

## 코로나 홀을 이용한 CIR과 지자기 폭풍의 경험적 예보 연구

이지혜<sup>1</sup>, 문용재<sup>2†</sup>, 최윤희<sup>3</sup>, 유계화<sup>1</sup>

<sup>1</sup>이화여자대학교 지구과학교육과, <sup>2</sup>경희대학교 우주과학과, <sup>3</sup>세종대학교 우주구조와 진화연구센터

## Empirical Forecast of Corotating Interacting Regions and Geomagnetic Storms Based on Coronal Hole Information

Ji-Hye Lee<sup>1</sup>, Yong-Jae Moon<sup>2†</sup>, Yunhee Choi<sup>3</sup>, and Kye-Hwa Yoo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Science Education, Ewha Womans University, Seodaemun-Gu, Seoul 120-750, Korea

<sup>2</sup>Department of Astronomy and Space Science, Kyunggi 449-701, Korea

<sup>3</sup>Astrophysical Research Center for the Structure and Evolution of the Cosmos,  
Sejong University, Seoul 143-747, Korea

E-mail: sojiro00@ewhain.net

(Received July 3, 2009; Accepted August 7, 2009)

### 요 약

이 연구에서 우리는 코로나 홀(Coronal hole, CH)의 정보(위치, 면적)를 이용하여 CIR(Corotating Interaction Regions)과 지자기폭풍(Geomagnetic Storm)에 대한 경험적인 예보를 수행하였다. 이것을 위해 1996년 1월 ~ 2003년 11월까지의 미국 국립 천문대-Kitt Peak 관측소의 He I 10830Å 영상으로부터 코로나 홀 자료를 얻고, Choi et al.(2009)로부터 확인된 CIR과 지자기 폭풍 자료를 활용하였다. 지자기 폭풍을 일으키는 코로나 홀의 특성을 고려하여 코로나 홀의 중심이 N40°와 S40° 사이, E40°와 W20° 사이에 위치하고 태양 반구에 대한 면적 비율이 다음과 같은 세 가지 경우를 선택하였다: (1) case 1: 0.36% 이상, (2) case 2: 0.66% 이상, (3) case 3: 1996 ~ 2000년 동안에는 0.36%, 2001 ~ 2003년 동안에는 0.66% 이상. 우리는 각 경우에 대하여 예보의 성공 유무를 확인할 수 있는 예보 분할표(Contingency Table)를 만들고, 그들의 태양 주기 위상(Solar cycle phase)에 대한 의존성을 조사하였다. 분할표로부터 우리는 PODy(the probability of detection yes), FAR(the false alarm ratio), Bias(the ratio of “yes” predictions to “yes” observations) 그리고 CSI(critical success index)와 같은 예보 평가 지수를 결정하였다. 이와 같은 예보에서 PODy와 CSI가 상대적으로 더 중요한 사실을 고려하여, 우리는 가장 좋은 후보가 case 3이라는 것을 발견하였다. 이 경우에 두 가지 예보에 대한 예보평가 지수는 아래와 같다: CH-CIR의 경우는 PODy=0.77, FAR=0.66, Bias=2.28, CSI=0.30이고, CH-storm의 경우는 PODy=0.81, FAR=0.84, Bias=5.00, CSI=0.16이다. 또한 태양 활동 극대기 이후 감쇄 기간 동안의 지수들이 태양 극대기 이전의 값들 보다 훨씬 잘 예보되고 있음을 알 수 있다. 따라서 코로나 홀을 이용한 CIR의 예보는 충분한 가능성을 보여주고 있으나, 지자기 폭풍의 예보는 너무 많은 허위 예보로 인하여 다소 어려울 것으로 예상된다.

### Abstract

In this study, we suggest an empirical forecast of CIR (Corotating Interaction Regions) and geomagnetic storm based on the information of coronal holes (CH). For this we used CH data obtained from He I 10830 Å maps at National Solar Observatory-Kitt Peak from January 1996 to November 2003 and the CIR and storm data that Choi

<sup>†</sup>corresponding author

et al. (2009) identified. Considering the relationship among coronal holes, CIRs, and geomagnetic storms (Choi et al. 2009), we propose the criteria for geoeffective coronal holes; the center of CH is located between  $N40^\circ$  and  $S40^\circ$  and between  $E40^\circ$  and  $W20^\circ$ , and its area in percentage of solar hemispheric area is larger than the following areas: (1) case 1: 0.36 %, (2) case 2: 0.66 %, (3) case 3: 0.36 % for 1996-2000, and 0.66% for 2001-2003. Then we present contingency tables between prediction and observation for three cases and their dependence on solar cycle phase. From the contingency tables, we determined several statistical parameters for forecast evaluation such as PODy (the probability of detection yes), FAR (the false alarm ratio), Bias (the ratio of “yes” predictions to “yes” observations) and CSI (critical success index). Considering the importance of PODy and CSI, we found that the best criterion is case 3; CH-CIR: PODy=0.77, FAR=0.66, Bias=2.28, CSI=0.30. CH-storm: PODy=0.81, FAR=0.84, Bias=5.00, CSI=0.16. It is also found that the parameters after the solar maximum are much better than those before the solar maximum. Our results show that the forecasting of CIR based on coronal hole information is meaningful but the forecast of geomagnetic storm is challenging.

