

중탄소강 Nd:YAG Laser 용접부의 열 거동 특성에 관한 연구

A Study on the Thermal Behavior of Medium Carbon Steel in Nd:YAG Laser Welding

방 한서*, 김 영표**, 片山 聖二***, 장 응성****

* 조선대학교 항공·조선공학부

** 조선대학교 선박해양공학과 대학원

*** 大阪大學 接合科學研究所

**** (재) 포항산업과학연구원

1. 서 론

일반적으로 레이저 용접 등과 같은 고에너지 용접의 경우 일반 아크 용접에 비해 용접부의 온도 측정이 까다로워 현재까지는 주로 수치시뮬레이션에 의한 열 거동 예측이 많이 행해졌으며, 근래에 들어 일부 연구자들을 중심으로 열전대 등을 이용한 실험 및 시뮬레이션을 병행한 연구 결과가 보고되어지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 최근 레이저 용접의 적용을 통해 제품 생산다양화가 검토되어지고 있는 S45C 중탄소강 레이저 용접부의 열거동 특성을 파악하기 위하여 각종 실험과 수치시뮬레이션을 병행하여 레이저 용접부의 열거동 특성을 확인하고자 하였다.

2. 실험 및 고찰

2-1. 실험방법

S45C 기계구조용 중탄소강(시편크기: 100mm×100mm×5mm)의 TIG 용접시 용융금속부의 냉각 온도를 측정하기 위하여 W/Re5-26% 열전대(0.25 ϕ , 측정 온도범위: 400~2,300 $^{\circ}$ C)를 사용하였으며, TIG 및 연속과 Nd:YAG 레이저 용접부 단면 각각의 경도를 미소경도계를 이용하여 측정한 후 그 결과를 실측에 의한 TIG 용접시의 용융금속 냉각특성과 비교하여 Nd:YAG 레이저 용접부의 냉각 특성을 추정하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 TIG 용접시의 냉각구배

TIG 용접시의 용융금속부의 냉각온도 특성을 실측한 결과 $\Delta t_{800/500}$ 구간에서의 냉각 구배와 냉각 시간은 각기 1.30×10^3 $^{\circ}$ C/sec와 0.23sec로 나타났다. 이 결과는 기존의 연구결과¹⁾와 일치함을 보이고 있으며 용융 금속부의 조직이 마르텐사이트 조직으로 되기에 충분한 급냉 속도임을 알 수 있었다.

2.2.2 연속과 Nd:YAG 레이저 및 TIG 용접부의 경도

TIG 및 연속과 Nd:YAG 레이저 용접부의 경도 시험결과는 Fig.1에 보인 것과 같으며 이들 용접부의 용융금속부(W.M)와 모재(B.M)의 경도는 서로 유사한 값을 가지나 열영향부(H.A.Z)에서의 경도는 상이하게 나타났다. 이것은 이들 열영향부에서의 냉각구배에 따라 마르텐사이트와 펄라이트 조직의 비율이 변화되었기 때문인 것으로 추정된다. 또한, TIG 용접 열영향부의 냉각구배가 연속과 Nd:YAG 용접 열영향부의 냉각구배 보다 큰 것을 알 수 있으며, 이것은 펄라이트 조직보다 마르텐사이트 조직이 차지하는 비율이 크기 때문인 것으로 사료된다.

2.2.3 TIG 및 레이저 용접부의 금속학적 성질

금속 조직 관찰결과로부터 TIG 용접부의 용융금속부와 연속과 Nd:YAG 레이저 용접부의 용융금속부 그리고 펄스 Nd:YAG 레이저 용접부의 용융금속부의 전영역에서 모재로의 열전도에 의한 급냉(냉각율 700 $^{\circ}$ C/sec 이상)으로 인해 생기는 비평형 조직인 마르텐사이트조직이 관찰되었다.

한편, 각 용접부의 열영향부에서는 마르텐사이트 조직과 펄라이트 조직이 혼재된 조직이 관찰되어졌다. 그리고 TIG 용접 열영향부의 마르텐사이트 조직비율이 연속과 Nd:YAG 레이저 용접 열영향부의 마르텐사이트 비율보다 더 크게 나타났으며, 이것을 통하여 급냉현상이 가열시간 및 용융금속과 모재의 체적 비율에 관련이 있음을 추정할 수 있었다.

