

CW Nd:YAG 레이저를 이용한 중탄소강과 오스테나이트계 스테인레스강의 이종금속 용접

유영태[#], 신호준^{*}, 안동규^{**}, 임기건^{***}, 신병현^{****}

Dissimilar Metal Welding of Medium Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel utilize CW Nd:YAG Laser

Young Tae Yoo[#], Ho Jun Shin^{*}, Dong Gu Ahn^{**}, Kie Gon Im^{***}, Byung Heon Shin^{****}

ABSTRACT

Laser welding of dissimilar metals has been widely used to improve a wear resistance and a corrosion resistance of the industrial parts. The objective of this research is to investigate the influence of the process parameters, such as the welding for SM45C and STS304 with CW Nd:YAG lasers. The bead-on-plate welding tests are carried out for several combinations of the experimental conditions. In order to quantitatively examine the characteristics of the dissimilar welding, the welding quality of the cut section, stress-strain behavior and the hardness of the welded metal are investigated. From the results of the investigation, it has been shown that the optimal welding condition without defects in the vicinity of the welded area and with a good welding quality is 1600W of the laser power, 0.85m/min of welding speed and 4 ℓ/min of pressure for shielding gas.

Key Words : Laser welding(레이저용접), Butt welding(맞대기용접), Aspect ratio(용입비), STS304(오스테나이트계 스테인레스강), SM45C(중탄소강), 입열량(Heat input capacity)

1. 서론

산업화가 고도화되면서 소비자는 고기능성의 제품을 원하고 제조회사들은 소비자의 요구를 맞추기 위해서 다양한 가공방법으로 기능이 다른 여러 종류의 재료로 제품을 생산하고자 한다. 특히 과거의 전통적인 용접으로는 만족할 수 있는 정밀한 금속접합이 어려워 레이저 용접으로 대체하고 있다. 재료를 고기능성으로 개선하기 위해 합금이 이용되

고 있고 더 나아가 신소재를 개발하거나 이종금속을 접합하여 그 기능을 보강하고 있다. 이에 따라 이종금속을 레이저로 용접함으로써 산업현장에서 요구하는 다양한 금속들의 접합에 대한 관심이 집중되고 있다.

그 예로 Mai¹는 평균출력이 350W인 Nd:YAG 펄스 레이저로 두께가 1mm인 시편을 제작하여 강과 kovar 그리고 동과 알루미늄을 이종 용접하였다. Brüggemann² 는 RSt37-2강과 알루미늄합금 (Al-Mg-Si0.7)

접수일: 2005년 7월 27일; 게재승인일: 2006년 2월 10일

교신저자: 조선대학교 기계공학과

E-mail ytyou@chosun.ac.kr Tel. (062) 230-7016

* 조선대학교 대학원

** 조선대학교 기계공학과

*** 전남대학교 물리학과

**** 조선대학교 기계공학부

을 출력이 5kW 인 CO₂ 레이저를 이용하여 이중용접에 대한 이론과 실험결과를 비교하였다. 이는 STS304와 SM45C를 평균 출력이 500 ~ 600W인 Nd:YAG 펄스레이저로 두께가 0.5mm인 시편을 겹치기 용접을 하였다. 그러나 고출력의 CW Nd:YAG 레이저로 두께가 각각 3mm이상 되는 STS304와 SM45C를 이중 용접한 연구 결과는 찾지 못했다.⁴⁻¹⁸

STS304와 SM45C를 이중 용접할 때 레이저 빔을 이용하면 고 에너지 밀도 열원에 의해 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 중횡비(Aspect Ratio)가 대단히 크고, 용입 깊이가 깊고, 열영향부(Heat Affected Zone:HAZ)가 작은 용접을 할 수 있다. 일반적으로 이중금속 용접은 용융용접을 주로 실시하고 있으나, 용접 시 많은 문제점들이 있다. 이는 각각의 금속 화학성분의 차이에 따라 달라지는데, 용접 시 금속조직이 조대화되거나, 용융 온도와 응고 온도가 다르기 때문이다. 특히 원자구조가 달라서 용접 시 가장 먼저 생각해야 할 것은 물리적 화학적 성질이 거의 비슷한 성질을 가지고 있어야 한다. 일반적으로 용융용접에서 용접차가 큰 경우 용접부 균열이 발생하기 쉽다. 즉, 응고시에 용접차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 또한 계면에 취약한 생성상(phase)이 형성되거나, 두 금속의 회석에 의해 균열이 발생하여 양호한 성능을 얻을 수 없다.

그래서 레이저가 가지고 있는 장점을 이용하여 이중 용접의 문제점들을 극복하기 위해, STS304와 SM45C를 이중 용접하였다. 이중용접에 이용한 STS304는 고온산화성이 적고 뛰어난 내식성 때문에 부식 환경에 적응성이 우수한 특성이 있다. SM45C는 피로강도가 높고 열처리하면 마모에 강한 성질이 있어 내연기관이나 공작기계의 주요 부품으로 사용한다. 두 금속 최적의 용접조건을 결정하기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate)를 실시하였다. 비드 온 플레이트 실험 결과로부터 용융 용접시 고온균열이나 기공 등 결함이 생기지 않는 조건을 찾았다.

