

관벽온도에 따른 D.C. 저압 방전의 전기적 특성의 해석

Analysis of Electrical Characteristics of D.C. Low-Pressure Discharge by the Effect of Bulb-Wall Temperature

金秀吉* · 李鎭雨** · 池哲根***

(Soo-Gil Kim · Chin-Woo Yi · Chol-Kon Chee)

요 약

이 논문에서는 관벽온도에 따른 방전램프의 동작전압과 전류를 예측할 수 있는 수식모델이 전개된다. 저압 수은-아르곤 가스 방전을 이용하는 형광램프가 모델로 사용된다. 저압 수은-아르곤 가스 방전에서 여기원자와 전자의 연속방정식, 전자의 에너지 보존식, 열전도도 방정식과 이상기체 상태 방정식이 방전의 물리량을 예측하는데 이용된다. 이들 방정식과 회로 방정식을 이용하여 방전램프의 관벽온도의 효과로 인한 D.C. 저압 방전의 전기적인 특성을 예측한다. 이러한 예측은 방전램프의 설계를 하는 데 있어서 많은 도움이 되리라고 생각된다.

Abstract

In this thesis, a mathematical model which can predict the operating voltage and current of a discharge lamp by the effect of bulb-wall temperature is developed. Fluorescent lamp which uses a low pressure mercury-argon gas discharge is used in model development. In a low pressure mercury-argon gas discharge, the continuity equations for each excited atom and electron, electron balance equation, thermal conductivity equation and ideal gas state equation are used for predicting the physical quantities of discharge. By coupling these equations and the circuit equation, the electrical characteristics by the effect of bulb-wall temperature of the D.C. discharge lamp can be predicted. This prediction is expected to give help in designing discharge lamp.

1. 서 론

저압 수은-아르곤 기체방전의 양광주에 관한 연구는 1950년 C.Kenty의 논문 발표를 기점으로 체계적인 연구가 시작되었다.

준안정레벨 여기원자밀도와 여기함수를 사용하여 구한 각 에너지레벨 사이의 천이확률을 비

교한 C.Kenty, 전자와 여기원자간의 충돌에 의한 이온화를 고려하여 수은-아르곤 플라즈마의 특성을 규명한 J.F. Waymouth와 F. Bitter, 수은-아르곤 혼합기체중에서의 전하이동도를 구한 W. Verweij, 수은-아르곤 방전의 다양한 입자들의 공간상의 변화를 고려하여 미분방정식을 세우고 컴퓨터를 이용한 수치해석을 사용한 M.A.

* 正會員: 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程

** 正會員: 세명백트론(株) 研究室長 · 工博

*** 正會員: 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字: 1993年 9月13日

Cayless의 기초적인 연구가 있었다.

이와 같은 기초적인 연구외에도 방전램프의 특성이 사용하는 기체와 봉입물질, 방전관의 구조, 인가전압 주파수 및 파형, 주위온도의 변화와 한류소자의 종류에 따라 변화하므로 이들 영향을 동시에 고려하여 방전램프의 특성을 예측할 수 있는 모델들이 연구되었다. 또한 방전램프의 전기적, 물리적 특성을 표현하기 위하여 여러가지 수식모델이 제안되었다.

본 논문에서 논의하려는 모델은 직류모델로서, 저압기체방전에 대한 반경방향분포를 고려한 입자평형식 및 에너지보존식, 열전도도 방정식, 이상기체 상태방정식을 구성하고 이를 방전등의 회로방정식과 연결하여 연립미분방정식의 해를 구함으로써 직류 저압방전램프의 관벽온도에 따른 제 특성들을 해석하려고 한다.

2. 저압 수은-아르곤 방전의 해석적 모델링

여기에서는 대표적인 저압 수은-아르곤 방전 램프인 32(mm), 40(W)형광등에 적용하여 수식모델을 구성한다. ^{1), 6), 12)}

2.1 전제 조건 ^{5), 7), 11)}

형광등의 특성을 모델링하기 위하여 저압기체 방전의 특성으로부터 다음의 조건을 가정한다.