*Keywords:* coronal hole, corotating interaction regions, geomagnetic storm

## 1. 서 론

코로나 홀(CH)은 태양의 코로나 보다 평균적으로 더 어둡고 더 낮은 플라즈마 밀도와 온도를 가진 지역을 말한다. 코로나 홀은 X-선 사진에서 어둡게 보이는 지역으로 확인할 수 있는데, 이것은 코로나 홀이 기체 밀도가 낮고 에너지 방출량이 적기 때문이다. 그것은 코로나 홀이 자기력선이 열린 곳이며 여기서부터 코로나 기체가 쉽게 태양풍의 형태로 행성간 공간으로 방출되기 때문이다. 코로나 홀은 주로 극 지역에서 나타나고, 이것은 고속 태양풍(Fast Solar Wind)의 원인이 된다(Gosling & Pizzo 1999). 태양 활동이 활발한 시기에 코로나 홀은 위도가 낮은 지역에도 다양하게 나타나며, 이때 고속 태양풍류(High Speed Streams, HSS)가 발생한다. 태양 적도 근처에서 내뿜는 저속 태양풍(Slow Solar Wind) 보다 고속 태양풍류가 훨씬 더 빠르기 때문에 고속 태양풍류는 저속 태양풍을 따라잡게 되고 두개의 영역이 부딪히게 된다. 이 두 태양풍은 각각의 물리량과 기원이 다르기 때문에 금방 동화되지 못하고 부딪혀 상호작용 지역을 만든다. 이 지역의 구조는 한 쌍의 앞쪽 충격파(Forward Shock, FS)와 뒤쪽 충격파(Reverse Shock, RS)로 경계되고 그 자체의 경계면 지역(Interface Region, IR)을 가진다. 이 영역이 태양 회전 때문에 뒤틀리는, 이런 흐름들의 나선형 구조와 상호작용 지역을 동회전 상호작용 지역(Corotating Interaction Regions, CIR)이라 부른다. 이것은 태양의 자전과 함께 회전하며 태양보다 몇 배나 더 넓은 영역에 퍼져 있다.

우주 기상 예보의 관점에서 볼 때, CIR-HSS 구조는 여러 가지 측면에서 중요하다. CIR-HSS 구조는 보통 몇 일 동안(오랫동안) 지속되는 지자기 폭풍을 야기시키고 그 세기는 드물게  $Dst = -100nT$ 에 도달한다. CIR은 코로나 물질 방출(Coronal Mass Ejections, CME)과 함께 지자기 폭풍을 일으키

는 원인으로 알려져 있다. CIR에 의한 폭풍은 코로나 물질 방출로 인한 폭풍과는 다르다. CIR의 Bz 성분이 매우 큰 파동을 가지기 때문에, 폭풍은 강하지 않고 약하거나 보통이다(Guarnieri et al. 2006). 이것은 보통 행성간 코로나 물질 방출(Interplanetary Coronal Mass Ejections, ICME)에 의해 야기된 몇몇 폭풍 보다 약하다. 그러나 CIR과 코로나 물질 방출 모두 지자기 폭풍에 주요한 원인으로 알려져 있다. 특별히, CIR-HSS는 태양 활동 극대기 이후 감쇄기간(declining phase) 동안 지자기 활동에 중요한 역할을 한다(Vršnak et al. 2007a).

CIR과 지자기 폭풍의 관계는 여러 저자들에 의해 연구되었다. Richardson et al.(2006)은 1996 ~ 2004년에 관측된 79개 주요 지자기 폭풍 중 9가지 경우가 코로나 물질 방출(CME)이나 행성간 코로나 물질 방출(ICME)과는 관계없이 CIR에 의해 일어난 것을 발견했다. Alves et al.(2006)은 1996 ~ 2003년까지 고속 태양풍류를 이용해 CIR 목록을 작성하고 지구 영향 여부를 조사했다. 이들은 보통 또는 강한 지자기 폭풍의 1/3이 CIR과 관련된다는 것을 발견했다. Zhang et al.(2007)은 주요 지자기 폭풍( $Dst \leq -100nT$ )의 태양과 행성간 원인을 광범위하게 연구했고, 주요 지자기 폭풍이 CME(혹은 ICME)와 CIR에 의해 각각 87%, 13%씩 발생한다는 것을 발견했다. 또한 Vršnak et al.(2007a)은 CIR이 지자기 폭풍에 많은 영향을 미치는 태양 활동 감쇄기 기간인 2005년의 코로나 홀 정보와 태양풍 변수들 간의 관계를 연구하고, Vršnak et al.(2007b)에서는 코로나 홀 정보와 Dst 지수의 경험적 관계성에 기초하여 고속 태양풍에 의한 지자기 폭풍을 예보하는 간단한 방법을 제안하였다. 이렇게 지금까지 연구들은 CME나 halo CME와 지자기 폭풍간의 관계, CIR과 지자기 폭풍간의 관계 또는 지자기 폭풍을 일으키는 태양 혹은 행성간 원인을 분석하는 경험적 연구들이 많이 있었다. 지자기 폭풍을 예보하는 방법의 연구는 halo CME를 이용한 지자기 폭풍의 방법이 많았고(Kim et al. 2005, 2008), CIR을 통한 지자기 폭풍의 직접적 예보는 드물었다. 우리는 코로나 홀을 통한 CIR과 지자기 폭풍을 예보하는 방법을 제안하기 위해 코로나 홀, CIR, 지자기 폭풍간의 경험적 관계를 연구한 Choi et al.(2009)의 코로나 홀 정보를 이용하였다. 여기에서 얻어진 코로나 홀의 위치와 크기 등의 정보를 이용하여 직접적으로 1996 ~ 2003년 동안의 코로나 홀 중 지구에 영향을 줄 수 있는 것을 선택하여 CIR과 지자기 폭풍을 예보하고 이것을 통계적으로 평가하고자 한다.

## 2. 사용자료

### 2.1 코로나 홀(CH) 선택

우리는 미국 국립 천문대-Kitt Peak 관측소(National Solar Observatory-Kitt Peak, NSO/KP)의 He I 10830Å 영상으로부터 1996년 1월부터 2003년 9월까지의 코로나 홀 자료를 이용하였다. 우리는 CIR과 지자기 폭풍을 일으킬 수 있는 코로나 홀의 후보를 결정하기 위해 먼저 태양 반구 위에서의 코로나 홀 위치를 고려하였다. 이 조건을 고려하기 위해 같은 기간 동안의 코로나 홀과 CIR 그리고 지자기 폭풍 간의 관계를 연구한 Choi et al.(2009)를 보면, CIR과 연관된 코로나 홀 중 74%가 위도  $N30^{\circ} \sim S30^{\circ}$ , 81%가 경도  $E40^{\circ} \sim W10^{\circ}$ 에 그 중심이 위치하는 것을 보여준다. 그러나 이 연구에서는 CIR과 연관된 코로나 홀 뿐 아니라 이 기간 동안의 모든 코로나 홀을 대상으로 확장하여 연구한 결과 Choi et al.(2009)에서 제시된 영역보다 각 방향으로  $10^{\circ}$  가량 확장시킨 위도  $N40^{\circ} \sim S40^{\circ}$ , 경도  $E40^{\circ} \sim W20^{\circ}$  영역이 더 좋은 예보 결과를 나타내었다. 이 결과를 바탕으로 코로나 홀을 통한 예보의 가능성을 높이기 위해 선택 영역을 확장하였다. 그림 1은 우리가 고려한 코로나 홀의 위치 영역을

