

# 연속파 Nd:YAG 레이저를 이용한 Ni-MH전지용 저탄소강의 다층 박판 용접 특성

양윤석<sup>+</sup>, 황찬연<sup>+</sup>, 유영태<sup>\*</sup>

(논문접수일 2011. 06. 15, 심사완료일 2011. 08. 30)

Multi-thin plate welding characteristics of Low Carbon Steel for Ni-MH battery of  
using Continuous Wave Nd:YAG laser

Yun-Seok Yang<sup>+</sup>, Chan-youn Hwang<sup>+</sup>, Young-Tae Yoo<sup>\*</sup>

## Abstract

Lap joint welding conducts low carbon steel plates using a 2.0kW continuous wave Nd:YAG laser beam. The specimen is composed of thin plate of 20 sheets. Process Variables contain two controlled parameters of the laser power and the welding speed. In order to quantitatively examine the characteristics of the lap welding, the welding quality of the cut section, stain-stress behavior, and the hardness of the welded part are investigated. The weld width difference between the top and the bottom because the welding speed is increased. The reason, cooling rate is decreased because of fast welding speed. When the heat input is higher, larger volume of the base metal will melt and the welding heat has longer time to conduct into the bottom from the top. The microstructure and tensile properties of the joints are investigated in order to analyze the effects of heat input on the quality of laser welded specimen. From the results of the investigation, We observe that welding quality is good for the laser power of 1800W, and laser welding speed from 1.8m/min to 2.2m/min.

**Key Words** : Multi-thin plate(다층다판), Low Carbon steel(저탄소강), CW(continuous) Nd:YAG laser(연속파형Nd:YAG레이저)

## 1. 서론

최근 급격한 원유 가격 상승과 지구환경 온난화에 따른 저탄소 배출 친환경자동차에 대한 요구가 급증하고 있다. 이와 같은 상황 하에 미국의 캘리포니아 주에서는 무공해 차량(ZEV : Zero Emission Vehicle)의 판매를 의무화하는 배기가스 규제 법안을 입법화하였다. 무공해 차량의 요구에 따라 각국은 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle : HEV), 전기자

동차(Electric Vehicle : EV) 연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle : FCEV)의 개발에 관심이 높아지고 있다.

하이브리드 전기자동차와 전기자동차의 핵심부품 중의 하나는 내연기관 자동차의 엔진 역할을 하는 모터와 배터리이다. 이와 같은 이유로 많은 산업체에서는 에너지 밀도가 높은 배터리 개발에 관심을 가지고 연구개발에 박차를 가하고 있다. 에너지밀도 측면에서 리튬이온 배터리에 대한 관심이 고조되고 있고, 안정성 측면에서는 Ni-MH 배터리의 성능개선과 경량화에

<sup>+</sup> 조선대학교 첨단부품소재공학과 (정밀기계설계공학)

<sup>\*</sup> 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지 조선대학교 공과대학1호관 8층 메카트로닉스공학과

연구가 집중 되고 있다<sup>(1,2)</sup>.

본 연구에서는 기존에 Ni-MH 하이브리드용 전지를 제작 할 때 TIG용접을 하거나 볼트로 체결하여 사용했던 부분을 개선 하여 출력을 높이고 배터리 무게를 줄이기 위해 레이저 용접을 하고자 한다. TIG 용접은 비소모성 텅스텐 용접봉과 모재간의 아크열에 의해 모재를 용접하는 방법으로 용접부 주위에 불활 성가스를 공급하면서 용접한다. TIG용접의 단점으로는 용접속 도가 느리고, 텅스텐 전극 봉이 용접부에 녹아들어가 오염될 경우 용접부가 취화되기 쉽고, 용가재의 끝부분이 공기에 노출 되면 용접금속이 오염되고, 열영향부가 크다는 단점이 있다. 그 중 TIG용접의 단점인 열영향부가 크다는 한계 때문에 배터리를 구성하는 부품이 커져 배터리 무게가 증가하게 된다. 열영향 부가 크기 때문에 극주와 극판 용접시 극판이 손상된다는 문제 점이 있다. 이 때문에 두 재료에 열영향을 주지 않기 위해 둘의 이음새 부분을 멀리 해야 하므로 자재가 길어지게 된다. 이렇게 자재가 길어지면 코스트 비용이 증가하고, 배터리 중량 또한 증가하여 차량경량화에 문제점으로 작용한다. 또 극주와 극판 부분이 길어지게 되면 그 만큼의 전도손실이 발생하여 배터리 출력성이 떨어지게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 극주와 극판을 레이저 용접하고자 한다. 여기서 말하는 극판은 배터리를 구성하는 음극판과 양극판을 말하며 극주는 여 러 장의 음극판과 양극판을 하나로 묶어 주는 단자이다.

기존의 용접방법에 비교하여 레이저 용접을 하면 기하학적으로 작은 부분을 변형이 거의 없이 극소화하면서 용접이 가능하다. 레이저빔을 이용하는 용접은 고밀도 에너지 열원을 사용하기 때문에 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되어 일반용접에 비해 종횡비(Aspect Ratio)가 크고, 용입 깊이는 깊고, 열영향 부(Heat Affected Zone: HAZ)가 작아 열변형이 거의 없고 극 소 부위 용접이 가능한 장점이 있다. 레이저용접은 용가재 (Filler Wire)를 사용하지 않는 용접 방법이며, 높은 출력밀도로 매우 짧은 시간 내에 용접하기 때문에 모재 내부로 열확산이 적어 내부응력이 작게 형성되어 용접변형이 적다. 이러한 이유로 레이저 용접은 일반 용접에 비해 금속조직이나 기계적 성질 측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 용접 성 평가를 받고 있다.