(1) 전자는 수은원자와 아르곤원자와만 충돌한다. 즉 원자간의 충돌과 전자간의 충돌은 무시한다.

(2) 아르곤원자의 최저 여기레벨에너지는 수은의 이온화레벨보다 훨씬 높으므로 전자와 아르곤 원자는 탄성충돌만을 한다.

(3) 전자의 에너지분포는 Maxwellian분포를 갖는다.

(4) 전자온도는 반경방향에 관계없이 일정하다.

(5) 방전관내의 플라즈마는 축방향으로 균등하며, 축에 대하여 대칭이다.

(6) 방전관의 음극 및 양극전압강하는 양광주전 계에 비례한다.

(7) 관벽에서 완전한 재결합과 de-excitation이 이루어진다.

(8) Volume recombination과 multiple ionization은 무시한다.

2.2 수은원자의 에너지레벨⁶⁾

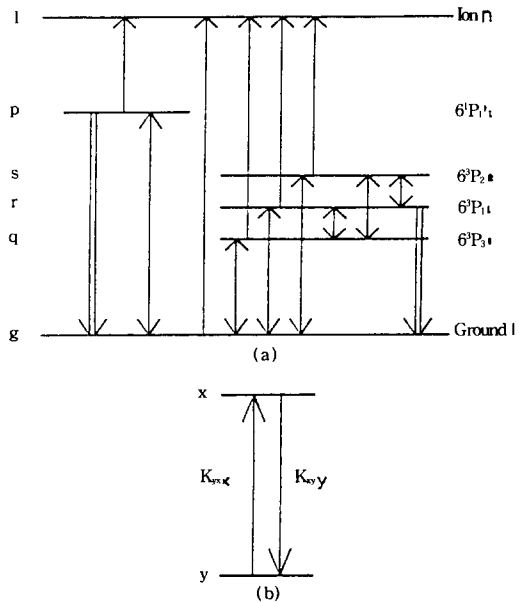


그림 1. 모델링에 사용된 에너지레벨 및 레벨간의 천이와 개념도

Fig. 1. Energy levels used in modeling and schimatic diagram of the transitions between the levels

2.3 주위온도와 관벽온도의 관계⁹⁾

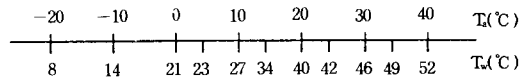


그림 2. 주위온도와 관벽온도의 관계

Fig. 2. Relation between ambient temperature and bulb-wall temperature

2.4 보존방정식^{2~5), 8)}

2.4.1 수은의 여기원자 및 전자의 연속방정식

그림 1에서 6³P_{0(q)}준위의 시간당 밀도변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_1 = D_1 \nabla^2 n_1 + n_e [K_{sq} n_g + K_{q1} n_r + K_{sq} n_s]$$

$$-n_e [K_{qg} + K_{qs} + K_{qi} + K_{qi}] n_i \quad (1)$$

$6^3P_1(r)$ 준위의 시간당 밀도변화는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_r = D_r \nabla^2 n_r + n_e [K_{gr} n_g + K_{qr} n_i + K_{sr} n_s] - n_r [K_{rg} + K_{ri} + K_{rs} + K_{rn}] n_r - \frac{n_r}{\tau_{\text{eff}}} \quad (2)$$

$6^3P_2(s)$ 준위의 시간당 밀도변화는 q 준위와 유사하다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_s = D_s \nabla^2 n_s + n_e [K_{gs} n_g + K_{qs} n_i + K_{ss} n_s] - n_s [K_{sg} + K_{si} + K_{sr} + K_{sn}] n_s \quad (3)$$

전자의 시간당 밀도변화는 유극성확산에 의한 손실과 수은원자의 이온화에 의한 생성으로 이루어진다. 전자의 시간당 밀도변화는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e = D_e \nabla^2 n_e + n_e [K_{ge} n_g + K_{qe} n_i + K_{se} n_s + K_{ee} n_e] \quad (4)$$

2.4.2 전자의 에너지보존식

에너지의 단위로 [eV]를 사용하면 단위체적당 전자의 에너지보존식은 다음과 같이 표현된다.

