

A6061 알루미늄합금 판재의 맞대기 TIG용접에서 반응표면법을 이용한 최적용접조건선정에 관한 연구

정성훈* · 이도엽* · 김봉을** · 이목영*·†

*포항산업과학연구원 소재이용연구그룹

**포항특수용접

A Study for the Welding Condition Optimization using Response Surface Method in TIG Butt Welding of A6061 Aluminum Alloy

Sunghun Jung*, Doyup Lee*, Bong Ueoul Kim**, and Mokyoung Lee*·†

*Material Solution Research Group, RIST, Pohang, 37673, Korea

**Pohang Special Welding Company, Pohang, 37839, Korea

†Corresponding author : accelee@rist.re.kr

(Received April 11, 2018 ; Revised May 8, 2018 ; Accepted May 23, 2018)

Abstract

In this study, aluminum alloy sheet was welded on I-butt joint using AC type TIG welding machine. Welding conditions were designed with CCD(Central Composite Design) method in which input variables were welding current and travel speed. TIG welding was done on A6061 alloy sheet for the welding conditions at Ar shielding. The second-order regression equation was obtained using Minitab R18 with the bead shape measured from TIG welded samples. The optimum weld bead shape selected from the surface response graphs was effective penetration depth 1.78mm, upper bead width 5.36mm and sagging 0.39mm. And the correspond welding condition was welding current 115A and travel speed 5.7m/min. The reliability of the calculated regression equation for bead shape was varied from 90% of sagging to 98.7% of upper bead width.

Key Words : A6061 alloy, TIG welding, I-butt joint, Regression analysis, Bead shape, Welding condition optimization

1. 서 론

알루미늄합금은 성형성, 용접성, 내식성 등이 우수한 대표적인 경량소재이며, 총 비용 측면에서도 상대적으로 효율적이다. 환경오염의 주요 원인으로 지목되는 자동차 배출가스 및 연비규제가 강화됨에 따라 자동차, 항공, 조선 등 수송기기 산업에서 그 적용이 활발히 진행되고 있다¹⁾. 배출가스저감 및 연비향상을 동시에 달성하는 효율적인 수단은 차체 경량화인데, 그 대표적인 방법은 최적구조설계, 경량소재 사용, 새로운 성형공법 등이다. 본 연구는 알루미늄합금 자동차 부품제조에서

중요한 공정에 해당하는 알루미늄합금 판재의 용접특성에 관한 것이다.

알루미늄합금 부품을 제작하기 위해서는 3차원 형상의 조립용접이 요구되는데, 소량 생산의 경우 주로 TIG(Tungsten Inert Gas) 용접이 적용된다. TIG 용접은 비소모성 텅스텐 전극을 사용하므로 아크가 안정되고 용접비드가 균일하고 용접부가 청정한 장점이 있다. 그러나 MIG(Metal Inert Gas) 용접 대비 용접속도가 늦고 이음부 관리가 까다로워 자동화가 어려운 문제점이 있다. 또한, 알루미늄합금의 표면은 치밀한 절연성 산화피막으로 덮여있기 때문에 AC 전원의 용접기를 사용하여야 한다²⁾. 알루미늄합금의 TIG 용접은 널리 알

려져 있는 편이지만, 다양한 산업적용을 위한 활발한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 자동차 차체 등 비교적 강도가 요구되는 부품에 일반적으로 사용되는 A6061 알루미늄합금의 맞대기 TIG 용접에서 비드형상에 미치는 주요 공정변수의 영향을 실험계획법을 이용하여 체계적으로 알아 보았다.

2. 이론적 배경

TIG 용접에서 비드형태, 강도 등의 반응에 영향을 미치는 공정변수가 다양하고 복잡한 교호작용을 포함하는 경우에는, 실험계획법을 이용하면 적은 실험 횟수로 객관적인 결과를 얻을 수 있다. Fig. 1에 실험계획법(DOE, Design of Experiment)의 종류에 대해 나타내었다.

2.1 실험계획법

실험계획법이란 반응치(특성치)에 영향을 주는 변수의 수준 및 실험순서를 결정하는 것으로, 실험자의 심리적 관성을 배제하고 객관적인 인과관계를 파악하는데 유익한 방법이다. 적정하게 설정된 계획에 따라 실험을 하면, 적은 실험횟수로 객관적이고 정확한 결과를 얻을 수 있다.

