

# 니켈도금된 S45C강의 연속파형 Nd:YAG 레이저 겹치기용접 특성

유영태\* · 신호준\*\*

\*조선대학교 공과대학 메카트로닉스공학과

\*\*조선대학교 일반대학원 정밀기계공학과

## Characteristics of CW Nd:YAG Laser Lap Welds of Nickel Coated S45C Steel

Young-Tae Yoo\* and Ho-Jun Shin\*\*

\*Dept. of Mechatronics Engineering, Chosun University, Gwang-ju 501-759, Korea

\*\*Dept. of Precision Mechanical Engineering, Chosun University, Gwang-ju 501-759, Korea

### Abstract

Laser welding process is widely used in the industrial field due to its numerous advantages: a small heat affected zone(HAZ), deep penetration, high welding speed, ease of automation, single-pass thick section capability, enhanced design flexibility, and small distortion after welding. 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 and Lap welding experiments are carried out for several combinations of the experimental conditions. In order to quantitatively examine the characteristics of the welding quality of the cross section, tensile stress behavior and the hardness of the welded part are investigated in comparison of the Nickel coated and Nickel uncoated S45C steel. As a result of experiment, nickel coated S45C Steel showed more even weld zone than Nickel uncoated counterpart upon lap welding. Also, it showed relatively small amount of internal defects and spatter, and Nickel coated S45C showed better weldability than Nickel uncoated S45C steel. The optimum welding process upon lap welding of Nickel coated S45C steel is when each laser power is 1900W; focal positions is -1mm; welding speed is 0.9~1.0m/min. The heat input was 4.178~4.36×103J/cm<sup>2</sup>.

\*Corresponding author : ytyou@chosun.ac.kr

(Received December 28, 2006)

Key Words : Laser welding, Nickel coated S45C steel, Heat input capacity, Bead on plate and lap welding

## 1. 서 론

전기·전자, 정밀기계, 통신 산업, 우주·항공기 산업 등에서 정밀 부품을 접합할 때 사용하는 레이저용접 기술은 생산성이 뛰어나고 용접부의 품질이 우수하여 연구개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 특히 차세대 에너지동력 산업에서 레이저 빔을 활용한 용접기술이 생산성 관점에서 각광을 받고 있다. 레이저 용접은 고밀도 에너지 열원에 의해 단시간에 용융 및 응고 과정이

진행되기 때문에 일반적인 용융용접에 비해 종횡비 (aspect ratio)가 대단히 크다. 특히 용가재를 사용하지 않는 용접방법으로 모재로 열 확산이 적어 내부응력이 작게 형성되어 용접변형이 적다. 레이저 용접은 일반 용접에 비해 금속조직이나 기계적 성질측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 용접성 평가를 받고 있다<sup>1-4)</sup>.

산업현장에서는 동종재질의 두께변화를 주는 방식으로 이종용접, 서로 다른 재질을 겹치기 용접하는 이종 금속 용접할 때 전기저항 및 마찰용접, 전자빔 용접 등

을 사용하고 있다.

본 연구에 사용된 S45C강은 대부분 흑색도색 공정을 통해 내부식성을 향상시킨다. 그리고 특정부품에 적용될 때는 아연도금이나 니켈도금처리 하는 경우가 있다. 시편표면에 도금된 니켈은 고온환경에서 우수한 내부식성을 가지고, 상온에서 가공성 우수하며, 전기전도성이 좋다. 이와 같은 이유로 각종 기계부품에 니켈도금으로 표면개질 한다. 하지만 레이저 용접시 아연은 낮은 비등점으로 인하여 용접성을 저해하고, 니켈도금과 같은 경우 응고균열, 기공 등 내부결함의 경향이 크다고 알려져 있다<sup>5)</sup>.

레이저용접은 일반적인 용융용접에 비해 많은 장점이 있지만 공정변수에 민감하다는 문제점도 있다. 레이저 용접시 공정변수로는 레이저 출력, 용접속도, 초점거리, 보호가스의 유량 및 종류가 있으며, 레이저 파장 및 재질에 따라 용접결과가 다양하게 나타난다.

선행연구결과 Noh<sup>6)</sup>는 펄스 Nd:YAG레이저를 이용하여 니켈 도금된 SUM24L와 니켈 도금 되지 않은 시편 용접에 관한 연구를 하였다. 이때 니켈 도금된 SUM24L을 용접했을 때 균열 발생이 도금되지 않은 시편보다 크게 나타났는데, 이는 니켈 도금층에 레이저빔이 조사될 때 표면반사도가 상대적으로 커서 초기 빔 흡수율이 저하되어 용융깊이가 작게 형성된 것으로 판단하였다. 겹치기 레이저 용접에서 여러 조건에 따른 용접특성이 몇몇 문헌에서 연구 발표 되었다<sup>7-9)</sup>. 특히 프라이머 코팅된 강판에서 두 판재 사이의 간격(gap)과 코팅성분의 영향이 용접 결과에 중요한 영향을 준다고 알려져 있다<sup>10)</sup>.

본 연구에서는 부식방지 및 내부저항을 최소화시키기 위해 니켈 도금된 S45C강과 니켈도금 되지 않은 S45C강을 연속파형(continuous wave: CW) Nd:YAG 레이저를 이용하여 겹치기 용접특성을 고찰하였다. 그리고 용접에 중요한 영향을 미치는 레이저 출력, 용접속도, 초점위치 등의 공정변수를 실험적으로 분석하여 최적의 공정변수를 제시하고자 한다. 최적의 용접공정변수에서 용접단면의 조직, 인장강도, 용융표면에서 경도분포값을 제시하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용되어진 Nd:YAG레이저는 파장이 1.06 $\mu$ m이고, 최대출력은 2.8kW인 연속파형 레이저이다. 평균유효출력은 2kW, 레이저빔 발산각은 25mrad이고, 직경이 600 $\mu$ m인광섬유를 통해서 전달된다.

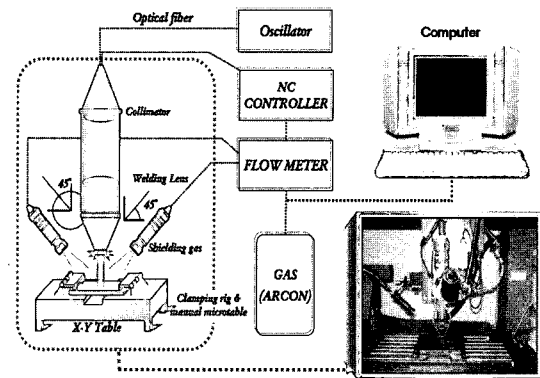


Fig. 1 Experimental set-up

광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, x, y, z축의 위치정밀도는 각각 5 $\mu$ m, 5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m이고, 반복정밀도는 8 $\mu$ m이다. 레이저 용접시 표면과 대기 중의 오염 물질 사이의 상호작용을 방지하기 위해서 Ar 가스를 45 $^\circ$ 각도, 1bar의 가스압력으로 분사시킨다. 본 연구에 사용된 실험장치의 계략도는 Fig. 1과 같다.

