

CW Nd:YAG 레이저를 이용한 저탄소강과 오스테나이트계 스테인레스강의 이중금속 용접

유영태[#], 신호준^{*}, 안동규^{**}, 임기건^{***}

Dissimilar Metal Welding of Austenite Stainless Steel and Low Carbon Steel using CW Nd:YAG Laser

Young Tae Yoo[#], Ho Jun Shin^{*}, Dong-Gyu Ahn^{**}, Kiegon Im^{***}

ABSTRACT

Dissimilar-metal welds(DMWs) are used widely in various industrial applications due to the practical importance from the technical and economic aspect. However, DMWs have several fabricative and metallurgical drawbacks that can often lead to in-service failures. For example, the most pronounced fabrication faults are hot cracks. Recently, DMWs have used the various of heat source to decrease such as faults. In this paper, the weldability on dissimilar metal welds of Austenite stainless steel and Low carbon steel using a continuous wave Nd:YAG laser was experimentally investigated. Experiments were conducted to determine effects of welding parameters, on eliminating or reducing the extent welding zone formation at dissimilar metal welds and to optimize those parameters that have the most influence parameters such as focus length, power, beam speed, shielding gas, and wave length of laser.

Key Words : Laser welding(레이저 용접), Low carbon steel(저탄소강), Austenite stainless steel(오스테나이트 스테인레스강), Dissimilar metal welding (이중금속용접)

1. 서론

탄소함량이 적은 저탄소강과 오스테나이트 스테인레스강의 이중용접은 발전, 화학, 석유화학, 원자력산업에서 널리 이용되고 있다. 이중금속 용접은 기술적, 경제적인 이유로 산업분야에 다양하게 적용되고 있다. 특히 항공기, 우주산업, 전자기기, 저온기기 등 첨단 산업분야에 고품질, 고기능성을

가지면서, 가격 면에서 유리한 제품 생산기술이 요구되고 있기 때문이다.¹⁻¹²

일반적으로 이중금속용접은 주로 용융용접을 하고 있다. 그러나 용접시공시 많은 문제점들이 있다. 이는 각각의 금속 화학성분 차이에 따라 달라지는데, 용접시 금속조직이 조대화 되거나, 용융온도와 응고온도가 다르기 때문이다. 특히 격자구조와 물성치가 달라서 용접후 응고할 때 균열발생빈도가

^{**} 접수일: 2005년 2월 17일; 게재승인일: 2005년 5월 13일

[#] 교신저자: 조선대학교 기계공학과

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

^{*} 조선대학교 대학원

^{**} 조선대학교 기계공학과

^{***} 전남대학교 물리학과

높고, 기공이 발생하기 쉬운 결점이 있다. 또 하나의 문제점은 용융용접에서 용접차가 큰 경우 용접부 균열이 발생하는 문제점이다. 즉, 응고시에 용접차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 그리고 계면에 취약한 생성상(Phase)이 형성되거나, 두 금속의 회석때문에 균열이 발생하여 양호한 성능을 얻을 수 없다는 문제가 있다. 용접재료의 가격면에서 용접부 개선과 용가재 사용으로 인한 경제적인 부담이 상당히 심하게 나타난다. 최근에는 이런 단점을 극복하기 위해 고밀도 에너지를 가지는 전자빔이나 레이저빔을 이용한 용융용접방법이 주로 사용하고 있다. 특히 레이저빔 용접은 에너지 밀도가 높고, 열원이 아주 가늘고, 제품의 형상에 관계없이 자유롭게 자동화를 통한 용접이 가능하다는 특징 때문에 이종용접에 대한 관심이 집중되고 있다. 레이저빔을 이용하는 용접은 전자빔 용접과 달리 대기중에서 작업을 할 수 있어서 레이저를 이용한 가공기술개발이 진행되고 있다.¹³⁻¹⁶

이종금속용접의 일반적인 용융용접은 오스테나이트 스테인레스강의 전극봉이나 용가재를 사용하고 있다. 이들의 전극봉이나 용가재는 높은 합금원을 가지고 있는 것으로 알려져 있어, 용접부의 탄소강 재료의 회석정도에 따라 미세조직의 균열민감도가 선택적으로 적용되고 있다. 그러나 유감스럽게도 이종금속용접은 현장적용사례가 부족하고 금속학적 결점때문에 몇몇의 구조물에 사용하고 있다. 대부분 알려진 구조물의 결함들은 고온균열이고, 일반 용융용접에서 탄소강 전극봉의 부적절한 사용 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다. 스테인레스강과 탄소강의 이종용접시 탄소강용접봉을 사용했을 때 스테인레스강에 미치는 영향은 작으나 균열민감도가 상당한 크기로 작용하는 것으로 나타나 있다. 또한 카바이드영역(Carburized zone)이 용접경계면에서 조직이 크게 성장하기 때문에 용접 결함이 많이 나타나며, 용접변수 즉, 입열량(Heat input), 용접속도(Welding speed)등을 잘못 선정하였을 경우 고온균열에 의한 용접금속 결함이 발생한다. 이와 같이 이종 용접은 많은 문제점이 있어 본 연구에서는 건축구조물, 차량구조물, 보일러 및 열교환기에 사용하는 일반구조용 페라이트계 압연강재인 SS400과 오스테나이트계 스테인레스강인 STS304를 용접하였다. 페라이트계강과 오스테나이트계 강 of 이종용접은 발전소 전자로의 주 증기라인과 석유화학 플랜트등에서 사용되고 있다.

