

# Nd:YAG 레이저빔을 이용한 아연도금강판(SECC)과 쾌삭강봉(SUM24L)의 용접에 관한 연구

노영태 · 김병철 · 김도훈 · 윤갑식\*  
연세대학교 공과대학 재료공학부

\*삼성전자 디지털 미디어 총괄 프린터 사업부

Welding behavior between Zn-coated steel plate and  
free cutting carbon steel rod by Nd:YAG laser beam

Y. T. Noh, B. C. Kim, T. H. Kim, \*K. S. Youn

## ABSTRACT

This work was carried out to apply a laser welding technique in joining between a Zn coated low carbon steel plate(SECC) and a free cutting carbon steel shaft(SUM24L) with or without Ni coating. Experiments were carried out and analysed by applying the FD(factorial design)method to obtain the optimum Laser welding condition. Optical microscopy, SEM, TEM and XRD analyses were performed in order to observe the microstructures in the fusion zone and the HAZ. Mechanical properties of the welded specimens were examined by microhardness test, tensile test and twist test. There was no trapped Zn in the fusion zone by EDS analysis. This means that during the welding process, Zn gas could be eliminated by appropriate shielding gas flow rate and butt welding gap. Ni coating itself did not influence on the tensile strength and hardness. However, twist bending strength and the weld depth of the Ni-coated free cutting carbon steel were lower as compared with those of the uncoated free cutting carbon steel. It was attributed to a lower absorbance of laser beam to the shin Ni surface. According to the results of the factorial design tests, the twist bending strength of welded specimens was primarily affected by pulse width, laser power, frequency and speed.

keywords ; Zn-coated low carbon steel sheet, laser welding, Ni-coated free cutting carbon steel, factorial design method, twist bending strength, optimum condition, pulse width

## 1. 서론

레이저에 의한 용접은 비접촉 가공기술로 재료의

오염을 방지할 수 있고, 기존 용접법에 비하여 용접부와 열영향부가 작으며, 용접변수들을 조절하여 원

하는 용접특성을 얻을 수 있는 장점이 있다.<sup>1)</sup> 용접에 적용되는 레이저는 대부분 CO<sub>2</sub>레이저와 Nd:YAG레이저가 보편화되어 있으며, 가장 많은 용접이 이루어지는 재료는 철강재이다. 보통 대형부품의 경우에는 CO<sub>2</sub>레이저를 사용하며 소형의 정밀부품에는Nd:YAG레이저를 사용한다.<sup>2)</sup> Nd:YAG레이저는 CO<sub>2</sub>레이저에 비하여 짧은 파장(1.06μm)을 가지고 있어 알루미늄, 구리, 황동, 금등과 같은 반사도가 큰 합금의 경우에 유리하며, 광 파이버(fiber)를 이용한 레이저빔 전송과 로봇틱스를 이용한 광집속부 3차원 이동에 의하여 용접이음 케적이 평탄하지 않거나 직선이 아닌 경우에도 자동 용접이 가능하다.

Nd:YAG레이저 용접시 용접모드는 연속파(continuouswave) 및 펄스모드(pulse mode)로 구분 할 수 있다. 연속파 용접모드는 용접시 연속적인 에너지 주사로 기밀한 용접을 할 수 있으며, 정상상태를 유지하여 품질 유지가 쉬운 장점이 있다. 그러나, 같은 목표의 용접깊이를 용접시 펄스모드에 비해 약 1.5~2배 정도 높은 파워를 필요로 한다. 레이저 공진기에서 연속파 및 펄스 모드를 변조 사용할 수 있는 레이저 시스템 경우 현상이 뚜렷하게 나타난다.<sup>3)</sup> 레이저 공진기에서 발전된 레이저빔 에너지는 인가된 전압에 따라 정해진 총 에너지를 가지게 된다. 연속파 출력모드를 선택하는 경우 연속적인 공진기내 출력감소로 레이저 공진기 첨두출력이 낮아지게 되며, 용접침투깊이에 영향을 미치는 첨두출력을 크게 할 수 없다. 펄스모드의 경우 펄스폭(pulse width)과 주파수(frequency)를 조절하여 첨두출력(peak power)을 조절하고, 연속파 모드에 비하여 전체적인 총 투입열량을 최대 절반으로 줄일 수 있어, 열 영향부가 적고 중첩도를 조정하여 양호한 용접부를 형성할 수 있다. 철강재는 레이저 용접시 탄소함량이 임계 탄소량 보다 큰 경우 균열(crack)이 발생하기 쉬우며, 심용접(deep penetration welding)일 경우 기포(prosity) 생성이 용이하다. 일반적인 철강재는 내부식성을 향상시키기 위하여 아연 및 니켈도금처리를 하는 경우가

많으며, 레이저 용접에 영향을 미친다. 레이저 용접시 아연은 낮은 비등점으로 인하여 용접성을 저해하는 문제가 발생되며 니켈 도금 재료 용접시 응고 균열 경향<sup>4)</sup>이 크다고 알려져 있다.

