

SF₆가스의 전자에너지 분포함수에 관한 연구

(A study on the electron energy diffusion function of the sulphur hexafluoride)

김상남* · 하성철**

(Sang-Nam Kim · Sung-Chul Ha)

요 약

SF₆ 가스의 전자에너지 분포함수를 평균에너지의 평형 영역에 대하여 E/N = 500~800[Td]에서 해석하였다. 본 논문은 저자들에 의해 결정된 충돌 단면적을 사용하여 몬테칼로 시뮬레이션과 볼츠만 방정식에 의해 E/N=150~800[Td]범위에서 계산된 SF₆ 가스의 전자 수송 특성과 TOF법에서 구한 전자군 파라미터 값들을 나타냈다.

전자이동속도 전자 이온화 또는 부착계수, 종·횡 방향 확산계수 등의 전자군 파라미터 값들은 E/N 범위에서 실험 치와 이론 치가 일치하였다. 전자사태의 특성은 전자에너지의 비평형 영역에서 고려되었다.

Abstract

The electron energy distributions function were analysed in sulphur hexafluoride at E/N : 500~800(Td) for a case of non-equilibrium region in the mean electron energy. This paper describes the electron transport characteristics in SF₆ gas calculated for range of E/N values from 150~800(Td) by the Monte Carlo simulation and Boltzmann equation method using a set of electron collision cross sections determined by the authors and the values of electron swarm parameters. The results gained that the value of an electron swarm parameter such as the electron drift velocity, the electron ionization or attachment coefficients, longitudinal and transverse diffusion coefficients agree with the experimental and theoretical for a range of E/N. The properties of electron avalanches in an electron energy non-equilibrium region.

Key word(중요용어) : The electron transport coefficients(전자수송계수),
TOF(Time of flight : 비행시간법),
Electron swarm parameter(전자군 파라미터)

* 정희원 : 동국대학교 박사과정 (인천전문대학 전기과 교수)

** 정희원 : 동국대학교 전기공학과 교수

접수일자 : 1996년 4월 6일

1. 서 론

전기재료로 사용되는 기체들의 여러 가지 특성을 알아보기 위해서는 전계 중에서 방전 현상으로 전자군의 성질을 규명해야 하며 그러기 위해서는 전자에너지 분포함수와 전자수송계수(전자군 파라미터) 즉 전자이동속도, 전리, 부착계수, 종·횡방향의 확산계수, 평균에너지 등을 해석해야 한다. 그리고 이와 같은 전자에너지 분포함수와 전자 수송계수를 해석하기 위해서는 정확한 운동량 변환 단면적, 여기 단면적, 전리 및 부착 단면적이 필요하고 이들의 값을 이용하여 전자군 파라미터의 특성을 볼츠만 방정식(BEq)과 몬테칼로 시뮬레이션(MCS)에 의해서 구하여지고 있다[1,2,3,4]. 특히 몬테칼로법은 가스의 탄성 및 비탄성 충돌을 고려한 비평형 상태의 비교적 높은 E/N[Td] 영역의 범위에서 낮은 전리로 전자에너지 분포 함수와 전자군의 파라미터를 해석하는 가장 우수한 방법으로 현재 많은 연구자들에 의해 이용되고 있다[1,2]. 이와 같은 전자군 파라미터 특성(전자수송계수)은 방전공간 내에서 난수를 이용하여 전자의 운동을 각종 파라미터의 위치적 변동에 의해서 전자의 평균 에너지와 전자 밀도 및 시간의 함수로서 추적하여 해석하는 것이다[1,2,3]. 이와 같은 이론은 최초 H. Itoh, T. Musha[5] 및 R.L. Thomas, R.W.G Thomas[6]에 의해서 전자사태에 의한 연구에 적용되었다. 즉 전자사태에서 나타나는 전체의 전자를 추적하여 전자이동속도 등 전자군 파라미터의 동향을 조사하여 이들 전자의 물리량을 가상적으로 샘플링(Sampling)하고 그들 하전입자의 운동을 전자계산기로 추적하여 전자군 파라미터의 특성을 확률적으로 결정하는 것이다.