하지만 레이저 용접은 고에너지밀도로 매우 빠른 속도로 용 접하기 때문에 용접공정변수에 예민하게 반응하는 성질이 있 다. 그러므로 레이저 용접을 할 때는 다양한 공정변수를 적절하 게 조절하여 최적의 상태로 용접해야 한다. 레이저 용접할 때 대표적인 공정 변수로는 레이저 파장, 레이저 출력, 레이저빔 이송속도, 초점위치, 보호가스의 종류 유량 및 각도, 용접재료 의 재질조성분과 반사율 등이 있다. 레이저 파장은 레이저빔의 에너지가 재료에 흡수되는 에너지를 결정하는 중요한 변수이 고, 레이저 출력, 레이저빔 이송속도, 초점위치 등으로 입열량 을 결정하기 때문에 재료의 두께 등을 고려하여 공정변수를 선

정해야 한다. 특히 레이저빔은 전자기파이므로 금속표면의 자 유전자에 의해 반사되는 반사량과의 상호작용이 중요한 변수 로 작용하기 때문에 레이저빔의 종류와 금속 그리고 재료 가공 상태에 따라 용접성이 다르게 나타난다. 더욱이 탄소강은 용접 시 탄소(Carbon)의 조성성분이 많을 경우 고온균열이 촉진된 다는 연구결과가 있다<sup>(3~9)</sup>. 하지만 본 연구에서 사용된 SS400 은 저탄소강으로 탄소함량이 적어 고온 균열의 결함 발생확률 이 적을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 배터리를 구성하는 얇은 박판 수십 장을 관통 용접하여 극주에 용접하고자 한다. 박판을 관통용접 할 때 겹친 부분의 갭(Gap)의 영향과 입열량에 따라 레이저 용접특성이 달라질 것으로 판단되기 때문에 최적의 용접변수를 결정하고 자 한다. 실험에 사용한 레이저는 파장이 1.06 $\mu$ m인 Nd: YAG 레이저이다. 실험에 사용한 시편은 배터리 극주에 부착되는 저 탄소강인 SS400이다. 최적의 공정변수를 얻기 위해 레이저빔 의 출력과 레이저빔의 이송속도를 변화시켜 실험하고 종횡비 와 입열량을 결정하고자 한다. 용접한 후 용융단면의 결함을 분석하기 위해 용접단면의 조직사진을 고찰하였고 용접부의 경도 및 인장시험을 통해 용접부의 조직의 경도변화와 인장응 력을 기준으로 용접성을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구에 이용된 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06 $\mu$ m이고, 최 대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(Con tinuous Wave : CW)이고, 레이저빔은 직경 600 $\mu$ m인 광섬유 를 통해서 전달된다. 레이저빔 발산 각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이다. 작업대 는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되었

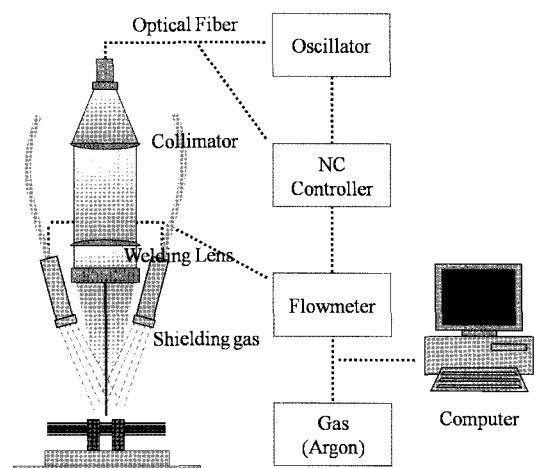


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

고, 다층 박판을 용접하기 위한 모식도는 Fig. 1에 나타내었다.

레이저 가공헤드는 젠트리 타입 가공 장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 1000mm, 500mm, 400mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5 $\mu$ m, z축에 대한 위치정밀도는 1 $\mu$ m, 반복정밀도는 8 $\mu$ m이다<sup>(8,9)</sup>.

## 2.2 실험방법 및 시편

실험에 사용된 시편은 저탄소강으로 SS400이며 크기는 80mm(L) $\times$ 25mm(W) $\times$ 0.1mm(T)이고 시편 20장을 겹쳐 용접하였다. 용접 시 시편 표면의 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후, 레이저빔의 출력과 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 실험하였다. 시편의 화학적 성분은 Table 1과 같고 포스코에서 제공한 검사증명서를 정리한 것이다. 용접 할 때 시편은 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 흘러보내 공기를 차단함으로써 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 2~3l/min로 하였다. 레이저 용접하면서 레이저빔의 입열량 변화에 따른 용접특성을 연구하기 위해 레이저출력은 1400W, 1600W, 1800W로 변화시키는 한편 레이저빔의 이송속도를 1~3.4m/min으로 변화시키면서 시편 20장이 전부 관통용접 되었는지 확인하여 이송속도 한계를 결정하였다.

레이저 공정변수 변화에 따른 용접단면을 관찰하기 위해 와이어 컷팅기로 용접시편을 절단하고 사포(sand paper)로 연마 및 폴리싱 후 에칭액(Nital 3%)을 만들어 에칭하였다. 에칭된 용접비드 경계면은 광학 현미경(Olympus : GX-51)으로 관찰하였다. 박판 20장을 겹치기 용접 후 용접단면을 절단하여 광학 현미경으로 용입 깊이와 폭을 측정하였다. 용접 시 레이저빔 이송속도의 변화에 따른 종횡비(Aspect Ratio), 시편내부로 흡수되는 입열량(Heat Input Capacity)의 변화에 따른 인장응력의 변화를 측정하였다. 시편 20장을 겹치기 용접할 때 레이저빔의 출력과 레이저빔의 이송속도를 결정하기 위해 레이저빔 출력과 이송속도 변화시키면서 레이저 용접실험을 했다. 실험 조건은 시편 20장이 전부 관통용접 되었는지를 확인하면서 실험했다. 레이저빔 출력이 1400W일 때는 레이저빔의 이송속도 1m/min~1.8m/min로 하였고 1600W일 때는 1.2m/min~2.0m/min, 1800W일 때는 1.8m/min~3.4m/min하여 레이저빔의 속도를 0.2m/min씩 증가시키면서 입열량의 변화에 따라 용접특성을 실험하였다. 출력별 이송속도가 다른 이유는 출력이 낮을 때 이송속도를 증가시키면서 시편 20장이 전부 관통용

접 되지 않는 한계속도까지 속도를 증가시킨 결과 값이다. 레이저빔의 이송속도의 낮은 한계속도는 시편의 가장 윗면에 있는 시편이 고에너지에 의해 증발되어 용접의 결합이 발생하지 않을 수 있는 저속도 한계 값이다.

시편은 공작대에 부착된 지그(Jig)와 박판 20장을 겹칠 수 있는 지그를 제작하여 단단히 고정시켜 용접 중 열팽창에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다. 레이저 용접시 열 때문에 발생하는 조직변화에 의한 경도측정은 마이크로 비커스(SHIMADZU : HmV-2 model) 경도 시험기를 사용하여 0.5kg의 하중을 적용시켰다.

