

디지털 Langmuir Probe 에 의한 플라즈마 진단

연충규, 황기웅
서울대학교 전기공학과

Plasma Diagnostics
with Digital Langmuir Probe

C.K. Yeon, K.W. Whang
Seoul National University

Abstract:

Plasma diagnostics using Langmuir Probe is of wide application because of its simplicity in measurement of electron temperatures and densities. Current methods using simple circuit and analog meters, however, have troubles when they are applied to time-varying or thermal plasmas. To overcome these problems and expand the area of applicability, we have designed fast electronic voltage sweeping circuit in which we can detect digital data. Diagnostics using our digital Langmuir Probe is performed in various kinds of plasmas and the results are shown. Our method can be applied to measuring electron temperature and density of high temperature or time-varying plasmas. And we expect further knowledge of each state of plasma.

1. 서론

일반적으로, 전자의 온도와 밀도는 특정의 플라즈마 상태를 이해할 수 있게하는 대표적인 변수라 할 수 있다. 전자의 온도와 밀도로부터 특정 플라즈마의 상태에 대해 Debye length, Plasma parameter, Ambipolar diffusion coefficient 등 여러가지 정보를 알 수 있고 그 측정방법도 여러가지로 개발되어 왔으나 본 고에서는 Langmuir probe 법에 초점을 맞추기로 하였다. Langmuir probe 법은 single probe 방법과 double probe 방법으로 나누어 볼 수 있다. 기존의 실험에서는 가변전원과 X-Y plotter 또는 전류계등의 analog 계기를 이용하여 플라즈마에 가해지는 전압과 그때 흐르는 전류를 측정하는 방법을 써왔으나, 플라즈마의 상태가 시간에 따라 변화하는 system 이나 플라즈마의 열용량이 몹시 커서 probe 자체가 녹아버릴 경우에는 정확한 실험치를 얻어 내기가 어려웠다. 이를 극복하고 probe method 의 범위를 확장시키기 위해서 본 연구에서는 electronic sweeping method 를 사용하여 급변하는 플라즈마의 온도, 밀도를 측정하는 방법을 개발하여 여러가지 다른 상태의 플라즈마에 적용하였다.

2. 측정장치의 구성

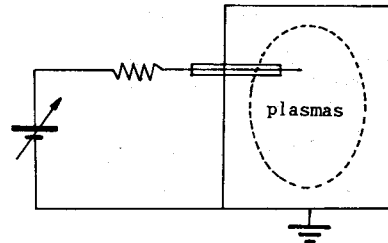


그림 1. Single probe 실험용 회로

그림 1 과같이 가변전원을 probe 에 연결하여 manual sweeping 에 의하여 각 전압에 따른 전류의 변화를 얻을 경우, 손으로 가해줄 수 있는 전압변화의 time scale 과 실험자가 읽을 수 있는 계기의 time scale 을 고려할 경우 플라즈마의 변화가 그 시간보다 매우 빠를 때는 측정할 수가 없게 된다. 또한 고온의 플라즈마에서 probe 가 손상을 입지않는 시간내에 측정을 끝내기 위해서는 빠른 시간내에 가변전압을 가해주고 그 변화와 전류값을 읽어들일 수 있는 장치가 필요하다. 이와같은 필요성에 의하여 그림 2 와 같은 장치를 제작하였다.

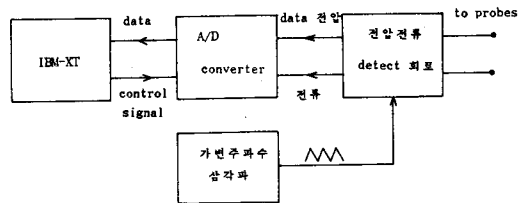


그림 2. 측정장치의 개략도.

플라즈마 변화의 time scale 보다 더 빠른 삼각파 전압을 probe 에 가함으로써 플라즈마의 순간순간의 상태를 알아낸다는 것이 본 측정장치제작의 기본목표이다. 전류전압 detect 회로는 +15~-15 [V] 의 삼각파를 probe 에 가하고 얻어진 전류파형을 filtering, 증폭하여 A/D Converter 에 전달하게 된다. A/D converter 에서 digital화된 data 는 personal computer 에 입력되어 저장되고 체계화된 Algorithm 에 의해 계산된다.

