

오스테나이트계 스테인리스강과 SM45C의 연속파형 Nd:YAG 레이저 용접특성비교

유영태*, 오용석⁺, 노경보⁺, 임기건⁺⁺
(논문접수일 2002. 12. 16, 심사완료일 2003. 5. 6)

Comparison of Welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel and SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser

Young-Tae Yoo*, Yong-Seok Oh⁺, Kwan-Bo Ro⁺, Ki Gun Lim⁺⁺

Abstract

Welding characteristics of austenite 304 stainless steel and SM45C using a continuous wave Nd:YAG laser are experimentally investigated. 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 welding processes, leading to a rather small weld zone. Experiments are performed for 304 stainless steel plates changing several process parameter 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 and plates, etc. The Nd:YAG laser welding process is one of the most advanced manufacturing technologies owing to its high speed and penetration. This paper describes the weld ability of SM45C carbon steel for machine structural use by Nd:YAG laser. The follow 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.

Key Words : Laser Welding(레이저용접), Aspect Ratio(종횡비), Spot Size(초점크기), Focal Position(초점위치), Welding Speed(용접 속도), SUS304, SM45C

* 주저자, 조선대학교 기전공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375
+ 조선대학교 대학원
++ 전남대학교 물리학과

1. 서론

기계구조용 강인 SM45C와 내식성이 강한 오스테나이트계 304 스테인리스강을 Nd:YAG 레이저로 용접하여 특성을 비교 분석하였다. 레이저 용접은 레이저빔을 이용하여 용접할 때 대부분 별도의 용가재를 사용하지 않고 빠른 속도로 용접할수 있는 특징이 있어 많은 관심이 집중되고 있다. 레이저 용접은 열영향부는 작지만 집중된 에너지 빔을 사용하기 때문에 대단히 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문이다.

용접 입열이 적고 급가열, 급냉각 성질이 있기 때문에 열변형이 적고 여타의 용접 방법에 비해 정밀도가 높아 정밀 기계 산업분야로 그 적용범위가 확대되고 있다.

그러나 레이저를 이용하여 용접할 때는 공정변수를 면밀히 관리해야 하는 어려움이 있다. 레이저빔으로 용접할때 성능에 영향을 주는 요소로는 레이저 파장, 레이저 출력밀도, 초점거리, 보호가스, 레이저빔 이송속도, 재질의 흡수율이 따라 용접결과가 달라지기 때문이다.

그래서 본 연구에서는 오스테나이트계 304 스테인리스강과 SM45C를 Nd:YAG로 용접 했을때 그 결과를 비교했다.

본 연구에서 이용한 SM45C는 내연기관에서 코로트, 크랭크샤프트, 기어 등은 내마모성과 코스트 다운등을 고려하여 사용하고 있다. 뿐만 아니라 선반, 드릴, 밀링과 같은 공작기계의 각종축과 나사, 기어에도 이용되고 있다. 이러한 공작기계의 주축은 절삭하중에 충분히 견디도록 인성, 강성이 풍부하고 시효변화가 없어야 하기 때문에 주축용 재료로 SM45C가 이용되고 있다. 그러나, 기계구조용 중탄소강은 저탄소강에 비해 탄소함유량이 많아 용접 영향부의 열화에 따라 각종 기계적, 금속학적 특성 저하와 함께 용접부위에 균열과 기공이 발생하고, 급랭경화현상이 나타나므로 문제점이 많다⁽¹⁾. 그러므로, 제조라인의 다목적화를 실현하기 위하여 SM45C를 가공할 경우 소재가 가지고 있는 고유한 성질을 상실하지 않는 용접공정을 도입하여야 할 필요가 있다.

SM45C를 레이저 용접할 때 재질 변화에 따른 용접결과를 비교하기 위해 이용한 오스테나이트계 304 스테인리스강은 저온 취성을 일으키지 않고, 저온 인성이 좋아, 저온 용접 구조물 재료로 널리 사용되며, 고온 산화성이 적고 뛰어난 내식성 때문에 산이나 알칼리 등의 광범위한 부식 환경에 많이 사용하고 있다. 이러한 특성 때문에 식기 및 주방기구류, 배관, 온수기, 보일러, 욕조, 머플러, 건축 내·외장

의 건자재용으로 스테인리스 중 가장 널리 사용되고 있는 강종으로 오스테나이트계 스테인리스강이 산업 전반에 걸쳐 많이 사용되고 있다.

레이저 용접은 일반 용접에 비해 금속조직이나 기계적성질 측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 평가를 받고 있다. 또한 뛰어난 제어성과 대기 중 광파이버를 이용하여 장거리 전송이 가능하고, 산업용 로봇 등과 결합하여 복잡한 빔 전송 경로의 시스템을 용이하게 구축할 수 있어서 일반용접으로는 용접하기 힘든 부위도 쉽게 용접할 수 있는 장점을 가지고 있다^(2,3).

현재 산업용 레이저로 가장 많이 사용하고 있는 레이저는 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저가 있는데 연속파형(Continuous Wave :CW) Nd:YAG 레이저(파장:1.06 μ m)는 CO₂ 레이저(파장:10.6 μ m)보다 금속에 대한 흡수율이 높아서, CO₂ 레이저 보다 낮은 미소균열을 나타내는 장점을 가지고 있어 최근에는 Nd:YAG 레이저 사용이 증가하고 있다. 펄스 Nd:YAG 레이저는 열영향이 작고, 입열이 적은 용접이 가능하여 반사율이 큰 재질이나, 박판용접에 가능하였지만, 연속파형(CW) Nd:YAG 레이저는 고속용접과 후판용접이 가능하여 최근에는 연속파형Nd:YAG 레이저의 용접범위가 늘어나는 추세이다.

