

대기압 산소 방전에 관한 공간 평균 모델 시뮬레이션

황석원 · 이호준 · 이해준*

부산대학교 전자전기공학과, 부산 609-735

(2011년 5월 28일 받음, 2011년 7월 7일 수정, 2011년 7월 7일 확정)

대기압에서 산소 플라즈마가 생성될 때 생기는 화학종의 밀도와 전자 온도를 정성적으로 분석하기 위하여 전산모사 방법 중 하나인 공간 평균 모델을 개발하였다. 본 논문에서는 플라즈마 바늘(plasma needle) 장치를 이용하여 전산모사를 수행하였다. 생성된 화학종 중, O, O₃, O₂^{*}, O₂⁺ 순서대로 높은 밀도를 가지고, 전자 에너지의 대부분이 산소 분자와의 이온화 과정과 여기화 과정에서 소모가 된다. 입력 파워가 증가할 때 대다수의 화학종의 밀도는 입력 파워가 증가한 비례만큼 증가하고, 산소 가스의 온도가 300 K에서 700 K으로 증가할 때는 오존 생성을 위한 삼체 충돌 현상이 약해져 오존 밀도가 감소한다. 방전 공간의 표면적에 대한 부피 비 또한 플라즈마 밀도와 전자 온도에 영향을 준다.

주제어 : 공간 평균 모델, 산소 플라즈마, 대기압 방전

I. 서 론

대기압에서 플라즈마를 발생시킬 때는 진공 플라즈마에서 요구하는 진공 장비가 필요 없기 때문에 플라즈마 발생 장치가 간단해지는 장점이 있다. 이러한 이점으로 대기압 플라즈마의 이용 범위는 점점 커지고 있는 추세이다. 대표적인 응용 분야에는 금속 표면의 이물질 제거를 위해 필요한 세정 공정이 있다. 기존에 주로 사용하던 습식 방법의 세정은 세정 과정 중에 각종 폐기물과 폐수가 생성되고, 염소계의 물질 사용으로 오존층이 파괴되는 등 친환경적이지 않았다. 하지만 대기압 플라즈마를 이용한 건식 세정 방법은 표면에 남아 있는 오염물질을 플라즈마 내에서 발생하는 산소 원자 활성종(radical)을 이용하여 제거하기 때문에 환경적으로 안전하며, 또한 공기를 이용한 세정은 추가적인 재료비가 들지 않기 때문에 공정 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다 [1,2]. 그리고 상업에서는 진공 장비가 필요하지 않기 때문에 플라즈마 장치를 대면적으로 쉽게 만들 수 있는 장점이 있어, 대면적을 가진 유리 표면의 유기물질 제거와 LCD 패널의 세정작업에도 이용될 수 있다 [3]. 또한 플라즈마 처리를 한 유리 표면은 표면의 거칠도(roughness)가 커지게 되어 소수성 성질을 띠게 되는 장점을 가지고 있다 [4]. 의료 분야에서는 기존 에틸렌 옥사이드(EO)를 이용하여 의료 기기를 살균하는 방식에 더하여 산소 플라

즈마에서 발생하는 오존을 이용하여 의료 기기를 살균할 수 있고 [4], 과산화수소(H₂O₂)와 헬륨 플라즈마를 치아에 함께 사용하면, 과산화수소 만을 사용했을 경우보다 훨씬 뛰어난 미백 효과를 보인다는 것이 보고되었다 [5]. 그리고 저온 대기압 플라즈마를 이용하면 흑색종(melanoma) 세포 사멸과 세포의 자연사(apoptosis)를 유도할 수 있는 가능성이 있다고 한다 [6-8].

본 논문에서는 저온 대기압 플라즈마 중에서 순수 산소 플라즈마 발생 장치에서 생성되는 플라즈마 화학종들의 밀도와 전자 온도를 알기 위해 공간 평균한 모델을 이용하였다 [9-11]. 공간 평균한 모델은 각 화학종의 밀도와 전자 온도를 공간적으로 평균한 값을 사용하기 때문에 각 화학종의 밀도 변화 추이를 정성적으로 관측하고자 할 때 유용한 방법이다. 특히 공간 평균한 모델은 플라즈마에서 발생하는 종의 개수가 많을 때 외부 조건에 따라서 각 화학종의 밀도와 전자 온도가 어떤 영향을 받는지를 알 필요가 있을 때 더욱 유용한 방법이다. 본 논문에서는 바늘(needle) 형상의 전극을 가진 저온 플라즈마 장치를 전산 모사에 적용하였다 [12,13]. 다음 절에서는 전산모사 방법에 대해서 설명하였고 세 번째 절에서는 입력 파워, 가스 온도, 방전 공간의 부피 변화에 따른 전산모사 결과에 대해 언급하였다.

