

전파통신에서의 전리층 역할* IONOSPHERIC EFFECTS ON THE RADIO COMMUNICATION

표유선¹, 조경석¹, 이동훈², 김은화²
¹정보통신부 전파연구소, ²경희대학교 우주과학과

YOO SUN PYO¹, KYOUNGSEOK CHO¹, DONG-HUN LEE², AND EUNHWA KIM²

¹Radio Research Laboratory, MIC

²Department of Astronomy and Space Science, Kyung Hee University

E-mail: yspyo@rrl.go.kr

Received Dec. 6, 2000; Accepted Dec. 12, 2000

ABSTRACT

The ionosphere, the atmosphere of the earth ionized by solar radiations, has been strongly varied with solar activity. The ionosphere varies with the solar cycle, the seasons, the latitudes and during any given day. Radio wave propagation through or in the ionosphere is affected by ionospheric condition so that one needs to consider its effects on operating communication systems normally. For examples, sporadic E may form at any time. It occurs at altitudes between 90 to 140 km (in the E region), and may be spread over a large area or be confined to a small region. Sometimes the sporadic E layer works as a mirror so that the communication signal does not reach the receiver. And radiation from the Sun during large solar flares causes increased ionization in the D region which results in greater absorption of HF radio waves. This phenomenon is called short wave fade-outs. If the flare is large enough, the whole of the HF spectrum can be rendered unusable for a period of time. Due to events on the Sun, sometimes the Earth's magnetic field becomes disturbed. The geomagnetic field and the ionosphere are linked in complex ways and a disturbance in the geomagnetic field can often cause a disturbance in the F region of the ionosphere. An enhancement will not usually concern the HF communicator, but the depression may cause frequencies normally used for communication to be too high with the result that the wave penetrates the ionosphere. Ionospheric storms can occur throughout the solar cycle and are related to coronal mass ejections (CMEs) and coronal holes on the Sun. Except the above mentioned phenomena, there are a lot of things to affect the radio communication. Nowadays, radio technique for probing the terrestrial ionosphere has a tendency to use satellite system such as GPS. To get more accurate information about the variation of the ionospheric electron density, a TEC measurement system is necessary so RRL will operate the system in the near future.

Keywords: ionosphere, ionospheric variations, communication, HF radio waves

I. 서 론

1864년 스코틀랜드 수학자인 James Clerk Maxwell에 의해서 전기장과 자기장으로 구성된 파동이 공기 중에서 하나의 장소로부터 다른 장소로 이동할 수 있다는 것이 알려졌다. Maxwell의 전자기 복사 원리는 독일 과학자 Heinrich Hertz에 의하여 실험적으로 증명되었으며 1899년 이탈리아의 과학자 Guglielmo Marconi는 영국과의 무선 통신에 성공하였고 1901년에는 마침내 대서양 횡단 통신에 성공하였다. Marconi의 실험은 무선 통신의 새로운 지평을 연 사건이었지만 동시에 몇 가지 의문점이 나타났다. 즉, 전자기 복사가 빛과 마찬가지로 일직선상으로 움직인다고 생각한다면 최대 통신 거리는 시선상의 끝이 되며 시선 건너편과의 통신

은 불가능하게 된다. 하지만 어떤 종류의 반사층이 존재한다면 전파 신호가 시선 너머에 있는 수신기에 도달할 수 있게 되어 통신이 가능하게 된다. 다시 말하면, 어떤 반사층이 존재하여 통신을 가능하게 한다는 사실은 전파를 반사하는 성질을 가진 층이 지구 상공에 존재한다는 것을 간접적으로 증명한 것이 된다. 1902년 Oliver Heaviside와 Arthur Kennelly는 각각 고층 대기에 전도층(conducting layer)이 존재한다는 가설을 제안하였다. 이 시점까지 이러한 층이 존재한다는 사실을 증명하지는 못하였고 다만 지구 고층대기의 물리적 또는 전자기적 성질만이 조금 알려졌을 뿐이다. 만약에 전도층이 존재한다면 시선 거리의 한계를 극복하여 지구 반대편의 사람과의 통신이 가능하게 되는 것이다. 이러한 전도층을 연구하기 위하여 1920년대 중반에 ionosonde를 개발하여 전리층을 직접 관측함으로써 전도층의 특성과 이러한 것이 전파에 미치는 영향을 연구하게 되었다. 현재

*해설논문(Review Article)

는 과학 위성, 로켓, 라이다(Lidar), 비간섭성 산란 레이더(Incoherent Scatter Radar:ISR)등 전리층을 관측할 수 있는 다양한 방법이 개발되어 관측 및 연구를 수행하고 있다.

