

오염된 LANGMUIR 탐침의 특성

표유신¹, 민경옥², 최영원², 이동훈³, 강광모³, 황순모⁴, 김병철⁴, 김준⁵, 이수진⁵

¹전파연구소, ²한국과학기술원 물리학과, ³경희대학교 우주과학과

⁴기초과학지원연구소, ⁵항공우주연구소

CHARACTERISTICS OF THE CONTAMINATED LANGMUIR PROBE

Y. S. Pyo¹, K. W. Min², Y. W. Choi², D. H. Lee³, K. M. Kang³
S. M. Hwang⁴, B. C. Kim⁴, J. Kim⁵, S. J. Lee⁵

¹Radio Research Laboratory, e-mail: yspyo@cc.rrl.go.kr

²Dept. of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology

³Dept. of Astronomy and Space Science, Kyunghee University

⁴Korea Basic Science Institute

⁵Korea Aerospace Research Institute

(Received October 30, 1995; Accepted November 20, 1995)

요 약

1997년 10월에 발사 예정인 과학 로켓 3호는 고도 160km까지 도달할 것이 예상되므로 한반도 상공의 전리층 E 영역에 존재하는 플라즈마를 직접 측정할 수 있는 좋은 기회를 제공한다. 한편 플라즈마 측정에 있어서 가장 기본이 되는 검출기인 Langmuir 탐침을 실험실에서 사용하는 방법 그대로 우주 실험에 적용하면 탐침의 오염으로 인해 정확한 플라즈마 실험이 불가능해진다. 본 논문에서는 로켓용 탐침 제작에 앞서 실험실용 탐침을 제작하여 진공 용기에서 플라즈마 실험을 수행함으로써 탐침의 오염 문제를 연구하였다. 그 결과, 플라즈마의 밀도가 낮을수록 오염에 의한 효과는 적었으며 탐침에 제공되는 쏘기전압의 주파수가 증가할수록 오염에 의한 효과를 줄일 수 있었다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 로켓 실험에 적당한 변형된 형태의 Langmuir 탐침을 제안하였다.

ABSTRACT

Korea's third rocket, which is currently under development for launch in 1997, is expected to reach as high as 160 km and thus, it will provide a good opportunity for the direct measurement of the plasmas in the E-region ionosphere of the Korean peninsula. Langmuir probe techniques, which are the basic tools of

the plasma experiment, may yield inaccurate results if they are applied in the conventional form as they are used in the laboratory experiments because of the contamination. In the present paper we study the contamination problem by performing the ground experiments in the vacuum chamber using the contaminated probe. The result shows that the contamination effect is reduced when the plasma density is low or when the frequency of the sweep voltage is fast. We propose a modified Langmuir probe based upon our experiments which is suitable for the rocket experiments.

1. 서 론

Langmuir가 플라즈마 연구를 위해 탐침 방법을 고안해 낸 이후, 탐침은 실험실 플라즈마에서부터 우주 플라즈마에 이르기까지 여러 방면에 적용되어 왔으며, 오늘날에는 플라즈마 실험에 있어서 가장 기본적인 측정 방법으로 인식되고 있다. 그 실험 원리는 다음과 같다. 일반적으로 작은 금속 조각으로 되어있는 탐침을 플라즈마 내에 삽입하고 탐침과 진공용기 사이에 전압을 걸어주게 되면, 플라즈마를 구성하고 있는 전자와 이온들에 의하여 탐침에 전류가 흐르게 된다. 이때 걸어진 전압과 플라즈마에 의해 흐르는 전류 사이의 관계를 전압-전류 특성 곡선이라고 하며 간단히 $V-I$ 특성 곡선이라고도 한다. 비자기화된 플라즈마의 경우에 탐침에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$I_p = I_i^* - neS\sqrt{kT_e/2\pi m_e} \exp(eV_p/kT_e) \quad (1)$$

