

# Ar, Hg 및 Ar-Hg 혼합증기중에서 전자 에너지분포함수와 수송특성에 관한 연구

## A study on the Characteristics of Transport and Electron Energy Distribution Function in Ar, Hg and Ar-Hg Mixtrured vapour

하성철\*, 하영선\*, 윤상호\* 백승권\*\*  
(Sung-Chul Ha, Young-Sun Ha, Sang-Ho Yoon, Seung-Kwon Paek)

### 요 약

더블히트파이프(DoubleHeatPipe) 장치를 이용하여, 순수 Ar, Hg 및 Ar-Hg 혼합증기의 전하이동속도를, 온도는 순수 Ar의 경우 293(° K), Hg의 경우 453~540(° K), Ar-Hg 혼합증기의 경우 320(° K), E/N은 0.4~10(Td), 기체압력은 10~100(Torr)범위에서 유도전류법에 의해 측정하였다. 한편 볼츠만 방정식의 Backward Prolongation 계산법으로 전자에너지분포함수를 구하고 그 값으로부터 전자수송특성을 산출하여 실험치와 비교하고 탄성 및 비탄성 충돌 단면적을 결정하였다. 그리고 Ar기체에 Hg증기를 0.5%, 1%, 5%, 10% 혼합하였을 때의 전자에너지분포함수와 전하이동속도를 산출하고 그에 미치는 영향을 고찰하였다.

### Abstract

Using Double Heat Pipe, electron drift velocity is measured in Ar, Hg and Ar-Hg mixed vapour for temperature 293(° K), 453~540(° K), 320(° K), respectively, E/N of 0.4~10(Td) and gas pressure of 10~100(Torr), by induced current method. And then electron energy distribution function is calculated by Backward-Prolongation of Boltzmann equation, electron transport characteristics calculated from that value are compared with experimental value, elastic and inelastic collision cross sections have been determined. Electron energy distribution function and electron drift velocity are also calculated in gas mixtures of 0.5%, 1%, 5%, 10% Hg in Ar gas.

### 1. 서론

기체중에서의 전자군의 운동은 볼츠만 방정식의 수송해석을 이용하여 이론적으로 해석하고 유도전류법에 의해서 실험적 측정이 실행되고 있다. 그리고 혼합기체중의 전자수송특성에 관한 연구는 최근 원자, 분자의 충돌과정, 반도체소자의 생성, 신소재의 표면개선, 미세가공, 기체레이저, 플라즈마 프로세싱 기술전개, 방전관, 전기절연, 금속증기 램프, 또한 금속 플라즈마를 이용한 레이저 매질 등 새로운 기체전자응용공학 분야로 널리 이용되고 있다<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 유도전류법에 의한 전하이동속도를 더블히트파이프(Double Heat Pipe)를 이용하여 측정하고 측정데이터는 GP-IB Interface를 이용하여 전자계산기의 메모리용량이 허용되는 범위에서 연산처리를 하고, 이론적인 해석은 볼츠만방정식의 수송해석을 Backward-Prolongation을 이용하여 계산하고자 한다.<sup>(2)</sup>

따라서 드리프트 튜브의 진공도  $2 \times 10^{-6}$  (Torr), 기체압력 10~100(Torr), 순수 Ar의 경우 453~540(° K), Ar-Hg 혼합증기의 경우 320(° K) 및 E/N 0.4~10(Td)의 범위에서 단일 및 혼합기체를 드리프트 영역에 발생시키고 전극간에 초기전자를 발생시켜 전하이동속도를 측정하고자 한다. 본 연구에서 이용한 순수 불활성기체인 Ar기체에 미량의 Hg증기를 혼합하였을 때 혼합기체의 물리적인 성질과 전자, 원자, 분자, 이온 등 각 입자 상호간의 충돌과정, 전자에너지분포함수, 전자수송특성(전리계수, 전하이동속도, 확산계수, 평균에너지 및 특성에너지 등)을 정량적으로 산출하고, 혼합비의 변화에 따라서 혼합기체의 수송특성과 에너지분포함수에 미치는 영향을 고찰하고, Ar과 Hg증기의 운동량 변환 단면적을 결정하려한다.

그리고 위에서 이론적, 실험적 방법으로 얻은 결과에 대하여 해석하고, 그의 유용성을 검토한다. 일반적으로 대부분의 실용기기(형광방전등)에서는 불활성기체(Ar)에 금속증기(Hg)가 혼합되면, 처음 점등될 때는 Hg증기압력 범위에서 Ar기체가 존재하므로써 방전개시전압이

\* : 동국대학교 전기공학과

\*\* : 인제대학교 전자공학과

接受日字: 1993年 2月 3日

크게 저하되는(Penning현상) 것과 같이 금속증기와 완충기체(불활성기체 등)를 혼합한 상태에서 사용되고 있다. 이들 금속증기의 탄성, 비탄성 충돌 단면적은 불활성기체에 비하여 대단히 크고, 비탄성 여기 단면적의 개시에너지는 금속증기가 매우 낮으므로 불활성기체에 미량의 금속증기를 혼합하면 전자수송특성에 커다란 영향을 미친다고 생각된다. 1(Td)는  $1 \times 10^{-17} [V \cdot cm^2]$ 를 의미한다.

