

고압 나트륨 방전에서의 아아크 분광분포 해석에 관한 연구

論文
3-1-1

A Study on the Arc Spectrum Analysis in the HPS Discharge

池 哲 根* · 朴 旺 烈** · 廉 正 德***
(Chol-Kon Chee · Wang-Ryeol Park · Jeong-Dug Ryeom)

요 약

고압 방전 아아크의 물리적 특성을 예측하기 위해서는 고압 방전 아아크의 특성을 근거로 한 타당성있는 모델이 고안되어야 한다. 광 에너지 분포의 계산방법을 상당히 개선하여 고압 방전 아아크의 분광학적 특성을 상세히 나타낼 수 있는 시불변 아아크 모델을 제시하였다. 그리고 계산 결과, 이 모델은 고압 방전 아아크의 물리적 특성을 비교적 잘 나타낸다는 사실을 알았고 아아크의 축 중심부의 온도가 높아질수록 나트륨의 공진선인 D 선보다 비공진선들의 방사 에너지가 많아지는 사실을 알 수가 있었다. 그러므로 축 중심부의 온도가 높아질수록 광원의 연색성이 개선된다는 사실을 예측할 수가 있다.

Abstract

In order to predict the physical characteristics of the HID arc, reasonable model based in HID arc characteristics must be designed. In our study we present the time independent arc model which is described spectral characteristics of HID arc in detail. It is improved calculation method of spectral energy distribution in the radiation energy term of HID arc mode. And in the results of calculation, we obtain the fact that this model well describes physical characteristics of the HID arc, and that temperature of axis of arc increasing, radiation energy of non resonance lines increase more than it of Na resonance line. Therefore we predict that the more temperature of the axis of arc increase the more color rendering of light source improve.

1. 서 론

인간의 눈은 태고로부터 자연스럽게 주광에 적응

하여 왔기 때문에 주광하에서 최적의 생활을 할 수 있다. 그리고 물체에 대한 색의 분별은 주광하에서 얻어지는 색감을 그 기준으로 하고 있다. 그러므로 인공적으로 인간에게 제공되는 조명환경은 그 광원의 스펙트럼 분포가 주광의 스펙트럼 분포에 근사할 것이 요망된다. 즉, 가시광선 영역에서의 광원의 스펙트럼 분포는 각 파장의 에너지 분포가

*正會員: 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
**正會員: 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程
***正會員: 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程

균일한 것이 바람직하다. 그러므로 주광에 근사한 조명환경에 대한 요구는 날로 증가하고 있는 실정이다.

특히 방전 아아크 내에서의 에너지평형과 함께 온도변화, 광출력의 특성 등은 방전등의 최적화 설계에 대단히 중요하며 이 중 광출력의 특성은 연색성의 개선이라는 문제와 관련되어 조명공학 분야의 지대한 관심사가 되고 있다.

이러한 방전 아아크의 특성에 대한 연구에 의해 현재에 이르러 많은 모델들이 고안되었으며 이 모델들은 각각 여러가지 장단점들을 가지고 있다. 즉, 방전 아아크의 특성을 비교적 이론적인 근거에서 도출해낸 모델에서는 방전 아아크의 특성을 정확히 기술하고 예측할 수 있는 반면 그 계산법이 너무 복잡하여 실제로 적용하기가 어려우며^{11) 12)} 한편 경험과 직관에 의존하여 고안된 모델에서는 기초적인 원리가 결여되어 일반적인 상황에까지 확장하여 적용할 수가 없다.^{9) 14)}

이들 중 보다 직접적이고 그러나 복잡한 계산과정을 요구하는 아아크 모델이 Chalek과 Kinsinger에 의해 제시된 모델로써¹²⁾ 이들은 복사 에너지 부분을 optically thick와 optically thin의 두 부분으로 구분하였다. 이 방법은 optically thick 부분을 나트륨의 공진선(589 / 590nm)에서의 방사(emission)와 흡수(absorption)의 관계를 이용한 복사 에너지 flux의 발산으로 표현하였고 optically thin 부분은 여기 전압(exciting voltage)의 평균치를 3.6 eV로 보아 단순화하였다.

본 논문에서는 이론적인 근거는 Chalek과 Kinsinger의 방법에 두고 있으나 복사 에너지 항을 개선하여 상세한 분광 에너지 분포가 고려된 고압 방전 아아크의 모델 방정식을 구성하고 정상 상태의 직류 동작하에서 모델 방정식을 계산하여 그 물리적인 의미를 고찰하였다.

