

Na-He혼합증기중에서 충돌단면적에 의한 전자군의 수송계수 해석

Analysis of Electron Swarm Transport Coefficients by Collision Cross Section in Na-He Gas Mixtures

하 성철* · 백 수현*

Sung-Chul Ha · Soo-Hyun Baek

요 약

볼츠만 수송방정식에 관한 홀스타인의 식을 사용하여, 온도는 273(°K), 상대전계의 세기가 $1 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr)인 때의 Na와 He 단일기체중을 통과하는 전자의 에너지분포함수와 수송계수를 계산하였다. 그리고 전자 이동속도의 결과치를 실험값과 비교하였으며, 실험치와 계산치가 일치하도록 충돌단면적을 수정하여 계산에 적용하였다. 이러한 방법으로 He는 0.1[eV]~50[eV]까지 Na는 0.1[eV]~5[eV]까지의 에너지범위에서 결정된 운동량변환단면적의 값은 제한된 범위에서 Crompton 및 Nakamura의 값과 거의 일치하였다. 또한 이와 같이하여 계산된 Na와 He 단일기체의 충돌단면적을 이용하여 온도는 273(°K), 상대전계의 세기는 $1 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr)의 범위에서, Na-He혼합증기의 혼합비율을 He : Na는 99.5 : 0.5, 99 : 1, 9 : 1, 1 : 1로 변화시켜 특성에너지, 평균에너지, 전하이동속도, 전자에너지 분포함수를 계산하였다.

ABSTRACT

Energy distribution functions and transport coefficients have been calculated for electrons moving through He and Na pure gas under the action of uniform electric field for $1 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr), at 273(°K), using Holstein form of Boltzmann transport equation. And then the resulting Values of electron drift velocity were compared with experimental data and the adjustment was made in assumed Cross Sections until good agreement is obtained. The momentum transfer Cross Section determined in this method agrees well with the in restricted energy range. That is, the momentum transfer

* 동국대학교 전기공학과

이 논문은 1989년도 문교부 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

Cross Sections for He and Na are obtained in the range of $0.1 \sim 50$ [eV], $0.1 \sim 5$ [eV] respectively. Moreover, by using the Cross Sections of He and Na pure gas, the energy distribution function, electron drift velocity, mean energy and ratios of diffusion coefficients to mobility D/μ of Na-He gas mixtures have been calculated for $1 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr), at 273° K, in He-Na mixed proportions of 99.5 : 0.5, 99 : 1, 9 : 1, 1 : 1.

1. 서 론

약전리기체중에서 운동하는 하전입자는 전기계의 영향으로 기체분자와 충돌을 반복하면서 진행한다. 이 결과 전자군의 운동은 기체의 종류, 기체의 밀도, 온도 및 전기계의 세기에 따라 시간과 더불어 이동·확산한다. 이와 같은 전자군의 운동과 전기적 성질을 파악하기 위하여 전자기동속도, 확산계수 등의 전자군 파라미터가 이용되고 있다. 전자군 파라미터는 기체레이저, 플라즈마프로세싱, 방전램프, 기체절연과괴 등과 같은 응용분야에서 전기적 성질의 예측 및 해석을 위해 필수량이며, 전자와 분자의 충돌단면적을 추정하는데 있어서 유용한 량이다. 그러므로 전자군 파라미터 값을 정확히 결정하는 것은 매우 중요하며, 특히 전자기동속도는 전자에너지 분포함수와 수송계수의 이론적 계산 및 기체분자의 운동량변환단면적을 결정하기 위한 기본적인 량이며 이의 해석을 위해 볼츠만의 수송방정식이론을 이용하고 있다. 한편 전자군의 이동속도를 측정하는 방법으로써는 비행시간법(Time of Flight), 펄스타운젠트법(Pulse Townsend) 및 정상태운젠트법(Steady State Townsend)이 있으며 T. O. F법과 P. T법은 음극에서 조사된 초기전자에 의해 전자군의 밀도(n)가 위치(r)와 시간(t)의 함수로써 측정된다. S. S. T법은 평행평판전극의 음극에 연속적으로 자외선을 조사하여 초기전자를 공급

하면서 간극(d)에 관한 함수로써 정상적인 전류를 측정하는 방법이다. 종래에는 전자군의 하전입자수를 시간이 지나도 변하지 않는 입자수보존계로 취급하였으나 실제로는 전계가 가해지고 있는 기체공간에서 전리충돌 및 전자부착이 일어나므로 비보존계가 되고 이것이 전자군 파라미터에 영향을 끼친다.