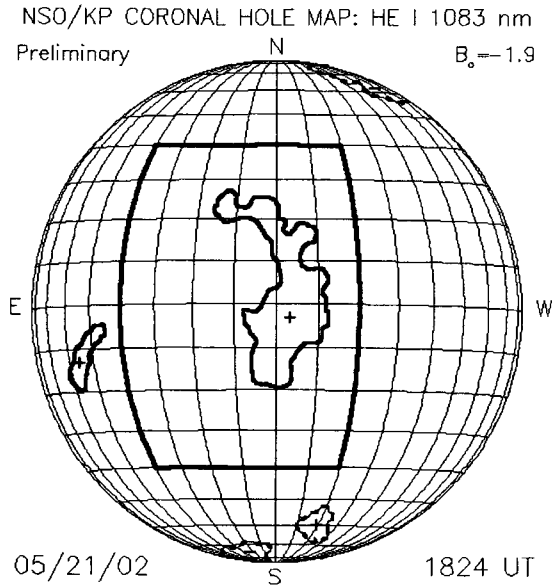


그림 1. 코로나 홀 위치 선택 영역 그림. NSO/KP의 He I 10830Å 2001년 5월 21일 자료. 굵은 선은 코로나 홀을 선택하기 위해 고려한 S40° ~ N40°, E40° ~ W20°의 영역을 나타낸다.

보여준다. 우리는 코로나 홀의 중심이 굵은 선으로 표시된 N40° ~ S40°, E40° ~ W20° 사이에 들어오는 코로나 홀을 자료로 선택하였다. 이 기간 동안에는 383개의 코로나 홀을 선택하였다. 코로나 홀의 위치 조건으로 이 영역을 고려하였기 때문에 극 지역에만 위치한 코로나 홀은 제외되었으며, 이 영역 안에 들어오지 않는 낮은 위도 코로나 홀도 포함되지 않았다. 하지만, 극 코로나 홀 중 이 영역 안까지 확장된 것은 선택하였다. 따라서 27개의 저위도까지 확장된 극 코로나 홀을 포함하였다. 그림 1에서는 굵은 선 안의 큰 코로나 홀은 포함되었지만 동쪽, 남쪽, 북쪽 지역의 코로나 홀은 제외하였다.

## 2.2 CIR과 지자기 폭풍 자료 선택

우리는 Choi et al.(2009)에서 사용한 1996년 1월부터 2003년 11월 까지의 CIR과 지자기 폭풍 자료를 활용하였다. 위 연구에서는 ACE/WIND 위성자료를 사용하여 CIR을 확인하였고, 이것을 같은 기간 동안의 코로나 홀과 연결하여 123개의 CIR을 확인하였다. 우리는 이 자료들 중 코로나 홀 자료가 없는 2003년 12월 자료를 제외하고 116개의 CIR 자료만을 선택하였다. 또한 우리는 지자기 폭풍의 크기 값을 나타내는 Dst 지수로 1996년 1월부터 2003년 11월까지 116개 자료를 사용하였다. Choi et al.(2009)에서는 CIR과 지자기 폭풍의 관계를 찾기 위해 다음의 변수들을 결정하였다; Dst 지수의 최소값, 태양풍 속도 Vsw의 최대값, IMF Bs의 남쪽 성분의 최대값, 그리고 대류 전기장  $E_y = VswBs$ 의 최대값. 우리가 사용한 Dst 지수는 CIR과 연관된 값이다. 우리는 이 연구를 위해  $Dst \leq -50nT$  이하인 것을 폭풍으로 선택하였다. 116개 Dst 값들 중 53개의 지자기 폭풍이 선택되었다.

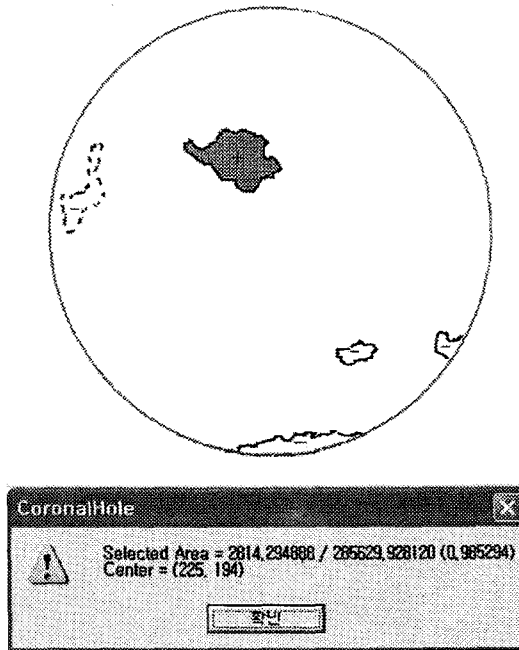


그림 2. Coronal Hole Identification Software. 이것은 NSO-KP의 He I 10830Å 코로나 홀 영상을 읽은 후 계산하고자 하는 코로나 홀을 선택하면 어두운 영역으로 표시되어 계산된다.

