

The Analysis of Insulation Properties with Electron Collision Processes on SF₆ Mixture Gases

소순열†
(Soon-Youl So)

Abstract - SF₆ gas would be used in power transformer, GIS (Gas insulated switchgear) and so on because of its electrically superior insulation and chemically stable structure. Recently, the reduction of SF₆ is required to avoid global warming and the researches on the dilution of SF₆ with other gases have been carried out. SF₆ mixture gases with N₂ and C_xF_y have drawn attention to the synergy effect. However, in order to understand the mechanism of the synergy effect, it is important to analyze and evaluate properties of mixture gases quantitatively.

In this paper, we investigated the mechanism of synergy effect from electron collision processes and electron energy distribution by solving Boltzmann equation with propagator method. Three kinds of gases for dilution of SF₆ (SF₆/N₂, SF₆/CF₄ and SF₆/C₄F₈) are considered in this simulation. On the properties of SF₆/N₂ mixture gas, the variation of reduced electric field was shown highly within 0%~40% mixtures of SF₆. And the more low-level electron energy has been distributed, the higher insulation capability has appeared.

Key Words : Gas Insulated Switchgear, SF₆/N₂ Mixture Gas, SF₆/CF₄ Mixture Gas, SF₆/C₄F₈ Mixture Gas, Synergy Effect, Propagator Method

1. 서론

SF₆ 가스는 화학적으로나 전기적으로 매우 안정적이어서 절연개폐기, 가스차단기 등의 전력기기에 사용되고 있는 절연물질이다. 전류를 차단할 때 발생하는 접점간의 아크를 압축실에서 가스를 급속히 압축하여 노즐을 통해 분사함으로써 소호하고, 전류 차단 후의 절연내력이 급속히 회복되는 장점을 가지고 있다. 또한, 차단기기를 소형화할 수 있으며 불활성가스로 전극소모가 적은 특성을 갖고 있으므로 고전압 대전류 절연체로 주로 사용되어 왔다. 그러나 지구 온난화 배출규제 가스로 규정되어 현재, SF₆ 가스의 배출량 삭감과 사용량의 저감 방안 등이 요구되고 있으며 동시에 전기적 성능, 열적 성능 및 안정성 등을 고려한 새로운 절연가스에 대한 관심이 매우 높아지고 있다[1~4]. 따라서, SF₆ 가스의 저감에 요구되는 대체가스를 분석하기 위해서는 혼합가스의 전자수송 특성을 통한 물성적 기초연구와 방전현상과 혼합가스 절연내력의 정량적 해석 등에 대한 연구가 먼저 수행되어야 할 것이다.

현재 SF₆ 가스를 희석하기 위해 N₂ 가스가 혼합된 SF₆/N₂ 혼합가스가 상용화되고 있으며, 이 혼합가스에는 절

연내력의 상승효과가 나타나 절연내력이 각 가스의 평균치보다 높은 절연성이 보여진다. 상승효과란 전리계수와 부착계수가 동일하게 되는 임계전계 (E/N)를 혼합비별로 측정하였을 경우, 각각의 단독가스일 때의 임계전계보다 높게 형성되는 것을 말한다.

본 연구에서는 SF₆ 가스에 N₂ 가스를 포함해서 CF₄ 및 C₄F₈ 가스와 혼합하였을 경우의 절연내력의 상승효과와 전자수송 특성 분석을 수치해석기법을 통하여 연구한다. 절연상승효과의 정량적 분석과 SF₆ 가스에 희석할 대체가스를 고려할 때 활용할 중요한 자료를 제공하고자 한다.

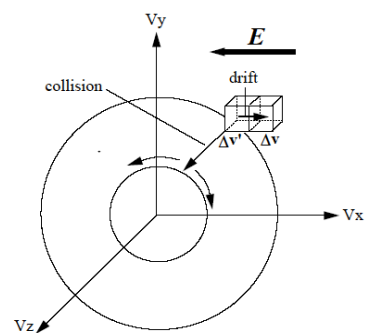


그림 1 속도공간에서 전자의 이동속도와 충돌과정.