2. 이론

2-1 유도전류법(Induced Current Method)

기체중에서의 전자이동속도를 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)등이 있다. 본 실험에서는 열전자의 영향을 받지 않는 유도전류법을 이용하여 평행평판의 전극간에 인가한 초기전자와 기체분자의 전리충돌에 의해서 발생하는 전자와 전극사이를 이동하여 음극에 전류가 유도되며, 이 때 기체분자밀도(N)은 0(°C), 1(Torr)에서  $3.5355 \times 10^{16} [cm^{-3}]$ 일 때 전자-증성기체분자간의 충돌만을 고려하였다. 전극간의 전계 E(x)에 의하여 전자의 전하 q가 미소시간 dt 사이에 미소거리 dx 이동할 때 유도전류 I(t)와 적분전압 V(t)는 다음식으로 된다.<sup>3)</sup>

$$I(t) = \frac{qE(x)}{V} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{qE(x)}{V} V_d, \quad td = \frac{d}{V_d} \text{이고}$$

$$V(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt = \frac{q}{CV} \int_0^t E(x) V_d dt = \frac{q}{Cd} V_d t = \frac{q}{C} \frac{t}{t_d} \quad (1)$$

여기서  $V_d$ : 이동속도,  $0 \leq t \leq t_d$  ( $t_d$ : 이동시간)  
C: 콘덴서 용량이다.

즉 전극간에 펄스를 인가한 전자군이 음극에도달하는데 걸리는 시간은 전자가 이동영역을 주행하는데 필요로 하는 시간과 일치하여 출력 파형은 직선적으로 상승하다가  $t > t_d$ 에서 V(t)는 CR의 시정수로 감쇠하기 시작할 때까지의 교점을 전자 이동시간( $td=d/V_d$ )로 하여 전자의 이동속도를 측정하였다.

2-2 볼츠만 방정식

전계의 영향으로 기체중을 운동하고 있는 전자의 에너지분포함수와 전자수송특성을 볼츠만 방정식을 이용하여 해석할 수 있다.

전극은 무한 평행평판으로 하고 전계는 전극에 수직(x방향)으로 인가할 때 전자의 분포함수 f에 대한 볼츠만 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\left( \frac{\partial f}{\partial t} \right) + \left[ V_x \frac{\partial f}{\partial x} \right] + \left[ a \frac{\partial f}{\partial V_x} \right] = \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\dots} \quad (2)$$

여기서  $(\partial f / \partial t)_{\dots}$ 은 충돌에 의한 f의 시간적변화율을 나타내는 충돌항이며,  $a=eE/m$ (e: 전자의 전하, m: 전자의 질량)은 가속도이다.

식(1)에서 제 1항은 분포함수의 시간적 변화 제 2항은 입자운동의 확산 제 3항은 외력의 영향을 나타낸다. 한편 전자분포함수 f는 시간과 위치공간에 따라 변화하는 전자의 밀도수  $n(r, t)$ 과 전자의 에너지분포함수  $f(u)$ 로 분리되며 다음과 같이 나타낸다.<sup>(4)</sup>

$$f = n(r, t) f(u) \quad (3)$$

단  $u=1/2 mv^2$ 은 전자의 운동에너지이다.

식(3)은 f(u)가 r, t에 대해서 독립일 때 성립하고 이것은 전자의 이동에 비하여 확산이 무시될 수 있는 경우이다. 그리고 혼합기체를 적용한 전자에 에너지분포함수 f(u)은 L. S. Frost와 A. V. Phelps에 의해 제안된 볼츠만 방정식에 의해 구할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$\frac{1}{3} \left( \frac{E^2}{N} \right) \frac{\partial}{\partial u} \left\{ \sum_s \frac{u}{P_s Q_{s,u}(u)} \frac{\partial f(u)}{\partial u} \right\} + \frac{KT}{e} \frac{\partial}{\partial u}$$

$$\left\{ u^2 \frac{\partial f(u)}{\partial u} \sum_s P_s \left[ Q_{s,u}(u) \frac{2m}{M_s} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial u} \left\{ u^2 f \sum P_s \right.$$

$$\left. \left( Q_{s,u}(u) \right) \frac{2m}{M_s} + \sum P_s \left\{ (u+u_{s,i}) Q_{s,i}(u+u_{s,i}) f(u+u_{s,i}) \right. \right.$$

$$\left. \left. - u Q_{s,i}(u) f(u) \right\} + \sum (f P_s Q_{s,i}(u_x+u_{s,i}) f \right.$$

$$\left. (u_x+u_{s,i}) \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) - P_s Q_{s,i}(u) u f(u) \right) = 0 \quad (4)$$

- 여기서  $M_s$ : s번째 기체분자의 질량
  - $N$ : 기체의 밀도수
  - $P_s$ : s번째 기체의 압력
  - $m$ : 전자의 질량
  - $L_{s,i}$ : s번째 기체의 여기에너지
  - $M$ : 원자의 질량
  - $u_{s,i}$ : s번째 기체의 전리에너지
  - $T$ : 온도(K)
  - $Q_{s,i}$ : s번째 기체의 운동량 변환 단면적
  - $K$ : 볼츠만 정수
  - $Q_{s,i}$ : s번째 기체의 여기 단면적
  - $e$ : 전자의 전하
  - $Q_{s,i}$ : s번째 기체의 전리 단면적
- 혼합기체중의 전자에너지분포함수 f(u)은 식

