

高壓 아아크 放電시스템의 각종 特性 解析에 관한 研究

**A Study on the Analysis of Various Characteristics for the
High-Pressure Arc Discharge System**

池哲根* · 朴旺烈** · 李鎭雨***

(Chol-Kon Chee · Wang-Ryeol Park · Chin-Woo Yi)

요 약

본 論文은 전반적인 에너지 節約趨勢와 더불어 수요증가 및 사용의 다양화가 요구되는 高光度 放電燈에 대하여 시스템의 설계 제작시 직접 응용 가능한 高壓 아아크 放電의 시스템 모델을 구성하여 각종 특성을 糾明하고자 한다.

高壓 아아크 放電의 시동특성과 관련하여 봉입원자가 管壁溫度의 상승에 따라 증발되는 과정이 2階 微分方程式으로 제시되고 아아크 중심으로부터 放電管 및 외관 벌브에로의 熱에너지 이동이 각 단계별로 5개의 1階 微分方程式으로 표현되어 始動 特性 方程式을 구성하며, LTE가 성립되면 流體 方程式으로부터 유도되는 시변에너지 平衡 方程式, 放射에너지 근사식 및 放電管内의 물질함수를 포함한 定常狀態에서의 모델화를 통하여 각각 始動過程 및 定常狀態의 시변 특성을 해석하게 되며, 이를 高壓 水銀燈에 적용하게 될 것이다.

Abstract

Recently, HID lamps have been considered as important in regard to the trend of energy saving, and increasingly and diversely used in various ways. This paper will show the simulating models concerning high-pressure arc discharge system directly applicable for its design and manufacture, and analyze its various characteristics.

For warm-up characteristics, the evaporating process of inert atoms is described in terms of second-order differential equation; for the thermal conduction from arc axis to discharge wall and outer bulb, its transfer process is introduced according to five first-order differential equations. Under the steady state satisfying LTE, the time-variant characteristics are suggested by means of time-depen-

*正會員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

**正會員 : 特許廳 電子審查官室 審查官 · 工博

***正會員 : 世明백트론(株)研究室長 · 工博

接受日字 : 1991年 12月 4日

dent energy balance equation derived from fluid equations, approximation of radiation energy and material functions in the discharge tube. The simulating models concerning these equations are then applied for high-pressure mercury lamp.

1. 序 言

放電燈의 특성은 放電管 및 外管의 기하학적 구조, 封入物質의 種類 및 양, 引加電壓의 周波數, 限流素子の 종류와 크기 등 여러 요소들의 複合的인 영향에 따라 달라진다. 放電燈과 安定器의 최적 設計時에는 이러한 要素들이 미치는 영향을 동시에 考慮해야한다. 따라서 放電燈의 특성에 관한 適當한 모델이 있다면, 要素들의 關係를 더욱 明確히 解析할 수 있고, 시스템의 設計에 있어서 最大限의 能率性을 발휘할 수 있을 것이다.^{1), 2)}

본 研究는 범 세계적인 에너지 節約 追勢와 더불어 需要 增加와 사용의 多樣化가 요구되는 高光度 放電燈에 대하여 지금까지의 研究 結果를 토대로 하되 램프의 설계 제작과 관련하여 직접 응용 가능한 高壓아아크 放電 시스템의 解析을 目的으로 하여 放電管과 安定器, 周圍 溫度와 管壁 溫度, 아아크 溫度에 따른 放射 現狀 등 始動 特性과 定常 狀態의 諸 特性을 詳細하고자 한다.

高壓 아아크 放電 시스템에 電源이 인가되면 放電이 開始되고 放電管內 溫度가 上昇하게 된다. 封入 氣는 溫度 上昇과 더불어 蒸發이 일어나고 氣壓의 上昇 및 粒子間의 衝突에 의하여 電離 또는 勵起 現象이 발생하며 입력 전력과 放射에너지, 전도손실, 대류손실 등이 平衡狀態를 維持하면 安定 點燈 狀態가 되어 放電 시스템의 正常的인 作動이 이루어진다. 본 研究는 이와 같은 일련의 프로세스를 수식 모델화 하고 이를 高光度 放電燈의 기본 모델인 高壓 水銀燈에 適用하고자 한다.

2. 시스템 모델方程式의 構成과 그 適用

2.1 前提 條件

1) 램프의 點燈狀態는 放電 開始後의 狀態,

즉 글로우 放電으로부터 아아크 放電으로의 이행이 완료된 후의 狀態를 대상으로 한다.

