

論文
3-2-1

고주파구동 형광램프 양광주의 입자밀도 계산

Particle Density Calculation for the Positive Column of a High Frequency Operated Fluorescent Lamp

池 哲 根* · 張 禹 鎭** · 呂 寅 善* · 李 鎭 雨**
(Chol-Kon Chee · Woo-Jin Jang · In-Seon Yeo · Chin-Woo Yi)

요 약

전원주파수 5-13[kHz]로 구동되는 형광램프(38mm 40W) 양광주 내의 수은의 여기원자 밀도를 시간과 반경방향에 대하여 계산하였다. 계산과정에서 수은의 에너지 준위는 기저 준위, 6^3P_0 , 6^3P_1 , 6^3P_2 와 이온화 준위가 고려되었으며, 전자의 에너지 분포함수는 2 Electron Group Model이 사용되었다. 계산결과는 일반적으로 사용하는 반경방향의 여기원자 밀도가 포물선 혹은 0차 Bessel 함수 형태라는 가정과 크게 다른것으로 나타났다.

Abstract

The time and radial dependent behavior of the excited particle densities of a positive column in a fluorescent lamp(38mm 40W) is calculated which is driven by 5~13 kHz power supply. In the calculation, the ground state, 6^3P_0 , 6^3P_1 , 6^3P_2 states, and ionization state of mercury energy levels are considered, and 2 Electron Group Model is used for the electron energy distribution function. The results are very different from the common assumption that the excited particle densities are radially parabolic or 0th Bessel function.

1. 서론

형광등을 고주파로 점등하면 많은 장점이 있기때문에 현재 형광등의 고주파 점등이 크게 늘고 있

다. 이에따라 고주파 점등시에 발생하는 제 현상에 대한 해석이 필요하게 되었다.

형광램프에서 빛을 내는 부분인 양광주는 Kenty (1950), Waymouth와 Bitter(1956), Cayless(1961)에 의하여 직류전원구동의 경우가 연구되었다.¹⁾²⁾³⁾ 그후 Polman과 Drop(1972)에 의하여 교류전원 구동의 경우가 연구되었다.⁴⁾ 이들의 연구 중 직류전원 구동시 수은의 여기원자 밀도의 반경방향분포는

* 正會員: 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 ** 正會員: 서울産業大 電氣工學科 助教授 · 工博
 正會員: 全南大 工大 電氣工學科 助教授
 正會員: 서울大 工大 大學院 電氣工學科 博士課程

Cayless에 의하여 연구되었으며³⁾, 교류전원구동시 관중실에서 밀도의 시간에 대한 변화가 Polman과 Drop에 의하여 연구된 바있다.⁴⁾ 그리고 많은 연구들에서는 여기원자의 반경방향분포를 포물선으로, 전자의 반경방향분포를 0차 Bessel 함수 혹은 포물선으로 가정하고 있다.

본 논문에서는 전원주파수 5-13[kHz]에서 38mm 40W 형광램프를 점등 할 경우, 양광주에서 여기원자와 전자의 시간과 반경방향에 대한 변화를 계산하여, 일반적으로 사용하는 위의 가정을 고주파 교류전원구동시에 사용 할 수 있는지의 여부를 검토하였다.

2. 가정

고주파 구동 형광램프의 양광주에서 입자 밀도를 계산하기 위하여 다음과 같은 조건을 가정한다.

(1) 양광주 내에서 전자는 수은원자와 비탄성 충돌을 하며, 아르곤 원자와는 탄성 충돌을 한다. 따라서, 수은원자는 여기 및 이온화되어 전기적으로 중성 프라스마 상태로 유지된다. 아르곤원자는 완충기체로만 작용한다.

(2) 양광주 내에서 전자의 방전영역 내에서의 재결합에 의한 손실은 무시한다.

(3) 전자 에너지분포는 2 Electron Group Model을 사용한다. 저압 방전등에서는, 고압 방전등의

경우와는 달리, 극부 열평형이 이루어지지 않으며, 따라서 Maxwell 분포를 사용하지 않는다. 전자 분포에서 tail 온도가 bulk 온도에 비하여 1000[K] 낮다.⁵⁾

(4) 광출력은 수은의 공진 준위에서의 실효수명에 의하여 결정된다.

(5) 양광주 내에서의 전자온도 및 기체온도는 반경방향에 대하여 일정하다.

(6) 수은원자의 에너지 준위는 그림1의 경우만을 고려한다.

