

고출력 레이저에 의한 이종금속 용접특성

신호준*, 유영태+, 임기건**, 안동규***

Welding characteristics of Dissimilar Metal by High Power Laser

Ho-Jun Shin*, Young-Tae Yoo+, Kie-Gon Im**, Dong-Gyo Ahn***

Abstract

For many years and primarily for economical reasons, Dissimilar Metal Welds have been used as transition joints in a variety of equipment and applications. But Dissimilar Metal Welds have several fabrication and metallurgical drawbacks that can often lead to in-service failures. In this paper, the laser weldability of STS304 stainless steel and SM45C at dissimilar metal welds using a continuous wave Nd:YAG laser are experimentally investigated. An experimental study was 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 were tested.

Key Words : Laser welding (레이저 용접), Dissimilar welding (이종용접), SM45C (탄소강), SUS304(스테인레스강)

1. 서론

이종금속 용접은 기술적, 경제적인 이유로 산업분야에 다양하게 이용되고 있다. 특히 항공기, 우주산업, 전자기기, 저온기기 등 첨단 산업분야에 고품질, 고기능성을 가지면서, 가격 면에서 유리한 제품 생산기술이 요구되고 있기 때문이다.⁽¹⁻³⁾

일반적으로 이종금속용접은 용융용접을 주로 실시하고 있다. 그러나 용접시공시 많은 문제점들이 있다. 이는 각각의 금속 화학성분의 차이에 따라 달라지는데, 용접시 금속 조직이 조대화 하거나, 용융온도와 응고온도가 다르기 때문이다. 특히 원자구조가 달라서 용접시 균열의 발생빈도

가 높고, 기공이 발생하기 쉬운 결점이 있다. 이와 같은 이유 때문에 이종금속 용접시 가장 먼저 생각해야 할 것은 물리적 화학적 성질이 거의 비슷한 성질을 가지고 있어야 한다. 가장 큰 문제중의 하나는 두 금속간의 용점 차이이다. 두 금속의 용점 차가 100℃ 이내에 있으면 일반적으로 이종용접이 가능하다. 그러나 일반적인 용융용접에서 용점 차가 큰 경우 용접부 균열이 발생하기 쉽다. 즉, 용고시에 용점차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 그리고 계면에 취약한 생성상(phase)이 형성되거나, 두 금속의 희석에 의해 균열이 발생하여 양호한 성능을 얻을 수 없다는 문제가 있다. 또한 시편의 가격면에서 용접부 개선과 용가재사용

* 신호준, 조선대학교 정밀기계공학과(sbn66@hanmail.net)
주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

+ 조선대 기계공학과

++ 전남대 물리학과

+++ 조선대 기계공학과

으로 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.⁽⁴⁻⁸⁾

이종금속용접의 일반적인 용융용접은 오스테나이트 스테인레스강의 전극봉이나 용가재를 사용하고 있다. 이들의 전극봉이나 용가재는 높은 합금원을 가지고 있는 것으로 알려져 있어, 용접부의 탄소강으로부터 재료의 희석정도에 따라 미세조직의 균열민감도가 선택적으로 적용되고 있다. 그러나 유감스럽게도 이종금속용접은 현장적용사례가 부족하고 금속학적 결점 때문에 몇몇의 구조물에 사용하고 있다. 대부분 알려진 구조물의 결함들은 고온균열이고, 일반 용융용접에서 탄소강 전극봉의 부정확한 때문에 발생하는 있는 것으로 알려져 있다. 이종금속용접시 탄소강용접봉을 사용했을 때 스테인레스강에 미치는 영향은 매우 경하고 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 기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계 스테인레스강인 STS304를 용접하였다. SM45C와 STS304를 용접하기 위해 연속파형 Nd:YAG레이저를 사용하였다. 탄소강인 SM45C를 용접했을 때 공정변수가 맞지 않으면 고온균열, 냉간균열등이 심하고, 용융부에 기공이 많은 특징이 있다. 그러나 오스테나이트계인 STS304는 비교적 레이저 용접특성이 양호하기 때문에 SM45C를 용접 하였을 때 발생하는 용접결함을 해소할 수 있을 것으로 판단하여 이종용접을 실시하였다. 연구방법으로는 SM45C와 STS304에 대한 선행 예비실험 결과를 기초로하여 이종 용접했다.⁽⁶⁾ 이종 용접 공정변수는 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도, 레이저빔의 작업거리를 변화시켜 맞대기용접 한 다음 용접부의 특성을 정리하였다.

