

Analysis on DC Glow Discharge Properties of Ar Gas at the Atmosphere Pressure

소순열[†]
(Soon-Youl So)

Abstract - Atmosphere Plasma of Gas Discharge (APGD) has been used in plasma sources for material processing such as etching, deposition, surface modification and so on due to having no thermal damages. The APGD researches on AC source with high frequency have been mainly processed. However, DC APGD studies have been not. In order to understand APGD further, it is necessary to study on fundamental properties of DC APGD.

In this paper, we developed a one-dimensional fluid simulation model with capacitively coupled plasma chamber at the atmosphere pressure (760 [Torr]). Nine kinds of Ar discharge particles such as electron (e), positive ions (Ar^+ , Ar_2^+) and neutral particles (Ar_m^* , Ar_r^* , Ar_h^* , $Ar_2^*(1)$, $Ar_2^*(3)$ and Ar gas) are considered in the computation. The simulation was worked at the current range of 1~15 [mA]. The characteristics of voltage-current were calculated and the structure of Joule heating were discussed. The spatial distributions of Ar DC APGD and the mechanism of power consumption were also investigated.

Key Words : Atmosphere Pressure, DC Glow Discharge, Fluid Model, Plasma Simulation, Argon Discharge

1. 서론

대기압 글로우 방전은 화학적으로 반응이 매우 높게 형성되며 저압 방전에 요구되는 진공장치 등이 불필요하고, 방전 전극의 경방향으로의 균일한 분포가 유지되는 특성으로부터 대면적으로 균일한 처리 공정이 가능하다는 장점을 가지고 있다[1]-[3]. 이에 따라 플라스틱재료의 표면처리 및 액정기판의 세정과 의료용 기구재의 저온살균, 카본 나노튜브 제조 등 넓은 분야에 응용되고 있다[4][5].

지난 몇 년 동안, 대기압 글로우 방전 특성연구는 다양한 형태의 방전구조와 가스 (He, N₂, O₂ 등)에 대한 실험분석과 시뮬레이션 기법을 이용한 수치해석 등으로 수행되어 왔다[6]-[8]. 지금까지 보고된 연구는 고주파 전원의 교류전압을 이용한 방전 특성분석이 주를 이뤄 왔으며[8][9], 직류전원을 이용한 연구결과는 He 가스 이외에 보고되고 있지 않다[10][11]. 그러나 대기압 글로우 방전의 제 특성을 해석하고 제어하기 위해서는 여러 조건하에서의 기초특성을 미시적 및 공간적으로 분석하는 연구가 매우 필요하다.

본 연구에서는 재료공정과 의료용에 많이 응용되는 Ar 가스의 대기압 글로우 방전 특성을 분석하고자 하며, 대기압용 1차원 유체 모델을 개발하여 시뮬레이션하였다. 하전입자 밀도, 전자 온도, 방전가스 온도 및 전계강도 등의 공간적 분포를 분석하고, 전압-전류 특성과 방전가스의 가열구

조를 검토하였다. 또한, 각 하전입자별 전력소비의 구조를 조사하였다. 본 시뮬레이션에서는 3종의 전자와 이온입자 (e, Ar^+ , Ar_2^+), 6종의 중성 입자(Ar_m^* , Ar_r^* , Ar_h^* , $Ar_2^*(1)$, $Ar_2^*(3)$ 및 Ar buffer gas)를 고려하여 계산하였다.

2. 본론

2.1. 기본 방정식

본 연구에서는 1차원 유체 모델을 개발하여 방전 공간내에서 Ar 가스 대기압 글로우 방전 (APGD; Atmosphere Plasma of Gas Discharge) 특성을 분석하였다. 유체 모델은 각 하전입자의 연속방정식, 전자 에너지 및 버퍼 가스 에너지 보존 방정식과 포아송 방정식 등을 연립하여 해석한다 [12]-[14]. 수치적으로 안정된 정상상태의 결과를 통하여 방전구조를 분석한다. 각 하전입자의 연속방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} = -\frac{\partial \Gamma_j}{\partial x} + S_j \quad (1)$$

$$\Gamma_j = W_j N_j - D_j \frac{\partial N_j}{\partial x} \quad (2)$$

위식에서 j는 본 연구에서 고려한 3종의 전자와 이온입자 (e, Ar^+ , Ar_2^+), 6종의 중성 입자(Ar_m^* , Ar_r^* , Ar_h^* , $Ar_2^*(1)$, $Ar_2^*(3)$ 및 Ar buffer gas)를 나타낸다. N_j 는 각 하전입자의 밀도, Γ_j 는 각 입자의 유속 (flux)을 표시한다. S_j 는 전자의 비탄성 충돌 및 각 입자간의 화학결합에 의한 발생과 소멸을 나타낸다. 또한 W_j 는 j입자의 이동속도, D_j 는 확산 계수를 표시한다.

