

# Nail Head 형상을 가지는 레이저 용접 단면부의 잔류응력 분포 특성에 관한 연구

방한서\* · 김영표\*\* · 주성민\*\* · 권영섭\*

\*조선대학교 선박해양공학과

\*\*조선대학교 선박해양공학과 대학원

## A Study on the Distribution of Welding Residual Stresses in Laser Welds with the Nail-head Shape.

HAN-SUR BANG\*, YOUNG-PYO KIM\*\*, SUNG-MIN JOO\*\* AND YOUNG-SUB KWON\*

\*Faculty of Naval Architectural Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

\*\*Faculty of Naval Architectural Engineering, Graduate school of Chosun University, Gwangju, Korea

**KEY WORDS:** Laser Welding 레이저 용접, Nail Head Shape 못 형상, Welding Residual Stresses 용접잔류응력, Medium Carbon Steel 중탄소강, 유한요소해석 Finite Element Method

**ABSTRACT:** During the laser welding, weldments are suddenly heated by laser beam and cooled. This phenomenon gives occasion to complex welding residual stresses, which have a great influence on structural instability strength, in laser welds. However, a relevant research on this field is not sufficient until present and residual stress measurements have experimental and practical limitations. For these reasons a numerical simulation may be attractive in order to solve the residual stress problem. In order to determine the distribution of heat and welding residual stresses in laser welds with the nail-head shape, authors conduct the finite element analysis (two-dimensional unstationary heat conduction & thermal elasto-plastic analysis). From the result of this study, we can confirm the stress concentration is occurred at the place of melting line shape changed in laser welds with the nail-head shape.

### 1. 서 론

최근 각종 용접법의 개발과 이의 적용이 확대되어지고 있는 가운데 그 중에서도 레이저 용접의 경우 기술발전에 따른 가격 대비 출력의 증대에 함께 우수한 용접부 품질 특성으로 인해 그 사용이 증대되어지고 있으며 그 적용이 단순한 박판의 용접에서 벗어나 다양한 형태의 하중 이력을 겪는 중요한 기계부품과 구조물의 조립은 물론 의공학 분야에 이르기까지 그 적용분야의 폭이 넓어지고 있다. 따라서 이러한 분야에 적용되어지는 레이저 용접접부의 역학적 특성을 아는 일은 매우 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 용접부의 역학적 특성을 규명하는데 중요한 변수 중의 하나인 용접부의 이음형상을 보면 이제까지 일반적으로 적용되어온 아크용접의 경우, 기본적으로 이음부의 개선 형태에 의해 용접부의 형상이 결정되어지는데 반해 레이저 용접의 경우는 특별한 개선 없이 용접재료의 갭을 최소로 한 후 용접되어지며 이 때 용융자 내의 유체 역학적인 거동 등에 의해 그 형상이 결정되어지는 특징을 가지고 있으며, 일반적인 레이저 용접부의 특징으로 일컬어지는 못 형상(Nail-head shape)의 용접부 형상이 나타나기도 한다.

따라서, 본 연구에서는 레이저 용접시 발생하는 못 형상(Nail head shape)의 용접부에 대해 열 전도 및 열탄소성 유한요소 해석을 실시하여 용접부에 대한 역학적 특성을 확인하고자 하였으며 기존의 연구(M.R.FREWIN 1999, C. Carmignani 1999)에서는 주로 용접부의 상면에 대한 수치해석 및 실험에 의한 고찰이 이루어진데 반해 상대적으로 고찰이 적으며 실험으로 규명이 어려운 용접 단면부의 깊이방향에 대한 용접부의 역학적 특성을 수치해석을 통하여 병행 고찰하는데 주안점을 두었다.

### 2. 유한요소해석

#### 2.1 2차원 비정상 열전도 및 열탄소성 해석 이론

온도의 시간 및 공간적 분포는 2차원 비정상 열전도 지배 방정식을 만족하며 경계조건으로서는 해석대상인 모델 내부로의 열전도와 대기 중의로의 열전달이 있는 것으로 하였으며, 고체에서의 열전도 문제를 갈락킨법을 이용하여 식 (1)과 같이 유한요소 정식화하였다.

