

운전압력 변화에 따른 마이크로파 공기 플라즈마의 특성연구

조정현† · 장봉철 · 박봉경 · 김윤환 · 정용호* · 김곤호

한양대학교 응용물리학과, *원자력공학과
(논문접수일 : 2001년 8월 16일)

Characteristics of Microwave Air Plasma With a Wide Range of Operating Pressures

Jung-Hyun Cho†, Bong-Chul Jang, Bong-Kyung Park, Yun-Hwan Kim, Yong-Ho Jung*, and Gon-Ho Kim

Department of Application Physics and Nuclear Engineering, *Hanyang University
(Received August 16, 2001)

요 약

본 연구에서는 운전압력을 1 mTorr~760 Torr까지 변화시키며 발생하는 마이크로파 공기 플라즈마의 특성을 관찰하였다. 마이크로파 공기 플라즈마 발생을 위하여 마이크로파의 전송선로인 도파관은 TE₀₁ mode로 설계 및 제작하였으며, 가정용 전자렌지에 사용되는 마그네트론을 이용하여 AC-type microwave source를 제작하였다. 입력 전력은 370 W로 일정하게 유지하였으며, 이때 발생하는 플라즈마의 특성 관찰은 고속주사 정전탐침과 OES (Optical Emission Spectroscopy)를 이용하였다. 최소 절연과파 전기장의 세기(breakdown E-field)를 가지는 압력인 500 mTorr를 기준으로 발생 플라즈마의 특성은 많은 변화를 보였으며 이 압력은 입력주파수(ω)와 충돌주파수(ν_c)가 일치하는 조건이었다. 이때 공기의 유효충돌 단면적은 $9.23 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 로 계산되었다. 운전압력 500 mTorr 이하의 영역에서 절연과파 전기장의 세기는 약 $5.7 \times 10^4 \text{ V/m-Torr}$ 의 값을 갖으며 압력에 반비례하여 감소하였고, 500 mTorr에서 전기장은 12.5 kV/m로 최저 값을 갖고, 500 mTorr 이상의 영역에서는 약 43 V/m-Torr로 압력에 비례하여 증가하였다. OES 측정결과 마이크로파 공기 플라즈마에서 발생하는 주요 이온의 성분은 산소, 아르곤, 질소였으며, 특히 500 mTorr 이하의 영역에서는 산소와 아르곤 이온의 발생이 지배적이었다. 공기내의 산소(O(II))의 이온온도는 압력이 증가함에 따라 약 1.2 eV에서 0.5 eV로 감소하는 경향을 보였다. 정전 탐침 측정 결과는 500 mTorr 이하의 영역에서 플라즈마 밀도가 증가하는 경향을 보였으며 500 mTorr 이상의 영역에서 플라즈마 밀도는 비교적 낮았다.

Abstract

It is observed the characteristic of the microwave air plasma in the wide range of the operating pressure, 1 mTorr~760 Torr. The microwave air plasma was generated by an AC-type microwave source manufactured with a magnetron taken from a commercial microwave oven and the input power was fixed at 370 W. Characteristics of the plasmas were observed by an injection Langmuir probe and an OES(Optical Emission Spectroscopy). The breakdown electric field is drastically changed at 500 mTorr. For < 500 mTorr, the ratio of the breakdown electric field and the pressure decreased inversely to the pressure, $5.7 \times 10^4 \text{ V/m-Torr}$. However, the ratio increased linearly as 43 V/m-Torr for the operating pressure, > 500 mTorr. The minimum breakdown electric field was observed about 12.5 kV/m at 500 mTorr. It corresponds that the input frequency equals to the collision frequency. The effective collision cross section of the air at this pressure was calculated as $9.23 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$. The results of the OES measurement revealed that the main ions were composed of the oxygen, argon, and nitrogen for > 500 mTorr. In contrast, only oxygen and argon ions were dominated for < 500mTorr. Ion temperature of oxygen (O(II)) in the air was decreased from about 1.2 eV to 0.5 eV as the pressure increased. Langmuir probe data shows that the plasma density for < 500 mTorr was higher than that for > 500 mTorr.

† E-mail : hyun918@newton.hanyang.ac.kr

1. 서 론

마이크로파 플라즈마는 내부에 전극이 없이 고밀도 플라즈마를 형성할 수 있는 장점을 갖고 있어 1980년대 초부터 저기압 마이크로파 플라즈마는 유리의 표면 증착, DLC제조등에 활용되며, 특히 대기압 마이크로파 플라즈마는 산업폐기물 처리, 기체 상태의 폐기물 처리등에도 활용되고 있다 [1]. 따라서 마이크로파 플라즈마의 활용은 광범위한 운전 압력에서 이뤄지고 있음을 알 수 있으며 보다 효율적인 운전을 위해서 광범위한 운전 압력에 대한 마이크로파 플라즈마의 발생 특성에 대한 연구가 절실히 요구된다.

