

아연도금 강판의 CO₂ 레이저-TIG 하이브리드 용접에 관한 연구 Part 2 : 공정변수와 용접성과의 관계

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 2 : Relationship between Welding Parameters and Weldability

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

Optimization of process parameters for laser-arc hybrid welding process is intrinsically sophisticated because the process has three kinds of parameters - arc, laser and hybrid welding parameters. In this paper, the relationship between weldability and several process parameters such as laser beam-arc distance, electrode height, welding current and welding speed, were investigated by the full factorial experimental design. Weld quality was evaluated by using weight of spatters which is related with the pore area. It was found that the weld quality was increased with the increases in laser beam-arc distance and welding current, and decreased with the increases in electrode height and welding speed.

*Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received April 12, 2006)

Key Words : Laser-TIG hybrid welding, CO₂ laser, Zinc-coated steel, Welding parameter, Weldability

1. 서 론

아연도금강판의 겹치기이음에 레이저 용접을 적용할 때 발생하는 결함을 방지하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔지만, 생산적용에 적합한 방법은 여전히 개발이 미비한 실정이다. 레이저-아크 하이브리드 용접은 레이저와 아크를 조합하므로 각각의 열원을 조합하는 방식에 따라 적용성이 광범위하여 차체의 조립공정에 탄력적으로 적용될 수 있으며, 아연도금강판을 이용한 다른 용접공정에도 적용이 확대되고 있다^{1,2)}. 아연도금강판의 겹치기이음부에 레이저용접시 발생하는 기공문제를 해결하기 위하여 레이저-TIG하이브리드 용접의 적용이

검토된 바 있으며³⁾, 본 논문의 Part 1에서는 레이저-TIG하이브리드 용접공정에서의 용접현상에 대하여 분석하였다⁴⁾. 그러나 레이저-아크 하이브리드 용접공정의 특성상 레이저, 아크 및 하이브리드 공정변수가 각각 존재하므로 공정변수의 수가 많아 공정을 최적화하기가 쉽지 않다. 특히 아연도금 강판의 레이저-TIG하이브리드 용접에서 공정변수가 용접성에 미치는 영향에 대한 선행 연구들이 부족한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 레이저-TIG 하이브리드 용접에서 레이저와 아크의 간격, 전극의 높이, 용접전류 및 용접속도 등의 공정변수가 용접품질에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험에서 사용한 시편 및 용접시스템은 본 논문의 Part 1과 동일하며, 실험에서 고정된 용접 변수는 Table 1에 나타내었다.

레이저 출력을 고정시킨 상태에서 용접전류, 용접속도와 함께 레이저와 아크 간의 배치와 관련된 전극높이, 레이저-전극간 거리를 변화하면서 공정변수와 용접성과의 관계를 평가하였다. 이때, TIG가 레이저에 선행하는 아크 선행방식의 레이저-TIG 하이브리드용접을 적용하였다.

용접성의 평가는 스패터의 발생량이 적을수록 결함이 없는 용접이라 가정하고, 용접 전후의 모재 질량을 측정하여 질량손실이 적을수록 스패터의 발생량이 적어 용접성이 우수한 것으로 판단하였다.

Fig. 1은 질량손실이 각각 다른 시편에 대해 방사선 투과 검사를 실시한 결과이다. 용접 비드가 투영된 면적과 결함영역이 투영된 면적의 비를 계산하였고, 질량 손실과의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 이를 통해 용접 전후의 질량손실을 이용하여 계산한 스패터의 양과 용접부의 결함 발생 비율은 대체적으로 비례관계에 있음을 확인할 수 있다.

