

## The Analysis of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Plasma Properties Under the Atmosphere Pressure

소순열\* · 이진†  
(Soon-Youl So · Jin Lee)

**Abstract** - Atmosphere Plasmas of Gas Discharge (APGD) have been used in plasma sources for material processing such as etching, deposition, surface modification, etc. This study is to investigate and understand the fundamental plasma discharge properties. Especially, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas would be used in power transformer, GIS (Gas insulated switchgear) and so on. In this paper, we developed a one dimensional fluid simulation model with capacitively coupled plasma chamber at the atmosphere pressure (760 [Torr]). 38 kinds of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> plasma particles which are an electron, two positive ions (SF<sub>5</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>), five negative ions (SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup>, SF<sub>4</sub><sup>-</sup>, F<sub>2</sub><sup>-</sup>, F<sub>1</sub><sup>-</sup>), thirty excitation and vibrational particles for N<sub>2</sub> were considered in this computation. The N<sub>2</sub> gases of 20%, 50%, 80% were mixed in SF<sub>6</sub> gas. As the amount of N<sub>2</sub> gas was increased, the properties of electro-negative plasma moved toward the electro-positive plasma.

**Key Words** : Atmosphere Pressure, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Plasmas, Fluid Model, Plasma Properties, Mixture Gas

### 1. 서론

대기압 상태에서의 비평형 플라즈마는 고가의 진공장치를 구비하지 않아도 되는 이점으로부터 지난 10여 년 동안 많은 연구자의 관심을 받아왔다[1,2]. 대기압 방전 플라즈마는 증착 및 식각, 표면처리 등의 재료공정에 최근 널리 이용되고 있으며, 그 특성에 관한 연구도 증대하고 있는 실정이다. 이러한 방전 특성에 관한 연구는 실험적인 관점으로부터 기본적인 과정들을 분석하고 해석하는 것은 매우 어렵고, 특히 재료공정에 있어서의 최적 구동조건을 찾기 위한 원인 분석이 집중적으로 이루어져야 함에 따라, 시뮬레이션 기법을 이용한 미시적 및 공간적 방전 특성을 분석하는 것이 매우 효과적이라고 하겠다[3-10].

전력기기의 절연가스로 많이 사용되고 있는 SF<sub>6</sub>는 화학적으로 매우 안정적이고 전기적으로 매우 안정적이지만 환경오염 물질로 저감시켜야 하는 어려움이 있어 최근에 질소와 혼합하여 그 사용량을 감소시키고 있는 실정이다. 그러나, 혼합기체의 방전 특성에 대한 면밀한 분석이 이루어져야 함에도 불구하고 전기적 절연성능에 집중되어 있어서, 질소의 혼합량에 따른 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 방전 플라즈마의 미시적, 공간적 특성에 관한 연구가 절실히 필요하다.

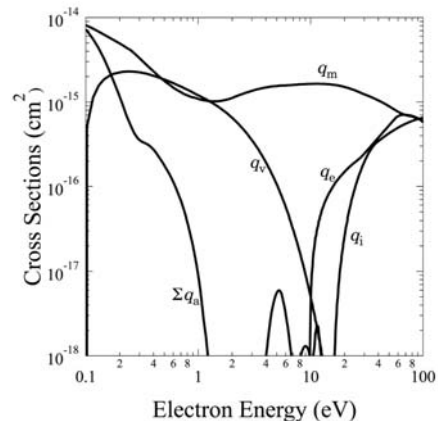
따라서, 본 연구에서는 RF (13.56MHz) 전원에서 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합기체의 대기압 방전 특성을 분석한다. 질소의 혼합비를 20~80%로 변화시켜 플라즈마의 특성을 비교 및 분석한다.

시뮬레이션 기법은 1차원 유체 모델을 이용하였으며, 하전 입자는 8종의 전자와 이온입자 (e, SF<sub>5</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup>, SF<sub>4</sub><sup>-</sup>, F<sub>2</sub><sup>-</sup>, F<sub>1</sub><sup>-</sup>)이며, 30가지의 여기 입자들을 고려하여 계산하였다.

