

논문 16-2-14

## 몬테칼로 시뮬레이션과 볼츠만 방정식을 이용한 저전압 기중차단기의 전자수송계수 특성파악

### Analysis of Electron Transport Coefficients in Low Voltage Air Circuit Breaker Using MCS and BE

하성철, 서상현

(Sung Chul Ha and Sang Hyun Seo)

#### Abstract

The electron transport coefficients in Air is analysed in range of E/N values from 100~1000(Td) by a MCS and BE method. This paper have calculated W,  $ND_L$ ,  $ND_T$ , Mean energy mixtures by  $N_2+O_2$ . The results gained that the values of the electron swarm parameters such as the electron drift velocity, longitudinal and transverse diffusion coefficients.

**Key Words** : MCS, BE, Electron energy distribution function

#### 1. 서론

진공차단기 및 에어차단기는 현재 사용중인 고압 차단기로서 소호매질인 Air의 질소와 산소전자의 이동속도, 중형축화산계수, 충돌단면적, 평균에너지와 같은 전자수송계수를 파악하는 것이 성능특성 분석 및 향상에 중요한 기술적 자료가 될 것이다.

현재 차단기의 전자계 해석은 대체적으로 분석이 되어진 상태지만 차단기 내부에 있는 소호매질인 Air( $N_2+O_2$ )에 대한 전자이동속도는 국내에서 해석된 곳이 없다. 따라서 본 연구에서는 산출된 전자수송계수의 물리적 현상을 명확히 규명하여 진공차단기 및 Air 차단기의 특성을 개선 및 고비용의 실험없이 시뮬레이션만으로 차단기의 차단능력을 파악하는 것이 주된 목적이다. 그러므로 전계가 인가된 기체 중에서의 전자의 운동을 파악하기 위해서는 운동량 변환 단면적, 여기 충돌 단면적, 전리 충돌 단면적, 전자이동속도, 확산계수, 전자 부

착계수, 전자에너지분포함수에 대한 정확한 측정과 해석이 필요하다. 특히 전계를 인가한 기체중에서의 전자 이동속도는 전자의 충돌단면적을 결정하는 중요한 요소가 되고, 전자의 충돌단면적을 이용하여 입자군의 전자에너지 분포함수와 수송계수를 계산할 수 있다. 따라서 측정된 전자이동속도와 볼츠만 수송방정식을 Backward prolongation법으로 해석하여 Air기체의 전자수송계수 및 충돌단면적을 결정하고 전기적 절연특성과 냉각효과의 개선을 위한 혼합기체의 개발에 관련된 기초적 물성의 해석과 응용성을 검토하고자 한다[1-3].

또한 Air기체의 전기 전도 특성을 나타내는 전자이동속도(W), 전자의 중형방향의 확산계수( $ND_L$ ,  $ND_T$ ) 및 평균에너지 등의 전자수송계수를 E/N(Td):100~1000(Td) (E:전계, N:기체분자수밀도, 1Td= $1 \times 10^{17} V \cdot cm^{-2}$ , N: $3.5353 \times 10^{16} cm^{-3}$  0°C 1Torr에 해당)의 범위에서 볼츠만 방정식으로 계산했다[4,5].

#### 2. 시뮬레이션 이론 및 전자충돌 단면적

##### 2.1 MCS법

MCS은 난수(Random Number)를 이용하여 충돌

동국대학교 전기공학과  
(서울시 중구 필동 3-27,  
Fax : 02-2260-3348

Corresponding Author : scha@donguk.dgu  
2002년 8월 22일 접수, 2002년 10월 10일 1차 심사완료,  
2002년 10월 30일 최종 심사완료

의 종류, 산란후의 방향 및 비행시간 등을 결정하면서 전자의 운동을 반복 추적하는 시뮬레이션으로 전자군의 성질을 조사하기 위해 전자계내의 전자운동상태와 분자의 충돌산란확률을 고려하여 전자, 이온의 상태량을 추적하는 것을 기본으로 하여 입자를 확률현상의 난수로 모의하는 방법을 말한다. 이때 사용하는 난수는 컴퓨터에서 발생하는 [0~1]사이의 擬似亂數(Pseudo random number)로서 확률론적인 기법으로 얻어진 결과로부터 통계적인 분산이 생기는 단점이 있다. 이 때문에 신뢰되는 파라미터를 구하기 위해서는 충분한 샘플수를 확보할 필요가 있다.

