

대면적 상압글로우 플라즈마의 발생 및 특성 진단 연구

강신현 · 문세연 · 최원호*

한국과학기술원 물리학과, 대전광역시 유성구 구성동 373-1, 대전 305-701

강방권 · 엄세훈 · 이용관

플라즈마트, 대전광역시 유성구 구성동 373-1, 대전 305-701

(2003년 10월 9일 받음)

대면적 재료의 표면처리를 목표로 13.56 MHz의 rf 소스를 이용하여 길이와 폭이 각각 200 mm와 50 mm인 직사각형 모양의 접촉면적을 가지는 상압 글로우 플라즈마를 발생시켰다. 광학적인 진단법을 이용하여 발생된 플라즈마의 주요 변수들을 공간적으로 측정된 결과, (200 - 450) W의 입력과 위 범위에서 기체온도(gas temperature)와 진동온도(vibrational temperature)가 각각 (540-610) K와 (2400-3300) K였으며, 플라즈마에서 방출되는 빛의 세기변화를 통해 발생된 플라즈마가 시간에 따라 연속적임을 확인하였다. 또한 전기적 진단법에 의한 측정결과로부터 전형적인 저압 글로우방전 플라즈마의 특성과 일치하는 I-V 특성곡선을 얻었다. 플라즈마 변수들의 공간적인 분포를 측정해보니 플라즈마의 길이방향으로 균일도가 93 % 이상이었는데 이것은 처리하는 면적의 전 영역에서 플라즈마의 균일도가 상당히 높은 것을 의미한다. 또한 플라즈마의 진단 결과로부터 기체유량과 입력과위를 변화시켜 플라즈마 변수를 어느 정도 제어할 수 있음을 알아내었다.

PACS numbers: 52.70.-m, 52.70.Ds, 52.70.Kz

Keywords: 상압 플라즈마, 대면적 플라즈마, 글로우 플라즈마

I. 서 론

고비용의 진공장비를 필요로 하지 않고, 구조가 간단하며, 실시간 처리가 가능하고, 작동이 간편하다는 등의 장점들로 인하여 상압 플라즈마가 최근 들어 활발히 연구되고 있다. 이러한 여러 가지 장점들로 인해 많은 유형과 다양한 구조의 상압 플라즈마 원이 지금까지 개발되었는데 마이크로파 플라즈마원과 radio frequency (rf) 플라즈마 토치, 유전장벽방전(dielectric barrier discharge), 그리고 micro-hollow 음극방전(MHCD) 등이 대표적인 예들이다 [1-5]. 상압 플라즈마의 주 응용분야는 실시간 방출 선스펙트럼 관측과 재료표면 개질, 유해기체 처리, 생물 및 의학적 응용, 원자 분광계 등이다. 특히, 재료처리에 폭 넓게 사용되고 있는 저압 플라즈마의 역할을 대신하기 위해, 기체온도가 낮고 공간 균일도가 높은 상압 대면적 플라즈마가 집중적으로 연구되고 있다 [3,5-7]. 이러한 플라즈마 원들이 많은 분야에 이용되기 위해서는 기체온도가 낮고 플라즈마 면적이 넓어야 하며, 고농

도의 활성종의 함유, 그리고 공간적으로 균일한 방전특성 등이 만족되어야 한다. 본 연구에서도 위와 같은 목표를 가지고 글로우방전 플라즈마 원을 개발하였다.

발생된 플라즈마의 특성을 연구하기 위해 전기적인 측정방법과 광학적인 진단방법을 이용하였다. 특히 상압 플라즈마의 경우, 응용성때문에 여러 무거운 중성입자의 운동에너지를 나타내는 기체온도가 중요한 변수로 취급된다. 본 논문에서는 기체온도를 측정하기 위해 이원자 분자의 스펙트럼을 분석하여 기체온도를 알아내는 볼츠만 분석법을 이용하였다 [8-10]. 또한 상압 플라즈마가 활용될 수 있는 응용분야 중 하나가 직물, 폴리머, 혹은 LCD나 PDP 제조를 위한 유리판 등과 같은 대면적 재료의 표면개질이기 때문에, 산업적 활용성이 높은 상압 플라즈마를 만들기 위해서는 높은 공간적 균일도가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 플라즈마 방출광의 세기, 기체온도, 진동온도 등의 여러 변수들을 공간적으로 측정하여 플라즈마의 균일도를 측정하였다. 또한 상압 플라즈마에서 자주 문제가 되는 고전류 아크와 스트리머(streamer)가 없는 안정되고 균일한 플라즈마 생성 조건에 대해서 조사하였다.

*E-mail: 교신저자 wchoe@kaist.ac.kr

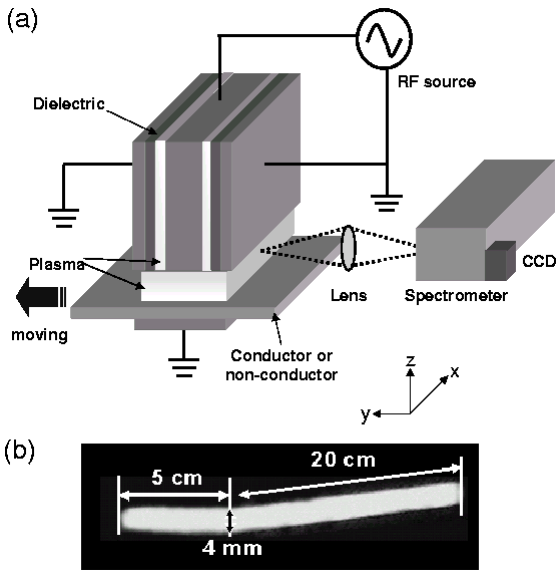


Fig. 1. (a) Schematic of the experimental setup, and (b) a picture of the produced plasma.

