

# 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 SM45C 맞대기용접의 공정변수

유영태<sup>#</sup>, 노경보<sup>\*</sup>, 오용석<sup>\*</sup>, 김종신<sup>\*\*</sup>, 임기건<sup>\*\*\*</sup>

## Process Parameters of Butt Welding of SM45C using a Continuous Wave Nd:YAG Laser Beam

Young-Tae Yoo<sup>#</sup>, Kyoung-Bo Ro<sup>\*</sup>, Yong-Seak Oh<sup>\*</sup>, Jong-Shin Kim<sup>\*\*</sup> and Kiegon Im<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

The Nd:YAG laser process is known to have high speed and deep penetration capability to become one of the most advanced welding technologies. This paper describes the machining characteristics of SM45C carbon steel welding by use of an Nd:YAG laser. In spite of its good mechanical characteristics, SM45C carbon steel has a high carbon contents and suffers a limitation in the industrial application due to the poor welding properties. The major process parameters studied in the present laser welding experiment were position of focus, travel speed and laser power. Optical microscope and SEM were used to investigate the microstructures of the welded zone. The experimental results showed that penetration depth of the welding process increases with laser power. Both the microstructural investigation and the theoretical calculations indicated that materials undergoes a very high heating and cooling cycle during welding process. It was also found that the austenite nucleation takes place at the initial stage and the completion temperature of austenite transformation is much higher than in the case of the arc welding.

**Key Words** : Nd:YAG laser(Nd:YAG레이저), SM45C, Laser welding(레이저 용접), Hot cracking(고온균열)

### 1. 서론

기계 구조용 탄소강은 탄소이외에 Mn, Si, P, S 등이 함유되어 있는데 강의 성질 조정은 주로 탄소량에 의해 조절된다. 일반적으로 탄소강은 탄소량이 증가됨에 따라 경도, 강도가 증가하고, 반면에 연

신율, 단면 수축율은 감소된다.<sup>1</sup> SM40C~SM58C와 같은 기계구조용 중탄소강은 냉간가공성, 용접성은 약간 취약하지만, 고주파 담금질에 의해 표면경화시켜 피로강도가 높고, 또 마모에 강한 기계부품으로 사용할 수 있기 때문에 그 용도가 광범위하며 실제로 사용량도 많다. 예를 들어, 내연기관에서 콘로

<sup>\*\*\*</sup> 접수일: 2002년 11월 20일; 게재승인일: 2003년 3월 31일

<sup>#</sup> 교신저자: 조선대학교 기전공학과

Email: ytyou@chosun.ac.kr, Tel: (062) 230-7016

<sup>\*</sup> 조선대학교 대학원

<sup>\*\*</sup> (주)이노테크닉스

<sup>\*\*\*</sup> 전남대학교 물리학과

드, 크랭크샤프트, 기어 등은 내마모성과 코스트다운 등을 고려하여 SM45C강재를 사용하고 있다. 이러한 공작기계의 주축은 절삭하중에 충분히 견디도록 인성, 강성이 풍부하고 시효변화가 없어야 하기 때문에 주축용 재료로 SM45C가 이용되고 있다. 토목기계(트랙터)는 땅에 접하는 부분의 마모가 문제가 되고, 또한 반복하중을 받는 것이 문제가 되어 슈링핀, 트랙롤러, 서포트롤러와 같은 주요부품에 기계구조용 탄소강 SM45C가 사용되고 있다.

그러나, 기계구조용 중탄소강은 저탄소강에 비해 탄소함유량이 많아 용접 영향부의 열화에 따라 각종 기계적, 금속학적 특성 저하와 함께 용접부위에서 균열과 기공이 발생하고, 급랭경화현상이 나타나므로 문제점이 많다.<sup>2</sup> 그러므로, 제조라인의 다목적화를 실현하기 위하여 SM45C를 가공할 경우 소재가 가지고 있는 고유한 성질을 상실하지 않는 용접공정을 도입하여야 할 필요가 있다.

아크용접과 같은 일반 용접법은 재료에 가해지는 에너지의 공급이 재료표면에서 되고, 내부의 용융은 열전도만으로 행해지므로, 종횡비가 큰 용입은 얻기가 어렵다.<sup>3</sup> 그러나, 레이저는 전자빔과 함께 고에너지 밀도 열원에 의해 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(aspect ratio)가 대단히 크고, 열영향부(HAZ)가 작은 용접을 할 수 있다.<sup>4,5</sup> 그리고 레이저빔의 높은 출력밀도로 매우 짧은 시간내에 용접하기 때문에 적절한 열확산과 적은 내부응력을 형성하여 용접변형이 적으므로,<sup>6</sup> 레이저 용접은 일반용접에 비해 급속조각이나 기계적 성질측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 평가를 받고 있다.

산업용으로 사용하고 있는 레이저 중 고출력 연속파형(continuous wave: CW) Nd:YAG레이저는 CW CO<sub>2</sub> 레이저와 비교해, 높은 beam quality, 안정적인 출력, 규격화된 디자인, 쉬운 출력분배 등이 쉬운 뿐만 아니라, CW CO<sub>2</sub> 레이저보다 입열이 작아서 열비틀림이 작다는 장점을 가지고 있다.<sup>7,8,9</sup> 또한, CW Nd:YAG레이저(파장:1.06 $\mu$ m)는 CO<sub>2</sub> 레이저(파장:10.6 $\mu$ m)보다 금속에 대한 흡수율이 높아서, CO<sub>2</sub> 레이저보다 낮은 미소균열을 나타내는 장점을 가지고 있어서 최근에는 Nd:YAG 레이저 사용이 증가하고 있다. 펄스(Pulse) Nd:YAG 레이저는 열영향이 작고, 입열이 적은 용접이 가능하여 반사율이 큰 재질이나, 박판용접에 가능하였지만, CW Nd:YAG 레이저는 고속용접과 후판용접이 가능하여 최근에

는 CW Nd:YAG 레이저의 용접범위가 늘어나는 추세이다.

그러므로, 본 연구에서는 2KW CW Nd:YAG 레이저를 이용해서 SM45C용접에 중요한 영향을 미치는 레이저 출력, 레이저빔 이송속도, 초점위치 등의 공정변수를 실험적으로 연구하여 최적의 공정변수를 제시하고자 한다. 또한, 레이저 맞대기 용접 공정변수의 변화에 따른 용접비드의 폭과 침투깊이 등을 측정하여 레이저 맞대기 용접의 최적의 공정변수를 찾아내기 위해 실험하였다.