전자군에 대한 관측방법으로는 TOF, PT, SST 등이 있다. 문제별로 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 전자수를 많이 설정하여 계산하는데 그것에 비례하여 계산시간도 증가한다[6,7].

**2.2 전자 산란이론**

일반적으로 충돌후의 전자의 산란방향은 등방산란과 비등방산란으로 분류한다[11].

**2.2.1 등방산란**

전자의 새로운 산란각  $\theta$  및  $\psi$ 는 입사각에 관계없이 2개의 난수계열에 의하여 다음과 같이 결정한다.

$$\cos \theta = 1 - 2\xi_1 \tag{1}$$

$$\psi = 2\pi \xi_2 \tag{2}$$

( $\theta$ : z축과 이루는 전자의 산란각  $\psi$ : x축과 이루는 전자의 산란각)

**2.2.2 비등방산란**

비등방산란을 가정한 경우 충돌후의 편향각( $\omega$ )와 방위각( $\chi$ )는 다음과 같이 2개의 난수에 의하여 결정한다.

에너지  $\varepsilon$  을 갖는 전자가  $k$  충돌 때의 미분단면

적을  $\sigma_k(\varepsilon, \omega)$ 로 하면 그때의 적분 단면적을  $q_k(\varepsilon, \omega)$  는 다음과 같이 나타낸다.

$$q_k(\varepsilon) = \int_0^\pi \sigma_k(\varepsilon, \omega') 2\pi \sin \omega' d\omega' \tag{3}$$

여기서 편향각  $\omega$ 와 방위각  $\chi$ 은 식(4)와 식(5)으로 구한다. ( $\xi_1, \xi_2$ : 난수)

$$\xi_1 = \int_0^\omega \sigma_k(\varepsilon, \omega') 2\pi \sin \omega' d\omega' / q_k \tag{4}$$

$$\xi_2 = \chi / 2\pi \tag{5}$$

전자의 입사방향 ( $\theta', \psi'$ ) 및 그에대한 산란방향 ( $\omega, \chi$ )과 전자의 새로운 운동방향 ( $\theta, \psi$ )은 다음과 같이 나타낸다.

$$\cos \theta = \cos \theta' \cos \omega + \sin \theta' \sin \omega \cos \chi \tag{6}$$

$$\cos \psi = \frac{1}{\sin \theta} \{ \cos \psi' (\cos \omega \sin \theta' - \sin \omega \cos \theta' \cos \chi) \} \tag{7}$$

$$\sin \psi = \frac{1}{\sin \theta} \{ \sin \psi' (\cos \omega \sin \theta' - \sin \omega \cos \theta' \cos \chi) - \cos \psi \sin \omega \sin \chi \} \tag{8}$$

또한 미분단면적  $\sigma_k(\varepsilon, \omega)$ 은 충돌전의 전자에너지 ( $\varepsilon$ )에 의하여 결정되지만 그의 에너지 ( $\varepsilon$ )가 미분단면적의 입력에너지값인  $\varepsilon(\varepsilon_j, \omega)$ 와  $\varepsilon(\varepsilon_{j+1}, \omega)$ 으로 사용할때 미분단면적  $\sigma_k(\varepsilon, \omega)$ 은  $\sigma_k(\varepsilon, \omega) = \varepsilon(\varepsilon_j, \omega) + \{ \varepsilon(\varepsilon_{j+1}, \omega) - \varepsilon(\varepsilon_j, \omega) \} \times \frac{\varepsilon - \varepsilon_j}{\varepsilon_{j+1} - \varepsilon}$ 로 나타낸다.

**2.3 볼츠만 방정식법**

기체중의 방전현상을 원자론적인 입장에서 보면, 상호충돌을 되풀이하는 하전입자 즉 전자, 원자, 분자, 이온에서 성립되며, 이들 하전입자는 전자군의 속도와 위치 및 시간에 따라 분류할 수 있는데, 하전입자가 열평형 상태에 있는 경우를 제외하고 전자의 운동 중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의

의 위치가 있는 전자의 수가 시간에 따라 어떻게 변화하는가를 결정하는 것이다[12].

