

1. 서 론

표면처리 강판은 주로 북미 등에서 제철용 염화칼슘에 대한 방청목적으로 개발되었으나, 최근에는 산성비등 대기환경에 대한 대책으로 표면처리의 역할이 이루어지고 있으며, 그 수요도 날로 다양화되면서 증가하고 있다. 특히 아연도금강판은 우수한 내구성과 값이 싸며 내부식성이 강하므로 자동차 산업, 강판제조업 뿐만 아니라 가전제품에도 많이 사용되는 재료이다. 자동차 차체에 적용되는 아연도금강판의 용접은 대부분은 점용접으로 행하여지고 있으며, 그 우수한 용접특성으로 인해 특수 부위를 제외하고 거의 대부분에 적용되고 있다. 점용접의 경우 용접속도가 낮고 밀봉용접이 불가능하다는 용접특성상의 단점을 가지고 있으므로 기존의 점용접에 비하여 고속으로 용접하는 대체공정 또는 밀봉특성을 요구하는 특수 부위에 대한 용접기술의 개발 및 적용이 요구되고 있으며, 이러한 관점에서 레이저 용접기술에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 레이저 용접은 비접촉 가공기술로 재료의 오염을 방지할 수 있고, 기존 용접법에 비해 열영향부가 작으며, 용접변수들을 조절하여 원하는 용접특성을 얻을 수 있다. 현재 레이저 용접은 기존의 점용접의 대체공정 또는 새로운 용접시공법으로 그 우수성을 인정받고 있다. 레이저 용접의 차체(car body) 적용시 장점은 점용접부에 비해 차체 강도 향상이 가능하며, 기존의 점용접부에서 요구되던 플렌지 길이를 축소⁴⁾시킬 수 있으므로 차체의 중량 감소를 통한 경량화가 가능해진다. 또한 연속적인 용접부 형성이 가능하므로 차체의 비틀림 강도를 향상시킬 수 있으며, Nd:YAG 레이저의 경우 광섬유를 이용한 빔 전송이 가능하므로 다양한 이음부에 대해 적용성이 높다. 산

업용 레이저중 높은 평균출력을 이용하여 고속 용접이 가능한 CW Nd:YAG 레이저의 경우, 이미 기존의 점용접공정으로 행하여지던 겹치기 이음부(lap joint)에 적용되어 점용접부가 가지는 용접특성을 충분히 만족하며, 연속적인 에너지 투입으로 고속용접이 가능한 장점을 가지고 있어 일부의 공정을 대체하였으며, 향후 점진적인 확대가 예상된다. 그러나 CW 레이저는 펄스형 레이저에 비해 높은 평균출력을 사용하여야 하므로 입열량 증가에 따른 열변형 문제, 이음부 구조상의 아연증기(Fig. 1) 배출문제^{2,5)}로 인해 밀봉용접 등의 공정에 대해서 아직 적용되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 점용접이나 CW Nd:YAG 레이저로 적용이 어려운 특수 부위, 즉 용접시공시 밀봉특성을 요구한다던지, 최외각에 노출되기 때문에 열변형이나 열영향이 발생하지 않아야 할 부분의 적용을 위해 펄스형 레이저의 장점인 적은 열변형, 쉬운 입열량 제어, 중첩도 조절을 통해 아연도금 강판의 다양한 이음부에 적용하여 용접부 건전성 확보를 위한 연구를 하였다.

다양한 조건으로 제작된 용접부를 광학 현미경 및 전자주사 현미경을 이용하여 각 이음부의 용입형상 및 미세조직을 관찰하였고, EDS 분석을 통한 용접금속내의 아

