

레이저 용접의 비드 형상에 대한 실험치와 이론 결과의 비교

김 재 도*

Comparison of Theoretical Model with Experiment in Bead Shape of Laser Welding

Jae-Do Kim*

ABSTRACT

A theoretical heat-flow model incorporating with a constant moving CO₂ laser beam has been analyzed to predict the penetration depth and the shape of bead section during laser beam welding. The laser beam is exponentially attenuated with an absorption coefficient in the material. The solution can be expressed in terms of normalized variables. The experimental data were generated by using CW 2 kW CO₂ laser with multi beam mode and CW 3 kW CO₂ laser with Gaussian mode. The specimens were made as bead-on-plate welds for SM 10C, STS 304, STS 316, STS 420 and pure Nickel. The maximum possible penetration depth and the shape of bead section for given sources of laser power, travel speed and beam spot size can be predicted with this model in a given material.

Key Words : CO₂ Laser welding (CO₂ 레이저 용접), Travel speed (용접 속도), Beam mode (빔 모드), Absorption coefficient (흡수 계수), Penetration depth (용입 깊이), Bead shape (비드 형상)

기호설명

c : Specific heat
 f : Focal length of lens
 G : Heat source function
 K : Thermal conductivity
 m, n : Number of angular as in TEM_{mn}
 P : Laser Power
 p : Incident laser power
 R : Reflectivity
 r : Radius

T : Temperature
 t : Time
 x, y, z : Cartesian coordinate
 α : Absorption coefficient
 ρ : Density
 λ : Wavelength of laser beam
 δ : Radius of focal point of beam
 δ₁ : Radius of beam entering the lens
 κ : Thermal diffusivity
 θ : Normalized temperature rise
 τ₁ : $8κt_1/δ^2$

* 인하대학교 기계공학과

$$r_2 : 8\pi r_2 / \delta^2$$

1. 서 론

고출력 레이저가 산업계에 소개된 이후 절단, 용접, 드릴링 및 열처리 등에 급속히 적용하고 있다. 최근에는 로봇트를 이용하거나 광 케이블을 사용하여 3차원 형상의 부품을 절단하거나 용접하는 등 산업현장에 폭넓게 응용하고 있다. 레이저 용접은 레이저 빔을 열원으로 하는 고에너지 밀도 용접이며, 열 용입량이 적어서 재료의 뒤틀림이 거의 없고 용접폭에 대한 용입깊이가 매우 큰 비드를 얻을 수 있다. 전자 빔 용접에 비해서 진공로가 필요 없으며, 모재를 녹여 용접하기 때문에 용가재 (filler metal) 가 불필요하다.

레이저 용접은 심용입용접 (Penetration welding) 이라 하는데, 그 조건은 이온 가스로 가득찬 키홀 (keyhole) 의 형성이 기본 조건이다. 키홀은 재료의 증발이 일어나는 임계 에너지 밀도보다 흡수되는 레이저 에너지 밀도가 높을 때 일어난다. 레이저 빔 용접의 임계 에너지 밀도는 10^{10} W/m^2 의 높은 값이다(1, 2).

레이저 용접은 여러가지 가공 변수에 의해서 용입 깊이와 비드 폭등의 용접 결과에 영향을 미치는 데 레이저 빔 특성, 광학 장치 및 용접할 재료의 광물리적 특성이 대표적인 인자들이다. 빔 특성으로는 레이저 출력, 초점의 크기와 레이저 에너지 분포형상이 중요한 변수이다. 주어진 여러 레이저 용접 조건에 대해서 용입 깊이와 비드 형상 등을 예측함으로써 실험 결과를 미리 예견하는 것은 중요한 일이다. 아울러 어떤 레이저 용접 변수의 변화에 대한 결과도 예견하게 되면 산업현장에서 매우 요긴하게 사용할 수 있다.

레이저 용접에서 Swift-Hook(3) 등은 키홀 영향을 고려하여 비드 폭을 예측할 수 있는 2차원 모델을 제시 하였으나 용입 깊이는 예측할 수 없다. Cline과 Anthony(4)는 모든 레이저 에너지가 재료 표면에서 흡수된다고 가정하여 온도 분포를 구하였는데 반도체 재료의 레이저 어닐링에 적합한 모델이다. Mazumder과 Steen(5)은 가우시안 레이저 빔을 일정한 속도로 조사할 때 유한차분법으로 온도 분포를 구하였으나, 모두 레이저 에너지가 100% 표면에서 흡수되는 black body 로 가정하였다. Davies(6) 등은 레이저 용접에서 용융부의 유체 흐름에 대한 유체역학적인 해석 방법을 사용하여 용융 폭을 예측할 수 있는 모델을 제시하고 있으나

용입깊이를 예측할 수 없는 단점을 갖고 있다.

본 연구에서 레이저 빔 에너지의 분포는 가우시안이며 3차원 열전달 방정식을 해석적으로 풀어서 용접 재료에서의 온도 분포를 구하였다. 레이저는 연속과 2kW 급 레이저와 3kW급 레이저를 사용하였으며 탄소강, 스테인리스강, 니켈, 크롬강을 실험하여 이론 예측치와 비교 검토하였다.

