

SF₆가스의 전자에너지 분포함수에 관한 연구

A study on the electron energy diffusion function of the sulphur hexafluoride.

김 상남* 시립인천전문대학 전기공학과
유 회영 대림전문대학 전자공학과
서 상현 동국대학교 전기공학과
박 동화 시립인천대학교 전기공학과
하 성철 동국대학교 전기공학과

Sang-Nam Kim* Dept. of Electrical Eng. Junior College of Incheon.
Heoi-Young Yu Dept. of Electronic Eng. Junior College of Dae Lim.
Sang-Hyeon Seo Dept. of Electrical Eng. Dongguk University.
Dong-Wha Park Dept. of Electrical Eng. Incheon University.
Sung-Chul Ha Dept. of Electrical Eng. Dongguk University.

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.

1. 서론

전계중에서 방전 현상으로 전자군의 성질을 규명하기 위해서는 전자에너지 분포함수와 전자수송계수(전자군 파라미터) 즉 전자기동속도, 전리, 부착계수, 종·횡방향의 확산계수, 평균에너지 등을 해석해야 한다.

그리고 이와같은 전자에너지 분포함수와 전자수송계수를 해석하기 위해서는 정확한 운동량변환단면적, 여기 단면적, 전리 및 부착단면적이 필요하고 이들의 값을 이용하여 전자군 파라미터의 특성을 볼츠만 방정식과 몬테칼로 시뮬레이션에 의해서 구하여지고 있다^(1,2,3). 특히 몬테칼로법은 가스의 탄성 및 비탄성 충돌을 고려한 비평형상태의 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)

이와같은 전자군 파라미터 특성(전자수송계수)은 방전공간내에서 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⁽⁴⁾ 및 R.L. Thomas, R.W.G. Thomas⁽⁶⁾에 의해서 전자사태에 의한 연구에 적용되었다. 즉 전자사태에서 나타나는 전체의 전자를 추적하여 전자기동속도 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 차단성능이 우수한 특성을 가지고 있음으로서 각종 고전압기기에 이용되고 있다. 그리고 최근에는 약전리 기체 프라즈마 프로세스의 에칭(etching)가스로서 또는 반도체 미세가공 분야 등에도 이용이 기대되고 있는 추세에 있다.⁽⁷⁾ 더욱이 절연 기체의 특성평가지수는 전자의 전리계수(α)와 부착계수(η)에 의해서 기술되며 이들의 값은 전기 기기 설계에 귀중한 Data로 활용되고 있다. 따라서 이와 같은 절연 기체에 대한 전기 절연 내력의 향상을 위하여 그의 물성적특성을 명확히 규명할 필요가 있다고 본다.

본 연구에서는 SF₆기체의 전자군의 수송특성에 직접 관련되는 전자에너지 분포함수와 전기 전도 특성을 나타내는 전리계수(α/N), 부착계수(η/N), 실효전리계수($\alpha - \eta$)/N, 전자이동속도(W), 전자의 중·횡방향의 확산계수(ND_L, ND_T) 및 평균에너지 등의 전자수송특성을 E/N(Td):150~800(Td) (E:전계, N:기체분자수밀도, 1Td=1×10¹⁷ V·cm², N:3.5353×10¹⁶cm⁻³ 0°C 1Torr에 해당)의 범위에서 볼츠만 방정식에 의한 Backward prolongation법⁽⁴⁾과 비등방성 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 전자충돌면적의 타당성에 대하여 검토하였다.