2. 모델 방정식의 구성

do Groot의 연구에 의하면 HPS 아아크의 복사 에너지는 공진선인 D선 (589 / 590nm)이 전체 복사 에너지의 46.9%를 차지하고 비공진선인 568 / 569nm, 818 / 819nm, 1138 / 1140nm들이 전체의 2

4.5%를 차지한다고 하였다.^{7) 9)} 그러므로 위의 8개 파장이 전체 HPS 아아크의 복사 에너지의 71.4%를 차지한다고 말할 수 있으므로 위에서 언급한 8개의 파장의 광경방향 복사 에너지를 이용하면 매우 적절한 복사 에너지항을 구성할 수가 있다.

본 논문에서는 위의 8개 파장에 대한 광경 방향의 복사 에너지항을 구하여 그의 1.4배를 취하여 전체 복사 에너지로 가정한다. 그리고 이를 이용하여 시불변 에너지평형 방정식을 풀어 방전 아아크의 물리적인 특성을 고찰한다.

2.1 아아크 모델의 전제 조건

본 연구에서 설정되는 아아크 모델의 전제조건은 다음과 같다.

- (1) 양광주의 양끝의 공간전하에 의한 효과는 무시하고 무한 원통형 모델을 가정하여 축방향 및 방위각 방향의 radiation flux의 변화를 무시한다.
- (2) LTE(Local thermodynamic equilibrium) 상태를 가정한다.
- (3) 광경방향 및 관측방향의 압력이 일정하다.
- (4) 방전관 벽의 열관성이 크므로 관벽 온도는 방전 아아크의 변화에 관계없이 항상 일정(1500 K)한 것으로 본다.
- (5) 방전관 내의 기체는 이상기체(Ideal Gas)로 보며, 방전관 내의 봉입 물질들은 완전히 증발한다고 가정한다.
- (6) 점성효과(viscosity effect)와 자기효과(magnetic effect)를 무시한다.
- (7) 아아크는 정상 상태 동작으로 가정한다.

2.2 모델 방정식

(1) 에너지 평형식

에너지 평형식은 봉입기체 온도의 단위체적당 변화율과 단위체적당 입출력 에너지의 변화의 관계를 나타낸다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma E^2 - U_{rad} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rK) \frac{\partial T}{\partial r} - \rho C_p V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial t} \tag{1}$$

이 방정식의 오른쪽항은 차례로 저항가열, 복사손실, 열전도, 광경방향 대류손실과 단열가열(adiabatic

heating)을 나타낸다.

(2) 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rVr\rho) = 0 \quad (2)$$

(3) 기체상태 방정식

$$P = \rho RT \quad (3)$$

4) 단위길이당 봉입기체의 무게(fill gas loading)

$$\int_0^{R_w} \rho 2\pi r dr = M (= \text{const}) \quad (4)$$

(5) Ohm의 법칙

$$I = E \int_0^{R_w} \sigma 2\pi r dr \quad (5)$$

이들 방정식에 사용되는 대부분의 기호들은 표준화된 일반적인 의미를 지니며 그외의 기호들에 대한 설명은 본 논문의 마지막에 설명하였다.

경계치 조건은 다음과 같다.

$$T(R_w) = T_w$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

$$Vr(0) = 0$$

$$Vr(R_w) = 0$$

위의 연립 편미분 방정식은 초기치로서 정상상태에서의 온도분포, 압력, 상수로서의 봉입기체의 양 그리고 입력 에너지로서의 입력전류등이 주어지면 풀 수가 있다.

3. 복사 에너지의 계산

3.1 복사 에너지 FLUX의 계산

전항의 식¹⁾에 나타낸 단위체적, 단위시간당 복사 에너지 손실 Urad는 아아크의 양광주부분의 모델링에 있어서 아주 중요한 요소가 된다. 이 물리량은 각각의 복사 파장에 대하여 방출되는 분광 에너지의 양에서 흡수되는 분광 에너지의 양을 뺀 값의 복사 파장에 대한 적분치로 나타낼 수 있다. 복사 에너지를 구하기 위해 사용된 단위 시간당 분광 에너지는 단위 시간당 아아크의 출력 분광 에너지의 값이 된다.

이 Urad의 값은 당연히 에너지가 방출되는 아아크의 중심부에서는 양의 값을 갖는다. 그러나 공진선 복사가 흡수되는 관벽부근에서는 음의 값이 될 수 있다.

