

## Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 아크방전 중의 전자밀도 측정

조 주현<sup>o</sup> 노 영수 이 홍식

한국전기연구소

### Electron density measurement in arc discharge using Mach-Zehnder interferometer

J.H. Cho<sup>o</sup>, Y.S. Roh, H.S. Lee

Korea Electrotechnology Research Institute

#### ABSTRACT

The Laser aided diagnostic method makes it possible to diagnose plasma characteristics which have never been done by other one.

The aim of this study is to measure the electron density profile of an arc plasma by Mach-Zehnder interferometer. The two laser beams (He-Ne and Argon Lasers), which are different in wavelength, pass across an arc plasma and meet a change of refractivity which makes fringe shifts. From this effects we could find densities of electron and neutral particle.

#### 1. 서론

플라즈마는 핵융합 발전으로부터 막막형성을 위한 스퍼터 시스템에 이르기 까지 다양한 응용분야에 활용되고 있다. 이러한 플라즈마를 특성의 목적에 응용하기 위해서는 플라즈마발생장치의 개발과 더불어 플라즈마의 내부 현상을 진단하는 기술이 필수적이다. 왜냐하면 플라즈마 입자들의 온도, 밀도와 같은 특성파라메타를 측정함으로써 플라즈마 내에서 발생하는 반응역학들을 규명할 수 있으며, 또 이 파라메타를 제어하여 최적의 플라즈마 상태를 만들어 줌으로써 공정의 개선을 도모할 수 있기 때문이다.

플라즈마를 진단하기 위하여 다양한 방법들이 연구, 개발되어 왔으며 측정대상에 따라 각종의 측정방법이 적용되어 왔다. 레이저에 의한 플라즈마 진단법은 플라즈마 내에서 레이저 빔의 투과, 산란, 굴절 등의 효과를 이용하는데 이 방법을 이용함으로써 기존의 다른 방법으로는 불가능하였던 플라즈마의 특성을 진단하는 것이 가능하게 되었다 [1, 3-7].

본 연구는 아크 방전 중의 입자밀도, 온도를 레이저를 이용하여 측정하는 것이다. 이것은 파장이 다른 두 개의 레이저(헬륨-네온 레이저와 아르곤 레이저)를 이용한 Mach-Zehnder 간섭계를 구성함으로써 실현될 수 있다. 즉 레이저 빔이 아크 플라즈마를 통과할 때 굴절율의 변화로 인하여 간섭무늬의 이동이 발생하는데, 이 정보를 Abel 변환을 통하여 전자와 중성입자의 밀도를 계산하였다.

#### 2. 플라즈마의 비굴절율과 입사광의 파장과의 관계

플라즈마의 비굴절율과 입사광의 파장과의 관계는 전자의 영향이 지배적이고 이온과 중성입자들의 영향은 거의 무시할 수 있다.

입사하는 전자파의 주파수가 전자의 충돌주파수 보다 크고 외부자장이 없는 플라즈마에 대해서 유전율은 다음식으로 주어진다.

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} = 1 - n_e \frac{e^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2} = 1 - \frac{n_e}{n_c} \quad (2.1)$$

여기서,  $\omega_{pe}$ 는 plasma frequency이고,  $\omega_{pe}^2 = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}$

$n_c = \frac{\epsilon_0 m_e \omega^2}{e^2}$ 으로 전자파의 critical cutoff density이다.

따라서 전자밀도와 굴절율의 관계는 다음과 같이 된다.

$$N = \left(1 - \frac{n_e(r)}{n_c}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{n_e(r)}{n_c} = 1 + K_e n_e(r) \quad (2.2)$$

$K_e$ 는 전자의 비굴절율을 나타내고, 음의 값을 가지며 그 절대치는  $|K_e| \propto \omega^2$ 의 관계가 있음을 알 수 있다.

