

CW Nd:YAG 레이저에 의한 이종금속 용접특성

유영태[#], 신호준^{*}, 송성욱^{*}

Welding Characteristics of Dissimilar Metal by Continuous Wave Nd:YAG Laser

Young Tae Yoo[#], Ho Jun Shin^{*} and Seong Wook Song^{*}

ABSTRACT

Laser welding techniques have been characterised for various materials. In this paper, the laser weldability of STS304 stainless steel and Inconel 600 at dissimilar metal welds using a continuous wave Nd:YAG laser are experimentally investigated. Inconel 600 is being used in a steam generator tubing of pressurized water reactor(PWR) exposed to some corrosion. Stress corrosion cracking can occur on this material.

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 Metal(이종금속), Microstructure(미세조직), STS304, INCONEL600

1. 서론

이종금속 용접은 기술적, 경제적인 이유로 산업 분야에 다양하게 이용되고 있다. 특히 항공기, 우주 산업, 전자기기, 저온기기 등 첨단 산업분야에 고품질, 고기능성을 가지면서, 가격 면에서 유리한 제품 생산기술이 요구되고 있다.¹⁻³

일반적으로 이종금속용접은 용융용접을 주로 실시하고 있다. 그러나 용접시공시 많은 문제점들

이 있다. 이는 각각의 금속 화학성분의 차이에 따라 달라지는데, 용접시 금속조직이 조대화 하거나, 고저용융상(Phase)으로 분리된다. 특히 원자구조가 달라서 용접시 균열의 발생빈도가 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 용접 차이이다. 두 금속의 용접 차가 100℃이내에있으면 일반적으로 이종용접이 가능하다. 그러나 일반적인 용융용접에서 용접차가 큰 경우 용접부 균열이

^{***} 접수일: 2004년 4월 28일; 게재승인일: 2004년 8월 13일

[#] 교신저자: 조선대학교 기전공학과

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

^{*} 조선대학교 대학원

발생하기 쉽다. 즉, 응고시에 용접차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 그리고 계면에 취약한 생성상(Phase)이 형성되거나, 두 금속의 회색에 의해 균열이 발생하여 양호한 성능을 얻을 수 없다는 문제가 있다. 또한 시편의 가격면에서 용접부 개선과 용가재사용으로 인한 경제적인 부담이 상당히 심하게 나타난다. 최근에는 이런 단점을 극복하기 위해 고밀도 에너지원을 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.^{4,15}

그래서 본 연구에서는 인코넬 600과 STS304 steel의 이종용접특성을 실험적으로 연구하였다. 두 금속중 초내열 합금인 인코넬 600의 금속학적인 특성은 주 합금원소가 Ni-Cr-Fe인 γ -계 고온강화형 합금으로 고온에서 안정하고, 성형성, 내부식성 및 고온 기계적 특성이 우수하기 때문에 화학용기, 열처리장치, 항공기의 엔진 및 구조재료에 사용되고 있다. 특히 발전소 스팀 제너레이터 튜브의 슬리브 보수 작업을 위해 펄스파형 Nd:YAG 레이저 이용한 용접 연구가 진행되어 왔다.²¹ 그리고 18%Cr과 8%Ni를 함유하여 18-8 스테인레스 강으로 불려지는 오스테나이트계 304 스테인리스(이하 STS304)는 저온 취성을 일으키지 않고, 저온 인성이 좋아 저온용접 구조물 재료로 널리 사용되며, 고온 산화성이 적고 뛰어난 내식성 때문에 산이나 알칼리 등의 광범위한 부식환경에 많이 사용하고 있다.

그러나 이종금속 용접시 인코넬 600과 STS304 사이의 열영향부(Heat Affected Zone:HAZ)에서 입계파괴가 일어나는 경향이 있다. 이것은 용접시 열영향부(HAZ)에서 용융풀이 형성되는데 이때 수소를 발생시켜 균열의 형태로 나타나고 있다. 또한 인코넬합금은 응고 과정에서 상변태가 없는 오스테나이트조직을 나타내고 있어 고온균열의 감수성이 높고 용접시 결합이 발생하는데 그 결합에는 각각 응고균열, 입계액화균열, strain age cracking이 있다.¹⁶⁻²⁰

이런 일반용접 문제점에 비해 전자빔 용접과 레이저빔 용접은 각각의 열원의 특성과 장점을 가지

고 있어 이종금속용접을 실시하였다.

