

## 레이저용접에서 알루미늄 도금량이 용접성에 미치는 영향

김기철<sup>†</sup> · 차준호  
포항산업과학연구원

### Effect of Coating Weight on the Laser Weldability in the Welding of Aluminized Steels

Ki Chol Kim<sup>†</sup> and Joon Ho Cha  
Research Institute of Industrial Science & Technology

(2003년 10월 11일 받음, 2003년 11월 1일 최종수정본 받음)

**Abstract** Laser weldability of aluminized steels for deep drawing application has been investigated. Test coupons for Nd:YAG laser welding and CO<sub>2</sub> laser welding were prepared from the commercial steels. According to the test results, total penetration and back bead width of aluminized steels were sensitive to the welding conditions. Bead width at the half thickness of the overlap joint, however, was rather constant. Laser weldability of aluminized steels was superior to that of zinc coated steel. Weld microstructure revealed that overlap zone adjacent to the fusion line was filled with coated materials, which was thought to be desirable to protect weld from crevice corrosion. The aluminum coated materials was also found in the weld metal. Practically no spattering was observed in the laser welding of aluminized steels even when the welding was performed without joint gap. In the welding of zinc coated steel, however, spattering was so severe that it was difficult to get the acceptable weld. Bead quality of aluminized steel laser weld was smooth and stable.

**Key words** Coated steel, Aluminized steel, Galvanealed steel, Laser welding

### 1. 서 론

알루미늄 도금강재(이하 Al 도금강)는 우수한 내식성 때문에 종래의 아연 도금강재(이하 Zn 도금강)와 함께 중요한 구조용 철강소재이다. Al 도금강은 도금층의 조성에 따라서 2종류로 분류되며 도금층에 Al 이외에 Si가 함유된 경우 도금 피막에는 Al-Si 합금층으로 되어 있으며 소지철과의 계면에서는 순 Al 도금강에 비하여 얇은 합금층을 형성하는 특징이 있다.<sup>1-5)</sup> Al 도금강은 자동차용으로 공급되는 냉연강 또는 기존의 Zn 도금강과 동등한 소재를 사용하기 때문에 기본적으로 우수한 기계적특성을 나타내는 재료이다.

지금까지는 내식성과 성형성이 동시에 요구되는 부품 제조업계에서 Zn 도금강이 전통적으로 널리 사용되고 있었다. 그러한 이면에는 Zn 도금강의 품질 및 생산기술의 안정성이 이미 정립되어 있고 또 강종 다양화에 의한 선택의 폭이 넓은 것도 적지 않게 작용하였다.

한편 생산성과 제조공정의 효율성을 중요시하는 자동차와 전자산업을 중심으로 레이저 용접기술의 공정도입 및 개발사태가 급격히 증가하고 있다.<sup>6-12)</sup> 그러나 산업현장에서 Zn 도금강은 용접시 다량의 스패터 발생으로 설비사고 유발, 작업환경 오염 또는 용접부 건전성 부족 등

많은 문제점이 거론되고 있다.<sup>13-16)</sup>

본 연구에서 용접 현장의 어려움을 해결하기 위하여 새로운 철강소재의 하나인 Al 도금강의 레이저 용접성을 조사하고 그 결과를 Zn 도금강과 비교함으로써 Al 도금강의 적용 기틀을 마련하고자 하였다.

### 2. 실험 방법

시험재는 Table 1에 보인 바와 같이 도금부착량이 양면 40~130 g/m<sup>2</sup>인 Al 도금강을 사용하였고 비교재는 Zn 도금강 및 도금이 되지 않은 냉연강재였다. 시험재의 두께는 0.8 mm였으며 전단장치를 이용하여 소정의 크기로 절단한 다음 레이저용접을 실시하였다. 이 때 전단부의 후처리 는 실시하지 않았으며 용접이음 형태는 겹치기였

**Table 1.** Coating conditions of specimens

| Specimens | Coating weight(g/m <sup>2</sup> ) | Remarks           |
|-----------|-----------------------------------|-------------------|
| A40       | 40                                |                   |
| A60       | 60                                |                   |
| A80       | 80                                | Aluminized steel  |
| A110      | 110                               |                   |
| A130      | 130                               |                   |
| Zn90      | 90                                | Galvanealed steel |
| CR        | -                                 | Cold rolled steel |

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

다. 용접시험편을 얻기 위하여 Nd:YAG 레이저와 CO<sub>2</sub> 레이저 용접장치를 이용하였으며 특별한 언급이 없는 실험결과는 모두 Nd:YAG 레이저용접에 관한 것이다. 용접공정 변수는 레이저출력, 용접속도, 초점위치 및 겹치기 간극으로 한정하였고 기타 조건은 고정하였다.

용접이 완료된 시험체는 기계적특성과 미세조직을 관찰하기 위하여 필요한 가공을 하였으며 용접부 인장시험, 조직 및 분석시험, 그리고 방사선투과 시험을 실시하여 용접품질을 비교 평가하였다. Table 2는 용접조건을, Fig. 1은 용접부 인장시험편의 형상과 용어들을 나타내고 있다.