맞대기용접의 공정변수 중 레이저빔과 가공재료와의 상호작용 못지 않게 맞대기용접의 경우가 공물사이의 갭영향도 무시할 수 없다. 이 갭의 영향을 최소화하기 위해 맞대기용접의 접촉면을 연마가공을 하는데, 이 연마 공정의 필요여부를 판정하기 위해 레이저빔의 스폿사이즈별 출력밀도를 계산하였다. 이 계산결과를 근거로 맞대기 용접 갭에 영향을 줄 수 있는 범위를 확인하기 위해 SM45C와 Nd:YAG 레이저빔의 상호작용 때문에 발생하는 스폿크기변화를 실험적으로 규명하여 실험식을 제시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시편

용접용 시편은 기계구조용 중탄소강 SM45C를 사용하였고, SM45C의 화학적 구성비는 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical compositions of SM45C (%)

	C	SI	Mn	P	S
SM45C	0.42~ 0.48	0.15~ 0.35	0.60~ 0.90	≤.030	≤0.035

레이저빔에 의한 용접의 최적공정변수는 모든 재료가 같지 않기 때문에 재료의 특성을 고려하여 레이저 용접을 실시해야한다. 그러므로 재료별 물성을 파악하고 있어야 하는데 본 실험식에 이용한 SM45C의 물성은 Table 2와 같다. 레이저 용접특성 실험에 사용한 시편은 100mm(L)×50mm(W)×4.5mm(T)의 크기로 절단하여 bead-on-plate 용접을 실시하였고, 맞대기 용접특성실험에 사용한 시편은 100mm(L)×50mm(W)×2.4mm(T) 크기로 절단하였다. 각각의

시편은 레이저 용접전에 시편의 표면을 아세톤으로 세척 및 건조시켜 시편표면의 이물질을 깨끗이 제거하였다.

Table 2 Characteristics of medium carbon steels

물리적성질	화학조성(%)	용융점(°C)
중탄소강	C 0.3~0.45	1420~1450
열팽창계수 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	인장강도 (kg f/mm <sup>2</sup> )	열전도율 (kcal/wh <sup>°</sup> C) (20°C)
10.73~10.92	$\geq 48$	36.5~43.5

## 2.2 레이저 용접장치

본 연구에 이용한 Nd:YAG 레이저 발전기의 파장은  $1.06\mu\text{m}$ 이고, 최대출력은 2.8KW이다. 평균출력은 2KW인 연속파이고, 레이저빔은 직경이  $600\mu\text{m}$ 인 Step-Index-type 광섬유를 통해서 전달된다. 연구에 이용된 빔발산각은 25mrad이고, 레이저 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, LASMA 1054의 작업대는 지면으로부터의 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다. 레이저 발전기에서 레이저빔은 광섬유를 통해 LASMA 1054에 장착되어있는 레이저 용접헤드에 전달된다. 작업대는 겐트리 타입으로 회전축이 부착되어 있는 가공장치로서 x, y, z 축 이송거리는  $1000\text{mm} \times 500\text{mm} \times 400\text{mm}$ 이며, x축, y축에 대한 위치정밀도는  $\pm 5\mu\text{m}$ , z축에 대한 위치정밀도는  $\pm 1\mu\text{m}$ , 반복정밀도는  $\pm 8\mu\text{m}$ 이다. 용접헤드 초점렌즈의 초점거리는 200mm이고, 초점렌즈의 직경은 60mm이다. 공작물을 가공할 때 스페터에 의한 레이저 용접헤드의 렌즈를 보호하기 위한 보조가스 노즐과 용접하고 있는 상태를 모니터링 할 수 있는 CCD 카메라가 레이저 용접헤드에 부착되어 있다. 보호가스는 불활성가스인 아르곤을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하였다. 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

## 2.3 시험방법

레이저빔의 초점크기는 시편에 미치는 에너지 밀도와 밀접한 관계가 있으므로 용접하기 전에 출력과 초점위치의 변화에 따른 초점크기 변화를 실험했다. 초점거리의 위치변화에 대한 레이저빔 조사시간은 각각의 위치에서 180ms동안 조사시켰다. 시편에 대한 CW Nd:YAG 레이저 용접의 용융 특성

을 파악하기 위한 주요공정변수는 Table 3과 같이 변화시켜 실험을 수행하였다.

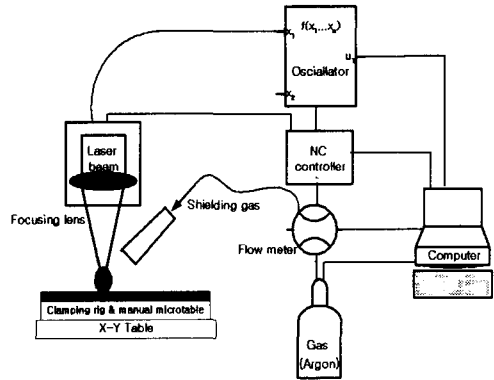


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

Table 3 Process Parameters for experimental set-up

Laser power (W)	1000 ~ 2000
Travel speed (m/min)	0.6 ~ 6
Position of Focusing (mm)	$z = -4 \sim +6$
Shielding gas	Ar (4 l/min)

용접이 완료된 시편에 대해서는 용접방향에 대하여 수직이 되는 방향으로 와이어 커팅을 하고, 사포로 연마 및 polishing(기계연마)후, 5% perchloric acid + 95% methanol을 사용하여 에칭을 하였다. 에칭한 시편에 대해서는 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 용접부의 형상(비드폭, 용입깊이 등) 및 균열 등을 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 초점크기 및 초점깊이

용접이나 열처리 할 경우, 초점을  $+1\text{mm}(z>0)$  또는  $-1\text{mm}(z<0)$ 씩 상하로 이동하면서 에너지밀도와 초점면의 크기를 결정하였다. 그러나 재질에 따라 열전도율, 전기저항, 열흡수율 등이 다르기 때문에 초점의 크기가 각기 다르다. 이와같은 이유 때문에 레이저로 금속재료를 가공할 때는 레이저빔에 대한 반사율이 에너지 흡수율과 관련하여 중요한 요인으로 작용하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 출력과 초점위치에 따른 초점크기를 구하였고, 시편에 레이저빔을 조사했을 때 초점크기를 기준으로 레이저

에너지 밀도를 계산하였다. 이때 각각 초점크기를 나타내는 위치에서 bead-on-plate 방법으로 용접하여 용입깊이, 용접단면, 중형비등을 측정했다. 실험에 사용한 Nd:YAG 레이저의 빔의 초점크기, 초점깊이는 다음식으로 계산하였다.<sup>10</sup>

$$w_0 = \frac{2}{\pi} \lambda f \# \quad (1)$$

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

윗식에서  $w_0$ 는 레이저빔의 최소반경의 빔허리, 파장  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ ,  $d_0$ 는  $2 w_0$ 로 레이저빔의 최소 빔허리직경이고,  $b$ 는 초점깊이다.  $f \#$ 는 초점거리  $f = 200\text{mm}$ 이고, 렌즈의 직경  $D$ 가  $60\text{mm}$ 이므로,  $f \# = \frac{f}{D} \cong 3.33$  이다. 윗식으로 계산한 초점크기( $w_0$ )는  $2.248\mu\text{m}$ , 초점깊이( $b$ )는  $9.586\mu\text{m}$ 이다. SM45C의 경우 출력을  $500\text{W}$ 로 했을 때 실제 측정된 초점크기( $w_0$ )는  $871\mu\text{m}$ 이고, 초점깊이( $b$ )는  $1652\mu\text{m}$ 였다. 이론식에 의한 레이저빔의 크기와 레이저빔의 침투깊이가 실제 측정된 값과 다른 이유는 레이저빔이 다른 물질과 상호작용이 없는 자유공간에서의 계산값이기 때문이다. 그러나 재질에 따라 반사율, 열흡수율, 전기전도도와 같은 물성치 뿐만 아니라 격자구조의 음자(phonon)의 진동에 따라 레이저 에너지가 재료에 흡수되는 양이 달라진다. 이와같은 이유 때문에 레이저로 금속재료를 가공할 때는 레이저빔에 대한 반사율이 에너지 흡수율과 관련하여 중요한 요인으로 작용하고 있다. 그러므로 레이저 가공을 위해서는 레이저 출력별 초점의 크기 및 정확한 초점위치를 결정하는 것이 무엇보다 중요하다.