2. 레이저 빔 특성

2.1 빔 모드

광학 공진기 내에서 전자기장은 반사경 사이에서 반복적인 반사에 의해 진폭의 분배와 위상이 증폭되며, 이는 공진기의 횡축 방향의 전자기장 모드 (Transverse Electromagnetic Mode) 를 형성한다. 빔 모드는 TEM₀₀, TEM₀₁*, 및 multi 모드가 있다. TEM₀₀ 모드는 대부분의 재료가공에서 가장 이상적인 모드이고 다음과 같은 가우시안 에너지 분포를 갖는다 (11).

$$I = I_0 \exp(-2r^2/\delta^2) \quad (1)$$

가우시안 레이저 빔의 초점 반경 δ_0 는 다음과 같다.

$$\delta_0 = \frac{\lambda f}{\pi \delta_1} \quad (2)$$

멀티 모드인 경우 레이저 빔의 초점 반경은 다음과 같다.

$$\delta_0 = \frac{\lambda f(2m + n + 1)}{\pi \delta_1} \quad (3)$$

대부분의 재료가공에서 집속렌즈 또는 반사경으로 들어오는 레이저 빔의 직경은 알 수 있으므로 집속된 초점 크기는 식 (2)와 식 (3)에 의하여 계산할 수 있다.

2.2 레이저 빔과 재료의 상호작용

2.2.1 반사율

레이저 빔이 금속 표면에 조사될 때, 재료의 광학적 특성에 따라 일부는 흡수되고 일부는 반사된다. 재료의 반사율은 레이저 빔의 파장, 가공 재료의 표면상태, 입사각과 온도에 따라 변한다.

재료의 상(고체, 액체)이 레이저 에너지의 흡수에 큰 영향을 미치며, 재료의 상은 에너지 밀도뿐 아니라 조

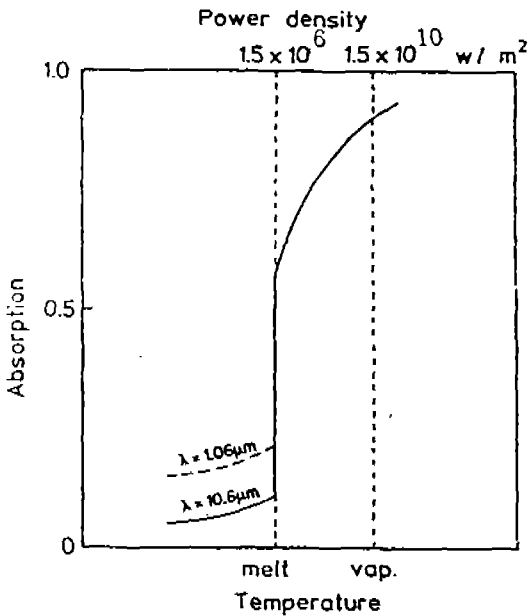


Fig.1 Simplified model of the absorption related to different wavelengths for Fe-alloys.

사시간, 재료의 물성치등에 의해서 결정된다. 일반적으로 레이저 에너지 밀도가 10^{10}W/m^2 이상이 되면 레이저 에너지 흡수는 Fig.1에서처럼 급격히 상승한다. 이때 키흔이 발생하여 에너지 흡수는 급속히 증가된다(11, 12).

레이저를 이용한 가공에서, 레이저 펄스가 조사되는 초기의 매우 짧은 시간동안 출력의 세기는 매우 높기 때문에 가공중인 재료의 표면온도는 급속하게 증가한다. 이것은 온도 증가에 의한 반사 손실의 감소를 의미한다.

2.2.2 플라즈마 생성

조사되는 빔과 재료사이에 작용하는 기본적인 문제는 빔 조사시 형성된 플라즈마의 효과이다. 레이저에 의한 플라즈마 발생과 그 다음에 일어나는 흡수에 관한 여러 가지 설명들이 여러 학자들에 의해서 제안되었다(12, 13).

플라즈마는 레이저 빔 에너지에 따라 증발되는 중성 원자, 또는 전자와 이온 등 전하를 띤 입자들로 나타나며, 그 후 입사하는 빔 에너지는 여러 과정에 의해 특히 전하를 띤 입자들 상호작용에 의해 플라즈마에 흡수된다. 플라즈마에 의한 에너지 흡수는 온도를 급속하게 상승시킨다.

플라즈마는 LSC파(Laser Supported Combustion wave)와 LSD파(Laser Supported Detonation wave) 두가지 형태가 있다(14, 17). 약 10^{11}W/m^2 을 초과하는 레이저 출력 밀도에서 형성되는 LSC파는 입사되는 레이저 빔을 따라 재료 표면으로 부터 아음속으로 전파되어 간다. 더 높은 출력 밀도에서는 발생하는 LSD파는 초음속으로 전파되며 재료가공을 거의 불가능한 상태로 만든다.

3. 이론적 해석

본 모델에서 좌표계는 재료에 고정시켰으며 레이저 빔은 z축에 대하여 평행하고 x축 방향으로 일정한 속도 v로 이동한다. 레이저 빔의 반경(δ)은 에너지 밀도가 중심값의 $1/e^2$ 일때의 반경으로 정의하며, 레이저 빔 에너지 분포는 가우시안 분포로 가정하였다.

