

SF₆-Ar 혼합기체의 電子 平均에너지

김상남^o, 성낙진
인천전문대학

Mean energy of electrons in SF₆-Ar Mixtures Gas

Sang-Nam Kim, Nak-Jin Seong
Incheon City Collge

Abstract - Energy distribution function for electrons in SF₆-Ar mixtures gas used by MCS- BEq algorithm has been analysed over the E/N range 30~300[Td] by a two term Boltzmann equation and by a Monte Carlo Simulation using a set of electron cross sections determined by other authors, experimentally the electron swarm parameters for 0.2[%] and 0.5[%] SF₆-Ar mixtures were measured by time-of-flight(TOF) method. The results show that the deduced electron drift velocities, the electron ionization or attachment coefficients, longitudinal and transverse diffusion coefficients and mean energy agree reasonably well with theoretical for a rang of E/N values

The transport coefficients for electrons in (0.2[%])SF₆-Ar and (0.5[%])SF₆-Ar mixtures were measured by time-of-flight method, and the electron energy distribution function and the parameters of the velocity and the diffusion were determined by the variation of the collision cross-sections with energy.

The results obtained from Boltzmann equation method and Monte Carlo simulation have been compared with present and previously obtained data and respective set of electron collision cross sections of the molecules.

1. 서 론

최근 국내외적으로 고도 산업과 경제 성장으로 전력 수요가 매년 증가하는 실정이다. 따라서 전력 전송의 고전압화, 대용량화 및 핵융합 등의 새로운 에너지 기술개발의 기초 과학 연구가 다각적으로 활발히 이루어지고 있는 추세이다. 한편 산업 발전에 따라 전력 계통의 대용량화, 송전 전압의 초고압화에 의하여 각종 전기 기기에 방전 현상이 중대한 영향을 미치게 되고 환경문제 등 여러 산업 분야에서 방전을 이용하려는 노력이 증가하고 있다. 따라서 기체 방전을 지배하는 Mechanism을 정확히 이해할 필요가 있으며 이를 위하여 이론적, 실험적 수치 해석적으로 많은 연구를 필요로 하고 있다[1][2][3].

특히 SF₆ (sulphur Hexafluoride)기체는 1950년대 최초로 전력용 변압기의 기체 절연체로 사용되었으며 1970년대에 기체 절연장치(GIS), 가스 차단기(GCB)등에 이용되어 상품화되기 시작하였으며 1980년대에 본격적으로 연구 개발되어 최근에는 화학적으로 안전하고 절연성과 소호성이 우수하여 기체 절연 전선로(GIL), 초 고전압 및 대용량 전력 차단기, 전력계통에 널리 이용되고 있다.

최근 SF₆ 기체를 포함한 혼합 기체에서 전자군 특성을 정량적으로 파악하기 위해서는 전자에너지 분포함수를 갖는 전자군과 각각의 하전 입자군과의 충돌현상으로 나타나는 전자이동속도, 확산계수, 전리, 부착계수 등 전자수송계수에 대해 이론적, 실험적 해석에 의한 규명이 필요로 된다.

전자의 전리, 부착, 실효전리계수 및 전자수송계수의 특성 연구는 혼합기체의 전기 절연내력의 질적인 향상과 절연용 기체의 개발 및 각종 고전압 기기의 이용 가능성 등의 응용분야에서 장래의 적용 가능성에 대한 그의 물성적 특성(기초적인 전자 수송계수, 전자 충돌 단면적) 연구에 매우 중요시된다. 전자 수송계수의 거동은 전자와 기체 원자, 분자의 전자 충돌 단면적에 대한 이론적, 실험적인 방법으로 결정된다. 여기서 이론적 방법으로는 MCS(Monte Carlo Simulation)와 BEq(Boltzmann Equation)를 이용하고, TOF(Time of Flight)법을 이용한 실험에 의해 전자도착 시간분포를 구한다.

또한 SF₆가스는 불평등 전계에서 절연능력이 떨어지고 저온에서 액화의 용이성 등으로 인한 절연재료의 결점을 보완하기 위하여 혼합기체의 상승효과(Synergism)을 이용한 절연특성의 효율화에 대한 연구가 이루어지고 있다[4][5].