2. 실험방법 및 실험장치

Table 1 Chemical component of Materials

	C	Si	Mn	S	Cr	Ni
SM45C	0.42 ~0.48	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.035	-	-
STS304	0.08	1.0	2.0	8.0~10	18~ 20	8.0~ 10.5

본 연구에 사용된 재료는 Ni기 오스테나이트계 고용체합금인 STS304과 기계구조용강인 SM45C로써 화학적 조성을 Table. 1에 나타내었다.

SM45C와 STS304의 이종금속 용접을 위한 용접공정변수를 결정하기 위해 Bead on plate 방식으로 용접한 선행 연구논문 결과를 이용하였다. 선행연구결과를 기준으로 하여 SM45C의 최적용접공정변수로 이종용접하였다. 이 결과를 비교하기 위해 STS304의 최적용접상태를 나타내는 공정변수로 이종 용접하여 그 특성을 분석하였다. SM45C와 STS304의 이종용접의 최적용접 공정변수는 종횡비가 크고 용접결함이 없는 경우를 용접공정변수로 하여 실험으로 결정하였다.

선행 실험 결과SM45C의 경우 가장 양호한 레이저빔 출력은 1.6kW이었기 때문에 1.6kW를 기준으로하는 출력범위를 1.5~1.8kW를 적용시켰고, 빔 이송속도를 $v = 1.0\text{m/min}$, $z=0\text{mm}$ 및 레이저빔을 출력을 2.0kW, $z=-0.5\text{mm}$, 빔 이송속도를 각각 $v=1.0, 1.5, 2.0, 2.5\text{m/min}$ 을 변화시켜 중심으로 이종용접을 하였다. 시편의 두께는 3mm이다. 두 금속을 맞대기용접을 하였다. 시험편은 가로 100mm, 세로 50mm로 레이저 절단했고 열영향부는 사포(sand paper)로 제거하였다. 맞대기 용접(butt welding)은 레이저 절단으로 인하여 접촉부에 열영향부분이 있을 수 있기 때문에 두개의 시료 접촉부를 사포(sand paper(#220))으로 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 사포(sand paper)로 #800, #1000, #1200, #1500, #2000번까지 연마 후 최종적으로 suspension 6 μm , 1 μm 입도로 폴리싱(polishing)하였다. 이종재료의 에칭은 CuSO₄, HCl, 증류수의 배율로 용접부의 부식상태를 확인하여 침적시간을 조절하였다. 에칭된 용접비드 경계면은 광학현미경과 금속

조직현미경을 사용하여 용접부의 형상과 결합 여부를 관찰하였다. 또한 용접부의 기계적성질을 관찰하기 위해 마이크로 비커스경도 측정하였고, 인장강도실험도 실시하였다.

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

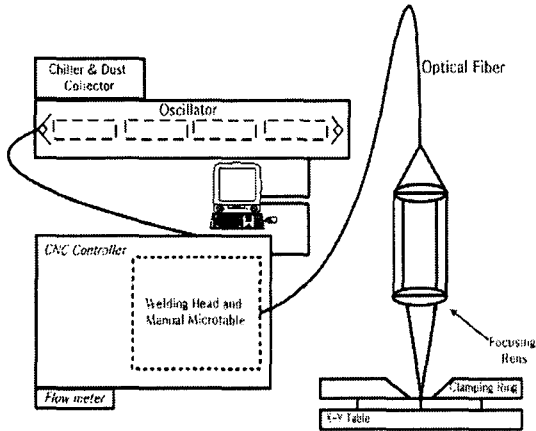


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

통하여 전달되는 레이저빔의 초점크기(Spot size)는 0.6mm이다. 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 $F=200$ mm이고, 렌즈의 직경(D) 60mm인 $F\#$ (F number: F/D)가 3.33인 렌즈를 사용하였다. 실험 장치에 대한 도식도는 Fig. 1에 나타냈다. STS304와 SM45C를 Nd:YAG 레이저로 용접시 보호가스로 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다.