최근 전리층의 연구는 군사 통신, 위성 통신, 위성체 보호, 우주-지구간 통신의 안정적 품질 확보, GPS 위성 측지 오차 발생, 로켓 및 위성 개발 필요성 등에 의하여 과거 보다 더욱 활발하게 진행되고 있다. 특히 태양 활동 변화에 의한 지구 근접 우주공간 변화의 직, 간접적인 영향으로 발생하는 전리층의 변화는 단파대 영역 통신에서부터 위성-지구간 통신에 이르기까지 통신에 대하여 광범위한 영향을 미치므로 우주환경변화에 대한 통신 장애 예측 및 사후 분석을 위해서 전파통신에서의 전리층 역할에 대한 이해가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이러한 전리층의 특성과 변화 현상 그리고 통신에 미치는 영향 등에 대하여 알아본다.

II. 전리층의 특성과 변화 현상

전리층은 지표면 상공 약 60 km부터 1,000 km까지의 지구 고층 대기가 태양으로부터 복사되는 EUV, X선과 같은 전자기 복사와 은하에서 나오는 우주선 등에 의하여 이온화되어 입자들의 전리 정도가 매우 중요한 물리적 파라미터로 작용하는 영역이다. 각기 다른 고도에서의 이온화율은 파장의 함수로써 태양 복사세기와 전리층을 이루고 있는 중성가스의 이온화율에 의존한다. 그리고 태양복사가 대기를 투과하여 복사경로가 길어질수록 복사강도가 약해지므로 결과적으로 태양의 천정각에 의존하며 최대 이온화율은 천정각이 0 일때이다(민경욱 등 1995). 태양에서 복사되는 대부분의 에너지는 약 $5 \times 10^3 \text{ Jm}^2$ 의 선속(flux)을 갖는 수소 Ly- α (121.6 nm)와 그보다 수 십배 약한 헬륨 Ly- α (30.4 nm)선에 집중되어 있다. Ly- α 는 지표면으로부터 60 km까지 전자 생성에 크게 기여를 하며 80 km정도에서 가장 큰 영향을 준다. 태양의 활동이 조용한 시기의 X선은 약 90 km에서 가장 큰 영향을 주며, 태양 플레어에서 나오는 X선은 지표면에서도 전자를 이온화시킬 만큼 강한 에너지를 가지고 있다. 전리층은 주간에 D, E, F1, F2 층으로 구분되며 야간에는 E, F층만이 주로 존재한다. D층의 영역은 60 km부터 90 km 사이이며 고도의 상승에 따라서 전자 밀도가 급격하게 증가한다. 전자의 최대밀도는 태양의 복사량이 최대가 되는 태양정오 이후에 일어나며 태양의 복사량이 최저가 되는 밤에는 밀도가 급격하게 낮아진다. D층의 전자밀도는 여름에 가장 크며 계절적 변화 또한 매우 심하다. 그리고 태양의 X선이 지배적인 원천이 되는 70-90 km의 범위에서 태양활동 극대기때 전리율이 최대가 된다. 태양활동의 극소기일 때에는 70 km이하에서 우주선에 의한 전리가 지배적이다. 지자기 폭풍이 회복기에 접어드는 조용한 날에는 복사벨트(Radiation belt)로부터 강력한 전자의 낙하가 발생되어 전자 밀도가 상승한다(ITU-R 보고서 725-3, 1990). 또한, D층에서는 VLF와 ELF파가 반사되지만 HF파는 신호 감쇠를 일으키는 흡수 역할을 하고 있다. E층은 고도 90 km부터 140