Table 2. Welding conditions

|                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| Applied laser power (P) | 1~3 kW                   |
| Travel speed (V)        | 17~33 mm/s               |
| Position of focus (F)   | -1.5~+1.5 mm             |
| Shield gas              | Argon, 15 l/min          |
| Joint configuration     | 2-sheet overlap          |
| Joint gap (G)           | 0~25% of sheet thickness |

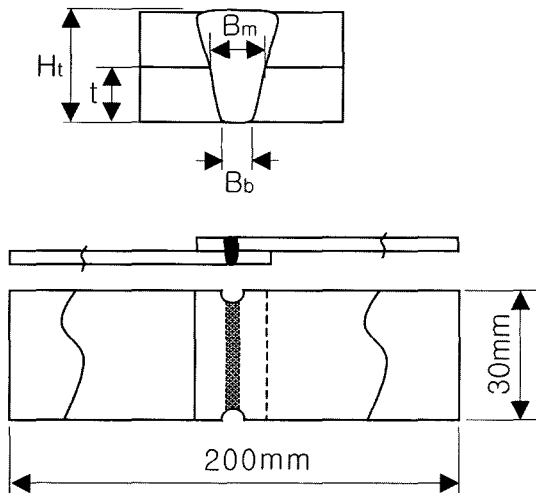


Fig. 1. Nomenclature and dimension of tensile test specimen. H<sub>t</sub>: total penetration, t: specimen thickness, B<sub>m</sub>: bead width at the overlap joint, B<sub>b</sub>: back bead width

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 용접부형성에 미치는 도금 종류 및 도금량의 영향

Fig. 2~Fig. 4는 용접부 형성에 미치는 레이저 조사 조건과 도금량의 영향에 대하여 조사한 것으로 도금강판의 2매 겹치기 용접에서 레이저 용접조건과 용입깊이(H<sub>t</sub>), 겹치기이음부 접합폭(B<sub>m</sub>) 및 이면비드폭(B<sub>b</sub>)과의 관계를 보인 것이다. Fig. 2는 용접속도 27 mm/s와 재료 표면에 초점을 맞추고 용접을 실시한 결과로 레이저출력의 증가에 따라 용입깊이와 이면 비드폭은 급격한 변화를 보이고 있으나 겹치기 이음부 접합폭은 거의 일정한 값을 나

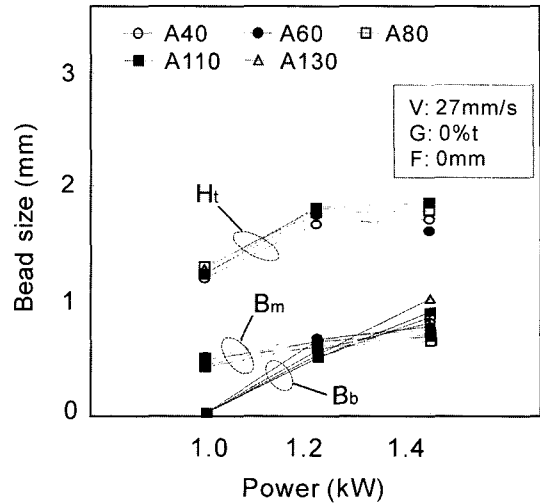


Fig. 2. Effect of laser power and coating weight on bead formation.

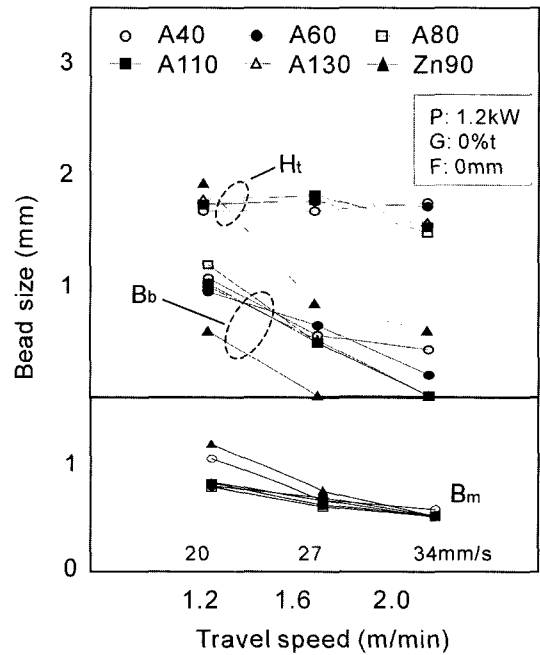


Fig. 3. Effect of welding speed and coating weight on bead formation.

타내고 있다. 이러한 경향은 이면비드가 거의 형성되지 않았던 용접조건에서도 동일하게 나타났으며 후술하는 용접속도와 초점위치를 변화시켰던 실험에서도 동일하게 나타났다. 한편 Fig. 3은 용접속도의 영향을 보인 것으로 Zn 도금강의 경우 특히 용접조건에 대하여 예민하게 영향을 받고 있으며 격심한 스패터 발생으로 소정의 용접부를 얻기가 어려웠다.

Fig. 4는 초점위치의 영향을 조사한 것으로 H<sub>t</sub>, B<sub>b</sub> 및 B<sub>m</sub>은 초점을 재료 표면에 설정하였을 때 가장 양호한 용접부가 얻어졌다. 초점위치가 비드형성에 미치는 정도는 B<sub>b</sub>의 경우 가장 현저하였으나 B<sub>m</sub>은 이 조건에서도 거의 변화를 나타내지 않았음을 알 수 있었다. 이상의 실험결

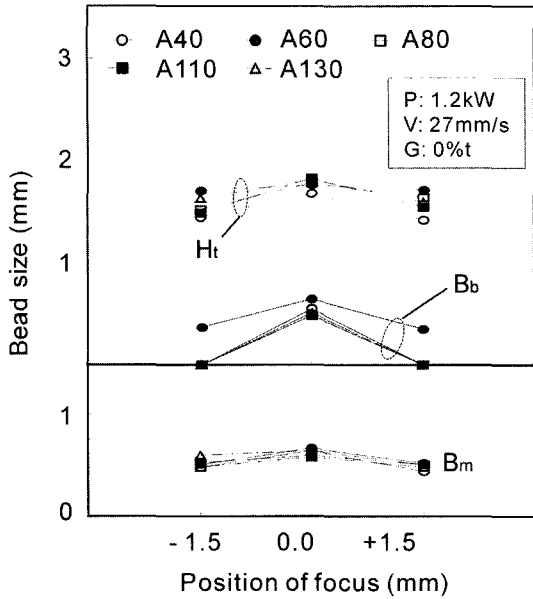


Fig. 4. Effect of position of focus and coating weight on bead formation.

