

論 文
6-6-3

SF₆가스의 전자이동속도 측정 및 수송계수 해석

The Measurement of Electron Drift Velocity and Analysis of Transport Coefficients in SF₆ Gas

하 성 철*, 하 영 선*, 윤 상 호*, 전 병 훈*, 백 승 권**
 (Sung-chul Ha, Young-sun Ha, Sang-ho Yoon, Byoung-hun Chun,
 Seung-Kwon Paek)

요 약

본 연구에서는 SF₆가스의 전자이동속도를 더블히트파이프 실험장치를 이용하여 유도전류법에 의해 실험적으로 측정하였다. 그리고 전자수송계수의 정량적인 산출은 볼츠만 수송방정식의 Backward-Prolongation을 이용하여 계산하고 해석하였다. 이때 전자에너지 분포함수와 전리 및 부착계수를 구하고 운동량변환단면적을 결정하였다. 그리고 실험적으로 측정된 SF₆가스의 전자이동속도와 계산된 전자수송계수를 비교 검토하여 해석함으로써 절연체의 기초적인 물성자료로 사용할 수 있다.

Abstract

In this paper, experimentally electron drift velocity is measured in SF₆ by Induced Current method, using Double Heat Pipe. And quantitative production of electron transport coefficient is calculated by Backward-Prolongation of Boltzmann equation. Then electron energy distribution and ionization, attachment coefficients are calculated, and momentum transfer cross-section is determined. And this paper can use the electron drift velocity by experimentally measured and electron transport coefficients as a basic data of an insulator by comparing investigating.

* : 동국대학교 전기공학과

** : 인제대학교 전자공학과

接受日字: 1993年 7月 30日

1. 서 론

기체방전의 성질을 파악하기 위하여 전계를 인가하면 전자와 분자사이의 충돌단면적과 그의 기체중에서 전자군(Electron swarm)의 파라미터는 전자의 에너지 분포함수를 매개로 하여 서로 밀접한 상호관계가 나타난다.

SF₆가스는 전자에너지가 $0(\text{eV}) \leq \epsilon \leq 12$ (eV)의 범위에서 가장 큰 부착 단면적 $3.8 \times 10^{-14}(\text{cm}^2)$ 을 가지며 방전으로 생성되는 부이온(SF₆⁻, SF₅⁻, F⁻)이 형성함으로 전계가 인가되어도 높은 에너지 상태에 도달할 수 없고 전리가 일어나지 않고 따라서 질소나 공기보다 높은 절연특성이 유지되므로 넓은 범위의 고전압용으로 이용되고 있는 실정이

다.⁽³⁾

특히 절연능력과 소호작용이 우수한 SF₆ 가스의 물성적 특성을 정량적으로 산출하는 것은 기체절연내력의 향상을 위하여 반드시 규명되어야할 기초적 물성연구의 필요성으로 본다.

따라서 약전리 기체중에서의 하전입자의 전리계수, 부착계수, 전자이동속도, 평균 및 특성에너지 등의 수송계수를 해석할 필요가 있으며, 이와 같은 수송계수의 해석은 운동량변환단면적, 여기 단면적, 전리 부착 단면적 및 전자에너지분포함수에 대한 정확한 값이 필요하다.

특히 하전입자들이 갖는 에너지 분포함수를 산출함으로써 각종 충돌단면적을 결정할 수 있고, 전자이동속도를 비롯한 각종 전자수송계수를 계산할 수 있다. 원리적으로 S. S.T(Steady State Townsend), P.T(Pulsed Townsend), T.O.F(Time of Flight), D.S(Double Shutter) 및 I.C.M(Induced Current Method)법 등의 실험방법으로 전자이동속도가 구하여 진다.⁽²⁾ 따라서 이들 전자수송계수의 정량적인 산출은 기체절연재료의 성능향상, 전기적 성질의 해석과 예측을 하는데 매우 중요한 것이며 특히 근래에 SF₆가스는 우수한 전기절연재료, 가스절연개폐장치(GIS), 가스 차단기(GCB), 가스절연전선로(GIL) 및 초고압 전력기기의 절연체로 널리 이용되고 있으나 절연체의 물성적 성질에 대해서는 잘 알려지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 2단 배기 시스템을 구성하여 2.0×10^{-6} (Torr)의 진공도를 유지하는 진공 챔버와 측정회로를 설계 제작하여 상대전계의 세기 $1.0(V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}) \leq E/P \leq 200(V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1})$, 온도 300(°K)의 범위에서 유도전류법을 이용하여 SF₆가스의 전자이동속도를 실험적으로 측정하였다.

그리고 이론적인 해석은 볼츠만 수송방정식을 Backward-Prolongation에 의하여 전자계산기(Cyber.940)에 의하여 연산처리하여 운동량변환단면적을 결정하고, 전자에너지 분포함수와 수송계수를 정량적으로 산출하여 그에 미치는 영향을 고찰하였다.⁽¹⁴⁾

따라서 본 연구에서는 순수 SF₆가스의 $1.0 \leq E/P \leq 200(V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1})$ 범위에서 SF₆가스의 운동량변환단면적(Q_m)의 값을 반복 수행하여 가장 타당성 있는 Q_m값을 결정하여 전자군의 수송 파라미터를 계산하고 이론적, 실험적 방법으로 구한 전자이동속도 결과에 대하여 해석하였으며, 약전리 기체의 성질을 표현하는 가장 기본적인 전리계수와 부착계수의 계산 결과에 대하여 검토한다.

전자이동속도는 유도전류법에 의하여 E/P (20~200(V·cm⁻¹·Torr⁻¹))범위에서 Paranjpe 및 Aschwanden등이 측정한 결과와 거의 같은 경향을 나타내었다. 그리고 전리계수(α/P)의 계산값은 Aschwanden 및 Siddagengappa의 실측값과 거의 일치하고 또한 부착계수(η/P)의 계산값은 E/P의 증가와 더불어 Maller, Naidu의 실측값은 본 연구의 계산결과보다 감소하였다. 이것은 SF₆ + e → SF₆⁻으로 나타나는 부착단면적만을 고려하여 산출한 결과이며 전자가 분자에 부착하여 부이온을 만들기 때문이라고 생각된다. 또한 탄성 및 비탄성 충돌을 고려한 전자의 운동량변환단면적은 Hayashi, Novak의 값보다 에너지가 3(eV)~20(eV)범위에서 본 연구의 계산값이 증가하였다. 이와 같은 차이는 예측한 단면적의 시행오차와 전자이동속도의 실험적 조건으로 나타난 것이라고 생각된다.

특히 SF₆가스중에서 약전리 기체의 성질을 정확히 파악할 수 있는 중요한 기초자료로 많이 이용할 것이다.

