

Experimental Analysis on the 0 Dimensional Plasma Model in an Inductively Coupled Plasma (ICP)

Myoung-Jae LEE*

Department of Physics and Research Institute for Natural Sciences, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

Eui Jun CHUNG

Seoul Science High School, Seoul 03066, Korea

(Received 19 April 2016 : revised 19 July 2016 : accepted 4 August 2016)

A 0 dimensional model is widely used because of its simple and easy application to low-temperature plasmas, and the model can be applied and tested in a cylindrical inductively-coupled plasma (ICP). The electron energy distribution functions (EEDFs) obtained by using rf-compensated Langmuir probes under various conditions (pressures and rf powers) are measured for comparison with those obtained using the model, and the plasma densities and the electron temperatures from the EEDF are compared with those from the model. The measured plasma densities are found to be almost 50% of those from the model, and the measured electron temperatures are 150% larger than those from the model. If these discrepancies are to be reduced, the effects of a non-Maxwellian electron energy distribution, the plasma generation efficiency, and the gas temperature on the model need to be considered in a modified model. When such effects are considered in a modified model, the experimental results are found to agree well with the results obtained from the modified model. This shows that such effects must be considered in the model.

PACS numbers: 52.70.Ds

Keywords: Inductively coupled plasma, Electron temperature, Non-Maxwellian distribution

유도 결합 플라즈마에서 0차원 플라즈마 모델의 실험적 비교 분석 연구

이명재*

한양대학교 물리학과 및 자연과학연구소, 서울 04763, 대한민국

정의준

서울과학고등학교, 서울 03066, 대한민국

(2016년 4월 19일 받음, 2016년 7월 19일 수정본 받음, 2016년 8월 4일 게재 확정)

저온 플라즈마를 간단하게 해석할 수 있는 0D 모델을 유도 결합 플라즈마 용기에 적용하여 실험 결과와 비교 분석하였다. 랑뮤어 탐침으로 전자 에너지 분포 함수를 측정하여 구한 플라즈마 밀도와 전자 온도를 0D 모델과 비교하였다. 플라즈마 밀도의 경우, 실제 측정값이 모델에서 계산된 밀도의 약 50% 정도로 낮았고 전자 온도의 경우 1.5 배 정도 큰 값을 가졌다. 0D 모델에서 고려하지 않은 비 맥스웰 전자 분포,



기체 온도 효과, 전력 효율 등 몇 가지 요인들을 고려하여 모델을 다시 계산한 결과, 측정 값과 모델 값의 차이가 현저히 줄었다. 더 정확한 모델을 위해서는 이러한 요인들을 고려되어야 함을 알 수 있다.

PACS numbers: 52.70.-m

Keywords: 유도결합 플라즈마, 전자온도, 비맥스웰분포

I. 서론

유도 결합 플라즈마는 고밀도 플라즈마를 발생시키고 플라즈마 밀도와 이온 에너지를 독립적으로 제어할 수 있어서 반도체 식각 공정에 널리 사용되고 있다 [1]. 이러한 유도 결합 플라즈마는 안테나에 교류 전류를 인가할 때 패러데이 유도 법칙에 의해 유도 전기장이 발생된다. 이 유도 전기장으로 인해 전자가 가속되고 에너지를 얻은 전자들이 중성 기체 분자들과 이온화 충돌을 통해서 플라즈마가 생성된다.

유도 결합 플라즈마를 해석할 수 있는 유체 기반의 0D 모델이 연구에 많이 적용되고 있다. 0D 모델은 플라즈마 반응 용기의 기하학적인 구조, 즉 공간적인 형태를 무시하므로 계산을 매우 신속하게 할 수 있고, 보다 쉽게 플라즈마 밀도와 전자 온도를 구할 수 있어 플라즈마 물성을 이해하는데 도움이 많이 되고 있다 [2-4]. 모델에서 얻은 플라즈마 밀도와 전자 온도를 플라즈마 내부 화학 반응, 즉 전자-분자의 충돌 반응 계수에 대입하면 플라즈마 내부 분자, 조각진 분자, 원자 등 기체의 화학 조성비를 계산할 수 있다 [5,6].

