

# SF<sub>6</sub> 가스의 전리 및 부착계수에 관한 연구

(A study on the electron ionization and attachment coefficients ins SF<sub>6</sub> gas)

徐相賢\* · 柳會英\*\* · 金相南\*\*\* · 河聖哲\*\*\*\*

(Sang-Hyeon Seo · Heoi-Young Yu · Sang-Nam Kim · Sung-Chul Ha)

## 요 약

본 논문은 저자들에 의해 결정된 전자충돌단면적을 사용하여 몬테칼로 시뮬레이션과 볼츠만 방정식법에 의해 E/N : 150~800(Td) 범위에서 계산된 SF<sub>6</sub> 가스의 전자수송 특성과 TOF법에서 구한 전자군 파라미터 값들을 나타냈다. 전자기동 속도 전자전력 또는 부착계수, 종 · 횡방향 확산계수 등의 전자군 파라미터 값들은 E/N 범위에서 실험치와 이론치가 일치하였다. 전자사태의 특성은 전자에너지의 비평형영역에서 고려되었다. 전자에너지 분포함수는 평균에너지의 평형영역에 대하여 E/N : 500~800(Td)에서 해석하였다. 그 결과의 타당성은 TOF법에 의해 입증되었다.

## Abstract

This paper describes the electron transport characteristics in SF<sub>6</sub> gas calculated for range of E/N values from 150~800(Td) by the Monte Carlo simulation and Boltzmann equation method using a set of electron collision cross sections determined by the authors and the values of electron swarm parameters are obtained by TOF method. The results gained that the values of the electron swarm parameters such as the electron drift velocity, the electron ionization or attachment coefficients, longitudinal and transverse diffusion coefficients agree with the experimental and theoretical for a range of E/N. The properties of electron avalanches is concerned electron energy non-equilibrium region. The electron energy distributions function were analysed in sulphur hexafluoride at E/N : 500~800(Td) for a case of non-equilibrium region in the mean electron energy. The validity of the results obtained has been confirmed by a TOF method.

Key word(중요용어) : The electron transport coefficients(전자수송계수), TOF(비행시간법),  
electron swarm parameter(전자군 파라미터)

\*正會員 : 동국대 대학원 전기공학과 석사과정

\*\*正會員 : 대림전문대 전자과 교수

接受日字 : 1996年 10月 25日

\*\*\*正會員 : 인천전문대 전기과 교수

\*\*\*\*正會員 : 동국대 공대 전기공학과 교수

## 1. 서 론

전계중에서 방전 현상으로 전자군의 성질을 규명하기 위해서는 전자수송계수(전자군 파라미터) 즉 전자이동속도, 전리, 부착계수, 종횡방향의 확산계수, 평균에너지 및 전자에너지 분포함수 등을 해석해야 한다. 그리고 이와같은 전자수송계수를 해석하기 위해서는 정확한 운동량변환 단면적, 여기 단면적, 전리 및 부착단면적이 필요하고 이들의 값을 이용하여 전자군 파라미터의 특성을 볼츠만 방정식과 몬테칼로 시뮬레이션의 TOF샘플링에 의해서 구하여지고 있다.<sup>1, 2, 3, 4)</sup> 특히 몬테칼로법은 가스의 탄성 및 비탄성충돌을 고려한 비평형상태의 비교적 높은 E/N(E: 전계, N: 기체분자수밀도)영역의 범위에서 낮은 전리로 전자에너지 분포 함수와 전자군의 파라미터를 해석하는 가장 우수한 방법으로 현재 많은 연구자들에 의해 이용되고 있다.<sup>1, 2)</sup>

이와같은 전자군 파라미터 특성(전자수송계수)은 방전공간내에서 난수(random number)를 이용하여 전자의 운동을 각종 파라미터의 위치적 변동에 의해서 전자의 평균 에너지와 전자 밀도 및 시간의 함수로서 추적하여 해석하는 것이다.<sup>1, 2, 3)</sup> 이와 같은 이론은 최초 H. Itoh, T. Musha<sup>5)</sup> 및 R. W. L. Thomas, W.R.L Thomas<sup>6)</sup>에 의하여 전자사태에 대한 연구에 적용되었다.

SF<sub>6</sub>가스는 전기 절연 성능과 전류의 차단성능이 우수한 특성을 가지고 있으므로 각종 고전압기에 이용되고 있다. 그리고 최근에는 약전리 기체 플라즈마 프로세스의 에칭(etching)가스 또는 반도체 미세가공 분야 등에도 이용이 기대되고 있는 추세에 있다.<sup>7)</sup> 더욱이 절연 기체의 특성평가지수는 전자의 전리계수( $\alpha$ )와 부착계수( $\eta$ )로 나타낼 수 있으며 이들의 값은 전기 기기 설계에 귀중한 데이터로 활용되고 있다.

