

유체 시뮬레이션을 이용한 선형 마이크로웨이브 플라즈마의 특성 분석

Characterization of Linear Microwave Plasma using the Fluid Simulation

서 권 상* · 한 문 기* · 김 동 현* · 이 호 준†
(Kwon-Sang Seo · Moon-Ki Han · Dong-Hyun Kim · Ho-Jun Lee)

Abstract - Discharge characteristics of linear microwave plasma were investigated by using fluid simulation of 2D axis-symmetry based on finite elements method. The microwave power was 2.45 GHz TEM mode and transmitted through linear antenna. Resistive power and pressure were considered simulation variables and argon was used for working gas. A decrease of electron density along the quartz tube was observed in low power condition but relatively uniform plasmas were generated in chamber by increasing the resistive power. The electron temperature was highly detected near the surface of quartz tube because the electron was heated only dielectric surface. The power transmission efficiency decreased and characteristics of surface plasma were observed in high electron density condition.

Key Words : 2.45 GHz, Fluid simulation, Linear microwave plasma, PECVD

1. 서 론

마이크로웨이브는 일반적으로 300 MHz ~ 300 GHz 사이의 주파수를 가지는 교류신호를 말하며, 1 mm ~ 1 m 범위의 파장을 가져 밀리미터파(Millimeter waves)라고도 불린다. 마이크로웨이브를 이용한 플라즈마는 동작 압력 범위가 넓고, 동작 주파수가 이온 플라즈마 주파수보다 높고 적절한 압력범위에서는 전자의 충돌주파수가 유사한 범위를 가지게 된다. 따라서 효율적인 전자의 가열이 가능하며, 낮은 이온에너지를 가지는 고밀도 플라즈마를 생성시킬 수 있다. 또한 파장의 길이가 챔버 크기에 비하여 짧아 진행파 성분을 이용한 대면적 적용성이 우수하다. 이러한 장점들로 인해 마이크로웨이브를 이용한 플라즈마는 RF를 이용한 플라즈마 장치와 함께 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)에 적합한 장치로 많은 연구가 되어왔다[1-3].

그 중에서 본 논문에 연구된 선형 안테나를 이용하는 마이크로웨이브 플라즈마 장치는 그 구성이 매우 간단하고, 직·병렬 등의 다양한 결합 방법을 통해 고효율, 고밀도 플라즈마를 생성시킬 수 있다는 장점이 있다[4, 5]. 최근 플라즈마 공정에서의 대면적화가 주요 관심사인 가운데 마이크로웨이브를 이용한 플라즈

마에 대한 관심이 높아지고 있으며, 선형 마이크로웨이브 플라즈마 장치의 경우 Roll-to-roll 프로세스에 적합한 형태로 장치 제작이 용이하여 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[6].

본 연구에서는 유체 시뮬레이션을 통하여 선형 마이크로웨이브 플라즈마 장치에 대한 기본적인 특성을 분석하였다. 상용유한 요소시뮬레이션 패키지를 사용하여 2차원 축대칭으로 시뮬레이션을 진행 하였고, 압력과 플라즈마 내에 흡수된 파워를 주요 변수로 하였다. 입력 변수에 따른 전자 밀도, 전자 온도, 전기장 등의 변화를 살펴보았으며, 플라즈마 생성 조건에 따른 입력 파워의 흡수 및 손실에 대하여 알아보았다.

2. 시뮬레이션 조건 및 지배방정식

그림 1은 본 논문에 연구된 선형 마이크로웨이브 플라즈마 장치의 모식도와 TEM mode의 전기장과 자기장의 방향을 나타낸 것이다. 장치는 크게 마이크로웨이브 발생부와 Wave가 진행하는 직사각 도파관, 그리고 선형 안테나와 석영관이 삽입된 챔버가 결합된 형태로 구성된다. 마이크로웨이브 발생부로부터 발생한 Wave는 초기에 직사각 도파관을 따라 진행하게 되며, Wave가 안테나에 여기되면 안테나를 따라 진행하면서 파워를 전달하여 플라즈마를 발생시킨다. 일반적으로 선형 마이크로웨이브 플라즈마 장치는 2.45 GHz의 동작 주파수를 가지는 TE₁₀ mode를 사용한다. 직사각 도파관을 통하여 진행된 TE₁₀ mode의 Wave가 Coaxial 형태로 구성된 안테나에 여기되면, 그림과 같은 진행방향으로 전기장과 자기장 성분이 존재하지 않는 TEM mode로 전환되어 진행하게 된다[7].

