

SF<sub>6</sub>+Ar 混合氣體의 電離 및 附着係數에 關한 研究

The Study on the Electron Ionization and Attachment Coefficients in SF<sub>6</sub>+Ar Mixtures Gas

김상남\* 하성철\*\*  
(Sang-Nam Kim\* Sung-Chul Ha\*\*)

Abstract

In this paper, we describe the results of a combined experimental theoretical study designed to understand and predict the dielectric properties of SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>+Ar mixtures.

The electron transport, ionization, and attachment coefficients for pure SF<sub>6</sub> and gas mixtures containing SF<sub>6</sub> 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[%] SF<sub>6</sub>+Ar mixtures were measured by time-of-flight method, The results show that the deduced electron drift velocities, the electron ionization or attachment coefficients, longitudinal and transverse diffusion coefficients and mean energy agree reasonably well with the experimental and theoretical for a rang of E/N values.

Electron energy distribution functions computed from numerical solutions of the electron transport and reaction coefficients as functions of E/N.

We have calculated  $\alpha$ ,  $\eta$  and  $\alpha-\eta$  the ionization, attachment coefficients, effective ionization coefficients. and (E/N), the limiting breakdown electric-field to gas density ratio, in SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>+Ar mixtures by numerically solving the Boltzmann equation for the electron energy distribution, The results obtained from Boltzmann equation method and Monte Carlo simulation have been compared with present and previously obtained data and respective set of electron collision cross sections of the

1. 서 론

최근 국내외적으로 고도 산업과 경제 성장으로 전력 수요가 매년 증가하는 실정이다. 따라서 전력 전송의 고전압화, 대용량화 및 핵융합 등의 새로운 에너지 기술개발의 기초 과학 연구가 다각적으로 활발히 이루어지고 있는 추세이다. 한편 산업 발전에 따라 전력 계통의 대용량화, 송전 전압의 초고압화에 의하여 각종 전기 기기에 방전 현상이 증대한 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][2][3].

본 연구에서는 실험적으로 불활성 기체(Ar)에 미량의 분자가스(SF<sub>6</sub>:0.2[%],0.5[%])을 혼합하여 E/N:30~300[Td], E : 전계의 세기, N : 기체 분자수 밀도  $3.5353 \times 10^{16}[\text{cm}^{-3}]$ , 0[°C], 1[Torr], Po : 0.1~5.0[Torr], 셔터 펄스폭 60~350[ns], 드리프트 거리 1~10[cm], 전류 0.1~10<sup>-12</sup>[A]의 범위에서 전자 도착시간 분포의 TOF법으로 전자 수송 계수를 측정하였다.

한편 이와 같은 측정을 위하여 진공 챔버의 진공도는 1×10<sup>-6</sup>[Torr]으로 배기 시키고 기체의 압력 측정은 바르톤 압력계(MKS 220[A], 10[Torr])를 이용하였다[9][10].

실험 장치에 전자계산기를 GP-IB로 접속시켜 데이터를 통계 연산 처리 프로그램으로 계산할 수 있도록 측정 시스템을 구성하였다[4][5].

\*인천전문대학 전기과  
(인천광역시 남구 도화동235 인천전문대학)  
Fax : 032-760-8895

E-mail : sn7332@www.icc.ac.kr  
\*\* 동국대학교 전기공학과 교수

## 2. 실험장치 및 방법

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.

실험은 Double shutter drift tube를 이용하여 TOF(Time of Flight)법으로 하였다. 기압, 기체온도 및 E/N (E:전계의 세기, N:기체수밀도  $3.5353 \times 10^{-16}$  [cm<sup>-3</sup>] 0[°C] 1 [Torr])의 일정한 조건에서 전극사이에 초기전자를 발생시켜 전리전류를 pico electro meter로 측정하였다. 그리고 진공도와 봉입기체의 압력측정에는 전리진공계와 바라트론압력계를 이용하였다. 본 실험에서 shutter에 인가되는 펄스 폭은 60~350[ns]으로 펄스전압은 Pulse Regulator( S1 : 8013B, HP, S2 : PG230 )에 의해서 인가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 전자도착 시간분포

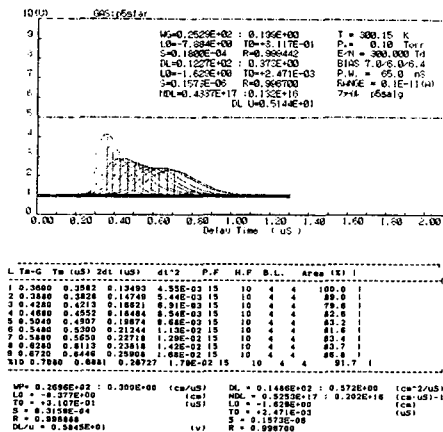


그림 3.1 SF<sub>6</sub>+Ar 혼합기체중의 전자도착 시간분포의 측정예  
Fig. 3.1 An example of arrival time spectra of electrons measured in SF<sub>6</sub>+Ar mixtures

그림3.1에서는 혼합기체중의 전자도착 시간분포의 측정결과 중 하나의 예(SF<sub>6</sub>+Ar 0.5[%], 99.5[%] 혼합기체, 압력 P<sub>0</sub>=0.1[Torr], E/N = 300[Td], drift distance = 1.2[cm], 온도 = 300.15[K])를 나타내었다.

