solar Cycle, Sun spot Cycle)라고 한다. 태양흑점은 광구의 특정 지역에서 강력한 자기장이 생기게 되면 대류를 방해하게 되어 주변보다 온도가 낮아져 어둡게 보이는 것이다. 이러한 흑점은 태양표면의 자기장과 연관성이 깊다. 그리고 태양표면에서 발생하는 여러 폭발현상은 주로 자기장이 강한 태양흑점과 연관되어 발생한다. 태양표면에서의 주요 활동 역시 태양의 자기장과 밀접한 관련이 있다. 태양의 변화를 주도하는 태양의 자기장은 약 11년을 주기로 변하는데 이는 태양표면에 분포하는 흑점을 통해 잘 알 수 있다. 태양흑점수와 면적은 태양흑점주기의 시작과 끝에서 가장 적고 점점 증가하였다가 감소하는 양상을 보여준다. 태양표면의 활동의 발생빈도는 흑점수와 면적이 변화함에 따라 비슷한 양상으로 변한다.

태양흑점수와 면적은 주기에 따라 북쪽 반구와 남쪽 반구의 빈도변화가 다르게 나타나는데 이를 북-남 비대칭성(North-South asymmetry)이라고 부른다(Chang 2006, 2007a,b). 한 태양흑점주기 내에서 북쪽의 흑점 빈도가 증가하여 극대기까지 이르고 나서 남쪽의 흑점 빈도가 극대기에 이른다. 이렇게 빈도가 다르게 나타남에 따라 태양흑점주기의 초반에는 북쪽에 흑점이 많고 후반에는 남쪽에 흑점이 더 많이 보인다. 이러한 흑점의 북-남 비대칭성에 따라 플레어(Flare), 홍염(Prominence), 필라멘트(Filament), 자기플럭스(Magnetic flux), 코로나강도(Coronal intensity) 등과 같은 태양활동의 발생빈도도 북쪽과 남쪽의 비대칭성이 나타나게 된다(Newton & Milson 1955, Howard 1974, Roy 1977, Verma 1987, 1993, Vizoso & Ballester 1987, Garcia 1990, Ataç & Özgüç 1996, Li et al. 1998, Duchlev 2001, Temmer et al. 2002, 2006, Joshi & Joshi 2004, Knaack et al. 2004, Brajša et al. 2005). 이 연구 결과와 마찬가지로 태양에서 발생한 코로나질량방출(Coronal Mass Ejection, CME) 역시 북-남 비대칭성을 보인다.

태양활동 중 플라스마를 직접적으로 방출하는 CME와 같은 현상이 발생하였을 때 지구에 영향을 미친다. 플라스마를 방출하는 태양활동의 발생빈도도 하나의 태양주기 안에서 점점 증가하였다가 감소하는 양상을 보인다. 지구의 자기폭풍의 발생빈도와 CME, 흑점수의 빈도 변화를 비교한 연구 결과를 보면 태양활동과 흑점수에 따라 변하는 양상과 지자기폭풍의 발생빈도가 변하는 양상이 비슷하다(Zhang et al. 2003). 한 태양주기에서 주기의 상반기에는 변화양상이 잘 맞지만 하반기로 갈수록 그 양상이 상반기에 비해 잘 맞지 않는다. 태양활동 중 직접적으로 대량의 플라스마를 방출하는 CME와 지구 영향도에 대해 알아 본 연구에서는 CME와 지자기폭풍은 밀접한 상관성이 있음이 밝혀졌다(Moon et al. 2002, 2005, Wang et al. 2002, Venkatakrishnan & Ravindra 2003, Srivastava & Venkatakrishnan 2004, Kim et al. 2005, 2008). 태양흑점과 태양활동이 서로 연관성이 있듯이 태양흑점과 지구의 자기교란, 태양활동과 지구의 자기교란 역시 상관관계가 있음을 보여준다.

이와 같이 태양흑점수와 면적의 분포와 그 북-남 비대칭성에 대해서는 많은 연구가 이루어졌다. 그리고 태양활동과 흑점의 연도별 분포와 연도별 북-남 비대칭성에 대해서도 서로 연관된 많은 연구결과가 있다. 태양활동의 발생빈도와 지자기폭풍의 발생빈도 분포에 대한 연구도 있었고 서로 상관관계가 있음이 알려져 있다. 하지만 흑점과 태양활동의 북-남 비대칭성에 따라 지구에 어떠한 영향이 있는지에 대해서는 뚜렷한 연구결과가 없다. 이번 연구에서는 태양흑점주기 중 23주기의 태양흑점의 연평균 분포, 지구에 영향을 미치는 태양활동 중 CME의 연도별 발생빈도 분포, 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포의 상호 상관관계를 알아보았다. 그리고 태양흑점과 CME의 북-남 비대칭 분포, 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포의 상호 상관관계도 알아보았다. 또한 CME의 규모에 따라 지구영향도가 달라진다는 이전 연구들의 결과에 따라 CME를 각너비(Angular Width, AW)와 속도(Linear Speed, v)에 따라 나눈 CME의 연도별 발생빈도 분포와 흑점, 지자기폭풍의 분포간의 상호 상관관계를 알아보았다(Moon et al. 2002, Srivastava & Venkatakrishnan 2004).

2장에서는 여기서 사용된 자료에 대해 소개하고 각 자료의 분포에 대해 설명하겠다. 그리고 3장에서는 CME와 흑점수와 면적, CME와 지자기폭풍, 흑점과 지자기폭풍과의 상관관계 분석 결과, 4장에서 결론에 대해 이야기 하고자 한다.

2. 자료 및 분포

이번 연구에서는 CME 발생빈도, 태양흑점수와 면적, 지자기폭풍의 발생빈도 사이의 상호 상관관계를 알아보기 위해 1996년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지의 CME 자료, 흑점수와 면적을 나타낸 자료와 지자기지수 자료를 사용하였다.

2.1 CME

CME는 태양표면에서 일어나는 플레어와 같은 여러 폭발 현상에 의해 빠른 속도로 분출되는 거대한 플라스마 덩어리로 지자기폭풍의 원인이 되는 주요 태양활동으로 알려져 있다. 이번 연구에서는 1996년부터 2007년까지 발생한 SOHO/LASCO 목록¹의 CME를 사용하였다. 이 CME들의 태양에서 발생한 위치를 알아내기 위해 CME가 발생하기 전 시간의 NGDC(National Geophysical Data Center²)에서 제공하는 EUV Imaging telescope(EIT)의 코로나 태양분광단색영상(Spectro He-

