

## Air에서의 전자수송계수 특성파악

### Analysis of electron transport coefficients in Air

서 상현, 하 성철, 전 병훈  
(Sang Hyun Seo, Sung Chul Ha, Byung Hun Jun)

#### 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(중요용어)** : MCS(몬테칼로 시뮬레이션), BE(볼츠만 방정식), Electron energy distribution function (전자에너지분포함수)

#### 1. 서 론

현재 사용중인 고압 차단기중 하나인 에어차단기에서 Air성분인 질소와 산소전자의 이동, 확산, 충돌, 평균에너지를 파악하고 전자군의 수송특성을 정량적으로 해석하기 위해서는 전자 에너지 분포함수와 각 입자 상호간의 충돌단면적 및 전자 수송계수를 구하여 기체의 물성적인 특성을 해석해야 한다. 따라서 측정된 전자이동속도와 계산에 의해 산출된 전자 수송계수를 비교하여 전자군의 물리적 현상을 명확히 규명하여 Air 차단기의 특성을 개선 및 고비용의 실험없이 시뮬레이션만으로 차단기의 차단능력을 파악하는 것이 요구된다. 그러므로 전계가 인가된 기체 중에서의 전자의 운동을 파악하기 위해서는 운동량 변환 단면적, 여기 충돌 단면적, 전리 충돌 단면적, 전자이동속도, 확산계수, 전자 부착계수, 전자에너지분포함수에 대한 정확한 측정과 해석이 필요하다. 특히 전계를 인가한 기체중에서의 전자 이동속도는 전자의 충

돌단면적을 결정하는 중요한 요소가 되고, 전자의 충돌단면적을 이용하여 입자군의 전자에너지분포함수와 수송계수를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 측정된 전자이동속도와 볼츠만수송방정식을 Backward prolongation법으로 해석하여 Air기체의 수송계수 및 충돌단면적을 결정하고 전자수송계수와 전자에너지분포함수, 전자 부착계수 등의 영향을 검토하여 전기적 절연특성과 냉각효과의 개선을 위한 혼합기체의 개발에 관련된 기초적 물성의 해석과 응용성을 검토하고자 한다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 Air기체의 전기 전도 특성을 나타내는 전자이동속도(W), 전자의 종횡 방향의 확산계수( $ND_L, ND_T$ ) 및 평균에너지 등의 전자수송계수를  $E/N(Td):100\sim1000(Td)$  ( $E$ :전계,  $N$ :기체분자수 밀도,  $1Td=1\times10^{-17} V \cdot cm^2$ ,  $N:3.5353\times10^{16} cm^{-3}$   $0^\circ C$   $1Torr$ 에 해당)의 범위에서 볼츠만 방정식으로 계산했다.<sup>(2)</sup>

#### 2. 시뮬레이션 및 전자충돌단면적

MCS은 난수(Random Number)를 이용하여 충돌의 종류, 산란후의 방향 및 비행시간 등을 결정하면서 전자의 운동을 반복 추적하는 시뮬레이션으로 전자군의 성질을 조사하기 위해 전자계내의 전자운동상태와 분자의 충돌산란확률을 고려하여 전

\* 동국대학교 전기공학과

\* 중부대학교 정보공학부 전기전자공학과  
(충남 금산군 추부면 마전리 산2-25,  
Fax : 041-750-6655

자, 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 파라메터를 구하기 위해서는 충분한 샘플수를 확보할 필요가 있다.<sup>(6)</sup>

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 전자수를 많이 설정하여 계산하는데 그것에 비례하여 계산시간도 증가한다.<sup>(2)</sup>

기체중의 방전현상을 원자론적인 입장에서 보면, 상호충돌을 되풀이 하는 하전입자 즉 전자, 원자, 분자, 이온에서 성립되며, 이들 하전입자는 전자군의 속도와 위치 및 시간에 따라 분류할 수 있는데, 하전입자가 열평형상태에 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 더  
불어 변화하므로 일반적으로는 위치공간과 속도공  
간을 일치시킨 위상공간과 분포함수 개념을 도입하  
여 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  $d n$ 이라 하면  $d n = f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{r} \cdot d\vec{v}$ 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.<sup>(3)</sup>

