

SF<sub>6</sub>+Ar의 전자수송계수에 관한 연구

\*박재세, 김상남  
인천전문대학

A Study of Electron Transport properties in SF<sub>6</sub>+Ar Gas

\*Jae-Sae Park, Sang-Nam Kim  
Incheon City College

**Abstract** - In this paper, we describe the results of a combined experimental theoretical study designed to understand and predict the dielectric properties of SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>+Ar mixtures. The electron transport, ionization, and attachment coefficients for pure SF<sub>6</sub> and gas mixtures containing SF<sub>6</sub> has been analysed over the E/N range 30~300Td 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% SF<sub>6</sub>+Ar mixtures were measured by time-of-flight 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 the experimental and theoretical for a rang of E/N values,

도착시간분포를 TOF 법으로 드리프트 거리를 가변시켜 전자 수송계수를 측정하고 다른 저자의 실험결과와 비교하여 나타내었다.

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[5].

컴퓨터의 계산성능이 향상됨에 따라 방전 공간 내에서 난수를 이용하여 각종 파라미터의 위치적 변동에 의해서 전자의 평균에너지와 전자위치 및 시간의 함수로서 추적하여 해석하는 몬테칼로법은 전자사태에서 나타나는 개개의 전자를 추적하여 방전 파라미터의 동향을 조사하여 이들 전자의 물리량을 가상적으로 샘플링하고 그들 하전입자의 운동을 컴퓨터로 분석하여 전자군의 파라미터의 값을 확률적으로 결정하는 것이다.

전계가 존재하는 공간의 방전 메카니즘에 있어서 전자는 전계에 의해서 높은 에너지를 갖게 되지만 전자에너지가 평형상태에 있지 않으므로 전자에너지분포를 추정하기는 매우 어렵다. 따라서 이러한 상태에서 전자에너지를 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 전자운동상태와 분자의 충돌산란확률을 고려하여 전자, 이온의 상태량을 추적하는 것을 기본으로 하여 입자를 확률현상의 난수로 모의하는 방법을 말한다. 사용하는 난수는 컴퓨터에서 발생하는 [0~1]사이의 의사난수(Pseudo random number)이다[5]~[7].

MCS은 확률론적인 기법을 이용하기 때문에 얻어진 결과로 부터 통계적인 분산이 생기는 단점이 있다. 이 때문에 신뢰되는 파라미터를 구하기 위해서는 충분한 샘플수를 확보할 필요가 있다.

전자군에 대한 관측방법으로는 TOF, PT, SST 등이 있다. 몬테칼로 시뮬레이션에 있어서도 data 샘플링을 이들 관측법에 의해서 행한다. 3종의 관측법 중에 PT, SST에서는 계산을 행한 전자수가 그대로 샘플수로 생성되어 얻어지지만 TOF에서는 위치와 시간을 같이 지정하기 때문에 샘플수는 작게된다. 더욱이 에너지 분포를 구하는 경우 샘플수는 점점 작게되고 통계적 변동을 많이 포함한 결과가 되기 쉽다. 그것을 방지하기 위해

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 과학연구가 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 메카니즘을 정확히 이해할 필요가 있으며 이를 위하여 이론적, 실험적 수치 해석적으로 많은 연구를 필요로 하고 있다[1]~[4].

따라서 전리된 혼합기체중의 운동량 변환단면적, 여기, 전리, 부착 및 진동단면적의 값을 이용하여 전자수송특성을 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation) 법과 볼츠만의 Backward prolongation을 사용한 이론적 방법으로 계산하고 실험적으로는 TOF(Time of Flight)법의 전자도착 시간분포를 이용하여 구하였다. 그리고 전자수송특성의 이론적인 해석을 위하여 SF<sub>6</sub>와 Ar가스의 전자 충돌단면적은 Itoh, Ikuta, Bell, Nakamura 등의 측정값을 이용하여 MCS, BEq법에 의한 simulation의 결과와 비교 검토하고 순수 SF<sub>6</sub>기체와의 전자수송특성을 고찰한다.