용접실험 하기 전에 에너지 밀도가 가장 높은 초점위치를 결정하기 위해 기초실험 한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 f는 레이저빔 집속렌즈 초점거리를 나타내고, Z는 장비의 수직축 위치를 의미한다. 실험 결과를 바탕으로 초점 면적이 가장 작은 위치를 작업거리 0으로 하고 실험 기준점으로 하여 실험하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 종횡비와 입열량 특성

레이저빔이 재료표면에 흡수되는 것은 재료의 표면에서 물성치와 가공조건에 따라 달라진다. 용접에 영향을 주는 재료의 대표적인 물성치는 반사율, 열전도율 및 전기전도도이다. 레이저빔이 표면에 조사되면 초점위치에 따라 시편 표면에 미치는 재료별 물리적 성질이 다르기 때문에 흡수도가 달라진다<sup>(10)</sup>. 레이저용접은 키홀(Key hole)용접으로 초기에 매우 높은 에너지 밀도의 레이저빔이 금속표면에 조사되면, 레이저빔은 전자기장이기 때문에 매우 큰 전기장의 영향으로 재료표면의 자유전자에 영향을 주게 되고, 이 자유전자는 레이저빔의 충돌에 이동하는 방향에 반대 방향으로 저항하면서 열이 발생한다. 이렇게 발생한 열은 금속표면의 반사율을 감소시켜 에너지를 집중시켜 내부로 전달되면서 키홀용접 된다. Fig. 3은 레이저빔을 시

Table 1 Chemical composition of SS400 (POSCO Mill Test Certificate)

SS400 (Wt %)	C	Si	Mn	P	S
	0.1511	0.222	0.749	0.0158	0.0086

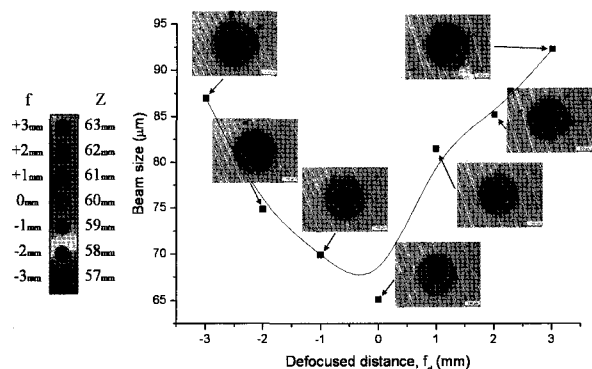


Fig. 2 Variation of beam spot size to defocused distance

편 20장의 표면에 조사시켰을 때 키홀이 형성되면서 용접된 겹치기 용접한 실험결과이다. 시편단면에 검정색으로 나타나 있는 부분은 시편이 박판으로 겹쳐있기 때문에 예칭하면서 발생한 박판사이의 이물질로 용접결함은 아니다.

Fig. 3은 레이저빔의 출력을 1400W, 1600W와 1800W로 하고 각각의 출력별 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 입열량을 변화시켜 용접한 실험결과이다. 레이저빔의 출력별 레이저빔 이송속도는 시편 20장이 관통용접 되지 않을 때까지 이송속도를 각각 0.2m/min씩 증가시키면서 실험한 결과이다. 레이저빔의 출력 1400W에서 1.8m/min이상으로 레이저빔 이송속도가 증가하면 시편 20장이 관통용접 되지 않았고, 레이저빔의 출력이 1600W에서는 2.0m/min이상에서 시편 20장이 관통용접이 되지 않았다. 1800W에서는 3.2m/min에서는 19장이 용접되었고, 3.4m/min에서는 18장이 용접되었다. 레이저빔 출력을 일정하게 고정하고 레이저빔의 이송속도를 증가시키면 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하는 시간이 짧아져 재료에 충분한 에너지가 흡수되지 않기 때문에 관통용접 되지 않았다. 레이저빔의 출력이 1400W에서 레이저빔 이송속도가 1m/min보다 느릴 경우 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하는 시간이 상대적으로 길어져 과입열량이 되어 표면에 있는 시편이 증발되는 심각한 용접결함이 발생하여 1m/min이하로는 용접하지 않았다. 레이저빔 출력이 1600W에서는 1.2m/min, 1800W에서는 1.8m/min보다 느릴 경우 과입열량에 의한 재료의 증발현상이 나타났다. 레이저빔의 출력이 1800W에서는 레이저빔의

이송속도가 3.2m/min와 3.4m/min에서는 아래 부분에 있는 시편이 각각 1장과 2장이 용접되지 않았다.

Fig. 3의 실험결과와 특징은 레이저빔의 이송속도가 느릴 경우 레이저빔과 재료가 서로 상호작용하는 시간이 상대적으로 길어지면서 가장 상부에 있는 시편표면(전면비드)으로부터 열전도가 발생하여 용접 단면적이 증가하였다. 본 실험 조건에서 레이저빔 이송속도가 가장 느린 경우에는 전면비드와 후면비드(가장 아래 용접시편) 폭의 차이가 비교적 적은 반면 레이저빔의 이송속도가 빨라지면 전면비드와 후면비드 폭의 차이가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 입열량이 감소하여 시편 주변부로 열손실이 발생하기 때문에 발생하는 현상이다. 레이저빔의 출력과 레이저빔의 이송속도를 기준으로 용접단면의 특성을 분석하기 위해 입열량을 아래 식 (1)로 계산하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

$$E = \frac{P}{W \cdot v} \quad (J/cm^2) \quad (1)$$

식 (1)에서  $E$ 는 입열량,  $P$ 는 레이저빔 출력,  $W$ 는 용융폭,  $v$ 는 레이저빔 이송속도이다. Fig. 4에서 횡축은 레이저빔 이송속도이고, 종축은 입열량이다. Fig. 4에서 출력변화에 대한 레이저빔의 이송속도가 전 속도영역으로 나타내지 않고 출력별로 구분되어 있는 것은 시편 20장이 관통용접 되었을 때를 기준으로 나타냈기 때문이다. 전체적으로 레이저빔의 이송속도

