

삼중탐침과 단일탐침에 의한 RF, DC, RF+DC 플라즈마의 특성비교

최용섭 · 정규선 · 장두희 · 심연근 · 김진희

한양대학교

요약

필라멘트 직류 가열 방식에 의한 DC 플라즈마, Capacitive RF 플라즈마, 그리고 DC+RF 혼성 플라즈마를 발생시켜서, 삼중탐침과 단일탐침으로 측정비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

	전자온도(eV)		밀도(10^{19}cm^{-3})	
	단일	삼중	단일	삼중
DC 플라즈마	9.8/3.1	9.7	5.6	4.7
RF 플라즈마	9.4	20	1.0	2.3
DC+RF 플라즈마	6.7	17	1.2	1.8

또한 두 개의 온도분포가 존재할 때 단일 탐침과 삼중탐침을 비교하여 삼중탐침이 energetic electron 포집함을 알 수 있었다.

1. 서론

전장탐침은 1920년대 Langmuir에 의해 제안된 후 지구도 플라즈마 변수측정을 위해 활발히 사용되고 있는 플라즈마 진단 기술이며, 종류 또한 단일, 이중, 삼중, 유속, 점성, 방출탐침등으로 다양하며 각각의 탐침들은 약간씩 다른 특성을 나타낸다. 이들 탐침은 핵융합장치의 경계플라즈마, Processing plasma, Space plasma에서의 우주선 부근의 플라즈마 물성측정에 사용되고 있으나, 자기장이 인가될 때에는 자료해석에 어려움이 있다. 단일탐침은 인가전압에 대한 직속전류의 상관관계로부터 전자온도, 플라즈마밀도, 부유공간전위 등을 측정 할수 있으나 Non-linear fitting의 어려움이 있고, 삼중탐침은 전자온도와 밀도 부유전위 등을 curve fitting 없이 real time으로 계측이 가능하나, 높은전자온도를 나타내는 단점이 있다. 이 중에서 삼중탐침은 다른 정전탐침과는 달리 인가전압을 변화시킨 필요가 없이, 정적인 플라즈마뿐 아니라, 요동이 심한 플라즈마를 측정할 수 있는 장점이 있으나, 삼중탐침은 전자의 온도와 밀도를 즉시 알 수 있는 반면, 이중온도 전자

의 경우 두 온도는 측정할 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 삼중탐침과 단일탐침을 이용하여 DC, RF, DC+RF Plasma의 온도와 밀도를 비교하였고 이 결과를 통하여 삼중탐침이 단일탐침보다 높은 전자온도를 측정함을 알 수 있었고 이를 Two Temperature model을 이용하여 확인 하였다.

2. 배경이론

1) Single Probe

단일탐침은 플라즈마진단에 기본적인 유용한 장치로 다음과 같은 이론으로 전자의 온도와 밀도를 구한다.[1] 단일 온도분포($n_e(z) = n_{e0} \exp(e\phi(z)/T_e)$)를 가정하면 Probe로 접속되는 전류는 $\phi(z) - \phi_w \gg T_e/e$, 일때 전자전류는 $I_e = -\frac{1}{4} \overline{ev_e} A_p n_{e0} \exp[e\frac{\phi_w}{T_e}]$, $\overline{v_e} = \left(\frac{8T_e}{\pi m_e}\right)^{1/2}$ 이다.

또, 이온전류는 준중성, 이온의 연속성, 이온의 자유낙하운동으로부터 $I_i = 0.61 A_s n_{e0} e \left(\frac{T_e}{m_i}\right)^{1/2}$ 이 된다.

본 연구에서는 전자를 단일 Maxwellian으로 보지 않고, 두 개의 온도분포($T_{e,high}$, $T_{e,low}$)를 가정하여 단일 탐침을 해석하였고, 이를 단일 온도 모델과 비교 하였다. 이 때 전자의 온도는 $\ln(I)-V$ 의 그래프를 이용하여 구하였으며 이를 이용하여 고속전자와 저속전자의 밀도 비율을 구하였다.

