J. Astron. Space Sci. 15(2), 401–415 (1998)

중형과학로켓, KSR-II를 이용한 이온층 전자 밀도 및 온도 분포 측정에 관한 연구

이재진[1] · 김준[2] · 이수진[2] · 민경욱[1]
표유선[3] · 조광래[2] · 이황재[3]
[1]한국과학기술원 물리학과
[2]한국항공우주연구소
[3]전파연구소

A STUDY OF THE IONOSPHERIC ELECTRON MEASUREMENT ON THE MEDIUM-SIZED SCIENTIFIC ROCKET , KSR-II

Jae-Jin Lee[1], Jhoon Kim[2], Soo-Jin Lee[2], Kyoung-wook Min[1]
You Surn Pyo[3], Gwang Rae Cho[2], and Hwang-Jae Rhee[3]
[1]Department of Physics, KAIST
[2]Space Division, Korea Aerospace Research Institute
[3]Radio Research Laboratory

(Received October 15, 1998; Accepted November 10, 1998)

요 약

1998년 6월 11일 오전 10시(KST)에 태안 반도(37° N, 126° E)에서 발사된 국산 로켓 KSR-II는 73km에서 130km고도에 걸쳐 전자 밀도, 전자 온도, 부동 전위 등을 관측하는데 성공하였다. 이 지역은 이온층의 E-region에 해당하는 지역으로 전자 온도가 낮고 특히 Probe의 오염 효과에 의해 오차가 생길 수 있기 때문에 전자 온도에 대한 정확한 데이터를 얻기가 쉽지 않다. 본 실험에서 사용된 장비는 Langmuir Probe (LP)와 Electron Temperature Probe (ETP)로 두 가지 서로 다른 probe를 통해 얻은 전자 온도를 비교하여 검증된 전자 온도를 구할 수 있었다. 실험 결과 전자 밀도는 약 90km 지점에서 급격히 증가하여 약 102km지점에서 최대 전자 밀도를 갖고 이 이상의 고도에서는 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이는 최대 전자밀도가 110km에서 나타나는 IRI(International Reference Ionosphere)95-model이나 PIM(Parameterized Ionospheric Model)과 비교해 보면 다소 낮은 고도에서 최대 전자 밀도가 존재하였음을 알 수 있으며 측정된 값은 모델 계산에 비해 약간 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 한편 ETP로 측정된 전자 온도는 200°K에서 700°K에서 LP에 의한 교란 효과로 추정되는 요동현상을 보였으며 이를 제외하면 전자 온도가 고도에 따라 다소 증가하는 경향을 볼 수 있었다. LP를 통해 구한 전자 온도는 125km이상의 고도에서 ETP를 통하여 구한 전자 온도와 어느 정도 일치한다는 점에서 신뢰할 만한 측정값을 얻었다고 판단된다.

ABSTRACT

This paper reports the results obtained from the Langmuir probe (LP) and Electron Temperature Probe (ETP) experiments on the sounding rocket KSR-II (Korean Scientific Rocket - II) which was launched on Jun 11, 1998 at 10:00 KST from Tae-An peninsula (37° N, 126° E). The instruments successfully measured the electron density, electron temperature, and the floating potential at altitudes of 73km to 130km. While the electron temperature measurement is not easy in this region, since the temperature is very low and the contamination effect of the probe may give rise to a problem, we were able to obtain a reasonable electron temperature profile by employing two independent methods, the pulse modulated Langmuir Probe and Electron Temperature Probe. The preliminary results show that electron density increases sharply at about 90km, and forms a peak at 102km. The density profile is roughly consistent with IRI (International Reference Ionosphere)95-model or PIM (Parameterized Ionospheric Model) results except that the peak density appears at 110km in the model and model electron density is slightly lower than the observed one. Electron temperature obtained from ETP fluctuates between 200°K and 700°K, an effect presumably coming from the wakes developed by LP, and it tends to increase with the altitude, which is consistent with the LP results.

1. 서 론

이온층은 태양으로부터 나오는 UV(UltraViolet), EUV(Extreme UltraViolet), 및 X-ray와 같이 짧은 파장 영역의 복사선에 의해 중성 입자가 이온화되어 플라즈마 상태로 존재하는 공간으로 지상 60km에서 약 1000km에 걸쳐 존재한다. 이온층은 1901년 Marconi가 대서양을 가로질러 전파를 전달함으로써 그 존재가 명확히 밝혀진 이래 전파를 이용한 많은 연구가 진행되어 왔다. 전파를 이용한 이온층 측정 방법은 1958년 Gordon이 Thomson scatter를 이용하여 전자 온도를 구할 수 있는 방법을 제시하면서 비약적인 발전을 이루게 된다(Evans 1962). 그러나 전파를 이용한 이온층 연구는 근본적인 한계를 가지고 있다. 예를 들면, 전파가 이온층에 반사되어 되돌아오는 시간을 재어 계산한 높이를 virtual height라 하는데, 플라즈마 안에서는 group velocity가 작아지므로 virtual height는 이온층의 실제 높이 보다 더 큰 값으로 나타난다. 또한 자기장에 의해 생기는 복굴절(birefringence)도 전파를 이용한 관측을 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 따라서 정확하고 세밀한 이온층 연구를 위해서는 로켓이나 인공위성을 이용한 직접 관측이 필요하다.

이온층 연구를 위한 최초의 로켓 발사는 2차 세계대전 직후인 1947년 Reifman and Dow(1949)에 의해 이루어 졌다. 독일의 V-2 로켓을 개량한 이 로켓에는 Langmuir Probe가 실려 전자 밀도와 전자

온도를 측정하고자 하였으나 이렇다 할 결과를 내지는 못했다. 1960년대 들어 냉전 체제가 강화되면서 로켓 실험 또한 활기를 띠기 시작했는데, Spencer *et al.*(1965)등에 의해 전자 온도와 전자 밀도를 측정하기 위한 일련의 실험이 행해졌다. 그러나 이 때 이루어진 실험들은 probe 표면에 있는 오염 효과를 고려하지 않은 것으로서 특히 전자 온도가 실제 보다 높게 측정되는 결과를 낳았다. probe 표면에는 H_2O, O_2 및 다른 불순물 등에 의해 오염층이 생기게 되는데, 이 오염층에 의해 생긴 capacitance에 의해 정확한 전자 온도를 측정할 수 없었던 것이었다.

