

Nd:YAG 레이저를 이용한 알루미늄도금강판의 용접성(I)

- 알루미늄 도금부착량이 용접부 강도에 미치는 영향 -

김종도* · 이정한** · 김기철***

*한국해양대학교 기관시스템공학부

**한국해양대학교 대학원

***포항산업과학연구원 용접센터

Welding Characteristics of Aluminized Steel Sheet by Nd:YAG Laser(I)

- Effects of Al Coating Weight on Weld Strength -

Jong-Do Kim*, Jung-Han Lee** and Ki-Chol Kim***

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

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

***Welding research center, RIST, Pohang 790-330, Korea

Abstract

Laser weldability of the aluminized steel for the full penetration welding will be described in this paper. We focused on the effect of Al coating conditions on weld strength. For these objectives, aluminized steel sheets that have various thickness and coating weight were prepared for laser welding. And then, tensile-shear and hardness test were carried out. At the same time, Al contents in weld after laser welding were analyzed and their correlations with mechanical properties were investigated. Besides, as removing partially coating layer, weldability has been investigated according to the position of coating layer. As a result of this study, tensile-shear strength was decreased with increasing Al contents in weld, and Al of coating layer caused grain growth.

*Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received June 11, 2007)

Key Words : Aluminized steel sheet, Laser welding, Al coating weight, Tensile-shear strength, Hardness

1. 서 론

철강제품은 대량 생산에 의해 경제성이 뛰어나고 기계적 성질도 매우 우수한 재료로써 자동차, 조선, 건설 등 제반 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 반면, 여기에 사용되고 있는 철강제품은 스테인리스강과 같은 일부 특수강을 제외하고는 부식환경에 취약한 약점을 가지고 있으며 이를 해결하기 위해 각종 표면처리강판이 사용되고 있다.

현재 표면처리강판의 주류를 이루고 있는 것은 아연계 도금강판이며, 보다 고내식성이 요구되는 곳에는 알루미늄도금강판이 사용되고 있다. 아연도금강판은 알루

리늄도금강판에 비해 제조가 용이하고 제작원가가 저렴하다는 장점이 있는 반면, 아연의 용점(약 419°C)이 낮아서 고온에서는 사용이 곤란하며 알루미늄도금강판에 비해서 내식성이 다소 저하된다는 한계를 지니고 있다. 따라서 자동차 배기계 및 연료탱크, 고온용 주방기기(전기밥솥, 전기 및 가스오븐, 전자레인지 등) 그리고 보일러 등과 같이 고온(약 550°C까지)에서의 내식성이 요구되거나, 건물 외벽과 같이 고내식성을 요구하는 부분에서는 알루미늄도금강판을 사용하고 있다.

한편, 이와 같은 표면처리강판은 일반적으로 냉연강판에 비해 용접성이 크게 문제시 되어왔다. 특히 저항용접을 실시했을 때, 도금층과 모재의 용접차 및 전기전도도의 차이에 의해 소정의 너깃(nugget)직경을 얻

기 위한 적정용접전류범위가 상승하고, 도금층과 전극이 반응하여 생성된 화합물이 전극소모를 촉진시키기 때문에 전극의 교환·드레싱 없이 연속 용접하는 경우에 용접점수가 현저하게 저하하는 등의 문제가 있었다¹⁾.

더불어 선진국을 중심으로 실용화가 진행되고 있는 레이저 용접²⁻³⁾의 경우에는 겹치기 이음부가 많기 때문에 아연도금강판의 사용시 다량의 스파터가 발생하여 용접 지그나 부재를 오염시키고 광학계가 오손되는 등의 용접 가공상의 문제 및 용접결함을 일으켜 접합강도가 저하하는 등의 문제를 유발한다고 보고⁴⁻⁵⁾되고 있다. 이러한 결함을 일으키는 주된 원인은 아연의 낮은 비점(906°C)때문이며, 이를 해결하기 위해 겹침부에 간극을 두거나 하이브리드 용접을 실시하는 등 많은 연구가 진행되고 있다⁶⁻⁸⁾.

