

## 자동차용 도금강재의 저항 점용접부 특성

김기철<sup>†</sup> · 차준호 · 박화순\*

포항산업과학연구원  
\*부경대학교

## Resistance Spot Weldability of Coated Steels for Automobile Applications

Ki Chol Kim<sup>†</sup>, Joon Ho Cha and Hwa Soon Park\*

Research Institute of Industrial Science & Technology

\*Pukyong University

(2004년 1월 29일 받음, 2004년 4월 1일 최종수정본 받음)

**Abstract** Resistance spot weldability of coated steels for automobile applications was investigated. Test samples were prepared from commercial products of 0.8 mm in thickness. Based on the tensile-shear test, surface quality examination and cracking behavior, it was clear that aluminized steels showed good weldability. Microstructural inspection revealed that the coated materials was piled up at the split zone in the welding of aluminized steels. It was also demonstrated that no weld crack was found in the aluminized steel weld metal even the welding was carried out with higher current. However, through thickness cracks were detected at the weld metal of zinc coated steel. Small particles were found on the crack surface of zinc coated steel weld metal. It was thought that zinc vapor played key role to form the weld crack.

**Key words** Aluminized steel, Zinc coated steel, Resistance spot welding, Weld crack

### 1. 서 론

자동차용 도금강재는 환경친화성이라는 전제하에 점차 고강도화와 높은 내식성을 요구하는 추세이다. 지금까지 자동차용 도금강재의 대표제품은 아연(이하 Zn)도금강이라고 할 수 있으며 그것은 오래 동안의 생산기술축적과 대량생산에 따라 다양한 제품의 공급체계가 이루어졌고 또 품질 안정성 및 가격경쟁력이 높다는 것이 중요하게 작용하였다.

한편 자동차와 가전용으로 중요하게 쓰이는 강재 중에서는 내식성이 특히 요구되는 경우도 많다. 연료탱크는 대표적인 예이며 최근까지 납도금 제품이 쓰이지만 공해 문제로 더 이상 사용할 수 없는 상태에 와 있다. 이러한 목적으로 사용되는 강재의 경우는 전면부식, 구멍부식 또는 고온부식 등에 대한 저항성이 높아야 하지만 소재의 우수한 용접성 또한 중요한 과제이다.<sup>1-9)</sup> 따라서 몇몇 철강 선진국에서는 알루미늄(이하 Al)계 도금강의 개발연구와 적용을 위한 조치가 이루어지고 있다. Al계 도금강은 이미 몇 종류가 개발되고 있으며 그들의 내식성에 관하여도 비교적 많은 자료가 보고<sup>10-14)</sup>되고 있지만 용접성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 이러한 점을 감안하여 Al도금강의 저항 점용접부 특성에 관하여 조사하고 종래의 Zn도금 강재의

용접성과 비교함으로써 새로운 용도의 Al도금강재 개발과 그 이용 범위확대를 위한 기반을 다지고자 한 것이다.

### 2. 실험 방법

시험재는 생산공정에서 채취한 두께 0.8 mm의 시판용 Al도금강이었다. 이 재료는 편의상 분류 방법에 의한 Type-I 용융 Al 도금강판에 해당하는데 도금 피막은 Al 기지에 약 10%의 Si를 함유하고 있는 일종의 Al-Si 합금도금 강재이다.

시험재는 표면의 도금 부착량에 따라 5종류(시험재 A-E)로 구분하였으며 비교재료는 도금 부착량 90 g/m<sup>2</sup>의 합금화 Zn도금강(시험재 F)이었다. Table 1은 본 실험에 사용된 재료의 화학조성, 도금 부착량 및 기계적 특성을 나타낸 것이며 이 표에서 알 수 있듯이 시험재 E를 제외하고는 도금 전 모재의  $C_{eq/TW}$  값이 낮은 극저탄소강 계열이었다.

용접은 교류식 점용접기를 이용하였으며 예비실험에서 가압력(2.45 kN)과 용접시간(15 cycle) 등을 결정한 다음 고정하였고 본 용접에서는 용접전류만을 변화시켰다. Table 2는 용접조건을 나타낸 것이다. 용접부 조직특성 시험은 용접부의 중앙을 정확히 절단한 후 연마 및 부식한 다음 기본적인 측정을 행하였고 정밀한 관찰을 위하여 전자현미경과 관련 분석장치를 이용하였다.

