

SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체의 전하이동속도와 전자분포함수

김상남\*

시립인천전문대학

Drift Velocities and Distribution Function for Electrons SF<sub>6</sub>-Ar Mixtures Gas

Sang-Nam Kim\*

Incheon City College

**Abstract** - Drift velocities and Distribution Function for electrons in SF<sub>6</sub>-Ar mixtures gas used by MCS-BE<sub>q</sub> 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 [%]and0.5[%] SF<sub>6</sub>-Ar mixtures were measured by time-of-flight method,

The results show that the deduced electron drift velocities agree reasonably well with theoretical for a rang of E/N values

The results simulation have been compared with present and previously obtained data and respective set of electron collision cross sections of the molecules.

1. 서 론

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 Mechanism을 정확히 이해할 필요가 있으며 이를 위하여 이론적, 실험적 수치 해석적으로 많은 연구를 필요로 하고 있다[1]~[10].

본 연구에서는 SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체 중에서 몬테칼로 시뮬레이션, 볼츠만 방정식의 Backward prolongation법에 의해 수치해석으로 전하이동속도를 SF<sub>6</sub>-Ar혼합기체(SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체 중에 있어서 SF<sub>6</sub> 농도: 0.1%, 0.5%, 1.0%, 3.0%, 5.0%)에 대해서 E/N : 0.01~300(Td) [E:전계, N:기체분자 수밀도, 1Td =1×10<sup>17</sup>V·cm<sup>2</sup>, N : 3.5353×10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup> 0°C 1 Torr에 해당]와 P<sub>0</sub> : 0.5, 1, 5 (Torr)범위에서 비등방성 산란을 고려하여 계산하여 전자수송특성을 고찰하였다. 그리고 전자충돌단면적의 타당성에 대하여 검토하고 평균에너지에 따른 전자에너지분포함수를 볼츠만 방정식에 의한 PT, TOF, SST의 전자 Swarm법과 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 전자군 파라미터를 해석하였다[3]~[7].

위의 파라미터 즉, 전자 에너지 분포 함수를 갖는 전자군과 하전입자 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 산출하였다.

2. 해석 방법

몬테칼로법은 2차대전기간 동안에 원자탄 개발을 위한 중성자 수송에 관련된 문제를 해결하기 위한 목적으로 많은 과학자들에 의해 연구, 발전되어왔다. 다양한 응용분야에서의 몬테칼로법 중 에서 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[3].

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 전자계 내의 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.

하전입자 각각의 속도는 각각 다른 시간 t와 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 t로 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 dn이라 하면

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

로 나타낼 수 있다.

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

볼츠만 방정식을 간단히 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다

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

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.

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 전자 운동 상태와 분자의 충돌산란확률을 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.[3],[4]

몬테칼로법은 2차 대전기간 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[3].

2.2 BEq법

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 운동 중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의의 위치에 있는 전자의 수가 시간에 따라 변화한다.

본 논문에서는 볼츠만 방정식에 의한 전리, 부착 및 실효전리 계수의 수치해석은 Philip E. Luft의 Backward prolongation계산법을 이용하였다.[7]

또한 전자가 음극에서부터 양극에 도달할 때까지 SPARC WORKSTATION(SS-20)으로 반복 추적하여 계산하였으며, 표1은 볼츠만 시뮬레이션 결과의 예를 나타내었다.