### 2.2 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 일반기계구조용강으로서 니켈 도금된 S45C강과 니켈도금 되지 않은 S45C강을 최적의 겹치기 용접 공정변수를 결정하기 위해 비드용접(Bead welding)실험하였다. 시편의 니켈도금 두께는 약 5 $\mu$ m이다. Table 1은 S45C강의 화학 조성분이고, Table 2는 S45C의 물리적 성질이다.

시편은 공작대에 부착된 지그에 고정시키고 용접헤드에 정렬된 He-Ne 레이저광(적색)을 이용하여 용접위치를 확인하였다. 비드용접과 겹치기 용접에 사용된 시편의 크기는 각각 150 $\times$ 80 $\times$ 4.5mm, 300 $\times$ 150 $\times$ 1.6mm 이다. 각각의 용접 공정변수는 Table 3과 같다.

실험결과를 비교분석하기 위해 레이저 공정변수의 변화에 따른 용접비드의 폭과 침투깊이 등을 측정한 후 각각의 공정에 대한 입열량의 변화를 측정하였다. 각각의 공정변수 변화에 따른 입열량<sup>1,13)</sup>의 상관관계를 고찰하였다. 본 실험 결과분석에 사용한 입열량은 아래식 (1)과 같다.

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

Table 1 Chemical compositions of specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
S45C	0.45	0.194	0.702	0.02	0.01	0.02	0.01	0.008

**Table 2** Physical property of the material

S45C	specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	tensile strength(MPa)	melting point(°C)	emissivity
	7.84	≥646.8	1450	15%
	thermal conductivity(cal/cm sec °C)		expansion coefficient(*10 <sup>-6</sup> )	specific resistance(-cm)
	0.106		11.3	20

**Table 3** Parameter of laser welding

	Bead welding	Lap welding
Laser power	1,800W, 1,900W, 2,000W	1,900W
Welding speed	0.65~3.0m/min	0.9~1.5m/min
Focal position(z)	0(f=200mm)	-1mm(f=200mm)
Shielding gas (Ar)	1bar, 3l/min	1bar, 3l/min

위 식에서는  $E_0$ 는 입열량,  $P$ 는 레이저출력,  $W$ 는 용입 폭(상부),  $V$ 는 용접속도이다.

선행 실험은 비드용접을 실시하여 니켈도금된 시편과 니켈도금되지 않은 시편을 비교 및 분석하였고, 겹치기 용접은 시험편의 두께가 3.2mm 이므로 비드용접조건에서 내부결합이 없는 최적 용접조건으로 실험하였다. 용접후 비드형상 및 미세조직은 정밀금속절단기로 용접 시편의 종단면을 절단하고 마운팅한 후 폴리싱하여 Nital 2%로 에칭(etching)하여 관찰하였다. 에칭된 용접부 경계면은 광학현미경으로 관찰하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기를 사용하여 0.3kg의 하중을 적용시켰다. 인장 시험편은 KS B0801규격으로 제작하여 인장시험기로 인장강도(tensile stress) 및 인장변형률(Tensile strain)를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 비드용접

##### 3.1.1 레이저출력별 초점크기 변화

레이저빔이 재료표면에 흡수되는 것은 재료의 물리적 성질과 가공조건에 따라 다르다. 그러므로 레이저 용접에 영향을 미치는 재료의 대표적인 물성치는 반사율, 열전도율 및 전기 전도도이다.

레이저빔이 시편 표면에 조사되면 초점위치에 따라 표면에 미치는 재료별 물리적 성질이 다르기 때문에 표면 흡수율이 달라진다. 이와 같은 이유로 금속표면에 레이저빔이 조사되었을 때 초점면의 크기가 재료에 따라 다르게 형성된다. 금속재료는 표면반사율에 따라 빔의 흡수도가 다르다. 1.06um 파장에서의 표면 반사율

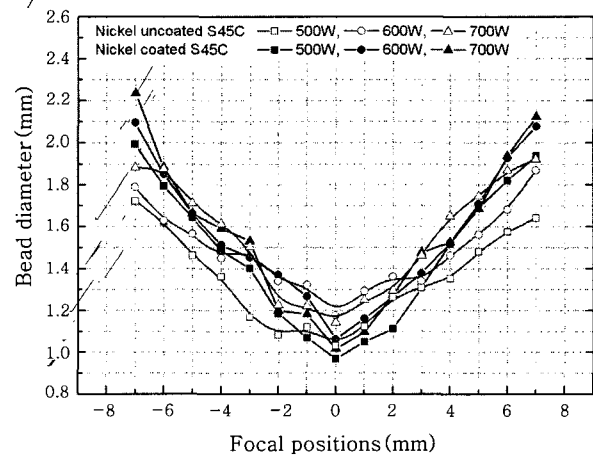
값은 니켈과 철의 경우에는 각각 72%, 65%로서 니켈이 철보다 빔 흡수가 잘 되지 않는다.

Fig. 2는 레이저 출력(P)에 대한 초점위치별 시편표면에 만들어지는 비드직경의 변화를 나타내었다. 이때 180ms의 단펄스(single pulse)의 레이저빔을 조사하였다. 측정방법은 레이저빔이 시편표면에 조사된 후 표면 열흔적을 광학현미경을 통해 용융된 크기(비드직경)를 측정하여 각각의 초점위치별 크기를 계산하였다.

니켈 도금된 시편에 레이저빔을 짧은 시간에 조사하였을 때 초점면의 크기가 니켈 도금 되지 않은 시편보다 약9.3% 정도 작았다.

니켈 도금된 시편에서 용융 작은 것은 니켈의 반사율이 72%로 철의 65%보다 크기 때문에 레이저 빔을 흡수하는 양이 작기 때문이다. 초점거리  $z=0$  ( $f=200mm$ )에서 비드직경의 크기가 가장 작고, 초점위치를 벗어나면서 비초점의 영향으로 비드직경의 크기가 증가하였다.

니켈 도금된 S45C 강에 레이저 빔을 조사시켰을 때 비산(spattering)되는 양이 니켈 도금되지 않은 시편보다 적었다. 이는 레이저 출력이 같은 경우에는 니켈 도금된 시편 표면에 흡수된 에너지의 반발력이 도금되지 않은 시편보다 작기 때문이다. 이러한 현상은 레이저 빔이 시편에 조사된 후 광자(photon)로부터 재료에 전달되는 운동량으로 인한 전자의 운동이 발생한다. 이와 같은 현상으로 광자가 재료의 음자(phonon) 및



**Fig. 2** Variations bead diameter according to focal positions

자유전자들과 충돌하여 음자가 움직이는 방향에 저항하는 힘 때문에  $\sim 10^{-13}$ sec 이내에 열로 바뀌어 금속표면의 온도를 증가시키는데, 레이저빔이 고출력으로 되면 표면으로부터 증발되는 원자들이 빠른 속도로 방출되면서 발생하는 운동량이 더욱 커진다. 니켈 도금을 했을 경우 표면 반사율이 철보다 크기 때문에 레이저빔 흡수율이 적고, 고유 저항값은 철이 니켈 보다 크기 때문에 열전자가 니켈보다 많이 발생하여 니켈 도금하지 않은 시편의 스파터가 더 많이 발생하였다.

