

## 비대칭 아크 플라즈마의 온도 분포 측정

### Temperature Measurement of asymmetric arc plasma by abel inversion

조영태\*, 나석주\*

\* 한국과학기술원

**ABSTRACT** 아크 플라즈마의 온도 분포를 측정하는 방법으로 개발된 CCD 카메라를 이용한 온도 측정 방법을 비대칭 플라즈마의 온도 분포 측정에 적용하기 위해 비대칭 플라즈마의 데이터 변환에 이용 가능한 아벨 역산 방법을 개발하였다. 비대칭 플라즈마 중 V-groove 상의 아크는 타원형의 플라즈마로 볼 수가 있으므로 타원형의 단면을 가지는 플라즈마에 대해 온도 측정을 수행하고 그 결과로서 모재로 전달되는 아크의 열속(heat flux)의 분포를 예측 할 수 있었다.

### 1. 서 론

아크 플라즈마란 양극과 음극 사이의 전기 방전에 의해 발생하는 전기적으로 중성인 이온화된 기체를 일컫는다. 플라즈마는 전류에 따라 그 특성이 변하며 음극과 양극 사이를 양극강하구간, 음극강하구간, 아크 기둥으로 나눌 수 있다. 음극강하구간과 양극강하구간은 폭이 매우 작아서 아주 큰 전기장이 형성되는데 반해 아크의 대부분을 차지하는 아크 기둥 영역에서는 아크 길이의 변화에 따라 전압이 선형적으로 변하게 된다. 이러한 아크 기둥영역은 원자나 분자를 포함하는 중성입자들과 전자나 이온과 같은 전하를 띤 입자로 구성되어 있는데 단위 부피 안에 양의 전하를 가진 입자들의 수와 음의 전하를 띤 입자들의 수가 같아서 일정한 전기장을 형성하게 된다.

용접 시 이용되는 아크는 대기압 플라즈마로서 무거운 입자들 사이의 빈번한 충돌로 인하여 에너지 교환 확률이 증가하기 때문에 입자들 사이의 온도차이가 작아서 부분적으로 열적 평형 상태(LTE)로 볼 수가 있다.

강한 빛을 내는 아크 플라즈마의 온도는 아크를 구성하는 입자들이 여기 되었다가 바닥상태로 전이되면서 방출하는 복사에너지의 크기에 비례하므로 방출하는 빛의 에너지를 측정하여 플라즈마의 온도 분포를 알 수 있게 된다. 아크 전체의 온도 분포를 실시간으로 얻기 위해서 CCD 카메라를 사용하여 광의 세기를 측정하고 측정된 광의 세기와 온도 분포 사이에 미리 구해진 보정함수를 적용하여 아크 플라즈마의 온도 분포를 얻을 수 있다[1,2]. 이 과정에서 CCD 카메라로 얻

을 수 있는 정보는 2차원 데이터이므로 이를 3차원 공간 데이터로 변환하는 과정이 필요한데 이 때 아벨 역산법이 적용된다[3,4,5].

아크 플라즈마가 편평한 모재 위에서 발생하는 경우 아크 플라즈마에 원통형 대칭성이 존재하므로 아벨 역산의 구현이 상대적으로 쉬우나 대칭성이 사라지게 되면 2차원 데이터를 3차원으로 복원할 수가 없게 된다. 따라서 비대칭 플라즈마의 경우 아벨 역산의 구현을 위해서 또 다른 제한 조건(constraints)이 필요하며 본 연구에서는 원통형 대칭성은 잃어버리지만 타원형의 대칭성을 가지게 되는 경우에 대하여 아벨 역산을 구현함으로써 V-groove 상의 플라즈마에 대한 온도 분포를 구하였다.

### 2. 타원형 플라즈마에 대한 아벨 역산

모재를 45° 회전한 fillet 접합부의 형태로 하고 690nm의 대역 통과 필터를 적용하여 150A의 아크 플라즈마를 촬영한 사진을 그림 1에서 보여주고 있다.