여기서, I_p 는 플라즈마 전류, I_i^* 는 이온 포화 전류, n 은 플라즈마 밀도, e 는 전자 전하량, S 는 탐침 표면적, k 는 볼츠만 상수, T_e 는 전자 온도, m_e 는 전자 질량, 그리고 V_p 는 탐침에 걸어주는 전압이다. 일반적으로 이온에 의한 전류는 전자에 의한 효과보다 훨씬 작으므로 식(1)에서 I_i^* 는 무시할 수 있다. 위 식은 전자가 열적 평형 상태에 있으며 속도 분포가 맥스웰 분포 형태를 가질때 적용되며, 이때 탐침 전류(I_p)의 로그값과 탐침 전압(V_p)이 선형 관계를 가지게 된다. 한편, 때로는 실험에서 얻은 데이터가 비선형의 관계를 나타내는 경우가 있는데 이러한 비선형성은 전자 속도가 비 맥스웰 분포를 가지고 있거나 또는 맥스웰 분포 곡선이 여러개 중첩되기 때문이다. 본 논문에서는 비맥스웰 분포에 의한 비선형 문제는 다루지 않고 전자 온도측정에 심각한 영향을 미칠 수 있는 탐침의 오염에 대하여 논하기로 한다.

일반적으로 실험실 플라즈마의 Langmuir 탐침에 의한 실험 결과로 발표된 기존의 논문들은 탐침의 표면 조건에 대한 언급이 없으나, 오염된 표면을 가지고 있는 탐침은 전자온도 측정에 대하여 오차를 발생시킨다. 오염된 Langmuir 탐침의 $V-I$ 특성 곡선은 주위 플라즈마 전위에 대하여 쓸기전압을 음에서 양으로 증가시키거나 양에서 음으로 감소시킬 때 서로 간에 다른 경로를 가진다. 이러한 탐침 곡선의 형태를 탐침의 히스테리시스 현상이라고 부르며 이에 대한 연구는 Van Berkel (1938)이 처음 시작한 이후 최근까지 연구가 계속되어 왔다 (Easley 1951, Wehner

& Medicus 1952, Waymouth 1959, Oyama 1976, Oyama & Hirao 1976). 본 논문에서는 먼저 이론적으로 등가회로를 이용한 오염층 모델을 세우고, 오염된 탐침을 이용하여 기초과학 지원 연구소 다목적 진공 용기에서 행한 실험 결과를 소개하기로 한다.

2. 오염층에 대한 이론적 연구

탐침을 세척하지 않거나 탐침이 오염되었다면 Langmuir 탐침에서 얻어지는 $V-I$ 곡선은 심하게 찌그러진다. 오염된 Langmuir 탐침은 화학적으로 세척함에도 불구하고 탐침 표면은 일반적으로 완전하게 깨끗해지지 않는다. 여러 오염 물질들이 탐침 표면에 흡착되면 탐침 금속 표면에 얇은 막을 형성하게 되는데 주된 오염 물질은 수분(H_2O)이며 이는 커다란 용량을 가진 capacitor와 같은 역할을 한다. 그 밖에도 N_2 나 O_2 와 같은 다른 여러가지 물질이 흡수되는데 이러한 물질들은 높은 저항값을 가진다. 따라서 여러 오염층을 등가회로로 나타내면 그림 1과 같이 축전기 C_c 와 저항 R_c 가 병렬로 연결되어 있다고 생각할 수 있다. C_c 와 R_c 의 크기는 오염 물질의 종류와 오염 정도에 따라서 결정되어지는데 일반적으로 C_c 와 R_c 는 수 μF 과 수 백 Ω 정도의 값을 가진다. 그림 1의 회로에서 탐침에 쓸기 전압을 걸어주면, 탐침에 들어오고 나가는 전류는 탐침 바이어스의 쓸기 전압에 따라서 변한다. 만약 탐침에 걸어주는 바이어스를 천천히 변화시켜 주면 전류가 R_c 로만 흐르므로 C_c 는 탐침 전류에 영향을 주지 못한다. 한편, 오염된 탐침 표면에 실제로 공급되는 전압은 V_p 가 아니라 다음 식처럼 표현된 V_{eff} 이다.

$$V_{eff} = V_p(R_s + R_p)/(R_s + R_p + R_c) \quad (2)$$

따라서 오염된 탐침 표면 V_{eff} 의 전압은 언제나 밖에서 공급되는 V_p 보다 작다. 결과적으로 탐침 전압의 감소는 전자 온도를 실제보다 높게 측정하게 만든다. C_c 의 효과를 고려하면 $V-I$ 특성 곡선은 바이어스 전압을 올리거나 내릴때 서로 다른 경로를 가지는 히스테리시스 곡선을 그리게 된다. 쓸기 전압의 주파수가 커지면 히스테리시스의 감소가 나타나는데 이는 C_c 에 축적된 전하가 한번의 쓸기 주기 동안에 회로를 통하여 방전이 되지 않으며 C_c 가 마치 전지처럼 작동하기 때문이다.