TIG 용접에서는 각 인자간의 교호작용이 있으므로 비선형모델을 사용하여야 한다. 따라서 식(1)에 나타낸 것과 같은 2차 회귀모델을 가지는 실험계획법이 필요하다³⁾.

$$\hat{y} = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_{11}x_1^2 + B_{22}x_2^2 + B_{12}x_1x_2 \quad (1)$$

2.2 반응표면법

반응표면법(RSM; Response Surface Method)은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 여러 개의 입력변수 π_i, π_j 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 출력변수 \hat{Y} 에 영향

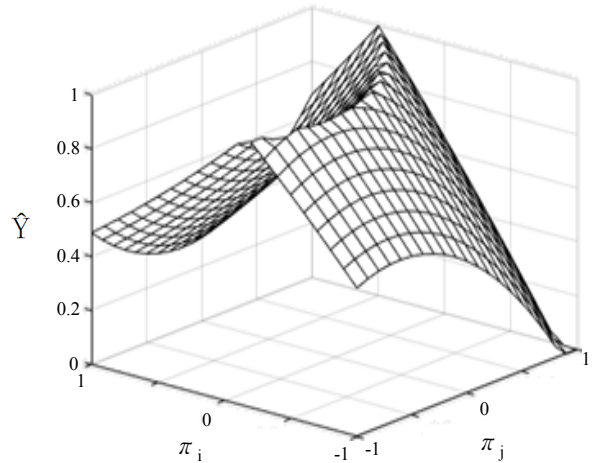


Fig. 2 Plot of RSM

을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 반응표면에 미치는 영향에 대한 통계적인 분석방법이다⁴⁾. 반응표면법은 변수가 측량이 가능하며, 실험자가 그 수준을 제어할 수 있어야 한다.

반응표면법은 입력변수의 변화에 따른 출력변수 값의 변화를 알 수 있고, 적은 수의 실험으로 예상 회귀모형의 추출이 가능하며, 입력변수에 대한 출력변수의 최적화 과정을 통해 이루어진다. 따라서 입력변수들의 복합적인 반응을 분석할 수 있는 회귀모델을 사용하여, 최적의 값을 찾아내는 기법으로 회귀모델을 잘 추출할 수 있는 실험계획법이 요구된다.

2.3 중심합성계획법

출력변수를 최적화하기 위한 반응표면법은 회귀분석(Regression analysis) 방법에 의해 추정되므로, 실험계획에 따른 실험의 결과 값을 통해 2차 회귀모델을 구하며, 식(1)과 같이 나타난다³⁾. 여기서, \hat{y} 는 예측된 반응량 추정 값이고, x_1, x_2 는 입력변수들의 코드변수 값(Coded unit)이며 $B_0, B_1, B_2, B_{11}, B_{22}, B_{12}$ 는 최소자승법을 적용하여 구한 계수이다. 중심합성계획법(CCD; Central Composite Design)은 최적조건을 선정하기 위한 반응표면법의 일종으로, 이 분석에 필요한 실험적 회귀모델을 구하기 위해 사용된다(Fig. 3). 중심합성계획법은 심플렉스계획법이나 2^k요인배치법의 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하기 위하여 중심점과 축 점을 2^k요인실험에 추가시킨 실험계획법이다⁵⁾.

