

〈 논문 〉

자유표면변형을 고려한 저에너지밀도 및 고에너지밀도 레이저 용접공정 통합 해석

하 응 지* · 김 우 승†
(2005년 3월 10일 접수, 2005년 9월 15일 심사완료)

A Unified Analysis of Low-Power and High-Power Density Laser Welding Processes with Evolution of Free Surface

Eung-Ji Ha and Woo-Seung Kim

Key Words: Laser Welding(레이저 용접), Free Surface(자유표면), Marangoni Convection(마랑고니 대류), Keyhole(키홀), Knudsen Layer(Knudsen 층), Recoil Pressure(증발압력)

Abstract

In this study, a unified numerical investigation has been performed on the evolution of weld pool and key-hole geometry during low-power and high-power density laser welding. Unsteady phase-change heat transfer and fluid flow with the surface tension are examined. The one-dimensional vaporization model is introduced to model the overheated surface temperature and recoil pressure during high-power density laser welding. It is shown that Marangoni convection in the weld pool is dominant at low-power density laser welding, and the keyhole with thin liquid layer and the hump are visible at high-power density laser welding. It is also shown that the transition from conduction welding to penetration welding for iron plate exists when the laser power density is about 10^6W/cm^2 .

기호설명

<p>a : 음속(m/s)</p> <p>c_p : 비열(J/kg·K)</p> <p>δh : 격자간격(m)</p> <p>k : 열전도계수(W/m·K)</p> <p>f : 체적 분율 함수</p> <p>g_m : 액상 분율</p> <p>g_v : 기상 분율</p> <p>I : 입사 열유속(W/cm² or W/m²)</p> <p>L_m, L_v : 용융, 기화 잠열(J/kg)</p>	<p>M : 마하수(Mach number)</p> <p>n : 자유표면 법선벡터(m⁻¹)</p> <p>S : 생성항</p> <p>p : 압력(Pa)</p> <p>R : 기체상수(J/kg·K)</p> <p>t : 시간(s)</p> <p>T : 온도(K)</p> <p>u_r, u_z : r, z 방향 속도(m/s)</p> <p>X : Knudsen 층으로부터의 거리(m)</p>
<p>그리스문자</p>	
<p>γ : 비열비</p> <p>κ : 곡률(m⁻¹)</p> <p>ρ : 밀도(kg/cm³)</p> <p>σ : 표면장력 계수(N/m)</p> <p>μ : 동점성계수(kg/m·s)</p>	

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과

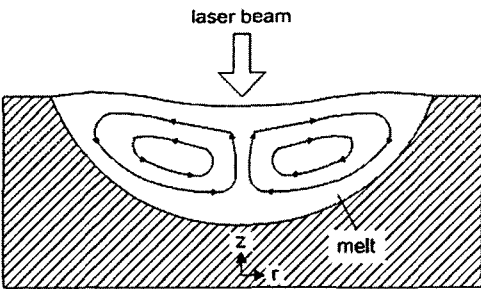
E-mail : wskim@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5248 FAX : (031)418-0153

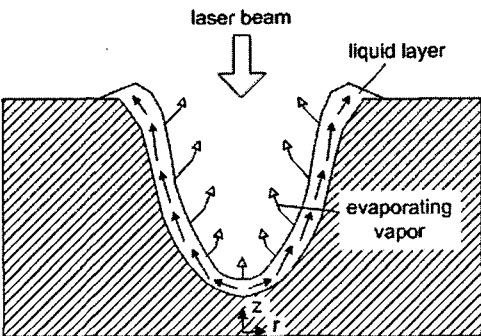
1. 서 론

레이저(laser) 빔은 고밀도의 집중열원이며 용접 및 가공 열원으로서 재료에 주는 열영향 및 열변형이 적기 때문에 정밀함을 요하는 용접공정에서 많이 이용되고 있다. 레이저 용접의 경우, 사용되는 레이저 빔의 에너지 밀도에 따라 크게 저에너지밀도 레이저 용접과 고에너지밀도 레이저 용접으로 나눌 수 있다.⁽¹⁾ 저에너지밀도 레이저 용접에서는 가열된 재료가 용융점을 넘어서면서 Fig. 1(a)와 같이 용융풀이 형성되고, 용융풀의 자유표면에서는 표면장력의 변화에 의한 유체의 유동이 생겨난다. 이러한 저에너지 밀도 레이저 용접에서는 용입깊이가 비교적 작은 용접부를 얻을 수 있다. 한편, 고에너지밀도 레이저 용접에서는 용융된 재료가 비등점 이상으로 가열되어 기화가 일어나면서 Fig. 1(b)와 같이 키홀(keyhole)이 형성되고, 이와 동시에 금속 증기의 해리에 의한 플라즈마가 발생한다. 일단 키홀이 형성되면 키홀 내부에서의 산란, 흡수 효과에 의하여 레이저