레이저 용접 상태는 레이저빔의 파장, 레이저빔의 이송속도, 초점거리, 레이저빔의 출력, 보호가스 종류 및 유량, 재료의 레이저빔 흡수율과 반사율에 따라 다르다. 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저(파장 1.06 μ m)를 이용하여 STS304와 SM45C를 이중 용접하였다. 때문에 재료와 파장은 결정되어있다. 그러나 레이저 빔으로 이중 용접할 때 공정 변수로는

레이저빔의 출력, 빔의 이송속도, 초점거리를 변화시키면서 실험하였다. 이중 용접한 후 용융비드 모양, 용접 단면의 미세조직을 관찰한 후 인장강도 실험하여 최적의 용접 공정변수를 제시하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06 μ m이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔은 직경이 600 μ m인 광섬유를 통해서 전달한다. 빔 발산 각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다.

레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공 장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 1000 \times 500 \times 400mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5 μ m, z축에 대한 위치정밀도는 1 μ m, 반복정밀도는 8 μ m이다.

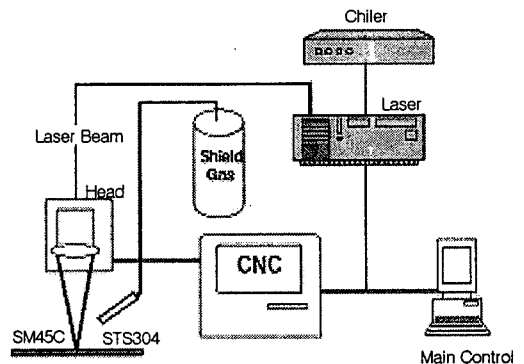


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

2.2 실험방법 및 시편

STS304와 SM45C를 Nd:YAG 레이저로 용접 하였으며 이 경우 보호 가스는 불활성 가스인 아르곤 (Ar)을 이용해 공기와 차단하여 용접 시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 3-4 l/min로 하였다. 레이저 용접을 위한 레이저 빔 이송속도와 용접비드의 관계를 연구하기 위해 레이저 출력을 1600W와 2000W로하고 초점거리 z=0으로 하여 용접공정 변

Table 1 Mechanical and physical properties of STS304 and SM45C

	Tensile stress (N/mm ²)	Elongation (%)	Thermal conductivity (W/mK)	Melting point(°C)	Density (Mg/m ³)	Thermal expansion	Hardness (H _B)
SM45C	48이상	-	36.5~43.5	1420~1450	-	10.73~10.92	220
STS304	612	40	14.9	1400	8	18.8	210

수를 연구했다.

이때 용접속도는 각각 1.0m/min ~ 10m/min로 변화시키면서 용접 비드면과 비드 폭을 측정하였다.

레이저 공정변수 변화에 따른 용접단면을 관찰하기 위해 정밀금속절단기로 용접시편을 절단하고 사포로 연마 및 폴리싱 후 CuSO₄ 10mg + Hcl 50ml + H₂O 50ml로 에칭 하였다. 에칭 된 용접비드 경계면은 광학현미경으로 관찰하였다. 레이저 빔을 금속 시편에 직접 조사하는(bead on plate) 방식과 맞대기 용접후 용접단면을 절단하여 전자 현미경으로 용입 깊이를 측정하였다. 용접시 용접속도의 변화에 따른 종횡비(aspect ratio)와 맞대기 용접시 최적의 용접조건을 찾기 위해 공정변수를 변화시키면서 레이저 용접실험을 했다.

사용된 시편으로는 STS304와 SM45C이며 시편의 두께는 각각 3mm이다. 용접시 시편 표면의 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시켜 가면서 실험하였다. 각 시편의 물리적·화학적 성분은 Table 1와 Table 2에 나타내었다.

시편은 공작대에 부착된 지그에 고정시키고 용접헤드에서 나오는 He-Ne 레이저광(적색)을 이용하여 용접위치를 확인하였다. 용접위치의 허용오차는 0.1mm 이하로 유지하였다. 시편을 지그로 단단히 고정시켜 용접 중 열팽창에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다. 이는 산업현장에서 용접 시 작업의 편의성 때문에 지그나 클램프 등으로 고정하는 것과 같은 현상을 재현하기 위함이기도 하다.