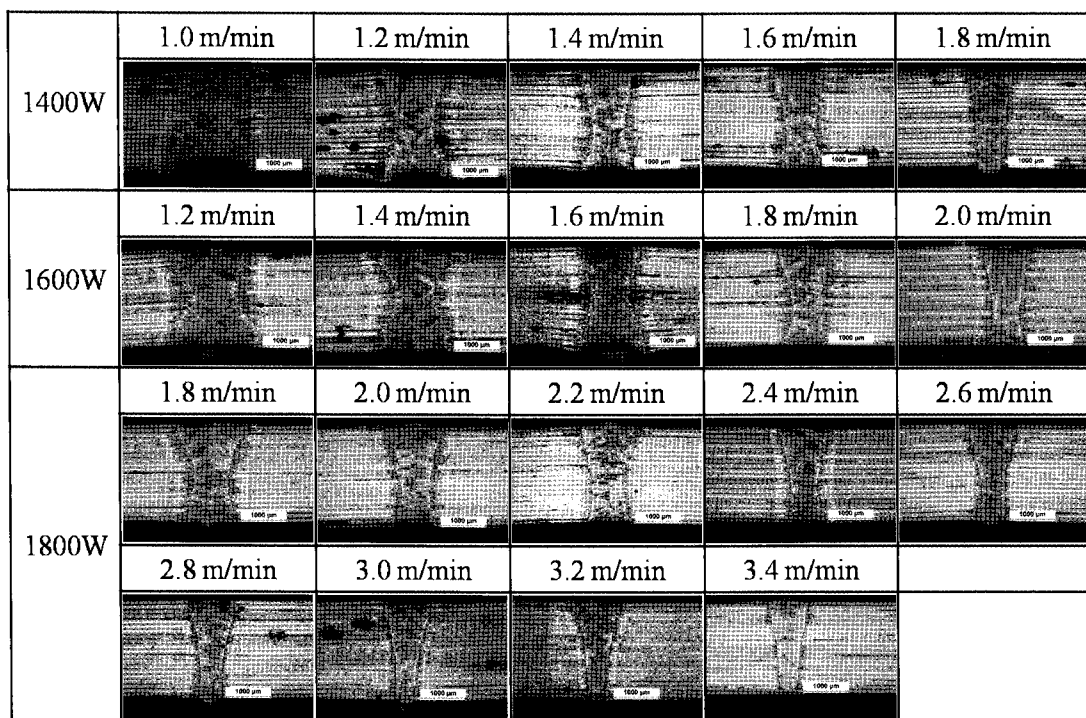


Fig. 3 Welding cross-sectional area to variation of welding speed and power

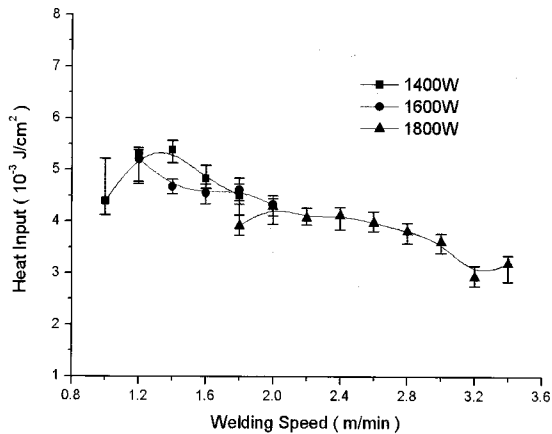


Fig. 4 Influence of welding speed and power on the Heat Input

가 증가할수록 레이저빔과 재료가 상호작용하는 시간이 짧아져 입열량이 감소함을 나타내고 있다. 레이저빔의 이송속도가 1.6m/min일 때 레이저빔의 출력 1400W와 1600W일 때 비슷한 입열량 값을 나타내고 있고, 레이저빔의 이송속도가 2.0m/min 일 때는 레이저빔의 출력이 1600W와 1800W일 때 입열량과 비슷한 값을 나타내고 있다. 레이저빔의 출력을 고정하고 레이저빔의 이송속도를 증가시키면서 시편 20장을 관통용접 했을 때, 레이저빔의 이송속도가 일정속도 이상이 되면 시편 20장이 전부 관통용접 되지 않았다. 하지만 레이저빔의 출력과 레이저빔의 이송속도를 증가시키면서 입열량을 조절하면 목표로하는 용접이 가능함을 의미한다. 레이저빔의 출력이 낮을 때보다 레이저빔의 출력을 크게 했을 때 입열량이 작게 나타나고 있는데 이는 입열량이 작으면 시편에 대한 열전도 작기 때문에 시편 주위로 열전도 되는 양이 작아 열영향부 좁아지기 때문에 우수한 용접이 가능함을 의미한다. 그림에서 이송속도가 3.2m/min 부터는 입열량이 작아 시편 20장 전부 용접되지 않았지만 인장 응력 특성분석의 자료로 활용하기 위해 도시하였다.

레이저빔의 출력과 레이저빔의 이송속도의 변화에 대한 입열량 특성을 비교하기 위해 용접 윗면(전면비드)의 폭과 아래면(후면비드)의 폭의 비를 나타내었다. 용접 단면의 윗면(전면비드) 폭을  $W_1$ 으로 하고 아래면(후면비드) 폭을  $W_2$ 로 하여 관통용접 후 시편 전면비드 폭과 후면비드 폭의 변화를 비교 분석하기 위해 용접면 폭비(Width Ratio : WR) 식 (2)로 계산한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 레이저빔의 이송속도가 증가할수록 후면비드의 폭이 열전도 손실에 의해 작아지기 때문에 WR값이 증가하였다.

$$WR = \frac{W_1}{W_2} \quad (2)$$

다음에 논의 할 인장응력은 용접 시편의 전면비드 폭과 후면

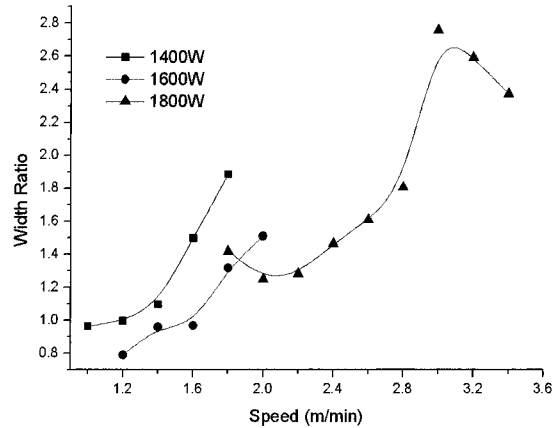


Fig. 5 Influence of welding speed and power on the Width Ratio

비드 폭의 용접단면 폭비(WR)이 1.3에서 1.5일 때 가장 인장 응력 값이 크게 나타났다. 일반적으로 겹치기 용접할 때 식 (2)로 나타낸 폭비가 1인 경우 가장 양호하게 용접된 것으로 판단 하지만 다층박판용접을 할 경우 인장응력 값이 작게 측정되었다. 이는 박판 1장을 겹치기 용접할 경우 폭비가 1정도 되었을 때 유효 용접단면적이 증가하기 때문에 인장응력이 클 수 있으나 다층박판 용접일 경우 폭비가 1근방에서는 가장 위에 있는 시편의 조성성분의 일부가 증발되어 시편이 손실되기 때문에 인장응력 값이 상대적으로 작게 나타났다. 이는 용융온도가 1907°C인 Cr에 비해 온도가 1455°C인 Ni과 용융온도가 1246°C인 Mn성분의 일부가 증발되어 손실되기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2 인장강도 및 경도특성