따라서 본 논문에서는 전자군의 운동을 파악하기 위해 볼츠만방정식에 의한 해석방법을 이용하며, 이를 위해 충돌단면적을 예측하여 전자에너지분포함수를 계산하고, 그 값으로부터 전자군의 수송계수를 산출하고, 측정된 전자기동속도를 본 연구의 계산결과와 비교하여 충돌단면적을 결정한다. 전계가 인가된 Na-He혼합기체중을 전자가 운동할 때 전자군 파라미터의 물리적인 량과 전기적 성질을 정량적으로 산출하는 것이다. 따라서 He와 Na를 단일기체상태에서 온도는 273° K, 상대전계의 세기는 $1 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr)의 범위에서 전자기동속도의 값을 볼츠만방정식을 이용하여 계산하고, 실험에 의해 측정된 전자기동속도와 비교하였으며, 실험치와 계산치가 일치하였을 때 He 및 Na의 운동량변환단면적(Q_m), 여기단면적(Q_{ex}), 및 전리단면적(Q_i)등을 결정하였다. 또한 이 충돌단면적을 이용하여 He와 Na를 혼합하였을 때의 전자에너지분포함수 및 수송계수의 값을 상대전계의 세기는 $1 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr)의 범위에서 전자기동속도의 값을 볼츠

만방정식을 이용하여 계산하고, 실험에 의해 측정된 전자이동속도와 비교하였으며, 실험치와 계산치가 일치하였을 때 He 및 Na의 운동량변환단면적(Qm), 여기단면적(Qex), 및 전리단면적(Qi)등을 결정하였다. 또한 이 충돌단면적을 이용하여 He와 Na를 혼합하였을 때의 전자에너지분포함수 및 수송계수의 값을 상대전계의 세기는 $1 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr), 온도는 273(°K), 혼합비율은 He : Na = 99.5 : 0.5, 99 : 1, 9 : 1, 1 : 1의 조건에서 볼츠만 방정식을 이용하여 계산하고, 이 때의 운동량변환단면적(Qm), 전자여기단면적(Qex), 전리단면적(Qi) 등의 영향을 고찰하였다.

2. 볼츠만 방정식

기체중을 운동하는 전자의 에너지분포함수는 다음과 같은 볼츠만 수송방정식으로 부터 얻는다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \vec{a} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}} \quad (1)$$

$$\vec{a} = -eE/m, f=f(\vec{r}, \vec{v}, t)$$

단 전극은 평면평행전극판으로 하고 전계는 극판과 수직방향(X축방향)을 취하므로 에너지분포함수 $f(\epsilon)$ 는 y축 및 z축에는 무관하다. 또한 좌변의 제 1항의 분포함수의 시간적 변화, 제 2항은 입장의 운동에 의한 확산, 제 3항은 외력의 영향 그리고 우변의 $\frac{\partial f}{\partial t}$ 항은 전자와 전자, 이온과 중성분자와의 충돌에 따른 $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 의 변화의 비율로 나타내는 항인데, 여기에는 탄성충돌항, 여기충돌항, 초탄성충돌항, 전리충돌항 및 부착충돌항 등이 포함된다.¹⁾ 또한 식(1)로부터 얻는 전자분포함수

$f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 시간과 위치의 함수로 표시되는 전자의 밀도 $n(\vec{r}, t)$ 와 에너지분포함수 $f(\epsilon)$ 로 분리하여 다음과 같이 표시한다.

$$f(\vec{r}, \vec{v}, t) = n(\vec{r}, t) f(\epsilon) \quad (2)$$

여기서 에너지분포함수 $f(\epsilon)$ 은 위치(r)와 시간(t)에 대하여 독립적이어야 하는데, $f(\epsilon)$ 이 위치(r)에 독립적이라는 가정은 전자의 확산(Diffusion)이 전자이동(Drift)에 비해 무시되어질 때 가능하며, 또한 $f(\epsilon)$ 이 시간(t)에 대하여 독립적이라는 가정은 이동(Drift)시간이 에너지 이완(Relaxation)시간 보다 훨씬 길게 될 때 가능하다.²⁾