고압방전 아아크는 충돌 지배 플라즈마 상태이므로 복사 에너지 및 출력 분광 에너지의 계산 과정은 국부적인 열적 평형에서의 복사전달 이론을 그대로 적용한다.

단위시간, 단위 체적당 복사 에너지 Urad(r)는 각 파장에 대한 복사 광속 $F_\lambda(r)$ 의 적분치의 아아크의 관경방향에 대한 발산으로 표시된다.

$$Urad = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \int d\lambda F_\lambda(r)) \quad (6)$$

각 파장에 대한 관경 방향의 복사 광속 $F_\lambda(r)$ 는 총 입체각에 대한 관경 방향의 복사 에너지의 세기 (radiation intensity)의 적분치로 나타낼 수 있다.

$$F_\lambda(r) = \int d\Omega I_\lambda(r, \vec{s}) \cos(\phi(\vec{s}, \hat{e}_r)) \quad (7)$$

방전 아아크의 출력 스펙트럼은 관경방향의 복사 광속의 반경에 대한 적분치로 구할 수가 있다.

관경 방향을 따라 위치 r에서의 벡터방향의 복사 에너지의 세기 $I_\lambda(r)$ 은 단위 파장, \vec{s} 에 수직인 단위 면적 그리고 \vec{s} 방향의 단위 입체각에 대한 일률(power)로 나타낼 수 있다. 그리고 국부적인 열적 평형(LTE) 상태에서는 \vec{s} 방향의 복사 에너지의

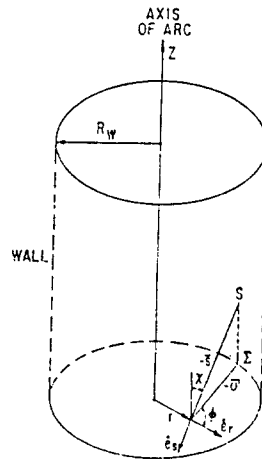


그림 1. 복사 에너지항을 계산하기 위한 원통 좌표

세기의 변화는 방사(emission) 및 흡수(absorption)의 차로 표현될 수 있다. 즉, 다음 방정식이 성립한다.

$$\frac{\partial}{\partial s} I_{\lambda}(r, \vec{s}) = E_{\lambda}(r) - K_{\lambda}(r) I_{\lambda}(r, \vec{s}) \quad (8)$$

충돌지배 플라즈마 하에서는 LTE가 성립하는데 이 경우 방사되는 양과 흡수되는 양 사이에는 키르히호프(Kirchhoff)의 법칙이 성립한다.

그러므로 방전 아아크 내에서 동일 파장에 있어서는 온도만 같다면 방사되는 양과 흡수되는 양은 어디서나 일정하다.

한편 흡수계수는 원자 준위의 밀도에 의존적이므로

$$E_{\lambda}(r) = K_{\lambda}(r) B_{\lambda}(T(r)) \quad (9)$$

로 나타낼 수가 있다. 이때 $B_{\lambda}(T(r))$ 는 Planck 함수로서

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2(hc^2/\lambda^5)}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (10)$$

이다.

그러므로 식(9)와 식(10)을 식(8)에 대입하여 식(8)을 풀어 복사 에너지의 세기를 구하고 이를 식(7)에 대입하여 관경방향 flux를 구하면 다음과 같다.

$$F_{\lambda}(r) = 4 \times \int_0^{\pi} d\phi \cos\phi \int_0^{\infty} d\sigma K_{\lambda}(\sigma) B_{\lambda}(\sigma) \int_0^{\frac{\pi}{2}} dX \sin X \times \exp[-\int_0^{\sigma} d\sigma' K_{\lambda}(\sigma') / \sin X] \quad (11)$$

여기서 X는 아아크의 축방향과 S 방향과의 사이 각이고 ϕ 는 \vec{s} 의 수평면에 대한 사영 σ 와 관경방향 벡터 \hat{e}_r 와의 사잇각이다. 그리고 복사 에너지의 관벽에서의 반사는 무시한다.

