

# 고출력 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 인코넬 600의 용접 특성

유영태\*, 신호준+, 임기건\*\*

(논문접수일 2004. 6. 14, 심사완료일 2004. 8. 3.)

## Welding Characteristics of Inconel 600 using a high power CW Nd:YAG Laser

Young-Tae Yoo\*, Ho-Jun Shin<sup>+</sup>, Kie-Gon Lim<sup>++</sup>

### Abstract

The welding characteristics of Inconel 600 Alloy using a continuous wave Nd:YAG laser are experimentally investigated. The major process parameters studied in the present laser welding experiment were the positions of focus, laser power and travel speed of laser beam. We measured the fusion zone size and its shape using an optical microscope for the observation of cross-sectional area. We performed two tests regarding the tension and the micro hardness for welding quality estimation. Then we measured residual stress in welds by electronic speckle pattern interferometry(ESPI). In conclusion, the optimum butt welding process parameters were 0.5mm focus position, 1.6kW laser power, 1m/min travel speed and 5.5 ℓ/min assist gas discharge.

**Key Words :** Laser Welding(레이저 용접), Inconel Alloy 600(인코넬 600 합금), 종횡비(Aspect ratio), micro-structure(미세조직), residual stress(잔류응력)

## 1. 서론

레이저에 의한 재료 가공은 현재 성장기의 기술로서 열 영향에 의한 변형이 적고, 가공속도가 매우 빠른 특징이 있다. 정밀가공이 가능하여 기존 공법을 대체하거나 신공법 등의 응용기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 레이저에 의한 소재 절단의 경우는 이미 여러 산업 분야에서 광범위하게 사용되고 있다.

그러나 레이저 접합 기술은 아직 일반화 되어 있지 않고 특수한 부품을 접합하는데 국한되어 있다. 인코넬 600의 레이저 용접에 관한 연구는 용력부식균열과 관련하여 발전소 증기 발생기 전열관의 슬리브 보수 작업을 위해 펄스 파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 진행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup>

인코넬 600은 니켈 및 크롬이 다량으로 함유된 니켈 합금강으로, 인성과 Creep 특성이 우수하고, 특히 고온강도가 높고, 화학적으로도 안정하여 고온 부식 환경에도 강한

\* 조선대학교 기전공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대 대학원

++ 전남대학교 물리학과

장점을 가지고 있다. 그래서 고온 내수성, 가스 분위기가 요구되는 핵 발전소 스팀 제너레이터 튜브, 열교환기, 화학 및 식품관련설비, 반도체설비부품, 전자부품 등에 사용되고 있다.

이와 같이 인코넬 600은 다양한 부분에 사용되고 있기 때문에 부품의 보수나 가공을 위한 특성을 분석하는 것은 매우 중요한 요소이다. 인코넬 600을 레이저로 최적 상태의 용접을 하기 위해서는 레이저 출력, 레이저 빔 이송속도, 레이저 빔의 파장, 보호 가스의 종류 및 유량 그리고 최적의 용융깊이와 폭을 갖는 작업표면과 초점렌즈사이의 거리를 결정해야 한다.

그래서 본 연구에서는 일정한 이동속도 조건에서 최적의 용입비를 얻기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate) 용접 방법으로 용접 비드면을 관찰한 다음 맞대기 용접을 실시하였다. 맞대기 용접은 비드 온 플레이트로 실험한 결과를 기초로하여 최적의 용입열량을 나타내는 레이저 출력과 레이저 빔의 이송속도를 결정하여 용접하였다. 용접 후 용융풀에서 모재로의 급냉 때문에 발생하는 용접 비드 단면을 관찰하였다.

