

CW Nd:YAG 레이저에 의한 SCP1의 용접특성

신병헌*, 유영태#, 신호준*, 윤철중**

Welding Characteristics of SCP1 on CW Nd:YAG Laser

Byung Heon Shin*, Young Tae Yoo#, Ho Jun Shin* and Chul Jung Yun**

ABSTRACT

Laser welding of metals has been widely used to improve a wear resistance and a corrosion resistance of the industrial parts. The objective of this research works is to investigate the influence of the process parameters, such as the welding for metals with CW Nd:YAG lasers. The bead-on-plate welding tests are carried out for several combinations of the experimental conditions. In order to quantitatively examine the characteristics of the butt welding, the welding quality of the cut section, stain-stress behavior and the hardness of the welded part are investigated. From the results of the investigation, it has been shown that the optimal welding condition without defects in the vicinity of the welded area and with a good welding quality is 1325W of the laser power, and 1.4m/min of laser welding speed.

Key Words : CW Nd:YAG Laser welding (연속파형 Nd:YAG 레이저용접), Heat input capacity (입열량), Cold rolled carbon steel (냉연강판), Butt welding (맞대기용접), Surface temperature (표면온도)

1. 서론

최근, 레이저용접은 다양한 금속들의 접합 가능성과 전통적인 용접들의 한계를 극복할 수 있는 특성 때문에 생산성 향상을 위한 공정에 폭 넓게 이용되고 있다. 고 밀도 에너지 열원인 레이저 빔을 이용하여 용접을 하면 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(aspect ratio)가 크고, 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)가 작은 용접이 가능하다.¹⁻⁴

그러나 금속용접은 용융용접을 주로 실시하고

있어 용접 시 표면 열전도 때문에 많은 문제점들이 발생한다. 용융전도 용접의 경우는 열영향부가 크고 응고과정에서 내부에 결함이 발생할 수 있을 뿐만 아니라 용가재(filler wire)가 필요하다.

공정변수는 레이저빔의 파장, 레이저빔의 이송 속도, 초점거리, 레이저빔의 출력, 보호가스 종류, 유량, 재료의 레이저빔 흡수율과 반사율 등이 있으며 각 공정변수의 상호작용에 따라 용접의 결과가 다르게 나타난다.

레이저용접은 용가재가 필요 없는 키 홀 용접의 특성을 가지고 있다. 키 홀 용접을 하는 레이저용

접수일: 2006년 6월 30일; 게재승인일: 2007년 2월 21일

* 조선대학교 일반대학원

교신저자: 조선대학교 기전공학과

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

** 조선대학교 메카트로닉스공학과

접은 파장이 10.6 μ m인 CO₂레이저와 1.06 μ m인 Nd:YAG 레이저가 주로 활용되고 있다. 탄소강의 표면에 CO₂레이저를 조사시키면 대부분의 빔이 반사되는 반면, Nd:YAG 레이저는 빔 흡수율이 CO₂레이저보다 7배 이상 높아 고효율의 금속용접이 가능하다.⁵

레이저 용접에 대한 선행연구를 조사해보면 Erolu⁶등은 레이저를 이용해서 저탄소강의 열영향부(HAZ)를 연구하였고, Murugan⁷등은 두 종류의 저탄소강을 맞대기 용접하여 온도분포를 연구하였다. Bertrand⁸등은 연속파형 Nd:YAG레이저를 이용하여 레이저 용접 시 스테인레스강의 표면온도를 연구하였다. Carmignani⁹, Nam¹⁰ 등은 얇은 판재를 레이저를 이용하여 맞대기용접에서의 유한요소법으로 연구하였다. Kim¹¹ 등은 CO₂ 레이저를 이용하여 아연도금 강판을 연구하였고, Hu¹² 등은 알루미늄 합금의 특성을 연구하였다.

냉연강판을 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 용접한 연구는 찾을 수 없었다. 본 연구에서는 냉연강판을 Nd:YAG 레이저로 용접할 때 최적의 공정변수를 실험적으로 연구하였다. 본 연구에 이용한 냉연강판은 자동차, 조선, 가전산업 등 산업전반에 사용 되는 재질이다.

연속파형(Continuous Wave : CW) Nd:YAG 레이저를 이용해 맞대기 용접을 하기 전에 최적의 용접 조건을 결정하기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate) 용접하였다. 비드 온 플레이트 실험 결과로부터 종횡비가 큰 용접공정변수를 결정하고, 종횡비가 가장 큰 공정변수를 기준으로 레이저 빔 이송속도, 초점거리, 레이저 출력 등을 변화시켜 맞대기용접 특성을 실험했다.

Nd:YAG 레이저(파장 1.06 μ m)를 이용하여 냉연강판을 용접하였기 때문에 레이저 공정변수 중 재료와 파장은 결정되어 있다. 또한 최적의 공정변수로 레이저빔의 출력, 빔의 초점 거리는 선행연구 Yoo^{13,14}의 실험과 같은 방법으로 실험하였다. 종횡비가 가장 큰 용접 공정변수를 중심으로 맞대기 용접할 때 용융풀의 온도, 용융단면의 경도분포, 용융단면의 조직 및 인장응력을 측정하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06

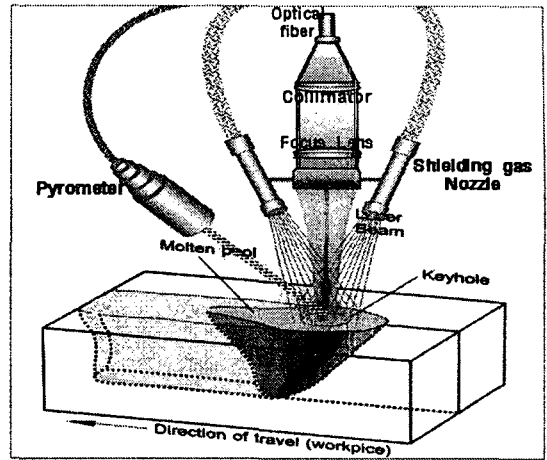


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

μ m이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(CW)이고, 레이저 빔은 직경이 600 μ m인 광섬유를 통해서 전달된다. 빔 발산 각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되었고, 맞대기 용접의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다.