3.2 흡수계수(absorption coefficient)의 계산

위에서 언급한 바와 같이 관경방향의 flux를 계산하기 위해서는 아아크 내에서의 각 파장과 각 관경방향의 위치에 대한 복사 에너지의 흡수 계수 K_{λ} 를 구하여야 한다. 흡수 계수 K_{λ} 는 각각의 스펙트럼 선에 대한 흡수계수 $K_{\lambda m}$ 의 합으로 나타낸다.

$$K_{\lambda} = \sum K_{\lambda m} \quad (12)$$

각각의 스펙트럼 선에 대한 흡수계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{\lambda m}(T) = \pi \text{ ro fm } N_n(T) [1 - \exp(-hc/\lambda kT)] \quad (13)$$

$L_{\lambda m}(T)$ 는 정규화된 선분포(line profile)로서 로렌츠형(Lorentzian shape)으로 가정한다.

$$L_{\lambda m}(T) = \left(\frac{1}{\pi}\right) \left(\frac{\mu_m}{(1/\lambda - 1/\lambda_m)^2 - \mu_m^2}\right) \quad (14)$$

공진 선폭(resonance broadening)을 고려한 최대치의 절반에서의 절반 선폭(line half-width at half-maximum) μ 는 다음과 같다.

$$\mu = \frac{3r_0}{4\pi} \left(\frac{g_l}{g_m}\right)^{1/2} \lambda_m \text{ fm } N(T) \quad (15)$$

여기에서는 공진선폭에 비해 다른 선폭은 대단히 작으므로 중성 나트륨 원자에 의한 공진선폭만을 고려하여 line shape를 나타내었다.

위의 식들을 계산하기 위해서는 $N_n(T)$ 와 $N(T)$ 의 값을 알아야 하는데 고압 방전 아아크에서는 LTE가 성립하므로 Boltzmann 분포와 Saha 방정식을 이용하여 그 값을 구할 수가 있다.

즉, 기체 상태 방정식 $P = NkT$ 에서

$$P = (N_o + N_i + N_e)kT \quad (16)$$

로 표현할 수 있다. 이 식에서는 여기된 원자나 기타 분자의 밀도는 대단히 작으므로 무시한다. 이때 플라즈마의 의사 중성 상태(Quasi Neutrality)에 의해 전자밀도 N_e 와 이온밀도 N_i 를 같게 놓을 수 있으므로 식(16)으로 부터

$$N_o = \frac{P}{kT} - 2N_e \quad (17)$$

또한 Saha 방정식은

$$\frac{N_i N_e}{N_o} = 2 \frac{g_i}{g_o} \frac{(2\pi M_e kT)}{h} \exp\left[-\frac{E_i}{kT}\right] \quad (18)$$

Boltzmann 방정식은

$$N_k = N_o \left[\frac{g_k}{g_o}\right] \exp\left[-\frac{E_k}{kT}\right] \quad (19)$$

$N_e = N_i$ 이므로 식(17)과 식(18)에서 N_o 를 구할 수가 있다.

위의 식(13)~식(18)를 이용하여 각각의 스펙트럼 선에 대한 흡수계수를 구하여 이 계수들의 합을

각각의 파장 및 반경 방향 위치에서의 흡수 계수로 한다.

4. 모델의 계산 및 결과

4.1 모델의 계산

(1) 복사 에너지 항의 계산

계산 과정의 복잡성을 피하기 위하여 복사 에너지의 계산과정에서 관경방향 온도분포를 등온 간격 stepwise profile로 변환하였다. 이렇게 함으로써 복사 에너지 flux는 두 반지름 사이의 중간지점인 r_{Fj} 에서 계산하게 된다. 여기서 r_{Fj} 은

$$r_{Fj} = \left[\frac{r_j^2 + r_{j-1}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (20)$$

로 나타낼 수 있고 이경우 각 등온 간격 안에서는 온도의 함수인 흡수계수 K_λ 와 Planck 함수 B_λ 가 반경에 무관한 일정한 값이 되어 복사 에너지 flux의 계산 과정이 간편해진다. 즉,

$$G_n(X) = \int_0^\pi \exp\left(-\frac{X}{\sin\Theta}\right) \sin^n\Theta \, d\Theta \quad (21)$$

라 하고 σ 에서의 광학적 깊이(optical depth) τ_λ 는

$$\tau_\lambda(\sigma) = \int_0^\sigma K_\lambda(\sigma') \, d\sigma' \quad (22)$$

식(21) 및 식(22)를 사용하여 식(11)를 변환하면 복사 에너지 flux는 다음과 같다.

$$F_\lambda(r) = \int_0^\pi d\phi \cos\phi \sum_{\sigma_1=0}^{\sigma} B_\lambda(\tau_1) [G_1(\tau_{\lambda ie}) - G_1(\tau_{\lambda io})] \quad (23)$$

여기서 보면 주어진 위치에서 관벽까지 σ 를 따라 적분하는 항이 연속된 등온간격마다의 단순한 대수적인 함수로 바뀌어 계산이 매우 간편해진다. 그리고 $\tau_{\lambda ie}$ 와 $\tau_{\lambda io}$ 는 σ 를 따라 i 번째 등온 간격으로 들어가는 점과 나가는 점에서의 광학적 깊이이다.

