

제 1 장 서 론

태양 활동은 흑점과 플레어(flare), 태양 물질 방출(Coronal Mass Ejection, CME), 전파 폭발(radio burst), 분출 홍염(eruptive prominence)등 여러 가지 현상으로 나타나며, 이러한 현상들은 지구뿐만 아니라 태양계내의 다른 행성 및 행성간 공간에 영향을 미친다. 높은 에너지를 방출하는 태양 활동은 지구 자기권을 크게 섭동시키고 위성 및 전기, 전파, 통신 등의 기기의 작동에 여러 가지 영향을 끼치기도 한다. 최근 인류의 활동 영역이 우주 공간으로 확대됨에 따라 우주 공간상에서 운용되는 위성 통신과 과학위성, 군사위성 그리고 향후 건설될 우주정거장에 이르기까지 많은 장비가 운용되고 있다. 하지만 급격히 변화하는 우주 환경은 막대한 금전적인 피해와 인명의 손실을 가져올 수 있으므로 이에 대한 대책으로 장비가 운용되고 있는 우주환경의 정확한 이해가 필요하다. 이를 위해서 많은 과학자가 다양한 모델을 개발하여 우주공간의 변화현상을 연구하고 있다.

태양풍과 행성자기장의 상호작용은 매우 다양한 형태의 자기구를 존재하게 한다. 행성자기장의 전반적인 모델을 개발하는 것은 학문적으로도 큰 중요성을 가진다. 우주에서의 직접 측정이 이루어지기 전까지는 외부 공간의 자기장의 분포 연구는 지상에서 측정한 값들을 이용한 우주공간의 상태를 예측하는 수학적 모델들로 연구되었으나 이것들은 우주 탐사에 의해 알려진 바와 같이 복잡한 형태의 실제 자기장 분포와는 거리가 먼 것으로 밝혀졌다. 모델이나 관측사실로부터 지구 주변 자기장의 분포를 알면 맥스웰 방정식을 이용하여 임의의 지점에서 전기장의 변화를 알 수 있으며 자기 유체 역학 방정식을 사용하면 그 지점의 전류 등을 구할 수 있다. 또한 주어진 자기장에서 전하입자의 운동을 추정함으로써 미시적 물리현상을 조사할 수도 있다. 자기장 모델의 수치모델개발에는 크게 실험적 모델과 이론적 모델의 두 가지로 나눌 수 있다. 실험적 모델은 관측결과를 분석하여 변화현상을 수치적으로 해석하는 반면에 이론적 모델은 물리, 화학적 이론 연구결과를 체계적으로 구성하여 임의의 현상을 분석하기 위하여 개발된다. 이 두 가지는

상호 보완적이며 분석하고자 하는 자료와 연구의 특성에 따라 구분되어 사용된다.

지구의 전리층은 태양으로부터 복사되어 오는 EUV(Extreme Ultra-violet)와 X-선과 같은 전자기 방사선과 은하에서 나오는 우주선에 의해 지구의 상층대기가 이온화되어 만들어진다. 또한 전리층은 지표면 상공 약 65km부터 2,000km까지의 공간을 일컫는 것으로 이온화가 매우 중요한 물리적 파라미터로 작용하는 영역으로 전자 밀도 분포에 따라 D, E, F1, F2층으로 나누어진다. 이 층들은 태양활동과 지구의 계절, 밤과 낮에 따라 급격히 변화하기 때문에 사용자가 원하는 파라미터를 얻기 위해 다양한 모델들이 개발되어 있다.

태양 활동의 영향에 따른 지구 근접환경의 변화를 이해하기 위해서는 지구 자기권과 전리층 및 대기에 관한 연구가 선행되어야 한다. 이러한 연구의 일환으로 지구의 자기장과 전리층 및 대기에 대한 여러 모델들을 제시하고 널리 사용되는 몇 개의 모델의 특징과 프로그램 구조를 분석한다. 그리고 몇 개의 모델의 CGI 프로그램을 만들어 인터넷상에서 자자기와 전리층에 관한 값을 계산할 수 있게 만들었다. 현재 여러 나라의 웹사이트에서 이러한 서비스를 제공하고 있지만 사용자의 요구에 따른 다양한 서비스를 제공하고 있지 않다.. 본 연구에서는 실제 사용자들의 필요에 부응할 수 있는 서비스를 제공할 수 있는 사이트를 구성하였고 그중 몇몇은 세계 어느 나라의 웹에서도 얻을 수 없는 데이터를 제공하고 있다.

제 2장에서는 지자기와 전리층을 연구하고 있는 기관들을 조사하였고, 제 3장은 전리층과 대기 모델에는 어떤 것이 있으며 모델 데이터를 제공해 주는 웹사이트를 조사하였으며, 제 4장에서는 지구 자기구 모델들에 관하여 조사하였고 모델들 중 특히 IGRF 모델 데이터를 제공해 주는 웹사이트에 관하여 언급하였으며, 제 5 장에서는 조사한 전리층 모델중 특히 PIM과 IRI 모델을 분석하였고, 제 6장에서는 지자기 모델중 IGRF 모델을 분석하였고, 제 7장에서는 전리층과 지자기 모델의 CGI프로그램 개발에 관하여 언급

하였다.

제 2 장 전리층 및 지자기 연구 기관

제 1 절 개요

전리층은 지표면 상공 약 65km부터 2,000km까지의 공간을 일컫는 것으로 입자들이 이온화가 매우 중요한 물리적 파라미터로 작용하는 영역이다. 태양으로부터 복사되는 EUV(Extreme Ultra-Violet)와 X-선과 같은 전자기 방사선과 은하에서 나오는 우주선은 지구의 상층 대기를 이온화시켜 전리층을 만든다. 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 최대이온화율은 천정각이 0일때이다.

태양에서 복사되는 대부분의 에너지는 약 $5 \times 10^3 \text{Jm}^2$ 의 선속(flux)를 가진 수소 Ly- α (121.6nm)와 그보다 수십배 약한 헬륨 Ly- α (30.4nm)선에 집중되어 있다. 지표면에서 보면 Ly- α 가지표면으로부터 60km까지 전자 생성에 크게 기여를 하며 80km정도에서 가장 큰 영향을 준다. 태양의 활동이 조용한 시기의 X선은 약 90km에서 가장 큰 영향을 주며, 태양 플레어에서 나오는 X선은 지표면에서도 전자를 이온화시킬 만큼 강한 에너지를 가지고 있다. 전리층은 전자밀도분포에 따라서 D, E, F1, F2로 나누어진다. 전리층의 명칭은 전리층의 존재가 알려진 초창기에 HF파가 반사되는 층을 E층이라고 칭한 후에 과학의 발전에 따라서 그 성질이 E층과 구분되는 영역을 영문자 순서대로 D층과 F층으로 나누며 이를 다시 F1층과 F2층으로 나누었다. 그리고 태양의 활동이 11년을 주기로 변화함에 따라서 전리층에서의 전자밀도가 변화한다. D층은 고도의 상승에 따라서 전자밀도가 급격하게 증가하여 최대 전자 밀도는 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 70-90km의 범위에서 태양활동 극대기때 전리율이 최대가 된다. 태양활동의 극소기일때는 70km이하에서 우주선에 의한 전리가 지배적이다. 지자기 폭풍이 회복기에 접어드는 조용한 날에는 복사벨트(radiation belt)로부터 강력한 전자의 낙하가 발생되어 전자밀도가 상승한다. F층은 130km이상의 상공의 영역을 나타내며 수직전자밀도의 윤곽으로 F1층과 F2를 구분하고 있다. 그러나 야간에는 전리층에서의 전자 발생에 크게 기여하는 태양 복사의 소멸로 이러한 구분이 되지 않고 있다. F2층의 전자밀도는 낮과 밤의 차이가 약 100배로서 주간에는 $10^{12}/\text{m}^3$ 이고 야간에는 $5 \times 10^{10}/\text{m}^3$ 정도의 값을 가진다. E층과 F층은 HF(High Frequency)통신에서 무선파를 반사하는 역할을 하기 때문에 장거리 육상 및 해상 통신에 사용되고 있으며, D층에서는 VLF와 ELF파가 반사되지만 HF파는 신호감쇠를 일으키는 흡수 역할을 하고 있다. GIS와 같은 중요사업에 사용되는 GPS위성에서 보내는 신호는 전리층을 통과하면서 시간적 지연으로 인하여 위치 정밀도를 낮추기 때문에 전리층에 대한 연구가 매우 중요하다.

지구 자기장의 90%는 지구의 외핵에서 발생된 것이다. 그리고 ring current 등이 나머지 10%를 차지하는데 이것을 자기장의 external source라고 한다. 지구 내부의 변화는 바로 자기장의 변화로 이어지고 이런 변화를 측정함으로써 내부 변화를 예측할 수 있다. 따라서 자기장의 연구는 지질학에 응용될 수 있고 특히 지진 예보에 이용될 수 있어서 중요하다. 또, 자기장 연구는 광물 자원을 찾기 위하여 쓰인다. 세계 여러 나라에서는 다양한 용도로 사용하기 위하여 자국의 자세한 자기장 조사를 하고 있고 자국 상공의 자기장에 대한 모델을 만들고 있다. 자기장의 연구는 학문적으로나 지진과 같은 재해 예방 등을 위하여 자기장의 연구는 상당히 중요하다.

이 장에서는 전리층과 지자기를 연구하는 기관에 대해서 알아보겠다.

제 2 절 국외 전리층 연구 기관

1. 국제 전리층 연구 기관

가. ITU (International Telecommunication Union)

ITU-R(International Telecommunication Union Radiocommunication assembly)의 제 6 연구위원회는 전리층에서의 전파전파(Radio Propagation in the Ionosphere)를 연구하는 그룹으로, 일반적인 전리층의 특성으로부터 전파 잡음, 전리층에서의 전파 전파 예측등을 연구한다.



그림 2-1. ITU의 홈페이지 화면



그림 2-2. URSI 홈페이지 화면

나. URSI(International Union of Radio Science)

(1) Commission G

URSI의 G 위원회에는 전리층의 전파 전파(Ionospheric Radio and Propagation)를 담당하고 있다. 이것은 다시 다음과 같이 네 그룹으로 나눌 수 있다.

- G.1. INAG(Ionosonde Network Advisory Group)
- G.2. Studies of the Ionosphere Using Beacon Satellites
- G.3. Incoherent Scatter
- G.4. Ionospheric informatics

(2) VERSIM (VLF/ELF Remote Sensing of Ionospheres and Magnetospheres)

VERSIM(VLF/ELF Remote Sensing of Ionospheres and Magnetospheres)은 IAGA(International Association of Geomagnetism and

Aeronomy)와 URSI가 함께 만든 Working Group으로 ELF(300Hz - 3 kHz)와 VLF(3 - 30 kHz) 전파에 의한 전리층과 지구 자기권의 변화를 연구한다. 이것은 1975년에 처음 만들어졌다. 처음에는 whistler에 의한 지구 자기권의 변화를 규명을 중점적으로 연구하였지만 차차 연구범위가 방대해졌다. 현재는 파동-입자 와 파동-파동 상호관계(wave-particle and wave-wave interactions), 지구 자기권과 전리층에서 입자들에 의한 파동의 감쇄(Wave-induced particle precipitation in magnetosphere and ionosphere)를 세계 22개국의 100여명의 학자들이 연구하고 있다. VERSIM에 속해 있는 일부 연구소는 다음과 같다.

- Augsburg College, USA
- INPE, Brazil
- Institute of Atmospheric Physics, Czech Republic
- Oulu University, Finland
- LPCE Orleans, France
- University of Poitiers, France
- Chiba University, Japan
- Communications Research Laboratory, Japan
- NIPR, Japan
- University of Electro-Communications, Japan
- University of Otago, New Zealand
- University of Natal, South Africa
- British Antarctic Survey, UK
- University of Leeds, UK
- University of Sheffield, UK
- University of Southampton, UK
- Stanford University, USA

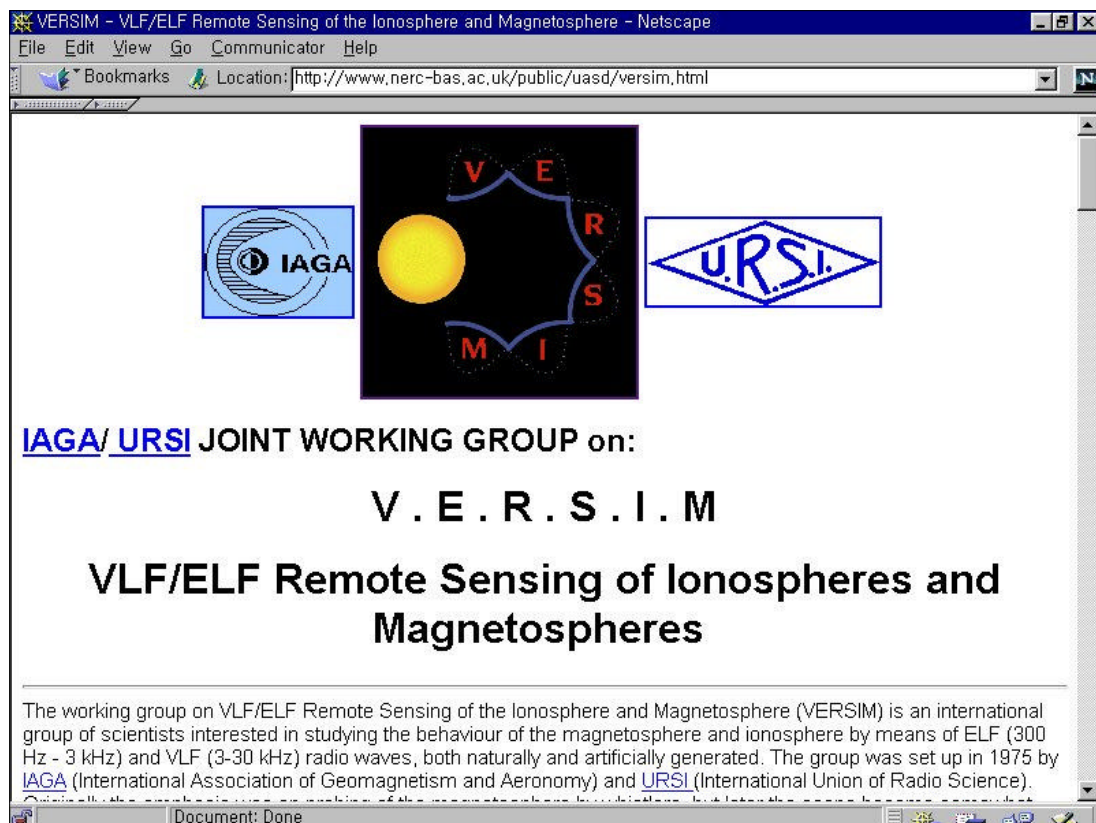


그림 2-3. VERSIM의 홈페이지

- Astronomical Observatory, Belgrade, Yugoslavia

다. IAGA(International Association of Geomagnetism and Aeronomy)

IAGA의 Division II은 초고층 대기 현상(Aeronomical Phenomena)을 연구하는데, 다음과 같은 working 그룹으로 나뉘어져 있다.

Working Group II-A : Electrodynamics of the Middle Atmosphere

Working Group II-B : Thermospheric Dynamics

Working Group II-C : Meteorological Effects on the Ionosphere

Working Group II-D : External Forcing of the Middle Atmosphere

Working Group II-E : Ionospheric Irregularities, Fields, and Waves

Working Group II-F : Extension of the Auroral Oval and Polar Cap into

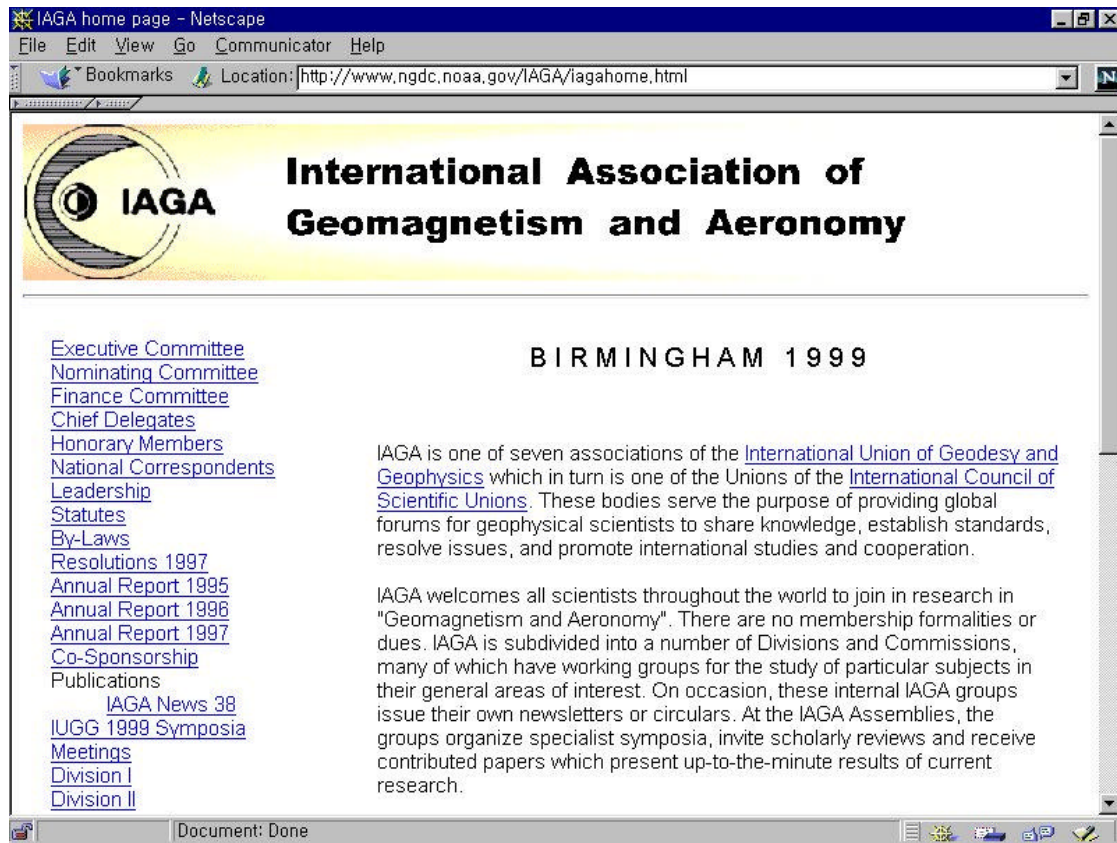


그림 2-4. IAGA의 홈페이지

the Magnetosphere

Working Group II-G : Antarctic Research

IAGA/URSI Working Group : (VERSIM) VLF/ELF Remote Sensing of
the Ionosphere and Magnetosphere

2. 서구의 전리층 연구 기관

가. NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration : 미국)

NOAA 산하 NESDIS(National Environmental Satellite, Data, and
Information Service)는 다음과 같은 기관이 있다.

- Environmental Information Services
- National Oceanographic Data Center
- National Climatic Data Center
- National Geophysical Data Center
- Office of Satellite Operations
- Office of Satellite Data Processing and Distribution
- Office of Research and Applications
- Office of Systems Development
- NPOESS Integrated Program Office

그 중에서 특히 NGDC(National Geophysical Data Center)는 해양 지질학 지구 물리학, 지구 주변 환경 등에 대한 광범위한 데이터를 제공하고 있다. 이 데이터들은 각각 WDC-A(World Data Center-A)에서도 동시에 제공한다.

나. NASA(National Aeronautics and Space Administration)

NASA산하 NSSDC(The National Space ScienceData Center)에서는 우주 공간 물리학(Space Physics)과 태양 물리학(Solar Physics) 관련 데이터, NASA의 우주 탐사선으로부터 온 달과 다른 행성의 데이터 등과 기타 데이터 또는 모델 등을 제공하고 있다.

다. Millstone Hill Observatory

미국 Massachusetts주 Westford에 위치하고 있는 Millstone Hill 관측소는 대기 과학에 관한 넓은 분야를 연구하고 있는데 이곳에서 소장하고 있는 관측장비는 다음과 같다.



그림 2-5. Millstone Hill 관측소의 Digisonde 데이터 제공 사이트

(1) ISR(Incoherent Scatter Radar)

- 설치 장소 : M. I. T. (1965 - 현재)
- 주파수 범위 : 440 MHz
- 출력 : 2-5 MW.
- 연구 목적 : 전리층의 E층과 F층 연구

(2) Digisonde

- 설치 장소 : U. Massachusetts/Lowell (1987- 현재)
- 주파수 범위 : 0.5 - 30 MHz

(3) FPI(Fabry Perot Interferometer)

- 설치 장소 : MIT/U. Pittsburgh (1989 - 현재)
- 기종 : 100mm Fabry-Perot 간섭계

(4) 기타

- All-Sky Image
- Imaging Spectrometer
- IR Group
- CCD Telescope
- Triple-etalon Interferometer
- ASDI (All-Sky Doppler Interferometer)
- CEDAR FPI
- GPS
- Meteor Radar System
- LIDAR

3. 일본의 전리층 연구 기관

가. STELab(Solar-Terrestrial Environment Laboratory)

STELab은 일본 나고야 대학에서 운영하고 있는 연구소로 태양활동과 이에 따른 지구 근접 우주환경에 대한 연구를 수행하고 있는 곳이다. 이 중 전리층 분야와 관계된 활동은 다음과 같다.

(1) Svalbard Incoherent Scatter Radar

STELab과 EISCAT(European Incoherent Scatter Radar) Scientific Association은 함께 Svalbard Incoherent Scatter Radar 연구과제를 지난 1992년부터 진행하고 있다.

(2) 위성 자료에 기초한 지구 자기권 - 전리층의 coupling 현상 연구

(Magnetosphere-Ionosphere Coupling Based on Satellite
Observations)

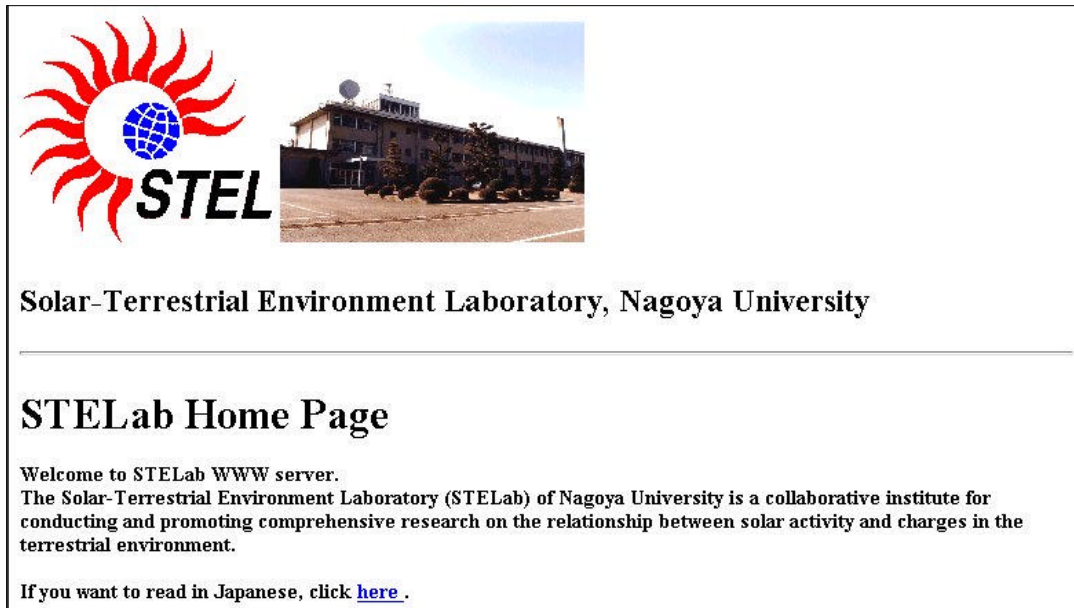


그림 2-6. 일본 STELab의 홈페이지 화면

지구의 극지방 근처에서 발생하는 지구 자기권과 전리층의 coupling 현상 연구가 일본의 AKEBONO위성과 미국의 Dynamics Explorer위성 데이터에 기초하여 수행중이다. 이들 데이터에는 오로라의 이미지, 플라즈마와 전자의 흐름등이 포함되어 있어 지구 자기권에서의 여러 현상을 연구하는데도 사용된다.

(3) 위성의 TEC값 관측에 기초한 지구 자기권 - 전리층의 coupling 현상 연구

(Ionosphere-Magnetosphere Coupling Based on GPS-TEC Observations)

TEC(Total Electron Content)의 관측은 GPS(Global Positioning System)위성으로부터 이루어지고 있다. 이들 데이터를 사용하여 나고야 대학은 Troms0와 연계하여 연구를 진행중이다.

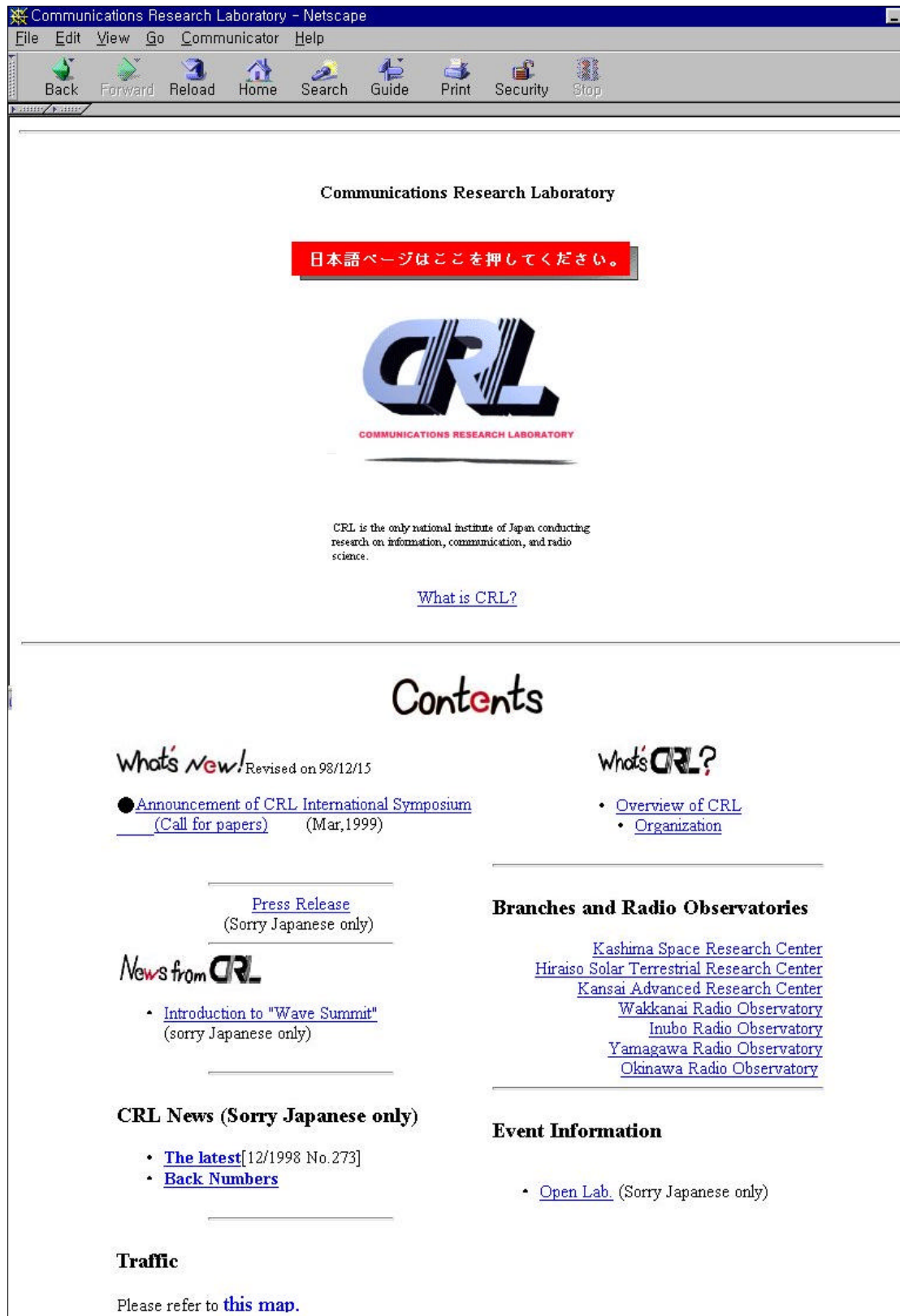


그림 2-7. 일본 CRL(Communication Research Laboratory)의 홈페이지 화면

나. CRL(Communications Research Laboratory)

CRL(Communications Research Laboratory)은 원거리 통신, 지구 근접 통신 환경과 태양 및 행성 과학에 초점을 맞추고 있는 연구소이다. 이 연구소는 다음의 관측소를 운영하고 있다. 이 중 Yamagawa Radio Observatory에서는 MF radar의 관측을 통하여 대기의 바람과 전리층 D층의 전자밀도를 관측하고 있으며, Wakkanai, Kokubunji, Yamagawa, Okinawa등에서는 Ionosonde를 가지고 전리층을 관측하고 있다. 그림 2-7은 CRL의 홈페이지 화면이다.

제 3 절 국내 전리층 연구 기관

1. 전파연구소

전파연구소는 1966년 발족시부터 전리층 관측을 시작했다. 전파연구소에서 사용되었던 관측기 및 현재 운용중인 관측기기는 다음과 같다.

(가) 1966년 10월 : 일본 무선주식회사 Model NJZ-134 설치

- 관측 방식 : 수직 입사
- 관측기 구성 :
 - 주장치 (송신기, 수신기, 동기조정기)
 - $h' - f$ flow indicator
 - 감시지시기 및 시각조정기
 - 축전지 및 변압기
- 기술적 특성 :
 - 주파수 범위 : 1-20 MHz
 - 관측시간 : 5, 15, 30, 60분, 연속관측 가능

매시 30분, RWD(Regular World Day)는 15분

- 최대 출력 : 10Kw
- 주파수 sweep 시간 : 30 sec
- 공중선 : △형
- 기록 방식: 35mm 필름사진

(나) 1969년 : 일본 무선주식회사 Model NJZ-502A 설치

- 관측 방식 : 수직 입사
- 관측기 구성 :
 - 송신부
 - 수신부
 - Control 장치부
- 기술적 특성 :
 - 주파수 범위 : 0.4 - 15 MHz
 - 관측 시간 : 5, 15, 30, 60분, 연속관측 가능
 매시 30분, RWD(Regular World Day)는 15분
 - 최대 출력 : 10Kw
 - 주파수 sweep 시간 : 15.3 sec
 - 공중선 : △형
 - 기록장치 : 35mm 필름사진

(다) 1983년 8월 : 호주 KEL 사의 IPS-42 설치

- 1983년 9월부터 관측개시
- 관측 방식 : 수직 입사
- 관측기 구성 :
 - IPS-42 송수신부 장치
 - KEL-46 Ionogram의 판독장치
 - KEL-47 Data 처리 장치

- Print 장치
- 기술적 특성 :
 - 주파수 범위 : 1 - 22.6 MHz
 - 관측 시간 : 5, 15, 30, 60분, 연속관측 가능
매시 30분, RWD(Regular World Day)는 15분
 - 최대 출력 : 5 Kw
 - 주파수 sweep 시간 : 12 sec
 - 공중선 : Δ 형
 - 기록장치 : 16mm 필름사진 및 Floppy Disk
(8 bit Apple Computer를 이용)

(라) 1990년 12월 : 미국 Lowell 대학 ULCAR의 DGS-256 설치

- 1991년 1월부터 관측개시, 현재까지 운용(관측장비 upgrade)
- 관측 방식 : 수직 입사, 사입사 관측가능
- 관측기 구성 :
 - 송신부 : Final Power Amplifier,
Delay Line, exciter,
Pulse Power Supply
 - 수신부 : Antenna Switch
 - Controller부 : 송수신기와 Processor, ARTIST, 원격 시스템
 - 관측자료처리부 : ADEP 시스템
- 기술적 특성 :
 - 주파수 범위 : 0.5 - 30 MHz (현재 1 - 16 MHz 사용)
 - 관측 시간 : 15, 30, 45, 60분, Manual 관측가능
 - 최대 출력 : 10Kw(현재 5 Kw 조정 발사)
 - 주파수 sweep 시간 : 15.3 sec
 - 공중선 : Δ 형(half Rombic 안테나)

- 기록장치 : 디지털 컴퓨터 처리(자기테이프/전산기록지에 입력)
- 시각동기부 : GPS 시각과 자체 Rb시각 이용 시각동기

2. 항공우주연구소

항공우주연구소에서는 1997년 7월 9일 과학로켓 KSR-Ⅱ 1호기 발사 성공에 이어 1998년 6월 11일에는 KSR-Ⅱ 2호기를 발사하여 전리층의 전자 밀도 및 온도를 측정하는데 성공하였다. 그림2-8은 전리층 관측 결과로 다음과 같다. 항공우주연구소에서는 2단형 중형과학로켓(KSR-Ⅱ) 후속으로 2003년까지 액체 추진기관을 사용하는 고성능 과학로켓 KSR-Ⅲ의 개발을 목표로 현재 연구사업에 박차를 가하고 있다.

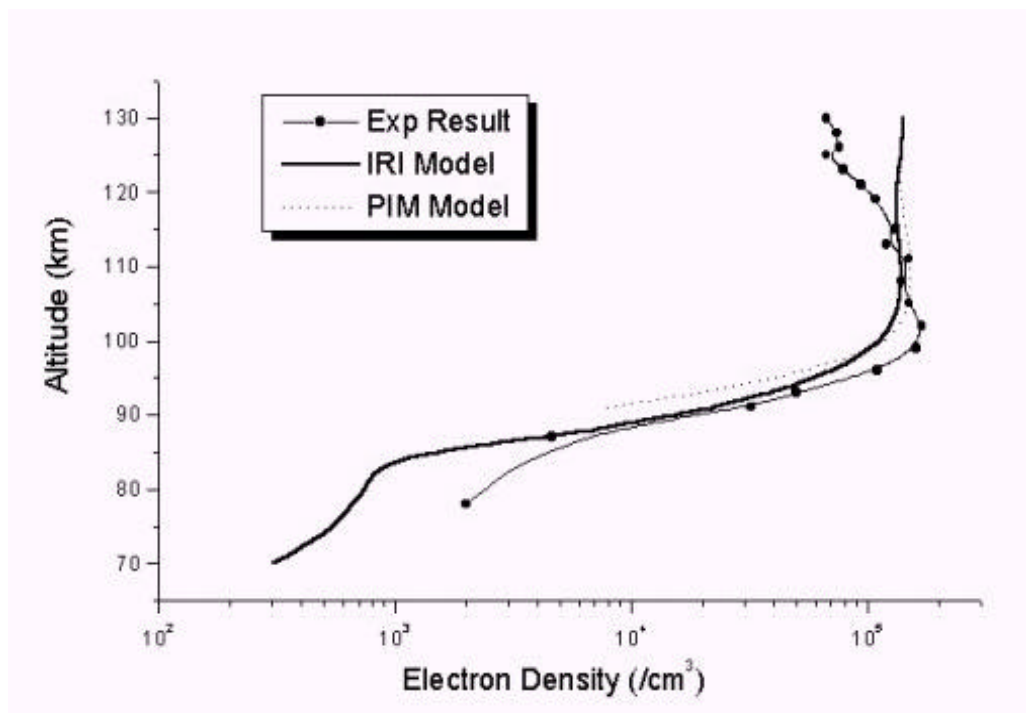


그림 2-8. 로켓으로 관측한 전자 밀도의 분포와 IRI, PIM 모델과의 비교

(가) KSR-Ⅱ 의 규격

- 탑재중량 : 150 kg
- 도달고도 : 137.2 km (발사각각 79도)
- 지상거리 : 123.9 km (발사각각 79도)
- 비행시간 : 365초
- 길이 : 11.10 m
 - 1단 : 3.6 m
 - 2단 : 7.5 m
- 직경 : 0.42 m
- 총중량 : 탑재중량 포함 2.02톤
 - 1단 : 0.77톤
 - 2단 : 1.25톤
- 추진제중량 :
 - 1단 : 423 kg
 - 2단 : 582 kg
- 연소시간 :
 - 1단 : 9초
 - 2단 : 20초
- 최대추력 :
 - 1단 : 22.7 톤
 - 2단 : 15.8 톤
- 최대속도 : 1550m/sec (30.8초)
- 최대가속도 : 12.6 g (3.6초)

(나) KSR-Ⅲ 의 규격

- 길이 : 12m
- 직경 : 1m
- 중량 : 4톤

- 추력 : 10톤
- 고도 : 200km 급

3. 경희대학교 우주과학과

경희대학교 우주과학과에서는 전리층에서 발생하는 여러 가지 물리적인 현상들을 전파연구소의 Ionosonde 데이터와 모의실험 등을 통하여 연구하고 있다.

제 4 절 지자기 연구 기관

1. 국외 연구기관

국외에는 많은 지자기 연구 기관이 있다. 몇몇 나라에서는 여러 목적에 이용하기 위하여 자국의 정밀한 자기장 조사를 하여 자국만을 위한 모델을 만들기도 하였다.

가. AGSO(Australian Geological Survey Organisation)

AGSO는 호주에 있는 연구기관으로 지질학 및 지구과학과 관련된 다양한 분야의 연구를 한다. AGSO에서는 지구 자기구 모델로 가장 많이 쓰이는 IGRF를 이용하여 호주 전역에 걸친 상세한 자기장 모델인 AGRF(Austlian Geomagnetic Reference Field)를 개발하였다. 그림 2-9는 AGSO의 홈페이지 모습이다.

나. USGS(U. S. Geological Survey)

USGS는 지진학, 지진과 관련된 장비, 자기장, 위성 통신 등을 연구한다. 1985년 이 기관에서는 미국 전역에 대한 정확한 자기장 값 계산을 위

하여 USGS 자기장 모델을 개발하였다. 그림 2-10은 USGS 산하 Geomagnetism의 홈페이지이다.

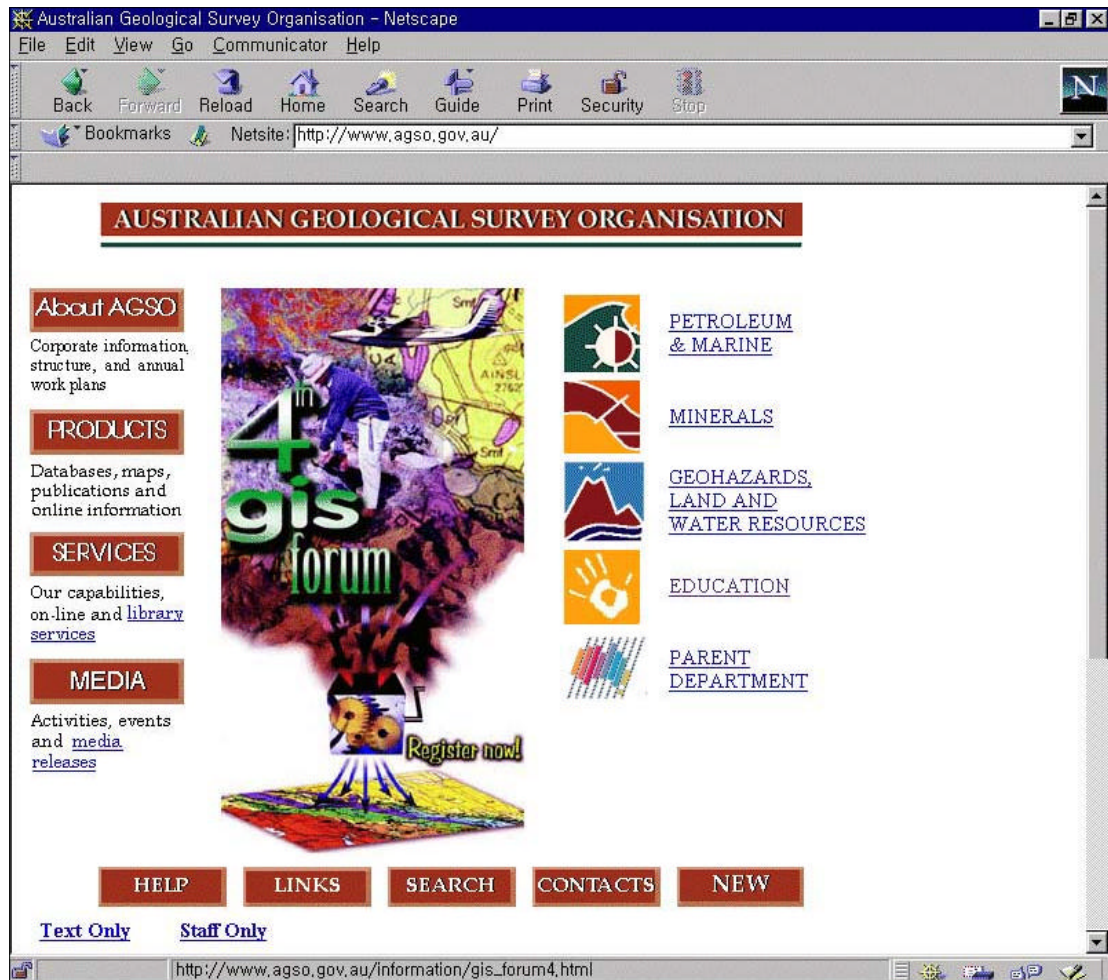


그림 2-9. AGSO의 홈페이지.

다. NSSDC(National Space Science Data Center)

NASA 산하에 있으며 2절에서 언급하였지만 태양 물리 및, 우주 공간 물리 등의 자료를 제공하고 있다. 그림 2-11은 NSSDC의 홈페이지이다. 그리고 그림 2-12는 NSSDC에서 제공하고 있는 모델 등의 데이터이다. NSSDC에서는 IGRF 데이터 출력 및 다양한 서비스를 제공하고 있다.

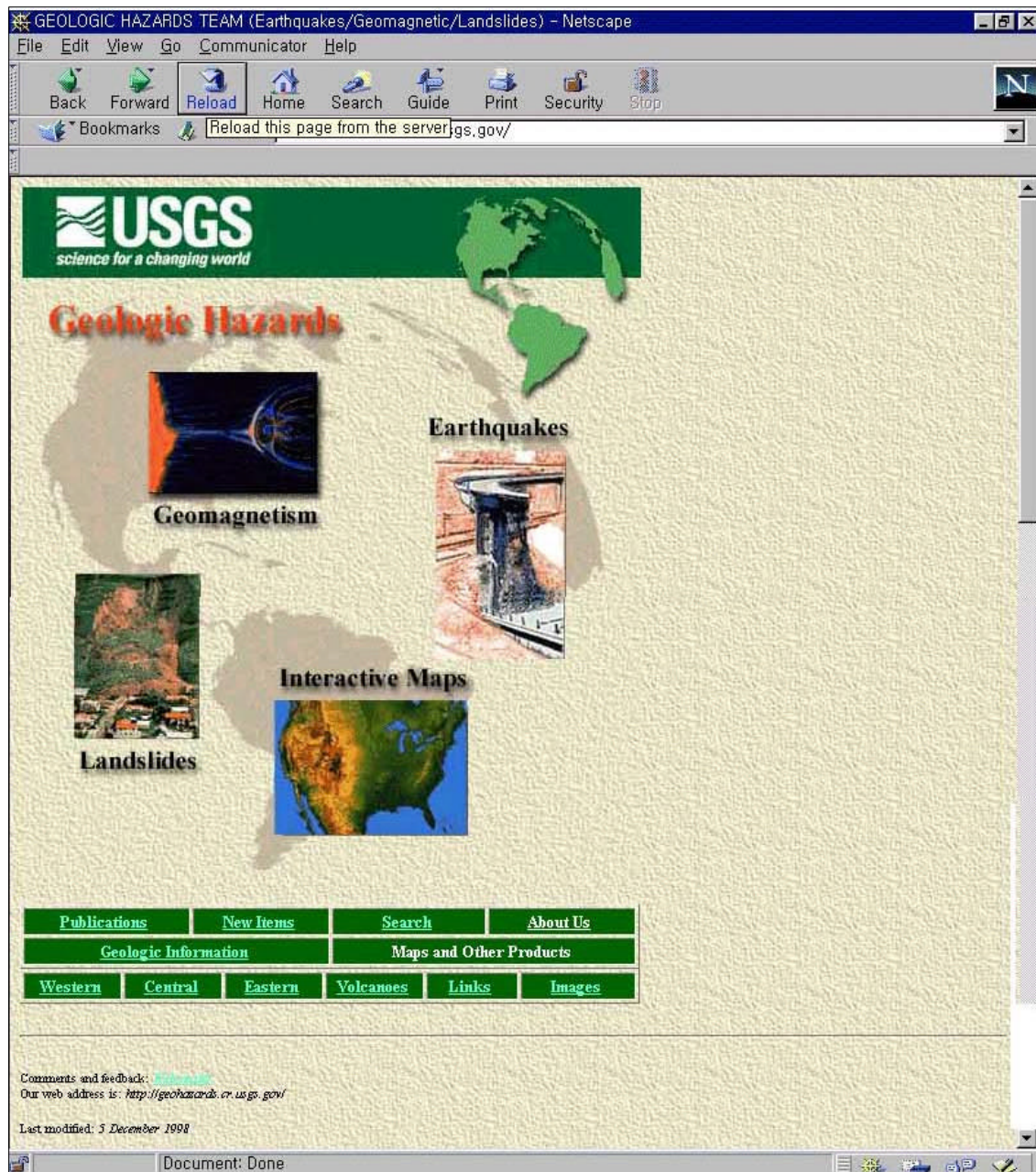


그림 2-10. USGS의 홈페이지.

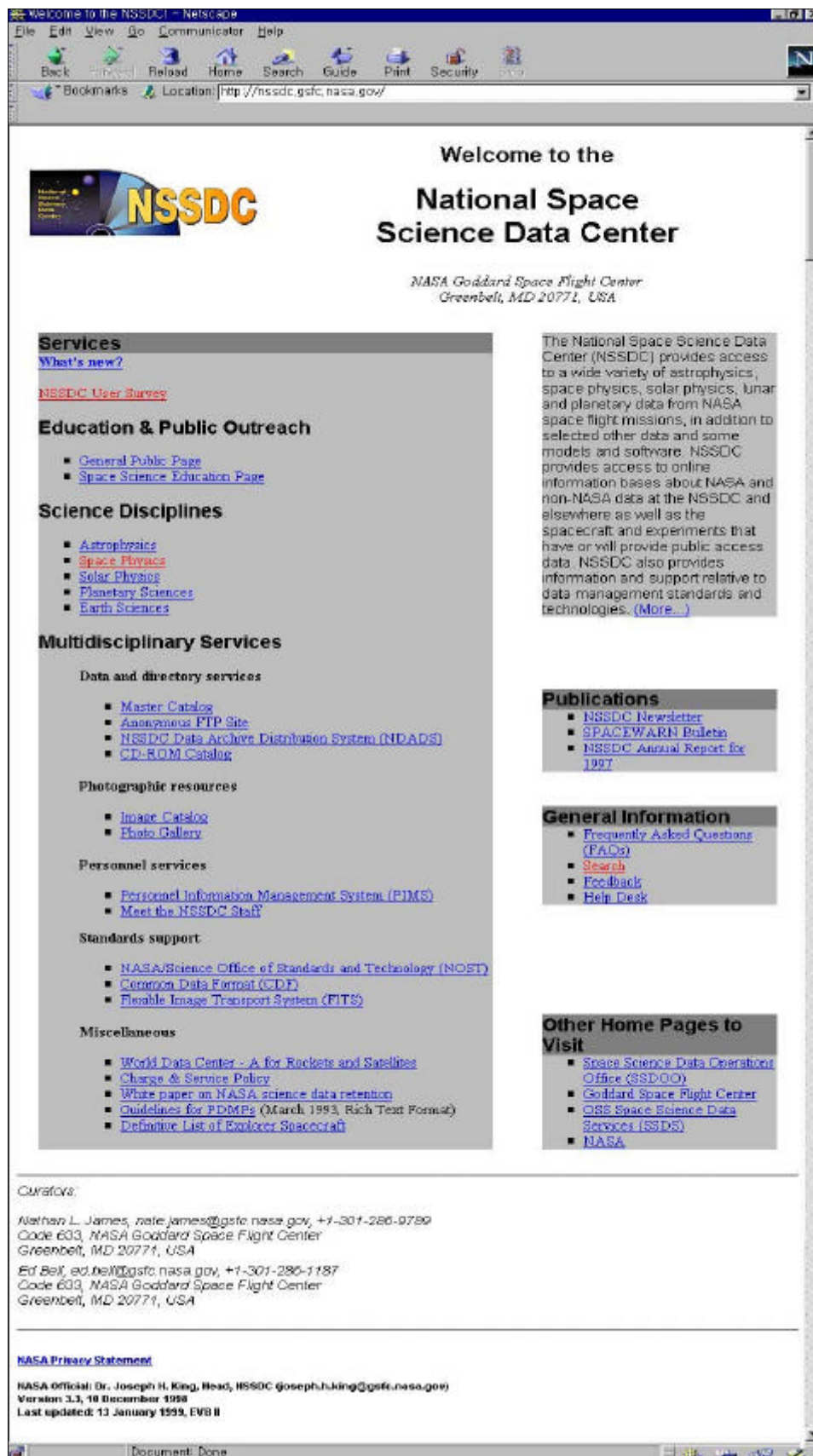


그림 2-11. NSSDC의 홈페이지.

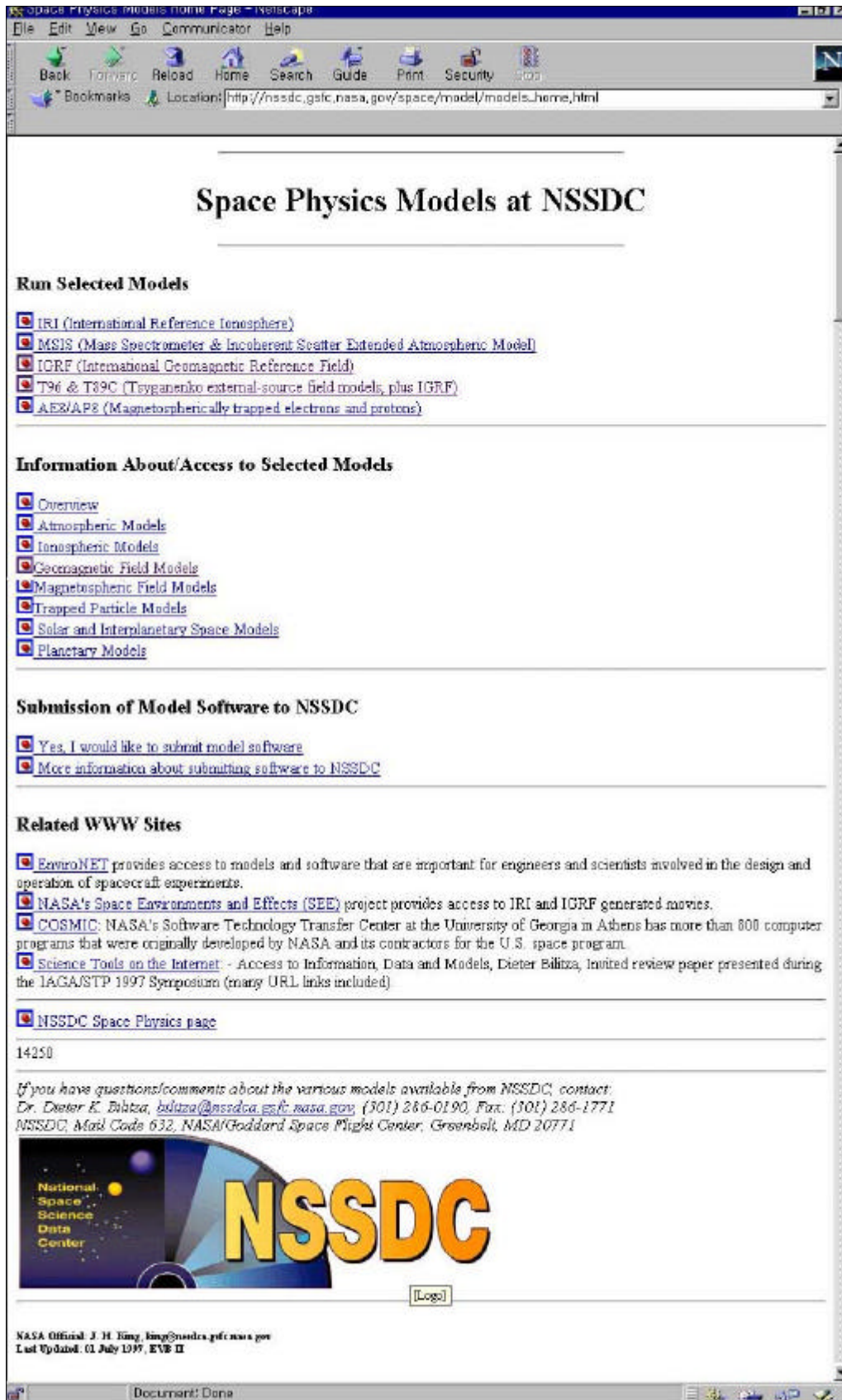


그림 2-12. NSSDC에서 제공하는 모델들.

라. IAGA(International Association of Geomagnetism and Aeronomy)

IAGA의 Division V는 지구 자기장 관측 및 분석한다. 이 그룹은 IGRF를 만드는 등 자기장에 대한 많은 연구를 하고 있다. 이 그룹은 다음의 몇 개의 부분으로 나누어 연구를 하고 있다.

WG V-1 : Geomagnetic Observatories, Instruments and Standards

WG V-2 : Geomagnetic Data, Indices and Applications

WG V-3 : External/Internal Geomagnetic Relations

WG V-7 : Earth and Planetary Magnetic Survey Satellites

WG V-8 : Analysis of Global and Regional Geomagnetic Field and its
Secular Variation

WG V-9 : Magnetic Anomalies(Land and Sea)

마. NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)

NOAA는 2절에서 언급한 것과 같이 산하에 여러 기관을 가지고 있다. 특히 NGDC는 지구 자기장 모델 중 IGRF와 그 외 모델의 프로그램 등을 제공하고 있다. 그림 2-13은 NGDC의 홈페이지이다.

2. 국내 연구기관

국내에는 지자기 연구가 활발하지 않다. 그러나 전파연구소에서는 제주도, 이천, 경희 대학교에 자력계를 설치하여 실시간 자기장 변화 데이터를 얻고 있다. 이 데이터는 지자기 변화를 이용한 우주 환경예보 등에 이용되고 있으며 현재 지구 자기장 모델과 같은 연구에는 이용되고 있지 않다.

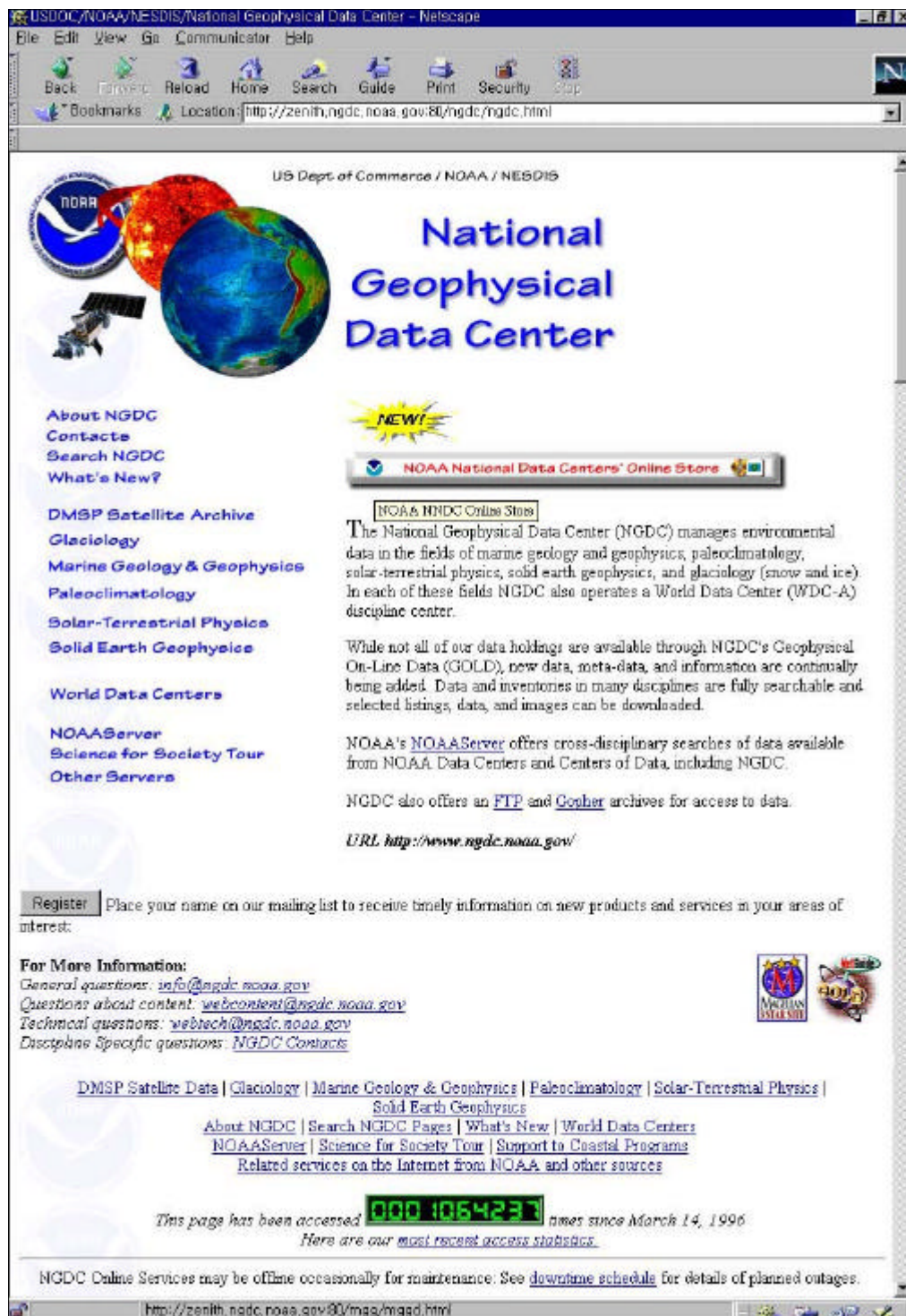


그림 2-13. NGDC의 홈페이지.

제 3 장 전리층 및 대기 모델

제 1 절 개요

이 장에서는 전리층 및 대기 모델의 종류와 특징을 알아보고 또한 전리층 모델을 웹에서 제공하는 사이트와 기타 전리층 관련 데이터를 제공하는 사이트에 대해서 알아볼 것이다.

