

## 다목적 실용위성 1호로 측정된 저위도 상부 이온층의 전자 온도와 전자 밀도의 경도 및 계절별 변화

김희준<sup>1†</sup>, 박선미<sup>1</sup>, 이재진<sup>1</sup>, 이은상<sup>1</sup>, 민경욱<sup>1</sup>, 한원웅<sup>2</sup>, 남육원<sup>2</sup>, 진호<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>한국과학기술원 물리학과  
<sup>2</sup>한국천문연구원

### LONGITUDINAL AND SEASONAL VARIATIONS OF THE ELECTRON TEMPERATURE AND DENSITY IN THE LOW-LATITUDE TOPSIDE IONOSPHERE OBSERVED BY KOMPSAT-1

Heejun Kim<sup>1†</sup>, Sun Mie Park<sup>1</sup>, Jae-Jin Lee<sup>1</sup>, Ensang Lee<sup>1</sup>,  
Kyoung-Wook Min<sup>1</sup>, Wonyong Han<sup>2</sup>, Uk-Won Nam<sup>2</sup>, and Ho Jin<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Dept. of Physics, KAIST, 373-1 Guseong, Yuseong, Daejeon 305-701, Korea  
<sup>2</sup>Korea Astronomical Observatory, 61-1 Hwaam, Yuseong, Daejeon 305-348, Korea  
E-mail: woodcar@space.kaist.ac.kr

(Received April 18, 2002; Accepted May 23, 2002)

#### 요 약

다목적 실용위성 1호는 고도 685km, 98°의 궤도 경사각을 가지며, 탑재된 이온층 측정 센서(Ionospheric Measurement Sensor)로 전자 온도와 전자 밀도를 측정하였다. 이 관측 자료로부터 22:50LT인 밤 시간에 +60° ~ -60°의 저위도 지역에서 자기적으로 안정한 상태(Kp < 4)의 계절별 전자 밀도와 전자 온도의 분포를 구하였다. 관측 결과, 전자 온도와 전자 밀도의 분포는 계절과 경도에 따라 변화를 나타냈다. 대체로 전자 밀도는 자기 적도 부근에서 높아지고, 전자 온도는 낮아지는 경향을 보였다. 봄, 가을에는 전자 밀도와 온도 모두 자기 적도를 중심으로 대칭적으로 분포하였다. 그러나 여름에는 전체적으로 북반구 쪽으로 이동하여 전자 밀도의 극대점과 전자 온도의 극소점이 자기 적도 북쪽에 위치하였고, 겨울에는 이와 반대의 변화를 나타냈다. 또한, 각 계절에서 경도에 따라라도 전자 온도와 밀도 분포의 차이를 보였다. 이러한 차이가 생기는 원인은 경도와 계절에 따라 달라지는 F층의 중성 바람이 이온층 플라즈마에 영향을 주는 것에 의해 설명될 수 있다. 이 관측에서 얻은 전자 온도와 밀도의 분포는 IRI95 모델을 이용해 구한 분포와 차이를 보였다.

#### ABSTRACT

The electron density and temperature in the topside ionosphere are observed by the Ionosphere Measurement Sensor (IMS) onboard the KOMPSAT-1, which has the sun-synchronous orbit of the altitude of 685 km and the orbital inclination of 98° with a descending node at 22:50LT. Observations have been analyzed to determine the seasonal variations of the electron density and temperature in the low-latitude region. Only the night-time (22:50LT) behavior on magnetically quiet days (Kp < 4) has been examined. Observations show a strong longitudinal and seasonal variation.

†corresponding author

Generally, in the dip equator the density increases and the temperature decreases. In equinox the latitudinal distributions of the electron density and temperature are quite symmetric about the dip equator. However, the local maximum of the density and the local minimum of the temperature shift toward the Northern hemisphere in summer solstice but the Southern hemisphere in winter solstice. Such variations are due to the influences of field-aligned plasma transport induced by F region neutral wind. Compared with the IRI95 model, the observed electron density and temperature show significant differences from those predicted by the IRI95 model.

*Keywords:* ionospheric structure, ionospheric soundings

## 1. 서 론

고도 300km 이상의 상부 이온층에 대한 연구는 1970년대부터 위성 관측과 모델링을 통해 이루어져 왔다. 이 지역에서는 중성 기체의 밀도가 높아 중성 기체의 이동(중성 바람, neutral wind)이 플라즈마의 이동에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Heelis & Hanson 1980). 이런 플라즈마 이동의 효과는 자기장이 거의 수평 방향인 자기 적도를 중심으로 하는 저위도 지역에서 두드러지게 나타나며, 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다(Venkatraman & Heelis 1999a).

