ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 19-03-18
j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.23,No.3,865~872,September 2019
http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2019.23.3.865
115

대기압 Ar 직류 글로우 방전에서 인가전압의 파형특성에 따른 광원효율 분석

The Analysis of Light Emissions on Ar DC Glow Discharge under the Atmosphere Pressure

소 순 열*★

Soon-Youl SO*★

Abstract

We developed a one-dimensional Ar fluid model running in DC-type applied voltage with a sine and a pulse waveform at the atmosphere pressure. We investigated the light emissions and efficiencies of λ_{128nm}, λ_{727nm}, λ_{912nm} and λ_{966nm} from the Ar excited particles. From the results, the light emission of λ_{128nm} and λ_{727nm} in the applied voltage with a sine waveform were almost two times as in DC voltage type. The shorter the switching time of applied voltage was, the more the light emissions of λ_{128nm} and λ_{727nm} were. We discussed the power consumption and Joule heating by charged particles.

요 약

대기압에서의 Ar 직류 글로우방전 현상을 1차원 유체모델을 통하여 시뮬레이션을 수행하였다. Ar 기체방전의 여기입자들로부터 방출되는 광원으로서 4가지(λ_{128nm}, λ_{727nm}, λ_{912nm} 그리고 λ_{966nm}) 파장의 빛을 검토하였다. 그 결과, 사인형태의 전원전압을 인가하였을 경우, λ_{128nm}와 λ_{727nm}의 광원이 직류 전압파형을 인가하였을 때보다 거의 2배에 가까운 빛을 방출하는 것을 확인하였다. 또한, 전원전압의 스위칭 시간이 짧을수록, λ_{128nm}와 λ_{727nm}의 방출이 더 많아지는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 하전입자에 의한 줄 열과 소모 전력에 관해서도 논의하였다.

Key words : Ar plasmas, Atmosphere pressure, DC glow discharge, Fluid model, Light emission

Ⅰ. 서론

대기압 글로우 방전은 화학적으로 반응이 매우 높게 형성되고 저온상태를 유지하며, 방전을 통해 형성되는 광원을 활용하여 물질의 표면처리 및 액정기판의 세정과 의료용 기자재의 저온살균 등에 이 기술이 널리 응용되고 있다[1, 2, 3]. 그러나 대기압 글로우 방전의 제 특성을 해석하고 제어하기 위해서는 여러 조건하에서의 기초특성을 미시적 및 공간적으로 분석하는 연구가 매우 필요하다. 그

* Dept. of Electrical and Control Engineering, Mokpo National University
※ Acknowledgment
This work is financially supported by the Ministry Of Trade, Industry & Energy (MOTIE) through the fostering project of Energy Valley Industry-University Convergence.
Manuscript received Sep. 5, 2019; revised Sep. 18, 2019; accepted Sep. 24, 2019.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

중에서도 여기입자들의 물리적 운동의 이해는 저온 글로우 방전의 반응적 특성과 이를 응용하는 공정에 있어서 매우 중요한 요소이며, 특히 준안정상태의 입자들의 물리적 운동과 화학적 반응은 방전을 유지하는 에너지 저장소로 활용되고 있다[4, 5]. 또한, 이 여기입자들로부터 발생하는 빛 광원은 UV 광원, 엑시머 레이저 그리고 다양한 램프 제작에도 폭 넓게 활용되고 있다[6, 7]. 따라서 저전력 고효율의 광원개발을 위해 방전에 의한 여기입자들의 발생과 그 입자들에 의해 파생되는 광원의 특성을 세밀히 이해할 필요가 있다.

본 연구에서는 유체방정식을 이용한 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 이 모델을 활용하여 Ar 가스의 직류 대기압 글로우 방전을 시뮬레이션하였다. 기존에 발표하였던 직류 글로우 방전 결과와 비교하여[8], 사인과 펄스패턴의 파형을 가진 전원전압을 통해 하전입자밀도 및 전자온도 그리고 여기입자의 분포와 광원의 변화를 분석하였다. 본 시뮬레이션에서는 전자와 이온입자(e, Ar^+, Ar_2^+), 6종의 중성입자($Ar_2^*(1)$, $Ar_2^*(3)$, $Ar_h^*(2P_{10}$: excitation state), $Ar_m^*(1S_5$: metastable state), $Ar_r^*(1S_4$: resonant level), 및 Ar buffer gas를 고려하여 계산하였으며, 여기입자에 의해 방출되는 광원으로 λ_{128nm} ($Ar_2^* \rightarrow Ar$), λ_{727nm} ($Ar(2P_{10}) \rightarrow Ar(1S_5)$), λ_{912nm} ($Ar(2P_{10}) \rightarrow Ar(1S_5)$) 그리고 λ_{966nm} ($Ar(1S_4) \rightarrow Ar$)를 분석하였다[9, 10]. 또한 100.0 [kHz]~1.0 [MHz]의 주기성을 가진 사인파형 및 펄스파형의 전압을 인가하여 전원전압의 형태에 따른 여기입자 및 광원의 변화율도 검토하였다. 하전입자들에 의한 전력소모 구조를 분석하여 글로우 방전의 가열구조를 확인하였다.