[†] 교신저자, 정회원 : Mokpo대학교 전기공학과 조교수 · 공박
E-mail: syso@mokpo.ac.kr

접수일자 : 2010년 10월 5일

최종완료 : 2010년 11월 23일

양 전극표면에서의 경계조건으로서 정이온 (Ar^+ , Ar_2^+)들은 전극에 충돌하여 2차 전자를 방출하는 것으로 고려하였으며, 그 방출계수는 0.1로 설정하였다. 방출된 2차 전자의 온도는 0.5 [eV]로 설정하였다. 방전공간 내에서 전극방향으로 입사하는 전자속은 전자 열속도의 함수로 결정되어지고, 전극 면으로 향한 전자는 전부 흡수되는 것으로 가정하였다. 평균 전자 에너지 및 전계의 함수로 구해지는 각 파라메타를 결정하기 위해서 전자 에너지 보존식과 포아송 방정식을 해석한다.

$$\frac{\partial(\epsilon \cdot N_e)}{\partial t} + \frac{\partial q_e}{\partial x} = -\Gamma_e e E - \sum_k H_k \cdot R_k \quad (3)$$

$$q_e = \frac{5}{2} \kappa_B T_e \Gamma_e - \frac{5}{2} N_e D_e \frac{\partial(\kappa_B T_e)}{\partial x} \quad (4)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (5)$$

여기서, q_e 는 엔탈피 유속 (e는 전자), Γ_e 는 전자유속, H_k 는 전자 충돌에 의한 에너지 손실, R_k 는 반응 계수, k 는 전리 및 여기 반응을 나타낸다. κ_B 는 볼츠만 상수, V 는 전극 전위, ρ 는 실 전자 밀도, ϵ_0 는 진공 유전율을 나타낸다. 글로우 방전에 의한 Ar 가스의 온도는 열전달 방정식을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\frac{5}{2} \kappa_B N_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\kappa_g \frac{\partial T_g}{\partial x}) + S_g \quad (6)$$

$$N_g = \frac{P}{\kappa_B T_g} \quad (7)$$

여기서, N_g 는 버퍼 가스 밀도, T_g 는 가스 온도를 나타낸다. 또한 κ_g 는 열전도도, S_g 는 가스 가열에 의한 전력 밀도를 나타내었다. 이것은 전자와 방전 가스와의 탄성 충돌에 의한 줄 가열과 정이온인 Ar^+ 및 Ar_2^+ 에 의한 줄 가열을 고려한 것이다. 본 방정식에서는 양 전극의 온도는 300 [K]로 설정하였으며, 식 (7)의 이상기체 상태방정식으로부터 Ar 버퍼가스의 밀도를 계산하였다.

2.2. 챔버 및 외부회로

그림 1에 전극구조와 외부회로를 나타내었다. 방전기구에 직렬로 연결된 가변 저항과 직류 전원을 통하여 방전공간의 전압 V_g 를 구하였으며, 방전공간은 평행판 원형 전극으로 가정하였다. 그림 1 (b)와 같은 등가회로로부터 방전공간 전압 V_g 에 대한 전도전류 (I_C), 변위전류(I_D)를 계산하였으며 아래에 그 방정식을 나타내었다[15].

$$V = RI + V_g \quad (8)$$

$$I = I_C + I_D \quad (9)$$

$$I_C = \frac{eS}{d} \int_0^d (\Gamma_{(Ar^+)} + \Gamma_{(Ar_2^+)} - \Gamma_e) dx \quad (10)$$

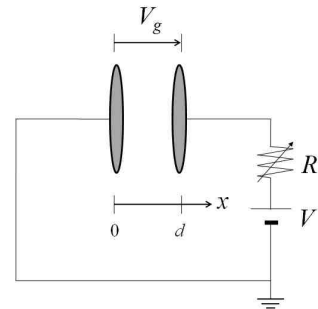
$$I_D = C_g \frac{dV_g}{dt} \quad (11)$$

여기서, I 는 방전 전류를 나타내며, C_g 는 진공상태일 때의 방전공간상의 정전용량을 표시한다. 정상상태에 도달하

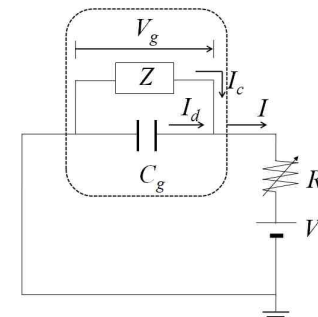
면 $I_D=0$ 이 된다. 전극간의 거리는 0.3 [cm], 전극면적은 1.0 [cm^2]으로 설정하였다.