2. 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서 전자의 산란은 비등방성을 고려한 몬테칼로 시뮬레이션으로 추적하여 해석하였다. 그리고 전자 궤도 추적의 방법은 Itoh, Musha의 것을 적용하였다.^(5,6) 따라서 전자의 평균에너지로 추정되는 평균 전자충돌주파수와 추적시간과의 곱은 큰값이 필요하므로 비탄성 충돌일때도 수천회(3,000회) 충돌하는 것으로 설정하였다. 전자의 평균자유행정(λ)는 전자운동의 미소 비행거리 $\Delta l = \lambda/10$ 으로 궤도를 계산하였다. 또한 MCS에서는 위치와 시간을 지정한 그점

의 전자평균 에너지와 전자궤도에서 전리가 일어난 경우의 샘플수(No. of sampling points : 20등분)와 난수(Random Number : 13) 등은 적으며 음극에서 양극에 도달할때까지 SPARC WORKSTATION (SS-20)으로 반복 추적하여 계산하였고 그림(1)은 본 시뮬레이션에서 사용한 flowchart로써 최초에 전계분포, 기체수밀도, 초기 전극간분할(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 평균에너지지를 갖는 미소비행거리(Δl)사이에서 충돌하는 확률은 평균자유행정(λ)의 1/10으로 계산하였으며, 전자의 이동, 충돌의 종류, 충돌후의 비행방향을 시뮬레이션 하였다.

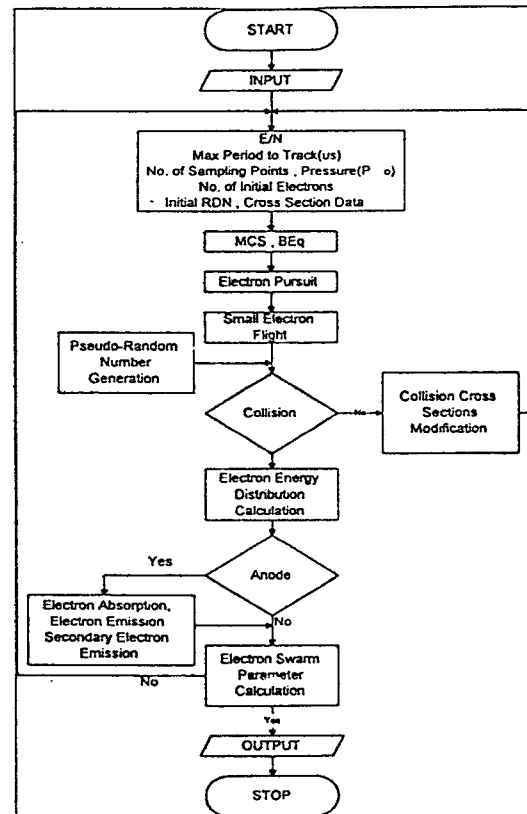


그림 1. 몬테칼로 시뮬레이션의 순서도.
Fig 1. The flowchart of Monte Carlo simulation.

표 1. 몬테카를로 시뮬레이션의 data.

Table 1. The data of Monte Carlo simulation.

The Result of Monte Carlo Simulation of Electrons

Mixture : sf601.dat /sf601.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	0.1949E-03	0.2154E-07	0.4778E-05	0.6599E-01
2	0.1000E-07	18	0.1579E-02	0.4442E-05	0.2909E-04	0.4803E-00
3	0.1500E-07	12	0.2411E-02	0.2549E-05	0.3570E-04	0.6023E-00
4	0.2000E-07	10	0.2907E-02	0.5740E-05	0.2790E-04	0.7800E-00
5	0.2500E-07	9	0.4230E-02	0.1385E-04	0.2409E-04	0.1147E-01
6	0.3000E-07	7	0.4924E-02	0.2793E-04	0.1549E-04	0.1300E-01
7	0.3500E-07	7	0.5027E-02	0.3870E-04	0.1288E-04	0.1248E-01
8	0.4000E-07	4	0.6963E-02	0.5177E-04	0.1460E-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	0.1380E-04	0.3822E-01
11	0.5500E-07	3	0.1364E-01	0.1372E-03	0.2452E-04	0.4472E-01
12	0.6000E-07	3	0.1328E-01	0.1667E-03	0.3522E-04	0.4346E-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	0.1966E-04	0.3470E-01
15	0.7500E-07	3	0.1130E-01	0.2903E-03	0.8893E-05	0.3369E-01
16	0.8000E-07	3	0.9994E-02	0.3514E-03	0.5379E-05	0.2806E-01
17	0.8500E-07	3	0.8959E-02	0.3443E-03	0.7773E-05	0.2246E-01
18	0.9000E-07	3	0.8929E-02	0.3727E-03	0.1182E-04	0.2364E-01
19	0.9500E-07	3	0.9089E-02	0.3290E-03	0.1280E-04	0.2256E-01
20	0.1000E-06	3	0.8767E-02	0.2902E-03	0.2250E-04	0.2053E-01

표 2. 볼츠만 법의 data.

