

# 정전 탐침법과 유체 시뮬레이션을 이용한 유도결합 Ar 플라즈마의 특성 연구

## Analysis of Inductively Coupled Plasma using Electrostatic Probe and Fluid Simulation

차 주 홍\* · 이 호 준†  
(Ju-Hong Cha · Ho-Jun Lee)

**Abstract** - Discharge characteristics of inductively coupled plasma were investigated by using electrostatic probe and fluid simulation. The Inductively Coupled Plasma source driven by 13.56 Mhz was prepared. The signal attenuation ratios of the electrostatic probe at first and second harmonic frequency was tuned in 13.56Mhz and 27.12Mhz respectively. Electron temperature, electron density, plasma potential, electron energy distribution function and electron energy probability function were investigated by using the electrostatic probe. Experiment results were compared with the fluid simulation results. Ar plasma fluid simulations including Navier-Stokes equations were calculated under the same experiment conditions, and the dependencies of plasma parameters on process parameters were well agreed with simulation results. Because of the reason that the more collision happens in high pressure condition, plasma potential and electron temperature got lower as the pressure was higher and the input power was higher, but Electron density was higher under the same condition. Due to the same reason, the electron energy distribution was widening as the pressure was lower. And the electron density was higher, as close to the gas inlet place. It was found that gas flow field significantly affect to spatial distribution of electron density and temperature.

**Key Words** : 13.56 Mhz, Fluid simulation, PECVD, Ar plasma, Inductively Coupled plasma

### 1. 서 론

유도결합 플라즈마 발생 장치는 코일 형태의 안테나를 이용하여 RF(Radio Frequency)파워를 인가하는 비교적 간단한 구조의 플라즈마 소스로서 동작압력은 수 mTorr에서 수 Torr 영역에서 이루어지는 장비이다.<sup>[1]</sup> 유도결합 플라즈마 발생 장치는 비교적 높은 전자 밀도와 저온 공정이 가능한 장점을 가지기 때문에 반도체 공정 중 건식 식각 공정에 주로 사용되고 있으며 물리적인 연구에서부터 다양한 산업 분야까지 다양한 분야에 응용되고 있다.<sup>[2]</sup> 산업 분야에서 사용되는 공정에서는 다양한 화합물 가스를 이용하여 식각 및 증착 공정이 이루어지며, 이때 장비의 기본적인 특성을 비교하고 분석하기 위하여 Ar, He 등과 같은 18족 비활성 기체를 사용하여 장비 특성 분석을 실시한다.

본 논문에서는 자체 제작한 단일 랭뮤어 프로브와 상용 유체 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 유도결합 플라즈마 장치에 대한 기본적인 분석을 실시하였으며 공정가스로는 Ar 가스를 사용하여

장비의 특성 분석을 실시하였다. 단일 랭뮤어 프로브는 리드코일을 사용하여 13.56 Mhz와 27.12 Mhz 영역에서 높은 감쇠 비를 갖도록 제작하였으며, 이를 통해 플라즈마 진단의 정확도를 높이도록 하였다.<sup>[3]</sup> 또한 상용 유한 요소 시뮬레이션 패키지를 이용하여 2차원 축대칭 구조의 시뮬레이션을 진행 하였다. 실험과 시뮬레이션에서는 압력 및 인가 파워를 주요 변수로 설정 하여 공간 분포에 따른 특성을 분석하였다. 압력 변수에 따라 플라즈마 전위, 전자 밀도, 전자 온도 등의 플라즈마 변수들의 변화를 살펴보았으며 실험 및 시뮬레이션 결과를 비교 분석 하였다.

### 2. 실험구성 및 실험방법

그림 1은 실험에 사용된 유도결합 플라즈마 발생 장치의 모식도이다. 실험에 사용된 진공 챔버는 반경 110[mm], 높이 235[mm]로 원형으로 제작 되었으며 두께 13[mm]의 RF 윈도우를 챔버 윗면에 위치하도록 설계하였다. 3 turn 나선형 안테나가 RF 윈도우로부터 10[mm] 떨어진 지점에 위치해 있으며 반경 80[mm]로 제작 되었다. 챔버의 중앙 하단에는 높이 105[mm], 반경 60[mm]의 chuck이 위치해 있으며, RF 윈도우의 바로 하단 부분으로 가스 주입이 가능하도록 설계하였다.

플라즈마 발생에는 Ar gas를 사용하여 방전을 실시하였으며,

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.  
E-mail : hedo@pusan.ac.kr

\* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.