본 연구에서는 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 인코넬 600과 STS304을 이종금속을 용접하였을 때의 일반 용융용접(GTAW etc.)의 결합을 줄이고 금속학적 특성을 향상을 시키기 위해 연구했다. 연구방법으로는 각각 금속에 대한 최적의 용입비를 결정하기 위해 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도를 변화시켜 실험하였다. 이 실험결과를 기준으로 인코넬 600과 STS304를 맞대기 용접하여 최적의 용접공정 변수를 결정했다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장비

본 연구에 사용된 레이저는 파장이 1064nm, 멀티모드(multi-mode)의 빔으로써 최대출력이 2.8kW 인 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=200 mm이고, 렌즈의 직경(D) 60mm인 F#(F number:F/D)가 3.33인 렌즈를 사용하였다. 실험 장치에 대한 도식도는 Fig. 1에 나타냈다. STS304와 인코넬 600를 Nd:YAG 레이저로 용접시 보호가스로 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다.

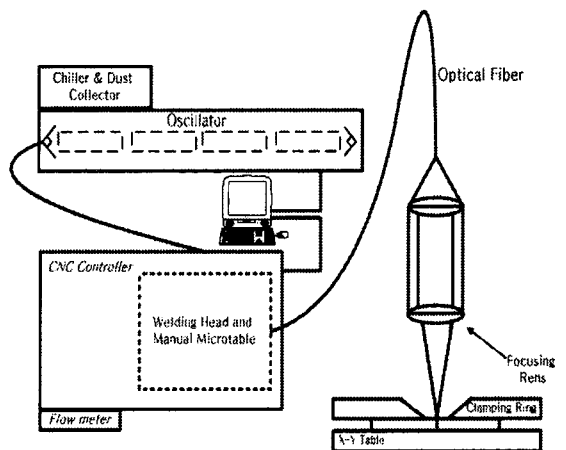


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 Mechanical&Physical properties of Materials

	Tensile stress (N/mm ²)	Elongation (%)	Thermal conductivity (W/mK)	Melting point(℃)	Density (Mg/m ³)	Thermal expansion	electric resistance	Hardness (H _B)
Inconel600	550	35~55	11.7	1395	8.47	13.3	103.0	220
STS304	612	40	14.9	1400	8	18.8	-	210

2.2 실험방법 및 실험시편

본 연구에 사용된 재료는 Ni기 오스테나이트계 고용체합금인 인코넬 600과 STS304 으로서 물리적 특성 및 화학적 조성을 Table 1와 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Chemical component of Materials

	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Fe	Cu
Inconel 600	0.01	0.1	0.3	0.3>	76	15.5	8	0.2
STS304	0.08	1.0	2.0	0.04	8.0~10.5	18~20	69	-

먼저 선행실험으로 인코넬 600과 STS304를 각각 Bead on plate 방식을 이용하여 최적의 공정변수를 결정한 다음 서로 대응되는 공정변수를 가지고 맞대기 용접을 하기 위해 실험하였다. 이때 레이저 빔의 최적의 작업거리를 확인하기 위해 각각 시편의 초점위치에 따라 비드의 종횡비를 관찰하여, 최적의 작업거리를 결정하여, 이중용접을 하였다. 이때의 작업위치를 시편표면보다 아랫방향인 z=-1.0mm에서 용접속도를 1.0m/min으로 고정하고 출력을 1.3 ~1.6kW로 변화시키면서 레이저빔을 시편에 조사시켰다. 출력을 변화시키면서 실험한 결과 STS304와 인코넬 600의 경우 레이저 출력이 1.4kW일 때 비드종횡비가 가장 큰 값을 나타냈으며 그 결과는 Fig. 3에 나타냈다.