이러한 오염 효과를 제거하기 위한 노력이 1960년대 말과 1970년대 초에 여러 과학자들에 의해 시도 되었으며 특히 Oyama 등은 오염층을 저항과 축전기(capacitor)로 이루어진 등가 회로로 생각하여 오염층에 의한 효과를 설명하였다(Oyama 1975a; Oyama 1975b; Hirao and Oyama 1972). 이러한 사실을 바탕으로 하여 Szuszczewicz and Holmes(1975)는 쓸기 전압(sweeping voltage)에 100Hz정도 되는 pulse파형을 인가 시킴으로써 오염층 효과를 줄이는데 성공하였다. 한편 Hirao and Oyama(1970)는 probe에 30kHz정도 되는 높은 주파수의 sine파를 인가시켜 오염층의 영향을 받지 않고 전자 온도만을 측정할 수 있는 전자 온도 측정기(Electron Temperature Probe)를 개발하였다.

본 연구에서는 Szuszczewicz 등에 의해 제안된(Holmes and Szuszczewicz 1975) Pulse Modulated Langmuir Probe와 Oyama 등에 의해 제안된 Electron Temperature Probe를 개발하여 국산 로켓(KSR-II)에 동시에 탑재하여 관측하였다. KSR-II는 1998년 6월 11일 오전 10시(KST)에 태안 반도(37° N, 126° E)에서 발사되어 한반도 상공의 이온층을 약 80초 동안 성공적으로 관측하였다. 본 논문에서는 관측 결과를 IRI(International Reference of Ionosphere)-95 model과 PIM(Parameterized Ionosphere Model)을 이용한 simulation 결과와 서로 비교하였으며 간단한 모델을 만들어 전자 밀도를 분석하였다. 또한 안양 전파연구소에서 Digisonde를 이용하여 관측한 결과와도 비교해 보았다.

지금까지 로켓을 이용한 많은 이온층 관측 실험이 행해 졌지만, 비용에 비해 짧은 관측시간 때문에 충분한 자료를 얻었다고 말할 수는 없다. 특히 60km에서 90km의 영역에 해당하는 D 영역에 대한 관측, Sporadic-E layer와 관련된 특이 현상(Fukao *et al.* 1998) 및 저 고도 이온층의 전자 가열현상은 아직까지 풀리지 않은 수수께끼로 남아 있다. 한편 충돌 효과 때문에 전파를 이용한 130km이하의 전자 온도, 90km이하의 전자 밀도 측정이 쉽지 않다는 점을 상기한다면 결국 이러한 문제들은 로켓에 의한 관측 자료를 바탕으로 해결될 수 밖에 없을 것이다.

2. 측정장치

2.1 Pulse Modulated Langmuir Probe

Langmuir Probe는 플라즈마 계측 장치 중 가장 오래 되고 동시에 아직까지 가장 널리 쓰이는 측정 장치다. 플라즈마에 원통형 금속 막대를 삽입하고 여기에 쓸기 전압을 인가하면 그림1과 같은 모양의 전류-전압 특성 곡선을 얻게 된다.

그림 1에서 A 영역을 전자 포화 영역(electron saturation region), B 영역을 전자 지체 영역(electron

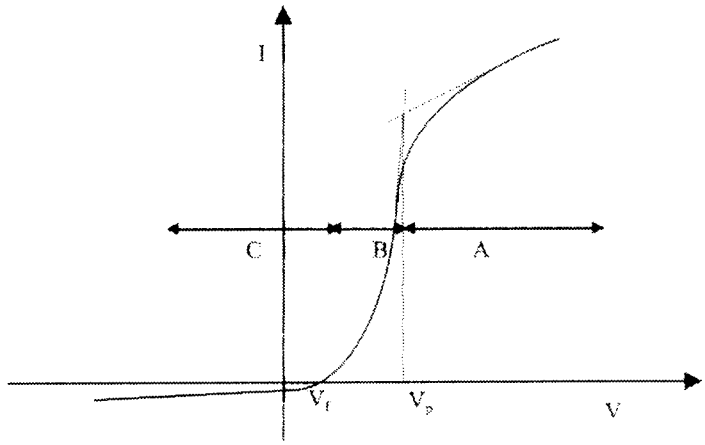

그림 1. 원통형 Langmuir Probe의 전류-전압 특성 곡선

retardation region), C 영역을 이온 포화 영역(ion saturation region)이라 하며 이들에 대한 식은 다음과 같이 표현 된다.

$$I_e(sat) = -(\frac{kT_e}{2m_e\pi})^{1/2} N_e A_c e \frac{2}{\sqrt{\pi}} [1 + \frac{eV}{kT_e}]^{1/2} \text{(electron saturation region)} \quad (1)$$

$$I = I_i - (\frac{kT_e}{2m_e\pi})^{1/2} e\, N_e A_c exp(\frac{eV}{kT_e})^{1/2} \text{(electron retardation region)} \quad (2)$$

$$I_i(sat) = (\frac{kT_i}{2M_i\pi})^{1/2} e\, N_i A_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} [1 - \frac{eV}{kT_i}]^{1/2} \text{(ion saturation region)} \quad (3)$$

여기서 N_i는 이온 밀도, N_e는 전자의 밀도, T_i는 이온의 온도, T_e는 전자의 온도, k는 Boltzmann 상수, A_c는 probe의 표면적, e는 전자의 전하량, V는 플라즈마 potential을 기준으로 한 전압을 나타내며 M_i는 이온의 질량, m_e는 전자의 질량을 나타낸다. 위의 식들을 이용하면 전자 지체 영역에서 전자 온도를, 그리고 전자 포화 영역에서 전자 밀도를 구할 수 있다.

