

SF₆+Ar 혼합기체의 전자수송특성 개선에 관한 연구

논문
11-1-11

A Study on the Improvement of the Electron Transport Properties in SF₆+Ar Mixtures Gas

하성철*, 김상남*, 유희영*, 서상현*, 임상원*, 전병훈*

(Sung-Chul Ha, Sang-Nam Kim, Heoi-Young Yu, Sang-Hyeon Seo, Sang-Won Lim, Byoung-Hun Chun)

Abstract

In this paper, the electron swarm parameters in the 0.5% and 0.2% SF₆+Ar mixtures are measured by time of flight method over the E/N(Td) range from 30 to 300(Td). The measurements have been carried out by the double shutter drift tube with variable drift distance from the cathod. A two-term approximation of the boltzmann equation analysis and Monte Carlo simulation have been also used to study electron transport coefficients. We have calculated W, ND_L, ND_T, α, η, α-η, and the limiting breakdown electric field to gas mixtures ratio in pure SF₆ gas and SF₆+Ar mixtures. The electron energy distribution function has been analysed in SF₆ gas and SF₆+Ar mixtures at E/N : 200(Td) for a case of the equilibrium region in the mean electron energy. The measured results and the calculated results have been compared each other.

Key words(중요용어) : Electron swarm parameters(전자군파라미터), Time of flight method(비행시간법), Monte Carlo simulation(몬테칼로 시뮬레이션), Electron energy distribution function(전자에너지 분포함수)

1. 서 론

SF₆ 가스는 전기적 부성기체로 전기절연성능과 소호매체로써 매우 우수한 특성을 가지고 있으므로 각종 고전압기기 및 차단기에 광범위하게 이용되고 있으며 더욱이 혼합기체의 전기적 절연내력의 질적 향상을 위하여 전자수송 특성의 정량적인 규명은 임계 절연파괴 전계 E/N(Td)에 의해서 절연평가특성을 결정한다.^{1,2)}

이것은 전자에너지 분포함수를 갖는 전자군과 하전입자군과의 충돌현상으로 나타나는 전자기동속도, 충돌방향의 확산계수, 전리, 부착 및 실효계수 등의 전자수송특성의 실험적, 이론적 계산에 의하여 정량적으로 산출된다. 따라서 전리된 혼합기체중의 운동량 변환단면적, 여기, 전리, 부착 및 진동단면적의 값을 이용하여 전자수송특성(Electron swarm parameter)을 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo

Simulation)법과 볼츠만의 Backward prolongation을 사용한 이론적 방법으로 계산하고 실험적으로는 TOF(Time of Flight)법의 전자도착 시간분포를 이용하여 구하였다. 이들 전자수송특성의 연구는 혼합기체의 전기절연가스의 특성평가, 소호특성 및 각종 고전압기기의 이용가능성 특히 최근에는 Si계의 예청가스로써 플라즈마 프로세싱의 중요한 가스의 하나로 이에 대한 기초적 물성연구와 전기적 특성을 체계적으로 확립하는데 목적이 있다.^{3,4,5)}

그리고 전자수송특성의 이론적인 해석을 위하여 SF₆와 Ar가스의 전자 충돌단면적은 Itoh, Ikuta²⁾, Bell, Nakamura^{6,7)} 등의 측정값을 이용하여 MCS, BEq법에 의한 simulation의 결과와 Double shutter drift tube의 실험장치를 이용하여 TOF의 전자도착 시간분포로 부터 산출된 실험결과를 이론치와 비교 검토하고 순수 SF₆기체와의 전자수송특성을 고찰한다. 더욱이 전자에너지 분포의 비등방성과 드리프트 속도의 전자부성특성이 나타나는 원인을 해석하고 그때의 전자 충돌단면적의 타당성에 대해서 검토한다. 그리고 실효전리계수 (α-η)/N < 0의 영역으로 부터 임계절연파괴 전계를 산출한다.

* : 동국대학교 전기공학과
연락처:서울시 중구 필동 3가 26
접수일자 : 1997년 8월 14일
심사완료 : 1997년 10월 2일

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 이용한 실험장치의 구성도를 그림1에 나타내었다.