Table 1 Welding conditions used in experiments

Specimen	SGCD1 (300mm×100mm×1mm)
Laser power	4kW
Shielding gas	He 100%(15 l/min)
Electrode diameter	1.6 mm
Torch angle	45 deg.
Joint	Lap joint

Case No.	RT results	Spatter weight(g)
1		0.1
2		0.4
3		0.8
4		1.4

Fig. 1 Radiation test results for various spatter weights

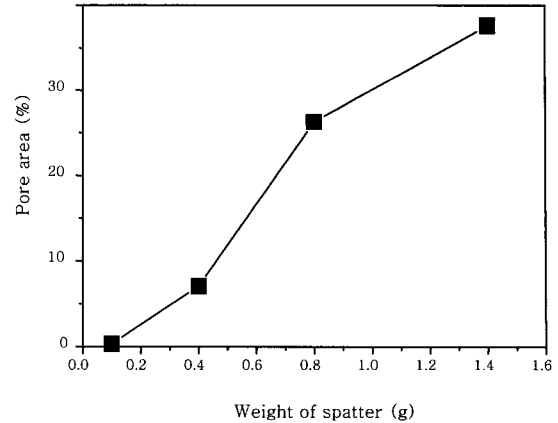


Fig. 2 Relationship between weight of spatter and pore area

3. 실험 결과

3.1 용접전류, 전극높이와 레이저-전극간 거리가 용접성에 미치는 영향

먼저 용접속도를 3.0m/min으로 고정시키고 용접전류, 전극의 높이, 레이저-전극간 거리에 따른 공정변수의 영향을 평가하기 위하여 Table 2와 같이 용접전류를 2수준으로, 나머지 2개의 변수는 3수준으로 설정하고 모든 수준의 조합에 대하여 각 1회씩 18회의 실험을 수행하였다.

측정된 스패터의 양을 미니탭(Minitab)을 이용하여 평가하여 Table 3과 같이 주요인과 교호작용에 대한 분산분석을 수행하였다⁵⁾. 분산분석에서 P값이 유의수준(α)보다 작은 경우 그 인자의 효과는 유의 수준, α 에 유의하다. 즉 인자의 수준에 따라 결과값은 차이가 있다. 각 인자들의 주효과는 모두 P값이 0.05 이하의 값을 가지므로 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하다. 그러나 요인간 교호작용(A*B, B*C, C*A)의 경우는 모두 P값이 0.05 이상으로 유의하지 않음을 알 수 있다. 각 인자의 수준에 따른 스패터 발생량은 Fig. 3에 나타내었다. 실험에서 선정한 인자수준에서는 용접전류와 레이저-전극간 거리가 커질수록, 전극높이는 낮을수록 스패

Table 2 Control factors and their levels for the full factorial design with fixed travel speed, 3.0 m/min

Factor	Level		
	1	2	3
A. Arc current (A)	80	120	
B. LB electrode distance (mm)	5	7	9
C. Electrode height (mm)	0.4	1.0	2.0

Table 3 ANOVA results for the full factorial experiments with Table2

Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean Square	F0	P
A	1	0.8889	0.8889	10.00	0.034
B	2	1.6533	0.8267	9.30	0.031
C	2	3.5733	1.7867	20.10	0.008
A*B	2	0.1244	0.0622	0.70	0.549
B*C	4	1.8133	0.4533	5.10	0.072
C*A	2	0.5511	0.2756	3.10	0.154
Error	4	0.3556	0.0889		
Total	17	8.96			

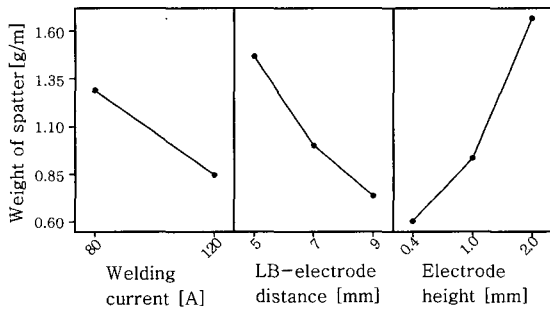


Fig. 3 Main effects of control parameters on weight of spatter at fixed travel speed, 3.0m/min

터 발생량은 감소하는 경향을 보인다.

