

9Cr-1Mo강에 대한 Laser 및 SMAW 용접부의 열분포 특성 비교

The Comparison of the Heat Distribution and Characteristic between the Laser & SMAW Welds of 9Cr-1Mo Steel.

오종인**, 방한서***, 김영표**, 박형근**

** 조선대학교 일반대학원 선박해양공학과

*** 조선대학교 공과대학 항공·조선공학부

ABSTRACT : Recently 9Cr-1Mo alloy is used in the Nuclear power plant due to its specific properties. This material has the merit of high-strength resistance and corrosion resistance. Therefore the demand for this alloy is dramatically increased in the Nuclear power, petro-chemical complex etc. The various research has been conducted to improve the material properties of this alloy. In spite of this circumstance, detail research in the area of welding process of this alloy is yet to be expanded . In this study the numerical non-linear heat transfer analysis of laser welding which may possibly replace the conventional SMAW fabrication of 9Cr-1Mo steel has been carried out.

1. 서 론

원자력발전설비를 구성하는 구조물에는 다수의 파이프와 압력용기들로 구성되어있으며, 사용되는 압력용기들의 재질은 그 특성상 고온 및 고압의 사용 환경에 노출되어 있다. 이러한 사용 환경에서 구조물의 안전성과 신뢰도를 높이기 위해서는 내열, 내압의 성질이 매우 우수한 재료의 사용이 필수적으로 요구된다. 그 중 내열, 내압 및 내부식성에서 뛰어난 내구성을 가지고 있는 Cr-Mo강의 수요가 점차 증가하고 있으며, 보다 경제적이고 효율적이며 우수한 재질의 Cr-Mo강을 얻고자 합금원소를 첨가하여 개선해 가고 있다.

이들 압력용기들의 제작공정에서 접합의 수단으로 100% 용접이 이루어지며, 이들 고온 재료들은 일반 탄소강과는 달리 여러 가지 합금원소가 첨가되어 있기 때문에 용접부의 물성(인장강도, 연신율, 경도, 크리프강도 등)은 용접방법, 즉 열 사이클에 따라 달라진다. 또한 용접부에는 필연적으로 용접잔류응력 및 변형이 발생되며 용접부의 좌굴 강도 및 취성파괴 강도 등을 현저하게 저하시켜 구조물의 안전성 및 건전성에 위협요인이 되고 있다. 그러나 원자력 발전설비에서와 같이 고온 환경에서 사용하기 위해 현재 개선되어 가고 있는 Cr-Mo강의 용접방법 및 그 용접부에 대한 열거동과 응력, 변형거동의 예측 및 해석

기반기술 확보를 위한 연구개발은 매우 미흡한 실정이다. 따라서 용접부의 강도나 인성이 용접 방법에 따라 어떻게 변화하는가에 대해 파악하는 것이 필요하고 특히, 원자력설비 구조안전기술중 가장 핵심인 고온 환경에서의 용접부의 역학적 특성을 규명함으로써 개선된 Cr-Mo 강에 대한 용접성 및 신뢰성을 확립해 나아가야 한다.

본 연구에서는 9Cr-1Mo강에 대한 새로운 용접방법으로 Laser 용접에 대하여 수치 해석을 통한 용접부의 용접잔류응력 특성 및 파괴인성 특성을 파악하고자 우선 먼저 용접시 발생하는 열이력 및 열분포 특성에 대한 해석을 선행함으로써 기존의 용접방법인 SMAW 용접부의 특성과 비교하여 그 적용 가능성을 검토하였다.

2. 해석이론 및 조건

2.1 2차원 비정상 열전도 해석이론

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

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

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

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

2.2 해석 조건

본 연구에서는 4절점 Isoparametric 요소를 이용하여 2차원 비정상 열전도 해석을 실시하였다. 수치 해석시 사용된 용접조건은 실제 시험편 제작시 사용되었던 용접조건으로 Table1에 나타내었다. 레이저 용접의 경우 12kW급 CO₂ 레이저 용접기를 이용하여 1Pass 완전 용입으로 용접하였고 SMAW 용접의 경우 개선각 60°, gap 3mm를 주어 S-9016.B3 3.2mm, 4.0mm 용접봉을 사용하여 총 10pass로 용접하였으며 마지막 pass는 back gauging을 실시하였다.

