

용접열원에 따른 2.25Cr-1Mo 강 용접부의 잔류응력 분포특성에 관한
수치해석적 연구

Numerical Analysis on The Distribution of Welding Residual
Stresses in 2.25Cr-1Mo Steel Welds by Welding Heat Sources

방한서, 김형, 김영표
조선대학교
광주광역시 동구 서석동 375

요 약

우수한 내열 및 내압 및 내부식성으로 인해 발전설비의 중고온용 압력용기 제작에 사용되어지는 2.25Cr-1Mo 강의 경우 재질에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있으나 용접방법의 경우 발전 산업의 특성상 지금까지 검증된 일부 용접프로세스만이 주로 사용되어져 왔다. 그러나 최근에 들어 선진국의 경우 다양한 용접 열원의 개발과 더불어 이들을 사용한 고품질 용접의 실현과 더불어 생산성 향상 측면에서도 다양한 검토가 시도되고 있어 본 논문에서는 새로운 용접열원을 사용하는 레이저 용접기법의 중고온용강에 대한 적용가능성을 검토하기 위해 유한요소법을 이용하여 레이저 용접부와 기존의 아크용접부에 분포하는 잔류응력 분포 특성을 비교 고찰하고자 하였다. 수치 해석 결과 잔류응력 분포 특성 측면에서 레이저 용접법이 기존의 아크 용접법에 비해 장점을 가질 수 있음을 알 수 있었으며 용접부의 역학적 특성 측면에서 중고온용 2.25Cr-1Mo 강에 대한 레이저 용접기법의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

Abstract

The continuous studies for the material properties of Cr-Mo steel being used for the high pressure vessel at medium high temperature condition in electric power generation facilities are being conducted, because of the excellent thermal, pressure and corrosion resistance. But the only verified welding processes have been applied mainly so far, due to the specific reasons in electric power industries. But when it comes to the development of various welding heat sources and their application for

the high quality welds and the productivity, the various researches have been being conducted recently in developed countries. And, in this study, in order to verify the application possibility of the laser welding process to the 2.25Cr-1Mo steel, it is intended to compare with and inquire into the characteristics of residual stresses distribution in welds by arc and laser welding using the finite element method. As the result of numerical analysis, the fact that the laser welding process has a benefit in respect to the residual stress distribution has been found out, and the application possibility of the laser welding process to the 2.25Cr-1Mo steel has been found out as well in respect to the mechanical characteristics in welds

1. 서 론

발전설비를 구성하는 구조물중 중고온용 압력용기 제작에 사용되어지는 2.25Cr-1Mo 강 의 경우 우수한 내열, 내압 및 내부식성으로 인해 재질에 대한 지속적인 연구¹⁾가 이루어 지고 있으나 용접방법의 경우 발전 산업의 특성상 지금까지 검증된 일부 아크 용접프로 세스만이 주로 사용되어져 왔다. 그러나 최근에 들어 선진국의 경우 다양한 용접 열원의 개발과 더불어 이들을 사용한 고품질 용접의 실현과 더불어 생산성 향상 측면에서도 다 양한 검토가 시도되고 있어 본 논문에서는 새로운 용접열원을 사용하는 레이저 용접기법 의 중고온용 2.25Cr-1Mo 강에 대한 적용가능성을 검토하기 유한요소법을 이용하여 레이 저 용접부와 기존의 아크용접부에 분포하는 잔류응력 분포 특성을 비교 고찰하고자 하였 다. 용접부에서 발생하는 잔류응력의 경우 용접구조물의 강도에 직접적인 영향을 끼치며 특히, Cr-Mo 강의 경우는 용접 시공 후 잔류응력의 완화를 위해 시공되어지는 용접후열 처리과정 중 재열균열의 발생 위험이 높아 가능하면 용접잔류응력이 적게 생성되도록 용접시공을 할 필요가 있다^{2),3)}. 더불어 용접잔류응력은 용접열원 즉, 용접방법에 의해 그 생성 및 분포에 있어 차이점이 발생할 것으로 사료되어 본 논문에서 이러한 차이점을 확인하기 위해 2.25Cr-1Mo 강 시편에 대해 SAW 용접법과 레이저 용접법을 적용한 경 우에 대해 2차원 열전도 및 열·탄소성 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과 잔류응력 분포 특성 측면에서 레이저 용접법이 기존의 아크 용접법에 비해 장점을 가질 수 있음을 알 수 있었으며 용접부의 역학적 특성 측면에서 중고온용 2.25Cr-1Mo 강에 대한 레이저 용접기법의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

