

# 톱니파 및 삼각파 프로브 bias 전압에 의해 측정된 전자에너지 분포함수의 비교에 관한 연구

## A Study on the Comparison of Electron Energy Distribution Function measured by sawtooth and triangle waveform probe bias voltages

김두환, 신중홍<sup>#</sup>, 김규섭<sup>\$</sup>, 박영찬, 조정수, 박정후  
부산대 전기공학과, # 동의대 전기공학과, \$ 동명전문대 전기과

D. H. KIM<sup>1</sup>, J. H. SHIN<sup>#</sup>, G. S. KIM<sup>\$</sup>, Y. C. PARK, J. S. CHO, C. H. PARK

Department of Electrical Engineering, Pusan National University

<sup>#</sup> Department of Electrical Engineering, Dong Eui University

<sup>\$</sup> Department of Electrical Engineering, Dong Myung Junior College

Abstract- In this paper, we have obtained electron energy distribution function(EEDF) in plasma by using two differentiators. In addition, we have investigated the comparison of the EEDF's by sawtooth and triangle waveform voltages. It is found that as pressure is decreased, electron density is decreased, and plasma potential is increased. And as the position of probe moves the outer of plasma, plasma potential is decreased, and electron temperature is decreased.

### 1. 서 문

전자에너지 분포함수는 플라즈마내의 전자의 에너지 상태를 알 수 있는 것으로서 이것은 전자가 전체로 부터 에너지를 받고 원자 혹은 분자와의 충돌에 의하여 에너지를 잃는 균형과제에서 결정되는 중요한 물리량이며, 플라즈마 프로브에 응용하게 이용되고 있다. (1) 일반적으로 전자에너지 분포함수는 싱글 프로브에 인가된 전압에 대하여 프로브 전류를 2회 연속 미분하는 Druyvestoyan 식을 이용하여 전자에너지 분포함수를 구하는 방식으로는 직류전압에 미소한 교류전압을 중첩시켜 이를 플라즈마에 삽입된 프로브에 인가하여 직류전압에 중첩된 교류전압 주파수의 2배에 해당하는 주파수를 가진 프로브 전류를 검출하여 전자에너지 분포함수를 구하는 제2 고조파법이 있다. 이때, 직류전압에 중첩된 교류전압 주파수의 2배에 해당하는 주파수를 가진 프로브 전류(이하부터는 2고조파 전류라 칭함)로써 전자에너지 분포함수를 구할 수 있는 근거는 프로브에 인가된 직류전압 및 교류전압을 합수로 하여 프로브 전류를 테일러 급수전개를 하면 알 수 있다. (2) 그런데 정확한 테일러 급수전개를 위해서는 직류전압의 크기에 비해 교류전압의 진폭은 무시할 정도로 작은 값이 되어야 하는 조건을 만족시켜야 하는 점이다. 따라서 교류전압의 진폭은 전자 평균에너지의 0.1배 보다 작은

값이 되어야 한다는 연구보고도 있다. (2) 한편, 2고조파 전류를 프로브 전류로 부터 추출하기 위해서는 밴드 패스 필터 (band pass filter) 및 Lock-in 앰프등이 필요하게 되는데 (3) 앞서 언급한 테일러 급수전개와 관련시켜 교류전압의 진폭을 너무 작게하면 밴드 패스 필터 및 Lock-in 앰프가 제대로 동작하지 못하여 2고조파 전류, 즉 전자에너지 분포함수를 구할 수 없는 문제가 생기게 된다. 본 논문에서는 이와같은 문제점을 배제하기 위해서 연산증폭기로 이루어진 미분회로를 구성하였지만, 연산증폭기를 이용한 미분회로는 시간영역에서 미분을 수행하기 때문에 프로브 전류를 프로브 전압의 영역에서 2회 연속 미분율 하여 전자에너지 분포함수를 구할 수 없게 된다. 하지만 프로브에 인가되는 전압의 파형을 시간적인 선형성을 갖는 톱니파 및 삼각파로 함으로써 전자에너지 분포함수를 구할 수 있었고, 아울러 톱니파 및 삼각파동의 프로브 인가 전압의 파형에 따른 전자에너지 분포함수에 대한 체계적인 연구가 거의 없는 실정이므로, 프로브의 위치 및 동작압력등을 변수로 하여 프로브 인가 전압의 파형에 따른 전자에너지 분포함수를 비교검토하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2-1. 2회 연속 미분회로