지금까지 마이크로파 플라즈마의 운전 압력 변화에 따른 특성은 1949년 MacDonald나 Brown에 의해 깊이 연구되었다 [2]. 이들은 수소 가스를 사용하여 약 500 mTorr에서 200 Torr까지의 압력범위에서 마이크로파 플라즈마를 발생시켜서 절연파괴될 때의 전기장의 세기(Breakdown E-field ; E_b)와 정상 운전 상태 전기장의 세기(Steady State E-field ; E_s)를 측정하였다. 그 결과 최소 E_b 는 약 5 Torr에서 20 kV/m, 최소 E_s 는 약 3 Torr에서 15 kV/m로 측정되었으며 압력에 따라 비례하고 반비례하는 두 개의 영역을 갖음을 관찰하였다(이에 대한 상세한 내용은 2절 참조). 압력에 반비례하는 영역에서의 E_b 의 기울기는 약 1.6×10^4 V/m-Torr, E_s 의 기울기는 약 5×10^3 V/m-Torr로 측정되었고, 압력에 비례하는 영역에서의 E_b 의 기울기는 약 995 V/m-Torr, E_s 의 기울기는 약 100 V/m-Torr로 측정되었다.

1966년 MacDonald [3]는 Heg 가스를 사용하여 약 500 mTorr에서 200 Torr까지의 압력범위에서 마이크로파 플라즈마를 발생시켜 E_b 를 측정하였다. 그 결과 최소 E_b 는 약 10 Torr의 압력에서 약 8 kV/m로 측정되었으며, 압력에 반비례하는 영역에서의 기울기는 약 1.3×10^4 V/m-Torr, 압력에 비례하는 영역에서의 기울기는 약 113 V/m-Torr로 측정되었다. 그러나 이 결과들은 수 mTorr의 낮은 운전 압력이나 혹은 760 Torr의 대기압에서 발생하는 마이크로파 공기 플라즈마에 대해 적용하기 어려워 보다 광범위한 운전 압력에서의 마이크로파 공기 플라즈마의 절연파괴 특성에 대한 연구가 수행될 필요가 있

었다.

본 연구에서는 수 mTorr에서 대기압까지의 압력 변화에 따른 마이크로파 공기 플라즈마의 특성 및 절연파괴 특성을 관찰하였다. 다음 2절에서는 압력 변화에 따른 마이크로파 플라즈마의 절연파괴 특성에 대한 이론적인 고찰을 하였으며 3절에서는 마이크로파 공기 플라즈마의 특성을 관찰하기 위하여 본 연구에서 사용된 정전탐침과 OES등의 실험장치 및 실험조건에 대하여 기술하였다. 4절에서는 탐침 결과와 OES 결과로부터 얻은 공기 플라즈마의 E_b 와 E_s , 전자온도, 전자 포화전류, 이온온도 등의 측정결과를 기술하였고 결론은 5절에 기술하였다.

2. 마이크로파 플라즈마의 절연파괴 특성

마이크로파 플라즈마의 절연파괴 특성은 입력전력에 따른다. 일반적으로 외부에서 인가되는 전자기파로부터 플라즈마의 전자가 얻는 전력은 식 (2.1)과 같이 표시할 수 있다.

$$P = \frac{e^2 E_{0b}^2}{2m\nu_c} \left(\frac{\nu_c^2}{\nu_c^2 + \omega^2} \right) \quad (2.1)$$

여기서 E_{0b} 는 전자기 방사 최대 전기장의 세기, e 는 전하량, m 은 전자질량, ν_c 는 전자와 중성가스입자와의 탄성 충돌주파수이며 ω 는 입력 전력의 주파수로 여기서는 마이크로파 주파수이다. 만일 운전압력이 낮은 경우 $\omega \gg \nu_c$ 의 조건을 만족하며 이 경우 식 (2.1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P \approx \frac{e^2 \nu_c E_{0b}^2}{2m\omega^2} \quad (2.2)$$

만일 식 (2.1)의 입력전력이 모두 이온화 전력으로 소모되었다고 가정하면 마이크로파 플라즈마의 이온화 충돌 주파수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\nu_i = \frac{P}{eV_i} = \frac{e\nu_c E_{0b}^2}{2mV_i \omega^2} \quad (2.3)$$

여기서 V_i 는 이온화 퍼텐셜이다.

충돌 주파수와 확산계수 및 확산 거리간의 관계식은 다음과 같다.

$$\nu_i = \frac{D}{\Lambda^2} \quad (2.4)$$

여기서 Λ 는 확산길이, D 는 확산계수로

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} = \frac{\bar{v}^2}{3\nu_c} = \frac{8eT_e'}{3\pi\nu_c m} \quad (2.5)$$

또한 \bar{v} 은 평균 자유 행정거리, \bar{v} 는 mean thermal velocity, T_e' 는 characteristic energy 이다. 식 (2.5)를 이용하여 식 (2.4)를 다시쓰면,

$$\nu_i = \frac{8eT_e'}{3\pi\nu_c m \Lambda^2} \quad (2.6)$$

식 (2.3)과 식 (2.6)을 이용하여 정리하면 절연과피 전기장 E_b 는 다음과 같다.

$$E_b = \frac{4c}{\nu_c \lambda \Lambda} \sqrt{\frac{2\pi V_i T_e'}{3}} \propto \frac{1}{p} \quad (2.7)$$

여기서 λ 는 마이크로파의 파장이며 식 (2.7)은 운전 압력에 반비례함을 보여준다. $\omega \gg \nu_c$ 의 조건에서는 입력 주파수가 너무 높아 가속된 전자가 효율적으로 중성 입자와의 충돌을 통한 이온화 과정을 겪기 힘들게 된다. 따라서 절연과피가 일어날 조건은 운전 압력이 낮아짐에 따라서 인가되어야 하는 전기장의 세기는 커져야 하여 식 (2.7)에서와 같이 충돌 절연과피 전기장의 세기는 충돌주파수에 반비례하고 압력에 비례하여 감소하게 된다 [1].

