

다양한 전기탐침을 이용한 RF 플라즈마 전자온도의 측정

서영준, 우현중, 최근식, 유현중, 노태협¹, 정규선
 한양대학교 전기공학과, ¹한국기초과학지원연구원

On the deduction of electron temperature by various electric probes in RF plasma

Y.-J. Seo, H.-J. Woo, H.-J. You, T. Lho¹, K.-S. Chung

Department of Electricity & Control Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

¹Korea Basic Science Institute, Daejeon, 305-333, Korea

Abstract - An electric probe is a conductor inserted into the plasma, by which plasma density and electron temperature can be deduced from the collected current (I) versus applied voltage (V) to the probe. In RF plasma the I-V characteristics of electric probe is distorted due to the RF fluctuation of plasma potential, so that it is hard to measure the real plasma parameters, especially the electron temperature. To eliminate the RF fluctuation, several compensation methods are developed such as RF compensation probe, peak-to-peak method, asymmetric double probe. By comparing proposed methods, a suitable method is to be introduced in determining electron temperatures in RF plasma.

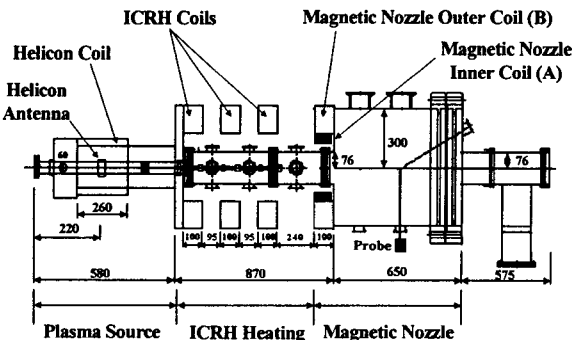
1. 서 론

플라즈마는 반도체 공정, 핵융합, 우주 추진체 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이런 플라즈마의 변수들을 정확히 측정하는 것은 그 자체의 이용뿐만 아니라 물질 등과의 반응 관계에서도 중요하다. 전기 탐침은 이런 플라즈마 변수 측정에 단순하면서도 쉬운 제작성 때문에 널리 사용하는 진단 장비의 하나이다. 하지만 그 해석기술에 있어서는 아직 연구가 진행 중이며, 특히, 공정 과정에 이용되는 식각, 박막장비 등은 대부분 RF를 이용한 플라즈마 장비인데, RF 플라즈마의 경우 플라즈마 전위의 RF 요동과 탐침 외장의 비선형성은 I-V 특성곡선의 전자 전이 영역을 왜곡시키며 부유 전위의 값을 더욱 음으로 치우치게 한다. [1, 2] 기존의 전기탐침 해석방법을 이용하여 I-V 특성곡선을 해석할 경우 전자온도(T_e)와 플라즈마 전위(V_s) 같은 변수들의 왜곡을 가져오게 된다. 특히 전자온도의 경우 과대 해석되어 질 수 있다. 그러나 RF에 의한 플라즈마 전위 요동의 보상(플라즈마 전위 요동에 대한 탐침 전위의 뒤따름)이 이루어진다면 정확한 플라즈마 변수를 얻을 수 있다. 물론 Maxwellian 플라즈마의 경우 RF 요동이 있더라도 높은 전자온도와 낮은 플라즈마 전위의 낮은 요동 즉, 전자 전류가 지수적 영역을 벗어나지 않는다면 전자전류로부터 정확한 온도를 구할 수도 있다. [2, 3] 본 연구에서는 이런 RF 플라즈마의 요동을 보상하는 여러 방법을 사용하여 전자온도를 비교해 보았다.

2. 실험 방법

2.1 RF 플라즈마원

본 실험은 우주 추진체 모사장치인 K2H (KBSI- KAIST-Hanyang)에서 수행되어졌다. 구성도는 <그림 1>과 같다. K2H 장치는 플라즈마 소스, ICRH (Ion Cyclotron Resonant Heating) 부분, 자기노즐의 세부부분으로 구성되어 있다.