따라서 본 연구에서는 출력을  $500\text{W}$ ,  $600\text{W}$ ,  $700\text{W}$ 로 변화시키고 초점거리는  $-15\text{mm}$ 에서  $+15\text{mm}$ 로 변화시켜가면서 초점의 크기를 측정하였고 대표적으로 출력이  $700\text{W}$ 인 경우를 Fig. 2에 나타내었다. 각각의 초점거리에서 레이저빔 조사시간을  $180\text{ms}$ 로 했기 때문에 초점면에서 높은 에너지 밀도에 의해 순간적으로 용융되었던 시편표면에서 증발물질이 발생하여 압력저하가 발생하고 용융부의 표면장력에 의해 반동적으로 돌출한 모양을 하고 있다. 에너지 밀도

초점위치	-15	-12	-9	-6
spot size				
초점위치	-3	0	+3	+6
spot size				
초점위치	+9	+12	+15	
spot size				

Fig. 2 Spot size and Focal position according to Laser power 700W

가 높은 부분인 초점면을 기준으로 했을 경우 디포커싱되는 양이 많아질수록 용융부에 비해 열영향부가 작아지는 형태를 나타내고 있다.

### 3.2 초점의 크기와 용접성

레이저빔의 초점크기는 레이저빔의 강도와 밀접한 관계가 있으므로 용접출력과 초점위치의 변화에 따른 초점크기변화를 실험했다. 맞대기 용접시 초점의 크기는 용접부의 맞대는 부분의 허용오차를 결정하는데 중요한 요소가 되기 때문이다. 그래서 본 연구에서는 맞대기 용접을 할때 맞대기 용접접에 대한 레이저빔의 초점크기를 예측할 수 있는 실험식을 얻고 초점별 레이저빔의 강도를 다음식으로 계산하였다.

$$I = \frac{P}{\pi r^2} \quad (3)$$

윗식에서  $I$ 는 레이저빔의 강도( $\text{W}/\text{cm}^2$ ),  $P$ 는 출력( $\text{W}$ ),  $r$ 은 초점의 반경( $\text{cm}$ )이다. 출력  $500\text{W}$ ,  $600\text{W}$ ,  $700\text{W}$ 에서 실험한 결과를 식 (3)을 이용하여 초점위치에 대한 레이저빔의 강도를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3의 결과에 따르면 레이저출력을 변화시킬지라도 초점위치가  $-2\text{mm}$ 에서  $+2\text{mm}$ 사이에서 레이저빔의 강도가 다른 위치에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이 결과는 이 위치에서 순간적인 열흡수율

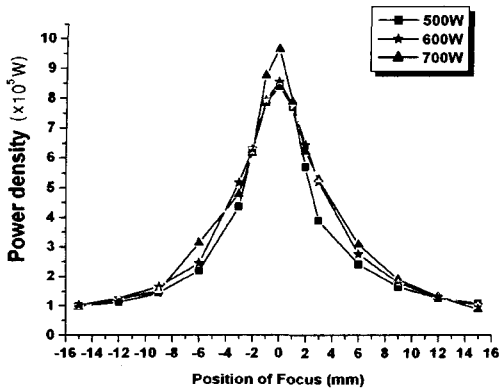


Fig. 3 The dependence of the power density on the focal position

이 높다는 의미이다.

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>

Fig. 3의 결과에 의하면 Nd:YAG 레이저의 경우 초점면이 시편표면에 있을 경우 700W부터는 SM45C일 때 박판용접이 가능할 것으로 판단된다.

Nd:YAG 레이저 출력이 700W일 때 출력에 따른 초점크기를 가지고 레이저빔의 강도를 조사해본 결과 초점위치  $z=0$ 에서의 레이저빔 강도와 초점위치  $z=+12$ 에서의 레이저빔 강도의 차이는 약 7배 정도였다. 특히  $z=-1$ mm에서는 초점면이 시편표면의 바로 밑에 있어 에너지 밀도가 큰 위치가 시편표면보다 아래에 있기 때문에 높은 에너지 밀도에 의해 기화된 기공이 분출된 현상이 관찰되었다. 그러나

디포커싱 크기가 증가되면 에너지 밀도가 작아져 용융에 의한 기포분출 현상은 현저하게 줄어들었다.

### 3.3 초점크기에 미치는 용접변수의 영향

Nd:YAG 레이저 출력 500W, 600W, 700W에서  $f=-15$ mm ~  $+15$ mm의 범위를  $+1$ 씩 변화시키면서, 각각의 초점위치에 따른 용접특성을 분석하기 위해 실험하였다.  $f=200$ mm인 초점위치에서 초점의 크기가 가장 작았고, 출력이 500W일 경우 그 크기는 0.871mm였다. 시편 SM45C에 레이저빔을 조사했을 때 초점위치 변화에 따른 초점크기의 실험값을 Fig. 4에 나타냈다.

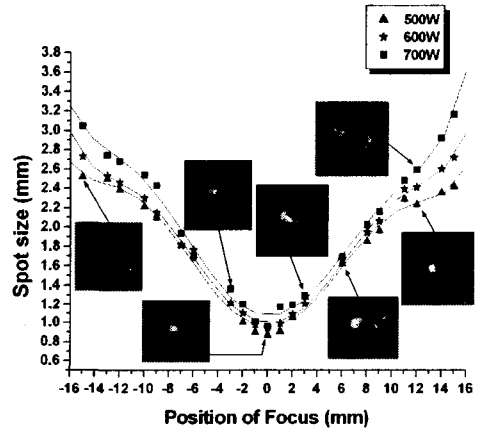


Fig. 4 The dependence of the spot size on the focal position

레이저빔에 의한 가공법은 레이저빔을 집속한 에너지를 이용하기 때문에 집속한 에너지 밀도뿐만 아니라 공간분포도 중요하다. 특히 맞대기 용접을 할 경우 맞대는 위치의 갭(gap)이 집속한 빔의 크기

Table 4 Experimental Equation using Polynomial Regression about laser beam spot size

