

지자기교란 예보를 위한 CME 지구 도달 예측 기술 연구

2016. 12.



국립전파연구원

National Radio Research Agency

제 출 문

본 보고서를 「지자기교란 예보를 위한 CME 지구 도달 예측 기술 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2016. 12. 31.

연구책임자 : 강 진 구(우주전파센터 예보팀)

연구 원 : 송 홍 중(우주전파센터 예보팀)

한 진 욱(우주전파센터 예보팀)

김 재 훈(우주전파센터 예보팀)

이 재 형(우주전파센터 예보팀)

요 약 문

태양 흑점폭발과 필라멘트 분출에 의해 발생된 전자, 양성자 등으로 구성된 코로나물질은 지구에 도달하여 지구자기장과 상호작용을 하여 유도 전류를 발생시키며 이로 인해 지구자기장이 교란되어 지자기교란 현상이 발생한다. 강력한 지자기교란에 의해 변전시설 손상, 광역 HF 통신 장애, 극항로 항공기 방사능 피폭, GPS 위치 기능 장애 등 전 세계적으로 많은 피해를 발생시킬 수 있어 이에 대한 대비가 절실한 상황이다.

우주전파센터는 지자기교란의 주요 원인인 코로나물질방출(Coronal Mass Ejection, CME)의 지구 도달 여부를 예측하기 위해 미국 항공우주국에서 운영하고 있는 SDO, SOHO 위성과 유럽우주국에서 공동 운영하고 있는 STEREO 위성 등 태양관측위성의 초기 발생 영상 분석을 통해 CME의 초기 속도, 발생 위치, 각넓이 등을 분석하여 지구도달 여부를 판단하고 있다. 하지만 CME의 초기 물리량을 이용한 예측은 불확정성이 높아 이를 보완할 예보 연구가 필요하다.

본 연구에서는 지구로부터 150만 km 떨어진 곳에 위치하여 태양으로부터 오는 전자, 양성자 등을 관측하고 있는 미국 ACE 위성의 양성자, 전자, 알파입자 모니터(EPAM) 관측 자료를 이용하여 CME의 지구 도달을 예측하고 예보 현업에 활용할 수 있는 연구를 수행하였다. 이를 위해 최근 지자기교란 현황과 태양활동과의 연관성을 확인하였고, 미국 조지메이슨 대학과 우주전파센터의 CME 관측 목록을 비교하였다. 그리고 지자기교란을 발생시킨 주요 CME의 초기 물리량과 ACE EPAM에서 관측된 물리량을 비교 분석하여 전자·양성자의 증가량에 따른 지자기교란 발생 확률을 도출하고, CME의 발생 위치에 따른 전자·양성자의 변화 양상을 확인하였다.

본 연구를 통해 마련된 예보 확률표와 분석 결과는 예보매뉴얼에 적용되어 예보 업무 현업에 활용될 예정이며 예측 확률의 지속적인 검증과 조정을 통해 지자기교란 예측정확도 향상에 기여할 것으로 기대한다.

목 차

제1장 서론	1
제1절 코로나물질방출(CME)	1
제2절 CME 관측 위성	2
제3절 CME 예보 현황 및 문제점	5
제4절 EPAM을 이용한 CME 지구도달 예측기술 연구	8
제2장 지자기교란 현황 분석 연구	10
제1절 지자기교란 발생 현황	10
제2절 지자기교란 피해 사례	13
제3장 CME 지구 도달 예측 기술 연구	14
제1절 미국 GMU의 CME-ICME 목록 분석	14
제2절 한국 우주전파센터(KSWC)의 CME CATool 분석	15
제3절 GMU-KSWC의 CME-ICME 관측자료 비교 분석	17
제4절 CME 물리량과 ACE EPAM 관측자료 비교 분석	20
제5절 ACE EPAM 통계 분석	25
제4장 결론	27
참고문헌	29
[부록 1] CME-ICME ACE EPAM 분석 결과	30

표 목 차

[표 1] Honolulu와 Godhavn의 K 지수 비교표	10
[표 2] 국내지역의 K 지수 비교표	11
[표 3] 우주전파재난 상황별 특징 비교	11
[표 4] 2016년 단계별 경보 발령 내역	12
[표 5] 2007~2014년 관측된 미국 GMU의 CME-ICME 목록	14
[표 6] 2013~2015년 관측된 한국 KSWC의 CME-ICME 목록	16
[표 7] 2013~2014년에 관측된 GMU-KSWC의 CME-ICME 일치 목록 ..	17
[표 8] 2013~2014년에 관측된 KSWC의 CME-ICME 목록	18
[표 9] 2013~2014년에 관측된 G1 이상 발생시킨 CME-ICME 목록 ·	20
[표 10] ACE EPAM 관측량에 따른 지자기교란 1단계 이상 발생 확률 ·	25
[표 11] ACE EPAM 관측량에 따른 지자기교란 2단계 이상 발생 확률 ·	25
[표 12] ACE EPAM 관측량에 따른 지자기교란 발생 확률	26

그림 목 차

[그림 1] 미국 SDO 위성에서 관측된 흑점	1
[그림 2] 미국 SDO 위성에서 관측된 필라멘트	1
[그림 3] STEREO 위성과 SOHO 위성을 이용한 3차원 태양 관측 현황 .	2
[그림 4] DSCOVR 위성 위치와 라그랑주점	3
[그림 5] SOHO LASCO C2 영상	4
[그림 6] SOHO LASCO C3 영상	4
[그림 7] CME 자동분석 모델	5
[그림 8] Enlil 모델	6
[그림 9] IPS 모델	6
[그림 10] IPS-Enlil 통합모델	7
[그림 11] ACE EPAM 5분 평균 관측 자료	8
[그림 12] 1996~2016년 지자기교란 경보 발생 횟수	12
[그림 13] 2003년 10월 할로윈 폭풍에 의한 전 세계 피해 사례	13
[그림 14] CATool 운영자환경(GUI)	15
[그림 15] 2014년 12월 17일 04시 48분에 발생한 ICME 관측자료	21
[그림 16] 2013년 3월 15일 07시 12분에 발생한 ICME 관측자료	22
[그림 17] 2013년 9월 29일 22시 12분에 발생한 ICME 관측자료	23
[그림 18] 2013년 5월 22일 22시 25분에 발생한 ICME 관측자료	24

제1장 서론

제1절 코로나물질방출(CME)

태양 흑점폭발과 필라멘트 분출에 의해 발생된 전자, 양성자 등으로 구성된 코로나물질은 지구에 도달하여 지구자기장과 상호작용하여 유도전류를 발생시키며 이로 인해 지구자기장이 교란되어 지자기교란 현상이 발생한다. 코로나물질방출(Coronal Mass Ejection, CME)은 지구 방향으로 발생할 경우 평균 2~3일 후에 지구에 도달하여 지자기교란을 일으키게 된다.

흑점폭발에 의한 CME는 태양활동 극대기에 흑점의 활동이 활발한 시기에 많이 발생하며 필라멘트 분출에 의한 CME보다 초기 속도가 빠른 특징을 가지고 있다. 강한 흑점폭발이 있어도 항상 CME가 동반되지는 않으며, 흑점폭발의 지속시간이 긴 경우에는 약한 흑점폭발이더라도 CME가 동반되는 경우가 많다. 상대적으로 필라멘트 분출에 의한 CME는 초기 속도가 느려 지구 영향이 약한 특징을 가지고 있다.

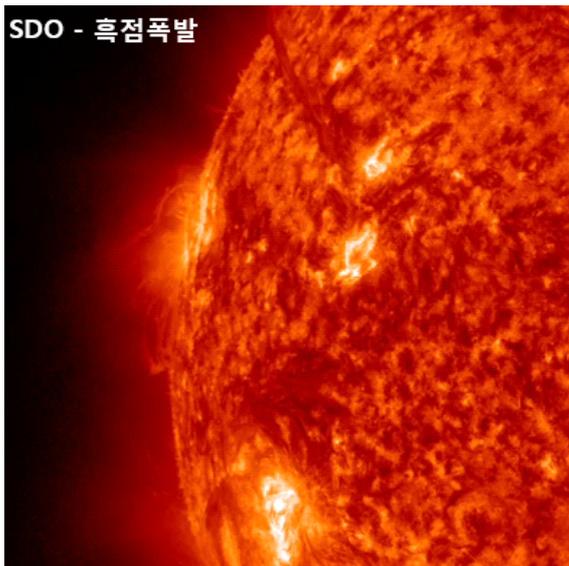


그림 1 미국 SDO 위성에서 관측된 흑점

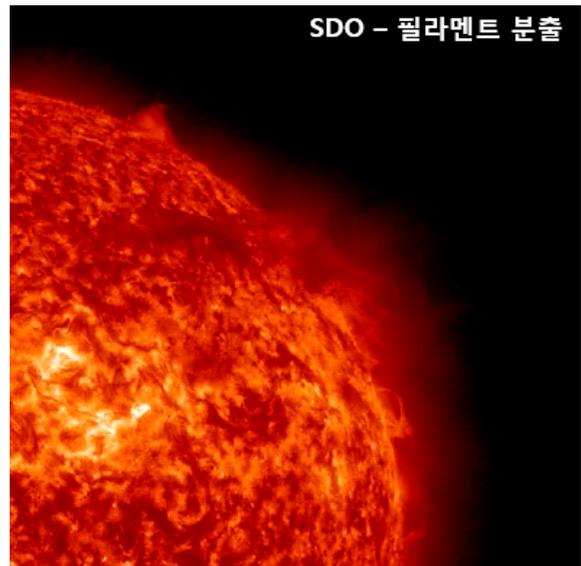


그림 2 미국 SDO 위성에서 관측된 필라멘트

제2절 CME 관측 위성

CME 예측을 위해서 사용되는 주요 위성은 전 세계적으로 미국 항공 우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서 운용하고 있는 SDO(Solar Dynamics Observatory) 위성, STEREO(Solar Terrestrial Relations Observatory) 위성, ACE(Advanced Composition Explorer) 위성과 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 운용중인 DSCOVR(Deep Space Climate ObserVatoRy) 위성과 미국 항공우주국과 유럽 우주국(European Space Agency, ESA)이 공동으로 운용중인 SOHO(Solar Heliospheric Observatory) 위성이 있다.

2010년 2월에 발사한 태양관측위성인 SDO 위성은 지구정지궤도 위성으로 서경 102°에 위치하고 있으며, 태양의 극자외선 파장 영역을 분석하는 위성이다. 2006년 발사한 STEREO 위성은 2개의 위성이 서로 다른 두 지점에서 태양을 관측하고 있으며, “Ahead” 라고 부르는 A 위성은 지구의 앞쪽에서 출발하여 움직이고 있고, “Behind” 라고 부르는 위성은 지구의 뒤쪽에서 반대방향으로 움직이고 있다. STEREO 위성을 통해 서로 다른 두 지점에서 얻은 자료를 분석함으로써 코로나물질방출과 흑점폭발 등의 현황에 대한 정보를 얻을 수 있다.

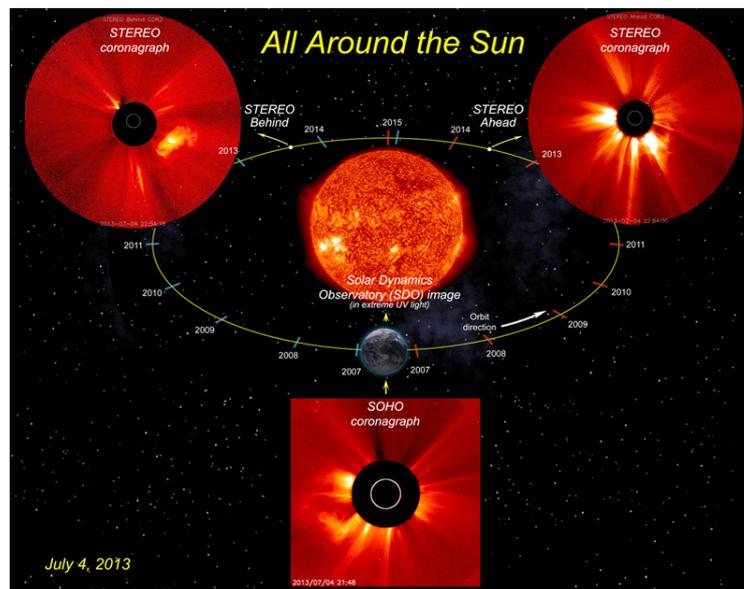


그림 3 STEREO 위성과 SOHO 위성을 이용한 3차원 태양 관측 현황

1997년 8월에 발사한 ACE 위성은 지구에서 약 150만km 떨어진 L1 라그랑주점에 위치하여 태양풍 고에너지 입자, 행성간 자기장 등을 연구하는 역할을 수행하고 있다. 2024년까지 궤도를 유지하기 위한 연료를 가지고 있으며, NASA 고다드 우주 비행 센터(Goddard Space Flight)에서 우주선의 개발과 운영을 통합하여 관리하고 있다. 2015년 2월에 발사한 DSCOVR 위성은 ACE 위성과 동일한 L1 라그랑주점 주위의 리사주 궤도에 위치하여 ACE 위성의 후속 위성 역할을 수행하고 있다. 우주전파센터는 ACE 위성에서 이어 DSCOVR 위성 데이터를 수신하고 있다.

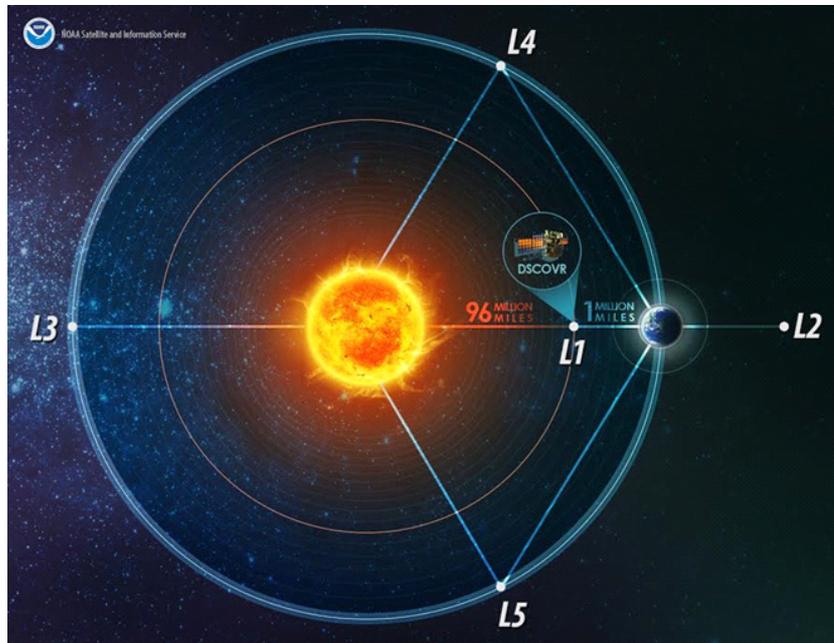


그림 4 DSCOVR 위성 위치와 라그랑주점

유럽우주국은 1975년 5월에 프랑스, 독일, 영국 등 유럽 10개국이 공동으로 설립한 우주개발기구이며, 현재 19개국이 참가하여 우주발사체 개발 중심의 업무를 추진하고 있다. 1995년 12월에 미국 NASA와 공동 프로젝트를 통해 SOHO 위성을 L1 라그랑주점으로 발사하여 태양 관측을 수행하고 있다. SOHO 위성은 STEREO 위성과 함께 태양에서 나오는 CME를 LASCO(Large Angle Spectrometric COronagraph) 관측장비를 이용하여 관측하고 있다. LASCO는 태양을 임의의 물체로 가려 태양으로부터 오는 빛을 차단시켜 태양 주위의 코로나 영역을 볼 수 있도록 해주는 관측

장비이다. LASCO C2는 태양에서 8,400,000km까지 영역을 주로 관측하며, C3는 태양에서 45,000,000km까지의 영역을 관측할 수 있다. LASCO 영상의 가운데 흰 원은 실제 태양의 크기를 보여주며, 주위의 검은 영역은 태양의 밝은 빛을 가릴 수 있는 원판 역할을 한다.

