

## 오스테나이트계 304 스테인리스강의 Nd:YAG 레이저 맞대기 용접특성

유영태<sup>†</sup> · 오용석\* · 신호준\* · 임기건\*\*  
(2003년 7월 10일 접수, 2003년 11월 28일 심사완료)

### Butt Welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser Beam

Young-Tae Yoo, Yong-Seok Oh, Ho-Jun Shin and Kiegon Im

**Key Words:** Laser Welding(레이저용접), Butt Welding(맞대기용접), Aspect Ratio(용입비),  
Spot Size(초점크기), Focal Position(초점위치), Welding Speed(용접속도)

#### Abstract

Laser beam welding is increasingly being used in welding of structural steels. The laser welding process is one of the most advanced manufacturing technologies owing to its high speed and deep penetration. The thermal cycles associated with laser welding are generally much faster than those involved in conventional arc welding processes, leading to a rather small weld zone. Experiments are performed for 304 stainless steel plates changing several process parameters such as laser power, welding speed, shielding gas flow rate, presence of surface pollution, with fixed or variable gap and misalignment between the similar and dissimilar plates, etc. The following conclusions can be drawn that laser power and welding speed have a pronounced effect on size and shape of the fusion zone. Increase in welding speed resulted in an increase in weld depth/ aspect ratio and hence a decrease in the fusion zone size. The penetration depth increased with the increase in laser power.

#### 1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스 304 (이하 STS304)는 고온산화성이 적고, 뛰어난 내식성으로 광범위한 부식환경 뿐만아니라 저온 인성이 좋아 저온 용접 구조물 재료로도 널리 사용되고 있다. 이러한 STS304의 사용범위가 증가됨에 따라, STS304 레이저 용접에 관한 연구가 CO<sub>2</sub>레이저를 중심으로 계속되어 왔다.<sup>(1~3)</sup> Nd:YAG 레이저용접

인 경우에는 평균 출력이 수백W 이내의 펄스 레이저를 이용한 용접 공정변수에 대한 연구가 선행되어 왔다.<sup>(4~6)</sup>

금속재료(Fe, Al 등)의 경우, 파장이 10.6 $\mu$ m인 CO<sub>2</sub> 레이저에 비해 파장이 1.06 $\mu$ m인 Nd:YAG 레이저는 파장이 짧기 때문에 표면에서 흡수율이 약 2~3배 이상 좋다.<sup>(7)</sup> 이러한 Nd:YAG 레이저 특성 때문에 산업체에서의 레이저용접은 CO<sub>2</sub> 레이저에서 Nd:YAG 레이저로 옮겨지는 추세이다.

따라서 본 연구에서는 연속파(continuous wave : cw) Nd:YAG 레이저를 이용한 스테인리스 용접 공정변수 및 용접특성을 연구하였다. 레이저용접 특성을 연구하기 위해 작업거리(working distance)

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 조선대학교 기전공학과  
E-mail : ytyou@chosun.ac.kr  
TEL : (062)230-7016 FAX : (062)227-6329

\* 조선대학교 대학원  
\*\* 전남대학교 물리학과

에 따른 초점크기 및 초점깊이에 대한 출력을 변화시켜가면서 예비 실험한 후, 그 결과를 기준으로 해서 레이저 용접을 했다.

맞대기 용접시 맞대는 부분의 갭(gap: g)의 영향을 평가하기 위해 최적의 레이저 용접 공정변수 상태에서 맞대기 용접을 하였다. STS304를 맞대기 용접한 후 기계적인 인장강도 평가는 기계재료편람에서 주어지는 범위(55kg/mm<sup>2</sup>)를 기준으로 평가하였다. 이를 통하여 맞대기 용접시 갭의 허용오차를 예측할 수 있는 실험식과 갭의 허용오차 범위 내에서 최적의 레이저 용접공정 변수를 제공하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장비

본 실험에 이용된 레이저 장치는 TRUMPF사의 HL2006D로서 최대출력 2.8kW 발진기를 보유한 장비이고, 가공기는 금속의 절단, 용접, 열처리 등 레이저에 의한 다양한 가공에 효과적인 적용이 가능한 장비이다. 실험 장치에 대한 모식도는 Fig. 1에 나타내었다.<sup>(8)</sup>

STS304를 Nd:YAG 레이저로 용접시 보호가스는 불활성 가스인 아르곤을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 3~4 ℓ/min로 하였다. 이때의 용접속도를 각각 2, 3, 4m/min로 변화시키면서 용접비드면과 비드폭을 측정하였다. 레이저 용접을 위한 레이저 출력과 레이저 빔 이송속도와 용접비드의 관계를 연구하기 위해 레이저 출력을 1500W, 1800W, 2000W로 변화시키면서 용접공정 변수를 연구했

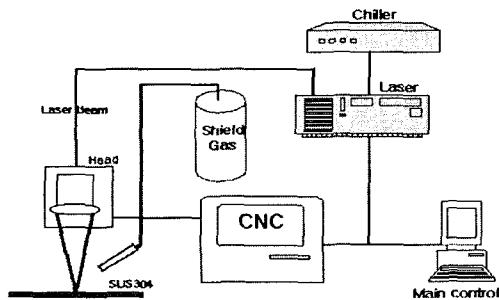


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

다.