2. 해석이론 및 시뮬레이션 조건

2.1 2차원 비정상 열전도 및 열탄소성 해석 이론

온도의 시간 및 공간적 분포는 2차원 비정상 열전도 지배 방정식을 만족하며 경계조건 으로서는 해석대상인 모델 내부로의 열전도와 대기 중의로의 열전달이 있는 것으로 하였

으며, 고체에서의 열전도 문제를 갈락킨법을 이용하여 식 (1)과 같이 유한요소 정식화하였다.

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

여기서, $[K]$: 열전도 매트릭스

$[C]$: 열용량 매트릭스

$\{F\}$: 절점에서의 열유속 벡터

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

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

2.2 용접 시뮬레이션 조건

용접부의 역학적 거동을 파악하기 위하여 용접부를 2차원 1/2 모델로 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 해석^{4),5)}을 실시하였으며 Fig.1에 나타내었다. 열 경계조건으로는 재료 내부로의 열전도 및 대기중의로의 열전달 고려하였으며 Plane deformation 열탄소성해석을 위해 Fig.2의 역학적 경계조건 사용하였으며, 재료는 등방성이며, 초기 온도는 20℃ 인 것으로 가정하였으며 재료의 역학적 강성 회복온도를 750℃로 가정하였다. 그러나, 용융지의 유체역학적 거동과 금속재료의 상변태 및 레이저 용접시의 키홀내부의 기화 및 열방사는 고려하지 않았다. 또한, 폭(300mm)×길이(500mm)×두께(12mm)인 시험편에 대해 서브머지드 아크용접의 경우는 용접부의 개섩각을 40°로 하여 루트부 갭이 4mm인 맞대기 용접이음부에 대해 용접조건을 V=460V, I=29A, v=0.83cm/sec으로하여 단층 서브머지드아크 용접을 실시하는 것으로 하였으며 이 때의 입열량은 식(3)을 이용하여 구하였다.

$$Q_{net} = \eta_{arc} \frac{EI}{v} \quad (3)$$

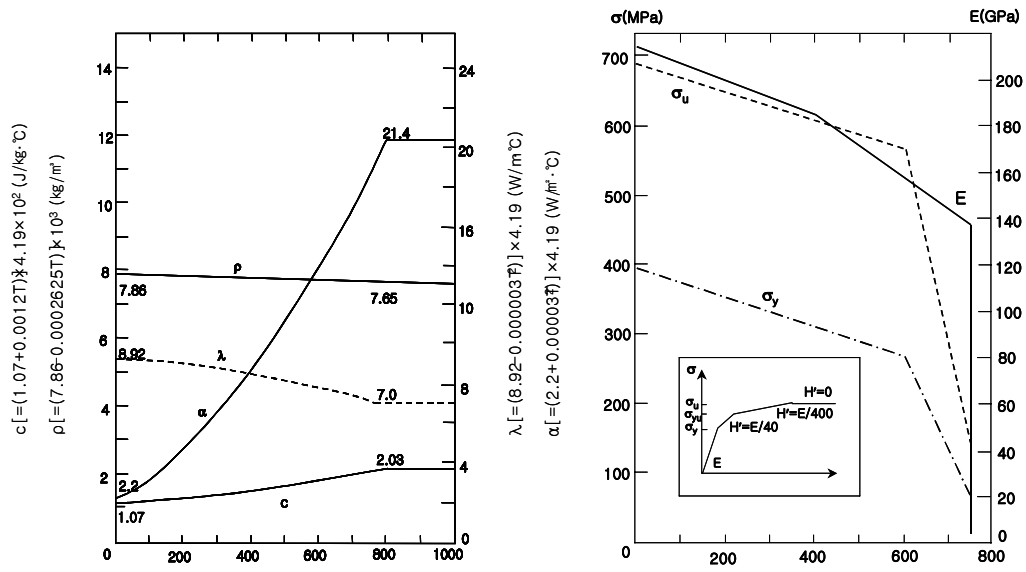
여기서, Q_{net} : 아크의 유효 입열량 (J/cm)