* [전자우편] haejune@pusan.ac.kr

II. 공간 평균 모델 전산모사 방법

플라즈마 바늘(plasma needle) 장치에 산소 기체를 흘려보내면 바늘 틈새 공간은 산소 기체로 채워지게 되고 외부 공기압과 같은 대기압 상태가 된다. 이 때 바늘 틈새 공간에서는 산소 기체뿐만 아니라 미량의 질소 성분 또한 포함 된다. 하지만 질소 함유량(산소 가스 주입 유량에 따라 질소의 성분비가 달라지지만, 대략적으로 0.1% 이하임)이 매우 적기 때문에 본 연구에서는 산소 기체가 100% 있다고 가정하였다. 이 때 사용된 입력 파워, 전극 면적 및 방전공간, 산소 기체의 조건 등은 Table 1에 설명되었다.

1. 공간 평균 모델 방정식 및 화학 반응

플라즈마를 유체 방정식으로 완벽하게 기술하기 위해서는 연속 방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 모두 풀어야 한다. 이 유체 방정식을 성공적으로 적용한 모델로는 PDP (plasma display panel)가 있다. 하지만, 플라즈마 바늘을 이용한 상압방전은 PDP 모델과는 달리 유체 모델을 제한적으로 사용될 수밖에 없는데, 그 이유는 플라즈마 바늘의 전극 간격이 PDP 전극 간격(수십~수백 μm) 보다 대략 10배 이상 커서 전산모사에 필요한 격자수가 증가하기 때문이다. 그리고 방전 때 생기는 화학종의 높은 밀도로 전산 모사 수행의 안정화에 필요한 시간 간격이 작아져야 한다는 문제점이 있다. 하지만, 공간적으로 평균한 모델을 사용하면 공간적인 변화를 고려하지 않아도 되기 때문에, 전자 온도 및 외부 조건 변화에 따른 각 종들의 밀도 변화를 간단하게 예측할 수 있는 장점이 있다. 이를 이용하면 외부 조건 변화에 따라 특정 화학종의 밀도 변화를 정성적으로 파악하는데 도움이 된다.

공간 평균 모델에서 사용하는 방정식에는 각 종들의 (1)

Table 1. Reference conditions of simulation.

Variable	Value
Input power (P_{abs})	1.0 W
Electrode area (S)	1.0 mm^2
Discharge volume (V)	1.0 mm^3
Gas temperature (T_g)	300 K
Gas pressure (P_g)	760 Torr
Gas flow rate (Q_{flow})	1 SLM

연속 방정식과 (2)전자 에너지 방정식이 있다. 이 두 방정식을 수치적으로 동시에 풀면 각 종의 밀도와 전자 에너지를 구할 수 있다.

$$\frac{dn_k}{dt} = S_{\text{bulk},k} - L_{\text{bulk},k} - \left(\frac{S}{V}\right)\Gamma_k - L_{\text{flow}} \quad (1)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{2}{3} \frac{1}{Vn_e} P_{\text{abs}} - P_e$$

$$P_e = \frac{S_{\text{ela}}}{n_e} \frac{3m_e}{m_g} T_e + \sum_j \frac{S_{\text{bulk},e}}{n_e} \left(\frac{2}{3}\epsilon_j + T_e\right) + \sum_j \frac{L_{\text{bulk},e}}{n_e} \left(\frac{2}{3}\epsilon_j - T_e\right) + \left(\frac{2}{3} \frac{T_e}{n_e}\right) \left(\frac{S}{V}\Gamma_k + L_{\text{flow}}\right) \quad (2)$$

