

Distribution Function and Drift Velocities in Mixtures of SF₆ and Ar

김 상 남[†]
(Sang-Nam Kim)

Abstract - Distribution Function and Drift velocities for electrons in SF₆-Ar mixtures gases used by MCS-BEq 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[%] and 0.5[%] SF₆-Ar mixtures were measured by time-of-flight method.

The results obtained in this work will provide valuable information on the fundamental behaviors of electrons in weakly ionized gases and the role of electron attachment in the choice of better gases and unitary gas dielectrics or electro negative components in dielectric gas mixtures.

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

Key Words : Mixture Gases, Drift Velocities, Distribution Function, Monte Carlo Simulation

1. 서 론

전력 계통의 대용량화, 송전 전압의 초고압 화에 의하여 각종 전기 기기에 방전 현상이 중대한 영향을 미치게 되고 환경문제 등 여러 산업 분야에서 고전압 방전을 이용하려는 노력이 증가하고 있다. 따라서 기체 방전을 지배하는 메카니즘을 정확히 이해할 필요가 있으며 이를 위하여 이론과 실험을 통하여 많은 연구를 필요로 하고 있다[1]~[9].

본 연구에서는 SF₆-Ar 혼합기체 중에서 몬테칼로 시뮬레이션, 볼츠만 방정식의 Backward prolongation법에 의해 수치해석으로 전자이동속도를 SF₆-Ar혼합기체(SF₆-Ar 혼합기체 중에 있어서 SF₆ 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 = 1×10⁻¹⁷V·cm², N : 3.5353×10¹⁶cm⁻³ 0℃ 1 Torr에 해당]와 P₀ : 0.5, 1, 5 (Torr)범위에서 비등방성 산란을 고려하여 계산하여 전자수송특성을 고찰하였다. 그리고 전자충돌 단면적의 타당성에 대하여 검토하고 평균에너지에 따른 전자에너지분포함수를 볼츠만 방정식에 의한 PT, TOF, SST의 전자 Swarm법과 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 전자군 파라미터를 해석하였다[2]~[6].

전자 에너지 분포 함수를 갖는 전자군과 하전입자군과의 충돌 현상으로 나타나는 전자 이동 속도와 에너지 분포함수를 정량적으로 산출하였다.

2. 해석 방법 및 실험장치

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 확률현상의 난수로 모의하는 방법을 말한다. 사용하는 난수는 컴퓨터에서 발생하는 [0~1]사이의 의사난수(Pseudo random number) 이다[2]~[3].

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[2].

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 전자수송계수 등의 수치해석은 Philip E. Luft의 Backward prolongation계산법을 이용하였다[6].

[†] 교신저자, 시니어회원 : 인천대학교 전기공학과 교수·공박
E-mail : sn7332@incheon.ac.kr

접수일자 : 2009년 12월 15일

최종완료 : 2010년 4월 22일

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	0.4966E-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

2.3 실험장치

그림 1에 실험장치의 구성도를 나타내었으며 대별하여 Double shutter drift tube 와 진공 배기계, 기체 도입계 등으로 구성하였다. Double shutter drift tube 는 전원을 공급하는 음극(K), 2개의 전자 shutter(S1, S2) 콜렉터(C) 및 가이드링 등으로 이루어졌으며 초기전자의 공급은 중수소 UV Lamp의 자외선으로 조사되고 shutter (S1, S2)는 스텐레스 원판으로 1 mm의 간격으로 구성되어 있다. 그리고 드리프트 거리는 1~10 cm의 범위로 가변할 수 있도록 하고 다이얼 게이지에 의하여 조정된다. 콜렉터(C)는 직경 82 mm의 스텐레스 원판이고 Guidring은 내경 100 mm, 두께 9 mm의 스텐레스 원판으로 전자가 이동영역을 평등 전계 중에서 이동할 수 있도록 하였다.

실험은 Double shutter drift tube를 이용하여 TOF(Time of Flight)법으로 하였다. 기압, 기체온도 및 E/N(E:전계의 세기, N:기체수 밀도 $3.5353 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 0 °C, 1 Torr)의 일정한 조건에서 전극사이에 초기 전자를 발생시켜 전리 전류를 pico electro-meter로 측정하였다. 그리고 진공도와 봉입기체의 압력측정에는 전리 진공계와 바르톤 압력계를 이용하였다.

본 실험에서 shutter에 인가되는 펄스폭은 60~350 ns로 펄스 전압은 Pulse Regulator(S1:8013B, HP, S2:PG230)에 의해서 인가하였다.

