

## 무전극 램프의 방전가스 연구

김근\*, 전병훈\*  
동국대학교\*

### A Study on discharge gas of Fluorescent Induction Lamp

Keun Kim\*, Byung-hoon Jeon\*  
Dongguk University\*

**Abstract** - Pure Xe, Kr and Ne atoms and Mixures of Xe-Ne used in fluorescent induction lamps(FILs). However standard regulation of FILs is not made up until now. Therefore, the electron transport coefficients, the electron drift velocity W, the longitudinal diffusion coefficient  $ND_L$  and the ionization coefficient  $\alpha/N$  in pure Xe, Kr, Ne gases and Xe-Ne mixtures(1:9, 5:5, 7:3) were calculated over the wide E/N range from 0.01 to 500 Td at 1 Torr by two-term approximation of the Boltzman equation.

$Z_m(t_k)$ 라고 하면, 종속확산계수  $D_L$ 은 전자의 전계 방향의 위치분산으로 표현하여 식 2.3으로 표현할 수 있다.

$$D_L = \frac{1}{2!M_k} \sum_{j=1}^{M_k} Z_j - Z_m(t_k)^2 \quad 2.3$$

또한 SST(Steady State Townsend Experiment)기법에 의해 전리주파수를 얻으며 전리주파수와 이동속도의 관계로부터 전리계수 값을 구할 수 있다[5].

### 1. 서 론

기체는 전계중에서 방전현상으로 전자군의 성질이 변화하게 되며 이것을 해석하기 위해서 전하이동속도, 전리계수, 부착계수, 실효전리계수, 종·횡방향확산계수, 평균에너지 및 전자에너지 분포함수를 파악하는 것이 필수불가결하다. 이와 같은 전자수송특성을 해석하기 위해서 정확한 전자충돌단면적이 필요하며, 이를 이용한 전자수송계수의 특성은 볼츠만 방정식과 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 해석할 수 있다[1][2].

본 연구에서 이용되고 있는 Xe, Kr과 Ne 원자기체는 무전극 형광램프의 방전관 주입기체로 주로 사용되고 있지만, 그 주입기체의 적절한 혼합비율에 대한 표준화를 찾지 못하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 기존의 비율[3]과 새로운 비율의 혼합가스를 비교·분석하고, 전자군 방법을 이용하여 Xe, Kr과 Ne 원자기체의 전자충돌단면적을 이용하여, 압력 1 Torr와 온도 300 K의 조건에서 E/N을 0.01에서 500 Td까지 광범위하게 변화시키며 각각의 순수원자기체 및 혼합기체의 전하이동속도 W, 종방향 확산계수  $ND_L$ , 전리계수  $\alpha/N$ 의 전자수송계수를 계산하고 이를 물성적으로 해석하였다.

### 2. 2항 근사 볼츠만방정식 해석

2항 근사와 다항근사 볼츠만 방정식은 몬테카를로 시뮬레이션 기법과 함께 기체중에서 하전 입자군의 수송계수를 측정하는 방법으로 이용되고 있으며, 열평형 상태가 아닌 다입자계(多粒子系) 운동의 기술을 이용하여 전자군의 거동 해석에 이용되고 있다. 볼츠만 방정식은 전자의 거동을 거시적 형태인 분포함수로 나타내고, 이 분포함수에서 전자수송계수를 산출한다. 이러한 방법은 충돌의 확률적인 성질을 기초로 하여 전자군 발달의 통계적 변동은 일어나지 않으며, 통계 시간은 비교적 짧은 장점을 가지지만, 미적분 방정식으로 되어있으므로 일반적으로 그 해를 산출하는 것이 어렵다. 본 연구에 이용된 불활성기체는 탄성충돌과 비탄성의 여기 및 전리충돌단면적으로 이루어져 있기 때문에 2항 근사에 의해서도 정확한 산출 값을 얻고 있다[4].