연성분 유입여부를 확인하였다. 또한 경도 및 인장시험을 통하여 용접부가 가지는 인장하중 특성 및 연신율 등의 기계적 성질을 평가하였으며, 에릭슨 시험 및 굽힘 시험을 통하여 레이저 용접으로 확보 가능한 성형성을 평가하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 시편은 차체에 적용되고 있는 아연도금강판으로 다양한 이음부 제작을 위해서 시편의 크기를 30(W) × 100(L) × 0.7(T)mm로 준비하였다. 용접에 적용한 이음부는 겹치기 이음부(lap joint), 가장자리 이음부(edge joint) 및 가장자리 맞대기 이음부(edge butt joint) 그리고 접촉형 용접이음부(kissing weld joint)로 구성하여 실험하였으며, 각 이음부에 대한 초점위치 제어를 통하여 스파터(splatter) 발생 최소조건 도출, 인장하중을 만족하는 용접부 최소 유효 단면적 도출 등에 대하여 연구하였다. 용접에 사용된 레이저는 800W급의 펄스 레이저(모델명:HBL-PF800)를 사용하였으며, 레이저 발진기에서 발진된 빔은 SI(Step Index) 600 μ m(직경)의 광섬유를 통하여 전송되어 초점길이 125mm의 집속렌즈를 통하여 재료에 조사되었다. 용접시 스파터 및 흠(fume)의 발

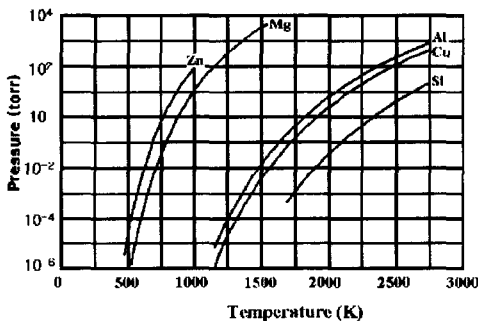


Fig. 1 Vapor pressure vs. temperature relation of various materials

Table 1 Welding conditions for various weld joints

Weld joint	Pulse width (Frequency)	Ave. Power (Peak power)	Overlap rate
Lap joint	7ms (12Hz)	560W (6.7kW)	16%
Edge joint	0.9ms (80Hz)	550W (7.6kW)	69%
Edge butt joint	0.8ms (100Hz)	570W (7.1kW)	67%
Kissing weld joint	1.6ms (50Hz)	620W (7.8kW)	57%

생을 고려하여 용접장치의 하단부에 cross-jet을 설치하여 비산물로부터 렌즈를 보호하였다.

예비 실험을 통하여 다양한 이음부에 대해 용접시 소요되는 펄스당 에너지 (J/pulse)조건 및 적정 용접속도를 도출하였다. 각 이음부에 적용된 레이저 변수 및 출력조건 등을 Table 1에 나타내었다.

실험시의 모든 공정은 CNC 장비를 이용하여 용접 속도, 초점위치 등의 가공변수를 정확히 제어하였으며, 본 연구에 적용된 시스템 구성 및 이음부의 형태를 아래의 Fig.2 및 Fig. 3에 도식화 하여 나타내었다.

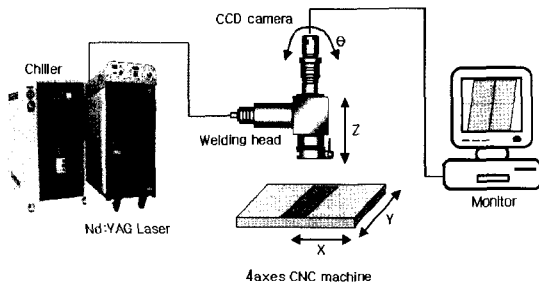


Fig. 2 Schematic diagram of laser welding system

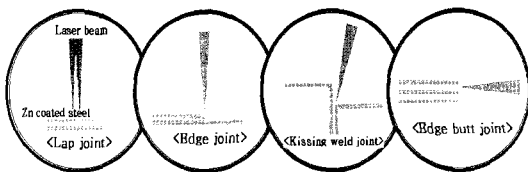


Fig. 3 Schematic diagram of various weld joints

3. 실험결과 및 고찰

철의 최대 단점인 녹(rust)발생을 방지하고, 장점인 강성과 경제성을 최대한 살릴 수 있는 아연도금강판은 경제성 있는 도금성과 뛰어난 희생 방식성을 가지고 있는 강판으로 방청측면에서는 최적인 반면

에 상대적으로 용접성을 약화시키는 요인으로 작용한다. 특히 겹치기 이음부에서 발생하는 문제는 상판과 하판이 겹쳐지는 아연도금층에서 열원에 의한 아연증기 발생이며, 아연의 증발온도가 강판의 용융온도보다 낮기 때문에 먼저 발생하게 되는 아연증기에 의한 용접성 약화가 용접성 저하의 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 수백여 개 강판의 조합으로 이루어지는 차체에서 기존의 점용접부나 CW Nd:YAG 레이저 용접에서 적용되고 있는 겹치기 이음부를 기본이음부로 하여 용접성 및 용접 속도 향상을 위해 다양한 이음부에 대해 적용하였다.