이것은 전자 에너지 분포 함수를 갖는 전자군과 하전입자 군과의 충돌 현상으로 나타나는 전리 계수, 부착 계수 및 실효 계수 전자 이동 속도, 중·횡방향의 특성 에너지, 등의 전자 수송 특성의 실험적, 이론적 계산에 의하여 정량적으로 산출한다.

2. 해석 방법

몬테칼로법은 2차대전기간 동안에 원자탄 개발을 위한 중성자 수송에 관련된 문제를 해결하기 위한 목적으로 많은 과학자들에 의해 연구, 발전되어왔다. 다양한 응용분야에서의 몬테칼로법 중에서 기체중의 전자의 거동에 관한 몬테칼로 시뮬레이션(MCS)으로는 H. Itoh, M. Musha 및 R. W. L. Thomas, W. R. L. Thomas 에 의해서 최초의 연구가 시작되었다[3].

전계가 존재하는 공간의 방전 메카니즘에 있어서 전자는 전계에 의해서 높은 에너지를 갖게 되지만 전자에너지가 평형상태에 있지 않으므로 전자에너지분포를 추정하기는 매우 어렵다. 따라서 이러한 상태에서 전자 에너지 분포를 산출해내는데 몬테칼로 시뮬레이션은 매우 유용하다.

MCS은 난수(Random Number)를 이용하여 충돌의 종류, 산란후의 방향 및 비행시간 등을 결정하면서 전자의 운동을 반복 추적한다. 또한 전자군의 성질을 조사하기 위한 몬테칼로 법은 전자계 내의 전자 운동 상태와 분자의 충돌 산란 확률을 고려하여 전자, 이온의 상태량을 추적하는 것을 기본으로 하여 입자를 확률 현상의 난수로 모의하는 방법을 말한다. 사용하는 난수는 컴퓨터에서 발생하는 [0~1]사이의 의사난수(Pseudo random number)이다.

본 논문의 이론적인 해석은 몬테칼로법(MCS)과 볼츠만법(BEq)을 이용하여 전자에너지 분포함수와 전자수송계수(전자군 파라미터)를 구하는 것으로 이것은 [0~1]사

이에 일정한 분포를 갖는 난수(Random number)를 이용하여 충돌의 종류, 산란후의 방향 및 비행시간 등을 결정하면서 전자의 운동을 반복 추적한다.

난수를 이용하여 충돌현상을 확률적으로 취급하고 사용한 난수를 계산기에 발생시켜 [0,1] 사이에 대응할때 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]

$$\int_0^{2\pi} f(\theta)d\theta = r \quad (1)$$

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

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

식(1)에 의해서 순차적으로 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k$ 를 발생시켜가는 방법이다. 여기서 a, c, m 은 정수의 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

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

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.

TOF 에서는 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]

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

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

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

식(5)의 시간에 대한 기울기로 나타낸다.

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

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

여기서 r_j 는 Z_j 의 직각방향의 성분이다.

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

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

로 나타낸다.

그리고 전자사태의 공간성장과정이 정상상태 일 때 전

자군 파라미터를 이용하여 전리계수, 부착계수 및 실효 전리계수는 2항 근사에 의한 볼츠만 방정식의 해석에서 아래 식 (9), (10)으로 나타낸다.[5][6]

$$\alpha = \frac{\nu_{is}}{\frac{\bar{W}_s}{2} + \left\{ \left(\frac{\bar{W}_s}{2} \right)^2 - (\nu_i - \nu_a) D_s \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

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

여기서 ν_i 는 전리주파수, ν_a 는 부착주파수이다.

3. 전자 충돌 단면적

3.1 SF₆의 전자 충돌 단면적

본 연구에 이용한 SF₆의 전자 충돌 단면적은 H. Itoh et al의 Set을 사용하였으며 그림3.1에 나타내었다[6]~[9].