그림1은 싱글 프로브 전류용 싱글 프로브에 인가된 전압에 대해 2회 연속미분을 할 수 있는 미분회로를 나타내고 있다. 이때, 미분기로서 사용되는 OP 앰프는 시간 영역(timo domain)에서 미분동작을 하므로 식(1)로 표현되는 전압 영역(voltage domain)에서 2회 미분을 수행해야 하는 Druyvestoyan 식을 회로적으로 구현할 수 없는 문제가 생긴다.

$$F(\epsilon) = \frac{2}{N_e e A} \cdot \left( \frac{2m_e V_p}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d^2 I_p}{dV_p^2} \quad (1) \quad \text{여기}$$

서,

$F(\epsilon)$ : 전자에너지 분포함수  $N_e$ : 전자밀도  $e$ :

전자의 전하량  $A$ : 푸르브의 표면적  $m_e$ : 전자의 질량

$V_p$ : 푸르브 전압  $I_p$ : 푸르브 전류

그러나, 프로브에 인가되는 전압이 식(2)와 같이 표현되는 시간적으로 선형성을 가지는 파형이 되면, 이와같은 문제는 해결될 수 있다.

$$V_p = k \cdot t \quad (2)$$

여기서,

$V_p$ : 푸르브 전압  $k$ : 상수

$t$ : 시간

즉, 식(2)를 식(1)에 대입시키면 식(3)이 되고, 식(3)에서 알 수 있듯이 프로브 전류를 시간 영역(time domain)에서 2회 미분할 하더라도 전자에너지 분포함수를 구할 수 있다.

$$F(\epsilon) = \frac{2}{N_e e A} \cdot \left( \frac{2m_e V_p}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot k^{-2} \cdot \frac{d^2 I_p}{dV_p^2} \quad (3)$$

### 2-2. 전자에너지 분포함수 측정 및 자화 플라즈마 발생 장치

그림2는 전자에너지 분포함수 측정 시스템 및 자화 플라즈마 발생장치의 개략도를 나타내고 있다. 측정에 사용된 프로브의 재질은 텅스텐이고, 프로브의 형상은 원통형( $\phi: 0.25\text{mm}$ )으로 제작하였고, 플라즈마에 노출되는 프로브의 길이는 2mm였다. 프로브 측정값들은 저장형 오실로스코프의 X-Y 모드에서 관찰하였다. 이때, 프로브에 인가되는 전압은 X축(오실로스코프의 CH1)으로 전송되게 하였고, 프로브 전압에 대해 2회 미분된 프로브 전류는 Y축(오실로스코프의 CH2)에 나타나게 하였다. 한편, 방전전극의 구성은 2개의 원판상 황동전극을 서로 마주보게 배치한 것으로 직경 5cm, 전극 간격을 5cm로 설치하여 전극간에 원통형 플라즈마가 형성되도록 하였다. 플라즈마에 가해지는 자계는 전공조 외부에 2개의 코일군으로 나누어 각각 3000회로 감아 코일에 흐르는 전류를 가변시켜 0 ~ 1000(Gauss) 까지 제어할 수 있도록 하였다. 발생된 플라즈마에 의한 전공조 내부의 온도 상승을 억제하기 위해 전공조를 2중 수냉벽으로 하였다. 전공조 내의 진공도는  $10^{-6}$  (Torr)까지

초기 배기한 후, MFC(Mass Flow Controller)로서 동작 가스 유량을 조절할 수 있었고, 본 실험에서는 아르곤 플라즈마를 연구 대상으로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

