

研究論文

박판의 이중 빔 레이저 용접에서 열유동 해석에 관한 연구

김 재 응*

A Study on Thermal Analysis of Dual Beam Laser Welding of Thin Metal Sheet

Jae-Woong Kim*

Key Words : Dual Beam Laser Welding(이중 빔 레이저 용접), Preheating(예열), Cooling Rate(냉각속도), Laser Welded Blank(레이저 용접 블랭크), Distributed Heat Source(분포 열원), Line Heat Source(선열원)

Abstract

Analytical model for the temperature distribution and the cooling rate of weld in dual beam laser welding is presented for investigating the possibility of controlling the cooling rate. The model is based on the solutions to the problem of heat flow due to the distributed and line heat sources for preheating and welding respectively in plates with finite thickness. The effects of beam power, beam distribution parameter, interbeam distance, and welding speed on the resulting temperature distribution and cooling rate are presented.

The cooling rates of dual beam laser weld at the weld centerline under the investigated conditions are reduced to as one third of those of welds which were produced by single beam laser. And it appeared that the cooling rate of dual beam laser weld is strongly dependent on the process parameters of preheating laser beam power and welding speed.

1. 서 론

레이저 빔 용접(laser beam welding)은 고밀도 에너지를 이용하는 관계로 전자 빔 용접(electron beam welding)과 함께 두꺼운 용접물의

심입용접(deep penetration welding) 가능성에 대해 관심이 주목되었다.^{1,2)} 그러나 근래 자동차 제조업에서 레이저 용접기술을 적극 활용하게 되므로써 기존의 용접 공정들이 레이저 용접으로 대체되어 가고 있다. 이들 자동차 관련 제조업에서의 레이저 용접은 주로 박판 금속을 접합하는데 적용되

※ 1997년 1월 31일 접수

* 정회원, 영남대학교 기계공학과

고 있으며, 기존의 전기저항 점 용접을 대체하거나 각종 보강재를 단순화 또는 제거하기 위하여 프레스 작업 전단계의 이중판재들을 서로 용접(레이저 용접 블랭크, laser welded blank)하는데 활용되고 있다.³⁻⁵⁾

레이저 용접은 좁고 깊은 용융부가 형성되므로써 적은 변형과 고효율 용접이 가능하며, 좁은 열영향부의 형성으로 기계적 성질저하가 감소된다는 장점을 가지고 있다. 아울러 고속용접이 가능하며 장거리 에너지 전달이 가능한 장점도 있다. 그러나 고밀도 에너지 용접공정에서 공통적으로 내재하는 문제점으로 용접부의 냉각속도가 매우 크다는 것을 지적할 수 있다. 이것은 경우에 따라 취성조직을 형성할 수 있기 때문이다. 특히 레이저 용접 블랭크(laser welded blank)는 소성가공에 대한 성형성(formability)이 유지되어야 하며 이 성형성에 영향을 미치는 주요 인자로 용접부의 경도(hardness)를 들 수 있다.⁶⁻⁸⁾

용접부의 경도증가와 취성조직형성을 감소시키기 위해서는 냉각속도의 조절이 요구되며, 기존의 용접공정에서는 모재를 예열(preheating)시키므로써 용접부의 냉각속도를 감소시킨다. 그러나 모재 전체를 예열시키는 공정이 추가되면 생산성이 저하되고, 과도한 에너지가 소비되며, 용접부 이외의 부분까지 열영향을 받게 될 수 있다. 기존 예열공정의 문제점을 극복하고 냉각속도를 감소시키는 방법으로 이중 빔 레이저 용접(dual beam laser welding)의 개념이 도입되었다. 다른 용접공정과 달리 레이저 빔은 분할이 가능하므로, 분할된 빔을 이용하여 용접부의 형상 및 냉각속도를 변화시키는데 적용될 수 있다.^{9,10)} 냉각속도 조절을 위한 이중빔 레이저 용접은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 두 개의 레이저 빔을 용접 진행 방향으로 배치하여 용접하는 것으로 입열량의 배분에 따라 용접부의 냉각속도가 달라지게 된다. 두 개의 빔을 동일한 강도의 용접용 열원으로 적용한 경우¹⁰⁾와 선행하는 빔을 예열용 분포열원으로하고 추종하는 빔을 용접용 집중열원으로 적용한 경우¹¹⁾의 결과를 통해 냉각속도 조절의 가능성이 제시되었다. 그러나 이들의 연구결과들은 모두 반무한고체를 대상으로 해석한 것이어서 두꺼운 모재의 용접에 제한적으로 적용이 가능하다.

본 연구에서는 국부적 동시 예열에 의한 이중 빔

레이저 용접공정의 열유동 해석을 위하여 유한두께의 모재에 대한 해석적 모델을 구축하였다. 여기서 예열용 선행 레이저 빔은 모재를 녹이지 않고 예열효과를 주기 위해 가우시안 분포의 열원(Gaussian distributed heat source)으로 하고 용접용 열원은 키홀(keyhole)용접을 대변하기 위해 선열원(line heat source)으로 하여 이들을 조합함으로써 예열공정을 포함하는 용접공정의 해석적 모델을 만들었다. 두께 1mm의 연강판재에 대해 본 해석 모델을 적용하여 예열용 레이저 빔의 강도와 분포정도, 두 빔간의 거리, 용접속도 등에 따른 냉각속도의 변화를 해석하였다.