(4)를 수치해석하여 구하고 이  $f(u)$ 을 이용하여 전이이동속도( $V_d$ ), 확산계수( $D_0$ ), 전자평균 에너지  $u$  및 특성에너지( $D_0/\mu$ )는 다음과 같이 나타낸다. (6)

$$V_d = \frac{1}{3} \left( \frac{E}{N} \right) \left( \frac{2e}{m} \right)^{1/2} \int_0^u u \left( \frac{\partial f}{\partial u} \right) \frac{du}{\Sigma_s P_s Q_{s,m}} \quad (5)$$

$$D_0 = \frac{1}{3N} \left( \frac{2e}{m} \right)^{1/2} \int_0^\infty u f(u) \frac{du}{\Sigma_s P_s Q_{s,m}} \quad (6)$$

$$u = \int_0^\infty u^{3/2} f(u) du \quad (7)$$

여기서 전자에너지분포함수는 다음과 같이 규격화 하였다.

$$\int_0^\infty u^{(-1/2)} F(u) du = 1$$

이상의 볼츠만 방정식을 이용하여  $f(u)$ 을 구하고 이 값을 식(5)~식(7)에 적용하여 Ar-Hg 혼합기체의 전자수송특성을 계산한다.

### 3. 실험장치

본 연구에 이용한 실험장치의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 실험장치는 크게 분류하면 드리프트 튜브(Drift Tube)와 진공배기계, 가스 도입계, 측정데이터처리계로 이루어진다. 드리프트 튜브는 더블 히트 파이프로 스테인레스 스틸 SUS 304이며 외경 34(mm), 길이 600(mm)의 원통형으로 내벽은 120(mesh/inch)의 wick로 2중 삽입하였다. 전극은 망상구조로 하고, 초기전자의 공급은 직경 0.15(mm)인 텅스텐 필라멘트를 사용하여 공급하고 전자셔터와 음극, 양극은 직경 0.32(mm), 0.15(mm)인 니크롬선으로 만들었다. 그리드는 전자가 양극으로 확산되는 것을 차단하기 위해 음극에 대하여 부(-)로 바이어스시키고 그리드와 음극간에 정(+) 펄스가 입력되는 시간동안만 전자가 방출하도록 하였다. 전극간격은 0~20(mm)의 범위에서 가변할 수 있도록 하였고, 진공배기계는 로타리 펌프를 이용하여  $2 \times 10^{-6}$ [Torr]이하로 배기하였으며, 진공도 측정은 전리진공계(Ionization Vacuum Gauge, Phillips 307)를 사용하였다. 또한 압력계는 실리콘 오일(HIVAC F-5)을 넣은 U자형 오일 마노메타를 이용하여 기체압력을 측정하였다.

본 실험에 이용한 더블 히트 파이프는 혼합기체의 발생을 열평형상태로 유지하기 위하여 외측 히트 파이프 오븐 동작물체(HIVAC F-5)의 열원장치를 이용하여 증발과 응축으로 열을 이동영역으로 수송하는 장치이고, 사용된 동작물체의 증기압곡선에 따라서 관내의 압력은  $\pm 1$  [°C]이내로 열평형상태를 유지할 수 있다.

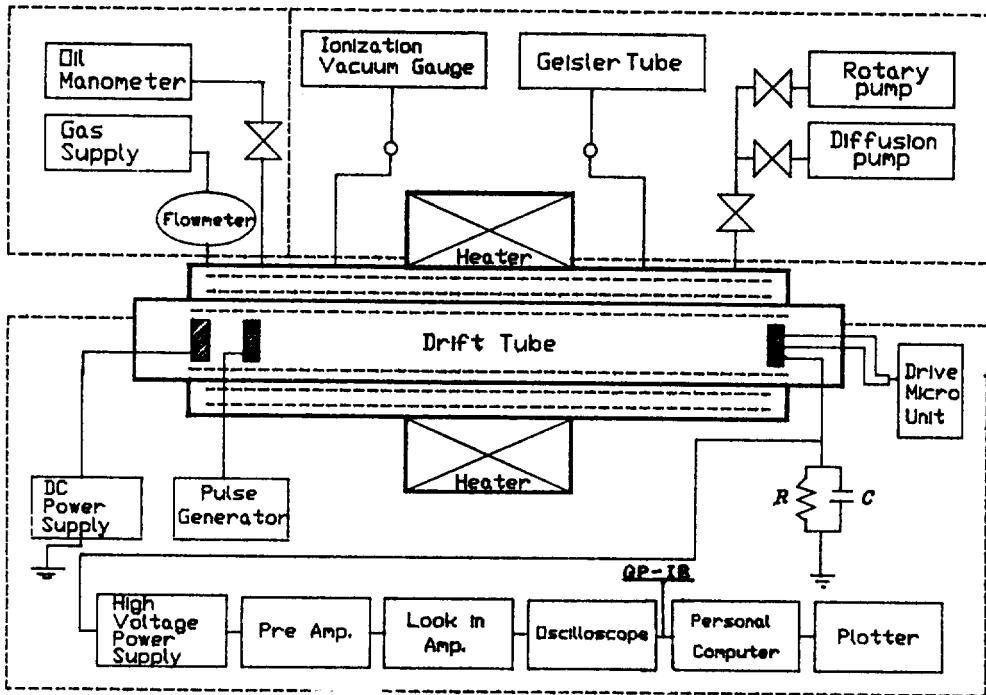


그림 1 실험장치의 구성  
Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

이러한 특성에 의하여 내측의 히트 파이프에 열평형상태를 유지할 수 있으며, 내측 히트 파이프의 금속증기는 불활성기체의 압력과 평형시켜 이 불활성기체의 압력을 측정하므로써 금속증기의 압력을 알 수 있다. 또한 관벽외부에 열전대를 부착하여 온도분포를 측정하므로써 관내의 일정압력의 증기를 얻을 수 있다.