이에 반해 알루미늄도금강판의 경우에는 알루미늄의 비점(2,450°C)이 철의 비점(3,000°C)과 상대적으로 큰 차이가 없기 때문에 아연도금강판에 비해 건전한 접합부를 얻을 수 있다는 보고⁹⁾가 있으나, 이에 대한 연구가 많이 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CW Nd:YAG 레이저를 사용하여 알루미늄도금강판의 용접시 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 기계적 특성에 미치는 영향 및 도금층 위치에 따른 용접성을 평가하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 도금층 내에 알루미늄 이외 약 10%의 규소(Si)가 함유된 알루미늄도금강판을 사용하여 겹치기 용접을 실시하였다. Table 1에 시험편의 두께, 도금부착량 및 그 화학적 조성을 나타내며 탄소함량의 차이가 적기 때문에 도금부착량에 따른 용접부의 기계

Table 1 Chemical compositions of aluminized steel

Thickness (mm)	Al coating weight (g/m ²)	Chemical compositions(wt%)					
		C	Si	Mn	P	S	Fe
0.4	80	0.002	0.000	0.110	0.0013	0.005	bal.
	120	0.003	0.010	0.080	0.012	0.008	bal.
0.6	80	0.0024	0.001	0.090	0.120	0.007	bal.
	120	0.002	0.000	0.090	0.015	0.007	bal.
	160	0.0016	0.002	0.080	0.012	0.005	bal.
1.2	40	0.002	0.000	0.190	0.010	0.007	bal.
	80	0.0026	0.002	0.090	0.012	0.007	bal.
	120	0.0026	0.002	0.090	0.012	0.007	bal.
1.5	80	0.0030	0.000	0.080	0.008	0.009	bal.
	120	0.0025	0.002	0.080	0.009	0.006	bal.

적 특성을 평가하는데 적합한 소재라 할 수 있다.

한편 도금부착량은 양면 도금량을 뜻하는 것으로서 80g/m²은 시험편의 상부와 하부에 각각 40g/m²의 알루미늄이 용융 도금되어 있는 것을 뜻한다.

2.2 실험방법

시험편은 CW Nd:YAG 레이저를 이용하여 완전용입의 조건으로 겹치기 용접을 실시하였으며 용접공정변수로는 레이저 출력과 용접속도로 한정하였다. Table 2에 그 용접조건을 나타낸다. 용접이 완료된 시험편은 알루미늄 도금부착량에 따른 기계적인 특성을 평가하기 위해서 인장전단시험과 경도시험을 실시하였다. 인장전단시험편은 용접부의 접합강도를 평가하기 위해 시험편 좌·우를 가공하였으며 Fig. 1에 시험편의 형상 및 치수를 나타낸다.

또한 용접시 도금층에서 용접부로 혼입되는 알루미늄의 정량분석을 위해 면적계산법과 습식분석을 실시하였다. 면적계산법은 도금층의 알루미늄이 모두 용접부로 혼입된다는 가정하에 “용접부 단면적 당 혼입된 알루미늄량”을 2차원적으로 평가한 것으로서 Fig. 2의 모식도에서 나타내는 것처럼 상부비드폭(W_f), 접합부폭(W_j), 하부비드폭(W_b)을 광학현미경으로 측정하여 용접부 단면적을 구했으며, 알루미늄 도금층의 면적은 도금두께와 비드폭의 곱으로 구했다. 습식분석은 Fig. 3에서 나타내는 것처럼 용접부만을 채취하여 ICP장비로 정량분석을 실시하였으며 면적계산법으로 구한 정량값과 비교·분석하였다.

도금층 위치에 따른 용접성을 평가하기 위해서는 용접 전에 Fig. 4에서 나타내는 것처럼 도금층 조건을 변화시켜 용접을 실시하였다. 알루미늄도금층 제거에는 80%염산수용액을 이용하였으며 상부 도금층만 제거한 경우(Sample 2), 겹침부의 도금층만 제거한 경우(Sample 3) 그리고 양면 도금을 모두 제거한 경우(Sample 4)의 3가지 시험편을 양면도금이 되어있는 시험편(Sample 1)과 비교·분석하였다.