Received: March 21, 2016; Accepted : June 21, 2016

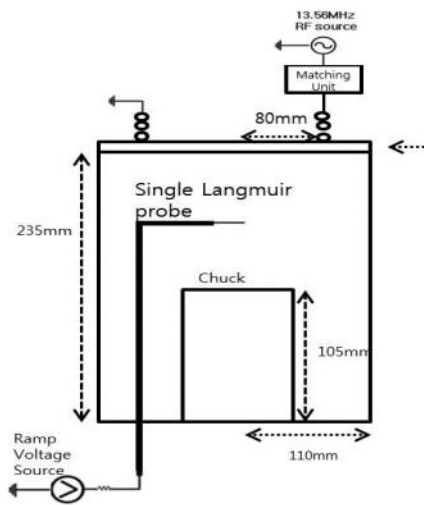


그림 1 유도결합 플라즈마 장치 모식도  
 Fig. 1 Schematic diagram of Inductively coupled plasma

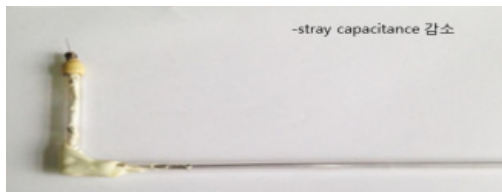


그림 2 랭뮤어 프로브  
 Fig. 2 home-made tuned single langmuir probe

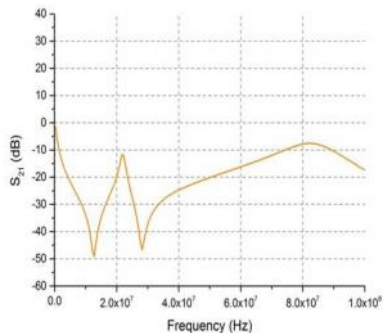


그림 3 랭뮤어 프로브의 주파수에 따른 공진 점  
 Fig. 3 resonance frequency of the single langmuir probe

초기진공은  $10^{-5}$  Torr로 하여 실험을 진행 하였다. 실험의 조건은 압력을 5mTorr, 10mTorr, 15mTorr, 20mTorr, 입력 파워를 250W, 300W, 350W, 400W, 450W 범위에 따라 변화시켜가며 공간 분포 상 플라즈마 변수의 변화를 관찰 하였다.

진공 챔버 내의 플라즈마 진단은 그림 2와 같이 자체 제작한 싱글 랭뮤어 프로브를 이용하여 실시하였다. 프로브는 탐침으로 들어오는 RF 노이즈 성분을 감소시키기 위하여 자기 공명 주파수 13Mhz, 28Mhz의 리드코일을 이용하여 제작하였다. 리드코일의 자기 공명 주파수는 Agilent technologies 사의 E5071B

Network Analyzer를 이용하여 측정하였으며  $S_{21}$  parameter 값이 -40 dB에서 -50 dB의 값을 가지도록 설계하였다.

또한 프로브 진단 시 발생하는 프로브의 stray capacitance 값으로 인한 공진주파수 영역의 변이를 막기 위하여 공진 영역의 대역폭이 넓도록 랭뮤어 프로브를 설계하였다. 이를 통하여 RF 노이즈 간섭으로 인한 프로브 진단의 오차를 감소시켰다. 이를 이용하여 시간에 따라 선형적으로 변하는 삼각파 신호를 인가하여 탐침에 인가하는 전압의 크기에 따른 전류 V-I 커브를 측정 한 후 플라즈마 변수 값을 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입력 파워 및 압력에 따른 플라즈마 변수 측정

ICP(Inductively Coupled Plasma)는 저압에서 고밀도 플라즈마를 발생시키는 플라즈마 발생 장치로서 수 mTorr에서 수 Torr 영역을 동작압력으로 한다. 패러데이 법칙으로 코일에서 유도되는 전기장을 이용하여 플라즈마가 발생 및 유지되며, 특정 압력에서 파워를 인가할 경우 약한 발광을 수반하는 열은 플라즈마가 발생되며 파워가 높아 질 수록 전자 구름떼를 형성하며 밝은 플라즈마가 형성 되는 것을 특징으로 한다. 이는 E 모드 방전에서 H 모드 방전으로 모드 전이되는 것을 뜻하며, 이를 E-H mode transition(E-H 모드 전이)라 칭한다. E 모드는 안테나에 걸리는 전압의 전기장에 의하여 방전하는 모드이며, H 모드는 코일의 전류가 만드는 자기장 H에 의해 방전하는 모드이다. 본 실험에서는 40W의 전원을 인가했을 때 그림 4와 같이 전자구름떼를 보이는 H모드로의 E-H 모드 전이가 발생 하였으며 power transfer efficiency 상승으로 인하여 그림 5 (c) 20mTorr 영역과 같이 전자 온도와 전자밀도가 함께 상승하는 현상이 나타났다.<sup>[4]</sup>

