

아연도금 강판의 CO₂ 레이저-TIG 하이브리드 용접에 관한 연구

Part 1 : 용접현상분석

김철희* · 최응용** · 채현병*** · 김정한* · 이세현***

*한국생산기술연구원 정밀접합팀

**삼성전자 디지털미디어 총괄

***한양대학교 공과대학 기계공학부

A Study on CO₂ Laser-TIG Hybrid Welding of Zinc-Coated Steel Sheet

Part 1: Analysis of Welding Phenomena

Cheol-Hee Kim*, Woong-Yong Choi**, Hyun-Byung Chae***, Jeong-Han Kim* and Se-Hun Rhee***

*Advanced Joining Technology Team, KITECH, Incheon 406-130, Korea

**Digital Media Business, Samsung Electronics, Suwon 443-742, Korea

***School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract

In lap welding of zinc-coated steel, porosity formation is one of most significant weld defects, which is caused by zinc vapor generated between the steel sheets. Various solutions have been proposed in the past years but development of more effective method is a worthwhile subject to be investigated. In this study, autogenous laser welding and laser-TIG hybrid welding was applied to the lap welding of zinc-coated steel without gap, and weld pool behaviors were observed by using high speed camera and the porosity generation mechanism was analyzed. The weld defects were successfully eliminated by laser-TIG hybrid welding. This is because the leading TIG arc partially melted the upper sheet and vaporized/oxidized the coated zinc on the lapped surfaces prior to the trailing laser illuminating the specimen.

*Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received April 12, 2006)

Key Words : Laser-TIG hybrid welding, CO₂ laser, Zinc-coated steel, Porosity

1. 서 론

레이저 용접은 높은 에너지 밀도의 열을 이용하는 용접으로서, 좁고 깊은 용접부를 얻을 수 있고 소입열 용접이 가능하며, 고속 용접과 용접 공정의 유연성을 부여할 수 있다는 장점을 갖고 있다¹⁾. 자동차 산업에서는 생산성의 향상을 목적으로 레이저 용접의 장점을 이용하기 위하여 다양한 노력을 하고 있으며 최근 환경 문제로 자동차 경량화가 심각하게 제기되어 레이저 용접기술에 대한 관심이 더욱 고조되고 있다²⁾. 특히 기존 저항 점용접을 대체하여 자동차 차체용접에 레이저 용

접을 적용할 경우 고속 용접이 가능하고 전극마모 및 압흔으로 인한 문제가 없으며 용접설계의 유연화와 열 변형 최소화가 가능하다³⁾.

아연도금강판은 우수한 성형성 및 내부식성으로 인하여 자동차 차체에 많이 사용되고 있으나 간극이 없는 겹치기이음부(lap joint)에 레이저용접을 사용할 경우 용접부 품질에 심각한 문제를 발생시킨다 이것은 모재인 강의 용점(1530℃)보다 아연의 비등점(906℃)이 낮기 때문에 발생한다⁴⁾. 레이저가 조사되면 겹쳐진 면에서의 아연 도금층이 기화하면서 부피가 팽창하고 그 압력으로 인해 상대적으로 약한 용융풀을 통해 아연증기가 외부로 분출하게 된다 이때 용접부에서는 다량의

스패터가 발생하면서 표면에 블로우홀(blow-hole)이 발생하게 되며, 용융풀 내에 아연 증기가 잔류하거나 대기가 유입하여 기공(porosity)을 형성하기도 한다. 이렇게 발생한 블로우홀과 기공은 용접부의 기계적 성질에 치명적인 영향을 미치는 용접불량이므로 반드시 발생을 방지하여야 한다.