η_{arc} : 용접 효율 또는 아크의 입열 효율

E : 아크전압 (V)

I : 아크전류 (A)

v : 용접속도 (cm/sec)



(a) Physical properties (b) Mechanical properties
 Fig.1 Temperature dependency of physical and mechanical properties

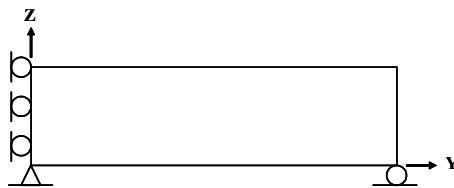


Fig.2 Boundary condition for stress analysis

또한, 레이저 용접의 경우는 동일 시험편에 대해 평균출력 10kW 급의 CO₂ 레이저 용접을 맞대기 이음부에 실시하는 것으로 하였으며 이때 개선각은 없으며 시험편 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 depth	0 mm
Travel speed	2 cm/sec

그리고, 상기의 용접조건을 이용하여 용접부에 투입된 입열량을 계산하였으며, 이를 위해

K. W. Carlson⁶⁾에 의해 제안된 입열 계산식 (4)를 이용하였다.

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

여기서, Q : 용접입열 (kJ/cm)

P : 시편에서의 레이저 출력 (kW)

V : 용접속도 (cm/sec)

η_L : 레이저 용접효율

한편, 해석에 사용된 표준 2.25Cr-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. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 용접열분포

서브머지드아크 용접의 경우 해석 주목점은 일반적으로 맞대기 용접이음부에서의 잔류 응력의 크기가 용접부의 상부에서 가장 크게 관찰되어지는 것으로 보고 되어지는 점을 고려하여, 시험편의 상면으로부터 0.5mm(Z=11.5mm) 떨어진 지점을 선정하여 이 주목점을 기준으로 용착금속부와 열 영향부의 폭 방향 용접열 이력을 관찰하였으며 그 결과를 Fig.3에 나타내었다. Fig.3을 고찰하여 보면 용착금속부에서의 냉각구배가 열 영향부에서의 구배보다 큼을 알 수 있었다. 또한 수치해석에 의해 계산되어진 용접부의 용융선과 열 영향부와 모재의 경계를 각각 등온 영역을 이용하여 Fig.4에 나타내었다. 이 때 용착금속부의 온도는 1500℃를 기준으로 하였으며, 열 영향부의 기준은 역학적 강성 회복 온도인

750°C로 하여 판정하였다.

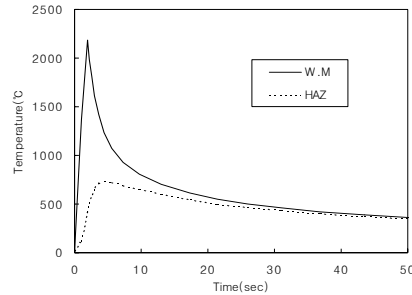
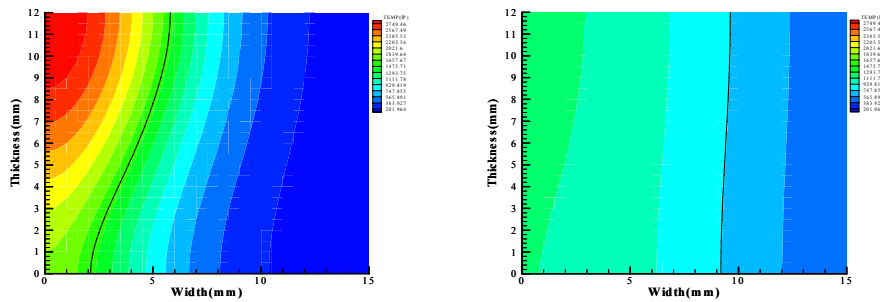