맞대기 용접한 시편의 평가를 위해서 초점위치와 출력의 변화에 따른 용접부 단면의 형상 및 크기를 비교하였고, 인장강도 시험, 마이크로 비커스 경도 시험, ESPI를 이용한 잔류응력 측정 실험을 했다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 레이저는 파장이 1064nm, 멀티모드(multi-mode)의 빔으로써 최대출력이 2.8kW인 연속파(continuous wave;CW)형 Nd:YAG 레이저이다. 레이저 빔은 직경 600 $\mu$ m인 광섬유를 통해 시편에 전달된다. 광섬유로

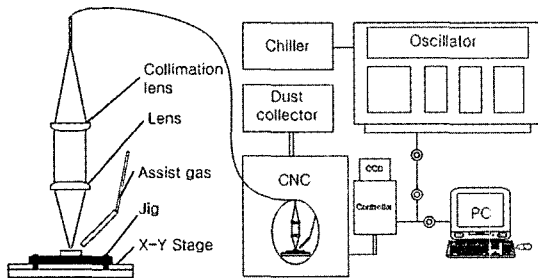


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

전달되는 레이저 빔의 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 나타났다. 연속파형 Nd:YAG 레이저 가공기는 독일 Trumpf 사 제품로 레이저 발진은 아크(arc) 플래시 램프에 의해 광 펌핑(pumping)하여 연속여기 된다.

### 2.2 시편

본 연구에 사용된 재료는 판 두께 3mm의 Ni기 오스테나이트계 고용체합금인 인코넬 600으로서 화학조성 및 기계적, 물리적 특성을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

시험편은 가로 100mm, 세로 30mm로 제작하였다. 비드 온 플레이트(bead on plate)용 시편은 단일판을 사용하였고 맞대기 용접(butt welding)용은 두 개의 시료를 맞댈 수 있도록 준비하였으며 접촉부는 폴리싱(polishing)하여 갭(gap)을 0.3mm 이하로 하였다<sup>(4)</sup>. 용접시 시편 표면의 이 물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시키면서 실험하였다.

### 2.3 실험 방법

연속파형 Nd:YAG 레이저 용접을 위해 레이저 빔을 급속 시편에 직접 조사하는 비드 온 플레이트(bead on plate)

Table 1 Chemical analysis(wt. %)

	C	Fe	S	Ni	Cr	Al
Inconel 600	0.019	9.72	<0.001	73.25	16.12	0.231

Table 2 Mechanical & physical properties of materials

	Inconel 600
Tensile strength(MPa)	610
Elongation(%)	40
Thermal conductivity(W/m · °C)	14.9
Melting range(°C)	1354-1413
Density(g/cm <sup>3</sup> )	8.47
Specific heat(J/kg · °C)	13.3
Electrical resistivity( $\mu\Omega \cdot m$ )	1.03
Hardness(Hv)	185

용접 및 맞대기 용접(butt welding)을 실시하였다. 실험에 사용된 연속파형 Nd:YAG 레이저 용접 파라미터는 용접속도, 초점위치, 출력의 변화 등으로 하였다. 이 때의 용접속도를 1.0m/min로 한 후, 초점 위치를  $z=-10\text{mm}$ 에서  $z=+10\text{mm}$ 으로 변화시켰다. 레이저 출력은 600W, 800W, 1000W로 하여 시편을 비드 온 플레이트 용접하여 최적의 용접공정변수를 결정하였다. 용입비가 가장 큰  $z$ 의 위치에서 두께 3mm를 관통하는 완전 관통용접(full penetration welding)을 확인하기 위해 레이저가 시편을 통과하는 실험을 하였다. 레이저 빔 이송속도 1m/min에서 출력을 1400W, 1500W, 1600W, 1700W로 변화시키면서 비드 온 플레이트(bead on plate)용접 후 재료의 뒷 표면의 용융상태 또는 표면변색 및 용융흔적을 관찰하여 평가하였다.

Inconel 600을 Nd:YAG 레이저로 용접시 보호가스로 불활성 가스인 아르곤(Ar) 가스를 사용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 5.5 l/min로 하였다.

사양 절단한 시편의 용접부위에서 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후 시편을 지그(Jig)로 단단히 고정시켜 용접중 열팽창에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다. 용접위치의 허용오차는 0.1mm 이하로 유지하였다.