아연도금강판의 겹치기 이음부를 레이저 용접할 때 발생하는 결함을 방지하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔지만, 생산적용에 적합한 방법은 여전히 개발이 미비한 실정이다. 대표적인 방법으로 모재가 겹쳐진 면에 간극을 주어 아연증기의 통로를 확보하는 방법 기계적 또는 화학적인 방법을 이용하여 용접부의 도금층을 제거한 후 용접하는 방법, 펄스 레이저를 이용하여 기공의 형성을 변화시키는 방법 두 개의 레이저빔을 이용하여 도금층을 제거하면서 용접하는 방법 등이 있다⁵⁻⁹⁾. 기존의 방법 중에서 간극을 조성하는 방법이 생산현장에서 많이 쓰이고 있으나 간극의 제어가 쉽지 않으며 다른 방법들은 생산성의 문제로 많이 사용되고 있지는 않다¹⁰⁾.

레이저-아크 하이브리드 용접공정은 레이저 용접전원과 아크 용접전원을 동시에 적용하여 하나의 용접부를 형성하는 공정으로 레이저용접의 장점과 아크용접의 장점을 동시에 가지고 있는 용접방법이다. 이때 레이저와 아크간의 배치를 통하여 용접부에 대한 예열 및 후열처리가 가능한 특징을 가지고 있다¹⁻¹³⁾. 아연도금강판의 겹치기이음부의 경우 용가재의 투입이 필요하지 않기 때문에 H. Gu와 R. Miller는 TIG를 이용한 레이저-아크 하이브리드 용접을 적용하여 적용성을 검토하였으며, 정성적인 가설을 통하여 용접현상을 설명하였다¹⁴⁾.

본 연구에서는 TIG아크를 레이저에 선행시켜 아연도금층을 제거하고 용접성을 개선하고자 아연도금강판의 겹치기 이음부에 레이저-TIG하이브리드 용접공정을 적용하였다. 레이저단독용접 및 TIG단독용접, 레이저-TIG하이브리드 용접을 수행하면서 용접현상 및 용접비드 현상을 관찰하였으며, 레이저 단독용접에서 불량 발생 원인과 레이저-TIG 하이브리드용접에서 용접결함이 방지되는 메커니즘을 검토하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 강판은 KS D 3506에서 규정된 SGCD1 아연도금강판으로 조성은 Table 1과 같다. 전면과 후면 모두 54g/m²으로 아연이 도금되어 있으

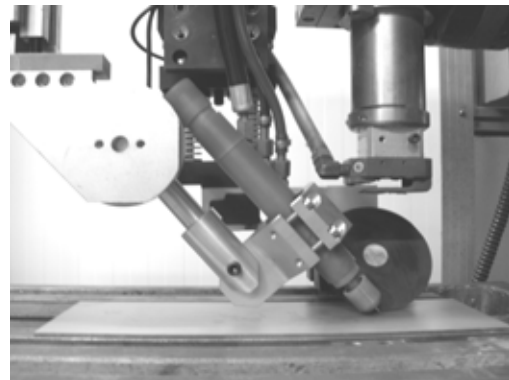
Table 1 Properties of SGCD1 steel used

Mechanical property				
YP(MPa)	TS(MPa)		EL(%)	
147	292		48	
Chemical composition (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.0028	0.009	0.129	0.0079	0.0097

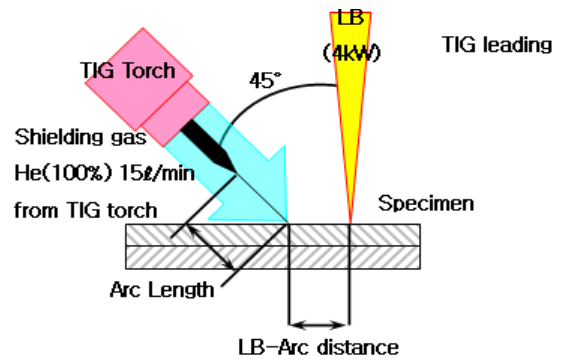
며, 시편의 폭, 길이, 두께는 각각 100mm, 300mm, 1mm이다.

실험에서는 최대 출력 12kW의 CO₂ 레이저를 사용하였으며, 초점거리와 초점에서의 빔의 지름은 각각 250mm 와 0.4mm이다.