이 실험결과를 기준으로 레이저빔 출력은 1.4kW로 하였다. 시편의 두께는 3mm로 고정하고 빔 이송속도를 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8m/min으로 변화시켜 두금속을 맞대기용접을 하였다. 시험편은 가로 100mm, 세로 40mm로 제작하였다. 비드 온 플레이트(bead on plate)용 시편은 단일판을 사용하였고, 맞대기 용접(butt welding)용은 두개의 시료를 맞댈 수 있도록 준비하였으며 접촉부는 sand

paper(#220)으로 연마하여 시편의 갭(약40μm)을 줄였다. 용접시 시편 표면의 이 물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 한 후, 레이저 용접 공정변수를 변화시켜 가면서 실험하였다. 광학 현미경상의 조직관찰을 위해 용접 후 용접방향에 수직으로 비드단면을 금속정밀 절단기로 절단한 후 마운팅(hot mounting) 하였다. 마운팅된 용접시편 비드의 절단면에 대하여 sand paper로 #400, #800, #1000, #1200번까지 연마 후 최종적으로 suspension 6μm, 1 μm 입도로 폴리싱(polishing)하였다. 이중재료의 에칭은 HNO₃, HCl, 증류수의 배율로 용접부의 부식상태를 확인하여 침적시간을 조절하였다. 에칭된 용접비드 경계면은 광학현미경과 금속조직현미경을 사용하여 용접부의 형상과 결합 여부를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 종횡비관찰 및 작업거리결정

기존의 연구방법은 레이저빔을 시편에 점용접(spot welding)하여 초점크기(spot size)를 기준으로

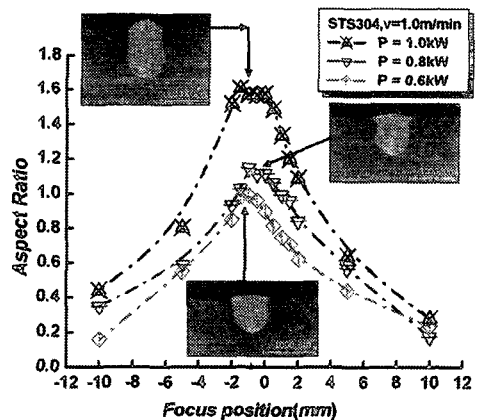


Fig. 2 The aspect ratio on the focus position

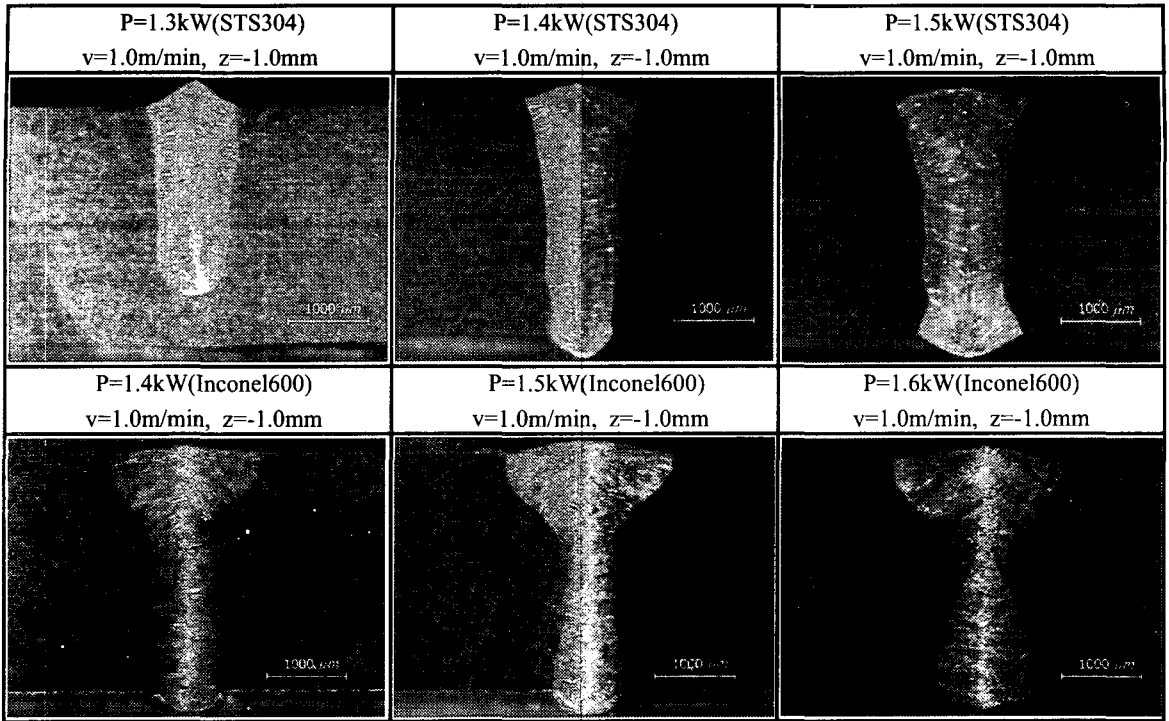


Fig. 3 Welding Cross-section according to the laser beam power(STS304, Inconel 600)

하여 시편표면에서 초점의 크기가 가장 작은 작업 거리를 $z=0$ 으로 놓고 실험하였다.

