

시뮬레이션에 의한 SF₆-Ar 혼합기체의 電子 移動速度

김상남
시립인천전문대학

Drift Velocities for Electrons in SF₆-Ar Mixtures Gas by Simulation

Kim Sang-Nam
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 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 range of E/N values

1. 서 론

최근 국내외적으로 고도 산업과 경제 성장으로 전력 수요가 매년 증가하는 실정이다. 따라서 전력 전송의 고전압 화, 대용량화 및 핵융합 등의 새로운 에너지 기술개발의 기초 과학 연구가 다각적으로 활발히 이루어지고 있는 추세이다. 한편 산업 발전에 따라 전력 계통의 대용량화, 송전 전압의 초고압 화에 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].

이것은 전자 에너지 분포 함수를 갖는 전자군과 하전입자 군과의 충돌 현상으로 나타나는 전자 이동 속도를 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교 검토하였다.

2. 해석방법

몬테칼로법은 세계 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[4][5]. 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.

하전입자 각각의 속도는 각각 다른 시간 t와 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 t로 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 dn이라 하면

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

로 나타낼 수 있다.

여기에서 $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 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 전자 수 밀도는 위치 변화에 따른 밀도와 전계의 속도 변화에 의한 밀

도 그리고 충돌로 나타나는 속도 변화에 따른 밀도의 변화로 나타낼 수 있다는 것이다.

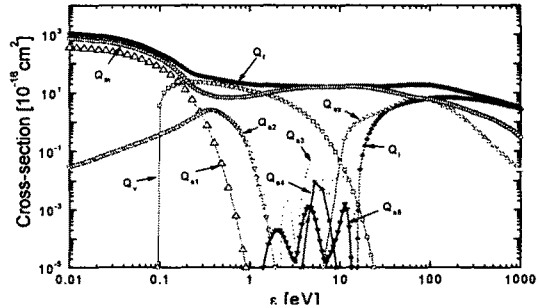
전자군 시뮬레이션 결과는 FORTRAN을 SPARC WORKSTATION을 이용하여 계산하였다.

3. 전자충돌 단면적

3.1 SF₆의 전자 충돌 단면적

본 연구에 이용한 SF₆의 전자 충돌 단면적은 H. Itoh et al.의 Set을 사용하였으며 그림 1에 나타내었다[6]-[7].

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.

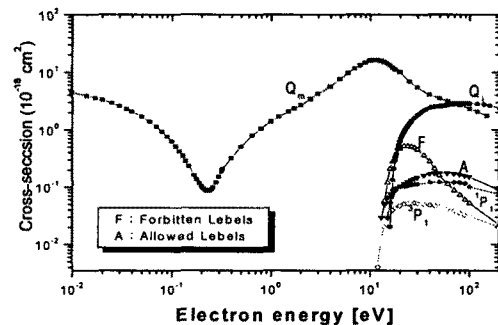


<그림 1> SF₆기체의 전자 충돌 단면적
<Fig. 1> Collision cross sections in SF₆ gas

3.2 Ar의 전자 충돌 단면적

Ar의 전자 충돌 단면적을 그림 2에 나타내었으며, Ar의 전자 충돌 단면적에 대한 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i)등을 나타내었다[8]-[9].

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.



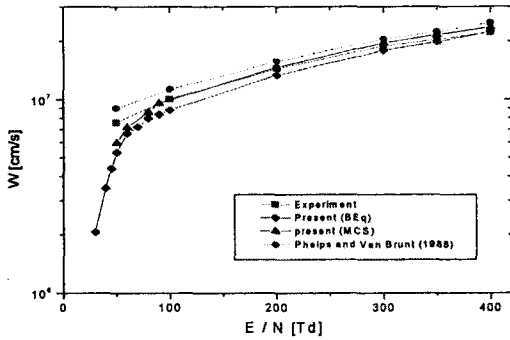
<그림 2> Ar기체의 전자 충돌 단면적
<Fig. 2> Collision cross sections in Ar gas

4. 결과 및 고찰

4.1 SF₆ 기체에서 전자의 이동속도

그림 3은 순수 SF₆ 기체에서 전자의 이동속도(W)를 나타냈으며, 이동속도는 E/N[Td]의 함수로서 MCS, BEq법으로 구한 이론값의 결과를 A. V. Phelps and R. J. Van Brunt들의 실험값과 본 연구의 실험값 등 4개의 값을 비교한 결과를 나타내었다[9].

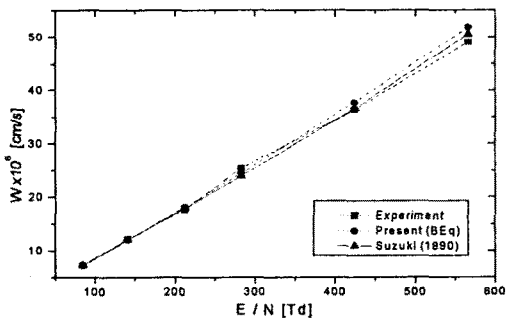
전자의 이동속도는 E/N[Td]의 증가와 더불어 거의 선형적으로 증가하였으며 일반적으로 전자 에너지가 낮은 영역의 전자충돌 단면적은 운동량변환 단면적이 비탄성충돌 단면적보다 크므로 전자의 충돌 빈도는 운동량변환 단면적의 영향으로 나타나며 또한 전계로부터 에너지를 얻은 전자의 충돌 전리확률은 평균자유행정에 의해 나타나며 이것은 압력에 반비례하므로 낮은 기압에서 전자에너지는 큰 값으로 작용하기 때문에 전자 이동속도는 전계의 크기와 그의 전자산란의 빈도에 의해서 결정된다고 생각된다.