제1저자 방한서 연락처: 광주광역시 동구 서석동 375

062-230-7134 hsbang@mail.chosun.ac.kr

$$[K]\{\phi\} + [C]\left\{\frac{\partial\phi}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (1)$$

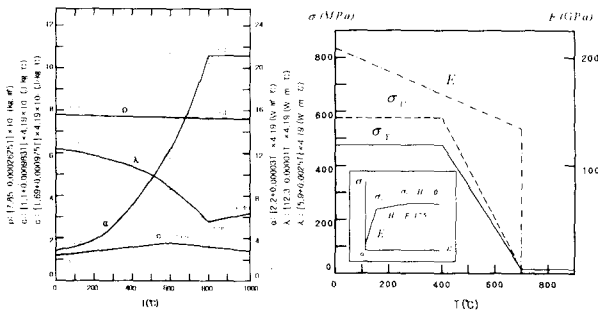
여기서,  $[K]$ : 열전도 매트릭스  
 $[C]$ : 열용량 매트릭스  
 $\{F\}$ : 절점에서의 열유속 벡터

또한, 열탄소성 해석을 위해서는 식 (2)에 보인 것처럼 전변형률( $\epsilon$ )에 탄성변형률( $\epsilon^e$ )과 소성변형률( $\epsilon^p$ ) 그리고 열응력에 의한 변형률( $\epsilon^t$ )이 포함되도록 하였다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^t \quad (2)$$

## 2.2 수치해석 조건

본 연구에서는 용접열원을 순간 열원으로 가정하였으며, 4절점 Isoparametric 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 또한, 해석대상 재질로는 기계구조용 중탄소강인 JIS S45C를 사용하였으며 이에 대한 재료의 실제 온도의존성 물리정수 및 기계적 물성치(Fig.1)를 고려하였다. 그러나 용융지의 유동, 키홀 내부의 증발과 복사현상 및 금속상변태는 고려하지 않았으며, 시뮬레이션 모델의 열 및 열탄소성 해석을 위하여 자체 개발한 유한요소 프로그램을 사용하였으며, 해석의 정도를 높이기 위하여 기존 연구(K.W.Carlson 1985, M.R.FREWIN 1999, A. Kaplan 1994)에서 사용된 입열 계산식인 식 (3)과 식 (4)를 보정하여 사용하였으며, 이때 사용된 레이저 및 용접조건을 Table 1에 나타내었다.



(a) physical properties (b) mechanical properties

**Fig.1** Temperature dependency of physical properties and mechanical properties (Smithells metal reference book, CRC Handbook of Chemistry and Physics )

$$P = P' \exp(-\alpha L) : \text{Beer-Lambert 법칙} \quad (3)$$

여기서,  $P$ : 깊이  $L$ 에 도달하는 레이저 출력 (kW)  
 $P'$ : 입사 출력 (kW)  
 $\alpha$ : 흡수계수 ( $m^{-1}$ )  
 $L$ : 용입 깊이

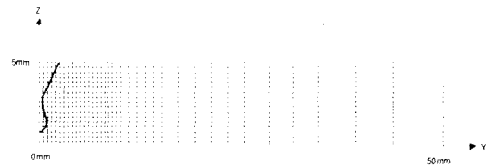
$$Q = \eta_L \frac{P}{V} \quad (4)$$

여기서,  $Q$ : 용접입열 (kJ/cm)  
 $P$ : 시편에서의 레이저 출력 (kW)  
 $V$ : 용집속도 (cm/sec)  
 $\eta_L$ : 레이저 용집효율

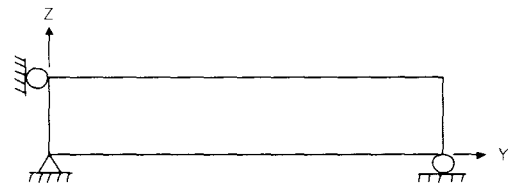
**Table 1** Laser welding condition

Type of Laser	CW Nd:YAG Laser
Beam power	3.3kW
Focal length	0 mm
Travel speed	1.25 cm/sec

또한, 해석을 위하여 사용된 모델은 실제 시편의 중앙부 단면에서의 2차원  $\frac{1}{2}$  모델 (크기: 50mm×50mm, Fig.2)에 대해 해석하였으며 전체 절점수 및 요소수는 각각 4,029개와 3,900개로 하였으며, 최소요소의 크기는 0.1mm×0.1mm로 하였다. 또한 열탄소성 해석을 위한 경계조건을 Fig.3에 나타내었다.