Table 2 Laser welding conditions

Welding parameters	Conditions
Laser power, P(kW)	1.5~2
Welding speed, v(m/min)	0.6~6
Gap of lap joint, G(mm)	0
Defocused distance, f _d (mm)	0
Shield gas	Ar
Flow rate of shield gas, Q(ℓ/min)	15

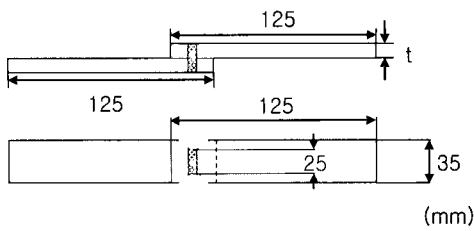
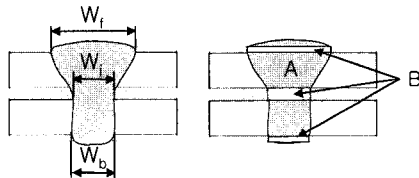


Fig. 1 Specimens for tensile-shear test



A: weld square
B: Al coating square
※ $(B/A) \times 100 = (\text{Al coating square} / \text{weld square}) \times 100$

Fig. 2 Schematic illustration of weld

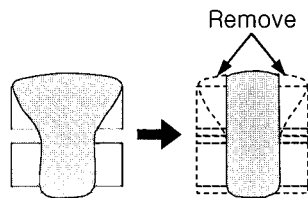


Fig. 3 Preparation of ICP specimens

Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4

Fig. 4 Schematic of surface treatment before welding

3. 실험결과 및 고찰

3.1 도금부착량이 용접부의 기계적 특성에 미치는 영향

3.1.1 도금부착량과 접합강도의 관계

인장전단시험 결과, 시험편 두께 증가에 따른 접합강도의 변화를 Fig. 5에 나타내며 용접부의 접합강도와 모재의 강도를 비교하였다. 그래프에서 알 수 있듯이 모재의 강도는 시험편 두께가 증가함에 따라 비례하여 증가하는 반면, 용접부의 접합강도는 시험편 두께 1.2mm를 기점으로 그 증가폭이 감소하는 경향이 있었으며 이는 인장전단시험편의 파단형상과 관련이 있다고 사료된다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 파단면의 외관형상 및 단면사진을 나타낸 것이다.

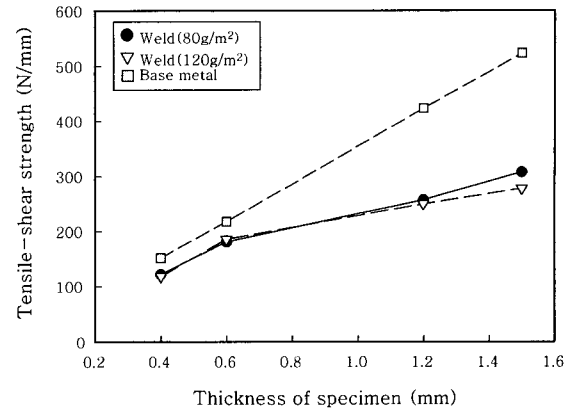


Fig. 5 Variation of tensile-shear strength with thickness of specimen

Thickness Appearance	0.6mm	1.2mm
Fracture appearance		
Fracture pattern		

Fig. 6 Appearance of fracture and its pattern

Thickness Cross-section	0.6mm	1.2mm
Schematic illustration		
Position A		
Position B		

Fig. 7 Cross-section of fracture

시험편 두께 1mm를 기점으로 파단형상을 달리하였으며 0.6mm에서는 HAZ에서 파단이 일어났고, 0.4mm도 동일한 경향을 보였다. 반면 두께 1.2mm는 겹치기 용접부에서 파단이 일어났으며, 1.5mm도 동일한 위치에서 파단이 일어났다.