제 2 절 전리층 모델

1. 일반적인 모델

가. International Reference Ionosphere 1995

(1) 제작자 : D. Bilitza

(2) 파라미터 : 전자밀도, 전자온도, 이온온도, 이온구성(O^+ , H^+ , He^+ , NO^+ , O_2^+)

(3) 설명

IRI(International Reference Ionosphere)는 COSPAR(Committee on Space Research) 와 URSI(International Union of Radio Science)의 후원을 받아서 진행된 국제적인 연구과제이다. 이 기관들은 유용한 관측 데이터에 기반을 둔 실험적인 전리층의 모델을 만들기 위해서 최근 60년 동안 working group을 만들었다. 몇 몇은 계속적으로 보강되어 발표되고 있다. 주어진 장소, 시간과 데이터에 의해서 IRI는 고도 50km에서 2000km까지의 전자밀도, 전자 온도, 이온 온도, 이온 구성과 전자량을 계산한다. 이것은 자기장이 비교적 활동적이지 못한 경우에 오로라지역을 제외한 전리층의 각 값을 한 달치를 평균 내어서 제공한다. 주요 데이터 소스는 전 세계적으로 분포한 ionosonde과 incoherent scatter radar (Jicamarca, Arecibo, Millstone Hill, Malvern, St. Santin), ISIS, Alouette topside sounder 그리고

몇몇 위성과 로켓의 직접관측 등이다. 앞으로 이온 drift, 오로라지역과 극지역의 전리층에 대한 설명, 자기 폭풍 효과 등을 포함할 계획이다.

2. 전자밀도 모델

가. PIM(Parameterized Ionospheric Model)

- (1) 제작자 : 미 공군 필립스 연구소
- (2) 파라미터 : 전자밀도
- (3) 설명

PIM은 이론적인 전리층 모델로써 고위도, 중위도, 저위도 지역모델을 결합하여 지구 전체의 전리층상태를 분석할 수 있도록 미 공군의 필립스 연구소에서 개발하였다. 이 프로그램의 언어는 포트란이며, 고도 90km부터 2500km까지 영역의 전자밀도 분포와 이에 따른 전리층 E층과 F2층의 임계 주파수 그리고 총 전자밀도 함유량을 수치화하여 그 결과를 출력할 수 있다.

나. Chiu Ionospheric Model

- (1) 제작자 : Y. T. Chiu
- (2) 파라미터 : 전자밀도
- (3) 설명

이 전지구적 실험적인 모델은 전리층의 전자밀도를 지역시간, 위도, 태양 흑점수의 변화에 따라 기술하고 있다. 이것은 1957년부터 1970년까지 50개의 ionosonde 데이터에 기반을 두고 있다. 모델의 profile은 E, F1, F2층의 chapman 함수 값에서 얻는다. 이것은 1975년 Chiu에 의해서 발전되었다. 이 모델은 50개보다 적은 수의 계수를 사용하기 때문에 비교적 간단하다. 하지만 이것은 적도와 고위도 지방에서는 사용할 수 없는 한계를 지니고 있음에도 불과하고 이 모델은 빠르고 간단하게 조작할 수 있으며, 1차로 근사시키는 경우에 좋은 선택이 된다. 또한 극지방의 전리층에도 사용할 수 있는 모델이 개발중이다.

다. Bent Ionospheric Model 1972

(1) 제작자 : R. B. Bent

(2) 파라미터 : 전자밀도

(3) 설명

이 모델은 전리층의 전자밀도를 경·위도, 시간, 계절, 태양의 전파 플럭스의 함수로 나타내준다. 전리층의 상층은 포물선과 세 지수 프로파일 선으로, 하층은 두 개의 포물선으로 나타내고 있다. 이것은 5만개의 Alouette 상층 ionogram (1962-1966), 6천개의 Ariel 3의 직접 관측(*in situ*) 데이터 (1967-1968), 40만개의 하층 ionogram(1962-1966)에 기반을 두고 있다. 또한 CCIR의 F2 최대값이 사용되었다. 이 모델은 위성 궤도 추적에서 전리층의 굴절 보정에 널리 사용되고 있다. 하지만 이것은 D, E, F1등 전리층의 하층 부분은 포함하고 있지 않으며, CCIR의 M(3000)F2와 F2의 최대높이간의 2차적인 현상에 사용된다. Bilitza et al. (1988)은 Bent모델과 IRI모델을 비교하였고, 또한 이것을 위성 궤도 측정의 적용시키는 것에 대해서 논하였다. 이에 의하면, IRI는 전리층의 하층 밀도 구조를 보다 자세하게 설명할 수 있기 때문에 Bent모델보다 더 나은 결과를 보였다.

라. Penn State Mk III Model 1985

(1) 제작자 : J. S. Nisbet, R. Divary

(2) 파라미터 : 전리층의 전자밀도와 함유량

(3) 설명

Penn State Mk III 모델은 (가) 고도 120km부터 1250km까지의 전자밀도를 계산하고, (나) 전리층의 전자 함유량과 (다) 산발적인 E층 교란의 통계적인 성질을 제공한다. 이 모델에서는 두 가지 모드를 사용할 수 있다. 하나는 정해진 하나의 장소에서 각 시간에 따른 값을 보는 것이고, 다른 하나는 정해진 시간에 정해진 범위 안의 값을 보는 것이다. 이 모델은 F2 최대치의 실험적인 모델과 이론적인 수치결과를 절충한 것이다. MkIII는 펜실바니아대

학의 Nisbet(1971)과 Lee(1985)에 의해서 보다 발전되었다. 이것은 대기모델의 일종인 MSIS-83, AE-E위성에 의한 태양 플럭스 값(Hinteregger and Fukui 1981), 핵반응율(Torr et al., 1979), 그리고 Rush et al.(1984)에 의해 발전된 F2 최대치의 준관측지도를 사용하여 만들어졌다.

마. SLIM Model 1985

가. 제작자 : D. N. Anderson, M. Mendillo, B. Herniter

나. 파라미터 : 전자밀도

다. 설명

SLIM(Semi-Empirical Low-Latitude Ionospheric Model)은 저위도 전리층의 이론적인 수치모델에 기초하고 있다. 180km에서 1800km까지의 전자밀도는 몇 개의 위도와 지역시간에 의해서 결정되어진다. 전자밀도 profile은 F2최대치에 의해서 이론화되었고, 각각의 profile은 여섯 개의 수정된 Chapman 함수에 의해서 나타내어진다. 태양활동이 극대 혹은 극소기일때 각각 춘·추분, 하지, 동지인 경우에 모델에서 계산 값을 얻을 수 있다. 이론적인 계산을 할 때 사용되는 입력 파라미터는 중성입자의 온도와 밀도를 계산하는 MSIS 모델, IRI 모델의 온도비, 낮의 ion drift pattern을 포함하고 있다.

바. FAIM Model 1989

(1) 제작자 : D. N. Anderson, J. M. Forbes

(2) 파라미터 : 전자밀도

(3) 설명

FAIM(Fully Analytical Ionospheric Model)은 SLIM모델에 맞추어진 계수를 갖는 Chiu모델의 형식(formalism)에 사용한다. 지역시간변화는 6차 이상의 푸리에급수와 4차 조화 진동 함수로 나타나는 Dip위도의 변화로 표현된다.

3. F2 최고치 모델과 응용 프로그램

가. CCIR foF2 and M(3000)F2 Model Maps 1982

- (1) 제작자 : Comite Consulatif International des Radiocommunications
- (2) 파라미터 : F2-peak 파라미터
- (3) 설명

이 데이터 set은 Comite Consulatif International des Radiocommunications에서 만들어진 foF2와 M(3000)F2 계수를 포함하고 있다. foF2는 F2-peak에서의 플라즈마 주파수이고 밀도 NmF2와 다음과 같은 관계가 있다.

$$N_m F2 / m^{-3} = 1.24 \times 10^{10} (foF2 / MHz)^2$$

M(3000)F2(=MUF(3000)/foF2)는 F2-peak의 높이와 밀접한 관계가 있는 전파 요소이다. MUF(3000)은 전리층에서 반사되어서 3000km안에서 수신할 수 있는 가장 높은 주파수이다. foF2와 M(3000)F2는 보통 ionogram에서 그 값의 비율이 정해진다. CCIR 지도는 1954년부터 1958년까지 전 세계의 150여 개의 관측소에서 얻어진 ionogram의 값에 기반을 둔다. Jones와 Gallet(1962, 1965)는 이 모델을 보다 발전시켰다.

나. URSI foF2 Model Map 1988

- (1) 제작자 : C. M. Rush
- (2) 파라미터 : F2 peak 플라즈마 주파수, foF2
- (3) 설명

URSI 계수는 International Union of Radio Science(URSI) Working Group G5에 의해서 얻어진 결과이다. 이것의 수학적 방법은 CCIR foF2 모델과 같다. CCIR 모델은 ionosonde가 드물게 있는 남반구에 대해서는 잘

맞지 않는다. Rush et al.(1983, 1984)는 초고층 대기 물리학을 사용하였다. Fox와 McNamara(1988)은 Rush의 방법과 4만 5천개의 ionosonde 데이터를 가지고 최종 URSI 계수를 확정지었다.

다. ISS-b foF2 Maps 1981

- (1) 제작자 : Dr. Matuura
- (2) 파라미터 : F2- peak 임계 플라즈마 주파수, foF2
- (3) 설명

이 데이터 set은 여섯 개의 계수 set으로 구성되어 있고 다른 시간대의 전지구적인 foF2지도를 만들기 위해서 포트란 프로그램으로 만들어졌다. 이 모델은 일본의 ISS-b topside sounder의 관측 값에 기본을 두고 있다. 데이터는 2시간마다 계산되어진다. 1978년 8월 11일에서 12월 12일, 1978년 10월 10일에서 1979년 2월 11일, 1978년 11월 9일에서 1979년 3월 13일, 1979년 1월 10일에서 5월 14일, 1979년 2월 9일에서 6월 13일, 1979년 8월 8일에서 1979년 12월 13일까지의 지속적인 관측데이터로서 전지구적인 모델을 가능하게 했다. 구면 조화 분석은 이 데이터를 9차의 보정된 dip 위도와 4차의 경도로 나타낼 수 있도록 하였다. 분석 방법은 일본 통신종합연구소(Communications Research Laboratory)의 6개 보고서에서 설명되었다. 이 보고서들은 또한 각기 다른 표준시간과 지역시간의 전지구적인 등고선 그림을 포함하고 있다. ISS-b 지도는 태양활동이 활발할 때의 그림인데 반해서 CCIR과 URSI의 그림은 태양활동이 활발할 때와 그렇지 않을 때를 모두 포함하고 있다. Rush et al.은 새로운 URSI 모델이 예전의 CCIR모델보다는 ISS-b모델에 가깝다고 밝혔다.

라. MINIMUF/QSTMUF Model 1985

- (1) 제작자 : R. B. Rose
- (2) 파라미터 : HF 전파 통신의 사용 가능한 최대 주파수
- (3) 설명

이 모델은 MUF(Maximum Usable Frequency)을 예보해주는 프로그램의 일종인데, 여러 경로를 통해서 경사를 가지고 입사한 ionogram에 바탕을 두고 있다. 발신 장소와 송신 장소에서의 데이터와 태양 플럭스 지수 또는 태양 흑점수를 가지고 매시간의 MUF값을 구할 수가 있다.

마. IONCAP Model 1983

- (1) 제작자 : L. R. Teters, J. L. Lloyd, G. W. Haydon, F. G. Stewart
- (2) 파라미터 : 전자밀도, MUF 등
- (3) 설명

IONCAP(IONospheric Communications Analysis and Prediction program)은 어떤 위치에서든 HF 전파 진행 파라미터의 평균값을 계산해 준다. 자기장의 세기, MUF(Maximum Usable Frequency)와 LUF(Lowest Usable Frequency)는 IONCAP에서 계산할 수 있는 파라미터 가운데 하나이다. 이러한 파라미터를 구하기 위해서는 송수신 장소, 송수신 출력, 표준시간과 태양 흑점수 등이 필요하다.

4. 전자온도모델

가. AEROS Electron temperature Model 1979

- (1) 제작자 : K. Spenner
- (2) 파라미터 : 고도 300~700km의 전지구적인 전자온도
- (3) 설명

이 모델은 고도 300~700km의 전지구적인 전자온도를 지역시간 오전 3시와 오후 3시에 제공한다. 이것은 1973년 처음 100일 동안 AEROS에 의해 수집된 data에 기초하고 있다. 각각 3차항으로 나타나는 구면조화함수는 지자기 경위도의 함수로써 전자온도를 기술하는데 쓰인다. 고도의 변화는 맥급수의 3차항으로 나타낼 수 있다. 36개의 계수로 이뤄진 두 개의 set는 각각 오전 3시와 오후 3시에 사용된다.

나. Density Dependent Electron Temperature

- (1) 제작자 : L. H. Brace and R. F. Thesis
- (2) 파라미터 : 고도 400km 아래의 전자온도
- (3) 설명

이 모델은 고도 130~400km의 낮동안의 전자온도를 전자밀도 $N_e(\text{m}^{-3})$ 와 높이 $h(\text{km})$ 의 함수로 나타낸다.

$$T_e = 1051 + (17.01h - 2746)e^{-5.122 \times 10^{-4}h + 6.094 \times 10^{-12}N_e - 3.353 \times 10^{-14}hN_e}$$

이것은 1973년 12월부터 1974년 12월까지 북위 50에서 남위 50까지 태양방위각이 85도 보다 작은 동안의 AE-C Langmuir probe 데이터에 기초하고 있다. 태양의 활동변화를 포함하고 있는 보다 확장된 version은 International Reference Ionosphere(Bilitza et al. 1985)에 사용되었다.

다. AE/ISIS Electron Temperature Models 1981

- (1) 제작자 : L. H. Brace, R. F. Thesis
- (2) 파라미터 : 300km, 400km, 1400km, 3000km에서의 전자온도
- (3) 설명

이 데이터 set은 전리층의 전자온도에 대한 전지구적인 실험적 모델이다. 춘추분과 하동지에 관한 두 모델의 고도 300km에 해당하는 것은 ISIS 1 위성의 1969-1970년 데이터이고 춘·추분, 하지, 동지의 세 모델의 1400km에 해당하는 것은 ISIS 2의 1971-1972년의 데이터, 그리고 춘·추분과 하지의 두 모델의 300-400km에 해당하는 것은 AE-C의 1975년 4월-1976년 12월, 1977년 2월-1978년 6월의 데이터에 기초하고 있다. 구면조화함수의 특별한 해는 각 모델의 81개의 계수를 만들어 내는 위성데이터에 잘 적용된다. 이 계수들은 DIP 위도와 지역시간의 함수로써 전자온도의 변화를 기술한다. 이 모델들은 IRI에서 사용되었다.

5. 이온 구성과 편위모델(DRIFT MODELS)

가. DY Ion Composition Model 1985

- (1) 제작자 : A. D. Danilov, A. P. Yaichnikov
- (2) 파라미터 : 75km에서 1000km까지의 이온구성성분
- (3) 설명

이 모델은 전리층의 이온 구성 성분을 고도, 태양의 방위각, 위도, 태양의 전파 플럭스와 달의 함수로 나타낸다. 이것은 1978년에 나온 Danilov와 Semenov의 모델에 기초하고 있는데, Danilov와 Semenov의 모델은 Electron 2, 4와 S3-1의 위성데이터와 20개의 로켓의 원지점에 의한 데이터로부터 만들어진 것이다. 54개의 비교(reference) 프로파일은 O^+ , NO^+ , H^+ , He^+ , N^+ 와 Cluster ions로 구성된다. 이 간단한 해석적인 함수는 고도, 태양의 방위각, 위도(O^+ , N^+ , He^+ , H^+), 계절(NO^+ , O^{+2} , Cluster)과 태양활동(Cluster를 제외한 모든 성분)의 변화를 나타내는데 쓰여진다.

나. ISR Ion Drift Model 1980

- (1) 제작자 : A. D. Richmond
- (2) 파라미터 : 지구자기장과 수직인 고도 300km의 이온의 drift
- (3) 설명

이 모델은 자기 고도 -65도에서 +65도사이 고도 300km에서의 이온의 속도를 기술한다. 이것은 Millstone Hill(1976.5~1977.11), St. Santin(1974.8~1977.5), Arecibo(1974.8~1977.10)의 ISR(Incoherent Scatter Radar)데이터를 기초로 한다. 지자기가 안정되어 있을 때만의 데이터만을 골랐다. 이 데이터들은 겨울(11월-2월), 여름(5월-8월), 봄가을(3월, 4월, 9월, 10월)의 각각의 계절별로 반시간마다 평균 내어진다. 주어진 지자기 경위도, UT, 날짜 등을 이용해서 지자기장에 대한 drift 속도의 수직성분을 구할 수 있다.

다. St. Santin Ion Drift Model 1979

(1) 제작자 : M. Blancm P. Amayenc

(2) 파라미터 : 지구자기장과 수직인 고도 300km의 이온의 drift

(3) 설명

이 모델은 St. Santin에서 ISR로 관측된 F층의 전기장으로 인한 플라즈마 drift의 낮밤과 계절의 변화를 기술하는 모델이다. 이것은 지자기가 조용한 기간인 1973년에서 1975년까지 3년동안 관측된량을 기초로 하고 있다. 지자기장에 수직인 이온의 drift는 지역시간의 각 계절별 9개의 계수를 사용해서 간단한 조화함수로 나타낼 수 있다.

6. 전기장 모델

가. Polar Cap Potential Drop Model 1981

(1) 제작자 : P. H. Reiff, R. W. Spiro, T. W. Hill

(2) 파라미터 : 극관지역(Polar Cap)을 지나는 포텐셜 강하

(3) 설명

간단하고 선형적인 관계는 극관지역을 지나는 포텐셜 강하에 종속적인 것으로 주어진다. 선형적으로 줄어드는 파라미터는 AE-C, AE-D, S3-3 위성 데이터를 최소자승법으로 정리하면 구할 수 있다. 이 파라미터들은 태양풍의 속도와 행성간 자기장 성분을 포함한 행성간 파라미터의 변화에 종속되는 것으로 정리된다. Kp 값의 변화는 1990년 Senior et al.에 의해서 구해졌다.

나. Volland Electric Field Model 1978

(1) 제작자 : H. Volland

(2) 파라미터 : 전지구적인 전기 포텐셜과 전기장

(3) 설명

이것은 준 정적(quasi-static) 전위(potential)에 기반을 둔 계산적인

모델이다. 대류 전위는 오로라 지역으로 들어온다. 준 실험(semi-empirical)적인 분석 표현은 모든 위도의 지역시간에서 전리층 전기장의 수평 성분으로 주어진다. 이것들은 극궤도 위성에 의해서 관측된 전기장의 일반적인 형태에 맞추기 위해서 정렬되었다. 자기권의 전기장은 고정된 자기이중극 자장(magnetic dipole field)과 수직성분만의 전기장을 가정하고 기술되었다. 이 모델은 18개의 계수를 사용한다. 계수는 지자기활동이 낮은 경우와 일반적인 경우로 나뉘어서 제공된다.

다. Heelis Electric Convection Field Model 1982

- (1) 제작자 : R. A. Heelis, J. K. Lowell, R. W. Spiro
- (2) 파라미터 : 고위도에서의 전위와 전기장, 이온 대류 속도
- (3) 설명

이 고위도 대류 패턴의 수학적 모델은 Volland(1975) 모델의 수식에 기초를 하고 있다. 이것은 경계지점에서 반전되는 모양을 포함한, 두 cell 대류 패턴의 일반적인 모양을 나타내고 있다. 이 모델은 간단하고 쉽게 풀 수가 있는데 파라미터는 입자의 조건에 따라서 조절될 수 있다. 이것은 남쪽을 향한(southward) IMF(Interplanetary Magnetic Field)에만 적용될 수 있고, 또한 정오 근처에서 두 대류 cell들이 서로 겹치는데 대한 것을 나타낼 수 없는 명백한 한계를 보이고 있다.

라. Utah Electric Convection Field Model 1986

- (1) 제작자 : J. J. Soja, C. E. Rasmussen, R. W. Schunk
- (2) 파라미터 : 고위도에서의 전위와 자기장, 이온의 대류속도
- (3) 설명

이 모델은 전리층 고도에서의 지구자기권 전기장을 설명할 수 있다. 이것은 간단한 함수로 사용되는데 이 함수는 K_p 와 IMF(Interplanetary Magnetic Field)의 B_x , B_y , B_z 에 종속되며 Heelis와 Volland 모델과 위성 데

이터, ISR(incoherent scatter radar)관측에 기초를 두고 있다. 남쪽을 향한 IMF에서 모델의 자기장은 IMF By에만 의존한다. 북쪽을 향한 IMF일 경우는 한 쌍의 잉여 대류 cell이 극관안에 존재하게 된다.

마. IZMEN-IZMIRAN Electrodynamic Model

(1) 제작자 : A. E. Levitin, Ya. I. Feldstein, B. A. Belov and V. O. Papitashvili

(2) 파라미터 : 전위, 전기장, 고위도에서 field-aligned 전류

(3) 설명

이것은 지자기, 전리층 및 파동전파 연구소(IZMIRAN, Moscow, Russia)에서 Faermark의 1977년 모델을 발전시켜서 만든 것이다. IZMEN 모델의 1985년판은 몇 개의 미리 산정한 표로 구성되어 있다. 이 표는 고위도 전리층의 전기역학적인 파라미터들로 이루어져 있고, 파라미터들은 세 계절(춘 추분, 여름, 겨울)의 IMF의 방향, 세기, 유용성에 의해서 정해진다. 고위도 전리층 전기역학의 여덟 개의 파라미터는 IMF의 세기와 방위, 전기장, field-aligned 전류, 전리층의 전류 벡터, Joule heating rate뿐만 아니라 지구 표면의 지자기적 섭동 벡터, 전리층의 정전위 등에 의해서 결정될 수 있다.

바. Millstone Hill Electron Field Model 1983

(1) 제작자 : W. L. Oliver, J. M. Holt

(2) 파라미터 : 오로라지역의 이온 drift와 전기장

(3) 설명

이 모델은 변하지 않는 자기 위도를 나타내는 6차의 다항식과, 지역 시간의 전기장의 E_x 와 E_y 를 나타내는 8차의 푸리에 급수로 구성되어 있다. 이것은 1978년 Millstone Hill의 ISR(incoherent scatter radar)에서 관측된 전기장의 평균을 나타내는 것이다. 지자기활동계수(K_p)는 세 단계로 생각할 수

있었다. 평균은 위도 60도에서 75도 사이의 위치에서 위도 1도 마다 30분의 간격으로 결정되었다. Holt et al.[1986], Foster et al.[1986]은 이 모델을 좀 더 발전시킨 형태로 만들었다.

사. Heppner-Maynard-Rich Electric Field Model 1990

- (1) 제작자 : J. P. Heppner, N. C. Maynard, F. J. Rich
- (2) 파라미터 : 고위도의 전위와 전기장, Pedersen & Hall 전도도, field-aligned 전류, Joule 열
- (3) 설명

이 소프트웨어는 몇몇 대류전기장 모델, AFGL 예측 및 전도도 모델 등을 포함하고 있다. AFGL 예측 및 전도도 모델은 전도도, 전류, 열을 측정함으로써 얻을 수 있다. Heppner-Maynard 모델은 OGO 6 (Polar-Orbiting Observatory 6)과 DE 2(Dynamics Explorer 2)에서 관측된 전기장에 기초를 하고 있으며, 지자기위도 60도 이상의 전위와 전기장을 제공한다. 몇몇 모델들은 다른 IMF조건을 사용하고 있다. 남쪽을 향하는 IMF의 경우에는, 지자기활동에 의한 명백한 변화를 보이는 모델들은 포함하고 있다. Heelis 대류 자기장 모델은 이러한 변화의 차이점을 보여줄 수 있다. Rich와 Maynard(1989)은 Heelis모델보다 자신들의 모델이 얼마나 개선된 것인가를 보였으며, 또한 Harang 불연속 경계와 낮부분(dayside) 가까이에서 Foster et al.(1986)의 것과의 차이점을 지적하였다.

7. 오로라 형성과 전도도(CONDUCTIVITY) 모델

가. Rice Electron Precipitation Model 1982

- (1) 제작자 : R. W. Spiro, P. H. Reiff, L. J. Maher
- (2) 파라미터 : 전자 에너지 플럭스와 특징의 예측, 오로라지역에서의 Pedersen & Hall 전도도

(3) 설명

AE-C, AE-D 위성에서 저에너지 전자 실험으로부터 얻은 데이터는 예측된 오로라의 전자 에너지 플럭스 분포와 지자기 활동이 다른 경우 그 에너지의 평균을 결정하는데 사용되었다. 이 연구는 1974년 1월에서 1976년 4월까지 30,407개의 관측에 바탕을 두고 있다. 오로라 지역의 고층전류계수 (Auroral Electrojet index : AE)의 네 단계에 의해서 에너지 플럭스와 특징을 나타낸 표들이 만들어졌다. 각 표들은 위도 30도에서 88도사이의 고정된 값에서의 변화량을 나타낸다. 실험적인 값은 Pedersen & Hall 전도도에 대한 간단한 표를 만드는데 사용되었다. Robinson et al. (1987)은 Rice 모델에서 계산한 전도도의 오차를 지적하였고 Kamide et al. (1989)가 이것을 줄이는 방법을 제시하였다.

나. AFGL Electro Precipitation Model 1987

(1) 제작자 : D. A. Hardy, M. S. Gussenhoven

(2) 파라미터 : 에너지 플럭스의 적분값과 예측된 오로라 전자 수 플럭스, Pedersen & Hall 전도도

(3) 설명

이 모델은 에너지 플럭스의 적분 값과 예측된 오로라 전자 수 밀도를 7단계의 지자기활동계수($K_p = 0 \sim 6$)에 따라서 나타낸다. DMSP F2와 F4위성의 SSJ/3 검출기와 P78-1 위성의 CRL-251검출기에서 받은 약 천사백만개의 스펙트럼(50eV~20keV)이 이 모델의 기초를 이루는 데이터이다. Epstein 변화 함수는 공간적인 변화를 나타내는 데 사용되었으며, 6차 푸리에 급수는 일시적인 변화를 나타내는 데 쓰인다. 계수들은 전자 에너지 플럭스, 수 플럭스와 Pedersen & Hall 전도도 등을 결정하는데 쓰인다.

다. AFGL Ion Precipitation Model 1989

(1) 제작자 : D. A. Hardy, M. S. Gussenhoven, D. Brautigam

(2) 파라미터 : 에너지 플럭스의 적분값, 수 플럭스, 예측된 오로라 이온

의 평균 에너지(30eV ~ 30keV)

(3) 설명

이 모델은 에너지의 적분 값과 수 플럭스, 그리고 예측된 오로라 이온의 평균에너지를 보정된 지자기 위도(CGL), 자기 지역 시간(MLT), 그리고 지자기 활동계수(Kp)의 함수로 나타내어 준다. DMSP F6, F7위성의 SSJ/4 검출기로부터 얻은 26.5백만 개의 스펙트럼 각각은 30개의 CGL 간격(50 - 90)과 지자기 활동계수 Kp의 각 7단계마다 24시간의 간격으로 표본화된다. 이러한 결과로 스펙트럼의 평균그림과 정오에서 자정과, 새벽에서 저녁의 자오선을 따르는 CGL의 함수로 나타내지는 에너지 플럭스와 수 플럭스 적분의 평균값 그래프, MLT-CGL 좌표계의 안에서 같은 양을 갖는 스펙트럼의 색코드를 얻을 수 있다.

8. 기타 오로라 모델들

가. Auroral Oval Representation 1975

- (1) 제작자 : R. H. Holzworth, C. -I. Meng
- (2) 파라미터 : 오로라 타원체(auroral oval)의 수치해
- (3) 설명

이 모델은 오로라 타원체(auroral oval)의 수치해를 일곱 개의 간단한 퓨리에 급수로 나타낸다. Holzworth & Meng(1975)는 지자기활동계수의 각 단계마다 Feldstein(1963) 타원체의 계수를 정렬하였다.

나. Auroral Absorption Model 1983

- (1) 제작자 : A. J. Foppiano, P. A. Bradley
- (2) 파라미터 : 고위도에서 HF 파동의 전파 수치해를 구함
- (3) 설명

이 모델은 고위도에서 HF 파동의 전파 수치해를 구해준다. 이것은

전세계적의 Riometer 데이터에 기초를 두고 있다. 이 모델은 1dB을 초과하는 HF 전파 흡수 확률 Q1을 기술하고 있다. Q1은 긴 주기의 예보에 중요한 역할을 한다. 간단한 관측적인 표현은 보정된 지자기 경위도, 지역시간, 태양 활동, 계절등에 따라 달라진다. 모델의 개발자는 흡수율의 누적에 로그를 취하고, Q1과 중앙 흡수율과의 간단한 선형적인 관계를 추론하였다.

제 3 절 대기 모델

1. 밀도와 온도 모델

가. U. S. Standard Atmosphere 1976

- (1) 제작자 : National Geophysical Data Center
- (2) 파라미터 : 대기층의 밀도, 온도, 압력
- (3) 설명

COESA(Committee on Extension to the Standard Atmosphere)의 작업은 1953년에 시작되었고, 1958년, 1962년, 1966년에 보다 발전된 모델이 나왔으며, 1976년 에 발표된 U. S. Standard Atmosphere의 기반이 되었다. 이 모델은 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), NASA(National Aeronautics and Space Administration), U. S. Air Force등의 기관이 협력해서 발표하였다. 미국의 30여개의 정부 기관, 연구소, 대학 등이 COESA의 작업에 협력하였다. 로켓과 위성 데이터, 그리고 이상 기체 이론에 기반을 두고 대기의 밀도, 온도를 고도 1000km까지 나타냈다. 32km 보다 낮은 지역의 U. S. Standard Atmosphere는 ICAO(International Civil Aviation Organization)의 표준 대기과 같다. U. S. Standard Atmosphere(1958, 1962, 1976)은 태양활동을 적당히 줄인 이상기체방정식을 써서 하나의 프로파일로 나타난다. 중력, 압력 높이 측도, 수밀도, 평균 입자 속도, 평균 충돌주파수, 평균 분자의 무게, 빛의 속도, 동역학적인 점성율, 운

동학적인 점성율, 열적 전도성 등에 의해서 발생하는 온도, 압력, 밀도, 가속도 등으로 파라미터들은 정렬된다. 고도 분해능은 0.05km에서 5km까지로 변한다. 모든 값들은 meter 단위를 쓴다.

나. Standard Jacchia Reference Atmosphere 1977

- (1) 제작자 : L. G. Jacchia
- (2) 파라미터 : 상층 대기의 밀도와 온도
- (3) 설명

Jacchia Reference Atmosphere는 1970, 1971, 1977년에 설명서, 공식, 목록과 함께 발표되었는데 90km부터 2500km까지의 밀도, 온도, 구성성분 등이 주어졌다. 이것들은 계절, 위도, 지역시간의 변화를 고려한 양이었다. 예비 목록은 반년마다 지자기 적이고 계절적인 위도의 효과를 제공한다. 확산 평형을 가정하면 대기의 프로파일은 외기권의 온도로 정의할 수 있다. 또, 110km에서 200km까지의 열권은 CIRA-72모델에 사용되기도 했다. Jacchia(1964)는 태양풍과 지구대기간의 coupling을 가장 먼저 지적했다.

다. COSPAR International Reference Atmosphere : 1986 (Thermosphere)

- (1) 제작자 : CIRA Working Group
- (2) 파라미터 : 열권의 중성 입자 온도, 밀도
- (3) 설명

CIRA(COSPAR International Reference Atmosphere)는 대기 온도와 밀도의 관측적인 모델이다. 120km보다 높은 곳의 CIRA-86은 MSIS-86모델과 같다. 또한 실험적인 모델인 CIRA-86은 London 대학의 D. Ree와 그의 동료들이 만든 이론적인 열권의 모델을 포함하고 있기도 하다.

라. MET Model 1988

- (1) 제작자 : M. P. Hickey

(2) 파라미터 : 열권의 중성입자 온도, 밀도

(3) 설명

MET(Marshall Engineering Thermosphere Model)은 기본적으로 보정된 Jacchia 1970모델이다. MET은 Huntsville에 있는 NASA의 Marshall Space Flight Center에서 발전되었다. MSIS모델은 MET모델의 보다 발전된 것으로 간주되는데 그 이유는 MSIS가 더 많은 데이터를 가지고 있고 또한 보다 정교한 수학적 계산을 하고 있기 때문이다.

마. MSIS Model 1986

(1) 제작자 : A. E. Hedin

(2) 파라미터 : 열권의 중성입자 온도, 밀도

(3) 설명

MSIS(Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter)모델은 고도 100km이상인 고층대기의 중성입자의 온도, 밀도를 기술하고 있다. MSIS-86은 CIRA(COSPAR International Reference Atmosphere)의 고층부분을 기술하고 있는 것이다. 이 모델은 보다 넓은 규모의 데이터와 A. E. Hedin의 분석으로부터 시작되었다. 데이터 소스는 몇 개의 로켓과 OGO 6, San Macro 3, AERO-A, AE-D, AE-E, ESRO 4, DE 2등의 위성 데이터, Millstone Hill, St. Santin, Arecibo, Jicamarca, Malvern에 있는 ISR(incoherent scatter radars)의 데이터이다. 계산을 하기 위해서는 연도, 날짜, 표준시간, 고도, 측지학적인 경위도, 지역 태양 시간, 태양의 10.7cm와 플럭스, 자기 A_p 계수등이 필요하다. 계산으로 얻을 수 있는 것으로는 He, O, N₂, O₂, Ar, H, N의 수밀도와 총 질량 밀도, 중성입자의 온도와 exospheric온도 등이다. Hedin (1988)은 MSIS모델과 Jacchia 1970, 1977모델을 비교했다.

바. MSISE Model 1990

(1) 제작자 : A. E. Hedin

(2) 파라미터 : 지상부터 열권까지의 중성입자의 밀도와 온도

(3) MSISE 모델은 지상으로부터 열권까지 중성입자의 밀도와 온도를 기술한다. 72.5km아래의 것은 지구의 평균 온도와 압력의 도표인 MAP Handbook에 기초하고 있는데 이것은 또한 CIRA-86모델에 사용되었다. 20km아래의 것은 NMC(National Meteorological Center)의 데이터로부터 보충되었다. 72.5km 윗부분의 MSISE-90은 MSIS-86모델을 수정한 값이다. 120km이상의 대기에 관심이 있는 사람들은 MSIS모델을 사용할 것을 제작자는 권하고 있다.

제 4 절 모델 데이터 제공 사이트

1. NGDC(National Geophysical Data Center)

미국 NOAA 산하 NGDC(National Geophysical Data Center)의 SPIDR(Space Physics Interactive Data Resource)에서는 전리층의 foF2값 이외의 다양한 값을 제공하고 있다.

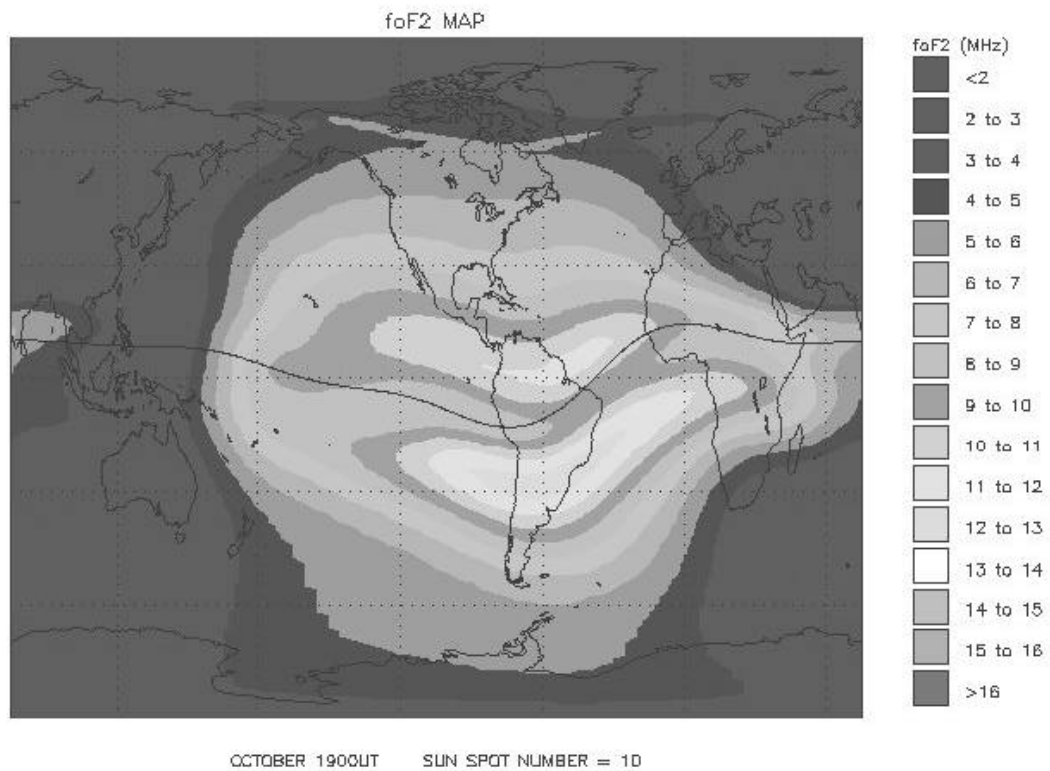


그림 3-1. 1996년 10월의 foF2 평균값



FOF2 VALUES (MHz)
CHILTON OCTOBER 1996 UNIVERSAL TIME
LAT: 51.6 LON: 358.7

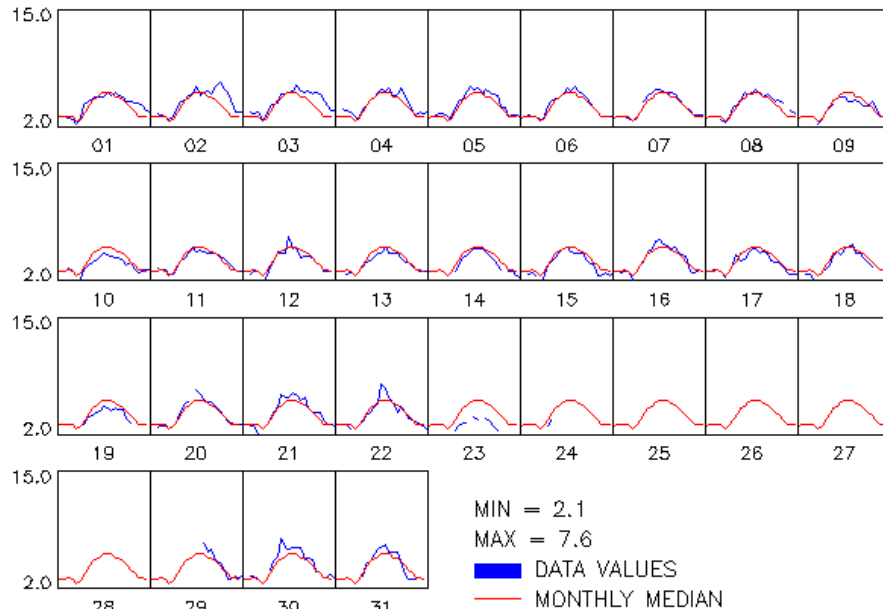


그림 3-2 영국 Chilton의 1996년 10월의 foF2

이곳에서는 1957년부터 1996년까지의 foF2 월평균 global map과 세계 주요 도시에서의 foF2, fxF2, M3000F2, h'F2등 다양한 물리량을 제공한다. 하지만 이 주요도시에 서울 등 우리 나라의 도시는 제외되어 있다. 다음 그림 3-1은 1996년 10월의 foF2의 월 평균값이고, 그림 3-2는 1996년 10월 영국 Chilton의 foF2이다.

2. NSSDC

미 NASA 산하 NSSDC에서는 각종 전리층 모델, 대기 모델, 자기장 모델등의 설명과 몇몇의 모델 CODE와 데이터 값을 제공한다. 그 중, 특히 IRI95를 웹에서 운용하고 있다. 여기에서는 임의의 날짜의 고도별, 경도별, 위도별로 전리층의 전자밀도와 각종 데이터를 제공하고 있지만, Global Map을 제공하지 않고 있다. 그림 3-3는 이곳에서 데이터와 함께 제공하는 1998년 11월 11일 UT00시 안양(37.4 °N, 127.0 °E)에서의 전자밀도, 이온등의 수

직 프로파일 그림이고, 그림 3-4는 같은 조건에서 여러 물리량 제공 화면이다.

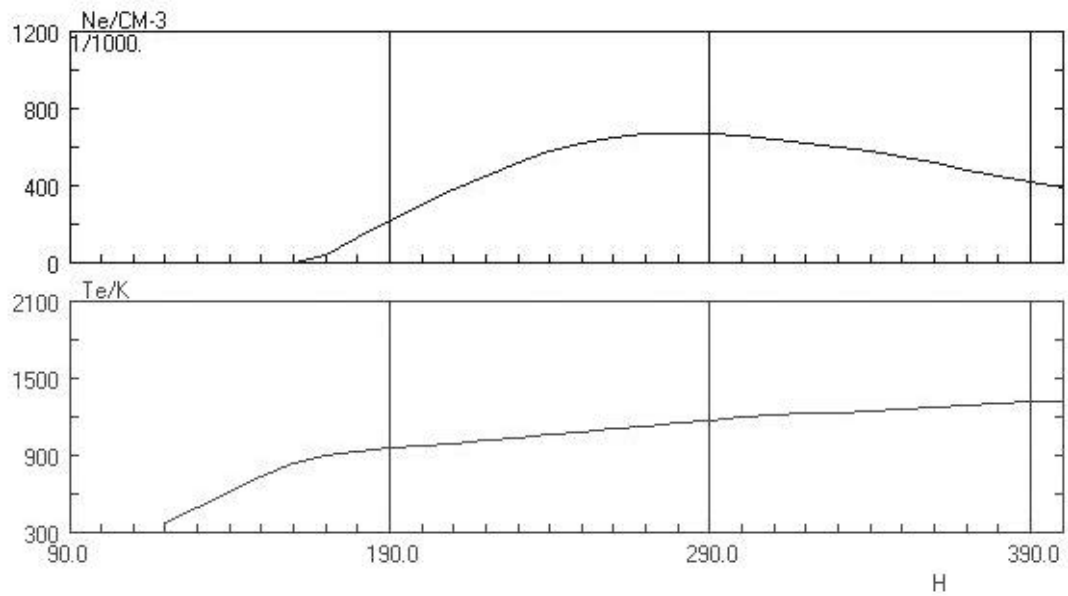


그림 3-3. 1998년 11월 11일 UT10시 안양에서의 전자 밀도와 전자 온도의 수직 프로파일

NSSDC

International Reference Ionosphere (IRI-95) Model

You submitted the following name/value pairs:

DATE: year or Rz12=1998. month=11 day=11

TIME: hour=0.UT

Geographical latitude = 37.4

Geographical longitude = 127.

height = 90

Results of MODEL calculations:

URSI maps are used for the F2 peak density (NmF2)

CCIR maps are used for the F2 peak height (hmF2)

Peak Densities/cm⁻³: NmF2=1115486.1 NmF1= 0.0 NmE= 91609.5

Peak Heights/km: hmF2= 240.84 hmF1= 159.06 hmE= 110.00

Solar Zenith Angle/degree 71.9

Dip (Magnetic Inclination)/degree 52.47

Modip (Modified Dip)/degree 45.78

Solar Sunspot Number (12-months running mean) Rz12 79.9

Ionospheric-Effective Solar Index IG12 127.6

H	ELECTRON DENSITY		TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							
km	Ne/CM-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	
90.0	5911	0.0053	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
100.0	65120	0.0584	-1	-1	-1	0	-1	0	0	30	70	-1	
110.0	91610	0.0821	-1	-1	-1	1	-1	0	0	34	65	-1	
120.0	78661	0.0705	368	368	368	2	-1	0	0	38	60	-1	
130.0	89251	0.0800	484	484	519	4	-1	0	0	39	57	-1	
140.0	217525	0.1950	573	573	670	9	-1	0	0	37	54	-1	
150.0	361889	0.3244	642	642	822	19	-1	0	0	34	47	-1	
160.0	504637	0.4524	694	694	973	36	-1	0	0	31	33	-1	
170.0	633550	0.5680	735	735	1124	57	-1	0	0	25	18	-1	
180.0	759032	0.6804	766	766	1276	74	-1	0	0	18	9	-1	
190.0	872146	0.7819	790	790	1426	82	-1	0	0	11	6	-1	
200.0	965938	0.8659	809	809	1574	87	-1	0	0	7	6	-1	

Where IRI parameters are NOT available the fill value -1 is used

[Go to Graphical output of model results](#)

그림 3-4. 1998년 11월 11일 UT10시 안양에서의 전자 밀도, 이온 밀도 등 여러 물리량 (NSSDC제공 Web화면)

3. COST251

COST(European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research)에서는 ionogram과 TEC값, 그리고 흡수계수 등을 Web상에서 제공하고 있다.

가. Vertical Incidence Ionosonde Database

이곳에는 현재 유럽 COST 251 지역(그림 3-5) 50여곳에서의 ionosonde parameter를 포함하고 있다. 제공되는 연도는 1957년부터 1997년까지 인데, 가장 오래된 데이터를 1944년의 데이터이다. 그림 3-6은 1991년 10월 Rome(41.8 °N, 12.5 °E)의 foF2 값이다.



그림 3-5 COST 251 지역

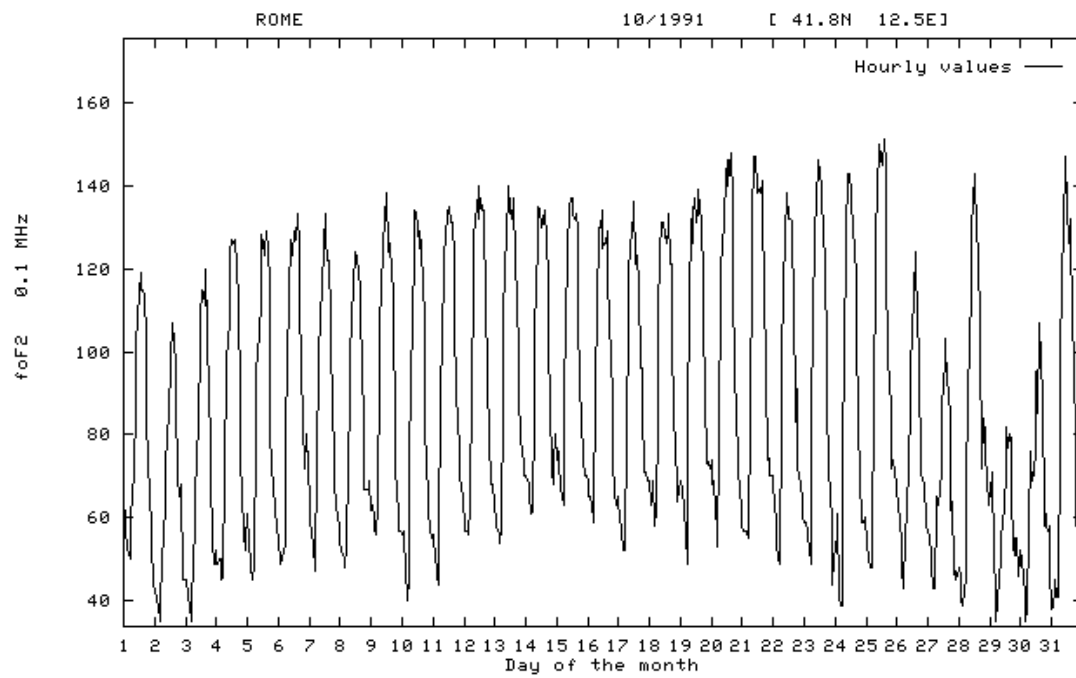


그림 3-6 COST에서 제공하는 1991년 10월 Rome(41.8 °N, 12.5 °E)의 foF2

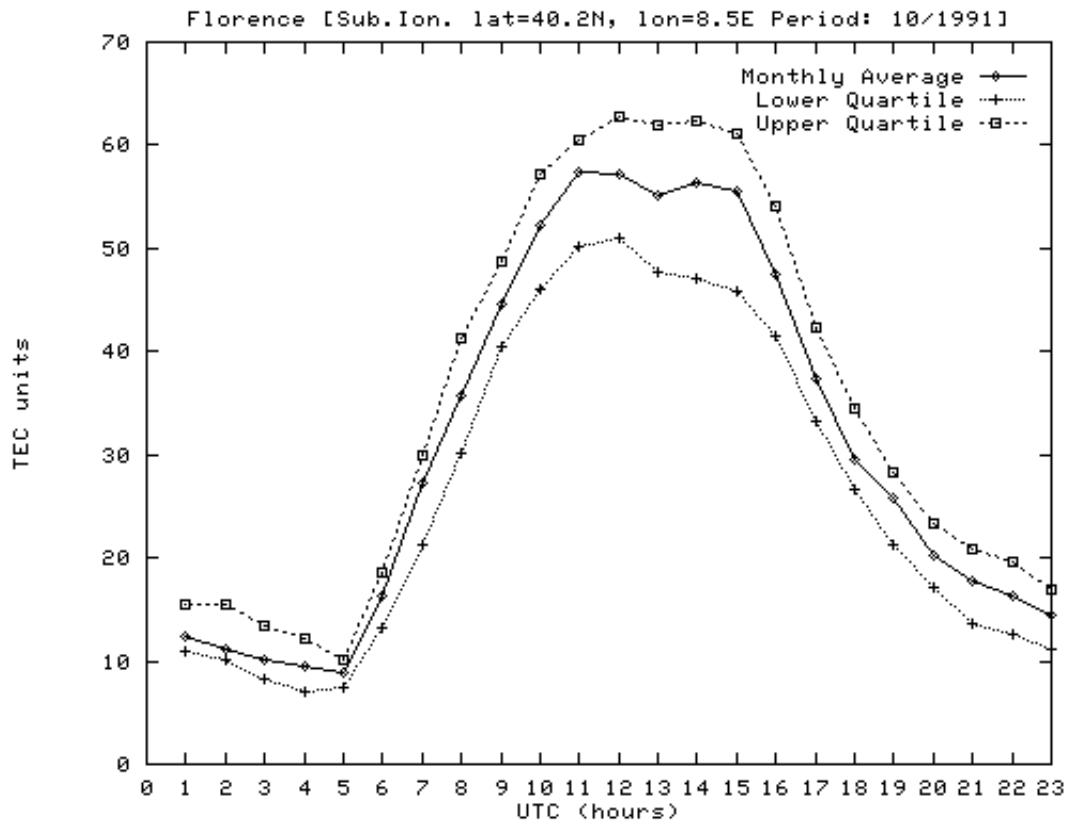


그림 3-7 COST에서 제공하는 1991년 10월 Florence(40.2 °N, 8.5 °E)에서의 TEC.

나. TEC(Total Electron Content)

이곳에서는 수직 입사 Ionosonde 데이터 뿐만 아니라 TEC(Total Electron Content)값을 월별로 제공하고 있다. 이 데이터들은 정지위성 신호의 Faraday Rotation으로부터 계산되며, 그림 3-7은 1991년 10월 Florence (40.2 °N, 8.5 °E)에서의 TEC값의 일변화이다.

다. Ionospheric Absorption Data

이곳에서는 현재의 전리층에서의 흡수 데이터를 dB로 제공하고 있다. 데이터는 하루의 평균값이 한 달 단위로 정렬되어 있다. 이곳에서 제공하고 있는 주파수는 2614 kHz, 2775 kHz, 6090 kHz, 245 kHz이다.

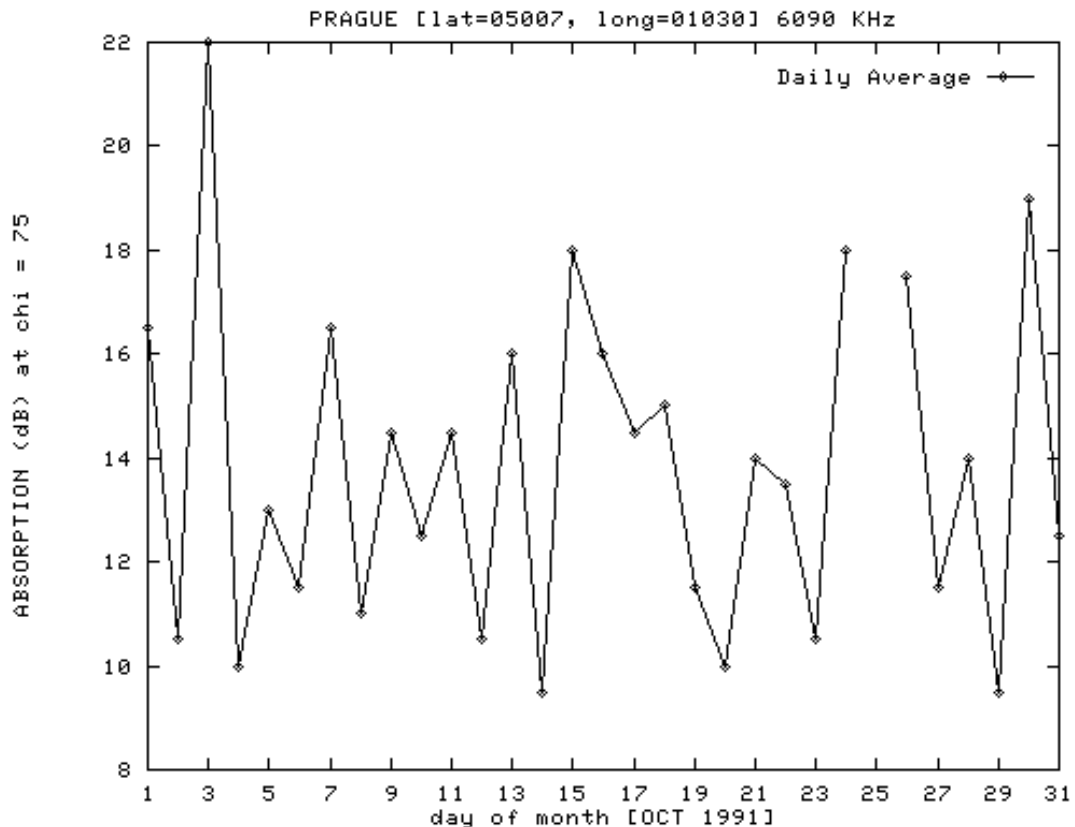


그림 3-8 1991년 10월 Prague(5.007 °N, 01.030 °E)에서의 6090 kHz 전파의 흡수량(dB)

- 2614 kHz

- 이 전파의 흡수량은 Norddeich - Panska Ves path (반사지점 52N, 11E, L=2.36, 송신기에서 수신기까지의 거리 610 km)를 따라서 1960년 6월부터 1973년 5월까지 측정되었다.

- 2775 kHz

- 이 전파의 흡수량은 1960년 6월부터 1973년 5월까지 Kiel - Panska Ves path (반사지점 52.45N, 12.45E, L=2.39, 송신기에서 수신기까지의 거리 518 km)를 따라서 측정되었다.

- 6090 kHz

- 이 전파의 흡수량은 Luxemburg - Panska Ves path (반사지점 50.07N, 10.30E, L=2.21, 송신기에서 수신기까지의 거리 610km)를 따라서 1971년부터 1994년까지 측정되었고, 1995년부터 1996년 10

월까지의 원래의 조건과 비슷한 Bremen으로 송신기가 교체되어 측정되었다.

- 245 kHz

- 이 전파의 흡수량은 Kalundborg - Kuhlungsborn path (반사지점 54.9N, 11.4E, L=2.7, 송신기에서 수신기까지의 거리 180 km)를 따라서 1968년부터 1983년까지 측정되었다.

4. Air Force Research Laboratory

이곳에서는 MSIS, PIM, IRI등의 모델 데이터를 제공하고 있다. 그림 3-9는 모델 데이터 서비스 웹 페이지 화면이다.

가. MSIS

이곳에서는 경위도와 날짜, 시간에 따른 수직 프로파일을 제공하고 있다. 그림 3-10은 모델을 계산하기 위하여 입력을 받기 위한 웹 화면이고, 3-11은 1999년 1월 1일 안양에서의 각 이온별 밀도 결과 화면이다.