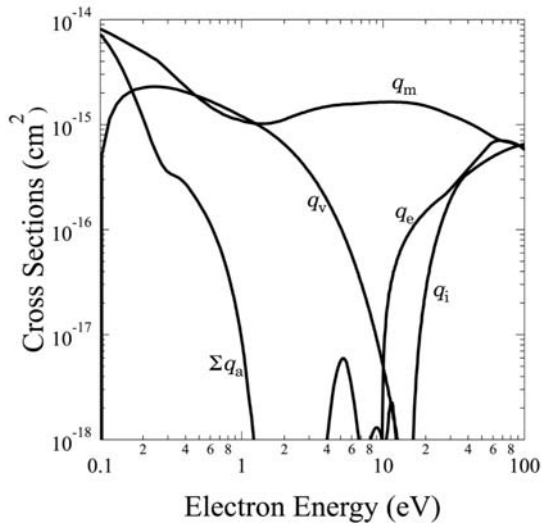
Fig. 1 The electron drift and collision processes within velocity space.

† 교신저자, 정회원 : 목포대학교 전기공학과 조교수 · 공박

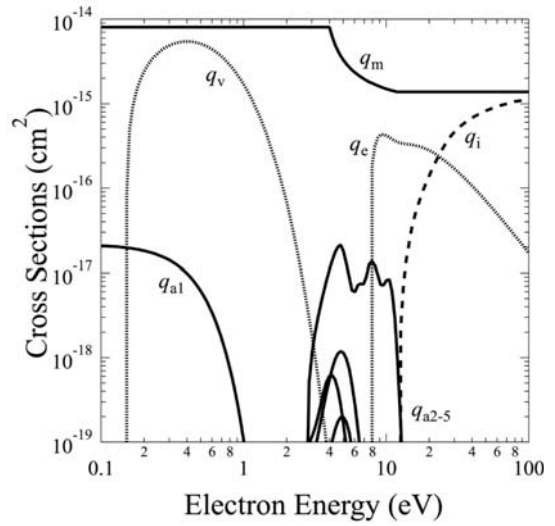
E-mail : syso@mokpo.ac.kr

접수일자 : 2010년 3월 2일

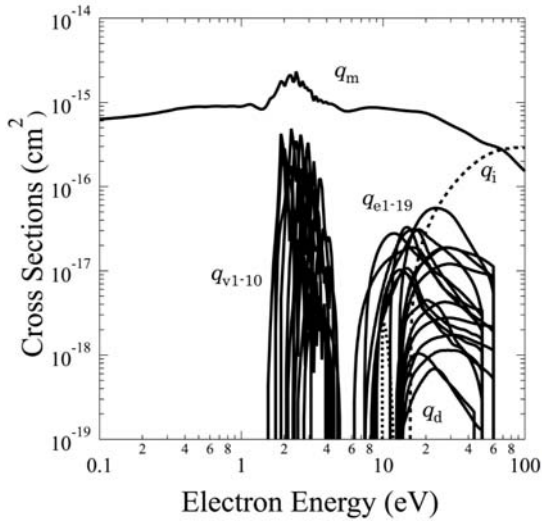
최종완료 : 2010년 3월 26일



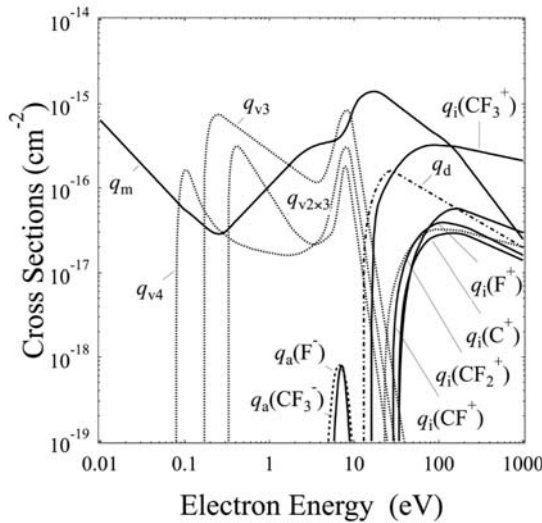
(a) SF₆



(d) C₄F₈



(b) N₂



(c) CF₄

그림 2 전자충돌 단면적. q_m 은 모멘텀, q_i 는 전리반응, q_d 는 해리반응, q_v 와 q_e 는 각각 진동 및 여기반응.