II. 모델링

1. 유체 방정식

본 연구에서는 유체방정식을 토대로 한 1차원 시뮬레이션 모델을 개발하여, 방전 공간 내에서 형성되는 Ar 직류 대기압 글로우 방전특성을 분석하였다. 본 모델에서 각 하전입자의 연속방정식, 전자에너지 및 버퍼 가스 에너지 보존 방정식과 포아송 방정식을 연립하여 유체방정식을 해석하고 방전특성을 시뮬레이션하였다. 각 하전입자의 연속방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} = -\frac{\partial \Gamma_j}{\partial x} + S_j \tag{1}$$

$$\Gamma_j = W_j N_j - D_j \frac{\partial N_j}{\partial x} \tag{2}$$

여기서 j는 본 연구에서 고려한 3종의 전자와 이온입자(e, Ar^+, Ar_2^+), 6종의 중성 입자($Ar_2^*(1)$, $Ar_2^*(3)$, $Ar_h^*(Ar\ 2P_{10}$: excitation state), $Ar_m^*(Ar\ 1S_5$: metastable state), $Ar_r^*(Ar\ 1S_4$: resonant level), 및 Ar 버퍼가스를 나타낸다. 글로우 방전을 구성하는 입자의 밀도 N_j, 입자의 유속 Γ_j과 입자의 이동속도 W_j, 확산계수 D_j 그리고 전자의 비탄성 충돌 및 각 입자간의 화학결합에 의한 발생과 소멸 S_j을 단위 시간별로 계산하였다.

각 입자들의 유체방정식에 요구되는 파라메타와 공간전계 분포를 구하기 위해 전자 에너지 보존식(식3)과 포아송 방정식 (식5)을 해석하였다.

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

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

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{5}$$

여기서, q_e는 엔탈피 유속(e는 전자), Γ_e는 전자유속, H_k는 전자 충돌에 의한 에너지 손실, R_k는 반응 계수, k는 전리 및 여기 반응을 나타낸다. κ_B는 볼츠만 상수, V는 전극 전위, ρ는 실 전하 밀도, ε_0는 진공 유전율을 나타낸다.

전극표면에서의 형성되는 2차 전자는 주로 양이온(Ar^+, Ar_2^+)들이 전극에 충돌하여 방출되는 것으로 고려하였으며, 그 방출계수는 0.1로 설정하였다. 그리고 2차 전자의 초기 온도는 0.5[eV]로 설정하였다. 방전공간 내에서 전극방향으로 입사하는 전자속은 전자 열속도의 함수로 계산하였고, 전극 표면으로 향한 전자는 전부 흡수되는 것으로 고려하였다.

2. 인가전압 파형

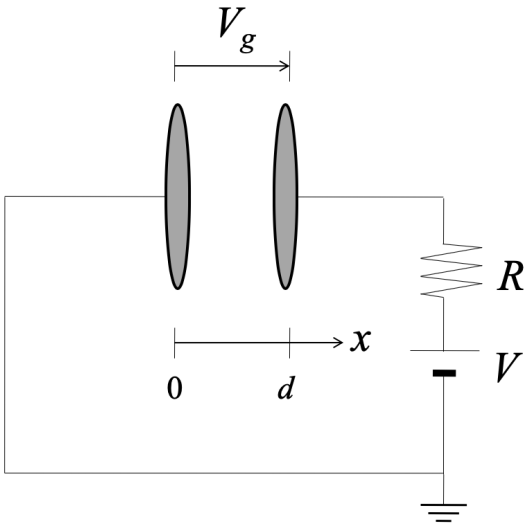
그림 1에 용량결합형 평행평판 전극을 모식한 회로를 나타내었다. 방전기구에 직렬로 저항(R)을 연결하였고, 직류 전압전원(V)으로부터 방전공간내의 전압(V_g)을 구하였다. 방전공간은 임피던스(Z)와 커패시턴스(C_g)가 병렬구조로 연결된 회로로 모식하

였으며, 방전공간 전압(V_g)에 대한 전도전류(I_C), 변위전류(I_D)를 계산하였다.

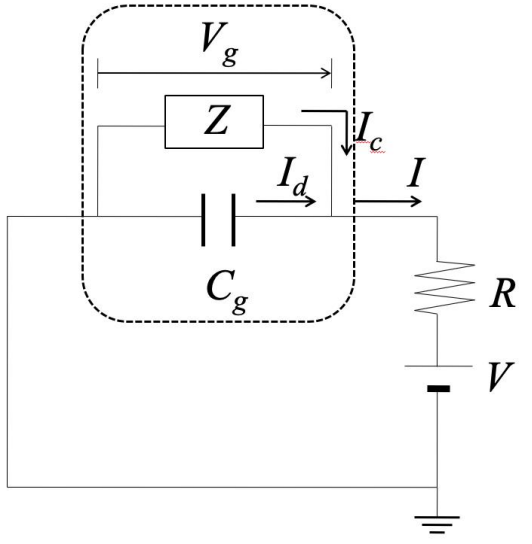
$$I_C = \frac{eS}{d}\int_0^d (\Gamma_{(Ar^+)} + \Gamma_{(Ar_2^+)} - \Gamma_e)dx \quad (6)$$

$$I_D = C_g \frac{dV_g}{dt} \quad (7)$$

본 연구에서 고려한 각 입자간의 충돌반응식 및 충돌계수를 표 1에 나타내었으며, 표 2에 시뮬레이션 조건을 나타내었다.



