

Laser와 TIG 용접 시 2.25Cr-1Mo강 용접부에서의 역학적 특성에 관한 연구 (I)

(열적 특성)

An Study on the Mechanical Characteristics of 2.25Cr-1Mo Steel Welds

in TIG Welding and Laser Welding (I) (Thermal characteristics)

김 형*, 김 영표*, 주 성민*, 김 하식**, 방 한서***

* 조선대학교 선박해양공학과 대학원

** 조선이공대학, 기계공학과

*** 조선대학교 항공·조선공학부 교수

Table. 1과 같다.

1. 서 론

레이저 용접장비 활용이 보편화되어 감에 따라, 고품질의 용접이 요구되는 설비 제작에서 레이저 용접기 활용이 확산되어 가고 있으며, 발전설비 중 2.25Cr-1Mo강이 적용되는 고온·고압 용기 제작에서의 용접품질 확보는 안정된 발전설비 운영에 필수적이다.

2.25Cr-1Mo강으로 제작되는 고온·고압 용기 제작에서 지금까지는 TIG 용접이 주로 적용되어온 반면에 레이저 용접은 적용되지 않고 있었다. 이 점에 착안하여, 본 연구는 2.25Cr-1Mo강에 레이저 용접과 TIG 용접을 적용하였을 발생하는 열적 특성을 본 연구실에서 개발된 열 해석 프로그램을 이용하여 예측하였으며, 이 예측결과가 실질 용접부의 단면 형상과 일치함을 확인 함으로서, 레이저 용접을 2.25Cr-1Mo강에 적용하였을 때, 발생 가능한 상황을 예측하고자 한다.

2. 2.25Cr-1Mo강의 재질 특성과 용접 조건

열전도 해석 및 용접이 적용된 2.25Cr-1Mo강의 온도의존성을 고려한 재료 물성치는 Fig.1과 같으며, 용접조건은 Table.1과 같다.

시험편의 크기가 300mm×500mm×12mm인 2.25Cr-1Mo강의 bead-on-plate에 적용된 TIG 용접기와 CO₂ 레이저 용접기의 용접조건은

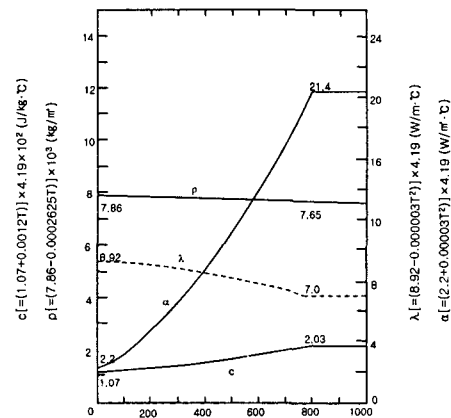


Fig.1 Physical properties of 2.25Cr-1Mo steel for heat conduction analysis

Table. 1 Welding technology parameters

Welding type	Welding parameters				
	Voltage(V)	Current(A)	Power(W)	Focus length	Travel speed
TIG	13V	180A	-	-	3.17mm/sec
CO ₂ 레이저	-	-	3 kW	0 mm	13.33 m/sec

3. TIG 용접과 CO₂ 레이저 용접에 의한 열 영향부 특성 파악

3.1 수치해석에 이용된 수식

(1) 유한요소법에 의한 2차원 전도 해석

재료가 등방성(isotropic)일 때, 연속체의 비정상 열전도 문제의 지배방정식은 식(1)과 같다.

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

여기서 $T = T(x, y, t)$: 온도($^{\circ}C$), ρ : 밀도(g/cm^3), \dot{Q} : 단위시간당 입열량(cal/sec), λ : 열전도율($cal/cm \cdot sec \cdot ^{\circ}C$), t : 시간(sec), c : 비열($cal/g^{\circ}C$)이다.

식(1)을 Green-Gauss 정리를 이용하여 부분적분한 후, Fourier법칙의 경계조건을 대입하여 매트릭스화 하면 식(2)와 같이 얻어진다.