만일 운전압력이 높은 경우, 즉 입력 주파수 ω 가 충돌주파수 ν_c 보다 매우 작은 경우, $\omega \ll \nu_c$ 에는 전자가 얻는 전력, 식 (2.1)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P \approx \frac{e^2 E_{0b}^2}{2m\nu_c} \quad (2.8)$$

이를 이용하여 충돌에 의해 전자가 잃는 에너지를 구하면 다음과 같다.

$$W_a = P \tau_c = \frac{P}{\nu_c} = \frac{e^2 E_{0b}^2}{2m\nu_c^2} \quad (2.9)$$

여기서 τ_c 는 전자가 중성 입자와 충돌에 걸리는 평균시간이다.

전자와 중성입자(대부분의 질량을 이온의 질량으로 가정)와의 충돌에서 이온화 에너지로 손실되는 크기는 다음과 같다.

$$W_c = \frac{2mMeV_i}{(m+M)^2} \approx \frac{2meV_i}{M} \quad (2.10)$$

여기서 M 은 중성 입자의 질량을 의미한다. 따라서 전자의 잃은 에너지의 대부분이 이온화 에너지로 사용되었다고 가정하여 식 (2.9)과 식 (2.10)으로부터 다음 식 (2.11)을 얻을 수 있다.

$$E_b = m\nu_c \frac{\sqrt{2V_i}}{eM} \propto p \quad (2.11)$$

식 (2.11)에서와 같이 충돌주파수는 압력에 비례하므로 절연과피 전기장 E_b 는 압력에 비례하게 된다 [1]. 이는 운전 압력이 높아 짐에 따라서 전자가 이온화에 충분한 에너지를 얻기도 전에 충돌과정을 겪어 효율적인 이온화를 이루지 못하고 있음을 보여준다. 따라서 높은 운전 압력에서 절연과피를 유지하기 위해서는 보다 큰 전기장이 요구된다. 식 (2.7)과 식 (2.11)의 결과로부터 $\omega = \nu_c$ 인 지점을 경계로 $\omega \gg \nu_c$ 인 영역에서는 식 (2.7)와 같이 운전 압력이 증가함에 따라 E_b 는 감소하고, $\omega \ll \nu_c$ 인 영역에서는 식 (2.11)과 같이 압력이 증가하면 E_b 가 증가하게 된다. 따라서 $\omega = \nu_c$ 를 만족하는 압력을 경계로 압력 변화에 따라 절연과피에 요구되는 전기장의 세기는 서로 다른 경향으로 변화하며 $\omega = \nu_c$ 를 만족하는 압력에서 최저 절연과피 전기장의 세기를 갖게 됨을 예상할 수 있다.

3. 실험장치 및 조건

실험장치는 그림 1과 같이 구성되었다. 가정용 마이크로웨이브 오븐에서 사용되는 마그네트론(HITACHI 2M213)을 이용하였으며, 발생하는 마이크로파의 주파수는 2.45 GHz이다. 마이크로파의 전파를 위한 도파관은 TE₀₁ mode로써 가로, 세로, 높이의 길이를 각각 67.3 mm, 33.3 mm, 443 mm로 하였으며 알루미늄 재질로 제작하였다. 플라즈마 반응기의 외경이 36 ϕ (mm), 내경이 32 ϕ인 pyrex관을 사용하여 그림 1과 같이 도파관에 삽입하여 반응장치를 완성하였다.

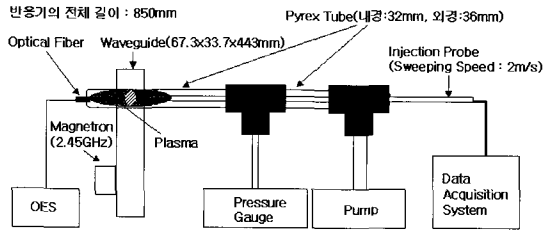


그림 1. 마이크로파 공기 플라즈마 발생장치.

플라즈마 특성은 정전 탐침법을 이용하였다. 고 밀도의 마이크로 플라즈마에서 탐침 팁이 용융되는 것을 방지하기 위해서 공기압력이 약 6기압, 주사 속도가 2 m/s인 고속주사 탐침을 이용하였다. 탐침의 팁은 길이 1 mm, 직경 0.5 ϕ 인 원통형 팁을 사용하였고(집속면적 1.57 mm²), 팁의 재질은 열에 강하고 이차전자 방출이 적은 Ta (Tantalium)로 하였으며, 전압은 1초 동안 ± 60 V로 변화시켰다. 그림 1의 도파관 중앙의 빗금친 부분에 탐침을 약 1초간 머무르도록 하여 자료를 얻었다. 본 실험에서 발생하는 마이크로파 플라즈마는 60 Hz의 주기를 갖고 발생과 소멸을 반복하므로 이 때 얻어진 전압에 대한 전류의 파형은 사인함수 형태로 60개의 침두 값을 갖게 된다. 따라서 각 침두 값에서 플라즈마가 안정화 되었다고 가정하여 각 침두값에 상응하는 탐침 전압을 이용하여 탐침의 전류-전압 특성곡선(I-V 특성곡선)을 얻었다. 특성 곡선으로부터 전자 포화전류밀도, 플라즈마 전자온도 등을 정량적으로 분석하였다.