출력(W)	초점범위	실험식	정확도(%)
500	$z=-15 \sim +15$	$w(z) = 0.98969 - 7.71562 \times 10^{-5} z + 0.02242 z^2 - 1.12849 \times 10^{-4} z^3 - 1.33711 \times 10^{-4} z^4 + 4.4054 \times 10^{-7} z^5 + 2.81835 \times 10^{-7} z^6$	98.9
600	$z=-15 \sim +15$	$w(z) = 0.99806 - 0.00788 z + 0.02324 z^2 + 4.50121 \times 10^{-5} z^3 - 1.35312 \times 10^{-4} z^4 - 5.01213 \times 10^{-8} z^5 + 2.94252 \times 10^{-7} z^6$	99.69
700	$z=-15 \sim +15$	$w(z) = 1.05084 - 0.0048 z + 0.02341 z^2 - 9.59947 \times 10^{-5} z^3 - 1.24954 \times 10^{-4} z^4 + 6.06073 \times 10^{-7} z^5 + 2.73418 \times 10^{-7} z^6$	99.25

Table 5 Experimental Equation using Polynomial Regression about laser beam spot size

출력(W)	초점범위	실험식	정확도(%)
500	$z < 0$	$w(z) = 0.86188 - 0.10524 z + 0.00828 z^2 + 5.29835 \times 10^{-4} z^3$	99.9
	$z > 0$	$w(z) = 0.8748 + 0.13244 z - 3.36861 \times 10^{-4} z^2 - 1.07339 \times 10^{-4} z^3$	99.57
600	$z < 0$	$w(z) = 0.92591 - 0.09584 z + 0.00844 z^2 + 4.57476 \times 10^{-4} z^3$	99.62
	$z > 0$	$w(z) = 0.93533 + 0.08017 z + 0.00841 z^2 - 3.89918 \times 10^{-4} z^3$	99.9
700	$z < 0$	$w(z) = 0.969 - 0.08293 z + 0.01281 z^2 + 6.11111 \times 10^{-4} z^3$	98.95
	$z > 0$	$w(z) = 0.95677 + 0.11063 z + 0.00205 z^2 + 2.40055 \times 10^{-4} z^3$	99.96

보다 크면 레이저빔이 전부 빠져나가 용접이 불가능하기 때문이다. 또 한편으로는 용접이 가능한 충분한 에너지 밀도를 가지고 있는 레이저빔으로 용접할 때 맞대기 용접의 갭을 필요이상 정밀하게 연마나 다듬질하여 용접한다면 공정수의 증가로 생산성이 저하되기 때문이다. 그래서 레이저빔의 출력별 초점위치 변화에 따른 초점크기를 실험한 Fig. 4의 결과를 기준으로 해서 실험식을 Table 4에 나타냈다. 레이저빔의 초점거리를 변화시키면서 조사한 초점크기를 대표적으로 정리한 Fig. 4의 점들은 초점거리, 초점크기 및 레이저 출력변화에 따른 실험값이고, 실선은 최소자승법에 의해 작성한 결과다. Table 4에 표시된 것처럼 레이저 출력과 초점거리 변화에 대한 초점크기 변화식은 6차항까지 진행하면 초점크기의 정확도가 99%정도가 된다. 이렇게 6차항까지 진행시켜야 정확도를 확보할 수 있는 이유는 레이저 초점면을 조사시키는 위치가 시편보다 아래방향( $z < 0$ )일 때와 위로 진행하면서( $z > 0$ ) 레이저빔이 조사될 때 표면에서 레이저빔을 흡수하는 것과 반사하는 양이 달라 좌우 대칭적으로 변화하지 않기 때문이다. 레이저빔의 초점위치를  $z < 0$ 방향으로 변화시켰을 때 초점의 크기변화와  $z > 0$ 방향으로 변화시켰을 때의 초점크기변화를 구별하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다.

Fig. 5와 Fig. 6에 나타낸 실험결과에 대한 실험식을 각각의 출력에서  $z < 0$ 와  $z > 0$ 으로 분류해서 Table 5에 정리하였다. Table 5에 정리한 것처럼 레이저 초점면을 표면을 중심으로 아래 방향으로 디포커싱하거나 위 방향으로 디포커싱했을 때의 실험식이 3차항서도 실험값을 99%이상 접근하면서 변화하는 실험식을 얻었다. 레이저 용접에서 초점크기를 중심으로 용접 비드면의 크기를 예측할 때 재질과 용접속도, 레이저빔의 종류, 초점거리, 보호가

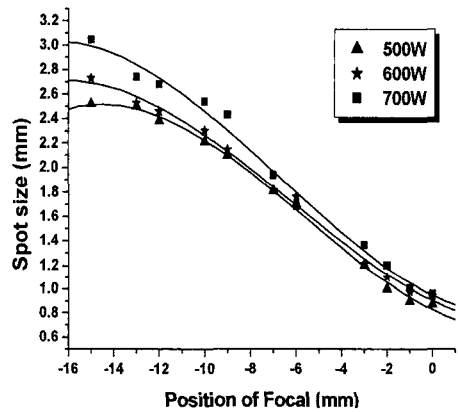


Fig. 5 Polynomial Regression for DATA

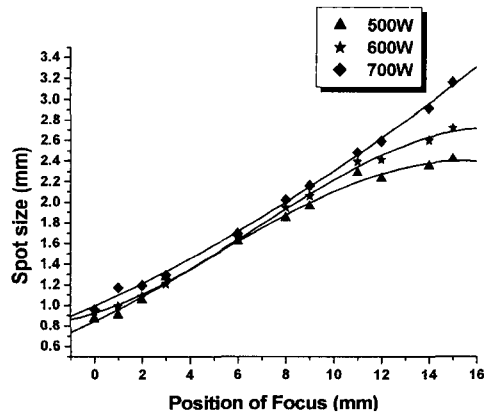


Fig. 6 Polynomial Regression for DATA

스량 등 그 변수가 매우 많다. 그러나 재질과 레이저 파장 및 보호가스가 결정되면 일정한 초점거리에서 출력변화에 따른 초점의 크기를 지금까지의 실험결과를 중심으로 수식화 할 수 있다. 이 수식

을 이용하면 맞대기 용접이 가능한 갭의 크기를 예측할 수 있기 때문에 레이저빔의 강도가 높은 범위인 초점거리  $z = \pm 2$  이내에서의 결과를 Table 6과 Fig. 7에 정리하였다.