본 논문에서는 0D 모델을 13.56 MHz의 원통형 유도 결합 플라즈마의 여러 조건에 적용하였다. 실험으로는 전자 에너지 분포 함수를 측정하였고 측정된 전자 에너지 분포를 통해서 플라즈마 밀도와 전자 온도를 얻었으며 이러한 측정 값들과 0D 모델과 비교하였다. 실험값과 모델 값에는 차이가 있었는데, 이러한 차이를 줄일 수 있는 여러 요소들, 즉 전자 에너지 분포, 기체 온도, 전력 효율 등을 고려하여 적용한 결과 실험과 모델의 차이를 줄일 수 있었다.

II. 배경 이론

플라즈마 상태에서 기체 분자는 고에너지 전자와 충돌로 이온화된다. 기체 분자와 전자는 수많은 충돌을 하게 되는데, 이 충돌은 크게 이온화, 들뜬 상태, 탄성 충돌 등으로 나눌 수 있다. 이때 플라즈마 밀도에 직접적인 영향을 미치는 충돌은 이온화를 일으키는 충돌이다. 들뜬 상태 또한 다단계 충돌로 이온화되기는 하지만 높은 압력, 고밀도 외에는 크지 않다. 플라즈마 내부에서는 전자와 이온의 질량 차이에 의한 확산 차이 때문에 원통 벽 또는 표면 근처에 양

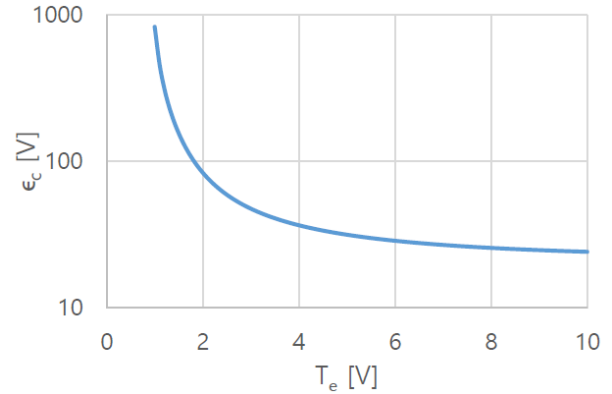


Fig. 1. (Color online) Collisional energy losses per ion-electron creation.

전하 공간이 생기게 되는데, 이를 쉬스(Sheath)라고 한다. 쉬스에서는 전자와 이온의 밀도가 다르기 때문에 플라즈마 본체의 밀도를 n_0 라고 하고, 플라즈마 쉬스 경계에서의 밀도를 n_s 라고 하자. n_s 와 n_0 의 밀도 비를 h 라 정의하고, $n_s = hn_0$ 라 한다. 이때 h 는 이온 평균 자유 행로 (Mean Free Path) λ_i 의 함수이다 [1]. 다음 내용들은 참고 문헌 [1]을 참고하여 기술한다.

1. 전력 균형 방정식 (Power balance equation)

플라즈마에 인가된 전기장을 통해 플라즈마의 전자가 흡수한 전력을 P_{abs} 라고 하고, 플라즈마를 생성하면서 소모하는 에너지, 즉 각종 충돌을 거치면서 전자와 이온의 생성으로 소모되는 전력을 P_{loss} 라 한다. 정상 상태에서는 플라즈마로 공급되는 전력은 전자와 이온이 플라즈마 내부에서 소모하는 전력과 평형을 이루므로 $P_{abs} = P_{loss}$ 이다. 플라즈마를 빠져나가는 이온의 선속은 $n_s u_B$ 이고, 용기 벽 면적을 A 라 하면 총 손실전력 P_{loss} 는 $P_{loss} = An_s u_B \epsilon_T$ 이다. 이때 ϵ_T 는 전자-이온 한 쌍이 생성되는 데 필요한 총 에너지이다. ϵ_T 는 V 단위로 표현하기 위해 $\epsilon_T = e \epsilon_T$ 로 나타낼 수 있고, $P_{loss} = An_s u_B e \epsilon_T$ 이다. 전자 하나가 벽과 만나면서 손실되는 에너지 ϵ_e 는 에너지 선속으로부터 $\epsilon_e = 2T_e$ 가 된다. 이온이 벽으로 나가면서 벽으로 가져가는 에너지 ϵ_i 는 전자가 플라즈마 전위를 넘어가면서 손실되는 운동에너지와 같다. $\epsilon_i \approx V_p \approx 5.2T_e$ 이다. 전자가 이온을 하나 만들기까지 기체와 충돌로 소모하는 에너지인 ϵ_c 는

