

분광분석법을 이용한 나트륨-수은 플라즈마의
열역학적 상태 변화에 관한 연구

A Study on the Variation
of Thermodynamic State of Na-Hg Plasma by Spectroscopy

최 지훈 김 창섭 지 철근

J.H. Choi C.S. Kim C.K. Chee

서울대학교 공과대학 전기공학과

Dep. of electrical Eng. Seoul National University

요약

고압 나트륨 램프를 해석할 경우 일반적으로 열역학적 평형상태를 가정한다. 그러나 교류를 인가하여 시간에 따라 온도와 압력이 변할 경우 모든 시간에서 열역학적 평형상태가 만족한다고 할 수 없다.

Abstract

Generally for the analysis of arc plasma, LTE(Local Thermodynamic Equilibrium) is assumed. But, if AC source is applied, the temperature and pressure variations would be so great that LTE assumption can be invalid for the time. So this paper testifies the LTE condition of the typical arc plasma of high pressure sodium lamp using spectroscopy for the optically thick resonance D line and other optically thin lines.

1. 서론

고압 나트륨 램프 플라즈마 해석에 관하여 많

은 연구가 진행되어 왔으며, 플라즈마 내에서의 광자의 전달과정을 고려한 연구는 천체 물리학 분야를 비롯하여 여러 분야에서 진행되고 있다. 고압 아크 방전램프에서의 제 방전특성을 광전달 과정까지 고려하여 연구한 모델링은 Lowke, Church, Chalek, Dakin, Groot 등에 의하여 제안되었다. 이들 연구의 공통점은 극부적 열역학적 평형상태를 가정하고 에너지 평형식, 질량 보존식, 상태 방정식 등을 이용한 점이다. 그러나, 방사 에너지의 계산은 크게 광전달식에 의한 방법과 escape factor를 이용하는 방법의 두 가지 방법으로 수행되었다.

본 논문에서는 일반적으로 가정하고 있는 극부적 열역학적 평형상태가 시간에 따라서 성립하는지를 분광분석법을 이용하여 검증하고자 한다.

2. 극부적 열역학적 평형 상태

고압 방전등에 전압을 인가하여 방전이 시작되면 봉입된 gas는 부분 전리되어 플라즈마 상태가 된다. 방전등에서의 플라즈마는 중성원자 또는 분자들이 그 구성입자의 대부분을 차지하고 일부

원자가 이온화 되어 같은 수의 전자와 이온을 포함하고 있다. 플라즈마 내에서는 다른 입자들에 비하여 상대적으로 무게가 가벼운 전자들이 전계 내에서 빠른 속도로 이동하게 된다. 따라서 전자는 다른 입자들에 비하여 단위 시간당 많은 에너지를 얻게 되고 이 전자가 다른 입자와 충돌하여 에너지를 전달하게 된다. 이때 전자와 다른 입자와 충돌하여 에너지를 전달하게 된다. 이때 전자는 다른 입자들 사이의 충돌은 탄성 충돌과 비탄성 충돌로 나눌 수가 있다. 탄성 충돌로 인하여 입자들은 에너지를 얻어 온도가 상승하게 되고 비탄성 충돌로 인하여 입자들의 전리 및 높은 에너지 준위로의 여기가 일어나는데 이것이 아아크 방전의 지속 및 발광 현상의 원리이다.

저압 방전등의 경우 중성 기체입자들의 밀도가 낮으므로 전자와의 충돌기회도 적어서 중성 입자의 온도는 전자보다 훨씬 낮다. 그러나 gas압력이 높아지면 중성입자의 밀도가 높아지므로 전자와의 충돌 확률이 커진다. 전자와 원자와의 충돌 횟수가 많이짐에따라 전자는 탄성충동에 의해 원자에게 많은 에너지를 잃게되고 그 결과로 전자의 온도는 감소하고 gas의 온도는 증가하게 된다. 일정 압력이상에서는 전자와 gas의 온도가 거의 같아지게 되어 국부적 열역학적 평형상태 (Local Thermodynamic Equilibrium : LTE)가 성립한다.

3. LTE가정에 의한 플라즈마 상태 분광분석

플라즈마가 국부적 열역학적 평형 상태에 있다면 국부적인 플라즈마의 물리적 상태는 모두 국부적 열역학적 변수인 온도, 압력, 그리고 입자

밀도등에 의하여 기술될 수 있다. 분광분석에 이용된 중요한 식들은 다음과 같다.