저위도 이온층에서 플라즈마 온도는 자기 적도에서 조금 벗어난 곳에서 크게 감소하여 골(trough)을 형성하는데, 이 현상을 적도이상(equator anomaly)이라 부른다. 이것은 플라즈마가 자기력선을 따라 이동할 때 일어나는 단열 가열/냉각에 의한 영향으로 알려져 있다(Balan et al. 1997, Venkatraman & Heelis 1999b). 한편, 전자와 이온의 밀도는 자기 적도 부근에서 크게 증가하는데, 이는 자기 적도 부근에서 일어나는 위쪽 방향의  $E \times B$  drift에 의해 일어난다는 연구 결과가 발표되었다(Vannaroni et al. 1999). 이러한 플라즈마 온도와 밀도 분포는 계절에 따라, 그리고 경도에 따라 차이를 보였다. 또, 자기 활동이 심한 경우 이온층에도 교란이 일어나 플라즈마 온도와 밀도의 분포가 크게 달라졌다(Burke & Maynard 2000).

본 연구에서는 다목적 실용위성 1호(아리랑 1호)가 운용 중인 고도 685km의 상부 이온층에서 전자 온도와 밀도 분포의 계절별 변화를 알아본다. 다목적 실용위성 1호는 지방시(local time)가 일정한 태양동기궤도에서 공전하기 때문에 일정한 고도에서 동일한 지방시의 이온층의 상태를 관측할 수 있고, 따라서 동일한 지방시에서 이온층의 전지구적 분포를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 자기적으로 안정한 때의 이온층에서 전자 온도와 밀도의 전지구적 분포를 구하고, 이들의 계절별 변화를 알아본다. 또한, 이온층에 대한 표준 모델로 사용되고 있는 IRI95 모델과 관측 결과를 비교한다. IRI 모델은 이상적인 상태에서는 관측 결과와 잘 일치하나 태양 극대기에는 잘 일치하지 않고(Oyama 1994), 적도 이상이나 South Atlantic magnetic anomaly는 예측하지 못하는 것으로 알려져 있다(Dabas et al. 2000). 본 연구에서 이용한 이온층 관측은 태양 극대기 중에 이루어졌으며, IRI 모델과의 비교를 통해 태양 극대기 시에 보이는 IRI 모델의 문제점을 제시한다.

## 2. 관 측

다목적 실용위성 1호는 1999년 12월 21일에 발사됐으며, 고도 685km, 궤도 경사각 98°, 강교점(descending node)을 22:50LT에 통과하는 태양동기궤도를 공전하고 있다. 우주환경 관측을 위한 탑재체로 Space Physics Sensor(SPS)가 탑재되어 있고, 이는 고에너지 입자 검출기(High Energy Particle Detector; HEPD)와 이온층 측정 센서(Ionospheric Measurement Sensor; IMS)로 구성되어 있다. 이온층 측정 센서는 Langmuir probe(LP)와 Electron temperature probe(ETP)로 이루어져 있다. 본 연구에서는 LP 자료를 사용하였다. LP는 IV 특성 곡선을 측정하여 전자 온도, 전자 밀도, 및 이온 밀도를 구하며, 4초의 샘플링 주기를 갖는다. 전자 밀도는  $10^4 \sim 10^6/\text{cm}^3$  범위를 측정할 수 있고, 해상도는  $10^3/\text{cm}^3$ 이다. 전자 온도는  $0 \sim 10^4$  K 범위를 측정할 수 있고, 해상도는 1K이다. LP 관측은 하루에 14 시간 동안 약 9번의 공전에 대해 수행되었다.

본 연구에서는 위성이 강교점 아래에 있을 때, 즉 22:50LT인 밤 시간 동안 관측된 자료를 사용하였고, 위도  $-60^\circ \sim 60^\circ$ 인 중, 저위도 지역만을 고려하였다. 또한, 자기 활동에 의한 변화를 배제하기 위해 자기적으로 안정한 상태인  $K_p < 4$ 인 때에 관측한 자료만을 고려하였다. 각 계절별 변화를 보기 위해 각 계절을 춘분, 추분, 하지, 동지를 기준으로 2달 간의 기간으로 분류하였다. 즉, 가을은 2000년 8월 15일부터 11월 5일까지, 겨울은 2000년 11월 23일부터 2001년 1월 21일까지, 봄은 2001년 2월 21일부터 4월 21일까지, 여름은 2001년 5월 21일부터 7월 21일까지로 나누었고, 각 기간 사이에 관측된 자료를 위, 경도 모두  $3^\circ$  간격으로 나누어 평균을 구하였다. 가을의 경우 관측 자료가 적어서 다른 계절에 비해 20일 정도 더 날짜를 넓게 잡았다. 자기 위도 기준으로  $\pm 40^\circ$  이내인 중위도와 저위도에서 전자 온도와 밀도의 통계적 오차는 각각  $\pm 43$  K,  $0.02 \times 10^5/\text{cm}^3$  정도였다.