2. 실험 장치

본 연구에 이용한 실험장치는 크게 분류하면 드리프트 튜브(Drift Tube), 진공배기계, 가스도입계 및 측정회로로 나누어진다. 사진 1은 본 실험에 사용한 실험장치의 전경을 나타낸 것이다. 또한 본 실험의 측정에 이용한 더블히트 파이프의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

이 더블히트파이프의 동작은 액체의 증발(가열)로 증기의 이동(압력차)과 응축(흡열)

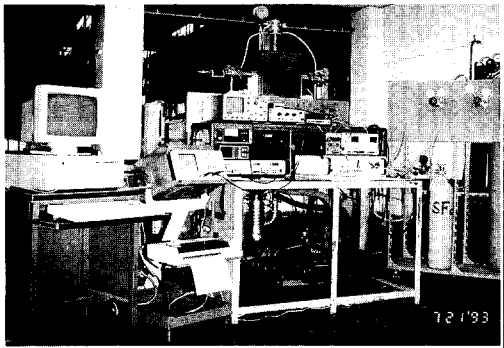


사진 1 실험장치의 전경
Photo.1 Photograph of Experiment Device

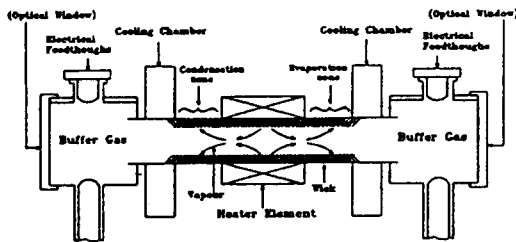


그림 1 더블 히트 파이프의 개략도
Fig. 1 Schematic Diagram of Double Heat Pipe

으로 액체의 이동(위크내의 모세관 현상)의 과정을 연속적으로 되풀이 하면서 열을 증발잠열의 형태로 수송하는 것이다.⁽¹⁾ 더블히트 파이프의 재질은 스테인레스 스틸 SUS 304이며 두께 1(mm), 외경 34(mm), 길이 600(mm)의 원통형으로 내벽은 120(mesh/inch)의 위크(Wick)로 2중 삽입되도록 제작하였다. 위크의 윗부분에서는 증발잠열을 방출하여 응축된 증기를 모세관의 힘으로 아래부분인 가열부에는 액체를 공급하여 증발과 응축의 과정을 연속적으로 작용한다. 히트 파이프의 양끝은 탈착가능한 부분으로 오-링(O-ring)을 이용하여 밀폐되도록 하였다.

본 연구에 이용된 Double Heat Pipe는 금속증기중에서의 이동속도를 측정하는데 주로 사용되고 있지만 본 실험에서는 E/P(300°K)를 유지하기 위하여 Heat Pipe의 증기압 곡선에 의한 온도를 변화시켜 미세한 압

력을 조정하였다.

본 실험 장치에 사용된 flow meter에 의하여 일차 압력 조정후 Heat Pipe의 온도 조정에 의하여 동일한 E/P조건하에서 반복 실험하여 실험값의 신뢰도를 유지하였다.

예를 들면

$$P_{300} = \frac{300}{T} P \text{ 이고,}$$

E/P₃₀₀ = (V/d)/P₃₀₀에서 동일한 E/P를 유지하려면 전압 V를 변화시켜도 가능하다. SF₆기체중에서는 부작에 의한 영향이 크고 실제 기체의 압력이 3 Torr이상에서는 측정이 곤란하므로 압력에 의한 영향이 크고 따라서 전압 V를 변화시켜 E/P를 동일하게 유지 하면 실험조건이 변화되어 실험값의 신뢰도의 유지가 곤란하다. 그러므로 동일한 실험조건을 유지하려면 일차 flow meter로 Drift Tube중의 압력을 실험조건에 근사하게 조정한 후(미세조정이 불가능 함) Double Heat Pipe의 Heater에 의하여 Drift Tube내의 온도를 변화시켜 동일한 P₃₀₀을 유지시켜야 한다.

두번째는 Drift Tube내의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 설치하는 방법중 가장 적당한 방법인 D.H.P에 사용된 방법이 가장 신뢰도(Drift Tube내에 설치하면 정전용량에 의하여 평등전계의 유지가 곤란하다.) 유지가 확실한 방법이다.

또한 그림 2는 진공배기계의 개략도를 나타낸 것이다.

진공계의 배관은 실리콘 오일 마노메타(Manometer)와 가스용기에 접속되어 있고, 광학창 부분에 도입 단자가 설치되어 있다.

오-링은 냉각수의 순환으로 냉각되며 진공실에는 히터의 전류단자 및 열전대(Chromel-Alumel)도입단자가 설치되어 이것으로 히트 파이프의 온도분포와 증기온도가 측정된다.

히트 파이프를 가열하기 위하여 히터용기를 아래부분에 세라믹으로 하였고 가열선은 직경 0.8(mm)의 니크롬선을 사용하여 전계가 되도록 발생하지 않도록 무유도로 배치하였다. 히터의 전원은 AC 100(V)를 슬라이

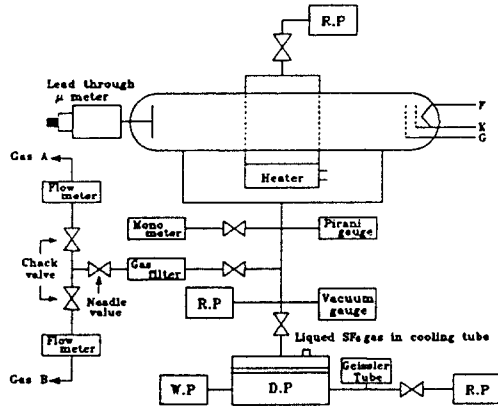


그림 2 진공계의 개략도
Fig. 2 Schematic Diagram of Vacuum system

드 저항기로 전력을 변환시켰다. 전자이동속도를 측정하기 위하여 전극계는 초기전자를 공급할 수 있도록 휠라멘트를 직경 0.15(mm)의 텅스텐을 사용하였고 전자 셔터와 음극(K), 양극(C), 휠라멘트 스크린(Fs)(전자 공급의 효율을 높임)등 0.32(mm), 0.2(mm)인 니크롬선으로 만들었다. 셔터는 전자가 양극을 향하여 흐르지 않도록 하기 위함이고 음극을 부로 바이어스 시키고 셔터-캐소드(Shutter-Cathode)간에 어떤 정펄스가 인가되었을 때에만 펄스상태의 전자가 이동영역으로 방출되도록 하였다. 또 압력계는 유면차 12.5(mm)가 1(Torr)에 해당하는 실리콘 오일(HIVAC F-5)을 넣은 U자형 오일마노미터를 제작하여 압력을 측정하였다.

그리고 진공 배기계는 회전 및 확산 펌프에 의하여 2×10^{-6} (Torr)로 배기하고 진공도 측정은 전리진공계(Phillips 307)를 사용하였다. 히트 파이프를 충분히 배기한 후에 SF₆가스를 소정의 압력(Baratron Type 127 A)으로 측정하여 충전시키고 열평형 상태로 유지하기 위하여 외측 열원장치를 이용하여 증발과 응축으로 열을 이동영역으로 수송 전달 하도록 하였다.