<sup>†</sup>E-Mail : kicholk@rist.re.kr

**Table 1.** Chemical compositions and mechanical properties of base metals

	C	Si	Mn	P	S	Coating (g/m <sup>2</sup> )	C <sub>eq./IIW</sub>	TS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)
A	0.0047	0.0034	0.064	0.006	0.0078	Al-Si: 40	0.016	294	185	40
B	0.0033	0.0061	0.073	0.012	0.0103	Al-Si: 80	0.016	305	199	39
C	0.0031	0.0058	0.066	0.011	0.0098	Al-Si: 110	0.015	289	189	39
D	0.0031	0.0066	0.073	0.012	0.0101	Al-Si: 130	0.016	291	179	39
E	0.0186	0.0059	0.24	0.011	0.0104	Al-Si: 60	0.060	407	313	23
F	0.0086	-	0.12	0.007	0.0083	Zn: 90	0.029	271	163	46

**Table 2.** Welding conditions

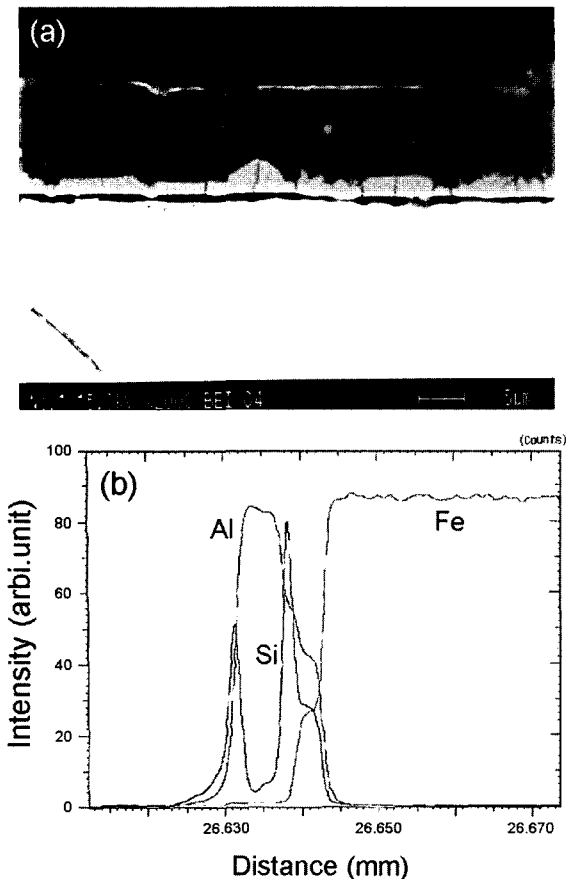
Parameters	Test conditions
Welding current	5~12 kA
Electrode force	2.45kN
Welding time	15 cycle
Cooling water flow rate	8 l/min
Welding electrode	Cu-1%Cr, 6 mm in diameter

**3. 결과 및 고찰**

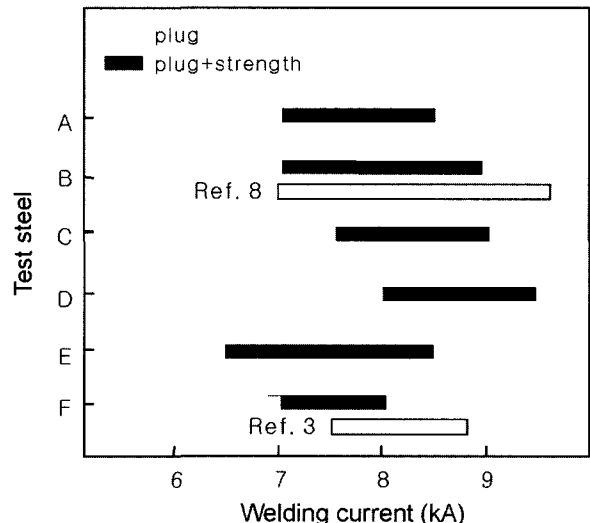
Fig. 1은 시험에 사용된 강재의 하나인 시험재 B의 모재단면 도금특성을 나타낸 것이다. 시험재 B의 목표 도

금량은 80 g/m<sup>2</sup>으로 두께로 환산할 때 편편 14.7 μm에 해당한다. Fig. 1(a)에서 상부에 회색으로 보이는 부분이 도금층이며 그 아래 조금 밝고 높이가 일정하지 않은 부분이 소지철과 Al층이 합금을 이룬 영역이다. 합금층의 평균두께는 본 연구에 사용된 강재에서 Al 도금량과 관계없이 3~5 μm 범위였다. 이러한 결과는 실험에서 사용된 강재가 Type-I Al도금강이었기 때문이다.<sup>2)</sup> Fig. 1(b)는 이 소재의 단면을 분석한 결과로서 도금표면에서 소지 내부방향으로 Al, Si 및 Fe의 농도분포를 보여주는 것이다. 한편 Fig. 1(a)에서 도금층과 소지철 사이의 검은 띠는 시험편의 부식과정에서 형성된 영역으로 도금층의 박리와는 관계가 없는 것이며 Fig. 1(b)를 기초로 할 때 재료표면으로부터 약 15 μm(26.642 mm 위치)떨어진 Fe-Al 합금층에 해당한다.