## 3. 결 과

### 3.1 계절에 따른 변화

그림 1은 전자 밀도의 분포를 계절별로 나타낸 것이다. 실선은 자기 적도를 나타낸 것이고, 자료가 없는 부분은 사선으로 나타내었다. 전체적으로 봄과 가을은 서로 비슷한 분포를 보이지만, 여름과 겨울에는 뚜렷한 차이가 나타난다. 봄과 가을에는 자기 적도를 따라 전자 밀도가 증가하고, 대체로 자기 적도를 중심으로 대칭적인 분포를 보인다. 반면에 아프리카 남쪽(경도  $30^\circ$ , 위도  $-35^\circ$  부근)에 전자 밀도가 크게 감소하는 영역이 존재한다. 겨울에는 전자 밀도가 증가하는 영역이 전체적으로 자기 적도의 남쪽으로 이동하는 경향을 보인다. 특히, 남태평양에서 남아메리카에 걸쳐 전자 밀도가 높게 증가한다. 반면에 북반구의 중위도 지역에 걸쳐 전자 밀도가 크게 감소하는 영역이 나타난다. 여름에는 겨울과 반대로 전자 밀도가 증가하는 영역이 전체적으로 자기 적도의 북쪽으로 이동하는 경향을 보인다. 북대서양과 아프리카 북부에 걸쳐 전자 밀도가 높게 증가하고, 아프리카 남단에 나타나던 저밀도 영역이 저위도 지역까지 크게 확장하여 남반구의 대부분에 걸쳐 전자 밀도의 감소가 나타난다.

그림 2는 전자 온도의 분포를 계절별로 나타낸 것이다. 전자 밀도와 마찬가지로 봄과 가을에는 서로 비슷하지만, 여름과 겨울에는 뚜렷한 차이가 보인다. 우선, 봄과 가을에는 자기 적도의 남, 북으로  $40^\circ$  이내에서 대체로 일정한 분포를 보이며, 그림 4의 봄의  $320^\circ$  그래프에서 온도가 감소하는 골

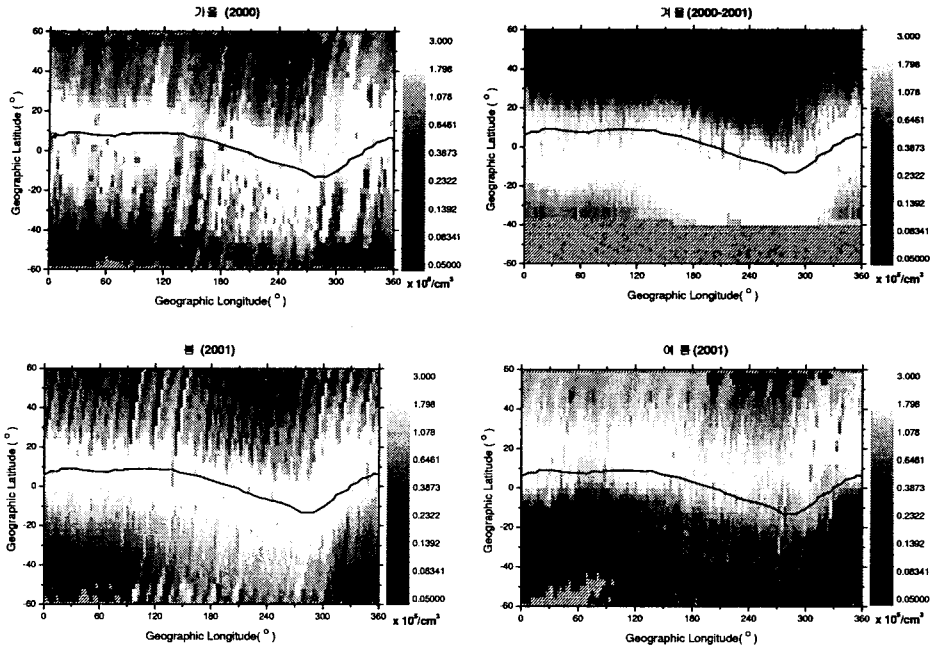


그림 1. IMS로 관측한 전자 밀도의 계절별 분포도. 실선은 자기 적도를 나타내고, 사선으로 나타낸 지역은 자료가 없는 부분이다.