Table 2. The data of Boltzmann method.

***** Boltzmann Equation Analysis (TSSMID.FOR) *****

sf601.dat / sf601.dat Mixture
 Mix Ratio sf601.dat : sf601.dat =100.000 : 0.000

E/N : 100.000 (Td) Temperature : 300.0 (K)
 No of Cross Section Included sf601.dat : 5 sf601.dat : 5
 Maximum Energy for Distribution Function : 20.000 (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	f4	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	-1.307E-10	0.1840E-00	-7.011E-08
1.500	0.1120E+00	-5.076E-04	0.2030E-07	-1.557E-10	0.1127E-00	-1.467E-07
2.250	0.8190E-01	-5.061E-04	0.2300E-07	-1.809E-10	0.8191E-01	-1.749E-07
3.000	0.6441E-01	-5.203E-04	0.3402E-07	-1.964E-10	0.6440E-01	-1.860E-07
3.750	0.5207E-01	-4.988E-04	0.3391E-07	-2.037E-10	0.5206E-01	-1.900E-07
4.500	0.4300E-01	-4.602E-04	0.3317E-07	-2.045E-10	0.4307E-01	-1.876E-07
5.250	0.3700E-01	-4.348E-04	0.3215E-07	-2.014E-10	0.3708E-01	-1.807E-07
6.000	0.3134E-01	-4.043E-04	0.3106E-07	-1.992E-10	0.3136E-01	-1.704E-07
6.750	0.2641E-01	-3.734E-04	0.2994E-07	-1.990E-10	0.2644E-01	-1.575E-07
7.500	0.2200E-01	-3.409E-04	0.2872E-07	-1.847E-10	0.2200E-01	-1.414E-07
8.250	0.1814E-01	-3.000E-04	0.2728E-07	-1.788E-10	0.1817E-01	-1.229E-07
9.000	0.1457E-01	-2.677E-04	0.2541E-07	-1.717E-10	0.1460E-01	-1.049E-07
9.750	0.1138E-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	-1.463E-10	0.8295E-02	-6.465E-08
11.250	0.5748E-02	-1.343E-04	0.1508E-07	-1.229E-10	0.5708E-02	-4.646E-08
12.000	0.3810E-02	-9.003E-05	0.1199E-07	-9.959E-11	0.3831E-02	-3.187E-08
12.750	0.2404E-02	-6.669E-05	0.8756E-08	-7.717E-11	0.2446E-02	-2.092E-08
13.500	0.1497E-02	-4.318E-05	0.6130E-08	-5.738E-11	0.1505E-02	-1.321E-08
14.250	0.8947E-03	-2.743E-05	0.4144E-08	-4.107E-11	0.8956E-03	-8.077E-09
15.000	0.5191E-03	-1.689E-05	0.2705E-08	-2.838E-11	0.5221E-03	-4.982E-09

3. 전자의 충돌단면적

본 연구에 이용한 SF₆의 전자충돌단면적은 H. Itoh, et al⁽¹³⁾의 값을 그림(2)에 나타내었다.

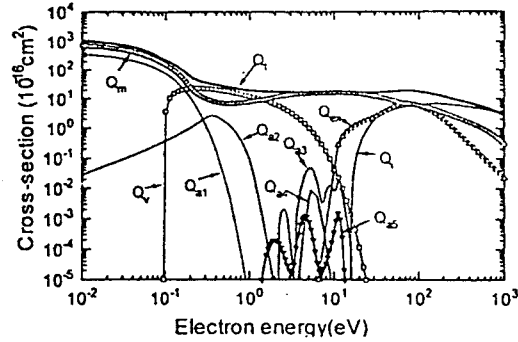


그림 2. SF₆기체의 전자충돌단면적.