본 연구는 일반적인 철강재료 레이저 용접 경향을 고찰하고, 생산 적용이 가능한 레이저 용접 주사조건을 구하기 위하여 아연도금된 저탄소강 강판(SECC)과 쾌삭 강봉(SUM24L)의 맞대기(butt welding) 용접을 수행하여 기계적인 특성과 금속학적 특성을 분석하였다. 공정 최적화와 신뢰성 있는 레이저 용접 주사조건을 얻고, 각종 변수를 복합적으로 고려하면서 변수의 영향을 고찰하기 위하여 실험계획법인 FD법<sup>5)</sup>(factorial design method)을 사용하였다. 쾌삭 강봉인 경우에는 부식방지를 위해 니켈 도금 처리를 한 시편과 도금처리를 하지 않는 시편에 대하여 각각 용접을 실시하여 아연도금의 영향<sup>7,8)</sup>과 니켈도금 영향<sup>9)</sup>을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에 사용된 금속은 저탄소강(SECC)으로서 표면이 아연 도금된 1.6mm 두께의 강판과 직경 8mm, 홈(tap)의 두께 1.6mm인 쾌삭강인 SUM24L 강봉을 사용하였다. SUM24L의 경우 니켈도금된 강봉과 니켈도금 되지 않은 강봉 2종류를 선택하고, 강판의 아연 도금층은 3.36μm 이고, 강봉 니켈도금층은 4.12 μm이다. 시편 화학조성은 발광 분석 분석기(Emissionspectroscopy)를 사용하여 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of base metal  
1) Plate Zn coating thickness 3.36μm

| Composition    | C     | Si    | Mn  | P    | S    | Al   | Fe   |
|----------------|-------|-------|-----|------|------|------|------|
| contents (wt%) | 0.045 | 0.018 | 0.2 | 0.02 | 0.07 | 0.03 | Bal. |

2) Shaft Ni coating thickness 4.12 $\mu$ m

| Composition    | C     | Mn   | S     | Si   | Cu   | Fe   |
|----------------|-------|------|-------|------|------|------|
| contents (wt%) | 0.082 | 1.04 | 0.341 | 0.01 | 0.02 | Bal. |

레이저 용접은 용가제(filler metal)를 사용하지 않았으며, 맞대기 형상 레이저 용접을 수행하였다. 레이저빔 조사시 생성되는 증발입자나 플라즈마를 제거하고 대기로부터 용접부 산화를 방지하기 위하여 질소(N<sub>2</sub>) 보조가스를 시편과 45° 각도로 불어 주었다. 빔의 위치가 정확히 아연도금강판과 캐삭강봉 경계부에 놓이도록 시편배치 및 빔조준에 세심한 주의를 기울였다. 강판과 강봉 용접 모식도는 Fig. 1과 같다.

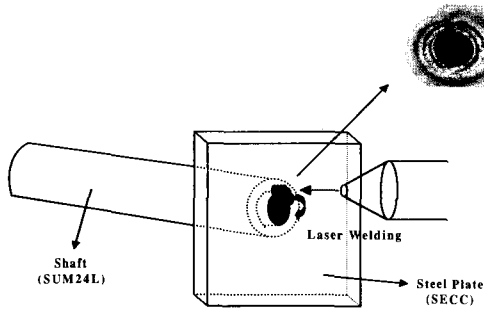


Fig.1. Schematic illustration of Laser welding

용접부 기계적 특성을 분석하기 위하여 연속 압입 하중 시험법<sup>10)</sup>을 이용한 인장물성 측정과 비틀림 시험, 경도 시험을 수행하였다. 연속 하중 시험법은 인장 시편 제작이 불가능 할 경우에 타당한 방법으로, 용접된 시편의 인장강도, 연신율, 가공경화지수 등을 측정하였고, 용접 후 변화를 파악하기 위하여 모재에 대해서도 같은 시험을 실시하여 결과를 비교 분석하였다. 실험은 압입깊이가 최대 300 $\mu$ m가 되도록 하였으며 분석을 위하여 15회 부분하중제거를 실시하였다. 실험 조건은 최대 변위가 300 $\mu$ m이고, 하중제거회수가 15회였으며, 압입속도는 0.3mm/min, 직경 1mm 구형압입자를 사용하였다. 아연도금강판과 캐삭강봉의 용접부 건전성 여부를 평가하기 위하여 수행한 비틀림 강도 시험(twist bending strength test)은 토크렌치(torque wrench)를 사용하여 실시하

였고, 변수에 따른 최대 접합 강도 값을 측정하였으며, 비틀림 시험 후 시편 파단 양상을 조사하기 위하여 SEM(scanning electron microscopy)관찰을 수행하였다. 용접 후 시편의 용접부 경도 변화를 알아보기 위하여 미소 경도기(micro-vickers hardness)를 이용하여 시험 하였고, 0.2mm 간격씩 200g 하중을 주었다.

용접부 형상을 관찰하기 위하여 용접시편 단면을 채취하여 연마 후 나이탈(Nital)로 에칭한 후, 광학현미경(optical microscopy)과 SEM(scanning electron microscopy)을 사용하여 분석하였다. 용접부에 형성된 상을 예측하고 생성물 유무를 확인하기 위하여 XRD분석을 실시하였고, 용접부내에 아연과 니켈로 인한 개재물 유무를 확인하기 위하여 EDS분석을 수행하였다. 용융부에서 광학현미경에 의한 관찰과 XRD분석으로 구분이 어려운 상 확인을 위하여 TEM 분석을 병행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. FD(factorial design)법에 의한 최적조건 설정

본 연구에서는 FD법을 사용하여 레이저 용접된 시편들 중 최대 비틀림 접합 강도와 용융깊이를 만족시키는 레이저용접의 최적조건을 설정하였다. 예비 실험을 통하여 비틀림 접합 강도와 용융깊이에 가장 영향을 미치는 레이저 출력, 주사 속도, 펄스 폭, 주파수들을 실험 인자(Factor)로 설정하고, 인자 범위는 2수준(Level)으로 설정하였다. 시편은 니켈도금되지 않은 강봉을 사용하였으며, 예비실험을 통하여 결정된 실험 인자들과 수준을 Table 2에 나타내었다.