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

여기서 $[K]$, $[C]$ 와 벡터 $\{F\}$ 는 열전도 매트릭스, 열용량 매트릭스와 열유속 벡터이고 $\{\Phi\}$ 는 온도함수이다.

(2) 시험편에 입열된 입열량 계산 방법

Table. 1과 같은 용접조건으로부터 TIG 용접에 의한 입열량은 식(3)을 입열량을 구하였으며, 레이저 용접에 의한 입열량은 K. W. Carlson에 의해 제안된 식(4)을 이용하였다.

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

여기서, η_{arc} : 아크 입열효율, E : 아크 전압(V), I : 아크전류(A), v : 용접속도(cm/sec)이다.

$$Q_{net} = \eta_L \frac{P}{v} \quad (4)$$

여기서, η_L : 레이저 입열효율, P : 레이저 power(kW), v : 용접속도(cm/sec)이다.

3.2.3 해석모델 및 방법

용접부의 역학적 거동을 파악하기 위하여 용접부를 2차원 1/2모델로 모델링(총절점수: 2337개, 총요소수: 2240개) 하였으며, 형상은 Fig.2와 같다.

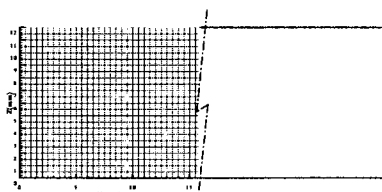


Fig.2 Schematic mesh division (two-dimensional half model)

2차원 비정상 열전도의 유한요소법에 의한 수치해석은 4절점 아이소파라메트릭 요소를 이용하였다.

한편 시뮬레이션의 실 용접현상 재현을 위하여

시험장 재료 정수의 온도 의존성을 고려하여 해석을 실시하였다. 열 경계조건으로는 재료 내부로의 열전도 및 대기로의 열전달 고려하였으며, Fig.1과 같은 온도변화에 따른 열전도 특성을 이용하였다. 재료는 등방성이며, 초기 온도는 $20^{\circ}C$ 인 것으로 가정하였다.

시험편의 표면에 TIG용접기와 레이저 용접기를 이용하여 입열하여 형성된 2.25Cr-1Mo의 bead-on-plate 용접 단면으로부터, 강에 형성된 HAZ 영역의 실 계측을 통해서, 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하였다.

3.2 용접 열 영향부의 열적 특성

일반적으로 잔류응력의 크기가 용접부의 상부에서 가장 크게 관찰되어지는 시험편의 상면으로부터 $0.5mm$ ($Z=11.5mm$) 떨어진 지점을 주목점으로 선정하였다.

(1) TIG 용접

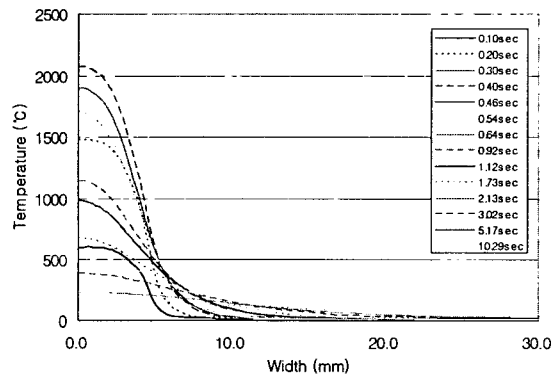


Fig. 3 Temperature distribution along the width direction

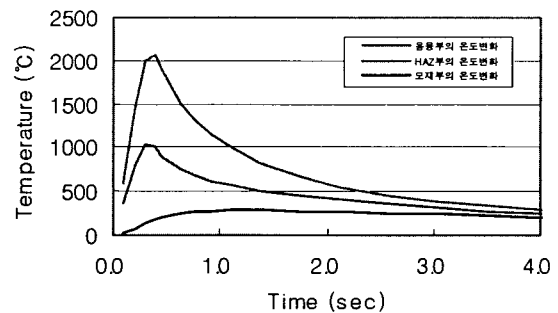
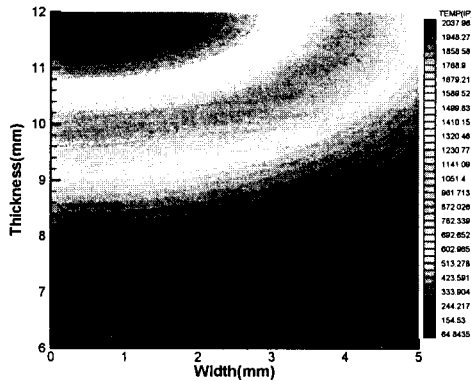