km사이의 영역이며 1902년 마르코니의 최초 대서양횡단 무선통신과 관련되어 처음 발견된 층이다. 강하게 이온화된 간헐적인 입자들이 때때로 같은 광범위한 고도에서 관측되기도 한다. F층은 140 km이상의 상공의 영역을 나타내며, 수직전자밀도의 율곡으로 F1과 F2를 구분하고 있다. 그러나 야간에는 전리층에서의 전자 발생에 크게 기여하는 태양 복사의 소멸로 이러한 구분이 되지 않고 있다. F2층의 전자밀도는 주간에는 10^{12} m^{-3} 이고 야간에는 $5 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 정도의 값을 가진다. 적도 이상변동(equatorial anomaly)은 지자기 적도를 중심으로 $\pm 20 \sim \pm 30^\circ$ 범위내의 F2층의 전자밀도가 태양의 천정각에 대한 존속성에서 크게 이탈되는 현상으로 적도부근의 태양 복사가 가장 크므로 적도부근의 전자밀도가 가장 크리라고 여겨지지만 실제의 경우에는 지자기 적도로부터 남북으로 떨어진 지역에서 전자밀도가 최대값을 가지는데 이러한 현상은 분수 메커니즘으로 설명된다(민경욱 등 1995).

전리층의 변화 현상은 일일, 계절, 위도, 태양활동 주기에 따른 변화 등 크게 4가지로 나눌 수 있다. 일일변화는 전리층 생성의 주요한 원인인 태양 복사의 존재 유무에 따라서 밤과 낮의 전자밀도가 차이가 발생한다. 특히 야간에는 F1, F2층의 구분이 사라진다. 계절 변화는 사계절에 따라서 F2층의 높이가 변하는데 우리 나라의 경우 춘, 추분에서 F2층의 임계주파수인 foF2값이 연중 최대 값을 가지며 여름과 겨울에는 상대적으로 낮게 측정된다. 그리고 전리층은 저위도, 중위도, 고위도마다 변화 양상이 각기 다르게 나타나며 태양 활동 주기에 따라서 foF2 측정값이 2배 이상 차이가 나기도 한다. 특히 태양활동 주기 변화에 있어서 foF2 값의 변화를 가지고 예측이 가능할 정도로 태양활동과 밀접한 관계가 있다(그림 1).

III. 전리층 관측

전리층 관측에 많은 종류의 관측 장비와 기술이 이용되고 있으며 그 중에서 몇 가지를 간단히 살펴본다.

(a) Ionosonde

Ionosonde는 높이에 따른 전리층 플라즈마의 전자밀도 분

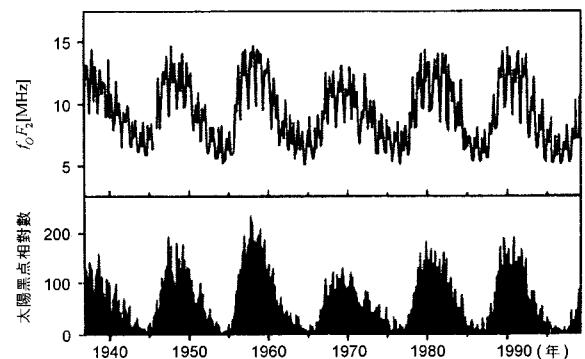


그림 1. 태양활동과 foF2와의 관계 (恩藤忠典 등 2000)

포를 측정하기 위한 가장 기본적인 장비로 전파를 수직 입사하여 전리층내의 여러 전자층에서 반사되어오는 전파를 측정함으로써 전리층내의 전자들의 분포를 높이에 따른 함수로 나타낼 수 있는 장비이다. 보통 ionosonde가 방출하는 전파는 HF영역의 전파로 1-30 MHz의 범위를 가진다. Ionosonde로 관측한 결과를 나타낸 그림을 ionogram이라고 하며 전파 측정 결과가 나타나므로 그림을 해석하면 관측 당시의 전리층 상태를 알 수 있다(그림 2).

Ionosonde에서 발사되는 전파의 주파수가 증가하면 진행파는 이온화된 층에서 굴절되어 진행하다가 반사점에 도달하면 군속도(group velocity)가 0이 되면서 신호진행시간이 증가한다. 점차 주파수가 증가하면 반사되지 않고 투과할 수 있게 된다. 정상파는 송신주파수가 투과하는 층의 플라즈마 주파수를 초과할 때 나타난다. 비정상파는 자기장에 의한 효과가 추가적으로 나타나며 정상파보다 더 높은 주파수에서 반사가 일어난다.