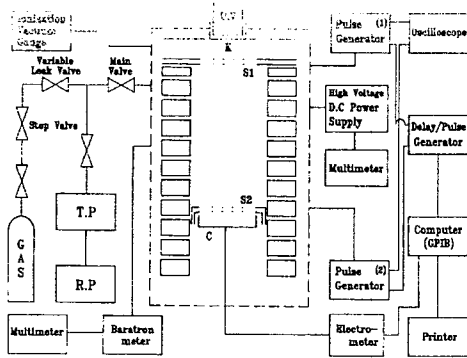


그림 1. 실험장치의 구성도

Fig. 1. Schematic diagram of experiment system.

실험장치의 구성은 크게 나누어 Double shutter drift tube 와 진공배기계, 기체도입계 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(mm)의 간격으로 구성되어 있다. 그리고 드리프트 거리는 1~10(cm)의 범위로 가변할 수 있도록 하고 다이얼게이지에 의하여 조정된다. 콜렉터(C)는 직경 82(mm)의 스텐레스 원판이고 Guidring은 내경 100(mm), 두께 9(mm)의 스텐레스 원판으로 전자가 이동영역을 평등전계 중에서 이동할 수 있도록 하였다. Drift tube 의 진공은 Turbo molecular pump(TCP 121 독일제)와 Rotary pump(Tokuda RP-180BG)를 이용하고 진공도 측정은 전리진공계 (HIG-BA)를 이용하였다. 또한 기체압력의 측정은 Baratron pressure gauge(MKS 220A, 10Torr)를 이용하여 1×10^{-6} (Torr)를 유지한 상태에서 기체도입계를 이용하여 소정의 압력으로 기체를 봉입한다. Collector전류의 측정은 측정범위 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-13}$ (A)의 범위를 Electronic pico Amperemeter(TR 8651 Takeda Riken)로 이용하고 이것을 전자계산기의 GP-IB Interface에 접속하여 전자도착시간분포로부터 메모

리된 데이터를 통계연산처리 프로그램으로 계산할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

2.2 실험방법

실험은 Double shutter drift tube를 이용하여 TOF(Time of Flight)법으로 하였다. 기압, 기체온도 및 E/N (E : 전계의 세기, N : 기체수밀도 $3.5353 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-3}$ 0°C 1 Torr)의 일정한 조건에서 전극 사이에 초기전자를 발생시켜 전리전류를 pico electrometer로 측정하였다. 그리고 진공도와 봉입기체의 압력측정에는 전리진공계와 바라트론(Baratron) 압력계를 이용하였다. 본 실험에서 shutter에 인가되는 펄스 폭은 60~350(ns)으로 펄스전압은 Pulse Regulator(S1 : 8013B, HP, S2 : PG230)에 의해서 인가하였다. 여기서 DC 펄스전압이 인가되지 않을 때는 shutter(S1, S2)에 전자가 통과 할 수 없도록 바이어스 되고 있으며 DC 펄스전압이 인가되는 순간에만 전자가 이동영역으로 드리프트되어 Collector에 도달한다. 본 측정에 사용한 혼합기체(SF₆+Ar) 중에서 E/N : 30~300(Td) P₀ = 0.1(Torr)의 범위에서 이동거리를 가변하면서 Computer에 GP-IB interface를 접속하여 양극에 얻어진 전자도착 시간 분포로부터 메모리된 데이터를 (1)식을 이용하여 전자군의 수송계수를 통계연산처리 프로그램으로 각종 전자 swarm parameter를 산출한다.

$$n(L, t) = \frac{n_0}{\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left[-\frac{(L - Wt)^2}{4D_L t} + (\alpha - \eta)Wt\right] \quad (1)$$

여기서 n₀는 t = 0 에서 음극의 전자수, W : 전자이동속도, D_L : 종방향확산계수, α : 제1전리계수, η : 부착계수를 나타낸다.

