

고장력강(HT50) 레이저용접부의 용접잔류응력 및 파괴인성 특성

노찬승* · 오종인* · 방희선** · 방한서**
*조선대학교 선박해양공학과 대학원
**조선대학교 항공·조선공학부

The Welding Residual Stress and Fracture Toughness Characteristics of HT50 Laser Welded Joint

CHAN-SEUNG RO*, CHONG-IN OH*, HEE-SEON BANG** AND HAN-SUR BANG**
*Graduate School, Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun Univ., Gwangju, Korea
**Division of Aerospace and Naval Architecture Eng., Chosun Univ., Gwangju, Korea

KEY WORDS: Laser beam welding 레이저빔용접, Crack tip opening displacement(CTOD) 균열선단개구변위, Charpy absorbed energy 샤르피 흡수에너지, Fracture toughness 파괴인성, Fracture pass deviation(FPD) 파괴경로변경

ABSTRACT: Recently, many industries have been employing the application of laser beam welding, due to the resulting high welding quality, such as smaller width of melting and heat affective zone, smaller welding deformation, and fine grains of weldment, compared to arc welding. However, in order to appropriately utilize this welding process with steel structure, the characteristics of welding residual stresses and fracture toughness in welded joints are to be investigated for reliability. Therefore, in this study, the mechanical properties of weldments by arc and laser welding are investigated using FEM to confirm the weldability of laser welding to the general structural steel (HT50). The Charpy impact test and 3-points bending CTOD test are carried out in the range of temperatures between -60 °C and 20 °C, in order to understand the effect on the fracture toughness of weldments. From the research results, it has been found that the maximum residual stress appears at the center of plate thickness, and that the fracture toughness is influenced by strength mis-match.

1. 서 론

레이저빔 용접법은, 아크용접법에 비하여 역사가 짧고, 비교적 새로운 용접법이지만, 여러가지 장점을 가지고 있어 폭넓은 분야에 적용이 기대되어지고 실용화를 향한 연구개발이 활발히 진행되고 있다(Yasuda and Kitani, 2000).

레이저빔 용접법은 고에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 용융부가 좁고 깊은 용입이 얻어지고, 용접입열에 의한 열전도가 적기 때문에 아크용접법에서 문제로 되고있는 용접변형을 저감할 수가 있다. 또한 기계화, 자동화가 비교적 쉬운 특징을 가지고 있다. 반면, 초기 설비비가 고가이고, 재료에 정밀한 개선평공 등을 필요로 하기 때문에 그 적용은 한정된 분야에 국한되어 왔었지만, 최근 기술이 향상되어 고출력화, 비용감소, 고속 후판의 용접이 가능하게 되고, 자동차, 기계, 및 이화학분야 등의 작은 부품뿐만 아니라 대형구조물의 적용이 진행되고 있다. 강구조물에 대하여 레이저빔 용접법을 유효하게 활용하기 위해서는 용접부의 역학적 제특성에 대하여 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 50kg급 고장력강의 레이저빔 용접부에 대하여 수치해석을 통하여 용접잔류응력 및 소성변형도

특성을 고찰하였고, 3점굽힘 CTOD시험 및 샤르피충격시험을 통하여 용접부의 파괴인성 특성을 고찰하였다.

2. 실험 및 유한요소해석 방법

2.1 실험조건 및 방법

실험에 사용한 재료는 50kg급 고장력강이며 Table 1, 2에 재료의 화학조성 및 기계적 성질을 나타내었다. 또한, 시험편의 크기는 Fig. 1에서 보인 바와 같이 길이(L)=500mm, 폭(B)=300mm, 판두께(T)=12mm 이며, 용접은 맞대기 CO₂ 레이저용접으로 용접조건은 Table 3과 같다.