SF₆가스는 전기 절연 성능과 전류의 차단 성능이 우수한 특성을 가지고 있음으로서 각종 고전압 기기에 이용되고 있다. 그리고 최근에는 약전리 기체 프라즈마 프로세스의 에칭(etching)가스로서 또는 반도체 미세 가공 분야 등에도 이용이 기대되고 있는 추세에 있다[7]. 더욱이 절연 기체의 특성 평가지수는 전자의 전리계수(α)와 부착계수(η)에 의해서 기술되며 이들의 값은 전기 기기 설계에 귀중한 Data로 활용되고 있다.

본 연구에서는 SF₆기체의 전자군의 수송특성에 직접 관련되는 전자에너지 분포함수와 전기 전도 특성

을 나타내는 전리계수(α/N), 부착계수(η/N), 실효전리계수($\alpha - \eta/N$), 전자이동속도(W), 전자의 종·횡방향의 확산계수(ND_L, ND_T) 및 평균에너지 등의 전자 수송 특성[13,14,15]을 E/N=150~800 [Td] (E:전계, N:기체 분자수 밀도, 1Td = 1×10^{17} V·cm², N: 3.5353×10^{16} cm⁻³ 0°C 1 Torr에 해당)의 범위에서 볼츠만 방정식에 의한 Backward prolongation법[4]과 비 등방성 산란을 고려한 몬테칼로 시뮬레이션에 의해서 계산하고 그 결과를 A.V. Phelps[8], M. Hayashi[9], Y. Nakamura[10], Aschwanden[11], M.S. Naidu[12]의 실험치와 비교 검토하고 전자충돌단면적의 타당성에 대하여 검토한다.

2. 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서 전자의 산란은 비 등방성을 고려한 몬테칼로 시뮬레이션으로 추적하여 TOF 샘플링에 의하여 해석하였다. 그리고 전자 궤도 추적의 방법은 Itoh, Musha의 것을 적용하였다[5,6]. 따라서 전자의 평균에너지로 추정되는 평균 전자 충돌 주파수와 추적 시간과의 곱은 큰 값이 필요하므로 비탄성 충돌일 때도 수 천회(3,000회) 충돌하는 것으로 설정하였다. 전자의 평균자유행정(λ)은 전자운동의 미소 비행거리 $\Delta \ell = \lambda/10$ 으로 궤도를 계산하였다. 또한 TOF에서는 위치와 시간을 지정한 그 점의 전자평균에너지와 전자궤도에서 전리가 일어난 경우의 샘플수(No of sampling points : 20등분)와 난수(Random Number : 13) 등은 적으며 음극에서 양극에 도달할 때까지 SPARC WORKSTATION(SS-20)으로 반복 추적하여 계산하였고 그림 1은 본 시뮬레이션에서 사용한 flowchart로써 최초에 전계 분포, 기체수 밀도, 초기 전극간 분할(Sampling points : 20), 전자수 및 1초간의 추적시간 등의 초기 값을 입력한다. 전자는 1회 비행으로 $\Delta t(0.1\mu s)$ 사이를 추적한다. 그리고 충돌의 유무를 판정한다. Δt 의 값은 전자의 평균에너지를 갖는 미소비행거리($\Delta \ell$) 사이에 충돌하는 확률은 평균자유행정(λ)의 1/10으로 계산하였다. 그리고 전자의 이동, 충돌의 종류, 충돌 후의 비행 방향을 시뮬레이션 한다. 표1과 표2는 몬테칼로 시뮬레이션과 볼츠만 방정식에 의한 데이터를 표시하였다.

