

레이저 이종용접에서의 입열량 변화에 대한 용접특성

모양우*, 유영태⁺, 신병헌⁺⁺, 신호준⁺⁺
(논문접수일 2005. 10. 27, 심사완료일 2006. 2. 2)

Welding Characteristics on Heat input Changing of Laser Dissimilar Metals Welding

Yang-Woo Mo*, Young-Tae Yoo⁺, Byung-Heon Shin⁺⁺, Ho-Jun 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 works 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, stain-stress behavior and the hardness of the welded part 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(레이저 용접), Butt welding(맞대기 용접), Welding speed(빔이송 속도), Aspect ratio(중횡비), STS304(오스테나이트계 스테인레스강), SM45C(중탄소강), Heat input capacity(입열량)

1. 서론

산업사회가 발전 하면서 기계부품이 다양해짐에 따라 서로 다른 기능적 특성을 지닌 금속재료의 접합 필요성이 증

가하고 있다. 금속 재료별 내식성, 내마모성, 인장강도, 압축강도 등 장점을 활용하는 기계부품이 산업현장에서 널리 쓰이고 있기 때문이다⁽¹⁾. 특히 물리화학적인 특성을 복합적으로 필요로 하는 산업현장에서 하나의 금속으로는 까다로운

* 조선대 기계공학과
+ 교신저자, 조선대학교 기계공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지
++ 조선대 일반대학원 정밀기계공학과

조건을 완벽하게 충족할 수 없는 경우가 많다. 그래서 새로운 재료를 개발하거나 이종의 금속을 용접해서 사용하는 경우가 많다⁽²⁾. 서로 다른 기계적 특징을 갖는 재료를 접합하는 이종용접은 사용용도, 사용 빈도, 효율적인 측면에서 매우 중요시되고 있다. 이러한 이종용접의 특성 때문에 이와 관련된 연구가 절실히 필요하다. 그래서 산업현장에서 이종 금속 용접에 대한 신뢰성과 안전성 및 생산성 향상에 기여할 수 있는 연구를 실시하였다⁽³⁾.

이종의 금속을 용접함에 있어 여러 방법이 있으나 본 연구에서는 레이저를 이용하여 연구하였다. 선행 연구로 Mai⁽⁴⁾는 평균출력이 350W인 Nd:YAG 펄스 레이저로 두께가 1mm인 시편을 제작하여 강과 Kovar 그리고 동과 알루미늄을 이종 용접하였다. Brüggemann⁽⁵⁾는 RS137-2강과 알루미늄합금(AI-Mg-Si0.7)을 출력이 5kW인 CO₂레이저를 이용하여 이종용접에 대한 이론과 실험결과를 비교하였다. 이⁽⁶⁾는 STS304와 SM45C를 평균 출력이 500~600W인 Nd:YAG 펄스레이저로 두께가 0.5mm인 시편을 겹치기 용접을 하였다. 그러나 고출력의 연속파(Continuous Wave: CW) Nd:YAG 레이저로 두께가 각각 3mm이상 되는 STS304와 SM45C를 이종 용접한 연구 결과는 많지 않다.

STS304와 SM45C를 이종 용접할 때 레이저 빔을 이용하면 고 에너지 밀도 열원에 의해 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(aspect ratio)가 크고, 용입 깊이가 깊고, 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)가 작은 용접이 가능하다. 일반적으로 이종금속 용접은 용융 용접을 주로 실시하고 있으나 용접 시 많은 문제점들이 있다. 이는 각각의 금속학적성분의 차이에 따라 달라지는데, 용접 시 금속조직이 조대화 되거나, 용융 온도와 응고 온도가 달라 발생하는 문제점들이다. 특히 원자구조가 달라 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, 응고 시에 용접차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 또한 계면에 취약한 생성상(phase)이 형성되거나, 두 금속의 희석에 의해 균열이 발생하여 양호한 성능을 얻을 수 없다.

그래서 레이저가 가지고 있는 장점을 이용하여 이종 용접의 문제점들을 극복하기 위해, STS304와 SM45C를 이종 용접하였다. 이종용접에 이용한 STS304는 고온산화성이 적고 내식성이 좋기 때문에 부식 환경에 적응성이 우수한 특성이 있다. SM45C는 피로강도가 높고 열처리하면 마모에 강한 성질이 있어 내연기관이나 동작기계의 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 용접은 레이저빔의 파장, 레이저빔의 이송속도, 초점거리, 레이저빔의 출력, 보호가스 종류, 유량, 재료의 레이저빔 흡수율과 반사율에 따라 다르다. 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저(파장 1.06μm)를 이용하여 STS304와 SM45C를 이종 용접하였기 때문에 재료와 파장은 결정되어있다. 또한 최적의 공정변수로 레이저빔의 출력, 빔의 초점 거리는 선행연구 유⁽⁷⁾의 결과를 기준으로 하여 실험하였다. SM45C와 STS304의 이종 용접 후 용접성 평가는 인장강도 시험을 하고, 최적의 공정조건에서 내부 조직을 관찰하였다. SM45C와 STS304의 모재 인장강도, 용접 후 인장강도, 이종 용접 인장강도를 레이저빔 이송 속도를 변화시키는 방법으로 열량을 조절하여 최적의 용접 조건을 제시하였다.

