

2003년 10월의 태양활동과 우주환경의 영향

조경석^{1†}, 문용재¹, 김연한¹, 최성환¹, 김록순^{1,2}, 박종욱¹, 김해동³, 임무택⁴, 박영득^{1,5}
¹한국천문연구원, ²충남대학교 천문우주과학과, ³한국항공우주연구원
⁴한국지질자원연구원, ⁵Big Bear Solar Observatory/NJIT

EFFECTS OF SOLAR ACTIVITY AND SPACE ENVIRONMENT IN 2003 OCT.

Kyung-Seok Cho^{1†}, Yong-Jae Moon¹, Yeonhan Kim¹, Sungwhan Choi¹,
Roksoon Kim^{1,2}, Jonguk Park², Haedong Kim³,
Mutaek Lim⁴, and Youngdeuk Park^{1,5}

¹Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

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

³Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-333, Korea

⁴Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

⁵Big Bear Solar Observatory/NJIT, Big Bear, CA, USA

E-mail: kscho@kao.re.kr

(Received November 11, 2004; Accepted November 25, 2004)

요 약

본 연구에서는 2003년 10월과 11월에 발생한 강력한 태양활동과 우주환경의 변화에 대한 국내외 관측결과를 분석하였다. 이러한 태양활동은 거대한 흑점군, X 급 이상의 강력한 플레어, 연이은 코로나물질 방출(Coronal Mass Ejections: CMEs) 및 프로톤 현상 등으로 특징지어 질 수 있다. 특히 이때 발생한 고속의 CME들은 지구 방향으로 진행하여 매우 강력한 지자기 폭풍을 일으켰다. 미국 해양대기청 우주환경예보센터에서 제시한 우주환경기준(Space Weather Scales)에 따라 국내외 관측 자료를 분석하고 위성 및 통신에 미치는 영향을 예측하였다. 또한 같은 기간 동안 우리나라에서 관측된 전리층 총전자함유량(Total Electron Contents: TEC), 오로라, 전리층의 F2 임계주파수, 그리고 아리랑 위성 1호의 궤도자료를 분석함으로써 우주환경변화가 우리나라 상층대기, 위성궤도, 무선통신 등에 미치는 영향을 조사하였다.

ABSTRACT

In this paper, we present a good example of extreme solar and geomagnetic activities from October to November, 2003. These activities are characterized by very large sunspot groups, X-class solar flares, strong particle events, and huge geomagnetic storms. We discuss ground-based and space-based data in terms of space weather scales. Especially, we present several solar and geomagnetic disturbance data produced in Korea : sunspots, geo-magnetograms, aurora, Ionogram, and Total Electron Content (TEC) map by GPS data. Finally, we introduce some examples of the satellite orbit and communication effects caused by these activities; e.g., the disturbances of the KOMPSAT-1 operational orbit and HF communication.

Key words: solar activities, geomagnetic storms, space weather effects

[†]corresponding author

1. 서 론

태양에서 탈생하는 플레어와 코로나물질방출 등의 폭발현상은 엄청난 양의 전자기파와 고에너지 입자들을 방출하여 우주환경의 급격한 변화를 일으킨다. 표 1은 2000년까지 Joe(2000)의 자료를 기본으로 최근의 대표적인 우주환경에 의한 피해사례를 정리한 것이다. 우주환경의 변화는 표 1에서 보는 바와 같이 무선 및 위성 통신, 위성체, 위성궤도 그리고 지상 전력시스템 등과 같이 우주공간 및 지상에 설치된 최첨단 기기의 성능과 신뢰성에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 우주비행사 및 비행 승무원의 안전을 위협하는 등 다양한 경제-사회적인 손실을 유발한다.

미국은 해양대기청, 미공군, 항공우주국, 내무부, 에너지부 그리고 미국과학재단 연합으로 우주환경 감시와 예보의 필요성을 인식하고 1996년 국가우주환경 프로그램(National Space Weather Program 1997)을 수립 추진하고 있다. 일본은 우정성 산하 통신총합연구소(Communication Research Laboratory: CRL)에서 태양전파, 전리층, 지구 자기장을 관측 분석하여 우주환경예보 업무를 수행하고 있으며, 전파 예·경보 및 우주환경정보를 제공하고 있다. 호주는 산업과학부 전파업무청(Ionospheric Prediction Service: IPS)에서 지자기 관측소를 비롯하여 2개의 태양관측소, 12개의 전리층관측소를 운영하고 있으며, 단파통신예보 및 상세한 우주환경 정보를 제공하고 있다. 최근 유럽연합에서도 우주환경의 필요성을 인식하고 우주환경에 관련된 기획연구(Stamper 2001)를 통해 우주환경의 영향 분석, 우주환경 관측시스템 구축 등에 관한 여러 가지 방안들을 제시하고 태양활동 감시 및 경보, 인공위성 장애 경보 등 9개의 우주환경 서비스 분야를 제안하였다.

미국 우주환경예보센터는 우주환경의 변화를 태양복사(X선) 활동, 태양입자 활동(프로톤 현상) 그리고 지자기 활동으로 구분하고 각 활동규모에 따라 예상되는 무선통신 및 항법시스템, 위성체 및 위성운동, 그리고 지상 전력 시스템 및 송유관에 미치는 세부적인 영향을 우주환경기준(NOAA Space Weather Scales³)을 통해 제시하고 있다. 이 기준에 따르면 태양복사활동은 미국 GOES 위성이 측정 한 $1 \sim 8\text{\AA}$ ($0.1 \sim 0.8\text{nm}$)과 $0.5 \sim 4.0\text{\AA}$ ($0.05 \sim 0.4\text{nm}$)에서의 단위 면적당(m^2) X-선의 5분 평균 세기(Watt)에 따라 R1에서 R5까지 5단계로 나누어 분류하고 있다. 그리고 태양입자활동은 GOES 위성 관측을 통해 측정된 단위면적(cm^2), 시간(sec), 입체각(sr) 당 프로톤(10 MeV 이상) 입자수 (Proton Flux Unit: pfu)를 S1에서 S5의 5단계로 나누어 분류하고 있다. 마지막으로 지자기 활동은 미국 볼더 관측소 외에도 전 세계 8개의 지자기 관측소의 자료를 사용하여 결정한 전 지구적인 지자기 활동 지수 Kp가 5 이상부터 9까지인 경우를 G1에서 G5까지 나누어 분류하고 있다. 그리고 각 활동규모에 따라 예상되는 무선통신 및 항법시스템, 위성체 및 위성운동, 그리고 지상 전력 시스템 및 송유관에 미치는 세부적인 영향을 우주환경기준(NOAA Space Weather Scales)에 자세히 기술하고 있다.