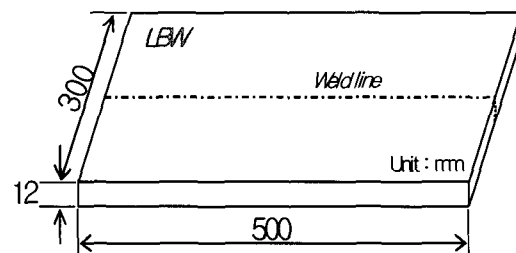


Fig. 1 Configuration of welding specimen

교신저자 오종인: 광주광역시 동구 서석동 375

062-230-7137 chong1015@hotmail.com

Table 1 Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.15	0.26	1.14	0.011	0.002	0.01	0.01	0.034

Table 2 Mechanical properties

Tensile test					CVN	
σ_Y (Kgf/mm ²)	σ_T (Kgf/mm ²)	El.(%)	Y.R.(%)	Temp.(°C)	ave.(J)	
40	54	22.8	73.6	0	340	

σ_Y : Yield stress, σ_T : Tensile strength,
El.: Elongation(G.L.=32mm), Y.R.: Yield to tensile ratio

Table 3 Welding condition of 12kw CO₂ laser beam welding

Average output	Working gas	Gas capacity	Welding speed	Focus
10 kW	He	40 L/min	1.2 m/min	189 mm

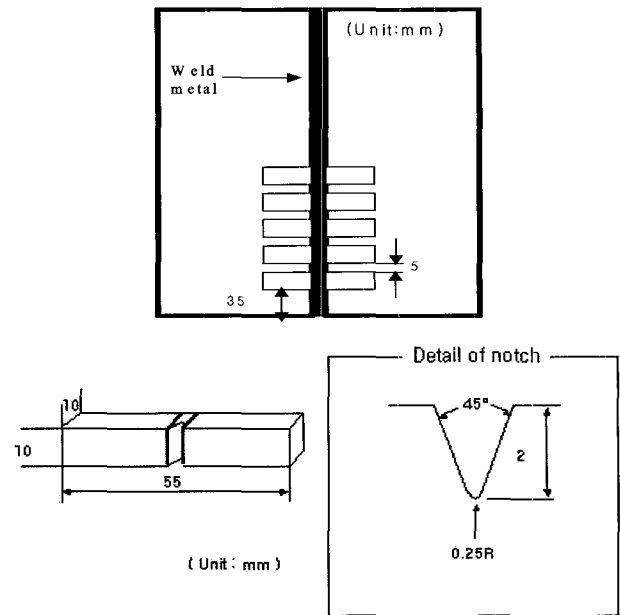
CO₂ 레이저 용접에 의해 제작된 시험편에 대하여 비커스 경도, 파괴인성 및 3점굽힘 CTOD 실험을 수행하였다.

시험편의 단면에 대해 용접부의 두께방향으로 1/4t, 2/4t, 3/4t의 위치 및 중앙부(용접선)에 대하여 비커스 경도를 측정하였으며 용접금속의 파괴인성 실험을 위한 샤르피 충격시험은 용량 294J의 시험기를 이용하여 용접체로부터 결함이 적은 판두께 중앙부로부터 채취된 표준 V노치 시험편을 -60°C ~ 20°C의 온도 범위에서 수행하였다. 또한, 3점굽힘 CTOD 시험편 역시 샤르피 충격시험편과 동일하게 용접부로부터 결함이 적은 용접금속부 중앙이 되도록 채취하였으며, 시험편의 냉각은 냉각베스를 이용하여 드라이아이스를 투여한 메탄을 안에서 수행하였으며, 그 시험편의 형상 및 크기는 Fig. 2에 나타내었다(Satoh et al., 1985).

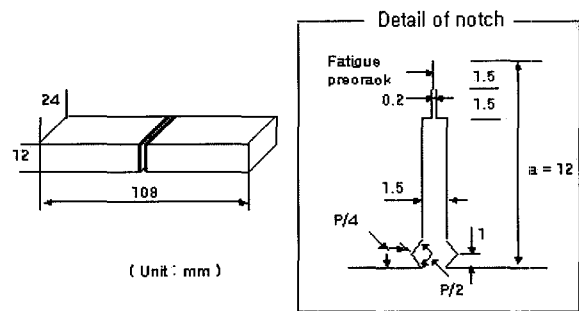
2.2 유한요소해석 이론 및 조건

온도의 시간 및 공간의 분포는 식 (1)과 같이 2차원 비정상 열전도 지배방정식을 만족하며 경계조건으로서는 해석대상인 모델 내부로의 열전도와 대기 중으로의 열전달이 있는 것으로 하였으며, 고체에서의 열전도 문제를 갈라킨법을 이용하여 식 (2)와 같이 유한요소 정식화를 하였다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (1)$$