광학 현미경상의 조직관찰을 위해 용접 후 용접방향에 수직으로 비드단면을 금속정밀 절단기로 절단한 후 마운팅 프레스(Mounting press)로 마운팅 하였다. 마운팅된 용접시편 비드의 절단면에 대하여 샌드페이퍼(sand paper)로 #400, #800, #1000, #1200번까지 연마 후 최종적으로 diamond suspension 6 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ 입도로 폴리싱(polishing)하였다. 에칭은 황산구리( $\text{CuSO}_4$ ) 10mg, 염산(HCl) 50ml, 증류수 50ml의 혼합용액을 사용하였으며 침적 시간은 재료의 부식 상태를 관찰하면서 조절했다. 에칭된 용접비드 경계면은 광학현미경과 금속조직현미경을 사용하여 용접부의 형상과 결합을 관찰했다.

맞대기용접 시편에 대해 인장강도 시험, 마이크로 비커스 경도 시험, 잔류응력 측정 실험을 통해 용접성을 평가했다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 종횡비 관찰 및 작업 거리 결정

레이저 용접에서 작업표면과 초점렌즈사이의 거리는 시편에 미치는 에너지 밀도와 밀접한 관계가 있다. 기존에는 레이저빔을 시편에 점 용접(spot welding) 했을 때, 스폿 크기(spot size)가 가장 작은 위치를 초점 위치  $z=0\text{mm}$ 으로

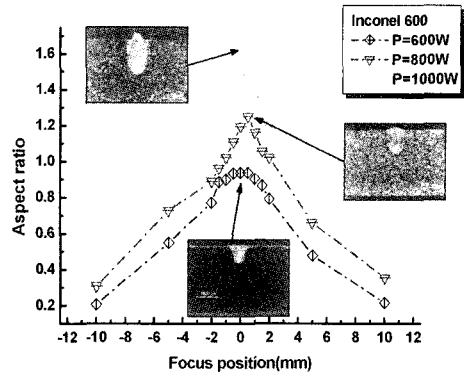


Fig. 2 Relation between position of focus and aspect ratio

놓고 실험하였다<sup>(5-7)</sup>. 그러나 초점 위치와 최적의 작업거리의 의미가 다르므로 비드 온 플레이트 방식을 택해서 용접 전 출력과 작업표면에서부터 초점렌즈까지의 거리 변화에 따른 용입비를 조사했다.

용접 조건을 결정하기 위한 선행 실험으로는 빔이송속도 (1m/min), 보호가스(Ar 5.5 l/min)를 고정하였다. 초점위치 ( $z$ )는 -10mm에서 +10mm까지 변화시켰고, 출력은 600W, 800W, 1000W로 하여 비드 온 플레이트 용접을 했다. 용접한 시편의 비드면과 종횡비를 Fig. 2에 나타내었다. 용입 깊이는 시편표면인  $z=0\text{mm}$  위치 보다 아래 방향인  $z=-1\text{mm}$ 까지의 실험 결과가 시편표면의 윗 방향 위치인  $z=0.5\text{mm}$ 일 때보다 컸다<sup>(8,9)</sup>. 그 이유는 작업 거리를 시편 표면보다 약간 낮게 했을 경우 시편에 대한 열전달 효과가  $z=0.5\text{mm}$ 일 때 보다 크기 때문이다.

출력이 작을 경우 열이 시편 표면으로 전달되는 양이 깊이 방향으로 전달되는 양보다 많아 종횡비가 작게 나타났다. 레이저 출력을 증가시키면 시편 표면으로 전도되는 에너지양보다 시편 깊이 방향으로 전달되는 에너지양이 많아져 종횡비의 변화가 커졌다.

실험한 결과 중 출력을 1000W로 했을 때를 선택해서 종횡비의 관점에서 관찰했다. 종횡비는  $z$ 위치가 시편 표면( $z=0$ )보다 약간 아래 부분이 가장 큰 것이 아니라 시편 표면보다 약간 높은 위치인  $z=0.5\text{mm}$ 에서 종횡비가 가장 크게 나타났다.

