

## 고주파 유도결합 플라즈마의 전자에너지 분포함수 측정에 관한 연구

(A Measurements on the Characteristics of Electron Energy Distribution Function  
of Radio-Frequency Inductively Coupled Plasma)

하장호\* · 전용우\* · 최상태\*\* · 박원주\*\*\* · 이광식\*\*\*

(Jang-Ho Ha · Yong-Woo Jun · Sang-Tae Choi  
Won-Zoo Park · Kwang-Sik Lee)

### 요 약

본 연구에서는 푸로브법과 교류중첩법을 이용하여 고주파 유도결합 플라즈마에서 전자에너지 분포함수를 측정하였다. 실험조건은 압력 10~40[mTorr], 입력파워는 100~600[W]이고, 가스유량은 3~12[sccm]이며, 전자에너지 분포함수의 공간분포 측정에 있어서 아스펙트비(R/L)는 2로 하였다. 전자에너지 분포함수는 압력 및 입력파워에 대하여 강한 의존성을 나타내었고, 가스유량이 증가할수록 증가하였다. 전자에너지 분포함수의 반경방향 분포는 플라즈마 중심에서 최대가 되었다. 전자에너지 분포함수의 축방향 분포는 석영창과 기판 사이의 중심에서 최대가 되었다. 이러한 결과는 고주파 유도결합 플라즈마의 생성 메커니즘 이해와 간단한 ICP(Inductively Coupled Plasma) 모델링 응용에 기여할 수 있을 것이다.

### Abstract

Electron Energy Distribution Function(EEDF) were measured in Radio-Frequency Inductively Coupled Plasma(RFICP) using a probe method. Measurements were conducted in argon discharge for pressure from 10[mTorr] to 40[mTorr] and input rf power from 100[W] to 600[W] and flow rate from 3[sccm] to 12[sccm]. Spatial distribution of electron energy distribution function were measured for discharge with same aspect ratio (R/L=2). Electron energy distribution function strongly depended on both pressure and power. Electron energy distribution function increased with increasing flow rate. Radial distribution of the electron energy distribution function were peaked in the plasma center. Normal distribution of the electron energy distribution function were peaked in the center between quartz plate and substrate. From the results, we can find out the generation mechanism of Radio Frequency Inductively Coupled Plasma. And these results contribute the application of a simple Inductively Coupled Plasma(ICP).

\* 정회원 : 영남대학교 대학원 전기공학과 박사과정

\*\* 정회원 : 경주대학교 컴퓨터전자공학부 · 공학박사 · 전임강사

\*\*\* 정회원 : 영남대학교 공과대학 전기전자공학부 · 공학박사 · 교수

접수일자 : 1999년 7월 24일

## 1. 서 론

신소재 개발에 플라즈마가 이용됨에 따라 플라즈마 프로세스의 필요성은 점점 더 확대 되었고, 웨이퍼의 미세화와 대면적화가 급속도로 진행되었다. 따라서 저압력에서 보다 넓은 면적의 균등한 플라즈마를 생성할 수 있는 새로운 고효율 플라즈마원(Plasma Source)의 연구개발이 필요하게 되었다. 고주파 유도 결합 플라즈마(RFICP : Radio-Frequency Inductively Coupled Plasma) [1]~[3]는 이러한 요구를 잘 만족시키는 플라즈마원이라고 알려져 있다. 플라즈마의 균일성과 밀도를 확실히 이해하기 위하여 최적의 모델을 개발하는 것이 필요하고, 방전의 최적화, 효율화 규명에 체계적 이해를 도모해야 할 것이다.

본 연구에서는 푸로브법과 교류중첩법[4]을 병행하여 전리와 이온의 온도와 밀도 및 플라즈마내의 다양한 충돌작용과 전달특성을 알수있는 전자에너지 분포함수(EEDF : Electron Energy Distribution Function)를 여러가지 파라메타에 대해서 계측하였다.

## 2. 측정값과 그 평가

푸로브 전류는 이온전류와 전자전류로 분리할 수 있는데, 측정된 푸로브 전류로부터 영남대 플라즈마 및 레이저 응용연구팀이 확인한 것과 같이, 전자온도  $T_e$ 와 전자밀도  $N_e$ 를 구한다[4]~[7].

