

2000년도 대한전기학회 전문대학교육연구회 학계학술대회 논문집 2000. 7. 7-8

SF₆+Ar 혼합기체의 MCS-BE 알고리즘에 의한 전자에너지 분포함수

김상남* · 하성철**
인천전문대학*, 동국대학교**

A Study on the Electron Energy Distribution Function in SF₆+Ar Mixtures Gas used by MCS-BE Algorithm

Sang-Nam Kim*, Sung-Chul Ha**
Incheon Junior College*, Dongguk University**

Abstract - A Study on the electron energy distribution function in SF₆+Ar mixtures gas used by MCS-BE algorithm, the electron swarm parameters in the 0.5% and 0.2% SF₆+Ar mixtures are measured by time of flight method over the E/N(Td) range from 30 to 300(Td). A two-term approximation of the Boltzmann equation analysis and Monte Carlo simulation have been also used to study electron transport coefficients. The electron energy distribution function has been analysed in SF₆ gas and SF₆+Ar mixtures at E/N : 200(Td) for a case of the equilibrium region in the mean electron energy. The measured results and the calculated results have been compared each other.

1. 서 론

SF₆ 가스는 고압차단기에서 아크소호매체로 사용되는 열적 화학적으로 안정된 불활성의 무독, 무색의 기체로써 우수한 절연내력을 가지고 있다. 그러나 SF₆ 가스의 가격은 상당히 고가이므로 이를 대체하기 위해 다른 기체와의 혼합에 의한 가격의 절감이 특히 요구되고 있는 실정이다. SF₆ 가스는 각종 고전압기기 및 차단기에 광범위하게 이용되고 있으며 더욱이 혼합기체의 전기적 절연내력의 질적 향상을 위하여 전자수송 특성의 정량적인 규명은 임계절연파괴 전계 E/N(Td)에 의해서 절연평가 특성을 결정한다.^{[1][2]}

이것은 전자에너지 분포함수를 갖는 전자군과 하전입자군과의 충돌현상으로 나타나는 전자이동속도, 종횡방향의 확산계수, 전리, 부착 및 실효계수 등의 전자수송 특성의 실험적, 이론적 계산에 의하여 정량적으로 산출된다. 따라서 전리된 혼합기체중의 운동량 변환단면적, 여기, 전리, 부착 및 진동단면적의 값을 이용하여 전자수송특성(Electron Swarm Parameter)을 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)법과 볼츠만의 Backward Prolongation을 사용한 이론적 방법으로 계산하고 실험적으로는 TOF(Time of Flight)법의 전자도착 시간분포를 이용하여 구하였다. 이들 전자수송특성의 연구는 혼합기체의 전기절연가스의 특성평가, 소호 특성 및 각종 고전압기기의 이용가능성 특히 최근에는 Si계의 에칭가스로써 플라즈마 프로세싱의 중요한 가스의 하나로 이에 대한 기초적 물성연구와 전기적 특성을 체계적으로 확립하는데 목적이 있다.^{[3][4]}

본 연구는 전자수송특성의 이론적인 해석을 위하여 SF₆와 Ar가스의 전자충돌단면적은 Itoh, Ikuta, Bell, Nakamura등의 측정값을 이용하여 MCS, BEq법에 의

한 simulation의 결과와 Double shutter drift tube의 실험장치를 이용하여 TOF의 전자도착 시간분포로부터 산출된 실험결과를 이론치와 비교 검토하고 순수 SF₆기체와의 전자수송특성을 고찰한다. 더욱이 전자에너지 분포의 비등방성과 드리프트 속도의 전자부성특성이 나타나는 원인을 해석하고 그때의 전자 충돌단면적의 타당성에 대해서 검토한다. 그리고 실효전리계수 $\alpha - \eta / N < 0$ 의 영역으로부터 임계절연파괴 전계를 산출한다.