박판 20장을 겹치기 용접한 시편을 한국 산업 규격의 금속 재료 인장 시험편의 13B호에 맞춰서 제작하였으며 최소한의 열영향과 정확한 절단을 위해서 와이어 컷팅을 하였다. 레이저

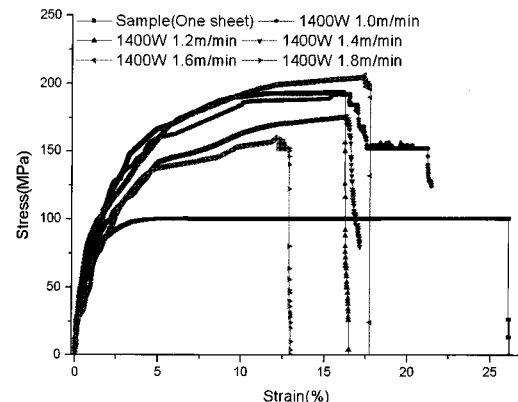


Fig. 6 Comparison of tensile stress for laser beam travel speed

빔의 출력이 1400W일 때 레이저빔의 이송속도 변화에 따른 인장응력 실험결과를 Fig. 6에 나타냈다. 인장응력이 가장 크게 나타난 레이저빔의 이송속도는 1.6m/min로 이때 인장응력 값은 206.27Mpa이고, 가장 인장응력이 작게 나타난 것은 1.8 m/min로 이때 인장응력 값은 160.21Mpa이다. Fig. 6의 그림 중에 인장응력이 대략 100Mpa로 표시된 것은 시편 1장을 용접하지 않고 인장시험 한 결과이다. 모재 1장만을 인장시험 했을 경우 인장응력은 20장을 겹치기 용접했을 때보다 약 2배정도 작았지만 변형율은 상대적으로 크게 나타났다. 이는 용접시 용접부의 경도 값이 증가하기 때문에 강도가 증가하면서 취성 또한 증가하기 때문에 모재보다 변형율이 작아진 것이다. 실험 값 중 1.0m/min인장응력이 불연속선이 나타난 것은 시편 20을 용접하여 인장시험 도중 내부에서 1장이 먼저 항복점이 지난 다음 나머지가 그 뒤따라 항복점을 넘었기 때문이다. 레이저빔의 출력이 1400W일 때 레이저빔의 이송속도가 1.8m /min로 상대적으로 빠를 경우 충분한 입열량을 얻지 못하여 인장응력이 작은 것으로 판단된다.

Fig. 7은 레이저빔 출력이 1600W일 때 레이저빔 이송속도 변화에 따른 인장응력 크기를 나타낸 결과이다. 인장응력이 가장 크게 나타난 것은 레이저빔 이송속도가 2.0m/min이고 1.6m/min일 경우에 인장응력이 가장 작게 측정되었다. 각각의 최대 인장응력 값은 2.0m/min일 때 208.309MPa, 1.6m/min일 때 158.211MPa로 측정되었다. 레이저빔 출력에 비해 레이저빔 이송속도가 지나치게 느려지면 시편과 레이저빔과의 상호 작용 시간이 상대적으로 길어져 과입열량이 되어 용접부의 조성 성분 중 용융온도가 낮은 일부가 증발되어 인장응력 값이 작은 것으로 판단된다.

Fig. 8은 레이저빔 출력이 1800W일 때 레이저빔 이송속도 변화에 따른 인장응력 값을 나타낸 결과이다. 인장응력이 가장 크게 나타난 레이저빔 이송속도는 2.2m/min일 때 인장응력이 204.232MPa로 가장 크게 나타났고 이송속도가 3.0m/min일

때는 인장응력 값이 152.214Mpa로 가장 작게 나타났다. 시편 20장을 겹치기용접을 할 때 3.2m/min으로 레이저빔을 이송할 경우 시편의 가장 아래에 있는 1장이 용접되지 않았고, 3.4m/min으로 레이저빔을 이송하면서 용접하였을 경우 시편의 가장 아래 시편 2장이 용접되지 않을 때 인장강도가 역시 작게 측정되었다. 레이저빔의 이송속도를 빠르게 할 경우 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하는 시간이 짧아 충분한 입열량을 얻지 못해 관통용접이 완벽하게 이루어지지 않아 인장응력 값이 작게 나타나 다른 공정조건에 비해 용접결함으로 나타났다.

Fig. 6에서 Fig. 8을 종합 해 보면 시편 20장이 전부 관통되도록 겹치기 용접했을 때 레이저빔의 이송속도가 느릴 경우 인장응력 값이 크게 측정되지 않았다. 이는 시편을 급가열 한 후 급 냉각되는 레이저 용접의 특성상 레이저빔의 이송속도가 느리다면 레이저빔과 재료의 상호작용이 상대적으로 길어지면서 용융온도가 낮은 일부 조성분이 증발하여 손실되기 때문인 것으로 판단된다. 또 한편 레이저빔의 이송속도가 지나치게 빨라졌을 때 인장응력 값이 작게 측정된 이유는 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하는 시간이 짧아 용접부에서 용융과 재응고 현상이 적절하지 않기 때문이다. 레이저빔의 이송속도가 지나치게 빠르면 키홀이 열려 용접부 내부로 용융부가 침투하며 전달되기 전에 키홀이 닫히기 때문에 완전한 용접이 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 또 한편으로는 레이저빔 이송속도가 빨라지면서 레이저빔과 재료가 상호작용하는 시간이 짧아져 시편 주변부로 에너지를 손실하여 용접단면 모양이 Fig. 3에 나타난 것처럼 화분모양으로 형성되어 유효 용접단면이 감소하기 때문이다.

