연 구 논 문

선체고장력강 레이저 용접부의 열분포 특성에 관한 연구

방한서* · 윤병현** · 김성주*** · 임채환****

*조선대학교 공과대학 항공 · 조선공학부
**한국기계연구원 구조연구그룹
***한국선급
****한국기계연구원 구조연구그룹

Heat Distribution Characteristics of High Tensile Steel for Ship Structures in Laser Welding

Han-Sur Bang*, Byung-Hyun Yoon**, Seong-Joo Kim*** and Chae-Hwan Rim****

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
**Dept. of Structural System Engineering, Korea Institute for Machinery and Materials, Daejeon 305-600, Korea
***Korean Register of Shipping, Chonnam 530-140, Korea
****Dept. of Structural System Engineering, Korea Institute for Machinery and Materials, Daejeon 305-600, Korea

Abstract

This paper describes the heat distribution characteristics of ASTM A131DH36 high tensile steel for ship structures in 5kW CO_2 laser welding. In general, high energy of laser beam concentrates on the small area of the weldment instantaneously; therefore, this heat transfer mechanism induces the rapid changes of temperature and mechanical characteristics in laser welds this mechanism. So temperature distribution analysis is important to understand mechanical characteristics of laser welds. Authors have conducted finite element simulation to analyze the heat distribution characteristics in laser welds. The result of simulation has been verified by comparing with the metallurgical experiment result. From the result of this study, we can accurately predict the heat distribution characteristics in laser welds by using numerical simulation.

(Received September 6, 2002)

Key Words : CO_2 laser welding, Heat conduction, Finite element method, Thermal-transformation diagram

1. 서 론

레이저 용접은 국내에서 자동차나 첨단 전자산업등 고효율, 고부가가치 산업분야에서 3mm이내의 박판을 용접하는데 주로 이용되고 있다. 최근에는 30㎾급의 레이저가 개발 상용화됨에[1] 따라 30~50mm두께의 후판 용접의 기틀이 마련되었고 이를 생산라인에 도입하려는 기업이 늘어가고 있으나 후판 용접에 대한 기술과 자료가 미흡한 실정이다. 특히, 레이저 용접은 용융부가 깊고 협소하며 HAZ의 폭이 좁기 때문에 아크용접과는 달리 용접부와 주변부와의 온도구배가 아주 큰 열이력을 겪게 된다. 이에 본 연구에서는 후판의 레이저 용접시 온도분포 특성을 수치해석을 통해 시뮬레이션하여 급열, 급냉의 열이력을 정도 높게 해석하고 이를 실험을 통하여 비교 검증 하고자한다.

2. FEM에의한 열전도 이론의 정식화

레이저 용접은 짧은 시간에 형성되는 keyhole을 통해 열전달이 이루어진다. 키홀내의 열복사와 다중반사를 통해 깊숙이 투과 전달된 빔은 일부는 플라즈마에 산란, 흡수되고 일부는 금속에 흡수된다. 용접부의 시, 종단부를 제외한 나머지 부분은 열적 현상이 동일하다고 가정하여 중앙부를 준정상역으로 가정하고 시편의 중앙부(Fig. 1)에 대한 비정상 2차원 열전도 프로그램을 구성하였다.

본 해석에 적용된 레이저빔은 TEM_{00}모드이며CW (Continuous Wave)발진이므로 용접부에 조사되는 레

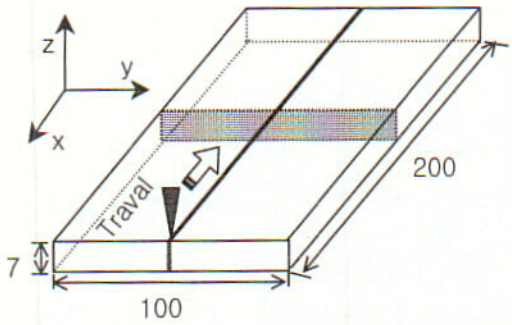


Fig. 1 Schematic illustration of the laser welding

이저의 에너지 분포(Fig. 2)는 식(1)[2]로 가정하였다.

$$P = P' \exp(-\alpha L) \quad (1)$$

α : 빔의 흡수계수 (m^{-1})
P : 임의의 깊이 L에서 레이저출력(㎾)
P′ : 레이저 출력

에너지 흡수율은 용접기의 효율과 금속의 표면 조건등을 고려하여 60%로 산정하였다[3].