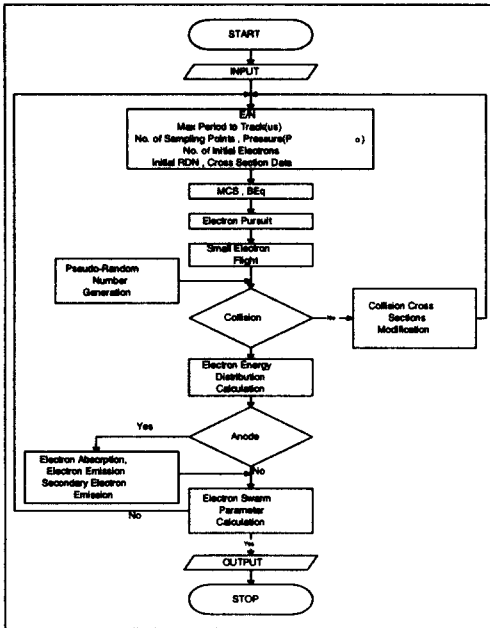


그림 1. 몬테카를로 시뮬레이션의 순서도
Fig 1. The flowchart of Monte Carlo simulation

표 1. 몬테카를로 시뮬레이션의 data
Table 1. The data of Monte Carlo simulation

The Result of Monte Carlo Simulation of Electrons
Mixture : SF₆ 01.dat / SF₆ 01.dat
Mix Ratio : 100.0000/ 0
E/N = 100.000 (Td)
Pressure = 0.100 (torr)
Max Period to Track = 0.100(us)
No. of Sampling Points = 20
No. of Initial Electrons =5000
Initial RDN = 13

NN	Time	Sample	ZZ	R+R	DLT	Energy
1	0.5000E-08	130	0.1948E-03	0.2154E-07	0.4778E-05	0.6689E-01
2	0.1000E-07	18	0.1579E-02	0.4442E-05	0.2300E-04	0.4693E+00
3	0.1500E-07	12	0.2411E-02	0.2540E-05	0.3570E-04	0.6822E+00
4	0.2000E-07	10	0.2807E-02	0.5740E-05	0.2790E-04	0.7806E+00
5	0.2500E-07	9	0.4230E-02	0.1389E-04	0.2403E-04	0.1147E+01
6	0.3000E-07	7	0.4824E-02	0.2793E-04	0.1598E-04	0.1305E+01
7	0.3500E-07	7	0.5027E-02	0.3970E-04	0.1288E-04	0.1248E+01
8	0.4000E-07	4	0.6863E-02	0.5177E-04	0.1480E-04	0.2010E+01
9	0.4500E-07	3	0.9795E-02	0.8164E-04	0.1408E-04	0.3178E+01
10	0.5000E-07	3	0.1162E-01	0.1102E-03	0.1386E-04	0.3822E+01
11	0.5500E-07	3	0.1354E-01	0.1372E-03	0.2465E-04	0.4472E+01
12	0.6000E-07	3	0.1328E-01	0.1667E-03	0.3522E-04	0.4345E+01
13	0.6500E-07	3	0.1282E-01	0.1950E-03	0.3079E-04	0.4153E+01
14	0.7000E-07	3	0.1116E-01	0.2617E-03	0.1986E-04	0.3470E+01
15	0.7500E-07	3	0.1130E-01	0.2953E-03	0.8888E-05	0.3359E+01
16	0.8000E-07	3	0.9894E-02	0.3514E-03	0.5379E-05	0.2836E+01
17	0.8500E-07	3	0.8595E-02	0.3443E-03	0.7775E-05	0.2246E+01
18	0.9000E-07	3	0.8828E-02	0.3727E-03	0.1182E-04	0.2364E+01
19	0.9500E-07	3	0.9098E-02	0.3290E-03	0.1286E-04	0.2255E+01
20	0.1000E-06	3	0.8767E-02	0.2932E-03	0.2250E-04	0.2053E+01

표 2. 볼츠만 법의 data

Table 2. The data of Boltzmann method

** Boltzmann Equation Analysis (TSSMIX.FOR) **
SF₆ 01.dat / SF₆ 01.dat Mixture
Mix Ratio SF₆ 01.dat : SF₆ 01.dat=100.000 : 0.000
E/N = 100.000 (Td) Temperature = 3000 (K)
No. of Cross Section Included SF₆ 01.dat: 5 SF₆ 01.dat: 5
Maximum Energy for Distribution Function=30.000 (eV)
Energy Separation = 0.1500E-01 (eV)
No. of Points for Distribution Function = 2000
Print Step = 50
Energy vs. Distribution Function

