한국해양공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집 PP.274~278

수치해석에 의한 2¼Cr-1Mo강 CO_2 레이저 용접부의 잔류응력 분포 특성에 관한 연구

방한서* · 김영표** · 김 형** · 유석민**
*조선대학교 선박해양공학과
**조선대학교 선박해양공학과 대학원

A Study on the Distribution of Welding Residual Stresses in 2¼Cr-1Mo Steel by CO_2 Laser Welding.

HAN-SUR BANG*, YOUNG-PYO KIM**, HYOUNG KIM** AND SUK-MIN YU*
*Faculty of Naval Architectural Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea
**Faculty of Naval Architectural Engineering, Graduate school of Chosun University, Gwangju, Korea

KEY WORDS: 2¼Cr-1Mo Steel 2¼Cr-1Mo강, CO_2 Laser Welding CO_2 레이저 용접, 용접잔류응력, Welding Residual Stresses Finite Element Method 유한요소해석.

ABSTRACT: *In recent, an application of high energy density beam welding is increasing to obtain the high quality in weldments. Laser welding, especially, has been recognized as an useful method and its beam power has also increased according to the development of relevant technology. However, welding method in the fields of power plant is conservative because their structures have required to endure high temperature and pressure. So, authors conduct the numerical simulation in order to consider the possibility of laser welding on the material of the pressure vessels (2¼Cr-1Mo steel). As a result of this study, we can confirm the advantages of laser welding and obtain useful information for the experiments of weldability.*

1. 서 론

고밀도 에너지 용접법의 경우 지금까지는 주로 용접부의 고품질이 요구되어지는 분야에 일부 적용되어지는데 그쳤으나, 최근 기술의 발전에 따른 고출력화가 실현되어 중공업을 비롯한 각종 제조업 분야에 활발하게 적용되어지고 있으며 선진국의 경우 발전설비의 용접에 고에너지 용접법을 적용한 사례가 보고되어지고 있다. 특히 고에너지 용접법 중 레이저 용접의 경우 전자빔 용접에서 제약사항으로 대두되어지는 진공 챔버가 필요 없으며, 전자빔 용접에 상응하는 고출력화가 이루어져 향후 가장 주목받는 첨단 용접법이라 할 수 있을 것이다. 따라서 타 산업 분야에 비해 우수하고 건전한 용접부 즉, 재질의 열화 및 용접 입열의 최소화와 우수한 강도 특성이 요구되어지는 발전분야, 특히 원자력 발전 분야의 용접부에 대해 레이저 용접의 적용 가능성을 검토함으로써 원자력 발전설비에 대한 용접법의 최적 프로세스를 확립하고자 하였으며, 이를 위해 발전 분야에서 많이 쓰이고 있는 2¼Cr-1Mo 강의 레이저 용접부에 대한 열 해석 및 열탄소성 해석을 실시하여 용접부의 역학적 특성을 규명하고자 하였다.

2. 해석이론 및 시뮬레이션 조건

2.1 2차원 비정상 열전도해석

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

여기서, T : 온도 (℃)
ρ : 밀도 (g / cm^3)
$\dot{Q}$: 단위시간당 단위면적에서 발생되어지는 열에 의한 온도변화율 ($cal / cm^2 \sec$)
t : 시간(sec)
λ : 등방성물질의 열전도율($cal / cm \sec ℃$)
c : 비열($cal/g℃$)

2.2 열탄소성해석

열탄소성 해석을 위해서는 식 (2)에 보인 것처럼 전변형율(ε)에 탄성변형율(ε^e)과 소성변형율(ε^p) 그리고 열응력에 의한 변형율(ε^t)이 포함되도록 하였다.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^t \qquad (2)$$