3. 전자 충돌단면적

3.1 SF₆의 전자 충돌단면적

본 연구에 이용한 SF₆의 전자 충돌단면적은 H.Itoh, et al.의 단면적Set을 사용하였으며 그림2에 나타내었다.²⁾ 이 SF₆의 전자 충돌단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착단면적 (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(eV)를 이용하였다. 그리고 탄성충돌에 의한 운동량 변환단면적(Q_m), 여기

단면적(Q_{ex}), 전리단면적(Q_i), 진동 여기단면적(Q_v) 및 전충돌단면적(Q_T) 등의 값을 이용하여 계산하였다.

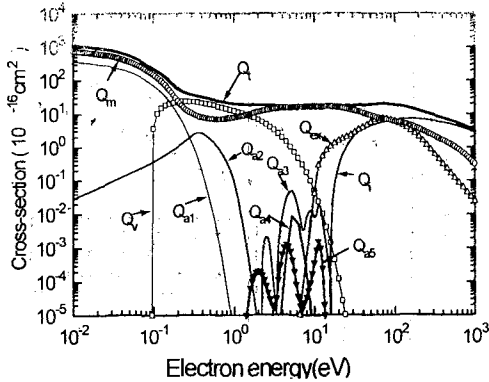


그림 2. SF₆ 가스의 전자 충돌단면적
Fig. 2. The collision cross sections of electrons in SF₆ gas.

3.2 Ar의 전자 충돌단면적

Ar의 전자 충돌단면적에 대한 운동량 변환단면적(Q_m), 여기단면적(Q_{ex}), 전리단면적(Q_i) 등을 그림3에 나타내었다.⁸⁾

이 Ar의 전자 충돌단면적은 저에너지 영역(0~0.23eV)에서 Ramsauer minimum을 갖는 운동량 변환단면적(Q_m)은 K.L.Bell, N.S.Scott의 계산값을 이용하였고 전자에너지 0.136~54.4eV 영역의 범위에서는 W.C.Fon의 측정값을 이용하였다.⁶⁾ 그리고 여기단면적(Q_{ex})은 허용대 준위의 여기단면적(3P_2 , 3P_1 ,

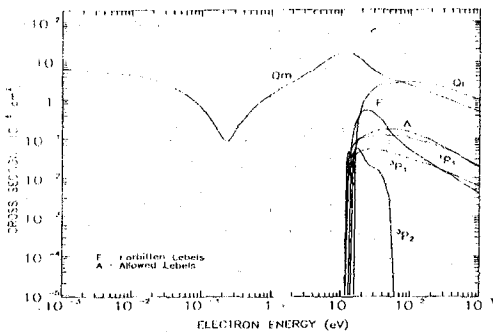


그림 3. Ar 가스의 전자 충돌단면적
Fig. 3. The collision cross sections of electrons in Ar gas

3P_0 , 1P_1)과 금지대 준위의 여기단면적(13.0~13.9eV)으로 분류하여 Y. Nakamura, Kurachi, Chútjian 등의 측정값을 이용하였고 전리단면적은 Donald Rapp이 측정한 결과를 이용하였다.^{7,9)}

4. 결과 및 고찰

4.1 전자도착 시간분포

그림4에서는 혼합기체중의 전자도착 시간분포의 측정결과중 하나의 예(SF₆+Ar 0.5%, 99.5% 혼합기체, 압력 $P_0=0.1$ Torr, $E/N = 300$ Td, drift distance = 1.2cm, 온도 = 300.15K)를 나타내었다.

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

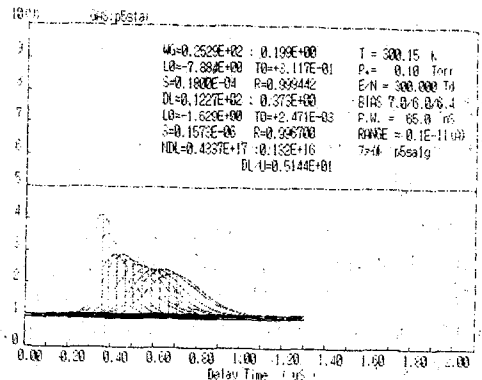


그림 4. SF₆+Ar 혼합기체중의 전자도착 시간분포의 측정예

Fig. 4. An example of arrival time spectra of electrons measured in SF₆+Ar mixtures.