† 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 : January 28, 2015; Accepted : March 20, 2015

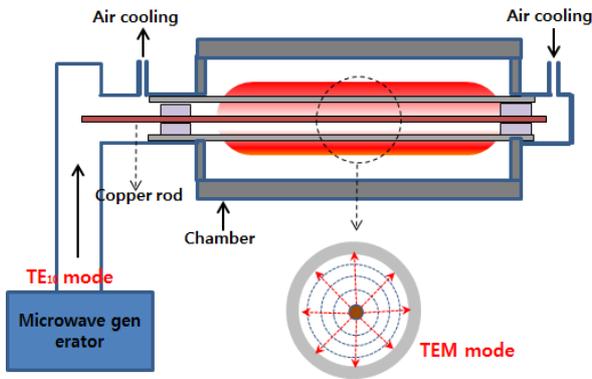


그림 1 선형 마이크로웨이브 플라즈마 장치 모식도
 Fig. 1 Schematic diagram of linear microwave plasma

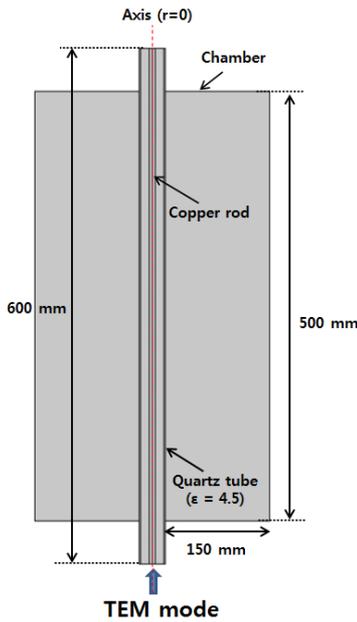


그림 2 선형 마이크로웨이브 플라즈마 시뮬레이션에 적용된 장치 개략도
 Fig. 2 Modeling geometry used in linear microwave plasma simulation

선형 마이크로웨이브 플라즈마 장치 시뮬레이션에 적용된 장치의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 그림에 표시된 중심축(r=0)을 중심으로 2차원 축대칭으로 시뮬레이션을 하였고, 150 mm의 반경을 가지며 길이는 500 mm의 방전영역을 설정하였다. 안테나 역할을 하는 Copper rod의 반경은 4 mm이며, 길이는 600 mm로 설정하였다. 유전체 역할을 하는 석영관의 길이는 안테나의 길이와 동일하며, 안쪽 반경은 15 mm와 바깥쪽 반경은 17 mm로 설정하였다. 입력 파워의 경우 안테나에 여기된 상태로 가정하여 TEM mode의 마이크로웨이브를 인가하였다.

마이크로웨이브 플라즈마 시뮬레이션을 위해 사용된 지배 방정식은 플라즈마 내의 전자 밀도와 에너지에 대한 보존 방정식, Wave의 진행과 전계 계산을 위한 파동 방정식, 플라즈마 전위를 계산하기 위한 Poisson 방정식, 그리고 중성 입자와 이온에 대한 보존 방정식 등이 적용되었다[8]. 플라즈마 내의 전자 밀도와 에너지에 대한 보존 방정식은 Drift-diffusion 근사식으로부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\vec{\mu}_e \cdot \vec{E}) - \nabla(\overline{D_e n_e})] = R_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\vec{\mu}_e \cdot \vec{E}) - \nabla(\overline{D_e n_e})] + \vec{E} \cdot \Gamma_e = R_e \quad (2)$$