Table 2 Calculated Zn contact area and penetration depth of weld joints

Weld joint	Calculated Zn contact area	Penetration depth
Lap joint	100%	Full penetration
Edge joint	33%	0.35mm
Edge butt joint	11%	0.35mm
Kissing weld joint	43%	0.5mm

(*Coating thickness: 2 μ m, Spot size: 0.9mm)

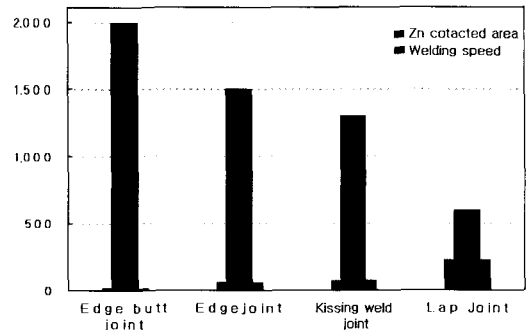
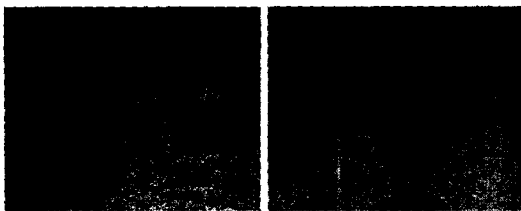


Fig. 4 Welding speed on similar power for various weld joints

Table 2에 겹치기 이음부를 기준으로 본 실험에서 얻고자 하는 용입깊이 및 용접시 레이저빔에 접촉하게 되는 아연도금

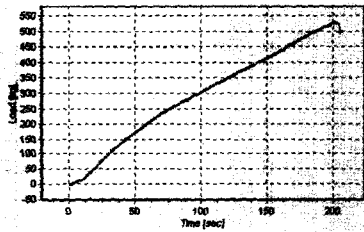
층의 접촉면적을 계략적으로 표시하였으며, Fig 4에 각 이음부에 적용한 용접속도를 나타내었다. 각 이음부별로 목적하고자 하는 용입깊이의 차이와 이음부의 구조 특성에 따라 용입깊이의 차이를 보일 수 있지만, 본 실험에서는 아연도금층 접촉 면적이 가장 적은 가장자리 맞대기 이음부에서 가장 빠른 고속의 용접이 가능하였다.

3.1 겹치기 이음부에서의 점(spot) 용접



(a) 0.2mm gap

(b) No gap



(c) Tensile load

Fig. 5 Cross section of lap joint & tensile load for specimen

레이저 조사시 가장 넓은 아연 접촉 면적을 가지는 본 이음부는 현재 CW 레이저의 높은 평균출력특성으로 고속용접이 가능하며, 용접특성에 대한 검증이 이미 확보되어 점용접의 대체 공정으로 일부 산업현장에서 이미 적용되고 있다. 본 이음부에 대한 펄스형 레이저의 용접 실험은 점 간격이 2.3mm인 BI prism이 장착된 트윈스폿(twin spot) 용접장치를 이용하여 20mm 용접선 내에서 레이저 점용접을 실시하여 정적 인장하중을 측정하였으며, 갭(gap)의 존재 여부에 따른 용접특성 즉, 동일 출력 내에서 상판과 하판에 임의의 하

중으로 압착시키거나 또는 0.2mm의 눈금자(scale bar)를 사용하여 다양한 갭형성범위에서 용접하여 단면검사를 실시하였다.