(a) discharge model



(b) equivalent Circuit

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

그림 1. 직류 글로우 방전 모델과 등가회로

Table 1. Present reaction model and coefficients in Ar glow discharge[10].

표 1. Ar 기체의 탄성 및 비탄성 충돌반응 및 반응계수

No.	Reaction					Rate coefficient
	Electron Impact					
E1	Ar	+ e	→	Ar	+ e	calculation
E2	Ar	+ e	→	Ar_m^*	+ e	calculation
E3	Ar	+ e	→	Ar_r^*	+ e	calculation
E4	Ar	+ e	→	Ar_h^*	+ e	calculation
E5	Ar	+ e	→	Ar^+	+ 2e	calculation
E6	Ar_m^*	+ e	→	Ar^+	+ 2e	calculation
E7	Ar_r^*	+ e	→	Ar^+	+ 2e	calculation
E8	Ar_h^*	+ e	→	Ar^+	+ 2e	calculation
	Charge Transfer					
C1	Ar^+	+ 2Ar	→	Ar_2^+	+ Ar	$1.0\times10^{-32}(300/T_g)^{1.5}$
	Neutral Reaction					
N1	Ar_m^*	+ 2Ar	→	$Ar_2^*(1)$	+ Ar	1.0×10^{-32}
N2	Ar_r^*	+ 2Ar	→	$Ar_2^*(1)$	+ Ar	1.0×10^{-32}
N3	Ar_m^*	+ 2Ar	→	$Ar_2^*(3)$	+ Ar	3.0×10^{-34}
N4	Ar_r^*	+ 2Ar	→	$Ar_2^*(3)$	+ Ar	3.0×10^{-34}
N5	$Ar_2^*(3)$	+ Ar	→	$Ar_2^*(1)$	+ Ar	4.0×10^{-14}
	Penning Ionization					
P1	$Ar_2^*(1)$	$+Ar_2^*(1)$	→	Ar_2^+	+2A+e	5.0×10^{-10}
P2	$Ar_2^*(1)$	$+Ar_2^*(3)$	→	Ar_2^+	+2A+e	5.0×10^{-10}
P3	$Ar_2^*(3)$	$+Ar_2^*(3)$	→	Ar_2^+	+2Ar+e	5.0×10^{-10}
P4	$Ar_2^*(1)$	$+Ar_m^*$	→	Ar_2^+	+Ar+e	6.0×10^{-10}
P5	$Ar_2^*(1)$	$+Ar_r^*$	→	Ar_2^+	+Ar+e	6.0×10^{-10}
P6	$Ar_2^*(1)$	$+Ar_h^*$	→	Ar_2^+	+Ar+e	6.0×10^{-10}
P7	$Ar_2^*(3)$	$+Ar_m^*$	→	Ar_2^+	+Ar+e	6.0×10^{-10}
P8	$Ar_2^*(3)$	$+Ar_r^*$	→	Ar_2^+	+Ar+e	6.0×10^{-10}
P9	$Ar_2^*(1)$	$+Ar_h^*$	→	Ar_2^+	+Ar+e	6.0×10^{-10}
P10	Ar_m^*	$+Ar_m^*$	→	Ar^+	+Ar+e	5.0×10^{-10}
P11	Ar_m^*	$+Ar_r^*$	→	Ar^+	+Ar+e	5.0×10^{-10}
P12	Ar_m^*	$+Ar_h^*$	→	Ar^+	+Ar+e	5.0×10^{-10}
P13	Ar_r^*	$+Ar_r^*$	→	Ar^+	+Ar+e	5.0×10^{-10}
P14	Ar_r^*	$+Ar_h^*$	→	Ar^+	+Ar+e	5.0×10^{-10}
P15	Ar_h^*	$+Ar_h^*$		Ar^+	+Ar+e	5.0×10^{-10}
	Ion-Electron Recombination					
I1	Ar^+	+e	→	Ar_m^*	+ $h\nu$	1.0×10^{-11}
I2	Ar^+	+e+Ar		Ar	+Ar+Ar	3.1×10^{-28}
I3	Ar_2^+	+e	→	Ar	$+Ar_h^*$	8.5×10^{-7}
	Radiation					
R1	$Ar_2^*(1)$	+e	→	2Ar	+ $h\nu$	2.38×10^{8}
R2	$Ar_2^*(3)$	+e	→	2Ar	+ $h\nu$	3.13×10^{5}
R3	Ar_h^*		→	Ar_m^*	+ $h\nu$	1.89×10^{7}
R4	Ar_h^*		→	Ar_r^*	+ $h\nu$	5.46×10^{6}
R5	Ar_r^*		→	Ar	+ $h\nu$	5.0×10^{4}