2) 放電 개시후 定常 狀態로 되는 過渡 狀態와 定常 狀態를 구분하여 모델화 한다.

3) 放電管의 外관은 타원형의 벌브가 아닌 실린더 형태로 한다.

4) 定常 狀態下의 放電管은 局部的인 熱力學的 平衡狀態로 가정한다.

5) 아아크放電은 軸방향으로 균일하고 管中心에 대하여 대칭이다.

6) 放電管內의 溫度分布는 포물선 형태이다.

7) 放電管內의 氣壓力은 시간에 따라 변화하지만 管경방향으로는 변화하지 않는다.

8) 放電管內의 氣는 이상기체 (Ideal Gas) 로 본다.

9) 高壓 水銀 램프의 封入氣 성분은 아르곤과 같은 버퍼氣의 영향을 무시하고 水銀만을 고려한다.

2.2 始動 特性 方程式

본 절에서는 그림 1 과 같은 放電 시스템 회로에서 시뮬레이션용 수식모델을 사용하고자 하며 램프의 시동기간 혹은 조광을 위한 電源 電壓을 변화 시킨 후의 過渡 動作을 고려하게 된다. 물론 안정기의 구성 요소가 다르더라도 점등회로로서의 役割은 마찬가지로 適用이 가능하다.

放電 램프 시스템에 스위치가 투입되어 전원이 인가되면 버퍼氣의 작용으로 放電이 개시되고 아아크로 이행되는 過渡 狀態가 된다. 이 경우 放電管內 단위 길이당 電壓 V_u 는 Elenbaas의 경험식에 의해 아아크 電流, 氣壓力 및 放電管의 지름의 항목으로 표현된다.⁴⁾

$$V_u = D_1^{-0.3219} \left\{ \frac{P_r}{\log(I) + 1.3834} \right\}^F \quad (1)$$

여기서, $F = 0.16112 \log\left(\frac{10^4 I}{8.552}\right)$,

P_s : 가스壓力

放電管 단위 길이당 전력 P_u 와 램프전력 P_{lamp} 의 電壓-電流의 관계는 다음과 같다.

$$P_u = V_u I PF_s \quad (2)$$

$$P_{lamp} = L_a P_u + V_{e1} I \quad (3)$$

$$V_{lamp} = P_{lamp} / I \cos\phi \quad (4)$$

여기서, PF_s 는 放電管의 力率, $\cos\phi$ 는 회로의 力率

V_{e1} 은 전극에서의 電壓 降下

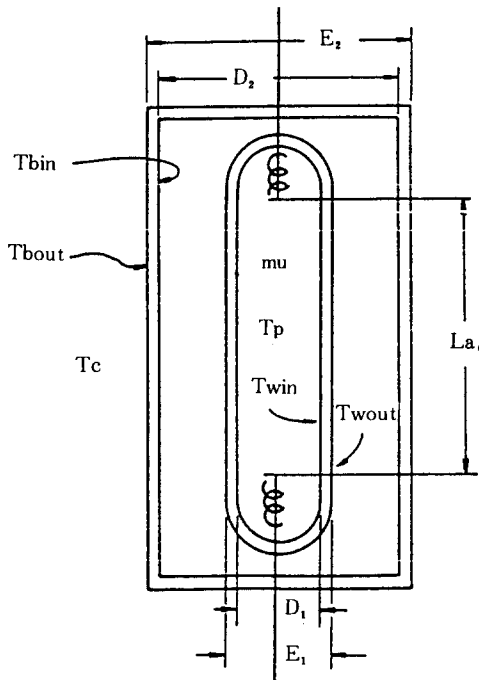
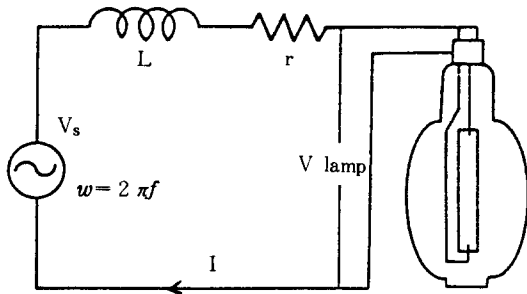


그림 1. 高壓水銀燈의 점등회로 및 모델화
Fig. 1. Diagram of Operating Circuit and Modelling for the High-Pressure Mercury Lamp

안정기를 포함한 경우의 回路 方程式은 다음으로 표시한다.