TIG용접을 위하여 300A급 인버터 용접기와 1.6mm 직경의 텅스텐 전극봉을 이용하였다. Fig. 1은 하이브리드 용접을 위한 헤드 및 레이저와 아크의 배치를 나타낸다. 레이저빔은 모재 표면에 초점을 맞추어 수직으로 조사되고, TIG 토치는 모재에 45° 기울어져 설치되었다. 플라즈마 역제를 위하여 순수 헬륨을 보호가스로 사용하였으며, TIG 토치의 노즐을 통하여 15 l/min으로 공급하였다. 시편은 레이저 헤드의 한쪽에 설치되는 물리방식의 고정장치를 이용하여 간극없이 밀착시켜주



(a) Photo of laser-TIG hybrid head



(b) Schematic diagram

Fig. 1 Experimental setup for hybrid welding

었다. 실험에서 레이저의 출력과 용접속도는 4kW와 3.0m/min으로 각각 고정시켰다.

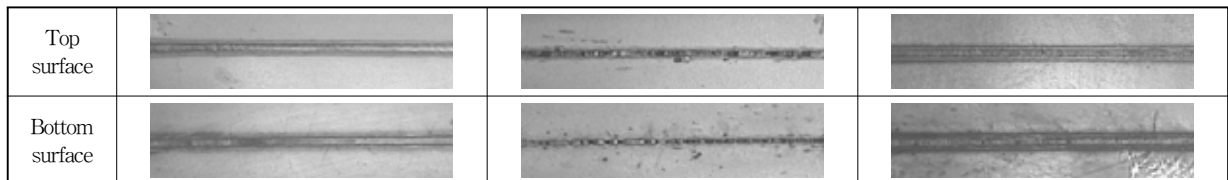
3. 실험 결과 및 분석

3.1 용접현상

아연도금강판의 겹치기 이음부를 레이저 용접할 때 발생하는 결함과 그 원인을 확인하고자 아연도금강판과 도금이 되어 있지 않은 강판을 각각 4kW의 출력으로 시편의 표면에 초점을 두고 3.0m/min의 용접속도로 레이저 용접을 실시하였다.

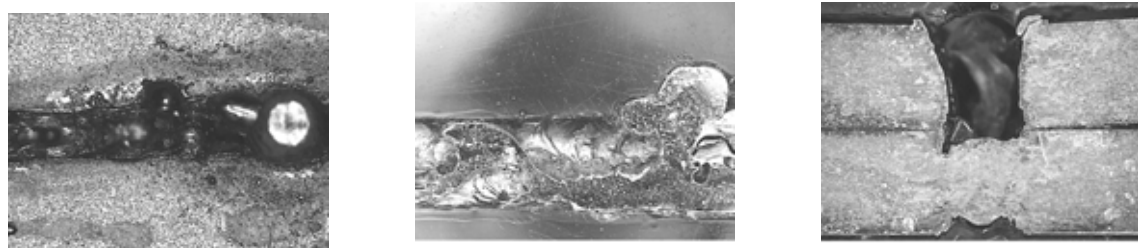
Fig. 2는 (a) 아연도금강판을 겹치지 않고 한 장의 강판에 수행한 비드용접(bead welding), (b) 아연도금강판의 간극이 없는 겹치기 이음의 용접, (c) 무도금강판의 간극이 없는 겹치기 이음의 용접에 대한 용접부의 상면(top surface)과 이면(bottom surface)의 모습을 각각 보이고 있다. 아연도금강판의 겹치기 이음의 경우에는 용접 중에 다량의 스페터가 발생하면서 상면과 이면 모두에서 많은 수의 블로우홀이 생성되어 심각한 용접결함을 보이고 있다. 반면 무도금 강판의 겹치기 이음과 아연도금강판의 비드용접의 경우 상면과 이면 모두 결함이 없는 건전한 용접부를 보이고 있다 따라서 간극이 없는 겹치기 이음의 아연도금강판을 레이저 단독으로 용접할 때 발생하는 결함은 경계면에 존재하는 아연도금층이 그 원인임을 알 수 있다

