

CO₂ 필렛 용접에서 2차 반응 표면 모델을 활용한 용융 거동 분석 Analysis of melting behavior in CO₂ Fillet Welding Using Second-Order Response Surface Model

김민석* · 배원준** · 박지현** · 이정희*** · 박재섭*** †

Min-Seok Kim*, Won-Jun Bae**, Ji-Hyeon Kwak**, Jung-Hee Lee*** and
Jea-Seob Kwak*** †

(Received 23 July 2025, Revision received 28 August 2025, Accepted 28 August 2025)

초록 : 현대 제조 산업에서 용접 품질 향상과 구조적 안정성 확보를 위하여 공정변수 최적화와 용입 깊이의 정량적 예측은 필수적이다. 본 연구는 CO₂ 필렛 용접 공정에서 하판부 용입 깊이를 주요 분석 대상으로 설정하고, 이를 예측하기 위한 2차 반응 표면 모델을 개발하였다. Box-Behnken 실험 설계를 기반으로 용접 속도, CO₂ 유량, 전류, 전압을 공정변수로 설정하여 총 27회의 실험을 수행하였으며, 열해석을 통해 산출된 heat flux와 용입 깊이 간 상관성을 분석하였다. 그 결과, 최적 공정 조건은 용접 속도 3.3 mm/s, CO₂ 유량 20 l/min, 전류 230 A, 전압 33 V로 도출되었으며, 빠른 용접 속도인 5.0 mm/s의 조건을 제외한 조건에서 두 변수 간 양의 상관관계가 확인되었다. 최종적으로 구축된 2차 반응 표면 모델의 예측 정확도는 약 81%를 나타내어, 용입 깊이 예측에 효과적으로 활용될 수 있음을 입증하였다.

키워드 : 용입 깊이 예측, 2차 반응 표면 모델, 공정 최적화, CO₂ 필렛 용접

Abstract : Accurate prediction of weld penetration and process optimization are critical for enhancing weld quality and structural integrity. This study develops a second-order response surface model to predict lower plate penetration depth in CO₂ fillet welding. Based on the Box-Behnken design, 27 experiments were conducted with welding speed, CO₂ flow rate, current, and voltage as key parameters. Heat flux values from thermal analysis were used to examine their correlation with penetration depth. Optimal conditions were identified as 3.3 mm/s, 20 l/min, 230 A, and 33 V. A clear positive correlation was observed between heat flux and penetration depth, except at the high speed of 5.0 mm/s. The developed model achieved approximately 81% prediction accuracy, confirming its applicability for process optimization and weld quality control.

Key Words : Prediction of Penetration Depth, Second-order Response Surface Model, Process Optimization, CO₂ Fillet Welding

*** † 박재섭(<https://orcid.org/0000-0003-2456-2000>) : 교수,
국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공
E-mail : jskwak5@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6319
*김민석(<https://orcid.org/0009-0009-4281-7688>) : 연구원, 한
국생산기술연구원
**배원준(<https://orcid.org/0009-0000-7368-6101>), 박지현(<https://orcid.org/0009-0000-9079-3742>) : 대학원생, 국립부경대학교
기계공학부 기계공학전공
***이정희(<https://orcid.org/0000-0001-8771-1996>) : 연구원,
국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공

*** † Jae-Seob Kwak(<https://orcid.org/0000-0003-2456-2000>) :
Professor, Mechanical Engineering, Pukyong National University.
E-mail : jskwak5@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6319
*Min-Seok Kim(<https://orcid.org/0009-0009-4281-7688>) : Researcher,
Korea Institute of Industrial Technology.
**Won-Jun Bae(<https://orcid.org/0009-0000-7368-6101>), Ji-Hyeon
Kwak(<https://orcid.org/0009-0000-9079-3742>) : Graduate student,
Mechanical Engineering, Pukyong National University.
***Jung-Hee Lee(<https://orcid.org/0000-0001-8771-1996>) :
Researcher, Mechanical Engineering, Pukyong National
University.

1. 서 론

최근 자동차, 항공우주, 선박 및 배관 시스템 등 다양한 현대 제조 산업에서 제품의 강도와 내구성을 보장하고 효율적인 생산을 위해 용접 성능 개선 및 최적화가 필수적이다.^{1,2)} 특히, 용접부의 강도, 내구성, 기계적 특성을 파악하기 위하여 용접 후 용입 깊이를 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다.³⁾ 용입 깊이를 측정하기 위해서는 용접 부위의 절단 또는 X선, 초음파 검사와 같은 다양한 비파괴 검사 방법이 활용된다.⁴⁾ 그러나 이러한 방법들은 많은 시간과 비용이 소요되므로, 최근에는 다양한 모델을 활용한 용입 깊이 예측 방식이 주목받고 있다.