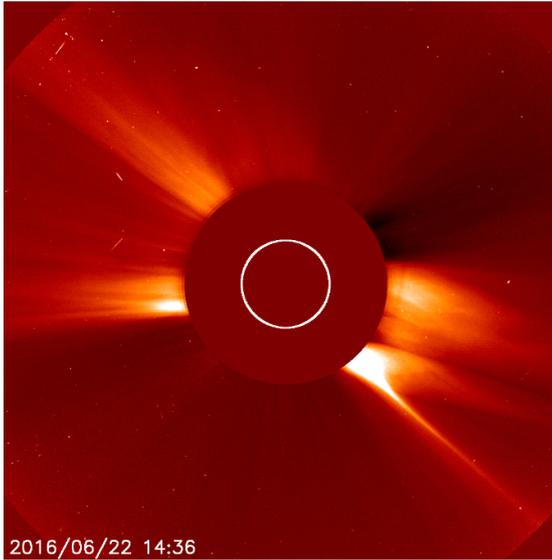


그림 5 SOHO LASCO C2 영상

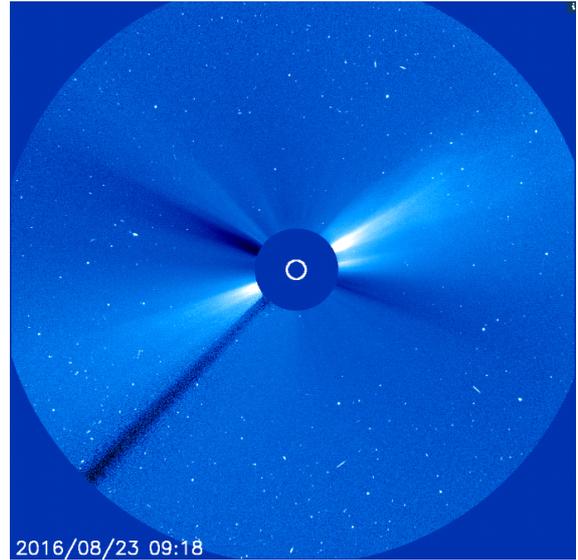


그림 6 SOHO LASCO C3 영상

제3절 CME 예보 현황 및 문제점

우주전파센터는 CME의 분석 및 예측을 위해 모델 개발 연구를 수행하고 있으며, 모델 산출물과 실제 태양풍 관측 자료를 분석하며 지자기교란 예보를 위한 노력을 수행하고 있다. 2013년에는 태양관측 위성(SOHO, STEREO)의 실시간 코로나그래프 관측 자료를 수집하고 이를 활용하여 CME 발생을 자동으로 인식할 수 있는 모델을 개발하여 CME의 방향 및 초기속도를 자동으로 분석하는 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 1시간 주기로 실행되도록 개발되었고, 각 위성영상으로부터 각각 CME의 발생을 자동검출하고, 그 결과를 이용하여 3차원 CME 물리량을 산출하도록 개발되었다. 산출된 결과는 각 위성 영상별로 CME의 투영된 물리량인 속도, 방출방향(Position Angle, PA), 방출폭(Width), 방출 시각을 산출하도록 하였고, 이를 바탕으로 각 영상의 자료를 결합하여 3차원 물리량인 방출 방향(ϕ , θ)과 3차원 방출속도, 방출 각을 산출하도록 하였다. 하지만 이 모델은 실제 CME 인식률이 낮으며, 2015년 이후 STEREO-B 위성의 관측 자료가 수신되고 있지 않아 분석 결과의 정확도가 매우 낮은 상태이다.

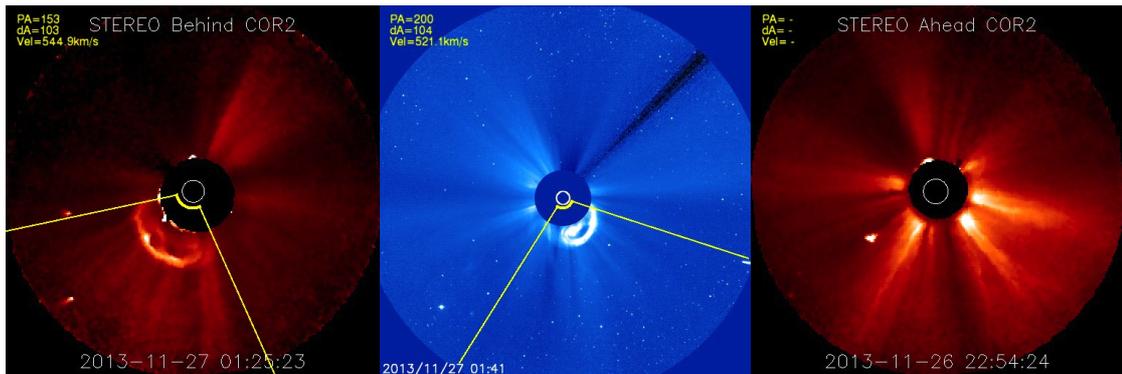


그림 7 CME 자동분석 모델(STEREO-B(좌), SOHO/LASCO C3(중앙), STEREO-A(우))

또한 STEREO-A 위성은 매년 22° 씩 서쪽으로 이동함에 따라 2022년경에는 지구 정면에 위치할 것으로 예상되어 태양 뒷면을 관측할 수 있는 위성이 없어질 것으로 보인다. 따라서 STEREO 위성의 후속 위성이 발사되지 않는다면 2022년경에는 1차원 영상 분석만을 통해서 CME의 속도와 방향 등을 분석해야 하는 잠재적인 문제점을 가지고 있다.

우주전파센터는 태양풍 이동경로 예측모델인 Enlil, IPS, Enlil-IPS 모델들을 운영하고 있으며, 코로나물질 이동경로 예측모델 개선을 통해 모델 정확도를 개선하기 위한 노력을 수행하고 있다. Enlil 모델은 조지메이슨(George Mason University, GMU) 대학의 Dusan Odstcil 박사에 의해 개발되었으며, 태양 인접 영역(0.1AU)의 태양풍 정보로부터 물리적인 방정식을 풀어 수치적으로 태양풍의 진행을 계산해내는 시뮬레이션 모델이다. 기존의 태양풍 예측 모델인 WSA (Wang - Sheely-Argé) 모델 결과를 Enlil의 입력 자료로 활용하고, CME의 물리적 특성을 규정하는 Cone 모델을 결합하여 지구 방향으로 진행하는 태양풍 및 CME 등의 코로나물질 이동경로 예측하는데 활용하고 있다.

IPS(InterPlanetary Scintillation) 모델은 지구에서 먼 거리에 있는 잘 알려진 전파소스(전파은하 등)를 관측하고 이 신호의 산란을 이용하여 태양 주변의 태양풍의 물리량을 추정하는 방법을 이용하고 있다. 미국 캘리포니아 대학교 샌디에이고(University of California, San Diego, UCSD)의 Jackson 교수는 일본의 관측자료 및 위성에서 관측한 가시광 전천 영상을 바탕으로 의학에서 사용되는 단층 촬영기법을 활용하여 태양풍의 이동 경로를 예측하는 3차원 IPS Tomography 모델을 개발하였고, 이 모델을 우주전파 환경 예보에 활용하는 개발 연구를 수행하고 있다.

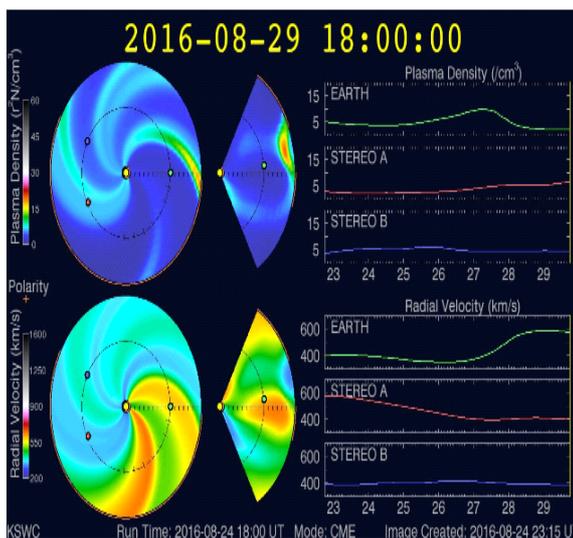


그림 8 Enlil 모델

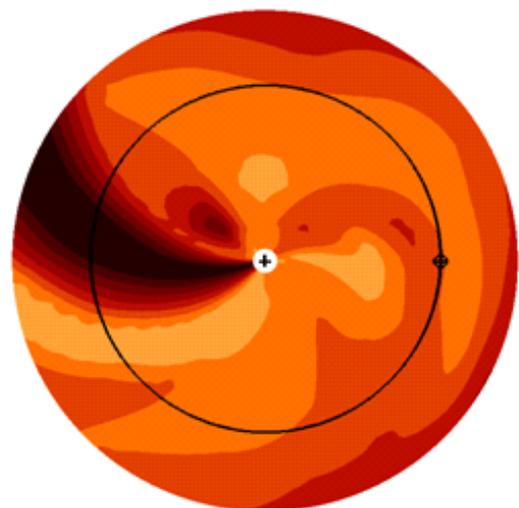


그림 9 IPS 모델

IPS-Enlil 통합모델은 수치예측 태양풍 모델(Enlil)과 관측기반 태양풍 모델(IPS Tomography)을 통합한 태양풍 예측 모델이다. IPS 관측 자료를 기반으로 생성된 IPS Tomography 정보 중 태양으로부터 0.1AU 거리에 있는 값들을 Enlil의 입력자료 형태로 재가공하면 IPS 관측자료를 기반으로 하는 Enlil 결과를 얻을 수 있다.

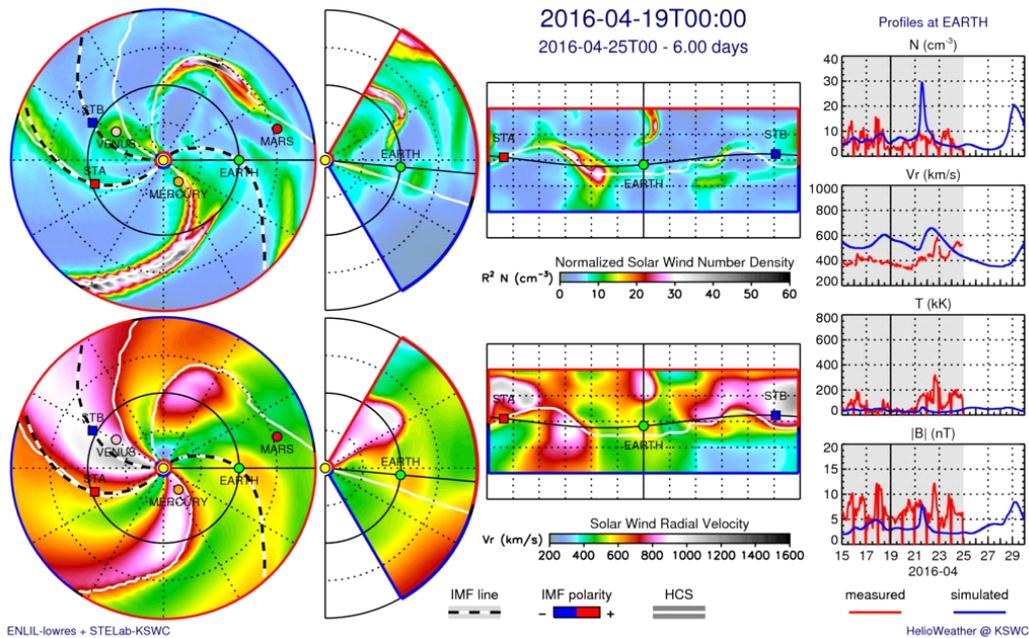


그림 10 IPS-Enlil 통합모델

하지만 위 세 가지 태양풍 이동경로 예측모델 중 가장 현업에 적극적으로 활용중인 Enlil 모델조차 약 16.5시간 정도의 시간 오차가 발생할 수 있어 보다 정확한 예측 결과를 얻기에 어려움이 있다. 또한 IPS 모델과 IPS-Enlil 통합모델은 지상관측장비의 장애에 영향을 받으며, 모델 검증이 충분히 더 이루어져야 할 것으로 현업에서는 판단하고 있다. 뿐만 아니라 CME 예측의 다른 문제점은 CME가 발생한 초기 영상 분석에 의존하기 때문에 CME의 경로를 예측하기 어렵고 정확한 도달시간을 측정하기 어렵다는 것이다. CME를 관측할 수 있는 태양에 가장 가까운 위치는 L1 라그랑주점이며, 태양과 지구사이의 거리를 고려할 때 100:1 수준의 거리에 위치하고 있어 L1 지점에 위치한 ACE 또는 DSCOVR 위성에서 관측된 CME는 불과 30~40분 뒤에 지구자기권에 영향을 미치게 된다.

제4절 EPAM을 활용한 CME 지구 도달 예측 기술 연구

이러한 CME 예보 현황 및 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 CME 발생 시에 동반되는 고에너지입자를 관측할 수 있는 ACE 위성의 EPAM 관측 자료와 CME의 규모, 방향 등의 물리량의 상관성 분석을 통해 지자기교란 예보 정확도를 제고하고자 한다. EPAM은 Electron, Proton and Alpha-particle Monitor의 약자로 미국 NASA에서 운용하는 ACE 위성의 전자, 양성자, 알파 입자 관측기로 여러 에너지 대역의 태양풍 밀도 관측이 가능하다.

ACE/EPAM은 그림 11과 같이 39~53keV 전자량(파랑), 175~315keV 전자량(하늘), 47~68keV 양성자량(빨강), 115~195keV 양성자량(주황), 310~580keV 양성자량(노랑), 795~1193keV 양성자량(회색), 1060~1900keV(초록) 양성자량 등을 보여준다. 이번 연구에서는 CME 발생시 가장 변동폭을 보이는 39~53keV 전자량(파랑)과 47~68keV 양성자량(빨강)에 대해 연구하였다.

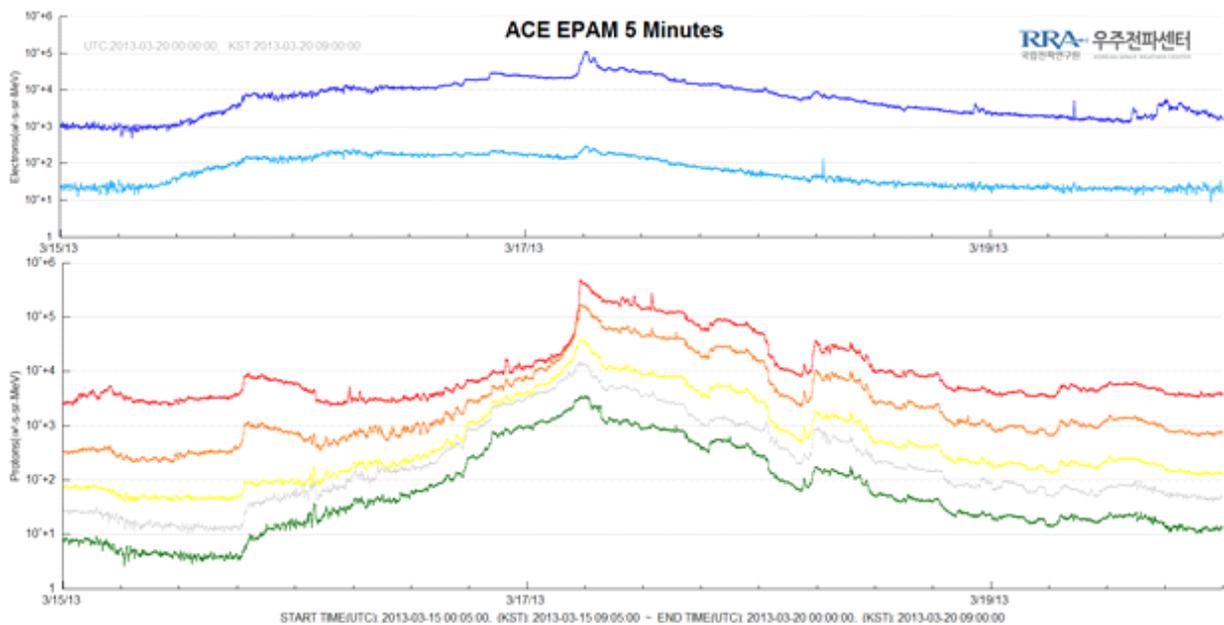


그림 11 ACE EPAM 5분 평균 관측 자료

본 연구의 내용은 다음과 같다. 제 1 장에서는 코로나물질방출(CME)에 대한 기본 설명 및 CME 예보에 대한 현황과 문제점을 파악하고, 제 2 장

에서는 지자기교란 현황 분석을 통해 태양 주기활동에 따른 지자기교란 발생 빈도수를 분석해 본다. 제 3 장에서는 한국과 미국에서 수집한 CME 목록을 비교 분석하고, ACE 위성 자기장-입자 관측기(MAG-SWEPAM)와 전자, 양성자, 알파입자 모니터(EPAM) 관측 자료를 분석하여 EPAM을 이용한 지자기교란 예보 알고리즘을 소개하고, 예보매뉴얼 적용 방안을 제시한다. 제 5 장에서는 본 연구결과의 내용을 정리하고, 향후 추진 방안에 대해 요약한다.