$$V_s^2 = (\omega LI)^2 + (V_{lamp} \cos\phi + rI)^2 + (V_{lamp} \sin\phi)^2 \quad (5)$$

電源 電壓의 인가와 더불어 放電이 개시되면 放電管内의 溫度가 상승하고 이에 따라 봉입가스, 즉 水銀의 증발이 일어난다. 주로 放電管의 단부에 밀집되어 있는 水銀은 管壁 溫度의 전달로 溫度 上昇을 일으키고 기화점에 도달하면 기체로 변화하게 되는데 管壁 溫度의 2차 遲延現狀으로 간주되어 다음과 같은 2階 微分 方程式으로 표현될 수 있다.⁵⁾

$$\frac{d^2 m_u}{dt^2} + 2\delta\omega_n \frac{dm_u}{dt} + \omega_n^2 m_u = T_{win}/B_1 \quad (6)$$

여기서, m_u 는 단위 길이당 水銀 蒸氣量, δ 는 감쇠율, ω_n 은 고유각 주파수, B_1 은 水銀의 기화정수

입력 전력과 過渡狀態의 축적열, 전도 손실 및 광출력을 고려한 에너지 평형관계는 다음의 方程式으로 표현된다.⁶⁾

$$m_u C_1 \frac{dT_p}{dt} + \pi D_1' H_1 \frac{m_u}{m_{us}} (T_p - T_{win}) + m_u G_1 \exp\left(\frac{-90500}{T_p}\right) = P_u \quad (7)$$

여기서, T_p 는 아아크 플라즈마의 實效溫度 G_1 은 방사출력의 係數

m_{us} 는 단위 길이당 水銀 封入量, 즉 $m_{us} = m/La$

C_1 은 水銀의 比熱

D_1' 은 放電管의 실효 내경

H_1 은 水銀의 열전도율

앞서 본 바와 같이 입력 에너지에 따라 放電管内 아아크 溫度 및 管壁 溫度가 상승하게 되면 내관과 외관간의 封入가스, 외관과 周圍溫度 등 시스템간의 열교환이 이루어지는데 여기에서의 열전달 관계는 다음의 여러가지 微分 方程式으로 표현된다.^{6), 7)}

$$m_2 C_2 \frac{dT_{win}}{dt} + \pi \frac{2D_1}{E_1 - D_1} H_2 (T_{win} - T_{wout}) = P_{uc} \quad (8)$$

여기서, $P_{uc} = \pi D_1 H_1 \frac{m_u}{m_{us}} (T_p - T_{win})$: 管壁으로의 전도손실

$$m_3 C_3 \frac{dT_{wout}}{dt} + \pi \frac{2E_1}{D_2 - E_1} H_3 (T_{wout} - T_{bin})$$

$$= \pi \frac{2D_1}{E_1 - D_1} H_2 \times (T_{win} - T_{wout}) \quad (9)$$

$$m_4 C_4 \frac{dT_{bin}}{dt} + \pi \frac{2D_2}{E_2 - D_2} H_4 (T_{bin} - T_{bout})$$

$$= \pi \frac{2E_1}{D_2 - E_1} H_3 \times (T_{wout} - T_{bin}) \quad (10)$$

$$m_5 C_5 \frac{dT_{bout}}{dt} + \pi \frac{2E_2}{D_3 - E_3} H_5 (T_{bout} - T_c)$$

$$= \pi \frac{2D_2}{E_2 - D_2} H_4 \times (T_{bin} - T_{bout}) \quad (11)$$

以上에서, m_2, m_3, m_4, m_5 는 각각 放電管, 外管가스, 外管, 주위공기의 單位길이당 質量 C_2, C_3, C_4, C_5 는 각각 放電管, 外管가스, 外管, 주위공기의 比熱

H_2, H_3, H_4, H_5 는 각각 放電管, 外管가스, 外管, 주위공기의 熱전도율

放電管内 플라즈마 온도는 램프始動後 급속히 상승하여 약 6,000K에 도달한다. 이것에 대하여 管壁 溫度는 급격한 변화를 하는 것은 가능하지 않고 서서히 상승하여 定常狀態에서 약 1,000K이상이 된다. 水銀 램프는 封入 水銀量이 크게 잡아서 수 10mg정도이며 水銀 蒸氣量은 管壁 溫度에 대하여 시간적으로 지연이 일어나지만 (6식 참조), 水銀 蒸氣는 보통 불포화의 狀態로서 동작하는 것으로 생각되어진다. 따라서 발광관내의 水銀 蒸氣壓 P_r 과 양광주 實效 溫度 T_p 의 관계는 氣體의 溫度와 壓力의 관계를 나타내는 van der Waals의 식,