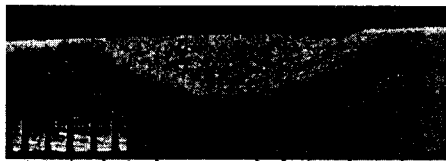
Fig. 4 Comparison of Temperature distribution in welding metal, HAZ and base metal.

750의 HAZ부 형성 온도와 시간의 변화에 따른 시험편 상부의 온도분포 그림인 Fig.3으로부터 HAZ영역의 경계가 용접부 중앙으로부터 4.3mm 지점에서 형성됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 4의 그림으로부터 용융부의 시간에 따른 온도 변화로부터 TIG 용접에 의한 2.25Cr-1Mo강의 냉각구배 예측이 가능하였다. 또한 Fig. 4의 그림은 TIG 용접의 경우 최고 온도를 유지할 수 있는 일정 시간의 존재로 HAZ부의 온도가 1000 까지 상승케 하였으며, 이 두 요인의 상호작용이 냉각구배를 떨어뜨리는 원인임을 확인하였다.



(a) 열해석 시뮬레이션 결과



(b) 용접부의 HAZ형성부 확인사진

Fig. 5 Comparison between the measurement and the simulation

각 요소점에서의 Fig. 3과 같은 계산 결과를 얻음으로써 Fig. 5와 같은 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었으며, 이 결과의 신뢰성은 HAZ를 확인하는 용접부의 확인 사진과의 비교로부터 확인할 수 있었다.

(2) CO₂ 레이저 용접

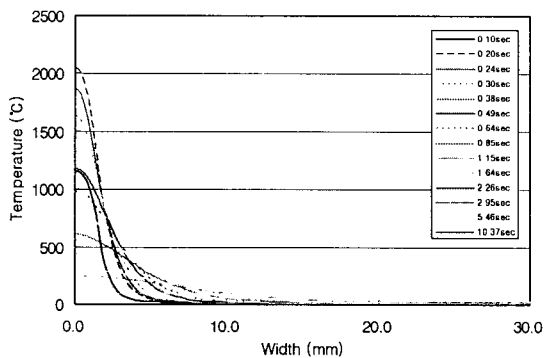


Fig. 6 Temperature distribution along the width direction

CO₂ 레이저에서는 형성된 HAZ폭은 Fig. 6의 그림으로부터 2mm임을 확인하였으며, Fig. 7의

그림으로부터 최고온도에 도달하는 순간 냉각하는 특성과 급속한 냉각구배에 의해서 TIG 용접과는 달리 HAZ부의 최고 온도가 750 을 약간 초과하였음을 확인하였다.

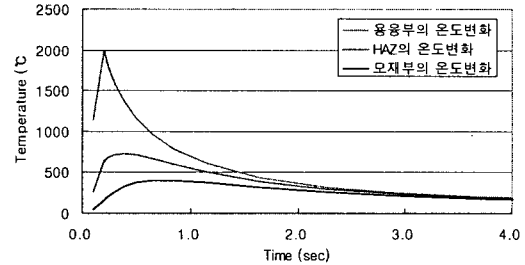
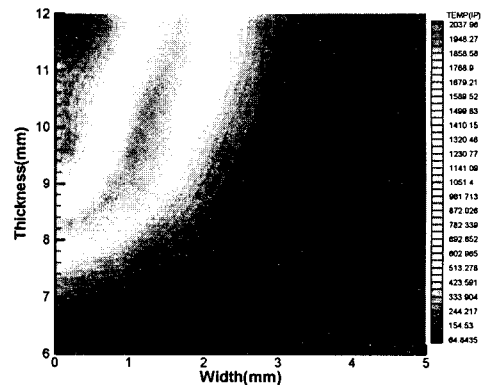