제2장 지자기교란 현황 분석 연구

제1절 지자기교란 발생 현황

지구자기장의 변화는 지구 내부의 변화에 의해 오랜 기간을 주기로 천천히 변화하는 영년변화, 태양에서 오는 자외선, X선 등의 복사로 인해 형성된 외부자기장이 낮 지역과 밤 지역의 자기장의 세기가 다르기 때문에 발생하는 하루를 주기로 변화하는 일변화, 태양에서 발생한 급격한 현상으로 인해 갑작스럽게 변화하는 지자기교란 등이 있다. 이러한 지자기 변화는 평상시 지구자기장에 의해 차단되었던 고에너지의 하전입자들이 지구에 유입되어 인공위성, 통신, 송전설비 등에 문제를 일으키는 등 우리 경제, 사회에 막대한 피해를 입히게 된다.

지자기교란은 중위도와 고위도에서 전리권의 전자밀도를 광범위하게 변화시킨다. 지자기교란에 의해 발생하는 전리권교란은 지자기교란과 같이 발생하며, 지자기교란이 사라진 후에도 일정 시간 지속된다. 특히, 지자기교란의 시작으로부터 오로라 지역에서는 약 10분 후, 중위도의 저녁 시간대에서는 6 ~ 12시간 후에 전리권교란이 시작되어, 짧게는 하루 동안 지속되며 길게는 한 달 간 지속되기도 한다.

지자기교란 정도를 판단하기 위해 사용하는 지수를 국제 지자기교란 지수라(Kp 지수)하며, 1939년 Bartels이 태양입자에 의한 지구 영향을 연속적으로 모니터링하기 위하여 지자기변화 정도를 0 ~ 9 사이 값으로 분류한 값이다. 각 지자기 관측소의 K 지수는 세계시를 기준으로 0시부터 매 3시간 동안의 지자기 변화량 중 수평 성분의 변화량 중 큰 쪽을 택하여 결정된 값을 미리 설정된 준대수 척도와 비교하여 0에서 9 사이의 값을 부여한다.

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Honolulu	0	3	6	12	24	40	70	120	200	300
Godhavn	0	15	30	60	120	210	360	60	1000	1500

표 1 Honolulu와 Godhavn의 K 지수 비교표

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
강릉	0	3	6	12	24	42	72	120	198	300
이천	0	3	6	12	24	42	71	120	198	300
제주	0	3	6	11	22	39	67	112	185	28

표 2 국내지역의 K 지수 비교표

우주전파재난 재난 유형 중 지자기교란은 다른 우주전파재난에 비해 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다. 지난 관측 자료 분석을 통해 4단계 이상 경보 발생 현황을 분석할 때 11년 주기 동안 태양흑점폭발은 약 9회, 태양입자유입은 약 4회 발생하는 것에 비해 지자기교란의 평균 발생 빈도는 약 104회로 가장 빈번히 발생했다. 지자기교란은 전리층교란 및 지자기유도전류 등을 발생시키며 위성·항공·항법·전력·통신 등 모든 산업 분야에 피해를 유발할 가능성이 있다. 1단계 이상 지자기교란의 평균 지속시간은 6시간이며, 2일 이상 교란현상이 지속되는 경우도 많다.

분류	태양흑점폭발	태양입자유입	지자기교란
4단계 이상 발생 횟수 ¹⁾ (11년 평균)	9회	4회	104회
주요 피해분야	위성, 항공, 항법, 방송·통신	위성, 항공 항법, 방송·통신	위성, 항공 항법, 전력, 방송통신
평균 지속시간 (1단계 이상)	48분 ²⁾	7시간 ³⁾	6시간 ⁴⁾

표 3 우주전파재난 상황별 특징 비교

1) 미국 NOAA Space Weather Scales 기준

2) 1975~2014년 GOES X선 관측 자료 기준

3) 1920~2002년 GOES proton 관측 자료 기준

4) 1996~2013년 Kp 지수 관측 자료 기준

지자기교란 발생 빈도수를 확인하기 위하여 교토대학에서 제공하는 지난 1996년부터 2016년 6월까지 20년간 관측된 국제 지자기교란 지수를 분석하였다. 지난 20년간 1단계 이상의 지자기교란은 1,874회 발생하였으며, 연평균 89회가 발생하였다. 지자기교란의 발생 빈도는 태양활동이 가장 활발하였던 2001년에 비해 2003년에 가장 많은 지자기교란이 발생하였다. 3단계 이상 지자기교란은 총 213회 발생하였고, 1단계 이상 지자기교란의 평균 지속시간은 약 7.5시간, 3단계 이상 지자기교란 평균 지속시간은 6.5시간으로 조사되었다.



그림 12 1996~2016년 지자기교란 경보 발생 횟수

또한, 2016년에는 태양흑점폭발이 16회, 태양입자유입이 1회 발생한 것에 비해 지자기교란이 총 90회 발생하였다. 흑점의 생성과 활동이 감소함에 따라 태양흑점폭발과 태양입자유입 경보가 줄어든 것으로 보이며, 이에 따라 태양흑점폭발에 의한 CME 발생 비율은 감소하였으며, 코로나홀에 의한 지자기교란 비율이 높아졌다. 그리고 2015년에 비해 87회 감소하며 2004년과 유사한 형태의 감소를 보이며 태양활동 극소기로 진입한 것으로 분석되었다.

구분	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	계
태양흑점폭발(X선)	13	3	-	-	-	16
태양입자유입(양성자)	1	-	-	-	-	1
지자기교란(Kp지수)	62	24	4	-	-	90
계	76	27	4	-	-	107

표 4 2016년 단계별 경보 발령 내역

제2절 지자기교란 피해 사례

코로나홀의 고속태양풍에 의한 지자기교란에 비해 CME에 의한 지자기교란은 상대적으로 강한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 강력한 지자기교란에 의해 변전시설 손상, 광역 HF 통신 장애, 극항로 항공기 방사능 피폭, GPS 위치 기능 장애 등 전 세계적으로 많은 피해를 발생시킬 수 있어 이에 대한 대비가 절실한 상황이다. 지자기교란에 의한 대표적인 피해 사례로는 1989년 3월 14일에 발생한 캐링턴 자기폭풍에 의해 전 세계적으로 발생한 피해가 있으며, 2003년 10월에 발생한 할로윈 자기폭풍으로 인해 미국에서는 통신 두절로 인한 항로 제한, 아프리카 대륙의 광역 HF 통신 장애, 일본 위성통신 장애 등이 보고되었다. 또한 향후 10년간 캐링턴 자기폭풍급(-1760nT) 이상의 지자기교란 발생 확률은 6.3%이며, 캐링턴 자기폭풍의 절반 수준(-850nT) 급의 지자기교란 발생 확률은 12%로 예측되고 있다. 2010년 국제보험협회 Lloyd 보고서에 따르면 강력한 지자기교란 발생 시 2.6조\$(약 3,000조원)의 피해가 있을 것으로 추정하고 있다. 그리고 2011년 9월 서울 일부 지역에서는 강제순환정전에 따라 30분간 정전이 되었으며, 이에 따라 약 610 억원의 피해가 발생한 것으로 추산 보고되었다.



그림 13 2003년 10월 할로윈 폭풍에 의한 전 세계 피해 사례

제3장 CME 지구 도달 예측 기술 연구

제1절 미국 GMU의 CME-ICME 목록 분석

CME에 의한 지구영향 분석을 위해 미국 조지메이슨 대학(GMU)과 한국의 우주전파센터(KSWC)의 CME 목록을 수집하였다. 먼저 GMU는 Enlil 모델의 개발자인 Dusan Odstrcil 의 소속대학으로 CME와 행성간 CME(Interplanetary CME)가 일치되는 CME 목록을 보유하고 있다. 태양에서 발생한 CME가 태양과 지구사이의 행성간공간을 이동하여 지구에 도달한 경우 이를 행성간 CME 또는 ICME라고 부른다. 2007년부터 2014년까지 총 66회의 ICME가 관측되었으며, ICME의 발생 원인을 분석한 결과 흑점폭발에 의한 CME는 42회, 필라멘트에 의한 CME는 24회로 확인되었다.

태양 활동 극소기였던 2007~2008년에는 필라멘트 분출에 의한 ICME가 2회 관측되었으나, 흑점 폭발에 의한 ICME는 관측되지 않았다. 태양 흑점이 관측되지 않은 무흑점 기간으로 인해 흑점 폭발에 의한 CME가 발생하지 않은 것으로 확인된다. 이후 태양활동은 극대기로 진행함에 따라 흑점 폭발에 의한 ICME 관측 건수는 점차 늘어 2013~2014년에는 흑점폭발에 의한 ICME가 각각 10회 관측되었으며, 필라멘트 분출에 의한 ICME도 2011~2012년에 각각 5회 관측되며 태양활동 극대기에는 극소기에 비해 ICME 발생 빈도수가 높은 것으로 분석되었다. 이는 필라멘트 분출의 발생 횟수도 극소기보다 극대기가 많다는 것을 의미하며, 필라멘트의 활동성도 극대기가 됨에 따라 활발했다는 것으로 분석된다.

발생년도	흑점폭발	필라멘트
2007	0	1
2008	0	1
2009	4	1
2010	5	4
2011	6	5
2012	7	5
2013	10	4
2014	10	3
총	42	24

표 5 2007~2014년 관측된 미국 GMU의 CME-ICME 목록

제2절 한국 우주전파센터(KSWC)의 CME CATool 분석

한국의 우주전파센터는 2013~2015년에 걸쳐 태양에서 발생한 CME의 지구영향 여부를 분석하기 위해 CATool을 이용하여 CME의 속도와 방향 등을 분석하였다. CATool은 미국 SWPC에서 개발한 CME 분석 도구로 분석한 결과는 Enlil의 입력자료로 활용할 수 있다. CATool은 1개의 위성 영상을 이용하여 CME의 특징을 분석한 Cone Tool이라 불리는 초기 운용 체계로부터 발전되었다. Cone Tool은 분석 결과의 심각한 모호성으로 인하여 사용되지 않았다. Cone Tool과는 다르게 CATool은 STEREO-A, B 와 SOHO-LASCO의 3가지 위성 영상을 사용한다. 간단하고 사용하기 쉬운 CATool의 운용 환경을 이용하여 3가지 위성 영상을 분석하여 정확하게 ENLIL 입력 환경변수를 결정할 수 있다. CATool의 사용자 환경은 그림 14에서 볼 수 있다.

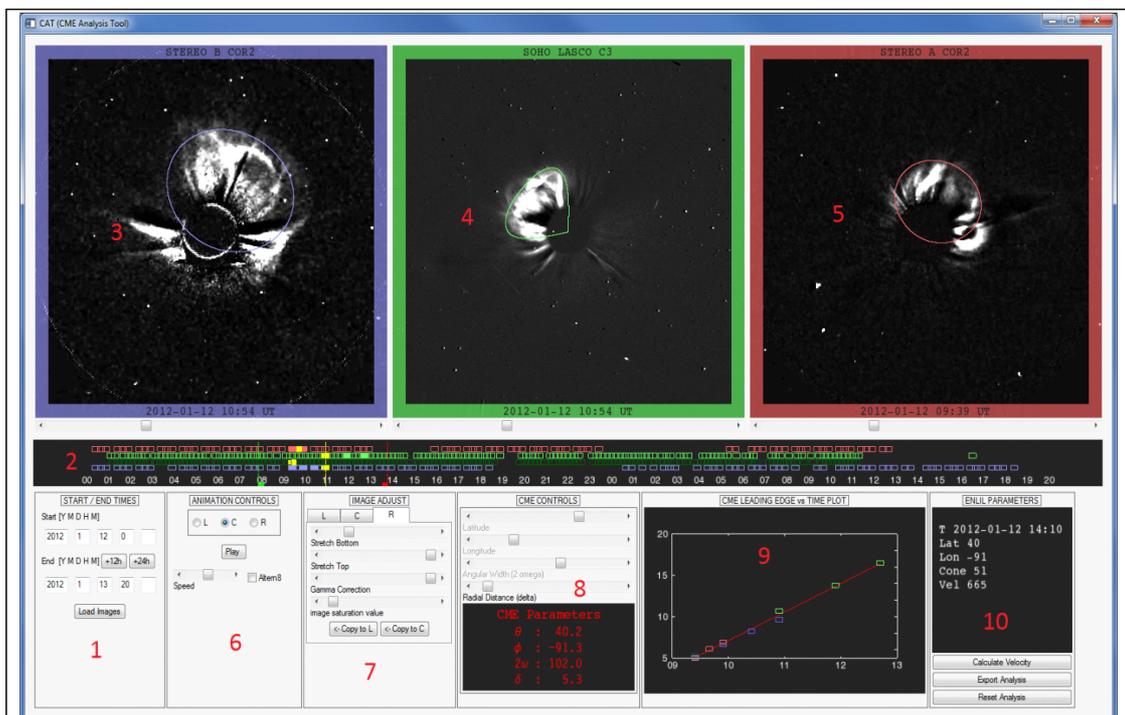


그림 14 CATool 운영자환경(GUI) (1) 시작/종료 시각 위젯 (2) 영상 시각표 (3-5) STEREO-B, LASCO, STEREO-A 영상 (6) 동영상 조절기 (7) 영상 조정 위젯 (8) CME 조절기 (9) 시간에 따른 CME 전면부 위치 그래프(10) Enlil 환경 변수와 출력 위젯

한국의 우주전파센터는 2013~2015년에 걸쳐 총 219개의 CME를 분석하였다. 219회의 CME 중 흑점폭발이 원인인 CME는 82회 관측되었으며, 필라멘트는 72회로 분석되었다. 발생 원인은 우주전파센터에서 제공하고 있는 3일 예보 분석문을 기준으로 분석하였다. 2013년은 태양 활동 극대기로서 2015년에 비해 CME 발생이 잦았으며, 또한 CATool 도입 초기로 태양 측면에서 발생한 CME 분석도 많았던 것으로 확인된다. 지구에 도달한 CME는 3일 예보문의 예보관 분석 결과에 의해 발생 원인과 지구 도달 시간을 확인하였다. 2013~2015년 동안 흑점폭발에 의해 발생한 CME는 34회 지구에 도달하였으며, 필라멘트 분출에 의해 발생한 CME는 20회 지구에 도달하였다. 태양활동 극대기에는 흑점폭발에 의한 CME가 필라멘트 분출에 의한 CME보다 많이 관측된 것으로 분석된다.