이 SF₆의 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비

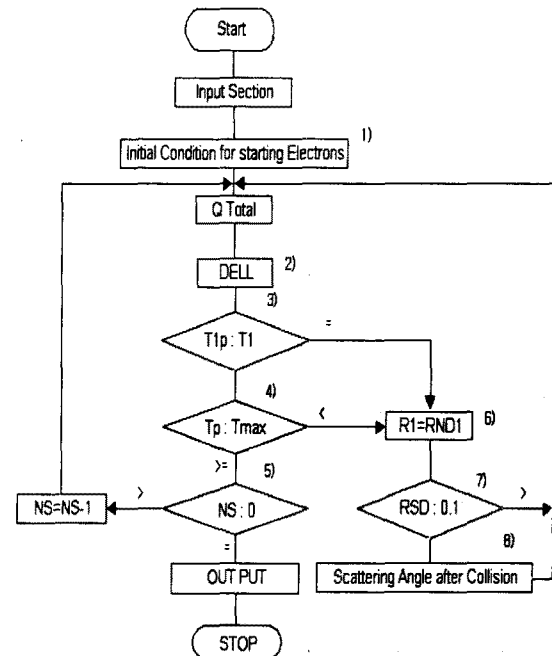


그림 2.1 계산의 순서도

Fig. 2.1 Algorithm flow chart

하여 매우 큰 전자 부착단면적 (Q_{a1}, Q_{a2})이 낮은 에너지 영역에 존재하고 또한 해리성 부착단면적 (Q_{a3}, Q_{a4}, Q_{a5})의 Threshold에너지 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 전충돌 단면적(Q_T) 등의 값을 이용하여 계산하였다.

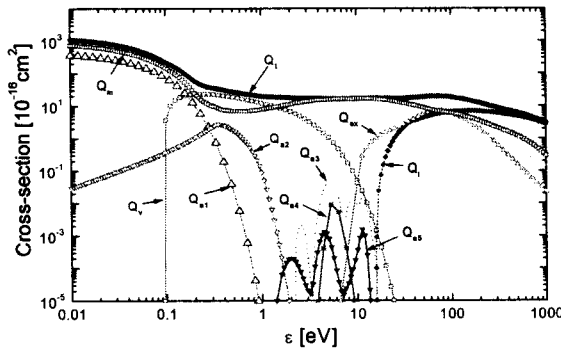


그림 3.1 SF₆기체의 전자 충돌 단면적
Fig. 3.1 Collision cross sections of electrons in SF₆ gas

3.2 Ar의 전자 충돌 단면적

Ar의 전자 충돌 단면적을 그림3.2에 나타내었다.

Ar의 전자 충돌 단면적에 대한 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i)등을 나타내었다.

이 Ar의 전자 충돌 단면적은 저 에너지 영역(0~0.23[eV])에서 Ramsauer Townsend minimum을 갖는 운동량 변환 단면적(Q_m)은 K. L. Bell, N. S. Scott의 계산값을 이용하였고 전자에너지 0.136~54.4[eV] 영역의 범위에서는 W. C. Fon의 측정값을 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 SF₆ 기체에서 전자의 평균에너지

전자의 평균에너지는 전극간 거리와 시간의 함수로 계산한 전자의 에너지 분포함수, 전자 이동 속도 등에

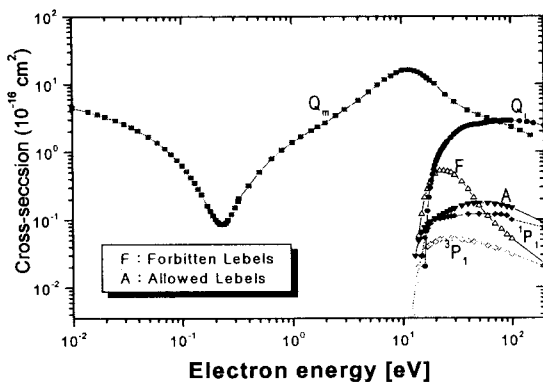


그림 3.2 Ar기체의 전자 충돌단면적
Fig. 3.2 Collision cross sections of electrons in Ar gas
관계되는 물리량으로 전극면에서의 전자운동의 증가는 음극의 에너지가 영에서 수직으로 이동하고 양극에서는 반사되거나 2차 전자가 방출하기 때문에 모두 흡수한다 [6], ~[11].