#### 3. Abel 변환

Mach-Zehnder 간섭계의 간섭무늬 이동수  $\Delta N$ 은 식 (2.2)의 관계를 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta N = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \int_0^L \{K_e(n_n - n_0) + K_i n_i + K_e n_e\} dl \quad (2.3)$$

여기서  $K_n$ ,  $K_i$ 는 각각 중성기체와 이온의 비굴절율이다. 플라즈마가 원통대칭형이라 가정하면(대부분의 경우가 가정은 타당하다), 플라즈마 내의 입자의 밀도는 반경 방향  $r$ 의 함수라 볼 수 있으므로 식(2.3)을 편이상 다음과 같이 놓는다.

$$\Delta N = \frac{1}{\lambda} \int_0^L f(r) dl \quad (2.4)$$

$$f(r) = K_e(n_n - n_0) + K_i n_i + K_e n_e \quad (2.5)$$

식(2.4)를 그림 3.1과 같은 좌표계에서 변수변환을 하면 다음과 같다.

$$\Delta N = \frac{2}{\lambda} \int_y^R \frac{f(r) r dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \quad (2.6)$$

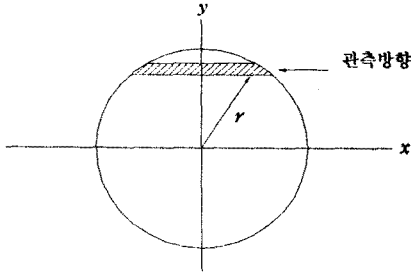


그림 3.1 대칭원통형 플라즈마에서의 좌표계

식(2.6)은 Abel's integral equation이고,  $f(r)$  이  $r > R$  인 영역에서 모두 0이라면 식(2.6)은 다음과 같이 역변환 된다.

$$f(r) = -\frac{1}{\lambda\pi} \int_r^R \frac{(dN/dy)dy}{(y^2-r^2)^{1/2}}, \quad y > r \quad (2.7)$$

식(2.7)을 계산하는 방법은 여러 논문에서 여러 가지 방법들이 제안되었고, 여기서는 William L. Barr의 적분방법을 이용하여 식(2.7)을 계산한다[7]. 먼저  $x$ 축( $r$ 축)과  $y$ 축을 다음과 같이 등분한다.  $\Delta$ 를 충분이 작으면 다음과 같다.

$$y_n = n\Delta, \quad r_k = k\Delta, \quad R = N\Delta \quad (2.8)$$

이와 같이 이산화하여 식(2.7)을 계산하면 다음식과 같이 된다.

$$f_k = \frac{1}{\pi\Delta} \sum_{n=k}^N \beta_{kn} \Delta N_n, \quad k > 2 \quad (2.9)$$

$$f_k = \frac{1}{\pi\Delta} \sum_{n=0}^k \beta_{kn} \Delta N_n, \quad k \leq 2$$

여기서  $\beta_{kn}$ 은 수치해석적으로 구한 값이고, 식(2.7)의 계산과정이 모두  $\beta_{kn}$ 에 포함되어 있다. 두 파장 레이저에 의한 간섭무늬 이동수의 차이에 의해서 구해지는 입자들의 밀도는 전자와 이온의 밀도를 같다고 가정하면 다음과 같다.

$$n_e(r) = \frac{\lambda_1 K_e f_H(r) - \lambda_2 K_e f_{H_2}(r)}{K_n(K_{e2} - K_{e1})} + n_0 - \frac{K_i}{K_n} n_i(r) \quad (2.10)$$

$$n_e(r) = n_i(r) = \frac{\lambda_1 f_H(r) - \lambda_2 f_{H_2}(r)}{K_{e1} - K_{e2}} \quad (2.11)$$

여기에서  $f_H(r)$ ,  $f_{H_2}(r)$ 은 아크의 중심으로 부터의 거리  $r$ 에서, 각각 파장  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 에 대한 아벨역변환 값을 나타낸다.

#### 4. 실험 및 관찰

##### 4.1 Mach-Zehnder 간섭계

그림 4.1은 Mach-Zehnder 간섭계의 개략도를 나타낸 것이다. 레이저 광은 beam splitter에 의해 2개로 나누어지고, 측정 빔(probing beam)은 굴절율이  $n$ 인 측정공간을 통과하고, 기준빔은 굴절율이  $n_0$ 인 매질을 통과한다. 검출기에서 2개의 빔이 재결합함으로써 간섭이 일어난다. 헬륨-네온 레이저의 파장은 632.8 nm이고  $TEM_{00}$  출력은 10 mW이다. 아르곤 레이저는 457 nm에서 514 nm까지 파장을 변조할 수 있으며  $TEM_{00}$  출력 파워는 튜브의 전류가 10

A일 때 출력 파장에 따라서 10 mW에서 42 mW까지의 범위에 있다.