2.4 F-test와 P-value를 통한 검정

중심합성계획법에 의해 구해진 회귀식의 유의성에 대한 판단은 F-test 및 P-value에 의해 결정된다. F-

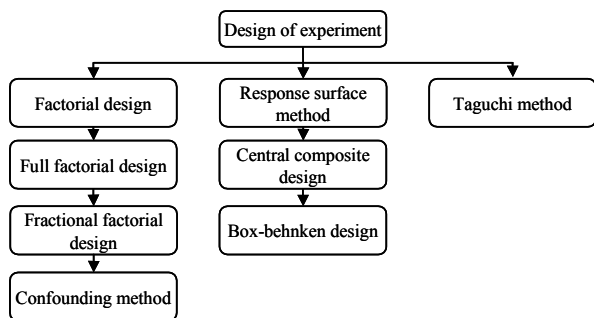


Fig. 1 Classification of DOE

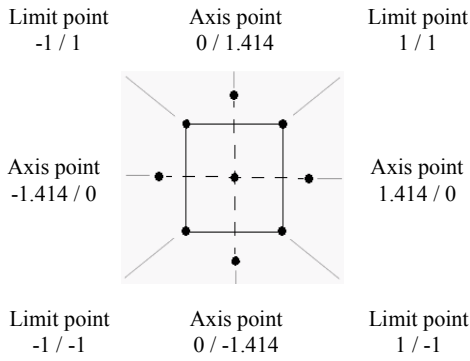


Fig. 3 Central composite design

test에서는, 회귀 평균제곱(MSR: Regression mean squares)과 잔차 평균제곱(MSE: Error mean square)의 비율($\frac{MSR}{MSE}$)을 계산하였을 때⁶⁾, 표본 집단인 F_0 의 값이 모집단인 $F(\alpha)$ 와 비교하여 클수록 회귀방정식의 정도가 좋다고 할 수 있다⁷⁾. P-value의 경우, 예측된 통계 값과 다른 결과값이 나올 확률을 말하는 것으로 F-test와 반대로 P-value의 값이 낮을수록 수학적 회귀모델의 정도가 좋다. 따라서 F-test에서는 $F_0 > F(\alpha)$, P-value의 경우 $(P\text{-value}) < (\text{유의수준}=0.05)$ 을 만족할 경우 회귀식이 유의하다고 판별된다.

2.5 호감도 함수

실험계획법에서 출력변수의 최적화 기법인 호감도 함수를 사용하여, 각 회귀모델의 출력값을 호감도 함수로 평가한다. 호감도 함수의 범위를 0~1로 정의하면, 각 응답에 대한 만족도가 클수록 1에 접근하고, 만족도가 작을수록 0에 접근한다⁸⁾. 본 연구에서 호감도 함수는 망목적 특성을 나타내며, 수식으로 표현하면 식(2)와 같다. T는 목표 값이며, d는 측정 값이고, L은 하한 값, U는 상한 값이다. 비드 형상에 있어서 종합적인 용접품질을 평가할 각 호감도 함수를 식 (3)과 같이 복합 호감도 함수로 바꾸어 주었다. 여기서 D는 각 출력변수의 호감도 함수값이며, w_a, w_b 는 중요도인데 본 논문에서는 각 출력변수의 중요도는 동일한 비율로 선정하였다. 검증된 회귀모델과 호감도 함수식을 사용하여, 만족도(D)가 가장 높은 비드형상을 구하여 최적화하였다⁹⁾.

$$D = \begin{cases} 0, & d < L \\ \frac{d-L}{T-L}, & L \leq d \leq T \\ \frac{d-U}{T-U}, & T \leq d \leq U \\ 0, & d > U \end{cases} \quad (2)$$

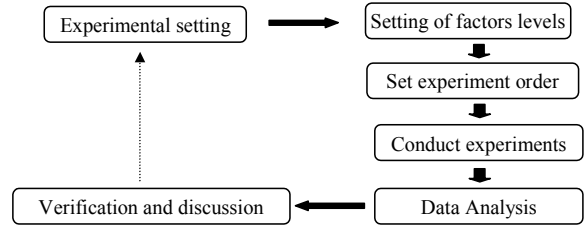


Fig. 4 Typical process of experiment and data analysis

$$D = \frac{(w_a \times DF_a) + (w_b \times DF_b)}{2} \quad (3)$$

3. 실험방법 및 순서

본 실험계획법에 따른 최적화를 위하여 Fig. 4와 같이 실험, 분석 및 최적화 등의 순서로 실시하였다. 중심합성계획법으로 설계된 실험계획으로 용접을 실시한 후, 얻어진 실험 결과 값을 수학적 회귀모델로 구한 뒤, 이를 ANOVA, F-test, P-value 및 결정계수(R^2)를 사용하여 검증하였다. 검증 완료 후, 수학적 회귀 모델과 복합 호감도 함수를 사용한 최적화 및 회귀모델의 정확도 검사를 진행하였다.

3.1 용접 조건

본 실험에서는 두께 2mm의 A6061 알루미늄 합금 얇은판재를 사용하였는데, Table 1에 A6061 합금의 화학적 성분을 표기하였다. A6061 알루미늄합금 판재는 200mm x 100 mm 크기로 가공하여 용접을 하였다. 용접기는 Fronius사의 Magic Wave 3000 TIG 이었으며, 표면 산화층의 청정 기능이 있는 AC 전류로 용접을 실시하였다. 이면비드 생성 부근을 알코올을 이용해 불순물을 제거한 후 맞대기 용접하였으며, Fig. 5

Table 1 Chemical composition of A6061 aluminum alloy (wt.%)

Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.669	0.429	0.210	0.809	0.152	0.120	0.0406	bal.

