

고압 수은등의 온도분포 측정에 대한 연구

A study on the temperature distribution measurement of the high pressure mercury lamp

손승현* 김상용 김창섭 지철근
S.H.Son S.Y.Kim C.S.Kim C.K.Chee

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

Abstract

Temperature distribution of high pressure mercury lamp has been measured as a function of time using spectroscopic method. Sampling signal which is synchronized by lamp voltage was used to measure temporal line intensity at each radius. To obtain radial temperature distribution, the measured intensity was transformed into radial line intensity by Abel's formula.

Absolute temperature profile was calculated from relative intensities of spectral lines as a function of line and tube radius.

The temperature profile is very similar to the electrical tube current profile.

1. 서론

고압 방전등의 경우 plasma는 극부적 열평형 상태에 있으므로 방전상태를 기술하기 위해서는 온도분포를 구하는 것이 필요하다. 대부분의 방전등은 상용 주파수의 전원으로 점등하고 있으

므로 시간에 따른 순시입력전력의 변화에 따라 방전등 내의 plasma의 온도도 변한다. 따라서 방전등의 plasma해석을 위해서는 관경방향에 따른 온도분포 뿐만 아니라 시간에 따른 온도분포도 필요하다.

Plasma의 온도를 측정하는 방법은 여러가지가 있으나 방전등의 온도분포 측정에 적용할수 있는 방법으로는 분광분석법(spectroscopy)이 이용되고 있다. 분광분석에 의한 방법은 적용되는 광원의 optical depth에 따라 각각 다른 방법이 제안되고 있다. 본논문에서 사용한 수은등은 뚜렷한 선스펙트럼을 가지며 이들은 optically thin한 분광선들이므로 두 분광선의 상대적 휘도비교에 의한 plasma의 온도결정법을 사용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 고압 방전등에서의 plasma

고압 방전등에 전압을 인가하여 방전이 시작되면 봉입된 gas는 부분 전리되어 plasma상태가 된다. 방전등에서의 plasma는 중성의 원자 또는 분자들이 그 구성입자의 대부분을 차지하고

일부 원자가 이온화 되어 같은 수의 전자와 이온을 포함하고 있다. 이 plasma내에서 전자의 질량이 이온들에 비해 매우 작으므로 전계로부터 많은 에너지를 얻어 빠른 속도로 이동한다. 이러한 빠른 전자들이 이온이나 중성 원자와 충돌하여 전계로부터 받은 자신의 에너지를 전달해 주는 역할을 한다.

저압방전등의 경우 중성 기체입자들의 밀도가 낮으므로 전자와의 충돌기회도 적어서 중성 입자의 온도는 전자보다 훨씬 낮다. 그러나 gas 압력이 높아지면 중성입자의 밀도가 높아지므로 전자와의 충돌 확률이 커진다. 전자와 원자와의 충돌 횟수가 많아짐에따라 전자는 탄성 충돌에 의해 원자에게 많은 에너지를 잃게되고 그 결과로 전자의 온도 T_e 는 감소하고 gas의 온도 T_g 는 증가하게 된다. 일정 압력이상에서는 전자와 gas의 온도가 거의 같아지게 되어 국부적 열평형(local temperature equilibrium;LTE)이 성립한다. 고압 수은방전등에서 gas압력의 증가에 따른 전자와 gas의 온도변화를 그림 1.에 나타내었다.

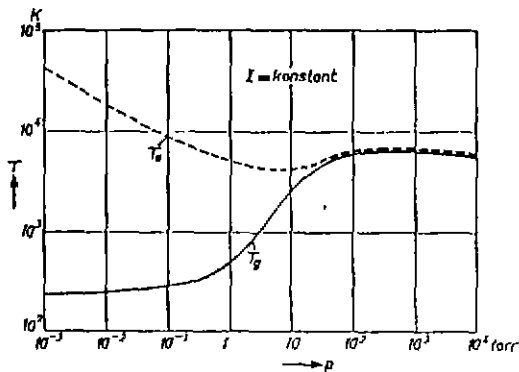


그림 1. Gas압력증가에 따른 온도의 변화

국부적 열평형하에서는 원자의 여기과정과 그 반대과정이 평형상태가 되므로 각 입자들의 밀도는 온도에의해 구해질수 있다.

본 논문에서 고압방전등의 온도분포를 구하기 위해 plasma가 LTE상태에 있다고 가정한다. 그러나 LTE가 성립하기 위해서는 위에서 살펴본 바와 같이 gas의 압력이 충분히 높아서 전자 밀도가 일정한 한계에 도달해야 하며 이때 필요한 전자 밀도는 H.Griem에의해 다음 식으로 알려져 있다.