(a) Charpy impact test specimen



(b) 3-point bend test specimen

Fig. 2 Charpy impact and 3-point bend test specimens

$$[K]\phi + [C] \frac{\partial \phi}{\partial t} = \{F\} \quad (2)$$

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

또한, 열탄소성 해석을 위해서는 식 (3)에 보인 것과 같이 전변형률(ϵ)에 탄성변형률(ϵ^e)과 소성변형률(ϵ^p) 그리고 열응력에 의한 변형률(ϵ^t)이 포함되도록 하였다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^t \quad (3)$$

본 연구에서는 용접열원을 순간열원으로 가정하고 해석에서 실 용접현상의 재현을 위해 역학적 경계조건은 실제 용접현상을 반영하여 수치 해석하였으며 탄성 및 소성의 전 영역에서 재료의 기계적 물성치(항복응력, 탄성계수, 열팽창계수 등) 및 재료상수의 온도 의존성을 고려하여 해석하였다. 또한, 소성역에서는 선형등방경화법칙을 고려한 von-Mises 항복조건을 항

복합수로 사용하였으며, 변형·응력의 관계식을 소성 이론에 따라 증분식으로 나타내어 용접잔류응력을 해석하였다. 여기서 용융부에서의 유체역학적 거동, 키홀 내부의 증발현상, 잠열 및 금속 상변태는 고려하지 않았으며 재료는 등방성이고 초기 온도는 20℃인 것으로 가정하였고 재료의 역학적 강성 회복온도는 750℃로 가정하였다(김중명, 1997).

수치해석을 위하여 사용되어진 모델 형상은 Fig. 3에 보인 것과 같이 4절점 등계수(Isoparametric) 요소를 사용하고 용접선 길이방향의 중앙단면에서 시험편의 대칭성을 고려하여 1/2 모델(총 절점수 1965개, 총 요소수 1820개, 최소 요소크기 0.1mm×0.2mm)을 이용하였으며 열원에 따른 입열량은 실제 용접조건을 고려하여 식 (4)와 (5)(Carlson, 1985)를 이용하여 계산하였다.

$$P = P' \exp(-\alpha L) \tag{4}$$

여기서, P : 깊이 L 에서의 빔의 출력, P' : 입사출력(kW)
 α : 흡수계수(-1)

$$Q = \eta_L \frac{P}{V} \tag{5}$$

여기서, Q : 입열량(kJ/cm), V : 용접속도(cm/sec)
 P : 시편에서의 레이저 출력(kW)
 η_L : 레이저 빔 용접효율

또한 레이저 용접부는 용접금속 및 열영향부 폭이 매우 좁기 때문에 용접금속의 기계적 성질을 파악 할 수 있는 인장시험이 곤란한 점이 있어서 용접금속의 기계적 성질은 실온에서 측정된 비커스 경도로부터 식 (6)을 이용하여 환산하여 사용하였다(Satoh, 1988).

$$\sigma_Y = \frac{Hv}{3} (0.16)^{\frac{1}{\sigma_Y}}, \quad \sigma_T = \frac{Hv}{3} \left(\frac{7}{0.217\sigma_T} \right)^{\frac{1}{\sigma_T}} \tag{6}$$

여기서, σ_Y : Yield stress (kgf/mm²)
 σ_T : Tensile stress (kgf/mm²)

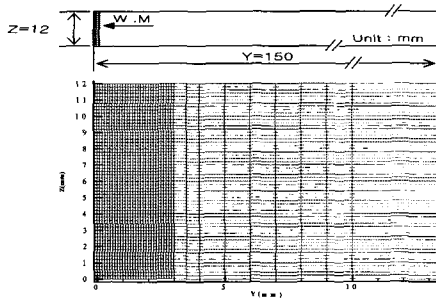


Fig. 3 Mesh division for numerical analysis

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부의 형상 및 경도 측정 결과

용접부의 마크로 단면사진과 용접부의 두께방향으로 1/4t, 2/4t, 3/4t의 위치 및 중앙부(용접선)에 대하여 측정된 비커스 경도와 각 측정위치에서의 용착부의 폭을 정리하여 Table 4에 나타내었다.