일반적으로 레이저 빔은 $-t_1$ 에서 켜지며 t_2 에서 꺼진다. 표면으로부터의 열전달은 재료내부에서 일어나는 전도와 비교해서 무시할 수 있다고 가정하였다. 열전도율(K), 밀도(ρ), 비열(C) 등은 온도에 대하여 무관한 상수로 가정하였다(10, 18).

열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 T = - \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{G}{K} \quad (4)$$

단위 체적당 열원 함수는 재료 내에서 발생한 열에 증속된 공간과 시간의 함수로서 다음과 같다(18).

$$G = \frac{2\alpha(1-R)p}{\pi\delta^2} \cdot \exp[-2(x-vt)^2/\delta^2 - 2y^2/\delta^2 - az] \quad (5)$$

일반해는 무차원화된 변수로 표현될 수 있으며, $x = 2x/\delta$, $\xi = 2y/\delta$, $\zeta = az$, $\tau = 8xt/\delta^2$, $\nu = v\delta/4$, $\gamma = \alpha\delta/2$ 이고, θ 는 무차원화된 온도로 정의하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T(x, y, z, t) = [p(1-R)/(\sqrt{2\pi}K\delta)] \theta(x, \xi, \zeta, \tau, \nu, \gamma) \quad (6)$$

$$\theta(x, \xi, \zeta, \tau, \nu, \gamma) = (\gamma/2\sqrt{\pi}) \int_{\tau_0}^{\tau+\tau_1} \left[\exp\left(\frac{\gamma^2 \tau'}{(\tau'+1)}\right) \cdot \exp\left\{-\left[\frac{(x-\nu(\tau-\tau'))^2 + \xi^2}{(\tau'+1)}\right]\right\} \cdot \left[\exp(\zeta) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\gamma\sqrt{\tau'}}{2} + \frac{\zeta/2\gamma\sqrt{\tau'}}{\sqrt{\tau'+1}}\right) + \exp(-\zeta) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\gamma\sqrt{\tau'}}{2} - \frac{\zeta/2\gamma\sqrt{\tau'}}{\sqrt{\tau'+1}}\right)\right] \right] d\tau' \quad (7)$$

여기서 $\tau_0=0, -\tau_1 < \tau < \tau_2$
 $=\tau-\tau_2, \tau-\tau_2$

4. 실험

4.1 실험재료

본 모델의 계산 결과와 비교하기 위하여 5종류의 금속 재료를 선정하여 실험하였다. SM 10C 시편의 크기는 200×30×10mm이며 다른 4종류의 금속 재료는 100×20×6mm인 시편을 사용하였다. 기계가공한 SM 10C 시편은 반사손실을 줄이기 위해서 표면에 인산염 피막처리하였고 STS 304, STS 316, STS 420, Ni은 아세톤을 사용하여 표면의 불순물만을 제거하였다. 각 시편의 화학조성은 Table 1에 예시하였다.

Table 1. Chemical compositions of specimens. (wt %)

	SM 10C	STS 316	STS 304	STS 420
C	0.105	0.054	0.028	0.21
Mn	0.45	1.65	1.46	0.25
Si	0.25	0.49	0.54	0.40
P	0.03	0.02	0.02	0.009
S	0.035	0.012	0.004	0.007
Cr		17.1	17.5	12.2
Ni		12.5	8.6	0.6
Mo		2.23	0.27	0.9
V			0.09	0.31

4.2 레이저 빔 시스템

본 연구에 이용한 레이저는 한광(주)에서 개발한 최대

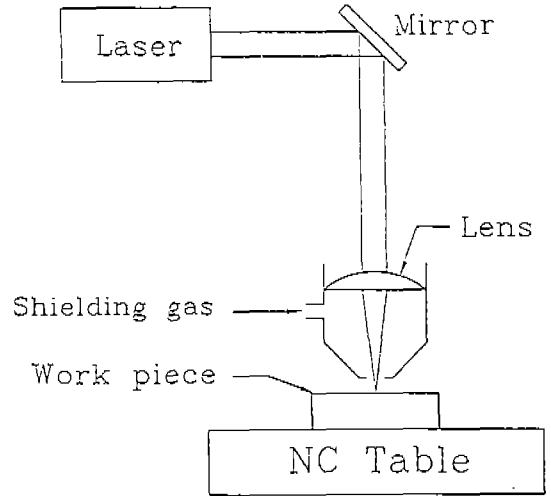


Fig.2 Illustration of laser system and optics.

출력 2kW의 CO₂ 레이저인 HBM 2001과 CBL optronics사의 3kW CO₂ 레이저를 사용하였다. 레이저 시스템은 Fig. 2과 같으며 수치제어 방식의 테이블을 포함하고 있다.