식 (1)에서 n_k 는 각 화학종들의 밀도, $S_{\text{bulk},k}$ 와 $L_{\text{bulk},k}$ 는 플라즈마 방전 공간 내에서 단위 시간당 생성 또는 소멸되는 각 화학종의 밀도변화율이고 S는 방전 공간의 표면적, V는 방전 공간의 부피, Γ_k 는 각 화학종이 표면에 입사하는 유량(flux)으로 입자들이 맥스웰 분포를 가진다고 가정하면 $\Gamma_k = n_k v_k / 4$ 로 평균 열속도 v_k 의 함수로 표현할 수 있다. 이 때 열 속도는 $v_k = (8k_B T_k / \pi m_k)^{0.5}$ 로 표현된다. k_B 는 볼츠만 상수, T_k , m_k 는 각 화학종의 온도와 질량이다. 여기서 온도 T_k 는 산소 온도 T_g 와 같다고 가정하였다. L_{flow} 는 산소 가스 흐름 때문에 각 화학종이 단위 시간당 방전공간 외부로 빠져나가는 양을 의미하는 것으로 각 화학종의 밀도 대 산소 가스의 비율로 정해진다고 가정하였다. 곧, $L_{\text{flow}} = n_k Q_{\text{flow}} / (n_g V)$ 로 표현되고, 이 때 Q_{flow} 는 산소 가스의 유량이고 n_g 는 산소 기체의 밀도이다. 식 (2)에서 T_e 는 전자의 온도이고, P_{abs} 는 입력파워로 모든 입력파워가 전자에 흡수된다고 가정하였다. P_e 의 첫 번째 항은 전자와 산소 분자간의 탄성 충돌 때, 두 번째 항은 화학반응으로 전자가 생성될 때, 세 번째 항은 화학반응으로 전자가 소멸될 때 각각 손실되는 전자에너지이다. S_{ela} 는 전자와 산소분자간의 탄성 충돌율이고, m_e 와 m_g 는 각각 전자의 질량과 산소 분자의 질량이다. 이 때 ϵ_j 는 각 화학 반응에 필요한 전자 에너지로, Table 2에서 전자가 반응물질(reactants)에 참여하지 않는 R16, R17, R18 화학 반응인 경우에는 ϵ_j 은 0이 된다. 네 번째 항은 각각 전자가 표면에 충돌하여 소멸하거나 산소 가스 흐름에 따라 외부로 빠져나갈 때 생기는 손실 에너지이다. 모든 입자들은 표면에 충돌하면 100% 소멸된다고 가정하였고, 표면과 이온 또는 중성 입자의 충돌에서 생

Table 2. Chemical reactions of oxygen gas and rate constants.

	Reaction	Rate coefficient (cm ³ /s)	Electron loss energy (eV)
R0	e+O ₂ → O ₂ +e	4.7E-8T _e ^{0.5}	3T _e (m _e /M)
R1	e+O ₂ → O ₂ *+e	1.7E-9exp (-3.1/T _e)	0.977
R2	e+O ₂ → O ₂ +e	5.6E-9exp (-2.2/T _e)	-0.977
R3	e+O ₂ → O+O*+e	5.0E-8exp (-8.4/T _e)	7.09
R4	e+O → O*+e	4.2E-9exp (-2.25/T _e)	1.97
R5	e+O* → O+e	8E-9	-1.97
R6	e+O* → O ⁺ +2e	9.0E-9T _e ^{0.7} exp (-11.6/T _e)	11.64
R7	e+O ₂ → O ⁻ +O	8.8E-11exp (-4.4/T _e)	3.657
R8	e+O ₂ → 2O +e	4.2E-9exp (-5.6/T _e)	5.12
R9	e+O ₂ → O ₂ ⁺ +2e	9.0E-10T _e ^{0.5} exp (-12.6/T _e)	12.14
R10	e+O ⁻ → O+2e	2.0E-7exp (-5.5/T _e)	-1.463
R11	e+O ₂ ⁺ → 2O	2.2E-8T _e ^{-0.5}	-7.02
R12	e+O ₂ → O ⁻ +O ⁺ +e	7.1E-11T _e ^{0.5} exp (-17/T _e)	17.267
R13	e+O ₂ → O+O ⁺ +2e	5.3E-10T _e ^{0.9} exp (-20/T _e)	18.73
R14	e+O → O ⁺ +2e	9.0E-9T _e ^{0.7} exp (-13.6/T _e)	13.61
R15	e+O ₃ → O ₂ ⁻ +O	1E-9	0.61
R16	O ⁻ +O ₂ → O ₃ +e	5E-15	0.413
R17	O ⁻ +O ₂ * → O ₃ +e	3E-10	-0.564
R18	O ⁻ +O → O ₂ +e	5E-10	-3.657
R19	O ⁻ +O ₂ ⁺ → O+O ₂	2E-7 (200/T _g) ^{0.5}	
R20	O ⁻ +O ₂ ⁺ → 3O	1E-7	
R21	O ⁻ +O ⁺ → 2O	2E-7 (200/T _g) ^{0.5}	
R22	O ⁺ +O ₂ → O+O ₂ ⁺	2E-11 (300/T _g) ^{0.5}	
R23	O ₂ * + O ₂ → 2O ₂	2.2E-18 (T _g /300) ^{0.8}	
R24	O ₂ *+O → O+O ₂	7E-16	
R25	O*+O → 2O	8E-12	
R26	O*+O ₂ → O+O ₂	7E-12exp (67/T _g)	
R27	O*+ O ₂ → O+O ₂ *	1E-12	
R28	O ⁻ +O ₂ * → O ₂ ⁻ +O	1E-10	
R29	O ₃ +O ₂ → 2O ₂ +O	7.3E-10exp (-11400/T _g)	
R30	O ₃ +O → 2O ₂	1.8E-11exp (-2300/T _g)	
R31	2O+O ₂ → 2O ₂	2.5E-31T _g ^{-0.63}	
R32	O+2O ₂ → O ₃ +O ₂	6.9E-34 (300/T _g) ^{1.25}	
R33	O ₂ *+O ₃ → 2O ₂ +O	6.0E-11exp (-2853/T _g)	