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

### 3.2 전리, 부착 및 실효전리계수

그림 3.2, 3.3, 3.4에 SF<sub>6</sub>+Ar가스 중에서 전리계수 ( $\alpha/N$ ), 부착계수( $\eta/N$ ) 및 실효전리계수( $\alpha-\eta/N$ )를 E/N : 30~300[Td]범위에서 나타내었다.

본 연구에서 혼합가스중의 계산결과와 A.V. Phelps, M.Hayashi의 순수 SF<sub>6</sub>가스 실험치와 같은 경향으로 증감하였고 혼합비의 영향으로 증감의 차이를 나타내었다[6]~[11].

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.

한편 SF<sub>6</sub>에 존재하는 대단히 큰 부착단면적의 영향으로 기체중에 발생한 전자를 부착하여 부이온이 되는 경향이 크므로  $\eta/N$ 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 되게 충분치 않으면 전

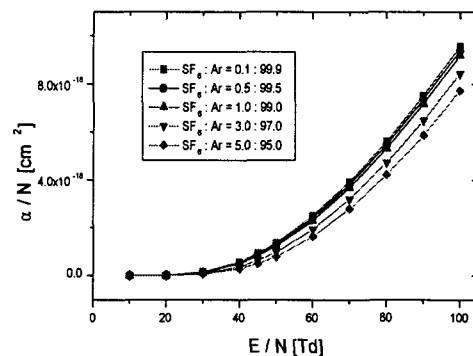


그림 3.2 SF<sub>6</sub>+Ar기체 중에서 전리계수  
Fig. 3.2 The ionization coefficients in SF<sub>6</sub>+Ar gas

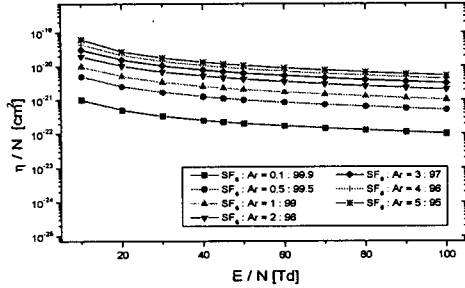


그림 3.3 SF<sub>6</sub>+Ar기체중에서 부착계수  
Fig. 3.3 The attachment coefficients in SF<sub>6</sub>+Ar gas

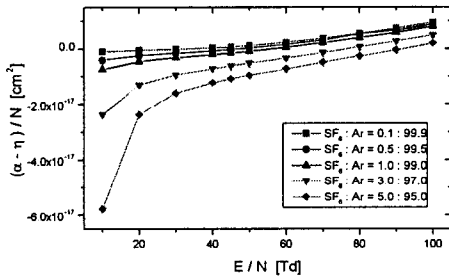


그림 3.4 SF<sub>6</sub>+Ar기체 중에서 실효전리계수  
Fig. 3.4 The effective ionization coefficients in SF<sub>6</sub>+Ar gas

자의 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.

### 3.3 전자에너지 분포함수

그림 3.5은 SF<sub>6</sub>+Ar 혼합가스 중에서 탄성 및 비탄성충돌을 고려하여 P<sub>0</sub>=0.1[Torr]에서 E/N : 200 [Td]에서 전자에너지 분포함수 F( $\epsilon$ )를 BEq와 MCS 법으로 나타낸 것이다. 전계가 인가될 때 단일기체와 혼합기체 등을 이동하는 전자군의 에너지 분포함수는 어떤 조건에서 전자의 각 에너지에 대한 확률 밀도와 전자와 분자와의 각 충돌 단면적이 방전현상으로 인하여 전자수송특성에 직접적으로 관련되는 물리량이다. 그 때 하전입자는 여러 종류의 에너지

성분을 갖는 기체분자가 열평형 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 2사항 근사식에 의한 BEq, 및 MCS 법으로 전자를 추적하여 나타난 값은 순수기체와 혼합기체와의 전자에너지 분포함수는 평형 및 비평형상태로 변화하였다. F( $\epsilon$ )의 초기 값에서는 전자에너지가 증가하고 높은 전자에너지 측에서는 감소하였다.

이와 같은 현상은 낮은E/N에서 가스의 Ramsauer minimum 이 존재하는 원인으로 생각된다.