레이저 공정변수 변화에 따른 용접단면을 관찰하기 위해 와이어 커팅으로 용접시편을 절단하고 사포로 연마 및 폴리싱 후 CuSO<sub>4</sub> 10mg + HCl 50 ml +H<sub>2</sub>O 50ml로 에칭하였다. 에칭된 용접비드 경계면은 광학현미경으로 관찰하였다. 레이저 빔을 금속 시편에 직접 조사하는(bead on plate) 방식과 맞대기 용접후 용접단면을 절단하여 이미지 분석기로 용입깊이를 측정하였다.

용접시 출력과 용접속도의 변화에 따른 종횡비(aspect ratio)와 맞대기 용접시 갭 부분의 허용오차 범위를 찾기 위해 공정변수를 변화시키면서 레이저 용접실험을 했다.

### 2.2 시편

본 연구에서 사용된 시편으로는 STS304 (wt%: 0.08C, 1.00Si, 2.00Mn, 0.04P, 0.03S, 18.00~20.00Cr, 8.00~10.50Ni)이며, 시편의 두께는 2mm이다. 용접시 시편 표면의 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시켜 가면서 실험하였다.

Fig. 2는 맞대는 부분의 갭과 단차(a)의 허용오차를 도식화하였다. 맞대는 부분의 갭(gap:g)은 시편의 두께(t)에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$g(mm) \leq \sqrt{\frac{t(mm)}{10}} \quad (1)$$

식 (1)에 의해 용접할 시편의 두께가 2mm이므로 맞대기 용접시 갭(gap:g)은  $g \leq 0.447mm$  이어야 하고, 초점크기의 40%를 넘지 않아야 한다.

맞대기 용접시편의 단차(a)는 다음 식을 이용하여 한계오차 범위내로 조정하였다.<sup>(10)</sup>

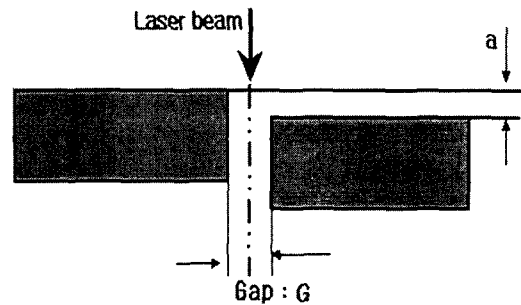


Fig. 2 Schematic diagram of the toleration face gap

$$a \leq \frac{t}{5} \quad (2)$$

식 (2)에 의하면 맞대기 용접의 맞대는 부분의 단차는 시편의 두께가 2mm 이므로 0.4mm 이하로 했다.

이러한 값을 유지시켜주기 위해 맞대기 용접부분은 사링 절단한 시편의 용접부위에서 이물질 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후 지그(Jig)를 사용하여 용접부의 갭을 0.3mm, 단차는 0.25mm 이하로 유지하였다.

시편은 공작대에 부착된 지그에 고정시키고 용접헤드에서 나오는 He-Ne 레이저광(적색)을 이용하여 용접위치를 확인하였다. 용접위치의 허용오차는 0.1mm 이하로 유지하였다. 시편을 지그로 단단히 고정시켜 용접중 열팽창에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 초점크기 및 초점깊이

레이저빔에 의한 용접은 재료의 특성에 따라 공정변수가 달라진다. 그래서 최적의 조건을 결정하기 위해서는 재료의 특성을 고려하여 레이저 용접을 실시해야 한다.

본 연구에 사용된 시편의 물성을 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용한 Nd:YAG 레이저의 빔의 초점크기(spot size:  $w_0$ ) 및 초점깊이(depth of focus:  $b$ )는 다음과 같이 정의된다.<sup>(10)</sup>

$$w_0 = \frac{2}{\pi} \lambda \frac{f}{d} \quad (3)$$

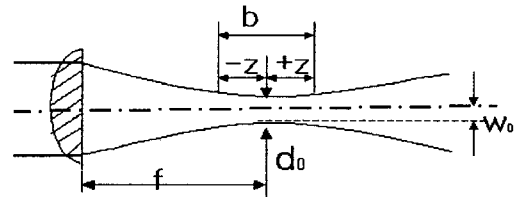
$$b = \frac{0.64\pi}{\lambda} w_0^2 = \frac{2 w_0^2}{\lambda} = \frac{d_0^2}{2\lambda} \quad (4)$$