과를 정리하여 보면 본 실험범위에서 Al 도금강의 레이저용접시 도금량은 출력, 속도 및 초점위치에 대하여 일정한 상관성을 보이지 않음으로 Al 도금량 자체는 레이저용접부 형성과 거의 관계가 없는 것으로 판단할 수 있었다.

Fig. 5는 용접속도와 용접부 인장시험 결과와의 관계를 나타낸 것이다. 실험결과에 의하면 용접속도의 증가에 따라서 용접부 강도가 전반적으로 조금 낮아지는 경향을 보였으나 그 이유는 분명하지 않았다. Zn 도금강은 용접시 다량의 스패터 현상에 의한 내부결함 발생의 영향을 받아 용접부 강도 저하량이 컸던 것으로 생각되었다. 그러나 Al 도금강의 경우는 레이저 겹치기 용접에서 도금량이 용접부강도에 별다른 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

이상과 같은 실험을 통하여 2매 겹치기 레이저용접의 적정 용접조건범위를 나타낸 것이 Table 3이다. 즉 겹치기 간극이 없는(G=0%t) 상태로 완전용입을 이루는 용접속도는 Al 도금강의 경우 최대 27 mm/s 범위였으며 레이저 출력은 최저 1.2 kW였다. 그러나 집속광학계의 초점거리가 비교적 짧은 실험장치의 경우 초점위치 설정에 주의가 필요함을 알 수 있었다. 한편 Zn 도금강의 경우는 Fig. 3에서 제시한 바와 같이 B<sub>m</sub>이 형성되었음에도 불구하고 과도한 용접결함 때문에 강도의 저하가 일어났고 용접부 형상불량 등으로 그 품질을 비교하는 것이 어려웠다.

3.2. 용접부에서 도금물질의 거동

Fig. 6은 Al 도금강인 A40 시험체에 대하여 레이저출력 1.4 kW와 용접속도 27 mm/s의 조건에서 만들어진 레이저용접부의 단면을 나타낸 것이다. 사진에서 알 수 있

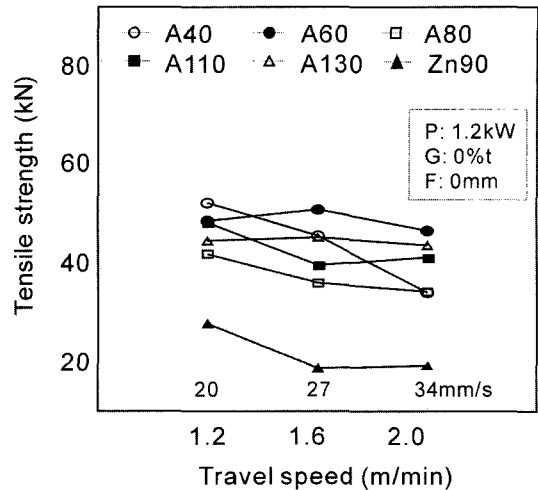


Fig. 5. Effect of travel speed on weld strength.

Table 3. Acceptable welding range

a) P: 1.2 kW, G: 0%t, F: 0 mm

| Speed (mm/s) | A40 | A60 | A80 | A110 | A130 | Zn90 |
|--------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| 20           | ●   | ●   | ●   | ●    | ●    | *    |
| 27           | ○   | ●   | ○   | ●    | ●    | *    |
| 34           | ×   | ○   | ×   | ×    | ×    | *    |

b) V: 27 mm/s, G: 0%t, F: 0 mm

| Power (kW) | A40 | A60 | A80 | A110 | A130 | Zn90 |
|------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| 1          | ×   | ×   | ×   | ×    | ×    |      |
| 1.2        | ○   | ●   | ○   | ●    | ●    | *    |
| 1.4        | ●   | ●   | ●   | ●    | ●    | -    |

c) P: 1.2 kW, V: 27 mm/s, G: 0%t

| Focus (mm) | A40 | A60 | A80 | A110 | A130 | Zn90 |
|------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| -1.5       | ×   | ×   | ×   | ×    | ×    | -    |
| 0          | ○   | ●   | ○   | ●    | ●    | *    |
| +1.5       | ×   | ×   | ×   | ×    | ×    | -    |

●: Sound weld, base metal fracture, ○: Sound weld, base or weld metal fracture

×: Interface fracture, \*: Weld defects

듯이 Al 도금강의 레이저용접부 단면은 통상의 냉연강 용접부에 비하여 상부비드가 퍼지는 모습을 보였다. 이러한 현상이 발생한 이유에 대하여 분명한 근거는 발견하지 못하였으나 표면에 부착되어 있는 Al층의 영향일 것으로 생각된다. 사진의 (b)는 사진 (a)의 점선을 따라 분석한 것으로서 용접금속 내부의 도금물질 잔류여부를 알아보기 위한 실험이었다. 그 결과 용접금속에는 도금물질인 Al과 미량의 Si이 검출되고 있었는데 이러한 특성은 Zn 도금강의 경우와 다른 점이었다. 또 극부적으로 Al 성분이 특히 많이 검출되는 영역도 존재하고 있었으며, 용접부 조직 안에는 화살표로 표기되어 있는 것