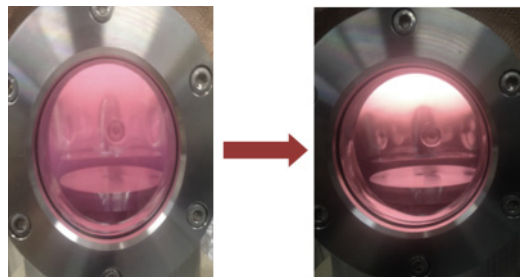


그림 4 E-H 모드 전이 현상  
 Fig. 4 E-H mode transition

본 실험에서는 자체 제작한 싱글 랭뮤어 프로브를 이용하여 동작압력 5mTorr, 10mTorr, 15mTorr, 20mTorr에서 인가 파워를 250W, 300W, 350W, 400W, 450W로 변화시켜 가며 플라즈마 변수를 측정 하였다. 탐침의 위치는 진공 챔버의 윈도우로부터 6cm 아래에서 측정을 하였으며 윈도우와 chuck의 중앙 부분에서 측정을 실시하였다.

그림 5와 같이 인가 파워와 압력을 주요 변수로 하여 변화시

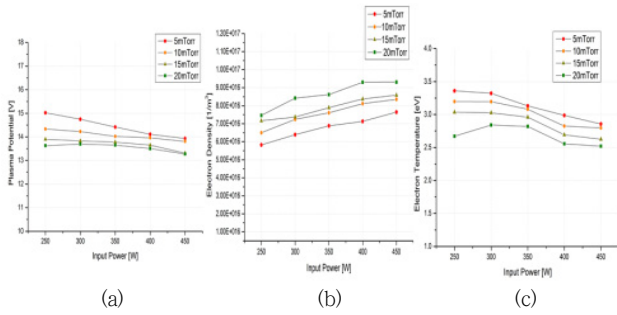


그림 5 정전 탐침법을 이용한 플라즈마 변수 측정  
 (a) 인가파워와 압력에 따른 플라즈마 전위  
 (b) 인가파워와 압력에 따른 전자밀도  
 (c) 인가파워와 압력에 따른 전자 온도

Fig. 5 measuring plasma parameter using single langmuir probe (a) plasma potential (b) electron density (c) electron temperature

켜 가며 플라즈마 전위, 전자 밀도, 전자 온도의 변화를 관찰 하였다. 플라즈마 전위는 통상적인 결과와 같이 인가 파워가 동일 할 때는 압력이 낮을수록, 인가 압력이 동일할 때는 인가 파워가 낮을수록 플라즈마 전위가 높아지는 경향성을 보였다. 전자 밀도는 인가파워와 인가압력이 높을수록 증가하며 전자온도는 압력이 낮고 파워가 낮을수록 전자온도가 상승하는 경향을 보였다.

이는 플라즈마 발생 시에 입자수가 증가 할수록 입자간 충돌의 증가로 인하여 입자 수는 증가하는 반면 입자의 에너지는 감소하는 것을 나타낸다. 또한 ICP의 특성상 그림 5 (b)와 (c)의 20 mTorr에서 250W에서 300W로 인가 파워를 높여 주었을 때 전자 밀도와 전자 온도가 동시에 상승하는 결과가 발생하는데 이는 1E17 정도에서 포화되는 전자 밀도에 따른 power transfer efficiency(파워 전달 효율)이 상승하기 때문에 발생하는 것으로 보인다.

결과적으로 인가 전압이 높으며 인가 압력이 클수록 전자 밀도가 상승하며 반대로 전자 온도는 낮아지는 현상이 발생한다. 때문에 이온에너지가 낮으며 고밀도 플라즈마 발생이 필요한 건식 식각 공정의 경우 인가 파워와 인가 압력이 중요한 변수로 작용하게 된다.<sup>[5]</sup>

### 3.2 공간 분포 및 압력 따른 플라즈마 변수 측정

그림 6은 입력 전압을 350W로 고정한 상태에서 공간 분포 및 압력에 따른 플라즈마 변수를 측정한 그래프이다. 챔버 중앙의 수직 위치 및 수평 위치에 따라 공간 분포를 나타 내었다. 그림 6 (a), (b)는 윈도우로부터의 거리에 따라 전자 온도 및 밀도를 나타 내었으며 그림 6 (c), (d)는 윈도우로부터 6.5cm 아래의 위치에서 수평 거리에 따라 전자 온도와 밀도를 나타낸 모습이다. 그림 6 (a), (b)를 통해 수직 위치 및 압력에 따른 전자 밀도를 측정 한 결과 압력에 따라 전자 밀도의 최대 지점이 다른 현상을 확인 할 수 있다. 또한 낮은 압력으로 갈수록 전자 밀도의 최대치 구간이 윈도우로부터 멀어지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 플라