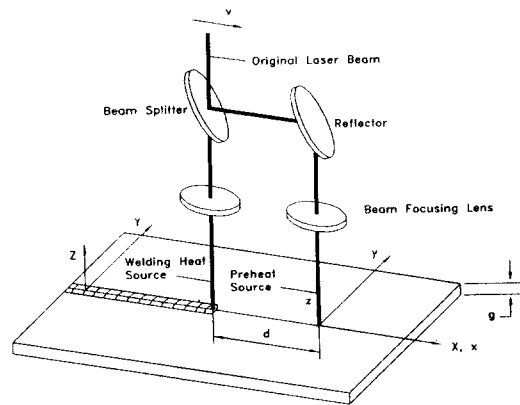


Fig. 1 Schematic of the dual-beam laser welding system

2. 이론해석

레이저 용접공정에서 용융부는 비교적 작기 때문에 용융금속의 유동에 의한 열전달효과는 아크 용접과 같은 기존의 용접공정에 비해 매우 작은 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 따라서 열전도 방정식에 의한 해석적 모델을 이용하여 레이저 용접공정을 분석한 결과들이 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.^{1, 12-14)}

본 연구에서는 선행하는 빔에 의해 용접부를 예열시키므로써 용접후 냉각속도의 변화량을 해석하는 것이 목적이다. 따라서 선행하는 빔은 분포열원을 이용하므로써 비교적 넓은 면적을 예열시키는 것이 냉각속도를 감소시키는데 적합함을 알 수

있다. 용접용 열원으로는 선열원(line heat source)을 고려할 수 있으며, 이는 박판 맞대기 용접에서 용접비드폭을 해석하는데 선열원을 적용하여 키홀 용접을 잘 대변하는 것으로 해석되었기 때문이다.¹³⁾

Fig. 1에 예열용 열원과 용접용 열원의 배치와 좌표계를 나타내었다. 여기서 (X, Y, Z) 좌표계는 고정 좌표계이며, (x, y, z) 좌표계는 모재 표면에서 예열용 빔의 중심을 원점으로 하는 이동좌표계이고, 빔은 x축방향으로 v의 균일한 속도로 이동된다. 분포열원은 점열원의 집합체로 볼 수 있으며, 임의의 시간 t'에 미소시간 dt' 동안 (X', Y')에서 발생한 점열원 q'의 열량이 이후 임의의 시간 t에 유한 두께 내의 임의 위치 (X, Y, Z)에 미치는 온도 증분량은 열의 대류손실을 무시할 때 다음과 같다.^{15,16)}

$$dT_p = \frac{q' dt'}{2\pi k g (t-t')} \exp\left\{-\frac{(X-X')^2 + (Y-Y')^2}{4\alpha(t-t')}\right\} \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\exp\{-\alpha(n\pi)^2(t-t')/g^2\} \cos \frac{n\pi}{g} Z \right] \quad (1)$$

여기서 k는 모재의 열전도도(thermal conductivity)이고 a는 열확산계수(thermal diffusivity)이며 g는 모재의 두께를 나타낸다. 분포열원인 경우 모재로 입열된 에너지 밀도는 q_p(X, Y)로 표현할 수 있고, 이때 열원 분포내의 임의의 위치 (X', Y')에 입열된 미소 열량 q_p(X', Y')dX'dY'에 의한 온도 증분량은 식(1)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dT_p = \frac{q_p(X', Y') dt' dX' dY'}{2\pi k g (t-t')} \exp\left\{-\frac{(X-X')^2 + (Y-Y')^2}{4\alpha(t-t')}\right\} \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\exp\{-\alpha(n\pi)^2(t-t')/g^2\} \cos \frac{n\pi}{g} Z \right] \quad (2)$$

예열용 레이저 빔을 가우시안 분포의 열원으로 가정하고, 그 강도가 시간에 따라 균일한 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹¹⁻¹⁵⁾

$$q_p(X', Y') = \frac{\eta_1 P_1}{2\pi a^2} \exp\left\{-\frac{X'^2 + Y'^2}{2a^2}\right\} \quad (3)$$

여기서 P₁은 예열용 레이저 빔의 출력이고 η₁은 재료의 흡수율(absorptivity), 그리고 a는 가우시안 빔에서 빔의 출력 에너지 분포 파라미터로써 이 값이 작을수록 집중된 에너지 빔을 나타낸다.

따라서 가우시안 분포열원에 의한 온도 증분량은 식(3)을 식(2)에 대입하고 적분을 취하므로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dT_p = \frac{\eta_1 P_1 dt'}{\pi \rho c g} \cdot \frac{1}{a^2 + 2\alpha(t-t')} \exp\left\{-\frac{X^2 + Y^2}{2a^2 + 4\alpha(t-t')}\right\} \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\exp\{-\alpha(n\pi)^2(t-t')/g^2\} \cos \frac{n\pi}{g} Z \right] \quad (4)$$

여기서 ρ와 c는 각각 모재의 밀도와 비열을 나타낸다.