여기서 n_e 와 n_e 는 전자와 전자의 에너지 밀도, R_e 는 전자의 생성, R_e 는 전자가 비탄성 충돌로 에너지를 잃거나 얻는 것을 의미한다. 전자의 $\overline{D_e}$, 전자 에너지 이동도 $\vec{\mu}_e$, 전자 에너지 확산계수 $\overline{D_e}$ 는 전자의 이동도 $\vec{\mu}_e$ 로부터 Einstein relation에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{D_e} = \vec{\mu}_e T_e, \quad \vec{\mu}_e = \left(\frac{5}{3}\right)\vec{\mu}_e, \quad \overline{D_e} = \vec{\mu}_e T_e \quad (3)$$

또한 중성 입자와 이온과 같은 무거운 입자에 대한 보존 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(w_k) + \rho(\vec{u} \cdot \nabla)w_k = \nabla \cdot \vec{j}_k + R_k \quad (4)$$

여기서 ρ 는 가스의 밀도, w_k 는 질량 분율, \vec{j}_k 는 확산 선속 벡터, R_k 는 반응 계수를 의미한다. 본 연구에서는 선형 마이크로웨이브 플라즈마의 특성을 잘 나타낼 수 있도록 챔버 안에 중성 입자가 고르게 분포하며 대류에 의한 입자의 확산을 고려하지 않고, \vec{u} 가 포함된 항을 무시하고 시뮬레이션을 하였다. 플라즈마 전위에 대한 방정식은 아래의 Poisson 방정식을 사용하였다.

$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla V) = -qn_e + \sum_i Z_i n_i \quad (5)$$

마이크로웨이브의 진행에 대한 파동 방정식은 Maxwell 방정식으로부터 유도되며, 다음과 같이 나타내어진다[9].

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} \right) - k_0^2 (\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0}) \vec{E} = 0 \quad (6)$$

여기서 k_0 는 자유공간에서의 파수(Wave number)를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c_0} \quad (7)$$

표 1 시뮬레이션에 적용된 화학 반응식

Table 1 Chemical reaction used in the simulation

No.	Reaction formula	Rate coefficient (m ³ /s)	Δε(eV)
1	e+Ar => e+Ar	f(ε)	
2	e+Ar => e+Ars	f(ε)	11.5
3	e+Ars => e+Ar	f(ε)	-11.5
4	e+Ar => 2e+Ar+	f(ε)	15.8
5	e+Ars => 2e+Ar+	f(ε)	4.427
6	Ars+Ars => e+Ar+Ar+	6.2 X 10 ⁻¹⁶	
7	Ars+Ar => Ar+Ar	3 X 10 ⁻²¹	

※ f(ε) : Collision cross section data

여기서 c_0 는 진공에서의 빛의 속도를 나타낸다. 위의 방정식들을 이용하여 유체 시뮬레이션을 진행하였으며, 이에 사용된 화학 반응식에 대한 정보는 표 1에 나타내었다[10]. 사용된 가스는 Ar이며, Ar 플라즈마에서 가장 주요한 반응식들을 사용하였다. 입력 조건을 압력을 200~500 mTorr로 100 mTorr씩, 플라즈마에서 흡수된 파워를 100~400 W로 100 W씩 변화시키며 플라즈마 생성 조건에 따른 플라즈마 특성의 변화를 분석하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

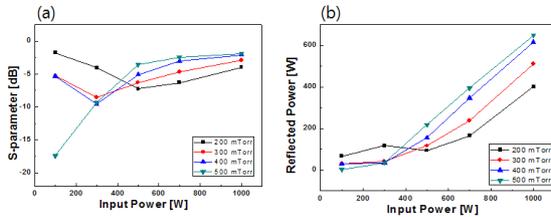


그림 3 압력과 입력 파워에 따른 (a) S-parameter, (b) 반사된 파워

Fig. 3 (a) S-parameter, (b) Reflect power according to pressure and input power

시뮬레이션 조건에 따른 플라즈마 특성의 변화를 실제 공정과 비교하기 위해서는 반사 전력을 계산할 필요성이 있다. 그림 3은 압력과 입력 파워에 따른 S-parameter와 반사 파워의 크기를 나타낸 그래프이다. 시뮬레이션을 통하여 파워가 인가되는 지점에서의 S-parameter를 구하여 그림 3(a)에 나타내었으며, 이는 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$s_{11} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Reflected Power}}{\text{Input Power}} \right) \quad (8)$$

