

레이저 심 용입 용접에서 열유동 해석

A Heat Flow Analysis in the Laser Welding for Deep Penetration

영남대학교 대학원 기계공학부 이규태
 영남대학교 공과대학 기계공학부 김재웅

I. 서론

레이저 빔 용접은 고 밀도 에너지를 이용하는 관계로 전자 빔 용접 (electron beam welding)과 함께 두꺼운 용접물의 심 용입 용접 (deep penetration welding)가능성에 대해 관심이 주목되었다.¹⁾

레이저 용접시 용융 금속 바로 위에는 고온의 금속 증기와 함께 전자와 이온들이 공존하는 플라즈마가 형성된다. 이 플라즈마는 입사되는 레이저 에너지를 자체에서 흡수하거나 산란시켜 용접효율을 저하시키며 플라즈마 재복사열에 의하여 용융부 상부의 비드폭을 넓히는 결과를 가져온다. 따라서, 지금까지 선 열원의 조건에서 해석한 결과만으로는 실제의 용접부 표면부근에서 형성되는 접시머리(nail-head)형상을 반영하지 못하고 있다.

따라서, 레이저 빔 용접에서 용접부의 강도를 일차적으로 대변하는 용융부의 크기나 용접부의 미세조직의 형성에 영향을 미치는 냉각과정을 정확히 예측하기 위해서는 용접부의 정밀한 열유동 해석이 선행되어야 할 필요성이 있으며, 현재 많은 연구자들이 이 분야에 관한 연구를 진행하고 있다.²⁻³⁾

본 연구에서는 용융부의 정확한 형상을 예측하기 위하여 선행되어야 할 빔 에너지 전달과정을 이해하고, 이를 수치해석적인 방법을 통하여 적용시켜 용융부의 크기를 정확히 예측하는데 그 목적이 있다.

열유동의 수치해석 계산을 위하여 상용 프로그램인 ABAQUS 와 SCI O₂ 운용시스템을 사용하였다.

II. 실험방법

1. 열원모델 (Heat Source Model)

레이저 용접시 용융 금속 바로 위에는 고온의 금속 증기와 함께 전자와 이온들이 공존하는 플라즈마가 형성된다. 이 플라즈마는 입사되는 레이저 에너지를 흡수하거나 산란시켜 용접효율을 저하시키며, 플라즈

마 재복사열에 의하여 용융부 상부의 비드폭을 넓히는 결과를 가져온다.

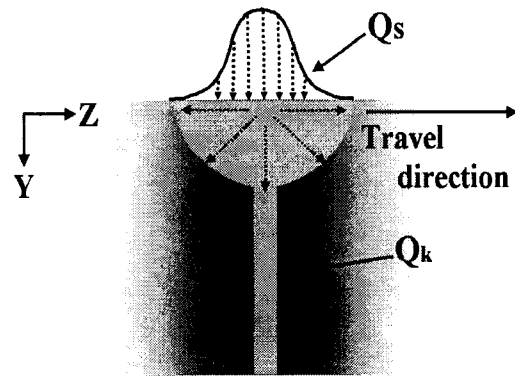


Fig. 1 Schematic diagram for analysis

레이저 빔이 용접물에 조사되면서 일정한 속도로 이동할 때, Fig.1과 같이 열원의 입력은 정규분포 (Gaussian distribution)의 열 입력(Q_s)과 키킬 부분을 고려한 열 입력(Q_k)을 조합하여 다음과 같이 표현할 수 있다.⁴⁾ 즉,

$$\eta Q = Q_s + Q_k \quad (1)$$

여기서, Q 는 레이저 출력이며, η 는 모재의 레이저 흡수율을 나타낸다.