¹http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

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

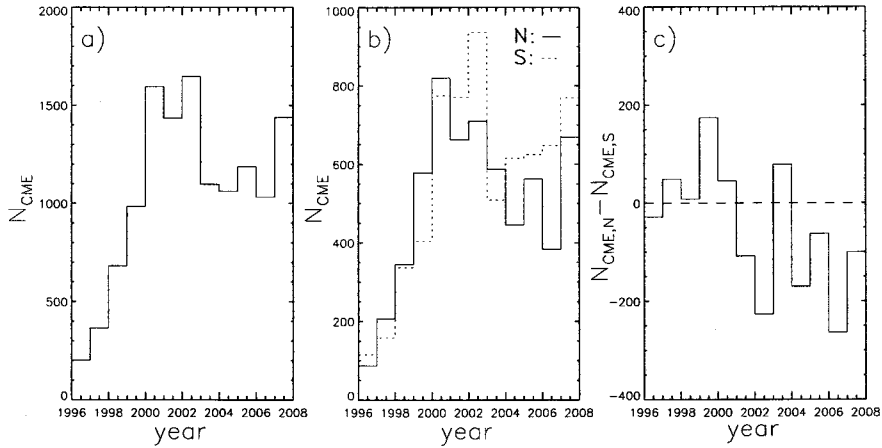


그림 1. 1996년부터 2007년까지 CME 총 발생빈도(a) CME_T 와 CME를 발생위치에 따라 북쪽 반구에서 발생한 것과 남쪽 반구에서 발생한 것으로 나누어 나타낸 연도별 발생빈도(b) CME_N , CME_S , CME의 북-남 비대칭 분포(c) CME_A . a)와 b)의 가로축은 연도를 나타내고 세로축은 CME의 갯수를 나타낸다. 여기서 북쪽 반구에서 발생한 CME의 수는 실선으로 나타내었고 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수는 점선으로 나타내었다. c)의 가로축은 연도를 나타내고 세로축은 북쪽 반구에서 발생한 CME의 수에서 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수를 뺀 것이다. 북쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 많으면 양수로 나타나고 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 많으면 음수로 나타난다.

liogram)을 사용하였다. 이렇게 알아낸 위치 정보를 이용하여 태양의 북쪽 반구에서 발생한 CME와 남쪽 반구에서 발생한 CME를 구분하였다. 그림 1a는 CME의 연도별 총 발생빈도(CME_T)를 나타낸 것이다. 이의 분포는 1996년부터 2001년 전후까지 증가하는 양상을 보이고, 그 뒤에 줄어들었다가 2007년 다시 증가하는 양상을 보인다. CME의 빈도는 한 태양주기에서 상반기보다 하반기에 더 큰데 이에 대한 정확한 이유는 밝혀지지 않았다. 그리고 1996년부터 1998년까지 관측장비의 안정화 문제로 인해 관측히 후반기에 비해 정확도가 떨어져 상반기와 하반기의 차이가 더 크게 나타난다. 그림 1b는 CME를 태양의 북쪽 반구에서 발생한 것과 남쪽 반구에서 발생한 것으로 나누어 연도별 발생빈도(CME_N , CME_S)를 나타낸 것이다. CME는 2000년에 북쪽 반구에서 가장 많이 발생하였고 2002년에 남쪽 반구에서 가장 많이 발생하였다. 그림 1c는 북쪽 반구에서 발생한 CME 수와 남쪽 반구에서 발생한 CME 수의 차이를 연도별로 나타낸 것이다. 이를 CME의 북-남 비대칭성(CME North-South Asymmetry, CME_A)이라고 한다. 이를 보면 상반기에는 북쪽 반구에서 발생한 CME가 더 많고 하반기로 갈수록 남쪽 반구에서 발생한 CME가 더 많음을 알 수 있다.

CME에 관련된 이전 연구결과에서 CME의 규모가 클수록 지구에 더 많은 영향을 미친다는 것이 알려져 있다(Moon et al. 2002, Srivastava & Venkatakrishnan 2004). 이번 연구에서는 CME와 흑점, 지자기폭풍 발생빈도 간의 상관관계를 자세히 알아보기 위해 CME를 규모별로 나누었다. CME의 규모를 간접적으로 나타내는 각너비(Angular Width, AW)와 속도(Linear Speed, v)를 이용하여 CME를 나누고 그 발생빈도를 알아보았다. CME의 각너비를 이용하여 CME의 각너비가 120° 보다 큰 것과 360° (HALO, 헤일로)인 것으로 나누어 보았고 CME의 속도를 이용하여 CME의

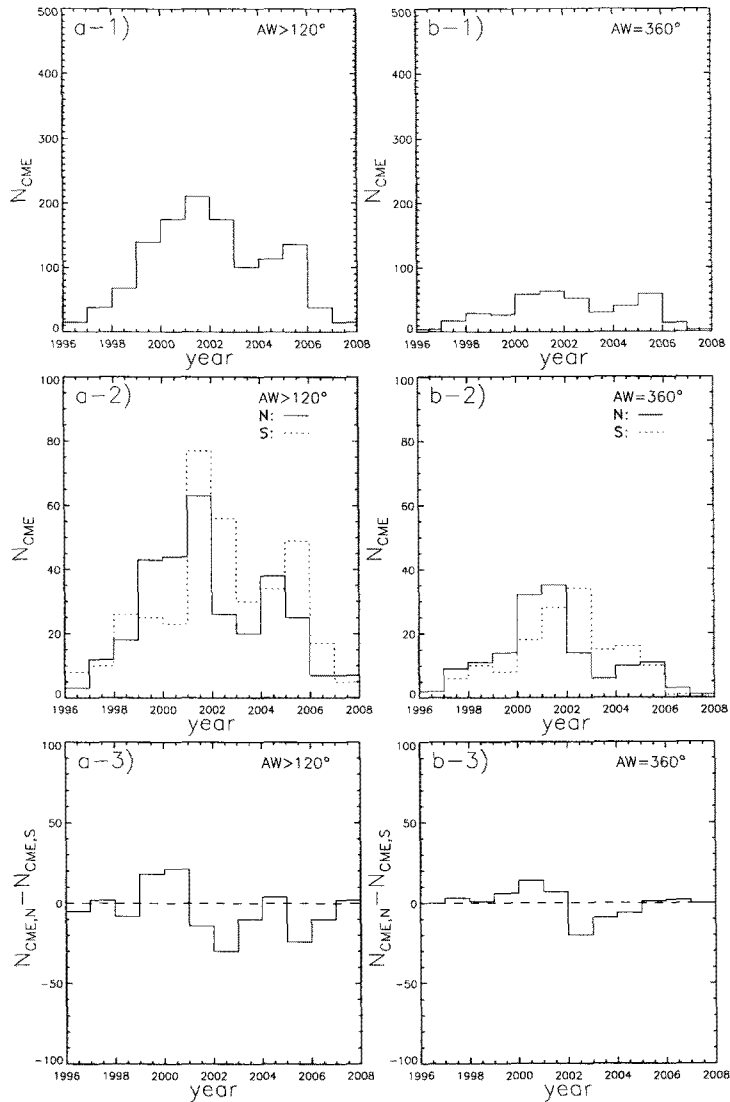


그림 2. 각너비(AW)에 따른 CME의 연도별 발생빈도 분포. a)는 각너비가 120° 보다 큰 경우이고 b)는 각너비가 360° 인 헤일로(HALO) CME의 경우이다. a-1)과 b-1)은 각너비가 각각 120° 보다 큰 경우와 360° 인 경우의 총 CME 발생빈도($CME_{T(>120^\circ)}$, $CME_{T(HALO)}$)를 나타낸 것이다. a-2)와 b-2)는 각각의 각너비에 해당하는 CME를 발생위치에 따라 북쪽 반구에서 발생한 것($CME_{N(>120^\circ)}$, $CME_{N(HALO)}$)과 남쪽 반구에서 발생한 것($CME_{S(>120^\circ)}$, $CME_{S(HALO)}$)으로 나누어 이의 연도별 발생빈도 분포를 나타낸 것이다. 북쪽 반구에서 발생한 경우는 실선으로 나타내었고 남쪽 반구에서 발생한 경우는 점선으로 나타내었다. a-3)과 b-3)은 각각의 각너비에 따라 북쪽 반구에서 발생한 CME와 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수 차이($CME_{A(>120^\circ)}$, $CME_{A(HALO)}$)를 나타낸 것이다. 북쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 많으면 양수로 나타나고 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 많으면 음수로 나타난다.