구조용압연강재인 SS400를 용접했을 때 공정변수가 맞지 않으면 고온균열, 냉간균열등이 심하고, 용융부에 기공이 많은 특징이 있다. 그러나 오스테나이트계인 STS304는 비교적 레이저 용접특성이 양호하기 때문에 SS400를 용접 하였을 때 발생하는 용접결함을 해소할 수 있을 것으로 판단하여 이종 용접을 실시하였다. 연구방법으로는 SS400와 STS304에 대한 선행 예비실험 결과를 기초로 하여 이종 용접했다. 이종 용접 공정변수는 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도, 레이저빔의 작업거리를 변화시켜 맞대기용접 한 다음 용접부의 특성을 정리하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 레이저는 파장이 1064nm, 멀티모드(multi-mode)의 빔으로써 최대출력이 2.8kW인 연속파형(continuous wave: CW)Nd:YAG 레이저이다. 레이저빔은 직경 600 μ m인 광섬유를 통해 시편에 전달된다. 광섬유를 통하여 전달되는 레이저빔의 초점크기(Spot size)는 0.6mm이다. 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 F=200mm이고, 렌즈의 직경(D) 60mm인 F#(F number:F/D)가 3.33인 렌즈를 사용하였다. 실험 장치에 대한 모식도는 Fig. 1에 나타냈다. 공작물을 가공할 때 스패터에 의한 레이저 용접헤드의 렌즈를 보호하기 위한 보조가스 노즐과 용접하고 있는 상태를 모니터링 할 수 있는 CCD 카메라가 레이저 용접헤드에 부착되어 있다. 실험에 사용된 각각의 시편을 CW Nd:YAG 레이저로 용접시 보호가스로 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방

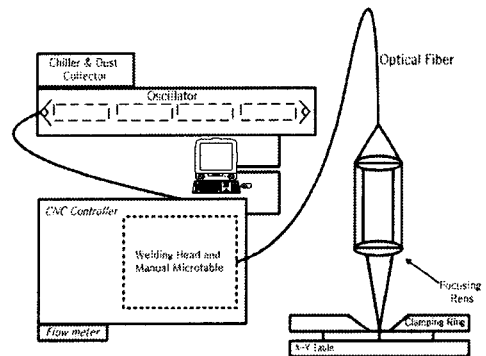


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다.

2.2 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 재료는 니켈기 오스테나이트계 고용체합금인 STS304과 기계구조용강인 SS400으로써 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of SS400 & STS304 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
SS400	0.18~0.23	0.15~0.35	0.30~0.60	≤0.30	≤0.035	-	0.2
STS304	0.08	1.0	2.0	0.04	8.0~10.5	18~20	8.00~10.5

SS400과 STS304의 이중금속 용접을 위한 용접 공정변수를 결정하기 위해 비드온플레이트(Bead on plate) 방식으로 용접한 예비실험 결과를 이용하였다. 예비실험결과를 기준으로 하여 SS400의 최적용접공정변수로 이중용접하였다. 이 결과와 비교하기 위해 STS304의 최적용접상태를 나타내는 공정변수로 이중 용접하여 그 특성을 분석하였다. SS400과 STS304의 이중용접의 최적용접 공정변수는 중형비가 크고 용접결합이 없는 용접공정변수를 실험으로 결정하였다.

선행 실험으로 SS400의 경우 가장 양호한 레이저빔 출력을 알아보기 위해 빔 이송속도를 $v=1.0\text{m/min}$, 초점위치 $z=0$ 으로 고정하고 빔 출력을 1.0~2.0kW까지 출력을 변화시키면서 용입깊이와 용융폭을 관찰하였다. 그리고 레이저빔 출력을 1.8kW, $z=0$, 빔 이송속도를 각각 $v=1.0 \sim 3.0\text{m/min}$ 까지 각각 0.2m/min씩 증가시켰을 때 비드형상을 관찰하였다. 실험에 사용한 시편의 두께는 3mm이다. 이와 같은 데이터를 중심으로 SS400과 STS304 두 금속을 맞대기용접을 하였다. 시험편은 가로 100mm, 세로 50mm로 레이저 절단했고 열영향부는 사포(Snad paper)로 연마하여 제거하였다.

맞대기 용접(Butt welding)은 레이저 절단으로 인하여 접촉부에 열영향부분이 있을 수 있기 때문에 두개의 시료 접촉부를 사포로 연마함과 동시에 시편의 갭(약40 μm)을 줄였다. 용접시 시편 표면의 이 물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 한 후, 레이저 용접 공정변수를 변화시켜 실험하였다.

광학 현미경상의 조직관찰을 위해 용접 후 용접방향에 수직으로 비드단면을 금속정밀 절단기로 절단한 후 마운팅(Hot mounting) 하였다. 마운팅된 용접시편 비드의 절단면을 사포로 #800, #1000, #1200, #1500, #2000번까지 연마 후 최종적으로 suspension 6 μm , 1 μm 입도로 폴리싱(Polishing)하였다. 이중재료의 에칭은 CuSO_4 , HCl, 증류수의 배율로 용접부의 부식상태를 확인하여 침적시간을 조절하였다. 에칭된 용접비드 경계면은 광학현미경과 금속조직현미경을 사용하여 용접부의 형상과 결합여부를 관찰하였다. 또한 용접부의 기계적 성질을 관찰하기 위해 마이크로 비커스경도 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저탄소강(SS400)의 레이저용접특성