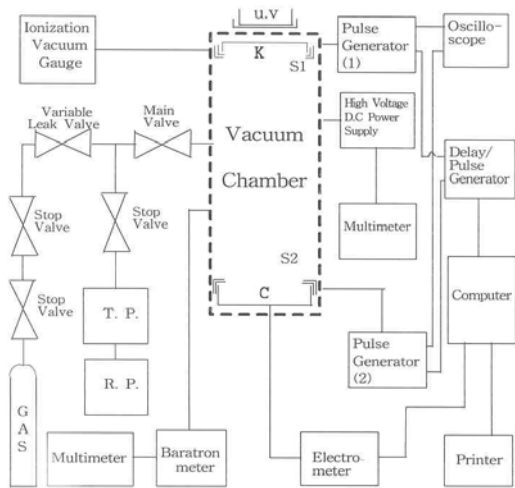


그림 1 실험장치의 구성도.

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment system.

3. 전자충돌 단면적

3.1 SF6의 전자 충돌 단면적

본 연구에 이용한 SF6의 전자 충돌 단면적은 H. Itoh et al.의 Set을 사용하였으며, 그림 2에 나타내었다[9-11].

그림의 SF6 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착 단면적 (Q_{a1} , Q_{a2})이 낮은 에너지영역에 존재하고 또한 해리성 부착단면적 (Q_{a3} , Q_{a4} , Q_{a5})의 Threshold에너지 값은 각각 3.29 eV, 3.95 eV, 1.57 eV를 이용하였다. 그리고 탄성충돌에 의한 운동량 변환 단면적 (Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i), 진동 여기 단면적 (Q_v) 및 전충돌 단면적(Q_T) 등의 값을 이용하여 계산하였다.

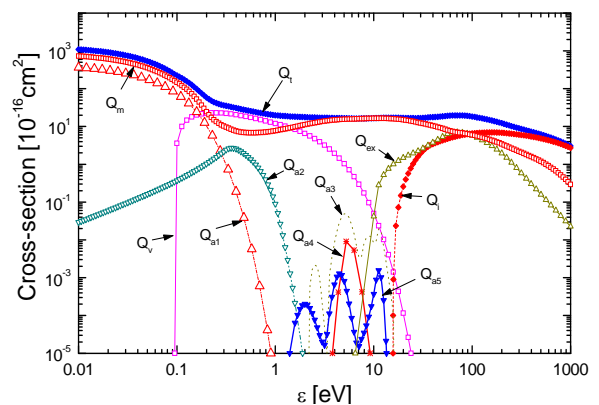


그림 2 SF6기체의 전자 충돌 단면적.

Fig. 2 Collision cross sections for electrons in SF6.

3.2 Ar의 전자 충돌 단면적

Ar의 전자 충돌 단면적에 대한 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i)등을 그림 3에 나타내었다 [12-14].

그림의 Ar 전자 충돌 단면적은 저 에너지 영역(0~0.23eV)에서 Ramsauer Townsend minimum을 갖는 운동량 변환 단면적(Q_m)은 Bell, Scott의 계산값을 이용하였고 전자에너지

0.136~54.4 eV 영역의 범위에서는 W. C. Fon의 측정값을 이용하였으며, 여기 단면적(Q_{ex})은 허용대 준위의 여기 단면적(3P_2 , 3P_1 , 3P_0 , 1P_1)과 금지대 준위의 여기 단면적(13.0~13.9 eV)으로 분류하여 Y. Nakamura, M. Kurachi, A. Chutjian 등의 측정값을 이용하고 전리 단면적은 Arati Dasgupta and A. K. Bhatia이 측정한 결과를 이용하였다[15].

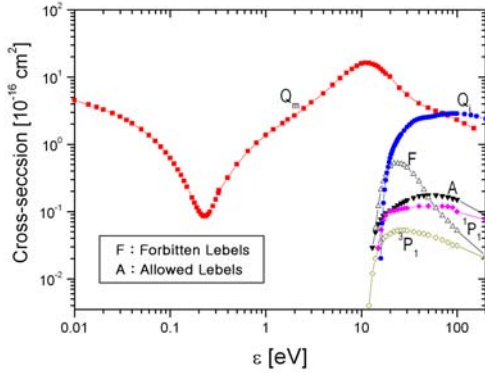
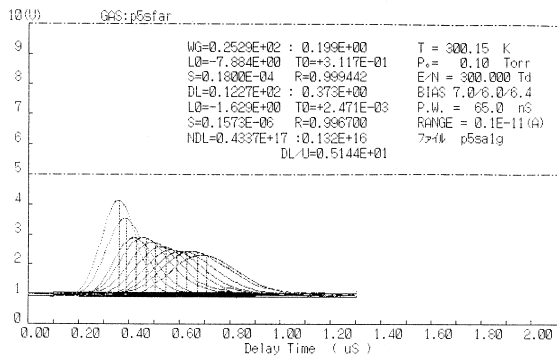


그림 3 Ar기체의 전자 충돌단면적.
Fig. 3 Collision cross sections for electrons in Ar.