또, 플라즈마 내부의 전자에너지 분포는 Druyvesteyn 해석법으로 다음과 같은 식에 의해서 전자에너지 분포함수  $f(v)$ 를 구한다.[5]

$$f(v) = 1,264 \times 10^{14} \cdot k^{-2} \cdot \frac{v^{\frac{1}{2}}}{n_e A_p} \frac{d^2 I_e}{d v^2}$$

$I_e$  : 전자 전류[A],  $A_p$  : 푸로브 면적[cm<sup>2</sup>],

$V_p$  : 푸로브 전압[V],  $v$  : 전위차,  $k$  : 보정계수

## 3. 실험장치 및 측정방법

본 실험에 사용한 고주파 유도결합 플라즈마 발생 장치의 진공관은 길이 400[mm], 직경 300[mm]의 스텐인레스 스틸로 설계·제작하였고, 푸로브 측정법에

적당한 구조로 되어있다. 진공관 내부에는 박막 가공을 행할 때 시료를 고정하는 웨이퍼 홀더(wafer holder)가 있으며, 기판은 상하로 움직일 수 있도록 하였다. 그리고, 진공관 상부에는 안테나 코일을 설치하기 위하여 직경 280[mm], 두께 25[mm]의 원판형 석영창을 두었고, 고주파 전원을 공급받는 안테나 코일은 고주파 전원과 플라즈마를 전자기적으로 결합시키는 유도결합소자로서, 폭 20[mm], 두께 0.5[mm]의 동판을 와권상으로 20[mm] 간격으로 5회 감은 코일을 사용하였다.

그림 1은 전자에너지 분포를 계측하기 위한 개략도로서 DC Power supply로 직류전압을 공급하고, Sweep function generator에 미소 진폭을 가진 교류전압을 중첩하여 미분기를 통하여 멀티메타로 전류값을 구한다.

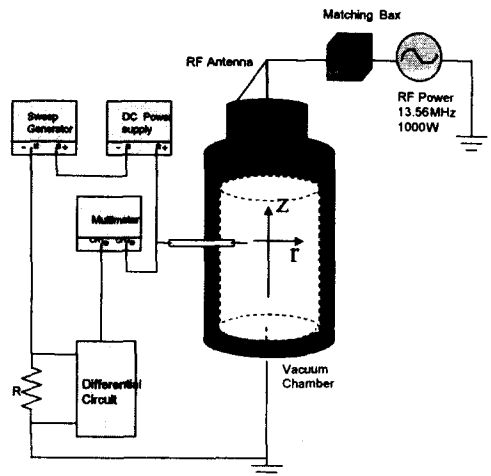


그림 1. 전자에너지 분포 측정의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of Electron Energy Distribution

## 4. 실험결과 및 고찰

전자에너지 분포의 입력파워 의존성과 가스압력 의존성, 유량 의존성, 반경방향공간분포 및 축방향공간분포 계측의 공통된 실험조건으로서는 아스펙트 비(aspect ratio ; R/L)를 2로 하였고, 아르곤 가스 유량은 5[sccm]으로 안정하게 공급하였다.