내용(9폰트, 150줄간격)

3. 결과 및 고찰

3.1 SM45C강의 레이저 용접 특성

일반 기계구조용강인 SM45C는 용접시 C의 영향으로 고온균열을 촉진하는데 0.15%C 이상에서는 고온균열이 발생한다고 발표되었다.(9)

특히 높은 출력으로 레이저 용접한 경우 심입용접한 용접 비드면의 중앙부에 고온균열현상이 현저하게 관찰되고 있는데, 이것은 용접부에서 증발 때문에 용융금속의 절대량이 매우 적고, keyhole 내부의 온도가 매우 높아 가스의 팽창

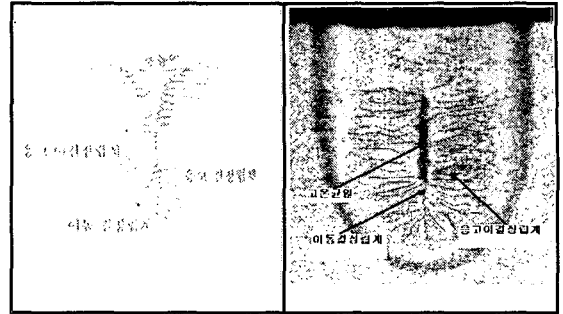


Fig. 2 Schematic and picture of welding hot cracking

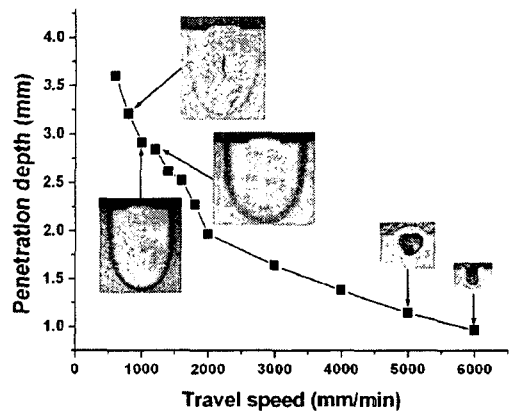


Fig. 3. Effect of travel speed on the weld penetration

압력과 용융금속의 표면장력등 복잡한 상관관계에 따라 격심한 용융금속의 교반효과와 때문에 발생한다. 레이저 용접 풀에서는 표면장력과 대류 유동에 영향을 받아 용융풀 주변에서 용승작용(Up welding)을 일으킨다. 용융풀에는 증기압(vaporization pressure)과 비슷한 반발압력이 작용하고, 용융풀 중심으로부터 주변부로 유동하면서 용융풀 표면이 약간 함몰된다. 용융풀 표면이 함몰되면서 자기초점(self-focus)현상이 발생하며 이 함몰 지역에서 레이저빔 흡수가 집중된다.

증기압, 유체동압(hydrodynamic pressure), 복사압력(radiation pressure)은 키홀을 열리게하는 반면에 유체정압(hydrostatic pressure)과 표면장력(surface tension)은 복원압력으로 작용한다. 레이저빔이 이송하면 급격하게 형성된 용접부의 용융온도가 모재로 전달되면서 표면장력이 증기압보다 커지면 키홀이 닫혀 진다. 용접부의 급격한 온도 구배 때문에 용융부의 경계부근에서 용융부의 중심쪽으로

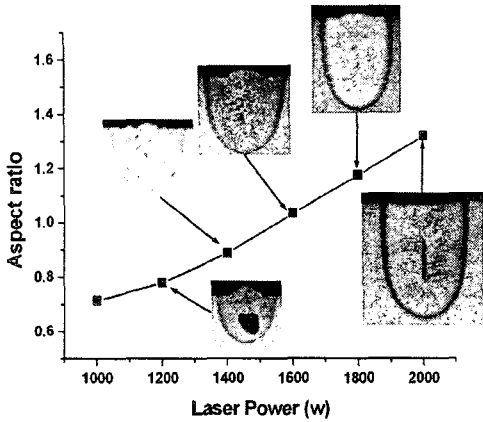


Fig. 4. Effect of laser power on the weld penetration

조직이 성장하는데 이때 SM45C의 경우 내부에서 고온균열이 발생한다.