Fig. 2 The cross section set for (a) SF₆, (b) N₂, (c) CF₄, (d) C₄F₈ gases; q_m , momentum transfer; q_i , ionization; q_d , dissociation; q_v and q_e , vibration and excitation state, respectively.

2. 본 론

2.1 시뮬레이션 방정식

본 연구에 사용된 수치해석기법은 방전 플라즈마 중의 입자 움직임을 표현하는 기본방정식으로서 식(1)의 볼츠만 방정식을 계산하여 추적하는 입자의 에너지와 속도분포의 정보를 얻어 입자의 움직임을 정확히 해석하는 방법이다.

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial t} = \vec{v} \cdot \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{r}} + \vec{a} \cdot \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{v}} + \left(\frac{\partial \vec{f}}{\partial t} \right)_c \quad (1)$$

$\vec{f}(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 위상공간을 미소영역(셀)으로 분할하고 각 셀의 전자수로 표현한다. 볼츠만방정식에서 표현되는 전자의 흐름은 셀 사이의 전자의 흐름으로 간주하고 전자의 상태전이 확률을 이용하여 계산한다. 그림 1과 같이 외부에서 전계가 인가되면 셀내에 존재하는 전자가속은 속도공간의 평행 이동으로 계산하고, 충돌은 저에너지영역으로 이동하여 산란되는 것으로 계산한다[5].

전자군의 이동도와 충돌과정을 고려하여 볼츠만방정식을 변형함으로써 다음과 같이 전자 평균에너지($\bar{\epsilon}$), 이동속도(W)와 충돌반응계수(R)를 얻을 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int \frac{1}{2} m v^2 f(\vec{v}, t) d\vec{v}}{\int f(\vec{v}, t) d\vec{v}} \quad (2)$$

$$W = \frac{\int v f(\vec{v}, t) d\vec{v}}{\int f(\vec{v}, t) d\vec{v}} \quad (3)$$

$$R = \frac{\int Nqv f(v,t)dv}{\int f(v,t)dv} \quad (4)$$

여기서, v 는 평균속도, m 은 전자의 질량, N 은 기체분자 수밀도, a 는 외부인가전계에 의한 가속도를 나타내며, q 는 전자 충돌 단면적이다.

본 시뮬레이션에 사용된 전자 충돌 단면적은 그림 2에 나타내었다. 이 데이터들은 Itoh, Ohmori 등의 결과를 인용한 것이다[6-9]. 절연가스 연구의 실험방법인 펄스 다운젠티법(Pulsed Townsend Method)을 인용하여 평행판관 전극 시스템에서 시뮬레이션을 수행하였다. 온도 273 K (0°C), 1 torr에서 전자에너지 분포를 구하고 전자충돌주파수 및 에너지 손실 등을 분석하였다.

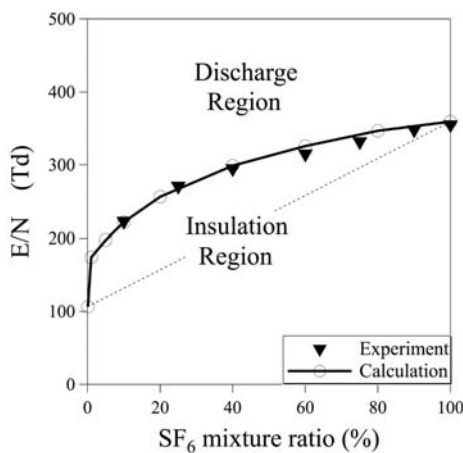


그림 3 SF₆ 혼합비에 따른 SF₆/N₂ 혼합가스의 임계전계(E/N) 의존성.

Fig. 3 The reduced electric field of SF₆/N₂ according to the ratio of SF₆ gas mixture.