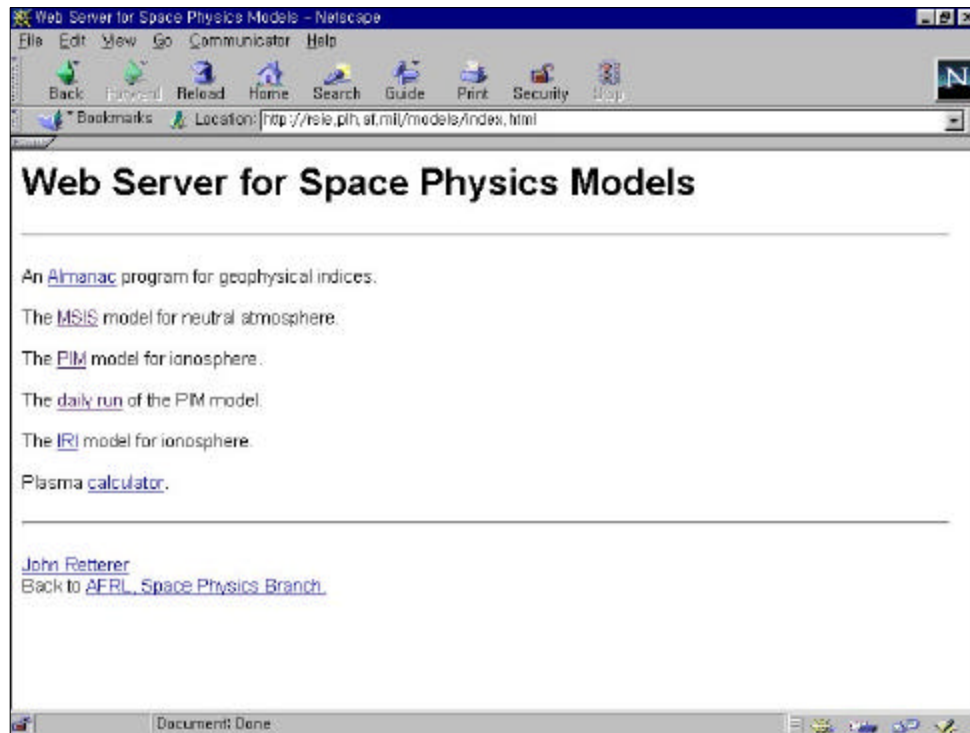


그림 3-9. Air Force Research Laboratory의 모델 데이터 서비스 웹 페이지 화면

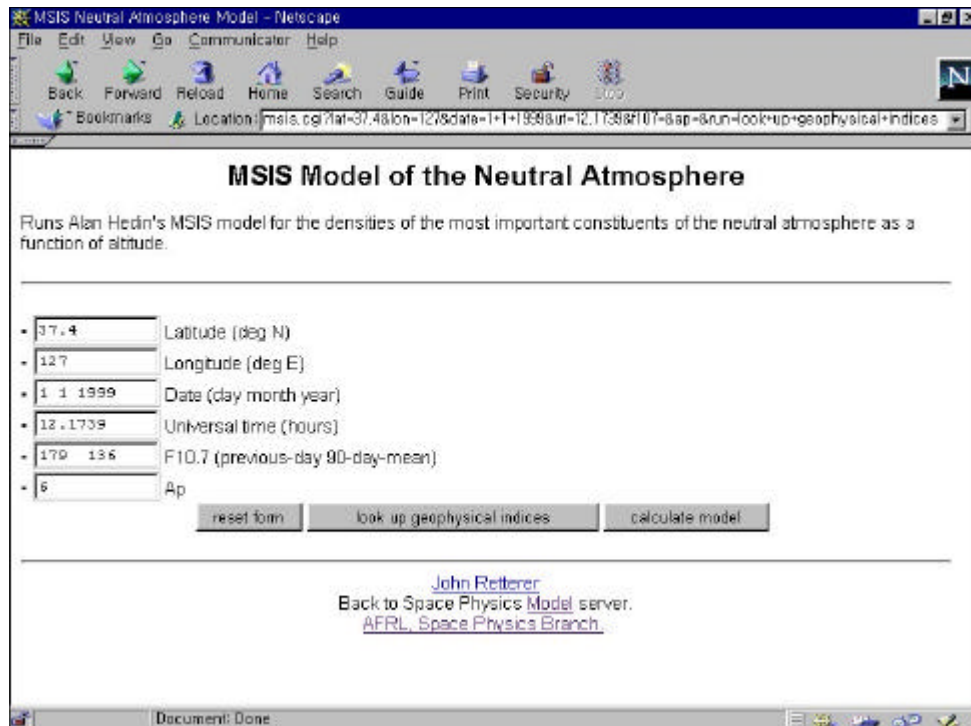


그림 3-10. Air Force Research Laboratory의 MSIS 데이터 입력 화면

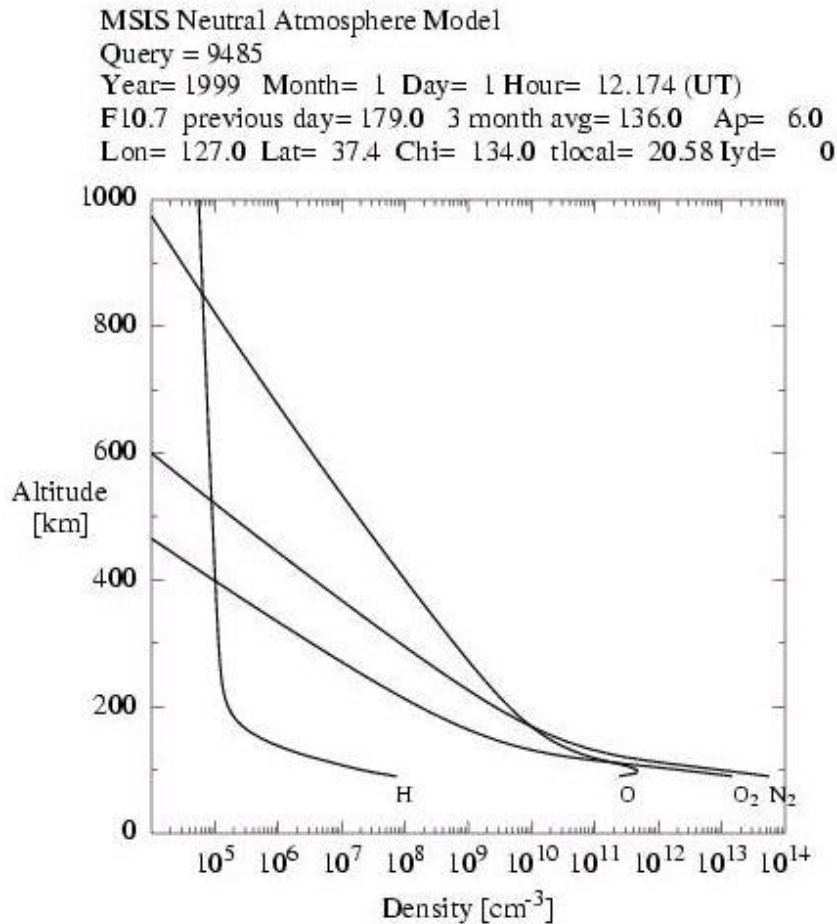


그림 3-11. 1999년 1월 1일 안양(37.4 °N, 127.0 °E)에서의 이온 밀도(Air Force Research Laboratory 제공)

나. PIM

이곳에서는 PIM의 결과를 두 가지로 나누어서 제공하고 있다. 하나는 일정 경위도에서의 수직 밀도 프로파일이고 다른 하나는 전 지구적인 분포이다. 일정 경위도에서의 수직 밀도 프로파일을 계산할 때에는 특정 날짜를 지정할 수 있지만 전 지구적인 분포도를 보고자 할 때에는 특정 날짜를 지정할 수 없는 단점이 있다. 그림 3-12는 1999년 1월 1일 안양에서의 값을 보기 위한 입력화면이고, 그림 3-13은 이때의 결과이다. 또한 그림 3-14는 FoF2, HmF2, TEC값의 전 지구적인 분포를 보여주는 웹 화면이다.

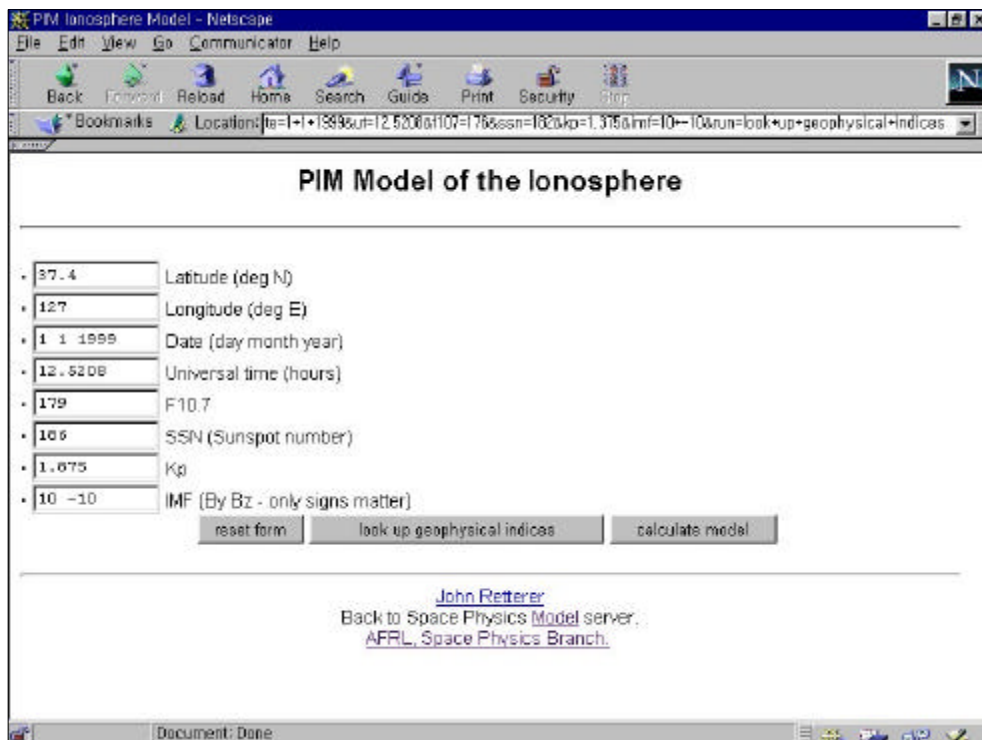


그림 3-12. Air Force Research Laboratory의 PIM 데이터 입력 화면

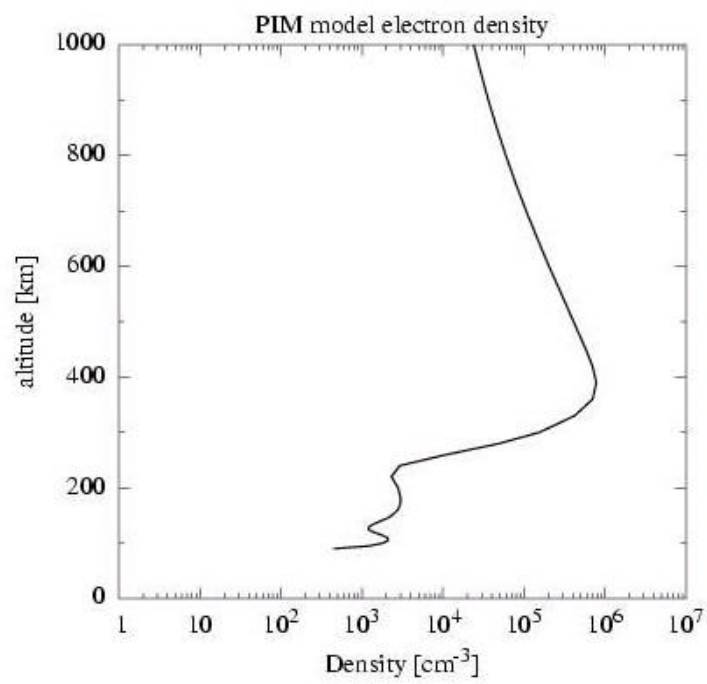
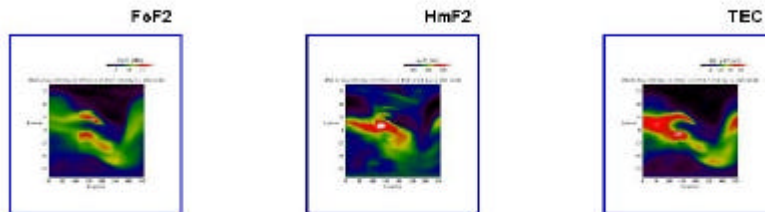


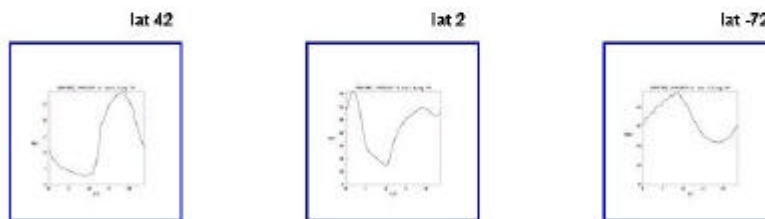
그림 3-13. 1999년 1월 1일 안양에서의 전자밀도

Daily Global PIM Ionospheric Model Run

The Air Force Research Laboratory's [PIM](#) ionospheric model is run daily using yesterday's (the most recent) values of the [geomagnetic indices](#) posted by SEL. These runs are used to produce global maps of ionospheric parameters:



Similar runs are used to produce plots of the variation with time of the vertical Total Electron Content at several locations:



[John Retterer](#)
[John Retterer](#)
[AFRL Space Physics Branch](#)

그림 3-14. Air Force Research Laboratory의 FoF2, HmF2, TEC값의 전 지구적인 분포를 보여주는 웹 화면

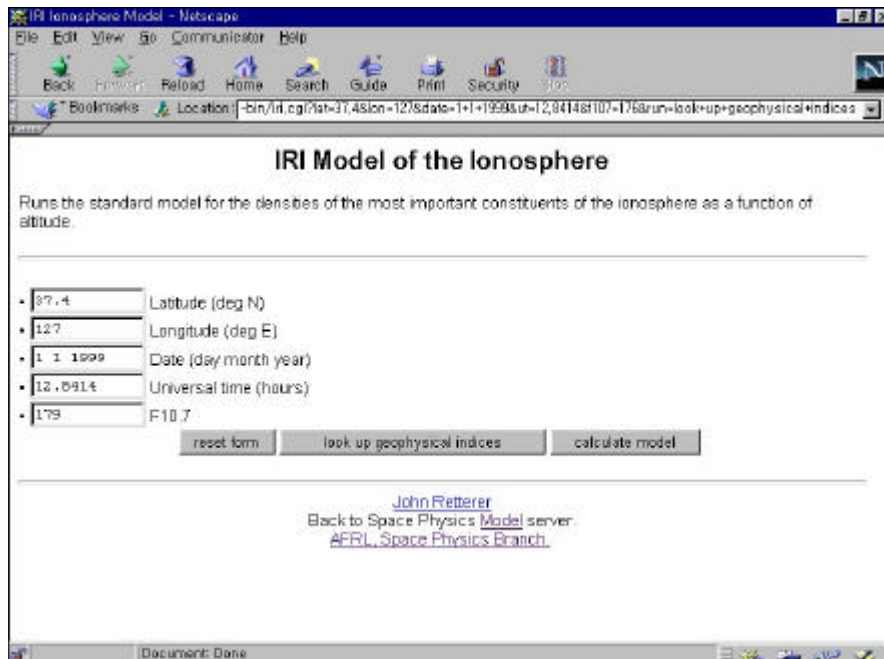


그림 3-15. Air Force Research Laboratory의 IRI 데이터 입력 화면

다. IRI (International Reference Ionosphere)

이곳에서는 IRI의 데이터를 일정 경위도에서의 전자밀도 프로파일로 제공하고 있으며, 전 지구적인 분포는 제공하지 않는다. 그림 3-15는 1999년 1월 1일 안양(37.4 °N, 127.0 °E)에서의 전자밀도를 계산하기 위한 입력 화면이고, 그림 3-16은 이때의 계산결과이다.

INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE

Query = 9735

LATI= 37.4 LONG=127.0 R=158. MONTH= 1 HOUR=21.31

CALCULATED VALUES: MLAT= 26.4 MLON=194.9 COV=179.0 DAY= 15

DIP = 52.4 DIPL= 33.0 MODIP= 45.8 DEC=-5.4

XHI =141.9 SUNRISE/SET(LT): 7.2/16.8 SUN-DEC=-21.6

ELECTRON CONTENT BETWEEN 90.0 AND 1000.0 KM = 7.315E+16

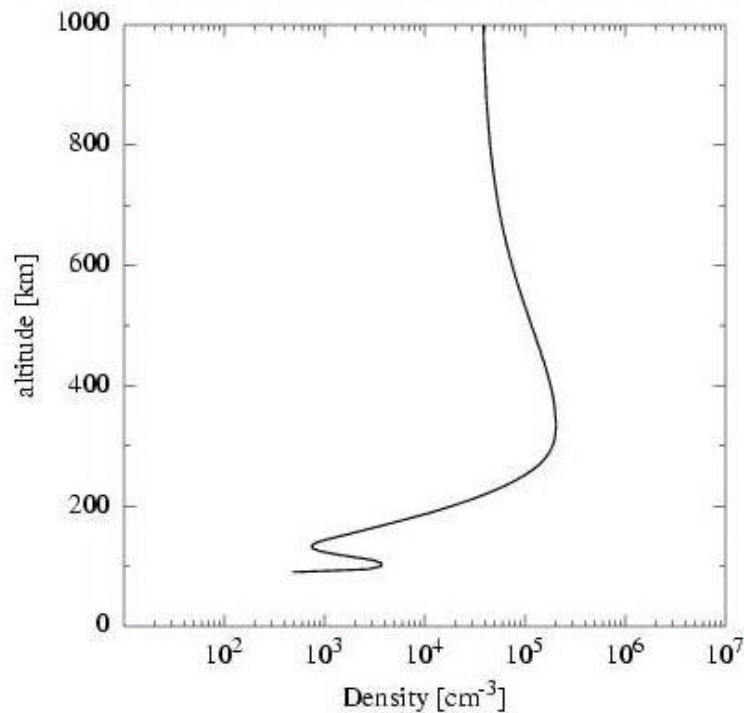


그림 3-16. 1999년 1월 1일 안양에서의 IRI로 계산한 전자밀도(Air Force Research Laboratory)

제5절 요약

전리층 모델 중 가장 널리 사용되고 있는 것은 IRI(International Reference Ionosphere)이고, 이 모델은 NSSDC의 사이트에서 직접 데이터를 얻을 수 있으며, 또한 포트란과 C의 코드도 제공되고 있다. 그러나 NSSDC의 사이트에서는 해당 지역의 수직 프로파일 또는 일정 경위도에서의 프로파일만을 얻을 수 있는 단점이 있다. 그리고 NGDC에서는 Global Map을 지

원하고 있지만, 제공되는 특정 지역 이외의 수직 프로파일은 제공하지 않는다. IRI는 이렇게 데이터를 제공하는 사이트가 많지만 PIM(Parameterized Ionospheric Model)의 경우에는 이 모델을 소개하거나 데이터를 제공하는 사이트는 손에 꼽을 정도이다. 게다가 국내에서는 전리층에 대한 정보를 제공하는 사이트가 존재하지 않는다. 본 연구에서는 IRI와 PIM의 전 지구적인 분포를 동시에 제공하는 사이트를 개설하였다.

제 4 장 지구 자기구 모델들

제 1 절 개요

자기장 모델의 수치모델개발에는 크게 실험적 모델과 이론적 모델의 두 가지 측면이 있다. 실험적인 모델은 막대한 양의 직접관측값을 모두 입력시켜서 실험식을 정하는 방법이다. 이는 관측값을 기초로 하기 때문에 부분적인 오차가 작고 실제와 비교적 가까운 자기장 분포를 알려준다. 반면에 자기장 형태의 기본적인 형성과정이나 왜곡 등의 물리적 과정을 조사하는데는 의미가 상대적으로 줄어든다. 특히 자기구의 형태는 태양풍이나 자기구 내부의 불안정성에 의해 그 변화가 크게 주어지는데 실험적 모델은 그 물리적 변화과정에 관한 이해에 큰 도움이 되지 못한다. 이론적 모델은 실제 환경에 가까운 몇 가지 가정을 기초로 하여 자기구의 형태를 결정하는 방법으로 형태의 변화과정에 따라서 해당되는 모델변수를 바꾸어 줌으로써 간단히 그 변화된 결과를 나타낼 수 있는 방법이다. 이는 거시적인 변화의 물리적 원인을 밝히는데 도움이 되며 관측의 주요 특징을 예측할 수 있는 장점이 있기도 하다. 그러나 직접 관측의 정밀한 검증이나 미시적 변화를 추적할 수 없는 단점이 있다. 이와 같이 두 가지 접근 방식은 상호보완적이며 실제로 분석자료의 특성에 따라 중요한 역할을 한다.

제 2 절 자기장모델의 수학적 배경

1. 자력선의 표시방법

임의의 자기장 $\vec{B}(\vec{r})$ 을 나타내기 위해서는 자력선 원소(element) $d\vec{r}$ 이 \vec{B} 와 평행하다는 조건을 사용한다. 즉,

$$\vec{dr} \times \vec{B} = 0 \quad (1)$$

(x, y, z) 좌표계에서 식(1)을 나타내면

$$\frac{B_x}{dx} = \frac{B_y}{dy} = \frac{B_z}{dz} = c \quad (2)$$

가 된다. 따라서 식(2)를 만족하는 선을 그리면 c 값에 해당하는 3차원 공간에서의 특정 자력선을 나타내게 된다. 그러나 각각의 자력선을 그리는 것으로 주어진 3차원 공간 전체에서의 자기장을 표현하기는 곤란하며 일반적으로 자기장을 기준으로 한 좌표계가 사용된다. 대개의 수치 모델에서는 자기장을 포함한 방정식이 원통이나 구형과 같은 curved-field계에서도 사용되므로 때로는 자기장의 방향이 한 개의 좌표축과 일치하도록 수직좌표계를 도입하는 것이 편리한 경우가 있다. 이를 위해서는 Euler potential이라 부르는 수직좌표계가 일반적으로 사용된다[Stern, 1970].

2 Euler potentials

(α, β, γ) 로 구성된 수직좌표계를 고려하고 자기장 \vec{B} 가 $\vec{\nabla}\gamma$ 와 나란하다고 가정하자. 따라서

$$\vec{B} = B\hat{\gamma} = B \frac{\vec{\nabla}\gamma}{|\vec{\nabla}\gamma|} \quad (3)$$

$$\vec{B} \cdot \vec{\nabla}\alpha = \vec{B} \cdot \vec{\nabla}\beta = 0 \quad (4)$$

의 관계식이 성립된다. 이때는 $\vec{\nabla}\alpha, \vec{\nabla}\beta$ ($\alpha = \text{const}, \beta = \text{const}$)가 곡면에 각각 수직이므로 $\alpha = \text{const}$ 와 $\beta = \text{const}$ 의 곡면들은 \vec{B} 의 자력선을 포함하면서 서로 수직으로 교차하게 되고 $\gamma = \text{const}$ 곡면은 \vec{B} 방향에 수직이다. 여기서 α, β, γ 를 Euler potential이라 부르며 $\hat{\alpha} \times \hat{\beta} = \hat{\gamma}$ 를 만족하는 수직좌표계를 이루게 된다. α, β 는 그 크기나 방향에 따라 무한개의 선택이 가능하므

로 \vec{B} 에 대한 조건을 고려하여 다루기 쉬운 α, β 를 선택해보자. 어떤 형태이든 \vec{B} 는 항상 solenoidal (divergence-free)해야하므로 \vec{B} 를 다음과 같이 만족시키는 α, β 를 고려한다.

$$\vec{B} = \vec{\nabla}\alpha \times \vec{\nabla}\beta \quad (5)$$

식(5)은 식(4)과 $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ 을 모두 만족시키며 \vec{B} 의 크기를 $B = |\vec{\nabla}\alpha| |\vec{\nabla}\beta|$ 로 간단히 표시할 수 있다. 예를 들어 균일한 직선 자기장 $\vec{B} = B_0 \hat{z}$ 인 경우 (편의상 $B_0 = 1$ 로 가정하자) $\alpha = x$, $\beta = y$, $\gamma = z$ 와 $\vec{\nabla}\alpha = \hat{x}$, $\vec{\nabla}\beta = \hat{y}$, $\vec{\nabla}\gamma = \hat{z}$ 로 쓸 수 있다. 또한 이중극자인 경우를 고려하면 규격화된 자기장은

$$\vec{B} = -\frac{1}{r^3} (2 \cos \theta \hat{r} + \sin \theta \hat{\theta}) \quad (6)$$

로 주어진다. \vec{B} 는 $\hat{\phi}$ 에 수직이고 ϕ 에 무관하므로 $\beta = \phi$ 로 가정할 수 있다. $\vec{B} \cdot \vec{\nabla}\alpha = 0$ 조건에서 변수분리 방법으로 α 를 구하면

$$\alpha = C_1 \left(\frac{\sin^2 \theta}{r} \right)^{C_2} \quad (7)$$

가 된다. 여기서 편의상 $C_2 = 1$ 를 취하고 자기장 방향과 일치시키기 위해 $C_1 = -1$ 를 가정하면

$$\vec{\nabla}\alpha = \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \hat{r} - \frac{2 \sin \theta \cos \theta}{r^2} \hat{\theta} \quad (8)$$

$$\vec{\nabla}\beta = \frac{1}{r \sin \theta} \hat{\phi} \quad (9)$$

가 성립한다. 식(6)과 (8),(9)식에서 $\vec{B} = \vec{\nabla}\alpha \times \vec{\nabla}\beta$ 가 만족되므로 이중극자인 경우 식(5)은 쉽게 적용됨을 알 수 있다[Lee and Lysak, 1989]. 그러므로 어

면 \vec{B} 에 대해서 식(5)을 만족하는 좌표계 α, β 를 구하면 $\hat{\gamma} = \vec{\nabla}\alpha / |\vec{\nabla}\alpha| \times \vec{\nabla}\beta / |\vec{\nabla}\beta|$ 에서 γ 를 계산할 수 있으므로 \vec{B} 를 한 좌표계에 나란히 한 수직좌표계를 얻게 된다. 자기장이 휘어진 계를 기술할 경우, 그 기하학적 형태가 단순하다면 유한차분법(finite difference method)을 자기 유체역학식 등에 이용할때 이와 같은 Euler potential은 매우 유효하게 사용된다[Stern, 1970].

3. curl-free 자기장의 표현

이제까지는 \vec{B} 가 임의의 자기장, 즉, $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ 을 만족하는 임의의 함수로 주어지는 경우의 좌표계를 알아보았다. 그러나 우리가 기술하고자 하는 자기장이 매우 불균일하며 복잡한 형태를 갖는 경우는 위의 Euler potential방법이 사용되기가 어렵다. 그 이유는 식(5)에서 α 또는 β 중 한가지를 대칭성이나 기타 기하학적인 특징에서 쉽게 구할 수 없을 때 식(4)은 $\vec{\nabla}\alpha \cdot \vec{\nabla}\beta = 0$ 를 만족시키면서 해석학적인 함수형태로 풀리기가 어렵기 때문이다.(이중극자의 경우 축대칭조건에서 $\beta = \phi$ 를 구할 수 있었음을 상기하자.) 이러한 일반적으로 복잡한 형태의 자기장을 기술하는 조건은 curl-free 자기장을 가정하는 것이다[Tsyganenko, 1990].

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (10)$$

즉, $\vec{B} = -\vec{\nabla}\gamma$ 를 만족하는 자기 scalar potential γ 가 존재한다. \vec{B} 가 solenoidal 조건을 만족하며 따라서 자기 potential γ 는 Laplacian 방정식을 만족해야하므로

$$\nabla^2 \gamma = 0 \quad (11)$$

이 성립된다. 식(5)의 Euler potential로 나타낸 \vec{B} 는 solenoidal 조건을 만족하지만 $\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0$ 조건이 반드시 만족될 필요는 없으므로 주어진 자기장이

curl-free 이든 non-curl-free이든 α, β 의 해를 구할 수 있는 경우는 Euler potential방법이 매우 유용하다. 그러나 실제 Euler potential로서 행성자기구의 다양한 형태를 나타내기는 어려우며 그 적용범위가 한정되어 있다. 우주 공간에서 복잡한 형태의 자기장은 대부분 여러 종류의 유도 자기장이 섞여 있기 때문이다. 예를 들어 행성자기구의 태양쪽 경계면이 압축되어 있고 반대쪽이 긴 꼬리형태로 늘어난 경계를 갖는 이유는 magnetopause에 태양풍의 전하입자들이 발생시킨 표면전류와 행성의 고유 자기장이 중첩되었기 때문이다. 따라서 행성자기권의 임의의 자기장 \vec{B} 는

$$\vec{B} = \vec{B}_S + \vec{B}_I \quad (12)$$

와 같이 magnetopause의 표면전류에 의한 외부 유도자기장 \vec{B}_S 과 행성 자기권에 의한 고유 자기장 \vec{B}_I 의 중첩으로 표현될 수 있다. 각각은 경계를 제외하고 행성자기구의 대부분 공간에서 식(10)을 만족하므로 $\vec{B}_S = -\nabla\gamma_s$, $\vec{B}_I = -\nabla\gamma_I$ 인 γ_s, γ_I 가 존재한다. \vec{B}_I 는 대부분 이중극자에 가까운 값으로 근사되지만 \vec{B}_S 는 행성 자기권의 각 형태에 따라 다양한 모델이 있을 수 있다. Magnetopause의 모양이 포물선, 타원체 등으로 근사될 수 있으며 $\nabla^2\gamma_s=0$ 의 해를 구할 때 주어진 경계면의 형태에 따라 사용되어진 좌표계가 달라질 수 있다.

제 3 절 수치모델

지구 표면에서 측정된 지구자기장은 다양한 근원에 의해 발생된 여러 개의 자기장의 혼합형태이다. 측정된 자기장의 90%는 지구의 외핵에서 발생한 것으로 Main Field라 한다. 이 Main Field는 행성간 공간(Interplanetary Space)에 자기권(Magnetosphere)이라 불리우는 공동(cavity)를 형성한다. 자기권은 태양풍의 dynamic pressure에 반응하는 혜성과 같은 모양을 하고 있

다. 그리고 그것은 태양 방향으로는 지구반경의 약 10배 정도이고, 반대 방향으로 지구반경의 약 100배 이상 확장되어있다. 자기권 내부의 대전된(charged) 입자들의 운동은 자력선들에 의해 유도(guide)된다.

이온과 전자의 다른 흐름은 자기권과 이온층에서 지구 자기장의 세기를 변화시키는 전류(current system)를 형성한다. 이온화된 상층대기권과 자기권의 외부전류(external currents)는 내부의 중심자기장(internal main field) 보다 매우 짧은 시간 척도로 변화하고, Main Field의 10% 크기의 자기장을 형성한다.

1. 실험적 모델

실험적 모델의 대표적인 예로서는 지구의 자기장을 나타낸 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)모델을 들 수 있다. 그외에 WMM, POGO, GSFC, MGST, USGS, MDTILT, Olson-Pfizer Field, Mead-Fairfield Field, Geotail Field, AWE, IGS 모델들이 있다.

가. IGRF 모델

IGRF는 IAGA(International Association of Geomagnetism and Aeronomy) Working Group V-8에 의해 만들어졌다. 1945년부터 5년 간격으로 만들어 졌으며, 가장 최근의 IGRF 1995는 2000년까지 사용할 수 있다. DGRF(Definitive Geomagnetic Reference Field)는 지나간 IGRF를 대신하며, 최근 것은 DGRF 1990로 1990년부터 1995년까지 지구자기장 계산에 사용할 수 있다. 간단히, IGRF는 지난 5년간의 관측으로 다음 5년간의 자기장을 예측하는 것이며, DGRF는 5년간의 관측 후 관측기간동안의 자기장을 나타내는 것이다.

이 모델은 외부 근원(external source)를 배제한 Main Field를 나타내며 식(11)에 구면 좌표계를 적용시켜 구면조화함수(spherical harmonics)로

표시한다.

$$\gamma(r, \theta, \phi) = R \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} (a_n^m \cos m\phi + b_n^m \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (13)$$

여기서 R 은 지구의 반지름(6371.2 km)이다. a_n^m , b_n^m 의 상수들은 지상, 위성, 항공기, 선박등에서의 관측에 의해 구한 것으로 지구의 자전, 공전 및 태양활동과 내부의 물리적 상태에 따라 변화되는 시간의 함수들로 표시된다. 실험적 모델로서의 IGRF는 결국 식(13)으로 주어진 경계치 문제(boundary-valued problem)가 된다. 일반적으로 식(13)이 $1/r^n$ 의 항들로 구성되어 있으므로 실제 관측값과 IGRF의 값들은 r 이 커질수록 그 오차가 줄어들기 때문에 지구 표면에 가까울수록 IGRF모델의 오차는 심해지고 지구 중심에서 멀리 떨어질수록 그 오차는 줄어든다. 그러나 이것은 지구 내부자기장에 비해 외부에 의한 자기장이 비교적 적을 때 그 지역적 차이를 보여주는 데는 유효하지만 지구에서 멀리 떨어진 지역, 즉 외부의 자기장이 상대적으로 클 때는 이 모델은 유효하지 못하다. 따라서 IGRF의 유효범위안에서는 지구 중심에서 멀수록 실제값과 가까우며 지구표면에 가까울수록 그 오차가 증가하는 내부자기장의 대표적인 예다. 또한 IGRF와 같은 실험적인 모델은 식(3)의 경계치 문제를 해결하기 위해서 많은 양의 자료가 요구되므로 지구를 제외한 타 행성들에 응용하기는 어렵다. 지구에서 비교적 멀리 떨어진 자기구의 자기장 분포나 타 행성들의 자기구 형태는 충분히 나타낼 수 없는 것이 단점이다.

IGRF를 개선시키는 주 개발자들로는 소련의 IZMIRAN(the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation), 미국 NASA의 Goddard Space Flight Center, USGS(the U.S. Geological Survey), USNOO(the U. S. Naval Oceanographic Office) 그리고, 영국의 BGS(the British Geological Survey)이다.

인터넷상에서 IGRF모델 프로그램들을 제공하고 있다. 주로 FORTRAN 언어로 NSSDC(National Space Science Data Center)와 NGDC(National Geophysical Data Center)등에서 제공하고 있다. 부함수(subroutine)들은 주

어진 위치에서 L값과 자기장 벡터의 성분들을 계산하기 위하여 사용된다. NSSDC 버전(version)에서는 ESOC(European Space Operations Center)의 G. Kluge에 의해 만들어진 자기장의 벡터값을 계산하는 FELDG라는 부함수와 L값을 계산하는 SHELLG subroutine을 사용한다. IGRF 부함수들은 USGS의 A. Zunde 에 의해 개발되었다. BILCAL program(main program)은 위도, 경도(geodetic), 고도, 연도(decimal)가 주어지면 지구자기장의 세기, 벡터 성분(B-abs, B-north, B-east, B-down, declination, inclination), 자기장의 최소값(B0), 쌍극자 모멘텀(dipole moment), L값을 제공한다. 입력값으로는 자기장값을 계산하고자 하는 위치의 위도, 경도, 고도인데 도(degrees)값과 km값으로 제공되어야한다.

나. WMM(World Magnetic Model)

앞에서 언급한바와 같이 지구의 자기장은 다양한 근원에 의해 만들어 지는데 가장 중요한 것들을 보면

- 지구의 외핵
- 지구의 지각과 상층의 맨틀
- 이온층
- 자기권

이다.

지구 자기장의 90%는 외핵에서 발생된 것이다. 1995 Epoch World Magnetic Model(WMM-95)에 의해 나타나는 것이 바로 지구 자기장의 이러한 부분들이다. 자기장의 이런 부분들은 모델이 공간적이고 시간적으로 변화하여도 변칙적으로 변화하는 지구 자기장을 나타낼 수 있는 정확한 모델을 만들 수 없다. 이 모델은 168개의 구면 조화 가우스 계수(spherical-harmonic Gauss coefficients)들을 포함하고 있는 1 차(degree)이고 12계 구면조화 중심자기장 모델(order 12 spherical-harmonic Main Field(MF) model)과 추가로 168개의 구면조화 가우스 계수들을 포함하고 1차이고 12계

구면조화 중심자기장 변화모델(order 12 spherical-harmonic Secular-Variation(SV : 핵에서 발생된 것의 느린 주기의 변화) field model)를 포함하고 있다. 1995 Epoch를 위한 데이터는 POGS(Polar Orbiting Geomagnetic Survey)위성의 데이터이다. 이 데이터는 1991년부터 1993년까지의 전체 세기(total intensity)와 1988년부터 1993년까지 수행된 MAGNET에서 얻어진 vector-aeromagnetic 데이터에 의해 보완되었다. 이 두 데이터와 지구자기관측소의 실제 데이터는 처음으로 전체차수(full degree)와 12계(order 12)의 SV 가우스 계수(Gauss coefficients)들이 계산될 수 있을 만한 충분한 공간적, 시간적 영역을 제공한다. MF Gauss 계수들은 WMM-95에서 기본원년(base epoch:1995년)이라 불리우는 시간에서의 지구자기장을 나타낸다. SV 계수들은 WMM-95에 대해 base epoch로부터 종료원년(termination epoch:2000년)까지 5년 동안 지구자기장의 느린 변화를 나타낸다. 자기장 성분들은 각각의 field 성분과 관련된 구면조화 전개 형태로 자기장 변화 알고리즘(GEOMAG)에 의해 계산된다.

이 모델은 지구 자기장 중 외핵에서 발생된 것만 나타낼수 있다는 것을 알아야한다. 결과적으로 나침판과 자력계와 같은 자기센서는 적당한 WMM을 참고했을 때 공간적, 시간적 자기장의 변칙적인 변화를 관측할 수 있다. 특히 위치적, 주기인 자기 감소 변화(magnetic declination anomalies)는 10 차(degree)를 초과할 수 있다. 이 양의 변화는 일반적인 것은 아니지만 항상 존재하는 것이다. 3이나 4 차(degree)정도의 감소 변화(declination anomalies)는 공간적인 자기장 불균일에 의해 발생된다. 지상에서 공간적인 변화는 산들, 광석의 퇴적, 지리적 특징과 기차, 비행기, 탱크, 철로 등과 같은 문화적인 차이에 의해 만들어진다. 해양에서 이런 변화는 해저산맥 근처와 해양 분수령(ridges), 협곡, 단층근처, 해저화산의 근원지근처에서 매우 빈번히 발생한다. 배와 잠수함들도 해양에서의 자기적 감소의 근원이 된다.

지상과 해양에서의 주기적인 변화는 몇 분부터 수일에 걸쳐 지속될 수 있고 태양풍에 의해 유도된 전리층과 자기권의 변화 때문에 만들어지기

도 한다. 특히, 태양풍이나 다른 태양활동에 의한 자기폭풍은 지구 환경에 맹렬하고 지속적인 자기적 변화를 일으킨다. 심지어 태양활동이 조용한 기간에도 괄목할만한 공간적 시간적 자기 변화가 auroral electrojet과 equatorial electrojet과 같이 이온층의 전류계(current system)에 의해 만들어지며 지구의 극과 적도에서 발견된다. 지구 전체 관점에서 global 투시도(perspective)로부터 WMM의 감소(D), 증가(I), Grid 변화(GV)의 RMS(root-mean-square) 오차가 해양에서는 0.5 차보다 작고 지상에서는 1.0차 보다 작다고 추산된다. 또, 해양과 육지에서 Horizontal Intensity(H), Vertical component(Z), Total Intensity(F)의 RMS 에러는 200 nT보다 작다고 추산된다.

프로그램상의 입력값은 위도(-90도 ~ +90도), 경도(-180도 ~ +180도), 고도(msl(평균해면높이:mean sea level) 위로 1000km까지, msl아래는 -값, msl위에는 +값), Grid Interval(1.0 ~ 10800.0 arc minutes), 연도(WMM-95의 경우는 1995.0 ~ 2000.0)이다. 출력값은 총자기장의 세기, 수평(horizontal) 성분, 동쪽방향성분(X), 북쪽방향성분(Y), 수직(vertical) 성분(Z), 자기적감소, 자기적 증가와 Epoch의 년 변화율이다. 프로그램은 NGDC에서 C언어, BASIC, FORTRAN으로 제공하고 있다.

다. POGO Model

이 모델도 지구의 Main Field를 나타내는 것이다. 이것은 POGO(Polar Orbiting Geophysical, Observatory)위성에 의해 얻은 자기장 세기자료를 바탕으로 한다.

1968년 POGO(3/68) 모델은 1965년 10월부터 1967년 8월까지 POGO 2, 4에 의해 만들어졌다(대부분은 POGO 2에 의해 만들어짐). 1968년 POGO(10/68) 모델은 1967년 12월까지의 POGO 4의 관측에 기초를 두며 POGO(3/68)을 개선한 것이다. 1970년 POGO(8/69) 모델은 POGO 6의 데이터도 추가하여 이전의 것을 개선한 것이다. 1974년 POGO(8/71)은 이전의 데이터를 모두 이용한 것으로 65년 10월부터 70년 3월까지의 것을 사용하였다.

이 당시 POGO(8/71), AWC(75), IGS(75), IGRF(75)를 비교하였는데 POGO(8/71), AWC(75), IGS(75)는 거의 비슷한 결과를 보였으나 IGRF 1975는 부족한 예견 능력을 보였다. POGO(8/71)의 좋은 결과는 놀라운 일이다. 그 이유는 제한된 기간동안에 수량 데이터(scalar data=자기장 세기)만으로 이 모델을 만들었기 때문이다. 다른 모델들은 scalar와 vector data를 사용했고 오랜 기간의 관측을 바탕으로 했다.

라. GSFC model

이 모델도 지자기의 Main Field부분을 나타내었다. 1966년의 GSFC(9/65)은 1945년부터 1964년까지의 데이터에 바탕을 두고 있다. 1967년의 GSFC(12/66)은 1900년부터 1964년까지 가능한 모든 데이터를 추가하였고 사용된 위성은 Vanguard 3와 Alouette이다.

GSFC(9/80)은 15,206 MAGSAT 벡터 관측들(MGST(6/80)에서 사용한 것과 같은 1979년 11월 5-6일), 71,000 POGO 스칼라 관측들, 148개의 지자기 관측소의 관측들, 300개의 해양관측들에 바탕을 두고 있다. GSFC(9/80)은 상당량의 데이터를 사용하였고, anomaly field를 나타내기 위해 지상 관측소의 데이터를 추가하였으므로 이전의 것들을 상당히 개선 했다고 볼 수 있다. 1982년 Langel 등은 GSFC(9/80)을 MGST(6/80), AWC(75)와 비교하였다. GSFC(9/80)은 20년에 걸친 관측값과 가장 좋은 일치를 보여주었다.

GSFC(12/83)은 1979년 11월부터 1980년 4월까지의 54,728 MAGSAT 데이터와 91개 자자기 관측소들이 관측한 1982년까지의 데이터에 바탕을 두고 있다. 앞의 MAGSAT 데이터에 바탕을 둔 모델과는 다르게 MAGSAT 벡터 데이터 중에서 위도 50도에서 적도 방향의 것만 사용하였다. 50도에서 극쪽으로의 것은 단지 field magnitude(scalar) 데이터가 고려되었다.

GSFC(11/87)은 많은 DE위성 데이터에 바탕을 두어 만들어졌다. 1981년 9월 30일부터 1983년 1월 6일까지의 DE 2 위성의 데이터는 MAGSAT(11/79 - 4/80)의 데이터, 158개의 지상관측소의 데이터(1979 -

1983), 해양관측(1980-1983.5)과 지상 측지(land survey:1979.5 - 1983.5)의 데이터와 합해졌다. 벡터 데이터는 MAGSAT과 MAGNET(aircraft : 1.5km - 8 km)에 의해 얻어졌다. 그리고 모든 다른 데이터 자료로부터는 단지 스칼라 데이터만이 고려되었다. 50도에서 극쪽으로는 단지 스칼라 데이터가 극의 이온층에서의 field-aligned current의 효과를 제거하기 위해 사용되었다. 모든 관측소 데이터에서는 Main Field가 아닌 anomaly bias들이 고려되었다.

마. MGST model

Main Field를 모델화 한 것이다. MGST(6/80)은 MAGSAT 위성의 결과를 처음으로 사용한 것중 하나이다. 그리고, 1979년 11월 5-6일의 자기적으로 조용한 날들의 벡터측정에 바탕을 두고 있다. 그리고 External Field의 효과를 조금은 고려하였다. MGST(4/81)은 공공적으로 알려지지 않는다고, 15일 동안의 MAGSAT 데이터에 바탕을 두고 있다.

바. USGS model

이 모델은 U. S. Geological Survey(USGS)에서 개발하였고, 1985년을 시점으로 미국에서의 자기장의 방향과 세기와 다음연도에 예상되는 변화를 묘사한 것이다. 이것은 지상, 해양, 항공기에 의한 측지와 IGRF 1985와 통합한 값들, 그리고 지자기관측소들의 최신 자료들로부터 만들어졌다. 하와이와 미국전역에 대해 상세한 자기장 값을 알 수 있다.

사. MDTILT Magnetic Field Model 1969

이 분석적인 모델은 magnetopause와 tail current의 역할을 고려하였다. 총 자기장은 지구의 쌍극자(dipole)와 magnetopause 표면을 이용하여 magnetopause에서 압력 평형 방정식(pressure balance equation)을 풀어서 만들었다. tail current는 모델을 위성의 데이터와 비교하여 실험적으로 결정되었다. 변화하는 태양풍 압력의 효과는 magnetopause standoff 거리를 사용

함으로써 나타내졌다. field는 Legendre polynomial expansion에 의해 결정되고 자기장값은 solar magnetospheric coordinate로 주어진다. 이 모델은 약 7Re까지 적용된다. 이 오래된 모델의 사용은 ring current에 의해 야기되는 자기장 값을 고려하지 않아서 사용에 그 한계가 있다.

아. Olson-Pfizer Field Model 1974

이것은 dayside subsolar magnetosphere에서부터 nightside magnetotail에 있는 달의 궤도까지 지구의 자기장의 분석적인 모델이다. 단지 magnetopause, tail, ring current로부터 만들어진 것을 포함하여 quiet time magnetosphere가 나타내어진다. core field는 고정된 dipole로 나타내어진다. field는 Cartesian GMS coordinate로 주어진다. 이 모델에 쓰인 계수들은 POGO 3, 5로부터 측정된 600번의 magnetometer 관측에 의해 결정되었다. 이 모델의 결점은 단지 quiet condition을 나타낸다는 것과 Main Field와 ring current의 방향이 고정되어있다는 것이다.

자. Mead-Fairfield Field Model 1975

이 모델에서는 계수들이 Kp에 의해 magnetic activity가 4개의 단계로 나누어지기 때문에 4개의 계수그룹이 있다. 그리고 약 17Re까지 나타낼 수 있다. 계수들은 1966년부터 1972년 사이의 4개의 IMP위성의 451개 궤도들로부터 얻은 12,616개 벡터 자기장 측정을 최소자승근사(least-square-fit)하여 얻은 것이다. ring current와 같이 지역적인 current와 tail의 sheet current의 효과는 부분적으로 잘 모델화가 잘 되지 않았다. 프로그램은 Main Field를 나타내기 위해 GSFC(12/66)을 포함하고 있다.

차. Geotail Field Model 1979

-40Re부터 +10Re까지 자기장을 계산할 수 있다. 계수들은 지구의 dipole 축이 태양-지구 선에 수직이라고 가정하여 계산되었다. external

source를 포함하고 있다.

카. AWE(75) Model

지구의 Main Field를 모델화 한 것이다. 이것은 1939년부터 1974년에 걸친 100,000여개의 지상, 해양, 대기의 자기장 측정에 바탕을 두고 있다.

타. IGS(75) Model

지구의 Main Field를 모델화 한 것이다. POGO위성들, 해양, 항공관측, 지상관측의 데이터에 바탕을 둔 것이다.

표 4-1. 실험적 모델의 분류

	Main Field modeling	Main Field + External source modeling
모델	IGRF, WMM, POGO, GSFC, MSDT, AWE(75), IGS(75)	USGS, MDTILT Magnetic Field Model 1969, Olson-Pfizer Field Model 1974, Mead-Fairfield Field Model 1975, Geotail Field Model 1979

2. 이론적 모델

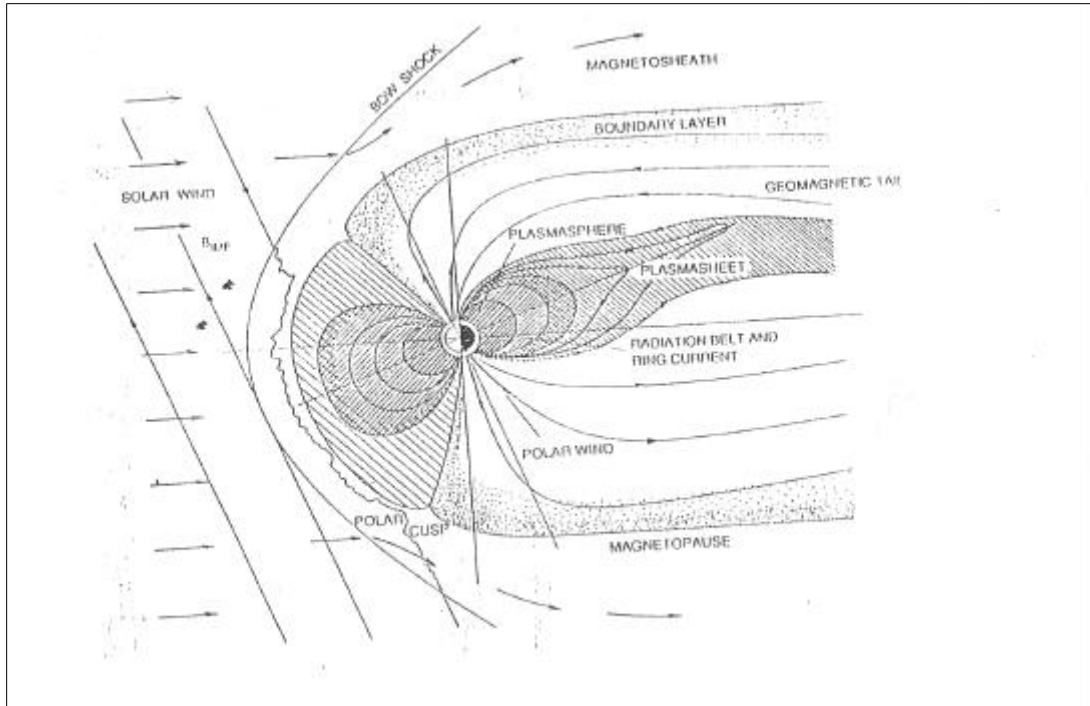


그림 4-1. 옆에서 본 지구 자기구의 일반적인 모습(after Fig. 1.3 in *Physics of space plasmas* [Parks, 1991]).

앞에서 기술한 실험적 모델은 식(13)에서와 같이 구형 모델이므로 지구 중심의 내부 자기장의 효과가 클 때 적합하다. 이는 식(12)에서 외부 자기장 B_S 를 제외하고 내부 자기장 B_I 를 강조한 경우이다. 그러나 그림 4-1에서 알 수 있듯이 전체적인 행성자기장의 형태를 3차원 공간에서 구형대칭과는 크게 다르며 따라서 외부 전류에 의한 새로운 자기장을 고려해야만 한다. 또한 시간에 따른 자기장의 다양한 형태와 그 변화과정은 실험자기구 모델에서는 간단히 표현할 수 없기 때문에 이에 대한 연구에도 이론적 모델이 필수적이다. 이론적 모델은 비교적 작은 양의 자료에서 얻은 사실들을 기초로 전반적인 자기구 형태를 표시할 수 있으므로 직접 관측이 이루어지지 않는 외부 지역과 각 경계들의 위치등을 추정하는데도 유용하다. 행성자기구에서 외부 자기장 B_S 를 가정하는 방법은 비교적 간단하다. 원리적으로는 경계면에서의 전류분포를 알아야만 r_s 및 B_S 를 구할 수 있으나 이는 실험적 모델과 마찬가지로 매우 방대한 관측자료를 필요로 하기 때문에 실제 불가능하다. 이제까지 기존 관측에서 알 수 있는 것은 경계면의 위치 및 분포형태

와 행성 자기장이 경계면에 대해서 대부분 평행하다는 결과 등이다. 따라서 경계면에 분포하는 전류 분포를 직접 구하는 것 대신 다음의 외부 유도 자기장에 대한 경계 조건을 사용한다.

$$\hat{n} \cdot (\vec{B}_S + \vec{B}_I) = 0 \quad (14)$$

경계를 나타내는 곡면을 $S=S_0$ 로 할 때 식(14)은 식(11)과 함께

$$\left(\frac{\partial \gamma_S}{\partial s} + \frac{\partial \gamma_I}{\partial s} \right) \Big|_{S_0} = 0 \quad (15)$$

$$\nabla^2 \gamma_S = \nabla^2 \gamma_I = 0 \quad (16)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서 내부자기장 γ_I 를 앞에서와 같이 이중극자 등으로 근사할 수 있으므로 식(15)에서 γ_S 를 경계치 문제로 구할 수 있게 된다. 이때 식(16)의 Laplacian방정식을 어떤 좌표계에서 나타내느냐에 따라 자기구의 관심있는 지역을 구분할 수 있다. 즉, magnetopause부분의 경계는 포물선 형태이고 자기구 전체 경계 모습은 타원형에 가까우며 magnetotail 부분만을 고려한다면 slab형태가 될 것이다. 우선 타원형의 경우를 예로 들기로 하자. 그림 4-2에서 자기구 전체의 형태를 나타내기 위한 타원 형태의 예를 정성

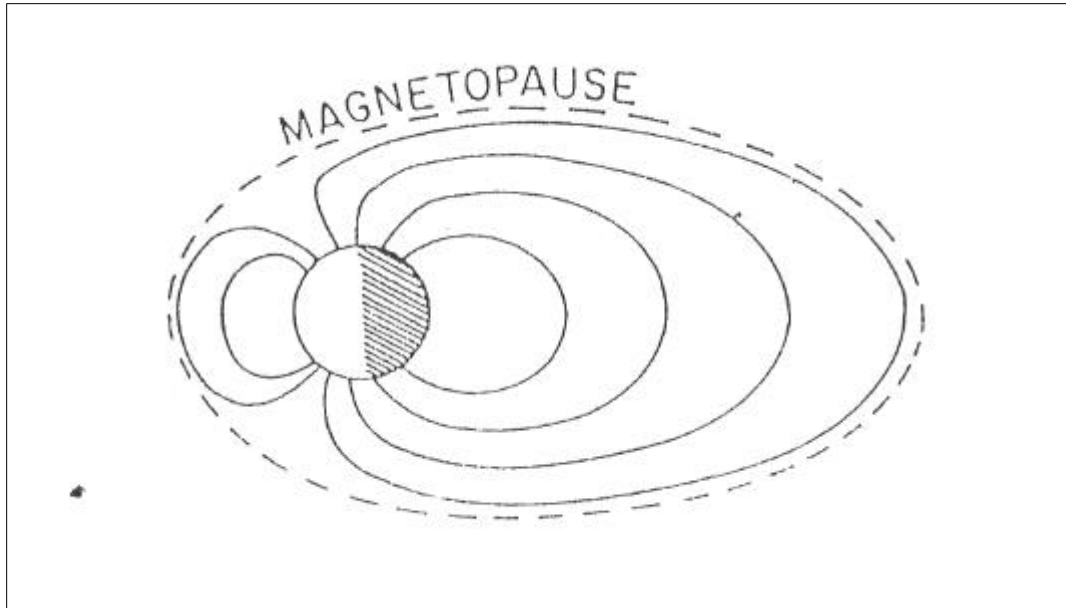


그림 4-2. 타원체 경계면을 가진 자기구의 경우 이중극자 형태의 자기장이 중심에서 벗어나 있을 때의 정성적인 모습.

적으로 나타내었다. 경계면에서 자기장을 평행한 성분만을 가져야 하므로 행성내부 자기능률이 치우친 쪽이 경계가 magnetopause가 되고 반대편은 magnetotail이 될것이다. 타원형을 표시하기 위해서 타원체 좌표 (σ, τ, ϕ) [Tsyganenko, 1989]를 도입하면 각각은

$$\sigma = \frac{1}{a} \left\{ \frac{S^2 + (S^4 - 4a^2x^2)^{1/2}}{2} \right\}^{1/2} \quad (17)$$

$$\tau = \frac{1}{a} \left\{ \frac{S^2 - (S^4 - 4a^2x^2)^{1/2}}{2} \right\}^{1/2} \text{sgn}(x) \quad (18)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{z}{y} \right) \quad (19)$$

$$S^2 = x^2 + y^2 + z^2 + a^2 \quad (20)$$

으로 표시된다. 이때 $\sigma = \text{const}$ 는 타원체의 표면에 해당되는 곡면이고 τ

$=\text{const}$ 는 x 축에 축대칭 형태를 하고 각 타원체의 표면을 수직으로 지나는

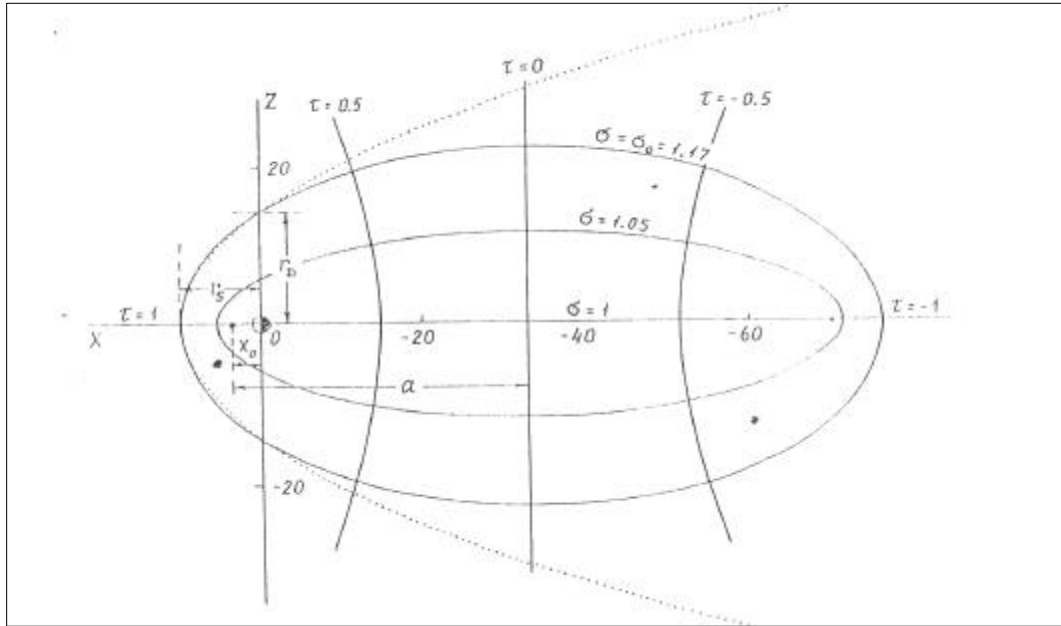


그림 4-3. 타원체 좌표계 (σ, τ, ϕ) 를 (x, y, z) 에서 나타낸 모습이다. 행성의 위치를 원점으로 가정하면 타원형의 자기구의 중심은 $a-x_0$ 만큼 이동되어 있다.

곡면이며 ϕ 는 x 축을 중심으로한 (y, z) 평면에서 y 축으로부터 회전각을 나타낸다. 또 a 는 타원체의 모양을 결정하는 상수이다. 타원체 중심에서의 단면은 타원형인데 이때 초점거리의 반, 즉, 중심에서 초점까지 거리를 나타낸다. 각 변수의 정의구역은 타원체의 외부경계를 $\sigma=\sigma_0$ 로 할 때

$$1 \leq \sigma \leq \sigma_0$$

$$-1 \leq \tau \leq 1 \quad (21)$$

$$0 \leq \phi \leq 2\pi$$

으로 주어진다. 식(17)-(20)은 내부자기장의 중심이 이동되지 않았으므로 x 축에 대해서 평행이동시키면 그림 4-2와 같은 경우를 얻게 된다. 타원체의

중심을 $x=0$ 에서 $a-x_0$ 만큼 이동시켰다면 식(17)-(20)의 x 는

$$x \rightarrow x - x_0 + a \quad (22)$$

로 치환된다. 이와 같은 좌표를 그림 4-3과 같은 형태를 갖게 된다. 타원체 좌표계의 성질과 이 좌표계에서의 Laplacian 방정식의 해는 부록 I 과 II에서 자세히 기술하였다.