선정된 인자와 수준을 가지고 FD법에 따라 16개 조건의 실험배열표(Design Matrix)를 작성하고, 실험에서 비제어인자를 고려해주기 위하여 2회반복실험을 수행하였다. 실험배열표 조건에 따라 레이저 주사 후 비틀림 접합 강도와 용융깊이를 측정하여 특성치를 얻었다.

Table 2 Process control parameters and limits in factorial design

| Parameters        | limits |     |
|-------------------|--------|-----|
| Laser power(P)    | -1     | +1  |
| Scanning speed(S) | 550    | 580 |
| Pulse width(W)    | 2.5    | 5   |
|                   | 10     | 13  |
| Frequency(F)      | 30     | 40  |

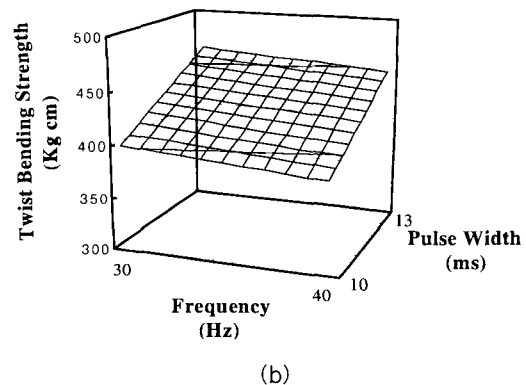
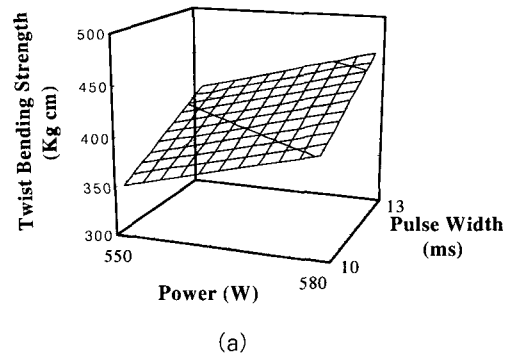
Table 3은 FD법에 따른 16개조건의 실험배열표를 나타낸다. Table 3에서 볼 수 있듯이 최대 비틀림 강도와 용융깊이는 8번 주사조건에서 얻을 수 있다.

Table 3 Design points in factorial design

| run | variables in coded units |          |          |          | variables in original units |     |    |    | response   |       |
|-----|--------------------------|----------|----------|----------|-----------------------------|-----|----|----|------------|-------|
|     | $\chi_1$                 | $\chi_2$ | $\chi_3$ | $\chi_4$ | P                           | S   | W  | F  | twist test | depth |
| 1   | -1                       | -1       | -1       | -1       | 550                         | 2.5 | 10 | 30 | 320        | 1.42  |
| 2   | +1                       | -1       | -1       | -1       | 580                         | 2.5 | 10 | 30 | 360        | 1.45  |
| 3   | -1                       | +1       | -1       | -1       | 550                         | 5   | 10 | 30 | 350        | 1.41  |
| 4   | +1                       | +1       | -1       | -1       | 580                         | 5   | 10 | 30 | 410        | 1.52  |
| 5   | -1                       | -1       | +1       | -1       | 550                         | 2.5 | 13 | 30 | 400        | 1.56  |
| 6   | +1                       | -1       | +1       | -1       | 580                         | 2.5 | 13 | 30 | 450        | 1.59  |
| 7   | -1                       | +1       | +1       | -1       | 550                         | 5   | 13 | 30 | 410        | 1.55  |
| 8   | +1                       | +1       | +1       | -1       | 580                         | 5   | 13 | 30 | 460        | 1.62  |
| 9   | -1                       | -1       | -1       | +1       | 550                         | 2.5 | 10 | 40 | 300        | 1.36  |
| 10  | +1                       | -1       | -1       | +1       | 580                         | 2.5 | 10 | 40 | 350        | 1.42  |
| 11  | -1                       | +1       | -1       | +1       | 550                         | 5   | 10 | 40 | 330        | 1.39  |
| 12  | +1                       | +1       | -1       | +1       | 580                         | 5   | 10 | 40 | 390        | 1.45  |
| 13  | -1                       | -1       | +1       | +1       | 550                         | 2.5 | 13 | 40 | 400        | 1.53  |
| 14  | +1                       | -1       | +1       | +1       | 580                         | 2.5 | 13 | 40 | 430        | 1.56  |
| 15  | -1                       | +1       | +1       | +1       | 550                         | 5   | 13 | 40 | 400        | 1.50  |
| 16  | +1                       | +1       | +1       | +1       | 580                         | 5   | 13 | 40 | 450        | 1.58  |