결국 이동좌표계와 열원중심의 좌표(X₀, Y₀) 값을 이용하여 임의의 위치에서 예열용 빔에 의한 온도를 계산하면 모재의 초기온도를 T₀라 할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_p(x, y, z, t) = T_0 + \int_0^t \frac{\eta_1 P_1}{\pi \rho c g} \cdot \frac{1}{a^2 + 2\alpha(t-t')} \exp\left\{-\frac{\{x + X_a(t) - X_a(t')\}^2 + \{y + Y_a(t) - Y_a(t')\}^2}{2a^2 + 4\alpha(t-t')}\right\} \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\exp\{-\alpha(n\pi)^2(t-t')/g^2\} \cos \frac{n\pi}{g} z \right] dt' \quad (5)$$

빔 중심의 위치는 x축을 따라 v의 속도로 이동되고 있으므로 식(5)는 다음과 같이 빔 이동속도로 표현할 수 있다.

$$T_p(x, y, z, t) = T_0 + \int_0^t \frac{\eta_1 P_1}{\pi \rho c g} \cdot \frac{1}{a^2 + 2\alpha(t-t')} \exp\left[-\frac{\{x + v(t-t')\}^2 + y^2}{2a^2 + 4\alpha(t-t')}\right] \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\exp\{-\alpha(n\pi)^2(t-t')/g^2\} \cos \frac{n\pi}{g} z \right] dt' \quad (6)$$

용접용 열원으로 모델링한 선열원에 의해 임의의 시간 t' 에 미소시간 dt' 동안 발생한 임의의 위치에서의 온도 증분량은 다음과 같다.¹⁶⁾

$$dT = \frac{\eta_2 P_2 dt'}{4\pi k g(t-t')} \exp\left[-\frac{\{x-d+v(t-t')\}^2 + y^2}{4\alpha(t-t')}\right] \quad (7)$$

여기서 P_2 는 용접용 레이저 빔의 출력이고 η_2 는 키홀 용접에서 모재의 레이저 빔 흡수율이며, d 는 예열용 빔과 용접용 빔간의 거리를 나타낸다.

따라서 예열을 포함하는 이중 빔 레이저 용접공정에서 임의의 위치에서의 온도값은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$T(x, y, z, t) = T_p(x, y, z, t) + \int_0^t \frac{\eta_2 P_2}{4\pi k g(t-t')} \exp\left[-\frac{\{x-d+v(t-t')\}^2 + y^2}{4\alpha(t-t')}\right] dt' \quad (8)$$

식 (8)에 의한 온도값 계산은 수치적분을 통해 구하였다. 해당 조건에서 이동좌표계에 대한 정상상태 (steady-state)의 온도 값을 각 위치에 대해 구하였으며, 정상상태의 온도분포로부터 냉각속도 (CR)를 다음과 같이 구하였다.

$$CR = -\frac{dT}{dt} = -\frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{dt} = v \frac{\partial T}{\partial x} \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 이용하여 이중 빔 레이저 용접공정에서의 열유동을 해석하기 위해서는 모재의 물성치들이 요구된다. 모재의 물성치들은 일반적으로 온도에 따라 변화하는 값을 가지고 있다. 이에

대해 용접공정의 해석적 모델에서는 상온에서 용융점까지의 평균물성치를 적용하므로써 해석결과를 근사화시키는 것을 볼 수 있다.¹⁶⁾ 본 연구에서도 연강을 대상으로 하여 온도 의존성 물성치들은 상온에서 용융점까지의 평균물성치를 계산에 적용하였다. (Table 1) CO₂ 레이저 빔을 열원으로 가정하였으며, 재료의 레이저 흡수율은 레이저 용접 공정해석의 중요한 변수로서 재료의 온도 및 표면상태, 레이저 파장, 용접속도 등에 따라 크게 변화될 수 있다. 본 연구에서는 예열용 열원에 의한 모재의 예열 최고온도가 용융점 이하가 되도록 공정 변수값을 설정하였다. 따라서 레이저 표면경화처리 공정과 유사하게 볼 수 있으며 이 때 연삭된 표면의 강재에서 CO₂ 레이저의 흡수율은 15-16%로 측정된 것을 이용하여^{17,18)} 예열용 레이저 빔의 흡수율(η_1)은 15%로 계산에 적용하였다. 그러나 키홀 용접에서 용융부의 레이저 흡수율은 훨씬 큰 값을 나타내므로, 연강 1mm두께 모재의 2kW 레이저 출력에 의한 키홀 용접에서 측정된 CO₂ 레이저 흡수율을 본 연구의 용접용 레이저 빔 흡수율(η_2)로 적용하였다. 측정된 흡수율은 용접속도에 따라 크게 변화되었으며 용접속도 10mm/sec에서 60mm/sec까지에 대한 흡수율은 17%에서 35%로 거의 선형 비례적인 값으로 측정되었다.¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 진술한 선행연구와 동일한 두께(1mm)의 모재에 대해 동일한 레이저 출력(2kW)을 적용하였고, 흡수율은 위의 값을 직선 보간하여 적용하였다.