*E-mail: mjlee@hanyang.ac.kr

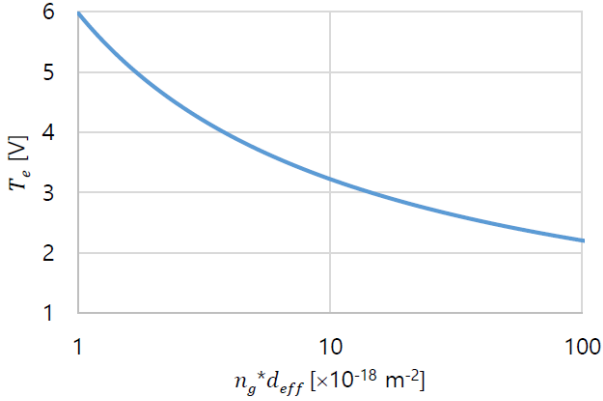


Fig. 2. (Color online) Electron temperatures versus $n_g d_{eff}$.

이온화, 들뜬 상태, 탄성충돌을 만드는 데 사용된다. 이를 반응 속도 식을 통해 값을 구하면 Fig. 1과 같이 된다.

전자-이온 한 쌍이 생성되는 데 필요한 총 손실 에너지는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\epsilon_T = \epsilon_e + \epsilon_c + \epsilon_i \approx \epsilon_c + 7.2T_e$$

그러므로 $P_{abs} = en_s u_b A \epsilon_T$ 이고, $n_s = n_0 h = \frac{P_{abs}}{e u_B \epsilon_T A}$ 이다. 플라즈마 밀도를 구하는 식을 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$n_0 = \frac{P_{abs}}{e u_B \epsilon_T h A} \quad (1)$$

2. 입자 균형 방정식 (Particle balance equation)

플라즈마 밀도, 즉 n_0 를 구하기 위해서는 u_B , ϵ_T 가 전자 온도 T_e 의 함수이므로 T_e 를 계산해야 한다. T_e 를 계산하기 위해 입자 균형 방정식을 사용한다. 플라즈마 내부에서 전자와 이온의 단위시간당 생성되는 양과 벽으로 손실되는 양은 같기 때문에 아래와 같은 식이 성립한다.

$$K_{iz} n_g n_0 V = n_s u_B A = h n_0 u_B A \quad (2)$$

위 식의 좌변으로 T_e 의 함수인 변수들을 정리하면 $\frac{K_{iz}}{u_B} = \frac{1}{n_g} \frac{hA}{V}$ 인데, $d_{eff} = \frac{V}{hA}$ 로, 면적 대 부피 비에 비례하는 값이다. 그러므로 $\frac{K_{iz}}{u_B} = \frac{1}{n_g d_{eff}}$ 이다. $K_{iz} = K_{iz,0} e^{-E_{iz}/T_e}$ 이고, $u_B = \sqrt{\frac{eT_e}{M_i}}$ 이므로 위 방정식을 풀면 $T_e \approx \frac{7}{\log(1.48 n_g d_{eff}) - 17}$ 이고, Fig. 2와 같이 얻을 수 있다.

반지름이 R 이고 높이가 L 인 원통형 용기의 경우는 반경 방향과 축 방향의 쉬스 경계에서의 h 가 다르기 때문에 각

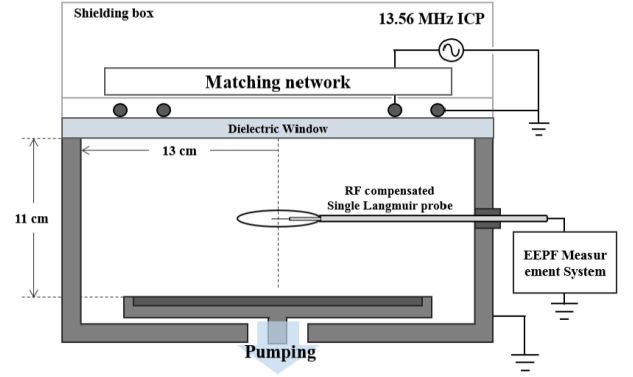


Fig. 3. (Color online) A schematic of an inductively coupled plasma reactor.