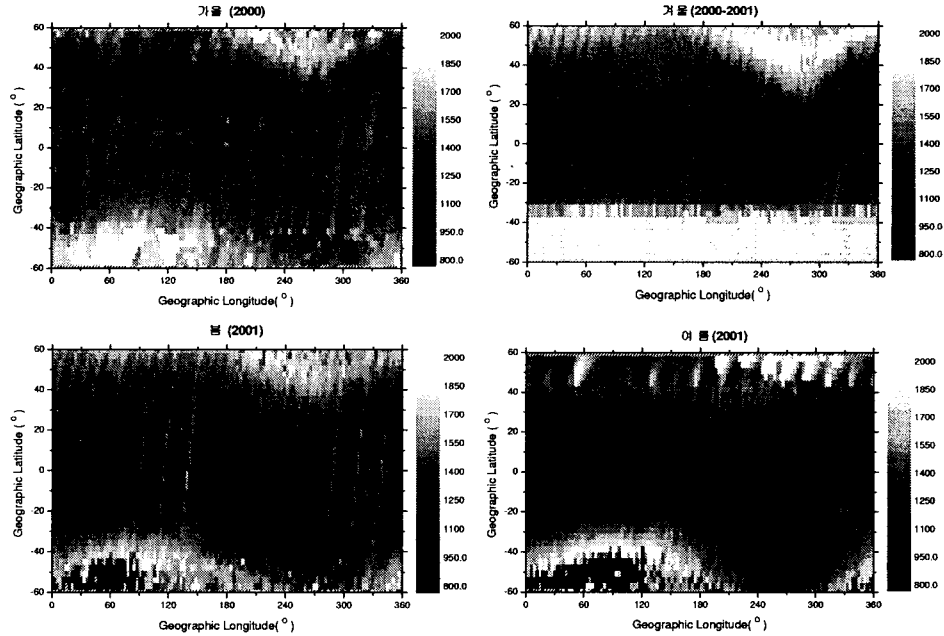


그림 2. IMS로 관측한 전자 온도(K)의 계절별 분포도. 실선은 자기 적도를 나타내고, 사선으로 나타낸 지역은 자료가 없는 부분이다.

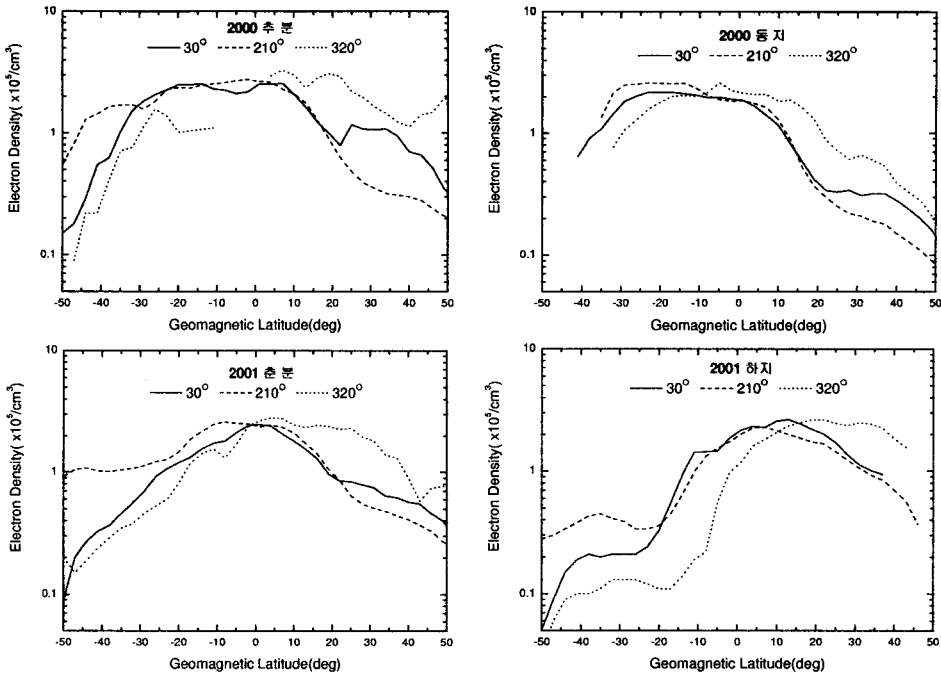


그림 3. 경도 30°, 210°, 320°인 곳에서 자기 위도에 따른 전자 밀도의 분포.

과 증가하는 마루(crest)가 나타난다. 그러나 온도 감소와 증가 정도는 100 K 이내로 그다지 크지 않다. 전자 밀도가 크게 감소하는 아프리카 남단에서는 전자 온도의 큰 증가가 보인다. 골과 마루의 분포는 경도에 따라 달라지는데, 이는 다음 장에서 자세히 다루기로 한다. 겨울에는 대체로 자기 적도의 남쪽에 골이 나타나는데, 봄에 비해 온도가 더 감소하는 경향을 보인다. 여름에는 겨울과 반대로 자기 적도의 북쪽에 골이 나타난다. 여름에는 골에서의 온도 감소가 다른 계절에 비해 특히 두드러진다. 겨울과 여름에도 봄, 가을과 마찬가지로 경도에 따른 변화가 나타난다.

### 3.2 경도에 따른 변화

계절별로 나타낸 전자 온도와 밀도의 분포에서 경도에 따른 차이가 나타난다. 이러한 차이는 크게 세 지역으로 구분될 수 있다. 즉, 경도 0° ~ 150° 사이, 150° ~ 270° 사이, 그리고 270° ~ 360° 사이에서 각각 비슷한 분포를 갖는다. 이는 자기 적도가 지리적 적도에 대해 보이는 경사도에 따른 구분과 거의 일치한다.