따라서 탄성 여기산란 및 전리의 효과를 고려하고 단일기체인 경우의 볼츠만방정식은 다음과 같다.³⁾

$$\frac{d}{d\epsilon} \left[\frac{e^2 E^2 \epsilon}{3N Q_m(\epsilon)} \frac{d}{d\epsilon} f(\epsilon) \right] + \frac{2m}{M} \frac{d}{d\epsilon} \left[\epsilon^2 N \times Q_m(\epsilon) \left\{ f(\epsilon) + kT \frac{d}{d\epsilon} f(\epsilon) \right\} \right] + \sum_i \left[(\epsilon + \epsilon_i) \times f(\epsilon + \epsilon_i) N Q_i(\epsilon + \epsilon_i) - \epsilon f(\epsilon) N Q_i(\epsilon) \right] + \int_{\epsilon}^{\infty} N Q_i(\epsilon_x + \epsilon_i) f(\epsilon_x + \epsilon_i) P_i(\epsilon/\epsilon_x) d\epsilon_x - N Q_i(\epsilon) \epsilon f(\epsilon) = 0 \quad (3)$$

여기서

N : 기체분자 수밀도 m : 전자의 질량

M : 기체분자의 질량 T : 절대온도(°K)

K : 볼츠만 정수 e : 전자의 전하량

Qm : 운동량변환단면적

Q : 여기충돌단면적 Qi : 전리충돌단면적

$p_i(\epsilon/\epsilon_x) d\epsilon_x$: $\epsilon_x + \epsilon_i$ 인 에너지를 갖는 전자가 ϵ 과 $\epsilon + d\epsilon$ 인 범위의 에너지를 갖는 확률이며 $d\epsilon/\epsilon_x$ 로 근사화된다.

또한 혼합기체에 적용하는 경우에는 다음과 같다.⁴⁾

$$\begin{aligned} & \frac{1}{3} \left[\frac{E}{N} \right]^2 \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left[\sum_s \frac{\epsilon}{P_s Q_{sm}(\epsilon)} \frac{\partial f(\epsilon)}{\partial \epsilon} \right] \\ & + \left[-\frac{kT}{e} \right] \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left[\epsilon^2 \frac{\partial f(\epsilon)}{\partial \epsilon} \sum_s P_s \left\{ (Q_{sm}(\epsilon) \frac{2m}{M_s}) \right\} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left[\epsilon^2 f(\epsilon) \sum_s P_s \left\{ Q_{sm}(\epsilon) \frac{2m}{M_s} \right\} \right] + \sum_s P_s \left[\right. \\ & \left. (\epsilon + \epsilon_{si}) Q_{sj}(\epsilon + \epsilon_{sj}) - \epsilon Q_{sj}(\epsilon) f(\epsilon) \right] + \sum_s \left[\right. \\ & \left. P_s Q_{sj}(\epsilon_x + \epsilon_{sj}) f(\epsilon_x + \epsilon_{sj}) (\partial \epsilon / \epsilon_x) - P_s Q_{sj}(\epsilon) \right. \\ & \left. \times \epsilon f(\epsilon) \right] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

- M_s : s번째 기체분자의 질량
- P_s : s번째 기체의 분압
- ϵ_{sj} : s번째 기체의 여기에너지
- ϵ_{si} : s번째 기체의 전리에너지
- Q_{sm} : s번째 기체분자의 운동량변환단면적
- Q_{sj} : s번째 기체분자의 여기단면적
- Q_{si} : s번째 기체분자의 전리단면적

식(3) 및 식(4)로부터 계산된 에너지분포함수 $f(\epsilon)$ 과 다음의 식을 이용하여 전자기동속도 (Vd), 확산계수(D), 전자평균에너지($\bar{\epsilon}$) 및 전자특성에너지(D/μ)등의 수송계수를 계산한다.⁵⁾

$$v_d = -\frac{E}{3} \left[\frac{2e}{m} \right]^{1/2} \int_0^\infty \frac{\epsilon}{N \sum_s P_s Q_{sm}(\epsilon)} \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(\epsilon) d\epsilon \quad (5)$$

$$D = \frac{E}{3} \left[\frac{2e}{m} \right]^{1/2} \int_0^\infty \frac{\epsilon}{N \sum_s P_s Q_{sm}(\epsilon)} \frac{\partial}{\partial \epsilon} f(\epsilon) d\epsilon \quad (6)$$

$$\bar{\epsilon} = \int_0^\infty \epsilon^{3/2} f(\epsilon) d\epsilon \quad (7)$$

$$D/\mu = -\frac{1}{e} \frac{\int_0^\infty [f(\epsilon)/Q_{sm}(\epsilon)] d\epsilon}{\int_0^\infty [\epsilon/Q_{sm}(\epsilon)] [df/d\epsilon] d\epsilon} \quad (8)$$

$$f(\epsilon) = A \exp \left[-\int_0^\epsilon \frac{d\epsilon}{[ME^2 e^2 / 6mN^2 Q_{sm}^2(\epsilon) \epsilon] + kT} \right] \quad (9)$$