Table 6 Experimental Equation using Polynomial Regression about laser beam spot size

초점범위	실험식	정확도(%)
$z = -2$	$w(x, z) = 0.50233 + 1 \times 10^{-3}P$	99.98
$z = -1$	$w(x, z) = 0.639 + 5.4 \times 10^{-4}P$	92.30
$z = 0$	$w(x, z) = 0.65567 + 4.5 \times 10^{-4}P$	87.94
$z = +1$	$w(x, z) = 0.232 + 0.00132P$	95.78

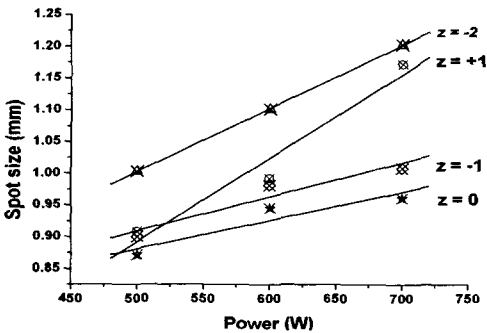


Fig. 7 The relation between power and spot size

Table 6을 보면 각 초점거리 위치에서의 출력변화에 따른 초점의 크기가 1차항에서 비교적 정확도가 높은 실험식을 얻을 수 있다. SM45C를 Nd:YAG 레이저로 용접할 경우, 출력이 수 KW 이상 증가시킬 지라도 본 실험식을 이용하면 맞대기 용접시 갭의 영향을 고려하여 용접할 수 있기 때문에 맞대기 용접하기 전에 용접면의 연마가공 여부를 결정할 수 있을 것으로 사료된다. 그뿐 아니라 레이저빔을 재료표면에 조사하면서 진행할 경우 급가열과 급냉에 의해 발생하는 자체냉각 효과 때문에 표면이 경화되는 열처리 면적을 예측하는데 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 초점거리를 변화시킨 위치에서 출력을 증가시켰을 때 초점크기 변화를 나타낸 Fig 7에 의하면  $z=0$  과  $z=-1$ mm에서는 출력의 증가에 따라 초점크기 증가율이 작았다. 그러나  $z=-1$ mm과  $z=+1$ mm와 비교하면  $z=-1$ mm일 때 보다  $z=+1$ mm일 때 출력의 증가에 따라 초점크기가 급격하게 증가

하였다. 이것은 레이저빔의 초점이 표면으로부터 떠있는 위치인  $z > 0$ 에서는 레이저빔이 표면열원으로 흡수되는 양이 많아져 표면으로 열이 전달되기 때문으로 생각된다.  $z = -1$ mm과  $z = -2$ mm인  $z < 0$ 인 경우를 살펴보면 레이저빔이 표면에서 내부로 진행하면 표면에서 반사되는 열원이 많아지고 주변으로 레이저빔이 산란되기 때문에 내부로 열이 침투하지 못하고 주위로 확산되어 초점의 크기가 커졌다. 초점의 크기가 증가된 것은 에너지 밀도가 상대적으로 낮아짐을 의미한다.

### 3.4 용입특성에 미치는 용접변수의 영향

Fig. 8은 연속파 Nd:YAG 레이저 용접에서 유량 4l/min, 빔이송속도 1000mm/min, 초점위치  $z=0$ 으로 고정시켰을 경우, 레이저 출력을 1000W에서 2000W까지 증가시키면서 Bead-on-Plate 방법으로 실험한 결과를 보여주고 있다. 출력이 낮은 경우에는 일반적인 용접에서 볼 수 있는 표면열원에 의한 용접부 용입형상과 비슷한 형태를 보이다가 출력이 커지면서 용입깊이가 거의 선형적으로 깊어짐을 볼 수 있었다. 출력 1800W 이상에서는 최종 응고부인 용접금속 중앙부에 수직으로 고온균열(Hot Cracking)이 발생하였다. 이는 용접열에 의해 용융되었던 금속이 응고과정에서 SM45C의 조성에 포함되어있는 P, S, C 성분이 원인이라 사료된다. P은 용접이 낮아 국부적으로 응고온도를 낮추어 고온균열 감수성을 증가시키고, S은 C와 비교해서 확산에 의한 이동속도가 늦어서 응고중에 편석이 심하게 일어나기 때문에 균열감수성을 증가시킨다. 또한 C는 오스테나이트 안정화원소로 고온균열을 촉진하는데 Borland

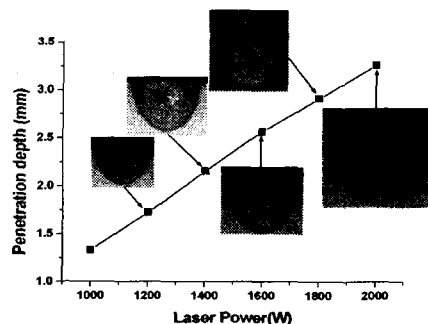


Fig. 8 Effect of laser power on the weld penetration

는 0.15%C 이상에서는 고온균열이 발생한다고 하였다.<sup>11,12</sup> 특히 2000W로 심입용접한 용접비드면의 중앙부에 고온균열현상이 현저하게 관찰되고 있는데, 이것은 용접부에서 용융금속의 절대량이 매우 적고, keyhole내부의 온도가 매우 높기 때문에 가스의 팽창 압력과 용융금속의 표면장력등 복잡한 상관관계에 따라 격심한 용융금속의 교반효과 때문에 발생한다.

또한 레이저빔이 시편에 조사되었을 때 가열 및 냉각 싸이클에서 모재가 가지고 있는 온도에 비해 용융부의 온도는 매우 높기 때문에 온도구배가 급격하여 응고시 조직사이에 미세응력이 국소적으로 존재하게 되고, 용접부가 응고하는 단계에서 중심부에 아직 용액으로 잔류해 있는 액상에 의해 메워지지 못하고 균열이 발생하였다고 생각된다. 용접 고온균열은 용융pool의 경계면인 고-액 경계면에서 응집력이 용접부와 수직방향으로 가해진 응력보다 낮을 때 용접선 중심을 따라 균열이 발생하는 현상을 Fig. 8에 나타냈다. 레이저빔이 시편에 조사되면 재질의 입자는 입사파의 진동수로 진동하며 전자파를 재방출하고, 전자-진동자가 표면가까이에 놓인 전자들이 입사된 빛에 의해 진동하게 되며 복사에너지를 방출하게 된다. 이때 SM45C의 조성분 중에 MnS 와 FeS의 용융점은 1100~1200℃인데 비해서, Fe는 1538℃이기 때문에 철이 용융되기전에 MnS 와 FeS가 용융되어 기포가 형성되고, 이 기포가 부력 때문에 용융풀에서 상승한다. 이때 레이저빔이 빠른 속도로 진행하면서 열의 냉각속도가 빠르기 때문에 용융풀이 표면에서 냉각되어 기포가 중간에 포획된 결과가 Fig. 8의 그림중 1200W일 때 나타났다.