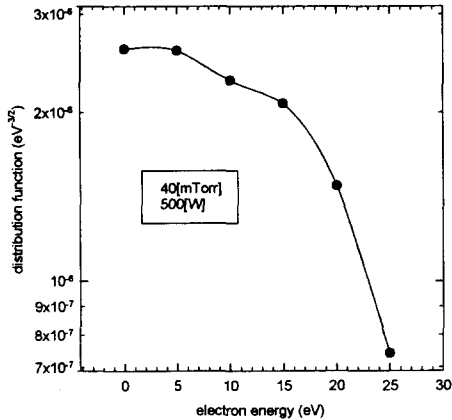


그림 2. 전자에너지 분포함수의 특성  
Fig. 2. Characteristic of EEDF

그림2는 동작압력 40[mTorr], 입력파워 500[W]에서 전자에너지 분포함수의 특성을 나타내었다. 이 곡선은 저전자에너지 부분에서 Non-Maxwell분포를 이루고 있으며, 전자에너지가 증가할수록 지수적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 가스방전에서의 전자에너지 분포함수가 일반적으로 Non-Maxwell분포를 이루는다는 것<sup>[9]</sup>과 일치하며, 저에너지 영역에 비해 고에너지 영역에서는 맥스웰 분포에서 예상된 것보다 적은 수의 전자가 존재하기 때문이다[10]. 그림2에서 전자의 에너지가 낮은 부분에서는 질량차로 인한 인력이 작용하기 때문에 배경 기체와 탄성충돌이 일어난다. 또, 에너지를 많이 가지고 있는 전자에서는, 이온이나 자유라디칼을 생성시키기 위해 그 에너지가 우선적으로 기체의 전자충돌 해리 및 전리되어 옮겨진다. 분자를 여기상태로 만듦으로써 기체분자에 에너지를 주는 전자에서는 비탄성충돌이 발생한다. 여기분자는 빛을 방출함으로써 에너지를 내어놓을 수 있으며, 이것은 코로나방전의 특성글로우를 발생시키고, 이 여기분자는 화학반응에 관여하거나( 분자의 화학구조의 변경 ) 화학반응을 촉진시킬 수 있는 라디칼로 해리시킬 수 있다. 에너지를 가장 많이 가지고 있는 전자는 배경기체분자를 전리시키며, 그 결과 더 많은 전자를 내어놓고 수명이 더 긴 라디칼종을 만들어낸다. 이러한 상호작용은 전체 불평형 플라즈마에 걸쳐서 실질적으로 축적되는 에너지로 바꾸는 기체의 가열보다는 플라즈마의 생성에 영향을 미친다[8].

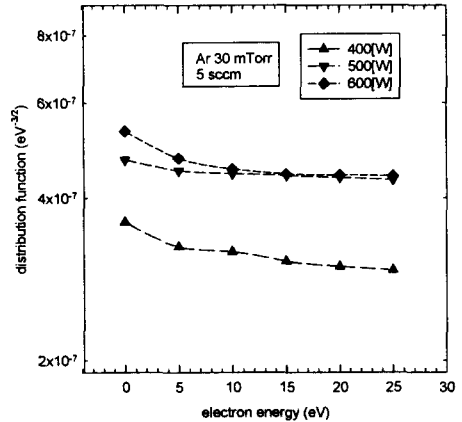


그림 3. 전자에너지 분포함수의 입력파워의존성  
Fig. 3. Dependence of EEDF on input rf power

그림3에서 전자에너지 분포함수의 입력파워 의존성 계측에 사용된 동작압력은 30[mTorr]이고, 측정 위치는 플라즈마 중심부(r=0, z=3)이다. 여기에서 입력파워는 RF 전원에서 입력하고 있는 파워이다. 전자에너지 분포는 파워가 증가할수록 증가하고, 500[W]와 600[W]에서는 거의 일치하는 형태를 보인다. 이는 방전공간내에 파워가 증가할 수록 전체의 세기가 강해지기 때문에, 전자가 더 많은 에너지를 받아서 더욱 빠르게 가속되고, 더 많은 충돌에 의해 다른 전자를 방출시켜 높은 전자에너지 분포함수가 나타난다.

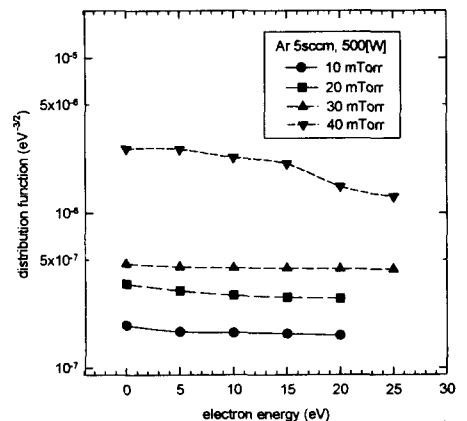


그림 4. 전자에너지 분포함수의 압력의존성  
Fig. 4. Dependence of EEDF on pressure

그림4에 전자에너지 분포함수의 압력의존성의 결과를 나타내었다. 저압력 동작 유도결합 플라즈마원은 일반적으로  $10^{-4}$ [Torr]에서  $10^{-2}$ [Torr] 정도의 압력으로 동작시킨다. 이것은 ECR플라즈마원 등에 비해서 비교적 높은 동작압력이다. RFICP 플라즈마원에서 어떤 동작압력에서 막질공공에 유용한가 하는점에서는 많은 토론이 필요하겠지만 전체적인 경향은 높은 동작 압력에서 높은 전자에너지 분포함수를 갖고 있다. 본 실험에서는 전자에너지 분포함수의 압력의존성을 10[mTorr]에서 40[mTorr]의 범위로, 측정의 위치는 플라즈마 중심부( $r=0, z=3$ )로 하였고, 입력파워는 500[W]로 하여 측정하였다. 전자에너지 분포함수도 압력이 증가할수록 높은 분포를 이루고있다. 이것은 압력이 증가할수록 기체분자수가 많아지는 경향이 강하게 나타나기 때문에 전자충돌빈도도 그 만큼 증가하고, 충돌되는 전자수도 증가함으로써 높은 전자에너지 분포함수가 나타난다.