3. 기호

3.1. 제물리량

$n\alpha$	α 입자의 밀도
$k\alpha\beta$	α 레벨에서 β 레벨로 단위시간당 단위체적당 천이확률 계수
$U\alpha$	α 레벨의 위치에너지
$U\alpha\beta$	$U\alpha - U\beta$
$D\alpha$	α 입자의 확산계수
D_a	유극성(ambipolar) 확산계수
$\mu\alpha$	α 입자의 이동도
T_e	전자온도[K]
T_g	기체온도[K]
E	축방향의 전계
i	관전류
R	관의 반경
$T\alpha$	α 레벨에서 수은, 여기원자의 실효수명
X	전자와 아르곤기체의 충돌시 전자의 에너지손실비율
V_{col}	전자와 아르곤기체의 충돌주파수
V	전압
L_c	회로인덕턴스
R_c	회로저항
q	전자의 전하량

3.2. 고정첨자

g	기저레벨 6^1S_0
q	준안정레벨 6^3P_0
r	공진레벨 6^3P_1
s	준안정레벨 6^3P_2

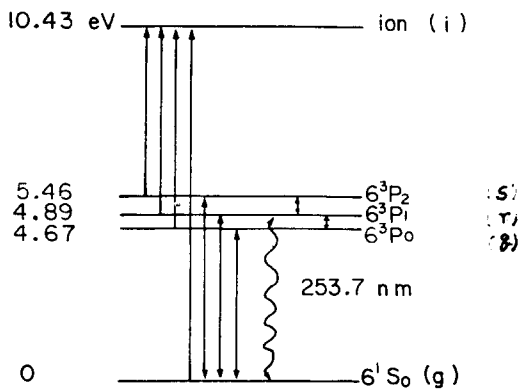


그림1. 수은원자의 에너지레벨
Fig. 1. Energy level of mercury atom

- i 이온화레벨
- e 전자
- ar 회유기체
- w 관벽에서의 값
- o 관중심에서의 값
- so 전원
- l 램프

3.3. 가변첨자

- x g q r s (주요 여기레벨)
- y g q r s i (모든 에너지레벨)

4. 이론

4.1. 연속방정식

4.1.1. 준안정레벨의 연속방정식

수은의 준안정레벨 원자 밀도의 시간에 대한 변화는 식(1)로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_x = \text{div} \{ D_x n_a \text{grad}(n_x/n_a) \} + \sum_y (k_{yx} n_y - k_{xy} n_x) n_e \quad (1)$$

(y ≠ x, x ≠ r, x ≠ g)

이 식에서 우변의 첫째항은 확산에 의한 밀도의 변화를 나타내며, 둘째항은 레벨간의 천이에 의한 밀도의 변화를 나타낸다.

4.1.2. 공진레벨의 연속방정식

수은의 공진레벨의 연속방정식에서는 준안정레벨의 연속방정식에 자발방사에 의한 항을 더 고려하여야 한다. 자발방사항을 고려하면 공진레벨 원자밀도의 시간에 대한 변화는 식(2)로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_r = \text{div} \{ D_r n_{ar} \text{grad}(n_r/n_{ar}) \} + \sum_y (k_{yr} n_y - k_{ry} n_r) n_e - n_r/T_r \quad (2)$$

(y ≠ r)

4.1.3. 전자의 연속방정식

전자의 연속방정식은 수은의 준안정상태의 연속방정식과 비슷하나 확산계수나 유극성 확산계수로 변화되며, 방전영역 내에서의 재결합에 의한 손실은 무시하므로 전자밀도의 시간에 대한 변화는 식(3)으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e = \text{div} \{ D_a n_{ar} \text{grad}(n_e/n_{ar}) \} + \sum_y (k_{yi} n_y n_e) \quad (3)$$

(y ≠ i)

유극성 확산계수 D_a 및 수은의 이온 원자 및 기체 원자의 온도는 식(4)로 표현된다.

$$D_a = D_i(1 + T_e/T_i), \quad T_i = T_g = T_w \quad (4)$$

4.2. 에너지평형식

전자의 온도를 관경방향에 대하여 일정하다고 가정하였으므로, 전자의 온도는 관중심에서 에너지평형식을 세워서 구한다. 단위체적당 에너지의 시간에 대한 변화는 식(5)로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_{eo} U_e) = n_{eo} \{ -XV_{col}(U_e - U_g) + \mu_e E^2 + \sum_{xy} k_{xy} n_{xo} U_{xy} + n_{ro}/T_r U_{rg} \} \quad (5)$$