빔의 흡수가 급격하게 증가된다. 그리고 기화현상으로 금속증기가 생기면서 발생한 증발압력(recoil pressure)이 용융물을 키홀 밖으로 밀어낸다. 이 때 기화현상과 용융물 방출로 인한 폭이 좁고 용입이 깊은 용접부를 얻을 수 있게 된다. 지금까지 저에너지밀도 레이저 용접과 고에너지밀도 레이저 용접공정은 주요 유동 형성기구(mechanism)의 차이로 인하여 분리되어 연구되어 왔다. 저에너지밀도 레이저 용접해석에서는 주로 상변화와 용융풀내의 유동을 고려하여 용융풀의 깊이와 용융폭을 구하는 연구가 진행되었으며,⁽²⁾ 최근에는 자유표면변형을 고려한 용융풀의 형상해석이 수행되었다.⁽³⁾ 고에너지밀도 레이저 용접공정 해석인 경우에는 물리적 현상의 복잡성으로 인하여, 많은 논문들이 계산영역을 1차원으로 가정하거나,⁽⁴⁾ 2차원 축대칭좌표계인 경우에도 자유표면을 일정한 함수의 형태로 가정하여 해석하였다.^(5,6) 최근에는 계산영역을 2차원 축대칭 좌표계로 확장하고, 열전달과 자유표면 유동을 고려한 연구가 진행되었다.⁽⁷⁻⁹⁾ 본 연구에서는 2차원 축대칭 좌표계를 사용하여 저에너지밀도 및 고에너지밀도 레이저 용접 공정에서의 금속재료의 가열, 용융, 기화 및 자유표면 유동현상을 통합적으로 해석할 수 있는 수치 해석 방법을 도입하고 해석을 수행하였다. 용융풀 자유표면에서의 열모세관 효과(thermo-capillary effect)와 키홀내의 액상층 자유표면에서의 유동과 표면장력을 해석하기 위하여 유체체적법(volume-of-fluid method)⁽¹⁰⁾과 변형된 연속표면력법(continuum surface force method)⁽¹¹⁾을 도입하였다. 그리고 액상-기상 경계면에서의 과열 표면온도와 기화에 의한 증발압력을 해석하기 위하여 1차원 기화모델^(8,12)을 도입하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 물리적 현상을 단순화하기 위하여 플라즈마의 발생과 차폐가스의 유동은 고려하지 않았다.



(a) Low-power density laser welding



(b) High-power density laser welding

Fig. 1 Schematic representation of laser welding

2. 수치해석방법

2.1 기본방정식

저에너지밀도 레이저 용접의 주요 유동형성기구는 용융풀의 형성과 용융풀 표면에서의 온도변화에 의한 표면장력차에 따른 마랑고니 대류이

며, 고에너지밀도 레이저 용접의 주요 유동형성 기구는 기화에 의한 키흐의 형성과 키흐내 얇은 액상 층에서의 증발압력과 표면장력의 작용에 의한 용융물 배출이다. 따라서 고상에서 액상, 액상에서 기상으로의 상변화와 증발압력 및 표면장력의 해석이 주요한 모델링의 초점이 된다. 저에너지밀도 및 고에너지밀도 레이저 용접해석에 필요한 기본 방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\rho \frac{\partial u_r}{\partial t} + \rho u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \rho u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right] + S_{u_r} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_z}{\partial t} + \rho u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \rho u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} \right] + S_{u_z} \quad (3)$$

유체체적방정식:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_r \frac{\partial f}{\partial r} + u_z \frac{\partial f}{\partial z} = S_f \quad (4)$$

에너지방정식:

$$\begin{aligned} & \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \rho C_p u_z \frac{\partial T}{\partial z} \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[kr \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ & \quad - \rho L_m \frac{\partial g_m}{\partial t} - \rho L_v \frac{\partial g_v}{\partial t} + S_T \end{aligned} \quad (5)$$

식 (2)와 (3)에서 S_{u_r} , S_{u_z} 는 표면장력에 의한 생성항을 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$S_{u_r} = \sigma \kappa n_r + \nabla_s \sigma_r / \delta h \quad (6)$$

$$S_{u_z} = \sigma \kappa n_z + \nabla_s \sigma_z / \delta h \quad (7)$$

식 (4)의 S_f 는 기화현상에 의한 액상의 감소를 나타내며, 식 (5)의 S_T 는 레이저 흡수에 의한 에너지 생성항을 나타낸다.

