

Al 5J32 합금의 레이저 용접에서 레이저출력 모듈레이션을 이용한 이면 험핑 비드의 안정화

안도창*·김철희**·†·김재도***

*LG화학 중대형전지 활성화생산파트

**한국생산기술연구원 용접·접합연구그룹

***인하대학교 기계공학부

Prevention of Back Side Humping in Laser Welding of Al 5J32 Alloy by Using Laser Power Modulation

Do-Chang Ahn*, Cheolhee Kim**·† and Jaedo Kim***

*Advanced Automotive Battery Business, LG Chem, Ochang 363-911, Korea

**Welding & Joining Research Group, KITECH, Incheon 406-840, Korea

***Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

†Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received July 4, 2011 ; Revised August 16, 2011 ; Accepted August 22, 2011)

Abstract

In the 5xxx series Al-Mg alloy, magnesium addition can increase the strength of aluminum alloy by solid solution strengthening but it has a relatively low melting and boiling temperature. During full-penetration laser welding of the Al-Mg alloys, its low boiling point and high vapor pressure brings about the spiky humping bead on the bottom side. Under back-side shielding, the spiking of back bead can be reduced but it restrains the process flexibility. In this study, a square pulse waveform modulation was employed to stabilize keyhole and back bead surface without back-side shielding. By using an experimental design, the bead shapes were evaluated for various process parameters such as the focal position, welding velocity and waveform parameters and the smooth back bead shape could be achieved.

Key Words : Laser overlap welding, Al-Mg alloy, Laser power modulation, Back side spiking

1. 서 론

5000계열 알루미늄 합금은 Al-Mg계 비열처리 알루미늄 합금으로 Mg첨가에 따라 인장강도가 향상되고 용접균열이 제어되어 용접성이 비교적 우수하다¹⁾. 합금성분인 Mg은 모재인 Al에 비해 용융점과 기화점이 낮기 때문에 아크 용접 시 용적의 폭발이나 레이저 용접에서 기공발생의 원인으로 작용하기도 한다²⁻⁴⁾.

5000계열 알루미늄 합금의 레이저용접 시 완전용입이 생성되는 경우에는 용접부의 이면에 스파이크형상의

험핑비드가 형성되는 경우가 있다. 이는 합금원소인 Mg의 낮은 기화점이 원인인 것으로 알려져 있으며 험핑비드의 방지를 위해 이면에 보호가스를 공급하거나 듀얼 빔(dual beam)용접을 적용하여 이를 방지하는 연구결과가 발표되었다⁵⁾.

레이저 용접에서 출력을 모듈레이션할 경우 키홀의 안정성이 증가하고 이를 이용한 기공과 언더컷의 방지, 불완전 용접용입에서의 용입 안정성 증가 등에 대한 연구가 수행된 바 있다⁶⁻¹¹⁾.

본 연구에서는 Al 5J32 합금의 겹치기 용접에 레이저 용접을 적용하면서 펄스 형상으로 레이저출력을 모

둘레이션하여 이면 보호가스 적용 없이 이면 험핑비드의 거동을 관찰하고자 하였다. 용접속도 등 기존 공정 변수와 레이저 출력 파형의 형상 등을 실험계획법의 인자로 선정하고 용접비드의 안정성을 예측할 수 있는 예측합수를 개발하여 이의 적정성을 검증하고자 한다.

2. 이면비드의 험핑

Al 3004, 5J32, 6K21합금의 레이저 겹치기 용접에서 용접부 이면에서의 보호가스 유무에 따른 이면비드 형상은 Fig. 1과 같다. 이 때 레이저 출력은 연속과 형으로 인가하였으며 완전용입이 되는 용접조건을 선정하였다.