경계조건 식(15)에서 외부자기 potential γ_s 를 구할 수 있으므로 최종적으로 $\vec{B} = \vec{B}_I + \vec{B}_S$ 는

$$\begin{aligned} \vec{B} &= -\vec{\nabla}\gamma_I - \vec{\nabla}\gamma_S \\ &= -\frac{\partial}{\partial\sigma}(\gamma_I + \gamma_S)\vec{\nabla}\sigma - \frac{\partial}{\partial\tau}(\gamma_I + \gamma_S)\vec{\nabla}\tau - \frac{\partial}{\partial\phi}(\gamma_I + \gamma_S)\vec{\nabla}\phi \end{aligned} \quad (23)$$

가 된다. 식(23)에 식(17)-(20)을 대입하면 \vec{B} 를 B_x, B_y, B_z 으로 쓸 수 있고 따라서 식(2)에 의한 자력선을 직접 그릴 수 있게 된다. 비교적 안정된 상태

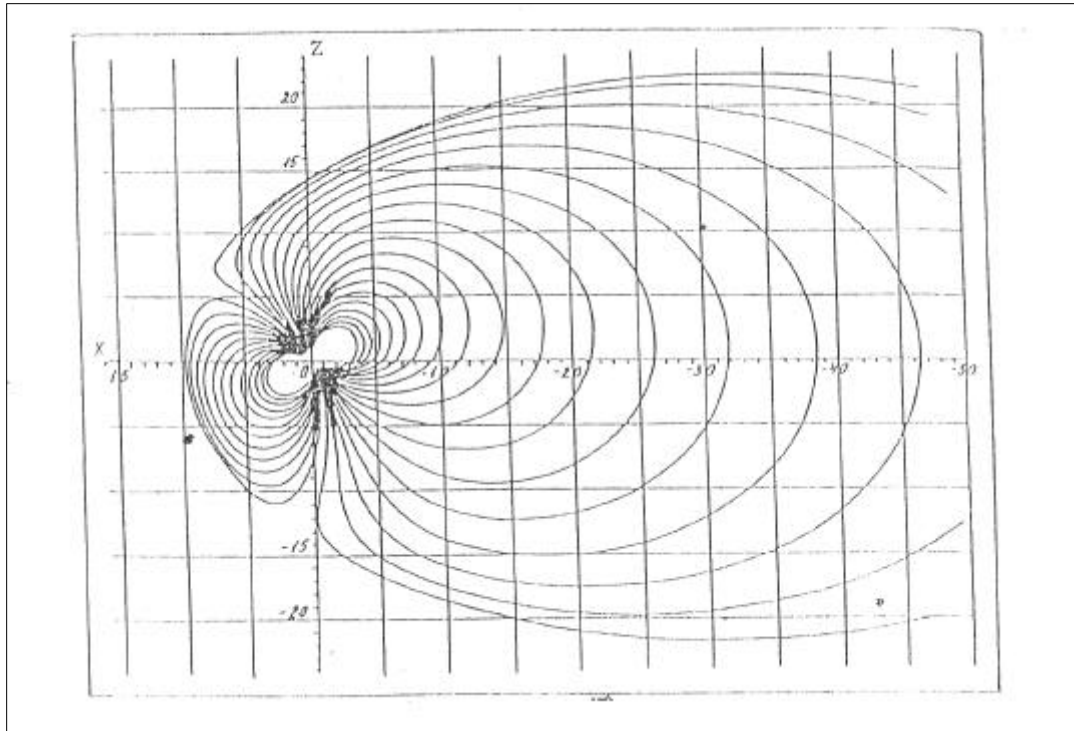


그림 4-4. 기울기를 30도로 가정한 경우($\phi=30^\circ$) 행성자기구의 모습. 부록 I, II에서 계산한 상수들을 사용하였다[Tsyganenko, 1989].

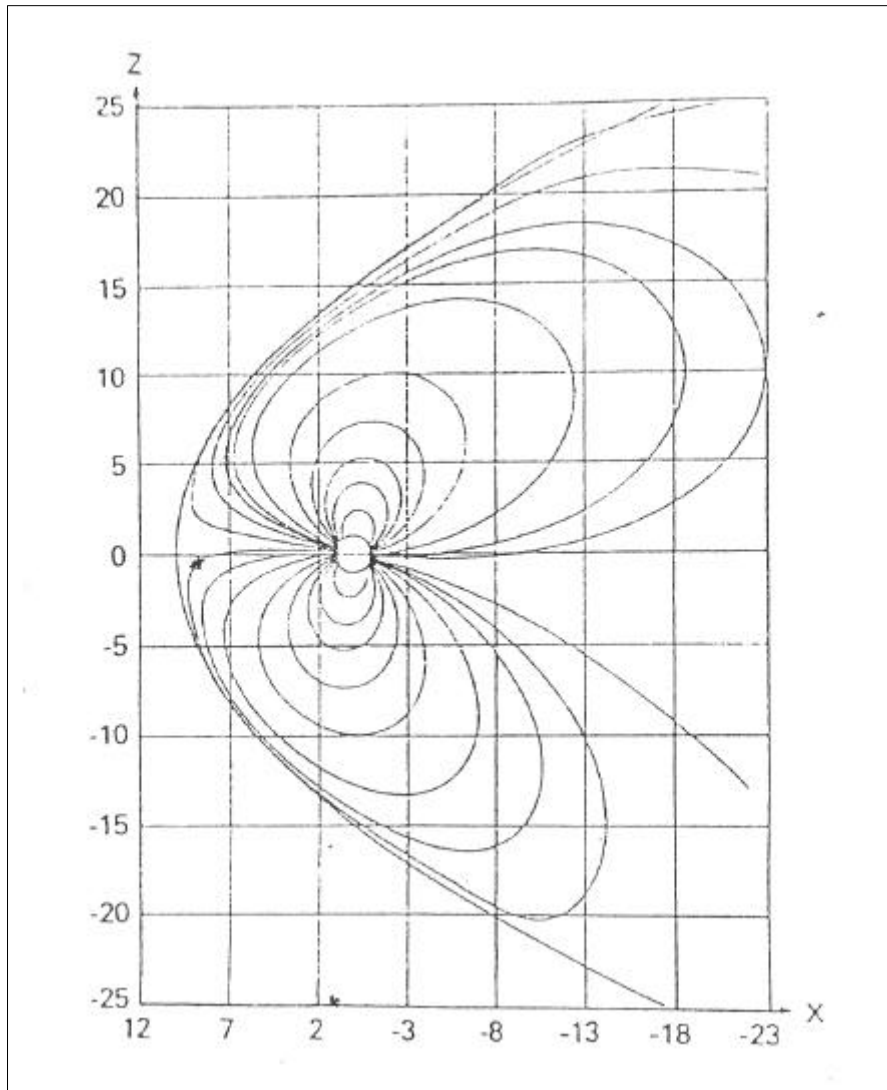


그림 4-5. 포물선 좌표계에서 이중극자의 기울기를 80도로 가정한 경우($\phi=80^\circ$). 천왕성과 같이 자기축이 공전면에 가까운 행성 자기구의 앞부분을 잘 나타내주고 있다[Stern, 1985].

의 지구자기구를 보여주는 예를 부록 II에 실었으며 이를 기초로 한 자기장 형태를 그림 4-4에서 나타내었다. 이 타원체 모델은 자기구 전체의 형태를 동시에 다룰 수 있다는 장점에도 불구하고 자기구의 고위도 부분이나 magnetopause의 앞부분에서는 실제와 상당한 오차를 보인다. 이러한 단점은 포물선 모델에서 크게 보완된다[Stern, 1985]. 포물선 좌표계 (λ, μ, ϕ)는

$$\lambda^2 = r + x \quad (24)$$

$$\mu^2 = r - x \quad (25)$$

$$\tan \phi = \frac{z}{y} \quad (26)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (27)$$

으로 주어지며 magnetopause는 $\lambda = \lambda_0$ 곡면으로 가정된다. 그림 4-5는 앞에서의 타원체 좌표를 이용한 경우와 유사한 계산과정을 통해 얻어진 모습이다. 포물선을 이용한 경계면은 그림 4-5에서 알 수 있듯이 자기구의 앞부분은 임의의 기울기에 대하여 비교적 정확히 묘사할 수 있는 장점이 있다. 그러나 포물선은 자기구의 뒷부분의 자기장보다 매우 빠르게 발산하는 관계로 magnetotail 부분을 나타내는 좌표계로서는 적당하지 못하다.

가. Tsyganenko Model

이것은 자기장의 준 실험적인 best-fit 표현을 하였다. 이 모델은 N.A.Tsyganenko에 의해 개발되었으며, 70Re 까지 나타낼 수 있다. 위에서 설명한 것이 대부분 이 모델이다. 1987년도, 89년도, 96년도 버전이 있는데 87년도 것은 사용되지 않는다. IMP, HEOS, ISEE등의 위성에 의한 관측에 바탕을 두었다. 이것은 ring current, magnetotail current system, magnetopause current와 field-aligned current의 large-scale system 과 같은 external source의 효과도 나타내어준다.

제 4 절 IGRF 모델 데이터 제공 사이트

1. NSSDC(National Space Science Data Center)

NSSDC는 NASA 산하에서 천체 물리학, 우주과학, 태양물리학, 행성

천문학 등과 관련된 다양한 데이터를 제공하고 있다. 특히 우주과학 분야에서는 여러 가지 전리층과 대기모델 및 지구 자기장 모델에 관한 데이터를 제공하고 있으며 모델의 프로그램 및 여러 소프트웨어(software)들도 제공하고 있다. 특히 IGRF를 웹에서 운영하고 있는데 구할 수 있는 데이터는 다음과 같다. 첫째, 임의의 한 점에서의 자기장벡터 값의 계산, 둘째, 고도에 따른 자기장 벡터의 세기, 셋째, 위도에 따른 자기장 벡터의 세기, 넷째, 경도에 따른 자기장 벡터의 세기, 다섯째, 연도에 따른 자기장 벡터의 세기이다. 그림 4-6은 NSSDC에서 운영 중인 사이트의 모습이다. 첫째, 임의의 한 점에서 자기장 벡터를 계산하기 위하여 입력할 좌표계, 연도, 고도, 위도, 경도가 필요하고 그림 4-7은 출력 화면이다. 둘째, 고도에 따른 자기장 벡터의 세기를 계산하는 경우 연도, 위도, 경도, 계산 시작 고도, 종료 고도, 고도의 간격을 입력해야 하고 그림 4-8은 출력화면이다. 셋째, 위도에 따른 자기장 벡터의 세기 계산의 경우 연도, 경도, 위도, 계산 시작 위도, 종료 위도, 위도의 간격을 입력해야하고 그림 4-9는 출력 화면이다. 넷째, 경도에 따른 자기장 벡터의 세기를 계산 할 경우 입력값은 연도, 위도, 고도, 계산 시작 경도, 종료 경도, 경도의 간격을 입력하고, 그림 4-10은 출력 화면이다. 다섯째, 연도에 따른 자기장 벡터의 계산의 경우, 위도, 경도, 고도, 계산 시작 연도, 종료 연도, 연도의 간격을 입력해야하고 그림 4-11은 출력 화면이다. 그러나 지구 전체에 관한 global map은 제공하고 있지 않다.

2. BGS(British Geological Survey)

BGS는 영국의 지구 과학에 관한 데이터를 제공하고 있으며 땅의 이용 계획, 황무지 정리, 토목 공학, 광물 조사, 기후 변화에 관한 일 등을 하고 있다. 여기서 IGRF의 데이터를 제공하고 있다. 그림 4-12는 BGS에서 제공하고 있는 IGRF 입력 화면이고 그림 4-13은 출력화면이다. 여기서는 한 지점에 관한 자기장 벡터의 여러 가지 값들을 제공하고 있고 입력값은 입력할 좌표계, 연도, 입력위치의 경도 위도이며 출력값은 벡터의 크기, 각도 성분의 감소(Declination), 증가(Inclination), 수평 성분, 북쪽 성분, 동쪽 성분,

수직 성분, 변화량이며 원하는 데이터만 선택적으로 획득할 수 있다. 그러나 NSSDC와 같이 다양한 서비스를 제공하고 있지 않다.


3. NGDC(National Geophysical Data Center)

NGDC는 지구 해양의 지질학과 물리학, 고기후학, 태양 주변 환경의 물리학, 지구 과학, 빙하학과 같은 분야의 데이터를 운영하고 있다. 지구 과학 분야에서 IGRF를 이용한 자기장 데이터를 제공한다. 그림 4-14는 NGDC에서 제공하는 사이트의 입력화면이다. 입력값은 원하는 시작 날짜, 종료 날짜와 간격, 원하는 위치의 고도, 경도와 위도이다. 날짜의 간격은 연도의 간격을 입력하는 것이며 그 크기는 시작 연도와 종료 연도의 차이보다 작아야 한다. 출력값은 벡터의 각도 성분(angular components)인 D(Declination)와 I(Inclination), 벡터의 수평성분, Z, 북쪽 성분, X, 동쪽성분, Y, 그리고 벡터의 크기인 F이다. 그림 4-15는 1980년부터 1998년까지, 간격 2년, 고도 300km, 경도 131도, 위도 37도 인 경우 출력 화면이다. NGDC에서도 global map을 제공하고 있는데 그림 4-16이 출력화면이다. D, I, 자기장 벡터의 세 성분의 global map을 제공하고 있다.

File Edit View Go Communication Help

Back Forward Reload Home Search Guide Print Security

Bookmarks Reload this page from the server http://space.model/models/igrf.html



DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1945 - 2000 and Related Parameters

PART 1
This page enables to calculate the following parameters for one point:
(a) Transformation of Geographic coordinates to Corrected GeoMagnetic (CGM) coordinates and vice versa; (b) the DGRF/IGRF magnetic field components H (nT), D (deg.), and Z (nT); (c) the dipole latitude and longitude; (d) the geographic coordinates of a magnetically conjugate point; (e) the geographic coordinates of the magnetic field line footprint (if the given point is located above the Earth's surface); (f) the apex of the magnetic field line; (g) the magnetic local time (MLT) midnight in UT (hours); and (h) the meridian angle between the geographic and CGM poles (positive for the eastward azimuth of the CGM pole, and negative for the westward azimuth).

[Go to calculate parameters for one point](#)

PART 2
This page enables the computation of International Geomagnetic Reference Field (IGRF) parameter profiles in altitude, (geographic) latitude, longitude, or year. The parameters include the magnetic field strength and vector components, the magnetic inclination and declination angles and the L value.

[Go to the description of DGRF/IGRF model and source codes](#) Click on independent variable for profile:

[HEIGHT PROFILE](#)
[LATITUDE PROFILE](#)
[LONGITUDE PROFILE](#)
[YEAR PROFILE](#)

Height Profile

Year(1945 - 2000):

Latitude(deg. from -90 to 90): Longitude(deg. from 0 to 360):

Height(km. from 0 to 30000): Start Stop Stepsize

Absolute mag. field strength, B
 (Normalized to equator, B/B0)

Latitude Profile

Year(1945-2000):

Longitude(deg. from 0 to 360): Height (km):

Latitude (deg. from -90.0 to 90.0): Start Stop Stepsize

Absolute mag. field strength, B
 (Normalized to equator, B/B0)

Longitude Profile

Year(1945-2000):

Latitude(deg. from -90 to 90): Height (km):

Longitude(deg. from 0.0 to 360.0): Start Stop Stepsize

Absolute mag. field strength, B
 (Normalized to equator, B/B0)

Year Profile

Latitude(deg. from -90 to 90): Longitude(deg. from 0 to 360):

Height(km):


Year(1945-2000): Start Stop Stepsize

Absolute mag. field strength, B
 (Normalized to equator, B/B0)

[Go to the NSSDC Space Physics page](#)

3540

*If you have any questions/comments about this model available from NSSDC, contact:
 Dr. Dieter Bilitza, dbilitza@nssdc.gsfc.nasa.gov*



*If you have any questions/comments about WWW access to this model, contact:
 Dr. Natalia Papsternik, FAX (301) 286-1771, E-mail: natalia@nssdc.gsfc.nasa.gov, National Space Science Data Center, Mail Code 633, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771*

NASA Official: J.H. King, king@nssdc.gsfc.nasa.gov

Version 1.0, 30 December 1995
 Last Updated: 6 January 1997, NEP

Document: Done

그림 4-6. NSSDC에서 제공하고 있는 IGRF 데이터 입력 사이트.

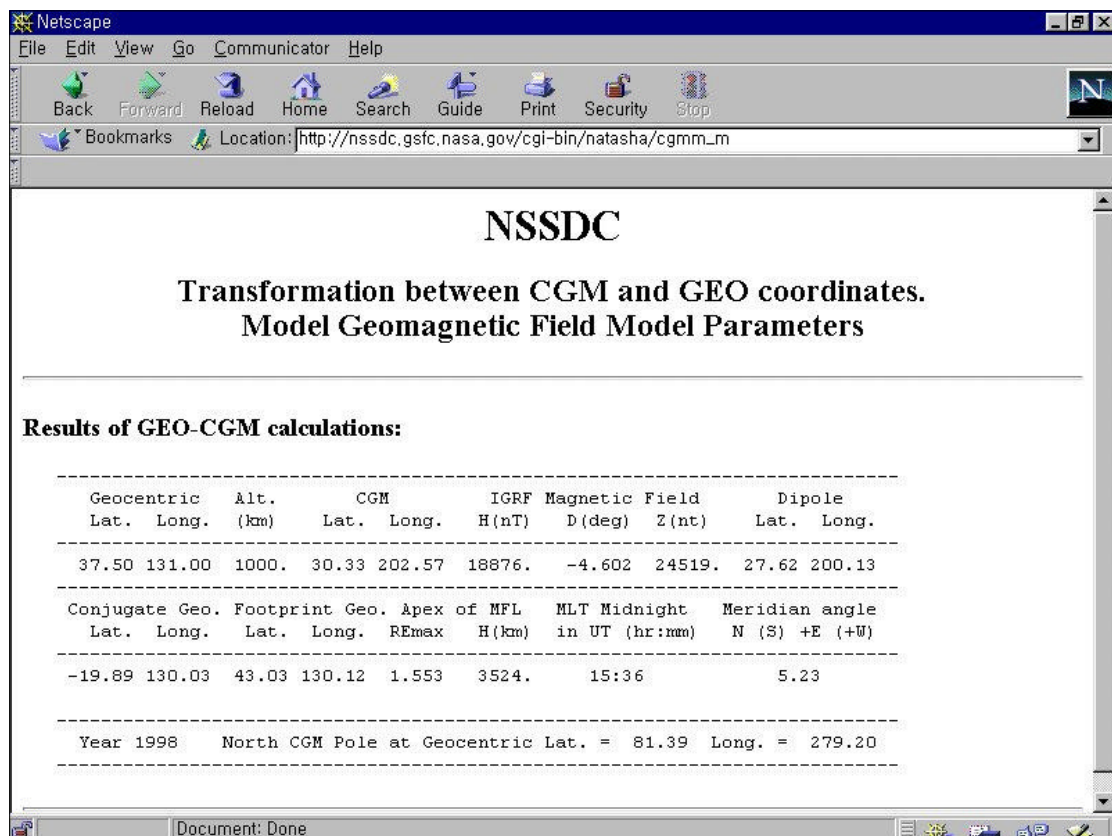


그림 4-7. NSSDC에서 제공중인 임의의 한 점에서 IGRF 데이터 출력 화면.

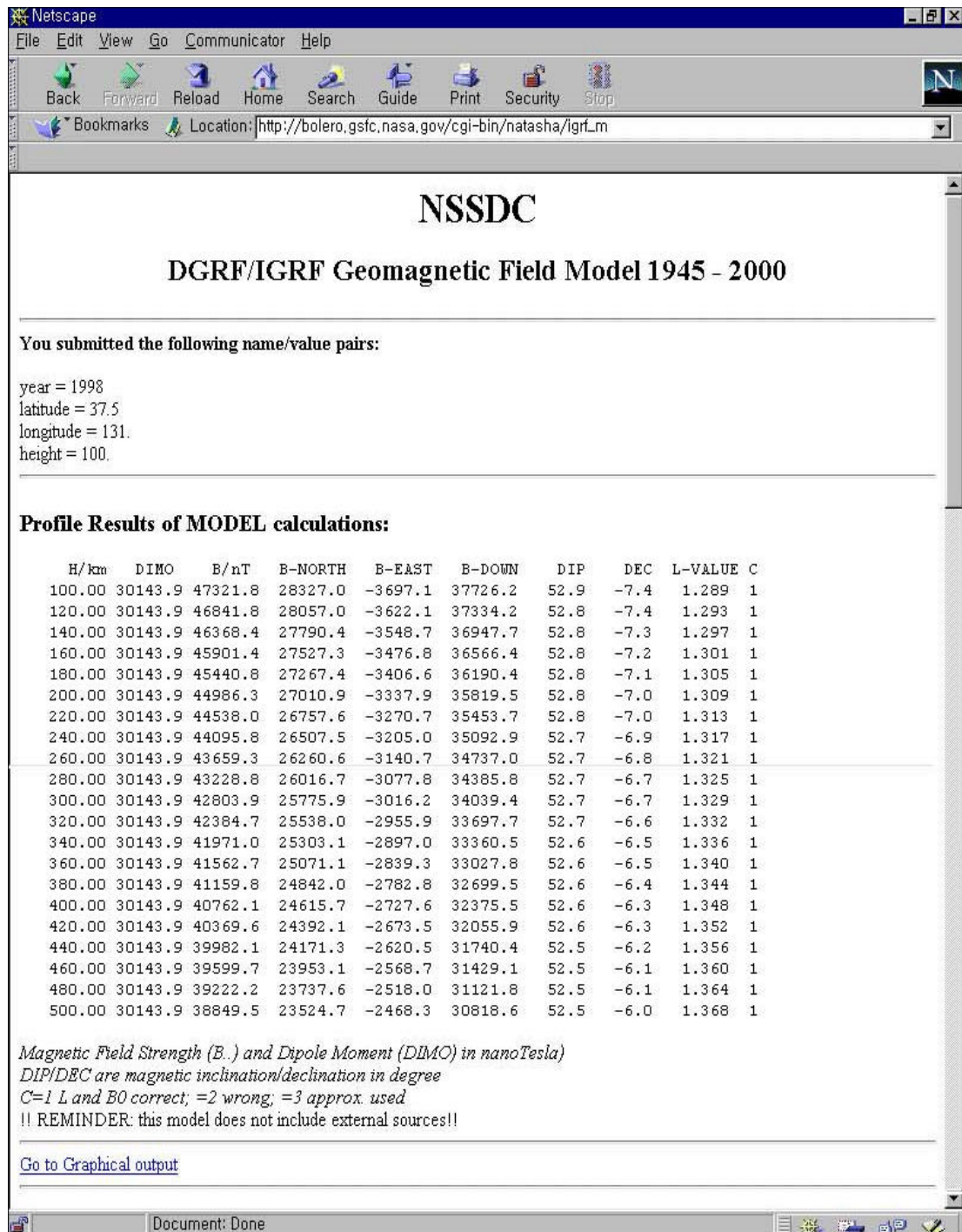


그림 4-8. NSSDC에서 제공중인 고도에 따른 IGRF의 출력 화면.

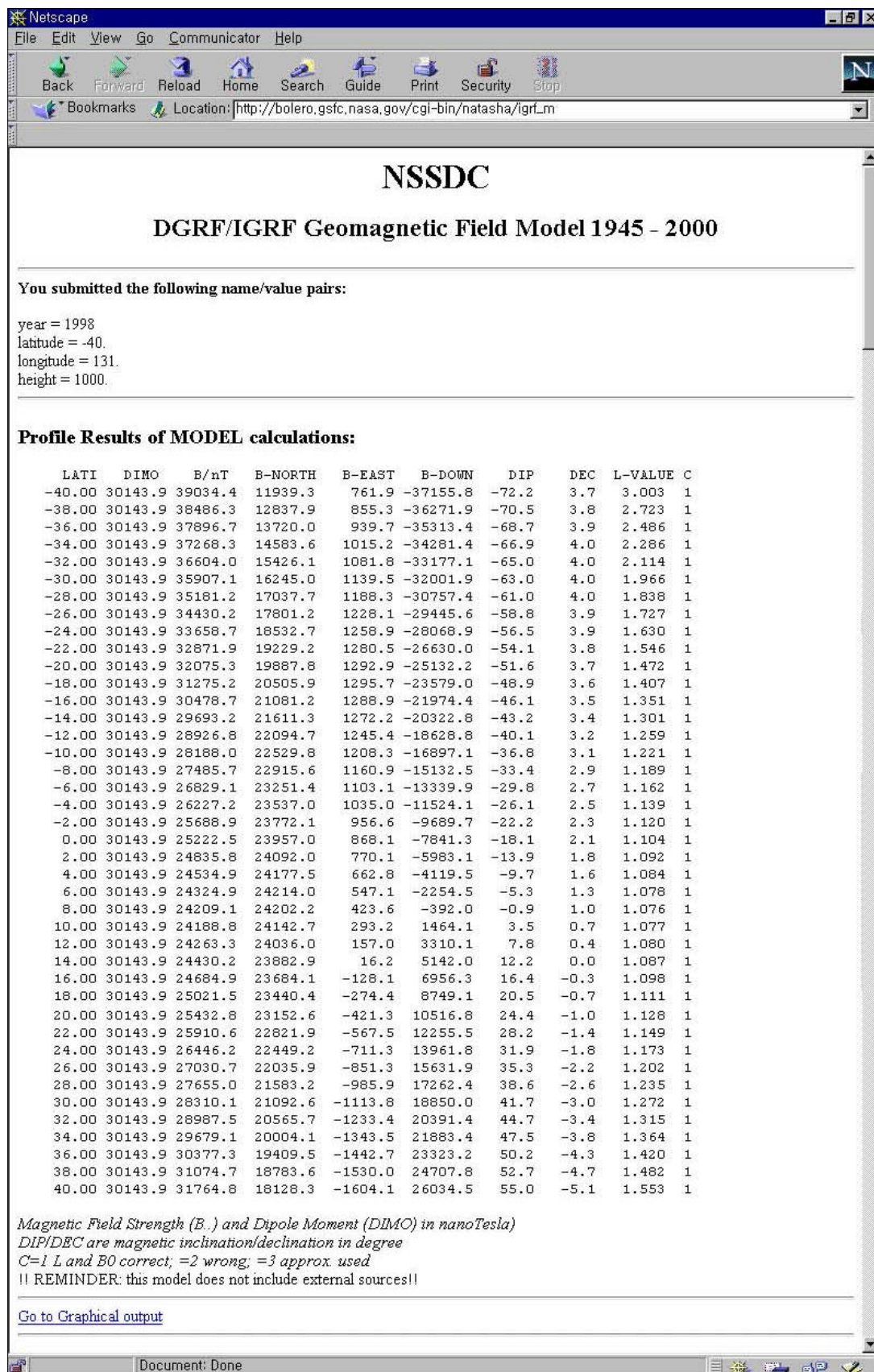


그림 4-9. NSSDC에서 제공중인 위도에 따른 IGRF 출력화면.

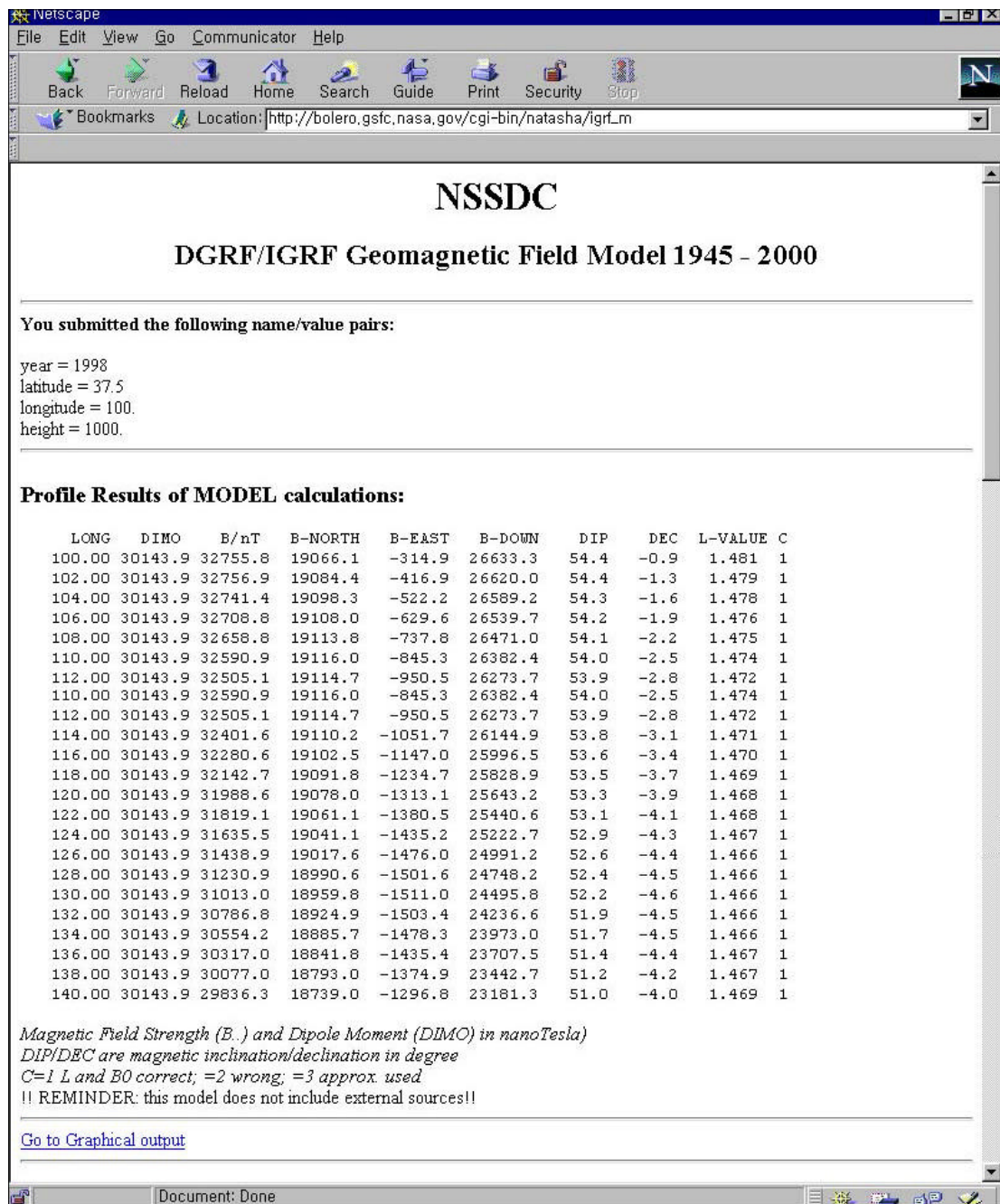


그림 4-10. NSSDC에서 제공중인 경도에 따른 IGRF 출력화면.

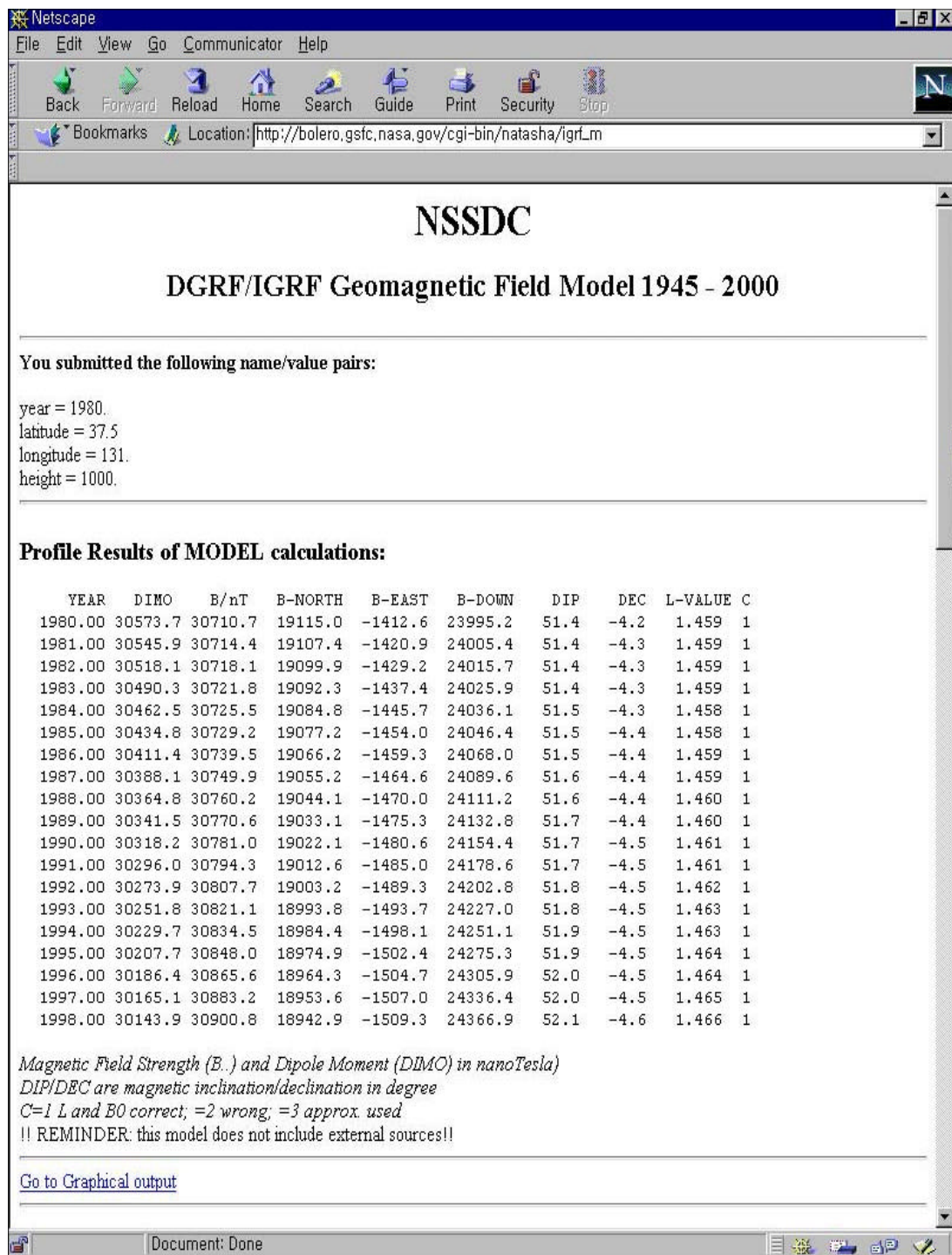



그림 4-11. NSSDC에서 제공중인 연도에 따른 IGRF 출력화면.

IGRF Synthesis Form - Netscape

File Edit View Go Communicator Help

Back Forward Reload Home Search Guide Print Security Stop

Bookmarks Location: http://ub.nmh.ac.uk/gifs/igrf_form.html

 **British Geological Survey** **IGRF Synthesis Form**

Please enter your name and email address

This is an IGRF spot value request form:

Coordinate Type: ☒ Geodetic ☐ Geocentric

Date: Altitude: (Radial Distance if Geocentric)

Name of Location: (optional)

Position Coordinates: ☒ Degrees and Minutes ☐ Decimal Degrees

LATITUDE degrees, minutes (ONLY for Degrees & minutes option)

LONGITUDE degrees, minutes (ONLY for Degrees & minutes option)

☒ Total Intensity ☐ Declination ☐ Inclination ☐ Horizontal Intensity

☐ North Component ☐ East Component ☐ Vertical Component

☐ Secular Variation

Include a Map of the Location: ☐ NO ☒ YES

This option takes approx. 20 seconds to produce the map, plus the small transfer time sending the image (file size 5 K).

To submit the query, press this button:

To clear the form, press this button:

RETURN to the [GIFS PAGE](#), [IGRF](#) description page.

http://www.nmh.ac.uk/gifs/igrf_form.html
 Page maintained by [Ellen Clarke](#)
 Global Seismology and Geomagnetism Group, British Geological Survey, Murchison House, West Mains Road, Edinburgh EH9 3LA, UK.
 Tel: +44 (0)131 667 1000, Fax: +44 (0)131 667 1877.
 Last Revised: 31/10/98

그림 4-12. BGS에서 제공 중인 IGRF의 입력 화면.

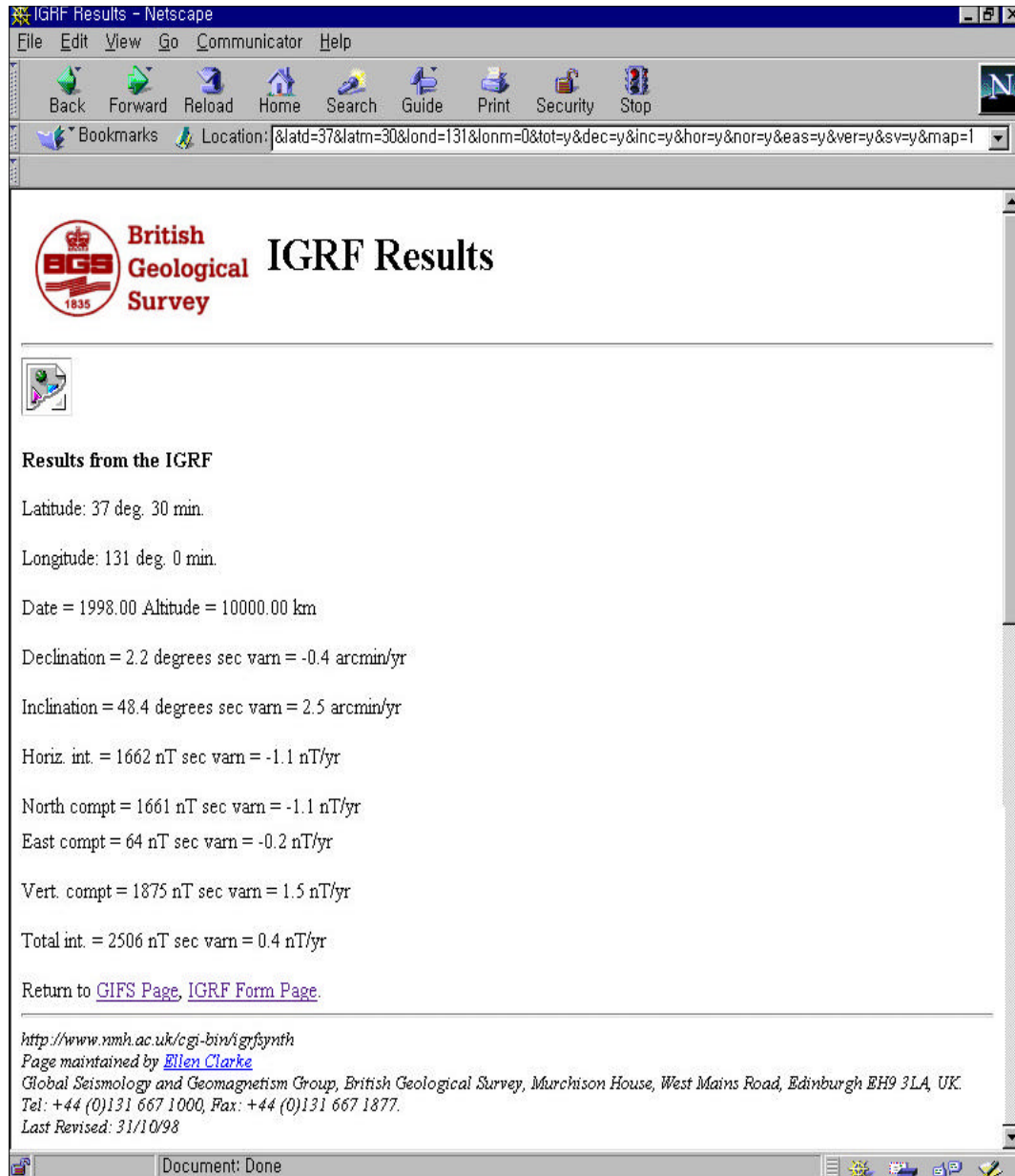


그림 4-13. BGS에서 제공중인 IGRF의 데이터 출력화면.

Geomagnetic Field Synthesis Program Input Form - Netscape

File Edit View Go Communicator Help

Back Forward Reload Home Search Guide Print Security Stop

Bookmarks Location: <http://zenith.ngdc.noaa.gov/seg/noaa-by/ngdc/seginfo/geomag/geomagv3p13.html>

Providing Access to Environmental Data on the WWW 1992 NOAA

National Geophysical Data Center Boulder, Colorado USA

Geomagnetic Field Synthesis Program (Version 3.0) Input Form

The program run from this form computes the values of the Earth's magnetic field parameters for a given location and date or date range. Date may be entered as a decimal year (i.e. 1993.5) or as year, month, day (1993 7 15). Latitude and longitude are inputted as degree and fraction of a degree or as degree, minutes, and seconds. The magnetic parameters (D, I, H, X, Y, Z, and F) are computed based on a Schmidt quasirationalized spherical harmonic model of the magnetic field. Accuracies for the angular components (Declination and Inclination) are generally within 30 minutes. Accuracies for the force components (Horizontal, North, East, Vertical, and Total force) are generally within 25 nanotesla. Local disturbances and attempting to use a model beyond its valid date range could cause greater errors. The sign convention used throughout is Declination (D) positive east, Inclination (I) and Vertical intensity (Z) positive down, North component (X) positive north, and East component (Y) positive east. The current IGRF model is used for all computations.

☐ Date in decimal years
Start or single date: End date:

☒ Date in year, month and day
Start or single date
Year (1900 to 2000): Month (1 to 12): Day (1-31):
End date
Year (1900 to 2000): Month (1 to 12): Day (1-31):
Step size:

Elevation:

☒ km (-1 to 600) ☐ mi (-0.62 to 372.82) ☐ ft (-3280.84 to 1968503.94)

Location:

Range:
Latitude (0 to 90 (Northern Hemisphere) -90 to 0 (Southern Hemisphere))
Longitude (0 to 180 (Eastern Hemisphere) -180 to 0 (Western Hemisphere))

☐ Latitude & longitude in decimal degrees
Latitude (-90 to 90):
Longitude (-180 to 180):

☒ Latitude & longitude in degrees, minutes, and seconds
Latitude (-90 to 90):
Degrees (integer):
Minutes (integer):
Seconds (integer):
Longitude (-180 to 180):
Degrees (integer):
Minutes (integer):
Seconds (integer):

Submit Reset

Default

Return to: [Geomag Home Page](#).

Find out more about: [downloading](#) the GEOMAG program.

Latest version of this page:
<http://geomag.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/geomagv3p13.html>
The NOAA WebTV Project at NGDC
Rich Pozard, pozard@ngdc.noaa.gov 303-497-6124

Geomagnetic Field Synthesis Program Input Form

그림 4-14. NGDC에서 제공중인 IGRF의 데이터 입력화면.

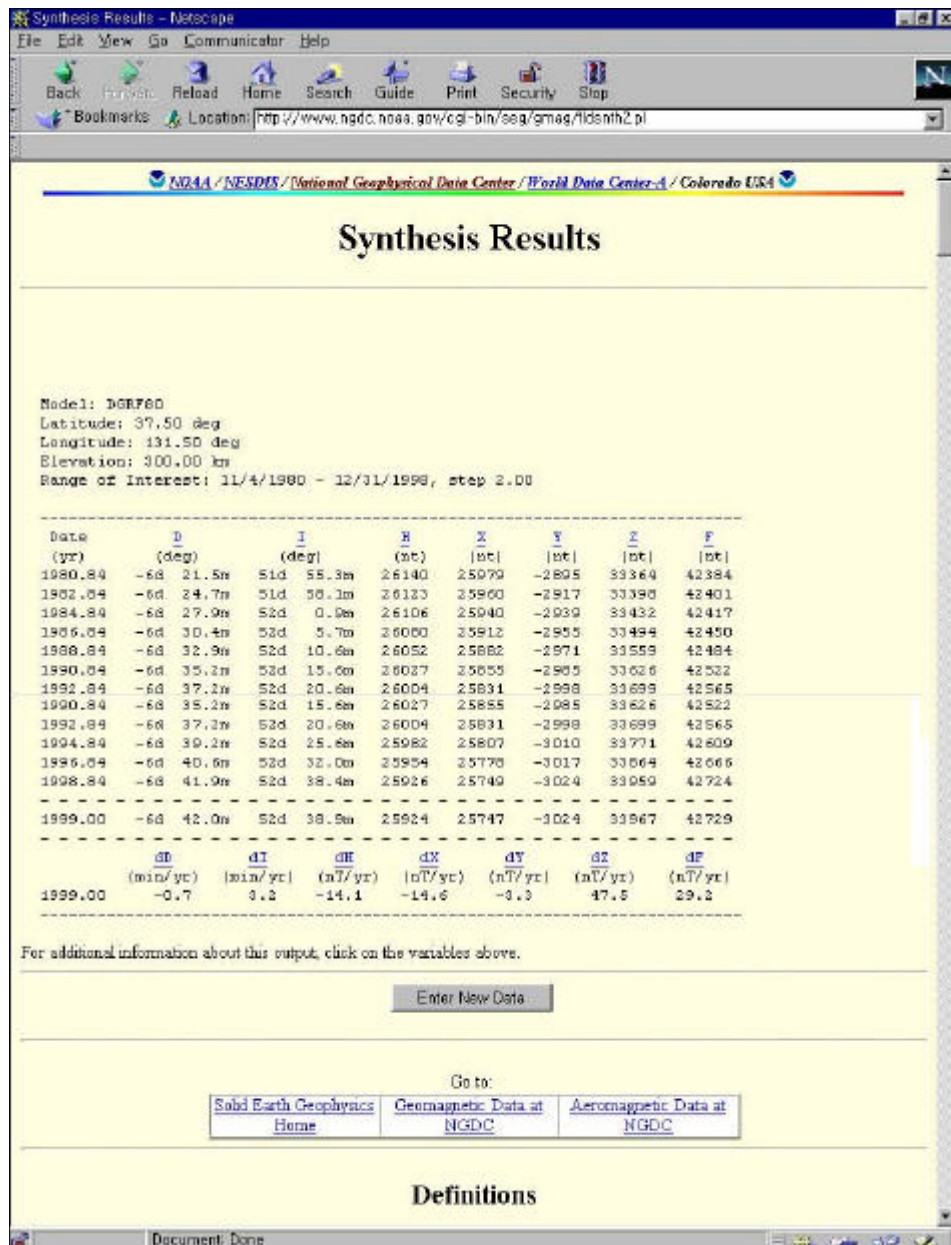


그림 4-15. NGDC에서 제공중인 IGRF 데이터 출력화면.

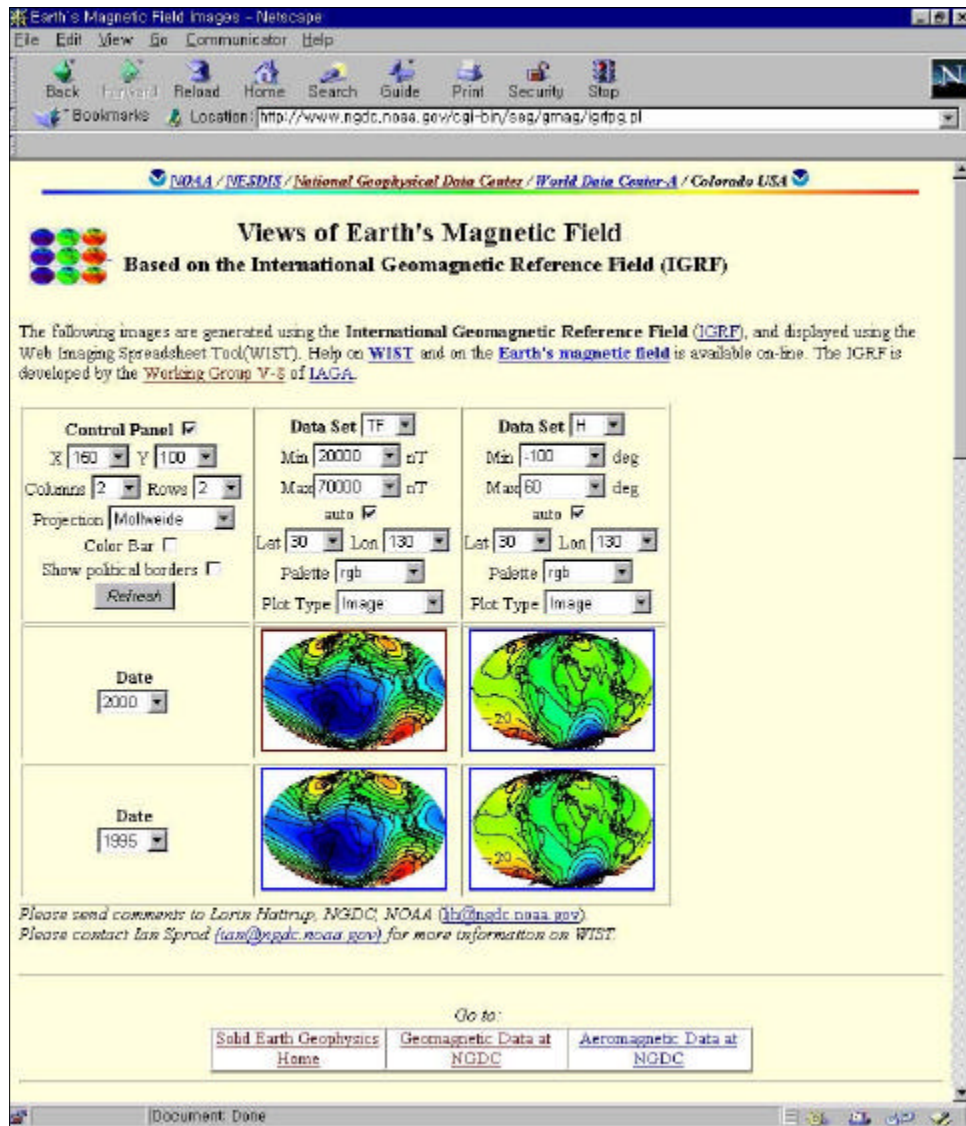


그림 4-16. NGDC에서 제공중인 IGRF의 global map 화면.

제 5 절 요약

이론 및 수치모의실험 뿐만 아니라 관측자료의 비교를 위해서도 실제에 가까운 자기권의 수치모델은 매우 중요하다. 실험적 모델은 관측자료가 많고 제한적 지역의 비교적 정밀한 모델에 사용할 수 있으며 이론적 모델은 자기권의 시간적 변화와 전체적인 공간분포를 조사하는데 더 이용 가치가 높다. 전자의 경우 지구 자기구에 한정되어 있으며 IGRF등이 대표적인 예가 될 수 있고 이론적 모델은 해당되고 영역에 따라 다양한 좌표계가 사용될 수 있다. 후자의 경우 경계조건으로부터 외부자기장을 계산하여 내부자기장과 함께 임의의 물리적 조건에 따른 자기장의 분포를 구할 수 있다. 앞에서 본 것처럼 이론적인 것과 실험적인 것에는 각각 장, 단점이 있다. 따라서 필요에 따라 장점을 고려하여 적합한 모델을 선택해야한다.

자기장에 관한 연구는 지질학 등에 응용 할 수가 있는데 특히 광물자원을 찾는데 이용되고 있다. 여러 가지 용도를 위하여 호주와 미국 등은 IGRF를 바탕으로 자국의 정밀한 자기장 분포를 연구하고 있다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 것이 IGRF모델이며 여러 인터넷 사이트에서 IGRF 모델에 대한 데이터를 사용자의 필요에 맞게 다양하게 제공하고 있으나 부족한 면도 있다. 국내에는 자기구 모델에 관하여 연구하는 기관이나 IGRF를 운영하고 있는 웹도 없었으나 본 연구에서는 국내 최초의 IGRF를 웹에서 운용하였다.

제 5 장 전리층 모델 분석

제 1 절 개요

IRI(International Reference Ionosphere)는 가장 널리 사용되고 있는 전리층의 실험적인 모델이며, PIM(Parameterized Ionosphere Model)은 전리층의 경험적인 모델이다. 본 장에서는 IRI와 PIM이 어떠한 입출력 값과 구성에 대해서 알아보고, 두 모델을 비교할 것이다.

제 2 절 IRI(International Reference Ionosphere)

IRI(International Reference Ionosphere)는 COSPAR(Committee on Space Research) 와 URSI(International Union of Radio Science)의 후원을 받아서 진행된 국제적인 연구과제이다. 이들은 최근 60여년동안 관측 데이터에 기반을 둔 실험적인 전리층 모델을 만들기 위해서 노력해 왔다. 몇몇은 계속적으로 보강되어 발표되고 있다. 주어진 장소, 시간과 데이터에 의해서 IRI는 고도 60km에서 2000km까지의 전자밀도, 전자 온도, 이온 온도, 이온 구성과 전자량을 계산한다. 이것은 자기장이 비교적 활동적이지 못한 경우에 오로라지역을 제외한 전리층의 각 값을 한 달치를 평균 내어서 제공한다. 주요 데이터 소스는 전 세계적으로 분포한 ionosonde과 incoherent scatter radar (Jicamarca, Arecibo, Millstone Hill, Malvern, St. Santin), ISIS, Alouette topside sounder 그리고 몇몇 위성과 로켓의 직접관측 데이터 등이다. 앞으로 이온 drift, 오로라지역과 극지역의 전리층에 대한 설명, 자기 폭풍 효과 등을 포함할 계획이다. 경험적인 모델은 같은 태양 활동 조건하에서 서로 다른 전리층 상태를 관측한 데이터를 평균한 것이므로 세세한 전리층 변화나 특정지역의 변화현상은 무시되어 나타난다. 이로 인해 오로라 극관

(auroral oval), 적도이상변동(equatorial anomaly), 부오로라 공동(subaurora trough)등의 현상을 제대로 나타낼 수 없다. 또한 경험적인 모델에 사용되는 관측 데이터 양이 관측기기의 불규칙한 분포로 인하여 시공간적 제약을 가진다. IRI의 사용언어는 포트란이며, C 코드도 같이 제공되고 있다.

2. IRI95의 구성

IRI95 포트란 버전은 IRIS13.for, IRIF13.for, IRIT13.for, CIRA86.for등 네 개의 포트란 파일과 URSI, CCIR 데이터의 아스키 코드 파일로 구성되어 있다. IRI는 크게 전자밀도 등의 여러 물리량을 구하는 루틴과 총전자함유량(TEC : Total Electron Content)을 구하는 루틴으로 나눌 수 있다. 후자의 경우는 전자의 물리량 중 전자밀도를 바탕으로 구하지만, 두 경우는 다른 파일로 나뉘어져 있다. 각 파일에 대한 설명은 다음 표 5-1과 같다.

표 5-1. IRI95 for FORTRAN의 각 파일의 설명

파일명	설 명
IRIS13.FOR	이 파일 안의 iris13()함수를 main에 포함시켜서 원하는 결과를 출력시킬 수 있다. 여기서 총전자함유량(TEC)을 제외한 전리층의 주요 프로파일-전자밀도, O^+ , H^+ , He^+ , O^{2+} , NO^+ 의 밀도, 전자온도, 이온온도, 중성대기의 온도를 구할 수 있다.
IRIF13.FOR	IRIS13()을 실행시키는 데에 필요한 여러 가지 부함수들이 포함되어 있는 파일이다.
IRIT13.FOR	이 파일은 IRIS13.for에서 구할 수 없는 총전자함유량(TEC : Total Electron Content)을 구하는 루틴이 포함되어 있다.
CIRA86.FOR	IRI에서 이온과 중성대기의 온도를 구할 때는 CIRA86과 MSIS86모델을 사용하는데, 이것이 포함되어 있는 파일이다.

가. IRIS13.FOR

IRIS13() 함수가 들어있는 파일로 총전자함유량(TEC)을 제외한 전리층의 전자와 이온의 밀도, 온도 등을 구하는 루틴이 포함되어 있다. IRIS13() 함수는 주요 출력 값을 구하기 위해서 여러 가지 초기값을 설정한 후에 IRIF13.FOR에 들어있는 부함수들을 호출하여서 각 값들을 계산한다. 이 파일의 주요 입출력 값은 IRI의 전체 총전자함유량(TEC)을 제외한 입출력 값과 동일하다.

(1) IRIS13()의 입력값

IRIS13()의 입력값은 IRI 프로그램의 입력값과 같다. IRI를 실행시키기 위해서 필요한 값들은 다음의 표 5-2와 같다.