우리나라의 경우에는 민경욱 등(2001)이 국내 연구공동체의 연구협력을 통한 우주환경 관측시스템 구축, 우주환경 예보기능 구축, 위성 운용자료 구축 방안을 각각 제시한 바 있으나 아직까지 우주환경 변화를 종합적으로 모니터하고 분석 제공하는 체계는 갖추어지지 않았다. 그리고 외국의 경우처럼 우주환경 변화에 의한 영향이 보고되었거나 분석된 바가 거의 없다. 우주환경 변화가 전 지구적 현상이라는 사실에 비추어 보면 비록 우리가 인식하지 못하는 사이에 그 변화가 우리의 무선통신과 인공위성에 크고 작은 영향을 주었다고 생각된다. 그러나 통신 및 위성 관계자들은 비록 우주환경 변화의 영향을 받았더라도 그 원인을 기기나 장비의 문제로 인식하거나, 아니면 곧 정상상태로 회

³<http://www.sec.noaa.gov/NOAAScales/>

표 1. 대표적인 우주환경에 의한 피해 사례.

발생일	피해 내용	원 인
1982.11.26	○ 운량조사용 GOES4 기상위성의 가시광선 및 적외선 spin-scan radiometer가 45분간 운용 중단	태양플레어에 의한 양성자 유입
1989. 3.14	○ 전세계적으로 HF대 사용 불가 ○ VHF 방송의 이상도달 및 전파간섭현상을 유발 ○ 일본 위성의 이중임여 명령회로의 절반 파손 ○ 미국 NASA가 운영하는 인공위성 궤도 이탈로 수명 단축 ○ 캐나다의 Quebec 주 송전시설에 2만 MW의 전력손실 야기 ※ 태양흑점 극대기에 발생한 최대 사건	자기폭풍 및 열권의 대기 밀도 증가
1991.04.29	○ 미국 Main주 Yankee 핵발전소 변압기 파손	자기폭풍
1994.01.20	○ 캐나다 Anik E1, Anik E2와 Intelsat-K 위성 장애로 전화 두절 및 TV 및 라디오 수신 곤란 ○ 동계올림픽 기간 중 일본통신위성(BS-3a) Single Event Upset 현상으로 방송장애 발생 ※ 일본의 우주환경예보 활성화의 계기가 되었음	전자의 이상증가
1991.04.29	○ 미국 AT&T사 통신, 방송위성 Telstar 401호의 기능 상실 ※ 태양흑점 극소기에 발생한 최대 사건	고에너지 하전입자유입
2000. 7. 14	○ 미국의 기상위성인 GOES 위성의 가시광 및 적외선 카메라에 영향 ○ 태양풍을 관측하는 ACE 위성의 이온 검출기 장애 ○ SOHO 위성의 태양 전지판의 성능 저하 ○ WIND 위성의 태양풍 센서에 영향을 줌. ○ 일본 ASCA 위성의 수명단축 ○ 일본 Akebono 위성의 전자장비 고장	태양 프로톤 현상과 고층대기의 밀도 증가 고에너지입자
2000. 10. 26	○ 주요 항공사의 HF 통신장애로 극 항로에서 다른 항로로 변경운항	4차례의 태양플레어
2001. 4. 15	○ 디트로이트-북경 간 항로변경으로 도착 지연 ○ 연속 이틀간 Newyark에서 홍콩 간 항로 변경으로 운항 시간지연	태양활동에 의한 HF 통신두절
2003. 10. 28	○ 미국의 화성탐사 위성인 오딧세이의 radiation 측정 장비 손상. ○ 일본의 화성 탐사 위성인 노조미 위성의 장애 ○ 호주전역에서 HF 통신 교란	고에너지 하전입자 유입 태양플레어

복되는 우주환경의 특성으로 인해 그 영향을 심각히 받아들이지 않는 것 같다.

지난 2003년 10월에 거대한 흑점군의 출현과 함께 격렬한 태양활동이 있었고 그 영향으로 강력한 지자기폭풍과 전리층 교란이 발생하였다. 외국의 경우 무선통신 및 항법시스템의 장애가 여러 곳에서 보고되었고 다수의 위성의 측정장비 및 위성체의 장애가 있었으며 강력한 태양 프로톤 현상의 발생으로 국제우주정거장 우주인들의 긴급한 대피가 이루어진 것으로 알려져 있다. 그러나 우리나라의 경우에는 위 기간동안의 우주환경변화가 종합적으로 분석되었거나 그로 인한 영향이 보고된 바가 없다. 본 연구의 2장에서는 GOES와 SOHO 위성의 태양관측자료와 우리나라에서 관측한 태양흑점, 지자기 측정자료를 사용하여 지난 10월말에 있었던 급격한 태양활동과 우주환경 변화를 분석하고 그 변화를 미국 우주환경예보센터의 우주환경기준(Space Weather Scales)에 따라 분류하므로써 위성 운용 및 통신에 미치는 영향을 예측하였다. 그리고 3장에서는 동일 기간동안 우리나라에서 관측된 전리층, 고층대기, GPS 및 아리랑 1호의 궤도자료를 분석함으로써 그 당시 우주환경변화가 우리나라 위성 및 통신에 어떤 영향을 미쳤는지 조사한다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 결론을 요약하고 천문연구원에서 개발한 우주환경감시시스템과 그 활용전망에 대해 논한다.

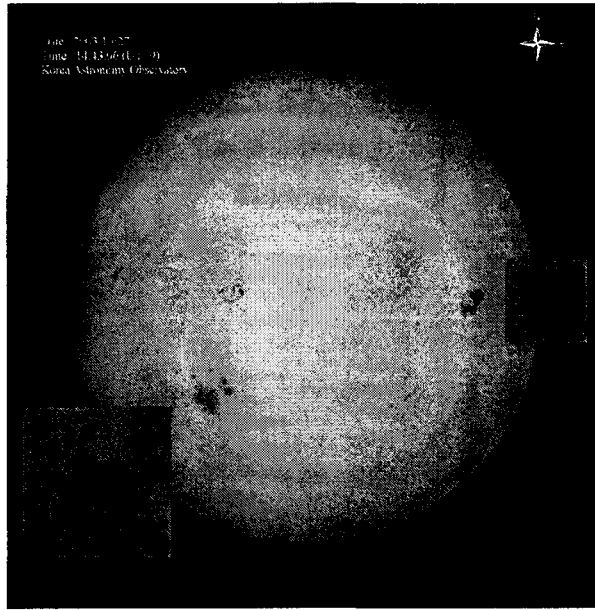


그림 1. 천문연구원이 관측한 태양 백색광 영상.