그러므로, 본 연구에서는 2kW CW Nd:YAG 레이저를 이용해서 SM45C와 오스테나이트계 304 스테인리스강의 용접에 중요한 영향을 미치는 레이저 출력, 레이저빔 이송속도, 초점위치 등을 변화 시키면서 실험하여 그 특성을 비교하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장비

본 연구에 사용된 레이저는 최대출력이 2.8kW인 연속파형 Nd:YAG 레이저이며, 레이저빔은 직경 600 μ m인 광섬유를 통해 시편에 전달된다. 초점크기(Spot size)는 0.6mm이다. 이때 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 $f=200$ mm이고, 렌즈의 직경 (D)은 60mm인 $f\#$ (f number:f/D)가 3.33인 렌즈를 사용하였다⁽⁴⁾.

실험 장치에 대한 모식도는 Fig. 1에 나타났다. SM45C와 오스테나이트계 304 스테인리스강을 Nd:YAG 레이저로 용접시 보호가스로 불활성 가스인 아르곤을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 3~4 l/min

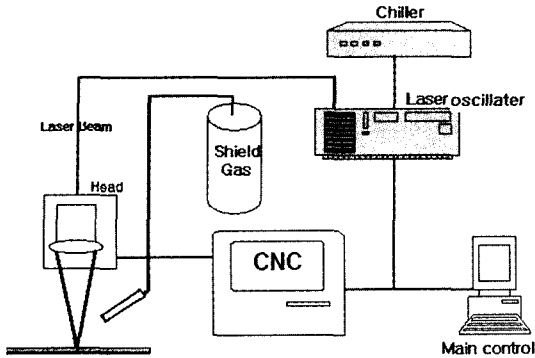


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

로 하였다. 이때의 용접속도를 각각 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10m/min로 변화시키면서 용접 비드면과 비드폭등을 측정하였다. 레이저 용접을 하기 위한 레이저 출력과 레이저 빔 이송속도와의 관계를 연구하기 위해 레이저 출력을 1500W, 1800W, 2000W로 변화시켜 용접하였다.

용접부위 외관은 광학현미경을 사용하여 관찰 하였다. 용접단면의 비드 모양과 단면의 조직을 관찰하기 위해 와이어 커팅으로 용접시편을 절단하고 사포로 연마 및 기계적 연마 (polishing) 후 CuSO_4 10mg + HCl 50ml + H_2O 50ml로 에칭하였고, SM45C는 5% perchloric acid + 95% methanol 을 사용하여 에칭을 하였다.

에칭된 비드 용접부의 경계면을 광학현미경을 가지고 관찰하였다. 용접단면은 bead on plate 방식과 맞대기 용접후 용접단면을 절단하여 이미지분석기로 용입 깊이를 측정하였다. 용접시 각각의 출력과 용접속도의 변화에 따른 종횡비(aspect ratio)와 맞대기 용접시 틈새 부분의 허용오차 범위내에서 용접을 실시하였다

2.2 시편

본 연구에서 사용된 시편은 오스테나이트계 스테인리스 304 강과 SM45C의 주성분을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

용접시 시편 표면의 이 물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시켜 가면서 실험하였다. 맞대기 용접시 유의해야할 사항으로는 Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 맞대는 부분의 틈새와 단차(a)의 허용오차를 정하여야 한다.

맞대는 부분의 틈새는 시편의 두께(t)에 따라 다음과 같이 나타낼수 있다⁽⁵⁾.

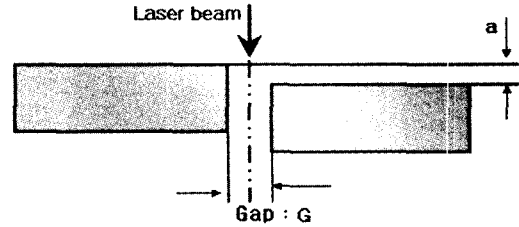


Fig. 2 Schematic diagram of the toleration face gap

Table 1 Chemical compositions of SM45C and STS304 (%)

	C	SI	Mn	P	S
SM45C	0.42~0.48	0.15~0.35	0.60~0.90	≤.030	≤0.035
SUS304	0.06	0.64	1.08	0.019	0.01

Table 2 Characteristics of SM45C and STS304

	electric resistance ($\mu \Omega/\text{cm}$)	tensile strength (kg/mm^2)	thermal expansion ($\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)	melting point ($^\circ\text{C}$)	thermal conductivity ($\text{Cu}=1$)
SM45C	15	≥48	10.73	1430	0.17
SUS304	75	≥55	20.2	1395	0.12

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

식 (1)에 의해 용접할 시편의 두께가 2mm이므로 맞대기 용접 허용오차는 $g \leq 0.447\text{mm}$ 이어야 한다. 또한 초점크기의 40%를 넘지 않아야 한다.

맞대기 용접시편의 단차(a)는 다음 식을 이용하여 한계오차 범위내로 조정하였다⁽⁵⁾.

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

식 (2)에 의하면 맞대기 용접의 맞대는 부분의 단차는 시편의 두께가 2mm이므로 0.4mm 이하로 했다. 이 값을 유지시켜주기 위해 맞대기 용접부분은 절단한 시편의 용접부위에 이 물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 후 지그를 사용하여 고정시켜 맞대는 부위의 틈새를 0.3mm, 단차를 0.25mm이하로 유지하였다. 시편을 공작대에 부착된 지그에 고정 시킨후 용접헤드의 노즐로부터 나오는 He-Ne 레이저광(적색)을 이용하여 조준위치를 확인하며, 조준위치의 허용오차는 0.1mm 이하이다.