<그림 1> K2H의 구성도

플라즈마 소스는 고정된 13.56MHz, 최대 1kW RF파워에 의해 m=+1 헬리콘 안테나를 사용하여 플라즈마를 발생시킨다. 헬리콘 안테나는 너비 10mm, 두께 0.5mm의 구리판으로 제작되었으며, 반경 30mm, 길이 180mm로 되어있다. 제작된 안테나는 플라즈마 소스부분에서 5%의 균일함을 갖

는 800G의 자기력을 갖는 전자석 코일 안의 직경 60mm석영관 외부에 장착되어 있다. 자기노즐 끝부분에 터보분자 펌프가 위치해 있다. 본 연구에서는 600W의 파워, 기본압력 9*10⁻⁶ torr, 운전압력 3.5mTorr의 Ar 플라즈마로 실험을 하였으며, 자기노즐 끝 포트에 각각 RF 보상탐침과 비대칭형 이중탐침을 삽입하였고, 비대칭형 이중탐침에서 측정탐침을 단일탐침으로 이용하여 보상 없는 단일탐침법과 극점 측정법을 실시하였다.

2.2 전기탐침법

2.2.1 RF 보상 탐침 (RF compensation probe)

RF 보상 탐침 (RF compensation probe)는 탐침 신호의 RF 왜곡을 줄이기 위해 측정 회로의 임피던스를 증가시키는 RF 공명 필터 (RF Resonant Filter)를 탐침의 회로 내부에 넣는 방법이 제안되었으며, RF 공명 필터를 포함한 고-임피던스 회로 (High Impedance Circuit)는 외장 전위의 요동과 탐침 회로 사이의 분압기로 작용한다. RF 플라즈마에서 플라즈마 전위 (V_s)는 직류전위 (V_{dc})와 플라즈마 전위의 RF 요동 (V_{RFsinωt})으로 표현될 수 있다. 즉, V_s=V_{dc}+V_{RFsinωt} 라고 할 때 탐침이 전위의 요동을 뒤따르기 위해서는 다음 조건을 만족해야 한다. [2]

$$\frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_{ck}} |V_{RF}| \ll \frac{kT_e}{e}$$

여기서, Z_{sh}, Z_{ck}는 각각 외장과 탐침 회로의 임피던스이고 k는 볼츠만 상수, e는 전자의 전하량이다.

이번 실험에서 RF 보상탐침은 13.56 MHz (1st harmonic), 27.12 MHz (2nd harmonic)에서 공명하는 초크를 이용하여 RF 요동에 의한 효과를 줄였으며, 탐침 팁은 반경 0.25mm, 길이 3mm의 원통형 몰리브덴 팁을 사용하여 반경 1mm세라믹으로 고정하였다. 실제 탐침 팁 면적의 50배에 해당하는 Reference 팁과 1nF의 콘덴서(capacitor)로 연결되어 있다.

2.2.2 극점 측정법 (Peak to peak method)

RF 플라즈마의 경우 탐침에 흐르는 순간전류(instantaneous current)는 탐침에 수집되는 입자전류와 시간적으로 변하는 플라즈마 외장에 의한 변위 전류(displacement current)로 다음과 같이 나타낼 수 있다. [4]

$$I(V_{probe}, t) = I_i(V) + I_e(V) + C_{sh} \frac{dV}{dt}$$

여기서 V=V_{dc}+V_{RFsinωt}-V_{probe}이고, V_{probe}는 탐침에 걸린 전압, C_{sh}는 탐침의 정전용량이다.