또 한가지로 고려할 수 있는 사항으로 700 °C를 기준으로 물성치를 비교하면 니켈의 열전도(K)는 0.72 W/cm °C이고, 철은 0.33 W/cm °C이다. 비열(C)은 니켈의 경우 0.56J/g°C, 철은 0.98 J/g°C이다. 재료의 열확산도(K/ρC)가 작다는 것은 열이 금속내부로 잘 침투되지 못함을 의미한다. 반대로 열확산도가 크다는 것은 표면으로부터 열이 빨리 제거 된다는 것을 의미한다. 이와 같은 이유로 니켈을 도금했을 경우 초점면과 비산되는 양이 작은 것으로 생각되고 니켈과 철의 용점을 비교했을 때 니켈은 1,455°C이고, 철은 1,535°C이기 때문에 니켈을 도금한 시편에 레이저빔을 조사했을 때 니켈이 기화되면서 열을 손실하기 때문이다.

3.1.2 입열량변화에 따른 종횡비 특성

레이저용접 공정변수가 적절하지 않으면 열 변형과 용접 결함 등이 발생하므로 최적의 용접 공정 변수를 결정한 후 용접해야 한다. Fig. 3과 Fig. 4는 겹치기 용접 전 공정변수를 결정하기 위해 비드용접을 통해 종횡비 및 입열량 변화에 대한 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강을 비교한 결과이다. 각각의 공정변수에 대한 평균오차는 ±3%이다.

Fig. 3에서 용접속도가 0.65m/min로 입열량이 클

경우, 니켈 도금하지 않은 시편의 종횡비(aspect ratio)가 작은 현상은 용융폭과 깊이가 동시에 크기 때문에 용접속도가 1.0m/min 일 때보다 종횡비가 크지 않았다. 그러나 용접속도가 1.0m/min인 지점을 기준으로 종횡비를 비교하면 출력이 증가할수록 침투깊이가 용융폭보다 크게 증가하여 종횡비가 증가하였다.

레이저출력이 2,000W로 시편에 레이저빔을 조사하여 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금 되지 않은 S45C강의 종횡비를 비교했을 경우, 니켈 도금된 시편의 종횡비가 크지만, 레이저출력을 1,800W로 감소시키면 오히려 니켈 도금된 시편의 종횡비가 작았다.

이런 현상은 S45C강의 표면을 니켈 도금했을 경우 충분한 출력밀도로 시편을 조사하지 않으면 니켈도금 표면에서 반사되는 에너지양이 상대적으로 많기 때문이다. 종횡비가 크게 형성될 경우 내부기공이 크게 발생하는 용접결함이 나타났다. 특히 종횡비가 커질수록 큰 기공이 발생하였다. 종횡비가 클 때 기포에 의한 기공이 많이 형성되는 이유는 키펀 용접시 용융점이 비교적 낮은 Mn, Cu, P, S등이 기화하여 발생한 기포가 레이저빔이 이동되면서 표면이 응고될 때 분출되지 못하고 키펀이 닫히면서 포획되었기 때문이라 판단된다.

Fig. 4와 Fig. 5는 레이저 공정변수를 정량화하기 위한 목적으로 용입폭과 용접속도, 레이저빔 출력을 계산하여 나타낸 것이다. Fig. 4에서는 용접속도가 2.0m/min까지 시편표면에 니켈도금 유·무에 따라 입열량 차이는 크지 않았다. 그러나 용접속도를 증가시켜 입열량을 줄이면 니켈 도금한 시편의 입열량이 니켈도금하지 않은 시편보다 크게 나타나고 있다. 이런 현상은 입열량을 작게 하여 시편표면에 조사하면 초기 반사되는 양이 니켈도금하지 않은 시편보다 많아 용융폭이 작게 형성된 것을 기준으로 계산했기 때문이다. Fig. 5는 입열량에

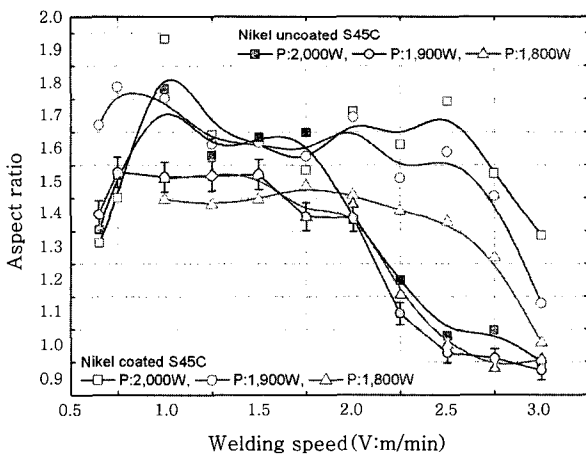


Fig. 3 Influence of the aspect ratio on welding speeds

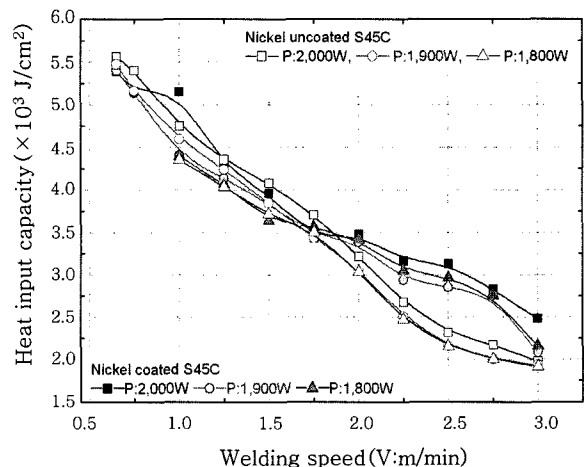


Fig. 4 Variation of heat input capacity according to welding speeds

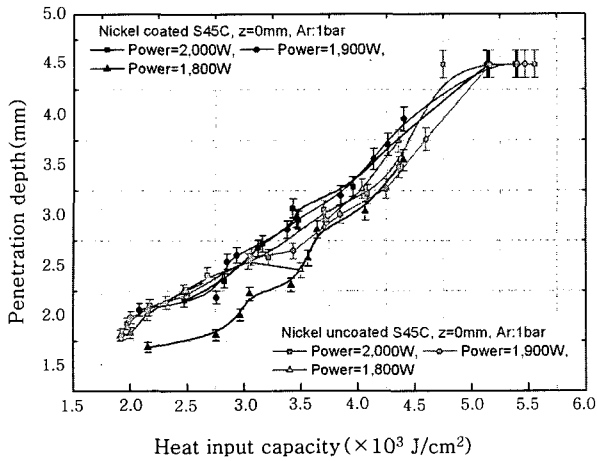


Fig. 5 Penetration depth for heat input capacity

대한 침투깊이의 양으로 나타낸 것으로서 Fig. 4와 비교하였을 때 용접속도가 낮아 입열량이 클 경우에는 니켈 도금된 시편과 니켈 도금되지 않은 시편의 용입깊이 차이가 크기 않았다.