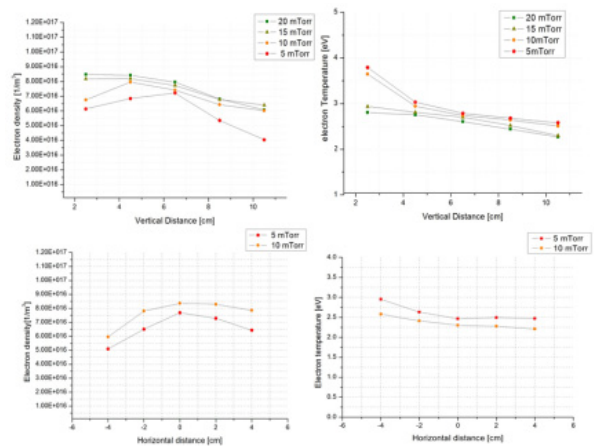


그림 6. 공간 분포 위치와 압력에 따른 플라즈마 변수  
 (a)윈도우로부터 수직거리에 따른 전자밀도 (b) 윈도우로부터 수직거리에 따른 전자온도 (c) 수평 위치에 따른 전자밀도 (d) 수평 위치에 따른 전자 온도

Fig. 6 plasma parameter along the spatial distribution  
 (a) electron density along the vertical distance  
 (b) electron temperature along the vertical distance  
 (c) electron density along the horizontal distance  
 (d) electron temperature along the horizontal distance

즈마 내부에서 입자의 diffusion 현상이 질량과 밀도가 작을수록, 전자 온도가 높을수록 활발히 일어나기 때문에 발생하는 현상이다. 압력이 높을수록 확산도가 떨어져 윈도우에 가까운 부분에서 전자 밀도가 높게 나타난다. 또한 그림 6 (b)를 통해 입력 압력이 낮을수록 전자 온도가 높아지며 윈도우로부터의 거리가 멀어질수록 skin depth 부분에서 멀어지기 때문에 전자 온도가 낮아짐을 확인 할 수 있다. 그림 6 (c), (d)는 수평 위치에 따른 전자 온도와 전자 밀도를 나타낸 그래프이며 비교적 입자수가 많은 gas inlet에 가까울수록 높은 전자 밀도를 가지며 반대로 전자 온도는 낮아지는 경향을 보인다.<sup>[6]</sup> 이를 통하여 gas의 flow field가 전자 밀도 및 전자 온도와 같은 플라즈마 변수에 큰 영향을 끼치는 것을 확인 할 수 있다.그림 7은 인가 전원을 350W로 고정 한 후 압력에 따라(a) EEDF(Electron Energy Distribution Function)와 (b) EEPF(Electron Energy Probability Function)를 나타낸 그림이다. 전자 에너지 분포 함수를 5mTorr, 10mTorr, 15mTorr, 20mTorr로 압력을 5mTorr씩 증가 시키며 실험을 실시하였다. 압력이 높을수록 플라즈마 내의 입자수가 증가하게 되므로 충돌이 증가하여 전자 밀도는 증가하는 반면 잦은 충돌로 인한 입자의 에너지는 낮아져 전자 온도는 낮아지게 된다. 이 때문에 동일한 인가 파워 조건에서 압력이 높을수록 낮은 에너지 영역에서 전자가 많이 분포 하며 높은 에너지 균으로 갈수록 전자의 분포도가 줄어드는 현상이 나타나게 된다. 동시에 압력 별 전자 에너지 확률 분포 함수의 경우에서도 낮은 에너지 영역에서 높은 압력 조건의 전자 분포 확률이 낮은 압력 조건의 전자 분포 확률보다 높으며 높은 에너지 영역으로 갈수록 낮은 압력 조건의 전자 분포 확률이 높은 압력 조건의 전자 분포 확률보다 높아지는 현상이

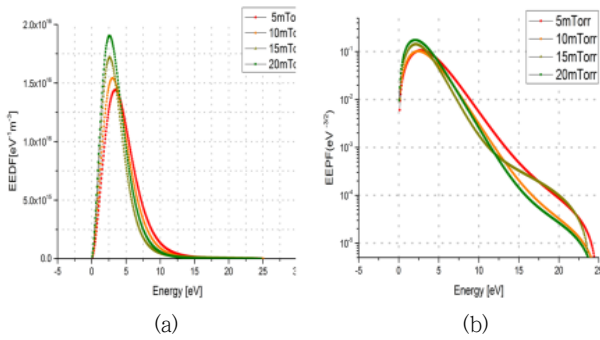


그림 7 압력에 따른 (a) 전자 에너지 분포함수 및 (b) 전자 에너지 확률 분포함수

Fig. 7 (a) EEDF(Electron Energy Distribution Function) and (b) EEPF(Electron Energy Probability Function) along the input pressure