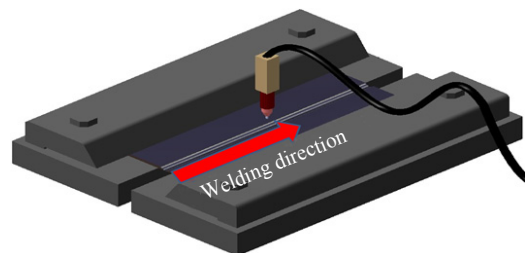


Fig. 5 Welding process set-up

와 같이 시험편을 지그에 장착한 후, 아래보기 자세(1G)로 용접을 수행하였다. 비드의 형상에 영향을 미치는 인자로서는 용접전류, 이송속도, 아크 길이, 토치 각도, 보호가스 종류와 유량 등 많은 인자들이 있지만, 예비실험을 통해 비드 형상에 가장 크게 영향을 미치는 인자로 용접전류 및 이송속도를 찾아내었고, 이 인자들이 용입 깊이와 이면비드의 폭에 미치는 효과를 분석하였다.

고정변수는 Table 2에 나타난 것과 같이 아크 길이(팅스텐 전극 선단에서 피용접재 표면까지의 거리) 1mm, 토치 각도 90°, 전극 직경 3mm, 보호 가스 Ar 15L/min를 사용하였다. 입력변수는 용접전류 및 이송속도였고, 출력변수는 용입 깊이와 비드 폭이었다.

본 연구에서는 입력변수와 용접비드 특성치의 상관성 및 회귀식을 알아보기 위하여 중심합성계획법을 사용하였고, 입력변수인 용접전류와 이송속도 범위를 Table 3에 나타내었다.

3.2 용접비드 형상 측정

TIG 용접실험은 절단가공 된 알루미늄합금 모서리를 맞대기로 정렬한 상태에서 각 조건 당 3회를 실시하였다. 용접비드 형상을 측정하기 위하여 정밀절단기를 사용하여 TIG 용접시편의 중앙인 약 100mm 지점에서 단면조직검사용 샘플을 채취하였다. 상기의 샘플을 일반적인 조직검사 절차에 따라 물딩, 연마 및 부식(나이탈액)을 시킨 후, 광학현미경 관찰을 하였다. 용접부 형상은 상부 비드 폭(W_U), 하부 비드 폭(W_L), 유효 용입 깊이(D_E), 언더 필(H_U) 및 비드 처짐(H_S)을 측정하였다. 완전용입 용접부에서 용입깊이는 모재 두께와 동일해야 하지만 실제로는 언더필 및 비드처짐이 발생하여

Table 2 Welding conditions for TIG welding test

Torch angle, °	90
Shielding gas	Ar
Gas flow, L/min	15
Electrode dia., mm	3
Arc length, mm	1

Table 3 Input parameters and level for experimental design

Level	X_1 Current / A	X_2 Travel speed / mm·s ⁻¹
-1	110	5
0	120	6
1	130	7

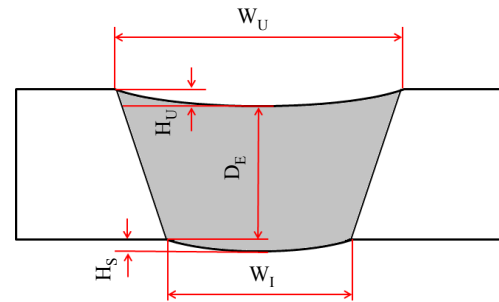


Fig. 6 Measuring parameters on the weld cross section

모재 두께 보다 작아진다. 본 연구에서는 언더 필과 비드 처짐을 제외한 깊이를 유효 용입 깊이로 정의하였다.

3.3 검정 및 용접 품질 평가

알루미늄 TIG 용접부에서 비드폭, 용입깊이, 비드처짐 등 비드 특성치들을 측정하고, 그 평균값들을 통계 분석 프로그램(Minitab R.18)을 사용하여 수학적 회귀모델과 회귀모델의 검정을 위한 F-test와 P-value를 통해 5% 신뢰수준에서 유의성을 확인하였다. 비드 형상은 ISO 6520의 규격을 적용한 망목특성의 호감도 함수식을 사용하여 최적화하였다.