SM45C에서 발생하는 고온균열을 Fig. 2에 모식도와 고온균열이 발생한 비드중단면의 실험결과를 나타내었다. 비드의 중심부를 용접방향과 동일한 방향으로 절단한 횡단면의 모식도와 사진에서 고온균열이 비드의 모든 부분에서 발생하지 않고 용접비드의 일부 구간에서 불규칙적으로 발생한다.

레이저 출력에 따른 레이저빔 이송속도의 변화에 따라 발생하는 고온균열현상을 파악하기 위해 레이저 빔 출력을 1800W로 하여 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 레이저빔의 초점크기가 시편 표면에서 가장 작은 거리를 $z=0$ 로 하였을 때 레이저빔 이송속도가 1000mm/min보다 느린 경우, 용접부 중앙에 수직으로 고온균열이 발생하였고, 이송속도가 5000mm/min 이상에서는 용융단면에 비해 상대적으로 큰 기공이 나타났다. 일반적으로 레이저빔 출력을 증가시켜 입열량을 증가시키면 용융금속의 양이 많아지고 용입깊이도 깊어진다.

그 결과 응고 수축량이 커지고 완전응고에 소요되는 시간도 다소 길어진다. 그러나 용입깊이가 커지면 같은 용융 금속량을 가지더라도 고-액 경계면의 면적을 넓히는 효과가 있기 때문에 응고속도를 빠르게 작용하여 고체경계면 쪽으로 수축력을 증가시킨다. 이때 용접면의 중심부에 용액으로 잔류해있는 용액이 메우지 못해 내부에 고온균열이 발생할 수 있는데, 이런 현상이 레이저빔의 이송속도와의 상호관계가 있음을 나타내었다.

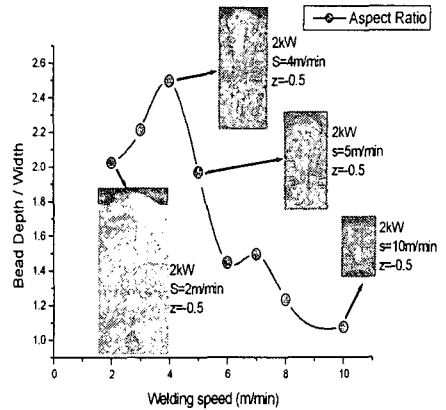


Fig. 5. Effect of travel speed on the weld penetration

레이저빔에 의한 용접은 심입용접이 가능하기 때문에 레이저 출력에 대한 용융폭과 용융깊이의 비인 종횡비 (Aspect ratio)를 Fig. 4에 나타내었다. 레이저빔의 출력이 작으면 레이저빔에 의한 복사에너지가 대부분 금속표면에서 되반사 되어 용융풀의 깊이가 작아 종횡비가 작으나 출력을 증가시킬수록 종횡비가 증가하였다. 레이저용접은 keyhole 형성이 매우 중요한데 저출력에서 keyhole형성이 충분히 형성하지 못하기 때문이고, 고출력인 경우에는 keyhole형성에 따른 다중 반사량이 증가하여 심입용접이 가능하다.

실험결과에 의하면 용접금속의 종횡비가 증가할수록 고온균열 발생확률이 커지고 있다. 종횡비가 큰 경우, 즉 좁고 깊은 용접금속의 모양은 주상정이 내부로 성장하기 때문에 중심부에 편석이 심하게 일어나고 수축변형이 중앙에서 집중적으로 작용하여 고온균열이 크게 나타난다. 이처럼 SM45C의 경우는 용접공정변수가 최적화 되지 못하면 내부결합이 발생하는 특징을 가지고 있다. 이와 같은 내부결합이 쉽게 발생하는 SM45C를 STS304와 같이 용접하고자 한다.

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 알카리 등의 광범위한 부식환경에 많이 사용하고 있다. 특히 유압밸브에 magnetic stainless steel과 연강관 부

품(mild steel tubular parts)에 적용되는데, 높은 기계적특성과 operating pressure cycles를 가져야 하기 때문이다.