$$(P + \frac{n^2 a}{V_m^2}) (V_m - nb) = nRT \quad (12)$$

에 管壁 溫度 T_{win} 의 2승을 하고, 係數 K_1 을 도입하여 $g \text{ mol}$ 수 n 과 단위 길이당의 水銀 蒸氣量 m_u 를 이용하여 다음의 식으로 표현되는 것으로 가정한다.⁵⁾

$$P_r = K_1 \left\{ \frac{m_u L_a R T_p}{1,000 \times 200.59 V_m - b m_u L_a} - a \left(\frac{m_u L_a}{1,000 \times 200.59 V_m} \right)^2 \right\} T_{win}^2 \quad (13)$$

여기서, T_p 는 實效 溫度, V_m 는 수는 1mol당의 체적 a, b 는 정수, R 은 분자 기체상수

水銀이 전부 증발할 때까지 이와 같은 지연은 램프 電壓 변화의 주된 원인으로 간주되고 램프 電壓 또는 光束의 변화로부터 2차 지연으로 응답하는 것으로서 (6)식을 제시한 바 있다. 이 식은 2계 微分方程式으로 되어 있기 때문에 자동제어 등에서 명확하게 볼 수 있듯이 감쇄율 δ , 고유각 주파수 ω_n 으로 결정되고, δ 와 ω_n 사이에는 다음의 관계가 성립한다.^{5), 6)}

$$\omega_n = \frac{\pi}{(1 - \delta^2)^{1/2} T_r} \quad (14)$$

여기서, T_r 는 고유 각 주파수의 최초 피크치에 도달하는 시간

2.3 에너지 平衡 關係式

거시적인 아아크 플라즈마의 解析은 Boltzmann 방정식에 의해 유도되는 流體方程式의 풀이에 의해 가능하며, 다음의 質量保存式 (Mass Continuity Equation), 運動量 方程式 (Momentum Equation) 및 에너지 보존식 (Energy Conservation Equation)을 유도해 낼 수 있으며, 또한 2.1절의 가정하에서 본 논문에도 適用되는 다음과 같은 아아크 放電管内의 質量保存式과 에너지 方程式 유도가 가능하다.^{8), 9)}

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (r v_r \rho) = 0 \quad (15)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma E^2 - U_{rad} + \frac{\partial}{\partial r} (rK \frac{\partial T}{\partial r}) - \rho C_p v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (16)$$

여기서, ρ : 封入가스의 質量密度 [kg/m^3]

C_p : 定壓比熱 [$\text{J}/\text{kg K}$]

T : 플라즈마의 溫度 [K]

U_{rad} : 단위 체적당 방사에너지 [W/m^3]

K : 열 전도율 [$\text{W}/\text{m K}$]

v_r : 관경방향 對流速度 [m/sec]

위의 에너지 평형식은 封入 氣體 溫度의 단위 체적당 변화율과 단위체적당 입출력 에너지의 변화의 관계를 나타낸 것으로서 이 方程式의 오른쪽 항은 차례로 저항가열, 복사손실, 열전도, 관경 방향 대류 손실과 단열 가열을 의미한다.

교류전원이 인가되고 그림 1과 같은 점등회로를 갖는 경우 회로 방정식과 電流는 다음의 관계식을 갖는다.

$$V_s(t) = L \frac{dI}{dt} + IR + E L_1 \quad (17)$$

$$I = 2\pi E \int_0^{R_w} \sigma r dr \quad (18)$$

여기서 L_1 : 전극 강하를 고려한 전극 거리 [m]

R_w : 放電管 半徑 [m]

σ : 도전을 [σ/m]

아아크 放電으로 이행된 후 단위길이당 封入된 水銀의 양과 壓力의 관계로서

$$m = \int_0^{R_w} \rho 2\pi r dr = \int_0^{R_w} \frac{P}{KT} M 2\pi r dr \quad (19)$$

m : 단위길이당 封入된 水銀의 무게 [kg/m]

M : 水銀 原子의 무게 ($=3.332 \times 10^{-25}kg$)

p : 封入 가스의 壓力 [Atm]

k : 볼츠만 상수 ($=1.38 \times 10^{-23}J/K$)

위의 5가지 식과 境界條件

$$v_r(r=0) = 0$$

$$\left[\frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=0} = 0$$

$$T(r=R_w) = T_w$$

을 합하여 풀어서 高壓放電의 特性을 예측할 수 있다.