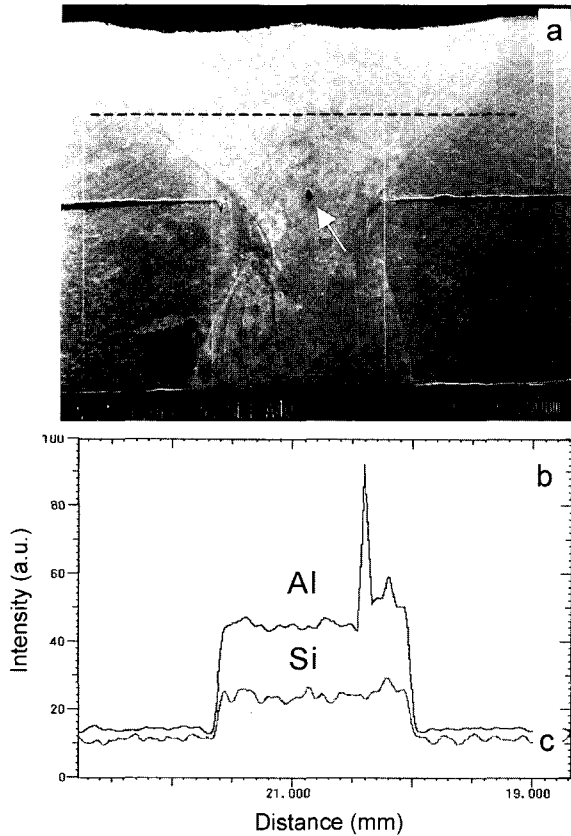


Fig. 6. SEM image (a) and line analysis results (b) of A40 steel weld metal.

과 같은 개재물도 관찰되었다.

이러한 개재물이 Al 도금층과 어떤 관계가 있는지를 알아보기 위하여 본 실험에서 도금량이 가장 많은 A130 시험재의 용접부 시험편에 대하여 조사한 것이 Fig. 7이다. 이 사진에서는 Fig. 6보다 좀 더 큰 개재물이 관찰되었으며(사진에서 B), 용접부 하단부근에서는 직경  $0.6\ \mu\text{m}$  정도의 기공도 보인다. 사진 (b)는 기공 표면을 분석한 것으로 기공 주위와 내부 표면에 Al의 농화가 이루어져 있음을 알 수 있다. 또 용접금속 중앙부(사진의 A부근)를 면분석한 결과 아래 그림 (c)와 같이 도금물질인 Al의 존재를 확인할 수 있었다.

본 실험에서 발견된 또 하나의 중요한 사실은 Al 도금강의 레이저 겹치기용접부 계면에서는 도금물질의 기화로 인한 도금층 손실이 없다는 것이다. 즉 사진 (a)의 왼쪽에 C로 표시한 접합계면을 살펴보면 상하 2개의 시험재 사이 간극에는 후술하는 Zn 도금강 용접부에서와 같은 도금물질의 손실에 의한 공간이 없다. 그림 (d)는 이 영역에 대한 성분분석 결과로서 접합계면에는 도금피막의 주성분인 Al과 Si으로 구성된 물질이 충전되어 있음이 확인된다. 이러한 현상은 용접 과정에서 소지금속보다 먼저 용융된 표면의 Al 도금물질이 대부분 기화하지 않고 용융금속과 혼합된 다음 응고하였거나 과열상태에서 모세관현상에 의하여 용접부 밖의 좁은 간극으로 스며들었기 때문으로 사료된다. 도금물질의 잔류현상은 용

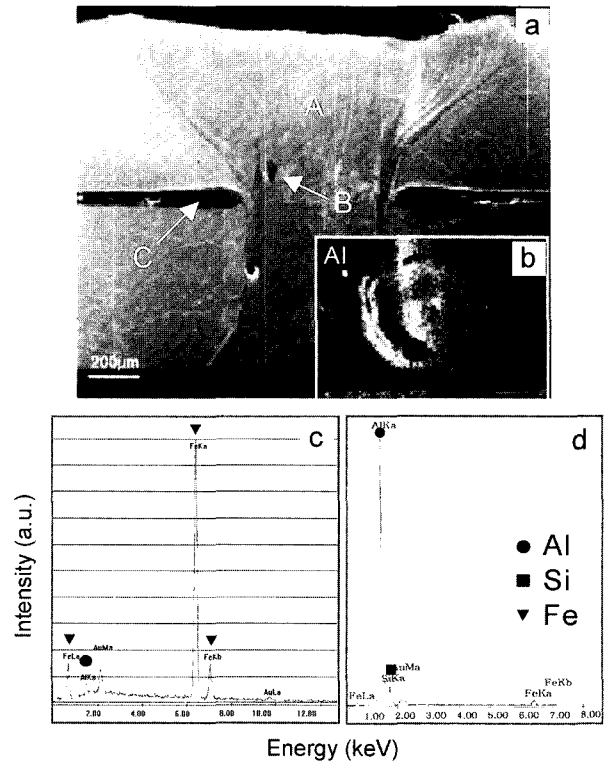
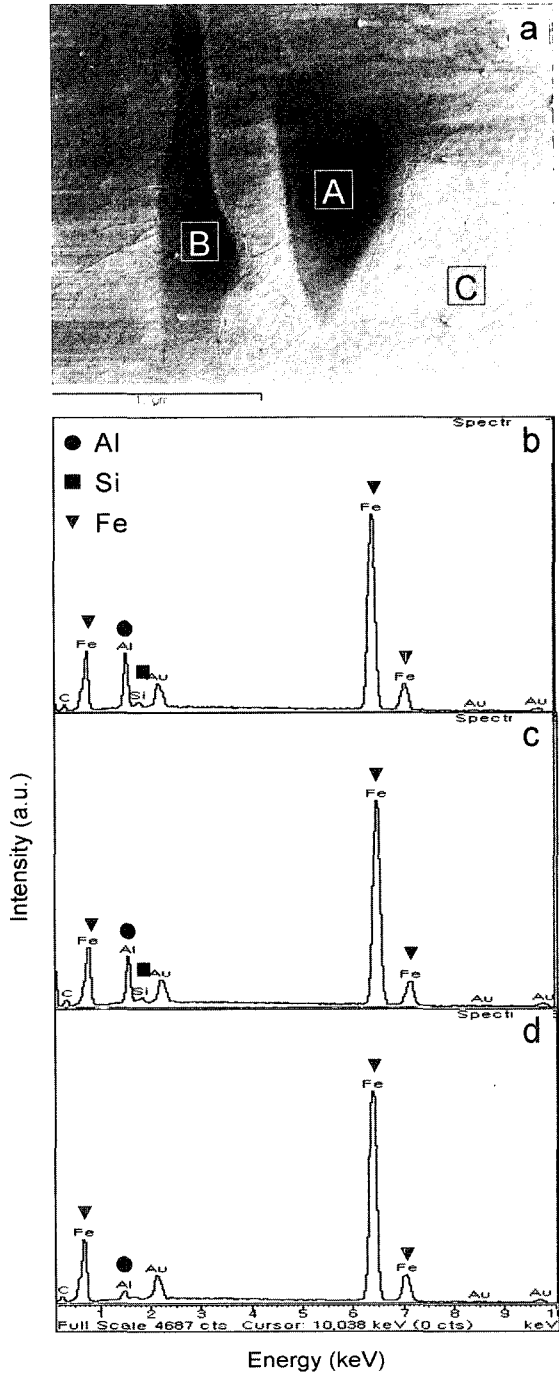


