

SF₆-Ar混合氣體의 MCS-BEq알고리즘에 의한 확산계수

김상남*, 하성철**

시립인천전문대학*, 동국대학교**

Diffusion coefficients of electrons in SF₆-Ar Mixtures Gas used by MCS-BEq Algorithm

Sang-Nam Kim* · Sung-Chul Ha**

Incheon city collage, Dongguk University.**

Diffusion coefficients 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 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 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 SF₆ 기체를 포함한 혼합 기체에서 전자군 특성을 정량적으로 파악하기 위해서는 전자에너지 분포함수를 갖는 전자군과 각각의 하전 입자군과의 충돌현상으로 나타나는 전자수송계수에 대해 이론적, 실험적 해석에 의한 규명이 필요로 된다 [1]~[3].

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 연구에 매우

중요시된다. 전자 수송계수의 거동은 전자와 기체 원자, 분자의 전자 충돌 단면적에 대한 이론적, 실험적인 방법으로 결정된다. 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 절연성능이 떨어지고 저온에서 액화의 용이성 등으로 인한 절연재료의 결점을 보완하기 위하여 혼합기체의 상승효과를 이용한 절연특성의 효율화에 대한 연구가 이루어지고 있다[4][5].

이것은 전자 에너지 분포 함수를 갖는 중·횡방향의 확산계수를 실험적, 이론적 계산에 의하여 정량적으로 산출하였다.

2. 해석 방법

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 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.

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.

3. 전자충돌 단면적

3.1 SF₆의 전자 충돌 단면적

본 연구에 이용한 SF₆의 전자 충돌 단면적은 H. Itoh et al.의 Set을 사용하였다[6]~[9].

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 단면적에 대한 운동량 변환 단

면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i)등을 나타내었다. 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.[9]

4. 종 · 횡방향 확산계수

4.1 SF₆ 기체에서 종 · 횡방향 확산계수

그림 4.1과 그림 4.2는 SF₆ 기체의 종방향 확산계수와 횡방향 확산계수를 E/N [Td]을 파라미터로 하여 MCS와 BEq법으로 구하고, A. V. Phelps and R. J. Van Brunt의 실험값[10]과 본 연구의 실험값을 비교하였으며, 그 결과 거의 일치한 값을 얻었다.

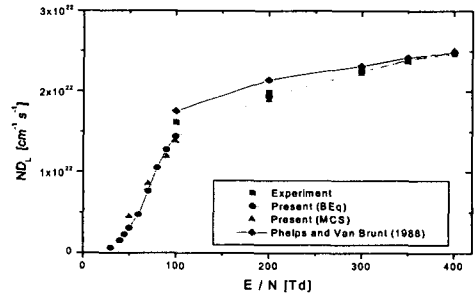


그림 4.1 SF₆ 기체에서 전자의 종방향 확산계수
Fig. 4.1 Longitudinal diffusion coefficients in SF₆

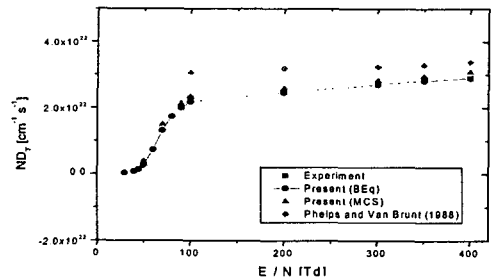


그림 4.2 SF₆ 기체에서 전자의 횡방향 확산계수
Fig. 4.2 Transverse diffusion coefficients in SF₆

전자의 확산계수와 기체 분자수 밀도와와 ND_L , ND_T 를 E/N [Td]의 함수로 전리, 부착계수 및 이동속도의 영향으로 하전입자밀도의 공간적 구배와

전계가 공존하는 공간내에서 하전입자의 거시적 운동이 일어나지 않고 평형 상태의 균일한 밀도 분포를 나타낸 것이다. 그러나 낮은 E/N[Td] 영역에서는 하전입자 밀도의 구배가 급격히 변화한 것은 분자의 여기 과정 영향으로 미소 거리를 진행하는 사이에 비평형 상태로 밀도 분포가 균일하지 않는 현상으로 사료된다.

4.2 Ar 기체에서 종 · 횡방향 확산계수

그림 4.3은 종방향 확산계수를 압력 $P_0=0.1$ [Torr], 온도 $T=300$ [°k] 일때 E/N[Td]의 변화에 따라서 볼츠만 방정식의 2항 근사식 이론 값과 Y. Suzuki의 실험값[10]을 비교하여 나타낸 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 $1 \leq E/N \leq 600$ [Td]범위에서는 탄성, 비탄성 충돌작용의 등방 산란을 고려한 볼츠만 해석과 실험값은 거의 일치하였고, Y. Suzuki의 실험값은 낮은 E/N[Td]에서 일치하였고, 이것은 전자와 기체 분자간에 미분 단면적에 의해 전방산란과 종방향 확산계수의 영향으로 전자의 비율이 크게 작용되고 있기 때문으로 생각된다.