윗식에서  $w_0$ 는 레이저 빔의 최소반경의 빔허리,  $\lambda$ 는 파장,  $\frac{f}{d}$ 는 F# (F number:  $f/d$ ),  $d_0$ 는 2  $w_0$ 로 레이저빔의 최소 빔 허리직경이다.  $z$ 는 초점깊이의 양측 위치이고, 초점깊이( $b$ )는  $2z$ 이다. 윗식으로 계산한 초점크기( $w_0$ )는 20.3 $\mu$ m, 초점깊이( $b$ )는 123.8 $\mu$ m이다.

일반적으로 레이저용접을 할 경우 초점렌즈의 초점위치에서 초점이 형성되지 않는 경우가 많다. 그 이유는 렌즈의 많은 종류의 수차 때문이다. 그러므로 레이저 용접을 하기 전에 정확한

**Table 1** Austenite 304 stainless steels material characteristics

steel	electric conductivity	reflexibility
STS 304	720 [n · m]	70 %
thermal expansion (0~982℃)	electric resistance	specific gravity
20.2 [ $\mu$ m/m/℃]	72 [ $\mu$ Ω/cm]	7.92%



**Fig. 3** Schematic diagram of the beam size and focal length

초점거리를 알기 위해 흑지(black paper)를 이용해서 초점위치를 알아낸다. 그러나 본 실험에서는 초점위치 보다 초점거리의 변화에 따른 시편(STS304)의 레이저빔(파장1.06 $\mu$ m) 흡수 변화량을 분석하기 위해 작업거리 변화에 따른 초점크기의 변화를 측정했다.

출력 600W에서 초점위치를  $z=-5 \sim +6$ mm의 범위내에서 +1mm씩 변화시키고, 레이저빔을 180ms 동안 조사시켜 변화된 초점의 크기를 Fig. 4에 나타냈다.

초점거리를 변화시킨 위치에서 레이저빔을 짧은 시간 동안 시편에 조사하였을 때 가장 작은 초점크기( $w_0$ )는 970 $\mu$ m이고, 초점깊이( $b$ )는 200  $\mu$ m였다. 실제 용접할 때와 동일한 출력(1500W, 1800W, 2000W)에서의 초점크기는 에너지 밀도가 너무 커서 주위로의 열전달에 의한 영향과 스패터링 때문에 초점의 크기를 나타내기가 어려웠다. 그래서 시편이 관통되지 않는 출력 범위에서 (400W, 500W, 600W) 작업거리와 초점크기를 비교하였다. 이중에서 대표적으로 출력이 600W인 경우 작업거리에 대한 초점크기를 Fig. 4에 정리하여 나타낸 것이다.

작업거리가 초점면적이 가장 작게 나타나는 위치에 있을 때를  $z=0$ 으로 하였고, 이 거리를 초점거리로 하였다. 초점이 시편 아래 방향에 위치할 때( $z<0$ )가 윗 방향으로 향했을 때( $z>0$ )보다 초

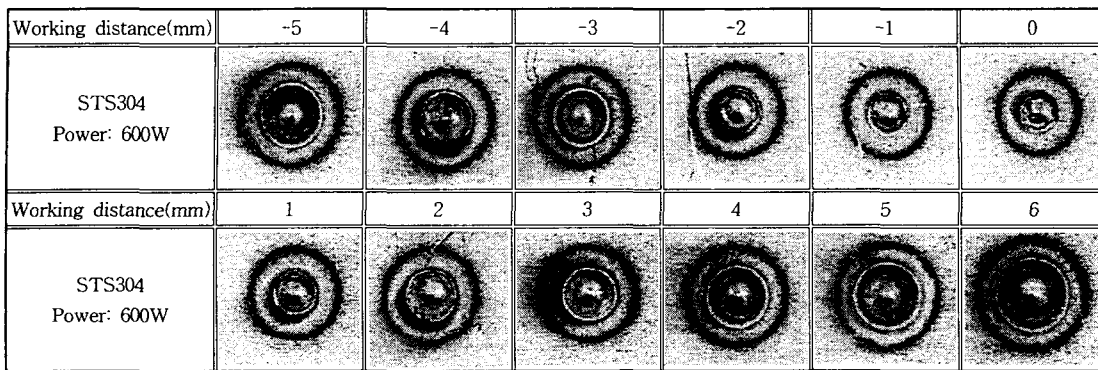


Fig. 4 Spot size and focal position according to laser power 600W

점의 크기는 작으나 용융된 양은 많았다. 초점크기가 가장 작은 부분의 중심부는 용융된 부분이 관찰되고 있으며, 이 부분을 중심으로 상하로 초점 위치를 변화시키면 레이저빔이 표면 열원으로 되어 초점의 크기는 커지지만 용융된 부분은 줄어들고 있다. 이것은 용입 깊이가 작아짐을 의미한다. 이처럼 레이저용접은 레이저빔이 조사되어 초점을 맺는 위치에 따라 시편과 상호 작용하여 용융되는 면적과 용융깊이가 매우 중요한 요소로 작용한다.