표 1. 볼츠만 시뮬레이션 결과의 예  
Table 1. The results of Boltzmann equation simulation

```

***** Boltzmann Equation Analysis ( TSSMIX.FOR ) *****
cf4.dat / ar.dat Mixture
Mix Ratio cf4.dat : ar.dat = 5,000 : 95,000
E/N = 80.0000 (Td) Temperature = 300.0 (K)
No. of Cross Section Included cf4.dat : 8 ar.dat : 7
Maximum Energy for Distribution Function = 34,000 (eV)
Energy Separation = 0.1133E-01 (eV)
No. of Points for Distribution Function = 3000
Print Step = 50
Energy vs. Distribution Function
Energy(eV) f0 f1 f2 f3 fs f001
0.000 0.5898E-01 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.6050E-01 0.0000E+00
0.567 0.5864E-01 -1.138E-04 0.4611E-09 0.2473E-11 0.5998E-01 -5.297E-08
1.133 0.5823E-01 -2.218E-04 0.2558E-08 0.2714E-11 0.5939E-01 -4.366E-08
1.700 0.5743E-01 -3.172E-04 0.4956E-08 0.3510E-11 0.5842E-01 -2.823E-08
2.267 0.5631E-01 -4.009E-04 0.7569E-08 0.4874E-11 0.5714E-01 -8.440E-09
2.833 0.5488E-01 -4.731E-04 0.1030E-07 0.6850E-11 0.5556E-01 0.1513E-08
3.400 0.5314E-01 -5.336E-04 0.1305E-07 0.9358E-11 0.5369E-01 0.4220E-08
3.967 0.5116E-01 -5.839E-04 0.1593E-07 0.1217E-10 0.5158E-01 0.6985E-08
4.533 0.4893E-01 -6.235E-04 0.1884E-07 0.1518E-10 0.4923E-01 0.9866E-08
5.100 0.4644E-01 -6.520E-04 0.2164E-07 0.1834E-10 0.4663E-01 0.1270E-07
: : : : : : :
28.900 0.6178E-08 -5.348E-10 0.2179E-12 -5.446E-15 0.5562E-08 0.5412E-14
29.467 0.3465E-08 -3.067E-10 0.1281E-12 -3.295E-15 0.3110E-08 0.2979E-14
30.033 0.1938E-08 -1.753E-10 0.7499E-13 -1.984E-15 0.1734E-08 0.1629E-14
30.600 0.1082E-08 -9.997E-11 0.4378E-13 -1.190E-15 0.9654E-09 0.8882E-15
31.167 0.6035E-09 -5.694E-11 0.2551E-13 -7.117E-16 0.5370E-09 0.4833E-15
31.733 0.3376E-09 -3.249E-11 0.1488E-13 -4.255E-16 0.2996E-09 0.2635E-15
32.300 0.1912E-09 -1.874E-11 0.8752E-14 -2.561E-16 0.1692E-09 0.1451E-15
32.867 0.1126E-09 -1.120E-11 0.5314E-14 -1.584E-16 0.9943E-10 0.8272E-16
33.433 0.7398E-10 -7.402E-12 0.3540E-14 -1.065E-16 0.6526E-10 0.5275E-16
34.000 0.6142E-10 -6.124E-12 0.2919E-14 -8.755E-17 0.5421E-10 0.4318E-16

```

### 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 그림2에 나타내었다[6]-[9].

이 SF<sub>6</sub>의 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착단면적 (Q<sub>a1</sub>, Q<sub>a2</sub>)이 낮은 에너지영역에 존재하고 또한 해리성 부착단면적 (Q<sub>a3</sub>, Q<sub>a4</sub>, Q<sub>a5</sub>)의 Threshold 에너지 값은 각각 3.29[eV], 3.95[eV], 1.57[eV]를 이용하였다.

그리고 탄성충돌에 의한 운동량 변환 단면적(Q<sub>m</sub>), 여기 단면적(Q<sub>ex</sub>), 전리 단면적(Q<sub>i</sub>), 진동 여기 단면적(Q<sub>v</sub>) 및 전충돌 단면적(Q<sub>T</sub>) 등의 값을 이용하여 계산하였다.