Table 2. Simulation conditions considered in this paper.
표 2. 시뮬레이션을 위한 모델링 조건

Discharge Conditions	Values
Gas	Ar (100%)
Pressure (***P***)	760 Torr (1 atm)
Electrode distance (***d***)	0.3 [cm]
Electrode Area (***S***)	0.02 [cm^2]
Waveform	DC, Sine, Pulse
Applied Power (***W***)	24 [W]
Resistor (***R***)	400 [kΩ]

III. 결과 및 고찰

그림 2에 본 연구에서 고려한 인가전원의 파형을 나타내었다. 파형의 변화에 따른 제반 요소의 해석을 단순화하기 위해 인가전력을 24[W]로 고정하였고, 동일한 전력에서의 방전특성을 비교 및 분석하였다. 그림 2 (a)는 펄스파형으로, 주기에 변화를 주면서 방전특성을 분석하였다. 그림 2 (b)는 주기를 고정하고, 전압이 제로에서 최대치에 도달하는 시간(r_t)을 변화시켜 방전특성을 분석하였다. 그림 2 (c)와 (d)는 사인파형으로, 주기를 변화시켜 특성을 분석하였다. DC 파형에서는 약 1.17[mA]의 전류가 흘렀으며, 펄스와 사인파형의 전압원에서는 반복 주기를 500[kHz]로 설정하였을 경우, 각각 약 0.92[mA]와 0.85[mA]의 전류가 형성되었다. 이와 동일한 조건에서 전압을 인가하였을 때의 전자, 양이온 및 여기입자의 공간분포를 그림 3에 나타내었다. 기존에 보고된 결과와 같이, 양광주 영역(x=0.1~0.28[cm])에서 전자 및 이온의 입자 수밀도 분포가 높게 형성하였다(그림 3 (a), (b)). 음극 주변에서는 전자와의 전리반응 과정이 활발하게 형성되면서 양이온의 발생도 방전공간내의 다른 영역에 비교해서 상대적으로 높게 형성됨을 알 수 있다. 이러한 전자의 발생과정과 분포로 인해 전자-버퍼가스의 비탄성 충돌반응이 활발해지면서, 그림 3 (c)와 같이 여기입자의 분포도 매우 높게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 방전공간의 중심부에서는 전반적으로 펄스 및 사인파형의 전압의 경우가 DC와 비교했을 때 상대적으로 높은 수밀도를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이는 스위칭 오프(T_off) 기간 동안에 전자가 전극 중심부에 쌓이게 되면서, 상대적으로 높은 수밀도를 형성하게 된다. 이러한 전자분

