

지 철 근 ° 염 정 덕
서울대학교 전기공학과

A Study on the Analysis of Arc Plasma Model in the HPS Discharge

Chee, Chai Kon Ryeom, Jeong Dug
Dept. of Electrical Engineering, S. N. U.

Abstract

A time-dependent model for wall-stabilized local thermodynamic equilibrium (LTE) arcs has been used to examine the high-pressure sodium vapor arc.

Arc properties including temperature, electrical conductivity, and optically thick and optically thin radiation fluxes were calculated as functions of radius and time.

1. 서 론

Weakly ionize 된 기체의 아아크 플라즈마 모델은 고압 나트륨 아아크 방전의 해석에 매우 적절히 응용될 수가 있는데, 이는 크게 time-independent model 과 time-dependent model 로 나눌 수가 있다.

Time-independent model 은 Waymouth 와 de Groot 등에 의해 고안된 모델로서 dc model 을 사용하여 아아크의 교류특성을 나타낸 것이다. 그리고 time-dependent model 은 온도 분포 곡선과 복사 에너지 부분을 어떻게 결정하느냐에 따라 Lowke, Stormberg, Chalek 그리고 Dakin 등이 여러가지 모델의 형태를 제시하였다.

본 논문에서는 Chalek 과 Kinsinger 의 모델에 이론적인 근거는 부족하나 복사 에너지 부분이 상당히 개선된 time-dependent 아아크 모델을 고안하여 고압 나트륨 아아크 방전에서의 환경 방향의 온도 분포, 복사 에너지 분포 및 전기 전도도 분포 등을 계산해 보았다.

2. 역사적인 고찰

2.1 Time-independent arc model

Time-independent arc model 모서는 Waymouth, de Groot 등이 de model 을 사용하여 교류 아아크의 특성을 간략화하여 나타내었는데 Waymouth 의 방법은 온도 분포 곡선을 무단계 곡선으로 가정하여 그 계산 방법을 극단적으로 간략화 시켰으며 de Groot 의 방법은 온도 분포 곡선을 포물선으로 가정하여 근사화하였다.

2.2 Time-dependent arc model

Time-dependent arc model 은 처음에 Louke 등에 의해 Ar, Hg 아아크 방전의 해석에 사용되었는데 이 방법은 복사 에너지 부분을 결정하는데 실험적으로 얻은 전압-전류 특성에서부터 접근하는 방법을 사용하였다.

Stormberg, Schafer 등은 high pressure mercury discharge 의 해석에 관한 논문에서 이론적인 근거로부터 도출된 복사 에너지 방정식을 제시하였는데 이 방법은 local net radiation emission 을 zero's order Bessel function 을 응용한 arc tube bore, gas pressure, gas temperature 들의 함수로서 해석하는 시도를 하고 있다.

이에 비해 보다 직접적이고 그러나 복잡한 계산 과정을 요구하는 아아크 모델이 Chalek 과 Kinsinger 에 의해 제시되었는데 이들은 복사 에너지 부분을 optically thick 와 optically thin 의

두 부분으로 구분하여 계산하였다. 이 방법은 optically thick 부분중 Na 공진선부분 (589/590 nm) 을 emission 과 absorption 과의 관계를 이용한 복사 에너지 flux 의 발산으로 표현하였고 공진선 이외의 부분은 공진선에서의 계산 결과에 115%를 곱해주는 것으로 보장하여 주었고 대부분이 적외선 부분인 optically thin 부분은 여기진압의 평균치를 3.6 eV 로 보아 단순화 하였다.

3. 아아크 모델의 가정 및 모델 방정식

de Groot 에 의하면 HPS 의 복사 에너지는 공진선인 D line (589/590 nm) 이 전체의 약 40 - 50 % 를 차지하고 비공진선인 568/569, 818/819, 1138/1140 nm 들의 파장이 전체의 약 30% 를 차지한다고 하였다.

그러므로 위에서 언급한 8 개 파장이 HPS 전체 복사 에너지의 70 - 80 % 를 차지한다고 말할 수가 있다. 때문에 이들 8개 파장에서의 emission 및 absorption 을 고려한다면 매우 적절한 복사 에너지 항을 구성할 수가 있다.

본 논문에서는 위에서 언급한 8 개 파장을 이용한 아아크 모델을 구성하여 주어진 방전관 환경, gas loading, 그리고 current wave form 하에서의 continuity equation, energy balance equation 그리고 radiation transfer equation 의 time-dependent 한 해를 구하여 전계, 압력, 관경방향 온도분포 그리고 spectral output 의 각 시간 단계마다의 해를 제공한다.

3.1 아아크 모델의 가정

본 논문에서 설정되는 아아크 모델의 가정은 다음과 같다.

1) 양극주 양극의 공간 진하에 의한 효과는 무시하고 무한 원통형 모델을 가정하여 축방향 및 방위각 방향의 radiation flux 의 변화를 무시한다.

