

## 저압 수은-아르곤 혼합기체 방전의 주파수에 따른 전압, 전류 변화의 이론적 해석

(A Theoretical Analysis of Voltage and Current in Low Pressure Mercury-Argon Mixture Gas Discharge with Frequency Variation)

이진우\*

(Chin-Woo Yi)

### 요 약

저압 수은-아르곤 혼합기체 방전을 이용하는 형광램프는 일정전력을 소비하는 경우, 전원주파수 1[kHz] 부근에서 전류는 최대값을 램프전압은 최소값을 갖는 현상을 나타낸다. 본 논문에서는 원자레벨의 방전 모델식을 만들어 입자밀도와 전자온도의 변화를 수치해석을 이용하여 계산하고, 이를 이용하여 전원주파수에 따라 형광램프의 전류와 램프전압이 변화하는 현상을 이론적으로 설명하였다.

### Abstract

A fluorescent lamp which uses low pressure mercury-argon gas discharge shows the maximum current and minimum lamp voltage near 1[kHz] source frequency at constant power. For explain these phenomena theoretically, in this paper a atomic level discharge model was made and particle density and electron temperature variation were calculated using numerical method.

Key Words : fluorescent lamp, current, lamp voltage, frequency variation

### 1. 서 론

저압 수은-아르곤 혼합기체의 방전현상을 이용하는 형광램프는 가장 많이 사용되는 매우 중요한 인공광원이다. 최근에는 에너지절약과 소형경량화라는 목적을 달성하기 위하여 전자식 안정기의 사용이

계속 증가하고 있다.

형광램프는 전원주파수를 변화시키면 이에 따라 램프전압과 전류가 변화하는 현상을 보이는 것은 실험적으로 확인할 수 있다. 이러한 현상에 대한 보고는 여러 문헌에 나타나고 있다[1]. 그러나 이러한 현상에 대한 이론적 해석은 아직까지 발표된 예가 없다.

본 논문에서는 주파수 변화에 따른 형광램프 전압과 전류의 변화를 설명하기 위하여 전자와 밀접한 관계가 있는 전자온도를 형광램프 방전 모델을 사용하여 정량적으로 계산하고 이를 사용하여 해석하였다.

\* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

Tel : 041-540-5655, Fax : 041-540-5693

E-mail : leejw@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2005년 1월 13일

1차심사 : 2005년 1월 24일

심사완료 : 2005년 2월 7일

저압 수은-아르곤 혼합기체 방전의 주파수에 따른 전압, 전류 변화의 이론적 해석

본 논문에서는 안정기로 인덕턴스, 저항 직렬회로를 사용하였다.

그리고 본 논문의 계산결과의 타당성을 보이기 위하여 T-12 40[W] 형광등회로가 램프소비전력 40[W]로 고정된 경우에 대하여 이론적인 계산치와 실험치를 비교하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 모델의 가정

본 논문에서는 다음과 같은 가정을 사용한다[2]~[4].

- (1) 방전 플라즈마는 약 이온화되어 있다.
- (2) 방전관 내의 모든 입자는 축 방향으로 균일하며, 축대칭이다.
- (3) 수은의 기저상태와 아르곤 가스 원자의 밀도는 방전관 공간 내에서 일정하다.
- (4) 수은의 에너지레벨은 대표적인 Hg( $6^1P_1$ ), Hg( $6^3P_0$ ), Hg( $6^3P_1$ ), Hg( $6^3P_2$ ) 여기레벨, Hg( $6^1S_0$ ) 기저레벨과 이온화레벨 등 6개 레벨을 고려한다.

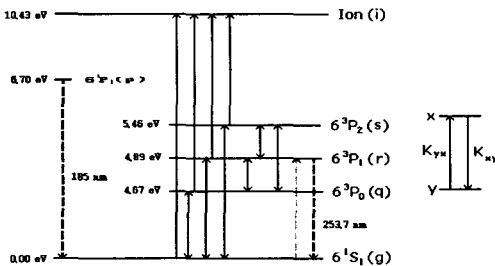


그림 1. 수은원자 에너지레벨과 천이확률계수의 정의  
Fig. 1. The Energy level of mercury atom and the definition of transition rate coefficients