이와 같은 특성을 가진 STS304와 기계구조용강인 SM45C를 용접하여 그 특성을 분석하였다. 레이저빔의 출력을 2.0kW, z=-0.5mm로 하고, 레이저빔의 이송속도 변화에 대한 특성을 분석하기 위해 bead on plate 용접한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 보호가스 유량 Ar=4 l/min일 때, 레이저빔의 이송속도간격을 1m/min씩 증가시켜 2~10 m/min범위에서 실험 한 결과이다. SM45C의 실험결과를 나타낸 Fig. 4와는 다르게 실험 전 영역에서 고온균열이나 기포가 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. 그리고 종횡비가 변화할 지라도 SM45C와는 다르게 내부결합이 나타나지 않았다.

3.3 SM45C강과 STS304의 이중금속용접 특성

3.1과 3.2에서 언급한 것처럼 SM45C와 STS304를 레이저로 용접했을 때 그 특성이 다르게 나타난다. 일반 기계구조용강인 SM45C는 탄소함유량이 0.42 ~ 0.48%로 탄소함유량이 0.08%인 STS304와는 에너지가 높은 레이저빔과 상호작용 했을 때 용접부의 용융플 특성이 다르게 나타난다. SM45C의 경우 입열량을 크게 하면 용입깊이는 증가하

지만 내부에 고온균열이나 기공이 발생하기 때문에 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도 및 초점등을 잘 고려하여 최적의 입열량으로 작업해야 한다. 그러나 STS304의 경우는 레이저 용접공정변수에 따라 용접부의 폭에 대한 용접깊이의 비로 나타내는 용입비(aspect ratio)의 변화만 있을 뿐 탄소강처럼 내부결합은 거의 없었다. 그러므로 STS304 보다 탄소량이 많은 SM45C와 고에너지의 레이저빔과 상호작용할 때 탄화작용과 급격한 냉각 때문에 발생하는 용융플에서의 결합을 STS304재질이 혼합되면서 보완할 것으로 판단하여 STS304 와 SM45C를 용접하였다. 레이저빔의 초점크기가 시편 표면에서 가장 작은 위치인 z=0mm에서 레이저빔의 이송속도는 1.0m/min로 하고 레이저빔 출력을 변화시키면서 SM45C와 STS304를 용접한 결과를 Fig. 6에 나타냈다.

Fig. 6에서 좌측은 SM45C이고 우측은 STS304이다. 용접부 형태가 전체적으로 STS304재질이 용융되어 SM45C재질 쪽으로 유동한 형태를 하고 있다. Fig. 6에 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 1.8kW 인것과는 대조적이다. SM45C의 경우 1.8kW부터는 내부에 약간의 기공과 고온균열이 발생하기 시작하여 2kW에서는 내부결합이 현저하게 나타나는 Fig. 4의 결과와는 다르게 Fig. 6에서는 용접부 내부 결합은 없었다. 용접부의 모든 시편에서 SM45C만 용접했을 때 발생하는 기공과 균열이 발생하지 않는 이유는 오스테나이트계 고용체합금이 용융부에서 상변태가 일어나지 않고 연성이 큰 오스테나이트 상

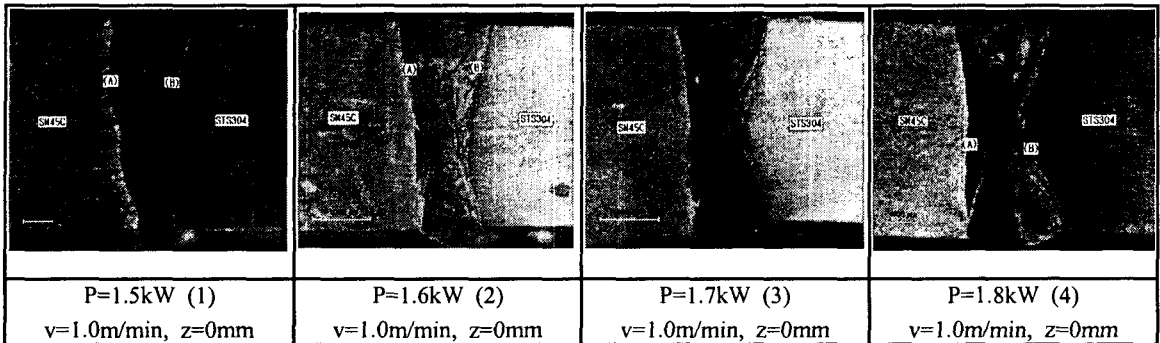


Fig. 6. Welding Cross-section of SM45C and STS304 according to the laser beam power