Fig. 7. Analytical results of A130 steel laser weld. a: SEM image, b: Al mapping of porosity, c: analysis of weld metal, d: analysis of joint gap

접금속의 오른쪽 간극에서도 동일하게 나타났다.

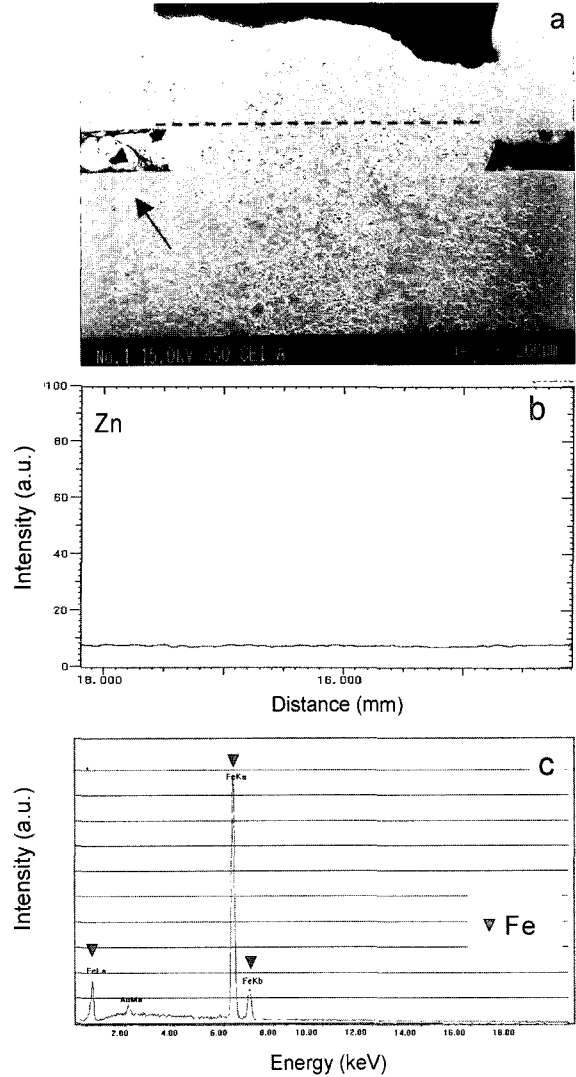
한편 Fig. 8(a)는 Fig. 7에서 개재물 형태를 나타내는 B부분을 확대한 것이며, Fig. 8(b, c 및 d)는 입자 A와 입자 B 및 용접금속(C)의 분석 결과이다. 입자 A와 B에서는 예상하였던 것과 같이 도금물질인 Al의 높은 피크가 확인되었으나 용접금속에서는 미약한 Al 신호 강도가 얻어져 이 부분에는 도금물질의 잔류가 거의 없음을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 유추할 때 개재물 입자형태를 보이는 영역에서는 용융되었던 도금물질과 소지금속이 완전히 섞이지 않은 상태로 응고하였음을 보여 주고 있다. 그 이유는 레이저용접의 온도기울기 및 높은 용접속도에 기인하는 것으로 사료되었다. 또 이와 같은 개재물성 물질의 금속학적 특성과 용접부 성능에 미치는 영향에 대하여는 향후 좀 더 깊이 있는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 9는 Zn도금강의 용접부 단면을 나타낸 것으로 이 시험편의 용접조건은 레이저출력 1.2 kW 및 용접속도 17 mm/s였다. 또 겹치기 간극 20%를 부여하였기 때문에 용접부 건전도는 매우 양호하였으나 상부비드의 함몰을 피하는 것은 어려웠다. Fig. 9(b)는 용접금속에 도금물질인 Zn의 잔류여부를 확인하기 위한 용접금속의 상부 점선을 따라 분석 결과로서 용접금속 내부에는 Zn이 전혀 검출되지 않았다. 또 그림 (c)는 용접금속의 지지 중양부에 대한 성분분석 결과이며, 이곳에서도 도금



**Fig. 8.** Analytical results of position B in Fig. 8. a: SEM image, b: analysis of particle A, c: analysis of particle B, d: analysis of weld metal