그러나 Fig. 4에서는 용접속도가 빠를 때 니켈 도금한 경우 입열량이 크게 계산되었지만 Fig. 5에서는 출력이 상대적으로 낮아 오히려 침투깊이가 작았다. 이것은 레이저 출력이 상대적으로 낮을 때 니켈도금의 영향으로 레이저빔의 반사되는 양이 많아 레이저빔 흡수율이 작은 결과를 식(1)로 계산했기 때문이다.

Fig. 6은 용접속도를 변화시켜 용접한 후 용접부 단면변화를 관찰한 결과이다. 니켈 도금된 S45C강이 니켈도금 되지 않은 S45C강보다 용접부에 포획된 기공크기가 크게 나타났다. Fig. 3에선 설명된 것처럼 S45C를 구성하고 있는 조성분의 용융온도차이 때문에 종횡비가 클 경우 기공이 포획되는 경우가 많다. 탄소의 용융점은  $3,555^\circ\text{C}$ (비결정성), 비중은 1.8~2.1(비결정성)이고, 순철의 경우 용융점은  $1,535^\circ\text{C}$ 인 반면 용융

온도가 낮은 Cu, Mn, P, S의 기화된 기포가 배출되지 못하고, 레이저 빔이 이송되면서 키홀이 닫힐 때 포획되었기 때문이다. 특히 니켈 도금한 시편의 경우 용융온도가 철과 탄소에 비해  $1,455^\circ\text{C}$ 로 낮지만 비중은 크기 때문에 용융되면서 중력의 영향으로 아래로 침투된 니켈성분이 기화되어 포획된 기포양이 많았다. 레이저 빔이 시편에 조사될 때 플랑크상수(h)와 주파수(v)의 곱으로 표시되는 양자화 된 에너지  $E = nhv$ 이다. 파장이  $1.06\mu\text{m}$ 인 레이저 빔이 조사 될 때 1개의 광양자 에너지는  $6.25 \times 10^{-20} \text{ J}$ 이다. 출력이 1900W로 레이저 빔이 시편에 조사될 때 양자화 된 광자수(n)는  $3.04 \times 10^{22}$ 양자/sec가 된다. 이 많은 수의 광자가 금속입자에 작용할 때 비중이 큰 금속이 비중이 작은 금속에 비해 상대적으로 운동량이 크다. 중력장 내에 물질이 존재하는 순간 측정 불가능할 정도의 빠른 시간 내에 물질을 인지하고 이 인지력은 비중의 크기에 영향을 받는다. 용융풀 내의 용융금속은 고온상태에서는 점성의 영향보다 광자의 에너지전달에 영향을 받은 뒤 냉각되면서 점성이 증가하려 한다. 냉각 될 때는 광자가 작용하는 용융풀 내의 중력장의 영향보다 점성의 영향을 더 크게 받으면서 응고되어 용융풀이 형성된다. 본 실험에서는 내부결함이 없는 조건을 찾기 위해 용접속도를 증가시키면서 용접한 시편을 10mm간격으로 5곳을 절단하여 용접단면을 관찰한 결과로서 용접속도가 1.5m/min일 때, 용접단면에 기공과 고온균열 발생이 상대적으로 거의 없었다. 이때 입열량(E)은  $3.846 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$  이었다.

3.2 니켈 도금된 S45C강의 겹치기용접특성

Fig. 7는 니켈 도금된 S45C강에 레이저 출력을 1,900W로 고정한 후 비드용접, 겹치기용접, 맞대기 용접할 때

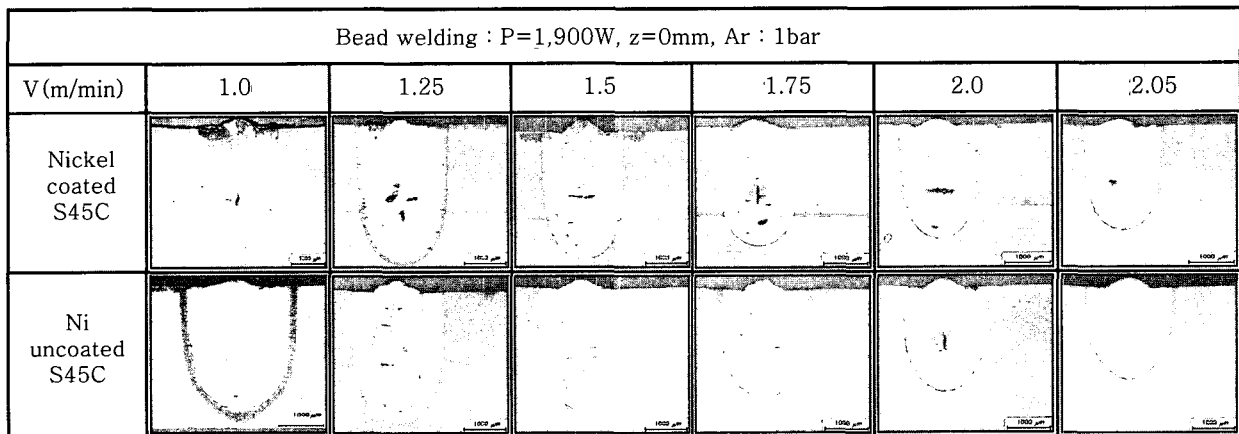


Fig. 6 Shape of the cross-section according to welding speeds

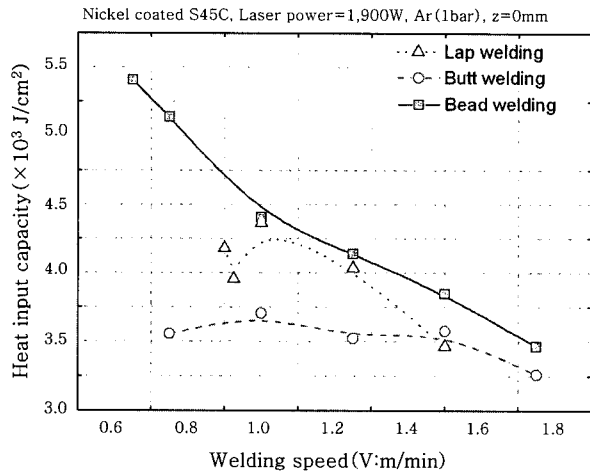


Fig. 7 Variation of heat input according to welding speeds

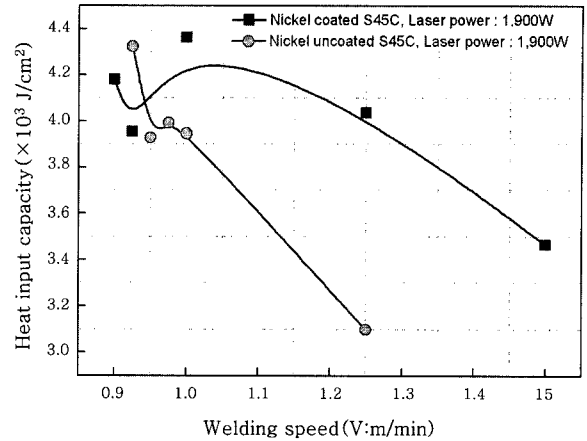


Fig. 8 Influence of the heat input capacity by Nickel coated and Nickel uncoated specimen

용접속도 변화에 대한 입열량의 관계를 나타냈다. 비드 용접 했을 때는 입열량의 크기가 가장 크게 나타나는데, 맞대기용접은 시편의 맞대는 갭(gap)사이로 레이저빔이 조사되면, 아주 작은 경계면에서는 난반사가 되어 용융되는 면적이 넓어져 입열량이 작게 계산되었다.