레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 1000mm, 500mm, 400mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5 μ m, z축에 대한 위치정밀도는 1 μ m, 반복정밀도는 8 μ m이다.

2.2 실험방법 및 시편

실험에 사용된 시편은 냉연강판(Cold Rolled Carbon steel)이며 시편의 크기는 150mm(L) × 80mm(W) × 2mm(T)이다. 용접 시 시편 표면의 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시키면서 실험하였다. 시편의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 시편을 Nd:YAG 레이저로 용접 시 보호 가스는 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기를 차단하여 용접 시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 3~4 l/min로 하였다. 레이저 용접을 위한 레이저 빔 이송속도와 용접비드의 관계를 연구하기 위해 레이저 출력을 1000W로 하고 초점거리 f=200mm이고 직경 D가 60mm인 렌즈를 사용하였

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of cold rolled carbon steel(%)

	C	Si	Mn	P	S
	≤0.12	-	≤0.5	≤0.04	≤0.045
SCPI	항복점	인장강도	연신율	경도	경도
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	Min(%)	(H _R B)	(H _R V)
	-	≥270	38	50~71	95~130

다. 시편표면에서 초점면이 가장 작은 초점거리인 f=200mm를 작업거리(z=0)로 하였다. 작업거리(z)를 변화시켜 공정별 중형비를 분석하였다. 이때 용접속도는 각각 1m/min ~ 5m/min로 변화시키면서 용접 비드면과 비드 폭을 측정하였다.

레이저 공정변수 변화에 따른 용접단면을 관찰하기 위해 정밀금속절단기(BUEHLER : isomet 4000 precision Saw 1)로 용접시편을 절단하고 사포(sand paper)로 연마 및 폴리싱 후 에칭액(Nital 5%)을 만들어 에칭하였다. 에칭 된 용접비드 경계면은 광학현미경(Nikon : ECLIPSE L150)으로 관찰하였다. 레이저 빔을 금속 시편에 직접 조사하는(bead on plate) 방식과 맞대기 용접 후 용접단면을 절단하여 광학현미경으로 용입 깊이를 측정하였다. 용접 시 용접속도의 변화에 따른 중형비(Aspect ratio), 시편 내부로 흡수되는 입열량(Heat input capacity)과 맞대기 용접 시 최적의 용접조건을 찾기 위해 레이저빔 이송속도와 작업거리를 변화시키면서 레이저 용접 실험을 했다.

시편은 공작대에 부착된 지그(Jig)에 고정시키고 용접헤드에서 나오는 He-Ne 레이저광(적색)을 이용하여 용접위치를 확인하였다. 용접위치의 허용오차는 0.1mm 이하로 유지하였다. 시편을 지그로 단단히 고정시켜 용접 중 열팽창에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다. 이는 산업현장에서 용접 시 작업의 편의성 때문에 지그(Jig)나 클램프(Clamp) 등으로 고정하는 것과 같은 현상을 재현하기 위함이기도 하다.

레이저 용접 시 열 때문에 발생하는 조직변화에 의한 경도 측정은 마이크로 비커스(SHIMADZU : HmV-2 model) 경도 시험기를 사용하여 0.5kg의 하중을 적용시켰다. 적외선 온도계를 이용하여 레이저 조사 시 실시간으로 표면온도를 모니터링 하였다. 적외선 온도계는 독일 Impac Inc.의 장치로 모델명은 IGAR 12-LO이다. 0.2mm의 Optical mono

fiber(red)를 사용하였다. 분해능interface 0.1℃, 측정 온도범위는 500 ~ 2200℃이다. 레이저빔이 시편에 조사될 때 스캐터링이 발생하여 온도계(pyrometer)의 손상을 가져올 수 있기 때문에 렌즈보호필터를 부착하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초점위치에 따른 출력밀도특성

레이저빔이 재료표면에 흡수되는 것은 재료의 물성치와 가공조건에 따라 다르다. 용접에 영향을 미치는 재료의 대표적인 물성치는 반사율과 열전도율 및 전기 전도도이다. 레이저빔이 표면에 조사되면 초점위치에 따라 시편 표면에 미치는 재료별 물리적 성질이 다르기 때문에 흡수도가 달라진다. 이와 같은 이유로 금속표면에 레이저 빔이 조사되었을 때 초점면의 크기가 재료에 따라 다르다.

초점거리 변화에 따른 초점면의 변화를 분석하기 위해 레이저빔의 초점거리를 -4mm에서 +3mm 까지 변화시켜 레이저빔을 조사한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 초점면의 크기는 맞대기 용접 시 레이저빔이 시편 간격 사이로 통과하는 여부와 비드 폭의 크기를 판단할 수 있는 중요한 기준이 된다. 각 초점위치에서 레이저빔의 조사시간은 180ms이고, 이때 조사한 레이저 출력은 700W이다.