따라서 본 연구의 주요 내용은 기체 중의 전자, 이온, 및 중성원자의 전리현상에 대한 전자 수송계수를 정량적으로 산출하기 위한 볼츠만 방정식과 몬테칼로법에 대하여 서술하고 이를 이용하여 도출한 전자 수송계수 즉 전자이동속도(W), 전리계수( $\alpha$ ), 전자 부착 계수( $\eta$ ), 실효전리계수( $\alpha = \eta$ )등의 산출한 값을 실험 결과와 비교 검토 하였고, SF<sub>6</sub>+Ar혼합기체 중에서 실험적으로 전자의

전자수를 많이 계산하는데 그것에 비례하여 계산기 시간도 증가한다.

볼츠만 방정식은 MCS와는 다르게 개개의 전자를 추적하지 않고 처음부터 다수의 입자를 포함하는 전자류를 취급하기 위하여 충돌의 확률적 성질을 기초로 하여, 전자군의 연속적인 예측이 가능하고 계산시간이 비교적 짧아 각종 전자군 파라미터를 산출하는데 일반적으로 사용되어 왔다.

전리 기체중에 존재하는 전자 수송은 입자 성분을 위치와 속도 및 시간으로 나타내며 볼츠만 방정식은 열평형 상태가 아닌 경우에 전자가 운동중 충돌에 의하여 임의의 속도와 임의의 위치에 존재하는 전자의 수가 시간에 따라 어떻게 변하는가를 추적, 결정하는 것이다.

기체중의 방전현상을 원자론적인 입장에서 보면, 상호 충돌을 되풀이하는 하전입자 즉 전자, 원자, 분자, 이온에서 성립되며, 이들 하전입자는 전자군의 속도와 위치 및 시간에 따라 분류할 수 있는데, 하전입자가 열평형 상태에 있는 경우를 제외하고는 전자의 운동중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의의 위치에 있는 전자의 수가 시간에 따라 변화한다.

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

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

로 나타낼 수 있다.

여기에서  $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 하전입자의 속도분포함수이다. 볼츠만 방정식을 간단히 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다

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

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

볼츠만 수송방정식은 열평형 상태가 아닌 경우 전자가 운동 중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의의 위치에 따라 어떻게 변화하는가를 결정하는 것이다. 볼츠만에서는 몬테칼로 시뮬레이션과는 달리 개개의 전자를 추적하지 않고 처음부터 다수의 입자를 포함하는 전자류를 취급하기 위하여 충돌의 확률적 성질을 기초로 하여 전자군의 연속적인 관찰이 가능하다. 따라서 전자군의 운동과정을 명확히 규명할 수 있으며 이들의 여러 가지 파라미터를 정량적으로 해석하는 경우 비교적 짧은 시간으로 전산 처리하여 구하는 것이 가능하다[8].

이러한 전자수송현상을 이해하기 위해서는 기체의 전자 충돌 단면적을 알아두어야 할 필요가 있다.

### 3. 전자충돌 단면적

#### 3.1 SF<sub>6</sub>의 전자 충돌 단면적

본 연구에 이용한 SF<sub>6</sub>의 전자 충돌 단면적은 H.

Itoh, et al.의 Set을 사용하였으며 그림3.1에 나타내었다.[9]~[11]

이 SF<sub>6</sub>의 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.