본 연구에서는 연속방정식과 운동량방정식을 수치적으로 해석하기 위하여 투사법(projection method)⁽¹³⁾을 도입하였고, 유체체적방정식을 해석하기 위하여 PLIC법(piecewise linear interface calculation method)⁽¹⁰⁾을 적용하였다. 에너지방정식을 해석하기 위하여 체적평균 엔탈피법(volume-averaged enthalpy method)⁽¹⁴⁾을 사용하였으며, 고상에서의 속도를 0으로 고정하였다.

2.2 액상-기상 경계면에서의 기화 모델

액상-기상 경계면의 온도가 비등온도에 이르게 되면 기화현상이 일어나기 시작한다. 고에너지밀도 레이저 가열에 의한 기화현상에서는 액상-기상 경계면의 바깥쪽에 Knudsen 층이라고 불리는 평균자유행로(mean free path)의 2~3배에 해당하는 매우 얇은 층이 존재하는 것이 알려져 있다. Fig. 2에 Knudsen 층 윗면에서 충격파(shock wave)가 전파되어 나가는 유동 구조를 나타내었다. 이 층을 포함해서는 연속체 가정이 성립하지 않을 뿐만 아니라 온도와 압력 그리고 밀도의 급격한 변화가 일어난다. 그리고 강력한 기화에 동반된 증발압력이 유효 포화 압력을 증가시킴에 따라 기화현상이 일어나는 액상의 표면온도는 메질의 비등점보다 항상 높게 된다. Fig. 2의 액상-기상 경계면에서 질량, 운동량, 그리고 에너지 보존방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.^(7,8)

$$\rho_3(D - u_3) = \rho_s D \quad (8)$$

$$p_3 - \rho_s D u_3 = p_s \quad (9)$$

$$-\rho_s D L_v + k \frac{\partial T}{\partial n} = I \quad (10)$$

여기서 D 와 ρ_s 는 기화면의 이동 속도와 기화표면밀도를 나타내며, 식 (8)~(10)에 하첨자로 사용되는 1~3은 Fig. 2에 나타낸 Knudsen 층 윗면의 기화층기 또는 주변 기체 영역을 나타낸다. 식 (8)~(10)으로부터 기화표면압력 p_s 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_s = \frac{R_3 T_3 + \left(1 - \frac{\rho_3}{\rho_s}\right) u_v^2}{L_v u_v} \left(I - k \frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (11)$$

여기서 $u_v = u_3 - D$ 이다. 한편 p_s 는 Clasius-Clapeyron 방정식으로도 나타낼 수 있다.

$$\frac{p_s}{p_1} = \exp \left[\frac{L_v}{R_3} T_{vl} \left(1 - \frac{T_{vl}}{T_s} \right) \right] \quad (12)$$

여기서 T_{vl} 과 T_s 는 1기압하에서의 비등점과 기화표면온도를 나타낸다. 식 (11)과 식 (12)의 미지수를 구하기 위해서는 Knight⁽¹²⁾에 의하여 유도된 Knudsen 층에서의 아래와 같은 도약조건을 이용하여야 한다.

$$\frac{p_3}{p_1} = 1 + \gamma_1 M_3 \frac{a_3}{a_1} \left[\frac{\gamma_1 + 1}{4} M_3 \frac{a_3}{a_1} + \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma_1 + 1}{4} M_3 \frac{a_3}{a_1} \right)^2} \right] \quad (13)$$

$$\frac{T_3}{T_s} = \left[\sqrt{1 + \pi \left(\frac{\gamma_3 - 1}{\gamma_3 + 1} \frac{m}{2} \right)^2} - \sqrt{\pi} \frac{\gamma_3 - 1}{\gamma_3 + 1} \frac{m}{2} \right] \quad (14)$$

$$\frac{\rho_3}{\rho_s} = \sqrt{\frac{T_s}{T_3}} \left[\left(m^2 + \frac{1}{2} \right) F(m) - \frac{m}{\sqrt{\pi}} \right] + \frac{1}{2} \frac{T_s}{T_3} (1 - \sqrt{\pi} m F(m)) \quad (15)$$