Fig. 2에 나타낸 초점 면적은 전체적으로 에너지 출력이 큰 중앙부의 용융된 부분은 표면장력 때문에 약간 부푼 둥그런 원의 형상을 하고 있다. 이 둥그런 원을 중심으로 반지름 방향으로 온도구배가 같은 등온선(isothermal line)의 열영향부와 모재가 순환형(circulation)의 경계를 하고 있다. Fig. 2의 실험 결과를 이용해서 초점위치별 출력밀도와 초점면적을 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 2의 실험결과를 이용해서 초점위치에 따라 초점면적(Spot area)과 출력밀도($P_p = P/A$)값을 계산하였다. z=0인 초점거리(f=200mm)에서 초점 면적이 가장 적어 출력밀도가 가장 컸다. 그림에서 (-)로 표시한 왼쪽은 초점면을 시편 표면보다 아랫방향으로 이동하면서 조사한 결과이고 (+)로 표시된 실험결과는 윗 방향으로 이동하면서 실험한 결과이다. 초점위치를 시편표면보다 아래 방향으로 진행하면서 레이저 빔을 조사하면 오른쪽에 비해 초점 면적이 작아 출력 밀도는 약간 크게 나타난다. 초점을 시편 표면보다 아래로 이동시키면 출력밀도가 가장 큰 위치인 초점위치가 시

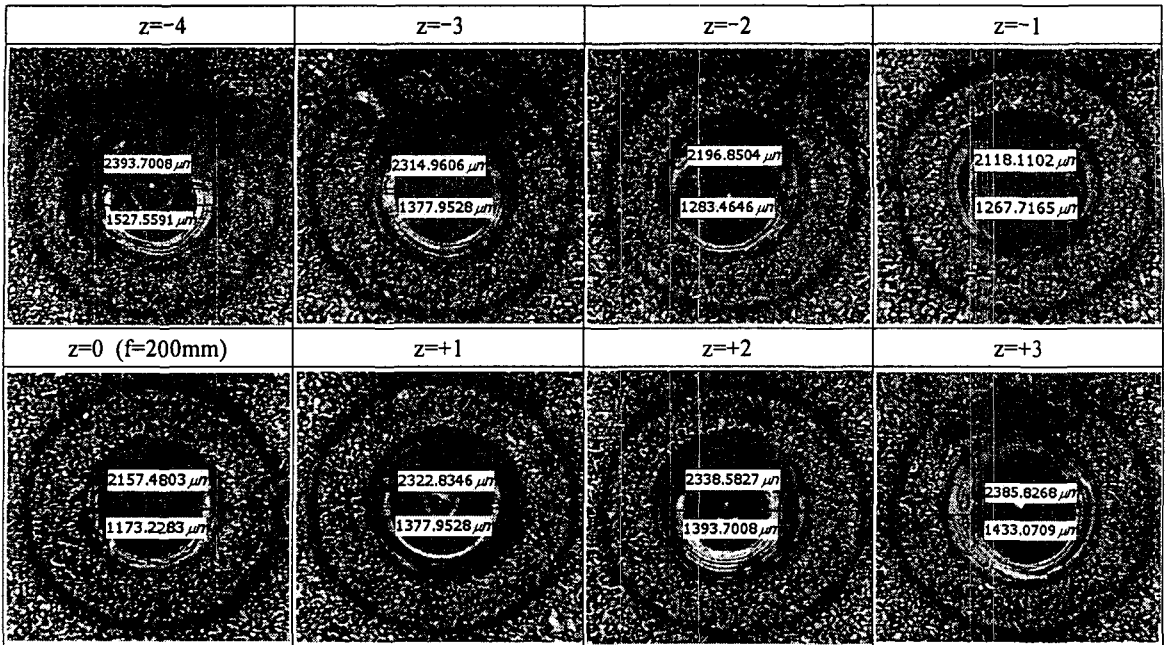


Fig. 2 Spot size measurement on the focus position

편 내부에 작용하여 깊이 방향으로 열이 침투되기 때문이다. 그러나 초점을 시편 표면보다 위 방향으로 이동시키면, 단위 시간당 에너지밀도가 아래방향으로 하여 조사 시켰을 때 보다 작아져 초점면적은 커지고 출력밀도는 작아졌다. 이와 같은 현상은 레이저용접이 keyhole 용접특성을 가지고 있는 것을 고려할 때 효율적인 용접을 하기 위해서는 초점 위치를 시편표면이나 약간 아래로 이동시켜 용접하는 것이 효율적임을 나타내고 있다.

3.2 비드 온 플레이트를 통한 입열량 특성

레이저용접 시 공정변수가 적절하지 않으면 열변형과 용접 결함 등이 발생하므로 최적의 용접 공정 변수를 결정하여 용접해야 한다.¹¹ 최적의 용접 공정변수를 결정하기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate)로 용접하여 입열량을 비교했다.