레이저빔에 의한 용접은 심입용접이 가능하기 때문에 레이저 출력에 대한 용융폭과 용융깊이의 비인 종횡비(Aspect ratio)를 Fig. 9에 나타내었다. 레이저빔의 출력이 작으면 에너지밀도가 작아 keyhole형성이 효과적이지 못해 용융풀의 깊이가 작아져 종횡비가 작으나, 출력을 증가시키면 출력 밀도가 커져 순간적으로 형성된 keyhole에서 에너지 흡수율이 급격하게 증가하여 종횡비가 커진다. 용접금속의 종횡비가 증가할수록 고온균열의 발생이 커지는 것을 Fig. 9에 나타냈다. 종횡비가 큰 경우, 즉 좁고 깊은 용접금속의 모양은 주상정이 내부로 성장하기 때문에 중심부에 편석이 심하게 일어나고 수축변형이 중앙에서 집중적으로 작용하여

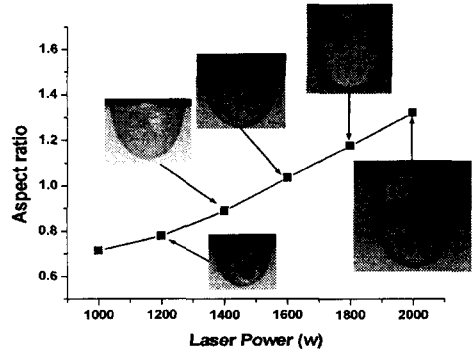


Fig. 9 Effect of laser power on the weld penetration

고온균열이 크게 나타났다. 따라서, 고온균열을 최소화하기 위해서는 최적 종횡비를 연구할 필요가 있다고 사료된다. Fig. 9의 실험결과를 기본으로 하여 출력증가에 대한 종횡비 변화율을 실험으로 나타내면  $AR=6.23143 \times 10^{-4}p+0.05029$  이고, 정확도는 98.6%이다. 여기에서 AR은 종횡비이고  $p$ 는 출력이다.

초점거리  $z=0$ , 레이저빔 이송속도 1000mm/min, 유량 4l/min로 했을 때 레이저 출력변화에 대한 레이저 용접비드 실험결과를 나타낸 Fig. 9를 살펴보면 종횡비가 큰 심입용접인 동시에 고온균열이 미세하게 발생한 부분은 1800W였다. 위와같은 조건에서 이번에는 초점위치 변화에 대한 용접비드의 단면을 관찰하기 위해 초점위치를 변화시켜 용접한 후 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다.

시편의 표면보다 낮은 위치에 초점면을 집중시킨  $z=-1mm$ 의 경우, 내부에 레이저빔의 에너지가 집중되어 용융된 pool에서 격심한 교반작용에 의해

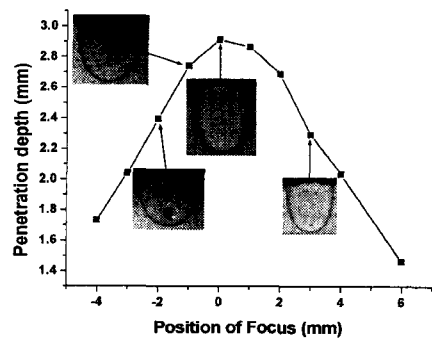


Fig. 10 Relation between position of focus and penetration



시편표면의 측면을 가열하게 되어 용입폭이 깊이에 비해 커지게 된다.  $z$ 가  $-2\text{mm}$ 위치에서는 시편내부에 집속된 레이저빔의 높은 에너지 밀도에 의해 용융될 때 발생한 기포가 한데 모여 있는데, 이것은 용융pool의 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 기포들이 방출되지 못하여 포획된 형태로 남아있다. 그러나  $z>0$  위치로 이동했을 경우에는 기포 발생량이 상대적으로 크게 줄어들었다.

### 3.5 고온균열

Fig. 9의 결과에 따르면 빔이송속도를  $1000\text{mm}/\text{min}$ 로 하고 레이저출력은  $1600\text{W}$ 일 때 기공과 고온균열이 발생하지 않았고, 용융면이 비교적 양호했지만  $1800\text{W}$ 에서는 미세하게 고온균열이 발생했다.  $1800\text{W}$ 일 때 발생한 용접조건이 레이저빔의 이송속도와 관계 분석하기 위해 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

초점위치가  $z=0$ 에서 레이저빔 이송속도가  $1000\text{mm}/\text{min}$ 보다 느린 경우, 용접부 중앙에 수직으로 고온균열이 발생하였고, 이송속도가  $5000\text{mm}/\text{min}$  이상에서는 용융단면에 비해 상대적으로 큰 기공이 나타났다. 고온균열은 같은 조건에서 출력이 증가할수록 발생할 확률이 높다는 것은 Fig. 8의 결과에서 살펴보았는데, 일반적으로 레이저출력을 증가시키면 용융금속의 양을 증가시키고 용입깊이도 깊어지기 때문이다. 그 결과 응고 수축량이 어느정도 커질 것이고 완전응고에 소요되는 시간도 다소 길어질 것이다. 그러나 용입깊이가 커진다는 것은 같은 용융 금속량을 가지더라도 고-액 경계면의 면적을 넓히는 효과가 있기 때문에 응고속도를 빠르게

작용하여 고체 경계면 쪽으로 수축력을 증가시킨다. 이때 용접면의 중심부에 용액으로 잔류해있는 용액을 매우지 못해 내부에 고온균열이 발생할 수 있는데, 이런 현상이 레이저빔의 이송속도와 관계 있음을 나타내기 위해 Fig. 11에 정리한 것이다.

Fig. 11의 결과에 의하면 레이저빔의 이송속도가 증가할수록 용접부의 고온균열이 발생하지 않고 있음을 나타내고 있다. 용접속도가 증가하면 급속한 냉각효과를 나타내는 영역이 좁아져 초기균열 길이를 억제하는 효과가 있다고 생각된다. 따라서 용접속도가  $5000\text{mm}/\text{min}$ 이하에서는 용접속도가 빨라질수록 고온균열이 적게 나타나는 것으로 사료되는데 이는 통상의 아크용접과는 크게 다른 현상이다. 레이저출력이  $1800\text{W}$ 이고 레이저빔의 이송속도가  $5000\text{mm}/\text{min}$ 이상에서는 Fig. 11에 나타낸 것과 같이 양호한 용접상태를 만들 수 없다. 레이저빔의 이송속도가 증가함에 따라 침투깊이가 감소하는 경향은 용접속도가 증가함에 따라 시편에 전달되는 입열량이 감소하기 때문이다.

Fig. 12는 레이저 출력이  $1800\text{W}$ 일 때 레이저빔의 이송속도 변화에 대한 종횡비의 변화를 나타냈다. 레이저빔의 이송속도가  $1000\text{mm}/\text{min}$ 부근까지는 종횡비가 증가하지만  $1000\text{mm}/\text{min}$ 이상 빠른 속도에서는 종횡비가 감소하였다. 종횡비가 크다는 것은 심입 용접을 의미하며 종횡비가 작다는 것은 용접비드의 폭이 깊이에 비해 크다는 의미이다. 레이저빔의 이송속도가 증가하여  $5000\text{mm}/\text{min}$ 정도 되면 레이저빔에 의한 에너지가 대부분 표면에서 반사되어 keyhole을 형성하지 못하기 때문에 레이저용접의 특성을 살리지 못한다.