단면사진으로부터 용접부는 관통 용접비드가 얻어진 키홀 용접이 되었음을 알 수 있다. 또한 측정결과 평균 용착부의 폭은 3.2mm 정도였으며, 평균 경도는 모재가 약 160정도이고 용착부가 약 330정도로 모재와 용착부의 강도비($Sr = Hv^{WM}/Hv^{BM}$)는 약 2.06 정도였다.

3.2 유한요소해석 결과

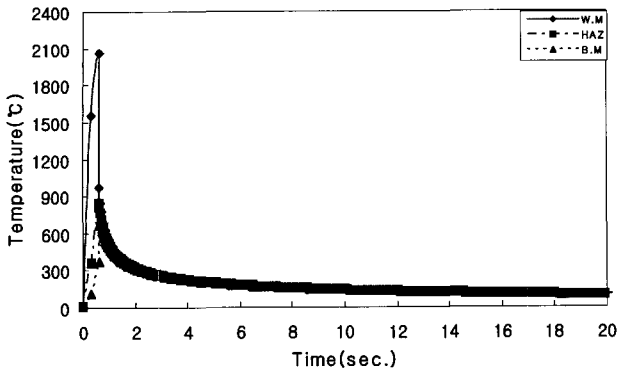
Fig. 4 (a), (b), (c)는 각각 두께방향의 상층부($z=11.9$ mm), 중앙부($z=6.0$ mm), 하층부($z=0.1$ mm)에서 용착금속(WM), 열영향부(HAZ), 모재(BM)에서 시간에 따른 열 이력을 나타낸 것으로써 공통적으로 1초미만의 짧은 시간동안에 급열, 급냉의 과정이 나타나고 있으며, 그 정도는 용착금속에서 가장 현저하게 보이고 두께에 따른 온도분포는 용착금속을 기준하여 볼때, 상층부에서 가장 높은 온도가 형성되고 다음은 하층부, 그리고 중앙부 순으로 나타나고 있는데 이것은 레이저빔 용접의 특성상 표면(상층부)부로부터 빔이 조사되어 두께방향으로 관통되면서 용접이 이루어지므로 상층부에서 보다 높게 나타나는 것으로 생각된다. 반면 중앙부에 비하여 하층부가 보다 고온이 되는 것은 관통용접에 의하여 하층부에서 열의 집적 현상이 이루어지기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 용접 초기에 온도 구배가 크고, 시간이 경과함에 따라 완만하게 냉각이 진행되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 상표면($z=11.9$ mm)지점에서의 용착부에 대한 서브머지드 아크용접(SAW)과 레이저 빔 용접(LBW)의 수치해석 결과를 비교해 놓은 열 이력 곡선이다(방한서, 1998).

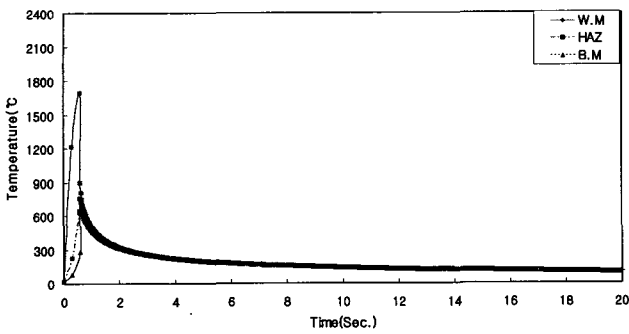
그림을 살펴보면 레이저빔 용접의 경우가 서브머지드 아크 용접에 비하여 순간적으로 온도가 상승하고 냉각되는 정도가 큰 특징을 잘 보여주고 있는데, 이는 레이저 빔 용접부의 열영향부 폭이 상대적으로 좁게 되고 용착금속의 경화 정도가 크게 되는 원인으로 사료된다.