Fig. 5의 (a)에 나타낸 것과 같이, 0.2mm 눈금자를 사용하여 갭을 형성시킨 용접부의 단면 검사 결과 용접부의 형성은 모재표면보다 움푹 들어가서 형성되는 경향을 나타내고 있었다. 형성된 용접금속 자체는 비교적 안정적 이었으며, 상판과 하판의 겹침부에서 기공 및 균열의 발생은 거의 관찰되지 않았으나, 미접합된 부분을 일부 관찰할 수 있었다. 반면 Fig. 5의 (b)와 같이 갭이 없도록 임의의 하중을 주어 용접한 시편의 경우, 상판과 하판의 겹침부에서 아연도금층에 의한 영향으로 점용접부의 표면비드에서는 스패터에 의한 드릴링 현상이 일부 관찰되었으며, 단면 분석결과 루트부 및 용접금속의 중심부에서 일부의 시편에서 기공이 관찰되었다. 인장하중 시험결과, 겹치기 이음부의 용접부위가 가지는 정적 인장하중은 Fig. 5에서 보듯이 약 520kgf 정도로 목적하였던 인장하중수치인 420kgf를 상회하는 결과를 얻을 수 있었다.

본 이음부에 대한 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접 결과 발생할 수 있는 용접불량의 형태는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- ① 레이저빔 조사시 재료표면(아연도금층)에서 스패터에 의한 드릴링 현상 발생 (Fig. 6(b))
- ② 완전용입시 하판의 아연도금층에 의한 이면비드 드릴링 현상

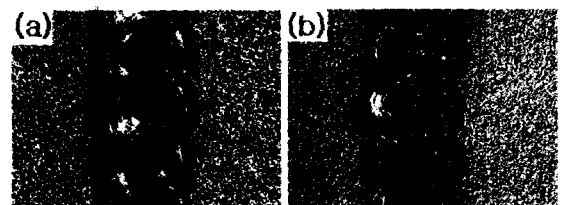
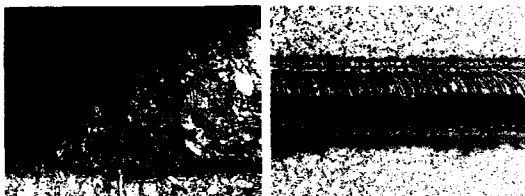


Fig. 6 Sound surface bead(a) and drilled surface bead(b) by Zn coated layer

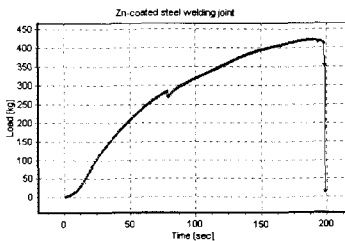
- ③ 상판과 하판의 겹침부에서 폭발적으로 증발하는 아연증기에 의한 기공발생 및 미접합부 발생

3.2 가장자리 이음부에서 심(Seam) 용접

아연도금 강판의 용접시공시 가장 큰 불량 요인으로 작용하는 아연도금층과 레이저빔의 접촉 면적이 겹치기 이음부에 비해 약 1/3수준인 본 이음부는 점용접에 비해 적은 펄스에너지로도 용접이 가능하였다. 가장자리 이음부의 용접 시험결과, 점용접에서 일부 관찰되던 비드의 함몰 또는 드릴링 현상은 완전히 제거가 가능하였으며, 상판의 가장자리부가 완만하게 용융된 미려한 표면비드를 얻을 수 있었다. 가장자리 이음부의 경우 겹치기 이음부에 비해 펄스에너지를 약 73% 정도로 감소시킬 수가 있었으며, 펄스형 레이저의 특징인 높은 침투출력을 이용하여 약 550W의 출력으로 1500mm/min.의 속도로 용접이 가능하였다. 용접부 단면 분석결과, 유효용접선이 0.35mm 이상 형성되면 목적하고자 하는