Fig. 3은 아연도금강판의 간극이 없는 겹치기 이음의



(a) Bead welding, zinc-coated steel (b) Lap welding, zinc-coated steel (c) Lap welding, non-coated steel

Fig. 2 Bead surfaces for autogenous laser welding of zinc-coated and non-coated steel sheets



(a) Top surface (b) Longitudinal cross section (c) Transverse cross section

Fig. 3 Weld defects for autogenous laser lap welding of zinc-coated steel

용접결과로 얻어진 용접부의 상부 표면 종방향 단면(longitudinal cross-section), 횡방향 단면(transverse cross-section)을 보이고 있다. 용접부의 전구간에서 비드 연속성을 저해하는 결함이 발견되고 있으며 그 대표적인 결함은 블로우홀과 기공임을 알 수 있다 이와 같은 불량이나 나타나는 원인을 M. Ono *et al.*은 강의 용접보다 아연의 비등점이 낮기 때문에 레이저 조사에 의해 상판이 용융됨과 동시에 경계면의 아연이 기화되고, 압력이 증가하여 상대적으로 압력이 약한 용융풀을 뚫고 대기 중으로 폭발하기 때문으로 설명하였다⁹⁾.

이를 확인하기 위하여 레이저 단독용접을 수행하면서 고속촬영을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 수 ms동안에 용융풀 내부에서 아연증기의 압력상승에 의해 용융풀의 형상이 급격히 변화하면서 스페터와 함께

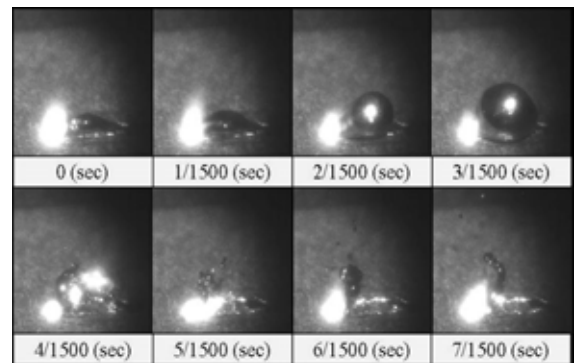


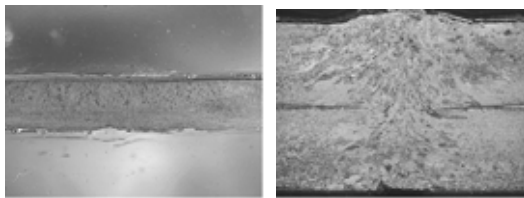
Fig. 4 High speed images for autogenous laser lap welding of zinc-coated steel sheets

분출하는 모습을 잘 보여주고 있으며 앞서의 결함발생 원인을 시각적으로 보여주고 있다

본 연구에서는 갭이 없는 겹치기 용접에서 결함을 없애기 위하여 CO₂ 레이저-TIG 하이브리드 용접을 수행하였다. TIG 아크가 선행하는 레이저-TIG 하이브리드 용접을 수행한 용접부 단면의 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 용접구간 전체에 걸쳐 기공이 발견되지 않는 양호한 용접부를 형성하였으며 횡방향 단면 형상에서 TIG 아크로 인한 입열로 상판의 윗면이 이루어지고 레이저가 키홀모드로 열을 전달하여 비드를 형성함을 확인하였다. Fig. 6의 고속촬영결과에서도 용융풀의 폭발없이 안정적인 용융풀 및 키홀의 유지가 이루어짐을 알 수 있다.