4.2 전자기동속도

그림5에 나타난 전자 이동속도는 희가스 Ar에 미량의 분자가스 0.2%, 0.5%의 SF₆를 혼합한 SF₆+Ar 혼합기체중의 전자도착 시간분포에 의해서 측정하였다. 측정한 실측치와 Monte Carlo Simulation(MCS)으로 구한 이론치의 결과를 순수 Ar, SF₆가스의 전자기동속도와 비교 검토하였다.

그림의 $E/N = 30 \sim 300$ (Td)범위에서 E/N (Td)의 증가에 따라 순수 이론치와 혼합 실험치가 차이를 나타내고 있다. 특히 $E/N=30 \sim 150$ (Td)의 저영역범위에서 증감의 차이가 크고 그이상의 영역에서는 증감의 차이가 비교적 적었다. 이것은 E/N (Td)가 낮을

때 운동량단면적에 Ramsauer minimum 최소값을 갖는 Ar가스의 에너지영역에서 분자가스 SF₆의 충돌단면적이 크고 또한 대단히 큰 부착충돌의 영향과 드리프트 거리에 따라서 전자도착시간분포의 중심이동의 영향으로 전자수의 증감이 발생하기 때문에 전자이동속도의 혼합기체의 실측치가 순수 SF₆, Ar의 전자이동속도보다 증가하는 영향을 나타내었다.^{6,7,10)}

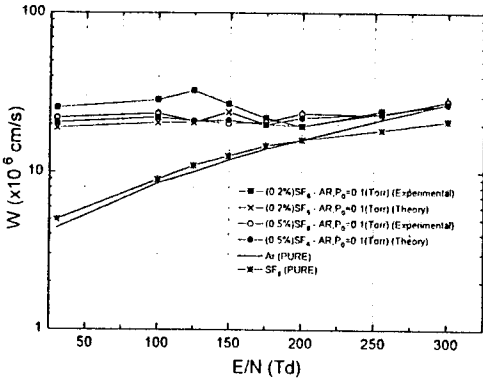


그림 5. SF₆+Ar 가스중에서 전자 이동속도
Fig. 5. The drift velocity of electrons in SF₆+Ar gas.

즉 전자이동속도는 저에너지 영역에서 분자가스의 혼합비에 따라서 분자가스의 비탄성 충돌단면적은 거의 기여하지 않는 것으로 생각된다. 한편 전계에 의하여 에너지를 받은 전자가 미소거리를 진행하는 동안에 충돌 전리하는 확률은 평균자유행정으로 나타난다. 따라서 평균자유행정은 기체압력(P₀)에 반비례하므로 저압력에서 평균자유행정과 전자에너지는 크기 때문에 전자이동속도가 증가하는 것으로 생각된다. 그리고 전자이동속도는 SF₆가스의 혼합비의 변화에 따라 낮은 에너지영역에서 부착단면적의 영향이 크므로 그 의존성이 크게 나타났으며 실효전리계수 $\alpha - \eta/N < 0$ 가 되는 임계절연과피 전계 E/N : 125, 175(Td)의 값으로 산출되어 순수SF₆의 값보다 감소하여 절연성능이 떨어지는 것으로 생각된다.

4.3 종방향 및 횡방향확산계수

그림6, 7는 종방향 및 횡방향확산계수를 나타낸 것이다. 이들의 측정치의 값은 혼합비에 따라서 E/N(Td)의 의존성은 크게 나타나지 않았으나 혼합기체의 높은 E/N(Td)영역의 전자도착 시간분포가 불안정하게 나타난 것으로 보아 정확한 ND_L, ND_T값으로 결정하기에는 어렵다고 생각된다. 그리고 혼합기체중의 전자의 확산은 부착계수 및 이동속도 등의

영향으로 하전입자밀도의 공간적 구배와 전계로 인하여 하전입자의 운동이 평형상태와 거의 균일한 밀도 분포를 나타낸 것으로 생각된다.¹¹⁾

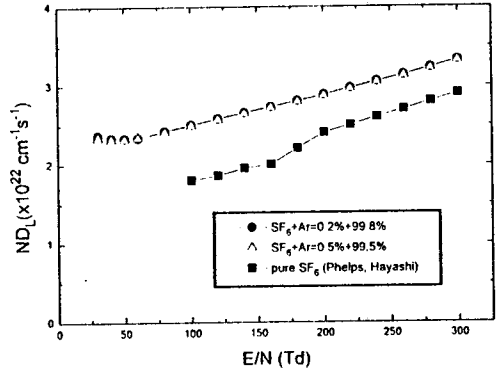


그림 6. SF₆+Ar 가스중에서 종방향 확산계수
Fig. 6. The longitudinal diffusion coefficients in SF₆+Ar gas.