2.2 Data 처리 Algorithm

- 실험을 수행하기 위한 program 은
- 1> 계기 제어용 program
 - 2> data 저장용 program

3> 계산용 program
 으로 나눌 수 있다. 이중 data 처리에 의한 온도, 밀도 계산용 program의 algorithm을 그림 4에 나타내었다. 수행된 각 실험 data로 semi-log graph를 그린 후 그 기울기를 least square method로 구하여 전자 온도 및 밀도를 구할 수 있는데 이것은 다음의 관계식에 의존한다.

$$\ln I_e = (q/kT_e)V_p + \ln A_j - (qV_s/kT_e)$$

- .. I_e : electron current
- .. V_p : potential of probe
- .. T_e : electron temperature
- .. V_s : plasma potential
- .. A : area of probe
- .. j_0 : initial current
- .. k : Boltzmann's const

(single probe 사용시)

$$\ln [(I_p/I_e) - 1] = -qV_p/kT_e + \ln a$$

- .. I_p : ion saturation current
- .. I_e : electron current
- .. a : constant dependent on each experimental condition

(double probe 사용시)

$$I_{is} = \exp(-0.5)AN_e(T_e/M_i) \cdot q$$

- .. I_{is} : ion saturation current
- .. N_e : electron density
- .. M_i : mass of ion

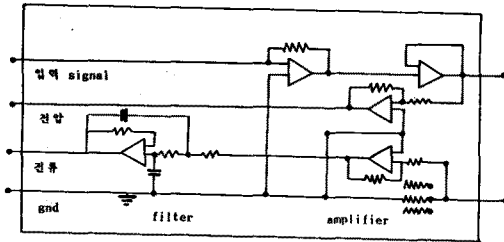


그림 3. 전류전압 detect 회로 개략도.

A/D converter의 sampling time은 제어용 program에 의하여 임의조정할 수 있으며 실험하고자 하는 플라즈마의 특성에 따라 변화시킬 수 있다. 또한 A/D converter의 특성을 바꾸어 다른 부분의 변화없이 측정장비의 sampling time을 보다 높일 수 있고 몹시 빠르게 변화하는 플라즈마의 변화를 측정할 수 있다. 이상과 같은 algorithm에 의하여 실험의 속도를 높일 수 있다는 점과 체계화된 data의 처리가 가능하였다는 점도 본 연구의 부수적인 성과라 할 수 있을 것이다.

3. 측정 사례

3.1 Microwave 플라즈마의 측정

2.45 [GHz]의 microwave를 발생시키는 magnetron (OM52A, max power 550 W)을 energy source로 하여 발생된 플라즈마를 double probe method에 의하여 측정해보았다. 종래의 방법은 manual sweeping에 의한 data를 analog 계기에 의하여 읽어들이었으나 본 연구에서는 1 [KHz]의 삼각파 전압을 probe에 가하여 그림 6과 같은 전류 파형을 얻었다. 이와같은 전류 파형에서 얻을 수 있는 정보는 다음과 같다.

a 부분에서는 플라즈마에 가해지는 power가 0이므로 더 이상 discharge는 발생하지 않는다. 따라서 particle들은 wall로의 확산, recom-

bination, exhaust에 의해 없어지고 플라즈마는 turn-off된다. 이러한 특성은 magnetron에 가해지는 직류전원이 반파정류의 방식을 쓰고 있음에 기인하며 직류전원의 power를 thyristor에 의한 제어정류회로로 대체할 경우에는 power의 변화에 따라 a부분의 폭이 변화하게 된다. b부분에서는 power가 가해지고 discharge는 유지되나 power의 시간에 따른 변화에 의하여 미세한 상태의 변화가 수반된다. 이때 각 주기의 I-V graph를 그리고 그 graph를 분석하면 전자 온도와 밀도의 각 주기동안의 값을 얻어 낼 수가 있다.

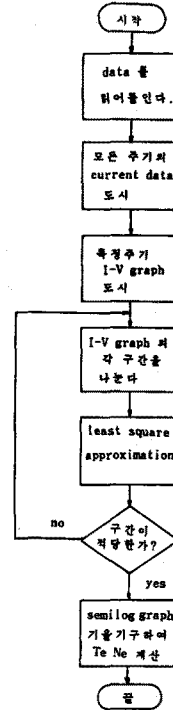


그림 4. 계산 algorithm의 개략도.

