

Nd:YAG 레이저를 이용한 알루미늄도금강판의 용접성(Ⅱ)

- 용접부내 알루미늄의 거동 -

김종도* · 이정환** · 김기철***

*한국해양대학교 기관시스템공학부

**한국해양대학교 대학원

***포항산업과학연구원 용접센터

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

- Behavior of Al element in the weld -

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

Aluminized steel sheet is a material with excellent heat resistance, thermal reflection and corrosion resistance. It has wide applications, owing to its low cost and excellent performance, in the petrochemical industry, electric power and other energy conversion systems, etc and has attracted the attention of many investigators. But the welding of aluminized steel sheet has a problem of decreasing tensile-shear strength, caused by mixed Al in the weld. This study investigated behavior of Al and its structural properties to resolve this problem. Several analysis equipment(SEM, EDX, EPMA) were used to investigate Al element in the weld. Also microhardness tester and TEM equipment were used to find the intermetallic compound. As a result of this study, Al-rich zones existed in the weld and Fe-Al intermetallic compounds were found in these zones. At the same time, the weldability of aluminized stainless steel sheet was investigated and compared with that of aluminized steel sheet. Although there is a difference between the base metal of the low carbon steel and stainless steel, it is interpreted that a behavior of Al element in the weld is similar.

*Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received June 11, 2007)

Key Words : Aluminized steel sheet, Laser welding, Behavior of Al, Intermetallic compound, Aluminized stainless steel sheet

1. 서 론

알루미늄도금강판은 강판 고유의 기계적 특성에 알루미늄 특유의 내식성을 조합시킨 강판으로 아연도금강판과 함께 널리 사용되고 있다.

또한 최근에는 환경문제와 리사이클의 관점에서 환경부하물질 및 유해물질을 포함하지 않는 재료가 요구되고 있으며 납의 사용량을 규제하고 있다. 차량용 연료

탱크의 경우, 일반적으로 도금층 중에 납을 약 90% 함유한 납-주석도금강판(Pb-Sn alloy coated steel)이 사용되고 있다. 이는 자동차 1대의 연료탱크가 100~200g의 납을 사용하는 것이며 배터리를 제외한 자동차 전체 납 사용량에 1/10 정도에 달한다. 따라서 연료탱크의 대체 강판에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 미국, 유럽이나 이웃 일본의 경우 알루미늄도금강판을 사용하여 이러한 문제를 해결하려는 노력이 진행되고 있는데 반해, 국내에서는 그에 대한 연구가 많이

부족한 실정이다.

더욱이 현재 가장 큰 이슈 중의 하나인 연료전지의 경우, 전극과 분리판의 적층으로 이루어지는 스택(stack)에 있어 고온 작동에 따른 분리판의 부식문제를 해결해야만 한다. 이것을 위한 방안으로 스테인리스강재를 사용하거나 스테인리스강재에 알루미늄을 도금 또는 증착하여 사용하고 있으며 겹치기 용접을 실시하여 기밀성을 확보하고 있다⁴⁻⁷⁾.

한편 레이저 용접은 용접부의 투입열량이 적고 가열 범위가 한정적이기 때문에 도금강판의 용접시 도금부분의 파괴가 거의 없으며, 고속 용접이 가능하므로 용접 공정의 효율을 높일 수 있다.

그러나 본 연구의 제 I 보⁸⁾에서 논한 것과 같이 알루미늄도금강판의 용접시 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 접합강도가 저하하는 문제점이 있었다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 저탄소강 기지의 알루미늄도금강판 용접시 용접부로 혼입된 알루미늄의 거동을 조사하고 동시에 연료전지용 스테인리스-알루미늄도금강판과의 용접특성을 비교·분석하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 재료는 약 10%의 규소(Si)가 도금층에 함유된 알루미늄도금강판이다. 시험편 두께(t)는 0.4mm 및 0.6mm이고 도금부착량은 양면 80~160g/m²으로 동일한 두께에서 서로 다른 도금량을 가지는 시험편을 선택하여 겹치기 용접을 실시했으며, 그 화학적 조성을 Table 1에 나타낸다. 또한 비교재로 사용한 스테인리스-알루미늄도금강판은 STS310S에 알루미늄(Al-10wt.%Si)을 용융도금한 강판으로써 두께는 0.75mm, 도금부착량은 120g/m²으로 그 화학조성을 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of aluminized steel