레이저빔의 속도 변화에 따른 용입 깊이와 용융폭을 측정하여 식 (1)로 계산하여 종횡비를 구한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 식 (1)에서 AR(Aspect Ratio)는 종횡비이고 H는 용입깊이(bead depth), W는 용융폭(bead width)이다.

$$A \cdot R = \frac{H}{W} \quad (1)$$

Fig. 4에서 횡축은 레이저 빔의 이송 속도이고 종축은 종횡비이다. 레이저 빔 이송속도가 느린 0.8m/min 와 1.0m/min에서는 레이저 빔이 내부로 침투되는 것 못지않게 표면으로 열전도 되는 양도 많아져 레이저빔의 이송속도가 1.4m/min 부근보다 종횡비가 작았다. Fig. 4에서 종횡비(Aspect Ratio: AR)가 가장 큰 레이저빔 이송속도는 1.4m/min이었다. 레이저 빔 이송속도가 1.4m/min 부근에서의 종횡비가 가장 컸기 때문에 1.4±0.1m/min로 변화시켜 확인 실험하였다. 확인 실험 결과 1.4-0.1m/min보

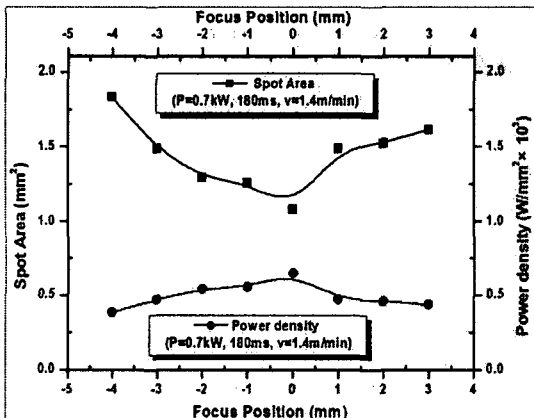


Fig. 3 Spot area distribution on the bead on plate

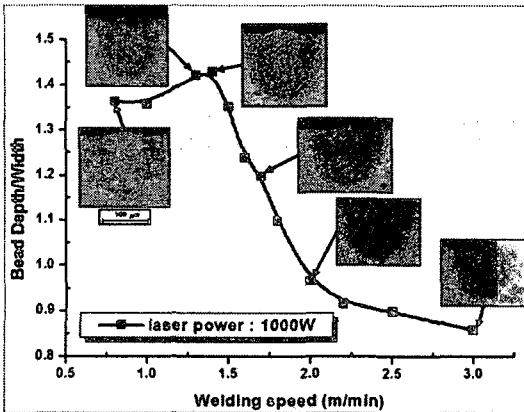


Fig. 4 Influence of welding speed on the aspect ratio

다 1.4±0.1m/min일 때 종횡비가 더 좋았다. 레이저 빔 출력이 1000W일 때 종횡비가 가장 큰 영역은 레이저 빔의 이송속도가 1.4m/min 부근임을 확인하였다. 이보다 빔 이송속도를 증가시키면 빔 이송속도가 증가할수록 단위시간당 출력밀도가 작아져 종횡비가 감소하는 현상이 나타나고 있다.

빔 이송속도에 따른 입열량은 식 (2)로 계산하여 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

$$E = \frac{P}{W \cdot v} \quad (J/cm^2) \quad (2)$$

식 (2)에서 E는 입열량(J/cm²), P는 레이저 출력(W), W는 용융 폭(mm), v는 레이저 빔 이송 속도(m/min)이다. 레이저 출력을 1000W로 하고 z=0 위치에서 레이저 빔 이송속도를 0.5m/min에서 3.0m/min까지 0.5m/min 간격으로 이동시켜 실험하였다. 레이저빔의 이송속도가 증가하면, 레이저빔과 재료의 상호작용 시간이 감소하여 입열량이 감소하는 형태로 나타나고 있다. 그러나 Fig. 4에서 확인한 종횡비가 가장 큰 레이저 빔 이송속도 구간인 1.4m/min±0.1m/min에서, Fig. 5의 입열량 변화를 보면 잠열이 있는 것으로 나타나고 있다. 이 부근에서는 표면 열원으로 인한 표면열전도보다 깊이 방향으로 열이 침투되는 구간으로 레이저빔의 이송속도가 0.5m/min와 1.0m/min보다 입열량이 작은 특성을 나타내고 있다. 종횡비가 가장 큰 1.4m/min±0.1m/min로 실험한 결과와 비교해볼 때, 1.4m/min±0.1m/min보다 레이저 빔 이송속도를 증가시키면 입열량은 급격히 감소하였다. 레이저빔의 이송속도가 1.4m/min±0.1m/min의 속도보다 큰 경우에는 내

부로 침투되는 열보다 표면으로 전도되는 양이 많고 상대적으로 속도가 빠르기 때문에 입열량은 계속적으로 감소하였다.

레이저 출력이 1000W일 때 레이저빔의 이송속도를 2.0m/min이상으로 하면 종횡비가 1보다 작아 열이 깊이 방향으로 침투하는 양보다 표면 열전도가 크게 나타나 키 홀 용접특성을 상실하고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 시편의 두께가 2mm인 시편에 레이저빔을 조사하여 관통되지 않는 상태에서 실험한 결과를 정리한 것이다. 그러나 Fig. 6에서는 두께가 2mm인 시편을 관통되는 비드 온 플레이트 용접하여 용접특성을 분석하고자 한다. 그래서 Fig. 4와 Fig. 5에서 최적의 조건인 레이저빔 이송속도를 1.4m/min로 고정하고 레이저 빔의 출력을 증가시키면서 실험하였다. 레이저빔의 이송속도를 1.4m/min로 고정하고 레이저빔의 출력을 1100W에서 1400W까지 100W씩 증가시키면서 실험한 결과를 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6의 실험은 레이저 출력을 증가시켜 레이저빔을 시편에 조사한 다음 시편 뒷면을 확인하여 관통용접의 여부를 확인하였다. 출력 1300W일 때 완전 관통용접이 되었기 때문에 최초 관통용접에 필요한 출력을 확인하였다. 레이저빔의 출력을 1200W에서 1300W사이에서 25W씩 증가시키면서 용접한 결과 최초로 시편이 관통 용접된 출력은 1275W였다. 출력 1275W에서는 용접 시편의 뒷면에 형성된 비드 모양이 일정하지 않고, 비드 모양이 물방울 모양으로 띄엄띄엄 떨어져서 형성되어 있다. 이는 출력 1275W이고 레이저빔 이