본 연구에서 고려한 Ar 직류 글로우 방전에서 형성되는 각 입자간의 충돌반응식 및 충돌계수를 표 1에 나타내었으며, 본 연구에서 채택한 시뮬레이션 조건을 표 2에 나타내었다.

그림 2에 본 시뮬레이션의 흐름도를 나타내었다. 각 입자들의 확산과 이동속도를 통하여 연속방정식과 에너지 보존식을 계산한다. 이것으로부터 입자의 수밀도를 구하고 전류



(a) discharge model



(b) equivalent Circuit

그림 1 직류 글로우 방전 모델과 등가회로.

Fig. 1 A schematic diagram for (a) DC glow discharge model and (b) equivalent circuit.

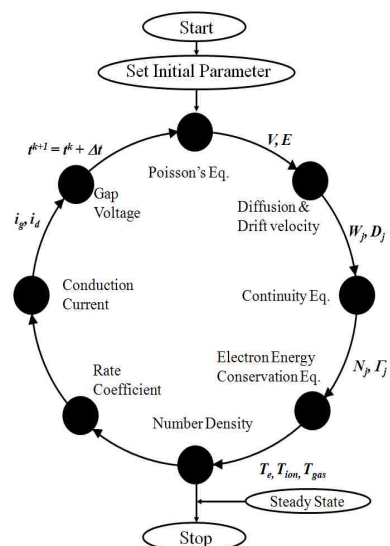


그림 2 직류 글로우 방전 시뮬레이션 흐름도.

Fig. 2 Flowchart for the present plasma simulation.

표 1 Ar 기체의 입자간의 충돌반응과 충돌계수

Table 1 Present reaction model and coefficients in Ar glow discharge.

No.	Reaction			Rate coefficient	No.	Reaction			Rate coefficient		
1	Ar	+e	→ Ar ⁺	+e	calculation	20	Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar _h ⁺	→ Ar ₂ ⁺	+Ar +e	60x10 ³⁰
2	Ar	+e	→ Ar _m ⁺	+e	calculation	21	Ar ₂ ⁺⁽³⁾	+Ar _m ⁺	→ Ar ₂ ⁺	+Ar +e	60x10 ³⁰
3	Ar	+e	→ Ar _r ⁺	+e	calculation	22	Ar ₂ ⁺⁽³⁾	+Ar _r ⁺	→ Ar ₂ ⁺	+Ar +e	60x10 ³⁰
4	Ar	+e	→ Ar _h ⁺	+e	calculation	23	Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar _h ⁺	→ Ar ₂ ⁺	+Ar +e	60x10 ³⁰
5	Ar	+e	→ Ar ⁺	+2e	calculation	24	Ar _m ⁺	+Ar _m ⁺	→ Ar ⁺	+Ar +e	50x10 ³⁰
6	Ar _m ⁺	+e	→ Ar ⁺	+2e	calculation	25	Ar _m ⁺	+Ar _r ⁺	→ Ar ⁺	+Ar +e	50x10 ³⁰
7	Ar _r ⁺	+e	→ Ar ⁺	+2e	calculation	26	Ar _m ⁺	+Ar _h ⁺	→ Ar ⁺	+Ar +e	50x10 ³⁰
8	Ar _h ⁺	+e	→ Ar ⁺	+2e	calculation	27	Ar _r ⁺	+Ar _r ⁺	→ Ar ⁺	+Ar +e	50x10 ³⁰
9	Ar ⁺	+2Ar	→ Ar ₂ ⁺	+Ar	10x10 ³² (30/4) ¹⁵	28	Ar _r ⁺	+Ar _h ⁺	→ Ar ⁺	+Ar +e	50x10 ³⁰
10	Ar _m ⁺	+2Ar	→ Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar	10x10 ³²	29	Ar _h ⁺	+Ar _h ⁺	→ Ar ⁺	+Ar +e	50x10 ³⁰
11	Ar _r ⁺	+2Ar	→ Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar	10x10 ³²	30	Ar ⁺	+e	→ Ar _m ⁺	+hv	10x10 ¹¹
12	Ar _m ⁺	+2Ar	→ Ar ₂ ⁺⁽³⁾	+Ar	30x10 ³¹	31	Ar ⁺	+e+Ar	→ Ar	+Ar +Ar	31x10 ²⁸
13	Ar _r ⁺	+2Ar	→ Ar ₂ ⁺⁽³⁾	+Ar	30x10 ³¹	32	Ar ₂ ⁺	+e	→ Ar	+Ar _h ⁺	85x10 ⁷
14	Ar ₂ ⁺⁽³⁾	+Ar	→ Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar	40x10 ³¹	33	Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+e	→ 2Ar	+hv	238x10 ⁸
15	Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	→ Ar ₂ ⁺	+2Ar+e	50x10 ³⁰	34	Ar ₂ ⁺⁽³⁾	+e	→ 2Ar	+hv	313x10 ⁶
16	Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar ₂ ⁺⁽³⁾	→ Ar ₂ ⁺	+2Ar+e	50x10 ³⁰	35	Ar _h ⁺		→ Ar _m ⁺	+hv	18x10 ⁷
17	Ar ₂ ⁺⁽³⁾	+Ar ₂ ⁺⁽³⁾	→ Ar ₂ ⁺	+2Ar+e	50x10 ³⁰	36	Ar _h ⁺		→ Ar _r ⁺	+hv	54x10 ⁶
18	Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar _m ⁺	→ Ar ₂ ⁺	+Ar +e	60x10 ³⁰	37	Ar _r ⁺		→ Ar	+hv	50x10 ⁷
19	Ar ₂ ⁺⁽¹⁾	+Ar _r ⁺	→ Ar ₂ ⁺	+Ar +e	60x10 ³⁰						