2. MCS - BEq법

본 논문의 이론적인 해석은 몬테칼로법(MCS)과 볼츠만법(BEq)을 이용하여 전자에너지 분포함수와 전자수송계수(전자군 파라미터)를 구하는 것으로 이것은 [0~1]사이에 일정한 분포를 갖는 난수(Random number)를 이용하여 충돌의 종류, 산란후의 방향 및 비행시간 등을 결정하면서 전자의 운동을 반복 추적한다. 또한 전자군의 성질을 조사하기 위한 몬테칼로법은 전자계내의 전자운동상태와 분자의 충돌산란화률을 고려하여 전자, 이온의 상태량을 추적하는 것을 기본으로 하여 입자를 확률현상의 난수로 모의하는 방법을 말한다. 또한 난수를 이용하여 충돌현상을 확률적으로 취급하고 사용한 난수를 계산기에 발생시켜 [0,1] 사이에 대응할 때 독립한 난수열을 다수회 시행하여 평균치를 계산기로 구하는 것이다. 난수를 변수 θ 와 $d\theta$ 의 미소 범위에서 발생하는 확률을 $f(\theta)d\theta$ 로 나타내면 다음과 같이 식(1)으로 나타낸다.^{[5][6][7]}

$$\int_0^{\theta_{max}} f(\theta)d\theta = r \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (1)$$

여기서 r 은 0~1사이에 균일하게 분포되어 있는 난수이다. 본 연구에서는 산출난수인 승적합동법으로 의사난수(擬似亂數)를 구하여 사용하고 승적합동법은 다음과 같은 난수발생법으로 나타낸다.

$$Y_{k+1} = ar_k + c \pmod{m} \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2)$$

식(1)에 의해서 순차적으로 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k$ 를 발생시켜 가는 방법이다. 여기서 a, c, m 은 정의 정수이며 본 논문의 프로그램에서는 다음의 값을 이용하였다.

$a: 1229, c: 351750, m: 1664501$

이 경우에 $ar_k + c$ 를 m 으로 나누어서 남은 나머지를 의미한다.

또한 r_k 에 대해서는

$$S_k = \frac{r_k}{m} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3)$$

으로 계산하면 S_k 는 구간 [0,1] 사이의 일정한 분포의 난수가 된다. 이 방법으로 발생한 난수 r_k 는 $0 \leq r_k \leq m-1$ 를 찾아내어 m 개를 생성하고 계속 반복된다.

TOF에서는 전자의 위치와 시간을 지정하기 때문에 샘플수가 적으며 에너지분포를 구할 때에도 샘플수는 적게 되어 통계적 변동을 많이 포함하는 결과를 나타낸다. TOF 샘플링법으로 방전공간의 전자수송계수를 구하기 위해서는 시간 t_k, t_{k+1} 에서 전자의 샘플수를 M_k, M_{k+1} 위치 영역을 $Z_i(t_k)$ 로하면 시간 t_k 에서의 전자군 중심의 평균위치 $\langle Z_i(t_k) \rangle$ 는 다음과 같이 식(4)으로 나타낸다.^[6]

$$\langle Z(t_k) \rangle = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} Z_j(t_k) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (4)$$

전자군의 중심 이동속도 W 는 다음과 같다.

$$W = \frac{\langle Z(t_{k+1}) \rangle - \langle Z(t_k) \rangle}{t_{k+1} - t_k} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5)$$

한편 전자의 확산계수는 시간 t_k 일 때 전자의 전계방향의 중심위치를 $Z_m(t_k)$ 라면 종방향 확산계수 D_L 은

$$D_L = \frac{1}{2! M_k} \sum_{j=1}^{M_k} (Z_j - Z_m(t_k))^2 \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (6)$$

식(5)의 시간에 대한 기울기로 나타낸다.

그리고 횡방향 확산계수 D_T 는 전계에 직각방향으로 위치가 분산되어 다음과 같이 시간에 대한 기울기로 나타낸다.

$$D_T = \frac{1}{2} \frac{1}{2! M_k} \sum_{j=1}^{M_k} (r_j)^2 \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (7)$$

여기서 r_j 는 Z 의 직각방향의 성분이다.

평균에너지 ($\bar{\epsilon}$)는 i 번째의 에너지를 ϵ_i 라고 하면

$$\langle \bar{\epsilon} \rangle = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} \epsilon_j \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (8)$$

로 나타낸다.