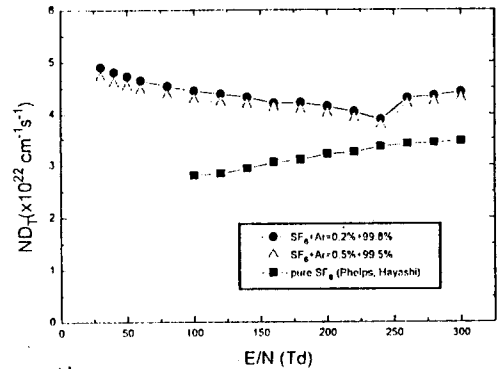


그림 7. SF₆+Ar 가스중에서 횡방향 확산계수
Fig. 7. The transverse diffusion coefficients in SF₆+Ar gas.

4.4 전리, 부착 및 실효전리계수

그림 8, 9, 10에 SF₆+Ar가스 중에서 전리계수 (α/N), 부착계수(η/N) 및 실효전리계수($\alpha - \eta/N$)를 E/N : 30~300(Td)범위에서 나타내었다. 본 연구에서 혼합가스중의 계산결과는 Phelps, M.Hayashi의 순수 SF₆가스 실험치와 같은 경향으로 증감하였고 혼합비의 영향으로 증감의 차이를 나타내었다.^{12,13)}

이것은 E/N(Td)이 낮은 영역에서의 전자의 운동은 부착단면적이 큰 분자에 부착하여 부이온의 형성과 Ar가스의 Ramsauer minimum을 갖는 운동량 변환단면적의 영향으로 전하는 전리되고 E/N(Td)가

높은 영역에서는 비탄성 충돌단면적에 의하여 전자의 운동에너지를 저하시키므로 전리는 증가된다고 생각된다.

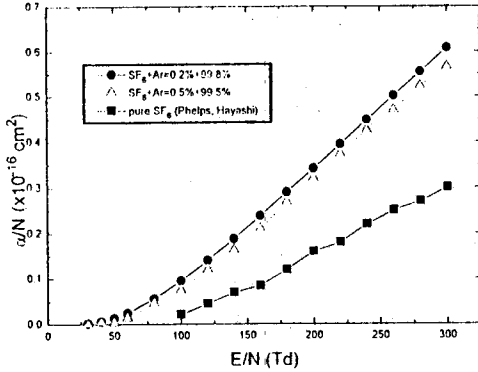


그림 8. SF₆+Ar 가스중에서 전리계수
Fig. 8. The ionization coefficients in SF₆+Ar gas.

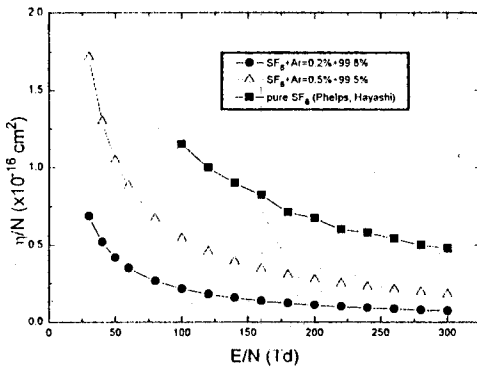


그림 9. SF₆+Ar 가스중에서 부착계수
Fig. 9. The attachment coefficients in SF₆+Ar gas.