3.2 겹치기 이음 계면의 분석

Fig. 7은 Fig. 5와 같은 TIG용접조건에서 TIG 단독용접을 수행한 결과이다 입열이 부족하여 상판의 윗면에서만 용융이 일어나 부분용입형태를 보이고 있으나 상판의 이면에서는 아연층이 산화됨을 확인하였다 Fig. 8은 상판의 이면을 확대한 사진으로 모재부와 열



(a) Longitudinal cross section (b) Transverse cross section

Fig. 5 Cross-sectional bead shapes for CO₂ Laser-TIG hybrid weld (100A arc current; 1mm electrode height; 7mm LB-electrode distance; TIG leading)

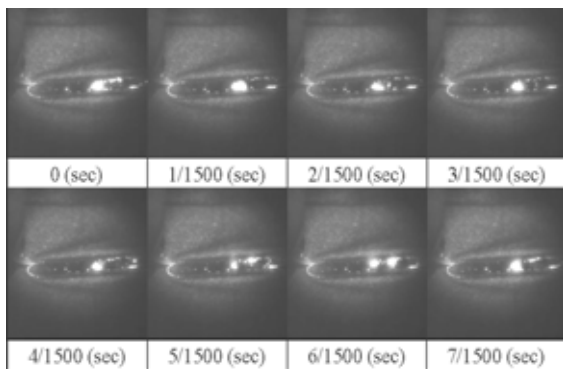


Fig. 6 High speed images for CO₂ Laser-TIG hybrid lap welding of zinc-coated steel sheets

영향으로 산화된 부분이 나누어짐을 알 수 있다 Fig. 9은 상판의 아랫면에서 용접선에 수직인 방향으로 성분 분석을 수행한 결과로 모재부와 달리 용접열의 영향을 받은 이면에서는 일부의 아연이 제거됨을 확인할 수 있다

따라서 아연도금 강판에 레이저-TIG 하이브리드 용접을 적용하였을 때 기공 등의 불량에 방지되는 원인은 2가지로 사료된다. 첫째, 2개의 레이저를 이용한 방법과 같이 선행하는 아크에 의하여 경계면의 아연이 증기