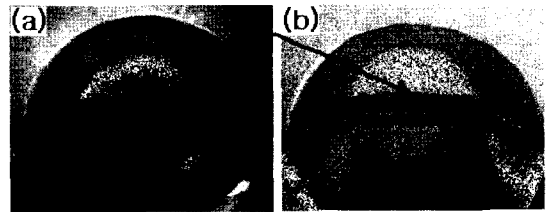
(a) Cross section (b) Surface bead



(c) Tensile load

Fig. 7 Cross section and surface bead of edge joint & tensile load for specimen

인장하중을 만족하는 것으로 관찰되었다. Fig. 7에 본 이음부의 단면 및 표면형상과 이음부의 인장하중치를 나타내었다. 이음부의 동적 성능을 평가하기 위해서 에릭센 시험(Erichsen test)을 실시하였으며, Fig. 8에 그 결과를 나타내었다. Fig. 8의 (a)와 (b)에 파단 전 및 파단후의 시험편 형상을 각각 나타내었다. (b) 화살표 부근이 본 성형능 시험시 최대 변형률을 갖는 부위로 용접비드와 평행하게 파단 됨을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 본 실험에서 형성된 용입깊이에 관련된 결과로 모재의 1/2정도 형성된 낮은 용입깊이에 기인한다. 에릭센 시험결과, Table 3과 같이 시험편이 가지는 최대 변형높이는 약 8mm 정도로 용입깊이가 0.35mm인 용입된 용접부가 가지는 성형성으로는 양호한 것으로 판단된다.



(a) before fracture (b) after fracture

Fig. 8 Erichen test result

Table 3 Max. deformation height of specimens

Sample	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	Ave.
Max. height(mm)	8.0	7.5	8.3	8.1	7.9	≈8.0

Fig. 9에 가장자리 이음부의 응용 구조인 햄플렌지(hem flange)⁽⁶⁾를 도식화하여 나타내었다. 햄플렌지의 용접구조는 강성이 요구되는 부분 즉, 도어(door), 후드(hood), 테일게이트(tail gate) 등에 주로 적용되는 구조로서 이러한 부분들은 자동차의 최외각에 위치하여 품질과 직결되기

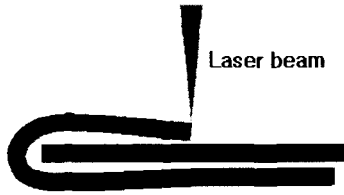


Fig. 9 Schematic diagram of hem flange

때문에 압입자국 등이 발생하는 점용접은 심미적인 측면에서 문제점을 수반하므로 적용이 불가능하며 현재에는 봉입재 (sealer)를 채워 경화시킨다.

헴플렌지를 레이저 용접한 후 굽힘 시험을 통하여 용접부가 가지는 성형성을 평가하였다. Fig. 10에서 나타내듯이 180° 굽힘에서 최대 변형률을 갖는 용접부위에서 용접금속의 연신을 통하여 용접부 특성을 유지하고 있는 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

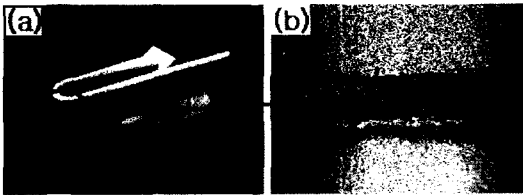


Fig. 10 180° bending test for hem flange

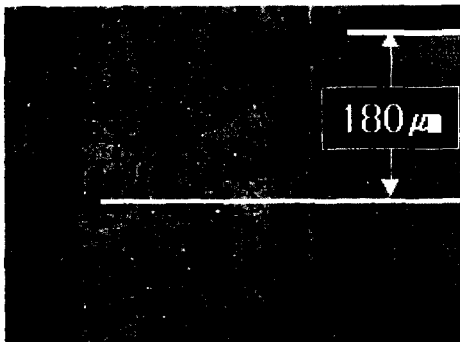


Fig. 11 Heat affected zone of hem flange

펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 헴플렌지 적용검토를 위해 용접후 단면검사를 통한 열영향부 범위를 관찰하였다. Fig. 11에서 나타내듯이 펄스형 Nd:YAG 레이저

로 형성된 용접부의 열영향 정도는 헴플렌지 중간 삽입강판의 약 0.18mm의 범위 안에서 결정립의 조대화가 멈춘 것으로 관찰되었다. 따라서 헴플렌지에 펄스형 Nd:YAG 레이저를 적용할 경우, CW 레이저에 비해 최소의 입열을 통한 용접이 가능하기 때문에 열변형 문제에서 보다 유리하며, 펄스 중첩도 조절을 통한 밀봉용접 특성도 얻을 수 있었다. 본 용접부가 차체에 적용될 경우, 절단된 강판의 모서리를 완만하게 용융시키는 것이 가능하게 되므로 기존에 행해지던 기계가공 공정 등의 후공정 감소에 따른 생산원가 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 최외각의 재료에는 열변형이나 열영향이 거의 없는 용접부형성이 가능할 것으로 판단된다.