기는 2차 전자 방출로 생기는 효과는 미미하여 본 논문에서는 무시하였다. 그리고 플라즈마 내 입자는 외부에서 공급되는 산소 기체의 흐름과 함께 같이 빠져나가지만, 다음 절의 결과에서 알 수 있듯이 흐름 속도가 입자의 열속도에 비해 아주 작아서 그 효과는 미미하였다. 기준이 되는 전산 모사 조건을 Table 1에 나열하였다. 여기서 사용한 방전 공간과 전극 면적은 플라즈마 바늘 장치를 [13] 참고하였다.

Table 2에서는 전산모사에서 사용한 산소 화학 반응, 반응 상수, 화학 반응에 필요한 전자 에너지를 나열하였다.

III. 전산모사 결과 및 분석

전자가 1 W (시스템의 부피가 1.0 mm³)이므로 power

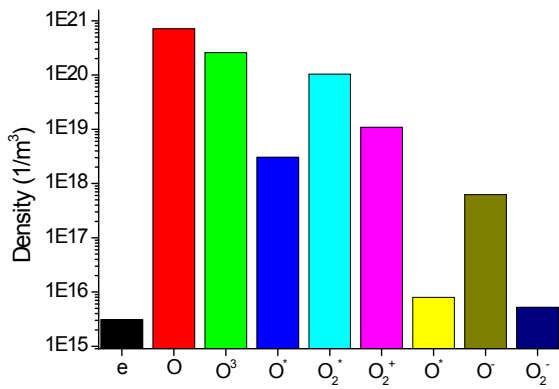


Figure 1. Density of species in plasma.

density는 10^3 W/cm^3 로 상당히 큰 값을 가진다. 따라서 전자 온도가 높음의 일정한 파워를 흡수하고 있을 때 플라즈마 내의 각 종들의 밀도를 Fig. 1에 나타냈다. 이 결과에서 전자 온도는 5.1 eV으로 일반적인 CCP (capacitively coupled plasma) 또는 ICP (inductively coupled plasma) 아르곤(Ar) 방전에서의 전자 온도(1 ~ 2 eV)보다 높게 나오지만, He+H₂O 혼합 가스를 공간 평균한 모델의 결과와 비슷한 것을 알 수 있다 [11]. 전자 온도는 3.3절 결과에서 볼 수 있듯이 방전 공간 크기에 따라 달라질 수 있다. Fig. 1을 보면, 산소 원자(O)가 가장 큰 밀도를 가지고 다음으로 오존(O₃), 산소 준안정 분자(O₂^{*}), 산소 양이온(O₂⁺) 순으로 밀도가 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2(a)는 각 화학 반응이 전체 화학 반응에서 차지하는 비율을 나타내고 있다. 이 그림에서 보듯이 전자와 산소 분자(O₂)간의 탄성 충돌 반응이 전체 화학 반응의 80%를 차지하는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 상압에서의 산소 기체 밀도는 대략 $2.45 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 에 이르고, 전자의 평균 온도는 수 eV로 작기 때문에 산소 분자를 이온화, 여기, 또는 해리시키는 반응보다 산소 분자와의 탄성 충돌 반응이 우세하기 때문이다. 다음으로 많은 화학 반응은 전자가 산소분자를 산소 원자(O)와 산소 준안정 원자(O^{*})로 해리시키는 반응(R3)이다. 이 화학 반응으로 인해 산소 원자가 가장 많이 생성되고, 산소 원자가 생성되는 비율만큼 산소 준안정 원자 또한 생성이 된다. 또한 산소 원자는 산소 분자의 여기 반응(R8)으로도 생성이 된다. 반면, 산소 준안정 원자는 해리 반응(R3)으로 생성이 많아졌지만, 산소 분자와의 소멸 반응(R26, R27)으로 인해 산소 원자만큼 남아 있지 못하고, 밀도가 $3.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 로 낮아지게 된다. Fig. 2(a)에