겹치기 용접은 비드용접과 맞대기 용접의 중간정도의 입열량으로 용접했을 때 아래에 있는 시편까지 용접되었다. 비드용접 때보다 용접속도를 작게 해서 입열량을 증가시켜야 완전하게 관통용접이 되었다.

이것은 겹치기 용접에서 윗쪽 시편과 아래 시편 사이의 경계면에서 레이저빔이 열전달 될 때 손실되는 양을 보상해 줄 수 있을 만큼 충분히 출력이 높아야 하기 때

문이다. 이와 같은 이유로 윗쪽 시편의 용융 면적이 비드용접의 용융면적보다 넓어 입열량이 작게 계산되었다. 그리고 겹치기용접 경계면에서 미세한 간극이 존재하기 때문에 위쪽 시편에서 아래 시편으로 레이저빔이 전달될 때 에너지가 연속적이 아니라 불연속적으로 전달되기 때문이다. 그러므로 겹치기 용접할 때는 비드용접했을 때보다 큰 입열량으로 용접해야 한다. 또한 겹치기 용접은 맞대기 용접과 비드용접보다 스패터가 다량으로 발생하였다. 이는 겹치기는 경계면에서 레이저빔이 금속표면의 난반사가 되었기 때문이라 판단된다. 또한 니켈 도금된 시편을 비드 용접할 때 초기에 빠른 속도로 내부로 열이 전달된다. 빠르게 내부로 전달된

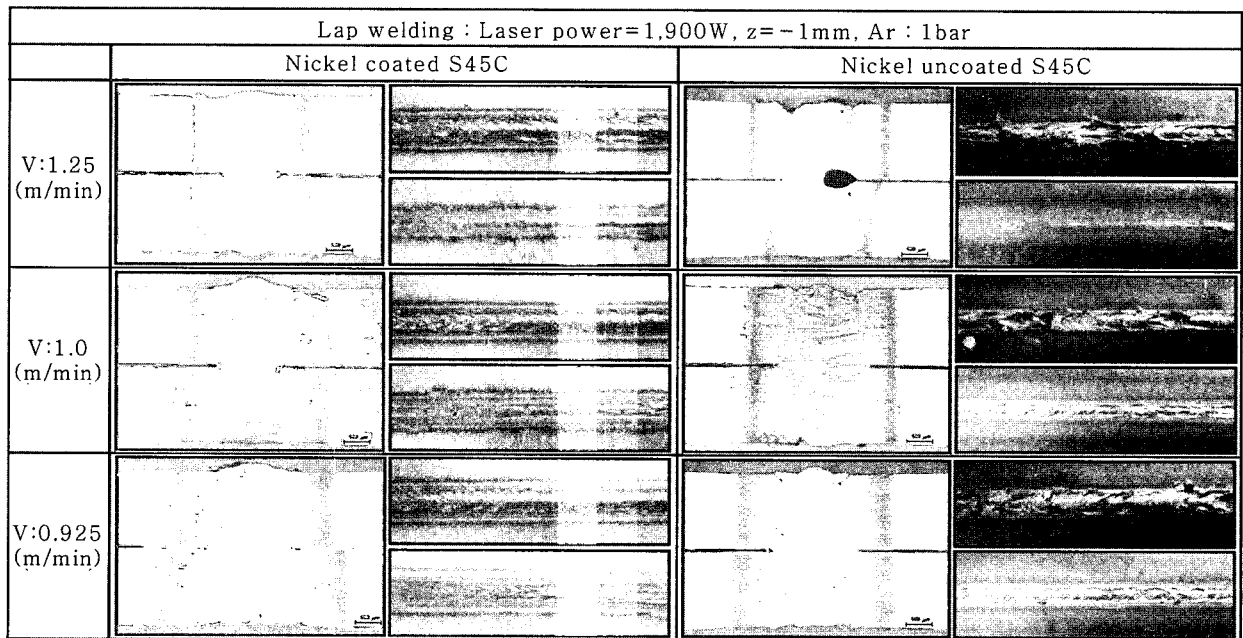


Fig. 9 Variation of the bead shape according to welding speeds

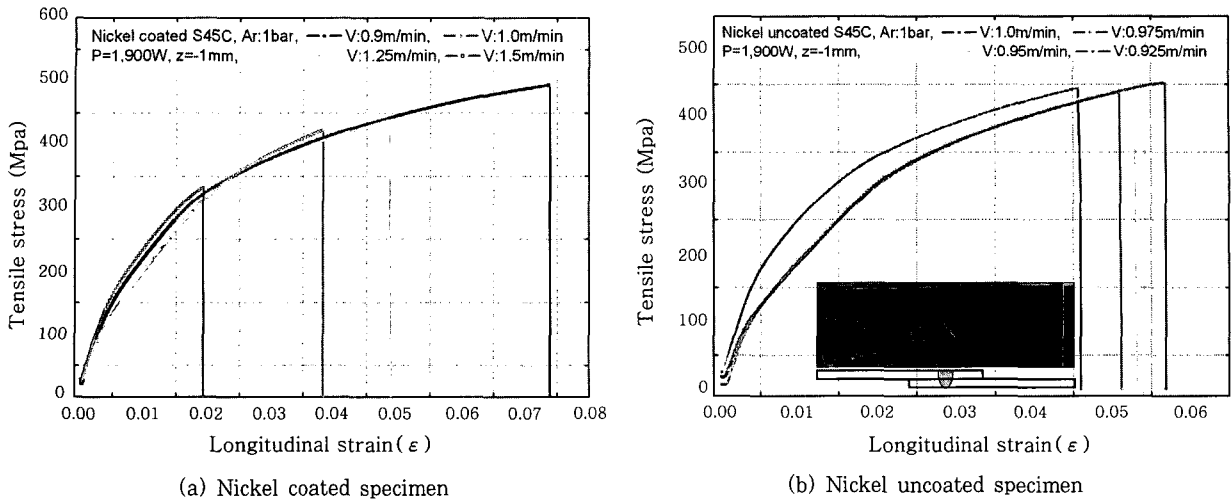


Fig. 10 The result of tensile stress for longitudinal strain according to welding speeds

열량이 비드용접시 용융풀의 체적을 증가시켜 용융풀 표면적이 금속증기압과 플라즈마의 반발력이 커 스패터가 많았다. 겹치기 용접을 하면 용접단면 체적의 증가로 시편내부로의 급냉각에 의한 영향 때문에 용융풀의 체적이 작아 상대적으로 스패터가 작은 것으로 판단된다.