그러나 오염층 효과를 고려하지 않을 경우, 변형된 전류-전압 곡선을 얻게 되고 이것은 특히 전자 온도를 구하는데 치명적인 오차의 원인이 된다. 이러한 오염층에 의한 효과를 줄이기 위해 그림2와 같은 꼴의 펄스 변조 쓸기 전압을 인가하였다. 쓸기 전압의 주기는 4초로 했고 각 펄스의 간격은 4msec가

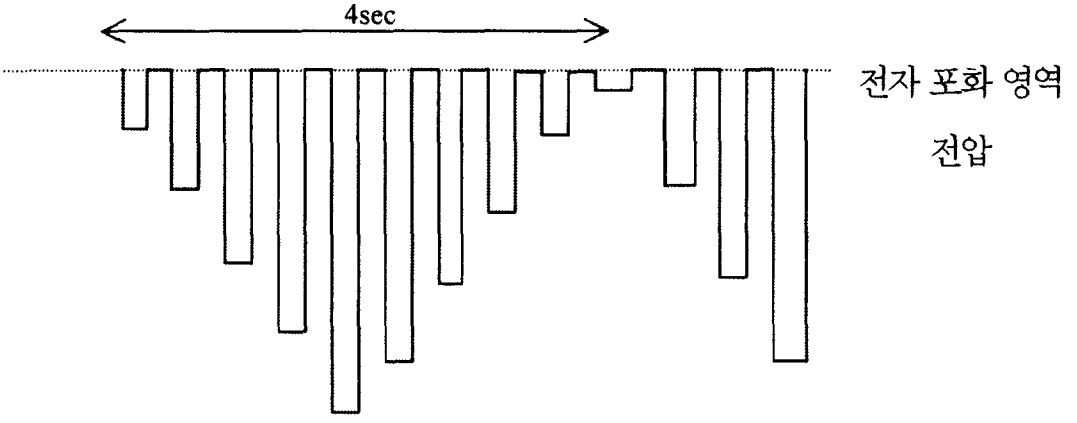

그림 2. probe에 인가되는 쓸기 전압. 4초 주기의 삼각파에 125Hz의 구형파가 변조되었다.

되도록 설정하였다. 이렇게 함으로써 probe에는 125Hz의 높은 주파수의 전압이 인가되기 때문에 오염층에 의해 생기는 capacitance 효과를 줄여 줄 수 있다(표유선 *et al.* 1995).

한편 좁은 공간에서의 전자 밀도의 변화를 보기 위해 그림2에서와 같이 전자 포화 영역에 해당하는 전압이 probe에 인가되도록 하였다. (1)식에서 보통 전자 온도를 500°K라고 생각하면 e/kT_e는 23.1이 되어 1 보다 큰 값이 되므로 (1)식은 다음과 같이 근사 되어 질 수 있다.

$$I_e(sat) \approx -N_e A_c e^{3/2} (\frac{2V}{m_e \pi^2})^{1/2} \tag{4}$$

(4)식에서 보인 바와 같이 만일 일정한 전압 V를 probe에 인가한다면, 이 전압에 의한 전류는 바로 전자 밀도에 비례하게 된다. 따라서 그림 2에서와 같이 일정한 전자 포화 전압을 인가하여 세밀한 전자 밀도의 변화까지도 측정할 수 있도록 설계하였다.

그림 3은 로켓에 탑재된 Langmuir Probe에 의해 검출된 전류-전압 곡선을 나타내고 있다. 이 그림에서 보이는 히스테리시스는 probe에 존재하는 오염층에 의해 생긴 것으로 생각되나 오염층 효과를 고려하지 않은 Langmuir Probe와 비교할 때 무시할 수 있을 정도의 작은 효과를 보이고 있다. 쓸기 전압을 증가시킬 때와 감소시킬 때의 온도를 비교해 보더라도, 각각 544°K와 491°K로 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것으로 볼 때 Pulse Modulated Langmuir Probe를 이온층의 전자 온도 측정에 적용함에 있어 오염층에 의한 오차는 그리 크지 않을 것으로 생각된다. 본 실험에서 사용한 Langmuir

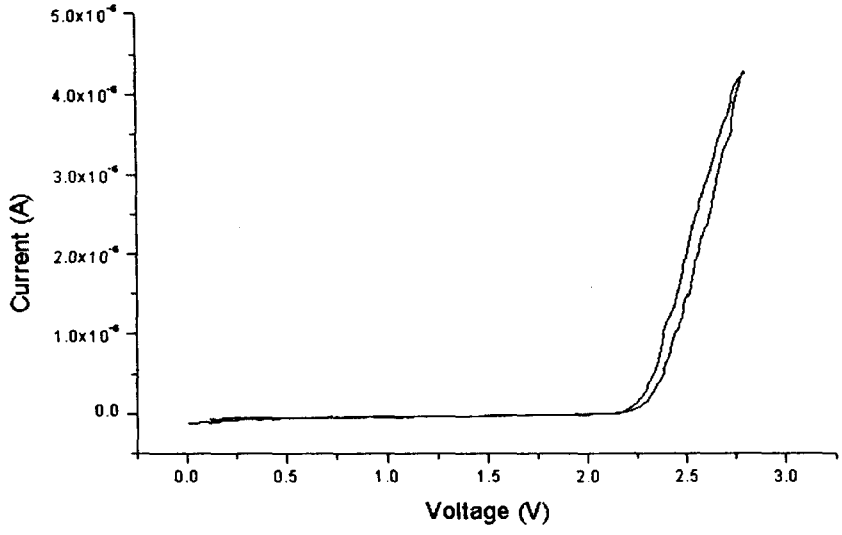

그림 3. Langmuir Probe에 의한 전류-전압 곡선

Probe는 지름 2mm에 길이 200mm인 원통형 모양으로 재질은 텅스텐을 사용하였다.