물질은 발견되지 않는다. 이상의 실험에서 Zn 도금강의 겹치기 용접에서는 낮은 용점(420°C)과 기화점(907°C)을 나타내는 Zn이 용접초기에 이미 기화 및 제거되기 때문에 용접금속 내부에는 잔류되지 않는 것으로 생각되었다. 그러한 영향은 겹치기 접합계면에서도 그대로 나타났으며, 그 결과 용접부에 인접한 부분에서는 도금물질인 Zn이 전혀 발견되지 않았다. 사진의 왼쪽 화살표로 나타낸 접합 간극의 불규칙한 입자는 용접과정에서 소지금속인 철의 용융물이 묻쳐있는 것이다. 또, 이러한 도금층의 Zn



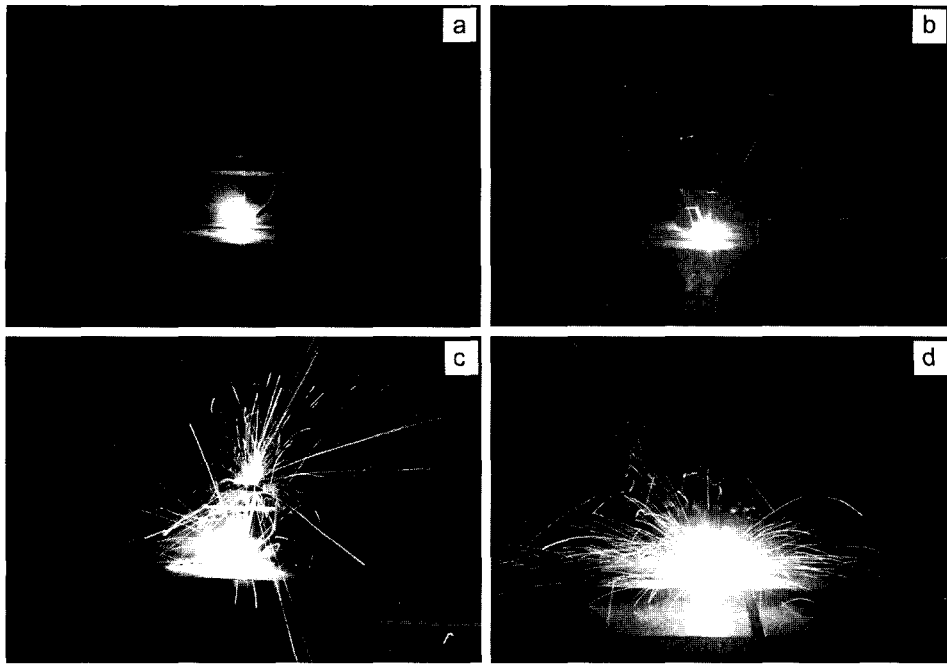
**Fig. 9.** Analytical results of Zn90 steel laser weld. a: SEM image, b: line analysis of weld metal, c: point analysis of weld metal

피막 손실은 용접 후 사용과정에서 내식성 저하를 초래한다는 것이 쉽게 예상된다.

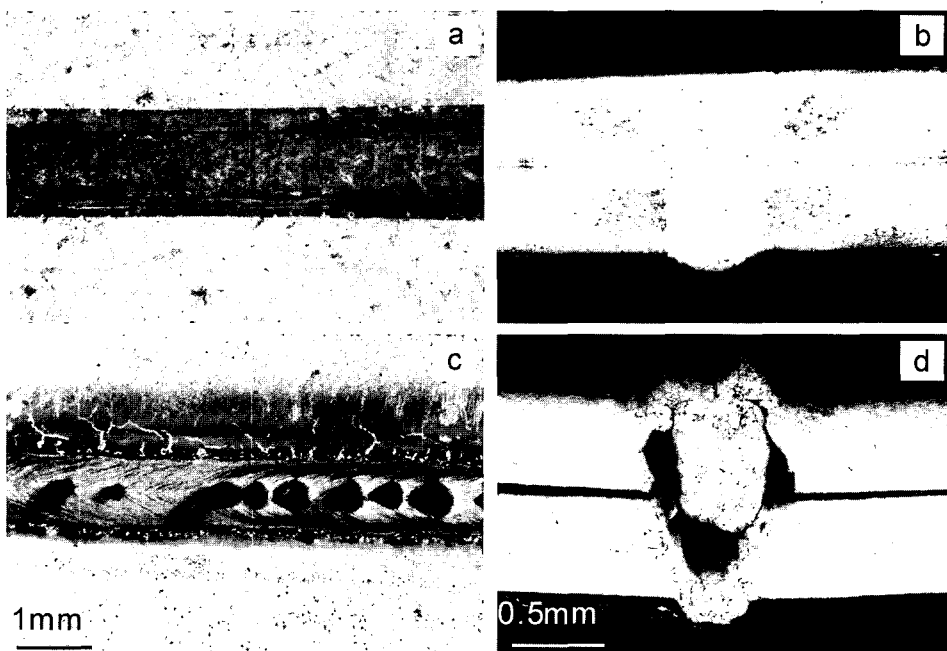
### 3.3. 용접결함에 관한 고찰

Zn 도금강의 레이저용접에서 겹치기 간극을 부여하지 않을 경우 도금피막의 격렬한 기화에 의하여 매우 심한 용접 스패터를 발생시켜 목표로 하는 용접품질을 얻기 어렵다. 그러나 Al 도금강의 레이저용접에서는 겹치기 간극이 없는 조건에서도 용접 중 스패터 발생이 거의 관찰되지 않았다. Fig. 10은 그러한 사실을 비교하여 보여주는 실험결과로서 모든 용접실험을 겹치기 간극이 없는 조건(G=0%)에서 실시한 것이다. 사진 (a) 및 (b)는 각각 A80강을 이용한 Nd:YAG 레이저 및 CO<sub>2</sub> 레이저 용접 모습이며, (c)와 (d)는 동일한 조건에서 Zn90강을 용접할 때 나타나는 현상으로 도금조건에 따라서 레이저 용접시 스패터 발생 정도에 큰 차이를 보이고 있다.