본 연구에서는 SF<sub>6</sub>기체의 전기 전도 특성을 나타내는 전리계수( $\alpha/N$ ), 부착계수( $\eta/N$ ), 실효전리계수( $\alpha-\eta/N$ ), 전자이동속도(W), 전자의 종횡방향의 확산계수( $ND_L$ ,  $ND_T$ ) 전자에너지 분포함수 및 평균에너지 등의 전자수송계수를 E/N [Td]: 150~800 [Td] (E: 전계, N: 기체분자수

밀도, 1 [Td]= $1 \times 10^{-17}$  [V·cm<sup>2</sup>], N:  $3.5353 \times 10^{16}$  [cm<sup>-3</sup>] 0°C 1 [Torr]에 해당) 범위에서 볼츠만 방정식에 의한 Backward prolongation법<sup>4)</sup>과 비등방성 산란을 고려한 몬테칼로 시뮬레이션을 TOF샘플링에 의해서 계산하고 그 결과를 A.V. Phelps<sup>8)</sup>, M. Hayashi<sup>9)</sup>, Y. Nakamura<sup>10)</sup>, Aschwanden<sup>11)</sup>, M.S. Naidu<sup>12)</sup>의 실험치와 비교 검토하고 전자충돌단면적의 타당성에 대하여 검토한다.

## 2. MCS-BE법

본 논문은 몬테칼로법(MCS)과 볼츠만법(BE)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. 난수를 변수  $\theta$ 와  $d\theta$ 의 미소 범위에서 발생하는 확률을  $f(\theta)d\theta$ 로 나타내면 다음과 같이 식(1)로 나타낸다.<sup>1, 2, 3)</sup>

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

여기서 r은 0~1사이에 균일하게 분포되어 있는 난수이다. 본 연구에서는 산술난수인 승적합동법으로 擬亂數를 구하여 사용하고 승적합동법은 다음과 같은 난수발생법으로 나타낸다.<sup>3)</sup>

$$Y_{i+1} = ar_i + c \pmod{m} \quad (2)$$

식 (1)에 의해서 순차적으로  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ 를 발생시켜가는 방법이다. 여기서  $a, c, m$ 은 정의 정수이며 본 논문의 프로그램에선 H. Itoh<sup>13)</sup>의 값을 이용하였다.

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

이 경우에  $ar_i + c$ 를  $m$ 으로 나누어서 남은 나머지를 의미한다. 또한  $r_i$ 에 대해서는

$$S_i = r_i / m \quad (3)$$

으로 계산하면  $S_i$ 는 구간 [0, 1] 사이의 일정한 분포의 난수가 된다. 이 방법으로 발생한 난수  $r_i$ 는  $0 \leq r_i \leq m-1$ 를 찾아 내어  $m$ 개를 생성하고 계속반복된다.

TOF 샘플링방법으로 방전공간의 전자수송계수를 구하기 위해서는 시간  $t_0, t_{i+1}$ 에서 전자의 샘플

플수는  $M_k, M_{k+1}$  위치 영역을  $Z(t_k)$ 로 하면 시간  $t_k$ 에서의 전자군 중심의 평균위치  $\langle Z(t_k) \rangle$ 는 다음과 같이 식 (4)으로 나타낸다.<sup>2)</sup>

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

전자군의 중심 이동속도  $W$ 는 다음과 같다.

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

한편 전자의 확산계수는 시간  $t_k$ 일때 전자의 전계방향의 중심위치를  $Z_m(t_k)$ 라하면 종방향 확산계수  $D_L$ 은

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

식 (5)의 시간에 대한 기울기로 나타낸다.

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

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

여기서  $r_j$ 는  $Z_j$ 의 직각방향의 난수이다.

평균에너지 ( $\bar{\epsilon}$ )는  $i$ 번째의 에너지는  $\epsilon_i$ 라고 하면

$$\langle \bar{\epsilon} \rangle = \frac{1}{M_k} \sum_{i=1}^{M_k} \epsilon_i \quad (8)$$

로 나타낸다.

그리고 전자상태의 공간성장과정이 정상상태일 때 전자군 파라미터를 이용하여 전리계수, 부착계수 및 실효전리계수는 2항 근사에 의한 볼츠만 방정식의 해석은 아래 식 (9), (10)으로 나타낸다.<sup>1, 2)</sup>

$$\alpha = \frac{v_{is}}{\frac{\bar{W}_s}{2} + \left\{ \left( \frac{\bar{W}_s}{2} \right)^2 - (v_i - v_o) D_s \right\}^{1/2}} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{v_{as}}{\frac{\bar{W}_s}{2} + \left\{ \left( \frac{\bar{W}_s}{2} \right)^2 - (v_i - v_o) D_s \right\}^{1/2}} \quad (10)$$

( $v_i$ : 전리주파수,  $v_o$ : 부착주파수)

### 3. 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서 전자의 산란은 비등방성을 고려한 몬테칼로 시뮬레이션으로 추적하여 TOF 샘플링에 의하여 해석하였다. 그리고 전자 궤도 추적의 방법으니 Itoh, Musha의 것을 적용하였다.<sup>5, 6)</sup>

