

## 시뮬레이션을 이용한 SF<sub>6</sub>-Ar의 전리계수

김상남  
시립인천전문대

### A Simulation of the ionization coefficients in mixtures of SF<sub>6</sub> and Ar

Sang-Nam Kim  
Incheon city collage

**Abstract** - In this dissertation the results of the combined experimental and theoretical studies designed to understand and predict the spatial growth and transport coefficients for electrons in SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>-Ar mixtures have described.

The transport coefficients for electrons in(0.1[%]) SF<sub>6</sub>-Ar,(0.5[%])SF<sub>6</sub>-Ar,(1.0[%]) SF<sub>6</sub>-Ar,(3.0[%])SF<sub>6</sub>-Ar and(5.0[%])SF<sub>6</sub>-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.

연구가 활발하게 진행되고 있으며, 전리 기체에 대한 물리적 현상의 명확한 이론 정립을 위해서는 전자의 충돌 단면적 및 에너지 분포 함수의 정확한 산출과 이를 이용한 전자군의 수송 계수의 정립이 요구된다.

이것은 전자 에너지 분포 함수를 갖는 전자군과 하전 입자 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. 해석방법

### 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 과학 연구가 다각적으로 활발히 이루어지고 있는 추세이다. 한편 산업 발전에 따라 전력 계통의 대용량화, 송전 전압의 초고압화에 의하여 각종 전기 기기에 방전 현상이 증대한 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]~[4].

특히 6불화 유황(SF<sub>6</sub>: sulphur Hexafluoride)기체는 1950년대 최초로 전력용 변압기의 기체 절연체재료로 사용되었으며 1970년대에 기체 절연장치(GIS), 가스 차단기(GCB)등에 이용되어 상용화되기 시작하였으며 1980년대에 본격적으로 연구 개발되어 최근에는 화학적으로 안전하고 절연성과 소호성이 우수하여 기체 절연 전선로(GIL), 초 고전압 및 대용량 전력 차단기, 전력계통에 널리 이용되고 있다.

또한 SF<sub>6</sub>가스는 불평등 전계 에서 절연성능이 떨어지고 저온에서 액화의 용이성 등으로 인한 절연체재료의 결점을 보완하기 위하여 혼합기체의 상승효과(Synergism)을 이용한 절연특성의 효율화에 대한 연구가 이루어지고 있다[5].

이와 같은 시대적 요망에 따라 전자군의 운동 즉, 전자 수송 계수에 대하여 각종 실험과 시뮬레이션에 의한

### 2.1 MCS법

MCS은 난수(Random Number)를 이용하여 충돌의 종류, 산란후의 방향 및 비행시간 등을 결정하면서 전자의 운동을 반복 추적한다. 또한 전자군의 성질을 조사하기 위한 몬테칼로법은 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.[6] [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 작게 된다. 더욱이 에너지 분포를 구하는 경우 샘플수는 점점 작게 되고 통계적 변동이 많이 포함된 결과가 되기 쉽다. 그것을 방지하기 위해 전자수를 많게 계산하는데 그것에 비례하여 계산기 시간도 증가한다.[8][9]

### 2.2 BE법

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 운동 중 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

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

로 나타낼 수 있다.

여기에서  $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 하전입자의 속도분포함수 이다.