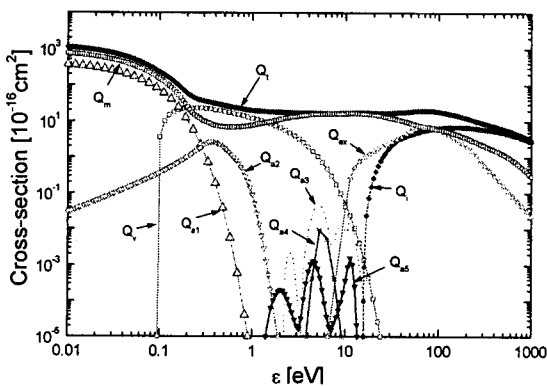


그림 1. SF<sub>6</sub>기체의 전자 충돌 단면적  
Fig. 1. Collision cross sections of electrons in SF<sub>6</sub> gas

#### 3.2 Ar의 전자 충돌 단면적

Ar의 전자 충돌 단면적을 그림3에 나타내었으며, Ar의 전자 충돌 단면적에 대한 운동량 변환 단면적(Q<sub>m</sub>), 여기 단면적(Q<sub>ex</sub>), 전리 단면적(Q<sub>i</sub>)등을 나타내었다.[14]-[19]

이 Ar의 전자 충돌 단면적은 저 에너지 영역(0-0.23[eV])에서 Ramsauer Townsend minimum을 갖는 운동량 변환 단면적(Q<sub>m</sub>)

은 K. L. Bell, N. S. Scott의 계산 값을 이용하였고 전자에너지 0.136-54.4[eV] 영역의 범위에서는 W. C. Fon의 측정값을 이용하였다.

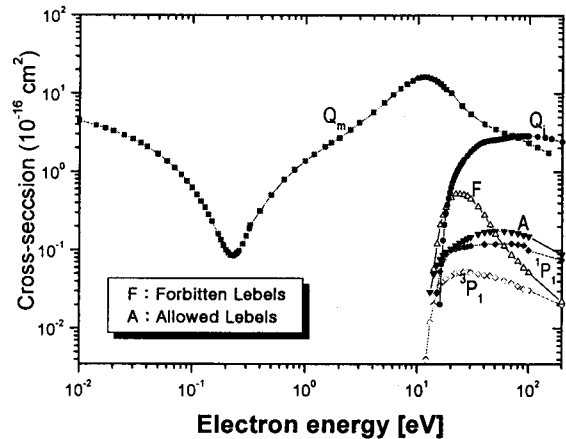


그림 2. Ar기체의 전자 충돌단면적  
Fig. 2. Collision cross sections of electrons in Ar gas

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 SF<sub>6</sub> 기체에서 전자의 이동속도

그림 3은 순수 SF<sub>6</sub> 기체에서 전자의 이동속도(W)를 나타냈으며, 이동속도는 E/N[Td]의 함수로서 MCS, BEq법으로 구한 이론값의 결과와 A. V. Phelps and R. J. Van Brunt들의 실험값과 본 연구의 실험값 등 4개의 값을 비교한 결과를 나타내었다 [11][12].

전자의 이동속도는 E/N[Td]의 증가와 더불어 거의 선형적으로 증가하였으며 일반적으로 전자 에너지가 낮은 영역의 전자충돌 단면적은 운동량변환 단면적이 비탄성충돌 단면적보다 크므로 전자의 충돌 빈도는 운동량변환 단면적의 영향으로 나타나며 또한 전계로부터 에너지를 얻은 전자의 충돌 전리확률은 평균 자유행정에 의해 나타나며 이것은 압력에 반비례하므로 낮은 기압에서 전자에너지는 큰 값으로 작용하기 때문에 전자 이동속도는 전계의 크기와 그의 전자산란의 빈도에 의해서 결정된다고 생각된다.

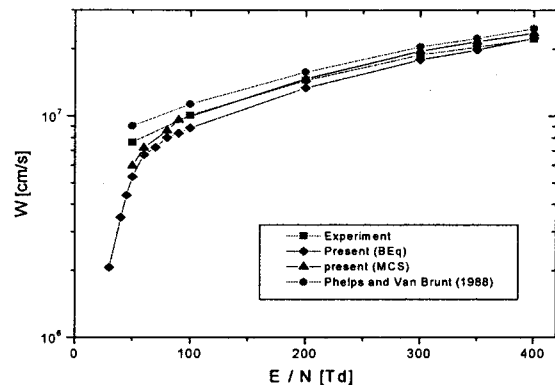


그림 3. SF<sub>6</sub> 기체에서 전자의 이동속도  
Fig. 3. Drift velocities of electrons in SF<sub>6</sub>

### 4.2 Ar 기체에서 전자의 이동속도

그림 4는 Ar 기체에서 E/N[Td]을 파라미터로 하여 전자의 이동속도를 BEq법으로 구한 이론값과 Y. Suzuki의 측정값과 본 연구의 실험값을 비교하여 나타낸 것으로 거의 일치하였다[17].

