

온도에 따른 D.C. 저압방전의 전기적 특성해석

Analysis of electrical Charactersitics by the effect of ambient temperature in D.C. low-pressure discharge

김수길 이진우 지철근
Kim Soogil Yi Chinwoo Chee Cholkon

서울대학교 공과대학 전기공학과

Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

요약

균일한 positive column의 상세한 이론이 충돌 단면적 곡선과 공진 방사 그리고 다단계 여기(multistage)와 이온화 과정을 고려하여 0.5에서 5mmHg 압력에서 수은과 희유가스(rare-gas)가 혼합되어 있는 D.C. 정광 램프 방전에 대해 전개된다. 온도와 이온, 비이온화, 여기원자의 밀도가 수치해석에 의하여 계산된다.

Abstract

A detailed theory of the uniform positive column is developed for d.c. fluorescent lamp type discharges in mercury and rare-gas mixture at 0.5 to 5 mmHg pressure, taking into account available cross section curves, resonance radiation, multi-stage excitation and ionization. Temperature and the distributions of the ions, unexcited and excited atoms are calculated by using Numerical analysis.

1. 서론

형광램프에서 더 밝은 세기의 빛을 만들어 내기 위한 관심은 원형과 비원형 단면적을 가진 관에서 저압 수은 희유가스 방전에서 공진 방사의 생성 Mechanism에 대한 관심을 유발시켰다. 이런 형태의 방전이론에 대하여 연구한 것이 Kenty(1950)와 Waymouth, Bitter(1956)의 것이다. Kenty는 아주 상세히 수은의 여기상태사이의 여러 천이를 해석했고 특별한 방전에서 관측된 공진방사의 생성을 설명하는 데 성공했다. 단순화된 천이 도안(transition scheme)을 포함하여 가정을 단순화함으로써 Waymouth, Bitter는 수은-아르곤 혼합에서 다양한 방전의 특성을 아주 근사한 정도로 계산할 수 있었다. 그런데 이들은 관의 단면적에 대하여 방전의 평균적인 행동만을 다루었다. 게다가 응용 영역을 제한함으로써 단면적 형태와 관련된 어떤 고려를 배제한다.

본 논문은 이런 근사를 피하고 관의 단면적에 대하여 방전의 본포를 다루고 Kenty의 도안에서 고려된 모든 천이를 포함하는 이론을 전개하는 것이 목적이다.

2. 가정

형광등의 특성을 모델링하기 위하여 글로우 방전의 특성으로부터 다음의 조건을 가정한다.

- (1) 전자는 수은원자와 아르곤원자와만 충돌한

- 다. 즉 원자간의 충돌과 전자 충돌은 무시한다.
- (2) 아르곤 원자의 최저 여기레벨 에너지는 수은의 이온화 레벨보다 훨씬 높으므로 전자와 아르곤 원자는 탄성충돌만을 한다.
- (3) 전자의 에너지분포는 Maxwellian 분포를 갖는다.
- (4) 전자온도는 반경방향에 관계없이 일정하다.
- (5) 방전관 내의 플리즈마는 축방향으로 균등하며, 축에 대하여 대칭이다.
- (6) Wall에서 완전한 recombination과 de-excitation이 이루어진다.
- (7) Volume recombination과 multiple ionization은 무시한다.

3. 이론

3.1. 일반적인 확산 방정식

3.1.1. 일반적인 이론

보존 방정식은 가스온도분포를 결정하는 열전도도 방정식과 함께 각 지점에서 수은 원자에 대해 전체 천이율과 전체 확산율이 균형이 이루어져야 한다.

높은 state t와 u(그림 1)로의 천이되는 수는 작고 대부분은 역방향의 방사 천이에 의하여 균형을 이루기 때문에 남아있는 state에 영향을 끼치지 않는다. 그래서 이 단계에서 이것은 무시될 수 있다.

그러므로 기저상태 g, 여기상태 q, r, s와 이온 i(그림 1)사이의 천이의 균형을 고려하는 것이 필요하다.