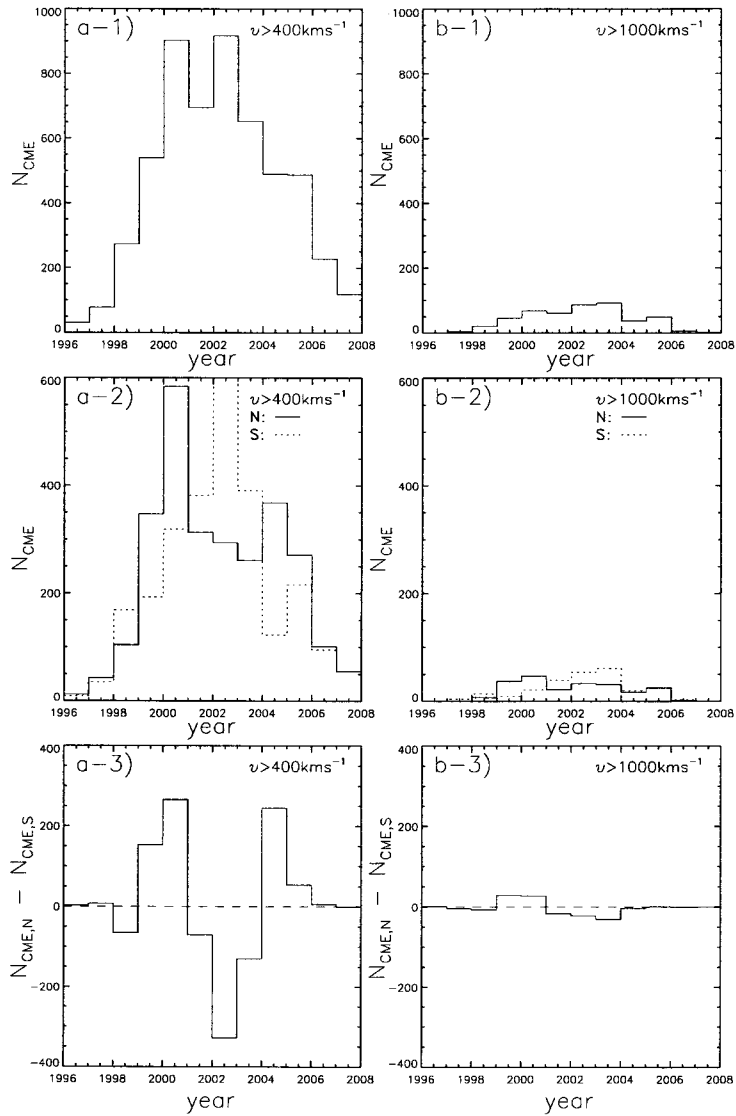


그림 3. 속도(v)에 따른 CME의 연도별 발생빈도 분포. a)는 속도가 400km s^{-1} 보다 큰 경우이고 b)는 속도가 1000km s^{-1} 보다 큰 경우이다. a-1)과 b-1)은 속도가 각각 400km s^{-1} 보다 큰 경우와 1000km s^{-1} 보다 큰 경우의 총 CME 발생빈도($\text{CME}_{T(>400\text{km s}^{-1})}$, $\text{CME}_{T(>1000\text{km s}^{-1})}$)를 나타낸 것이다. a-2)와 b-2)는 각각의 속도에 해당하는 CME를 발생위치에 따라 북쪽 반구에서 발생한 것($\text{CME}_{N(>400\text{km s}^{-1})}$, $\text{CME}_{N(>1000\text{km s}^{-1})}$)과 남쪽 반구에서 발생한 것($\text{CME}_{S(>400\text{km s}^{-1})}$, $\text{CME}_{S(>1000\text{km s}^{-1})}$)으로 나누어 이의 연도별 발생빈도 분포를 나타낸 것이다. 북쪽 반구에서 발생한 경우는 실선으로 나타내었고 남쪽 반구에서 발생한 경우는 점선으로 나타내었다. a-3)과 b-3)은 각각의 속도에 따라 북쪽 반구에서 발생한 CME와 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수 차이($\text{CME}_{A(>400\text{km s}^{-1})}$, $\text{CME}_{A(>1000\text{km s}^{-1})}$)를 나타낸 것이다. 북쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 많으면 양수로 나타나고 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 많으면 음수로 나타난다.