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

이 SF₆의 전자충돌단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자부착단면적 (Q_{a1}, Q_{a2})이 낮은 에너지 영역에 존재하고 또한 해리성 부착단면적(Q_{a3}, Q_{a4}, Q_{a5})의 Threshold에너지의 값은 각각 3.29(eV), 3.95(eV), 1.57(eV)를 이용하였다. 그리고 탄성충돌에 의한 운동량변환단면적(Q_m), 여기단면적(Q_e), 전리단면적(Q_c), 진동여기단면적(Q_v) 및 전 충돌단면적(Q_t) 등의 값은 그대로 이용하여 계산하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림(3), (4)는 SF₆기체에서 탄성 및 비탄성산란을 고려하여 압력 P₀:0.1(Torr)에서 E/N:500(Td), 800(Td)에서 전자에너지분포함수 F(ε)를 MCS법으로 나타낸 것이다.

전계가 인가될때 기체중을 이동하는 전자군의 에너지 분포함수는 어떤조건에서 전자의 각에너지에 대한 확률밀도와 전자와 분자사이의 각종 충돌단면적과 방전현상으로 나타나는 전자수송특성에 직접적으로 관련되는 물리량이다. 그때의 하전입자는 여러종류의 에너지성분을 갖는 기체분자가 열평형상태에 있는 경우에 에너지의 크기와 온도에 의존하는 방전공간에 등

방적인 Maxwell-Boltzmann 에너지분포를 나타낸다. 그러나 전자가 전계에 의해서 진행할때 샘플15, 거리 L:0.6(cm) E/N:500(Td), 800(Td) 범위에서 MCS법으로 전자를 추적하여 나타난 전자에너지분포는 비평형상태로 변화였다. 이러한 경우에 전자에너지 분포함수의 계산은 평균에너지의 값이 각각 $\bar{\epsilon}:11.3(\text{eV})$, $\bar{\epsilon}:14.5(\text{eV})$ 에서 나타낸것이다.

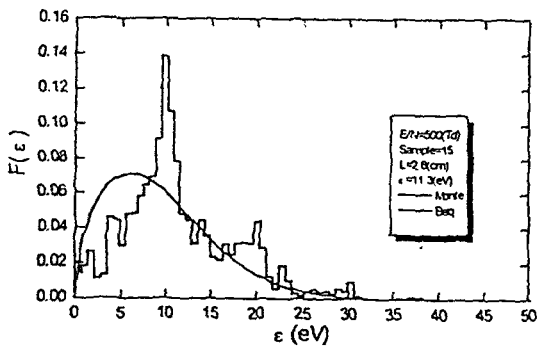


그림 3. SF₆기체중에서의 전자에너지 분포함수.
Fig. 3. The energy distribution function of electrons in SF₆ gas.

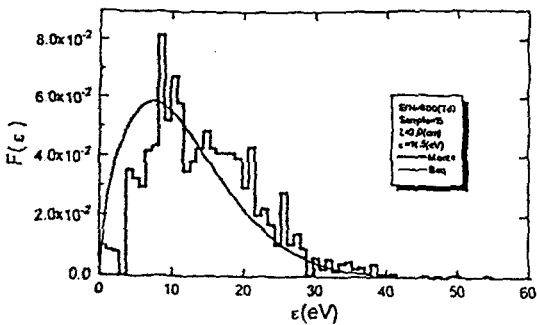


그림 4. SF₆기체중에서의 전자에너지 분포함수.
Fig. 4. The energy distribution function of electrons in SF₆ gas.

그림 (3), (4)에서 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 불평형영역도 크게 나타났다. F(ε)의 값은 초기 에너지에서는 증가하고 그이상의 전자에너지는 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 전자의 수와 에너지가 낮을때는 양극에 흡수되는 전자의 에너지분포는 증가하고 에너지

가 증가함에 따라서 F(ε)은 감소하여 38(eV)이상에서는 일치 되고 있다.