시편에 입사된 레이저빔은 재료 표면에서 반사되고, 일부는 투과되며, 나머지는 흡수된다. 금속에서 레이저빔이 재료에 흡수되는 양은 레이저빔이 금속을 투과하지 못하므로 금속 표면에서 반사되는 양을 제외한 나머지 레이저빔이 금속에 흡수된다. 레이저빔이 재료에 흡수되는 양을 측정하는 방법으로 반사되는 양을 측정하여 반사도를  $R$  값으로 흡수율을 계산했다. 반사도는 재료가 가지고 있는 전기 전도에 따른 반사율과 열 흡수율이 다르기 때문이며 다음 식을 이용하였다.<sup>(10)</sup>

$$R = 1 - 2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\sigma} \frac{\lambda}{c}} \quad (5)$$

윗식에서  $R$ 은 반사도,  $\sigma$ 는 전기전도도,  $\nu$ 는 주파수,  $c$ 는 빛의 속도,  $\lambda$ 는 레이저의 파장이다. 식 (5)을 이용하여 계산한 반사도는 87.4% 이었다. 윗 식으로 계산한 결과에 의하면 Nd:YAG 레이저가 시편(STS304)에 흡수된 에너지는 입사 에너지의 12.6%이다.

### 3.2 초점의 크기와 용접성

레이저빔의 초점크기는 시편에 미치는 에너지

밀도와 밀접한 관계가 있으므로 용접전 출력과 초점위치의 변화에 따른 초점크기를 조사해야 한다. 맞대기 용접시 초점의 크기는 용접부의 맞대는 부분의 갭 허용오차를 정하는데 중요한 요소가 되기 때문이다.

출력이 같을 경우 초점의 크기가 작을수록 용접 시편의 에너지 밀도가 높아져 심입 용접을 할 수 있지만, 초점의 크기가 일정량 이상으로 크게 되어 에너지 밀도가 낮아지면, 용접이 되지 않기 때문에 레이저빔의 초점크기에 대한 에너지 밀도는 레이저 가공에 중요한 요소가 된다.

그래서 레이저빔이 시편에 조사될 때 에너지 밀도를 다음 식으로 계산하였다.

$$I = \frac{P}{\pi r^2} \quad (6)$$

윗식에서  $I$ 는 에너지 밀도( $W/cm^2$ ),  $P$ 는 출력( $W$ ),  $r$ 은 초점의 반경( $cm$ )이다.

시편에 조사되는 에너지 밀도가  $10^5 W/cm^2$  이하에서는 레이저빔이 대부분 표면에서 반사되고, 에너지 밀도가  $10^7 W/cm^2$  이상에서는 증발에 의한 금속의 제거가 일어나게 되어 시편이 절단 또는 천공이 되므로 용접시의 에너지 밀도는  $10^5 W/cm^2$ 에서  $10^7 W/cm^2$  사이에서 용접이 가능하다.<sup>(10)</sup>

이와 같은 이유로 Nd:YAG 레이저 발전기에서 전달되는 초점크기에 대한 에너지 밀도 변화를 연구하였다.

맞대기 용접시 두 시편 사이의 갭이 레이저 빔의 초점크기보다 크면 레이저빔이 틈새로 빠져나가 용접이 이루어지지 않는다. 그렇기 때문에 맞대기 용접할 때 갭을 작게 하기 위해 맞대는 부분을 연마해서 틈새를 최소화해야 한다.