발생년도	CATool 분석	태양 발생 CME			지구 도달 CME	
		흑점폭발	필라멘트	기타	흑점폭발	필라멘트
2013	113	35	52	7	11	8
2014	68	33	15	2	12	6
2015	38	14	5	2	11	6
총	219	82	72	11	34	20

표 6 2013~2015년 관측된 한국 KSWC의 CME-ICME 목록

제3절 GMU-KSWC의 CME-ICME 관측자료 비교 분석

GMU와 KSWC의 CME-ICME 목록 중 일치하는 CME에 대해 CME의 물리적 특성 및 지자기교란의 최대값을 조사하였다. 표 7은 2013~2014년에 관측된 양 기관의 CME-ICME 목록이 일치하는 경우이며, 표 8은 KSWC의 CME-ICME 목록이다. 흑점의 발생일시(UT), 흑점폭발의 세기, 흑점폭발의 발생 위치, 지구 도달속도, 도달시간, 지자기교란 최대값(Kp)이 기록되어 있다.

발생일시(UT)	흑점폭발세기	위치 (위도, 경도)	도달속도 (km/s)	도달시간 (시:분)	지자기교란 최대값(Kp)
13/03/15 07:12	M1.2	N09W05	497.4	46:18	6(G2)
13/04/11 07:24	M6	N10W01	411.2	62:36	3
13/06/05 09:12	M1.3	S28W62	423.8	29:48	6(G2)
13/07/03 07:36	M1	S11E48	335.0	58:24	4
13/07/09 15:12	필라멘트	N15E05	395.5	73:18	5(G1)
13/09/29 22:12	필라멘트	N10W30	516.6	51:03	6(G2)
13/10/25 15:12	X2	S08E59	354.1	87:48	3
13/11/19 21:15	X1	S13W79	350.3	78:44	3
14/02/25 01:25	X4	S15E65	435.8	62:35	4
14/03/23 03:48	C3	S14E23	395.4	63:41	4
14/04/02 14:00	M6	N13E41	374.6	67:59	4
14/04/18 13:25	M7.3	S15W42	544.4	45:34	5(G1)
14/04/25 00:48	X1	S17W91	308.4	115:11	4
14/06/04 13:48	필라멘트	S08E03	484.4	74:12	6(G2)
14/08/15 18:36	필라멘트	S17W10	352.6	84:23	6(G2)
14/09/09 00:16	M4.5	N15E14	613.8	70:43	7(G3)
14/11/07 18:08	X1.6	N15E33	467.5	55:21	5(G1)
14/12/17 04:48	M8.7	S19W02	385.1	109:41	5(G1)

표 7 2013~2014년에 관측된 GMU-KSWC의 CME-ICME 일치 목록

발생일시(UT)	흑점폭발세기	위치 (위도, 경도)	도달속도 (km/s)	도달시간 (시:분)	지자기교란 최대값(Kp)
13/02/13 07:48	필라멘트	S30W45	13/02/16 21:00	85:12	4
13/03/20 01:09	C1.5	N10W37	13/03/24 03:18	98:09	2
13/04/26 21:00	필라멘트	S40W20	13/04/30 18:55	93:55	3
13/05/15 10:44	X1.2	N11E63	13/05/18 10:20	71:36	5(G1)
13/05/17 17:51	M3.1	N12E23	13/05/20 09:00	63:09	4
13/05/22 22:25	M5.0	N13W80	13/05/25 18:50	68:25	5(G1)
13/06/28 12:30	C7.3	S17W01	13/06/30 20:30	56:00	3
13/06/30 11:50	B6.5	N19W31	13/07/05 23:00	131:10	4
13/08/18 03:21	M3.3	S07W33	13/08/21 06:30	75:09	4
13/08/20 16:44	필라멘트	S50W30	13/08/24 08:55	88:11	2
13/10/03 09:35	필라멘트	S15E50	13/10/07 10:50	97:15	5(G1)
13/10/06 23:24	필라멘트	S15W43	13/10/09 04:42	53:18	5(G1)
13/10/23 06:19	M4.2	N07E04	13/10/27 07:50	97:31	1
13/10/24 09:28	M9.3	S12E09	13/10/27 22:00	84:32	1
13/12/29 16:00	필라멘트	S25E60	14/01/01 17:10	73:10	4
14/01/05 04:12	M4.0	S08E38	14/01/07 23:00	66:48	3
14/01/08 03:23	X1.2	S09W03	14/01/10 04:30	49:07	3
14/01/14 19:00	필라멘트	N20W20	14/01/19 04:00	105:00	1
14/01/31 01:05	M6.6	S14E41	14/02/03 08:30	79:25	2
14/02/04 09:44	M3.8	S12W12	14/02/08 01:15	87:31	4
14/06/20 01:30	필라멘트	N00E30	14/06/24 07:00	101:30	3
14/06/21 14:00	필라멘트	N20W01	14/06/26 04:30	110:30	2
14/09/03 01:00	필라멘트	N20W10	14/09/07 00:16	95:16	3

표 8 2013~2014년에 관측된 KSWC의 CME-ICME 목록

GMU와 KSWC의 CME-ICME 목록 중 일치하는 경우는 총 18회로 확인되었으며, 이중 지자기교란을 발생시킨 ICME는 10회로 분석되었다. KSWC에서 관측된 23회의 ICME 목록 중 지자기교란을 일으킨 경우는 총 4회였다. ACE 위성의 MAG-SWEPAM 분석 결과 흑점폭발의 세기와 도달 속도, 도달시간과 지자기교란의 최대값은 연관성을 보이지 않았다. 이는 ICME의 자기장 구조 중 특히 남북방향의 행성간자기장 B_z 가 지자기교란을 발생시키는 주요 인자이기 때문인 것으로 분석된다. 또한 도달 속도와 도달 시간과의 상관성도 뚜렷이 보이지 않아 CME가 발생한 위치에 의해서도 도달 시간의 변화가 생기는 것으로 볼 수 있다.

제4절 CME 물리량과 ACE EPAM 관측자료 비교 분석

2013~2014년에 관측된 GMU와 KSWC의 CME-ICME 일치 목록과 KSWC에서 관측된 CME-ICME 목록 중 Kp 최대값이 5이상인 경우에 대해 38~53 keV의 전자와 47~68 keV의 양성자 값과의 비교 분석을 수행하였다. 2013~2014년 기간 동안 지자기교란 1단계(G1, Kp=5) 이상 발생한 경우는 총 14회이며, 이중에서 고에너지 전자와 양성자가 관측된 사례는 6회로 분석되었다. 각 사례에 대한 ACE 위성의 MAG-SWEPAM 자료와 EPAM 자료를 비교 분석하였다.

발생일시 (UT)	발생원인 (폭발세기)	위치 (위도, 경도)	도달속도 (km/s)	도달시간 (시:분)	지자기교란 최대값(Kp)	38-53keV 전자	47-68keV 양성자
13/03/15 07:12	M1.2	N09W05	497.4	46:18	6(G2)	111,000	473,000
13/06/05 09:12	M1.3	S28W62	423.8	29:48	6(G2)	-	-
13/07/09 15:12	필라멘트	N15E05	395.5	73:18	5(G1)	-	-
13/09/29 22:12	필라멘트	N10W30	516.6	51:03	6(G2)	840,000	670,000
14/04/18 13:25	M7.3	S15W42	544.4	45:34	5(G1)	-	-
14/06/04 13:48	필라멘트	S08E03	484.4	74:12	6(G2)	-	-
14/08/15 18:36	필라멘트	S17W10	352.6	84:23	6(G2)	-	-
14/09/09 00:16	M4.5	N15E14	613.8	70:43	7(G3)	-	-
14/11/07 18:08	X1.6	N15E33	467.5	55:21	5(G1)	-	-
14/12/17 04:48	M8.7	S19W02	385.1	109:41	5(G1)	105,000	149,000
13/05/15 10:44	X1.2	N11E63	-	71:36	5(G1)	650,000	203,000
13/05/22 22:25	M5.0	N13W80	-	68:25	5(G1)	1,690,000	433,000
13/10/03 09:35	필라멘트	S15E50	-	97:15	5(G1)	97,400	1,170,000
13/10/06 23:24	필라멘트	S15W43	-	53:18	5(G1)	-	-
13/04/11 07:24	M6.5	N10W01	411.2	62:36	3	91,900	213,000

표 9 2013~2014년에 관측된 G1 이상 발생시킨 CME-ICME 목록

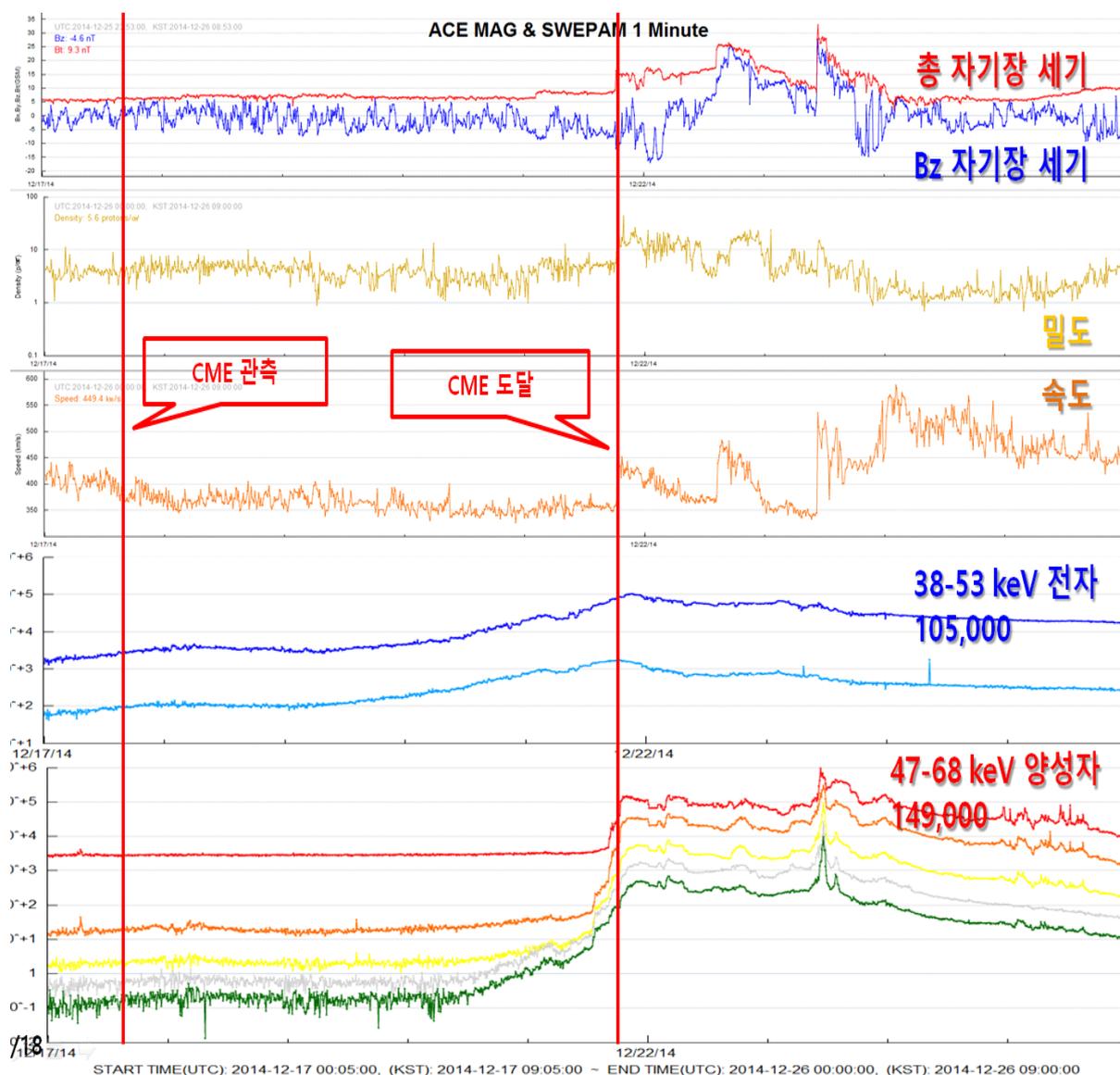


그림 15 2014년 12월 17일 04시 48분에 발생한 ICME 관측자료

2014년 12월 17일 04시 48분에 발생한 CME는 S19W02 에 위치한 흑점에 발생한 폭발에 의해 동반되어, 109시간 41분 뒤에 358.1 km/s 속도로 관측되었으며 지자기교란 1단계가 발생하였다. 이 ICME에 의해 38~53 keV의 전자 밀도는 ICME가 도달하는 시각에 최대값 105,000을 기록하였으며, 47~68 keV의 양성자도 149,000을 기록하였다. 이 이벤트의 특징은 38~53 keV 전자와 47~68 keV의 양성자 모두 ICME의 충격파가 도달한 시간에 최대값을 보였다는 것이다. 이는 기존 2004년과 2014년에 Smith에 의해 보고된 논문과 동일한 결과를 보였다.

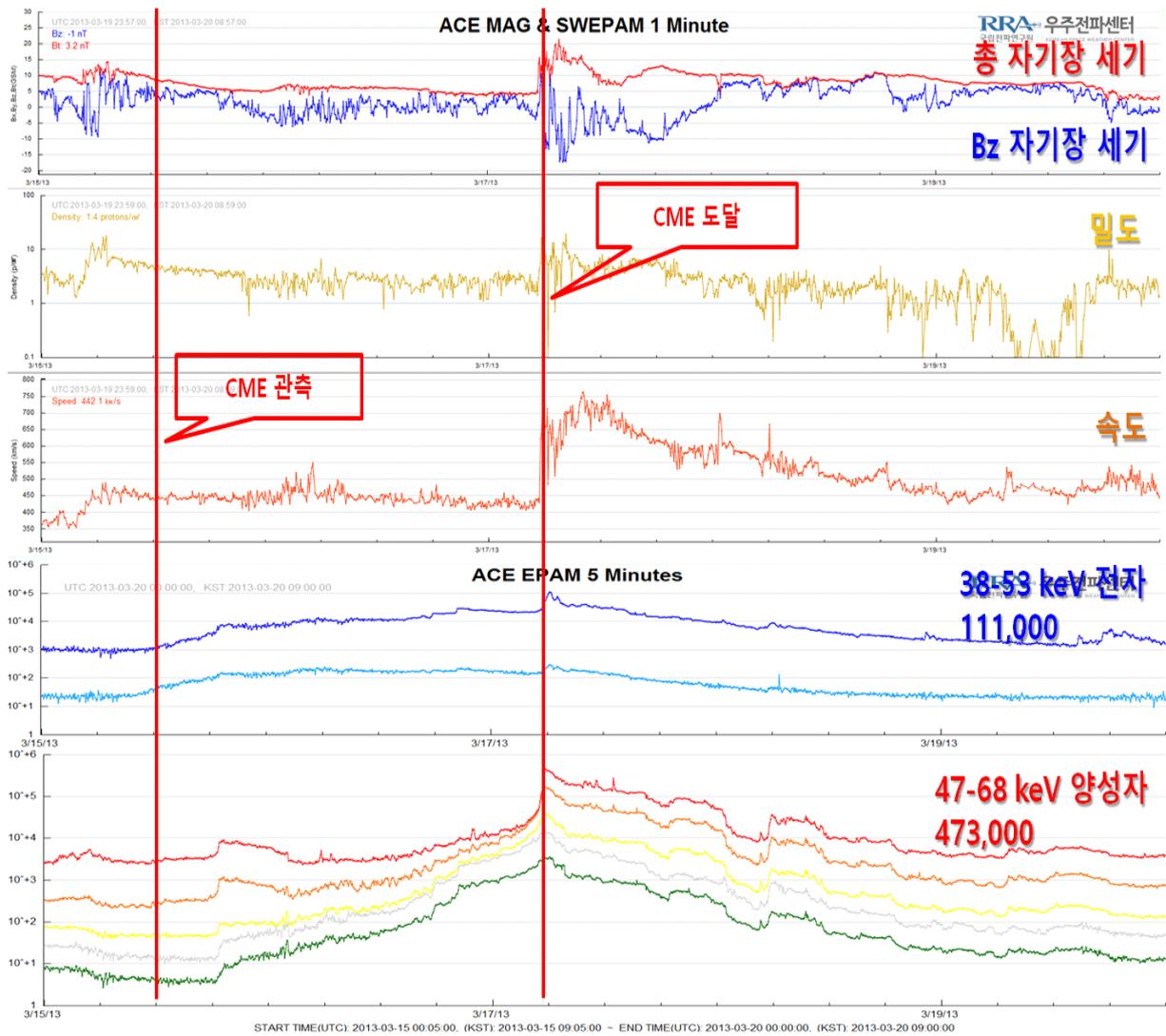


그림 16 2013년 3월 15일 07시 12분에 발생한 ICME 관측자료

2013년 3월 15일 07시 12분에 발생한 CME는 N09W05 에 위치한 흑점에 발생한 폭발에 의해 동반되어, 46시간 18분 뒤에 497.4 km/s 속도로 관측되었으며 지자기교란 2단계가 발생하였다. 이 ICME에 의해 38~53 keV의 전자 밀도는 ICME가 도달하는 시각에 최대값 111,000을 기록하였으며, 47~68 keV의 양성자도 473,000을 기록하였다. 이 이벤트의 특징도 38~53 keV 전자와 47~68 keV의 양성자 모두 ICME의 충격파가 도달한 시간에 최대값을 보였다는 것이다. 또한 위의 두 이벤트는 태양 중앙면에서 발생한 CME로 인해 전자와 양성자가 ICME의 충격파가 도달하는 시간과 동일한 시각에 최대값을 보인 것으로 분석된다. 이를 좀 더 확인하기 위해 다른 위치에서 발생한 ICME 관측 자료를 추가 분석하였다.