Fig.3 Temperature distribution in W.M and HAZ (at z=11.5mm, SAW)



(a) W.M boundary (after 2.00sec) (b) HAZ boundary (after 5.65sec)

Fig.4 Calculated W.M and HAZ boundary (SAW)

Fig.4로부터 용접부 상부에서의 용착금속부 폭과 열 영향부의 폭은 각각 약 5.5mm와 약 4mm로 나타났다.

레이저 용접의 경우 용접속도 2cm/sec 에서의 레이저 입열시간은 0.5sec 였으며 이 때 용접부의 상 표면으로부터 0.5mm 지점(즉, Z=11.5mm) 지점에서 용착금속부(W.M)와 열 영향부(HAZ)의 온도 상승 및 냉각 이력을 온도와 시간의 함수로 표현하여 Fig.5에 나타내었으며 곡선으로부터 용착금속부의 경우 순간적으로 온도가 용융점 이상으로 가열되어지고 있으며, 역학적 강성 회복 구간인 750°C 부근에서 용착금속부와 열 영향부의 냉각 곡선의 냉각 구배가 큼을 알 수 있다. 한편, 열 해석을 통해 계산되어진 용착금속의 크기 (약 1.25~1.5mm)와 열영향부의 크기(약 1.5mm)를 Fig.6의 (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.

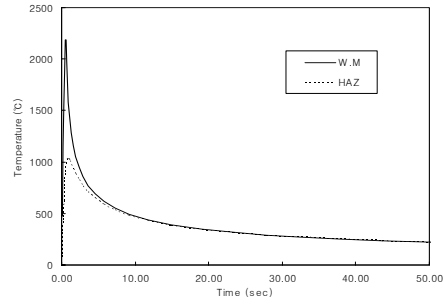
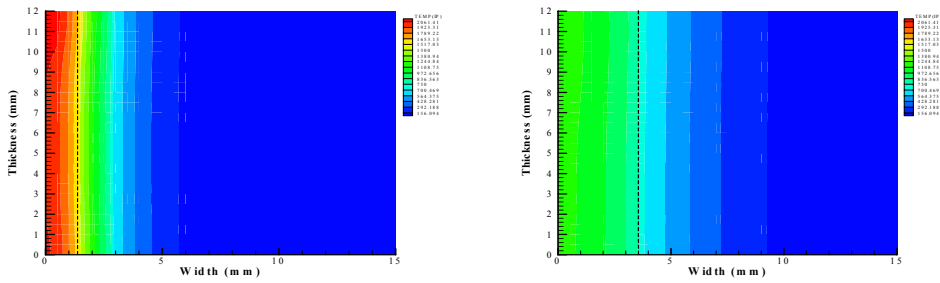


Fig.5 Temperature distribution in W.M and HAZ (at z=11.5mm, Laser)

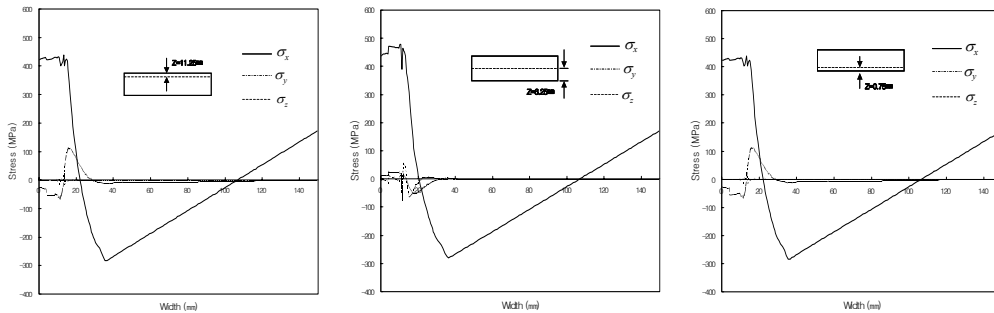


(a) W.M boundary (after 0.5sec) (b) H.A.Z boundary (after 1.58sec)

