

분광 분석법에 의한 고압 수은등의 온도분포 측정

'89추계학술발표회

89 - 2

Temperature Distribution Measurement of High-pressure Mercury Lamp using Spectroscopic Method

김 상용 김 창섭 지 철근
Kim, Sangyong Kim, Changseob Chee, Cholkon

서울대학교 대학원 전기공학과
Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

ABSTRACT

Temperature distribution of 250W high-pressure mercury lamp has been measured by the spectroscopic method using relative intensities of spectral lines. To obtain radial temperature distribution, the measured intensity which was integrated along the line of sight was transformed into radial line intensity by Abel's inversion. Temperature was determined from relative intensities of spectral lines of the same atomic species.

The measured temperature of 250W high-pressure mercury lamp is 6000K at the axis. In this experiment temperature profile of high-pressure arc is parabolic as known.

I. 서론

고압 아아크 방전 내의 플라즈마는 LTE 상태에 있으므로 방전관 내의 온도분포만 안다면 모든 방전의 상태를 기술할 수 있다. 따라서 방전관 내의 온도분포를 구하는 것이 방전해석의 기본이다. 실험적으로 플라즈마의 온도를 측정하는 방법은 크게 나누면 프루브(probe)법과 분광분석법이 있다. 광원으로 사용되는 고압 아아크 방전의 경우는 방전관 내에 프루브를 삽입하는 것이 불가능하므로 분광분석법에 의해 온도를 측정해야한다. 분광학적 방법을 이용한

플라즈마의 온도 측정에는 여러가지가 있는데 플라즈마가 LTE 상태에 있다면 한 종류의 원자에서 방사되는 optically thin한 분광선의 상대적인 휘도로부터 플라즈마의 절대적인 온도를 결정할 수 있다.

본 논문에서는 위에 기술한 방법으로 250W 고압 수은등 내관의 온도분포를 측정하였다.

II. 이론

광원으로 사용되는 고압도 방전등 내의 고압 아아크 방전은 부분전리 플라즈마(partially ionized plasma)상태이며 이러한 플라즈마는 중성의 기체 원자 또는 분자들이 구성입자의 대부분을 차지하고 같은 수의 전자와 이온이 포함되어있는 플라즈마이다.

방전등에 전압을 인가하여 방전을 일으키면 방전관 길이의 대부분을 차지하는 양광주(positive column)는 플라즈마 상태로 되며, 이 플라즈마 내에서 중성입자 또는 이온에 비해 무게가 월등히 가벼운 전자는 전계 내에서 빠른 속도로 이동하므로 많은 에너지를 얻게되고 이 전자가 다른 입자와의 충돌하여 전계로부터 얻은 에너지를 전달한다. 전자와 다른 입자간의 충돌은 탄성충돌과 비탄성충돌로 나눌 수 있는데 탄성충돌에 의하여 중성의 기체원자는 에너지를 얻어 온도가 상승하게되고 비탄성충돌에 의하여 중성의 기체원자의 전리, 여기가 일어나 방전의 지속과 발광현상이 일어나게된다.

저압 아아크 방전의 경우 중성기체입자들의 밀도가 낮으므로 전자와 중성입자간의 탄성충돌 횟수도 적어서 전자온도가 매우 높은 반면 중성입자의 온도는 낮다. 그러나 가스 압력이 점차 높아져서 고압 아아크 방전으로 이행되면 중성기체원자의 밀도가 높아지므로 입자의 평균자유행정(mean free path)가 짧아져서 탄성충돌 횟수도 점차 많아지게된다. 따라서 전자와 다른 입자간의 에너지 교환이 충분히 일어나므로 전자의 평균에너지는 낮아지고 중성원자의 평균에너지는 높아지게되며 고압 아아크 방전에서는 이들 입자의 온도가 거의 같아지게된다. 아아크 내의 가스 압력 변화에 따른 구성입자들의 일반적인 온도변화를 그림 1에 나타내었다.