3. 오염 효과 실험

$V-I$ 특성 곡선이 쓸기 바이어스의 방향에 따라 결정되어지는 것은 탐침에 제공되는 전압과 탐침에 흘러 들어가고 나오는 전류사이에 위상차가 존재한다는 것으로 해석될 수 있다. 이에 대한 분석을 간단히 하기 위하여 외장저항(sheath resistor) R_s 를 상수로 가정하자. 실제 플라즈마에서는 한번의 쓸기 주기동안 R_s 가 상수는 아니지만 오염 효과를 이해하는데에는 R_s 를 상수라고 가정하여도 크게 문제가 되지 않는다. 탐침 전압 V 를 각 주파수 ω 인 사인파로 생각하면 탐침에 주어지는 전압 V 와 회로에 흐르는 전류 I 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

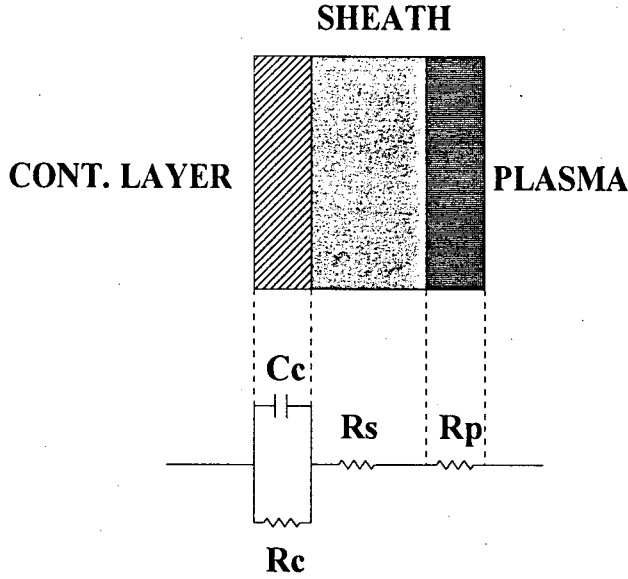


그림 1. 오염층을 등가회로로 나타낸 그림.

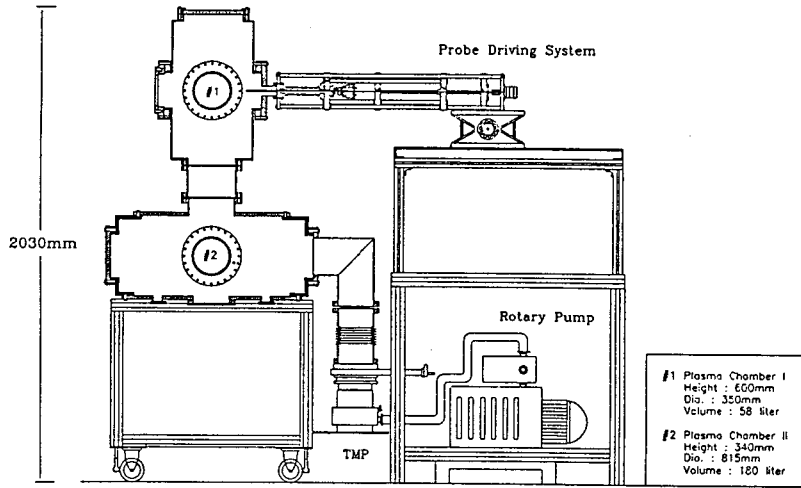
$$V = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{R_c} + j\omega C_c\right)} + R_s + R_p \right) \cdot I = |Z| e^{-j\Psi} I \quad (3)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left[\frac{-\omega C_c R_c^2}{R_c + (R_s + R_p)(1 + \omega^2 C_c^2 R_c^2)} \right] \quad (4)$$