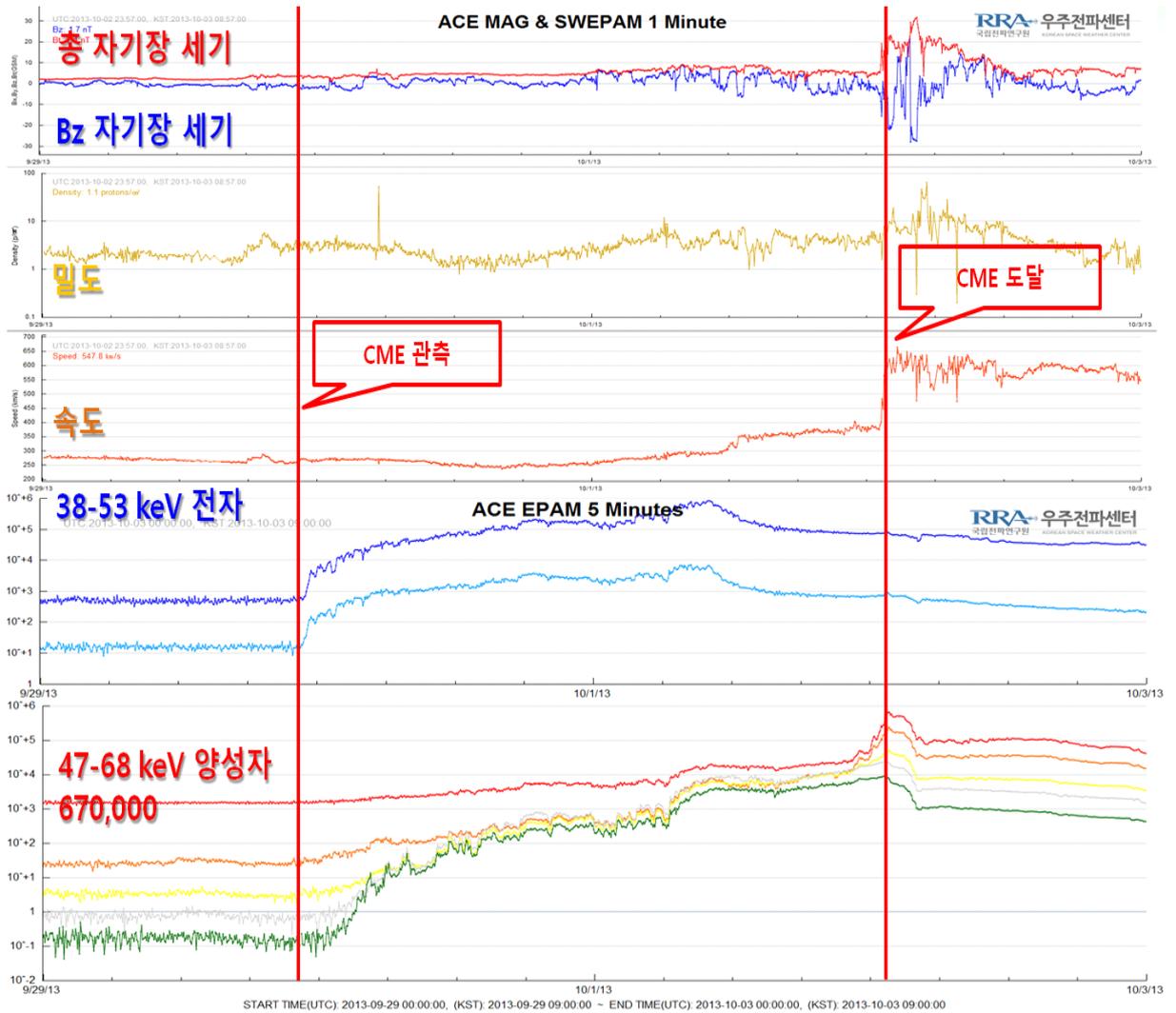


그림 17 2013년 9월 29일 22시 12분에 발생한 ICME 관측자료

2013년 9월 29일 22시 12분에 발생한 CME는 N10W30에 위치한 필라멘트 분출에 의해 발생하여, 51시간 3분 뒤에 516.6 km/s 속도로 관측되었으며 지자기교란 2단계가 발생하였다. 이 ICME에 의해 38~53 keV의 전자 밀도는 ICME의 충격파가 도달하는 시각의 약 12시간 이전에 최대값 840,000을 기록하였으며, 47~68 keV의 양성자는 이전 이벤트들과 동일하게 ICME의 충격파가 도달하는 시각에 최대값 670,000을 기록하였다. 태양 서쪽 30도에서 발생한 CME에 의해 전자밀도가 최대가 되는 시간이 양성자밀도가 최대가 되는 시간보다 짧은 것으로 관측되어 CME 발생의 위치가 서쪽으로 이동함에 따라 전자가 최대가 되는 시점이 빠른 것으로 분석된다.

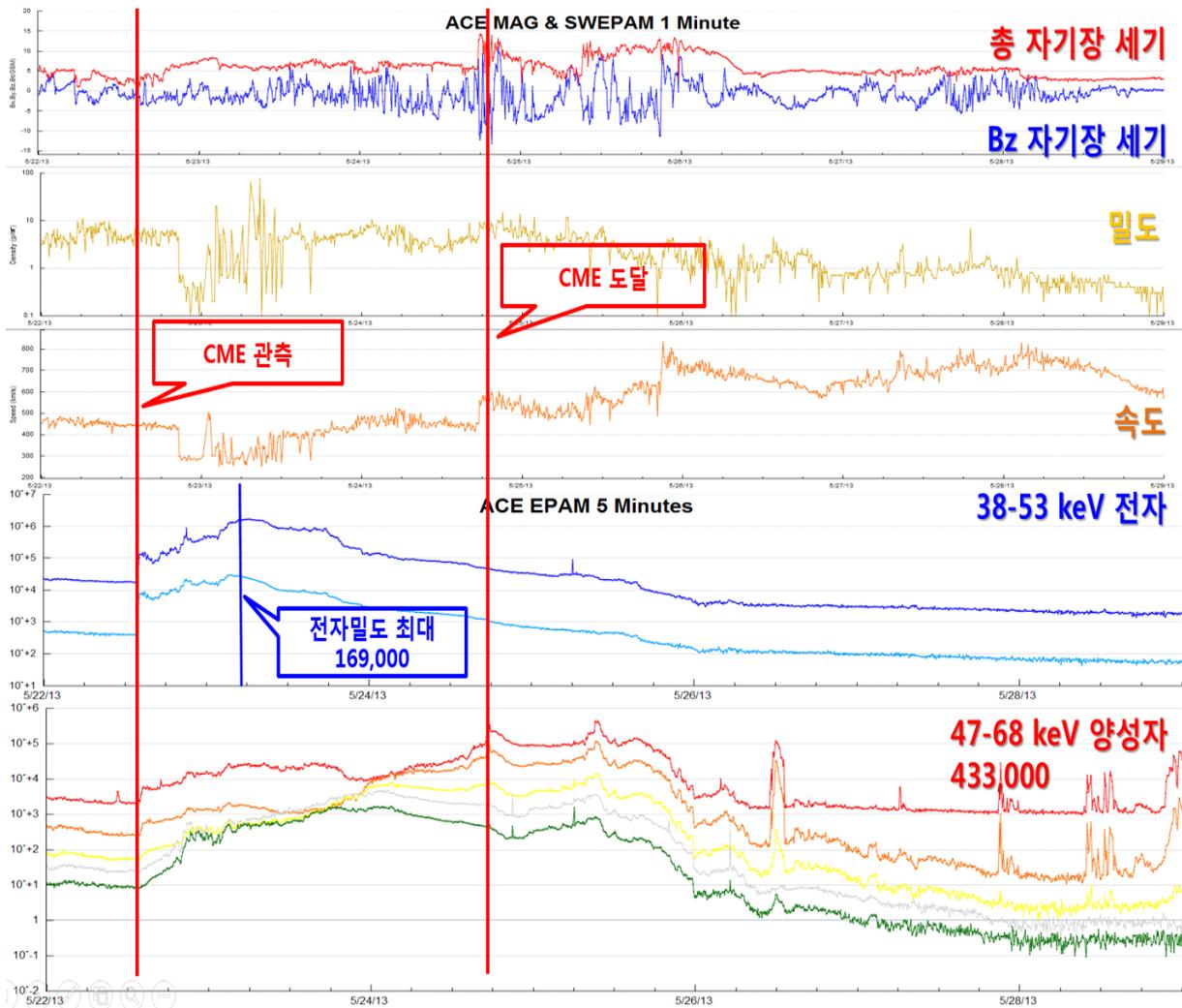


그림 18 2013년 5월 22일 22시 25분에 발생한 ICME 관측자료

2013년 5월 22일 22시 25분에 발생한 CME는 N13W80에 위치한 M5.0 규모의 흑점폭발에 의해 발생하여, 68시간 25분 뒤인 5월 25일 18:50에 관측되었으며 지자기교란 1단계가 발생하였다. 이 ICME에 의해 38~53 keV의 전자 밀도는 ICME의 충격파가 도달하는 시각의 약 36시간 이전에 최대값 169,000을 기록하였으며, 47~68 keV의 양성자는 이전 이벤트들과 동일하게 ICME의 충격파가 도달하는 시각에 최대값 433,000을 기록하였다.

CME의 발생위치가 서쪽 경계로 이동할수록 전자밀도가 최대가 되는 시점이 빨라졌으며 전자밀도의 양도 강한 지자기교란이 발생한 경우 더 많은 전자 밀도가 관측된 것으로 분석되었다.

제5절 ACE EPAM 통계 분석

분석 결과를 예보매뉴얼에 적용하기 위하여 관련 자료를 통계 분석하였다. 예보매뉴얼은 우주전파센터에서 제공하는 3일 예보의 확률값 결정 방법을 기술한 문서로 3일 예보 업무매뉴얼은 일관성있는 예보체계를 확립함으로써 향후 예보기술 발전의 토대를 구축해 나가는 것을 목적으로 한다.

2013~2014년 동안 관측된 ICME에 의해 전자, 양성자가 증가된 사례는 총 41회의 이벤트 중에 7회 관측되었으며, 47~66keV 양성자량이 9×10^4 이상 관측된 경우에는 6회(85%)의 확률로 지자기교란 1단계(G1, Kp=5) 이상이 발생하였다. 그리고 10^5 이상 관측된 경우에는 모든 경우에서 지자기교란 1단계 이상 경보가 발생하였다. 또한 47~66keV 양성자량이 10^5 이상 관측되고 38~53keV 전자량이 4.5×10^5 이상 관측된 경우에는 지자기교란 2단계(G2, Kp=6)가 발생하였다.

47~66KeV 이상 에너지 양성자량 (protons/cm ² /ster/s)	$9 \times 10^4 \leq p$	$10^5 \leq p$
G1 이상	85%	99%

표 10 ACE EPAM 관측량에 따른 지자기교란 1단계 이상 발생 확률

47~66KeV 이상 에너지 양성자량 (protons/cm ² /ster/s)	38~53KeV 이상 에너지 전자량 (electrons/cm ² /ster/s)	G2 이상
$10^5 \leq p$	$4.5 \times 10^5 \leq p$	99%

표 11 ACE EPAM 관측량에 따른 지자기교란 2단계 이상 발생 확률

이는 2004년 Smith et al.에서 제시한 확률표와 다소 차이를 보였다. Smith et al.은 1998년부터 2000년까지 관측된 115개의 CME를 분석하였으며, 이중에서 48회 이벤트에서 47~68keV 양성자량이 증가하였다. 이 논문에 의하면 47~66keV 양성자량이 10^5 이상 3×10^5 미만으로 관측된 경우에는 지자기교란 1단계 이상 발생 확률이 80%로 분석되었으며, 지자기교란 3단계 이상 발생 확률은 40%로 분석되었다. 3×10^5 이상 10^6 미만으로 관측된 경우에는 지자기교란 1단계 이상 발생 확률이 약 90%, 3단계 이상 발생 확률이

50%로 분석되었다. 10^6 이상 관측된 경우에는 모든 경우에서 지자기교란 1단계 이상이 발생한 것으로 보고되었다.

47~66KeV 이상 에너지 양성자량 (protons/cm ² /ster/s)	$10^5 \leq \rho < 5 \times 10^5$	$3 \times 10^5 \leq \rho < 10^6$	$10^6 \leq \rho$
G1~G2	80%	90%	99%
G3 이상	40%	50%	50%

표 12 ACE EPAM 관측량에 따른 지자기교란 발생 확률(Smith et al. 2004)

Smith et al. 과 본 연구의 결과는 23주기 극대기(1998~2000년)와 24주기 극대기(2013~2014)에 발생한 CME를 각각 분석하여 통계 분석 자료의 표본 수가 비교적 적어 23~24주기를 통합한 연구가 추후 필요할 것으로 보인다. 그에 따라 충분한 수의 표본 수를 확보하여 통계적으로 의미있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

제4장 결론

본 연구에서는 코로나물질방출(CME)이 발생할 때 동반되는 고에너지 양성자량과 전자량(ACE/EPAM) 분석을 통해 코로나물질방출에 의한 지자기교란 발생 확률을 결정하였다. 또한 CME 발생 위치에 따라 47~66keV 양성자량과 38~53keV 전자량의 변화 형태가 다르게 나타나는 현상을 연구하였다.

이번 연구에서는 먼저 23~24주기 태양활동주기에 따른 지자기교란 발생 현황을 확인하였다. 교토대학에서 제공하는 1996~2016년 Kp 지수 관측 자료에 따르면 23주기 극대기 중 가장 많은 지자기교란이 발생한 2003년(298회) 대비, 24주기 극대기 중 가장 많은 지자기교란이 발생한 2015년은 전 주기 대비 41% 감소한 177회 발생하였다. 또한 지자기교란의 평균 발생 횟수는 년 89회로 분석되었으며, 1단계 이상 지자기교란 평균 지속시간은 7.5시간으로 분석되었다. 특히, 2016년은 2015년에 비해 87회 감소한 90회의 지자기교란이 발생하며 2004년과 유사한 형태의 감소를 보이면서 태양활동 극소기로 진입한 것으로 분석되었다.