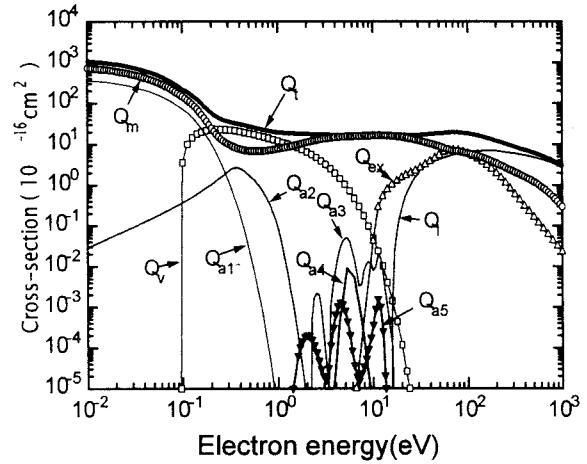


그림 3.1 SF<sub>6</sub>기체의 전자 충돌 단면적  
Fig. 3.1 The collision cross sections of electrons in SF<sub>6</sub> gas

#### 3.2 Ar의 전자 충돌 단면적

Ar의 전자 충돌 단면적에 대한 운동량 변환 단면적( $Q_m$ ), 여기 단면적( $Q_{ex}$ ), 전리 단면적( $Q_i$ )등을 그림3.2에 나타내었다[12]~[13].

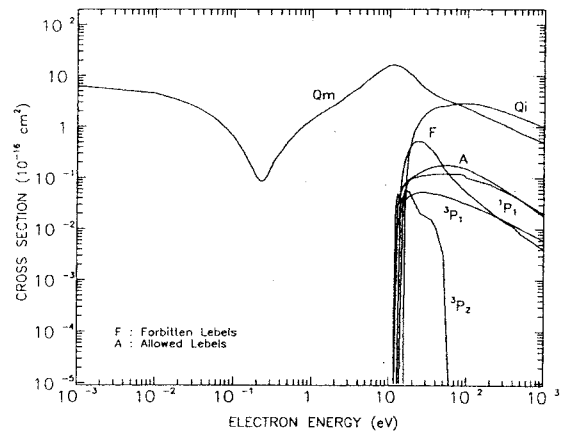


그림 3.2 Ar기체의 전자 충돌단면적  
Fig. 3.2 The collision cross sections of electrons in Ar gas

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 계산 값을 이용하였고 전자에너지 0.136~54.4[eV] 영역의 범위에서는 W. C. Fon의 측정값을 이용하였다. 그리고 여기 단면적( $Q_{ex}$ )은 허용대 준위의 여기 단면적( $^3P_2, ^3P_1, ^3P_0, ^1P_1$ )과 금지대 준위의 여기 단

면적(13.0~13.9[eV])으로 분류하여 Y. Nakamra, M. Kurachi, A. Chutjian 등의 측정값을 이용하고 전리 단면적은 Arati Dasgupta and A. K. Bhatia이 측정된 결과를 이용하였다[14].

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 SF<sub>6</sub>+Ar기체의 전리계수

전자에 의한 충돌전리는 전자가 전계 중에서 가속되어 전자의 운동에너지가 기체의 전리에너지를 넘으면 전리 확률을 갖고 기체분자를 전리한다. 따라서 전자의 충돌 전리의 크기를 정량적으로 나타내는 것을 전자의 충돌 전리계수( $\alpha$ )라고 한다. 전리확률은 기체 내를 전자가 갖는 운동에너지 즉 전자가 평균자유행정 사이에서 얻은 에너지의 함수이므로  $\alpha/N = f(E/N)$ 으로 나타낸다.

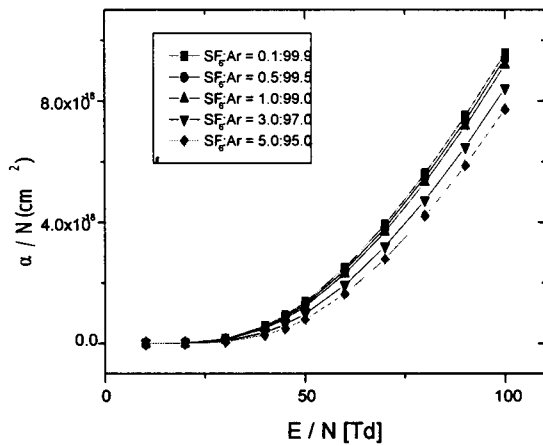


그림 4.1 SF<sub>6</sub>+Ar기체 중에서 전리계수  
Fig. 4.1 The ionization coefficients in SF<sub>6</sub>+Ar gas