탄소강은 용접시 C의 영향으로 고온균열을 촉진하는데 0.15%C이상에서는 고온균열이나 기공이 발생한다고 발표되었다. 특히 높은 출력으로 레이저 용접한 경우 심입용접한 용접비드면의 중앙부에 고온균열 현상이 현저하게 관찰되고 있는데⁴, 이것은 용접부에서 증발 때문에 용융금속의 절대량이 매우 적고, 키홀(Keyhole) 내부의 온도가 매우 높아 가스의 팽창 압력과 용융금속의 표면장력등 복잡한 상관관계에 따라 격심한 용융금속의 교반효과 때문에 발생한다. 일반적 산업현장에서 사용하고 있는 기계구조용 강인 경우 이와 같은 현상이 뚜렷이 나타난다. 그러나 본 실험에 사용된 SS400의 경우 탄

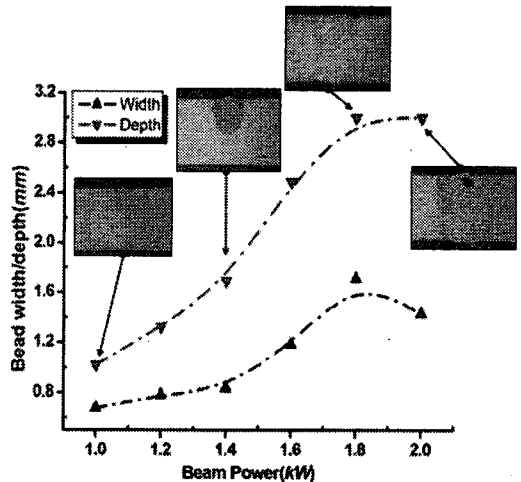


Fig. 2 Effect of laser power on bead shape

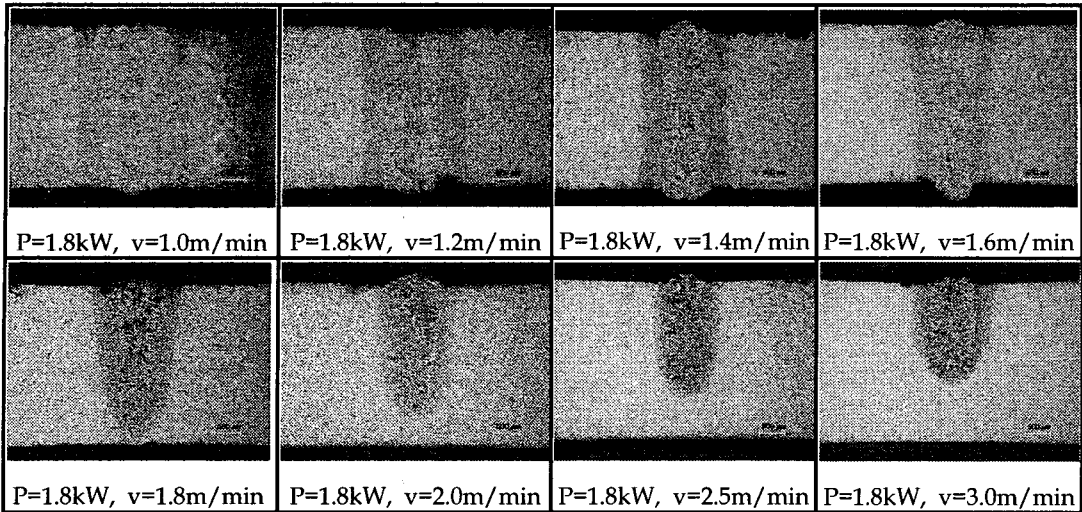


Fig. 3 Influence of welding speed on the depth of penetration

소함량이 SM45C에 비해 C함량이 적어 고온균열의 결함 발생확률이 적은 것으로 사료된다. 그래서 초점위치($z=0\text{mm}$)를 고정하고 출력을 변화시켰을 때 비드 형상을 관찰하기 위해 레이저빔의 이송속도를 1.0m/min로 고정했을 때 실험한 결과를 Fig. 2에 정리하였다. 레이저빔의 출력이 증가할수록 용융깊이는 급격히 증가하지만 용융폭의 증가율은 용융깊이의 증가율에 비해 매우 작다. 이와 같은 현상은 레이저용접이 용입비가 큰 용접에 적합함을 의미한다. 그러나 레이저출력이 2.0kW에서는 용접부 내부에 기공이 발생하였다.

Fig. 3는 Fig. 2에서 얻어진 레이저 빔 출력값을 가지고 레이저 빔 이송속도가 비드폭에 미치는 결과 나타내었다. 이때 사용한 출력은 1.8kW이며, 초점위치는 $z=0\text{mm}$ 이다. 빔 이송속도가 1.0~1.6m/min으로 증가할수록 비드폭이 감소하여 1.6m/min 일 때는 1.0m/min 일 때 보다 비드폭이 약 2배가량 감소하였고, 용접부의 표면이 부풀어 오른부분이 발생하였다. 레이저빔의 이송속도가 1.2m/min이하로 레이저 빔이송속도가 작을 경우 높은 레이저빔의 밀도 때문에 용융물질의 증기압에 대한 반발력이 많은 스패터로 작용하기 때문이다. 그러나 레이저 빔의 이송속도가 증가하면 용접부위에 작용하는 에너지 밀도가 상대적으로 감소하여 스패터양이 감소하고 표면장력과 응집력이 증가하고 용융부의 조직이 조대해지기 때문이다. 또한 레이저 빔 이송속도

가 1.8m/min이상일 경우 용입깊이가 감소하여 관통 용접이 되지 않았다.