이온화된 층을 투과할 수 있는 최대 주파수를 임계주파수라고 하며 임계주파수는 전자밀도와는 다음의 관계가 있다.

$$\text{정상파의 경우} : f_c \approx 8.98 \sqrt{N_e}$$

$$\text{비정상파의 경우} : f_c \approx 8.98 \sqrt{N_e + \frac{0.5Be}{m}}$$

여기서 f_c 는 Hz 단위의 임계주파수, N_e 는 세제곱미터당 전자밀도, B 는 자기장세기, e 는 전자 전하량, 그리고 m 은 전자 질량이다. 임계주파수보다 높은 주파수를 가진 투과주파수는 반사되지 않고 진행하며, 군속도는 이온화정도에 따라 속도가 변하여 체공시간(time-of-flight)이 증가한다. 만약 전리층의 플라즈마 주파수가 진행파의 주파수보다 높으면 진행파는 반사되어 돌아온다. 이때 측정된 높이를 가상높이(virtual height)라고 하며 이 높이는 실높이(true height)보다 높게 나타난다. 즉, 가상높이는 전리층의 이온화정도에 영향

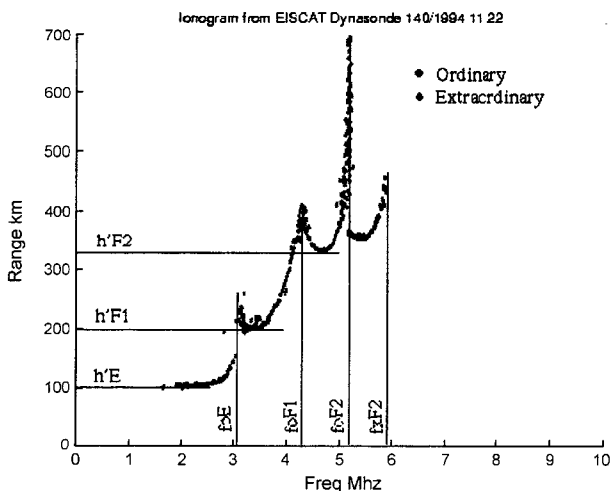


그림 2. Ionosonde로 관측한 ionogram을 해석하는 방법. 최신의 장비는 데이터를 자동적으로 처리하여 그 결과를 즉석에서 보여줄 수 있다 (<http://www.eiscat.rl.ac.uk>).

을 받으며 가상높이를 실높이로 바꾸는 과정은 실높이 분석(true height analysis)과정을 통하여 이루어진다.

(b) 비간섭성 산란 레이더(Incoherent Scatter Radar: ISR)

1960년대에 개발된 비간섭성 산란 레이더 기술은 전리층 상태에 대한 많은 정보를 얻을 수 있는 방법이다. 비간섭성 산란 레이더 기술은 고도 100 km부터 1,000 km까지 분포되어있는 플라즈마의 열적 운동으로부터 반사되어 나오는 레이더 후산란(backscatter)을 이용한 것으로 공간분해능은 5-50 km이다. 짧은 비간섭성 산란 레이더 펄스는 전파의 속도를 이용하여 후산란 영역의 높이를 측정하는데 사용된다. ISR은 장비의 규모가 크고 많은 인력과 자금이 소요되기 때문에 전 세계에 단지 몇 기만이 운용 중에 있다.

(c) 로켓과 위성

외국에서는 1960년대부터 로켓과 위성을 이용한 많은 연구가 수행해오고 있으며 최근에는 우리 나라에서도 이를 이용한 전리층 관측이 진행되고 있다(표유선 등 1995, 이재진 등 1998). 전리층 관측에 주로 쓰이는 관측 장비로는 Langmuir probe와 전자 온도 검출기(Electron Temperature Probe: ETP)등이 있으며 이러한 장비들은 우리 나라 현실에 맞게 개량되어 아리랑 위성 등에 장착되어 운용 중에 있다. 최근 미국에서는 IMAGE 위성에 고층 전리층을 관측할 수 있는 장비를 탑재하고 있는데 이 장비는 지상에서 운용하고 있는 ionosonde를 개량한 것으로 전파를 이용하여 고층 전리층 구조를 분석하는데 사용하고 있다.