제1저자 방한서 연락처: 광주광역시 동구 서석동 375
062-230-7134 hsbang@mail.chosun.ac.kr

2.3 CO_2 Laser 용접 시뮬레이션 조건

용접부의 역학적 거동을 파악하기 위하여 용접부를 2차원 ½ 모델(폭: 150㎜×두께: 12㎜)로 모델링(총절점수: 4525개, 총요소수: 4320개) 하였으며, 4절점 아이소파라메트릭 요소를 이용하여 2차원 비정상 열전도 및 Plane deformation 열탄소성 유한요소해석을 실시하였다. 한편 시뮬레이션의 실 용접현상 재현을 위하여 각종 재료 정수 및 기계적 물성치의 온도 의존성 고려하여 해석을 실시하였다. 열 경계조건으로는 재료 내부로의 열전도 및 대기중의로의 열전달 고려하였으며 Plane deformation 열탄소성 해석을 위해 Fig.1의 역학적 경계조건 사용하였으며, 재료는 등방성이며, 초기 온도는 20℃인 것으로 가정하였으며 재료의 역학적 강성 회복온도를 750℃로 가정하였다. 그러나, 용융지의 유체역학적 거동, 키홀 내부의 기화 및 열방사, 그리고 금속상변태는 고려하지 않았다. 그리고, 수치해석의 실 현상 재현성을 높이기 위해 재료의 물리정수와 기계적 물성치는 온도의존성을 고려하였다.

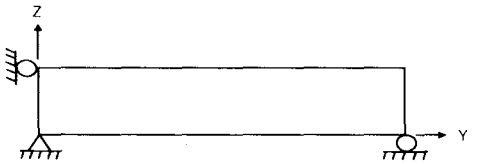


Fig.1 Boundary condition for stress analysis

또한, 용접은 12㎜ 두께의 2¼Cr-1Mo 강재에 대해 평균출력 10kW 급의 CO_2 레이저 용접을 맞대기 이음부에 실시하는 것으로 하였으며 이때 개선각은 없으며 시편 간극은 최소화 되도록 하였으며 용접조건은 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1 Laser welding condition

Type of Laser	CW CO_2 Laser
Beam power	10 kW
Focal length	0 ㎜
Travel speed	2 ㎝/sec

그리고, 상기의 용접조건을 이용하여 용접부에 투입된 입열량을 계산하였으며, 이를 위해 K. W. Carlson(1985)에 의해 제안된 입열 계산식 (3)을 이용하였다.

$$Q = \eta_L \frac{P}{V} \qquad (3)$$

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

한편, 해석에 사용된 표준 2¼Cr-1Mo강의 화학조성과 물성치는 Table 2와 Table 3에 보인 것과 같다.

Table 2 Chemical composition of standard material (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
≤0.17	≤0.50	0.30 ~0.60	≤0.030	≤0.030	2.00 ~2.50	0.90 ~1.10

Table 3 Mechanical properties of standard material

Y.S(MPa)	T.S(MPa)	Elong.(%)	R.A(%)
≥315	520~690	≥18	≥45

3. 해석결과 고찰

3.1 용접열전도 해석

레이저 용접속도 2㎝/sec 에서의 레이저 입열시간은 0.5sec 였으며 이 때 용접부의 상 표면으로부터 0.5㎜ 지점(즉, Z=11.5㎜) 지점에서의 용착금속부(W.M)와 열 영향부(HAZ)의 온도 상승 및 냉각 이력을 온도와 시간의 함수로 표현하여 Fig.2에 나타내었으며 곡선으로부터 용착금속부의 경우 순간적으로 온도가 용융점 이상으로 가열되어지고 있으며, 역학적 강성 회복 구간인 750℃ 부근에서 용착금속부와 열 영향부의 냉각 곡선의 냉각 구배가 큼을 알 수 있다.

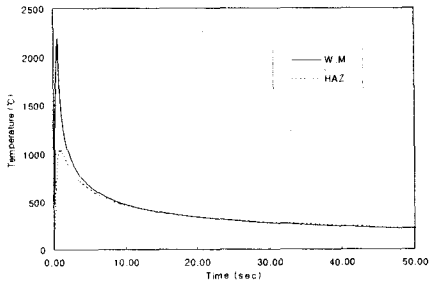
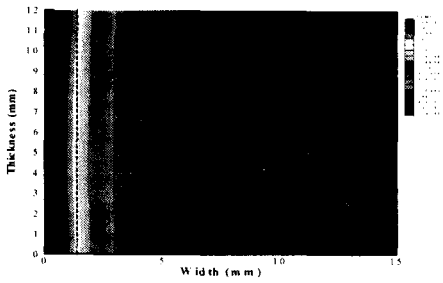
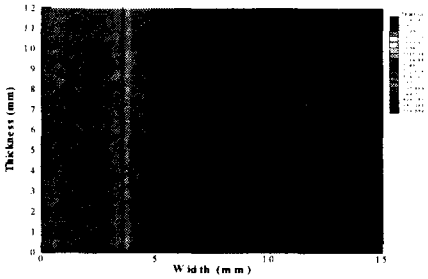