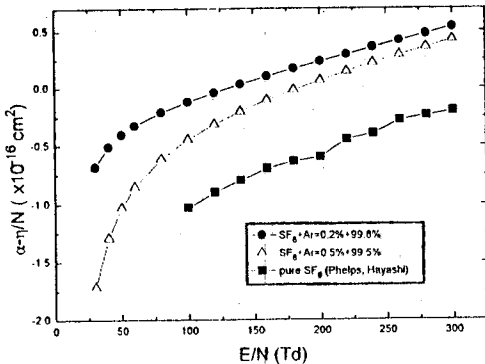


그림 10. SF₆+Ar 가스중에서 실효전리계수
Fig. 10. The effective ionization coefficients in SF₆+Ar gas.

한편 SF₆에 존재하는 대단히 큰 부착단면적의 영향으로 기체중에 발생한 전자를 부착하여 부이온이 되는 경향이 크므로 η/N 은 E/N의 증가와 더불어 감소하였다. 그리고 전리계수와 부착계수의 차로 계산되는 $(\alpha-\eta/N)$ 의 실효전리계수는 $\alpha-\eta=0$ 값을 갖는 E/N(Td)최소값 이하로 되면 부착특성이 우세하므로 전자의 충돌 전리는 효과적으로 이루어지지 않는다고 생각된다. 즉 실효전리계수 $(\alpha-\eta/N)$ 이 부(-)의 값을 나타내는 E/N : 30~130(Td) 범위에서 절연내력의 효과를 나타낼수 있으나 그이상의 영역에서는 혼합비에 따라서 절연내력의 효과를 나타내지 않았다.

4.5 전자에너지 분포함수

그림 11, 12는 순수 SF₆가스와 SF₆+Ar 혼합가스중에서 탄성 및 비탄성충돌을 고려하여 P₀=0.1(Torr)에서 E/N : 200(Td)에서 전자에너지 분포함수 F(ϵ)를 BEq와 MCS법으로 나타낸 것이다. 전계가 인가될 때 단일기체와 혼합기체 등을 이동하는 전자군의 에너지 분포함수는 어떤 조건에서 전자의 각 에너지에 대한 확률밀도와 전자와 분자와의 각 충돌 단면적이 방전현상으로 인하여 전자수송특성에 직접적으로 관련되는 물리량이다. 그 때 하전입자는 여러 종류의 에너지 성분을 갖는 기체분자가 열 평형 상태에서 Maxwell-Boltzmann 에너지 분포를 나타낸다. 전자가 전계에 의하여 운동할 때 샘플 14, 거리 L: 2.6(cm), 평균에너지 :7.3(eV) 및 E/N:200(Td)범위에서 2항 근사식에 의한 BEq, 및 MCS 법으로 전자를 추적하여 나타난 값은 순수기체와 혼합기체와의 전자에너지 분포함수는 평형 및 비평형상태로 변화하였다. F(ϵ)의 초기 값에서는 전자에너지가 증가하고

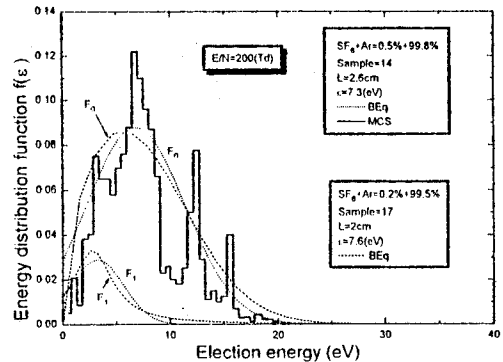


그림 11. SF₆+Ar 가스중에서 전자에너지 분포함수
Fig. 11. The energy distribution function of electrons in SF₆+Ar gas.

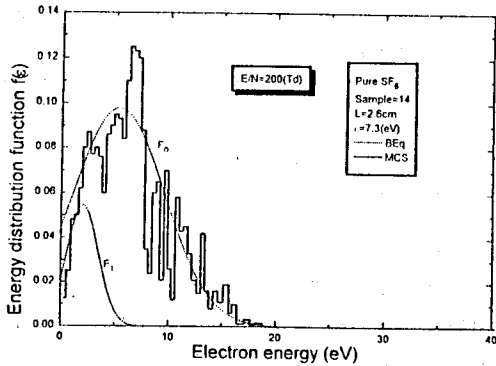


그림 12. SF₆+Ar 가스중에서 전자에너지 분포함수
 Fig. 12. The energy distribution function of electrons in SF₆+Ar gas.