Table 2 Chemical composition of STS304 and SM45C

	C	Si	Mn	P	Ni	Cr
SM45C	0.42~ 0.48	0.15~ 0.35	0.6~ 0.9	0.03>	-	-
STS304	0.08	1.0	2.0	0.04>	8.0~ 10.5	18~20

3. 결과 및 고찰

3.1 STS304와 SM45C의 용접특성

이중용접에 앞서 STS304와 SM45C의 각각 최적의 용접조건을 결정하기 위해 예비실험을 하였다. 출력을 1.6kW로 하고 시편위에 초점면을 위치시켜 레이저빔의 속도 변화에 따른 용입 깊이의 변화를 bead on plate로 SM45C의 실험한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서는 레이저빔의 이송속도가 낮으면 입열량이 커서 용입 깊이는 증가하지만 내부에 고온균열이 발생하는 현상이 나타나 있다. 그러나 레이저빔의 이송속도가 작으면 레이저 용접 단면 내부에 기공이 발생하였다. 이와 같이 기공은 레이저 용접 시 출력이 작았을 경우 모재가 열을 충분히 흡수하지 못하여 용융된 면적이 작고, 용융물의 유동성이 저하되어 용융 pool 내부에 발생 한 기포가 확산되어 표면 위로 방출하지 못한 상태에서, 용융 표면이 급속히 응고되면 기포가 내부에 포획되어 발생한다. 고온균열은 입열량이 클 경우 레이저 용접 시 용접 열에 의해 용융되었던 금속이 응고과정에서 SM45C의 조성분에 포함되어 있는 P, S, C성분이 원인이다. 즉, P는 용접이 낮아 국부적으로 응고온도를 낮추어 고온균열 감수성을 증가시키고, S는 C와 비교해서 확산에 의한 이동속도가 늦어 응고 중에 편석이 심하게 일어나기 때문에 균열감수성을 증가시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해선 금속의 P, S, C를 없애거나 함유량을 낮추는 것이 최선의 방법이나 이는 경제적인 문제가 발생하므로 용접 시 각종의 변수를 변화시킴으로써 고온균열이 발생하지 않는 최적의 공정변수를 찾아 해결하는 방법이 효과적인 방법이다. 고온균열이 발생하지 않는 최적의 공정변수를 찾아 해결하는 방법이 효과적인 방법이다.

레이저빔 용접속도가 증가하면 급속한 냉각효과를 나타내는 영역이 좁아져 초기균열 길이를 억

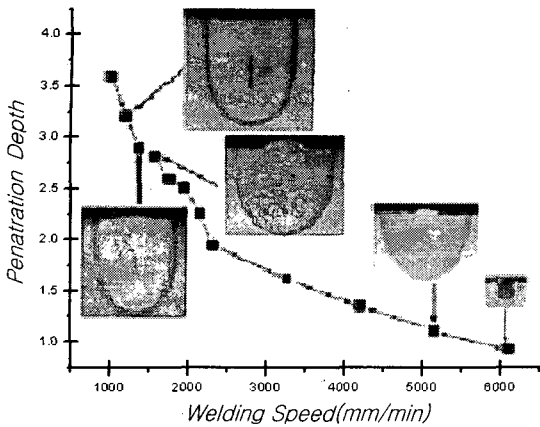


Fig. 2 Influence of welding speed on the penetration depth (SM45C)

제하는 효과가 있다. 따라서 용접속도가 5000mm/min 이하에서는 용접속도가 빨라질수록 고온균열이 적게 나타나는 것으로 사료되는데 이는 통상의 아크용접과는 크게 다른 현상이다. 레이저출력이 1600W이고 레이저빔의 이송속도가 5000mm/min 이상에서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 양호한 용접상태를 만들 수 없다. 레이저빔의 이송속도가 증가함에 따라 침투깊이가 감소하는 경향은 용접속도가 증가함에 따라 시편에 전달되는 입열량이 감소하기 때문이다. 또한 6000mm/min 이상에서는 입열량이 적고 냉각속도가 빨라서 기공이 발생한다.

SM45C의 용접특성과 STS304의 용접특성을 비교하기 위해 출력을 2KW 초점면의 위치는 시편표면보다 0.5mm 아래인 z=-0.5mm에서 레이저빔의 이송속도 변화에 따른 비드 단면의 변화를 bead on plate로 실험하여 Fig. 3에 나타내었다. 이때 사용한 보호 가스는 Ar이고 유량은 4 l/min으로 일정하게 유지하였다. 이송 속도가 낮으면 시편 표면의 용융 부위가 커지기 때문에 중횡비는 오히려 레이저빔의 이송속도가 4m/min 일 때 보다 작았다. 빔의 이송속도가 커지면서 용입 깊이가 줄어들고 있는데, 이런 현상은 표면에서 키 홀이 잘 형성되지 않아 레이저빔이 용융 풀에서 다중 반사될 확률이 줄어들어 흡수 에너지양이 줄어들기 때문이다. 용접공정 변수를 Fig. 3의 결과를 근거로 판단하면 STS304의 경우 출력 2000W에서는 빔 이송속도를 1000mm/min으로 했을 경우 초점거리 z=-0.5mm에서 두께 4mm까지 용접이 가능함을 알 수 있다. SM45C의 실험