(2) 모델 방정식의 계산

위에서 유도한 복사 에너지 항은 복사 에너지의 71.4%에 달하는 양이므로 이 값의 1.4배를 취하여 단위체적당 복사 에너지 U_{rad} 의 양으로 한다.

또한 모델 방정식의 계산 가운데 편미분 방정식형은 FDM(Finite Difference Method)를 이용하여 계산하였는데 해의 불안정성을 피하기 위하여 음적차분법(Implicit Finite Difference Method)을 이용하였다.⁸⁾

초기치로는 정상상태에서의 압력과 직류동작에서의 온도분포를 취하여 입력하였다. 그리고 계산후 얻어진 온도분포를 초기치로 입력하였던 온도분포와 비교하여 허용치보다 클 경우에는 계산에서 얻어진 압력과 온도 분포를 다시 초기치로 하여 계산과정을 처음부터 다시 수행한다. 그리하여 수렴오차가 허용치 이하가 될때까지 위의 계산과정을 반복한다.

본 논문에서 수행하는 고압 방전 아아크 모델의 계산 과정의 흐름도는 그림 3과 같다.

4.2 계산 결과

모델 방정식을 계산하기 위해서 정의된 방전등은 내벽의 반지름이 0.28 cm, 두 극간거리가 39mm, 관벽온도가 1500°K 그리고 입력전력이 150W로 고정되어 있고 정상상태의 직류동작을 하고 있다고 가정한다. 그리고 내부 봉입기체의 압력은 정상 상태

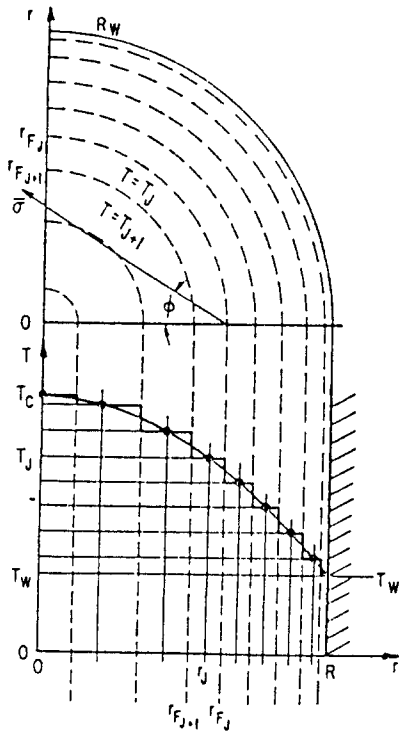


그림 2. Stepwise 된 등온 온도 분포곡선

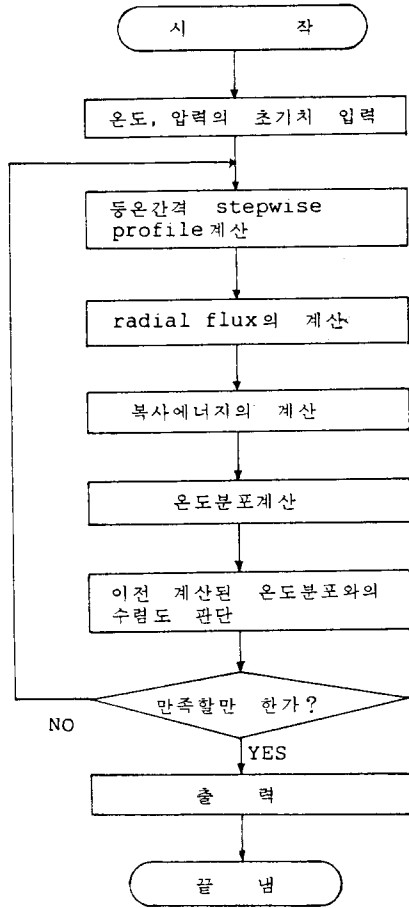


그림 3. 모델방정식의 흐름도

에서 340 torr의 수은, 70 torr의 나트륨, 190 torr의 크세논으로 구성되어 있다고 가정한다. 또한 초기치로 주어지는 관경 방향 온도분포는 de Groot의 근사 곡선에서 $n=2.3$ 인 경우를 사용하였다.