본 논문에서 고려한 수은의 공진레벨은 $6^3P_1(r)$ 레벨과 $6^1P_1(p)$ 레벨 두가지이고, p 레벨의 방사는 r 레벨에서의 방사의 10[%]로 가정하였으므로 식(5)에서 1.1로 표현하였다.

$$\frac{d}{dt} n_{e0} U_e = n_{e0} [-\chi \nu_{\text{coll}} \{U_e - U_g\} + \mu_e E^2 + \sum K_{xy} n_{x0} \Delta U_{xy}] - \frac{n_e}{\tau_{\text{eff}}} \Delta U_{e0} \times 1.1 \quad (5)$$

2.4.3 열전도도 방정식과 이상기체상태 방정식
생성된 열은 탄성충돌에 의해 전자가 잃어버린 에너지와 같다. 이때 희유가스만이 영향을 끼치므로 식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (K \nabla T_g) + \chi n_e n_g = 0 \quad (6)$$

그리고 이상기체 상태방정식은 다음과 같다.

$$P_a = n_g \chi T_g \quad (7)$$

2.4.4 경계조건

방전의 모델링에서는 정확한 경계조건을 사용하는 것이 중요하며, 특히 관벽에서의 경계조건을 고려하는 것이 중요하다. 본 논문에서 사용한 경계조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial n_i}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial n_r}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial n_s}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial n_e}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (8)$$

$$n_i \Big|_{r=R} = n_r \Big|_{r=R} = n_s \Big|_{r=R} = n_e \Big|_{r=R} = 0 \quad (9)$$

$$T_g \Big|_{r=R} = T_w \Big|_{r=R} \quad (10)$$

$$n_g \Big|_{r=R} = N_{ig}(T_w) \Big|_{r=R} \quad (11)$$

축 중심에서는 Neumann condition을, 관벽에서는 Dirichlet condition을 경계조건으로 사용하였다. 또한 중성기체밀도는 관벽에서의 값을 관벽온도에 따른 값으로 하였다.

2.4.5 회로방정식

직류의 경우에는 안정기로 인덕터를 사용할 수 없으므로 회로방정식은 다음과 같다. 여기에서 1.2E는 램프전압이며, 형광램프와 같은 열음극의 경우 양광주 전압E에 1.2를 곱한 양을 램프 전압으로 생각할 수 있다.

$$R_i I + 1.2E = V_s \quad (12)$$

3. 수치해석 결과

본 논문에서는 저항은 $R=350[\Omega]$ 으로, 관벽온도는 305[K]에서 328[K]까지 변화시키면서 계산을 수행하였으며 전원전압은 220[V]로 고정하였다. 각 레벨의 밀도는 FDM을 사용하여 구하고, 전자온도는 Runge-Kutta Method를 사용하여 구했다.