그러나 초점크기와 작업거리 및 종횡비를 결정하는 용입 깊이는 분명히 차이가 있기 때문에 Bead on plate 방식을 선택하여 실험하였다. Fig. 2는 레이저 출력이 각각 600W, 800W, 1000W으로 놓고, 빔 이동속도를 1 m/min으로 실험했을 때의 종횡비이다. Fig. 2에 나타난 결과에 의하면 종횡비의 크기가 가장 크게 나타는 위치는 시편표면위치인 $z=0$ 이 아니라 시편표면보다 약간 아랫방향에 있다. 출력이 높아지면서 종횡비가 비교적 큰 범위가 넓어지고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3은 레이저빔 이송속도와 작업거리위치인 초점위치를 각각 1.0m/min, -1.0mm로 고정하여 레이저출력 변화에 따른 비드형상을 관찰한 것이다. 레이저빔의 이송속도(1.0m/min)와 작업거리($z=-1.0$ mm)를 고정하고 출력의 변화에 따른 용입비를 관찰한 결과 1.4kW일 때 용입비(종횡비)가 가장 크게 나타나 이중용접의 출력기준점으로 하였다.

Fig. 3은 윗부분은 STS304이고 아래부분은 인코넬600을 비드온플레이트(Bead on plate)로 용접했을 때 비드모양이다. STS304 경우에는 출력이 증가하면서 용입깊이와 용융폭의 폭이 넓어지고 있다. 그러나 인코넬 600의 경우에는 시편표면에서의 용융부가 크고 아랫방향으로 용입깊이가 증가하는 나사못 머리 모양을 하고 있다. 이처럼 용융비드모양에 커다란 차이가 있는 것은 인코넬의 경우 Ni성분이 많고, STS304의 경우에는 Fe성분이 많기 때문이다. 또한 이는 용융온도가 1455℃이고 비중이 8.9인 니켈성분이 많은 인코넬의 경우 레이저빔이 시편에 조사되었을 때 발생한 플라즈마와 용융온도가 1535℃이고 비중이 7.87인 철(Fe)성분이 많은 STS304의 용접시 발생한 플라즈마의 동적거동차이 때문이라 판단된다.