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

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 수직 점등시 방전관 중심의 온도는 대략 6000 [K] 정도라고 한다.

이 값들을 식 1에 대입하면

$$N_e \geq 1.8 \times 10^{17}$$

이고 J.J.Gront의 연구에 의하면 고압 수은등의 중심에서의 전자밀도는 $10^{21} - 10^{22}$ [m^{-3}] 이므로 고압수은등의 방전관 중심 부근은 LTE가 성립한다고 볼수 있다.

2.2 상내 휘도 비교에 의한 온도 결정법

여기된 원자가 전이될때 나오는 분광선의 휘도는 높은 에너지 준위의 밀도에 비례하므로 그 분광선의 휘도를 측정하면 plasma내의 원자들의 양자상태의 밀도를 알 수 있다. 또한 LTE상태에

서 각 에너지 준위로 여기된 원자의 밀도는 Boltzman 의 식으로 표현되므로, 이식을 역으로 이용하면 온도를 계산할 수 있다.

Boltzman에 의하면 에너지 준위 E_k 로 여기된 원자 밀도 n_k 는 다음과 같다.

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

여기서,

g_k ; statistical weight of kth level

n ; concentration of atoms

$U(T)$; partition function

그리고 단위체적의 plasma에서 단위 시간, 단위 파장당 단위 입체각으로 방사되는 에너지는 다음식으로 표현된다.

$$\epsilon_{\nu,L} = \frac{hc}{4\pi\lambda} A_{k_1, n_k} P_{\nu} \quad \text{--- (3)}$$

여기서,

h ; 플랑크 상수

c ; 광속

A_{k_1} ; Einstein's spontaneous transition probability

P_{ν} ; normalized line profile

만일 plasma가 optically thin하고 균일하다면 식 2와 식 3에 의해 분광휘도는 다음과 같다.

$$I_{\nu} = \epsilon_{\nu,L} \cdot l \\ = \frac{hc}{4\pi\lambda} (g_k A_{k_1}) \frac{n_l}{U} \exp \left[-\frac{E_k}{kT} \right] P_{\nu}$$

여기서,

l ; optical length of plasma

같은 종류의 원자에 의한 분광선들의 휘도는 각각 식 4를 만족하며 두개의 분광선의 휘도비는 다음과 같다.

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

만일 두 분광선이 동일한 이온화 단계에 속한다면,

$$U_1 = U_2$$

$$n_1 = n_2$$

가 되며 식 5는 아래와 같이 쓸수 있다.

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

식 6에서 원자 상수를 알고 있으면 두 분광선의 상대적인 비로부터 온도를 구할수 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 2 에서와 같이 밖에서 관측되는 휘도는 특정 단위체적에서 방사되는 빛의 휘도가 아니라, 관측 방향을 따라 여러층의 체적요소에서 방사되는 빛의 적분값이 된다. 여기서 방전관이 cylindrically symmetry라고 하면 관측된 휘도를 Abel's transform식에 의해 계산하여 관경방향의 방사계수 $\epsilon(r)$ 을 구할 수 있다.

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

여기서 R 은 $\epsilon(r)$ 이 영이 되는 반경이다. 식 7에서 $\epsilon(r)$ 을 구하면 다음과 같다.

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

본 논문에서는 y 를 미소간격 Δy 로 나누어 $I(y)$ 로 측정한 다음 $\epsilon(r)$ 을 구하였다.