식 (14)와 식 (15)는 아음속 유동의 경우에 사용되며, 음속 유동의 경우에는 $T_3/T_s = 0.669$, $\rho_3/\rho_s = 0.308$ 이다. 식 (14)와 식 (15)에서 $F(m) = e^{m^2} \operatorname{erfc}(m)$, $m = u_3/\sqrt{2R_3 T_3}$ 이다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 도입한 수치해석 모델을 적용한 저에너지밀도 레이저 수치해석 결과의 타당성은 이전 논문⁽³⁾에서 검증되었다. 기화모델이 적용된 고에너지밀도 레이저 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 1차원 유동모델을 사용한 Ki 등⁽⁹⁾이 수행한 수치해석결과와 본 연구에서 해석한

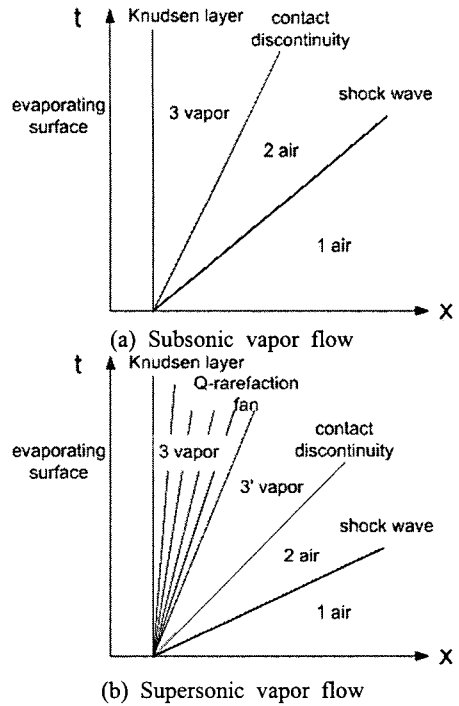


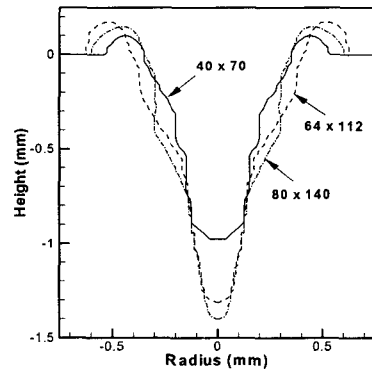
Fig. 2 Flow structure in the vapor phase

결과를 비교하였다. 해석에 사용된 입사 레이저의 밀도는 10^7W/cm^2 과 10^8W/cm^2 이고, 빔 직경이 $500 \mu\text{m}$ 인 가우시안 형태의 에너지 분포가 고려되었다. 플라즈마의 영향과 재응결(recondensation)은 무시하였으며, 키홀내의 다중반사를 고려하기 위하여 입사선 추적법을 사용하였다. 표적으로는 1.5mm 두께의 철판(iron plate)을 고려하였으며, 철판의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 표면장력은 온도의 함수 형태로 가정하였으며, 표면장력을 제외한 모든 물성치는 상수값을 사용하였다. 격자의존성해석을 위하여 각각 40×70 , 64×112 , 80×140 의 균일 격자계를 사용하였다. Fig. 3(a)에 10^7W/cm^2 의 레이저를 1.2ms (milliseconds) 동안 조사했을 때의 각각의 격자계에 대한 키홀의 형상을 나타내었으며, Fig. 3(b)에는 10^8W/cm^2 의 레이저를 0.19ms 동안 조사했을 때의 각각의 격자계에 대한 키홀의 형상을 나타내었다. Fig. 3을 살펴보면 64×112 와 80×140 격자계에서 키홀의 내부 형상 및 키홀 가장자리에 형성된 험프(hump)의 형상이 유사하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 3(a)에서 키홀의 깊이는 80×140 격자계의