Fig. 7 Comparison of Temperature distribution in welding metal, HAZ and base metal



(a) 열해석 시뮬레이션 결과



(b) 용접부의 HAZ형성부 확인사진

Fig. 8 Comparison between the measurement and the simulation

Fig. 8의 레이저 용접에 의해 형성된 HAZ부와 모재의 경계선의 형상이 2차함수 형태 꼴로서 타원형인 TIG 용접과는 다름을 확인할 수 있었다. 용접부의 단면 형상에서 비드 폭이 TIG 용접에 비해 적으며, HAZ 폭이 TIG 용접에 비해 작음을 확인하였다.

Fig. 8 (a)와 같이 얻어진 시뮬레이션 결과는 (b) 그림에서 얻어진 HAZ 잘 일치하는 결과를 얻었다.

(3) 용접방법에 따른 열전도와 HAZ부 형상

용접법에 따른 용접부의 단면 형상인 Fig. 5와 6 그리고 냉각속도를 나타내는 Fig. 3과 6으로부터, 용융부와 HAZ부에서의 시간에 따른 온도변화로부터 TIG 용접법과 레이저 용접법에 의한 열전달 방법의 차는 다음과 같음을 확인하였다.

TIG 용접의 경우는 타원형의 용융경계면으로부터 모재로 전달되는 열전도의 크기가 폭 방향과 깊이방향이 같음으로서 HAZ부의 형상이 용융부와 동일한 타원형인 반면에, 레이저 용접의 경우는 용융부로부터 전달되는 열전도가 용융부의 깊이방향으로의 폭방향의 열전도 기여도가 큼으로서 HAZ 형성모양이 용융부의 깊이방향보다는 폭방향으로 주로 형성됨으로써, 두 용접법에 따른 HAZ부의 형성 모양이 상이한 것이다.

4. 결 론

TIG 용접과 레이저 용접을 2.25Cr-1Mo강에 적용한 경우 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용융부의 열전달 방향의 기여도면에서 TIG 용접은 용융부의 깊이방향과 폭방향이 동일한 반면에, 레이저 용접의 경우는 깊이방향보다는 폭방향의 기여도 큼을 확인하였다.
- 2) 시험편에서 용융깊이에 따른 용접진행 방향과는 수직인 폭 방향으로의 열전달면이 레이저 용접이 TIG 용접에 비해 3배이상인 됨으로써 냉각 면에서 레이저 용접이 TIG 용접보다 유리함을 확인하였다.
- 3) 레이저 용융부의 깊이가 TIG 용접에 비해 3배 이상인 반면에 HAZ 형성부의 폭은 1/2 이하임을 확인하였다
- 4) 용접속도와 냉각속도가 TIG 용접에 비해 레이저 용접이 매우 빠름으로써 HAZ 영역의 형성 폭이 레이저 용접이 작음을 해석 과정과 해석결과로부터 확인하였으며, 이 해석결과가 2.25Cr-1Mo강의 bead-on-plate에서 얻어진 HAZ 형성부 사진과 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2002년도 원자력연구개발 중장기 사업의 위탁과제(계정번호: 53733-02)의 일환으로 수행되어졌으며, 한국원자력연구소의 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 방한서, 김유철: 유한요소법에 의한 후판 용접시의 3차원 비정상 열전도 해석, 대한용접학회지, 9-2(1991), pp.37-43
2. C. Carmignani, R. Mares, G. Toselli : Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick plate, *Comput. Method s Appl. Mech. Engrg.* 179 (1999) 197-214.
3. 장원석, 나석주 : 미세 레이저 용접에서 용융부 형상예측을 위한 열원의 방정식에 관한 연구, *大韓熔接學會誌*, 18-4 (2000), 489~494
4. Qi Yunlian, Deng Ju, Hong Quan, Zeng Liying : Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet, *Material science engineering*, A280(2000) 177-181