

고압나트륨 램프의 온도와 압력의 측정에 관한 연구

論 文
4-2-2

(A Study on the Measurement of Temperature and Pressure
of High Pressure Sodium Lamp)

池 哲 根* · 金 昌 變**
(Chol-Kon Chee · Chang-Seob Kim)

요 약

기존의 고압 나트륨 램프의 플라즈마 진단은 온도와 압력의 한 주기간의 평균값만을 구하고 있다. 그러나 고압 나트륨 램프의 플라즈마는 열관성이 작으므로 플라즈마 상태의 시간에 대한 변화가 크다. 그러므로 플라즈마 상태의 시간에 대한 변화를 진단할 필요성이 크다. 본 연구에서는 Na D선의 스펙트럼을 순시치로 측정하고 이를 해석하여 시간에 따른 플라즈마 상태를 구하는 spectroscopy에 의한 시변 진단 기법을 제안하고 있다.

Abstract

The previous plasma diagnostics on HPS (high pressure sodium) lamp have analyzed only the average temperature and pressure. But the time change of the plasma state of HPS lamp is great by the small heat inertia. By these properties, the necessity of the diagnostics of time change of plasma state is important. This thesis proposes a new time-varying spectroscopy technics that can get the time-varying plasma state by measuring and analyze Na D line spectrum.

1. 서 론

현재까지의 고압 나트륨 램프의 플라즈마 상태의 진단을 위한 spectroscopy는 주로 Na D선의 스펙트럼을 이용하여 압력과 온도를 측정하는 것이었다. 현재까지의 진단 기법은 모두 한 주기간의 평균적인 스펙트럼에 의존하였으므로 한 주기간의 평

균적인 온도와 압력의 측정만이 가능하였다. 그러나 고압 나트륨 램프의 플라즈마는 작은 열관성으로 인하여 온도와 압력의 시간에 따라 변화가 매우 크므로 플라즈마의 평균적인 상태만으로는 램프의 동작특성을 이해하기에 많은 문제점이 존재한다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 고압 나트륨 램프의 플라즈마 상태를 시간적 변화에 대하여 측정할 수 있는 새로운 측정기법을 제안하고자 하며 그 기본 원리는 Na D선의 스펙트럼을 시간별로 측정하여 그 변화로부터 플라즈

*正會員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

**正會員 : 서울大 工大 大學院 電氣工學科 博士課程

마의 상태를 유추하는 것이다.

2. 본 론

플라즈마의 상태의 시간에 따른 변화를 구하기 위해서는 우선 특정시간에서의 온도, 압력이 필요하다. HPS 램프에 봉입되는 수은-나트륨아말감의 양과 혼합비를 알 수 없으므로 실험에 의하여 구해야 하는 양이다.

이러한 초기와 모델링의 입력사항은 특정시점에서의 방사 스펙트럼과 전류전압값이다. 방사 스펙트럼으로부터 수은과 나트륨의 기체압력을 구한다. 이 기체압력에 의하여 온도 변화에 대한 플라즈마의 전기전도도를 구하며 이때 크세논의 기체압력은 기지의 데이터를 이용한다. 측정된 온도값을 얻도록 온도분포를 가정하여 온도분포를 구한다.

위의 과정에 의하여 구한 기체압력과 온도분포를 이용하여 스펙트럼을 계산하고 이를 측정치와 비교하여 오차를 확인한 후 오차가 심한 경우 위의 과정을 다시 수행하여 스펙트럼의 계산결과가 측정결과와 일치할 때까지 계속하여 초기화를 수행한다. 이러한 작업을 시간에 따라 계속적으로 수행함으로써 시간에 대한 플라즈마의 상태를 구할 수 있다.

2.1 Spectroscopy에 의한 수은과 나트륨 증기압 측정

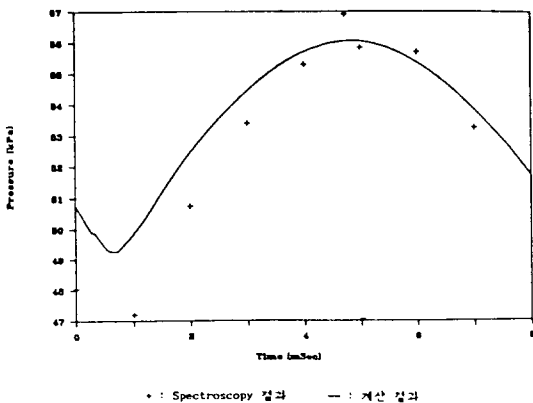


그림 1. 220V인가시 압력의 계산치와 측정치 비교
Fig. 1. Comparison of calculated and measured pressure under 220V