다음은 전자에 관한 이중온도 모델이다:

$$I_e(V_b) = I_{e,high} \exp\left(\frac{-e(V_p - V_b)}{T_{e,high}}\right) + I_{e,low} \exp\left(\frac{-e(V_p - V_b)}{T_{e,low}}\right), \quad V_b \leq V_p$$

$$I_e = I_e^* = I_{e,high} + I_{e,low} \quad V_b > V_p$$

여기서 첨자 high는 fast electron,, low는 slow electron을 나타낸다.

이 경우 온도를 구하기 위해 log를 취하면,

$$\ln(I(\phi)) = \ln(I_{e0}^*) + \ln[\exp(-k\phi/T_{e1}) + \alpha\sqrt{\beta} \exp(-k\phi/T_{e2})]^{1/2}$$

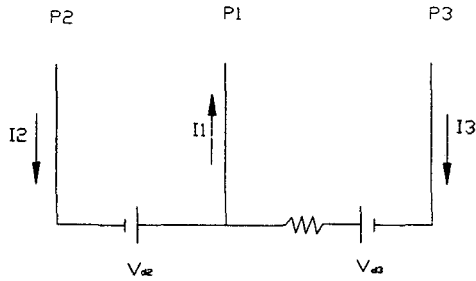
$$\alpha = n_{e1}/n_{e2}, \quad \beta = T_{e1}/T_{e2}$$

이다. 이경우 floating potential (V_f) 부근에서는 고속전자가 주로 탐침에 접속되어, 높은 온도를 읽을 수 있고, floating potential 보다 $\sim T_e$ V 정도 큰부분에서는 저속전자들이 포집됨을 알 수 있다.

2) Triple Probe

삼중탐침은 단일 탐침과 같이 Voltage sweep이 필요가 없고, 바로 전자온도를 알 수있기 때문에

변화가 심한 플라즈마에 적용하기 좋은 방식이다. 대략적인 이론은 다음과 같다.[2]



$$I_1 = I_2 + I_3, \quad V_2 - V_1 = V_{d2}, \quad V_3 - V_1 = V_{d3}$$

$$\begin{aligned} -I_1 &= -S J_e \exp(-\phi V_1) + S J_i(V_1) \\ I_2 &= -S J_e \exp(-\phi V_2) + S J_i(V_2), \quad \phi \equiv e/kT_e, \\ I_3 &= -S J_e \exp(-\phi V_3) + S J_i(V_3), \quad J_e = n_e e (kT_e/2\pi m_e)^{1/2} \end{aligned}$$

J_e : 전자포화 전류 (electron saturation current)

J_i : 이온 포화 전류 (ion saturation current)

S : 탐침의 외장 (sheath) 면적

이때 $J_i(V_1) \approx J_i(V_2) \approx J_i(V_3)$ 이라고 가정하면 (이 경우 이온포화전류의 변화를 고려하여도

큰 차이가 나지 않는다. [2]) 전자온도는 $\frac{I_1 + I_2}{I_1 + I_3} = \frac{1 - \exp(-\phi V_{d2})}{1 - \exp(-\phi V_{d3})}$ 이 되고, $V_2 = V_{float}$,

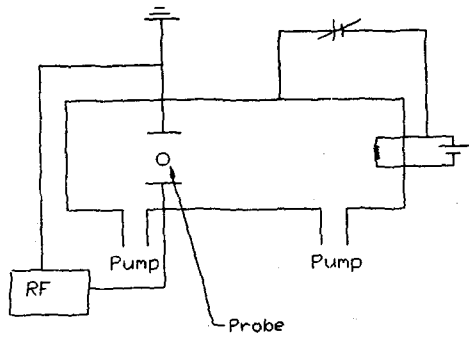
$V_{d3} \gg V_{d2}$ 인 경우 윗식은 $T_e = \frac{V_{d2}}{\ln 2}$ 이 되고, 밀도는 다음식을 사용하여 구할 수 있다.