3. 실험 및 해석방법

3-1. 실험 방법

기체중에서 전자의 이동속도를 측정하는 방법으로는 P.T(Pulsed Townsend)법, S.S.T(Steady State Townsend)법, T.O.F(Time of Flight)법, D.S(Double Shutter)법 및 I.C.M(Induced Current Method)법 등이 있다.⁽²⁾

본 연구에 이용한 측정회로의 개략도를 그림 3에 나타내었다.

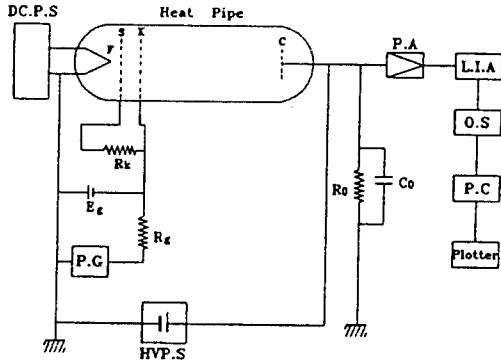


그림 3 측정회로의 개략도
Fig. 3 Schematic Diagram of Measuring system

본 실험에서는 열전자의 영향을 받지 않는 유도전류법을 이용하여 평행평판 전극사이에 인가한 전자와 기체분자의 충돌전리 및 부착에 의하여 발생 생성되는 전자와 부이온이 전극사이를 이동하여 음극에 전류가 유도된다.

이때 실험장치의 균일한 온도분포를 유지하기 위하여 더블 히트 파이프(Double Heat Pipe)를 이용하였고 기압, 기체 온도, E/P 및 진공도 등의 일정조건에서 초기전자를 발생시켜 전자의 이동속도를 측정하였다.

즉 휠라멘트(F)에서 열전자가 공급되고, 전자는 셔터와 그리드 사이에 인가한 전압에 의해 저지되어 셔터에 정펄스를 인가할 때 펄스상의 전자군이 주기적으로 이동영역에 주입된다. 이 드리프트 공간에 주입된 전자군이 인가된 전계와 더불어 확산하면서 양극으로 이동되고 그 사이의 전류는 부유용량에 의하여 적분된다. 전리증식이 없을 때는 부유용량의 단자전압은 직선적으로 상승하고 전자군이 양극에 도착후 부유용량에

축적된 전하는 고저항(R)을 통하여 방전하고 단자전압은 감소한다.

서터에 정펄스를 주기적으로 인가하면 단자전압은 그의 주기로 되풀이 된다. 이때 전압신호는 프리앰프(Pre Amp.)와 락 인 앰프(Lock in Amp.)를 거쳐 디지털 오실로스코프(Digital Oscilloscope, 2430 Tektronix)로 관측하였고, 스크프와 GP-IB 인터페이스(Interface)로서 접속하여 측정값을 구하였다. 즉 전극간에 정펄스를 인가하여 전자군이 양극에 도달하는데 걸리는 시간은 전자가 이동영역을 주행하는데 필요로 하는 시간과 일치하며 이 신호파형이 직선적으로 상승하다가 CR의 시정수로 감소하기 시작할 때까지의 교점을 전자의 이동속도 시간(Td)으로 하여 전자기동속도를 측정하였으며, 측정된 출력전압파형의 예는 그림 (3-1)과 같다.

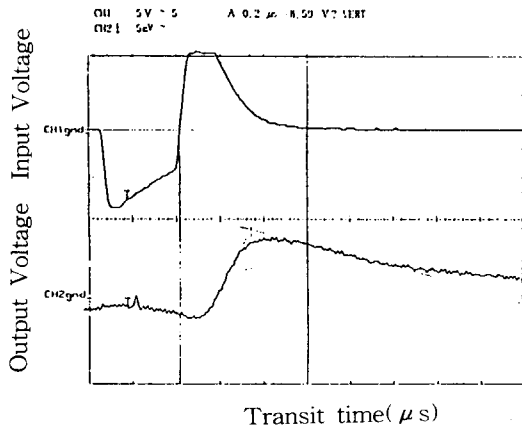


그림 3-1 출력전압파형의 예
Fig. 3-1 A typical example of output voltage waveform

3-2. 해석 방법

평행평판 전극간 정상상태의 평행영역에서 전자의 수송계수 해석은 부착을 고려한 Thomas가 제안한 볼츠만 방정식을 이용하였다. 해석에 이용한 볼츠만 방정식에서는 방전관내의 전자에너지 ϵ , 위치 x , 시간 t 에서 전자밀도를 $n(\epsilon, x, t)$ 로 하면 (0, ϵ)사이 존재하는 전자밀도의 증가율은 충돌에 의한 것 $R_c(\epsilon)$, 전계의 가속에 의한 것 $R_E(\epsilon)$, 실

제공간의 이동에 의한 것 $R_X(\epsilon)$, 부착에 의하여 소멸한 것 $R_a(\epsilon)$ 의 제로 다음과 같이 나타낸다.⁽³⁾

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^\epsilon n(\epsilon, x, t) dt = R_c(t) + R_E(t) + R_X(t) - R_a(t) \dots\dots\dots(1)$$

여기서

$$R_c(t) = VN \frac{2m}{M} Q_m(\epsilon) \epsilon^{3/2} n(\epsilon, x, t) + VN \int_\epsilon^{\epsilon + \epsilon_m} \epsilon^{1/2} Q_{ex}(\epsilon) n(\epsilon, x, t) d\epsilon VN$$

$$\int_\epsilon^{\epsilon + \epsilon_i} \epsilon^{1/2} Q_v(\epsilon) n(\epsilon, x, t) d\epsilon + VN \left(\int_\epsilon^{[\epsilon/(1-\Delta) + \epsilon_i]} + \int_\epsilon^{[\epsilon/\Delta + \epsilon_i]} \right) \epsilon^{1/2} Q_i(\epsilon) n(\epsilon, x, t) d\epsilon \dots\dots\dots(2)$$

$$R_E(t) = -E_i(\epsilon, x, t) \dots\dots\dots(3)$$

$$R_X(t) = -\frac{\partial}{\partial X} \int_0^\epsilon i(\epsilon, x, t) d\epsilon \dots\dots\dots(4)$$

$$R_a(t) = VN \int_0^\epsilon \epsilon^{1/2} (Q_{SF_6^-}(\epsilon) + Q_{SF_5^-}(\epsilon) + Q_{F^-}(\epsilon)) n(\epsilon, x, t) d\epsilon \dots\dots\dots(5)$$

$$i(\epsilon, x, t) = \frac{V\epsilon^{1/2}}{3NQ_T} (E\epsilon^{1/2} \frac{\partial}{\partial \epsilon} n(\epsilon, x, t) \epsilon^{-1/2} + \frac{\partial n(\epsilon, x, t)}{\partial X}) \dots\dots\dots(6)$$

그리고 전리와 부착을 고려하고 전자의 이탈을 무시한 전자에너지 분포함수 $F(\epsilon)$ 은 다음과 같이 나타낸다.