그러나 맞대기 용접할 때마다 맞대는 부분을

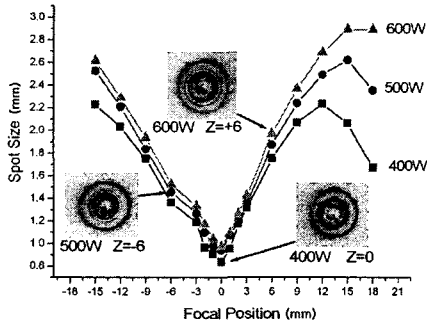


Fig. 5 The relations between focal position and spot size

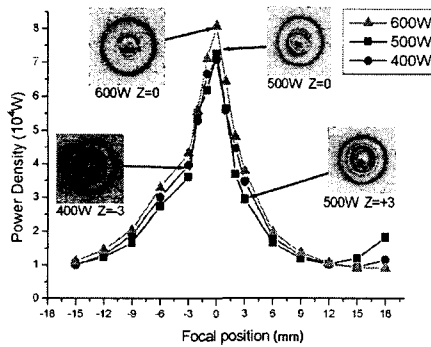


Fig. 6 The relation between focal position and power density

정밀 연마가공을 하면 공정변수가 많아져 생산성의 경쟁력이 저하되기 때문에 시편을 절단기로 절단한 상태에서 맞대기 용접 시편의 틈새를 측정 한 후 레이저빔의 초점크기와 비교하여 용접을 실시하면 생산성이 향상될 것이다. 이렇게 하기 위해선 출력별 초점의 위치와 크기의 변화에 관한 자료가 필요하다.

그래서 출력과 초점거리의 변화에 따른 초점크기의 변화를 분석하기 위해 초점거리를 -15mm에서 +15mm까지 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

조사된 레이저빔의 출력이 증가되면 시편의 열 흡수량이 증가되어 초점의 크기도 증가하였다. 시편표면을 중심으로  $z=\pm 3\text{mm}$  이내에서는 출력이

Table 2 Experimental equation

초점위치	실험식 (mm)	정확도(%)
$z=0$	$b= 0.838 + 0.0571 P$	94.3
$z=-3 \text{ mm}$	$b= 1.227 + 0.0701 P$	99.7
$z=+3 \text{ mm}$	$b= 1.315 + 0.0697 P$	99.8
$z=-6 \text{ mm}$	$b= 1.363 + 0.3229 P$	95.4
$z=+6 \text{ mm}$	$b= 1.707 + 0.1698 P$	97.5

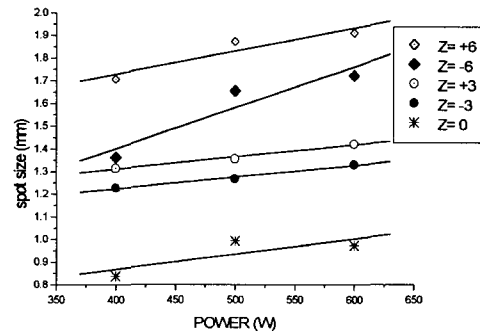


Fig. 7 The relations between power and spot size

증가해도 초점크기 증가량이 작았으나  $z=\pm 12\text{mm}$  부근에서는 초점크기의 증가량이 매우 크게 나타났다. 이것은 레이저빔의 에너지 밀도가 작아져 재료 내부로 열이 침투되지 못하고 시편 표면으로 열이 전도되기 때문이다.

그러나  $z=-12\text{mm}$  부근에서는 시편 표면에 생긴 열을 흡수한 초점면의 크기 변화는 크지 않아 표면으로 확산되는 열보다는 내부로 침투된 에너지 양이 많음을 나타낸다.

초점위치( $z$ )를 시편 표면을 중심으로 해서 아래 방향(-)과 위로 올라가는 방향(+)으로 변화시키면서 초점크기를 비교하면, 초점면이 시편아래 방향쪽이 위쪽 방향으로 이동하면서 초점크기를 측정했을 때 보다 작았다. 이런 현상은 초점이 시편 표면보다 아랫 방향에 맺히게 했을 때 열침투가 깊게 되고, 초점면을 시편의 윗방향으로 증가시켜가면서 맺히게 했을 경우 레이저 용접의 특징 중의 하나인 키홀 형성이 잘 되지 않아 시편 주위로 열전도 되는 양이 많아짐을 의미한다.

이런 현상은 초점거리의 위치  $z=+9\text{mm}$  이상 증가했을 경우 초점면의 크기가 급격히 증가하면서 침투깊이가 급격하게 떨어지는 현상에도 관찰되었다. 그러나 초점거리를 -방향(아랫방향)으로 증가시켰을 경우에는 레이저빔의 흡수량 손실이 작

아 침투깊이가 증가함도 관찰했다.

Fig. 6은 Fig. 5의 실험결과를 이용해서 레이저 빔의 초점거리의 변화에 따라 출력밀도 변화를 나타내었다. 초점거리 변화에 따른 레이저빔의 에너지밀도 역시 초점면이 시편표면보다 아래에 있는 경우가 초점면이 시편표면보다 높은 위치에 있을 때 크게 나타나 Fig. 4에서의 예측결과와 일치하고 있다.

레이저 용접의 경우 실험결과를 고찰하면 레이저 에너지 밀도가  $10^5/cm^2$  에서  $10^7W/cm^2$  사이에 용접이 가능하기 때문에 맞대기 용접할 때 겹에 레이저빔이 빠져나갈지라도, 레이저빔이 빠져나가는 양이 40%미만인 조건은 레이저 출력이 1800W일 때 용접속도를 1m/min로 하면, 초점위치가 -10mm와 +10mm 사이에서 박판용접이 가능할 것으로 판단된다.