전자의 평균에너지는 전극간 거리와 E/N [Td]의 변화에 따른 몬테칼로 시뮬레이션으로 그림 4.1에 그 값을 나타내었다. ($\bar{\epsilon}$)전자가 존재하는 경우에 샘플링의 차이

에 따라서 음극과 양극 가까운 영역의 전자의 평균에너지는 영점으로부터 비탄성 충돌이 일어날 에너지까지는 직선적으로 상승하여 비평형의 상태로 나타났으며 그 외 영역에서는 거의 평형상태의 에너지 값의 결과를 나타내었다.

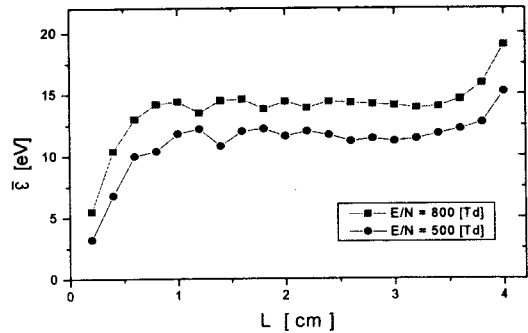


그림 4.1 SF₆ 기체에서 전자의 평균에너지.
Fig. 4.1 Mean energy of electrons in SF₆.

4.2 Ar 기체에서 전자의 평균에너지

전자의 평균 에너지 ($\bar{\epsilon}$)와 특성 에너지 (D/μ)의 관계는 $D/\mu = \frac{kT}{e} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\epsilon}}{e}$ 의 관계이므로 전자의 평균에너지 ($\bar{\epsilon}$)는 특성 에너지 (D/μ)의 $\frac{3}{2}e$ 배가 될때 그 값이 같아지며 전극 간 거리와 E/N[Td]의 변화에 따른 몬테 칼로 시뮬레이션으로 그림 4.2에 그 값을 나타내었다.

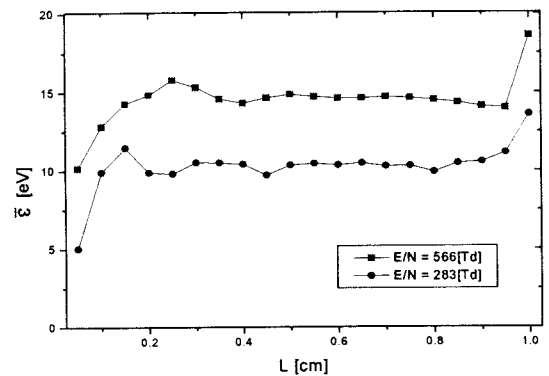


그림 4.2 Ar 기체에서 전자의 평균에너지
Fig. 4.2 Mean energy of electrons in Ar

전자가 존재하는 경우에 샘플링의 차이에 따라서 음극과 양극 가까운 영역의 전자의 평균에너지는 영점으로부터 비탄성 충돌이 일어날 에너지까지는 직선적으로 상승하여 비평형의 상태로 나타났으며 그 외 영역에서는 거의 평형상태의 에너지 값의 결과를 나타내었다.

4.3 SF₆ - Ar 혼합기체에서 전자의 평균에너지

그림 4.3은 SF₆ - Ar 혼합기체의 전자의 평균에너지를

나타냈으며, 전극간 거리 $L=2.6[\text{cm}]$, $E/N=200 [\text{Td}]$ 로 하고 혼합비 0.2[%], 0.5 [%]를 혼합한 기체에서 초기전자의 수를 1000개로 하여 전자를 추적한 값을 나타내었다.

전자의 평균 에너지는 전극간 거리와 시간의 함수로 계산한 전자에너지분포, 전자 이동속도 등에 관련된 물리량으로 전자 에너지분포를 형성한다.