#### 3.2 출력에 따른 비드면 관찰

선행 실험에서 작업표면과 초점렌즈사이의 거리는 초점 위치( $z=0.5\text{mm}$ )일 때 종횡비가 가장 컸으므로 초점위치( $z$ )를  $z=0.5\text{mm}$ 로 고정시키고, 빔 이송속도를 1m/min, 보호

가스를 Ar 5.5 ℓ/min로 한 후, 출력을 1.4kW, 1.5kW, 1.6kW, 1.7kW로 변화시키면서 각각 비드 온 플레이트 (bead on plate) 용접 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 출력이 1.4kW일 때는 관통 용접이 되지 않았으며, 출력 1.5kW에서부터 관통되었음을 알 수 있었다. 그러나 출력 1.5kW에서 시편의 뒷 표면의 용융 상태를 살펴본 결과 관통이 되지 않는 부분이 간헐적으로 발생하여 불규칙적인 용융상태가 관찰 되었다. 출력을 1.6kW로 하였을 때에는 완전하게 관통 용접이 되었다. 출력을 1.7kW로 하였을 때에는 뒷 표면의 폭이 커졌음을 확인할 수 있었다. 그리하여 관통용접의 최적 출력을 1.6kW로 하여 맞대기 용접을 실시하였다. 출력이 작을 때에는 비드 모양이 나사못머리 모양을 하고 있지만, 출력이 증가하면서 모래시계 모양으로 변화했다. 출력이 작을 때에는 표면에서의 용융풀의 용융물이 표면에서 전도됨과 동시에 시편의 깊이 방향으로 레이저빔의 에너지가 전달되지만 모재로부터의 냉각효과가 커서 관통되지 못했다.

레이저 출력이 증가하여 시편이 관통될 경우 시편의 밑부분에서의 표면장력과 열전도 때문에 모래시계 모양으로 용접비드의 단면이 형성된 모양을 Fig. 3(D)에 나타내었다.

용접된 모든 시편에서 균열이 발생되지 않았다. 이것은 모재와 용접된 시편의 용융구역 모두 상변태가 일어나지 않

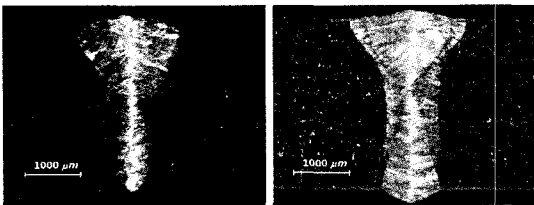
고 연성이 큰 오스테나이트 상태로 존재하기 때문이다.

### 3.3 맞대기 용접부 미세조직

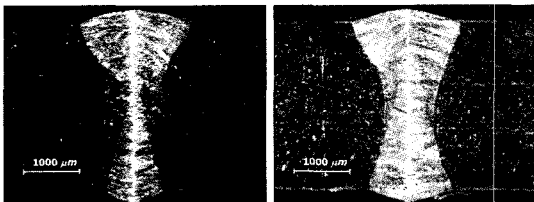
출력 1.6kW, 용접속도  $v=1.0\text{m/min}$ , 초점 위치  $z=0.5\text{mm}$ 로 맞대기 용접한 시험편의 비드 모양과 조직 사진을 각각 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다. 모니터를 통하여 맞대기 용접시 중심선의 벗어남이 없도록 하였다.

Fig. 5의 조직 사진에서 빔에 의하여 입사된 열이 모재로 전도됨에 따라 응고부위가 결정표면에서 일정한 방향을 가지고 성장하는 epitaxy 형태를 나타내고 있다. 모재 중앙부위의 용융선의 각 입자들은 용융부위의 입자들이 성장할수록 큰 성장영역을 제공하고 있다. 조성적 과냉(constitutional supercooling)으로 증가되면서 응고속도가 더욱 빨라져 cellular-dendrite가 성장되었음을 알 수 있었다. 모재로부터 응고가 시작되면서 면선단응고(planar front solidification)가 일어난 후 세포상응고(cellular solidification)가 진행되고 있다<sup>(10)</sup>.

