

Nd:YAG 레이저빔을 이용한 SCP 강판과 STS304강판 용접시 오프셋(off-set) 위치 결정에 관한 연구

윤부선* · 김도훈* · 박기영** · 이경돈**

*연세대학교 금속공학과

**고등기술연구원

**A study of the determination of off-set position for Nd:YAG
laser welding between SCP steel sheet and STS304 sheet**

B. S. Yoon*, T. H. Kim*, G. Y. Park and G. D. Lee****

*Dept. of Metallurgical System Engineering, Yonsei University

**Insitute for Advanced Engineering

Abstract

This work was attempted to join SCP sheet and STS304 sheet by using Nd:YAG laser beam. SCP sheet has good formability and low cost, while STS304 has excellent corrosion resistance and mechanical properties in high temp. In this experiment, butt joint type was used to develop the tailored blank welding for dissimilar steel. Sheets which have different thermal properties.

Computer simulation was conducted to obtain the off-set position for efficient welding by considering laser power, scanning speed, focal length and basic properties. The result showed that the optimum thermal distribution was obtained when the laser beam was irradiated at 0.05 ~ 0.1 mm off-set toward the SCP sheet side.

The experiment was conducted based on the result of computer simulation to show the same optimum conditions. Optimum conditions were 3KW in laser beam power, 6m/min in scanning speed, -0.5mm in focal position, 0.1mm off-set toward SCP. Microhardness test, tensile test, bulge test, optical microscopy, EDS, and XRD were performed to observe the microstructure around fusion zone and to evaluate the mechanical properties of optimum conditions.

The weld zone had high microhardness values by the formation of the martensitic structure. Tensile test measured the strength of welded region by vertical to strain direction and the elongation of welded region by parallel to strain direction.

Bulge test showed 52% formability of the original materials. Bead shape, grain size, and martensitic structure were observed by the optical microscopy in the weld zone. Detailed results of EDS, XRD confirmed that the welded region was connected of martensitic structure.

Key words : Nd:YAG laser beam, SCP sheet, STS304 sheet, Tailored blank laser welding, computer simulation, optimum conditions, off-set position, hardness, formability, martensite

1. 서 론

한 재료가 동시에 가지기 힘든 다양한 물성은 서로 다른 재료를 레이저로 용접함으로써 가능하게 되었다. 이는 큰 에너지 밀도, 적은 열영향부와 좁은 용접부가 생기는 레이저용접 특성을 잘 이용한 것이다. 그 한 예가 Tailored Blank Welding을 이용한 자동차용 강판의 제조이다. Tailored Blank Welding 기법은 두께, 표면 코팅 상태, 강도 등이 다른 두 종류 이상의 판재를 원하는 모양으로 절단하여, 최종적인 프레스 성형 전에 이들을 용접시키는 기술이다.

본 연구에서 재료는 성형성과 비용 면에서 우수한 SCP강판과 내식성이 양호하고 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 STS304강판을 선택하였다. 특히 STS304강판은 고온 산화성이 적고, 뛰어난 내식성으로 인해 산, 알칼리등의 광범위한 부

식 환경에 사용이 가능하여 자동차 배기계의 차재관(flexible pipe), 열교환기, 수송용기, 식품 용기 등에 사용된다. 그러나 이런 서로 다른 금속들 간의 용접방법은 물리적인 성질에 대한 영향을 고려해 주어야 한다. SCP강은 STS304강 보다 열전도율이 크므로 열영향부의 크기가 달라짐으로써 성형성등의 문제가 발생할 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때 레이저 용접은 짧은 시간에 집중된 열을 좁은 구역에 가할 수 있고 급속한 냉각으로 양호한 용접부위를 얻게 되어 이와 같은 용접결합을 상당히 줄일 수 있을 것이다.