복사 에너지 항의 계산은 방전동 내벽의 반지름을 10 등분하였고 400nm에서 1200nm까지의 복사 파장을 10nm 간격으로 구분하고 σ 와 관경방향 사이의 사이의 각 ϕ 는 0에서 π 까지 20등분하여 계산하였다. 그림 4의 (a), (b)는 모델방정식을 계산하기 위하여 사용되는 계수들의 값을 도표로 표시한 것이다.

전자 계산기를 사용하여 계산한 고압방전 아아크 모델의 계산결과는 다음과 같다.

그림 5는 정상상태에서의 직류동작하의 분광 에너지 분포이다. 이를 실측치 그림 6과 비교하여 보면

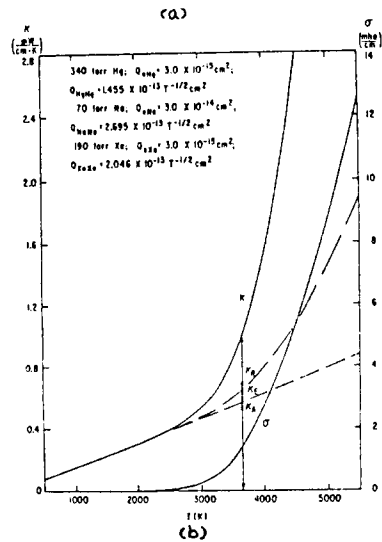
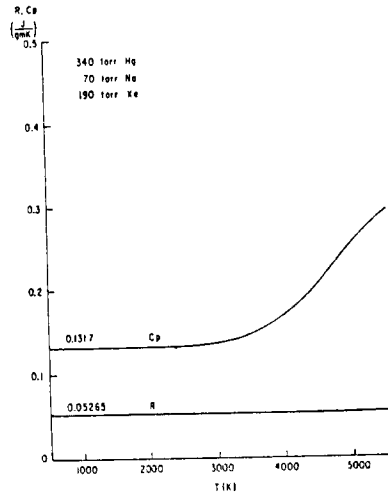


그림 4. 온도의 함수인 gas properties C_p , R , K , σ 의 값들

그 오차가 589/590nm는 15%, 818/819nm는 11%, 1138/1140nm는 5% 등으로 대략 10%의 스펙트럼선에 대한 평균계산 오차를 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 주요 스펙트럼들의 상대적인 세기도 계산치와 실험치가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 7은 온도분포곡선으로 입력전류가 증가하면 축 중심부의 온도가 증가한다. 이는 입력이 증가하면 복사 에너지가 증가함을 나타낸다. 그림 8은 복사 에너지 flux의 분포로서 flux는 축 중심부와 관벽

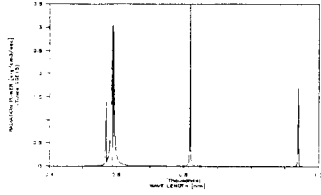


그림 5. 분광에너지 분포 (계산치)

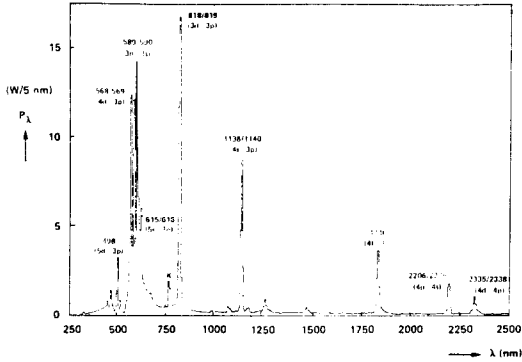


그림 6. 분광에너지 분포 (실측치)

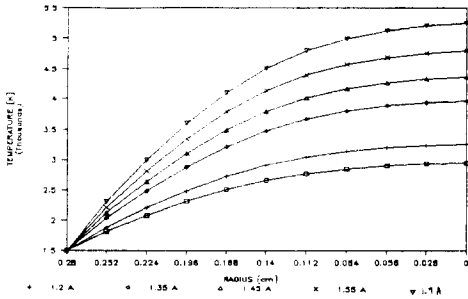


그림 7. 입력전류의 변화에 대한 온도분포

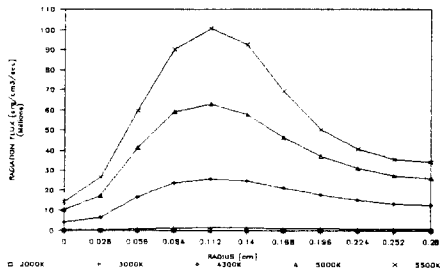


그림 8. 축중심 온도의 변화에 따른 복사에너지 flux의 변화

부근에서는 감소하여 복사 에너지가 축 중심 부근에서는 최대이고 관벽부근에서는 최소를 나타낸다는 사실과 일치한다. 또한 스펙트럼 분포 그림 9를 보면 관 중심부의 온도가 높을수록 나트륨의 비공진선의 영향이 증가함을 알 수가 있는데 이는 Johnson과 Rautenberg의 논문에서 밝힌 사실¹³⁾과도 일치한다. 그림 10은 단위시간, 단위체적당 복사 에너지를 나타낸 것이다. 그림 11에서 보면 공진선