$$\Phi(\epsilon) + \frac{E\epsilon^{1/2}(\alpha - \eta)}{3NQ_m} F(\epsilon) + (\alpha - \eta) \int_0^\epsilon \left(\frac{E\epsilon}{3NQ_m} \frac{\partial}{\partial \epsilon} (F(\epsilon)\epsilon^{-1/2}) + \frac{(\partial - \eta)\epsilon^{1/2}}{3NQ_m} F(\epsilon) \right) d\epsilon = 0 \dots\dots\dots(7)$$

여기서

$$\Phi(\varepsilon) = \frac{2m}{M} N Q_m \varepsilon^{3/2} F(\varepsilon) \frac{E^2 \varepsilon}{3 N Q_m} \left(\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \right) (F(\varepsilon) \varepsilon^{-1/2}) + \sum_j N \int_{\varepsilon}^{\varepsilon + \varepsilon_{vj}} \varepsilon^{1/2} Q_{exj}(\varepsilon) F(\varepsilon) d\varepsilon + N \left(\int_{\varepsilon}^{\varepsilon/(1-\Delta) + \varepsilon_i} \varepsilon^{1/2} Q_i(\varepsilon) F(\varepsilon) d\varepsilon - N \int_{\varepsilon}^{\varepsilon/\Delta + \varepsilon_i} \varepsilon^{1/2} Q_a(\varepsilon) F(\varepsilon) d\varepsilon \right) \dots (8)$$

- V : 1(eV)의 전자속도
- m, M : 전자 및 SF₆의 분자질량
- N : 가스의 분자밀도
- α, η : 전리 및 부착계수
- ε_i : 전리 에너지
- ε_v : 진동 에너지
- ε_{ex} : 여기 에너지
- Δ : 전리후 에너지 분배비
- i(ε, x, t): 위치x, 시간t에서 에너지 ε와 ε+dε의 전류밀도
- Q_a : 부착 단면적
- Q_{ex} : 여기 충돌 단면적
- Q_v : 진동 여기 단면적
- Q_i : 전리 단면적
- Q_m : 운동량변환단면적
- Q_T : Q_m+Q_i+Q_v+Q_{SF6}⁻+Q_{SF5}⁻+Q_F⁻
- Q_{SF6}⁻, Q_{SF5}⁻, Q_F⁻: 각 ion을 생성하는 부착 단면적

본 수치해석은 최초로 전자에너지 분포함수 F(ε)의 값이 충분히 크다고 생각되는 전자에너지(ε_{max})에서 초기값으로 가정하고 Backward-prolongation 방법을 이용하여 전자이동속도(V_d), 확산계수(D₀), 전리계수(α), 부착계수(η), 전자의 평균(ε̄) 및 특성 에너지(D₀/μ), 전리주파수(v_i), 부착주파수(v_a)는 다음 값으로 계산한다.

$$V_d = -\frac{1}{3} \sqrt{2 \text{overme} E} \int_0^\infty \frac{\varepsilon}{N Q_m(\varepsilon)} \frac{\varepsilon}{d\varepsilon} \left(\frac{F(\varepsilon)}{\sqrt{\varepsilon}} \right) \dots (9)$$

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^\infty F(\varepsilon) d\varepsilon \dots (10)$$

$$D_0 = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{m}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{\varepsilon}}{N Q_m(\varepsilon)} F(\varepsilon) d\varepsilon \dots (11)$$

$$U_K = \frac{D_0}{u} = \frac{D_0}{V_d} E = \frac{\frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{m}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{\varepsilon}}{N Q_m(\varepsilon)} F(\varepsilon) d\varepsilon}{-\frac{1}{3} \frac{\sqrt{2}}{m} e E \int_0^\infty \frac{\varepsilon}{N Q_m(\varepsilon)} F(\varepsilon) d\varepsilon} E = \frac{2}{3} \bar{\varepsilon} (V) \dots (12)$$

$$v_i = \sqrt{\frac{2}{m}} \int_0^\infty \sqrt{\varepsilon} F(\varepsilon) N Q_i(\varepsilon) d\varepsilon \dots (13)$$

$$v_a = \sqrt{\frac{2}{m}} \int_0^\infty \sqrt{\varepsilon} F(\varepsilon) N Q_a(\varepsilon) d\varepsilon \dots (14)$$

그리고 정의에 따라서 전리계수(α)와 부착계수(η)는 다음식으로 된다.

$$\alpha = v_i / v_d \dots (15)$$

$$\eta = v_a / v_d \dots (16)$$

이사의 볼츠만 방정식을 이용하여 F(ε)을 구하고 이 값을 식(9)~(16)에 적용하여 SF₆ 가스의 전자수송계수를 해석한다.

4. 충돌단면적의 결정

하전입자는 열운동을 하는 기체분자와 여러 종류의 충돌을 한다. 특히 전자의 경우 그의 질량은 분자에 비하여 대단히 적으며 분자는 충돌시에 정지하고 있는 것으로 일반적으로 취급한다. 전자와 분자가 충돌할