본 논문의 Part 1에서는 아연도금강판의 겹치기 용접부에 레이저-TIG 하이브리드 용접을 적용한 경우 선행 아크로 인한 입열로 인하여 후행 레이저 도달 전 경계면의 아연이 기화 및 산화됨을 불량 감소의 원인으로 제기하였다⁴⁾. 따라서 용접전류가 커지면 아크에 의한 입열이 증가하게 되므로 아연층이 보다 넓게 제거될 수 있고, 레이저-전극간 거리가 커지면 선행아크에 의해 기화된 아연증기의 배출 및 산화에 필요한 시간을 충분히 확보할 수 있기 때문에 스파터 발생이 감소하는 것으로 판단된다. 반면, 전극높이가 높아지면 아크가 불안정해지고 입열밀도가 감소하여 아연도금층이 충분히 제거되지 못하므로 결함 방지를 위해서는 전극높이가 낮을수록 유리하다. 그러나 실험에서 전극높이가 낮은 경우 텅스텐 전극봉의 손상이 자주 발견되었으며, 전극봉이 손상되는 경우 교체에 따른 시간 손실이 발생하므로 전극봉의 손상을 고려한 전극높이 선정이 필요하다.

3.2 전극높이와 전극의 손상

정극성의 TIG용접에서는 입열을 집중하여 공정의 안정성을 높이기 위하여 일정한 각도로 팁을 연마하여 사용한다^{6,7)}. 정전류 용접 전원에서 팁의 높이와 용접전압값은 비례하는 관계를 가지므로 본 연구에서는 용접

전압값을 측정하여 팁손상 판단의 기준으로 이용하였다.

Fig. 4는 각 전극 높이에서 용접회수에 따른 용접전압 파형 측정 결과이며, Fig. 5는 전극의 손상형상이다. 전극높이가 0.4 mm 일 때 첫 번째 용접실험 중 용접전압의 급격한 증가가 나타난 후 이 후 이 실험에서는 일정한 전압이 유지되었다. 전극봉 또한 첫 번째 실험이후 손상됨을 확인할 수 있다. 전극 높이가 1.0mm인 경우에는 2번째 용접실험에서 같은 현상이 발견되었으며, 전극 높이가 2.0mm 인 경우에는 10번의 실험에서는 이러한 현상이 발견되지 않았다. Fig. 5의 전극봉의 손상도 같은 경향을 보여주었다.

3.3 용접전류, 레이저-전극간 거리, 용접속도의 영향

전극봉 손상에 따른 전극봉 교체주기를 최소화하기 위해 전극높이는 2mm로 선정하고, 용접전류, 레이저-전극간 거리, 용접속도가 스파터 발생량에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. Table 4와 같이 세 인자들을 3 수준으로 선정하고 조합이 이루어진 27개의 조건에 대해 각각 3번씩 용접을 수행하였으며, 분산분석 결과를 Table 5에 나타내었다.

각 인자의 주효과에 있어서 A와 C의 경우 P값이 0.05 이하이므로 용접전류와 용접속도의 주효과는 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의함을 알 수 있다. 레이저-전극간 거리(B)의 주효과와 요인간 교호작용(A*B, B*C, C*A) 모두 P값이 0.05이상으로 유의하지 않지만 레이저-전극간 거리의 주효과에 의한 P값은 교호작용들에 의한 값보다는 상당히 작다. 따라서 교호작용의 영향은 무시하고 주효과가 스파터 발생량에 미치는 영향만을 확인하고자 Fig. 6에 수준별 평균값을 나타내었다. 비록 레이저-전극간 거리의 주효과는 유의수준을 벗어나고 있지만, 주효과의 분석 결과 공정변수의 수준에 따른 경향성을 나타냄을 확인할 수 있다

Fig. 3과 마찬가지로 용접전류와 레이저-전극간 거리가 클수록 스파터 발생량은 적어졌으며, 용접속도의 경우 속도가 빠를수록 스파터 발생량은 많아짐을 보였다. 용접속도가 증가하면 단위길이당 아크입열이 감소하여 아연층이 충분히 제거되지 못하고, 또한 아연증기배출 및 산화에 필요한 시간의 확보가 어려워지므로 스파터 발생이 증가하는 원인이 된다.