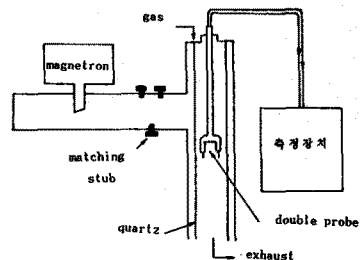


그림 5. microwave system에서의 측정

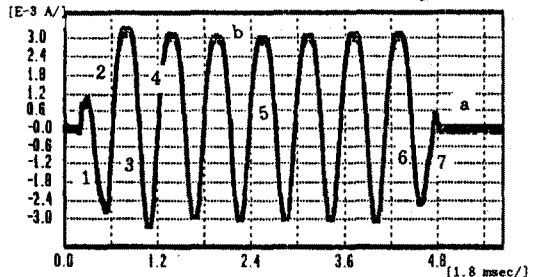
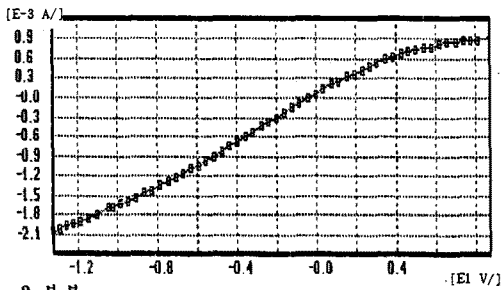


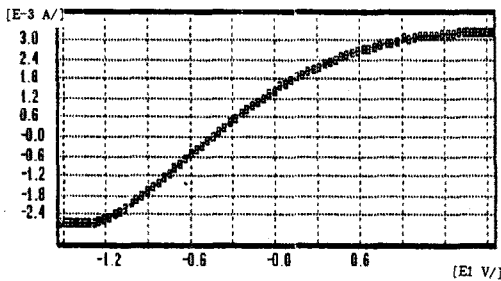
그림 6. 전류 파형

조건 : CO gas (20 SCCM) , 10 [mbar]

1 부분



2 부분



각 부분의 data

	Te	Ne [/cubic cm]
1	2.3 eV	5.0 E11
2	2.76eV	1 E12
3	3.39eV	1 E12
4	3.307eV	9.8 E11
5	3.34eV	9.12 E11
6	3.05eV	8.47 E11
7	1.16eV	3.48 E11

그림 7. 각 주기의 I-V graph 와 data

3.2 HCD 플라즈마의 측정

HCD (Hollow Cathode Discharge) 에 의한 DC 플라즈마를 측정해 보았다. DC를 전원으로 이용하기 때문에 플라즈마의 상태가 지속적으로 유지되나, 진원측의 Thyristor 제어후 평활회로를 거친 직류전압은 약간의 Riffle 을 가지게 되고 그것은 플라즈마의 밀도, 온도를 변화시켜 probe 에 detect 되는 flux 변화를 유발한다. 따라서 그림 8 과 같은 전류파형이 일어난다.

측정에 사용된 방법은 floating 된 chamber 와 probe 사이에 전압을 인가하는 방법으로써, 이것은 double probe method 라 할 수 있으나 그 면적의 차이가 크므로,

$$I_p = 1 - \exp(qV_p/kT_e)[1 - drI_p]^\theta$$

- .. I_p : probe current/ion saturation current
- .. d : ratio of probe area
- .. r, θ : ratio of ion saturation current, temperature of two regions.

when $d \ll 1$, $I_p = 1 - \exp(qV_p/kT_e)$

와 같은 single probe 에 근사한 판례를 보이게 된다.