**Fig.2** Schematic mesh division(2-D  $\frac{1}{2}$  model)



**Fig.3** Boundary condition for thermal elasto-plastic analysis

## 3. 해석결과 고찰

### 3.1 열전도 해석결과 및 고찰

수치해석 결과를 고찰하기 위하여 Fig.4에 보인 바와 같이 모델의 폭방향 및 깊이방향의 주목선을 각각 2개씩 취하여 이를 기준으로 해석 결과를 고찰하였다.

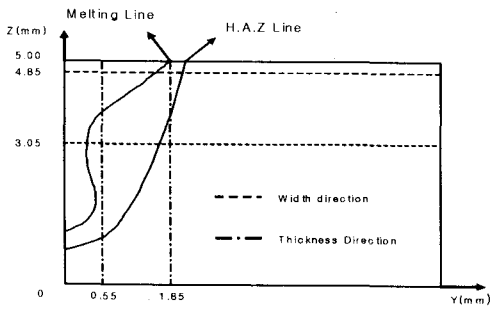
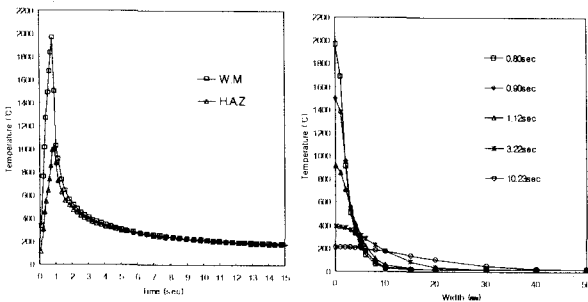


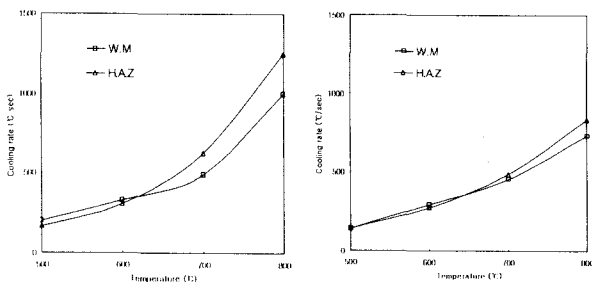
Fig.4 Thermal and mechanical view lines

우선 용접에 의해 온도의 변화가 급격할 것으로 예상되어지는 상표면 바로 아래지점에서 용착금속(W.M)과 열영향부(H.A.Z)의 용접열사이클을 Fig.5의 (a)에 보였으며 Fig.5 (b)에는 시간에 따른 냉각사이클을 도시하였으며 이를 좀더 자세하게 고찰하기 위하여 Fig.6과 같이 용접부 깊이에 따라 상부와 중앙부에서의 용착금속부와 열영향부의 냉각구배를 검토하였다.



(a) between W.M and H.A.Z (b) along the width direction

Fig.5 Temperature distribution (z=4.85mm)



(a) z=4.85mm (b) z=3.05mm

Fig.6 Cooling rates in W.M and H.A.Z

상기 그림에 도시된 냉각구배 곡선을 고찰하여 보면 상부에서의 냉각구배가 중앙부에서의 냉각구배보다 큼을 알 수 있으며 이로써 용접부의 상부에서 보다 급냉이 이루어짐을 알 수 있으며 이는 용접상부의 경우 모재로의 열전도 및 대기 중의 열전달이 동시에 이루어지기 때문인 것으로 사료된다.