그림 3은 경도 30°, 210°, 320°에서 전자 밀도의 자기 위도에 따른 변화를 각 계절별로 나타낸 것이다. 자료는 자기 경도와 자기 위도를 기준으로 각각 9°와 3°간격으로 평균하였다. 계절별 변화에서 보인 것처럼 봄과 가을의 분포는 서로 비슷하고, 여름과 겨울에는 서로 상반된 분포를 나타낸다. 봄과 가을의 분포를 보면, 경도 210°와 320°에서 자기 위도에 따른 분포가 서로 상반되는 관계를 보인다. 즉, 210°에서는 남반구 쪽에서 밀도가 높게 나타나지만 320°에서는 북반구 쪽에서 높게 나타난다. 30°에서는 남, 북반구 양쪽 모두에서 대략 이 두 지역의 중간 정도 밀도를 갖는다. 자기 적도

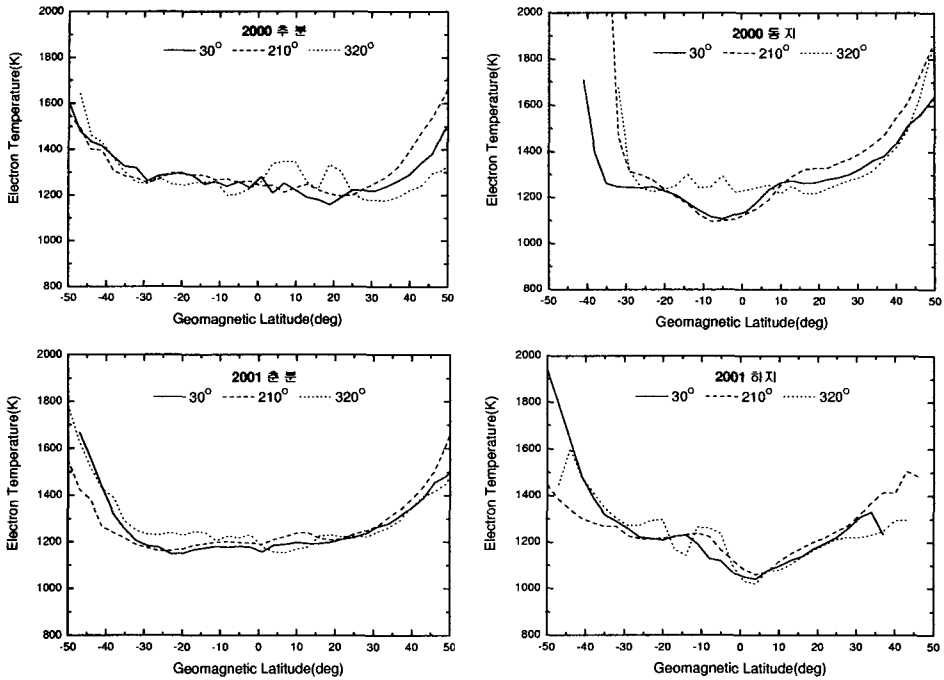


그림 4. 경도 30°, 210°, 320°인 곳에서 자기 위도에 따른 전자 온도의 분포.

부근에서는 세 지역 모두 거의 비슷한 값을 보인다. 겨울과 여름에는 각각 봄, 가을에 나타난 북반구에서의 특징과 남반구에서의 특징이 두드러지게 나타난다. 즉, 겨울에는 자기 위도 10° 이상에서 경도 320° 지역의 전자 밀도가 가장 높게 나타나고, 30° 지역은 중간 정도, 210° 지역은 가장 낮은 값을 갖는다. 반면에 여름에는 자기 위도 -5° 이하에서 겨울과 반대의 경향을 보인다.

그림 4는 경도 30°, 210°, 320°에서 전자 온도의 자기 위도에 따른 변화를 각 계절별로 나타낸 것이다. 봄과 가을에는 저위도 지역에서 자기 위도에 따른 변화가 거의 보이지 않는다. 반면에 여름과 겨울에는 골과 마루의 특징이 뚜렷이 나타난다. 겨울에는 경도 210°와 30°인 지역에서 자기 적도의 약간 남쪽과 북쪽에 각각 골과 마루가 나타난다. 그러나 경도 320°인 지역에서는 이런 변화가 보이지 않는다. 여름에는 세 지역 모두에서 겨울과 반대로 자기 적도의 약간 북쪽과 남쪽에 각각 골과 마루가 나타난다. 이러한 자기 위도에 대한 전자 온도의 변화는 플라즈마가 자기력선을 따라 이동하면서 겪는 단열 가열/냉각 기작으로 설명될 수 있다.

