

## 연구논문

## 도금조건에 따른 알루미늄도금강판의 레이저 용접성에 관한 연구

김종도\* · 이정한\*\*

\*한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\*한국해양대학교 대학원

**A Study on the Laser Weldability of Aluminized Steel Sheet with Coating Condition**

Jong-Do Kim\*, Jung-Han Lee\*\*

\*Division of Marine Engineering System, Korea Marine University, Busan 606-791, Korea

\*\*Graduated school, Korea Marine University, Busan 606-791, Korea

**Abstract**

The aluminized steel sheet exhibits excellent resistance to oxidation and corrosion, and can substitute for stainless steel or heat-resisting steel in some situations. Furthermore it has wide applications, owing to its low cost and excellent performance, in the petrochemical industry, electric power, other energy conversion system, etc. and has attracted the attention of many investigators. Laser welding is a remarkably advantageous method for welding of thin sheets and surface-treated steel sheets since the method requires less heat input, and it is suitable for high-speed welding. In this study, thus, the laser weldability of aluminized steel sheet was investigated. As the result from the study, there is an Al-rich zone in a welded part which has decreased the welding strength due to the intermetallic compounds in the Al-rich zone.

**Key words** : Aluminized steel sheet, Laser welding, Weld strength, Al-rich zone, intermetallic compounds

**1. 서론**

알루미늄도금강판은 저탄소 냉연강판 수준의 기계적 강도를 가지며 알루미늄도금에 의해 높은 내식성을 발휘하는 도금강재이다. 상업적으로 공급되는 알루미늄도금강판은 도금욕의 규소(Si)첨가 유무에 따라 크게 두 종류로 나누고 있으며, 규소는 도금층 중의 Fe-Al 합금층의 성장을 억제시키는 효과와 병행하여 도금부착량을 감소시킨다고 알려져 있다. 이러한 알루미늄도금강판은 자동차 배기계 및 연료탱크, 고온용

주방기기, 보일러 등과 같이 고온(약 550°C까지)에서의 내식성이 요구되거나 내열성이 요구되는 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다.

특히 자동차의 주요부품인 연료탱크는 도금층 중에 납을 약 90% 함유한 용융 납-주석도금강판(Pb-Sn alloy coated steel sheet)이 주류를 이루고 있으며, 이는 자동차 1대의 연료탱크가 100~200g의 납을 사용하는 것으로 배터리를 제외한 자동차 전체의 납 사용량에 1/10정도에 달한다. 그러나 최근 환경문제와 더불어 유해물질인 납의 사용량을 규제함에 따라 연료탱크의

대체 강판에 대한 연구가 시급한 실정이다<sup>1)</sup>.

한편, 일반적으로 표면처리강판은 도금금속과 기저금속의 물성차이로 인해 용접성이 크게 떨어진다는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있으나 기존의 연구는 대부분 아연도금강판을 대상으로 한 것으로, 알루미늄도금강판에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다<sup>2-3)</sup>.

따라서 본 연구에서는 도금조건에 따른 알루미늄도금강판의 Nd:YAG 레이저 용접성을 평가하고 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 발생하는 현상을 파악하는데 그 목적을 두었다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서 사용한 용접재료는 도금층내에 알루미늄 외의 약 10%의 규소가 함유된 알루미늄도금강판이다. 용접시 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 기계적 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해, 동일한 두께에서 서로 다른 도금량을 가지는 시험편을 선정하여 겹치기 용접을 실시하였다. 사용된 시험편의 두께는 0.4, 0.6, 1.2 및 1.5mm이고 도금부착량은 양면 80, 120 및 160g/m<sup>2</sup>으로, 대표적인 두께 0.6mm 시험편의 화학조성과 그 도금량을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of aluminized steel

Thick-ness (mm)	Al coating weight (g/m <sup>2</sup> )	Chemical compositions(wt.%)					
		C	Si	Mn	P	S	Fe
0.6	80	0.0024	0.001	0.09	0.12	0.007	bal.
	120	0.002	0	0.09	0.015	0.007	bal.
	160	0.0016	0.002	0.08	0.012	0.005	bal.

### 2.2 실험방법

시험편은 2kW CW Nd:YAG 레이저를 사용하여 완전용입의 조건으로 겹침부의 간극없이 초점거리( $f_d=0$ )에서 용접을 실시하였다. 주요 공

정변수로는 레이저 출력(1.5~2kW)과 용접속도 (0.6~6m/min)로 한정하였으며, 보호가스로는 Ar (15ℓ /min)가스를 사용하였다.