재료가 등방성(isotropic)일 때 비정상 열전도문제의 지배방정식(governing equation)은 식(2)와 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \dot{Q} \quad (2)$$

식(2)를 Green-Gauss 정리를 이용하여 부분적분 한 후 Fourier법칙의 경계조건을 대입하여 matrix화하면 식(3)과 같다.

$$\sum [K]\{\theta\} + \sum [C]\frac{\partial \theta}{\partial t} = \sum \{F\} \quad (3)^{4)}$$

[K]: 열전도 matrix [C]: 열용량 matrix

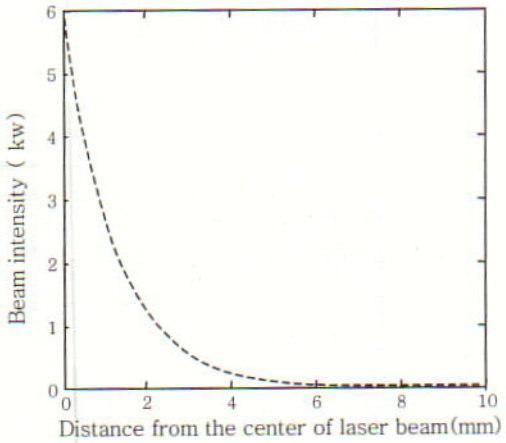


Fig. 2 Beam intensity distribution

{θ}: 온도의 vector {F}: 열유속 vector

3. 수치해석에 의한 온도 분포 결과

해석 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 정도 높은 해석을 위하여 요소분할은 중앙부는 0.1mm간격으로 아주 조밀하게 하였으며 최대 5mm가 넘지 않도록 하였고 생성된 요소의 총수는 1800개이다.

입열요소의 선택은 절단면 형상을 통하여 얻은 네일헤드(nail head)를 갖는 레이저 용접 용융부의 형상을 최대한 고려하여 설정하였고 모재의 표면상태에 따른 흡수율과 레이저빔의 분포 형태등을 고려하여 요소마다 각기 다른 입열량을 적용하였다[5,6]. 해석에 이용한 금속은 저온 인성이 좋은 ASTM A131 DH-36강이며 열적 특성과 화학조성은 Table 1, 2와 Fig. 4에 나타내었다.

해석에 있어서 용접시 모재의 용융에 의한 잠열과 플라즈마의 발생으로 인한 열전달의 영향은 고려하지 않았다. 참조 온도는 20℃이며 온도변화에 따른 열적, 물리적 정수들은 온도 의존성을 고려하였다. 온도분포를 해석한 결과는 다음과 같다. Fig. 5는 용접부가 용융되어 최대 열분포를 가진 순간의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 일반 arc 용접에서 용융부의 액상 온도는 약 2,400℃로 알려져 있는데[7] 레이저 용접부에서는 고온의 프라즈마가 생성되는 온도(3000℃)[8] 이상으로 나타나고 있다. 또한 고밀도의 열원이 좁은 영역에 조사됨으로써 용접부에서 용융부와 모재와의 온도구배가 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

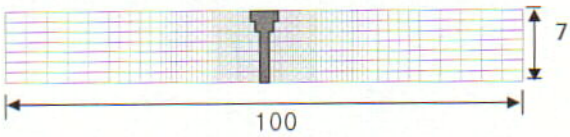


Fig. 7 Mesh division

Table 2 Thermal properties (at 20℃)