그림3은 방전전압 550V, 자계 120Gauss인 조건에서 동작압력을 100mTorr, 80mTorr, 60mTorr, 40mTorr 로 각각 변화시킨 상태에서 프로브에 펄스파 인가 전압 및 삼각파 인가 전압을 가하여 얻어진 전자에너지 분포함수들의 프로파일(profile)을 나타내고 있다. 그림에서 A, B, C, D는 동작압력이 100mTorr, 80mTorr, 60mTorr, 40mTorr 등으로 각각 변화시킨 상태에서 펄스파 인가 전압에 의해 측정된 전자에너지 분포함수를 나타내고 있으며, E, F, G, H는 이상과 같은 동일한 동작압력의 변화에서 삼각파 프로브 인가 전압으로 측정된 전자에너지 분포함수를 보여주고 있다. 그림 A, B, C, D에서 알 수 있듯이 압력이 감소할수록 전자에너지 분포함수는 맥스웰 분포에 가까워지는 경향을 보이고 있다. 한편, 전자에너지 분포함수의 최대치, 영점(최대치와 최소치 사이에서 x-축과 전자에너지 분포함수와의 교차점)(4), 최소치로써 플라즈마의 공간전위의 결정에 이용되는데(5) 본 연구에서는 펄스파 프로브 인가 전압에 의해 측정된 전자에너지 분포함수 A, B, C, D에서는 최대치에 대응한 프로브 전압을 플라즈마 공간전위로 하고, 삼각파 프로브 인가 전압으로 측정된 전자에너지 분포함수 E, F, G, H에서는 최대치와 최소치 사이에서 x-축과 전자에너지 분포함수와의 교차점, 즉 영점에 대응한 프로브 전압을 플라즈마 공간전위로 했을 때, 이들의 플라즈마 공간전위는 거의 일치함을 알 수 있으며, 그림4에 동작압력의 변화에 따른 플라즈마 공간전위의 아울러 전자밀도등의 변화를 나타내었다. 그림3에서 알 수 있듯이 동작압력이 감소할수록 공간전위는 증가하였고, 전자 밀도는 감소하였다.

그림5는 방전전압 530V, 자계 170Gauss, 압력 100mTorr인 조건에서 프로브 위치를 0cm(a점), 1cm(b점), 2cm(c점), 3cm(d점), 4cm(e점)순으로 변화시키면서 펄스파 프로브 인가 전압에 따른 전자에너지 분포함수(그림5에서 좌측 그림들) 및 삼각파 프로브 인가 전압에 따른 전자에너지 분포함수(그림5에서 우측 그림들)들의 프로파일(profile)을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 프로브의 위치를 a점부터 d점으로 변화시키기에 따라 전자에너지 분포함수는 맥스웰 분포에 가까운 경향을 보이고 있으나 e점에서의 전자에너지 분포함수는 맥스웰 분포를 벗어나고 있다. 한편, 우측의 삼각파 프로브 인가 전압에 따른 전자에너지 분포함수 또한 a점부터 d점까지는 거의 맥스웰 분포를 따르고 있으나 e점의 전자에너지 분포함수는 맥스웰 분포를 벗어나 있음을 알 수 있었다.

그림6은 방전전압 530V, 자계 170Gauss, 압력 100mTorr인 조건에서 프로브의 위치 변화에 따른 플라즈마 공간전위와 전자온도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 프로브의 위치