4.3. 회로방정식

형광등회로는 그림2와 같다. 이 회로에서 회로방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$L_c \frac{di}{dt} + R_{cl} + V_e = V_{so} \quad (6)$$

$$i = 2\pi q \mu_e E n_{et} \quad (7)$$

$$n_{et} = \int_0^R n_e r dr \quad (8)$$

2중 슬릿을 사용하여 측정을 하면 40W 형광램프에서 양광주의 길이는 117cm 유극강하영역이 3cm가 된다. 그런데 관전압은 약 100V 유극강하를 10V로 보면, 38mm 40W 형광램프의 경우 식(9)를 가정할 수 있다.

$$V_e = 1.2E \quad (9)$$

식(7)(8)(9)를 사용하면 식(6)은 식(10)으로 변형된다.

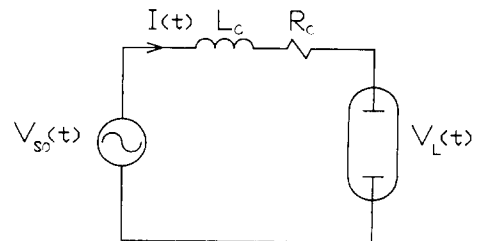


그림2. 형광등 점등회로

Fig. 2. Fluorescent lamp operating circuit

$$\frac{d}{dt} (\mu_e E n_{et}) = \frac{V_{so}}{2\pi q L_c} - \left(\frac{R_c}{L_c} + \frac{1.2}{2\pi q L_c \mu_e n_{et}} \right) \mu_e E n_{et} \quad (10)$$

4.4. 계수의 결정

k_{xy} , μ_e , D_e 는 수은의 비탄성충돌단면적과 아르곤 기체의 Ramsauer cross section을 사용하며, 전자분포함수는 tail 온도가 bulk 온도보다 1000[K] 낮다고 가정하여 계산하였다. 표1에 확산계수와 이온의 이동도를 나타내었다.⁹⁾ 여기레벨의 확산계수와 이온 이동도의 온도에 대한 관계는 식(11)을 사용하였다.

$$D_v \propto T_g^{-1.5} \quad (11)$$

실효수명은 1.175×10^{-6} [sec]로 하였다.⁷⁾

표 1. 희유기체 중에서의 수은이온의 이동도와 이온과 여기원자의 확산계수 (0°C, 1 torr)

Table 1. Mercury ion mobility and diffusion coefficient of ion and excited atom in rare gas(0°C, 1 torr)

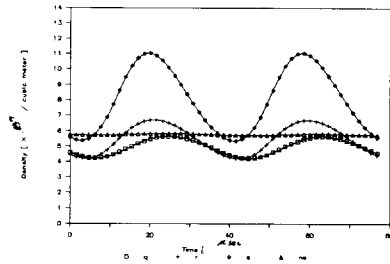
구분	He	Ne	Ar	비고
μ_i	14.200	4.310	1.340	cm ² /volt sec
D_i	334	101.5	31.5	cm ² /sec
D_g, D_r, D_s	455	161	70.8	cm ² /sec

5. 수치계산

위에서 구성한 방정식을 살펴보면 두개의 준안정레벨과 하나의 공진레벨, 하나의 전자에 대한 편미분방정식과, 에너지평형식과 회로방정식에 대한 상미분방정식이 연결되어 나타나게 된다. 본 논문에서는 4개의 편미분방정식은 FDM으로, 2개의 상미분방정식은 2nd order Runge-Kutta 방법을 사용하여 시간에 대하여는 초기치문제, 반경방향에 대하여는 경계치문제로 보아, 그 해의 변화가 0.01% 이내로 될 때까지 반복 계산하였다. 초기조건은 직류점등에서 입자 밀도의 값을 사용하였고, 경계조건은 관벽에서는 $n_x=0$, 관중심에서는 $\frac{\partial}{\partial r} n_x=0$ 으로 하였다.

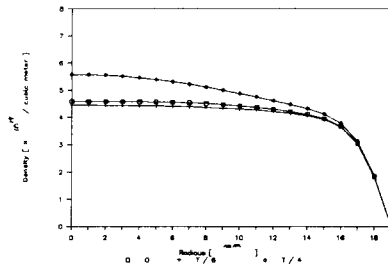
주파수 13[kHz]의 경우($V_{so}=220V, L_c=5.45mH$,

$R_c=7.94\Omega$) 각 입자 밀도의 계산 결과를 그림3에 나타내었다.