3. 결과 및 고찰

그림 3에서와 같이, 질소 혼합비에 대한 SF₆/N₂의 임계전계 특성은 전자와 질소 입자의 비탄성충돌에 의해 전자에너지가 감소하고 SF₆ 분자가 전자를 포획하기 쉬운 상태로 전환함으로써 나타나는 현상이라고 정성적으로 설명되고 있다 [10]. 임계전계 (E/N)는 전리반응에 의해 발생하는 전자와 부착반응에 의해 소멸되는 전자의 수가 제로가 되는 전계를 나타낸다. 임계전계의 아래 영역은 절연영역을 표현하며 위 영역은 전리영역 또는 방전영역으로 설명된다. Frechette의 실험결과와 비교하였으며, 이것으로부터 본 시뮬레이션 기법의 타당성을 설명할 수 있다[10].

본 논문에서는 전자에너지 손실과 전자에너지 분포관계를 통하여 정량적으로 상승효과를 평가한다. 전자에너지 손실은 전자가 모든 충돌과정에서 발생하는 손실분 중에서 각각의 충돌과정에서 발생하는 손실분을 계산하여 분석한다. 각각의 전자충돌반응에 의한 에너지 손실계산에 있어서 탄성충돌 에너지손실(ϵ_m), 전자부착 에너지 손실(ϵ_a), 기타 비탄성충돌에 의한 에너지 손실(ϵ_j)은 다음과 같이 계산한다.

$$\epsilon_m = \frac{2m_e}{M} \int \epsilon \cdot Nq_m v \cdot f(v)dv \quad (5)$$

$$\epsilon_a = \int \epsilon \cdot Nq_a v \cdot f(v)dv \quad (6)$$

$$\epsilon_j = \int \epsilon_{loss,j} \cdot Nq_j v \cdot f(v)dv \quad (7)$$

그림 4는 주요한 충돌과정 중에서 SF₆/N₂ 혼합가스의 전자 여기반응과 진동반응에 대한 에너지 손실비를 보여준다. N₂의 전자에너지 손실은 대부분 전자 여기충돌에 의해서 감소되는 것을 확인하였으며, 이것으로부터 SF₆에 의한 전자 부착반응이 높게 형성되어 절연내력의 상승효과가 발생하는 것을 알 수 있었다.

그림 5는 SF₆에 CF₄와 C₄F₈ 가스를 혼합한 경우의 임계전계 혼합비 의존성을 보여주고 있다. N₂에 비해서 CF₄의 경우는 절연내력의 상승효과가 두드러지지 않지만, C₄F₈의 경우는 각각의

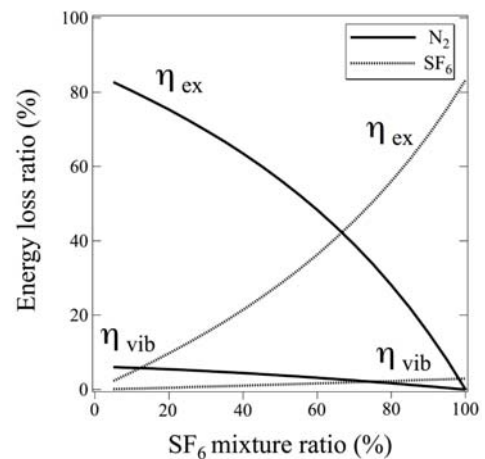


그림 4 SF₆ 가스의 혼합비에 따른 전자에너지 손실비.

Fig. 4 The ratio of electron energy loss according to the SF₆ gas mixture; η_{ex} , the energy loss for excitation collision and η_{vib} , for vibration collision.