Thermal conductivity (㎉/h.m.℃)	Density (㎏/㎥)	Specific heat (㎉/㎏℃)
0.108	7,812	0.11

Table 1 Chemical compositions (wt %)

C	S	Mn	Cr	P	Si
0.18	0.1	1.0	0.03	0.04	0.29

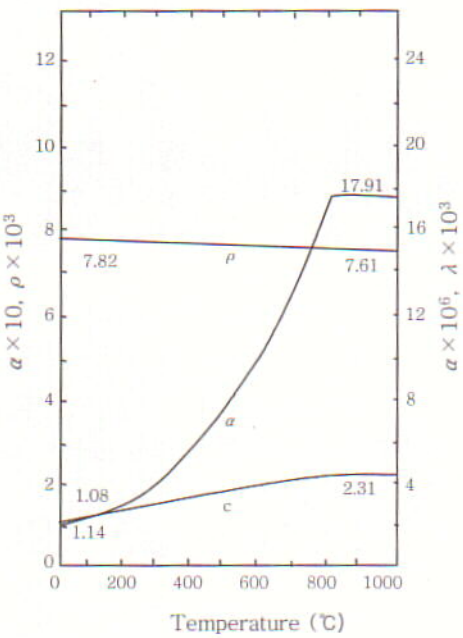


Fig. 4 Thermal properties of thermal dependence

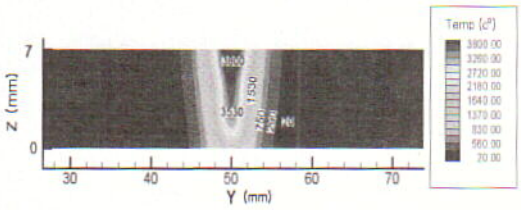


Fig. 5 Thermal distribution of section area

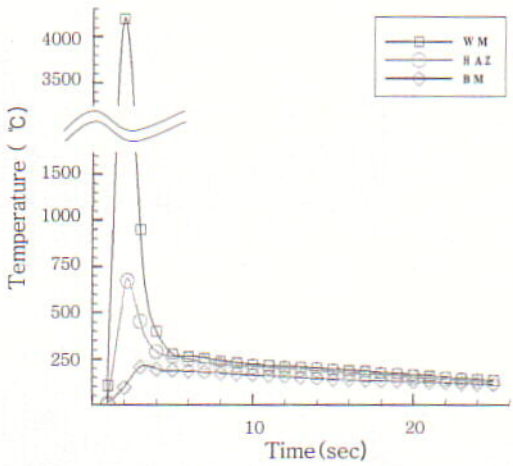


Fig. 6 Temperature histories at weldment

Fig. 6은 용융부(WM)와 HAZ, 모재(BM)의 온도이력을 나타낸 그래프이다. 용접부의 최대 냉각속도는 용융부의 경우 1000℃/sec이상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 실 험

4.1 시편의 제작

용접장치는 한국기계연구원에서 제작한 CO_2레이저 용접기이다. 최고출력 6kW, 출력파는 연속파(CW)이고 빔모드는 TEM_{00}, 용접 속도는 0.4~0.6m/min이다. 용접시 용융금속의 산화(oxidation)와 질화(nitrification)를 방지하고 플라즈마에 의한 레이저광의 흡수와 산란을 막기 위하여 노즐(nozzle)로부터 레이저 빔과 동일 축방향으로 분류하는 질소가스(N_2)를 유량 60ℓ/min으로 분사 하였으며 용접변형과 이탈을 방지하기 위하여 한국기계연구원에서 개발한 에어펌프형 용접용 지그(jig)를 사용하였다. 레이저 용접은 소영역 고밀도 열원에 의한 용융용접이므로 아크용접이나 가스용접에 비해 비드 폭이 매우 좁고 용접 열 사이클 동안의 열변형이 적은 것이 특징이나 용접조건이 부적절한 경우에는 용접비드 내에 기공 또는 균열이 발생하거나 비정상적인 비드가 생성되는 경우가 많다. 따라서 이상의 용접 결함을 억제하고 적정한 접합강도를 얻기 위해서는 레이저 용접성에 영향을 미치는 인자들 가운데 레이저 출력, 용접속도, 레이저 빔의 위치 및 초점 위치 등을 고려하여야 한다. 또한 이들은 서로 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 재료에 따른 체계적이고 통일된 조건 설정이 필요하다. 본 실험에서는 공정변수를 용접속도에 두었으며 레이저 빔의 직경과 빔의 흡수율을 고려하여 시편의 표면 거칠기는 10㎛이하로 연삭 밀링 가공하였으며 건전한 용접비드를 얻기까지 반복 실험을 실시하였다. 시편의 크기는 200×50×7mm이고 맞대기 용접을 실시하였다.