일반적으로 HPS램프의 경우 수은과 나트륨은 모두 증기화되지 않으므로 램프의 동작중 각기체의 증기압을 구하기 위하여 spectroscopy에 의하여 구한다. 이에 관련된 연구는 Chien, Reiser, Sen Jen, Vliet 등에 의하여 수행된 바 있다. 위의 연구는 모두 공통적으로 Na D선의 스펙트럼을 이용하여 증기압을 구하고 있다. 그러나 이들의 연구결과를 검토한 결과 나트륨 증기압의 측정결과는 모두 비교적 일치하고 있으나 수은 증기압의 측정결과는 많은 차이를 보이고 있다. D선의 스펙트럼으로부터 나트륨과 수은의 증기압을 구하는 과정은 다음과 같다.

Sen Jen은 blue wing의 peak shift $\Delta\lambda_B$ 와 나트륨 증기압의 관계를 다음의 식으로 정리하였다.

$$P_{Na} = \frac{C}{\sqrt{R}} (2\Delta\lambda_B) \quad (1)$$

$$c = 2.7 \pm 0.5$$

Vliet에 의한 peak shift와 수은의 증기압의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{P_{Hg}}{P_{Na}} = \frac{(\Delta\lambda_R/\Delta\lambda_B)^2 - 1}{0.057(\Delta\lambda_R^{1/2} - 0.85)} \quad (2)$$

그러나 실제적으로 위의 연구결과를 적용하고자 하는 경우에는 위의 연구결과와 불일치 뿐만 아니라 측정상의 문제점으로 많은 어려움이 따르며 특히 수은 증기압의 예측이 불완전하다. 이는 $\Delta\lambda_B$ 와 나트륨 증기압은 민감도(sensitivity)가 작은 비례적인 관계가 있으나 $\Delta\lambda_R$ 의 변화에 대한 수은 증기압의 민감도가 매우 크므로 정확한 $\Delta\lambda_B$ 값과 $\Delta\lambda_R$ 값이 요구되어진다. 그러나 본 연구에 사용된 monochromator의 파장 calibration이 불안정하므로 식 자체의 불안정성과 함께 spectroscopy만에 의하여 정확한 수은과 나트륨의 증기압을 예측하는 것은 매우 어렵다.

2.2 전기전도도에 의한 온도 분포의 계산

위의 과정에 의하여 나트륨, 수은의 기체 압력을 구하였다. 플라즈마의 전기 전도도는 각 입자의 탄성충돌 단면적, 압력 그리고 온도에 의하여 결정된다. 특정 시점에서의 전류 I 과 전압 V를 측정한다. 일반적으로 HPS램프 발광관 전극에서의 음극 강하전압은 4V로 알려져 있다. 그러므로 이 시각에서의 전계세기 E는 다음과 같다.

$$E = \frac{V-4}{\text{전극간 거리}} \quad (3)$$

또한 전류 I는 다음과 같이 나타난다.

$$I = E \int_0^R \sigma 2\pi r dr \quad (4)$$

이때 전도도 σ 는 각기체의 압력이 결정되어 있으므로 온도만의 함수가 되며 이 시각에서의 온도 분포의 가정에 의하여 전류를 계산할 수 있으며 계산치와 측정치가 일치하도록 온도 분포를 결정한다. 온도 분포는 다음과 같은 trial function의 형태를 갖는다고 가정하였다.

$$T(r) = (T_A - T_W) \times (1 - (\frac{r}{R})^{2n}) + T_W \quad (5)$$

여기에서 일반적으로 400W HPS램프의 정격 동작중의 관벽온도는 1500 K로 알려져 있다. 그러나 전기전도도에 의하여 온도분포를 구하는 모델링에서 전류의 측정치와 계산치를 일치시키는 과정은 유일해(unique solution)가 존재하지 않는다. 즉, 전류의 계산값을 결정하는 변수는 2개이고 결정식은 1개이므로 닫혀있지 않은 알고리즘을 이용하고 있다는 문제점을 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 위의 문제점을 극복하기 위하여 spectroscopy에 의하여 얻어진 결과와 전기전도도 계산에 의하여 얻어지는 온도분포를 이용하여 spectrum을 방사전달식에 의하여 계산하고 이를 측정스펙트럼과 비교 검증하는 방법을 사용하고자 한다.