4. 실험 결과

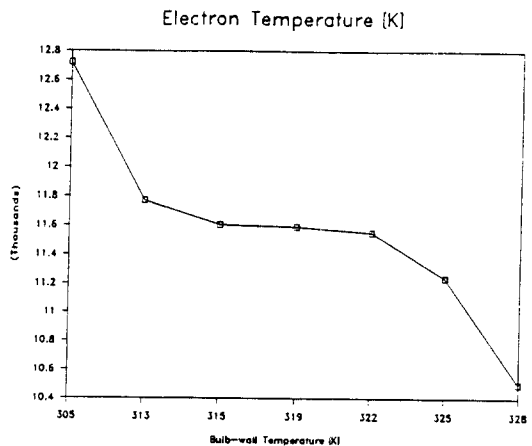


그림 3. 계산된 전자온도의 변화

Fig. 3. The variation of calculated electron temperature

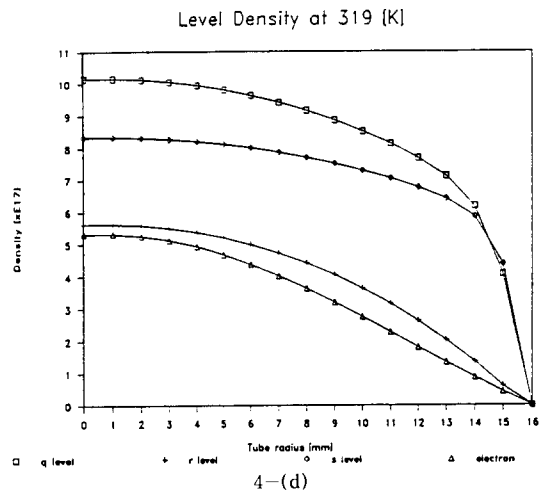
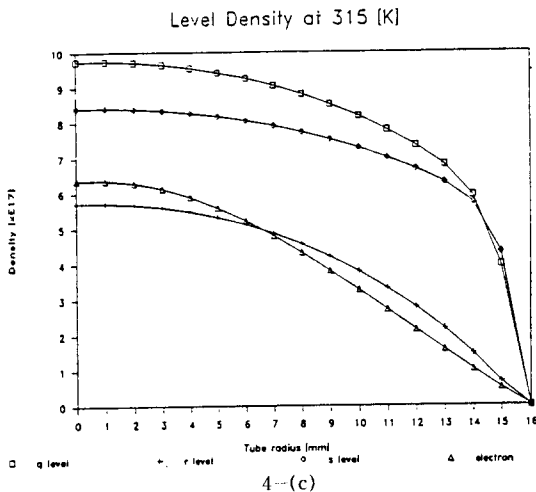
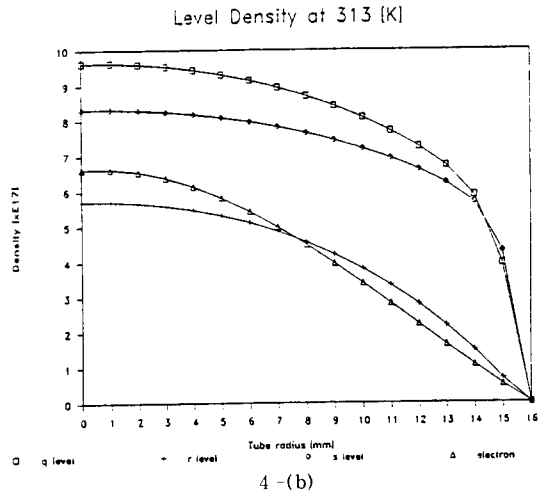
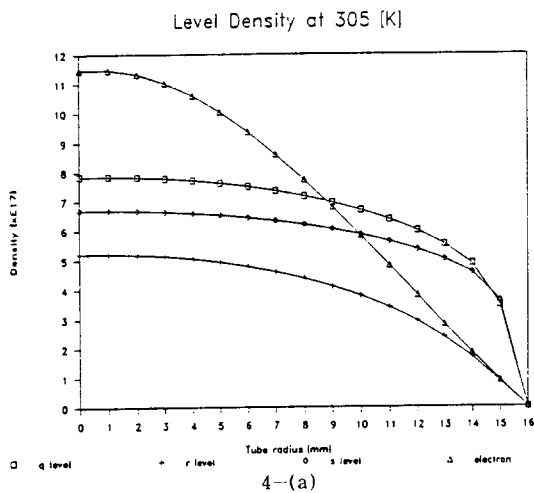


그림 4. 반경방향에 따른 수은의 여기원자 및 전자의 밀도 변화

Fig. 4. The variation of excited (q, r, s) level atom and electron density with radial direction

4.1 실험 장치

이 실험은 방전관의 관벽온도를 조절해야 하므로 수조속에 방전등을 집어 넣은 상태에서 측정한다. 실험장치는 그림 7과 같다.