방향에 대한 h 는 다음과 같이 나타난다.

$$h_L = 0.86 * \left(3 + \frac{L}{2\lambda_i} \right)^{-1/2}$$

$$h_R = 0.80 * \left(4 + \frac{R}{2\lambda_i} \right)^{-1/2}$$

면적 값을 다음과 같이 보정할 수 있고, n_0 를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$hA = A_{eff} = 2\pi R^2 h_L + 2\pi R L h_R$$

$$d_{eff} = \frac{V}{A_{eff}}$$

앞에서 본 것과 같이 여기서는 다단계 이온화 과정을 무시했기 때문에 전자온도와 플라즈마 밀도가 서로 독립적인 관계로 주어졌다. 하지만 다단계 이온화 과정을 고려하면 더 이상 밀도와 전자 온도가 독립적으로 주어지지 않고 밀도에 따라 전자 온도가 변하게 된다 [7].

III. 실험 결과 및 분석

Fig. 3과 같은 원통형 유도 결합 플라즈마 장치에서 실험을 진행했다. 용기의 반지름은 13 cm, 높이는 10 cm이다. 13.56 MHz 전력이 임피던스 매칭 박스를 통해서 안테나로 연결된다. 압력을 고정시키고 전력을 바꾸고, 전력을 고정시키고 압력을 바꾸면서 전자 에너지 분포를 측정하였다.

량무어 탐침을 사용하여 플라즈마 밀도, 전자 온도를 측정하였다. 단일 량무어 탐침은 길이 10 mm와 지름 0.1 mm의 텅스텐 wire로 만들었고 탐침에는 정확한 측정을 위해서 rf 보상 필터를 적용하였다. 또한 탐침은 레퍼런스 탐침과 rf 왜곡을 줄여주는 13.56 MHz의 공명 필터를 삽입한 것으로 Fig. 3과 같이 구성되어 있다. 탐침을 통해 흐르는

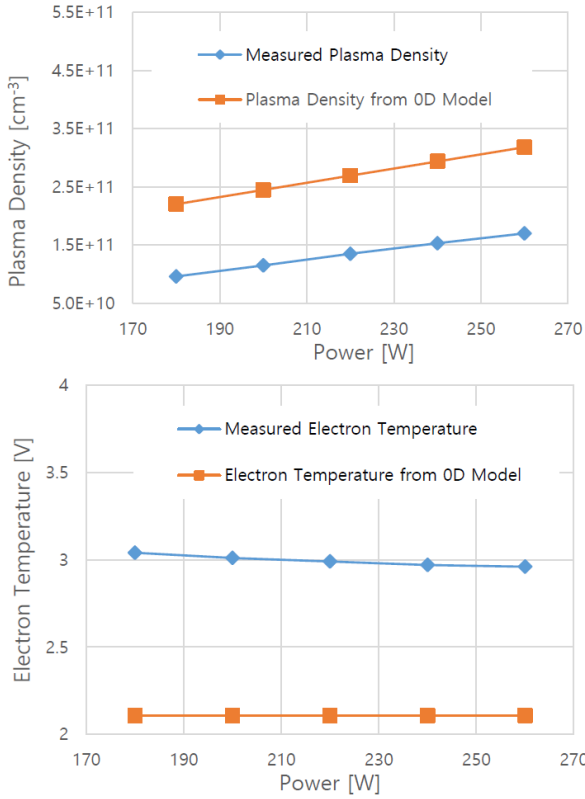


Fig. 4. (Color online) Plasma densities and electron temperatures at pressure 20 mTorr.

