

# 하이브리드 용접에서 레이저에 의한 금속 증기가 아크 플라즈마에 미치는 영향에 관한 해석

Numerical analysis of the effect of laser induced vaporization on the arc plasma

조영택\*, 나석주\*

\* 한국과학기술원

**ABSTRACT** 최근 레이저와 아크를 동시에 사용하여 용접 속도와 품질을 향상시킬 수 있는 하이브리드 용접 기술이 개발되어 활발히 연구가 진행되고 있다. 레이저와 아크를 동시에 사용하게 되면 각각의 열원이 서로 영향을 주어 새로운 용접 열원으로서 동작하게 되는데 특히 레이저에 의해서 발생하는 모재의 금속 증기는 아크 플라즈마의 안정화를 가져오는 것으로 알려져 있다. 또한 금속 증기 속의 이온과 전자가 아크 플라즈마의 음극점을 형성하는데 도움을 줌으로써 플라즈마의 국부적인 온도 상승을 가져오게 된다. 본 연구에서는 effective electrical potential 개념을 도입하여 이러한 현상을 해석하였고 용접 조건에 따른 플라즈마의 거동 변화를 시뮬레이션 하였다.

## 1. 서 론

레이저의 에너지가 금속 재료에 전달되면서 조사된 지점에서 모재의 온도가 올라가고 더 가열되면 용융금속이 증기화(vaporization)되어 이온화된 기체 plume의 형태로 방출되게 된다. 이러한 레이저에 의한 재료의 금속 증기 방출이 포함된 플라즈마 해석을 통해 아크 플라즈마가 어떻게 집중된 열원으로 작동하는지 이를 해석하고자 한다.

레이저와 아크 플라즈마의 상호 작용을 해석하는 것은 발생하는 금속 증기에 의한 플라즈마의 비평형상태[1], 레이저 유도 플라즈마의 진동 현상[2], 플라즈마를 통과하면서 흡수되는 레이저의 에너지[3], 레이저와 금속 재료의 상호 작용뿐만 아니라 아크의 음극에서의 전자 방출 현상[4]등을 모두 고려해야 하는데 이러한 현상을 모두 고려하여 해석하는 것은 그 복잡성으로 인해 어려움이 있다. 따라서 현상을 모사할 수 있는 물리적인 근거가 있는 가정을 통해 해석을 단순화하여야 한다. 해석의 용이성을 위해 먼저 참고 문헌을 기초로 레이저에 의해 발생하는 레이저 유도 플라즈마(laser induced plasma)를 가정하고 가정된 레이저 유도 플라즈마가 아크 해석의 영역과 경계에 어떤 영향을 주는지 파악하며 최종적으로 레이저의 금속 증기 발생에 의한 아크 플라즈마의 상태 변화를 시뮬레이션 하였다

## 2. 해석 영역 및 가정

해석 영역에 레이저 유도 플라즈마의 형상을 고려하기 위해 그 형상을 가정하였는데 레이저 파워에 따라 발생하는 플라즈마의 폭( $r_d$ )은 레이저 spot의 size로 일정하게 하고 높이( $l_p$ )는 실제 실험 결과와 유사하게 정하였다. 이런 형상의 가정 하에서 금속 증기의 성분비는 다음의 식으로 표현되는 Fe와 Ar의 부분압으로 나타내어진다 [5,6,7].

$$C_{Fe} = \frac{P_{Fe} M_{Fe}}{P_{Fe} M_{Fe} + (1 - P_{Fe}) M_{Ar}} \quad (1)$$

금속 증기의 부분압은 가운데 지점에서 Fe의 성분이 100%가 되고 Ar의 성분이 0%, 형상의 경계 지점에서 Fe의 성분이 0%, Ar의 성분이 100%가 되게 하며 그 사이 영역에서는 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였다.

해석을 위한 플라즈마의 영역을 Fig. 1과 같이 하였는데 이 때 anode boundary에서의 경계조건이 해석의 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 anode boundary에서 레이저에 의해 anode가 가열되어 이온화된 금속 증기의 형태로 방출될 때 이를 경계에서의 전위차 형성으로 생각하였다.