표 2 수치계산을 위한 외부회로 조건

Table 2 Simulation conditions considered in this paper.

Discharge Conditions	Values
Gas	Ar (100%)
Pressure (<i>P</i>)	760 Torr (1 atm)
Electrode distance (<i>d</i>)	0.3 [cm]
Electrode Area (<i>S</i>)	0.02 [cm ²]
Waveform	D.C.
Applied Voltage (<i>V</i>)	1.7 [kV]
Resistor (<i>R</i>)	100 ~ 700 [kΩ]

및 전압을 계산 한 후, 다시 포아송 방정식으로부터 전 방전 공간의 전계를 구한다. 이러한 사이클을 반복하여 수밀도 및 에너지가 수치적으로 안정될 때까지 시뮬레이션을 행한다.

3. 결과 및 고찰

그림 3에 Ar 직류 글로우 방전의 전압-전류 특성을 나타내었다. 전극간 거리 (*d*)가 0.3 [cm], 방전전류 1~15 [mA]의 범위에서 시뮬레이션을 수행하였고, 이 영역에서는 전류가 증가함에 따라 방전유지 전압은 조금씩 감소하다가 안정화되는 결과를 얻었다. 저압 직류방전에서와 같이, 글로우 방전의 초기현상에서는 방전전압이 감소하며 정상상태에서는 방전 전압이 일정하게 유지되는 특성을 알 수 있었다.

그러나 전극간 거리가 0.1 [mm] 이하로 좁아지면 저압 직류 글로우 방전과 달리 전압-전류 특성 (*dV/dI*)이 반대로 증가하는 현상이 일어난다고 보고되고 있다(Wang 등)[16].

그림 4에 방전전류가 3.7, 5.0, 7.6, 15.3 [mA]일 때의 Ar

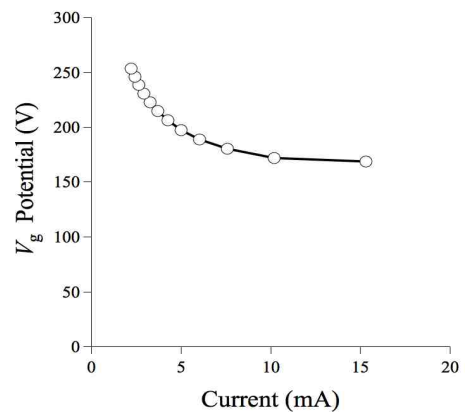


그림 3 방전 전극간 전압-전류 특성.

Fig. 3 The characteristics of voltage-current in DC Ar glow discharge.

직류 글로우 방전 특성을 나타내었다. 그림 4 (a)~(c)는 방전구간의 하전입자 수밀도를 나타내었으며, 그림 4 (d)는 전계강도, 그림 4 (e)~(f)는 전자와 버퍼가스의 온도 공간분포를 나타내었다.

