

선체고장력강 레이저 용접부의 잔류응력분포 특성에 관한 연구

방한서* · 윤병현** · 김영표*** · 임채환**

*조선대학교 공과대학 항공·조선공학부

**한국기계연구원 구조연구그룹

***조선대학교 선박해양공학과 대학원

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

Han-Sur Bang*, Byung-Hyun Yoon**, Young-Pyo 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

***Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

Abstract

Laser welding has good characteristics such as high density energy, high speed and short heating time, as compared with conventional arc welding. The joint of laser welding also has good mechanical characteristics in general. However, relevant research is not sufficient to understand laser welding in the view point of mechanics until a recent date.

In this paper, numerical simulation has been conducted to analyze distribution of welding residual stresses. Welding residual stresses of specimen have been measured by using sectioning method to compare the results between simulation and experiment.

(Received September 6, 2002)

Key Words : Welding residual stress, Laser welding, Finite element method, Sectioning method

1. 서 론

후판 레이저 용접의 특징은 고밀도 열원이 ($10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 이상) 협소한 면적에 깊게 침투하여 용융이 이루어지므로 용융부의 상, 하 비드의 폭이 비슷한 투과용접(penetration welding)이 이루어진다. 또한 용융부의 불륨이 적고 깊게 나타나며 레이저 빔의 이동 직후 복사와 열전도, 전달에 의해 곧바로 냉각되는 급냉 과정을 거치게 됨으로써 잔류응력의 분포 면적이 좁고 항복응력을 초과하지 않는 분포가 나타나는 것으로 알려져 있다. 현재, 국내에서는 레이저 용접기의 고출력화로 후판 용접에 대한 기틀이 이미 마련되어 있으나 후판 레이저 용접의 적용에 관한 정보와 역학적 메카니

즘에 관한 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 후판(7mm)의 레이저 용접시 용접체에 잔류하여 접합부의 신뢰성에 큰 영향을 미치는 잔류응력 분포 특성을 수치해석 및 실험을 통하여 명확히 규명하고자 한다.

2. 열탄소성 이론의 정식화

해석을 위하여 재료는 등방성(isotropic)임을 가정하였고, 탄성 및 소성 전 영역에서 재료의 기계적 성질(항복응력, 탄성계수, 프와송비, 소성계수)은 온도 의존성을 포함하였다. 소성역에서의 항복조건은 선형등방경화법칙을 고려한 폰-미세스(Von-Mises)의 조건을 사용하였다.

1) 탄성역에서의 전변형률 $\{\epsilon\}$

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^e\} + \{\epsilon^t\} \quad (1)$$

$\{\epsilon^e\}$: 탄성변형률

$\{\epsilon^t\}$: 열변형률(= $\{\alpha\}T$)

응력과 변형률은 후크의 법칙(Hooke's law)으로부터 식(2)로 쓸 수 있다.

$$\{\sigma\} = [D^e]\{\epsilon^e\} \quad (2)$$

$[D^e]$: 탄성 응력-변형률 매트릭스

식(1)을 식(2)에 대입하면

$$\{\sigma\} = [D^e](\{\epsilon\} - \{\epsilon^t\}) \quad (3)$$

이때, 재료의 역학적 성질은 온도의존성을 고려하여, 응력증분의 영향을 $[C]dT$ 라고 하고, 증분형으로 쓰면 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\epsilon\} - [C]dT \quad (4)$$

여기서 탄성변형률 $\{\epsilon^e\}$ 는 응력 $\{\sigma\}$ 및 온도 T 의 함수이므로, 탄성변형률의 증분은

$$\{d\epsilon^e\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\}dT \quad (5)$$

그러므로 전변형률의 증분은 식(6)과 같다.

$$\{d\epsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\}dT + \{\alpha\}dT \quad (6)$$

따라서, 탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같다¹⁾.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\epsilon\} - [C]dT \quad (7)$$

2) 소성상태에서의 전변형률은 식(8)과 같다.