### 2.2 모델 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} n_q(r,t) = -D_f \nabla^2 n_q(r,t) + n_e(r,t) [K_{gq} n_g + K_{rj} n_r(r,t) + K_{sq} n_s(r,t) - (K_{qg} + K_{qr} + K_{qs} + K_{qj}) n_q(r,t)] \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_r(r,t) = -D_f \nabla^2 n_r(r,t) + n_e(r,t) [K_{gr} n_g + K_{qr} n_q(r,t) + K_{sr} n_s(r,t) - (K_{rg} + K_{rq} + K_{rs} + K_{rj}) n_r(r,t)] - \frac{n_r(r,t)}{\tau_{\text{eff}}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_s(r,t) = -D_f \nabla^2 n_s(r,t) + n_e(r,t) [K_{gs} n_g + K_{rs} n_r(r,t) + K_{ss} n_s(r,t) - (K_{sg} + K_{sr} + K_{ss} + K_{sj}) n_s(r,t)] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e(r,t) = -D_e \nabla^2 n_e(r,t) + n_e(r,t) [K_{ge} n_g + K_{re} n_r(r,t) + K_{se} n_s(r,t) + K_{ee} n_e(r,t)] \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \{n_e(0,t) U_e(t)\} = n_e(0,t) [-\chi v_{\text{coll}} \{U_e(t) - U_g\} + \mu_e \{F(t)\}^2 + \sum_{x,y} K_{xy} n_x(0,t) \Delta U_{xy}] - \frac{n_e(r,t)}{\tau_{\text{eff}}} \Delta U_{eg} \times 1.1 \quad (5)$$

$$L_c \frac{dI(t)}{dt} + R_c I(t) + VI(t) = V_s(t) \quad (6)$$

$$I(t) = 2\pi q \mu_e F(t) \int_0^R n_e(r,t) r dr \quad (7)$$

$$\mu_e = 2.05 \times 10^8 \times T_e^{-1.55} \quad (8)$$

여기에서,  $n_a$ 는 a레벨 입자의 밀도,  $K_{ab}$ 는 a레벨에서  $\beta$ 레벨로 단위시간당 단위체적당 천이확률계수,  $U_a$ 는 a레벨의 위치에너지,  $D_a$ 는 a레벨입자의 확산계수,  $D_e$ 는 유극성 확산계수,  $\mu_e$ 는 전자의 이동도,  $T_e$ 는 전자온도,  $F$ 는 축 방향 전계의 세기,  $I$ 는 램프전류,  $\tau_{\text{eff}}$ 는 r레벨에서 수은여기원자의 실효수명,  $x$ 는 전자와 아르곤기체의 충돌시 전자의 에너지 손실비율,  $v_{\text{coll}}$ 은 전자와 아르곤 기체의 충돌주파수,  $V_s$ 는 전원전압,  $L_c$ 는 회로인덕턴스,  $R_c$ 는 회로저항,  $V_l$ 은 램프전압,  $q$ 는 전자의 전하량을 나타낸다.

### 2.3 수치해석

식 (1)~(4)는 시간 변수(t)와 길이 변수(r)을 갖는 연립 편미분 방정식이다. 또한 식 (5), (6)은 시간 변수(t)를 갖는 연립 상미분 방정식이다. 이들 방정식을 FDM과 2계 Runge-Kutta방법의 혼합법을 사용하여 수치적으로 풀어 해를 구하였다.

경계조건은  $r=0$  즉, 축에서는

$$\frac{\partial n_a}{\partial r} = \frac{\partial n_r}{\partial r} = \frac{\partial n_s}{\partial r} = \frac{\partial n_e}{\partial r} = 0$$

$r=R$  즉, 관벽에서는

$$n_a = n_r = n_s = n_e = 0$$

### 2.4 모델 방정식의 상수와 계수

실효 방사수명 :  $\tau_{\text{eff}} = 1.175 \times 10^{-5} [\text{sec}]$  [5].