그리고 전자상태의 공간성장과정이 정상상태 일 때 전자군 파라미터를 이용하여 전리계수, 부착계수 및 실효전리계수는 2항 근사에 의한 볼츠만 방정식의 해석에서 아래 식 (9), (10)으로 나타낸다.^{[5][6]}

$$\alpha = \frac{\nu_i}{\frac{W_s}{2} + \left\{ \left(\frac{W_s}{2} \right)^2 - (\nu_i - \nu_a) D_s \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$\eta = \frac{\nu_{as}}{\frac{W_s}{2} + \left\{ \left(\frac{W_s}{2} \right)^2 - (\nu_i - \nu_a) D_s \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (10)$$

여기서 ν_i 는 전리주파수, ν_a 는 부착주파수이다.

본 논문에서는 볼츠만방정식에 의한 전리, 부착 및 실효전리계수의 수치해석은 Philip E. Luft의 Backward prolongation계산법을 이용하였다.^[7] 또한 전자가 음극에서부터 양극에 도달할때 까지 SPARC

WORKSTATION(SS-20)으로 반복추적하여 계산하였고 그림 2.1은 본 시뮬레이션 전체의 개략적인 흐름을 나타내었다.

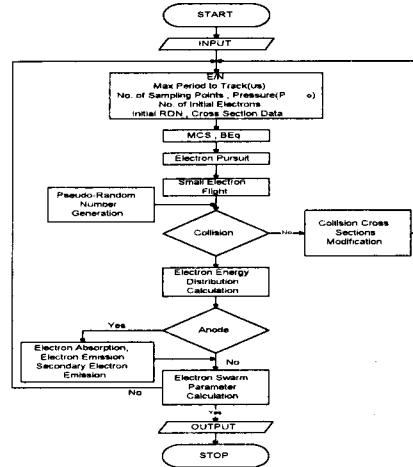


그림 2.1 시뮬레이션 흐름도

Fig. 2.1 Flowchart of the simulation

3. 전자 충돌 단면적

3.1 SF₆의 전자 충돌단면적

본 논문에서 사용한 SF₆와 Ar의 전자 충돌 단면적을 각각 그림3.1과 그림3.2에 나타내었는데 이들 충돌 단면적은 전자의 특성을 파악하는 기초 자료로써 상당히 중요하다. 특히 여러 단면적 중에서 절연가스에 관련된 전리와 부착 단면적, 에칭에 관련된 여기, 해리 단면적은 충돌 단면적에서도 상당히 중요하다. 그중에 SF₆의 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착 단면적 (Q_{a1}, Q_{a2})이 낮은 에너지 영역에 존재하고 또한 해리성 부착 단면적(Q_{a3}, Q_{a4}, Q_{a5})의 Threshold에너지의 값은 각각 3.29(eV), 3.95(eV), 1.57(eV)를 이용하였다. 그리고 탄성충돌에 의한 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i), 진동 여기 단면적(Q_v) 및 전 충돌 단면적(Q_T) 등의 값은 그대로 이용하여 계산하였다.

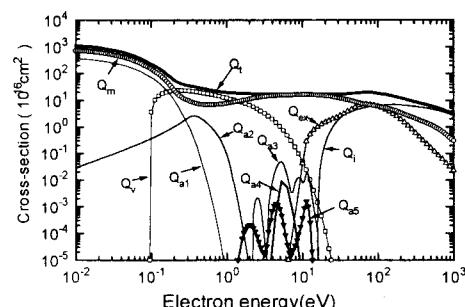


그림 3.1 SF₆기체의 전자충돌단면적

Fig. 3.1 The collision cross sections of electrons in SF₆ gas

3.2 Ar의 전자 충돌단면적

Ar의 전자 충돌단면적에 대한 운동량 변환단면적 (Q_m), 여기단면적(Q_{ex}), 전단면적(Q_i) 등을 그림3.2에 나타내었다.^[8]

