

SF₆-Ar混合氣體의 MCS-BEq알고리즘에 의한 電子 平均에너지 解析

(Analysis on the Mean energy of electrons in SF₆-Ar Mixtures Gas
used by MCS-BEq Algorithm)

김상남* · 하성철

Sang-Nam Kim · Sung-Chul Ha

(시립인천전문대학 · 동국대학교)

Abstract

Mean energy of 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, 0.1[%] and 5.0[%], SF₆-Ar mixtures were measured by time-of-flight(TOF) method.

The transport coefficients for electrons in (100[%])SF₆, (100[%])Ar, (0.2[%])SF₆-Ar and (0.5[%])SF₆-Ar, (5.0[%]) SF₆-Ar, (0.1[%])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

건축물이 점차 대형화하여 감에 따라 건축물에서 사용하는 전기용량도 증가하고 있으며, 생산성을 고려한 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].

이것은 전자에너지 분포함수를 갖는 전자군과 하전 입자군과의 충돌현상으로 나타나는 전자 평균에너지 특성을 실험적, 이론적 계산에 의하여 정량적으로 산출된다.

따라서 전리된 혼합기체중의 운동량 변환단면적, 여기, 전리, 부착 및 진동단면적의 값을 이용하여 전자수송특성을 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)법과 볼츠만의 Backward prolongation을 사용한 이론적으로 계산하고 실험적으로는 TOF(Time of Flight)법의 전자도착 시간분포를 이용하여 구하였다. 그리고 전자수송특성의 이론적인 해석을 위하여 SF₆와 Ar가스의 전자 충돌단면적은

Itoh, Ikuta, Bell, Nakamura 등의 측정값을 MCS, BEq법에 의한 simulation의 결과와 비교 검토하고 순수 SF₆기체와의 전자 평균에너지를 고찰한다.

이것은 전자 에너지 분포 함수를 갖는 전자군과 하전입자 군과의 충돌 현상으로 나타나는 결과를 이용하여 전자 평균에너지를 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 산출해내는 데 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 전자계내의 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.

하전입자 각각의 속도는 각각 다른 시간 t 와 더불어 변화하므로 일반적으로는 위치공간과 속도공간을 일치시킨 위상공간과 분포함수 개념을 도입하여 위치벡터 $\vec{r}=(x, y, z)$, 속도벡터 $\vec{v}=(v_x, v_y, v_z)$, 시간을 t 로 놓았을 때, 전자의 위치 $\vec{r}-(\vec{r}+d\vec{r})$, 속도 $\vec{v}-(\vec{v}+d\vec{v})$ 의 범위에 있는 미소 공간에 존재하는 입자수를 dn 이라 하면

$$dn=f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{r} \cdot d\vec{v} \dots\dots\dots(1)$$

로 나타낼 수 있다.

여기서 $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 하전입자의 속도분포함수이다.

볼츠만 방정식을 간단히 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{r}} f + \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{v}} f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll} \dots\dots\dots(2)$$

위 식에서 보면 전자군의 임의의 위치와 속도 및 시간을 갖는 전자수 밀도는 위치 변화에 따른 밀도와 전기의 속도 변화에 의한 밀도 그리고 충돌로 나타나는 속도 변화에 따른 밀도의 변화로 나타낼 수 있다는 것이다.

그리고 전자사태의 공간성장과정이 정상상태 일 때 전자군 파라미터를 이용하여 전리계수, 부착계수 및 실효전리계수는 2항 근사에 의한 볼츠만 방정식의 해석에서 아래 식 (3), (4)으로 나타낸다.[5] [6]

$$\alpha = \frac{\nu_{is}}{\frac{\overline{W_s}}{2} + \left\{ \left(\frac{\overline{W_s}}{2} \right)^2 - (\nu_i - \nu_a) D_s \right\}^{\frac{1}{2}}} \dots\dots(3)$$

$$\eta = \frac{\nu_{as}}{\frac{\overline{W_s}}{2} + \left\{ \left(\frac{\overline{W_s}}{2} \right)^2 - (\nu_i - \nu_a) D_s \right\}^{\frac{1}{2}}} \dots\dots(4)$$

여기서 ν_i 는 전리주파수, ν_a 는 부착주파수이다.