II. 실험장치 구성

상압 플라즈마 발생을 위한 실험장치는 Fig. 1(a)과 같다. 이 장치의 중요한 특징들 중 하나는 두 개의 측면 방전간극을 가진 이중구조인데, 이는 플라즈마가 큰 면적으로 발생될 뿐만 아니라 안정적으로 발생되도록 도와주는 역할을 한다. 1 mm 두께의 알루미늄산화물(Al_2O_3)이 각각의 접지전극을 덮고 있으며, 전극을 덮고 있는 유전체는 아크로 인한 과전류를 막아주며 동시에 상압에서 안정되고 균일한 글로우 플라즈마가 생성되도록 도와준다. 측면과 비슷한 구조가 전원이 공급되는 중앙의 전극과 하부도체 사이에도 있으며, 하부 방전간극의 폭은 (4 - 6) mm이다. Fig. 1(b)에서 보듯이, 발생된 상압 플라즈마의 면적은 200 mm × 50 mm이고 높이는 (4 - 6) mm이다. 한편, 처리하고자 하는 재료가 플라즈마를 가로지르는 방향으로 움직이는 경우에는 200 mm의 폭을 가지고 무한한 면적으로 처리가 가능하다.

13.56 MHz rf 전원공급장치는 임피던스 결합회로와 함께 사용하였으며, 균일하고 안정적인 플라즈마 발생을 위하여 지름이 0.4 mm인 기체주입구를 Fig. 1 (a)의 x축 방향으로 전극내부에 등간격으로 배열하여 이를 통해 아르곤 기체를 분사하였다. 이러한 기체분사 구조는 저압 공정용 플라즈마원에서 shower head 방식과 유사하며, z축 방향의 입력기체의 흐름이 x축 방향으로 거의 균일할 것으로 기대된다. 발생된 플라즈마의 전기적인 특성들은 전류탐침(Tektronix TCP202)과 전압탐침(Tektronix P6015A)을 이용하여 측정하였으며, 발생

된 플라즈마로부터 방출되는 가시광선 영역의 스펙트럼은 CCD가 장착된 Chromex 250is 분광기와 광전자증배관(Photomultiplier tube)을 이용하여 측정하였다. 광진단을 통한 플라즈마 변수의 공간분포 측정은 Fig. 1의 실험장치에서 보여지듯이 볼록렌즈를 사용하여 1:1 상결합(image matching)을 통해서 이루어졌으며, 구성된 광학계의 공간분해능은 다음과 같이 확인하였다. 먼저 실제 플라즈마로부터 나오는 방출광이 광학부품들을 거쳐 최종적으로 분광기의 입구슬릿에 이르는 광경로를 재현하여, 빔의 지름이 5 mm인 He-Ne 레이저를 실제 플라즈마 방출광을 가이드할 경우 상이 맺히는 부분인 분광기의 입구슬릿 위치에 두고, 역으로 플라즈마가 있는 부분에 스크린을 두어 레이저의 상이 맺히게 하였다. 그런 뒤, 스크린의 위치를 Fig. 1의 y축 방향으로 움직여 가면서 스크린에 맺히는 레이저빔의 지름을 측정하였다. 스크린이 플라즈마의 중심부분, 즉 Fig. 1에서 $y = 2.5$ cm에 위치할 때 빔의 지름이 약 1 mm로 광섬유 코어의 지름과 동일한 크기인 것으로 측정되어, 플라즈마 방출광을 측정할 때의 공간측정 간격인 1 cm보다 매우 작음을 알 수 있었다. 한편, 발생조건에 따른 플라즈마의 특성을 조사하기 위해 rf 입력파워를 200 W에서 450 W까지, 그리고 아르곤 기체의 유량을 5 lpm에서 25 lpm까지 변화시켰다.

III. 실험결과

1. 전기적 특성 진단

Fig. 2(a)는 실험에 사용된 방전시스템의 등가회로를 보여준다. 이미 앞에서 언급했듯이 방전시스템은 이중방전구조를 가지고 있기 때문에 두 종류의 다른 축전기로 회로를 구성할 수 있다. 그림에서 C_1 과 C_2 는 각각 측면전극과 하부전극의 전기용량을 가리키고 $C_{dielectric}$ 과 C_{gas} 는 유전체와 방전을 위한 기체간극의 전기용량을 나타낸다. 일단 방전이 시작되면 플라즈마는 전도체의 역할을 하게되므로 Fig. 2(b)에서처럼 플라즈마를 저항 $R_{discharge}$ 로 표현할 수 있다. 이 등가회로를 바탕으로 전압(V)과 전류(I)의 측정을 통해 방전시스템의 전기적인 특성들을 조사하였다.

Fig. 3(a)의 I-V 곡선은 플라즈마가 전형적인 글로우 방전의 특성을 갖는다는 것을 보여준다. 하부전극의 폭이 4 mm이고 아르곤 유량이 10 lpm일 때, 측정된 전리전압(breakdown voltage)은 435 V_{peak} 였다. 이 값은 상압 기체방전 시 통상적으로 측정되는 수 kV 정도보다