SS400은 일반구조용강으로 페라이트가 주요 조직 성분이지만, 상당한 양의 펄라이트가 존재하며, 탄소량에 따라 그 부피율이 증가한다. 또한 페라이트 결정립계에 시멘타이트의 막이 존재한다. 그리고 소량의 펄라이트와 함께 페라이트의 등축상 결정립으로 되어 있으며, 약간의 시멘타이트가 페라이트 결정립계에 나타나기도 한다. 그리고 레이저 빔이 조사되면 시편 내부로 입열량이 침투하면서 용융부와 열영향부의 조직이 다른 형태로 발생한

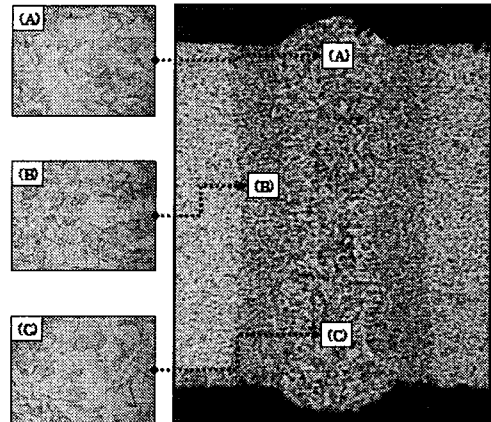


Fig. 4 Optical microstructure in the vicinity of the welded area

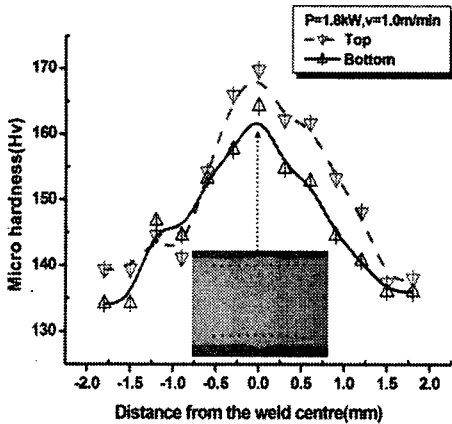


Fig. 5(a) Vicker hardness distribution along the weld bead(P=1.8kW, v=1.0m/min)

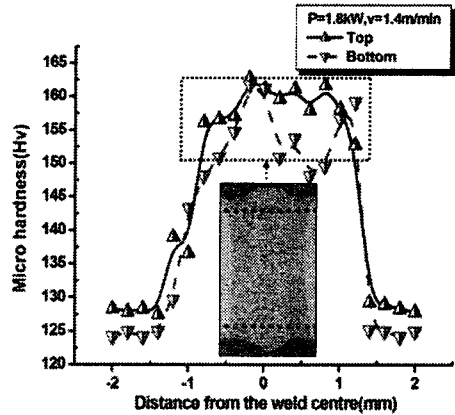


Fig. 5(b) Vicker hardness distribution along the weld bead(P=1.8kW, v=1.4m/min)

다. 이런 현상을 관찰하기 위해 Fig. 3에 있는 결과 중 P=1.8kW, v=1.4m/min인 경우 실험한 결과를 Fig. 4에서 나타내었다. 시편 내부의 미세조직 형태를 알아보기 위해 500배의 배율로 관찰하였다. Fig. 4(A)는 최초로 입열량이 미치는 곳으로써 용융 온도가 매우 높게 작용되기 때문에 오스테나이트 온도까지 증가하였다가 냉각되면서, 마르텐사이트가 존재하고 있다. 그러나 마르텐사이트 조직이 어느 일정한 부분에 발생하지 않고 용융부에 산발적으로 위치해 있는 것을 알 수 있다. (B)는 열영향부로 펄라이트와 페라이트입자가 조대해 지는 것을 볼 수 있었다. (C)는 주로 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있는 용접부하단 부분이다.

용접부의 경도 측정값을 다음 Fig. 5에서 나타냈다. 각각의 측정범위는 각각 시편 윗면과 아랫면에서 약 0.3mm정도의 위치에서 횡단면을 기준으로 경도값을 측정하였다. 출력과 초점거리를 일정하게 하고 레이저빔의 이송속도를 증가시키면서 실험한 결과를 나타낸 것이다. 시편 윗 부분이 경도가 약간 크게 나타나고 있는데 윗 부분은 레이저빔에 의한 급 가열현상과 급속 자체에 의한 급냉각 속도가 빠르기 때문에 경한 조직이 상대적으로 많이 발생하였기 때문이다. Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 빔 이송속도가 증가할수록 용접부의 경도분포가 직사각형 형태로 형성되는 반면 빔 이송속도가 감소하면 삼각 형태로 경도분포가 형성되지만 상대적으로 최고 경도값은 약간 증가하였다. 레이저빔으로 급가열되어 온도가 상승된 후 빠르게 냉각되면서 모재

부위보다 용접부의 경도값이 상승되었다. 이는 오스테나이트가 균질화가 되는 용융선까지 온도가 급속히 상승되었다가 급냉되면서 퍼얼라이트와 마르텐사이트로 변했기 때문이다. 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min로 느릴 경우 용융부에서 재결정이 발생하고 입자가 성장하여 큰 입자와 작은 입자가 공존하지만, 레이저빔 이송속도가 1.4m/min로 빠르게 진행하면 충분히 입자가 성장하지 못하여 비교적 미세한 침상형 페라이트와 조밀한 퍼얼라이트 및 마르텐사이트가 혼합되기 때문이다.