##### 4.2 SF<sub>6</sub>+Ar기체의 부착계수,

전자부착은 전리에 의하여 발생한 전자는 기체 중에 중성원자 혹은 분자(산소, 수증기, 할로젠 등)에 부착하여 부 이온을 형성하는 것으로 전자에 비하여 질량이 크고 전계의 가속을 받아도 높은 에너지 상태에 도달하기 어렵고 전리능력도 없다.

따라서 전자는 기체 중의 부성기체분자에 부착하여 전리능력을 잃고 기체의 절연내력을 현저하게 향상된다. 이 때문에 부성기체(SF<sub>6</sub>)는 고전압용 절연체로서 널리 이용된다. 낮은 E/N[Td]영역에서는 전자부착계수는 증가하고 높은 E/N[Td]영역에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 비탄성 충돌 단면적의 영향으로 전자의 전리확률을 저하시켜 절연내력을 향상시키는 것으로 생각된다. 따라서 전자부착계수( $\eta/N$ )는 E/N[Td]의 증가와 더불어 감소하였고 phelps and Van Brunt(1988), Hayashi and Hara(1991)의 실험값과 비교적 일치한 경향을 나타내었다.

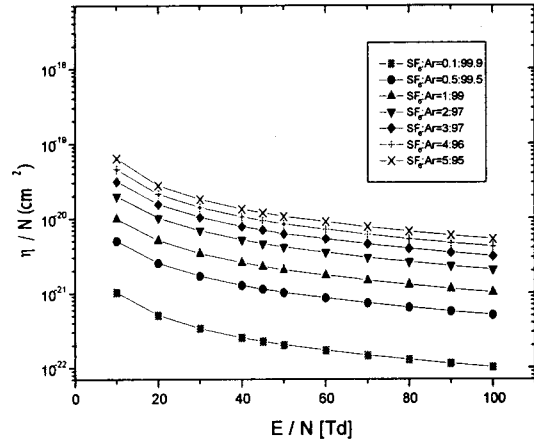


그림 4.2 SF<sub>6</sub>+Ar기체중에서 부착계수  
Fig. 4.2 The attachment coefficients in SF<sub>6</sub>+Ar gas

##### 4.3 SF<sub>6</sub>+Ar기체의 실효전리계수

그림 4.3은 SF<sub>6</sub>+Ar혼합기체 중에서 실효전리계수( $\alpha - \eta/N$ ) 값을 갖는 E/N[Td]를 파라미터 하여 혼합비에 따라 계산한 결과를 나타내었다.

본 연구에서 혼합기체 중의 전리계수( $\alpha/N$ )는 E/N과 혼합비의 증가에 따라 감소하고 부착계수( $\eta/N$ )는 증가하였으며 실효전리계수( $\alpha - \eta/N$ )는 감소하는 경향이 나타났다.

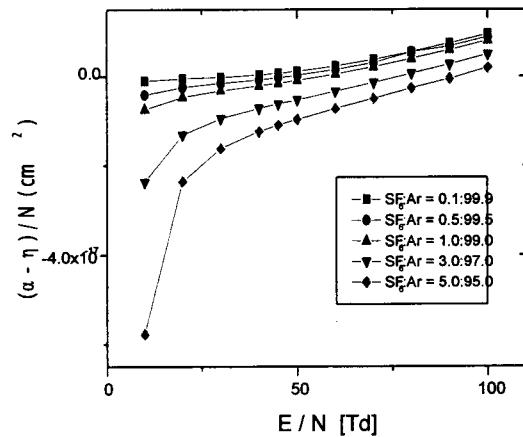


그림 4.3 SF<sub>6</sub>+Ar기체 중에서 실효전리계수  
Fig. 4.3 The effective ionization coefficients in SF<sub>6</sub>+Ar gas

즉 SF<sub>6</sub> 기체가 가지고 있는 성분을 억제하고 SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup>을 형성하는 전자부착 작용을 효율적으로 이용하는 것이다.