레이저빔이 맞대기 용접시 갭을 작게 하기 위해 맞대기 용접의 맞대는 부분을 연마해서 틈새를 최소화해야 한다. 맞대기 용접의 시편사이 틈새는 레이저빔의 초점크기보다

작게 해서 용접하면 심입 용접을 빠른 속도로 실시할 수 있다. 그러나 맞대기 용접할 때마다 맞대는 부분의 연마가공을 하면 공정변수가 많아져 생산성의 경쟁력이 저하되기 때문에 시편을 절단기로 절단한 상태에서 맞대기 용접 시편의 특성을 측정 한 후 레이저빔의 초점크기와 비교하여 용접을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초점크기 및 초점깊이

레이저출력, 레이저빔 이송속도, 레이저빔의 초점거리 등을 변화시키면서 오스테나이트계 304 스테인리스강과 SM45C를 bead on plate 방식과 맞대기 용접 후 그 특징을 비교하였다. 레이저빔에 의한 용접은 재료의 특성에 따라 반사율이나 열흡수율이 달라 공정변수가 달라지기 때문에 최적의 조건을 결정하기 위해 재료의 특성을 고려하여 레이저 용접을 실시해야한다.

실험에 사용한 Nd:YAG 레이저빔의 초점크기(spot size: w_0) 및 초점깊이(depth of focus: b)는 다음과 같이 정의된다.

$$w_0 = \frac{2}{\pi} \lambda \frac{f}{D} \quad (4)$$

$$l = \frac{0.64\pi}{\lambda} w_0^2 \approx \frac{2 w_0^2}{\lambda} = \frac{d_0^2}{2\lambda} \quad (5)$$

윗 식에서 λ 는 파장, D 는 렌즈의 직경, f 는 초점거리, $\frac{f}{D}$ 는 f number, d_0 는 $2 w_0$ 로 레이저빔의 최소 빔 허리 직경이다. z 는 초점깊이의 양측위치이고, 초점 깊이 (b)는 $2z$ 이다. 윗 식으로 계산한 초점크기(w_0)는 $20.3\mu\text{m}$, 초점 깊이(b)는 $123.8\mu\text{m}$ 이다. 그러나 시편에 레이저빔을 180ms 동안 조사하였을 때 오스테나이트계 304 스테인리스강의

초점크기(w_0)는 $970\mu\text{m}$ 이고, 초점깊이(b)는 $200\mu\text{m}$ 였고,

SM45C의 경우 초점크기는 $871\mu\text{m}$ 이고, 초점깊이는 $1652\mu\text{m}$ 였다. 이론에 의한 레이저빔의 크기와 레이저빔의 침투깊이가 실제 측정 한 값과 다른 이유는 레이저빔을 가공하는 물질과 상호작용이 없는 자유공간에서 계산된 값이기 때문이다. 그러나 레이저빔과 물질이 상호작용하면 레이저빔의 반사와 흡수율이 재료에 따라 다르기 때문에 레이저빔에 의한 초점의 크기나 깊이가 달라진다. 그러므로 레이저 가공을 위해서는 레이저 출력별 초점크기와 정확한 초점위치를 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 출력과 초점거리를 변화시켜가면서 초점크기를 측정하였다.

레이저빔의 출력을 600W로 하여 초점위치 변화에 따른 초점크기 변화를 SM45C와 오스테나이트계 304 스테인리스와 비교하기 위해 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4의 실험결과를 살펴보면 $z=0$ 일때 초점의 크기가 가장 작고, $z<0$ 일때 $z>0$ 보다 초점의 크기는 작고 빔 중심부의 용융 정도가 많았다. 빔의 세기가 큰 초점이 시편 표면에 맺히게 되면 순간적으로 시편 내부로 키흐이 형성되어 시편의 깊이방향으로 열이 전달되어 키흐이 형성된다. 그러나 시편의 표면이 초점에서 멀어지면 에너지 밀도가 작아 키흐을 형성하는 양이 작아지고 시편 표면에서 레이저빔의 반사되는 양이 많아지기 때문에 내부로 침투되는 양이 작아지고 표면에서 확산된다. 그래서 디포커싱(defocusing)되면 레이저빔의 열에너지를 나타내는 밀도가 상대적으로 작아 내부로 침투되지 못한 현상이 나타나고 있다. 이처럼 레이저 용접은 레이저빔이 흡수되어 시편과 상호 작용하여 용융되는 면적과 용융깊이가 매우 중요한 요소이다. 레이저빔이 시편에 조사되면 입사된 레이저빔은 대부분 재료 표면에서 반사되고, 나머지는 흡수된다.

Fig. 4의 실험결과를 살펴보면 오스테나이트계 304 스테인리스는 초점위치가 $z>0$ 일 경우에는 같은 초점위치에서 초점의 크기가 SM45C보다 컸다. 그러나 $z<0$ 인 초점위치에서는 초점의 크기가 반대현상으로 나타났다.

이것은 Table 1과 Table 2에 나타낸 성분 중 탄소의 영향과 전기전도도 및 시편 표면에서의 반사율이 다르기 때문이라고 생각한다. 오스테나이트계 304 스테인리스보다는 SM45C의 경우 표면에서 반사율이 작기 때문에 $z<0$ 일 경우 대부분 에너지를 흡수하고, $z>0$ 디포커싱할 경우 SM45C는 레이저빔의 에너지가 표면 열원으로 전달되지만 오스테나이트계 304 스테인리스는 반사되는 양이 많기 때문에 판단된다.

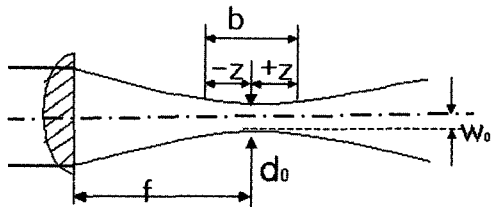


Fig. 3 Schematic diagram of the beam size and focal length

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 된다. 레이저빔의 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 않는다.

이와같이 레이저빔의 초점크기에 대한 에너지 밀도는 레이저 가공에 중요한 요소가 되기 때문에 시편에 조사되는 빔의 세기는 다음 식으로 계산하였다.

$$I = \frac{P}{\pi r^2} \quad (9)$$

윗 식에서 I는 빔의 세기(W/cm²), P는 출력(W), r은 초점의 반경(cm)이다.