3.2 오스테나이트계 스테인레스강의 레이저 용접 특성

18%Cr과 8%Ni를 함유한 18-8 스테인레스 강인 오스테나이트계 304 스테인리스(이하 STS304)는 저온 취성을 일으키지 않고, 저온 인성이 좋아 저온용접 구조물 재료로 널리 사용된다. 고온 산화성이 적고 뛰어난 내식성 때문에 산이나 알칼리 등의 광범위한 부식환경에 많이 사용하고 있다. 특히 유압밸브에 마그네틱 스테인레스강과 연강관 부품에 적용되는데, 높은 기계적특성과 작동압력사이클을 가지고 있기 때문이다. 이와 같은 특성을 가진 STS304와 구조용압연강재인 SS400을 용접하여 그 특성을 분석하였다. 레이저빔의 출력을 2.0kW, z=-0.5mm로 하고, 레이저빔의 이송속도 변화에 대한 특성을 분석하기 위해 비드온플레이트 용접한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 보호가스 유량 Ar=4ℓ/min일 때, 레이저빔의 이송속도간격을 1m/min씩

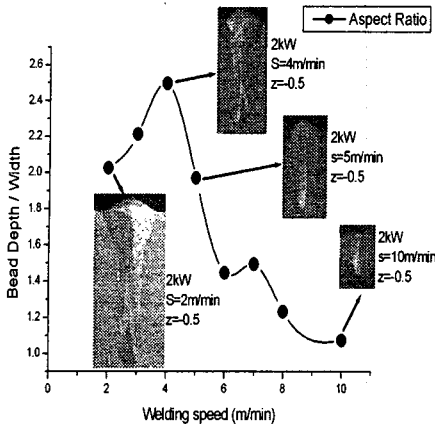


Fig. 6 Effect of welding speed on the bead shape

증가시켜 2~10 m/min범위에서 실험 한 결과이다. SS400의 실험결과를 나타낸 Fig. 2와는 다르게 실험 전 영역에서 기공이 발생되지 않았다.

레이저빔의 이송속도가 느린 2m/min일 경우에는 용융깊이가 가장 깊지만 시편표면에서 용융폭도 크기 때문에 종횡비는 2정도였다. 그러나 레이저빔의 이송속도가 4m/min일 때는 레이저빔의 이송속도가 2m/min일 때 보다 용입깊이는 깊지 않았지만 시편 표면에서 용융폭이 작아 종횡비가 2.5로 가장 크게 나타났다.

3.3 이중용접 특성

SS400과 STS304를 레이저로 용접했을 때 그 특성이 다르게 나타난다. 일반 구조용압연강재인 SS400은 탄소함유량이 0.18 ~ 0.26%로 탄소함유량이 0.08%인 STS304와는 에너지가 높은 레이저빔과

상호작용 했을 때 용접부의 용융풀 특성이 다르게 나타난다. SS400의 경우 입열량을 크게 하면 용입 깊이는 증가하지만 내부에 고온균열이나 기공이 발생할 수 있기 때문에 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도 및 초점등을 잘 고려하여 최적의 입열량으로 작업해야 한다. 그러나 STS304의 경우는 레이저 용접공정변수에 따라 용접부의 폭에 대한 용접 깊이의 비로 나타내는 용입비의 변화만 있을 뿐 탄소량은 다르게 내부결함은 거의 없었다. 그러므로 STS304 보다 탄소량이 많은 SS400과 고에너지의 레이저빔과 상호작용 할 때 탄화작용과 급격한 냉각 때문에 발생하는 용융풀에서의 결함을 STS304재질이 혼합되면서 보완할 것으로 판단하여 STS304 와 SS400을 용접하였다. 레이저빔의 초점 크기가 시편 표면에서 가장 작은 위치인 z=0mm에서 레이저빔의 이송속도는 1.0m/min로 하고 레이저빔 출력을 변화시키면서 SS400과 STS304를 용접한 결과를 Fig. 7에 나타냈다.

Fig. 7에서 좌측은 SS400이고 우측은 STS304이다. 용접부 형태가 전체적으로 STS304재질이 용융되어 SS400재질 쪽으로 유동한 형태를 하고 있다. Fig. 7에 나타낸 것처럼 레이저빔 출력을 1.5kW, 1.6kW, 1.7kW, 1.8kW로 증가시키면서 용접했을 때 모두 관통용접이 되었으나 용입비 측면에서 판단하면 1.6kW일 때가 가장 양호한 상태를 나타내고 있다. bead on plate 용접시 종횡비(aspect ratio)기준으로 판단할 때 가장 양호한 레이저빔 출력이 1.8kW인 것과는 대조적이다. SS400의 경우 1.8kW부터는 내부에 약간의 기공이 발생하기 시작하여 2kW에서는 내부결함이 현저하게 나타나는 Fig. 2의 결과와는 다르게 Fig. 7에서는 용접부 내부 결함은 없었다. 용접부의 모든 시편에서 SS400만 용접했을 때 발생하는 기공과 균열이 발생하지 않는 이유는 오