4.3 레이저 용접 실험

두 종류의 레이저를 사용하였으며, 시편에 Bead-on-plate 용접을 하였다. 2kW 레이저를 사용한 경우는 출력을 2kW로, 레이저 빔의 조사속도를 0.5 m/min부터 5.0 m/min까지 세분하여 실험하였다. 사용한 렌즈의 초점거리는 127mm이며 초점위치는 재료의 표면에서 아래로 1.0mm인 곳에 위치하였다. 보호가스는 질소를 유량이 0.5kgf/cm²이 되게 하여 용접부를 공기 중의 산소로부터 차단하였다.

3kW 레이저를 사용한 경우는 출력을 2.5kW로, 조사속도는 0.5 m/min부터 5.0 m/min까지 세분하였다. 사용한 렌즈의 초점거리는 127mm이며 초점위치는 재료 표면에서 아래로 1.0mm인 곳에 위치하였고 보호가스는 아르곤 가스를 사용하였다.

레이저 용접한 시편의 중심부를 횡단면으로 절단한 후 마운팅하였다. 마운팅된 시편의 단면을 연마 후 폴리싱하였고, SM 10C는 0.5% Nital 용액에 부식시켰고, 다른 종류의 시편은 Glyceregia 용액에 20초 동안 부식시켰다. 광학 현미경을 사용하여 용입 깊이, 비이드 폭 및 비이드 단면 형상을 측정하였다.

Table 2. Thermophysical and optical properties of specimens for calculations.

	SM 10C	STS 316	STS 304	STS 420	Ni
Thermal conductivity (W/m°C)	24	24	24	23	62
Thermal diffusivity (m ² /s)	0.55×10 ⁻⁵	0.45×10 ⁻⁵	0.45×10 ⁻⁵	0.67×10 ⁻⁵	1.40×10 ⁻⁵
Melting temperature (°C)	1530	1500	1500	1500	1453
Vaporizing temperature (°C)	2870	2870	2870	2900	2910
Reflectivity	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Absorption coefficient (cm ⁻¹)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0

5. 결과 및 고찰

재료의 반사율은 레이저 빔의 파장, 표면상태, 온도 등에 따라 변한다. 모든 금속의 반사율은 적외선 파장에서 높게 나타나며 입사된 빔은 반사율에 따라 부분적으로 반사하고 흡수된다. 실온에서 대부분의 금속은 CO₂ 레이저에서 방출되는 10.6μm 파장에 대하여 매우 높은 반사율을 갖는다.

재료의 흡수계수 α는 단위 길이당 감소된 에너지 밀

도로 나타낸다. 여러 학자들(15, 16, 17)에 의하면 입사하는 빔의 파장에 따라 자유 이온수가 증가되며 이 때문에 흡수율이 증가한다고 설명하고 있다. 낮은 온도에서 흡수계수 α는 이온화 정도에 비례하며 온도에 따라 급속도로 증가한다. 알루미늄 증발시 10,000°K에서 최대 6cm⁻¹의 값에 도달한다. 불행히도 금속 재료의 증발시 측정된 흡수계수의 실험치에 대한 연구결과는 아주 미미하다. Mazumder와 Steen(5)은 연강의 값으로 8cm⁻¹을 사용하였으며 Klemens(19)는 6cm⁻¹을 Schuücker(20)는 10cm⁻¹ 및 6cm⁻¹을 사용하였다. 본 연구에서는 계산에 사용한 금속 재료의 흡수계수로 6cm⁻¹을 사용하였다. 컴퓨터 계산에 사용한 물성치는 Tabel 2에 예시하였다.

고출력의 경우 레이저 빔 에너지 분포가 완벽한 가우시안을 얻기 어려우나 본 연구에서는 가우시안 빔으로 가정하여 이론치를 구하였다. 2kW 레이저는 멀티 모드에 가까워서 식 (3)을 이용하여 초점 반경을 구하였는데 250μm 이었고, 3kW 레이저는 가우시안 모드에 가까워서 식 (2)을 이용하여 초점 반경을 구하였는데 150μm 이었다.

식 (7)에 의해 계산된 재료 표면에서의 무차원화된 3차원 온도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 무차원화된 여러 속도에 대하여 y축 방향의 온도 분포를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 속도가 증가됨에 따라 최고온도는 감소하고 이동되는 레이저 빔 중앙의 뒤쪽에 놓였다. 속도가 0에 가까게 매우 느릴 때 최고온도는 무한대로 증가하지는 않는다. 재료 내부로 전도에 의해 전달되는 열 손실로 제한되기 때문이다. 일반적으로 t>0일 때 최고

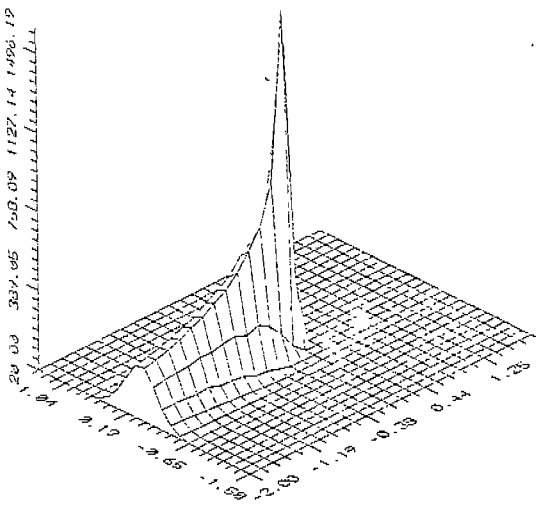


Fig. 3 Typical normalized surface temperature profile.