Energy(eV)	f0	f1	f2	f3	fs	f001
0.000	0.1223E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1220E+01	0.0000E+00
0.750	0.1843E-00	-6.171E-04	0.2452E-07	-1.207E-10	0.1840E+00	-7.101E-08
1.500	0.1128E+00	-5.976E-04	0.3020E-07	-1.557E-10	0.1127E+00	-1.467E-07
2.250	0.8198E-01	-5.651E-04	0.3300E-07	-1.809E-10	0.8191E-01	-1.749E-07
3.000	0.6441E-01	-5.323E-04	0.3402E-07	-1.964E-10	0.6439E-01	-1.855E-07
3.750	0.5267E-01	-4.989E-04	0.3391E-07	-2.037E-10	0.5266E-01	-1.900E-07
4.500	0.4396E-01	-4.652E-04	0.3317E-07	-2.045E-10	0.4397E-01	-1.876E-07
5.250	0.3706E-01	-4.348E-04	0.3215E-07	-2.014E-10	0.3708E-01	-1.807E-07
6.000	0.3134E-01	-4.043E-04	0.3109E-07	-1.962E-10	0.3136E-01	-1.704E-07
6.750	0.2641E-01	-3.734E-04	0.2994E-07	-1.904E-10	0.2644E-01	-1.575E-07
7.500	0.2206E-01	-3.409E-04	0.2872E-07	-1.847E-10	0.2209E-01	-1.414E-07
8.250	0.1814E-01	-3.060E-04	0.2728E-07	-1.788E-10	0.1817E-01	-1.239E-07
9.000	0.1457E-01	-2.677E-04	0.2541E-07	-1.717E-10	0.1460E-01	-1.049E-07
9.750	0.1128E-01	-2.253E-04	0.2287E-07	-1.612E-10	0.1131E-01	-8.491E-08
10.500	0.8270E-02	-1.791E-04	0.1949E-07	-1.445E-10	0.8235E-02	-6.465E-08
11.250	0.5748E-02	-1.346E-04	0.1588E-07	-1.229E-10	0.5768E-02	-4.646E-08
12.000	0.3616E-02	-9.603E-05	0.1193E-07	-9.656E-11	0.3631E-02	-3.187E-08
12.750	0.2434E-02	-6.665E-05	8.875E-08	-7.717E-11	0.2445E-02	-2.032E-08
13.500	0.1498E-02	-4.318E-05	0.6136E-08	-5.738E-11	0.1506E-02	-1.321E-08
14.250	0.8947E-03	-2.743E-05	0.4144E-08	-4.107E-11	0.8905E-03	-8.067E-09
15.000	0.5191E-03	-1.699E-05	0.2705E-08	-2.838E-11	0.5221E-03	-4.786E-09

3. 전자의 충돌단면적

전계중의 기체분자에 대한 전자의 충돌 단면적은 전자에너지에 의하여 영향을 받으며 기체의 여기, 해리, 이온화 등의 반응을 여기 단면적, 해리 단면적, 이온화 단면적 등으로 나타내며 전 충돌 단면적은 개개의 반응 과정의 합으로 표현된다.

본 연구에 이용한 SF₆의 전자 충돌 단면적은 H Itoh, etal[13]의 값을 그림 2에 나타내었다.

이 SF₆의 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착 단면적 (Q_{a1}, Q_{a2})이 낮은 에너지 영역에 존재하고 또한 해리성 부착 단면적 (Q_{a3}, Q_{a4}, Q_{a5})의 Threshold에너지의 값은 각각 3.29[eV], 3.95[eV], 1.57[eV]를 이용하였다. 그리고 탄성 충돌에 의한 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q), 진동 여기 단면적(Q_v) 및 전 충돌 단면적(Q_T) 등의 값은 그대로 이용하여 계산하였다.

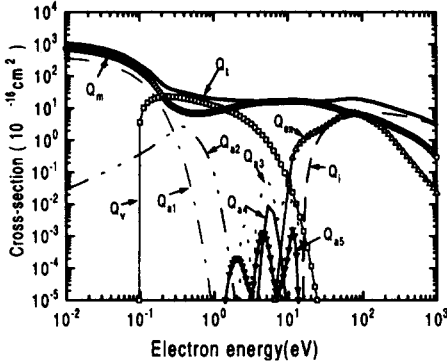


그림 2. SF₆가스의 전자충돌단면적
Fig 2. The collision cross sections of electrons in SF₆ gas

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 3, 4는 SF₆가스에서 탄성 및 비탄성 산란을 고려하여 압력 P₀ = 0.1[Torr]에서 E/N = 500[Td], 800[Td]에서 전자 에너지 분포함수 F(ε)를 MCS 방법으로 나타낸 것이다. 그림에서 BEq1과 BEq2는 볼츠만 방정식에 의한 결과로서 6개의 곡선을 얻을 수 있는 데 점점 작아지므로 그들 중 제1곡선과 제2곡선을 나타내었다.