2. 실험

2.1 실험장비

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06μm이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔은 직경이 600μm인 광섬유를 통해서 전달한다. 빔 발산 각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있으며 Fig. 1에 모식도를 나타내었다.

레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서

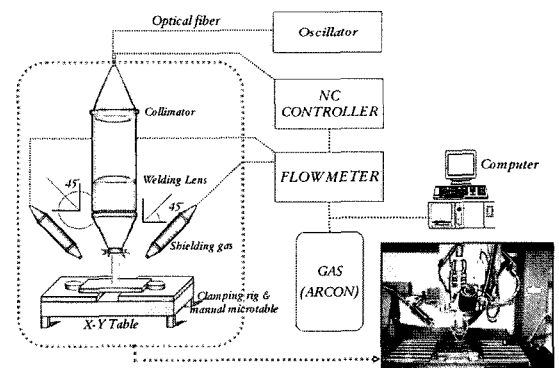


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 1000×500×400mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5 μ m, z축에 대한 위치정밀도는 1 μ m, 반복정밀도는 8 μ m이다.

2.2 실험방법 및 시편

실험에 사용된 시편은 STS304와 SM45C이며 시편의 크기는 100mm(L)×50mm(W)×3mm(T)이다. 용접시 시편 표면의 이물질 제거를 위해 아세톤으로 세척한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시켜 가면서 실험하였다. 각 시편의 물리적·화학적 성분은 Table 1, Table 2에 나타내었다. STS304와 SM45C를 Nd:YAG 레이저로 용접 시 보호 가스는 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기를 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 2000W로 하고 초점거리 f=200mm이고 렌즈 직경 D가 60mm인 렌즈를 사용하였다. 시편표면에서 초점면이 가장 작은 초점거리가 f=200mm를 작업거리(z)로 하였다. 이때 작업거리 z=0이다. 작업거리(z)를 변화시켜 공정별 입열량을 분석하였다. 이때 용접속도는 각각 1.0m/min~10m/min로 변화시키면서 용접 비드면과 비드 폭을 측정하였다.

레이저 공정변수 변화에 따른 용접단면을 관찰하기 위해 정밀금속절단기(BUEHLER : isomet 4000 precision Saw 1)로 용접시편을 절단하고 사포(sand paper)로 연마 및 폴리싱 후 에칭액(CuSO₄10mg + HCl 50ml + H₂O 50ml)을 만들어 에칭 하였다. 에칭 된 용접비드 경계면은 광학현미경(Nikon : ECLIPSE L150)으로 관찰하였다. 레이저 빔을 금

속 시편에 직접 조사하는(bead on plate) 방식과 맞대기 용접 후 용접단면을 절단하여 광학 현미경으로 용입 깊이를 측정하였다. 용접시 용접속도의 변화에 따른 종횡비(aspect ratio)와 맞대기 용접시 최적의 용접조건을 찾기 위해 공정변수를 변화시키면서 레이저 용접실험을 했다.

시편은 공작대에 부착된 지그(Jig)에 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 지그(Jig)나 클램프(Clamp) 등으로 고정하는 것과 같은 현상을 재현하기 위함이기도 하다.

용접 후 레이저 빔의 이송 속도 변화에 따른 인장강도 시험은 (Universal Testing Machine:4206 Instron Corporation U.S.A.)으로 하였다. 용접하면서 열 때문에 발생하는 조직변화에 의한 경도 측정은 마이크로 비커스(SHIMADZU : HmV-2 model) 경도 시험기를 사용하여 1.0kg의 하중을 적용시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 종횡비와 입열량특성

입열량에 따른 용접의 특성을 실험하기 위해 STS304와 SM45C 동종의 재료를 맞대기용접하고 이중 재료를 맞대기 용접하였다. 용접 공정변수가 적절하지 않으면 열변형과 용접 결함등이 발생하므로 최적의 용접 공정 변수를 결정하여 용접해야 한다. 그래서 빔 이송속도에 따른 입열량을 식 (1)로 계산하여 그래프를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Mechanical and physical properties of STS304 and SM45C