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^e\} + \{\epsilon^p\} + \{\epsilon^t\} \quad (8)$$

$\{\epsilon^e\}$: 탄성변형률

$\{\epsilon^p\}$: 소성변형률

$\{\epsilon^t\}$: 열변형률($\{\alpha\}T$)

변형률의 증분은 $\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\}$ 으로 탄·소성 및 열변형률의 합이며, 소성역에서의 응력증분에 대한 구성식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} = & [D^e]\{d\epsilon\} - [D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}\lambda - [D^e]\{\alpha\}dT \\ & + \frac{[D^e]}{dT}[D^e]^{-1}\{d\sigma\}dT \end{aligned} \quad (9)$$

$\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}$: 편차응력, λ : 양(+) 스칼라량

열응력 해석에서 각 요소에 대한 평형방정식은 식(10)과 같다²⁾.

$$\Sigma[K]\{dU_1\} - \Sigma\{dL_1\} = \Sigma\{dF_1\} \quad (10)$$

$\{dU_1\}$: 변위벡터

$[dL_1]$: 열에 의한 등가 절점력

3. 수치해석에 의한 잔류응력의 분포

3.1 해석 모델 및 조건

해석 모델 및 경계조건을 Fig. 1와 Fig. 2에 나타내었다. 2차원 열분포 해석의 결과가 입력데이터로 사용되었다. 2차원 평면변형 요소를 사용하였으며 재료의 기계적 상수(Fig. 3)들은 온도 의존성을 고려하였고 역학적 용융온도인 HAZ의 온도는 725°C, Cut-off 온도는 150 0°C로 한 열탄소성 해석을 수행하였다³⁾. 본 해석에서는 액상에서 기화시 잠열과 금속의 상변태를 고려한 체적의 변화는 고려하지 않았다^{4,5)}.

Table 1에는 20°C에서 재료의 물리적 상수 값을 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties (at 20°C)

Tensile stress (kgf/mm ²)	Yield stress (kgf/mm ²)	Elongation (%)	E (kgf/mm ²)	Poisson's ratio
52	35.2	19-22	21000	0.3