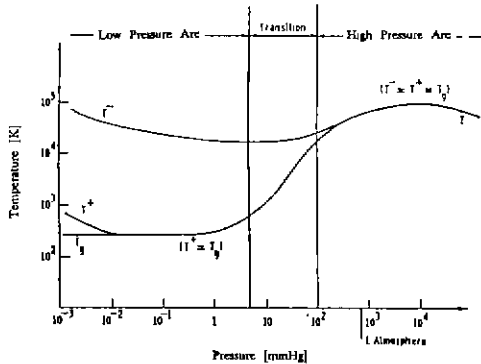


그림 1. 가스압력변화와 온도변화

이상에서 알 수 있는 바와 같이 충돌지배 플라즈마(collison dominated plasma)인 고압 아아크 방전에서는 각 입자의 자체 내에서만 열역학적 평형이 성립하는것이 아니라 단위체적 내에 있는 모든 입자들의 에너지가 동일한 국부적 열역학적평형(LTE : local thermodynamic equilibrium)이 성립하게된다. 이러한 국부적 열평형이 성립하게되면 아아크 내부에서 어느 위치의 온도를 아는 경우 그 위치에서 일어나는 모든 물리적 제 현상의 계수와 각 입자들의 밀도를 알 수 있게된다.

1. 국부적 열평형의 성립

고압 아아크 방전의 반경방향의 온도분포를 측정하는 기본적인 방법은 아아크의 모든 단위 체적요소에서 LTE가 성립한다는 가정에 기초한다

LTE상태는 압력이 충분히 높아서 전자밀도가 어떤 한계치 이상인 충돌지배 플라즈마에 적용될 수 있으며 H. Griem에 의하면 LTE상태에 필요한 전자밀도는 다음식으로 표현된다.

$$N_e \geq 9 \times 10^{17} \left(\frac{E_2}{E_n} \right)^3 \left(\frac{kT}{E_n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서,

E_2 : 첫 공진선의 에너지

E_n : 이온화 에너지

고압 수은등의 경우 W. Elenbaas에 의하면 $E_2 = 4.67[eV]$, $E_n = 10.43[eV]$ 이며 수직점등시 방전관 중심의 온도는 대략 6000[K] 정도이라고 한다. 이 값들을 식 (1)에 대입하면

$$N_e \geq 1.8 \times 10^{17} \quad (1')$$

이라는 LTE상태의 성립에 필요한 전자밀도의 요구 조건이 얻어진다. J.J de Groot의 연구에 의하면 고압 수은등 중심에서의 전자밀도는 $10^{21} \sim 10^{22} [m^{-3}]$ 이므로 고압 수은등의 방전관 중심 부근에서는 LTE가 성립한다는 가정이 타당하다. 그러나 방전관의 벽 부근에서는 온도보다 전자밀도가 급격히 감소하므로 LTE가 성립하지 않을 것이라 예상할 수 있다.

2. 분광분석법에 의한 플라즈마의 온도 결정

플라즈마에서 방출되는 빛을 해석하여 플라즈마의 상태를 분석하는 것이 분광분석법이다. 원자, 이온 또는 분자들의 분광휘도는 전이되는 에너지 준위의 왼쪽 준위 밀도와 양자 에너지에 비례하므로 그 분광선의 휘도를 측정하면 주어진 플라즈마 내의 원소들의 양자상태의 밀도를 계산할 수 있다. 뿐만아니라 LTE의 경우 플라즈마내의 화학적 조성비를 알고 볼츠만 관계식을 이용하면 자기 다른 양자상태의 밀도를 온도로 환산할 수 있다.

에너지 준위 E_k 에 존재하는 원자 밀도 n_k 는 다음의 볼츠만 식으로 표현된다.

$$\frac{n_k}{n} = \frac{g_k}{U(T)} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) \quad (2)$$

여기서,

g_k : statistical weight of k^{th} level

n : concentration of atoms

$U(T)$: partition function

그리고 분광선에 의해 단위체적의 플라즈마에서 단위시간, 단위과장당 단위입체각으로 방사되는 에너지는 다음식으로 표현된다.

$$\epsilon_{\nu,L} = \frac{hc}{4\pi\lambda} A_{ki} n_k P_{\nu} \quad (3)$$

여기서,

h : 플랑크 상수

c : 광속

A_{ki} : Einstein's spontaneous transition probability

P_{ν} : normalized line profile

만일 플라즈마가 optically thin 하고 균일하다고 가정하고, 식 (3)의 n_k 를 식 (2)에 의해 표현하면 분광선의 휘도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{\nu,L} &= \epsilon_{\nu,L} \cdot l \\ &= \frac{hc}{4\pi\lambda} (g_k A_{ki}) \frac{n}{U} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) P_{\nu} \quad (4) \end{aligned}$$

여기서,

l : optical length of the plasma

여기서 플라즈마가 LTE조건을 만족한다면 전이확률 등의 원자상수들을 알고, 분광도가 좋은 monochromator를 이용하여 분광선의 휘도를 측정함으로써 플라즈마의 온도를 구할 수 있음을 알 수 있다.