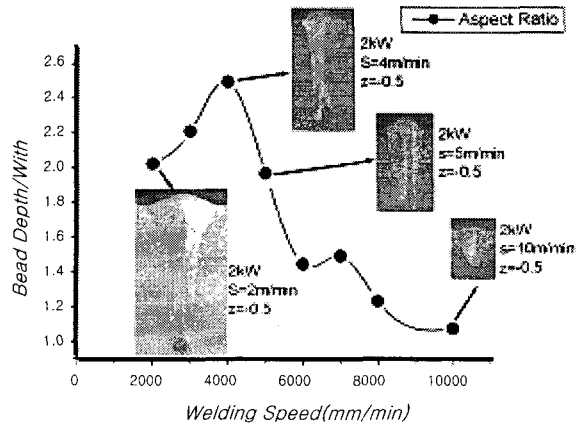


Fig. 3 Influence of welding speed on the aspect ratio of the bead(STS304)

결과를 나타낸 Fig. 2와 비교해서 큰 특징은 용접단면 전체가 내부결함이 없이 양호한 상태를 나타내고 있다. 이것은 SM45C보다 탄소성분은 적고 Ni과 Cr성분이 많아 열확산속도가 빠르기 때문이다.

P=1.6KW(SM45C) V=0.6m/min, z=0	P=1.6KW(SM45C) V=0.8m/min, z=0	P=1.6KW(SM45C) V=1.0m/min, z=0
P=1.6KW(STS304) V=0.6m/min, z=0	P=1.6KW(STS304) V=0.8m/min, z=0	P=1.6KW(STS304) V=1.0m/min, z=0

Fig. 4 Influence of welding on the bead shape

Fig. 4는 레이저 출력과 초점거리를 P=1600W, z=0으로 고정하고 레이저 빔 이송속도를 변화시켰을 때 용입 폭과 용입 깊이를 관찰하기 위해 비드형상을 관찰하였다. Fig. 4를 보면 SM45C는 0.6m/min에서는 용융부가 시편을 관통하여 후면비드가 생겼다. 0.8m/min에서는 용융부가 시편 끝까지 잘 생성되었고 1.0m/min에서는 시편을 완전히 관통하여 용융하지 못하였다. STS304는 용융부가 전체적으로 잘 생성이 되었지만 이송속도가 증가할수록 용융

폭(W)이 감소하여 종횡비가 증가하고 있다. 특히 레이저빔의 이송속도가 0.6m/min일 때는 입열량이 지나치게 커서 용접 시편의 표면은 움푹 들어가고 시편 밑 부분인 후면비드 모양도 크게 나타났다.

3.2 입열량

레이저 빔의 출력과 이송 속도 변화에 따른 SM45C와 STS304의 입열량 변화를 비교하기 위해 식 (1) 로 계산하여 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

$$E = \frac{P}{W \cdot v} (J/cm^2) \quad (1)$$

여기서, E는 입열량 (J/cm^2), P는 출력(W), W는 용접면의 비드폭(cm), v는 레이저빔의 이송속도m/s이다. SM45C의 실험 결과인 Fig. 5는 레이저 빔 이송속도가 0.8m/min까지는 레이저 빔 이송속도가 증가 할수록 입열량이 증가 하지만 0.9m/min이상에서는 급격히 감소한다.

STS304는 Fig. 6에 나타낸 것처럼 본 실험 조건에서는 이송속도가 증가함에 따라 입열량이 감소함을 보여준다. Fig. 3의 실험결과와는 빔의 이송속도를 2m/min이상으로 비교적 빠르게 하여 실험하였으나, Fig. 6에서는 레이저빔의 이송속도를 1.5m/min 이하로 하여 실험하였다. 그 이유는 SM45C와 STS304를 이종 용접 했을때 빔의 이송속도가 같을 경우 용접 비드면을 관찰하기 위해서이다. Fig. 6에서 빔의 이송속도를 0.6m/min 이하로 하지 않는 이유는 이종 용접하고자 하는 시편의 두께가 3mm인데 STS304와 SM45C 두 종류 전부 레이저 빔 이송 속도가 0.6m/min에서는 관통 용접이 돼 있기 때문이다. 특히 레이저빔의 이송속도를 0.6m/min로 했을때 시편 표면의 용접폭이 다른 용접 속도에 비해 매우 크고 SM45C의 경우 열영향부가 상대적으로 크게 증가 하였기 때문이다.

전체적으로 SM45C의 경우 레이저빔을 시편표면에 조사 하였을 때 STS304보다 표면에 흡수하여 전달되는 열량이 많아 용접폭이 열영향부를 고려했을때 상대적으로 크다. 그러나 STS304는 레이저빔이 표면에 조사 되었을 때 주위로 열을 빠르게 전달하기 때문에 용접폭은 레이저빔의 이송 속도가 작을 때를 제외하고는 작고 용입 깊이가 큰 용접 결과를 나타내고 있다. 그래서 레이저 용접할 때 SM45C의 경우 내부 결함이 없고입열량이 가장 크

게 나타나는 용접 공정변수에서 이종 용접하였다. 그리고 이종 용접이 가능한 용접 공정 조건은 레이저빔의 출력은 1600W, 초점거리는 시편표면(z=0)으로 하고, 보호가스인 Ar의 유량은 4 l/min로 하였다. 레이저빔 이송속도의 변화에 대한 입열량의 변화를 나타낸 Fig. 5과 Fig. 6의 실험결과에 의하면 레이저빔의 이송속도가 0.8m/min 일 때 최대 입열량이 SM45C의 경우 $5.275 \times 10^3 J/cm^2$ 이고 STS304는 $6.5 \times 10^3 J/cm^2$ 이었다. 레이저빔의 이송 속도가 0.9m/min 일 때는 SM45C의 입열량은 $5.213 \times 10^3 J/cm^2$ 이고 STS304는 $6.27 \times 10^3 J/cm^2$ 이었다.