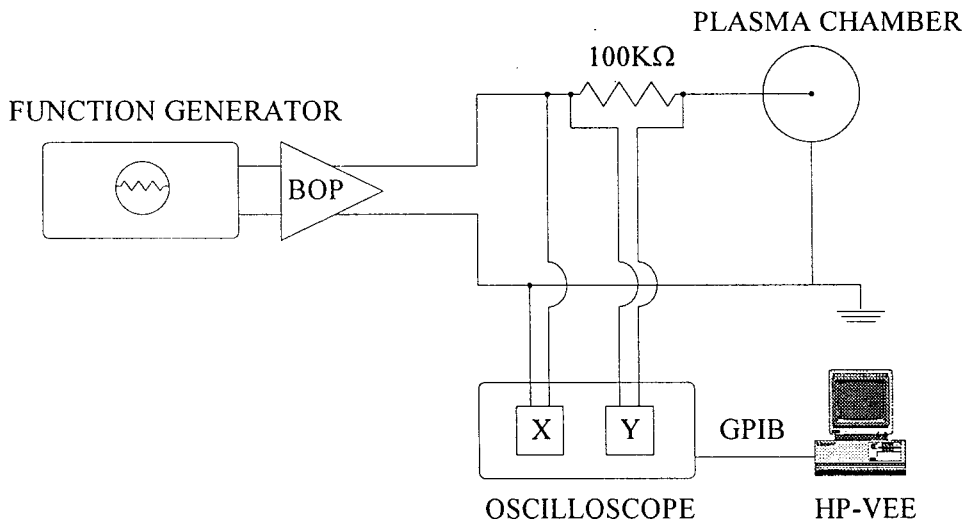
$$|Z| = \frac{[\{(R_s + R_p)(1 + \omega^2 C_c^2 R_c^2) + R_c\}^2 + \omega^2 C_c^2 R_c^4]^{1/2}}{1 + \omega^2 C_c^2 R_c^2} \quad (5)$$

여기서, Ψ 는 탐침에 공급된 전압과 회로에 흐르는 전류간의 위상차이며, $|Z|$ 는 절연층을 포함한 외장 플라즈마 임피던스의 절대값이다. 위의 방정식에서 공급된 신호의 주파수가 증가하면 회로의 임피던스 $|Z|$ 는 감소하고 외장 저항값인 $R_s + R_p$ 에 점점 가까워진다. 한편 위상차 Ψ 는 0에서 시작하여 점점 증가하다가 최대치에 이른 후 다시 감소한다.

식 (3)에서 보면 바이어스 전압의 낮은 출력 주파수 영역에서는 올바른 $V-I$ 곡선을 얻을 수 없는데 그 이유는 회로의 임피던스가 $R_p + R_s$ 보다는 $R_p + R_s + R_c$ 에 의하여 결정되기 때문이다. 전체 회로 임피던스가 외장 저항 크기에 근접하는 높은 주파수 영역에서 $V-I$ 특성 곡선은 외장 플라즈마 임피던스의 움직임을 나타낸다. 따라서 이러한 주파수 영역에서는 $V-I$ 곡선으로부터 올바른 전자 온도를 구해낼 수 있다. 한편 외장 저항 R_s 가 증가함에 따라서 위상 차이가 감



(a)



(b)

그림 2. 실험에 사용된 다목적 플라즈마 발생장치 (a)와 실험장치의 개략도(b).

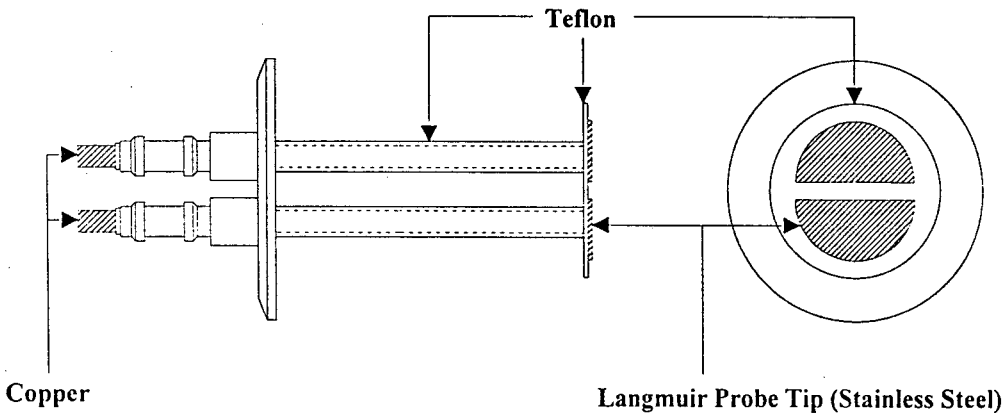


그림 3. 실험에 사용된 Langmuir 탐침.

