

## 태양활동과 우주환경<sup>1</sup> SOLAR ACTIVITY AND SPACE ENVIRONMENT

윤홍식

서울대학교 천문학과

HONG SIK YUN

Department of Astronomy, Seoul National University

Received Nov. 16, 1999; Accepted Dec. 5, 1999

### ABSTRACT

The Earth is exposed to constant outflow of the solar wind from the outer layers of the Sun, and violent transient events taking place from active regions increase the energy flux of both radiation and particles leaving the Sun. Thus the space surrounding the Earth is a highly dynamic environment that responds sensitively to changes in radiation, particles and magnetic field arriving from the Sun. Nowadays, it becomes increasingly important to understand how the physical system of Earth-space works and how the space around the Earth connects to interplanetary space. In the present paper we describe how explosive solar events, such as CME(Coronal Mass Ejection) and flares affect the Earth-space environment and how the space weather reacts to them. Practical consequences are presented to demonstrate why a broader view of Earth's environment is greatly needed to cope with modern day's inhabitation problem in a rapidly developing space age.

*Key words:* Sun:flares - Sun: CME - Sun: solar terrestrial relations

### 1. 서론

#### 1.1. 배경

태양은 우리 인류의 생존에 없어서는 안 될 매우 중요한 에너지 공급원이다. 태양의 복사 에너지가 없으면 생명을 유지할 만한 온도는 물론 광합성에 필요한 에너지, 지상 생물체가 살아가는 데에 필요한 환경이 제공되지 못한다. 만약 태양의 자외선 방출이 현재보다 적었다면, 옅은 지구 대기층에 존재할 수 없었을 것이며, 지상의 생물체는 태양의 고에너지 광자에 노출되어 생명 보존이 어려웠을 것이다.

우리는 이미 수십 년 전부터 태양표면의 미세한 변화조차도 지구 주변의 우주환경에 크고 작은 변화를 일으키고 있음을 잘 알고 있었다. 또한 그것이 과학위성이나 지상에 설치된 고성능 정밀장치의 작동이나 통신에 장애를 일으키는 등, 우리 일상생활에 직접적인 영향을 미치고 있기 때문에 "우주환경 예보"의 필요성을 느껴왔던 것이다. 그러나 우주환경과 관련된 정보 중에는 냉전시대의 군사작전과 깊이 관련된 것들이 있었고, 우주과학 기술이 일상생활에서 차지하는 비중이 오늘날처럼 그다지 크지 않았기 때문에 우주환경 예보업무를 담당하는 정식 기구의 발족이 지연되어 왔던 것 사실이다. 이제 과학기술이 일상생활에서 차지하는 비중이 점점 증가함에 따라 우주환경 변화가 우

리에게 미치는 영향의 규모가 커지고 있다. 또 그로 인한 피해가 때로는 국익과 직결되어 국방, 경제 및 사회 전반에 엄청난 손실을 초래할 수도 있게 되었다. 그러므로 미국, 일본을 비롯한 구미의 선진국에서는 태양활동과 우주환경 변화에 각별한 관심을 갖고 수십 년 전부터 우주환경 예보 센터를 설립, 태양활동을 감시하는 체제를 갖추어 왔다.

미국의 경우를 본다면, 1994년 이전까지는 우주환경 정보를 가장 필요로 하는 공군 예보센터(Air Force Forecast Center)와 국립 해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)이 국립 과학재단(National Science Foundation, NSF), 국방부(Department of Defence, DOD), 항공우주국(NASA)등의 지원을 받아 그 업무를 수행해 왔지만, 이 체제하에서는 다양한 우주환경 정보제공을 위한 다각적인 연구가 불가능하였다(Off. Fed. Coord. Meteorol. Serv. 1993). 이후 일관된 목적 지향적인 연구수행이 가능한 기구가 절실히 필요하게됨에 따라 우주기상정보서비스국(National Space Weather Service)이 1994년 국립과학재단(NSF), 국방부(DOD), 항공우주국(NASA) 그리고 국립해양대기국(NOAA)에 의하여 구상되었다(National Research Council, 1994). 1996년에는 우주기상계획(National Space Weather Program, 1995)이 수립되어 오로지 우주환경 연구만을 위한 대규모 연구지원이 가능해졌으며, 우주환경연구전용 과학위성이 국제 태양-지구

<sup>1</sup>해설 논문 (Review Article)

관계 연구계획(International Solar-Terrestrial Program, ISTP)하에 발사되고 관측자료의 전송망이 세계 주요 지상 우주환경관측소에 접속됨에 따라, 범국가적인 태양-지구관계의 연구가 본격적으로 시작되었다. 그 후 국립연구심의회(National Research Council, NRC)는 태양-우주물리 분과위원회(Committee on Solar and Space Physics, C SSP)와 태양-지구 연구위원회(Committee On Solar-Terrestrial Research, CSTR)를 두고, 이들이 태양활동과 우주환경 연구의 장기계획을 수립하도록 하여, NASA의 우주과학부(Office of Space Science)와 NSF의 대기과학 및 천문학 분과로 하여금 이 사업을 추진토록 하고 있다.