본 실험에서 사용된 재료들의 적정용접 조건은 Fig. 2에 제시되어 있으며, 전단인장시험에서 플러그파단 영역(회색)과 플러그파단 및 전단인장강도 A급을 동시에 만족하는 영역(흑색)을 구분하였다. 또 용접조건에 상한은 과도한 스파터가 발생하는 전류로 하였으며,<sup>13)</sup> 실험 결과에서 알 수 있듯이 Al도금강(A~E)의 점용접조건 범위는 Zn계 도금재(F) 대비 동등 이상으로 양호함을 알 수 있다. 시험재 B와 F의 하단에 제시된 백색 선은 해당 시험재와 유사한 재료를 이용하여 실험한 문헌의 결



**Fig. 1.** Analytical results of coated layer(steel B). (a) SEM micrograph (b) line analysis results



**Fig. 2.** Acceptable welding range.

과이며 본 실험과 비교하는데 목적이 있다.

기존의 문헌들<sup>3,6,7)</sup>을 참고로 할 때 시험재 B의 용접 전류 범위는 문헌결과보다 약간 낮게 나타나 있으나 그것은 용접조건 설정상의 차이로 사료되었다. 즉 문헌의 용접조건은 전극 가압력과 통전시간이 각각 1.96 kN과 20 cy.이었으나 본 실험에서는 스패터 발생에 의한 용접성 저하를 억제하기 위하여 전극압력 2.45 kN에서 통전시간을 15 cy.로 설정하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 점용접부 형성에 미치는 용접조건 영향의 나타낸 것으로 Fig. 3에서는 전류증가에 따라 너깃 크기가 적정조건 범위 부근에서 거의 직선적 관계가 있다. 또 Zn도금재인 시험재 F와 Al도금재의 너깃 형성특성 구분이 어려울 정도로 비슷하며, 그러한 경향은 용접부 표면품질의 평가요소인 압흔 측정결과(Fig. 4)에서도 유사하게 나타났다. 또, 이 실험의 도금범위에서 Al도금층 두께에 따른 너깃 형성특성의 차이는 분명하지 않았으나 도금량이 적은 시험재에서 더 양호하게 나타났다.

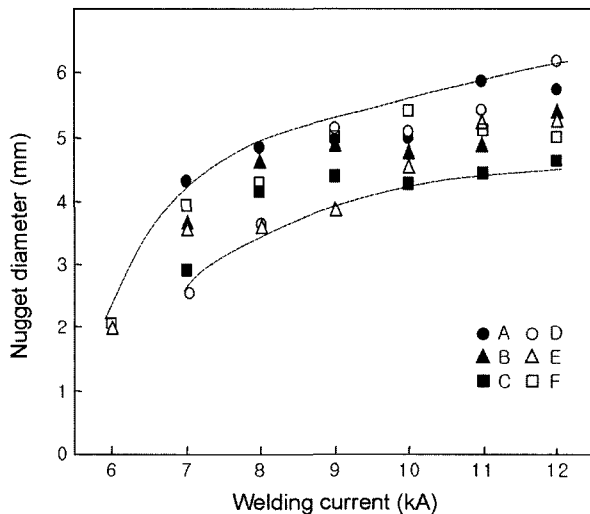


Fig. 3. Nugget diameter change with welding current.

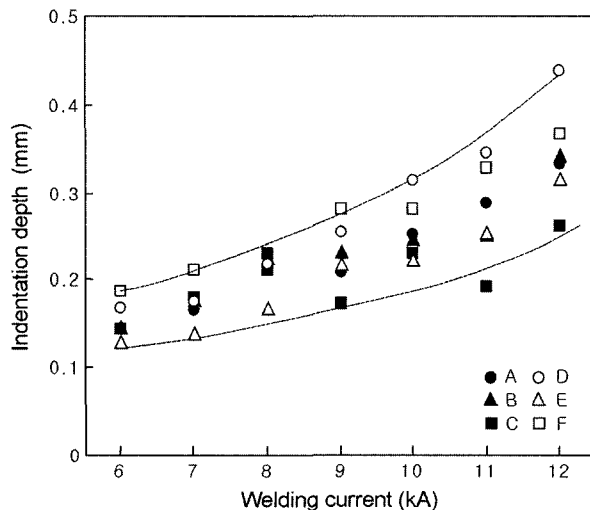


Fig. 4. Indentation depth as a function of welding current.

본 실험에서 얻은 중요한 결과의 하나는 Fig. 5와 Fig. 6에서 보여주는 용접 후 판 분리 영역에서 도금층의 거동이다. Al도금강의 경우, 도금량과 관계없이 용접 후 판 분리 영역에는 도금물질로 채워져 있었다. Fig. 5는 그러한 예로서 도금량 40 g/m<sup>2</sup>인 시험재의 결과이며 상부의 SEM 사진에서 A영역 분석 결과(Fig. 5a)를 볼 때 매우 높은 Al분석 강도를 확인할 수 있다. 또 코로나 본드인 SEM 사진의 B부분 분석결과(Fig. 5b)에서도 접합계면에는 Al-Si 물질이 잔존하고 있었다. 이와 같이 접합계면에 도금물질이 충전하여 있다는 것은 용접부의 틈부식 등에 대한 저항력 향상에 매우 긍정적인 효과가 있음을 의미한다.