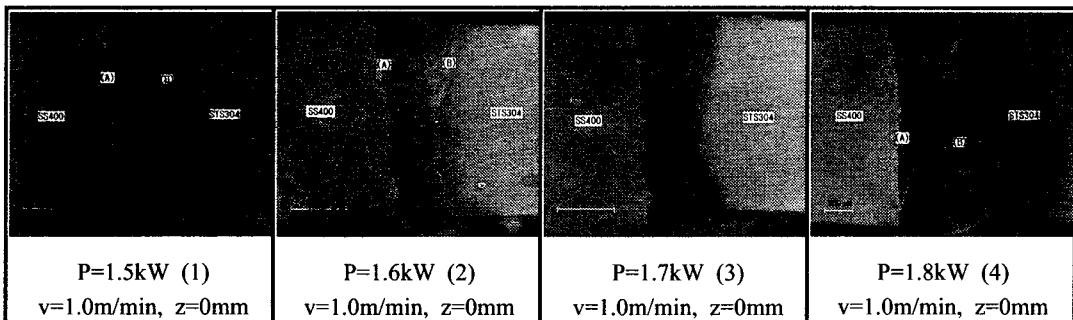


Fig. 7 Influence of laser power of the bead shape

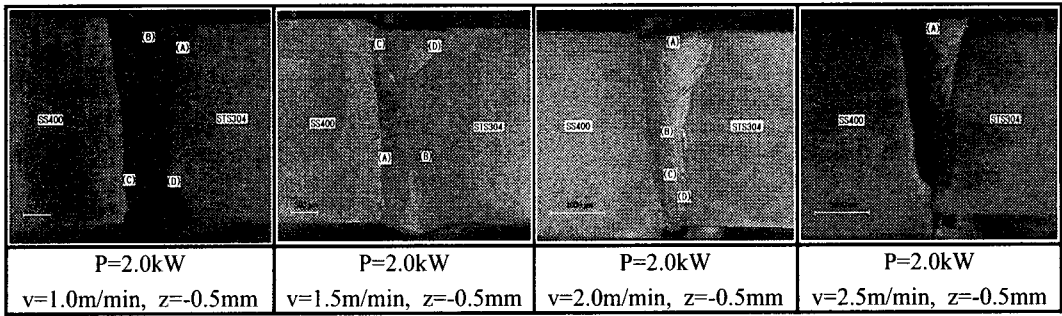


Fig. 8 Welding Cross-section of SS400 and STS304 according to the laser beam speed

스테나이트계 고용체합금이 용융부에서 상변태가 일어나지 않고 연성이 큰 오스테나이트 상태와 혼합되어 보완하기 때문이다. 또 다른 이유로 고려할 수 있는 것은 18~20%를 포함하고 있는 Cr이 고온에서 확산속도가 빨라져 내부결합을 제어했기 때문이다. STS304의 용접공정변수를 기준으로 SS400과 STS304를 용접한 실험결과는 Fig. 8에 나타냈다. STS304를 bead on plate 로 용접한 용접공정변수는 레이저빔 출력은 2kW, z=-0.5mm로 하여 레이저빔의 이송속도를 변화시킨 Fig. 6의 결과와 비교하기 위해서이다.

STS304를 SS400과 이종용접했을 때 Fig. 8에 나타낸 것처럼 내부결합 없이 레이저빔의 이송속도가 1.5m/min일 때 용입비가 비교적 큰 용접이 이루어 졌다. SS400과 이종용접했을 때는 레이저빔 이송속도가 2.5m/min로 STS304만을 비드온플레이트로 용접한 결과와는 다르게 이송속도가 낮은데도 불구하고 관통용접이 이루어지지 않았다.

STS304만을 용접했을 때는 레이저빔의 이송속도가 SS400에 비해 빠를지라도 효과적으로 키홀을 형성하여 용입깊이를 증가 시키지만, SS400과 함께 용접했을 때는 급속하게 SS400시편에 에너지를 손

실하기 때문이다. 두개의 재질을 용접했을 때는 열전도율과 열팽창계수가 낮은 재질이 용접될 수 있도록 용접공정변수를 선정해야 한다는 것을 나타내고 있다. 이종금속용접의 미세조직은 동일한 조직을 가지고 있지 않기 때문에 미세조직을 관찰하였다. 본 연구에서 시편이 가지고 있는 조직은 각각 SS400은 펄라이트와 페라이트, STS304는 오스테나이트조직을 형성하고 있다.

이종용접한 용접단면을 관찰하기 위해 Fig. 8에 있는 용접단면을 확대하여 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9는 Fig 8에서 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min와 1.5m/min일 때 용접단면을 표시한 것을 확대하여 나타낸 것이다. 이종용접의 용융부에서 SS400 면에 가까운 부분은 펄라이트와 페라이트의 조직이 레이저빔이 조사될 때 STS304와 높은 온도에서 혼합되면서 조직의 입자크기(grains size)가 조대해진다. 이와 반대로 STS304면에 가까운 부분은 오스테나이트조직과 페라이트 상이 관찰되며, 수직상의 오스테나이트 구조로 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 용접시 시편에 전달되는 열이 냉각속도에 따라 달라지고, 이 부분의 조직은 Cr과 Ni성분을 많이 가지고 있기 때문이다. 가열과정에서 오스테나이트