Al-Mn계 합금인 Al 3004합금과 Al-Mg-Si계 합금인 6K21합금의 경우 이면 보호가스 적용 여부와 무관하게 안정된 이면 비드형성이 가능하였으나 Al-Mg계 합금인 5J32합금에서는 보호가스를 공급하지 않을 경우 매우 거친 이면비드가 형성됨을 확인할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 레이저 출력을 구형 펄스(square pulse)로 모듈레이션하면서 알루미늄 합금의 겹치기 용접부의 비드 안정성을 평가하였다. 실험에 사용한 소재는 Al-Mg계 알루미늄 합금인 5J32합금이며, 적용 소재의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 사용된 시험편의 두께는 1 mm이며, 겹치기 용접조건으로 용접을 수행

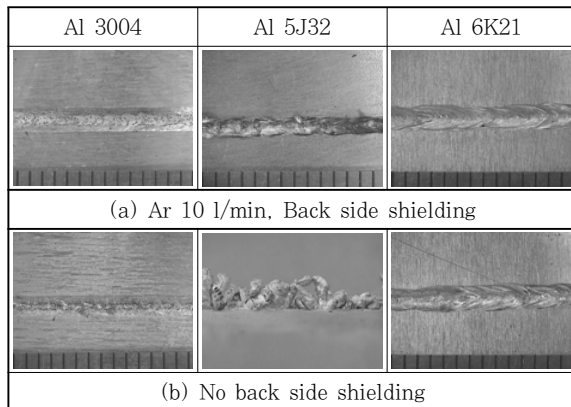


Fig. 1 Back bead shapes for various Al alloys

Table 1 Chemical composition of Al 5J32 alloy used in the study (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.03	0.07	0.31	0	5.6	0	0	0.02	Bal.

하였다.

실험에 사용한 레이저는 4 kW급 디스크레이저이며, 직경 200 μm의 광파이버 및 초점거리 220 mm 광학계로 빔을 전송하여 레이저 빔을 조사하였다. 보호가스는 내경 6 mm 노즐을 통해 용접 표면에서만 20 l/min으로 아르곤 가스를 공급하였다.

4. 변수 스크린 실험계획

비드 안정성 예측 모델을 실험계획법으로 개발하기 전 스크린 실험에서는 레이저 출력 주파수, 사용률(duty), 베이스 출력, 피크 출력, 초점위치, 용접속도를 실험변수로 선정하였다. 레이저 파형의 정의는 Fig. 2에 나타내었다.

각 출력 변수에 대해 Table 2와 같이 3수준으로 인자의 수준을 결정하였으며, 3수준계 직교 배열인 $L_{27}(3^{13})$ 을 이용하여 인자를 배치하고 교호작용을 무시하고 주인자에 대한 영향만 평가하였다.

이면 비드 형상을 Table 3과 같이 정성평가하여 주인자에 대한 분산분석을 실시하고 Table 4에 나타내었다.

인자들중 유의인자는 분산분석의 F 검정과 결정계수

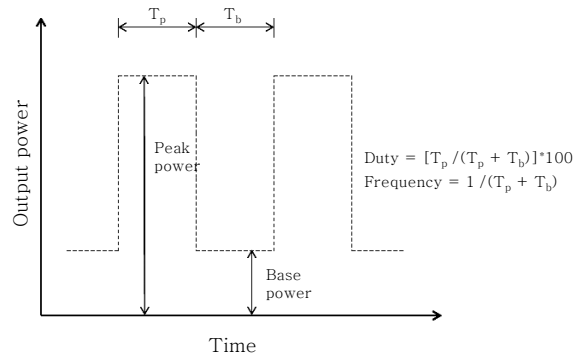


Fig. 2 Definition of parameters for laser power modulation

Table 2 Control factors and their levels for the screening experiment

Factor	Level		
	0	1	2
A. Frequency (Hz)	30	50	70
B. Duty (%)	30	50	70
C. Base power (kW)	0.2	0.4	0.6
D. Peak power (kW)	2.0	3.0	4.0
E. Focal position (mm)	0	5	10
F. Welding speed (m/min)	3	4	5

Table 3 Qualitative evaluation of back side spiking

Level	Bead shape
0	Partial penetration
1	Spiky humping back bead
2	Stable back bead

Table 4 ANOVA results for the screening experiment

Source	Sum of squares	Degree of freedom	F0	F(0.05)
A	0.666	2	1.75	3.74
B	2.888	2	7.583	3.74
C	0.222	2	0.583	3.74
D	0.888	2	2.333	3.74
E	2	2	5.25	3.74
F	0.666	2	1.75	3.74
Error	2.666	14		
Total	10	26		

로 판단하였다. F분포에서 유의수준 0.05에서의 기각치를 Table 4에 함께 나타내었고, 주인자들중 초점거리(E)와 사용률(B)이 유의함을 확인하였다.