	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Thermal conductivity (W/mK)	Melting point(°C)	Density (Mg/m ³)	Thermal expansion	Hardness (H _B)
SM45C	570	—	36.5~43.5	1420~1450	—	10.73~10.92	220
STS304	520	40	14.9	1400	8	18.8	210

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

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

식 (1)에서 E는 입열량, P는 레이저 출력, W는 용융폭, v는 레이저 빔 이송 속도이다. Fig. 2에서 횡축은 레이저 빔의 이송 속도이고 종축은 입열량이다. DMW는 이종용접(Dissimilar Metal Welding)결과이고 STS304와 SM45C는 동종 재료를 맞대기 용접 했을때 결과이다. STS304와 SM45C의 맞대기 용접 시작 속도가 다른 이유는 STS304의 경우 레이저 빔의 이송 속도는 0.7m/min 이하로 했을 경우 관통 용접되어 용접시편 뒷면의 용융부가 지나치게 크기 때문이다. 그러나 SM45C는 STS304와는 다르게 레이저 빔의 이송 속도가 0.5m/min로 입열량이 커도 시편 뒷부분의 용접 단면이 과 용융 후 재 응고가 심하지 않았다. 이것은 STS304는 용접이 1400℃이고 열팽창 계수가 18.8인데 비하여 SM45C는 용접 온도가 1420~1450℃로 온도는 높고 열팽창 계수는 10.73~10.92로 STS304보다 낮기 때문이다. 그래서 같은 공정 변수일때 STS304가 SM45C보다 용융되는 양이 많다. 레이저 빔의 이송 속도가 증가 하면서 용접 단면의 용융폭이 감소하고 시편의 깊이 방향으로 열이 전달되면서 STS304는 레이저 빔의 이송 속도가 0.8m/min일때, SM45C는 0.6m/min일때 용융폭이 가장 작아 입열량이 크게 나타났다. 그러나 속도를 더욱 증가시키면 시편 표면에 조사되는 레이저 빔이 시편 표면에서 열전달 때문에 용융폭이 증가하여 입열량은 감소하였다. 이와 같은 특성을 지닌 SM45C와 STS304를 이종 용접한 결과를 DMW로 표시하였다. 실험 결과에 의하면 이종 용접했을 때 입열량이 STS304와 SM45C의 중간 값을 나타내는 것이 아니라 크게 상승하였다. 이것은 SM45C

와 STS304를 같이 용접 했을때, SM45C의 주성분인 C와 STS304의 주성분인 Ni과 Cr이 서로 용융되면서 열전도량이 증가되는 것으로 판단한다.

레이저빔의 속도 변화에 따른 용입 깊이와 용융 폭을 측정하여 식 (2)로 계산하여 종횡비를 구한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

$$A \cdot R = \frac{H}{W} \quad (2)$$

식 (2)에서 A·R(Aspect Ratio)는 종횡비이고 H는 용입 깊이 W는 용융폭이다. STS304와 SM45C의 종횡비 특성을 관찰하면 STS304는 열팽창 계수가 크기 때문에 시편 내부로 열 침투깊이가 커서 SM45C보다 종횡비가 크게 나타났다. SM45C와 STS304를 용접할 때 용접 속도를 증가 시켜 입열량을 감소시키면 용접 폭이 줄어들어 종횡비가 크게 나타난다. STS304의 경우 종횡비가 가장 큰 레이저빔 이송 속도는 1.0m/min일때 가장 크고 SM45C는 0.85m/min일때 종횡비가 가장 컸다. 그러나 이 속도 범위를 지나면 종횡비는 오히려 감소하였다. 이것은 재료별 레이저 빔에 의한 열 침투 깊이에 대한 레이저 용접폭에 관련된 최적의 조건이 존재함을 의미한다. 종횡비가 STS304가 SM45C에 비해서 큰 이유는 STS304의 주성분인 Ni과 Cr성분 때문이고 Fig. 2에서 설명한 내용과 같다. 또한 레이저빔의 이송속도를 증가시키면서 입열량의 변화를 분석한 결과 레이저빔의 이송속도가 0.8m/min까지는 지속적으로 입열량이 감소하였다. 그러나 레이저빔의 출력은 일정하고 레이저빔 이송속도를 증가하면 용접단면의 비드폭이 감소한다. 본 실험의 경우 레이저