3.2 인코넬 600과 STS304의 이중용접특성

인코넬은 탄소의 고용도가 낮아 고온에서 장시간 사용하거나 및 열처리하여도 침탄, 탈탄반응이 생기기 힘들고, 열팽창계수가 오스테나이트계

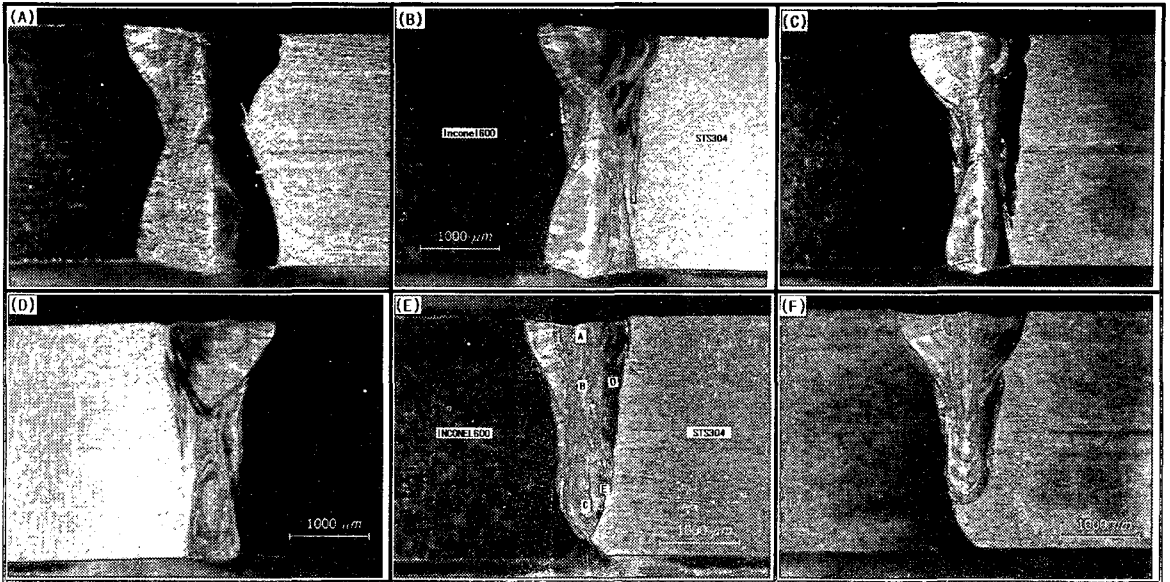


Fig. 4 Dissimilar metal Welding of the Cross-section by laser welding speed ($z=-1.0\text{mm}$, $P=1.4\text{kW}$)

Stainless Steel과 탄소강의 중간 정도이고 반복 가열에 강하다는 특성이 있다. 인코넬 600은 고온에서의 심한 부식성 분위기에 사용되는 표준합금이다.

이 합금은 실질적으로 15.5%Cr 및 8%Fe을 함유하는 Ni-Cr-Fe 3원합금인데 높은 강도와 시공성을 겸비하고 있다. 그러나 일반적인 용접시공(GTAW)에서는 여러 가지 공정변수의 영향을 받아 많은 결함을 볼 수 있다. 이와같은 재료적 특성을 가지고 있는 인코넬 600에 저온인성이 좋아 저온용접구조물 재료로 널리 사용되고 있어 고온산화성이 적은 STS304를 맞대기 용접하였다. 레이저빔 출력을 1.4kW, $z=-1.0\text{mm}$ 로 고정하고 빔 이송속도를 각각 0.2m/min씩 증가시켰을 때($v=0.8 \sim 1.8\text{m/min}$)의 이종용접형상을 Fig. 4에 나타냈다.

그림에서 왼쪽은 인코넬600이고 오른쪽은 STS304 시편이다. 비드온플레이트로 용접한 후 용접단면을 나타낸 Fig. 3의 실험결과를 기준으로 STS304일 경우, 레이저빔 출력이 1.4kW일 때 비드 모양과 인코넬600일 때 모양을 합성시키는 맞대기 용접을 하였을 때 용접비드 모양이다. 실험결과에 의하면 레이저빔의 이송속도가 1m/min일 때 용융 풀의 폭에 대한 용입깊이 비를 나타내는 종횡비가 가장 좋게 나타났다. 레이저빔의 이송속도를 0.8m/min로 했을 경우 용접단면이 모래시계모양을 하고 있고 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 용접단면이 나사못 머리모양을 나타내고 있다. 레이저빔의 이송속도가 1.6m/min부터는 관통용접이 되지 않고 있어 충분한 에너지가 가해지지 못하고 있음을 나타낸다.

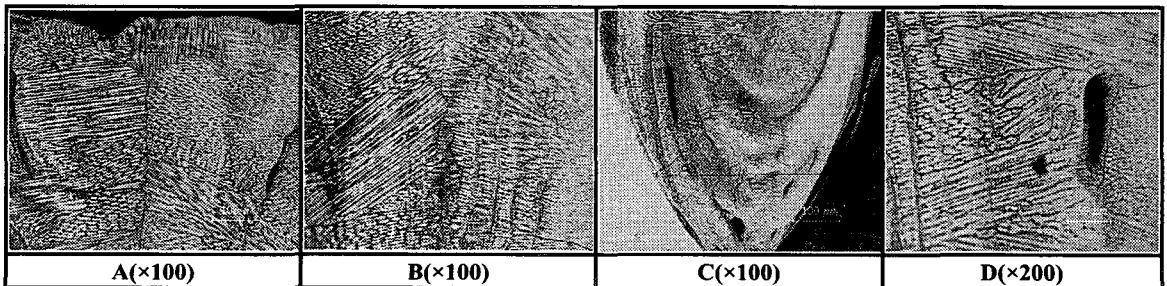


Fig. 5 Photographs of fusion zones in laser welding power 1.4kW, and welding speed 1.6m/min