$$n_e = \left(\frac{\sqrt{m_i}}{S} I \right) \cdot \frac{\exp(1/2)}{e(kT_e)^{1/2} [\exp(\phi V_{d2}) - 1]}$$

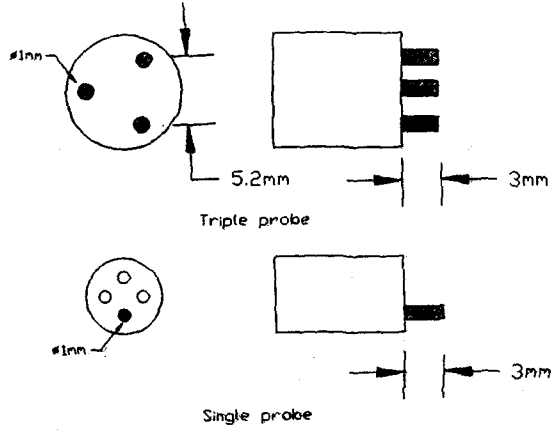
3. 실험장치

실험은 세가지 경우의 플라즈마(RF, DC, DC+RF)에 대하여 단일탐침과 삼중탐침을 이용하여 측정하였으며 다음의 실험장치를 사용하였다.

실험장치 개략도



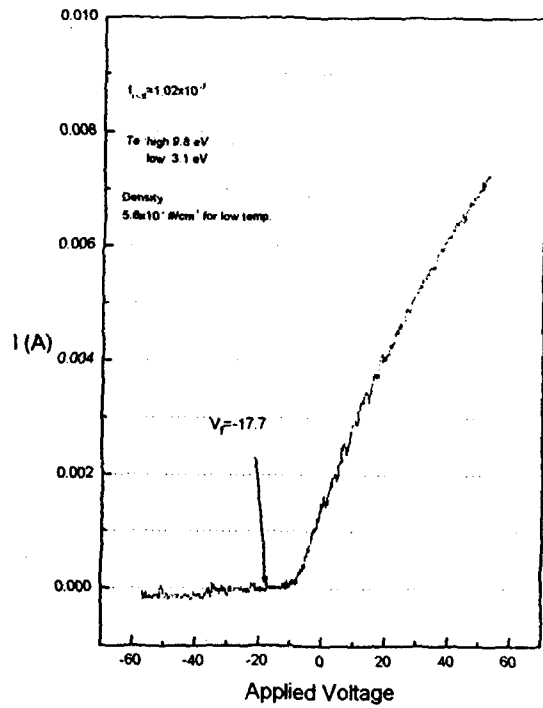
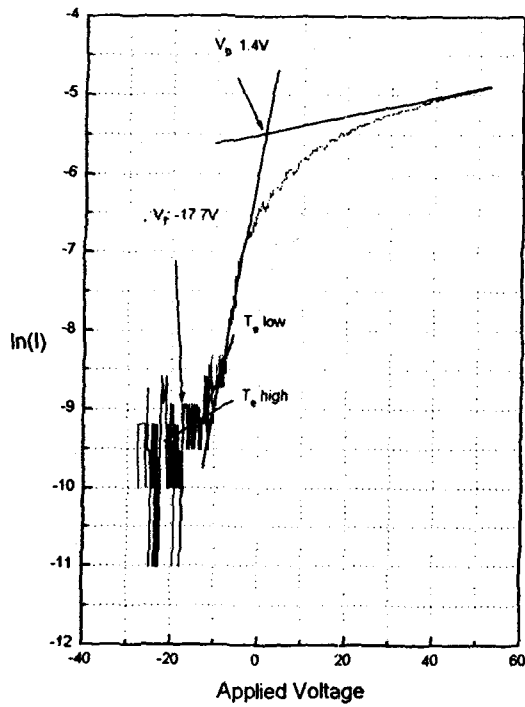
탐침 팁(Tip)