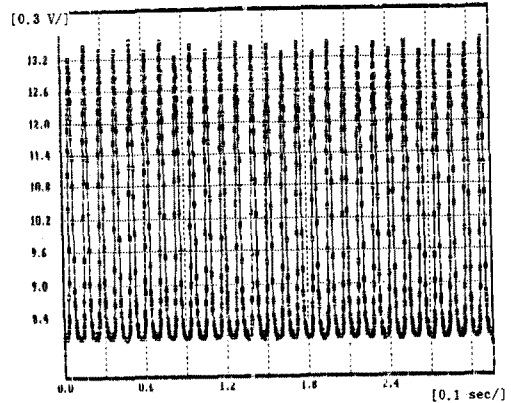
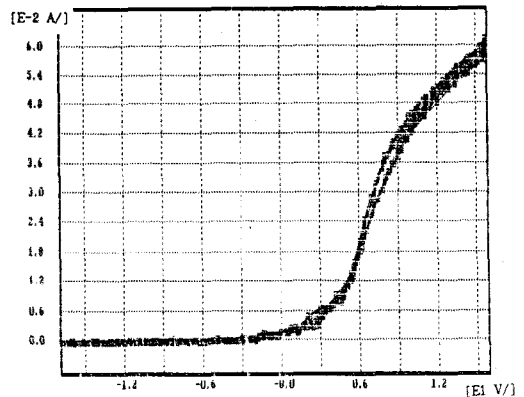


그림 8. HCD Plasma 에서의 전류 파형
조건 : Ar gas , 0.08 [mbar] , 100 [A]

- 1) probe 를 고정시켜서 측정할 경우, 한 지점에서의 전자온도와 밀도를 여러주기에 반복된 data 로부터 얻음으로써 보다 정확한 측정이 가능하다.



Te : 5.2 [eV] , Ne : 1.5 E11 [/cubic cm]

그림 9. 정지된 probe 에서의 multiple scan 된 data.

- 2) Moving probe 방법에 의한 측정. Chamber 내의 한 점에 probe를 고정하지 않고 계속 움직이면서 probe 에 삼각파를 가할 경우, 공간내의 전자 온도, 밀도의 profile 을 얻을 수 있다. 또한 이 방법은 Hollow Cathode 근처의 몹시 밀도가 높고, 열용량이 큰 플라즈마를 probe 의 손상없이 측정할 수 있게 해준다. 그림 10 에 moving probe 사용시의 전류파형이 보여졌다.

3.3 DC Thermal plasma 에서의 측정.

일반적으로 electric arc 를 energy source 로 하여 발생된 고밀도 (10⁻¹⁰ /cubic cm), 고온의 플라즈마를 DC Thermal plasma 라 하며, 그 구성입자들은 고밀도와 고에너지로 인하여 LTE (Local Thermodynamic Equilibrium) 상태라 가정된다. 충분한 충돌에 의해 ion 과 electron, 그리고 neutral particle 들이 같은 온도를 갖게 된다는 가정에 의하면 플라즈마의 열용량은 몹시 커지게 되고 따라서 probe 를 오랜시간 고정시켜 둘 수가 없다. 이때 사용할 수 있는 방법은 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 첫째는 probe 를

water-cooling 시키는 방법이고, 두 번째는 probe 를 빠른 속도로 움직여서 열을 받는 시간을 줄이는 방법이다. 전자의 방법은 실제로 측정하고자 하는 Thermal plasma가 일반적인 경우 작은 scale 을 가지고 있음을 고려해 볼 때 정밀한 설계와 제작을 필요로 한다. 두 번째의 방법은 설계상의 문제가 적으며, 빠른 시간안에 data를 받아들이어 처리하여야 한다는 요구가 본고에서 사용하고 있는 electronic sweeping의 목적과 일치하기 때문에 실험은 moving double probe 방법을 사용하여 수행되었다. Thermal plasma 의 중심부 근처 (반경 3mm 이내) 에서 얻은 data 의 I-V plot 과 Semi-log plot , 그리고 온도와 밀도를 그림 11 에 나타내었다.