Fig.2 Comparison of the temperature distribution in W.M and HAZ (at z=11.5㎜)

한편, 열 해석을 통해 계산되어진 용착금속의 크기 (약 1.25~1.5㎜)와 열영향부의 크기(약 1.5㎜) 를 Fig.3의 (a)와 (b)에 나타내었으며 이로부터 레이저 용접부의 열 영향부 폭이 일반적인 아크 용접보다 적게 형성되어짐을 알 수 있었으며 용접부 두께 방향으로 열 분포 양상도 거의 균일함을 알 수 있었다. 따라서, 용접열영향부(재질 열화부)의 기계적 특성 또한 균일하게 분포할 것으로 사료되어진다.



(a) W.M boundary (after 0.5sec)



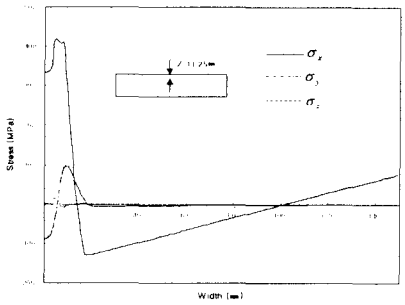
(b) H.A.Z boundary (after 1.58sec)

Fig.3 Calculated W.M and HAZ boundary

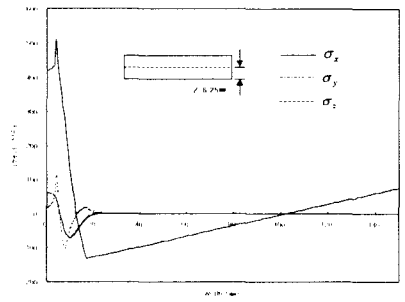
3.2 용접잔류응력 분포 및 소성변형율 분포 해석

열분포 해석의 결과를 입력데이타로 하여 열탄소성 해석에 의한 잔류 응력 해석을 실시 하였으며 해석되어진 잔류응력의 용접선 폭 방향 분포를 Fig.4에 나타내었으며 이때의 주목점은 각각 표면으로부터 0.75㎜(Z=11.25㎜, top), 5.75㎜(Z=6.25㎜, middle) 그리고 11.25㎜(Z=0.75㎜, bottom) 지점이었다. 우선 상부의 응력 분포 현황을 보면 용접선 길이 방향 응력 성분인 σ_x의 경우 용착금속부와 열 영향부의 영역에서 항복 응력을 넘는 인장 성분의 잔류응력이 발생하여 모재 끝단부로 갈수록 압축 성분으로 변하는 경향을 보이고 있으며 이때 인장성분과 압축 성분의 교차점은 모재부에서 형성되어지고 있으며 용접선 길이 방향의 강성이 가장 큰데 기인하여 잔류응력 역시 가장 크게 형성되었으나, 그 크기가 극한 응력에는 미치지 못하고 있다.

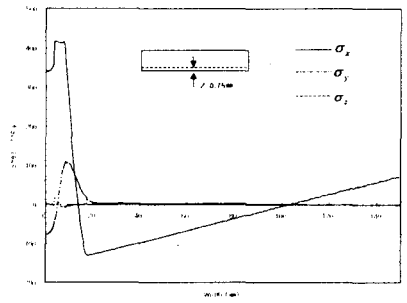
또한, 용접선 폭방향의 응력 성분인 σ_y의 경우는 용착금속부와 열 영향부의 영역에서 항복 응력에 크게 미치지 못하는 압축성분의 인장 성분의 잔류응력이 발생하여 모재와 열 영향부의 경계를 기점으로 하여 인장성분으로 바뀌는 경향을 나타내며, 시편 두께 방향의 응력 성분인 σ_z는 다른 두 성분에 비해 크게 작게 나타 났다.