한편 Fig. 6은 Zn도금재 용접부의 판 분리 영역으로 Fig. 5의 결과와는 큰 차이가 있다. 즉, Zn도금재 용접부의 단면관찰 결과, 이 영역에서는 도금층을 발견하기 어려웠다. Fig. 6의 SEM 사진은 그러한 사실을 확인하려는 것으로 용접시 고온으로 가열되었던 영역(사진의 A부근)에서 도금피막은 보이지 않으며 조금 떨어진 곳에서 피막의 일부가 보이지만(사진의 B부근) 소지금속의 표면으로부터 박리 되어 있는 형상이었다. 한편, 판 분리 영역의 중간에 보이는 크고 작은 입자들은 시험편 준비 과정에서 불가피하게 혼입된 물밀용 플라스틱분말이 응고한 것이다.

Fig. 7은 도금물질의 거동과 관련하여 용접부 표면 형상을 관찰한 것이다. 용접 현장에서는 생산성을 높이기

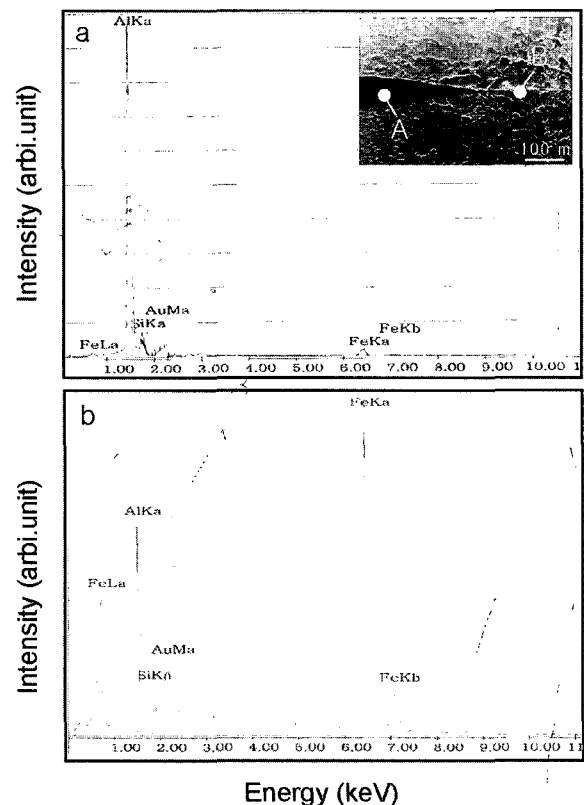


Fig. 5. Analytical results of test point A (a) and B (b) in SEM image (steel A).

위하여 적정용접 조건의 상한 또는 그보다도 약간 높은 전류를 사용한다. 그 결과 소재표면에 부착되어 있는 도금층은 전극과 합금반응이 촉진되거나 용접열과 압력의 영향을 받아 소실 또는 외곽으로 배출되는 것이 일반적이다. 그러나 Fig. 7(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 Al도금층의 용접부에서는 높은 전류로 용접이 실시되었을 경우에도 도금층의 많은 부분이 표면에 그대로 남아 있다. 이러한 결과는 Al의 높은 비등점과 관계가 깊을 것으로 사료되었으며 도금 후 표면 내식성에 관하여 매우 바람직한 효과를 나타낼 것이 예상된다. 이와는 대조적으로 Zn도금층의 용접부 표면에서는 도금피막의 소실을 확인할 수 있으며 전극압력과 온도가 가장 높았던 중심부에서는 소지금속이 그대로 노출되고 있어 용접 후 표면 내식성보증이 불가능함을 알 수 있다.

또, Zn도금층은 높은 전류를 사용할 경우 과열된 Zn-Cu 합금의 영향을 받아 용접부에 액화균열 등을 일으키는 것으로 알려져 있다.<sup>14,15)</sup> Fig. 8은 그러한 예를 보인 것으로 Fig. 7(b)의 용접부 중앙을 절단하여 본 결과, 사진과 같이 많은 수의 균열들과 일부 관통균열도 관측되었다. 이러한 균열의 생성과 도금피막의 관계를 살펴보기 위하여 본 실험에서는 저온에서 Fig. 9의 상부 개략도와 같은 방법으로 용접부를 쪼개 다음 아래의 사진과 같이 균열을 3 부분(A, B 및 C)으로 구분하고 용접균열의 선단부(B)와 파단 종료점 부근(C)을 조사하였다. 즉