### 2. 본론

#### 2.1. 시뮬레이션 방정식

본 시뮬레이션에서는 유체 모델을 이용한 평행평판형 1차원 모델을 개발하여 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합기체의 대기압 방전 플라즈마 특성을 분석하였다. 그림 1과 그림 2에 SF<sub>6</sub>와 N<sub>2</sub>의 전자



**그림 1** SF<sub>6</sub> 가스의 전자충돌 단면적.  $q_m$ 은 모멘텀,  $q_i$ 는 전리반응,  $q_a$ 는 부착반응,  $q_v$ 와  $q_e$ 는 각각 진동 및 여기반응.

**Fig. 1** The cross section set for SF<sub>6</sub> gas;  $q_m$ , momentum transfer;  $q_i$ , ionization;  $q_a$ , attachment;  $q_v$  and  $q_e$ , vibrational and excitation state, respectively.

\* 정희원 : 목포대학교 공대 전기공학과 조교수 · 공박

† 교신저자, 정희원 : 목포대학교 공대 전기공학과 교수 · 공박

E-mail: syso@mokpo.ac.kr

접수일자 : 2009년 11월 20일

최종완료 : 2009년 11월 21일

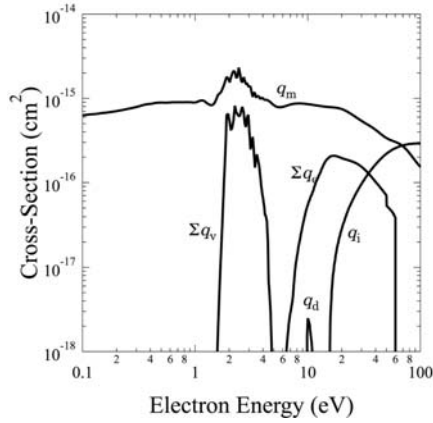


그림 2 N<sub>2</sub> 가스의 전자충돌 단면적. q<sub>m</sub>은 모멘텀, q<sub>i</sub>는 전리반응, q<sub>d</sub>는 해리반응, q<sub>v</sub>와 q<sub>e</sub>는 각각 진동 및 여기반응.

Fig. 2 The cross section set for N<sub>2</sub> gas; q<sub>m</sub>, momentum transfer; q<sub>i</sub>, ionization; q<sub>d</sub>, dissociation; q<sub>v</sub> and q<sub>e</sub>, vibrational and excitation state, respectively.

충돌 단면적을 나타내었다. 이 데이터는 Itoh 및 Ohmori 등의 결과를 인용한 것이다[11,12]. 유체 모델은 각 하전입자의 연속방정식, 전자 에너지 보존 방정식 및 포아송 방정식으로 구성되어 있다. 대전입자의 전송의 식을 아래에 표시하였다.

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

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

여기서 j는 전자 및 양이온을 나타낸다. N<sub>j</sub>는 각 하전입자의 밀도, S<sub>j</sub>는 전자 충돌 및 화학 반응에 의한 각 입자의 발생 및 소멸 항을 나타낸다. 또한 Γ<sub>j</sub>는 입자속(flux), D<sub>j</sub>는 확산 계수, μ<sub>j</sub>는 이동도, E<sub>j</sub>는 전계를 나타낸다. s는 전자의 경우 -1, 이온의 경우 +1을 나타낸다.

전극방향으로 입사하는 전자속은 전자 열속도의 함수로 결정되어진다. 그리고, 전극 면으로 향한 전자는 전부 흡수되는 것으로 가정하였다. 전극면에서의 전자 2차 방출 계수를 0.05로 설정하였다[7]. 평균 전자 에너지 및 전계의 함수로 구해지는 각 파라메타를 결정하기 위해, 연속방정식에 에너지 보존식 및 포아송 방정식이 포함되어 있다. 플라즈마 방전에 의한 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 기체의 온도는 열전달 방정식을 이용하여 계산하였다.

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

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

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

$$\frac{\partial (\kappa_g C_p T_g)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\kappa \frac{\partial T_g}{\partial x}) + P_g \quad (6)$$

여기서, q<sub>e</sub>는 엔탈피 유속(e는 전자 전하), H<sub>k</sub>는 전자 충돌에 의한 에너지 손실, R<sub>k</sub>는 반응 계수, k는 전리 및 여기 반응을 나타낸다. V는 전극 전위, ρ는 실 전하 밀도, ε<sub>0</sub>는 진공 유전율을 나타낸다. κ<sub>g</sub>는 가스 밀도, C<sub>p</sub>는 비열, T<sub>g</sub>는 가스 온도를 나타낸다. 또한 κ는 열전도도, P<sub>g</sub>는 가스 가열에 의한 전력 밀도를 나타낸다.