그림 4 (a)와 같이, 방전전류가 증가함에 따라 전 공간에 걸쳐 전자 수밀도가 증가함을 알 수 있다. 특히, 음극 (*x*=0) 주변과 방전 벌크영역 사이에서 전자 수밀도의 최대치 (66×10^{12} [cm⁻³])가 분포하고, 양광주 영역 (약 *x*=0.1~0.28 [cm])에서는 전자 수밀도가 약 17×10^{12} [cm⁻³] 정도로 높게 분포하는 것을 알 수 있다. 양이온 (Ar⁺, Ar₂⁺)들은 주로 Ar⁺ 이온이 지배적으로 분포하고 있으며, 양극 (*x*=*d*) 주변에서

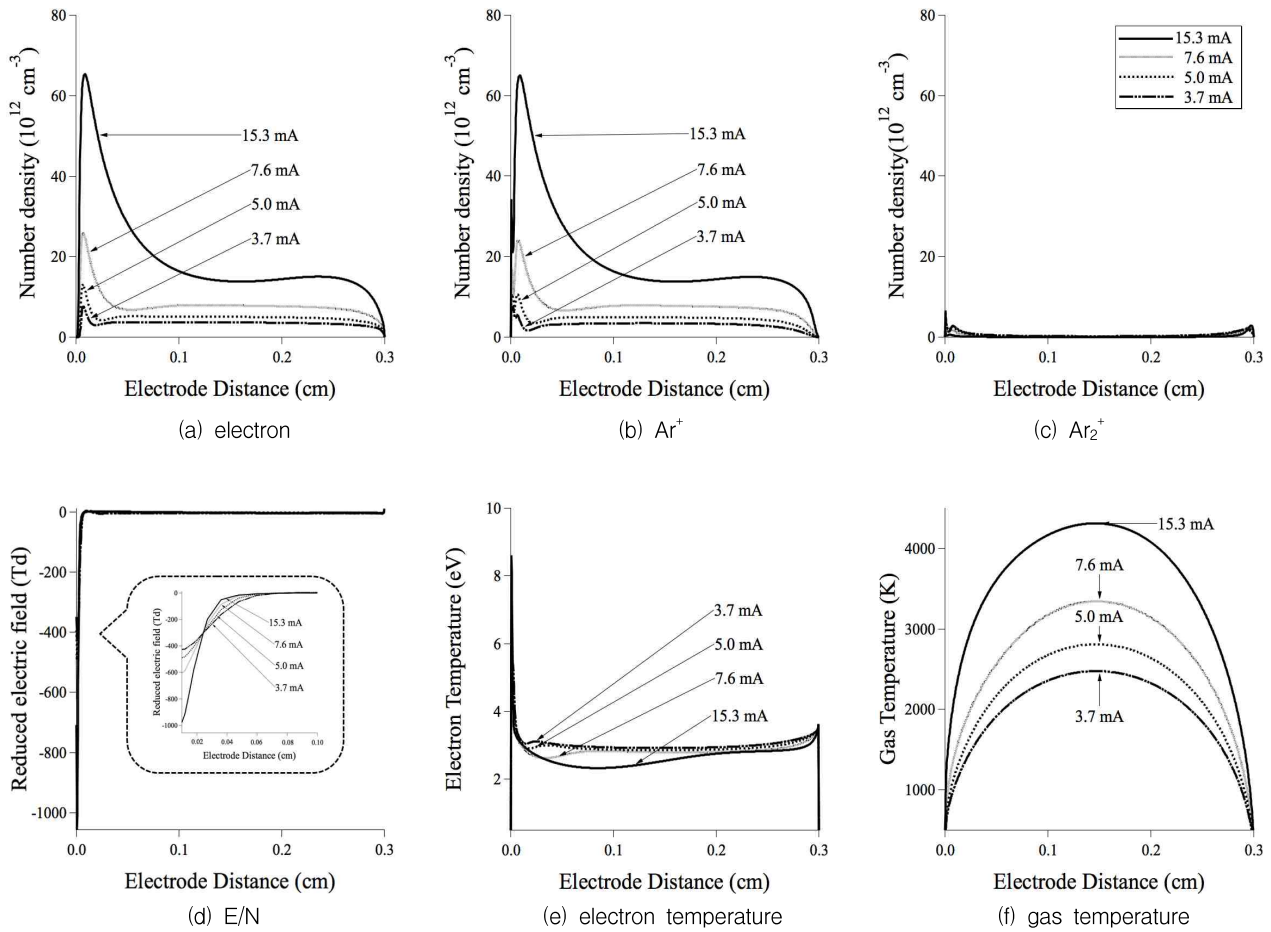


그림 4 DC Ar 글로우 방전의 공간분포도. (a) 전자 수밀도, (b) Ar^+ 수밀도, (c) Ar_2^+ 수밀도, (d) 공간전계, (e) 전자 에너지 및 (f) 버퍼가스 온도

Fig. 4 The spatial distributions of (a) electron density, (b) Ar^+ density, (c) Ar_2^+ density, (d) reduced electric field, (e) electron temperature and (f) Ar gas temperature, respectively.