3.3 가장자리의 맞대기 이음부의 심용접

Nd:YAG 레이저는 광섬유로의 전송이 가능하므로 로봇 등의 장치에 연동되어 사용될 경우 높은 자유도 확보가 가능하다. 본 용접은 기존의 점용접부 및 현재 그 적용이 확대되고 있는 CW 레이저에서 적용되고 있는 겹치기 이음부에 대해 광섬유 전송에 따른 높은 자유도 확보가 가능한 특징을 이용하여 이음부의 모서리부분을 용접하였다. 본 이음부는 구조상 다른 이음부와 비교하여 레이저빔과 아연도금층과의 접촉을 최소화시킨 형태(겹치기 이음부 대비 약 11%)로 겹치기 이음부에서 사용된 펄스당 에너지와 비교하여 약 76% 정도 감소시킨 저에너지 투입으로도 용접금속의 형성이 가능하였으며, 저입열 고반복에 따른 약 3.3배 정도의 용접속도 향상(2000mm/min.) 효과를 얻을 수 있었다. 제작된 시편의 용접부 분석 결과, 형성된 용접금속의 최소 유효 용접선 길이는 Fig. 12에서 나타내듯이 약 0.35mm로 요구되는 인장하중특성의 충족이 예상되며, 시편구조상 정적 인장하중이 측정이 어려운 관계

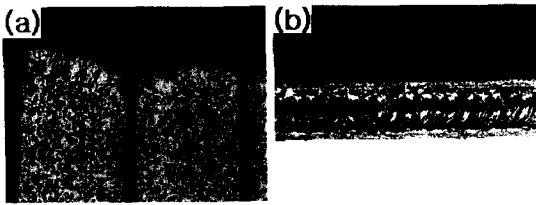


Fig. 12 Cross section and surface bead of edge butt joint

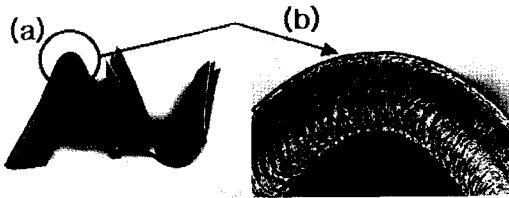


Fig. 13 Bending test of impact tester used

로 샤르피 충격 시험기(Charpy impact test)를 통해 동적 성형 특성을 평가하였다.

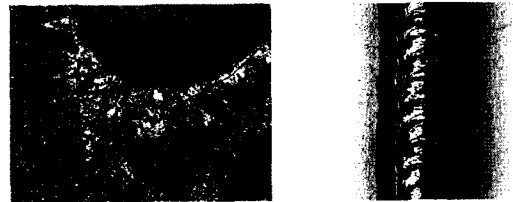
충격시험기의 해머 위치를 최대 위치에너지(300J)를 갖도록 하여 약 0.5sec.의 짧은 시간 내에 순간 타격한 결과 변형된 용접부를 Fig. 13에 나타내었다.

실험 결과 용접부는 최대인장변형과 최대 압축변형을 가지는 부분에서 연신 및 압축을 통하여 파괴나 균열 등이 보이지 않고 용접부 특성을 그대로 유지하고 있었다. 이음부 구조상 갭 의존도는 상대적으로 높은 편이나 용접시 갭 관리가 확보된다면 표면 품질유지가 상대적으로 용이하며 레이저 빔과 아연도금층과의 접촉면적이 작기 때문에 동일 출력에서 속도 향상 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

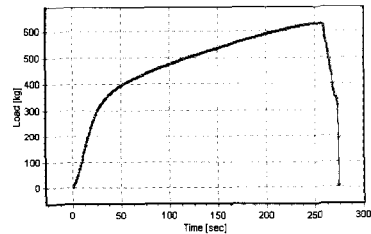
3.4 접촉형 용접이음부의 심용접

펄스형 Nd:YAG 레이저의 경우, 입열량 및 펄스 중첩도 제어를 통해 최소의 열변형으로 밀봉용접을 가능하게 한다. 본 이음부의 형태는 차체에서 점용접이나 CW