이는 시험편 두께 대비 접합부폭의 관계(W_j/t)에서도 확인할 수 있는데 Fig. 8에서 나타내듯이 0.4mm와 0.6mm의 경우에는 W_j/t 값이 큰 것에 반해, 1.2mm와 1.5mm는 W_j/t 값이 작다. 따라서 파단형상 차이는 용접부 형상과 관련이 있다고 사료되며, 부수적으로 도금층에서 혼입된 알루미늄이 용접부 강도에 영향을 미친다고 판단된다.

Fig. 9는 도금부착량 80g/m^2 과 120g/m^2 을 대상으로 용접부 내 혼입된 알루미늄량과 접합강도의 관계를 유추한 것이다. Fig. 9(a)의 모식도에서 알 수 있듯이 시험편 전체 두께(t_s) 대비 도금층 전체 두께(t_c)가 증가할수록, 즉 도금부착량이 증가할수록 알루미늄 혼입량은 증가한다고 판단된다.

Fig. 9(b)는 (t_c/t_s) 의 백분율과 접합강도와의 관계를 도시한 것으로서 그래프에서 알 수 있듯이 시험편

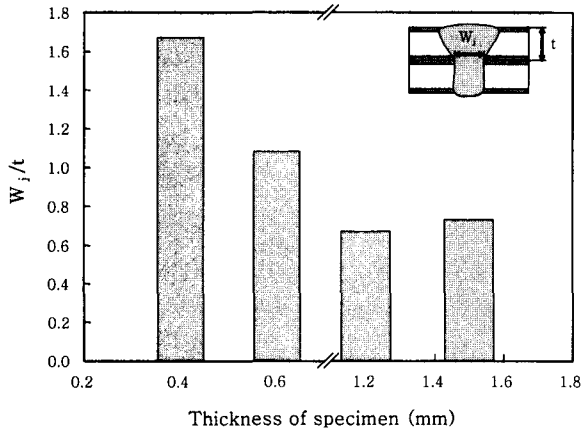
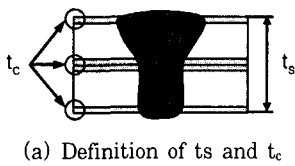
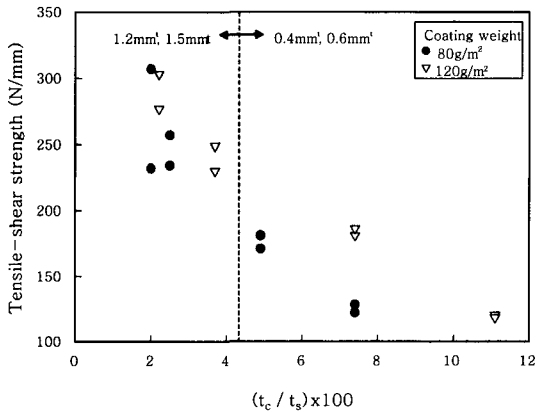