또한 국제적으로도 태양-지구환경에 관련된 연구를 보다 효율적으로 계획, 조정, 관리하고, 보다 신속한 정보를 제공할 수 있는 새로운 국제기구가 필요하였다. 1996년에는 미국 우주기상계획의 출범과 때를 같이하여, 그간 국제전파연맹(International Union of Radio Science, URSI), 국제천문연맹(IAU), 국제측지 및 지구물리학회(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG), 천문지구물리자료관리연맹(Federation of Astronomical and Geophysical Data Service, FAGOS)이 운영해왔던 International Ursigrams and World Days Service(IUWDS)의 체제를 바꾸어 국제 우주환경국(International Space Environment Service, ISES)을 발족시켰다. 현재, 국제우주환경국은 지구 주변과 행성간 공간을 운행하는 인공위성들의 운행상태를 매일 보고하는 업무를 수행하고 있으며, 미국 국립해양대기국(NOAA)의 우주환경센터(Space Environment Center), 일본 통신종합연구소의 히라이소 태양-지구연구센터(Hiraiso Solar Terrestrial Research Center, HSTRC) 등 각국의 우주환경 연구센터와 10개 지역의 우주환경 경보센터(10 Regional Warning Centers; Beijing, New Delhi, Tokyo, Boulder, Ottawa, Warsaw, Moscow, Prague, Paris and Sydney)를 조정 관리하고 태양-지구환경에 관련된 연구를 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 국제협력을 도모하고 있다.

### 1.2. 우주환경과학(space environment science)

우주환경과학을 어떻게 정의할 수 있을까? 전통적인 기상학을 간단히 지구대기의 물리적 상태를 연구하는 학문이라고 정의한다면, 우주환경과학은 과학위성이나 행성 탐색선이 차지하는 우주공간의 물리적 상태를 연구하는 학문으로 정의할 수 있다. 그러므로 우주환경과학은 지구주변 우주공간의 물리체계(physical system)가 어떻게 작동되고 있는지를 이해하는 학문이라고 할 수 있다.

이를 위해서는 무엇보다 우주공간의 물리체계에 가장 큰 영향을 미치는 태양활동과 그로부터 일어나는 현상 그리고 그들의 물리적 특성을 이해하는 연구가 선행되어야 할 것이다. 또한 그들이 행성간 공간이나 지구주변의 우주공간

에서 어떠한 상호작용을 하며, 물리적으로 어떻게 연관되어 있는지에 관한 연구도 수행되어야 한다. 이러한 종합적인 연구들이 결실을 맺게 될 때, 우주환경의 진상이 명료하게 밝혀질 뿐만 아니라 우주 환경 변화로부터 받을 피해를 미연에 방지하거나 피해를 최소화하기 위한 대책 마련이 가능해질 것이다.

## 2. 우주환경의 구성

### 2.1. 태양 표면의 활동영역

우주환경 변화를 야기시키는 요소에는 어떤 것들이 있을까? 우주환경 변화를 야기시키는 주요 요소를 추적해 간다면 궁극적으로는 태양표면에서 일어나고 있는 다양한 태양활동에서 그 원천을 찾을 수 있다. 태양활동은 태양표면에 나타나는 흑점 수에 따라 약 11년의 주기로 반복된다. 흑점은 강한 자기장을 지니고 있다. 태양 자기장의 분포는 흑점 수가 가장 많은 극대기에 가장 복잡해진다. 태양 자기장이 재생되는 과정은 구체적으로 잘 알려져 있지 않지만, 태양내부에서 부단히 운동하고 있는 고온의 기체 덩어리가 태양의 자전운동과 맞물리면서 태양내부 대류층 하단에서 생성되는 것으로 알려져 있다(e.g., van Ballegoijen, 1982; Schmitt et al., 1984; Stix, 1989; Priest, 1982). 활동영역은 태양내부에서 재생된 자기장이 태양표면에 떠올라 형성한 흑점단지에 해당된다.

태양은 그 중심부에서 생산한 에너지를 거의 일정한 비율로 방출함으로써 균형을 유지하며, 표면에 이르러서는 중심부에서 생성된 에너지의 거의 대부분을 가시복사로 방출한다. 그 중 극히 일부만이 자외선이나 X-선, gamma선, 그리고 전파로 방출되는데, 비록 그 양은 아주 작지만 그 변동률은 가시복사 경우보다 훨씬 크다. 특히, 플레어와 같은 태양표면의 폭발 현상이 일어났을 때, 그 변동률은 가장 크며 방출량이 평상시보다 100배 이상에 이르는 경우가 많다 (e.g., Zirin, 1988; Phillips, 1995).