발생 플라즈마의 분광학적 특성을 얻기 위하여 분광측정기구인 분광기(Ocean Optics Inc. SAD 500)를 사용하였고, optical fiber는 그림 1에서와 같이 발생 플라즈마의 정면에 설치하여 자료를 얻었다. 역시 마이크로파 플라즈마가 60 Hz의 주파수를 가지므로 분광기의 detect integral time은 17 ms로 고정하고 각 파장대의 빛의 세기를 관찰하였다.

주입가스는 공기를 사용하였고, 운전 압력은 1 mTorr ~760 Torr까지 넓은 영역으로 변화시켰다. 모든 경우의 입력 전력은 370 W로 고정하고 플라즈마를 발생시켰다. 운전압력을 변화시키면서 플라즈마가 발생될 때의 절연파괴 전기장의 세기(breakdown E-field ; E_b)와 유지된 플라즈마가 소멸되기 직전의 정상상태 전기장의 세기(steady state E-field ; E_s)를 측정하였다.

반응기 내부의 전기장의 세기는 다음과 같은 식으로 계산되었다 [4].

$$E = \sqrt{\frac{2P}{\epsilon_0 f V}} \quad [\text{V/m}] \quad (3.1)$$

여기서 P 는 입력 전력, ϵ_0 는 공기중에서의 유전상수, f 는 마이크로파의 주파수이고, V 는 도파관 내의 체적으로 가정하였다.

플라즈마 발생시와 소멸되기 직전의 입력 전력을 측정하고, 식 (3.1)을 이용하여 절연파괴 전기장의 세기와 정상상태 전기장의 세기를 측정하였다. 공기는 산소, 질소, 아르곤등이 혼합되어 있는 가스이므로 공기의 유효 충돌 단면적(σ_c^{eff})을 구하는 것은 중요하다. 공기의 유효 충돌 단면적은 플라즈마 발생에 최대 효율을 가지는 조건을 $\omega = \nu_c$ 으로 가정하여 식 (3.2)를 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다 [5].

$$\sigma_c^{eff} = \frac{\nu_c}{3.5 \times 10^{13} p} \left(\frac{8kT_e}{\pi m} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad [\text{cm}^2] \quad (3.2)$$

여기서 ν_c 는 충돌 주파수, p 는 압력, k 는 볼츠만 상수, T_e 는 전자온도, m 은 전자의 질량이다. 실제 실험에서는 탐침 팁에서의 이차전자와 열전자 방출로 인해 포화이온전류의 측정이 불가능한 경우가 많아 전자 포화전류의 변화를 통하여 발생 플라즈마의 밀도 변화를 관찰하였다. 여기서 플라즈마 밀도의 정성적인 분석을 위하여 전자온도는 Maxwellian 분포를 갖고 있다고 가정하였다. 이 가정은 일부 높은 운전 압력의 마이크로파 플라즈마에서 충돌성동의 영향으로 탐침 주변에서 형성되는 플라즈마 쉬스의 모델을 정확하게 설정할 수 없으나 본 연구에서는 운전 압력 대비 전자온도의 정성적인 변화를 관찰하고자 하였다. 또한 충돌성이 쉬스 형성에 미치는 영향에 대해서는 추후 연구에서 발표하고자 한다.

본 연구에서는 발생된 마이크로파 공기 플라즈마를 LTE(Local Thermodynamic Equilibrium ; 국소 열 평형)상태의 플라즈마로 가정하고 상대 빛 세기법을 사용하여 플라즈마내의 이온의 온도를 정성적으로 분석하고자 하였다. 여기상태의 입자의 밀도는 열에너지 kT 와 여기에너지, 통계적 가중치(statistical

weight) 등에 의해 결정되기 때문에 식 (3.3)에 의하면 종류가 같고 이온화 상태도 같은 원자에서 방출되는 두 분광선의 상대적 세기(relative intensity)를 이용하여 이온의 온도를 측정할 수 있다. 총 빛의 세기는 다음과 같이 표현할 수 있다 [6].

$$I = \frac{1}{4\pi} Ah\nu g \frac{n}{Z} \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (3.3)$$

여기서, E 는 입자의 상위 여기상태의 에너지, n 는 입자의 밀도, Z 는 이온이 여기 되어진 상태의 온도 T 에서 계산된 입자의 분배함수(partition function), g 는 입자의 상위 여기상태에서의 통계적 기중치, A 는 원자 천이 확률, h 는 플랑크 상수를 나타낸다. I 는 OES로 측정된 총 빛의 세기를 나타낸다 [9]. 종류가 같고 이온화 상태도 같은 원자에서 방출되는 두 분광선의 상대적 세기(relative intensity)를 이용하면 플라즈마 이온의 온도를 식 (3.4)로 계산할 수 있다 [6].