Thick-ness (mm)	Coating weight (g/m ²)	Chemical compositions(wt%)						
		C	Si	Mn	P	S	Fe	
0.4	80	0.002	0	0.11	0.0013	0.005	bal.	
	120	0.003	0.01	0.08	0.012	0.008	bal.	
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.	

Table 2 Chemical compositions of aluminized STS310S

Thick-ness (mm)	Coating weight (g/m ²)	Chemical compositions(wt%)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.75	120	0.08	1.5	2	0.045	0.03	19~22	24~26	bal.

2.2 실험방법

연료전지나 연료탱크의 경우, 완전한 밀폐상태를 만들기 위하여 완전용입용접이 요구된다. 따라서 시험편은 소정의 크기로 절단한 후 완전용입의 조건으로 겹치기 용접을 실시하였으며, 주요공정변수는 레이저 출력(P)과, 이송속도(v)로 한정하였다. Table 3에 본 연구의 용접조건을 나타낸다.

용접이 완료된 시험편은 Fig. 1에서 나타내는 것처럼 용접진행방향 115mm지점에서 일괄적으로 조직시편을 채취하였으며, 용접부 내 혼입된 알루미늄의 조직적 분석을 위해 다양한 분석장비를 사용하였다. 우선적으로 SEM을 사용하여 용접부 내 이상거동물질을 관찰하고, EPMA로 mapping을 실시하여 용접부 내의 성분적인 차이 및 알루미늄의 농화(Al-rich)유무를 파악하였다. 그리고 알루미늄 농화부에서는 미소경도기를 사용하여 주변 용접부와 기계적 성질을 비교하였으며, TEM을 사용하여 Fe-Al계 금속간화합물의 존재유무를 파악하였다. 또한 저탄소강 기지의 알루미늄도금강판과 STS310S-Al 도금강판의 용접부를 EPMA로 분석하여 도금층의

Table 3 Laser welding conditions

Welding parameters	Conditions
Laser power, P(kW)	1.5~2
Welding speed, v(m/min)	2.7~6
Gap of lap joint, G(mm)	0
Defocused distance, f _d (mm)	0
Type of shield gas	Ar
Flow rate of shield gas, Q(ℓ/min)	15

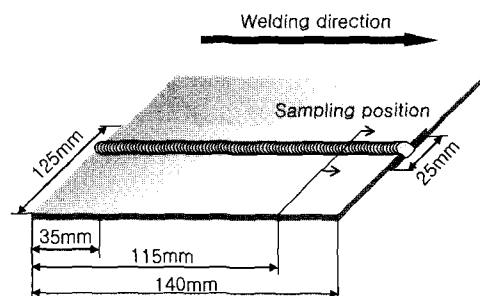


Fig. 1 Sampling of specimen in lap welding

알루미늄이 용접부로 혼입되면서 발생하는 현상을 비교·분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부 내 알루미늄의 거동

Fig. 2는 두께별 대표적인 용접부 단면 조직사진을 나타낸 것으로, 용접부 내에는 모재인 철과 완전히 융합되지 못하고 알루미늄으로 예상되는 영역이 관찰되며 접침부 계면을 통하여 밀려나가는 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 급열·급랭인 레이저 용접공정에 기인한다고 사료되며, 혼입된 알루미늄이 용접부 내에 어떤 형태로 존재하는지를 확인하기 위해 SEM, EDX 및 EPMA 분석을 실시하였다.