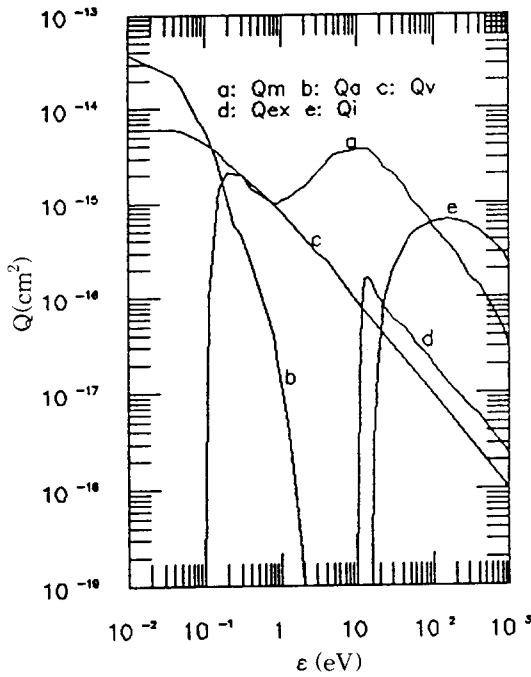


그림 4 SF₆가스의 전자 충돌단면적
Fig. 4 Electron Collision Cross-Section for SF₆ Gas

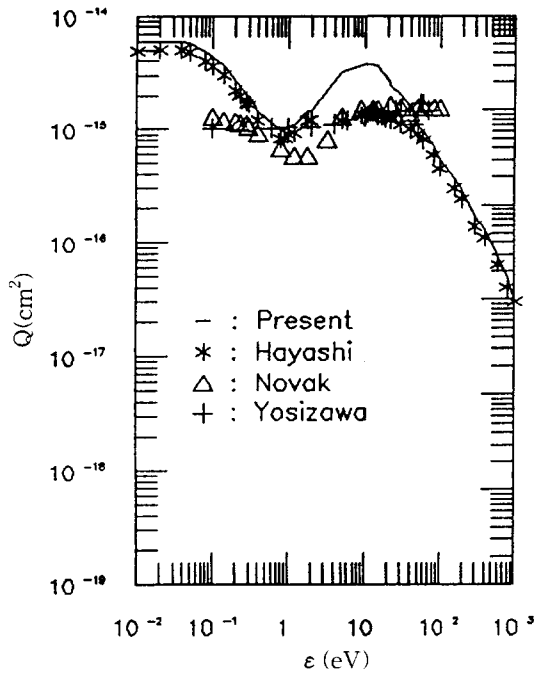


그림 5 SF₆가스의 운동량 변환단면적
Fig. 5 Momentum Transfer Cross-Section for SF₆ Gas

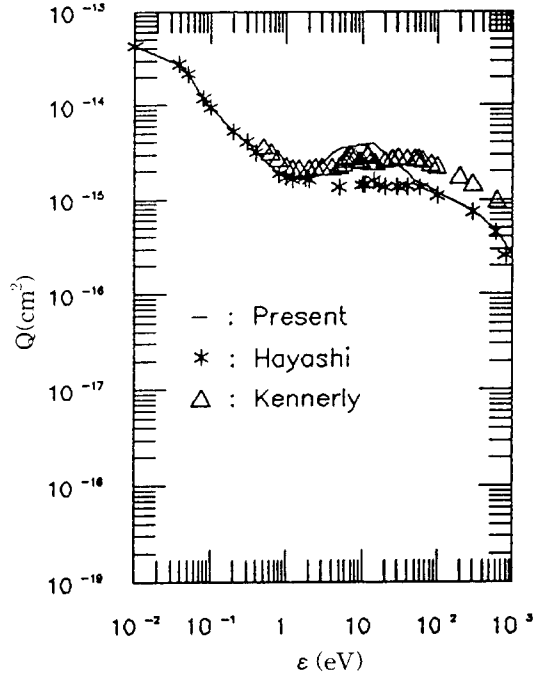


그림 6 SF₆가스의 전자의 전충돌단면적
Fig. 6 Total Electron Collision Cross-Section for SF₆ Gas

때 분자의 내부 에너지가 변하지 않는 탄성 충돌과 그의 충돌을 비탄성충돌이라 한다.

탄성충돌은 주로 전자의 운동방향을 변화시키는 역할을 하며 그의 에너지손실은 작으며 충돌직전의 에너지 ϵ 의 $(2m/M)\epsilon$ 정도가 된다.

비탄성충돌에서는 분자의 회전과 진동으로 분자내의 변화로 전자의 여기를 일으키고 전리 부착 충돌로 전자의 발생과 소멸이 일어난다. 따라서 전리에 의하여 발생한 전자는 분자에 부착하여 부이온을 형성하기 쉬운 부성기체가 된다.⁽³⁾

본 연구에서는 SF₆가스의 각 충돌 단면적을 그림 4에 나타내었다.

여기서 각 충돌 단면적을 결정하는데 있어서 문헌에 보고된 값을 될 수 있는한 변화시키지 않고 수송계수 해석에 이용하였다. 먼저 운동량변환 단면적과 그의 비탄성 충돌단면적을 결정하여 볼츠만 방정식을 수치해석하여 전자에너지 분포함수 $F(\epsilon)$ 를 구하고 이 분포함수를 적용하여 각종 전자수송

계수를 계산하여 전자이동속도의 실측값과 비교한다.

그림 5는 본 연구에서 반복 수정하여 결정된 운동량변환단면적(Q_m)의 값을 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 Hayashi⁽⁴⁾, Novak⁽⁵⁾, Yosizawa⁽⁶⁾의 값과 거의 일치한 경향을 나타내었으나 에너지가 3(eV)~20(eV)범위에서 본 연구의 계산값이 증가하였다. 이와 같은 차이는 전자이동속도의 실험적 조건으로 나타난 실측값과 계산값과의 예측한 단면적의 시행오차로 생각된다. 또한 전리 단면적(Q_i)는 넓은 에너지 범위에서 측정된 Kauppila(1983)⁽⁴⁾의 단면적을 이용하였고 이것의 문턱에너지는 15.8(eV)이었다. 그리고 진동, 여기 단면적은 Hayashi(1981)⁽⁴⁾, Trajmar & Chuthian⁽⁷⁾의 측정값을 이용하고 부착단면적(Q_a)는 Chutjion⁽⁷⁾, Kline⁽⁸⁾의 측정값을 이용하였다.

그림 6은 SF₆가스의 전충돌단면적을 나타낸 것이다.

여기서 본 연구에서 산출한 Q_T 의 계산치와 비교하기 위하여 Hayashi와 Kennery⁽⁴⁾

의 전충돌단면적(Q_T)을 이용하였다. 전자와 분자간의 전충돌단면적은 대개 4×10^{-14} (cm²)~ 3×10^{-16} (cm²)의 값으로 거의 같은 값을 나타냈으며 충돌의 종류에 따라 단면적의 크기와 형태의 차이가 있다. 전충돌단면적 $Q_T = Q_m + \sum Q_{ex} + \sum Q_v + \sum Q_i + \sum Q_a$ 로 나타낸다.

5. 실험결과 및 검토

5-1. 전자이동속도

그림 7은 SF₆가스의 전자이동속도의 실험치와 계산치를 나타내었다.

그림에 나타낸 바와 같이 본 실험의 측정 및 계산범위인 E/P(20~200V·cm⁻¹·Torr⁻¹)에서 Paranjpe⁽⁹⁾, Aschwanden⁽¹⁰⁾의 측정값과 비교 검토하였다.

그림에서 알수있는 바와 같이 전자이동속도(V_d)값은 E/P의 증가에 따라 거의 같은 경향으로 비례하여 증가하였음을 알 수 있었다. 이것은 일정한 증기압력에서 전극간 전압(V_{CK})를 변화시키면 전자가 SF₆가스중을 충돌할 때에 전자의 질량은 대단히 적은 양이며 SF₆가스분자의 충돌산란이 전계로 작용하기 때문에 전자이동속도(V_d)는 E/P의 증가와 전자 충돌산란 빈도에 의하여 결정된다고 생각된다. 또 일반적으로 $Q_m \gg Q_{inelastic}$ 에 있으므로 전자의 충돌빈도는 거의 Q_m 의 크기에 영향을 받으므로 전자이동속도는 증가된다고 생각한다. 그리고 전자이동속도는 전리계수의 큰 영향을 받으므로 SF₆가스의 변화로 V_d 의 변화는 전리계수와 같은 증가의 경향을 나타내고 있다.