Fig. 8은 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강을 겹치기 용접할 때 용접속도 변화에 대한 입열량을 비교한 결과이다. 용접속도를 증가시키면서 시편에 레이저빔을 조사했을 때 니켈 도금된 경우 표면에서 레이저 빔의 반사 때문에 용융폭이 니켈 도금되지 않은 경우보다 작아 입열량이 크게 나타났다.

이와 같이 입열량 차이가 발생하는 것은 산화방지 처리한 S45C강을 현장에서 사용되는 상태로 레이저빔을 조사하였기 때문이다. 이는 레이저빔 흡수율이 많아 용융폭이 니켈 도금된 시편보다 넓기 때문에 입열량이 상대적으로 작게 계산된다.

Fig. 9은 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강을 겹치기 용접한 후 용접부 단면과 비드 모양을 나타낸 것이다. 그 결과 니켈도금 유·무에 관계없이 용접단면의 중앙부 용융에 의해 용접되었다.

그리고 니켈 도금되지 않은 S45C강은 용접속도가 빠를 경우 비드형상이 와인컵 형상, 용접속도가 느린 경우 일자형으로 용접부가 생성되었다.

다만 다른점은 용접속도가 작아 입열량이 클 경우 니켈도금한 아래 시편표면에 있는 니켈도금층의 용융으로 표면 열전도에 영향을 주어 아래시편의 용융부가 크게 나타났다. 니켈 도금된 시편은 레이저용접 후 전면비드와 후면비드가 용접방향에 따라 균일하게 형성되었다.

이와 반대로 니켈도금이 되지 않은 시편은 동일한 공정에서 전체적으로 표면비드모양이 불균일하며, 다량의

험핑과 스패터가 시편 표면에 응착되었다. 후면비드에는 일정한 간격으로 갈색의 비드가 형성되는데 이는 용접시 발생하는 MnS계재물이 용접부에서 노출되고 있기 때문이다. 니켈은 연성이나 전성이 우수하고 비중은 철에 비해 크기 때문에 중력의 영향을 받아 아래 방향으로 열이 전도되면서 시편의 용융폭이 크게 나타났다. 아래 시편의 비드면이 균일하게 형성되는 것은 철보다 비중이 큰 니켈의 영향으로 용융부 침투깊이가 증가하였기 때문이다.

Fig. 10은 겹치기 용접한 시편의 인장 실험한 결과이다. Fig. 10(a)는 니켈 도금된 S45C강이며, (b)는 니켈도금 되지 않은 S45C강이다. 니켈 도금된 시편에서는 용접속도가 0.9m/min 일 때 용접부의 최대 인장강도는 493.67MPa, 변형률(strain)은 0.0738로 측정되었다. 용접속도가 1.5m/min로 입열량이 충분하지 않으면 인장강도가 331.6MPa이었다. 이때 입열량(E)은  $3.464 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$  이었다. 일반적으로 중탄소강의 인장강도값은 Table 2에서와 같이  $\geq 646.8 \text{ MPa}$ 이다. 그러나 겹치기 용접한 후 인장강도값은 최대 493.67MPa로 약 153MPa정도 작게 나타났다. 용접속도를 증가시켜 입열량을 감소시키면 충분한 용접 용융풀이 형성되지 않아 인장강도가 하락하였다. 인장시험결과 파단되는 시편은 시편에 레이저빔이 직접 조사되어 충분한 용융풀이 형성된 위쪽 시편보다 아래시편에서 파단 되었다.

니켈 도금되지 않은 시편의 인장강도는 용접속도를 0.925, 0.95, 0.975, 1.0m/min 큰 차이가 없고 변형률만 다르게 나타났다. 니켈 도금 되지 않은 시편의 경우 최대 인장강도는 용접속도가 가장 느린 0.925m/min 일 때이며, 452.63 MPa이다. 용접부의 경도값은 인장강도에 중요한 변수로 작용한다. 이는 경도값이 클수

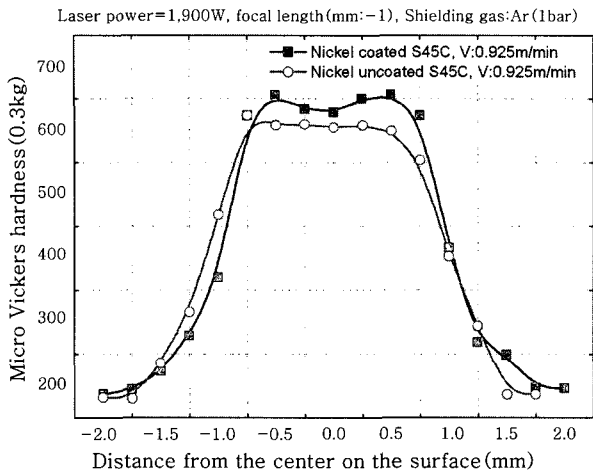


Fig. 11 Hardness profile of cross section

록 취성이 강해져 용접부의 연성이 작게 형성되기 때문이다. 그래서 Fig. 11과 같이 겹치기용접부의 경도값을 측정하였다. 측정위치는 시편표면에서 100um아래 지점부터 250um간격으로 용접부 단면비드의 횡방향으로 측정하였다. 니켈 도금된 시편이 니켈도금 되지 않은 시편에 비해 경도값이 약간 크게 분포 되었다. 경도값은 모재에 비하여 용접부의 경도값이 3배정도 크게 나타났다. 이는 용접부에서 조직이 용융되었다가 급냉각되면서 조직이 치밀한 마르텐사이트 조직으로 변태되었기 때문이다.

### 3.3 미세조직 특성

중탄소강의 기본조직은 페라이트와 시멘타이트(Fe<sub>3</sub>C)로서 이루어진 혼합조직을 갖고 있고, 이 조직의 혼합 비율은 탄소량에 의해서 결정되기 때문에 탄소강의 물리적 성질은 탄소량에 따라 변화된다. 탄소강의 레이저 용접은 대부분 용접부가 급가열·급냉각 때문에 조밀한 마르텐사이트로 된다.

본 연구에서는 용접부의 미세조직특성을 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강을 비교하였다. 먼저 시편의 두께가 4.5mm인 시편을 비드용접한 후 폴리싱작업 및 나이탈(2%) 에칭을 통해 미세조직을 관찰하였다. 그 결과 용접의 대부분의 공정에서 미세한 고온균열과 함께 기공이 관찰되었다.

Fig. 12은 레이저출력을 2,000W, 초점위치를 z=0mm로 고정하고, 용접속도를 각각 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 m/min변화 시켰을 때 용접부 단면의 변화를 나타낸 것이다.