Fig.6 Calculated W.M and HAZ boundary (Laser)

3.2 용접잔류응력 분포 및 소성변형을 분포

서브머지드아크 용접부의 용접잔류응력 분포 곡선을 Fig.7에 나타내었으며 이를 고찰해보면, 용접선 길이방향 잔류응력 성분인 σ_x 의 시험편 폭 방향 분포 특성을 보면 시험편의 상·하부 그리고 중앙부에서 모두 용착금속부와 열 영향부에서 인장성분이 발생하였으며 모재부 끝단으로 갈수록 압축성분으로 되는 경향을 보이고 있다.



(a) top (Z=11.25mm) (b) Middle (Z=6.25mm) (c) Bottom (Z=0.75mm)

Fig.7 Residual stresses (SAW)

또한, 인장과 압축이 교차하는 지점은 모재부에서 형성되고 있음을 보이고 있다. 한편, 용접선 폭 방향 잔류응력 성분인 σ_y 의 경우 시험편의 상·하부에서는 동일하게 압축성분에서 인장성분으로 변화하는 경향을 보이고 있으나, 중앙부에서 이와는 반대인 인장성분에서 압축성분으로 변화하고 있으며 σ_x 와 같은 변화경향을 보여주고 있다. 그러나, 응력의 크기는 상하부에 비해서 적은 경향을 나타내고 있으며 이와 같은 상이한 경향의 발생 원인은 시편의 상·하부와 중앙부의 냉각구배 차이에 기인된 것으로 사료된다. 한편, 일반적으로 가장 취약 할 것으로 예상되는 용착금속부에 가까운 열 영향부의 조대화 영역(Y=6.75mm)에 대한 시험편의 두께 방향의 잔류응력분포 특성을 Fig.8에 나타냈으며 그 특성을 보면, σ_x 의 경우 두께의 전 영역에서 인장성분을 나타내고 있으며, σ_y 의 경우 시험편의 상·하부에서는 압축성분을 나타내고 있으나 중앙부에서는 인장성분을 보여주고 있다. 한편, σ_z 는 거의 zero(0)에 가까운 값을 나타내고 있다.

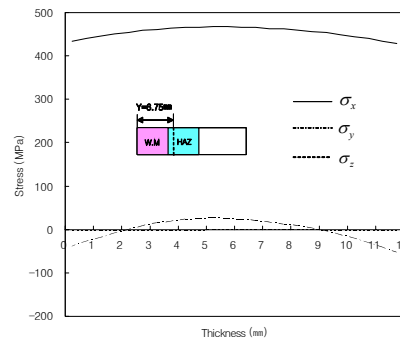
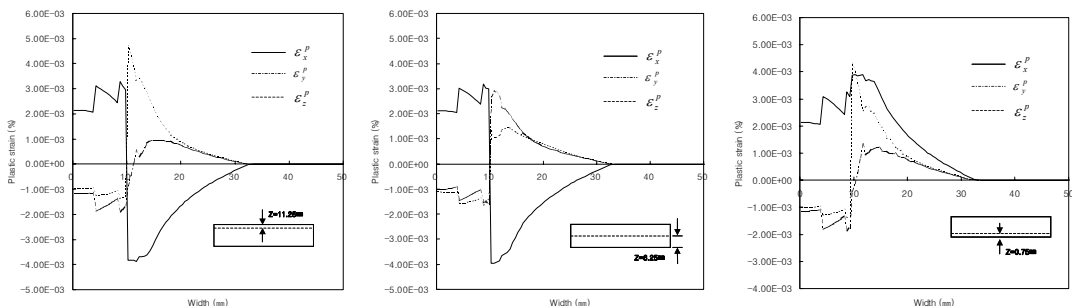