용접부의 접합강도를 평가하기 위해서는 인장 전단시험을 실시하였으며, 용접부 내 알루미늄의 정량분석을 실시하여 용접부 강도와 비교·분석하였다. 정량분석은 크게 두 가지 방법으로 실시하였다. 그 중 하나인 면적계산법은 용접시 도금층의 알루미늄이 모두 용접부로 혼입된다는 가정하에 “용접부 단면적 당 혼입된 알루미늄량”을 계산적으로 평가한 것이다. Fig. 1의 모식도에서 나타내는 것처럼 상부비드폭( $W_f$ ), 접합부폭( $W_j$ ), 하부비드폭( $W_b$ )을 광학현미경으로 측정하여 용접부 단면적을 구했으며, 알루미늄도금층의 면적은 도금두께와 비드폭의 곱으로 구했다. 또한 면적계산법을 비교·검증하기 위해 두께 0.6mm 시험편을 대상으로 ICP(Inductively Coupled Plasma) 분석을 실시하였다. ICP분석시료는 Fig. 2와 같은 방법으로 용접부만을 채취하였다.

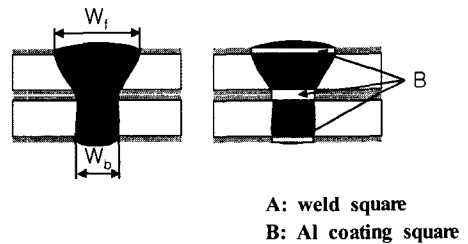


Fig. 1 Schematic illustration of weld.

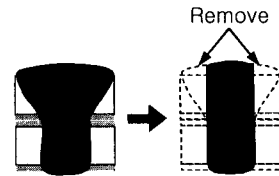


Fig. 2 Preparation of ICP specimens.

도금층 위치에 따른 용접성을 평가하기 위해서는 용접 전에 도금층 조건을 변화시켜 용접을 실시하였다. 알루미늄도금층 제거에는 80% 염산 수용액을 이용하였으며 상부 도금층만 제거한 경우, 겹침부의 도금층만 제거한 경우 그리고 양면 도금을 모두 제거한 경우의 3가지 시험편을

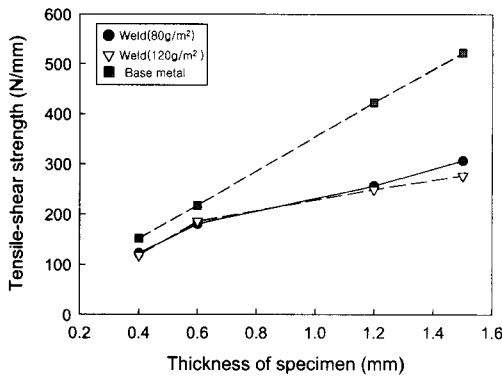


Fig. 3 Variation of tensile-shear strength with thickness of specimen.

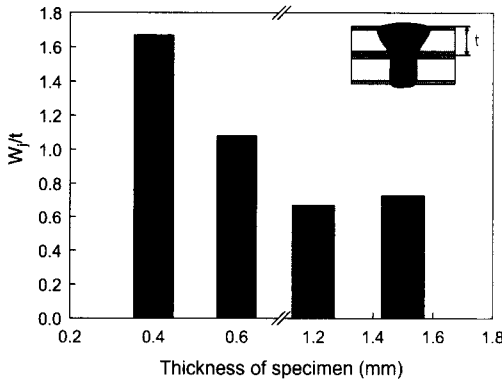


Fig. 4 Variation of  $W/t$  with thickness of specimen.

양면도금이 되어있는 시험편과 비교·분석하였다.