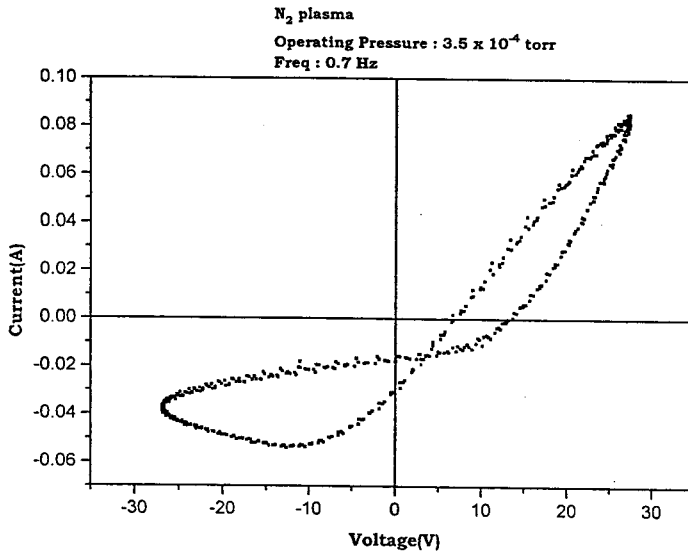


그림 4. 밀도가 3.5×10^{-4} torr일 때 쓸기전압 주파수가 0.7Hz일 경우의 실험 결과.

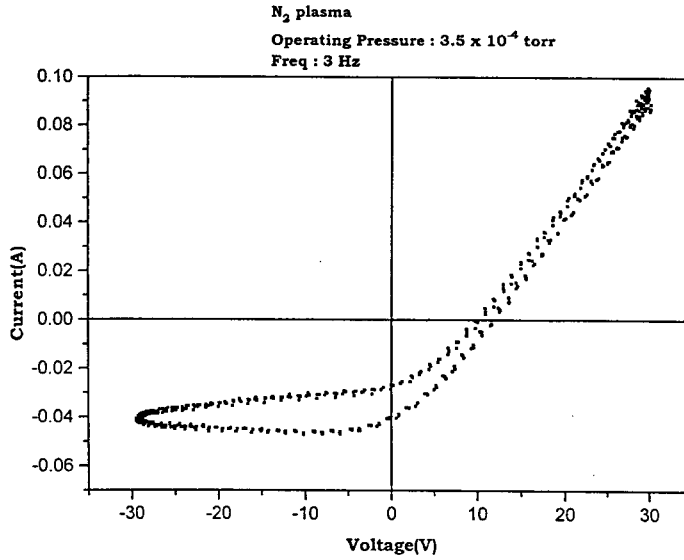


그림 5. 밀도가 3.5×10^{-4} torr일때 쏠기전압 주파수가 3Hz일 경우의 실험 결과.

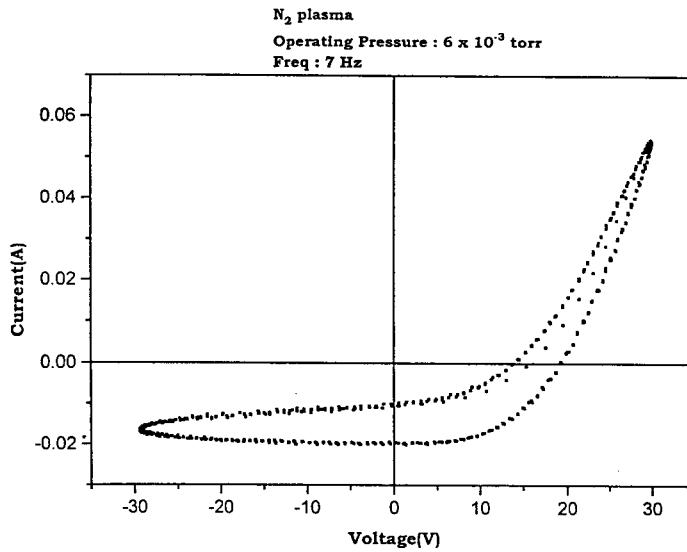


그림 6. 쏠기전압 주파수가 7Hz일때 플라즈마 밀도가 6×10^{-3} torr일 경우의 실험 결과.