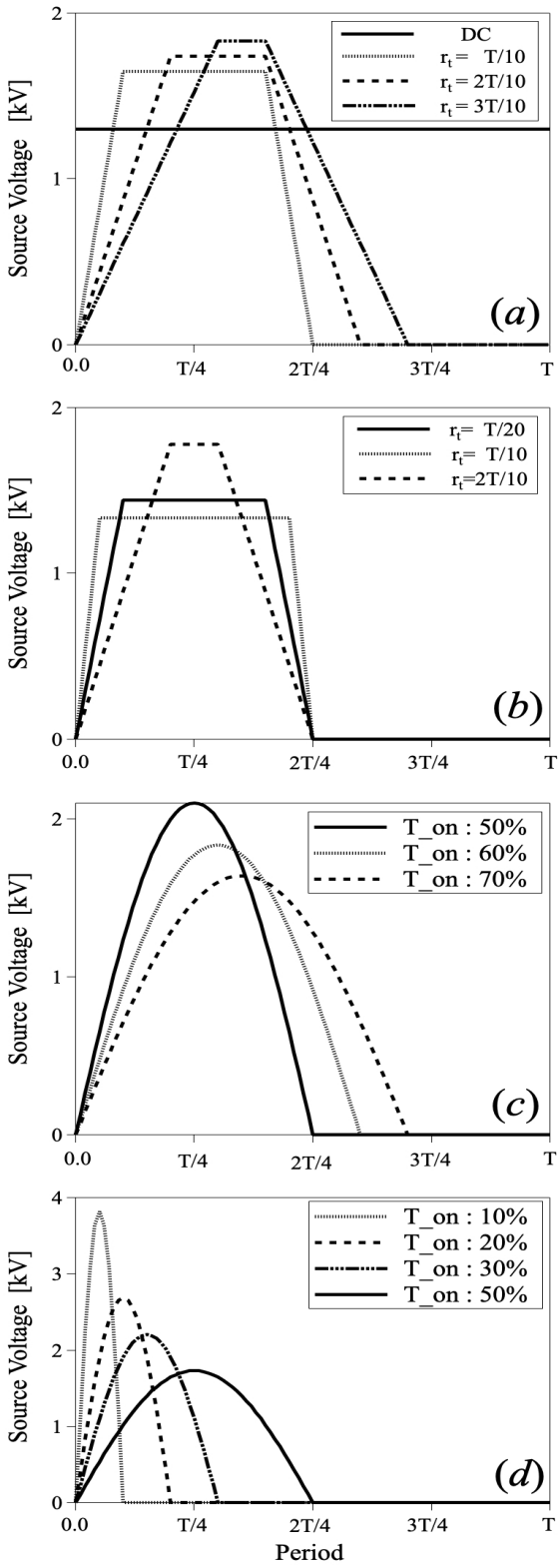


Fig. 2. The waveform and duty ratio of the applied voltage at the same power of 24[W].
그림 2. 동일한 소비전력 (24[W])에서의 인가전압 파형과 스위칭 온/오프 패턴

포로 인해 전극 중심부에서의 여기입자 밀도도 더불어 증가하게 되고, 전체적으로 빛의 발생빈도가

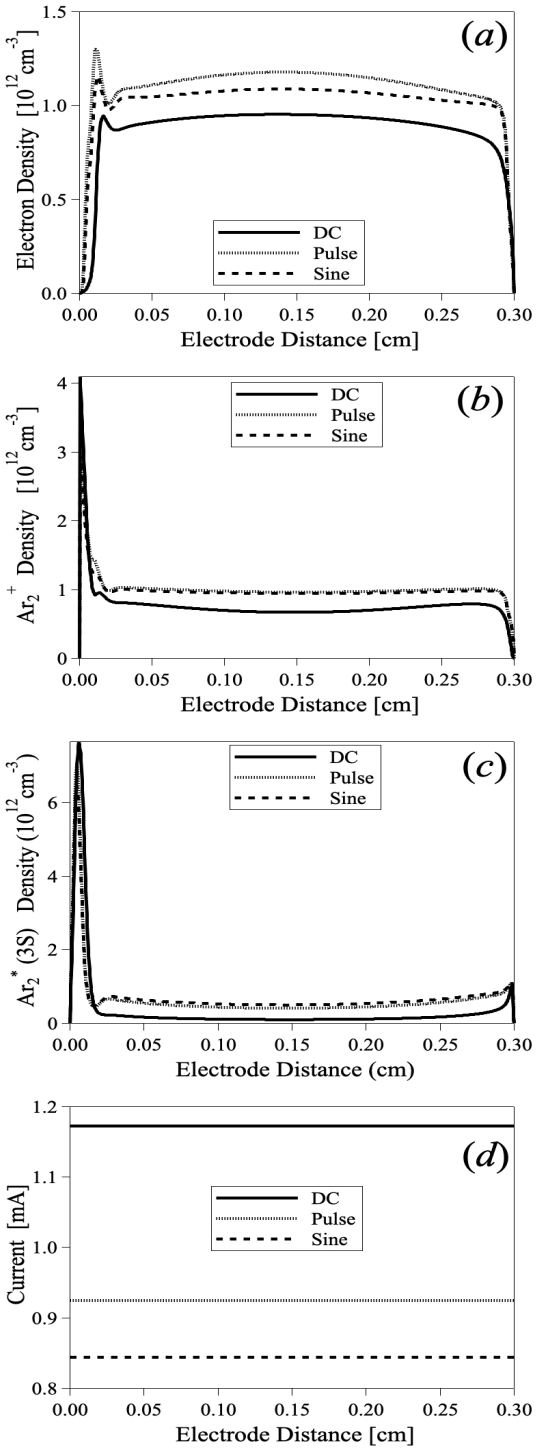


Fig. 3. The spatial distributions of (a) electron density, (b) Ar_2^+ density, (c) Ar_2^* density and (d) current at 500[kHz] and 24[W].

그림 3. 24[W], 500[kHz]에서 인가전압 파형에 따른 방전공간내의 (a) 전자수밀도 분포, (b) Ar_2^+ 수밀도 분포, (c) Ar_2^* 여기입자의 수밀도 분포 및 (d) 전류

높아지게 된다.

그림 4는 펄스파형의 인가전압으로, 그 주기를 100 [kHz]~1 [MHz]로 변화시켰을 때의 광원의 변

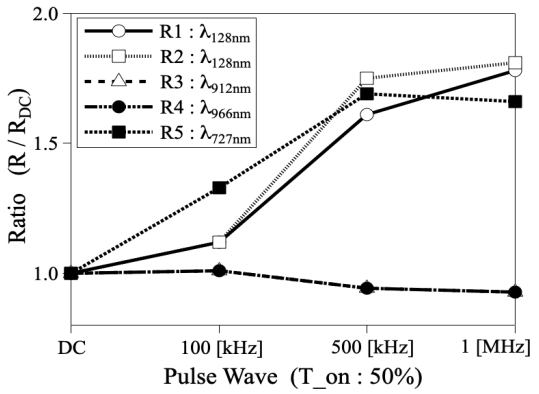


Fig. 4. The generation ratios of light source according to the switching frequency of the applied voltage with a pulse waveform.