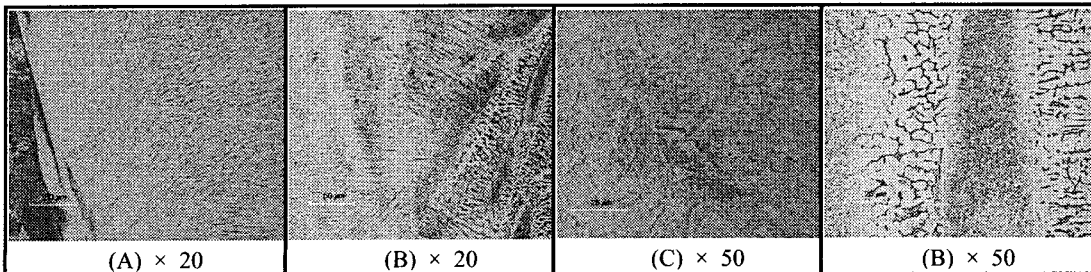


Fig. 9(a) Photographs of fusion zones(P=1.6kW, V=1.0m/min, z=0mm)

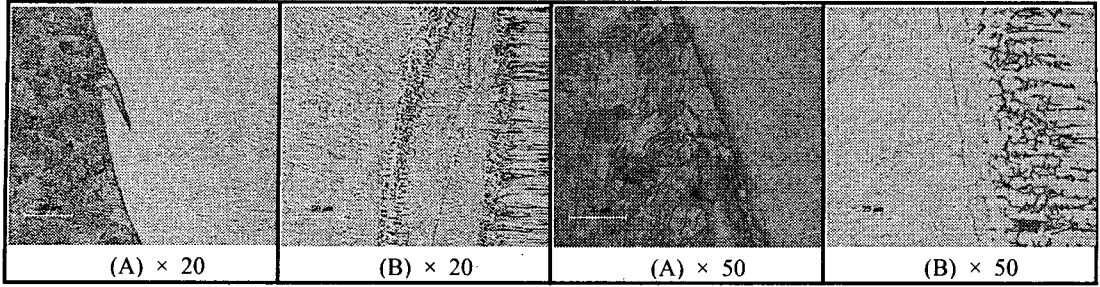


Fig. 9(b) Photographs of fusion zones(P=2.0kW, V=1.5m/min, z=-0.5mm)

핵 생성속도는 퍼얼라이트내부의 핵 생성site에서의 경우보다 상당히 늦은데, 이것은 Cr, Ni 등의 첨가 원소가 오스테나이트 핵 생성 성장 및 균질화를 지연시킨다. 오스테나이트조직성분인 STS304는 모재의 영향 때문에 급랭으로 인하여 모재와 용접면과의 경계면으로부터 냉각되어 용융부 중심부 쪽으로 수지상(dendrite)조직이 형성됐다. SS400의 용융점은 1430℃이고 STS304의 용융점은 1395℃이다. 높은 용융점을 가진 재료에서 먼저 응고가 시작되고 용융점이 낮은 원소는 온도가 충분히 내려갈 때까지 액상으로 머무르다가 응고된다. 용액을 응고에 영향을 받지 않도록 방지하면 두 재료의 비중이 일치하여 중첩되며, 이 중첩된 혼합물을 실제 이용하는데 문제가 많이 발생한다. 그러나 레이저용접은 신속한 급랭으로 이 중첩을 방지할 수 있어 두 금속 원소를 미세하고 균일하게 분포시키고 있다. 냉각속도가 빠르면 결정핵의 수가 많아지므로 결정입자는 미세하게 되고 냉각속도가 느리면 형성되는 핵의 숫자가 적으므로 결정입자가 커져 경도가 낮아진다. 용융온도가 높은 용접 용융부 중심에서 보다

온도가 낮은 모재부분에서부터 응고가 시작하여 중심방향으로 각 결정이 추상정이 형성되었다.

이종용접한 시편의 경도측정값을 Fig. 10에 나타냈다. 레이저빔의 이송속도를 1.0m/min으로 하고, 레이저빔의 출력을 1.5kW, 1.6kW, 1.7kW, 1.8kW로 증가시키면서 SS400과 STS304를 이종용접한 후 경도측정값을 Fig. 10(a)에 나타냈다. 1.5kW으로 저출력일 경우에는 SS400 모재의 열영향부 경도값이 큰 부분이 넓었다. 그러나 레이저 출력이 증가하여 1.7kW와 1.8kW일 때는 STS304 모재부분의 열영향부가 크게 나타났다. 이는 레이저 출력이 작았을 때는 STS304의 열전도율이 크기 때문에 쉽게 주위로 전달되지만, 출력이 높아지면 높은 열원이 주위에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 그러나 출력을 2.0kW으로 고정하고 초점위치 z=-0.5mm로 하여 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 SS400과 STS304를 이종용접했을 때의 경도 분포는 Fig. 10(a)와 다른 현상으로 나타나고 있음을 Fig. 10(b)에 나타내었다. 출력을 일정하게 하고 레이저빔의 이송속도를 증가시켰을 때는 SS400의 모재부분의

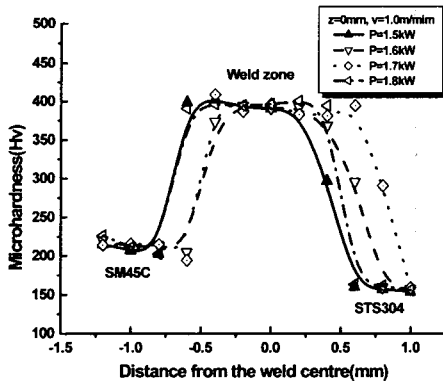


Fig. 10(a) Vickers hardness distribution in the welded are according to various laser power(z=0mm, v=1.0m/min)