나타난다. 이를 통해 플라즈마 공정 시 동일한 입력 파워 하에서 높은 압력을 가할수록 전자의 에너지 분포가 낮은 에너지 쪽에서 높은 확률로 존재하게 되며 낮은 압력의 공정조건에서 보다 높은 에너지 영역에서 전자들의 분포도가 증가하는 경향이 나타남을 알 수 있다.<sup>[7][8]</sup>

### 3.3 유체 시뮬레이션을 이용한 압력과 입력 파워에 따른 플라즈마 변수 측정

그림 8은 유체 시뮬레이션에 사용된 유도결합 플라즈마 장치의 개략도이다. 코일의 형태 및 챔버의 길이는 실제 실험에 사용된 유도결합 플라즈마 발생 장치와 동일하게 모델링 되었으며 크게 코일, 유전체, 플라즈마 발생 부분과 chuck으로 구성 되어있다. 유체 시뮬레이션은 속도 향상을 위하여 2 dimension 축 대칭 형태로 계산을 실시하였다.

시뮬레이션 시에 챔버 벽면은 ground로 설정 하였으며 코일의 인가 파워와 플라즈마 인가 압력에 따라 플라즈마 변수를 계

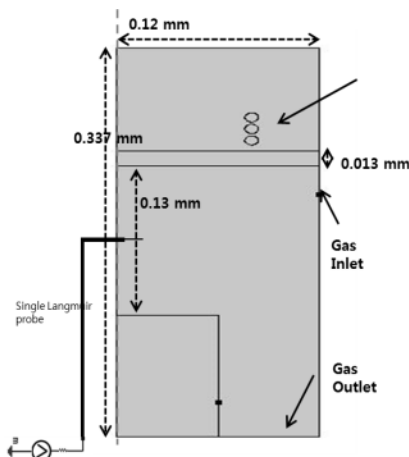


그림 8 플라즈마 유체시뮬레이션 개략도  
Fig. 8 Plasma Fluid simulation Modeling Geometry

산하였다. 시뮬레이션은 Navier-stokes 방정식을 포함하여 아래와 같은 지배 방정식을 이용하여 계산하였다. 아래의 지배 방정식을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

기본적으로 Poisson 방정식을 사용하여 electric field 및 potential을 구하였으며, 플라즈마 내의 입자 변화를 계산하기 위하여 전자 보존 방정식과 에너지 보존 방정식을 사용하여 전자 밀도 분포와 전자 평균 에너지를 구하였다.

#### particle conservation

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e - (u \cdot \nabla)n_e$$

#### 드리프트-확산 방정식

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \nabla n_e$$

#### 에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e + E \cdot \Gamma_e = S_{en} - (u \cdot \nabla)n_e + (Q + Q_{\geq n})/q$$

#### 에너지 유속

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \nabla n_e$$

#### Poisson 방정식

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon_0}$$

#### Einstein relation

$$D_e = \mu_e T_e, \mu_{en} = \left(\frac{3}{5}\right)\mu_e, D_e = \mu_e T_e$$

#### Navier-stokes equation

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u$$

$n_e [1/m^3]$  : 전자밀도,  $n_e [V/m^3]$  : 전자에너지 밀도

$R_e [1/(m^3 \cdot s)]$ : 전자 비율,  $I [1/(m^2 \cdot s)]$  : 유속

$E [V/m]$  : 전기장,  $D_e [m^2/s]$  : 전자 확산 계수

$D_{en} [m^2/s]$  : 전자에너지확산계수,

$\mu_e [m^2/V \cdot s]$  : 전자이동도

$\mu_{en} [m^2/(V \cdot s)]$  : 전자에너지이동도,  $u [m/s]$  : 속도

또한 전자의 평균 에너지를 구하여 전자온도를 계산하였다. 전자의 확산계수, 에너지 이동도, 에너지 확산계수는 Einstein relation을 이용하여 계산하였다. 또한 유체 시뮬레이션에 이용한 유도결합 플라즈마 방전 영역의 화학 반응은 아래 표의 화학 반응식을 사용하여 계산하였다.<sup>[9][10]</sup>

그림 9는 상용 유체 플라즈마 시뮬레이션 툴을 사용하여 얻어진 플라즈마 전위, 전자 밀도, 전자온도에 관한 결과이다. 조건은 실험과 동일한 크기의 챔버를 2차원 축대칭 구조로 제작하여 실시하였다. 실험 조건과 같이 입력 파워를 250W, 300W, 350W, 400W, 450W로 증가 시켜가며 실험을 실시하였으며, 압력 조건 또한 5mTorr, 10mTorr, 15mTorr, 20mTorr로 조건을 변화시키며 실험을 실시하였다. 압력과 밀도에 따른 플라즈마 전위, 전자 밀