따라서 전자의 평균에너지로 추정되는 평균 전자충돌주파수와 추적시간과의 곱은 큰값이 필요하므로 비탄성충돌일때도 수천회(3,000회) 충돌하는 것으로 설정하였다. 전자의 평균자유행정 ( $\lambda$ )는 전다운동의 미소 비행거리  $\Delta l = \lambda/10$ 으로 궤도를 계산하였다. 또한 TOF에서는 위치와 시간을 지정한 곳의 전자평균에너지와 전자궤도에서 전리가 일어난 경우의 샘플수(Number of sampling points: 20등분)와 난수(Random Number: 13)의 값이 적다. 그래서 본 논문에서는 전자가 음극에서 부터 양극에 도달할때까지 SPARC WORKSTATION(SS-20)으로 반복 추적하여 계산하였고 그림 1은 본 시뮬레이션에서 사

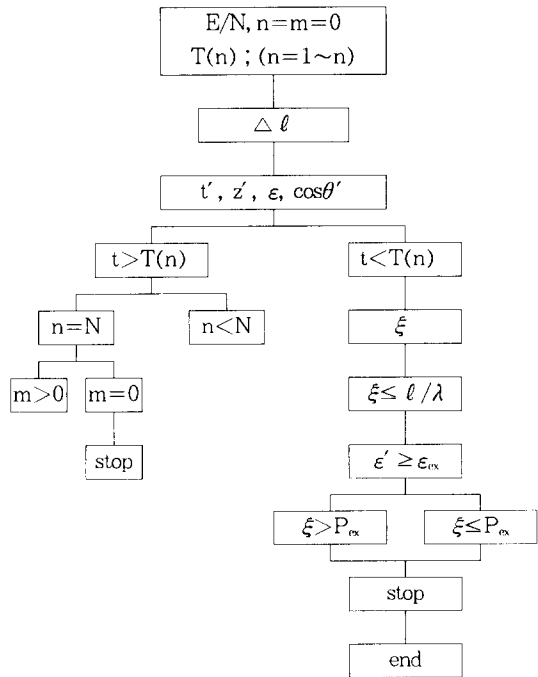


그림 1. 몬테칼로 시뮬레이션의 순서도  
Fig 1. The flowchat of Monte Carlo simulation.

용한 순서도로서 전계, 기체분자수밀도, 초기전자 수, 전자속도를 입력하고  $\Delta \theta$  비행후의  $\epsilon'$ ,  $z'$ ,  $\ell'$ ,  $\cos\theta$  등을 계산하였다.

그리고  $t > T(n)$  ( $T(n)$ : 기체분자의 절대온도) 이면,  $\epsilon'$ ,  $z'$ ,  $\ell'$ ,  $\cos\theta$ 를 샘플링하고  $n=N$ 이면 전리에 의한 2차 전자의 잔여수  $m$ 이 0보다 크면  $\epsilon$ ,  $z$ ,  $\ell$ ,  $\cos\theta$ 를 초기치로서 새롭게 추적한다. 만약  $m=0$ 이면 필요한 파라미터를 출력하여 계산을 마친다.  $t < T(n)$  일때는 난수  $\xi$ 를 발생하여  $\xi \leq \ell/\lambda$ 이면 충돌하였다고 판정하고 더욱이 충돌의 종류를 에너지  $\epsilon'$ 에 대응하는 탄성, 여기, 전리의 각 충돌 확률의 내분비로 판정하고 계산을 마친다.

또한 볼츠만 방정식에 의한 정리 및 부착계수의 수치해석은 Philip E. Luft의 Backward prolongation계산법을 이용하였다.<sup>4)</sup>

### 4. 전자의 산란방향 결정

일반적으로 충돌후의 전자의 산란방향은 등방산란과 비등방산란으로 분류한다.<sup>2)</sup>

#### 1. 등방산란

전자의 새로운 산란각  $\theta$  및  $\phi$ 는 입사각에 관계없이 2개의 난수계열에 의하여 다음과 같이 결정한다.

$$\cos\theta = 1 - 2\xi_1 \quad (11)$$

$$\phi = 2\pi\xi_2 \quad (12)$$

( $\theta$ : z축과 이루는 전자의 산란각  $\phi$ : x축과 이루는 전자의 산란각)

#### 2. 비등방산란

비등방산란을 가정한 경우 충돌후의 편향각( $\omega$ )와 방위각( $x$ )는 다음과 같이 2개의 난수에 의하여 결정한다.