여기서 에너지분포함수 $f(\epsilon)$ 는 다음과 같이 정규화 하였다.

$$\int_0^\infty \epsilon^{1/2} f(\epsilon) d\epsilon = 1 \quad (10)$$

위의 식(3), 식(4), 식(5) 및 식(9)는 전자에너지 분포함수와 전자기동속도가 운동량변환단면적(Q_m)의 값에 크게 의존하며, 비탄성충돌은 단지 전자가 높은 에너지에 도달하는 것을 방지하는 것을 의미한다.

3. 해석 결과 및 검토

기체중에서는 전자의 수송계수를 산출하기 위해서는 식(5), 식(6), 식(7)에서 알 수 있는 것과 같이 전자에너지분포함수를 필요로 하고 이를 위해 식(3)을 적분하여야 하며, 이 때 충돌단면적이 필요하다. 따라서 필요한 단면적을 추정하고, 식(3)을 이용하여 전자에너지 분포함수를 계산한 다음, 식(5)을 이용하여 전자기동속도(Vd)를 계산하고, 이 때의 이동속도의 계산치와 실험치를 비교하여, 이를 두 값이 서로 일치하도록 충돌단면적의 값을 계속 수정하여 계산함으로써 He와 Na의 충돌단면적의 값을 결정하였다. 그리고 이 때의 전자에너지분포함수를 이용하여 전자기동속도뿐만 아니라 확산계수, 평균에너지 및 이동도등의 수송계수를 산출하였으며, 또한 이와 같이 하여 결정된 충돌단면적을 식(4)에 대입

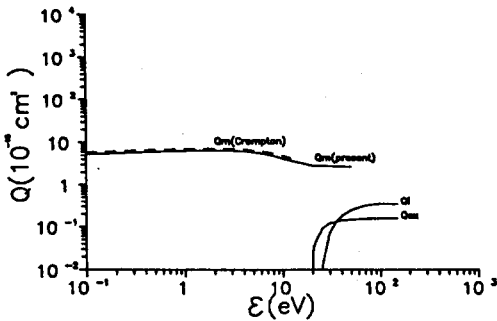


그림 1. He의 충돌단면적
Fig. 1. Collision Cross Section of Helium.

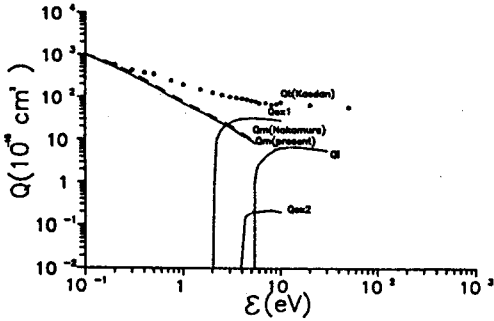


그림 2. Na의 충돌단면적
Fig. 2. Collision Cross Section of Sodium.

하여 두 기체의 혼합비율과 전계의 세기의 변화를 주면서 혼합증기의 전자에너지분포 함수와 수송계수를 산출하였다.

1) 충돌 단면적 및 전자기동속도

He의 충돌단면적은 그림 1과 같이 운동량 변환단면적(Q_m)과 여기단면적(Q_{ex}) 및 전리 단면적(Q_i)를 결정하였다. 운동량변환단면적(Q_m)의 값은 0.1~

10[eV]의 에너지 범위에서는 Crompton⁶⁾의 범위에서는 Crompton & Milloy¹³⁾의 실험값과 일치하며, 상대전계의 세기 $5 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr)의 범위에서는 Stern¹⁴⁾의 값과 일치하였다. 또한 Na의 단면적은 He의 경우와 같은 방법으로 계산하여 그림 2에 표시하였는

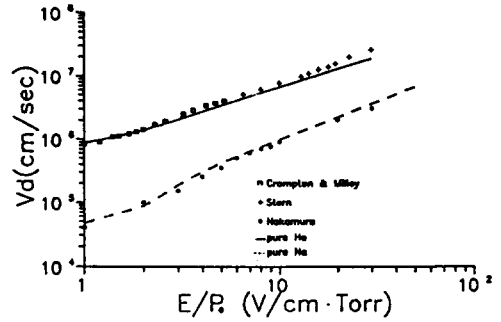


그림 3(a). He 및 Na체중에서 전자기동속도의 계산치와 실험치의 비교
Fig. 3(a). Comparison between Theoretical and Experimental Values of Electron Drift Velocity in Helium and Sodium.