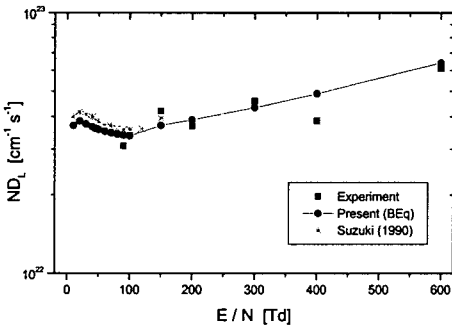


그림 4.3 Ar 기체에서 전자의 종방향 확산계수
Fig. 4.3 Longitudinal diffusion coefficients in Ar

그림 4.4는 Ar 기체의 횡방향 확산계수를 압력 $P_0=0.1$ [Torr], 온도 $T=300$ [°k]일 때 E/N[Td]의 변화에 따라서 볼츠만 방정식의 2항 근사식 이론 값과 Suzuki의 실험값과 본 연구의 실험값을 비교하여 나타낸 것이며, 그림에 나타난 바와 같이 $1 \leq E/N \leq 400$ [Td] 범위에서는 탄성, 비탄성 충돌작용의 등방 산란을 고려한 볼츠만 해석과 실험값과 Y. Suzuki의 실험값[10]과 본 연구의 실험값의 비교 결과는 거의 일치하였다.

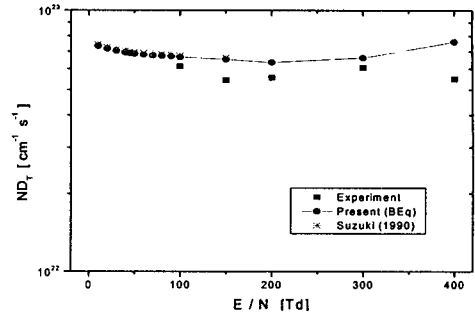


그림 4.4 Ar기체에서 전자의 횡방향 확산계수
Fig. 4.4 Transverse diffusion coefficients in Ar

4.3 SF₆-Ar 에서 종 · 횡방향 확산계수

그림 4.5와 그림 4.6은 SF₆-Ar 혼합기체의 종방향 확산계수와 횡방향 확산계수를 E/N[Td]를 파라미터로 하여 MCS와 BEq법으로 혼합비에 따라 계산하였고, 전자도착 시간분포에 의해 실험적으로 구하여 그 결과를 나타낸 것이다. 방전 공간 내에서 하전입자 밀도 분포가 균일하지 않는 경우에는 밀도가 이동하여 확산 현상이 나타나는 것으로 이 현상은 하전입자가 전리 기체 공간에서 소실되어 가는 것으로 1차원의 경우 탄성과 비탄성 충돌에 의하여 입자의 운동량의 변화가 일어나는 것이다.

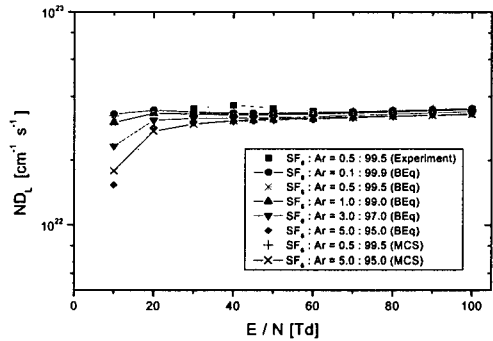


그림 4.5 SF₆-Ar 혼합기체에서 종방향 확산계수
Fig. 4.5 Longitudinal diffusion coefficients in SF₆-Ar

이 때 하전입자 밀도의 구배와 전계가 동시에 존재하는 공간 내에서 하전입자의 거시적 운동이 일어나지 않는 평형상태에서는 거의 균일한 밀도 분포가 나타난 것으로 본다.

이것은 열평형 상태에 있는 하전입자 밀도의 공간 분포로서 볼츠만 분포를 갖는다[11]~[13].

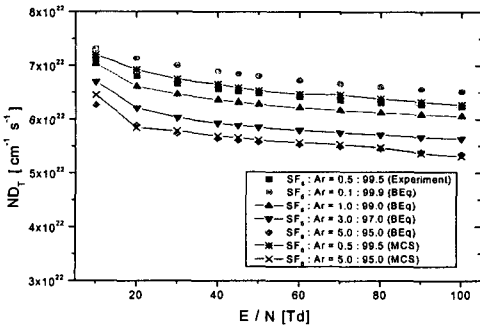


그림 4.6 SF₆-Ar 혼합기체에서 횡방향 확산계수
Fig. 4.6 Transverse diffusion coefficients in SF₆-Ar

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 중 전자의 종·횡방향 확산계수를 볼츠만 방정식을 이용한 이론 해석과 몬테칼로 시뮬레이션에 의해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의하여 전자의 종·횡방향의 확산계수가 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. 본 연구의 결과로 얻은 계수의 데이터를 바탕으로 새로운 고전압 전기재료의 물성적 기초 자료에 활용과 실제 기기의 설계에 적용, 기체 방전 모델을 확장한 정량적 해석도 가능할 것으로 사료되며, 펄스 코로나 방전을 이용한 오염 물질을 제거시키는 배기 가스 처리 문제에도 응용할 수 있다고 본다.

참고 문헌

[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.* "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] 하성철, 전병훈, 백승권, "몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송계수에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp. 685 ~692, 1995.

[6] A. Gilardini, "Low Energy Electron 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] A. V. Phelps and R. J. Van Brunt "Electron transport ionization attachment and dissociation coefficients in SF₆ and its mixtures" J. Appl. Phys. 64, pp.4269~4277, 1988.

[11] 김상남, 하성철, 유희영, 송병두 "SF₆+He 혼합기체의 MCS-BE알고리즘에 의한 전자에너지 분포함수연구" 대한전기학회지, Vol.49P-1-11, pp.660~667, 1999.

[12] 金相南, 河聖哲 "SF₆+Ar 混合氣體에서의 電離와 附着係數" 韓國電氣電子材料學會誌. Vol. 14 No. 9, pp.773-778, 2000

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