4. 실험방법

실험은 유도전류법을 적용하였고, 균일한 온도분포를 유지하기 위하여 더블 히트 파이프를 이용하였다. 기압, 기체온도, E/N, 진공도 등의 일정 조건에서 전극간에 초기전자를 발생시켜 전자의 이동속도를 측정하였고, 측정조건에 대한 출력데이터는 프리앰프(Pre Amp.)와 록인 앰프(Lock in Amp.)를 거쳐 디지털 오실로스코프(Digital Oscilloscope(2430, Tektronix)로서 관측하였고, 스코프(Scope)와 GP-IB Interface로서 접속하여 측정값을 프로터(Plotter)로 구하였다.

이것으로부터 구한 데이터를 식(1)에 나타난 유도전류법을 이용하여 전자이동속도( $V_d$ )를 산출한다. 측정범위는 E/N=0.4~10(Td) 기체온도는 순수 Ar의 경우 293(°K), Hg증기의 경우 453~540(°K), Ar-Hg 혼합증기의 경우 320(°K), 기압은 10~100(Torr)으로 정하고 펄스폭은 30ns~0.1(μs), 펄스전압은 5.0(V)로 하였다. 히트 파이프내를 배기시켰을 때의 진공도는  $2 \times 10^{-6}$ (Torr)로 하였다. 혼합기체의 압력은 오일 마노메타로 측정하고 혼합기체의 혼합비는 다음과 같이 결정한다.

순수한 금속증기의 발생은 넓은 에너지범위에서 발생시킬 수 있는 장점이 있지만 금속의 용점이 실험장치의 동작온도범위를 초과하거나 용점부근의 증기압이 높은 금속에서는 응축손실이 크므로 측정할 수 있는 시간이 매우 짧아지게 된다. 이러한 단점은 금속증기의 압력을 낮게 하므로써 개선할 수 있으나 측정할 수 있는 압력의 범위가 제한 된다.

그러나 본 실험장치를 사용하여 불활성기체를 희석하는 것은 전체의 압력을 유지하면서 금속증기의 분압을 낮추어 실행하는 방법을 이용하였다.

이 방법은 측정 온도를 낮게 할 수 있고, 금속원자의 밀도를 적게 할 수 있으므로 앞의 단점을 보완할 수 있다.

불활성기체와 금속증기를 혼합하여 혼합기체를 만들려면, 먼저 전체의 압력 P.와 금속증기  $P_{Hg}$ 와의 혼합비( $P_{Hg}/P.$ )를 결정하고 Hg의 증기압 곡선으로부터 Hg증기압력  $P_{Hg}$ 가 될 때의 Hg증기의 온도  $T_{Hg}$ 를 구한 다음 파이프내에 불활성기체의 압력 P.가 되도록 채우고, 더블 히트 파이프의 히터압력을 변화시켜 온도  $T_{Hg}$ 에서 열평형상태를 만들어 주면 필요한 혼합기체를 발생시킬 수 있다.

그리고 볼츠만 방정식의 수치해석에는 Back-

ward-Prolongation 계산법을 이용하였다. 본 연구에서 계산에 이용한 운동량 변환 단면적( $Q_e$ ), 여기충돌단면적( $Q_{ex}$ ), 전리충돌단면적( $Q_i$ )은 Ar의 경우 그림 2에 나타난 것과 같이 Nakamura<sup>(7)</sup>, Suzuki<sup>(8)</sup>, Bell<sup>(9)</sup>, 및 Frost & Phelps<sup>(10)</sup>의 충돌단면적을 검토하면서 반복계산을 수행하여 실험치와 일치하는 값을 Ar의 충돌단면적으로 결정하였고, Hg증기의 경우는 그림 5에 나타난 것과 같이 Rockwood<sup>(11)</sup>와 Lucas<sup>(4)</sup>의 충돌단면적을 검토하면서 기본적으로는 Rockwood의 단면적에서 시작하여 전자이동속도의 실험치에 대응하는 충돌단면적을 변화시켜 반복 수정을 되풀이하여 결정하였다. 이 계산으로 얻어진 전자에너지 분포함수의 값으로 각 전자수송계수를 계산하여 실측한 전자 이동속도와 비교한다. 이 비교, 검토에 적용한 상대전계 E/N은 0.4~10(Td)범위에서 이루어지고 기체밀도는  $3.5355 \times 10^{-16}$ (cm<sup>-3</sup>) [0°C, 1 Torr]에서 전자의 운동을 추적하였다.