에너지  $\epsilon$ 를 갖는 전자가  $k$  충돌때의 미분단면적을  $\sigma_k(\epsilon, \omega)$ 로 하면 그때의 적분단면적을  $q_k(\epsilon, \omega)$ 는 다음과 같이 나타낸다.<sup>2)</sup>

$$q_k(\epsilon) = \int_0^\pi \sigma_k(\epsilon, \omega') 2\pi \sin\omega' d\omega' \quad (13)$$

여기서 편향각  $\omega$ 와 방위각  $x$ 은 식 (14)와 식 (15)

으로 구한다. ( $\xi_1, \xi_2$ : 난수)

$$\xi_1 = \int_0^\pi \sigma_k(\epsilon, \omega') 2\pi \sin\omega' d\omega' / q_k \quad (14)$$

$$\xi_2 = x/2\pi \quad (15)$$

전자의 입사방향( $\theta', \psi'$ ) 및 그에 대한 산란방향( $\omega, x$ )과 전자의 새로운 운동방향( $\theta, \phi$ )은 다음과 같이 나타낸다.

$$\cos\theta = \cos\theta' \cos\omega + \sin\theta' \sin\omega \cos x \quad (16)$$

$$\cos\psi = \frac{1}{\sin\theta} \{ \cos\psi' (\cos\omega \sin\theta' - \sin\omega \cos\theta' \cos x) \} \quad (17)$$

$$\sin\psi = \frac{1}{\sin\theta} \{ \sin\psi' (\cos\omega \sin\theta' - \sin\omega \cos\theta' \cos x) - \cos\psi' \sin\omega \sin x \} \quad (18)$$

또한 미분단면적  $\sigma_k(\epsilon, \omega)$ 은 충돌전의 전자에 에너지( $\epsilon$ )에 의하여 결정되지만 그의 에너지( $\epsilon$ )에 의하여 결정되지만 그의 에너지( $\epsilon$ )가 미분단면적의 입력에너지값인  $\epsilon(\epsilon, \epsilon(\epsilon+1, \omega))$ 으로 사용할때 미분단면적  $\sigma_k(\epsilon, \omega)$ 은

$$\sigma_k(\epsilon, \omega) = \epsilon(\epsilon, \omega) + \{ \epsilon(\epsilon+1, \omega) - \epsilon(\epsilon, \omega) \} \times \frac{\epsilon - \epsilon_1}{\epsilon_{+1} - \epsilon} \quad (19)$$

식 (19)로 나타낸다.

### 5. 전자의 충돌단면적

본 연구에 이용한 SF<sub>6</sub>의 전자충돌단면적은 H. Itoh 등<sup>13)</sup>의 값을 그림 (2)에 나타내었다.

dl SF<sub>6</sub>의 전자충돌단면적은 다른 원자, 분자에

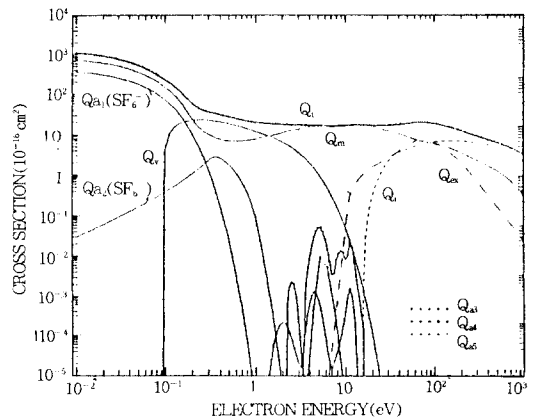


그림 2. SF<sub>6</sub>기체의 전자충돌단면적  
Fig 2. The collision cross sections of electrons in SF<sub>6</sub> gas.

비하여 매우 큰 전자부착단면적( $Q_{a1}$ ,  $Q_{a2}$ )이 낮은 에너지영역에 존재하고 또한 해리성 부착단면적( $Q_{ca1}$ ,  $Q_{ca2}$ ,  $Q_{ca3}$ )이 Threshold에너지의 값은 H. Itoh 등<sup>13)</sup>이 계산한 3.29(eV), 3.95(eV), 1.57(eV)를 이용하였다. 그리고 탄성충돌에 의한 운동량변환단면적( $Q_m$ ), 여기단면적( $Q_{ex}$ ), 전리단면적( $Q_i$ ), 진동여기단면적( $Q_v$ ) 및 전 충돌단면적( $Q_T$ )등의 값은 그대로 이용하여 계산하였다.

## 6. 시뮬레이션 결과 및 고찰

전자군 수송계수의 변호를 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

그림 3의 전자기동속도  $W$ 는  $E/N=150\sim 800$  [Td], 범위에서 MCS법으로 계산하고 그 결과를 A.V. Phelps<sup>9)</sup>, M. Hayashi<sup>9)</sup>, Y. Nakamura<sup>10)</sup>의 실측치와 비교하여 나타낸 것이다.