Fig 9는 20장을 겹치기 용접한 후 가운데 시편인 10번째 시편의 용접된 횡단면의 경도분포를 측정한 결과이다. 용접된 부분의 경도는 약 250에서 280Hv의 경도 값을 나타내고 있다. 모재의 경도가 90Hv 내외인 것을 고려하면 약 2.8배정도 경도 값이 증가되었다. 이것은 용융부의 탄소 성분이 냉각되면서 퍼

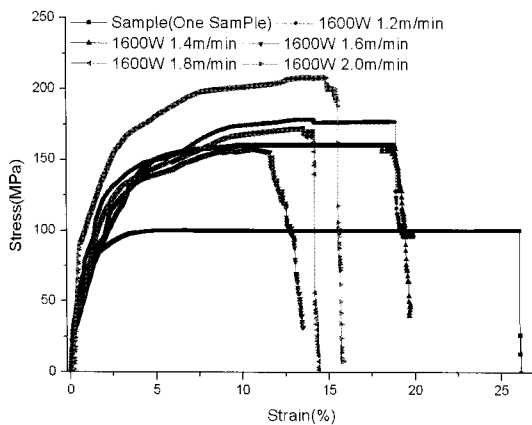


Fig. 7 Comparison of tensile test results for laser beam travel speed

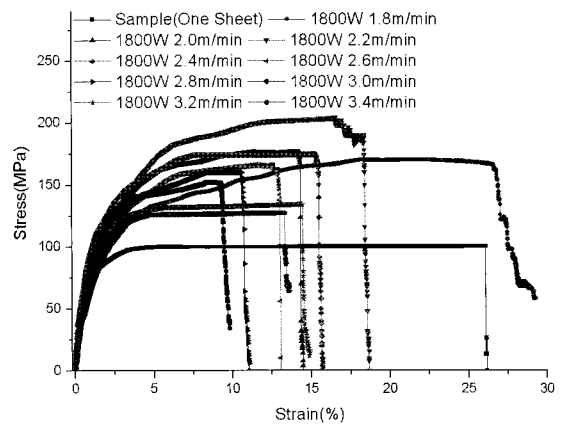


Fig. 8 Comparison of tensile test results for laser beam travel speed

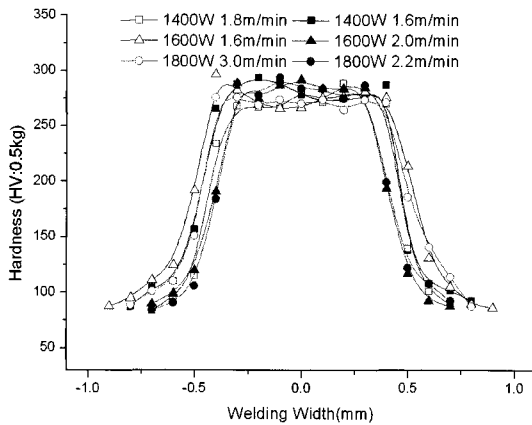


Fig. 9 Hardness distribution on the Welding Width

얼라이트 조직으로 변태되었기 때문으로 판단된다. 경도 값을 나타난 용접부의 폭은 약 1mm 정도이다. 그림에서 제시한 공정 변수들은 각각 레이저빔 출력별로 인장응력이 가장 크게 나타난 것과 가장 작게 나타난 공정변수의 경도분포를 측정 한 결과이다. 레이저빔 출력이 1400W일 경우 레이저빔 이송속도가 1.6m/min일 때 인장응력이 206.27MPa로 가장 인장응력 값이 크고, 이송속도가 1.8m/min일 때 인장응력 값은 160.21MPa로 가장 작게 나타났는데, 용접부가 용융과 재응고 되면서 조직이 변태되어 경도가 증가된 폭은 이송속도가 늦은 1.6m/min일 때 약간 크게 측정된 것과 일맥상통하다. 이것은 레이저빔의 이송속도가 늦을 경우 시편과 레이저빔이 상호작용하는 시간이 상대적으로 길어져 에너지가 시편주변부로 전도되었기 때문이다. 경도 값도 레이저빔의 이송속도가 1.6m/min일 때 약간 크게 측정되었으나 그 차이는 10Hv 내외로 측정되었다. 레이저빔 출력별로 레이저빔의 이송속도를 증가시켰을 때 인장강도가 가장 크게 측정되는 공정조건에서 용융부의 용접 폭은 감소하였다.

Fig. 10은 시편 20장이 용접된 용융단면의 위에서 아래 방향으로 중앙부를 따라 경도 값을 측정 한 것이다. 그림에 표시된

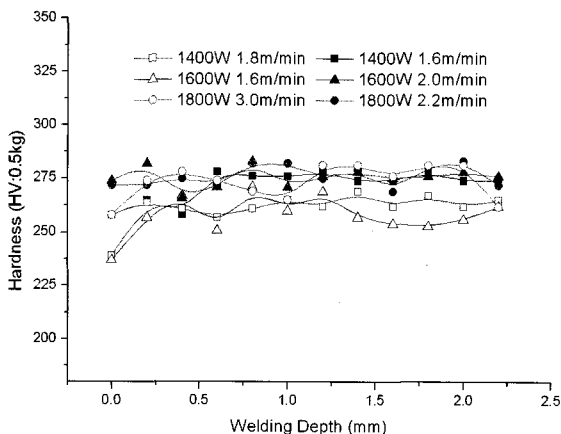


Fig. 10 Hardness along the Welding depth

결과 값은 레이저빔의 출력변화에 대한 레이저빔의 이송속도를 변화시켰을 때 인장응력이 가장 클 때(오른쪽 공정표시)와 가장 작았을 때(왼쪽 공정표시)의 시편의 용접부의 경도 값을 측정 한 결과이다. 레이저빔 출력이 작을 때는 상대적으로 레이저빔 이송속도가 느리기 때문에 레이저빔 출력이 크고 레이저빔 이송속도가 빠른 경우보다 약간 경도 값이 작았다. 레이저빔 출력이 크고 레이저빔의 이송속도가 빠를 경우 시편이 급가열 급냉각 되면서 용융된 풀의 조직이 성장하기 전에 응고되기 때문에 경도 값이 크게 나타난 것으로 판단된다. 경도 값을 측정 했을 때 약간의 오차가 발생하는 것은 조직의 경도를 측정할 때 조직의 내부를 측정 한 값과 경계부분이 측정될 경우가 있기 때문에 발생하는 경우로 생각되지만 그 오차 10Hv 범위로 평균 경도 값이 250Hv에서 280Hv인 점을 고려하면 큰 오차범위는 아니라고 생각한다.