Table 4 Vickers hardness & width of weldment

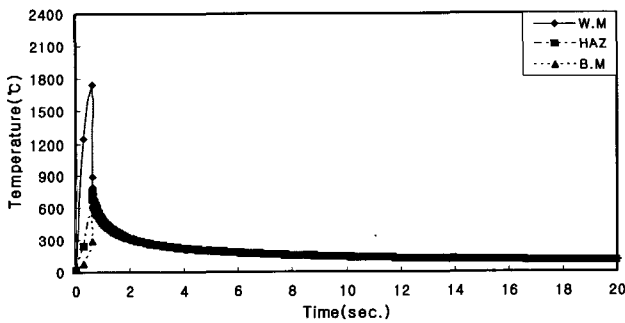
Bead shape	Position	Width of weldment	Hardness		Strength ratio ($Sr = Hv^{WM}/Hv^{BM}$)
			BM	WM	
	1/4t	3.5 mm	158	350	2.22
	2/4t	3.2 mm	160	324	2.03
	3/4t	2.9 mm	161	318	1.98
	Average	3.2 mm	160	330	2.06



(a) Top section



(b) Middle section



(c) Bottom section

Fig. 4 Temperature variations with time

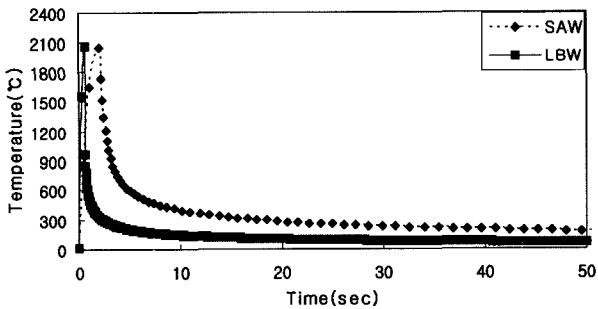
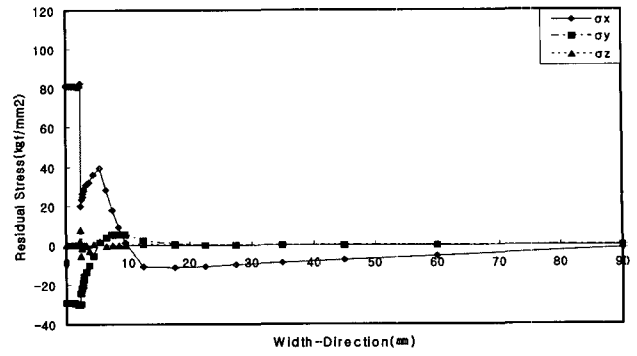
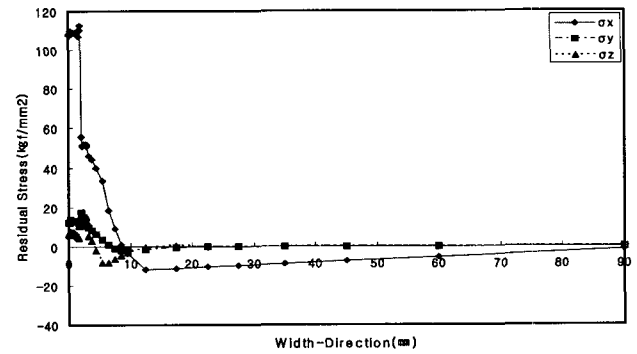


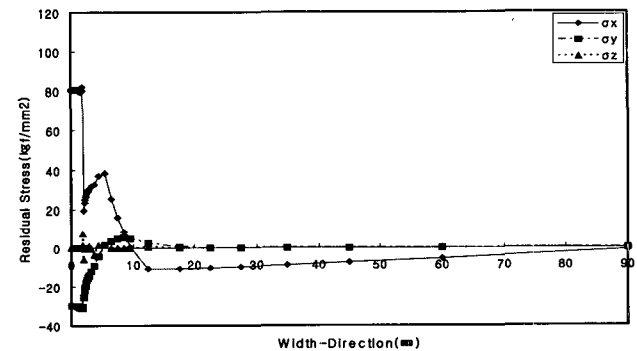
Fig. 5 Thermal history comparison of SAW & LBW