Fig. 3은 용접부 내 알루미늄으로 예상되는 부위를 EDX로 분석한 결과이다. 사용한 시험편은 두께 0.4mm, 도금부착량 80g/m²으로 사진의 A부위를 확대한 SEM 이미지 상의 (a), (b), (c) 3곳을 측정하였으며, 용접부와 알루미늄농화부로 예상되는 영역을 비교·분석하였다. 그 결과 용접부인 (a)영역에서는 Fe가 95.81wt%, Al이 3.49wt%로 Fe 기지에 도금층으로부터 혼입된 알루미늄이 일부 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 반면, (b) 위치에서는 Al이 35.19wt%로 다량 검출되었으며 도금층에 가까운 (c) 위치에서는 58.22wt%를 기록하였다. 또한 Si 역시 Al이 다량 검출되는 (b), (c) 위치에서 정도가 높았다. 이는 도금층의 합금층 성장을 억제하기 위해 함유되어 있는 Si가 용융시에도 알루미늄

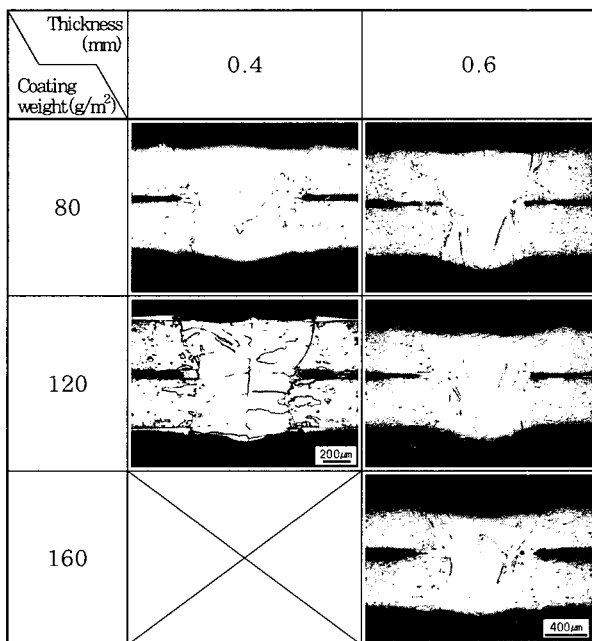


Fig. 2 Cross-section of weld as coating weight

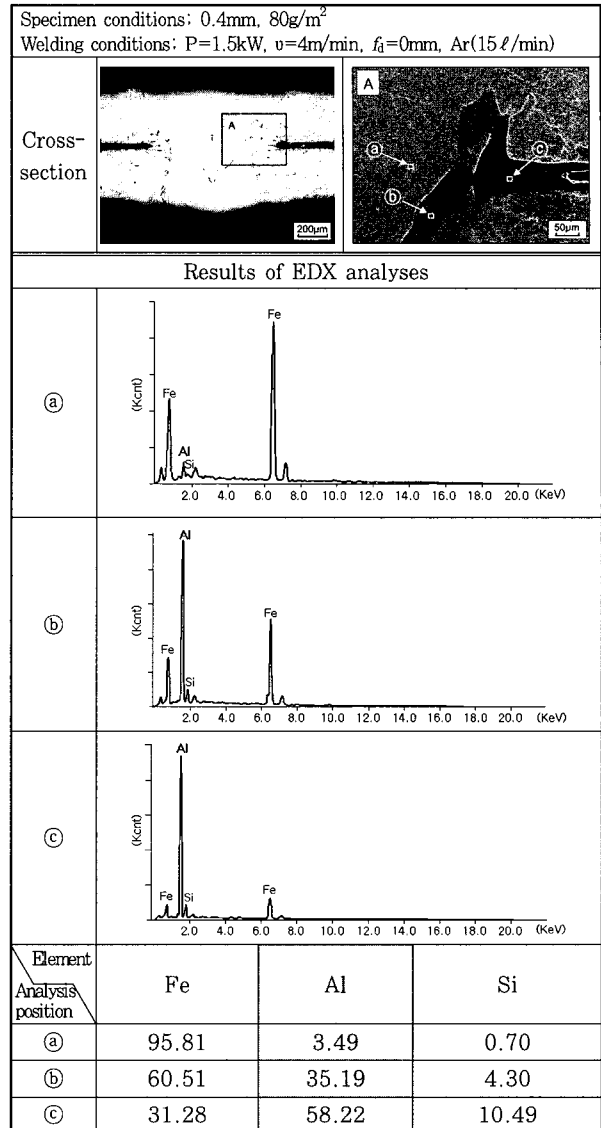


Fig. 3 Results of EDX analyses(Unit: wt%)

과 그 거동을 함께 하기 때문이라고 사료된다.