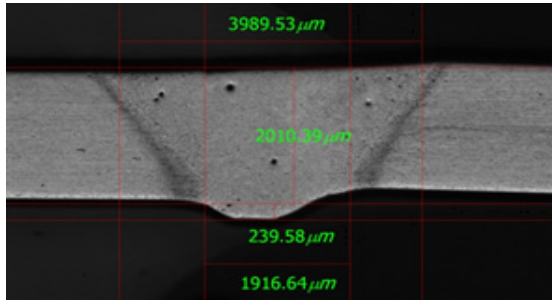
4. 결과 및 고찰

4.1 용접 비드 측정

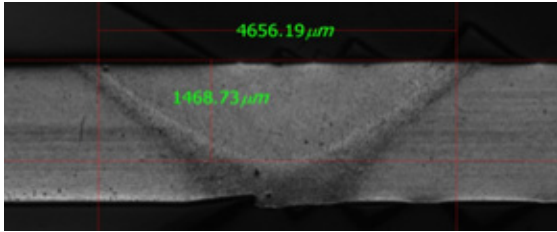
중심합성계획법에 따라 설계된 실험조건표 및 그 비드특성치 측정 결과를 Table 4에 정리하였다. Fig. 7

Table 4 Central composite design and experimental results

No	Coded variables		Response(mm)			
	X_1	X_2	W_U	W_L	D_E	H_S
1	110	5	5.21	3.46	2.03	0.5
2	130	5	6.02	5.16	2.01	0.44
3	110	7	3.99	1.92	2.0	0.24
4	130	7	4.46	2.29	1.98	0.3
5	106	6	4.66	0	1.47	0
6	134	6	6.48	5.43	2.12	0.3
7	120	4.6	5.47	4.07	2.01	0.49
8	120	7.4	4.65	2.55	2.05	0.53
9	120	6	5.23	3.86	2.02	0.41
10	120	6	5.49	4.05	2.06	0.41
11	120	6	5.75	4.35	2.06	0.48
12	120	6	5.58	4.2	2.07	0.41
13	120	6	5.3	3.46	2.04	0.49



(a) Bead shape of No.3



(b) Bead shape of No.5

Fig. 7 Cross sectional views of the weld

(a)에 나타난 No. 3의 비드 형상의 경우, 완전 용입이 형성되어 모든 인자의 값이 유효하였다. 그러나 No. 5(Fig. 7 (b))의 경우, 불완전 용입으로 W_L 및 H_S 이 형성되지 않았는데, 이 값은 이산형 데이터로서 예측수식의 정확도를 낮출 것으로 예상되었다.

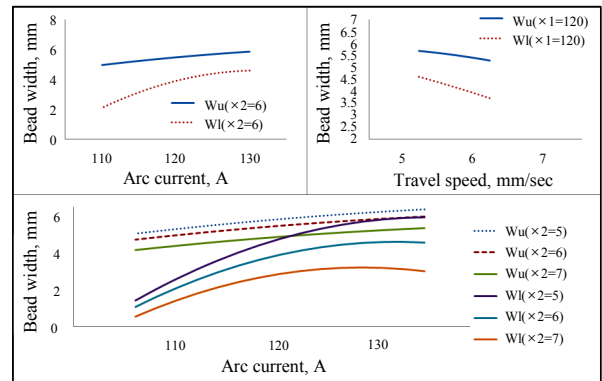
4.2 ANOVA 결과

총 13개 입력조건의 용접부에서 측정된 출력변수에 대해 반응표면법으로 수학적 회귀모델을 생성하였다. 회귀모델의 도출 방법은 Table 4의 실험계획에서 각 변수의 비교를 통해 함수로 만들고, 관심영역에서 입력변수인 용접전류(X_1) 및 이송속도(X_2)에 대한 출력변수의 회귀식은 식(4)에 나타내었다.

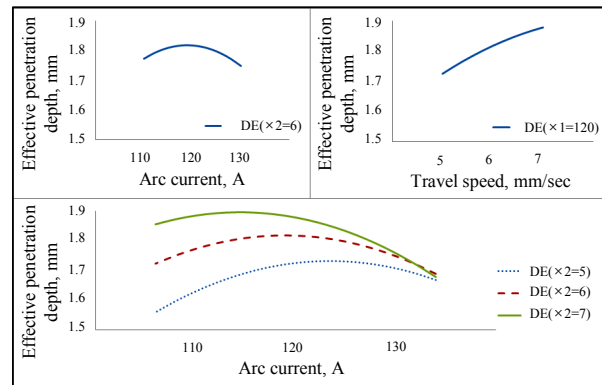
$$\begin{aligned}
 W_U &= -12.2 + 0.213X_1 + 1.22X_2 - 0.000644X_1^2 \\
 &\quad - 0.1188X_2^2 - 0.00228X_1X_2 \\
 W_L &= -114.9 + 1.677X_1 + 4.52X_2 - 0.00555X_1^2 \\
 &\quad - 0.089X_2^2 - 0.0367X_1X_2 \\
 D_E &= -10.93 + 0.1660X_1 + 0.877X_2 - 0.000569X_1^2 \\
 &\quad - 0.0156X_2^2 - 0.00511X_1X_2 \\
 H_U &= -3.31 + 0.0694X_1 - 0.343X_2 - 0.000331X_1^2 \\
 &\quad - 0.0058X_2^2 + 0.00310X_1X_2 \\
 H_S &= -16.15 + 0.3117X_1 - 0.852X_2 - 0.001320X_1^2 \\
 &\quad + 0.0432X_2^2 + 0.00246X_1X_2 \quad (4)
 \end{aligned}$$