시편에 조사되는 빔의 세기가 105W/cm² 이하에서는 레이저빔이 대부분 표면에서 반사되고, 빔의 세기가 107W/cm² 이상에서는 증발에 의한 금속의 제거가 일어나게 되어 시편이 절단 또는 천공이 되므로 용접시의 빔의 세기는 105W/cm²에서 107W/cm² 사이에서 용접이 가능하다⁽⁶⁾.

이와 같은 이유로 Nd:YAG 레이저 발전기에서 전달되는 초점크기에 대한 빔의 세기를 조사하였다. 맞대기 용접

시 두 시편사이의 틈새가 레이저빔의 초점크기보다 크면 레이저빔이 틈새로 빠져나가 용접이 이루어지지 않는다.

초점위치 변화에 따른 출력밀도를 오스테나이트계 304 스테인리스강과 SM45C의 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 초점위치가 같을 경우 오스테나이트계 304 스테인리스강의 출력밀도가 SM45C보다 약간씩 작게 나타났다. 이것은 SM45C와 오스테나이트계 304 스테인리스강과의 표면 반사율과 전기전도도 및 Table 1에 나타낸 것처럼 탄소함유량의 차이 때문인 것으로 판단된다. 탄소는 강의 강도를 향상시키는 원소로써 오스테나이트에서 고용하여 급냉하면 마르텐사이트 조직을 형성한다. 레이저 용접은 용접속도가 빨라 용접 비드면이 급냉되면서 일부 탄소가 변태하여 격자 내에 단단히 붙어 있게 되어 침탄 조직인 마르텐사이트가 되면서 오스테나이트계 304 스테인리스강 보다 원자간의 에너지 변화가 크기 때문이라고 판단된다.

레이저빔의 크기에 대한 초점거리의 변화에 따라 표면에서의 레이저빔의 세기를 정리하여 Fig. 5에 나타내었다. 초점거리 변화에 따른 레이저빔의 세기 역시 초점면이 시편 표면보다 아래에 있는 경우가 초점면이 시편표면보다 높은 위치에 있을 때 크게 나타나고 있다. 실험결과에 의하면 레이저빔의 세기가 105W/cm² 정도부터 107W/cm²사이에서 용접이 가능하기 때문에 맞대기 용접할 때 갭에 레이저빔이 빠져나갈지라도 레이저 출력이 1800W일 때 용접속도를 1m/min로 하면 초점위치가 -10mm에서 +10mm사이에서

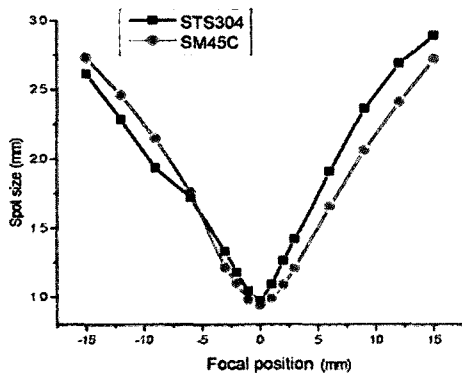


Fig. 4 The relations between focal position and spot size

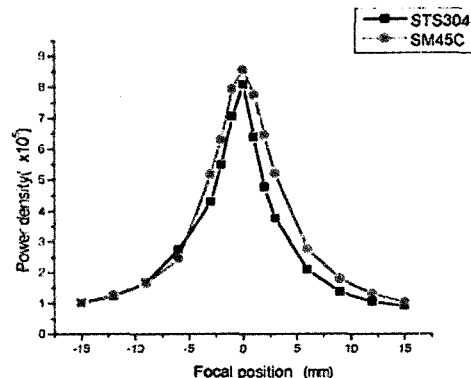


Fig. 5 The relation between focal position and power density

Table 3 Experimental equation

material	Experimental equation (Power : 600W)	accuracy(%)
SM45C	$b = 0.998 - 0.007z + 0.023z^2 + 4.501 \times 10^{-5}z^3 - 1.353 \times 10^{-4}z^4 - 5.012 \times 10^{-8}z^5 + 2.942 \times 10^{-7}z^6$	99.7
STS304	$b = 1.2134 + 0.0216z + 0.0142z^2 - 1.219 \times 10^{-4}z^3 - 3.272 \times 10^{-5}z^4 + 4.057 \times 10^{-7}z^5$	96.1

각판용접이 가능할 것으로 판단된다. 이와같은 실험결과를 이용하여 맞대기 용접할 때 시편사이 겹의 크기를 예측하여 자동화 프로그램하기 위해선 출력과 초점거리 변화에 따른 디포커싱 위치를 변화시켜 맞대기 용접 겹을 보상할수록 실험식을 Table 3에 나타내었다.

이 실험식의 결과는 최소자승법에 의해 커브 피팅한 Fig. 4의 결과이다. Fig. 4는 레이저 출력과 초점위치에 따른 초점크기의 실험값을 도형으로 나타내었고 실험값을 가지고 근사한 결과값을 실선으로 나타내었다.

Table 3에 나타난 초점위치에 대한 초점의 크기를 예측하는 실험식이 5차항까지 될 경우 정확도가 95%정도였다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 살펴보았듯이 디포커싱하는 방법이 시편표면보다 아래로 이동하는 것과 위로 이동할 때 초점의 크기나 에너지 밀도가 다르기 때문에 초점위치를 중심으로 해서 하향방향과 상향방향을 분리하여 실험식을 정리하여 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 디포커싱하는 방법을 시편표면으로부터 아래로 내려가면서 측정할 값을 최소자승법으로 나타냈을 때는 Table 4에 나타난 바와 같이 3차항까지만 해도 99%이상의 정확도를 가지고 있어 프로그램하는데 간단해진다.