5-2. 전리계수와 부착계수

전자의 충돌전리계수(α)와 평균자유행정(λ)에서 전리확률(P_i)는 $P_i = \alpha\lambda = \alpha/P$ 의 관계에 있으며 이것은 전자의 충돌전리의 크기를 정량적으로 나타내는 것이다. 또한 전자의 부착을 정량적으로 나타내는데는 전자 부착계수(η)가 사용되며 반대방향으로 진행할 때 단위거리당 중성원자 및 분자에 부착하는 전자수로서 나타낸다. 따라서 n_e 개의

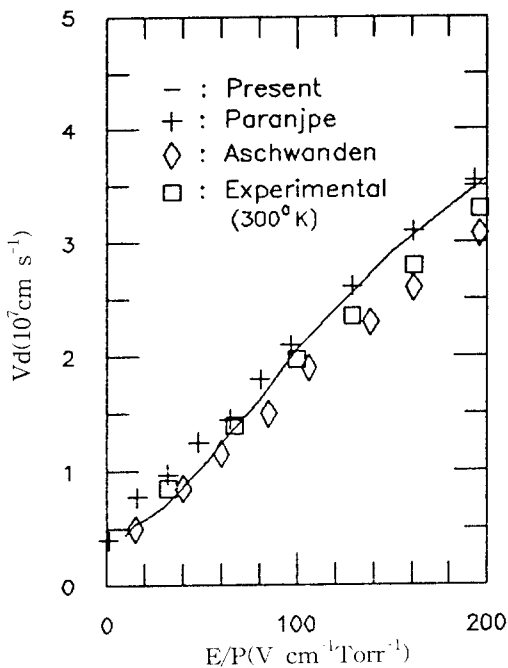


그림 7 SF₆가스의 전자이동속도
Fig. 7 Electron Drift Velocity in SF₆ Gas

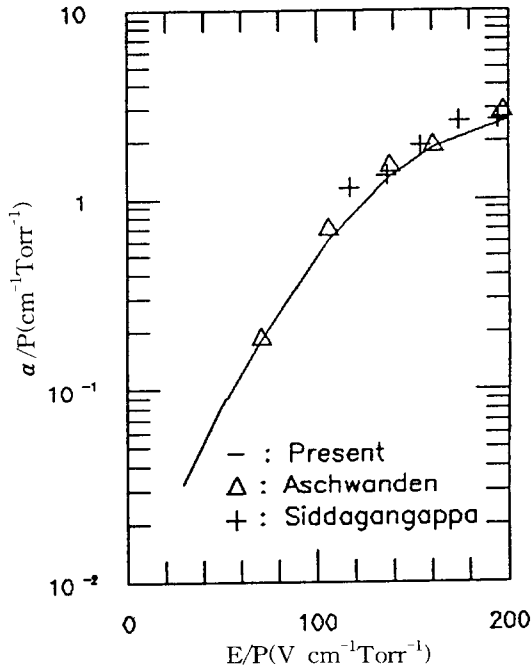


그림 8 SF₆가스의 전자전리계수
Fig. 8 Electron Ionization Coefficient in SF₆ Gas

전자가 x 에서 $x+dx$ 까지 진행하는 사이에 소실되는 전자수는 $dn_e = -n_e \eta dx$ 로 된다. 그리고 전리확률은 전자가 갖는 운동에너지 다시 말하면 전자가 평균자유행정사이에서 얻은 에너지($eE\lambda = k \cdot E/P$)의 함수이므로 α/P 는 일반적으로 $\alpha/P = f(E/P)$ 의 함수관계가 있다.⁽¹³⁾

그림 8은 SF₆가스의 전리계수(α/P)의 값을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 E/P의 값이 $70(\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}) \sim 200(\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1})$ 에서는 Aschwanden, Siddagangappa⁽¹¹⁾의 실측값과 거의 일치하였다. 즉 E/P 값이 적을 때는 α/P 는 급격히 증가하고 E/P가 크게되면 그 증가율은 다소 둔화 되었다.

이와같은 현상은 전자의 에너지가 너무 크면 충돌할 때에 상호작용한 시간이 너무 짧기 때문에 전리하기 어렵기 때문으로 생각된다. 전리기체중에서 가장 중요한 전리과정은 전자충돌에 의한 것이므로 전자는 중성분자와 탄성충돌에서는 자신의 운동에너지를 잃어버리므로 전계로 인하여 전리에너

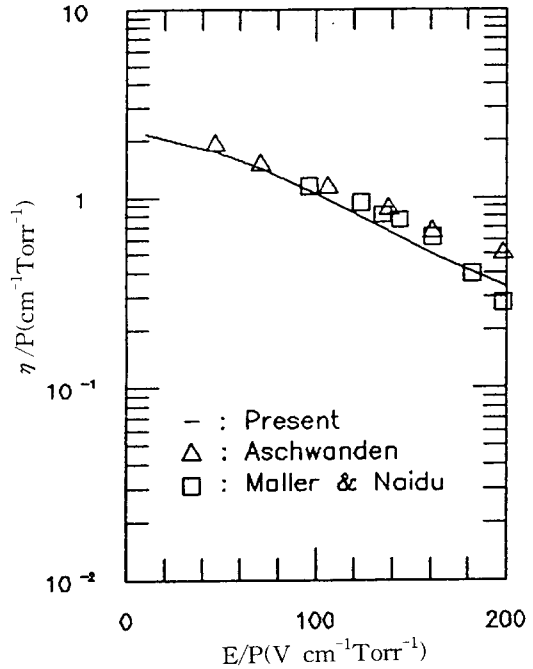


그림 9 SF₆가스의 전자부착계수
Fig. 9 Electron Attachment Coefficient in SF₆ Gas

지로 가속되어 전리나 여기 과정의 역할을 한다.

그림 9는 전자의 부착계수(η/P)의 값을 나타낸 것이다. 전자의 부착은 전자가 중성원자 혹은 분자에 충돌하면 에너지에 의하여 전자는 원자나 분자에 포획되어 부이온을 형성한다. 부이온은 전자에 비하여 질량이 크고 기체중에서 전계의 가속을 받아도 높은 에너지상태에 도달하기 어렵고, 전리능력도 없다. 따라서 원자 또는 분자에 전자가 부착하여 부이온이 안정하게 존재하기 위해서는 원자, 분자가 갖는 에너지는 전자가 부착하여 감소 되어야 한다. 그림에 나타난 바와 같이 E/P의 증가에 따라 Aschwanden 및 Maller & Naidu⁽¹²⁾의 실측값은 본 연구의 계산 결과보다 감소하였다. SF₆가스의 방전으로 생성되는 부이온은 SF₆⁻, SF₅⁻, F⁻ 이온이라는 것이 보고되고 있으나, 본 연구에서는 SF₆ + e → SF₆⁻으로 나타나는 부착단면적은 Chutjian⁽⁷⁾, Kline⁽⁸⁾의 측정값을 이용하여 부이온의 생성과정에 의존하여 부착