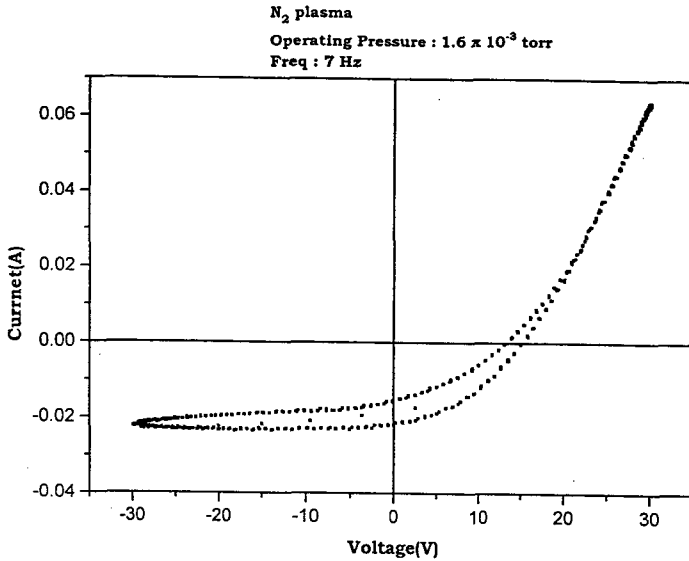


그림 7. 쏘기전압 주파수가 7Hz일때 플라즈마 밀도가 1.6 × 10⁻³ torr일 경우의 실험 결과.

소하는데 반하여 회로의 임피던스는 R_s 가 0일때 $R_c/(1 + \omega^2 C_c^2 R_c^2)^{1/2}$ 으로부터 점차 외장 저항 값에 가깝게 증가한다. 즉, 이것은 플라즈마 밀도가 작을 때 탐침 특성 곡선이 거의 외장 저항에만 의존한다는 사실을 나타내며 탐침 특성 곡선은 주위 플라즈마 밀도가 감소할수록 올바른 특성 곡선에 가깝게 가게 된다.

Langmuir 탐침의 오염 효과 실험을 위하여 기초과학지원연구소에 있는 다목적 플라즈마 발생장치를 이용하였다. 진공용기의 전체 면적은 238 리터이고 로타리 펌프 1기와 터보분자 펌프 1기를 사용하여 10⁻⁷ torr의 진공을 생성, 유지할 수 있다. 전체 진공 용기는 두 부분으로 구성 되어 있는데, 상부 용기의 위쪽에는 플라즈마 발생을 위한 전극, 필라멘트 그리고 진단 창치를 위한 포트가 있으며 하단부 용기에는 진공펌프로 연결 되는 배기구와 진공 게이지를 부착할 수 있는 구조로 이루어져 있다. 또한, 진공도의 측정을 위하여 피라니 게이지와 이온화 게이지를 사용하고 있다. 진공 용기의 재질은 알루미늄으로 되어있으며 탐침과 게이지 장착등을 위해 외부와 연결되는 특정 부분은 스테인레스 스틸로 제작되어 외력에 의한 마모와 충격을 견딜 수 있게 되어있다(김종일 1995). 그림 2의 (a)는 다목적 플라즈마 발생장치이며, (b)는 실험 장치의 개략도이다.

실험은 다음과 같은 상태에서 시행하였다. 기반 압력이 2 × 10⁻⁷ torr인 상태에서 N₂ 가스를 진공용기 내에 주입하여 운용 압력을 6 × 10⁻³ torr로 조절한 다음 바이어스 전압을 40V로, 필라멘트에 흐르는 전류의 양을 17A로 조정하여 플라즈마를 발생시켰다. 운용압력은 6 × 10⁻³ torr, 1.6 × 10⁻³ torr 그리고 3.8 × 10⁻⁴ torr 세 단계로 나누어 각각의 상태에서 실험을 하였다. 또한 각각의 상태에서 쏘기 전압의 주파수를 0.7Hz, 3Hz, 7Hz로 변화시켜가면서 측정하였다. 실험에