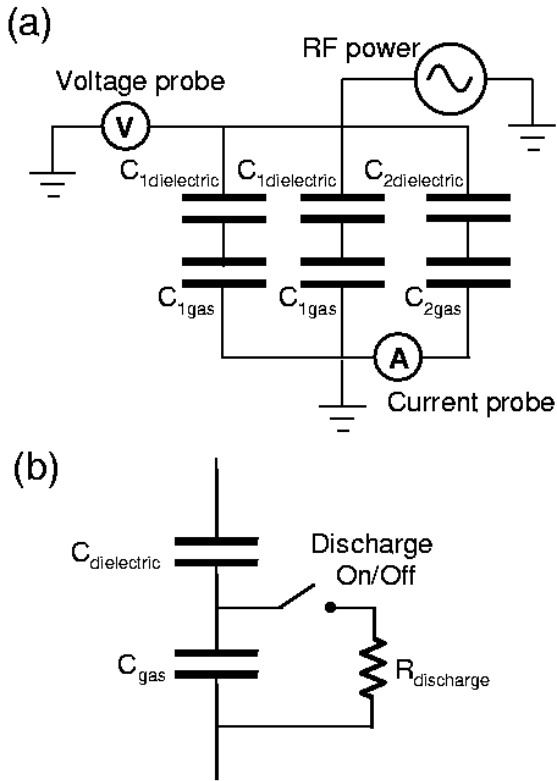


Fig. 2. (a) Equivalent circuit of the discharge system. (b) Equivalent circuit of the bottom discharge gap before and after discharge onset.

훨씬 낮은 값이므로 높은 전압에 의해 과다하게 생성되는 전자들로 인한 아크나 스트리머의 발생을 피할 수 있음을 예상할 수 있다 [3]. 방전이 일어난 이후 방전 유지 전압(sustain voltage)은 약 $170 V_{\text{peak}}$ 였는데 이 값은 전류가 증가하여도 거의 일정하게 유지되었다. I-V 곡선은 전형적인 저압 글로우 방전에서의 특성과 거의 비슷해 보인다 [11]. 방전 전 I-V 곡선의 기울기로부터 얻어진 장치의 전기용량은 32.2 pF 인데, 이것은 순수하게 축전기만으로 구성된 Fig. 2(a)의 등가회로부터 유전체의 크기와 간극 폭을 이용하여 계산한 전기용량값인 30.8 pF 와 거의 같다.

한편 Fig. 3(b)와 (c)에 보면, 방전이 일어나지 않을 때에는 전류와 전압 사이의 위상차가 시스템의 등가회로가 순수하게 축전기로 구성된 회로에서 볼 수 있는 $\pi/2$ 이지만, 플라즈마가 발생한 이후에는 전기저항이 낮은 전도체의 역할을 하는 플라즈마의 특성으로 인하여 위상차가 $\pi/4$ 로 감소하였다. 또한 방전 이후 전압은 감소하고 전류는 증가하였다.

플라즈마가 발생된 상황에서 입력파워와 기체유량을 변화시키면서 플라즈마의 특성변화를 관찰하였다. 입력파워가 200 W 에서 400 W 까지 증가할 때 Fig. 4(a)에서

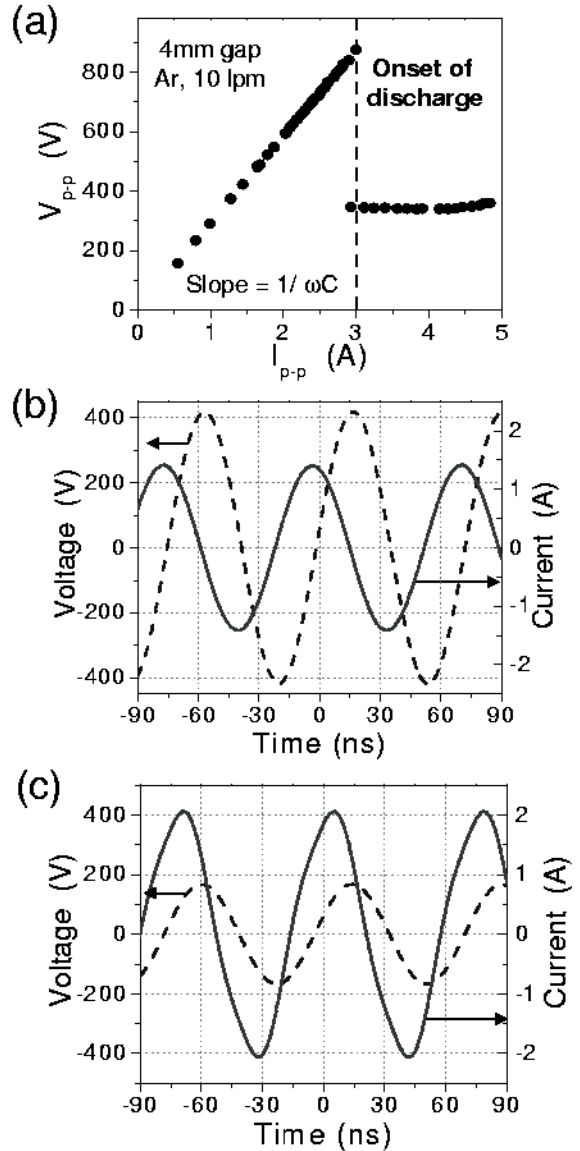


Fig. 3. (a) Measured current (I) versus voltage (V) curve. Oscillogram of I-V (b) before and (c) after the discharge onset.