전계가 인가될 때 기체 중을 이동하는 전자군의 에너지 분포함수는 어떤 조건에서 전자의 각 에너

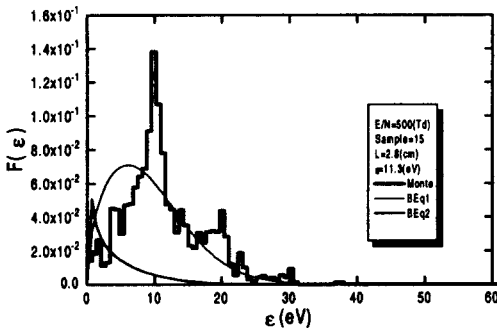


그림 3. SF₆가스 중에서의 전자에너지 분포함수
Fig 3. The energy distribution function of electrons in SF₆ gas

지에 대한 확률 밀도와 전자와 분자사이의 각종

충돌 단면적과 방전현상으로 나타나는 전자수송 특성에 직접적으로 관련되는 물리량이다. 그때의 하전 입자는 여러 종류의 에너지 성분을 갖는 기체분자가 열 평형 상태에 있을 때 에너지의 크기와 온도에 의존하는 방전공간에 등방적인 Maxwell-Boltzmann 에너지 분포를 나타낸다. 그러나 전자가 전계에 의해서 진행할 때 샘플15, 거리 L : 0.6[cm] E/N : 500[Td], 800[Td] 범위에서 MCS법으로 전자를 추적하여 나타난 전자 에너지 분포는 비평형 상태로 변화 하였다.

이러한 경우에 전자 에너지 분포함수의 계산은 평균에너지의 값이 각각 $\bar{\epsilon} : 11.3[\text{eV}]$, $\bar{\epsilon} : 14.5[\text{eV}]$ 에서 나타낸 것이다. 그림 3, 4에서 알 수 있는 바와 같이 E/N : 500[Td]의 경우가 E/N:800[Td]의 경우에 비하여 여기로 인하여 전자의 에너지를 잃어버리는 것이 크면 볼츠만 평형 영역도 크게 나타났다. F(ε)의 값은 초기 에너지에서는 증가하고 그 이상의 전자 에너지는 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 전자의

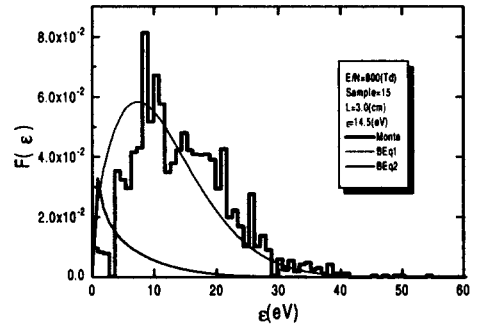


그림 4. SF₆가스 중에서의 전자에너지 분포함수
Fig 4. The energy distribution function of electrons in SF₆ gas

수와 에너지가 낮을 때는 양극에 흡수되는 전자의 에너지 분포는 증가하고 에너지가 증가함에 따라서 F(ε)은 감소하여 38[eV]이상에서는 일치되고 있다. 또한 비탄성 충돌에 의한 분포함수의 변화는 여기에 에너지가 전자의 평균에너지보다 적으므로 급격히 감소 되어 나타나는 현상으로 생각된다. 전자의 평균 에너지는 전극간 거리와 시간의 함수로 계산한 전자의 에너지 분포함수, 전자 이동 속도 등에 관계되는 물리량으로 전극면에서의 전자 운동의 증가는 음극의 에너지가 영에서 수직으로 이동하고 양극에서는 반사나 2차 전자가 방출하기 때문에 모두 흡수한다.