표 5-2. IRIS13()의 입력값

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
1	jm	Integer		0, 1	원하는 위치의 좌표계 설정 0 : Geographic Coordinate 1 : Geomagnetic Coordinate
2	alati	Real	°N	-90 ~ 90	원하는 위치의 위도
3	along	Real	°E	0 ~ 360	원하는 위치의 경도
4	iyyyy	Integer	year		원하는 연도 e.g.1998
5	imd	Integer	mmdd	0101~1231	네 자리로 입력을 시키면 월/일로 인식
			-ddd	-0 ~ -365(366)	음수 세 자리로 입력을 시키면 연간일수로 인식

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
6	iut	Integer		0, 1	시간을 설정 0 : Local Time 1 : Universal Time
7	hour	Real	hour	0 ~ 23.9	시간
8	hx	Integer	km	60 ~ 3,000	출력 고도 지정. ivar의 값이 1인 경우는 값을 읽어 들인 후에 무시
9	ivar	Integer		1 ~ 8	변화시키고자 하는 값 지정 1 : 고도 2 : 위도 3 : 경도 4 : 연도 5 : 월 6 : 일 7 : 연간일수 8 : 시간 (UT 또는 LT)
ivar=1인 경우만 해당					
10	vbeg	Real	km	60 ~ 3,000	출력 최저 고도
11	vend	Real	km	60 ~ 3,000	출력 최고 고도
12	vstep	Real	km	60 ~ 3,000	출력 고도 간격
ivar=2인 경우만 해당					
10	vbeg	Real	°N	-90 ~ 90	출력 최저 위도
11	vend	Real	°N	-90 ~ 90	출력 최고 위도
12	vstep	Real	°N	-90 ~ 90	출력 위도 간격
ivar=3인 경우만 해당					
10	vbeg	Real	°E	0 ~ 360	출력 최저 경도
11	vend	Real	°E	0 ~ 360	출력 최고 경도
12	vstep	Real	°E	0 ~ 360	출력 경도 간격

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
ivar=4인 경우만 해당					
10	vbeg	Real	Year		출력 최저 연도
11	vend	Real	Year		출력 최고 연도
12	vstep	Real	Year		출력 연도 간격
ivar=5인 경우만 해당					
10	vbeg	Real	month	1 ~ 12	출력 최저 월
11	vend	Real	month	1 ~ 12	출력 최고 월
12	vstep	Real	month	1 ~ 12	출력 월 간격
ivar=6인 경우만 해당					
10	vbeg	Real	day	1 ~ 30(28,31)	출력 최저 일
11	vend	Real	day	1 ~ 30(28,31)	출력 최고 일
12	vstep	Real	day	1 ~ 30(28,31)	출력 일 간격
ivar=7인 경우만 해당					
10	vbeg	Real	연간 일수	1 ~ 365(366)	출력 최저 일수
11	vend	Real	연간 일수	1 ~ 365(366)	출력 최고 일수
12	vstep	Real	연간 일수	1 ~ 365(366)	출력 간격
ivar=8인 경우만 해당					
10	vbeg	Real	hour	0 ~ 23.9	출력 최저 시간
11	vend	Real	hour	0 ~ 23.9	출력 최고 시간
12	vstep	Real	hour	0 ~ 23.9	출력 시간 간격
13	jf(1)	Integer		0, 1	1 : 전자밀도를 출력함 0 : 출력하지 않음

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
14	jf(2)	Integer		0, 1	1 : 전자, 이온, 중성입자의 온도를 출력함 0 : 출력하지 않음
15	jf(3)	Integer		0, 1	1 : 이온 밀도를 출력함 0 : 출력하지 않음
16	jf(4)	Integer		0, 1	1 : 지구 자기장 값을 table option에서 지정 0 : B0값을 Gulyaeva(1987)모 델에서 취함
17	jf(5)	Integer		0, 1	1 : foF2값을 CCIR86에서 구 함 0 : URSI86으로부터 구함
18	jf(6)	Integer		0, 1	1 : 이온밀도를 표준값으로 지정 0 : Danilov-Yachnikov -Smironova 모델로 지정
19	jf(7)	Integer		0, 1	1 : 전자밀도를 표준값으로 지정 0 : IRI79의 topside로 지정
20	jf(8)	Integer		0, 1	1 : foF2값을 모델에서 계산 0 : 사용자가 foF2/MHz 또 는 NmF2를 입력
21	jf(9)	Integer		0, 1	1 : hmF2값을 모델에서 계산 0 : 사용자가 fmF2/km 또 는 M(3000)F2를 입력

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
22	jf(10)	Integer		0, 1	1 : 전자온도를 표준값으로 지정 0 : 사용자가 Ne(300km), Ne(400km), Ne(600km) 입력. 입력하지 않을 경우 각 값은 -1.
23	jf(11)	Integer		0, 1	1 : 전자밀도를 표준값으로 지정 0 : Lay함수로 지정
24	jf(12)	Integer		6, 12	메시지는 unit 6 또는 12에 쓰여짐
25	jf(13)	Integer		0, 1	1 : foF1값을 모델에서 계산 0 : foF1 또는 NmF1를 사용자가 직접 입력
26	jf(14)	Integer		0, 1	1 : hmF1값을 모델에서 계산 0 : 사용자가 직접 입력
27	jf(15)	Integer		0, 1	1 : foE값을 모델에서 계산 0 : 사용자가 직접 입력
28	jf(16)	Integer		0, 1	1 : hmE값을 모델에서 계산 0 : 사용자가 직접 입력
29	jf(17)	Integer		0, 1	1 : Rz12값을 파일에서 입력 0 : 사용자가 직접 입력

※ 권장사항 : jf(5)를 제외한 jf(1) ~ jf(17)은 1로 지정할 것.

(2) IRIS13()의 기본 출력값

IRI는 다음과 같은 기본 출력값을 갖는다. 이들의 출력 범위는 각 물리량마다 조금씩 다른데, 전자밀도의 경우에는 60km ~ 2,000km, 각종 온도의 경우에는 120km ~ 3,000km, 이온 밀도의 경우는 100km ~ 2,000km까지

계산이 가능하다.

표 5-3 IRIS13()의 기본 출력값

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
1	alati	Real	°N	-90 ~ 90	원하는 위치의 위도
2	along	Real	°E	0~360	원하는 위치의 경도
3	yyyy	Integer	year		원하는 연도 e.g.1998
4	imd	Integer	-ddd	- 0 ~ -365(366)	연간일수로 인식
5	hour	Real	hour	0 ~ 23.9	UT 또는 LT
6	hx	Real			입력값의 ivar, vbeg, vend, vstep에 따라서 변화시킨 값을 출력
7	outf(1,*)	Real	$\#/m^{-3}$		전자밀도
8	outf(2,*)	Real	K		중성대기의 온도
9	outf(3,*)	Real	K		이온 온도
10	outf(4,*)	Real	K		전자 온도
11	outf(5,*)	Real	$\#/m^{-3}$		O ⁺ 이온밀도
12	outf(6,*)	Real	$\#/m^{-3}$		H ⁺ 이온밀도
13	outf(7,*)	Real	$\#/m^{-3}$		He ⁺ 이온밀도
14	outf(8,*)	Real	$\#/m^{-3}$		O2 ⁺ 이온밀도
15	outf(9,*)	Real	$\#/m^{-3}$		NO ⁺ 이온밀도
16	outf(10,*)	Real	%	0 ~ 100	이온밀도를 Danilov - Yachnikov - Smironova 모델로 지정할 경우 Cluster 이온의 %
17	outf(11,*)	Real	%	0 ~ 100	이온밀도를 Danilov - Yachnikov - Smironova 모델로 지정할 경우 N ⁺ 이온의 %

(3) IRIS13()의 부가 출력값

IRI에서 제공하는 기본 출력값 이외의 값으로, 이 중 일부분은 사용자가 입력을 할 때에 조건에 의해서 모델에서 계산되지 않고 직접 입력되기도 한다.

표 5-4. IRIS13()의 부가 출력값

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
1	oarr(1)	Real	m^{-3}		NmF2
2	oarr(2)	Real	km		HmF2
3	oarr(3)	Real	m^{-3}		NmF1
4	oarr(4)	Real	km		HmF1
5	oarr(5)	Real	m^{-3}		NmE
6	oarr(6)	Real	km		HmE
7	oarr(7)	Real	m^{-3}		NmD
8	oarr(8)	Real	km		HmD
9	oarr(9)	Real	km		Hhalf
10	oarr(10)	Real			고도에 따른 지구자기장 B0
11	oarr(11)	Real	m^{-3}		Valley-base
12	oarr(12)	Real	m^{-3}		Valley-top
13	oarr(13)	Real	K		Te-Peak
14	oarr(14)	Real	km		Te-Peak
15	oarr(15)	Real	K		고도 300km에서의 Te-Mod
16	oarr(16)	Real	K		고도 400km에서의 Te-Mod
17	oarr(17)	Real	K		고도 600km에서의 Te-Mod
18	oarr(18)	Real	K		고도 1400km에서의 Te-Mod
19	oarr(19)	Real	K		고도 3000km에서의 Te-Mod
20	oarr(20)	Real	K		고도 120km에서의 Te=Tn=Ti

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
21	oarr(21)	Real	km		고도 430km에서의 Ti-Mod
22	oarr(22)	Real	km		Te와 Ti가 같을 때 X
23	oarr(23)	Real	°		태양 천정각
24	oarr(24)	Real	°		태양 경사각
25	oarr(25)	Real	°		DIP
26	oarr(26)	Real	°N		DIP 위도
27	oarr(27)	Real	°N		보정된 DIP 위도
28	oarr(28)	Real	°		δ
29	oarr(29)	Real	hour		일출시간
30	oarr(30)	Real	hour		일몰시간
31	oarr(31)	Integer		1, 2, 3, 4	계절 1 : 봄 2 : 여름 3 : 가을 4 : 겨울
32	oarr(32)	Integer		1, 2, 3, 4	북반구의 계절 1 : 봄 2 : 여름 3 : 가을 4 : 겨울

(4) 주요 흐름도

IRIS13()을 사용하여 전자밀도 및 각종 물리량을 얻고자 할 경우에는 실행 프로그램에 이 함수를 삽입 시켜야 한다. 이 경우에 여러 입력값을 오류 받아서 IRI13()에 넘겨준 다음, 출력을 시킨다. 다음의 표 5-5는 이 과정

을 나타낸 것이다.

표 5-5. IRIS13()를 주프로그램에 사용할 경우의 주요 흐름도

M A I N	경위도, 날짜, 시간 등을 입력받아서 IRI13()에 넘겨준다		
	IRIS13() TEC 값을 제외한 전리층의 프로파일을 계산함	밀도와 온도 등을 계산하기 위한 초기값을 구함	입력받은 경, 위도를 지자기 경, 위도로 바꾸어줌
			계절, 연중 일수, 태양 경사각을 계산
			F10.7cm값의 평균값과 restricted solar activity를 구함
			정오의 태양의 천정각을 구함
		전자밀도를 구함	E층의 최대밀도를 구함
			CCIR/URSI중 선택받은 것의 데이터를 불러들임
			전리층의 상층부분과 하층 부분의 밀도 파라미터를 구함
			F1층의 파라미터를 구함
			E층의 계곡 부분의 파라미터를 구함
			E층 이하의 파라미터를 구함
			HmF1을 구함
		중성대기의 온도를 구함	CIRA86() : CIRA86/MSIS86을 이용해서 중성대기의 온도를 구함
		전자온도를 구함	TEDE() : CIRA86/MSIS86을 이용해서 전자의 온도를 구함
		이온의 온도를 구함	TN() : CIRA86/MSIS86을 이용해서 이온의 온도를 구함
		이온의 각 밀도를 구함	Thiemann의 함수를 사용해서 O^+ , H^+ , He^+ , O^{2+} , NO^+ 의 %밀도를 구함
	IRIS13()에 의해 계산된 값을 출력한다.		

나. IRI13.FOR

고도 100km부터 원하는 높이까지 IRIS13() 함수에서 구한 전자밀도

프로파일을 적분하여 총전자함유량(TEC : Total Electron Content)값을 구하는 프로그램인 IRT13()함수가 포함되어 있는 파일이다.

(1) 입력값

IRT13()을 실행시키기 위해서는 원하는 위치, 시간, 총전자함유량을 알고싶은 고도 구간만을 알고 있으면 된다. 자세한 사항은 표 5-6에 있다.

(2) 출력값

총전자함유량 이외에 전리층의 아래부분과 윗부분의 전자밀도를 %로 제공한다. 자세한 사항은 표 5-7에 있다.

표 5-6. IRT13()의 입력값

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비 고
1	lati	Real	°N	-90 ~ 90	출력 위도
2	along	Real	°E	0 ~ 360	출력 경도
3	jmag	Integer		0, 1	1 : 지자기 경위도 0 : 지리학적 경위도
4	hour	Real	hour	0 ~ 23.9	지역시간
5	hbeg	Real	km	60 ~ 3000	적분을 시작할 고도
6	hend	Real	km	60 ~ 3000	적분을 마치는 고도

표 5-7. IRIT13()의 출력값

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
1	TEC	Real			단위 면적 당 총전자함유량
2	tecb	Real	%	0 ~ 100	전리층 아래부분의 전자밀도
3	tect	Real	%	0 ~ 100	전리층 윗부분의 전자밀도

표 5-8. IRIT13()을 주프로그램에 사용할 경우의 주요 흐름도

MAIN	경위도, 날짜, 시간 등을 입력받아서 IRIS13()에 넘겨준다.	
	IRIS13()함수를 호출해서 전자밀도를 계산하여 IRIT13()에 넘겨준다.	
	IRIT13() ; 단위면적의 총 전자함유 량을 구한 다.	IRL_TEC() : 실질적인 계산을 하는 부함수 입력값 - 적분을 시작할 고도 - 적분을 끝낼 고도 - 적분 간격 0 : FAST, 1 : STANDARD 2 : SLOW) 출력값 - 단위면적당 총전자함유량 - 전리층 아래부분의 전자밀도 % - 전리층 윗부분의 전자밀도 %
	IRIT13()에서 계산한 값을 출력한다.	

(3) 주요흐름도

표 5-8은 IRIT13()을 주프로그램에 사용할 경우의 주요흐름도를 나타내고 있다. 총전자함유량을 구하기 위해서는 위치, 시간 등을 입력받아서 IRIS13()에 넘겨주어 전자밀도를 계산한 후, 전자밀도 값만을 취해서

IRIT13()에 넘겨서 계산한 뒤 출력을 시키면 된다.

제 3 절 PIM(Parameterized Ionospheric Model)

PIM은 이론적인 전리층 모델로써 고위도, 중위도, 저위도 지역모델을 결합하여 지구 전체의 전리층 상태를 분석할 수 있도록 미 공군의 필립스 연구소에서 개발하였다. 이 프로그램의 언어는 포트란이며, 고도 90km부터 2500km까지 영역의 전자밀도 분포와 이에 따른 전리층 E층과 F2층의 임계 주파수 그리고 총 전자밀도함유량을 수치화 하여 그 결과를 출력할 수 있다.

1. PIM에 사용된 물리적 모델

PIM은 저위도 F 영역 모델(LOWLAT), 중위도 F층 모델(MIDLAT), 저위도와 중위도 E층 모델(ECSD) 그리고 고위도의 E와 F영역 모델(TDIM)로 구성되어있다. 이러한 모든 모델은 지구자기장을 경사진 이중극자(tilted dipole)로 나타내었고 이로부터 얻어진 지구자기좌표계를 사용한다. 또한 위의 4개모델은 모두 MSIS-86 자연대기모델을 사용한다.

(가) 저위도 F층 모델(LOWLAT)

1973년 Anderson가 저위도 F층 모델을 처음 개발하였다. 이것은 자기 플럭스 튜브(magnetic flux tube)에 따라 존재하는 O^+ 에 대하여 확산방정식(diffusion equation)을 푼 것이다. 일반적으로 전체 플럭스튜브는 플럭스 튜브 양끝의 화학적 평형 경계조건(chemical equilibrium boundary condition)을 계산하여 얻는다. 하지만 여기에는 열 전달(heat transfer)을 고려하지 않았으므로 이온과 전자 온도 모델을 사용해야한다. 또한 Hedin이 개발한 수평 풍모델(HWM:Horizontal Wind Model)은 열권에서의 바람을 기술하는데 사용되었다. 자기위도 $\pm 15 \sim 20^\circ$ 의 양쪽에 이온들이 집중되어 분포하는 $E \times B$ 편이($E \times B$ drift) 적도 이상변동을 기술하기 위하여 Atmospheric Explorer-E(AE-E)위성이 관측한 데이터를 사용하는 경험 모델로부터 수직

편이(vertical drift)를 계산하였다.

(나) 중위도 F층 모델(MIDLAT)

중위도 F층 모델은 저위도 F층 모델과 같지만 다이나모 전기장(dynamo electric field)부분은 포함되어있지 않다.

(다) 중, 저위도 E층 모델(ECSD)

중, 저위도 E층 모델은 CSD 근사(Continuous Slowing Down apporximation) 기법을 이용하여 계산된 광전자(photoelectron)의 운동을 포함한다. 이온화의 집중정도는 국부적으로 화학적 평형상태임을 가정하고 계산한다.

(라) 고위도 모델(TDIM)

이 모델은 오로라 입자에 의한 이온화를 포함하며, 이온 생성률은 B3C 전자 전달 코드를 이용하여 계산된 것을 사용한다.

2. PIM의 입출력값

(가) 입력값

PIM은 총 35개의 입력값을 사용하는데 각 입력값의 종류와 특성 그리고 범위는 아래와 같다.

표 5-9. PIM의 입력값

번호	변수이름	데이터 형식	단위	유효범위	비 고
1	YEAR	Integer	Years	1800 ~ 2100	연도
2	DOY	Integer	Days	1 ~ 365(366)	연간 일수. 최대값은 YEAR 에 의하여 결정됨. 윤년의 경우는 366이며 평년의 경우 는 365임.
3	UT	Integer	hhmm	0000 ~ 2359	국제 표준시
4	OUTTYPE	Integer	n/a	0, 1, 2	PIM의 출력형식을 지정함. 0 : 전리층 E와 F2의 임계주파수와 높이, TEC 값 1 : EDP 2 : EDP, 전리층 E와 F2의 임계주파수와 높이, TEC 값

5	GRIDTYPE	Interger	n/a	0, 1, 2	출력시 좌표계 0 : 직각 위도/경도 좌표계 (NLAT, SLAT, DLAT, NLON, SLON, DLON 참조) 1 : 위도/경도 페어(NPR, LATPR, LONPR 참조) 2 : 지상 관측자에 의한 방 위각과 고도각(OBSLAT, OBSLON, NAZ, SAZ, DAZ, NEL, SEL, DEL 참조)
6	OUTFILE	Character *32	n/a	유효한 파일명	출력파일 이름
7	IMFBY	Character *1	n/a	+, -	IMF By 방향
8	IMFBY	Character *1	n/a	+, 0, -	IMF Bz 방향 PIM에서 사용되는 Kp값에 영향을 미침.
9	SSNTREAT	Interger	n/a	0, 1, 2	F10.7과 SSN을 어떻게 사용 할 것인가를 결정. 0 : F10.7과 SSN이 독립적 으로 사용됨. 1 : F10.7에서 SSN을 계산 하여 적용. 2 : SSN에서 F10.7을 계산 하여 적용. F10P7과 SSN 참조
10	F10P7	Real	$10^{22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$	0. - 300.	10.7cm(2800MHz)의 태양전 파플럭스 SSNTREAT가 2이면 이 값 을 읽은 후 무시되며 F10.7 은 SSN에서 계산되어 적용. 전리층이 평균변화값에 더 관련이 있으므로 F10.7의 일 일값보다는 27일 평균값을 적용할 것을 권함.

11	SSN	Real	n/a	0. - 300.	태양흑점수. SSNTREAT가 1이면 이 값을 읽은 후 무시되며 SSN은 F10.7에서 계산되어 적용. 전리층이 평균변화값에 더 관련이 있으므로 SSN의 일일값보다는 27일 평균값을 적용할 것을 권함.
12	KP	Real	n/a	0. - 9.	Kp 지자기 활동지수. IMFBZ가 0 또는 +이면 KP 값을 읽은 후 무시되고 1이면 PIM에 사용됨.
13	FOF2NORM	Integer	n/a	0 또는 1	foF2 nomarlization 방법결정 0 : foF2를 URSI-88계수로 normalization함. 1 : foF2를 URSI-88계수로 normalization하지 않음. 1을 사용할 것을 권고함
14	FOENORM	Integer	n/a	0 또는 1	foE nomarlization 방법결정 0 : foE를 CCIR foE 모델로 normalization함. 1 : foE를 CCIR foE 모델로 normalization하지 않음. 1을 사용할 것을 권고함
15	LLFSECT	Integer	n/a	0, 1, 2, 3, 4	LLF parameterized model에서 사용하는 경도 영역을 지정함 0 : 모든 4가지 영역을 사용함 1 : 브라질경도영역의 모델 사용 2 : 인도경도영역의 모델 사용 3 : 태평양경도영역의 모델 사용 4 : 미국경도지역의 모델 사용 PIM을 국부적으로 이용할 때 영역에 맞는 하나의 LLFSECT를 선택하여 사용함.

16	CRDTYPE	Character *1	n/a	G 또는 M	출력하고자하는 좌표계 형식 G : Geographic Coord. M : Corrected Geomagnetic Coord. SLAT, SLON, LATPR, OBSLON, SAZ참조
17	NLAT	Integer	n/a	≥ 1	직각 위도/경도 출력 눈금에 서 위도 갯수 GRIDTYPE이 0이 아니면 NLAT가 읽혀진 뒤 적용되 며 그 후는 무시됨
18	SLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	직각 위도/경도 출력 눈금에 서 시작 위도점. 이것의 좌표 계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨. GRIDTYPE이 0이 아니면 SLAT은 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
19	DLAT	Real	°N	-180. ~ 180:≠0.	직각 위도/경도 출력 눈금에 서 위도 증가값. GRIDTYPE이 0이 아니면 DLAT가 읽혀진 뒤 적용되 며 그 후는 무시됨
20	NLON	Integer	n/a	1 ~ 3601	직각 위도/경도 출력 눈금에 서 경도 갯수 GRIDTYPE이 0이 아니면 NLON이 읽혀진 뒤 적용되 며 그 후는 무시됨
21	SLON	Real	°E	-360. ~ 360	직각 위도/경도 출력 눈금에 서 시작 경도점. 이것의 좌표 계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨. GRIDTYPE이 0이 아니면 SLON이 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
22	DLON	Real	°E	-360. ~ 360:≠0	직각 위도/경도 출력 눈금에 서 경도 증가값. GRIDTYPE이 0이 아니면 DLON이 읽혀진 뒤 적용되 며 그 후는 무시됨

23	NPR	Integer	n/a	1 ~ 1,000	위도/경도 페어 출력 눈금에서 위도/경도 페어 갯수 GRIDTYPE이 1이 아니면 NPR이 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
24	LATPRi	Real	°N	-90. ~ 90.	위도/경도 페어 출력 눈금에서 i번째 위도/경도 페어에서 위도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨. GRIDTYPE이 1이 아니면 LATPRi가 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
	LONPRi	Real	°E	-360. ~ 360.	위도/경도 페어 출력 눈금에서 i번째 위도/경도 페어에서 경도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨. GRIDTYPE이 1이 아니면 LONPRi가 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
25	OBSLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	방위/고도 출력 눈금에서 지상관측자의 위도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨. GRIDTYPE이 2가 아니면 OBSLAT가 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
26	OBSLON	Real	°E	-360. ~ 360.	방위/고도 출력 눈금에서 지상관측자의 경도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨. GRIDTYPE이 2가 아니면 OBSLON이 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨

27	NAZ	Integer	n/a	1 ~ 3601	방위각/고도각 출력 눈금에서 방위각 갯수 GRIDTYPE이 2가 아니면 NAZ가 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
28	SAZ	Real	°	-360. ~ 360.	방위각/고도각 출력 눈금에서 시작 방위각 GRIDTYPE이 2가 아니면 SAZ가 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
29	DAZ	Real	°	-360. ~ 360.:≠0.	방위각/고도각 출력 눈금에서 방위각 증가량 GRIDTYPE이 2가 아니면 DAZ가 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
30	NEL	Integer	n/a	≥1	방위각/고도각 출력 눈금에서 고도각 갯수 GRIDTYPE이 2가 아니면 NEL이 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
31	SEL	Real	°	0. ~ 90.	방위각/고도각 출력 눈금에서 시작 고도각 GRIDTYPE이 2가 아니면 SEL이 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
32	DEL	Real	°	-90. ~ 90. :≠0	방위각/고도각 출력 눈금에서 고도각 증가량 GRIDTYPE이 2가 아니면 DEL이 읽혀진 뒤 적용되며 그 후는 무시됨
33	NLAT	Integer	n/a	1 ~ 100	출력 고도 눈금의 고도 갯수
34	ALTi	Real	km	90. ~ 25000.	출력 고도 눈금의 I번째 고도
35	PLASPH	Character*1	n/a	Y 또는 N	Plasmaphere까지 포함해서 PIM을 사용할것인가를 결정

(나) 출력값

PIM은 서로다른 조건에 따라서 여러 가지 출력값을 가진다. 각 조건에 따른 출력값의 종류와 이에 대한 설명은 다음과 같다.

표 5-10. PIM의 출력값

번호	변수이름	데이터 형식	단위	유효범위	비 고
1	HEADER1	Character	n/a	n/a	안내문
2	HEADER2	Character	n/a	n/a	안내문
3	YEAR	Integer	연	1800 ~ 2100	연도
	DAY	Integer	일	1 ~ 365(366)	일
	UT	Real	초	0. ~ 86399.999	국제표준시
	F10P7	Real	$10^{22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$	0. ~ 300.	10.7cm(2800MHz)의 태양 전파플럭스
	KP	Real	n/a	0. ~ 9.	지자기계수 Kp
	SSN	Real	n/a	0. ~ 300.	태양흑점수
4	BLANK1	Character	n/a	n/a	공백
5	BLANK2	Character	n/a	n/a	공백
6	CRDTYPE + GRIDTYPE *10 + PLASPH *100	Integer	n/a	0, 1, 10, 11, 20, 21, 100, 101, 110, 111, 120, 121	CRDTYPE은 출력하는 좌표계 시스템을 나타냄. 0 : geographic 1 : corrected geographic GRIDTYPE은 출력눈금의 형태를 결정함. 0 : 직각 위도/경도 눈금 1 : 위도/경도 쌍 눈금 2 : 지상관측자에 의한 방 위각/고도각 PLASPH는 plasmasphere 모델의 사용여부 표시 0 : 사용안함 1 : Gallagher plasmasphere 모델 사용

7	HEADER3	Character	n/a	n/a	안내문
8	HEADER4	Character	n/a	n/a	안내문
GRIDTYPE=0인 경우에만 해당					
9	SLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	직각 위도/경도 출력 눈금에서 시작 위도점. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	SLON	Real	°E	-360. ~ 360	직각 위도/경도 출력 눈금에서 시작 경도점. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	ELAT	Real	°N	-90. ~ 90.	직각 위도/경도 출력 눈금에서 끝 위도점. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	ELON	Real	°E	-360. ~ 360	직각 위도/경도 출력 눈금에서 끝 경도점. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	NLAT	Integer	n/a	≥1	직각 위도/경도 출력 눈금에서 위도 갯수
	NLON	Integer	n/a	1 ~ 3601	직각 위도/경도 출력 눈금에서 경도 갯수
	DLAT	Real	°N	-180. ~ 180:≠0.	직각 위도/경도 출력 눈금에서 위도 증가값.
	DLON	Real	°E	-360. ~ 360:≠0	직각 위도/경도 출력 눈금에서 경도 증가값.
GRIDTYPE=1인 경우에만 해당					
9	LATPR _i	Real	°N	-90. ~ 90.	위도/경도 페어 출력 눈금에서 첫번째 위도/경도 페어에서 위도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	LATPR _{NPR}	Real	°N	-90. ~ 90.	위도/경도 페어 출력 눈금에서 마지막 위도/경도 페어에서 위도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.

	LONPR _i	Real	°E	-360. ~ 360.	위도/경도 페어 출력 눈금에서 첫번째 위도/경도 페어에서 경도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	LONPR _{NPR}	Real	°E	-360. ~ 360.	위도/경도 페어 출력 눈금에서 마지막 위도/경도 페어에서 경도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	NPR	Integer	n/a	1 ~ 1000	위도/경도 페어 출력 눈금에서 위도/경도 페어 갯수
	0	Integer	n/a	0	A dummy placeholder
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
GRIDTYPE=2인 경우에만 해당					
9	SAZ	Real	°	-360. ~ 360.	방위각/고도각 출력 눈금에서 시작 방위각
	EAZ	Real	°	-360. ~ 360.	방위각/고도각 출력 눈금에서 끝 방위각
	SEL	Real	°	0. ~ 90.	방위각/고도각 출력 눈금에서 시작 고도각
	EEL	Real	°	0. ~ 90.	방위각/고도각 출력 눈금에서 끝 고도각
	NAZ	Integer	n/a	1 ~ 3601	방위각/고도각 출력 눈금에서 방위각 갯수
	NEL	Integer	n/a	≥1	방위각/고도각 출력 눈금에서 고도각 갯수
	DAZ	Real	°	-360. ~ 360.:≠0.	방위각/고도각 출력 눈금에서 방위각 증가량
	DEL	Real	°	-90. ~ 90.:≠0	방위각/고도각 출력 눈금에서 고도각 증가량
10	OUTTYPE	Integer	n/a	0, 1, 2	PIM의 출력형식을 지정함. 0 : 전리층 E와 F2의 임계주파수와 높이, TEC 값 1 : EDP 2 : EDP, 전리층 E와 F2의 임계주파수와 높이, TEC 값

OUTTYPE=0인 경우에만 해당					
11	BLANK3	Character	n/a	n/a	빈칸
GRIDTYPE=0과 GRIDTYPE=1인 경우에만 해당					
12	GLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	출력눈금점의 지리학적 위도
	GLON	Real	°E	-360. ~ 360.	출력눈금점의 지리학적 경도
	MLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	출력눈금점의 보정된 지자기 위도
	MLON	Real	°E	-360. ~ 360.	출력눈금점의 보정된 지자기 경도
	MLT	Real	시간	0. ~ 23.999	출력눈금점의 보정된 지자기 지역시
13	HEADER5	Character	n/a	n/a	레코드 14을 위한 column label
14	FOF2	Real	MHz	≥0.	출력눈금에 대한 전리층 F2영역의 임계주파수
	HMF2	Real	km	≥0.	출력눈금에 대한 전리층 F2영역의 최대높이
	FOF1	Real	MHz	0.	출력눈금에 대한 전리층 F1영역의 임계주파수. 이값은 언제나 0인데 그 이유는 PIM이 아직 계산 을 하지 못하기 때문임.
	HMF1	Real	km	0.	출력눈금에 대한 전리층 F1영역의 최대높이. 이값은 언제나 0인데 그 이유는 PIM이 아직 계산 을 하지 못하기 때문임.
	FOE	Real	MHz	≥0.	출력눈금에 대한 전리층 E영역의 임계주파수
	HME	Real	km	≥0.	출력눈금에 대한 전리층 E영역의 최대높이
	VERTEC	Real	TECU	≥0.	출력눈금에 대한 고도 90 부터 25,000km까지의 수 직 TEC

GRIDTYPE=2인 경우에만 해당					
12	AZ	Real	°	-360. ~ 360	출력 눈금점의 방위각. 북쪽 시작점은 CRDTYPE 값에 의한 좌표계 시스템에 의하여 결정됨.
	EL	Real	°	0. ~ 90.	출력 눈금점의 고도각
	OBSLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	지상관측자의 위도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	OBSLON	Real	°N	-360. ~ 360	지상관측자의 경도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
13	HEADER6	Character	n/a	n/a	레코드 14을 위한 column label
14	FPMAX	Real	MHz	≥0.	slant EDP가 최대일때의 플라즈마 주파수
	HMAX	Real	km	≥0.	slant EDP가 최대 고도
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	SLANTTEC	Real	TECU	≥0.	출력 눈금 점에서 출력 고도 눈금에 의해 정의된 고도 범위에서의 Slant TEC
각 출력 눈금 지점에서 레코드 11-14 반복					
OUTTYPE=1인 경우에만 해당					
11	LABEL1	Character	n/a	고도 지점 갯수	요소 NALT의 표식
	NALT	Integer	n/a	1 ~ 100	출력 고도 눈금의 고도 갯수
12	HEADER7	Character	n/a	n/a	레코드 14를 위한 헤더
13	ALT <i>i</i>	Real	km	90. ~ 25000.	출력 고도 눈금의 <i>i</i> 번째 고도 (NALT만큼 반복)

14	BLANK4	Character	n/a	n/a	빈칸
GRIDTYPE=0과 GRIDTYPE=1인 경우에만 해당					
15	GLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	출력 눈금점에서의 지질학적 위도
	GLON	Real	°E	-360. ~ 360	출력 눈금점에서의 지질학적 경도
	MLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	출력 눈금점에서의 보정된 지자기 위도
	MLON	Real	°E	-360. ~ 360	출력 눈금점에서의 보정된 지자기 경도
	MLT	Real	시간	0. ~ 23.999	출력 눈금점에서의 보정된 지자기 지역시
GRIDTYPE=2인 경우에만 해당					
15	AZ	Real	°	-360. ~ 360.	출력 눈금점의 방위각. 북쪽 시작점 (AZ = 0°)은 CRDTYPE 값에 의한 좌표계 시스템에 의하여 결정됨.
	EL	Real	°	0. ~ 90.	출력 눈금점의 고도각
	OBSLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	지상관측자의 위도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	OBSLON	Real	°E	-360. ~ 360	지상관측자의 경도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE에서 정의됨.
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
16	HEADER8	Character	n/a	n/a	레코드 17를 위한 header
17	EDENi	Real	cm ⁻³	≥0.	출력고도 눈금 i번째 고도에서의 전자밀도 (NALT만큼 반복)

각 출력눈금 지점에서 레코드 14-17 반복					
OUTTYPE=2인 경우에만 해당					
11	LABEL2	Character	n/a	고도 지점 갯수	요소 NALT의 포식
	NALT	Integer	n/a	1 ~ 100	출력고도눈금의 고도 갯수
12	HEADER9	Character	n/a	n/a	레코드 13를 위한 헤더
13	ALT <i>i</i>	Real	km	90. ~ 25000.	출력고도눈금의 <i>i</i> 번째 고도 (NALT만큼 반복)
14	BLANK4	Character	n/a	n/a	빈칸
GRIDTYPE=0과 GRIDTYPE=1인 경우에만 해당					
15	GLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	출력 눈금점에서의 지질학적 위도
	GLON	Real	°E	-360. ~ 360	출력 눈금점에서의 지질학적 경도
	MLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	출력 눈금점에서의 보정된 지자기 위도
	MLON	Real	°E	-360. ~ 360	출력 눈금점에서의 보정된 지자기 경도
	MLT	Real	시간	0. ~ 23.999	출력 눈금점에서의 보정된 지자기 지역시
GRIDTYPE=2인 경우에만 해당					
15	AZ	Real	°	-360. ~ 360.	출력 눈금점의 방위각. 북쪽 시 작 점 (A Z = 0 °) 은 CRDTYPE 값에 의한 좌표계 시스템에 의하여 결정됨.
	EL	Real	°	0. ~ 90.	출력 눈금 점의 고도각
	OBSLAT	Real	°N	-90. ~ 90.	지상관측자의 위도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE 에서 정의됨.
	OBSLON	Real	°E	-360. ~ 360	지상관측자의 경도. 이것의 좌표계 시스템은 CRDTYPE 에서 정의됨.
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder

16	HEADER10	Character	n/a	n/a	레코드 17를 위한 header
17	EDENi	Real	cm^{-3}	$\geq 0.$	출력고도 눈금 i번째 고도에 서의 전자밀도 (NALT만큼 반복)
18	HEADER11	Character	n/a	n/a	레코드 19를 위한 header
GRIDTYPE=0과 GRIDTYPE=1인 경우에만 해당					
19	FOF2	Real	MHz	$\geq 0.$	출력눈금에 대한 전리층 F2 영역의 임계주파수
	HMF2	Real	km	$\geq 0.$	출력눈금에 대한 전리층 F2 영역의 최대높이
	FOF1	Real	MHz	0.	출력눈금에 대한 전리층 F1 영역의 임계주파수. 이 값은 언제나 0인데 그 이유는 PIM이 아직 계산을 하지 못하기 때문임.
	HMF1	Real	km	0.	출력눈금에 대한 전리층 F1 영역의 최대높이. 이 값은 언제나 0인데 그 이유는 PIM이 아직 계산을 하지 못하기 때문임.
	FOE	Real	MHz	$\geq 0.$	출력눈금에 대한 전리층 E 영역의 임계주파수
	HME	Real	km	$\geq 0.$	출력눈금에 대한 전리층 E 영역의 최대높이
	VERTEC	Real	TECU	$\geq 0.$	출력눈금에 대한 고도 90부 터 25000km까지의 수직 TEC
GRIDTYPE=2인 경우에만 해당					
19	FPMAX	Real	MHz	$\geq 0.$	slant EDP가 최대일때의 플 라즈마 주파수
	HMAX	Real	km	$\geq 0.$	slant EDP가 최대일때의 고 도
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	FPMAX	Real	MHz	$\geq 0.$	slant EDP가 최대일때의 플 라즈마 주파수

	HMAX	Real	km	$\geq 0.$	slant EDP가 최대일때의 고도
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	0.	Real	n/a	0.	A dummy placeholder
	SLANTTEC	Real	TECU	$\geq 0.$	출력눈금 점에서 출력고도 눈금에 의해 정의된 고도범 위에서의 Slant TEC
각 출력눈금 지점에서 레코드 11-14 반복					

3. PIM의 구성

PIM은 K_p , F10.7, 경위도 등의 데이터베이스로부터 전자밀도를 구하기 위해서 만들어 졌으며 다음과 같은 순서로 값을 얻을 수 있다.

- 사용자가 원하는 지리학적인 파라미터와 시간을 입력받는다.
- 모델을 호출한다.
- 모델로부터 전자밀도 프로파일을 얻어서 출력시킨다.

또한 PIM은 실행시키기 위해서는 총 35개의 입력값(표 5-9)이 필요하고 이 조건에 따라서 다른 출력값(표 5-10)을 갖는다. 이것은 22개의 포트란 파일과 17개의 inc파일, 그리고 CCIR, URSI의 데이터로 이루어져 있으며, 그 중 주 실행함수를 담은 파일이 PIM.FOR이다. 이것을 실행시켰을때의 주요 흐름도가 표 5-11에 나타나있다. 이 파일은 GETDAT(), READ_DBASE(), OUTPUT()등의 세 부함수를 사용하고 있으며 각각 GETDAT.FOR, READ_DBA.FOR, OUTPUT.FOR에 포함되어 있다. 이들의 설명은 다음의 표 5-12과 같다.

표 5-11. PIM을 실행시켰을 때의 주요 흐름도

PIM	날짜, 시간, 경위도, Kp지수 등의 초기값을 GETDAT()에 넘김		
	GETDAT() ; 데이터를 얻기위한 초기값을 생성시킴	GETDATE()	날짜, 시간, 출력 형식, 출력 간격 형식, 출력파일의 이름등을 PIM의 입력값으로부터 얻는다.
		SGI()	입력값으로부터 foF2와 foE, 태양 파라미터와 지구 파라미터 등을 구한다.
		SET_UP()	각 부분을 계산에 용이하게 초기화시킨다.
	READ_DBASE() 알맞은 USU데이터 베이스를 읽음	READ_E	E층의 데이터를 읽음
		RDLOW	F층의 하층 데이터를 읽임
		READUSU	USU 데이터를 읽임
		READMID	중위도의 이온 종류와 형태를 결정.
		READAWS	파일에서 URSI계수를 읽어 들임
	OUTPUT() ; 최종 데이터를 계산하고 출력	GRID_OUTPUT	출력 간격의 형식에 따라서 하나를 선택하여 계산값을 출력
		PRS_OUTPUT	
		AZEL_OUTPUT	

표 5-12. PIM의 주요 파일 설명

파일명	설 명
PIM.FOR	여러 함수를 호출하여서 데이터를 계산하는 주프로그램이다.
GETDAT.FOR	Kp 지수, F10.7, 경위도 등을 입력받아서 원하는 데이터를 얻기위한 초기값을 만드는 루틴이 포함되어 있는 파일이다.
READ_DBA.FOR	알맞은 USU데이터 베이스를 읽어 들인다.
OUTPUT.FOR	앞의 두 파일에서 받은 값들로 최종 데이터를 계산하고 출력하는 루틴이 포함되어 있는 파일이다.

가. GETDAT() 의 구성

이 함수는 주어진 파라미터를 가지고 최종 전자밀도를 구하는데 필요한 초기값을 만드는 역할을 한다. 먼저 1) 년, 일, 국제표준시를 입력받은 후 2) 입력데이터의 경로를 지정하여 읽고, 3) 실시간 데이터를 받아들이고 후 4) 출력데이터 파일을 연다. 이 함수를 실행함으로써 생성된 파일에 출력된 값은 다음의 표 5-13과 같고, 이를 위해서 원하는 날짜, 시간, 등의 파라미터 이외에 출력할 파일의 이름을 입력값으로 주어야 한다. 또한 이 함수에서 사용한 부함수의 설명이 다음의 표 5-14이다.

표 5-13. GETDAT()를 실행시킨 결과로 생성된 파일에 저장될 출력값

변수이름	설 명
GRDTYP	다음 값에 따라서 출력 간격의 형식이 결정 [0] 직각 위도/경도 눈금 [1] 위도/경도 쌍 눈금 [2] 지상관측자에 의한 방위각/고도각
IDOY	년중 일수
OUTTYP	다음 값에 따라서 출력형식이 결정된다. [0] 임계주파수와 높이, 수직 총전자함유량(TEC) [1] 수직 전자밀도 프로파일 [2] 수직 전자밀도 프로파일과 임계주파수, 높이, 수직 총 전자함유량 [3] 출력값 없음
IYEAR	연도
OUTFILE	최종 출력값을 기록할 파일의 이름
UT	국제표준시

나. READ_DBASES()의 구성

이 함수는 알맞은 USU 데이터베이스를 읽어들이는 기능을 한다. 이를 위해서 다음의 표 5-15와 같은 입력값을 가지며, 출력값은 없다. 또한 이 함수는 표 5-16에서 설명하는 부함수를 사용하고 있다.

표 5-14. GETDAT()에서 사용한 부함수

함수명	설 명
GETDATE	날짜, 시간, 출력 형식, 출력 간격 형식, 출력파일의 이름등을 PIM의 입력값으로부터 얻는다.
SGI	PIM의 입력값으로부터 foF2와 foE 표준화 시킨 값, 태양 파라미터와 지구의 파라미터 등을 구한다.
SET_UP	실제 계산을 위하여 위도/경도를 지자기위도로 고치는 등 각 부분을 계산에 용이하게 초기화시킨다.

표 5-15. READ_DBASES()의 입력값

변수이름	설 명
IDOY	년중 일수
AWSPATH	URSI 계수의 경로를 지정
LMEPATH	E층의 중층과 하층의 데이터베이스의 경로 지정
LOWPATH	F층의 하층 데이터베이스의 경로 지정
MIDPATH	F층의 중층 데이터베이스의 경로 지정
MONTH	달(月)중 일수
USUPATH	USU 데이터베이스가 있는 경로지정
UT	국제 표준시

다. OUTPUT()의 구성

이 함수는 출력 간격 형식에 따라서 각 부함수를 호출해서 최종 결과를 계산하고 출력한다. 입력값은 표 5-17과 같고, 사용한 부함수는 표 5-18과 같다.

표 5-16. READ_DBASES()에서 사용한 부함수

함수명	설 명
READ_E	E층의 중층과 하층 데이터를 읽음
RDLOW	F층의 하층 데이터베이스로부터 값을 읽어들임
READUSU	USU데이터를 읽어들임
READMID	주어진 입력값으로부터 중위도의 이온 종류와 형태를 결정함.
READAWS	파일에서 URSI계수를 읽어들임

표 5-17. OUTPUT()의 입력값

변수	설 명
DAY	년중 일수
GRIDTYP	다음 값에 따라서 출력 간격의 형식이 결정 [0] 직각 위도/경도 눈금 [1] 위도/경도 쌍 눈금 [2] 지상관측자에 의한 방위각/고도각
LUCI	가장 먼저 계산된 파일의 논리 입출력 번호
LUTEXT	출력 파일의 논리 입출력 번호
MLAT	보정된 지자기위도
MLT	보정된 지자기 지역 시간
OUTFILE	출력 간격 파일의 이름
UT	국제 표준시
YEAR	년도
OUTTYP	다음 값에 따라서 출력형식이 결정된다. [0] 임계주파수와 높이, 수직 총전자함유량(TEC) [1] 수직 전자밀도 프로파일 [2] 수직 전자밀도 프로파일과 임계주파수, 높이, 수직 총전자함유량 [3] 출력값 없음

표 5-18. OUTPUT()에 사용되는 부함수

함수명	설 명	비 고
GRID_OUTPUT	고위도 지방 전리층의 전자밀도 계산	출력 간격의 형식이 직각 위도/경도 눈금인 경우
PRS_OUTPUT	위도/경도 쌍 눈금의 출력값을 계산	출력 간격의 형식이 위도/경도 쌍 눈금인 경우
AZEL_OUTPUT	고위도 지방 전리층의 전자밀도 계산	출력 간격의 형식이 지상관측자에 의한 방위각/고도각인 경우

제 4 절 IRI 95와 PIM의 결과 비교

IRI 95와 PIM은 각각 경험적인 모델과 이론적인 모델로 실제 같은 시간, 장소의 전자밀도 프로파일을 그리면 많은 차이점을 보인다. 본 절에서는 1998년 임의의 날짜의 전자밀도 프로파일을 두 모델 각각 구한 후 비교할 것이다.

(가) 1998년 계절별 전리층 전자밀도 : IRI

다음 그림 6.1 은 1998년 1월 1일, 5월 1일, 8월 1일, 10월 1일 오전 11시(UT02:00)와 오후 11시(UT14:00) 경희대학교(37.14 °N, 127.04 °E)에서의 IRI의 계산에 의한 전리층의 전자밀도 프로파일이다. 겨울인 1월과 비교적 기후인 8월, 10월의 그림에서는 낮과 밤의 차이를 뚜렷하게 볼 수 있다. 하지만, 여름인 8월의 경우에는 NmF2의 값이 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 또 밤(UT14:00)의 경우에는 F1층이 나타나지 않지만, 낮(UT02:00)의 경우에는 D층과 F1층, F2층을 구별할 수 있다.

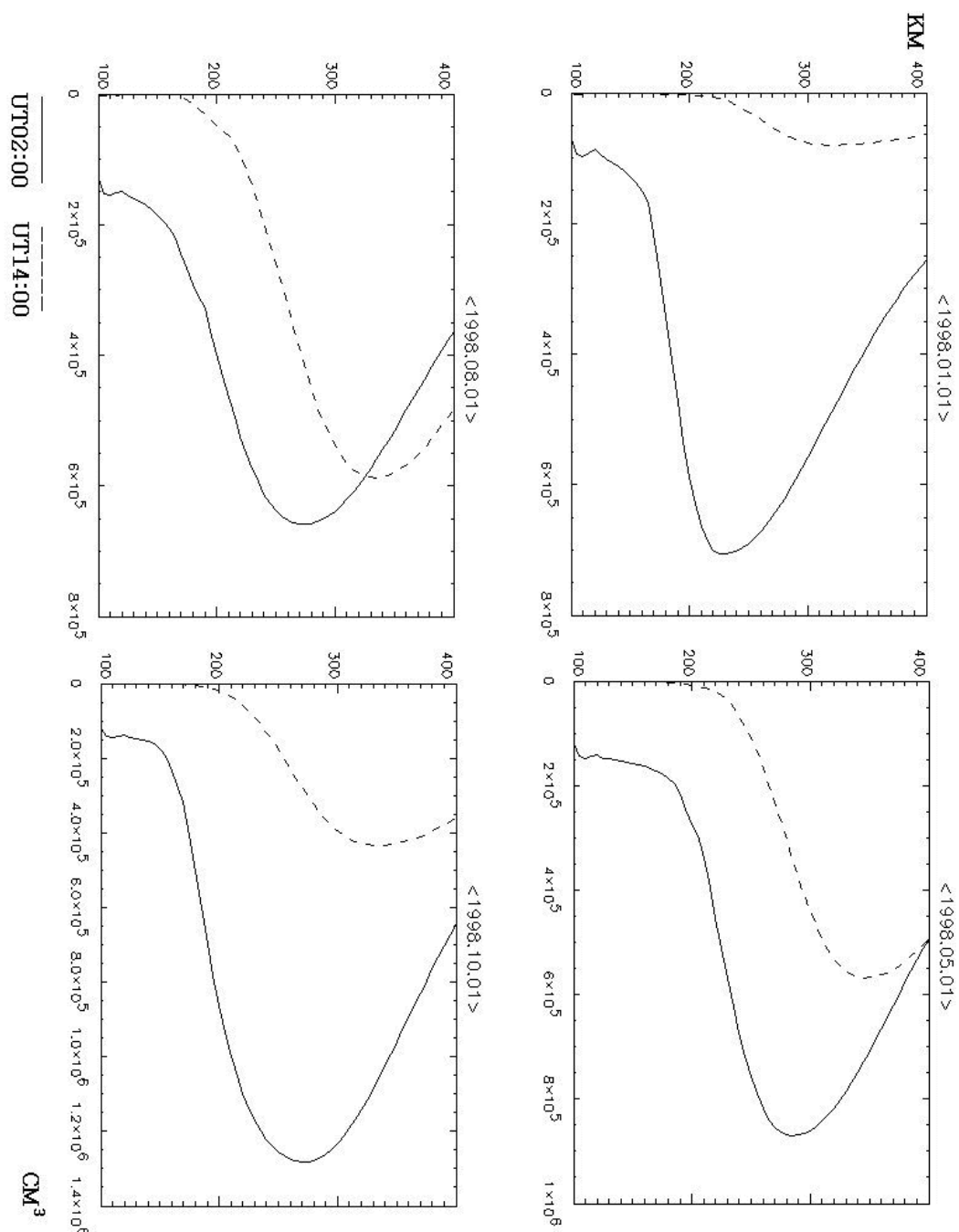


그림 5-1. 경희대학교(37.14 °N, 127.04 °E)에서의 IRI의 계산에 의한 전리층의 전자밀도 프로파일. 좌측 상단으로부터 1998년 1월 1일, 5월 1일, 8월 1일, 10월 1일. 실선은 오전 11시(UT02:00)의 그림이고, 점선은 오후 11시(UT14:00)의 그림이다.

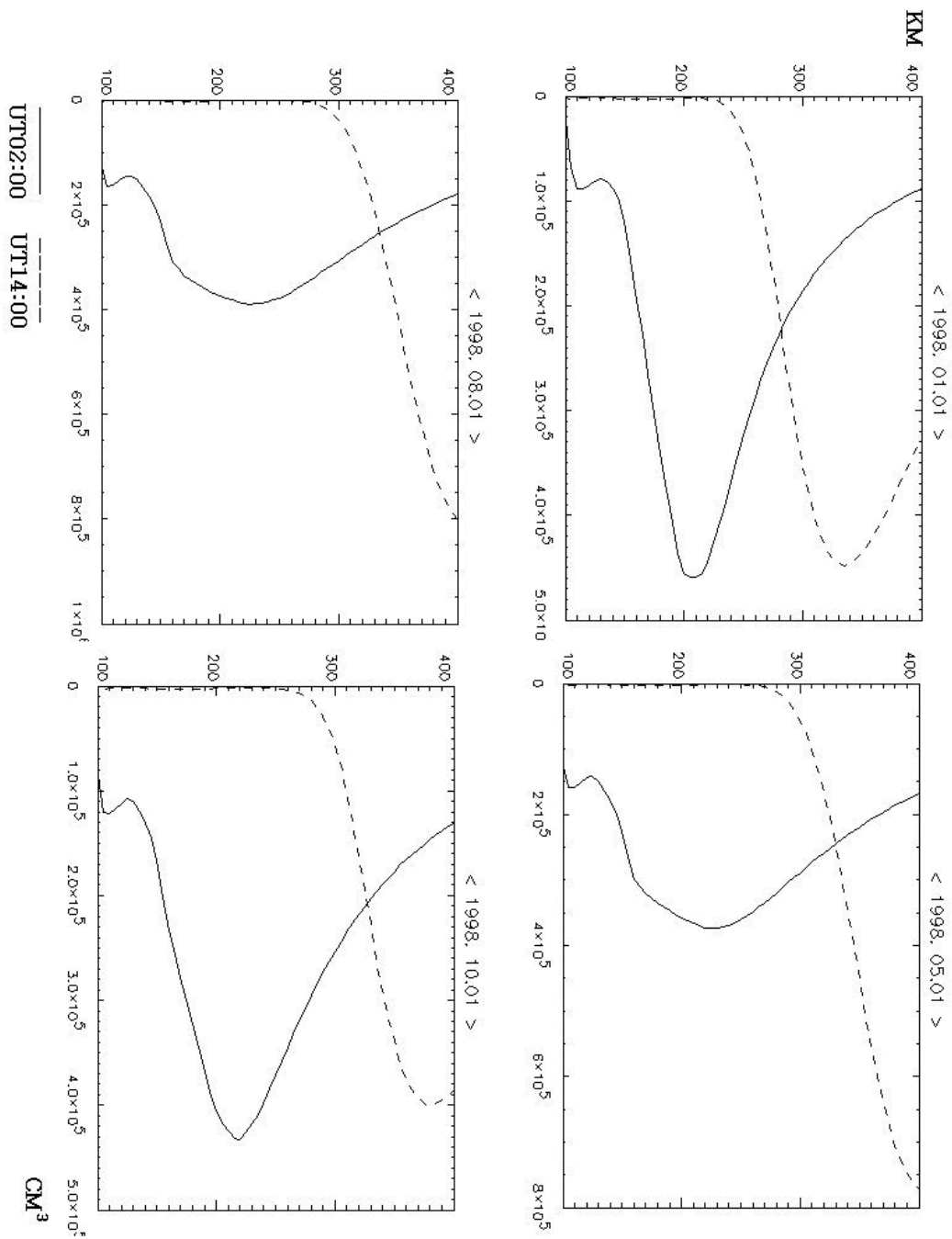


그림 5-2. 경희대학교(37.14 °N, 127.04 °E)에서의 PIM의 계산에 의한 전리층의 전자밀도 프로파일. 좌측 상단으로부터 1998년 1월 1일, 5월 1일, 8월 1일, 10월 1일. 실선은 오전 11시(UT02:00)의 그림이고, 점선은 오후 11시(UT14:00)의 그림이다.

(나) 1998년 계절별 전리층 전자밀도 : PIM

다음 그림 6.2 은 1998년 1월 1일, 5월 1일, 8월 1일, 10월 1일 오전 11시(UT02:00)와 오후 11시(UT14:00) 경희대학교(37.14 °N, 127.04 °E)에서의 PIM의 계산에 의한 전리층 전자밀도 프로파일이다. PIM에서도 역시 낮의 경우에 E, F1, F2층의 구별을 쉽게 할 수 있지만, 밤의 경우에는 층의 구분이 모호해지는 것을 볼 수 있다. 표 5-19와 표 5-20은 PIM을 실행시키기 위해서 필요한 지자기 활동 계수(Kp Index)와 태양 흑점수(Sun Spot Number)이다. 그리고 Rz12값은 IRI를 실행시킴으로써 얻을 수 있는 값이다.

표 5-19. 경희대학교 (37.14 °N, 127.04 °E)에서 UT02:00(LT11:00)에서의 지자기활동계수(Kp Index)와 태양 흑점수(Sun Spot Number)

날 짜	지자기 활동 계수 (Kp)	태양 흑점수 (Sun Spot Number)	Solar Sunspot Number (12-months running mean) Rz12
1998. 1. 1	0.7	39	25.2
1998. 5. 1	1.3	57	52.9
1998. 8. 1	1.7	64	71.2
1998. 10. 1	5.3	30	80.7

표 5-20. 경희대학교 (37.14 °N, 127.04 °E)에서 UT14:00(LT23:00)에서의 지자기활동계수(Kp Index)와 태양 흑점수(Sun Spot Number)

날짜	지자기 활동 계수 (Kp)	태양 흑점수 (Sun spot Number)	Solar Sunspot Number (12-months running mean) Rz12
1998. 1. 1	0.7	39	25.2
1998. 5. 1	1.3	57	52.9
1998. 8. 1	4.3	64	71.2
1998. 10. 1	4.3	30	80.7

표 5-21. IRI95와 PIM의 출력 비교

		IRI95	PIM
사용 언어		FORTRAN	FORTRAN
특징		- 경험적인 모델 - 전자와 이온의 다양한 프로파일을 제공한다.	- 이론적인 모델 - 전자밀도에 관한 프로파일만을 제공한다.
출 력 값	전자밀도	○	○
	총전자함유량	○	○
	전자온도	○	×
	이온밀도	○	×
	이온온도	○	×
	이온 %	○	×
	각 층의 임계주파수 및 해당 고도	○	○
전자밀도의 출력 범위		60km ~ 2,000km	90km ~ 2,500km

제 5 절 요약

IRI95와 PIM은 전리층의 전자밀도를 구할 수 있는 대표적인 모델이다. 하지만 이들 사이에서는 약간의 차이점을 찾을 수 있다. IRI95는 많은 수의 ionosonde 데이터를 기초로 한 경험적인 모델이지만 PIM은 시간의존성 전리층 모델이며, 저위도 F 영역 모델과 이것을 개선한 중위도 모델 및 E 영역 국부화학코드를 사용한 이론적인 모델이다.

경험적인 모델과 이론적인 모델의 차이는 다음과 같다. 경험적인 모델은 같은 태양 활동 조건하에서 서로 다른 전리층 상태를 관측한 데이터를 평균한 것이다. 따라서 세세한 전리층 변화나 특정지역의 변화현상은 무시되

어 나타난다. 이로인해 오로라 극관(auroral oval), 적도이상변동(equatorial anomaly), 부오로라 공동(subaurora trough)등의 현상을 제대로 나타낼 수 없다. 또한 경험적인 모델에 사용되는 관측 데이터 양이 관측기기의 불규칙한 분포로 인하여 시공간적 제약을 가진다. 이에 반하여 이론적인 모델은 전형적인 전리층 현상을 나타낼 수 있다. 즉, 특정한 지구물리학적 조건에 부합될 수 있도록 하였기 때문에 특정날짜에 관측한 데이터와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 이러한 이론적인 모델도 사용되는 물리학적, 화학적 모델의 신뢰성과 완벽성등에 제한을 받는다. 이러한 이유에서 경험적인 모델인 IRI95는 전반적인 전리층의 변화현상을 살펴보는데 적당하고, 이론적인 모델인 PIM은 특정한 조건에서의 결과를 볼 때 적당하다.

이 장에서는 IRI와 PIM 각각을 분석하고 두 모델의 차이점에 대해서 알아보았다. 두 모델이 모두 실제 관측치에 바탕을 두고 있기는 하지만, 접근방법의 차이로 인하여 그 결과에도 뚜렷한 차이가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 그러나 이러한 방법으로는 특정지역, 시간의 전자밀도만을 비교할 수 있기 때문에, 지구 전역에 걸친 비교는 힘들다고 볼 수 있다. 따라서, 좀 더 넓은 지역에서의 두 모델의 비교가 필요하다.

제 6 장 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)모델 분석

제 1 절 개요

지구의 실제 자기구를 모델화하는 것은 중요한 일이다. 모델들 중 가장 많이 쓰이며 비교적 정확한 것이 IGRF 모델이다. IGRF 모델은 많은 관측 데이터를 기초로 만들어 졌으며 그 정확도가 비교적 높다. 이것은 FORTRAN 언어로 NSSDC(National Space Science Data Center)와 NGDC(National Geophysical Data Center)등에서 제공된다(부록 참조). IGRF는 지구 주변의 임의의 한 점의 자기장 벡터를 계산할 수 있다. 따라서 실제 연구에 이용하기 위해서는 IGRF를 사용자의 필요에 따라 변형 할 필요가 있다. 2절에서는 NSSDC버전의 IGRF 프로그램의 main과 subroutine의 함수들의 특성을 나타내었고 3절에서는 IGRF를 사용자의 요구에 맞게 변형시킨 것에 관하여 언급할 것이다.

제 2 절 IGRF 함수분석

1. 주함수 (main function)

IGRF의 주 함수는 입출력을 주관한다. 이것의 조작으로 원하는 입출력으로 바꿀 수 있다. IGRF는 입력된 지점의 자기장 값만 계산하여 주는 것이므로 사용자의 요구에 따라 입출력을 변형해야 한다. 입력값은 원하는 지점의 위도, 경도, 고도와 시간이며, 이 시간은 소수점으로 표현된 년도로 입력해야한다.(예: 1998.6) 출력은 그 지점의 자기장벡터의 3성분의 크기와 절대값이다.