5. 실험결과 및 고찰

그림 2에 나타난 바와 같이 Ar기체의 운동량 변환 단면적을 결정하였다. 이와같은 운동량 변환단면적의 결정은 전술한 바와 같은 실험방법에 의해 측정된 전자이동속도와 볼츠만 방정식에 예측한 단면적의 값을 시행착오적으로 반복 대입하여 산출하였다. 이 산출된 전자에너지가 0.01~0.1(eV)의 범위에서는 Frost & Phelps<sup>(10)</sup>의 값으로, 0.5~10(eV)의 범위에서는 Suzuki<sup>(8)</sup> 및 Nakamura<sup>(7)</sup>의 값과 거의 같은

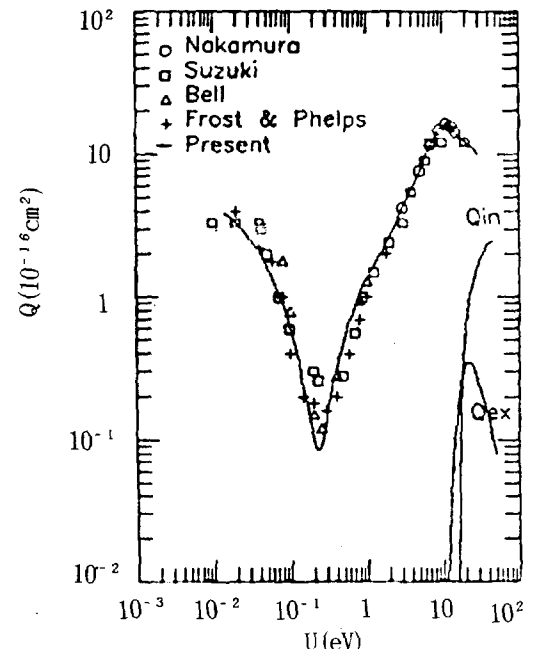


그림 2 Ar기체의 탄성 및 비탄성 충돌단면적  
Fig. 2 Elastic and Inelastic-Scattering Cross-Sections of Argon Gas.

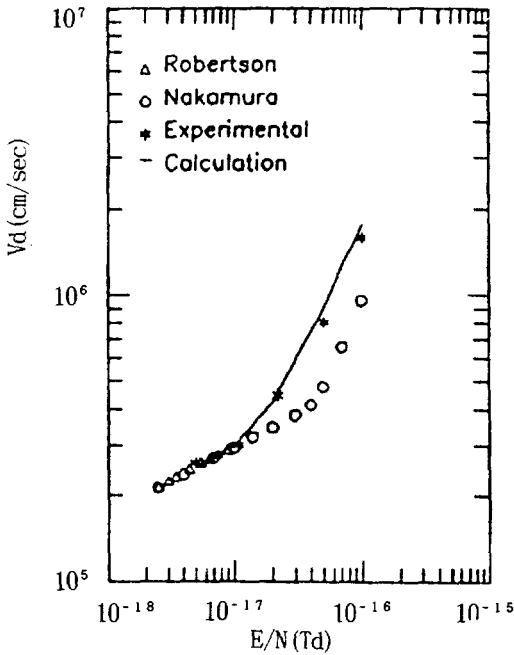


그림 3 Ar기체중에서의 전자이동속도  
Fig. 3 Electron Drift Velocity in Argon Gas

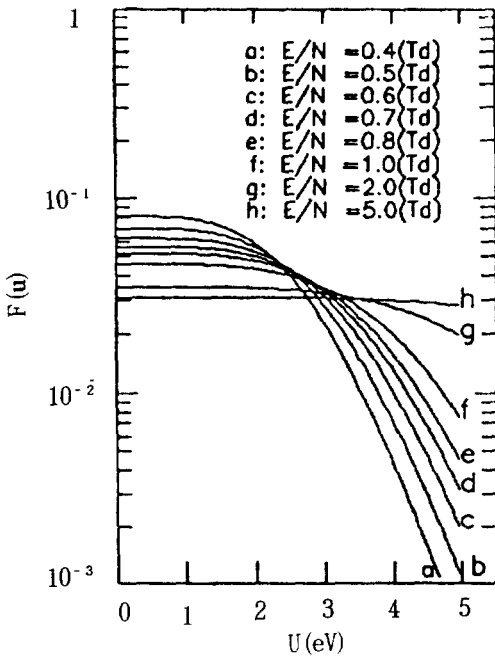


그림 4 Ar기체중에서의 에너지 분포함수  
Fig. 4 Electron Energy Distribution Function in Argon Gas.

경향을 나타내었다. 그리고 그림 3에서는 충돌 단면적으로부터 계산된 Ar기체의 전자이동속도와 본 연구의 실험치 및 Robertson<sup>(13)</sup> 및 Nak-

amura<sup>(7)</sup>의 값과 비교하였다. 여기서 전극간 전압을 변화시켰을 때 전자이동속도는 E/N이 1~10(Td)범위에서 급격히 증가하는 결과를 얻었다. 이와 같은 현상은 E/N이 증가하면 이동 영역으로 전자의 흐름이 증가하고 충돌산란의 영향이 활발하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그리고 그림 4는 Ar기체의 전자에너지분포함수 F(u)를 0.4~5(Td)인 범위의 E/N을 파라미터로 하여 나타내었다. 여기서 E/N이 0.4(Td)에서 전자에너지분포함수 F(u)는  $8 \times 10^{-2} [eV^{-3/2}]$ 이고 E/N이 5.0(Td)로 증가하였을 때 F(u)는  $3 \times 10^{-2} [eV^{-3/2}]$ 으로 감소하였다. 이는 전자가 중성분자에 충돌할 때 잃어버린 에너지가 전체에 비례하지 않는 것으로 생각된다.