용접속도에 따른 시편의 용접상태를 고찰하여 보면 0.4m/min에서는 과다 입열로 빔이 용접부를 미소하게 관통하는 현상이 나타나 비드가 함몰되고 뒷면에서는 용융풀이 녹아 떨어지면서 군데 군데 붙어 있어 비드의 형상이 아주 거칠게 나타났다.

0.6m/min에서는 입열부족으로 인해 언더컷이 발생하였고 뒷면에서는 비드의 폭이 아주 좁게 나타났다. 실험의 결과로써 용접속도 0.5m/min에서 앞, 뒷면의 비드 폭이 비슷하고 용접부가 건전한 최상의 시편을 얻을 수 있었다. 열분포와 HAZ영역을 알아보기 위해서 시편 중앙 단면의 조직사진을 촬영하였다. 용접조건은 Table 3에 나타내었고 Fig. 7은 용접속도에 따른 시편 앞, 뒷면의 용접부 사진이다.

4.2 용접부의 조직 검사

레이저 용접은 일반 아크 용접과는 달리 용융부와 인

Table 3 Welding conditions

Travel speed	0.4~0.6m/min
Shielding gas	N_2
Focal length	50㎜
Butt gap	10±2㎛
Peak power	6㎾
Pulse mode	CW
Beam mode	TEM_{00}
Defocus	-1mm
Active medium	CO_2

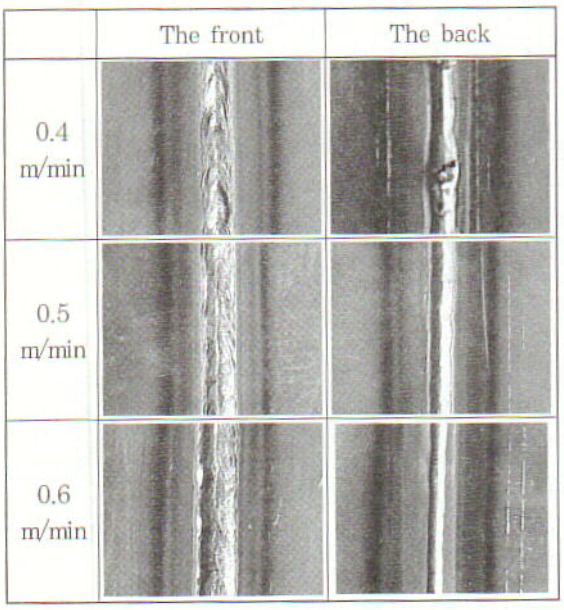


Fig. 7 Specimens after welding

접부까지의 거리에 따른 온도구배가 심하므로 열전대나 레이저 온도계를 이용하여 온도 분포를 측정한다는 것은 어려운 일이다. 수치해석 결과 나타난 용접부의 고온과 급냉의 현상을 검증하기 위해 항온변태도(Fig. 9)의 개념을 도입하였다.

용접부의 조직사진을 Fig. 8에 보였다. (a)용융부, (b)HAZ, (c)모재, (d)용융금속과 HAZ의 경계 부분, (e)HAZ와 모재의 경계부분을 200배 확대 촬영하였다. 사진에서 보는 것처럼 (a),(b),(c) 3지점의 조직이 많이 다름을 알 수 있다.