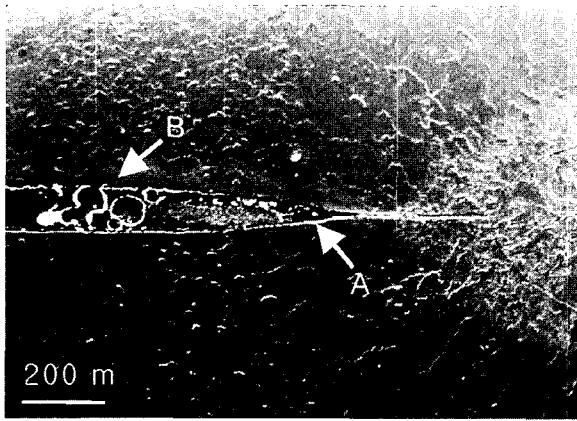


Fig. 6. SEM image showing split zone of steel F.

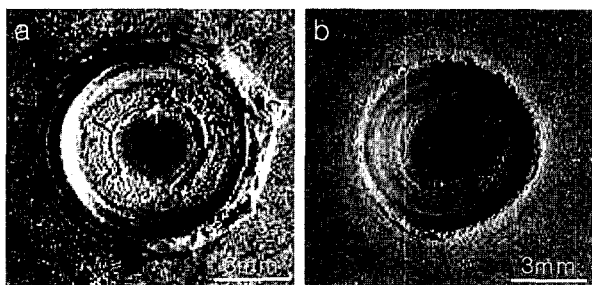


Fig. 7. Surface appearance of coated steel spot welds. (a) steel D, welding current: 12 kA (b) steel F, welding current: 10 kA.

Fig. 10(a)는 Fig. 9에서 B 부분을 확대한 것으로 용접균열 선단부에 해당한다. 사진의 아래는 용접균열이 발생하지 않았던 곳으로 저온파괴시 입내파단을 일으킨 것이며 위는 이미 균열이 존재하였던 곳으로 결정립 표면에서 많은 용착물질을 볼 수 있다. 한편 Fig. 10(b)는 용접부의 밑 부분으로 이곳도 건전부이며 대표적인 저온 입내파괴 양상을 보이고 있다.

Fig. 11은 Fig. 10(a)의 A 영역을 확대 및 분석한 결과이다. Fig. 11(a)의 우측에서는 용접시 이미 형성된 균열 사이로 용융물이 흘러 들어왔던 흔적을 확인할 수 있으며, 분석 결과(Fig. 11b, c) 그들은 예상하였던 것과 같이 전극과 도금층의 합금물질인 Zn과 Cu로 구성된 물질이었다. 한편 Fig. 11(a)에서는 흥미로운 사실이 발견되었는데 그것은 균열 표면에 작은 입자들이 다수 산재하여 있다는 것이다. 본 실험에서는 이들 입자의 주성분

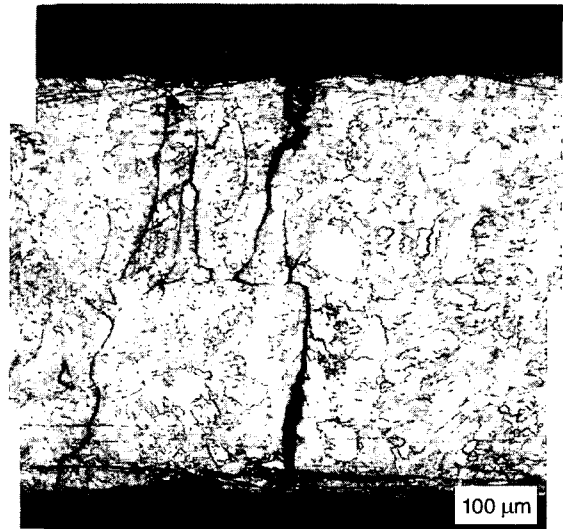


Fig. 8. Weld cross-section of steel F showing through thickness cracks.

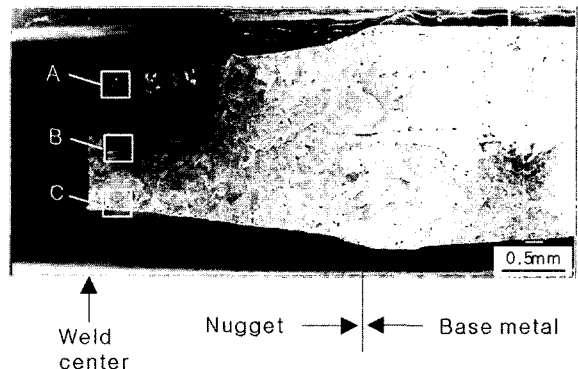
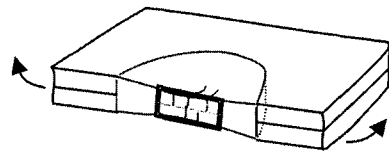


Fig. 9. Appearance of fractured weld showing through-thickness crack surface (steel F).