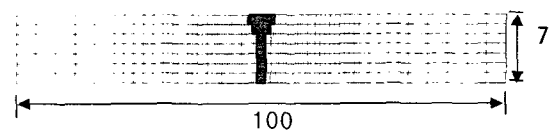


Fig. 1 Mesh division

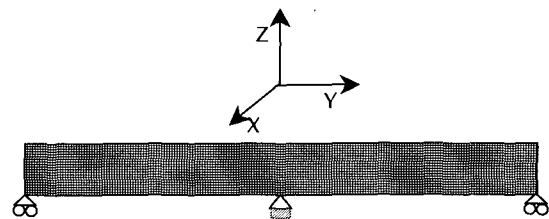


Fig. 2 Boundary conditions

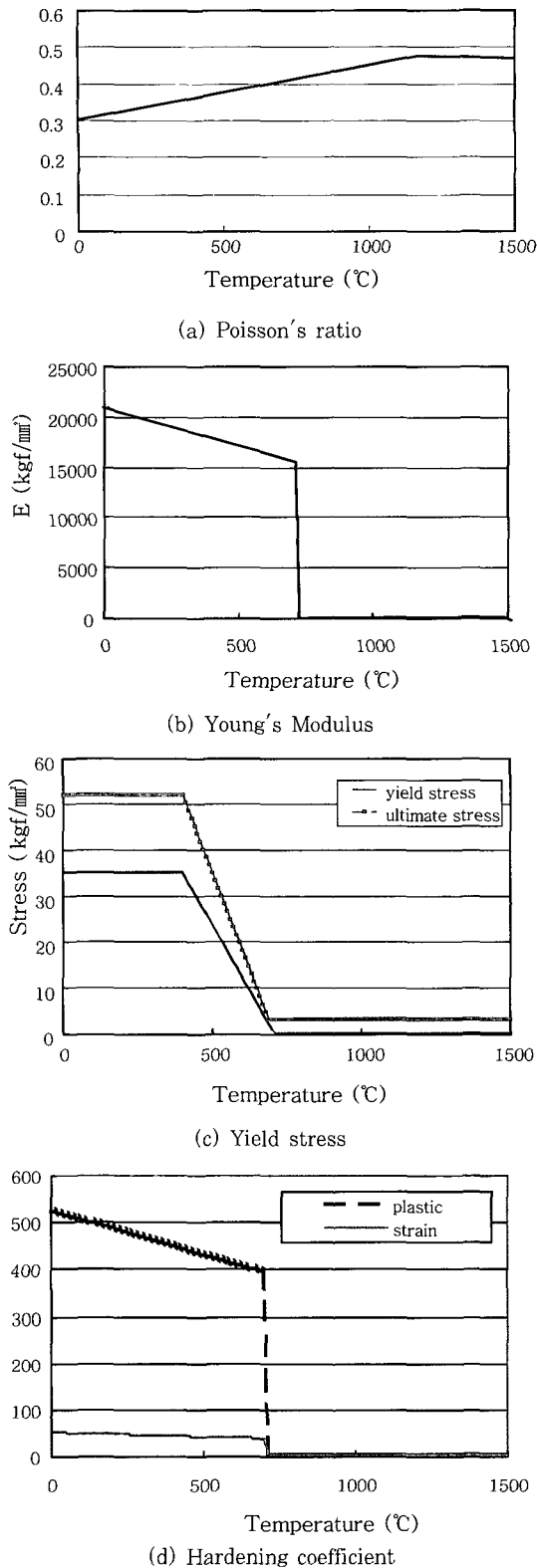


Fig. 3 Mechanical properties of thermal dependence

3.2 수치해석의 결과

레이저 용접에 의해 발생하는 잔류응력의 열탄소성 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 4

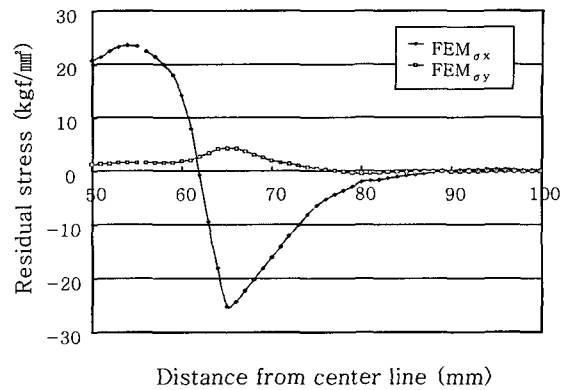


Fig. 8 FEM analysis results

는 용접부 중심선에서 우측 끝단 시편 표면에서의 x, y 방향의 잔류응력 분포를 그래프로 나타낸 것이다.

전형적인 용접부의 잔류응력 분포를 보이고 있으나 최대응력 값이 항복응력을 초과하지 않는 특성을 보이고 있다. 먼저 용접선 방향을 따라 분포하는 σ_x 의 분포를 보면 중앙에서 12mm지점까지는 인장응력이 분포하고 있고 최대 인장응력은 24kgf/mm^2 으로 항복응력의 70%에 해당하는 수준이며 압축응력은 중앙부에서 12mm지점에서 약 88mm지점까지 분포하고 있으며 최대응력은 -25kgf/mm^2 으로 항복응력의 71%수준인 것을 알 수 있었으며 끝단은 아무 영향 없이 응력이 0kgf/mm^2 인 것을 알 수 있었다. 이는 용접시 용융역이 협소하여 열이 주변으로 전도 되기 전에 빔 이송 후 곧바로 냉각되는 레이저 용접의 냉각 특성에 기인한 것으로 사료된다. 용접선의 법선으로 분포하는 σ_y 의 분포를 보면 전영역에 있어서 인장응력 분포가 압축에 비해 크게 나타나고 있으며 27mm지점에서부터는 미소한 압축응력이 분포하고 있다. 최대 인장응력은 4.3kgf/mm^2 으로 항복응력의 12% 수준으로 매우 낮게 분포하고 있음을 알 수 있으며 끝단은 응력수준이 0kgf/mm^2 인 것을 알 수 있었다.

4. 잔류응력의 계측

4.1 잔류응력의 계측 실험

시편은 공압 지그를 이용하여 구속시킨 상태에서 레이저 빔의 출력을 6kW로 고정시키고 레이저빔 헤드가 직선운동을 하며 용접을 수행하게 된다. 용접 속도는 0.4/min, 0.5m/min, 6m/min이며 용가재를 사용하지 않고 양호한 비드를 얻을 때까지 실험을 진행하였다. 실험에 이용된 시편은 ASTM A131 DH-36강이며 시편 한 개의 크기는 $200 \times 50 \times 7\text{mm}$ (L×B×T)이며 시편 2개를 맞대기하여 Butt용접을 수행하였다. 용접 조건은 Table 2에 나타내었다.