본 연구는 2항 근사 볼츠만 방정식에서 TOF(Time of flight)법을 이용하여 전자수송계수 산출을 하였는데, TOF에서는 위치와 시간을 함께 지정하기 때문에 샘플수가 적으며, 에너지 속도분포를 구하는 과정 중에 샘플수가 점차적으로 줄어들기 때문에 통계적 변동이 다수 포함된 결과로 나타나기가 쉽다. 전자수를 많이 택하면 그에 비례하여 컴퓨터의 계산시간도 비례하여 증가하므로 이를 보완하기 위해 순수한 관측법에서의 차이를 지정하는 영역에서 일정한 폭을 갖게 한다. TOF 샘플링 방법으로 방전공간의 전하이동속도, 확산계수를 구하기 위해서는 시간  $t_k$ 에서의 전자군 중심의 평균위치  $\langle Z(t_k) \rangle$ 는 다음과 같이 식 2.1로 나타내며, 이에 따른 전자군의 이동속도 W는 식 2.2와 같이 주어진다.

$$\langle Z(t_k) \rangle = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} Z_j(t_k) \quad 2.1$$

$$W = \frac{\langle Z(t_{k+1}) \rangle - \langle Z(t_k) \rangle}{(t_{k+1} - t_k)} \quad 2.2$$

한편 전자의 확산계수는 시간  $t_k$ 일 때 전자의 전계방향의 중심위치를

### 3. 전자 충돌 단면적

본 논문에서 사용한 Xe, Kr과 Ne 원자기체의 전자충돌단면적[6]을 각각 그림 1~3에 나타내었다. 이들 전자충돌단면적은 전자의 특성을 파악하는 기초 자료로써 상당히 중요하다.

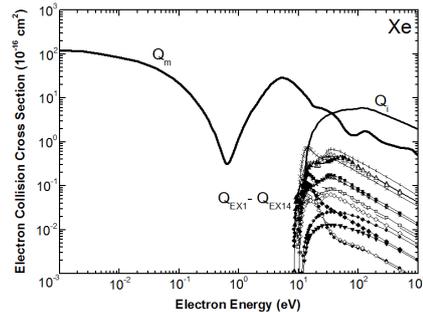


그림 1. Xe원자기체의 전자충돌단면적

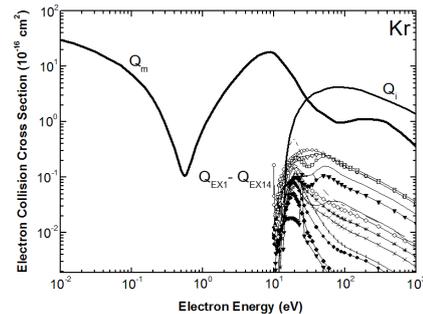


그림 2. Kr원자기체의 전자충돌단면적

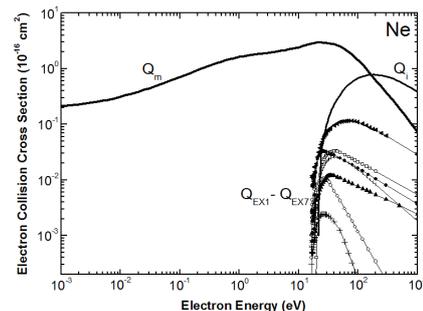


그림 3. Ne원자기체의 전자충돌단면적

이들 순수원자기체 중 Kr과 Xe의 경우 각각 9.915~13.437 eV와 8.315~11.58 eV 사이의 문턱에너지(threshold energy)를 가지고 있는 14 개의 여기단면적으로 구성되어 있으며, Ne의 경우에는 16.62~19.66 eV 사이의 문턱에너지를 가지는 7개의 여기단면적으로 구성되어 있다. 이를 통해 불활성기체는 그 원자번호가 낮아질수록 문턱에너지의 값이 높아짐을 알 수 있다. 그리고 운동량변환단면적에 있어서 Kr과 Xe의 경우에 0.4~0.8 eV의 낮은 에너지에서 RTM(Ramsauer Townsend minimum)을 볼 수 있지만, Ne의 경우에는 RTM이 존재하지 않음을 알 수 있다 [7].