3.1.2. 여기 상대 방정식

정상상태에서 각 여기상태 q, r, s에 대해 천이율=확산율 이다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$D \nabla^2 n_x + \sum_{x,y} K_{xy} n_y n_x = 0 \quad (1)$$

여기서

D = 확산계수

K_{xy} = 천이확률계수

x = q, r, s

y = g, q, r, s, i

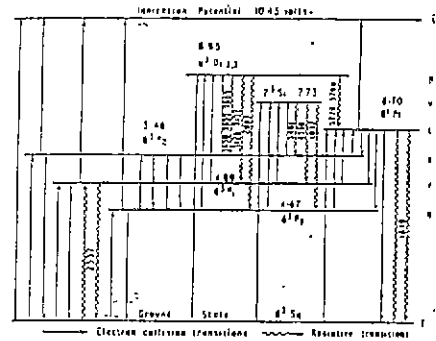


그림 1. 수은의 에너지 레벨과 천이

3.1.3. 전자 방정식

정상상태에서 전자의 천이율 = 확산율 이고 n₀=n_i 이고 K_{iy}는 항상 0이다. 그리고 유극성 확산계수(anisotropic diffusion coefficient)가 사용되므로 식은 다음과 같다.

$$D_a \nabla^2 n_0 + \sum_y K_{iy} n_0 n_y = 0 \quad (2)$$

여기서

D_a = 유극성확산계수

y = g, q, r, s

3.1.4. 열전도도 방정식

생성된 열은 탄성충돌에 의해 전자가 잃어 버린 에너지와 같다. 이때 희유가스만이 영향을 끼치므로 식은 다음과 같다.

$$\text{div}(K \text{ grad } T) + x_1 n_e n_a = 0 \quad (3)$$

여기서

- K = 열전도도
- x_1 = 에너지 손실율
- n_a = 희유가스 밀도

게다가 이상기체 상태방정식은

$$P_a = n_a k T \quad (4)$$

여기서

- k = 볼츠만상수
- T = 가스 온도
- P_a = 희유가스압력

3.1.5. 경계조건

방전의 모델링에서는 정확한 경계조건을 사용하는 것이 중요하며, 특히 관벽에서의 경계조건을 고려하는 것이 중요하다. 원통대칭의 경우 밀도와 온도의 반경방향으로의 도함수는 축에서는 0이다.

$$\frac{dn_q}{dr} = \frac{dn_r}{dr} = \frac{dn_e}{dr} = \frac{dn_a}{dr} = 0$$

그리고 관벽에서의 밀도는 0이다.

$$n_y = 0 \quad \text{at wall}$$

$$y = q, r, s, e$$

4. 수치해석 결과

4.1 해석방법

방전관의 반경은 19등분하여 각 위치에서의 함수값들을 계산하였다. 식(1), 식(2), 식(3)은 상

미분방정식으로 변형되며 2계 RungeKutta Method로 n_q, n_r, n_a, n_e 값을 계산하였다.

4.2 결과

관벽 온도가 295K와 315K일 때의 가스온도와 수은의 밀도, 그리고 각 level의 반경방향에 대한 변화를 그림2.에서 그림6.에 나타내었다.