Fig. 3(C)의 결과를 기준으로 초점 위치에 따른 맞대기 용접 특성을 비교하기 위해 출력과 용접속도는 1.6kW와  $v=1.0\text{min}$ 로 같게 하고, 초점 위치는 -0.5mm로 하여 맞대기 용접한 시험편의 비드 모양을 Fig. 6(A)에 나타냈다. 비드면의 상부 폭은 각각 1893 $\mu\text{m}$ 와 1974 $\mu\text{m}$ , 중간부 폭은 987 $\mu\text{m}$ 와 1001 $\mu\text{m}$ , 하부 폭은 1348 $\mu\text{m}$ 와 1510 $\mu\text{m}$ 로  $z=-5\text{mm}$ 일 때가  $z=0.5\text{mm}$ 일 때 보다 상부, 중간부, 하부의 비드폭이 각각 5%, 1%, 15% 증가했음을 알 수 있었다.  $z$ 의 위치를 -0.5mm로 했을 때, 용접 단면의 중앙부의 증가는 크지 않았고 시편 하부의 비드 폭은 가장 크게 증가하였다. 이는 시편하부면의 용융물이 표면장력 때문에 시편에서 분리되지 않고, 열이 주변으로 전달되었기 때문이다.



(A) P=1.4kW,  $v=1.0\text{m/min}$  and  $z=0.5\text{mm}$  (B) P=1.5kW,  $v=1.0\text{m/min}$  and  $z=0.5\text{mm}$



(C) P=1.6kW,  $v=1.0\text{m/min}$  and  $z=0.5\text{mm}$  (D) P=1.7kW,  $v=1.0\text{m/min}$  and  $z=0.5\text{mm}$

Fig. 3 Cross-sectional area of bead on plate welding

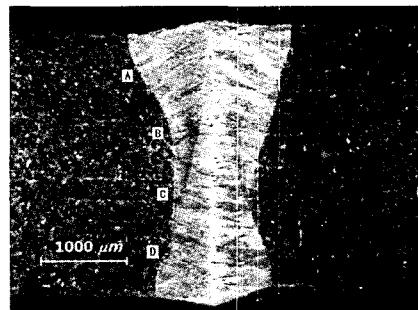


Fig. 4 Butt welding Cross-sectional area of the laser beam at P=1.6kW,  $v=1.0\text{m/min}$  and  $z=0.5\text{mm}$

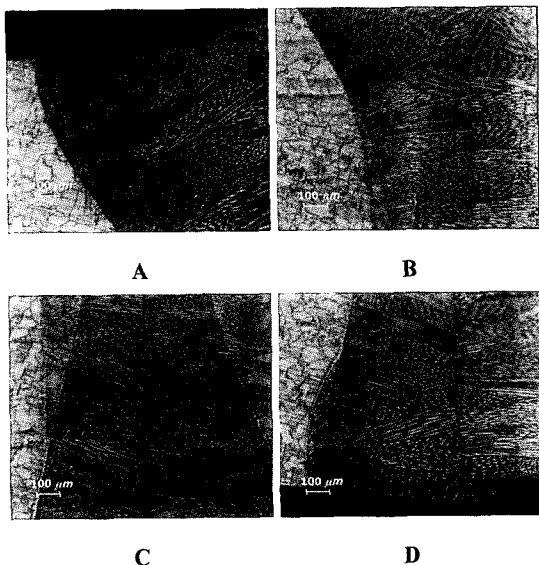
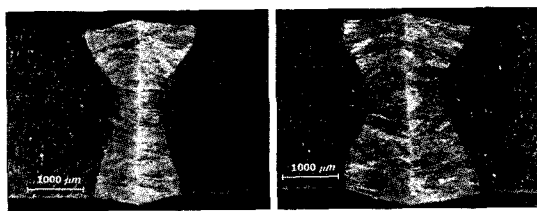


Fig. 5 Photographs showing laser butt welding(P=1.6kW, v=1.0m/min, z=0.5mm)



(A) P=1.6kW, v=1.0m/min (B) P=2kW, v=1.0m/min and z=-0.5mm and z=-0.5mm

Fig. 6 Butt welding cross-sectional area

Fig. 6(B)는 용접속도  $v=1.0\text{m/min}$ , 초점 위치  $z=-0.5\text{mm}$  일 때, 출력을 2kW로 하여 1.6kW일 때와 비교하기 위해 나타낸 것이다.