그리고, 각 시편의 모재에서는 퍼얼라이트 조직과 페라이트 조직이 관찰되어졌으며 결정립계의 크기는 각 부위에 대한 열 영향의 크기에 따라 W.M> H.A.Z> B.M 순 이었다. 각 용접부의 조직 사진은 Pt.oto.1에 나타내었다.

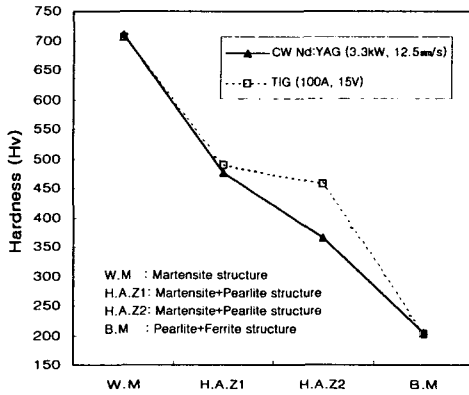


Fig.1 Hardness of specimen

TIG welding <i>i</i> =100A, E=15V, V=10.0mm/s, Ar(10 ℓ /min)	W.M	H.A.Z	B.M
CW Nd:YAG laser welding P=3.3kW, <i>f</i> _d =0, V=12.5mm/s, Ar(30 ℓ /min)	W.M	H.A.Z	B.M

Photo.1 Micro-structure of TIG and Nd:YAG laser welds

3. 수치시뮬레이션 및 고찰

3.1 해석이론

3.1.1 유한요소법에 의한 2차원 비정상 열전도 해석

온도의 시간 및 공간적 분포는 다음의 2차원 비정상 열전도 지배 방정식을 만족하며 경계조건으로서 해석대상인 모델 내부로의 열전도와 대기 중의로의 열전달이 있는 것으로 하였으며, 고체에서의 열전도 문제를 갈라진법을 이용하여 다음과 같이 유한요소 정식화하였다.

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

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

3.2 해석 및 고찰

3.2.1 해석방법 및 모델

본 연구에서는 용접열원을 순간 열원으로 가정하였으며, 자연 좌표 계에서 요소좌표와 변위에 대해 동일한 보간함수를 사용하는 4절점 Isoparametric 요소를 사용하였다. 또한, S45C 중탄소강의 실제 온도의존성 물리정수들^{2),3)}을 고려하였다. 그러나 용융지의 유동, 키홀 내부의 증발과 복사현상은 고려하지 않았으며, 시뮬레이션 모델의 열 분포 해석을 위하여 자체 개발한 유한요소 프로그램⁴⁾을 사용하였으며, 해석의 정도를 높이기 위하여 기존 연구에서 사용된 입열 계산식을 보정^{5),6),7)}하여 사용하였다. 또한, 해석을 위하여 사용된 모델은 실제 시편의 중앙부 단면에서의 2차원 1/2 모델 (크기: 50mm × 5mm)에 대해 해석하였으며 전체 절점수 및 요소수는 각각 4,029개와 3,900개로 하였으며, 최소요소의 크기는 0.1mm × 0.1mm로 하였다.

3.2.3 결과 및 고찰

냉각시간 및 냉각구배에 대한 시뮬레이션과 실험의 결과는 Fig.2의 (a)에 나타난 것과 같으며 실험 및 시뮬레이션 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, TIG 및 연속파 Nd:YAG 레이저 용접부(용융금속 및 열영향부)의 온도분포 시뮬레이션 결과는 Fig.2의 (b)와 (c)에 나타난 것과 같으며, 이들 그림을 Fig.1과 비교하여 보아도 TIG 용접 열영향부에서의 냉각이 연속파 Nd:YAG 레이저 용접의 경우보다 빠름을 알 수 있다.