표 1 시뮬레이션에 적용된 화학 반응식

Table 1 Chemical reaction used in the simulation

No	Reaction formula	Rate coefficient ( $m^3/s$ )	$\Delta \epsilon (eV)$
1	$e+Ar \Rightarrow e+Ar$	c	
2	$e + Ar \Rightarrow e+Ar_s$	$f(\epsilon)$	11.5
3	$e+Ar^*(4s) \Rightarrow e+Ar$	$f(\epsilon)$	-11.5
4	$e+Ar \Rightarrow 2e+ Ar^+$	c	15.8
5	$e+Ar^*(4s) \Rightarrow 2e+ Ar^+$	$f(\epsilon)$	4.42
6	$e+Ar \Rightarrow e + Ar^*(4p)$	$f(\epsilon)$	13.2
7	$e+Ar^*(4s) \Rightarrow e+Ar^*(4p)$	$f(\epsilon)$	1.64
8	$e+Ar^*(4p) \Rightarrow e+ Ar$	$f(\epsilon)$	-13.2
9	$e+Ar^*(4p) \Rightarrow 2e+ Ar^+$	$f(\epsilon)$	2.56
10	$e+Ar^*(4p) \Rightarrow e+Ar^*(4s)$	$f(\epsilon)$	-1.64
11	$Ar^*(4s)+Ar^*(4s) \Rightarrow e+Ar+Ar^+$	$1.2 \times 10^{-15}$	
12	$Ar^*(4s)+Ar \Rightarrow Ar+Ar$	$3 \times 10^{-21}$	
13	$Ar^*(4p)+Ar^*(4p) \Rightarrow e+Ar+Ar^+$	$6.2 \times 10^{-15}$	

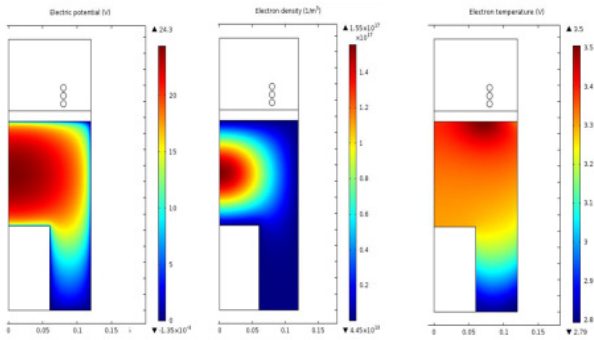


그림 9 플라즈마 유체시뮬레이션 이용한 (a) 플라즈마전위, (b) 전자밀도, (c) 전자온도 측정

Fig. 9 Plasma Fluid simulation (a) plasma potential, (b) electron density, (c)electron temperature

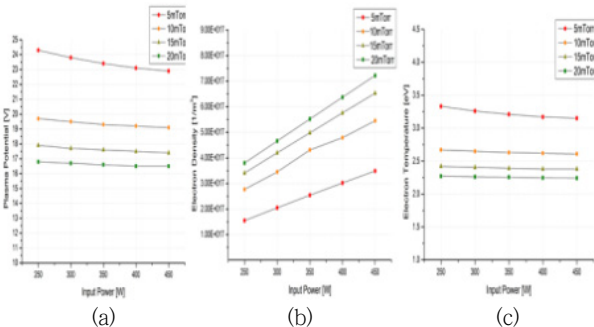


그림 10 입력 파워 및 압력에 따른 (a) 플라즈마전위, (b) 전자 밀도, (c) 전자온도

Fig. 10 Plasma parameter along the input power and pressure (a) plasma potential, (b) electron density, (c)electron temperature

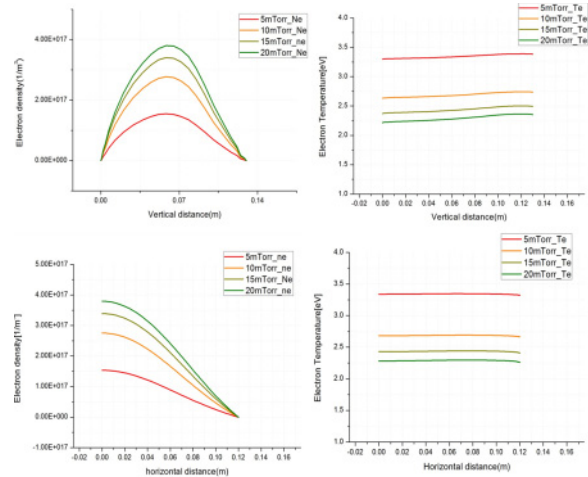


그림 11 시뮬레이션을 이용한 압력과 파워에 따른 공간 분포상의 플라즈마 변수측정 (a) 수직 방향 전자 밀도 (b)수직 방향 전자온도 (c) 수평방향 전자 밀도 (d) 수평방향 전자온도

Fig. 11 Plasma parameter along the input power and pressure (a) electron density, (b) electron temperature, (c) electron density (d)electron temperature

도, 전자 온도를 계산 하였으며, 실험과 같이 공간 분포상의 전자 밀도와 전자온도를 계산하여 실험값과 비교 분석을 실시하였다.