그리고 미국 조지메이슨대학(GMU)와 한국 우주전파센터(KSWC)에서 관측·분석 중인 CME 분석 목록을 수집하여 ACE 위성의 고에너지 전자, 양성자 관측기인 EPAM 관측자료와 비교·분석하였다. GMU에서 관측한 CME-ICME(행성간 CME)의 목록 분석 결과 태양활동 극대기에는 태양흑점폭발과 필라멘트 분출에 의해 발생한 CME의 지구도달 횟수가 극소기에 비해 증가하였다. 또한 흑점폭발에 의해 발생한 CME가 필라멘트 분출에 의해 발생한 CME보다 지구에 도달하는 빈도수가 높았다. 또한 지자기교란의 규모가 큰 수록 EPAM에서 관측된 47~66keV 양성자량과 38~53keV 전자량이 크게 나타나는 것을 확인하였으며, CME 발생 위치가 서쪽으로 이동할수록 38~53keV 전자량이 최대가 되는 시점이 빨라지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 나온 결론은 통계적인 측면에서 샘플수가 부족하여 지난 22주기 자료를 추가하여 분석할 필요성이 있다. 또한, 예보매뉴얼 개선을 통해 예보 현업에 활용할 예정이며 이를 통해 지속적인 확률 검증과 조정을 통해 예보정확도 향상에 기여할 것이다. 또한 지자기교란 및 CME 관측 데이터베이스는 향후 지자기교란의 원인 분석 및 CME 구조 분석에 지속 활용할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] 단파통신 장애 알림서비스 실시 방안 마련, 국립전파연구원, 2015
- [2] 태양폭발과 지상자력계 상관성 연구, 국립전파연구원, 2011
- [3] 우주환경물리학, 안병호, 2002
- [4] Relationship between solar wind low energetic ion enhancements and large geomagnetic storms, Smith et al., 2004
- [5] Solar wind low energy energetic ion enhancements_A tool to forecast large geomagnetic storms, Smith et al., 2014