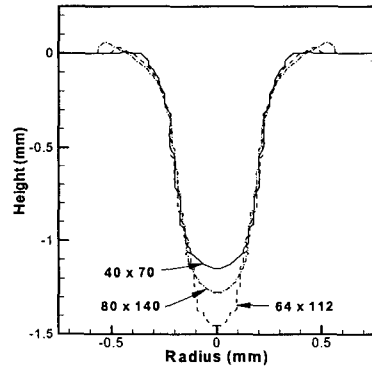
Table 1 Material properties for iron⁽⁹⁾

Property	Value
Liquid density (kg/m ³)	6518.5
Solid density (kg/m ³)	7870.0
Melting temperature (K)	1809.0
Normal boiling temperature (K)	3133.0
Critical point temperature (K)	9250.0
Viscosity (kg/m·s)	3.2175×10 ⁻³
Surface tension at melting temperature (N/m)	1.835
Temperature coefficient of surface tension (N/m·K)	-5×10 ⁻⁴
Liquid thermal conductivity (W/m·K)	43.99
Solid thermal conductivity (W/m·K)	40.96
Liquid specific heat (J/kg·K)	804.03
Solid specific heat (J/kg·K)	658.63
Latent heat of vaporization (J/kg)	6.3639×10 ⁶
Latent heat of melting (J/kg)	2.7196×10 ⁵
Laser absorptivity	0.15

결과가 64×112 격자계에 비하여 6.7% 크게 나타났으며, Fig. 3(b)에서는 15% 작게 나타났다. Fig. 4에는 각각의 격자계에 대하여 10⁷W/cm²와 10⁸W/cm² 레이저의 조사시간과 키홀 깊이와의 관계를 나타내었다. 10⁷W/cm²의 레이저에 대하여 64×112와 80×140 격자계에서의 천공완료시간은 각각 1.31ms와 1.26ms로 나타났으며, 이는 Ki 등이 계산한 1.2ms와 기존 실험결과⁽²⁾인 1~2 밀리초(millisecond)와도 비슷함을 알 수 있다. 본 논문에서의 천공완료시간이 Ki 등의 결과보다 조금 크게 나오는 이유는 표면장력과 험프에 의한 유동장애가 고려되어 레이저 조사중 생성된 용융물이 키홀 외부 배출이 억제되었기 때문인 것으로 보인다. 10⁸W/cm²의 레이저에 대한 천공완료시간은 64×112와 80×140 격자계에서 각각 0.19ms와 0.21ms로, Ki 등이 계산한 0.19ms와 유사하였다. Fig. 3과 Fig. 4로부터 64×112와 80×140 격자계에서 타당한 해석 결과를 보였으며, 이후의 해석에서는 64×112 격자계를 사용하였다. 입사되는 레이저 에너지 밀도에 따른 용접형태의 변화를 살펴보기 위하여 레이저 에너지 밀도를 10⁵W/cm²부터 10⁸W/cm²까지 변화시키면서 용융풀 및 키홀의 형상을 해석하였다. Fig. 5(a)에는 10⁵W/cm² 레이저를 2s(seconds) 동안 조사했을 때의 용융풀의



(a) $I = 10^7 \text{ W/cm}^2, t = 1.2 \text{ ms}$



(b) $I = 10^8 \text{ W/cm}^2, t = 0.19 \text{ ms}$

Fig. 3 Grid dependency of the key hole geometry for high-power density laser welding

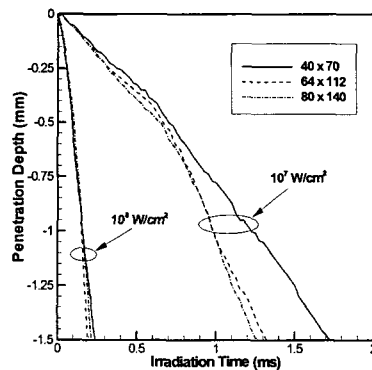


Fig. 4 Grid dependency of the penetration depth for high-power density laser welding