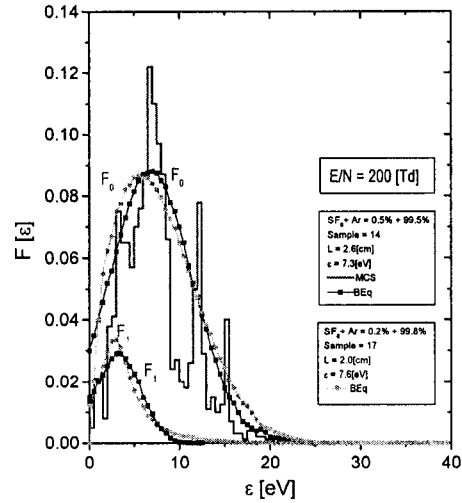


그림 3.5 SF<sub>6</sub>+Ar기체중에서 전자에너지 분포함수  
Fig. 3.5 The energy distribution function of electrons in SF<sub>6</sub>+Ar gas

또한 MCS 법에 의하여 계산한 결과는 큰 차이가 나타났다.

볼츠만 방정식의 2항근사 해석에서 등방성분 F<sub>0</sub>( $\epsilon$ )에 대하여 비등방성분 F<sub>1</sub>( $\epsilon$ )의 값이 적은 결과를 나타냈으며 MCS법에 의한 결과의 차이는 전자수와 에너지가 높을 때는 에너지 분포는 감소하기 때문에 25[eV]이상에서 일치되고 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 탄성 및 비탄성 충돌 단면적과 전리증식의 전자군을 형성하는 비교적 낮은 E/N[Td] 영역

에서 혼합기체의 혼합비에 따른 전리, 부착, 실효전리계수 및 전자 Swarm parameter(수송계수)를 볼츠만 방정식을 이용한 이론 해석과 몬테칼로 시뮬레이션 그리고 전자도착 시간분포를 측정하는 실험장치에 의해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1. 기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의한 전자 Swarm관측원리에 따라 도출한 전리계수( $\alpha$ ), 전자부착계수( $\eta$ ), 실효전리계수( $\alpha-\eta$ ), 등으로부터  $\alpha = \eta$  되는 임계환산전계( $E/N$ )lim에서 혼합기체의 절연 내력을 구하였다.

2. SF<sub>6</sub>+Ar 혼합기체의 절연 내력은 순수 SF<sub>6</sub>에 비해 25.84[%]으로 나타났으며 혼합비의 증가에 따라 그 값이 증가하는 경향을 확인 하였다.

3. SF<sub>6</sub>, Ar 순수기체, 및 SF<sub>6</sub>+Ar 혼합기체 중에서 E/N=30~300[Td]범위에서 전자 Swarm parameter(수송계수) 즉 전자기동속도, 특성에너지, 전자 평균 에너지 및 종·횡 방향 확산계수를 구하였다.

특히 전자 이동 속도의 계산한 결과는 낮은 E/N[Td]범위에서는 실험 값과 거의 일치하였으나 높은 E/N:125~300[Td]범위에서는 부구배(NDC:Negative Differential Conductivity)현상이 나타났다. 그리고 낮은 에너지 영역에서는 순수 SF<sub>6</sub>기체에 비하여 SF<sub>6</sub>+Ar혼합기체의 혼합비 변화에 따라서 그 의존성의 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

4. 전자 에너지 분포 함수는 평균 에너지가 평형 상태인 경우 Sample=14, L=2.6[cm]에서 등방성분(F<sub>0</sub>), 비등방성분(F<sub>1</sub>)을 2항근사의 볼츠만 법과 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 값은 현저한 차이를 나타내었으며 이것은 전자가 여기에 의해서 에너지를 잃어버린 값이 다른 영역에 비해 큰 것으로 생각된다. 한편 전자 Swarm연구에 이용한 전자 충돌 단면적의 타당성을 확인하였다.

향후 본 연구의 결과를 토대로 다양한 다른 기체에 대해서도 같은 과정을 통하여 전자의 수송 계수를 얻을 수 있을 것으로 확신한다. 이렇게 얻은 계수의 data를 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 물질

을 제거시키는 배기 가스 처리 문제에도 응용할 수 있다고 본다.

#### 참고 문헌

- [1] V.N.Maller and M.S.Naidu, "Advances in high voltage insulation and arc interruption in SF<sub>6</sub> and vacuum", Pergamon Press, 1981
- [2] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF<sub>6</sub> : 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] 몬테칼로法 と シミュレーション(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] Arati Dasgupta and A.K.Bhatia, "Scattering of electrons from Argon atoms" Phys. Rev.A. Vol.32, No. 6, pp.3335-3341, 1985.
- [9] 하성철, 서상현, "SF<sub>6</sub>가스의 전자수송특성에 관한 몬테칼로 시뮬레이션", 전기전자재료학회지, Vol. 9, No. 7, pp.660-667, 1996.
- [10] 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.
- [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.

본 연구는 인천전문대학 교내 연구비 지원에 의한 논문임