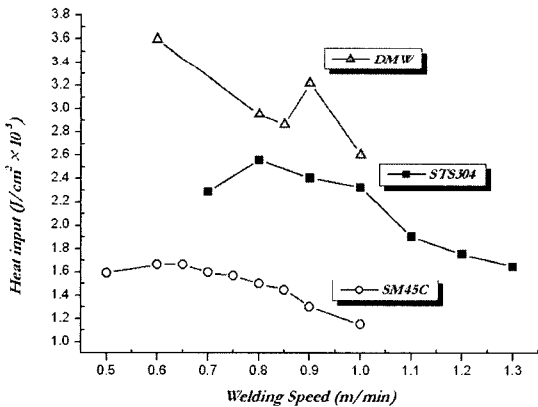


Fig. 2 Influence of Welding speed on the Heat input

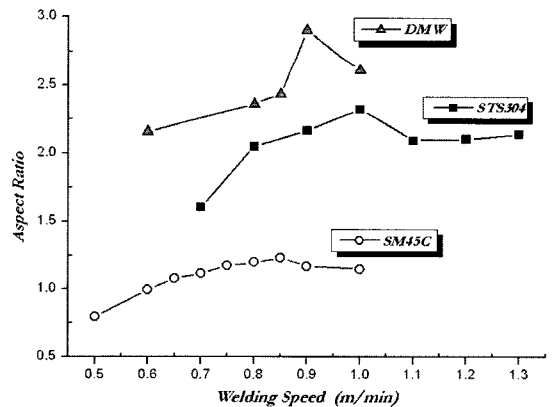


Fig. 3 Influence of Welding speed on the Aspect Ratio

빔 이송속도가 0.9m/min일 때 SM45C와 STS304를 이종용접했을 때 내부로의 열침투깊이가 레이저출력을 일정하게 하고 레이저빔 이송속도를 증가시켰을 때 비드폭이 0.8m/min보다 매우 작게 형성되어 입열량이 크게 계산되었다. 이 실험 결과는 Fig. 3, Fig. 4에 표시된 것처럼 종횡비가 가장 크게 나타났으며, 인장강도 실험결과와도 일치하고 있다.

STS304와 SM45C를 이종 용접했을 때 동종 재료를 용접했을 때보다 용융폭이 작아 종횡비가 컸다. 종횡비가 가장 큰 레이저빔 이송 속도는 동종 재료 용접 시 종횡비가 가장 큰 SM45C는 0.85m/min, STS304는 1.0m/min 중간 값인 0.9m/min에서 가장 컸다. 이것은 Fig. 2의 결과에서 언급한 것처럼 Ni, Cr, C가 서로 혼합 용융되면서 시편 표면에서의 열전달 보다 깊이 방향의 열 침투깊이가 크기 때문이다.

3.2 인장강도특성

이종 용접의 용접성 평가는 인장응력 시험으로 했다. 이종 용접의 입열량 변화는 레이저빔의 이송 속도를 변화시켜 입열량을 변화시켰다. 인장응력의 기준은 SM45C와 STS304 모재의 인장시험편을 제작하여 인장 시험하여 인장응력 기준값으로 하였다. 인장시험편은 한국공업규격(KS B0801 13B)에 맞도록 와이어컷하여 만든 후 인장시험장비(Instron Corporation U.S.A의 Universal Testing Machine 4206. 15ton)을 이용하여 실험하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 횡축은 레이저빔 이송 속도이고 종축은 인장응력이다. 그림에서 점선은 STS304모재의 인장응력이고 실선은 SM45C 모재의 인장응력이다. SM45C를 동종 용접하였을 경우 레이저빔의 이송 속도가 0.7m/min 이하에서는 모재의 인장 강도보다 크지만 레이저빔 이송 속도가 더 증가하면 입열량의 부족으로 모재보다 인장응력이 작았다. 그러나 STS304의 경우에는 본 실험범위 내에서는 전부 인장강도가 모재보다 크게 나타나 레이저 용접의 강점을 나타내고 있다. STS304와 SM45C를 이종 용접했을 경우에는 레이저빔 이송 속도가 0.6m/min에서 0.9m/min이하에서는 SM45C와 STS304 모재의 인장강도보다 컸다. Fig. 4를 기준으로 할때 레이저빔의 이송 속도가 0.6m/min, 0.7m/min, 0.8m/min, 0.9m/min에서는 두 모재의 인장 강도보다 크지만 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 종횡비도 크고 인장강도도 큰 레이저빔의 입열량 값은 레이저빔 이송 속도가 0.9m/min일때이다. 오스테나이트 안정화 원소인 C는 고온균열을 촉진하여 용융물의 급속한 냉각 때문에 마르텐 사이트를 형성시킨다. 또한 내마모성을 증가시키는 성질이 있다. Ni은 인성과 저온 충격 저항을 증가시키고 Cr은 내식성과 내마모성을 증가시키는 성분으로