4. 결 론

아연도금 강판의 겹치기 용접부에 레이저-TIG하이브리드 용접을 적용하였을 때 공정변수에 따른 용접성을

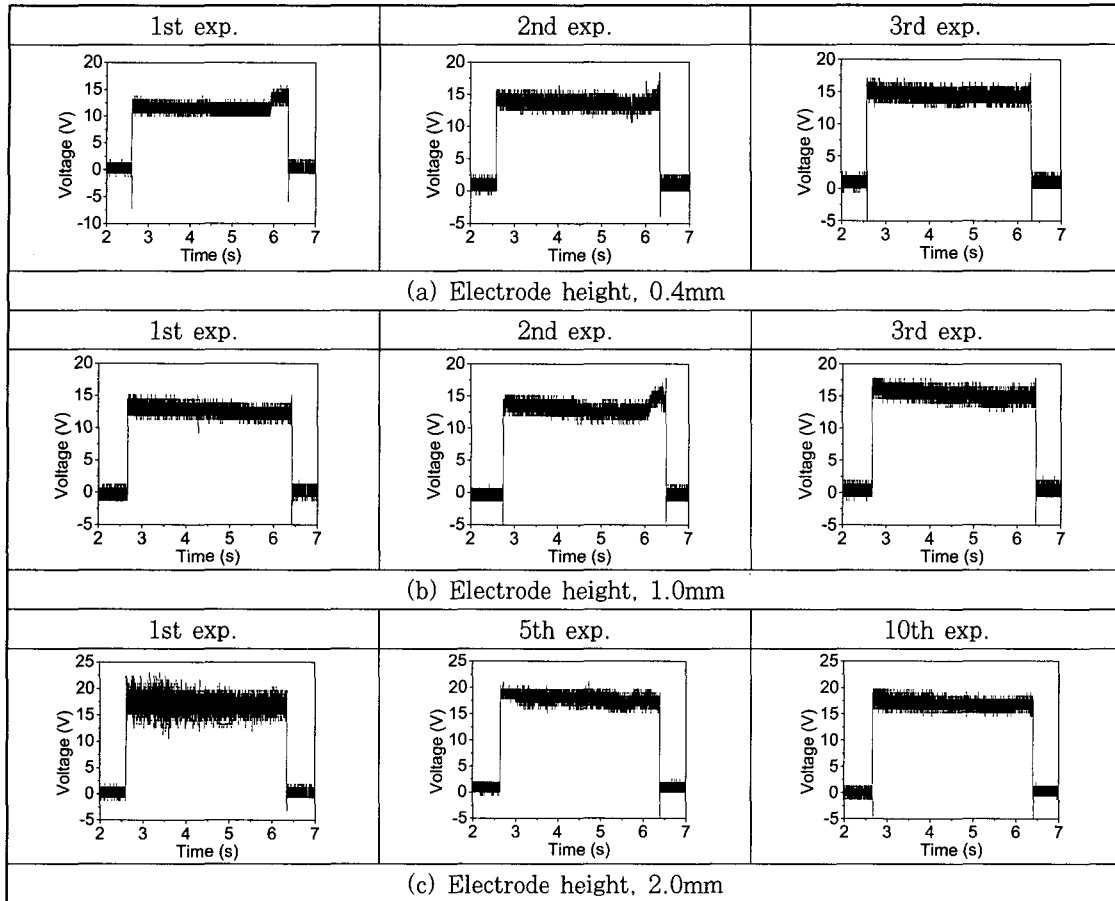
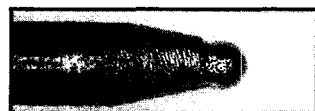


Fig. 4 Variation of welding voltage waveforms for each electrode height (100A arc current; 5mm LB electrode distance; 3m/min travel speed)



(a) 0.4mm (after 1st experiment)



(b) 1.0 mm (after 2nd experiment)



(c) 2.0 mm (after 10th experiments)

Fig. 5 Deterioration of electrode tip for various electrode heights after experiments

평가하고자 하는 본 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다

(1) 주된 용접결함인 기공발생량은 용접전후의 시편의 질량차를 이용하여 계산한 스패터 발생량과 비례관계에 있으므로 스패터 발생량을 측정하여 용접결함의 발생정도를 평가하는 것이 가능하였다.