(a) Top section



(b) Middle section



(c) Bottom section

Fig. 6 Residual stress patterns transverse to the weld line

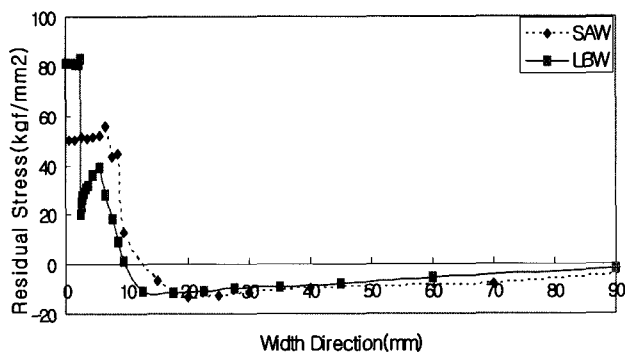
Fig. 6은 폭(y)방향을 따라 분포하는 용접잔류응력 특성으로써 (a)는 상단면($z=11.9\text{mm}$), (b)는 중앙단면($z=6.0\text{mm}$), (c)는 하단면($z=0.1\text{mm}$)에서의 잔류응력을 성분별로 나타낸 것이다.

두께별 잔류응력 분포가 중앙단면을 중심으로 상·하 단면에 유사한 대칭성의 특성을 보임을 알 수 있고 응력성분별로 살펴보면 σ_x 는 용착금속 및 열영향부에서 높은 인장응력이 나타나고 모재와의 경계부근에서 직선적으로 감소하는 경향을 보이는데 이처럼 직선적으로 감소하는 것은 불균질의 영향으로서 즉, 열영향부를 경계로 모재와 용착금속간의 강도차가 심할수록 직선적으로 감소하는 폭이 증가할 것으로 사료된다. σ_y 는 표면부의 용착금속부에서는 압축응력이 지배적으로 나

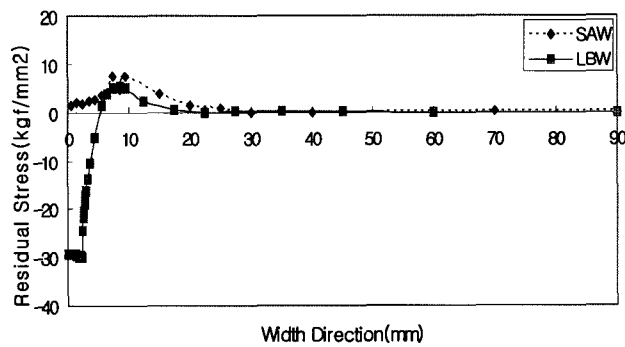
타나며 중앙부에서는 인장응력이 나타난다. 즉, 용접선 직각방향의 응력(σ_y)는 상·하 표면부의 일정 두께구간에서 압축응력이 잔류함으로써 표면부에서 발생하는 균열을 억제하는 효과가 있을 것으로 사료된다. σ_z 는 중앙부의 용착금속부에서 인장응력이 나타나고 표면부에서는 거의 0에 가까운 값을 보인다. 각 성분별 잔류응력의 크기를 비교하면 용접선 길이 방향의 응력인 σ_x 가 상대적으로 가장 높은 응력값을 나타내며 σ_z 가 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 시험체의 형상에 기인하는 기하학적 구속조건의 영향으로 사료된다.

Fig. 7은 레이저빔 용접부와 서브머지드 용접부의 용접잔류응력에 대한 수치해석 결과를 비교한 것이다(방한서, 1992).

용접잔류응력이 상대적으로 큰 용접선 길이 방향응력 σ_x 와 용접선 폭 방향 응력 σ_y 를 상표면($z=11.9\text{mm}$)에서 폭 방향에 대하여 나타낸 것이다. σ_x 는 두 용접법 모두 용접금속 및 열영향부 근처에서 높은 인장응력이 잔류하는 것을 알 수 있으며 그 크기는 레이저빔 용접의 경우가 크게 나타나는데 이것은 레이저빔 용접부의 경화가 보다 크기 때문인 것으로 사료된다. 반면 고응력이 잔류하는 영역은 용접금속 및 열영향부가 상대적으로 좁은 레이저빔 용접부에서 좁게 나타나고 있어 힘의 견지에서 보면 인장응력이 잔류하는 영역이 좁은 레이저빔 용접의 경우가 보다 작을 것으로 예상할 수 있다. σ_y 는 아크



(a) σ_x



(b) σ_y

Fig. 7 Comparison of residual stress value in SAW & LBW

용접부에서 인장응력이 지배적인데 비하여 레이저빔 용접부에서 용접금속 및 열영향부 부근에서 높은 압축응력이 잔류하는 것이 특징적이라 여겨지며, 앞서도 언급하였듯이 이러한 특성은 용접부 표면에서 발생할 수 있는 균열을 억제하는 작용을 할 것으로 예상되어서 레이저빔 용접부의 우수한 특성으로 사료된다.