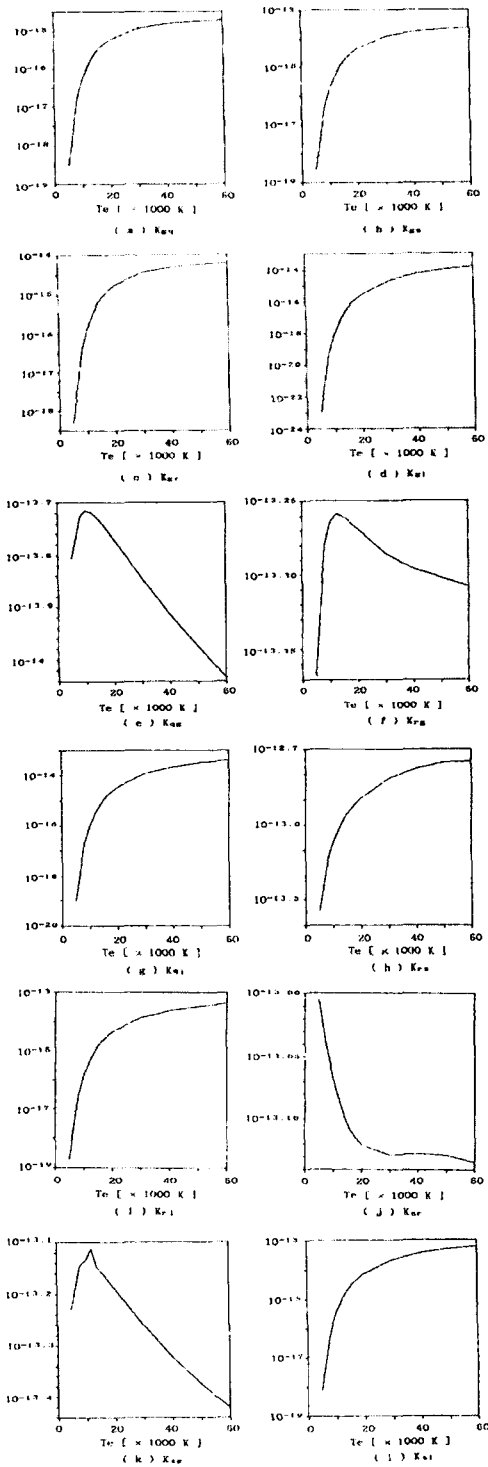


그림 2. 천이확률계수  
Fig. 2. The transition rate coefficients

273[K], 1[torr] 아르곤 중 수은 이온의 확산계수 :  $D_a = 31.5[\text{cm}^2/\text{sec}]$ .

273[K], 1[torr] 아르곤 중 수은 여기원자의 확산계수 :  $D_f = 70.8[\text{cm}^2/\text{sec}][6]$ .

에너지 전달을 위한 전자의 충돌 주파수 :

$\nu_{col} = n_0 * p (k T_e / q)^{-3.3/2}[\text{sec}]$ . 여기에서  $n_0 = 15 \times 10^8[\text{s}^{-1} \text{V}^{1.65} \text{torr}]$ ,  $p$ 는 희유가스의 압력[torr].

1회의 탄성충돌시 전달되는 에너지 손실 :  $c = 2.8 \times 10^5$ .

아르곤 압력 :  $P_{Ar} = 3[\text{torr}]$ .

램프 전압 :  $V_f(t) = 1.2 \times F(t)[V]$ .

천이확률 계수 :

$$K_{rq} = 0.23 \times K_{sr}$$

$$K_{sq} = 0.7 \times K_{sr}$$

$$K_{qr} = 3.5 \times K_{qg}$$

$$K_{qs} = 2.5 \times K_{qg}$$

각 레벨 사이의 충돌단면적으로부터 계산한 전자 온도에 따른 천이확률계수의 값은 다음 그래프와 같이 된다.

### 2.5 실험과 계산 결과

본 논문에서는 전원전압 220[V]인 경우에 안정기의 Q값을 일정하게 유지시키며, 40[W] T-12 램프 (관벽온도 40[°C])에서 소비전력이 40[W]로 일정한 경우에, 직류~10[kHz] 주파수범위에서 램프 전압과 전류의 계산된 실효치를 주파수 60[Hz] 실험값을 100[%]으로 하여 비교한 결과를 그림 3에 도시하였다.

계산값과 실험값은 구동 주파수 1[kHz] 부근에서 램프전압은 최소값, 전류는 최대값을 갖는 일치된 결과를 나타냈으며, 전체 영역에서는 램프전압은 3.5[%], 램프전류는 2[%] 범위의 오차 이내로 들어감을 볼 수 있다.

주파수 변화에 따른 전자밀도변화 계산결과를 그림 4에 나타내었다. 평균 전자밀도의 변화는 주파수 1[kHz] 부근에서 최대값을 갖는 것으로 나타났다.