### 3.3 관측 결과와 IRI 모델의 비교

이온층에 대한 표준 모델인 IRI 모델과 관측 자료를 비교하기 위해 그림 1과 그림 2에서 구한 전자 밀도 및 온도 분포와 IRI 모델 계산 결과의 차를 구해보았다. 그림 5는 각 계절별로 관측한 전자 밀도에서 IRI 모델 계산 결과를 뺀 값을 나타낸 것이다. 굵은 실선은 자기 적도를 나타낸 것이고, 가는 실선은 차이가 0인 등고선이다. 모든 계절에 걸쳐서 관측한 전자 밀도와 IRI 계산값 사이에 큰 차이가 나타난다. 그림 1과 비교해보면, 전자 밀도가 큰 자기 적도 부근에서는 관측값이 IRI 계산값보다 크지만, 전자 밀도가 작은 중위도 지역에서는 오히려 IRI 계산값이 더 크게 나타난다. 특히, 전자

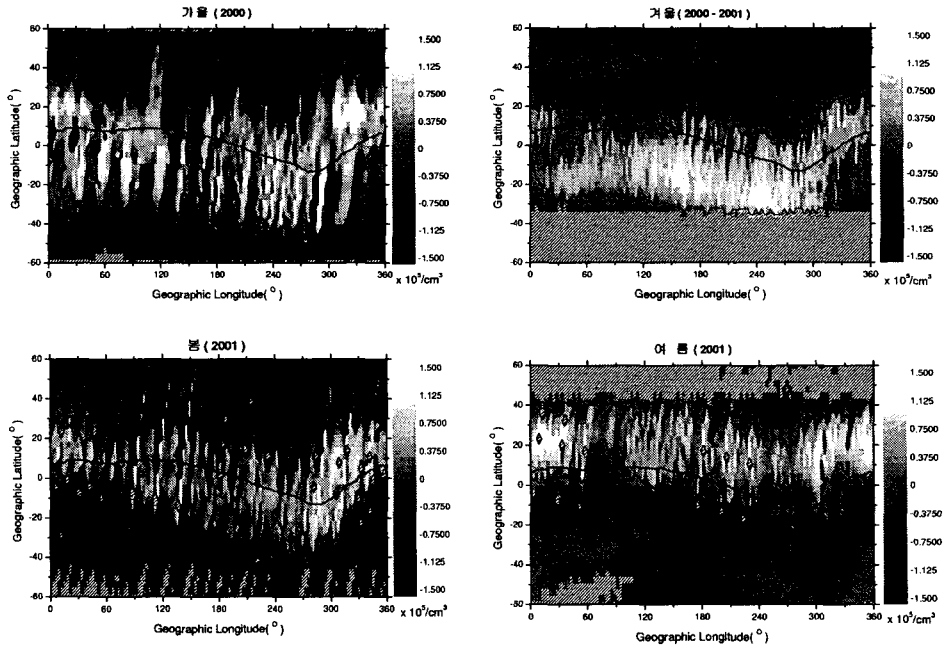


그림 5. IMS에서 관측한 전자 밀도와 IRI 모델 계산값의 차이. 굵은 실선은 자기 적도를 나타내고, 가는 실선은 차이가 0인 등고선이다. 사선은 자료가 없는 곳을 나타낸다.

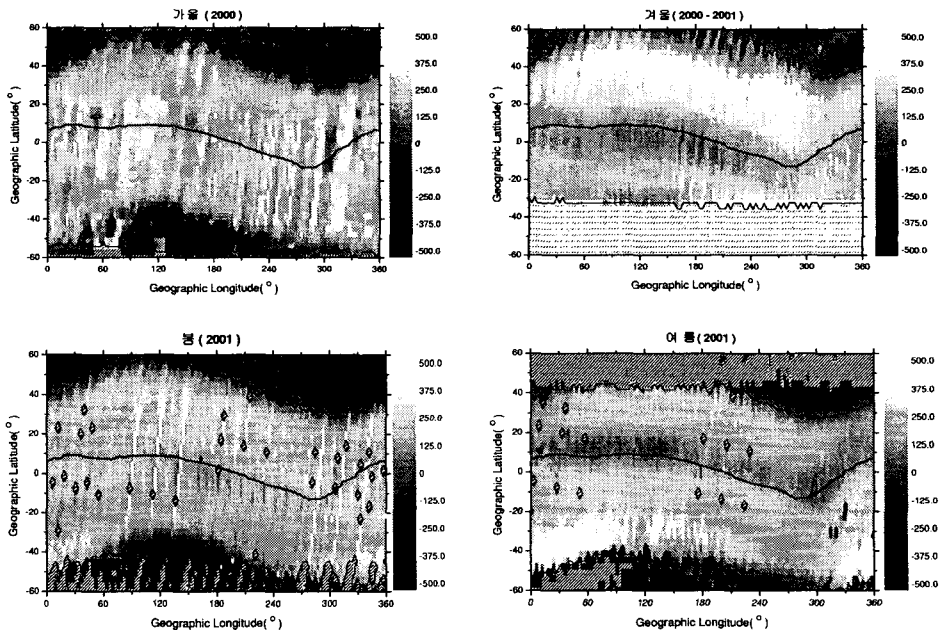


그림 6. IMS에서 관측한 전자 온도(K)와 IRI 모델 계산값의 차이. 굵은 실선은 자기 적도를 나타내고, 가는 실선은 차이가 0인 등고선이다. 사선은 자료가 없는 곳을 나타낸다.