5. 비드형상 안정성 예측 모델

앞 절의 스크린 실험계획에서 선정한 2개의 유의인자를 각각 3수준으로 선정하고 중심합성계획법을 이용하여 비드의 안정성을 예측하는 모델을 수립하였다. 이때 선정한 변수의 수준은 Table 5과 같으며, Table 6과 같이 배치하여 14회 실험을 수행하여 비드 형상을 관찰하였다. 이 중 대표적으로 스파이크한 험핑이 발생한 경우와 양호한 비드가 형성된 경우의 예를 Fig. 3에 나타내었다.

비드형상은 계면길이(M_b), 상판에서 언더필을 제외한

Table 5 Factors and their levels for central composite experimental design

level	Focal position [mm]	Duty [%]	Frequency (hz)	Velocity (m/min)	Base power (kW)	Peak power (kW)
-1	0.7	60	30	3	0.6	4.0
0	2.5	70				
1	4.2	80				

Table 6 Central composite experimental design

No.	Natural variables		Coded variables	
	Focal position (mm)	Duty (%)	X1	X2
1	0.7	60	-1	-1
2	4.2	60	1	-1
3	0.7	80	-1	1
4	4.2	80	1	1
5	2.5	70	0	0
6	2.5	70	0	0
7	2.5	70	0	0
8	0	70	-1.4	0
9	5.0	70	1.4	0
10	2.5	56	0	-1.4
11	2.5	84	0	1.4
12	2.5	70	0	0
13	2.5	70	0	0
14	2.5	70	0	0

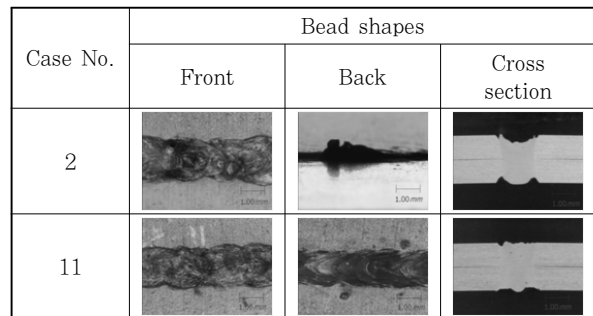


Fig. 3 Bead shapes for the selected cases

길이(U_f), 험핑 발생 평가(S_p), 표면 비드 폭과 이면 비드폭의 차이의 절대값(F_b)을 평가인자로 평가하였다. 이때, 험핑 발생평가에서는 험핑이 발생한 경우 1, 험핑이 방지된 경우를 2로 정성평가하였다.

실험결과로부터 입력 변수와 비드형상 변수와의 관계를 2차 회귀식으로 나타내면 식 (1)~(4)와 같으며, 각 식에 대한 결정계수는 각각 0.91, 0.94, 0.90 및 0.82로 상당히 정밀한 예측이 가능하였다.

$$M_b(x) = 0.6514 + 0.2201x_1 - 0.0395x_2 + 0.0043x_1^2 + 0.858x_2^2 - 0.2092x_1x_2 \quad (1)$$

$$U_f(x) = 2.890 + 0.0585x_1 - 6.522x_2 - 0.0058x_1^2 + 4.9375x_2^2 - 0.0852x_1x_2 \quad (2)$$

$$S_p(x) = -4.336 - 1.282x_1 + 20.9155x_2 - 0.14122x_1^2 - 18.750x_2^2 + 2.8409x_1x_2 \quad (3)$$

$$F_b(x) = 0.9505 - 0.4866x_1 - 1.0065x_2 - 0.2083x_2^2 + 0.7102x_1x_2 \quad (4)$$