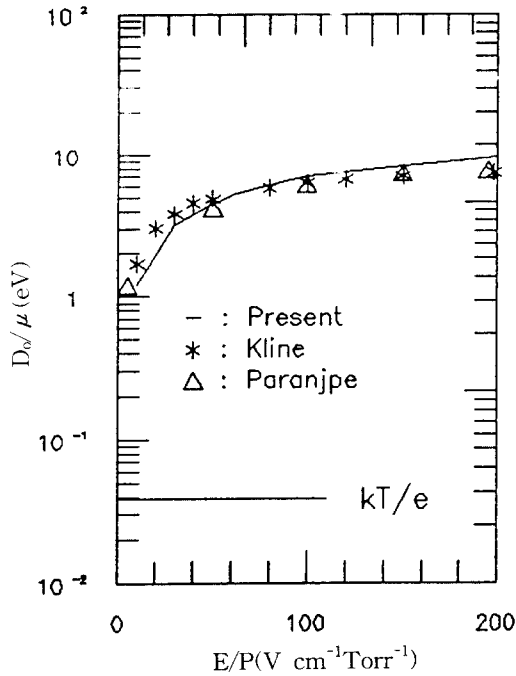


그림 10 SF₆가스의 전자특성에너지
Fig. 10 Electron Characteristic Energy in SF₆ Gas

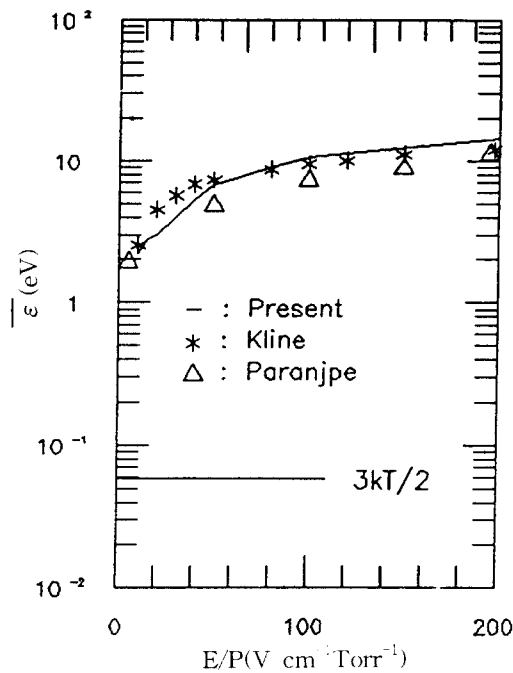


그림 11 SF₆가스의 전자평균에너지
Fig. 11 Electron Mean Energy in SF₆ Gas

계수를 계산하였다.

5-3. 전자의 특성에너지 및 평균에너지

그림(10)과 그림(11)은 전자의 특성에너지 (D_0/μ)와 평균에너지($\bar{\epsilon}$)를 $E/P(V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1})$ 를 파라미터로 하여 나타내었다.

전자의 특성에너지(D_0/μ)는 전자군의 확산계수(D_0)와 이동도(μ)와의 비로 정의되는 것으로 전자군의 에너지 분포함수가 맥스웰 분포를 나타내는 것은 전자와 기체분자의 충돌이 탄성적으로 분자가 가지는 에너지가 전자에 비하여 무시될 정도로 적은 값을 가질때 즉 전계가 없는 정상상태에 대하여 아인슈타인의 관계식에서 $D_0/\mu = kT/e = (2/3)\epsilon$ 로 된다.⁽¹³⁾ 즉 완전한 열평형상태(Maxwell 분포)에 있을 때는 전자의 평균에너지($\bar{\epsilon}$)는 위식에 나타난 바와 같이 특성에너지(D_0/μ)의 3/2배로 되므로 특성에너지는 평균에너지에 관한 지표를 나타내는 것을 알 수 있다. 전자군의 온도 T와 ϵ 의 관계는 $\epsilon = (3/2)kT$ 로 나타낸다. 그리고 전자의 평균 에너지 $\bar{\epsilon}$ 는 $\epsilon > (3/2)kT$ 로 되어 맥스웰 분포를 벗어난 값을 나타내었다. 또 $\bar{\epsilon}$ 과 D_0/μ 를 비교하면 분포함수의 형태가 비교적 낮은 $E/P(20V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1})$ 에서 평균에너지는 2.3(eV)값으로 나타났으며, 이 값은 $(3/2)kT$ 값과 차이가 있으므로 전자는 열평형상태를 벗어났다고 볼수있다. 특히 D_0/μ 의 값이 E/P 의 전영역에서 $\bar{\epsilon}$ 값과 큰 차이로 변화하였으며 낮은 $E/P(20V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1})$ 영역에서는 $\bar{\epsilon}$ 의 증가와 더불어 D_0/μ 의 값과 거의 같은 비율로 증가하였다. 이것은 낮은 에너지에서는 비탄성충돌로 에너지 손실과정이 존재하지 않으므로 증가하고 보다 높은 에너지 영역에서는 전리로 인한 전자가 분자에 부착하여 부이온을 형성하므로 전계의 가속을 받더라도 높은 에너지상태에 도달하기 힘들고 전자는 기체중의 부정기체 분자에 부착하여 전리능력을 잃어버린다고 생각된다.

5-4. 전자에너지 분포함수

전자군의 에너지 분포함수는 전자와 분자 간의 각종 충돌 단면적과 수송계수와 직접적으로 관련되는 항이다. 따라서 기체중을 운동하는 하전입자의 군은 여러 종류의 에너지 성분을 가지며 하전입자와 기체분자가 열평형상태에 있는 경우 하전입자는 에너지의 크기와 온도에 의존하는 공간에 등방적인 맥스웰의 에너지분포를 나타낸다.

그리고 그림 12는 SF₆가스의 전자에너지 분포함수 F(ε)를 20~200(V·cm⁻¹·Torr⁻¹)인 범위의 E/P를 파라미터로 하여 나타내었다.

여기서 모든 전자는 0 ≤ ε ≤ ∞ 범위의 에너지를 가지며 전자에너지 분포함수 F(ε)는

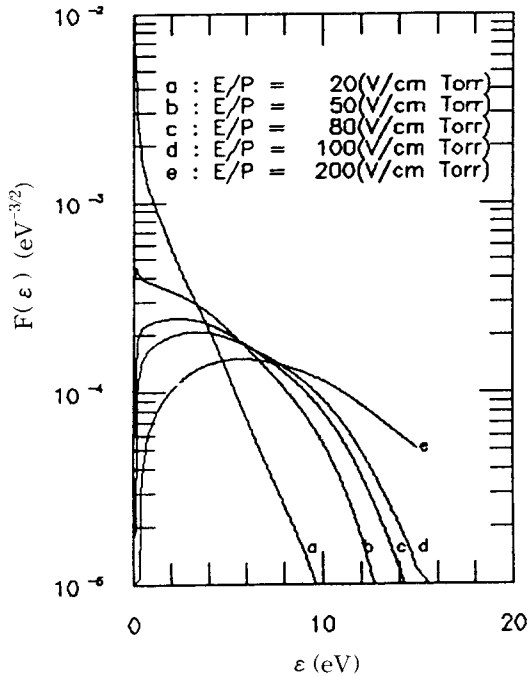


그림 12 SF₆가스의 전자에너지 분포함수
 Fig. 12 Electron Energy Distribution in SF₆ Gas

식 $\int_0^{\infty} \epsilon^{1/2} F(\epsilon) d\epsilon = 1$ 로 규격화하고 이때

E/P가 20(V·cm⁻¹·Torr⁻¹)의 낮은 범위에서 F(ε)는 6 × 10⁻³(eV^{-3/2})이고 에너지의 증가에 따라서 전자부착의 영향으로 분포함수가 감소하였음을 알 수 있었다. 그리고 E/P가

200 (V·cm⁻¹·Torr⁻¹)로 증가하였을 때 F(ε)는 9 × 10⁻³(eV^{-3/2})으로 감소하였고, 에너지의 증가에 따라 거의 일정한 값을 나타내었다. 이것은 비탄성충돌을 일으키는데 필요한 에너지는 하전입자와 기체분자 즉 兩입자의 상대운동 에너지로 공급되어 에너지 손실과정이 존재하지 않음으로서 나타나는 현상이다.