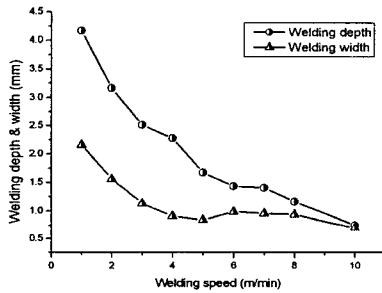


Fig. 8 The Welding width and Welding depth on the welding speed per unit time (m/min) at the power 2kW, z=-0.5, Ar=4 l/min

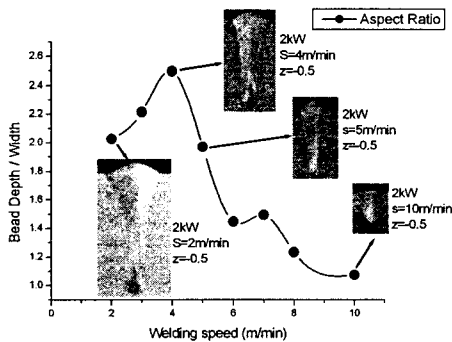


Fig. 9 The aspect ratio on the Welding speed per unit time(m/min) Power=2kW, z=-0.5, Ar=4 l/min

초점위치 변화에 따른 출력별 초점면의 크기를 Fig. 7에 나타냈고, 이때 실험값을 나타내는 식은 최소자승법으로 계산하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 7와 Table 2에 의하면 레이저의 출력의 증가에 따른 초점크기 변화에 대한 실험식이  $z=\pm 3$  내에서 STS304를 용접할 경우 출력 증가에 따른 초점크기 예측이 가능할 것으로 판단된다.

Table 2와 Fig. 7에 나타낸 실험결과 값은 출력을 600W 까지의 결과이기 때문에 출력을 1500W로 증가시켜 실험한 결과를 확인하기 위해 Table 2에 제시한 식을 이용하여 계산한 값과 비교했을 때 실험값과 비교적 잘 일치하였다.

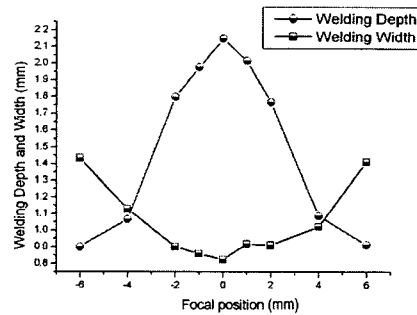


Fig. 10 The Welding width and Welding depth on the Focal position ( $z=0 \sim \pm 6$ ), Speed=2.5m/min, 1.5kW, z=0, Ar=4 l/min

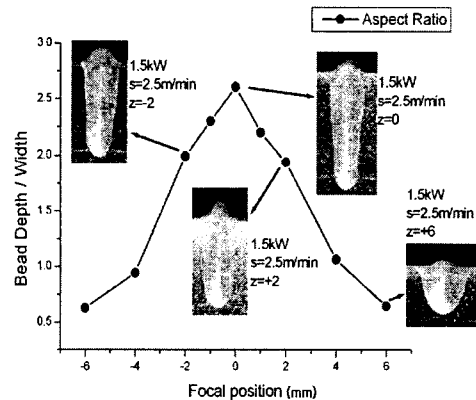


Fig. 11 The aspect ratio on the Focal position ( $z=0 \sim \pm 6$ ), Power=1.5kW, z=0, Ar=4 l/min