### 3. 분석방법

#### 3.1. 코로나 홀의 크기 계산

우리는 CIR과 자기 폭풍을 일으킬 수 있는 코로나 홀의 후보를 결정하기 위해 코로나 홀의 크기를 계산하였다. 383개의 코로나 홀의 면적을 계산하기 위하여 “Coronal Hole Identification Software”(Choi et al. 2009)을 사용하였다. 그림 2는 선택된 코로나 홀이 software를 이용해 계산된 자료를 보여준다. 회색으로 채워진 선택된 코로나 홀의 크기는 태양반구 면적에 대한 코로나 홀 면적의 상대적인 비율로서 나타낸다. 우리는 계산할 코로나 홀을 선택함에 있어 다음과 같은 점을 고려하였다. 첫째, 태양반구 위에 여러 개의 코로나 홀이 존재할 경우, 그 중심이 우리가 고려한  $N40^{\circ} \sim S40^{\circ}$ ,  $E40^{\circ} \sim W20^{\circ}$ 의 영역의 중심에 가까운 것을 선택하였다. Choi et al.(2009) 연구에 따르면 CIR을 일으키는 코로나 홀 중심 경도 평균이  $E8^{\circ}$ 이기 때문에 그 영역 안에서는 중심이  $E8^{\circ}$  부근에 가까운 코로나 홀을 선택하였다. 또한 극 코로나 홀을 제외하고 그 크기가 가장 큰 것을 선택하였다. 둘째, 여러 날 동안 지속되는 하나의 코로나 홀의 경우 그 중 면적이 가장 크게 발달하고, 코로나 홀 중심이  $E8^{\circ}$ 와 가까운 곳에 위치하고 있는 날을 선택하여 그날의 코로나 홀 면적을 계산하였다. 셋째, 그림 3과 같이 저위도 까지 확장된 극 코로나 홀의 경우, 극까지 연결된 코로나 홀 면적 전체의 크기가 아니라 이 영역 안에 들어온 면적의 크기만을 고려하여 크기(비율)를 계산하였다.

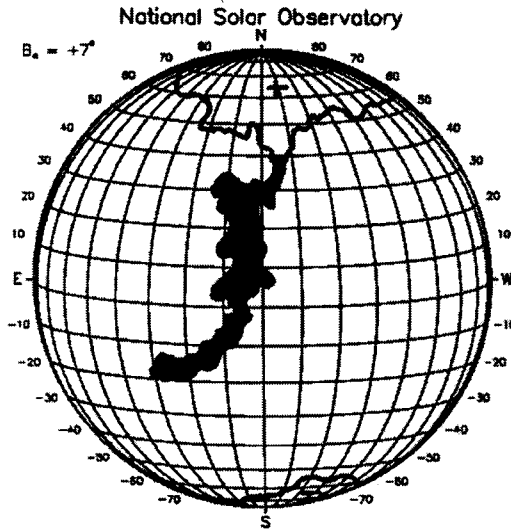


그림 3. 저위도까지 확장된 극 코로나 홀. 어두운 색으로 채워진 부분이 계산된 코로나 홀의 면적으로 S40° ~ N40°, E40° ~ W20° 영역 안에 들어오는 부분이다.

### 3.2. 코로나 홀 면적의 특징과 지구영향 코로나 홀 조건

우리는 1996년 1월에서 2003년 11월까지 기간 동안에 선택된 383개 코로나 홀의 면적을 각각 계산했다. 그림 4는 각 해의 코로나 홀 면적 분포를 보여준다. 1996년에서 2003년으로 갈수록 코로나 홀의 면적은 더욱 커지는 경향이 있다. 이 그래프는 특히 태양 극대기인 2000년을 기준으로 해서 그 전과 후의 코로나 홀 면적 크기가 다르게 나타나는 경향을 보여준다. 태양 극대기 이전인 2000년 이전의 기간 동안에는 코로나 홀의 크기가 다소 작고, 극대기 이후인 2000년 이후 기간에는 코로나 홀의 크기가 더 크게 나타난다. 마찬가지로 CIR과 연관된 코로나 홀의 경우에도 2000년 이전의 기간보다 그 이후부터 크기가 커지는 경향이 있다. 이것은 태양 극대기 이전과 이후에 코로나 홀의 크기가 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한 그에 따라 CIR과 지자기 폭풍에 영향을 주는 코로나 홀의 면적 조건도 다르다는 것을 의미한다.

이러한 결과를 고려하여 우리는 1996년 1월에서 2003년 11월 기간 동안에 선택된 383 코로나 홀 중 태양 주기 위상에 따른 코로나 홀의 면적 특성을 고려하여 CIR과 지자기 폭풍을 일으킬 수 있는 코로나 홀의 후보를 다음의 세 가지 경우로 나누어 선택하였다.

case 1: 태양반구 면적에 대한 코로나 홀의 면적 비율이 0.36% 이상인 경우

case 2: 태양반구 면적에 대한 코로나 홀의 면적 비율이 0.66% 이상인 경우

case 3: 태양반구 면적에 대한 코로나 홀의 면적 비율이 1996~2000년 동안에는 0.36%, 2001~2003년 동안에는 0.66% 이상인 경우

먼저 0.36%를 선택한 이유는 1996~2000년 기간 동안에 각 해의 CIR을 일으켰던 코로나 홀 면적 비율 최소값을 조사한 결과 이 값이 몇 개의 예외적으로 작은 값들(0.30 이하, 6개)을 제외한 일반