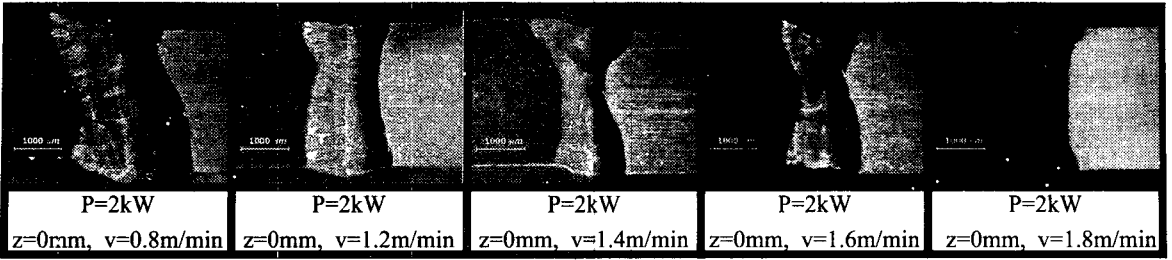


Fig. 6 Cross-sectional area of welding according to laser welding speed

Fig. 5는 Fig. 4에 (E)용접부의 미세조직을 관찰한 것이다. Fig. 5-A는 용접선을 중심방향에서 좌우로 셀 수지상형태로 분포되고 있다. 특히 인코넬 600과 STS304 시편의 모재가 각기 다른 성분으로 분포하고 있기 때문에 조직의 변화가 왼쪽과 오른쪽이 다르게 나타난다. 왼쪽의 조직사진은 인코넬 600으로 수지상조직이 매우 치밀하게 분포되고 있다. 반대로 STS304 근접부에서는 수지상조직보다 작은 점조직 형태로 많이 분포되고 있다. Table 2에 나타낸 것처럼 인코넬600중에는 Ni성분이 대부분인데 레이저빔이 시편표면에 조사되었을 때, STS304에서 가장 많은 성분인 Fe 보다 낮은 온도에서 용융되어, 표면에서 급속하게 열전도 됨과 동시에 시편깊이 방향으로 열이 전달된다.

시편의 깊이 방향으로 열이 전달되면서 모재의 영향으로 과냉되지만 용융풀의 표면은 주위로 용융된 금속이 전달되어 나사 못 머리 모양을 하고 있다. Fig. 3이 과냉으로 발생한 수지상조직이 인코넬 600을 나타낸 왼쪽부분이 더욱 선명하게 관찰되었다. 또한 검은색의 오스테나이트계 조직이 많이 분포하고 있다. Fig. 5-C는 용접부 끝자락을 관찰한 것이다. 그림에 관찰된 것처럼 용접부 최하단에서 작은 균열이 발생하였고, 기공이 많이 발생하였다. Fig. 5-A에 비해 충분한 레이저빔의 에너지가 조사되지 못한 Fig. 5-E의 경우 모재의 깊이방향으로 용융풀이 침투되면서 모재로부터 냉각이 시작된다. 이때 용접 비드면에서 용접할 때 발생한 각종 가스가 배출할 충분한 시간이 없어 포획된 기포가 존재하고 있다. 이와 같은 결함은 Fig. 4-A처럼 충분한 용입열량을 가하면 해소될 수 있지만 종횡비가 크고 열영향부가 작아 열에 의한 변형이 적은 용접을 하기 위해선 Fig. 4-B와 같은 공정으로 용접을 해야 한다. 용접부의 모재로부터 응고가 시작되면서 면선단응고(planer front solidification)가 일어난 후