이 Ar의 전자 충돌단면적은 저에너지 영역(0~0.23eV)에서 Ramsauer minimum을 갖는 운동량 변환단면적(Q_m)은 K.L.Bell, N.S.Scott의 계산값을 이용하였고 전자에너지 0.136~54.4eV 영역의 범위에서는 W.C.Fon의 측정값을 이용하였다.^[9] 그리고 여기단면적(Q_{ex})은 허용대 준위의 여기단면적($^3P_2, ^3P_1, ^3P_0, ^1P_1$)과 금지대 준위의 여기단면적(13.0~13.9eV)으로 분류하여 Y. Nakamura, Kurachi, Chutjian 등의 측정값을 이용하고 전리단면적은 Donald Rapp이 측정한 결과를 이용하였다.

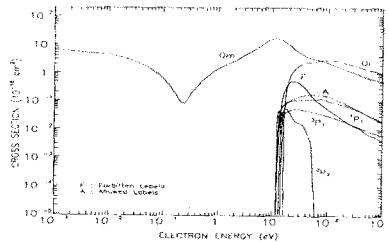


그림 3.2 Ar가스의 전자 충돌단면적

Fig. 3.2 The collision cross sections of electrons in Ar gas

4. 결과 및 고찰

4.1 전자이동속도

그림4.1에 나타난 전자 이동속도는 희가스 Ar에 미량의 분자가스 0.2[%], 0.5[%]의 SF₆를 혼합한 SF₆+Ar 혼합기체중의 전자도착 시간분포에 의해서 측정하였다. 측정한 실측치와 Monte Carlo Simulation (MCS)으로 구한 이론치의 결과를 순수 Ar, SF₆가스의 전자이동속도와 비교 검토하였다.

그림의 E/N = 30~300(Td) 범위에서 E/N(Td)의 증가에 따라 순수 이론치와 혼합 실현치가 차이를 나타내고 있다. 특히 E/N=30~150(Td)의 저영역범위에서 증감의 차이가 크고 그이상의 영역에서는 증감의 차이가 비교적 적었다. 이것은 E/N(Td)가 낮을 때 운동량단면적에 Ramsauer minimum 최소값을 갖는 Ar가스의 에너지영역에서 분자가스 SF₆의 충돌단면적이 크고 또한 대단히 큰 부착충돌의 영향과 드리프트 거리에 따라서 전자도착시간분포의 중심이동의 영향으로 전자수의 증감이 발생하기 때문에 전자이동속도의 혼합기체의 실측치가 순수 SF₆, Ar의 전자이동속도보다 증가하는 영향을 나타내었다.^{[9][10][11]} 즉 전자이동속도는 저에너지 영역에서 분자가스의 혼합비에 따라서 분자가스의 비탄성 충돌단면적은 거의 기여하지 않는 것으로 생각된다. 한편 전계에 의하여 에너지를 받은 전자가 미소거리를 진행하는 동안에 충돌 전리하는 확률은 평균자유행정

으로 나타낸다. 따라서 평균자유행정은 기체압력(P_0)에 반비례하므로 저압력에서 평균자유행정과 전자에너지는 크기 때문에 전자이동속도가 증가하는 것으로 생각된다. 그리고 전자이동속도는 SF₆가스의 혼합비의 변화에 따라 낮은 에너지영역에서 부착단면적의 영향이 크므로 그 의존성이 크게 나타났으며 실효전리계수 $\alpha - \eta / N < 0$ 가 되는 임계절연파과 전계 E/N : 125, 175(Td)의 값으로 산출되어 순수SF₆의 값보다 감소하여 절연성능이 떨어지는 것으로 생각된다.