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 전자기동속도

그림 4는 0.01~500 Td의 E/N범위에서 2항 근사 볼츠만 방정식을 이용한 각각의 순수원자기체(Xe, Kr, Ne)와 Xe-Ne혼합기체(Xe:Ne=1:9, 5:5, 7:3)의 전자기동속도 W의 계산결과를 보여주고 있다.

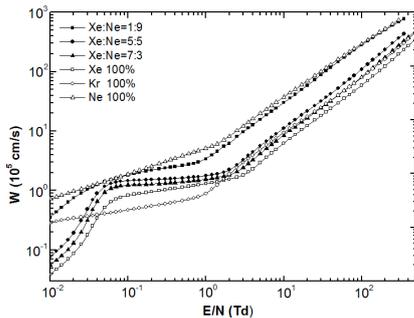


그림 4. 순수 Xe, Kr, Ne기체와 Xe-Ne혼합기체의 전자기동속도

Kr과 Xe 순수원자기체의 경우 전자기동속도 W가 일정 부분에서 부구배 특성(Negative Differential Conductivity, NDC)[8]을 나타낸다. Kr 순수원자기체가 Xe 순수원자기체보다 넓은 범위에서 NDC를 보이고 있는데, 이는 운동량변환단면적의 크기변화, RTM의 범위와 그 때의 단면적 값, 그리고 RTM 범위와 비탄성 여기단면적의 문턱에너지 값과의 차이에 의한 것으로 판단된다. Ne 순수원자기체는 E/N이 증가에 따라서 서서히 증가하다가 3 Td의 E/N 이후에 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 3 Td 이하의 E/N영역에서는 운동량변환단면적의 영향을, 3 Td 이상의 E/N영역에서는 여기단면적의 영향을 받아 전자의 이동속도가 증가한 것으로 사료된다. 한편 Xe-Ne 혼합기체(5:5, 7:3)의 경우 NDC 현상이 2 Td의 E/N 영역까지 나타나고, Xe-Ne 혼합기체(1:9)는 완만하게 전자기동이 증가하다가 1 Td의 낮은 E/N에서부터 전자기동이 급격히 증가한다.

##### 4.2 종방향 확산계수

그림5는 각각의 순수원자기체(Xe, Kr, Ne)와 Xe-Ne혼합기체(Xe:Ne=1:9, 5:5, 7:3)의 종축확산계수  $D_L$ 과 전자수밀도 N과의 곱의 관계인  $ND_L$ 을 E/N의 함수로 나타내었다.

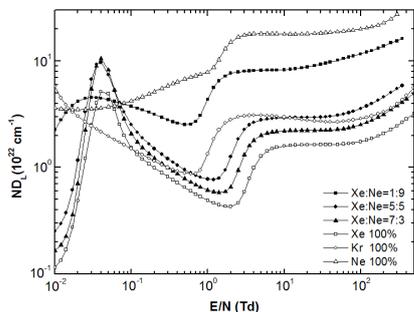


그림 5. 순수 Xe, Kr, Ne기체와 Xe-Ne혼합기체의 종축확산계수( $D_L$ )와 기체분자수밀도(N)의 곱

Kr과 Xe 순수원자기체의 경우 각각의 운동량단면적의 RTM영역에서 급격히 증가하다가 감소하는 NDC현상이 뚜렷이 나타나고 있지만, Ne 순수원자기체의 경우 거의 이러한 특성을 찾아볼 수 없다. Xe-Ne 혼합기체(5:5, 7:3)의 경우 NDC 현상이 뚜렷이 나타나고 있지만, Xe-Ne 혼합기체(1:9)는 이에 상대적으로 완만하게 증가를 하며 각각에 해당하는 Xe와 Ne 순수원자기체의 혼합비율에 따른 특성을 그대로 반영하고 있다.

#### 4.3 전리계수

그림 6은 각각의 순수원자기체(Xe, Kr, Ne)와 Xe-Ne혼합기체(Xe:Ne=1:9, 5:5, 7:3)의 전리계수  $\alpha/N$ 을 E/N의 함수로 나타낸 것이다.