위의 식을 이용하면 S-parameter의 값으로부터 반사된 파워의 크기를 계산할 수 있으며, 이를 그림 3(b)에 나타내었다. 그래프에 나타난 것과 같이 입력 파워가 낮을 경우에는 낮은 압력에

서 더 많은 반사파가 발생하지만, 파워가 증가하면 높은 압력 조건에서 더 많은 반사파가 발생하는 것을 알 수 있다. 파워가 인가되면 마이크로웨이브에 의한 전자 가열로 플라즈마를 생성하게 되는데, 압력과 입력파워가 낮은 조건에서는 전자 밀도와 충돌 주파수가 낮고 결과적으로 플라즈마 전기 전도도가 상당히 낮아지게 됨에 따라 파워 흡수가 잘 일어나지 않게 된다. 반면 입력 파워와 압력이 높은 영역에서는 챔버 내의 전자 밀도가 증가하게 되면서 전기 전도도가 매우 높아지게 되고, 이 경우에도 플라즈마 마로의 전력 전달이 어렵게 되어 반사파가 증가하게 된다. 이러한 결과로 볼 때 일반적인 전기적 부하의 전력 흡수 특성과 유사하게, 효율적인 전력 전달이 가능한 플라즈마 부하의 전기 전도도 영역이 존재함을 알 수 있다. 실제 장비에서는 반사파가 거의 발생하지 않는 조건으로 파워를 매칭하여 사용하므로, 입력 파워 기준으로 시뮬레이션 할 경우 반사되는 파워의 영향으로 정확한 비교·분석이 어렵다. 따라서 실제 플라즈마에서 흡수된 파워를 기준으로 시뮬레이션을 진행하였다.

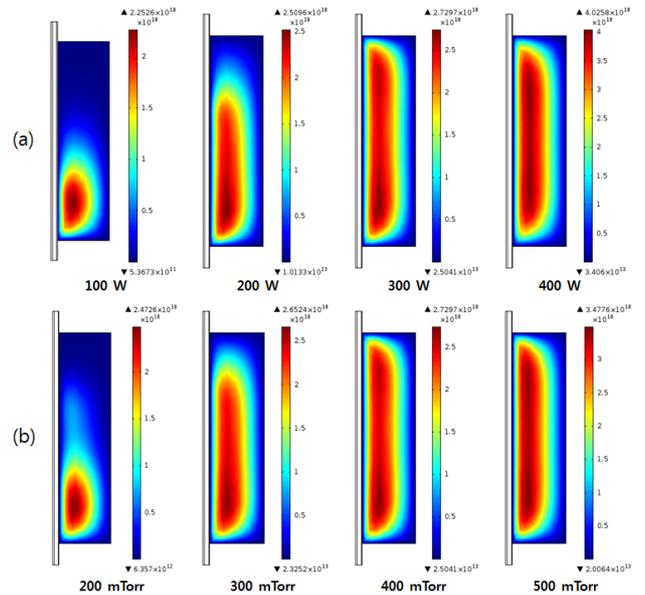


그림 4 (a) 흡수 파워(400 mTorr)와 (b) 압력(300 W)에 따른 전자 밀도 분포

Fig. 4 Electron density distribution according to (a) resistive power (400 mTorr) and (b) pressure (300 W)

그림 4는 압력과 흡수된 파워의 크기에 따른 전자 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 동일 압력(400 mTorr)에서 파워의 크기를 100 W씩 증가하면서 변화를 나타낸 것이고, 그림 4(b)는 동일한 파워(300 W)에서 압력의 변화에 따른 전자 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 파워의 증가에 따른 변화를 살펴보면, 파워가 증가함에 따라 전자 밀도 또한 증가하는 경향을 나타냈으며 낮은 파워 조건에서는 플라즈마가 챔버 전체에 생성되지 못하고 국부적으로 형성되는 것을 확인할 수 있다. Wave가 안테나를 따라 진행하며 파워를 전달하는데, 파워가 낮으면 안테