이와 같은 경향은 Ar 기체에서 전자 충돌 단면적 중에서 운동량변환 단면적이 비탄성 충돌 단면적 보다 큰 값의 영향으로 E/N[Td]의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하였다.

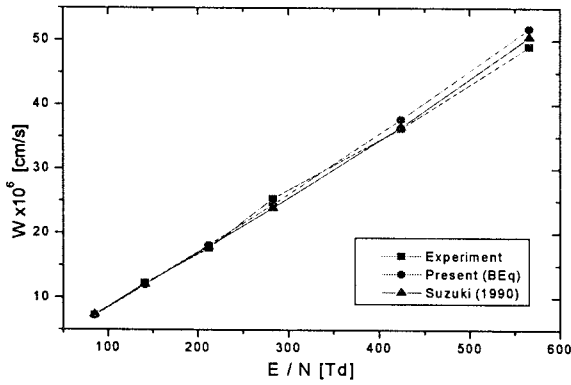


그림 4. Ar 기체에서 전자의 이동속도  
Fig. 4. Drift velocities of electrons in Ar

### 4.3 SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체에서 전자의 이동속도

그림 5에 나타낸 전자 이동속도는 E/N[Td]의 함수로서 기체의 혼합비의 변화에 따라 MCS, BEq법 및 전자도착 시간분포에 의한 실험적 방법으로 측정된 결과를 나타내었다.

실험적으로 측정된 실측값과 MCS 및 BEq법으로 구한 이론값의 결과는 낮은 영역에서 혼합비에 따라 증감의 차이가 나타났으나 높은 영역에서는 비교적 일치하였다.[18]~[24]

이와 같은 현상은 전자가 SF<sub>6</sub> 분자와 충돌 산란을 일으킬 때 이동거리에 따라서 전자도착 시간분포의 중심 이동의 영향을 받기 때문에 전자수의 증감이 발생하여 전자 이동 속도의 증감의 차이가 나타나는 것으로 생각된다.

한편 전자는 E/N[Td]가 높을 때 Ar 기체의 비평형 영역에서 충돌 여기가 활발하게 되므로 에너지를 잃어버리게 되어 전자수는 감소하고 이동 속도는 증가하는 현상이다.

SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체는 비평형 영역에서 충돌여기가 활발하게 되어 잃어버린 에너지 값이 많게 되어 전자수가 감소하고 이동속도는 증가하는 현상이 나타나고 SF<sub>6</sub> 기체는 Ar 기체에 비하여 전충돌단면적이 대단히 크게되어 충돌여기가 둔화되며 잃어버린 에너지의 값이 적게되어 전자수는 증가하고, 이동속도는 감소하는 현상으로 순수 SF<sub>6</sub> 기체 보다 느려진다고 사료된다.

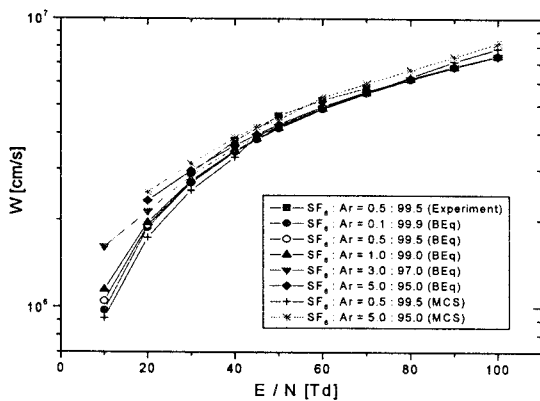


그림 5. SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체에서 전자의 이동속도  
Fig. 5. Drift velocity of electrons in SF<sub>6</sub>-Ar mixtures

### 4.4 SF<sub>6</sub> 기체에서의 에너지 분포함수

전계를 인가한 방전 공간에서 약진리 기체의 이동되는 전자군의 에너지 분포는 어떤 조건에서 전자의 각 에너지에 대한 확률 밀도와 전자와 분자 사이의 각종 충돌 단면적과의 방전현상으로 나타나는 전자수송 특성에 관련된 물리량이다.