높은 전자에너지 측에서는 감소하였다. 이와 같은 현상은 낮은 E/N(Td)에서 가스의 Ramsauer minimum이 존재하는 원인으로 생각된다. 또한 MCS법에 의하여 계산한 결과는 큰 차이가 나타났다. 볼츠만 방정식의 2항근사 해석에서 등방성분 F₀(ε)에 대하여 비등방성분 F₁(ε)의 값이 적은 결과를 나타냈으며 MCS법에 의한 결과의 차이는 전자수와 에너지가 높을 때는 에너지 분포는 감소하기 때문에 25(eV)이상에서 일치되고 있다.

5. 결 론

SF₆+Ar 혼합기체 중에서 전자수송특성은 이중서터 드리프트의 실험장치를 비행시간법의 원리로 이용하여 30 ≤ E/N ≤ 300(Td) 범위에서 측정하였고 MCS와 BEq에 의한 이론값의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 전자의 이동속도와 종횡방향의 확산계수를 전자도착 시간분포로 부터 측정하였고 전자 충돌단면적을 이용하여 전리, 부착, 실효전리계수 및 전자에너지 분포함수를 정량적으로 계산하였고 이들 수송특성 개선의 영향으로 혼합기체의 절연 파괴임계전압이 현저하게 감소되었음이 지배적이었다.

2. 전자기동속도는 상대 전계의 세기 E/N : 125~200Td 영역에서 순수 단일기체와 혼합기체의 차이가 나타났으며, 특히 부구배(NDC : Negative Differential Conductivity)특성이 나타남을 알수 있었다. 그리고 그 이상의 영역에서는 전리에 의한 전자 증배의 크기에 따라 증가됨을 확인하였다.

3. 전자에너지 분포함수는 등방성분(F₀)과 비등방성분(F₁)에서 현저한 차이를 나타내었고, 평균에너지가 평형상태인 경우 sample = 14, L = 2.6(cm)에서 계산한 MCS 에너지분포가 정점에서 큰 차이를 나타내었다. 이것은 전자가 여기에 의해서 에너지를 잃어버린 값이 다른 영역에 비해 큰 것으로 생각된다.

4. 전자기동속도는 순수SF₆가스에 비해 혼합비변화에 따라 낮은 에너지영역에서 그 의존성의 영향이 크게 나타났으며, 전리와 부착계수의 차이로 나타나는 실효전리계수 α-η/N < 0가 되는 임계절연 파괴 전계 E/N값은 125(Td), 175(Td)로 산출되었고, 이와 같은 값은 순수SF₆(E/N : 359Td)에 비해 현저하게 감소되었음을 확인하였다.

감사의 글

※ 본 연구는 1996년도 기초전력공학 공동연구소 신규과제(과제번호:96-016) 연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. V.N.Maller and M.S.Naidu, "Advances in high voltage insulation and arc interruption in SF₆ and vacuum", Pergamon Press, 1981
2. H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Taga shira, "Electron swarm development in SF₆ : I. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, pp.922-930, 1988.
- 3.菅野卓雄 "半導體 プラズ마 프로세스技術"(産業圖書), pp.38-50, 1993.
4. 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.
5. 몬테칼로법과 시뮬레이션(培風館), 1989.
6. 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.
7. Y.Nakamura and M.Kurachi, "Electron transport parameters in argon and its momentum transfer cross section" J.Phys.21, pp.718-723, 1988.
8. 하성철, 전병훈, 백승권, "몬테 칼로법을 이용한

- Ar가체의 전자수송계수에 관한 연구”, 한국 전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp.685-692, 1995.
9. Rapp D and Englander-Golden, J. chem. phys. 43, pp.1464-1489, 1965.
10. Arati Dasgupta and A.K.Bhatia, “Scattering of electrons from argon atoms” Phys. Rev.A. Vol.32, No. 6, pp.3335-3341, 1985.
11. 하성철, 서상현, “SF₆가스의 전자수송특성에 관한 몬테칼로 시뮬레이션”, 한국전기전자재료학회지, Vol. 9, No. 7, pp.660-667, 1996.
12. 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.4269-4277, 1988.
13. 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.