### 2.2. 챔버 및 외부 회로

평행 평판 전극에 콘덴서를 직렬 연결한 용량결합형 플라즈마 (CCP)의 모델을 그림 3에 나타내었다. 방전 여기 RF 전원 주파수는 13.56 [MHz], 전원 전압은 V<sub>rf</sub>=1100~1250[V], 최초의 가스온도는 T=300 [K]로 설정하였고, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 가스압력은 대기압 P=760 [Torr]으로 설정하였다. 전극간의 거리는 0.01 [cm], 전극면적은 1.0 [cm<sup>2</sup>]로 설정하였다. 전극간에 인가되는 전류(I<sub>g</sub>)는 다음과 같이 계산되어진다.

$$I_g = \frac{e}{V_g} \int_v (\Gamma_p - \Gamma_e) \cdot E_s dv \quad (7)$$

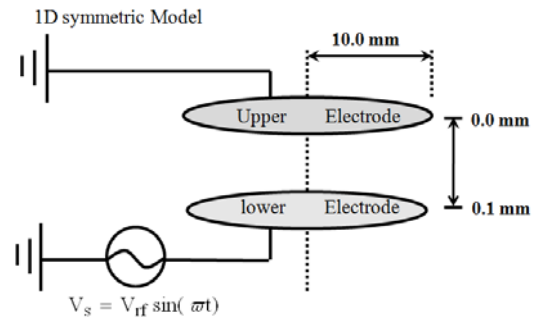


그림 3 용량결합형 플라즈마 모식도. 전원주파수 13.56 [MHz], 전극간격 0.01 [cm], 기압 760 [Torr].

Fig. 3 A schematic diagram for capacitively coupled plasmas. The frequency of source voltage is f=13.56 [MHz], electrode gap is 0.01 [cm], the pressure (P) is 760 [Torr].

### 3. 결과 및 고찰

그림 4는 질소가 20% 혼합된 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 플라즈마 특성을 보여주고 있다. 인가전압 1200[V], 입력전력 40 [kWcm<sup>-2</sup>]의 조건에서 RF 1 주기동안의 전자, 정이온, 공간전계 및 전자 에너지의 전극간 공간분포를 나타낸다. SF<sub>6</sub> 가스는 전형적인 전기적 부정기체(electro-negative gas)로 전자의 에너지가 낮으면 SF<sub>x</sub> (x=1~5) 및 F<sub>y</sub> (y=1~2) 라디칼에 포획되어, 그림 4의 (a)와 같이 벌크영역에서 전자의 밀도가 낮아지는 특성을 보여준다. 이것으로부터 SF<sub>6</sub> 기체가 전기적으로 절연성능이 아주 우수한 가스라고 설명할 수 있다.

상대적으로 전자의 에너지가 높은 쉬스영역에 비해서 벌크영역은 전자의 에너지가 낮으며, 이 결과 정이온 및 부이

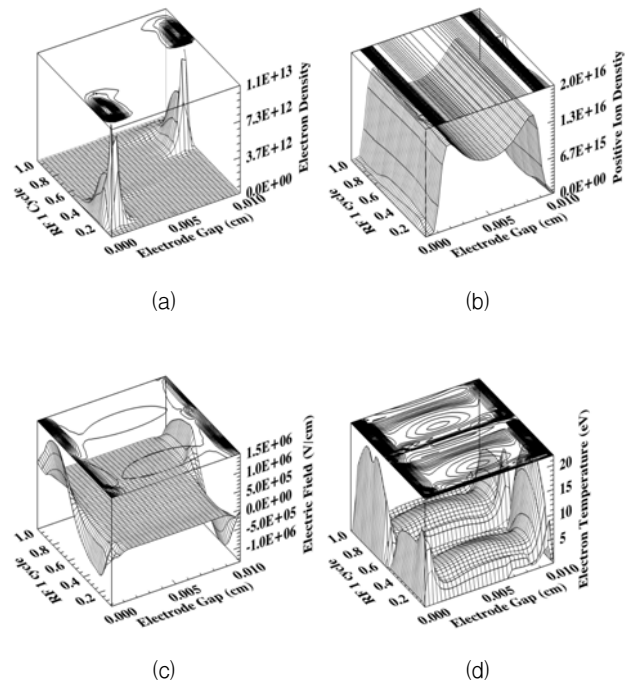


그림 4 RF 1 주기동안의 전자, 정이온, 전계 및 전자에 너지의 시·공간분포 (N<sub>2</sub> 20%).