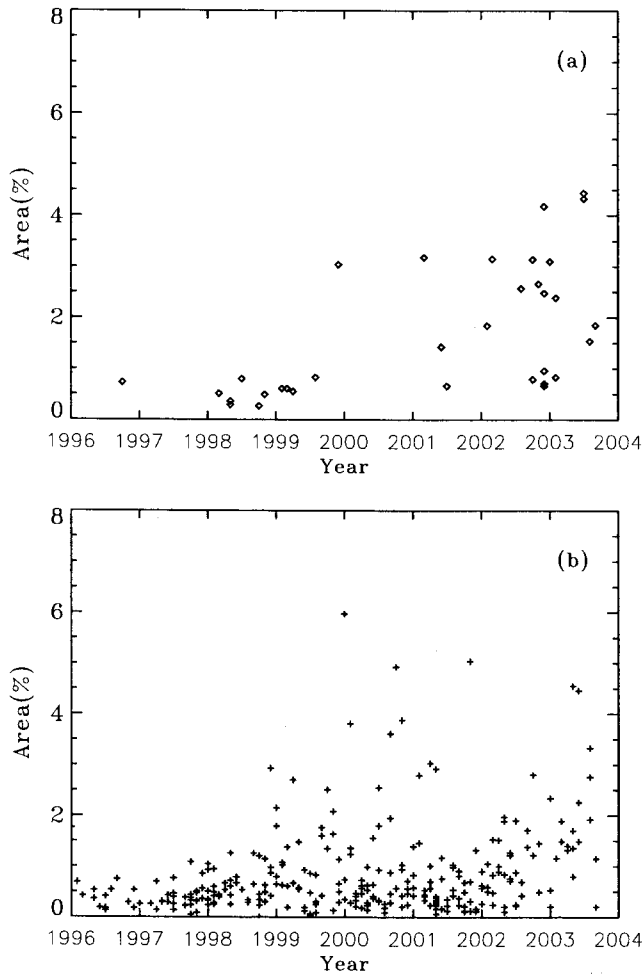


그림 4. 코로나 홀 면적 분포. 1996년부터 2003년 11월까지 나타난 코로나 홀의 면적 분포를 보여준다. ◇는 CIR과 연관된 코로나 홀, +는 CIR과 연관되지 않은 코로나 홀의 면적 분포를 나타낸다.

적인 코로나 홀의 최소값이기 때문이다. 또 같은 방법으로 2001~2003년 동안에는 이러한 값들(0.32 이하, 2개)을 제외한 일반적인 코로나 홀의 최소값이 0.66으로 나타났다. case 3은 태양 극대기 이전과 극대기 이후의 코로나 홀 면적 분포의 특징을 고려하여 1996~2000년 기간과 2000~2003년의 면적 조건을 다르게 적용한 경우이다. 이것은 CIR과 지자기 폭풍을 예보하는데 더 좋은 코로나 홀의 면적 조건을 찾기 위한 것이다.

### 3.3. 분할표(Contingency Table)

표 1은 세 가지 경우의 코로나 홀 예보의 정확성을 평가하기 위하여 우리가 사용한 기상학에서 널리 쓰이는 예보 분할표(Contingency Table)를 보여준다. 이것은 예보의 성공과 실패의 정보(혹은

표 1. 예보 분할표 계수(Forecast Contingency Table and Verification Statistics). a는 hits, b는 false alarm, c는 misses, d는 correct nulls

Prediction	Observation		Total
	Yes	No	
Yes	a	b	a+b
No	c	d	c+d
Total	a+c	b+d	a+b+c+d

그것의 정도)를 제공해 준다(Smith et al. 2000).

이 표에서 “a”는 맞춘 것(hits)으로 예보에서 ‘Yes’이고 실제로도 ‘Yes’인 경우이다. “b”는 허위 예보(false alarm)로 예보에서 ‘Yes’이지만 실제로는 ‘No’인 경우이다. 비슷하게 “c”는 놓친 것(misses)으로 예보에서 ‘No’이지만 실제로는 ‘Yes’인 경우, “d”는 현상이 일어나지 않을 것을 정확히 예보한 것(correct nulls)으로 예보에서 ‘No’이고 실제로도 ‘No’인 경우를 각각 나타낸다(Kim et al. 2005). 예보를 위한 통계는 이 분할표를 통해 계산된다. 우리는 예보 평가를 위해 PODy, FAR, Bias, CSI 이렇게 네 가지의 지수를 사용하였다. PODy(the probability of detection yes)는 정확한 예보의 비율로  $a/(a+c)$ 로 계산된다. FAR(the false alarm ratio)는 허위 예보된 비율로  $b/(a+b)$ 로 계산된다. Bias는 관측된 ‘Yes’에 대한 예보된 ‘Yes’의 비율로  $(a+b)/(a+c)$ 로 계산된다. CSI(critical success index)는 전체의 맞춘 비율 즉 예보 성공 임계지수로  $a/(a+b+c)$ 로 계산된다(Smith et al. 2000). 예보의 성공 여부는 PODy와 CSI( $0 \leq \text{PODy} \leq 1$ ,  $0 \leq \text{CSI} \leq 1$ )는 그 크기가 클수록 정확한 예보이고, FAR( $0 \leq \text{FAR} \leq 1$ )과 Bias( $0 \leq \text{Bias} \leq \infty$ )는 그 크기가 작을수록 정확한 예보이다.

PODy( $a/(a+c)$ )는 정확한 예보의 비율이다, FAR( $b/(a+b)$ )은 허위 예보된 비율, Bias( $(a+b)/(a+c)$ )는 관측된 ‘Yes’에 대한 예보된 ‘Yes’의 비율, CSI( $a/(a+b+c)$ ) 전체의 맞춘 비율 즉 예보 성공 임계지수이다.

#### 4. 연구결과

우리는 코로나 홀을 이용한 CIR과 지자기 폭풍의 예보 가능성을 높이기 위해 우리가 선택한 계수들 중 PODy와 CSI를 높이는 조건들을 선택하였다. 그렇기 때문에 상대적으로 FAR이 다소 높아진 경향이 있다. 또 우리는 코로나 홀을 통한 CIR 예보, 코로나 홀을 통한 지자기 폭풍 예보를 각각 case 1, case 2, case 3으로 나누어 예보, 평가하였다.