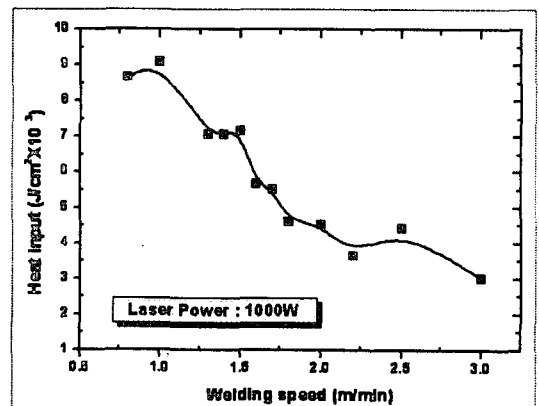


Fig. 5 Influence of welding speed on the heat input capacity

송속도가 1.4m/min에서는 관통용접하기 위한 충분한 입열량이 아님을 나타내고 있다. 레이저빔의 출력을 1300W로 증가 시키면 시편 뒷면의 비드 모양이 균일한 관통용접이 되었고 이때의 입열량은 $3.8 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다.

Fig. 4에서 중형비가 가장 큰 공정조건은 출력 1000W이고 레이저빔 이송속도 1.4m/min일 때 이 때의 입열량은 $7.1 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다. 그러나 Fig. 6에 의하면 출력 1325W일 때 레이저빔 이송속도가 1.4m/min인 경우 양호한 용접 결과를 얻었다. 이 때 입열량은 $3.76 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 으로 출력이 1000W일 때보다 약 두 배 가량 낮았다. 이것은 레이저 출력이 낮을 때보다 높은 출력으로 레이저빔을 시편에 조사하면 시편 내부로의 에너지 전달효율을 증가시키고, 입사에너지가 키 홀에 모여 효율적으로 키 홀을 깊이방향으로 진전시키기 때문이다. 용접효율이 높다는 것은 용접에 필요한 단위부피당 에너지가 일반 용접과정보다 작다는 것을 의미한다. 즉 열을 받는 부위를 작게 만드는데 기여하여 열영향부(HAZ)의 범위를 작게 만든다. 레이저출력을 1325W로 상승시켜 용접한 결과 시편 뒷면이 균일한 비드면을 형성하였으나, 1400W에서는 레이저빔의 출력이 지나치게 커서 용융 폭이 매우 크게 형성되고 표면에서 용융에 의한 기화현상이 발생하였다. 그래서 본 연구에서는 출력 1325W와 1275W의 중간 출력인 1300W로 실험하여 비드면을 확인한 다음 용접공정변수를 출력 1300W와 1325W로 하고 레이저 빔의 이송속도는 1.4m/min, z=0으로 하여 맞대기 용접하였다.

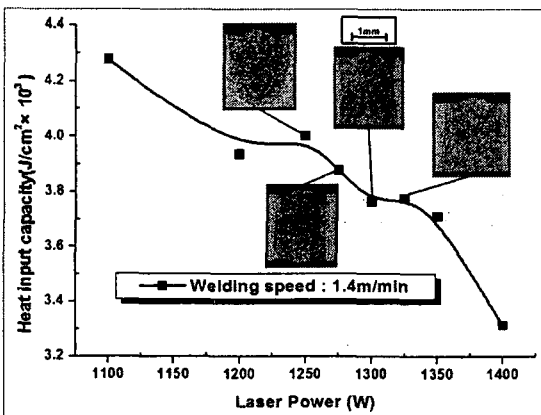


Fig. 6 Influence of Laser power on the heat input capacity

3.3 맞대기용접의 경도 및 인장강도특성

초점위치(focus position) 실험과 비드 온 플레이트 실험을 바탕으로 맞대기 용접을 하였다. 레이저 빔 출력을 1300W와 1325W로 맞대기 용접한 시편의 경도를 알아보기 위해 마이크로비커스경도기를 이용하여 경도를 측정하였다. 경도측정은 시편의 단면을 측정하였으며 표면에서 700 μm 만큼 떨어져서 레이저 빔의 진행방향과 수직방향으로 측정하였다. 이때 경도측정 시 단면의 굴곡이나 흠집 등으로 인한 경도 값의 오차를 없애기 위해 단면을 Sand paper로 연마하였다. 사용된 Sand paper는 #120, #220, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500, #2000이며 경면을 만들기 위해 6 μm 와 1 μm 의 Suspensor로 연마하였다.