용입 깊이만을 고려한 경우에는 초점위치를 아래방향으

로 변화해 갔을 때 용입 깊이가 깊어지기 때문에 하향방향으로 한 경우가 바람직하지만 이것과 비교하기 위해 상향방향의 결과인 Fig. 7, Table 4의 실험식을 나타내었다.

고출력일 경우 초점면에서 출력밀도가 매우 커서 시편의 두께 2mm를 관통하기 때문에 고출력일 경우 디포커싱할때 초점의 크기를 예측할 수 있는 실험식을 얻지 못했다. 그러나 출력을 증가시켜가면서 초점의 크기를 측정할 결과 $z = \pm 3$ 이내에서는 출력의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향성을 관찰하였다.

3.3 최적의 용접조건

빔 이송속도에 따라 오스테나이트계 304 스테인리스강과 SM45C의 용접성을 비교하기 위해 용입 깊이와 용융폭의 비인 종횡비를 Fig. 8와 Fig. 9에 나타내었다. 용접 시편의 두께와 제품의 용접 특성에 맞추어 용입깊이와 용융폭, 생산성 등을 검토하여 최적의 용접속도를 선택해야 하기 때문이다.

에칭된 비드 용접부의 경계면을 광학현미경(Olympus, 배율×500)을 가지고 확대 관찰한 조직단면을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

오스테나이트계 304 스테인리스강과 SM45C의 용접단

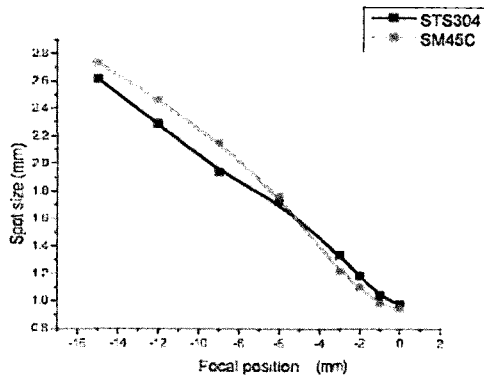


Fig. 6 The relations between spot size and focal position (-15 < z < 0)

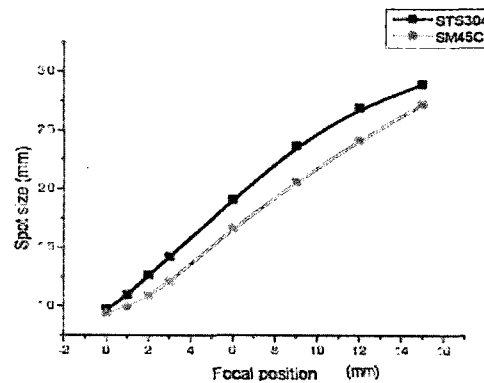


Fig. 7 The relations between spot size and focal position (0 < z < +15)

Table 4 Experimental equation

material	spot	Experimental equation (Power : 600W)	accuracy (%)
SM45C	z < 0	$b=0.926 - 0.096z + 0.008z^2 + 4.576 \times 10^{-4}z^3$	99.6
	z > 0	$b=0.935 + 0.08z + 0.008z^2 - 3.899 \times 10^{-4}z^3$	99.4
STS304	z < 0	$b=0.9214 - 0.169z - 8.53 \times 10^{-3}z^2 - 3.16 \times 10^{-4}z^3$	99.9
	z > 0	$b=0.9607 + 0.1428z + 4.48 \times 10^{-3}z^2 - 3.593 \times 10^{-4}z^3$	99.9

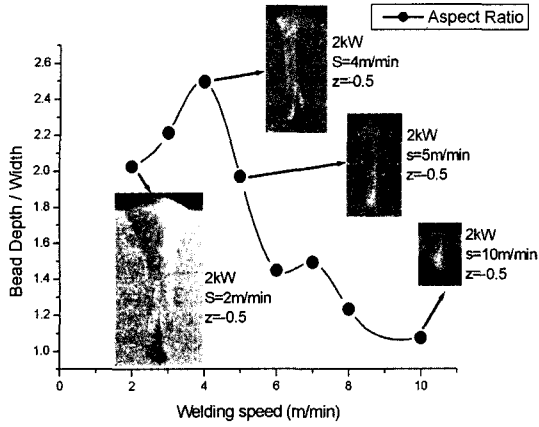


Fig. 8 The aspect ratio on the welding speed per unit time (STS304)

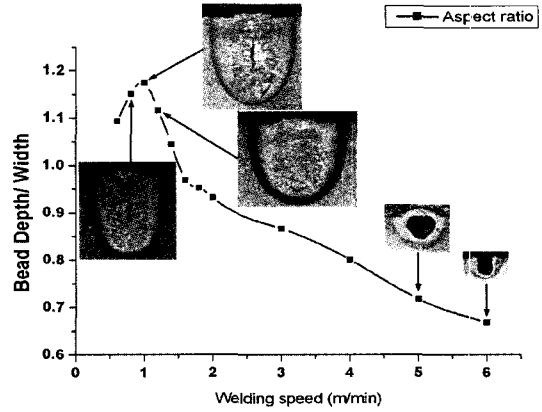


Fig. 9 The aspect ratio on the welding speed per unit time (SM45C)

면을 비교하면 오스테나이트계 304 스테인리스강의 경우 용접단면이 길쭉한 포도주잔 모양을 하고 있지만 SM45C의 경우는 타원을 짧은 축으로 절단해 놓은 모양을 하고 있다.