4. 결과 및 고찰

4.1 전자도착 시간분포

그림 4에서는 혼합기체중의 전자도착 시간분포의 측정 결과 중 하나의 예를 나타내었다.



L	Tm-G	Tm (uS)	2dt	dt^2	P.F	H.F	B.L.	Area (%)
1	0.3600	0.3582	0.13493	4.55E-03	15	10	4	100.0
2	0.3880	0.3828	0.14749	5.44E-03	15	10	4	89.0
3	0.4280	0.4213	0.16621	6.91E-03	15	10	4	79.6
4	0.4680	0.4552	0.18484	8.54E-03	15	10	4	82.6
5	0.5040	0.4907	0.19674	9.68E-03	15	10	4	83.2
6	0.5480	0.5300	0.21244	1.13E-02	15	10	4	81.6
7	0.5880	0.5650	0.22718	1.29E-02	15	10	4	83.4
8	0.6280	0.6113	0.23818	1.42E-02	15	10	4	83.7
9	0.6720	0.6446	0.25908	1.68E-02	15	10	4	86.8
10	0.7080	0.6881	0.26727	1.79E-02	15	10	4	91.7

WP=	0.2696E+02	: 0.300E+00	(cm/US)	DL =	0.1486E+02	: 0.572E+00	(cm^2/uS)
LO =	-8.377E+00		(cm)	NDL =	0.5253E+17	: 0.202E+16	(cm^2/uS)-1
TO =	+3.107E-01		(uS)	LO =	-1.629E+00		(cm)
S =	0.3159E-04			TO =	+2.471E-03		(uS)
R =	0.998888			S =	0.1573E-06		(cm)
DL/u =	0.5845E+01		(v)	R =	0.996700		

그림 4 SF₆-Ar 혼합기체중의 전자도착 시간분포의 측정 예.
Fig. 4 An example of arrival time spectra of electrons measured in SF₆-Ar mixtures.

많은 데이터 중 그림의 조건은 SF₆:Ar=0.5 %:99.5%혼합 기체, 압력 P₀=0.1 Torr, E/N=300 Td, drift distance=1.2 cm, 온도=300.15 K를 나타내었다.

전자도착분포의 대칭성을 이루고 있을 때 중심도착시간과 drift distance와의 관계에서 이동속도를 구하였다.

4.2 SF₆ 기체에서의 에너지 분포함수

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

그때의 하전입자는 여러 종류의 에너지 성분을 갖는 기체 분자가 열평형 상태 즉 맥스웰 볼츠만 에너지 분포를 나타낸다[9]~[10].

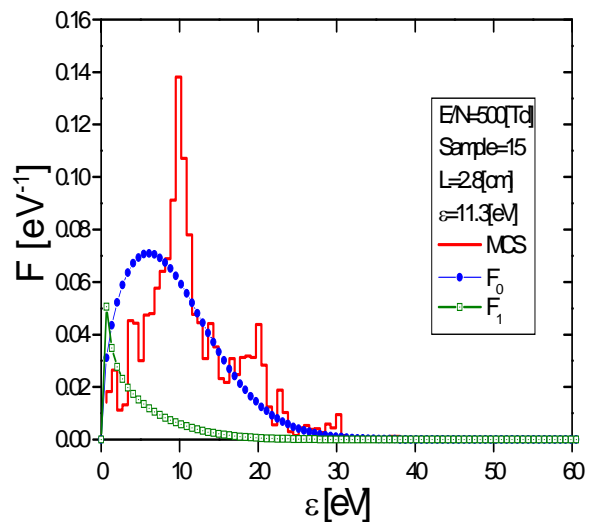


그림 5 SF₆기체에서 전자에너지 분포함수
Fig. 5 Electron energy distribution function in SF₆

그림 5는 SF₆기체의 E/N=500[Td]와 800[Td]를 P₀=1.0 [Torr], 샘플15, L=2.8[cm], ε=11.3[eV] 및 P₀=1.0[Torr], 샘플 15, 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 커져 비평형 영역이 크게 나타났다.

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

4.3 Ar기체의 에너지 분포함수

그림 6에서 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 나카무라 등의 연구결과와 일치하였다[13].