그동안 이와 비슷한 실험을 많이 수행해 왔으나 기존에는 맞대기 용접시 레이저빔을 중심에 두고 실험하여 열전도도 차이에 의해 용접비드가 한쪽으로 치우치는 경향을 나타내었다. 이러한 용접방법은 용접 불량으로도 이어 질수가 있다. 그래서 본 연구에서는 양호한 용접결과를 얻기 위해

이론적으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 레이저 빔 위치를 중심축으로부터 어느 정도 이동시켜야 하는지를 계산하고, 실제적으로 실험적 오프셋(off-set) 위치를 결정하려고 한다. Fig. 1은 레이저 용접의 모식적인 그림을 나타낸다. 레이저 재료가공은 많은 내적요인과 외적요인을 고려해야 되는데 일단 재료와 레이저가 결정이 되면 내적요인은 거의 결정이 되므로 외적요인을 적절히 조절하여 레이저 용접의 최적 조건을 반복실험(trial and error)과 컴퓨터 시뮬레이션을 병행 하여 실시하였다.

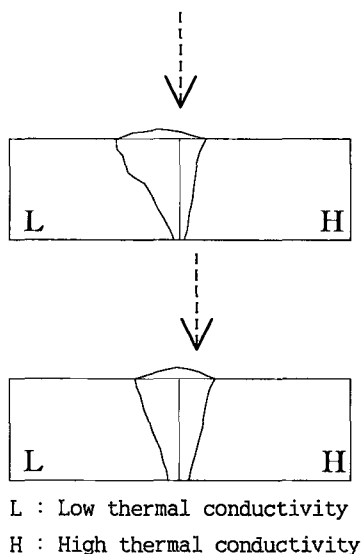


Fig. 1 Schematic illustration of laser welding

II. 실험방법

1. 시편의 준비 및 레이저 용접

본 실험에서 사용된 재료는 0.8mm두께의 SCP강판과 STS304강판을 사용하였다. 그리고 이 금속들을 광전원자 방출분광 분석기를 이용하여 성분분석을 하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다.

맞대기(butt) 용접을 위해 시편을 300×100 mm의 크기로 절단한 후 허용간격을 없애기 위하여 용접되는 면을 밀링가공 하였다. Table 2는 실험시편으로 선택한 재료에 대한 물리적, 화학적 및 전기적 성질을 비교한 것이다.

Table 1. Chemical composition of the specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
SCP	<0.001	0.004	0.057	0.012	0.012	0.023	0.020	0.014	0.019
STS304	0.059	0.600	1.208	0.035	0.004	8.025	18.02	0.301	0.202

Table 2. The Properties of SCP and STS304

	SCP	STS304
Lattice	B. C. C	F. C. C
Density (g/cm ³)	7.87	8
Melting Point(°C)	1533	1430
Specific Heat (J/g°C)	481	500
Thermal Conductivity (W/mK)	51.9	21.5
Electric Resistivity (μΩcm)	14.2	72
Tensile Strength at R.T(MPa)	330	579.2

Table 3. Specification of Nd:YAG laser

Nd:YAG laser	
Maker	TRUMPF HL3006D
Max Power	3KW(CW)
Spot Size	0.65mm

용접은 맞대기(butt) 용접으로, 자생용접 (autogeneous welding)을 하였고 실험에 사용한 레이저는 고등기술연구원(IAE)의 3kw급 연속파(Continuous Wave) Nd:YAG 레이저로 제원은 Table 3에 나타내었다. Fig. 2는 레이저빔 조사시의 시편과 레이저빔이 주사되는 것을 도식적으로 나타내고 있다. 용접은 효율성을 고려하여 중심부로부터 오프셋(off-set)을 주어 용접

을 실시하였다. 파장이 짧은 Nd:YAG 레이저는 플라즈마의 영향이 적어서 보호가스(Shielding gas)는 사용하지 않고 공기만을 불어주었다.¹⁾