따라서, 먼저, 모재의 윗 표면에서 열 유속 밀도 (q_s)의 분포는 식(2)와 같이 표현된다.

$$q_s = \frac{3Q_s}{\pi(r_b)^2} \exp\left[-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] \quad (2)$$

여기서, r = 열원 중앙으로부터의 거리(mm)

r_b = 전 열유속의 95%가 들어가는 반경(mm)

키킬부분을 고려한 온도항은 키킬 반경을 빔반경과

같은 값으로 가정하여 키흐벽의 표면적에 입사되는 열유속(heat flux)양과의 계산에서 얻어지고 계산식⁵⁾은 식(3)과 같다.

$$Q_k = \rho \nu (2\pi r_k L) \times C \times \Delta T \quad (3)$$

여기서, ρ 와 C 는 각각 밀도와 비열이며, ν 는 키흐의 이동속도(m/s), r_k 는 키흐의 반경(mm), 그리고 L 은 모재의 두께(mm)이다.

2. 계산과정

2.1 요소형성 및 경계조건

해석을 위하여 사용된 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 비교될 실험자료의 조건에 따라 진행방향(z)의 길이와 두께를 고려하였고, 해석영역의 크기는 $X=5\text{mm}$, $Z=10\text{mm}$, $Y=10\text{mm}$ 를 적용하였다.

요소분할(mesh generation)은 온도구배가 심한 용접부의 주변에는 보다 미세하게 하였고 일반적으로 3차원 열 유동 해석 시에 사용되는 8node solid element를 이용하여 구성하였다. 절점 개수는 6171개이고 요소개수는 5000개이다.

온도분포 해석에 필요한 경계조건으로 초기에 주어지는 모든 절점의 온도를 대기온도와 동일하게 20°C로 하였다. 열 손실은 주로 모재로의 열전도와 모재표면에서의 대류에 의해 이루어지고, 복사에 의한 손실의 정도는 미소하여 경계조건으로 대류만을 고려하였다.

측 대칭면(right)에서는 단열조건을, 기타 대기와 접하고 있는 부분에는 자연대류조건을 적용하였다. 대류경계조건의 기본식은 식(4)과 같다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad (4)$$

2.2 용접조건 및 물성치 (Properties)

유한요소해석에 있어서 해석결과의 신뢰성을 입증하기 위하여 Postacioglu et al⁶⁾과 Metzbower⁷⁾의 실험결과와 Dowden의 계산결과를 본 연구의 해석결과와 비교 검토할 것이므로 Table. 1과 같은 용접조건을 적용하였다.

용접부는 가열 및 급냉의 열 이력을 겪게 되므로

이를 해석하기 위해서는 온도에 따른 재료의 물성변화를 고려하여야 한다. 따라서, 재료의 열적 성질인 비열과 열전도율을 온도에 따른 수치로 입력하였다. 또한 열전달 해석시 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열(latent heat)에 대한 효과도 고려하였다.

Table.1 Welding condition

Variable Case	Q	η	Velocity	Metal Thickness
Postacioglu	9.9kW	45%	5mm/s	10mm
Metzbower	4.5kW	50%	5mm/s	10mm

III. 해석결과 및 고찰

용융부 내부에 입력되는 열원의 크기는 식(2)에 의하여 계산되고, 만족되는 온도 3500°C를 주었다. 실제 내부열원의 벽면온도가 재료의 기화온도라 가정할 때, 2800°C의 온도를 적용해야 하나, Kroos 등⁸⁾에 의하여 실제 선열원의 크기가 빔 직경의 1.7배라는 결과가 보여짐에 따라 계산상의 온도가 타당성이 있다. 이렇게 계산된 대표적인 온도분포를 Fig.2에 나타내었다.

Fig.3은 Q_s 와 Q_k 의 비율을 변화시키면서 계산한 결과이다. 레이저 출력이 9.9kW인 경우, 반복적인 해석결과를 통하여 열원 입력시 용접부 표면으로 흡수되는 열량(Q_s)이 전체 열량의 60%일 때 실험치와 가장 근접한 것으로 나타났다. 반면, 레이저 출력이 4.5kW인 실험에는 20-25 l/min의 He가스를 사용한 플라즈마 제거(plasma suppression)장치를 사용하였으므로 Q_s 의 비율이 적을 것으로 예상할 수 있었으며 계산결과 40%일 때 실험치와 가장 근접한 것으로 나타났다.