〈그림 3〉 SF₆ 기체에서 전자의 이동속도
〈Fig. 3〉 Drift velocities of electrons in SF₆

4.2 Ar 기체에서 전자의 이동속도

그림 4는 Ar 기체에서 E/N[Td]를 파라미터로 하여 전자의 이동속도를 BEq법으로 구한 이론값과 Y. Suzuki의 측정값과 본 연구의 실험값을 비교하여 나타낸 것으로 거의 일치하였다[10]-[11]. 이와 같은 경향은 Ar 기체에서 전자 충돌 단면적 중에서 운동량변환 단면적이 비탄성 충돌 단면적 보다 큰 값의 영향으로 E/N[Td]의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하였다.



〈그림 4〉 Ar 기체에서 전자의 이동속도
〈Fig. 4〉 Drift velocities of electrons in Ar

4.3 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자의 이동속도

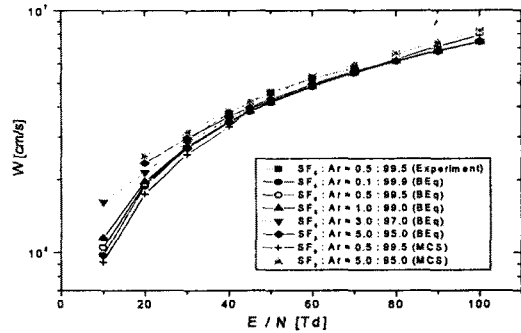
그림 5에 나타낸 전자 이동속도는 E/N[Td]의 함수로서 기체의 혼합비의 변화에 따라 MCS, BEq법 및 전자도착 시간분포에 의한 실험적 방법으로 측정된 결과를 나타내었다.

실험적으로 측정된 실험값과 MCS 및 BEq법으로 구한 이론값의 결과는 낮은 영역에서 혼합비에 따라 증감의 차이가 나타났으나 높은 영역에서는 비교적 일치하였다.

이와 같은 현상은 전자가 SF₆ 분자와 충돌 산란을 일으킬 때 이동 거리에 따라서 전자도착 시간분포의 중심 이동의 영향을 받기 때문에 전자수의 증감이 발생하여 전자 이동 속도의 증감의 차이가 나타나는 것으로 생각된다.

한편 전자는 E/N[Td]가 높을 때 Ar 기체의 비평형 영역에서 충돌 여기가 활발하게 되므로 에너지를 잃어버리게 되어 전자수는 감소하고 이동 속도는 증가하는 현상이다.

SF₆-Ar 혼합기체는 비평형 영역에서 충돌여기가 활발하게 되어 잃어버린 에너지 값이 많게 되어 전자수가 감소하고 이동속도는 증가하는 현상이 나타나고 SF₆ 기체는 Ar 기체에 비하여 전자충돌 단면적이 대단히 크게 되어 충돌여기가 둔화되며 잃어버린 에너지의 값이 적게 되어 전자수는 증가하고, 이동속도는 감소하는 현상으로 순수 SF₆ 기체 보다 느려진다고 사료된다.



〈그림 5〉 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자의 이동속도
〈Fig. 5〉 Drift velocity of electrons in SF₆-Ar mixtures

5. 결 론

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

기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의하여 전자 이동속도를 평균 에너지가 평형 상태인 경우 Sample=14, L=2.6[μ]에서 2항근사의 볼츠만 법에 의한 등방성분(F₀)과 비등방성분(F₁)을 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 값과 비교 시 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 필스 코로나 방전을 이용한 오염 물질을 제거시키는 배기 가스 처리 문제에도 응용할 수 있다고 본다.

〔참 고 문 헌〕

- [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.922-930, 1988.
- [2] 電気學會技術報告, '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 断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] Y. Nakamura, 'Transport Coefficients of Electrons and Negative Ions SF₆' J. Phys. D, Vol. pp.1-36, 1981.
- [7] Y. Nakamura and M. Kurachi, 'Electron Transport Parameters in Argon and its momentum transfer cross section' J. Phys. 21, p.718-723,
- [8] 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.
- [9] W. C. Fon, K. A. Berrington, P. G. Burke, 'The elastic Scattering of electrons from inert gases: III Argon' J. Phys. B : At. Mol. Phys. 16, pp.307-321, 1983
- [10] Y. Suzuki, T. Taniguchi and H. Tagashira "Momentum transfer cross section of argon deduced from electron drift velocity data", J. Phys. D : Appl. Phys. 23, pp.842-850, 1990.
- [11] 金相南 "SF₆ + Ar혼합기체의 MCS-BEq에 의한 전자 분포함수" 대한전기학회 논문집, 51P-1-4, pp.28-32, 2002