보듯이 방전 유지전압은 $170 V_{\text{peak}}$ 로 거의 일정하게 유지되는데 반해 하부전극으로 흐르는 전류는 $1.5 A_{\text{peak}}$ 에서 $2.5 A_{\text{peak}}$ 까지 거의 선형적으로 증가하였다. 이것은 입력파워가 증가함에 따라 이온화율이 높아지고 이로 인해 전자밀도가 증가하기 때문이다. 더불어 Fig. 4(b)에서 보듯이, 전압과 전류 사이의 위상차가 입력파워의 증가에 따라 감소하였다. 실제 플라즈마 발생에 소모된 파워 P_d 는 실험으로부터 얻은 I-V 신호로부터 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_d = \frac{1}{T} \int I(t) \cdot V(t) dt,$$

여기서 T 는 rf의 한 주기이며, I와 V는 각각 측정된 전류

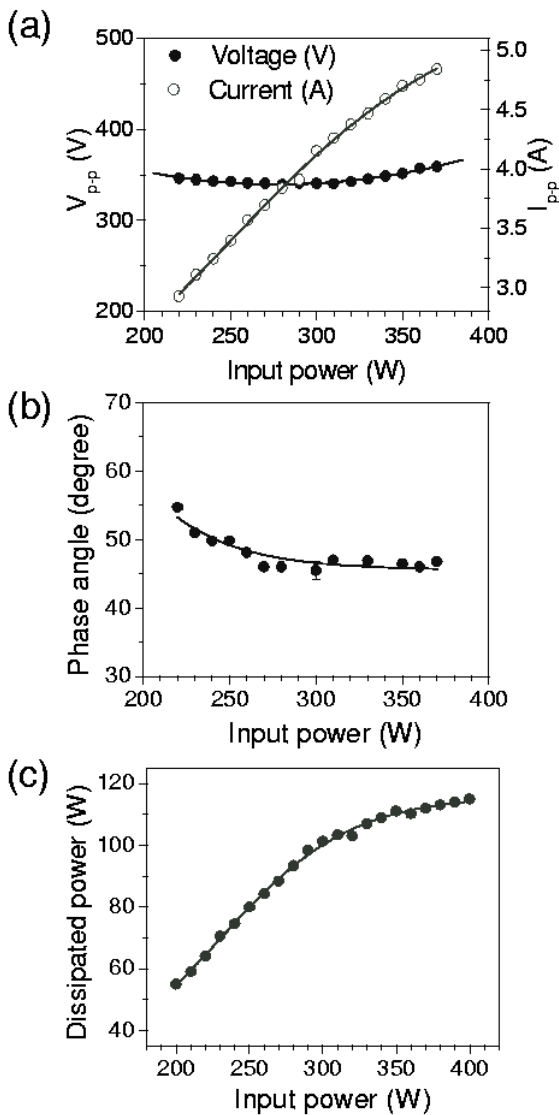


Fig. 4. (a) Discharge voltage and current at various input power levels (and at fixed gas flow rate of 20 lpm). (b) Phase angle difference between voltage and current at various input power levels. (c) Dissipated power in the bottom discharge gap during discharge (at 4 mm gap, 10 lpm).

와 전압을 의미한다. 하부전극 사이에만 걸리는 전압과 전류를 측정할 값을 위 식에 넣어 계산해 보면 하부전극을 통해 플라즈마로 전달되는 파워는 총 입력파워의 약 30% 정도이다 [Fig. 4(c)]. 입력파워는 하부전극 뿐만 아니라 측면전극을 통해서도 플라즈마로 흡수되기 때문에 플라즈마 전체로 흡수되는 파워가 얼마나 되는지 정확히 측정하기 위해서 측면전극 쪽에서 독립적으로 전압과 전류를 측정하여 알아낼 예정이다.

한편, 입력파워를 300 W로 고정시키고 기체유량을 변화시키면서 전류와 전압의 변화를 관찰하였다. Fig. 5(a)에서 보듯이 기체유량이 커질수록 전류의 크기

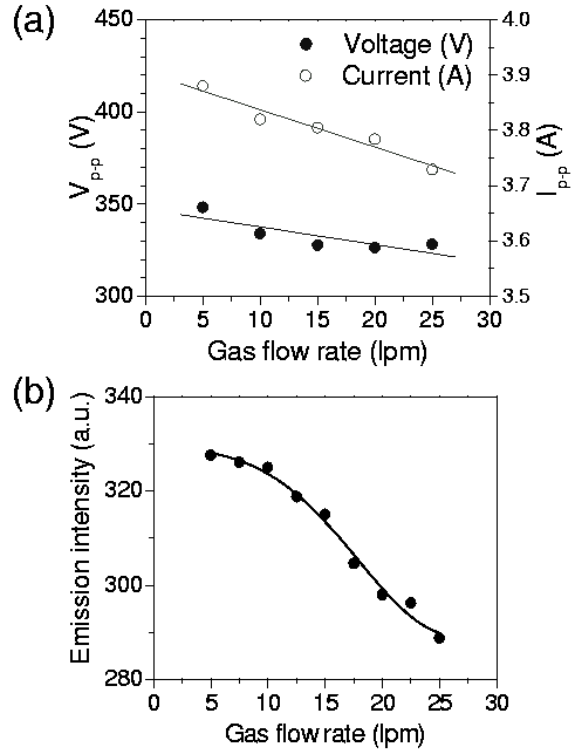


Fig. 5. (a) Discharge voltage and current at various argon flow rates (at fixed input power level of 300 W). (b) Plasma emission intensity at various gas flow rates (at 300 W, x = 10 cm).

가 감소하는데, 측정된 전류는 변위전류와 방전전류의 합이고 변위전류는 방전의 유무에 관계없이 일정하므로 총 전류가 감소한 것은 방전전류가 감소한 것을 의미한다. 기체의 유량이 증가하면 플라즈마의 부피가 증가하므로(Fig. 7) 전자밀도가 감소하여 방전전류가 감소하는 것으로 해석된다. 이러한 현상은 Fig. 5(b)에서 보듯이 기체유량이 증가할수록 플라즈마 방출광의 세기가 줄어드는 현상과도 잘 일치한다. 여기서, 플라즈마의 부피는 플라즈마에서 방출되는 빛의 세기를 광전자증배관을 이용하여 공간적으로 측정하였으며, 상부전극에서 하부전극까지의 높이와 면적의 곱으로 정의하였다. 플라즈마 발생 시 측면사이의 플라즈마 부피는 1 mm × 1 mm × 200 mm로 일정하게 유지되었다.