2. 부함수(subroutine function)

IGRF의 subroutine으로는 SHELLG, STOER, FELDG, FELDCOF, GETSHC, INTERPSH, EXTRAPSH가 있다. 각 부함수들의 입력값과 출력값, 프로그램에서의 역할을 나타내어 보았다.

가. subroutine SHELLG

명시된 geodetic 좌표, 고도, 지구 자기구의 field 모델을 위해 L 값을 계산하는 것이다.

(1) 입력값

- 입력지점의 'geodetic 위도(도 단위), 경도(도 단위), 고도(km 단위)로 GLAT, GLON, ALT라는 변수로 표현된다. (SHELLG)
- 입력지점의 지구 반지름 단위의 Cartesian Coordinates. X축은 경도 0도의 적도방향의 선이고, Y축은 경도 90도의 적도방향이며, Z축은 북극방향이다. 이것은 배열 v(3)로 주어진다.(SHELLC)
- dipole moment (gauss 단위) : DIMO
- SHELLG에 적합한 Field 모델 계수들 : H(144)

(2) 출력값

- L 값 : FL
- 가우스 단위의 자기장의 세기 : B0
- ICODE라는 것이 있는데 이것이 1이면 일반적인 결과이고, 2이면 비 물리적 변화하는 위치를 나타내며, 3이면 SHELL 파라미터(parameter)가 명확하게 계산할 수 있는 한계를 넘어서 근사값이 사용된다는 것을 뜻한다.

나. Subroutine STOER

SHELLG에서 Field Line을 추적하기 위해 사용된다.

다. Subroutine FELDG

구면조화함수모델(Spherical Harmonics Model)로부터 지구의 자기장을 계산한다.

(1) 입력값

- 입력지점의 geodetic 위도(도 단위), 경도(도 단위), 고도(km 단위)로 GLAT, GLON, ALT라는 변수로 표현된다.(FIELDG)
- 입력지점의 지구 반지름 단위의 Cartesian Coordinates. X축은 경도 0도의 적도방향의 선이고, Y축은 경도 90도의 적도방향이며, Z축은 북극방향이다. 이것은 배열 v(3)로 주어진다.(FELDC)

(2) 출력값

- BABS : 가우스 단위의 평균자기장의 세기.
- BNORTH, BEAST, BDOWN : geodetic 좌표계에서 North, East, Downward 방향의 field의 성분들

라. subroutine FELDCOF

- 계수들과 쌍극자 모멘트(dipole moment)를 결정한다.

(1) 입력값

- 계산되고자하는 연도

(2) 출력값

- 입력된 시간의 쌍극자 모멘트(가우스 단위)

마. subroutine GETSHC

배열로 된 어떤 특정한 파일로부터 구면조화 함수 계수(spherical harmonic coefficients)들을 읽는 역할을 한다. FELDOF에서 불리우게 된다.

(1) 입력값

- IU : IGRF 계수(coefficients) 세트를 위한 입력단위수
- FSPEC : 파일 내역

(2) 출력값

- NMAX : 모델의 최대 '차수'(degree)와 계수(order)
- ERAD : 높이와 같은 단위이며, 구면조화함수 계수(spherical harmonic coefficients)들과 관계된 지구의 반경.
- GH : Schmidt quasi-normal internal spherical harmonic coefficients.
- IER : 에러 수 (= 0, 에러 없음 : = -2, 최대차수를 넘음 : = FORTRAN run-time error number)

바. subroutine INTERPSH

두 개의 구면 조화 함수 모델(spherical harmonic model)들 사이에 선형적으로 삽입한다. 부함수 FELDOF에서 불리운다. (일종의 보간법(補間法)이다.)

(1)입력값

- DATE : 결과로 하는 모델의 날짜(소수로 표현된 연도)
- DTE1 : 결과로 하는 모델 바로 이전의 모델의 날짜
- NMAX1 : DTE1날짜 모델의 최대 차수와 계수
- GH1 : DTE1날짜 모델의 Schmidt quasi-normal internal spherical harmonic coefficients

- DTE2 : 결과로 하는 모델의 이후의 모델
- NMAX2 : DTE2날짜 모델의 최대 차수와 계수
- GH2 : DTE2날짜의 Schmidt quasi-normal internal spherical harmonic coefficients

(2) 출력값

- GH : 결과로 하는 날짜 모델의 계수들
- NMAX : 결과로 하는 날짜 모델의 최대 차수와 계수

사. subroutine EXTRAPSH

계산한 모델과 관계하여 선형적으로 spherical harmonic 모델을 보외(extrapolate)한다. subroutine FELDOF에서 불리우게 된다. (일종의 보외법(補外法))

(1) 입력값

- DATE : 결과로 하는 모델의 날짜(소수로 주어진 연도)
- DAE1 : 기본 모델의 날짜
- NMAX1 : 기본 모델의 최대 차수와 계수
- GH1 : 기본 모델의 Schmidt quasi-normal spherical harmonic coefficients
- NMAX2 : 모델 변화 비율의 최대 차수와 계수
- GH2 : 모델 변화 정도의 Schmidt quasi-normal spherical harmonic coefficients

(2) 출력값

- GH : 결과로 하는 모델의 계수들
- NMAX : 결과로 하는 모델의 최대 차수와 계수

표 6-1. IGRF의 입력값.

번호	변수이름	데이터 형식	단위	유효범위	비고
1	YEAR	Real	년	1945.0 ~2000.0	연도 및 날짜
2	LATI	Real	degree	-90.0~+90.0	입력 지점의 위도
3	LONGI	Real	degree	0.0 ~360.0	입력지점의 경도
4	HEIGHT	Real	km	0.0 ~	입력 지점의 고도

표 6-2. IGRF의 출력값.

번호	변수 이름	데이터 형식	단위	비고
1	BNORTH	Real	Gauss	입력 지점 자기장 벡터의 북쪽 성분
2	BEAST	Real	Gauss	입력 지점 자기장 벡터의 동쪽 성분
3	BDOWN	Real	Gauss	입력 지점 자기장 벡터의 지구 방향 성분
4	BABS	Real	Gauss	입력 지점 자기장 벡터의 크기

제 3 절 IGRF의 변형

IGRF 프로그램은 한 점의 자기장 값만을 계산하기 때문에 그 지점의 지나는 자력선 데이터, 특정 고도에 대한 지구 전체의 자기장의 크기 분포에 관한 데이터, 임의 지역의 자기장 크기 분포의 데이터를 얻기 위하여 그것의 입출력을 변형시켰다. IGRF의 단지 main function의 변형으로 다양한 데이터를 얻을 수 있다. 변형된 main function은 부록에 수록되어 있다. 특정 고도에 대한 데이터를 구하기 위해서 포트란의 'DO'문을 이용하여 위도와 경

도를 변화시키고 각 위도, 경도에서 값을 계산하여 하나의 데이터 파일로 출

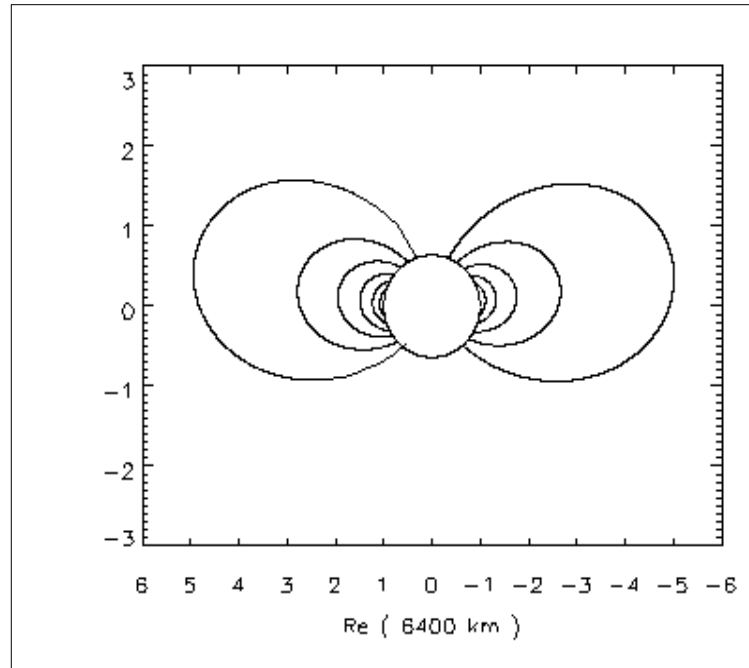


그림 6-1. 변형된 IGRF에 의해 계산된 경도 130도와 310도 부근의 자력선. 약 5Re 까지 나타나있다.

력할 수 있게 변형하였다. 그림 6-1은 경도 130도와 310도 부근의 자력선의 그림으로 변형된 IGRF를 이용하여 획득한 데이터를 플로팅 한 것이다. 자력선 계산의 경우 출력은 두 개의 파일로 나타나는데 각각 입력 지점에서 자력선의 북쪽 방향으로의 데이터와 남쪽방향으로의 데이터이다.

제 4 절 요약

IGRF에는 SHELLG, STOER, FELDG, FELDCOF, GETSHC, INTERPSH, EXTRAPSH 부함수들이 있고 그것들은 L값 계산, 자기장 계산, 쌍극자 모멘트 계산, 구면 조화 함수 계수를 파일들에서 읽는 역할 등을 한다. 전체적으로 입력값은 원하는 위치의 위도, 경도, 고도와 시간이며, 출력값은 자기장 벡터의 세 방향 성분, 자기장의 세기이다. IGRF모델은 비교적 정확한 모델이며 단지 입력된 한 점에서의 자기장 값을 계산하므로 실제

이용하기 위하여 주 함수를 바꿈으로써 입출력에 관한 것을 필요에 맞게 변형시켰다. 본 연구에서는 첫째, 입력 고도에 대한 지구 전체의 자기장의 세기 분포, 둘째, 입력 고도에 대한 임의의 지역의 자기장의 세기 분포, 셋째, 임의의 지역을 지나는 자력선을 추적할 수 있도록 변형하였다. 변형된 IGRF는 웹 상에서 실제 데이터 입력과 출력에 이용되어 많은 연구에 도움이 될 것이다.

제 7 장 전리층 및 지자기 모델의 CGI 프로그램 개발

제 1 절 개 요

앞의 절에서 살펴본 바로 전리층 및 지자기모델을 소개하고 있는 사이트는 웹상에 여러곳 존재하지만 그들의 서비스를 해 주는 곳은 세계적으로도 몇 군데 없었다. 특히 지구 전리층의 대표적인 모델이라고 할 수 있는 IRI(International Reference Ionosphere)는 NSSDC에서 CGI를 구현하고 있는 하지만 일정고도 또는 경도, 위도에서의 프로파일만을 제공하여 지구 전체의 전자밀도 또는 여러 온도를 한 눈에 볼 수 있을 수는 없었다. 그곳 이외에도 몇 군데에서 전리층에 관한 데이터를 제공하지만, 대부분이 Ionosonde 데이터를 직접 제공하거나, 단지 전자밀도의 전 지구적인 지도를 보여주는데 그쳤다. 일부는 더불어 세계 주요도시 몇 군데의 전자밀도 프로파일을 제공했지만, 그곳에 우리나라는 포함되어있지 않았다. 게다가 IRI와 다른 뚜렷한 특징을 가지고 있는 PIM(Parameterized Ionospheric Model)의 데이터를 제공해 주는 곳은 있으나, 소개를 하고 있는 사이트도 전 세계적으로 몇 군데에 지나지 않았다.

자기구 모델 중 특히 IGRF의 경우 여러 나라의 웹에서 데이터 서비스를 제공하고 있다. IGRF는 임의의 한 점에서의 자기장 값을 계산하도록 만들어 졌으며 현재 많은 웹에서 이 서비스를 제공하고 있다. 그러나 NSSDC에서는 위도에 따른 자기장 분포 등 다양한 서비스를 제공하고 있다. 더욱이 우리 나라에는 IGRF를 웹에서 제공하는 곳은 한곳도 없었으나 본 연구에서는 NSSDC에서 제공하는 서비스에 버금가는 다양한 서비스를 제공하고 있으며 그 중 임의 지점을 지나는 자력선에 대한 데이터는 세계에서 유일하게 제공하고 있다.

국내의 경우에는 전리층 및 지자기가 통신환경에 미치는 영향이 제대로 알려져 있지 않고, 이들을 소개하는 사이트나 데이터를 제공해주는 사이

트는 없는 실정이었다. 본 연구에서는 전리층 및 지자기 모델의 데이터를 제공해주는 사이트를 개설하였다.

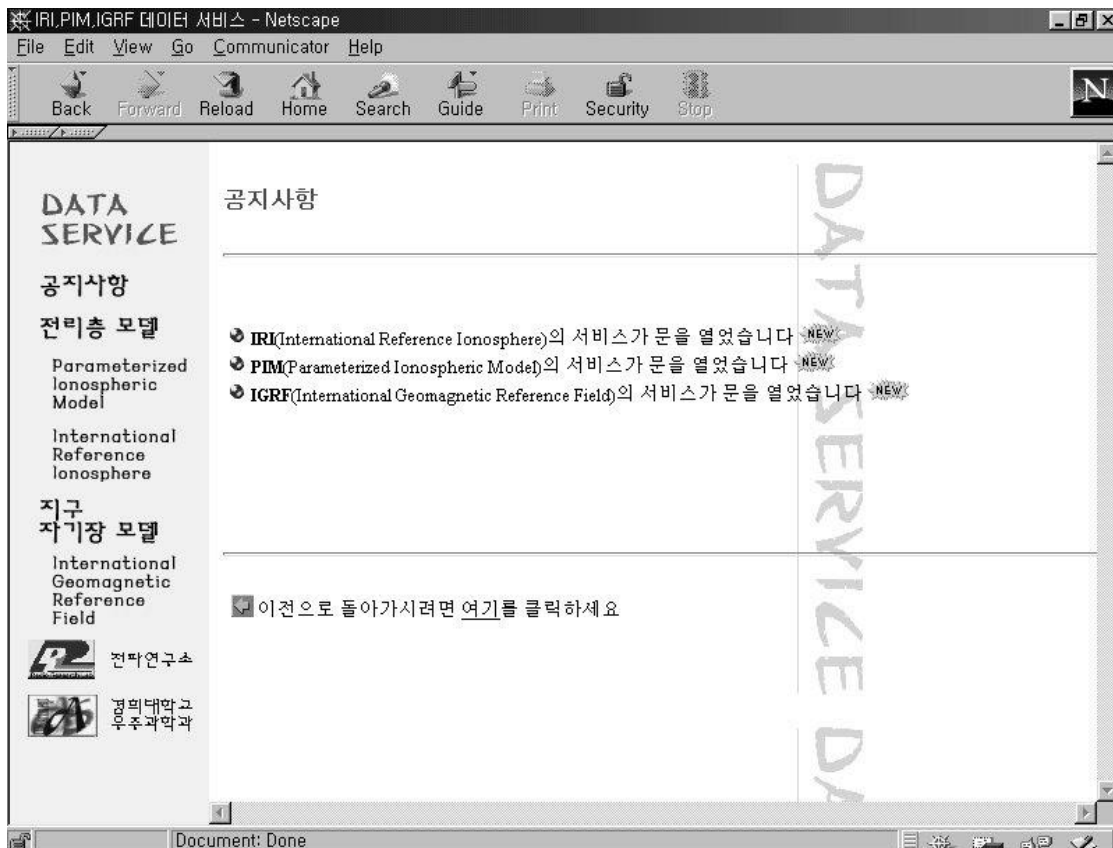


그림 7-1. 데이터 서비스의 공지사항 화면

제 2 절 제 작 과 정

1. 웹 페이지 제작 환경

- 사용 프로그램 : 나모 웹에디터 2.0 , 페인트 샵 프로 5.0
- 제작 화면 모드 : 800×600
- 사용 기자재 : 펜티엄 PC

본 사이트는 netscape나 explorer에 구애받지 않고 사용할 수 있도록 하였으며, 프로그램의 구현 속도를 위하여 JAVA등을 사용하지 않았고, 그림을 되도록 줄이는 방향으로 제작하였다. 또한 사용자가 PIM, IRI, IGRF등으로 쉽게 다닐 수 있도록 프레임으로 화면을 나누어 제작하였다. 그림 7-1은 본 사이트를 클릭했을 때 나타나는 공지사항 화면이다.

2. 각 프로그램의 입출력 변화

- 사용 프로그램 : FORTRAN 77, MS FORTRAN 4.0, 5.0
- 사용 기자재 : 펜티엄 PC, Workstation

세 프로그램의 소스를 컴파일해서 프로그램이 제공하는 원래의 입출력값을 얻을 수 있었지만, 웹에서 데이터를 제공하기 위해서 수정이 필요했다. 이를 위해서 MS FORTRAN 4.0과 5.0을 사용하였고, 이렇게 수정된 각 프로그램을 Workstation에서 다시 컴파일을 시켰다. 이렇게 변화된 입출력값은 다음 절에서 각 프로그램별로 나누어서 기술할 것이다.

3. CGI 프로그램

- 사용 프로그램 : GCC
- 사용 라이브러리 : Boutull CGIC 라이브러리
- 사용 이미지 라이브러리 : Boutull GD 1.3 라이브러리
- 사용 기자재 : Workstation

IRI, PIM, IGRF의 입력값을 웹의 화면에서 받아서 각기 실행을 시킨 후에 이것을 그림 또는 글자로 화면에 출력하였다. 이러한 CGI 프로그래밍에 사용된 언어는 GCC이며 CGI와 이미지 생성을 위한 라이브러리는 Boutull사의 CGIC 라이브러리와 GD1.3을 사용하였다.

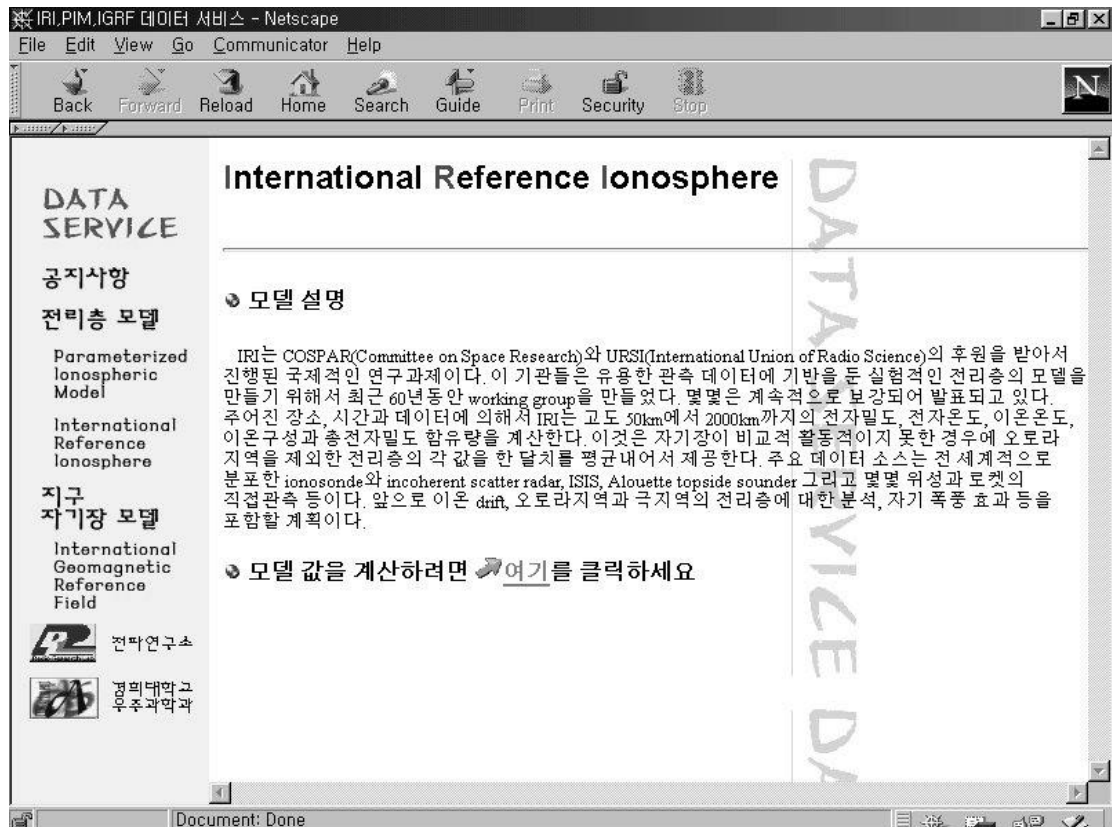


그림 7-2. IRI를 선택한 경우 WEB의 화면

제 3 절 IRI CGI 프로그램 개발

1. 웹 페이지 구성

처음의 공지사항 화면에서 IRI를 선택하면 모델에 관한 간단한 설명이 나온다(그림 7-2). 모델값을 계산하기 위해서 지정된 곳을 클릭하면 그림 7-3과 같은 화면으로 넘어간다.

2. 입 력

본래의 IRI에는 많은 입력값이 있었지만, 이것을 웹에서 일일이 입력받아서 프로그램을 작동시킨다는 것은 비효율적인 방법이기 때문에 입력값

을 간단히 바꾸었다. 기본 입력값에서 사용자가 입력받을 모델에서 계산되

International Reference Ionosphere

원하는 날짜를 입력해 주세요

년도(1958-2000) 연간일수(0-366) 시간(UT 00-24)

경도와 위도 값을 입력해 주세요

위도(-90 - +90) -1 경도 (0 - 360) -1

(지구 전역의 지도를 원하시면 -1을 넣어주세요)

원하는 물리량을 선택하세요

원하는 고도를 입력해 주세요

부터 까지 STEP

(지구 전역의 지도를 원하시면 초기값을 제외한 값에 -1을 넣어 주세요)

전자밀도 60 km - 2,000km
각종온도 120 km - 3,000km

그림 7-3. IRI의 데이터를 출력하기 위한 입력 화면

기를 원하는지 선택을 해야하는 곳은 IRI의 제작자가 원하는대로 모델에서 계산하였고, CCIR 데이터가 아닌 URSI 데이터를 사용하여 프로그램이 작동 되도록 하였다. 웹에서 받을 입력값이 다음의 표 7-1에 있다.

표 7-1. IRI의 웹에서의 입력값

번호	변수명	데이터 형식	단위	유효범위	기타
1	Year	Integer	Year	1958~2000	출력년도
2	Day	Integer	Day	1~365(366)	연간일수

3	UT	Real	hour	0~23.5	국제 표준시
4	Long	Real	°E	0~360	경도 -1 이면 지구 전체의 지도로 출력
5	Lati	Real	°N	-90~90	위도 -1 이면 지구 전체의 지도로 출력
6	Phys	Integer		0, 1, 2, 3	원하는 출력값 선택 0 : 전자 밀도 1 : 중성입자 온도 2 : 이온 온도 3 : 전자 온도
7	Begin	Real	km	60~3000	출력 시작 고도 원하는 출력값이 전자밀 도일 경우 범위는 60 ~ 2,000km이고, 다른 값은 120 ~ 3,000km.
8	End	Real	km	60~3000	출력 종료 고도 -1 이면 지구 전체의 지도로 출력 원하는 출력값이 전자밀 도일 경우 범위는 60 ~ 2,000km이고, 다른 값은 120 ~ 3,000km.
9	Step	Real	km	60~3000	출력 간격 -1 이면 지구 전체의 지도로 출력 원하는 출력값이 전자밀 도일 경우 범위는 60 ~ 2,000km이고, 다른 값은 120 ~ 3,000km.

3. CGI 프로그래밍

IRI를 위한 CGI 프로그램 파일은 IRICGI.C이고 이것의 실행파일은 IRI.CGI이며, 알고리즘이 표7-2이며, 이를 구성하고 있는 부함수들의 이름과 설명이 표 7-3이다.

표 7-2. IRI의 CGI 프로그램 알고리즘

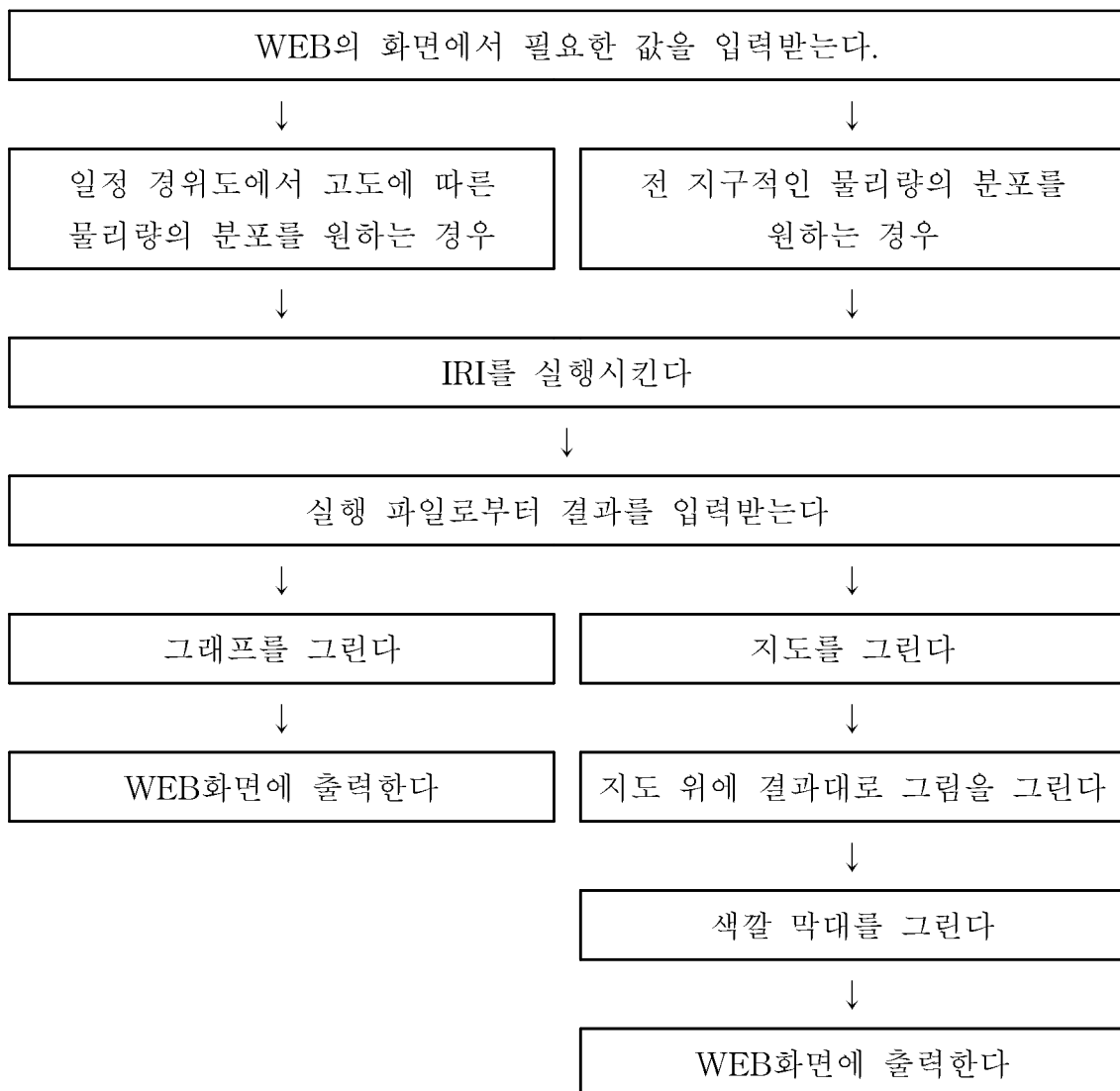


표 7-3. IRI의 CGI 프로그램 부함수

부함수 이름	설 명
ColorTable	Color Table을 생성하는 함수
DrawGraph	일정 경위도에서의 고도에 따른 그래프를 원하는 경우에 이 그림을 그려주는 함수
DrawValue	전 지구적인 물리량 분포를 원하는 경우에 지도 위에 물리량을 표시하는 함수
DrawBar	전 지구적인 물리량 분포를 원하는 경우, Color Table의 막대기를 그려주는 함수
DrawMap	전 지구적인 물리량 분포를 원하는 경우, 지도를 그려주는 함수

4. 출 력

사용자는 입력값에서 일정 고도의 프로파일 또는 전 지구적인 분포를 지정할 수 있었고, 이렇게 입력을 받으면 프로그램을 실행시켜서 그래프로 WEB화면에 나타낸다. 사용자가 볼 수 있는 물리량은 전자밀도, 중성입자온도, 이온 온도, 전자 온도 등이다.

가. 일정 고도의 프로파일

다음 그림 7-4, 7-5, 7-6, 7-7은 각각 1998년 11월 30일의 안양(37.4 °N, 127 °E)에서의 본 연구 계산에 의한 전자밀도, 중성입자온도, 이온 온도, 전자 온도의 프로파일이다.

나. 전 지구적인 분포도

다음 그림 7-8, 7-9, 7-10, 7-11은 각각 1998년 11월 30일 UT1시 고도150km에서의 전자밀도, 중성입자온도, 이온 온도, 전자 온도의 전 지구적

인 분포도이다.

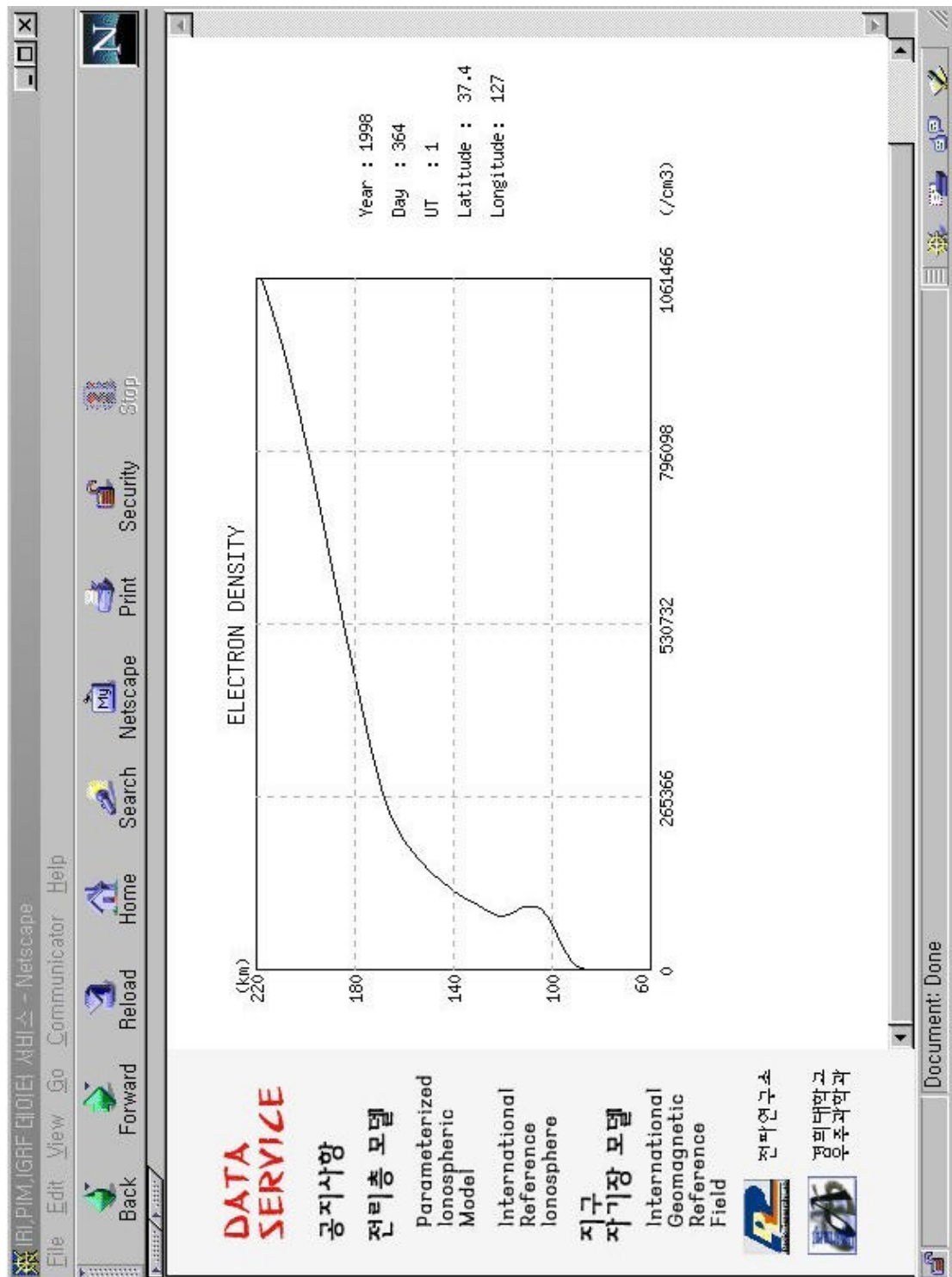


그림 7-4. 1998년 12월 30일 UT 1시의 안양(37.4 °N, 127 °E)에서의 전자 밀도

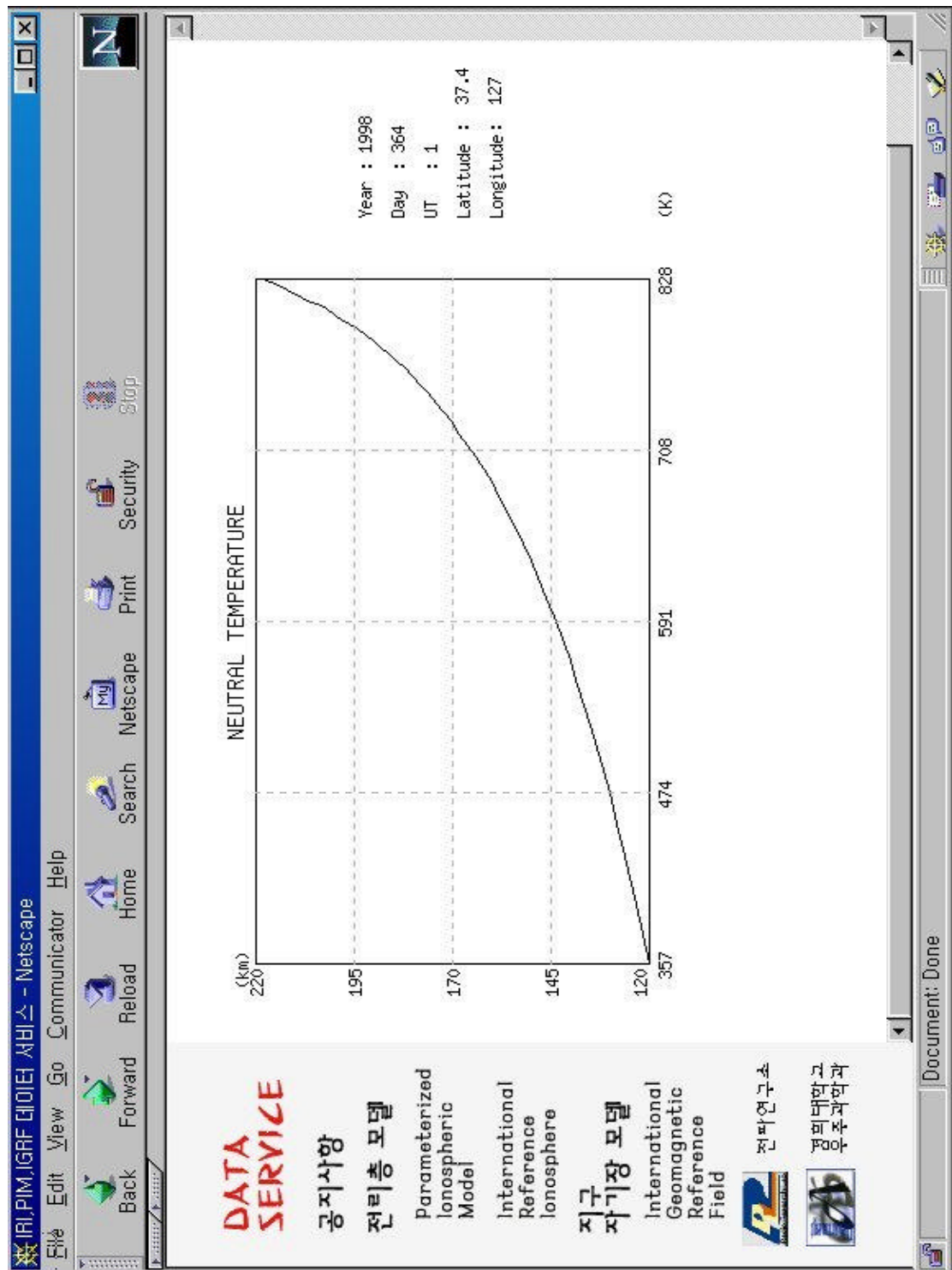


그림 7-5. 1998년 12월 30일 UT1시의 안양(37.4 °N, 127 °E)에서의 중성 입자온도

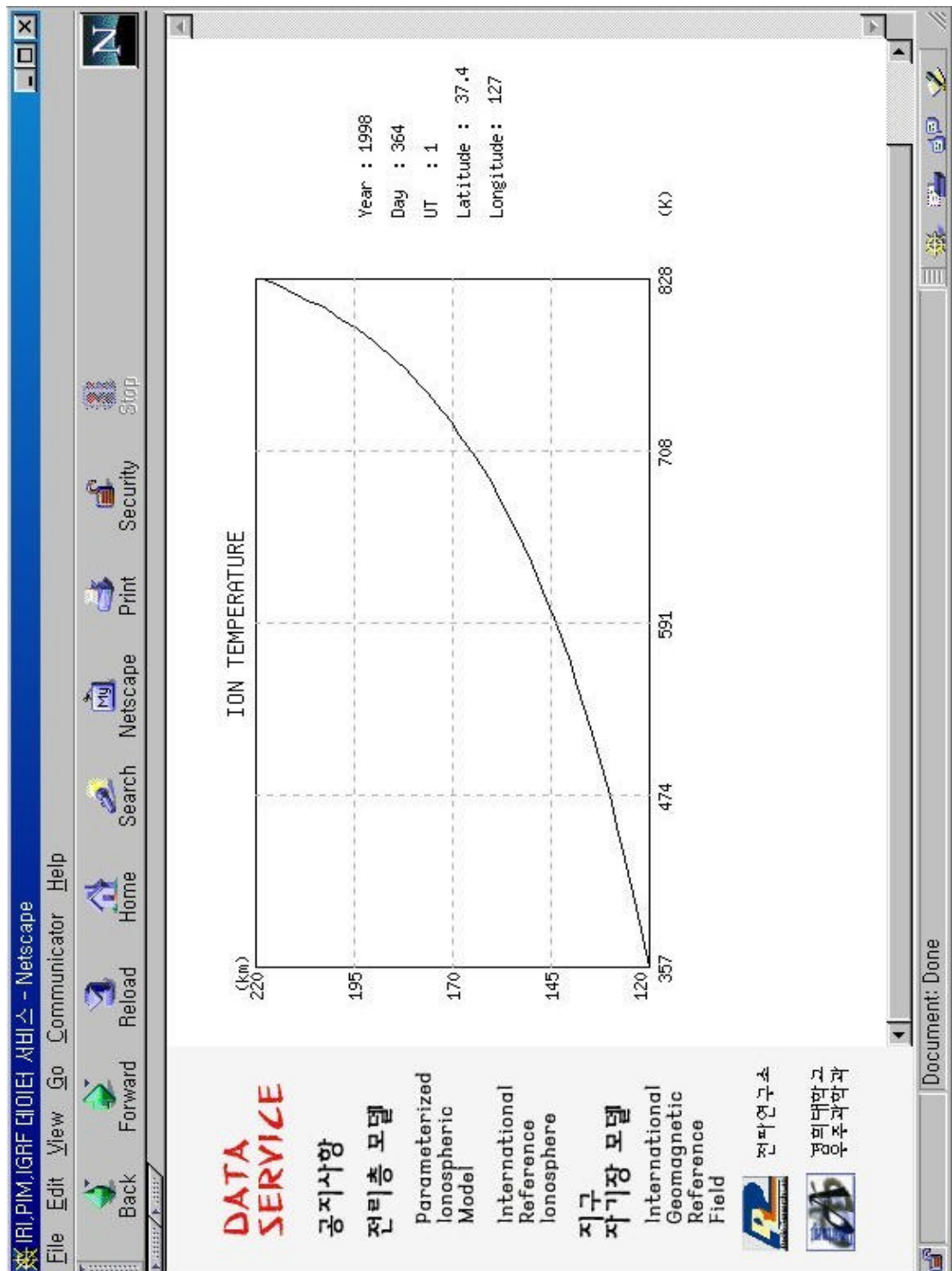


그림 7-6. 1998년 12월 30일 UT1시의 안양(37.4 °N, 127 °E) 에서의 이온 온도

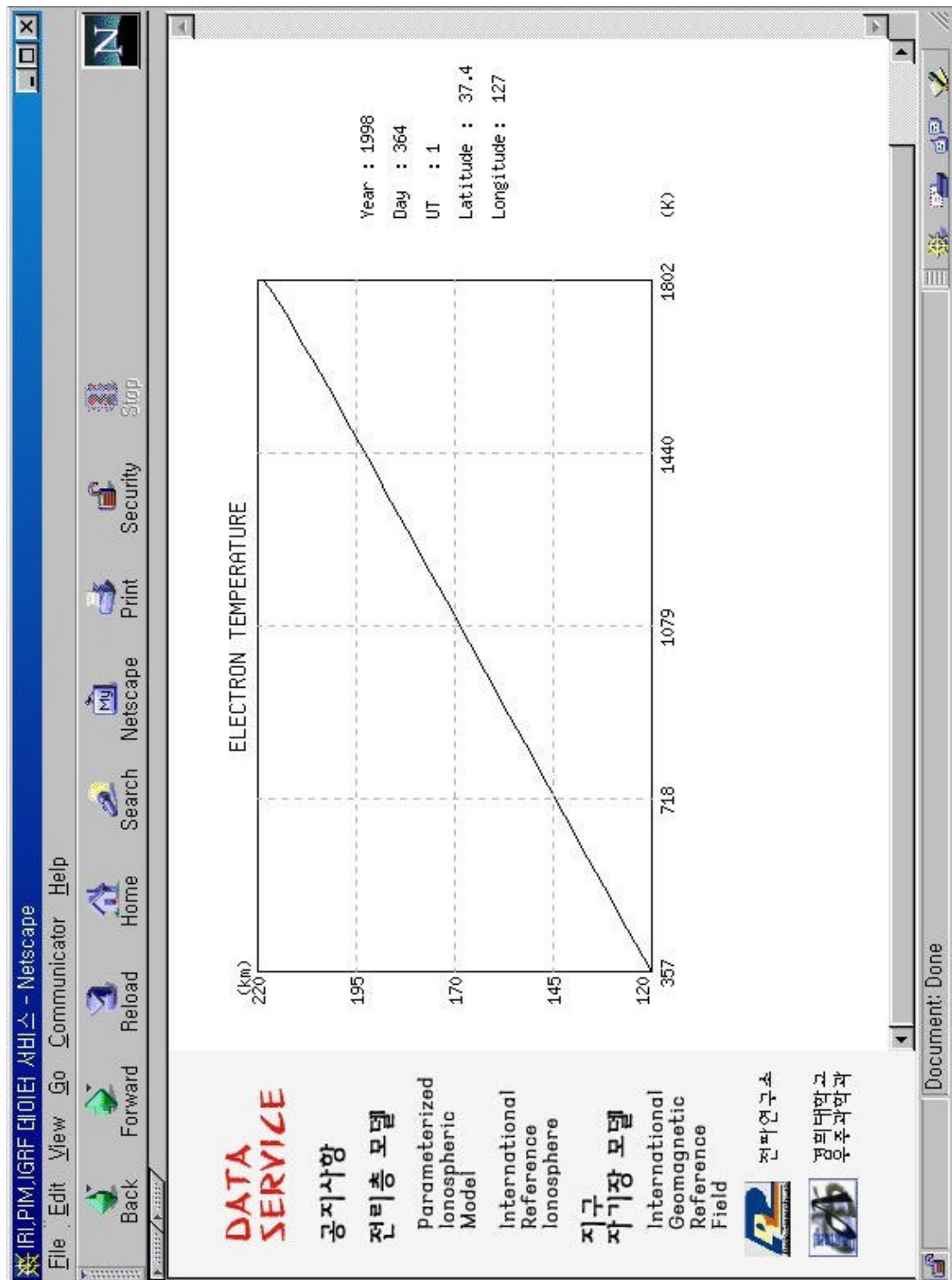


그림 7-7. 1998년 12월 30일 UT 1시 안양(37.4 °N, 127 °E)에서의 전자 온도

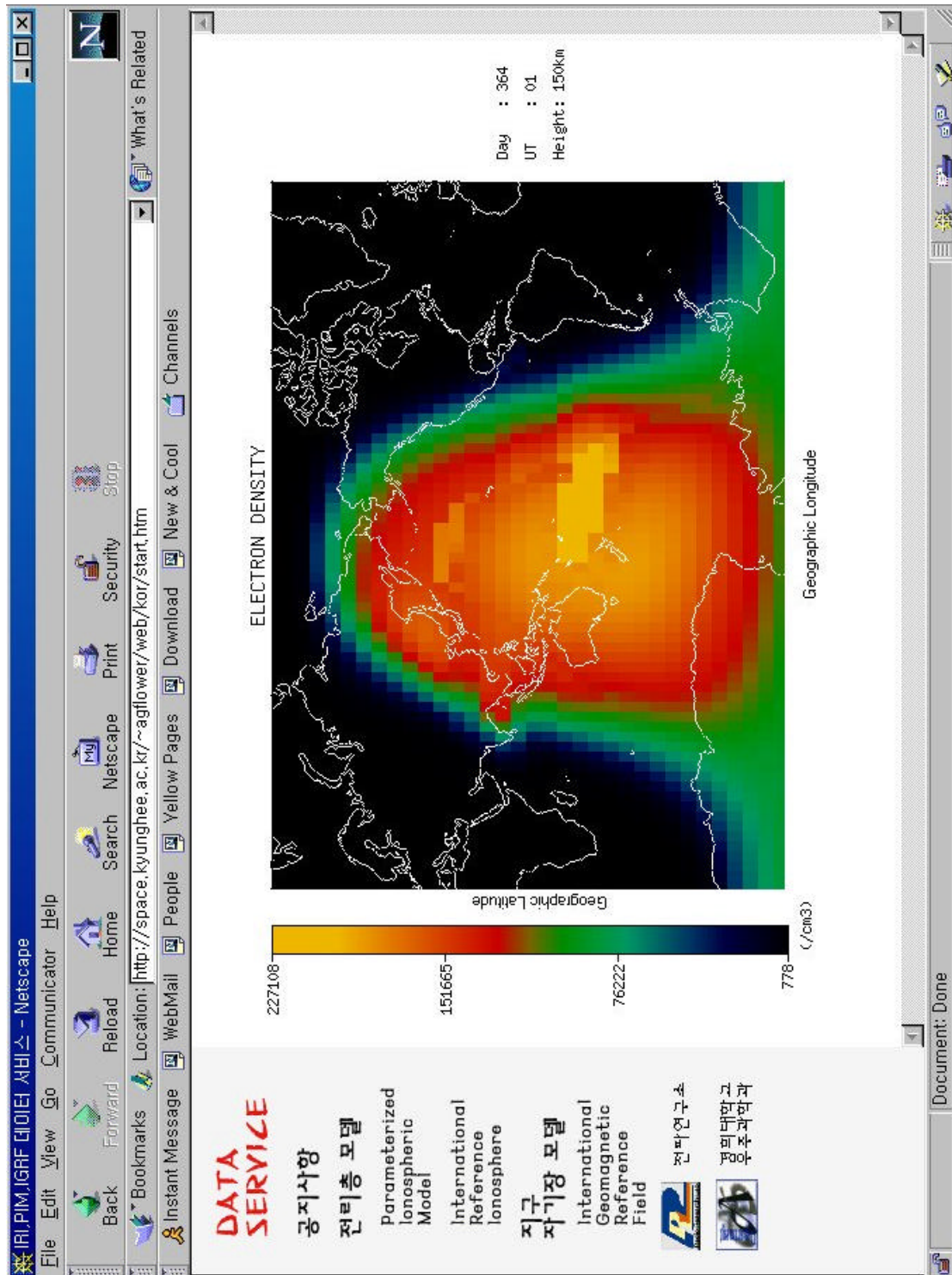


그림 7-8 1998년 11월 30일 UT 1시 고도150km에서의 전자밀도

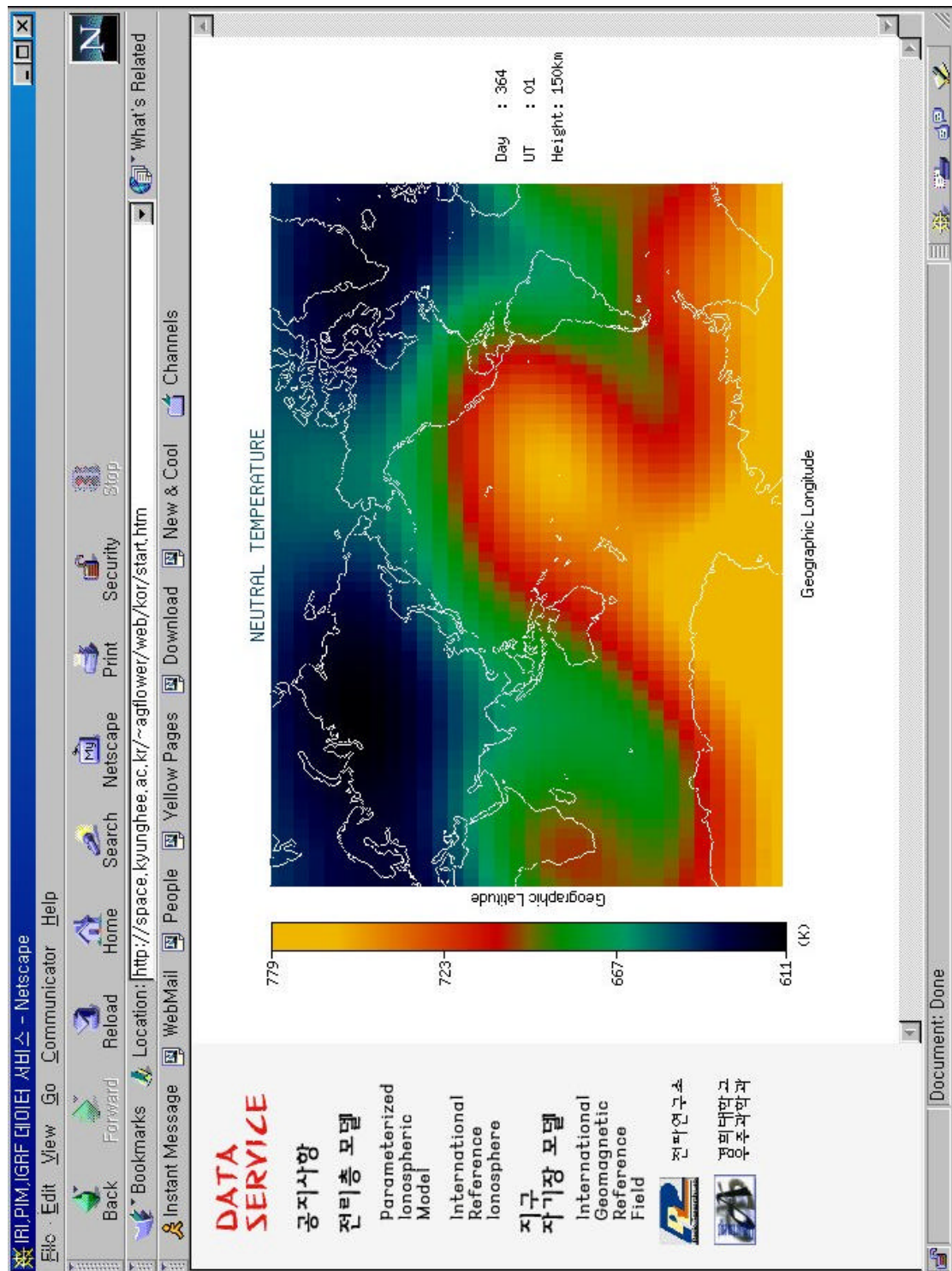


그림 7-9. 1998년 11월 30일 UT 1시 고도150km에서의 중성입자온도

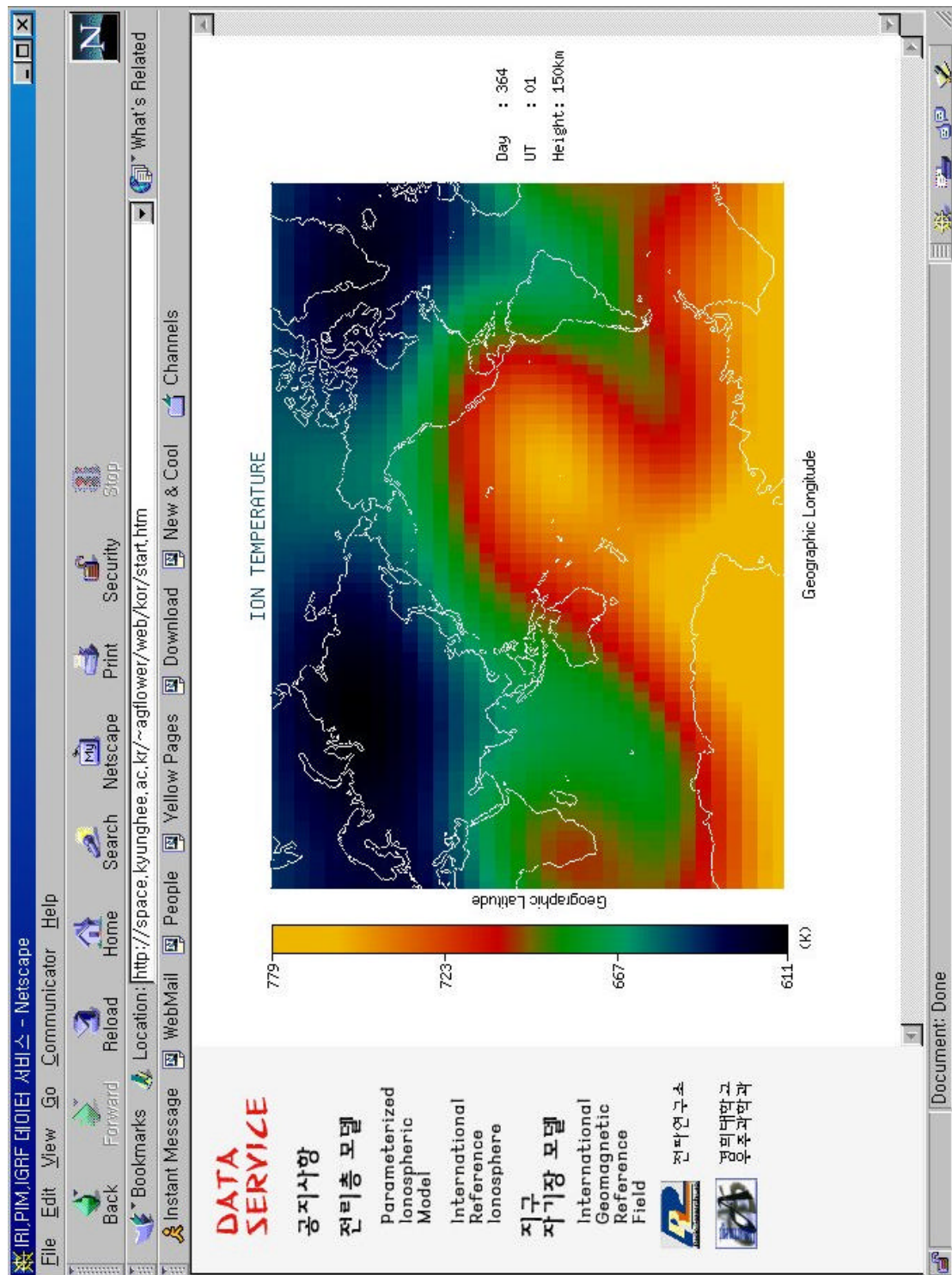


그림 7-10. 1998년 11월 30일 UT 1시 고도150km에서의 이온 온도

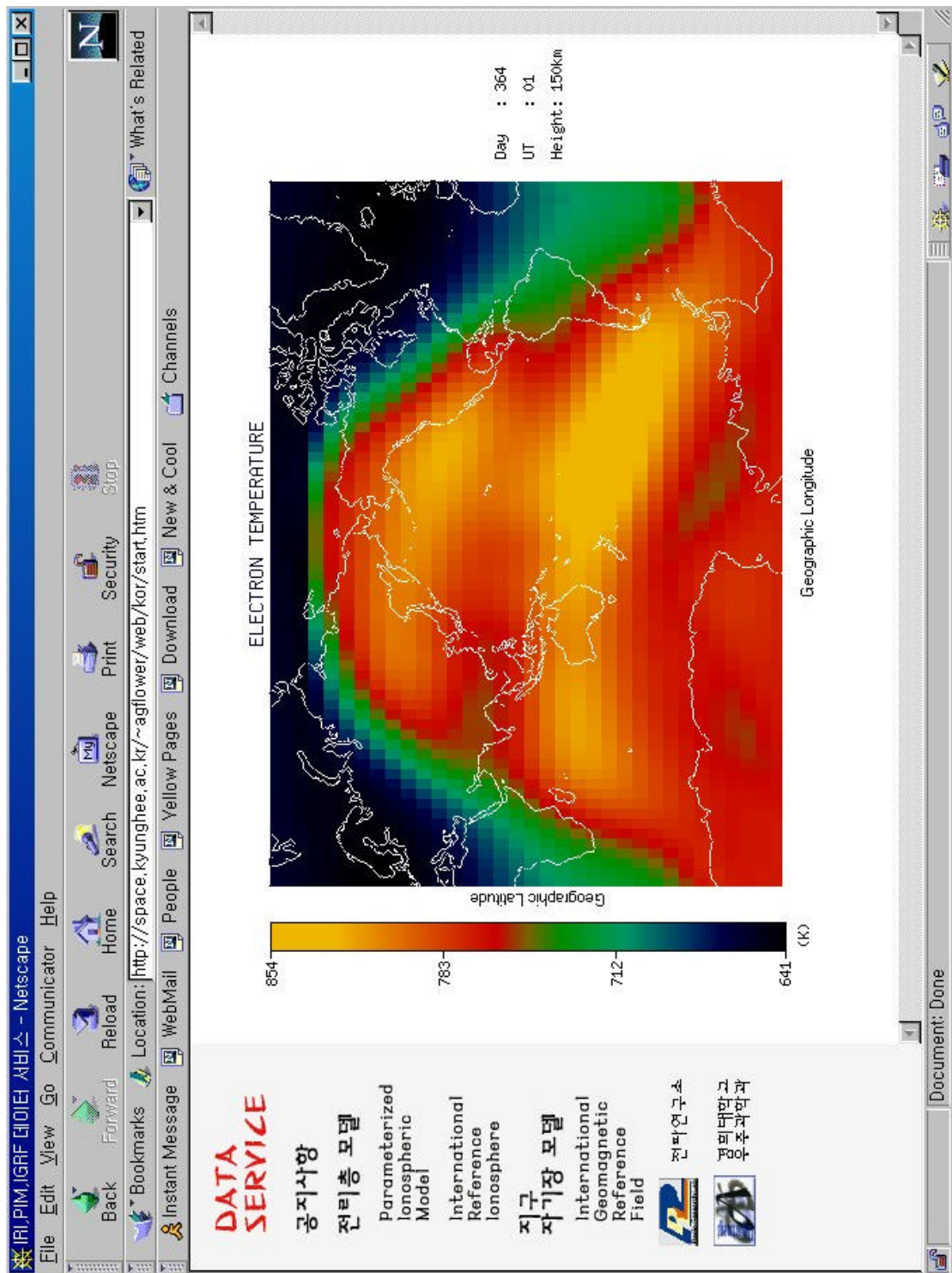


그림 7-11. 1998년 11월 30일 UT 1시 고도150km에서의 전자 온도

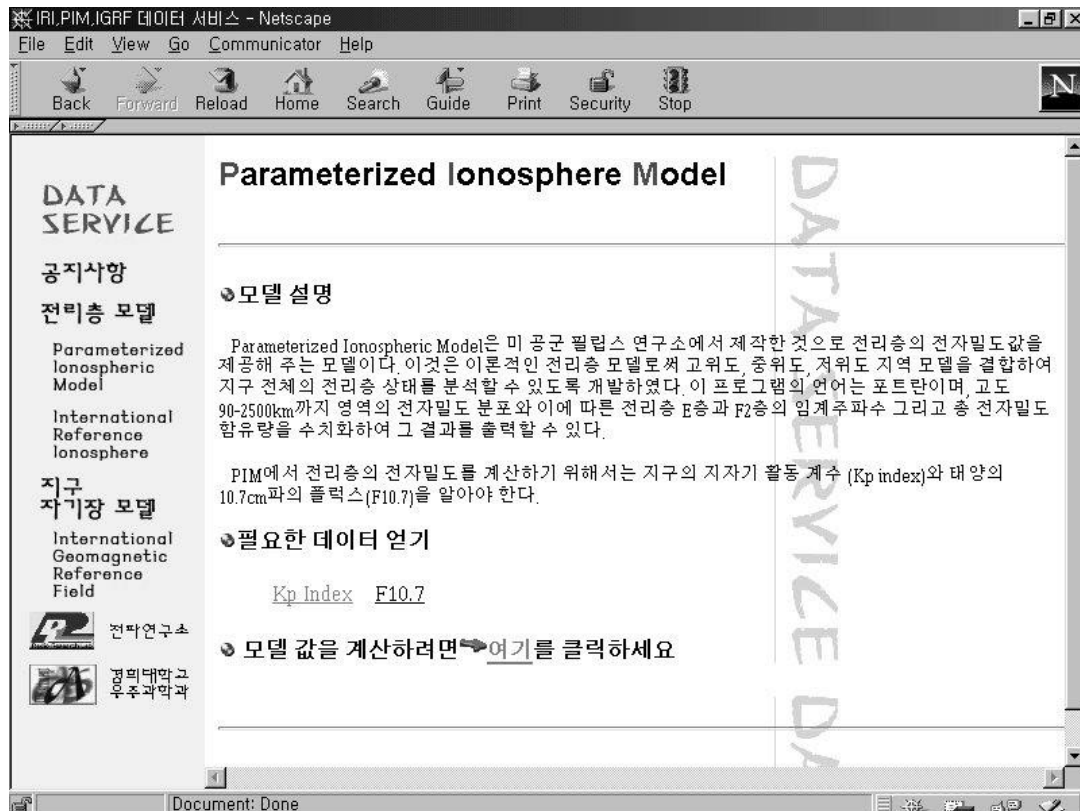


그림 7-12. PIM을 선택한 경우 웹화면

제 4 절 PIM CGI 프로그램 개발

1. 웹 페이지 구성

처음의 공지사항 화면에서 IRI를 선택하면 모델에 관한 간단한 설명이 나온다(그림 7-12). 모델값을 계산하기 위해서 지정된 곳을 클릭하면 그림 7-13과 같은 화면으로 넘어간다.