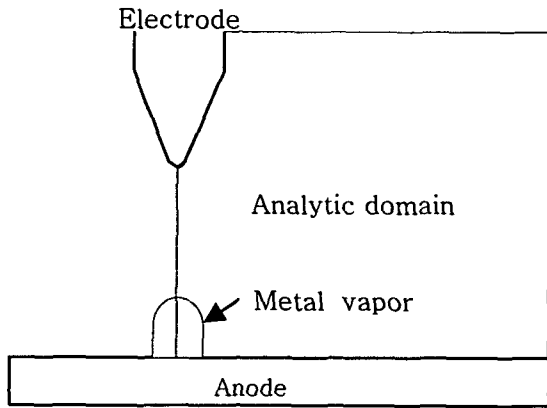


Fig. 1 Analytic domain

이를 effective electrical potential이라고 하였으며 다음과 같은 과정을 통해 구하였다. 먼저 K. Mundra and T. Debroy의 결과에 따르면 레이저가 조사될 때 방출되는 금속 원소의 증발양 (vaporization flux)은 Fig. 2와 같다[8].

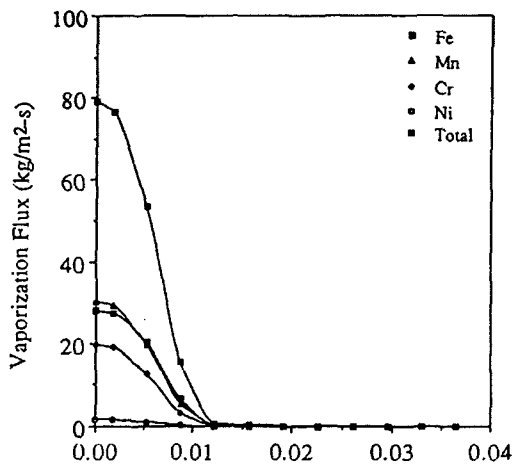


Fig. 2 Vaporization flux for various alloying elements and the total flux from the model presented by K. Mundra and T. debroy[8]

이러한 vaporization flux를  $f_v$  라고 하면 evaporation particle의 속도  $v_d$  는 금속의 밀도를  $d$  라 했을 때  $f_v/d$  와 같다. 금속 증기가 증발하면서 전자가 원자나 이온과 함께 방출되게 되는데 전자의 밀도를  $n_e$  라고 하면 전류 밀도는 그 정의로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J = en_e v_d = j_m(r) \quad (2)$$

여기서  $e$ 는 기본 전하량이고  $j_m(r)$  은 금속 표면에서의 전류밀도분포 이다.

$j_z$ 가 선형적으로 감소하여 앞서 가정한 금속 증기의 경계로 가면  $j_0$ 로 균일하게 된다고 가정하고 옴의 법칙을 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi - \phi_0 &= \frac{1}{\sigma} \int_0^p j_m(r) - \frac{j_m(r) - j_0}{l_p(r)} z dz \\ &= \frac{j_m + j_0}{2\sigma} l_p \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $l_p$  레이저 유도 플라즈마의 높이이다.

또한 가정한 플럼의 형상 위 경계가 반구 모양이라고 보고 전류 보존 식을 사용하여  $j_0$ 를 구하면 다음과 같다.

$$j_0 = \frac{1}{6} \frac{en_e f_{v,m}}{d} \quad \text{where } f_v = f_{v,m} \left(1 - \frac{r}{r_s}\right) \quad (4)$$

$f_{v,m}$  은 금속 증기 중심에서의 최대 vaporization rate이다. 이 식을  $\phi$ 에 관해서 정리하면 최종적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + \frac{en_e f_{v,m}}{12\sigma d} l_p(r) \left(7 - \frac{6r}{r_s}\right) \quad (5)$$

이러한 effective electrical potential을 anode boundary에서의 경계조건으로 사용하여 금속 증기가 방출되는 현상을 플라즈마 해석에 고려할 수 있게 된다.

이러한 가정 외에도 아크 플라즈마 해석의 일반적인 경우로 다음과 같은 가정을 하였다. 플라즈마는 축대칭이다. 레이저를 아크의 중심에 조사한다고 하면 레이저의 진행 경로를 고려하지 않는 이상 축대칭 플라즈마로 볼 수 있다. 플라즈마는 LTE 상태이다. 최근에는 양극 강하구간이나 음극 강하 구간에서 LTE 상태를 만족하지 않는다는 연구 결과들이 발표되고 있으나 아크 기둥 영역에서는 대기압하에서 플라즈마 입자들의 높은 충돌 횟수로 인하여 입자 사이의 온도

차이가 거의 없으므로 LTE 상태로 보아도 무방하다. 플라즈마의 흐름은 정상 상태이고 층류이다. 중력과 부력, 압력이 한 일은 무시한다. 플라즈마는 광학적으로 얇다. Anode의 변형은 생기지 않는다. 실제로는 레이저에 의한 금속 증기의 발생과 아크 플라즈마의 용융으로 인해 용융풀 영역에서 변형(deformation)이 생기지만 낮은 전류의 아크에서는 녹는 영역이 적고 레이저에 의한 표면 변형도 무시할만하다고 가정하였다.