또한 9Cr-1Mo강에 대해 고려한 온도의존성에 대한 물리정수를 Table2에 나타내었다.

Table1 Laser & SMAW welding condition

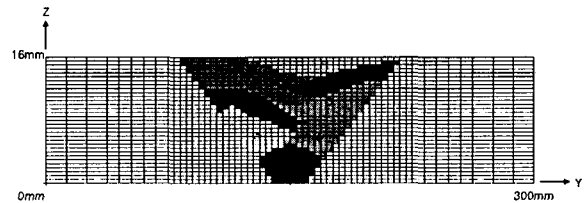
Type	Power	Speed	Shield gas
CO ₂ Laser	12 kW	1 m/min	He 15 l/min
SMAW	Groove	Current	Volt
	60°	170 A	25 V
	HJ	Speed	Pass
	17 KJ/cm	15 CPM	10

Table2 Physical property of 9Cr-1Mo steel

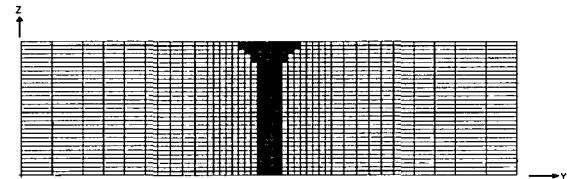
Temp (°C)	Density (g/cm ³)	Specific heat (J/KgK)	Thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	Thermal conductivity (W/mK)
RT	7.78	402	11.15	26.0
100		427	11.30	26.4
200		461	11.60	26.8
400		528	12.10	27.6
600		595	12.65	26.8
700		624	12.85	26.8

해석에 사용된 모델은 Fig.1에 나타낸 것과 같이 SMAW(300mm×16mm, 총요소수:2944개, 총절점수:3069)와 Laser 용접부에 대하여 열전도 해석을 수행하였고 재료 내부로의 열전도 및 대

기중의로의 열전달을 열 경계조건으로 사용하였으며 초기온도는 20°C인 것으로 가정하였다.



(a) SMAW



(b) CO₂ Laser

Fig.1 Schematic mesh division

SMAW 및 CO₂ Laser 용접부에 대한 입열량을 계산하기 위해 다음의 식 (3)과 식 (4)를 사용하였다.

SMAW

$$Q = \eta \frac{V \cdot I}{1000 \cdot W_s} \quad (3)$$

여기서, Q: 용접입열(KJ/cm) η_A: 아크용접효율
 V: 용접전압(V) I: 용접전류(A)

CO₂ Laser

$$Q = \eta_L \frac{P}{1000 \cdot W_s} \quad (4)$$

여기서, η_L: 레이저 용접효율 P: 레이저 출력(kW)
 W_s: 용접속도(cm/sec)

3. 해석결과 및 고찰

3.1 SMAW 열분포 수치 해석

Fig.2는 SMAW 용접부에 대한 각 Pass별 용접 시작 2초 후 최고 온도 분포를 나타내었다. 이 그림을 살펴보면 용접열이 열원을 중심으로 균일하게 전도됨을 보이고 용착 금속부와 열영향부(Heat Affect Zone)가 넓게 분포됨을 알 수 있다. 이때 용착 금속부의 온도는 1700°C를 기준으로 하였으며, 열영향부의 기준은 역학적 강성 회복 온도인 750°C를 기준하였다.

Fig.3은 CO₂ Laser 용접부에 대한 온도분포를 나타내었으며 열원을 중심으로 사방으로 퍼져나가는 경향을 보이는 SMAW와는 달리 용접열원을 중심으로 시험편 폭 방향으로 선 열원 형태의 분포로 열전달되는 현상을 볼 수 있다. 또한 SMAW 용접부에 비해 열영향부의 영역이 더 적게 생성됨을 알 수 있으며 보다 좁고 균일한 열영향부로 인해 CO₂ Laser 용접의 경우가 SMAW 보다 잔류응력의 영역대가 보다 작게 나타날 것으로 사료된다. Fig.4에서 나타난 각 용접부의 열이력 곡선의 특징을 보면 CO₂ Laser 용접의 경우가 SMAW 보다 냉각구배가 크게 나타남을 알 수 있다.