##### 4.1. 코로나 홀을 통한 CIR의 예보결과: CH-CIR

그림 5의 각 그래프는 PODy, FAR, Bias, CSI의 연도별 case 1, case 2, case 3의 결과 값을 보여준다. PODy의 값은 case 1과 case 3이 동일한 결과를 보이고 있다. 그러나 CSI에서 case 3이 case 1보다 더 높은 값을 나타내었다. FAR은 case 1, case 2, case 3이 대체적으로 비슷한 결과를 보인다. 그러나 case 1과 case 3을 비교해 보면 case 3이 2000년 이후 더 낮은 값을 나타내며 좋은 결과를 보인다. Bias는 case 2가 가장 낮은 값을 나타내어 좋은 결과를 나타내고 case 1과 case 3을 비교해 보면, case 3이 조금 더 낮은 값을 가진다. 지자기 폭풍의 예보를 통하여 우주환경에 대한 피해를 줄여야 한다는 관점에서 볼 때, 허위 예보의 비율이 다소 높아지더라도 실제 일어난 지자기 폭풍을 예보하지 못하



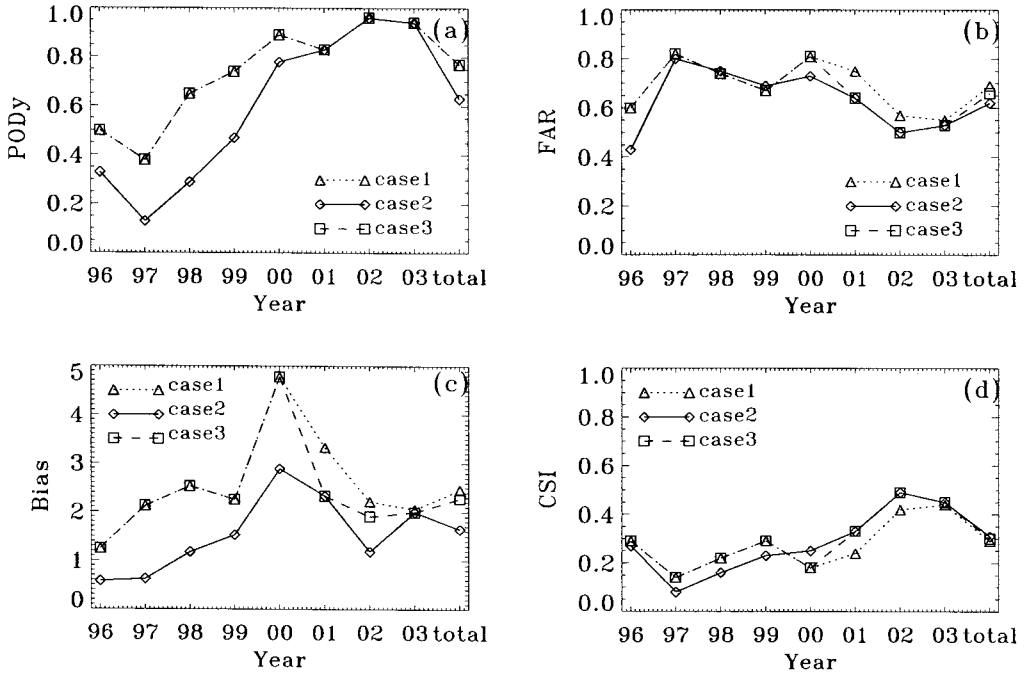


그림 5. 코로나 홀을 통한 CIR 예보 결과. 각각의 그래프는 (a) PODy, (b) FAR, (c) Bias, (d) CSI를 나타낸다. 각 그래프의 좁은 점선은 case 1, 실선은 case 2, 넓은 점선은 case 3을 나타낸다.

는 일이 적어야 한다. 따라서 우리는 예보 결과를 평가하는데 있어 PODy와 CSI 값이 높은 것이 예보가 잘 된 것으로 판단하였다. 따라서 case 3의 전체 자료 값이  $PODy=0.77$ ,  $FAR=0.66$ ,  $Bias=2.28$ ,  $CSI=0.30$ 으로 가장 좋은 예보 결과를 보여준다. case 1의 전체자료 값은  $PODy=0.77$ ,  $FAR=0.69$ ,  $Bias=2.46$ ,  $CSI=0.29$ , case 2는  $PODy=0.63$ ,  $FAR=0.62$ ,  $Bias=1.65$ ,  $CSI=0.31$ 을 각각 나타낸다. 이것은 태양 주기 위상에 따른 코로나 홀의 면적 특성을 이용하여 2000년 이전과 이후의 크기 조건을 다르게 적용한 case 3이 CIR을 예보하기에 가장 좋은 조건임을 나타낸다.

이 결과를 예보 기간별로 나누어 살펴보면, 1996~2000년 동안의 기간과 2001~2003년 기간에 차이가 있는 것을 알 수 있다. 2000년 이전의 기간 보다 2003년 이후의 기간이 PODy, CSI의 값이 높고, FAR의 값이 낮다. 이것은 태양 극대기 전의 2000년 이전의 기간보다 극대기 이후의 2000년 이후의 기간이 예보 가능성이 높다는 것을 나타낸다. 특히 2002년은  $PODy=0.96$ ,  $FAR=0.50$ ,  $Bias=1.91$ ,  $CSI=0.49$ (case 3)이고, 2003년은  $PODy=0.94$ ,  $FAR=0.53$ ,  $Bias=2.00$ ,  $CSI=0.45$ (case 3)으로 가장 좋은 결과를 나타낸다. 그러므로 태양 활동 극대기 이후 감쇄기 동안인 2002년과 2003년이 예보하기에 가장 좋은 기간으로 나타났다. 이런 결과는 코로나 홀과 지자기 폭풍간의 관계를 연구한 여러 연구들의 결과와 일치한다. 예를 들면 Gonzalez et al.(1999)는 지자기 폭풍의 행성간 원인을 연구하여 태양 활동 극대기 동안에 태양 활동은 코로나 홀의 영향이 크지 않은 반면 태양 활동 감쇄기 동안에