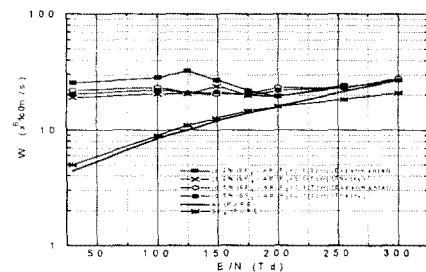


그림 4.1 SF₆+Ar가스중에서 전자이동속도

Fig. 4.1. The drift velocity of electrons in SF₆+Ar gas

4.2 종방향 및 횡방향확산계수

그림4.2, 그림4.3은 종방향 및 횡방향확산계수를 나타내는 전자도착 시간분포가낸 것이다. 이들의 측정치의 값은 혼합비에 따라서 E/N(Td)의 의존성은 크게 나타나지 않았으나 혼합기체의 높은 E/N(Td)영 불안정하게 나타난 것으로 보아 정확한 ND_L, ND_T값으로 결정하기에는 어렵다고 생각된다.

그리고 혼합기체중의 전자의 확산은 부착계수 및 이동속도 등의 영향으로 하전입자밀도의 공간적 구배와 전계로 인하여 하전입자의 운동이 평형상태와 거의 균일한 밀도 분포를 나타낸 것으로 생각된다.^[12]

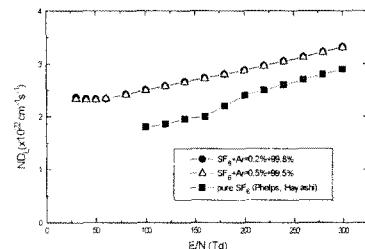


그림 4.2 SF₆+Ar가스중에서 종방향확산계수

Fig. 4.2 The longitudinal diffusion coefficients in SF₆+Ar gas

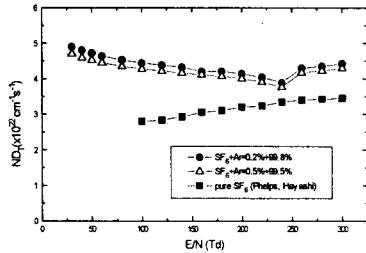


그림 4.3 SF₆+Ar가스중에서 횡방향확산계수
Fig. 4.3 The transverse diffusion coefficients in SF₆+Ar gas

4.3 전리, 부착 및 실효전리계수

그림 4.4, 그림4.5, 그림4.6에서는 SF₆+Ar가스 중에서 전리계수 (α/N), 부착계수 (η/N) 및 실효전리계수 ($\alpha-\eta/N$)를 E/N : 30~300(Td) 범위에서 나타내었다. 본 연구에서 혼합가스중의 계산결과는 Phelps, M.Hayashi의 순수 SF₆가스 실험치와 같은 경향으로 증감하였고 혼합비의 영향으로 증감의 차이를 나타내었다.⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ 이것은 E/N(Td)이 낮은 영역에서의 전자의 운동은 부착단면적이 큰 분자에 부착하여 부이온의 형성과 Ar가스의 Ramsauer minimum을 갖는 운동량 변환단면적의 영향으로 전하는 전리되고 E/N(Td)가 높은 영역에서는 비탄성 충돌단면적에 의하여 전자의 운동에너지지를 저하시키므로 전리는 증가된다고 생각된다.