Table 4 Control factors and their levels for the full factorial design with fixed electrode height, 2mm

Factor	Level		
	1	2	3
A. Arc current (A)	80	100	120
B. LB electrode distance (mm)	5	7	9
C. Travel speed (m/min)	2.5	3.0	3.5

Table 5 ANOVA results for the full factorial experiments with Table 4

Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F0	P
A	2	0.3499	0.1749	17.88	0.001
B	2	0.0402	0.0201	2.06	0.190
C	2	0.1252	0.0626	6.40	0.022
A*B	4	0.0084	0.0021	0.21	0.923
B*C	4	0.0235	0.0059	0.60	0.674
C*A	4	0.0531	0.0133	1.36	0.33
Error	8	0.0783	0.0098		
Total	26	0.6785			

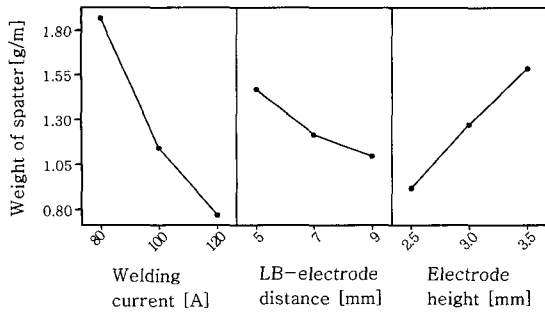


Fig. 6 Main effects of control parameters on weight of spatter fixed electrode height, 2mm

(2) 용접속도를 3.0m/s로 고정하고, 용접전류, 전극 높이와 레이저-전극간 거리에 따른 용접성을 평가한 결과 각 인자들의 주효과가 유의하였으며, 용접전류와 레이저-전극간의 거리가 클수록 그리고 전극높이가 낮을수록 용접성이 우수하였다.

(3) 전극의 높이가 낮을수록 용접성이 우수하나 용접 팁의 손상을 방지하기 위하여 2.0mm이상의 전극 높이의 유지가 필요하다.

(4) 전극 높이를 2.0mm로 고정하고, 용접전류, 용접속도, 레이저-전극간 거리에 따른 용접성 평가 결과 용접전류와 레이저-전극간 거리에 대한 주효과가 통계적으로 유의하였다. 용접성만을 기준으로 판단할 때 용접속도가 낮은 경우 용접성이 우수하였다.

참고 문헌

1. Y.-C Kim, J.-D. Kim and H. Stauffer: Laser Hybrid Welding and Laser Brazing - State of the Art and Applications in Audi A8 and VW-Phaeton, Journal of KWS, 22-4 (2004), 111-116 (in Korean)
2. H. Haferkamp, A. Ostendorf, J. Bunte, J. Szinyur, M. Hoefemann and P. Cordini: Increased Seam Quality for Laser-GMA Hybrid Welding of Zinc-Coated Steel, International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics(ICALEO), Section A, 2002
3. 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
4. C.-H. Kim, W.-Y. Choi, H.-B. Chae, J.-H. Kim and S. Rhee: A Study on CO₂ Laser -TIG Hybrid Welding of Zinc-coated Steel Sheet, Part 1: Analysis of Welding Phenomena, Journal of KWS, 24-4 (2006), 306-310 (in Korean)
5. 이상복: 예제 중심의 실험계획법, 이레테크, 2005 (in Korean)
6. 대한용접학회편: 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, 537-543 (in Korean)
7. American Welding Society: Welding Handbook - Volume 2 Welding Processes(8th Edition), American Welding Society, 1992, 81-82