Table 1. Physical properties of mild steel¹¹⁾ and process parameters used in computation

Thermal Conductivity (k)	24 W/m °K
Thermal Diffusivity (α)	$5.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
Initial Temperature (T_0)	20°C
Melting Temperature (T_m)	1500°C
Preheating Power (P_1)	Variable
Welding Power (P_2)	2kW
Laser Absorptivity for Preheating (η_1)	15%
Laser Absorptivity for Keyhole Welding (η_2)	Variable
Gaussian Distribution Parameter (a)	1, 2, 3mm
Welding Speed	40mm/s - 80mm/s
Inter-Beam Distance	Variable (0.5, 10, 15mm)

3. 계산결과 및 고찰

Fig. 2는 용접속도에 따라 변화하는 레이저 흡수율을 적용했을 때 계산한 용융비드폭과 측정된 값¹³⁾의 비교를 나타낸다. 안정된 용융폭을 나타내는 용접속도의 범위내 (20mm/sec - 80mm/sec)에서 계산결과들은 실험치와 잘 일치하는 것을 볼 수 있어, 해석적 모델이 용접부의 온도분포를 예측하는데 잘 적용될 수 있음을 보여준다. 이중 빔 레이저 용접공정의 모델을 이용하여 계산한 모재 표면의 온도분포 예를 Fig. 3에 나타내었다. 예열용 빔에 의한 예열 최고온도는 1012℃로 재료의 용융온도보다 작은 값을 보이고 있다. 본 연구에서는 모든 조건에서 예열에 의해 모재가 용융되지 않는 조건을 적용하였는데 이는 예열에 의해 용융부의 크기가 크게 변화되지 않도록 하기 위해서이다.

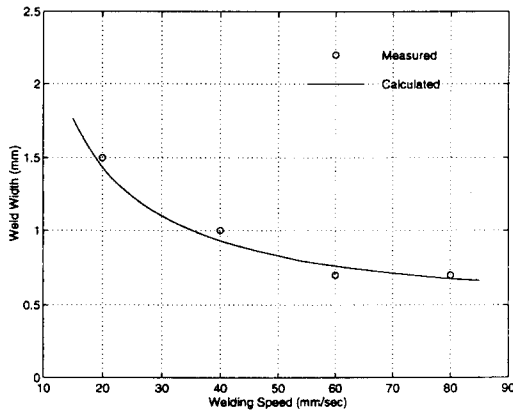
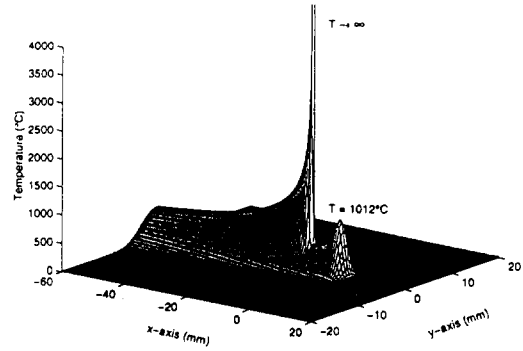
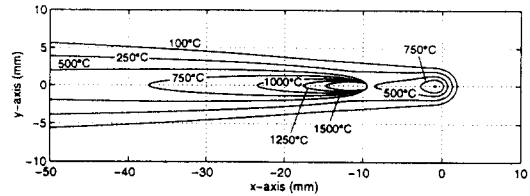


Fig. 2 Comparison of calculated weld width with measured values by R. Ducharme et al.¹³⁾

Fig. 4(a), 4(b) 그리고 4(c)는 예열용 빔의 출력이 각각 1800W, 1400W, 그리고 1000W일 때의 y=0 평면에서의 온도 분포이고, Fig. 5는 각각 모재 표면과 이면에서의 온도분포를 나타내고 있다. 이들 온도분포를 통하여 출력이 낮을 수록 적은 온도구배 값을 나타내며, 모재 표면과 이면의 온도차이가 작은 것을 볼 수 있다. 주어진 출력범위에서는 열원에서 약 10mm떨어진 위치에서부터 전 두께에 걸쳐 모재 표면과 이면의 온도가 거의 같아지는 것



(a) Temperature distribution



(b) Isothermal lines

Fig. 3 Temperature distribution of dual laser beam weld at the workpiece surface ($P_1=1800W$, $P_2=2000W$, $d=10mm$, $a=1mm$, and welding velocity (v)=60mm/sec)