한편 Fig. 11과 Fig. 12는 용접품질을 비교하기 위하



**Fig. 10.** Spattering in the 2-sheet overlap welding of coated steels at full penetration conditions. a: A80 steel, Nd:YAG laser,  $P=1.2$  kW,  $V=17$  mm/s and  $F=0$  mm, b: A80 steel,  $CO_2$  laser,  $P=2.0$  kW,  $V=17$  mm/s and  $F=0$  mm, c: Zn90 steel, Nd:YAG laser,  $P=1.2$  kW,  $V=17$  mm/s and  $F=0$  mm, d: Zn90 steel,  $CO_2$  laser,  $P=2.0$  kW,  $V=17$  mm/s and  $F=0$  mm



**Fig. 11.** Weld quality of coated steels. Welding conditions are  $P=1.2$  kW,  $V=17$  mm/s,  $F=0$  mm and  $G=0$  mm, respectively. a: A80 steel, surface b: A80 steel, cross-section c: Zn90 steel, surface d: Zn90 steel cross-section

여 용접부의 표면과 단면을 동시에 보인 것이다. 즉, Fig. 11(a) 및 (b)는 A80강의 용접부 표면 및 단면 형상을 나타낸 것이며, 미려한 비드와 결함이 전혀 없는 용접부 단면품질을 볼 수 있다. 이러한 현상은 완전용입 용접조건이었던 레이저출력 1.2 kW 및 용접속도 17~20 mm/s 구간에서 동일하게 나타났으며, 그 구간에서는 용접속도에

따라 비드폭의 차이는 있으나 용접부 건전성의 차이는 발견되지 않았다. 그러나 Fig. 11(b) 및 (d)와 같이 Zn90강의 용접부에서는 겹치기 간극을 부여하지 않을 경우 비드표면에 대형 기공이 다수 형성되어 있었으며, 단면조사 결과에서도 부분적으로 흑모양 비드와 함께 또는 큰 기공들이 연속적으로 분포되어 있었다. 간극을 부여하고

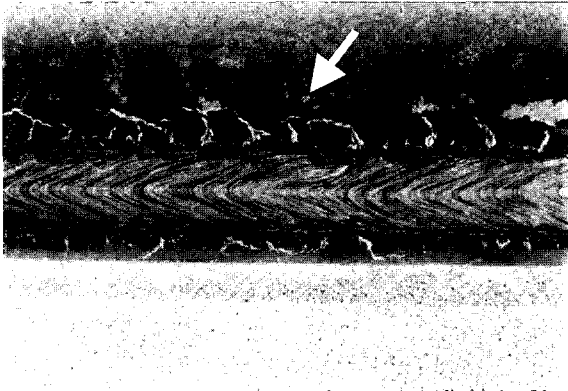


Fig. 12. Bead appearance of Zn90 steel laser weld. (P=1.2 kW, V=17 mm/s, F=0 mm, G=0.2 mm)

(G = 0.2 mm) 용접된 경우, 용접 비드의 표면 건전성은 Fig. 12에서 보인바와 같이 크게 향상되었으나 용접부 주변에 검은색 그늘음(화살표)이 넓게 덮여 있었다. 그러한 현상은 용접조건을 변화시킨 경우에도 비슷하여 Al 도금강 용접부의 비드 품질과 대조를 이루었다.

Fig. 13은 A40 시험재와 냉연강(CR) 용접부를 용접선 방향으로 절단한 것이다. 사진에서 알 수 있듯이 Al 도금강 레이저용접부 종단면 품질은 냉연강 수준으로 매우 양호하였다. 그러나 Fig. 14(a)에 제시한 것과 같이 Zn90 강의 레이저용접부 종단면은 간극을 부여하지 않을 경우 크고 많은 기공들이 존재하였으며, 심한 경우는 화살표 부분과 같이 상부 시험재가 완전히 비산하여 제거되어 있는 모습을 보기도 하였다. 겹치기 간극을 20%로 설정한 경우(사진 b) 절단 전의 외관에서는 양호한 용접부를 보였음에도 불구하고 단면을 절단하여 본 결과 접합계면 근처에 크고 작은 기공들이 많이 보였다. 이러한 결과로부터 차체용접 등 기밀성이 중요하지 않은 장소에 Zn 도금강을 적용할 때, 간극을 주면서 용접이 실시되면 외관이나 강도 보증이 가능함을 알 수 있었다. 그러나 기밀

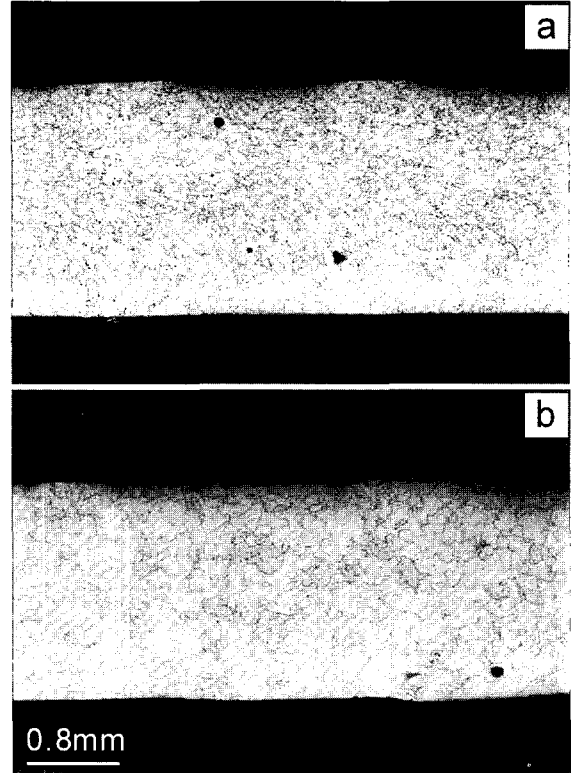


Fig. 13. Longitudinal sections of A40 steel (a) and CR steel (b) laser weld (P=1.5 kW, V=17 mm/s, F=-0.8 mm, G=0%)

성을 필요로 하는 부분에는 Zn 도금강의 레이저용접 적용이 적절하지 않았다.