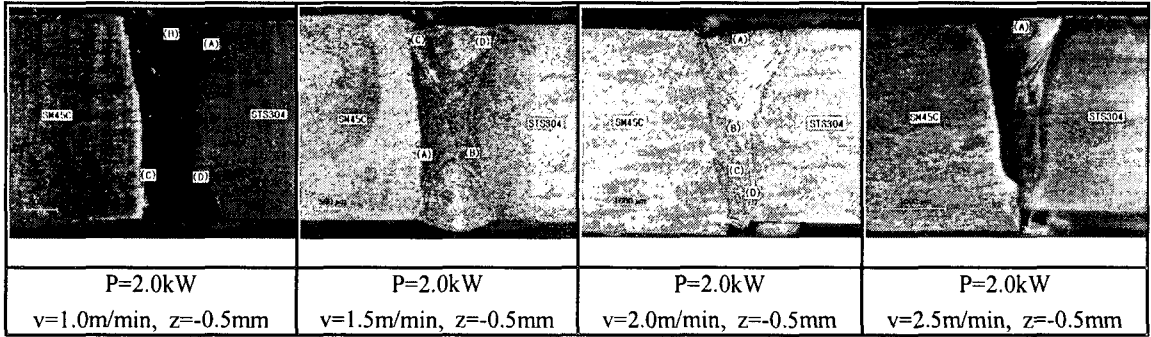


Fig. 7. Welding Cross-section of SM45C and STS304 according to the laser beam speed

태와 혼합되어 보완하기 때문이다. 또 다른 이유로 고려할 수 있는 것은 18~20%를 포함하고 있는 Cr이 고온에서 확산속도가 빨라져 고온균열을 제어했기 때문이다. STS304의 용접공정변수를 기준으로 SM45C와 STS304를 용접한 실험결과는 Fig. 7에 나타났다. STS304를 bead on plate로 용접한 용접공정변수는 레이저빔 출력은 2kW, z=-0.5mm로 하여 레이저빔의 이송속도를 변화시킨 Fig. 5의 결과와 비교하기 위해서이다. STS304만을 용접했을 때 Fig. 5에 나타난 것처럼 내부결함없이 레이저빔의 이송속도가 5m/min일 때까지 용입비가 비교적 큰 용접이 이루어졌지만, SM45C와 이종용접했을 때는 레이저빔 이송속도가 2.5m/min로 STS304만을 용접했을 때 레이저빔 이송속도가 낮은데도 불구하고 관통용접이 이루어지지 않았다.

STS304만을 용접했을 때는 레이저빔의 이송속도가 SM45C에 비해 빠를지라도 효과적으로 키홀을 형성하여 용입깊이를 증가 시키지만, SM45C와 함께 용접했을 때는 급속하게 SM45C시편에 에너지를 손실하기 때문이다. 두

개의 재질을 용접했을 때는 열전도율과 열팽창계수가 낮은 재질이 용접될 수 있도록 용접공정변수를 선정해야 한다는 것을 나타내고 있다.

이종금속용접의 미세조직은 동일한 조직을 가지고 있지 않기 때문에 미세조직의 관찰하는 것이 중요한 요소이다.

본 연구에서 시편이 가지고 있는 조직은 각각 SM45C는 펄라이트와 페라이트, STS304는 오스테나이트조직을 형성하고 있다. 이종용접의 용융부에서 SM45C 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, 수지상의 오스테나이트 구조로 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 용접시 시편에 전달되는 열이 냉각속도에 따라 달라지고, 이 부분의 조직은 Cr과 Ni성분이 많이 가지고 있기 때문이다.