3.3 파괴인성 실험 결과

Fig. 8은 용접금속 중앙부에 노치를 주어 설계한 표준 샤르피 충격시험편을 제작하여 $-60^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 충격시험을 수행한 결과이다. -60°C 에서 가장 낮은 흡수에너지를 나타내었고 -45°C 에서는 흡수에너지가 낮은 시험편($vE=57\text{J}$)에서 높은 시험편($vE=247\text{J}$)까지 폭넓게 분포하고 있으며 -20°C 와 0°C 에서는 흡수에너지가 상대적으로 높게 나타났다.

Fig. 9는 시험온도 -45°C 에서 가장 높은 흡수에너지와 가장 낮은 흡수에너지를 나타내는 시험편(Fig. 8중 원으로 표시)의 파괴경로를 보여주는 사진이다. 사진에서 보여주는 것처럼 흡수에너지가 낮은 시험편은 그 파괴경로가 용착금속부에서 발생한 반면 흡수에너지가 높은 시험편의 파괴경로는 용착금속으로부터 모재측으로 진행(FPD: Fracture path deviation)되어 있음을 알 수 있었다. 따라서 용착금속부가 좁은 레이저용접에서는 충격시험시 어느 일정온도 이상이 되면 파괴경로가 용착금속으로부터 모재측으로 벗어나 진행하는 특성이 있을 것으로 사료된다. 또한 -45°C 를 경계로 고온영역에서는 고 흡수에너지를 나타내는 연성파괴가 발생하고 저온영역에서는 저 흡수에너지를 나타내는 취성파괴가 발생하는 것으로부터 FPD가 나타나는 온도구간이 연성·취성 천이 구간으로 사료된다.

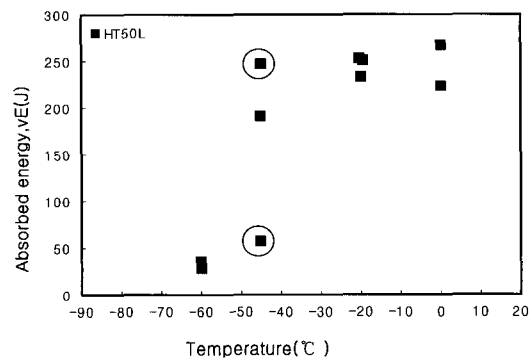
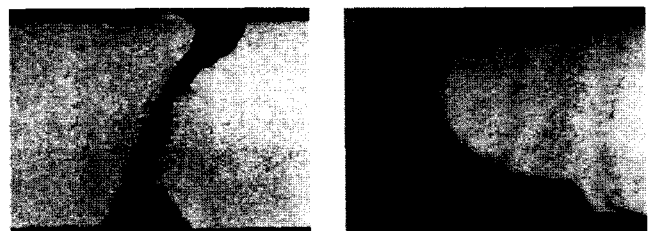


Fig. 8 Charpy transition curve of weld



(a) $vE= 57 \text{ J}$

(b) $vE= 267 \text{ J}$

Fig. 9 Fracture path of Charpy impact test(at -45°C)

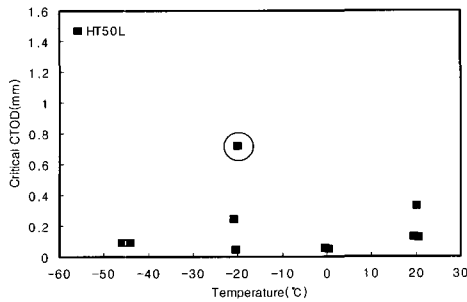


Fig. 10 Temperature dependency of critical CTOD values



Fig. 11 Fracture path of 3-point CTOD bend test ($\delta=0.719\text{mm}$)