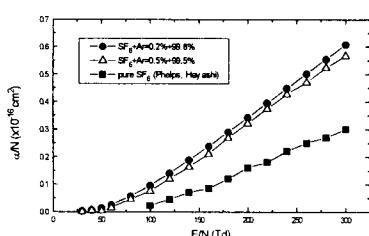


그림 4.4 SF₆+Ar가스중에서 전리계수
Fig. 4.4 The ionization coefficients in SF₆+Ar gas

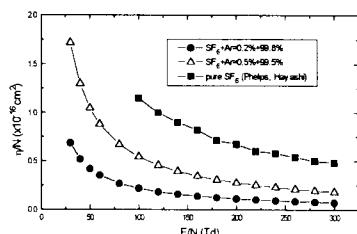


그림 4.5 SF₆+Ar가스중에서 부착계수
Fig. 4.5 The attachment coefficients in SF₆+Ar gas

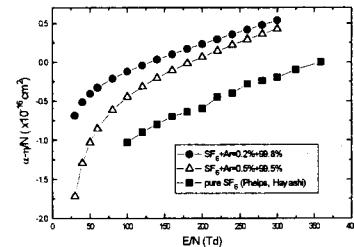
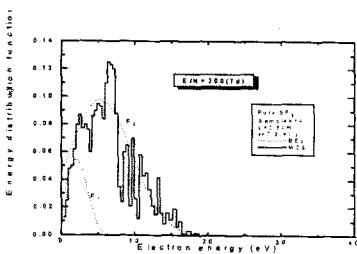
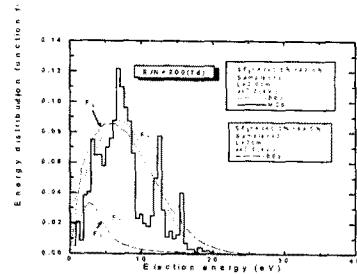


그림 4.6 SF₆+Ar가스중에서 실효전리계수
Fig. 4.6 The effective ionization coefficients in SF₆+Ar gas

한편 SF₆에 존재하는 대단히 큰 부착단면적의 영향으로 기체중에 발생한 전자를 부착하여 부이온이 되는 경향이 크므로 η/N 은 E/N의 증가와 더불어 감소하였다. 그리고 전리계수와 부착계수의 차로 계산되는 ($\alpha-\eta/N$)의 실효전리계수는 $\alpha-\eta=0$ 값을 갖는 E/N(Td) 최소값 이하로 되게 충분치 않으면 전자의 충돌 전리는 효과적으로 이루어지지 않는다고 생각된다. 즉 실효전리계수 ($\alpha-\eta/N$)이 부(-)의 값을 나타내는 E/N : 30~130(Td) 범위에서 절연내력의 효과를 나타낼 수 있으나 그이상의 영역에서는 혼합비에 따라서 절연내력의 효과를 나타내지 않았다.

4.4 전자에너지 분포함수

그림4.7, 그림4.8은 순수 SF₆가스와 SF₆+Ar 혼합가스 중에서 탄성 및 비탄성충돌을 고려하여 P₀=0.1 (Torr)에서 E/N : 200(Td)에서 전자에너지 분포함수 F(ϵ)를 BEq와 MCS법으로 나타낸 것이다. 전계가 인가될 때 단일기체와 혼합기체 등을 이동하는 전자군의 에너지 분포함수는 어떤 조건에서 전자의 각 에너지에 대한 확률밀도와 전자와 분자와의 각 충돌 단면적이 방전현상으로 인하여 전자수송특성에 직접적으로 관련되는 물리량이다.^[6] 그 때 하전입자는 어려 종류의 에너지 성분을 갖는 기체분자가 열 평형 상태에서 Maxwell-Boltzmann 에너지 분포를 나타낸다. 전자가 전계에 의하여 운동할 때 샘플 14, 거리 L: 2.6(cm), 평균에너지 : 7.3(eV) 및 E/N:200(Td) 범위에서 2사항 근사식에 의한 BEq 및 MCS 법으로 전자를 추적하여 나타난 값은 순수기체와 혼합기체와의 전자에너지 분포함수는 평형 및 비평형 상태로 변하였다. F(ϵ)의 초기 값에서는 전자에너지가 증가하고 높은 전자에너지 측에서는 감소하였다. 이와 같은 현상은 낮은E/N(Td)에서 가스의 Ramsauer minimum이 존재하는 원인으로 생각된다. 또한 MCS법에 의하여 계산한 결과는 큰 차이가 나타났다. 볼츠만 방정식의 2항근사 해석에서 등방성분 F₀(ϵ)에 대하여 비등방성분 F₁(ϵ)의 값이 적은 결과를 나타냈으며 MCS법에 의한 결과의 차이는 전자수와 에너지가 높을 때는 에너지 분포는 감소하기 때문에 25(eV) 이상에서 일치되고 있다.