그리고 전자의 평균 에너지 ($\bar{\epsilon}$)는 전극간 거리와 E/N[Td]의 변화에 따른 몬테칼로 시뮬레이션으로 그림 5에 그 값을 나타내었다. 전자가 존재하는 경우에

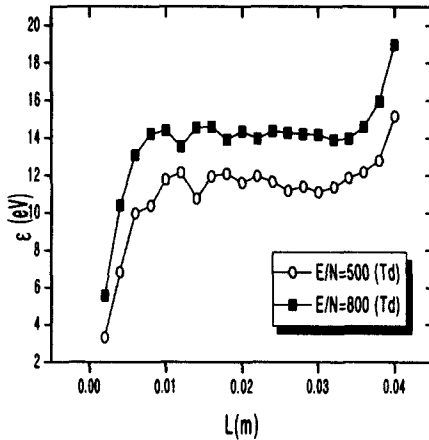


그림 5. SF₆가스 중에서의 전자의 평균에너지
Fig 5. The mean energy of electrons in SF₆ gas

샘플링의 차이에 따라서 음극과 양극 가까운 영역의 전자의 평균 에너지는 영점으로부터 비탄성 충돌이 일어날 에너지까지는 직선적으로 상승하여 비평형의 상태로 나타냈으며 그 외 영역에서는 거의 평형 상태의 에너지 값의 결과를 나타내었다.

전자군 수송계수의 변화를 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

그림 6의 전자기동속도(W)는 E/N=150~800[Td], 범위에서 MCS법으로 계산하고 그 결과를 A.V. Phelps[8], M. Hayashi[9], Y. Nakamura[10]의 실측치와 비교하여 나타낸 것이다.

전자에너지 분포함수와 탄성, 비탄성 충돌 단면적을 이용하여 계산된 전자기동속도는 E/N[Td]의 증가에 대하여 거의 선형적으로 증가하고 본 연구에서는 Y. Nakamura[10]의 2중 서터드립트 튜브를 이용하여 측정된 평균 도착 시간 분포로 측정된 이동속도의 값과 거의 일치하였다. 따라서 전자기동속도의 계산 값에 대응하는 전자 충돌 단면적의 타당성을 입증하였다.

또한 전계로부터 에너지를 얻은 전자가 미소거리를 이동하는 동안에 충돌 전리 확률은 평균 자유 행

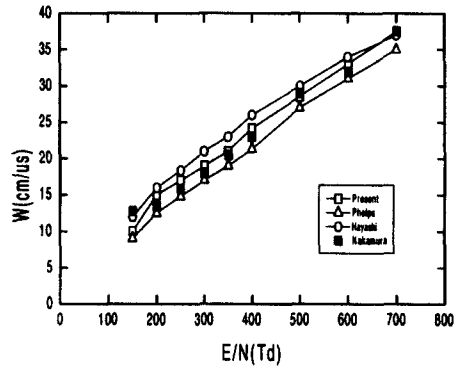


그림 6. SF₆가스 중에서의 전자기동속도
Fig 6. The drift velocities of electrons in SF₆ gas.

정에 의해 나타내며 그것은 압력에 반비례하므로 낮은 기압에서 전자 에너지는 크므로 전자 이동속도는 증가하는 것으로 생각된다.

그림 7~9에 전리계수 (α/M), 부착계수 (η/M), 실효전리계수 ($\alpha - \eta/M$)를 E/N=150~800[Td]의 함수로 나타내었다. 본 연구의 계산 결과는 A.V. Phelps[8], M.Hayashi[9]의 실험치와 같은 경향으로 증가하지만 Aschwanden[11]의 실측값은 거의 일치한 값을 나타 내었다.

Q_{a1} , Q_{a2} 는 부착 단면적의 절대값이 크기 때문에 E/N[Td]이 낮은 영역에서 전자의 운동에너지는 감소하여 전리는 저하되고 E/N[Td]가 높은 영역에서는 전자의 운동 에너지가 전리 에너지보다 크게 되어 전리는 증가된다고 생각된다.