이상의 식을 풀기 위해서는 방사에너지 U_{rad} , 전기전도도 σ , 定壓比熱 C_p 및 열 전도도 K 와 같은 물리량을 溫度 및 壓力의 函數로 나타낼 수 있어야 한다.

3. 모델方程式의 計算 및 檢證

始動 特性의 모델 方程式의 計算에서는 초기값으로 상온에서의 水銀 蒸氣壓과 外氣 溫度 등이 주어진다. 초기 조건에 의해 放電 電流와 단위 길이당의 전압 및 전력이 計算되고 放電管의 實效溫度, 放電管의 內壁 및 外壁 溫度, 외관의 內壁 및 外壁溫度가 전도 에너지 손실로서 計算되며, 아울러 放電管 內壁 溫度를 입력으로 하는 水銀 蒸氣量의 증발되는 2계 미분 方程式의 해가 구해짐으로써 다음 단계의 水銀 蒸氣壓을 計算하여 이와 같은 과정을 반복하게

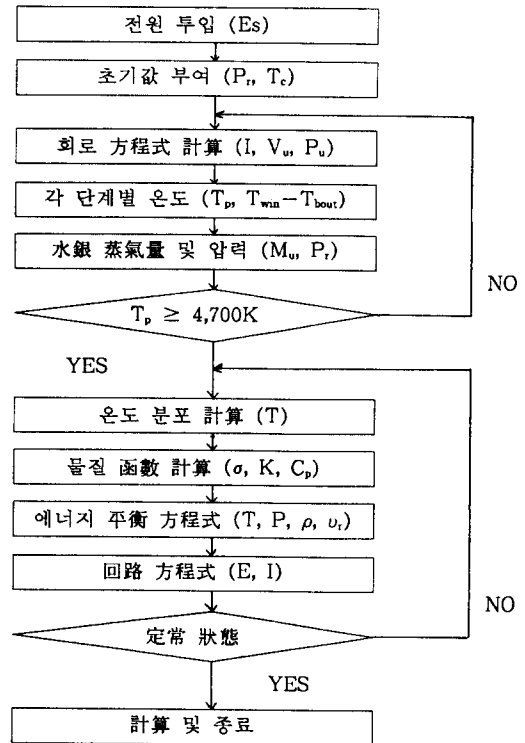


그림 2 모델 方程式의 計算 플로우 차트
Fig. 2 Flow Chart of Calculating the Modeling Equations

된다.

實效溫度가 4,700K에 도달하게 되면 LTE 가정이 타당한 定常狀態에 해당되기 때문에 回路 方程式, 에너지 平衡式, 壓力 등에서 별도의 적용이 가능한 定常狀態 모델 方程式의 計算으로 이행되어 각종 特性을 실효값 개념이 아닌 時變 特性을 計算하게 되는데 이의 모든 과정을 플로우 차트로 표현하면 그림 2와 같으며 다음의 事項을 고려하여 計算하였다.

- 1) 대상 램프는 HF100이고 초크 코일형 안정기를 직렬 연결하여 구동한다.
- 2) 전극강하는 放電電流에 관계없이 15[V]이다.
- 3) 각종 常數 및 係數값들은 참고문헌 (5), (6), (12)의 데이터를 活用한다.
- 4) 放射에너지의 계산은 溫度분포, 수은가스 壓力, 放電管 중심軸 온도 및 放電管의 반경을

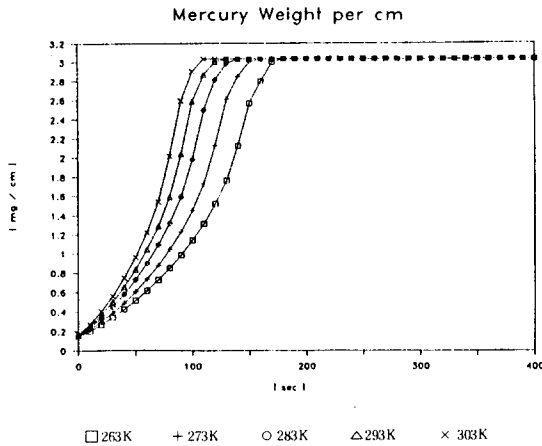


그림 3. 램프 시동후 周圍溫度에 따른 수은 증기량의 변화

Fig. 3. Variation of Mercury Vapor Quantity after Starting Lamp for Various Ambient Temperatures as a function of Time