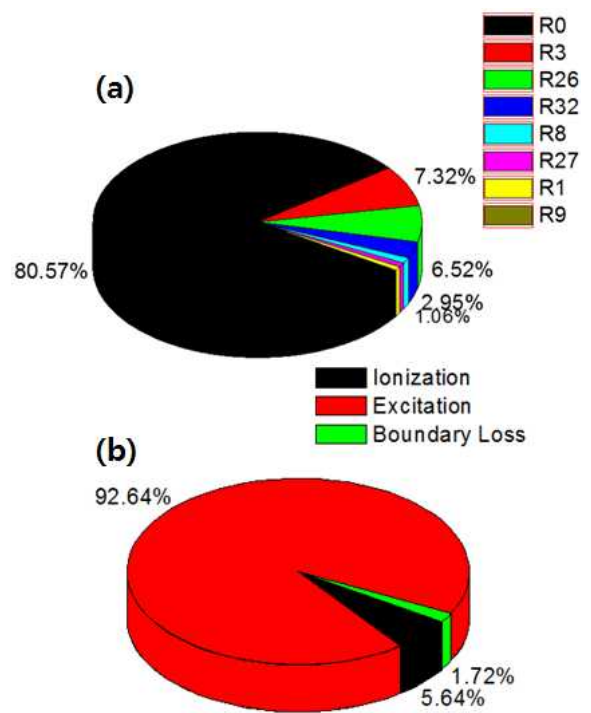


Figure 2. (a) Ratio of chemical reactions, (b) ratio of electron energy loss.

서 보듯이 오존은 주로 산소와 산소분자 간의 삼중충돌 반응(R32)으로 생성이 되고, 소멸 반응(R15, R29, R30, R33)으로 사라진다. 하지만, 소멸 반응은 생성 반응에 비해 그 크기가 10^4 만큼 낮기 때문에, 오존의 밀도는 $2.58 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 로 높게 유지된다. 산소 준안정 분자는 전자충돌로 인한 산소분자의 여기 반응(R1)과 산소 준안정 원자의 전자 에너지 전달 반응(R27)으로 생성이 되고 주로 O⁻와의 충돌반응(R17)으로 소멸된다. O₃나 O₂^{*}와 같이 생성 반응의 크기에 비해 소멸 반응 크기가 상대적으로 작은 화학종의 경우에는 전극 표면에서 충돌하거나 외부 공간으로 빠져나가는 현상으로 인해 소멸한다. Fig. 2(b)는 외부에서 에너지를 얻은 전자가 플라즈마 내에서 충돌하거나 표면으로 빠져나갈 때 생기는 에너지 손실률을 나타낸 것이다. 앞서 Fig. 2(a)에서 설명했듯이 전자와 산소 분자의 탄성 반응이 대부분의 충돌반응을 차지하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 탄성 충돌로 전자 에너지가 산소 분자로 옮겨지는 비율은 전자와 산소 분자간의 질량 차이로 인해 극미량의 전자 에너지만 산소 분자로 옮겨간다. 대신에 전자는 자신이 갖고 있는 에너지의 92%를 산소 분자의 여기와 해리 반응에 소모를 한다. 다음으로는 산소 분자의 이온화 반응으로

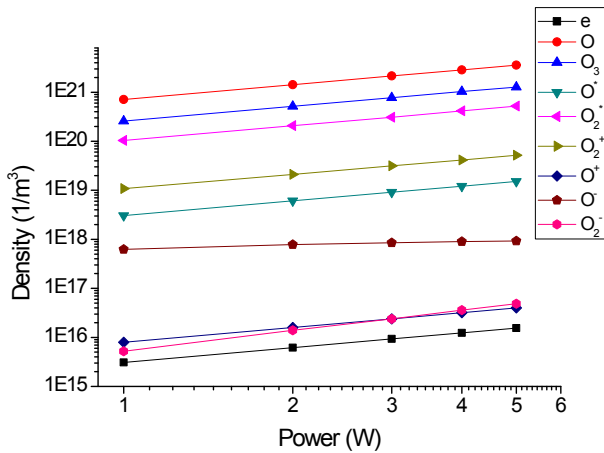


Figure 3. Plasma density with input power.

전자 에너지가 소모된다. 전자가 표면으로 빠져나가면서 에너지를 잃는 비율은 1.72%인데, 그 중에서 산소 기체 흐름 때문에 방전공간에서 빠져나가는 전자 에너지의 비는 극히 낮다. 그 이유는, 유체의 속도에 의한 이동시간에 비해 방전이 일어나는 시간이 짧고, 전자의 속도가 기체 유량 속도에 비해 1,000배 이상 빠르기 때문에 산소 기체 흐름에 따라 빠져나가는 양이 작기 때문이다.