Fig. 7에서 나타난 것처럼 표면경도는 모재에서 열영향부(HAZ)를 지나 용융부로 갈수록 경도 값이 커짐을 알 수 있다. 모재는 100Hv에서 110Hv이며 열영향부는 110Hv에서 160Hv의 경도 값이 나타났고 용융부는 160Hv에서 170Hv의 경도 값이 나타났다. 용융부에서 최대 경도 값은 모재에 비하여 약 1.7배 정도 컸다. 그림에서 보듯이 모재와 열영향부, 용융부에서 두 출력조건 모두 비슷한 경도분포를 나타내었다. 열영향부를 포함한 용접 폭은 약 3mm였고, 모재의 바로 옆 경계부에 경도가 약간 저하하는 자체 템퍼 구역(self-tempered zone)이 나타났다. 이 지역은 불균일한 내마모성이 나타날 수도 있다.

용접 후, 열영향부와 용융부에서 모재보다 큰 경도 값이 나타났으며 그 변화폭은 170%였다. 이는 재료가 가진 물리·화학적 특성 때문이며 이를 비

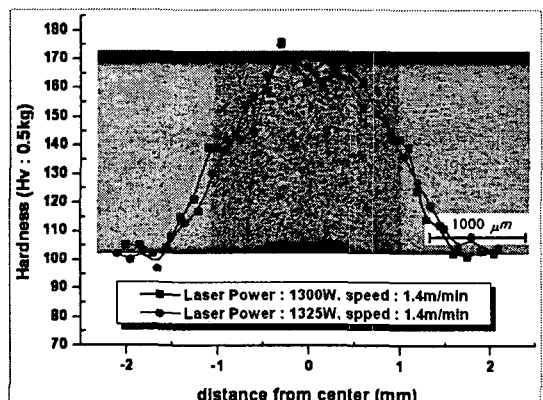


Fig. 7 Develop to hardness on the welding distance

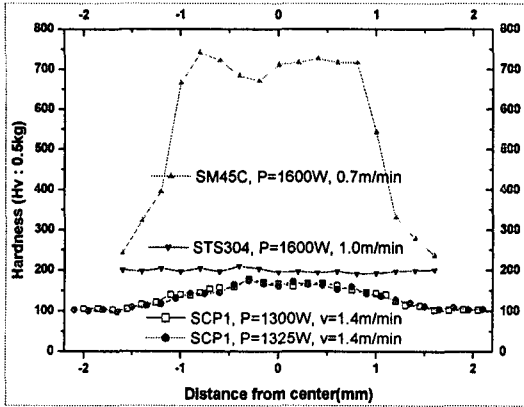


Fig. 8 Develop to comparative hardness on the welding distance of SCP1, SM45C and STS304

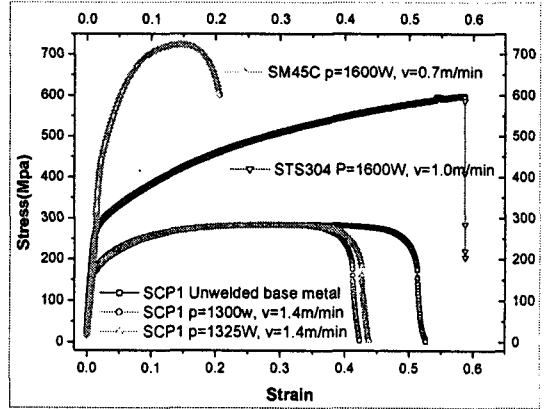


Fig. 9 Strain-Stress relationship for changing laser power and welded metal

교하기 위해 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보듯이 본 연구의 실험 재료인 냉연강판(SCP1), 중탄소강(SM45C)과 스테인레스 스틸(STS304)를 CW Nd:YAG 레이저를 이용하여 용접한 부분의 경도 변화 값을 나타내었다. SCP1이 모재에서 용융부로 갈수록 경도 값이 증가하여 1.7배의 경도상승이 나타난 반면 STS304는 모재의 경도인 200Hv값이 계속 유지되었다.

반면, SM45C는 모재의 경도가 250Hv에서 열영향부에서 급격한 경도 상승이 나타나고 용융부에서는 700~750Hv의 경도값을 보이고 있다. 용접 후 모재보다 경도 상승이 3.5배 증가하였음을 알 수 있으며 SCP1의 경도 증가율인 1.7배의 2배가 넘는다. 이는 레이저 빔이 SM45C에 조사되어 용융·응고될 때 급 가열 되었던 오스테나이트화 되었던 조직이 급 냉각되면서 마르텐사이트화 되었기 때문이다.

빔 이송속도를 1.4m/min, 레이저 출력은 1275W, 1300W, 1325W로 맞대기 용접한 시편과 모재의 인장력 실험한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 맞대기 용접한 시편은 한국공업규격(KS B0801)에 맞춘 인장시험편을 제작하였으며 최소한의 열 영향과 정확한 절단을 위해서 와이어 커팅을 하였다. 이때 인장력실험은 인장시험장비(Intron Corporation U.S.A의 Universal Testing Machine 4206, 15ton)을 사용하였다.

모재와 출력을 1300W, 1325W로 하여 맞대기 용접한 시편을 인장시험 한 결과 인장응력은 280Mpa로 비슷한 값을 나타내고 있다. 모재의 변형

률은 0.52였다. 레이저 빔 출력이 1325W로 용접했을 때 시편의 변형률은 0.43이였으며, 출력이 1300W로 용접한 시편의 변형률은 약 0.42정도 였다. 본 실험 공정변수로 맞대기용접하면 인장응력은 모재와 같지만 변형률은 0.09정도 감소하였다. 레이저 빔의 출력을 1325W와 1300W로 용접했을 때의 변형률을 비교하면 각각 0.43과 0.42로 변형률은 0.01 차이를 보인다. 이는 용접 후, 용융부를 중심으로 용융부와 열영향부에서 모재의 조직이었던 페라이트가 다량의 펄라이트조직으로 변화하여 경도는 상승하고 약간의 취성이 발생하였기 때문이다.