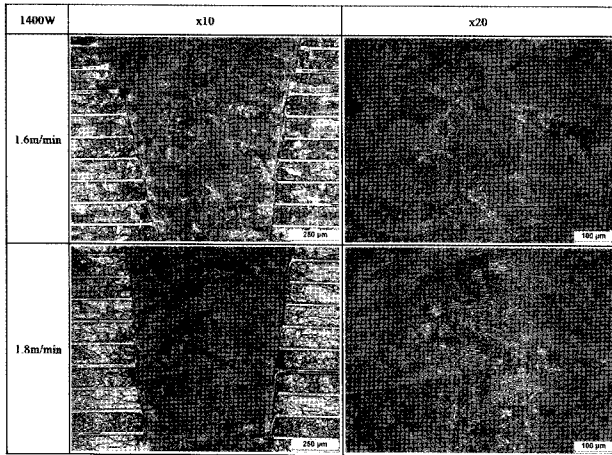
레이저빔 출력이 1400W일 때 용접단면의 중앙부를 따라 평균 경도 값을 측정 했을 때 레이저빔 이송속도가 1.8m/min 일 때는 261.17Hv이고 1.6m/min일 때는 평균경도 값이 271.92Hv로 경도 값 차이는 10.75Hv이었다. 레이저빔 출력이 1600W일 때 용접단면의 중앙부를 따라 평균 경도 값을 측정 했을 때 레이저빔 이송속도가 1.6m/min 일 때는 257.83Hv이고 2.0m/min 일 때는 평균경도 값이 275.5Hv로 경도 값 차이는 17.67Hv이었다. 레이저빔의 이송속도가 1.6m/min로 같고 레이저빔 출력을 1400W와 1600W로 변화 했을 때 레이저 출력이 1400W로 작을 때 평균경도 값이 271.92Hv로 출력 1600W일 때 평균경도 값 257.83Hv보다 14.09Hv정도 크게 측정되었다. 이것은 입열량 변화에 대한 냉각속도와 관계있는 것으로 판단된다. 레이저빔 출력이 1800W일 때 레이저빔 이송속도가 3.0m/min일 때 평균경도 값은 273.33Hv, 이고 레이저빔 이송속도가 2.2m/min일 때 평균경도 값은 276.17Hv인 데 그 차이는 2.84Hv로 다른 레이저빔의 출력에 비해 작게 나타났다. 박판 20장을 겹치기 용접했을 때 레이저빔 출력이 1800W로 비교적 높을 때에는 레이저빔의 이송속도에 따른 냉각속도가 경도변화에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 다만 인장강도 크기는 이송속도가 2.2m/min일 때 204.232MPa로 레이저빔 이송속도가 3.0m/min일 때 152.214MPa인 경우보다 52.018MPa 크게 측정되었는데 이는 용접단면의 입열량 변화에 따른 조직의 성장과 균질화에 관련 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 용접부 단면 미세조직 특성

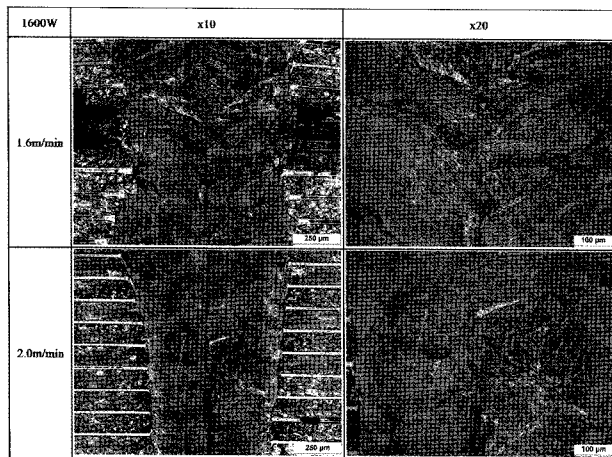
Fig. 11은 관통 용접 했을 때 조직사진을 나타냈다. 인장시험 결과 인장응력이 가장 크게 나타난 것과 가장 작게 나타난 시험편의 조직사진이다. 전체적으로 퍼얼라이트, 수지상조직, 시멘타이트가 합성되어 나타났다. Fig. 11의 (a)는 레이저빔의 출력이 1400W일 때 레이저빔의 이송속도가 1.6m/min일 때로 인

장응력이 가장 컸을 때의 조직사진과 인장응력이 가장 작게 측정된 1.8m/min의 레이저빔 이송속도로 용접했을 때 조직사진이다. 레이저 용접 후 중심부 높은 용융온도가 모재와의 경계면으로부터 냉각이 급격하게 진전되면서 중심부로 조직이 성장

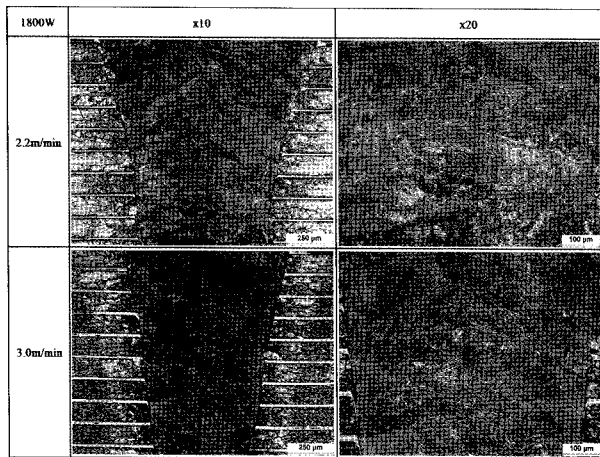
하게 된다. 박판의 각각 경계면의 조직은 공기층과의 냉각효과 때문에 조직이 미세하게 형성 되어있고, 용접 중심부는 모재와 경계면에 비하여 조직이 성장했음을 나타내고 있다. 이는 용융부 중심부는 모재와의 경계부분에 비해 용융부위 냉각시간이 상대적으로 길어지기 때문에 조직이 성장한 것이다. 레이저빔의 이송속도가 1.6m/min으로 상대적으로 느린 경우는 충분한 입열량 때문에 1.8m/min일 때 보다 조직이 균일하게 성장되어 용접단면적이 상대적으로 크기 때문에 인장응력 값이 크게 나타난 것으로 판단된다.



(a) Microstructure photos of weld zone (1400W)



(b) Microstructure photos of weld zone (1600W)



(c) Microstructure photos of weld zone (1800W)

Fig. 11의 (b)는 레이저빔의 출력이 1600W일 때 인장응력이 가장 작게 나타난 레이저빔의 이송속도가 1.6m/min일 때와 인장응력이 가장 크게 나타난 레이저빔의 이송속도가 2.0m/min일 때의 조직사진이다. 용융부의 중심선을 기준으로 양쪽 모재 방향으로 급격한 온도구배의 영향을 받아 성장된 조직이 박판의 경계면을 향하여 형성되어 있음이 관찰되었다. 이는 각각의 박판의 경계면의 공기층 때문에 발생하는 냉각효과로 나타나는 현상으로 판단된다. 각각 박판 경계면의 조직은 급격하게 냉각되면서 조직이 미세하게 형성되었지만 중심부의 세포상(cellular)조직이 모재방향으로 방향성을 가지고 형성되었음을 관찰 할 수 있다. 인장응력 시험결과와 레이저빔의 이송속도가 1.2m/min에서부터 1.6m/min까지는 그 크기가 비슷비슷하게 나타났는데 이송속도가 2.0m/min보다 인장응력이 작게 나타난 것은 용융풀의 조직이 균일하게 형성되지 못하고 불연속 조직이 생성되면서 발생한 내부응력 때문으로 판단된다.