1. 입력 파워 변화에 따른 변화

Fig. 3은 전자의 에너지 흡수가 증가할 때 플라즈마 밀도 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3이 보여주듯이 전자가 흡수하는 에너지가 선형적으로 증가하면, 전자의 밀도 또한 그 증가율만큼 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 곧, P_{abs} 가 1 W에서 5 W로 5배 증가하면 전자의 밀도도 대략 5배 증가한다. 하지만, 전자의 온도는 일정하게 유지되는데, 이는 파워가 늘어난 만큼 전자의 밀도도 동일 배수로 늘어나서 전자 온도 변화에 영향을 주지 못하기 때문이다. 그리고 Fig. 2(a)에 나타난 화학 반응식 중 산소 기체와 전자와의 반응(R1, R3, R8, R9)에서는 산소 기체가 일정하므로, 이 반응의 크기는 오로지 전자의 밀도 변화만큼 증가하게 된다. 곧, 이 반응과 관련된 O, O*, O₂*, O₂⁺ 종들의 밀도가 전자 밀도가 늘어난 배수만큼 증가하게 된다. 그 외 다른 나머지 반응들로 인해 O³와 O⁺의 밀도도 그 배수만큼 증가한다. 하지만, O⁻는 P_{abs} 가 5배 증가했을 때 대략 1.48 배만큼만 증가하는데, 이는 O⁻의 생성 반응(R7, R12)의 합과 소멸반응(R18, R19, R20)의 합 어느 한 쪽도 우세한 반

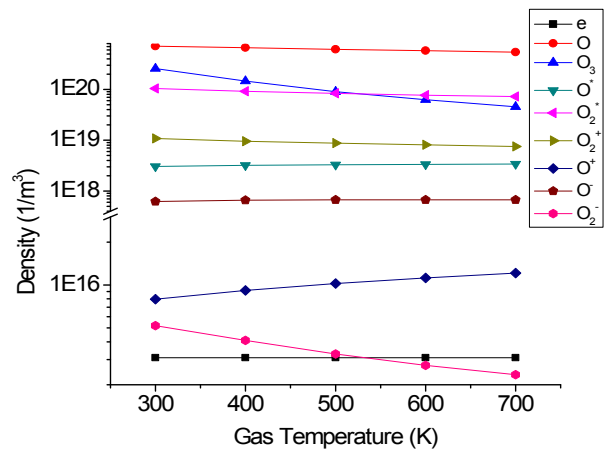


Figure 4. Plasma density with gas temperature.

응을 보이지 않기 때문이다. O₂⁻의 밀도는 9.48배로 대략 10배 이상 증가하였는데, 이는 O₂⁻ 생성 반응(R15, R28) 모두 크기가 5배 이상 증가하였기 때문이다.

2. 기체 온도 변화에 따른 변화

Fig. 4는 산소 기체 온도가 300 K에서 700 K까지 증가할 때의 플라즈마 밀도 변화를 나타낸 것이다. 대부분의 종들에서 밀도가 감소하는 경향을 보이고, 특히 오존의 밀도 감소가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 이는 기체 온도가 증가할수록 삼중충돌 반응(R32)이 약해져 O₃의 밀도가 감소하고, 따라서 O₃와의 반응으로 생성되는 다른 종의 밀도도 같이 감소하기 때문이다. 전자의 온도는 산소 기체의 온도가 증가할수록 조금씩 증가하는 경향을 보이지만 그 증가 크기는 1% 이내로 밀도변화에 큰 영향을 주지 않는다.

3. 표면적에 대한 부피 비 변화에 따른 변화

표면적에 대한 부피 비(v_s) 또한 방전 특성에 큰 영향을 미치는데, 입력 파워 고정 유무에 따라서 결과가 약간 달라진다. 입력 파워를 일정하게 유지하고 부피만을 증가시킨 경우(A)와 입력 파워 대비 부피를 일정하게 유지한 채로 부피를 증가 시킨 경우(B)에 대해 조사하였다. Fig. 5와 6은 A와 B 경우에 플라즈마 밀도와 전자 온도를 각각 나타낸 것이다. 두 경우 모두 전자 온도는 방전 공간 부피가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 앞서 3.1절에서 입력 파워는 증가하였지만, 전자 온도는 거의 변화가 없었던 것으