나 선단부에서의 전력 흡수에 의해 Wave가 안테나 끝까지 전달되지 못하여 국부적으로 플라즈마가 형성되는 것이다. 압력의 변화에 따른 전자 밀도 변화의 경우, 우선 압력이 높아질수록 플라즈마 형성 범위의 차이는 있지만 전자 밀도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 전자 밀도가 가장 높은 부분에서 파워의 흡수가 가장 많이 일어나며, 남은 파워에 의해 그 범위를 늘리는 형태로 시뮬레이션에서 해를 형성한다. 하지만 밀도가 높아지면서 국부적인 부근에서 파워 소비가 많이 일어나면서 플라즈마 형성 범위를 늘리지 못하고 평형 상태가 된다. 따라서 플라즈마가 형성된 범위의 차이가 나타난 것으로 보이며, 이는 시뮬레이션 조건에서 나타나는 현상이라 할 수 있다.

전자 밀도 분포에서 플라즈마 형성 범위의 변화가 나타나서 이를 알아보기 위해 마이크로웨이브에 의해 형성되는 전기장의 변화를 알아보았다. 그림 5는 400 mTorr 조건에서 흡수된 파워에 따른 전기장의 변화를 나타내는 그림이다. 초기에 플라즈마가 생성되기 전에는 Wave가 챔버의 안으로 침투하는 것을 볼 수 있었는데, 플라즈마가 생성되어 전자 밀도가 높아지면 그림과 같이 Wave가 침투하지 못하고 안테나를 따라 전기장을 형성한다. 파워가 낮을 경우 파워 흡수에 의해 전기장이 안테나 끝까지 생성되지 못하게 되고, 이로 인해 플라즈마가 챔버 전체에 형성되지 못한다. 하지만 파워를 높게 되어 파워 흡수에 의한 감소가 있더라도 안테나의 끝단까지 파워가 도달하는 조건이 되면 그림과 같이 안테나의 모든 영역에서 Standing wave가 형성되고, 이로 인하여 플라즈마가 챔버 전체에 형성되는 것을 알 수 있다.

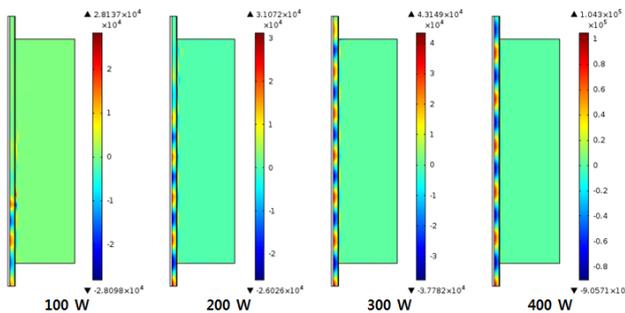


그림 5 흡수 파워 증가에 따른 전기장 분포 (400 mTorr)
 Fig. 5 Electric field distribution according to resistive power (400 mTorr)

선형 마이크로웨이브 플라즈마는 전자 밀도가 높아짐에 따라 표면 플라즈마의 특성을 나타낸다. 이러한 특성이 나타나는지 알아보기 위해 그림 5에서의 조건과 동일한 조건에서 흡수 파워에 따른 전자 온도를 그림 6에 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 공통적으로 전자 온도는 석영관의 표면 부근에서만 높게 나타나고, 표면에서 멀어질수록 전자 온도가 감소하는 것으로 나타났다. Wave에 의해 형성된 플라즈마의 전자 밀도가 임계 밀도 이상이 되면 Wave가 침투하지 못하기 때문에 표면 부근에서만 전자들이 에너지를 얻게 된다. 이로 인해 높은 에너지를 가지는 전자들은 표면 부근에서만 존재하게 되고, 이온화를 비롯한 반응들은 표면

에서만 일어나게 된다. 이렇게 표면 부근에 높은 에너지를 가지는 전자들이 존재하며, 표면에서 플라즈마가 생성되는 것은 선형 마이크로웨이브 플라즈마가 표면 플라즈마의 특성을 보인다는 것을 알 수 있다.