SM45C는 응력이 740MPa까지 증가한 반면 변형률은 0.2에 그쳤다. 이는 오스테나이트 안정화 원소인 C는 급 가열 후 급 냉각시키면 경도가 큰 마르텐사이트 조직으로 되지만 취성이 발생하여 변형률이 작게 나온 것이다. STS304는 응력은 600MPa까지 증가하고 변형률은 0.58이 나타났다. 이는 STS304에 들어 있는 Cr과 Ni성분 때문이다. Ni은 인성과 저온 충격 저항을 증가시키고 Cr은 내식성과 내마모성을 증가시키는 성분으로 강력한 탄화물 생성원소로 마르텐사이트 조직을 안정화시킨다.

3.4 용접단면 및 표면온도 특성

레이저 출력 P=1300W, P=1325W로 하고 레이저 빔 이송속도 v=1.4m/min으로 맞대기 용접을 한 결과를 광학 현미경(Nikon : ECLIPSE L150)으로 용융부(melting zone), 열영향부(HAZ), 모재(base metal)의 조직을 Fig. 10에 나타냈다. Fig.10에서 (A)는 레이저출력이 1300W로 맞대기 관통용접 했을 때 조

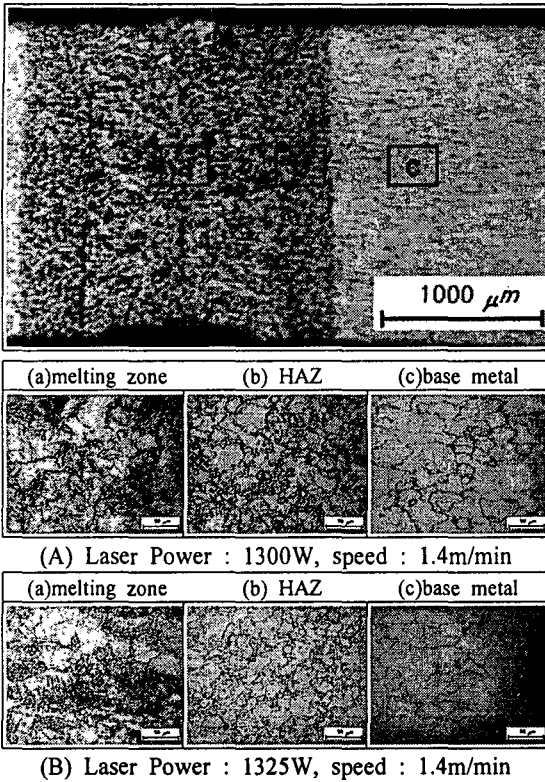


Fig. 10 Micro structure of welding bead

직사진이고 (B)는 1325W로 맞대기 관통용접 했을 때의 조직사진이다. 모재의 조직은 입자가 크고 흰 페라이트로 되어 있고 열영향부는 모재방향으로 급격한 냉각 때문에 입자들이 자기냉각(Self- quenching) 효과로 변태하여 입자의 크기가 조밀해지고 소량의 검은 펄라이트가 혼합되어 나타났다. 용융부는 펄라이트의 양이 많아지고 불규칙하고 작은 면적의 펄라이트와 흰색의 페라이트가 혼합되어 나타났다.

용접과정에서 생성된 펄라이트는 열영향부를 거쳐 용융부로 갈수록 단위 면적당 차지하는 비중이 커진다. 경도측정과 인장시험에서 보았듯이 펄라이트의 함량이 높아질수록 경도 값은 상승하고 변형률은 감소함을 알 수 있다. 즉, 레이저를 이용해 SCPI의 용접을 통해 생성된 펄라이트 용접부위와 그 주변에 경도의 상승을 가져오지만 인장응력을 받는 상태에서는 나쁜 영향을 주어 용접부위의 파괴원인이 될 수도 있음을 보여주고 있다.

빔 이송속도를 1.4m/min, 초점위치를 z=0mm (Lens focal length : 200mm), 빔 조사 길이(L)는

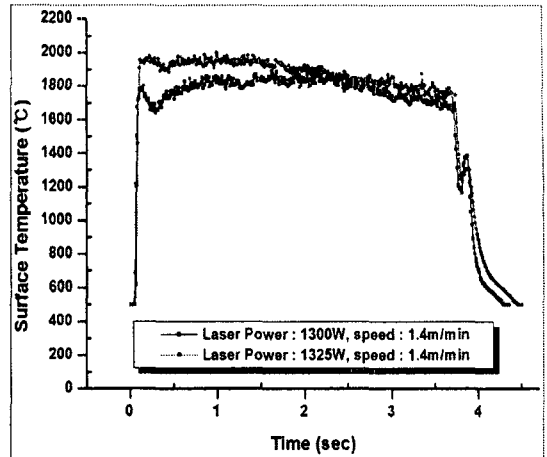


Fig. 11 The result of surface temperature monitoring by laser beam welding

80mm로 고정하고, 레이저출력은 1300W, 1325W, 변화시켜 용접할 때 표면온도를 측정하였다. 이때 적외선온도계의 측정각도는 45°이다.