Fig.8 Residual stresses at Y=6.75mm from center line (SAW)

서브머지드아크 용접부의 소성변형을 분포 특성은 Fig.9에 나타낸 것과 같으며 그 특성을 고찰해보면 다음과 같다. ϵ_x^p 의 경우 시험편의 상부와 중앙부는 동일하게 압축에서 인장으로 변화하는 경향을 보이는 반면, 시험편의 하부에서는 인장성분만이 존재하며, 이는 시편 두께 방향으로의 용접부 형상 변화에 따른 열탄소성 이력의 변화에 기인하는 것으로 추정된다.



(a) top (Z=11.25mm)

(b) Middle (Z=6.25mm)

(c) Bottom (Z=0.75mm)

Fig.9 Plastic strain (SAW)

또한, ϵ_y^p 의 경우는 시험편의 상·하부에서 동일한 크기와 경향을 보이고 있으나, 중앙부에서는 경향은 동일하나 모재부에서의 변형율의 크기가 감소하고 있다. 한편, ϵ_z^p 의 경우는 ϵ_x^p 와 동일한 경향을 보이며 전체적인 소성변형율의 크기는 $\epsilon_x^p > \epsilon_y^p > \epsilon_z^p$ 순으로 나타나며 각 성분들의 분포 경향의 교차점이 열 영향부와 모재의 경계에서 나타남을 보이고 있다.

한편, Fig.10의 열영향부 조대화 영역에서의 두께 방향으로의 각 성분별 소성변형율 분포 크기를 보면 용접선 길이방향 소성 변형율 성분인 ϵ_x^p 는 두께 전 영역에 걸쳐 균일한 분포양상을 보이고 있으며, 용접선 폭 방향 소성변형율 성분인 ϵ_y^p 와 두께 방향 소성변형율 성분인 ϵ_z^p 는 분포 경향이나 크기가 유사하게 나타났다.

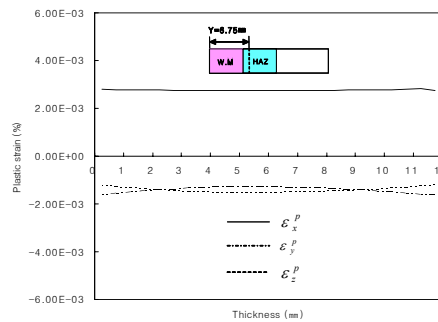
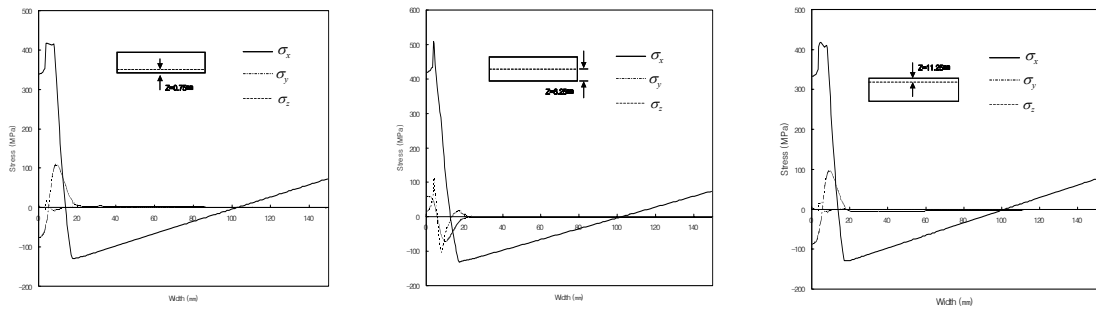


Fig.10 Plastic strain at Y=6.75mm from center (SAW)

레이저 용접부에 대한 용접잔류응력의 폭 방향 분포를 Fig.11에 나타내었으며 이때의 주목점은 각각 표면으로부터 0.75mm(Z=11.25mm, top), 5.75mm(Z=6.25mm, middle) 그리고 11.25mm(Z=0.75mm, bottom) 지점이었다. 우선 상부의 응력 분포 현황을 보면 용접선 길이 방향 응력 성분인 σ_x 의 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 잔류 응력 역시 가장 크게 형성되었으나, 그 크기가 극한 응력에는 미치지 못하고 있다.