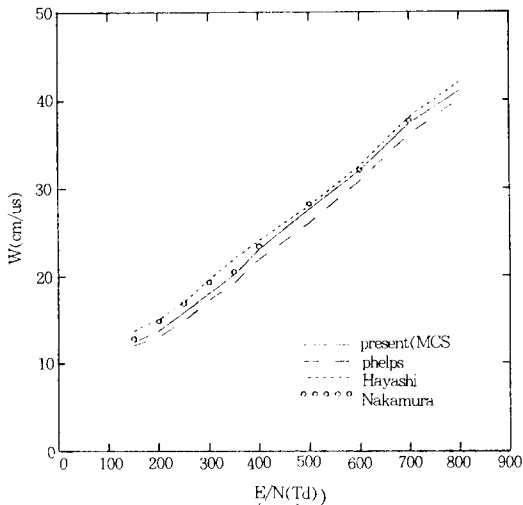


그림 3. SF<sub>6</sub>기체중에서의 전자기동속도  
Fig. 3. The drift velocities of electrons in SF<sub>6</sub> gas.

전자에너지 분포함수와 탄성, 비탄성충돌단면적을 이용하여 계산된 전자기동속도는  $E/N$  [Td]의 증가에 대하여 거의 선형적으로 증가하고 본 연구에서는 Y. Nakamura<sup>10)</sup>의 2중 셔터드리프트 튜브를 이용하여 측정된 평균 도착시간분포로 측정된 이동속도의 값과 거의 일치하였다.

또한 전계로부터 에너지를 얻은 전자가 미소거리를 이동하는 동안에 충돌전리확률은 평균자유

행정에 의해 나타내며 이것은 압력에 반비례하므로 낮은 기압에서 전자에너지는 크므로 전자기동속도는 증가하는 것으로 생각된다.

그림 4~6에 전리계수( $\alpha/N$ ), 부착계수( $\eta/N$ ), 실효전리계수( $\alpha-\eta/N$ )를  $E/N:150\sim 180$  [Td]의 함수로 나타내었다. 본 연구의 계산결과는 A.V. Phelps<sup>9)</sup>, M. Hayashi<sup>9)</sup>의 실험치와 같은 방향으로 증가하지만 Aschwanden<sup>11)</sup>의 실측값은 거의 일치한 값을 나타내었다.

$Q_{a1}$ ,  $Q_{a2}$ 는 부착단면적의 절대값이 크기 때문에  $E/N$  [Td]이 낮은 영역에서 전자의 운동에너지는 감소하여 전리는 저하되고  $E/N$  [Td]가 높은 영역에서는 전자의 운동에너지가 전리에너지보다 크게 되어 전리는 증가된다고 생각된다.

전리에 의하여 발생한 전자는 SF<sub>6</sub>기체분자에 부착하여 부이온을 형성하므로 부이온은 전자에

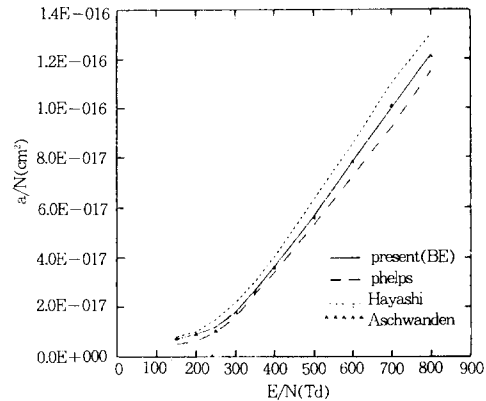


그림 4. SF<sub>6</sub>기체중에서의 전리계수  
Fig. 4. The ionization coefficients in SF<sub>6</sub> gas.

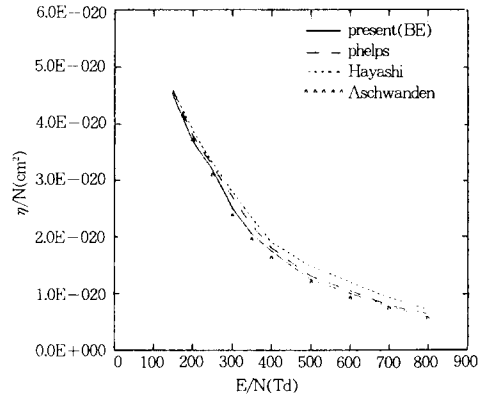


그림 5. SF<sub>6</sub>기체에서의 부착계수  
Fig. 5. The attachment coefficients in SF<sub>6</sub> gas.

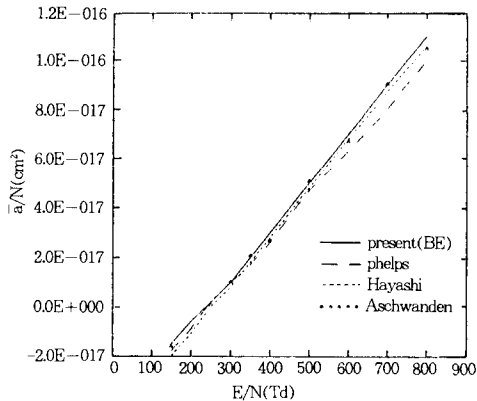


그림 6. SF<sub>6</sub>기체에서의 실효전리계수  
Fig. 6. The effective ionization coefficients in SF<sub>6</sub> gas.