#### 4. 결 론

1. Al 도금강의 레이저 겹치기용접에서 용접조건과 용입깊이 및 이면비드 크기는 비교적 예민한 관계가 있으나 이음부 접합폭은 거의 일정하여 용접부 강도만을 중요시하는 경우에는 약간의 이면비드 형성으로도 충분히

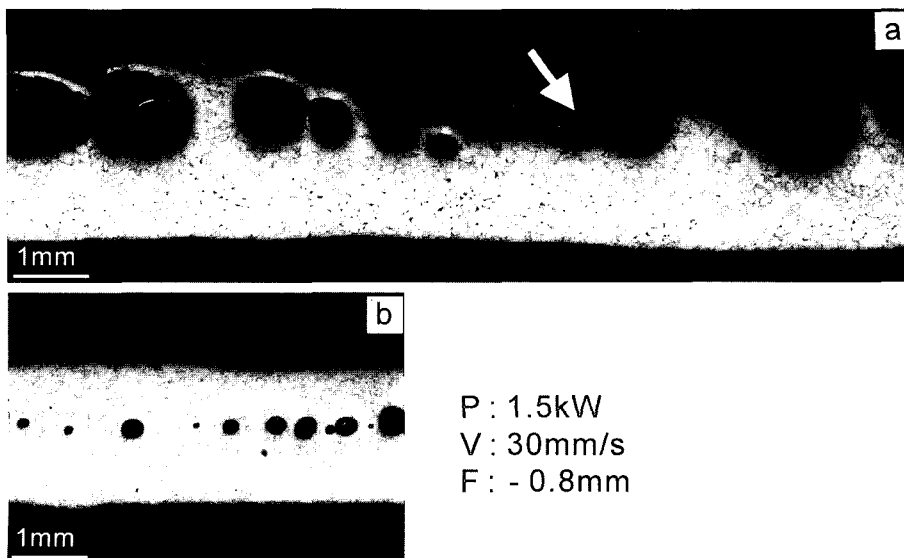


Fig. 14. Longitudinal sections of Zn90 steel laser weld. a: G = 0%, b: G = 20%

P : 1.5kW  
V : 30mm/s  
F : - 0.8mm

기계적 성능을 확보할 수 있을 것으로 사료되었다. 또 Al 도금량은 레이저용접성에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 Zn 도금강의 경우는 유사한 조건에서 소정의 겹치기 접합폭이 형성되었음에도 불구하고 많은 내부결함으로 인한 강도저하 등을 유발할 수 있으므로 Al 도금강 용접부와 동일한 방법으로 용접성을 판단하는 것은 곤란하였다.

2. Zn 도금강과 다르게 Al 도금강의 용접금속에서는 도금물질인 Al이 미량 검출되었으며 용접금속에는 주변과 다른 개재물 형태의 조직도 관찰되었는데 분석결과 그것은 국부적인 Al의 농화영역이었다.

3. Al 도금강의 겹치기용접 계면에는 도금물질의 기화로 인한 도금층 손실이 없을 뿐만 아니라 용접 중 밀려나온 것으로 생각되는 도금물질이 이 공간을 완전히 메우고 있어서 Zn 도금강 용접부에서와 같은 용접부 내식성 하락은 없을 것으로 판단되었다.

4. Zn 도금강의 레이저용접에서 겹치기 간극이 없을 때 격렬한 스펙터가 발생하여 용접품질을 크게 떨어뜨리지만 Al 도금강은 동일한 조건에서 냉연강 수준의 안정적인 용접이 가능하여 용접생산성을 향상시킬 것으로 나타났다. 또 Al 도금강은 용접부 표면 및 내부 건전성이 매우 높으므로 기계적특성과 기밀성이 동시에 요구되는 부분에 적용할 경우 우수한 성능을 나타낼 것으로 생각되었다.

## 참 고 문 헌

1. H. Takechi, ISIJ, **78**(3), 339 (1992).
2. A. Obe, Revival Series, **4**(6), 393 (1970).
3. W. Warnecke, J. Froeber and R. Bode, SAE Tech. Paper Series, 1999-01-0022, (1999).
4. L. M. Storojeva, Corrosion Prevention & Control, Oct., 119 (1997).
5. P. D. Clements, Doctoral dissertation, School of Eng., Univ. of Wales, Dec., 19 (1990).
6. Japanese Pat. No. 10-230363, (1988).
7. Japanese Pat. No. 7-157883, (1995).
8. Y. Izawa, A. Teramoto and S. Fukuda, Proc. Japan Welding Society, **61**, 242 (1997).
9. Japanese Pat. No. 6-158221, (1994).
10. Japanese Pat. No. 10-230363, (1998).
11. Japanese Pat. No. 7-157883, (1995).
12. Japanese Pat. 10-272582, (1998).
13. K. Kobylanska-Szkaradek, Welding Jour., Mar., 110s (1998).
14. Y. F. Tzeng, Welding Jour., Jul., 238s (1999).
15. I. S. Chang and B. S. Suh, Proc., High Density Energy Committee(HiDEC), Korean Welding Society, Dec., 9 (2000).
16. K. C. Kim, J. H. Cha and J. Y. Lee, Proc. Korean Welding Society, **40**, 99 (2003).