$$kT = \frac{E_1 - E_2}{\ln\left(\frac{I_1 A_2 \lambda_1 g_2}{I_2 A_1 \lambda_2 g_1}\right)} \quad (3.4)$$

여기서 λ 는 분광선의 파장을 나타낸다. 아래첨자 1은 비교하는 두 개의 분광선 중 첫 번째 분광선을 나타내며, 아래첨자 2는 두 번째 분광선을 나타낸다 [7]. 본 연구에서는 312.26 nm와 337.72 nm의 O(II) 분광선을 비교하여 O(II)의 이온온도를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 2는 압력 변화에 따른 E_b 와 E_s 를 측정한 결과이다. E_b 는 약 500 mTorr의 압력에서 최소값인 12.5 kV/m를 갖고 있음을 보여준다. 앞의 2절에서 설명한 바와 같이 $\omega = \nu_c$ 의 조건을 만족하는 운전 압력에서 플라즈마 발생효율이 최대가 되므로 [1], 500 mTorr의 운전 압력에서 $\omega = \nu_c$ 라 가정할 수 있다. 운전 압력 500 mTorr 이하의 낮은 압력에서는 입자간의 충돌주파수가 마이크로파의 주파수보다 작음으로 압력이 감소 할 수록 이온화률이 줄어들게 되므로 전자의 이온화에 필요한 에너지는 커지게 된다. 이 결과는 식 (2.7)에서와 같이, 이때의 E_b 는 약 5.7×10^4 V/m-Torr의 기울기(E_s 의 기울기는

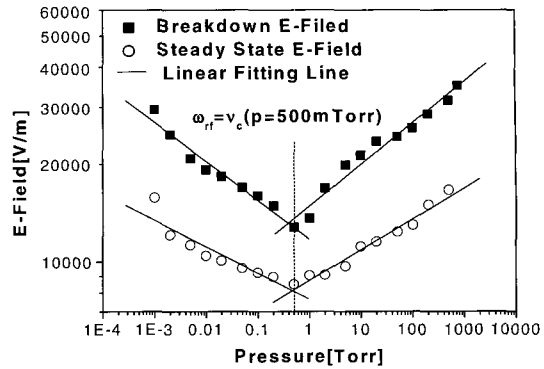


그림 2. 압력 변화에 따른 절연파괴 전기장의 세기(E_b)와 정상상태 전기장의 세기(E_s)의 변화. 최소 E_b 는 500 mTorr의 압력에서 12.5 kV/m이다. 500 mTorr 이하의 영역에서 E_b 와 E_s 는 압력에 반비례하고, 500 mTorr 이상의 영역에서 압력에 비례하며 전반적으로 E_s 는 E_b 보다 낮은 값을 가진다.

약 1.7×10^4 V/m-Torr)를 갖으며 압력에 반비례하는 경향을 보인다. 식 (2.7)로부터 계산된 기울기는 3.7×10^4 V/m-Torr로 비교적 유사한 값을 가졌다. 운전 압력이 500 mTorr 이상인 조건에서는 입자간의 충돌이 증가하여 마이크로파의 주파수보다 커져 이온화에 필요한 충분한 에너지를 얻기 전에 충돌로 인한 에너지 손실이 많아지게 된다. 이 경우에는 압력이 증가할수록 절연파괴에 더 많은 에너지를 필요로 하게 되며 이 결과는 식 (2.11)와 같이 나타난다. 이 영역에서 E_b 는 약 43 V/m-Torr의 기울기(E_s 의 기울기는 10 V/m-Torr)를 갖고 압력에 비례하여 커지는 결과를 보였다. 또한 측정된 기울기는 식 (2.11)을 이용하여 계산한 기울기인 59 V/m-Torr와 유사한 값을 가진다. 각 영역에서의 기울기의 계산값과 측정값의 편차는 계산에 사용된 식 (2.7), 식 (2.11)과 측정에 사용된 식 (3.1)의 변수들의 값을 근사적으로 사용했기 때문인 것으로 사려된다. 또한 식 (2.7)과 식 (2.11)의 경우 기울기 계산에 사용되는 변수인 A , V , T_e 는 압력 변화에 대한 보정이 필요할 것으로 사려된다. 압력 변화에 따른 E_s 의 변화는 E_b 의 변화와 유사한 경향을 보였으나 플라즈마가 생성된 후에는 초기점화에 필요한 에너지가 필요 없기 때문에 전반적으로 E_s 는 E_b 보다 낮았고, 최소 E_s 는 약 500 mTorr에서 8.5 kV/m였다. 바탕 전자(background