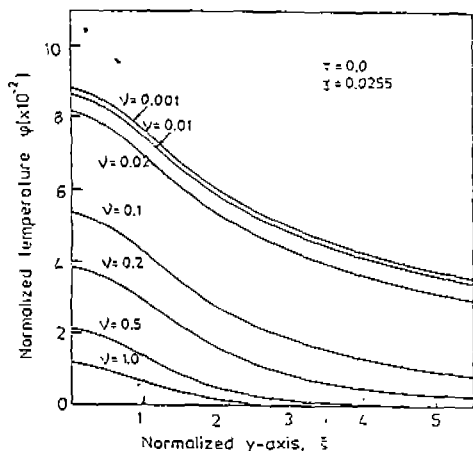
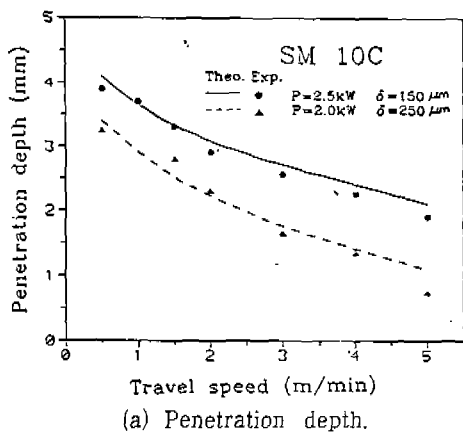


Fig. 4 Normalized temperature rise on the surface as a function of normalized y axis for different normalized velocities.

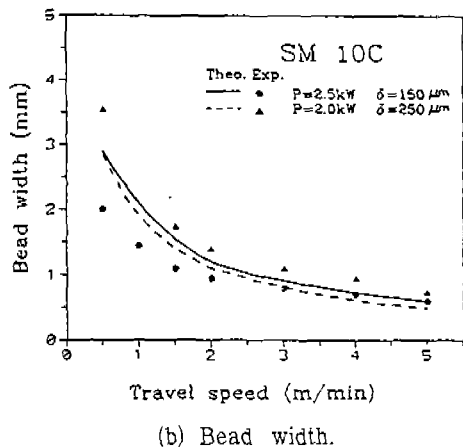
온도에 도달되는데 이것은 이미 지나간 레이저 빔으로부터 에너지가 전달되고 있기 때문이다.

Fig. 5-9까지는 용입 깊이와 비드 폭에 대한 이론치와 실험 결과를 비교한 것이다. 모든 재료에 대해 동일 용접 속도로 조사시켰을 때 레이저 출력이 증가함에 따라 용입깊이와 비드 폭은 증가함을 알 수 있고, 동일 레이저 출력에 대하여 용접 속도가 증가함에 따라 용입 깊이와 비드 폭은 감소함을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6에서 레이저 초점 크기가 클수록 용입 깊이는 작아지고 레이저 출력이 감소함에도 불구하고 비드 폭은 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8에서 처럼 니켈의 경우 용입 깊이는 이론치와 실험 결과가 거의 일치하지만 비드 폭의 실험 결과가 이론치보다 크게 얻어졌다. 이것은 니켈 표면의 녹은 형상이 다른 재료에 비해서 넓게 용융되기 때문이다.

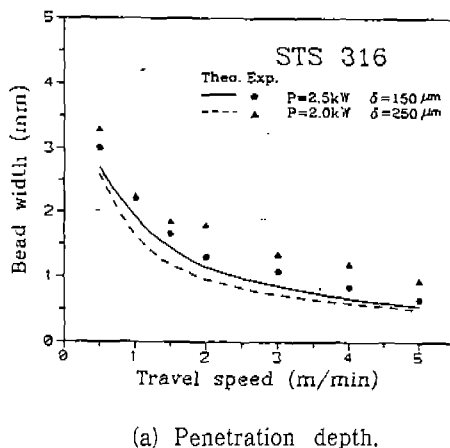


(a) Penetration depth.

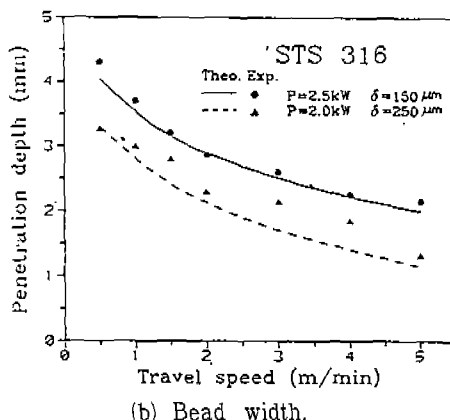


(b) Bead width.

Fig. 5 Comparison of the experimental results with the theoretical model for SM 10C.