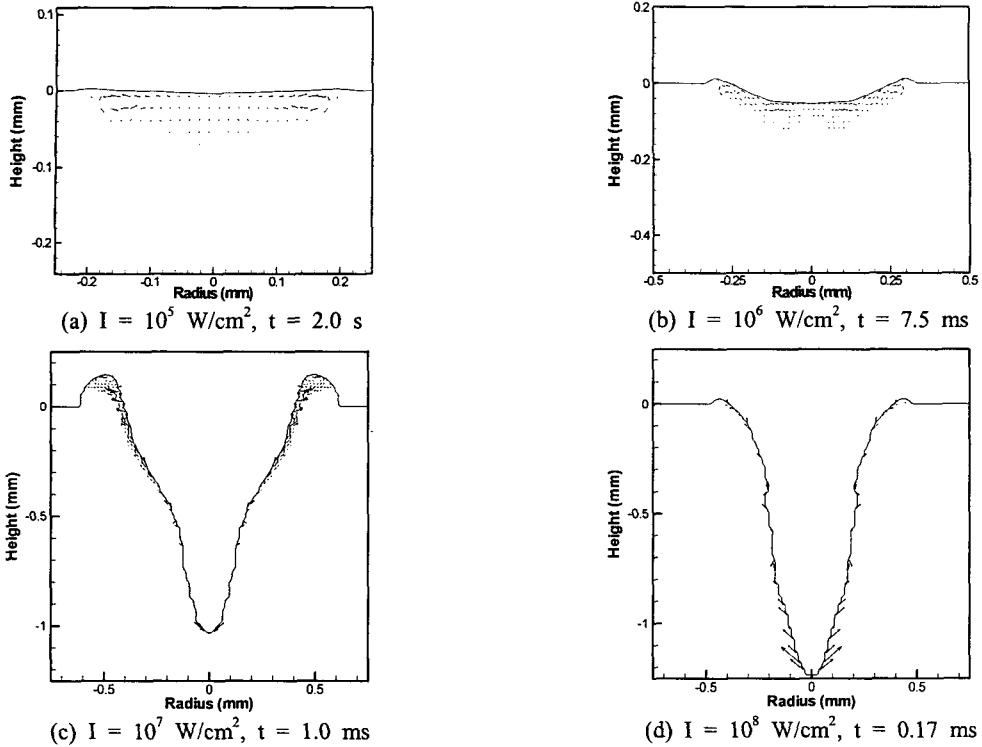


Fig. 5 Weld pool and key hole geometry for low-power and high-power density laser welding

형상을 나타내었다. 상대적으로 낮은 입사 에너지로 인하여 2s가 경과한 후에도 기화현상은 일어나지 않았으며, 용융풀내에서의 마랑고니대류 현상으로 인한 유동장을 확인할 수 있다. 그리고 미세하지만 용융풀 바깥쪽에서 용융풀 표면이 상승하고 용융풀 중심부에서 하강하는 저밀도에너지 레이저 용접에서의 용융풀의 형태를 보여주고 있다. 입사 에너지의 밀도를 10^6W/cm^2 로 높여서 7.5ms 동안 조사한 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 용융풀의 형태를 아직까지 유지하고 있지만, 용융풀 중심부에서 부분적으로 기화현상이 일어나면서 용융풀의 중심부가 하강하고 액상층의 두께가 가늘어진 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)에는 10^7W/cm^2 레이저를 1ms 동안 조사했을 때의 키홀의 형상을 나타내었으며, Fig. 5(d)에는 10^8W/cm^2 레이저를 0.17ms 동안 조사했을 때의 키홀의 형상을 나타내었다. 입사 레이저가 10^7W/cm^2 인 경우에는 키홀 상단부에서는 폭이 넓고 기울기가 완만한 형태를 나타내며 뚜렷하게 액상층과 헴프를 볼 수 있지만, 키홀 하단부에는

폭이 좁고 기울기가 가파른 형태를 나타내며 액상층 또한 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이는 입사된 레이저가 키홀 내에서 다중반사를 일으키면서 에너지 흡수가 키홀 중심의 하단부에 집중되기 때문이다. 입사열유속이 10^8W/cm^2 으로 높아지면 기화현상이 집중적으로 발생하게 되어 키홀은 전체적으로 좁고 깊은 형태를 가지게 되며 액상층은 거의 나타나지 않는다. 또한 키홀 가장자리에 생성된 헴프는 10^7W/cm^2 인 경우에 비하여 매우 작음을 알 수 있다. 본 논문에서 고려된 물리적 상황의 경우를 살펴보면, Fig. 5로부터 레이저 입사에너지가 10^6W/cm^2 정도의 범위를 넘어서면서 전도용접(conduction welding)에서 나타나는 용융풀의 형태가 용입용접(penetration welding)에서 볼 수 있는 키홀의 형태로 천이가 일어나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에는 각각의 입사에너지에 대한 용융풀 또는 키홀 표면온도의 변화를 나타내었다. Fig 6(a)로부터 입사에너지가 10^5W/cm^2 인 경우에는 표적의 온도가 매우 완만하게 상승함을 볼 수 있으며, 2s 정도가 경과한 후에야 표