FD법에 의한 실험계획법에 따라 비틀림강도와 용융깊이를 측정된 후 통계프로그램(SAS)을 이용하여 분산분석(ANOVA) 및 수학적 모델을 통하여 인자들의 유의성 및 영향을 알 수 있다. 특성치를 비틀림 접합 강도로 설정 할 경우 레이저 출력, 주사속도, 펄스 폭, 주파수, 주사속도와 펄스 폭의 교호작용이 유의한 변수이고, 용융 깊이에 대해서는 레이저 출

력, 펄스 폭, 주파수가 유의한 변수이다. 비틀림 접합 강도 경우 펄스폭과 레이저 출력, 주사속도가 증가할수록 비틀림 접합 강도가 증가하며, 주파수는 감소할수록 증가하였다. 용융깊이 경우는 펄스폭, 레이저 출력이 증가수록 용융깊이가 증가하였으며, 주파수가 감소할수록 증가하였고, 주사속도는 영향을 받지 않았다. FD법에 따른 조건에서 특성치(response)에 영향을 미치는 변수들의 영향을 수학적 모델링을 통하여 삼차원으로 도식하였다. Fig. 2(a)는 비틀림 접합 강도에 영향을 미치는 레이저 출력과 펄스폭 교호작용을 도식한 것으로 레이저 출력과 펄스폭이 증가할수록 비틀림 접합 강도가 증가하였으며, Fig. 2(b)는 비틀림 접합 강도에 영향을 미치는 주파수와 펄스폭 교호작용을 나타낸 것으로 주파수는 감소할수록, 펄스폭은 증가할수록 접합 강도는 증가하였다.



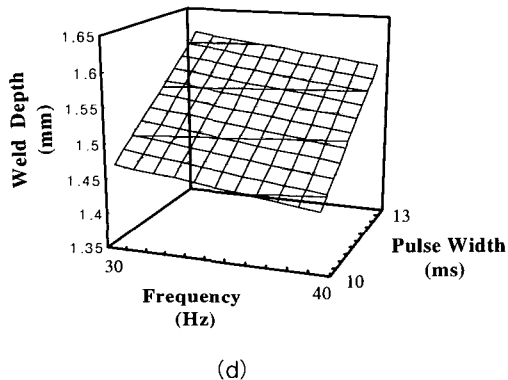
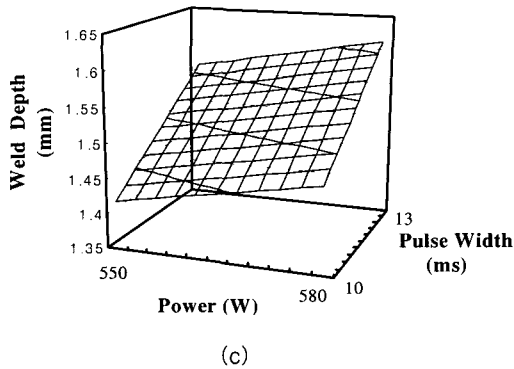


Fig. 2 Interaction effect in factorial design  
 (a) Interaction effect of power and pulse width for twist test  
 (b) Interaction effect of frequency and pulse width for twist test  
 (c) Interaction effect of power and pulse width for weld depth  
 (d) Interaction effect of frequency and pulse width for weld depth

Fig. 2(c)는 용융깊이에 영향을 미치는 레이저 출력과 펄스폭 교호작용을 보여주고 있고, Fig. 2(d)는 용융깊이에 영향을 미치는 주파수와 펄스폭 교호작용을 보여주고 있으며, 비틀림 접합강도와 비슷한 경향을 나타내었다. 인자 중 주어진 출력에서 특성치에 펄스폭이 가장 큰 영향을 미치며, 펄스폭이 길수록 비틀림 접합 강도 및 용융깊이가 커짐을 볼 수 있다. 주파수 감소로 인한 레이저 침투 출력의 증가와 펄스폭의 증가로 인한 입열량이 증가된 결과로 사료된다.

실험계획법의 결과로부터 아연도금강판(SECC)

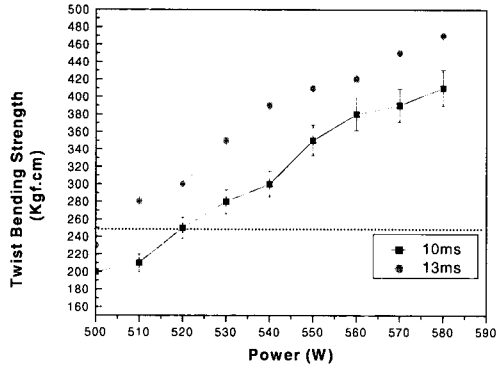
과 쾌삭강봉(SUM24L) 레이저 용접시 최적 주사 조건을 결정할 수 있었으며, 최적조건은 레이저 출력 580W, 주사속도 5mm/sec, 펄스 폭 13ms, 주파수 30Hz이다. Table 4는 실험계획법으로 축출된 결과를 고정변수와 함께 요약하였다.