Fig. 4는 용접부 전반에 걸쳐 알루미늄의 분포를 확인하기 위해 EPMA를 사용하여 Fe, Al 및 Si의 3가지 원소에 대하여 분석한 결과이다. 사용한 시험편은 두께 0.6mm, 도금부착량 160g/m²으로 도금층으로부터 용접부로 혼입된 알루미늄은 용접부 전반에 걸쳐 미량 분포하고 있으며, 시험편의 접침부 주변에 부분적으로 농화된 영역이 있었다. 또한 Si 역시 Al과 그 거동을 같이 하고 있었다.

이와 같은 용접부 내에 알루미늄 농화부와 알루미늄의 거동에 관해서는 다음과 같은 추측이 가능하다. 우선 알루미늄도금강판의 용접시 도금층의 알루미늄은 대부분 용융되어 용접부 내로 혼입된다. 급열·급랭의 레이저 공정의 특성상 시험편의 접침부로부터 유입된 알루미늄은 용융금속과 잘 교반되지 못하며, 그 결과 접

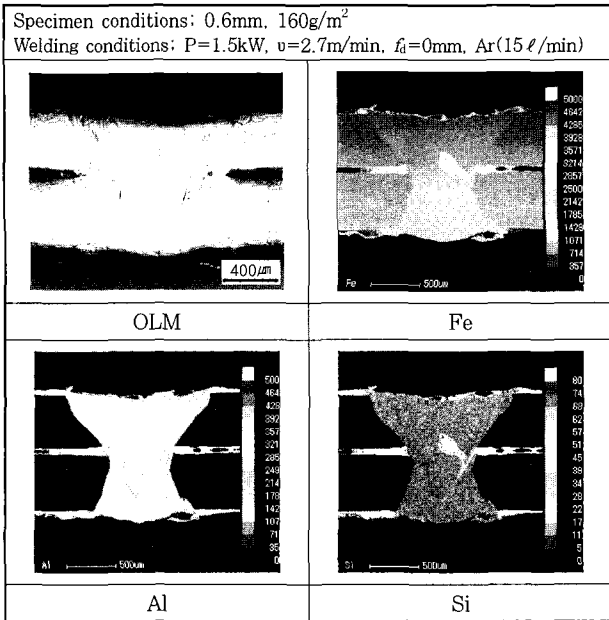


Fig. 4 EPMA analysis results showing Al concentrated region at weld

침부 주변에 부분적인 알루미늄 농화부가 형성되는 것으로 사료된다.

3.2 알루미늄 농화부의 미시적 분석과 조성

3.2.1 알루미늄 농화부의 미소경도

전술한 바와 같이 알루미늄도금강판의 용접에서는 도금층으로부터 혼입된 알루미늄이 용접부에 전반적으로 분포하고 있으며 부분적으로 집중된, 즉 알루미늄 농화부가 존재한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 알루미늄 농화부가 용접부 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 두께 0.6mm 시험편을 대상으로 미소경도시험(100gf)을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

실험결과를 살펴보면 용접부의 평균 경도값은 약 172Hv인데 반해, 알루미늄농화부(Al-rich zone)의 경도값은 330Hv~1,270Hv로 용접부의 평균경도값 대비 높은 값을 기록하였다. 이는 Fe와 Al이 경질한 화합물을 만들었기 때문이라 사료되며, 알루미늄농화부가 접합부 주위에 분포하고 있다는 것을 생각해 보았을 때 접합강도를 떨어뜨리는 원인이 된다고 판단된다.