기존의 연구자들은 S45C와 같은 중탄소강을 용접할 경우 용접부에서 고온균열과 기공이 발생빈도가 매우

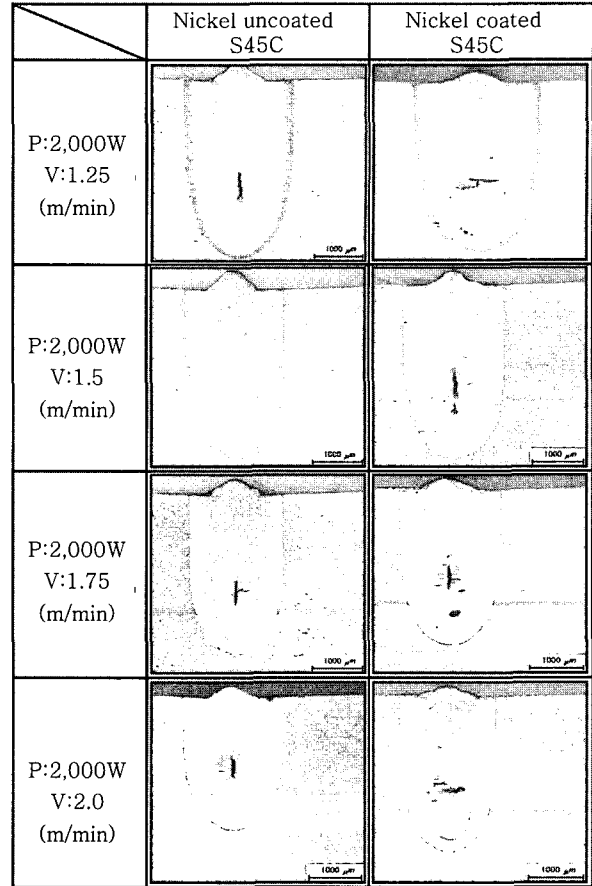


Fig. 12 Variations of cross section according to welding speeds

높다고 고찰하였다. 이러한 응고균열은 용접역에 의해 용융되었던 금속이 응고되는 과정에서 용접금속내의 최종응고부에서 발생하기 쉽고 일반적으로 용접부 중앙에 용접방향과 평행하게 발생하는데 주로 강중에 함유되어 있는 P, S, Cu등의 불순물 원소가 최종 응고부의 입계의 편석에 기인 한다<sup>11,12)</sup>. 특히 고온균열은 고온(1000℃)에서 발생하며, 연성이 거의 없으며 입계 균열로 발전한다. 또한 S 및 P 등의 불순원소의 편석으로 인하여 저융점화합물 또는 저융점공정물을 형성한다. 키홀용접을 하는 레이저 용접의 경우 중횡비가 큰 용접단면에서 용접부의 경계면에서부터응고하면서 중앙부 용융풀이 채워지지 못하고 고온균열이 발생하였다. 용접부폭이 좁고 깊은 용접부특성 때문에 주상정이 내부로 형성하여 중심부에 편석이 심하게 일어나고 수축변형이 중앙에서 집중적으로 작용하기 때문에 고온균열 발생이 잘 일어난다.

비드용접시 내부 결함이 없는 공정은 레이저 출력이 1900W일 때 니켈도금 시편은 용접속도가 1.0m/min, 니켈도금 되지 않은 S45C강은 1.5m/min 였을 때 다른 공정보다 상대적으로 균열이 발생하지 않은 최적의 공정변수를 나타내었다.



Fig. 13은 시편의 두께가 1.6mm인 시편을 접치기 용접 실험한 후 미세조직을 관찰하였다. (A)는 니켈도금된 S45C강이고, (B)는 니켈 도금되지 않은 S45C강을 용접한 결과이다.

Fig. 13(A)의 경우 용접단면에서 마르텐사이트 조직이 성장하였다. 용접단면에서 검은색 선은 접치기용접에서 시편사이의 갭이다. 갭이 형성되어진 부분에서 시편표면에 도금된 두께보다 많은 니켈이 고용되었다. 니켈 도금되지 않은 시편인 (B)의 경우가 니켈 도금한 (A)의 용접단면 보다 마르텐사이트 조직이 더 선명하고 크게 성장하였다. 용접단면에 수직상조직은 레이저빔이 빠르게 진행되면서 용융풀이 모재방향으로 급냉각되면서 모재 경계부로부터 용융풀 중심선 방향으로 성장한 것이다.

S45C의 모재성분인 철의 열전도율은 27°C에서 0.802

W/cm·K 이고 니켈의 열전도율은 0.907W/cm·K 이기 때문에 니켈을 함유 한 경우 냉각속도가 빨라 마르텐사이트 조직이 발생한다. 이와 같은 현상은 보다 많은 실험을 통해 분석하고자 다음 연구의 과제로 남겨 둔다.

Fig. 13(C)와 Fig. 13(D)는 용접속도를 1.25m/min로 하여 접치기 용접한 단면이다. Fig. 13(C)는 니켈도금된 시편이고, Fig. 13(D)는 니켈 도금되지 않은 시편의 용접단면이다. 니켈 도금된 C의 경우 니켈도금되지 않은 D의 시편보다 용융단면에 결함이 발견되지 않았다. 니켈을 도금하였을 경우 용융된 니켈이 용융단면에 혼합되면서 하강하여 아래 시편의 용융단면이 형성되었다. D의 경우는 접치기 용접 갭 부분에 기공이 성장되어 용접유효단면적을 감소시키고 있다. 앞에서 설명한 것처럼 용융부는 마르텐사이트 조직으로 되어있다. 이것은 에너지 밀도가 높은 레이저빔이 시편에 조