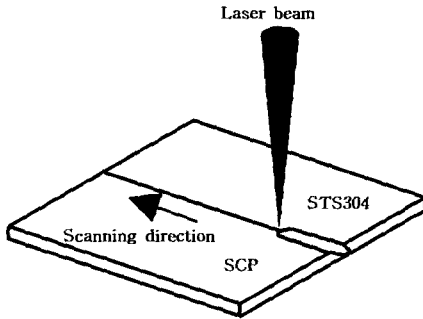


Fig. 2 Schematic illustration of laser irradiation

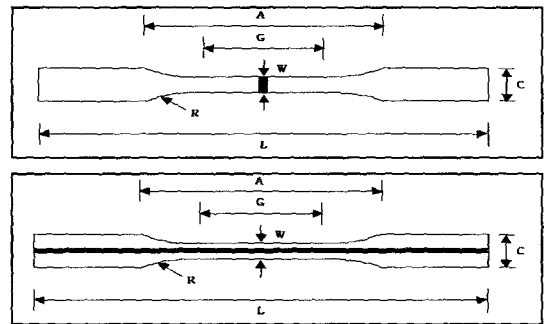
2. 컴퓨터 시뮬레이션

실험에 사용된 두 재료의 열전도도 차이에 중점을 두고 좀더 효율적인 용접을 하기 위해서 실험을 통하여 얻은 레이저빔 출력, 주사속도와 문헌에서 찾은 물리적 특성 값을 고려하여 간단히 열전도에 관한 프로그램을 만들었다. 이 프로그램은 용접 특성을 조사하기 보다는 온도분포만을 관찰하기 위한 목적으로 만들었다. 레이저빔 조사시 재료가 용융되지 않는 조건 하에 강판에서의 온도 분포를 관찰하고 이를 근거로 오프셋(off-set)을 결정하였다.

3. 기계적 특성 평가

모재, 열영향부 및 용접부의 경도변화를 측정하기 위하여 미세경도기를 사용하여 모재에서 열영향부와 용접부의 경도를 측정하였다. 1000gf의 하중 하에서 0.2mm의 측정간격으로 Vickers 경도 값을 측정하였다. 그리고 용접된 시편의 파단위치와 연신율, 인장강도 항복강도값을 알아보기 위해서 인장실험을 수행하였다. 인장시편

은 ASTM subsize type E8-78의 소형판상으로 제작 하였으며 용접부가 인장방향에 수직인 것과 인장방향에 수평인 것 두 가지 종류로 만들어서 실험을 하였다. 용접부가 인장 방향에 수직인 시편은 용접의 건전성을 조사하기 위한 것 이고, 용접부가 인장 방향에 평행한 시편은 용접부의 인장강도를 조사하기 위한 것이다. 인장시편은 Fig. 3에 나타내었다. 액압성형성 시험은 레이저 용접된 시편을 금형에 장착하고 용접시편이 파단될 때까지 유압을 가한 뒤 파단된 돔(Dome)의 높이를 측정하여 성형성을 평가 하였다.



단위(mm)

G : Gauge length 50, W : Width 12.5,
R : Radius of fillet 50, L : Over-all length 200,
A : Length of reduced section 100,
C : Width of grip section 20

Fig. 3 Geometries and dimension of tensile test specimen

4. 미세조직관찰 및 상분석

용접부 비드의 형상과 용접부 조직의 상을 관찰하기 위해서 용접 시편의 단면을 채취하여 연마후 Aqua regia (20ml HNO₃, 60ml HCl)용액을 사용하여 에칭 하였다.

용융후 냉각시 용접부의 상변화와 생성물의 유무를 관찰하기 위하여 X선 회절시험을 하였고 EDS분석은 모재와 용접부의 합금원소의 양과 분포양상을 알아보기 위해서 수행하였다.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

1. 컴퓨터 시뮬레이션

레이저빔이 표면에 조사시 용접 표면이 가열되며 레이저빔의 흡수율은 재질, 전기 전도도, 표면 거칠기, 표면 코팅여부, 재질의 온도 등에 영향을 받는다. 금속의 경우에 온도가 상승할수록 레이저빔의 흡수율은 증가한다. 그러나 본 실험에서는 열 분포도만을 확인하기 위해서 온도에 따라 변하지 않는다는 가정 하에 흡수계수는 0.5 상수로 놓았다. 열 분포해석 크기는 레이저 조사시 국부적인 온도분포를 고려하여 x축 10cm, y축 7.5cm로 하였다. 그리고 다른 인자 레이저 출력, 빔크기, 레이저 속도는 예비 실험을 통하여 얻은 값을 참고로 하여 사용 하였다.