2. 광학적 특성 진단

Fig. 6(a)는 플라즈마에서 방출되는 스펙트럼을 나타낸 것으로 주입된 아르곤 기체로 인하여 들뜬 중성 아르곤 원자의 스펙트럼 선(Ar I)들이 많이 관찰되었다. 플라즈마가 대기 중에서 발생되기 때문에 OH 분자 스펙트럼

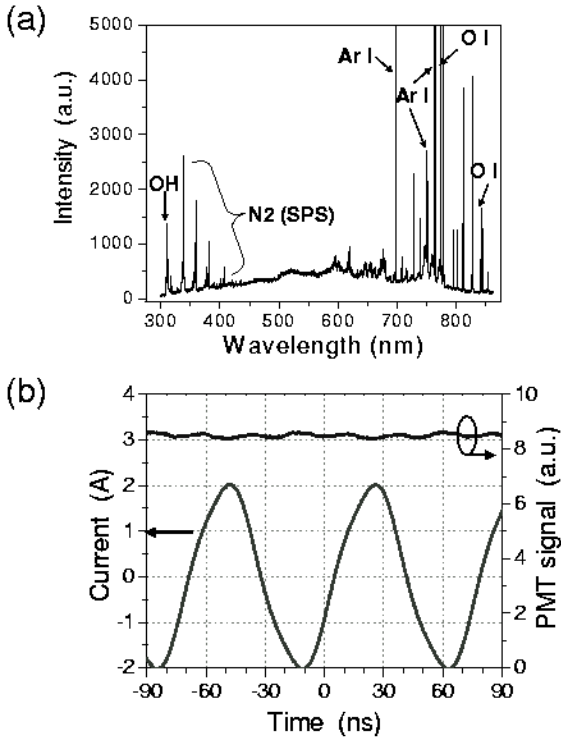


Fig. 6. (a) Plasma emission spectrum, and (b) time evolution of emission intensity and current signal.

과 N₂ 분자 스펙트럼들도 관찰되었는데, OH분자의 회전스펙트럼(rotational spectrum)과 질소분자의 진동스펙트럼(vibrational spectrum)은 각각 플라즈마 기체온도(T_{rot})와 진동온도(T_{vib})를 구하는데 사용되었다 [8-10].

잘 알려져 있듯이 플라즈마로부터 방출되는 빛은 원자, 이온 또는 분자에서 들뜬상태의 전자들이 바닥상태로 전이하면서 방출된다. 들뜬상태인 p준위의 전자밀도 n_p는 일반적으로 아래와 같이 표현된다 [12].

$$n_p \propto \exp\left(-\frac{E_p}{k_B T}\right), \quad (1)$$

여기서 E_p는 들뜬상태의 준위에너지이고, k_B는 볼츠만 상수이며, T는 해당 전이와 관련된 변수로서 온도이다. 따라서 전자들이 들뜬상태(p)에서 바닥상태(q)로 전이되면서 방출되는 빛의 세기(I_{pq})는 다음과 같이 주어진다 [10].

$$I_{pq} = n_p A_{pq} h\nu_{pq} \propto A_{pq} h\nu_{pq} \exp\left(-\frac{E_p}{k_B T}\right) \quad (2)$$

여기서, A_{pq}는 전이확률(transition probability)이고, h는 플랑크상수이며, ν_{pq}는 p → q 전이에 해당하는 광주파수이다. 따라서 원자스펙트럼, 분자회전 또는 분자진동

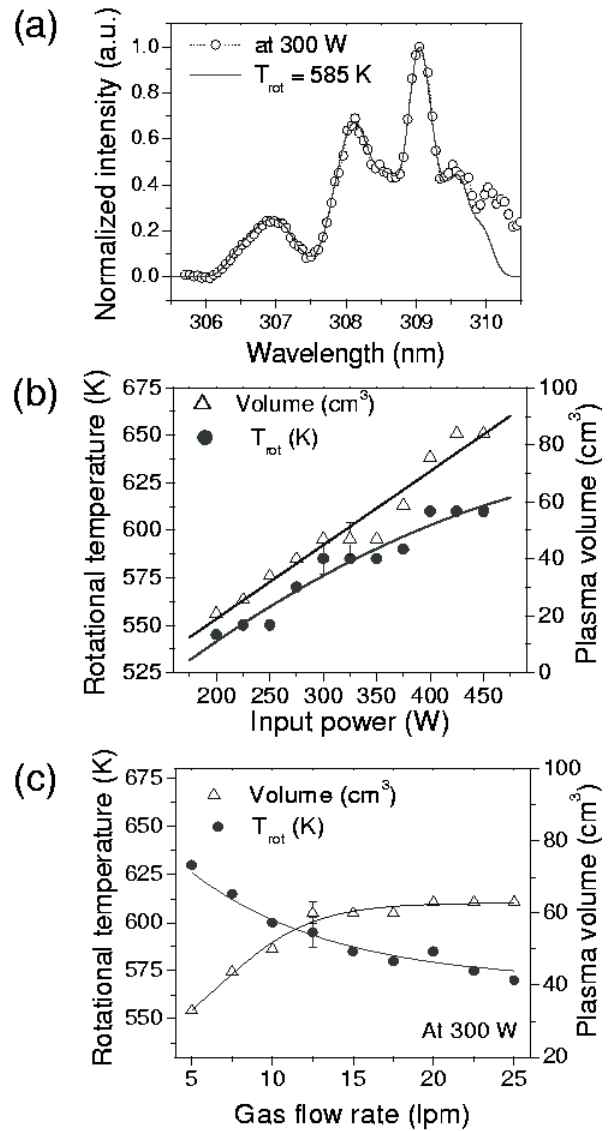


Fig. 7. (a) Comparison of the experimental OH spectrum (○) with the theoretical spectrum (—) for T_{rot} measurement. (b) T_{rot} values for various input power levels at fixed gas flow rate of 20 lpm, and (c) for various argon flow rates at fixed input power of 300 W.