2.2 Electron Temperature Probe (ETP)

본 실험에서 사용한 ETP는 일본의 Oyama등에 의해 개발된 Probe로 그림 4는 ETP의 개략적인 동작 원리를 나타낸다. ETP는 그림과 같이 두 개의 반원형 평면 probe로 구성되어 있다. Probe a에는 진폭이 0, a, 2a인 sine파가 입사하고, Probe b는 $100M\Omega$정도 되는 매우 큰 저항과 연결되어 있기 때문에 전류가 흐르지 못 한다. 이처럼 전류가 probe로 흐르지 않을 때 probe의 전압을 부동 전위(floating potential)이라 하는데, Probe b는 이 부동 전위를 측정하기 위해 사용된다.

한편 sine파가 인가 되는 Probe a는 이 sine 파에 의해 부동 전위가 바뀌게 되는데, 이 변화의 정도가 (5)식과 같은 전자 온도의 함수로 주어 진다.

$$\gamma = \frac{V_{p1} - V_p}{V_{p2} - V_p} = \frac{ln[I_0(ea/kT_e)]}{ln[I_0(2ea/kT_e)]} \tag{5}$$

여기서 I_0는 0^{th} order Bessel 함수이다. V_p, V_{p1}, V_{p2}를 알면 (5)식을 통해 전자 온도 T_e를 구할 수 있다. 본 실험에서는 지름이 12cm인 평면 원판에 금 도금을 한 probe를 사용하였으며, probe는 로켓 본체에서 150mm 떨어져 설치되었다. 또한 항공 우주 연구소에서 제작한 ETP도 같이 실어 상호 보완적으로 결과를 비교할 수 있도록 하였다.

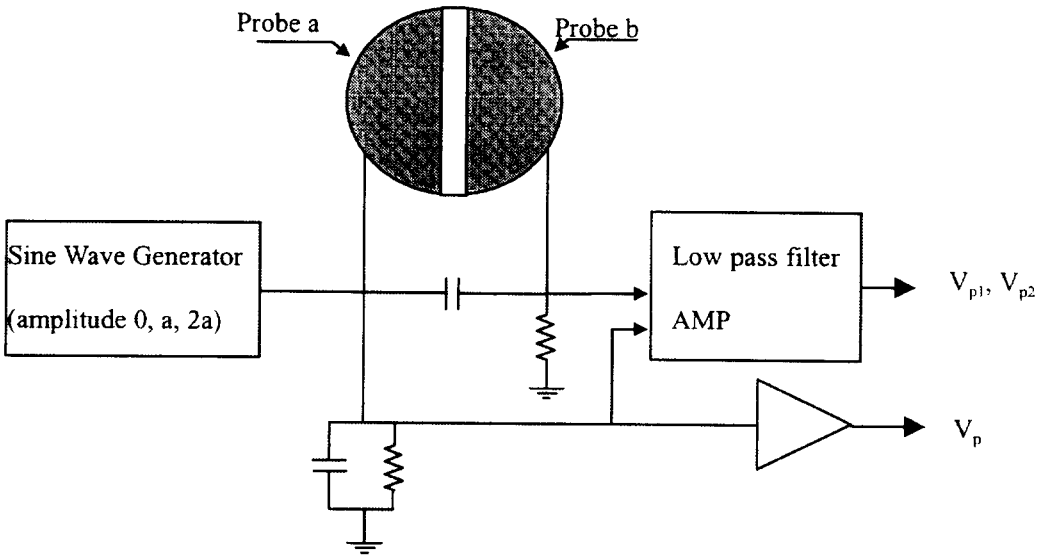

그림 4. ETP의 개념도

3. 관측자료분석

본 로켓 실험에서는 발사 70초 후 탐침을 플라즈마에 노출시켜 관측을 시작하여 150초까지 약 80초에 걸쳐 이온층 관측을 수행하였다. 이것은 고도 73km에서 130km에 해당하는 영역으로 이온층의 D영역 상부와 E영역 하층부에 해당한다. 로켓에 탑재된 payload의 모습을 그림 5에 나타내었다. 그림6은 LP를 통해 얻은 전자 밀도로 전류-전압 특성곡선을 통해 구한 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서 보인 것과 같이 전자 밀도는 90km지점에서 급격히 증가하여 약102km지점에서 최대가 되며 이 이상의 고도에서는 감소하는 것으로 나타났다. 최대 전자 밀도는 $1.7 \times 10^5/cm^3$로 모델에 의해 계산된 값보다 약간 높게 나타났다. 한편 그림7은 전자 포화 영역에 해당하는 전류의 변화를 나타내는데, 앞에서 언급했듯이 전류의 변화는 곧 전자 밀도의 변화를 반영한다. 그러나 (4)식에서 probe 전압 V는 로켓의 몸체를 기준으로 주어진 전압이 아니라, 플라즈마 포텐셜을 기준으로 정해지는 전압이기 때문에 플라즈마 포텐셜이 변할 경우 반드시 전자 밀도의 변화와 일치한다고 볼 수는 없다. 그림6과 그림7을 비교했을 때 최대 전자 밀도가 나타나는 고도와 이후의 고도에서 전자 밀도가 지속적으로 감소한다는 점에서 서로 일치하고 있다. 그러나 전자 밀도의 변화 정도에 있어 전류-전압 특성곡선에 의해 계산된 결과가 전자 포화 영역에서 구한 전류에 비해 급격하게 변하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 플라즈마 포텐셜이 92km이상의 고도에서는 점차 감소하기 때문이며, 전류-전압 특성 곡선 분석 결과 이러한 사실을 확인할 수 있었다. 그림7에서 주기적 파동 모양의 변화가 보이는 것은 쓸

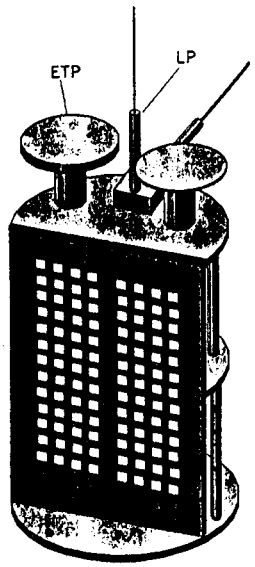

그림 5. 로켓에 탑재될 payload의 모습.