본 논문에서는 볼츠만방정식에 의한 전리, 부착 및 실효전리계수의 수치해석은 Philip E. Luft의 Backward prolongation계산법을 이용하였다.[5] 또한 전자가 음극에서 양극에 도달할 때까지 SPARC WORKSTATION(SS-20)으로 반복 추적하여 계산하였고 그림2.1은 본 시뮬레이션 전체의 개략적인 흐름을 나타내었다.

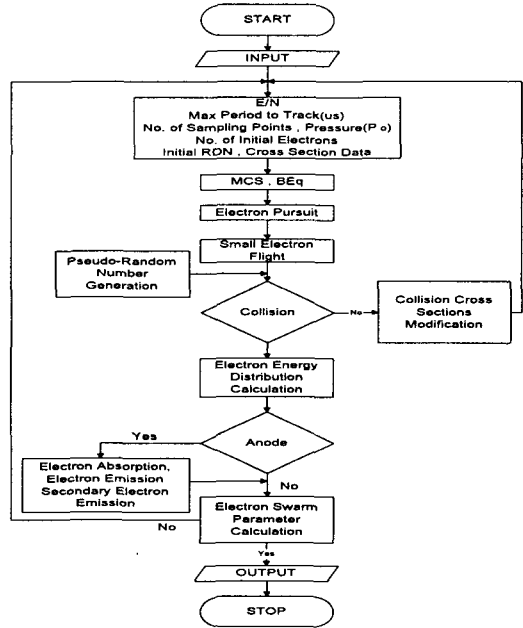


그림 2.1 전자 시뮬레이션 흐름도
Fig. 2.1 Flowchart of the electron simulation

3. 전자충돌 단면적

3.1 SF₆의 전자 충돌 단면적

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

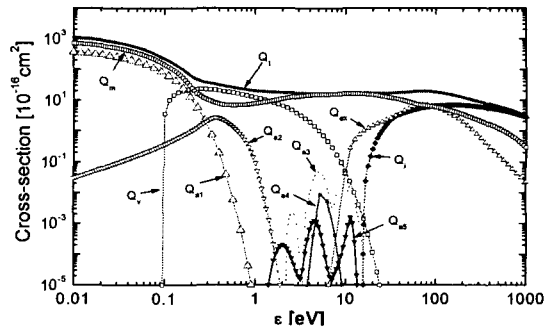


그림 3.1 SF₆기체의 전자 충돌 단면적
Fig. 3.1 Collision cross sections of electrons in SF₆

이 SF₆의 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착단면적 (Q_{a1}, Q_{a2})이 낮은 에너지영역에 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.

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.

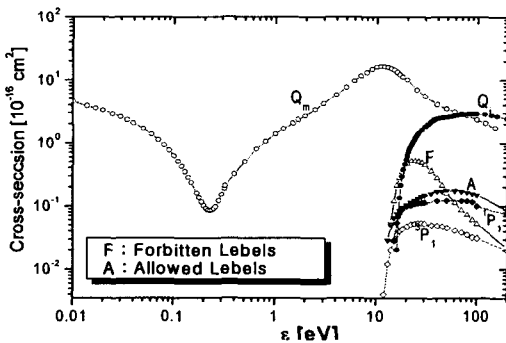


그림 3.2 Ar기체의 전자 충돌단면적
Fig. 3.2 Collision cross sections of electrons in Ar

4. 결과 및 고찰

4.1 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 영에서 수직으로 이동하고 양극에서는 반사되거나 2차 전자가 방출하기 때문에 모두 흡수한다[7][8].

전자의 평균에너지 ($\bar{\epsilon}$)는 전극간 거리와 E/N

[Td]의 변화에 따른 몬테칼로 시뮬레이션으로 그림 4.1에 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.

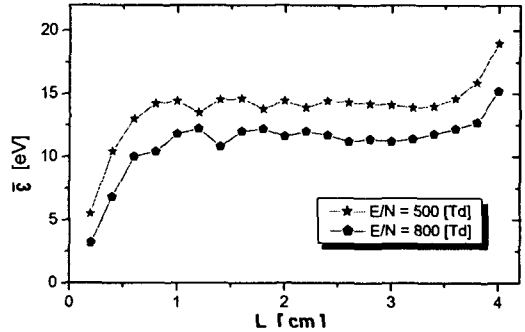


그림 4.1 SF₆ 기체에서 전자 평균에너지.
Fig. 4.1 Mean energy of electrons in SF₆.