그림 10은 인가 파워 250W, 300W, 350W, 400W, 450W와 Ar 가스를 이용한 인가 압력 5mTorr, 10mTorr, 15mTorr, 20mTorr 에 따른 플라즈마 변수를 측정된 그림이다.

유체 시뮬레이션을 이용하여 계산한 결과 실험 결과와 동일하게 인가 파워를 증가 시킬수록 전자 밀도는 증가하며 반대로 플라즈마 전위, 전자 온도는 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 동일한 파워에서 압력이 증가할수록 플라즈마 전위와 전자 온도는 감소하며 반대로 전자 밀도는 증가하는 것을 확인 하였다. 정전 탐침 법을 이용한 플라즈마 변수 측정과 시뮬레이션을 통한 결과를 비교했을 때 경향성이 일치하는 것을 확인 하였다.

그림 11은 유체 시뮬레이션 툴을 이용한 챔버 내에서 공간 분포에 따른 플라즈마 변수 값을 계산 한 모습이다.

Ar 가스를 인가하였을 때 인가 전원을 250W로 고정시킨 후 수직 방향과 수평 방향에 따른 공간 분포상의 플라즈마 변수 값을 계산하였다. 먼저 그림 11 (a), (b)에서 x축 방향 챔버 중앙지점을 기준으로 수직 방향의 전자 밀도와 전자 온도 분포를 측정 하였다. 그림 11 (a)와 같이 chuck을 기준으로 수직 방향의 전자밀도 값을 계산 하였을 때 인가 압력이 높을수록 전자 밀도 값이 상승하였으며 수직 방향으로 중앙 지점인 0.07m 지점에서 전자 밀도의 최대치가 나타남을 확인 하였다.

그림 11 (b)는 전자 온도를 측정된 모습이며 윈도우에 가까워 수록 전자 온도가 상승하며 압력이 낮을수록 전자 온도 값이 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 11(c)와 (d)는 챔버의 윈도우로부터 6cm 떨어진 지점에서 챔버 중앙을 기준으로 수평 방향으로 이동시키며 계산한 값으로 챔버 중앙에서 멀어질수록 전자 밀



도가 감소하며 압력이 높아질수록 전자 밀도가 증가하고 전자 온도는 감소하는 모습을 보였다.

본 시뮬레이션이 2차원 축대칭으로 계산 한 결과 inlet gas 위치에 따른 공간 분포 상의 플라즈마 변수 값이 실제 실험에서 측정된 결과와 차이점이 있음을 확인 할 수 있었다. 시간 단축을 위한 구조적 단점을 제외하고는 시뮬레이션의 경향성이 실험 치와 동일하게 나타남을 보였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유도결합 플라즈마 발생 장치를 이용하여 입력 파워와 Ar 인가 가스의 압력에 따라 플라즈마 전위, 전자 밀도, 전자 온도 및 챔버 공간 분포에 따른 플라즈마 변수 측정을 실시하였다. 플라즈마 변수 측정을 위하여 단일 랭뮤어 프로브를 사용하여 V-I Curve를 측정하고 플라즈마 변수를 계산 하였다. 또한 상용 유체 시뮬레이션을 이용하여 실험 결과와 비교 분석을 실시하였다.

유도결합 플라즈마 발생 장치의 특징인 E-H mode transition을 확인 할 수 있었으며, 이때 인가 파워가 40 W로 측정 되었다. 정전 탐침 법을 이용한 플라즈마 변수 측정 결과, 입자수가 증가할수록 입자 충돌이 증가하고 반대로 입자의 에너지는 감소함으로서, 압력이 낮을수록 플라즈마 전위가 증가하며 전자 밀도는 감소하며 반대로 전자온도는 증가하는 특성을 나타 내었다. 또한 입력 파워가 높을수록 플라즈마 전위는 낮아지며 전자 밀도가 증가하고 전자 온도는 감소하는 특징이 보였다. 더불어 20mTorr의 경우 전자 밀도와 전자 온도가 동시에 증가하는 경향이 보였는데 이는 유도결합 플라즈마의 특성상 외부 인가 파워가 증가함에 따라 파워 전달 효율이 증가하여 전자 온도와 전자 밀도가 동시에 상승하는 구간이 발생함을 확인 할 수 있었다. 공간 분포 상 수직 위치와 수평 위치별 플라즈마 변수를 측정 하였을 때 particle diffusion의 영향으로 수직 위치 및 압력에 따른 경우 전자밀도의 최대 점이 압력에 따라 다르며 원도우로부터 거리가 멀어질수록 온도가 낮아지는 것을 보였다. 또한 수평 위치 및 압력 별로 플라즈마 변수를 측정 했을 때 gas flow field의 영향으로 가스 투입 위치에 가까울수록 전자 밀도가 높아지며 반대로 전자온도는 낮아지는 현상을 나타냈다. 동일한 원인으로 인하여 압력별 전자 에너지 분포함수를 측정 하였을 때 압력이 높을수록 전자 에너지가 낮은 지역에서 분포도가 증가하며 고에너지로 갈수록 분포가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 압력 별 전자 에너지 확률 분포로 나타 내었을 때 동일한 결과가 발생하였다.