본 실험에서 이산화 방정식을 얻기 위해서 유한체적법 (Finite Volume Method)을 사용하여 제어체적에 적분을 하였다. FVM해석은 3차원을 적용하였으며, 3차원 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

ρ : 밀도, C : 비열, T : 온도,

t : 시간, κ : 열전도율

위식을 유한체적법에 의한 이산화방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_p T_P^{t+\Delta t} &= a_e T_E^{t+\Delta t} + a_w T_W^{t+\Delta t} \\ &+ a_n T_N^{t+\Delta t} + a_s T_S^{t+\Delta t} \\ &+ a_t T_T^{t+\Delta t} + a_b T_B^{t+\Delta t} + b \end{aligned}$$

a : 계수, b : 열원

초기 시편온도는 상온 20°C (293K)로 정의 하였다.

$$T = T_0(x, y, z) = 293\text{K at } t=0$$

경계조건은 대류, 복사 및 moving heat source를 고려하였다. 그러나 간략하게 하기 위해서 상수 값을 온도에 변하지 않는다는 가정 하에 일정한 값으로 설정 하였으며, 바닥으로 빠져나가는 열도 $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 일정하게 하였다.

$$q_c = h(T_{air} - T_B)$$

$$q_r = \epsilon \sigma (T^2 + T_{air}^2)(T + T_{air})(T_{air} - T_B)$$

$$q_l = \alpha \frac{P}{A}$$

h : 자연 복사 변화 계수 (50),

ϵ : 표면 방사율 (0.8)

σ : 볼츠만 상수, α : 흡수계수 (0.5)

P : 레이저 출력

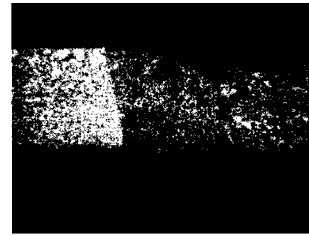
A : 빔 면적

위의 대수방정식을 풀기 위해서 가우스-자이달(Gauss Seidel Method) 방법을 사용하여 해를 얻었으며, 시간간격 ($\Delta t \leq \frac{\Delta y}{v_i} \frac{1}{2}$) 은 레이저의 열원이 한번에 두개이상의 y방향의 격자를 지날 수 없다는 조건에서 안정적인 시간간격을 사용하기 위해 0.5를 곱하였다.

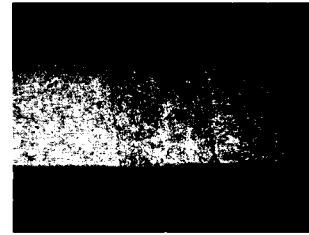
실제 실험시 오프셋(off-set)량이 $\pm 0.2\text{mm}$ 를 넘으면 용접이 불량하기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션은 Off-set 가능성이 있는 $-0.2\text{mm} \sim +0.2\text{mm}$ 까지 프로그램을 실행하였다. (+)로 표시한 것은 SCP강 쪽으로 Shift된 것을 나타내고, (-)로 표시한 것은 STS304쪽으로 이동(Shift)된 것을 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 Fig.4에 나타내었다.

가시화된 그림들을 보면 열전도도가 다

르기 때문에 온도분포가 약간씩 다르게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 오프셋(Off-set)이 STS304쪽으로 되었을 경우는 중심축에서 벗어나 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이렇게 되면 온도 분포가 불균일하게 되어 용접할 경우에 잘 되지 않을 확률이 높다. 그러나 SCP강 쪽으로 오프셋(off-set)을 주었을 경우에는 비교적 온도 분포가 양호하게 나타났다. 그 중에서 +0.05mm와 +0.1mm의 경우가 중심축을 따라서 온도분포가 잘 되었다. 두 가지의 경우 가시적인 결과로는 어느 것이 더 균일하게 분포 되었는지 판단하기 어려웠다. 그래서 실험을 병행하여 비드형상을 비교하였으며, 비드형상 비교 결과 오프셋(off-set)(+0.1)의 경우가 가장 양호하게 나타내었다. 비드형상 비교사진은 Fig. 5에 나타내었다. 실험과 시뮬레이션을 병행하여 실험한 결과 최적의 용접조건은 다음의 Table 4와 같이 나왔다.