같은 종류의 원자에 의한 분광선들의 휘도는 각각 식 (4)를 만족하며 2개의 분광선 휘도의 상대적인 비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2 U_2 n_1}{A_2 g_2 \lambda_1 U_1 n_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right) \quad (5)$$

만일 두 분광선이 같은 이온화 단계에 속한다면 partition function U_1 과 U_2 , 기저상태의 원자 밀도 n_1 ,과 n_2 는 같은 값을 갖는다. 따라서 식 (5)는 아래와 같게된다.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right) \quad (6)$$

본 연구에서는 식 (6)을 이용하여 플라즈마의 온도를 구하였다.

3. Abel's inversion

플라즈마의 관경 방향의 온도 분포를 실제적인 측정으로부터 직접 구해내는 것은 불가능하다. 그이유는 그림 2 에서 알 수 있는 바와 같이 monochromator와 같은 관측장비가 받아들이는 정보는 어느 특정 반경에서의 단위 체적요소에서 방사되는 빛의 휘도가 아니라 다른 방사계수(emmissivity)을 갖는 여러층의 체적요소에서 방사되는 빛이 관측방향을 따라 적분된 량이기 때문이다.

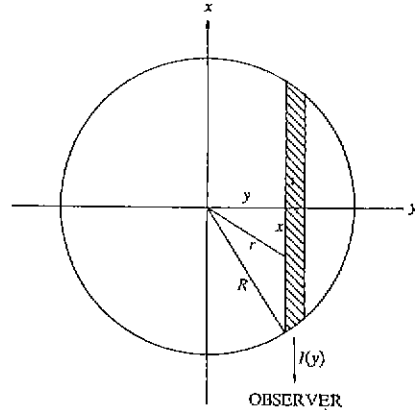


그림 2. 플라즈마의 단면도

Cylindrical 또는 spherical symmetry가 존재하는 플라즈마의 경우는 관측되는 투사된 분광휘도를 플라즈마 내의 관경 방향의 휘도분포로 변환하는 것이 가능하다. 그림 2 와 같이 x 축을 따라 cylindrical symmetry가 존재한다고 하면 x 축과 평행한 방향으로 관측되는 휘도는 플라즈마의 관경방향의 방사계수 $\epsilon(r)$ 을 x 축을 따라 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I(y) &= 2 \int_0^{\sqrt{R^2 - y^2}} \epsilon(r) dx \\ &= 2 \int_y^R \frac{\epsilon(r) r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \quad (7) \end{aligned}$$

여기서 R 은 $\epsilon(r)$ 이 제로가 되는 반경이다. 이 식은 Abel type의 식이므로 이 식을 역변환하면

$$\epsilon(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI(y)}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2-r^2}} \quad (8)$$

와 같은 Abel inversion 식이 얻어진다.

따라서 관경방향의 온도 분포를 구하려면 먼저 관경방향의 방사계수 $\epsilon(r)$ 을 알아야 하고 이를 위해서는 $I(y)$ 를 알아야 하므로 미소한 Δy 간격으로 분광휘도를 측정해야 한다.