Fig. 8 Variation of W_j/t with thickness of specimen

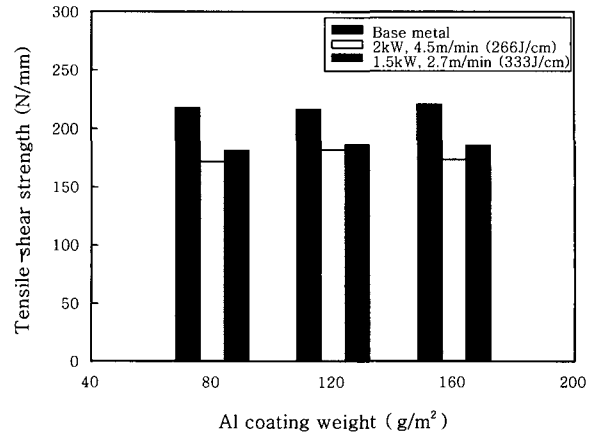


(a) Definition of t_s and t_c

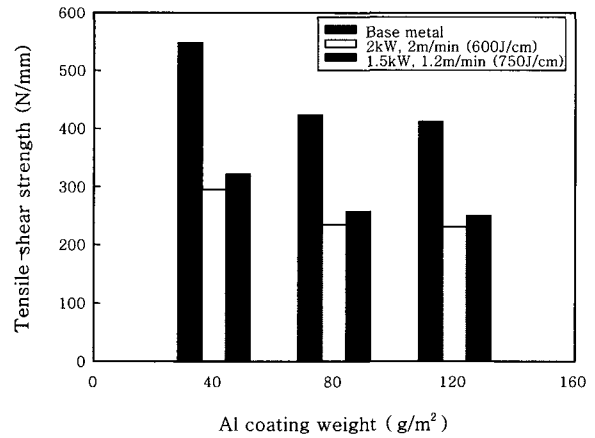


(b) Correlation of tensile-shear strength and t_c/t_s

Fig. 9 Variation of tensile-shear strength with t_c/t_s



(a) 0.6mm^t aluminized steel



(b) 1.2mm^t aluminized steel

Fig. 10 Comparison of tensile-shear strength

두께 대비 도금층 두께가 두꺼워 질수록 접합강도는 감소하는 경향을 보였으며 1.2mm와 1.5mm의 시험편이 알루미늄의 영향을 많이 받고 있음을 확인할 수 있었다.

또한 시험편 두께 0.6mm와 1.2mm를 대상으로 입열량과 접합강도의 관계를 도시한 Fig. 10을 보면 도금부착량에 관계없이 입열량 증가에 따라 접합강도 또한 다소 증가하는 사실을 알 수 있다. 이는 알루미늄이 기지인 Fe와 혼합될 수 있는 시간이 다소나마 증가했기 때문으로 판단되며 0.6mm의 경우, 모재대비 약 80%의 접합강도를, 1.2mm의 경우는 모재대비 약 55%의 접합강도를 얻었다. 이 또한 파단형상과 관련이 있다고 생각된다.

3.1.2 도금부착량과 경도의 관계

알루미늄도금강판의 용접시 혼입된 알루미늄이 용접부의 기계적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 인장전단시험 외에 경도시험을 실시하였다. 시험에 사용된 비커스경도(vickers hardness)의 하중은 0.3kgf이며

상부 시험편의 가운데 지점에서 0.2mm간격으로 측정하였다. 대표적인 시험편 두께 0.6mm의 경도분포를 Fig. 11에 나타내었으며 용접부(weld), 열영향부(HAZ) 및 모재(Base metal)의 평균 경도값을 병행하여 도시하였다. 그 결과 용접부의 경도값은 150.7Hv, 열영향부의 경도값은 112.5Hv 그리고 모재는 96.3Hv를 기록하였다.

또한 도금부착량 120g/m^2 시험편의 두께별 용접부 경도값을 나타낸 Fig. 12에서 알 수 있듯이 시험편 두께가 0.4mm에서 1.5mm로 증가할수록 용접부의 경도값이 하락하는 경향이 확인되었다. 이는 용접부에 혼입되는 알루미늄과 연관이 있다고 판단된다. 즉 시험편의 두께가 증가할수록 용접부 내 혼입되는 알루미늄량은 감소하게 되며, 상대적으로 높은 알루미늄 혼입율을 나타내는 0.4mm와 0.6mm 시험편의 경도값이 높다는 것을 고려하여 볼 때, 혼입된 알루미늄이 용접부를 경화시키는 원인으로 사료된다.