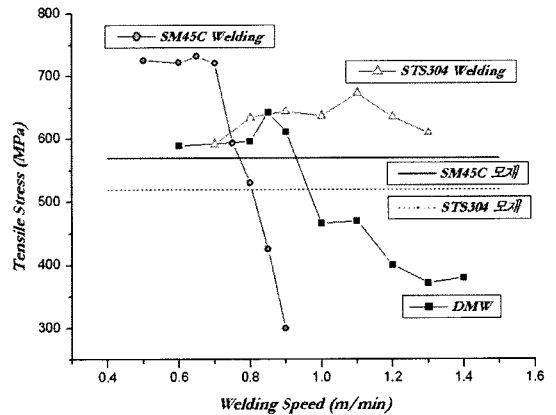


Fig. 4 Strain-Stress relationship for various dissimilar welding condition

강력한 탄화물 생성원소로 마르텐사이트 조직을 안정화시킨다. C는 급가열한 후 급냉각시키면 경도가 큰 마르텐사이트 조직으로 되지만 취성이 발생한다. 이 때문에 SM45C를 맞대기 용접하였을 경우 레이저빔의 이송 속도가 0.4m/min에서 0.7m/min까지는 인장강도가 모재보다 크지만 이 조건을 벗어나면 인장강도가 급격히 떨어진다. 그러나 SM45C와 STS304를 같이 용접했을 경우에는 인성이 큰 Ni성분과 혼합되어 0.9m/min까지 레이저빔 이송 속도를 증가 시켜도 모재의 인장강도보다 큰 값을 나타내고 있다.

3.3 용접단면 특성

인장강도 실험결과를 나타낸 Fig. 4에서 모재의 인장강도보다 큰 DMW용접 이송 속도를 중심으로 Fig. 5에 나타냈다. (a)는 STS304의 용접단면이고 (b)는 DMW용접 단면 (c)는 SM45C의 용접단면이다. Fig. 5 (a) STS304 사진중 중간에 오목한 현상은 Nd:YAG 레이저빔은 파장이 1.06μm에 해당하는 진동수로 금속표면의 전자들을 진동시키면서 진동에 대한 저항으로 열이 발생한다. 대부분 표면에서 매우 높은 진동수로 열이 발생한 표면열원이 내부로 침투되면서 모재 내부로 냉각되어 오목해진다. 시편 아랫부분은 용융된 점점이 많은 재료가 시편 아랫부분에 부착되어 표면으로 열이 전달되어 용융된 부분이 넓어 용융부가 모래시계 모양으로 되었다. STS304는 용접단면 내부에 결함이 없지만 SM45C는 용접단면 내부에 기공 등 내부결함이 발생하였다. SM45C의 경우 용접 공정값이 적절하지 않을 경우 용접부분의 고 액체면에서 응집력이 용접부와 수직 방향으로 가해진 응력보다 낮기 때문에 용접부 중심에 따라 고온 균열이 발생할 수 있다. 키 홀(Key hole) 용접을

하는 레이저용접은 용융온도가 낮은 성분이 기화된 성분의 부력에 의해 용접부 표면에서 탈출하지 못하여 기포로 포획된 형태도 SM45C 용접시 나타난다. Fig. 5 (b)의 경우 STS304쪽으로 용접비드가 형성되는데 이는 Fe(용융온도:1535°C)이 많은 SM45C와 Ni(용융온도:1445°C)이 많은 STS304를 용입열량이 크게 용법 했을 때 비중이 큰 Ni성분(비중:8.9)이 상대적으로 비중이 작은 Fe성분(비중:7.87)을 가지는 STS304시편쪽으로 쏠리는 현상이 발생된다. 이는 인코넬600과 STS304를 이

종용접 했을 때와 같은 현상이 발생하였다.

이처럼 내부결함이 발생하면 용접부의 유효 접촉 면적이 작아 인장응력이 급격하게 떨어진다. SM45C와 STS304 용접단면 모두 용접부 중심에서 모재 경계부로 급속한 냉각 때문에 수지상 조직을 나타내고 있다. STS304의 경우는 Ni와 Cr성분 때문에 열확산이 잘되어 용접단면의 결함없이 양호한 용접단면을 형성하고 있지만 SM45C는 C의 탄화작용으로 미소하게 내부균열이 발생하였다. 그러나 STS304와