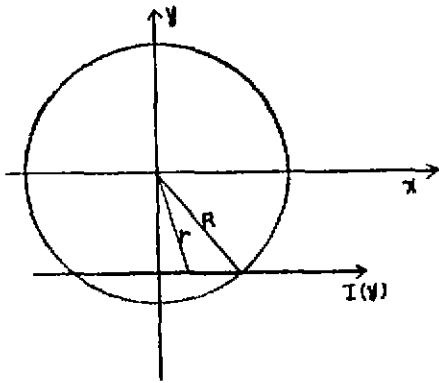


그림 2. 좌표계

3. 실험 및 결과

3.1 실험 방법

방전등은 micrometer에 의해 1/100 mm까지

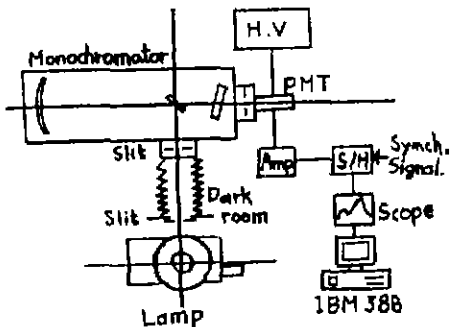


그림 3. 실험장치의 구성도

정밀하게 움직일 수 있는 x-z transducer 위에 설치하였고, x축과 평행한 빛만 측정하기 위해 두개의 slit을 사용하였다. 하나는 먼도날을 이용해 제작한 것으로서 laser의 diffraction pattern을 이용하여 간격을 20 μ m로 조정하였다. 또 하나는 monochromater의 entrance slit으로 micrometer에 의해 20 μ m로 조정하였다. 두개의 slit을 통과한 빛의 휘도는 매우 낮은 편이므로 noise의 영향을 줄이기 위해 slit사이에 암실을 설치하였다. monochromater에서 선택된 분광선은 photomultiplier에 의해 검출된 다음 amp에서 증폭되고 관전압 파형에 의해 동기된 신호에 의해 Δt 마다 sampling되어 oscilloscope에 저장된다. 실험의 효율과 정확성을 높이기 위해 oscilloscope는 IBM PC 386에 연결되어 즉시 computer로 data를 전송하여 계산을 수행한다. 아울러 중심으로 부터 0.5mm씩 이동하며 관경 방향의 온도 분포도 함께 구하였다.

그림 4는 방전등의 시간에 따른 관전압의 변화를 나타내며, $T = 0$ 에서 부터 10 ms씩 이동하며 각 r 에 대해 측정하였다.

3.2 실험 결과

실험에 사용된 고압 수은등의 스펙트럼은 그림 5와 같다.

고압 수은등의 온도분포는 일반적으로 다음식으로 표현되는 포물선 분포로 알려져있다.

$$T = T_0 - ar^2$$

따라서 $I(y)$ 를 4차의 다항식으로 가정하여 최소자승법으로 계수들을 구하였다. 식 8에서 $I(y)$

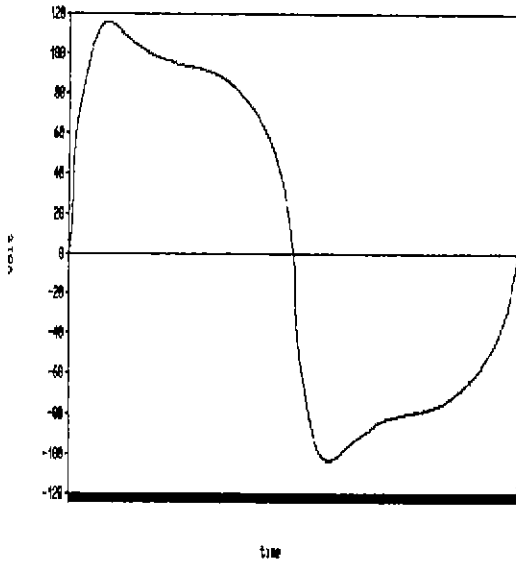


그림 4. 관전압 파형 (60Hz)

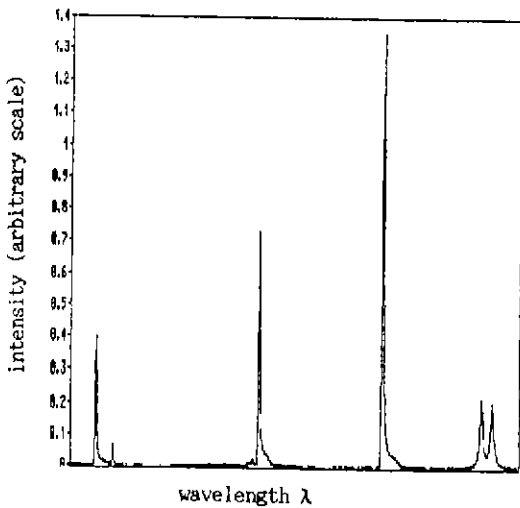


그림 5. 고압 수은등의 스펙트럼

가 4차식이면 적분이 해석적으로 가능하므로 관경방향의 방사계수 $\epsilon(r)$ 를 구하고 이로부터 식 6 에 의해 온도가 결정된다. 분광선의 휘도비교를 위해서 407.8nm 와 577.0nm, 597.0 + 599.1nm를 각각 비교하여 계산하였다. 이 분광선들의 원자 상수는 표 1 과 같다.