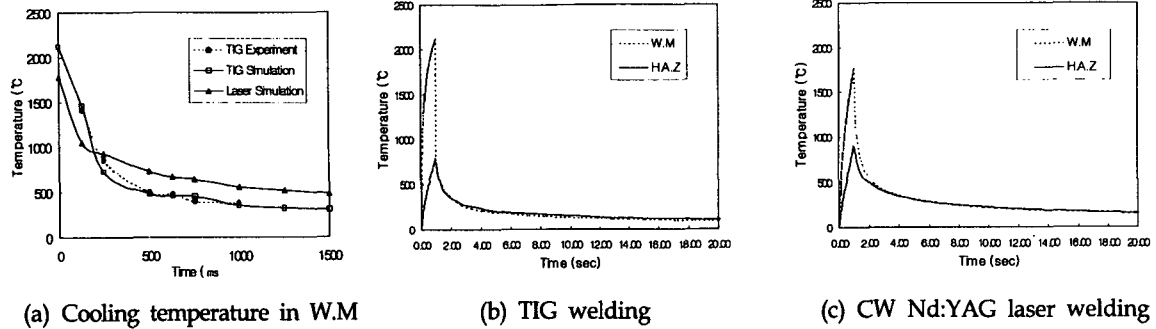


Fig.2 Comparison of the cooling temperature

Fig.3에 시뮬레이션에 의해 예측된 열영향부와 모재의 경계를 등온선(723°C)을 이용하여 나타내었으며, 그 결과가 실제 경계선과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

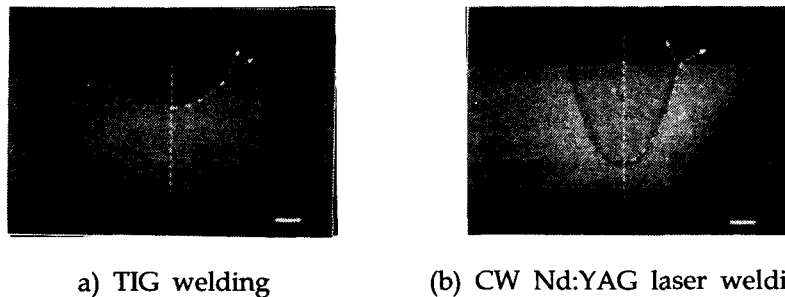


Fig.3 Comparison between experiment and simulation on the H.A.Z line

4. 결 론

1) 본 연구에 사용된 S45C 중탄소강 시편의 TIG 용접부(용융 금속부)의 냉각구배 및 냉각시간을 실측한 결과 기존의 선행 연구결과와 일치하였으며, 경도를 측정하여 비교한 결과 냉각구배가 용접부 금속조직비율에 영향을 미쳐 경도를 변화시킴을 알 수 있었다. 또한, 이를 통해 연속파 Nd:YAG 레이저 용접부(용융금속부)의 냉각구배를 유추할 수 있었다.

2) TIG 및 연속파 Nd:YAG 레이저 용접부의 냉각구배 및 냉각시간에 대한 실험 및 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 잘 일치하였으며, 실제 용접현상을 시뮬레이션을 통하여 재현함으로써 열영향부의 특성을 예측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 安田 功一, 木谷 靖 : 厚板のCO₂レーザー溶接金屬の冶金學的性狀, 日本溶接學會論文集, 第18卷, 第1號(2000), pp.95~101.
2. E. A. Brandes and G. B. Brook, Smithells metal reference book : 7th ed., Butterworth-Heinemann (1992), pp.14-27~14-41, pp.22-100~22-103.
3. 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), pp.12-176, 12-190.
4. 방한서, 김유철 : 有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元 非正常熱傳導 解析, 大韓溶接學會誌, 第9卷 第2號(1991), pp.37~43.
5. K.W.Carlson : The role of heat input in deep penetration laser welding, ICALEO(1985), pp.49~57.
6. M.R.FREWIN, D.A.SCOTT : Finite Element Model of Pulsed Laser Welding, AWS, Welding Journal(1999), pp.15-s~22-s.
7. A. Kaplan : A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile, T. Phys. D:Appl. Phys., Vol.27(1994), pp.1805~1814.