그때의 하진입자는 여러 종류의 에너지 성분을 갖는 기체 분자가 열 평형 상태 즉 Maxwell Boltzmann 에너지 분포를 나타낸다[13]~[14].

그림 6은 SF<sub>6</sub>기체의 E/N= 500[Td]와 800 [Td]를 P<sub>0</sub>=1.0[Torr],

샘플15, L=2.8[cm], ε=11.3[eV] 및 P<sub>0</sub>= 1.0[Torr], 샘플15, L=3.0 [cm], ε=14.5[eV]인 조건에서 MCS, BEq법으로 전자를 추적하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 전자 에너지 분포가 평형 및 비평형 영역으로 변화하였다.

그리고 E/N=500[Td]의 경우는 E/N=800[Td]의 경우에 비하여 여기 충돌과 부착 단면적의 영향으로 인하여 전자의 에너지를 잃는 값이 커서 비평형 영역이 크게 나타났다.

따라서 전자에너지 분포 함수의 값은 초기 에너지 값은 증가하고 그 이상의 에너지 값에서는 감소하여 38[eV]값에서 일치하는 경향이 나타났다.

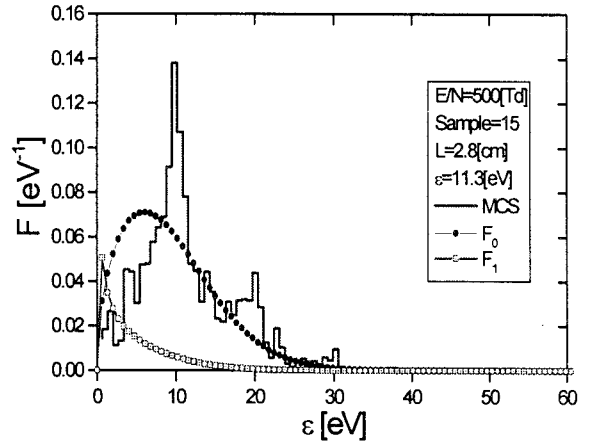


그림 6. SF<sub>6</sub>기체에서 전자에너지 분포함수  
Fig. 6. Electron energy distribution function in SF<sub>6</sub>

### 4.5 Ar기체의 에너지 분포함수

그림 7은 E/N= 283[Td]일 때 P<sub>0</sub> = 0.1 [Torr], 샘플 12, L=0.6 [cm] 및 평균 에너지ε=10.3[eV]와 14.5[eV]에서 MCS, BEq법으로 전자를 추적하여 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 전자의 여기 충돌로 인하여 초기 에너지에서 비평형 영역이 나타났고 E/N= 283[Td]에서는 6.3[eV]값에서 최대값을 나타내다가 그 이상에서는 감소하였고, 36[eV]값에서 일치하는 경향이 나타났고, E/N= 566[Td]에서는 8.5[eV]값에서 최대값을 나타내다가 그 이상에서는 감소하였고, 50[eV]값에서 일치하는 경향이 나타났다.[15]

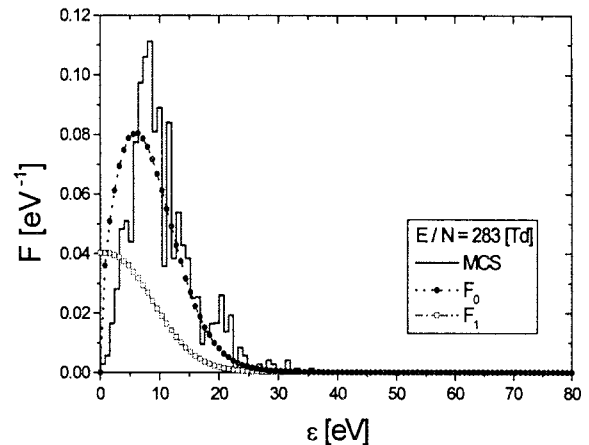


그림 7. Ar 기체에서 전자에너지 분포함수  
Fig. 7 Energy distribution functions for electrons in Ar