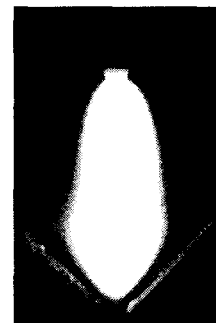


그림 1. V-groove 상의 아크 플라즈마

이러한 V-groove 상의 플라즈마는 단면을 타원

의 형태로 볼 수가 있고 아벨 역산을 위해 그 단면을 도식적으로 그리면 그림 2와 같다.

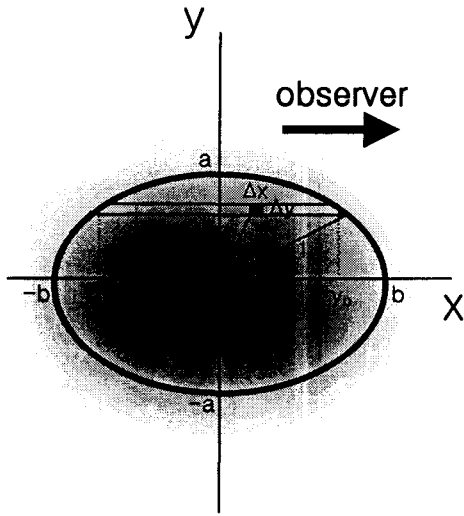


그림 2. 타원형 플라즈마의 단면

좌표의 정의는 전극봉 끝단에서 아래 방향으로 z 축이 되고 관측방향과 평행한 축을 x, 수직인 축을 y로 하였다. 플라즈마의 경계에서 s가 1이 되도록 하고 x축 상에서 플라즈마의 경계를 b, y축 상에서 플라즈마의 경계를 a로 하여 타원 식을 적으면 다음과 같다.

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = s^2 \quad (0 \leq s \leq 1) \quad (1)$$

이 식을 y에 관해 정리한 후 아벨 역산 식을 적으면 다음 두 식으로 표현이 가능하다.

$$I(y) = 2 \int_y^a \frac{\varepsilon(s)s}{\sqrt{s^2 - x^2}} \left(\frac{b}{a}\right) ds \quad (2)$$

$$\varepsilon(s) = -\frac{1}{\pi} \frac{b}{a} \int \frac{1}{\sqrt{y^2 - s^2}} \left(\frac{dI(y)}{dy}\right) dy \quad (3)$$

위 식을 보면 타원형 분포가 되면서 타원의 형태를 결정짓는 형상변수인 a와 b가 결정이 되면 앞선 연구에서 제안한 아벨 역산법을 적용할 수 있게 된다.

아벨역산의 기본 식을 이산화시키면 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

$$I(y)\Delta y = \sum_{-x_0}^{+x_0} \varepsilon(r)\Delta x\Delta y \quad (4)$$

측정 장치의 각 픽셀에서의 측정값을  $I_1, I_2, \dots, I_n$

이라고 하면 그림 3에서 보듯이 그 값은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= 2(S_{11}\varepsilon_1 + S_{12}\varepsilon_2 + L + S_{1n}\varepsilon_n)/d \\ I_2 &= 2(S_{22}\varepsilon_2 + S_{23}\varepsilon_3 + L + S_{2n}\varepsilon_n)/d \\ I_n &= 2(S_{nn}\varepsilon_n)/d \end{aligned} \quad (5)$$

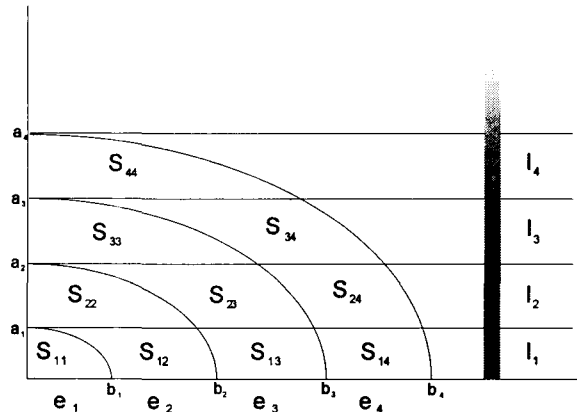


그림 3. 타원형 플라즈마의 아벨역산의 구현에 이용되는 면적행렬을 구하기 위한 개념도

그림에서 표시한 S원소를 구하기 위한 행렬 P는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} P_{ij} &= A(a_j, b_j, a_{i-1}) \\ &= \frac{1}{2} a_j b_j \theta + \frac{1}{2} a_j x_0 \cos \theta - x_0 a_{i-1} \\ x_0 &= b_j \sqrt{1 - \frac{a_{i-1}^2}{a_i^2}}, \quad \sin \theta = \frac{x_0}{b_j} \end{aligned} \quad (6)$$