Fig. 6은 용접부의 EPMA 결과와 미소경도와의 관계를 비교하기 위하여 경도 프로파일을 작성한 것이다. 10gf의 하중으로 용접부 내 총 576point를 측정하여 플롯트 하였으며, 그 결과 EPMA에서 알루미늄이 높게 검출되는 영역은 미소경도값 또한 높게 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

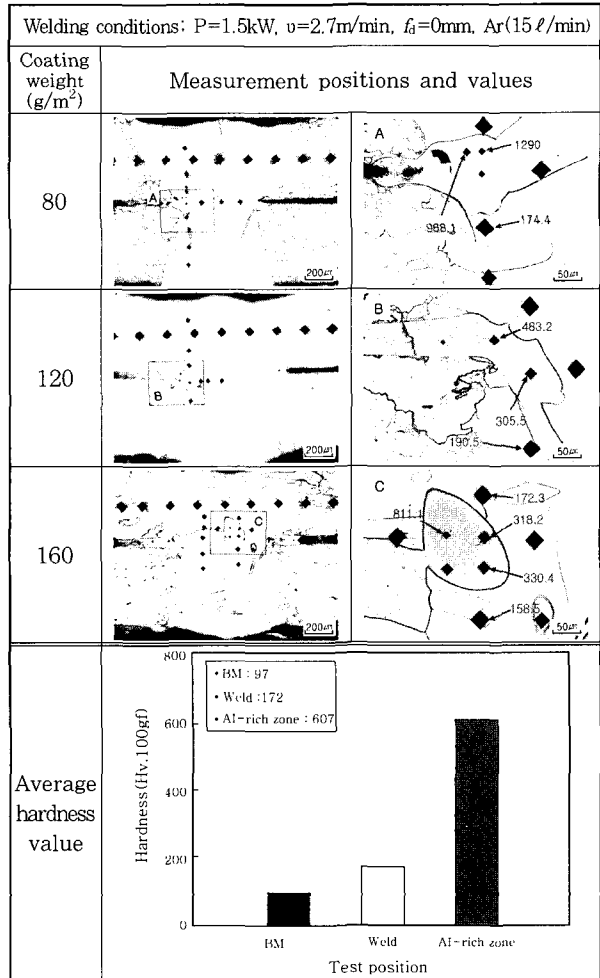


Fig. 5 Micro-hardness results of weld and Al-rich zone

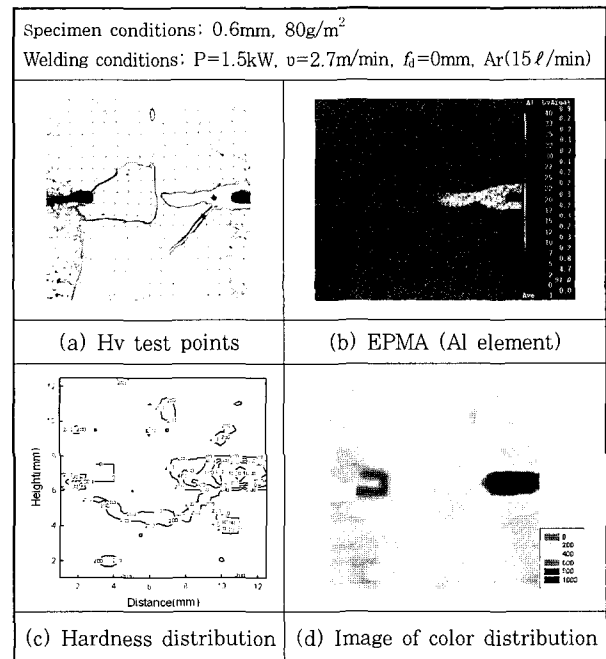


Fig. 6 Micro-hardness profile of weld

3.2.2 알루미늄 농화부의 TEM분석

용접부의 평균 경도값보다 알루미늄농화부의 미소경도값이 상당히 높다는데 착안하여, Fe-Al계 금속간화합물의 존재유무를 파악하기 위해 TEM분석을 실시하였다. TEM분석은 두께 0.6mm, 도금부착량 80g/m² 및 160g/m² 시험편을 대상으로 하였으며, 알루미늄 농화부를 FIB로 채취한 후, Fe-TEM으로 이미지 및 회절패턴을 관찰하였다. Fig. 7에 TEM시험편의 채취 위치를, TEM분석결과 이미지 및 회절패턴을 Fig. 8에 각각 나타내었다. 회절패턴 분석결과, 알루미늄농화부에서 Fe₂Al₅, FeAl 및 Fe₃Al의 금속간화합물이 관찰되었다. 이들 Fe-Al계 금속간화합물은 취성이 강하고 상온에서 연성 부족 및 수소취성 등의 문제점이 있으나, 고온에서 내산화성 및 황화성이 우수한 성질을 나타낸다고 알려져 있다⁹⁻¹⁰. 또한 Fe-Al계 금속간화합물의 미소경도값을 정리하여 나타낸 Table 4¹¹)에서 알 수 있듯이 본 실험에서 관찰된 화합물 이외의 금속간화합물도 존재할 것이라 판단된다.