표 1. 수은 분광선의 원자상수

wavelength	A_{ki}	g_k	$A_{ki}g_k$	energy level
487.8	0.7×10^7	1	0.7×10^7	7.92
577	2.0×10^7	5	1.4×10^8	8.845
579.0+579.1		5 and 3	$2A_g=1.3 \times 10^8$	8.837

그림 6 에서는 방전관의 중심에서 측정된 시간에 따른 온도 변화를 전원전압의 반주기에 대해 보여주고 있다. 이것은 관전류의 형태와 유사함을 알 수 있다.

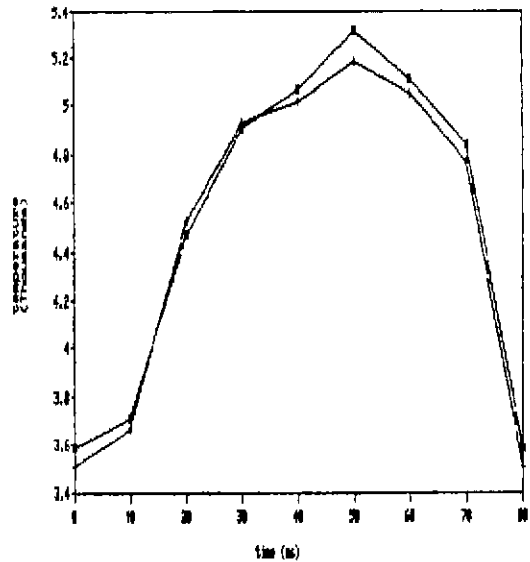


그림 6. 관중심에서 시간에 따른 온도분포

그림 7 에서는 $t = 40ms$ 에서 계산된 관경방향에 대한 온도 분포를 나타내고 있다. 이 결과는 김 상용의 논문에서 측정된 결과와 유사하며 포물선의 온도분포를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 실험에서 얻어진 결과는 지금까지 이론적, 실험적으로 알려진 결과와 매우 잘 일치한다. 다만, 시간에 대해 좀더 짧은 간격으로 측정하

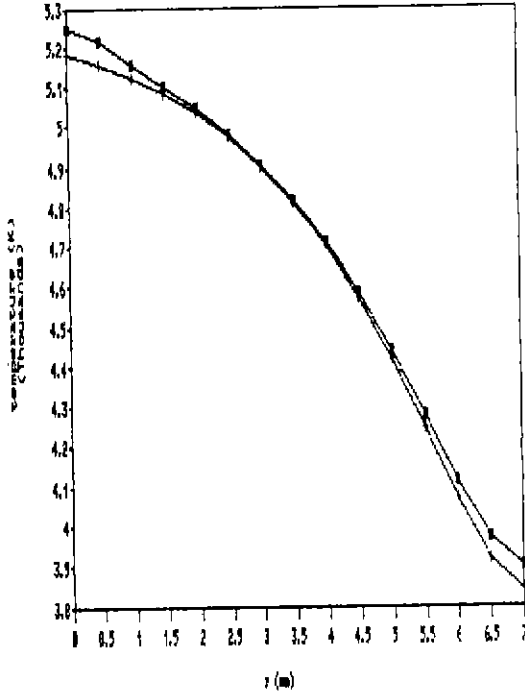


그림 7. $t = 50\text{ms}$ 에서 관경방향의 온도분포

어 자세한 온도 변화를 측정하는 것이 필요하지만 방대한 실험 양으로 인해 8개의 점에서 측정하였다. 세밀한 온도분포 측정을 위해서는 앞으로 온도변화를 측정할 수 있는 보다 정확하고 간편한 방법이 연구 되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Elenbaas, W., "Light sources", MacMillan, London, 1972
2. 김 훈, "에너지평형식을 이용한 고강도 방전등의 교류특성해석에 관한 연구" 박사학위 논문, 서울대, 1989
3. Elenbaas, W., "The high-pressure mercury-

vapor discharge', North Holland Publishing co., Amsterdam, 1951

4. Chien, Yu-Min, "On the shifts of self-reversed maxima of the sodium resonance radiation", J. Appl. Phys., Vol. 51, 1980, pp. 2965-2968
5. Holtgreven, W. L. ed., "Plasma diagnostic techniques", North-Holland, Amsterdam, 1968
6. Cherrington, B.E., "Gaseous Electronics and Gas Lasers", Pergamon, Oxford, 1979
7. Griem, H.R., "Plasma spectroscopy", McGraw-Hill, New York, 1964
8. 김상용, "분광분석법에 의한 고압 수은등의 온도분포 측정" 석사학위논문, 서울대, 1989