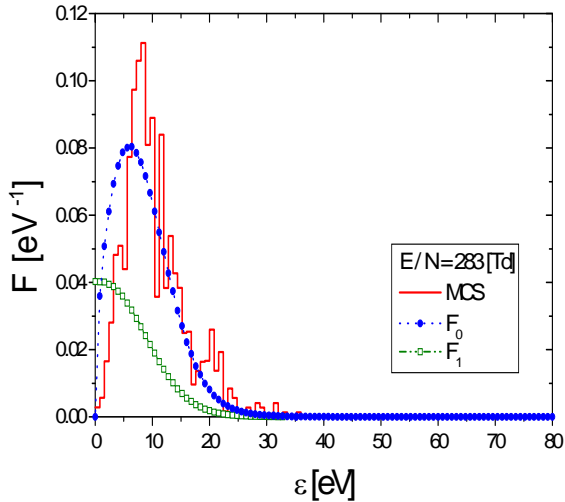


그림 6 Ar 기체에서 전자에너지 분포함수
Fig. 6 Energy distribution functions for electrons in Ar

4.4 SF₆-Ar 혼합기체의 에너지 분포함수

전자의 에너지 분포 함수는 외력이 작용하면 평형 상태에서 벗어났고 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[14].

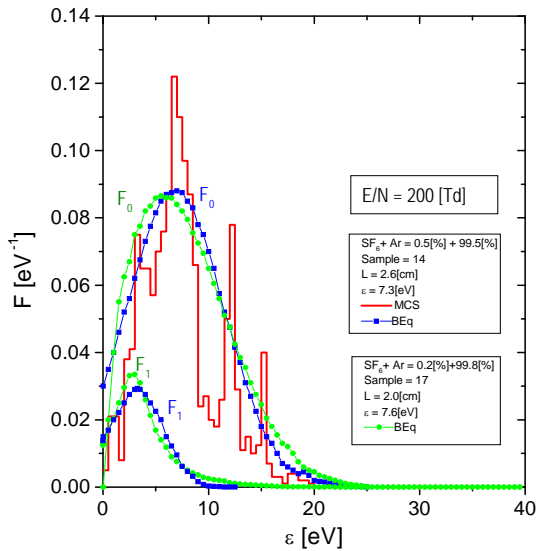


그림 7 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자에너지 분포
Fig. 7 Energy distribution function for electrons in SF₆-Ar

그림 7는 0.5% SF₆-Ar 혼합기체의 E/N=200[Td] (P₀=1.0 [Torr], 샘플=14, L=2.6[cm] 및 ε=7.3[eV])와 0.2% SF₆-Ar 혼합기체의 E/N=200[Td](P₀=1.0[Torr], 샘플=17, L=2 [cm], 평균 에너지ε=7.6[eV])에서 BEq법에 의한 전자 에너지 분포함수를 등방 성분(F₀)과 비등방 성분(F₁)으로 나타내고 MCS의 결과와 비교한 것이다.

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

4.5 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자의 이동속도

그림 8에 나타난 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[15]~[20]. 이와 같은 현상은 전자가 SF₆ 분자와 충돌 산란을 일으킬 때 이동거리에 따라서 전자도착 시간분포의 중심 이동의 영향을 받기 때문에 전자수의 증감이 발생하여 전자 이동속도의 증감의 차이가 나타나는 것으로 생각된다.

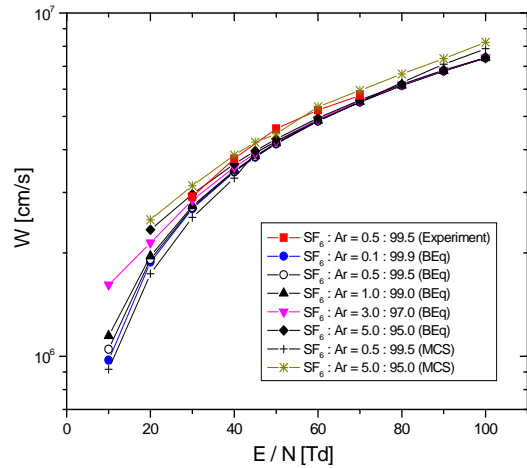


그림 8 SF₆-Ar 혼합기체에서 전자의 이동속도
Fig. 8 Drift velocity of electrons in SF₆-Ar mixtures

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.