III. 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 그림 3에 나타내었다.

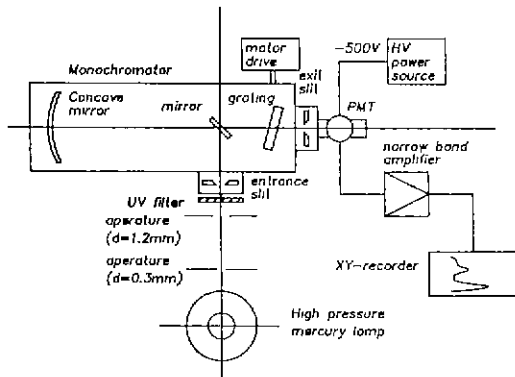


그림 3. 실험장치의 구성도

Monochromator는 일본 미조지리 광학사의 Ebert-type monochromator SG-12D-10B로서 격자정수 1200[lines/mm], 분산역수 8 [$\text{\AA}/\text{mm}$], collimator mirror 의 초점거리 1000 [mm], f수 17.0 이며 측정 파장범위는 2000~7000 \AA 이다. 방전등은 micro-meter 의 나사를 이용하여 제작되어 1/100 [mm] 간격으로 정밀한 이동이 가능한 $y-z$ transducer위에 설치하여 y 방향으로 scanning이 행해진다. 고압 수은등의 반경은 10[mm]정도이므로 0.5[mm]씩 scanning하여 20개 정도의 점에서의 분광휘도를 구한다. 광원과 monochromator 사이에 collimating aperture로 두개의 aperture를 설치하는데 광원 앞에는 직경 0.3[mm], monochromator 앞에는 직경

1.2[mm]의 원형 aperture를 사용하며 그 사이는 암실을 만들어 반사에 의한 빛의 잡음을 차단한다. 본 실험에서 측정되는 빛의 파장범위는 400[nm] ~ 600[nm]의 가시부이므로 UV컷트 필터를 사용, 350[nm]이하의 분광선을 차단하여 고조파의 영향을 배제한다. PMT (photo-multiplier tube)에는 -500[V]의 고압을 인가하며 PMT로부터의 출력신호는 협대역 증폭기를 통해 증폭된 후 X-Y 기록계에 의해 기록된다. 이 스펙트럼에서 필요한 파장의 분광휘도를 읽어 IBM-PC로 Abel inversion을 행하고 온도를 결정한다.

IV. 실험 결과 및 분석

일반적으로 고압 수은등의 스펙트럼은 그림 4와 같다.

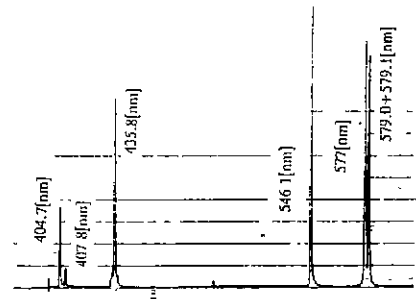


그림 4. 고압수은등의 스펙트럼

위에 기술한 온도분포 측정방법을 250W 고압 수은등의 경우에 적용하여 보았다. $y-z$ transducer를 이용하여 0.5[mm]간격으로 24개의 점에 대해 스펙트럼을 측정하였는데 cylindrical symmetry에 의해 19개의 점만이 유용한 데이터이다. 고압 방전등의 온도분포는 포물선 분포라고 알려져 있으므로 정확성을 기하기 위해 $I(y)$ 를 4차의 다항식으로 가정하였으며 최소자승법에 의해 4차식의 계수들을 구하였다. 식 (8)에서 $I(y)$ 가 4차식이면 적분이 해석적으로 가능하므로 관경방향의 방사계수 $\epsilon(r)$ 이 쉽게 구해진다. 이렇게 구해진 $\epsilon(r)$ 로부터 식 (6)에 의해 온도가 결정되는데 수은의 비공전선인 $\lambda=407.8[\text{nm}]$ 와 $\lambda=577[\text{nm}]$, $\lambda=407.8[\text{nm}]$ 와 $\lambda=599.0+599.1[\text{nm}]$ 두 조합의 경우에 온도를 각각 계산하였다. 이 분광선들에 대한 원자 상수들은 표 1과 같다.

wavelength [nm]	A_{ki} [sec ⁻¹]	g_k	$A_{ki}g_k$ [sec ⁻¹]	energy level [eV]
407.8	0.7×10^7	1	0.7×10^7	7.92
577	2.8×10^7	5	1.4×10^8	8.845
579.0+579.1		5 and 3	$\Sigma A_g = 1.3 \times 10^8$	8.837

표 1 수은 분광선의 원자상수

그림 5 에 계산된 온도분포를 나타내었다. $r=5[\text{mm}]$ 이후의 영역에서의 온도는 불규칙한 값이 계산되었는데 이는 이 영역에서는 LTE 상태가 성립하지 않기 때문이다.