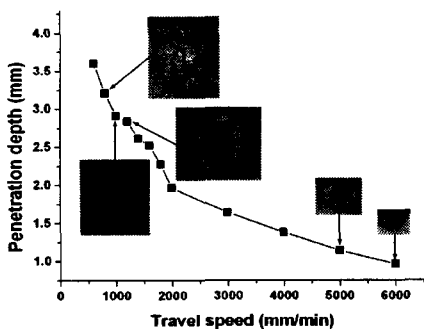


Fig. 11 Effect of travel speed on the weld penetration

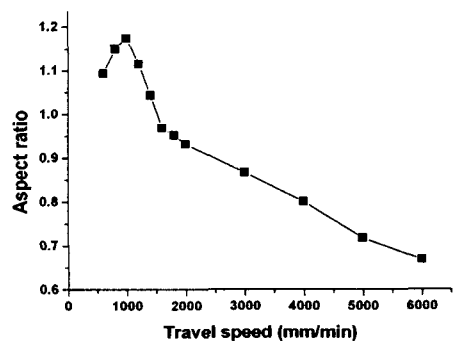


Fig. 12 Effect of travel speed on the weld penetration

### 3.6 용접부 조직

Fig. 13에서 Fig. 15는 용접 비드면의 단면을 절단하여 조직사진을 나타내었다. Fig. 13은 레이저 용접의 용융부를 나타낸 것으로 마르텐사이트 조직으로 되어있다. 이것은 에너지 밀도가 높은 레이저빔이 시편에 조사되어 용융된 시편에 대해 빠른속도로 레이저빔이 진행하면 시편이 급랭되면서  $\gamma$ -격자는 작은  $\alpha$ -격자에 겹치게 되고 하나의 철원자로 채워진 공간격자에는 속박용체를 가진 탄소원자가 채워진다. 이 강박상태가 격자를 왜곡시킴으로써 재질이 매우 강하게 되고 침상조직인 마르텐사이트로 된 것이다.

Fig. 14는 열영향부(heat affected zone)를 나타내고 있다. 용접금속은 대기에 열이 손실되는 것은 물론 금속이 용접됨으로써 전도에 의한 금속 열추출 때문에 매우 급속한 냉각상태로 응고된 부분이다. 모재의 띠모양 조직을 그대로 유지하고 있어서 이 영역에서는 퍼얼라이트만이 조직변태를 일으켰음을 알 수 있다.

Fig. 15는 모재(base metal)를 나타낸다. 페라이트(Ferrite)와 퍼얼라이트(Pearlite) 조직으로 구성되어 있다. 이 조직을 자세히 살펴보면 층상은 비교

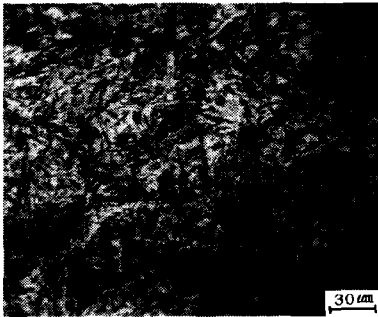


Fig. 13 Fusion zone



Fig. 14 Heat affected zone

적 불규칙한 형상을 나타내는 것을 볼 수 있다.

레이저 용접에서 여러 가지 중요한 점이 많이 있지만 용접단면 내부결함을 최소화하는 것이 무엇보다 중요하다. 내부결함 중 Fig. 11에서 살펴본 고온균열은 용접부 건전성 평가에 매우 중요하다. 비교적 용입깊이가 깊고 용접폭이 좁은 용접조건을 나타낸 Fig. 11의 결과는 레이저출력이 1800W이고 빔이송속도가 1000mm/min 인 조건이었다. 이와 같은 용접변수를 근거로 해서 레이저출력에 대한 레이저빔의 이송속도비가 일정할 때, 용접특성을 분석하기 위해 레이저빔의 출력을 P, 레이저빔의 이송속도를 v로 해서 실험했다.

Fig. 16에 나타낸 것과 같이 단위길이당 에너지가 같을지라도 레이저 출력이 크면 용입깊이가 커진다는 것을 알았다. 이것은 단위길이당 에너지보다는 초기출력이 keyhole 형성에 영향이 크다는 것을 의미한다. 단위길이당 에너지가 같을 때 중형비의 변화율을 Fig. 17에 나타냈다. P/v값이 1과 1.5에서는 중형비 증가율이 매우 커서 심입용접에 유리하다고 생각된다.



Fig. 15 Base metal

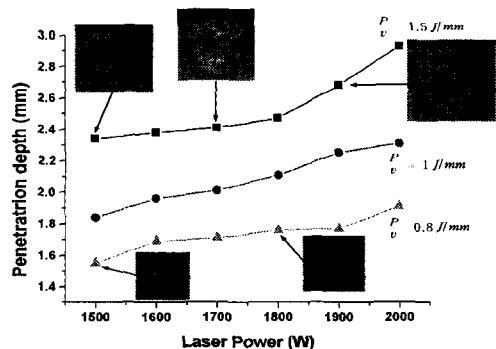


Fig. 16 Dependence of penetration depth on the laser power

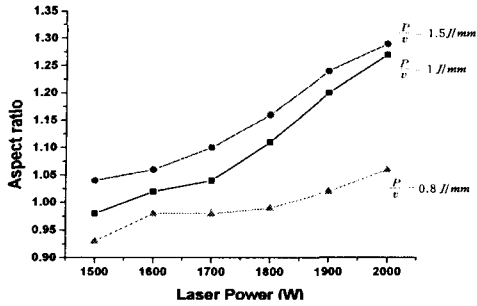


Fig. 17 Dependence of on the laser power

### 3.7 맞대기 용접과 인장시험

지금까지의 실험결과를 기초로 해서 두께가 2.4mm인 SM45C를 맞대기 용접했다. SM45C의 최적의 용접공정변수는 레이저빔의 출력을 1500W, 빔이송속도 1000mm/min, z=0, 보호가스 아르곤 4l/min이었다. 이때 용접시편을 맞대는 부분의 갭(gap)이 80μm일때 맞대기 용접한 용접단면을 Fig. 18에 나타냈다. Fig. 18에 의하면 앞에서 언급한 기공이나 고온균열현상이 나타나지 않았다. 위에서 설명한 용접의 건전성을 검증하기 위해 인장시험을 했다. SM45C의 경우 모재 인장강도는 Table 2에 표시한 것처럼 48kgf/mm<sup>2</sup>이상이면 구조용 탄소강으로 산업체에서 사용할 수 있다. Fig. 18에 나타낸 용접시편을 인장시험한 결과 용접부위 이외에서 절단되어 용접상태가 매우 양호한 것으로 사료된다.