그림 5는 Hg증기의 탄성 및 비탄성 충돌단면적을 나타내었다. 여기서 본 연구에서 산출한 계산치와 비교하기 위해서 Lucas<sup>(4)</sup>와 Rockwood<sup>(11)</sup>의 운동량 변환 단면적(Qm)과 Moiseiwich<sup>(12)</sup>의 여기단면적(Qex), Harrison<sup>(13)</sup>의 전리단면적(Qin)을 이용하였다.

본 연구에서 산출한 Qm값은 Rockwood가 측정 한 Qm과는 현저한 차이가 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 전자의 충돌산란의 영향이 본 실험 조건에서 활발하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

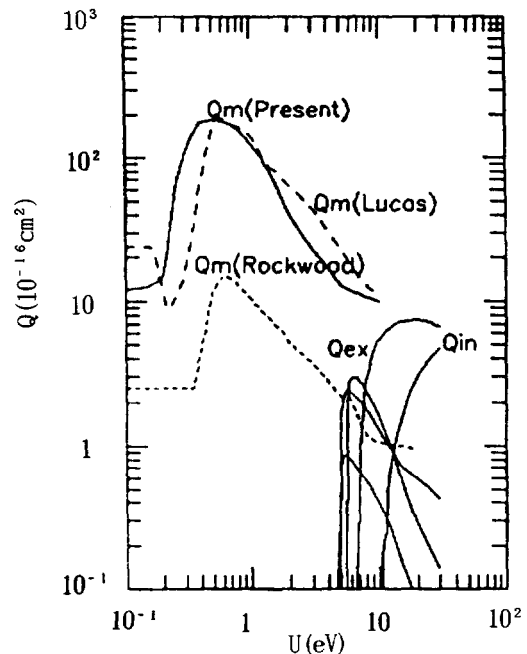


그림 5 Hg증기의 탄성 및 비탄성 충돌단면적  
Fig. 5 Elastic and Inelastic-Scattering Cross-Section of Mercury Vapour.

그림 6은 Hg증기의 전자이동속도의 실험치와 계산치를 나타내었다. 그림 6에 나타난 바와 같이 본 측정범위  $E/N 5 \times 10^{-18} \sim 1 \times 10^{-16} [cm^2]$ 에서 전자이동속도는 E/N의 증가에 따라 급격히 증가하였으며 이것은 전자가 Hg증기중을 운

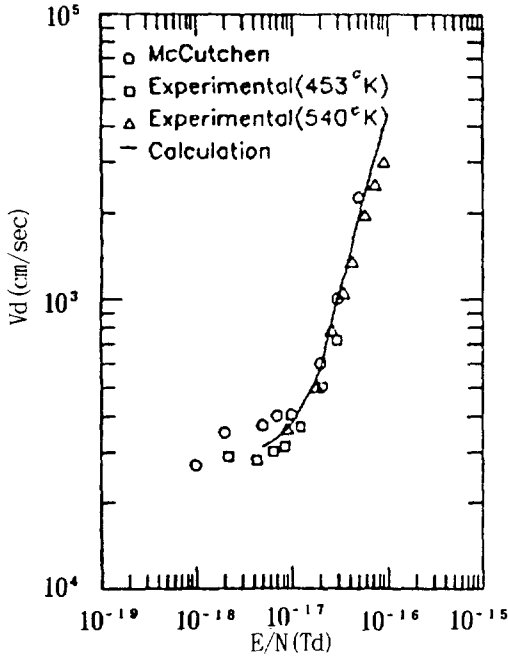


그림 6 Hg증기중에서의 전하이동속도  
Fig. 6 Electron Drift Velocity in Mercury Vapour.

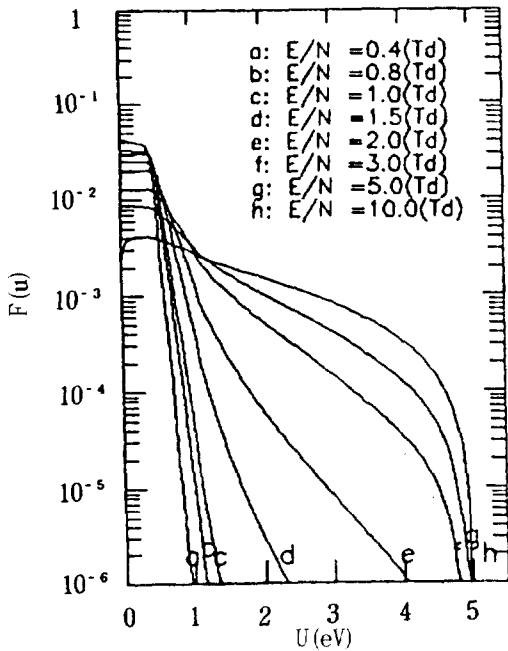


그림 7 Hg증기중에서의 전자에너지 분포함수  
Fig. 7 Electron Energy Distribution Function in Mercury Vapour.

동할 때 전자의 질량은 대단히 작고 Hg분자에 의한 전자산란이 전계로 작용하기 때문에 전하이동속도는 전계의 세기와 전자 산란 빈도에 의해서 결정된다고 생각된다.