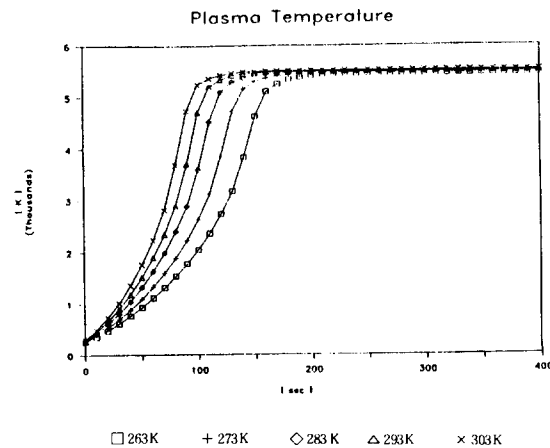


그림 4. 램프 시동후 周圍溫度에 따른 플라즈마 온도의 변화

Fig. 4. Variation of Plasma Temperature after Starting Lamp for Various Ambient Temperatures

고려하여 Legendre Polynomial로 近似化시키는 Stromberg와 Schäfer, 金壇의 計算方法을 적용한다. 2), 3)

5) 모델方程式에 적용한 物質函數와 관련하여, 電氣傳導度 σ 에 대해서는 Morris와 Walker

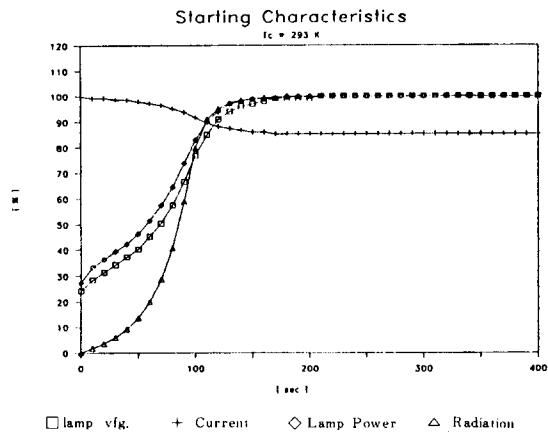


그림 5. 램프시동후 周圍溫度에 따른 램프전압, 放電電流 및 램프 電力의 변화

Fig. 5. Variations of Lamp Voltage, Discharge Current and Lamp Power due to various Ambient Temperatures

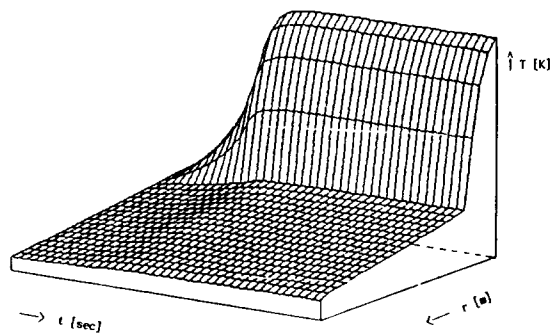


그림 6. 周圍溫度 293K에서 時間과 半徑에 따른 온도의 변화

Fig. 6. Variation of various Temperatures as a Function of Time and Radius at 293K of Ambient Temperature

의 연구 결과를, 정압비열 C_p 에 대해서는 金壇의 유도식을, 그리고 熱傳導度 K 는 Svelha의 data를 각각 使用하여 계산한다. (2, 10, 11)

6) 주위 온도는 263~303[K]에서 10[K]씩 5단계로 구분한다.

위의 計算結果로서 그림 3 내지 그림 6은 始動時의 諸特性을, 그림 7 및 그림 8은 定常

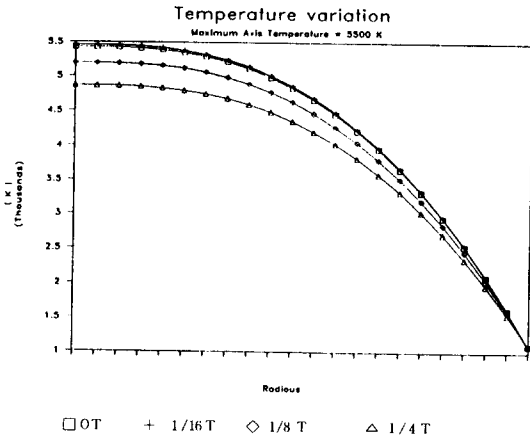


그림 7. 中心軸 온도 5,500K의 경우 時變 온도 분포
 Fig. 7. Time-dependent Temperature Profiles at 5,500K of Axis Temperature