전류와 탐침 전압과의 관계를 구한 뒤, 전류를 전압에 대해 두 번 미분하면 전자의 에너지 확률 함수 $f(\epsilon)$ 에 비례하게 된다. 전류의 이차 미분 I'' 와 전자의 에너지 분포 함수 $g(\epsilon) = \epsilon^{1/2}f(\epsilon)$ 는 아래와 같은 관계를 가지고 있다 [1].

$$g(\epsilon) = \frac{2m}{e^2 A} \left(\frac{2\epsilon}{m} \right)^{1/2} I''(\epsilon)$$

단, ϵ , e , m , A 는 각각 전자의 에너지, 전하량, 질량, 탐침의 면적이다. 전자 온도와 밀도는 다음과 같은 적분으로 구할 수 있다 [1].

$$n_e = \int_0^\infty g(\epsilon) d\epsilon$$

$$T_e = \frac{2}{3} \int_0^\infty \epsilon g(\epsilon) d\epsilon$$

본 실험에서는 전자 에너지 분포함수를 측정하여 플라즈마 밀도와 전자 온도를 구하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

실험 1) 20 mTorr 압력에서 전력을 변화시키며 플라즈마 밀도, 전자 온도를 측정했다. Fig. 4는 전력을 180 W에서

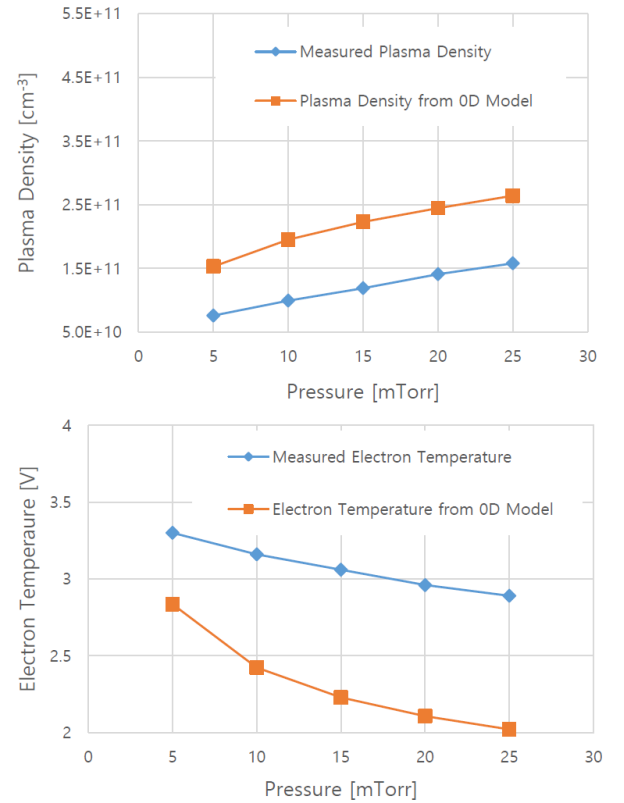


Fig. 5. (Color online) Plasma densities and electron temperatures at rf power 200 W.

260 W 까지 변화시키면서 측정한 플라즈마 밀도, 전자 온도를 나타낸 것이다. 측정값보다 모델의 밀도가 약 두 배 크고, 전자온도의 경우 측정값이 모델 값보다 1.5배 정도 크다.

Fig. 5는 200 W 전력에서 압력을 5 mTorr에서 25 mTorr로 변화시키며 플라즈마 밀도, 전자 온도를 측정한 결과이다. 측정값보다 모델의 밀도가 약 두 배 크고, 전자온도의 경우 측정값이 모델 값보다 1.5배 정도 크다.

0D 모델을 이용하여 계산한 값들과 실제로 측정한 값들은 큰 차이를 보였다. 이 차이를 줄이기 위해 고려해야 할 요소들을 생각해 보았다. 실제로 기체를 들뜬 상태로 만들거나 이온화시키는 전자는 12 eV 이상 높은 에너지를 가진 전자들이다. Fig. 6은 압력 20 mTorr, 입력 전력 200 W에서 측정한 전자 에너지 분포함수이다. Fig. 6에 나타나 있는 것 같이 12 eV 이상의 전자 에너지에서 비탄성 충돌(들뜬 상태, 이온화)로 인해 분포가 고갈(depletion)되어 있어, 맥스웰 분포에서 벗어나 있음을 알 수 있다. 이는 0D 모델이 맥스웰 분포 가정에서 출발했기 때문에 실험 값과 차이가 날 수 있음을 의미하는 것이다.