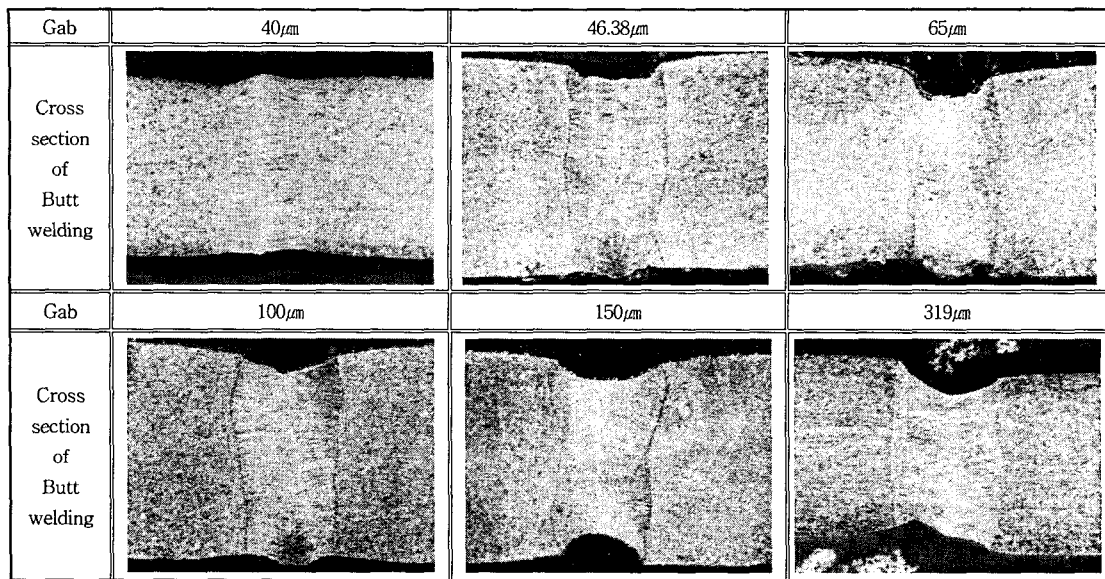


Fig. 12 Cross-section of butt welding with gab of 40 $\mu$ m, 46.38 $\mu$ m, 65 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m and 319 $\mu$ m

3.3 최적의 용접조건

빔 이송속도에 따른 용접성을 알기 위해 용입 깊이와 용융폭의 비인 종횡비를 분석하였다. 출력 2kW, 초점거리 -0.5mm, 보호가스유량 Ar=4 l/min일 때 빔 이송속도에 대한 용입 깊이와 시편표면에서의 용융폭을 Fig. 8에 나타내었다. 빔의 이송속도가 10m/min에서 용입 깊이에 대한 용융폭의 비가 1에 가까워지고 있다. 빔의 이송속도가 커지면 표면에서 키홀이 잘 형성되지 않아 레이저빔이 용융풀에서 다중 반사될 확률이 줄어들어 흡수 에너지양이 줄어들기 때문이다. 용접 공정 변수를 Fig. 8의 결과를 근거로 판단하면 STS304의 경우 출력 2000W에서는 빔 이송속도를 1m/min으로 했을 경우 초점거리 z=-0.5mm에서 두께 4mm까지는 용접이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 8을 근거로 해서 레이저출력 2000W, z = -0.5mm일 때 레이저빔 이송속도 변화에 따른 용접단면과 용접폭 비인 종횡비(aspect ratio)를 변수로 하여 대표적인 용접 단면을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 실험결과를 살펴보면 종횡비가 가장 큰 경우는 빔의 이송속도가 4m/min인 것으로 나타났다.

본 연구에서 사용한 시편의 두께가 2mm이므로 맞대기 용접할 시편의 두께에 맞는 출력과 초점 위치를 알아보기 위해 앞의 예비실험결과를 기초로 하여 출력 1500W로 3mm 두께의 시편에 레이

저 빔을 직접 조사하는 (Bead on plat) 방식으로 초점위치를 (z=0~±6mm) 변화시키면서 레이저빔을 조사하였다. 이때의 초점위치에 따른 용입 깊이와 용융폭을 Fig. 10에 나타내었고, 초점위치에 따른 종횡비와 비드의 단면을 Fig. 11에 나타내었다. 출력 1500W, 빔 이송속도 2.5m/min, 보호가스 Ar 4 l/min일 때 용입 깊이와 용융폭을 나타낸 실험결과이다. 실험결과에 의하면 2mm 두께의 시편의 경우 초점위치는 z=±1mm에서 용접을 했을 때 관통용접이 가능함을 알 수 있다. 레이저 출력이 1500W이고 레이저빔 이송속도가 2.5m/min일 때 종횡비는 초점위치 z=0에서 가장 크게 나타나고 있는 실험결과를 Fig. 11에 나타냈다.

이상의 실험결과를 기초로 출력이 1500W일 때 최적의 레이저 용접 공정변수 조건을 만족하는 맞대기 용접에서 갭의 영향을 다음과 같이 실험하였다. 용접시편을 사탕 절단 후 샌드페이퍼로 기계 가공하여 맞대는 부분의 오차를 40 $\mu$ m, 46.38 $\mu$ m, 65 $\mu$ m인 경우와 시편을 절단기로 절단하여 연마가공하지 않은 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m, 319 $\mu$ m인 상태에서 출력 1500W, 빔 이송속도 2.5m/min, 초점위치 z=0, 보호가스 Ar 4 l/min에서 맞대기 용접을 실시한 후 인장강도 실험을 실시했다.