SM45C의 경우에는 오스테나이트계 304 스테인리스강과는 달리 용접부 비드의 수직 방향으로 고온균열이 Fig. 10에 나타난 것과 같이 발생했다. Fig. 8과 Fig. 9에서 용입비가 가장 큰 경우를 비교하기 위해 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 SM45C에서는 오스테나이트계 304 스테인리스와는 다르게 고온균열이 나타났다. 이 고온균열은 용접부 중심부분의 고-액 계면에서 응집력이 용접부와 수직방향으로 가해진 응력보다 낮기 때문에 용접선 중심을 따라 형성된 것이다. 응고 표면이 매끄럽다는 것은 인장응력에 의해 균열이 발생되고 성장할 시기에 그 표면에는 액상이 잔류하고 있기 때문이다. 레이저 용접은 키홀 용접 특성을 가지고 있는데 키홀 하단부 및 산부의 경우 응고속도가 중심부에 비해 빨라서 균열이 발생되었다 하더라도 중심부에서는 아직 용액으로 잔류해있는 액상에 의하여 쉽게 매워질 수 있다. 그러므로 외부의 구속력이 없이 수축응력만으로 균열이 발생할 때는 용접부 중심에서만 매워지지 못하여 균열이 발생된 것으로 판단된다.

SM45C와 오스테나이트계 304 스테인리스강의 조성분을 살펴보면 C와 Mn의 성분차이가 크게 나타나고 있다. C는 오스테나이트 안정화 원소로 고온균열을 촉진시키는데 C 함량의 증가는 초점용고모드를 δ -페라이트에서 γ -오스테나이트로 천이 시킴으로써 고온균열 감수성을 증가시킨다. 이 고온균열을 발생시키는 발생지수는 다음식을 이용해

서 계산하였다⁽⁷⁾.

$$\frac{C(P+S+Si/25+Ni/100)}{3Mn+Cr+Mo+V} \times 10^3 \quad (6)$$

식 (6)에서 SM45C의 경우 오스테나이트계 304 스테인리스강 보다 C성분의 훨씬 많기 때문에 고온균열의 발생이 쉽게 나타나고 오스테나이트계 304 스테인리스강의 경우에는 Mn 성분이 SM45C보다 많기 때문에 고온균열이 잘 발생되지 않는다고 생각된다. Mn도 오스테나이트 안정화 원소이지만 Mn은 S와 반응하여 FeS보다 먼저 MnS를 형성하기 때문에 S 편석에 의한 저 용점 화합물 형성을 방지할 수 있기 때문이다. 형성된 MnS는 용융온도가 1620℃로 높아 강중에 Mn 양이 증가하면 입계의 액상 필름 형성이 어려워지기 때문에 고온균열을 피할수 있는 것으로 알려져 있다.

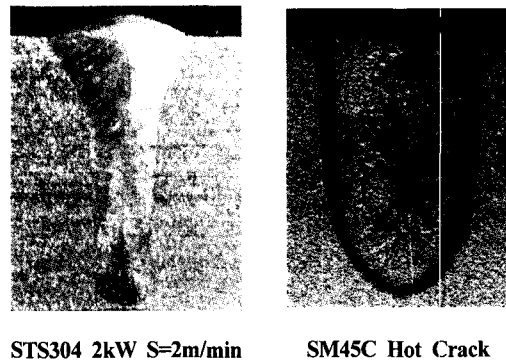


Fig. 10 Cross sectional area of bead on plate welding

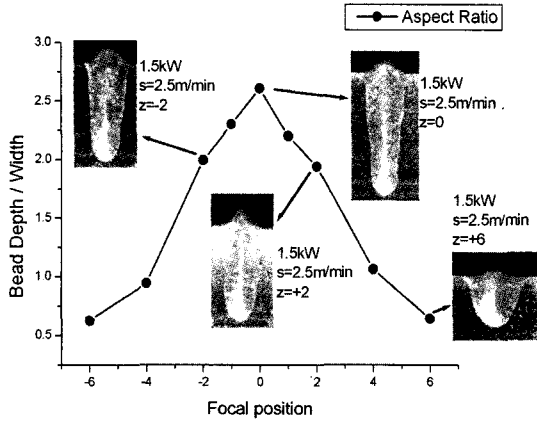


Fig. 11 Relation between position of focus and Aspect ratio ($z=0 \sim \pm 6$, $Ar = 4 \ell / \text{min}$)

시편을 오스테나이트계 304 스테인리스강으로 하여 출력 1.5kW, 초점거리 -0.5mm, 보호가스유량 $Ar=4 \ell / \text{min}$ 일 때 빔 이송속도에 대한 용입 깊이와 시편표면에서의 용융폭을 Fig. 8에 나타내었다. 용접속도가 빨라질 경우에는 용입 깊이에 대한 용융폭의 비가 1에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 용접속도가 빨라지면 표면에서 키홀이 잘 형성되지 않기 때문이다. 용접시편의 두께를 고려하여 용접공정 변수를 Fig. 8의 결과를 근거로 판단하면 오스테나이트계 304 스테인리스강의 경우 출력 2kW에서는 빔의 이송속도를 1m/min으로 했을 경우 4mm의 판재의 관통용접이 가능함을 알 수 있다. 종횡비의 경우 오스테나이트계 304 스테인리스강의 경우 용접속도가 4m/min 일 때 가장 종횡비가 컸지만, SM45C의 경우는 1m/min일 때 가장 종횡비가 컸다.

SM45C의 경우는 1m/min 부근에서 가장 용입비는 크지만 고온균열이 발생했고, 3.5m/min부터는 에너지 흡수율이 작아 양호한 키홀 형성이 안되고 있음을 Fig. 9에 정리하여 나타냈다.

초점거리 $z=0$ 으로 하고 레이저빔 이송속도를 1m/min, 유량을 $4 \ell / \text{min}$ 로 했을 때 레이저 초점위치에 대한 레이저 용접비드 실험결과를 나타낸 Fig. 11와 Fig. 12에 나타내었다. 레이저 출력이 1.5kW이고 레이저빔 이송속도가 2.5m/min 일 때 종횡비는 초점위치 $z=0$ 에서 가장 크게 나타난다는 것을 Fig. 11에 나타내었다. 그러므로 2mm두께의 오스테나이트계 304 스테인리스강의 맞대기 관통용접의 경우 출력 1.5kW, 빔 이송속도 2.5m/min, 초점위치 $z=0$, 보호가스 $Ar 4 \ell / \text{min}$ 으로 용접을 실시하였다. SM45C의 경우인 Fig.