을 볼 수 있다. 따라서 모재 전 두께에 걸쳐 균일한 냉각효과를 기대하기 위해서는 약 10mm이상의 빔간 거리가 요구됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 용접용 레이저 빔의 출력을 2000W로 하고 용접속도가 60mm/sec일 때 각종 예열 조건에 대한 모재 표면 용접중심선에서의 냉각속도를 나타낸다. 모재의 온도가 500℃에서 800℃일 때 각각의 냉각속도를 나타내었는데, 이는 강재의 고상변태가 이 온도 구역에서 주로 발생하기 때문이다. 그림에서 예열용 레이저 빔의 출력이 증가할 수록 냉각속도는 작아지는 것을 볼 수 있다. 예열용 레이저 빔의 출력이 클 수록 모재의 용접전 온도는 높아지므로 모재의 온도가 500℃-800℃인 구간이 열원에서 더욱 멀어진 위치가 되므로 냉각 속도는 감소한다. 모재의 온도가 800℃일 때 예열을 하지 않은 경우의 냉각속도는 2407℃/sec 인데 1800W의 예열용 빔을 적용한 경우 같은 모재 온도에서의 냉각속도는 830℃/sec를 나타내고 있다. 냉각속도의 크기는 모재의 온도가 높은 곳에서 큰 값으로 나타

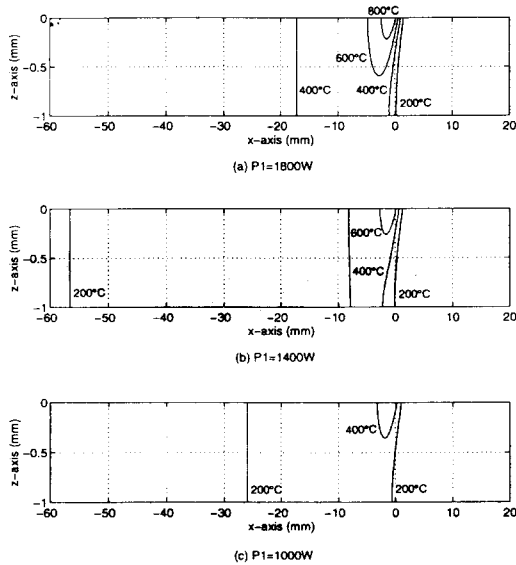


Fig. 4 Isothermal lines due to various preheating laser beam powers in the plane $y=0$ ($a=1\text{mm}$ and $v=60\text{ mm/s}$)

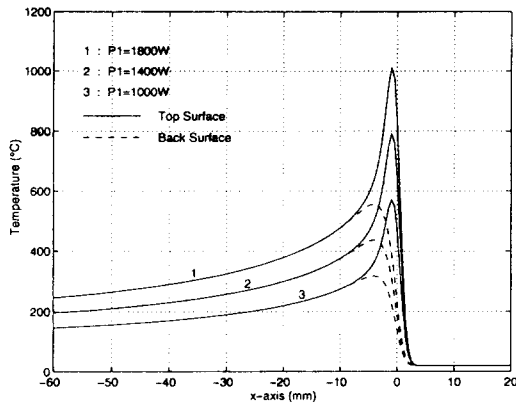


Fig. 5 Preheating temperature distributions at the weld center line on the top and back surfaces due to various preheating powers ($a=1\text{mm}$ and $v=60\text{mm/s}$)

나는데 이는 높은 온도쪽이 용접용 열원에 가까워 온도 구배가 더욱 크기 때문이다. 따라서 이중 빔 레이저 빔에 의해 예열한 용접물의 냉각속도와 예열을 하지않은 경우의 냉각속도간의 차이값은 모재 온도가 높을 수록 크게 나타난다. 모재온도가 500°C일 때 예열을 하지 않은 경우의 냉각속도는

578°C/sec이고 1800W열원으로 예열한 경우의 냉각속도는 187°C/sec로 나타나 전체적으로 냉각속도가 약 1/3값으로 줄어든 것을 볼 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 예열용 빔의 출력과 빔의 에너지 밀도 분포 파라미터에 따른 예열온도분포와 그에 따른 냉각속도를 나타낸다. Fig. 7에서 두 가지 경우의 예열 최고 온도는 유사하나 온도분포가 다른 것에 의해 냉각속도의 차이가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 기존의 예열공정에서 모재 전체를 예열하는 경우 일반적인 용접 예열온도는 250°C로 알려져 있다.¹⁹⁾ 모재 전체를 250°C로 예열했을 때 레이저 용접에 의한 냉각속도를 Fig. 8에 나타내었다. 이중 빔 레이저 용접에서 예열빔의 출력을 2300W, 빔의 분포 파라미터를 2mm로 하였을 때와 비교하면 모재 전체를 250°C로 예열했을 때 고온 영역에서 냉각속도가 더 큰 것은 볼 수 있는데 이것은 해당 부위가 용접용 열원에 더욱 근접해 있기 때문이다. 그러나 두 경우에 있어서 유사한 평균냉각속도를 보이고 있다. 따라서 적절한 예열 입력과 빔의 유효반경을 선택함으로써 기존의 예열공정에 준하는 냉각속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 예열용 레이저 빔의 분포 파라미터 (a)에 따른 예열온도분포와 용접후의 냉각속도이다. 분포 파라미터 값이 작을 수록 예열 최고온도는 증가하며 이에 따른 냉각속도는 감소