입력 파워와 압력을 변화시키면서 시뮬레이션을 한 결과, 그 전자 밀도의 분포의 경향성은 나타났지만 조건에 따라 플라즈마가 형성되는 영역의 부피가 달라 그 변화의 폭이 뚜렷이 나타나지 않았다. 따라서 자세한 변화를 알아보기 위해서 챔버 내의 총 전자 수를 알아볼 필요가 있다. 그림 7은 챔버 내의 총 전자의 수를 나타낸 것이다. 챔버 내의 총 전자의 수는 챔버 영역에 대하여 전자 밀도를 적분하여 구할 수 있으며, 이를 통해 조건에 따른 전자 밀도 분포에서 알 수 없었던 변화들을 알 수 있다. 먼저 파워의 변화에 따른 변화를 알아보면, 파워가 증가할수록 총 전자의 수는 선형적으로 증가한다. 이는 파워 변화에 따른 전자 수의 일반적인 변화라고 할 수 있다. 압력 변화에 따른 변화를 알아보면, 압력이 높을수록 총 전자의 수는 높은 것을 알 수 있고 또한 압력이 높을수록 파워 변화에 따른 선형적인 증가의 기울기가 커짐을 알 수 있다. 이는 압력이 높을 경우 그만큼 중성

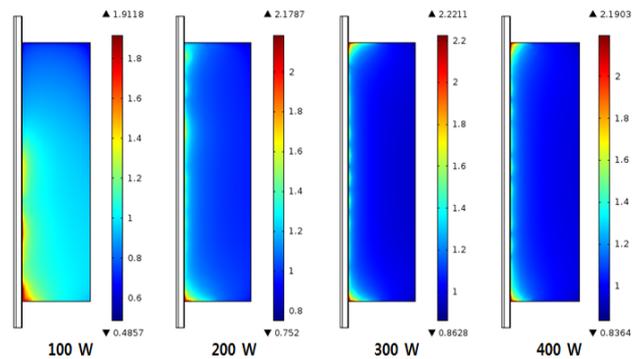


그림 6 흡수 파워에 따른 전자 온도 분포 (400 mTorr)
 Fig. 6 Electron temperature according to resistive power (400 mTorr)

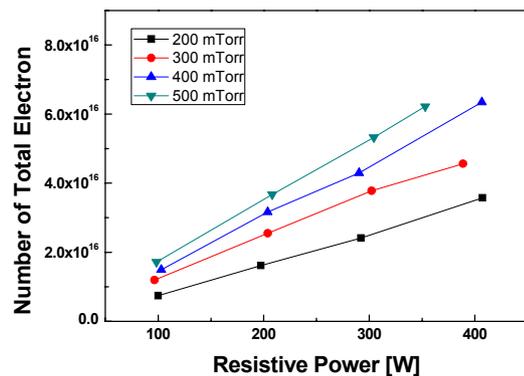


그림 7 압력과 흡수 파워에 따른 총 전자수의 변화
 Fig. 7 Number of total electron according to pressure and resistive power

입자들이 많이 존재하기 때문에 전자들이 더욱 많은 충돌을 일으키게 되고, 따라서 많은 전자들이 생성되게 된다[11].

전자들이 중성 입자들과 충돌을 하게 되면 에너지 손실이 발생하는데, 조건에 따른 소비되는 파워의 변화를 알아보기 위하여 Collisional power loss를 계산하였다. 그림 8(a)는 압력과 흡수 파워에 따른 Collisional power loss를 나타낸 것이고, 그림 8(b)는 흡수 파워를 기준으로 비율로 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 파워가 증가할 경우 그 값이 선형적으로 증가했으며, 압력이 높을 경우 더 높게 나타났다. 하지만 흡수 파워 대비 Collisional power loss의 비율은 압력에 따라 높지만, 파워에 따른 변화는 없는 것으로 나타났다. 압력이 높아지면 중성 입자들이 많아지기 때문에 그에 따라 충돌을 많이 일으키게 되고, 이에 따라 충돌할 때 소비되는 파워 역시 많아지게 되기 때문에 그림과 같은 결과를 보이게 된다. 흡수된 파워에서 Collisional power loss를 뺀 나머지는 표면에서 발생하는 손실이라고 할 수 있다. 파워 변화에 따른 Collisional power loss의 비율 변화가 거의 없기 때문에 표면 손실 역시 파워 변화에 대해서는 큰 차이를 보