또한, 용접선 폭방향의 응력 성분인 σ_y 의 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_z 는 다른 두 성분에 비해 크게 작게 나타났다.



(a) Top (Z=11.25mm) (b) Middle (Z=6.25mm) (c) Bottom (Z=0.75mm)
 Fig.11 Residual stresses (Laser)

한편, 중앙부에서의 응력 분포 현황을 보면 용접선 길이 방향 응력 성분인 σ_x 의 경우 용접부 상부와 마찬가지로 용착금속부와 유사한 분포 경향을 보이고 있으나 그 크기 측면에서 상부의 σ_x 성분 보다 약 100Mpa 정도 더 크게 나타나고 있다. 이는 용접부 중앙부에서의 강성이 상부 보다 크게 작용하며 용착금속부의 형상에 기인한 것으로 사료되며, 그 크기는 역시 극한 응력에는 미치지 못하고 있다. 또한, 용접선 폭방향의 응력 성분인 σ_y 의 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_z 의 크기는 용접선 상부의 σ_z 성분 크기보다 커져 오히려 σ_y 성분보다도 크게 나타났으며 이는 용접부 중앙에서의 시편 두께 방향 강성의 증가 효과인 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=1.75mm 지점)을 주목점으로 하여 두께 방향으로의 용접 잔류응력분포 특성과 크기를 Fig.12에 나타내었다.

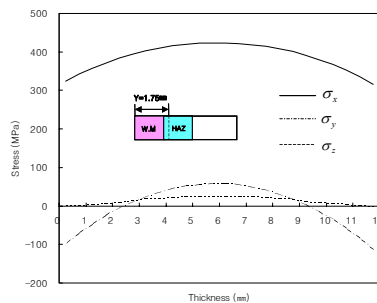
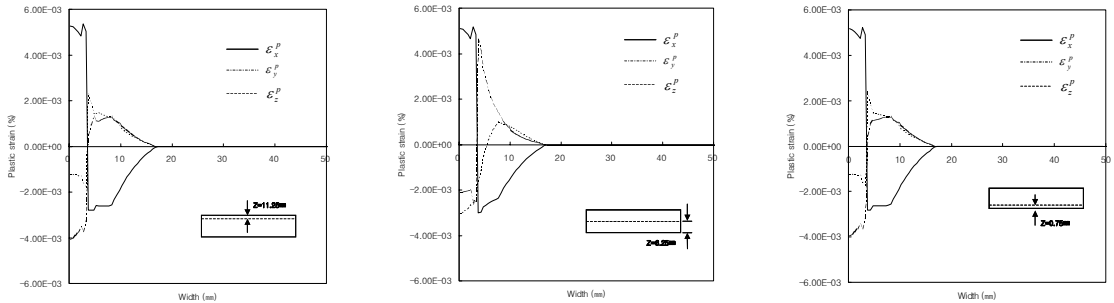


Fig.12 Residual stresses at Y=1.75mm from center (Laser)

그리고, 각 잔류응력 성분에 대한 분석과 더불어 소성변형율의 분포 및 크기를 응력과 동일한 주목점에 대하여 Fig.13과 Fig.14에 나타내었다.