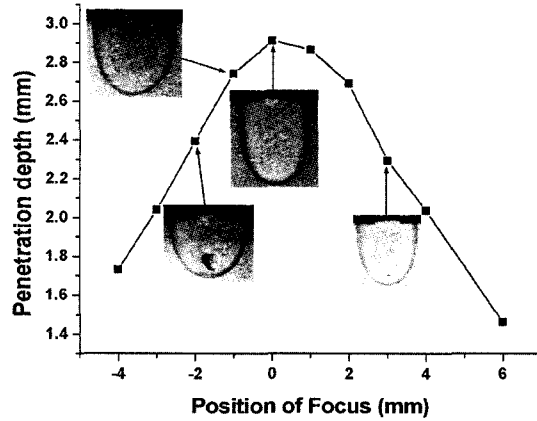


Fig. 12 Relation between position of focus and penetration depth ($z=0 \sim \pm 6$, $Ar = 4 \ell / \text{min}$)

12에서는 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 커지게 된다. z 가 -2mm 위치에서는 시편내부에 집중된 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.

Fig. 11과 Fig. 12의 결과에서 가장 양호한 공정조건에서 용접한 비드를 절단하여 Fig. 13에 나타내었다. 맞대기 용접시 갭(Gap)의 영향을 실험하기 위해 SM45C와 오스테나이트계 304 스테인리스강을 맞대기 용접할 때 용접시편을 절단 후 사포로 기계 가공하여 맞대는 부분의 오차를 $40 \mu\text{m}$, $47 \mu\text{m}$, $65 \mu\text{m}$ 인 경우와 시편을 절단기로 절단하여 연마가공하지 않는 $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $320 \mu\text{m}$ 인 상태에서 출력 1500W, 빔 이송속도 2.5m/min, 초점위치 $z=0$, 보호가스 $Ar 4 \ell$

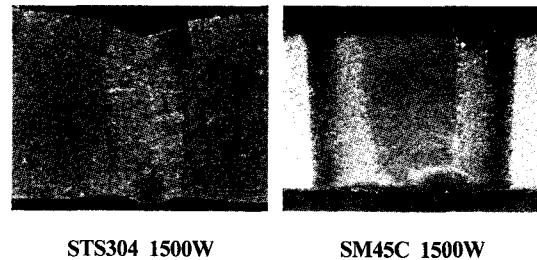


Fig. 13 Cross sectional area of bead on plate welding

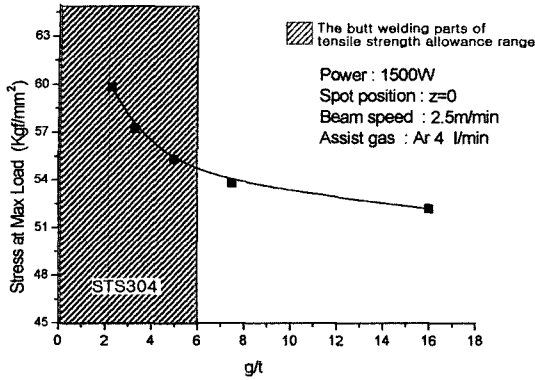


Fig. 14 Relation between tensile strength and g/t (STS304)

/min에서 맞대기 용접을 실시 한 후 인장강도를 측정했다. 맞대기 용접 갭이 40 μ m에서는 우수한 용접특성을 보였으나 용접부의 갭이 클수록 언필드(Unfilled)가 발생하였다. 이러한 현상은 맞대기 용접부의 갭이 클수록 용융물의 부족으로 인해 발생된 현상으로 용가재를 사용하면 이러한 현상이 발생하지 않을 것으로 생각된다.

Fig. 14와 Fig. 15는 종축을 인장강도, 횡축은 시편의 두께(t)와 갭(g)과의 비(g/t)로 해서 두께에 대한 갭의 영향을 나타내었다.

Fig. 14는 오스테나이트계 304 스테인리스강을 맞대기 용접할 때 출력 1500W빔 이송속도 2.5m/min, 초점위치 z=0, 보호가스 Ar 4l/min에서 갭에 대한 인장강도의 크기를 나타냈다. 맞대기 용접 갭이 40 μ m, 47 μ m, 65 μ m, 100 μ m, 150 μ m, 320 μ m의 인장강도가 각각 59.8kg/mm², 58.5kg/mm², 57.2kg/mm², 55.3kg/mm², 53.8kg/mm², 52.2kg/mm²로 측정되었다.

오스테나이트계 304 스테인리스강의 모재의 인장시험시 인장강도가 61kg/mm²였고, 오스테나이트계 304 스테인리스강의 표준인장강도가 55kg/mm²이므로 맞대기 용접시 갭에 대한 시편의 두께의 정도는 0.06 이하가 되어야 하며, 허용범위는 Fig. 14에 빗금친 영역으로 나타났다. 맞대는 부분의 허용오차가 작을수록 인장강도가 높아졌다.