### 4.6 SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체의 에너지 분포함수

전자의 에너지 분포 함수는 외력이 작용하면 평형 상태에서 벗어나고 이때 분포 함수의 형태가 변한다. 분포 함수에 대한 전기력의 영향은 입자의 종류에 의하여 차이가 나며 전장 중에서

하전입자는 가속되어 에너지로 변화하고 자장에서는 운동의 궤도가 변화한다. 따라서 전자 에너지 분포의 본질적인 영향은 전장 중에서 얻은 평균 에너지와 충돌로 잃은 에너지의 값으로 평가된다[16].

그림 8은 0.5[%] SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체의 E/N=200[Td] (P<sub>0</sub>=1.0 [Torr], 샘플=14, L=2.6[cm] 및 ε=7.3[eV])와 0.2[%] SF<sub>6</sub> + Ar 혼합기체의 E/N=200[Td](P<sub>0</sub>=1.0[Torr], 샘플=17, L=2 [cm], 평균 에너지ε=7.6[eV])에서 BEq법에 의한 전자 에너지 분포함수를 등방 성분(F<sub>0</sub>)과 비등방 성분(F<sub>1</sub>)으로 나타내고 MCS의 결과와 비교한 것이다.

이와 같은 현상은 Ar기체가 가지고 있는 운동량 변환단면적의 Ramsauer Townsend Minimum영역과 부착 작용으로 잃어버린 에너지, 평균 에너지의 영향으로 생각된다. 따라서 에너지 분포함수를 이용하면 중성 입자와 하전입자의 밀도와와의 관계와, 전자 충돌 단면적으로부터 나타나는 잃은 에너지 및 전리 반응 과정을 분석할 수 있다.

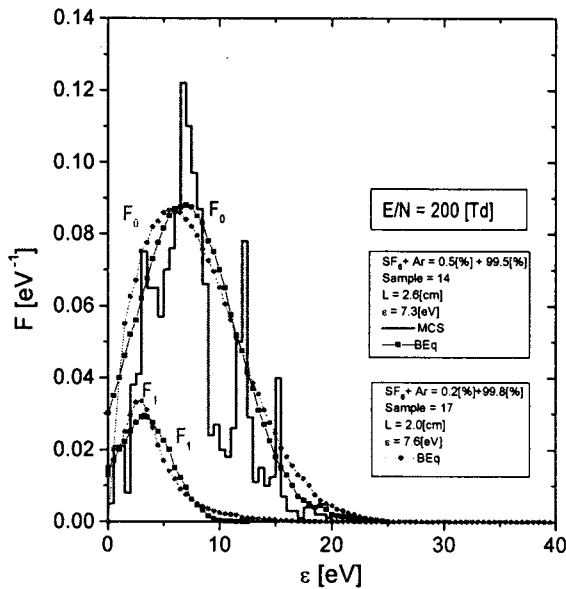


그림 8. SF<sub>6</sub>-Ar 혼합기체에서 전자에너지 분포함수  
Fig. 8. Energy distribution function for electrons in SF<sub>6</sub>-Ar

## 5. 결 론

본 연구는 탄성 및 비탄성 충돌 단면적과 전리증식의 전자군을 형성하는 비교적 낮은 E/N[Td] 영역에서 혼합기체의 혼합비에 따른 전자기동속도를 볼츠만 방정식을 이용한 이론 해석과 몬테칼로 시뮬레이션에 의해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의하여 전리계수, 전자 부착계수, 실효전리계수 등으로부터 전자 이동속도를 평균 에너지가 평형 상태인 경우 Sample=14, L=2.6[cm]에서 2항근사의 볼츠만 법에 의한 등방성분(F<sub>0</sub>)과 비등방성분(F<sub>1</sub>)을 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 값과 비교시 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 수송계수를 얻을 수 있을 것으로 확신한다.