[부록 1] CME-ICME ACE EPAM 분석 결과

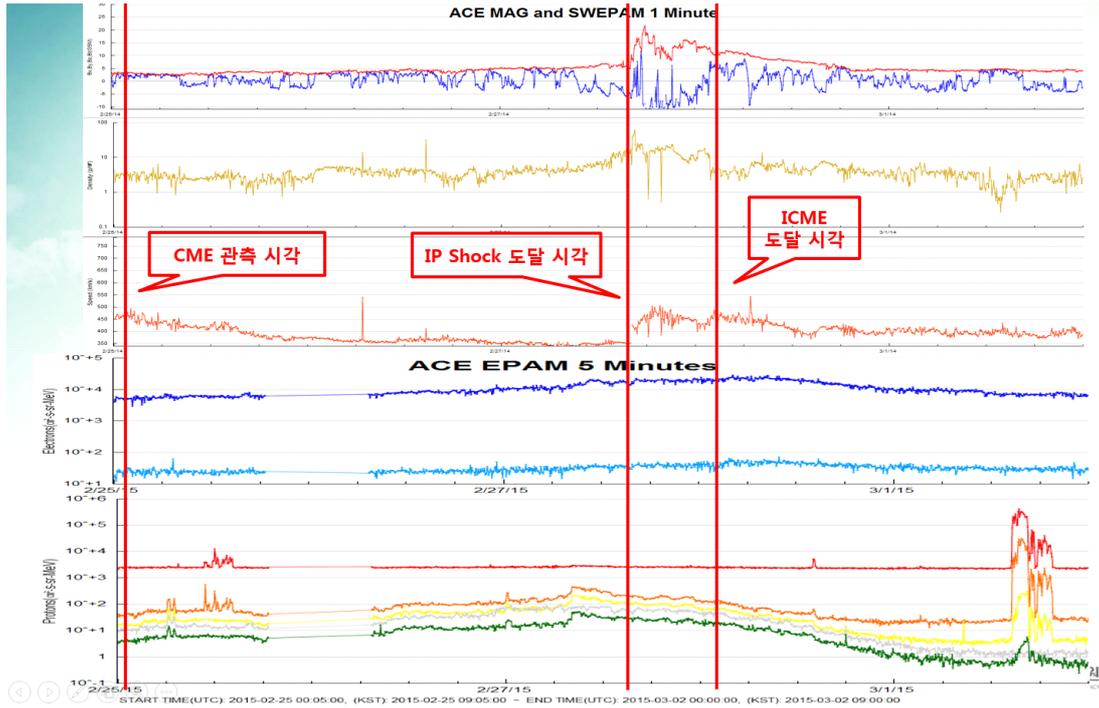


그림 1 2014년 2월 25일 01시 25분에 발생한 ICME 관측자료

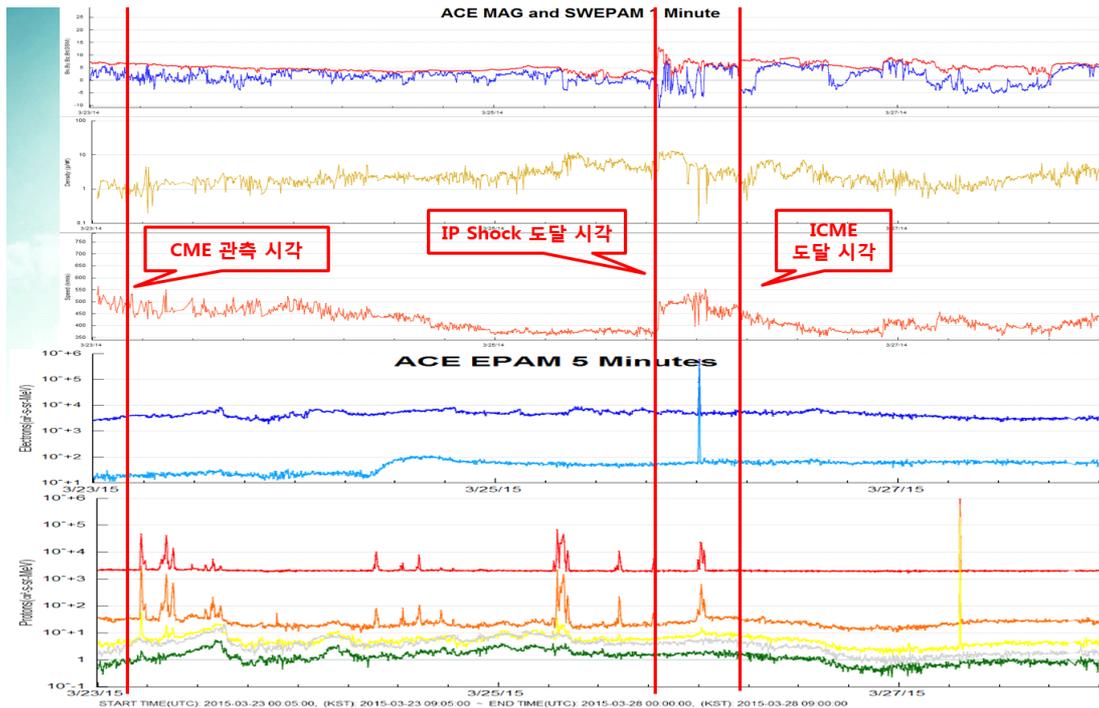


그림 2 2014년 3월 23일 03시 48분에 발생한 ICME 관측자료

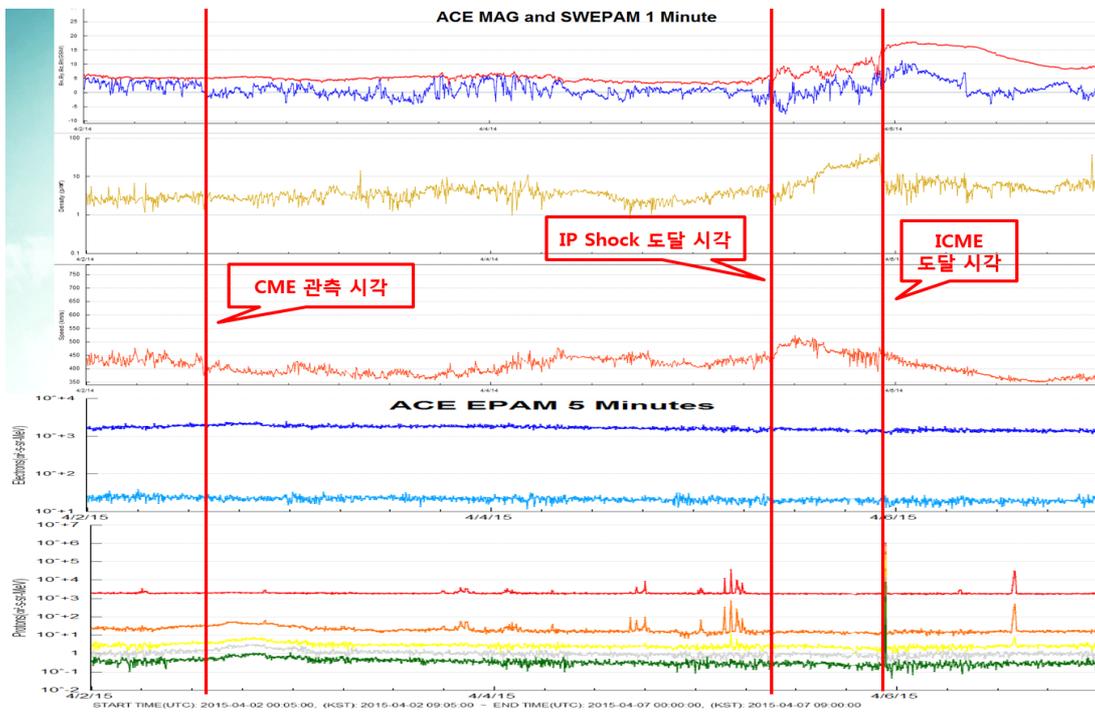


그림 3 2014년 4월 2일 14시 00분에 발생한 ICME 관측자료

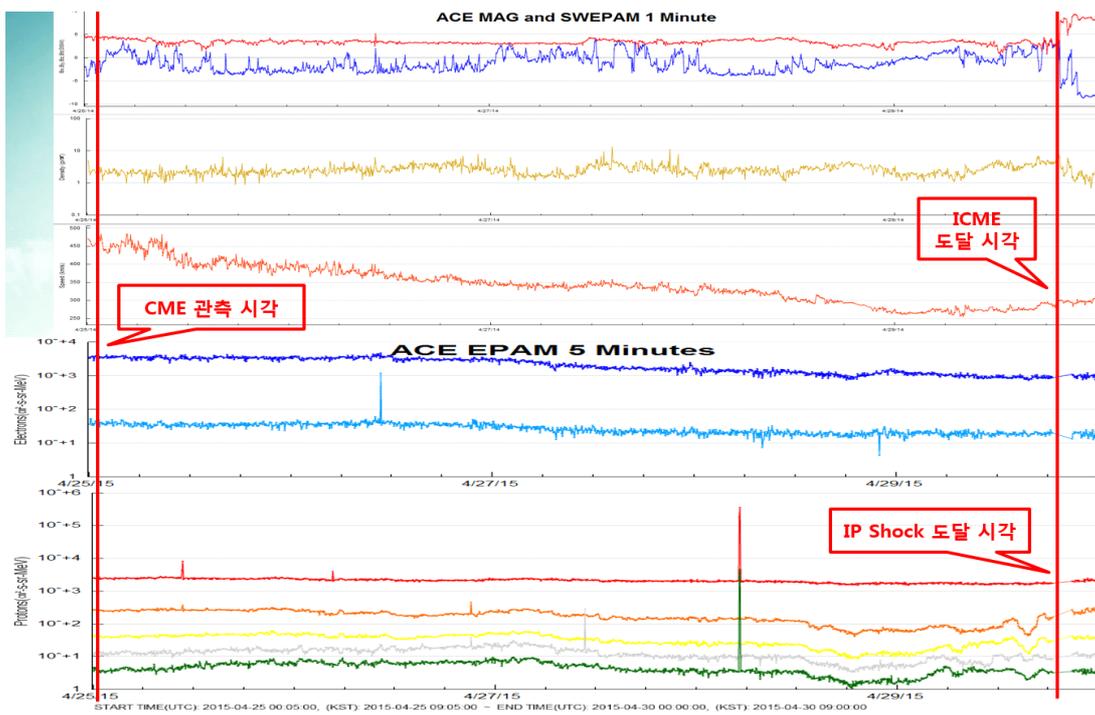


그림 4 2014년 4월 25일 00시 48분에 발생한 ICME 관측자료

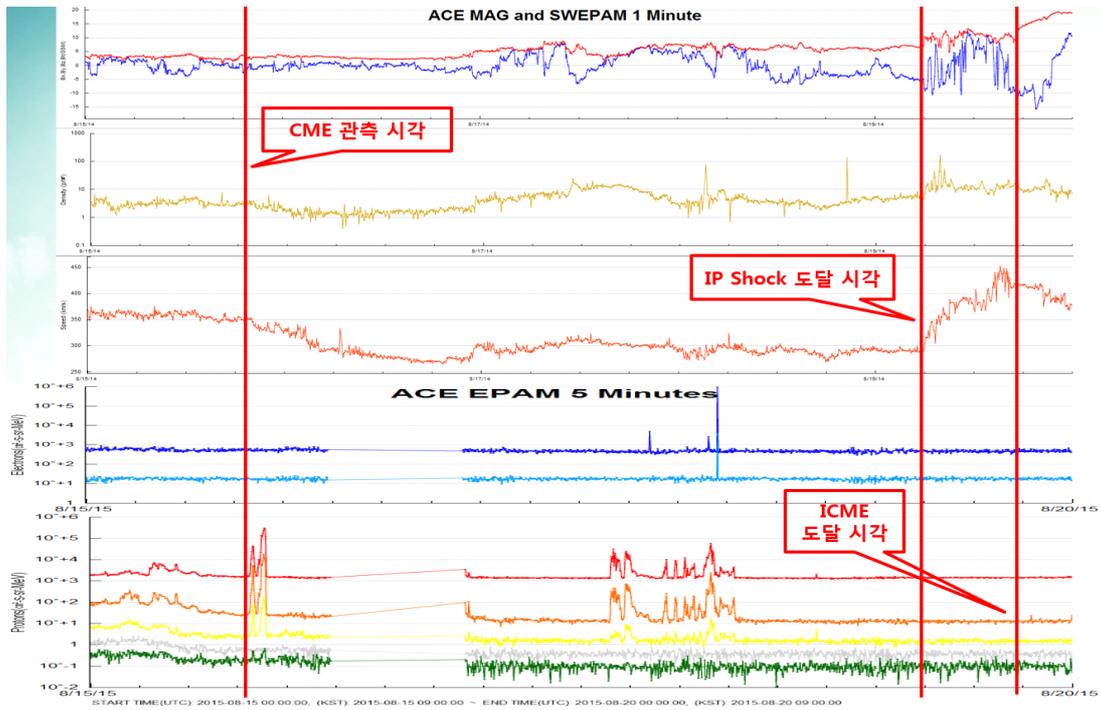


그림 5 2014년 8월 15일 18시 36분에 발생한 ICME 관측자료

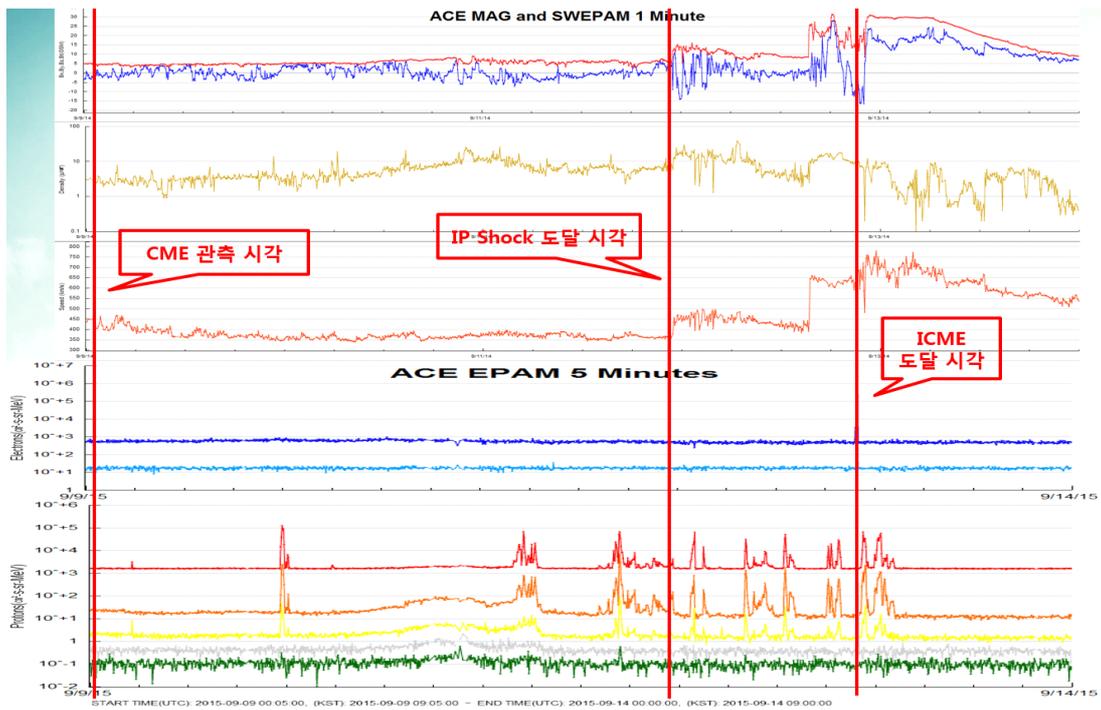


그림 6 2014년 9월 9일 00시 16분에 발생한 ICME 관측자료

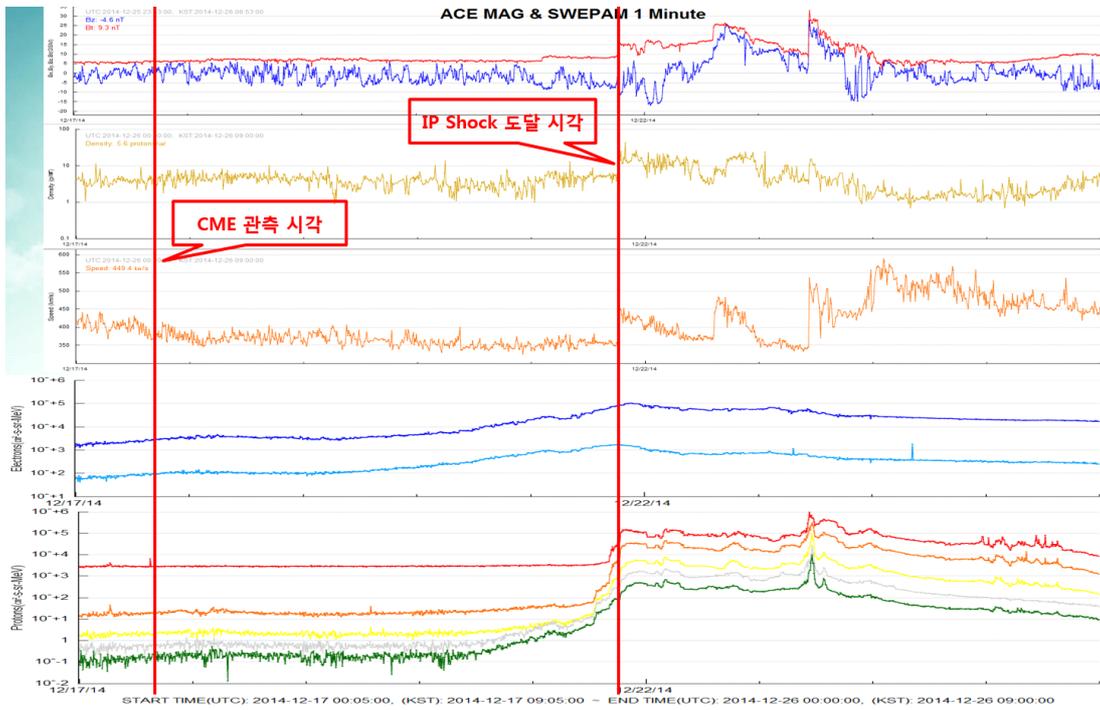


그림 7 2014년 12월 17일 04시 48분에 발생한 ICME 관측자료

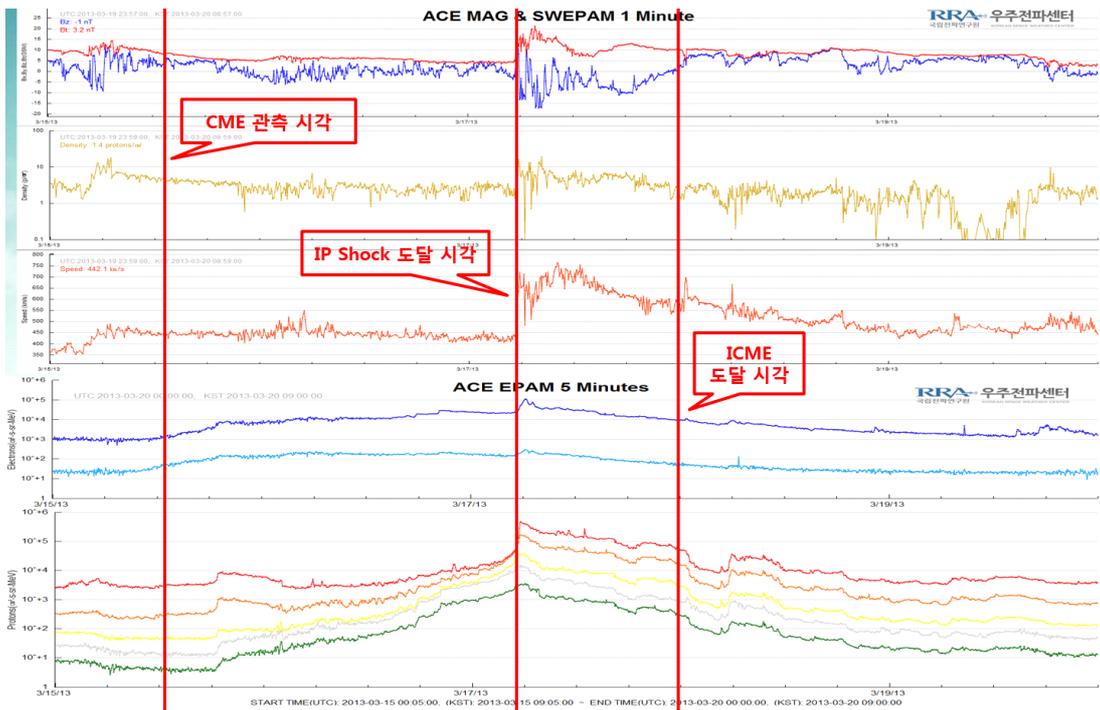


그림 8 2013년 3월 15일 07시 12분에 발생한 ICME 관측자료

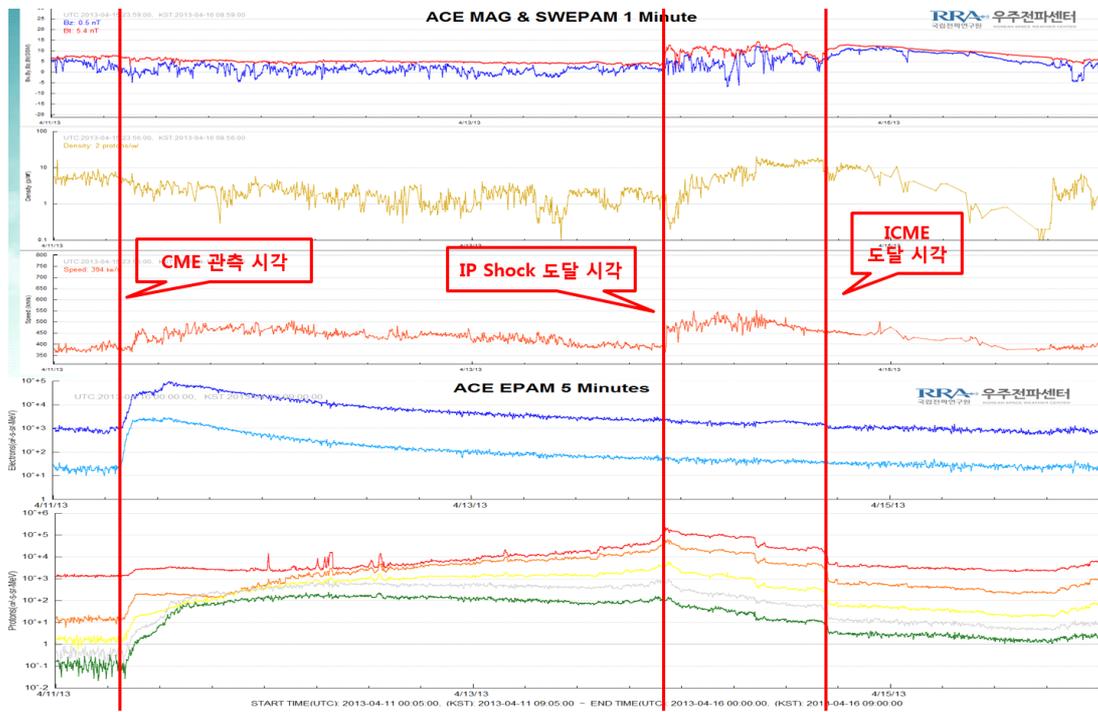


그림 9 2013년 4월 11일 07시 24분에 발생한 ICME 관측자료

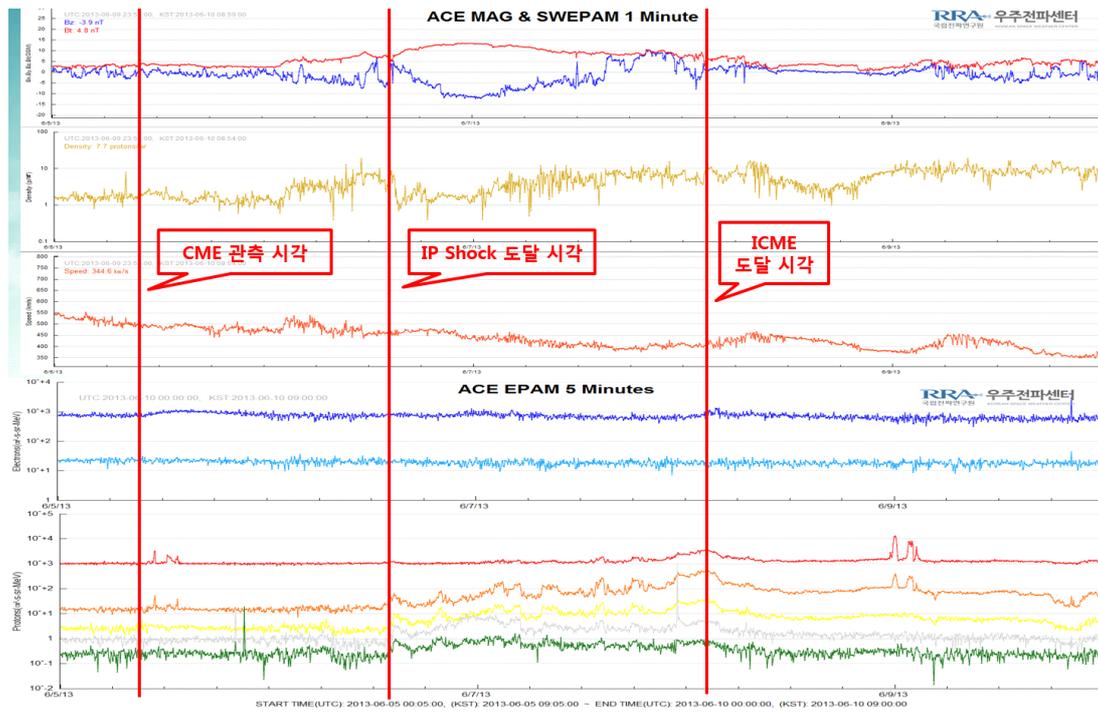


그림 10 2013년 6월 5일 09시 12분에 발생한 ICME 관측자료

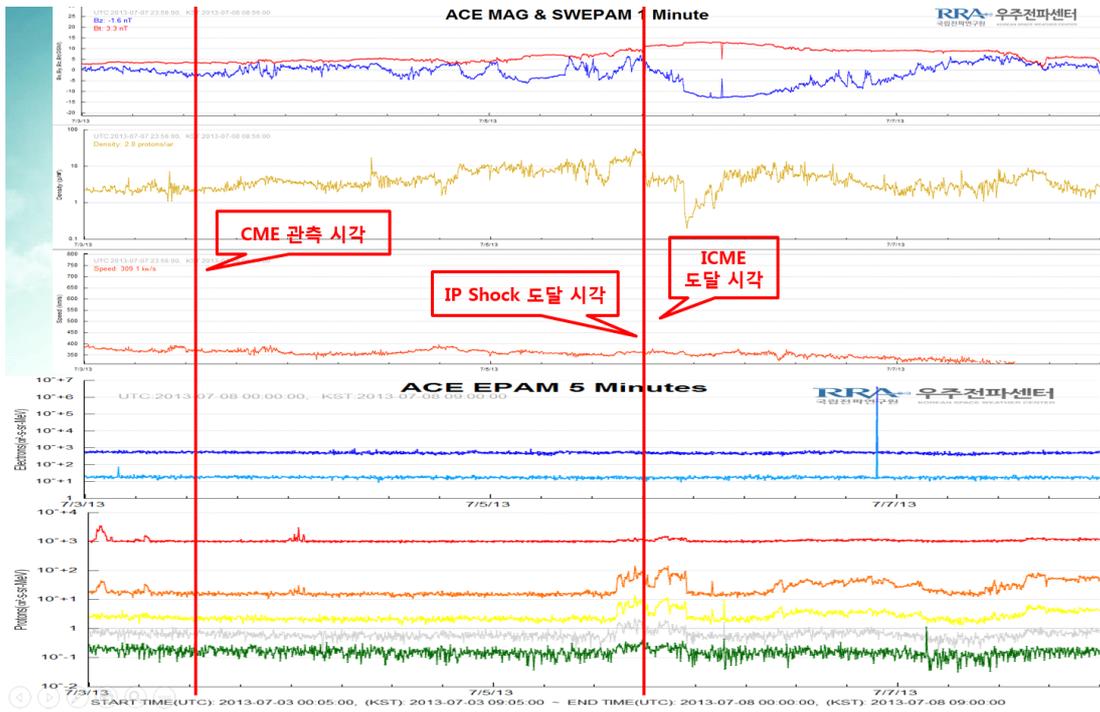