3.3 이종 용접 단면

STS304와 SM45C를 위에서 설명한 용접 공정변수 결정을 위한 예비 실험을 기본으로 하여 레이저빔의 이송속도를 0.8m/min, 0.85m/min, 0.9m/min로 이종 용접하였다. 이종 용접한 용접 단면은 Fig. 7에 나타내었다. SM45C와 STS304를 이종 용접했을 경우 탄소강인 SM45C의 탄소성분이 탄화되어 부족한 성분을 STS304성분이 SM45C 시편방향으로 유동하면서 재 응고된 형태를 나타내고 있다. 레이저빔의 이송속도가 0.9m/min일 때는 레이저빔의 이송속도가 빠르기 때문에 입열량이 상대적으로 작아 관통 용접이 되지 않았다. 관통 용접이 되지 않으면서 용접내부의 심각한 교반작용으로 시편 중심부 용융단면이 항아리 모양을 하고 있다. 레이저빔이 빠르게 진행하면서 시편의 윗면과 아래 부분은 빠르게 재 응고하고 냉각이 양쪽 기지 조직으로부터 진행되어 시편 내부중양부에 고온균열이 발생하였다.

Fig. 2와 Fig. 4에 나타낸 것처럼 SM45C는 레이저빔이 시편에 조사되면 열전도에 의해 용접입구단면적이 STS304보다 크다. 이와 같은 이유로 이종 용접의 경우에도 SM45C 방향으로 용융풀이 유동하면서 재 응고되었음을 나타내고 있다. 레이저 빔의 이송속도가 0.8m/min일 때는 0.85m/min에 비해 열영향부가 크게 나타났다. 특히 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min일 때에는 양쪽 모재에서 응고하기 시작하여 용융 풀 중심 방향으로 응고하기 때문에 용융 풀 중심부는 액체 상태로 있지만 모재부분부터 냉각에 의한 재 응고 때문에 중심부에 균열이 발생하였다.

고온 균열에 영향을 미치는 금속학적 인자로는 응고초기의 상(Phase), 응고모드(Solidification mode)

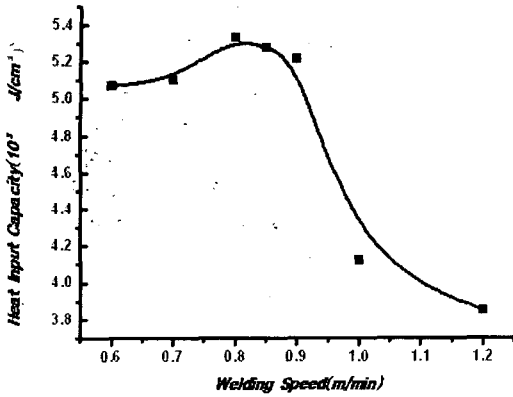


Fig. 5 Influence of welding speed on the heat treatment capacity(SM45C)

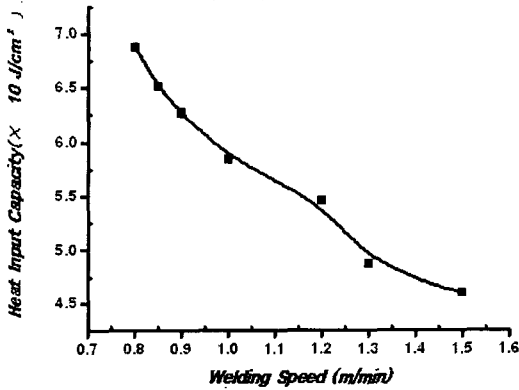


Fig. 6 Influence of welding speed on the heat treatment capacity(STS304)

, 입계 편석물 및 저 용점 개재물, 용접비드의 응고 형태를 들 수 있다. 이 중에서도 주된 발생 원인을 강 중에 함유되어 있는 P,S,C 등의 불순물의 편석에 따라 형성되는 저 용점 개재물로서, 이들의 최종 응고부의 입계에 존재함으로써 입계를 저온까지 취약하게 만든다. 따라서 고온균열은 통상 입계 조직에 따라 진행된다. 응고 이동 결정입계(Solidification migrated grain boundary)는 용접 금속이 응고할 때 생긴 수지상들이 마주쳐서 생긴 응고 결정립계이다. 응고 후 냉각 도중에 입계의 계면에너지를 최소화하기 위해 이동되며 직선화된 결정립계를 응고 이동 결정입계라고 하는데, 이때 용접부의 응고 이동 결정입계에서 지그 등의 고정 장치에 의해 발생하는 외부 구속력에 의한 구속도가 클수록 이동 결정립계에서 응고 균열이 발생한다. 그러므로 SM

45C와 STS304을 이종용접을 할 경우에는 레이저빔이 이동하면서 시편의 응고 속도가 용접단면에서 균일하게 하도록 레이저빔의 이송속도를 결정하여 용접중심선에 수직으로 냉각이 급속하게 진행 되게 해야 한다.