그림 7은 Hg증기의 전자에너지분포함수  $F(u)$ 를  $E/N$ 을 파라미터로 하여 나타낸 것이다. 전자군의 에너지 분포함수는 전자와 분자간에 각종 충돌단면적과 전자수송특성에 관계되는 양이다. 이 때 에너지 분포함수  $F(u)$ 는

$$\int_0^{\infty} u^{(-1/2)} F(u) du = 1$$

로 정규화하고 이 때 비교적 낮은  $E/N(0.4(Td))$ 의 영역에서는  $F(u)$ 의 값은 저에너지(0.9(eV))측에 거의 직선적으로 나타났으며 높은  $E/N(10.0(Td))$ 의 영역에서는 비탄성 충돌을 고려할 때에 맥스웰분포와 다른 형태의 분포함수가 된다고 생각된다.

그림 8 및 그림 9에 Ar-Hg증기의 전하이동속도 및 전자에너지분포함수를 나타내었다. 전하이동속도의 경우 a 및 f가 각각 순수 Ar 및 순수 Hg증기의 계산치이며 Hg증기의 혼합비 0.5%, 1%, 5%, 10%의 경우에 계산치가 b, c, d, e로 표현되었고 각각의 실험치가 x, □, △, +의 기호로써 표현되었다.  $E/N$ 이 1(Td)보다 낮은 범위에서는 혼합비율에 따라서 이동속도의 특성이 정배열 되고,  $E/N$ 의 증가로 정배열 상태에서 벗어난다. 이는  $E/N$ 의 증가에 따라 이동속도가 낮은 Hg증기의 영향에 의한 것이고, 특히 혼합비 5% 및 10%인 d, e의 경우  $E/N=6(Td)$ 를 지나면서 Hg증기의 이동속도 값보다 낮은 값이 나타나는데 이것은 Hg증기의 비탄성 충돌전이 때 잃어버린 전자에너지의 크기가 탄성충돌에 비하여 큰 값을 가지므로 고에너지를 가진 전

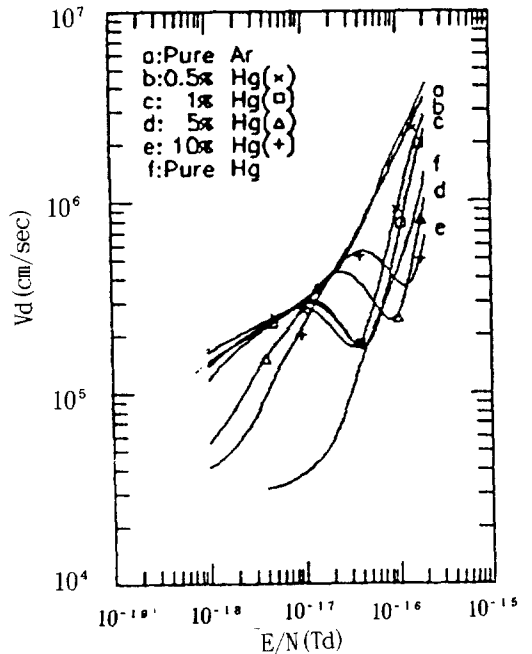


그림 8 Ar-Hg 혼합증기중에서의 전하이동속도  
Fig. 8 Electron Drift Velocity in Ar-Hg Mixed Vapour.

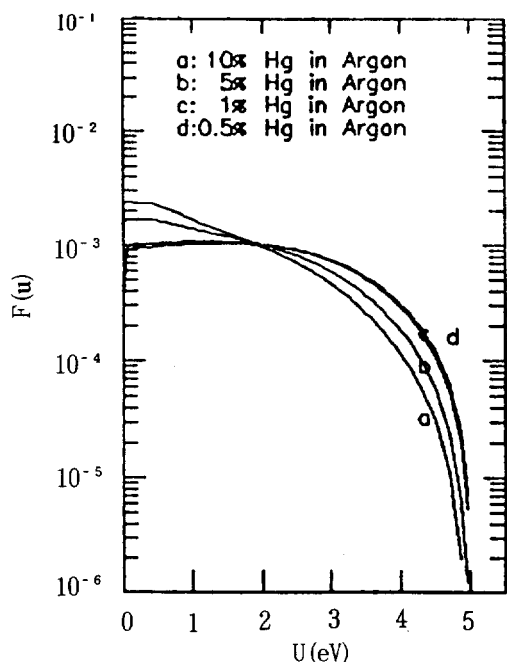


그림 9 Ar-Hg 혼합증기중에서의 전자에너지 분포함수  
 Fig. 9 Electron Energy Distribution Function in Ar-Hg Mixture Vapour.

자는 여기로 인하여 에너지를 얻으나 저에너지 측은 입사에너지 4.9(eV)의 경계에서 더이상 증가하지 못하고 머무르고 만다. 이 때문에 전자의 충돌빈도가 감소하여 전자의 이동속도는 감소하는 것으로 사료된다. 또한 그림 9에 E/N=1(Td)인 때의 혼합기체의 전자에너지분포함수를 나타내었는데 혼합비에 따라서 전자에너지 분포함수 값은 약간의 차이는 나타났으나 전체적으로 순수 Ar기체의 전자에너지분포함수와 거의 같은 경향을 나타내고 있다.