2. 2003년 10월의 태양 및 지자기 활동

지난 2003년 10월 말에 발생하였던 대규모의 태양폭발과 지자기 폭풍은 학계나 관련 기관들의 지대한 관심 속에 진행되었던 사건으로서 우주환경의 변화를 분석하고 그 예보를 평가하기에 아주 좋은 사례이다. 이번 사건동안 거대한 흑점군의 출현과 X급 이상의 강력한 플레어가 연속적으로 발생하였고 매우 강력한 지자기폭풍이 있었다. 본 연구에서는 위 기간동안 SOHO와 GOES 위성의 태양관측 자료와 한국천문연구원의 태양흑점관측, 한국지질자원연구원의 지자기 측정 자료를 사용하여 태양활동 및 지자기 활동의 변화를 분석한다.

2.1 태양활동

23주기 태양활동극대기(2000~2001)가 지났음에도 불구하고 2003년 10월말에서 11월초까지 약 10일 동안에는 9개의 강력한 X급 플레어가 발생하였다. 이번 플레어는 매우 큰 3개의 흑점군들의 출현과 연관되어 있으며 고속의 코로나물질방출(Coronal Mass Ejection: CME)과 강력한 프로톤 현상을 동반하고 지구자기권과 고층대기의 급격한 변화를 초래하였다. 그 결과 우주환경에 영향을 받는 무선통신과 위성체 및 지상 전력망 등에 많은 영향을 주었다. 이 플레어들 중 3개는 그 규모로 볼 때 1976년 이후로 발생한 플레어 중에 순위 20위권 안에 드는 강력한 플레어들이므로 알려졌다. 한국천문연구원에서 관측한 그림 1의 태양전면의 백색광 영상에서 우리는 2003년 10월 17일경 태양전면에 나와 11월 5일 사라질 때 까지 강력한 태양활동을 일으켰던 흑점군들을 볼 수 있다. 그림 1의 오른쪽에 보이는 흑점군(활동영역⁴ 0484)은 10월 18일 태양의 전면에 나타나기 시작하여 급격히 성장하였는데 10월 30일에 후면으로 들어갈때까지 2개의 X급 플레어를 폭발시켰다. 왼쪽의 흑점

⁴활동영역의 번호는 미국 해양대기청(NOAA)에서 흑점군의 발생순서에 따라 매기는 일련번호임

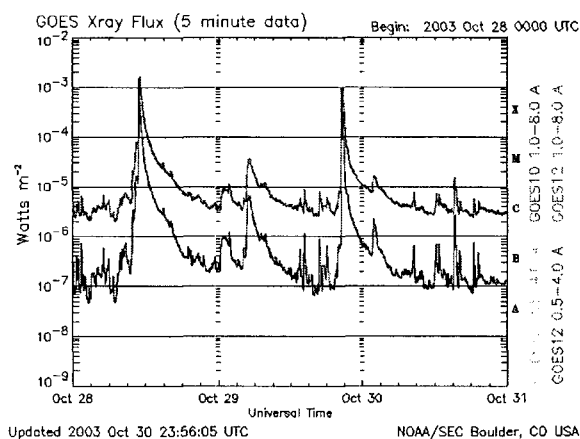


그림 2. GOES 위성에서 관측한 2003년 10월28일에서 10월 31일 동안 활동영역 0486에서 발생한 태양 X-선 플레어.

군은 2003년 10월, 11월에 가장 활발한 활동을 보였던 흑점군(활동영역 0486)으로서 10월 22일 태양 전면으로 나와서 11월 4일까지 무려 7개의 X급 플레어를 폭발시켰다. 그림 2는 10월 28일부터 10월 31까지 GOES 위성의 X-선 플럭스 자료로서 10월 28일과 29일에 활동영역 0486에서 발생한 X17급과 X10 급의 강력한 플레어를 확인 할 수 있다. 활동영역 0486은 그림 3과 4에서 보는 바와 같이 강력한 프로톤 현상을 연속하여 발생시켰으며 지구방향으로 진행되는 고속의 Halo CME를 발생시켰다. 더욱이 활동영역의 위치가 태양면 중심이고 CME의 각 크기가 360도이기 때문에 CME의 영향이 지구에 직접 도달할 것으로 예상할 수 있다.

이번 사건의 경우, 태양 X선 복사량 X17와 X10은 매우 활발한 현상이며 SEC의 우주환경 기준에 따르면 해당 경보 분류는 R4이며 예상되는 장애 수준은 Severe로 분류된다. 한편 SEC의 우주환경 척도에 따라 예상되는 장애 내용은 대부분의 일조지역에서 1~2시간 HF 통신 두절, 항해 및 비행용 HF 통신 두절, LF 항법 신호 두절(Outage), 그리고 위성 항법 신호에 약간의 이상이 발생할 것으로 예상되었다.

큰 규모의 플레어나 코로나물질방출이 발생하면 수십 분에서 수 시간 후에 상대론적 고에너지 입자가 지구에 도달하는 프로톤 현상이 발생한다. 이들은 지구자기장을 따라 극지방으로 유입되어 극관 흡수현상(PCAs: Polar Cap Absorption events)을 일으키는 등 전리층의 이온화를 증대시켜 극지역에서의 단파 통신이나 항법시스템에 장애를 일으킨다. 또한, 이 고에너지 입자들은 위성의 마이크로칩을 손상시키거나 위성에 탑재된 컴퓨터의 소프트웨어 명령을 변환시킨다. 또 위성 관측영상에 심각한 잡음을 발생시키고, 태양 전지판의 수명을 감소시키는 등 그 영향은 광범위하고 치명적이다(Robinson 1989). 특히 위성 센서나 초점면 광학계 등은 고에너지 프로톤이나 이온에 의해 만들어지는 노이즈에 매우 민감하게 영향을 받는다. 이번 사건의 경우 발생한 두개의 프로톤 현상이 모두 단위면적(cm^2), 시간(sec), 입체각(sr) 당 10MeV 이상의 에너지를 갖는 프로톤의 수가 1000개 이상인 대규모의 프로톤 현상으로 해당 입자경보 분류는 각각 S4, S5이며 예상되는 장애 수준은 Severe, Extreme으로 분류된다. 한편 예상되는 장애 내용으로는 수일간 항법 위치에러로 항법 운용에 큰 장

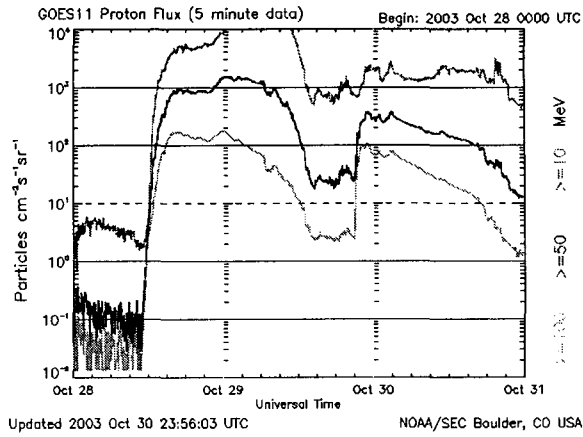


그림 3. 태양 활동영역 0486에서 발생한 두개의 프로톤 현상.