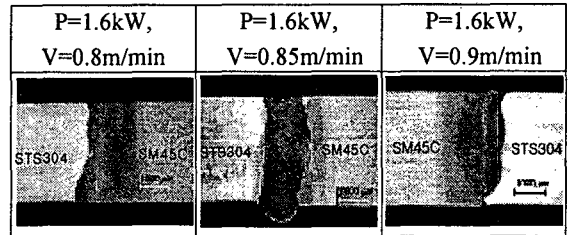


Fig. 7 Influence of welding speed on the bead shape for the dissimilar metal welding

3.4 이종 용접 시 인장강도 및 경도

STS304와 SM45C를 이종 용접한 같은 조건의 공정 변수로 용접하여 인장시편을 만들었다. 우선 100m×200m×3m(두께)의 시편을 맞대기 해서 출력 P=1600W, 초점거리 z=0, 보호가스 Ar의 압력은 4 l/min으로 하고 빔 이송속도는 0.8m/min, 0.85m/min, 0.9m/min으로 변화를 주어서 세 번을 용접하였다. 이렇게 맞대기 용접한 시편을 최소한의 열 영향과 정확한 절단을 위해서 와이어 커팅을 하였다. 또한 모재와 이종용접한 부분의 인장력을 비교하기 위해 STS304와 SM45C 모재를 각각 인장시편 규격으로 와이어 커팅 했다. 이렇게 와이어 커팅한 인장시편 5개를 인장테스트 하였다.

STS304와 SM45C의 레이저 빔의 이송 속도에 따른 입열량을 확인하고 용접 단면의 조직을 촬영하여 레이저 이종 용접의 최적의 공정 변수를 찾았다. 이를 다시 인장 강도와 경도를 확인해서 이종 용접 시 용접 금속의 정확한 물리적 값을 확인했다. Fig. 8을 보면 레이저 빔의 출력 P=1.6kW, 초점 z=0으로 고정하고 빔 이송 속도 V=0.8m/min, 0.85m/min, 0.9m/min으로 변화하면서 용접한 시편을 인장시편의 규격으로 와이어 커팅하여 인장테스트를 하여 결과 값을 나타내었다. 이때 이종 용접한 금속과 모재를 비교하여 용접 후 금속의 물리적인 성질변화를 알아보기 위해 모재 즉, STS304와 SM45C를 같은 조건으로 커팅하여 인장 실험하여 그 결과를 비교하였다.

각각 모재의 인장강도와 이종 용접했을 때의 인장강도의 크기를 비교하여 Fig. 8에 나타냈다. 인장

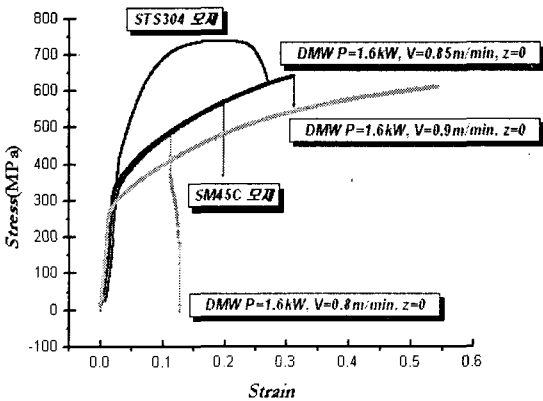


Fig. 8 Strain-Stress relationship for various dissimilar welding condition

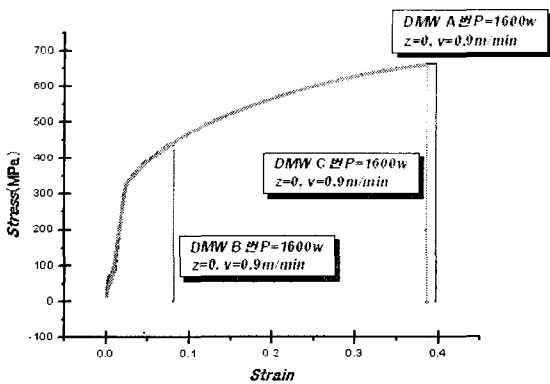


Fig. 9 Strain-Stress relationship according to the quality of the welded parts

강도는 STS304의 모재가 가장 크고 Fig. 7에 나타난 실험결과인 레이저 빔의 이송 속도가 0.9m/min로 이종 용접 했을 때의 인장 강도와 변형률이 가장 작았다. 변형률은 이종 용접 했을 때 내부의 결함이 없는 부분을 인장 시편으로 제작하여 인장 시험했을 때 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min일 때 가장 적다. 변형률과 인장 강도는 SM45C에 레이저 빔이 전달되는 열영향부의 크기에 따라 영향을 받고 있다. 레이저 빔의 이송 속도를 0.85m/min로 하여 이종 용접했을 경우 SM45C의 모재보다 변형률과 인장강도가 증가하였고 STS304의 모재 보다는 인장강도는 감소하였으나 변형률은 약간 증가 하였다. 이것은 STS304에 포함되어 있는 Ni과 Cr 및 SM45C의 주성분인 C성분이 혼합되어 나타난 현상으로 판단된다.