Ar_2^+ 이온이 조금 높게 분포하고 있음을 확인할 수 있다 (그림 4 (b)~(c)). 음극 주변에서는 전자와의 전리반응 과정이 활발하게 형성되는 것으로부터 많은 Ar^+ 이온의 발생이 일어나고, 양극주변에서는 두 이온간의 전하교환 충돌반응 ($Ar^+ + 2Ar \rightarrow Ar_2^+ + Ar$)으로 인해 Ar_2^+ 이온의 발생이 쉽게 형성되는 것으로 설명할 수 있다. 이것은 저압 글로우 방전과 다른 특성으로, 대기압 조건에서는 Ar^+ 뿐만 아니라 Ar_2^+ 도 존재하며 다양한 충돌반응이 형성되는 것을 알 수 있다.

그림 4 (d) E/N 의 공간분포로부터 방전전류가 증가함에 따라 음극강하부의 방전전계 폭이 좁아지며, 그 강도 약 1000 [Td]에 다다를 정도로 매우 커지는 경향을 확인할 수 있다. 전자의 온도도 방전전류가 15.3 [mA]인 경우, 음극 주변이 약 8.5 [eV] 정도로 양극주영역 (약 3.0 [eV])보다 높게 형성되는 것을 알 수 있다 (그림 4 (e)). Ar 버퍼 가스의 온도도 방전전류가 커짐에 따라 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 방전전류가 15.3 [mA]인 경우에 최대 약 4200 [K]까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 초기 상태의 가스온도를 300 [K]로 설정하였으며, 약 12배 정도 상승하였다. 준안정 여기원자 및 여기분자의 공간분포도는 도시하지 않았으나 음극 주변에서 밀도의 피크값을 형성하며, 그 최대치는 각각 약 5.4×10^{14} [cm^{-3}] (Ar_m^*), 4.4×10^{14}

[cm^{-3}] (Ar_n^*), 5.2×10^{13} [cm^{-3}] (Ar_r^*), 2.2×10^{12} [cm^{-3}] ($Ar_2^*(1)$), 1.3×10^{13} [cm^{-3}] ($Ar_2^*(3)$)였다.

그림 5는 방전전류가 15.3 [mA]인 경우의 줄 가열 (Joule heating)에 관한 공간분포를 보여주고 있다. 여기서 줄 가열은 식 (6)의 S_8 를 나타낸다. 음극 주변에서는 양이온 (Ar^+ , Ar_2^+)들의

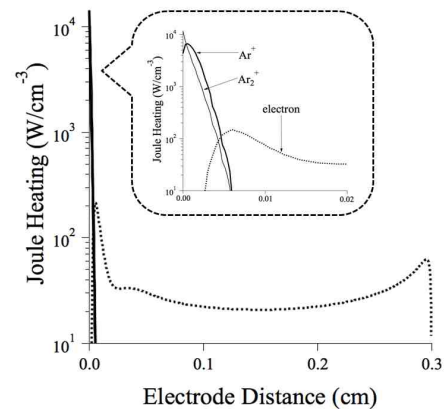


그림 5 줄 가열 (Joule heating)의 공간분포; $I = 15.3$ [mA].
Fig. 5 The spatial distribution of Joule heating at $I = 15.3$ [mA].

줄 가열에 의해 가스의 온도가 상승하는 것을 확인 할 수 있다. 전자에 의한 줄 가열은 음극 주변을 제외한 전 방전공간에 걸쳐 가스온도 상승에 기여하는 것을 알 수 있으며, 그 크기는 이온에 의한 것에 비해 수 10^2 배 정도로 작음을 확인할 수 있었다.

그림 6에 방전전류 1~15 [mA]의 범위에서 총 전력소비 중에서 전자에 의한 전력소비율 (P_e/P_{total})과 총 줄 가열 중에서 전자의 비율 (J_e/J_{total})을 나타내었다. 방전전류가 증가함에 따라 전자에 의한 전력소비 및 줄 가열의 비율이 다소 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 양이온 (Ar^+ , Ar_2^+)들의 역할이 방전전류 증가에 비례하여 기여하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 전력소비의 약 50~60%, 줄 가열의 70~80%가 이온들에 의한 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 양이온들의 전력소비 기여도가 매우 높은 것을 확인하였고, 줄 가열은 전자와 버피가스와의 탄성충돌에 의한 것뿐만 아니라 이온들도 중요한 역할을 담당하는 것을 확인하였다.