celuar solidification이 진행되고, 조성적 과냉(constitutive supercooling)이 있음을 Fig. 5에 나타냈다. 용융부에서 모재로 급냉이 진행되면서 육각형모양의 cellular 입자가 형성되고 있다. 용접중심부에서는 응고가 진행됨에 따라 결정립이 성장하여 columnar 입자조직이 나타나고 있다. 모재와 용접부가 만나는 경계부분에서는 모재로부터 응고가 시작되면서 면선단 응고가 일어난 후 셀룰라 응고가 진행된 실험결과를 Fig. 5에 나타냈다. 레이저빔의 이송속도를 느리게 할수록 모재에 대한 열전달 때문에 온도구배가 상대적으로 작아져 결정이 다른 결정표면에서 특정방위관계를 가지면서 성장하는 현상이 둔화된 현상을 실험결과로부터 관찰했다. 그러나 레이저빔의 조사속도가 빨라져서 냉각속도가 증가하면 용융풀이 입자성장이 용융중심선에 수직인 방향으로 발생하는 현상도 관찰되었다. 응고균열은 용융부에서 응고 시 고상이 얇은 액상film에 의해 분리되어 있을 때, 수축응력이 작용하면 발생한다. 특히 응고균열에 의한 파단면 표면은 응고말기를 나타내는 수지상형태를 가진다. Fig. 6은 이중급속 용접시 초점위치에 따라 용접비드형상을 비교한 것으로 출력과 빔 이동속도가 같은 조건이라도 용접시 작업거리인 z=0mm로 했을 때 용접비드형상이 z=-1mm로 했을 때와 상당한 차이가 나타남을 알 수 있다. 특히 빔 이송속도가 0.8m/min에서부터 1.6m/min일 때 급격한 입열량의 증가로 인해 용접시 비드면의 윗면에 조사되는 높은 에너지 밀도 때문에 급속이 증발되어 움푹파인 현상이 관찰됐다. 이 실험결과로부터 초점 표면에서 레이저 에너지밀도가 높기 때문에 z=0로 했을 때보다 z=-1mm로 했을 때, 용접비드면의 형성이나 종횡비가 양호한 것으로 나타났다. 이것은 Fe(용융온도:1535℃)이 많은 STS304와 Ni(용융온도:1455℃)이 많은 인코넬600를 용입열량이 크게 용접 했을

때 비중이 큰 Ni성분(비중:8.9)이 상대적으로 비중

STS304 모재보다는 100MPa정도 인장강도가 작고,

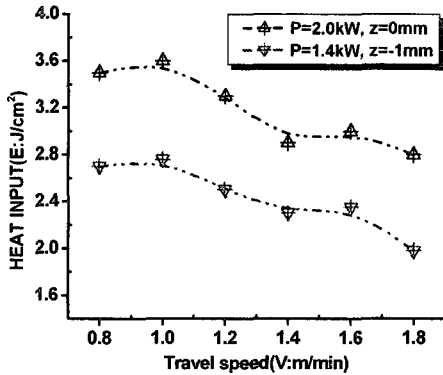


Fig. 7 Heat input by Travel speed

이 이 작은 Fe성분(비중:7.87)까지는 STS304시편쪽으로 약간 기울어졌다.

Fig. 7은 빔 이송속도에 따른 입열량변화를 최적의 공정변수에 맞추어 실험한 결과를 나타낸 것이다. 입열량의 계산은 시편에 조사한 레이저 출력을 레이저빔의 이송속도와 용융비드 폭으로 나누어 계산한 값이다. 레이저 출력이 작으면 레이저빔의 이송속도를 낮출지라도 시편표면에서 열이 주위로 전달되는 양이 많아 입열량이 증가하지 않는 현상을 그림에 나타냈다. Fig. 7의 결과로부터 레이저빔의 출력이 작으면 레이저빔의 이송속도를 작게 할지라도 시편주위로 열이 전도되는 양이 많아 에너지 밀도가 떨어져 용입비가 큰 용접이 어려움을 나타내고 있다.

Fig. 8은 출력과 빔 이송속도를 변화시켰을 때 변형률에 따른 인장강도 변화를 나타내었다. 각각의 공정변수는 비드형상 즉 종횡비가 가장 최적인 값을 사용하였고, 모재와 비교하기위해 No.1은 STS304, No.2는 Inconel 600의 인장강도변화를 나타내고 있다. 그리고 No.3은 Fig. 6의 실험결과인 출력(P)이 2.0kW이고, z=0mm, v=1.8m/min이며, No.4는 Fig. 4의 실험결과인 출력(P)이 1.4kW, z=-1mm, v=1.0m/min일 때의 인장강도변화이다.