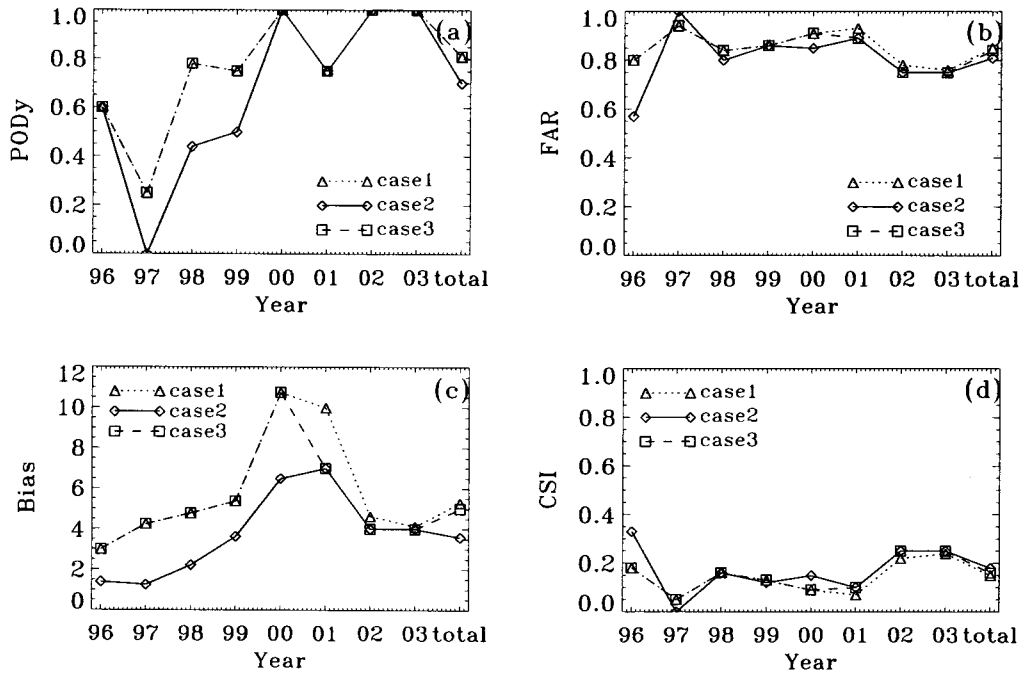


그림 6. 코로나 홀을 통한 지자기 폭풍(storm) 예보 결과. 각각의 그래프는 (a) PODy, (b) FAR, (c) Bias, (d) CSI를 나타낸다. 각 그래프의 좁은 점선은 case 1, 실선은 case 2, 넓은 점선은 case 3을 나타낸다.

는 코로나 홀이 행성간 환경에 지배적인 영향을 주는 것을 보였다. 또한 Vršnak et al.(2007a,b)은 태양 활동 감쇄기 동안 지자기 활동에서 CIR-HSS가 지배적인 역할을 한다는 것을 바탕으로 태양 감쇄기 동안인 2005년의 코로나 홀을 이용하여 지자기 폭풍을 예보하였다.

#### 4.2. 코로나 홀을 통한 지자기 폭풍의 예보결과: CH-storm

그림 6은 코로나 홀을 통한 지자기 폭풍의 예보 결과를 보여준다. 지자기 폭풍의 예보 결과는 CIR의 예보 결과와 비슷한 특성을 나타낸다. 먼저 case 3이 case 1과 case 2에 비해 가장 좋은 예보 조건으로 나타난다. case 3 변수들의 전체 자료 값은  $PODy=0.81$ ,  $FAR=0.84$ ,  $Bias=5.00$ ,  $CSI=0.16$ 이고, case 1은  $PODy=0.81$ ,  $FAR=0.85$ ,  $Bias=5.38$ ,  $CSI=0.15$ , case 2는  $PODy=0.70$ ,  $FAR=0.81$ ,  $Bias=3.60$ ,  $CSI=0.18$ 을 각각 나타낸다. CSI의 값은 case 2가 case 3에 비해 약간 높지만, PODy의 값은 case 3이 case 2에 비해 훨씬 높다. 그러므로 PODy와 CSI 값이 동시에 높은 것을 좋은 예보로 가정할 때, case 3이 가장 좋은 결과를 보인다.

또한 1996~2000년 기간과 2001~2003년 동안의 결과를 비교해 보면, 2001~2003년 동안의 기간이 PODy와 CSI값이 높고 FAR 값은 낮게 나타났다. 특히 2002, 2003년 모두  $PODy=1.00$ ,  $FAR=0.75$ ,  $Bias=4.00$ ,  $CSI=0.25$ 로 동일하게 가장 좋은 결과를 나타내었다. 이것은 코로나 홀을 이용한 지자기 폭풍 예보 역시 코로나 홀을 통한 CIR 예보와 마찬가지로 태양 극대기 이전의 기간보다 극대기 이

표 2. 코로나 홀과 halo CME를 이용한 예보 결과 비교. Kim et al.(2005)의 Disk CME와 Fast CME를 통한 지자기 폭풍 예보 결과(왼쪽)와 이 연구의 코로나 홀을 이용한 CIR과 지자기 폭풍 예보 결과(오른쪽)를 비교하였다.

	Disk CME-storm	Fast CME-storm	CH-CIR	CH-storm
PODy	0.79	0.91	0.77	0.81
FAR	0.55	0.60	0.66	0.84
Bias	1.76	2.26	2.28	5.00
CSI	0.40	0.39	0.30	0.16

후 감쇄기 동안, 특히 2002, 2003년이 예보하기에 가장 좋은 기간임을 보여준다.

이렇게 코로나 홀을 통한 CIR 예보와 지자기 폭풍 예보는 비슷한 경향의 결과를 나타내지만, PODy를 제외한 지자기 폭풍의 예보 값들은 CIR의 예보 값들보다 좋지 않게 나타난다. PODy는 코로나 홀을 통한 지자기 폭풍의 예보가 코로나 홀을 통한 CIR의 예보 보다 조금 더 좋은 결과를 나타내지만, FAR와 Bias 값이 더 높게 나타나고, 특히 CSI 결과가 CH-CIR 예보에 비해 매우 낮게 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 코로나 홀 정보를 이용한 CIR 예보는 가능성이 있으나, 코로나 홀을 이용한 지자기 폭풍의 직접적인 예보는 좀 더 어려운 것으로 보여진다.