전자군의 임의의 위치와 속도 및 시간의 함수인 전자수 밀도는 위치 변화에 따른 밀도의 변화와 전계에 의한 속도변화에 따른 밀도의 변화, 그리고 충돌로 나타나는 속도의 변화에 의한 밀도의 변화로 나타낼 수 있고 이것을 식으로 표현한 것이 볼츠만 방정식(Boltzmann Equation)이다.

BEq에서는 MCS(Monte Carlo Simulation)와 달리 개개의 전자를 추적하지 않고 처음부터 다수의 입자를 포함하는 전자류를 취급하기 위하여 충돌의 확률적 성질을 기초로 하여 전자군의 연속적인 통찰이 가능하고 따라서 전자군의 운동과정을 명확히 규명할 수 있으며 이들의 여러 가지 파라미터를 정량적으로 해석하는 경우 비교적 짧은 시간으로 전산 처리하여 구하여진다.

하전입자 각각의 속도는 각각 다른 시간  $t$ 와 더불어 변화하므로 일반적으로는 위치공간과 속도공간을 일체시킨 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 존재하는 입자수를  $dn$ 이라 하면  $dn=f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{r} \cdot d\vec{v}$ 이고 여기에서  $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 하전입자의 속도분포함수이다.

볼츠만 방정식을 간단히 정리하면 다음과 같다.

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

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.

#### 2.4 충돌단면적

본 논문에서 사용한 Air의 충돌단면적은 질소와 산소의 단면적을 이용하였다. 충돌단면적은 전자의 거시적 특성을 이용하는데 기초적 자료로서 중요하다. 가스절연에서 비평형 플라즈마 응용기술에 이르기까지 각각의 경우에 필요한 가스의 종류, 상태조건(E/N, 가스밀도, 여기조건)을 파악할 수 있으며 전자수송특성에 관한 정보를 알 수 있다. 절연가스로는 여러 단면적 중에서 전리단면적( $q_i$ )과

부착 단면적( $q_a$ )이 중요하며 에칭가스로는 여기단면적( $q_{ex}$ )과 해리단면적이 중요하다. 또한 기체분자에 대한 전자의 충돌단면적은 전자의 에너지에 의해서 변화 한다. 따라서 충돌입자간의 상호작용으로 기체분자의 여기, 해리, 이온화 등의 반응으로 여기단면적, 해리단면적, 이온화단면적 등으로 나타내며 전충돌단면적은 개개의 반응과정의 합으로 나타낸다.

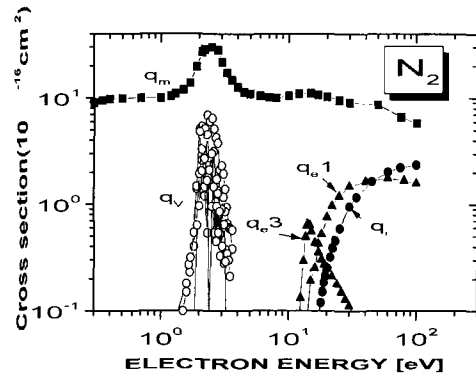


그림 1. 질소의 단면적.

Fig. 1. The collision cross sections of N<sub>2</sub>.

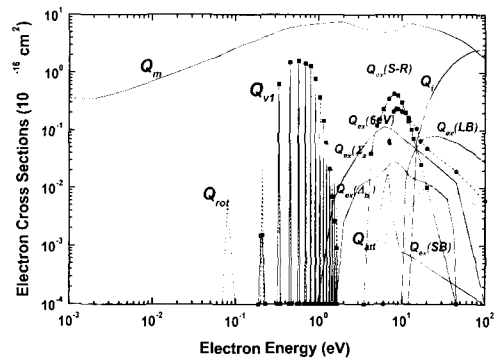


그림 2. 산소의 단면적.

Fig. 2. The collision cross sections of O<sub>2</sub>.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전자기동속도

전자에너지 분포함수와 탄성, 비탄성 충돌단면적을 이용하여 계산된 전자기동속도는 E/N[Td]에 따

라 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

$E/N$ 이 100[Td]일 때 드리프트 속도는  $2 \times 10^7$ [cm/s]이고  $E/N$ 이 증가할 때 마다 드리프트 속도는 증가함을 알 수 있다. 또한 전계로부터 에너지를 얻은 전자가 미소거리를 이동하는 동안에 충돌 전리화율은 평균 자유행정에 의해 나타내며, 이것은 압력에 반비례하고, 낮은 기압에서 전자에너지가 크므로 전자이동속도는 증가하는 것으로 생각된다.