2. 입 력

IRI은 하나의 입력틀 안에서 변화를 주었으나, PIM은 각기 다른 경우로 나누어 입력받도록 하였다.

DATA SERVICE

공지사항

전리층 모델

Parameterized Ionospheric Model

International Reference Ionosphere

지구 자기장 모델

International Geomagnetic Reference Field

 전파연구소

 공과대학교 우주과학과

Parameterized Ionosphere Model

1. 일정 경위도에서 전자밀도 프로파일

2. 일정 고도에서의 전지구적인 전자밀도 분포

1. 일정 경위도에서 전자밀도 프로파일

원하는 날짜를 입력해 주세요

년도 (1800-2100)
 연간일수 (0-366)
 시간 (UT 0000-2359 : 시분)

경도와 위도 값을 입력해 주세요

위도 (-90 - +90)
 경도 (0 - 360)

원하는 고도를 입력해 주세요

고도 (90 - 1000km)
 부터
 까지 STEP

!!! 주의 !!! (최고치.최저치) 간격 < 100

계산에 필요한 상수값을 입력해 주세요

Kp index (0 - 9)
 f10.7
 또는 태양 흑점수

원하는 출력 방식을 선택하세요

2. 일정 고도에서 전지구적인 전자밀도 분포

원하는 날짜를 입력해 주세요

년도 (1800-2100)
 연간일수 (0-366)
 시간 (UT 0000-2400 : 시분)

원하는 고도를 입력해 주세요

고도 (90 - 1000km)

계산에 필요한 상수값을 입력해 주세요

Kp index (0 - 9)
 f10.7
 또는 태양 흑점수

그림 7-13. PIM의 데이터를 출력하기 위한 입력 화면

가. 전자밀도의 전 지구적인 분포

이 경우는 전 지구적인 분포를 살펴보기 때문에 경도와 위도값은 입력을 받지 않는다. 단지, 날짜, 시간, 고도와 계산에 필요한 Kp 지수, 태양 흑점수 또는 F10.7값만을 받게 되어 있으며 자세한 사항은 표 7-4에 나와있다.

표 7-4. 일정 고도에서의 전지구적인 전자밀도 분포를 구하기 위한 PIM의 입력값

번호	변수명	데이터 형식	단위	유효범위	기타
1	Year	Integer	Year	1800~2000	출력년도
2	Day	Integer	Day	1~365(366)	연간일수
3	UT	Real	hour	000~2359	국제 표준시
4	SSNTREAT	Integer		1, 2	F10.7과 SSN을 어떻게 사용할 것인가를 결정 1 : F10.7에서 SSN을 계산하여 적용 2 : SSN에서 F10.7을 계산하여 적용
5	f107	Real	$10^{22} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$	0. ~ 300	107cm(2800MHz)의 태양 전파 플럭스 SSNTREAT가 2이면 이 값을 읽은 후 무시되며 F10.7은 SSN에서 계산되어 적용. 전리층이 평균 변화값에 더 관련이 있으므로 F10.7의 일일값보다는 27일 평균값을 적용할 것을 권함.

6	SSN	Real		0. ~ 300.	태양흑점수. SSNTREAT가 1이면 이 값을 읽은 후 무시되 며 SSN은 F10.7에서 계 산되어 적용. 전리층이 평균변화값에 더 관련이 있으므로 SSN의 일일 값보다는 27일 평균값을 적용할 것을 권함.
7	Kp	Real		0. ~ 9.	Kp 지자기 활동지수
8	ALTI	Real	km	90~25,000	출력 고도

나. 일정 경위도에서의 전자밀도 프로파일

이 경우는 일정 위치에서의 고도에 따른 전자밀도 프로파일을 살펴보는 것이기 때문에, 입력값은 앞선경우보다 조금 많다. 날짜와 시간, 경도, 위도, 고도의 변화량, 필요한 지수 등이 그 입력값으로 다음의 표 7-5에 자세한 사항이 나와있다.

표 7-5. 일정 경위도에서 전자밀도의 수직 프로파일을 구하는 경우의 PIM 입력값

번호	변수명	데이터 형식	단위	유효범위	기타
1	Year	Integer	Year	1800~2000	출력년도
2	Day	Integer	Day	1~365(366)	연간일수
3	UT	Real	hour	0~2329	국제 표준시
4	ALTI	Real	°N	-90 ~ 90	출력 위도

5	LONG	Real	°E	0 ~ 360	출력 경도
6	BEG	Real	km	90~25,000	출력 시작 고도
7	END	Real	km	90~25,000	출력 종료 고도
8	STEP	Real	km		출력 간격
9	SSNT REAT	Integer		1, 2	F10.7과 SSN을 어떻게 사용할 것인가를 결정 1 : F10.7에서 SSN을 계산하여 적용 2 : SSN에서 F10.7을 계산하여 적용
10	f107	Real	$10^{22} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$	0. ~ 300.	10.7cm(2800MHz)의 태양 전파 플럭스 SSNTREAT가 2이면 이 값을 읽은 후 무시되 며 F10.7은 SSN에서 계 산되어 적용. 전리층이 평균 변화값에 더 관련 이 있으므로 F10.7의 일 일값보다는 27일 평균값 을 적용할 것을 권함.
11	SSN	Real		0. ~ 300.	태양 흑점 수 . SSNTREAT가 1이면 이 값을 읽은 후 무시되 며 SSN은 F10.7에서 계 산되어 적용. 전리층이 평균변화값에 더 관련이 있으므로 SSN의 일일 값보다는 27일 평균값을 적용할 것을 권함.

3. CGI 프로그래밍

가. 전자밀도의 전 지구적인 분포

이 경우의 CGI 프로그램 파일은 MAPCGI.C이다. 데이터를 지도로 출력하기 위해서 사용한 부함수는 ColorTable, DrawValue, DrawBar, DrawMap등이며 이들의 기능은 앞절의 IRI에서와 같다. ColorTable은 ColorTable을 생성하는 함수이고, DrawMap는 지도를 그려주는 기능을 담당한다. 또한 DrawValue는 지도 위에 그림을 그려주는 기능을, DrawBar는 ColorBar를 그려준다.

나. 일정 경위도에서의 전자밀도 프로파일

이 경우의 CGI 프로그램 파일은 PROFILECGI.C이다. 프로파일을 그림으로 나타내기 위해서 DrawGraph라는 부함수를 만들어 사용하였다. 이 함수는 WEB으로부터 데이터를 받아서 그림을 그려주는 함수이다.

4. 출 력

가. 전자밀도의 전 지구적인 분포

그림 7-14는 1998년 11월 30일 고도 150km의 전 지구적인 전자밀도 분포이다. 이 날의 Kp 지수값은 0.3, 태양 흑점수는 99이다.

나. 일정 경위도에서의 전자밀도 프로파일

그림 7-15는 1998년 11월 30일 안양(37.4 °E, 127.0 °N)에서의 90km 부터 200km까지의 전자밀도 프로파일을 그린 것이다. 이 날의 Kp 지수값은 0.3이고, 태양 흑점수는 99이다.

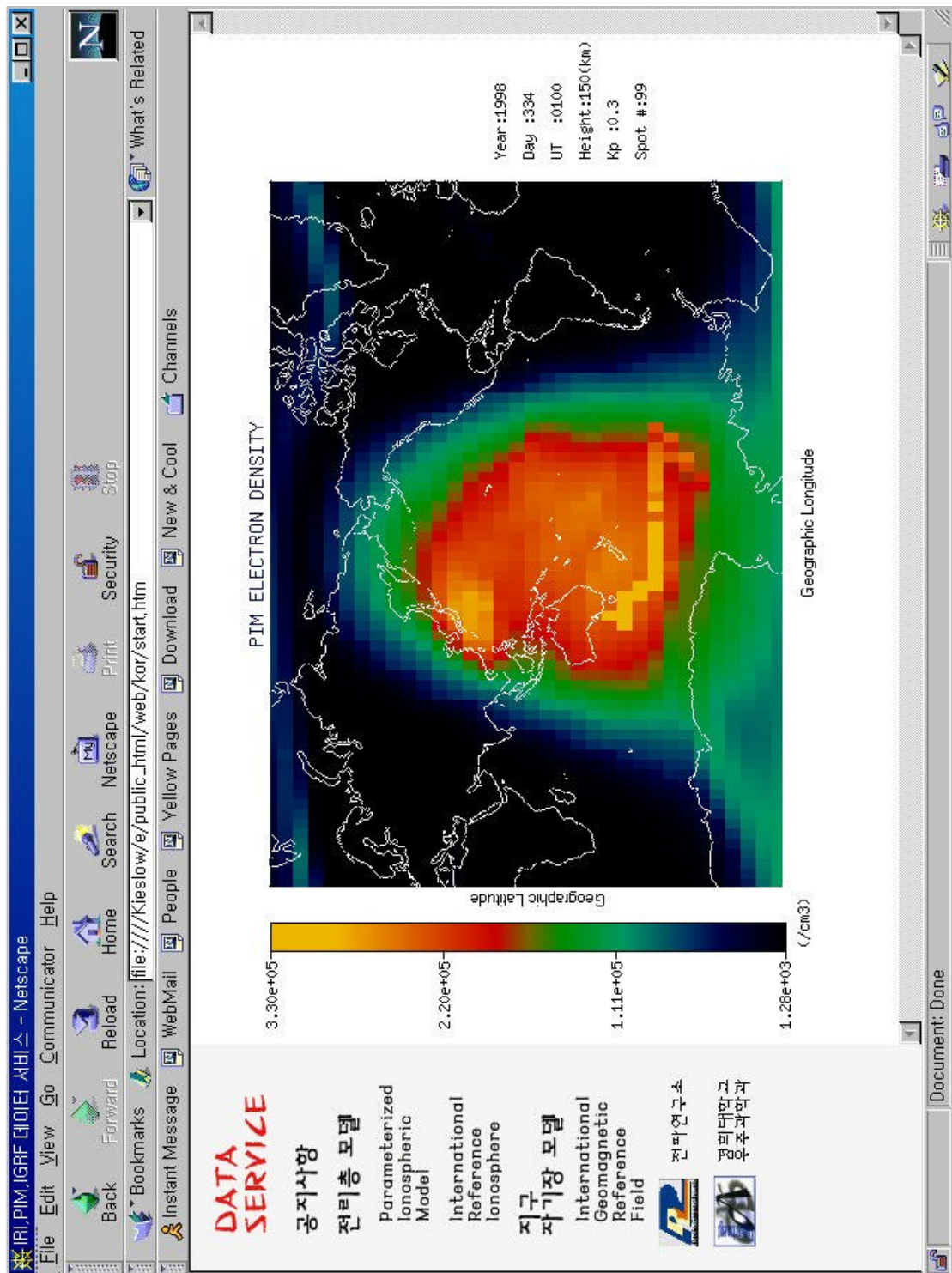


그림 7-14. 1998년 11월 30일 고도 150km의 전 지구적인 전자밀도 분포 (Kp 지수: 0.3, 태양 흑점수 : 99)

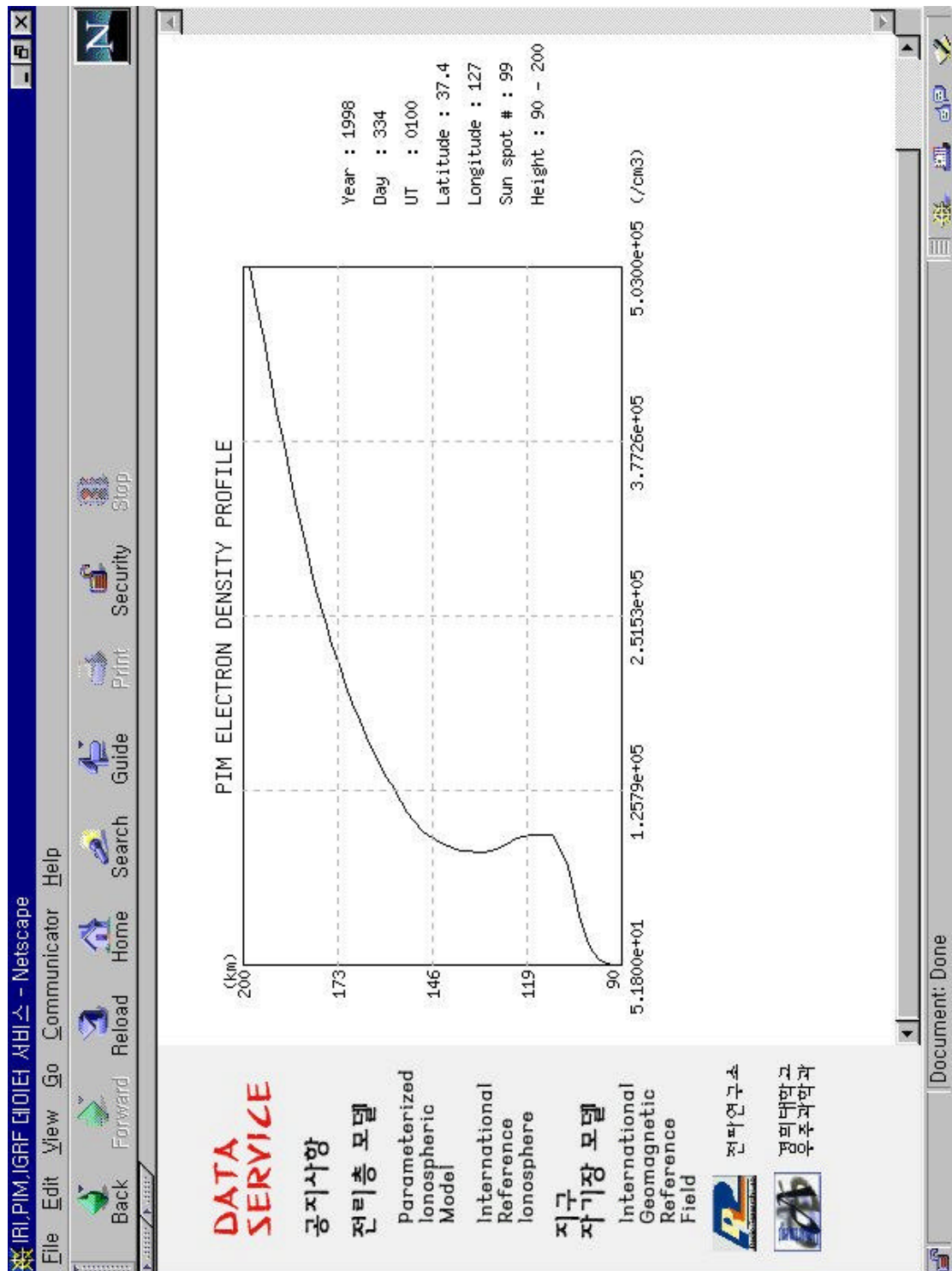


그림 7-15 1998년 11월 30일 안양(37.4 °E, 127.0 °N)에서의 90km부터 200km까지의 전자밀도 프로파일 (Kp 지수 : 0.3 , 태양 흑점 수 : 99)

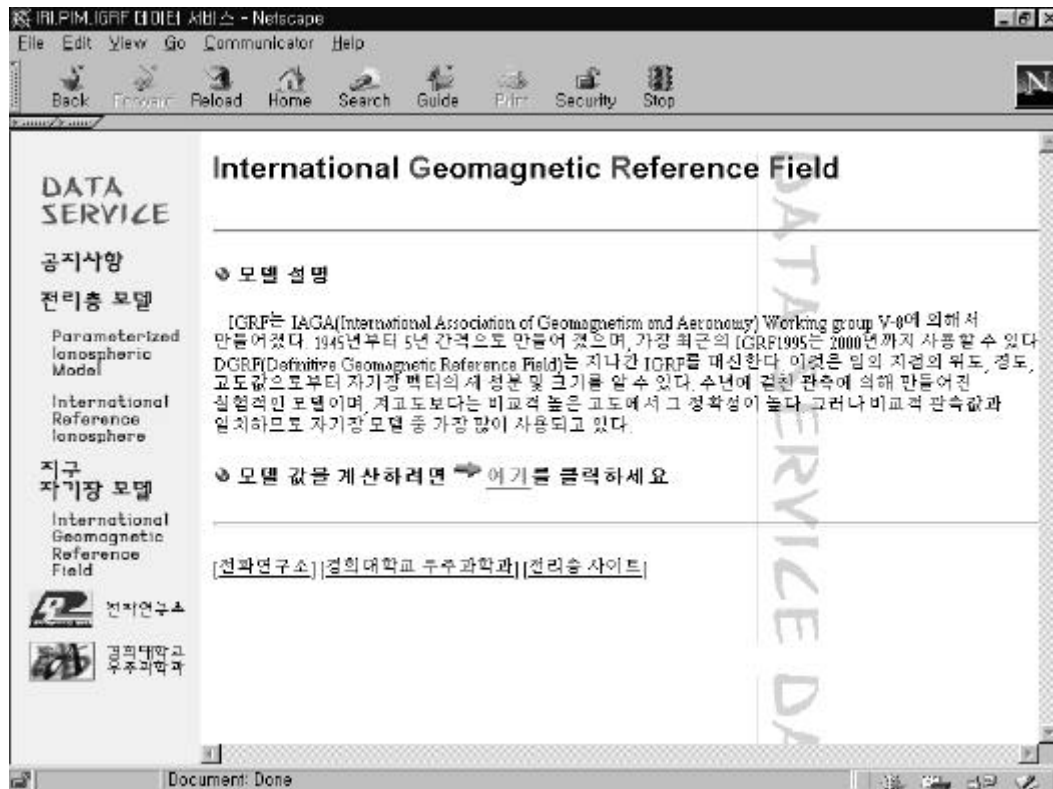


그림 7-16. IGRF를 선택한 경우 웹화면

제 5 절 IGRF CGI 프로그램 개발

1. 웹페이지 구성

처음의 공지사항 화면에서 IGRF를 선택하면 모델에 관한 간단한 설명이 나온다(그림 7-16). 모델값을 계산하기 위해서 지정된 곳을 클릭하면 그림 7-17과 같은 화면으로 넘어간다.

2. 입 력

가. 임의 지점에서의 자기장 데이터


이 경우는 일정한 지점에서의 자기장 벡터값을 출력하는 경우이다.


DATA SERVICE

공지사항

전리층 모델
Parameterized Ionospheric Model
International Reference Ionosphere

지구 자기장 모델
International Geomagnetic Reference Field

 국립연구소

 과학기술정보통신부

International Geomagnetic Reference Field

1. 임의 지점에서의 자기장 데이터

2. 임의 고도, 임의 지역의 자기장 데이터

3. 임의 지점을 지나는 자력선 데이터

1. 임의 지점에서의 자기장 데이터

연도 (1945 - 2000)

위도 (90 - +90)

고도 (0km -)

경도 (0 - 360)

Submit Query Reset

2. 임의 고도, 임의 지역의 자기장 데이터

연도 (1945 - 2000)

위도 (90 - +90) 부터 까지

경위도 간격 (1 - 90)

고도 (0km -)

경도 (0 - 360) 부터 까지

Submit Query Reset

3. 임의 지점을 지나는 자력선 데이터

연도 (1945 - 2000)

위도 (90 - +90)

고도 (0km -)

경도 (0 - 360)

Submit Query Reset

그림 7-17. IGRF의 데이터를 출력하기 위한 입력 화면

표 7-6. IGRF를 위한 CGI 프로그램 알고리즘



필요한 입력값은 연도, 경도, 위도, 고도 등이다.

나. 임의 고도, 임의 지점에서의 자력선 데이터

이때는 사용자가 원하는 지역에서의 자력선 데이터를 출력하므로, 입력값은 연도, 시작 경·위도, 마지막 경·위도, 그리고 경위도의 출력 간격이다.

다. 임의 지점을 지나는 자력선 데이터

이 경우의 입력값은 가.의 경우와 같다. 그러나 이때의 데이터는 입력 지점으로부터 자북, 자남 방향으로 나뉘어져 출력이 된다.

3. CGI 프로그래밍

IGRF는 입력받는 형태와 출력 형태가 모두 네 가지이고, 이에 따른 프로그램의 종류도 세 가지이다. 임의 지점에서의 자기장 데이터를 입출력해주는 프로그램은 POINTCGI.C이고, 임의 고도, 지역의 자기장 데이터는 LOCALCGI.C, 그리고 임의 지점을 지나는 자력선 데이터를 계산해 주는 것이 FIELD CGI.C이다. 이들 중 지구 전체 자기장 데이터를 그려주는 것을 제외한 나머지는 문자 출력만을 하기 때문에 사용된 부함수는 없으며, 이들은 WEB에서 필요한 입력값을 받아서 프로그램을 실행시켜 얻은 출력값을 WEB에 써 주는 기능을 담당한다. 전체적인 프로그램의 알고리즘이 다음의 표에 나타나있다.

4. 출 력

가. 임의 지점에서의 자기장 데이터

그림 7-18은 1998년 안양(37.4 °N, 127 °E)위의 고도 1000km지점에서의 자기장 데이터 출력 화면 이다.

나. 임의 고도, 임의 지역의 자기장 데이터

그림 7-19은 1998년 위도 30~40 °N, 경도 126~128 °E, 경위도 간격은 1° 인 경우에, 고도 1000km에서의 자기장 데이터를 출력한 화면이다.

다. 임의 지점을 지나는 자력선 데이터

그림7-20은 1998년 안양(37.4 °N, 127 °E)위의 고도 1000km지점을 지나는 자력선 데이터를 출력한 화면이다.

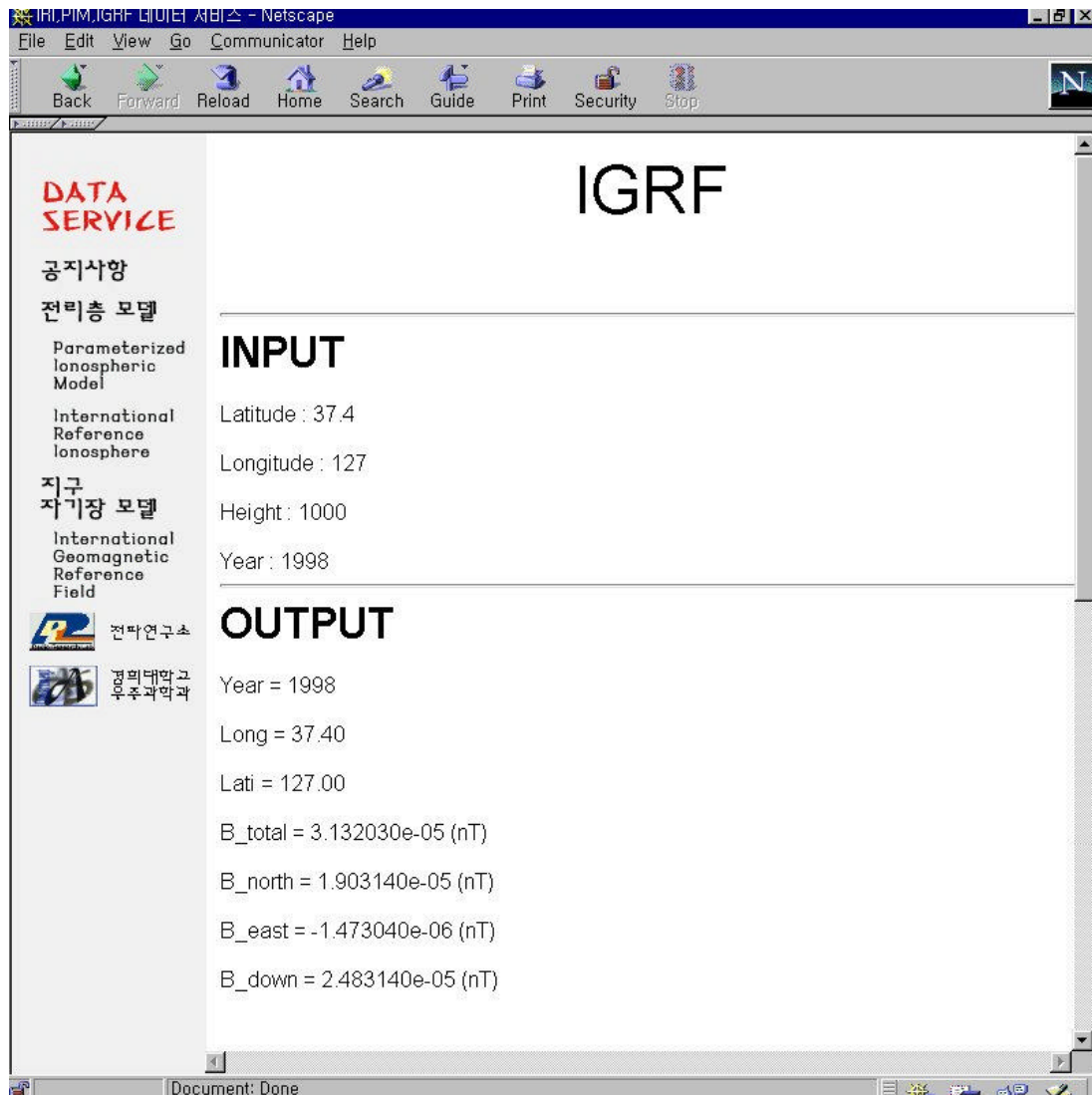


그림 7-18 1998년 안양(37.4 °N, 127 °E)위의 고도 1000km지점에서의 자기장 데이터

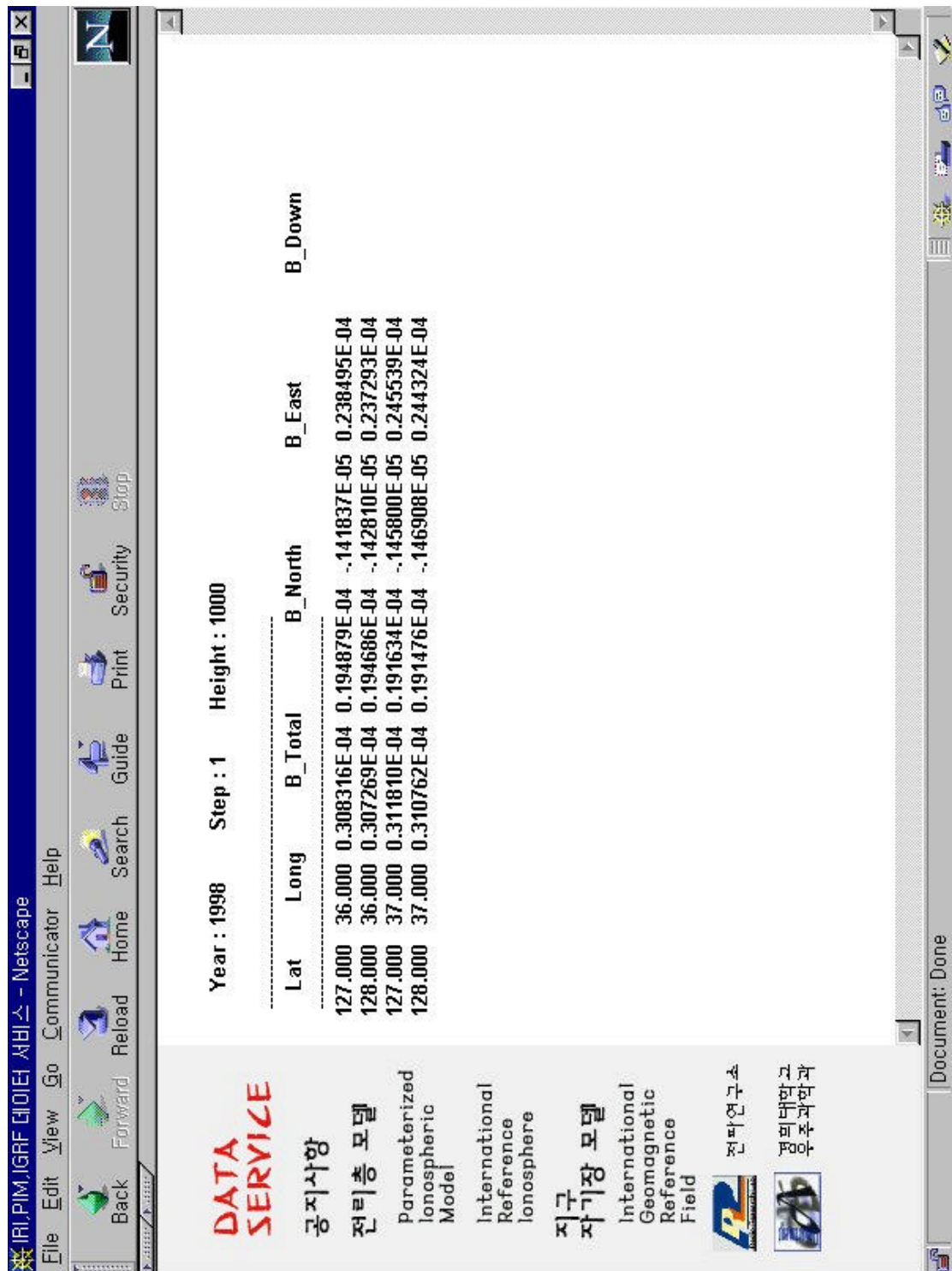


그림 7-19. 1998년 위도 30~40 °N, 경도 126~128 °E, 경위도 간격은 1°인 경우에, 고도 1000km에서의 자기장 데이터

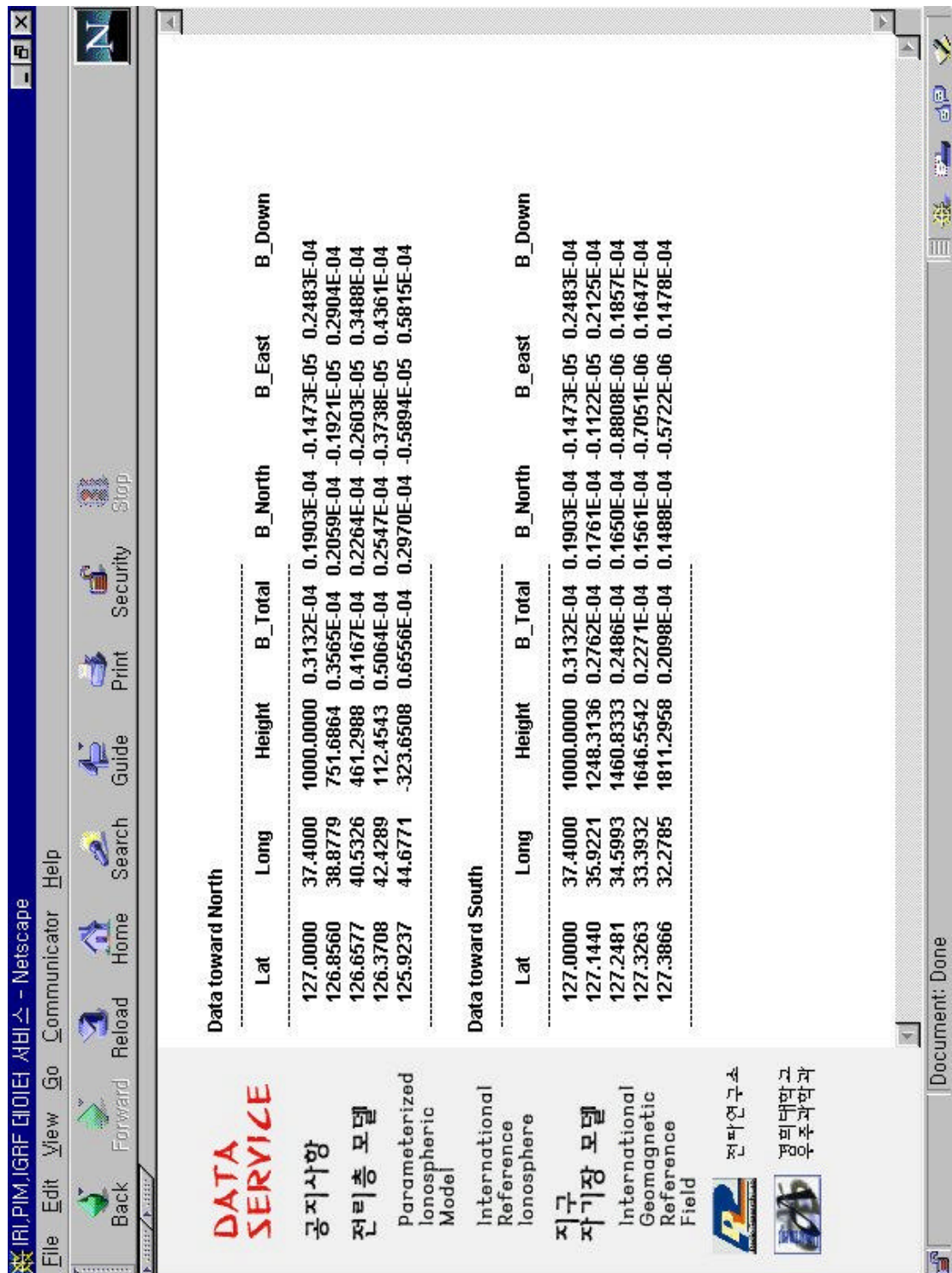


그림 7-20. 1998년 안양(37.4 °N, 127 °E)위의 고도 1000km지점을 지나는 자력선 데이터

제 6 절 요약

이 절에서는 IRI, PIM 그리고 IGRF의 CGI 프로그램과 이의 결과를 요약해 놓았다. 특히 본 연구에서는 이들 전리층의 전자밀도, 전자온도, 이온 온도, 중성입자온도 등과 임의 고도의 자기장 세기의 전 지구적인 분포도를 WEB에서 출력 받을 수 있는 프로그램을 개발하여 통신 환경에 많은 영향을 미치고 있는 이들 지역의 변화를 한눈에 볼 수 있도록 하였다. 현재 많은 웹 사이트에서 IRI, PIM, IGRF의 데이터를 제공하고 있다. 그러나 사용자의 필요에 부응하는 다양한 서비스를 제공하고 있지 않다. 본 연구에서 개발한 웹 사이트에서는 IRI와 PIM의 global map을 제공하고 있는데 지금까지 다른 웹에서는 local map만을 제공해 주었다. 이 global map은 지구 전체의 전리층의 전자밀도 분포를 한번에 볼 수 있어 매우 효과적이다. 또, IGRF의 경우 세계에서 몇 번째로 다양한 서비스를 제공하고 있으며 특히 임의 지점을 지나는 자력선 추적의 경우 세계에서 유일하게 서비스를 제공하고 있다.

제 8 장 결 론

태양으로부터 나오는 고에너지 입자들은 지구자기권과 결합하여 여러 가지 물리적 현상을 일으킨다. 이러한 현상은 지상 및 위성을 이용한 통신의 품질에도 영향을 주므로 통신의 품질개선을 위한 기초 연구로 활성화가 되어야 한다. 전리층은 지상근처의 대기와는 달리 구성입자들이 태양에너지를 흡수하여 일부 이온화되면서 생성된 전자와 이온들이 태양-지구간 우주환경의 변화에 따라 증가 또는 감소하면서 여러 가지 현상이 나타난다. 전리층에 대한 연구가 선진국을 중심으로 정보통신, 군사작전 및 첩보위성 이용의 원활한 운용을 위하여 많은 연구가 새롭게 진행되고 있다. 즉, 전리층의 변화 현상은 HF, VHF를 이용한 통신이외에도 GPS위성통신의 전파 지연을 발생시켜 정밀위치측정에 영향을 주고 있으며, 첩보위성과 통신위성과 같은 저궤도 위성은 급작스러운 전리층 전자밀도의 변화로 인하여 궤도가 변경되거나 위성체에 손상을 입히는 일도 발생하며 통신장애를 일으키기도 한다. 또한 21세기초는 태양활동이 극대가 되므로 지구주변의 환경에 커다란 변화가 예상되며 위성시대에 맞이하여 날로 증가하는 인공위성의 안정된 운용을 위하여 이의 연구가 반드시 필요하다. 지구 자기구는 태양 활동의 영향을 받아서 그 형태나 입자의 구성이 크게 변화한다. 이러한 변화는 다양한 물리적 현상을 일으키고 이로 인해서 우주전파환경은 직접 또는 간접적으로 많은 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 이러한 우주전파환경에 영향을 미치는 전리층, 지구자기의 여러 모델을 조사하였고, 그 중 대표적인 전리층의 경험적 모델인 IRI과 이론적 모델인 PIM, 또 지자기모델인 IGRF를 분석하였다. 각 모델의 프로그램 운용시 문제점을 분석하여 IDL 및 FORTRAN을 이용하여 각각의 분석 프로그램을 개발하고, 관측자료와의 비교분석을 통한 모델 프로그램을 검증하였다. 또, 세계 여러 나라의 웹사이트에서 제공하고 있는 PIM, IRI, IGRF의 데이터를 조사하였으며 전리층과 지자기 연구기관에는 어떤 것이

있는지 조사하였다. 또한 외국의 GUI(Graphic User Interface)프로그램 개발 현황을 조사하고, 전리층, 지자기 모델용 GUI 프로그램을 개발하여 WEB상에서 운용하였다.

전리층 및 지자기모델을 소개하고 있는 사이트는 웹 상에 여러 곳 존재하지만 그들의 서비스를 해 주는 곳은 세계적으로도 몇 군데 없었다. 특히 지구 전리층의 대표적인 모델이라고 할 수 있는 IRI(International Reference Ionosphere)는 NSSDC에서 CGI를 구현하고 있기는 하지만 일정고도 또는 경도, 위도에서의 프로파일만을 제공하여 지구 전체의 전자밀도 또는 여러 온도를 한 눈에 볼 수 있을 수는 없었다. 또, IRI와 다른 뚜렷한 특징을 가지고 있는 PIM(Parameterized Ionospheric Model)의 데이터를 제공해 주는 곳은 있으나, 소개를 하고 있는 사이트도 전 세계적으로 몇 군데에 지나지 않았다. 따라서 본 연구에서 개발한 웹사이트는 이런 서비스를 제공하고 있는 몇몇 안 되는 것 중 하나가 될 것이다.

자기구 모델 중 특히 IGRF의 경우 여러 나라의 웹에서 데이터 서비스를 제공하고 있다. IGRF는 임의의 한 점에서의 자기장 값을 계산하도록 만들어 졌으며 현재 많은 웹에서 이 서비스를 제공하고 있다. 그러나 NSSDC 에서는 위도에 따른 자기장 분포 등 다양한 서비스를 제공하고 있다. 더욱이 우리 나라에는 IGRF를 웹에서 제공하는 곳은 한곳도 없었으나 본 연구에서는 NSSDC에서 제공하는 서비스에 버금가는 다양한 서비스를 제공하고 있으며 그 중 임의 지점을 지나는 자력선에 대한 데이터는 세계에서 유일하게 데이터를 제공하고 있다.

개발한 웹사이트는 전리층 및 지자기 연구에 필요한 다양한 서비스를 제공하고 있으며 세계의 어느 웹사이트와 비교하여도 조금의 손색도 없는 국내 유일의 전리층, 지자기 데이터를 제공한다. 또, 제공되는 데이터 중 IRI와 PIM의 global map과 임의 지점을 지나는 자력선 데이터는 세계에서 유일하게 제공되는 것이며 본 연구의 가장 큰 성과라 할 수 있다.

참 고 문 헌

Anderson, D. N., J. M. Forbes, and M. Codrescu, A Fully Analytical, Low- and Middle-Latitude Ionospheric Model, J. Geophys. Res. 94, 1520, 1989.

Anderson, D. N., M. Mendillo, and B. Herniter, A Semi-Empirical, Low-Latitude Ionospheric Model, Air Force Geophysics Laboratory, Report AFGL-TR-85-0254, Hanscom AFB, Massachusetts, 1985.

Anderson, D. N., M. Mendillo, and B. Herniter, A Semi-Empirical Low-Latitude Ionospheric Model, Radio Sci. 22, 292, 1987.

Atlas of Ionospheric Critical Frequency (foF2) Obtained from Ionospheric Sounding Satellite-b Observation, Part 1, August to December 1978 (1979); Part 2, October 1978 to March 1979 (1980); Part 3, January to June 1979 (1981); Part 4, August to December 1979 (1983), Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications, Tokyo, Japan.

Batten, S., T. J. Fuller-Rowell, and D. Rees, A Numerical Data Base for VAX and Personal Computers for Storage, Reconstruction, and Display of Global Thermospheric and Ionospheric Models, Planet. Space Sci. 35, 1167, 1987.

Bent, R. B., S. K. Llewellyn, and M. K. Walloch, Description and Evaluation of the Bent Ionospheric Model, DBA Systems, Melbourne,

Florida, 1972.

Bent, R. B., S. K. Llewellyn, and P. E. Schmid, A Highly Successful Empirical Model for the Worldwide Ionospheric Electron Density Profile, DBA Systems, Melbourne, Florida, 1972.

Bent, R. B., S. K. Llewellyn, and P. E. Schmid, Ionospheric Refraction Corrections in Satellite Tracking, Space Research XII, 1186–1194, Akademie-Verlag, Berlin, 1972.

Bilitza, D., K. Rawer, and S. Pallaschke, Study of Ionospheric Models for Satellite Orbit Determination, Radio Sci. 23, 223, 1988.

Bilitza, D., K. Rawer, S. Pallaschke, C. M. Rush, N. Matuura, and W. R. Hoegy, Progress in Modeling the Ionospheric Peak and Topside Electron Density, Adv. Space Res. 7, #6, 5, 1987.

Bilitza, D., L. H. Brace and R. F. Theis, Modeling of Ionospheric Temperature Profiles, Adv. Space Res. 5, #7, 1985.

Bilitza, D., L. H. Brace and R. F. Theis, Modeling of Ionospheric Temperature Profiles, Adv. Space Res. 5, #7, 53, 1985.

Bilitza, D., N. M. Sheikh, and R. Eyfrig, A Global Model for the Height of the F2-Peak Using M(3000)F2 Values from the CCIR Numerical Map, Telecomm. J. 46, 549, 1979.

Blanc, M. and P. Amayenc, Seasonal Variations of the Ionospheric ExB

Drifts Above Santin on Quiet Days, J. Geophys. Res. 84, 2691, 1979

Brace, L. H., and R. F. Theis, An Empirical Model of the Interrelationship of Electron Temperature and Density in the Daytime Thermosphere at Solar Minimum, Geophys. Res. Lett. 5, 275, 1978

Brace, L. H., and R. F. Theis, Global Empirical Models of Ionospheric Electron Temperature in the Upper F-Region and Plasmasphere Based on *in situ* Measurement from the Atmosphere Explorer-C, ISIS 1, and ISIS 2 Satellites, J. Atmos. Terr. Phys., 43, 1317, 1981

Bradely, P. A., Mapping the Critical Frequency of the F2-Layer: Part 1-Requirements and Developments to Around 1980, Adv. Space Res. 10, #8, 47, 1990.

Ching, B. K. and Y. T. Chiu, A Phenomenological Model of Global Ionospheric Electron Density in the E-, F1-, and F2-Regions, J. Atmos. Terr. Phys. 35, 1615, 1973

Chiu, Y. T., An Improved Phenomenological Model of Ionospheric Density, J. Atmos. Terr. Phys. 37, 1563, 1975.

CIRA 1986, Part I: Thermosphere Model, D. Rees (ed.), Adv. Space Res. 8, #5-#6, 1988.

Danilov, A. D. and A. P. Yaichnikov, A New Model of the Ion Composition at 75 to 100km for IRI, Adv. Space Res. 5, 75, 1985

Danilov, A. D. and V. K. Semenov, Atmospheric Ion Composition Measurements Up to a Height of 170km, Space Research XIII, 493, Akademie-Verlag, Berlin, 1973

Danilov, A. D. and V. K. Semenov, Relative Ion Composition Model at Mid-Latitudes, J. Atmos. Terr. Phys. 40, 1093, 1978

Davies, K. (Chairman), Report of URSI Working Group G.5 on Mapping of Characteristics at the Peak of the F2-Layer, URSI Information Bulletin 243, 93, 1987.

Derr, V. E., Atmospheric Handbook: Atmospheric Data Tables Available on Computer Tape, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, Report UAG-89, Boulder, Colorado, 1984.

Evans, J. V., J. M. Holts, and R. H. Wand, Millstone Hill Incoherent Scatter Observations of Auroral Convection Over $60 \leq$ invariant latitude ≤ 75 , 1. Observing and Data Reduction Procedures, J. Geophys. Res. 84, 7059, 1979

Evans, J. V., J. M. Holts, W. L. Oliver and R. H. Wand, Millstone Hill Incoherent Scatter Observations of Auroral Convection Over $60 \leq$ invariant ≤ 75 , 2. Initial Results, J. Geophys. Res. 85, 41, 1980

Faermark, D. S., A restoration of 3-dimensional current systems in high-latitudes by the use of ground-based geomagnetic observations,

Geomagn. Aeron., 17, Engl. Transl., 114, 1977

Feldstein, Ya. I., On Morphology and Auroral and Magnetic Disturbances at High Latitudes, Geomagn. Aeron. 3, 138, 1963

Feldstein, Ya. L., A. E. Levitin, D. S. Faermark, R. G. Afonina, B. A. Belov and V. Y. Gaidukov, Electric fields and potential patterns in the high-latitude ionosphere for different situation in interplanetary space, Planet. Space Sci. 32, 907, 1984

Feldstein, Ya. L., and A. E. Levitin, Solar wind control of electric field and currents in the ionosphere, J. Geomagn. Geoelectr., 38, 1143, 1986

Foppiano, A. J., and P. A. Bradley, Day-to-Day Variability of Riometer Absorption, J. Atmos. Terr. Phys. 46, 689, 1984

Foppiano, A. J., and P. A. Bradley, Prediction of Auroral Absorption of High-Frequency Waves at Oblique Incidence, elecomm. J. 50, 547, 1983

Forbes, J. M., N. N. Anderson, M. Codrescu, and P. P. Batista, An Analytical/Empirical Model of the Middle and Low Latitude Ionosphere, Air Force Geophysics Laboratory, Report GL-TR-89- 0096, Hanscom AFB, Massachusetts, 1989.

Foster, J. C., J. M. Holt, R. G. Musgrove, and D. S. Evans, Ionospheric Convection Associated with Discrete Levels of Particle Precipitation, Geophys. Res. Lett. 13, 656, 1986

Fox, M. W., and L. F. McNamara, Improved World-Wide Maps of Monthly Median foF2, J. Atmos. Terr. Phys. 50, 1077, 1988.

Hardy, D. A., M. S. Gussenhoven, and D. Brautigam, A Statistical Model of Auroral Ion Precipitation, J. Geophys. Res. 94 , 370, 1989.

Hardy, D. A., M. S. Gussenhoven, and E. Holeman, A Statistical Model of the Auroral Electron Precipitation, J. Geophys. Res. 90, 4229, 1985

Hardy, D. A., M. S. Gussenhoven, and R. Raistrick, Statistical and Functional Representations of the Pattern of Auroral Energy Flux, Number Flux, and Conductivity, J. Geophys. Res. 92, 12275, 1987

Hedin, A. E. and G. Thuillier, Comparison of OGO 6 Measured Thermospheric Temperatures with the MSIS-86 Empirical Model, J. Geophys. Res. 93, 5965-5971, 1988

Hedin, A. E., A Revised Thermospheric Model Based on Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Data: MSIS-83, J. Geophys. Res. 88, 10170-10188, 1983.

Hedin, A. E., Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere, J. Geophys. Res. 96, 1159, 1991

Hedin, A. E., High Altitude Atmospheric Modeling, NASA Technical

Memorandum 100707, Scientific and Technical Information Office, Washington, D.C., 1988.

Hedin, A. E., J. E. Salah, J. V. Evans, C. A. Reber, G. P. Newton, N. W. Spencer, D. C. Kayser, D. Alcayde, P. Bauer, L. Cogger, and J. P. McClure, A Global Thermospheric Model Based on Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Data, J. Geophys. Res. 82, 2139-2156, 1977.

Hedin, A. E., MSIS-86 Thermospheric Model, J. Geophys. Res. 92, 4649, 1987.

Heelis, R. A., J. K. Lowell, R. W. Spiro, A Model of the High-Latitude Ionospheric Convection Pattern, J. Geophys. Res. 87, 6339, 1982

Heppner, J. P., and N. C. Maynard, Empirical High-Latitude Electric Field Models, J. Geophys. Res. 92, 4467, 1987

Heppner, J. P., Empirical Models of High-Latitude Electric Fields, J. Geophys. Res. 82, 1115, 1977

Hickey, M. P., An Improvement in the Integration Procedure Used in the Marshall Engineering Thermosphere Model, NASA CR-179389, Washington, D.C., 1988.

Hickey, M. P., The NASA Engineering Thermosphere Model, NASA CR-179359, Washington, D.C., 1988.

Hinteregger, H. E. and K. Fukui, Observational Reference and Model Data on Solar EUV from Measurements on AE-E, Geophys. Res. Lett. 8, 1147, 1981.

Holzworth, R. H., C. -I. Meng, Mathematical Representation of the Auroral Oval, Geophys. Res. Lett. 2, 377, 1975

Jacchia, L. G., Revised Static Models of the Thermosphere and Exosphere with Empirical Temperature Profiles, Smithson. Astrophys. Obs. Spec. Rept. No. 332, 1971.

Jacchia, L. G., Static Diffusion Models of the Upper Atmosphere with Empirical Temperature Profiles, Smithson. Astrophys. Obs. Spec. Rept. No. 170, Cambridge, Massachusetts, 1964. (B08448)

Jacchia, L. G., Thermospheric Temperature, Density, and Composition: New Models, Smithson. Astrophys. Obs. Spec. Rept. No. 375, 1977.

Johnson, D. L. and R. E. Smith, The MSFC/J70 Orbital Atmosphere Model and the Data Bases for the MSFC Solar Activity Prediction Technique, NASA TM-86522, Washington, D.C., 1985.

Jones, W. B. and D. L. Obitts, Global Representation of Annual and Solar Cycle Variation of foF2 Monthly Median 1954-1958, U.S. Institute for Telecommunication Sciences, Research Report OT/ITSRR 3, National Technical Information Service, COM 75-11143/AS, Springfield, Virginia, 1970

Jones, W. B. and R. M. Gallet, The Representation of Diurnal and Geographic Variations of Ionospheric Data by Numerical Methods, Telecomm. J. 29, 129, 1962, and 32, 18, 1965.

Kamide, Y., Y. Ishihara, T. L. Killeen, J. D. Carven, L. A. Frank, and R. A. Heelis, Combining Electric Field and Aurora I Observations from DE 1 and 2 with Magnetometer Records to Estimate Ionospheric Electromagnetic Quantities, J. Geophys. Res. 94, 6723, 1989

Labitzke, K., J. J. Barnett, and B. Edwards (eds.), Handbook MAP 16, SCOSTEP, University of Illinois, Urbana, 1985.

Lee, S., The Penn State Mark III Ionospheric Model: An IBM XT Computer Code, Pennsylvania State University, Scientific Report PSU CSSL 482, University Park, Pennsylvania, 1985.

Llewellyn, S. K. and R. B. Bent, Documentation and Description of the Bent Ionospheric Model, Air Force Geophysics Laboratory, Report AFCRL-TR-73-0657, Hanscom AFB, Massachusetts, 1973.

Matuura, N., M. Kotaki, S. Miyazaki, E. Sagawa, and I. Iwamoto, ISS-b Experimental Results on Global Distributions of Ionospheric Parameters and Thunderstorm Activity, Acta Astronautica 8, 527, 1981.

Nisbet, J. S., On the Construction and Use of a Simple Ionospheric Model, Radio Sci. 6, 437, 1977.

Oliver, W. L., J. M. Holt, R. H. Wand, and J. V. Evans, Millstone Hill Incoherent Scatter Observations of Auroral Convection Over $60 \leq$ invariant latitude ≤ 75 , 3, Average Patterns Versus Kp, J. Geophys. Res. 88, 5505, 1983

Papitashvili, V. O., A. N. Zaitzev, and Ya. I. Feldstein, Magnetic disturbances generated by the interplanetary magnetic field in the southern polar cap during the summer, Geomagn. Aeron., 23, Engl. Transl, 506, 1983

Papitashvili, V. O., B. A. Belov, D. S. Faermark, Ya. I., Feldstein, S. A. Golyshev, L. I. Gromova, and A. E. Levitin, Electric potential patterns in the northern and southern polar regions parameterized by the interplanetary magnetic field, J. Geophys. Res., 99, 13251, 1994

PIM 1.6 User Guide, Computational Physics Inc., 1997

Reiff, P. H., R. W. Spiro, and T. W. Hill, Dependence of Polar Cap Potential Drop on Interplanetary Parameters, J. Geophys. Res. 86, 7639, 1981

Rich, F. J. and N. C. Maynard, Consequences of Using Simple Analytical Functions for the High-Latitude Convection Electric Field, J. Geophys. Res. 94, 3687, 1989.

Richmond, A. D., M. Blanc, B. A. Emery, R. H. Wand, B. G. Fejer, R. F.

Woodman, S. Ganguly, P. Amayenc, R. A. Behnke, C. Calderon, and J. V. Evans, An Empirical Model of Quiet-Day Ionospheric Electric Fields at Middle and Low Latitudes, J. Geophys. Res. 85, 4658, 1980

Robinson, R. M., R. R. Vondrack, K. Miller, T. Dabbs, and D. A. Hardy, On Calculating Ionospheric Conductivities from the Flux and Energy of Precipitating Electrons, J. Geophys. Res. 92, 2565, 1987

Robinson, R. M., R. R. Vondrak, K. Miller, T. Dabbs, and D. Hardy, On Calculating Ionospheric Conductances from the Flux and Energy of Precipitating Electrons, J. Geophys. Res. 92, 2566

Rose, R. B., J. N. Martin, and P. H. Levine, MINIMUF-3: A Simplified HF MUF Prediction Algorithm, Naval Ocean Systems Center, Report 186, San Diego, Califor 1978.

Rose, R. B., MINIMUF: A Simplified MUF Prediction Program for Microcomputers, QST 66(12), 36, 1982.

Rush, C. M., Ionospheric Radio Propagation Models and Predictions-A Mini-Review, IEEE Trans. Antennas Propag. AP-34, 1163, 1986.

Rush, C. M., M. Fox, D. Bilitza, K. Davies, L. McNamara, F. Stewart, and M. PoKempner, Ionospheric Mapping: An Update of foF2 Coefficients, Telecomm. J. 56, 179, 1989.

Rush, C. M., M. PoKempner, D. N. Anderson, F. G. Stewart, and J.

Perry, Improving Ionospheric Maps Using Theoretically Derived Values of foF2, Radio Sci. 18 , 95, 1983.