스펙트럼의 세기는 위 식 (2)를 따르며, 이때 각각의 에너지 준위 및 대응되는 상수들과 함께 보다 정확한 식으로 표현될 수 있다. 즉, 분자 회전온도 측정을 위해 분석된 OH 분자회전 스펙트럼의 세기는 다음과 같이 표현된다 [8,10].

$$I = k^4 S \frac{C(J' + J'' + 1)}{Q_r} \exp\left(-\frac{B_v h c J'(J' + 1)}{k_B T_{rot}}\right) \quad (3)$$

여기서 k는 파수이고, S는 떨기세기(oscillator strength)이며, C는 쌍극자 모멘트의 변화와 초기 떨기상태에 해당하는 총 분자의 개수와 관련된 상수이다. 그리고

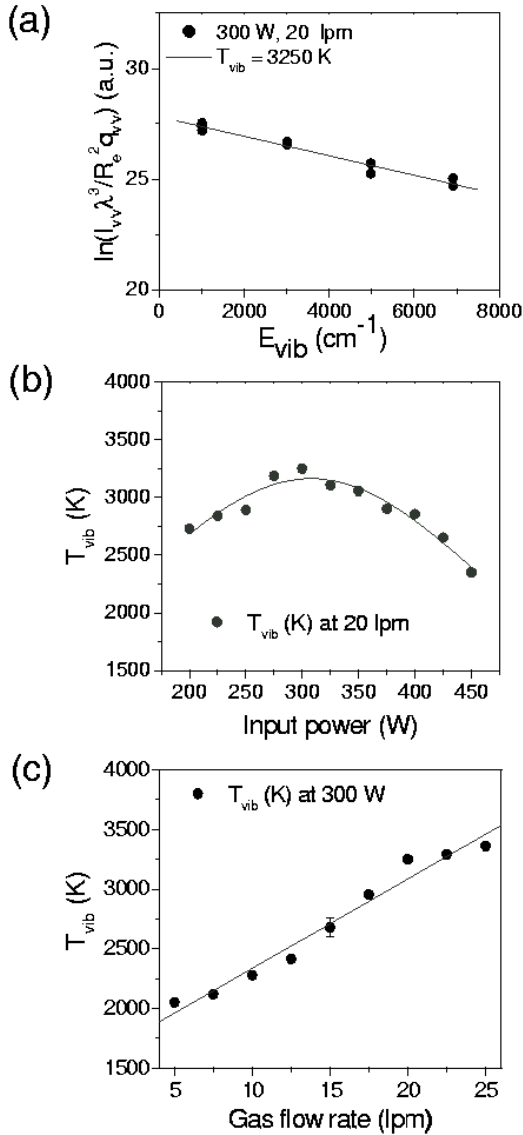


Fig. 8. (a) A Boltzmann plot for T_{vib} measurement. (b) T_{vib} at various input power levels at fixed gas flow rate of 20 lpm, and (c) at various argon flow rates at fixed input power level of 300 W.

Q_r 은 회전분배함수이며, J' 와 J'' 은 에너지준위의 위 준위상태와 아래 준위상태를 나타낸다. B_v 는 떨기양자수(vibrational quantum number)가 v 상태에서의 회전상수이며 T_{rot} 는 회전온도이다. h 와 c 는 각각 플랑크상수와 빛의 속도를 나타낸다. 비슷한 방식으로, 분자 진동 온도 측정에 사용된 분자진동 스펙트럼의 세기는 다음과 같다 [9,10].

$$I_{\nu'\nu} = N_0 R_e^2 \frac{q_{\nu'\nu}}{\lambda^3} \exp\left(-\frac{E_{vib}}{k_B T_{vib}}\right), \quad (4)$$

$$E_{vib} = \omega_e(\nu' + 1/2) - \omega_e \chi_e(\nu' + 1/2)^2, \quad (5)$$

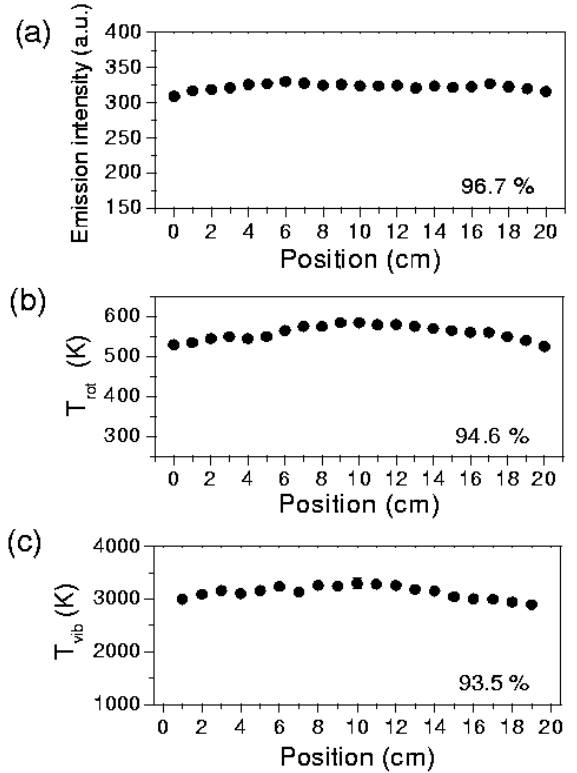


Fig. 9. Spatial distribution of (a) total optical emission intensity, (b) rotational temperature, and (c) vibrational temperature measured in the lengthwise direction. The spatial uniformity is 96.7 %, 94.6 %, and 93.5 %, respectively. At 300 W of input power and 20 lpm of argon flow rate.