속도가 400kms^{-1} 보다 큰 것과 1000kms^{-1} 보다 큰 것으로 나누어 보았다. 속도를 분류하는 기준에서 CME의 속도를 100kms^{-1} 단위로 나누어 분포를 살펴 본 결과 400kms^{-1} 은 보통 평균적인 CME의 분포, 1000kms^{-1} 은 아주 빠른 CME의 분포를 잘 대표한다고 판단되어 이 두 값을 사용하였다. 그림 2는 CME를 각너비에 따라 나누어 그 발생빈도를 연도별로 나타낸 것이다. a)는 각너비가 120° 보다 큰 CME의 발생빈도를 나타낸 것이고 b)는 각너비가 360° 인 헤일로 CME의 발생빈도를 연도별로 나타낸 것이다. a-1)과 b-1)은 각각의 각너비에 해당하는 총 CME의 발생빈도(각너비가 120° 보다 큰 것($\text{CME}_{T(>120^\circ)}$), 각너비가 360° 인 것($\text{CME}_{T(\text{HALO})}$))이다. 이를 보면 1996년부터 2001년까지 증가하는 양상을 보이다가 그 이후로 줄어드는 양상을 보인다. 2004년과 2005년에 이상적으로 전반적인 추세에서 벗어나 그 갯수가 많은 것을 알 수 있다. a-2)와 b-2)는 각 각너비에 해당하는 CME를 위치에 따라 북쪽 반구에서 발생한 것($\text{CME}_{N(>120^\circ)}$, $\text{CME}_{N(\text{HALO})}$)과 남쪽 반구에서 발생한 것($\text{CME}_{S(>120^\circ)}$, $\text{CME}_{S(\text{HALO})}$)으로 나누어 나타낸 것이다. 여기서 실선은 북쪽 반구에서 발생한 CME의 수를 나타내고 점선은 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수를 나타낸다. 북쪽 반구에서 발생한 CME의 경우 남쪽 반구에서 발생한 CME보다 상반기에 더 수가 많고 하반기로 갈수록 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 더 많은 분포를 보인다. a-3)과 b-3)은 각각의 각너비에 따라 북쪽 반구에서 발생한 CME와 남쪽 반구에서 발생한 CME의 차이($\text{CME}_{A(>120^\circ)}$, $\text{CME}_{A(\text{HALO})}$)를 나타낸 것이다. 이의 분포를 살펴보면 상반기에는 북쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 많고 하반기에는 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수가 많음을 알 수 있다. 그림 3은 CME를 속도에 따라 나누어 그 발생빈도를 연도별로 나타낸 것이다. a)는 속도가 400kms^{-1} 보다 큰 CME의 발생빈도를 나타낸 것이고 b)는 속도가 1000kms^{-1} 보다 큰 CME의 발생빈도를 연도별로 나타낸 것이다. a-1)과 b-1)은 각각의 속도에 해당하는 총 CME의 발생빈도(속도가 400kms^{-1} 보다 큰 것($\text{CME}_{T(>400\text{kms}^{-1})}$), 속도가 1000kms^{-1} 보다 큰 것($\text{CME}_{T(>1000\text{kms}^{-1})}$))를 나타낸 것이다. 이를 보면 앞서 살펴 본 각너비에 따른 분포와 같이 1996년부터 증가하여 2000년을 전후로 줄어드는 양상을 보인다. a-2)와 b-2)는 각 속도에 해당하는 CME를 위치에 따라 북쪽 반구에서 발생한 것($\text{CME}_{N(>400\text{kms}^{-1})}$, $\text{CME}_{N(>1000\text{kms}^{-1})}$)과 남쪽 반구에서 발생한 것($\text{CME}_{S(>400\text{kms}^{-1})}$, $\text{CME}_{S(>1000\text{kms}^{-1})}$)으로 나누어 나타낸 것이다. 여기서 실선은 북쪽 반구에서 발생한 CME 수를 나타내고 점선은 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수를 나타낸다. 북쪽 반구에서 발생한 CME의 경우 2000년에 가장 많고 남쪽 반구에서 발생한 CME의 경우 2002년에 가장 많은 분포를 보인다. a-3)과 b-3)은 각각의 속도에 따라 북쪽 반구에서 발생한 CME와 남쪽 반구에서 발생한 CME의 차이($\text{CME}_{A(>400\text{kms}^{-1})}$, $\text{CME}_{A(>1000\text{kms}^{-1})}$)를 나타낸 것이다. 여기서 $\text{CME}_{A(>1000\text{kms}^{-1})}$ 분포의 경우 상반기에는 북쪽에 수가 많은 양상을 보이고 하반기에는 남쪽 반구에서 발생한 CME가 많은 양상을 보여 앞서 살펴 본 각너비에 따른 분포와 크게 다르지 않다. $\text{CME}_{A(>400\text{kms}^{-1})}$ 의 경우 1996년부터 2000년까지는 북쪽 반구에서 발생한 CME가 전반적으로 많고 2001년부터 2003년 까지는 남쪽 반구에서 발생한 CME가 많다가 다시 북쪽 반구에서 발생한 CME가 많아지는 양상을 보인다.

2.2 흑점

흑점 자료의 경우 수와 면적으로 나누어 연평균 자료를 사용하여 분포를 살펴보았다. 흑점수는 브뤼셀의 국제 흑점지수 자료센터(Solar Influences Data Analysis Center, SIDC³)에서 발표하는 값

³<http://sidc.oma.be/sunspot-data/>

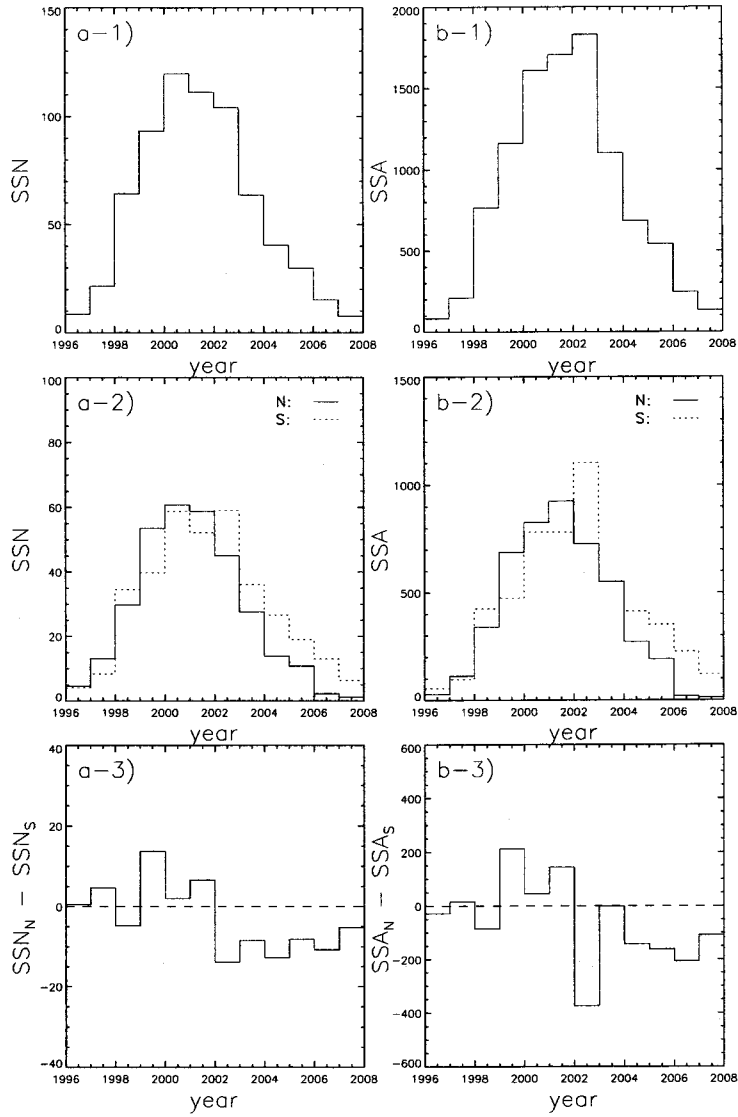


그림 4. 태양흑점수와 면적의 연평균 분포. a)는 태양흑점수 자료를 나타낸 것이고 b)는 태양흑점 면적 자료를 나타낸 것이다. a-1)과 b-1)은 태양흑점수와 면적의 연평균 분포(수; SSN_T , 면적; SSA_T)를 나타낸 것이다. a-2)와 b-2)는 태양흑점수와 면적을 북쪽 반구(SSN_N , SSA_N)와 남쪽 반구(SSN_S , SSA_S)로 나누어 이의 연평균 분포를 나타낸 것이다. 북쪽 반구의 경우는 실선으로 나타내었고 남쪽 반구의 경우는 점선으로 나타내었다. a-3)과 b-3)은 북쪽 반구에서 발생한 태양흑점과 남쪽 반구에서 발생한 태양흑점수와 면적의 차(SSN_A , SSA_A)를 나타낸 것이다. 북쪽 반구에서 발생한 흑점수와 면적이 많으면 양수로 나타나고 남쪽 반구에서 발생한 흑점수와 면적이 많으면 음수로 나타난다.