를 0cm, 1cm, 2cm, 3cm, 4cm로 변화시킬수록 플라즈마 공간전위는 감소하다, 4cm(0점)지점에서는 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 아울러 전자온도 또한 감소하는 경향을 보이다가 4cm(0점)지점에서는 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 싱글 푸르브에 인가된 전압에 대해 푸르브 전류를 2회 미분하여 전자에너지 분포함수를 구하는Druryvestoyn 식을 만족시키기 위하여 브로브 전압을 선형화하여 2회 연속 미분을 최종적으로 구현한 후, 브로브 전압의 파형이 톱니파와 상사파일때, 압력의 변화 및 브로브 위치에 따라 측정된 전자에너지 분포함수에서 플라즈마 공간전위는 거의 일정한을 알 수 있었고, 아울러 압력이 증가할수록 플라즈마 공간전위는 감소하고 전자밀도는 증가하였으며, 브로브의 위치가 플라즈마의 중심으로 부터 멀어질수록 플라즈마 공간전위는 감소하다, 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 전자온도 또한 감소하는 경향을 보인다 증가하였음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 이시우역, C. V. D 렌드북, 반도 출판사, 제 4 장, 1993.
- [2] C. H. Chen et al, J. Appl. Phys., vol. 43(11), 1972, p.4570.
- [3] C. M. Ferreir, Microwave Discharges, Pleum Press, pp306-307, 1993.
- [4] M. S. Barnos et al, Appl. Phys. Lett, vol. 62(21), p.2622,1993.
- [5] 일본전기학회 기술보고(11부)제152호, pp23-26.

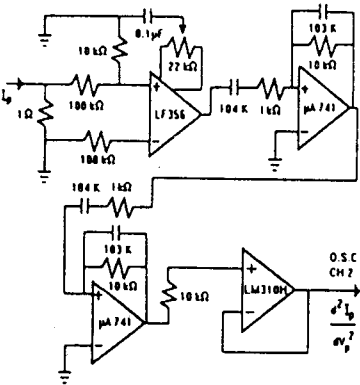


그림1. 2회 연속 미분회로

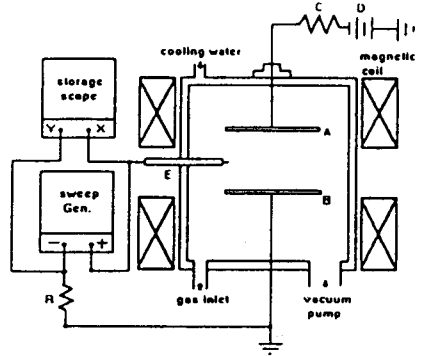
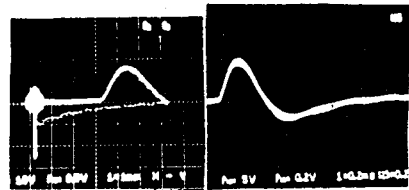
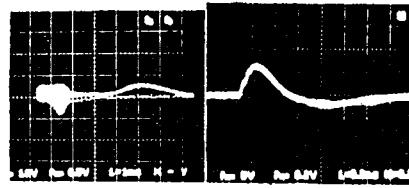