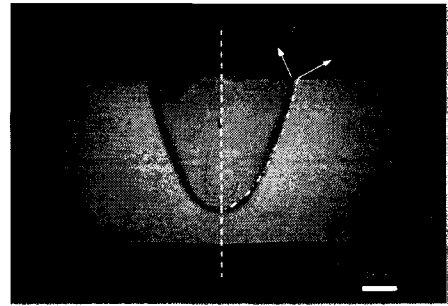
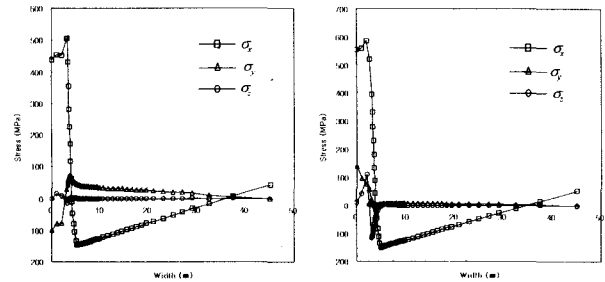


Fig.7 Comparison between experiment and simulation on the H.A.Z line

Fig.7에 시뮬레이션에 의해 예측된 열영향부와 모재의 경계를 등온선(723°C)을 이용하여 나타내었으며, 그 결과가 실제 경계선과 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며 이로써 열전도 해석이 실 현상의 재현성을 갖음을 확인할 수 있었다.

### 3.2 열탄소성 해석결과 및 고찰

우선, 상부(z=4.85mm)와 중앙부(z=3.05mm)에서의 잔류응력분포 (Fig.8)를 보면 상부와 중앙부에서 모두 잔류응력의 폭 방향 분포 폭이 좁은 열영향부로 인해 좁게 형성됨을 알 수 있으며 최고값은 열영향부에 인접한 모재에서 형성됨을 알 수 있으며 가장 두드러진 특징은 폭방향응력 성분( $\sigma_y$ )의 분포가 상이하다는 것이며 이는 상부와 중앙부에서의 냉각구배 차이에 기인된 것으로 사료되며 해석결과는 기존의 연구발표내용(C. Carnignani, 1999)과 동일한 양상을 보임을 알 수 있었다.



(a) z=4.85mm (b) z=3.05mm

Fig.8 Welding residual stresses along the width direction

또한, 동일한 주목선에서의 소성변형을 분포양상 (Fig.9)을 보면 잔류응력의 크기가 가장 작은 두께방향의 응력성분( $\sigma_z$ )에 대한 소성변형율이 가장 크게 나타남을 알 수 있으며 이는 두께방향의 강성도가 가장 작은데 기인된 것으로 생각된다.

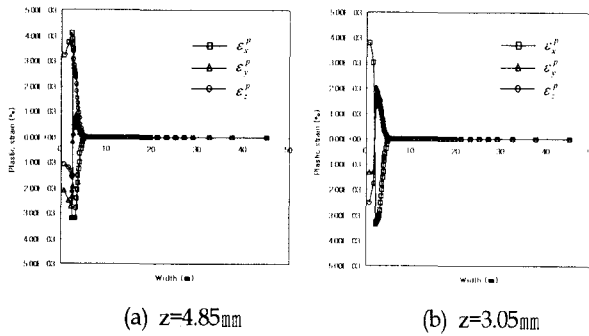


Fig.9 Plastic strain along the width direction

한편, 용접부의 깊이방향에 대한 용접부의 역학적 특성을 각각의 주목선( $y=0.55\text{mm}$ ,  $y=1.85\text{mm}$ )에 대해 고찰해 보면, Fig.10에 보인 잔류응력 분포곡선에서 볼 수 있는 것처럼 못 형상(Nail head shape)의 용접부에서 나타나는 용접부 형상이 급격히 변하는 지점에서 응력 집중현상이 발생하고 있음을 알 수 있으며 잔류된 소성변형을 분포 특성(Fig.11) 역시 이 부분에서 변형율이 작아짐을 알 수 있었다. 따라서, 부분용입 레이저 용접시 나타날 수 있는 못 형상의 용접부가 적용될 수 있는 개소에 대해서는 사전 용접설계 단계에서부터 이러한 특성을 고려한 용접설계가 필요할 것으로 생각되며, 합금원소나 황과 인 등이 다량 함유된 재질의 레이저 용접시 이러한 용접부의 역학적특성 고려가 필요할 것으로 생각된다.