### 2.2. 태양풍

태양표면 위로는 온도가 1~2만 K인 채층이 존재하며 그 위로는 수 백만 K의 희박한 고온 가스로 된 코로나로 연결된다. 코로나에서 발생하는 현상 중 가장 중요한 것은 태양풍이다. 태양풍은 주로 양성자와 전자들로 이루어진 입자의 흐름으로 태양으로부터 300km/sec - 700km/sec의 속도로 방출되고 있다 (e.g., Zirin, 1988). 태양풍이 존재하는 이유는 코로나의 온도가 아주 높아, 입자의 운동 속도가 너무나 커져서 태양중력으로는 이들의 입자를 도저히 잡아둘 수 없기 때문이다(e.g., Foukal, 1990; Phillips, 1995).

태양을 떠난 물질은 주로 태양풍의 형태로 태양계 속으로 퍼져나간다. 태양풍의 밀도는 극히 적다고 하여도 태양 표면적은 엄청나게 크기 때문에, 태양의 연간 질량 손실량은 수 천억 톤에 이른다. 이러한 질량손실은 지구규모에서

보면 엄청나지만, 태양규모에서 보면 아무 것도 아니다.

태양풍은 주로 코로나 구멍(coronal holes)이라고 부르는 코로나 영역을 통해서 방출된다 (Timothy, et al., 1975). 코로나 구멍은 X-선 영상에서 어둡게 보이는 영역으로 태양의 양 극영역이나 저위도 영역에서 흔히 관측된다. 일반적으로 코로나 구멍의 크기, 모양, 분포 양상도 태양 주기에 따라 변하는데, 코로나 구멍의 수는 자기 구조가 가장 단순해지는 태양 활동 극소기에 최대가 된다(e.g., Phillips, 1995).

태양자기장도 끊임없이 태양풍과 함께 행성간 공간으로 방출된다. 방출된 자력선은 태양의 자전운동 때문에, 행성간 공간에서 나선형을 그린다. 일반적으로 행성간 자기장은 태양자기장의 남극과 북극의 것으로 갈라져 있으며, 이들은 전류가 흐르는 전류판에 의해서 분리된다. 태양표면 자기장의 구조가 복잡할수록 전류판의 구조도 복잡해지므로, 전류판의 구조는 우주환경변화의 정도를 나타내는 척도가 된다(e.g., Phillips, 1995). 태양풍은 그 자체의 원천적 불균질성 때문에 행성간 공간에 또 다른 종류의 교란을 일으킨다. 코로나 구멍으로부터 유출된 고속흐름(700 km/sec)은 행성간 물질을 만나 압력을 주어 파동의 형태로 전파되며, 얼마 후 행성간 공간의 저속흐름(300 km/sec)을 만나서 교란을 일으킨다. 물론 두 흐름의 상호작용으로 생성된 교란영역의 자기장과 밀도는 증가한다(e.g., Goldstein 1998; Zirin, 1988; Dryer, 1987).

### 2.3. 지구 자기권

우리는 지구자기장에 의해서 태양풍으로부터 보호를 받고 있다. 지구에서도 태양처럼 그 내부에서 자기장이 끊임없이 재생되고 있다. 태양으로부터 방출되는 태양풍은 지구자기권계면 전면에 형성된 뱃머리 충격파(bow shock wave)에 의해서 감속된다. 자기권계면은 태양풍 가스의 충격차압(ram pressure)이 지구자기장의 자기압과 균형을 맺는 경계면이다. 뱃머리 충격파(bow shock wave)가 지구자기권계면 전면에 생기는 것은 이 영역에 이르러 태양풍의 속도가 음속이나 알페인파 속도보다 커지기 때문이다(e.g., 민경욱, 1998). 일반적으로 태양을 향한 쪽의 자기권계면은 태양풍의 강도에 따라 지면으로부터 6 ~ 15R<sub>⊙</sub> 되는 곳에 생기며, 그와 반대로 향한 쪽은 지구자기장이 만든 자기공동(cavity)의 긴 자기꼬리로 이어진다. 태양풍은 직접 지구자기장을 꿰뚫고 진입하지는 못하지만, 양극 영역의 자력선을 따라 우회하여 흘러들어 갈 수 있다(e.g., Cowley, 1998; Phillips, 1995).

지구자기장은 극관(polar caps)에서 행성간 자기장과 접촉되며, 태양풍과 행성간 대전입자들은 이 관문을 통해서 자기권과 이온층으로 흘러들어 간다. 오로라 타원체(auroral oval)는 두 자기장이 접촉되는 경계에서 형성되는데, 그것은 이 관문을 통해서 흘러들어간 수 KeV 이상의 고에너지 입자들이 대기내의 원자나 분자들과 충돌하

여 오로라 현상을 일으키기 때문이다(e.g., 안병호, 1998). 자기권내에서 포획된 고에너지 입자들의 밀집영역으로 대표적인 것은 반알렌대이다. 그 속에는 성간 가스이온입자들, 우주선과 대기원자간의 충돌로 생성된 이차 입자들, 그리고 고층대기의 고에너지 입자들이 포함되어 있다(e.g., Russell, 1987). 자기권내의 전자와 이온들은 전류를 만들어내므로, 지상이나 우주공간에서 측정된 자기장에 편차를 준다.