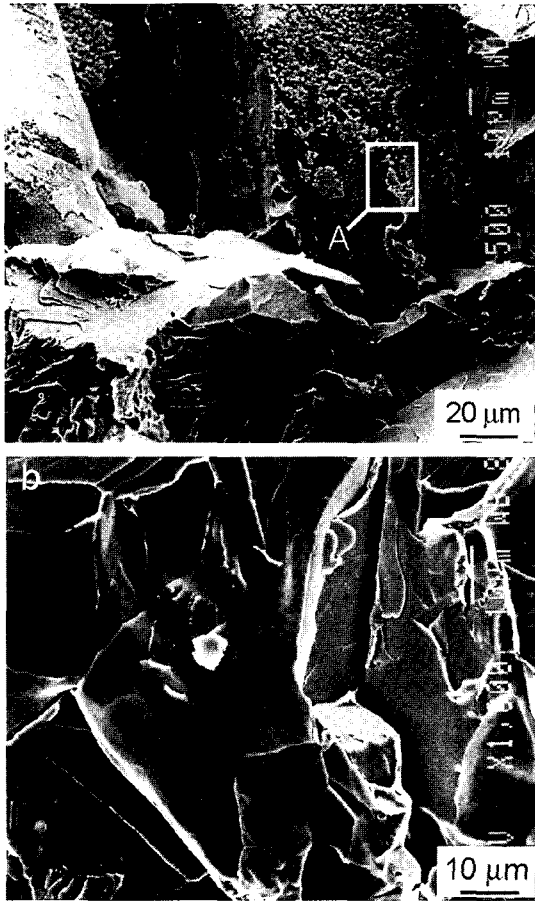


Fig. 10. SEM fractographs of crack surface shown in Fig. 9. (a) test position B (b) test position C

과 형성과정을 좀 더 자세히 조사하기 위하여 Auger 및 EDS 분석장치를 이용하였다. Fig. 12(a)는 균열 표면을 나타내는 영상이며, 비교적 입자가 크고(0.5 μm 이상) 인접 입자의 영향을 적게 받는 것을 골라서 분석한 위치가 표시되어있다. Fig. 12의 (b)와 (c)는 각각 표면 그대로의 상태에서 분석한 것과 20 nm 깊이로 Ar이온 sputtering을 실시한 후의 실험 결과이다. Fig. 12(b)를 살펴보면 입자표면에서 높은 강도의 C를 포함하여 O 및

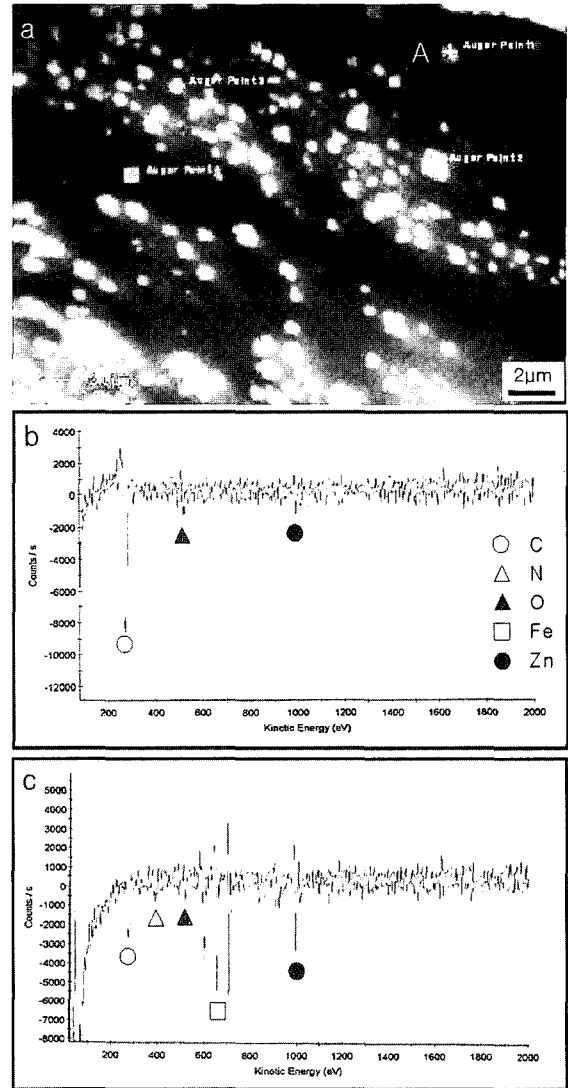


Fig. 12. SEM image and Auger analysis results of particle A on the crack surface of steel F. (a) surface image (b) analysis of as received specimen (c) analysis of 20 nm sputter cleaned specimen

Zn이 검출되었다. 그러나 예상되었던 Cu는 전혀 보이지 않았다.