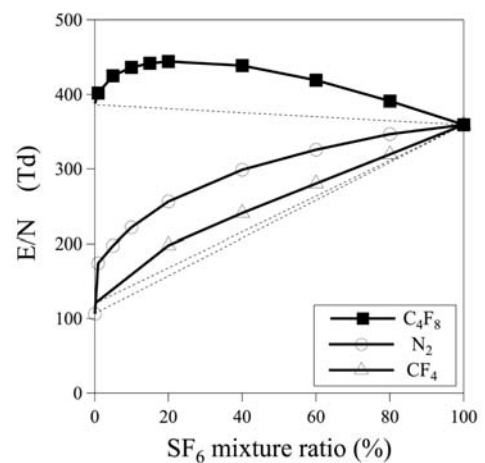


그림 5 SF₆ 혼합비에 따른 CF₄, C₄F₈ 혼합가스의 임계전계(E/N) 의존성.

Fig. 5 The reduced electric field of SF₆/CF₄ and SF₆/C₄F₈ gases according to the ratio of SF₆ gas mixture.

단독가스의 평균치 (그림 5의 점선)보다 임계전계가 매우 높고 강렬한 상승효과를 보여주고 있다. C₄F₈을 혼합함으로써 단독의 SF₆ 가스보다 더 우수한 절연성능을 보여준다. 전자 충돌 단면적으로부터 알 수 있듯이, 부착 단면적이 다른 가스에 비해 상당히 넓고 높은 분포를 하고 있기 때문에 높은 절연능력을 보이는 것이 당연하지만 혼합비에 대하여도 높은 포물선을 형성하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6에서와 같이 CF₄의 경우는 대부분의 에너지 손실은 SF₆의 전자 여기충돌에 의한 것으로 확인되며 진동충돌에 의한 CF₄ 가스의 에너지 손실분은 두드러지지 않음을 알 수 있었다. 따라서 임계전계의 혼합의존성 곡선이 평균치의 변화와 비슷하게 분포함을 확인할 수 있었다. C₄F₈의 경우는 N₂ 혼합특성과 비슷하고, 전자 여기충돌에 의한 C₄F₈ 가스의 에너지 손실이 명확함을 확인할 수 있다. SF₆보다 더 높은 에너지 손실율을 보여주고 있으며, 이것으로부터 매우 높은 상승효과가 나타난 것으로 설명할 수 있다 (그림 7).

그림 8에서와 같이, 각 혼합가스의 혼합비별 전자에너지 분포 변화를 통하여 상승효과 메커니즘을 분석하였다. C₄F₈ 가스의 경우는 임계전계를 440 Td로 설정하였고 N₂는 300 Td, CF₄는 250 Td로 계산하였다. 이 값들은 SF₆ 가스를 40%로 혼합했을 경우의 임계전계이다.

C₄F₈과 N₂의 경우는 5 eV 이하의 낮은 에너지를 갖는 전자가 많이 분포하고 있음을 나타내고 있으며, 이러한 낮은 에너지의 전자가 여기충돌에 의해서 에너지를 더욱 잃게 되고 SF₆ 가스가 이 전자들을 포획하기 쉬운 상태로 전환되는 것을 알 수 있었다. 특히 C₄F₈의 경우, SF₆ 가스의 혼합이 증가함에 따라 2중 피크의 곡선이 한 개의 피크 곡선으로 확산되는 것을 확인할 수 있었으며 높은 에너지 영역으로 전자들이 폭 넓게 분포되고 있음을 알 수 있었다. CF₄의 경우는 혼합비에 따른 전자에너지 분포곡선에 뚜렷한 변화를 확인할 수 없었으며, 이러한 결과들로부터 절연내력의 상승효과가 뚜렷하게 나타나지 않음을 설명할 수 있겠다.

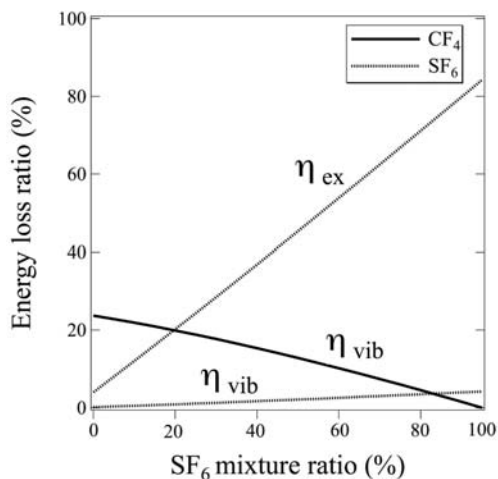


그림 6 SF₆ 가스의 혼합비에 따른 SF₆/CF₄ 가스의 전자 에너지 손실비.