Fig.4에서는 위의 조건들을 사용한 3-D 해석결과와 실험결과, 그리고 각 연구자들의 해석결과와 비교하였다. Fig. 4(a)에서는 "nail-head" 형상이 잘 나타남을 볼 수 있다. 표면에 흡수되는 열량이 크므로 깊이방향으로 약 4mm 지점까지 영향을 주고 있다.

Dowden에 의한 계산치의 경우, 바닥에서의 대류조건이 고려되지 않고 일정두께 이상에서의 용융부 폭을 고정하였으므로, 바닥부분에서 매우 벗어남을 알 수 있다. Fig.4(b)의 경우 플라즈마 제거장치의 사용으로 용융부 표면에 플라즈마가 억제되어, 생성된

플라즈마에 의한 열입력(Q_s)이 일반적인 경우보다 적음을 알 수 있다.

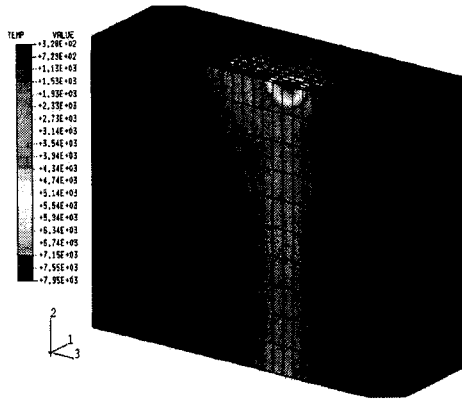


Fig. 2 Typical Calculated temperature distribution

플라즈마 재복사에 의한 용융부의 nail-head 형상이 개선되어 용융부 상부 및 하부의 폭이 직선적으로 경사지게 나타났다.

이것은 플라즈마에 의한 레이저 빔 에너지의 손실을 방지함으로써 키폭내부로의 에너지 전달이 유효하게 되어 용융부 하부의 폭은 상부의 폭과 큰 차이가 없게 된 것이라 사료된다. Metzbowe에 의한 계산치는 입력하는 파워를 통한 실험식을 사용하여 깊이 5mm이상부터는 같은 용융폭을 가정하였다. 따라서 표면의 용융부 폭을 제외한 부분이 일치하지 않으며, 특히 플라즈마 억제장치의 영향을 고려하지 않아서 계산치가 보여주는 "nail-head"형상은 실제 실험결과와 일치하지 않는다.

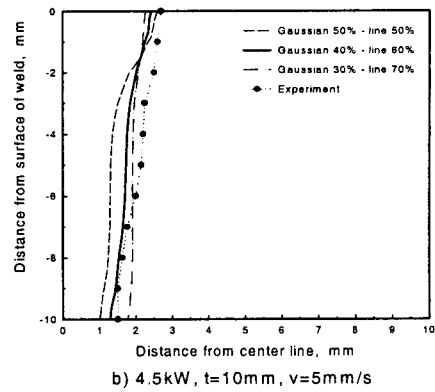
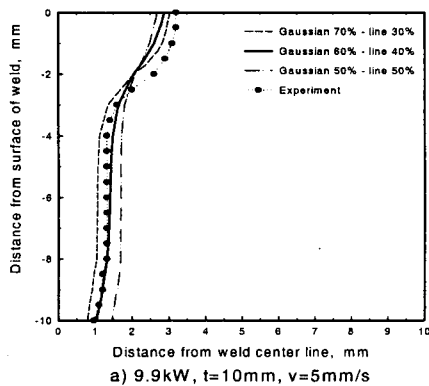


Fig. 3 Comparison of the heat input ratio

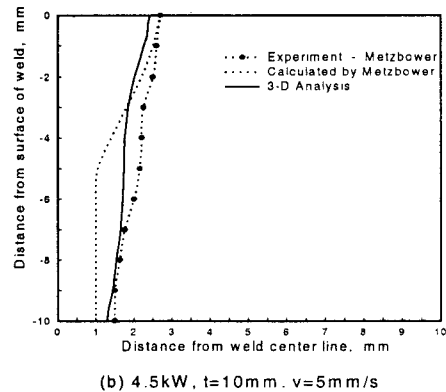
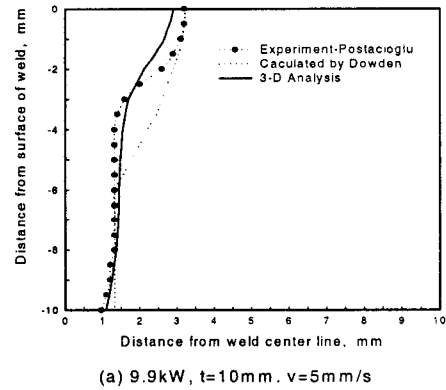