최적 입력변수를 선정하기 위하여 비드형상 함수를 식 (5)~(8)과 같이 정규화하고, 동일한 비율로 식 (9)와 같은 호감도함수를 도출하였다. 여기에서 U_f 의 경우 25% 이내의 언더필은 규격상 만족하므로 지수승을 0.1로 선정하였다¹⁴⁾.

$$d(M_b(x)) = \begin{cases} 0 & M_b \leq 1 \\ \left(\frac{M_b - 1}{1.5 - 1}\right) & 1 < M_b \leq 1.5 \\ 1 & 1.5 < M_b \end{cases} \quad (5)$$

$$d(U_f(x)) = \begin{cases} 0 & U_f < 0.75 \\ \left(\frac{U_f - 0.75}{1 - 0.75}\right)^{0.1} & 0.75 \leq U_f \leq 1 \\ 1 & 1 < U_f \end{cases} \quad (6)$$

$$d(S_p(x)) = \begin{cases} 0 & S_p = 1 \\ 1 & S_p = 2 \end{cases} \quad (7)$$

$$d(F_b(x)) = \begin{cases} 0 & F_b > 0.5 \\ \left(\frac{F_b - 0.5}{0 - 0.5}\right) & 0 < F_b \leq 0.5 \\ 1 & F_b = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$D(x) = [d(M_b) \cdot d(U_f) \cdot d(S_p) \cdot d(F_b)]^{1/4} \quad (9)$$

MINITAB을 이용하여 입력변수를 최적화를 수행한 결과 최적 입력변수는 초점거리 2.57 mm, 사용률 84%였으며, 예측 목적함수값은 0.897이었다. 최적 조건에서 재현실험을 수행한 결과는 Table 7에 나타내었으며 예측값과 재현 실험값의 적합률은 96%이다.

선정된 최적조건에서 제작된 겹치기 시험편에 대해

Table 7 Estimated and measured data for optimal condition

	M_b (mm)	U_f (mm)	S_p	F_b (mm)
Estimated	1.36	0.82	1.9	0.23
Measured	1.40	0.79	2.0	0.26

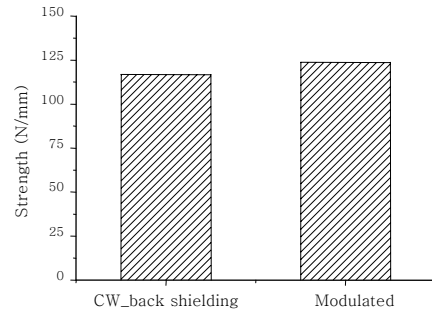


Fig. 4 Comparison of tensile-shear strength per unit weld length

전단인장시험을 수행한 결과를 연속파형 겹치기 용접결과¹³⁾와 비교하였다. 연속파형 실험에서는 동일한 소재에 이면에서 10 l/min으로 아르곤을 공급하였으며, 레이저 초점위치, 출력, 용접속도는 각각 -3 mm, 3.5 kW, 5 m/min이었다.

Fig. 4에서와 같이 보호가스를 사용하지 않고도 이면에서 아르곤을 공급한 연속파형 겹치기 용접과 유사한 수준의 전단인장강도 확보가 가능함을 알 수 있다. 여기에서 연속파형 레이저 용접실험 시에는 적정 완전용입이 형성되는 용접속도가 5 m/min이므로 더 빠른 용접이 가능함은 유의할 필요가 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 레이저 출력을 구형 펄스로 모듈레이션하여 이면 보호가스 공급하지 않고 겹치기 용접부의 이면 비드 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 5J32 알루미늄 합금의 연속파형 레이저 용접에서 발생하는 이면에서의 스파이크 현상의 험핑은 적절한 펄스 모듈레이션 변수를 선정할 경우 방지가 가능하였다.