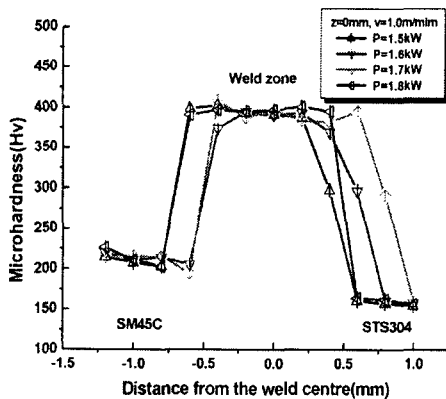


Fig. 8.(a) Hardness profiles of the laser power

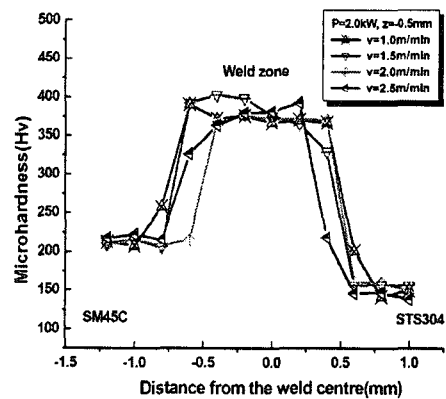


Fig. 8.(b) Hardness profiles of the laser travel speed

이종용접한 시편의 경도측정값을 Fig. 8에 나타냈다. SM45C와 STS304를 같이 용접했을 때 용접부의 중심을 기준으로 SM45C 모재 부분쪽의 용융부와 HAZ의 경도가 분포가 높게 나타났다. 그러나 용융부의 중심선을 기준으로 오른쪽 부부인 STS304 모재의 영향을 많이 받는 영역의 용융부와 HAZ의 경도값은 급속하게 모재의 경도값에 접근하였다. 레이저출력이 증가되면 SM45C의 C성분이 오스테나이트 조직인 STS304와 융합되어 높은 경도값을 갖는 영역의 STS304쪽으로 확장됐다.

오스테나이트조직성분인 STS304는 모재의 영향 때문에 급랭으로 인하여 모재와 용접면과의 경계면으로부터 냉각되어 용융부 중심부 쪽으로 수지상(dendrite)조직이 형성됐다. SM45C의 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 증착되며, 이 증착된 혼합물을 실제 이용하는데 문제가 많이 발생한다. 그러나 레이저용접은 신속한 급랭으로 이 증착을 방지할 수 있어 두 금속원소를 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 주상정이 형성되었다.

4. 결론

기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이종용접한후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이종용접시 SM45C에서 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 빨라져 고온균열을 제어했기 때문이다.

2) SM45C면에 근접한 부분의 미세조직은 펄라이트와 페라이트조직이 레이저빔이 조사될 때 STS304와 높은 온도에서 혼합되면서 조직의 입자크기가 조대해졌고,

STS304면에 근접한 부분은 오스테나이트조직과 페라이트상이 관찰되며, 수지상의 오스테나이트 구조로 나타났다.

3) 오스테나이트조직성분인 STS304는 모재의 영향 때문에 급랭으로 인하여 모재와 용접면과의 경계면으로부터 냉각되어 용융부 중심부 쪽으로 수지상(dendrite)조직이 형성되어 모재보다 경도값이 약간 상승하였다.

참고 문헌

- (1) Sun. Z., 1996, "Feasibility of producing ferritic/austenitic dissimilar metal joints by high energy density laser beam process", *ELSEVIER*, Vol. 68, pp. 153~160.
- (2) DUPONT. J. N. and BANOVIC. S. W., 2003. "Microstructural Evolution and Weldability of Dissimilar Welds between a Super Austenitic Stainless and Nickel-Based Alloys," *WELDING JOURNAL*, pp. 125~135.
- (3) Richard E. Avery, 1991. "Pay attention to dissimilar-metal welds Guidelines for welding dissimilar metals," *Chemical Engineering Progress*, pp. 1~7.
- (4) HOSKING. F. M., STEPHENS. J. J. and REJENT. J. A., 1999. "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," *WELDING JOURNAL*, pp. 127~136.
- (5) Z.Sun and R.Karppi, 1996. "The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overviews," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 257~267.
- (7) Lief Karlsson., 1995 "WELDING OF DISSIMILAR METALS," *Pergamon*, pp. 125.
- (8) OMARA. A., 1998. "Effects of Welding Parameters on Hard Zone Formation at Dissimilar Metal Welds," *WELDING JOURNAL*, pp. 86~93.