3.1 Boltzmann 공식

플라즈마 내에서 입자밀도가 n_i 이고 일정비가 여기되어 있다고 할 때 열역학적 평형 상태에서는 여기 입자의 비율은 Boltzmann 공식에 의하여 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{n_k}{n_0} = \frac{g_k}{U_0} \exp \left\{ - \frac{E_k}{kT} \right\} \quad (1)$$

$$U_0(T) = \sum_j g_j \exp \left\{ - \frac{E_j}{kT} \right\} \quad (2)$$

3.2 Saha식

Saha식이란 연속적인 이온화 단계(ionization stage)의 입자밀도의 비교에 사용되는 식이다.

$$\frac{n_z}{n_{z-1}} = 2 \frac{U_z(T) (2\pi m_0 kT)^{3/2}}{U_{z-1}(T) h^3} \exp \left\{ - \frac{E_i - \Delta E_i}{kT} \right\} \quad (3)$$

일반적으로 partition 함수 $U(T)$ 의 값은 기저 상태의 statistical weight와 일치하며 나트륨과 같은 알칼리 원소의 경우 중성입자와 이온입자의 partition함수의 비는 다음과 같다.

$$\frac{U_1(T)}{U_0(T)} = \frac{g_i}{g_0} = \frac{1}{2} \quad (4)$$

3.3 비공진선의 방사에너지

HPS 램프의 비공진선의 방사 에너지는 다음과 같다.

$$U = nh\nu\theta \quad \theta : \text{escape factor} \quad (5)$$

3.4 분광분석의 알고리즘

전체 분광분석의 흐름은 그림 1과 같다.

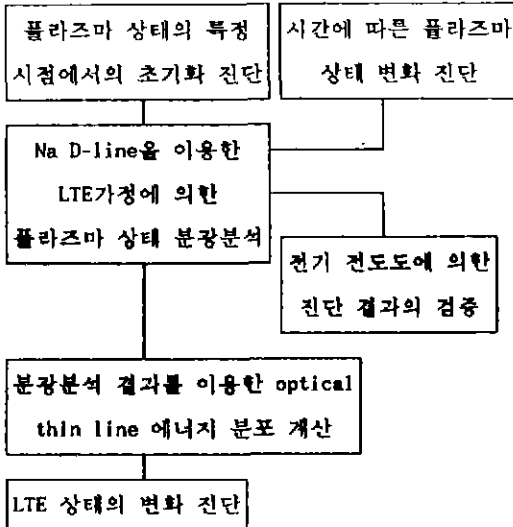


그림 1 LTE 상태 진단을 위한 전체 알고리즘

이중 초기화 진단에 적용된 알고리즘은 그림 2와 같다.

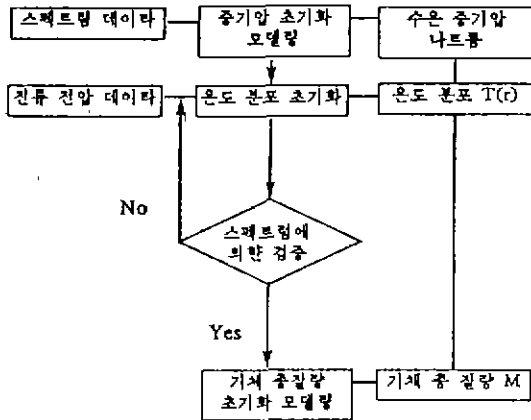


그림 2 초기화 진단에 적용된 알고리즘

4. 실험 방법

스펙트럼을 측정하기 위한 실험장치의 구성도는 그림 3에 나타내었다.

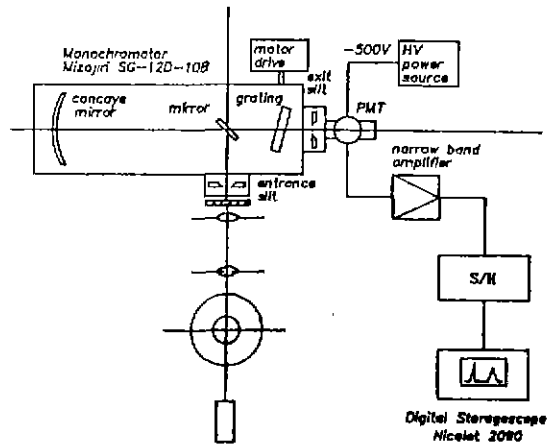


그림 3 실험에 사용된 실험 장치 구성도

5. 결과

측정과 계산에 의하여 도출된 Data를 다음 그림들에 나타내었다.