4.2 실험 결과와 계산치의 비교

수조의 수온을 조절하면서 방전전류와 방전전압을 측정된 결과 그림 8과 그림 9와 같은 특성곡선을 얻었다. 방전 전류는 관벽온도가 증가함에

따라 332[K]부근에서 최소가 되었다가 다시 증가하는 경향을 보이고, 방전전압은 반대의 현상을 보여주고 있다. 이것으로 방전등의 부저항 특성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

D.C.저압 방전의 제 물리량은 FDM과 Runge-Kutta Method를 사용하여 구했다. 수치해석을 이용하여 도출된 결과의 검증은 위해 305[K]에서

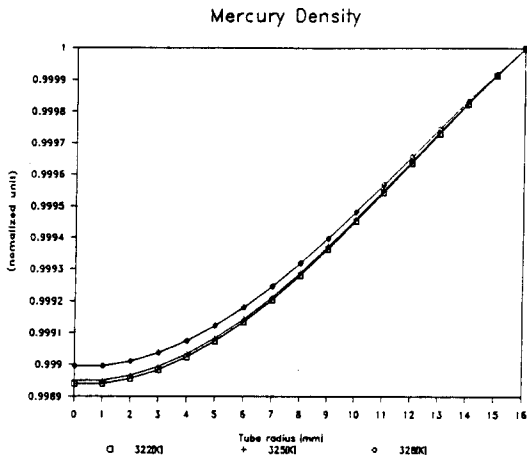


그림 5. 수은의 기저상태밀도
Fig. 5. Ground state density of mercury

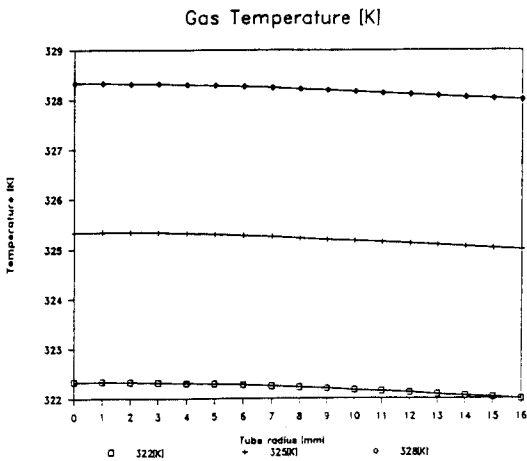


그림 6. 반경방향에 따른 가스온도의 변화
Fig. 6. The variation of gas temperature with radial direction

328[K]까지 관벽온도를 변화시켜 가면서 구한 측정치를 계산치와 비교했다.

가스온도는 반경방향에 따라 감소하고 있으나 전류가 적게 흐르는 저압방전램프에서는 중심부나 관벽에서의 온도차는 크지 않음을 알 수 있다. 수은원자의 밀도는 반경방향을 따라 증가하고 있다.

전자온도는 관벽온도가 증가할 수록 감소하는 현상을 보이는 데, 이것은 관벽온도가 증가하면 수은증기압 상승에 따라 수은원자가 급격히 증가하여 탄성 및 비탄성충돌의 기회가 늘어나 전자

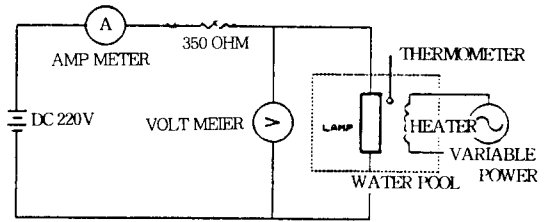


그림 7. 실험장치의 구성도
Fig. 7. Schematic diagram of experimental arrangement

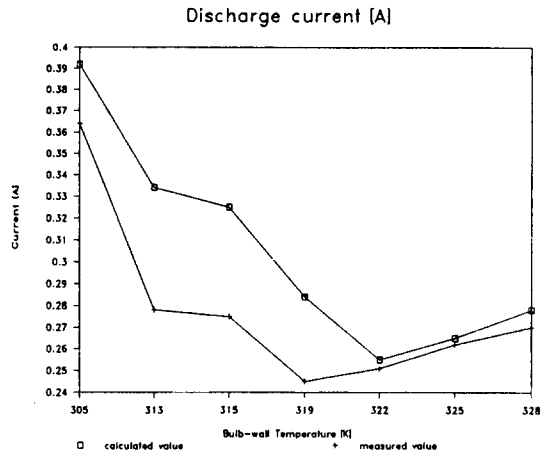


그림 8. 관벽온도에 따른 방전전류의 변화
Fig. 8. The variation of current with bulb-wall temperature