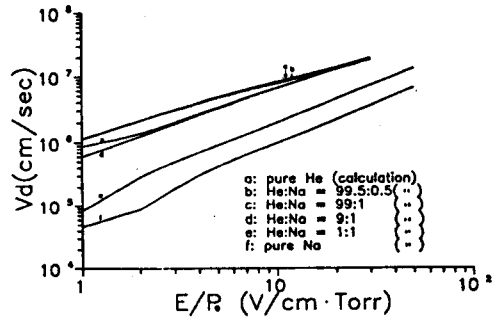


그림 3(b). He, Na 및 Na-He 혼합증기중에서 전자기동속도의 계산치
Fig. 3(b). Theoretical Values of Electron Drift Velocity in He, Na and Na-He Mixtures

데 운동량변환단면적(Q_m)은 Kadsan¹⁵⁾의 전 충돌단면적(Q_T)를 이용하여 결정하였다. 이와 같이 하여 계산된 값은 Nakamura의 계산값과 거의 일치하였다. 그리고 여기단면적(Q_{ex})의 값은 Enmark¹⁶⁾의 값을 이용하여 계산하였고 전리 단면적(Q_i)은 McFarland¹⁷⁾의 값을 이용하여 계산하였다. 그 결과 Na증기중에서 전자속도(V_d)는 그림 3(a) 표시한 것과 같이 Nakamura²⁰⁾의 실험치와 거의 일치하였다.

그리고 그림 3(b)에 He, Na와 Na-He혼합 값을 이용하였고, 그 이외의 범위에서는 외삽법에 의한 예측값을 적용하여 계산하였는데, Crompton의 값과 약간의 차이가 나타났다. 이는 Crompton은 전자의 이동속도를 상대전계의 세기가 $E/P_0 \leq 10$ (V/cm Torr)인 범위에서 측정하여 계산된 단면적이기 때문이라고 생각되며, 여기단면적(Q_{ex})의 값은 $Q_{ex1} \sim Q_{ex7}$ 까지 Bron-gersma⁷⁾, Jobe⁸⁾, Westerveld⁹⁾, Moustafa¹⁰⁾, Heer¹¹⁾의 값을 평균하여 이용하였고, 전리단면적(Q_i)의 값은 Rapp¹²⁾의 값을 이용하여 계산하였다. 이와 같이 계산된 전자이동속도(V_d)의 값과 실험에 의해 측정된 값을 비교하여, 그림 3(a)에 나타내었다. 여기서 상대전계의 세기가 $E/P_0 \leq 5$ (V/cm Torr)인 증기의 혼합비율에 따른 전자 이동속도(V_d)의 계산치를 나타내었다. 순수He중에서의 전자 이동속도(V_d)의 값이

He : Na=99.5 : 0.5 및 99 : 1의 경우보다 작게 나타나고 있다. 이는 식(5)에서 알 수 있는 바와 같이 전자이동속도(V_d)는 운동량변환단면적(Q_m)의 크기에 반비례하고 전자에너지 분포함수의 변화율($\partial f/\partial \epsilon$)에 정비례하는데,

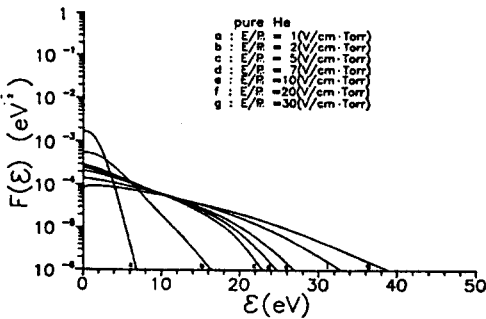


그림 4. 순수He 중에서의 전자에너지 분포함수
Fig. 4. Electron Energy Distribution Function in Pure He.