SF₆-Ar 혼합기체는 비평형 영역에서 충돌여기가 활발하게 되어 잃어버린 에너지 값이 많게 되어 전자수가 감소하고 이동속도는 증가하는 현상이 나타나고 SF₆ 기체는 Ar 기체에 비하여 전충돌단면적이 대단히 크게 되어 충돌여기가 둔화되며 잃어버린 에너지의 값이 적게 되어 전자수는 증가하고, 이동속도는 감소하는 현상으로 순수 SF₆ 기체 보다 느려진다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 탄성 및 비탄성 충돌 단면적과 전리증식의 전자군을 형성하는 비교적 낮은 E/N[Td] 영역에서 혼합기체의 혼합비에 따른 전자이동속도와 전자분포함수를 볼츠만 방정식을 이용한 이론 해석과 몬테칼로 시뮬레이션에 의해

해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의하여 전자 이동 속도를 평균 에너지가 평형 상태인 경우 Sample=14, L=2.6 [cm]에서 2항근사의 볼츠만 법에 의한 등방성분(F_0)과 비등방성분(F_1)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 사료된다.

향후 본 연구의 결과를 토대로 다양한 다른 기체에 대해서도 같은 과정을 통하여 전자의 수송 계수를 얻을 수 있을 것으로 확신하며, 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.

지금까지는 기체의 절연성능을 개선하기 위해 2종 기체의 혼합에 대해 연구해 왔다. 일반적으로 가스절연에 사용되는 기체절연물은 절연능력이 높아야 되나, 그 유해성 또한 고려해야만 한다. 앞으로의 연구는 이런 2종 기체의 연구 뿐 만 아니라 다원 혼합기체에 대한 전자수송계수의 연구가 필요할 것이라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF₆: I. Boltzmann equation analysis" Phys. D: Appl. Phys 21, pp.922-930, 1988.
- [2] 谷口敏幸 *et al.*, "ボルツマン方程式による運動量變換斷面 續推定に關して." 放電研究會資料, ED-86-116, pp.39~49, 1986.
- [3] S. Trajmar, A. Chutjian, "electron impact excitation of SF₆" J. Phys. B, Vol.10, pp.2943~2949, 1977.
- [4] "大森義行, 下妻光夫, 田頭博昭, SiH₄ ガスの電子衝突斷面 續および スウォームペラメータ" 電氣學會研究會資料, ED-86-114, HV-86-34, 1988.
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] C. Jacoboni and P. Lugli, "The Monte Carlo Method for Semiconductor Device Simulation", Springer Verlag-Wien, pp.1-4, 1989.
- [8] Philip. E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No.19, 1975.
- [9] 金相南 "SF₆-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, 2001
- [10] Y. Nakamura. "Transport Coefficients of Electrons and Negative Ions SF₆." J. Phys. D, Vol. pp. 1~36, 1981.
- [11] 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.
- [12] Y. Nakamura and M. Kurachi, "Electron Transport Parameters in Argon and its momentum transfer cross section" J. Phys. 21, pp.718~723, 1988.
- [13] 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.
- [14] 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
- [15] Arati Dasgupta and A. K. Bhatia, Scattering of electrons from Argon atoms" Phys. Rev. A. Vol. 32, No. 6, pp.3335 ~3341, 1985.
- [16] 下妻, 金子, 種里, "C-C₄F₈과 SiH₄ 가스의 電離係數測定", 電氣學會放電研究會, ED-83-86, 1983.
- [17] 金相南, "시뮬레이션에 의한 CF₄, CH₄, Ar 混合氣體에서 電子 에너지분포함수" 대한전기학회 논문집, 52P-1-2 pp.9~13, 2003
- [18] 金相南, "SiH₄-Ar혼합기체의 전자분포함수 해석" 대한전기학회 논문집 53P-1-2집. pp 65~69, 2004
- [19] M. S. Dincer and T. Aydin, "Simulation of limiting field behavior in electrons swarms in SF₆, N₂ gas mixtures" IEEE, transaction on dielectrics and electrical insulation, Vol. 1, No. 1, pp. 139~14 5, February, 1994.
- [20] A. Gilardini, "Low Energy Electron Collisions in Gases" John Wiley and Sons. Inc. pp.127~162. 1972

저 자 소 개



김 상 남 (金 相 南)

1951년 3월 21일생. 1978년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1980년 숭실대학교 대학원 졸업(석사), 2001년 동국대학교 대학원 졸업(공학박), 1978년~2009년 시립 인천전문대학 전기과 교수, 2010년~인천대학교 전기공학과 교수, 당학회 산업전기위원회 부회장
 Tel : 032-835-8439
 Fax : 032-835-4922
 E-mail : sn7332@incheon.ac.kr
 sn7332@hanmail.net