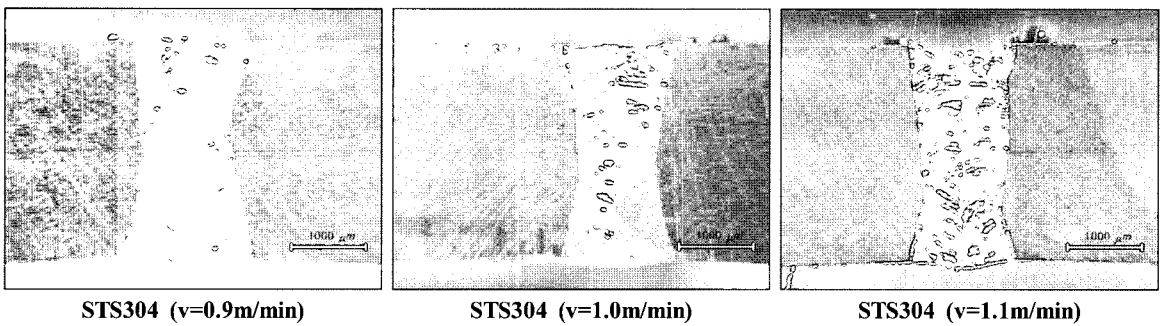


Fig. 5 (a) Influence of Welding on the bead shape(STS304)

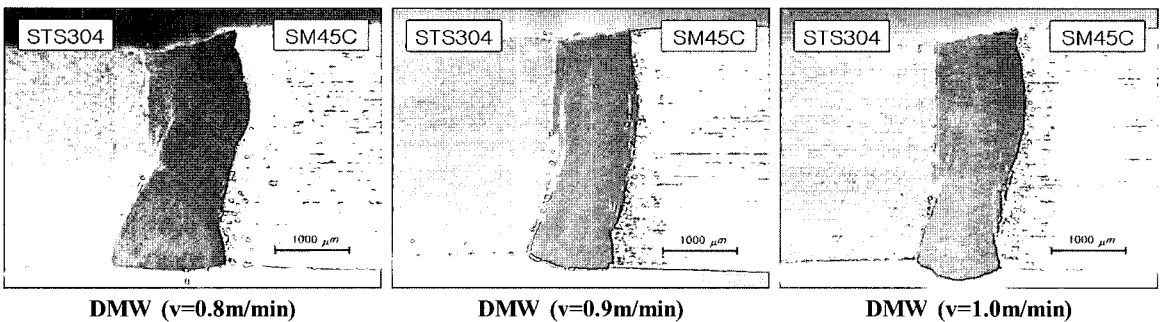


Fig. 5 (b) Influence of Welding on the bead shape(DMW)

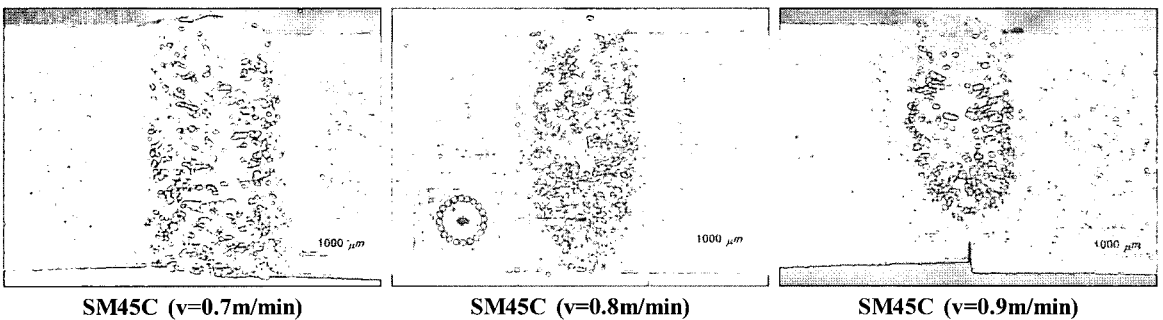


Fig. 5 (c) Influence of Welding on the bead shape(SM45C)

SM45C를 DMW용접한 (b) 그림을 보면 STS304의 모재가 SM45C으로 용융되어 혼합된 모습을 하고 있다. 이로 인하여 STS304성분 중 인성을 보강해주는 Ni성분과 혼합하여 DMW 용접의 경우 레이저빔 이송 속도가 0.6m/min, 0.7m/min, 0.8m/min, 0.9m/min까지 증가하여도 모재의 인장강도보다 크게 나타나고 있음을 Fig. 4에 나타냈다. 그리고 STS304성분 중 오스테나이트 안정화 원소인 Mn이 S와 반응하여 FeS 보다 먼저 MnS를 형성하기 때문에 S편석에 의한 저융점 화합물 형성을 방지할 수 있기 때문이다. 형성된 MnS는 용융 온도가 1620℃로 높아 강중에 Mn양이 증가하면 입계의 액상필름형상이 어려워지기 때문에 고온 균열을 피할 수 있다.