맥스웰 확률 분포는 아래 식과 같다.

$$f_p(\epsilon) = f_0 e^{-\frac{\epsilon}{T_e}}$$

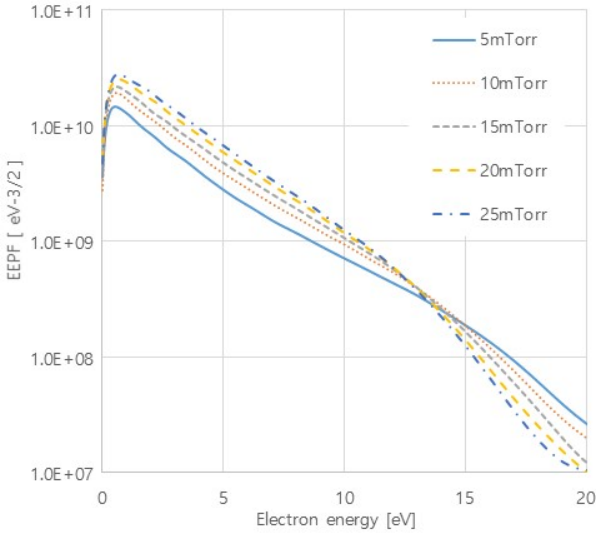


Fig. 6. (Color online) Measured electron energy probability functions at rf power 200 W.

Fig. 6 에서 전자 에너지 확률 함수에 로그를 취하면, 기울기의 절댓값은 $1/T_e$ 이기 때문에 기울기가 가파를수록 전자 온도가 낮음을 의미한다. 만약 플라즈마 내부의 전자가 Maxwell-Boltzmann 분포를 따른다면 위 그래프에서는 선형이 되어야 할 것이다. 하지만 에너지가 높아질수록 그래프의 기울기가 가파르게 되는 것을 알 수 있다. 실제로 Ar 원자를 이온화시키는 전자들은 운동에너지가 높은 전자들이기 때문에 적분으로 구한 전자온도보다 이온화 에너지 이상의 전자들의 운동 에너지를 평균하는 것이 더 타당하다. 위 Fig. 6 으로부터 아래 식과 같이 만들 수 있고 이온화 에너지 이상의 영역에서 평균을 취하면 그 해당 영역에서의 전자 온도를 구할 수 있다.

$$\frac{d}{d\varepsilon} \ln f_p = \frac{1}{f_p} \frac{df_p}{d\varepsilon} = -\frac{1}{T_e}$$

Fig. 6에서 5, 10, 15, 20 mTorr의 경우는 10 eV에서 20 eV 범위의 T_e 값을 평균 내어 계산에 사용하였다. 하지만 25 mTorr의 경우는 20 eV 근방에서 이온 전류에 의한 오차가 있는 것으로 측정되어 10 eV에서 18 eV 사이에서 평균 내어 사용하였다.

Fig. 6 으로부터 높은 에너지 영역의 전자 온도 T_e 를 구하면 Table 1과 같이 된다. 이온화에 관여하는 높은 에너지 전자 온도의 경우와 0D 모델의 전자 온도와 차이가 많이 줄었다. 이는 모델에서 이온화 에너지 이상의 전자의 온도만 고려했기 때문에 나타난 결과이다. I-V 곡선을 이용해 구한 플라즈마 전위는 Table 2와 같다.

전자 에너지 분포 함수가 맥스웰 분포에서 약간 벗어난 것 외에도 측정과 0D 모델의 차이를 만드는 여러 요인들을

Table 1. Comparison of electron temperatures.

Averaged T_e	T_e high energy range	T_e from 0D Model
2.96 V	2.22 V	2.11 V

Table 2. Plasma Potentials.

5 mTorr	10 mTorr	15 mTorr	20 mTorr	25 mTorr
16.8 V	15.7 V	15.1 V	14.5 V	14.2 V

Table 3. Power transfer efficiency at various powers [8].

Pressure [mTorr]	Efficiency [%]
5	45
10	50
15	52
20	55
25	55

Table 4. Modified plasma densities and electron temperatures.

200 W, 20 mTorr	Modified 0D Model	Measurement
Plasma density [cm^{-3}]	1.44E + 11	1.15E + 11
Electron temperature [V]	2.32	2.22 (in high energy range)

다음과 같이 생각해 보았다. 첫 번째 입력 전력이 100% 전달되지 않는다는 것이다. 유도 결합 플라즈마 발생 안테나에서 안테나 자체의 저항으로 인해 상당한 전력 손실이 생기게 된다. 전력 균형 방정식에서 P_{abs} 는 안테나에서의 전력 손실을 뺀 전력을 넣어야 한다. 거의 같은 구조의 유도 결합 플라즈마에서의 전력 전달 효율이 20 mTorr에서는 전력 효율이 약 55% 이라고 측정되었다 [8]. 그러므로 전력 효율을 고려하면 0D 모델의 밀도는 55% 정도로 감소하게 된다. 측정된 전력 효율은 압력에 따라 크게 바뀌므로, Table 2는 각 압력마다 측정된 전력 효율이다.