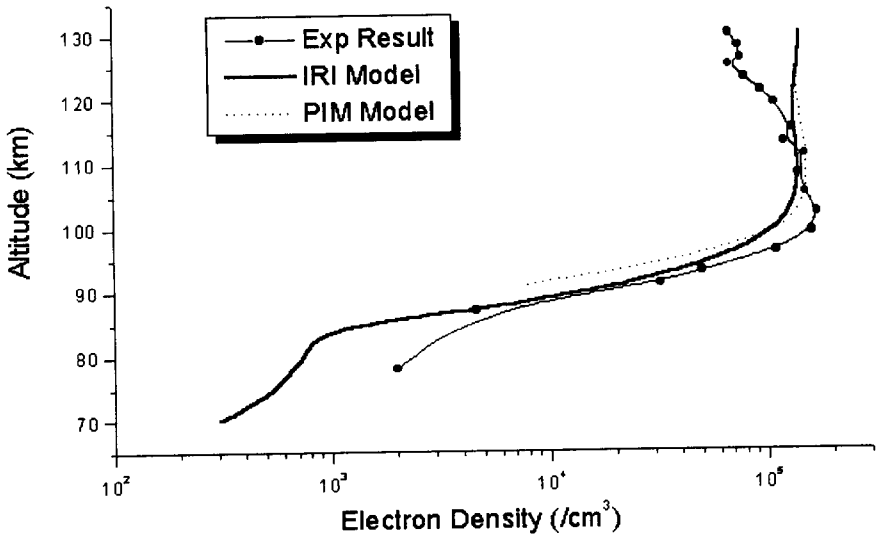

그림 6. 로켓으로 관측한 전자 밀도의 분포와 기존 모델과의 비교.

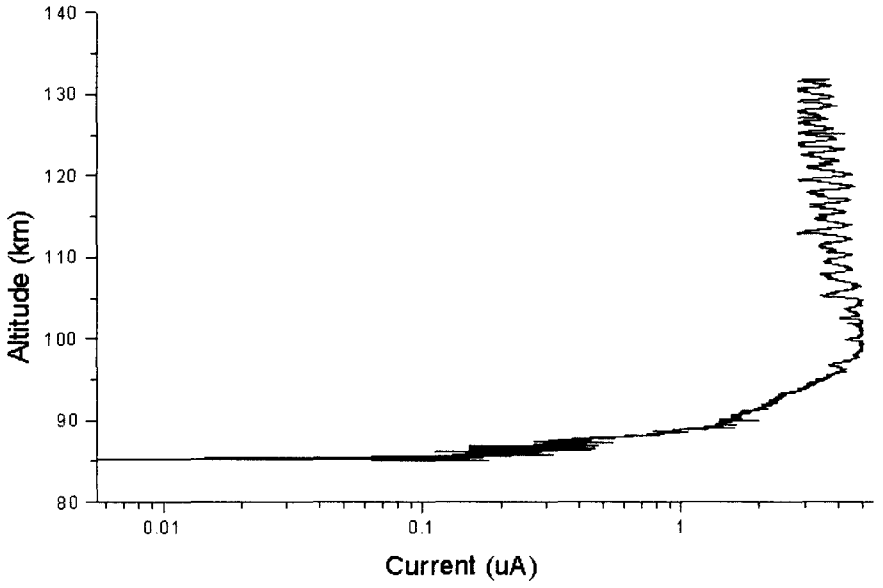

그림 7. 전자 포화 전류의 변화

기 전압에 의한 것으로 실제 이온층의 전자 밀도가 변하는 것은 아니다.

그림8은 로켓이 발사된 시간(6월11일 10:00 KST)에 안양에 있는 전파 연구소에서 Digisonde를 이용하여 이온층을 관측한 Ionogram을 나타낸다. Digisonde는 전파 주파수를 변화시키며 이온층에 입사 시켰을 때 반사된 전파를 관측하는 장비로 전자 밀도와 반사되는 전파의 주파수와의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$\omega_p = 2\pi f(\frac{4\pi n e^2}{m})^{1/2} \approx 56000\sqrt{n} \tag{6}$$

여기서 ω_p는 플라즈마 주파수며, m은 전자의 질량, e는 전자의 전하량을, n은 cm^{-3}의 단위를 갖는 전자 밀도를 나타낸다. Digisonde 관측 결과, 99km (zmE)에서 이온층 전자 밀도가 peak 값을 갖는 것으로 나타났는데, 이것은 로켓 데이터의 102km에 매우 근접한 값이다. 그리고 이때의 플라즈마 주파수는 3.26MHz로 (6)식을 이용하여 전자 밀도를 구해 보면 $1.3 \times 10^5/cm^3$이 되는 것으로 나왔는데, 이것은 로켓 데이터의 경우 $1.7 \times 10^5/cm^3$와 어느 정도 유사한 값이다. 여기서 약간의 차이가 생긴 것은 관측 장치의 오차에 의해 생긴 것일 수도 있고, 로켓에 의해 측정한 위치와 전파로 측정한 위치의 거리차에 의해 생긴 것일 수도 있다고 생각한다.

본 로켓 관측결과를IRI 모델이나 PIM과 같은 기존 모델과 비교해 보았을 때 전자 밀도의 변화는 어느 정도 일치하는 것을 볼 수 있지만, 모델에 의해 계산된 결과가 110km지점에서 최대 전자 밀도에 도달한 후 완만한 감소를 보이다가 120km에서 다시 증가하는 경향을 보이는 반면, 측정 데이터는