또한 용접부 내 혼입된 알루미늄의 조직적 분석을 위해 SEM을 사용하여 이상거동물질을 관찰하고, EPMA로 용접부 내의 성분적인 차이 및 알루미늄의 농화(Al-rich) 유무를 파악하였다. 알루미늄 농화부에서는 미소경도 실험을 실시하여 주변 용접부와 비교하였으며, TEM을 사용하여 Fe-Al계 금속간화합물의 존재유무를 파악하고자 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 도금조건과 용접부 기계적 특성

##### 3.1.1 도금량과 용접부 강도의 관계

Fig. 3은 시험편 두께에 따른 인장전단강도의

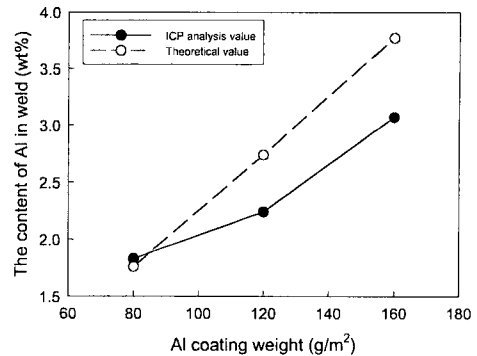


Fig. 5 Comparison of ICP and theoretical value with Al content in weld.

변화를 나타낸 것으로서 모재강도는 시험편의 두께에 비례하여 증가하는 반면, 용접부의 강도는 시험편 두께 1.2mm를 기점으로 그 증가폭이 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 인장전단시험편의 파단형상과 관련이 있다고 생각된다. 인장전단시험 결과, 두께 0.4mm와 0.6mm의 경우에는 HAZ에서, 1.2mm와 1.5mm의 경우에는 용접부에서 파단이 되었다. 이는 시험편 두께 대비 접합부폭의 관계( $W/t$ )에서도 확인할 수 있는데 Fig. 4에 나타내듯이 두께 0.4mm와 0.6mm의 경우가 1.2mm와 1.5mm 보다  $W/t$ 값이 크다. 따라서 용접부 강도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 파단형상과 관련된 접합부폭이며, 부수적으로 도금층에서 혼입된 알루미늄이 영향을 미친다고 판단된다.

##### 3.1.2 용접부내 알루미늄의 정량분석

도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 용접부 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 용접부내 알루미늄의 정량분석을 실시하였다. Fig. 5는 두께 0.6mm시험편을 대상으로 면적계산법과 ICP분석으로 구한 정량값의 비교결과이다. 그 결과 도금량이 80g/m²인 시험편은 3.8%, 120g/m²은 22.3% 그리고 160g/m²은 22.8%의 차이를 보였다. 이는 ICP분석시료를 채취하는 과정(Fig. 2)에서 발생하는 오차 때문으로 실질적인 차이는 크지 않을 것이라 판단된다. 또한 알루미늄도금강판의 용접부내에 기공이 없다는 것은 증발되어 소모되는 알루미늄량 또한 크지 않다는 것을 나타내므로, 면적계산법을 통해 용접부로 혼입된 알루미늄량의 개략적인 평가를

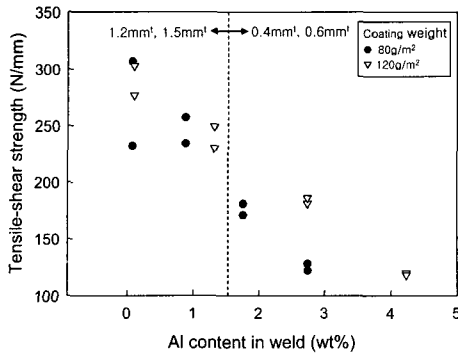


Fig. 6 Variation of tensile-shear strength on Al content in weld.

할 수 있다고 판단된다. Fig. 6은 면적계산법으로 구한 용접부 내 알루미늄의 정량값과 용접강도의 관계를 도시한 것으로 용접부 내 알루미늄량이 증가할수록 인장전단강도가 감소하는 경향이 확인되었다.

### 3.1.3 도금층 위치에 따른 용접성

Fig. 7은 도금층 위치에 따른 용접부의 단면조직사진이다. 상부 도금층만 제거한 경우(Sample 2), 겹침부의 도금층만 제거한 경우(Sample 3), 양면도금을 모두 제거한 경우(Sample 4)의 3가지 시험편을 양면도금이 되어있는 시험편(Sample 1)과 비교·분석하였다. 그 결과, 알루미늄이 일부라도 도금되어 있는 시험편의 용접부 조직은 조대하였으며, 열영향부와의 경계도 뚜렷하였다. 반면 알루미늄도금을 모두 제거한 시험편의 용접부 조직은 미세하였으며, 열영향부와의 경계도 불분명하였다. 따라서 도금층의 알루미늄이 용접부 조직을 조대화시키는 원인으로 판단되며, 조대한 용접부 조직이 용접강도 저하를 유발하는 원인 중 하나라 판단된다.