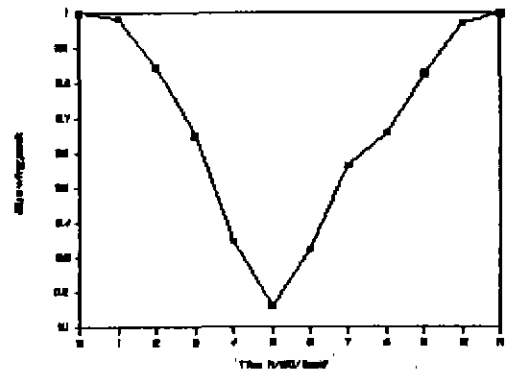


그림 4 측정된 공진선 D line의 blue wing peak 변화

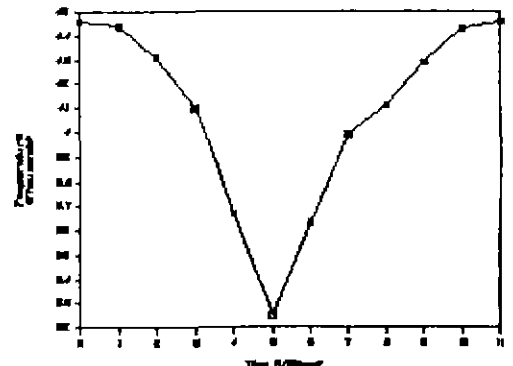


그림 5 계산에 의한 방전관 중심의 온도 변화

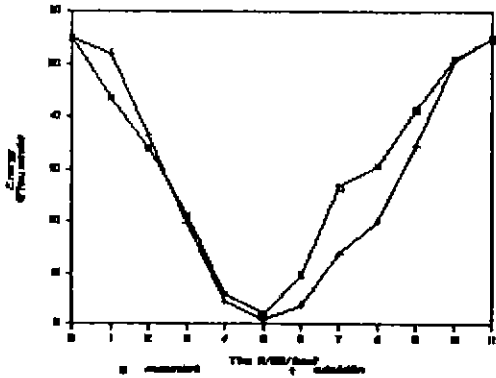


그림 6 계산과 측정에 의한 thin line(498.06nm)의 에너지 변화

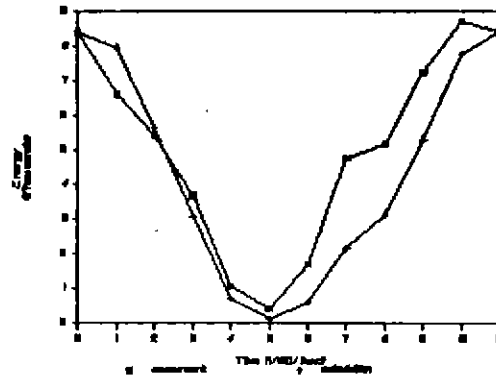


그림 7 계산과 측정에 의한 thin line(515.11nm)의 에너지 변화

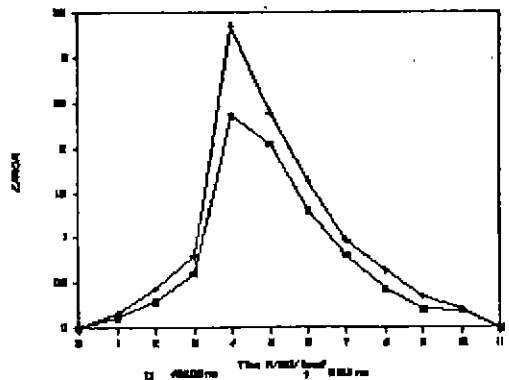


그림 8 계산치와 측정치 간의 오차

계산치와 측정치 사이의 오차는 식 6에 의하여 그림 8에 나타내었다.

$$\text{오차} = \frac{\text{측정에 의한 thin line 에너지} - \text{계산에 의한 thin line 에너지}}{\text{계산에 의한 thin line 에너지}} \quad (6)$$

6. 결론

그림 8에 나타나있는 것처럼 LTE를 가정한 상태에서 구한 값들은 온도가 낮아짐에 따라 측정에 의한 값들과 차이를 보이고 있다. 이는 교류를 인가할 때 전체적으로는 LTE상태가 성립한다고 보더라도 온도와 압력이 낮아지는 순간에는 LTE 상태로 가정하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

7. 참고 문헌

1. Elenbaas, Light Source, Phillips, 1972.
2. Groot de, Vliet van, 2nd.Int.Symp.on Incoherent Light Sources, 1979.
3. Groot de, The high pressure sodium lamp, Phillips tech rev.35, pp.334-342, 1975.
4. Lowke. J.J., "Characteristics of radiation-dominated electric arcs," J.Appl.Phys., vol 41, pp.2588-2600, 1970.
5. Vliet,van, "High pressure sodium discharge lamps," IEE.Proc., vol.128,no.6, pp.415-441., 1981
6. Watanabe K., "Resonance broadening of the sodium D lines," Phys.Rev., vol.59. pp.151-153, 1941
7. 김창섭, "방사 지배 아아크 플라즈마의 방사 특성 연구," 박사학위논문, 서울대학교, 1990