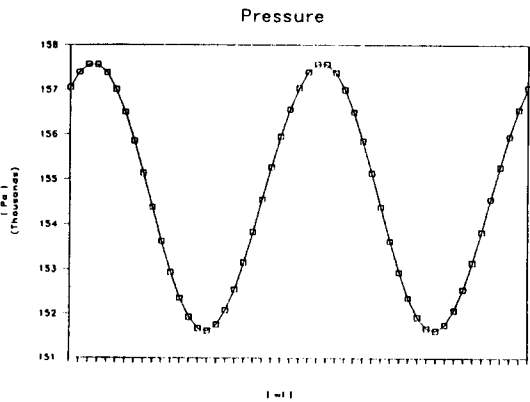


그림 8. 放電管에서의 가스압력의 시간적 변화
 Fig. 8. Time-dependent Variation of Gas Pressure at Discharge Tube

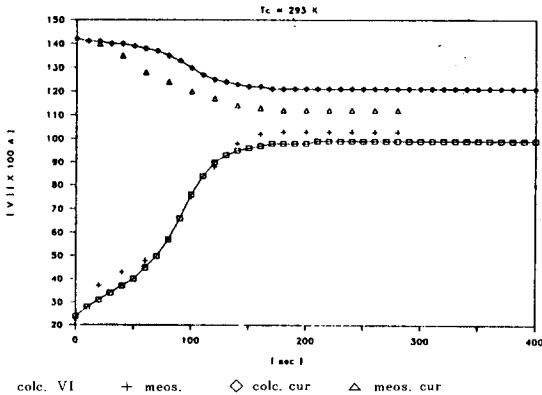


그림 9. 周圍溫度 293K에서 램프시동후 放電電流
 와 전압에 대한 계산값과 측정값의 비교
 Fig. 9. Comparison of the Calculated and Measured
 Values for the Discharge Current and
 Voltage after Starting Lamp at 293K

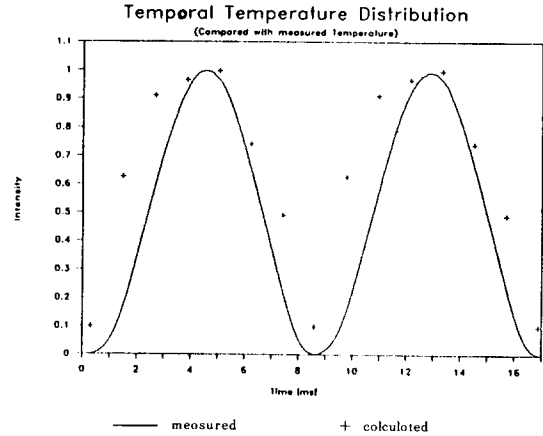


그림 10. 分光分析法를 이용한 온도分布의 계산값
 과 측정값의 비교
 Fig. 10. Comparison of Calculated and Measured
 Values for Temperature Distribution using
 the Spectroscopy Method

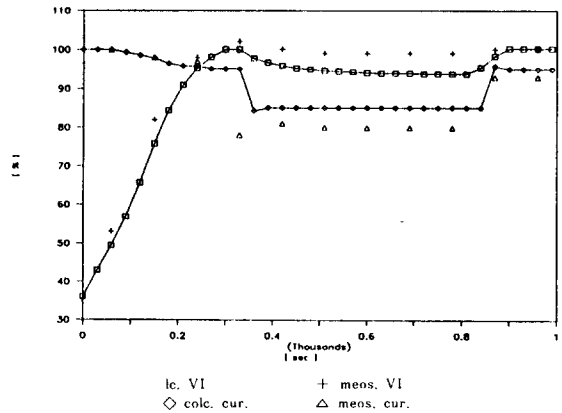


그림 11. 調光時 印加 전압을 200V에서 180V로
 變換시킨 경우 전압, 전류의 측정값과 비
 교 (300~800sec)
 Fig. 11. Comparison of Calculated and Measured
 Values for Voltage and Current in case of
 Dimming (300~800sec; 200V→180V)

狀態下의 時變特性을 보여주고 있으며, 그림 9

내지 그림 11은 檢證의 일환으로서 計算値와 實驗値를 비교하고 있다.

以上の 計算과 檢證으로부터 다음 章의 結論을 導出할 수 있었다.