3.4 경도특성

SM45C와 STS304를 맞대기 용접한 용접단면의 경도분포를 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6에서 SM45C와 STS304 동종재질을 맞대기 용접한 레이저빔의 이송 속도는 Fig. 4에 나타난 인장강도가 모재보다 큰 범위에서 실험한 결과를 측정된 값이다. SM45C의 경우 레이저빔의 이송 속도가 실험 범위 내에서 가장 빠른 0.7m/min일때 표면경도 값이 모재의 약 3배 정도 컸다. 특히 레이저빔의 이송 속도가 빠른 경우에는 급가열하여 오스테나이트화 되었던 재질이 급 냉각되면서 조밀한 마르텐사이트가 되었기 때문이다. 이 조밀한 마르텐사이트는 인성은 작지만 경도는 크게 나타난다. 그러나 Fig. 4에서 STS304의 맞대기 용접 인장강도가 가장 큰 레이저 빔 이송속인 1.0m/min와 1.1m/min로 용접한 용접단면의 경도를 측정된 결과 용접부의 경도는 모재의 경도와 변화가 없다.

STS304와 SM45C를 DMW용접 했을 때 용접면의 경도값을 측정하여 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7에서 횡축은 용접단면 중앙부를 0으로 하여 왼쪽은 SM45C, 오른쪽은 STS304

의 경도값이다. Fig. 6과 비교하여 큰 차이점은 동종 용접할 때에는 용융단면이 3mm이지만 DMW용접에서는 2mm 정도로 용접단면이 줄어들었다. 이것은 Cr과 Ni이 C성분과 혼합되면서 횡방향의 열전도도보다는 열이 깊이 방향으로 침투가 더 크다는 의미이다. 횡방향의 열 침투보다 종 방향의 열 침투가 더 큰 것은 비중이 큰 Ni(비중 8.845)과 Cr(비중 7.188), 비중이 가벼운 탄소(비중 1.5~2.1)가 용융풀에서 부력과 중력의 교반 작용이 효과적으로 발생하기 때문이다. Fig. 7의 실험 결과를 관찰하면 STS304와 SM45C가 용융풀에서 혼합되었지만 경도 크기는 SM45C쪽이 STS304보다는 약간 크게 나타났다. 동종 재료를 용접한 실험결과인 Fig. 6의 경도 분포값은 대칭적이지만 DMW용접은 비대칭적으로 나타났다. DMW용접에서 레이저빔 이송 속도가 빠를수록 경도 분포의 비대칭성이 커진다. 레이저빔 이송속도

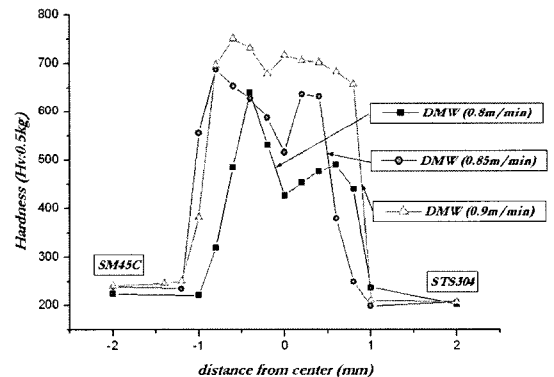


Fig. 7 Develop to Hardness on the Welding distance (Horizontal)

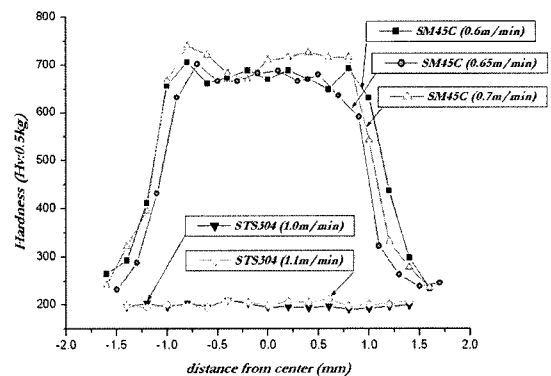


Fig. 6 Develop to Hardness on the Welding distance

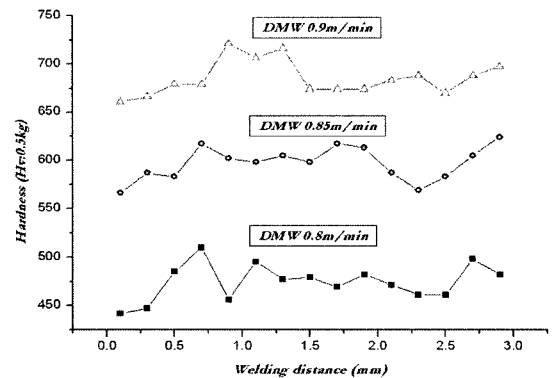


Fig. 8 Develop to Hardness on the Welding distance (Vertical)

가 늦어지면 STS304 모재쪽의 경도가 작아졌다. 용융온도가 Ni은 1455°C, Cr은 1890°C 이기 때문에 레이저빔의 이송 속도가 증가하면 용융온도가 3550°C 인 C성분이 용융되면서 Cr성분이 경화를 촉진하기 때문이다. 그러나 레이저빔의 이송 속도가 느려지면 Cr성분이 기화하여 경화를 촉진하는 Cr성분이 부족하기 때문이다.

