

CCD를 이용한 아크 플라즈마의 온도 측정에 관한 연구

A study on the measurement of arc plasma temperature by CCD camera

조영태 · 나석주

한국과학기술원 기계공학과

1. 서론

플라즈마를 이루는 입자들은 분자, 이온, 전자로 볼 수 있는데 플라즈마의 온도를 정확하게 묘사하기 위해서는 이들의 온도 즉, 기체온도(gas temperature), 이온화 온도(ionization temperature), 여기 온도(excitation temperature), 전자온도(electron temperature)를 각각 측정해야 한다. 그러나 용접시 이용되는 아크는 대기압에서 발생하는 플라즈마로써 저압에서 발생하는 플라즈마와는 달리 전자들과 무거운 입자들 사이의 빈번한 충돌로 인해 에너지 교환 확률이 증가하기 때문에 입자들 사이의 온도차이가 줄어들게 된다.

아크 플라즈마의 경우 매우 강한 빛을 내는데 그것은 아크를 구성하는 입자들이 여기되었다가 바닥 상태로 전이되면서 복사 에너지를 방출하기 때문이며 복사 에너지 스펙트럼은 원소와 이온의 특성 분광선(characteristic spectral line)으로 나타내어 진다. 기존의 연구에서는 분광학적인 방법을 통하여 monochromator를 이용해 음극과 양극 사이에 공간적인 배열을 구성한 후 각각의 지점에서 intensity를 측정해 아크의 온도를 구하였다[1,2].

본 연구에서는 CCD를 이용하여 아크 전체에 대한 intensity 분포를 동시에 얻고 기존의 실험 결과를 이용하여 intensity와 temperature간의 보정을 수행함으로써 CCD 영상의 intensity 정보로부터 아크 플라즈마의 온도 분포를 구할 수 있음을 보였다.

2. 아크 플라즈마의 온도 측정

평판위에 GTAW 아크를 발생시킨 후 690nm bandpass 필터를 단 CCD 카메라를 이용하여 아크의 영상을 촬영하였다. 발생된 아크 플라즈마는 축대칭 형상이므로 2차원 영상 데이터로 3차원 intensity 분포 정보를 얻기 위해 Abel inversion을 수행하였다. 그 다음 CCD intensity정보로부터 온도데이터를 얻을 수 있는 식을 결정하였으며 실제 결과와의 비교를 통해 보정을 수행하였다. 그 후 아크 플라즈마의 온도측정을 수행하고 검증된 해석결과와 비교하였다.

2.1 Abel inversion

측정 영상은 2차원인데 비해 플라즈마의 복사 밀도는 3차원 분포이므로 2차원 영상으로부터 3차원 데이터를 얻을 수 있는 변환식이 필요하다. 축대칭의 radiation source에 대한 이러한 변환식은 Abel inversion 방법으로 구할 수가 있다. 아크가 광학적으로 얇다고 하고 $N(y)$ 를 측정된 복사밀도라고 하면 $J(r)$ 을 반경 r 에서의 복사밀도라고 했을 때 그림 1에서 보듯이 다음과 같은 식을 쓸 수 있다.

$$N(y)\Delta y\Delta z = \sum_{-z_0}^{z_0} J(r)\Delta x\Delta y\Delta z \quad (1)$$

적분형태로 식을 바꾼 후 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$N(y) = \int_{-\infty}^{\infty} J(r)dx \quad (2)$$

$$J(r) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{dN(y(s,r))}{ds^2} \right) ds \quad (s^2 = y^2 - r^2) \quad (3)$$

이 식으로부터 측정된 복사 밀도 $N(y)$ 에서 $J(r)$ 을 얻기위한 식은 최종적으로 다음과 같이 쓸 수 있

다[3].

$$N_N(y) = \sum_{n=1}^N a_n \exp(-\gamma_n y^2) \quad (4)$$

$$J_N(r) = \sum_{n=1}^N b_n \exp(-\gamma_n r^2) \quad b_n = a_n \sqrt{\frac{\gamma_n}{\pi}} \quad (5)$$

복사밀도를 CCD로 측정하게 되면 이산화된 정보가 얻어지므로 식(4)로 측정데이터를 fitting할 때 오차를 최소화할 수 있는 a_n, b_n, N, γ_n 을 얻으면 식(5)로부터 $J(r)$ 을 구할 수 있게 된다.

80A TIG arc plasma에 대해 전극봉에서 3mm 아래면의 abel inversion 수행 결과를 그림2에 나타내었다. 그림 2(a)에서 N_{exp} 는 측정값이고 N_{fit} 은 적절한 변수값을 찾았을 때 fitting한 결과이다. 이때 반경 r 에 대한 아크의 복사 밀도는 그림 2(b)와 같이 나타내어진다. 그림에서 세로축은 상대적인 복사 밀도값이다.