그림 7은 전자에 의해 소비된 전력 중에서 줄 가열에 기여

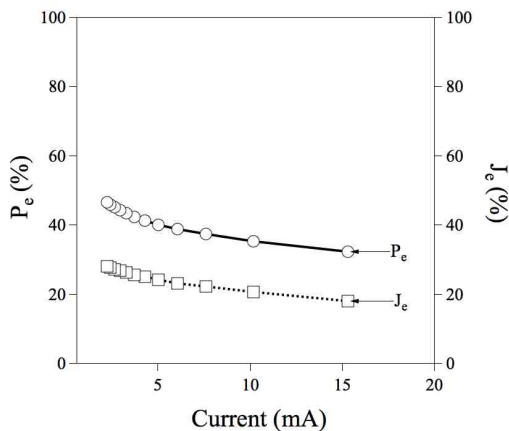


그림 6 총 전력에 대한 전자의 의존성 (P_e) 및 줄 가열에 대한 전자의 의존성 (J_e).

Fig. 6 The consumption dependences of power (P_e) and joule heating (J_e) by electron within the total input power and joule heating.

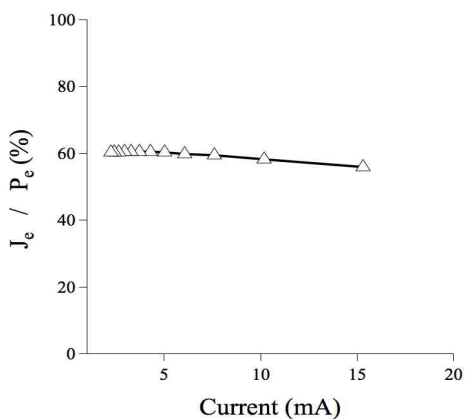


그림 7 전자에 의한 전력소비 중에서 줄 가열에 소비되는 비율.

Fig. 7 The consumption ratio of joule heating (J_e) to power (P_e) by electrons.

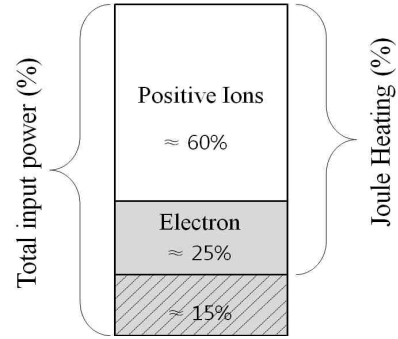


그림 8 Ar 직류 글로우 방전의 전력소비 및 줄 가열 흐름도.
Fig. 8 A schematic diagram of power consumption in atmosphere-pressure Ar DC glow discharge.

하는 정도를 백분율로 표시하였다. 양이온들에 의한 투입전력은 전부 줄 가열을 통하여 버피가스의 온도상승에 기여하였으며, 이에 대해 전자의 의한 투입전력 중에서 약 60%가 줄 가열에 의한 가스의 온도상승에 기여함을 확인할 수 있다. 나머지 약 40%는 전자에 의한 전리반응과 여기반응 등의 비탄성충돌에 의한 직류 글로우 방전 생성 및 유지에 이용되는 것을 알 수 있었다. 따라서 그림 8과 같이, 본 연구에 투입된 총 전력의 약 85%가 가스온도 상승에 소비되었으며, 전자의 비탄성충돌에 의한 직류 글로우 방전 유지에 나머지 약 15%가 소비되는 것을 알 수 있었다. 대기압 직류 글로우 방전에서는 저압 글로우 방전과 달리, 양이온들이 전력소비에 매우 높은 기여를 하고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기압 글로우 방전에 관한 기본 특성을 분석하기 위해서 Ar 가스의 직류 글로우 방전을 1차원 유체 모델을 통하여 시뮬레이션하였다. 방전 전압-전류 특성 및 방전공간의 분포도를 통하여 기본 특성을 분석하였으며, 버피가스의 가열구조와 전력소비 분담 등 각 하전입자들의 역할에 관하여 검토하였다.

(1) 방전전류를 증가시킬수록 방전전압은 조금씩 감소하다가 일정한 전압으로 안정화되는 것을 확인하였다.

(2) 방전전류가 증가됨에 따라 하전 입자들의 밀도도 높아지면서 $\sim 10^{13}$ [cm^{-3}] 이상까지 분포함을 확인하였다. 대기압 조건에서는 전하교환 충돌반응 ($Ar^+ + 2Ar \rightarrow Ar_2^+ + Ar$)으로 인해 Ar_2^+ 이온의 발생이 쉽게 형성되며, 전력소비와 줄 가열에 크게 기여함을 확인하였다.