출력이 2kW일 때, 상부 폭이  $2276\mu\text{m}$ , 중간부 폭이  $1370\mu\text{m}$ , 하부 폭이  $2430\mu\text{m}$ 으로 출력 1.6kW에 비해 14%, 37%, 56% 증가하였다. Fig. 6(A)의 결과와 비교했을 때, 출력의 증가에 따라 시편하부표면의 용융폭의 증가율이 커졌다.

레이저 용접풀은 표면장력과 대류유동의 영향을 받는다. 인코넬 600의 니켈 성분이 많아 용융풀 표면에서의 대류유동에 의한 열전달 때문에 용융면적이 시편의 중심보다는 크게 나타났다. 전체적으로 모재로부터 급격한 온도구배 때문

에 용융부 경계부분에서 용융 중심부쪽으로 길다랗고 얇은 타원형 모양의 Columnar 입자성장이 관찰된다. 레이저 용접의 급가열 급냉의 특성 때문에 탄소강의 경우는 용접 비드 중앙부에 침상의 조밀한 마르텐사이트가 나타나지만 인코넬의 경우 고온에서 확산속도가 빠른 Cr 때문에 침상의 마르텐사이트 조직이 나타나지 않았다<sup>(6,7)</sup>.

### 3.4 인장강도 및 경도 시험

출력과 용접속도는 1.6kW와  $v=1.0\text{m/min}$ 로 같게 하였을 때, 초점위치  $z=0.5\text{mm}$ 일 때와  $z=-0.5\text{mm}$ 일 때의 용접결과를 비교하기 위해 인장 강도 시험을 했다. 시편은 KS B 0801 13B의 표준시편을 사용하였으며, 초기 크로스헤드 속도는  $2.54\text{mm/min}$ 로 하였다. 인장시험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 모재의 최대인장강도는 610MPa정도이었고, 초점위치가 각각  $z=0.5\text{mm}$ ,  $z=-0.5\text{mm}$ 일 때의 최대인장강도값은 590MPa로 나타났으며 모재와 비교했을 때 인장강도의 손실이 거의 없음을 알 수 있다. 연신율은 초점위치  $z=0.5\text{mm}$ 일 때가  $z=-0.5\text{mm}$ 일 때보다 더 크다는 것을 알 수 있는데 이것은 용융단면이 작기 때문이다.

경도측정은 마이크로 비커스 경도 시험기를 사용하였으며, KS B 5540의 방법을 따랐다. 출력 1.6kW, 빔 이송속도  $1.0\text{m/min}$ , 초점위치  $z=0.5\text{mm}$ 일 때의 맞대기용접부 단면의 경도 측정 결과를 Fig. 8에 나타냈다.

Fig. 8은 시편 상부 표면으로부터  $200\mu\text{m}$  지점을  $250\mu\text{m}$  간격으로 경도 시험한 것이며, 용접부의 경도값이 모재보다 약 10~15Hv 정도 작게 나타났으며, 용접중심선쪽으로 갈

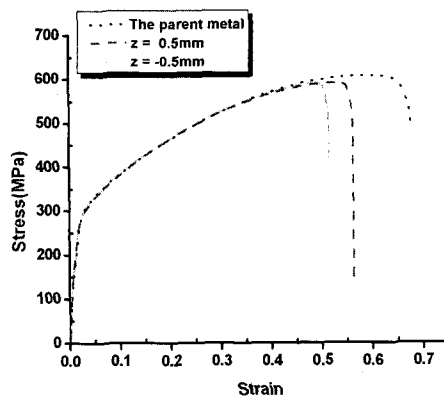


Fig. 7 Comparison of tensile test results for position of focus

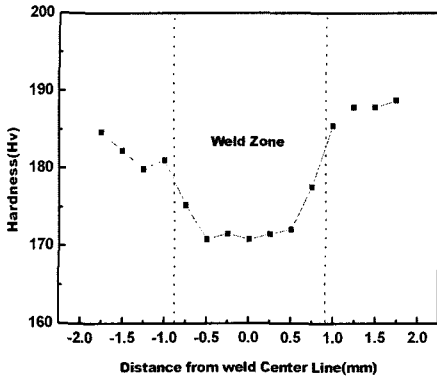


Fig. 8 Distribution of hardness in the cross section of the welded joint

수축 정도값이 줄어드는 경향을 보였다. 이는 용접부 중심부로 갈수록 조직이 조대해지기 때문이다.