### 2.4. 고층대기와 이온층

자기권의 바닥은 지구의 고층대기의 상단과 연결된다. 고층대기는 산소나 질소와 같은 기체의 원자 또는 분자로 구성되어 있으며, 그 밀도는 높이에 따라 급격히 감소한다. 예를 들면, 우주왕복선 궤도 높이 300 ~ 400 km에서의 밀도는 수 10<sup>8</sup>개/cm<sup>3</sup> 이지만 기상위성의 궤도의 높이 850 km에서는 우주왕복선 궤도에서 밀도의 1/100 ~ 1/1000 정도가 된다. 태양표면에서 강력한 태양활동이 발생하였을 때에는 고도 60 km에 위치한 원자나 분자들까지도 태양 X-선과 자외선 복사에 의해서 전리되어 두꺼운 이온층을 이루지만, 수 분 ~ 수 시간 후 이들은 다시 재결합하여 중성 원자나 분자로 환원된다. 이온층의 대전입자 수는 고도 300km까지 증가하며, 그 이상의 고도에서는 점차로 감소한다(e.g., Phillips, 1995). 실제로 이온층의 중성입자는 수적으로 이온이나 전자보다 훨씬 많다. 그럼에도 불구하고 이온층이 우주환경의 중요한 요소가 되는 것은 이온층에서 대전입자들이 전기전도성을 갖기 때문이다(e.g., Richmond, 1987, 1998).

## 3. 우주환경의 교란인자와 그가 미치는 영향

### 3.1. 코로나 질량분출(Coronal Mass Ejection, CME)

지구주변 우주환경의 변화는 주로 CME(Coronal Mass Ejection)와 플레어에 의해서 발생한다. CME와 플레어로부터 방출된 고에너지 입자와 자외선 및 X-선 복사는 행성간 공간 및 지구주변 우주공간내의 물질과 자기장에 교란을 일으킨다. 그 중 가장 극적으로 우주환경에 변화를 초래하는 것은 막대한 질량을 행성간 공간으로 방출하는 CME 현상이다. 그것은 무엇보다도 CME 분출시 방출되는 고에너지 입자의 속도가 크고 그 수가 많아서, 비교적 짧은 시간에 많은 질량이 분출되어 규모가 대단히 큰 교란을 야기시키기 때문이다.

CME는 자기루프의 불안정으로 자기력선과 뒤섞인 원추형 플라즈마 가스가 폭발적으로 팽창하여 수 시간을 두고 막대한 코로나 물질이 분출되는 현상이다. CME는 흔히 홍염분출과 관련되어 일어나는 것으로 알려져 있으며, 그 빈도는 흑점 주기에 따라 변하는데, 극대기에는 하루에 평균 2-3회, 극소기에는 1주일에 1회 정도 된다. 홍염과 관련되어 나타나는 전형적인 CME 분출시 그 구조를 보면 그림 1에서처럼 밝은 외곽루프가 팽창하면서 그 하부에 밝은 홍

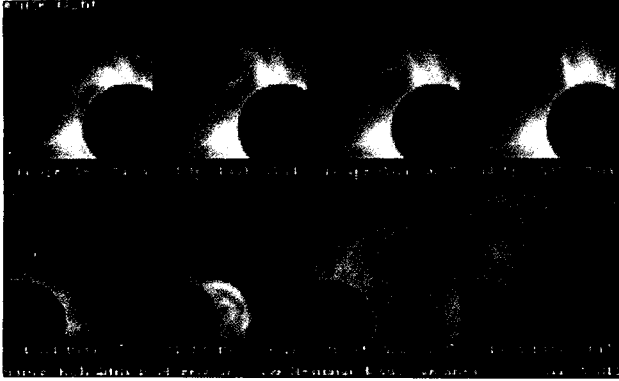


그림 1.— 1980년 4월 14일과 24일, 홍염과 관련되어 나타난 전형적인 코로나 물질방출(CME)현상을 SMM(Solar Maximum Mission) 과학위성에 탑재한 코로나그래프(coronagraph)로 촬영한 것이다.

염이 분출하는 것을 볼 수 있는데, 흔히 외곽의 밝은 루프와 빠른 속도로 분출하는 홍염 사이에는 검은 공동(cavity)이 있는 것이 특징이다(e.g., Foukal, 1990; Zirin, 1988).