(d) 기타

GPS의 전파 신호가 전리층을 통과하면서 발생하는 시간 지연을 이용하여 전리층내의 기둥 밀도(column density)를 관측하는 기술이 개발되어 전 세계 전리층의 전자밀도를 실시간으로 측정, 연구할 수 있게 되었으며 여러 개의 GPS 신호를 동시에 수신, 처리하여 전리층의 단면 구조를 해석할 수 있는 기법이 개발 중에 있다. 이에 따라서 전파연구소에서는 향후에 GPS를 이용한 총전자함유량(Total Electron Contents: TEC) 관측장비를 설치하여 운용할 예정에 있다. 그밖에 호주와 미국에서는 OTHR(Over The Horizon Radar)를 이용하여 기존 레이더의 한계를 극복하는 연구를 진행하면서 동시에 전리층 상태를 연구하고 있다.

IV. 전파 통신에 영향을 주는 전리층 현상

태양에서 방출되는 플레어는 전리층내의 전자 밀도를 증가시켜 단파통신 두절현상을 일으키며 코로나 물질 분출이나 지자기 폭풍은 전리층 폭풍을 발생시킨다. 이와 같이 태양-지구간 우주환경의 변화는 전리층을 교란시킴으로써 전

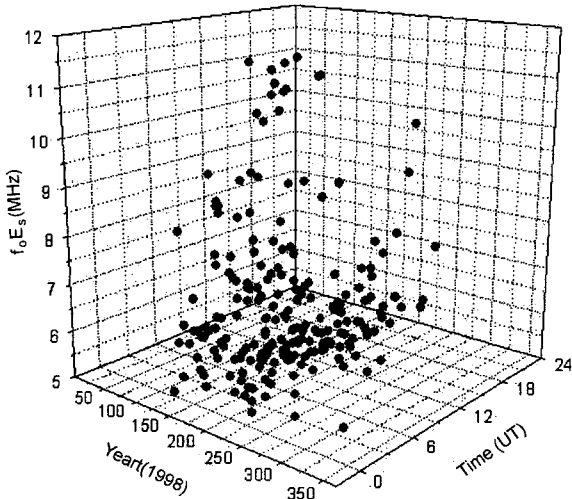


그림 3. 1998년에 전파연구소 안양청사에서 DGS-256으로 관측한 E_s 발생 분포. 세로축은 E_s층의 임계주파수이며 가로축은 각각 날짜와 시간을 나타낸다. E_s는 주로 여름철에 많이 발생되며 야간보다는 주간에 발생빈도가 높다(표유선 1999).

리층을 통과하거나 전리층 반사를 이용하는 통신에 영향을 주게 된다.

(a) Sporadic E(Es) 현상

Sporadic E는 전리층 E 영역에서 매우 높은 밀도의 전자 덩어리가 마치 구름처럼 불규칙하게 발생하는 것으로 특히 HF 전파 통신에 많은 영향을 미친다. 두께는 수십에서 수백 m이며 너비는 수 km부터 수백 km에 이른다. 높은 전자 밀도로 인하여 전파에 대하여 마치 거울과 같은 역할을 하기 때문에 전파거울이라고도 한다. 지상 송신국에서 발사된 전파는 E_s층에 의하여 투과되지 못하고 반사되어 원하는 수신국에 전파가 도달하지 못하는 경우가 발생된다. E_s가 발달하면 VHF 통신 또한 얼마간 두절되는 현상이 나타나기도 한다. 우리나라의 경우에는 늦봄부터 초가을에 집중적으로 나타나며 야간보다는 주간에 발생빈도가 높다.

(b) 단파 두절(Short wave fade-outs: SWF)

델린저(Dellinger) 현상 혹은 급시 전리층 교란(Sudden Ionospheric Disturbance: SID)이라고도 한다. 플레어 현상과 동반되는 태양의 강한 X선 방출은 전리층내의 전자밀도를 증가시켜 전파의 흡수 또는 감쇠를 야기하며 HF 대역 통신이 수분에서 수 시간동안 단절되기도 한다. 단파 두절은 태양 플레어의 크기와 발생 위치에 크게 의존하며 이러한 단파 두절 현상은 주로 태양활동 극대기에 많이 발생한다. HF 대역에서도 낮은 주파수가 크게 영향을 받으며 회복시간도 길다. 이에 반하여 상대적으로 높은 주파수는 영향이 적으며 회복시간 또한 짧다.