2.2 온도 결정 방법

아크 플라즈마의 경우 입자간 충돌이 빈번하여 LTE 상태라고 볼 수 있으므로 maxwell 방정식, boltzmann 방정식을 만족하며 이 방정식을 특징 짓는 변수인 온도 T 가 모두 같은 값을 가진다. 단 위부피 안에 n 개의 입자가 있다면 준위 i 에 있는 입자의 수는 다음과 같은 boltzmann 관계식을 만족한다.

$$n_i = n \frac{g_i}{U(T)} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (6)$$

여기서 g_i 는 준위 i 에서의 statistical weight, E_i 는 준위 i 에서의 에너지, k 는 볼츠만 상수, $U(T)$ 는 partition function을 나타낸다. 레벨 q 에서 p 로 전이되는 선스펙트럼의 복사밀도 I_{qp} 는 다음과 같다.

$$I_{qp} = n_q A_{qp} \frac{hc}{\lambda_{qp}} \quad (7)$$

여기서 A_{qp} 는 레벨 q 에서 p 로의 전이 확률이다. R 을 CCD 카메라의 파장에 따른 응답특성이라면 CCD의 영상에 나타나는 gray level G 는 다음 식과 같다.

$$G = R_\lambda I_\lambda \quad (8)$$

식 (6), (7), (8)로부터 온도를 결정하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T = -\frac{E_\lambda}{k(\ln G + f(T))} \text{ where } f(T) = \ln\left(\frac{r\lambda}{g_\lambda A_\lambda} \frac{U(T)}{n(T)}\right) \quad (9)$$

$U(T)$ 와 $n(T)$ 를 알지 못하므로 $f(T)$ 를 보정 함수로 정하였고 실제 온도 값과 비교하여 $f(T)$ 를 결정하였다.

2.3 보정 함수

보정을 위해서 검증이 된 해석결과를 이용하였다. 그림 3과 같이 길이 5mm인 아크를 6개의 평면으로 나누고 6개의 평면에서 얻어진 영상정보와 해석결과로부터 얻어진 온도정보를 비교하여 보정을

수행하였다. 그림 4와 같이 보정함수는 온도에 대한 그래프를 그리며 6차 polynomial로 fitting을 하여 보정함수 식을 구하였다. 같은 필터를 적용한 같은 CCD 카메라에 대해서는 한번 보정이 이루어지면 아크의 온도를 측정하는데 같은 보정함수를 적용할 수 있게된다.

2.4 온도 측정

본 연구에서 제안한 방법으로 측정된 아크 플라즈마의 온도 분포를 그림 5에 도시하였다. 아크의 음극강하 영역과 양극 강하 영역 근처에서는 오차가 커지지만 아크의 대부분을 차지하는 아크 기동영역에서는 본 연구에서 제안한 방법이 쓰일 수 있음을 알 수 있다. 또한 영상의 gray level이 낮은 경우에 노이즈가 영상에 미치는 영향이 커져서 측정오차가 생김을 알 수 있다.

3. 결론

CCD 카메라를 이용하여 아크 플라즈마의 온도를 측정하였다. 3차원 복사 밀도를 2차원 영상정보로부터 얻기 위해 Abel inversion을 수행하였고 얻어진 복사 밀도와 실제 아크 온도와의 대비를 통해 보정함수를 구하였다. 그 다음 실제로 아크 플라즈마의 온도를 측정하여 그 정확성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부와 포항제철에서 지원하는 두뇌한국 21사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Glickstein S.S. : Temperature measurements in a free burning arc, welding journal, 1976, pp222s-229s
2. Haddad G.N. and Farmer J.D. : Temperature determinations in a free-burning arc : I. Experimental techniques and results in argon, J. Phys. D: Applied Physics, 17(1984) pp1189-1196
3. Ignjatovic Lj.M. and Mihajlov A.A. : The realization of Abel's inversion in the case of discharge with undetermined radius, J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 72(2002) pp677-689

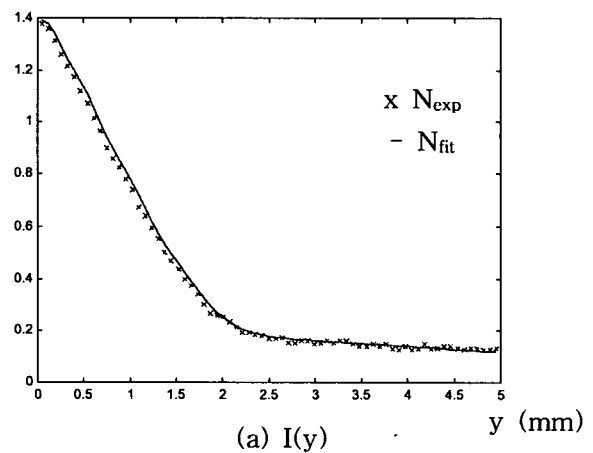
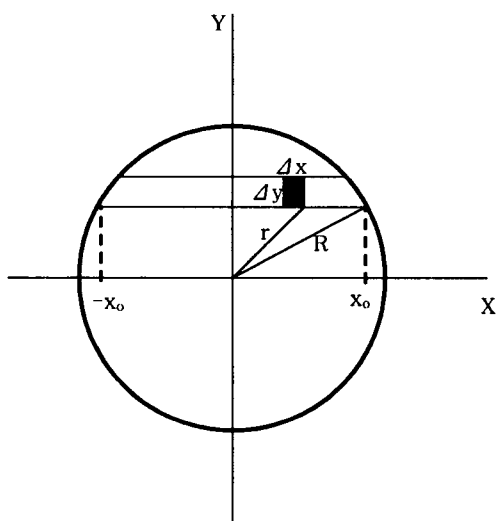