본 논문에서 사용한 Air의 충돌단면적은 질소와 산소의 단면적을 이용하였다. 이 충돌단면적은 전자의 투성을 파악하는 기초 자료로써 상당히 중요

하다. 특히 여러 단면적 중에서 절연가스에 관련된 전리와 부착단면적, 에칭에 관련된 여기, 해리 단면적은 충돌단면적에서도 상당히 중요하다. 그리고 탄성충돌에 의한 운동량변환단면적, 여기단면적, 전리단면적 및 전충돌단면적 등의 값을 이용하여 계산하였다.<sup>(4)(5)</sup>

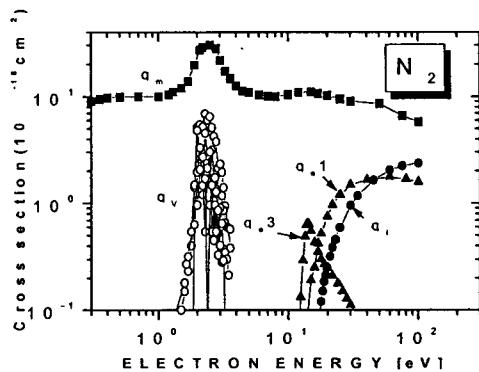


그림 1. 질소의 단면적

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

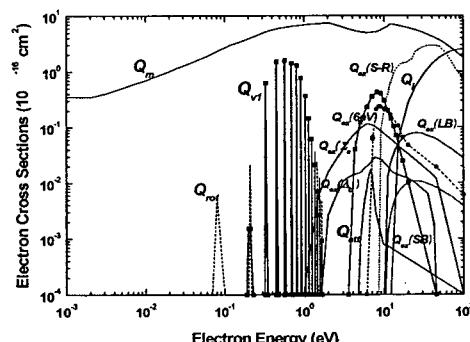


그림 2. 산소의 단면적

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

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전자이동속도

전자에너지 분포함수와 탄성, 비탄성 충돌단면적을 이용하여 계산된 전자이동속도는  $E/N[Td]$ 에 따라 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전계로부터 에너지를 얻은 전자가 미소거리 를 이동하는 동안에 충돌 전리확률은 평균 자유행정에 의해 나타내며, 이것은 압력에 반비례하고, 낮은 기압에서 전자에너지가 크므로 전자이동속도는 증가하는 것으로 생각된다.

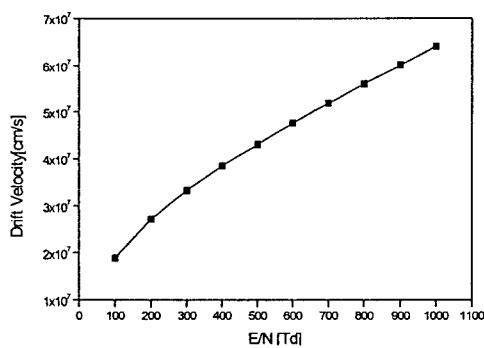


그림 3 Air 기체의 전자이동속도

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 음극의 에너지가 양극으로 이동하고 양극에서는 반사나 음극에서 방출된 2차 전자가 모두 흡수된다