두 번째 기체 밀도는 이 0D 모델에서 $n_g = \frac{p}{kT_g} \approx 3.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 로 근사해서 사용했다. 이 식에서 기체의 온도 T_g 는 상온인 300 K로 계산했지만, 실제 플라즈마에서 기체의 온도는 이보다 높기 때문에 기체의 밀도는 낮아지고, 이론상으로 계산하는 전자 온도는 높아질 것으로 예상된다. Ar과 N_2 기체가 전자에 의해 비슷한 기체 온도를 플라즈마에서 가진다고 가정하면, Ar 기체는 실제로는 600 K 정도가 된다고 한다 [9]. 처음 계산한 기체 밀도에 대해 온도가 두 배 증가했으므로, 기체 밀도는 절반이 된다.

위에서 언급한 전자 에너지 분포, 전력 효율, 그리고 기체 온도, 세 가지 요소를 모두 적용해서 20 mTorr, 200 W

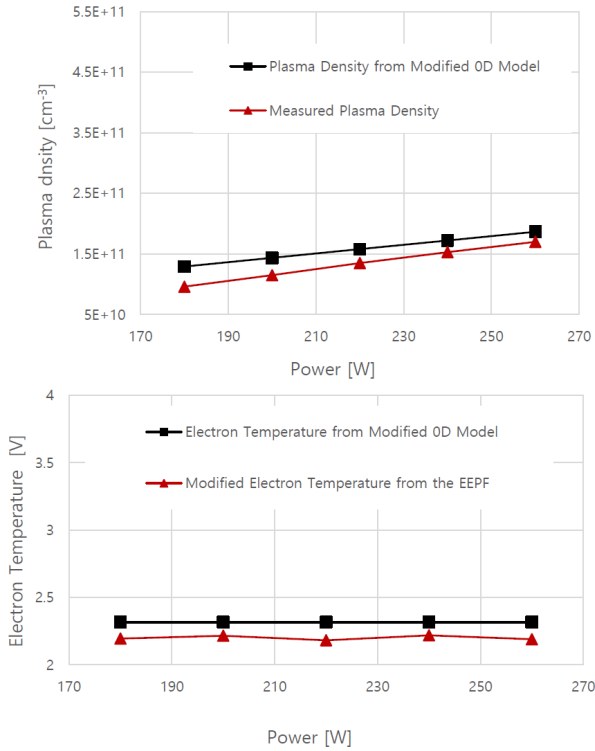


Fig. 7. (Color online) Modified plasma densities and electron temperatures at 20 mTorr.

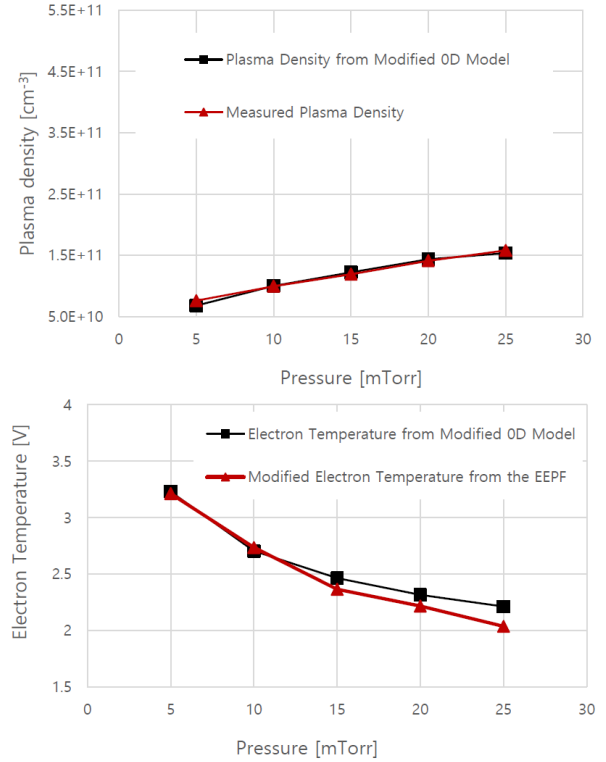


Fig. 8. (Color online) Modified plasma densities and electron temperatures at power 200 W.