### 3.5 잔류응력 시험

잔류응력은 기계적 강도와 수명에 주요한 영향을 끼치는 인자이다. 용접 공정을 출력 1.6kW, 레이저 빔 이송속도  $v=1.0\text{m/min}$ , 초점위치  $z=0.5\text{mm}$ , 보호 가스 유량  $\text{QAr}=5.5\text{ l/min}$ 로 하였을 때, 인코넬 600의 맞대기 용접에 대한 잔류응력 측정을 위하여 전자처리 스페클패턴 간섭계(ESPI : Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 이용하였다. ESPI는 레이저 스페클(Speckle)의 간섭현상으로 미소 변위를 측정한다. 물체의 변위를 측정하기 위하여 입사되는 레이저를 물체에 조사되는 물체빔(object beam)과 측정의 기준이 되는 기준빔(reference beam)으로 나누고, 이 두 빔의 간섭현상에 의해 발생하는 스페클 패턴을 CCD 카메라로 받아 들여 PC에 저장한다. 물체가 변형을 일으키게 되면 경로차가 발생하여 변형 전과는 다른 스페클 패턴을 형성한다. 이러한 두 스페클 패턴을 차감함으로써 프린지패턴(Fringe Pattern)이 형성된 결과를 분석하여 변형정도를 판단한다<sup>(11)</sup>.

변형을 주기 위한 외력으로는 레이저빔에 의한 열을 이용하였고, 시험편의 온도차에 의해 형성된 프린지패턴을 보고 잔류응력의 존재 여부를 판단하였다.

Fig. 9는 간섭계에 의한 변위 변위에 대한 위상지도(Phase map)를 나타낸 것이며, 간섭무늬가 변형되거나 굴곡된 부분이 없이 일정하게 나타난 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 변형률 분포를 3차원으로 나타낸 것이며, Fig. 11은 x축 방향에 대한 변형률 분포를 나타낸 것으로 레이저 용접은 열영향부가 작고 열변형이 거의 없기 때문에 용