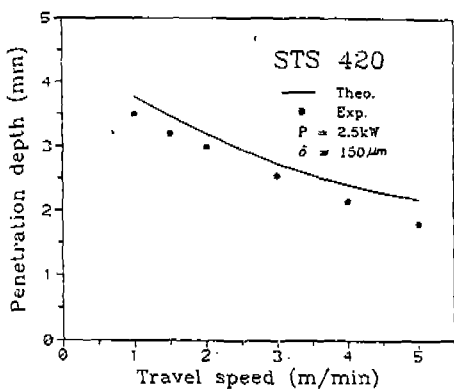


(a) Penetration depth.

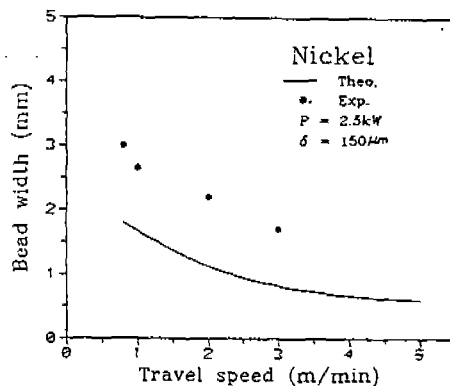


(b) Bead width.

Fig. 6 Comparison of the experimental results with the theoretical model for STS 316.

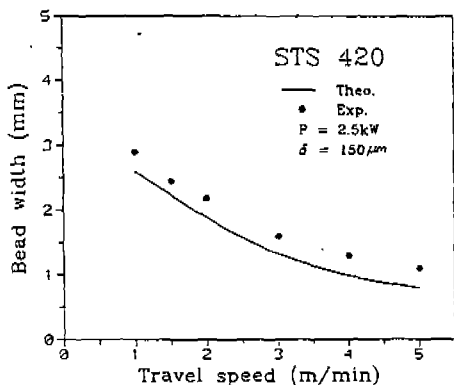


(a) Penetration depth.



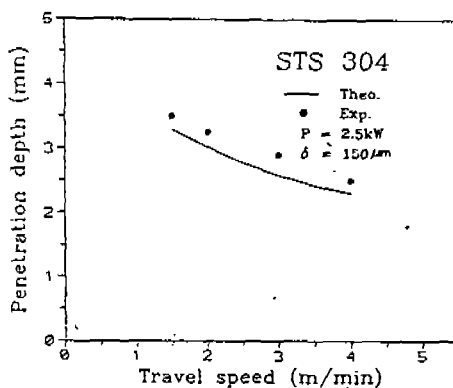
(b) Bead width.

Fig. 8 Comparison of the experimental results with the theoretical model for Nickel.

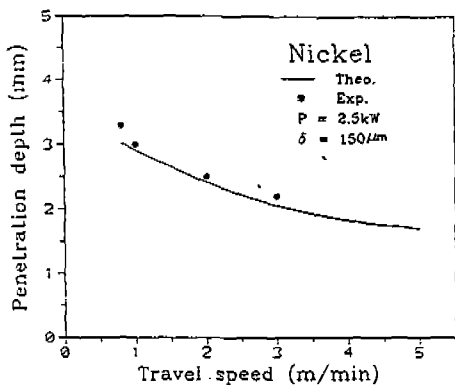


(b) Bead width.

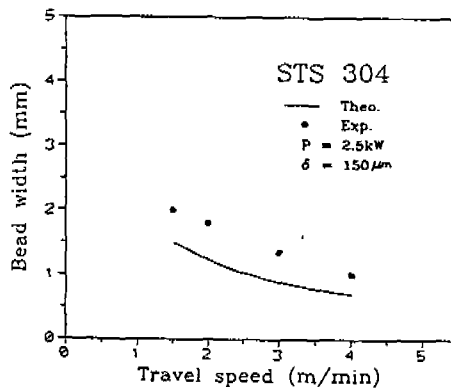
Fig. 7 Comparison of the experimental results with the theoretical model for STS 420.



(a) Penetration depth.

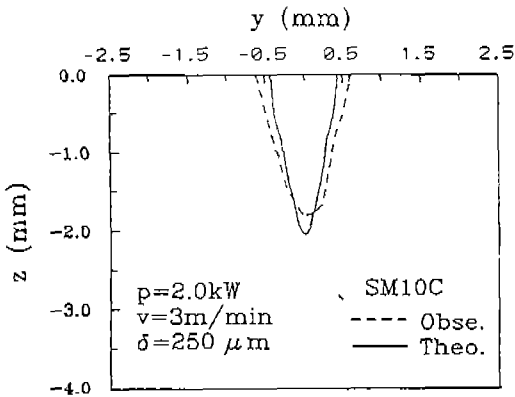


(a) Penetration depth.

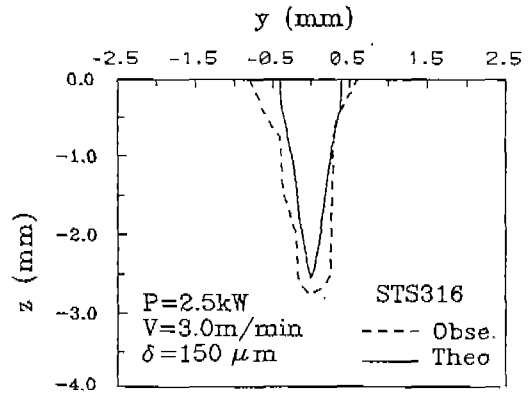


(b) Bead width.