Fig. 15은 두께가 2.4mm인 SM45C를 맞대기 용접 후 인장강도를 나타내었다. SM45C의 최적의 용접 공정변수는 레이저빔의 출력을 1500W, 빔 이송속도 1m/min, z=0, 보호가스 Ar 4l/min이었다. 이때 용접시편을 맞대는 부분의 갭(gap)이 80 μ m일때 맞대기 용접한 용접단면이 가장 용접성이 우수하였다. SM45C의 경우 모재 인장강도는 48kg/mm²이

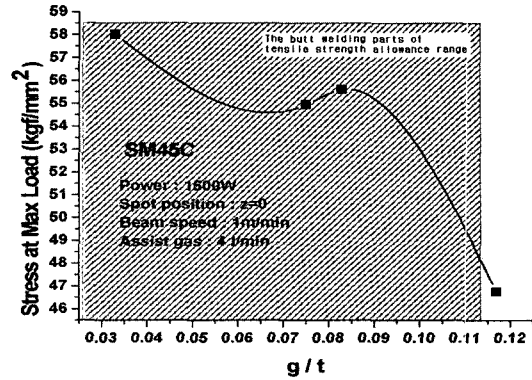


Fig. 15 Relation between tensile strength and g/t (SM45C)

상이면 구조용 탄소강으로 산업체에서 사용할 수 있다. 용접시편을 인장 시험한 결과 용접부위 이외에서 절단되어 용접상태가 매우 양호한 것으로 사료된다.

맞대기 용접에서 맞대는 부분의 갭에 대한 용접특성을 알아보기 위해 맞대는 부분의 오차를 180 μ m, 200 μ m, 280 μ m인 상태에서 맞대기 용접을 실시한 후 인장강도 실험을 실시하였다. SM45C의 경우 본 실험조건에서 g/t의 비가 0.1 정도까지는 인장강도가 크게 나타나 양질의 용접상태를 보이고 있다. 그러나 g/t의 값이 0.12이상이 되면 용접할 때 충분히 갭을 채우지 못해 기준 인장강도에 미치지 못하였다. Fig. 15의 실험결과로부터 맞대기 용접할 때 용접 조건 중 하나인 갭의 허용정도를 예측할 수 있어 맞대는 부분의 가공정도를 결정할 수 있을 것으로 판단한다.

오스테나이트계 304 스테인리스강과 SM45C를 Nd:YAG 레이저로 맞대기 용접했을 때 갭에 의한 허용범위를 비교한 결과 오스테나이트계 304 스테인리스강의 갭에 대한 시편의 두께비 (g/t)가 0.06이고, SM45C의 경우는 0.1이었다.

위의 결과로부터 SM45C일 경우 갭에 대한 두께 비가 오스테나이트계 304 스테인리스강 보다 커서 맞대기 용접할 때 맞대기 용접 갭의 허용오차가 큼을 알수 있다.

4. 결론

오스테나이트계 304 스테인리스강과 SM45C를 Nd:YAG 레이저 빔으로 용접한후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 종횡비의 경우 오스테나이트계 304 스테인리스강의 경우 용접속도가 4m/min 일 때 가장 종횡비가 컸지만,

- SM45C의 경우는 1m/min일 때 가장 중형비가 컸다.
- (2) SM45C에서는 오스테나이트계 304 스테인리스강 보다 C성분의 훨씬 많기 때문에 용접시 고온균열이 발생하였다.
 - (3) 오스테나이트계 304 스테인리스강의 갭에 대한 시편의 두께비(g/t)가 0.06이고, SM45C의 경우는 0.1이었다.
 - (4) 오스테나이트계 304 스테인리스강을 맞대기 용접할 때 갭이 100 μ m일 경우 출력 1500W, 빔 이송속도 2.5m/min, 초점위치 z=0, 보호가스 Ar 4 l/min에서 인장강도는 55.3kg/mm²로 모재의 인장강도 61kg/mm²와의 차이는 5.7kg/mm²였고, 모재의 인장강도 보다 9.3% 감소하였다.
 - (5) 두께 4.5mm의 기계구조용 중탄소강 SM45C를 bead on plate 용접할 때 출력1800W이상에서는 최종 응고부인 용접금속 중앙부에 수직으로 고온균열(Hot Cracking)이 발생하였고, 레이저빔의 이송속도가 증가할수록 용접부의 고온균열이 발생하지 않고 있음을 나타내고 있다.

후 기

본 논문은 산업자원부 광특화연구센터의 장비와 레이저 응용신기술 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) S. G. Han.,1988, "The explanation for composites structure after thermal treat of metal," pp. 234~235.
- (2) BY J. XIE, A.KAR., 1999, "Laser welding of Thin sheet steel with surface oxidation," The welding Journal research supplement, pp. 348.
- (3) KANAOKA MASARU., 1987, " Laser machining Technology Application manual," Doc.-no.:21-02-

- 14-AS.
- (4) G.Lothonkum, P.Chaumbai, P.Bhandhuanyong., 1999, "TIG pulse welding of 304L austenitic stainless steel in flat, vertical and overhead positions," Journal of Materials Processing Technology, pp. 89~90, 410~414.
- (5) KANOKA MASARU., 2001, "Laser Technology," June, pp. 27~33.
- (6) Christopher Dawes, CEng., 1992, "Laser Welding ," pp. 59~61, 78~87.
- (7) The Korea Welding Society., 2001, "Welding & Conjugation dictionary," January, pp. 21.
- (8) Gobayashi shyo., 1987, "Manual for Laser manufacturing technology application," pp. 155~210.
- (9) A.M.El-Batahgy., 1997, "Effect of laser welding parameter on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels," Material Letters Vol. 32, pp. 155~163.
- (10) J.O.Milwski, M.B.Barbe., 1999, "Modeling and Analysis of Laser Melting within a Narrow Groove Weld Joint," Supplement to The Welding Journal, April, pp. 109~115.
- (11) W. J. Han, J. G. Byeon, K. S. Park., 2001, "Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd:YAG laser beam: Journal of Materials Processing Technology 113 ," pp. 234~237.
- (12) D. H. Kim., 1990, "Laser machining ," pp. 153~154, 187~188, 213, 259.
- (13) W. P. Lee, B. H. Jeon., 1995, "A Tendency of Forming Technique using Tailor-Welded Blanks", KSMTE, 12 Vol. 4, No. 4, pp. 7~15