밀도가 크게 증가한 여름과 겨울에는 이 차이가  $1 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$  이상으로 크게 나타난다.

그림 6은 각 계절별로 관측한 전자 온도에서 IRI 모델 계산 결과를 뺀 값을 나타낸 것이다. 전자 밀도 분포에서는 관측값이 IRI 모델 계산값에 비해 커지거나 작아지는데 반해, 전자 온도는 자기 위도  $\pm 40^\circ$  사이의 저위도와 중위도 영역에서 관측값이 200 ~ 400 K 정도 더 높게 나타나며, 고위도에서는 반대로 200 ~ 400 K 정도 낮게 나타난다. 또한, 그림 2에서 여름과 겨울에 자기 적도 부근에 나타나는 전자 온도의 골과 마루가 IRI 모델에서는 보이지 않으며, 경도에 따른 변화도 거의 나타나지 않는다.

이러한 결과는 IRI 모델이 태양 극대기 시에 이온층의 상태를 제대로 나타내지 못한다는 것을 보여준다. 특히, 계절에 따른 변화나 전자 온도의 적도 이상 현상 등에서는 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 따라서, 태양 극대기 시의 이온층 상태를 보다 정확히 나타낼 수 있도록 IRI 모델을 보정하는 것이 필요하다고 생각된다.

#### 4. 토 의

본 연구에서는 다목적 실용위성 1호가 운용 중인 고도 685km의 상부 이온층에서 22:50LT의 밤 시간에 IMS를 이용하여 측정된 전자 온도와 전자 밀도의 계절에 따른 변화에 대해 알아보았다. 또한 이 관측 결과를 IRI 모델과 비교하여 차이를 알아보았다.

상부 이온층은 Hinotori, DE-2, DMSP 등의 위성들에 의해 관측되어왔다. 이러한 관측으로부터 상부 이온층을 구성하는 플라즈마의 온도와 밀도 분포 등이 연구되었고, 이들의 계절에 따른 변화, 태양 활동에 따른 변화, 전자 온도 적도 이상 등의 현상이 알려졌다. IMS 관측 결과는 이러한 이전의 연구 결과들과 잘 일치하였다. 여름과 겨울에 나타나는 전자 온도 및 밀도의 상반된 분포, 경도에 따른 분포의 변화, 전자 온도 적도 이상 등은 이전 연구들과 잘 일치하는 결과를 보였다. 그러나 Hinotori나 DE-2 등의 위성이 지방시가 변하는 궤도를 갖는 반면에 다목적 실용위성 1호는 지방시가 일정한 궤도를 가지므로, 동일한 지방시에 대한 위치에 따른 변화를 관측할 수 있었고, 전자 밀도와 온도의 전지구적인 분포도를 구할 수 있었다.

자기 적도 근처에서 나타나는 높은 전자 밀도는  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  drift에 의해 낮은 고도의 플라즈마가 위로 올라가는 것으로 설명될 수 있다. 고도 300km 이상의 상부 이온층에서는 고도가 높아짐에 따라 플라즈마 밀도가 감소하므로, 낮은 고도에 높은 밀도의 플라즈마가 존재한다. 따라서 낮은 고도에 있던 플라즈마의 상승은 높은 고도에서 주위보다 높은 밀도를 나타내게 할 수 있다. 이러한 상승을 일으키는  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  drift는 자기장이 거의 수평한 자기 적도 부근에서 크게 일어나고, 따라서 자기 적도 부근에서 높은 전자 밀도를 나타내게 한다.

자기 적도 근처에서 여름과 겨울에 나타나는 전자 온도의 골과 마루는 플라즈마가 자기력선 방향으로 이동하면서 단열 가열 및 냉각을 겪는 것으로 설명된다. 이러한 플라즈마 이동의 주된 원인은 적도 부근에 존재하는 중성 바람(neutral wind)이다. 이러한 경도 방향의 중성 바람(meridional wind)은 그림 7과 같이 여름에는 북반구에서 남반구로, 겨울에는 남반구에서 북반구로 불고, 위도 방향의 중성 바람(zonal wind)은 동쪽 방향으로 분다(Heelis & Hanson 1980). 겨울에는 경도  $150^\circ \sim 270^\circ$  지역, 여름에는  $270^\circ \sim 360^\circ$  지역에서 경도 방향의 중성 바람과 위도 방향의 중성 바람의 결합에 의해 자기력선을 따르는 플라즈마의 이동이 강화된다. 따라서 플라즈마는 적도 부근에서 자기력선을