볼츠만 방정식을 간단히 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다

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

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

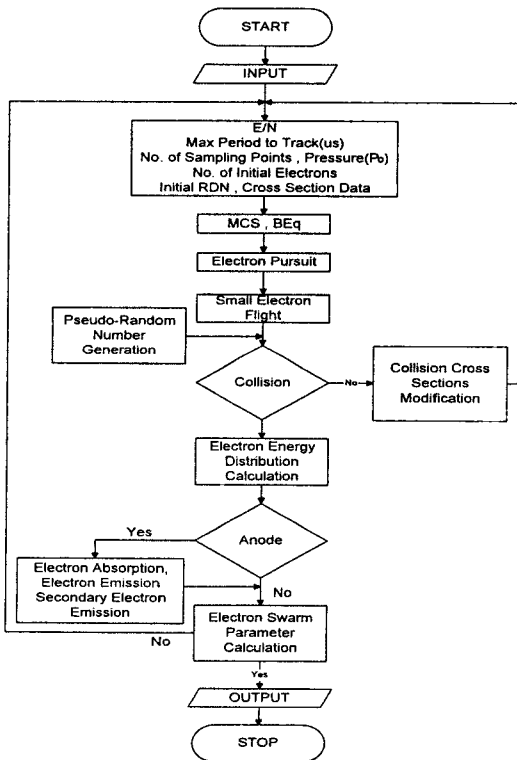


그림 2.1 전자 시뮬레이션 흐름도  
Fig. 2.1 Flowchart of the electron simulation

본 논문에서는 볼츠만방정식에 의한 전리, 부착 계수의 수치해석은 Philip E. Luft의 Backward prolongation 계산법을 이용하였다.[10] 또한 전자가 음극에서부터 양극에 도달할 때까지 SPARC WORKSTATION(SS-20)으로 반복 추적하여 계산하였고 그림2.1은 본 시뮬레이션 전체의 개략적인 흐름을 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 SF<sub>6</sub>기체의 전리계수

전자에 의한 충돌전리는 전자가 전체 중에서 가속되어 전자의 운동에너지가 기체의 전리에너지를 넘으면 전리확률을 갖고 기체분자를 전리한다. 따라서 전자의 충돌전리의 크기를 정량적으로 나타내는 것을 전자의 충돌전리계수( $\alpha$ )라고 한다. 전리확률은 기체 내를 전자가 갖는 운동에너지 즉 전자가 평균자유행정 사이에서 얻은 에너지의 함수이므로  $\alpha/N=f(E/N)$  으로 나타낸다 [9].

그림 3.1은 SF<sub>6</sub>기체의 전리계수를 나타낸 것으로 E/N 값이 적은 영역에서는  $\alpha/N$ 은 거의 일정한 포화상태를 유지하나 E/N=100 [Td]이상의 영역에서는  $\alpha/N$ 은 급속히 증가하였음을 나타내었다.

이것은 SF<sub>6</sub>기체의 특성 중에서 부착 단면적(Qa<sub>1</sub>, Qa<sub>2</sub>)의 절대값이 크므로 전리에 의하여 발생한 전자는 높은 에너지상태에 도달하기가 힘들고 전리능력이 없다.

그러나 전자의 운동에너지가 기체의 전리에너지 보다 크게 되어 전리확률은 급격히 증가하였다. 이들의 계산값을 A. V. Phelps and R. J. Van Brunt(1988), M. Hayashi and S. Hara(1991)들의 실험값과 비교하여 거의 일치한 값으로 나타냈다[9].

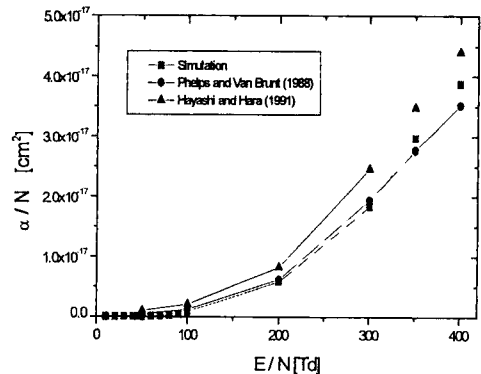


그림 3.1 SF<sub>6</sub> 기체의 전리계수  
Fig. 3.1 The coefficients of ionization in SF<sub>6</sub>

#### 3.2 Ar 기체에서 전리계수

그림3.2는 Ar 기체에서 전리계수를 나타내며 실험치와 시뮬레이션 계산값과 Y. Suzuki[7]의 실험값을 나타내었으며, Y. Suzuki의 실험값은 낮은 E/N[Td] 영역에

서는 나타나지 않았으나  $E/N > 50$  [Td]에서는 시뮬레이션 실험값과 거의 같은 값으로 나타났고 결과적으로 낮은  $E/N$ [Td]영역에서는 전리계수가 급격히 증가하였으나 높은  $E/N$ [Td]영역에서는 거의 일정한 경향을 나타내는데 이러한 현상은 전자의 에너지가 증가하면 충돌할 때 상호작용 시간이 너무 짧기 때문에 전리하기가 어렵기 때문이다.