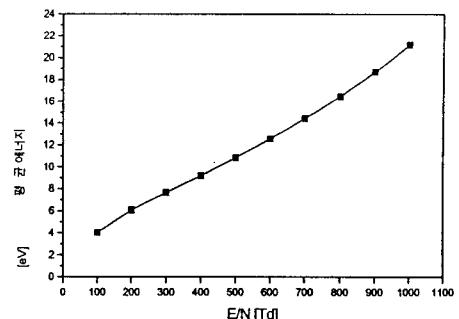


그림 4 Air 기체의 평균에너지

Fig. 4 The mean energy in Air

그리고 전자의 평균에너지는 전극간거리와  $E/N$  ( $Td$ )의 변화에 따른 볼츠만 방정식법으로 그림에 그 값을 나타내었다. 전자가 존재하는 경우에 샘플링의 차이에 따라서 음극과 양극 가까운 영역의 전자의 평균에너지는 영점으로부터 비탄성충돌이 일어날 에너지까지는 직선적으로 상승하여 비평형의 상태로 나타냈으며 그 외 영역에서는 거의 평형상태의 에너지 값의 결과를 나타내었다.

#### 3.3 종축 확산계수

횡축확산계수도 전리, 부착계수 및 이동속도의 영향으로 하전입자밀도의 공간적구배와 전계가 공존하는 공간내에서 하전입자의 거시적운동이 일어나지 않고 평형상태의 균일한 밀도 분포를 나타낸 것으로 생각된다. 그림 5의 종축확산계수는 기체 분자수 밀도와의 곱  $N D_L$ 을  $E/N$ 의 함수로 나타낸 것으로 본 연구에서는  $E/N=400[Td]$ 부터 확산이 빨리 진행되는 것이 파악되었다.

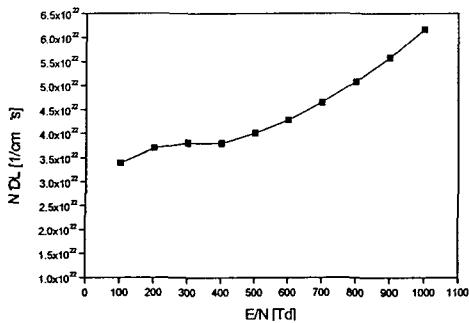


그림 5 Air기체의 종축 확산계수

Fig. 5 The longitudinal diffusion coefficients in Air

### 3.4 횡축 확산계수

그림 6의 횡축 확산계수도 전리, 부착계수 및 이동 속도의 영향으로 하전입자밀도의 공간적구배와 전계가 공존하는 공간내에서 확산이 진행되는 것을 파악할 수 있다. 낮은 E/N에서는 균일하게 진행이 되다가 E/N=400[Td] 이상에서 확산이 빨리 진행됨을 알 수 있다.

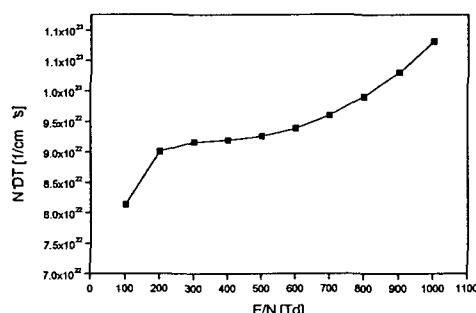


그림 6 Air 기체의 횡축 확산계수

Fig. 6 The transverse diffusion coefficients in Air

### 4. 결 론

Air에 대한 전자수송계수를 분석하여 전자이동속도, 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 전자이동속도의 결과를 서로 비교하여 데이터화 작업을 할 예정이다.

### 감사의 글

본 논문에 많은 지도와 격려를 아낌없이 주신 하 성철 교수님께 깊은 감사의 글을 전합니다.

### [참고문헌]

1. H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF<sub>6</sub> : I. Boltzmann equation analysis", J.Phys. D: Appl. Phys. 21, pp.922-930, 1988.
2. 氣體放電 シミュレーション技法(제140호), 1974.
3. 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.
4. Philip. E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No.19, 1975.
5. M. Hayashi, and S. Hara, "Joint Symposium on Electron and Ion Swarm and Low Energy Electron Scattering", A Satellite of ICPEAC XVII, Proc pp.109-111, 1991.
6. H. Itoh and T. Musha "Monte Carlo Calculations of Motions in Helium", J.Phys. soc. japan, Vol.15, No.9, pp.1675-1680, 1960.