-45°C에서 20°C 구간에서 실시한 3점굽힘 CTOD 실험결과를 Fig. 10에 나타내었다. 전체적으로 한계 CTOD값은 낮게 얻어졌으며 -20°C에서는 한계 CTOD값이 $\delta=0.719\text{mm}$, $\delta=0.244\text{mm}$, $\delta=0.048\text{mm}$ 로서 비정상적으로 넓은 범위에 걸쳐 실험결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이러한 원인을 알아보기 위하여 샤르피 충격시험에서와 동일하게 파괴경로를 살펴보았다. Fig. 11는 시험온도 -20°C에서 가장 높은 한계 CTOD값($\delta=0.719\text{mm}$)을 갖는 시험편의 파면 및 파괴경로를 나타내는 사진으로서 시험편의 파괴가 용착금속에서 벗어나 열영향부를 따라서 진행되어 있음을 잘 보여주고 있으며, $\delta=0.244\text{mm}$ 를 나타낸 시험편의 파괴경로 역시 파괴경로가 모재측으로 벗어나 있음을 볼 수 있었으나 가장 낮은 값을 나타내는 $\delta=0.048\text{mm}$ 의 시험편에서는 파괴경로가 용접금속에서 거의 직선적으로 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 샤르피 충격시험결과에서와 유사하게 3점굽힘 CTOD 시험에서도 어느 일정온도에서 FPD가 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러나 본 실험의 결과에서는 3점굽힘 CTOD 실험의 경우 0°C에서의 한계 CTOD값이 낮게 나타나고 있어서 충격시험의 결과에서처럼 FPD가 천이온도영역에서 발생한다고 결론 내리기는 어려울 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 50kg급 고장력강 레이저용접부의 용접잔류응력 및 파괴인성 특성을 수치해석과 실험을 통하여 검토하였으며 아크용접의 경우와 수치해석을 통해 열적특성 및 용접잔류응력에 대하여 역학적 관점에서 비교함으로써 아래와 같은 레이저빔 용접의 특성을 확인할 수 있었다.

(1) 레이저 용접부의 열적 특성은 순간적인 선 열원 형태로서 급열·급냉의 정도가 크고, 상하표면부가 중앙부에 비하여 온도가 높게 됨을 알 수 있었다.

(2) 잔류응력의 최대값은 판 두께 중앙부에서 나타나고 판 두께 중앙부를 경계로 상·하 대칭적인 잔류응력이 분포하는 것을 알 수 있으며 용접선 직각방향의 응력 σ_y 가 상·하 표면부에서 압축응력이 잔류하고 있어 표면에서 발생하는 균열을 억제하는 역할을 할 것으로 기대된다.

(3) 용접금속의 경도는 평균 Hv 330정도이고 강도비 $Sr=2.06$ 이다.

(4) 파괴인성 실험으로부터 온도에 따른 인성값을 고찰한 결과 -45°C이상의 온도에서는 우수한 충격 인성값을 나타냄을 알 수 있었으며 일정온도 이상에서 파괴경로가 용착금속으로부터 모재측으로 벗어나는 현상(FPD)이 나타남을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 “산업기술기반조성사업 (초정밀 기계·전자부품 제조를 위한 마이크로조이닝 공동연구 기반구축사업)”의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김종명 (1997). “후강판 Butt 및 T-joint 용접부의 최적 홈 형상에 관한 연구”, 조선대학교 박사학위 논문
- 방한서 (1998). “고장력강 용접부의 열 역학적 거동에 관한 수치해석적 연구”, 한국해양공학회지 제12권, 제4호, pp 33-42.
- 방한서 (1992). “후판 용접부의 역학적 특성”, 대한용접학회지 제10권, 제4호, pp 250-258.
- Carlson, K.W. (1985). “The Role of Heat Input in Deep Penetration Laser Welding”, ICALEO, pp 49-57.
- Satoh, K. (1988). “Welding Structure Handbook”, pp 53-54.
- Satoh, K., Minami, F. and Funato, K. (1985). “Fracture Toughness Evaluation by Side-Groove Charpy Tests of HT80 Electron Beam Welds”, JWRI, Vol 3, No 1, pp 97-103.
- Satoh, K. and Toyoda, M. (1986). “Fracture Toughness Requirements and Fracture Toughness Testing of Welds”, JWS, Vol 55, No 3, pp 144-152.
- Yasuda, K. and Kitani, Y. (2000). “Metallurgical Characteristics of Laser Weld Metal for Heavy Plates”, JWRI, Vol 18, No 1, pp 95-101.

2007년 2월 8일 원고 접수

2007년 5월 3일 최종 수정본 채택