Fig. 8은 DMW용접한 용융단면을 표면으로부터 깊이 방향으로 용접 중앙부에서 경도 값을 측정한 결과이다. 용접 용융단면 표면보다는 용융풀 표면에서 약 0.5~0.6mm 아래 부분의 경도가 약간 컸다. 그 이유는 레이저빔이 시편 표면에 조사될때 용융풀 표면에는 재 용융되는 양이 많아 냉각 속도가 모재 양쪽으로 냉각되는 속도보다 작아 마르텐사이트 조직이 조밀하지 않기 때문이다.

4. 결론

일반기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계304 스테인레스강을 CW Nd:YAG 레이저빔으로 동종용접, 이종 용접한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) STS304와 SM45C를 이종 용접했을 때 동종재료를 맞대기 용접했을 때보다 용융폭이 작아 종횡비가 크게 향상되었다. 각각 SM45C는 0.85m/min, STS304는 1.0m/min, 이종용접은 0.9m/min일 때 가장 큰 종횡비를 갖는다.
- (2) 이종 용접했을 때 레이저빔 이송속도가 0.6에서 0.9m/min 이하에서는 SM45C와 STS304모재의 인장강도보다 컸다. 빔 이송속도가 0.8m/min와 0.9m/min일 때는 약 610MPa 값을 가진다.
- (3) 레이저빔 이송속도가 증가할수록 경도값의 크기가 증가하였으며, 0.9m/min일 때 약 720Hv 값을 갖는다.
- (4) 이종 용접한 결과 SM45C의 동종 용접시 발생하는 고온균열은 STS304 성분 중 오스테나이트 안정화 원소인 Mn이 S와 반응하여 FeS보다 먼저 MnS를 형성하기 때문에 S편석에 의한 저융점 화합물형성을 방지할 수 있어 입계의 액상 필름 형상이 어려워지기 때문에 고온균열이 발생하지 않았다.
- (5) SM45C와 STS304를 이종 용접하면 레이저빔 출력 : 1.6kW, 레이저빔 이송속도가 0.9m/min, 초점위치를 0mm, 보호가스 : 1bar가 최적의 용접조건을 갖는다.
- (6) 이종용접은 사용용도, 사용빈도, 효율적인 측면에서 매우 중요한 변수이며, 국내의 경우 레이저이종용접에 관한 문헌이 드물며 현장에서 레이저 이종용접의 적합성을 가늠할 수 있었으며, 실제로 국외의 경우 자동차 부품중

O₂ Oxygen sensor, 유압밸브 등에 적용시키고 있다.

후 기

위 논문은 조선대학교 2005년 교내학술연구비 지원으로 연구하였습니다.

참 고 문 헌

- (1) Hoskingf, M. and Rejent, A., 1999, "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," *WELDING Journal*, pp. 127~136.
- (2) Qian, M. and Lippold, J. C., 2003, "Liquation Phenomena in the Simulated Heat-Affected Zone of Alloy 718 after Multiple Postweld Heat Treatment Cycles," *WELDING Journal*, pp. 145~150.
- (3) Dupont, J. N. and Marder, A. R., 2004, "The Influence of Microstructure on Fatigue Crack Propagation Behavior of Stainless Steel Welds," *WELDING Journal*, pp. 6~15.
- (4) Mai, T. A. and Spowage, A. C., 2004, "Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminum," *Materials Science and Engineering*, Vol. 374, pp. 224~234.
- (5) Brüggemann, G. and Benziger, Th., 2000, "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.
- (6) Lee, C. K. and Kang, C. K., 2000, "A Study on the Welding of Stainless Steels Sheets and Carbon Steel Sheets by Nd:YAG Laser Beam", *The Korean Welding Society*, pp. 90~91.
- (7) Yoo, Y. T., Shin, H. J., Ahn, D. G. and Im, K. K., 2005, "Dissimilar Metal Welding of Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel using CW Nd:YAG Laser," *Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, pp. 17~26.
- (8) Lee, C. K. and Chae, B. D., 2005, "A Study on the Welding of Aluminum Alloy and Stainless Steel by Laser," *TRANSACTIONS OF KSME*, Vol. 14, No. 2, pp. 91~95.