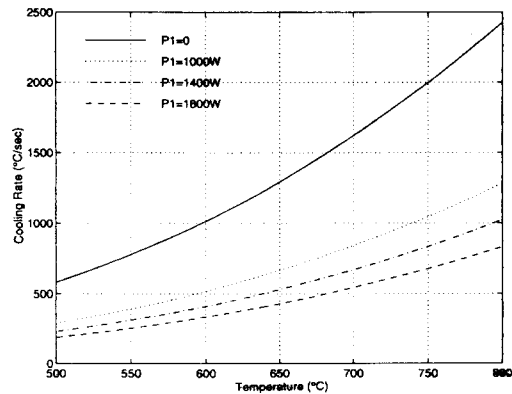


Fig. 6 Cooling rates of dual beam laser weld at the weld center line on the top surface due to various preheating powers ($a=1\text{mm}$, $P_2=2000\text{W}$ and $v=60\text{mm/s}$)

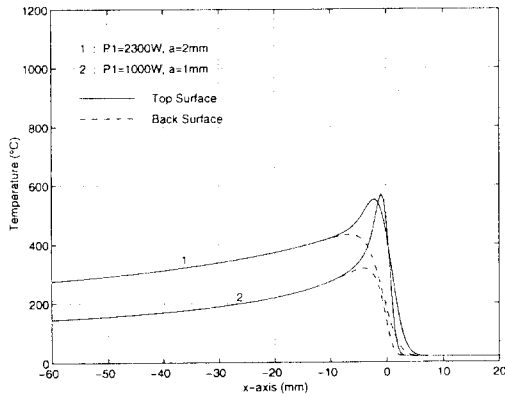


Fig. 7 Preheating temperature distributions at the weld center line due to various preheating powers and its distribution parameters

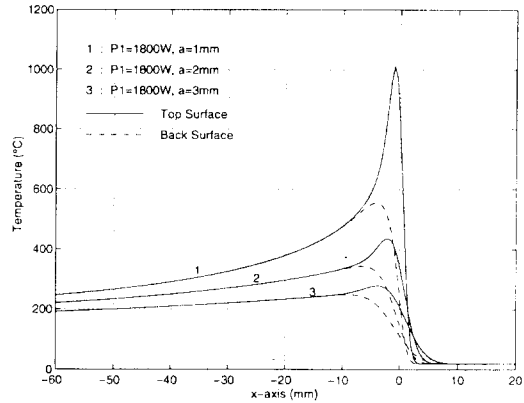


Fig. 9 Preheating temperature distributions at the weld center line due to various distribution parameters of preheating laser beam ($v=60\text{mm/s}$)

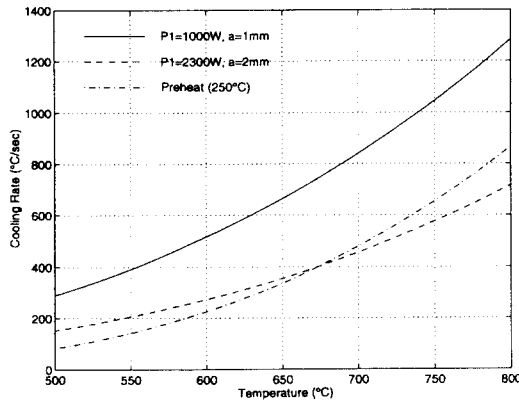


Fig. 8 Cooling rates of dual beam laser weld at the weld center line on the top surface due to various preheating powers and distribution parameters ($P_2=2000\text{W}$, $v=60\text{mm/s}$)

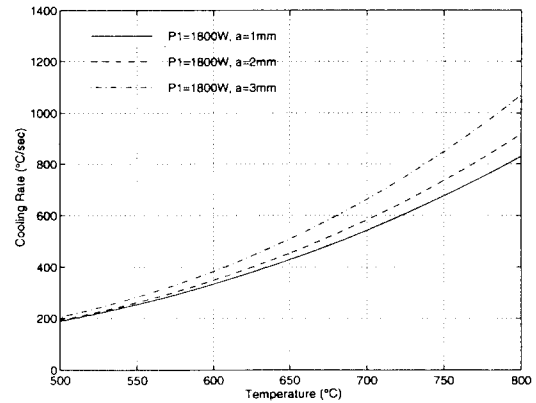


Fig. 10 Cooling rates of dual beam laser weld at the weld center line on the top surface due to various distribution parameters of preheating laser beam ($P_2=2000\text{W}$, $v=60\text{mm/s}$)

하여 800°C에서 최대 약 22%의 냉각속도 감소효과를 볼 수 있다. 그러나 저온 구역인 500°C 영역에서의 냉각속도는 거의 차이가 없음을 보여주고 있는데, 이는 레이저 빔으로부터 멀어질수록 예열온도가 서로 비슷하고 온도구배가 완만하기 때문이다.

Fig. 11은 예열용 레이저 빔과 용접용 빔 간의 거리(d)에 따른 모재표면에서의 온도분포이다. 여기서 빔간 거리가 5mm와 10mm일 때 예열부위의 온도분포는 실선으로 표시된 것과 중첩되었다.