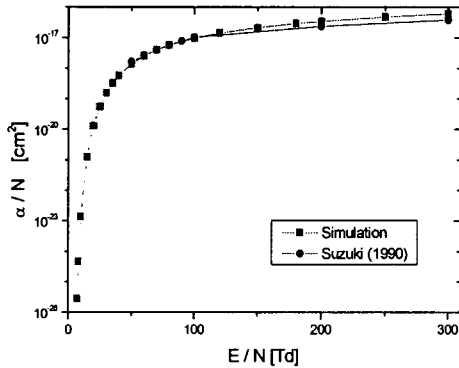


그림 3.2 Ar 기체의 전리계수  
Fig. 3.2 The coefficient of ionization in Ar

### 3.3 SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체에서 전리계수

그림 3.3은 SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체 중에서 전리계수( $\alpha/N$ ) 값을 갖는  $E/N$ [Td]를 파라미터로 하여 혼합비에 따라 계산한 결과를 나타낸다.

본 연구에서 혼합기체 중의 전리계수( $\alpha/N$ )는  $E/N$ 과 혼합비의 증가에 따라 증가하는 경향이 나타났다[11]~[12].

이것은 Ar기체의 Ramsauer Townsend Minimum을 갖는 운동량 변환 단면적, 비탄성 충돌 단면적의 영향과 SF<sub>6</sub>기체의 큰 부착 단면적에 기인한다.

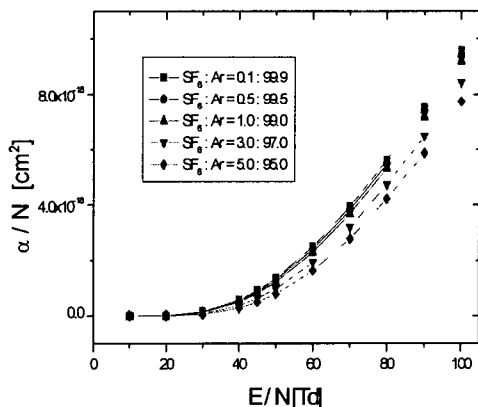


그림 3.3 SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체에서 전리계수  
Fig. 3.3 The ionization coefficients in SF<sub>6</sub>-Ar mixtures

## 4. 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 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

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

## 참 고 문 헌

- [1] L. G. H. Huxley & R. W. Cormpton, 'The Diffusion and Drift of Electrons in Gases'~John Wiley and Sons, Inc 1974.
- [2] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, 'Electronswarm development in SF<sub>6</sub> : I. Boltzmann equation analysis'~Phys. D:Appl. Phys 21, pp.922-930, 1988.
- [3] 電氣學會技術報告, '氣體放電시뮬레이션 技法' 第140號, 1974.
- [4] 몬테칼로法 と 시뮬레이션, 培風館, 1989.
- [5] 松村俊明, 佐藤孝紀 *et al.*, 'SF<sub>6</sub>를 포함 혼합가스의 絶縁特性'~放電研究會資料, ED-91-84, PP.67-84, 1991
- [6] 谷口敏幸 *et al.*, 'ホ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.
- [7] S. Trajmar, A. Chutjian, 'electron impact excitation of SF<sub>6</sub>' J. Phys.B, Vol.10, pp.2943 -2949, 1977.
- [8] 하성철, 전병훈, 백승권, '몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송계수에 관한 연구', 한국전기전자재료학회지, Vol. 1. 8, No. 6, pp. 685-692, 1995.
- [9] 河聖哲, 徐相賢, 'SF<sub>6</sub>가스의 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 'SF<sub>6</sub>-Ar 混合氣體에서의 電離 및 附着係數에 관한 研究' 工學博士 學位論文, 東國大學校, 2000
- [11] 김상남, 하성철 'SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체에서의 전리와 부착계수' 한국전기전자재료학회지, Vol. 14, No. 9, pp. 773-778, 2001.
- [12] 김상남 'MCS-BE에 의한 SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체에서의 전자 이동 속도' 대한전기학회지, Vol. 54P-1-5, pp. 29-33, 2005.