He의 운동량 변환단면적(Q_m)이 Na의 Q_m 보다 작은 값을 갖고 있으므로 두 기체가 혼합되면 He의 Q_m 보다 커지게 되므로 V_d 의 값은 작아져야 하지만, 그림 4, 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 에너지분포함수의 변화율은 오히려 점점 커지게 되므로 전자이동속도(V_d)가 Q_m 의 영향보다는($\partial f/\partial \epsilon$)의 영향을 더욱 많이 받아 전자이동속도(V_d)의 값이 커지게 된다.

2) 전자에너지 분포함수

전계를 가한 혼합증기중을 이동·확산하는 전자군의 에너지분포함수의 형태는 전자-분자 사이에서 각종 충돌단면적 및 전자수송계수와 직접적으로 관련된다. 따라서 전자에너지분포함수 $f(\epsilon)$ 를 식(10)과 같이 정규화하고 E/P_0 를 변수로 하여 상대전계의 세기가 $1 \leq E/P_0 \leq 30$ (V/cm Torr)인 범위에서 계산하였다.

그림 4에 He의 전자에너지 분포함수를 나타내었는데, 대체로 에너지의 값이 20[eV]에 이르면 에너지분포함수의 변화율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 He의 비탄성충돌단면

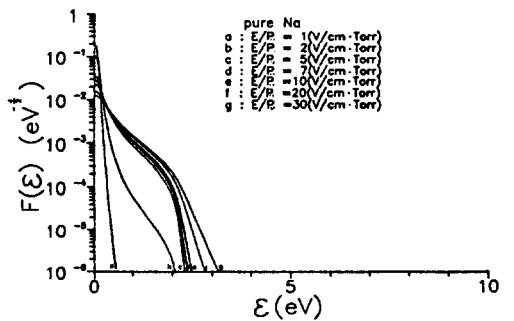


그림 5. 순수Na증기중에서의 전자에너지의 분포함수
Fig. 5. Electron Energy Distribution Function in Pure Na.

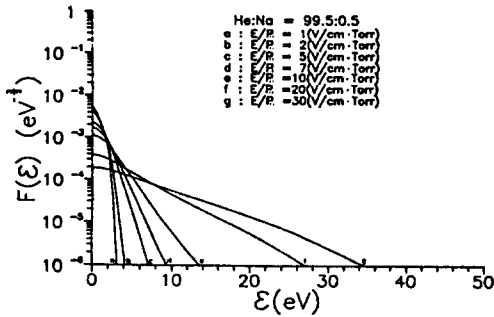


그림 6. He : Na=99.5 : 0.5인 경우의 Na-He혼합증기중에서의 전자에너지 분포함수

Fig. 6. Electron Energy Distribution Function for He : Na=99.5 : 0.5.

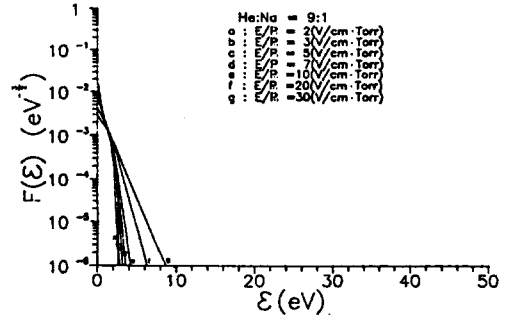


그림 8. He : Na=9 : 1인 경우의 Na-He혼합증기중에서의 전자에너지분포함수

Fig. 8. Electron Energy Distribution Function for He : Na=9 : 1.

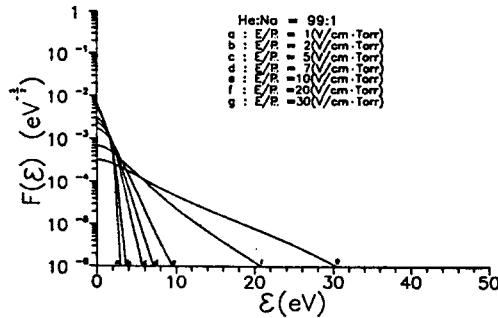


그림 7. He : Na=99 : 1인 경우의 Na-He혼합증기중에서의 전자에너지 분포함수

Fig. 7. Electron Energy Distribution Function for He : Na=99 : 1.