사용된 Langmuir 탐침은 그림 3과 같이 반원판 형태로 스테인레스 스틸을 사용하여 만들었고 두 개짜리 feedthrough의 양 끝면에 부착시켰다. 탐침의 직경은 33mm이고 사이 간격은 7mm로 전체 면적은 6.24cm²이다. 탐침은 플라즈마 용기의 하단에 설치 되어있으며 벽으로부터 133.5mm 거리에 위치하고 있다. 탐침 이외의 부분은 플라즈마에 의한 영향을 없애기 위하여 테프론 봉으로 절연시켰다. 실험 결과는 그림 4에서 그림 7에 나타나 있다. 그림 4와 그림 5는 같은 밀도의 플라즈마에서 쓸기 전압의 주파수를 각각 0.7Hz와 3Hz로 하여 실험한 것으로 주파수가 증가할수록 히스테리시스가 줄어드는 것을 잘 보여준다. 그림 6과 그림 7은 히스테리시스의 플라즈마 밀도 의존성을 보여주는 것으로 밀도가 낮아질 수록 히스테리시스가 줄어드는 것을 보여준다.

4. 토의 및 결론

앞에서 이론적인 연구와 실험을 통한 확인에서 Langmuir 탐침을 이용하여 얻은 $V - I$ 곡선은 오염에 의한 효과로 인하여 쓸기 전압의 방향에 따라 서로 다른 경로를 가지게 되는데 이는 히스테리시스효과를 나타낸다. 이러한 오염 효과를 줄이기 위하여 여러가지 방법을 생각할 수 있다. 우선 검출기를 가열시켜 오염물질을 제거한 후 유리판으로 밀폐시켰다가 실험 직전에 대기중에 노출시키는 방법은 현 단계의 로케트를 이용한 실험에서 기술적인 어려움이 따를 것으로 예상된다. 따라서 여기서는 이차적인 방법으로 전자 온도와 밀도를 분리하여 측정하는 방법을 채택하여 검출기가 오염이 되더라도 비교적 신뢰성 있는 전자 온도를 측정할 수 있는 전자 온도 검출기와, 전자 온도와 밀도를 측정하는 일반적인 Langmuir probe에 rf 변조를 이용하여 오염 효과를 줄여 주는 방법을 제시하고자 한다.

전자 온도 검출기에 진폭이 a 인 작은 사인파를 sweep voltage에 중첩시키면 floating potential이 다음과 같이 변하는 사실을 이용한다.

$$V_{fa} = \frac{kT_e}{e} \ln [i_i / i_e I_0(ea/kT_e)] \quad (6)$$

여기서 $I_0(ea/kT_e)$ 는 0차 modified Bessel function이다. 따라서 floating potential의 원래 위치로부터의 변위는 아래와 같다.

$$V_{fa} - V_F = -\frac{kT_e}{e} \left[\ln I_0\left(\frac{ea}{kT_e}\right) \right] \quad (7)$$

위 식은 온도만의 함수이므로 이로부터 전자의 온도를 측정할 수 있다. 이 방법의 장점은 두 개의 탐침을 사용하여 V_{fa} 와 V_F 를 측정하고 그 신호의 차이를 이용함으로써 두 탐침에 동시에 효과를 미치는 자기장, 오염 등의 영향을 어느 정도 제거할 수 있다는 것이다. 한편 전자 밀도의 검출은 기존의 Langmuir probe sweep voltage를 rf 변조시켜 오염층의 capacitance에 의한 히스테리시스를 줄이는 방법을 사용하는 것이 편리하다. 현재 이 두 가지 방법을 이용한 전자 검출기의 제작이 진행 중이며 그 결과는 추후에 발표할 예정이다.

참고 문헌

- 김종일 1995, 한양대학교 석사학위 논문
Easley, M. A. 1951, J. Appl. Phys., 22, 590
Oyama, K. 1976, Planet. Space Sci., 24, 183
Oyama, K. & Hirao, K. 1976, Rev. Sci. Instrum., 47, 101
Van Berkel, W. P. J. 1938, Physica, 5, 230.
Waymouth, J. F. 1959, J. Appl. Phys., 30, 1404
Wehner, G. & Medicus, G. 1952, J. Appl. Phys., 23, 1035