Fig. 9 Comparison of the experimental results with the theoretical model for STS 304.

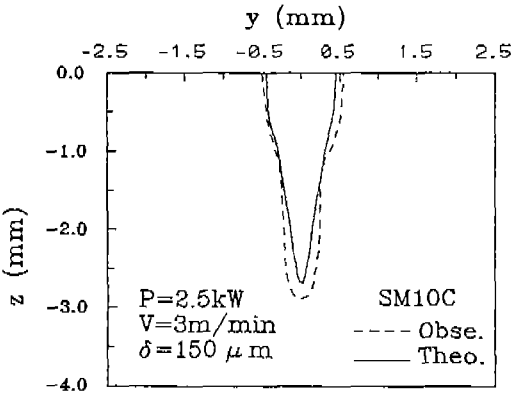


(a) P=2.0 kW,



(b) P=2.5 kW

Fig.11 Comparison between the calculated and observed fusion boundaries of laser welds for STS 316.



(b) P=2.5 kW

Fig.10 Comparison between the calculated and observed fusion boundaries of laser welds for SM 10C.

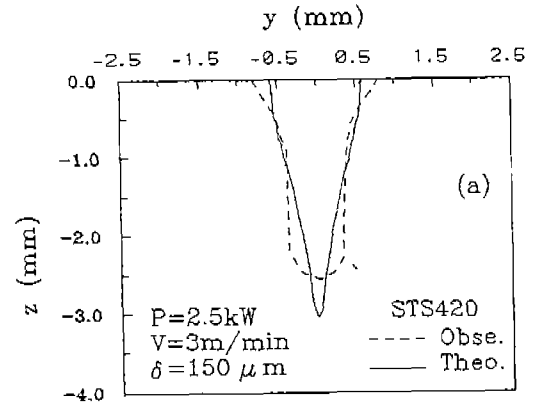
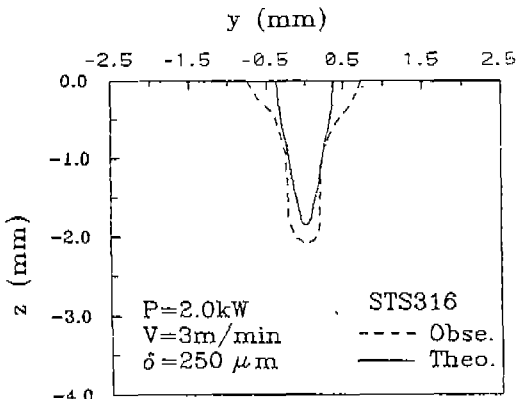


Fig.12 Comparison between the calculated and observed fusion boundaries of laser welds made with P=2.5kW in STS 420.



(a) P=2.0 kW,

용접 재료 표면 위에 생성된 고온의 플라즈마가 면적이 비교적 넓은 다른 열원으로서 재료 표면에 작용하여 더 많이 녹이는 것으로 사료된다.

Fig. 10에서 Fig. 14까지는 응용되는 단면 형상에 대한 예측 결과와 실험 결과를 보여주고 있다. 실험 결과는 bead-on-plate 용접에 의해서 구한 시편을 연마, 폴리싱하고 금속현미경으로 찍은 사진을 판독하여 구한 값을 그린 것이다. 비드 끝단의 형상에 있어서 이론에 의해서 구한 것이 실험 결과보다 더욱 날카로운 형상을 보여주고 있다. Fig. 15는 본 실험에 의해서 구한 비드 형상에 대한 대표적인 현미경 사진을 보여주고 있다.

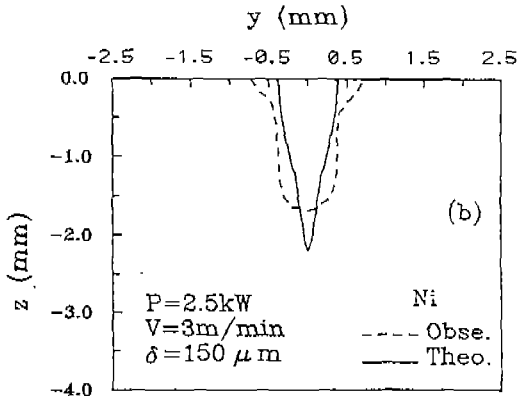
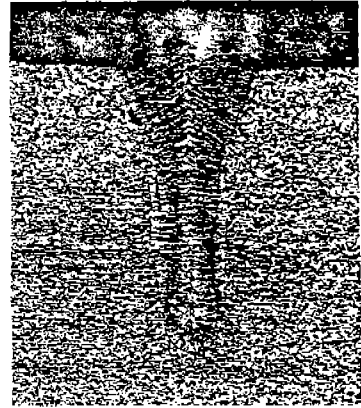


Fig. 13 Comparison between the calculated and observed fusion boundaries of laser welds made with P=2.5kW in Nickel.