STS304와 SM45C를 이종 용접했을 때 STS304의 주성분인 Ni은 용융온도가 1455℃이고 Cr은 1905℃이다. 반면에 SM45C의 주성분인 C는 용점이 3350℃이기 때문에 레이저 빔의 이송 속도가 느린 0.8m/min에서는 탄소의 용점보다 낮은 Ni과 Cr의 기화되는 양이 상대적으로 많이 모재에 비하여 변형률과 인장강도가 하락하였다. 레이저빔의 이송 속도를 0.9m/min로 했을 경우에는 Ni과 Cr 성분이 이종 용접이 용융 풀에 상대적으로 많이 용융되어 혼합되기 때문에 변형률이 증가 하였다고 판단된다.

Fig. 8에 나타난 결과를 보면 레이저 빔의 이송 속도가 0.9m/min에서 가장 작은 변형률 값을 얻었다. 이는 내부에 결함이 없는 부분을 컷팅하여 인장 테스트한 결과이다. 레이저빔의 이송속도가 0.85m/min 일때 조직사진 결과가 최상의 용접결과를 보여준 것과는 다른 내용이었다. 따라서 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min에서 추가적으로 실험을 하였다. 결과의 객관성을 유지하기 위해서 기존의 실험조건과 같은 조건으로 용접하여 컷팅, 인장테스트까지 같은 조건으로 실험을 하였다. Fig. 9에서 보듯이 레이저빔 이송속도가 0.9m/min에서 3번의 실험을 하였다. 3번의 실험에서 A번과 C번은 Fig. 8과 같은 결과가 얻어졌다. 하지만 0.9m/min에서는 급격한 강도의 저하를 보여준다. 이는 용접 시편 내부에 결함이 있음을 의미하고 0.9m/min의 용접 조건에서는 항상 좋은 용접의 결과를 얻을 수 없음을 의미한다. 이 두 실험을 통하여 최상의 용접조건을 얻을 수 있고, 항상 믿을 수 있는 결과를 얻기 위해서는 레이저 빔의 이송속도를 0.85m/min으로 하여 용접해야 함을 알 수 있다.

이종재료 용접단면의 경도 값은 마이크로 비커스 경도계를 측정된 결과를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10의 종축은 용접시편 표면으로부터 1000μm 깊이에서 횡 방향으로 측정된 경도 값이다. 횡축은 용단 단면의 횡축으로 이종용접의 중심부를 0으로 하여 왼쪽은 SM45C, 오른쪽은 STS304의 모재이다. 레이저빔의 이송속도를 0.8m/min, 0.85m/min, 0.9m/min로 변화시키면서 용접했을 때 경도 값은 탄소성분이 상대적으로 많은 SM45C 부근의 경도 값이 컸다. 용접부의 경도 값은 모재에 비하여 3배정도 크게 나타났다. 레이저빔의 이송속도가 작아 시편표면에 조사되는 단위 면적당 출력밀도가 클 경우에는 용점이 서로 다른 성분들의 기화 때문에 경

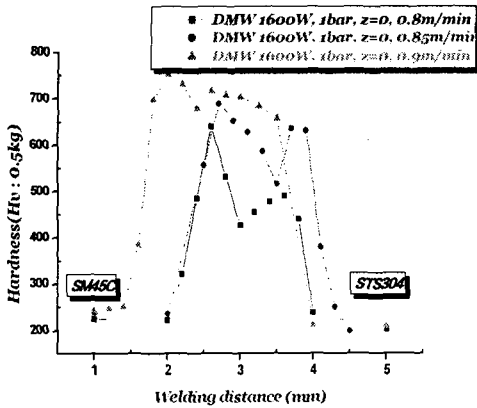


Fig. 10 Variation of the hardness according to the welding distance

도 값이 작았다. 그러나 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min 일 때에는 레이저빔에 의해 급 가열되어 재료가 오스테나이트화에 균질화 된 후 모재로의 급 냉각 때문에 마르텐사이트 조직이 많이 남아 경도 값이 크게 나타났다. 레이저빔이송속도가 0.8m/min 일 때는 레이저 용접 단면 중앙부의 경도 값이 작게 나타난다. 이와 같은 이유는 레이저빔의 강도 분포가 가우시안 분포와 비슷한 형태를 가지기 때문에 중앙부의 레이저빔 출력밀도가 레이저 빔의 주변부보다 크기 때문에 용융에 의한 조성분의 기화를 생각할 수 있다. 두 번째 가능한 이유는 레이저빔이 시편표면에 조사되어 용융된 뒤 재 응고할 때 중앙부의 시편이 용융부의 냉각속도가 주변부보다 약간 느리기 때문에 오스테나이트화 되었던 조직의 성장시간이 길어 급속 조직이 일부 조대화 되어있기 때문이다.