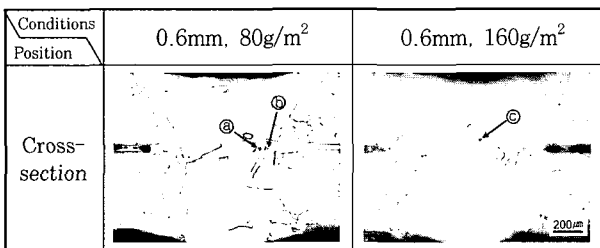


Fig. 7 Measuring positions of weld by TEM

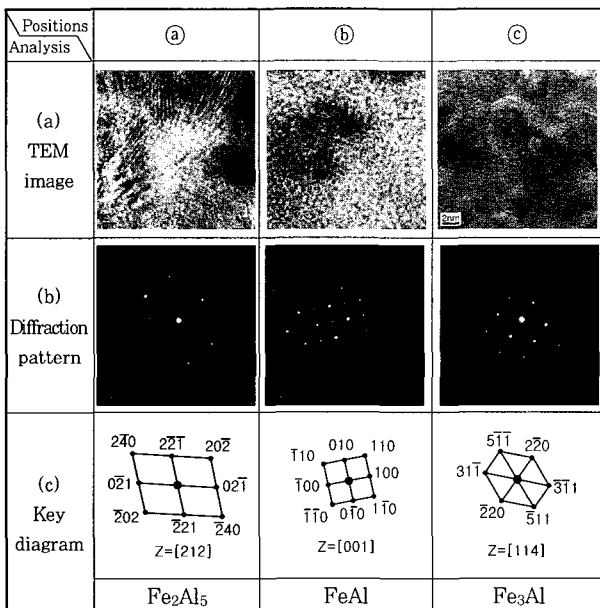


Fig. 8 TEM image(a), electron diffraction pattern(b) and its key diagram(c) of aluminized steel weld

Table 4 Microhardness of intermetallic compounds in the Fe-Al system

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

더욱이 취성이 강한 금속간화합물이 접합부 주위에 많이 분포하고 있다는 사실은 용접부를 취약하게 만들 뿐만 아니라 인성확보에도 영향을 미칠 것으로 사료되며, I 보에서 지적한 용접부로 혼입된 알루미늄량이 증가할수록 접합강도가 떨어지는 것은 이러한 금속간화합물의 존재 때문이라 판단된다.

3.4 기지재료 차이에 따른 용접부 내 알루미늄의 영향

알루미늄도금강판의 용접시 용접부로 혼입된 알루미늄은 기지인 Fe와 완전히 융합하지 못하고 알루미늄 농화부를 만들었으며 알루미늄농화부에서는 Fe-Al계 금속간화합물이 발견되었다.

본 절에서는 비교재료써 스테인리스-알루미늄도금강판을 사용하여 기지재료 차이에 따른 알루미늄의 거동을 비교·분석하였다.