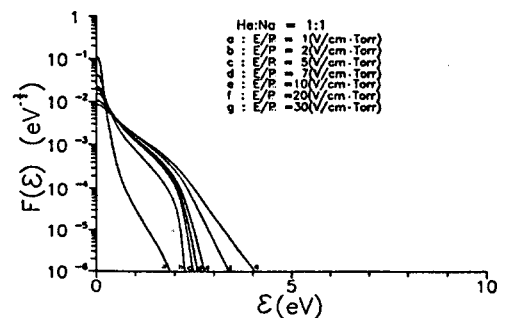


그림 9. He : Na=1 : 1인 경우의 Na-He혼합증기중에서의 전자에너지 분포함수

Fig. 9. Electron Energy Distribution Function for He : Na=1 : 1.

적(Q_{ex}, Q_i)의 값이 20[eV]에 이르면 나타나기 때문에 생기는 현상이고 E/P_0 가 커질수록 여기단면적(Q_{ex})과 전리단면적(Q_i)의 영향을 적게 받음을 알 수 있다. 또한 Na의 경우를 그림 5에 나타내었는데 분포함수의 변화율이 2[eV]를 지나면서 급격히 변화함을 알 수 있다. 이것도 역시 Na의 비탄성충돌단면적(Q_{ex}, Q_i)이 2[eV]를 지나면서 발생하기 때문에 나타나는 현상이다. 그림 6, 그림 7, 그림 8, 그림 9에 He : Na=99.5 : 0.5 99 : 1, 9 : 1,

1 : 1인 경우의 전자에너지분포함수를 나타내고 있는데 전체적으로 Na의 전자에너지분포함수의 유사한 모양으로 나타나고 있으며 특히 E/P_0 의 값이 작을수록 Na의 비탄성충돌의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

3) 평균에너지 및 특성에너지

그림 10에 He, Na 및 Na-He혼합증기중에서의 평균에너지를 나타내었다. He중에서의 평균에너지는 $E/P_0=3(V/cm Torr)$ 을 지나면서 에너지의 증가가 현저히 He의 평균에너지

가 아니라 He 중에서의 전자의 에너지 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 그림 1의 He의 충돌단면적에서 알 수 있는 것처럼 비탄성충돌단면적(Qex, Qi)의 영향과 그림 4 He중에서의 에너지분포함수에 나타난 바와 같이 $3 \leq E/P_0$ (V/cm Torr)의 범위에서 비탄성충돌의 영향을 받아 전자에너지분포함수의 기울기가 변화하는 것과 일치하고 있다. 또한 Na의 경우 $E/P_0=4$ (V/cm Torr)를 지나면서 에너지의 증가가 감소하는 것은 그림 2의 Na충돌단면적에 표시된 비탄성충돌(Qex, Qi)의 영향을 전자에너지의 상승이 방해받는 것이며, 이것은 그림 5에 표시된 Na의 전자에너지분포함수에서 알 수 있는 바와 같이 $4 \leq E/P_0$ (V/cm Torr)의 범위에서 비탄성충돌의 영향을 받아 에너지분포함수의 기울기가 현저하게 변화하기 때문이다. 그리고 혼합증기에 있어서는 전자이동속도(Vd)와는 달리 He : Na = 1 : 1의 경우 Na의 경향과 거의 일치하고, He : Na = 99.5 : 0.5의 경우에 있어서도 Na의 경향으로 치우치고 있는데, 이것은 Na의 비탄성충돌의 영향이 아주 현저하기 때

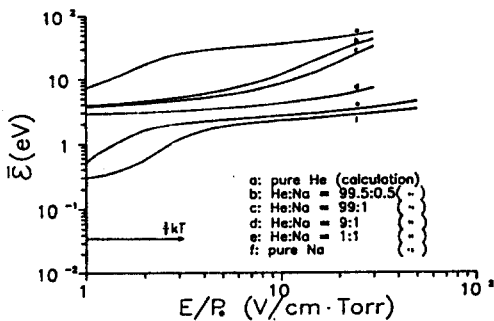


그림 10. He, Na 및 Na-He혼합증기중에서의 평균 에너지

Fig. 10. Mean Energy in He, Na and Na-He Gas Mixtures.

문이다. 또한 그림 11은 특성에너지(D/μ)를 나타내었다. 맥스웰(Maxwell)분포일때 특성에너지와 평균에너지는 다음과 같은 아인슈타인(Einstein)의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$D/\mu = kT/e = 2\bar{\epsilon}/3e$$

이 식으로부터 알 수 있는 바와 같이 273(°K)에서 $kT = 1.38 \times 10^{-23} [J/°K] \times 273 [°K] = 376, 74 \times 10^{-23} [J], 1[eV] = 1.6 \times 10^{-19} [J]$

$$\therefore \frac{kT}{e} = 0.0235 [V]$$

kT/e 의 값은 0.02352(V)이고 이 값이 그림 11에 표시되었는데 계산된 D/μ 의 값이 kT/e 보다 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한 평균에너지의 경우에 있어서도 $3kT/2 = 0.03528 [eV]$ 의 값과 같아야 하지만 그림 10에서 나타난 것과 같이 계산된 평균에너지의 값이 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 He와 Na 및 Na-He혼합증기는 모두 비맥스웰분포상태로 나타나고 있다.