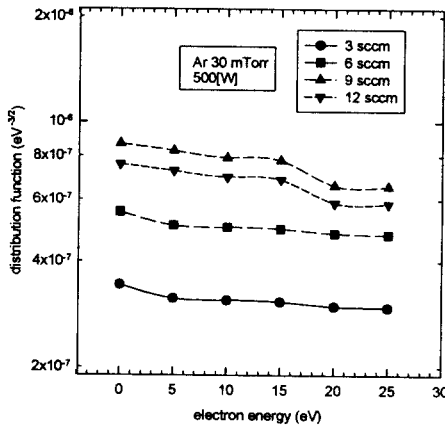


그림 5. 전자에너지 분포함수의 유량의존성  
Fig. 5. Dependence of EEDF on flow rate

그림5에서 나타낸 전자에너지 분포함수의 유량의존성의 측정 위치는 중심부( $r=0, z=3$ )이고 유량을 3[sccm]에서 12[sccm]까지 변화시켰다. 전자에너지 분포는 유량이 증가할수록 높게 분포하고, 9[sccm]과 12[sccm]에서 중성분자의 증가에 따르는 전자충돌빈도의 증가로 이온화되면서 전자온도에 영향을 주어서 전자에너지 분포함수는 감소하고, 에너지 전달특성에 의해 충돌할 때 잃어버린 에너지만큼 다른 전자가 에너지를 받아서 전자에너지는 증가하는 것으로 생각된다.

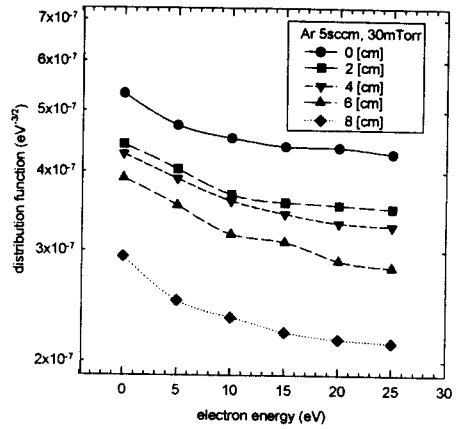


그림 6. 전자에너지 분포함수의 반경방향분포  
Fig. 6. Radial distribution of EEDF

그림6에 전자에너지 분포의 반경방향공간분포의 측정결과를 나타낸다. 그림에서  $r=0$  축이 플라즈마 중심부이고,  $r=8$  축이 플라즈마 주변부이다. 전자에너지 분포는 전체의 세기가 가장 강한 중심부에서 높게 분포하고, 주변부로 갈수록 낮은 에너지를 가짐을 알 수 있다. 이는 전계강도에 따라 중심부에 에너지가 높고 활발한 전자가 많이 분포하고, 주변부로 갈수록 플라즈마 확산에 의해 고에너지를 가진 기체분자수가 감소하기 때문이라고 생각된다.