이렇게 함으로써 세척에 대한 에너지 평형식을 단위 길이당의 에너지 평형식으로 가정할 수 있다.

2) LTE (local thermodynamic equilibrium) 상태를 가정한다.

플라즈마 입자들의 밀도는 Saha 방정식으로 부터 얻을 수가 있고 이들을 균등한 온도로 취급함으로써 1 개의 에너지 평형식을 사용할 수가 있다.

3) 관경 방향의 압력이 일정하다.

이는 continuity, energy equation 들로부터 관경 방향의 momentum equation 을 무시할 수가 있다.

4) viscous 와 magnetic effect 를 무시한다.

5) 그리고 아아크는 주기적인 정상상태 동작으로 가정한다. 이렇게 함으로써 관벽에서의 아아크의 온도와 단위 길이당 방전관내의 gas loading 이 일정해진다.

3.2 모델 방정식

discharge arc 를 나타내기 위해서는 국부적인 온도 T, 관경방향의 기체속도 Vr, 밀도 ρ, 압력 P, 전류 I 그리고 전계 E 로 구성되는 다섯개의 중요한 방정식이 있다.

그 방정식들은 다음과 같다.

1) 에너지 평형식

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0 E - Urad + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk \frac{\partial T}{\partial r}) - \rho C_p V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial t}$$

이 방정식의 오른쪽항은 차례로 저항가열, 복사손실, 열전도, 관경 방향 대류손과 단열 가열을 나타낸다.

2) continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r \rho) = 0$$

3) 기체 상태 방정식

$$P = \rho R T$$

4) fill gas loading

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

5) Ohm 의 법칙

$$I = E \int_0^{Rw} 0 2\pi r dr$$

경계치 조건은 다음과 같다.

$$T(Rw) = Tw$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} (r=0) = 0$$

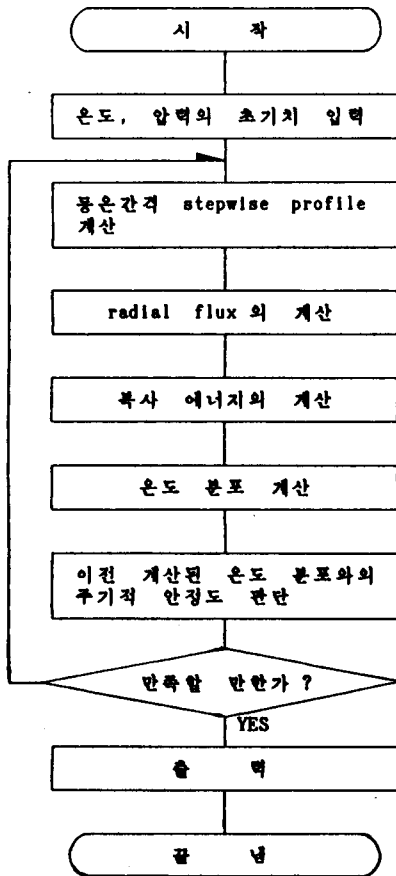
$$V_r(0) = 0$$

$$V_r(R_w) = 0$$

또한 초기치 조건은 다음과 같다.

- o 정상 상태 압력
- o 직류 동작하의 온도 분포

4. 계산 과정의 흐름도



5. 결과 및 검토

계산과정의 복잡성을 피하기 위하여 복사 에너지의 계산과정에서 관경 방향 온도 분포를 등온간격 stepwise profile로 변환하였다. 이 경우 각 등온간격 안에서는 absorption 계수가 관경에 무관한 항이 되어 radial flux의 계산과정이 간편해진다.

또한 모델 방정식 중의 편미분 방정식들은 FDM (Finite Difference Method) 을 이용하여 계산하였는데 해의 불안정성을 피하기 위하여 implicit finite difference method 를 이용하였다.

다음 도표는 모델 방정식을 계산한 결과 얻어진 HPS 아아크 플라즈마의 스펙트럼 분포이다.

도표를 보면 실측치(a)와 계산치(b)의 복사 에너지의 크기가 차이가 남을 알 수가 있다. 이는 계산치의 경우 즉 중심 부분에서의 스펙트럼 분포를 계산하였기 때문에 아아크 외부에서 측정된 측정치와는 차이가 남 것으로 추측된다.

도표 (c), (d), (e)는 568/589, 818/819, 1138/1140 [nm] 파장에서의 자기 흡수 현상을 보여준다.