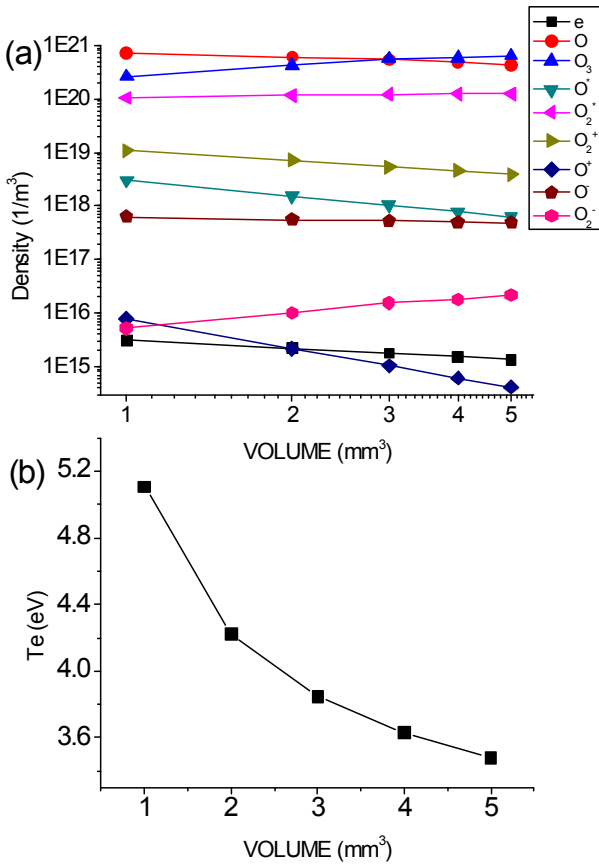


Figure 5. (a) Plasma density and (b) electron temperature with the fixed power of 1 W.

로 보아 전자 온도는 입력 파워의 크기보다는 표면에 대한 부피비에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. A의 경우에는 증가된 부피만큼 플라즈마 내 전자의 총 입자 개수도 늘어나지만, 입력 파워가 일정하므로, 개개의 전자에 분배되는 에너지는 감소하게 되어 전자 온도는 감소한다. 따라서 이온화율이 떨어지게 되어 전자의 밀도는 감소한다. B의 경우에는 v_s 가 증가하면 플라즈마 공간에서 생성되는 전자의 개수 증가에 비해 표면에 빠져나가는 전자의 손실이 감소하므로, Fig. 6(a)에서 보듯이 전자의 밀도는 증가하게 되고, 전자 밀도 증가의 반대 작용으로 전자의 에너지는 감소한다.

전자 온도가 감소하면 산소 분자와의 충돌 단면적이 작아지기 때문에 전자와의 충돌로 인해 발생하는 화학 반응의 반응상수는 감소한다. 곧, 전자 충돌로 인해서 발생하는 산소 분자의 해리, 이온화, 여기 반응의 크기가 감소하고, 이러한 반응에서 생겨나는 전자, O, O₂*, O*, O₂⁺의 밀도

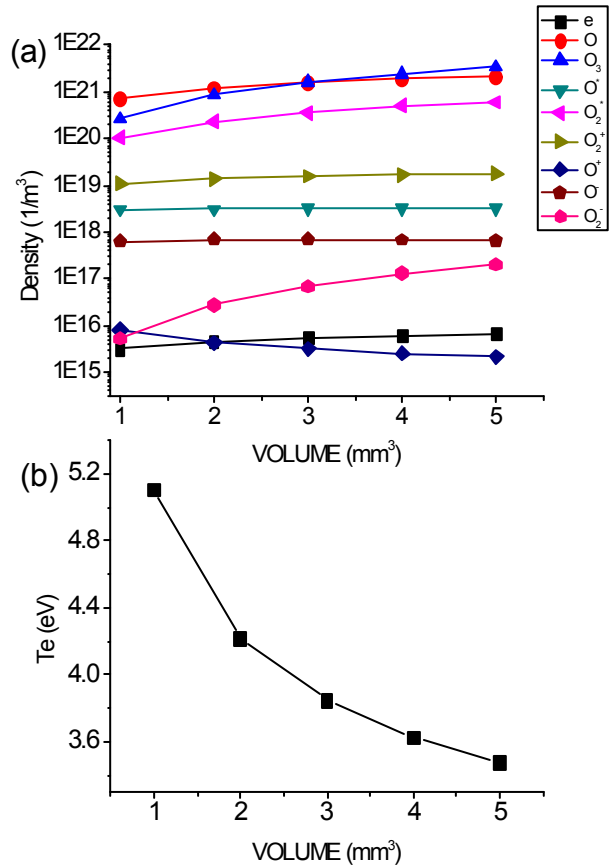


Figure 6. (a) Plasma density and (b) electron temperature with the fixed ratio of power to volume, 1 W/mm³.