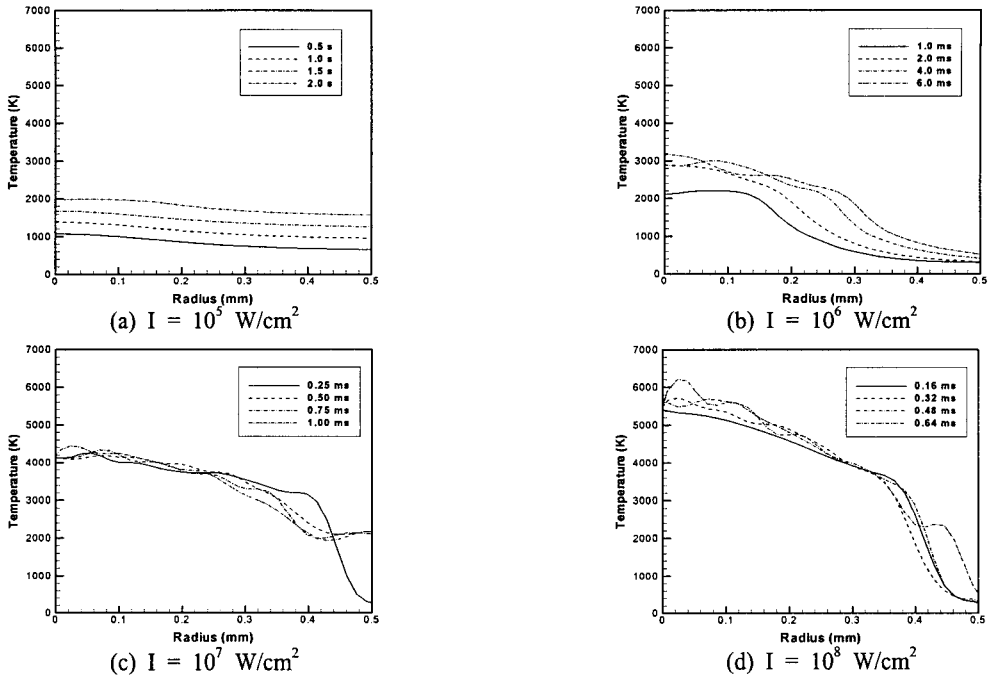


Fig. 6 Free surface temperature profile for low-power and high-power density laser welding

적이 용융점(1809K)을 넘는 것을 확인 할 수 있다. 입사에너지를 10^6W/cm^2 으로 증가시켰을때의 표면 온도분포를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 레이저 조사시간이 4ms가 경과하면서 레이저 입사 중심 부근에 위치한 표적표면이 부분적으로 기화점(3133K)을 넘어서게 된다. 따라서 4ms 이후에는 마랑고니 대류현상과 기화현상이 복합적으로 일어나게 된다. Fig. 6(c)와 6(d)에는 입사에너지가 각각 10^7W/cm^2 와 10^8W/cm^2 일 때의 키홀 표면온도 분포를 나타내었다. 두 경우 모두 레이저 조사 초기부터 레이저 입사 반경 내에 위치한 표적온도가 기화점을 넘어서면서 기화현상이 일어나기 시작한다. 또한 증발압력에 의한 유효포화압력이 증가되면서 표면온도가 1기압하의 기화점보다 크게 과열된 상태를 확인할 수 있다. 한편 레이저 조사시간이 경과함에 따라 키홀이 성장하고 입사된 레이저가 키홀내에서 다중 반사를 일으키게 된다. 이러한 다중 반사에 의하여 키홀 표면 온도분포가 레이저 조사시간이 경과함에 따라 비교적 매끈한 모양에서 물결모양으로 바뀌게 된다. 레이저 조사시간에 따른 기화에 의한 표적의 질량 손실량을 Fig. 7에 나타내었다. 기존 1차원

유동모델^(4,9)의 결과와는 달리 유동에 의한 표적 질량손실량은 표면장력과 응고층에서의 유동장으로 인하여 험프의 생성과 성장에만 기여하였고, 순수 기화에 의한 질량손실이 지배적으로 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 질량손실 특성은 2차원 유동모델을 사용한 수치해석결과⁽⁸⁾와 유사하였다. 입사에너지가 10^6W/cm^2 일때는 조사 초기에 질량손실 발생이 미미하다가 6ms 이상이 경과하면서 질량손실량이 10^{-3}kg 정도로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 10^7W/cm^2 이상의 고에너지 밀도 레이저를 조사한 경우에 10^{-6}kg 에 해당하는 질량손실이 일어나는데 걸리는 시간은 10^7W/cm^2 일 때 약 1.6ms이고 10^8W/cm^2 일 때는 약 0.17ms로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 저에너지밀도 및 고에너지밀도 레이저를 이용한 용접과정에서 발생하는 용융풀과 키홀의 형상을 통합하여 수치적으로 연구하였다. 용융풀 및 키홀 액상층에서의 표면장력을 포함한 2차원 유동해석을 위하여 유체체적법과 연