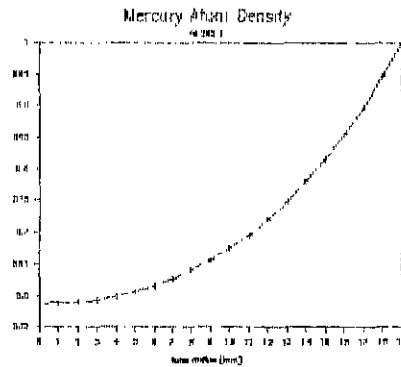


그림 2. Tw = 295[K]에서의 수은원자밀도 변화

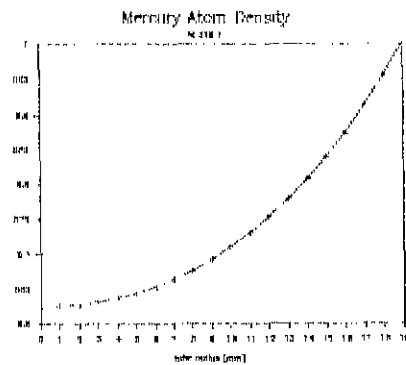


그림 3. Tw = 315[K]에서의 수은원자밀도 변화

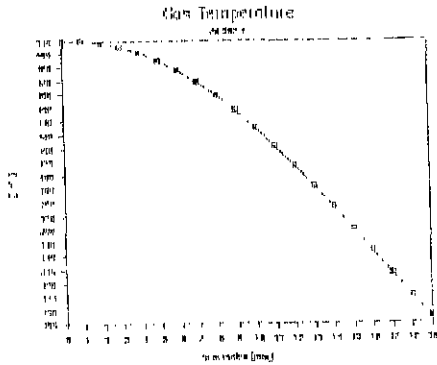


그림 4. $T_w = 295[K]$ 에서의 가스온도 변화

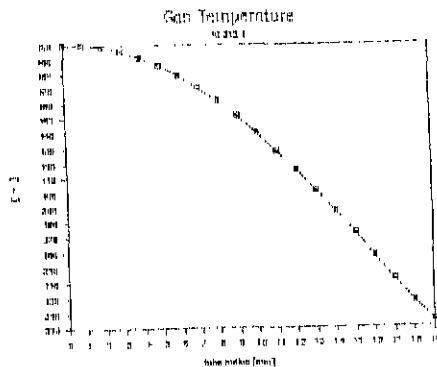


그림 5. $T_w = 315[K]$ 에서의 가스온도 변화

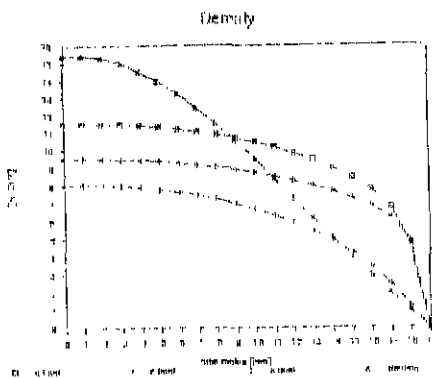


그림 6. $T_w = 315[K]$ 에서의 각 레벨의 밀도변화

5. 결론

그림에서 보는 바와 같이 가스온도는 반경 방향에 따라 감소하고 외부온도가 낮을 수록 빨리 감소하는 경향을 보여주고 있다.

수은원자의 밀도는 반경 방향에 따라서 증가 하고 있다. 이것은 관의 중심부분에서 여기되거나 이온화된 수은원자가 관의 바깥부분에서 재 결합하거나 de-excitation에 의해 다시 생성되는 것을 의미하고 이것은 diffusion에 의해 관의 중심부분으로 이동하여 다시 이온화되거나 excited된다.

각 level의 밀도는 전자밀도가 급격히 감소하고 q, r, s level은 완만히 감소함을 알 수 있다.

6. 참고문헌

- (1) M.A.Cayless, "Theory of the positive column in mercury rare-gas discharge", Brit. J. Appl. Phys., vol.14, pp.863-869(1963)
- (2) M.A.Cayless, "Theory of low pressure mercury rare gas discharges", Proc. 5th Int. Conf Ionization Phenomena in Gases, Munich, Vol.1, pp 262-277(1961)
- (3) M.A.Cayless, Proc. Fourth Int. Conf. on Ionization Phen in Gases, Uppsala, 1959 Vol 1(North Holland Publishing Co., Amsterdam 1960) pp 271-275
- (4) 이 진우, "저압방전 램프의 전기적 특성 모델링", 석사학위논문, 서울대(1990)
- (5) W.Elenbaas, "Light Sources", Macmillan
- (6) B.E.Cherrington, "Gaseous Electronics and Gas Lasers", Pergamon Press
- (7) 장 우진, "보완된 에너지 레벨을 고려한저압 방전등의 전기적 특성모델", 석사학위논문, 서울대(1989)
- (8) 이 진우, "온도에 따른 형광등 광속변화의 수식 모델에 관한 연구", 석사학위논문, 서울대(1986)