는 감소하게 된다. 하지만, O₃, O₂⁻ 경우에는 전자밀도의 증감 유무에 상관없이 v_s 가 증가할수록 밀도가 증가한다. 이는 표면에 빠져나가는 비율의 감소가 생성 비율의 감소보다 더 크기 때문이다. A, B 두 경우 모두 방전 부피 3 mm³부터 O₃의 밀도가 O의 밀도보다 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이를 실험에 응용하여 O와 O₃의 밀도를 측정, 비교해보면 해당되는 전자의 온도를 간접적으로 유추할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

대기압 방전 플라즈마에서 플라즈마 내의 종의 밀도와 전자 온도를 예측하는 것은 중요하다. 하지만, 실험적으로는 각 종들의 밀도와 전자 온도를 정확하게 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 이를 위해 공간 평균한

모델을 개발하였다. 이 모델을 이용하면 플라즈마가 생성하는 각 종의 밀도와 전자 온도가 외부 조건 변화에 따라 변하는 경향을 정성적으로 파악할 수 있다. 사용한 전산모사 모델은 제트 타입의 플라즈마 바늘 장치이다. 전산모사 결과, O, O₃, O₂^{*}, O₂⁺ 순서대로 높은 밀도를 가지며, 전자 에너지의 대부분이 산소 분자의 여기와 해리 반응에 소모되었다. 그리고 입력 파워가 모두 전자 에너지 증가에 쓰인다고 가정하였을 때, 입력 파워가 증가한 비율만큼 플라즈마 밀도도 상승하였다. 반대로 가스 온도가 높아질수록 산소 분자와 산소 원자 간의 삼중 충돌 반응이 약해져 오존의 밀도가 감소하는 경향을 보였다. 표면적에 대한 방전 공간의 부피가 증가할수록 전자 에너지는 감소하였고, 방전공간의 부피가 일정한 값(3 mm³) 이상일 때는 O보다 O₃의 밀도가 더 커지는 역전 현상이 생겼다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임 (No. 20104010100670).

참고문헌

- [1] G. -T. Lim, K. H. Kim, K. S. Kim, H. J. Li, S. J. Song, H. Shon, and D. L. Cho, *J. Korean Ind. Eng. Chem.* **19**, 640-644 (2008).
- [2] E. J. Ri, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.* **42**, 208-215 (2009).
- [3] G. -S. Kim, *J. IEEK.* **45**, 44-51 (2008).
- [4] H. S. Uhm, *J. Korean Vacuum Soc.* **15**, 117-138 (2006).
- [5] H. W. Lee, G. J. Kim, J. M. Kim, J. K. Park, J. K. Lee, and G. C. Kim, *J. Ethnopharmacol.* **35**, 587-591 (2009).
- [6] C. -H. Shon, G. -C. Kim, and H. J. Lee, *Trans. KIEE* **56**, 1972-1977 (2007).
- [7] H. J. Yoon, C. -H. Shon, G. -C. Kim, and H. J. Lee, *Trans. KIEE* **57**, 2249-2254, (2008).
- [8] X. Yan, F. Zou, S. Zhao, X. Lu, G. He, Z. Xiong, Q. Xiong, Q. Zhao, P. Deng, J. Huang, and G. Yang, *IEEE Trans. on Plasma Science* **38**, 2451 (2010).
- [9] W. -G. Lee, D. -C. Kwon, and N. -S. Yoon, *J. Korean Vacuum Soc.* **18**, 426-434, (2009).
- [10] G. Y Park, H. W Lee, G. C. Kim and J. K. Lee, *Plasma Process. Poly.* **5**, 569-576 (2008).
- [11] D. X. Liu, P. Bruggeman, F. Iza, M. Z. Rong, and M. G. Kong, *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 025018 (2010).
- [12] J. -Y. Choi, H. -J. Lee, D.-H. Kim, H. J. Lee, and C. -H. Park, *Trans. KIEE* **56**, 1802 (2007).
- [13] C. -S. Ha, J. -Y. Choi, D. -H. Kim, C. -H. Park, H. -J. Lee, and H. -J. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 061502 (2009).

Global Modeling of Atmospheric Pressure Oxygen Plasmas

Seok Won Hwang, Ho-Jun Lee, and Hae June Lee*

Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735

(Received May 28, 2011, Revised July 7, 2011, Accepted July 7, 2011)

A zero-dimensional global model simulator for atmospheric pressure oxygen plasmas has been developed. The simulation model considers the configurations similar to that of plasma needle device. The simulation results show that those species of O, O₃, O₂^{*} and O₂⁺ have the highest density in sequence. Electrons dissipate most of their energy through the collisions with oxygen molecules. If the input power increases, the density of most species also increases as much as three-body collision for the creation of ozone is weakened and hence the density of ozone decreases. The body to volume ratio also affects the plasma density.

Keywords : Global model, Oxygen plasma, Atmosphere pressure plasma

* [E-mail] haejune@pusan.ac.kr