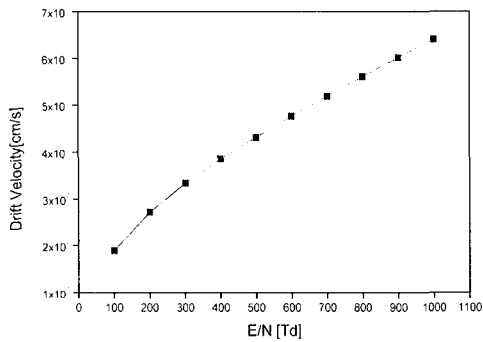


그림 3. Air 기체의 전자이동속도.  
Fig. 3. The drift velocity of electrons in air.

### 3.2 평균에너지

전자의 평균에너지는 전극간 거리와 시간의 함수로 계산한 전자의 에너지 분포함수, 전자이동속도 등에 관계되는 물리량으로 전극면에서의 전자운동의 증가는 유극의 에너지가 양극으로 이동하고 양극에서는 반사나 음극에서 방출된 2차 전자가 모두 흡수된다.

그리고 전자의 평균에너지는 전극간거리와  $E/N$  (Td)의 변화에 따른 볼츠만 방정식법으로 그림에 그 값을 나타내었다. 그림 4는 평균에너지가  $E/N$ 이 100~1000[Td]로 증가할때 일정한 값으로 상승함을 나타낸 것으로 실질적인 전극 거리간 평균에너지 값은 각  $E/N$ 마다 그 값이 있지만 대체적으로 전극과 가까운 거리에서는 비평형상태로 평균에너지가 증가하고 그 이외의 거리에서는 평형상태로 평균에너지가 일정하게 나타났다. 그림 4에 표시된 평균에너지는 각  $E/N$ 에서 평균한 데이터를 나타낸 것으로 평균에너지는 전계가 높아질 수록 에너지가 증가함을 나타낸 것이다.

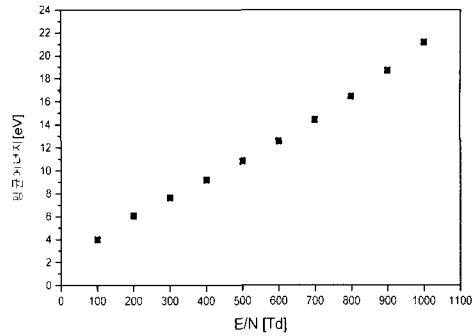


그림 4. Air 기체의 평균에너지.  
Fig. 4. The mean energy in Air.

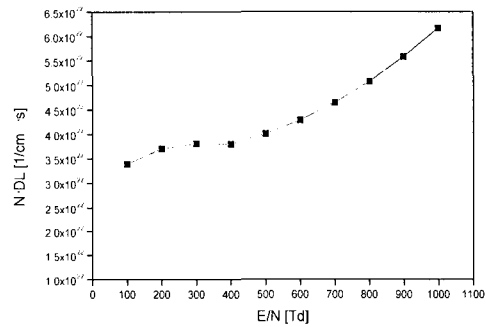


그림 5. Air기체의 종축확산계수.  
Fig. 5. The longitudinal diffusion coefficients in Air.

### 3.3 종축 확산계수

종축확산계수도 전리, 부착계수 및 이동속도의 영향으로 하전입자밀도의 공간적분포와 전계가 공존하는 공간내에서 하전입자의 거시적운동이 일어나지 않고 평형상태의 균일한 밀도 분포를 나타낸 것으로 생각된다. 그림 5의 종축확산계수는 기체분자수 밀도와 곱  $N \cdot DL$ 을  $E/N$ 의 함수로 나타낸 것으로 본 연구에서는  $E/N=400$ [Td]부터 확산이 빨리 진행되는 것이 파악되었다.

### 3.4 횡축 확산계수

그림 6의 횡축확산계수도 전리, 부착계수 및 이동속도의 영향으로 하전입자의 공간적 밀도 분포 차이와 전계가 공존하는 공간내에서 확산이 진행되는 것을 파악할 수 있다. 낮은  $E/N$ 에서는 균일하게 진행이 되다가  $E/N=400$ [Td]이상에서 확산이 빨리 진행됨을 알 수 있다.