그림 4. 2003년 10월 28일 11시10분(UT)에 태양활동영역 0486에서 발생한 CME의 모습: SOHO위성의 EIT(가운데 영상)와 LASCO(가장자리 영상)의 관측자료.

애, 극 지역에서의 HF 통신불가, 일부 위성 분실, 위성체 내 메모리 고장, 위성 영상에 심각한 노이즈 발생, 태양전지판의 기능 저하 및 영구적인 손상 등이다. 태양관측위성인 SOHO는 이번의 플레어로 인하여 CCD의 기능이 상당기간 동안 정지(blackout) 되기도 했다. 이 활동영역은 11월 4일에 태양의 가장자리에서 X28 급으로 1976년 이후 가장 강력한 플레어를 발생시켰으나 다행히 태양 가장자리에서 뒤로 넘어가면서 발생했기 때문에 지구에 큰 영향을 주지는 않았다.

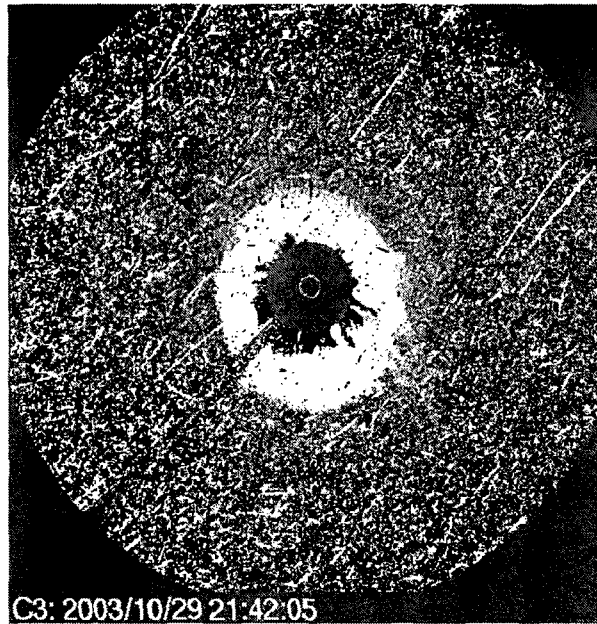


그림 5. 2003년 10월 29일 20시 10분(UT)에 태양활동영역 0486에서 또다시 발생한 CME의 running difference image(SOHO/LASCO 관측자료).

2.2 지구자기장 폭풍

태양활동영역 0486은 태양 중심부에 있으면서 두개의 고속 Halo CME를 일으켜 연속적인 지구 자기장 폭풍을 발생시켰다. 한국천문연구원은 이러한 CME의 출현 이후 곧바로 CME의 속도와 위치를 분석하였으며 태양 충격파와 CME의 지구도달시각 예측에 관한 통계분석연구(Cho et al. 2003)를 바탕으로 CME의 지구도달 시각을 예측하였고 그 결과를 관련 기관에 배포하였다. 한편 한국지질자원연구원에서는 CME에 의한 충격파와 지자기 폭풍을 지상 자력계를 통해 관측하였다.

이번 지자기폭풍은 10월 29일부터 31일 사이에 3개가 연속적으로 발생하였으며 또한 같은 기간동안의 Kp지수가 최대 변화량인 9를 기록할 정도로 강력한 폭풍들이었다. 태양 활동영역 0486은 2003년 10월 28일 11시 10분(UT)과 2003년 10월 29일 19시59분(UT)에 각각 태양 경도상 서쪽 29도와 태양경도 서쪽 06도에서 평균속도 2460km s^{-1} 와 2030km s^{-1} 의 Halo CME를 방출하였다. 그림 4는 SOHO 위성의 EIT와 LASCO 망원경으로 관측한 플레어(가운데 영상의 밝은 부분)와 Halo CME(가장자리영상의 밝게 사방으로 퍼진 부분)의 모습을 합성한 것으로 10월 28일 11시경에 발생한 플레어와 Halo CME의 모습을 잘 보여주고 있다. 그림 5는 10월 29일 약 20시(UT)경에 발생한 고속의 Halo CME를 넓은 시야를 갖는 LASCO C3 망원경으로 촬영한 모습이다. 이 그림의 가운데 작은 원은 태양이고 주변의 중간원은 태양의 산란광을 가린 차폐 원반이다. 이 영상은 촬영 전의 영상과의 차이를 강조한 running difference image로 차폐 원반 밖의 사방으로 퍼져나가는 Halo CME의 모습을 잘 보여주고 있다. 프로톤 현상 때문에 영상 잡음이 심하게 보인다. 이번 CME들은 태양전면에서 발생하였고 빠른 속도로 사방으로 퍼져 나갔기 때문에 지구에 거의 도달할 것으로 예상되었다.

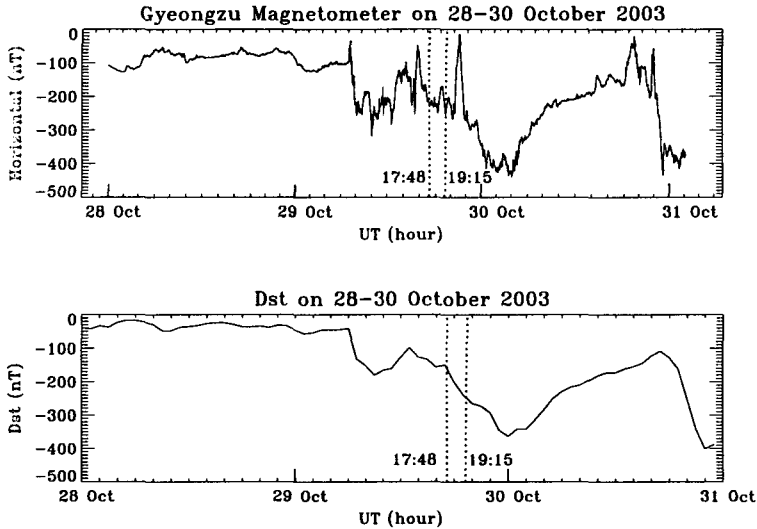


그림 6. 지구자기장 수평성분(위: 한국지질자원연구원 경주관측소 제공)와 Dst 지수(아래: NOAA/NGDC 제공). 가운데 점선들은 오로라가 관측시작 시각과 종료 시각을 나타낸다.

CME의 속도를 CME-SHOCK 진행모델(Gopalswamy 2001)에 적용해 보면 10월 28일 CME의 경우에는 약 17시간 후인 10월 29일 04시(UT)에 그리고 29일 CME의 경우에는 20시간 후인 10월 30일 16시(UT)에 충격파가 지구에 도착할 것으로 각각 예측되었다. 우리는 이러한 예측 결과를 위 기간 동안에 우리나라의 통신 및 위성 운용기관 등에 전자메일을 통해 배포한 바 있다.