레이저로는 용접특성이나 열변형 특성 등의 이유로 적용이 어려운 루트 부위나 트렁크 부분의 밀봉용접 적용을 위해 제작된 형태의 이음부이며, 자생 용접으로도 용접부 형성이 가능하며 Fig. 14에 용접부 단면과 표면비드 및 이음부의 인장하중치를 나타내었다.



(a) Cross section (b) Surface bead



(C) Tensile load

Fig. 14 Cross section and surface bead of kissing weld joint & tensile load for specimen

본 이음부의 경우 레이저 조사시 재료의 결합 위치에 따라 재료의 레이저 빔 간섭을 피하기 위해서 레이저빔의 조사각도가 달라져야 한다. Fig. 15는 각기 다른 단차를 주어 형성시킨 용접부 단면 형상을 나타낸 그림이다. 용접시 재료의 결합위치를 두 시편이 동일한 위치 또는 1mm의 단차를 가지고 재료가 결합되었을 경우, 용접선에 수직으로 레이저빔을 조사하여도 용접부 형성이 가능하였으나, 2mm의 단차를 가질 경우 혹은 그 이상의 단차를 가질 경우, 재료가 레이저빔의 간섭을 피할 수 있도록 조사 위치를 변경시켜야 한다. 실험결과 2mm이상의 단차를 가질 경우 Fig.

16에서 보듯이 최소 약 7°이상의 각을 주어 재료에 조사하면 용접이 가능한 것으로 나타났다.

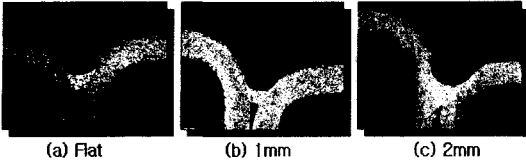


Fig. 15 Cross section of kissing weld joints. kissing weld joint

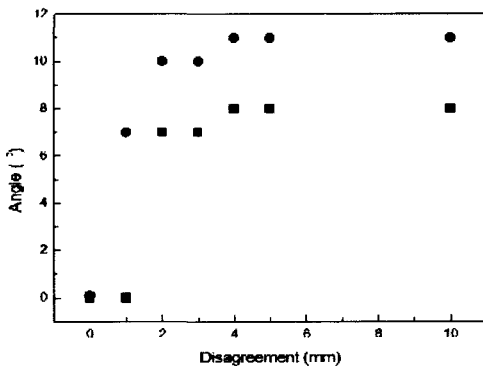


Fig. 16 Laser beam irradiated angle for materials disagreement in kissing weld joint

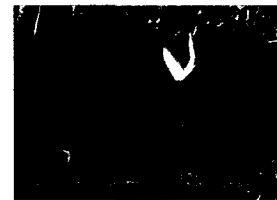
본 이음부에서 약 620W의 평균출력으로 용접할 경우, 약 1300mm/min. 정도의 용접속도로도 안정적인 비드의 형성이 가능하였다. 이는 겹치기 이음부에 비해 약 2배 정도 속도 향상 결과이며, 용접에 필요한 펄스당 에너지도 약 1/2배 수준으로 감소시킬 수 있었다. 본 이음부에 대해 다양한 중첩도를 주어 용접 시험한 결과, 약 64%정도 이상의 중첩도를 갖게 되면 밀봉 특성을 유지하는데 문제가 발생하지 않는 용접부 형성이 가능한 것으로 나타났다.(Fig. 14 (b))

3.5 아연도금 강판 용접부의 미세조직 특성

아연도금강판의 레이저 용접부 미세 조직을 관찰한 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 모재의 결정립에 비해 열영향부의 결정립 크기는 3~5배 정도의 성장을 관찰할 수