Fig. 4 The spatio-temporal distributions of (a) electrons, (b) positive ion, (c) electric field and (d) electron temperature. N<sub>2</sub> gas were mixed at amount of 20%.

온의 밀도분포도 낮게 형성되면서 전극중앙에서 윗쪽 파인 공간분포를 보여준다 (그림 4의 (b)). 그림 4의 (c), (d)에서 볼 수 있듯이, 양 전극 부근은 정이온과 부이온의 밀도차에 의해 높은 공간전계가 형성되면서 전자의 에너지 또한 상대적으로 높게 분포함을 알 수 있었다.

그림 5는 순수한 SF<sub>6</sub> 가스의 공간전계를 보여주며, RF 1 주기동안 시간평균한 분포를 나타낸다. 전기적 부성기체는 RF 전원주파수에서 그림 5와 같이 공간전계의 이중층(double-layer)의 특징을 나타낸다 [13,14].

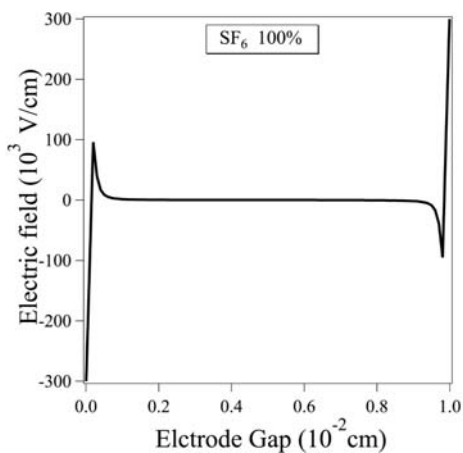


그림 5 1주기를 시간평균한 공간전계 분포.  
Fig. 5 Period-averaged spatial distribution of electric field.

공간전계의 이중층은 쉬스와 벌크영역의 경계에서 전자의 포획이 확대되어 부이온이 상대적으로 정이온보다 높게 형성되는 특성이다. 이러한 분포가 쉬스영역에서 정이온을 더욱 전극 방향으로 가속화시키는 원인이 되며, 전자들을 한 주기동안 벌크영역에 축적되지 못하게 하고 양 전극쪽으로 밀어낸다. 그러나, 전기적 정성기체 (electro-positive gas)인 질소가스가 함유되면서 이중층의 특성이 점점 소멸된다.

그림 6은 질소 가스를 20%, 50%, 80%로 각각 혼합한 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 기체의 전자밀도이며, RF 1주기를 시간평균한 전극간 분포를 나타내고 있다. 벌크-쉬스 경계영역에서 전자분포가 출렁이는 현상을 볼 수 있다. 질소가스는 전자의 저에너지 영역에서 강한 진동 및 여기현상을 일으키는 특성을 가지고 있어서 순간적으로 전극간을 운동하는 전자들의 에너지를 흡수한다. 에너지를 잃은 전자들은 SF<sub>6</sub> 가스에 쉽게 포획되기 때문에 밀도가 감소한다.

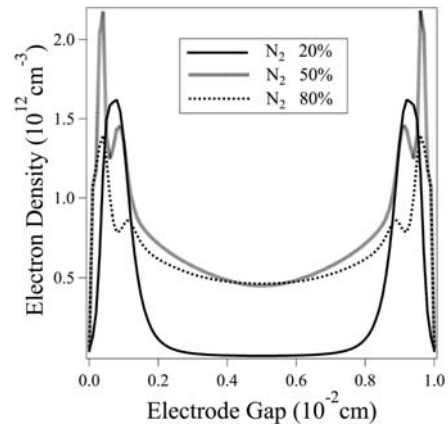
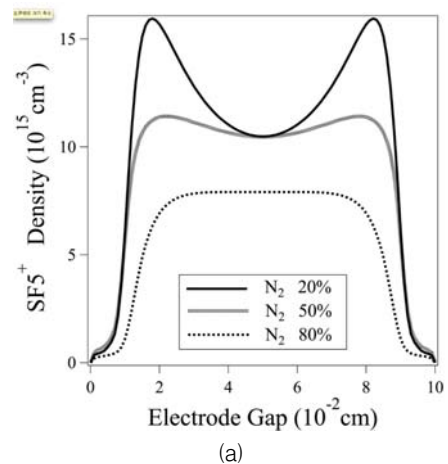