Off-set(+0.05)

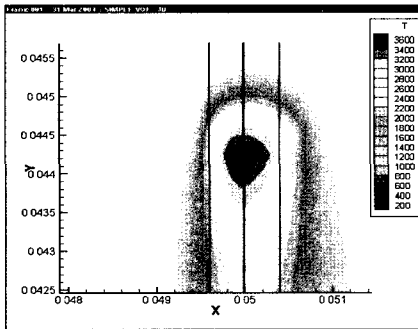


Off-set(+0.1)

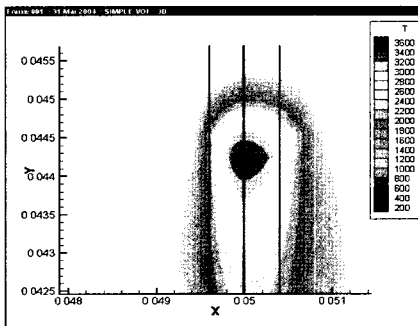
Fig. 5 Shapes of bead

Table 4 Optimum condition

Factor	Optimum condition
Laser power	3KW
Welding speed	6 m/min
Focus position	-0.5 mm
Gas	No
Off-set	0.1mm (to SCP)



(a) Off-set(+0.05mm)



(b) Off-set(+0.1mm)

Fig. 4 The result of simulation

2. 기계적 특성 평가

(1) 경도시험(Hardness test)

Fig. 6은 최적조건에서 용접된 시편의 경도 분포 결과이다. SCP강 쪽의 경도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 이것은 용융부의 팽창과 응고 시 압축에 의한 잔류응력의 영향으로 생각된다. 그러나 STS304 쪽은 경도 값이 달라지는 열영향부가 뚜렷이 발견되지 않았다.

용접부의 경도 값을 보면 전체적으로 모재보다 높은 경도 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 경도 값이 증가하는 것은 마르텐사이트의 생성과 입자의 미세화, C의 고용강화등으로 설명된다. 본 실험에 사용된 재료는 탄소의 함량이 적은 것으로 보아 높은 경도를 보이는 것은 마

르텐사이트의 생성과 입자의 미세화에 의해 높은 경도 값을 보이는 것으로 생각된다.²⁾

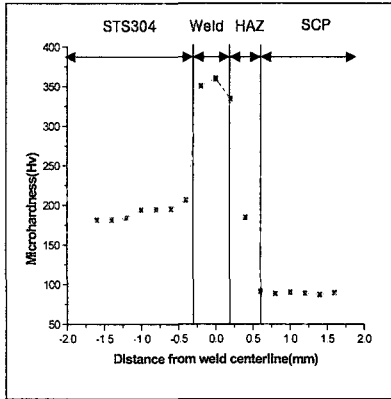


Fig. 6 Microhardness distribution of specimen

(2) 인장 시험(Tensile Test)

인장시험은 인장방향이 용접선과 평행한 것과 수직인 것 두 가지로 나누어 실험하였고 인장시험의 결과를 Table 5에 나타내었다.

성형성을 가장 잘 대표하는 연신율의 경우, SCP강은 50.65%, STS304는 55.8%, 용접선에 평행하게 인장한 시편은 44.7%로 모재대비 84%를 상회하는 만족할 만한 성형성을 보여주었다. 또한 용접선에 수직인 방향으로 인장한 경우에는 모재에 비해 51.1% 정도의 연신율로서 수평인장의 경우보다 성형성은 떨어지나 모재에서의 파단 결과로 볼 때, 용접이 잘 되어서 접합의 정도가 양호함을 보여주고 있다.

용접부를 포함한 시편의 인장결과를 비교해 볼 때, 모재에 비해 항복강도는 상승하고 연신율은 감소하는 경향이 나타났다. 이는 레이저 용접후 생성되는 비드(bead)의 경도가 모재에 비해 매우 크고 거의 변형이 없기 때문이다. 즉 시편의 비드부는 연신에 기여하는 정도가 거의 없기 때문에 동일한 시편에서는 모재에 비해 실제 연신

가능한 부분이 작아지게 된다. 이에 따라 연신율은 감소하게 되며 그 감소 정도는 용접선이 인장방향에 수직인 경우가 평행한 경우보다 커진다.³⁾

Table 5 Result of tensile test

	Stress at offset Yield (Mpa)	Stress at Max. Load (Mpa)	% strain at Max. Load (%)	Elongation(%)
SCP	167.511	307.650	45.330	50.65
STS304	306.031	728.850	92.080	55.8
Vertical	187.377	309.800	22.513	27.2
Parallel	281.870	535.800	78.280	44.7