Fig. 4 Comparison of the weldment size

해석상의 용융부 상부의 입열 정도는 정규분포 (Gaussian distribution) 열원의 밀도를 나타내는 유효 반경(r_b)에 따라 조금의 차이를 보일 수 있다.

이러한 결과로부터 용융부 바닥에서의 대류손실 조건이 바닥 면의 용융부 폭 감소에 큰 영향을 주며, 이를 고려하지 않을 경우 실제 현상과 맞지 않음을 알 수 있다. 지금까지의 여러 연구 결과 등은 비교되어진 계산결과와 같이 빔 형상이나 열원이 많이 단순화되어 계산되었고, 특히 용융부 상부의 폭에 관심을 두고 계산되어져 바닥면의 폭 형상이 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

레이저 용접에서 용융부의 형상 및 크기는 레이저 빔의 출력, 용접속도, 빔의 반경, 흡수율등 여러 공정 변수의 영향을 받는다. 이에 따라 일관성 있는 열원 모델 개발이 필요하다.

본 연구에서는 레이저 용접공정에서 플라즈마의 영향을 고려한 3차원 열유동 해석을 수행하였다. 그 결과 예측된 용융부의 크기와 형상을 실험 및 계산자료와 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 플라즈마는 용융부 표면에 2차 열원으로 작용하여 레이저 빔 용접부의 "nail-head"형상과 크기에 큰 영향을 미친다.
- (2) 플라즈마 제거장치를 사용한 결과에 의하여 용융부 표면의 플라즈마 영향이 감소함을 알 수 있다.
- (3) 2차 열원의 입열량을 고려한 해석한 결과가 "nail-head"를 보이는 실험자료의 용융부 형상과 잘 일치한다.
- (4) 플라즈마 제거 장치를 사용한 경우 2차 열원의 입열량을 감소시켜 해석함으로써 실제 용융부 형상에 근접한 결과를 얻었다.
- (5) 3차원 해석에 의해 표면에서의 대류조건을 고려한 결과 용융부의 밑부분 형상이 실험치에 근접함을 볼 수 있었다.

V.참고문헌

1. D.T. Swift-Hook and A.E.F. Gick, "Penetration welding with lasers" *Welding Journal*, Vol.52, No.11, pp. 492s-499s, 1973,
2. W.M. Steen, J. Dowden, M. Davis and P. Kapadia, "A point and line source model of laser keyhole welding" *J. Phys. D:Appl. Phys.* Vol.21 pp. 1255-1260, 1988

3. A. Kaplan, "A Model of Deep Penetration Laser Welding Based on Calculation of the Keyhole Profile" *J.Phys. D:Appl. Phys.* Vol.21, pp. 1805-1814, 1994
4. I. Miyamoto, K. Mori, H. Maruo, "Properties of the plasma plume in CO₂ laser welding of thin sheets" *Welding international.* Vol.11, pp. 863-869, 1995
5. E.A. Metzbower, "Experimental Welding Thermal Cycles" *J.Laser Appl.* Vol. I, No.3, pp.9-15, 1989
6. N. Postacioglu, P.D. Kapadia, M. Davis, J.M. Dowden, "Upwelling in the liquid region surrounding the keyhole in penetration welding with a laser" *J.Phys. D:Appl. Phys.* Vol.20, pp. 340-345, 1987
7. E.A. Metzbower, "Laser Beam welding Thermal profiles and HAZ Hardness" *Welding Journal*, pp. 272s-278s, 1990
8. J. Kroos, U. Gratzke and G. Simon, "Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding" *J.Phys. D:Appl. Phys.* Vol. 26, pp. 474-480, 1993