CME 현상의 분출기작에 대해서는 아직까지 모두 명확히 밝혀져 있지는 않으나, 그림 1에서 보는 바와 같이 흔히 홍염으로부터 분출된 자기루프의 팽창속도가 외곽의 밝은 루프의 팽창속도보다 커서 홍염의 자기루프가 외곽의 자기루프를 추월하게 될 때 주로 일어난다. 즉, 두 자기루프가 만나는 순간, 자기재결합으로 자기력선이 끊어지면서 자기루프에 구속되어 있던 막대한 물질이 분출하는 것으로 이해되고 있다(Antiochos et al., 1999). 또한 물질의 방출은 홍염 자기루프의 길이가 지나치게 길어서 자기장력(magnetic tension)이 자기부력(magnetic buoyancy)을 극복할 수 없을 경우, 홍염을 이루는 자기장이 부상하면서 자기장과 함께 자신이 품고 있던 막대한 물질을 행성간 공간으로 방출하는 것으로도 생각하고 있다.

CME의 분출속도는 규모에 따라  $600\text{km/sec} - 2000\text{km/sec}$ 의 값을 가지며, 그에 따른 물질의 유출량도 300억~1000억 톤/CME에 이른다. 연간 CME에 의한 질량유출은 태양풍에 의한 총 질량유출의 3배에 이른다(e.g., Phillips, 1995). 한편, CME는 행성간 공간에서 고에너지 입자를 만들어 내는 데에 큰 역할을 한다. CME는 흔히  $2000\text{km/sec}$  정도의 빠른 속도로 이동하므로, 그보다 훨씬 느린 속도로 진행하는 태양풍을 쉽게 추격할 수 있다. 이 때 강력한 충격파가 형성되면서 태양풍내의 이온들이 충격파에 의해 가속된다. 행성간 공간에 존재하는  $1\text{MeV}$  이상의 거의 모든 고에너지 입자들은 주로 이 과정에 의해서 만들어진다(e.g., Lin 1998). CME 사건 발생 후, 수 십 분이 지나면(저에너지 입자는 수일 후), 행성간 공간에서 만들어진 고에너지 입자들이 지구에 이르게 된다. 이 때 지구자기권에는 거대한 교란이 일어나고, 자기권과 그 주변에서는 잠시 입자밀도가 증가하는 현상이 나타난다. 즉 양 극지

방에서는 고에너지 입자들이 지구자기력선을 따라 고층대기로 진입하여, 고도  $100\text{km}$  이하의 이온층의 밀도를 증가시키면서, 플라즈마권면 상에 오로라 타원체를 형성한다. 때로는 고에너지 입자들이 오로라 타원체의 형성 영역보다 더 낮은 고도까지 침투하여 오존층 상단의 오존농도를 변화시키기도 한다.  $2000\text{km/sec}$  이상의 초고속 CME는 적도에 가까운 위도까지 심한 자기폭풍을 일으키며, 잠정적이지만 신생 복사대를 형성하기도 한다. 이 때 다수의 전자와 이온들이 오로라 타원체를 통해 이온층으로 흘러 들어가서 오로라 빛을 강화시키는 등 다양한 자기권 활동을 전개한다. 자기폭풍으로 오로라 전류와 고에너지 입자 수가 증가하면 지구고층대기가 가열되어 팽창한다. 특히, 거대 자기폭풍의 경우 인공위성이 선회하는 밀도가 자기폭풍이 없는 평상시 보다 100배 이상 증가되는 것으로 밝혀졌다(e.g., Phillips, 1995; Richmond, 1998).

### 3.2. 플레어

플레어는 태양표면에서 갑자기 극히 짧은 시간동안 막대한 에너지를 방출하는 장엄하고 격렬한 분출현상으로 태양의 강한 자외선 및 X-선의 방출원이기도 하다. 플레어는 보통 5~10 분 지속되며, 플레어가 발생하면  $10^{31} \sim 10^{33}$  erg의 엄청난 에너지가 방출된다. 플레어가 폭발하는 순간 태양 대기 가스는 수 천만 도까지 상승한다. 플레어에 의해 가열된 태양 대기 가스는 gamma선에서 전파에 이르기까지 전 파장에 걸쳐 강한 복사를 방출한다(e.g, Phillips, 1995). 지상에서 플레어는 흔히 수소의 붉은 선으로 관측되지만, 이처럼 가시영역에 속하는 에너지는 극히 적다. 또한 플레어는 분출시 양성자, 전자 그리고 이온들을 가속시킨다. 이 때 가속된 대전입자들 중 그 일부는 행성간 자기력선을 따라 지구에 이르러 우주환경에 변화를 일으킨다. 흑점 극대기에 플레어의 발생률을 보면, 소규모의 것은 하루에 평균 3~5개, 대 규모의 것은 수주에 한번 꼴이다. 폭발적 플레어의 수명은 수 십 초, 거대하고 점진적으로 일어나는 것은 수 시간에 이른다(e.g., Zirin, 1988; Stix, 1989).