Table 6 Result of bulge test

	Dome Height (mm)			Average
SCP	43.60	43.96	44.04	43.87
STS304	46.08	46.90	46.28	46.42
Welding	23.90	21.88	23.00	22.93

(3) 액압성형성 시험(Bulge Test)

액압성형성 시험(bulge test)를 수행하고 높이게이지(height gauge)를 이용하여 돔의 높이(dome height)를 측정 하였다. Table 6의 결과를 보면 용접된 시편 돔의 높이(dome height)는 모재에 비해 약 52.3%로 성형성이 좋지 않게 나왔다. 일반적으로 생산 현장에서 레이저 용접 후 성형하는 경우 보고에 의하면 실제 생산 공정에서 용접된 시편의 기계적 특성치가 모재의 80%이상이 요구된다.⁴⁾ 그러나 본 실험에서는 이 값에 너무 못 미치는 약 52.3% 정도를 나타내었다.

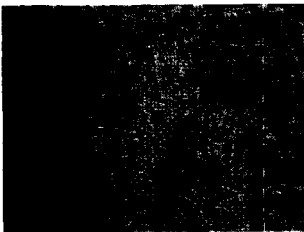
3. 미세조직 관찰 및 상분석

Fig. 7은 비드형상과 용접구역을 나타내는 미세조직 사진이다. 이것을 보면 용접

부의 크기는 상부비드폭과 하부비드폭이 0.7~0.75mm 정도이고, SCP강 쪽의 HAZ는 0.25~0.3mm정도이다. 그러나 STS304강 쪽의 열영향부는 관찰하기 힘들었다. 용접구역을 확대하여 lath형 마르텐사이트로 사료되는 조직들을 관찰 할 수 있었다. 이것은 레이저용접 특성의 하나인 빠른 냉각으로 인해 확산될 시간적 여유가 없어서 마르텐사이트로 변태했기 때문이다. 그리고 STS304강의 경우는 용접시 탄소들이 입계에서 탄화물로($Cr_{23}C_6$)석출되어 예민화 현상이 발생하기 쉬우나 마르텐사이트 생성과 마찬가지로 빠른 냉각속도로 인해서 탄화물이 결정립계에 석출되지 않았다. 또한 기공(pore)나 균열(crack)도 관찰되지 않았다. 이것은 앞의 인장시험 결과와도 잘 일치 하고 있다는 것을 보여준다.



Weld Zone (×120)



Magnification of weld zone (×300)

Fig. 7 Optical microstructure

(1) EDS (Energy Dispersive X-ray Microanalysis)분석

EDS로 주요성분에 대해 성분분석을 하여 Fig. 8에 Cr_{eq} 와 Ni_{eq} 을 Schaeffler diagram으로 나타내었다. 용접부를 Schaeffler diagram에 나타냄으로써 주요 성분이 마르텐사이트 구역에 있는 것을 알

수 있었고 한곳에 몰려 있지 않고 약간 분산되어 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 레이저용접이 레이저빔 하에서 용탕이 매우 높은 온도이나 표면 장력구배에 의한 혼합이 이루어질 정도로 급냉 과정에서 충분한 시간이 있지 않아서 이런 결과가 나온 것으로 생각된다.⁵⁾