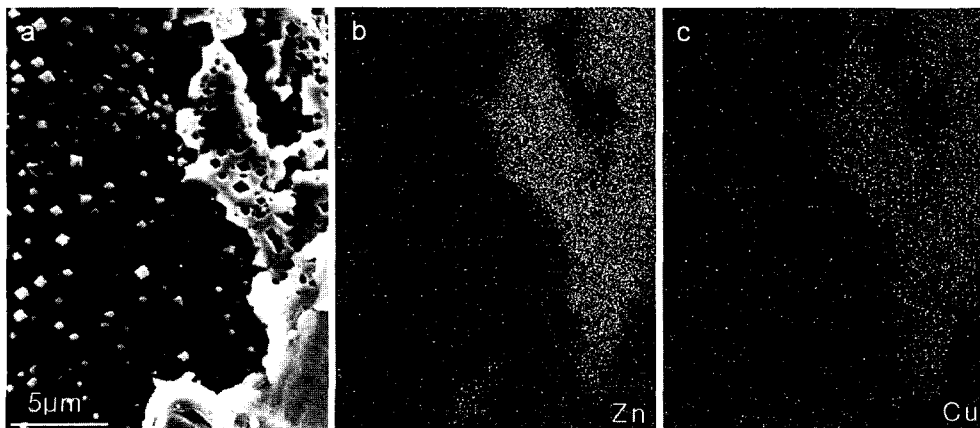


Fig. 11. SEM image(a) and analytical result of Zn(b) and Cu(c) of test point A in Fig. 10.

한편, 20 nm sputtering후의 결과(Fig. 12c)를 보면 앞에서의 C와 O 신호강도는 크게 낮아진 반면 Fe와 Zn의 신호강도가 매우 높아졌음을 확인할 수 있었으며, 이러한 조건에서도 Cu의 존재는 감지할 수 없었다. Fig. 13은 위 결과를 확인하기 위한 실험으로 선택된 입자에 대하여 EDS분석을 실시한 것이다. 이 분석결과를 살펴보면 분석된 입자의 크기는 약 0.8  $\mu\text{m}$  정도였으며 원소 분석에서는 Fe와 Zn만 검출되었다.

이러한 실험결과로부터 점용접부의 균열발생과 내부 균열표면에서 발견된 입자들에 관하여 다음과 같은 해석이 가능하였다. 즉, 적정조건에서 용접을 행할 때 점용접부 중앙 부근의 온도는 Fe의 용점 이상으로 상승하여야 하며, 좀 더 높은 전류로 용접이 이루어지면 표면에 인접한 부분까지도 고온영역이 확대된다. 이 때 그 표면에 피복 되어있던 Zn이 전극물질인 Cu와 합금을 이루기 전 단계에서 어떠한 이유로 용융 및 배출되지 못할 경우, 상당부분 기화되어 스패터로 비산되거나 높은 압력의 Zn 증기 상태로 그 전방에 있는 균열공간으로 밀려들어갈 것이다.<sup>3,15)</sup> 그 다음 냉각과정에서 Zn증기는 포화 및 응축될 것이며 이 때 고온의 소지표면과 반응을 일으켜 Zn-Fe 혼합물 또는 합금을 형성할 수 있을 것이다. 실제로 Zn-Fe 상태도에 의하면 상당히 낮은 온도까지 Zn-Fe 혼합상 용액이 잔류할 수 있음을 알 수 있다.

만일 그러한 과정이 용접균열 생성과 유사한 시간에 이루어진다면 용융부는 전극에 의하여 양쪽 통로가 막혀있는 상태와 높은 온도 분위기이므로 소지표면과의 반응도 더 잘 일으킬 수 있을 것으로 생각된다. 이 실험결과에서는 점용접부 균열형성이 저융점 합금물질의 용액이 결정립계를 따라 침입하는 것으로 알려진 기존의 균열 발생기구 이외에 기상으로 유입된 저기화점 원소가 균열형성을 조장하거나 이미 형성된 균열면에 응착하여 모재인 Fe과 반응을 일으켰을 가능성도 충분히 높다는 것이다. 그러한 추정은, 균열표면에 Fig. 11과 같이 제3의 물질이 연속적으로 묻쳐있는 영역에서는 Zn과 Cu가 동시에

확인되었으나 날개로 분산되어 있는 입자들에서는 Zn과 Fe만 검출되었을 뿐 Cu는 전혀 검출되지 않았다는 것과 관계가 깊다.

#### 4. 결 론

Si를 약 10% 함유한 Type-I 용융 Al도금강의 용접성을 조사하고 그 결과를 종래의 Zn도금재와 비교한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Al도금강의 적정 점용접 조건범위는 Zn계 도금재보다 넓거나 유사하였다. 본 실험범위에서 Al도금량에 따른 너깃 형성특성 차이는 분명하지 않았으나 도금량이 적은 시험재에서 양호한 경향을 보였다.