(c) 전리층 폭풍(Ionospheric storms)

태양에서 나타나는 여러 가지 현상으로 인하여 지구자기장은 흔들리게 된다. 지구 자기장과 전리층은 복잡한 방법으로 연결되어 있으며 지구자기장의 섭동은 때때로 F 영역의 전리층을 흔들어놓기도 한다. 전리층 폭풍은 전자밀도 증가와 함께 나타나며 수 일 동안 지속되기도 한다. 그리고 일반적으로 저위도보다 중, 고위도에서 더 많이 나타나며 단파 두절 현상과는 달리 높은 주파수가 더 많은 영향을 받으므로 폭풍의 영향을 줄이기 위해서는 낮은 주파수를 사용해야만 한다. 전리층 폭풍은 태양활동 주기와 관계없이 일어나며 코로나 물질 분출(Coronal Mass Ejections : CMEs)과 태양표면의 코로나 구멍(coronal holes)과 관련이 있는 것으로 알려져 있다.

(d) 극관 흡수 현상(Polar cap absorption events: PCAs)

극관 흡수는 태양으로부터 방출되어 지구 자기장을 따라 극지방으로 유입되는 고 에너지 양성자에 의하여 나타난다. 고에너지 양성자는 D 영역을 이온화시킴으로써 HF파의 감쇠를 야기한다. PCAs는 태양활동 극대기에 많이 나타나지만 fade-outs처럼 자주 일어나지 않는다. PCAs는 플레어

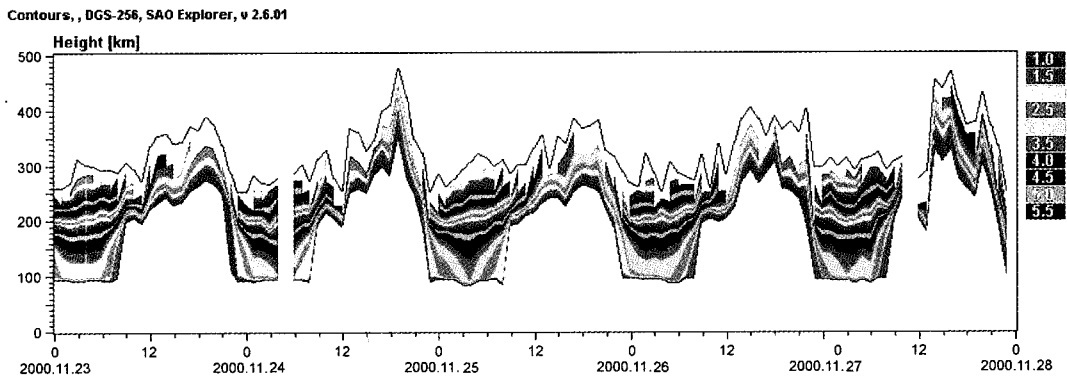
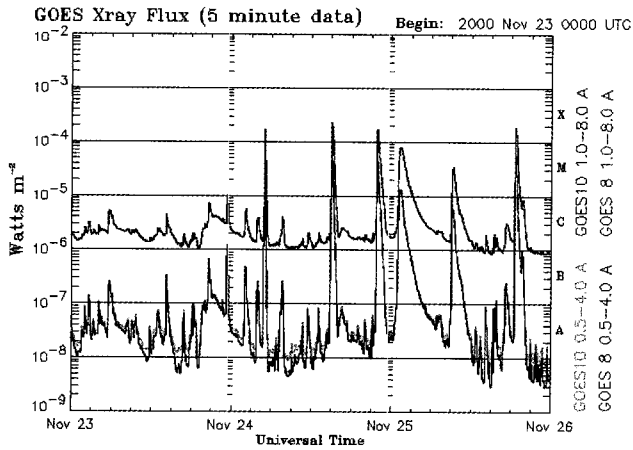


그림 4. 2000년 11월 24일에 발생한 SWF 현상. 그림에서 보면 11월 24일 UT 5시에 관측이 안된 것으로 데이터가 처리되었으므로 24일 전리층 높이(실선)가 비정상적으로 높게 나타났음을 알 수 있다. 당시 태양에서는 강력한 X선 방출이 관측되었다. 데이터는 전파연구소의 DGS-256에서 관측한 것을 이용하였다.