그림 4.7 SF₆+Ar가스중에서 전자에너지 분포함수Fig. 4.7 The energy distribution function of electrons in SF₆+Ar gas그림 4.8 SF₆+Ar가스중에서 전자에너지 분포함수Fig. 4.8 The energy distribution function of electrons in SF₆+Ar gas

5. 결 론

SF₆+Ar 혼합기체 중에서 전자수송특성은 이중셔터 드리프트의 설계장치를 비행시간법의 원리로 이용하여 30≤E/N≤300(Td) 범위에서 측정하였고 MCS와 BEq에 의한 이론값의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 SF₆+Ar 혼합기체 중에서 전자의 이동속도와 종횡방향의 확산계수를 30≤E/N≤300(Td) 범위에서 전자도착시간 분포로부터 측정하였고 전자 충돌단면적을 이용하여 MCS 및 BEq법으로 전리, 부착, 실효전리계수 및 전자에너지 분포함수를 계산하였다.
2. 전자이동속도는 상대 전계의 세기 E/N 125~200Td 영역에서 순수 단일기체와 혼합기체의 차이가 나타났으며 특히 부구배(NDC: Negative Differential Conductivity)특성이 나타남을 알 수 있었다. 그리고 그 이상의 영역에서는 전리에 의한 전자증배의 크기에 따라 증가됨을 확인하였다.
3. 전자에너지 분포함수는 등방성분(F₀)과 비등방성분(F₁)에서 현저한 차이를 나타내었고 평균에너지가 평형상태인 경우 sample = 14, L = 2.6(cm)에서 계산한 MCS 에너지분포가 정점에서 큰 차이를 나타내었다. 이것은 전자가 여기에 대해서 에너지를 잃어버린 값이 다른 영역에 비해

큰 것으로 생각된다.

4. 전자이동속도는 순수SF₆가스에 비해 혼합비변화에 따라서 낮은 에너지영역에서 그 의존성의 영향이 크게 나타났으며 전리와 부착계수의 차이로 나타나는 실효전리계수 $\alpha - \eta / N < 0$ 가 되는 임계절연파괴전계 E/N값은 125(Td), 175(Td)로 산출되었고 이와 같은 값은 순수SF₆(E/N : 359Td, Itoh et al)에 비해 현저하게 감소되었음을 확인하였다.

[참고문헌]

- [1] V.N.Maller and M.S.Naidu, "Advances in high voltage insulation and arc interruption in SF₆ and vacuum," Pergamon Press, 1981
- [2] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF₆ : I. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, pp.922-930, 1988.
- [3] 菅野卓雄 “半導體 プラズマ プロセス技術”(産業図書), pp.38-50, 1993.
- [4] R.W.L. Thomas, and W.R.L. Thomas, "Monte Carlo Simulation of electrical discharge in gases", J. Phys. B, Vol.2, pp.562-570, 1969.
- [5] モンテカルロ法とシミュレーション(培風館), 1989.
- [6] 氣體放電 シミュレーション技法(제140호), 1974.
- [7] Philip, E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients." JILA.information center report, No.19, 1975
- [8] 하성철, 전병훈, 백승권, “몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송 계수에 관한 연구”, 전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp.685-692, 1995.
- [9] K.L.Bell, N.S.Scott and M.A.Lennon, "The Scattering of low-energy electrons by Argon atoms" J.Phys. B: At. Mol. Phys. 17, pp.4757-4765, 1984.
- [10] Y.Nakamura and M.Kurachi, "Electron Transport Parameters in Argon and its momentum transfer cross section" J.Phys.21, pp.718-723, 1988.
- [11] Arati Dasgupta and A.K.Bhatia, "Scattering of electrons from Argon atoms" Phys. Rev.A, Vol.32, No. 6, pp.3335-3341, 1985.
- [12] 하성철, 서상현, “SF₆가스의 전자수송특성에 관한 몬테 칼로 시뮬레이션”, 전기전자재료학회지, Vol. 9, No. 7, pp.660-667, 1996.
- [13] A. V. Phelps and R. J. Van Brunt "Electron-transport, ionization, attachment and dissociation, coefficients in SF₆ and its mixtures", J.Appl. Phys. 64, pp.4269-4277, 1988.
- [14] M. Hayashi, and S. Hara, "Joint Symposium on Electron and Ion Swarm and Low Energy Electron Scattering", A Satellite of ICPEAC XVII, Proc pp.109-111, 1991.