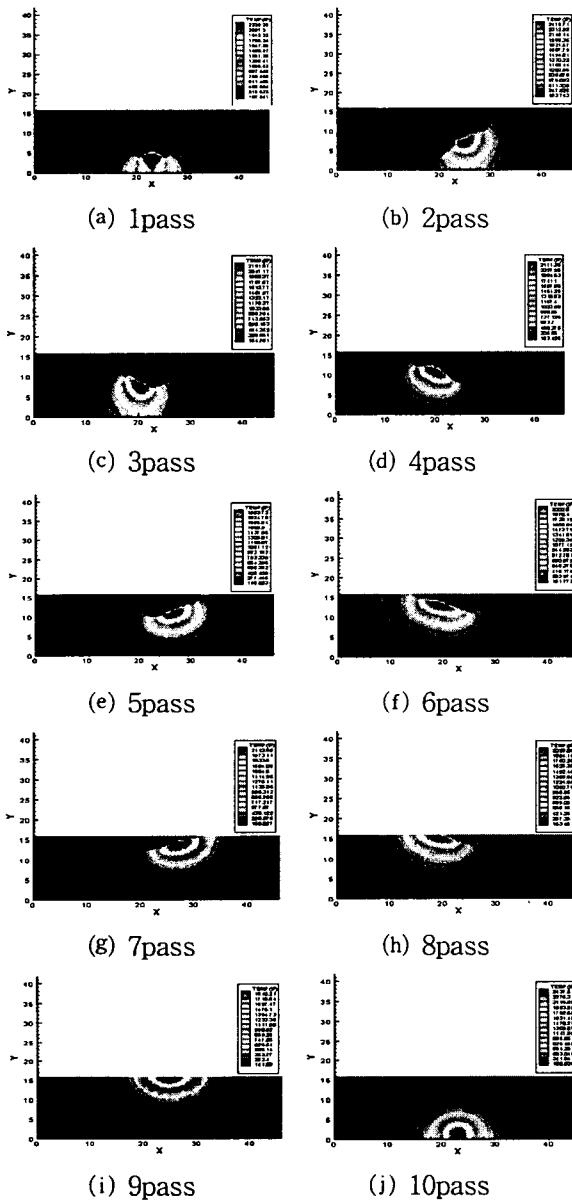


Fig.2 Thermal Distribution of SMAW

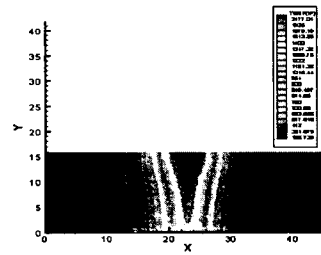
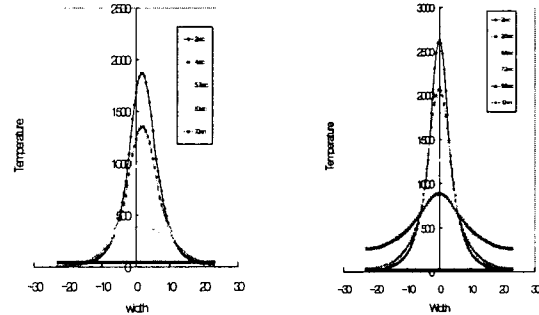


Fig.3 Thermal Distribution of CO₂ Laser



(a) SMAW(9pass) (b) CO₂ Laser

Fig.4 Thermal history of weldment

4. 결 론

이상에서 보인 9Cr-1Mo강에 대한 SMAW 및 CO₂ Laser 용접부의 용접 열분포 특성을 고찰해 본 결과는 다음과 같다.

- 1) SMAW의 경우 용접열원을 중심으로 사방으로 퍼져나가는 온도분포 경향을 보이고 CO₂ Laser 용접의 경우 시험편 폭 방향으로 선 열원 형태의 분포로 열전달되는 경향을 볼 수 있었다.
- 2) CO₂ Laser 용접부의 경우 SMAW 용접부에 비해 냉각 구배가 크고 열영향부의 영역이 보다 적고 균일하게 생성됨을 알 수 있었으며 이로 인하여 잔류응력의 영역대가 보다 작게 나타날 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 장웅성, 윤병현, 권영각, 이길제 : 압력용기 및 보일러용 Cr-Mo계 후판의 고강도화와 용접성 향상, 대한용접학회지, Vol. 20, No. 2(2002)32-41
2. E.Letofsky and H. Cerjak : Metallography of 9Cr steel power plant weld microstructures, Science and Technology of welding and Joining, Vol.9, No.1(2004) 31-36