### 3. 지배방정식 및 물성치

기본적인 지배 방정식으로 질량 보존, 에너지 보존, 운동량 보존, 전류 연속 방정식을 사용하였으며 플라즈마의 성분이 순수 Ar에서 metal vapor가 포함된 혼합 성분으로 바뀌었으므로 금속 증기의 농도에 따른 전기 전도도의 변화를 고려하였다. 그 이외의 물성치는 식 (1)을 이용하여 부분압에 따라 그 성질이 달라지는 것으로 표현하였다.

### 4. 해석 결과

레이저 용접 변수로 CW Nd:YAG laser 200W, 0.6mm 반경의 spot size로 하고 아크 용접 변수로 용접 전류를 80A, 아크 길이를 5mm로 하였을 때 온도 해석 결과를 Fig. 3에서 보여주고 있다.

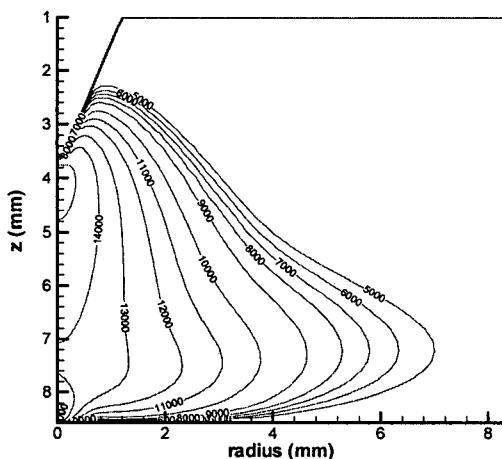


Fig. 3 Temperature distribution of laser arc hybrid welding plasma ( $f_{vm} = 80$ ,  $r_s=0.6mm$ ,  $I=80A$ ,  $l_{arc}=5mm$ )

예상했던 바와 같이 금속 증기에 의한 플라즈

마의 집중효과로 인해 레이저가 조사되는 지점에서 플라즈마 온도 상승이 보인다. 즉 레이저를 사용하여 금속 증기를 발생시킴으로써 아크 플라즈마의 국부적인 온도 상승 효과를 얻을 수 있을 수 있다.

### 4. 결 론

레이저 아크 하이브리드 플라즈마의 해석을 통해 그 주요 변수에 따라 플라즈마의 온도가 어떻게 변하는지 시뮬레이션 하였다. 레이저에 의해 유도되는 금속 증기를 해석의 경계 조건에서 고려하기 위해 effective electrical potential을 도입하였으며 이것은 금속 증기가 플라즈마에 주는 효과를 전압의 형태로 대체한 것이다. 해석 결과를 보면 레이저가 조사되는 지점에서 플라즈마의 온도 상승을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1 Mario Capitelli et al., "Non-equilibrium and equilibrium problems in laser-induced plasmas", Spectrochimica Acta Part B, 55(2000), pp.559-574.
- 2 Z. Szymanski et al., "Plasma Plume Oscillations During Welding of Thin Metal Sheets With a CW CO2 Laser", J. Phys. D: Appl. Phys., 34(2001), pp.189-199.
- 3 B. S. Yilbas et al., "Investigation Into Absorption of the Incident Laser Beam During Nd:YAG Laser Processing of Metals", Optics & Laser Technology, Vol.28, No. 7, 1996, pp.503-511.
- 4 L. Sansonnens et al., "Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion", J. Phys. D: Appl. Phys., 33(2000), pp.148-157.
- 5 J. J. Gonzalez et al., "Mathematical Modeling of A Free-burning Arc in the Presence of Metal Vapor", J. Appl. Phys., 74(5), September, 1993, pp.3065-3070.
- 6 A. Gleizes et al., "Influence of the Anode Material on an Argon Arc", IEEE Transactions On Plasma Science, Vol.25, No.5, October, 1997, pp.891-896.
- 7 J. J. Gonzalez et al., "The Influence of Iron Vapor on an Argon Transferred Arc", Plasma Sources Sci. Technol., 6(1997), pp.20-28.
- 8 K. Mundra and T. Debroy, "Toward Understanding Alloying Element Vaporization During Laser Beam Welding of Stainless Steel", Welding Research Supplement, January, 1993, pp.1s-9s.