2003년 10월 28일과 29일 양일간 태양활동영역 0486에서 발생한 CME는 10월 29일부터 10월 31일까지 약 3일에 걸쳐 강력한 지자기폭풍을 일으켰다. 이러한 지자기 폭풍은 지상 자력계의 관측을 통해 확인할 수 있다. 현재 우리나라에는 한국지질자원연구원에서 경주, 대전에 각각 지상 자력계를 운용하고 있으며 이번 지자기폭풍을 관측하였다. 그림 6은 2003년 10월 28일부터 30일 사이의 지구자기장 수평성분과 Dst 지수의 변화를 비교한 것이다. 충격파의 도착은 자력계 자료를 통해 그리고 지자기 폭풍의 규모는 Dst 지수로 알 수 있다. 10월 28일 CME에 의한 충격파는 예측된 시각보다 약간 늦은 10월 29일 06시 13분(UT)에 지구에 도달하였고 이후 강력한 지자기폭풍이 진행되었다. 그림 6에서 보는 것처럼 이러한 충격파의 지구도달은 자기장 수평성분의 순간증가(SC: Sudden Commencement)를 통해 확인할 수 있다. 그리고 이 시각 후에는 지구 자기장의 급격한 감소를 보이면서 급격히 요동치는데 이것은 지자기폭풍이 진행되고 있음을 나타낸다. 이러한 지자기 폭풍의 규모는 Dst 지수와 Kp 지수를 통해 알 수 있는데 Dst 지수는 -370nT 까지 떨어졌으며 Kp 지수도 최대 9까지 기록되었다. 한편 10월 29일 CME에 의한 충격파는 10월 30일 16시경에 지구에 도달하였으며 그 CME는 Dst 지수가 -400nT , Kp지수는 최대 9까지 이르는 강력한 지자기폭풍을 일으켰다. 이 두 CME 모두 지구 방향으로 고속으로 진행하였던 Halo CME 이었기 때문에 지구도달시각의 예측 적 중률은 매우 높다고 할 수 있다.

위와 같은 지자기폭풍은 지상 전력망에 유해한 유도전류를 만들거나 중성대기의 밀도를 변화시켜 저궤도 위성의 대기 마찰을 증가시킨다. 대기 마찰의 증가는 1000km 이하 고도를 운항하는 대부

분의 인공위성의 궤도 변화를 일으키는 주요 원인이다. 이는 1일 동안에 예상 궤도에서 수십 km 이상 벗어나는 결과를 가져온다. 그리고 지자기 폭풍은 지구표면을 따라 흐르는 전류를 만들어 내고 고위도에 있는 파이프라인, 전력선, 철도 그리고 다리와 같은 인공구조물에는 이러한 유도 전류가 흐르게 된다. 이번 사건의 경우 Kp 지수가 최대인 9까지 이르렀으므로 이를 우주환경예보기준에 적용해보면 1~2일간 다수 지역에서의 HF 전파전파불가, 수일간 위성 항법상태 저하 및 수 시간동안의 저주파 항법통신 두절 등이 예상되며 광범위한 위성체 표면의 대전, 위성 회전, 상 하향 링크 장애, 위성 통제 장애 등이 예상되었다. 또한 지상 전력시스템의 경우전력망 붕괴 및 변압기 파손 및 송유관 등에 수백 암페어 전류가 발생할 것으로 예상되었다.

3. 우주환경변화에 의한 영향

지금까지 우리는 지난 10월의 태양폭발(CME) 자료를 이용하여 태양폭풍이 지구 자기권에 도착할 시각을 예측하고 태양폭풍의 지구 도착시각에 급격한 지구 자기장 폭풍이 있었음을 지상 자력계를 통해 확인하였다. 그리고 미국 우주환경예보센터의 우주환경기준(Space Weather Scale)에 맞추어 예상되는 우주환경의 영향을 제시하였다. 이 장에서는 지자기 폭풍이 발생하는 동안 전 세계적으로 보고된 우주환경변화에 의한 영향을 소개하고, 특히 우리나라에서 관측된 전리층, 고층대기, GPS 및 아리랑 위성 1호의 궤도자료를 분석함으로써 그 당시 우주환경변화가 우리나라 위성 및 통신에 어떤 영향을 미쳤는지 조사하였다.

3.1 한반도 상공의 전리층 및 고층대기의 영향

태양 코로나물질방출과 태양풍 교란에 의해 발생하는 고에너지 입자는 극 지역을 통해 유입되며 고층대기의 전자밀도를 증가 시킨다. 그리고 지자기 폭풍으로 인해 발생하는 오로라는 지구자기꼬리에서부터 자기장을 따라 고위도로 유입되는 고속의 입자들이 대기원자들과 상호작용하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 미국 제트추진연구소(JPL: Jet Propulsion Laboratory)의 보고에 따르면 이번 지자기폭풍으로 전 세계적으로 총전자함유량(TEC: Total Electron Content)의 변화를 보였는데 특히 미국 서부의 경우 TEC 양이 정상시의 6배까지 증가하였다. 또 미국 우주환경센터(NOAA/SEC)의 보고에 따르면 이번 지자기 폭풍기간동안에 자기장의 중위도 지역인 미국 남부의 휴스톤까지 오로라가 관측되었다고 한다.

이번 사건의 경우 우리나라에서도 전리층의 변화와 오로라 출현이 확인되었다. 그림 7은 한국천문연구원에서 운용하고 있는 9곳의 GPS 측정소의 자료를 사용하여 계산 한 한반도 상공 전리층의 TEC 지도로서 태양폭발 전과 후의 변화를 비교한 것이다. 위 그림에서 보는 바와 같이 고위도에서 저위도로 갈수록 전반적으로 TEC가 증가하였으며 태양폭발 전과 후에 약 30% 이상의 증가를 보였다. 이러한 TEC의 증가는 전리층을 통과하는 GPS를 비롯한 위성 통신의 신호전달 지연이나 위상 변조 및 GPS 위치오차 등에 의해 기인된다. 우리나라 근대천문관측이 있던 이후 최초로 오로라 관측이 보현산 천문대에 설치한 광시야 전천(all sky) 카메라의 적색필터(6302Å)를 통해 한국해양연구원의 극지 연구팀에 의해 이루어졌다. 이번 오로라의 경우 그 관측시각이 10월 29일 17시 49분부터 19시 15분(UT) 사이로서 10월 28일 발생한 CME에 의한 지자기 폭풍과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각되며 GPS 자료로 구한 TEC의 최대 증가시각과도 대체로 일치한다.