전리에 의하여 발생한 전자는 SF₆가스 분자에 부착하여 부 이온을 형성하므로 부 이온은 전자에 비하여 질량이 크고 기체 중에서 전계의 가속을 받더라도 높은 에너지 상태에 도달하기가 힘들고 전리능력이 없기 때문에 낮은 E/N[Td]에서 전자 부착 계수는 증가하고 높은 E/N[Td]의 영역에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 비 탄성 충돌에 의하여 전자의 에너지를 저하시키므로 절연내력을 향상시키는 것으로 생각한다. 전기적 부성 기체는 기체중에 발생한 전자를 부착하여 부 이온이 되는 경향이 크며 α/N 은 E/N의 증가와 더불어 감소하였다.

전자가 전계에서 큰 에너지를 얻게 되면 부착이 일어나기 어렵다. 따라서 E/N이 $(\alpha - \eta)/N$ 을 +값이

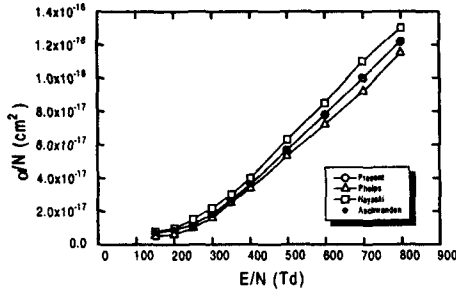


그림 7. SF₆가스중에서의 전리계수
Fig 7. The ionization coefficients in SF₆ gas

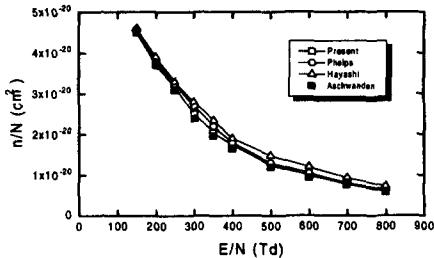


그림 8. SF₆가스에서의 부착계수
Fig 8. The attachment coefficients in SF₆ gas

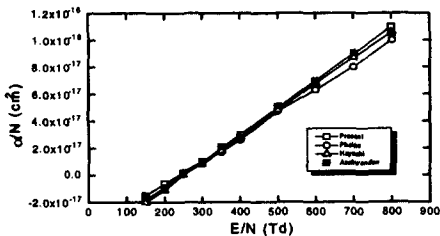


그림 9. SF₆가스에서의 실효전리계수
Fig 9. The effective ionization coefficients in SF₆ gas

되게끔 충분히 크지 않으면 전자의 충돌 전리는 효과적으로 이루어지지 않는다 $\bar{\alpha}/N = (\alpha - \eta)/N$ 고 생각된다.

실효 전리계수가 부(-)의값으로 나타나는 범위는 E/N=150~250(Td)로 나타났으며 Aschwanden[11]의 실험 치와 A.V. Phelps[8],

M. Hayashi[9]의 계산 값과 거의 일치한 경향을

나타냈다.

5. 결 론

전자에너지 분포함수는 평균 에너지의 값이 $\bar{\epsilon} = 11.3[eV]$, $\bar{\epsilon} = 14.5[eV]$, 샘플 15에서 비평형 상태를 나타내었다. 그리고 볼츠만 법에 의해 산출된 전리계수는 E/N이 낮은 범위에서는 급격히 증가하고 E/N이 어느 정도 크게 되면 그 증가율은 감소하였다. 또한 부착계수는 E/N의 증가와 더불어 감소하였는데 이것은 전자가 분자에 부착하여 부 이온을 만들기 때문에 전자에 비하여 질량도 크고 전계의 가속을 받아도 높은 에너지 상태에 도달할 수 없으며 전리능력이 없다고 생각된다.