에서 연평균 자료를 사용하였다. 흑점의 면적은 NGDC(National Geophysical Data Center⁴)에서 발표한 값에서 연평균 자료를 사용하였다.

그림 4는 태양흑점수와 면적의 연평균 분포를 나타낸 것이다. a)는 태양흑점수 자료를 나타낸 것이고 b)는 태양흑점의 면적 자료를 나타낸 것이다. a-1)과 b-1)은 태양흑점수와 면적의 연평균 분포(수(SSN_T), 면적(SSA_T))를 나타낸 것이다. 이의 분포를 보면 1996년부터 점차 증가하여 흑점수의 경우 2000년에 가장 수가 많고 면적의 경우 2002년에 가장 넓고 그 이후 점차 감소하는 양상을 보인다. a-2)과 b-2)는 태양흑점수와 면적을 북쪽 반구(SSN_N, SSA_N)와 남쪽 반구(SSN_S, SSA_S)로 나누어 이의 연평균 분포를 나타낸 것이다. 여기서 북쪽 반구의 경우는 실선으로 나타내었고 남쪽 반구의 경우는 점선으로 나타내었다. 이의 분포를 보면 앞서 살펴 본 CME의 발생빈도 분포와 비슷하게 북쪽 반구에서는 2000년을 기점으로 증가하였다가 감소하는 양상이 나타나고 남쪽 반구에서는 2002년을 기점으로 증가하였다가 감소하는 양상을 보인다. a-3)과 b-3)은 북쪽 반구에서 발생한 태양흑점과 남쪽 반구에서 발생한 태양흑점수와 면적의 차(SSN_A, SSA_A)를 나타낸 것이다. 이의 분포를 보면 1996년부터 2001년까지는 북쪽 반구에서 발생한 태양흑점이 많고 2002년부터는 남쪽 반구에서 발생한 태양흑점이 많은 것을 알 수 있다.

2.3 지자기지수

이번 연구에서 사용된 지자기지수는 Ap, Dst, aa지수이다. 이 세 가지 지수 모두 지구의 자기지수를 나타내는 것으로 지자기폭풍의 척도로 사용되고 있다. Ap지수는 3시간 간격으로 작성된 8개의 ap지수(daily equivalent planetary amplitude)를 평균한 것이다. Ap지수 값이 30 이상이면 지자기폭풍이 발생한 것으로 정의한다. 여기서는 Ap지수 값이 주요(major) 지자기폭풍을 설명하는데 유리한 점을 이용하여 40 이상의 값을 가지면 지자기폭풍이 발생한 것으로 간주하였다. Dst지수는 적도 근처의 4개의 관측소(Honolulu, San Juan, Hermanus, Kakioka)에서 얻은 수평 자기장의 값을 평균하여 계산한 것을 말하며 이 값이 감소하여 -50nT보다 낮아지면 지자기폭풍이 발생한 것으로 정의한다(Gonzalez et al. 1994). 마지막으로 aa지수 역시 지구의 자기장 변동정도를 표시하는 양으로 지구상의 정반대 지점에 위치한 두 관측소의 값을 평균한 것이다. 이 값은 40 이상이면 지자기폭풍이 발생하였다고 정의한다(Clilverd et al. 2002). 이 세 지수의 값은 NSSDC(National Space Science Data Center⁵)와 NGDC, SPIDR(Solar Physics Interactive Data Resource⁶)의 자료를 사용하였다. 지자기폭풍의 빈도를 시간별자료를 이용해 연도별로 알아 본 결과 일평균자료를 사용하여 지자기지수 값이 지자기폭풍 기준에 합당한 일수의 연도별 분포와 크게 차이를 보이지 않았다. 그래서 세 가지 지수 모두 일평균자료를 사용하였으며 일평균 값이 각각의 지자기폭풍 기준에 합당할 경우 지자기폭풍이 발생하였다고 보고 이의 빈도를 사용하였다. 그림 5는 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포를 나타낸 것이다. a)는 Ap지수, b)는 Dst지수, c)는 aa지수를 나타낸다. 이 분포를 보면 세 지자기지수 모두에서 2003년에 지자기폭풍이 가장 많이 발생한 것을 알 수 있다. Ap지수의 경우 Dst지수나 aa지수에 비해 지자기폭풍 발생빈도가 적은 것을 알 수 있다. 세 지자기지수에서 발생빈도의 차이는 나타나지만 전반적으로 태양주기 23의 초기와 말기에 그 빈도가 적고 점점 증가하였다가 감소하는

⁴<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/getdata.html>

⁵<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

⁶<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>

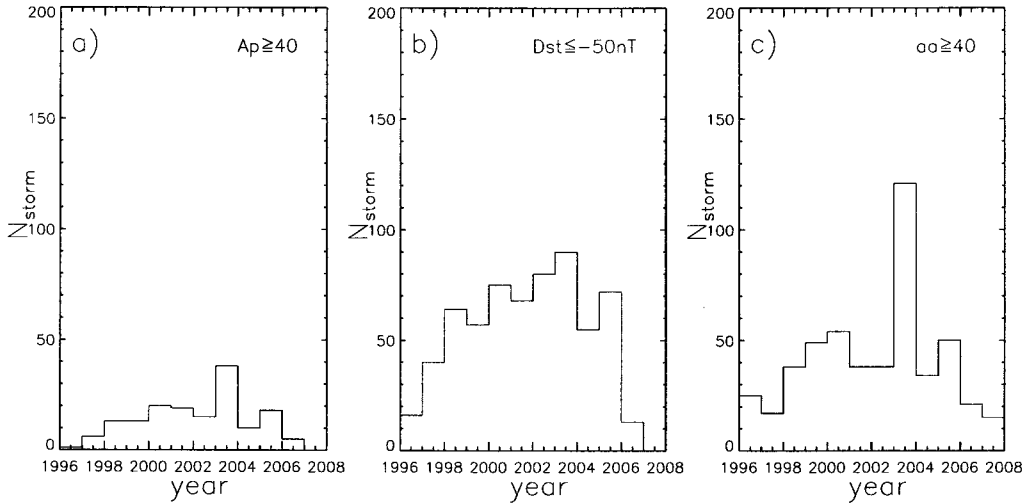


그림 5. 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포. 이 그림의 가로축은 연도를 나타내고 세로축은 지자기폭풍의 발생빈도를 나타낸다. a)는 Ap지수 값이 40 이상인 경우에 지자기폭풍이 발생한 것으로 정의하고 이의 연도별 발생빈도 분포를 나타낸다. b)는 Dst지수 값이 $-50nT$ 이하인 경우에 지자기폭풍이 발생한 것으로 정의하고 이의 연도별 발생빈도 분포를 나타낸다. c)는 aa지수 값이 40 이상인 경우에 지자기폭풍이 발생한 것으로 정의하고 이의 연도별 발생빈도 분포를 나타낸다.

양상을 보인다.