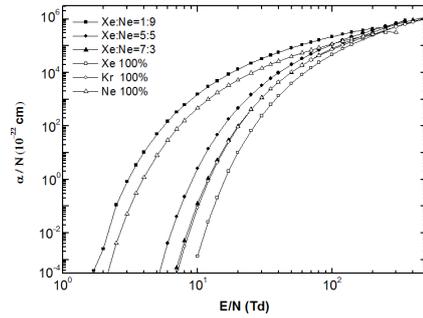


그림 6. 순수 Xe, Kr, Ne기체와 Xe-Ne혼합기체의 전리계수

전자가 전계 중에서 가속되어 전자의 운동에너지가 기체의 전리에너지를 넘으면 특정한 전리확률을 가지고 기체 분자에서 전리되게 된다. 그림 6의 모든 가스들은 낮은 E/N 영역에서 일정하게 증가를 하다가 높은 E/N의 영역에서는 거의 일정하게 증가하게 되는데, 이는 전자의 에너지가 증가하면 충돌할 때 상호 작용하는 시간이 너무 짧아서 전리하기 어렵기 때문이다. 또한 Ne 순수원자기체의 전리계수는 2 Td에서 전리가 시작되고, Xe 순수원자기체는 10 Td에서 전리가 시작하므로 혼합가스의 전리계수는 혼합비율에 따른 영향을 그대로 나타내었지만, Xe-Ne(1:9) 혼합기체의 경우에는 오히려 Ne 순수원자기체보다 낮은 E/N 영역에서 전리가 시작되는 현상이 나타났다.

#### 5. 결 론

볼츠만 방정식을 이용하여 Xe, Kr, Ne 순수원자기체, Xe-Ne(1:9, 5:5, 3:7)혼합기체의 전자기동속도 W, 확산계수  $ND_L$ , 전리계수  $\alpha/N$ 을 압력 1 Torr와 온도 300 K의 조건에서 E/N을 0.01에서 500 Td까지 변화시키며 계산을 하였다. 그 결과 기존에 제시되었던 Xe-Ne(5:5, 3:7)보다 Xe-Ne(1:9)의 비율이 더 낮은 E/N 영역에서 높은 전자기동속도를 가지며, 오히려 Ne 순수원자기체보다 더 낮은 E/N 영역에서 전리가 시작되는 특징이 있음을 알 수 있었다. 무전극 램프의 표준화에 있어서 더욱 다양한 종류의 기체를 더 많은 조건에서 변화시키며 최적의 기체의 종류와 비율, 압력 등을 결정하는 것이 과제로 남아있으며, 이와 함께 방전개시전압, 휘도와 같은 실제 무전극 램프의 특성을 해석할 수 있도록 기체의 물성적 특성을 이와 연결 지을 수 있는 데이터의 구축이 요구된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF6 : I. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, 922-930, 1988
- [2] H. Itoh and T. Musha, "Monte Carlo Calculations of Motions in Helium", J. Phys. soc. Japan, Vol.15, No.9, 1675-1680, 1960
- [3] H. I. Kim, "A Study on the Characteristics analysis and the standardization of Fluorescent induction Lamps", Thesis of Dongguk, 2007
- [4] S. C. Ha and B. H. Jeon, "A study of electron transport coefficient in Sih4-Ar mixture gas by using Boltzmann equation and Monte-Carlo simulation", J. KIEEME, 14, 169-174, 2001
- [5] A. E. D. Heylen, "Influence of Molecular Bonding on the Townsend Ionization Coefficients of Hydrocarbon Gases", J.chem.Phys, 38, 765-771, 1963
- [6] M. Hayashi, "Luminous layers in the prebreakdown region of low pressure noble gases", J. Phys. D, 1411-1418, 1982
- [7] L. S Frost and A. V. Phelps, "Momentum-transfer cross section for slow electron in He, Ar, Kr and Xe", Phys. Rev. A1538-45, 1964
- [8] Y. Nakamura and M. Kurachi, "Electron transport Parameters in Argon and its momentum transfer cross section", J.Phys, D21, 718-723, 1988