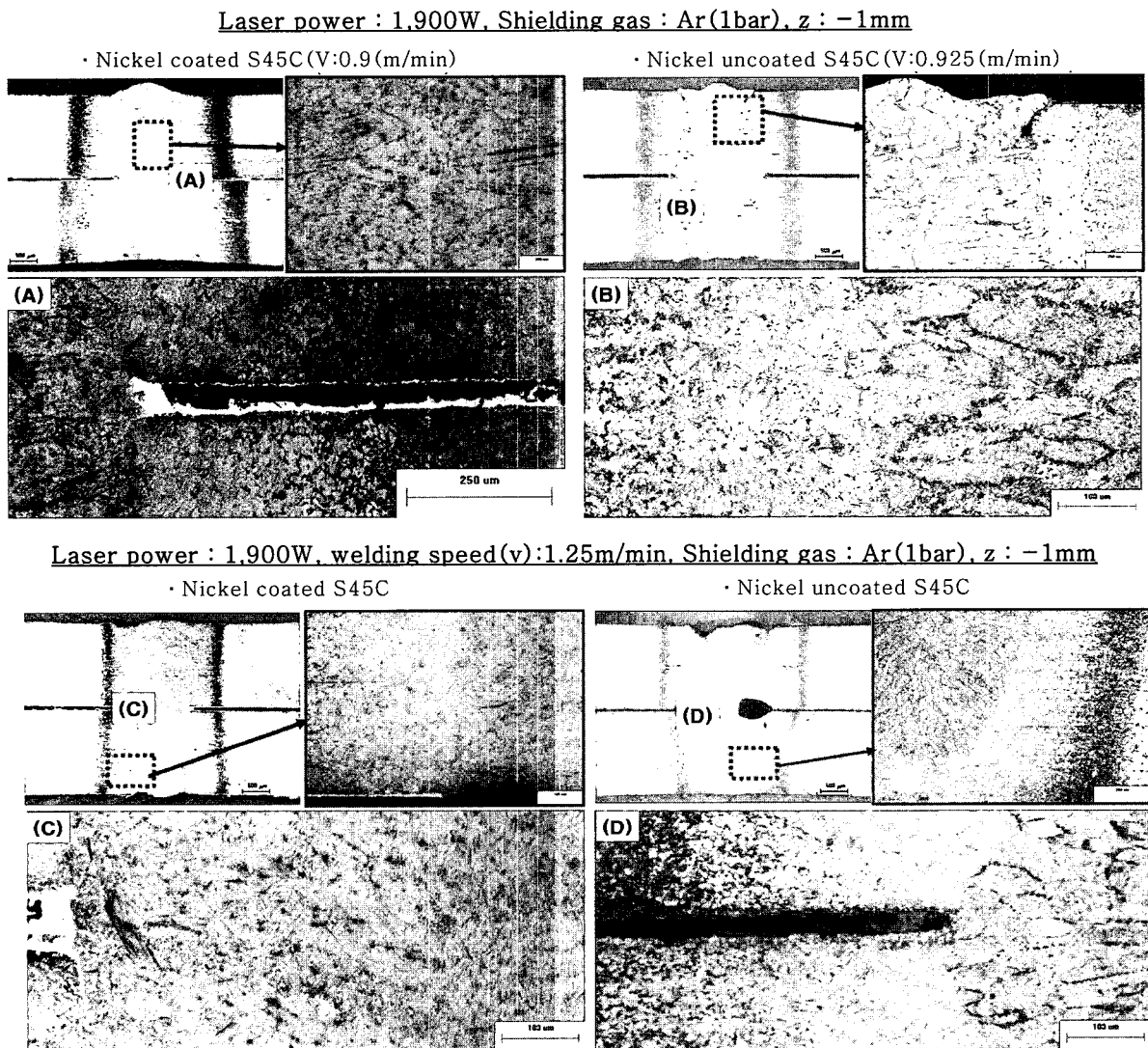


Fig. 13 Influence of the micro structure by welding speeds

사되어 용융된 시편에 대해 빠른속도로 레이저 빔이 진행 하면서 시편이 급랭되어  $\gamma$ -격자는 작은  $\alpha$ -격자에 접치게 되고 하나의 철원자로 채워진 공간격자에는 속박 용체를 가진 탄소원자가 채워진다. 이 강박상태가 격자를 왜곡시킴으로써 재질이 매우 강하게 되고 침상조직인 마르텐사이트로 된 것이다. 열영향부의 경우 용접금속은 대기에 열이 손실되는 것은 물론 금속이 용접됨으로써 모재로 전도에 의한 금속 열추출 때문에 매우 급속한 냉각상태로 응고되어 경도가 큰 마르텐사이트조직으로 되었다. 또한 합금원소의 영향으로 니켈은 오스테나이트 안정화원소로 연강에서 고온균열감수성을 증가시킨다. Rollason과 Roberts는<sup>11)</sup> 정해진 S함량에서 니켈이 결정입계에서 황화물을 증가시켜 고온균열을 조장한다고 하는데 이런 현상은 Fig. 12에 잘 나타나 있다. 용접부의 중형비가 큰 경우 중형비가 작은 경우에 비하여 고온균열의 위험성이 큰 것으로 보고 있다.

레이저 출력을 1900W로 하고, 초점거리  $z=-1\text{mm}$ 로 했을 때 레이저빔의 이송속도를 니켈 도금했을 경우 0.9m/min, 1.25m/min 일 때와 니켈 도금하지 않았을 때 레이저빔의 이송속도를 0.925m/min로 하면 고온균열과 같은 결함이 발생하지 않았다.

## 후 기

본 연구는 조선대학교 2007년 교내학술연구비지원으로 연구하였습니다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강의 접치기 용접 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비드용접에서는 니켈도금의 영향으로 니켈 도금되지 않는 시편보다 기공이나 고온균열 등과 같은 내부결함이 많이 발생하고 스패터의 양이 상대적으로 많이 나타났다.

2) 비드용접결과로 내부 결함이 없는 공정은 레이저 출력 1900W일 때 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강은 용접속도가 각각 1.0m/min, 1.5m/min이었다.

3) 접치기 용접시 니켈 도금된 S45C강은 니켈 도금되지 않은 S45C강보다 용접부의 형성이 균일하고, 내부결함 및 스패터의 양이 상대적으로 작게 형성되어 용접성이 좋다.

4) 접치기 용접시 니켈 도금된 S45C강의 경우 레이저 출력은 1,900W, 초점위치( $z$ )가  $-1\text{mm}$ , 용접속도가 각각 0.9~1.0m/min일 때 최적의 용접공정수이다. 이때 입열량( $E$ )이  $4.178\sim 4.36\times 10^3\text{J/cm}^2$  이었다.

## 참 고 문 헌

1. K.Y. Benyounis, A.G. Olabi and M. S. J. Hashmi : Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile, *Journal of Materials Processing Technology*, **164-165** (2005), 978-985
2. K.Y. Benyounis and A.G. Olabi : Optimizing the laser-welded butt joints of medium carbon steel using RSM, *Journal of Materials Processing Technology*, **164-165** (2005), 986-989
3. A.G. Olabi, G. Casalino, K.Y. Benyounis and M.S.J. Hashmi : An ANN and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of CO<sub>2</sub> laser welding, *Advances in Engineering Software*, (2006)
4. John F. Ready : LIA Handbook of Laser Materials processing, LIA, Magnolia Publishing Inc., (2001), 223-262
5. M.E. Khallaf and M.A. Ibrahim : On crack susceptibility in the submerged arc welding of medium-carbon steel plates, *Journal of Materials Processing Technology*, **68** (1997), 43-49
6. Y.T. Noh and B.C. Kim : Welding behavior between Zn-coated steel plate and free cutting carbon steel rod by Nd:YAG laser beam, *Journal of KSLP*, **4** (2001), 30-39
7. Robert Mueller : Laser Welding of Hem Flange Joints, *Proceedings of the 19th International Congress on Applications of lasers and electro-optics(ICALEO)*, (2000), F11-F20
8. K.D. Lee., K.Y. Park. and J.G. Kim : A study on the feasibility of partial penetration laser welding for the lap joint of 390MPa high strength steel sheets, *J. of the Korean Welding Society* **20-2** (2002), 76-82 (in Korean)
9. Z. Sun and M. Kuo : Bridging the joint gap wire feed laser welding, *Journal of Materials Processing Technology*, **87** (1999), 213-222
10. J.D. Kim and H.J. Park : The Weldability of 6mm Primer-coated Steel for Shipbuilding by CO<sub>2</sub> Laser(I), *Journal of KWS*, **23** (2005), 76-82 (in Korean)
11. 정홍철 : 탄소강의 용접부 고온균열, KISTI (in Korean)
12. Heinz W. Walther : Laser Welding in the Body Shop, *Proceedings of the International Body Engineering Conference on Advanced Technologies & Processes (IBEC)*, (1994), 92-96
13. Kanaoka, M., : Laser Manufacturing Technology, Korea Industrial Information center, (2000), 216