Fig. 12는 빔간 거리의 변화에 따른 냉각속도를 나타낸 것으로 빔간 거리가 작을 수록 냉각속도가 작아지는 것을 볼 수 있으나 그 차이는 비교적 적은 것으로 나타났다. 이는 용접용 빔에 의한 온도구배가 냉각속도를 결정하는 지배적인 요인이며, 높은 예열온도일 수록 모재의 온도가 500~800°C인 위치는 용접용 빔으로부터 후방으로 더욱 이동되어 온도구배가 작아지기 때문이다. 그러나 비록 이중 빔의 위치가 중첩된 경우라도 모재의 온도가

800℃ 인 위치는 $x = -26.7\text{mm}$ 가 되고, 예열용 레이저 빔의 중심으로부터 후방 20mm이후는 예열온도의 구배가 매우 작으므로 (Fig. 9) 예열효과와 차이도 작게 나타난다. 여기서 빔간 거리가 작을 수록 용융부의 크기가 커짐을 볼 수 있으므로 과대한 용융지 (weld pool)에 의해 용락 (burn through)이 발생하는 것을 방지하거나 원하는 용접비드의 크기에 따라 빔간 거리가 결정되어야 함을 알 수 있다.

Fig. 13은 예열용 레이저 빔의 출력 (P_1)이

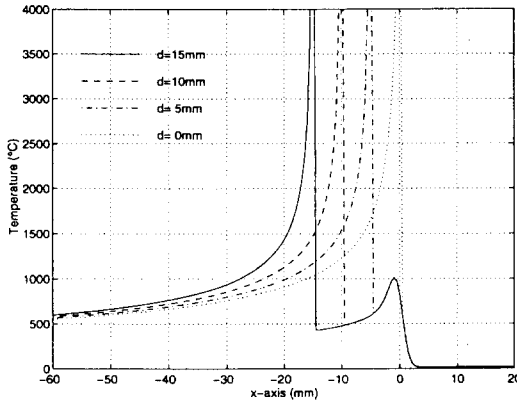


Fig. 11 Temperature distributions at the weld center line on the top surface due to various interbeam distances ($P_1=1800\text{W}$, $P_2=2000\text{W}$ and $v=60\text{mm/s}$)

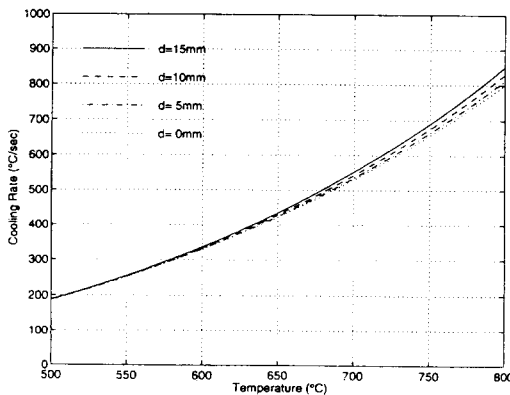


Fig. 12 Cooling rates of dual beam laser weld at the weld center line on the top surface due to various interbeam distances ($P_1=1800\text{W}$, $P_2=2000\text{W}$, $v=60\text{mm/s}$)

1800W, 빔의 분포 파라미터 (a)가 1mm, 용접용 레이저 빔의 출력 (P_2)이 2000W, 그리고 빔간 거리 (d)를 10mm로 고정하고 용접속도를 변화시켰을 때의 단일 빔 레이저 용접과 이중 빔 레이저 용접의 냉각속도를 나타낸 것이다. 이중 빔 레이저 용접에 의해 모재의 온도가 650℃인 위치에서 냉각속도는 용접속도 80, 60, 40mm/s에서 각각 38, 32, 29%의 값으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 용접속도가 느릴 수록 예열온도가 더 높아지므로 냉각속도는 더욱 감소하기 때문이다. 이중 빔 레이저 용접에서 용접물의 냉각속도는 예열용 레이저 빔의 출력과 용접속도에 의해 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

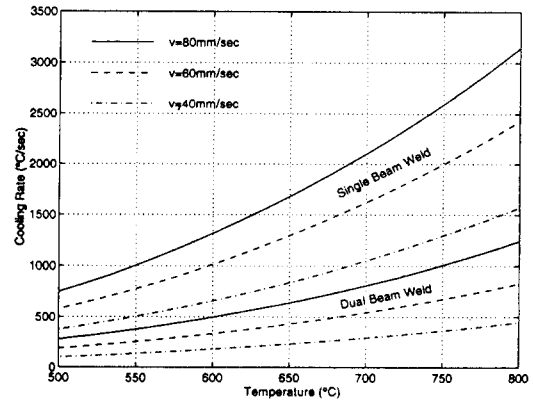


Fig. 13 Comparison of cooling rates for dual beam laser welds and single beam laser welds in various welding speeds ($P_1=1800\text{W}$, $a=1\text{mm}$, $P_2=2000\text{W}$ and $d=10\text{mm}$)

4. 결 론

유한 두께의 모재에 대한 열전도 해석해를 이용하여 1mm두께 박판 강재의 이중 빔 레이저 용접에 의한 열유동을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 용융금속의 유동은 고려하지 않고 용접용 레이저 빔을 선열원으로 가정하여 용융비드의 폭을 계산한 결과가 실험치와 비교적 잘 일치되는 것으로 나타났다.