Fig. 9는 용접속도에 따른 알루미늄도금강판과 스테인리스-알루미늄도금강판 조직사진의 대표적 실례를 나타낸다. 알루미늄도금강판의 경우, 두께 0.6mm와 도금부착량 160g/m²으로 STS310S-Al의 시험편과 두께 및 도금부착량의 차이는 있으나 용접부 내 알루미늄 거동을 관찰하는데는 무리가 없다고 판단된다. 용접부의 확대사진에서 알 수 있듯이 스테인리스-알루미늄도금강판의 경우에도 용접부 내 알루미늄에 의해 형성된 것으로 예상되는 결함이 관찰되었다. 알루미늄도금강판과 스테인리스-알루미늄도금강판 모두 접합부 주변에서 이러한 현상들이 발견되었으며, 이는 레이저 용접시 용접부로 혼입된 알루미늄이 기지와 충분히 융합하지 못함으로써 발생되는 결함이라 판단된다. 이 부분을 EPMA로 분석한 결과, 알루미늄도금강판에서 발견되는 알루미늄농화부가 스테인리스-알루미늄도금강판의 용접부 내에서도 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 알루미늄농화부의 미소경도측정 결과로, 사용한 미소경도의 하중은 50gf였다. 두 시험편 모두

Welding conditions: P=1.5kW, $f_0=0$, Ar(15ℓ/min)				
Type Position Welding speed(m/min)	Aluminized steel (0.6mm, 160g/m ²)			
	Cross-section	Micro photo	EPMA analysis	
			Fe element	Al element
3.2				
3.7				
4.2				
Type Position Welding speed(m/min)	Stainless-aluminized steel (0.75mm, 120g/m ²)			
	Cross-section	Micro photo	EPMA analysis	
			Fe element	Al element
3.2				
3.7				
4.2				

Fig. 9 Comparison of the weld defects caused by Al component with aluminized steel and stainless-aluminized steel

알루미늄농화부가 용접부보다 높은 경도값을 기록하였으며, 이는 알루미늄도금강판에서 발견되는 Fe-Al계 금속간화합물 또는 그 외의 화합물들이 이 영역에 존재하고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 알루미늄도금강

판과 스테인리스-알루미늄도금강판의 용접시 기지의 차이는 있으나 도금층의 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 유사한 거동을 보이고 알루미늄농화부를 형성한다는 것을 확인할 수 있었다.

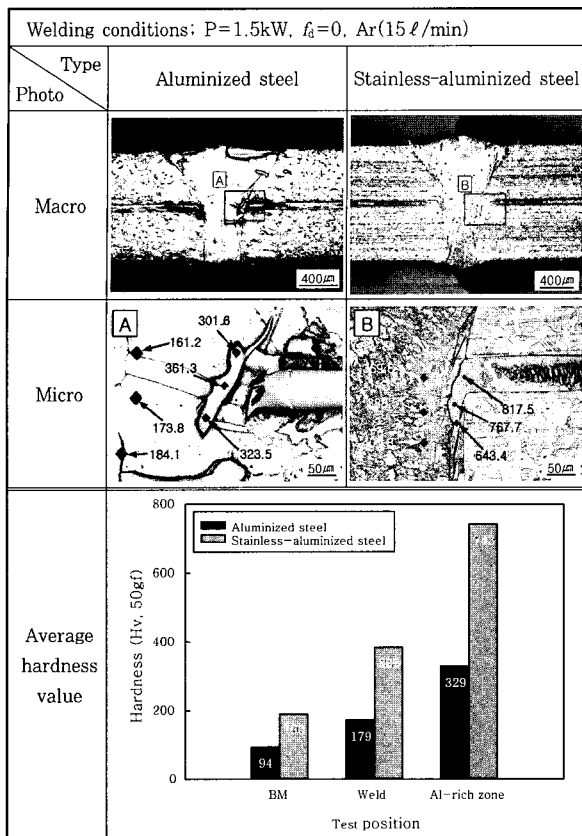


Fig. 10 Results of micro hardness test with aluminized steel and stainless-aluminized steel