RF 플라즈마에서 일반적인 탐침을 사용할 때 탐침에 수집되는 입자전류와 변위전류를 분리할 수는 없으며 특히 높은 에너지 전자에 의한 전류는 변위전류와 비슷한 크기이거나 더 작을 수도 있고 이는 높은 에너지 전자의 크기를 과대평가 할 수 있다. [5] 따라서 RF에 의한 왜곡이 없는 I-V 특성곡선을 구하려면 dV/dt≈0 인 조건에서 탐침에 흐르는 순간전류에서 변위전류를 무시할 수 있게 해야 한다. 이 조건은 V가 최대와 최소인 극점에 해당한다. 이 극점을 측정하는 두 가지 방법이 있는데, 첫 번째는 탐침에 걸어주는 전압을 단계적으로 변화시키며 각 전압마다 순간 전류 파형을 얻은 후 그 파형의 최소점을 연결 시키는 동위상 측정법(In-phase measurement)이다. 하지만 이 방법은 정확성은 있으나 하나의 온전한 I-V 특성곡선을 얻기 위한 시간이 길다는 단점이 있다. 실제 RF 주기 동안의 전류 파형 중 I-V 특성곡선에 사용하는 것은 한 지점으로 이를 이용하는 것이 오실로스코프의 극점 측정 방법(Peak detection method)을 이용하는 것이다. 오실로스코프의 극점 측정법을 이용하면 정류회로의 도움 없이 왜곡 없는 I-V 특성곡선을 얻을 수 있다. 그런데 극점을 측정하기 위해서는 RF 주기보다 빠른 샘플링이 필요한데 대부분의 측정 장치는 이를 따라가지 못하는 것이 사실이다. 하지만, 샘플링 비율을 이용한 위상신호를 이용하면 낮은 진동수에서도 RF 주기의 형태를 따라 갈 수 있다. [6] 본 실험에서는 5kHz의 샘플링 비율로 측정을 하였다.

2.2.3 비 등방성 이중탐침 (Asymmetric double probe)

비 등방성 이중탐침은 각각 탐침의 집속 면적의 비로 인해 비 등방적인 탐침의 형태를 갖춘 것이다. 기존의 이중 탐침이 집속 면적이 같고 각 탐침이 이온 포화 전류만을 집속하여 플라즈마 변수를 측정하는 것과 달리, 비 등방성 탐침은 면적이 큰 탐침이 기준탐침으로서 그 전위가 플라즈마의 부

유 전위 부근에 머물면서 동시에 플라즈마 전위의 요동과 같은 위상으로 흔들리게 된다. 이 기준탐침의 전위가 측정탐침의 기준이 되어 플라즈마 요동 효과를 보상 한 단일 탐침과 같은 효과를 보인다. 이런 효과를 보이기 위해서는 이중탐침의 면적비는 다음을 만족해야 한다. [7]

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1}{\zeta\alpha\phi} \frac{n_{e1,sh}}{n_{e2,sh}} \sqrt{\frac{m_+}{2\pi m_e}}$$

여기서 $A_{1,2}$ 는 측정탐침과 기준탐침의 면적으로 가정 가능하며, $n_{e1,sh}$, $n_{e2,sh}$ 는 각 탐침 외장 언저리에서의 전자밀도, m_+ 와 m_e 는 이온과 전자의 질량이다. ζ 는 플라즈마의 유동과 자기전위장 (magnetic sheath) 등에 의한 전위장에 걸린 밀도 감소 인자로 자기장이 없고 유동이 없는 안정한 플라즈마의 경우 $\zeta=0.61$ 이다. α 는 탐침과 플라즈마 사이의 전위차에 관계된 변수로 더바이 길이에 비례하지만, 탐침의 크기가 더바이 길이에 비해 크고, 전위차가 크지 않은 경우 5 보다 작은 값을 가진다. ϕ 도 탐침과 플라즈마 사이의 전위차에 관련된 변수로, 비대칭형 이중탐침을 사용하였을 때, 전자 분포 함수 부분의 오차를 3% 이하로 하려면 0.01이하가 되어야 한다. 위 식에 따르면 Ar의 경우 탐침간 면적비가 10000 배 이상 이어야 오차 없는 값을 얻을 수 있다.