저압 수은-아르곤 혼합기체 방전의 주파수에 따른 전압, 전류 변화의 이론적 해석

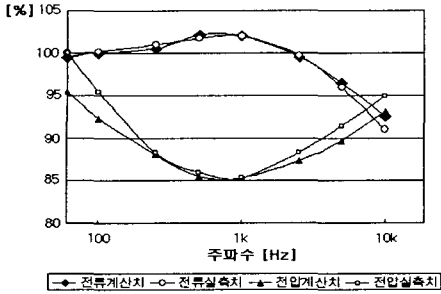


그림 3. 일정전력에서 주파수에 따른 램프 전압, 전류변화  
Fig. 3. The variation of lamp voltage and current with frequency at constant power

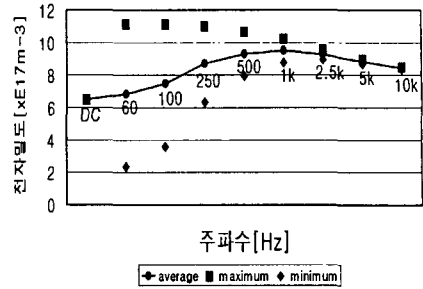
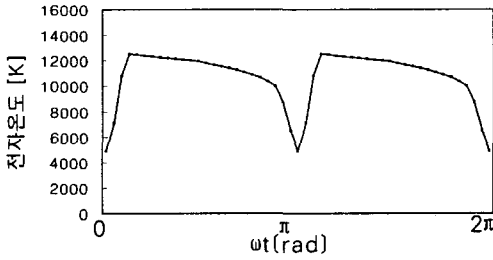
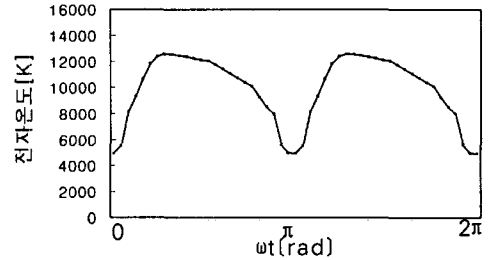


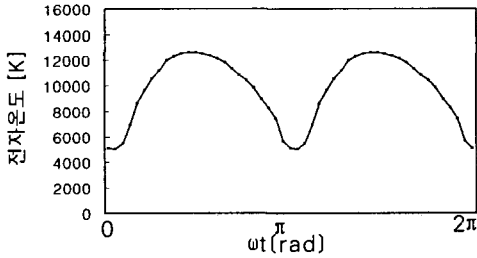
그림 4. 주파수에 따른 전자밀도의 변화  
Fig. 4. The variation of electron density with frequency



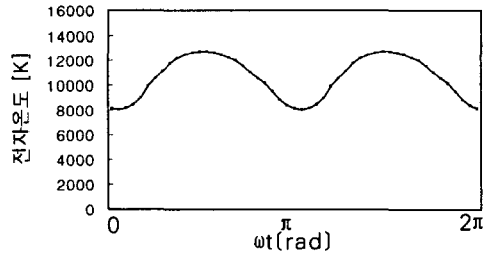
(a) 60(Hz)



(b) 250(Hz)



(c) 1(kHz)



(d) 5(kHz)

그림 5. 각속도에 따른 전자온도의 변화  
Fig. 5. The variation of electron temperature with angular velocity

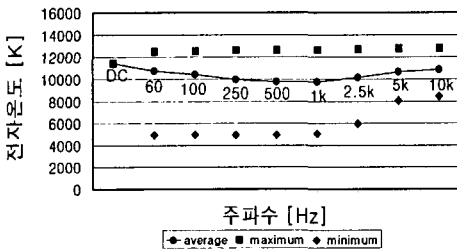


그림 6. 주파수에 따른 전자온도의 변화  
Fig. 6. The variation of electron temperature with frequency

본 논문에서 계산한 전원 주파수 한 주기 내의 전자온도 변화는 다음 그림 5와 같다. 주파수가 증가할수록 파형은 사각파에서 정현파로 이동하며, 최대값은 일정하나, 최소값이 주파수 1[kHz] 이상에서 점차 증가한다.

본 논문에서 계산한 전자온도를 주파수에 따라 정리하여 도시하면 그림 6과 같다. 전자온도는 주파수 1[kHz] 부근에서 최소값을 갖는 것으로 나타났다.