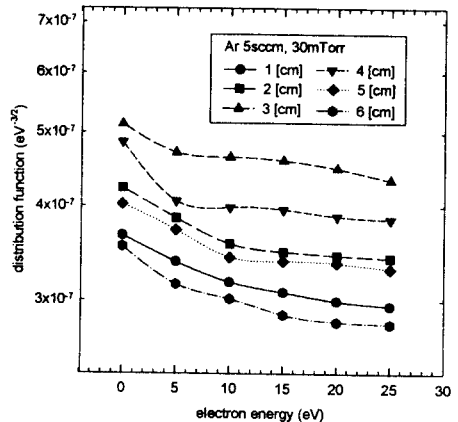


그림 7. 전자에너지 분포함수의 축방향분포  
Fig. 7. Axial distribution of EEDF

그림7에 전자에너지 분포함수의 축방향공간분포의 측정결과를 나타낸다. 푸로브의 반경방향 위치는  $r=0$ ,

즉 플라즈마 중심부에 두고, 석영창( $z=0$ )에서 기관( $z=6$ )까지 푸로브의 위치를 변화시키면서, 플라즈마 각 파라메타의 축방향 공간분포를 측정하였다. 전자에너지 분포는 중심부 부근인 3[cm]에서 가장 높은 분포를 이루고, 주변부로 갈수록 감소하지만 석영창 쪽의 위치인 1[cm]와 2[cm]가 5[cm]와 6[cm]보다 조금 높은 에너지 분포를 이루고 있음이 나타난다. 이것은 안테나 코일에서 발생하는 자장이 플라즈마 중으로 침투할수 있는 깊이는 표피두께(Skin depth)정도로 한정되고, 입력파워가 전달되는 영역 또한 석영창으로부터 표피두께 이내로 한정되므로 활성화된 전자가 전극 주위에 더 많이 분포함을 의미한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는, 고주파 유도결합 플라즈마의 장치를 직접 설계·제작하여, 고주파 유도결합형 플라즈마 중의 입력파워와 동작 가스압력에 따른 전자에너지 분포함수를 푸로브법과 교류중첩법을 병행하여 그 값을 계측하였다. 실험에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 입력파워가 증가할수록 전계강도의 증가로 전자에너지 분포함수는 증가하다가 500~600[W]부근에서 포화하는 경향을 보인다.
- (2) 진공 내의 압력이 증가할수록 전자에너지 분포함수는 높은 분포를 이룬다.
- (3) Ar가스유량이 증가할수록 충돌빈도의 증가로 전자에너지 분포함수는 높게 분포하였다.
- (4) 반경방향에 따른 전자에너지 분포함수는 확산에 의한 영향으로 중심부에서 주변부로 갈수록 감소하였다.
- (5) 축방향에 따른 전자에너지 분포함수는 중심에서 가장 높은 분포를 이루고, 주변부로 갈수록 감소하였다.

이상의 결론으로부터 고주파 유도결합 플라즈마의 생성메카니즘을 파악할 수 있었으며, 이는 대규모 프로세스용 플라즈마원으로써 설계·제작, 운전에 응용할 수 있는 가능성을 보여준다고 할 수 있다.

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] J. Hopwood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair and J. J. Cuomo, "Langmuir probe measurements of a radio frequency induction plasma", J. Vac. Sci. Technol, A11(1), p152, 1993.
- [2] J. A. O'Neill, M. S. Barnes and J. H. Keller, "Optical ion energy measurements in a radio-frequency-induction plasma source", J. Appl. Phys, 73(4), p1621, 1993.
- [3] J. H. Keller, J. C. Foster and M. S. Barnes, "Novel radio-frequency induction plasma processing techniques", J. Vac. Sci. Technol, A11(5), p2487, 1993.
- [4] 堤井信力, プラズ마基礎工學, 内田老鶴園, pp. 140-143, 1995.
- [5] 박덕규, "플라즈마 및 핵융합 물리학", 형설출판사, pp. 316-319, 1985.
- [6] 「고주파 유도결합 플라즈마의 전자에너지 분포함수 특성에 관한 연구」 98 한국조명·전기설비학회 학술발표회 논문집 pp.131-133.
- [7] "Measurements of Electron Energy Distribution of Radio Frequency Inductively Coupled Plasma, The 9th Asian Conference on Electrical Discharge(ACED 98) B1-4.
- [8] Michael, G. Grothaus and E. Robert Fanick " Diesel particulate/NOx exhaust aftertreatment using plasma or corona discharges ", Southwest Research Institute..
- [9] Ajit P. Paranjpe, James P. McVittie, Sidney A. Self, "A Tuned Langmuir probe for measurements in rf glow discharges" Journal of Applied Physics. 67(11), 1 June 1990, pp 6718-6727.
- [10] T I Cox, V G I Deshmukh, D A O Hope, A J Hydest, "The use of Langmuir probes and optical emission spectroscopy to measure electron energy distribution function in rf-generated argon plasmas. J. Phys. D:Appl. Phys. 20(1987) pp. 820-831.

## ◇ 저자소개 ◇

### 하 장 호 (夏長鎬)

1961년 3월 17일생. 1989년 경일대학교 전기공학과 졸업. 현재 영남대 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 당학회 정회원

### 전 용 우 (全容佑)

1969년 9월 25일생. 1996년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 영남대 대학원 전기공학과 박사과정. 당학회 정회원

### 박 원 주 (朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 일본 큐우슈대학교 대학원 졸업(박사). 현재 영남대 공대 전기전자공학부 부교수. 당학회 대구·경북지회 연구조사이사.

### 최 상 태 (崔相泰)

1957년 8월 8일생. 1985년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1997년 독일 Bochum Ruhr대학교 전자공학부 졸업(박사 Dr. Ing). 현재 경주대학교 컴퓨터 전자공학부 전임강사. 당학회 정회원. VDE(독일 전기전자공학회), 대한전기학회, 한국광학회 정회원.

### 이 광 식 (李廣植)

조명·전기설비학회논문지 1999. 8월호 참조.