이때 각각 맞대기 용접한 단면 모양은 Fig. 12에 나타내었다. 맞대기 용접 갭이 40 $\mu$ m정도에서

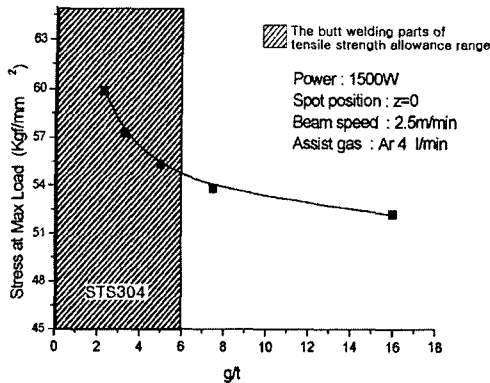


Fig. 13 The relations between tensile strength and welding gap

는 움푹 들어 부분이 없었으나 319 $\mu$ m에서는 움푹 들어간 부분이 나타났다.

이때 각각 용접한 시편의 인장시험 결과를 Fig. 13에 나타내었다. STS304를 맞대기 용접할 때 갭이 40 $\mu$ m일 경우 출력 1500W, 빔 이송속도 2.5m/min, 초점위치 z=0, 보호가스 Ar 4 l/min 에서 최대하중 1265kg<sub>r</sub>였고, 모재의 최대하중은 1314kg<sub>r</sub>였다.

맞대기 용접 갭이 40 $\mu$ m, 46.38 $\mu$ m, 65 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m, 319 $\mu$ m의 인장강도가 각각 59.8kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>, 58.5kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>, 57.2kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>, 55.3kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>, 53.8kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>, 52.2kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>로 측정되었다. STS304의 모재의 인장강도가 61kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>였고, 편람에 제시된 STS304의 기계적 인장강도가 55kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>이므로 맞대기 용접 시 허용오차는 100 $\mu$ m이하에서 맞대기 용접을 실시해야 한다.

그 갭의 허용범위는 Fig. 13에 빗금 친 영역으로 나타났다. Fig. 13에서 g는 갭의 크기이고 t는 시편의 두께이다. 갭과 시편의 두께비(g/t)가 6 이하에서는 양호한 상태의 인장강도를 얻었다.

#### 4. 결론

STS304를 Nd:YAG 레이저로 용접 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) z=0 일 때는 출력의 크기를 400W~700W로 증가시켰을 때 초기 초점에 의한 키홀(key hole) 형성으로 초점크기 변화가 거의 없다.

(2) 작업거리에 따른 출력별 초점크기는 일정한 비를 가지고 선형적으로 증가한다.

(3) 레이저 용접할 때 용접 비드 폭을 작게하고 열 영향부를 작게 접합해야 할 경우에는 작업거리를 가공물의 표면보다 높게 하는 것이 바람직하고, 용접 비드를 약간 넓게 할지라도 심입 용접을 할 경우에는 작업거리를 가공물 표면보다 밑에 두는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(4) STS304를 맞대기 용접할 때 갭이 100 $\mu$ m일 경우 출력 1500W, 빔 이송속도 2.5m/min, 초점위치 z=0, 보호가스 Ar 4 l/min 에서 인장강도는 55.3kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>로 모재의 인장강도 61kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>와의 차이는 5.7kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>였다.

(5) 본 실험연구에서는 g/t가 6이하에서는 허용범위내의 인장강도를 얻었다.

#### 참고문헌

- (1) Gobayashi shyo, 1997, "Manual for Laser Manufacturing Technology Application," pp. 155 ~157.
- (2) Batahgy-A.M.El, 1997, "Effect of Laser Welding Parameter on Fusion Zone Shape and Solidification Structure of Austenite Stainless Steels," *Material Letters* 32, pp. 155~163.
- (3) You-Hee Han and R. Andreas, Matzeit, 1994, "Laser Material Processing and Their Application for Light Structures," *J. of the KSME*, Vol. 34, No. 7, pp. 539~545.
- (4) Milwski.J.O and Barbe.M.B, 1999, "Modeling and Analysis of Laser Melting within a Narrow Groove Weld Joint," *Supplement to The Welding Journal*, pp. 109~115.
- (5) Han.W.J, Byeon.J.G and Park.K.S, 2001, "Welding charactics of the Inconel plate using a pulsed Nd:YAG laser beams," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 234~237.
- (6) Bartel.W.U, 1997, "Influence of Beam Quality when Welding with Nd:YAG Laser and CO<sub>2</sub> Laser," *Conference on Laser in Material Processing*, pp. 132~151.
- (7) Han. Y. H, 1991, "Laser Beam Processing Technique (III)," *KWS*, Vol. 9, No. 1, pp. 2~8.



- (8) Young-Tae Yoo, Yong-seok Oh, Kwan-Bo Ro and Kiegon Im, 2003, "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.
- (9) MASARU.K , 2001, "Reality of Laser Weldings," *Laser Technology*, pp. 27~33.
- (10) Kim.D.H, 1990, "Laser machining," pp. 153~154, 187 ~ 188, 213, 259.