4.2 Ar 기체에서 전자의 평균에너지

전자의 평균 에너지 ($\bar{\epsilon}$)와 특성 에너지 (D/μ)의 관계는 $D/\mu = \frac{kT}{e} = \frac{2}{3} \bar{\epsilon}$ 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. 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.

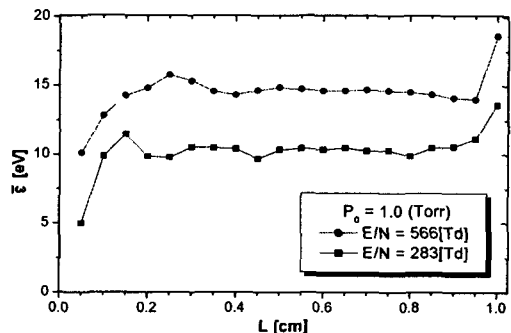


그림 4.2 Ar 기체에서 전자 평균에너지
Fig. 4.2 Mean energy of electrons in Ar

4.3 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자 평균에너지

그림 4.3은 SF₆-Ar 혼합기체의 전자 평균에너지를 나타냈으며, 전극간 거리 L=2.6[cm], E/N=200[Td]로 하고 혼합비 0.2[%], 0.5 [%]를 혼합한 기체를, 그림4.4는 혼합비 0.1[%], 5 [%], 순수 SF₆, 순수 Ar 기체의 전자 평균에너지를 나타냈으며, 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.

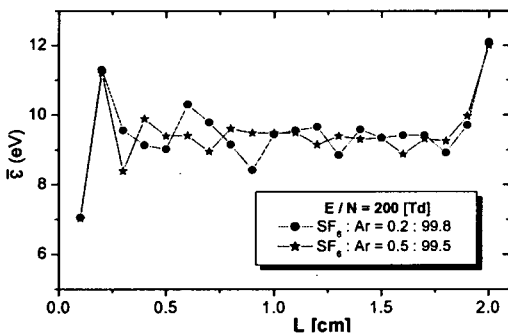


그림 4.3 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자 평균에너지
Fig. 4.3 Mean energy of electrons in SF₆-Ar

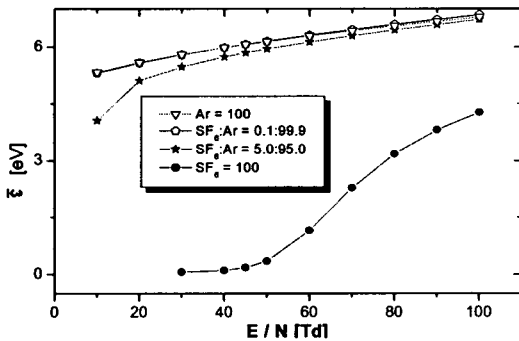


그림 4.4 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자 평균에너지
Fig. 4.4 Mean energy of electrons in SF₆-Ar

5. 결 론

본 연구는 탄성 및 비탄성 충돌 단면적과 전리 증식의 전자군을 형성하는 비교적 낮은 E/N[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[9]~[11]

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(F₀)과 비등방성분(F₁)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 전자평균 에너지를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 이렇게 얻은 계수의 데이터를 바탕으로 새로운 고전압 전기재료의 물성적 기초 자료에 활용과 실제 기기의 설계에 적용, 기체 방전 모델을 확장한 정량적 해석도 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF₆ : I. Boltzmann equation analysis" Phys. D:Appl. Phys 21, pp.922-930, 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.*, "볼츠만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] 몬테칼로法 と シミュレーション(培風館), 1989.
- [6] 하성철, 전병훈, 백승권, "몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송계수에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp. 685~692, 1995.
- [7] Y. Nakamura, "Transport Coefficients of Electrons and Negative Ions SF₆." J. Phys. D, Vol. pp.1~36, 1981.
- [8] Y. Nakamura and M. Kurachi, "Electron Transport Parameters in Argon and its momentum transfer cross section" J. Phys. 21, pp.718~723, 1988.
- [9] 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.
- [10] 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, 2000
- [11] 金相南, 河聖哲, "SF₆가스의 電子에너지 分布函數에 관한 研究", 韓國照明·電氣設備學會誌, Vol.23-2-14, pp.227-233, 1999.