비하여 질량이 크고 기체중에서 전계의 가속을 받더라도 높은 에너지 상태에 도달하기가 힘들고 전리능력이 없기 때문에 낮은 E/N(Td)에서 전자 부착계수는 증가하고 높은 E/N(Td)의 영역에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 비탄성 충돌에 의하여 전자의 에너지를 저하시키므로 절연내력을 향상시키는 것으로 생각된다. 전기적 부성기체는 기체중에 발생한 전자를 부착하여 부이온이 되는 경향이 크며  $\eta/N$ 은 E/N의 증가와 더불어 감소하였다. 전자가 전계에서 큰 에너지를 얻게되면 부착이 일어나기 어렵다. 따라서 E/N이  $(\alpha - \eta)/N$ 을 + 값이 되게끔 충분히 지 않으면 전자의 충돌전리는 효과적으로 이루어지지 않는다고 생각된다.

실효전리계수  $\bar{\alpha}/M(\alpha - \eta)/N$ 이 부(-)의 값으로 나타나는 범위는 E/N : 150~150(Td)로 나타났으며 Aschwanden<sup>11)</sup>의 실험치와 a.v. Phelps<sup>9)</sup>, M. Haysashi<sup>9)</sup>의 계산값과 거의 일치한 경향을 나타냈다.

그림 7의 종방향확산계수는 가스분자수밀도와 적 ND<sub>L</sub>을 E/N(Td)의 함수로 나타내었다. 본 연구에서는 H. Itoh 등의 전자 충돌단면적을 이용하여 계산한 ND<sub>L</sub>의 결과와 Aschwanden<sup>11)</sup>의 측정치와 거의 같은 결과를 나타내었다.

그림 8의 횡방향 확산계수는 가스분자수 밀도와 적 ND<sub>T</sub>를 M.S. Naidu<sup>12)</sup>의 측정치와 비교하였다. ND<sub>T</sub>는 E/N(Td)의 증가에 따른 의존성이

크게 작용하지 않음을 알 수 있다. SF<sub>6</sub>가스중의 전자확산계수는 전리, 부착계수 및 이동속도의 영향으로 하전입자밀도의 공간적구배와 전계가 공존하는 공간내에서 하전입자의 거시적운동이 일어나지 않고 평형상태의 균일한 밀도분포를 나타낸 것으로 생각된다.

그림 9, 10은 SF<sub>6</sub>기체에서 탄성 및 비탄성란을 고려하여 입력 P<sub>0</sub> : 0.1(Torr)에서 E/N : 500(Td), 800(Td)에서 전자에너지분포함수  $f(\epsilon)$ 를 MCS 법으로 나타낸 것이다.

전계가 인가될때 하전입자는 여러종류의 에너지성분을 갖는 기체분자가 열평형상태에 있는 경우에 에너지의 크기와 온도에 의존하는 방전공간에 등방적인 Maxwell-Boltzmann 에너지분포를 나

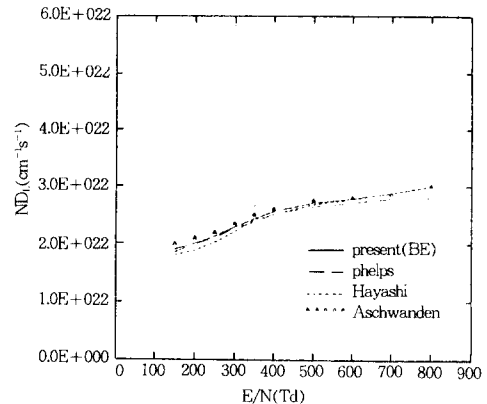


그림 7. SF<sub>6</sub>기체에서의 종방향확산계수  
Fig. 7. The longitudinal diffusion coefficients in SF<sub>6</sub> gas.

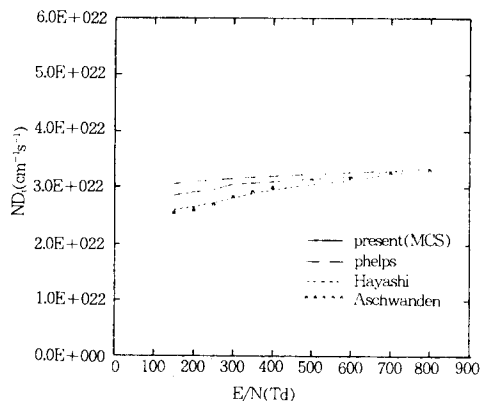


그림 8. SF<sub>6</sub>기체에서의 횡방향확산계수  
Fig. 8. The transverse diffusion coefficients in SF<sub>6</sub> gas.