특히, 용융부의 경우 일반 아크 용접부보다 마르텐사이트 조직의 출연이 두드러지고 있는데 이 조직은 Ms점에서부터 저탄소강의 경우 10^{2}㎝/sec속도로 급속하게 진행되며 원자의 확산이 이루어지지 않는 격자 변태로써 급냉시[9] 주로 나타나는 조직이다.

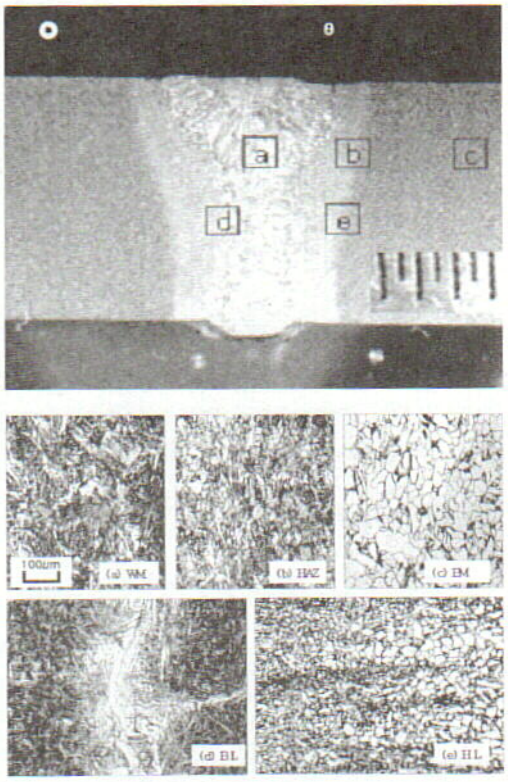


Fig. 8 Macro structure of weldment

본 금속의 Ms, M_f점은 약 471.5℃와 320℃이다. 수치해석 결과 Fig. 6의 그래프를 보면 용융부의 최대 순간 냉각속도는 1,000℃/sec이며 Ms, M_f점인 500℃~300℃영역에서는 160℃/sec이상의 냉각속도를 나타내고 있다. 이를 본 시편의 항온변태도 Fig. 9와 비교해 볼 때 마르텐사이트 조직이 출연하기 좋은 조건임을 알 수 있다.

다음은 HAZ의 크기를 비교하여 열분포 이력을 고찰하고자 한다.

Fig. 10 (a)는 레이저 용접부의 절단면 사진 위에 실선은 해석결과를, 점선은 실험에서의 HAZ를 그려놓은

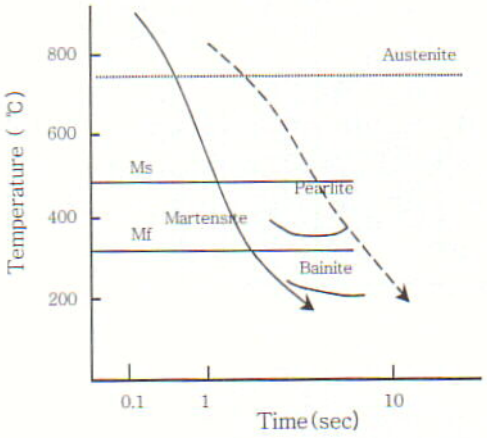
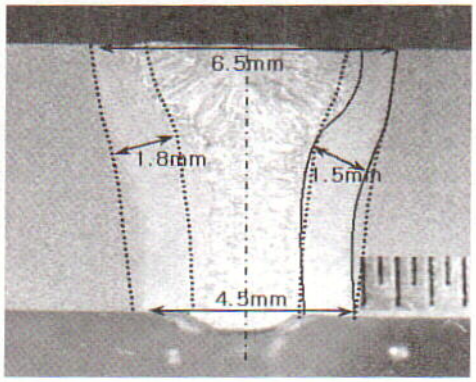
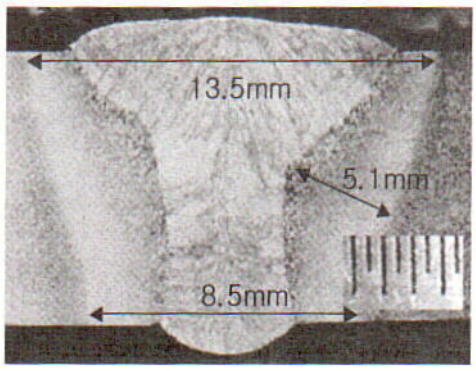