본 실험에서는 측정탐침 팁은 반경 0.25 mm, 길이 3mm의 원통형 물리 브랜 팁을 사용 하였고, 탐침 팁 면적의 170 배의 기준탐침을 제작하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

탐침에 충분한 음전위가 인가되었을 경우 모든 이온이 탐침 표면에 수집되며, 반대로 전자는 배척된다. 이 때 탐침으로 측정되는 이온 전류를 이온 포화 전류라 하며 다음과 같이 정의 된다.

$$I_{i,sat} = en_{i,sh} C_s A_p = en_{e,sh} C_s A = \zeta en_{\infty} C_s A$$

여기서 $n_{i,sh}$, n_{∞} 는 각각 외장 언저리에서의 이온과 전자 밀도 그리고 탐침의 영향을 받지 않는 곳의 플라즈마 밀도이다. 이온포화전류($n_{i,sh}$)는 전압대 탐침 전류의 전계영역에서 탐침 인가 전압에 상관없이 일정한 양이며, C_s 는 이온 음속으로 질량수가 μ 이고, $T_e \ll T_e$ 로 가정할 경우 다음과 같다.

$$C_s = 9.79 \times 10^5 \sqrt{\frac{T_e}{\mu}}$$

전자의 경우, 그 분포가 Maxwellian이라 가정할 경우, 플라즈마 전위보다 낮은 전압에서는 전자 전류는 다음과 같이 나타내어진다.

$$I_e = I_{e,sat} \exp\left[\frac{-e(V_s - V_{probe})}{T_e}\right]$$

여기서 $I_{e,sat}$ 는 전자 포화 전류이며 다음과 같이 정의 된다.

$$I_{e,sat} = -\frac{1}{4} en_{e,sh} \bar{v} A = -\frac{1}{4} en_{e,sh} \sqrt{\frac{8kT_e}{m_e}} A$$

이로부터 ln을 취한 전류의 기울기에 의해서 전자온도를 구할 수 있다.

$$T_e = e \left(\frac{d(\ln I_e)}{dV_{probe}} \right)^{-1}$$

이중탐침의 경우는 두개의 탐침이 같은 면적일 경우 탐침에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타내어진다.

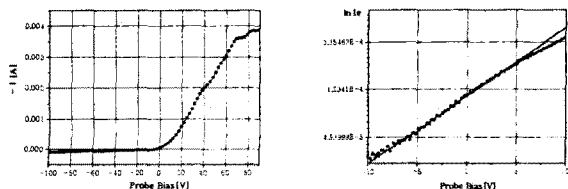
$$I = I_{i,sat} \tanh\left[\frac{eV}{2T_e}\right]$$

여기서 V 는 두 탐침간의 상대적인 전위차이다. 이 식으로부터 전자온도를 얻을 수 있다.

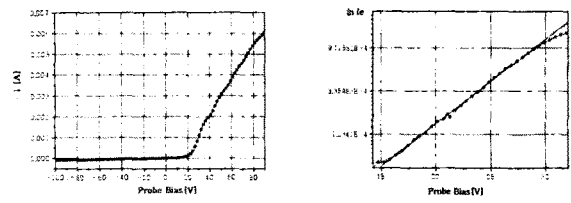
$$T_e = \frac{I_{i,sat}}{2} \left(\left[\frac{dI}{dV} \right]_{I=0} \right)^{-1}$$

실험으로부터 얻은 I-V 특성 곡선으로부터 위의 식들을 사용하여 플라즈마 밀도와 전자온도 측정하였다. 그 결과, 플라즈마 밀도 $1.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 에 전자온도는 각각 보상 없는 단일 탐침으로 측정하였을 경우 6.8eV, RF 보상 탐침으로 측정된 전자온도는 5.1eV, 극점간 측정법의 최대값 $T_{e,max}=6.2\text{eV}$, 최소값 $T_{e,min}=5.8\text{eV}$ 를 보였으며, 비 등방성 이중탐침은 이중탐침 해석법을 사용하여 $T_e=5.0\text{eV}$, 단일 탐침 해석법으로는 $T_e=6.2\text{eV}$ 의 결과를 보였다.