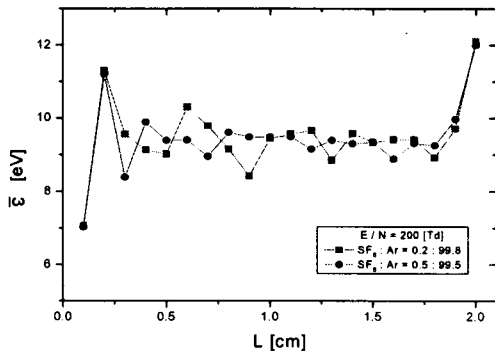


그림 4.3 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자의 평균에너지
Fig. 4.3 Mean energy of electrons in SF₆-Ar mixtures

5. 결 론

본 연구는 탄성 및 비탄성 충돌 단면적과 전리증식의 전자군을 형성하는 비교적 낮은 $E/N[\text{Td}]$ 영역에서 혼합기체의 혼합비에 따른 전자 수송계수(Swarm parameter) 중 전자의 평균에너지를 볼츠만 방정식을 이용한 이론 해석과 몬테칼로 시뮬레이션에 의해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의하여 전자의 평균에너지는 평균 에너지가 평형 상태인 경우 Sample=14, $L=2.6[\text{cm}]$ 에서 2항근사의 볼츠만 법에 의한 등방성분(F_0)과 비등방성분(F_1)을 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 값과 비교시 현저한 차이를 나타내었으며, 이것은 전자가 여기에 의해서 에너지를 잃어버린 값이 다른 영역에 비해 큰 것으로 생각된다. 그리고 전자군 연구에 이용한 전자 충돌 단면적의 타당성을 확인하였다.

본 연구의 결과를 토대로 다양한 다른 기체에 대해서도 같은 과정을 통하여 전자의 수송 계수를 얻을 수 있을 것으로 확신한다. 이렇게 얻은 계수의 데이터를 바탕으로 새로운 고전압 전기재료의 물성적 기초 자료에 활용과 실제 기기의 설계에 적용, 기체 방전 모델을 확장한 정량적 해석도 가능할 것으로 생각한다, 특히 최근 주목되고 있는 펄스 코로나 방전을 이용한 오염 물질을 제거시키는 배기 가스 처리 문제에도 응용할 수 있다고 본다.

본 연구는 인천전문대학 교내 연구비 지원에 의한 논문임

Reference

[1] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electronswarm development in SF₆ : I.Boltzmann equation

analysis" Phys. D:Appl.Phys 21, pp.92-930, 1988.

[2] 電氣學會技術報告, "氣體放電シミュレーション技法" 第140號, 1974.

[3] 谷口敏幸 *et al.*, "ボルツマン方程式による運動量變換 斷面積の推定に關して." 放電研究會資料, ED-86-116, pp.39~49, 1986.

[4] S. Trajmar, A. Chutjian, "electron impact excitation of SF₆" J. Phys. B, Vol. 10, pp. 2943 ~2949, 1977.

[5] 하성철, 전병훈, 백승권, "몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송계수에 관한 연구", 한국 전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp. 68 5~692, 1995.

[6] A. Gilardini, "Low EnergyElectron Collisions in Gases" John Wiley and Sons. Inc. pp. 127~162. 1972

[7] E. W. McDaniel and E. A. Mason, "The Mobility and Diffusion of Ions in Gases" John Wiley and Sons. Inc. pp.3~82, 1973

[8] Y. Nakamura. "Transport Coefficients of Electrons and Negative Ions SF₆." J. Phys. D, Vol. pp.1~36, 1981.

[9] Y. Nakamura and M. Kurachi, "Electron Transport Parameters in Argon and its momentum transfer cross section" J. Phys. 21, pp.718~723, 1988.

[10] 河聖哲, 徐相賢, "SF₆가스의 電子輸送特性에 관한 몬테칼로 시뮬레이션", 韓國電氣電子材料學會誌, Vol. 9, No. 7, pp.660~667, 1996.

[11] 金相南 "SF₆-Ar 混合氣體에서의 電離 및 附着係數" 工學博士學位論文, 東國大學校 大學院. 2000

[12] 金相南 "SF₆ + Ar混合氣體의 MCS-BEq에 의한 電子 分布函數" 大韓電氣學會論文集, 51P-1-4, pp. 28~32. 2002

[13] 金相南 "시뮬레이션에 의한 CF₄, CH₄, Ar混合氣體에서 電子에너지分布函數" 大韓電氣學會論文集, 52P-1-2, pp.9~13. 2003