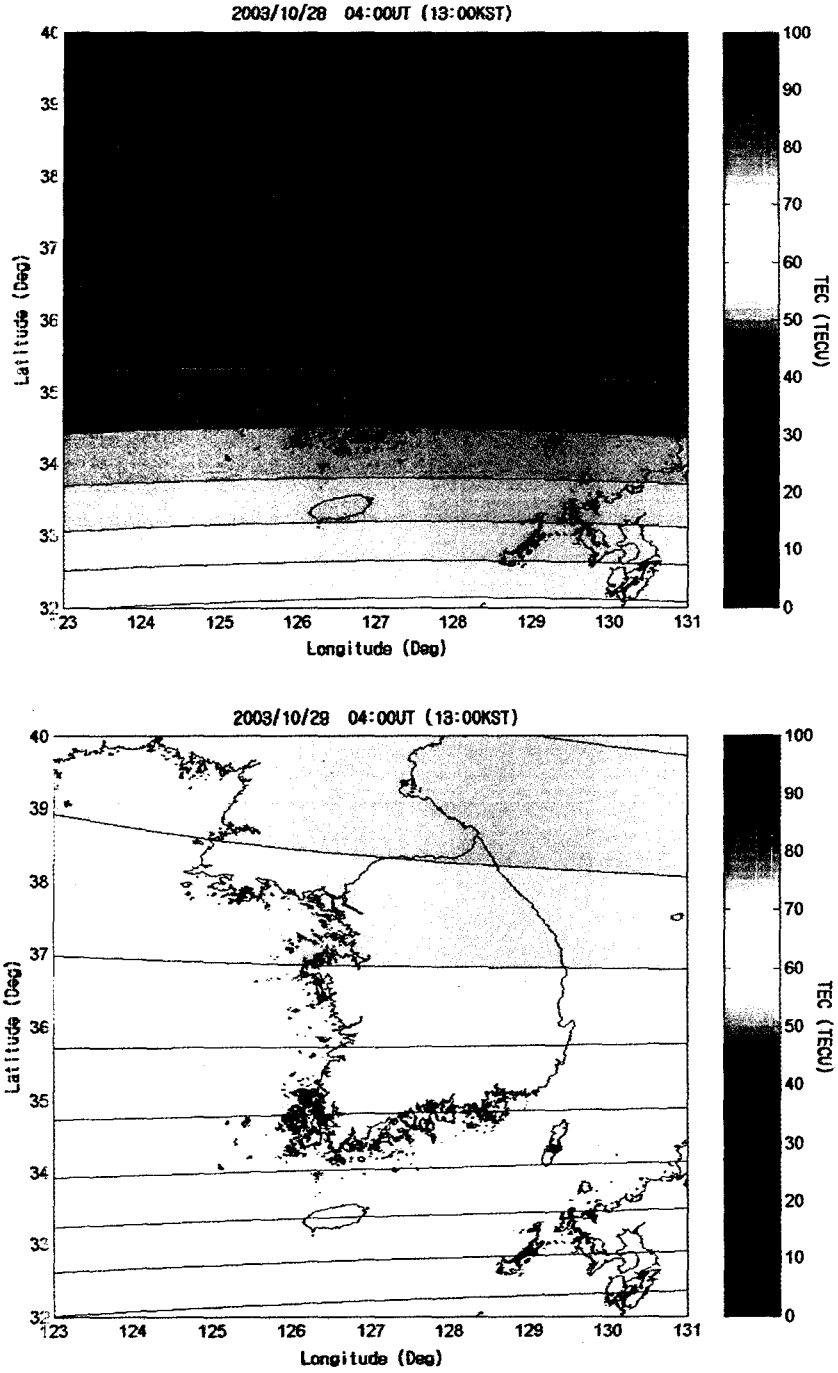


그림 7. 한국천문연구원의 GPS자료를 사용하여 계산한 한반도 상공의 전리층 TEC(총전자 함유량)를 태양폭발 발생 전(2003년 10월28일 04시(UT), 위)과 발생 후(2003년 10월 29일 04시(UT), 아래) 비교.

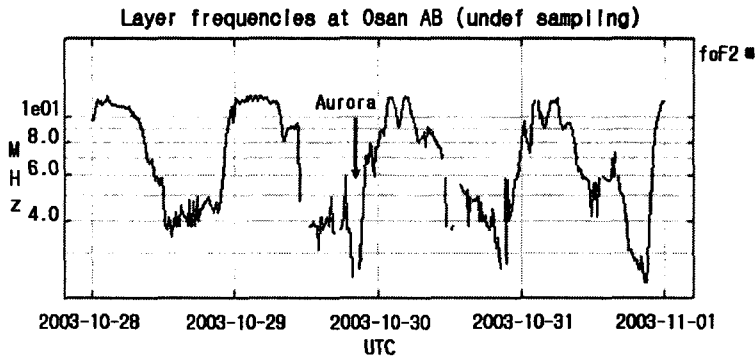


그림 8. 미 공군 오산 Ionosonde로 관측한 전리층 F2층의 임계주파수의 변화.

3.2 무선통신의 영향

외국의 경우 10월 말과 11월 초의 태양활동과 우주환경의 변화에 의한 무선통신 및 항법시스템의 장애가 여러 곳에서 보고되었다. 특히 10월 29일 19시 59분(UT)에 발생한 X10급의 플레어에 의해 호주전역에서 HF통신이 교란되었고 호주동부와 뉴질랜드 등지에서는 HF통신 신호의 감쇄를 일으켰다. 그리고 북반구에서는 항공에 사용되는 HF통신이 교란되어 항공기와 지상관제소의 통신장애로 비행기의 회항이 보고된 바 있다. 그러나 우리나라의 경우 이번 사건에 의한 무선통신 등에 대한 보고나 기록이 거의 없는 편이다. 특히 우리나라에서는 이번 태양폭발이 주로 밤 혹은 새벽시간에 발생하였다는 점 때문에 태양폭발 당시의 복사(X선 및 자외선)에 의한 직접적인 영향은 없었지만 약 2~3일 후 시작된 지자기 폭풍에 의한 전리층의 밀도 변화와 그로인한 무선통신 장애는 일어난 것으로 추정된다. 본 연구에서는 간접적인 전파장애의 증거로서 단파대역의 전파를 송수신하여 전리층의 상태를 관측하는 Ionosonde의 관측자료를 제시한다. 그림 8은 우주환경관측 DB인 NOAA/NGDC⁵를 통해 얻은 미 공군의 오산 Ionosonde 관측자료로서 10월 28일부터 10월 31일까지 전리층 F2층의 임계주파수의 변화를 보여주고 있다. 10월 28일부터 29일 12시(UT) 이전까지 F2 임계주파수가 주간에는 높고 야간에는 낮은 주기적인 일변화 양상을 보이고 있다. 그러나 지자기폭풍이 시작된 후인 10월 29일 12시(UT)이후부터 11월 1일까지 야간의 F2층의 임계주파수의 전반적인 감소와 일변화의 규칙성이 깨어짐을 볼 수 있다. 또한 10월 29일 12시, 20시, 10월 30일 12시, 23시에 전리층에서 F2층의 임계주파수가 사라지는 전파흡수 현상을 볼 수 있다. 일반적으로 단파통신에서 사용되는 최적의 통신 주파수는 F2층의 임계주파수의 약 85%에 해당하는 것으로 알려져 있다. 주간에 자주 보이는 이러한 F2층의 임계주파수의 불규칙적인 변화는 단파통신에 사용 가능한 통신주파수 대역이 불규칙적으로 변하고 통신신호의 감쇄 등 무선통신 장애가 있었음을 나타내는 간접적인 증거가 된다. 그리고 야간에 보인 F2층을 통해 반사되는 임계주파수가 사라지는 것은 단파대역에서 사용되는 전파가 전리층에서 흡수되어 전파두절이 발생하였음을 나타낸다.