Table 4 Optimum condition of laser welding

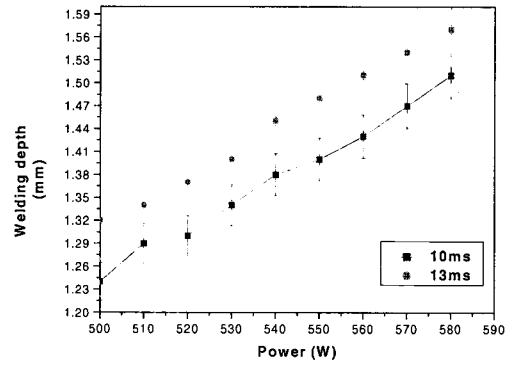
| Factor                 |                  | Optimum condition |
|------------------------|------------------|-------------------|
| Fixed factor           | focus position   | -0.25mm           |
|                        | shielding gas    | N <sub>2</sub>    |
|                        | flow rate of gas | 25l/min           |
| Laser power(W)         |                  | 580W              |
| Scanning speed(mm/sec) |                  | 5mm/sec           |
| Pulse width(ms)        |                  | 13ms              |
| Frequency(Hz)          |                  | 30Hz              |

### 3.2. 용접부 기계적 특성 평가

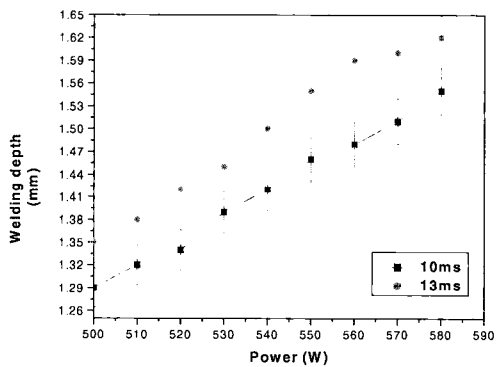
기계적 분석 방법중의 하나인 비틀림 시험(twist bending test)은 강판과 강봉의 접합부 건전성 여부를 평가하는 방법이다. Fig. 3(a)(b)는 강판과 니켈도금되지 않은 강봉의 비틀림 접합 강도와 용융깊이를 나타내었고, Fig. 3(c)(d)는 강판과 니켈도금된 강봉의 비틀림 접합 강도와 용융깊이를 나타내었다. 표의 가로축은 레이저 출력과 펄스폭에 대하여 나타내었고, 세로축은 비틀림 접합 강도와 용융깊이를 나타내었다. 수평점선은 guide line으로 강판과 강봉의 최소 접합 강도 기준값인 250Kgf·cm을 나타낸 것이다. 시편 모두 레이저 출력이 증가할수록 비틀림 강도와 용융 깊이가 증가하는 경향을 보이는데, 레이저 출력이 증가할수록 기홀 형성을 통한 심용접기구에 의하여 용융깊이 증가에 기인한다. 니켈도금 시편은 도금되지 않는 시편보다 낮은 비틀림 강도와 용융깊이를 나타내는데, 니켈 도금층 표면 반사도가 상대적으로 커서 초기 레이저빔 흡수율이 저하되어 용융깊이가 낮아진 것이라고 사료된다.



(a)

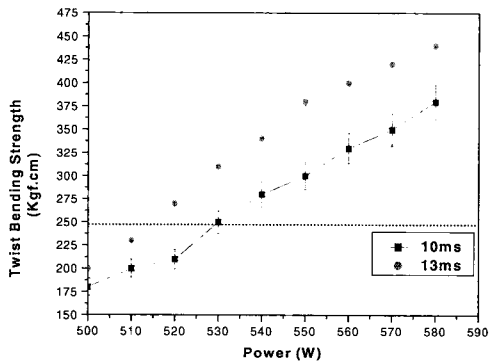


(d)



(b)

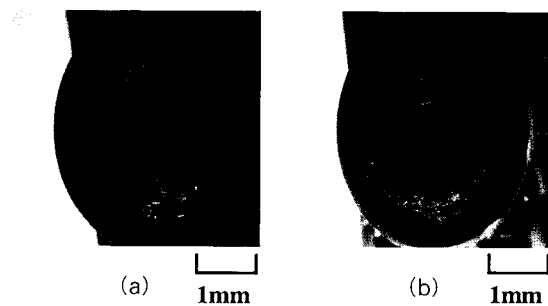
Fig. 3 SECC / SUM24L laser welding  
 (a) twist bending strength of specimen (Ni uncoated SUM24L)  
 (b) welding depth of specimen (Ni uncoated SUM24L)

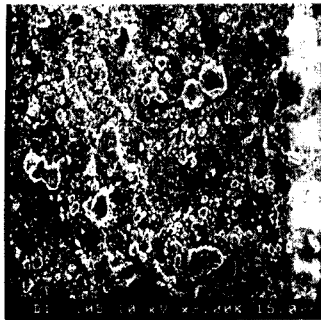


(c)

Fig. 3 SECC / SUM24L laser welding  
 (c) twist bending strength of specimen (Ni coated SUM24L)  
 (d) welding depth of specimen (Ni coated SUM24L)

Fig. 4는 비틀림 집합 강도 시험후 파단 양상을 나타낸 사진으로 Fig. 4(a)와 같이 건전한 용접 주사 조건은 강봉 에서 파단 이 일어났으며, 적절치 못한 용접 조건은 Fig. 4(b)와 같이 용접부 에서 파단이 일어났음을 볼 수 있으며, 용융깊이 저하에 기인한 결과로 생각된다. Fig. 4(c)는 비틀림 시험 후 파단된 부분의 주사전자현미경 (SEM) 사진을 보여주고 있다. 최적용접조건에서 용접된 용접부의 파단은 연성 파괴에서 보여지는 덩플 (dimple) 파괴 양상을 보여 주고있다.