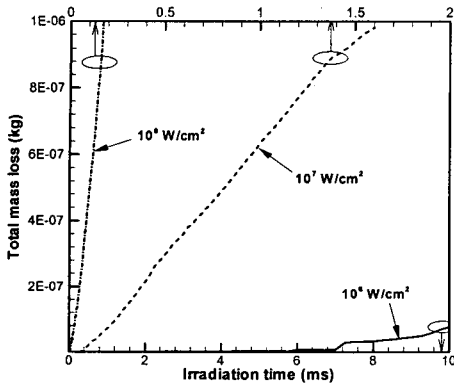


Fig. 7 Mass loss from vaporization

속표면력법을 사용하였다. 액상과 기상 경계면에서 키홀의 과열 표면온도와 증발압력을 고려하기 위하여 1차원 기화모델을 도입하였다. 저에너지 밀도 레이저 용접과정에서는 용융풀내의 유동과 자유표면 변형을 예측하였으며, 고에너지밀도 레이저 용접 과정에서는 액상/기상 경계면에서의 기화 현상과 키홀 액상층에서의 유동 형태를 예측하였다. 저에너지밀도 및 고에너지밀도 통합 모델을 사용한 결과 레이저 입사에너지에 따라 용접형태가 전도용접으로부터 용입용접형태로 천이되는 것을 확인 할 수 있었다. 철판에 대한 레이저 용접에서 10^5W/cm^2 정도의 입사에너지를 갖는 레이저를 수 초 동안 사용하는 것이 전도용접에 적당하며, 용입용접을 위해서는 10^7W/cm^2 이상의 입사에너지를 갖는 레이저를 수 밀리초 동안 사용하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-041-D20071).

참고문헌

- (1) Bauerle, D., 1996, Laser Processing and Chemistry, Springer.
- (2) Duely, W. W., 1999, Laser Welding, John Wiley & Sons, Inc.
- (3) Ha, E. and Kim, W., 2004, "A Study of Low-Power Density Laser Welding Process with Evolution of Free Surface," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 10, pp. 1202~1209.
- (4) Chan, C. L. and Mazumder, J., 1987, "One-Dimensional Steady-State Model for Damage by Vaporization and Liquid Expulsion due to Laser-Material Interaction," *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, pp. 4579~4586.
- (5) Kar, A. and Mazumder, J., 1990, "Two-Dimensional Model for Material Damage due to Melting and Vaporization During Laser Irradiation," *J. Appl. Phys.*, Vol. 68, pp. 3884~3891.
- (6) Kar, A. and Mazumder, J., 1992, "Two-Dimensional Model for Laser-Induced Material Damage: Effects of Assist Gas and Multiple Reflections Inside the Cavity," *J. Appl. Phys.*, Vol. 71, pp. 2560~2569.
- (7) Lim, J., 1993, A Computational Analysis of Deep Penetration Laser Welding, Ph. D.'s thesis, University of Arizona.
- (8) Ganesh, R. K., Bowley, W. W., Bellantone, R. R. and Hahn, Y., 1996, "A Model for Laser Hole Drilling in Metals," *J. Comput. Phys.*, Vol. 125, pp. 161~176.
- (9) Ki, H., Mohanty, P. S. and Majumder, J., 2001, "Modelling of High-Density Laser-Material Interaction Using Fast Level Set Method," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 34, pp. 364~372.
- (10) Rider, W. J. and Kothe, D. B., 1998, "Reconstructing Volume Tracking," *J. Comput. Phys.*, Vol. 141, pp. 112~152.
- (11) Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C. A., 1992, "Continuum Method for Modeling Surface Tension," *J. Comput. Phys.* Vol. 100, pp. 335~354.
- (12) Knight, C. J., 1979, "Theoretical Modeling of Rapid Surface Vaporization with Back Pressure," *AIAA J.*, Vol. 17, pp. 519~523.
- (13) Kothe, D. B. and Mjolsness, R. C., 1991, "RIPPLE: A New Model for Incompressible Flows with Free Surfaces," *AIAA* 91-3548.
- (14) Swaminathan, C. R. and Voller, V. R., 1993, "On the Enthalpy Method," *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, Vol. 3, pp. 233~244.