Fig. 6 The ratio of electron energy loss on SF₆/CF₄ gas according to the SF₆ gas mixture; η_{ex} , the energy loss for excitation collision and η_{vib} , for vibration collision.

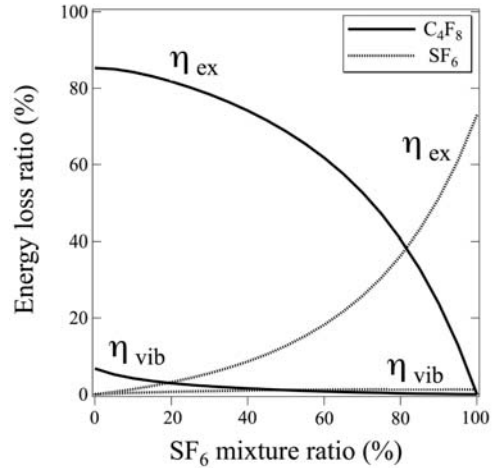
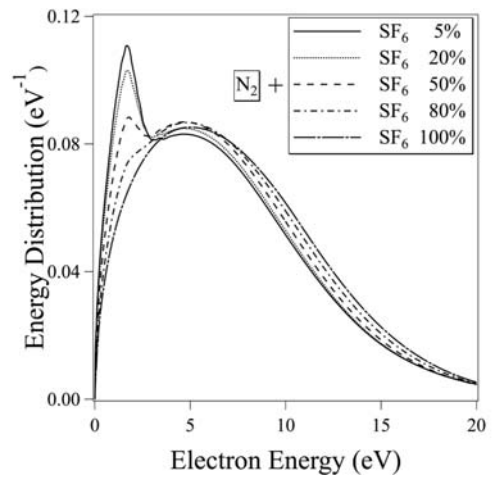
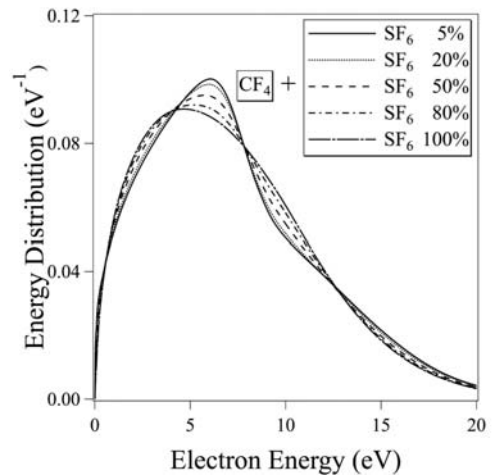


그림 7 SF₆ 가스의 혼합비에 따른 SF₆/C₄F₈ 가스의 전자 에너지 손실비.

Fig. 7 The ratio of electron energy loss on SF₆/C₄F₈ gas according to the SF₆ gas mixture; η_{ex} , the energy loss for excitation collision and η_{vib} , for vibration collision.



(a)



(b)

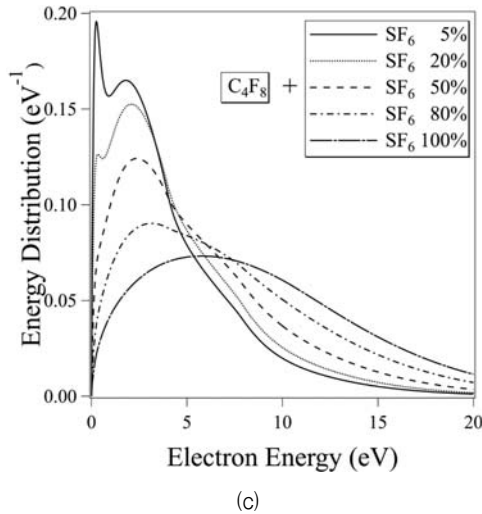


그림 8 SF₆의 희석가스 혼합비에 대한 전자에너지 분포: (a) N₂, (b) CF₄, (c) C₄F₈.