(a) Top (Z=11.25㎜)



(b) Middle (Z=6.25㎜)



(c) Bottom (Z=0.75㎜)

Fig.4 Residual stresses

한편, 중앙부에서의 응력 분포 현황을 보면 용접선 길이 방향 응력 성분인 σ_x의 경우 용접부 상부와 마찬가지로 용착금속부와 유사한 분포 경향을 보이고 있으나 그 크기 측면에서는 상부의 σ_x 성분 보다 약 100Mpa 정도 더 크게 나타나고 있다. 이는 용접부 중앙부에서의 강성이 상부 보다 크게 작용하는데 기인한 것으로 사료되며, 그 크기는 역시 극한 응력에는 미치지 못하고 있다. 또한, 용접선 폭방향의 응력 성분인 σ_y의 경우는 용접부 상부와 반대인 인장성분에서 압축성분으로 변하는 분포경향을 보이고 있으며 그 크기는 용접부 상부의 크기보다는 적게 나타나고 있다. 이 때 σ_y 성분의 분포 경향이 용접부 상부와 반대로 나타난 이유는 용접선 상부와 중앙부의 냉각구배 차이에 기인된 것으로 보인다. 한편, 시편 두께 방향의 응력 성분인 σ_z의 크기는 용접선 상부의 σ_z 성분 크기

보다 커져 오히려 σ_y 성분보다도 크게 나타났으며 이는 용접부 중앙에서의 시편 두께 방향 강성의 증가 효과 인 것으로 사료된다. 그러나, 용접부 하부에서의 각 성분별 잔류응력 분포 특성을 보면 상부와 분포 경향이나 그 크기 측면에서 거의 유사하게 나타나고 있다.

한편, 일반적으로 가장 취약할 것으로 예측되어지는 용착금속부에 가까운 열 영향부의 조대화 영역 (용접선 기준 Y=1.75㎜ 지점)을 주목점으로 하여 두께 방향으로의 용접 잔류응력분포 특성과 크기를 Fig.5에 나타내었다.

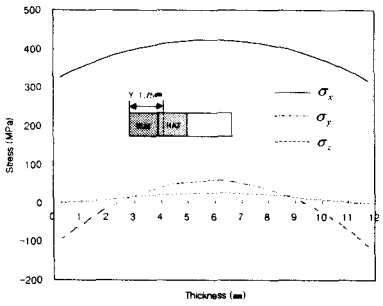
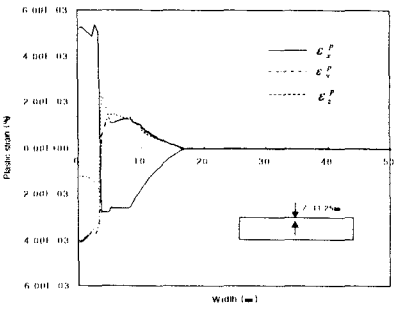
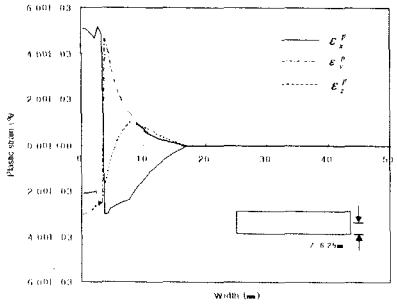


Fig.5 Residual stresses at Y=1.75㎜ from center

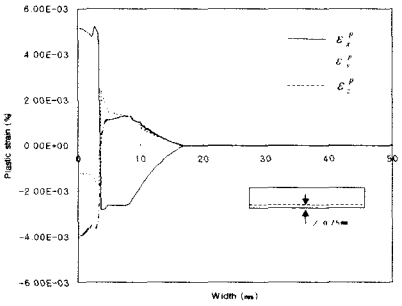
그리고, 각 잔류응력 성분에 대한 분석과 더불어 소성변형율의 분포 및 크기를 응력과 동일한 주목점에 대하여 Fig.6와 Fig.7에 나타내었다.