이 식을 이용하여 S를 구한 후 3차원 광방출률은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$[\varepsilon] = [S^{-1}][d_a][I] \quad (7)$$

### 3. V-groove상의 플라즈마 온도 측정

실제 V-groove 상의 아크 플라즈마에 적용하기 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 타원의 형태를 먼저 파악해야 한다. 이를 위해 그림 4와 같이 실험 장치를 꾸미고 아크 플라즈마를 발생시킨 후 같은 필터의 같은 카메라를 사용하여 앞에서 촬영한 영상과 모재에 평행한 방향에서 촬영한 영상을 비교하였다.

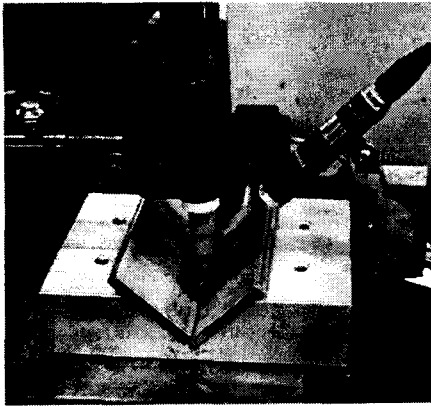


그림 5. 온도 측정을 위한 실험 장치

두 영상의 비교를 통하여 a/b 값을 구할 수 있었고 이러한 형상 계수를 아벨 역산 식에 넣어 주면 측정된 2차원 데이터를 3차원 데이터로 변환할 수 있게 된다. 그 후 보정함수를 이용하고 온도 결정 식을 적용하면 다음과 같이 플라즈마의 온도를 구할 수 있다.

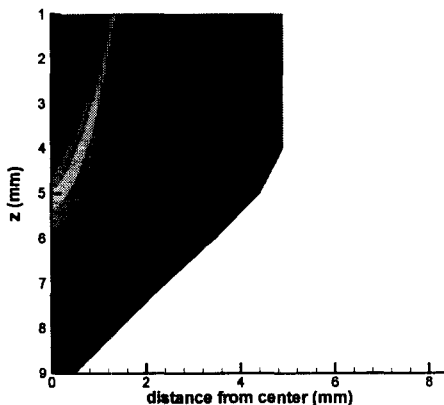


그림 6. V-groove 상에서 100A, 10mm 아크 길이를 가지는 TIG 아크의 온도 분포

#### 4. 결 론

용접 아크의 실시간 온도 분포 측정을 위해 개발된 CCD 카메라를 이용한 온도분포 측정 방법을 비대칭 아크 플라즈마에 적용하기 위해 새로운 아벨 역산 방법을 제안하였고 이를 구현하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 이를 V-groove 상의 플라즈마 온도 계측에 적용하였고 원통형 대칭성을 잃어 버리는 경우에 대해서도 플라즈마의 온도 분포를 구할 수 있음을 보였다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

1. Y.T. Cho and S.-J. Na, : A Study on the Measurement of Arc Plasma Temperature by CCD camera, 2002 춘계 용접학회.
2. Y. T. Cho and S.-J. Na, : Temperature Measurement of Laser Arc Hybrid Welding Plasma, 2003 ICALEO.
3. C. D. Maldonado et al., : New Method for Obtaining Emission Coefficients from Emitted Spectral Intensities. Part I - Circularly Symmetric Light Sources, J. of the Optical Society of America, Vol. 55, No. 10 (1965), 1247-1254
4. Y. Wang et al., An Interpolation solution of the Abel Transformation for Use in Optically-Thick, Cylindrically-Symmetric Plasmas, J. Quant. Spectrosc. Radiative Transf., 1991, 115-119.
5. Lj. M. Ignjatovic and A. A. Mihajlov : The Realization of Abel's Inversion in the Case of Discharge with Undetermined Radius, J. of Quantitative spectroscopy & Radiative Transfer, 72(2002), 677-689