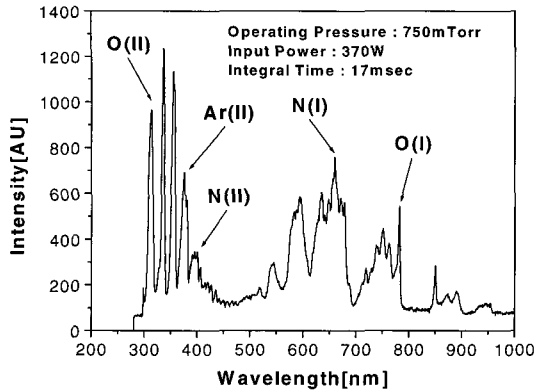


그림 3. 마이크로파 공기 플라즈마의 주요 성분. O(II), Ar(II), N(II)는 O⁺, Ar⁺, N⁺의 표기로 이온의 여기를 나타내는 분광선이고, O(I), N(I)는 O, N의 표기로 중성자의 분광선을 나타낸다. 이온들의 빛 세기가 상대적으로 큰 것은 플라즈마의 발생에 O⁺, Ar⁺, N⁺의 발생이 활발함을 나타낸다.

electron)의 영향으로 압력에 반비례하는 영역과 압력에 비례하는 영역에서 E_s의 기울기는 E_b의 기울기보다 작음을 알 수 있었다.

최소 E_b를 가지는 500 mTorr의 압력을 만족하는 조건인 $\omega = \nu_c$ 과 식 (3.2)를 이용하여 복합가스인 공기의 유효 충돌 단면적 σ_c^{eff} 를 계산하면 $9.23 \times 10^{16} \text{ cm}^2$ 이며 이는 공기중의 대부분을 차지하는 질소나 산소의 최대 이온화 충돌 단면적인 $2.64 \times 10^{16} \text{ cm}^2$ 과 유사한 크기를 갖았다.

그림 3은 공기 플라즈마의 OES측정 결과를 나타낸다. 그림 3에서 500 nm~800 nm의 영역은 O₂, N₂ 등 분자들의 해리반응의 결과로 나타난 분광선에 해당하며 O(I), N(I)로 표기하였고, 300 nm~500 nm의 영역은 주로 해리되어진 O, N, Ar등 원자들의 이온화 반응의 결과로 생성된 O⁺, N⁺, Ar⁺의 분광선에 해당하며 O(II), Ar(II), N(II)로 표기하였다 [7,8]. 발생된 공기 플라즈마를 구성하는 주요 이온들과 원자들의 천이과정은 표 1과 같다. 관찰된 각 이온의 주요 분광선의 파장과 천이과정은 O(II)가 312.26 nm, 2p³3p-2p²(³P)4s이고, Ar(II)이 379.66 nm, 3p⁴4p-3p4(¹D)4d이며, N(II)가 399.50 nm, 2p3s-2p(²P^o)3p이다 [9,10]. 주요 이온들의 천이 에너지는 3.96 eV, 3.26 eV, 3.10 eV로 약 3~4 eV를 유지하였다. 압력이 높을 때 OES

표 1. 주요파장에 따른 입자의 종류와 천이과정. 플라즈마 발생의 주요 분광선은 312.26 nm의 O(II), 379.66 nm의 Ar(II), 399.50 nm의 N(II)이다.

Wave Length [nm]	종류	Transition Array	Transition Energy [eV]
312.26	O(II)	2p ³ 3p - 2p2(³ P)4s	3.96
377.70	O(II)	2p ² 3s - 2p ² (¹ P)3p	3.67
355.00	Ar(II)	3p ⁴ p - 3p ⁴ (¹ P)4d	3.49
379.66	Ar(II)	3p ⁴ 4p - 3p4(¹ D)4d	3.26
399.50	N(II)	2p3s - 2p(² P ^o)3p	3.10
665.65	N(I)	2p ³ 3p - 2p ² (³ P)5s	1.86
777.54	O(I)	2p ³ 3s - 2p3(⁴ S ^o)3p	1.59

측정 결과와 낮은 압력조건의 결과와 비교해 보면 500 nm~800 nm영역의 빛 세기 감소비가 300 nm~500 nm영역의 빛 세기 감소비보다 크며, 이는 압력이 높을 때 전자온도가 낮아지면서 공기 입자들의 해리 비율이 감소하기 때문으로 사려된다.

그림 4는 압력 변화에 따른 전자 포화전류의 변화를 나타내었고, 그림 5는 압력 변화에 따른 주요 이온 성분의 빛 세기의 변화를 나타내었다. 정전탐침을 이용하여 압력 변화에 따른 전자 포화전류를 측정된 결과 전자 포화전류의 크기는 그림 4에서와 같이 500 mTorr 이하의 영역에서는 압력의 증가에 따라 전자 포화전류는 압력이 증가할수록 약 18 mA

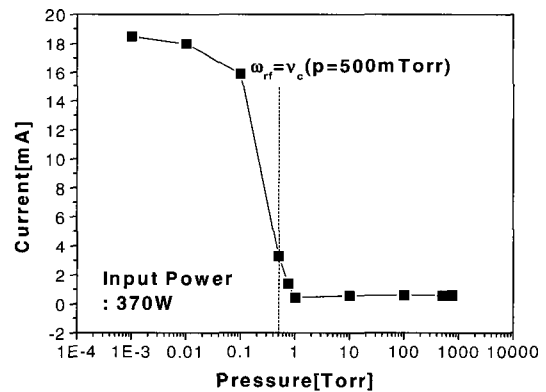


그림 4. 압력 변화에 따른 전자 포화전류의 변화. 500 mTorr 이하의 영역에서 전자 포화전류는 압력이 증가할수록 약 18 mA에서 3 mA로 감소하고 500 mTorr 이상의 영역에서는 약 0.5 mA로 포화된다.