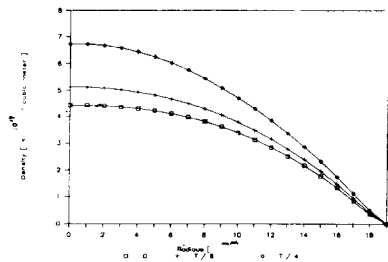
(3-a) 관중심에서 여러가지 입자밀도의 주기 중의 변화

(3-a) Variation of various particle densities in period at tube axis



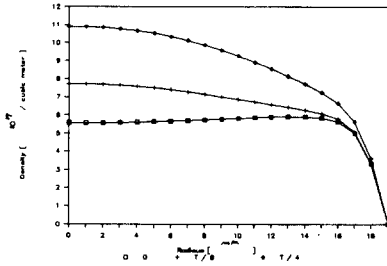
(3-b) q 레벨밀도의 반경방향의 주기 중의 변화 (0는 전원과의 위상차 0, $\frac{T}{8}$ 는 전원과의 위상차 $\frac{\pi}{4}$, $\frac{T}{4}$ 는 전원과의 위상차 $\frac{\pi}{2}$)

(3-b) Radial variation of q level density in period

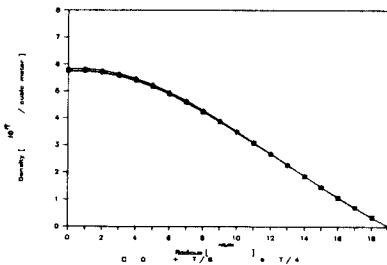


(3-c) r 레벨밀도의 반경방향의 주기 중의 변화

(3-c) Radial variation of r level density in period



(3-d) s 레벨밀도의 반경방향의 주기 중의 변화
 (3-d) Radial variation of s level density in psriod



(3-e) 전자밀도의 반경방향의 주기 중의 변화
 (3-e) Radial variation of electron density in period

그림3. 여러가지 입자밀도의 변화(주파수 13kHz)
 Fig. 3. Variation of various particle densities(
 frequency 13 kHz)

6. 결론

계산한 결과에 의하면 계산한 주파수 영역에서는 각 레벨의 시간과 반경방향 변화의 경향이 비슷하였다. 각 레벨별로 살펴보면 준안정레벨 중 s 레벨은 시간에 대한 변화가 매우 크게 나타났으며, 전자의 경우 시간에 대한 변화가 별로 나타나지 않았다. 또한 여기 원자밀도의 반경방향에 대한 변화는 두 준안정레벨이 비슷한 경향을 보였으나, 공진레벨의 경우는 방사에 의한 영향때문에 이들과는 다른 형태를 갖는 것으로 나타났다. 여기원자들 특히 준안정레벨의 경우 반경방향분포를 포물선으로 가정한다는 것은 계산결과에 많은 오차를 가져오게 된다는 것이 밝혀졌다. 전자의 반경방향분포는 0차 Bessel 함수에 가까운 형태를 보이는 것으로 나타났다.

본 논문에서 밝혀진 바에 따르면, 38mm 40W 형광램프의 고주파 점등시에는, 각 입자의 반경방향 밀도 분포를, 전자는 0차 bessel 함수로, 준안정레벨의 경우는 상수로, 공진레벨의 경우는 포물선으로 근사하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

- 1) Kenty, C., "Prduction of 2537 radiation and the role of metastable atoms in an argon-mercury discharge", J. Appl. Phys., vol.21, 1950, pp.1309-1318
- 2) Waymouth, J.F., et al, "Analysis of the plasma of fluorescent lamps", J. Appl, Phys., vol. 27, no.2, 1956, pp.122-131
- 3) Cayless, M. A., "Theory of low pressure mercury-rare gas discharges", Proc. 5th Intl. Conf. on Ionized Phenomena in gases, Munich, vol.1, 1961, pp.262-277
- 4) Polman, J. et al, "Calculations on the effect of supply frequency on the positive column of a low pressure Hg-Ar acdischarge", J. Phys. D: Appl. Phys., vol.5, 1972, pp.562-568
- 5) Vriens, L., "Two and Three electron group models for low pressure gas discharges", J. Appl. Phys., vol. 45, 1974, pp.1191-1195
- 6) 지철근, 장우진, 이진우, "형광램프 양광주 내의 전자이동도 계산", 조명전기설비 학회지, vol. 2, no.2, 1988, pp.162-164
- 7) 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