2) Al도금강 점용접부의 판 분리영역은 도금물질로 완전히 채워져 있었으며 이러한 현상은 도금량과 관계가 없었다. 이것은 Zn도금재의 용접부와 큰 차이를 보이는 것이며 Zn도금재에서는 이 영역이 비어있거나 다공질 형태였다. 또 접합계면에 도금물질이 충만하여 있는 것은 겹치기 이음부 내식성 향상에 매우 긍정적인 효과가 있을 것으로 사료되었다.

3) 높은 전류로 용접이 실시되었을 경우 Al도금재에는 용융 후 응고된 도금층이 표면에 남아 있었으며 이것은 Al의 비등점과 관계가 깊은 것으로 사료되었다. 그러나 Zn도금재의 용접부 표면에서는 도금피막의 소실이 뚜렷하며 전극압력과 온도가 가장 높았던 용접부 중앙에서는 소지금속이 그대로 노출되어 용접 후 표면 내식성의 저하가 예상되었다.

4) Zn도금재를 높은 전류로 용접하였을 경우 전극과 합금된 물질의 영향을 받아 용접균열을 일으키며 용접부 절단시험 결과 많은 수의 균열과 일부 관통균열이 관측되었다. 또 균열표면에서는 Zn-Cu계 구성물질을 확인할 수 있었고 침입물질이 흘러 들어오지 않았던 균열표면에는 작은 입자들이 다수 산재하여 있었다. 정밀시험 결과 그들은 Zn-Fe계 물질로 구성되어 있었으나 Cu는 전혀 감지되지 않았다.

5) Zn의 기화에 의한 압력이 용접균열 생성과 유사한 시간에 형성된다면 저융점 물질의 결정립계 침입이 원인으로 알려진 기존의 점용접부 균열발생기구 이외에 Zn과 같이 낮은 비등점 원소의 증기가 용접균열을 일으키거나 적어도 균열발생을 조장할 가능성은 충분히 크다. 한편 높은 비등점 피막을 가진 Al도금재의 경우는 어떠한 조건에서도 용접부 균열이 발견되지 않았다.

#### 참 고 문 헌

1. T. Asamura, ISIJ, **77**(7), 861 (1991).
2. H. Takechi, ISIJ, **78**(3), 339 (1992).
3. H. Asada, T. Eriguchi and S. Soga, Proc., Japan Welding Society, **56**, Apr., 176 (1995).
4. M. Ohara and T. Saito, Jour. of Japan Welding Society, **63**(4), 277 (1994).

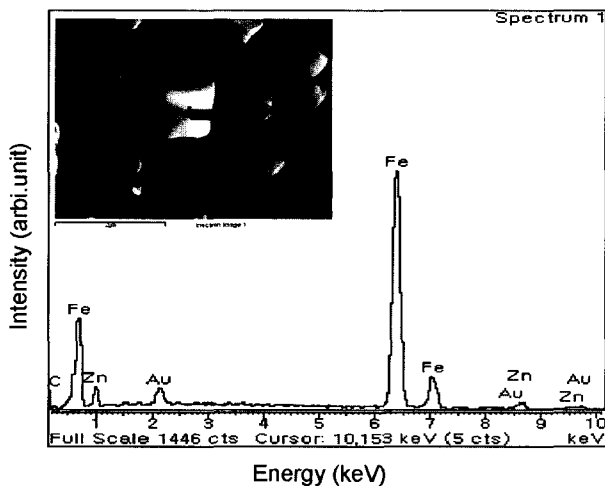


Fig. 13. Analytical results of a dispersed particle in SEM image.

5. T. Saito, Jour. of Japan Welding Society, **60**(6), 484 (1991).
6. Y. Izawa, A. Teramoto and S. Fukuda, Proc., Japan Welding Society, **61**, Sep. 242 (1997).
7. Y. Izawa, A. Teramoto and S. Fukuda,, Proc., Japan Welding Society, **61**, Sep., 244 (1997).
8. W. Warnecke, J. Froeber and R. Bode, SAE Technical Paper Series, 1999-01-0022.
9. J. Froeber and W. Warnecke, Technical Report, Thyssen Krupp Stahl AG (2000).
10. L. Yajiang and Z. Yonglan, Corrosion, Mar. **234** (1995).
11. Y. J. Li, X. L. Wang and Y. L. Zhang, British Corrosion Jour., **28**(2), 149 (1993).
12. A. Bahadur, T. L. Sharma, N. Parida, N. Mukherjee and O. N. Mohanty, Jour. of Materials Science, **28**, 5375 (1993).
13. W. C. Shin, J. K. Min and C. C. Shur, Jour. of Korean Welding Society, **28**(11), 1010 (1990).
14. K. Torii, Y. Kandono and Y. Tamura, Trans. of Japan Welding Society, **2**(1), 77 (1971).
15. H. B. Kim and C. H. Lee, Jour. of Korean Welding Society, **15**(5), 420 (1997).