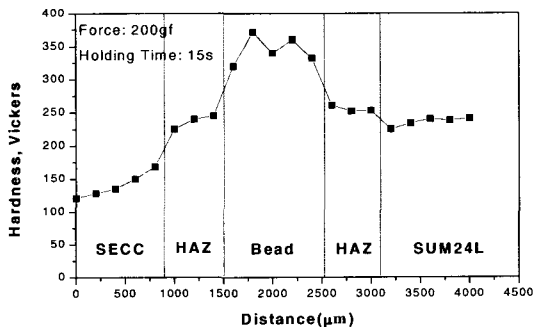


(c)

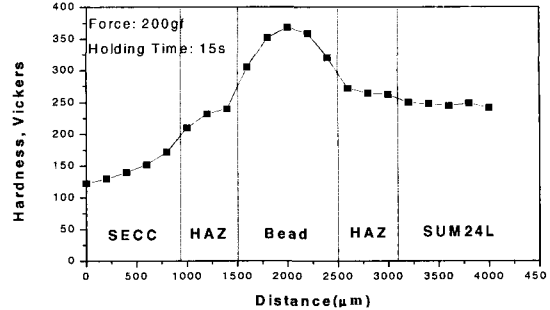
Fig. 4 result of twist test specimen

- (a) welded specimen on the optimum condition
- (b) welded specimen not on the optimum condition
- (c) SEM fractograph on the optimum condition

Fig. 5는 최적조건에서 용접된 시편을 가지고 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 용접부의 경도값을 조사하였다. Fig. 5(a)는 니켈도금되지 않은 강봉의 경도값을 Fig. 5(b)는 니켈 도금된 강봉의 경도값을 나타내었다. 니켈도금된 강봉과 니켈도금되지 않은 강봉의 경도 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 용접부 경도는 모재에 비하여 크게 증가되어 있음을 알 수 있는데, 경도 상승은 레이저용접시 급속냉각에 의해 용접부 결정립 미세화에 의한 경도 증가와 높은 경도를 갖는 새로운 상(phase)이 용접부에 형성된 것에 기인한다고 사료된다. 용접시 재료 일부만이 용융과 응고를 반복하면서 수축과 팽창에 따른 잔류응력 도입도 경화 원인으로 작용할 수 있다. 강봉(SUM24L)의 경우 강판(SECC)보다 약 1.5배 이상 높은 경도값을 나타내는데, 탄소함유량이 강판보다 높은 것에 기인한다.



(a)



(b)

Fig. 5 Microhardness profile traversing the weld

- (a) SECC / SUM24L(Ni uncoated)
- (b) SECC / SUM24L(Ni coated)

최적조건으로 용접된 시편을 가지고 연속압입시험법을 이용하여 인장물성을 측정하였다. 이 방법은 압입 상황 전반에 대한 정보를 측정된 압입하중-변위 곡선으로부터 예측함으로써 재료 경도값 외에도 다양한 기계적 성질을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 압입 시험법으로 이종의 모재, 용접부에 대하여 항복강도, 인장강도, 연신율, 가공경화지수를 얻을 수 있었다. 인장결과를 비교하여 보면 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Results of tensile test

|                         | Tensile strength (MPa) | Yield strength (MPa) | Index of processing hardness |
|-------------------------|------------------------|----------------------|------------------------------|
| SECC                    | 281.57                 | 195.84               | 0.15                         |
| SUM24L                  | 640.83                 | 335.83               | 0.24                         |
| Weld bead (Ni coated)   | 1165.17                | 384.72               | 0.37                         |
| Weld bead (Ni uncoated) | 1132.13                | 383.72               | 0.36                         |

용접부를 포함한 시편 인장결과를 전체적으로 분석하여 보면, 모재에 비해 항복강도는 상승하고 연신율은 감소하는 경향이 나타났으며, 레이저 용접 후 생성되는 용융부 경도가 모재에 비해 매우 크고 변형이 없기 때문이다. 니켈도금된 강봉과 도금되지 않은 강봉의 용융부 인장강도는 별 차이가 없었으며, 경도 시험 결과와 잘 일치한다. 가공경화지수는 시편 단면적 감소에 의하여 응력 상승을 견디어 내는 하

중 수용 능력을 의미한다. 응력증가가 가공경화에 의한 하중수용능력 증가보다 클 때 국부적인 변형인 네킹(necking)이 시작된다. 만일 본 실험에서 인장시편을 만들어 실험을 수행할 경우 가공경화지수가 가장 낮게 나타난 강판(plate)에서 파단이 일어났것이라고 예측을 할 수 있다.

### 3.3. 용접부의 금속학적 고찰

Fig. 6은 FD법에 의한 최적 용접 조건 설정에서 결정된 레이저 최적 용접 조건에 따른 니켈도금 강봉과 니켈도금 되지 않은 강봉의 용접부 단면 형상을 나타낸다. Fig. 6(a)는 니켈 도금된 강봉 용접부 단면 형상이고, Fig. 6(b)는 니켈 도금되지 않은 강봉의 용접부 단면 형상이다. Fig. 6(a)(b)에서 보듯이 용입깊이가 적절하고, 기포나 크랙등 용접결함이 없고, 용접부 기하학적인 형태가 균일한 것으로 보아 용접이 건전하게 되었음을 알 수 있다. Fig. 6(c)는 적절치 못한 용접 주사 조건에서 니켈 도금 강봉 용접에서 발생한 균열을 나타낸다.