Fig. 11의 (c)는 레이저빔의 출력이 1800W일 때 레이저빔의 이송속도가 2.2m/min과 3.0m/min일 경우 조직사진이다.

이송속도가 2.2m/min일 때 인장응력이 가장 큰 값을 나타냈고, 레이저빔 이송속도가 3.0m/min일 때 가장 인장응력 값이 작았다. Fig. 11(c)에서 볼 수 있듯이 레이저빔 이송속도가 빠르면 충분한 입열량을 얻지 못해 용접부 조직 변태와 모재부위에서 전달되는 냉각의 효과로 용접부위 균일하게 형성되지 못했다. 이 원인으로 이송속도가 빠르면 인장응력 값이 작은 것으로 판단된다. 이송속도가 2.2m/min일 경우에는 충분한 용융시간과 냉각시간이 생겨 용접부 중심에서 양쪽 방향으로 조직이 성장한 것을 볼 수 있다. 하지만 3.0m/min의 경우에는 용융 시간과 냉각시간이 너무 짧아 용접부 중심에서 양쪽 방향으로 조직이 성장하지 못하고 용접부 중심에만 성장된 것을 볼 수 있다. 이와 같은 이유로 인장응력 값이 3.0m/min일 때 보다 2.2m/min일 경우에 인장응력 값이 크게 나타난 것으로 판단된다. 용접단면의 전체적인 특징인 급가열에 따른 모재부로부터 급냉각 효과에 의해 수지상조직과 퍼얼라이트조직이 형성되었다. 용융부와 모재 경계부위의 급냉각 현상으로 조직이 경계부에서 미세하게 형성되어 있음을 관찰 할 수 있다<sup>(11,12)</sup>.

Fig. 11 Microstructure photos of weld zone to variation of welding speed and power



## 4. 결론

연속파 Nd:YAG 레이저로 두께가 0.1mm인 저탄소강 20장을 레이저빔의 출력과 이송속도를 변화시키면서 겹치기 용접하여 인장강도가 가장 크게 측정된 공정조건을 정리하면 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다층 박판을 겹치기 용접했을 때 전면비드 폭  $W_1$  과 후면비드 폭  $W_2$  의 비 ( $W_1/W_2$ )가 1.3과 1.5에서 인장강도가 가장 크게 나타났다.
- (2) 레이저빔의 출력이 1400W일 때는 레이저빔의 이송속도가 1.6m/min일 때 인장강도는 206.27MPa으로 이때 입열량은  $4.83 \times 10^{-3} \text{J/cm}^2$ 이다.
- (3) 레이저빔의 출력이 1600W일 때 레이저빔의 이송속도가 2.0m/min일 때 인장강도는 208.309MPa으로 이때 입열량은  $4.33 \times 10^{-3} \text{J/cm}^2$ 이다.
- (4) 레이저빔의 출력이 1800W일 때 레이저빔 이송속도가 2.2m/min일 때 인장강도는 204.232MPa으로 이때 입열량은  $4.08 \times 10^{-3} \text{J/cm}^2$ 이다.
- (5) 저탄소강 다층박판을 레이저 용접했을 때 용접부의 경도 값은 모재에 비해 2.8배정도 증가하였다.

이상의 결론으로부터 레이저 용접의 공정변수 중에 레이저빔의 출력을 크게 하여 용접했을 때 용접 생산성도 높고 입열량도 적어 열영향부가 작은 양호한 용접이 가능함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

- (1) Kim, H. W., 2005, viewed 13 February 2011, "System for hybrid cars ; review" *retired scientists and engineers for advancement of technology*, <<http://www.reseat.re.kr/>>.
- (2) jung, D. Y., 2007, "Hybrid car battery technology trends," *The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 34, No. 5, pp. 525~536.
- (3) Kim, S. J., Kim, J. G., and Moon, K. M., 2000, "An Electrochemical Study on the Effect of Post-weld Heat Treatment about Corrosion Resistance Property of SS400 Steel for Ship's Materials," *The Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 596~606.
- (4) Loredó, A., Martín, B., Andrzejewski, H., and Grevey, D., 2002, "Numerical Support for Laser Welding of Zinc-coated Sheets Process Development," *Applied Surface Science*, Vol. 195, No. 1-4, pp. 297~303.
- (5) Yan, S., Hong, Z., Watanabe, T., and Jingguo, T., 2010, "CW/PW Dual-beam YAG Laser Welding of Steel/Aluminum Alloy Sheets," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, No. 7-8, pp. 732~736.
- (6) Yilbas, B. S., Arif, A. F. M., and Abdul Aleem, B. J., 2010, "Laser Welding of Low Carbon Steel and Thermal Stress Analysis," *Optics & Laser Technology*, Vol. 42, No. 5, pp. 760~768.
- (7) Schmidt, M., Otto, A., and Kageler, C., 2008, "Analysis of YAG Laser Lap-welding of Zinc Coated Steel Sheets," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 213~216.
- (8) Mo, Y. W., Yoo, Y. T., Shin, B. H., and Shin, H. J., 2006, "Welding Characteristics on Heat input Changing of Laser Dissimilar Metals Welding," *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 51~58.
- (9) Mo, Y. W., Yoo, Y. T., Shin, H. J., and Shin, B. H., 2007, "The Characteristics of Butt Welding Nd:YAG Laser with a Continuous Wave of Nickel Coated S45C Steel," *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 16, No. 4, pp. 1~12.
- (10) Shin, B. H., Yoo, Y. T., Shin, H. J., and Yun, C. J., 2007, "Welding Characteristics of SCP1 on CW Nd:YAG Laser," *Korean Society for precision Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 35~43.
- (11) Lim, H. S., Kim, T. H., and Park, K. C., 2003, "Mechanical Properties and Microstructures in WC-12%Co/Low Carbon Steel Metal Matrix Composites (MMC) Welding Overlay," *Korean Welding and Joining Society*, Vol. 21, No. 2, pp. 180~186
- (12) Kim, J. D., Lee, J. H., and Kim, S. H., 2007, "Weldability of Low Carbon Steel with Al Coating Condition by Nd:YAG Laser," *The Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 31, No. 6, pp. 736~743.