이지 않는다. 시뮬레이션 결과, 압력이 낮을수록 표면 손실이 높아지는 경향을 보였다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 압력이 낮을수록 중성 기체들의 입자 수가 적어지기 때문에 표면으로 전자들이 빠져나갈 때 중성 기체들과 충돌할 확률 역시 줄어들게 되기 때문이다. 따라서 더 많은 전자들이 표면으로 빠져나가게 되고, 표면에서 발생하는 손실이 커지게 되기 때문에 이러한 결과가 나타나는 것이다.

그림 9는 시뮬레이션에 사용한 각각 화학반응식 별로 흡수 파워에 대하여 Collisional power loss의 비율을 계산하여 나타낸 것이다. 마찬가지로 파워 변화에 대해서 비율의 변화는 나타나지 않았고, 압력의 변화에 대해서만 변화가 나타났다. 압력이 증가하게 되면 Elastic collision에 소비되는 파워의 비율은 증가하게 되고, 이온화에 소비되는 파워의 비율은 감소하는 경향을 보인다. 이러한 이유는 압력이 높아지면 중성 입자의 수가 많아지기 때문에 전자들이 충분히 가속되지 못하고 충돌을 일으켜 높은 에너지를 갖는 전자들이 감소하기 때문이다. 하지만 충돌 횟수가 많기 때문에 비율은 감소하더라도 전자 밀도는 증가하는 경향을 보이게 되는 것이다.

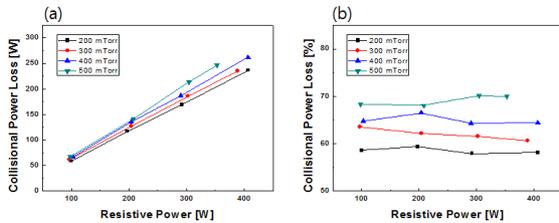


그림 8 압력과 흡수 파워에 따른 Collisional power loss (a) 크기, (b) 비율

Fig. 8 Collisional power loss according to pressure and resistive power (a) magnitude, (b) ratio

4. 결 론

본 연구에서는 유체 시뮬레이션을 통해 선형 마이크로웨이브 플라즈마의 특성을 분석하였다. 플라즈마 공정 변수인 압력과 파워 변화에 따른 특성을 알아보았다. 특정 조건에서 쉽게 고밀도의 균일한 플라즈마가 형성되는 것을 알 수 있었고, 표면 근처에서의 전자 밀도의 증가가 파워 흡수에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이는 곧 높은 파워 조건에서 전력 전달 효율이 매우 좋지 않다는 것을 의미하며, 현재의 시스템 조건에서는 400 W이상의 파워는 효율이 매우 좋지 않다는 것을 알 수 있었다. 또한 고밀도 조건에서의 표면 플라즈마의 특징이 가시화되었으며, 이에 따라 표면에서의 손실이 매우 커진다는 것을 확인하였다. 이는 압력이 높거나 파워가 높아질 경우 고밀도 조건이 되므로 실제 공정에서 파워 매칭이 중요한 문제가 될 것으로 보인다. 시스템 조건에 따라서 전자 밀도가 포화되는 경향을 보였으며, 그 이상 파워를 인가해주는 것은 많은 손실을 발생시켰다. 그러므로 마이크로웨이브 플라즈마에서 고밀도 조건이 되었을 때 전력 효율이 매우 떨어지므로, 이에 대해서 표면의 손실 문제를 해결한다면 더욱 효율적인 플라즈마 소스가 될 것으로 보인다.