6. 결 론

본 연구에서는 1.0~200(V·cm⁻¹·Torr⁻¹)범위에서 전자군 파라미터가 그의 실험값과 일치하도록 SF₆가스의 전자기동속도를 상대전계의 세기 E/P를 가변함으로서 유도전류법에 의하여 실험적으로 측정하고 전자에너지 분포함수 및 수송계수를 볼츠만 방정식을 이용하여 해석하였다.

그리고 운동량변환단면적을 반복 수정하여 결정하였고, 전자기동속도, 평균에너지, 특성에너지, 전리계수 및 부착계수등을 계산하여 실험값과 비교검토 하였다.

본 해석에서 얻어진 낮은 E/P(20~80V·cm⁻¹·Torr⁻¹)에서는 전자에너지 분포함수는 부착단면적의 영향으로 전리능력을 잃어 감소하고, 높은 E/P(100~200V·cm⁻¹·Torr⁻¹)에서는 비탄성충돌의 효과로 에너지손실이 존재하지 않으므로 전자에너지 분포가 거의 일정한 값을 나타내었다. 또한 결정된 운동량 변환단면적을 적용하여 계산한 전자기동속도는 E/P에 비례하여 증가하고 Paranjpe 및 Aschwanden의 값과 거의 일치한 값을 얻었다.

전자의 평균에너지 $\bar{\epsilon}$ 와 특성에너지 D₀/μ 값은 (3/2)kT의 큰 차이로 나타났으며 $\bar{\epsilon}$ 의 증가와 더불어 D₀/μ값도 거의 같은 비율로 증가되어 전자는 열평형상태를 벗어난 비맥스웰 분포에 있다고 생각된다.

본 해석에서 계산한 전리계수(α/P)는 Aschwanden 및 Siddagangappa의 값과 거의 일치하였으나 E/P가 낮은 범위에서는 α/P는 급격히 증가하고, E/P가 어느정도 크게되면 그 증가율은 감소하였다.

SF₆가스의 전자기동속도 측정 및 수송계수 해석

또한 전자의 부착계수(η/P)는 E/P의 증가와 더불어 감소하였으며 이것은 전자가 분자에 부착하여 부이온을 만들기 때문에 전자에 비하여 질량도 크고 전계의 가속을 받아도 높은 에너지 상태에 도달할 수 없고, 전리능력도 없다고 생각된다.

따라서 본 연구에 실험장치의 측정방법과 수치해석에 대한 타당성과 정확도가 입증되었다.

※ 본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.

7. 참 고 문 헌

1. S.Shimizu, "Theoretical Analysis of Heat Pipe Operation", UDC., Vol.41, No.9, 729-742, 1977
2. L.G.H.Huxley & R.W.Crompton, "The Diffusion and Drift of Electrons in Gases", John Wiley and Sons, Inc 1974
3. 吉次豊文 외 4명, "볼츠만方程式による SF₆가스中の 放電輸送係數의 解析" 放電研究會資料 ED-78-70, 1978
4. M.Hayashi, T.Nimura, "Importance of Attachment Cross-Sections of F-Formation for the Effective Ionisation Coefficients in SF₆", J.Phys.D, Vol.17, 2215-2223, 1984
5. J.P.Novak, M.F.Frechette, "Transport Coefficients of SF₆ and SF₆-N₂ Mixtures from Revised Data", J.Appl. Phys., Vol. 55(1), 107-119, 1984
6. T.Yosizawa, Y.Sauai, H.Tagashira and S.Sakamoto, "Boltzmann Equation Analysis of the Electron Swarm Development in SF₆", J.Phys. D, Vol.12, 1839-1852, 1979
7. S.Trajmar, A.Chutjian, "Electron Impact Excitation of SF₆", J.Phys.B, Vol. 10, 2943-2949, 1977
8. L.E.Kline, D.K.Davies, C.L.Chen, and P.J.Chantry, "Dielectric Properties for SF₆ and SF₆ Mixtures Predicted from Basic Data", J.Appl.Phys., Vol. 50(11), 6789-6796, 1979
9. A.P.Paranjpe, "Studies of Gas Discharge for Dry Etching Modeling and Diagnostics", Stanford University, Stanford, CA 94305, 1989
10. F.M.Harris, G.J.Jones, "Drift Velocities of Electrons in Sulphur hexafluoride", J.Phys.B, Vol.4, 1536-1540, 1971
11. Y.Nakamura, "Transport Coefficients of Electrons and Negative Ions in SF₆", J.Phys.D, 1-36
12. M.C.Siddagangappa, C.S.Lakshminarashimha, and M.S.Naidu, "Ionisation and Attachment in Binary Mixtures of SF₆-N₂ and CCl₂F₂-N₂", J.Phys.D, Vol. 16, 763-772, 1983
13. M.Yousfi, P.Segur, and T.Vassiliadis, "Solution of the Boltzmann Equation with Ionisation and Attachment: Application to SF₆", J.Phys.D, Vol. 18, 359-375, 1985
14. 本多侃士, "氣體放電現象, 東京電機大學"
15. Philip E.Luft, "Description of a Backward Prolongation Program for Computing Transport Coefficients", JILA, Information center report, No. 14, 1975

著者紹介



하성철
1940년 12월 25일생. 1966년 2월 인하대학 전기공학과 졸업. 1985년 2월 명지대 전기공학과 졸업(공학). 1993년 현재 동국대학교 전기공학과 부교수. 당 학회 편수이사.



하영선
1947년 1월 17일생. 1969년 2월 인하대학 전기공학과 졸업. 1991년 2월 동국대학 전기공학과 박사과정 수료. 1993년 현재 대림전문대학 제어계측과 교수.



대학 강사.

윤상호
1959년 4월 18일생. 1987년 2월 동국대 전기공학과 졸업. 1989년 2월 동국대 전기공학과 석사. 1992년 현재 동국대 전기공학과 박사과정 수료. 현재 유한공업전문



백승권
1955년 8월 26일생. 1979년 인하대학 공대 전자공학과 졸업. 1989년 일본 경응대학 전기공학과 박사과정 졸업(공학). 현재 인제대학교 전자공학과 전임강사.



전병훈
1969년 2월 18일생. 1992년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1993년 현재 동국대학교 대학원 전기공학과 재학중.