플레어는  $H_{\alpha}$ 에서 관측되기 10~30분전에 미량의 연 X-선(soft X-ray)과 극자외선을 방출하는 것이 특징이다. 이 기간을 플레어 발생 전 단계(pre-flare phase)라고 부르는데, 이 때 연 X-선 복사는 잠시 증가하기 시작하다가 곧 일정한 강도를 유지하는 반면에 극자외선 복사는 계속 증가하는 것으로 관측된다. 일단 플레어가 분출되기 시작하면, 수 십~수 백 초 사이에 플라즈마 덩어리가 우주공간으로 분출되고, 그림 2에서 보는 바와 같이 루프상단과 두 발판(foot points)에서 경 X-선(hard X-ray)과 극자외선이 강해지면서 엄청난 에너지가 방출되는 충격단계(impulsive phase)를 맞는다. 이 단계에서는 거꾸로 세운 Y자형의 중심부나 기존의 자기장과 신생 자기장이 만나는 영역에서 서로 방향이 반대되는 자기력선이 상호작용을 하여 극히 짧은 시간 내에 자기재결합(magnetic reconnection)이

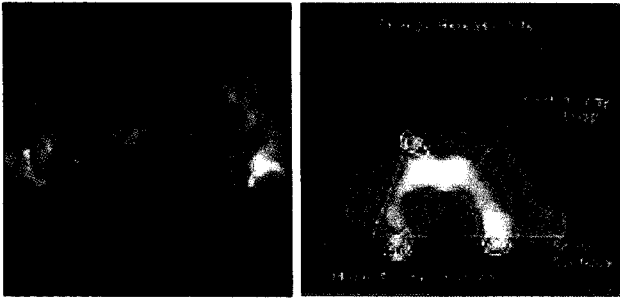


그림 2.— 1992년 1월 13일, 요코 과학위성에 탑재된 연 X-선 망원경으로 촬영한 연 X-선 태양의 모습(왼쪽)과 태양의 오른쪽 가장자리에서 발생한 플레어를 연 X-선과 경 X-선으로 관측하여 같이 나타낸 모습. 여기서 연 X-선은 이미지로, 경 X-선은 실선으로 겹쳐 나타냈다.

일어나는 것으로 이해되고 있다(e.g., Phillips, 1995). 그리고 충격단계에서 가속된 전자와 양성자는 자기루프를 따라 급격히 하강하면서 채층물질과 충돌하게 된다. 이 때 채층가스는 수 천 만 도에 이르는 고온으로 가열되면서 루프를 따라 상단을 향하여 급상승한다. 또한 X-선 영역에서는 연 X-선 자기루프가 관측되며, 가시영역에서는  $H_{\alpha}$  리본 ( $H_{\alpha}$  ribbon)이 관측된다. 플레어는 이처럼 지속적인 복사방출로 냉각되고,  $H_{\alpha}$  플레어가 차지하는 영역이 점점 축소되면서 결국 점진단계(gradual phase)를 거쳐 최후를 맞는다(e.g., Shibata, 1995).

플레어 발생 후 약 8분이 지나 그것이 방출한 다량의 자외선과 X-선이 지구에 이르게 되면 이들은 고에너지 대전입자의 경우와는 달리 지구자기장의 저지를 받지 않으므로, 태양을 향한 쪽의 대기층은 지체없이 고도 100 km 이하까지 전리된다. 이 때 이온층에서는 수 분~수 시간 동안 전리도가 급증하는 급격이온층교란(Sudden Ionospheric Disturbance, SID)현상이 일어나며, 이 때 단파 통신은 큰 장애를 받게 된다(e.g., Goldstein, 1998).

#### 4. 우주환경 변화가 미치는 영향

태양 상층대기로부터 끊임없이 흘러나오고 있는 태양풍과 활동영역에서 발생하는 격렬한 플레어, 그리고 CME 현상은 우리 주변의 우주환경을 변화시켜 다양한 형태로 우리 일상생활에 큰 영향을 미치고 있다. 우주환경 변화가 우리에게 미치는 주요 사례를 간략히 열거해 보고자 한다(Buonsanto and Fuller-Rowell, 1997; NOAA Space Environmental laboratory, 1995).

##### 4.1. 인공위성에 미치는 영향

고층대기내의 입자들로부터 받는 충격은 인공위성의 궤도를 변화시키고 표면물질을 마모시킨다. 자외선의 장기노출은 물질을 약화시키고, 인공위성은 운행고도에 따라서 기억장치의 칩과 같은 전자부품의 상태가 손상될 수도 있다.

특히, 인공위성이 반알렌대나 오로라 영역 등 고에너지 입자가 밀집되어 있는 우주환경에 진입할 경우, 인공위성은 충전될 가능성이 높아진다. 그 결과 인공위성에 순간전류가 흐르게 되면, 인공위성에 탑재한 장비의 작동이나 전력계 또는 인공위성 추진장치에 치명적인 타격을 주게 된다.