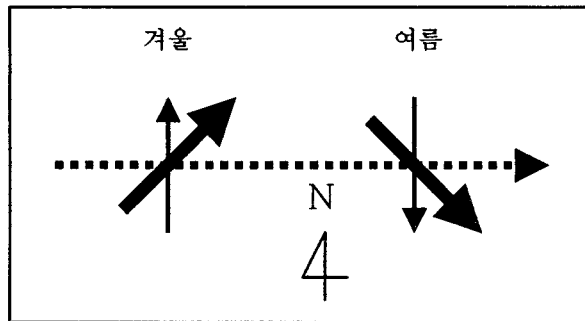


그림 7. 여름과 겨울에 중성 바람(가는 실선 - meridional wind, 점선 - zonal wind, 굵은 실선 - 실제 바람)의 방향(Venkatraman & Heelis 1999a).

따라 높은 고도로 올라가면서 단일 냉각이 되고,  $\pm 15^\circ$  부근(여름에는  $+15^\circ$ , 겨울에는  $-15^\circ$ )에서 자기력선을 따라 낮은 고도로 내려오면서 단일 가열이 된다. 그림 4의 겨울의  $150^\circ \sim 270^\circ$ 와 여름의  $270^\circ \sim 360^\circ$ 에서  $\pm 15^\circ$  부근에서 국소적으로 최대값이 생기며 적도 부근에서는 깊은 최소값이 생긴다.

반면 겨울에는  $270^\circ \sim 360^\circ$  지역, 여름에는  $150^\circ \sim 270^\circ$  지역에서 중성 바람의 방향과 자기력선 방향이 반대로 되면서 자기력선을 따르는 플라즈마의 이동이 감쇄된다(Venkatraman & Heelis 1999a). 이는 IMS 관측 결과와 잘 일치한다. 그러나 여름에  $150^\circ \sim 270^\circ$  사이에서도 골이 보였고, 이것은 다른 원인도 있을 수 있음을 나타낸다.

IRI 모델과 관측 자료를 비교한 결과 큰 차이가 나타났다. IRI 모델은 이온층에 대한 표준 모델로 사용되고 있으며, 최근 자기 폭풍 시와 상부 이온층의 온도 분포 등을 보정한 IRI2000 모델이 발표되었다(Bilitza 2001). 본 연구에서는 이전에 발표된 IRI95 모델을 사용하였다. IRI95 모델은 자기적으로 안정하고 태양 활동이 적은 상태에서는 관측 결과와 잘 일치하나 태양 극대기에는 잘 일치하지 않고(Oyama 1994), 적도 이상이나 South Atlantic magnetic anomaly는 예측하지 못하는 것으로 알려져 있다(Dabas et al. 2000). 본 연구에서도 IRI 모델과 여러 차이를 보였고, 따라서 IRI 모델의 보정이 필요하다고 생각된다. 한편, IRI 모델이 태양 극대기가 아닌 태양 활동이 적은 시기에는 잘 맞는다는 점에서 본 연구의 IMS 관측이 IRI 모델과 보인 차이는 태양 활동에 의한 차이를 나타낸다고 볼 수 있다. 본 관측 기간 동안 F10.7 값은  $150 \sim 200$  사이로 그다지 큰 값은 아니었지만, 몇 차례의 큰 자기 폭풍 등이 발생하는 등 자기 활동이 활발한 기간이 상당히 있었다. 이런 영향이 전자 밀도의 증가와 감소, 전자 온도의 전체적인 증가 등을 일으켰을 것으로 생각된다. 특히, 자기 폭풍 등으로 자기권이 교란되었을 때 이온층에 침투한 전기장에 의해 이온층 플라즈마가 상승한다는 연구 결과가 있었고(Fejer & Scherliess 1997), 이는 본 관측 결과의 자기 적도 부근에서의 전자 밀도 증가를 설명해 준다고 생각된다.

#### 참고문헌

- Balan, N., Oyama, K. I., Bailey, G. J., Fukao, S., Watanabe, S., & Abdu, M. A. 1997, JGR, 102, 7485

Bilitza, D. 2001, *Radio Sci.*, 36, 261

Burke, W. J., & Maynard, N. C. 2000, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 28, 1903

Dabas, R. S., Reddy, B. M., Lakshmi, D. R., & Oyama, K. I. 2000, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 62, 1352

Fejer, B. G., & Scherliess, L. 1997, *JGR*, 102, 24047

Heelis, R. A., & Hanson, W. B. 1980, *JGR*, 85, 3045

Oyama, K. I. 1994, *Adv. Space Res.*, 14, 105

Vannaroni, G., Dobrowolny, M., Venuto, F. D., Iess, L., & Zolesi, B. 1999, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2937

Venkatraman, S., & Heelis, R. 1999a, *JGR*, 104, 2603

Venkatraman, S., & Heelis, R. 1999b, *JGR*, 104, 17117