경우의 플라즈마 밀도, 전자 온도를 다시 계산하면 Table 4와 같다.

전자 온도는 차이가 0.1 V로 거의 일치하고 플라즈마 밀도 또한 굉장히 비슷해졌다. 다른 압력, 전력 조건에서도 플라즈마 밀도, 전자 온도를 보정하여 계산한 결과가 Fig. 7과 Fig. 8에 나와 있다.

수정 0D 모델의 플라즈마 밀도가 측정값에 매우 가까워졌다. 전력이 늘어날수록 오차가 줄어드는 모습을 보인다.

EEPF 보정 전자 온도는 측정 전자 온도를 EEPF 그래프를 이용해 실제 이온화를 일으키는 전자들의 온도를 계산한 것이다. 그러므로 이 그래프에서는 수정 0D 모델의 전자 온도와 EEPF 보정 전자 온도를 비교하면 된다. 수정 0D 모델의 온도와 측정값을 EEPF로 보정한 온도가 매우 비슷해졌다.

Fig. 7과 8에 나타나 있듯이 수정된 0D 모델에서 계산된 플라즈마 밀도와 측정 플라즈마 밀도 값은 매우 가까워졌다. 수정 0D 모델의 전자 온도와 고에너지 영역의 전자 온도도 매우 비슷해졌다. 압력이 커질수록 전자 온도의 차이가 점점 커지는 모습을 볼 수 있는데, 이는 압력이 높아질수록 0D 모델에서 포함되지 않은 다단계 이온화 과정이 커지기 때문이다.

V. 결론

0D 모델과 측정 값을 비교하였는데, 실험 값과 측정 값의 차이를 줄이기 위해 고려해야 할 여러 요소들 즉 에너지 분포함수, 전력 효율, 기체 온도를 고려했더니 간단한 0D 모델로도 실험값과 거의 같은 플라즈마 밀도와 전자 온도를 계산할 수 있었다. 플라즈마 밀도의 초기 0D 모델과 측정값의 오차에 가장 큰 영향을 주었던 요인으로는 전력 효율이다. 실제로 전달되는 전력이 60% 이하이기 때문에 실제 밀도 또한 0D 모델의 절반 정도로 나왔다. 전자 온도의 오차에 가장 큰 영향을 준 요인은 전자 에너지 확률함수에서 실제 기체를 이온화시키는 높은 에너지를 가진 전자의 온도가 전체적인 전자의 온도보다 낮다는 것이었다. 낮은 압력에서는 플라즈마 밀도와 전자 온도의 공간적 변화가 크지 않기 때문에, 0D 모델도 실제 플라즈마를 잘 예측한다고 볼 수 있다.

REFERENCES

[1] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Material Processing*, 2nd ed. (Wiley, New York, 2004).

- [2] R. Meyyappan and T. R. Govindan, [IEEE Trans. Plasma Sci.](#) **23**, 623 (1995).
- [3] J. M. Smith, *Chemical Engineering Kinetics* (New York, Wiley, 2001).
- [4] M. A. Lieberman and S. Ashida, [Plasma Sources Sci. Technol.](#) **5**, 145 (1996).
- [5] R. S. Wise, D. P. LyMBERopoulos and D. J. Economou, [Plasma Sources Sci. Technol.](#) **4**, 317 (1995).
- [6] E. Meeks and J. W. Shon, [IEEE Trans. Plasma Sci.](#) **23**, 539 (1995).
- [7] M. H. Lee and C. W. Chung, [Appl. Phys. Lett.](#) **87**, 131502 (2005).
- [8] M. H. Lee, S. H. Jang and C. W. Chung, [Phys. Plasmas](#) **13**, 053502 (2006).
- [9] Y. C. Kim, H. C. Lee, Y. S. Kim and C. W. Chung, [Phys. Plasmas](#) **22**, 083512 (2015).