3. 결 과

이번 연구에서는 태양의 흑점과 CME, 지자기폭풍과의 상호 연관성을 알아보기 위해 CME의 연도별 발생빈도 분포와 북-남 비대칭 분포, 태양흑점수와 면적의 연평균 분포와 북-남 비대칭 분포, 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포와의 상호 상관관계를 알아보았다. 그리고 CME를 각너비($> 120^\circ$, HALO)와 속도($> 400kms^{-1}$, $> 1000kms^{-1}$)에 따른 규모별로 나누어 연평균 분포와 북-남 비대칭 분포를 알아보고 흑점과 지자기폭풍의 분포와 상관관계를 알아보았다. 먼저 태양표면에서 발생하는 현상 중 하나인 CME의 연도별 발생빈도 분포와 북-남 비대칭 분포, 그리고 규모별로 나눈 발생빈도 분포와 흑점의 연평균 분포, 북-남 비대칭 분포와의 상관관계를 알아보았다. 그리고 CME의 각 분포와 지자기폭풍의 발생빈도와의 상관관계도 알아보았다. 흑점의 연평균 분포, 북-남 비대칭 분포와 지자기폭풍의 발생빈도와의 상관관계도 알아보았다. 이를 정량적으로 알기 위해 이들 각각의 경우에 따른 선형상관계수를 살펴보았다.

표 1은 태양흑점수의 연평균 분포와 CME의 발생빈도 분포의 상관관계를 알아보고 이의 상관계수를 나타낸 것이다. 이 표를 통해 알 수 있듯이 CME의 전체 연도별 발생빈도 분포(CME_T)와 흑점수의 연평균 분포(SSN_T)의 상관관계를 보면 선형상관계수가 0.52로 비교적 좋은 상관관계를 보였다. 그리고 CME의 규모를 나눈 집단과 SSN_T 의 상관관계를 살펴 본 결과 CME의 규모가 비교적 큰 $CME_{T(>120^\circ)}$ 와 $CME_{T(>400kms^{-1})}$ 의 경우 SSN_T 와의 상관관계 분석 결과 상관계수가 0.90으로 아주

표 1. 태양흑점수의 연평균 분포와 CME의 연도별 발생빈도 분포 비교 상관계수.

	SSN _T	SSN _N	SSN _S	SSN _A
CME _T	0.52	0.44	0.59	-0.28
CME _{T(>120°)}	0.90	0.87	0.91	0.11
CME _{T(HALO)}	0.79	0.73	0.82	-0.05
CME _{T(>400kms⁻¹)}	0.90	0.83	0.94	-0.09
CME _{T(>1000kms⁻¹)}	0.81	0.74	0.86	-0.13
CME _A	0.22	0.33	0.09	0.70
CME _{A(>120°)}	0.06	0.16	-0.04	0.56
CME _{A(HALO)}	0.08	0.20	-0.05	0.69
CME _{A(>400kms⁻¹)}	-0.04	0.02	-0.11	0.32
CME _{A(>1000kms⁻¹)}	0.05	0.14	-0.05	0.54

높은 상관관계를 보였다. CME_T은 북쪽 반구에서 발생한 흑점수의 연평균 분포(SSN_N)보다 남쪽 반구에서 발생한 흑점수의 연평균 분포(SSN_S)와 더 높은 상관관계를 보였다. CME를 규모에 따라 나누는 집단과의 상관관계를 알아 본 결과 선형상관계수가 모두 0.7 이상으로 CME_T의 경우 보다 상당히 높은 상관관계를 보였다. 그리고 이 역시 모든 집단에서 SSN_S와의 상관관계가 더 높게 나타났다. 그리고 SSN_T의 경우와 마찬가지로 CME의 규모가 비교적 큰 경우에 상관관계가 높게 나타났다. CME_T와 SSN_A의 상관관계를 살펴 본 결과 선형상관계수가 -0.28로 음의 상관관계를 보이고 아주 낮은 상관관계를 보였다. CME를 규모별로 나누는 집단과의 상관관계 역시 음의 상관관계를 보이며 거의 상관관계가 없는 것으로 나타났다. CME의 발생빈도 분포를 발생 지역에 따라 나누어 북쪽 반구에서 발생한 CME의 수에서 남쪽 반구에서 발생한 CME의 수를 뺀 분포인 CME_A와 SSN_T의 상관관계는 선형상관계수가 0.22로 매우 낮은 상관관계를 보였다. 그리고 CME를 규모별로 나누는 집단과의 상관관계 역시 낮게 나타났다. CME_A, 규모별로 나누는 집단과 SSN_N, SSN_S의 상관관계를 살펴 본 결과 거의 대부분 선형상관계수 값이 0.2 이하로 매우 낮은 상관관계를 보였다. 하지만 CME_A와 SSN_A의 경우 선형상관계수 값이 0.70으로 비교적 높은 상관관계를 보였다. CME를 규모별로 나누어 상관관계를 알아 본 결과는 전체보다는 상관관계가 낮게 나타났다.

표 2는 태양흑점 면적의 연평균 분포와 CME의 연도별 발생빈도 분포의 상관관계를 알아보고 이의 상관계수를 나타낸 것이다. 흑점수의 경우와 마찬가지로 CME의 전체 연도별 발생빈도 분포(CME_T)와 흑점 면적의 연평균 분포(SSA_T)의 상관관계를 보면 선형상관계수가 0.60으로 비교적 좋은 상관관계를 보였다. 그리고 CME의 규모가 비교적 큰 CME_{T(>120°)}와 CME_{T(>400kms⁻¹)}의 경우 SSA_T와의 상관관계 분석 결과 상관관계수가 0.93과 0.95로 아주 높은 상관관계를 보였다. CME_T와 SSA_N, SSA_S의 상관관계를 알아 본 결과 SSA_S의 경우에 더 높은 상관관계를 보였다. CME의 규모별로 상관관계를 알아 본 결과도 CME_{T(>120°)}를 제외한 모든 경우에 SSA_S과 높은 상관관계를 보였다. CME_{T(>120°)}, CME_{T(>400kms⁻¹)}과 SSA_N, SSA_S의 상관관계를 살펴보면 이 경우에 선형상관계수가 모두 0.90 이상의 높은 상관관계를 보였다. CME_T와 SSA_A의 상관관계는 앞서 흑점수의 경우와 마찬가지로 음의 상관관계이면서 상관도가 낮게 나타났다. CME를 규모별로 나누어 본 집단과도 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. CME_A와 SSA_T의 상관관계를 살펴 본 결과 선형상관계수가 0.07로 서로 상관관계가 없었다. CME를 규모별로 나누어 구한 북-남 비대칭 분포와 SSA_T의 상관

표 2. 태양흑점 면적의 연평균 분포와 CME의 연도별 발생빈도 분포 비교 상관관계수.