6. 결론

순수 Ar, Hg 및 Ar-Hg 혼합증기중에서 상대전계의 세기 E/N을 가변하면서 실험적으로 전자의 이동속도를 측정하였고 볼츠만 방정식을 이용하여 전자에너지분포함수를 구하고 그 분포함수로 전자의 이동속도를 계산한 다음 그 계산치와 일치되는 운동량 변환 단면적과 각종 비탄성 충돌단면적을 결정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 순수 Ar, Hg 증기중에서 293(° K), 453(° K) ~ 540(° K), 상대전계 E/N은 0.4~10(Td)의 범위에서 측정 계산된 전자의 이동속도는 Hg증기인 경우 McCutchen의 값과 일치하였으며 Ar의 경우는 E/N이 0.4(Td)~1(Td)의 범위에서 Robertson의 값과 일치하고 E/N이 1(Td)~10(Td)에서는 급격히 증가하는 결과를 얻었다.

2. 순수 Ar기체에 Hg증기를 0.5%, 1%, 5%, 10%로, 온도 320(° K)와 상대전계의 세기 E/N 0.4~10(Td)의 범위에서 전자의 이동속도를 측정 한 결과 Hg증기의 혼합비율에 따라서 E/N이 1(Td)보다 낮은 범위에서는 정배율이 되고, 특히 Hg증기의 혼합비율이 5(%) 및 10(%)에서 E/N의 증가로 정배열 상태에서 벗어난 결과를 얻었다.
3. 측정된 전자의 이동속도로부터 볼츠만 방정식을 이용하여 운동량 변환 충돌 단면적과 여기 및 전리 충돌단면적을 결정하였는데 Ar의 경우 Suzuki Bell 및 Frost & Phelps의 값과 거의 일치하였고, Hg증기의 경우에도 Rockwood의 값과 같은 경향으로 나타났으며 그 값은 상향조정된 것으로 결정되었다. 또한 결정된 단면적으로부터 순수 Ar, Hg 및 Ar-Hg혼합기체의 전자에너지분포함수를 계산하여 그 영향을 고찰한 바 낮은 E/N(0.4(Td))영역에서는 F(u)의 값은 저에너지(0.9(eV))측으로 나타났으며 높은 E/N(10.0(Td))영역에서는 5(eV)의 에너지를 갖는 분포함수를 나타내었다. 그리고 혼합기체의 경우 혼합비의 증가에 따라서 F(u)의 값은 전체적으로 비맥스웰 분포의 경향이 나타났다.

본 연구는 1991년도 “한국 과학재단 연구 과제” 연구비 지원으로 수행하였으며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. J. S. Chang, R. M. Hobson, “電離氣體の原子分子過程”, 東京電氣大學出版局 1984年.
2. B. Sherman, “The Difference-Differential Equation of Electron Energy Distribution in a Gas”, J. of Math Analysis and Application 1, 342-354, 1969.
3. Y Nakamura and J Lucas, “Electron Drift Velocities in Mercury, Sodium, and Thallium Vapours: I. Experimental”, J. Phys. D, Vol. 11, 325, 1987.
4. Y Nakamura and J Lucas, “Electron Drift Velocity and Momentum Cross-Section in Mercury, Sodium and Thallium Vapours: II Theoretical”, J. Phys. D, Vol. 11, 337, 1978.
5. L. S. Frost and A. V. Phelps, “Rotational Excitation and Momentum Transfer Cross-Sections for Electrons in H<sub>2</sub> from Transport Coefficients”, Phys. Rev., Vol. 127, no 5, 1621, 1962.
6. L. G. H. Huxely and R. W. Crompton, “The Diffusion and Drift of Electrons in Gases”, John Wiley and Sons, Inc 1974.
7. Y. Nakamura and M Kurachhi, “Electron Transport Parameters in Argon and Momentum Transfer Cross Section”, Proceedings

- of the Meeting of the Fourth International Swarm Seminar, 19-23 July, Tahoe City, U. S. A.
8. 鈴木雅史, スオーム パラメータからの衝突断面積の推定”, 電気學會放電研究會資料, ED-88-43.
  9. Bell K L, Scott N S and Lennon M A, J. Phys. 17, 1984.
  10. L. S. Frost and A. V. Phelps, “Momentum-Transfer Cross Section for Slow Electrons in He, Ar, Kr, and Xe from Transport Coefficients”, Phys Rev., 136, 6A, 1964
  11. Stephen D. Rockwood, “Effect of Electron Electron and Electron-Ion Collision in Hg, CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/He, and CO/N<sub>2</sub> Discharges”, J. of Appl. Phys., 45, 12, 1974.
  12. McConnell J. C & Mosewicz B. L, “The excitation of the 6<sup>1</sup>P<sub>1</sub> and 6<sup>3</sup>P<sub>0,1,2</sub> States of Mercury by Electron impact”, J. Phys. B: Atom. Molec. Phys. 1 406-13
  13. Harrison H 1966 Ph D Thesis, data quoted by Kiffier L J and Dunn G H, “Electron Impact Ionization Cross-Section Data for Atoms, Atomic Ions, and Diatomic Molecules: I. Experimental Data”, Rev. Mod. Phys. 38, 1-35, 1966.

著者紹介



하성철

1940년 12월 25일생. 1966년 2월 하대학 전기공학과 졸업. 1985년 1월 명지대 전기공학과 졸업(공학). 1993년 현재 동국대학교 전기공과 부교수. 당 학회 편수이사.



윤상호

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



하영선

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



백승권

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