타낸다. 그러나 전자가 전계에 의해서 진행할때 샘플 15, 거리  $L: 2.8(\text{cm})$   $E/N: 500(\text{Td})$ ,  $L: 3(\text{cm})$   $E/N: 800(\text{Td})$  범위에서 MCS법으로 전자를 추적하여 나타난 전자에너지분포는 비평형상태로 변화였다. 이러한 경우에 전자에너지분포함수의 계산은 평균에너지의 값이 각각  $\bar{\epsilon}: 11.3(\text{eV})$ ,  $\bar{\epsilon}: 14.5(\text{eV})$ 에서 나타낸 것이다.

그림 9, 10에서 알수 있는바와 같이  $E/N: 500(\text{Td})$ 의 경우가  $E/N: 800(\text{Td})$ 의 경우에 비하여 여기로 인하여 전자의 에너지를 잃어버리는 것이 크면 불평형영역도 크게 나타났다.  $F(\epsilon)$ 의 값은 초기에너지에서는 증가하고 그 이상의 전자에너지는 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 전자의 수와 에너지가 낮을때는 양극에 흡수되는 전자의 에너지분포는 증가하고 에너지가 증가함에 따라서  $F(\epsilon)$ 은 감소하여 38(eV)이상에서는 일치되고 있다.

또한 비탄성충돌에 의한 분포함수의 변화는 여기에너지가 전자의 평균에너지보다 적으므로써 급격히 감소되어 나타나는 현상으로 생각된다.

전자의 평균에너지는 전극간 거리와 시간의 함수로 계산한 전자의 에너지분포함수, 전자기동속도등에 관계되는 물리량으로 전극면에서의 전자운동의 증가는 음극의 에너지가 영에서 수직으로 이동하고 양극에서는 반사나 2차전자 방출하기 때문에 모두 흡수한다.

그리고 전자의 평균에너지  $\bar{\epsilon}$ 는 전극간거리와  $E/N(\text{Td})$ 의 변화에 따른 몬테칼로 시뮬레이션으로 그림 11에 그 값을 나타내었다. 전자가 존재하는 경우에 샘플링의 차이에 따라서 음극과 양극 가까운 영역의 전자의 평균에너지는 영점으로부터 비탄성충돌이 일어날 에너지까지는 직선적으로 상승하여 비평형의 상태로 나타냈으며 그 외 영역에서는 거의 평형상태의 에너지값의 결과를 나타내었다.

## 7. 결 론

$\text{SF}_6$ 가스의 전자충돌단면적을 이용하여  $150 \leq (E/N) \leq 800$ 범위에서 전자군의 파라미터 특성(수송계수)을 전자산란의 비평형상태에서 몬테칼로

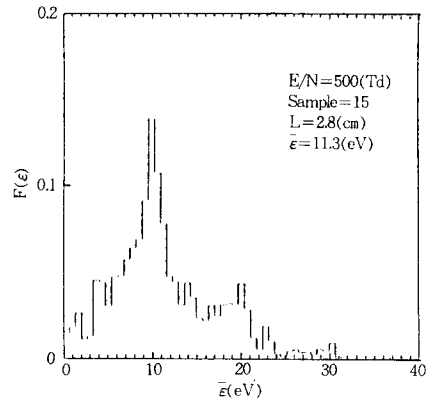


그림 9.  $\text{SF}_6$ 기체중에서의 전자에너지 분포함수  
Fig 9. The energy distribution function of electrons in  $\text{SF}_6$  gas.

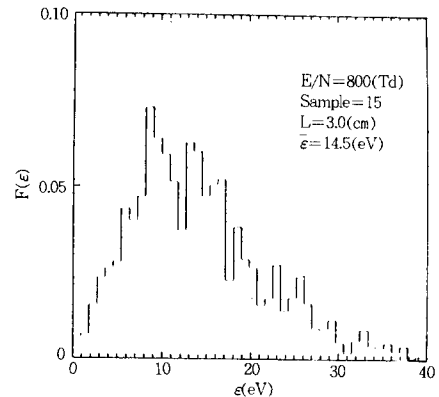


그림 10.  $\text{SF}_6$ 기체중에서의 전자에너지 분포함수  
Fig 10. The energy distribution function of electrons in  $\text{SF}_6$  gas.

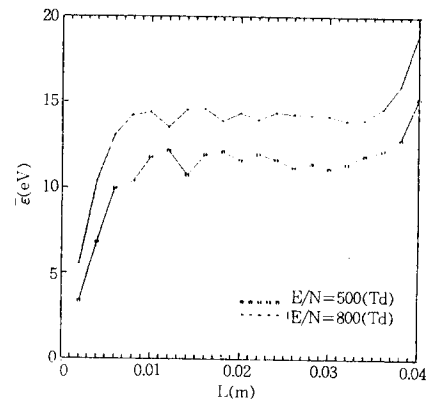


그림 11.  $\text{SF}_6$ 가스중에서의 전자의 평균에너지  
Fig 11. The mean energy of electrons in  $\text{SF}_6$  gas.