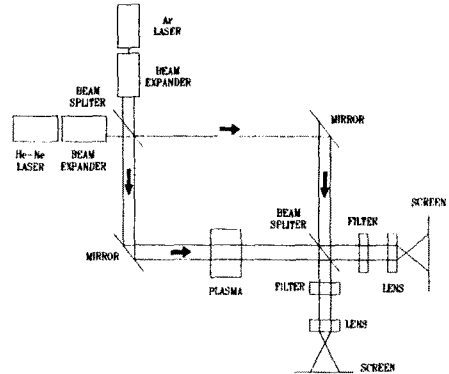


그림 4.1 Mach-Zehnder 간섭계의 구성

레이저 빔의 크기가 축소하고자 하는 플라즈마의 단면적 보다 넓어야 간섭 무늬의 이동도를 쉽게 관찰할 수 있으므로 beam expander를 이용하여 평행 빔의 크기를 가능한 확대하였다.

##### 4.2 DC 아크 중의 입자밀도 측정

사진과 같이 구성된 Mach-Zehnder 간섭계에서 DC 아크를 발생시켜 레이저를 통과시켜 얻은 간섭무늬를 그림 4.2에 나타내었다. DC 아크는 침 대 평판전극을 사용하였고, 전극간 거리는 2mm, 분위기 가스는 아르곤 기체로 하여 전극의 산화를 방지하여 레이저 빔의 산란을 가능한 줄였다.

그림 4.3과 그림 4.4는 그림 4.2의 간섭무늬를 판독하여 간섭무늬의 이동도 값을 식 (2.9)에 의하여 계산한 다음, 식(2.10)과 식 (2.11)에 대입하여 구한 전자와 중성 입자의 밀도를 나타낸 것이다. 이 계산에서 이용된 상수는 다음과 같다[4].  $K_{e1} = -1.79 \times 10^{-28}$ ,  $K_{e2} = -1.18 \times 10^{-28}$ ,  $K_n = 1.0303 \times 10^{-29}$ ,  $n_0 = 2.55 \times 10^{25}$  이다. 여기서  $K_n$ 과  $K_i$ 는 아르곤 기체에 대한 비유전율 이고, 그 값은 같다고 가정하였다.



그림 4.2 DC 아크방전에 의한 간섭무늬의 이동 ( 위 : Ar 레이저 아래 : He-Ne 레이저 )

아크 플라즈마는 보통 중성 입자와 전자의 온도가 거의 같은 국부적 열 평형(LTE, Local Thermal Equilibrium) 상태로 볼 수 있으므로 이온의 밀도를 알면 사하 방정식을 이용하여 입자의 온도를 구할 수 있다. LTE 상태의 아르곤 기체에 대한 사하 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{n_i}{n_e} \approx 28.8 \times 10^{15} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_{ion}} \quad (4.1)$$

그림 4.5는 전자와 중성 입자의 밀도를 사하 방정식에 대입하여 구한 입자의 온도 분포를 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 전자의 밀도는 종 모양의 분포를 갖고, 중심부에서  $n_e \approx 5 \times 10^{23} [ /m^3 ]$  정도임을 알 수 있다.