2.3 스펙트럼에 의한 검증

1절과 2절에서 고찰한 바와 같이 Na D선스펙트럼에서의 양 wing의 peak shift에 의하여 나트륨과 수은의 증기압을 구할 수 있고 또한 전기전도도의 계산에 의하여 온도분포를 구할 수 있다. 앞에서 고찰한 바와 같이 이러한 과정에 의하여 얻어진 결과가 정확한가를 검증할 필요가 있으므로 이 결과의 검증을 위하여 이 결과를 방사전달식에 대입하여 D선의 스펙트럼을 계산하고 이를 측정된 스펙트럼과 비교 검증한다.

$$L_\nu = \int_{-R}^R \frac{\epsilon_\nu(r)}{4\pi} \exp(-\int_r^R K_\nu(r') dr') dr \quad (6)$$

2.4 Spectroscopy에 의한 HPS 램프의 RD Arc 의 진단

기본적으로 플라즈마의 상태는 압력과 온도에 의하여 설명되어 질 수 있다. 일반적으로 인식되어

지는 바와 같이 spectroscopy에 의한 진단은 직접적이고 간편하므로 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 특히 HPS램프의 RD(Radiation Dominated) Arc 플라즈마의 상태를 진단하는 간편한 방법을 소개하고자 하며 Spectroscopy에 사용되는 원자 line(atomic line)은 Na D선의 스펙트럼을 이용한다. spectroscopy에 의하여 구해진 결과는 수치해석적으로 얻어진 결과와 비교하였다.

2.4.1 Na D선의 스펙트럼

플라즈마에서 방사되는 선 스펙트럼(line spectrum)과 연속 스펙트럼(continuum)은 모두 플라즈마의 상태에 대한 정보를 지니고 있으며, 측정과정에서의 교란이나 오차가 매우 적으므로 모두 spectroscopy의 대상이 될 수 있다. 그러나 D선을 제외한 비공진선은 주로 Stark effect의 영향이 지배적이므로 방사전달식에 의한 해석이 매우 어렵다. 그러므로 본 장에서는 Na D선의 스펙트럼을 이용하여 플라즈마의 진단을 수행하였다. Na D선 스펙트럼에 영향을 주는 요소는 각 입자의 압력, 온도 분포와 발광관의 기하학적 구조 등이 있으나 HPS 램프의 경우 기하학적 구조는 결정되어져 있으므로 압력과 온도 분포만을 고려해도 된다. 광전달식에 의하여 각 입자의 압력과 온도 분포에 의한 영향을 고찰하면 각 wing의 peak의 방사 세기는 온도 분포 특히 중심축 온도에 의하여 지배적으로 결정된

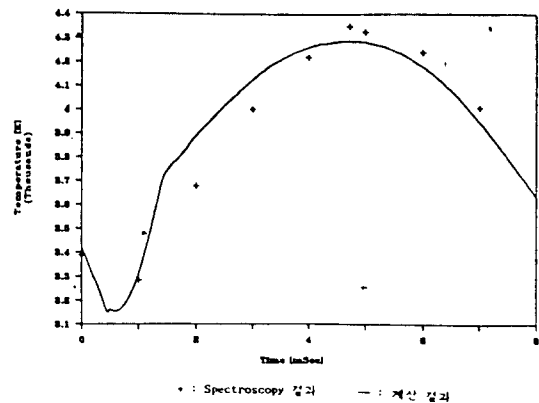


그림 2. 220V인가시 중심축 온도의 계산치와 측정치 비교

Fig. 2. Comparison of calculated and measured axis temperature under 220V

다.

또한 스펙트럼의 형태 특히 각 wing의 FWHM은 각 입자의 압력에 의하여 지배적으로 결정된다. 이러한 스펙트럼의 성질을 이용하여 다음과 같은 HPS램프 Arc 플라즈마의 진단법을 사용할 수 있다.