또한 비탄성충돌에 의한 분포함수의 변화는 여기에 에너지가 전자의 평균에너지보다 적으므로써 급격히 감소되어 나타나는 현상으로 생각된다.

전자의 평균에너지는 전극간 거리와 시간의 함수로 계산한 전자의 에너지 분포함수, 전자기동속도등에 관계되는 물리량으로 전극면에서의 전자운동의 증가는 음극의 에너지가 영에서 수직으로 이동하고 양극에서는 반사나 2차전자가 방출하기 때문에 모두 흡수한다.

그리고 전자의 평균에너지($\bar{\epsilon}$)는 전극간거리와 E/N(Td)의 변화에 따른 몬테칼로 시뮬레이션으로 그림(5)에 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 에너지값의 결과를 나타내었다.

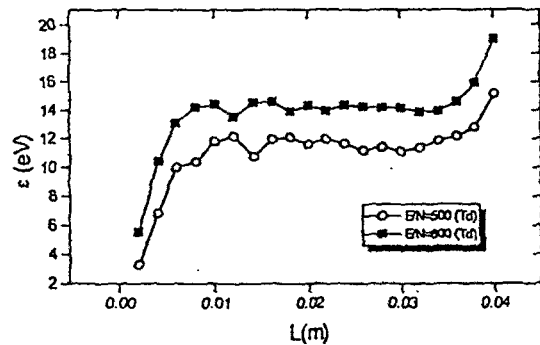


그림 5. SF₆가스중에서의 전자의 평균에너지.
Fig. 5. The mean energy of electrons in SF₆ gas.

전자군 수송계수의 변화를 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

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

전자에너지 분포함수와 탄성, 비탄성충돌단면적을 이용하여 계산된 전자기동속도는 E/N(Td)의 증가에

대하여 거의 선형적으로 증가하고 본 연구에서는 Y. Nakamura⁽¹⁰⁾의 2중 서터드리프트 튜브를 이용하여 측정된 평균 도착시간분포로 측정된 이동속도의 값과 거의 일치하였다. 따라서 전하이동속도의 계산값에 대응하는 전자충돌단면적의 타당성을 입증하였다.

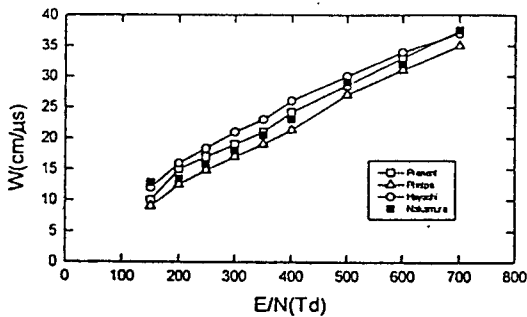


그림 6. SF₆기체중에서의 전하이동속도.
Fig 6. The drift velocities of electrons in SF₆ gas.

또한 전계로부터 에너지를 얻은 전자가 미소거리를 이동하는 동안에 충돌전리 확률은 평균자유행정에 의해 나타내며 이것은 압력에 반비례하므로 낮은 기압에서 전자에너지는 크므로 전하이동속도는 증가하는 것으로 생각된다.

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

Q_{a1} , Q_{a2} 는 부착단면적의 절대값이 크기 때문에 E/N(Td)이 낮은 영역에서 전자의 운동에너지는 감소하여 전리는 저하되고 E/N(Td)가 높은 영역에서는 전자의 운동에너지가 전리에너지보다 크게되어 전리는 증가된다고 생각된다.

전리에 의하여 발생한 전자는 SF₆기체분자에 부착하여 부이온을 형성하므로 부이온은 전자에 비하여 질량이 크고 기체중에서 전계의 가속을 받더라도 높은 에너지 상태에 도달하기가 힘들고 전리능력이 없기 때문에 낮은 E/N(Td)에서 전자부착계수는 증가하

고 높은 E/N(Td)의 영역에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 비탄성충돌에 의하여 전자의 에너지를 저하시키므로 절연내력을 향상시키는 것으로 생각한다. 전기적 부성기체는 기체중에 발생한 전자를 부착하여 부이온이 되는 경향이 크며 α/N 은 E/N의 증가와 더불어 감소하였다. 전자가 전계에서 큰 에너지를 얻게되면 부착이 일어나기 어렵다. 따라서 E/N이 $(\alpha - \eta)/N$ 을 +값이 되게끔 충분히 크지 않으면 전자의 충돌전리는 효과적으로 이루어지지 않는다고 생각된다.