SF₆가스의 전자 충돌 단면적을 이용하여 $150 \leq (E/N) \leq 800$ 범위에서 전자군의 파라미터 특성(수송계수)을 전자산란의 비평형 상태에서 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산하였고 볼츠만 법에 의해 전리, 부착, 실효전리계수를 구하였다. 그리고 이들의 계산치는 A.V. Phelps[8], M. Hayashi[9], Y. Nakamura[10] 및 Aschwanden[11]의 실험치와 비교 해석하여 산출된 값들은 정량적으로 거의 일치하였고 이용한 전자충돌 단면적의 타당성을 확인하였다. 또한 이용한 몬테칼로 시뮬레이션 기법의 타당성이 입증되었다고 생각된다. 특히 실효전리계수, 전리계수, 전자부착계수 및 종 방향 확산계수는 Aschwanden[11], H. Itoh[13]의 측정치와 거의 일치한 값을 산출하였다. 또한 종 방향 확산계수는 M.S. Naidu[12]의 실측치와 일치한 경향을 나타냈으며 E/N(Td)의 증가에 따라서 전자 이동속도는 전리에 의한 전자 증배의 크기에 따라서 그 영향이 나타났으며 Y. Nakamura[10]의 실측치와 거의 일치하였다.

(1) 전리계수는 E/N이 낮은 범위에서는 급격히 증가하고 어느 정도 크게 되면 증가율이 감소하였다.

(2) 부착계수는 E/N이 증가하면 감소하였다.

(3) 볼츠만 법에 의해 구한 전리계수, 부착계수, 실효계수는 A.V. Phelps[8], M. Hayashi[9], Y. Nakamura[10] 및 Aschwanden[11]의 실험치와 거의 일치하였다.

따라서 많은 시설비와 고가의 장비를 요하는 실험 장치를 사용하지 않고도 시뮬레이션을 이용하여 같은 결과를 구할 수 있으므로 이 분야를 연구하고 실용화하는데 많이 이용되리라고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 몬テカル로法 と シミュレーション(培風館), 1989.
- [2] 氣體放電 シミュレーション技法(제140호), 1974.
- [3] 森 正武 "Fortran 77 數値計算 프로그래밍" (岩波書店), pp.41-44, 1995.
- [4] Philip E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No.19, 1975.
- [5] H. Itch and T.Musha "Monte Carlo Calculations of Motions in Helium", J.Phys. soc. Japan, Vol.15, No.9, pp.1675-1680, 1960.
- [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] 菅野卓雄 "半導體 プラズ마 프로세스技術"(産業圖書), pp.38-50, 1993.
- [8] A.V. Phelps and R.J. Van Brunt "Electron-transport, ionization, attachment and dissociation, coefficients in SF₆ and its mixtures", J. Appl. Phys. 64, pp.4269-77, 1988.
- [9] M. Hayashi, and S. Hara, "Joint Symposium on Electron and Ion Swarm and Low Energy Electron Scattering", (A Satellite of ICPEAC XVI), Proc pp.109-11, 1991.
- [10] Y. Nakamura "Transport coefficients of electrons and negative ions in SF₆", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, pp.67-72, 1988.
- [11] Aschwanden "Gaseous Dielectrics IV ed", L G Christophorou and M O pace, (New York: Pergamon), pp.24-33, 1984.
- [12] M.S. Naidu and AN. Prasad "Diffusion and drift of electrons in SF₆", J. Phys. D: Appl. Phys. 5, pp.1090-5, 1972.
- [13] 하성철, 서상현 "SF₆ 가스의 전자수송특성에 관한 몬테 칼로시뮬레이션: 한국전기전자재료학회지 Vol. 9, No 7 pp.660-667 1996.
- [14] 하성철, 서상현, 유희영, 김상남 "SF₆ 가스의 전리 및 부착계수에 관한 연구: 한국조명·전기설비학회지 Vol. 10, No 6 pp.618-625 1996.
- [15] 하성철, 김상남, 유희영, 서상현, 임상원, 전병훈, "SF₆ + Ar 혼합기체의 전자수송특성 개선에 관한 연구: 한국전기전자재료학회지 Vol. 11, No 1 pp.67-73 1998

◇ 저자소개 ◇

김상남(金相南)

1951년 3월 21일생. 1978 숭실대 전기 공학과 졸업. 1980년 숭실대 대학원 전 기공학과 졸업(석사). 1998년 동국대 박사 과정 수료. 1978~현재 시립 인천 전문대 전기과 교수.

하성철(河聖哲)

1940년 12월 25일생. 1966 인하대 전 기공학과 졸업. 1985년 명지대 대학원 졸업(박사). 1994~1995 일본 게이오 대학 방문교수. 현재 동국대 공과대학 전기공학과 교수.