### 3. 결 론

식 (7)에서 전류값을 결정하는 인자는 전자이동도, 전계의 세기와 전자밀도이다.

주파수에 따른 평균 전자온도의 변화는 그림 6에 나타나는 것처럼 전원 주파수 1[kHz] 부근까지는 감소하고 이후에는 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 전자온도의 최대 최소값은 전원 주파수가 직류부터 1[kHz] 부근까지 일정하다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 그림 5에서 찾을 수 있는데, 낮은 전원 주파수에서는 방전에서 재점화 전압이 필요하기 때문에 램프전압 파형이 사각형이 되나 주파수가 증가할수록 정현파에 가깝게 된다. 이러한 이유는 식 (5)에 따르면 방전시스템에 공급되는 에너지는 램프 전압에 따르게 되므로 전자온도는 램프전압 파형을 따라 낮은 주파수에서는 사각형 형태를 나타내며 주파수가 증가할수록 정현파에 가깝게 되는 것으로 설명할 수 있다. 그러므로 직류에서 주파수 1[kHz] 부근까지는 평균 전자온도가 감소한다.

그림 6에서 보면 주파수 1[kHz] 이후에는 전자온도의 최대값은 일정하나 최소값이 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 최소값이 증가하는 이유는 식 (5)에서 방전 중 전자는 에너지를 잃는 이완시간이 존재한다. 그런데 전원 주파수가 높아지면 방전 내 전자의 이완주기보다 에너지 공급주기가 짧게 되어 전자온도의 최소값이 증가하게 된다. 이러한 현상은 그림 5에서 볼 수 있다.

식 (8)에서 전자이동도는 전자온도의 증가에 따라 단조 감소한다. 따라서 전자이동도는 최저 전자온도 일 때 최대값을 갖는다. 따라서 전자이동도는 전자온도가 최소가 되는 1[kHz] 부근에서 최대값을 갖는다.

전계의 세기는 전자이동도와 전자밀도의 곱에 반 비례하므로 방전의 저항이 최소가 되는 주파수 1[kHz] 부근에서 최소값을 갖는다. 그러나 감소 정도가 전자이동도와 전자밀도의 곱에 비하여 상대적으로 적다.

전자밀도는 그림 4에 보이는 것처럼 주파수 1[kHz] 부근에서 최대값을 갖는다. 그림 1의 (d), (g), (i), (l)에 의하면 전자온도가 증가할수록 전리 천이

확률계수가 증가하므로, 수은원자로부터 전자의 생성이 늘어나게 되나, 전자온도가 증가할수록 전자의 손실이 늘어나는 양이 전자 생성량을 초과하여 결과적으로 전자온도가 증가할수록 전자밀도는 감소하게 된다.

이상의 결과로부터 형광램프는 주파수 1[kHz] 부근에서 전류는 최대값을 램프전압은 최소값을 나타내는 현상을 이론적으로 설명하는 것이 가능하다.

이 논문은 2004년도 호서대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

### References

- (1) Polman, J., et al, "Calculations on the effect of supply frequency on the positive column of a low pressure Hg-Ar ac discharge", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.5, 1972, pp. 562-568.
- (2) Polman, J., von der Werf, J.E. and Drop, P.C., "Nonlinear effects in the positive column of a strongly modulated mercury-rare gas discharge", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.5, pp. 266-279, 1972.
- (3) Verbeek, T.G. and Drop, P.C., "The positive column of low pressure Hg/Ne and Hg/Ne/Ar discharges", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 7, pp. 1677-1683, 1974.
- (4) Vriens, L., "Energy Balance in low pressure gas discharges", J. Appl. Phys., Vol. 45, pp. 1191-1195, 1974.
- (5) Cornelis, H. W. et al. "Scaling of Positive Column Hg-Ar Discharges Towards Display cells", IEEE Tr. Electron Devices, vol. ED-24, 1977, no.10, pp. 1239-1244.
- (6) Cayless, M. A., "Theory of low pressure mercury-rare gas discharge", Proc. 5th Intl. Conf. on Ionized Phenomena in gases, Munich, vol. 1, 1961, pp.262-277.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 이진우 (李鎭雨)

1961년 2월 4일생. 1980년 2월 서울대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년 3월~1994년 2월 (주)세명백트론 연구실장. 1994년 3월~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 교수.