(a) Top (Z=11.25㎜)



(b) Middle (Z=6.25㎜)



(c) Bottom (Z=0.75㎜)

Fig.6 Plastic strain

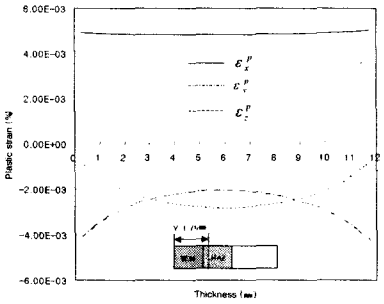


Fig.7 Plastic strain at Y=1.75㎜ from center

소성변형율의 경우 그 분포 양상은 시편의 상·하부 및 중앙부에서 모두 동일하게 나타났다. 즉, 용접선 길이방향의 소성변형율인 $\varepsilon^p{}_x$의 경우는 인장성분에서 압축성분으로 나타났으며, 용접선 폭 및 두께방향의 소성변형율 성분인 $\varepsilon^p{}_y$ 와 $\varepsilon^p{}_z$는 모두 압축성분에서 인장 성분으로 변화하였으며 각 성분들의 교차점은 모두 열 영향부와 모재의 경계부에서 동일하게 나타났다. 그러나 $\varepsilon^p{}_y$의 경우 시편 상하부에서는 압축성분이 더 크게 나타났으나 중앙부에서는 인장 성분이 더 크게 나타났으며, 크기는 중앙부에서의 값이 크게 나타나고 있다.

4. 결 론

이상에서 보인 2¼Cr-1Mo 강 레이저 용접부의 역학적 특성인 용접 열 분포와 잔류응력 및 소성변형율의 분포특성을 종합적으로 보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 시편의 두께 방향에 따라 냉각 구배 차이가 발생였으며, 이는 시편의 상·하부에서 열전도와 열전달 현상이 동시에 발생하였기 때문인 것으로 사료되며, 이로 인해 폭 방향으로 분포하는 잔류응력 성분 중 σ_y의 경우 시편의 두께에 따라 분포양상에 차이를 보이는 것으로 생각된다.

(2) 완전용입 Laser 용접의 특성으로 인해 용융부(약 1.25~1.5㎜) 및 열 영향부의 폭(약 1.5㎜)이 좁고 균일하게 형성되었으며, 이러한 좁고 균일한 열영향부로 인해 높은 잔류응력의 형성 영역이 일반적인 Arc 용접법에 비해 적고 균일하게 형성됨을 알 수 있었으며, 이로써 2¼Cr-1Mo 강에 대한 레이저 용접이 가질 수 있는 장점을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002년도 원자력연구개발 중장기사업의 위탁과제(계정번호: 53733-02)의 일환으로 수행되어졌으며, 한국원자력연구소의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

E. A. Brandes and G. B. Brook (1992). "Smithells metal reference book: 7th ed.", Butterworth-Heinemann

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

방한서 (1990). "有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元 非正常熱傳導解析", 大韓造船學會誌 第27卷 第4號, pp.43~50

방한서, 김유철 (1991). "有限要素法에 依한 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

장원석, 나석주(2000). "미세 레이저 용접에서 용융부 형상예측을 위한 열원의 방정식에 관한 연구", 大韓熔接學會誌 第18卷 第4號, pp.489~494

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

Isamu Miyamoto, Hiroshi Maruo and Yoshiaki Arata (1986). "Beam Absorption Mechanism in Laser Welding", SPIE Vol.668, Laser Processing: Fundamentals, Application, and Systems Engineering, pp.11~18

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,

E.A. METZBOWER, " Temperature in the Keyhole." Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 26B, pp.1029~1033

U. Ueda, Y.C.Kim, K.Garatani, T. Yamakita and H.S.Bang (1987). "Mechanical Characteristics of Repair Welds in Thick Plate(Report Ⅰ) - Distribution of Three-dimensional Welding Residual Stresses and Plastic Strains and Their Production Mechanism". TRANSACTION OF JWRI, Vol. 15, No.2

방한서 (19920. "厚板 熔接部의 力學的 特性 - 有限要素法에 依한 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

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.

H.-S.Bang and J.-M. Kim (2001). "Proposed specimen for reheating cracking susceptibility and mechanical behaviour assessment in 2.25Cr-1Mo steel pressure weld joint", Science and Technology of Welding and Joining, Vol.6, No.5, pp.293-299.

방한서, 김종명 (2000). "2¼Cr-1Mo강 압력용기 Nozzle 용접 이음부의 재열균열에 관한 수치해석적 연구." 한국해양공학회지, 제14권, 제 1호, pp.88-94

2003년 5월 10일 원고 접수
2003년 5월 10일 최종 수정본 채택