(a) STS 304, P=2.5kW, V=3 m/min (×20)

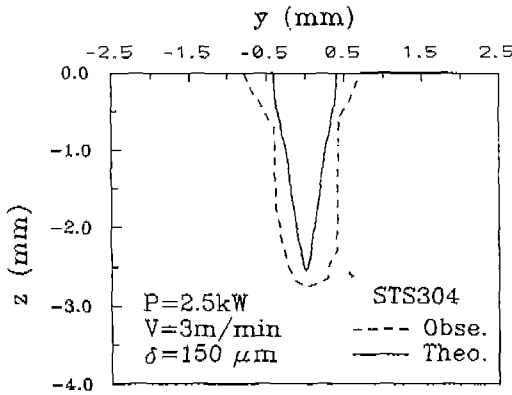


Fig. 14 Comparison between the calculated and observed fusion boundaries of laser welds made with P=2.5kW in STS 304.



(b) Nickel, P=2.5kW, V=3 m/min (×25)

Fig. 15 Macrosections bead-on-plate laser welds.

6. 결 론

열전달 모델을 해석하여 구한 예측치와 연속파 CO₂ 레이저로 실험하여 구한 연구 결과를 비교하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 모델을 사용하여 레이저 출력, 용접속도, 초점 크기, 용접 재료에 따라서 용입 깊이와 비드 형상을 예측할 수 있다.
- (2) 레이저 빔 초점 크기가 클수록 경우 용입 깊이는 감소하고 비드 폭은 약간 증가함을 알 수 있다.

- (3) 니켈의 경우에는 다른 재료에 비하여 용입부의 폭이 넓게 응용됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 *1991년도 한국과학재단 일반목적기초 연구비 지원(과제번호 KOSEF911-0909-014-2)에 의해서 이루어졌습니다. 이에 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. R. Walker, "Applying Multikilowatt CO₂ Lasers in Industry", Lasers & Applications, Vol. 4, pp.61~69, 1985
2. M. Banas, Laser Materials Processing, North-Holland, 1983
3. D. T. Swift-Hook et al., "Penetration Welding with Lasers", welding J., Vol. 52, No. 11, pp.492s~499s, 1973
4. H. E. Cline and T. R. Anthony, "Heat Treating and Melting Material with a Scanning Laser or Electron Beam", J. of Appl. Phys., Vol. 48, No. 9, pp.3896~3900, 1977
5. J. Mazumder and W. M. Steen, "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing", J. of Applied Physics, Vol. 51, No. 2, pp.941~947, 1980
6. M. Davies et al., "Modeling the Fluid Flow in Laser Beam Welding", Welding J., Vol. 64, No. 7, pp.167s~174s, 1985
7. J. E. Moody and R. H. Hendel, "Temperature Profiles Induced by a Scanning CW Laser Beam", J. of Applied Physics, Vol. 53, No. 6, pp.4364~4371, 1982
8. M. L. Burgener and R. E. Ready, "Temperature Distributions Produced in a Two-Laser Structure by a Scanning Laser or Electron Beam", J. of Applied Physics, Vol. 53, No. 6, pp.4357~4363, 1982
9. S. Kou and Y. H. Wang, "Three Dimensional Convection in Laser Melted Pools", Metal. Trans. A, Dec., pp.2265~2270, 1986
10. D. J. Sanders, "Temperature Distributions Produced by Scanning Gaussian Laser Beams", Applied Optics, 23(1), pp.30~35, 1984
11. D. Belforte and M. Levitt, The Industry Laser Annual Handbook, PennWell Publishing Company, 1986
12. T. E. Zavecz, et al, "Metal Reflectivity under High Intensity Optical Radiation", Appl. Lett., 26, pp.165~168, 1975
13. J. F. Ready, "Change of Reflectivity of Metallic Surfaces during Irradiation by CO₂ TEA Laser Pulses", IEEE J. of Quantum Electron, QE-12, pp.137~147, 1976
14. G. Herziger, "Basic elements of Laser Material Processing", Proc. SPIE, pp.66~74, 1983
15. W. E. Maher, et al., "Experimental Study of Ignition and Propagation of Laser-supported Detonation Waves", J. Appl. Phys., 45(5), pp.2138~2145, 1974
16. D. R. Keefer, et al., "Experimental Study of a Stationary Laser-sustained Air Plasma", J. of Appl. Phys., 46(3), pp.1080~1093, 1975
17. M. C. Fowler and D. C. Smith, "Ignition and Maintenance of Subsonic Atmospheric Pressure Air by CW CO₂ Laser Radiation and Their Effect on Laser Beam Propagation", J. of Appl. Phys., 46(1), pp.138~150, 1975
18. J. D. Kim and R. V. Subramanian, "Heat Flow in Laser Beam Welding", Proc. of 4th Int'l CISFFEL, Cannes, pp.175~182, 1988
19. P. G. Klemens, "Heat Balance and Flow Conductions for Electron Beam and Laser Welding", J. of Appl. Phys., 47(5), pp.2156~2173, 1976
20. D. Schuöker et al., "Material Removal Mechanism of Laser Cutting", Proc. of SPIE, pp.88~95, 1985