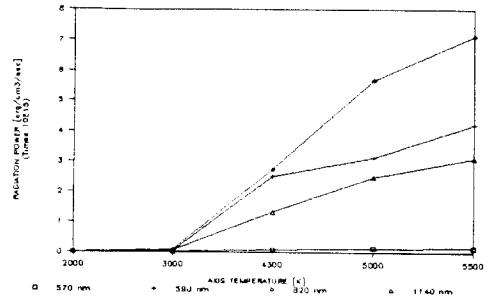


그림 9. 축중심 온도의 변화에 따른 분광에너지 분포의 변화

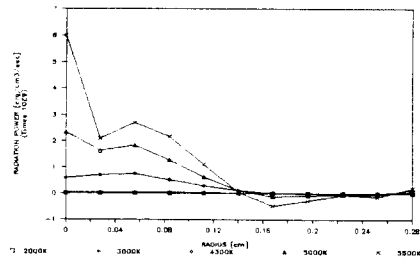


그림 10. 단위 시간, 단위 체적당 복사에너지

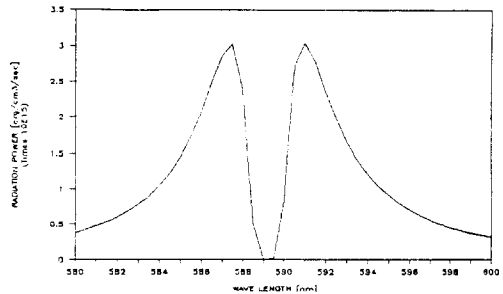


그림 11. 나트륨 공진선의 분광에너지 분포(계산치)

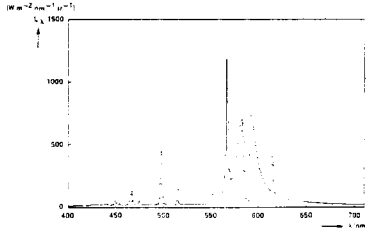


그림 12. 나트륨 공진선의 분광에너지 분포(실측치)

인 589/590nm 파장의 영역에서 자기 흡수 현상을 보여준다. 그리고 이것은 그림 12의 실측치와 유사한 스펙트럼 분포를 갖는 것을 알 수 있다.

이 모델에서는 Na원자들의 충돌에 의한 공진선폭(resonance broadening) 만을 고려해 주었으므로 실측치와 비교해 볼때 비공진선의 선폭이 다소 일치하지 않았다. 이는 나트륨 원자와 수은 원자나 크세논 원자와 같은 Buffer 기체 원자들과의 충돌에 의한 나트륨 공진선의 일그러짐과 수은 원자들의 충돌이나 전자와 이온들의 충돌에 의해 야기되는 Stark broadening 등이 스펙트럼에 미치는 영향 그리고 Van der Waals broadening 및 line shift 현상 등의 영향을 고려한다면 보상되어질 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 고압방전 아아크에서의 분광 에너지 분포에 의한 복사 에너지 분포가 상당히 개선된 시불변 아아크 모델을 제시하였다.

이 모델은 온도분포, 복사에너지 및 분광에너지 분포를 포함한 아아크의 특성들이 관경방향의 위치에 관한 함수의 형태로 얻어지게 된다.

모델 방정식을 구성하고 전자 계산을 이용하여 계산한 결과 아아크의 분광 에너지 분포가 실측치에 비해 10% 이내의 오차를 갖으므로 아아크의 분광학적 특성을 예측하기에 적절하다.

그리고 결과에서 보면 아아크의 축 중심부 온도가 높을수록 나트륨 공진선인 D선의 방사 에너지보다 비공진선들의 방사 에너지가 증가하는 것을 볼 수가 있다. 그러므로 축 중심부의 온도를 증가시키면 광원의 연색성이 개선된다고 할 수가 있다.