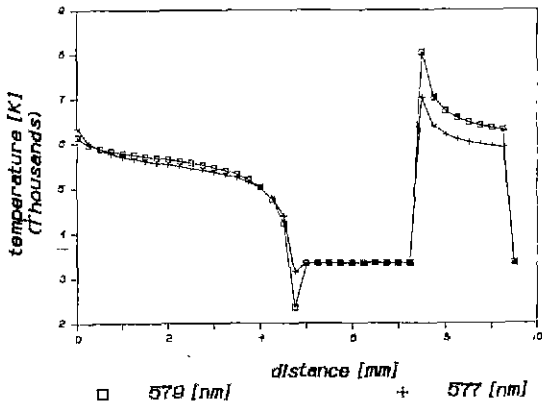


그림 5. 계산된 온도분포

그림 6 은 LTE가 성립하는 영역의 온도 분포이다. $r=0$ 에서 $r=4.5[\text{mm}]$ 까지는 포물선의 온도분포를 보임을 알 수 있다. 고압 방전등의 경우 60[Hz] 교류 전원으로 점등하면 시간에 따른 온도의 변화가 존재하나 이의 측정은 매우 어렵다. 본 실험에서도 고압 수은등을 60[Hz]로 점등하고 있으므로 시간에 따른 온도변화가 존재하나 이번 실험에서 측정된 온도는 이 온도변화가 시간에 대해서 평균된 값이다.

V. 결론

본 실험에서 얻어진 결과는 이론적으로 또는 실험적으로 알려져 있던 결과와 잘 일치한다. 본 실험에서 사용한 방법은 고압 수은등 뿐만아니라 다른 고압 방전등에도 적용 가능하다. 급후의 개선 과제로는 정확한 온도의 값을 구하기 위해 보다 정밀한 실험을

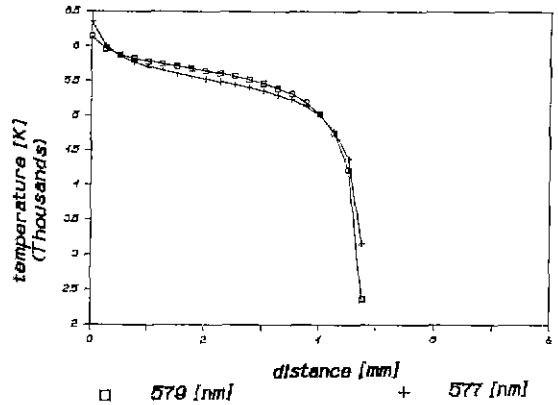


그림 6. 계산된 온도분포 (LTE 영역)

수행하여야 하고 내관의 지름이 더욱 큰 400W 수은등으로 실험을 행하여 더욱 자세한 온도 분포를 구해야 할 것이다. 그리고 시간에 따른 온도의 변화를 구해낼 수 있는 실험방법의 개발도 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Elenbass, W., "Light Sources", MacMillan, London, 1972
- [2] Hoyaux, M. F., "Arc physics", Springer-Verlag, New York, 1968
- [3] Griem, H. R., "Plasma spectroscopy", McGraw-Hill, New York, 1964
- [4] Lochte-Holtgreven, W., "Plasma diagnostic techniques", North-Holland, Amsterdam, 1968
- [5] Waymouth, J. F., "Electric discharge lamps", M.I.T. press, Cambridge, 1971
- [6] de Groot, J. J., "The high pressure sodium lamp", Philips technical library, Deventer, 1986
- [7] 김훈, "에너지평형식을 이용한 고압도 방전등의 교류특성해석에 관한 연구" 박사학위 논문, 서울대, 1989
- [8] Mouwen, C. A. M., "Determination of the radial temperature distribution in a high pressure discharge", Physica, Vol. 49, 1969, pp. 381~386
- [9] Ozaki, N., "Temperature distribution of the high pressure sodium vapour discharge plasma", JQSRT, Vol.11, 1971, pp. 1111~1123
- [10] Bockasten, K., "Transform of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma", J. Opt. Soc. Am., Vol. 51, 1961, pp. 943~947