알루미늄합금의 맞대기 TIG용접에서 비드형성에 미

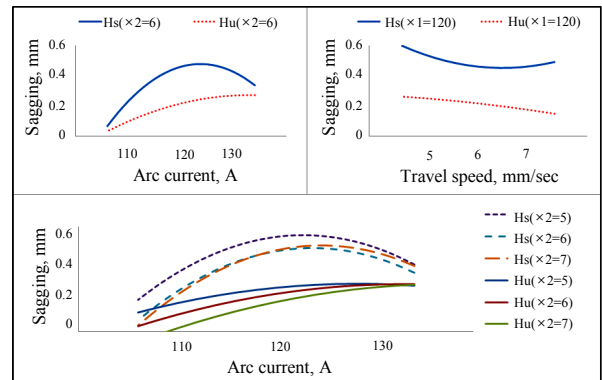
치는 각 인자들의 효과를 알아보기 위해 주 효과도와 교호 작용도를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8 (a)는 비드폭(W_U , W_L)에 미치는 용접전류와 이송속도의 영향을 나타낸 것으로 철강 등 TIG용접에서와 유사하게 비드 폭은 이송속도 증가에 반비례하여 감소한 반면, 전류 값에 비례하여 증가하였다. 본 실험조건에 따라 얻어진 W_U 및 W_L 에서 용접전류와 이송속도에서는 미소한 교호작용이 나타났다¹⁰⁾. Fig. 8 (b)는 유효 용입 깊이에 미치는 용접전류와 이송속도의 영향을 나타낸 것



(a) Effects of arc current and travel speed on bead widths (W_U & W_L)



(b) Effects of arc current and travel speed on effective penetration depth(D_E)



(c) Effects of arc current and travel speed on H_U & H_S

Fig. 8 Effects of the input parameters (Arc current and travel speed) on the responses (W_U , W_L , D_E , H_U , H_S)

이다. 일반적으로 TIG 용접에서 용입 깊이는 전류에 비례하는데¹⁰⁾, 본 연구의 경우, 저전류 영역의 유효 용입 깊이는 전류 변화에 비례하고 고전류 영역의 유효 용입 깊이는 전류에 반비례하는 경향을 보인다. 고전류 영역에서 상이한 거동을 보이는 이유는, 완전 용입에 의하여 용입 깊이가 제한되고 과입열의 경우 H_U 및 H_S 에 의하여 유효 용입 깊이가 오히려 감소하기 때문이다. Fig. 8 (c)는 H_U 및 H_S 에 미치는 용접전류와 이송속도의 영향을 나타낸 것이다. 저전류 영역에서 H_U 및 H_S 은 전류에 비례하여 증가한 반면, 고전류 영역에서는 감소하였다. H_U 및 H_S 은 이송속도에 반비례하는 경향을 보였는데, 6m/min 이상의 이송속도에서 H_S 의 변화는 미미하였다. 또한 H_S 에서 용접전류와 이송속도의 교호작용은 뚜렷하지 않았다.

4.3 검정

ANOVA 해석으로 얻은 회귀모델인 식 (4)를 F-test와 P-value를 통해 검증하였다. Table 5에 본 연구에서의 ANOVA 분석표를 기재하였다. F-test에서 회귀모델을 평가할 F_0 값은 $F(\alpha)$ 보다 크며, P-value는 유의수준인 0.05보다 작으므로 비드 형상에 관한 회귀모델을 F-test 및 P-value로 검정 결과, 본 회귀모델은 유의하다고 할 수 있다¹¹⁾.