지구자기장이 특히 약한 남대서양 상공에서는 고에너지 입자들이 저고도까지 존재하므로, 이 곳을 지나가는 인공위성은 고에너지 입자에 노출되기 쉽다. 다수의 전리입자들이 이온층에 진입함으로써 생긴 이온층 전류의 증가때문에 고층대기는 가열된다. 이 때 밀도는 흔히 300 ~ 500 km 고도까지 증가하게 되는데, 입자들에 의한 잦은 충돌로 인공위성의 궤도가 낮아져 잠시 인공위성과 통신이 두절되는 경우도 생긴다. 이는 결국 인공위성의 수명을 단축시키는 결과를 초래하게 된다.

##### 4.2. 정보, 통신 활동에 미치는 영향

전자밀도는 자외선, X-선 및 고에너지 입자 방출이 증가할 때 커진다. 우주환경의 변동으로 이온층의 전자밀도가 불규칙적으로 변할 때, 지상에서 인공위성으로 보낸 VHF와 UHF파(30MHz ~ 3 GHz)에 심한 변동이 생겨 이 파장대를 이용한 통신은 장애를 받는다. 군이나 해외방송에서 많이 사용하고 있는 단파(3-30 MHz) 통신은 이온층의 반사를 이용하고 있기 때문에 우주환경 변화에 또한 민감하게 영향을 받는다. 예를 들면, 고도 100 km 이하에서는 전자와 대기분자와의 충돌로 단파장도가 감소되며, 통신 가능한 주파수 선정에도 큰 지장을 준다. 특히 우주환경의 변화로 전자밀도가 급증할 경우에는 완전히 통신이 두절되는 경우도 발생한다. 태양 전파폭발(radio burst)에서 방출된 전파는 245 MHz ~ 2.7 GHz파에 교란을 일으켜 통신장애를 초래하기도 한다.

##### 4.3. 전기 동력계에 미치는 영향

자기폭풍이 일어나 자기권과 이온층 내의 전류가 급증하면 지상의 전력 공급망에 영향을 미칠 수 있다. 이 때 급증한 전류는 지구자기장을 교란시켜 특히 고위도 지방에 과도한 유도전류를 일으켜 송전선을 과열시키거나 교류용 전기장치에 심각한 손상을 주기도 한다.

##### 4.4. 인체에 미치는 영향

CME가 발생할 경우, 고위도 지방을 비행하는 사람들은 우주선 및 태양 고에너지 입자에 의한 피해를 입게 된다. 특히, 대기권 밖에서 활동하는 우주인은 반알렌대의 강도가 가장 강한 영역 바로 아래에서 일하는 경우가 많은데, 이 영역을 가능하면 피해야 할 것이다.

#### 4.5. 송유관에 미치는 영향

우주환경 변화로 유도된 전류가 긴 송유관을 지날 때, 적절히 접지하지 않았을 경우 갈바니 효과(Galvanic effect)를 일으켜 송유관이 급속히 부식된다.

#### 4.6. GPS(Global Positioning System)에 미치는 영향

이온층의 밀도변화에 따른 통신시간의 지연으로 GPS의 정확도가 감소된다.

### 5. 마칠 말

태양은 끊임없이 변하고 있다. 태양의 흑점수는 약 11년의 주기로 증감이 반복되며, 우주환경의 교란은 주로 흑점단지에서 일어나는 플레어와 CME에 의해서 발생한다. 플레어나 CME는 태양활동의 극대기에 가장 많이 나타나고, 태양폭풍은 태양과 우주환경에 심한 교란을 일으킨다. 이처럼 지구는 태양 상층대기로부터 끊임없이 흘러나오고 있는 태양풍에 그대로 노출되어 있다.

지금까지 우리는 우주환경을 구성하고 있는 주요 요소, 우주환경을 변화시키는 교란인자 그리고 그들이 어떠한 과정을 거쳐서 어떠한 영향을 우리 일상생활에 미치고 있는지에 관하여 살펴보았다. 대부분의 경우, 우주환경의 변동은 일상생활에서는 큰 관심거리가 못된다. 그러나 우주환경의 변화로 단파통신에 장애가 생긴다던가, 자기권과 이온층 내의 전류가 급증하여 지상에 설치된 주요 전기장치가 손상되고, 전력 공급망이 파괴된다던가, 우주궤도를 선회하는 인공위성이 반알렌대나 오로라 영역과 같은 고에너지 입자의 밀집영역을 지날 때, 인공위성 자체에 생긴 순간 전류로 탑재된 장비의 작동이나 전력계, 또는 인공위성 추진장치에 치명적인 타격을 준다던가, 우주비행 중 고에너지 입자의 노출로 인체에 큰 피해를 주는 경우가 생긴다면, 이들은 결코 쉽게 지나칠만한 사소한 문제는 아니다.