그림 11 2013년 7월 3일 07시 36분에 발생한 ICME 관측자료

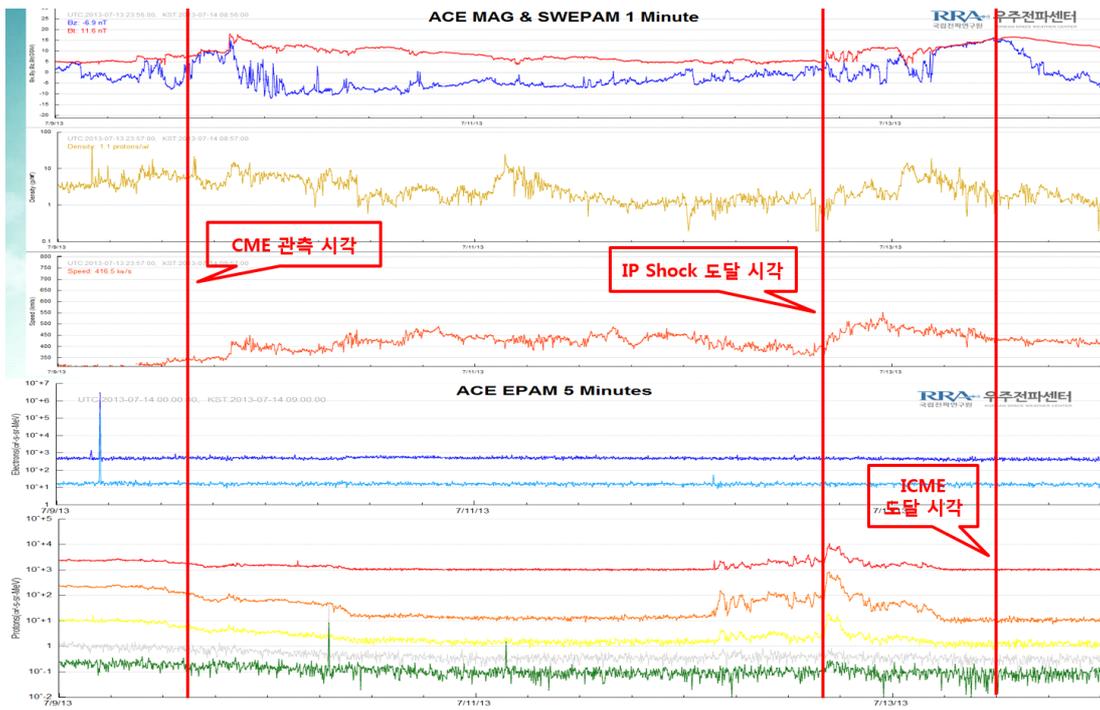


그림 12 2013년 7월 9일 15시 12분에 발생한 ICME 관측자료

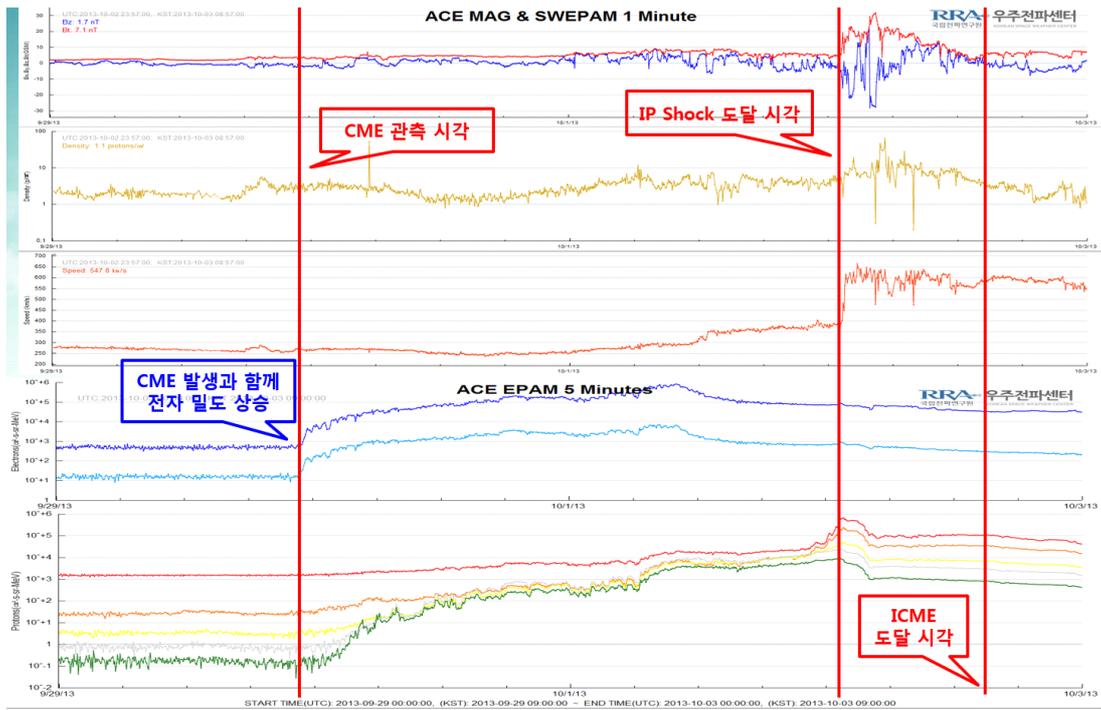


그림 13 2013년 9월 29일 22시 12분에 발생한 ICME 관측자료

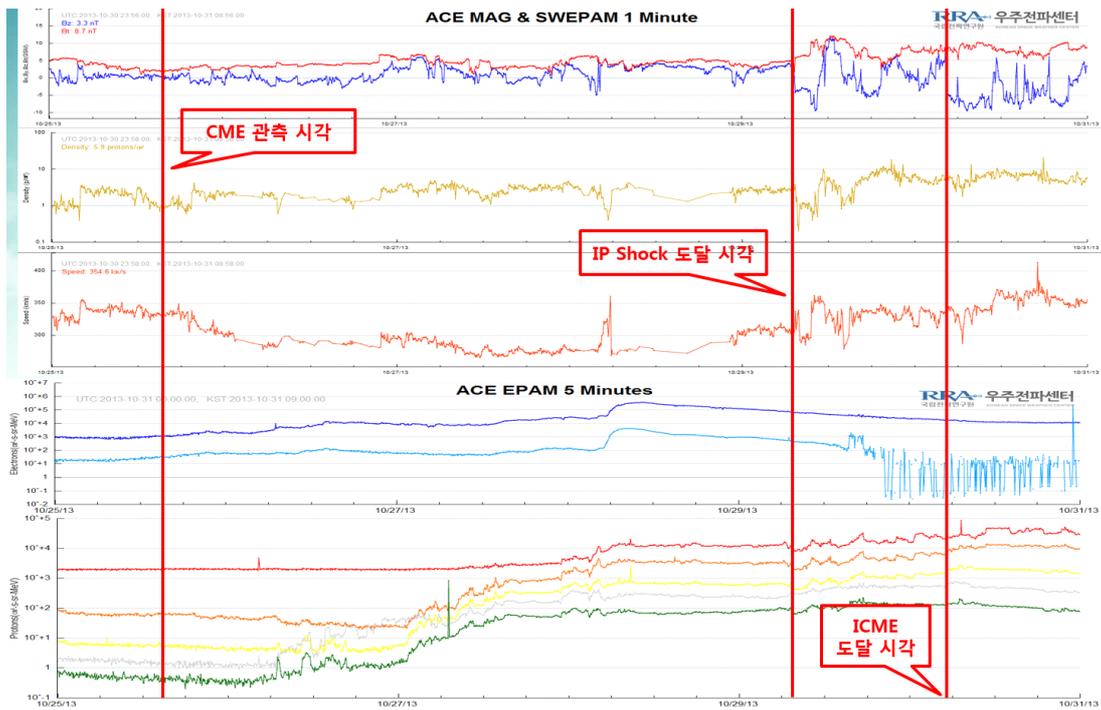


그림 14 2013년 10월 25일 15시 12분에 발생한 ICME 관측자료

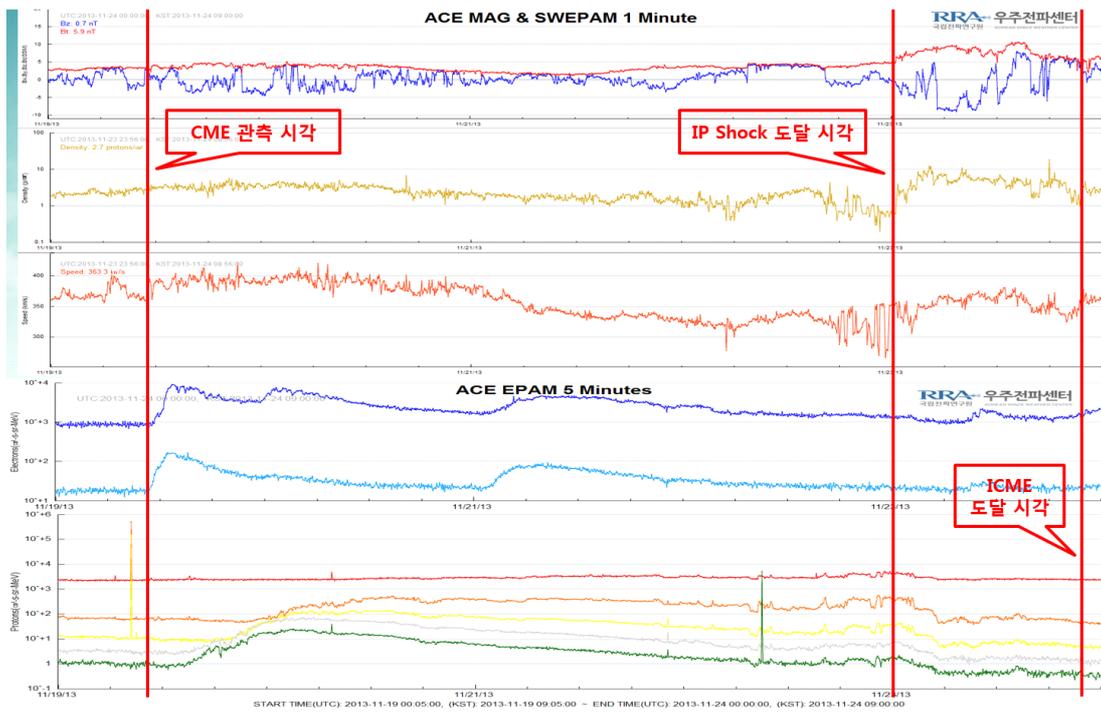


그림 15 2013년 11월 19일 21시 15분에 발생한 ICME 관측자료

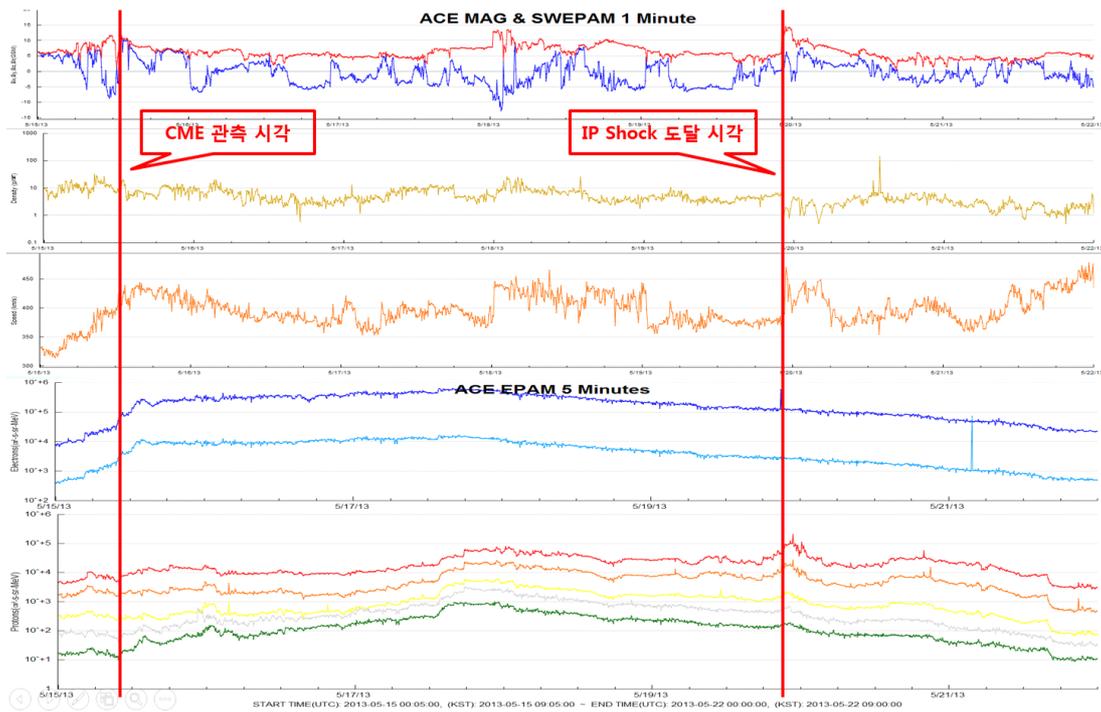


그림 16 2013년 5월 15일 10시 44분에 발생한 ICME 관측자료

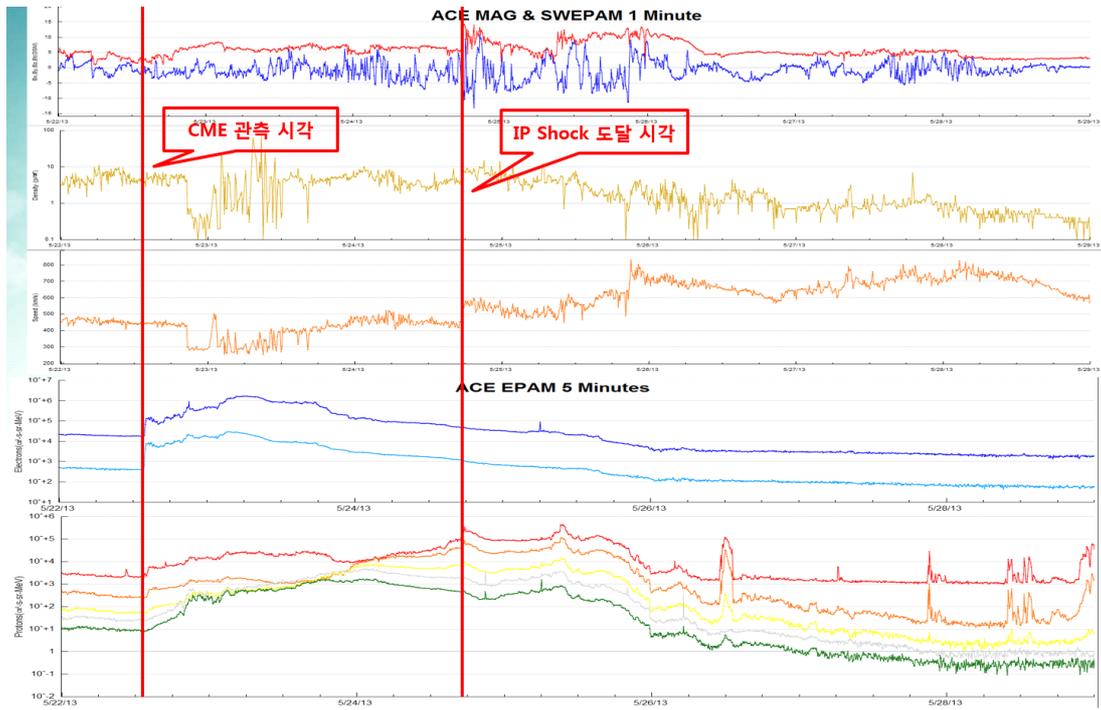


그림 17 2013년 5월 22일 22시 25분에 발생한 ICME 관측자료



그림 18 2013년 10월 3일 09시 35분에 발생한 ICME 관측자료

지자기교란 예보를 위한
CME 지구 도달 예측 기술 연구



국립전파연구원
National Radio Research Agency

(58217) 전남 나주시 빛가람로 767

발행일 : 2016. 12.

발행인 : 유 대 선

발행처 : 미래창조과학부 국립전파연구원

전화 : 061) 338-4414

인쇄 : (사)한국척수장애인협회 광주·전남인쇄사업소
062) 222-2788

ISBN : 979-11-5820-072-5 < 비 매 품 >

주 의

1. 이 연구보고서는 국립전파연구원에서 수행한 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 국립전파연구원 연구결과임을 밝혀야 합니다.