(2) 동일한 용접용 레이저 빔의 출력에 대해 예열용 레이저 빔의 출력이 클수록, 빔의 유효반경이 작을수록, 빔간 거리가 작을수록 용접물의 냉각속도가 감소되었다. 그러나 빔의 유효반경과 빔간 거리가 냉각속도에 미치는 영향은 비교적 작은 것으로 나타났다.

(3) 정해진 이중 빔 출력에 대해 다양한 용접속도를 적용했을 때 용접속도가 작을수록 큰 냉각속도 감소율을 나타내었다.

(4) 적절한 예열용 빔의 출력과 유효반경 선정에 의해 모재 전체를 예열한 경우와 유사한 냉각속도를 얻을 수 있었다. 이중 빔 레이저 용접에 의해 용접물의 냉각속도를 광범위에 걸쳐 조절할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 연구은 한국과학재단의 해외 Post-Doc. 연수 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D. T. Swift-Hook and A. E. F. Gick : Penetration Welding with Lasers, *Welding Journal*, Vol. 52, No. 11, (1973), pp. 492s-499s
2. W. M. Steen : *Laser Material Processing*, Springer-Verlag, London, (1991), pp. 108-116
3. F. A. DiPietro : Lasers Applied to Body-In-White, *Proceedings of International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, 24-28 Oct. (1993), Orlando USA. (ICALEO '93), pp. 471-476
4. O. Diehm : Worldwide Applications of Laser Welded Blanks, *Automotive Laser Applications Workshop*, 5-6 March (1996), Novi, Michigan, USA.
5. F. DiPietro, D. Roessler and N. Uddin :

The Laser Body Shop of the 21st Century, *Automotive Laser Applications Workshop*, 5-6 March (1996), Novi, Michigan, USA.

6. F. Natsumi, K. Ikemoto, H. Sugiura, T. Yanagisawa and K. Azuma : Laser Welding Technology for Joining Different Sheet Metals for One-Piece Stamping, *JSAE Review*, Vol. 12, No. 3, (1991), pp. 58-63
7. M. F. Shi, K. M. Pickett and K. K. Bhatt : Formability Issues in The Application of Tailor Welded Blank Sheets, *SAE Technical Paper*, No. 930278, (1993)
8. M. Yoshida, Y. Yamasaki, S. Kabasawa and M. Ono : Formability of Laser - Welded Steel Sheets, *NKK Technical Review*, No. 72, (1995)
9. E. Kannatey-Asibu, Jr. : Thermal Aspects of the Split-Beam Laser Welding Concept, *Trans. of the ASME; J. of Engineering Materials and Technology*, Vol. 113, April (1991), pp. 215-221
10. C. M. Banas : Twin-Spot Lasers Weld Stainless Tubing, *MAN*, Feb. (1992), pp. 14-16
11. Y.-N. Liu and E. Kanaatey-Asibu, Jr. : Laser Beam Welding With Simultaneous Gaussian Laser Preheating, *Trans. of the ASME; J. of Heat Transfer*, Vol. 115, Feb (1993), pp. 34-41
12. R. Ducharme, P. Kapadia, M. H. Glowacki, J. M. Dowden, K. Williams and W. M. Steen : The Welding of Thin Sheets of Various Metals with a Continuous CO₂ Laser and a Variety of Shielding Gases Investigated by Means of an Integrated Mathematical Model, *Proceedings of ICALEO '93*, Orlando, USA, (1993), pp. 233-241
13. R. Ducharme, K. Williams, P. Kapadia, J. Dowden, B. Steen and M. Glowacki : The Laser Welding of Thin Metal Sheets - an Integrated Keyhole and Weld Pool Model with Supporting Experiments, *J. of Physics; D: Appl. Phys.*, Vol. 27, (1994), pp. 1619-1627
14. R. Akhter, M. Davis, J. Dowden, P. Ka-

- padia, M. Ley and W. M. Steen : A Method for Calculating the Fused Zone Profile of Laser Keyhole Welds, J. of Physics; D:Appl. Phys. , Vol.21, (1989), pp.23-28
15. K. S. Boo and H. S. Cho : Transient Temperature Distribution in Arc Welding of Finite Thickness Plates, PIME; part B: J. of Engineering Manufacture, Vol.204, No. B3, (1990), pp.175-183
 16. H. S. Carslaw and J. C. Jaeger : Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, (1959)
 17. Y. Arata, K. Inoue, H. Maruo and I. Miyamoto : Application of Laser for Material Processing-Heat Flow in Laser Hardening, IIW DOC. IV-241-78, (1978)
 18. S. J. Na, S. D. Kim, K. E. Lee and T. K. Kim : Optimal Beam Spot Diameter for the Laser Surface Hardening of a Medium Carbon Steel, Proceedings of ICALEO '86, Arlington, VA. (1986), pp.113-119
 19. S. Kou : Transformation-Hardening Materials - Carbon and Alloy Steels, Welding Metallurgy, Wiley, New York, (1987), pp.334-347.