향후 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 CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등의 오염 물질을 제거시키는 배기가스 처리 문제에도 응용할 수 있다고 본다.

## [참 고 문 헌]

- [1] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, 'Electron swarm development in SF<sub>6</sub>!'. Boltzmann equation analysis' Phys. D: Appl. Phys 21, pp.922-930, 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.*, "ボルツマン方程式による運動量變換 斷面積推定に關して." 放電研究會資料, ED-86-116, pp.39~49, 1986.
- [4] S. Trajmar, A. Chutjian, "electron impact excitation of SF<sub>6</sub>" J. Phys. B, Vol.10, pp.2943~2949, 1977.
- [5] "大森義行, 下妻光夫, 田頭博昭, SiH<sub>4</sub> ガスの電子衝突斷面積および スウオームパラメータ" 電氣學會研究會資料, ED-86-114, HV-86-34, 1988.
- [6] 菅野卓雄 編著, "半導体プラズマプロセス技術", 産業圖書, pp. 38-50, 1993.
- [7] 小沼光晴著 "プラズマと成膜の基礎", 日刊工業新聞社, pp. 13-20, 1993
- [8] C. Jacoboni and P. Lugli, "The Monte Carlo Method for Semiconductor Device Simulation", Springer Verlag -Wien, pp.1-4, 1989.
- [9] Philip. E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA. information center report, No.19, 1975.
- [10] Pollock W. J, "Momentum Transfer and Vibrational Cross sections in Non-polar Gases" Trans. Faraday. Soc., 64, pp. 2919-2926, 1988.
- [11] A. V. Phelps and R. J. Van Brunt "Electron-transport ionization attachment and dissociation coefficients in SF<sub>6</sub> and its mixtures", J. Appl. Phys.64, pp. 4269~4277, 1988.
- [12] 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.
- [13] 金相南 "SF<sub>6</sub>-Ar 混合氣體에서의 電離 및 附着係數" 工學博士學位論文, 東國大學校, 2000
- [14] Y. Nakamura. "Transport Coefficients of Electrons and Negative Ions SF<sub>6</sub>." J. Phys. D, Vol. pp. 1~36, 1981.
- [15] Y. Nakamura and M. Kurachi, "Electron Transport Parameters in Argon and its momentum transfer cross section" J. Phys. 21, pp.718~723, 1988.
- [16] 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.
- [17] 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
- [18] Arati Dasgupta and A. K. Bhatia, Scattering of electrons from Argon atoms" Phys. Rev. A. Vol. 32, No. 6, pp.3335 ~3341, 1985.
- [19] 下妻, 金子, 種里, "C-C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>과 SiH<sub>4</sub> ガスの 電離係數測定", 電氣學會放電研究會, ED-83-86, 1983.
- [20] 金相南, "시뮬레이션에 의한 CF<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, Ar混合氣體에서 電子 에너지분포함수" 대한전기학회논문집, 52P-1-2 pp.9~13, 2003
- [21] 金相南, "SiH<sub>4</sub>-Ar혼합기체의 전자분포함수 해석" 대한전기학회 논문집 53P-1-2집. pp 65~69, 2004
- [22] 金相南 "MCS-BEeq 에 의한 SF<sub>6</sub>-Ar혼합기체의 전자기동속도" 대한 전기학회 논문집, 54P-1-5집 pp29~33, 2005
- [23] M. S. Dincer and T. Aydin. "Simulation of limiting field behavior in electrons swarms in SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub> gas mixtures" IEEE, transaction on dielectrics and electrical insulation, Vol. 1, No. 1, pp. 139-14 5, February, 1994.
- [24] A. Gilardini, "Low Energy Electron Collisions in Gases" John Wiley and Sons. Inc. pp.127~162. 1972