	SSA _T	SSA _N	SSA _S	SSA _A
CME _T	0.60	0.52	0.65	-0.23
CME _{T(>120°)}	0.93	0.92	0.90	0.16
CME _{T(HALO)}	0.83	0.79	0.82	0.01
CME _{T(>400kms⁻¹)}	0.95	0.90	0.95	-0.01
CME _{T(>1000kms⁻¹)}	0.89	0.85	0.89	0.01
CME _A	0.07	0.23	-0.10	0.77
CME _{A(>120°)}	-0.10	0.04	-0.24	0.62
CME _{A(HALO)}	-0.09	0.07	-0.25	0.70
CME _{A(>400kms⁻¹)}	-0.17	-0.06	-0.27	0.44
CME _{A(>1000kms⁻¹)}	-0.11	-0.02	-0.21	0.41

관계는 모두 음의 상관관계를 보였지만 선형상관계수가 낮아 상관관계가 거의 없는 것으로 보였다. CME_A와 SSA_N, CME_A와 SSA_S 역시 상관관계가 아주 낮았다. CME_A와 SSA_A의 경우 선형상관계수가 0.77로 비교적 높았고 CME를 규모별로 나누어 이의 상관관계를 알아 본 결과 CME를 각너비로 나누는 집단이 속도로 나누는 집단보다 상관관계가 높으며 그 중에서 CME_{A(HALO)}의 경우 선형상관계수가 0.70으로 가장 높게 나타났다.

CME의 연도별 발생빈도 분포와 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포와의 상관관계를 알아 본 결과는 표 3과 같다. CME_T, CME_A와 각 지자기지수별로 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포와의 상관관계를 살펴보면 선형상관계수가 0.35, 0.31, 0.19로 Ap와 Dst지수의 경우 비슷하게 나왔고 aa지수의 경우 상관관계가 더 낮게 나왔다. CME_T에서 CME의 규모별로 살펴 본 결과 CME_T와의 상관관계보다 높은 상관관계를 보였다. 그리고 Dst지수의 경우 CME_T에서 CME를 규모별로 나누는 모든 경우와 선형상관계수가 0.8 이상으로 아주 높은 상관관계를 보였다. CME_T에서 CME를 규모별로 나누는 경우 중 CME_{T(>1000kms⁻¹)}와 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포와의 상관관계를 살펴 본 결과 모든 지자기지수에서 선형상관계수가 0.75 이상으로 매우 높은 상관관계를 보였다. 전반적으로 보았을 때 각너비에 따른 규모 분류에서는 세 지자기지수 모두 변화를 거의 보이지 않았다. 하지만 속도에 따른 규모 분류에서는 속도가 빠를수록 상관관계가 향상되는 경향을 보였다. CME_A에서 CME의 규모별로 살펴 본 결과 모두 음의 상관관계를 보였지만 선형상관계수의 절대값이 아주 낮은 값을 가져 거의 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 그리고 Dst지수와 CME_{A(>120°)}, CME_{A(HALO)}의 상관관계를 나타낸 결과를 제외하고는 규모가 커질수록 상관관계가 향상되는 양상을 보였다. 하지만 이들 또한 상관관계가 크게 높지 않았다.

표 4는 태양흑점수와 면적의 연평균 분포와 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포의 상관관계를 알아보고 이의 상관계수를 나타낸 것이다. SSN_T와 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포의 상관관계를 살펴 본 결과 비교적 높은 상관관계를 보였다. 세 지자기지수 중 Dst지수가 가장 상관관계가 높은 것으로 나타났다. SSA_T와 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포의 상관관계 분석 결과 이 역시 SSN_T의 결과와 마찬가지로 비교적 높은 상관관계를 보이며 Dst지수의 경우 가장 높은 상관관계를 보였다. 전반적으로 보았을 때 SSN_T보다 SSA_T의 경우에 지자기폭풍과의 상관관계가 높게 나타났다. 흑점수의 경우 SSN_N과 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포의 상관관계보다 SSN_S와 지자기폭풍의 연도

표 3. 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포와 CME의 연도별 발생빈도 분포 비교 상관계수.

	Ap	Dst	aa
CME_T	0.35	0.31	0.19
$CME_{T(>120^\circ)}$	0.68	0.83	0.44
$CME_{T(HALO)}$	0.67	0.85	0.40
$CME_{T(>400km s^{-1})}$	0.75	0.84	0.57
$CME_{T(>1000km s^{-1})}$	0.89	0.90	0.77
CME_A	0.32	0.26	0.43
$CME_{A(>120^\circ)}$	-0.18	-0.22	-0.08
$CME_{A(HALO)}$	-0.13	-0.17	-0.19
$CME_{A(>400km s^{-1})}$	-0.14	-0.11	-0.11
$CME_{A(>1000km s^{-1})}$	-0.34	-0.23	-0.30

표 4. 태양흑점수와 면적의 연평균 분포와 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포 비교 상관계수.

	Ap	Dst	aa
SSN_T	0.65	0.79	0.45
SSN_N	0.60	0.74	0.41
SSN_S	0.69	0.82	0.48
SSN_A	-0.07	-0.04	-0.08
SSA_T	0.70	0.82	0.49
SSA_N	0.70	0.80	0.51
SSA_S	0.66	0.80	0.44
SSA_A	0.18	0.09	0.21

별 발생빈도 분포의 상관관계가 높았다. 흑점 면적의 경우 SSA_N 과 SSA_S 의 두 경우 상관관계가 비슷하게 나타났다. SSN_A , SSA_A 와 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포와의 상관관계를 알아 본 결과 SSN_A 와의 상관관계는 음의 상관관계, SSA_A 와의 상관관계는 양의 상관관계를 보였다. 하지만 세 지자기지수 모두 선형상관계수의 절대값이 낮아 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이번 연구에서는 태양주기 23에서 태양의 흑점과 CME, 지자기폭풍과의 상호 연관성을 알아보기 위해 CME의 연도별 발생빈도 분포와 북-남 비대칭 분포, 태양흑점수와 면적의 연평균 분포와 북-남 비대칭 분포, 지자기폭풍의 연도별 발생빈도 분포와의 상호 상관관계를 알아보았다. 그리고 CME를 규모별로 나누어 연평균 분포와 북-남 비대칭 분포를 알아보고 흑점과 지자기폭풍의 분포와 상관관계를 알아보았다. 먼저 CME의 연도별 발생빈도 분포와 북-남 비대칭 분포, 그리고 규모별로 나누어 발생빈도 분포와 흑점의 연평균 분포, 북-남 비대칭 분포와의 상관관계를 알아보았다. 그리고 CME의 각 분포와 지자기폭풍의 발생빈도와의 상관관계를 알아보았다. 마지막으로 흑점의 연평균 분포, 북-남 비대칭 분포와 지자기폭풍의 발생빈도와의 상관관계를 알아보았다. 이를 정량적으로 알기 위해 이들 각각의 경우에 따른 선형상관계수를 살펴보았다.