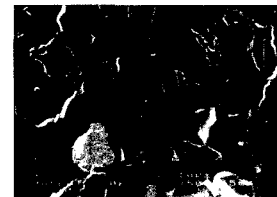
(a) Base metal



(b) HAZ



(c) Fusion line



(d) Weld metal



(e) Root

Fig. 17 Micro-structures of Zn coated steel weld metal

있었으며, 열방출이 비교적 용이한 용접금속 루트부나 표면에서는 모재와 비교하여 결정립 크기 변화는 크게 나타나지 않은 것으로 관찰되었으며, 결정립이 조대해진 열영향부에서 기계적 성질의 감소를 예측할 수 있다. Fig. 18에 용접금속의 경도분포를 나타내었다. 그림에서 보듯이 결정립이 조대화된 열영향부에서의 경도치가 모재의 약 60%정도의 값을 나타내고 있으며, 용접금속의 중심에서 높은 경도 값을 보인다. 또한 용접시 아연도금층의 용접금속 내부로의 유입여부를 관찰하기 위하여 용접금속 영역을 EDS 분석한 결과 Fig. 19와 같이 아연도금층의 용접금속내로의 유입은 없는 것으로 나타났다.

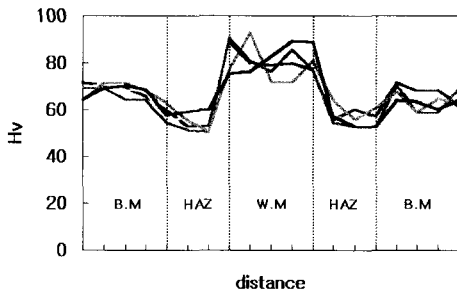


Fig. 18 Micro-Vickers hardness profile

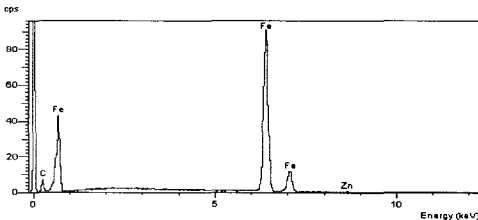


Fig. 19 EDS pattern of weld metal

4. 결 론

(1) 펄스형 Nd:YAG 레이저의 경우 높은 첨두 출력을 이용한 용접공정으로 입열량 제어가 용이하여 이음부의 특성

에 맞게 출력을 조절하여 열변형을 최소화시킬 수 있었다.

- (2) 다양한 이음부에 대해 연구한 결과, 겹치기 이음부에서는 요구되는 인장하중 값을 상회하는 결과를 얻을 수 있었으며, 아연층기 배출이 용이한 구조인 가장자리 이음부나 가장자리 맞대기 이음부에서는 모서리의 날카로운 부분이 둥글게 가공된 미려한 비드표면과 연신을 및 요구 인장하중 등 기계적 성질을 만족하는 결과를 나타냈다.
- (3) 밀봉특성을 요구하는 부위에 적은 열변형을 가지는 펄스 레이저 심용접을 적용할 경우, 완전 밀봉 및 용접부의 부드러운 표면으로 인한 후처리 공정의 감소 및 생산원가 절감의 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 펄스형 Nd:YAG 레이저의 평균출력을 증가시키게 되면 CW Nd:YAG 레이저에 비해 낮은 평균출력에서도 유사한 속도의 고속도용접이 가능하였다.

5. 참고 문헌

1. Y.F.TZENG, "Pulsed Nd:YAG laser seam welding of Zinc-coated steel", *Welding journal*, 1999, 238s~244s.
2. M.P.Graham, D.C.Weckman, H.W.Kerr, "Nd:YAG Laser beam welding of coated steels using a modified lap joint geometry", *Welding journal*, 1996, 162s~170s.
3. Y.F.TZENG, "Effect of operating on surface quality for the pulsed laser welding of zinc coated steel", *Journal of materials processing technology*, 2000, 163~170.
4. N.M.Uddinn, E.Berardi, R.C.Ducharme, D.A.Salada and J.J.Speranza, *Proc.*

SPIE conf. on laser processing,
Quebec city, Canada. 3-6, 1986,
260~264.

5. E.A.Brandes, GB.Brook : smithells
metals reference book, 1992, 8-54.
6. F.A.Dipietro, proc. 21st ISATA
symposium, Wiesbaden, 89504, 1989,
6-10.