Updated 2000 Nov 25 23:59:03 UTC NOAA/SEC Boulder, CO USA

그림 5. GOES 위성에서 관측한 X선 플럭스. 그림 4의 SWF 현상이 관측되었을 때(UT 5시경) 태양에서 강한 X선 방출이 있었음을 알 수 있다(<http://www.sec.noaa.gov>).

발생 직후 10분 후에 나타나고 10일 정도까지 지속된다.

(e) Spread F

Spread F는 전파를 산란시키는 영역이 불규칙적으로 확산되면서 나타난다. 이때 수신 신호는 각기 다른 높이에서 반사된 전파들이 약간의 시간차이를 두고 중첩되어 나타나거나 산란된다. 저위도에서 spread F는 야간과 춘, 추분에서 많이 나타나는데 반하여 중위도에서는 고위도나 저위도보다 발생빈도가 적고 야간과 겨울에 나타난다. 위도가 40도 이상인 지역에서 spread F는 대부분 야간과 춘, 추분 근처에서 많이 볼 수 있으며 극지방에서는 가끔씩 주야간 모두 나타난다. 모든 위도에서 spread F는 F영역 주파수를 감소시키는 경향이 있으며 때때로 전리층 폭풍(ionospheric storm)과 함께 나타난다.

(f) 신틸레이션(Scintillation)

신틸레이션은 전파가 불규칙한 전자밀도를 가진 전리층을 통과할 때 나타나는 것으로 대기밀도의 심한 경사도가 존재할 때 쉽게 일어난다. 신틸레이션의 변화는 지자기 위

도, 경도, 그리고 시간에 따라서 변화하며 중위도에서는 태양주기의 계절 및 활동기뿐만 아니라 위도와 일일 시간에 따라라도 변화한다. 중위도 신틸레이션의 일일 변화는 F층의 발생과 관계되는 자정근처에서 최대로 나타난다. 정오근처에서 두 번째 최대값이 나타나며 이것은 여름에 가장 현저하게 나타난다. 신틸레이션 강도는 수신 전력에서의 변화 또는 수신 전력의 대수적 변화에 의해서 특징지어지기도 하며 측정값은 수신 전력 대수변화의 표준편차로 나타낸다. 이들 측정 중 신호수준의 변동은 실험적인 확률 밀도 함수로 표시된다. 전리층의 신틸레이션과 대류층의 강우감쇠는 서로 독립적으로 발생되며 전파감쇠의 주요원인이 된다.

V. 맺음말

Sputnik 위성 발사로 우주 공간에 대한 직접 관측이 시작된 이후 많은 위성과 로켓을 이용한 관측이 진행되고 있다. 태양의 활동으로부터 시작되는 우주환경의 변화는 우주 시대를 살아가는 우리로서 반드시 그리고 지속적으로 연구되어야 할 대상이다. 전리층은 태양 활동 변화에 의하여 거의 동시에 변화를 일으키기도 하고 우주환경 변화의 마지막 형태로 나타나기도 한다. 특히 통신 운용의 관점에 있어서 HF대역 이외에도 VHF, UHF 그리고 수 십 GHz 대역까지의 통신 품질에 영향을 미치고 있으며 GPS를 이용한 측지 정보에 오차를 발생시키므로 전리층에 대한 연구가 매우 필요한 때이다. 나날이 정밀도에 대한 요구가 증가하는 작금에 조그마한 오차는 막대한 손실을 가져올 수 있기 때문이다.

참고문헌

- ITU-R 보고서 1990, 725-3
- 민경옥 등 1995, 중형 과학로켓을 이용한 우주환경 연구(I), 과학기술처
- 이재진 등 1998, 한국우주과학회지, 제15권 2호, 401
- 표유선 등 1995, 한국우주과학회지, 제12권 2호, 234
- 표유선 등 1999, 전파연구소 연구보고서, 우주전파환경·위성 이용기술분야, 5
- 恩藤忠典 등 2000, 宇宙環境科學, Ohmsha