이 연구를 수행하기 위해 1996년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지의 CME 자료, 흑점수와 면

적 자료, 지자기폭풍의 자료를 사용하였다. CME 자료는 SOHO/LASCO 목록과 EIT의 코로나 태양 분광단색영상을 사용하여 CME의 연도별 발생빈도 분포와 북-남 비대칭 분포를 구하였다. CME의 규모별 발생빈도 분포를 알기 위해 CME의 각너비가 120° 보다 큰 경우와 헤일로인 경우의 각각 발생빈도, 속도가 400kms^{-1} 보다 큰 경우와 1000kms^{-1} 보다 큰 경우의 각각 발생빈도를 구하였다. 흑점의 자료는 브뤼셀 국제 흑점지수 자료센터에서 발표하는 흑점수 자료와 NGDC에서 발표하는 흑점의 면적 자료의 연평균 값을 사용하였다. 지자기폭풍의 자료는 지자기폭풍의 척도로 사용되고 있는 Ap, Dst, aa지수를 사용하였다. 이 세 가지 지수 값의 일평균 자료를 이용하여 Ap지수 값이 40 이상인 경우, Dst지수 값이 -50nT 이하인 경우, aa지수 값이 40 이상인 경우의 발생빈도를 지자기폭풍의 자료로 사용하였다. 각각의 자료를 사용하여 발생빈도 분포를 구하고 이 분포들의 상호 상관관계를 알아보기 위해 선형상관계수를 구하였다.

각각의 분포를 가지고 선형상관계수를 구하여 이의 상관관계를 알아 본 결과로 알 수 있는 것은 다음과 같다.

(i) CME의 발생빈도 분포와 흑점의 연평균 분포와의 상관관계를 살펴 본 결과 CME의 전체 연도별 발생빈도 분포와 흑점의 전체 연평균 분포와의 상관관계는 흑점수와 면적 모두 좋은 상관관계를 보였다. CME를 규모별로 나누어 흑점의 전체 연평균 분포와 상관관계를 알아 본 결과 CME의 각너비가 120° 보다 큰 경우와 CME의 속도가 400kms^{-1} 보다 큰 경우의 연평균 발생빈도 분포와 높은 상관관계를 보였다. CME의 전체 연도별 발생빈도 분포와 흑점의 북-남 비대칭 분포와는 상관관계가 없고 CME의 북-남 비대칭 분포와 흑점의 전체 연평균 분포와도 상관관계가 없다. CME의 북-남 비대칭 분포와 흑점의 북-남 비대칭 분포와는 상관관계가 높았고 이 전체의 경우가 CME를 규모별로 나누어 구한 북-남 비대칭 분포보다 높게 나타났다.

(ii) CME의 발생빈도 분포와 지자기폭풍의 발생빈도 분포간의 상관관계를 살펴 본 결과 CME의 전체 연도별 발생빈도 분포와 지자기폭풍의 발생빈도 분포, CME의 북-남 비대칭 분포와 지자기폭풍의 발생빈도 분포 사이의 상관관계는 거의 비슷하며 낮게 나타났다. 하지만 CME를 규모별로 나누어 살펴 본 결과 CME 중 속도가 1000kms^{-1} 보다 큰 경우에 해당하는 CME 발생빈도 분포와 지자기폭풍의 발생빈도 분포 사이에 아주 높은 상관관계를 보였다. CME를 규모별로 나누어 구한 북-남 비대칭 분포와 지자기폭풍의 발생빈도 분포 사이의 상관관계는 CME의 북-남 비대칭 분포의 경우보다 현저히 낮은 상관관계를 보였다. 즉 지자기폭풍의 발생빈도는 CME의 북-남 비대칭 분포보다는 CME의 전체 발생빈도와 관련이 있고 CME가 태양을 빠져나오는 속도가 빠를수록 지자기폭풍의 발생빈도와 더 높은 상관관계를 보인다는 사실을 알 수 있다.

(iii) 태양흑점과 지자기폭풍의 발생빈도 사이의 상관관계를 알아 본 결과 지자기폭풍은 태양흑점수와 면적의 전체 연평균 분포와 상관관계가 높고 북-남 비대칭 분포와는 상관관계가 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 흑점수의 경우 북쪽 반구에서 발생한 흑점수의 연평균 분포보다 남쪽 반구에서 발생한 흑점수의 연평균 분포가 지자기폭풍의 발생빈도와의 상관관계가 높고 흑점 면적의 경우에는 북쪽 반구의 경우와 남쪽 반구의 경우가 비슷하다. 세 지자기지수 중 Dst지수를 사용한 경우의 지자기폭풍 발생빈도와 흑점의 연평균 분포와의 상관관계가 높다. 지자기폭풍의 발생빈도는 태양흑점의 전체 연평균 분포와 상관관계가 있고 이의 북쪽 반구 분포나 남쪽 반구 분포와의 상관관계 비교에서는 차이를 보이지 않아 흑점의 위치는 지자기폭풍과 크게 상관이 없는 것을 알 수 있다.

감사의 글: 이 논문은 학술진흥재단(KRF-2006-521-C00072)의 지원에 의하여 연구되었습니다. 코로나질량방출의 세부 분류와 지자기지수 사용 부분에 대해 좋은 지적과 조언을 해주신 문용재 박사님께 감사를 드립니다. 논문에 대해 좋은 지적과 조언을 해주셔서 논문의 완성도가 높아질 수 있도록 해주신 두분의 심사위원들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- Ataç, T. & Özgüç, A. 1996, *Solar Phys.*, 166, 201
- Brajša, B., Wöhl, H., Vršnak, B., Ruždjak, D., Sudar, D., Roša, D., & Hržina, D. 2005, *Solar Phys.*, 231, 29
- Chang, H.-Y. 2006, *JA&SS*, 23, 199
- Chang, H.-Y. 2007a, *JA&SS*, 24, 91
- Chang, H.-Y. 2007b, *JA&SS*, 24, 261
- Cllilverd, M. A., Clark, T. D. G., Clarke, E., Rishbeth, H., & Ulich, T. 2002, *J. Geophys. Res.*, 107, 1441
- Duchlev, P. I. 2001, *Solar Phys.*, 199, 211
- Garcia, H. A. 1990, *Solar Phys.*, 127, 185
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vaxyliunas, V. M. 1994, *J. Geophys. Res.*, 99, 5771
- Howard, R. 1974, *Solar Phys.*, 38, 59
- Joshi, B. & Joshi, A. 2004, *Solar Phys.*, 219, 343
- 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
- Knaack, R., Stenflo, J. O., & Berdyugina, S. V. 2004, *A&A*, 418, L17
- Li, K. J., Schmieder, B., & Li, Q. Sh. 1998, *A&A*, 131, 99
- 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
- Newton, H. W. & Milson, A. S. 1955, *MNRAS*, 155, 398
- Roy, J. R. 1977, *Solar Phys.*, 52, 53
- Srivastava, N. & Venkatakrisnan, P. 2004, *J. Geophys. Res.*, 109, A10103, DOI: 10.1029/2003JA010175
- Temmer, M., Veronig, A., & Hanslmeier, A. 2002, *A&A*, 390, 707
- Temmer, M., Rybák, J., Bendik, P., Veronig, A., Vogler, F., Otruba, W., Potzi, W., & Hanslmeier, A. 2006, *A&A* 447, 735
- Venkatakrisnan, P. & Ravindra, B. 2003, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2181, DOI: 10.1029/2003GL018100

Verma, V. K. 1987, *Solar Phys.*, 114, 185

Verma, V. K. 1993, *ApJ*, 403, 797

Vizoso, G. & Ballester, J. L. 1987, *Solar Phys.*, 112, 317

Wang, Y. M., Ye, P. Z., Wang, S., Zhou, 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