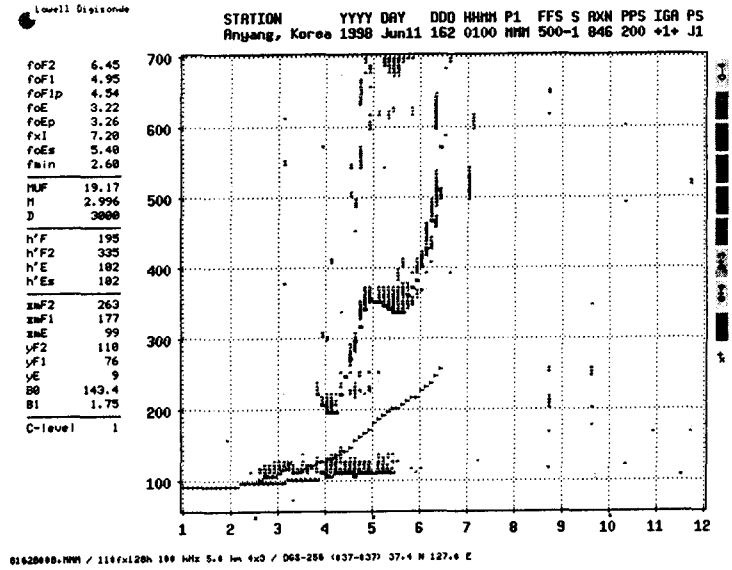

그림 8. 안양 전파 연구소에서 Disisonde를 이용해 관측한 Ionogram

지속적인 감소세가 이어진다는 점에서 차이를 보이고 있다.

그림9는 LP와 ETP를 통해 구한 전자 온도를 나타내고 있다. 이 지역은 전자 온도가 상대적으로 낮기 때문에 정확한 전자 온도를 측정하기가 어려운 지역에 해당한다. LP에 의해 구한 전자 온도는 500°K 에서 700°K 의 값을 가지며, 고도가 올라갈수록 완만하게 증가하는 반면, ETP에 의해 구한 전자 온도는 심한 변화를 가지며 어떤 주기성을 띠는 것처럼 보인다. ETP로 관측한 결과가 이러한 결과를 보이고 있는 것은 실제 전자 온도가 그렇게 변한 것이 아니고, LP에 의해 생긴 wake 효과의 결과로 추정된다. 그림10에 나타낸 부동전위 곡선에서 주기적인 파형이 나타나는 것은 wake 효과 같은 외부 요인에 의해 전자 온도 측정이 영향을 받고 있음을 암시하고 있다. LP는 ETP보다 약 25cm 길기 때문에 로켓이 회전하며 ETP에 wake 효과를 주기적으로 주게 되는데, 부동 전위의 변화 주기와 로켓의 회전 주기가 잘 일치한다는 점은 이러한 가정을 뒷바침하고 있다. ETP 결과가 wake 효과에 민감한 것은 부동전위의 변화로부터 전자 온도를 계산하기 때문이다. 그림10을 보면 130초(고도125km에 해당함) 이후에서 이러한 wake의 영향은 많이 줄어든 모습을 보이고 있는데, 이것은 로켓의 속력이 감소하면서 나타난 결과라 생각된다. 125km이산의 고도에서 LP에 의해 구한 전자 온도와 ETP에 의해 구한 전자 온도는 잘 일치한다. 이러한 사실은 wake 효과와 같은 외부 교란현상을 제외하면, 각각의 측정 장치가 오염층 등의 영향을 받지 않고, 신뢰할 수 있는 전자 온도를 측정했음을 의미한다.

IRI 모델과 비교해 보면 관측 결과와 마찬가지로 고도가 증가함에 따라 점차 전자 온도가 증가하

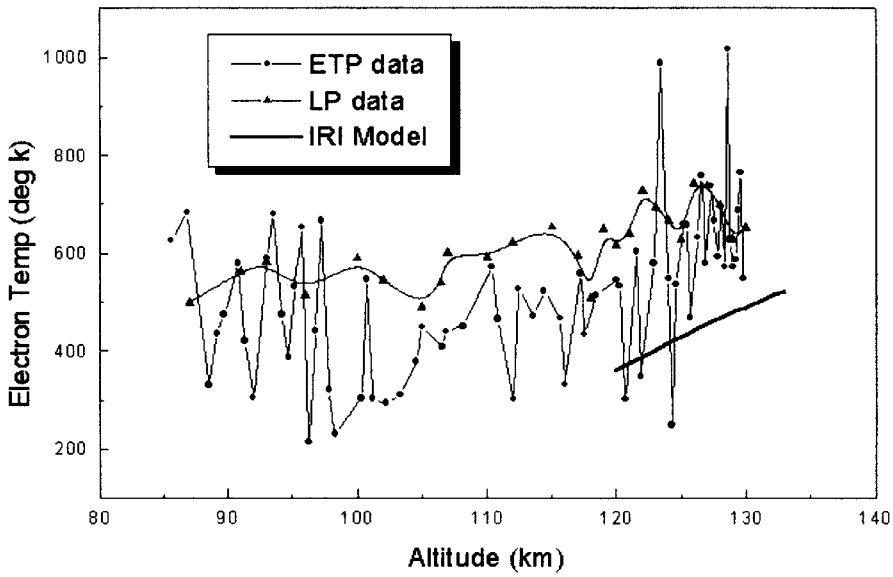

그림 9. 로켓 실험에서 LP와 ETP를 이용해 구한 전자 온도와 IRI 모델에 의해 계산된 결과. IRI 모델은 120km이하의 고도에서는 전자 온도가 계산되어 있지 않다.

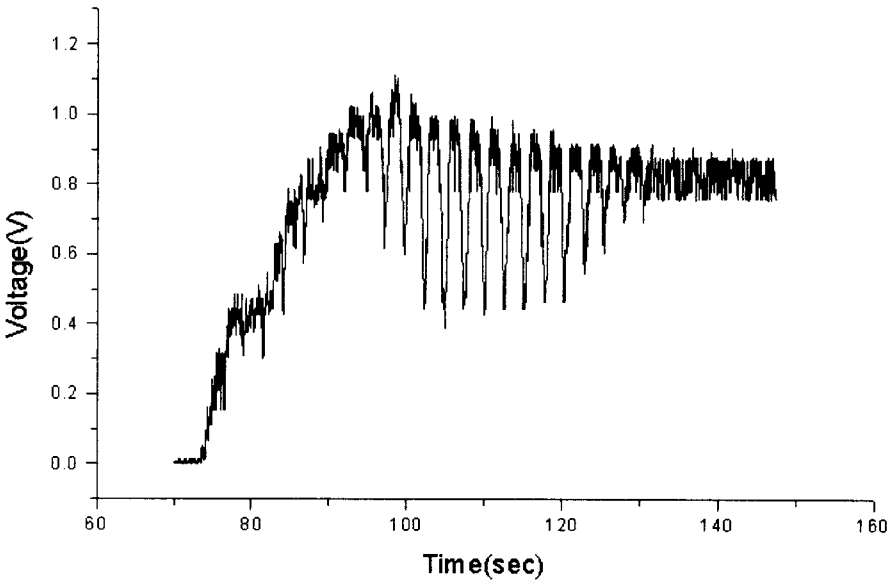

그림 10. ETP에서 구한 부동 전위(floating potential)의 변화.