그림 6 질소 혼합조건에 따른 RF 1주기를 시간평균한 전자 수밀도 분포.

Fig. 6 Period-averaged spatial distribution of electrons according to N<sub>2</sub> mixture rates.

그림 7은 질소 가스의 혼합율에 따른 정이온 및 부이온의 RF 1주기를 시간 평균한 전극간 분포를 보여주고 있다. 질소 가스 혼합율이 증가함에 따라 이온밀도의 공간적 분포가 쌍봉우리에서 단봉우리의 형태로 변화하는 것을 알 수 있다.



(a)

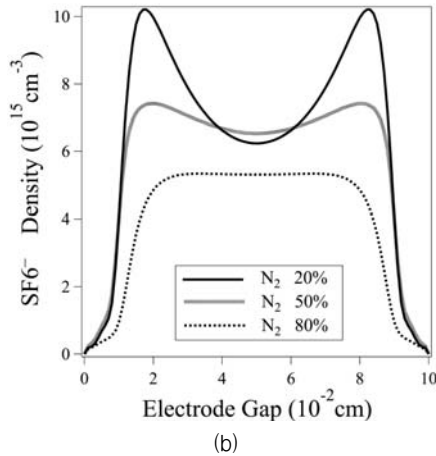


그림 7 질소 혼합조건에 따른 RF 1주기를 시간평균한 이온 수밀도 분포.

Fig. 7 Period-averaged spatial distribution of (a) positive ion ( $SF_5^+$ ) and negative ion ( $SF_6^-$ ) according to  $N_2$  mixture rates.

벌크영역에서 질소 가스로부터 생성되는 전자의 양이  $SF_6$  가스에 포획되어 소멸되는 양보다 상대적으로 많아지게 되면서 변화하는 현상으로 설명할 수 있다. 쉬스영역에서도 부이온의 발생 및 운동이 약화되면서 전자들이 쉬스-벌크의 경계영역을 보다 용이한 이동을 하게 된다.

그림 8은 질소 가스 혼합비별 부이온 입자들의 최고값을 보여주고 있다.  $SF_6^-$  이온이 제일 높게 분포하고,  $SF_5^-$ ,  $SF_4^-$ ,  $F_2^-$ ,  $F_1^-$  순으로 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

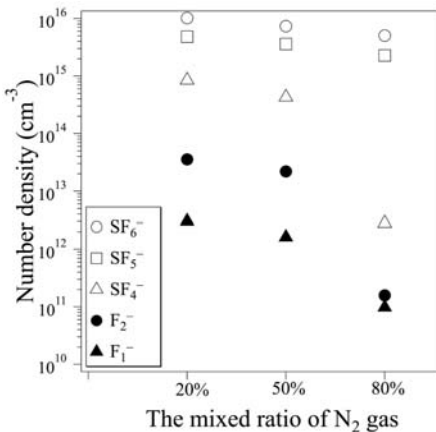


그림 8 질소 가스 혼합율에 대한 부이온 밀도의 비교.

Fig. 8 Comparison of negative ions according to  $N_2$  mixture rates.

#### 4. 결 론

본 연구에서는  $N_2$  기체를 20%, 50%, 80%로 혼합한  $SF_6/N_2$  방전 플라즈마 특성을 수치해석기법을 통하여 분석하였다. 평행판형 1차원 유체모델을 개발하여 8가지의 하전입자와 30가지의  $N_2$  여기입자를 고려한 시뮬레이션을 수

행하였다.