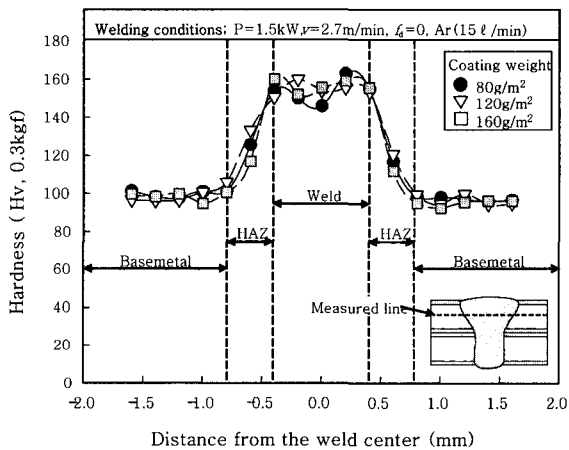


Fig. 11 Hardness distribution of aluminized steel sheet

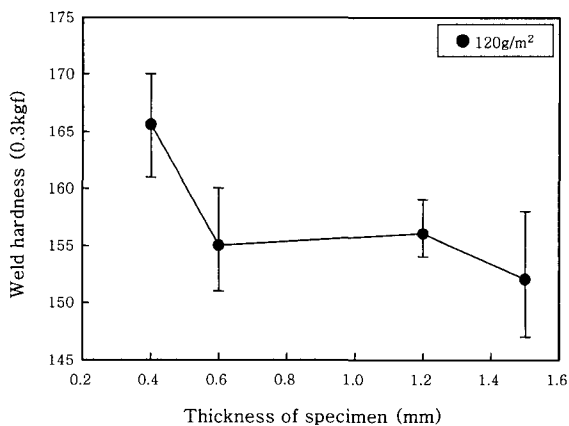


Fig. 12 Variation of weld hardness with thickness of specimen

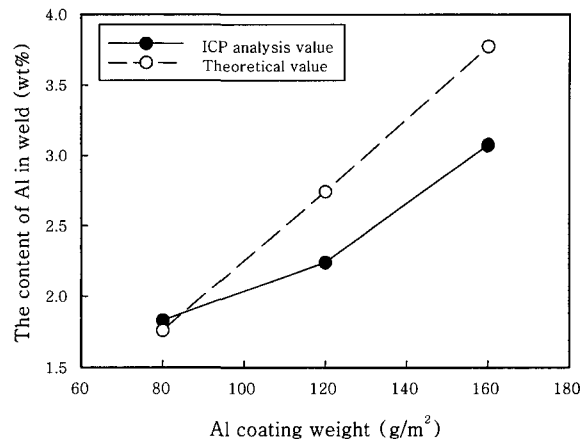


Fig. 13 Comparison of ICP and theoretical value with Al content in weld

3.2 용접부 내 혼입된 알루미늄의 정량분석

알루미늄도금강판의 용접시 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 용접부 강도 및 경도와 같은 기계적 특성에 영향을 미치는 것으로 판단되어 본 연구에서는 용접부 내 혼입된 알루미늄의 정량평가를 위해 두 가지 방법으로 접근을 하였다.

그 중 하나인 면적계산법은 도금층이 순수 알루미늄만으로 구성되어 있으며 도금층의 알루미늄이 모두 용접부로 혼입된다는 가정하에 “용접부 단면적당 혼입된 알루미늄량”을 이론적으로 평가하였다.

다른 하나는 면적계산법을 비교·검증하기 위한 방법으로 두께 0.6mm 시험편을 대상으로 ICP분석을 실시하였으며 면적계산법으로 구한 정량값과 비교하였다. 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 도금부착량이 적을수록 오차가 적기 때문에 80g/m^2 의 시험편을 기준으로 두 실험값들을 비교하면 도금부착량이 80g/m^2 인 시험편은 3.8%, 120g/m^2 은 22.3% 그리고 160g/m^2 은 22.8%의 차이가 발생하였다. 이는 ICP분석시료를 채취하는 과정(Fig. 3참조)에서 발생하는 오차 때문이라고 판단된다. 또한 알루미늄도금강판의 용접부 내에 기공이 없다는 것은 증발되어 소모되는 알루미늄량 또한 크지 않다는 것을 나타내므로, 면적계산법을 통해 용접부로 혼입된 알루미늄량의 개략적인 평가를 할 수 있다고 판단된다.