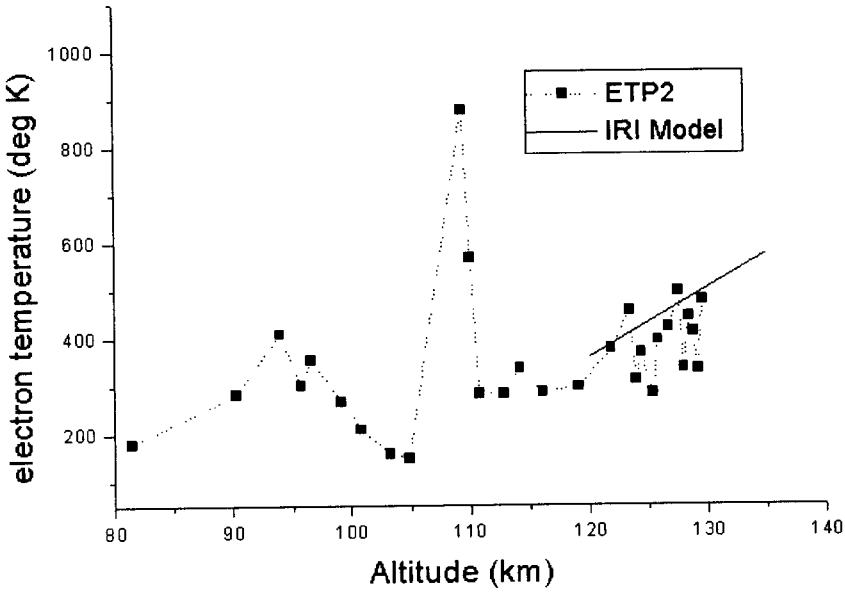

그림 11. 한국항공우주연구소에서 개발한 또 다른 ETP에서 얻은 전자 온도의 분포.

는 경향을 띠고 있는 것을 볼 수 있지만, IRI 모델을 통해 계산된 전자 온도값이 관측 값에 비해 낮게 나타나고 있다. 한편 그림11은 한국항공우주연구소에서 개발한, 또 다른 ETP에 의해 측정된 전자 온도 분포를 나타내고 있다. 그림9에 나타낸 결과와 비교해 보았을 때 다소 낮은 전자 온도를 나타내고 있으며, IRI 모델과 잘 맞는 것을 알 수 있다. 이러한 차이점이 생기는 이유는 앞에서 언급한 wake 효과와 같은 외부 요인에 의한 것으로 추정되며, 앞으로 좀더 세밀한 분석이 뒤따라야 할 것이다.

4. 모델계산

로켓 측정 자료의 분석을 위해 이온-중성간의 화학반응, 분해성 재결합(dissociative recombination), 그리고 광이온화과정을 포함하는 1차원 광화학모형(표 1참조)을 이용하여 E-층에서의 이온구성 성분과 전자의 밀도를 계산해보았다 (그림 12). 현재, 2차 전자 충돌 이온화 과정은 포함되지 않았으나, 이 과정을 포함시킨다면, 하층에서의 전자 밀도는 다소 증가할 것으로 예상되나, 계산 결과에는 큰 영향을 미치지는 않을 것이다. 이 계산은 계속되는 모델 확장 작업과정에서 추가될 예정이다. 모델의 계산은 로켓 발사시점에 맞추어 1998년 6월11일 오전 10시의 조건으로 계산되었다. 고도는 4km 간격으로 하였으며, 에너지는 Torr and Torr(1985)의 기준 스펙트럼, SC#21REFW와 동일하게 구성하여, 흡수면적(absorption cross section), 이온화 면적(ionization cross section), 그리고 분할비(branching ratio)를 이 에너지 구조에 맞추었다.

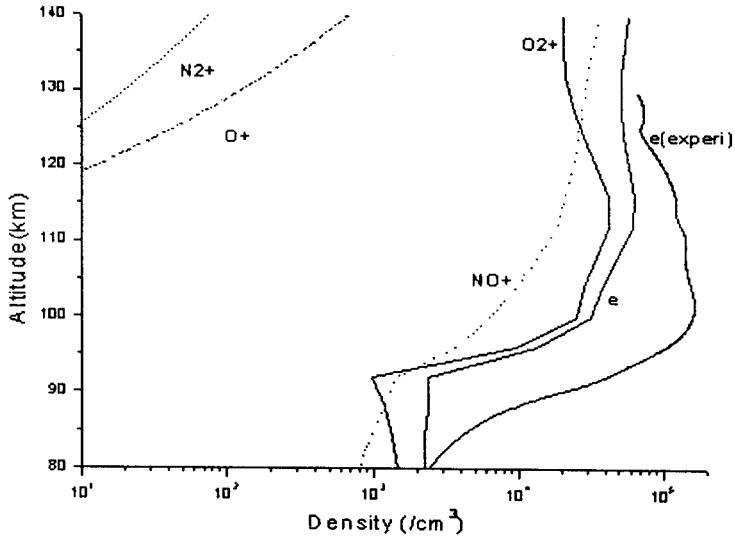

그림 12. 광화학 모형에 의해 계산된 이온 성분과 전자 밀도.

표 1. 모델 계산에 포함된 화학반응식.