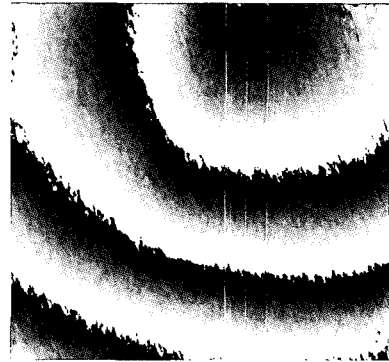


Fig. 9 Phase map and out-of-plane displacement distribution

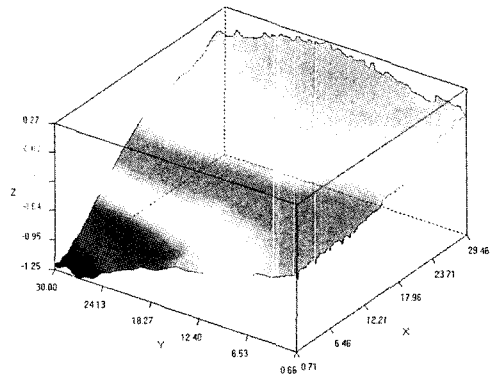


Fig. 10 Three-dimensional image

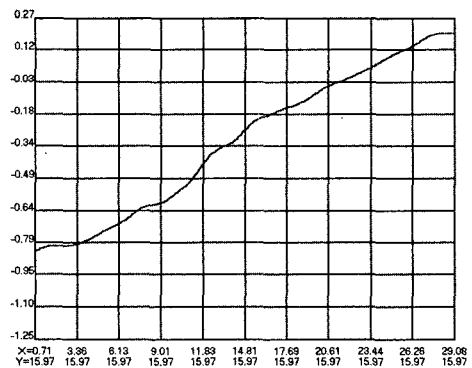


Fig. 11 Line profile to x-axis

접부에서의 특이한 변형 분포를 찾을 수 없어, 잔류응력이 거의 없는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구는 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 인코넬 600 합금의 맞대기 용접 특성을 알기 위해 수행하였다. 작업 거리, 레이저 출력 등의 용접 조건 변화에 따른 용접부의 비드 폭, 용입깊이, 비드 형상 및 금속 조직 등을 분석한 결과 레이저 빔 이송속도  $v=1.0\text{m/min}$ , 보호가스 유량  $Q_{Ar}=5.5\ell/\text{min}$ 일 때, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비드 온 플레이트 용접시 초점위치  $z=0.5\text{mm}$ 일 때 종횡비가 가장 크게 나타났다.
- (2) 비드 온 플레이트 용접방법으로 두께 3mm의 인코넬 600판재를 완전관통용접하기 위해서는 레이저 출력이 1.6kW 이상이 되어야 한다. 또한 관통용접에서 출력의 증가에 따라 시편상부에 비해 시편하부표면의 용융폭의 증가율이 커진다.
- (3) 레이저 출력을 1.6kW, 초점 위치를 각각 0.5mm, -0.5mm로 하여 맞대기 용접한 결과 모재와 근사한 인장강도 값을 얻었다.
- (4) 초점 위치  $z=0.5\text{mm}$ , 출력  $P=1.6\text{kW}$ 로 맞대기 용접했을 때, 초점위치를 -0.5mm로 하거나 출력을 2kW로 변화시켰을 때보다 좋은 용접품질을 얻을 수 있었다.
- (5) ESPI를 이용하여 잔류응력을 측정된 결과 잔류응력이 거의 없는 것으로 나타났다.

#### 후 기

위 논문은 조선대학교 2004년 교비연구비 지원으로 연구 하였습니다.

#### 참 고 문 헌

(1) Kim, J. D., Kim, C. J., and Chung, C. M., 2001, "Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 114, pp. 51~56.

(2) Han, W. J., Byeon, J. G., and Park, K. S., 2001, "Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd:YAG laser beam," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 234~237.

(3) Kim, J. D., and Moon, J. H., 2000, "C-ring stress corrosion test for Inconel 600 and Inconel 690 sleeve joint welded by Nd:YAG laser," *Corrosion Science*, Vol. 46, pp. 807~818.

(4) Kim, K. C., Lee, K. H., and Yoon, E. P., 1992, "Effect of Joint Preparation on LASER Butt Weldability of Structural Steel for Automobile Application," *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater*, Vol. 30, No. 7, pp. 124~131.

(5) Yoo, Y. T., Oh, Y. S., Ro, K. B., and Im, K. G., 2003, "Comparison of Welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel and SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser," *Transactions of the Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 3, pp. 58~67.

(6) Yoo, Y. T., Ro, K. B., Oh, Y. S., Kim, J. S., and Im, K. G., 2003, "Process Parameters of Butt Welding of SM45C using a Continuous Wave Nd:YAG Laser Beam," *Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 7, pp. 44~55.

(7) Yoo, Y. T., Oh, Y. S., Ro, K. B., Shin, H. J., and Im, K. G., 2003, "Decrease of Porosity and Cracking in the cw Nd:YAG Laser Welding of SM45C," *Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 10, pp. 65~73.

(8) Kim, T. H., 1990, *Laser Manufacturing*, Kyungmoon, pp. 154~215.

(9) Gobbi, S., Zhang, L., Norris, J., Richter, K. H., and Loreau, J. H., 1996, "High Power CO2 and Nd:YAG Laser Welding of Wrought Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 56, pp. 333~345.

(10) Kim, J. H., Kim, T. H., Chung, C. M., and Kim, C. J., 1997, "Study of Welding Behavior in Inconel 600 by Nd:YAG Laser Beam," *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater*, Vol. 35, No. 8, pp. 159~165.

(11) Jang, W. S., Lee, B. W., Kim, D. W., Jeong, J. H., Nah, J. W., Paik, K. W., and Kwon, D. G., 2002, "Evaluation of Thermal Deformations in Flip-Chip

Package Using Electronic Speckle Pattern Interferometry," *J. Kor. Inst. of Met. & Mater*, Vol. 40, No. 9, pp. 72~84.