실효전리계수 $\bar{\alpha}/N = (\alpha - \eta)/N$ 이 부(-)의 값으로 나타나는 범위는 E/N:150~250(Td)로 나타났으며 Aschwanden⁽¹¹⁾의 실험치와 A.V. Phelps⁽⁸⁾, M. Hayashi⁽⁹⁾의 계산값과 거의 일치한 경향을 나타냈다.

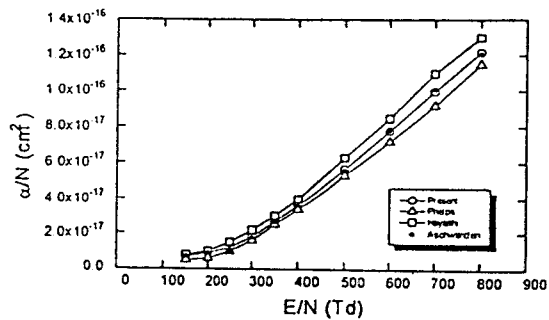


그림 7. SF₆기체중에서의 전리계수.
Fig 7. The ionization coefficients in SF₆ gas

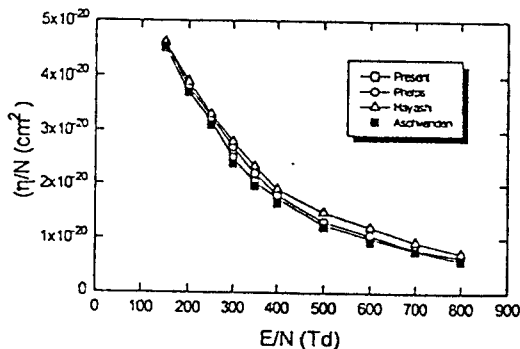


그림 8. SF₆기체중에서의 부착계수.
Fig 8. The attachment coefficients in SF₆ gas.

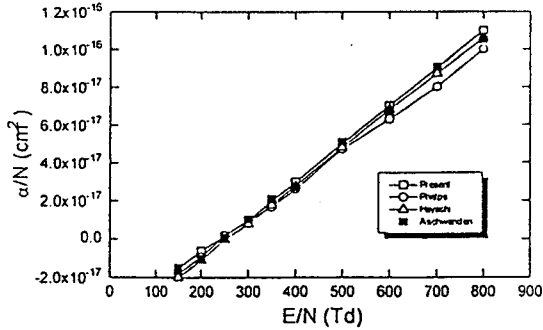


그림 9. SF₆기체에서의 실효전리계수.

Fig. 9. The effective ionization coefficients in SF₆ gas.

5. 결론

SF₆가스의 전자충돌단면적을 이용하여 $150 \leq (E/N) \leq 800$ 범위에서 전자의 에너지분포함수와 수송계수(전자 군파라메터)를 전자산란의 비평형상태에서 몬테칼로 시뮬레이션과 볼츠만방정식에 의해 전자기동속도, 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 전자충돌단면적의 타당성을 확인하였다. 또한 이용한 몬테칼로 시뮬레이션 기법의 타당성이 입증되었다.

6. 참고문헌

[1] 몬테칼로법과 시뮬레이션(培風館), 1989.
 [2] 氣體放電 시뮬레이션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. Itoh 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 プラズマ プロセス技術"(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 XVII), 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 A.N. Prasad "Diffusion and drift of electrons in SF₆", J. Phys. D: Appl. Phys. 5, pp.1090-5, 1972.
 [13] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF₆ : 1. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, pp.922-30, 1988.