이러한 실험 결과를 이론 치에 근거하여 계산한 상용 유체 시뮬레이션을 이용하여 비교 분석을 실시하였다. 실험값과 동일하게 유체 시뮬레이션을 통하여 압력과 입력 파워 별로 플라즈마 전위, 전자 밀도, 전자 온도를 계산하였다. 또한 챔버와 동일한 구조의 시뮬레이션 장치를 설계하여 공간 분포 상 전자온도와 전자밀도 플라즈마 전위를 측정 하였다. 실험값과 유체 시뮬레이션 결과 값을 비교한 결과, 인가 파워와 압력에 따른 플라즈마 변수 값의 분포의 경향성은 일치 하였으나 2차원 축대칭 구조로 설계 한 한계점으로 인하여 전자 및 이온 확산에 대한 한계 점으로

인하여 공간 분포 상 플라즈마 변수 값을 정확하게 계산 할 수 없는 한계점을 지녔다.

본 실험 결과 압력과 파워가 상승 할수록 유도결합 플라즈마의 전자 밀도는 상승하고 전자온도는 감소하며 이는 반도체 공정 중 고밀도 저 이온 에너지의 건식 식각 공정에 중요한 변수로 사용됨을 확인 할 수 있었다. 또한 파워 전달 효율에 따른 유도결합 플라즈마 장치의 특성을 확인 할 수 있었으며 주입 가스구의 위치에 따라 플라즈마 변수의 공간 분포 값에 변화가 발생하는 것을 확인 하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (No.2013H1B8A2032267)

#### References

- [1] Michael A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing" John Wiley&Sons (2005)
- [2] Chen-Fu Chien, J.K. Wang, "Economic Analysis of 450 mm Wafer Migration" IEEE, Semiconductor Manufacturing, 1-4 (2007)
- [3] Isaac D sudit, Francis F Chen, "RF compensated probes for high-density discharges", Plasma Sources Sci. Technol, 3, 162-168 (1994)
- [4] K Suzuki, K Nakamura, H Ohkubo, H Sugai, "Power transfer efficiency and mode jump in an inductive RF discharge ", Plasma Sources Sci. Technol. 713 - 20, (1998)
- [5] R. J. Shul, G. B. McClellan, S. A. Casalnuovo, D.J. Rieger et al, "Inductively Coupled plasma etching of GAN" Applied Physics letters, 69, 1119 (1996)
- [6] G. R. Kornblum, L. de Galan, "spatial distribution of the temperature and the number densities of electrons and atomic and ionic species an inductively couple=d RF argon plasma" Spectrochimica Acta part B : Atomic spectroscopy, 32, 2, (1977)
- [7] Valery A. Godyak, "Nonequilibrium EEDF in Gas Discharge Plasmas" IEEE Transaction on plasma science, vol. 34, 3, (2006)
- [8] V.A Godyak "Measuring EEDF in Gas Discharge Plasmas" plasma-surface interactions and processing of Materials, 176, 95-134 (1990)
- [9] COMSOL Multiphysics Version 4.4 User Guide (2013)
- [10] E.J. Son, D.H Kim, and H.J Lee "Analysis of DC plasma using Electrostatic probe and fluid simulation" Trans. KIEE, vol 63, 10, 1417-1422, (2014)

## 저 자 소 개



### 차 주 홍(Ju-Hong Cha)

1988년 11월 3일생. 2013년 부산대 공대 전자전기공학부 졸업. 2015년 동대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전자전자컴퓨터공학과 박사과정으로 재학 중

Tel : 051-510-2746

Fax : 051-510-1498

E-mail : ciwsh@pusan.ac.kr



### 이 호 준(Ho-Jun Lee)

1966년 10월 14일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 현재 부산대 공대 전기전자 컴퓨터공학과 정교수

Tel : 051-510-2301

Fax : 051-513-0212

E-mail : hedo@pusan.ac.kr