3.3 위성체 및 위성운용에 미치는 영향

인공위성을 운용하고 있는 미국, 일본 등 주요 선진국들의 대비에도 불구하고 2003년 10월의 태

⁵<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>

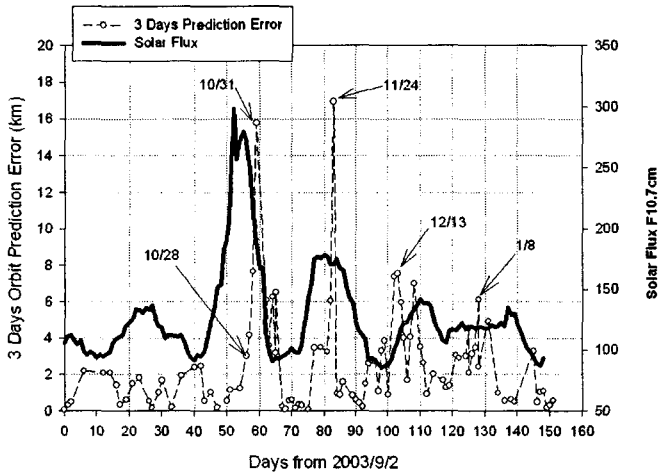


그림 9. 태양폭풍 발생 전후의 3일 궤도예측 정밀도 변화.

표 2. 30시간 GPS 데이터를 이용한 궤도결정 정밀도 변화(4시간 중첩궤도의 위치오차).

	Radial (m)	Cross-track (m)	Along-track (m)	대기저항계수 (Cd)	Decay Rate (m/day)
2003/10/10	1.119	1.633	2.233	2.128	-5.58
2003/10/28	4.362	2.004	24.051	1.517	-25.05
2003/10/31	10.386	1.987	72.479	0.606	-33.24

양활동에 의한 우주환경의 변화는 전세계적으로 많은 영향을 준 것으로 보고되고 있다. 그 예로 미국 항공우주국(NASA)의 화성탐사 위성인 오딧세이의 radiation 측정장비의 손상과 일본의 화성탐사 위성인 노조미의 위성체 장애를 들 수 있다. 특히 노조미 위성은 2003년 12월에 폐기되었는데 그 주요 원인 중의 하나가 이번 태양활동에 의한 우주환경의 변화인 것으로 알려져 있다. 그 외에 강력한 태양 프로톤 현상의 발생으로 국제우주정거장 우주인들의 긴급한 대피 등이 알려져 있다.

2003년 10월말에서 11월초까지의 태양폭발에 의한 우주환경의 변화는 아리랑 1호의 고도 감쇄율 및 궤도결정, 예측 정밀도에 영향을 주었다. 그림 9에서 보는 바와 같이 3일간의 아리랑 1호 위성의 궤도예측 정밀도 수준이 10월 28일에 발생한 태양폭풍을 기점으로 하여 2~3일 후에 급격하게 저하되었음을 확인할 수 있다. 특히, 태양폭풍 발생 하루가 지난 시점부터 CME에 의한 지자기 폭풍이 지구 대기권에 직접적인 영향을 미치면서 궤도예측 정밀도가 평소 수준인 2km보다 약 8배 정도 저하된 16km까지 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. 또한 태양폭풍 발생 직후 급격하게 저하된 궤도예측 정밀도는 이후에도 약 한달을 주기로 하여 3개월 정도 궤도예측 정밀도가 평소 수준보다 저하되는 것을 알 수 있다. 태양폭풍 전후 기간의 궤도결정 정밀도 변화를 살펴보기 위해 중첩법(overlap method)에 의한 궤도오차를 분석하였다. 중첩법 분석을 위해 30시간 데이터를 이용한 연속되는 두 개의 궤도를 결정하여 4시간 동안의 중첩되는 기간의 각 방향별 차이를 알아보았다. 표 2에서 보는 바와 같이 태양폭풍 발생 전에는 각 방향으로 최대 2.5m 이내 오차를 가지는 것을 알 수 있으나, 태양

폭풍 발생 직후에는 along 방향으로 24m, 3일이 지난 후에는 along 방향으로 약 72m까지 위치오차가 증가함을 알 수 있다. 특히, 고도 감쇄율은 매우 급격하게 변화하였는데, 태양폭풍 전 -5.5m/day 수준에서 태양폭풍 직후 -33m/day까지 약 6배 이상 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 궤도예측 정밀도 및 고도 감쇄율은 위성 운영에 있어 임무수행을 위한 위성과의 교신 및 추적에 중요하며, 특히 예기치 않은 대규모 태양폭풍을 간과하고 평소와 같이 수일 이전에 미리 예측된 궤도데이터에 의존하여 위성을 추적한다면 실패할 가능성이 발생하게 된다(김해동 등 2003). 이러한 결과는 태양활동에 의한 우주환경의 변화가 우리나라 위성의 궤도 운용에 직접적인 영향을 미쳤다는 증거이다. 따라서 태양활동 및 지자기 폭풍 등의 우주환경변화에 대한 정확한 정보는 항상 모니터링 되어져야 하며, 위성 임무운영에 반영하는 것이 중요하다.