질소의 혼합비를 증가시키면, 전자의 부착능력이 감소하면서 전자의 생성 또한 상대적으로 증가 하게 되고 공간전계의 이중층이 점점 감소한다. 이러한 운동으로부터 전기적 부성 특성이 소멸됨을 알 수 있었다. 또한, 이온의 공간분포가 쌍봉우리에서 단봉우리의 패턴으로 전이되는 것을 확인할 수 있었다.

$SF_6$  가스는 절연성능이 매우 우수하여 전력기기에 주로 사용되는데, 최근에 그 사용량을 절감하기 위해 질소가스를 혼합하는 등의 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구결과, 50% 이상의 질소 혼합조건에서는 플라즈마 방전 특성이 전기적 정성상태로 변화하는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 2007학년도 목포대학교 기성회지원 장기연수에 의하여 이루어진 연구임

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Park, I. Henins, H.W. Herrmann and S. Selywn, "Discharge phenomena of an atmospheric pressure radio-frequency capacitively plasma source", J. Appl. Phys., Vol. 89, pp. 20, 2001
- [2] K.H. Schoenbach, M. Moselhy, W. Shi and R.Bentley, "Microhollow cathode discharges", J. Vac. Sci. Technol. A., Vol. 21, pp. 1260, 2003
- [3] X. Yuan and L. Raja, "Computational study of capacitively coupled high-pressure glow discharge in helium", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 31, pp. 495, 2003
- [4] J.J. Shi, X.T. Deng, R. Hall, J.S. Punnett and M.G. Kong, "Three modes in a radio frequency atmospheric pressure glow discharge", J. Appl. Phys., Vol. 94, pp. 6303, 2003
- [5] J. P. Boeuf and L. C. Pitchford, "Two-dimensional model of a capacitively coupled rf discharge and comparisons with experiments in the Gaseous Electronics Conference reference reactor", Phys. Rev. E, Vol.51 No.2, pp.1376, 1995
- [6] D. Herrebout, A. Bogaerts, M. Yan, R. Gijbels, W. Goedheer and A. Vanhulsel, "Modeling of a capacitively coupled radio-frequency methane plasma: Comparison between a one-dimensional and a two-dimensional fluid model", J. Appl. Phys., Vol.92, No.5, pp. 2290, 2002
- [7] Seiji Samukawa and Tetsu Mieno, "Pulsed-time modulated plasma discharge for highly selective, highly anisotropic and charge-free etching", Plasma Sources Sci. Technol. Vol 5, pp. 132, 1996
- [8] 하장호, 전용우, 최상태, 신용철, 박원주, 이광식, 이동인, 도대호, "A Study on the Characteristics of the Inductive Coupled  $SF_6$  Plasma", Proceedings of 1999

KIIEE Annual Conference-International Symposium of Electric Discharge and Plasma, pp. 149, 1999

- [9] 박원주, "A Study on the Characteristics of Radio-Frequency Induction Discharge Plasma", Journal of the Korean Institute of the Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 34, 2001.
- [10] D.P. Lymberopoulos and D.J. Economou, "Fluid simulations of glow discharge: Effect of metastable atoms in argon", J. Appl. Phys., Vol.73, No.8, pp. 3668, 1992
- [11] H. Itoh, T. Matsumura, K. Satoh, H. Date, Y. Nakano and H. Tagashira, "Electron transport coefficients in SF<sub>6</sub>", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 26, pp. 1975, 1993
- [12] Y. Ohmori, M. Shimozuma and H. Tagashira, "Boltzmann equation analysis of electron swarm behaviour in nitrogen", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 22, pp. 724, 1988
- [13] N. Nakano and T. Makabe, "Influence of driving frequency on narrow gap reactive ion etching in SF<sub>6</sub>", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 28, pp. 31, 1995
- [14] L. Lallement, A. Rhallabi, C. Cardinaud, M.C. Peignon-Fernandez and L.L. Alves, "Global model and diagnostic of a low-pressure SF<sub>6</sub>/Ar inductively coupled plasma", Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 18, pp. 025001, 2009

## 저 자 소 개



### 소 순 열 (蘇 淳 烈)

1970년 10월 8일생. 1996년 전남대 전기공학 졸업(석사). 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



### 이 진 (李 進)

1955년 10월 3일생. 1982년 전남대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1990년~현재 목포대 전기공학과 교수  
Tel : 061-450-2751  
Fax : 061-450-6285  
E-mail : jinlee@mokpo.ac.kr