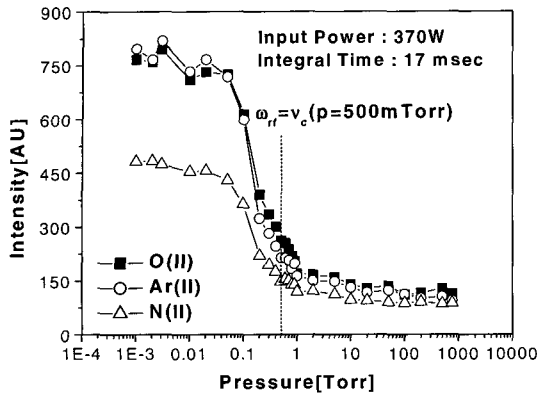


그림 5. 압력 변화에 따른 주요 이온의 빛 세기 변화. 500 mTorr 이하의 영역에서 압력이 증가할수록 주요 이온의 빛 세기는 약 800(a.u.)에서 150(a.u.)로 감소하고 500 mTorr 이상의 영역에서 약 100(a.u.)로 포화된다.

에서 3 mA까지 약 80% 감소하였고, 500 mTorr 이상의 영역에서는 약 0.5 mA로 거의 변화가 없었다. 이 결과는 압력이 증가함에 따라 충돌주파수가 마이크로파의 주파수보다 커지면서 충돌이 많아져서 이온화에 필요한 충분한 에너지를 얻지 못하게 되어 플라즈마 밀도가 낮아지기 때문으로 사려된다.

OES를 이용하여 얻은 주요 이온 성분의 압력에 따른 빛 세기의 변화도 그림 5에서와 같이 500 mTorr 이하의 영역에서 압력의 증가에 따라 상대 크기가 약 800(a.u.)에서 150(a.u.)까지 약 80%로 감소하였고, 500 mTorr 이상의 영역에서는 약 100(a.u.)로 거의 변화가 없이 전자 포화전류의 특성 변화와 유사한 경향을 보였다. 또한 500 mTorr 이하의 영역에서는 O(II)와 Ar(II)의 빛 세기가 N(II)의 빛 세기보다 약 60% 정도 큰 값을 가졌으며, 500 mTorr 이상의 영역에서는 이들 이온들의 빛 세기가 거의 같은 값으로 일정한 경향을 갖았다. 이 결과는 500 mTorr 이하의 영역에서는 O(II), Ar(II)의 해리-이온화반응이 N(II)보다 상대적으로 크고, 500 mTorr 이상의 영역에서는 O(II), Ar(II), N(II)의 해리-이온화반응이 비교적 작게 일어나고 있음을 의미한다. 운전 압력 500 mTorr 이하의 영역에서 발생된 공기플라즈마에서는 O(II), Ar(II)의 발생이 지배적임을 보여준다. 또한 500 mTorr 이상의 영역에서 이온화 반응 효율이 감소함을 나타낸다.

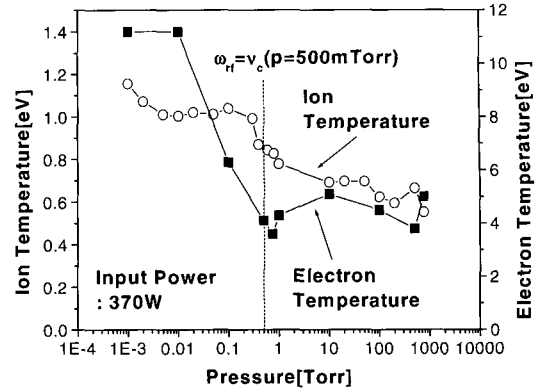


그림 6. 압력 변화에 따른 전자온도와 이온온도의 변화. 전자온도는 500 mTorr 이하의 영역에서 압력이 증가할수록 약 11 eV에서 3~4 eV로 감소하고, 500 mTorr 이상의 영역에서 약 3~4 eV로 거의 일정하다. 이온온도 또한 압력이 증가할수록 약 1.2 eV에서 0.5 eV로 감소하는 경향을 보인다.

압력변화에 따른 정전탐침을 이용하여 측정된 전자온도의 정성적인 변화와 OES의 상대 빛 세기법[6]을 이용하여 얻은 이온온도의 변화는 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서와 같이 낮은 압력(수십 mTorr 미만)에서 최대 전자온도는 약 11 eV임이 측정되었고, 500 mTorr 근방에서 전자온도는 급격히 감소하여 500 mTorr 이상의 압력에서 전자온도는 약 3~4 eV로 줄어들었다. 따라서 압력이 증가함에 따라 입자들 간의 충돌이 많아지고 자연히 전자의 온도는 감소하고 있으나 특정 운전 압력, 즉 500 mTorr 이상의 압력조건에서의 전자온도의 변화가 크지 않게 나타나는 이유에 대해서는 좀더 깊은 연구가 요구된다. 또한 그림에서와 같이 압력이 증가함에 따라 OES 측정 결과 O(II)의 이온 온도는 약 1.2 eV에서 0.5 eV로 감소하는 경향을 보였으며 이는 전자온도와 비슷한 경향을 갖음을 알 수 있었다.