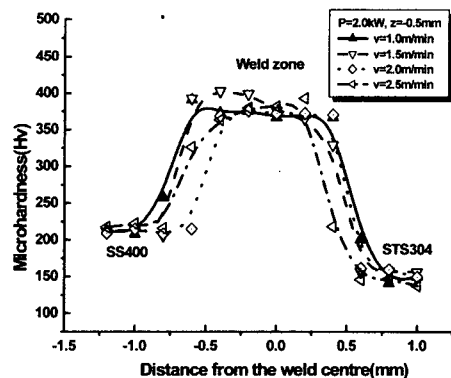


Fig. 10(b) Vickers hardness distribution in the welded are according to various welding speed(z=-0.5mm, P=2.0kW)

HAZ영역이 STS304 모재영역보다 크게 형성되었다. 이는 STS304는 열전도율이 커서 주위로 급속하게 열을 전달하지만 SS400은 STS304보다 열전도율이 크지 않기 때문이다. 이것은 레이저빔의 이송속도를 증가시켰을 때 경도가 큰 부분이 넓어지는 현상을 나타내는 실험결과인 Fig. 5와 같은 결과이다.

SS400과 STS304를 같이 용접했을 때 용접부의 중심을 기준으로 SS400 모재 부분쪽의 용융부와 HAZ의 경도분포가 높게 나타났다. 그러나 용융부의 중심선을 기준으로 오른쪽 부분인 STS304 모재의 영향을 많이 받는 영역의 용융부와 HAZ의 경도값은 급속하게 모재의 경도값에 접근하였다. 레이저출력이 증가되면 SS400의 C성분이 오스테나이트 조직인 STS304와 융합되어 높은 경도값을 갖는 영역이 STS304쪽으로 확장됐다.

4. 결론

일반기계구조용 탄소강인 SS400와 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이중용접한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SS400의 맞대기용접시 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min로 느릴 경우 용융부에서 재결정이 발생하고 입자가 성장하여 큰 입자와 작은 입자가 공존하지만, 레이저빔 이송속도가 1.4m/min로 빠르게 진행하면 충분히 입자가 성장하지 못하여 비교적 미세한 침상형 페라이트와 조밀한 퍼얼라이트 및 마르텐사이트가 혼합되어 있는 구조를 가진다.
2. 이중용접시 SS400에서 발생하는 기공과 고온균열이 거의 발생하지 않았다. 이는 오스테나이트계 고용체합금이 용융부에서 상변태가 일어나지 않고 연성이 큰 오스테나이트 상태와 혼합되어 보완하기 때문이다. 또 다른 이유로 18 ~ 20%를 포함하고 있는 Cr이 고온에서 확산속도가 빨라 저 고온균열을 제어했기 때문이다.
3. 오스테나이트조직성분인 STS304는 모재의 영향 때문에 급랭으로 인하여 모재와 용접면과의 경계면으로부터 냉각되어 용융부 중심부 쪽으로 수지상(dendrite)조직이 형성되어 모재보다 경도값이 약간 상승하였다.

후 기

이 논문은 산업자원부 한국산업기술평가원지정 지역협력연구센터인 조선대학교 산학협력단 레이저응용 신기술개발 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Sun, Z., "Feasibility of producing ferritic/ austenitic dissimilar metal joints by high energy density laser beam process," ELSEVIER, Vol. 68, pp. 153-160, 1996.
2. Dupont, N., Banovic, W. and Mard, R., "Microstructural Evolution and Weldability of Dissimilar Welds between a Super Austenitic Stainless and Nickel-Based Alloys," WELDING JOURNAL, pp. 125-135, 2003.
3. Avery, R. E., "Pay attention to dissimilar-metal welds Guidelines for welding dissimilar metals," Chemical Engineering Progress, pp. 1-7, 1991.
4. Yoo, Y.T., Oh, Y. S. and Im, K., "Comparison of welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel and SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser," KSMTE, Vol. 12, No. 3, pp. 58-67, 2003.
5. Hosking, F. M., Stephens, J. J. and Rejent, J. A., "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," WELDING JOURNAL, pp. 127-136, 1999.
6. Sun, Z. and Karppi, R., "The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overviews," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 59, pp. 257-267, 1996.
7. Lief, Karlsson., "Welding of Dissimilar metals," Pergamon, pp. 125, 1995.
8. Omar, A. A., "Effects of Welding Parameters on Hard Zone Formation at Dissimilar Metal Welds," WELDING JOURNAL, pp. 86-93, 1998.
9. Dupont, J. N., "Microstructural Development and Solidification Cracking Susceptibility of a Stabilized Stainless Steel," WELDING JOURNAL, pp. 253-263, 1999.
10. 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.
11. Cam, G., Yeni, C., "Determination of Mechanical and Fracture Properties of Laser Beam Welded Steel Joints," WELDING JOURNAL, pp. 193-201, 1999.
 12. Wu, X. W., Chandel, R. S. and Seow, H. P., "Wide gap brazing of stainless steel to nickel-based superalloy," Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 215-221, 2001.
 13. Iamboliev, T., Katayama, S., "Interpretation of Phase Formation in Austenitic Stainless Steel Welds," WELDING JOURNAL, pp. 337-347, 2003.
 14. 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.
 15. Richard, E. Avery., "Pay attention to dissimilar-metal welds Guidelines for welding dissimilar metals," Chemical Engineering Progress, pp. 1-7, 1991.
 16. Wei, P. S., Kuo, Y. K. and Ku, J. S., "Fusion Zone Shapes in Electron-Beam Welding Dissimilar Metals," ASME, Vol. 122, pp. 626-631, 2000.