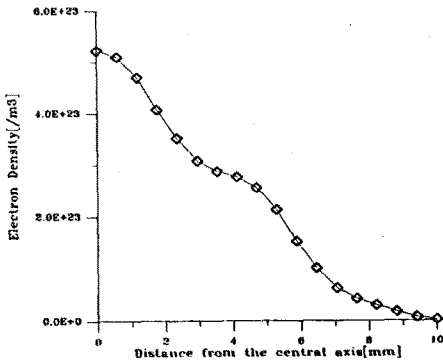


그림 4.3 아크방전중의 전자 밀도분포

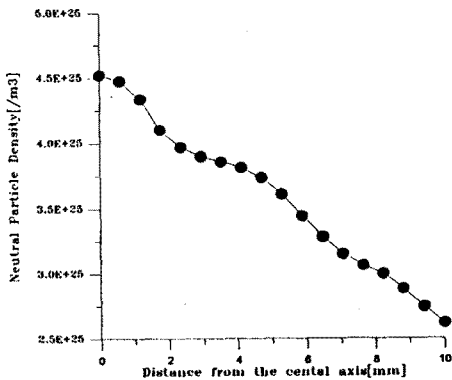


그림 4.4 아크방전에서의 중성입자 밀도분포

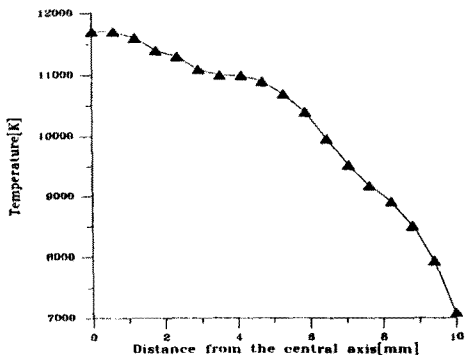


그림 4.5 사하 방정식에 의한 아크 방전중의 온도분포

## 5. 결론

플라즈마의 응용 범위가 확대되면서 그 특성을 진단하는 것이 매우 중요하게 되었다. 본 연구는 이런 중요성을 고려하여 아크 플라즈마의 밀도 및 온도를 레이저 빔에 의한 마하-헨더 간섭법으로 측정하였다. 전자에 의한 간섭 무늬의 이동도 효과는 파장이 다른 두 개의 레이저를 동시에 사용함으로써 관찰할 수 있는데 본 연구에서는 헬륨-네온 레이저와 아르곤 레이저를 이용하였다.

본 실험에서는 적류 아크 플라즈마를 대상으로 간섭 무늬의 이동도를 측정하였다. 관측된 이동도로 부터 구한 전자의 밀도는 아크 중심에서 약  $5 \times 10^{23} /m^3$  이었고 중심에서 벗어날수록 감소하였다. 또 중성 입자의 밀도는 중심에서 약  $4 \times 10^{25} /m^3$  정도가 되었다. 아크 플라즈마를 국부적 열평형 상태로 간주하고 거리에 따라 구한 전자와 중성 입자의 값을 사하 방정식에 대입하여 입자의 온도를 측정하였는데 중심에서 약 11,700K 정도였다.

그러나 측정 광로상에서 아크 플라즈마를 안정하게 유지하지 못하였고 또한 간섭 무늬를 보통의 카메라로 촬영하였기 때문에 간섭 무늬의 변화를 정확히 관찰하였다고 말할 수는 없다. 그렇지만 비록 측정의 오차는 클 것이라 생각되지만 전자의 밀도 및 입자의 온도의 경향성은 상당히 정확하다고 생각된다. 따라서 향후 매우 짧은 시간(수  $\mu sec$  정도) 동안의 변화를 관측할 수 있는 장비를 갖추고 안정된 고밀도 아크 플라즈마를 대상으로 실험하면 양호한 결과를 얻을 수 있을 것이라고 생각된다.

## 참고 문헌

- [1] Y.Kito, T.Sakuta, A.Kamiya, "Thomson scattering of laser light from a high pressure air/arc discharge and its application to electron density measurement" J.Phys. D(Appl. Phys) 17, 2283(1984).
- [2] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics, Macmillian", New York, 1959.
- [3] 松村年郎, 作田忠裕, "아크 플라즈마의計測と解析技術" J.IEE Japan. Vol.110, No.9, 1990.
- [4] A.A. Radzig, B.M. Smirnov, "Reference Data on Atoms, Molecules, and Ions", Springer-Verlag 1985.
- [5] M.Hamamoto, et al., "Measurements of Density Distributions in Short-Arc Lamp Using Laser Interferometry", The Laser Society of Japan No.RTM-93-10., 1993, Jan. pp.55-60.
- [6] 赤崎正則, 村岡克紀, "二波長 레이저 간섭법을 이용한 대기 중 인발스 아크의 연구", 日本電氣學會論文誌 昭和56年 5月號.
- [7] William L. Barr, "Method for Computing the Radial Distribution of Emitters in a Cylindrical Source" J. of the Optical Society of America, Vol.52, No.8 Aug. 1962.