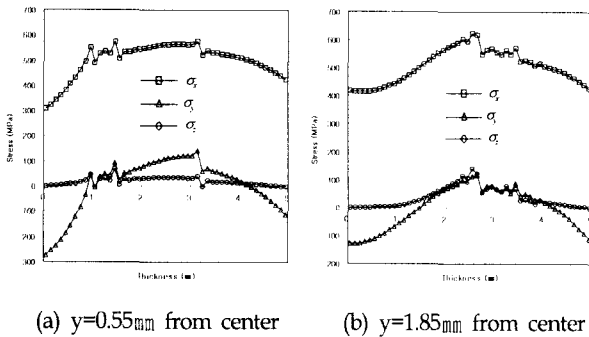


Fig.10 Welding residual stresses along the thickness direction

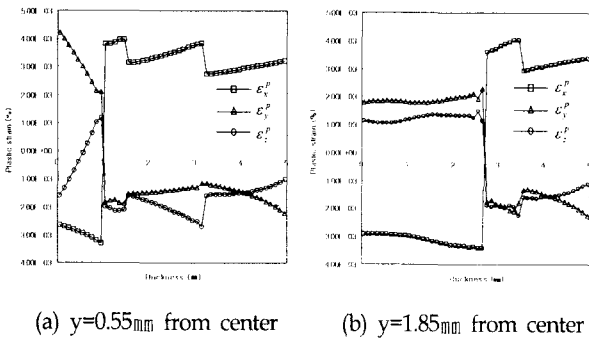


Fig.11 Plastic strain along the thickness direction

## 4. 결 론

본 논문에서는 레이저 용접시 발생하는 못 형상(Nail head shape)의 용접부에 대해 열 전도 및 열탄소성 유한요소 해석을 실시하여 용접부에 대한 역학적 특성을 확인하고자 하였으며, 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 용접부 상부에서의 냉각구배가 중앙부에서의 냉각구배보다 큼을 알 수 있으며 이로써 용접부의 상부에서 보다 급냉이 이루어짐을 알 수 있었다.

(2) 용접부 상부( $z=4.85\text{mm}$ )와 중앙부( $z=3.05\text{mm}$ )에서의 잔류응력분포를 보면, 잔류응력의 폭 방향 분포 폭이 좁은 열영향부로 인해 좁게 형성됨을 알 수 있으며 최고값은 열영향부에 인접한 모재에서 형성됨을 알 수 있었다. 또한, 폭방향응력 성분( $\sigma_y$ )의 분포 양상이 상부와 중앙부에서 상이하였으며, 이는 결론 (1)의 영향으로 사료된다.

(3) 부분용입 레이저 용접시 나타날 수 있는 못 형상(Nail head shape)의 용접부에서는 용접부 형상이 급격히 변하는 지점에서 응력 집중현상이 발생하며, 이러한 용접부 형상이 적용되는 개소에 대해서는 사전 용접설계 단계에서부터 이러한 특성을 고려한 용접설계가 필요할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 2002년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- E. A. Brandes and G. B. Brook (1992), "Smithells metal reference book", 7th ed., Butterworth-Heinemann, pp.14-27~14-41, pp.22-100~22-103.
- David R. Lide and H. P. R. Frederikse (1995-1996), "CRC Handbook of Chemistry and Physics", CRC press (National Institute of Standards and Technology), 76th Edition pp.12-176, 12-190.
- 방한서, 김유철 (1991), "有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元非正常熱傳導 解析", 大韓熔接學會誌, 第9卷 第2號, pp.37~43.
- 방한서 (1992), "厚板 熔接部의 力學的 特性 - 有限要素法에 의한 3次元 熱彈塑性解析", 大韓熔接學會誌, 第10卷 第4號, pp.250~258.
- K.W.Carlson (1985), "The role of heat input in deep penetration laser welding", ICALEO, pp.49~57.
- M.R.FREWIN, D.A.SCOTT (1999), "Finite Element Model of Pulsed Laser Welding", AWS, Welding Journal, pp.15-s~22-s.

- A. Kaplan (1994), "A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile", T. Phys. D:Appl. Phys., Vol.27, pp.1805~1814.
- C. Carmignani, R. Mares, G. Toselli (1999), " Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick plate. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.179 pp.197-214.

---

2002년 5월 10일 원고 접수

2002년 5월 10일 최종 수정본 채택