시뮬레이션의 TOF(Time Of Flight)샘플링으로 계산하였고 볼츠만법에 의해 전리, 부착, 실효전리계수를 구하였다. 그리고 이들의 계산치는 A.V. Phelps<sup>8)</sup>, M. Hayashi<sup>9)</sup>, Y. Nakamura<sup>10)</sup> 및 Aschwanden<sup>11)</sup>의 실험치와 비교 해석하여 산출된 값들은 정량적으로 거의 일치하였고 이용한 전자 충돌단면적의 타당성을 확인하였다. 또한 이용한 몬테칼로 시뮬레이션 기법의 타당성이 입증되었다고 생각된다. 특히 실효전리계수, 전리계수, 전자부착계수 및 종방향확산계수는 Aschwanden<sup>11)</sup>, M. Hayashi<sup>9)</sup>이 측정치와 거의 일치한 값을 산출하였다. 또한 횡방향 확산계수는 M.S. Naidu<sup>12)</sup>의 실험치와 일치한 경향을 나타냈으며 E/N(Td)의 증가에 따라서 전자이동속도는 전리에 의한 전자 증배의 크기에 따라서 그 영향이 나타났으며 Y. Nakamura<sup>10)</sup>의 실험치와 거의 일치하였다. 전자 에너지 분포함수는 평균에너지의 값이  $\bar{\epsilon}=11.3(eV)$ ,  $\bar{\epsilon}=14.5(eV)$ , 샘플 15에서 비평형상태를 나타내었다. 그리고 볼츠만법에 의해 산출된 전리계수는 E/N이 낮은 범위에서는 급격히 증가하고 E/N이 어느 정도 크게되면 그 증가율은 감소하였다. 또한 부착계수는 E/N의 증가와 더불어 감소하였는데 이것은 전자가 분자에 부착하여 부이온을 만들기 때문에 전자에 비하여 질량도 크고 전계의 가속을 받아도 높은 에너지 상태에 도달할 수 없으며 전리능력이 없다고 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 몬테칼로法 とシミュレーション(培風館), 1989.
- 2) 氣體放電 シミュレーション技法(제140호), 1974.
- 3) 森 正武, "Fortran 77 數値計算 プログラミング"(岩波書店), pp.41~44, 1995.
- 4) Philip E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No.19, 1975.
- 5) H. Itoh and T. Mushi "Monte Carlo Calculations of Motions in Helium", J.Phys. soc. Japan, Vol.15, No.9, pp.1675~1680, 1960.
- 6) R.V.L. Thomas, and W.R.L. Thomas, "Monte Carlo Simulation of electrical discharge in gases", J.Phys. B. Vol.2, pp. 562~570, 1969.
- 7) 菅野卓雄 "半導體 プラズ마 프로세스技術"(産業圖書), pp.38~50, 1993.

- 8) A.V. Phelps and R.J. Van Brunt "Electron-transport, ionization, attachment and dissociation, coefficients in SF<sub>6</sub> and its mixtures", J. Appl. Phys. 64, pp.4269~77, 1988.
- 9) M. Hayashi, and S. Hara, "Joint Symposium on Electron and Ion Swarm and Low Energy Electron scattering", (A Satellite of ICPEAC XV II), Proc pp.109~11, 1991.
- 10) Y. Nakamura "Transport coefficients of electrons and negative ions in SF<sub>6</sub>", J. Phys. D : Appl. Phys. 21, pp.67~72, 1988.
- 11) Aschwanden "Gaseous Dielectrics IV ed", L G Christophorou and M O pace, (New York : Pergamon), pp. 24~33, 1984.
- 12) M.S. Naidu and A.N. Prasad "Diffusion and drift of electrons in SF<sub>6</sub>", J. Phys. D : Appl. Phys. 5, pp.1090~5, 1972.
- 13) H. Itoh, Y. Mura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF<sub>6</sub> : 1. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D : Appl. Phys. 21, pp.922~30, 1988.

#### ◇ 著 者 紹 介 ◇



서 상 현(徐相賢)

1969년 9월 24일생. 1995년 동국대 전기과졸. 1996년 동국대 대학원 전기공학과 석사과정.



유 회 영(柳會英)

1946년 3월 31일생. 1970년 광운대학교 전자과졸. 1980년 단국대 대학원졸(석사). 1996년 동국대 박사과정. 현대 대림전문대 전자과 교수.



김 상 남(金相南)

1951년 3월 21日生. 1978년 崇實大 電氣科 卒. 1980年 崇實大 大學院卒(碩士). 1996年~ 東國大 博士課程. 1978~ 現在 市立 仁川專門大學 電氣科 教授.



하 성 철(河聖哲)

1940년 12월 25日生. 1966년 인하대 학공대 전기공학과 졸업. 1985년 명지대 대학원졸(박사). 1994~1995 일본계이오대학 방문교수. 현재 동국대 공대 전기공학과 교수.