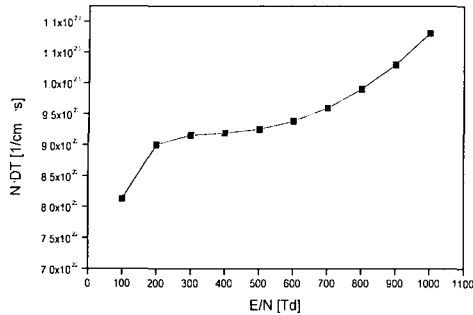


그림 6. Air 기체의 횡축확산계수.  
Fig. 6. The transverse diffusion coefficients in Air.

#### 4. 결론

에어차단기의 소호매질인 Air(N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)에 대한 전자수송계수를 분석하여 전자기동속도, 평균에너지, 종, 횡축 확산계수를 E/N 100~1000[Td]에서 구하였다.

전자 이동속도는 급격한 변화없이 일정하게 상승됨을 확인할 수 있었고 평균에너지 역시 선형적인 상승 흐름을 파악할 수 있었다. 평균에너지의 일정한 상승에 따라 확산계수 역시 종, 횡축 전부 상승함을 확인하였다.

본 논문에서 사용된 MCS프로그램과 볼츠만 법을 이용한다면 현재 사용되고 있는 ACB에 들어가는 Air와 SF<sub>6</sub>차단기에 사용되는 SF<sub>6</sub>가스의 특성 및 혼합기체에 대한 분석에 많은 성과가 있을 것으로 기대된다. 또한 반도체의 박막 공정, 에칭 및 Plasma CVD에 사용되는 각종 혼합기체들의 특성을 파악하여 데이터화를 할 목적으로 위 프로그램을 이용하여 사용하는 것이 주요할 것이라 사료된다. 끝으로 Air에서 해석된 전자수송계수를 기초로 삼아 에어차단기에서의 전자계 해석과 전자기동속도의 결과를 서로 비교하여 데이터화 작업을 할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 동국대학교 논문게재연구비 지원으로 이루어졌음.

#### 참고문헌

- [1] 하성철, 김상남, "SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체에서의 전리와 부착계수", 전기전자재료학회논문지, 14권, 9호, p. 773, 2000.
- [2] 하성철, 유희영, 김상남, 송병두, 백승권, "MCS-BE에 의한 SF<sub>6</sub>+He 혼합기체의 전자수송특성해석", 전기전자재료학회논문지, 13권, 4호, p. 359, 2000.
- [3] 하성철, 전병훈, 송병두, "볼츠만 방정식과 몬테칼로법을 이용한 메탄가스의 전자수송계수 해석", 전기전자재료학회논문지, 12권, 8호, p. 744, 1999.
- [4] 日本電氣學會 技術報告, "氣體放電 シミュレーション 技法", 第140号, 1974.
- [5] H. Itoh and T. Musha, "Monte Carlo calculations of motions in helium", J. Phys. Soc. Japan, Vol. 15, No. 9, p. 1675, 1960.
- [6] L. G. H. Huxley and R. W. Crompton. "The diffusion and drift of electrons in gases", John, Wiley and Sons, p. 12, 1967.
- [7] R. W. L. Thomas and W. R. L. Thomas, "Monte Carlo simulation of electrical discharges in gases", J. Phys. B (Atom molec. phys.), Ser. 2, Vol. 2, 1969.
- [8] B. E. Cherrington, "Gaseous Electronics and Gas Lasers", Pergamon Press, 1979.
- [9] 菅野卓雄, "半導體 フラズマ フロセス技術", 産業圖書, p. 38, 1993.
- [10] "モンテカルロ法と シミュレーション", 培風館, 1989.
- [11] 서상현, "SF<sub>6</sub>가스의 전리 및 부착특성에 관한 연구", 동국대학교 대학원 석사학위 논문, 1996.
- [12] Philip E. Luft, "Description of a backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, Information center report, No. 19, 1975.
- [13] Stephen M. Rossmagel, J. Cuomo, and William D. Westwood, "Handbook of Plasma Processing Technology", Noyes Publications, 1990.
- [14] Brian Chapman, "Glow Discharge Processes", John Wiley & Sons, 1980.
- [15] Y. Nakamura "Transport coefficients of electrons and negative ions in SF<sub>6</sub>", J. Phys. D : Appl. Phys., Vol. 21, p. 67, 1988.