Fig. 19는 출력1800W, 빔이송속도 1800mm/min, z=0, 보호가스 아르곤 4l/min, 용접시편을 맞대는 부분의 갭을 80μm로 해서 맞대기 용접해서 용접단면을 나타낸 것이다. 레이저빔의 에너지 밀도가 Fig. 18의 시험결과보다 크기 때문에 관통용접이 보다 분명하게 나타났고, 용접비드의 윗부분이 약간 더 부풀려 응

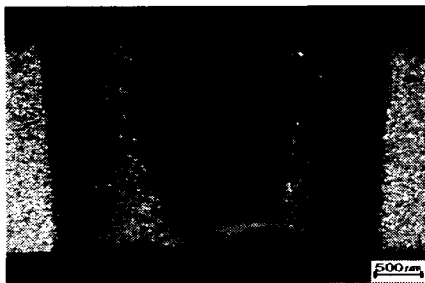


Fig. 18 Butt welding (P=1500W, v=1000mm/min)



Fig 19 Butt welding (P=1800W, v=1800mm/min)

고되었다. 인장강도는 용접비드면 아래에서 노치 현상이 나타나 용접부위에서 절단되었다. 이때 인장강도값은 37.67kgf/mm<sup>2</sup>으로 떨어졌다.

이와 같은 레이저 용접 공정변수를 기초로 하여 맞대기 용접에서 맞대는 부분의 갭에 대한 용접특성을 알아보기 위해, 맞대는 부분의 오차를 180μm, 200μm, 280μm인 상태에서 맞대기 용접을 실시한 후 인장강도 실험을 실시하였다. 맞대기 용접에서 갭의 영향을 실험한 결과를 종축은 인장응력, 횡축은 맞대기 용접할 때 시편사이의 갭(g)과 시편의 두께(t)의 비(g/t)로 해서 Fig. 20에 나타내었다. SM45C의 경우 본 실험조건에서 g/t의비가 0.1정도까지는 Table 2에 나타낸 인장강도보다 크게 나타나 양질의 용접상태를 보이고 있다. 그러나 g/t의 값이 0.12 이상이 되면 용접할 때 충분히 갭을 채우지 못해 Table 2의 기준 인장강도에 미치지 못하였다. Fig. 20의 실험결과로부터 맞대기 용접할 때 용접조건 중에 하나인 갭의 허용정도를 예측할 수 있어 맞대는 부분의 가공정도를 결정할 수 있을 것으로 판단한다.

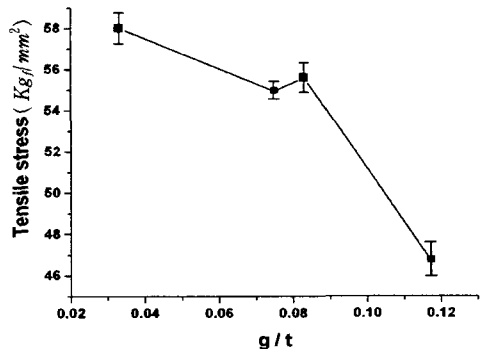


Fig. 20 Dependence of Tensile stress on the g/t

#### 4. 결론

#### 참고문헌

연속과 Nd:YAG 레이저를 이용하여 두께 4.5mm의 기계구조용 중탄소강 SM45C를 bead-on-plate 용접할 때 용접조건에 따른 용입특성의 영향을 조사하였고, 두께 2.4mm에서의 SM45C를 맞대기 용접할 때 겹에 대한 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 출력이 낮은 경우에는 일반적인 용접에서 볼 수 있는 표면열원에 의한 용접부 용입형상과 비슷한 형태를 보이다가 출력이 커지면서 용입깊이가 거의 선형적으로 깊어짐을 볼 수 있었다.

2. 출력 1800W 이상에서는 최종 응고부인 용접 금속 중앙부에 수직으로 고온균열이 발생하였다.

3. 초점위치에 대한 실험결과 시편의 표면보다 낮은 위치에 초점면을 집중시킨  $z=-1\text{mm}$ 의 경우, 내부에 레이저빔의 에너지가 집중되어 용융된 pool에서 격심한 교반작용에 의해 시편표면의 측면을 가열하게 되어 용입폭이 깊이에 비해 컸다.

4. 레이저빔의 이송속도가 증가할수록 용접부의 고온균열이 발생하지 않았다. 용접속도가 증가하면 급속한 냉각효과를 나타내는 영역이 좁아져 초기균열 길이를 억제하는 효과가 있다고 생각된다.

5. 용접 후 조직사진을 관찰한 결과 모재는 페라이트-펄라이트 조직이 나타났고, 용해부는 마르텐사이트 조직이 나타났으며, 열영향부는 모재의 띠모양을 그대로 유지하고 있었다.

6. 단위길이당 에너지가 같을지라도 레이저 출력이 크면 용입깊이가 커진다는 것을 알았다. 이것은 단위길이당 에너지보다는 초기출력이 keyhole 형성에 영향이 크다는 것을 의미한다.

7. 맞대기 용접 후 인장강도 실험결과 g/t의 비가 0.1정도까지는 Table 2에 나타낸 인장강도보다 크게 나타나 양질의 용접상태를 보이고 있다. 그러나 g/t의 값이 0.12 이상이 되면 용접할 때 충분히 겹을 채우지 못해 Table 2의 기준 인장강도에 미치지 못하였다.

#### 후 기

한국과학재단 연구비(RRC)와 광특화연구센터 장비를 이용해서 연구를 수행하였으며, 관계자에게 감사드립니다.

1. Han, Sang-Gu, "Metal Heat treatment Handbook, pp. 234-235.
2. Bang, Han-Sur, Kim, Young-Pyo, "A Study on the Weldability of S45C Medium Carbon Steel for Machine Structural Use by Nd:YAG Laser," Proceeding of the 2001 Annual Autumn Meeting of Korean Welding Society, pp. 134-139, 2001.
3. Park, Sung-Do, "Laser Manufacturing," Daekwang Book, pp. 165-172, 1997.
4. Kim, Jae-Do, Kim, Cheol-Jung, Chung, Chin-Man, "Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG lasers," Journal of Materials Processing Technology 114. pp. 51-56, 2001.
5. Havrilla, D., "Laser welding of stainless tube," Fabricator, Vol. 19, No. 6, pp. 24-25, 1999.
6. XIE, J., KAR, A., "Laser welding of Thin sheet steel with surface oxidation," The Welding Journal Research Supplement, 348-s, 1999.
7. Tzeng, Y.-F., "Process Characterisation of Pulsed Nd:YAG laser seam welding," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 16, pp. 10-18, 2000.
8. Loeffler, K., "High power CW Nd:YAGs advance," Industrial Laser Review, pp. 13-16, July 1996.
9. Radj, D., Koller, R., Dilthey, U., Buxbaum, "Laserschweissgerechtes Konstruieren in stuttgart," 1993.
10. Kim, T. H., Laser Manufacturing, Kyung Moon, 1pp. 154-215, 1996.
11. Jeong, H. C., "Weld Hot Cracking in C-Mn Steel," The Korean Welding Society, Vol. 17, No. 5, 1999.
12. Borland, J. C., "Suggested explanation of hot cracking in mild and low alloy steel welds," British Welding Journal, Vol. 8, pp. 526, 1961.