화학반응식
$N_2^+ + O \longrightarrow NO^+ + N$
$N_2^+ + O \longrightarrow O^+ + N_2$
$O^+ + N_2 \longrightarrow NO^+ + O$
$O^+ + O_2 \longrightarrow O_2^+ + O$
$O^+ + H \longrightarrow H^+ + O$
$H^+ + O \longrightarrow O^+ + H$
$O_2^- + NO \longrightarrow NO^+ + O_2$
$O_2^+ + N \longrightarrow NO^+ + O$
$N_2^+ + NO \longrightarrow NO^+ + N_2$
$N_2^+ + O_2 \longrightarrow O_2^+ + N_2$
$O^+ + NO \longrightarrow NO^+ + O$
$H^+ + NO \longrightarrow NO^+ + H$
$N_2^+ + e \longrightarrow N + N$
$O_2^+ + e \longrightarrow O + O$
$NO^+ + e \longrightarrow N + O$

발사당일의 F10.7은 $115.8\times10^{-22}Wm^{-2}Hz^{-1}$이었으며, 태양복사 스펙트럼은 Hinteregger의 대조비(contrast ratio)방식으로 계산되었다(Kim 1991). 광이온화율은 Nagy and Banks(1970)에 의거하여 계산되었으며, Hedin(1986)의 MSIS-86 모델로부터 중성대기의 밀도와 온도를 계산하였다.

이온구성성분의 계산 결과로 볼 때, E-층에서는 O_2^+와 NO^-가 주요 구성성분임을 확인할 수 있었다. 전자양의 고도분포는 로켓 측정자료와 비교해볼 때, E-층에서는 O_2^-와 NO^+가 주요 구성성분임을 확인할 수 있었다. 전자양의 고도분포는 로켓 측정자료와 비교해볼 때, 약 0.5배정도로 적게 계산이 되었다. 이는 2차 이온화 과정이 포함되면, 약 20%정도 증가할 수 도 있겠으나, 동시에 고려되지 못한 전자 및 이온의 온도분포, 이온화 문턱 에너지가 높아 NO^+가 E-층의 주요 구성성분이 되도록 하는 NO 밀도분포의 불확실성, 그리고 이온층 상부에 들어오는 고에너지 입자의 하강에 의한 이온화 영향등이 보정되거나 포함된다면 측정 값과 비교적 좋은 일치를 보일 것으로 예상된다. 그림에서 O_2^- 이온의 밀도분포가 90 km 부근에서 매끄럽지 못한 분포를 보이는 것은 Hedin의 모델이 그 이하에서는 유효하지 않기 때문에 US 표준대기(1976)을 대체하여 사용하였기 때문이다. 따라서, 전자 분포에도 매끄럽지 못한 밀도변화를 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 로켓 실험을 통하여 한반도 상공 이온층의 전자 밀도와 전자 온도를 측정한 결과를 제시하였다. 전자 밀도의 경우 102km에서 최대 밀도를 나타내었으며, 이 때의 밀도는 $1.7\times10^5/cm^3$이었다. 이것은 전파 연구소에서 Digisonde를 이용해 관측한 결과에 매우 근접한 값이다. 전자 온도는 전자 밀도에 비해 오차가 크지만, LP에 의해 측정된 결과로는 대략 500°K에서 700°K에 해당하는 온도분포를 하고 있었다. LP와 ETP를 동시에 사용하여 전자 온도를 구함으로써 두 probe의 성능을 상호 검증할 수 있었는데, 125km이상의 고도에서 두 값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 125km이하의 고도에서는 LP의 wake 효과에 의해 ETP의 측정값이 심하게 영향을 받는 것을 볼 수 있었다.

실험 결과를 IRI-95 모델이나 PIM과 같은 기존의 모델과 비교해 볼 때, 전체적인 경향은 일치하지만, 전자 온도의 경우 모델 결과에 비해 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 전자 밀도는 관측값이 최대가 되는 고도에서 모델값에 비해 약간 높게 나왔고, 그 이상의 고도에서는 모델값에 비해 빠르게 감소하는 것으로 나타났다. 광화학 모형을 이용한 전자 밀도의 계산 결과 측정값에 비해 낮은 전자 밀도를 나타내었다.

이러한 이론과 모델의 불일치는 아직 충분하지 않은 저고도 이온층의 관측 결과에 기인하는 것으로 생각된다. 믿을 만한 관측 데이터의 보다 많은 수집과 이온층 모델의 지속적인 개발을 통하여 이러한 문제점은 해결될 수 있을 것이다.

참고문헌

표유선, 민경욱, 최영완, 이동훈, 강광모, 황순모, 김병철, 김준, 이수진 1995, 한국우주과학회지, 12(2), 124

Evans, J.V. 1962, JGR, 67, 4914

Shoichiro, F., Yamamoto, M., Tsumoda, R. T., Hayakawa, H., & Mukai, T. 1998, Geophys. Res. Lett, 25, 1761

Hedin, A. E. 1986, JGR, 92, 4649

Hirao, K., & Oyama, K. 1970, J. Geomag. Geoelctr., 22, 393

Hirao, K., & Oyama, K. 1972, J. Geomag. Geoelctr., 24, 415

Holmes, J. C. & Szuszczewicz, E. P. 1975, Rev. Sci. Instrum., 46, 592

Kim, J. 1991, Ph.D. Thesis, the University of Michigan, Ann Arbor

Nagy, A. F. & Banks, P. M. 1970, JGR, 75, 6260

Oyama, K. I. 1975a, Report of ISAS(525)

Oyama, K. I. 1975b, Planet. Space Sci., 24, 183

Reifman, A. F. & Dow, W.G. 1949, Phys. Rev., 76, 987

Spencer, N. W., Brace, L. H., Carignan, G. R., Taeusch, D. R., & Niemann, H. 1965, JGR, 70, 2665

Szuszczewicz, E. P. & Holmes, J. C. 1975, J. Appl. Phys., 46, 5134

Torr, M. R. & Torr, D. G. 1985, J. Geophys. Res., 90, 6675