Fig. 8 The electron energy distributions for the ratio of (a) N₂, (b) CF₄ and (c) C₄F₈ gas mixtures with SF₆.

4. 결 론

본 연구에서는 SF₆ 가스에 N₂, CF₄ 및 C₄F₈의 가스를 혼합하고 임계전계의 혼합비 의존성과 에너지 손실 및 전자에너지 분포를 통하여 절연내력의 상승효과와 SF₆의 혼합기체의 유용한 특성을 분석하였다. 수치해석기법을 이용하여 전자충돌에 의한 입자들의 분포를 계산하였고 시공간적 분포를 통하여 혼합가스의 특성을 해석하였다.

SF₆ 가스에 N₂를 혼합하면 N₂의 여기충돌에 의해 분포된 저에너지의 전자가 SF₆에 쉽게 포획되어 절연내력이 증가됨을 확인하였고, N₂ 혼합비가 증가할수록 저에너지를 갖는 전자의 분포가 높아져 SF₆ 가스가 40% 이하로 혼합되었을 때 임계전계의 변화량이 높게 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

CF₄의 경우는 전자에너지 손실의 역할이 매우 저조하였고, 대부분 SF₆ 가스 자체의 여기반응에 의한 전자의 감소가 두드러졌다.

C₄F₈ 가스를 혼합하면 저에너지 영역에 2중 피크의 전자에너지 분포를 형성하였다. 이러한 낮은 에너지와 그 영역에서의 높은 전자입자 분포로 인하여 전자 포획이 쉽게 되고 절연영역이 매우 높게 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 앞으로 SF₆ 가스를 희석할 대체가스 연구의 기초자료로 응용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(2009T100100539) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

[1] J de Urquijo, J. L. Hernandez-Avila, E. Basurto and F. Ramirez, "Electron swarm and transport coefficients

for the binary mixtures of SF₆ with Ar and He", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 36, pp. 1489-1494, 2003

[2] Christophorou L. G., Olthof J. K., "Electron interactions with plasma processing gases", NIST International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, pp. mo02, 1997

[3] 서호준, 이동희, "SF₆계 혼합가스의 너임펄스 절연과피 특성", 한국전기전자재료학회, Vol. 18, No. 7, pp. 765-681, 2005

[4] 서영원, "절연가스(SF₆)의 온도변화에 따른 방전특성에 관한 연구", 석사학위논문, 영남대학교, 2005

[5] H. Sugawara, Y. Sakai, H. Tagashira and K. Kitamori, "The spatio-tempora development of electron swarms in gases: moment equation analysis and Hermite polynomial expansion", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 31, pp. 319-327, 1998

[6] H. Itoh, T. Matsumura, K. Satoh, H. Date, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron transport coefficients in SF₆", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 26, pp. 1975-1979, 1993

[7] Y. Ohmori, M. Shimozuma and H. Tagashira, "Boltzmann equation analysis of electron swarm behavior in nitrogen", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 21, pp. 724-729, 1988

[8] H. Itoh, T. Miyachi, M. Kawaguchi, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron transport coefficients in SF₆ and c-C₄F₈ mixtures", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 24, pp. 277-282, 1991

[9] H. Itoh, T. Matsumura, K. Satoh, H. Date, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron transport coefficients in CF₄", Proceeding 21st International Conference on Phenomena in Ionized Gases, pp. 385-386, 1993

[10] M. F. Frechette, "Experimental study of SF₆/N₂ and SF₆/CCl₂F₂ mixtures by the steady-state Townsend method", J. Appl. Phys., Vol. 59, pp. 3684-3693, 1986

저 자 소 개



소 순 열 (蘇淳烈)

1970년 10월 8일생. 1996년 전남대 전기공학 졸업(석사). 2003년 일본 홋카이도 대학교 대학원 전자정보공학 졸업(공학박). 2005년~현재 목포대학교 전기공학과 조교수

Tel : 061-450-2462

Fax : 061-450-6285

E-mail : syso@mokpo.ac.kr