그림 4. 펄스파형 인가전압에서 스위칭 주기를 변화시켰을 때의 광원 발생률

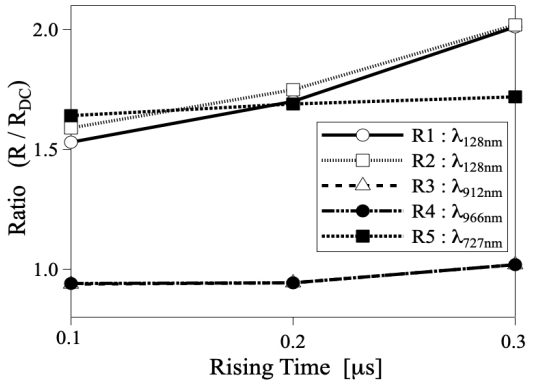


Fig. 5. The generation ratios of light source according to the rising time of the applied voltage with a pulse waveform at 500[kHz].

그림 5. 스위칭 주기 500[kHz]인 펄스파형 인가전압에서 상승시간의 변화에 대한 광원 발생률

화율을 나타내었다. 주기가 짧아질수록(1[MHz]) 높은 에너지를 갖는 짧은 파장의 광원(λ_{128nm}과 λ_{727nm})들이 DC 전압파형에 비교하여 1.8배 정도로 높은 변화율을 보여주고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 5는 펄스파형의 전원에서 전압 상승시간(rising time)에 변화를 주었을 경우의 광원변화율을 나타내고 있다.

그림 5는 펄스파형의 인가전압에서 상승시간의 변화에 따른 광원의 발생률을 보여주고 있다. 전반적으로 짧은 파장의 광원들이 DC 파형에 비해서 1.6배 정도의 발생률을 보여주고 있으며, 특히, 상승시간이 느려질수록 λ_{128nm}의 광원이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이, 높은 전압이 장시간 방전공간에 유입되면 양전

극 방향(x=0.3cm)으로의 전자들의 움직임도 빨라지게 된다. 이러한 운동이 오히려 방전공간 내에서의 비탄성 충돌과정을 저하하는 결과를 가져오게 되면서, Ar_2^*의 발생율을 감소시키게 된다. 이에 반해, 상승시간이 느려지게 되면 전자들이 방전공간을 이동하면서 Ar 입자들과 충분한 충돌반응을 형성하게 되면서 Ar_2^*의 수밀도를 증가시키게 된다. 상승된 수밀도 분포로 인해, 표 1의 R1과 R2의 발광반응이 향상되고 λ_{128nm}의 발생을 증가시킨다. 그림 6은 펄스파형의 상승시간을 고정하고, 스위칭 on의 시간을 변화시켰을 때 형성되는 λ_{128nm}의 발생률을 나타내었다. 인가전압의 주기가 빨라지면서 λ_{128nm}의 발생률은 DC에 비해서 1.8배 까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 스위칭 시간 변화에 대해서는 그 변화폭이 비교적 완만한 것을 알 수 있었다.

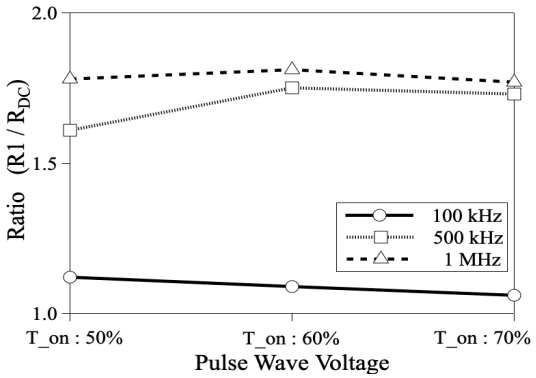


Fig. 6. The generation ratios of light source according to the duty ratio of the applied voltage with a pulse waveform at 500[kHz].

그림 6. 스위칭 주기 500[kHz]인 펄스파형 인가전압에서 온/오프 시간의 변화에 대한 광원 발생률

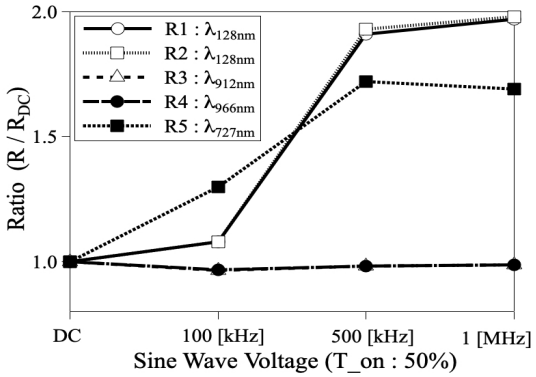


Fig. 7. The generation ratios of light source according to the switching frequency of the applied voltage with a sine waveform.