Fig. 14는 면적계산법으로 구한 용접부 내 알루미늄의 정량값과 접합강도의 관계를 도시한 것이다. 용접부 내 알루미늄의 양이 증가할수록 접합강도가 감소하는 사실을 확인할 수 있으며 시험편 두께 대비 도금층 두께와 접합강도를 비교한 Fig. 9와 좋은 대응관계를 나타내었다.

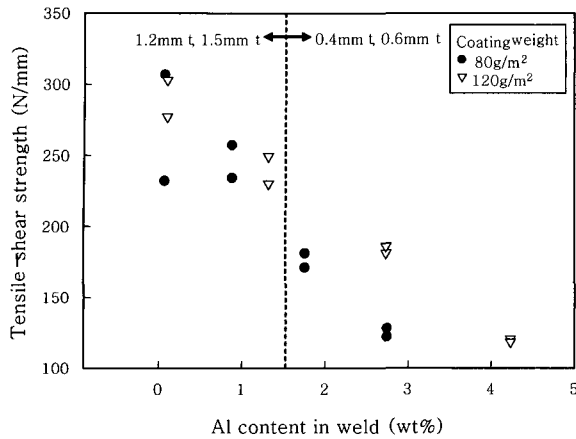


Fig. 14 Variation of tensile-shear strength on Al content in weld

3.3 도금층 위치에 따른 용접부의 변화

도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 용접부의 접합강도를 떨어뜨린다는 사실을 앞서 확인할 수 있었다.

본 항에서는 알루미늄도금강판의 겹치기 레이저 용접 시 도금층 위치에 따른 알루미늄의 영향을 평가하기 위해 도금층을 부위별로 제거한 후 용접을 실시하였으며 Fig. 15에 그 결과를 나타내었다. 단면조직을 관찰하여 보면 양면도금이 되어 있는 시험편과 상부 및 겹침부의 도금층을 제거한 시험편에서는 조직적인 차이를 발견할 수 없었다. 그러나 양면도금을 모두 제거한 시험편과 비교하면 용접부 조직은 큰 차이를 보였다. 즉 알루미늄이 도금되어 있는 강판의 용접부 조직은 조대하고 용접부와 열영향부의 경계가 뚜렷한데 반해, 양면도금을 제거한 강판의 경우는 용접조직이 미세하고 그 경계가 불분명하였다. 따라서 도금층의 알루미늄이 용접부 조직을 조대화시키는 원인이라는 것을 알 수 있다. 이와 같은 알루미늄의 효과에 관해 알루미늄이 탈산제 및 페라이트 생성원소로서 페라이트조직을 조대화시킨다는 보고¹⁰⁾가 있으며 조대한 용접부 조직으로 인해 접합강도가 저하된다고 판단된다.

Fig. 16은 도금층을 부위별로 제거한 후, 용접한 시험편의 접합부폭(W_j) 변화를 도시한 것이다. 양면도금층을 갖는 시험편과 상부도금층을 제거한 시험편은 겹침부와 양면도금층을 제거한 경우에 비해 접합부의 폭이 작다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 겹침부 사이의 알루미늄도금층이 용접시 접합부의 열을 빠르게 외부로 전달하기 때문으로 판단되며 도금부착량 차이에 따른 특별한 경향은 확인되지 않았다. 따라서 접합부의 도금층을 제거하거나 편면도금강판을 사용하여 겹치기 용접을 실시하면 강도에 영향을 미치는 접합부폭을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