일반적으로 상승효과라는 것은 기체를 혼합할 때 혼합기체의 특성이 혼합비에 따라 직선적인 관계보다도 높게되는 특성을 가지고 있다[15][16].

## 5. 결 론

본 연구는 탄성 및 비탄성 충돌 단면적과 전리증식의 전자군을 형성하는 비교적 낮은  $E/N$ [Td] 영역에서 혼합기체의 혼합비에 따른 전리, 부착, 실효전리계수 및 전자 수송계수(Swarm parameter)를 볼츠만 방정식을 이용한 이론 해석과 몬테칼로 시뮬레이션에 의해 해석한 결과는 기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의한 전자 Swarm 관측원리에 따라 도출한 전리계수( $\alpha$ ), 전자부착계수( $\eta$ ), 실효전리계수( $\alpha-\eta$ ), 등으로부터  $\alpha=\eta$  되는 임계환산전계( $E/N$ )lim에서 혼합기체의 절연 내력을 구하였으며, SF<sub>6</sub>+Ar 혼합기체의 절연 내력은 순수 SF<sub>6</sub>에 비해 25.84[%]으로 나타났으며 혼합비의 증가에 따라 그 값이 증가하는 경향을 확인 하였고, SF<sub>6</sub>, Ar 순수기체, 및 SF<sub>6</sub>+Ar 혼합기체 중에서  $E/N=30\sim 300$  [Td]범위에서 전자 수송계수를 구하였다.

본 연구는 시립인천전문대학 교내 연구비 지원에 의한 논문임

## [참 고 문 헌]

- [1] Lieberman M A & Lichtenberg A J, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing" John Wiley & Sons, pp.472~511 1994.
- [2] Flamm D L, "Plasma Etching" Academic Press, San Diego, pp.91~183. 1989.
- [3] Flamm D L, "Plasma Processing of Semiconductors" Williams P F, NATO ASI series, pp.1~22. 1997.
- [4] T.Yoshizawa, Y.Sakai, H.Tagashira and S.Sakamoto, "Boltzmann Equation Analysis of the Electron Swarm Development in SF<sub>6</sub>", J. Phys. D. Vol. 12, pp.1839~1852. 1979.
- [5] 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.
- [6] R.W.L. Thomas, and W.R.L. Thomas, "Monte Carlo Simulation of electrical discharge in gases", J. Phys. B. Vol. 2, pp.562-570, 1969.
- [7] Philip. E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No.19, 1975.
- [8] Philip. E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No. 19, 1975.
- [9] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF<sub>6</sub> : 1. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D:Appl. Phys. 21, pp.922~930, 1988.
- [10] 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.
- [11] S. Trajmar, A. Chutjian, "electron impact excitation of SF<sub>6</sub>" J. Phys. B, Vol.10, pp.2943~2949, 1977.
- [12] 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.
- [13] 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
- [14] Arati Dasgupta and A. K. Bhatia, "Scattering of electrons from Argon atoms" Phys. Rev. A. Vol.32, No. 6, pp.335~3341, 1985.
- [15] M. C. Siddagangappa, C. S. Lakshminarasimha, and M. S. Naidu, "Ionisation and attachment in binary mixtures of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> and CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>", J. Phys. D. Vol. 16, pp.763~772, 1983
- [16] L. E. Kline, D. K. Davies, C. L. Chen, and P. J. Chantry. "Dielectric properties for SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub> mixtures predicted from basic data" J. Appl. Phys., Vol. 50(11), pp.6789~6796, 1979.