그림 7. 사인파형 인가전압에서 스위칭 주기를 변화시켰을 때의 광원 발생률

그림 7은 사인파형의 인가전압으로, 스위칭 시간을 50%로 고정하고 주기를 변화시켰을 때의 광원의 발생률 변화를 보여주고 있다. 그림 5의 펄스파형 인가전압의 결과와 같이, 주기가 짧을수록 짧은 파장의 광원(λ_{128nm}과 λ_{727nm})들이 DC 파형에 비해 2배에 이르는 높은 발생률을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 상대적으로 펄스파형의 결과보다 높게 형성되는 것은 DC구간이 적을수록 방전공간에 걸쳐 형성되는 전자에 의한 충돌반응이 증가하게 되고, 이로 인해 여기입자들의 발생이 향상된다. 따라서 여기입자들에 의한 발광반응이 증가하고, 특히 R1과 R2에서의 반응이 상대적으로 높게 형성되는 것을 알 수 있었다.

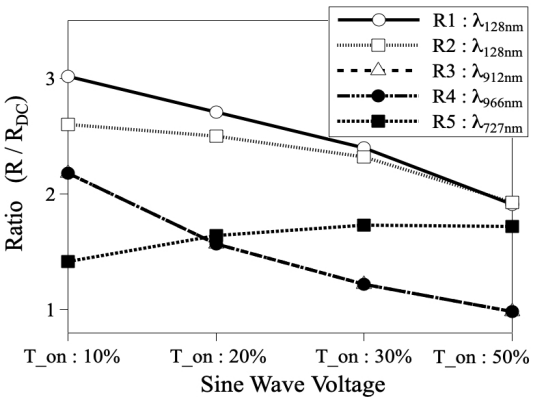


Fig. 8. The generation ratios of light source according to the duty ratio of the applied voltage with a sine waveform at 500[kHz], 24[W].

그림 8. 스위칭 주기 500[kHz]인 사인파형 인가전압에서 온/오프 시간의 변화에 대한 광원 발생률

그림 8은 스위칭 시간을 10[%]~50[%]로 변화를 주었을 때의 발광률을 보여주고 있다. 스위칭 온시간(T_on)이 오히려 길어질수록 빛의 발광은 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 순간적으로 높은 전압이 인가되면 음전극으로부터 전자가 양전극 방향으로 가속되며, 스위칭 오프(T_off) 기간에 방전공간 내에 전자들이 쌓이게 되면서 수밀도의 증가를 야기한다. 방전공간에 증가된 전자들에 의해 충돌과정이 빈번해지면서, 여기입자들의 밀도가 상대적으로 높게 형성되면서 발광반응(R1~R5)도 높게 형성되는 것으로 설명할 수 있다.

그림 9는 펄스파형 인가전압의 주기에 따른 소비전력의 변화를 도시하였다. 주기가 짧아질수록, 전자와 Ar_2^+ 이온에 의한 전력소모율의 변화가 두드

러지게 나타났다. 앞서 설명한 바와 같이, 주기가 짧아지면서 가속된 전자들이 방전공간 전반에 걸쳐 쌓이게 되고, 전자의 충돌반응이 증가되면서 전자에 의한 전력의 소비율도 높아진다.

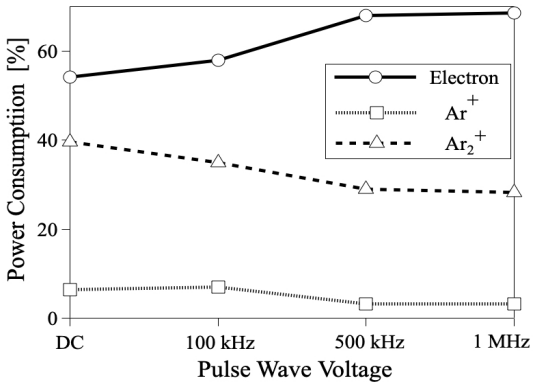


Fig. 9. The consumption ratio of joule heating by charged particles according to the variation of the switching frequency of the applied voltage with a pulse waveform at 24[W].

그림 9. 펄스파형 전압을 인가하였을 경우의 하전입자들에 의한 줄 가열 소비 에너지

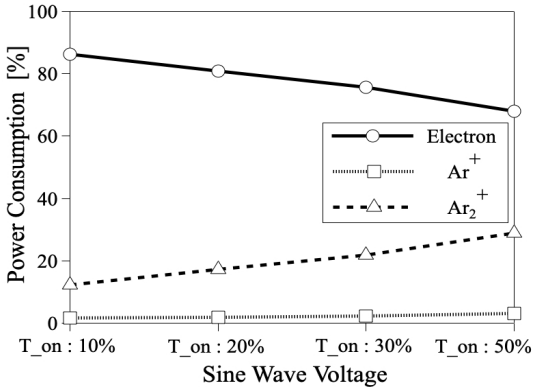


Fig. 10. The consumption ratio of joule heating by charged particles according to the variation of the duty ratio of the applied voltage with a sine waveform at 24[W].