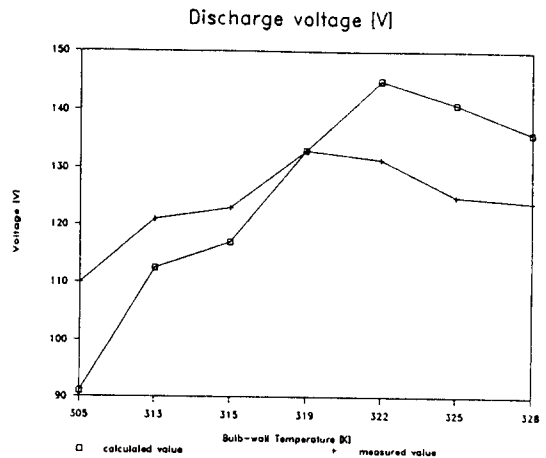


그림 9. 관벽온도에 따른 방전전압의 변화
Fig. 9. The variation of voltage with bulb-wall temperature

에너지가 감소함을 확인할 수 있으며, 상용 온도 범위에서 계산치나 측정치가 비슷함을 알 수 있다.

관벽온도가 상승함에 따라 전자밀도는 감소하다가 어느 온도 이상에서는 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 전자밀도가 최저로 되는 관벽온도에 있어서는 약간의 차이를 보이고 있다. 그리고 전자밀도가 증가함에 따라 $6^3P_{0,2}$ 의 준안정원자밀도는 점차 포화되어가고 6^3P_1 의 공진원자밀도는 직선적으로 상승함을 알 수 있다. 이것은 전자밀도의 증가에 따라 준안정원자가 전자와의 충돌에 의해 6^3P_1 여기상태로 천이되는 확률이 그 반대에 비해 상대적으로 커지기 때문이라고 해석된다. 그러나 전류밀도가 더 높아지면 제2종 충돌이 많이 일어나 모든 여기상태원자는 결국 포화될 것으로 판단된다.

그림 6을 살펴보면 관중심이나 관벽에서 가스 온도의 차는 거의 없는 것으로 나타난다. 그러나 관벽온도가 아주 낮은 경우에는 관중심 온도와의 차이가 커져서 관중심과 관벽에서의 가스온도는 차이가 생겨서 관중심의 온도가 다소 높게 될 것이다.

참 고 문 헌

1. 지 철근, 전기응용, 문운당, 1987.
2. M.A. Cayless, "Theory of the positive column in mercury rare-gas discharge", Brit. J. Appl. Phys., Vol.14, pp. 863-869, 1963.
3. 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.
4. M.A. Cayless, Proc. Fourth Int. Conf. on Ioniz. Phen in Gases, Uppsala, 1959 Vol.1(North Holland Publishing Co., Amsterdam 1960), pp. 271-275.
5. 이 진우, 저압방전 램프의 전기적 특성 모델링, 박사학위논문, 서울대, 1990
6. W. Elenbaas, Light Sources, Macmillan.
7. B.E. Cherrington, "Gaseous Electronics and Gas Lasers", Pergamon Press.
8. 장 우진, 보완된 에너지 레벨을 고려한 저압방전등의 전기적 특성모델, 박사학위논문, 서울대 1989.
9. 이 진우, 온도에 따른 형광등 광속변화의 수식모델에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대, 1986.
10. Hoyaux, M.F., Arc physics, Springer-Verlag, 1968.
11. Franklin, R.N., Plasma Phenomena in Gas Discharges, Clarendon Press, Oxford, 1976.
12. W.Elenbaas, Fluorscent Lamps, Macmillan, Eindhoven, 1971.