과학기술이 일상생활에서 차지하는 비중이 점점 커짐에 따라 우리는 우주환경 변화에 보다 민감한 생활환경에 접어들고 있다. 예를 들면, 40년 전 첫 번째 인공위성이 발사된 이후, 현재 수없이 많은 인공위성들이 우주공간을 선회하고 있으며, 10여 년 후에는 수 백여 개의 인공위성이 활동하게 될 것이다. 통신업체는 통신 중계장치를 우주공간에 두어 영구적 통신망을 구축하고자 하며, 인간은 머지않아 거의 상시적으로 우주정거장에 거주하게 될 것으로 예상된다. 이와 같은 미래지향적인 변화를 예상할 때, 우주환경변화가 우리에게 미치는 영향은 지금보다 훨씬 심각할 것이며, 그 규모도 상상할 수 없을 정도로 커질 것이다.

현재 미국, 일본을 비롯한 구미의 선진국에서는 태양활동과 우주환경 변화에 각별한 관심을 갖고 우주환경 예보 센터를 설립하여, 태양활동을 감시하는 체제를 갖추고 있다. 우리도 태양-지구관계의 진상을 밝히고 지식을 검증하며, 그것을 활용하는 연구에 적극 참여해야 할 때가 왔다고

생각된다. 우리 나라도 미국이나 일본처럼 매일의 우주환경 상태를 예보하는 국립 우주환경예보센터를 설립하여 우주환경의 변화로부터 받을 피해를 미연에 방지하고, 피해를 최소화하려는 노력에 적극 참여해야 할 것이다.

### 참고문헌

- 민경옥, 1998, 지구자기권의 거시적 구조, 우주과학의 제 문제, 민음사
- 안병호, 1998, 지구 자기권의 전류체계와 오로라, 우주과학의 제 문제, 민음사
- Antiochos, S. K. & Devore, C. R., 1999, "The Role of Magnetic Reconnection", *Solar Activity in Sun-Earth Plasma Connections*, ed. Burch, J. L., Carovillano, R. L., Antiochos, S. K., American Geophysical Union, Washington, DC.
- Ballegooijen, A. A. van, 1982, *A&A*, 113, 99
- Buonsanto, M. J. & Fuller-Rowell, T. J., 1997, *ESO* 78, No. 1
- Cowley, W. H., 1998, "The Earth's Magnetosphere", *From The Sun*, ed. Suess, S. T. & Tsurutani, B., American Geophysical Union, Washington, DC.
- Dryer, M., 1987, "Solar Wind and Heliosphere", *The Solar Wind and the Earth*, Geophysics and Astrophysics Monographs, D. Reidel Publishing Co., Boston.
- Foukal, P. V., 1990, *Solar Astrophysics*, Wiley, New York
- Goldstein, B. E., 1998, "The Solar Wind in From The Sun", ed. Suess, S. T. & Tsurutani, B., American Geophysical Union, Washington, DC.
- Lin, R. P., 1998, "Solar Flare Particle", *From The Sun*, ed. Suess, S. T. & Tsurutani, B., American Geophysical Union, Washington, DC.
- National Research Council, 1995. *A Science Strategy for Space Physics*, Space Studies Board, National Academy, Washington, DC
- National Space Weather Program. 1995. *The Strategic Plan FCM-P30-1995*. NOAA Space Environmental Laboratory, 1995, User Notes, No. 9, April, 1995
- Office of Federal Coordinator of Meteorological Services, 1993. *National Plan for Space Environment Services and Supporting Research, 1993-1997*, FCM-P10-1993, Washington, DC.
- Phillips, K. J. H., 1995, *Guide to the Sun*, Cambridge University Press
- Priest, E. R., 1982, *Solar Magnetohydrodynamics*, D. Reidel Publishing Co., Boston.
- Richmond, A. D., 1987, "The Ionosphere", *The Solar Wind and the Earth*, Geophysics and Astrophysics Monographs, D. Reidel publishing Co., Boston.

- Richmond, A. D., 1998, "The Ionosphere and Upper Atmosphere", From The Sun, ed. Suess, S. T. & Tsurutani, B., American Geophysical Union, Washington, DC.
- Russell, C. T., 1987, "The Magnetosphere", The Solar Wind and the Earth. Geophysics and Astrophysics Monographs, D. Reidel publishing Co. Boston.
- Shibata, K., 1995, "Coronal Dynamics and Flares", Proceedings of the Second SOLTIP Symposium, Nakaminato, Japan
- Schmitt, J. H., Rosner, R. & Bohn, H. U., 1984, ApJ., 282, 316
- Stix, M., 1989, The Sun, Springer-Verlag, New York
- Timothy, A. F., Krieger, A. S. & Vaiana, G. S., 1975, Solar Phys., 42, 13
- Zirin, H., 1988, Astrophysics of the Sun, Cambridge University Press, New York