이 모델에서는 Na 원자들의 충돌에 의한 공진 선폭만 고려해 주었으나 앞으로 Stark broadening과 line shift 현상등이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

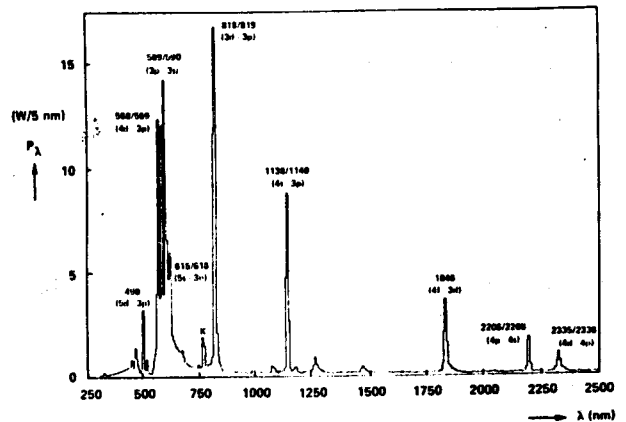


도표 (a) 스펙트럼 분포의 측정치

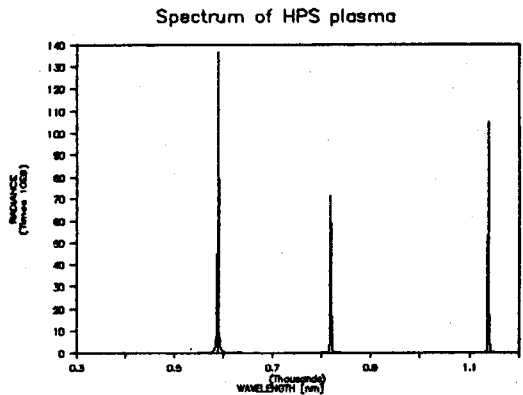


도표 (b) 스펙트럼 분포의 계산치

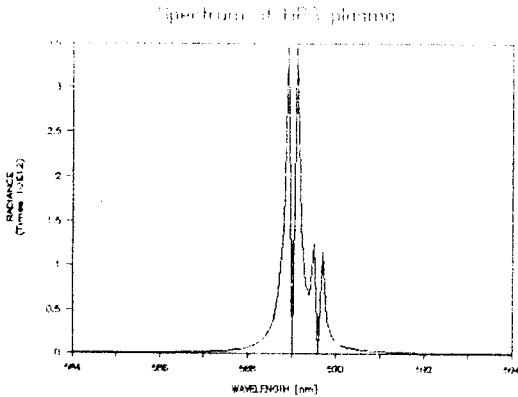


도표 (c) 스펙트럼 분포 (588/590 nm 부근)

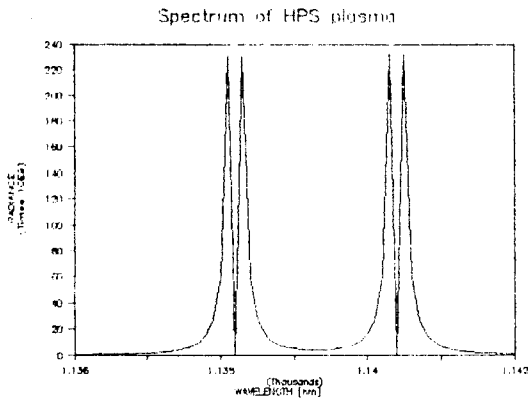


도표 (d) 스펙트럼 분포 (818/819 nm 부근)

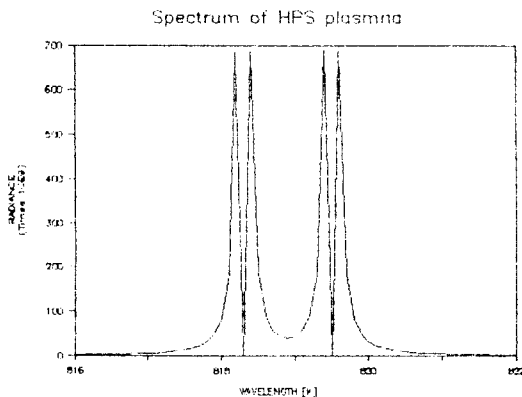


도표 (e) 스펙트럼 분포 (1138/1140 nm 부근)

6. 결 론

인간의 눈은 자연스럽게 주광에 적응하여 왔기 때문에 광원으로는 주광이 가장 이상적이다. 그러므로 가시광선 영역에서의 각 파장의 복사 에너지가 균일한 스펙트럼 분포를 갖는 광원의 특성이 요구된다.

때문에 방전관내 물리적 계 현상을 모델 방정식으로 표현할 수가 있다면 램프의 최적 설계를 가능하게 할 뿐 아니라 그 개선의 방법을 제시할 수 있을 것이다. 그러므로 보다 효율적이고 정확한 아아크 모델의 연구가 필요하다고 하겠다.

참 고 문 헌

1. 지 철 근, '전 기 용 용', 문운당, 1987
2. W. Elenbaas, 'Light Sources', MacMillan, London 1972
3. R.N.Helms, 'Illuminating Engineering', Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1980
4. J.A.J.M. van Vliet, J.J.de Groot, 'High-Pressure sodium discharge lamps', IEE Proc., Vol. 128, Pt.A, No.6, 1981, pp.415-441
5. 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 1847-1953
6. 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
7. 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