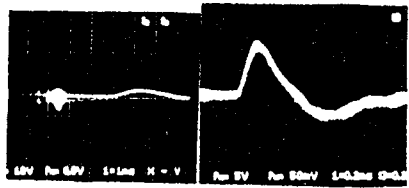
그림2 플라즈마 발생장치 및 측정시스템



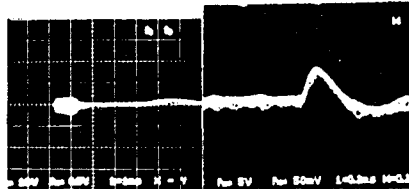
(A) 압력 100mTorr (I) 압력 100mTorr



(B) 압력 80mTorr (J) 압력 80mTorr



(c) 압력 60mTorr (G) 압력 60mTorr



(c) 압력 40mTorr (H) 압력 40mTorr

그림3 동작압력에 따른전자에너지 분포 함수의 브로뮨

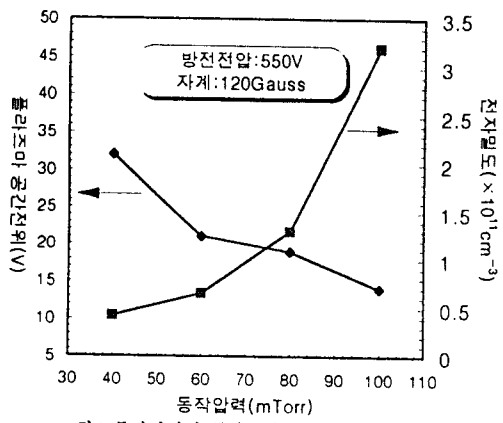


그림4 동작압력에 플라즈마 공간전위 및 전자밀도

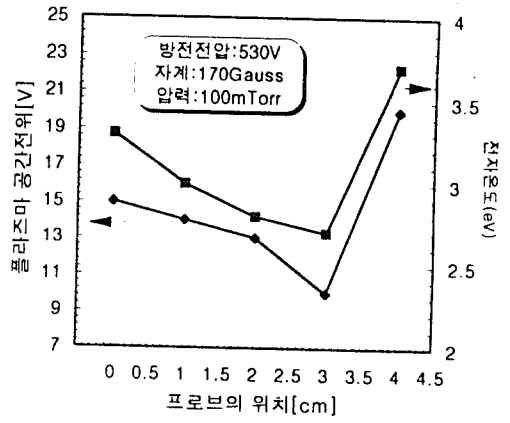


그림5 프로브 위치 변화에 따른 플라즈마 공간전위 및 전자온도

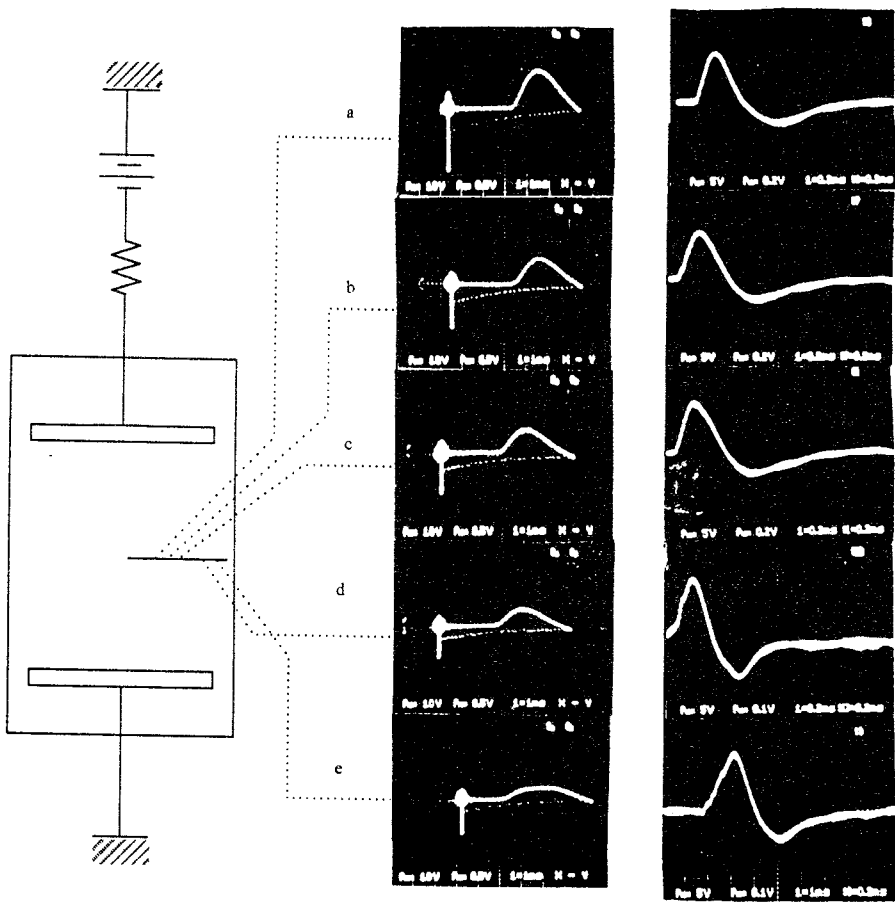


그림 6. 프로브의 위치에 따른 전자에너지 분포 함수의 프로파일