결론적으로 이 모델은 이론적인 근거가 확실하고 분광학적 특성이 비교적 상세히 고려된 모델이라고 할 수 있다.

그러나 모델의 분광학적 특성을 향상시키기 위하여 나트륨 원자와 buffer 기체들과의 충돌에 의한 나트륨 공진선의 일그러짐과 수은 원자의 충돌이나 전자와 이온들의 충돌이 스펙트럼에 미치는 영향 등도 고려되어야 할 것으로 생각된다. 그리고 앞으로 이 모델을 근거로하여 시간의 함수가 고려된 시변(Time-Dependent) 모델의 개발이 가능할 것으로 사료된다.

기 호 설 명

- T : 국부적인 온도
- V_r : 관경방향의 기체 속도
- ρ : 기체의 밀도
- p : 기체의 압력
- I : 관 전류
- E : 램프에 걸리는 전계
- Urad : 총 복사 에너지 손실
- F : 발산 광속 (radiation flux)
- ϵ : 방사 계수 (emission coefficient)
- k : 흡수 계수(absorption coefficient)
- R' : 기체 상수 (gas constant)
- $R\omega$: 방전관의 내측 반경
- M : 단위길이당 봉입가스의 무게(fill gas loading)
- C_p : 열용량 (heat capacity)
- K' : 열 전도도 (thermal conductivity)
- σ : 전기 전도도 (electrical conductivity)
- r_0 : 고전적인 전자 반지름 (classical electron radius)
- f_m : 진동자 강도 (oscillator strength)
- N_n : 기저 에너지 준위에 있는 나트륨 원자의 갯수 밀도
- g_m : 높은 에너지준위에서의 축퇴도 (statistical weight)
- g_l : 기저 상태의 축퇴도
- N : 나트륨 원자의 갯수 밀도
- g_i : 이온의 축퇴도
- M_e : 전자의 질량
- E_i : 전리 에너지

Nk : K 준위로 여기된 원자도 갯수밀도
 gk : K 준위의 축퇴도
 Ek : K 준위로의 여기 에너지

참 고 문 헌

- 1) 지철근, "진 기 응 용", 운문당, 1987
- 2) 김 훈, "에너지평형식을 이용한 고압도 방전등의 교류 특성 해석에 관한 연구", 서울 대학교, 1987
- 3) W. Elenbaas, Light sources, MacMillan, London 1972
- 4) R.N. Helms, Illuminating Engineering, (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1980)
- 5) H.R. Griem, Plasma Spectroscopy, (McGraw-Hill, New York, 1964)
- 6) W. Lochte-Holtgreven, Plasma Diagnostics, (North-Holland, Amsterdam, 1968)
- 7) J.J. de Groot, J.A.J. M. van Vliet, The High-Pressure Sodium Lamp, (Philips Technical library, 1986)
- 8) R.L. Burden, J.D. Faires, A.C. Reynolds, Numerical Analysis, (Prindle, Weber & Schmidt, Boston Massachusetts, 1981)
- 9) J.A.J.M. van Vliet, J.J. de Groot, "High-pressure sodium discharge lamps", IEEE Proc., Vol. 128, Pt. A, No. 6, 1981, pp. 45-41
- 10) C.H. Church, R.G. Schlecht, I. Liberman, B.W. Swanson, "Studies of Highly Radiative Plasmas Using the Wall - Stabilized Pulsed Arc Discharge", AIAA Journal 1966, Vol. 4, No. 11, pp. 1947-1953
- 11) J.J. Lowke, "A Relaxation method of calculating arc temperature profiles applied to discharges in sodium vapor", J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer, Vol. 9, 1969, pp. 487-498
- 12) C.L. Chalek, R.E. Kinsinger, "A Theoretical investigation of the pulsed high-pressure sodium arc", J. Appl. Phys., No. 52(2), 1981, pp. 716-723
- 13) P.D. Johnson, T.H. Rautenberg, Jr. "Spectral change mechanism in the pulsed high-pressure sodium arc", J. Appl. Phys., No. 50(5), 1979, pp. 3207-3211
- 14) John F. Waymouth, "An elementary arc model of the high pressure sodium Lamp", J. IES, 6, pp. 131-140, 1977
- 15) D.R. Stull, H. Prophet, NSRDS-NBS 37, National Standard Reference Data Series (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1971)
- 16) R.A. Svehla, National Aeronautics and Space Administration Technical Report R-132 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1962)
- 17) W.L. Wiese, M. W. Smith, B.M. Miles, NSRDS-NBS 22 V.II (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1969)