#### 4.3. 코로나 홀과 halo CME를 이용한 예보 비교

코로나 물질 방출(CME)과 CIR은 모두 지자기 폭풍의 원인으로 알려져 있다. 표 2에서는 우리의 결과들을 1997년부터 2003년까지 halo CME를 통한 지자기 폭풍의 예보 평가를 연구한 Kim et al.(2005) 연구와 비교하였다. Disk CME와 Fast CME를 이용한 지자기 폭풍 예보는 코로나 홀 정보를 이용한 CIR과 지자기 폭풍 예보 결과보다 PODy, CSI 값이 더 높다. 또 FAR, Bias 값들은 더 낮다. 그러므로 코로나 홀 정보를 이용해 CIR과 지자기 폭풍을 예보하는 것이 코로나 물질 방출을 이용한 지자기 폭풍의 예보보다 더 어렵다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

이 연구에서는 CIR과 지자기 폭풍을 일으킬 수 있는 코로나 홀의 특성들을 이용하여 코로나 홀을 이용한 CIR과 지자기 폭풍의 예보 가능성을 연구하였다. CIR과 지자기 폭풍을 일으킬 수 있는 코로나 홀의 후보를 결정하는데 있어 코로나 홀의 위치로 N40° ~ S40°, E40° ~ W20° 사이에 있는 코로나 홀을 고려하였고, 코로나 홀의 태양반구에 대한 면적 비율에 따라 세 가지 경우(case 1: 0.36% 이상, case 2: 0.66% 이상, case 3: 1996~2000년 동안에는 0.36% 이상, 2001~2003년 동안에는 0.66% 이상)를 고려하여 코로나 홀의 후보들을 결정하였다. 각 세 가지 경우의 예보 분할표(Contingency Table)을 만들어 예보 평가 지수 PODy, FAR, Bias, CSI를 각각 계산하여 예보 평가하였다. 그 결과 코로나 홀을 이용한 CIR 예보의 경우에는 PODy와 CSI의 중요성을 고려할 때 case 3이 PODy=0.77, FAR=0.66, Bias=2.28, CSI=0.30으로 가장 좋은 결과를 나타내었다. 또한 전체적으로(세 경우 모두) 태양 극대기 이전인 1996~2000년 기간보다 태양 극대기 이후인 2001~2003년 기간이 더 좋은 예보 결과를 보여주었다. 코로나 홀을 이용한 지자기 폭풍 예보의 경우 CIR 예보와 비슷한 결과를 나타내었다. case 1, case 2에 비해 case 3이 PODy=0.81, FAR=0.84, Bias=5.00, CSI=0.16으로 가장 좋

은 결과를 보였다. 또 1996~2000년 동안의 기간보다 2001~2003년 동안의 기간, 특히 두 결과 모두 2002년과 2003년이 가장 좋은 결과를 나타내었다. 코로나 홀 정보를 이용한 CIR과 지자기 폭풍 예보는 모두 case 3이 예보의 가장 좋은 조건이고, 태양 활동 극대기 이전 보다는 극대기 이후의 감쇄 기간이 예보하기에 좋은 기간이라고 할 수 있다. 그러나 지자기 폭풍 예보의 경우 CIR 예보 결과에 비해 매우 낮은 CSI 값을 나타내기 때문에 코로나 홀을 이용한 CIR 예보 보다 지자기 폭풍의 예보는 더 어려운 것으로 생각된다. 또 이 결과를 코로나 물질 방출을 이용한 지자기 폭풍 예보를 연구한 Kim et al.(2005) 연구와 비교해 보았을 때, 코로나 홀 정보를 이용한 CIR과 지자기 폭풍 예보는 코로나 물질 방출을 통한 지자기 폭풍 예보 보다 더 어렵다는 것을 알 수 있다.

**감사의 글:** 이 연구는 교육과학기술부의 기초연구과제(KRF-2008-314-C00158)와 세계수준대학육성사업(WCU grant No. R31-10016)의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Alves, M. V., Echer, E., & Gonzalez, W. D. 2006, *JGR*, 111, A07S10
- Choi, Y. H., Moon, Y.-J., Choi, S. H., Beak, J. H., Kim, S. S., Cho, K. S., & Choe, G. S. 2009, *Solar Phys.*, 254, 311
- Gonzalez, W. D., Tsurutani, B. T., Gonzalez, & AL. CD. 1999, *Space Science Reviews*, 8, 529
- Gosling, J. T. & Pizzo, V. J. 1999, *Space Science Reviews*, 89, 21
- Guarnieri, F. L., Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Echer, E., Gonzalez, A. C., Grande, M., & So-raas, F. 2006, *Proceedings of the ILWS Workshop*, eds. N. Gopalswamy & A. Bhattacharyya, ISBN: 81-87099-40-2, p.266
- Kim, R. S., Cho, K. S., Kim, K. H., Park, Y. D., Moon, Y. J., Yi, Y., Lee, J., Wang, H., Song, H., & Dryer, M. 2008, *ApJ*, 667, 1378
- Kim, R. S., Cho, K. S., Moon, Y. J., Kim, Y. H., Yi, Y., Dryer, M., Bong, S. C., & Park, Y. D. 2005, *JGR*, 110, A11104
- Richardson, I. G., Webb, D. F., Zhang, J., Berdichevsky, D. B., Biesecker, D. A., Kasper, J. C., Kataoka, R., Steinberg, J. T., Thompson, B. J., Wu, C. C., & Zhukov, A. N. 2006, *JGR*, 111, A07S09
- Smith, Z., Dryer, M., Ort, E., & Murtagh, M. 2000, *J. Atmos. Terr. Sol. Phys.*, 62, 1265
- Vršnak, B., Temmer, M., & Veronig, A. M. 2007a, *Solar Phys.*, 240, 315
- Vršnak, B., Temmer, M., & Veronig, A. M. 2007b, *Solar Phys.*, 240, 331
- Zhang, J., Richardson, I. G., Webb, D. F., Gopalswamy, N., Huttunen E., Kasper, J. C., Nitta, N. V., Poomvises, W., Thompson, B. J., Wu, C. C., & Yashiro, S. 2007, *JGR*, 112, A10102