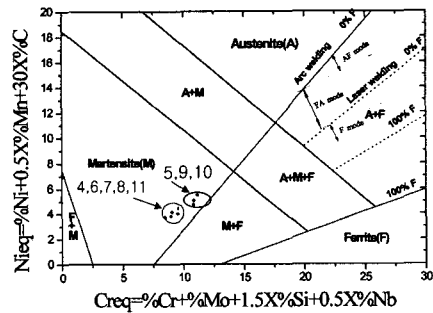


Fig. 8 Schaeffler diagram of laser welding

(2) XRD (X-Ray Diffractometry)분석

Schaeffler diagram에서 추정된 용접부의 상은 마르텐사이트일 것으로 예상 하였다. 위의 결과를 확인하기 위해 XRD분석을 실시하였으며, 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 레이저 용접의 결과를 보면 Schaeffler diagram에서의 예측과 같이 γ -오스테나이트 첨단(peak)은 나타나지 않고 α -마르텐사이트 첨단(peak)만이 관찰되었다. 그러나 마르텐사이트상 α' (b.c.t)은 그 변태 특성상 α (b.c.c) 결정구조의 한축이 약간 이동 한 것이므로 XRD 분석에 의해서 두상을 구별하는 것은 매우 힘들다. 그러나 X선 회절분석원리의 기본식 $\lambda=2dsin\theta$ 에서 마르텐사이트 변태에 의해서 d가 변하면 0° 와 90° 사이에서 θ 가 변하므로 마르텐사이트상이 있는 경우 그 peak의 2θ 값이 원래의 페라이트상 peak의 2θ 보다 약간 이동한다고 할 수 있다. 그러나 이것을 현실적으로 구분하기는 상당히 어렵기

때문에 본 실험에서는 α 와 α' 상을 모두 α 상으로 표기 하였다. 마르텐사이트와 페라이트가 XRD로 구분하기 어렵다는 것을 제외하고는 Schaeffler diagram의 예측과 잘 맞는다는 것을 알 수 있었다.

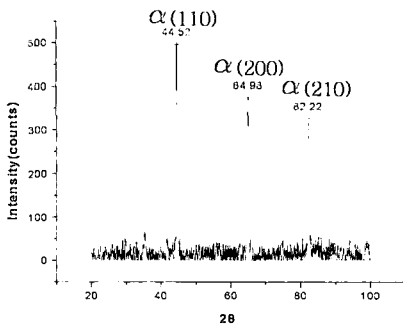


Fig. 9 The XRD profile of laser Welding

IV. 결 론

컴퓨터 시뮬레이션과 Nd-YAG 레이저를 이용하여 SCP강판과 STS304강판을 용접하여 기계적 특성과 미세조직을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 서로 다른 금속의 열전도 분포와 실험을 통하여 최적의 오프셋(Off-set)량을 도출 하였다. 그 값은 SCP강판 쪽으로 0.1mm의 위치이다.
2. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 우수한 용접성을 갖는 최적 조건은 레이저빔 출력 3kW, 용접속도 6m/sec, 초점위치는 -0.5mm, 오프셋(off-set)량은 SCP쪽으로 0.1mm이었다.
3. 수직인 방향의 인장시험 결과 모재에서 파단이 일어나 용접의 건전성을 확인할 수 있었고 수평인 인장시험결과 연신율이 모재대비 약84%로 상당한 연신율을 보여주었다.

4. 미세조직 관찰결과 lath형 마르텐사이트가 관찰되었고 이로 인하여 경도값, 인장등 기계적 성질이 향상된 것으로 사료된다.

실험을 통하여 레이저에 의한 용접의 최적조건을 설정할 수 있었으며 레이저의 장점을 이용하여 용접부를 제어함으로써 좋은 기계적 성질을 얻었다.

참고문헌

1. Jay Eastman and David Smith, "Shielding Gas Effect on Nd:YAG Laser Welding of Various Materials", ICALEO, Vol.87, pp.187-196, 1999
2. 원영상, 김도훈, "CO₂레이저에 의한 STS304 스테인레스 박판강의 용접성에 미치는 용접조건의 영향에 관한 연구" 1987
3. 레이저 기술, 통권 36호, pp.59-67, 1996
4. 박정호, "CO₂ 레이저빔에 의한 저탄소 강판과 오스테나이트 스테인레스강판의 용접에 관한 연구" 연세대학교 석사학위논문, pp.60, 1996
5. V. P. Kujanpää, "Composition and Microstructure of Laser Beam Welds Between Dissimilar Metals", J. of Laser App., pp.24-30, 1990
6. Zhang Li, G. Fontana, "Autogenous laser welding of stainless steel to free-cutting steel for the manufacture of hydraulic valves", Journal of Materials Processing Technology 74, pp.174-182, 1998
7. NC Sekhar, J D Russell, N A McPherson, "Autogenous Nd:YAG Laser Welding of 6mm Thick Dissimilar Steels", ICALEO, 2001