4. 결론

일반기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이중용접한 후 최적용접 공정변수를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SM45C의 경우 고온균열은 입열량이 클 경우 레이저 용접 시 용접 열에 의해 용융되었던 급속이 응고과정에서 SM45C의 조성분에 포함되어 있는 P, S, C성분이 원인이 된다.

(2) SM45C는 빔 이송속도가 1.0m/min 이상에서

는 급격히 감소하고 키 홀을 형성하지 못하여 입열량이 감소한 것으로 보인다. 이와 반대로 STS304는 빔 이송속도가 증가하면서 입열량이 선형적으로 감소하였다.

(3) 이중용접한 후 양쪽 모재에서 응고하기 시작하여 용융 풀 중심 방향으로 응고하기 때문에 용융 풀 중심부는 액체 상태로 있지만 모재부분부터 냉각에 의한 재 응고 때문에 중심부에 균열이 발생하였다.

참고문헌

1. Mai, T. A. and Spowage, A. C., "Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminum," *Materials Science and Engineering*, Vol. 374, pp. 224-234, 2004.
2. Brüggemann, G., Mahrle, A. and Benziger, Th., "Comparison of experimental determined and numerical simulated temperature fields for quality assurance at laser beam welding of steels and aluminum alloyings," *ND&E International*, Vol. 33, pp. 453-463, 2000.
3. Sun, Z., "Feasibility of producing ferritic/ austenitic dissimilar metal joints by high energy density laser beam process," *ELSEVIER*, Vol. 68, pp. 153-160, 1996.
4. DUPONT, J. N., BANOVIC, S. W. and MARD, A. R., "Microstructural Evolution and Weldability of Dissimilar Welds between a Super Austenitic Stainless and Nickel-Based Alloys," *WELDING JOURNAL*, pp. 125-135, 2003.
5. Avery, R. E., "Pay attention to dissimilar- metal welds Guidelines for welding dissimilar metals," *Chemical Engineering Progress*, pp. 1-7, 1991.
6. Yoo, Y. T., Oh, Y. S., Ro, K. B. and Im, K., "Decrease of Porosity and Cracking in the CW Nd:YAG Laser Welding of SM45C," *KSPE*, Vol. 20, No. 10, pp. 65-73, 2003.
7. HOSKING, F. M., STEPHENS, J. J. and REJENT, J. A., "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," *WELDING JOURNAL*, pp. 127-136, 1999.

8. Sun, Z. and Karppi, R., "The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 257-267, 1996.
9. Karlsson, Lief., "WELDING OF DISSIMILAR METALS," Pergamon, pp. 125, 1995.
10. OMAR, A. A., "Effects of Welding Parameters on Hard Zone Formation at Dissimilar Metal Welds," *WELDING JOURNAL*, pp. 86-93, 1998.
11. COLLING, M.G. and LIPPOLD, J.C., "An Investigation of Ductility Dip Cracking in Nickel-Based Filler Materials - Part I(II)," *WELDING JOURNAL*, pp. 288-295, 2003.
12. DUPONT, J.N., "Microstructural Development and Solidification Cracking Susceptibility of a Stabilized Stainless Steel," *WELDING JOURNAL*, pp. 253-263, 1999.
13. DAVE, V. R., COLA, M. J. and KUMAR, M., "Grain Boundary Character in Alloy 690 and Ductility-Dip Cracking Susceptibility," *WELDING JOURNAL*, pp. 1-5, 2004.
14. QIAN, M. and LIPPOLD, J. C., "Liquation Phenomena in the Simulated Heat-Affected Zone of Alloy 718 after Multiple Postweld Heat Treatment Cycles," *WELDING JOURNAL*, pp. 145-150, 2003.
15. LI, M. Y. and ASIBU, E. K., "Monte Carlo Simulation of Heat-Affected Zone Microstructure in Laser-Beam-Welded Nickel Sheet," *WELDING JOURNAL*, pp. 37-44, 2002.
16. KUSKO, C. S., DUPONT, J. N. and MARDER, A. R., "The Influence of Microstructure on Fatigue Crack Propagation Behavior of Stainless Steel Welds," *WELDING JOURNAL*, pp. 6-15, 2004.
17. CAM, G., ERIM, S. and YENI, C., "Determination of Mechanical and Fracture Properties of Laser Beam Welded Steel Joints," *WELDING JOURNAL*, pp. 193-201, 1999.
18. QIAN, M. and LIPPOLD, J. C., "The effect of Multiple postweld heat treatment cycles on the weldability of Waspaloy," *WELDING JOURNAL*, pp. 233- 238, 2002.