Fig. 9 Isothermal transformation diagram



—— Measurement ····· FEM Analysis

(a) 6 kW Co_2 laser Welding



(b) 450A, 33V, 0.65m/min. SAW

Fig. 10 Comparison of HAZ size

사진이며 (b)는 동일 시편으로 SAW용접을 실시하여 얻은 용접부의 단면에서 HAZ의 크기를 그려놓은 사진이다. SAW의 용접조건은 450A, 333V, 0.65m/min이다. 실험을 통해 얻은 레이저 용접부의 HAZ 크기는 1.5mm이고 SAW용접에서는 5.1mm였으며 수치해석에서는 약 1.8mm로 실험 값과 수치해석 값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

6kW CO_2 레이저 용접기를 이용하여 선체고장력강(두께 7mm)의 레이저 용접시 열분포 특성을 2차원 비선형 열전도 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 해석 결과를 실험과 비교 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실험을 통해 얻은 HAZ의 최대크기는 1.5mm이내였으며 수치해석의 결과는 1.8mm로써 해석과 실험의 결과 값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다. 또한 동일 시편을 450A, 33V, 0.65m/min로 SAW용접했을 때 나타나는 HAZ의 크기 5.1mm와 비교하면 레이저 용접부의 HAZ크기는 1/3로써 매우 작음을 알 수 있었다.

2) 수치해석에서 용접부는 열원이 제거됨과 동시에 급냉하는 냉각커브를 그리고 있다. 이 결과의 검증을 위해 시편의 항온변태도와 비교하여 본 결과 Ms, M_f점인 500℃~300℃영역에서의 냉각속도가 160℃/sec으로 나타났고 그 결과로써 급냉시에 자주 출현하는 냉각 마르텐사이트가 두드러지게 출현함을 조직사진 촬영을 통해 알 수 있었다. 이로써 수치해석의 냉각속도 그래프가 실제 레이저 용접시 용융부의 냉각속도를 근사하게 모사하고 있음을 유추 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원한 지역대학 우수과학자 지원 연구과제 (과제번호: R05- 2000-000-00244-0)에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Research group of laser hermo-mechanical Process : Trends and Prospects Technology of laser welding 118-128, 285-387 (1994)
2. D.T.Swift-Hook and A.E.F. Gick: Penetration welding with lasers, Welding Journal **Vol. 52** (1973) 492-499
3. M.R.Frewin, D.A.Scott: Finite Element Model of Pulsed Laser Welding, Welding Journal (1999), 15-s-22-s
4. Han-Sur Bang : Analysis on the dimensional unstationary heat conduction sheet plate, Journal of KWS, **9-2**(1991), 37-43
5. T.S.Ravigururajan and W.Fang:Thermal modeling of CW laser materials processing using finite Element Method Section B-ICALEO (1996), 126-135
6. D.F.Farson, K.R.Kim:Simulation of laser evaporation and plume Section F-ICALEO (1998), 197-206
7. Akira Matsunawa, Naoki Seto and Masami Mizutani : Liquid motion in keyhole laser welding Section G-ICALEO (1998), 151-160
8. K.W.Carlson: The role of heat input in deep penetration laser welding, ICALEO (1985), 49-57
9. E.A. Metzbower: Temperature in the Keyhole, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 26B(1995), 1029-1033