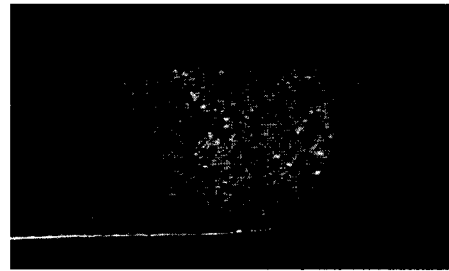
(a)

200µm



(b)

200µm



(c)

200µm

Fig. 6 Cross Section of weld bead  
 (a) weld bead of SECC - SUM24L (Nicoated) on the optimum condition  
 (b) weld bead of SECC - SUM24L (Niuncoated) on the optimumcondition  
 (c) Macro-crack of weld bead not on the optimized condition

적절치 못한 용접 조건의 경우 대부분 균열이 나타났는데, 레이저 용접시 생성되는 전형적인 응고 균열이라 사료된다. 모재 합금 성분중 용접시 균열감수성이 높은 탄소함량, 쾌삭강봉(SUM24L)의 비교적 높은 황(S) 및 니켈도금의 인(P) 함유가 응고균열의 원인이라 사료되며, 니켈도금 강봉 용접시 균열이 많이 나타난 원인은, 미용접된 용접 하단부에 인장응력이 집중되어 균열이 가속화 되었다고 판단된다.<sup>11)</sup>

아연과 니켈이 용접에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 용접된 용융부에 종축과 횡축 방향으로 EDS 점분석(spot analysis)을 수행한 결과에 의하면 용융부에서 아연과 니켈의 함유는 모두 오차 범위내에 있었으며, 국부적인 편석은 없는 것을 관찰하였다. 아연은 레이저 조사시 증발에 의하여 제거되고, 니켈은 용융시 용융부의 격렬한 교반에 의하여 분산되었으리라 사료된다.

용접부에 존재하는 상을 조사하기 위하여 XRD (X-Ray Diffraction Analysis)분석을 실시하였다. Fig. 7은 모재와 용접부의 XRD분석 결과를 비교하여 나타내었다. 용융부는 레이저용접의 급속한 응고와 냉각과정을 거치므로 상온에서도  $\gamma$ -오스테나이트(austenite) 조직이 잔류할 가능성이 있으나, XRD분석 결과에서는 모재와 용접부 모두 bcc



결정구조인  $\alpha$ -페라이트(ferrite)만을 관찰할 수 있었다. 그러나, 급격한 냉각에 의한 마르텐사이트(martensite)와 같은 페라이트 여러상이 혼재하고 있을 것이라고 생각된다.

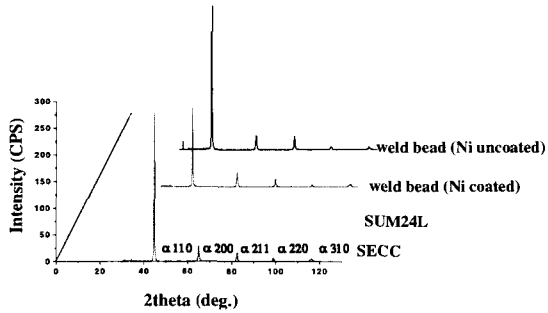
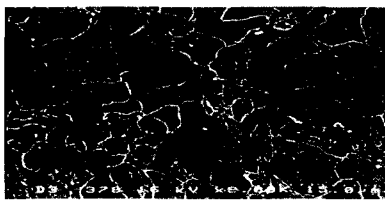


Fig. 7 X-ray diffraction pattern

광학 현미경 관찰을 통하여 강판(SECC)은 전형적인 페라이트 조직을 관찰할 수 있었으며, 강봉(SUM24L)은 페라이트와 펄라이트(pearlite) 조직을 볼 수 있었다. Fig. 8(a), (b)는 열영향구역과 용융부 SEM 사진으로 레이저 용접시의 급속냉각으로 인하여 모재보다 용접부의 결정립들이 미세화 되어있으며, 결정립 미세화는 재료의 경도와 인장강도증가에 기여하고, 응고균열을 방지할수 있다고 알려져 있다.<sup>12)</sup>



(a)



(b)

Fig. 8 SEM Microstructure  
(a) HAZ (b) weld bead

Fig. 9는 용융부 의 TEM 사진으로 래스 마르텐사이트조직(lath martensite)을 관찰 할 수 있었으며, 래스내에는 전위들이 높은 밀도로 뒤엉켜 있는 것을 볼 수 있는데 레이저 용접시 빠른 냉각속도에 기인한 것이라고 생각된다.