Fig. 8에서는 각각의 공정변수에 상관없이 선형 탄성영역이 거의 비슷한 값인 550MPa을 가진다. 그리고 No.3은 No.4보다 necking되는 시점이 약간 길고, No.2인 인코넬보다는 작다. 인코넬 600과 STS304를 이종용접해서 인장강도를 비교한 결과

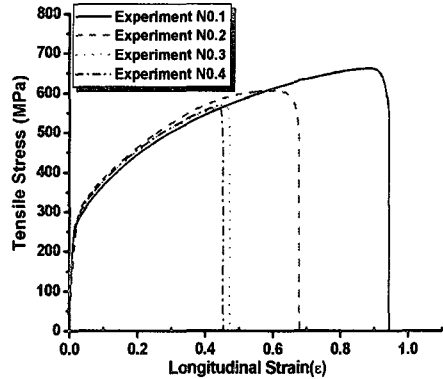


Fig. 8 Comparison of tensile test results for various of laser welding parameter

인코넬 600모재보다는 50MPa정도 작았으나, Table. 1에 나타난 인장강도보다는 크게 나타났다. 특히 출력과 빔 이송속도, 초점위치를 변화시키더라도 입열량의 값이 차이가 없으면 인장강도는 근소한 값을 가는 것을 알 수 있다.

4. 결론

초내열합금강은 인코넬 600과 오스테나이트계 304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이종 용접한후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이종용접의 초점위치는 Bead on plate 방식을 실험한 결과 종횡비가 가장 큰 위치는 시편표면이 아니라 z=-1.0mm로 초점위치가 달라짐을 알 수 있었다.
- 2) 각각을 비드온플레이트 실험을 했을 때 용융비드모양에 커다란 차이가 있는 것은 Inconel의 경우 Ni성분이 많고, STS304의 경우에는 Fe성분 많기 때문이다.
- 3) 레이저빔 이송속도가 느릴수록 온도구배가 상대적으로 작아져 결정이 다른 결정표면에서 특정방위관계를 가지면서 성장하는 현상이 둔화된 현상이 나타났다.
- 4) 레이저빔 이송속도가 빠를수록 냉각속도가 증가하면 용융풀이 입자의 성장이 용융중심선에 수직인 방향으로 발생하였다.
- 5) 레이저빔의 공정변수를 각각 다르게 하더라도

도 입열량의 차이가 작으면, 인장강도는 근소한 값의 차이를 가진다.

참고문헌

1. COLLING, M., LIPPOLD, J. C., "An Investigation of Ductility Dip Cracking in Nickel-Based Filler Materials - Part I(II)," WELDING JOURNAL, pp. 288-295, 2003.
2. DUPONT, J. N., "Microstructural Development and Solidification Cracking Susceptibility of a Stabilized Stainless Steel," WELDING JOURNAL, pp. 253-263, 1999.
3. 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.
4. QIAN, M., 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.
5. LI, M. Y., KANNATEY-ASIBU, E. and JR, "Monte Carlo Simulation of Heat-Affected Zone Microstructure in Laser-Beam-Welded Nickel Sheet," WELDING JOURNAL, pp. 37-44, 2002.
6. 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.
7. 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.
8. QIAN, M., LIPPOLD, J. C., "The effect of Multiple postweld heat treatment cycles on the weldability of Waspaloy," WELDING JOURNAL, pp. 233-238, 2002.
10. Sun, Z., "Feasibility of producing ferritic/austenitic dissimilar metal joints by high energy density laser beam process," ELSEVIER, Vol. 68, pp. 153-160, 1996.
11. Wu, X. W., Chandel, R. S. and Seow, H. P., Li, H., "Wide gap brazing of stainless steel to nickel-based superalloy," Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 215-221, 2001,
12. IAMBOLIEV, T., KATAYAMA, S. and AMTA., "Interpretation of Phase Formation in Austenitic Stainless Steel Welds," WELDING JOURNAL, pp. 337-347, 2003.
13. 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.
14. Avery, R. E., "Pay attention to dissimilar-metal welds Guidelines for welding dissimilar metals," Chemical Engineering Progress, pp. 1-7, 1991.
15. 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.
17. Yoo, Young Tae, Oh, Yong seok, Im, Kiegon, "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.
18. HOSKING, F. M., STEPHENS, J. J. and REJENT, J. A., "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," WELDING JOURNAL, pp. 127-136, 1999.
19. 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.
20. Karlsson, Lief., "WELDING OF DISSIMILAR METALS," Pergamon, pp. 125, 1995.
21. Kim, Jae Do, Kim, Cheol Jung and Chung, Chin Man, "Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser, Journal of Materials Processing Technology," Vol. 114, pp. 51-56, 2001.