레이저빔이 시편에 조사될 때 적외선온도계 (Infrared pyrometer)로 표면용융온도를 측정 한 결과를 Fig. 11에 나타냈다.

Fig. 11에 나타난 것처럼 레이저 빔 출력이 1325W일 때, 1300W보다 표면의 온도가 전체적으로 높게 나타났다. 레이저빔 출력이 1300W일 때 초기의 표면온도가 높았다가 차츰 낮아지는 것은 레이저빔이 조사될 때 piercing 이후 내부로 흡수된 에너지가 모재로 열전달이 이루어지는 과정에서 레이저빔이 이동될 때 초기 키 홀 내부로의 입열량보다 주변부로의 열 전달량이 많기 때문이다. 대부분의 적외선은 금속 표면에서 반사하기 때문에 레이저 용접 초기에 금속표면을 변화시켜 반사율을 감소시켜 레이저빔의 흡수율을 증가시킨다. 금속표면의 반사율을 낮추기 위해 Piercing할 때 레이저 출력이 순간적으로 금속 용융온도까지 상승시키면 Piercing영향을 받지 않음을 나타내고 있다.

이는 용접구간인 80mm에서 일정한 표면온도를 가지고서 용접결합이 없는 안정적인 용접을 위해서는 초기 Piercing 이후 레이저 빔이 나올 때까지 충분한 입열량이 주어지는 1325W가 안정적인 조건이라 하겠다.

4. 결론

입열량 변화에 따른 냉연강판의 레이저용접 특성을 파악하기 위해서 bead on plate로 최적의 공정 변수를 찾았으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Bead on plate를 실시하여 최고의 중횡비와 충분한 입열량을 기준으로 레이저 출력 1000W에서 빔 이송속도가 1.4m/min일 때 최적의 공정조건을 얻을 수 있었다.

(2) 경도와 인장강도 측정결과 빔 이송속도가 1.4m/min일 때 레이저 출력이 1300W, 1325W에서 최적의 값을 얻었으며, 용접 시 발생하는 표면의 온도를 측정된 결과 1325W에서 가장 안정적임을 알 수 있다.

(3) 본 연구에 사용된 냉연강판은 레이저 빔 출력 1325W, 빔 이송속도 1.4m/min, 초점거리 z=0에서 용접결함이 없고 최적의 강도를 가지는 가장 적당한 입열량을 나타내는 공정조건이다.

참고문헌

- Hoskingf, M. and Rejent, A., "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," WELDING JOURNAL, pp. 127-136, 1999.
- Olabi, A. G., Gasalino, G., Benyounis, K. Y. and Hashmi, M.S.J., "An ANN and Taguchi algorithms integraed approach to the optimization of CO2 laser welding," Advances in Engineering Software, pp. 1-6, 2006.
- Sun, Z. and Kuo, M., "Bridging the joint gap with wire feed laser welding," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, No. 1, pp. 213-222, 1999.
- Suh, J., Kang, H. S., Lee, J. H., Park, K. T., Lee, M. Y. and Jung, B. H., "Minimization of Welding Defect in CO2 Laser Welded Tube," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 6, No. 3, pp. 19-23, 2005.
- Hitz, B., "Introduction to laser technology," IEEE Press, U.S.A., pp. 1-6, 1998.
- Eroglu, M., Aksoy, M. and Orhan, N., "Effect of coarse initial grain size on microstructure and mechanical properties of weld metal and HAZ of a low carbon steel," Material Science and Engineering, Vol. A269, No. 1, pp. 59-66, 1999.
- Murugan, S., Kumar, P. V., Raj, B. and Bose, M.S.C., "Temperature distribution during multipass welding of plates," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, No. 12, pp. 891-905, 1998.
- Bertrand, Ph., Smurov, I. and Grevery, D., "Application of near infrared pyrometry for continuous Nd:YAG laser welding of stainless steel," Applied Surface Science, Vol. 168, No. 1, pp. 182-185, 2000.
- Carmignani, C., Mares, R. and Toselli, G., "Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate," Comput. Method Appl. Mech. Engrg., Vol. 179, No. 3, pp. 197-214, 1999.
- Nam, G. J., Kim, K. W., Hong, J. U., Lee, J. H., Suh, J. and Cho, H. Y., "Finite Element Analysis of Nd:YAG Pulse Laser Welding for AISI 304 Stainless Steel Plate," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 30, No. 4, pp. 428-434, 2006.
- Kim, C. H., Choi, W. Y., Chae, H. B., Kim, J. H. and Rhee, S. H., "A Study on CO2 Laser-TIG Hybrid Welding of Zinc-Coated Steel Sheet," The Korean Welding Society, Vol. 24, No. 4, pp. 306-310, 2006.
- Hu, B. and Richardson, I. M., "Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminum alloys," Materials Science and Engineering, Vol. A429, No. 1, pp. 287-294, 2006.
- Yoo, Y. T., Shin, H. J., Ahn, D. G. and Im, K. G., "Dissimilar Metal Welding of Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel using CW Nd:YAG Laser," Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 17-26, 2005.
- Yoo, Y. T., Shin, H. J., Ahn, D. G., Im, K. G. and Shin, B. H., "Dissimilar Metal Welding of Medium Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel utilize CW Nd:YAG Laser," Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 47-55, 2006.