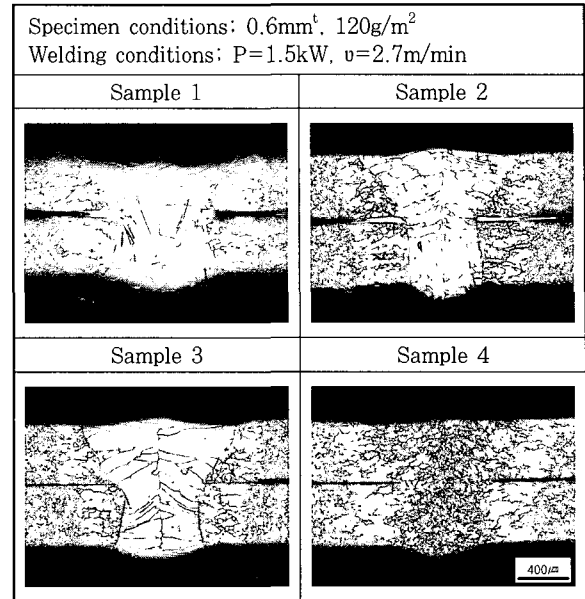


Fig. 15 Weld cross-section of surface pre-treated specimens

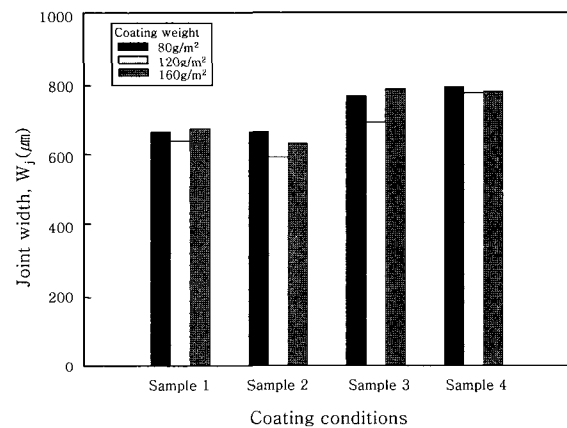


Fig. 16 Effect of coating conditions on formation of joint width

4. 결 론

알루미늄도금강판의 용접시 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 기계적인 강도에 미치는 영향을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인장전단시험 결과, 용접부 강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 용접부 형상이었으며 시험편 두께에 따라 파단형상을 달리하였다.
- 2) 두께별 용접부의 경도값을 비교하여 보았을 때, 혼입된 알루미늄이 용접부를 경화시키는 원인으로 판단되었다.
- 3) 용접부 내 알루미늄의 정량분석 결과, 알루미늄

혼입량이 증가할수록 접합강도는 하락하였다.

4) 도금층을 각 부위별로 제거한 시험편과 양면도금 강판의 용접부를 비교하여 보았을 때, 알루미늄이 용접부 조직 조대화의 원인이라는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Matsuda Hiroshi and Ono Moriaki : Spot and Laser Weldability of Coated Steel Sheets, Journal of the Japan Welding Society, **73-3** (2004), 32-38
2. R.Imhoff, E.Beyer and K.Behler : Car Body Welding with Laser Radiation, International Symposium on Automotive Technology & Automation (20th.)(1989), 2253-2261
3. Taishi Tarui : Trend of Laser Application for Car Body in European Automotive Industry, The 61th Laser Materials Processing Conference (2004), 152-157
4. Moriaki Ono, Tohru Kaizu, Masanori Ohmura : Laser Welding of Zinc Coated Steel Sheets, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, **15-3** (1997), 438-444
5. R. Akhter, Steen et al. : Laser welding of zinc coated steel, Proc. 5th Conf. Laser in manufacturing (1988), 195-206
6. Hongping Gu : A new method of lap welding of zinc-coated steel sheet, Section C-ICALEO (2000), 1-6
7. Claus Bagger, Isamu Miyamoto, Flemming OSEN : Process Behaviour during High Power CO₂ Laser Welding of Zinc Coated Steel, Proceedings of LAMP(1992), 553-558
8. M.M.S. Gualini, F. Grassi : Experimental result of laser welding of zinc coated steel sheets with a new method, International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics(2003)
9. Ki Chol Kim, Joon Ho Cha : Effect of Coating Weight on the Laser Weldability in the Welding of Aluminized Steels, Korean Journal of Materials Research, **14-1** (2004), 1-8
10. Japan Pat, No. 2002-103072(2000)