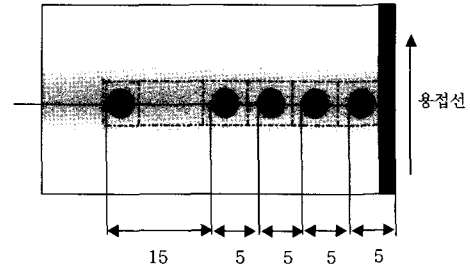
Table 2 Welding conditions

Travel speed	0.4~0.6m/min
Shielding gas	N ₂
Focal length	50mm
Butt gap	10±2 μ m
Peak power	6kW
Pulse mode	CW
Beam mode	TEM ₀₀
Defocus	-1mm
Active medium	CO ₂

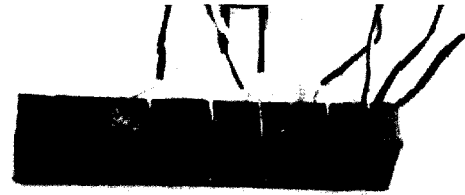
실험을 진행한 결과 0.4m/min에서는 입열량이 많아 빔이 시편을 완전히 관통하여 상부는 합물되고 하부는 용융풀이 군데군데 남아서 매우 거칠었으며 0.6m/min에서는 입열량이 부족하여 레이저 빔이 관통하지 못해서 하부에 용접이 이루어지지 않았으며 0.5m/min에서 투과용접이 이루어지고 상하 비드가 양호한 최적의 용접시편을 얻을 수 있었다. 잔류응력의 계측에는 0.5m/min 속도로 용접된 시편 중 상태가 가장 좋은 3개의 시편을 선택하였다. 잔류응력의 계측은 절단법(sectioning method)을 이용하였다. 시편의 중앙부에 y축을 따라 2축 게이지를 부착하여 x, y방향에 분포하는 잔류응력을 계측하였으며 게이지 지름과 톱날의 두께를 고려하여 5~15mm간격으로 부착하였다. 절단시에는 게이지를 중심으로 4방향을 완전히 절단하여 잔류응력이 모두 해방 될 수 있도록 하였다. 또한 실험의 오차를 최소화 하고 톱과 시편의 마찰로 인해 시편의 온도가 상승하는 것을 방지하기 위하여 최대한 서서히 절단하였고 대기온도가 동일한 시간을 택하여 실험을 진행하였다. Fig. 5 (a), (b), (c)는 게이지 부착위치와 4방향 절단 후 잔류응력을 계측하고 있는 사진이다.

4.2 잔류응력의 계측 결과

절단법에 의해 얻은 잔류응력의 계측 결과를 Fig. 6에 보였다. 3개의 시편에 각각 번호를 부여하여 Sectioning1, 2, 3으로 구분하였으며 각 시편의 x, y방향으로 분포하는 잔류응력의 크기를 나타내었다. 계측 결과를 보면 용접부의 중앙으로부터 25mm지점에서 인장응력과 압축응력이 교차하고 있으며 인장응력의 최대 크기는 각각 22, 31, 35kgf/mm²이고 최대 압축응력도 각각 -10, -15, -18kgf/mm²으로서 모두 항복응력 이하의 분포를 보이고 있다. 각각의 결과 값들이 조금씩 다른 양상을 보이고는 있지만 응력 값과 경향에서 비슷한 결과를 보이고 있다. 계측 결과 값들이 차이를 보이는 것은