2.4.2 Na D선에 의한 Spectroscopy

Na D선의 spectrum에 의하여 온도와 압력의 시간에 따른 변화를 진단할 수 있다. Na D선에 의한 spectroscopy의 원리는 다음과 같다. 기본 원리는 이미 초기화 모델링을 시간에 대하여 순차적으로 수행하는 것이다. 그러나 이러한 반복적인 작업은 다음과 같은 가정을 이용한다면 한 번의 초기화 작업에 의하여 결과를 얻을 수 있다. 이 방법에 요구되는 가정은 플라즈마의 압력과 온도 분포 지수가 시간에 대하여 일정하다는 것이다. 이러한 가정은 기존의 HPS램프의 연구에서 이미 많이 이용되고 있으며 또한 본 연구의 결과와 큰 모순을 갖지않고 있으므로 타당한 가정으로 볼 수 있다. 이 가정에 의하여 양 wing의 peak의 방사세기는 중심축 온도에만 의존하게된다.

peak 방사세기와 중심축 온도와의 관계를 보이는 테이블의 데이터와 시간에 따라 측정된 wing peak의 방사세기의 변화를 단순히 비교하는 것에 의하여 중심축 온도의 변화를 예측할 수 있고 이 결과와 함께 wing peak 간격의 변화를 테이블과 비교하여 압력의 변화 또한 예측할 수 있다. 이 방법을 위하여 필요한 데이터는 스펙트럼과 wing의 peak가 발생하는 특정과장에서의 방사세기의 시간에 따른 변화만이므로 매우 간편하고 빠른 방법이라고 볼 수 있다.

또한 한 주기간의 압력의 변화를 고찰하기 위하여는 다음의 방법이 있다. 즉 한주기 동안 수은과 나트륨의 증기압비가 변하지 않는다고 가정하면 스펙트럼의 wing peak간의 간격을 전적으로 나트륨과 수은의 압력에 비례하므로 초기화 모델링을 통하여 각 입자의 압력과 peak 간격을 구하면 시간에 따른 peak 간격의 측정에 의하여 압력의 변화를 구할 수 있다. 그러나 같은 압력하에서도 온도에 의하여 peak 간격이 변화하므로 온도에 의한 영향을 보정하여 주면 압력의 시간에 따른 변화를 예측

할 수 있다.

이러한 spectroscopy에 의하여 구한 측정결과와 에너지 평형식을 이용한 수치 해석 방법에 의한 계산 결과는 중심축 온도와 압력에 대하여 각각 그림1과 그림2에 나타내었다.

3. 결 론

본 연구에서 제안하고 있는 Spectroscopy에 의한 플라즈마의 시변 진단 기법은 매우 간편하고 또한 정확하다는 것을 확인할 수 있었으므로 실제 적용상에 많은 유용성이 있을 것으로 생각되므로 이러한 방법은 고압 나트륨 램프의 제작 및 설계에 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) Ali, A. W. and Griem, H.R., "Theory of resonance broadening of spectral lines by atomic impacts," Phys. Rev., vol. 140A, pp.1044-1049(1965) ; vol. 144A, p. 366(1966)
- 2) Foley, H. M., "The pressure broadening of spectral lines," Phys. Rev., vol. 69, pp. 616-628(1946)
- 3) Griem, H.R., Plasma Spectroscopy, McGraw-Hill Book Company, New.York(1964)
- 4) Holstein, T., "Imprisonment of resonance radiation in gases," Phys. Rev., vol. 72, pp.1212-1233(1947)
- 5) Houston, W.V., "Resonance broadening of spectral lines," Phys Rev. vol, 54, pp. 884-888(1938)
- 6) I. cc, H.E. and Cram. L.E., "On the theory of radiation-dominated wall-stabilised arcs," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 18, pp. 1561-1573(1985)
- 7) Lochte-Holtgreven, W., (Ed.), Plasma diagnostics, North-Holland(1968)
- 8) Ozaki, N., "Resonance radiations from high-pressure sodium plasma," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, vol. 11, pp. 1463-1473(1971 b)
- 9) Reek, G. P., Takebe, H, and Mead, C. A., "Theory of resonance absorption line shapes in

- monatomic gases," Phys. Rev., vol. 137A, pp. 683-698 (1965)
- 10) Reiser, P.A. and Wyner, E.F., "Use of the peak shifts of the 3S-3P sodium resonance lines for the analysis of high-pressure sodium lamps," J. Appl. Phys., vol. 57, pp.1623-1631 (1985)
- 11) Teh-Sen Jen, Hoyaux, M.F. and Forst, L. S., "A new spectroscopic method of high pressure arc diagnostics," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, vol. 9, pp. 487-498 (1969)
- 12) van Trigt, C. van and Laren, J. B. "On radiative transfer in gas discharges," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 65, pp. 1247-1252 (1973)
- 13) Yu-Min, Chien, "On the shifts of self-reversed maxima of the sodium resonance radiation," J. Appl. Phys., vol. 51, pp. 2965-2968 (1960)