

시뮬레이션을 이용한 SF₆-Ar혼합기체의 전자 평균에너지

김상남*
시립인천전문대학

A Simulation of the Mean energy of electrons in SF₆-Ar Mixtures Gas

Sang-Nam Kim*
Incheon City College

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 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 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.

Key Words : MCS(Monte Carlo Simulation), BEq(Boltzmann equation), TOF(time-of-flight),

1. 서 론

고도 산업과 경제 성장으로 전력 수요가 매년 증가하는 실정으므로, 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]

또한 SF₆가스는 불평등 전계에서 절연성능이 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, 종·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 많

은 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.

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.

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]

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

여기서 r은 0~1사이에 균일하게 분포되어 있는 난수이다. 본 연구에서는 산술난수인 승적합동법으로 의사난수(擬似

亂數)를 구하여 사용하고 승적합동법은 다음과 같은 난수 발생법으로 나타낸다.

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

식(1)에 의해서 순차적으로 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k$ 를 발생시켜가는 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

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

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 적게되어 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} 위치영역을 $Z_i(t_k)$ 로하면 시간 t_k 에서의 전자군 중심의 평균위치 $\langle Z_i(t_k) \rangle$ 는 다음과 같이 식(4)으로 나타낸다.[6]

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

전자군의 중심 이동속도 W 는 다음과 같다.

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

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

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

식(5)의 시간에 대한 기울기로 나타내며, 횡방향 확산계수 D_T 는 전계에 직각방향으로 위치가 분산되어 다음과 같이 시간에 대한 기울기로 나타낸다.

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

여기서 r_j 는 Z_j 의 직각 방향의 성분이다.

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

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

로 나타낸다.

그리고 전자사태의 공간성장과정의 정상상태 일 때 전자군 파라미터를 이용하여 전리계수, 부착계수 및 실효전리계수는 2항 근사에 의한 볼츠만 방정식의 해석에서 아래식 (9), (10)으로 나타낸다.[5][6]

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

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

여기서 v_i 는 전리주파수, v_a 는 부착주파수이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SF₆ 기체에서 전자의 평균에너지

전자의 평균에너지는 전극간 거리와 시간의 함수로 계산한 전자의 에너지 분포함수, 전자 이동 속도 등에 관계되는 물리량으로 전극면에서의 전자운동의 증가는 음극의 에너지가 영역에서 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 3.1에 그 값을 나타내었다. ($\bar{\epsilon}$)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.

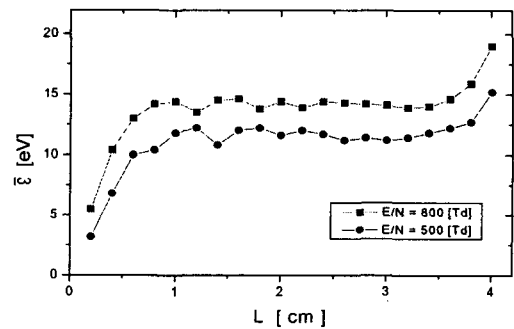


그림 3.1 SF₆ 기체에서 전자의 평균에너지.
Fig. 3.1 Mean energy of electrons in SF₆.

3.2 Ar 기체에서 전자의 평균에너지

전자의 평균 에너지 ($\bar{\epsilon}$)와 특성 에너지 (D/μ)의 관계는

$$D/\mu = \frac{kT}{e} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\epsilon}}{e} \text{의 관계이므로 전자의 평균에너지}$$

($\bar{\epsilon}$)는 특성 에너지 (D/μ)의 $\frac{3}{2}e$ 배가 될때 그 값이

갈아지며 전극 간 거리와 $E/N[Td]$ 의 변화에 따른 몬테 칼로 시뮬레이션으로 그림 3.2에 그 값을 나타내었다.

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.

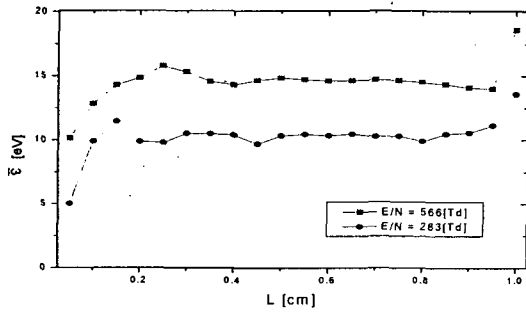


그림 3.2 Ar 기체에서 전자의 평균에너지
Fig.3.2 Mean energy of electrons in Ar

3.3 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자의 평균에너지

그림 3.3은 SF₆-Ar 혼합기체의 전자의 평균에너지를 나타냈으며, 전극간 거리 $L=2.6[cm]$, $E/N=200 [Td]$ 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.

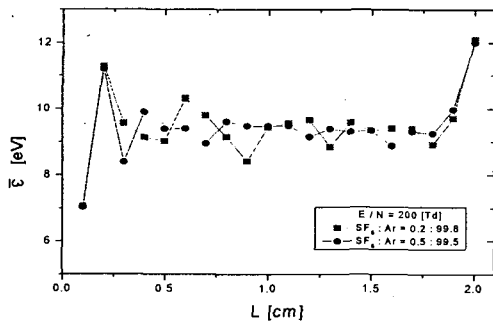


그림 3.3 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자의 평균에너지
Fig.3.3 Mean energy of electrons in SF₆-Ar mixtures

4. 결 론

기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의하여 전자의 평균에너지는 평균 에너지가 평형 상태인 경우 Sample=14, $L=2.6[cm]$ 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", 한국전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp. 685~692, 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