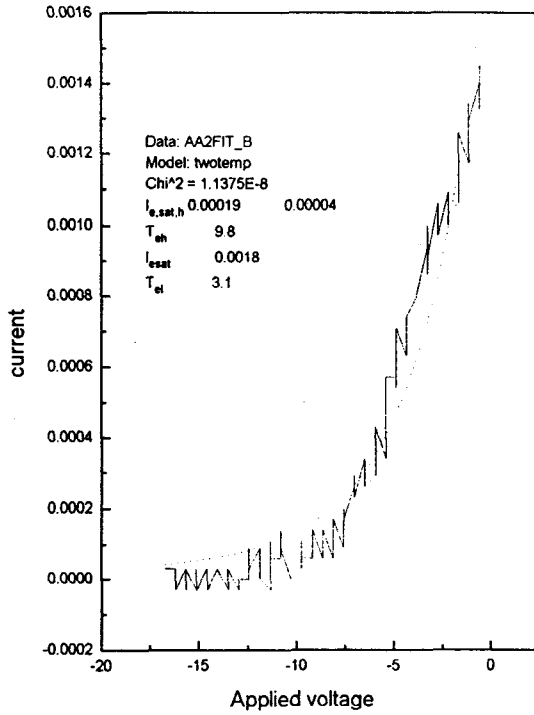
4.자료 해석 및 토론

다음은 DC, RF, DC+RF의 단일탐침의 그래프와 삼중탐침으로 측정 한 값이다.

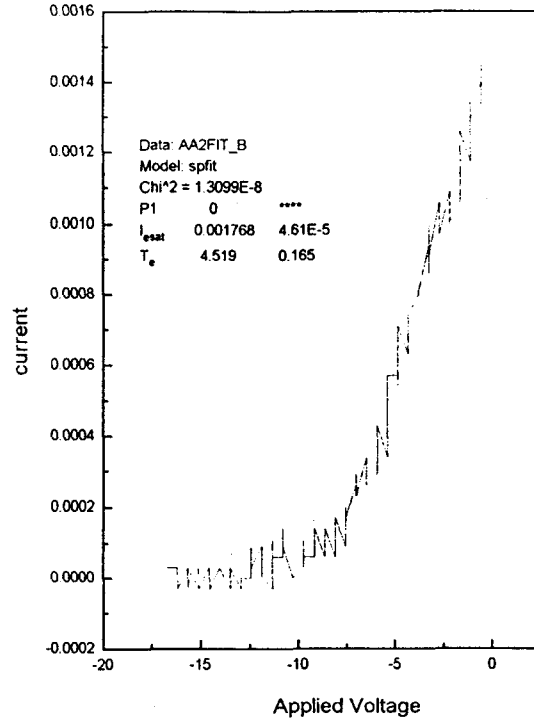
DC filament (filament current 17A, Bias Voltage 30V)