5. 결 론

마이크로파 공기 플라즈마의 E_b 는 500 mTorr에서 약 12.5 kV/m로 최소값을 가졌고, 500 mTorr 이하의 영역에서는 약 5.7×10^4 V/m-Torr의 기울기를 가지고 압력에 반비례하였으며, 500 mTorr 이상의 영역에서는 약 43 V/m-Torr의 기울기를 가지고 압력에

비례하여 증가하였다. 압력 변화에 따른 E_s 의 변화는 E_b 의 변화와 유사한 경향을 보였으나 압력에 반비례하는 영역에서의 기울기는 약 1.7×10^4 V/m-Torr, 압력에 비례하는 영역에서 약 10 V/m-Torr로 E_b 의 기울기 보다 작았으며 최소 E_s 의 값은 약 500 mTorr에서 8.5 kV/m였다. 이 결과는 플라즈마가 생성된 후에는 초기접화에 필요한 에너지가 필요 없어 전반적으로 E_s 는 E_b 보다 낮았다. 운전 압력 변화에 따라 전자온도는 약 11 eV에서 3~4 eV로 약 500 mTorr에서 급격하게 감소하여 일정한 값을 갖는 경향을 보였으며 이 경향은 산소 이온의 온도 측정 결과인 500 mTorr에서 약 1.2 eV에서 0.5 eV로 감소하는 경향과 유사하여 500 mTorr 근방에서 플라즈마의 특성이 크게 변화하고 있음을 알 수 있었다. 이 조건에서 전자 포화전류는 약 18 mA에서 0.5 mA로 감소하여 발생 플라즈마의 밀도가 급격히 줄어들었음을 보여주고 있다. 또한 이때 플라즈마내 입자들의 해리반응도 감소하여 OES측정결과의 빛세기 역시 80% 이상 감소하였다. 본 연구에서 계산된 공기의 유효충돌 단면적 σ_c^{eff} 은 9.23×10^{-16} cm² 이었으며, 마이크로파 공기 플라즈마의 주요 발생 성분은 O⁺, Ar⁺, N⁺ 이었다.

감사의 글

본 연구는 2001-2002년 교육부의 Brain Korea 21, 한양대학교 교내연구비 및 환경부 차세대 핵심환경기술개발 사업의 연구비와 (주) 샘 테크놀로지의 연구기자재 도움을 받아 수행되어 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] J. R. Roth, *Industrial Plasma Engineering* (IOP Publishing, Ltd., 1995).
- [2] A. D. MacDonald and S. C. Brown, *Phys. Rev.* **130**, 1841 (1949).
- [3] A. D. MacDonald, *Microwave Breakdown in Gases* (John Wiley, 1966).
- [4] D. J. Griffiths, *Introduction To Electrodynamics* (Prentice Hall, 1989).
- [5] B. Chapman, *Glow Discharge Processes* (John Wiley & Sons, 1980).
- [6] 김명규, *분광법을 이용한 제트 플라즈마의 이온 온도 측정*, 석사 학위 논문, 한양대학교, (1993).
- [7] H. R. Griem, *Principle Of Plasma Spectroscopy* (Cambridge University, Presso 1997).
- [8] H. R. Griem, *Plasma Spectroscopy* (McGrow-Hill, 1964).
- [9] W. L. Wiese, M. W. Smith and B. M. Glennon, *Atomic Transition Probabilities Vol. I Hydrogen Through Neon* (Superintendent Of Documents, U.S. Government Printing Office, 1966).
- [10] W. L. Wiese, M. W. Smith and B. M. Glennon, *Atomic Transition Probabilities Vol. II Sodium Through Calcium* (Superintendent Of Documents, U.S. Government Printing Office, 1969).
- [11] N. Hershkowitz, *How To Langmuir Probes Work In Plasma Diagnostics* (Academic Press, New York, 1990).
- [12] A. Grill, *Cold Plasma In Materials Fabrication* (IEEE Press, 1993).
- [13] J. W. Hill and Ralph H. Petrucci, *General Chemistry* (Prentice-Hall, 1996).
- [14] F. Rief, *Fundamentals Of Statistical And Thermal Physics* (McGrow-Hill, 1997).
- [15] 유재문, 강정진, 오양현, 안정식, *마이크로파 공학 입문* (학문사, 1999).
- [16] A. W. Scott, *Understanding Microwaves* (John Wiley & Sons, 1993).
- [17] W. L. Wiese, G. A. Martin, *Wavelengths And Transition Probabilities For Atoms And Atomic Ions* (Superintendent Of Documents, U.S. Government Printing Office, 1980).
- [18] David R. Lide, *Handbook Of Chemistry And Physics 73rd Edition* (CRC Press, (1992-1993).
- [19] G. Arthurs, *ORIEL Catalog* (ORIEL Corporation, (1994).
- [20] 고토 켄이치, *플라즈마의 세계* (전파과학사, 1996).