### 3.2 용접부내 알루미늄의 조직적 분석

#### 3.2.1 용접부내 알루미늄의 거동

알루미늄도금강판의 용접단면을 관찰하여 보면, 용접부 내에는 모재인 철과 완전히 융합하지 못하고 알루미늄으로 예상되는 영역이 관찰된다. 용접부내 알루미늄의 분포를 확인하기 위해 Fe, Al 및 Si의 3가지 원소에 대해 EPMA분석을 실시하였

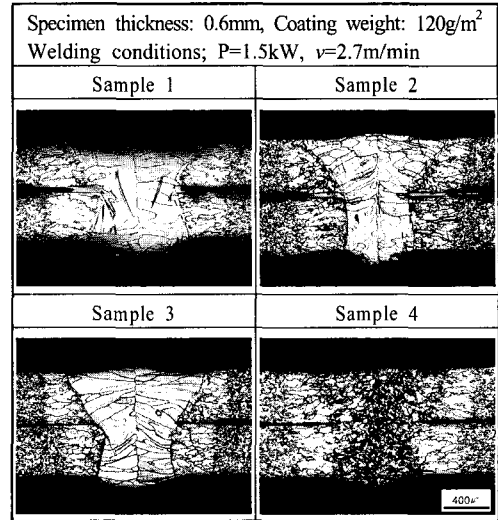


Fig. 7 Weld cross-section of surface pre-treated specimens.

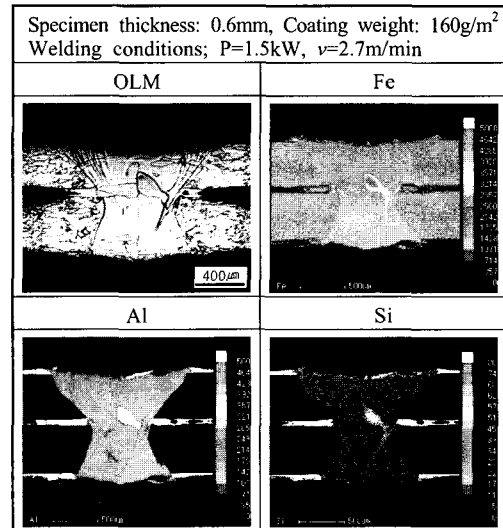


Fig. 8 EPMA analysis results showing Al-rich zone at weld.

으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 분석결과 도금층으로부터 용접부로 혼입된 알루미늄은 용접부 전면에 걸쳐 미량 분포하고 있었으며 부분적으로 농화된 영역이 접합계면 근처에서 관찰되었다. 이는 급열급랭의 레이저 공정의 특성상 시험편의 겹침부로부터 유입된 알루미늄은 용융금속과 잘 교반되지 못하고, 그 결과 겹침부 주변에 부분적인 알루미늄 농화부가 형성되는 것으로 사료된다.

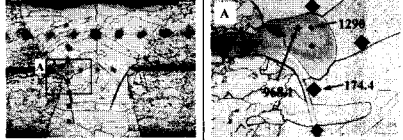
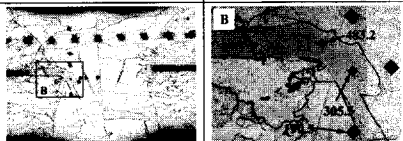

Specimen thickness: 0.6mm Welding conditions; P=1.5kW, v=2.7m/min, f <sub>d</sub> =0	
Coating weight(g/m <sup>2</sup> )	Measurement positions and values
80	
120	
160	

Fig. 9 Microhardness results of weld and Al-rich zone.

### 3.2.2 알루미늄 농화부의 분석

전술한 것처럼 알루미늄도금강판이 용접에서는 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 알루미늄 농화부를 만들었다. 이러한 농화부가 용접부의 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 미소경도시험(100gf)을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 실험결과를 살펴보면 용접부의 평균 경도값은 약 172Hv인데 반해, 알루미늄 농화부의 경도값은 318Hv~1,290Hv로 용접부의 평균경도값 대비 높은 값을 기록하였다. 이는 알루미늄 농화부에서 Fe와 Al이 경질한 화합물을 만들었기 때문이라 사료된다.