Table 5 Regression analysis of weld bead width and penetration depth

	P-value	R^2	F_0	$F(\alpha)$
W_u	0	93.53	20.24	3.79
W_l	0.022	79.95	5.58	
D_E	0.010	84.42	7.58	
H_U	0.019	80.76	5.88	
H_S	0.003	89.53	11.97	

4.4 최적조건 도출 및 검증 실험

A6061 합금에 대해 중심합성계획법으로 설계한 조건으로 TIG 용접하여 도출된 회귀식(식 4) 및 호감도 함수(식 2~3)에서 구한 반응표면도를 Fig. 9에 나타내었다. 식 3에서 출력변수의 복합 호감도 함수의 최고값이 최적조건이며 각각 $D_E=1.80\text{mm}$, $W_U=5.40\text{mm}$, $W_L=3.30\text{mm}$ 및 $H_S=0.40\text{mm}$ 이었다. 그에 상응하는 용접 조건은 $X_1 = -0.5$ 및 $X_2 = -0.3$ 이었으며, 직교좌표계로 찾아낸 실제 값을 Table 6에 나타내었다.

본 회귀모델로부터 도출된 최적의 용접조건으로 두께 2.0mm의 A6061 알루미늄합금 맞대기 이음부에 대한 검증실험을 수행하였다. 실험은 3회 반복하였으며, 비드 형상의 측정값을 Table 7에 나타내었다. $D_E=1.79\text{mm}$,

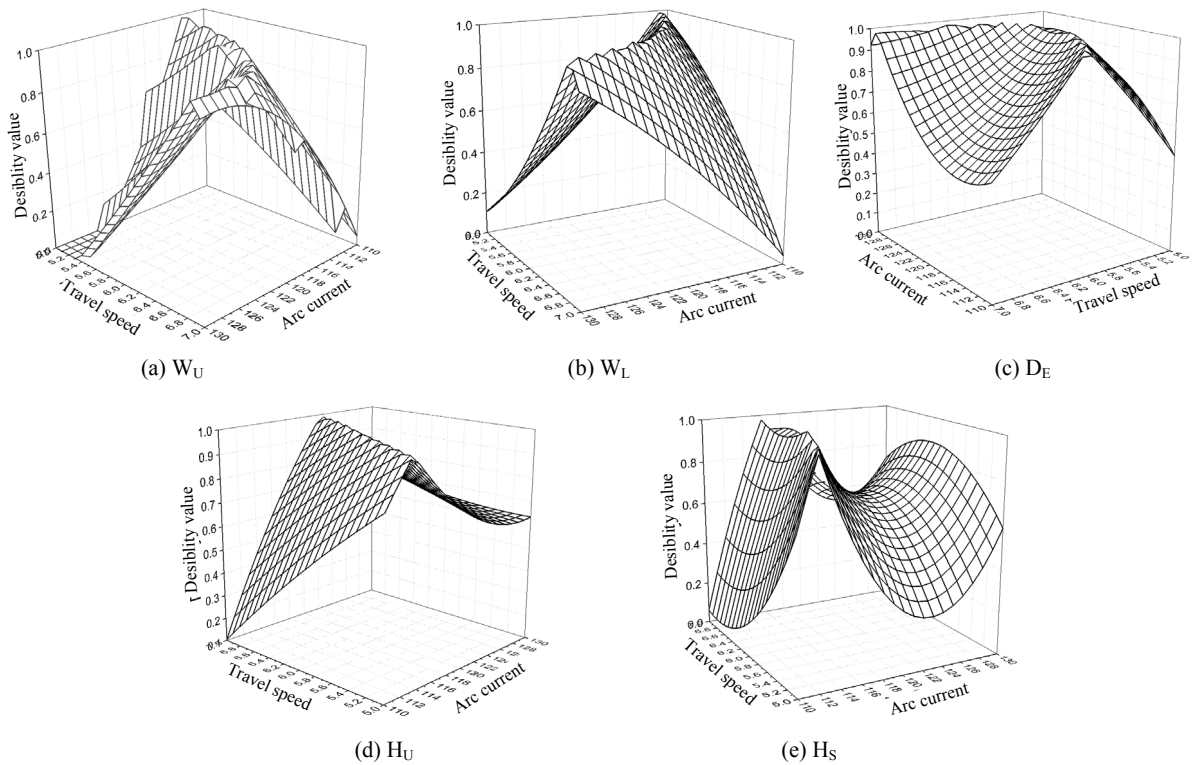


Fig. 9 Effects of the input parameters on the bead shape

Table 6 Optimal welding conditions

Coded variables		Natural variables	
X ₁	X ₂	Current, A	Travel speed, mm/s
-0.5	-0.3	115	5.7

Table 7 Results of verification test

	Target	#1	#2	#3	Stdev.
W _u	5.40	5.39	5.28	5.26	0.070
W _l	3.30	3.65	3.33	3.30	0.194
P _E	1.80	1.73	1.84	1.81	0.057
S _U	0.20	0.19	0.20	0.19	0.01
S _L	0.40	0.40	0.44	0.44	0.04

W_U 및 W_L은 각각 5.31mm 및 3.43mm이었으며, W_S=0.43mm이었다. 예측오차는 D_E=3.17%, W_U=1.30%, W_L=5.71%, H_U=5.00% 및 H_S=10.00%이었다.