4. 結論

본 研究 結果를 綜合해 보건데 周圍 溫度를 263K-303K에서 10K 간격으로 變化시킨 경우 放電管內 플라즈마 온도는 5,460K-5,520K, 放電管의 내벽온도는 1,090K-1,130K, 放電管의 외벽온도는 970K-1,010K, 외관 벌브의 내벽온도는 550K-590K, 외관 벌브의 外壁溫度는 435K-476K의 範圍에서 각각 정상 상태로 돌입하여 作動됨을 算出하였으며 특히 방전관과 외관 벌브간의 溫度 差異가 420K 정도로서 기존의 봉입 가스보다 熱 傳導率이 낮은 기체를 使用함으로써 전도 손실의 감소를 예측할 수 있었고 放電管과 外管의 내·외벽간의 온도 경사를 계산함으로써 使用 材料의 설계시 적용할 수 있는 데이터를 얻을 수 있었다. 周圍 溫度의 변화에 따른 각 狀態 變數의 變化過程 追跡으로서 전원 인가와 더불어 봉입 수은의 증발과 각 부의 온도가上昇되는 과정이 시간적으로 計算됨에 따라 高壓 아아크 放電燈의 주 위 온도 依存性을 밝혀 냈으며 周圍 溫度가 낮아짐에 의해서 시동 시간이 더 소요됨을 確認하였다. 定常 狀態에서는 방전관내 온도 분포, 압력 변화 및 가스 밀도를 時變 모델로 計算함으로써 印加電壓의 1 주기내의 각종 變數의 變動되는 狀況을 명확하게 추적할 수 있었고, 調光時를 가정하여 印加電壓을 10~20% 강압시킨 경우 및 安定器素子の 변경과 관련하여 안정기의 저항을 증가시키거나 印加電壓의 周波數를 변화시킨 경우에 대해서도 본 모델방정식의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

위의 계산에 적용된 모델 방정식의 妥當性을 檢證하기 위하여 시동시간과 시동시의 電壓, 電流의 안정화 과정, 안정 동작시의 외관 벌브의 溫度와 조광시에 있어서 전압, 전류의 변화를 측정하였고 정상 상태하의 온도 분포를 분

光 分析法에 의하여 측정 비교하였는 바, 외관 벌브 온도는 약 4% 이내이고 나머지 측정값들은 약 9% 이내의 誤差를 유지하여 비교적 잘 附合됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 1) 金 燾, “에너지 平衡式을 이용한 高光度 放電燈의 交流 特性 解析에 관한 研究”, 서울대학교, 工學 博士學位論文, 1988.
- 2) 金 燾, “高光度 放電燈의 아아크 特性에 대한 이론적 考察”, 조명·전기설비학회, 4권2호, 1989, pp. 117~124.
- 3) H.P. Stormberg, R. Schäfer, “Time-dependent Behavior of High-pressure Mercury Discharges”, J. of Appl. Phys. Vol. 54, No. 8, 1983, pp. 4338~4347.
- 4) W. Elenbaas, Light Sources, MacMillan, 1972.
- 5) S. Nakanishi, T. Himei, “A simulation model for high pressure mercury lamp operation by means of state variable equations”, J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 72 No. 6, 1987, pp. 327~332.
- 6) S. Nakanishi, T. Nakagawa, T. Himei, “The Simulation of High Pressure Mercury Lamp Operation by means of a State Variable Equation Model”, J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 72, No. 6, pp. 301~306, 1988.
- 7) S. Nakanishi, T. Nakagawa, “A simulation model of Metal Halide Lamps by State Variable Equation”, J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 73, No. 6, 1989, pp. 281~287.
- 8) K. Ragaller, W.R. Schneider, “A Special Transformation of the Differential Equations Describing Blown Arcs”, Z. Angew. Math. Phys. 22, pp 920~930, 1971.
- 9) C.L. Chalek, R.E. Kinsinger, “A theoretical investigation of the pulsed high-pressure sodium arc”, J. Appl. Phys., Vol. 52, No. 52, 1981, pp. 716~723.
- 10) J.C. Morris, J.H. Walker, “Electron-neutral transport cross section of mercury”, J. Apple. Phys., Vol. 44, No. 10, 1973, pp. 4558~4561.
- 11) Svelha. R.A., Estimated viscosities and thermal conductivities of gases at high temperatures. NASA Technical Report R-132 (1962).
- 12) 井上敏 外 3인, 岩波 理化學 大辭典, 岩波書店, 1965.