위 식에서 $I_{\nu'\nu}$ 는 들뜸 진동상태 ν' 에서 바닥 진동상태 ν 로의 전자전이에 의한 방출강도를 나타내고, N_0 는 총 밀도 수, R_e 는 전자전이 모멘트, $q_{\nu'\nu}$ 는 플랑크-코돈 인 수, λ 는 파장, k_B 는 볼츠만 상수, E_{vib} 는 들뜸상태의 에너지, ω_e 는 진동주파수(cm^{-1}), 그리고 χ_e 는 첫번째 진동 수의 진폭을 나타낸다. 따라서 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 T_{vib} 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{I_{\nu'\nu}\lambda^3}{R_e^2q_{\nu'\nu}}\right) = -1.4388 \times \frac{E_{vib}}{T_{vib}} + constant. \quad (6)$$

식 (6)에서 질소 분자스펙트럼과 관련된 모든 상수들은 이미 잘 알려진 자료에 근거한 적당한 값으로 대체하였다 [10].

Fig. 6(b)는 광전자증배관(PMT)으로 받은 총 방출광 세기와 전류탐침을 이용해 받은 방전전류 신호를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 PMT 신호가 방전전류의 시간에 따른 값에 상관없이 거의 일정하게 나오는 것으로 보아 플라즈마가 교류형태 또는 펄스 형태로 발생하는 것이 아니라 시간에 대해 연속적으로 발생 및 유지된다는 것을 알 수 있었다. 그림에서 PMT

신호 속의 작은 잔물결은 13.56 MHz의 노이즈 때문이다. 발생된 플라즈마의 시각적인 관찰뿐만 아니라 전기적 신호와 광방출 신호 등을 통해 조사해 본 결과 아크나 스트리머 발생의 징후를 전혀 발견할 수 없었다.

입력파워와 기체유량을 변화시키면서, 발생된 플라즈마의 부피와 방출스펙트럼으로부터 구한 회전온도를 Fig. 7에 나타내었다. 이원자 분자의 회전 스펙트럼으로부터 구한 회전온도(T_{rot})는 상압하에서 중성종과의 작은 충돌로 인하여 열평형 상태를 이루기 때문에 회전온도로부터 기체온도를 구할 수 있다 [8]. 따라서 플라즈마의 기체온도 측정을 위해 실험으로부터 얻은 OH 스펙트럼과 이론적으로 구한 합성스펙트럼을 비교한 결과, 300 W, 20 lpm의 조건에서 585 K의 온도를 얻었다 [Fig. 7(a)]. 유량과 입력파워가 각각 20 lpm과 (200 - 450) W의 범위에서, Fig. 7(b)에서처럼 입력파워가 증가함에 따라 회전온도 T_{rot} 이 증가하였다. 또한 입력파워가 증가함에 따라 플라즈마의 부피도 함께 증가하였는데 증가비율이 회전온도의 증가비율보다 컸다. 이것은 이 운전조건 하에서 입력파워가 증가함에 따라 중성 기체입자의 가열 보다는 이온화에 소모되는 파워의 비율이 커지기 때문인 것으로 생각된다. 한편 300 W의 파워에서 아르곤 기체의 유량이 5 lpm에서 25 lpm까지 증가할 때, T_{rot} 은 감소하는 대신 플라즈마 부피는 증가하다 포화되었다 [Fig. 7(c)]. 이것은 기체의 유량이 커짐에 따라 질소보다는 방전이 쉬운 아르곤의 영향이 더 큰 영역에서 발휘되기 때문이고, 기체온도가 감소하는 것은 플라즈마의 부피가 커짐에 따라 입력파워의 밀도가 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

한편 진동온도(T_{vib})는 전자와 무거운 입자들 특히 분자들 간의 에너지 전이에 관한 정보를 제공해 주는데 일반적으로 기체온도와 전자온도 사이에 있으면서 전자온도와 같은 경향을 보인다 [9,10]. T_{vib} 은 측정된 질소분자 방출스펙트럼(Second positive system)과 식 (6)을 이용한 볼츠만도표 분석법으로부터 구하였다.

Fig. 8(a)는 300 W, 20 lpm의 실험조건에서 식 (6)에 의해 구한 진동온도가 3250 K인 것을 보여준다. 한편, 입력파워에 따라 T_{vib} 는 Fig. 8(b)에서와 같이 증가하다가 감소하는데, 300 W 이상에서 감소하는 것은 활발한 이온화에 의한 전자에너지의 손실에 의한 것으로 생각된다. Fig. 7(b)를 보면 이 입력파워 영역에서 플라즈마의 부피가 상대적으로 크게 증가하는 것이 이 주장을 뒷받침해 준다. 한편, 300 W의 파워에서 아르곤의 유량이 5 lpm에서 25 lpm까지 증가할 때 T_{vib} 는 Fig. 8(c)에서와 같이 증가하였다.