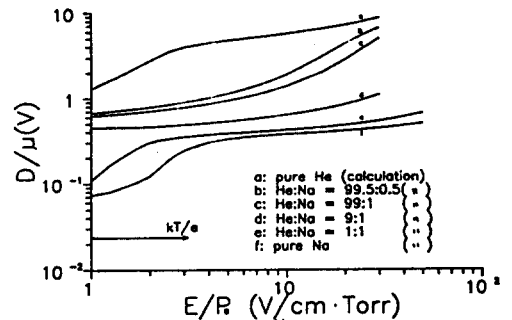


그림 11. He, Na 및 Na-He혼합증기중에서의 D/μ
Fig. 11. D/μ in He, Na and Na-He Gas Mixtures.

4. 결 론

Na He 및 Na-He혼합증기중에서 볼츠만방정식에 의한 전자수송계수의 해석결과는 다음과 같다.

- 1) Na-He혼합증기중에서 He에 미량의 Na를 첨가함으로써 이동속도 및 특성 에너지가 크게 변화는 경향이 나타났다.
- 2) Na-He혼합증기중에서 전자에너지 분포함수 $f(\epsilon)$ 를 구하였고, 그 분포함수로부터 계산한 수송계수와 일치하는 운동량변환단면적, 여기 및 전리단면적을 결정하였다.
- 3) Na-He혼합증기중에서 전하이동속도는 혼합비율에 따라서 단일기체의 값보다 크게 나타났다.
- 4) E/P_0 가 낮은 범위에서 전자의 평균에너지는 거의 $3KT/2$ 에 접근하지만 $1 \leq E/P_0(V/cm \text{ Torr})$ 의 범위에서는 전자에너지 분포가 열평형상태에 있진 않으므로 비맥스웰분포 상태로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) Holstein; *Phys. Rev.*, **70**, (5), 367. (1946)
- 2) Y. Nakamura and J. Lucas; *J. Phys. D*, **11**, 337. (1978)
- 3) L. G. H. Huey and R. W. Crompton; "The Diffusion and Drift of Electrons in gases", John Wiley and Sons, Inc, 558. (1974)
- 4) J. J. Lowke, A. V. Phelps and B. W. Irwin; *J. Appl. Phys.*, **44**, (10), 4664. (1973)
- 5) L. S. Forst and A. V. Phelps; *Phys. Rev.*, **127**, (5), 1621. (1962)
- 6) R. W. Crompton; *Aust. J. Phys.*, **23**, 667. (1970)
- 7) H. H. Brongersma and F. W. E. Knoop; *Chem. Phys. Letter*, **13**, (2) 16. (1972)
- 8) J. D. Jobe, and R. M. St. John; *Phys. Rev.*, **164**, (1), 117. (1967)
- 9) W. B. Westerveld, and H. G. M. Heideman and J. Van Eck; *J. Phys. B*, **12**, (1), 115. (1979)
- 10) H. R. M. Moussa and F. J. De Heer; *Physica*, **40**, 517, (1969)
- 11) F. J. Heer and R. H. J. Jansen; *J. Phys. B*, **10**, 3741, (1977)
- 12) D. Rapp and P. Englander-Gelden; *J. Chem. Phys.*, **43**, (5), 1464, (1965)
- 13) H. B. Milloy and R. W. Crompton; *Phys. Rev. A*, **15**, (5), 1847, (1977)
- 14) R. A. Stern; "Proceedings of the Sixth International Conference Phenomena in Gases," (1) 331, (1963)
- 15) A. Kasdan, T. M. Miller and B. Bederson; *Phys. Rev.*, **8**, (3), 1562, (1973)
- 16) E. A. Enmark and A. Gallagher; *Phys. Rev.*, **6**, 193, (1972)
- 17) R. H. Mcforland and J. D. Kinney; *Phys. Rev.*, **137**, 1058, (1964).

(1990년 3월 31일 접수)