그림 10. 사인파형 전압의 온/오프 시간의 변화에 따른 하전입자들에 의한 줄 가열 소비에너지

그림 10은 사인파형 인가전압의 스위칭 시간을 변화시켰을 때의 전력 소비율을 보여주고 있다. 그림 8의 결과와 같이, T_on 시간이 길어지면서 오히려 양전극을 통해 흡수되는 전자가 증가하게 되고, 이것이 전자의 충돌반응의 감소를 야기하면서 방전공간내의 전자에 의한 전력소비가 감소되는 것으로 설명할 수 있다.

Ⅲ. 결론

본 연구에서는 대기압 직류 글로우 방전에서의 광원효율 향상을 위해 전압소스의 주기와 파형을 변화시키면서 그 특성을 분석하였다. 유체방정식을 통한 1차원 평행평판형 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 여기입자들의 분포와 발광반응의 변화에 관하여 검토하였다. 소비전력을 24[W]로 고정하였고, 인가전압은 DC, 사인 및 펄스파형에 각각 100[kHz]~1[MHz]의 주기성을 갖는 것으로 산정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 인가전압의 스위칭 온오프 시간에 변화를 주면서 광원의 생성에 주목하였다.

(1) 인가전압의 스위칭 시간에 변화를 주면, 전자들이 방전공간 내에 쌓이게 되고 전자와의 충돌반응이 향상되면서 입자들의 수밀도가 높게 분포되는 것을 확인 할 수 있었다.

(2) 사인 및 펄스파형의 인가전압에서 주기가 짧아질수록(1[MHz]) λ_{128nm}과 λ_{727nm}의 발생률이 DC에 비해 1.8~2배 정도 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.

(3) 동일한 주기에서 상승시간(rising time)이 느릴수록 또는 스위칭 온(T_on) 시간이 짧을수록 λ_{128nm}과 λ_{727nm}의 발생률이 향상되는 것을 알 수 있었다.

(4) 전자와 Ar_2^+ 이온에 의한 전력소비 변화에서도 알 수 있듯이, 전자의 충돌반응이 활발해지면서 광원의 발생률도 향상되는 것을 확인하였다.

References

[1] 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.
DOI: 10.1088/0022-3727/21/5/028/meta

[2] X. Yuan and L. Raja, “Role of trace impurities in large-volume nobel gas atmoshpheric-pressure glow discharges,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.81, pp. 814-816, 2002. DOI: 10.1063/1.1497445

[3] J. H. KIM, S. I. KIM, Y. M. KIM, “Effect of Rise Time of a Pulse Bias Voltage on Atmospheric

Plasma Generation," *KIEE*, Vol.57, No.7, pp.1218-1222, 2008.
[4] A. Oda, Y. Sakai, H. Akashi and H. Sugawara, "One-dimensional modelling of low-frequency and high-pressure Xe barrier discharges for the design of excimer lamps," *J. Appl. Phys.*, Vol.32, pp. 2726-2736, 1999. DOI: 10.1088/0022-3727/32/21/304
[5] Q. Wang, D. J. Economou and V. M. Donnelly, "Simulation of a direct current microplasma dicharge in helium at atmospheric pressure," *J. Appl. Phys.*, Vol.100, pp.023301, 2006.
DOI: 10.1063/1.2214591
[6] A. Oda and T. Kimura, "One-dimensional Fluid Simulation of Atmospheric-Pressure Helium DC Glow Discharges", *IEEJ Trans. FM*, Vol.129, No.4, pp.251-256, 2009.
DOI: 10.1541/ieejfms.129.251
[7] J. B. Lee, "A Study on the Dielectric Barrier Discharges Plasmas of Flat Atmospheric Pressure Using an AC Pulse Voltage," *KIEE*, Vol.61, No.5, pp.717-720, 2012.
[8] S. Y. So, "Analysis on DC Glow Discharge Properties of Ar Gas at the Atmosphere Pressure," *KIEE*, Vol.59P, No.4, pp.56-62, 2010.
[9] M. Nikolic, J. Newton, C. I. Sukenik, L. Vuskovic and S. Popovic, "Measurements of Population Densities of Metastable and Resonant Levels of Argon using Laser Induced Fluorescence," *J. Appl. Phys.*, Vol. 117, pp. 1-9, 2015.
DOI: 10.1063/1.4905611
[10] Dissertation : Daniel J. Emmons II, "Analysis of Ar($1S_5$) Metastable Populations in High Pressure Argon-Helium Gas Discharges," Ph.D., Air Force Institute of Technology, 2017.

BIOGRAPHY

Soon-Youl SO (Member)

1996 : BS degree in Electrical Engineering, Chonnam National University.
1998 : MS degree in Electrical Engineering, Chonnam National University.
2003 : PhD degree in Electronic and Information Engineering, Hokkaido University.