(a) Top (Z=11.25mm) (b) Middle (Z=6.25mm) (c) Bottom (Z=0.75mm)

Fig.13 Plastic strain (Laser)

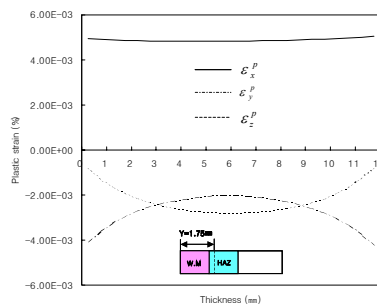


Fig.14 Plastic strain at Y=1.75mm from center (Laser)

소성변형율의 경우 그 분포 양상은 시편의 상·하부 및 중앙부에서 모두 동일하게 나타났다. 즉, 용접선 길이방향의 소성변형율인 ϵ_x^p 의 경우는 인장성분에서 압축성분으로 나타났으며, 용접선 폭 및 두께방향의 소성변형율 성분인 ϵ_y^p 와 ϵ_z^p 는 모두 압축성분에서 인장 성분으로 변화하였으며 각 성분들의 교차점은 모두 열 영향부와 모재의 경계부에서 동일하게 나타났다. 그러나 ϵ_y^p 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 2.25Cr-1Mo 강에 대한 서브머지드아크 및 레이저 용접부의 역학적 특성인 용접 열 분포와 잔류응력 및 소성변형율의 분포특성을 종합적으로 보면 서브머지드

아크 용접법과 레이저 용접법의 용접열원 특성 즉, 서브머지드아크 용접의 경우 대입열 용접 특성으로 인해 용착 금속 및 용접 열영향부가 넓게 형성(용융부 및 열 영향부의 폭이 상표면 기준 약 5.5mm와 약 4mm)되는 반면, 레이저 용접의 경우는 레이저 자체의 완전 용입용접(키홀용접) 특성으로 인해 용융부(약 1.25~1.5mm) 및 열 영향부의 폭(약 1.5mm)이 서브머지드아크 용접에 비해 짧은 시간에 좁고 균일하게 형성되었으며, 이러한 좁고 균일한 열영향부로 인해 높은 잔류응력의 형성 영역이 일반적인 Arc 용접법에 비해 적고 균일하게 형성됨을 알 수 있었다. 이로써 용접잔류응력 분포 특성 측면에서 2.25Cr-1Mo 강에 대한 레이저 용접이 가질 수 있는 장점을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2003년도 원자력연구개발 중장기사업의 위탁과제(과제번호:M20314010001-03A0214-00314)의 일환으로 수행되어졌으며, 한국원자력연구소의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sung Ho Kim, Woo Seog Ryu, and Il Hiun Kuk, "Microstructure and Mechanical Properties of Cr-Mo Steels for Nuclear Industry Application", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.31, No.6, 561-571 (1999)
2. H.-S.Bang and J.-M. Kim, "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, 2001, Vol.6, No.5, pp.293-299.
3. 방한서, 김종명 "24Cr-1Mo강 압력용기 Nozzle 용접이음부의 재열균열에 관한 수치 해석적 연구." 한국해양공학회지, 제 14권, 제 1호, pp.88-94, 2000
4. E. A. Brandes and G. B. Brook, "Smithells metal reference book", 7th ed., Butterworth-Heinemann (1992)
5. David R. Lide and H. P. R. Frederikse, "CRC Handbook of Chemistry and Physics: CRC press(National Institute of Standards and Technology)", 76th Edition (1995-1996)
6. K.W.Carlson, "The role of heat input in deep penetration laser welding." ICALEO, pp.49~57 (1985)
7. M.R.FREWIN, D.A.SCOTT, "Finite Element Model of Pulsed Laser Welding." AWS, Welding Journal, pp.15-s~22-s (1999)

8. E.A. METZBOWER, " Temperature in the Keyhole." Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 26B, pp.1029~1033
9. U. Ueda, Y.C.Kim, K.Garatani, T. Yamakita and H.S.Bang, "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 (1987)
10. 방한서 "厚板 熔接部の 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 (1992)
11. C. Carmignani, R. Mares, G. Toselli " 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 (1999)