5. 결 론

두께 2.0mm의 A6061합금의 맞대기 TIG용접에서 용접비드형상에 대한 수학적 회귀모델에 관한 연구결과와 다음과 같다.

1) 기초실험을 통해 비드 형상에 영향을 미치는 주요 인자로서 용접전류와 이송속도를 선정하였으며, 그 범위는 각각 110~130A 및 5~7mm/s이었다.

2) CCD법의 반응표면법으로 수학적 회귀 모델을 생성 하였으며, 생성된 2차 회귀 모델에 대해 F-test 및 P-value를 통해 검증하였다.

3) 수학적 회귀모델을 통해 용입 깊이와 비드 폭에서 각각의 입력변수에 대한 주효과 및 교호작용을 확인하였다. 완전용입에 따른 용입 깊이 제한에 의하여 과입 열 조건에서는 언더 필 및 비드 처짐의 증가로 인해 유효 용입 깊이가 오히려 감소하였다.

4) 회귀모델과 호감도 함수를 사용하여 반응표면도로부터 도출된 최적의 용접부는 D_E=1.80mm, W_U=5.40mm, W_L=3.30mm 및 H_S=0.40mm이었으며, 그 조건은 용접전류 115A 및 이송속도 5.7mm/s 이었다.

5) 검증 실험으로부터 본 연구에서 도출한 회귀 모델의 예측정확도는 W_U가 최대(98.7%)이었으며, H_S가 최소(90%)이었다.

후 기

본 논문은 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업기술혁신사업(N0001850)의 지원을 받아 수행되었습니다.

ORCID: Sunghun Jung: <https://orcid.org/0000-0002-3307-6437>

ORCID: Doyup Lee: <http://orcid.org/0000-0002-3330-4866>

ORCID: MokyoungLee: <http://orcid.org/0000-0001-7227-5415>

References

1. R. Singh, S. Chauhan, P.C. Gope, Influence of notch radius and strain rate on the mechanical properties and fracture behavior of TIG-welded 6061 aluminum alloy, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(3) (2016), 513-523
<https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.01.002>
2. J. G. Chung, K. D. Park, D. M. Kang, A Study on the TIG Joint Characteristics of Aircraft Material by Statistical Analysis, *Proceeding of 2014 KSME Spring Conference*, 114
3. T. Kim, H. Park, S. Rhee, Y.K. Oh, Optimization of Resistance Spot Welding Process for TRIP Sheets using Response Surface Methodology, *Proceeding of 2002 KSME Spring Conference*, 1131-1136
4. Jin Soo Jung, Hee Keun Lee, Young Whan Park, Prediction of Tensile Strength for Plasma-MIG Hybrid Welding Using Statistical Regression Model and Neural Network Algorithm, *Journal of Welding and Joining*, 34(2) (2016), 67-72
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.2.67>
5. Jun-Hyoung Park, Jae-Woong Kim, A Study on the Optimum Line Heating Condition for Straightening a Thin Plate Welded Structure, *Journal of KWJS*, 29(2) (2011), 40-45
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.2.040>
6. Joong gyo Chung, Kyoung do Park, Dae min Kang, TIG Welding Characteristics of Stainless Steel by Design of Experiment, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 18(3) (2014), 106-111
<https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.3.106>
7. Seok-chul Yun, Jae-Woong Kim, Selection of Optimal Welding Condition in Root-pass Welding of V-groove Butt Joint, *Journal of KWJS*, 27(1) (2009), 95-101
8. Y. S. Tarn and W. H. Yang, Optimisation of the weld Bead Geometry in Gas Tungsten Arc Welding by the Taguchi Method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14 (1998), 549-554
9. Hyoung-Jin Park, Seungho Ahn, Munjin Kang, Sehun Rhee, A Study on the Optimization for a V-groove GMA Welding Process Using a Dual Response Method, *Journal of KWJS*, 26(2) (2008), 85-91
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2008.26.2.085>
10. Japanese Welding Society, *Welding and Joining Handbook*, (1990), 252-266
11. Young-kil Yun, Jae-Woong Kim, Seok-chul Yun, Selection of an Optimal Welding Condition for Back Bead Formation in GMA Root Pass Welding, *Journal of KWJS*, 28(5) (2010), 86-92
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2008.26.2.085>