그림 1. Abel transformation을 위한 축대칭 아크의 단면

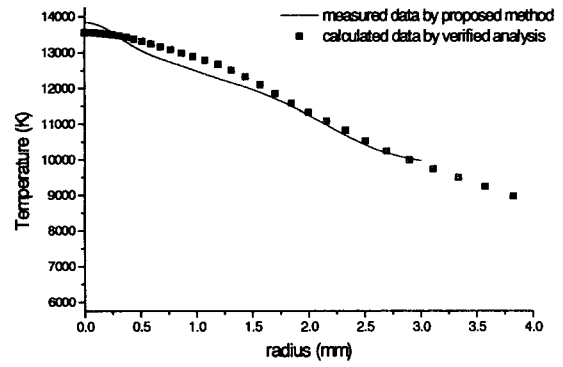
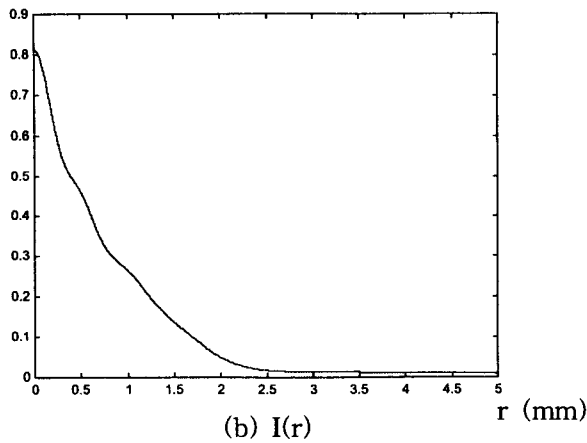


그림 2. 측정된 $I(y)$ 와 변환된 $I(r)$

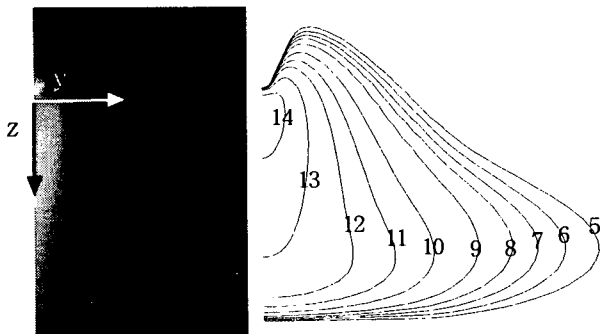


그림 3. 측정된 아크 영상과 보정을 위한 계산 결과 (80A, arc length=5mm)

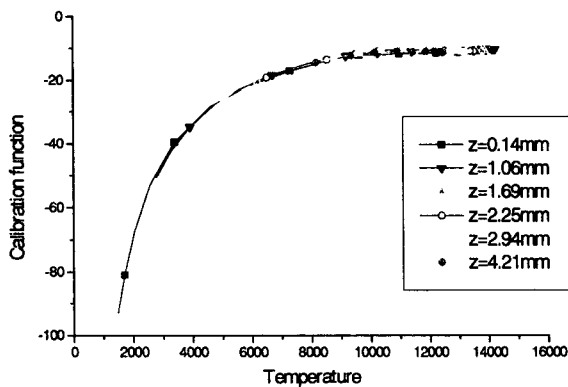
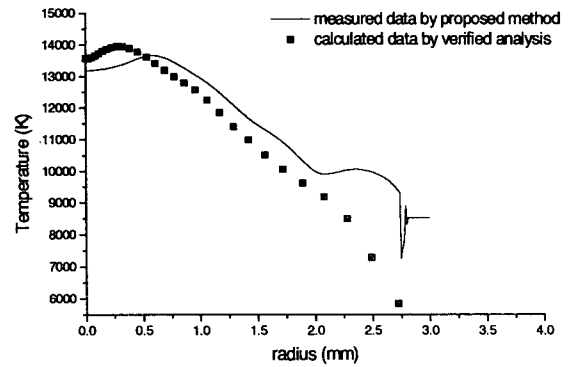


그림 4. Calibration function

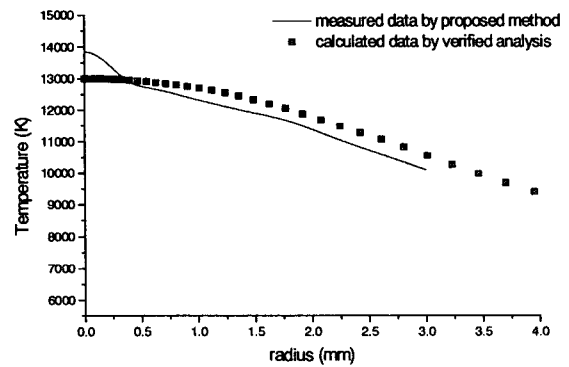


그림 5. 아크 온도 측정 결과