One Temp. fitting

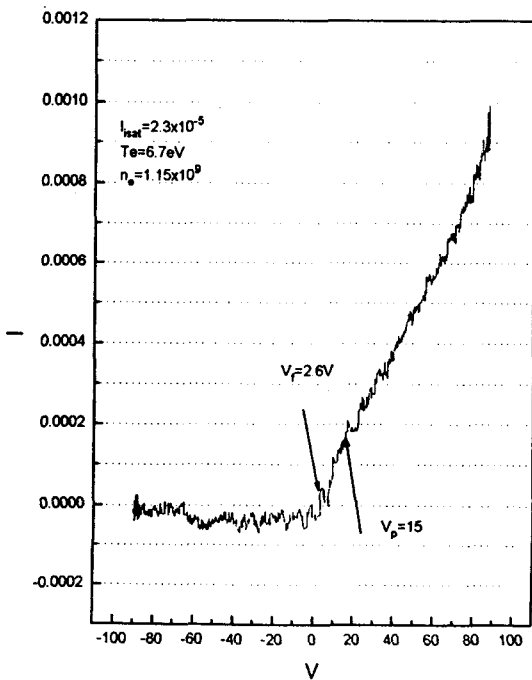


Two Temp. fitting

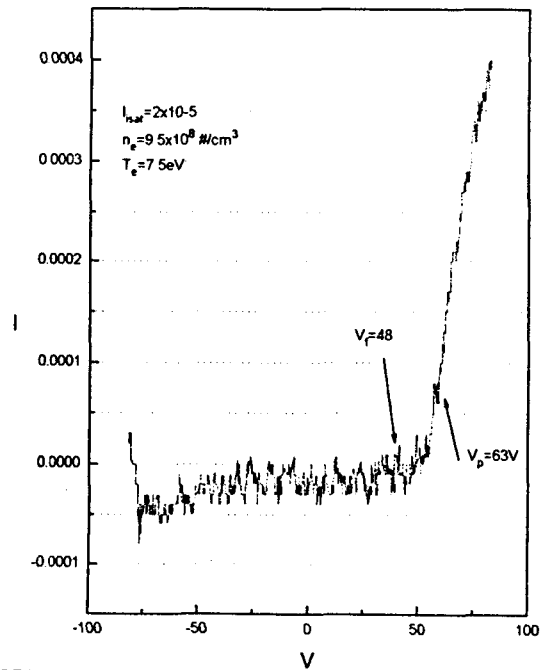


RF(power 10W) , DC(bias vlotage 55V, filament current 17A)+RF(power 10W)

Filament + RF



RF



	전자 온도		밀도	
	단일	삼중	단일	삼중
DC	9.8/3.1eV	9.7eV	5.6×10^{11}	4.7×10^{11}
RF	9.4eV	20eV	9.5×10^{11}	2.3×10^{11}
DC + RF	6.7eV	17eV	1.15×10^{12}	1.75×10^{11}

위의 결과에서 DC 플라즈마의 경우는 primary electron에 의한 온도와 bulk plasma의 온도가 단일탐침에서 보이며, 이중 높은 전자의 온도를 삼중탐침이 측정하는 것을 알 수 있다. 이는 삼중탐침이 floating potential부근에서 전자를 포획하기 때문에 상대적으로 높은 전자의 온도를 측정하게 된다. 삼중탐침의 경우에서도 두 온도분포를 고려하면 삼중탐침에 관한 식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{2} = \frac{1 - \exp(-\phi_r V_{d2}) + \frac{1}{\alpha\sqrt{\beta}} \{ \exp(-(\beta-1)\phi_r V_1) - \exp(-\phi_r(\beta V_2 - V_1)) \}}{1 - \exp(-\phi_r V_{d3}) + \frac{1}{\alpha\sqrt{\beta}} \{ \exp(-(\beta-1)\phi_r V_1) - \exp(-\phi_r(\beta V_3 - V_1)) \}}$$

$$\alpha = n_{ef}/n_{ei}, \quad \beta = T_{ef}/T_{ei}$$

이 경우 DC 플라즈마의 경우($\alpha=1/9$, $\beta=3.2$, $V_{d2}=6.7V$, $V_2=-17.7$, $V_1=-24.4$)를 적용시키면 잘 들어 맞는 것을 알 수 있었다.

RF와 RF+DC의 경우에 삼중탐침에 의해 나타나는 전자의 온도가 단일탐침보다 많이 높게 나타나며 단일탐침에서는 높은 온도가 나타나지 않아 RF에 대한 해석은 아직 않된 상태이며, RF에 의한 어떤 영향이 있으리라 생각된다(RF noise filtering, Self-bias voltage effect).

참고문헌

- [1] K-S CHUNG "Lecture on HANBIT Device" Ch. 9
- [2] Noah Hershkowitz "How Langmuir Probes Work" Plasma Diagnostics Vol.1 edited by Orlando Auciello and Daniel L. Flamm (Academic, San Diego, 1989)
- [3] Sin-Li CHEN and T. Sekiguchi, "Instantaneous Direct-Display System of Plasma Parameters by means of Triple Probe" J. Appl. Phys. 36, 8, p2363, 1965