2) 본 연구에서는 스크린 실험계획과 최적화 실험계획을 연속하여 수행하였으며 스크린 실험의 공정조건에서는 유의수준 0.05에서 초점위치와 사용률이 유의한 인자로 확인되었다.

3) 스크린 실험계획 적용에 따라 유의한 인자로 판명된 2개의 인자에 대해 중심합성실험계획을 적용하여 최적화를 시도하였다. 이 때, 비드 형상의 건전성은 험핑 발생 유무와 함께 계면에서의 비드폭, 상판에서의 언더필 발생, 표면 비드폭과 이면 비드폭의 차이를 평가하였다. 최적화 실험계획의 변수 범위안에서는 2차회귀식을 이용해서도 적절한 범위에서 비드형상의 예측이 가능하였으며, 호감도함수를 이용하여 최적화를 수행하여

양호한 비드가 형성되는 조건을 도출하였다.

4) 최적 용접조건에서 제작한 겹치기시험편의 전단인장시험 결과 보호가스를 공급한 연속파형 레이저 용접 실험과 유사한 수준 이상의 강도확보가 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Welding and Joining Handbook, Vol. 1, Korean Welding and Joining Society, 2008, 305-317 (in Korean)
2. R. A. Woods : Metal Transfer in Aluminum Alloys, Welding Journal, **59-2** (1980), 59-s-66-s
3. C. Kim, Y.-N. Ahn, J.-K. Choi and S. Rhree : Process Evaluation of Plasma-GMA Welding for Al 5052 and 6061 alloy, Journal of KWJS, **28-6** (2010), 666-670 (in Korean)
4. A. El-Batahgy and M. Kutsuna : Laser Beam Welding of AA5052, AA5083, and AA6061 Aluminum Alloys, Advances in Materials Science and Engineering, **2009** (2009), 1-9
5. A. Punkari, D. C. Weckman and H. W. Kerr : Effects of Magnesium Content on Dual Beam Nd:YAG Laser Welding of Al-Mg Alloys, Science and Technology of Welding and Joining, **8-4** (2003), 269-281
6. S. Fujinaga, H. Takenaka, T. Narikiyo, S. Katayama and A. Matsunawa : Direct Observation of Keyhole Behavior during Pulse Modulated High-Power Nd:YAG Laser Irradiation, Journal of Physics, Part D: Applied Physics, **33-5** (2000), 492-497
7. Matsunawa, M. Mizutani, S. Katayama and N. Seto : Porosity Formation Mechanism and its Prevention in Laser Welding, Welding International, **17-6** (2003), 431-437
8. T. Y. Kuo and S. L. Jeng : Porosity Reduction in Nd-YAG Laser Welding of Stainless Steel and Inconel Alloy by using a Pulsed Wave, Journal of Physics, Part D: Applied Physics, **38-5** (2005), 722-728
9. I. Kawaguchi, S. Tsukamoto, G. Arakane and H. Honda : Characteristics of High-Power CO₂ Laser Welding and Porosity Suppression Mechanism with Nitrogen Shielding. Study of High-Power Laser Welding Phenomena, Welding International, **20-2** (2006), 100-105
10. J.-H. Cho, D. F. Farson and M. J. Rieter : Analysis of Penetration Depth Fluctuations in Single-Mode Fibre Laser Welds, Journal of Physics, Part D: Applied Physics, **42-11** (2009), 1-8
11. J. E. Blackburn, C. M. Allen, P. A. Hilton, L. Li, M. I. Hoque, A. H. Khan : Modulated Nd:YAG Laser Welding of Ti-6Al-4V, Science and Technology of Welding and Joining, **15-5** (2010), 433-439
12. 박성현 : 현대실험계획법, 민영사, 1984 (in Korean)
13. D.-C. Ahn, C. Kim and J.-D. Kim : Laser Lap Welding of Al Alloys 5J32 and 6K32, Proceedings of LAMP2009, 2009, Paper No. #09-138
14. General Motors Engineers Standards : Automotive Laser Lap Welding Specification (GM4490M), General Motors, 1991