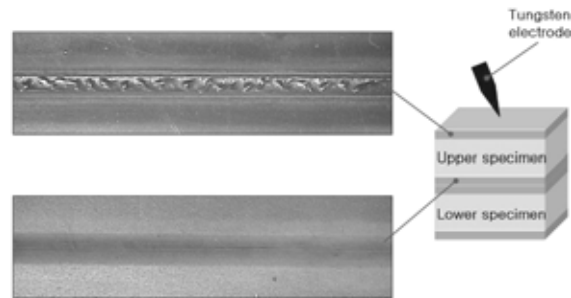


Fig. 7 Bead shapes for autogenous TIG welding

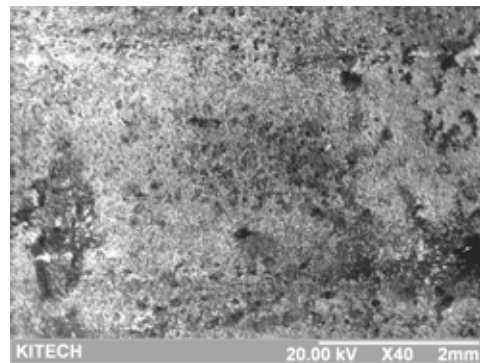


Fig. 8 SEM image for bottom surface of the upper sheet

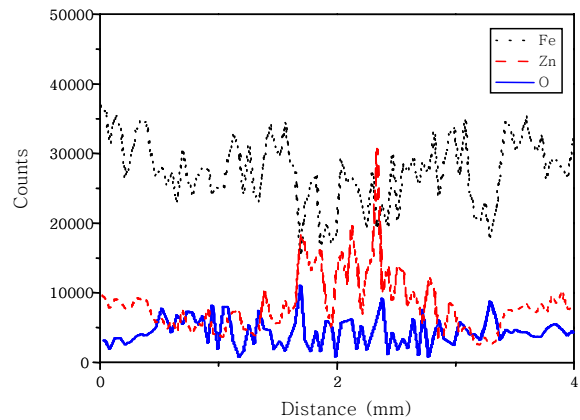


Fig. 9 EDS results on back bead surface of upper sheet

화되고 후행의 레이저가 도달하기 전 경계의 틈새로 배출되므로 아연증기의 폭발로 인한 불량 발생이 감소된다. 둘째, 선행아크에 의해 아연이 용점(419.5°C)이상으로 가열되어 산화가 급격히 일어나고 산화 아연(ZnO)은 용점이 1975°C로 철의 용점보다 높기 때문에⁴⁾ 후행 레이저 용접시 아연증기 발생을 감소시키는 역할을 한다.

4. 결 론

아연도금 강판의 겹치기 용접부에 레이저-TIG하이브리드 용접을 적용하였을 때 발생하는 용접현상을 분석하기 위한 본 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 아연도금 강판의 겹치기 용접부에 레이저 단독용접을 적용시 철의 용점보다 낮은 비등점을 갖는 아연이 기화되어 용융풀을 뚫고 폭발하면서 용접불량이 발생함을 고속촬영을 통하여 확인하였다

(2) 아연도금강판의 겹치기 용접부에 TIG선행의 레이저-TIG하이브리드 용접을 적용하여 간극 조성없이 기존의 블로우홀과 기공이 제거된 건전한 용접부를 얻을 수 있음을 확인하였다

(3) 선행 아크에 의한 입열로 인하여 후행 레이저 도달 전 아연의 증기화 및 산화가 발생하는 것이 불량 제거의 원인으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회편: 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, 608 (in Korean)
2. Y.-K. Oh and H. Park: Application of Welding Technology to Automotive Industry, Journal of KWS, **20-5** (2002), 583-587 (in Korean)
3. H. Zefferer and T. Morris: Guidelines for Laser Welding of Sheet Metal, Welding Journal, **84-8** (2005), 23s-28s

4. G. S. Brady and H. R. Clauser: Materials Handbook (12th Edition), McGraw-Hill Book Co., 1989
5. R. Akhter, W. M. Steen and D. Cruciani: Laser Welding of Zinc Coated Steel, Lasers in Manufacturing (LIM), 1988, 195-206
6. M. Ono, S. Kaizu, M. Ohmura, M. Kabasawa and K. Mori: Laser Welding of Zinc Coated Steel, Quarterly Journal of Japan Welding Society, **15-3** (1997), 438-444 (in Japanese)
7. Y-F. Tzeng: Pulsed Nd:YAG Laser Seam Welding of Zinc-Coated Steel, Welding Journal, **78-7** (1999), 238s-244s
8. M.M.S. Gualini: Experimental Result of Laser Welding of Zinc Coated Steel Sheets with a New Method, International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics(ICALEO), LMP Section A, 2003, 274-284
9. M. G. Forrest and F. Lu: Advanced Dual Beam Welding of Zinc-Coated Steel Sheets in Lap Joint Configuration with Zero Gap at the Interface, International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics(ICALEO), Laser Welding & Brazing Section, 2004, 112-119
10. M.M.S. Gualini: Laser Welding of Zinc Coated Steel Sheets, an Old Problem with a Possible Solution, International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics(ICALEO), Section C, 2001, Paper No. P511
11. W. M. Steen, M. Eboo and J. Clarke: Arc Augmented Laser Welding, Advances in Welding Processes Proceedings, 4th International Conference, Harrogate, U. K., May 9-11, 1978
12. N. Abe and H. Hayashi: Trends in Laser Arc Combination Welding Methods, Welding International, **16-2** (2002), 94-98
13. C. Bagger and F. O. Olsen : Review of Laser Hybrid Welding, Journal of Laser Applications, **17-1** (2005), 2-14
14. H. Gu and R. Miller : Hybrid Welding of Galvanized Steel Sheet, International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics(ICALEO), Section A, 2001, Paper No. 304