Rush, C. M., M. PoKempner, D. N. Anderson, J. Perry, F. G. Stewart, and R. Reasoner, Maps of foF2 Derived from Observations and Theoretical Data, Radio Sci. 19, 1083, 1984.

Rush, C. M., M. PoKempner, D. N. Anderson, J. Perry, F. G. Stewart, and R. Reasoner, Maps of foF2 Derived from Observations and Theoretical Data, Radio Sci. 19, 1083, 1984.

Schmid, P., R. B. Bent, S. K. Llewellyn, G. Nesterczuk, and S. Rangaswamy, NASA-GSFC Ionospheric Correction to Satellite Tracking Data, Goddard Space Flight Center, Report X-591-73- 281, Greenbelt, Maryland, 1973.

Senior, C., D. Fortaine, G. Claudal, D. Alcayde, and J. Fontanari, Convection Electric Fields and Electrostatic Potentials Observed with the EISCAT Facility, Annales Geophysicae 8, 257, 1990CCIR Atlas of Ionospheric Characteristics, Comit Consultatif International des Radiocommunications, Report 340-4, International Telecommunications Union, Geneva, 1967.

Sojka, J. J., C. E. Rasmussen, and R. W. Schunk, An Interplanetary Magnetic Field Dependent Model of the Ionospheric Convection Electric Field, J. Geophys. Res. 91, 11281, 1986

Spenner, K., and R. Plugge, Empirical Model of Global electron Temperature Distribution Between 300 and 700km Based on Data from AEROS-A, J. Geophys. 46, 43 , 1979

Spiro, R. W., P. H. Reiff, and L. J. Maher, Precipitating Electron Energy Flux and Auroral Zone Conductances-An Empirical Model, J. Geophys. Res. 87, 1982

Teters, L. R., J. L. Lloyd, G. W. Haydon, and D. L. Lucas, Estimating the Performance of Telecommunication Systems Using the Ionospheric Transmission Channel-Ionospheric Communications Analysis and Prediction Program User's Manual, National Telecommunication and Information Administration, Report NTIA 83-127, Boulder, 1983.

Torr, D. G. et al., An Experimental and Theoretical Study of the Mean Diurnal Variation of O^+ , NO^+ , O_2^+ , N_2^+ Ions in the Mid-Latitude F1-Layer of the Ionosphere, J. Geophys. Res. 84, 3360, 1979.

U.S. Extension to the ICAO Standard Atmosphere, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1958.

U.S. Standard Atmosphere, 1962, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1962.

U.S. Standard Atmosphere Supplements, 1966, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1966.

U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office,

Washington, D.C., 1976.

Volland, H., A Model of the Magnetospheric Electric Convection Field, J. Geophys. Res. 83, 2695, 1978

Volland, H., Models of the Global Electric Fields Within the Magnetosphere, Am. Geophys. 31, 159, 1975

Volland, H., Semi-Empirical Models of Magnetospheric Electric Fields, pp. 261-280, in: Quantative Modeling of Magnetospheric Processes, W. P. Olson (ed), American Geophysical Union, Washington D.C

Wakai, N., and N. Matuura, Operation and Experimental Results of the Ionosphere Sounding Satellite-b, Acta Astronautica 7, 999, 1980.

표유선 외, 연구보고서, 전파연구소, 1997

이재진 외 6명, 1998, 중형과학로켓, KSR-II를 이용한 이온층 전자밀도 및 온도 분포 측정에 관한 연구, 한국우주과학회지, 15(2)

<http://www.crl.go.jp/overview/index.html>

<http://shnet1.stelab.nagoya-u.ac.jp/omosaic/crle.html>

<http://www.itu.int/>

<http://www.nerc-bas.ac.uk/public/uasd/versim.html>

<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/iagahome.html>

<http://digisonde.haystack.edu/>

<http://hyperion.haystack.edu/>

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/>

<http://www.ngdc.noaa.gov/>
<http://cost251.ictp.trieste.it/>
<http://www.cordis.lu/cost/>
<http://julius.ngdc.noaa.gov/>
<http://rsie.plh.af.mil/>
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/igrf.html>
<http://zenith.ngdc.noaa.gov:80/seg/noaatv/ngdc/eoinforma/noaatvstop23.html>
<http://zenith.ngdc.noaa.gov:80/seg/potfld/magmodel.shtml>
http://ion.le.ac.uk/cutlass/routines/mag_list.html
<http://www.ci.pwr.wroc.pl/cgi-bin/plcon/winHiso/fdd.gsfc.nasa.gov/IGRF.html>
<http://geomag.usgs.gov/>
http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models_home.html
<http://www.ngdc.noaa.gov/cgi-bin/seg/gmag/igrfpg.pl>
http://ub.nmh.ac.uk/gifs/igrf_form.html
<http://www.agso.gov.au/>
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/>
http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/magnetos/magnetic_index.html
<http://www.nerc-murchison.ac.uk/>
<http://web.ngdc.noaa.gov/>
<http://www.noaa.gov/>

부 록 I

본문 식(17)-(20)에서 정한 (σ, τ, ϕ) 좌표를 (x, y, z) 에 대해서 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= a\sigma z \\ y &= a\sqrt{\sigma^2-1}\sqrt{1-z^2}\cos\phi \\ z &= a\sqrt{\sigma^2-1}\sqrt{1-z^2}\sin\phi \end{aligned} \tag{i}$$

이때 scale factor h_σ, h_z, h_ϕ 는

$$h_\sigma^2 = a^2 \left\{ \tau^2 + (1-\tau^2) \frac{\sigma^2}{\sigma^2-1} \right\}$$

$$h_{\tau}^2 = a^2 \left\{ \sigma^2 + (\sigma^2 - 1) \frac{\tau^2}{1 - \tau^2} \right\} \quad (\text{ii})$$

$$h_{\phi}^2 = a^2 (\sigma^2 - 1) (1 - \tau^2)$$

으로 각각 주어진다. 식(i)에서 타원체의 공식은

$$\frac{x^2}{\sigma^2} + \frac{y^2}{\sigma^2 - 1} + \frac{z^2}{\sigma^2 - 1} = a^2 \quad (\text{iii})$$

이 됨을 알 수 있다. 위 좌표계에서 식(16)에 주어진 Laplacian 방정식 $\nabla^2 \gamma_s = 0$ 를 쓰면 다음 식으로 정리된다[Korn and Korn, 1961].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left\{ (\sigma^2 - 1) \frac{\partial \gamma_s}{\partial \sigma} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1 - \tau^2) \frac{\partial \gamma_s}{\partial z} \right\} \\ + \frac{\sigma^2 - \tau^2}{(\sigma^2 - 1)(1 - \tau^2)} \frac{\partial^2 \gamma_s}{\partial \phi^2} = 0 \end{aligned} \quad (\text{iv})$$

따라서 변수 분리법에 의한 γ_s 의 일반해는

$$\gamma_s = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_n^m(\sigma) P_n^m(\tau) \{ a_{nm} \cos m\phi + b_{nm} \sin m\phi \} \quad (\text{v})$$

으로 주어지며 이때 P_n^m 은 Associated Legendre함수이다. 수치계산을 위해서 n 은 유한값을 가져야하며 여기서 $n=1, 2, \dots, N$ 까지의 항만을 고려한다고 가정하자. 높은 차수일수록 낮은 오차를 갖게 되므로 절단할 수 있게 된다. 실제 자기구의 형태는 행성의 내부자기 능률축이 자오선 상에서 기울기를 갖고 있으므로 이에 해당되는 외부자기장의 비대칭형 자기장을 효율적으로 표현하기 위해 다음의 특정한 γ 해를 가정한다.

$$\gamma_{so} = \sum_{n=1}^N a_{0n} P_n(\sigma) P_n(\tau) \quad (\text{vi})$$

$$\gamma_{sl} = \sum_{n=1}^N a_{1n} P_n^1(\sigma) P_n^1(\tau) \sin \phi \quad (\text{vii})$$

여기서 γ_{so} 는 ϕ 에 무관한 x 에 대한 축대칭의 값을 갖을 경우이고 γ_{sl} 은 z 축에 축대칭값을 갖는 경우이다. 따라서 일반적인 기울기를 갖는 자기장은

$$\gamma_s = \gamma_{so} \sin \phi + \gamma_{sl} \cos \phi \quad (\text{viii})$$

으로 쓰게 된다. 이에 해당되는 식(16) $\nabla^2 \gamma_I = 0$ 을 만족하는 행성의 내부 자기장은 이중극자모델로 대체될 수 있다. 식(viii)와 마찬가지로 이중극자축이 적도면을 향하여 x 축에 있는 γ_{so} 와 z 축에 일치하는 γ_{sl} 의 조합으로 자오선 상에서 임의의 기울기를 가진 이중극자 자기장을 구할 수 있다.

$$\gamma_I = \gamma_{so} \sin \phi + \gamma_{sl} \cos \phi \quad (\text{ix})$$

즉, γ_{so} 의 내부자기장은 γ_{so} 에 의해 주어진 외부자기장과, γ_{sl} 은 γ_{sl} 과 각각 중첩되어 타원체로 가정된 경계면에서 수직성분은 사라지고 나란한 자기장 성분만이 남게된다. 이러한 경계조건은 본문 식(15)에서 주어졌으며 이를 식 (viii), (ix)의 경우에 확장시키면

$$\frac{\partial \gamma_{so,sl}}{\partial \sigma} = - \frac{\partial \gamma_{so,sl}}{\partial \tau} = F_{0,1}(\tau, \phi) \quad (\text{x})$$

의 함수를 얻게 된다. 내부자기장은 위에서 가정한 바와 같이 이중극자이므로 규격화시킨 γ_{so} , γ_{sl} 은

$$\gamma_{so} = \frac{x}{R^3}$$

$$\gamma_{11} = \frac{z}{R^3} \quad (\text{xi})$$

$$\begin{aligned} R^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \\ &= a^2(\sigma_0^2 + \tau^2) + 2a(x_0 - a)\sigma_0\tau + x_0(x_0 - 2a) \end{aligned}$$

으로 주어지며 따라서 식(xi)를 식(x)에 대입하면 F 함수는 경계면에서 다음과 같이 주어진다.

$$F_0 = \frac{a}{R^3} \left\{ \tau - 3(x_0 - a + a\sigma_0\tau) \frac{(a\sigma_0 + 2(x_0 - a))}{R^2} \right\} \equiv f_0(\tau)$$

$$F_1 = \frac{a}{R^3} \{ (\sigma_0^2 - 1)(1 - \tau^2) \}^{1/2} \left\{ \frac{\sigma}{\sigma_0^2 - 1} - \frac{3a}{R^2} (a\sigma_0 + 2(x_0 - a)) \right\} \sin \phi \equiv f_1(\tau) \sin \phi \quad (\text{xii})$$

경계조건 식(x)에서 γ_s 를 정하기 위해 식(vi), (vii), (xii)을 식(x)에 대입하여 a_{0n} 과 a_{1n} 계수를 구하면 다음과 같다.

$$a_{0n} = \frac{n+1/2}{P_n(\sigma_0)} \int_{-1}^1 f_0(\tau) P_n(\tau) d\tau$$

$$a_{1n} = \frac{n+1/2}{n(n+1)P_n^1(\sigma_0)} \int_{-1}^1 f_0(\tau) P_n^1(\tau) d\tau$$

여기서 $\sigma \geq 1$ 이므로 $P_n^1(\sigma_0) = \sqrt{\sigma^2 - 1} P_n'(\sigma)$ 의 관계식을 만족한다.

부 록 II

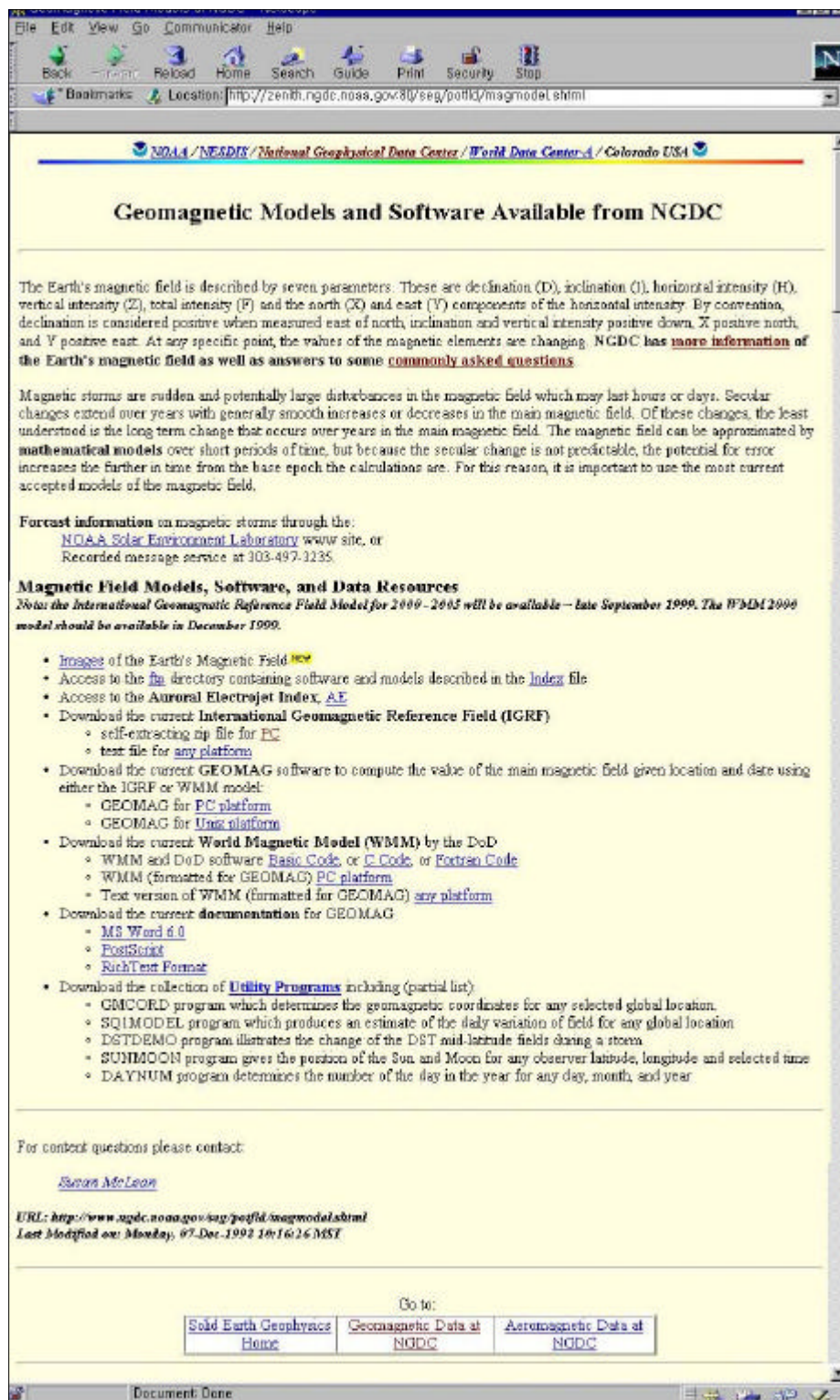
본문에서 정의된 타원체 좌표계에서 $\sigma_0=1.17$, $x_0=3.71$, $a=37$ 를 각각 가정한 경우 부록 1에서 유도된 a_{0n} , a_{1n} 을 계산하면 $n=1, 2, \dots, 20$ 항까지의 값은 각각 다음과 같다.

n	a_{0n}	a_{1n}
1	-4.1499239377916e-3	-2.9972944800363e-3
2	-3.4817437005218e-3	-8.486726649588e-4
3	-2.0864354491158e-3	-3.1982740046375e-4
4	-9.8952855947478e-4	-1.0999202279021e-4
5	-3.8195860755758e-4	-3.3253213115623e-5
6	-1.1700535300038e-4	-8.3782335366753e-6
7	-2.4291992112967e-5	-1.4868116123447e-6
8	1.9964058244268e-7	6.157572944163e-10
9	3.4832489080346e-6	1.5608402600713e-7
10	2.2708876568224e-6	9.139184947934e-8
11	1.0273783270835e-6	3.7102473835483e-8
12	3.7533907217808e-7	1.2098465302446e-8
13	1.1352295942906e-7	3.1739342014915e-9
14	2.7428343235314e-8	5.839100988046e-10
15	4.5909557627734e-9	8.0806500982122e-12
16	2.6431700746767e-10	-5.6357091688934e-11
17	2.3402256002581e-11	-3.3636686978008e-11
18	2.179124765811e-10	-1.3673847494596e-11
19	2.667147994611e-10	-4.4347458606901e-12
20	2.1621229348254e-10	-1.1477128048626e-12

부 록 Ⅲ

IGRF 프로그램 제공 웹 사이트

I. NGDC



II. GSFC


IGRF - Netscape

File Edit View Go Communicator Help

Back Forward Reload Home Search Guide Print Security Stop

Bookmarks Location: <http://www.cipwr.wisc.pl/cgi-bin/plcon/winHis/ldd.getc.nasa.gov/IGRF.html>

HTTP/1.1 200 OK Date: Tue, 19 Jan 1999 10:54:00 GMT Server: Apache/1.3.1 (Unix) Last-Modified: Tue, 04 Aug 1998 12:35:44 GMT ETag: "19b7-1450-35c70020" Accept-Ranges: bytes Content-Length: 5200 Connection: close Content-Type: text/html



International Geomagnetic Reference Field (1995)

Overview

The International Geomagnetic Reference Field (IGRF) model is the empirical representation of the Earth's magnetic field recommended for scientific use by the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). The IGRF model represents the main (core) field without external sources. They employ the usual spherical harmonics expansion of the scalar potential in geocentric coordinates. The IGRF model coefficients are based on all available data sources including geomagnetic measurements from observations, ships, aircraft and satellites.

The IGRF-95 model consists of coefficient sets for the epochs 1945 to 1995 in steps of 5 years and the first time derivatives of the coefficients for the time period 1995 to 2000. During the 5-year intervals between consecutive models, linear interpolation is recommended. The IGRF coefficients for 1945, 1950, ..., 1985, 1990 are definitive coefficient sets, meaning that no further revisions are anticipated. The latest model includes the definitive set of coefficients for 1990 (IGRF90) and the preliminary set of coefficients for 1995 (IGRF95) including the coefficients for the time regression from 1995 to 2000.

In combination with the IGRF coefficient sets different subroutines have been used to determine the components of the magnetic field vector and the L-value at a given location. The NSSDC version uses the subroutines FELDG (magnetic field vector) and SHELLG (L-shell) developed by G. Kluge at the European Space Operations Center (ESOC). His use of inverse cartesian coordinates simplifies the computation. The IGRF subroutines were developed by A. Zande of the U.S. Geological Survey (USGS).

The program BILCAL produces tables of the geomagnetic field strength, vector components (B-abs, B-north, B-east, B-down, declination, inclination), equatorial/planar field strength (B0), dipole moment, and L-value in latitude, longitude (geodetic), altitude, or year (declined). The IGRF/FELDG/SHELLG software package is available from NSSDC on tape, or on floppy disk for use on IBM compatible Personal Computers.

FORTTRAN Source Code

- * main program [ldcal.f90](#)
- * subroutines, functions [shells.f90](#)

Geomagnetic Field Model Coefficients

- * preliminary coefficients for 1995 [igrf95.dat](#)
- * extrapolated coefficients for 1995-2000 [igrf95e.dat](#)
- * definitive coefficients for 1990 [dgrf90.dat](#)
- * definitive coefficients for 1985 [dgrf85.dat](#)
- * definitive coefficients for 1980 [dgrf80.dat](#)
- * definitive coefficients for 1975 [dgrf75.dat](#)
- * definitive coefficients for 1970 [dgrf70.dat](#)
- * definitive coefficients for 1965 [dgrf65.dat](#)
- * definitive coefficients for 1960 [dgrf60.dat](#)
- * definitive coefficients for 1955 [dgrf55.dat](#)
- * definitive coefficients for 1950 [dgrf50.dat](#)
- * definitive coefficients for 1945 [dgrf45.dat](#)

Demonstration Programs

- * BILCAL user manual with examples [bilcal.log](#)
- * documentation [aareadme.doc](#)
- * additional [information](#) and [software](#)

REFERENCES

1. Peddie, H. W., International Geomagnetic Reference Field the third generation, *J. Geomagn. Geoelectr.* 34, 309-326, 1982
2. Kluge, G., Direct computation of the magnetic shell parameter, *Computer Phys. Communications* 3, 31-35, 1972
3. International Geomagnetic Reference Field Revision 1987, *J. Geomagn. Geoelectr.* 39, 771-779, 1987 and *ECG Trans.* 69, 559, 1988
4. Langel, R. A., D. R. Barraclough, D. J. Kerridge, V. P. Golovkov, T. J. Sabaka, and R. H. Estes, Definitive IGRF models for 1945, 1950, 1955, and 1960, *J. Geomagn. Geoelectr.* 40, 645-702, 1988
5. Langel, R. A., International Geomagnetic Reference Field, 1991
6. Revision, *J. Geomagn. Geoelectr.* 43, 1007-1012, 1991

For more information, please contact Mark.Woodard@553.1

Document Done

부 록 IV

※ 임의의 한점에서의 자기장 값 계산을 위한 IGRF 주함수와 부함수

<주함수>

```

c      INTEGER    EGNR,AGNR,OGNR
      REAL  LATI,LONGI,MLAT,MLONG,HEIGHT,BABS,BNORTH,BEAST,BDOWN,K,
&      BABS1,BNORTH1,BEAST1,BDOWN1,DIST,LATIRAD,B
&      slati,elati,slongi,elongi
      integer j
      CHARACTER ITEXT(4)*4
c      CHARACTER LTEX*4
c      CHARACTER    NAME*11
c      LOGICAL      NOTBEG
      DIMENSION DEN(8),TEMP(2),XVAR(4),VARE(4),VARB(4),A(73,37),TR(6)
&      ,C(10),CC(13)
      COMMON/MODEL/NAME,NMAX,TIME,G(144)
      COMMON/GENER/UMR,ERA,AQUAD,BQUAD
      COMMON BLANK
      DATA ITEXT/'LATI','LONG','H/km','YEAR'/,
&  LATI,LONGI,HEIGHT,YEAR,IVAR,BVAR,EVAR,SVAR/45.1,293.1,100,
&  1985.5,3,100,1000,100/,VARB/-90.0,-360.0,0.0,1940.0/,
&  VARE/90.0,360.0,30000.0,2000.0/,JAGNR/2/
C-- ERA: EARTH RADIUS FOR NORMALIZATION OF CARTESIAN COORDINATES
C-- EREQU, ERPOL: MAJOR AND MINOR HALF AXIS FOR EARTH ELLIPSOID
C--      AS RECOMMENDED BY INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION

ERA=6371.2
EREQU=6378.16
ERPOL=6356.775
AQUAD=EREQU*EREQU
BQUAD=ERPOL*ERPOL
UMR=ATAN(1.0)*4./180.
```

```

ALOG2=ALOG(2.)
ISTART=1

open(6,file='data1.txt',status='unknown')
  read(6,10)year,lati,longi,height
10   format(f6.1,2(1x,f8.4),1x,f10.4)

OPEN(18,FILE='point.dat',STATUS='UNKNOWN')

  CALL FELDCOF(YEAR,DIMO)
  CALL FELDG(LATI,LONGI,HEIGHT,BNORTH,BEAST,BDOWN,BABS)
  CALL SHELLG(LATI,LONGI,HEIGHT,DIMO,XL,ICODE,BAB1)
  B=BABS/(10000.0)
    bnorth1=bnorth/(10000.0)
    beast1=beast/(10000.0)
      bdown1=bdown/(10000.0)

  WRITE(18,12) year,lati,LONGI,B,bnorth1,beast1,bdown1
12   FORMAT(f6.1,2(2X,F8.4),1(2X, e12.6),3(2X,e12.6))

STOP
END

```

부 록 V

※ 임의의 고도의 임의 지역의 자기장 값 계산을 위한 IGRF 주함수

<주함수>

```

c      INTEGER    EGNR,AGNR,OGNR
      REAL  LATI,LONGI,MLAT,MLONG,HEIGHT,BABS,BNORTH,BEAST,BDOWN,K,
&      BABS1,BNORTH1,BEAST1,BDOWN1,DIST,LATIRAD,B
&      slati,elati,slongi,elongi
      integer j
      CHARACTER ITEXT(4)*4
c      CHARACTER LTEX*4
c      CHARACTER    NAME*11
c      LOGICAL      NOTBEG
      DIMENSION DEN(8),TEMP(2),XVAR(4),VARE(4),VARB(4),A(73,37),TR(6)
&      ,C(10),CC(13)
      COMMON/MODEL/NAME,NMAX,TIME,G(144)
      COMMON/GENER/UMR,ERA,AQUAD,BQUAD
      COMMON BLANK
      DATA ITEXT/'LATI','LONG','H/km','YEAR'/,
&  LATI,LONGI,HEIGHT,YEAR,IVAR,BVAR,EVAR,SVAR/45.1,293.1,100,
&  1985.5,3,100,1000,100/,VARB/-90.0,-360.0,0.0,1940.0/,
&  VARE/90.0,360.0,30000.0,2000.0/,JAGNR/2/
C-- ERA: EARTH RADIUS FOR NORMALIZATION OF CARTESIAN COORDINATES
C-- EREQU, ERPOL: MAJOR AND MINOR HALF AXIS FOR EARTH ELLIPSOID
C--      AS RECOMMENDED BY INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION

      ERA=6371.2
      EREQU=6378.16
      ERPOL=6356.775
      AQUAD=EREQU*EREQU

```



```

BQUAD=ERPOL*ERPOL
UMR=ATAN(1.0)*4./180.
ALOG2=ALOG(2.)
ISTART=1

open(6,file='data2.txt',status='unknown')
  read(6,10)year,height,slati,elati,slongi,elongi,j
10  format(f6.1,1x,f10.4,4(1x,f8.4),1x,i2)

OPEN(18,FILE='se1000.DAT',STATUS='UNKNOWN')

DO 102 LATI=slati,elati,j
  DO 202 LONGI=slongi,elongi,j
    CALL FELDCOF(YEAR,DIMO)
    CALL FELDG(LATI,LONGI,HEIGHT,BNORTH,BEAST,BDOWN,BABS)
    CALL SHELLG(LATI,LONGI,HEIGHT,DIMO,XL,ICODE,BAB1)
    B=BABS/(10000.0)
    bnorth1=bnorth/(10000.0)
    beast1=beast/(10000.0)
    bdown1=bdown/(10000.0)
    WRITE(18,12) LONGI,LATI,B,bnorth1,beast1,bdown1
12  FORMAT(2(2X,F7.3),1(2X,e12.6),3(2X,e12.6))
202  CONTINUE
102  CONTINUE

STOP
END

```

부 록 VI

※ 임의의 한점을 지나는 자력선 계산을 위한 IGRF 주함수

<주함수>

```

c    INTEGER    EGNR,AGNR,OGNR
      REAL  LATI,LONGI,MLAT,MLONG,HEIGHT,BABS,BNORTH,BEAST,BDOWN,K,
&      BABS1,BNORTH1,BEAST1,BDOWN1,DIST,LATIRAD,N_R,N_EQU,L_EQU,
&      dlati,dlongi,dheight,dbas1,dbnorth1,dbeast1,dbdown1,
&      dlatirad,dbabs,dbnorth,dbeast,dbdown,ddist
      CHARACTER ITEXT(4)*4
c    CHARACTER LTEX*4
c    CHARACTER    NAME*11
c    LOGICAL      NOTBEG
      DIMENSION DEN(8),TEMP(2),XVAR(4),VARE(4),VARB(4),A(73,37),TR(6)
&      ,C(10),CC(13)
      COMMON/MODEL/NAME,NMAX,TIME,G(144)
      COMMON/GENER/UMR,ERA,AQUAD,BQUAD
      COMMON BLANK
      DATA ITEXT/'LATI','LONG','H/km','YEAR'/,
&  LATI,LONGI,HEIGHT,YEAR,IVAR,BVAR,EVAR,SVAR/45.1,293.1,100,
&  1985.5,3,100,1000,100/,VARB/-90.0,-360.0,0.0,1940.0/,
&  VARE/90.0,360.0,30000.0,2000.0/,JAGNR/2/
C-- ERA: EARTH RADIUS FOR NORMALIZATION OF CARTESIAN COORDINATES
C-- EREQU, ERPOL: MAJOR AND MINOR HALF AXIS FOR EARTH ELLIPSOID
C--      AS RECOMMENDED BY INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION

      ERA=6371.2
      EREQU=6378.16

```

```

ERPOL=6356.775
AQUAD=EREQU*EREQU
BQUAD=ERPOL*ERPOL
UMR=ATAN(1.0)*4./180.
ALOG2=ALOG(2.)
ISTART=1

open(6,file='data1.txt',status='unknown')
    read(6,10)year,longi,lati,height
10  format(f6.1,1x,f8.4,1x,f8.4,1x,f10.4)

OPEN(19,FILE='lineup.DAT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(20,file='linedn.dat',status='unknown')
    J=0
    k=100000000.
    DIST=HEIGHT+EREQU

CALL FELDCOF(YEAR,DIMO)
CALL FELDG(LATI,LONGI,HEIGHT,BNORTH,BEAST,BDOWN,BABS)
CALL SHELLG(LATI,LONGI,HEIGHT,DIMO,XL,ICODE,BAB1)

    Babs1=BABS/(10000.0)
    Bnorth1=Bnorth/(10000.0)
    Beast1=Beast/(10000.0)
    Bdown1=Bdown/(10000.0)

    WRITE(19,12)LONGI,LATI,HEIGHT,Babs1,Bnorth1,Beast1,Bdown1
12  FORMAT(3(2x,f12.4),4(2X,e11.4))

    dlati=lati
    dlongi=longi
    dheight=height
    ddist=dheight+erequ

```

```

CALL FELDCOF(YEAR,DIMO)
CALL FELDG(dLATI,dLONGI,dHEIGHT,dBNORTH,dBEAST,dBDOWN,dBABS)
CALL SHELLG(dLATI,dLONGI,dHEIGHT,DIMO,XL,ICODE,BAB1)

dBabs1=dBABS/(10000.0)
dBnorth1=dBnorth/(10000.0)
dBeast1=dBeast/(10000.0)
dBdown1=dBdown/(10000.0)

WRITE(20,13)dLONGI,dLATI,dHEIGHT,dBabs1,dBnorth1,dBeast1,dBdown1
13  FORMAT(3(2x,f12.4),4(2X,e11.4))

DO WHILE (HEIGHT.GE.0.0)
    QQ=1.
    LATIRAD=LATI*3.141592/180.

LONGI=QQ*K*BEAST/DIST/100000./COS(LATIRAD)*180./3.141592+LONGI
    LATI=QQ*K/DIST/100000.*BNORTH*180./3.141592+LATI
    HEIGHT=QQ*K*(-1.*BDOWN)/100000.+HEIGHT

CALL FELDCOF(YEAR,DIMO)
CALL FELDG(LATI, LONGI, HEIGHT, BNORTH, BEAST, BDOWN, BABS)
CALL SHELLG(LATI, LONGI, HEIGHT, DIMO, XL, ICODE, BAB1)

Babs1=BABS/(10000.0)
Bnorth1=BNORTH/(10000.0)
Beast1=BEAST/(10000.0)
Bdown1=BDOWN/(10000.0)
DIST=HEIGHT+ERequ

WRITE(19,14) LONGI,LATI,HEIGHT,Babs1,Bnorth1,Beast1,Bdown1
14  FORMAT(3(2x,f12.4),4(2X,e11.4))

```

```

ENDDO

do while(dheight.ge.0.0)
  dLATIRAD=dLATI*3.141592/180.

      dLONGI=-QQ*K*dBEAST/dDIST/100000./COS(dLATIRAD)*180./3.141592
&      +dLONGI
  dLATI=-QQ*K/dDIST/100000.*dBNORTH*180./3.141592+dLATI
  dHEIGHT=-QQ*K*(-1.*dBDOWN)/100000,+dHEIGHT

  CALL FELDCOF(YEAR,DIMO)
  CALL FELDG(dLATI,dLONGI,dHEIGHT,dBNORTH,dBEAST,dBDOWN,dBABS)
  CALL SHELLG(dLATI,dLONGI,dHEIGHT,DIMO,XL,ICODE,BAB1)

  dBabs1=dBABS/(10000.0)
  dBnorth1=dBNORTH/(10000.0)
  dBeast1=dBEAST/(10000.0)
  dBdown1=dBDOWN/(10000.0)

  ddist=dheight+erequ

  WRITE(20,15)dLONGI,dLATI,dHEIGHT,dBabs1,dBnorth1,dBeast1,dBdown1
15  FORMAT(3(2x,f12.4),4(2X,e11.4))
ENDDO

STOP

END

```

부 록 VII

< IGRF CGI 프로그램들 >

```

/*****
    IGRF CGI 프로그램 - FIELDCLC
    < 임의 지점을 지나는 자력선 데이터를 출력하는 경우 >
    *****/
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "cgic.h"
#include "gd.h"
#include "gdfonts.h"
#include "gdfontl.h"
#define NUM 20
int cgiMain(void)
{
    char szYear[NUM],szHeight[NUM],szLati[NUM],szLong[NUM];
    FILE* fp;
    char ch;
    cgiFormStringNoNewlines("year4",szYear,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("alti4",szHeight,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("lati4",szLati,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("long4",szLong,NUM);
    fp = popen("/usr5/httpd/cgi-bin/mgkim/igrf/field.exe","w");
    fprintf(fp,"%s\n%s\n%s\n%s\n",szYear,szLong,szLati,szHeight);
    pclose(fp);

    cgiHeaderContentType("text/html");
    fprintf(cgiOut,"<HTML><BODY BGCOLOR = #FFFFFF>\n");

```

```

        fprintf(cgiOut,"<PRE><H5>\n");
        fprintf(cgiOut,"Data toward North\n");
        f p r i n t f ( c g i O u t , "
-----\
n");

        fprintf(cgiOut,"
        Lat
        Long
        Height
        B_Total      B_North      B_East      B_Down\n");
        f p r i n t f ( c g i O u t , "
-----\
n");

        fp = fopen("lineup.dat","r");
        while((ch = getc(fp)) != EOF)
            fprintf(cgiOut,"%c",ch);
        fclose(fp);
        f p r i n t f ( c g i O u t , "
-----\
n\n");

        fprintf(cgiOut,"Data toward South\n");
        f p r i n t f ( c g i O u t , "
-----\
n");

        fprintf(cgiOut,"
        Lat
        Long
        Height
        B_Total      B_North      B_east      B_Down\n");
        f p r i n t f ( c g i O u t , "
-----\
n");

        fp = fopen("linedn.dat","r");
        while((ch = getc(fp)) != EOF)
            fprintf(cgiOut,"%c",ch);
        fclose(fp);
        f p r i n t f ( c g i O u t , "
-----\
n");

        fprintf(cgiOut,"</H5></PRE>\n");
        fprintf(cgiOut,"</HTML></BODY>\n");
        return 0;
}

```

/*****

IGRF CGI 프로그램 - LOCAL.C

< 임의 고도, 임의 지역의 자기장 데이터 >

```

*****/
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "cgic.h"
#include "gd.h"
#include "gdfonts.h"
#include "gdfontl.h"
#define NUM 20
int cgiMain(void)
{
    char szYear[NUM],szHeight[NUM],szLatS[NUM],szLatE[NUM],szLongS[NUM];
    char szLongE[NUM],szGrid[NUM];
    char szExe[200],szFileName[200];
    char ch;
    FILE* fp;
    cgiFormStringNoNewlines("year3",szYear,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("alti3",szHeight,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("lati_start3",szLatS,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("lati_end3",szLatE,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("long_start3",szLongS,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("long_end3",szLongE,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("step3",szGrid,NUM);
    sprintf(szFileName,"%s_%s_%s_%s.dat",szYear,szHeight,szLatS,szLongS);
    sprintf(szExe,"/usr5/httpd/cgi-bin/mgkim/igrf/local.exe > %s",szFileName);
    fp = popen(szExe,"w");

    fprintf(fp,"%s\n%s\n%s\n%s\n%s\n%s\n%s\n%s\n",szYear,szHeight,szLatS,szLatE,szLongS,szL
ongE,szGrid);
    pclose(fp);
    cgiHeaderContentType("text/HTML");
    fprintf(cgiOut,"<HTML><BODY BGCOLOR=#FFFFFF>\n");
    fprintf(cgiOut,"<PRE><H5>\n");
    fprintf(cgiOut,"
                                Year   :   %s\t   Step   :   %s   \tHeight   :
%s\n\n",szYear,szGrid,szHeight);
    fprintf(cgiOut,"
f      p      r      i      n      t      f      (      c      g      i      O      u      t      ,      "
-----\n");
    fprintf(cgiOut,"
                                Lat           Long           B_Total           B_North
                                B_East           B_Down\n");
    fprintf(cgiOut,"
f      p      r      i      n      t      f      (      c      g      i      O      u      t      ,      "
-----\n");

```



```

        fp = fopen(szFileName,"r");

        while((ch = getc(fp)) != EOF)
            fprintf(cgiOut,"%c",ch);
        fclose(fp);
        fprintf(cgiOut,"</H5></PRE>\n");
        fprintf(cgiOut,"</BODY></HTML>\n");
        return 0;
    }

/*****
    IGRF CGI 프로그램 - POINTCGL.C
    < 임의 지점에서의 자기장 데이터 : >
*****/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "cgic.h"
#include "gd.h"
#include "gdfonts.h"
#include "gdfontl.h"
#define NUM 20
int cgiMain(void)
{
    char szYear[NUM],szHeight[NUM],szLati[NUM],szLong[NUM];
    FILE* fp;
    float fYear,fLong,fLati,fBTotal,fBNorth,fBEast,fBDown;
    cgiFormStringNoNewlines("year1",szYear,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("alti2",szHeight,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("lati1",szLati,NUM);
    cgiFormStringNoNewlines("long1",szLong,NUM);
    fp = popen("/usr5/httpd/cgi-bin/mgkim/igrf/point.exe > point.data","w");
    fprintf(fp,"%s\n%s\n%s\n%s\n",szYear,szLati,szLong,szHeight);
    pclose(fp);
    fp = fopen("point.data","r");
    fscanf(fp,"%f",&fYear);
    fscanf(fp,"%f",&fLong);
    fscanf(fp,"%f",&fLati);
    fscanf(fp,"%f",&fBTotal);
    fscanf(fp,"%f",&fBNorth);
    fscanf(fp,"%f",&fBEast);

```

```

fscanf(fp,"%f",&fBDown);
fclose(fp);
cgiHeaderContentType("text/html");
fprintf(cgiOut,"<HTML><HEAD><TITLE>IGRF</TITLE></HEAD>\n");
fprintf(cgiOut,"<BODY BGCOLOR=#ffffff>\n");

fprintf(cgiOut,"<CENTER><FONT                                SIZE                                =
10>IGRF</FONT></CENTER><BR>\n");
fprintf(cgiOut,"<HR>");
fprintf(cgiOut,"<FONT SIZE = 6><B>INPUT </B></FONT><BR>\n");
fprintf(cgiOut,"<p>Latitude   : %s<BR>\n",szLati);
fprintf(cgiOut,"<p>Longitude  : %s<BR>\n",szLong);
fprintf(cgiOut,"<p>Height     : %s<BR>\n",szHeight);
fprintf(cgiOut,"<p>Year       : %s<BR>\n",szYear);
fprintf(cgiOut,"<HR>");

fprintf(cgiOut,"<FONT SIZE = 6><B>OUTPUT</B></FONT><BR>\n");

fprintf(cgiOut,"<p>Year = %d<BR>\n",(int)fYear);
fprintf(cgiOut,"<p>Long = %.2f<BR>\n",fLong);
fprintf(cgiOut,"<p>Lati = %.2f<BR>\n",fLati);
fprintf(cgiOut,"<p>B_total = %e (nT)<BR>\n",fBTotal);
fprintf(cgiOut,"<p>B_north = %e (nT)<BR>\n",fBNorth);
fprintf(cgiOut,"<p>B_east = %e (nT)<BR>\n",fBEast);
fprintf(cgiOut,"<p>B_down = %e (nT)<BR>\n",fBDown);
fprintf(cgiOut,"</BODY></HTML>\n");
return 0;
}

```

부록 VIII

< IRI 입출력 소스 파일 >

[illegible]

International Reference Ionosphere

[illegible]

dimension out(11,100),oar(35,100)

logical jf(17), in(4)

CHARACTER*4 IMZ(8),stex

CHARACTER*5 ITEXT(8)

DATA IMZ /' 'GEOD','GEOD',3*' ','YEAR','L.T.'/,

$$\& \quad \text{ITEXT/' H/KM'},$$

```
& 'LATI','LONG','YEAR','MONTH','DAY','DAYOF','HOUR'/
```

```
open(9, file='out.txt')
```

[illegible]

c 각종 데이터를 읽음

c iy2 : 연도

[illegible]

```
if(hour.lt.0.) goto 2
```

[illegible]

[illegible]

- 246 -

```

ENDIF
xcor=vbeg
do 1234 li=1,numstp
c
c      special output: peak densities and altitudes
c
      IF(PIKTAB.eq.1) THEN
        iyp1=-1
        if(oar(1,li).ge.0.) iyp1=int(oar(1,li)/1.e6+.5)
        iyp2=-1
        if(oar(3,li).ge.0.) iyp2=int(oar(3,li)/1.e6+.5)
        iyp3=-1
        if(oar(5,li).ge.0.) iyp3=int(oar(5,li)/1.e6+.5)
        iyp4=-1
        if(oar(7,li).ge.0.) iyp4=int(oar(7,li)/1.e6+.5)
        if(oar(3,li).lt.0.1) oar(4,li)=0.
        GOTO 1234
      ENDIF
      IF(PIKTAB.eq.2) THEN
        yp1=-1.
        if(oar(1,li).ge.0.) yp1=sqrt(oar(1,li)/1.24e10)
        yp2=-1.
        if(oar(3,li).ge.0.) yp2=sqrt(oar(3,li)/1.24e10)
        yp3=-1.
        if(oar(5,li).ge.0.) yp3=sqrt(oar(5,li)/1.24e10)
        yp4=-1.
        if(oar(7,li).ge.0.) yp4=sqrt(oar(7,li)/1.24e10)
        if(oar(3,li).lt.0.1) oar(4,li)=0.0
        GOTO 1234
      ENDIF
c
c normal output
c

```


사용자가 일정 경위도에서의 프로파일을 원하는 경우

cc

```
else

    ivar=1
    vbeg=hx2
    vend=ending
    vstp=step
    jm=0
    iut=1

    iy=iy2
    imd=-imd2
    hour=hour2
    hx=hx2
    xlat=lati2
    xlon=long2

    numstp=int(abs(vend-vbeg)/abs(vstp))+1
    if(numstp.gt.100) numstp=100

    call iri_web(jm,jf,xlat,xlon,iy,imd,iut,hour,
&             hx,ivar,vbeg,vend,vstp,out,oar)

    agnr=6             !output unit number
    stex=imz(ivar)
    if(jm.gt.0) stex='GEOM'
    if(iut.gt.0) stex='UT'
    PIKTAB=0
    IF(IVAR.NE.1) THEN
        IF(HX.LT.1.0) PIKTAB=1
```



```

                IF(HX.LT.0.0) PIKTAB=2
ENDIF

xcor=vbeg
do 1235 li=1,numstp

c
c special output: peak densities and altitudes
c
    IF(PIKTAB.eq.1) THEN
        iyp1=-1
        if(oar(1,li).ge.0.) iyp1=int(oar(1,li)/1.e6+.5)
        iyp2=-1
        if(oar(3,li).ge.0.) iyp2=int(oar(3,li)/1.e6+.5)
        iyp3=-1
        if(oar(5,li).ge.0.) iyp3=int(oar(5,li)/1.e6+.5)
        iyp4=-1
        if(oar(7,li).ge.0.) iyp4=int(oar(7,li)/1.e6+.5)
        if(oar(3,li).lt.0.1) oar(4,li)=0.
    ENDIF
    IF(PIKTAB.eq.2) THEN
        yp1=-1.
        if(oar(1,li).ge.0.) yp1=sqrt(oar(1,li)/1.24e10)
        yp2=-1.
        if(oar(3,li).ge.0.) yp2=sqrt(oar(3,li)/1.24e10)
        yp3=-1.
        if(oar(5,li).ge.0.) yp3=sqrt(oar(5,li)/1.24e10)
        yp4=-1.
        if(oar(7,li).ge.0.) yp4=sqrt(oar(7,li)/1.24e10)
        if(oar(3,li).lt.0.1) oar(4,li)=0.0
        GOTO 1235
    ENDIF
c

```

c normal output

c

```
if(ivar.eq.1) oar(1,li)=oar(1,1)
i1=-1
if(out(1,li).ge.0.) i1=int(out(1,li)/1.e6+.5)
i2=-1
if(out(2,li).ge.0.) i2=int(out(2,li)+.5)
i3=-1
if(out(3,li).ge.0.) i3=int(out(3,li)+.5)
i4=-1
if(out(4,li).ge.0.) i4=int(out(4,li)+.5)
i5=-1
if(out(5,li).ge.0.) i5=int(out(5,li)+.5)
i6=-1
if(out(6,li).ge.0.) i6=int(out(6,li)+.5)
i7=-1
if(out(7,li).ge.0.) i7=int(out(7,li)+.5)
i8=-1
if(out(8,li).ge.0.) i8=int(out(8,li)+.5)
i9=-1
if(out(9,li).ge.0.) i9=int(out(9,li)+.5)
i10=-1
if(out(10,li).ge.0.) i10=int(out(10,li)+.5)
i11=-1
if(out(11,li).ge.0.) i11=int(out(11,li)+.5)
```

```
if(select .eq. 0) write(9,*) xcor, i1
if(select .eq. 1) write(9,*) xcor, i2
if(select .eq. 2) write(9,*) xcor, i3
if(select .eq. 3) write(9,*) xcor, i4
```

1235 xcor=xcor+vstp

```

endif

endfile(9)
close(9)

2    stop
    end

```

부 록 IX

< PIM 구성 파일 중 주요 파일인 PIM.for >

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC
C
C                                PIM.FOR
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CC

    BLOCK DATA ITERATS
C
C  VERSION

```

```

C    1.6    14-February-1997
C
C  MODIFICATIONS
C  ----Person----- Date----- Description-----
C    L. Brown      25-Sep-1995  1.3
C                                Removed references to INCLUDE file
C                                "cinit.inc" since it is no longer used.
C                                Removed initialization of variables ESCLLAT,
C                                FSCCLAT, USUE, USUF, and ONLYOP since they
C                                have been removed from common block INDIRECT.
C    L. Brown      23-Jan-1996  1.3 ==> 1.4
C                                Variables MSAT, NSAT, SATLAT, and SATLON
C                                renamed to MPR, NPR, PRLAT, and PRLON in
C                                common block GRID.
C                                Variables RADLAT and RADLON renamed to
OBSLAT
C                                and OBSLON in common block GRID.
C    L. Brown      14-Feb-1997  1.4 ==> 1.6
C                                Added points to altitude grid stored in
C                                array ZOUT in common block GRID to include
C                                plasmaspheric altitudes.
C
C    INCLUDE 'aindex.inc'
C    INCLUDE 'grid.inc'
C    INCLUDE 'indirect.inc'
C
C    DATA statements for AINDEX.INC
C
C    DATA ATR/24.4, 2.12/
C    DATA A/20.9, 1.7,13.4, 1.7,
6      20.9, 1.7,13.4, 1.7/
C
C    DATA statements for GRID.INC
C
C    D                      A                      T                      A
GGLAT0,GGLON0,GGLATF,GGLONF,DLAT,DLON,NUMLAT,NUMLON,NALT/
1 -89.,5.,89.,355.,2.,10.,90,36,80/
C
C    DATA NPR/1/
C    DATA PRLAT/MPR*0./
C    DATA PRLON/MPR*0./

```

C

DATA OBSLAT/0./
DATA OBSLON/0./
DATA NAZ/1/
DATA SAZ/0./
DATA DAZ/1./
DATA NEL/1/
DATA SEL/0./
DATA DEL/1./

C

DATA ZOUT/90.,95.,100.,105.,110.,115.,120.,125.,130.,
1 135., 140.,145.,150.,160.,170.,180.,190.,200.,210.,220.,
2 230.,240.,250.,260.,270.,280.,290.,300.,320.,340.,360.,
3 380.,400.,450.,500.,550.,600.,650.,700.,750.,
4 800.,850.,900.,1000.,1100.,1200.,1300.,1400.,1500.,1600.,1700.,
& 1800.,1900.,2000.,2100.,2200.,2300.,2400.,2500.,3000.,3500.,
& 4000.,4500.,5000.,5500.,6000.,6500.,7000.,7500.,8000.,8500.,
& 9000.,9500.,10000.,12500.,15000.,17500.,20000.,22500.,25000.,
5 20*0.0/

C

C

C

DATA statements for INDIRECT.INC

C

1 2 3 4 5 6

DATA F10P7,EKP,BY,KP(0),KP(1),KP(2)/

C

1 2 3 4 5 6

1 145., 2.0, 1.0, 1.9, 2.0, 2.1/

C

END

C

BLOCK DATA LOWF

C

C VERSION

C

1.2 27-April-1995

C

C MODIFICATIONS

C

-----Person-----

-----Date-----

-----Description-----

C

L. Brown 27-Apr-1995 1.2

C

Changed initialization of NF10P7L from 3

C

to 2.

C

Removed initialization of NKPL since NKPL has

```

C                                been removed from common block LOWER.
C
C      INCLUDE 'lower.inc'
C      DATA F10P7L,NF10P7L/70.,130.,210.,2/
C      END
C      BLOCK DATA LOWE
C
C
C  VERSION
C    1.2    27-April-1995
C
C  MODIFICATIONS
C
C                                -----Person-----      -----Date-----
C      -----Description-----
C    L. Brown      27-Apr-1995  1.2
C
C                                Corrected initialization of KPLE(1) from 2.
C                                to 1.
C                                Changed initialization of NF10P7LE from 3
C                                to 2.
C                                Changed initialization of NKPLE from 3 to 2.
C
C      INCLUDE 'low_e.inc'
C      DATA F10P7LE,KPLE,NF10P7LE,NKPLE/70.,130.,210.,1.,3.5,6.,2,2/
C      END
C      BLOCK DATA MIDF
C
C
C  VERSION
C    1.2    27-April-1995
C
C  MODIFICATIONS
C
C                                -----Person-----      -----Date-----
C      -----Description-----
C    L. Brown      27-Apr-1995  1.2
C
C                                Changed initialization of NF10P7M from 3
C                                to 2.
C                                Changed initialization of NKPM from 3 to 2.
C
C      INCLUDE 'midlat.inc'
C      DATA F10P7M,KPM,NF10P7M,NKPM/70.,130.,210.,1.,3.5,6.,2,2/
C      END
C      BLOCK DATA HIGH
C

```

```

C  VERSION
C    1.2    27-April-1995
C
C  MODIFICATIONS
C                                     -----Person-----      -----Date-----
C -----Description-----
C    L. Brown      27-Apr-1995  1.2
C                                     Changed initialization of NF10P7H from 3
C                                     to 2.
C                                     Changed initialization of NKPH from 3 to 2.
C
C    INCLUDE 'usuarr.inc'
C    DATA F10P7H,KPH,NF10P7H,NKPH/70.,130.,210.,1.,3.5,6.,2,2/
C    END
C
C    BLOCK DATA REGS
C    INCLUDE 'precip.inc'
C    INCLUDE 'region_b.inc'
C
C    DATA for PRECIP.INC
C
C    DATA LAT,MLT,ERG,LAT0,MLT0,RAD0,A0,A1,B1,MLATR,MLTR,VALTR,
C    1 MLATR0,MLTR0,RADTR0/414*0.0/
C
C
C
C
C    DATA statments for REGION_B.INC
C
C    DATA CTH,VTH/24.4,20.9,13.4,2.12,1.7,1.7/
C    DATA CAB,VAB/-10.5,2.7,0.8,0.0,.267,-.267/
C    DATA CB,PB/3.88,0.0,3.0,2.73,0.0,0.0/
C    DATA CBB,VBB/11.5,2.633333333,0.0,-0.08333333333/
C    DATA QBB,AB(0),BB(0)/0.0,0.00506666666,-10.5,11.5/
C
C    END
C    PROGRAM PIM
C
C  PURPOSE
C    PIM is the unadjusted parameterized model. Its purpose is to reconstruct
C    the profiles from the databases, merge the profiles according to F10P7,
C    Kp, and location, and return this as output.

```

```

C      (1) Get date and geophysical parameters from user
C      (2) Call parameterized models for output
C      (3) obtain EDP's from the parameterized models and return
C          same to calling program.
C
C  METHOD
C      The user will change the parameters as he/she wishes, and the
C      model uses the inputs to determine the ratio of profiles to merge
C
C  INPUT PARAMETERS
C      NAME      TYPE      ARRAY  description
C
C  OUTPUT PARAMETERS
C      NAME      TYPE      ARRAY  description
C
C  LOCAL VARIABLES
C      NAME      TYPE      ARRAY      description
C      A          REAL      (40,40,3,2)  The empirical orthogonal functions
C      CAPA        REAL      (0:8,17,40,3,2) The coefficients for the orthogonal functions
C      DAY          INTEGER                      The day of the year.
C      GRDTYP      INTEGER                      The switch for the type of output grid:
C                                          [0] Rectangular latitude/longitude grid
C                                          [1] Latitude/longitude pairs
C                                          [2] Azimuth/elevation (ground-based)
C      MLAT        REAL                      Corrected Geomagnetic latitude
C      MLON        REAL                      Corrected Geomagnetic longitude
C      MLT         REAL                      Corrected Geomagnetic local time
C      OUTFILE      CHARACTER*32              The name of the output grid file.
C      OUTTYP      INTEGER                      The switch for type of output:
C                                          [0] Critical frequencies and heights and
C                                          vertical TEC
C                                          [1] Vertical EDPs
C                                          [2] Vertical EDPs, critical frequencies and
C                                          heights, and vertical TEC
C                                          [3] No output
C      UT          REAL                      Universal time in seconds
C      UTHR        REAL                      Universal time in hours
C      YEAR        INTEGER                    The calendar year
C      Z           REAL      (40,3,2)        The values of the altitudes at index
C
C  SUBROUTINES CALLED

```



```

C   GETDAT:  obtains all real time data, sorts it according to
C             its nature (direct or indirect) and writes two files
C             (DIRECT.DATA and INDIRECT.DATA);  returns number of
C             records in each file.
C   OUTPUT:  Puts the station and grid outputs to disk
C   READ_DBASES  Reads the parameterized model and URSI coefficients
C               databases
C
C   FUNCTIONS CALLED
C   NONE
C
C   FILES ACCESSED
C   NONE
C
C   AUTHOR
C   Robert E. Daniell
C   Computational Physics, Inc.
C   240 Bear Hill Road  Suite 202A
C   Waltham, MA 02154  USA
C   (617)-487-2250
C
C   VERSION
C   1.6   14-February-1997
C
C   MODIFICATIONS
C
C               -----Person-----           -----Date-----
C   -----Description-----
C   L. Brown      30-Jan-1995   1.0.9 ==> 1.1
C                                     Local variable IGRIDSW has been renamed to
C                                     OUTTYP.
C                                     Local variable GRDTYP has been added.
C                                     The argument lists of routines GETDAT and
C                                     OUTPUT have changed.
C   L. Brown      27-Apr-1995   1.1 ==> 1.2
C                                     The description of local variable GRDTYP
C                                     has been modified to include the radar
C                                     output grid type.
C                                     The version number and date are displayed
C                                     to the default output device.
C   L. Brown      25-Sep-1995   1.2 ==> 1.3
C                                     Updated the version number and version

```

```

C                                     date.
C                                     Removed argument BATCH from the call to
C                                     routine GETDAT.
C                                     Removed local variable BATCH since it is no
C                                     longer used.
C                                     Removed INCLUDE statement for "cinit.inc"
C                                     since it is no longer used.
C                                     Replaced the call to routine USER_INPUT
C                                     with a call to routine READ_DBASES.
C                                     Added INCLUDE statement for "dpath.inc".
C                                     Removed FORMAT statements 1000 and 1100
C                                     since they are not used.
C      L. Brown      23-Jan-1996   1.3 ==> 1.4
C                                     Updated the version number and version
C                                     date.
C                                     Changed name of output grid type
C                                     "satellite track" to
C                                     "latitude/longitude pairs".
C                                     Changed name of output grid type
C                                     "radar azimuth/elevation" to
C                                     "azimuth/elevation (ground-based)".
C      L. Brown      30-Sep-1996   1.4 ==> 1.5
C                                     Updated the version number and version
C                                     date.
C      L. Brown      14-Feb-1997   1.5 ==> 1.6
C                                     Updated the version number and version
C                                     date.
C
C REFERENCES
C
C SPECIAL CONSTANTS
C
C Parameters and common blocks:
C
C      INCLUDE 'dpath.inc'
C      INCLUDE 'grid.inc'
C      INCLUDE 'indirect.inc'
C      INCLUDE 'logicuni.inc'
C
C Declarations:
C      INTEGER YEAR,DAY,OUTTYP,GRDTYP,MONTH
C      REAL UT,UTHR

```

```

      CHARACTER*32 OUTFILE
C
C
C  Display the version number and date
C
c    PRINT *, ' *****'
c    PRINT *, ' = PIM 1.6   14-February-1997 ='
c    PRINT *, ' *****'
C
C  Get the date, solar and geophysical parameters, and the altitude
C  and latitude longitude grid for the output.
C
      CALL GETDAT(YEAR,DAY,MONTH,UTHR,OUTFILE,OUTTYP,GRDTYP)
      UT = 3600.*UTHR
C
C  Initialize variables
C
      CALL INITPR
C
C  Read the parameterized model and URSI coefficients databases
C
      C              A              L              L
      READ_DBASES(DAY,MONTH,UTHR,PUSU,PMID,PLOW,PLME,PAWS,JOPEN)
C
C  Do the output grid.
C
      CALL OUTPUT(YEAR,DAY,UT,OUTTYP,GRDTYP,OUTFILE,LUTEXT,'N')
C
c    STOP
c    'PIM successfully completed.'
      END
C

```

본 보고서는 전파연구소의 공동연구과제인 태양활동에 의한 전리층, 지자기 변화에 관한 연구를 수행한 결과를 제시한 것입니다. 따라서 이 보고서의 내용은 정보통신부나 전파연구소의 공식적인 견해가 아닌 단순한 참고 자료이며 본 연구내용을 무단공개 또는 타인에게 제공해서는 않됨을 밝혀 둡니다.