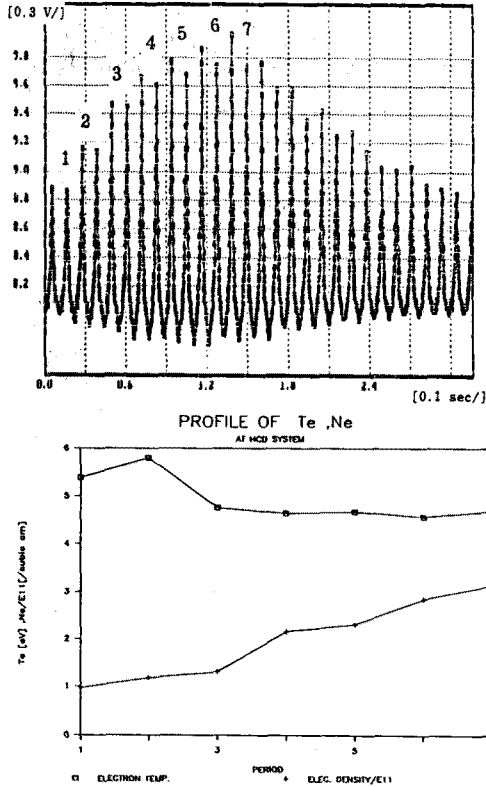
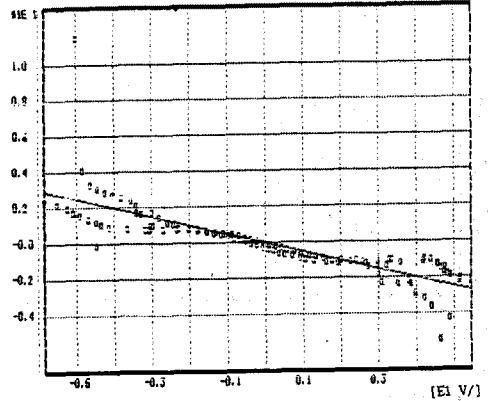
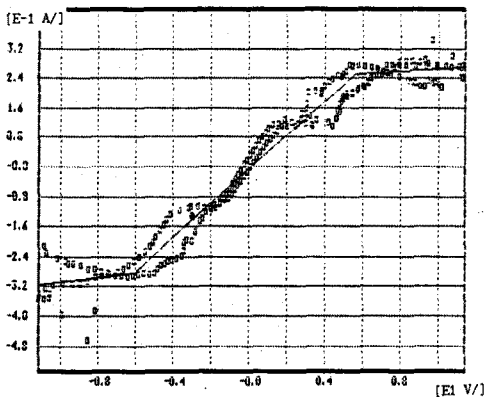


그림 10. Moving probe 사용시 전류파형과 Data.



조건 : Ar gas (2 SLM), 300 [A], 1 atm.
 Te : 2.09 [eV] , 9.32 E15 [/cubic cm]

그림 11. Thermal plasma 에서의 실험결과.

4. 결론

이상에서 Electronic Sweeping Probe 와 Digital Data 처리에 의해 좀 더 빠르고 정확한 측정을 할 수 있으며, probe method 가 적용 될 수 없었던 종래의 한계를 극복할 수 있음을 살펴보았다. 플라즈마의 상태가 주기적으로 반복 변화하는 system 의 경우 그 진원특성을 이해하고 개선하는 데에도 위의 방법은 유용하게 쓰일 수 있으며 microwave 나 RF 등의 고주파를 이용하는 system 에서의 impedance matching 에 의한 플라즈마로의 power 전달이 효율적으로 이루어지고 있는지를 알아 내는 방법으로도 응용할 수 있을 것이다. 또한 probe 에 가해지는 contamination 의 시간에 따른 변화와 data 에 미치는 영향을 살펴보는 데에도 이 방법을 쓸 수가 있다. 본 고에서 논한 이외에도 여러 종류의 플라즈마 에 적용하면 플라즈마 특성의 이해범위를 좀 더 넓힐 수 있으리라 기대된다.

참고 문헌

- (1) I.Langmuir and H.M. Mott-Smith , Gen.Elec. Rev.27, (1924)
- (2) E.O.Johnson and L.Malter, Phys. Rev. 80-1 (1950)
- (3) Principles of plasma diagnostics (Cambridge University press), I.H.Hutchinson (1988)
- (4) E.Leveroni, HIL internal report ,Univ. of Minnesota (1987)
- (5) E.Pfender,Gaseous Electronics (1978)
- (6) Edward P. Szuszczewics,& Julian C. Holmes, J. Appl.Phys. Vol.46 No.12 (1975)
- (7) Fumiuyuki Fujita and Hatsuo Yamazaki Jpn. J. Appl. Phys. Vol.27 No.8 (1988)