4. 결론 및 전망

외국의 경우 우주환경에 의한 피해 사례가 상당수 보고되었음에도 불구하고 우리나라의 경우에는 아직까지 우주환경 변화에 의한 영향이 분석되어진 바가 거의 없었다. 본 연구에서는 2003년 10월 말의 우주환경변화를 우리나라에서 관측된 태양 및 전리층, 지자기, 고층대기, GPS 관측 자료와 아리랑 위성 1호의 운용궤도 변화자료를 활용하여 분석하고 이 변화가 국내외 위성 및 통신에 미친 영향을 조사하였다. 그 결과, 태양활동에 의한 지자기 폭풍 기간동안 전리층 Ionosonde 자료에서 F2 층의 임계주파수의 일변화가 불규칙해지고 불연속해짐을 확인하였다. 그리고 GPS자료 분석을 통해서 한반도 상공의 총 전자함유량이 약 30% 이상 증가하였음을 또한 확인하였다. 이들은 무선통신 및 GPS 신호가 우주환경 변화에 의해 영향 받았음을 알 수 있는 간접적인 증거이다. 그리고 지자기 폭풍 동안에 위성의 궤도에 영향을 주었다는 직접적인 증거로 아리랑 위성 1호의 궤도예측 정밀도의 저하 및 고도 감쇄율의 증가를 확인할 수 있었다.

위와 같은 우주환경의 의한 영향을 제공하기 위해 천문연구원에서는 실시간으로 우주환경 상태를 모니터링하고 태양활동 및 우주환경의 급격한 변화가 발생하였을 때 예상되는 영향 정보를 예측하여 제공할 수 있는 우주환경감시시스템을 개발하고 있다. 위 시스템에 관한 개발 과정과 결과는 박형민 등(2004)과 박소영 등(2004)에 의해 자세히 기술되어 있어 여기서는 주요내용만 소개하고자 한다. 이 시스템은 IDL(Interactive Data Language)을 웹 기반으로 운용될 수 있도록 만들어진 ION(IDL On the Net) Script를 사용하여 개발한 것으로 태양 및 지구자기장 상태의 실시간 모니터링, 우주환경변화에 의한 통신과 위성 등의 영향 예측, 그리고 향후 3일 동안의 우주환경상태에 대한 예보 기능을 갖추고 있다. 또한 Moon et al.(2002)에 의해 개발된 태양충격파의 진행모델(Shock Time of Arrival-2: STOA-2)과 Gopalswamy et al.(2001)에 의해 개발된 CME 진행모델을 웹기반에서 구현되도록 함으로써 태양 충격파와 CME의 지구도달 시각을 예보할 수 있도록 했다. Cho et al.(2003)은 태양충격파와 CME의 지구도달 시각 예측에 관한 통계연구를 통해 이들 모델들의 예측률이 서로 비슷함을 확인하였다. 우주환경감시시스템은 미국 GOES 위성으로부터 1분마다 태양 X선⁶, 프로톤 입자⁷, 지자기 플럭스⁸ 등의 관측데이터를 실시간으로 다운받아 그 변화를 태양 X-선, EUV 그리고 백색광 코로나그래프 영상과 함께 제공한다. 또한 이들 실시간 관측 자료를 미국 우주환경예보센터의 우주환경

⁶<ftp://sec.noaa.gov/pub/lists/xray>

⁷<ftp://sec.noaa.gov/pub/lists/particle>

⁸<ftp://sec.noaa.gov/pub/indices/dayind>

기준을 적용하여 태양복사, 태양입자, 지구자기장 정보 등을 자동으로 발령할 수 있도록 개발되었다. 그리고 미국 우주환경예보센터에서 발령하는 3일 예보 레포트⁹를 참고하여 향후 3일 동안의 태양플레어, 태양프로톤현상, 지자기 폭풍의 발생 가능성을 예측하여 제공하고 있다. 그 밖에 우주환경의 변화와 그 영향에 대한 사후분석을 위해 과거의 데이터의 DB를 구축하고 해당 기간동안의 자료를 검색할 수 있도록 데이터 검색 엔진을 개발하였다. 이 엔진은 ION에 들어있는 FORM 기능을 사용하여 원하는 검색자료와 기간을 입력하였을 때 그 결과를 그러서 보여주는 기능을 갖고 있다. 이 엔진으로 검색이 가능한 자료는 태양 X선, 태양 프로톤 플럭스, 태양흑점수, 태양풍 플라즈마 및 자기장, 지자기 Kp 지수, Dst 지수, 기타 우주환경 레포트 등이다. 그리고 미국 빅베어 태양천문대와 미항공우주국과의 협력으로 태양활동영역의 변화를 지상 및 위성 태양관측자료를 통해 검색할 수 있는 ARM(Active Region Monitor)의 미러사이트를 구축하였고 천문연구원과 미국 JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 제공하고 있는 한반도 상공 및 전 세계 TEC 지도를 이용하여 우리나라의 과학기술위성 1호 등의 궤도상에서의 TEC의 변화를 모니터 할 수 있는 TEC 지도 등을 개발하고 있다. 이러한 우주환경감시시스템, 우주환경자료 검색엔진, ARM 그리고 TEC 지도 등은 2T-Byte의 저장용량 디스크와 리눅스 기반의 고성능 서버를 통해 운용되고 있으며 향후 지속적인 우주환경 모니터와 관련 정보를 제공할 예정이다.

감사의 글: 이 연구는 과학기술부의 “태양관측자료의 우주환경 응용기술개발(M1-0336-00-0011)”, “우주환경감시센터 기반기술 개발(M1-0336-00-0013)”, “태양전면감시기술개발(M1-0104-00-0059)”, 그리고 “태양폭발위험감지 및 관측기술개발(M1-0407-00-0001)” 연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김해동, 김은규, 최해진 한국항공우주학회지 2003, 31, 40
- 민경욱 2001, 우주환경 관측기술개발을 위한 기획연구, p.169
- 박소영, 조경석, 문용재, 박형민, 김록순, 황보정은, 박영득, 김연한 2004, 한국우주과학회지, 21, 441
- 박형민, 문용재, 조경석, 박소영, 이상우, 이우경, 박영득, 김연한 2004, 한국우주과학회지, 21, 429
- Cho, K.-S., Moon, Y.-J., Dryer, M., Fry, C. D., Park, Y.-D., & Kim, K.-S. 2003, J. Geophys. Res., 108, 1445
- Gopalswamy, N., Lara, A., Yashiro, S., Kaiser, M., & Howard, R. A. 2001, J. Geophys. Res., 106, p.29,207
- Joe, H. A. 2000, Proceeding of the S-RAMP Symposium, Sapporo, Japan.
- Moon, Y.-J., Dryer, M., Smith, Z., Park, -Y.-D., & Cho, K.-S. 2002, Geophys. Res. Lett. 29, 1029
- National Space Weather Program, Implementation Plan 1997, FCM-P31-1997, Washington, D.C.
- Robinson, P. A. 1989, Spacecraft Environment Anomalies Handbook, Report #GL-TR-98-0222, Air Force Systems Command, Hanscom AFB, MA 901731
- Stamper, R. 2001, Space Weather Service, Report #ESWS-RAL-TN-0003, ESA

⁹ftp://sec.noaa.gov/pub/forecasts/daypre/