(3) 줄 가열 (Joule heating)의 공간분포도를 통해서, 음극 주변에서는 양이온 (Ar^+ , Ar_2^+)들의 의한 줄 가열이 지배적이었으며, 전자에 의한 줄 가열은 음극 주변을 제외한 전 방전공간에서 발생되고 있음을 확인하였다. 그러나, 이온에 의한 것보다 전반적으로 수 10^2 배 정도 낮음도 알 수 있었다.

(4) 총 소비전력 중에서 약 50~60%가 양이온들에 의해 소비된 것이며, 약 70~80%가 양이온들에 의한 줄 가열임을 확인할 수 있었다. 본 연구의 대기압 조건에서는 총 소비전력 중에서 약 85%가 줄 가열에 사용되는 것을 알 수 있었으며, 나머지 15%는 전자의 비탄성충돌에 의한 직류 글로우 방전 유지에 소비되는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 앞으로 대기압 글로우 방전연구의 기초자료로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] M. J. Pinheiro and A. A. Martins, "Electrical and kinetic model of an atmospheric rf device for plasma aerodynamics applications", J. Appl. Phys., Vol. 108, pp. 033301 (2010)

[2] 김재혁, 진상일, 김영민, "대기압 플라즈마 발생시 인가 전압의 상승시간에 따른 영향", 전기학회논문지, Vol. 57, No. 7, pp. 1218-1222 (2008)

[3] 한성호, 김영민, 김재혁, "대기압 플라즈마 발생용 마이크로 전극 제작 및 저전압 동작 특성", 전기학회논문지, Vol. 56, No. 4, pp. 773-776 (2007)

[4] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki and S. Okazaki, "Stable glow plasma at atmospheric pressure", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 21, pp. 838-840 (1998)

[5] X. Yuan and L. Raja, "Role of trace impurities in large-volume noble gas atmospheric-pressure glow discharges", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, pp. 814-816 (2002)

[6] J. Park, I. Henins, H.W. Herrmann and S. Selwyn, "Discharge phenomena of an atmospheric pressure radio-frequency capacitive plasma source", J. Appl. Phys., Vol. 89, pp.20 (2001)

[7] M. Moravej, X.Yang, R.F.Hicks, J.Penelon and S.E.Babayan, "A radio-frequency nonequilibrium atmospheric pressure plasma operating with argon and oxygen", J. Appl. Phys., Vol. 99, pp. 093305 (2006)

[8] H-B. Wang, W-T. Sun, H-P. Li, C-Y. Bao, X. Gao and H-Y. Luo, "Discharge characteristics of atmospheric pressure radio frequency glow discharges with argon/nitrogen", Appl. Phys. Lett., Vol. 89, pp. 161504 (2006)

[9] J. J. Shi, X. T. Deng, R. Hall, J. D. Punnett and M. G. Kong, "Three modes in a radio frequency atmospheric pressure glow discharge", J. Appl. Phys., Vol. 94, pp. 6303 (2003)

[10] F. Tochikubo, T. chiga and T. Watanabe, "Structure of low-frequency helium glow discharge at atmospheric pressure between parallel plate dielectric electrodes", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, pp. 5244-5250 (1999)

[11] A. Oda and T. Kimura, "One-dimensional Fluid Simulation of Atmospheric-Pressure Helium DC Glow Discharges", IEEJ Trans. FM, Vol. 129, No. 4 (2009)

[12] Y. Sakai, S. Sawada and H. Tagashira, "Effect of Penning ionization on electron swarm in Ar/Ne mixtures: Boltzmann equation analysis", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 19, pp. 1741-1750 (1986)

[13] N. Sato and H. Tagashira, "A hybrid Monte-Carlo/fluid model of RF plasmas in a SiH₄/H₂ mixture", IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 19, pp. 102-112 (1991)

[14] E. V. Karoulina and Yu. A. Lebedev, "Computer simulation of microwave and DC plasmas: Comparative characterisation of plasmas", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 25, pp. 401-412 (1992)

[15] R. Morrow and N. Sato, "The discharge current induced by the motion of charged particles in time-dependent electric fields", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 32, pp. L20-22 (1999)

[16] Q. Wang, D.J.Economou and V.M.Donnely, "Simulation of a direct current microplasma discharge in helium at atmospheric pressure", J. Appl. Phys., Vol. 100, pp. 023301 (2006)

저 자 소 개



소 순 열 (蘇 淳 烈)

1970년 10월 8일생. 2003년 일본 홋카이도대학교 대학원 전자정보공학 졸업(공학박). 2005년~현재 목포대학교 전기공학과 조교수

Tel : 061-450-2462

Fax : 061-450-6285

E-mail : syso@mokpo.ac.kr