4. 결 론

알루미늄도금강판의 용접시 용접부로 혼입된 알루미늄의 거동 및 그 조직적 특성에 관해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 알루미늄도금강판의 용접시 도금층의 알루미늄은 용접부로 혼입되며 알루미늄 농화부가 관찰되었다. 이는 급열급랭인 레이저 공정의 특징상 시험편의 겹침부로부터 유입된 알루미늄이 용융금속과 교반되지 못하고 겹침부 주변에서 부분적인 알루미늄 농화부를 형성한 것으로 판단된다.

2) 알루미늄 농화부의 경도는 용접부 평균경도 대비 2~5배 높은 값을 나타내며 경도분포도를 작성하여 보았을 때, 알루미늄의 거동과 경도값의 일치성을 확인할 수 있었다.

3) 알루미늄 농화부에서는 Fe₂Al₅, FeAl 및 Fe₃Al 등의 금속간화합물이 발견되었다. 이러한 Fe-Al계 금속간화합물은 취성이 강하며 접합부 주변에 알루미늄 농화부가 분포하고 있다는 것을 고려하여 볼 때, 접합 강도를 저하시키는 요인이라 판단된다.

4) 극저탄소강 기지의 알루미늄도금강판과 스테인리스-알루미늄도금강판에 대한 용접성 비교시험 결과, 용접부 내에는 경질한 알루미늄농화부가 존재하였다. 따라서 기지의 차이는 있으나 알루미늄이 용접부로 혼입되면서 유사한 현상을 일으킨다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- Masao Kurosaki, Kenitiro Matusmura, Teruaki Izaki : Pb-free Coated Steel Sheet for Fuel Tanks, Nippon Steel Technical Report, No.378(2003), 46-50
- Hirofumi Taketsu, Yukihiko Morita, Sigeyasu Morikawa : Hot-dip Aluminized Steel Sheet "Alstar" for Automotive Fuel Tank, Nisshin Steel Technical Report, No.83 (2002), 47-83
- Masayoshi Suehiro, Jun Maki, Kazuhisa Kusumi : Properties of Aluminum Coated Steels for Hot-forming, Nippon Steel Technical Report, No.378 (2003), 15-20
- H.H. Park, J.S. Yoon, I.S. Bae: Corrosion Behavior of Stainless Steel Separator for Molten Carbonate Fuel Cell, Journal of The Korean Institute of Metals and Materials, 41-12(2003), 889-895
- Suk-Woo Nam, Jung-Tae Hwang, Kab-Soo Lee : Performance Analysis of 1.5kW-class Molten Carbonate Fuel Cell Stack, Energy Engg.J, 8-1(1999), 23-33
- J.H. Jun, J.H. Jun, S.B. Kim : Process for Hot-dip Aluminum Coated Stainless Steel, RIST研究論文, 15-2(2001), 210-217
- Jong-Do Kim, Jung-Han Lee, Ki-Chol Kim : Welding Characteristics of Aluminized Steel Sheet by Nd:YAG Laser(I), Journal of KWJS, 25-4(2007), 65-71
- JaeHo Jun, KyooYoung Kim, JoonHwan Jun : Influence of Aluminum Depletion on the Lifetime of an Al-Fe Coating in Eutectic(Li, K)2CO3 at 650°C, Materials Transactions, 44-1(2003), 133-137
- L. Yajiang, Z. Zengda, W. Xing : Phase Constitution Characteristics of the Fe-Al Alloy Layer in the HAZ of Calorized Steel Pipe, Welding journal, 76-9 (1997), 356-360
- S. Slyusarenko, O. Slukhovskii : Structure of liquid Fe-Al alloys, Materials Science and Engineering, A325(2002), 98-102
- Li Yajiang, Wang Juan, Zhang Yonglan : Fine structures in Fe3Al alloy layer of a new hot dip aluminized steel, Bull. Mater. Sci., 25-7(2002), 635-639