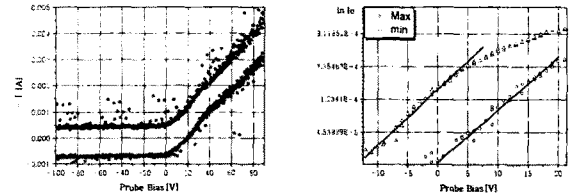
<그림 2>는 각 탐침으로부터 얻은 I-V 특성 곡선과 전자온도계산을 위한 Fitting(b)을 나타낸 것이다.



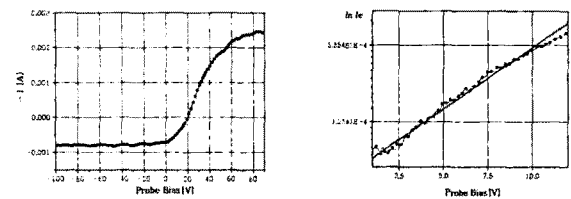
(a) I-V 곡선 (b) ln-fitting 한 전자전류
(i) RF 보상 없는 단일 탐침 ($T_e=6.8\text{eV}$)



(a) I-V 곡선 (b) ln-fitting 한 전자전류
(ii) RF 보상탐침 ($T_e=5.1\text{eV}$)



(a) I-V 곡선 (b) ln-fitting 한 전자전류
(iii) 극점간 측정법 ($T_{e,max}=6.3\text{eV}$, $T_{e,min}=5.8\text{eV}$)



(a) I-V 곡선 (b) ln-fitting 한 전자전류
(iv) 비 등방성 이중탐침법 ($T_e=6.2\text{eV}$)

<그림 2> 여러 가지 탐침으로부터 얻은 I-V곡선과 ln(Ie)곡선

RF 보상 탐침의 경우 비교적 깨끗한 데이터를 얻을 수 있지만, 초크의 제작 등은 회로 제작 후 보정을 통해 제거하고자 하는 공진 주파수를 얻어야 한다. 또한, 시간적으로 변하는 플라즈마 전위에 있어 RF 보상 탐침은 시간적으로 평균된 값이 측정되기 때문에 특정 위상에 대한 정보는 얻기 힘들다. 그에 반해 극점간 측정법은 시간에 따라 변화하는 플라즈마 I-V 특성곡선을 얻을 수 있게 된다. 비 등방성 이중탐침은 기존의 RF 보상탐침이 특정한 요동만을 보상 한다는 단점에서 벗어나 임의의 플라즈마 요동 및 이의 고조파에 의한 이차, 삼차, 그리고 그 이상의 요동도 보상할 수 있는 장점을 가진다. 본 연구에서는 단일탐침 해석법으로 해석할 경우 보상탐침에 비해 전자온도가 과대평가되어져 나타났는데, 이는 기준탐침의 면적이 충분히 크지 못해 일어난 현상으로 보인다.

[참고 문헌]

- [1] V.A. Godyak, R.B. Piejak and B.M.Alexandrovich, "Measurement of electron energy distribution in low-pressure RF discharges", Plasma Sources Sci. Tech. 1, 36, 1992
- [2] I.D. Sudit and F.F. Chen, "RF compensated probes for high-density discharges", Plasma Sources Sci. Tech. 3, 162, 1994
- [3] L.Oksuz, F. Soberón and A.R. Ellingboe, "Analysis of uncompensated Langmuir probe characteristics in radio-frequency discharges revisited", J. Appl. Phys. 99, 013304, 2006
- [4] R.B. Turkot, Jr. and D.N. Ruzic, "Time- and space-resolved radio-frequency plasma electron energy distributions from a displacement-current-based electric probe diagnostic", J. Appl. Phys. 73, 2173, 1993
- [5] D.D. Blackwell and F.F. Chen, "Time-resolved measurements of the electron energy distribution function in a helicon plasma", Plasma Sources Sci. Tech. 10, 226, 2001
- [6] Y.-S. Choi, B.-K. Lee and K.-S. Chung, "A new method of electron temperature determination in un-magnetized and magnetized RF plasmas without RF compensation circuit", Contrib. Plasma Phys. 44, 662, 2004
- [7] J.D. Swift, "Asymmetrical double-probe systems", Brit. J. Appl. Phys. 2, 134, 1969