(a) Location of strain gages and sectioning lines



(b) Sectioning method



(c) Measurement of residual stress

Fig. 5 Experiments by sectioning method

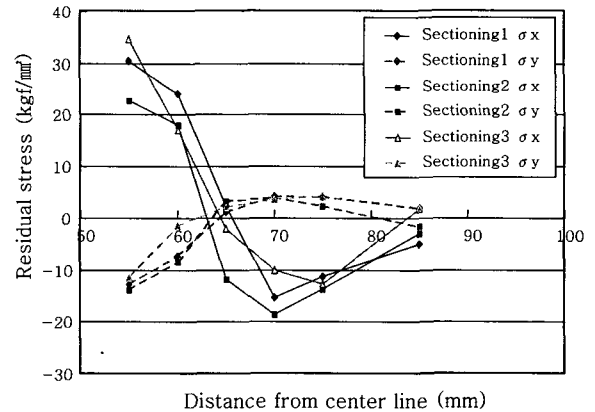


Fig. 15 Measuring results (sectioning method)

절단과정에서 게이지 부착 위치와 수동절단에 따른 실험 오차등에 기인한 것으로 사료된다.

5. 결 론

후판 레이저 용접부의 잔류응력분포 특성을 규명하기 위하여 재료의 온도의존성을 고려한 열탄소성 수치해석 프로그램의 개발과 잔류응력을 계측하여 결과를 비교 분

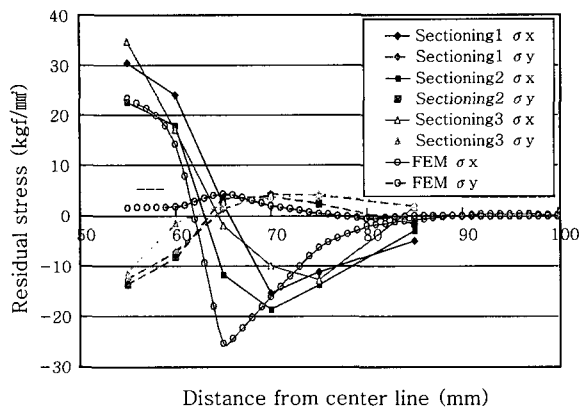


Fig. 7 Comparison FEM analysis with experiments

석하였다. 열탄소성 해석에서는 평면 변형 요소를 이용한 용접부의 중앙단면에 대한 2차원 비정상 열탄소성 해석을 수행하였으며 실험에서는 레이저용접을 실시하여 얻은 건전한 비드를 보이는 3개의 시편을 선택한 후 절단법을 이용하여 잔류응력을 계측하였다. Fig. 7은 수치해석과 실험의 결과들을 비교한 그래프이며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 레이저 용접부의 잔류응력은 일반 아크용접과 비슷한 분포 경향을 가지나 분포 영역이 좁고 인장과 압축에서의 최대응력 값이 항복응력의 70%수준인 것으로 나타났다. 용접부로부터 40mm지점부터는 열영향이 없어 끝단까지 잔류응력 값이 0인 것을 확인 할 수 있었다. 이로써 레이저 용접이 일반 아크용접보다 잔류응력 측면에서 더 우수하다는 것을 알 수 있었다.

2) 수치해석 결과와 계측 결과를 비교 분석해보면 용접부 근방에서는 인장 잔류응력(σ_x)이 재료의 항복응력

인 35.2kgf/cm²에 비해 70%수준인 24kgf/cm²으로 나타났다. 압축역에서는 최대 압축응력(σ_y)이 -25kgf/cm²로써 항복응력의 71%수준을 보이고 있다. 압축역에서 수치해석 결과가 계측결과보다 더 크게 나타나고 있는데 이는 열대류와 복사, 금속의 상변태 등을 고려하지 않았기 때문으로 사료되며 향후에 이러한 인자를 고려한다면 해석의 결과가 크게 향상 되리라 사료 된다.

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. H. S. Bang : The study on the mechanical behavior of welded part in thick plate, Journal of KWS, 10-4 Dec.(1992), 250~258(in Korean)
2. H. S. Bang : Analysis on the two dimensional unstationary heat conduction sheet plate, Society of Naval Architects in Korea: SNAK, 27-1 (1990), 44~50(in Korean)
3. D. F. Farson, K.R. Kim : Simulation of laser evaporation and plume, Section-F ICALCO, (1998), 197~206.
4. C. Gratzke and G.Simon : Absorption of the laser beam by the plasma in deep laser beam welding of metals, American Institute of Physics, 78(11) Aug.(1995), 6448~6453.
5. J. xie A.KAR : Laser Welding of thin sheet steel with surface oxidation, Welding Research Supplement (1999), 343~348.