발생된 플라즈마를 응용하는 입장에서 보면 플라즈마가 공간적으로 균일한 것은 큰 장점이 된다. 따라서 균일도를 조사하기 위해 플라즈마의 길이방향에 따라 T_{rot} 과 T_{vib} , 그리고 방출광의 세기를 측정해 보았다. Fig. 9(a)에서 보듯이, 주로 Ar I의 밀도에 비례하는 선적분된 총 방출세기를 각 위치 별로 측정하였으며, x-방향을 따라서 균일도가 매우 높은 결과(96.7%)를 얻었다. 여기서 공간 균일도는 max와 min을 각각 최대, 최소값이라 할 때 $1 - (max - min)/(max + min)$ 를 퍼센트로 나타낸 정의를 이용하였다. Fig. 9(b)와 (c)에 나타낸 것처럼, T_{rot} 과 T_{vib} 의 공간적인 분포 역시 각각 94.6%와 93.5%로 매우 균일하게 나타났다. 진동온도의 균일도가 높은 것은 플라즈마의 길이방향에 따라 분자 들뜸과정이 균일하게 일어난다는 것을 보여준다. 또한 실험에 의하면 입력파워와 아르곤의 유량이 바뀌어도 균일도는 거의 일정하게 유지되었다. 이 결과로부터 발생된 플라즈마가 대부분의 처리면적에 대해 열 손상이 별로 없이 표면처리에 매우 유용하게 이용할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 토의 및 결론

대면적 재료처리를 목표로 200 mm × 50 mm의 크기를 가지는 직사각형 모양의 상압 플라즈마를 발생시켰으며, 전기적인 진단과 광학적인 진단을 통해 발생시킨 플라즈마가 전형적인 저압 글로우 방전과 유사한 특성을 보이는 것을 확인하였다. 전기신호와 플라즈마의 방출광을 관찰해 본 결과, 방전이 일어나는 동안 아크나 스트리머의 징후가 전혀 발견되지 않아 이들에 의한 손상을 피해야 하는 공정에 이용할 수 있을 것으로 보인다. 광학진단법으로 측정된 기체온도는 (540 - 610) K 그리고 진동온도는 (2100 - 3300) K였으며, 비교적 낮은 기체온도와 높은 분자들뜸 능력으로 인해 큰 열손상 없이 재료의 표면처리에 발생된 플라즈마를 활용할 수 있음을 알 수 있었다. 플라즈마 변수들은 입력 rf파워나 아르곤 기체의 유량과 같은 운전조건을 변화시킴으로 어느 정도 제어할 수 있었다. 광방출 스펙트럼 세기의 공간적인 측정과 회전온도, 진동온도의 측정을 이용해 플라즈마의 균일도를 얻어보니 93 % 이상이 되어 플라즈마가 처리하는 모든 면적에 걸쳐 재료의 처리능력이 균일할 것임을 예상할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업(No. R01-2000-00254)의 부분적인 지원 하에 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] M. Moisan, J. Hubert, J. Margot, G. Sauvé, and Z. Zakrzewski, *Microwave Discharge: Fundamentals and Applications* ed. Ferreira C M and Moisan M (Plenum, New York, 1992), Chap. 1.
- [2] S. Y. Moon, W. Choe, H. S. Uhm, Y. S. Hwang, and J. J. Choi, *Phys. Plasmas* **9**, 4045 (2002).
- [3] J. Park, I. Henins, H. W. Hermann, and G. S. Selwyn, *J. Appl. Phys.* **89**, 15 (2001).
- [4] F. Massines, A. Rabehi, P. Descomps, R. BenGadri, P. Ségur, and C. Mayoux, *J. Appl. Phys.* **83**, 2950 (1998).
- [5] Y. B. Guo, and F. C. N. Hong, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 337 (2003).
- [6] J. R. Roth, *Industrial Plasma Engineering vol. 2: Applications to nonthermal plasma processing* (IOP Publishing, 2001).
- [7] M. Šimor, J. Ráhel, P. Vojtek, M. Černak, and A. Brablec, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 2716 (2001).
- [8] S. Y. Moon, and W. Choe, *Spectrochim. Acta Part B* **58**, 249 (2003).
- [9] S. D. Popa, *J. Phy. D: Appl. Phys.* **29**, 411 (1996).
- [10] G. Herzberg, *Molecular Spectra and Molecular Structure: 1. Spectra of Diatomic Molecules, 2nd ed.* (D. Van Nostrand Company Inc. 1964).
- [11] H. Conrads, and M. Schmidt, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 441 (2000).
- [12] F. Reif, *Fundamentals of statistical and thermal physics* (McGrawHill, 1985).

Study on the Generation of and the Diagnostics for an Atmospheric Large-Area Glow Plasma

Shin Hyun KANG, Se Youn MOON and Wonho CHOE*

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701

B. K. KANG, S. H. UHM and Y. K. LEE

Plasmart, Daejeon 305-701

(Received 9 October 2003)

A 13.56 MHz radio-frequency source was used to generate an atmospheric glow plasma with a length of 200 mm and a width of 50 mm for the surface treatment of large-area materials. Optical diagnostics of the plasma indicated that the gas temperature and the vibrational temperature were 540 - 610 K and 2400 - 3300 K, respectively, for an input power range of 200 - 450 W. Also, measurement of the emission spectrum intensity showed that the plasma was generated and sustained continuously in time. The electrical current and voltage characteristic curve was almost identical to that of a low-pressure glow discharge. The spatial uniformities of the emission spectrum intensity, the rotational temperature, and the vibrational temperature were measured to be more than 93 % in the lengthwise direction. Finally, We confirmed that the plasma parameters could be controlled to some extent by the gas flow rate and the input power.

PACS numbers: 52.70.-m, 52.70.Ds, 52.70.Kz

Keywords: Atmospheric plasma, Large area plasma, Glow discharge

*E-mail: wchoe@kaist.ac.kr