Fig. 10은 알루미늄 농화부의 TEM 분석결과이다. 회절패턴 분석결과 알루미늄 농화부에서는 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 및 FeAl의 금속간화합물이 관찰되었다. 또한 Fe-Al계 금속간화합물의 미소경도값을 정리하여 나타낸 Table 2에서 알 수 있듯이 본 실험에서 관찰된 화합물 이외의 금속간화합물도 존재할 것이라 판단된다. 더욱이 알루미늄 농화부가 접합부 주위에 분포하고 있다는 것을 고려하여 볼 때, 취성이 강한 이들 금속간화합물이 용접부를 취약하게 만들며 인성확보에 악영향을 미칠 것으로 사료된다. 따라서 용접부로 혼입된 알루미늄량이 증가할수록 접합강도가 떨어지는 것은 알루미늄 혼입에 따른 조직 조대화

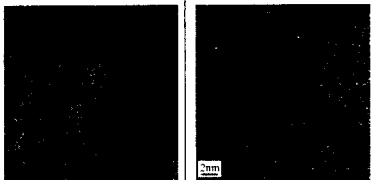
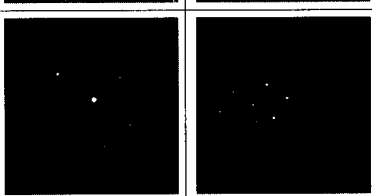
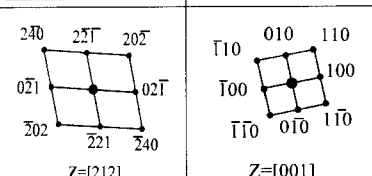
Specimen thickness: 0.6mm, Coating weight: 80g/m <sup>2</sup> Welding conditions; P=1.5kW, v=2.7m/min, f <sub>d</sub> =0	
TEM image	
Diffraction pattern	
Schematic diagram	 <p style="text-align: center;">Z=[212]                      Z=[001]</p> <p style="text-align: center;">Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>                      FeAl</p>

Fig. 10 TEM result of Al-rich zone.

Table 2 Microhardness of intermetallic compounds in the Fe-Al system

Hardness Phase	Al content (wt%)		Micro hardness
	According to phase diagram	Chemical analysis	
Fe <sub>3</sub> Al	13.87	14.04	350
FeAl	32.57	33.64	640
FeAl <sub>2</sub>	49.13	49.32	1,030
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	54.71	54.92	820
FeAl <sub>3</sub>	59.18	59.40	990
Fe <sub>2</sub> Al <sub>7</sub>	62.93	63.32	1,080

및 이러한 금속간화합물의 존재 때문으로 판단된다.

## 4. 결론

- 1) 용접부 강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 접합부폭과 관련된 용접부 형상이었다.
- 2) 용접부내 알루미늄 혼입량이 증가할수록 접합 강도는 하락하였다.

- 3) 도금층을 부위별로 제거한 시험편과 양면도 금강판의 용접부 조직을 비교하여 보았을 때, 도금층의 알루미늄이 용접부 조직을 조대화시키는 원인이라는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 레이저 용접과정에서 용접부 내로 혼입된 알루미늄은 용융금속과 완전히 융합되지 못하고 알루미늄 농화부를 만들었으며, 접합계면 근처에서 그 정도가 뚜렷하였다.
- 5) 알루미늄 농화부의 미소경도는 주변 용접부에 비해 2~5배 높은 값을 기록하였으며, TEM 분석결과 Fe-Al계 금속간화합물이 발견되었다. 접합계면 근처에서 알루미늄 농화부의 발생빈도가 높다는 것을 고려하여 볼 때, 이들이 용접강도 및 인성 저하의 요인으로 판단된다.

### 참고문헌

- 1) Hirofumi Taketsu and Yukihiro Morita : Hot-dip Aluminized Steel Sheet "Alstar" for Automotive Fuel Tank, Nisshin Steel Technical Report, No. 83, pp. 47-83, 2002.
- 2) Matsuda Hiroshi and Ono Moriaki : Spot and Laser Weldability of Coated Steel Sheets, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 73, No. 3, pp. 32-38, 2004.
- 3) Hongping Gu : A new method of lap welding of zinc-coated steel sheet, Section C-ICALCO, pp. 1-6, 2000.