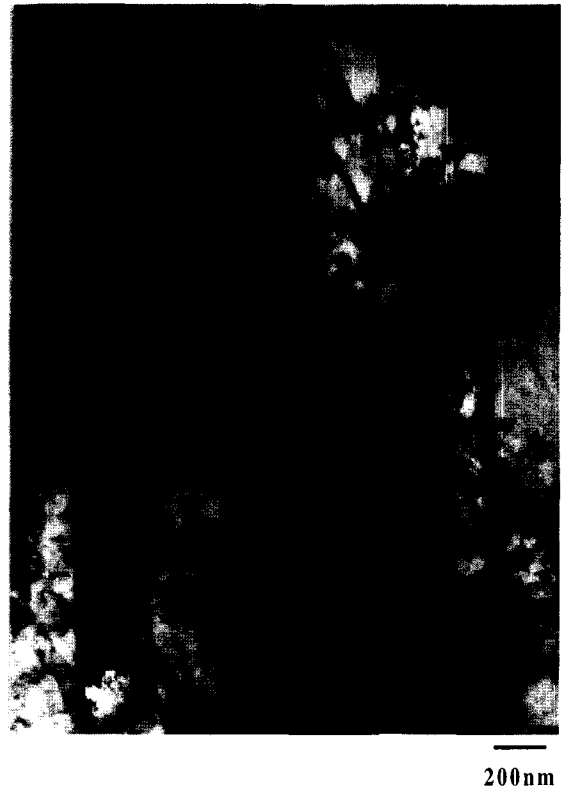


Fig. 9 TEM Microstructure

#### 4. 결 론

레이저용접을 생산현장에 적용하기 위한 기초시험으로, 아연도금된 강판(SECC)과 강봉(SUM24L) 레이저 용접시 실험계획법을 사용하여 최적의 용접 주사 조건을 구하고, 용접부 기계적인 특성 평가와 아연과 니켈도금 영향을 알아보기 위하여 수행된 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) FD(factorial design)법을 이용하여 최적 용접 주

- 사 조건을 구하였다. 비틀림 집합 강도와 용융깊이에 가장 유의한 인자로는 펄스폭, 레이저 출력, 주파수, 주사속도 순이었다. 최적의 주사 조건은 레이저 출력 580W, 펄스폭 13ms, 주사속도 5mm/sec, 주파수 30Hz였다.
- (2) 용접부 아연도금 영향과 니켈도금 영향을 고찰한 결과 최적의 주사 조건에서 용접을 수행했을 때 아연과 니켈 영향은 관찰되지 않았다.
  - (3) 아연도금 강판(SECC)과 니켈도금 여부에 따른 강봉(SUM24L)을 각각 용접을 실시한 결과 정도, 인장강도에서는 차이가 없었고, 용융깊이와 비틀림 강도는 니켈도금봉 용접에서 저하되었다.
  - (4) 적절치 않은 주사조건에서 균열의 경향이 나타났으며, 니켈도금봉 경우 균열 경향이 도금되지 않은 봉의 균열보다 크게 나타났다. 균열 생성원인은 응고균열이라 판단되며, 니켈도금강봉 경우 니켈 도금층 표면 반사도가 상대적으로 커서 초기 레이저빔 흡수율이 저하되어 용융깊이가 작으며, 미용접 하단부에 인장응력이 크게 작용한 결과로 사료된다.
  - (5) 경도와 인장시험결과 모재, 열영향구역, 용융부순으로 값이 상승했고, 이는 레이저 용접의 빠른 냉각속도로 인하여 용융부 조직이 미세화 되었고, 마르텐사이트 조직이 형성된 것에 기인한다.

### 참고 문헌

- 1) Daws, CEng., "Laser Welding", Abington Publishing, Cambridge England, pp16~30, 1992
- 2) 김도훈, "레이저 가공학", 경문사, 서울, pp 256 ~ 279, 1990
- 3) Keng H. Leong, Donna J. Holdridge and Yi Liu, "Comparison of Nd:YAG and CO<sub>2</sub> Laser Welding of Stainless Steels", ICALEO, Vol. 77, pp 704~711, 1993
- 4) C. Daws, CEng., "Laser Welding", Abington Publishing, Cambridge England, pp 69, 1992
- 5) Montgomery, "Design and Analysis of Experiments", pp 290~340, 1997
- 6) Eng. S. Ng, Ian. A. Watson and C. B. Allen. Y., "Multi-factorial analysis of Nd:YAG laser welding of high carbon steel: Effect of laser parameters and weld geometry", ICALEO, Vol. 87, pp 46~55, 1998
- 7) M. P. Graham, D. M. Hirak, H. W. Kerr, D. C. Weckman, "Nd:YAG Laser Welding of Coated Sheet Steel", ICALEO, Vol. 77, pp 651~660, 1993
- 8) Heyden, J., Nilsson, K. and Magnsson, C., "Laser Welding of Zinc Coated Steel", The Industrial Laser Annual Handbook, PennWell Publishing, Tulsa, Oklahoma, pp 161~167, 1990
- 9) E. Biro, D. C. Weckman, N. Zhou, "The Effects of Au and Ni plating on Pulsed Laser Welding of Thin Sheets in the lap-joint Configuration", ICALEO, Vol. 89, pp 116~125, 2000
- 10) 안정훈, 최열, 권동일, 대한금속·재료학회지, Vol. 38, No. 12, pp 1606~1619, 2000
- 11) C. Daws, CEng., "Laser welding", Abington Publishing, Cambridge England, pp 51~77, 1992
- 12) Tseng, C., Savage, W. F., Weld. J. Vol. 50, pp 777, 1971