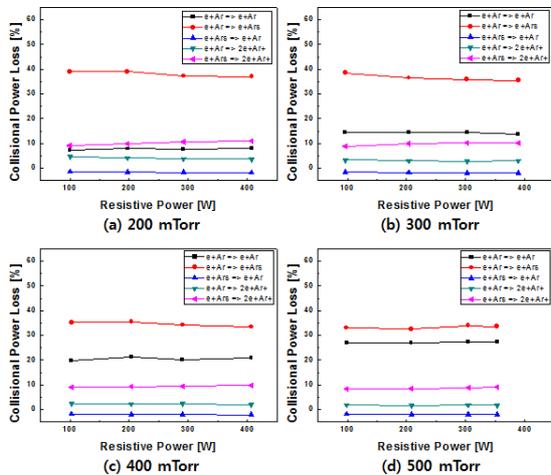


그림 9 흡수 파워 및 압력에 대한 각 Reaction별 Collisional power loss

Fig. 9 Collisional power loss according to pressure and resistive power for each reaction

감사의 글

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

References

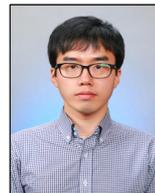
- [1] H. Schlemm, A. Mai, S. Roth, D. Roth, K. M. Baumgartner, and H. Muegge, "Industrial large scale silicon nitride deposition on photovoltaic cells with linear microwave plasma sources" Surf. Coat. Technol., vol. 174-175, pp. 208-211, Sep.-Oct., 2003.
- [2] M. Gunther, I. Bialuch, S. Peter, K. Bewilogua, and F. Richter, "High rate deposition of hard aC: H films using microwave excited plasma enhanced CVD" Surf. Coat. Technol., vol. 205, pp. S94-S98, July, 2011.
- [3] T. H. Kim, D. H. Kim, H. J. Lee, "A Study on the Characteristics of $\mu\text{c-Si:H}$ Films Prepared by Multistep Deposition Method using SiH_4/H_2 Gas Mixture" Trans. KIEE., vol. 63, No. 2, pp. 250-256, Feb., 2014.
- [4] M. Liehr and M. Dieguez-Campo, "Microwave PECVD for large area coating" Surf. Coat. Technol., vol. 200, No. 1-4, pp. 21-25, Oct., 2005.
- [5] M. Kaiser, K. M. Baumgartner, and A. Mattheus, "Microwave based plasma technology" Proceedings of the 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications; Dubrovnik, Croatia, Sept 20-23; IEEE: Piscataway, NJ, 2010.
- [6] T. Yamada, M. Ishihara, and M. Hasegawa, "Large area coating of graphene at low temperature using a roll-to-roll microwave plasma chemical vapor deposition" Thin Solid Films, vol. 532, pp. 89-93, Apr., 2013.
- [7] H. Rauscher, Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces : Food, biomedical, and textile applications, Weinheim: Wiley-Vch, 2010.
- [8] COMSOL Multiphysics Version 4.4 User Guide, December 2013.
- [9] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 3rd Edition, New York: Wiley, 2004.
- [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, No. 10, pp. 1417-1422, Oct., 2014.
- [11] K. Y. Lee, D. H. Kim, H. J. Lee, "Fabrication of Atmospheric Coplanar Dielectric Barrier Discharge and Analysis of its Driving Characteristics" Trans. KIEE., vol. 63, No. 1, pp. 80-84, Jan., 2014.

저 자 소 개



서 권 상(Kwon-Sang Seo)

1986년 7월 15일생. 2012년 부산대 공대 전자전기공학부 졸업. 2014년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정으로 재학중
 Tel : 051-510-2746
 Fax : 051-510-1498
 E-mail : acmilan47@naver.com



한 문 기(Moon-Ki Han)

1981년 3월 27일생. 2007년 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정으로 재학중
 Tel : 051-510-2746
 Fax : 051-510-1498
 E-mail : skyskuld@naver.com



김 동 현(Dong-Hyun Kim)

1961년 1월 9일생. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 부산대 플라즈마 연구센터 연구원
 Tel : 051-510-1544
 Fax : 051-510-1498
 E-mail : dhkim11@pusan.ac.kr



이 호 준(Ho-Jun Lee)

1966년 10월 14일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학). 현재 부산대 공대 전자전기컴퓨터공학과 정교수
 Tel : 051-510-2301
 Fax : 051-513-0212
 E-mail : hedo@pusan.ac.kr