Lee 등은 레이저 용접에서 알루미늄과 구리의 이종 재료 용입 깊이를 예측하기 위하여 다양한 머신러닝 알고리즘을 적용하였으며, 그중 Gaussian 회귀모델이 평균 절대 백분율 오차 0.2%로 가장 우수한 예측 성능을 나타내었다.⁵⁾ Huang 등은 고강도 강재의 레이저 용접에서 음향 신호와 용입 깊이 간의 관계를 분석하기 위하여 인공신경망(Artificial neural network, ANN)과 다중 회귀 분석을 활용하여 예측 정확도를 향상시켰다.⁶⁾ 또한 Wang 등은 용접 풀의 온도 데이터를 기반으로 머신 비전과 ANN을 결합한 예측모델을 제안하였으며, 4 mm 두께의 탄소강 용입 깊이 예측에서 약 86.6%의 예측 정확도를 달성하였다.⁷⁾ Mishra 등은 알루미늄 합금의 용입 깊이를 예측하기 위하여 회전 속도, 용접 시간, 축 방향 하중 등의 입력 변수를 활용하여 Random forest와 Robust 회귀모델 등 다양한 회귀 기법을 비교 평가하였으며, 그 결과, Robust 회귀모델이 결정 계수(Coefficient of determination, R^2) 0.96으로 가장 우수한 성능을 나타냈다.⁸⁾

이전 연구들을 통해 다양한 모델이 용입 깊이 예측에 효과적임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 CO₂ 필렛 용접 공정에서 반응표면법을 활용하여 최적 조건을 도출하고, 공정 중 발생하는 heat flux와 용입 깊이의 관계를 분석하여 2차 반응 표면 예측모델을 개발하고자 한다.

2. 2차 반응 표면 모델

2차 반응 표면 모델은 독립변수 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_P\}$ 와 종속변수 y 간의 관계를 2차 다항식으로 표현하여 분석하는 기법으로, Fig 1과 같은 과정을 통해 비선형 관계와 변수 간의 복잡한 상호작용을 학습한다. 독립변수 X 에 따른 2차 회귀 방정식은 식 (1)과 같다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i x_i + \sum_{i=1}^P \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

여기서, β 값들은 독립변수로부터 추정되는 2차 회귀식의 회귀 계수를 의미하며, P 는 독립변수의 개수, ϵ 는 오차항을 의미한다.

회귀모델은 최소제곱법(Least squares method, LSM)을 사용하며 식 (2)와 같이 오차 제곱합을 최소화하는 방향으로 계수들을 최적화한다.

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

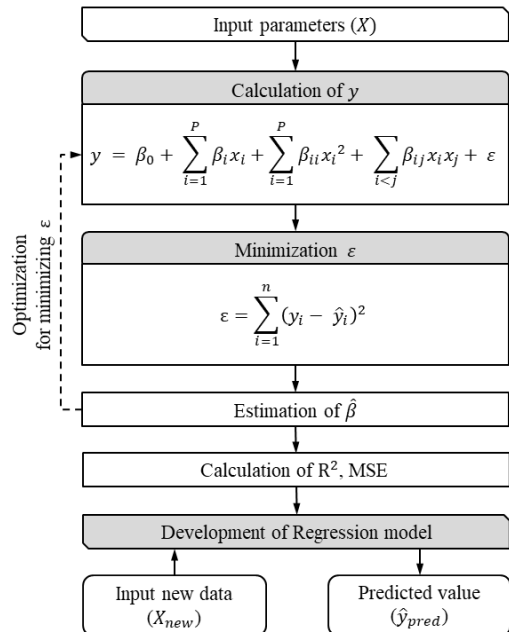


Fig. 1 A flowchart for quadratic regression model

여기서, y_i 와 $\hat{y}_i$ 는 각각 i 번째 데이터에 대한 실측값과 예측값을 의미한다.

특히, 회귀모델의 적합도를 평가하기 위해 성능 평가 지표인 R^2 와 평균 절대 오차(Mean square error, MSE) 값을 통해 예측 성능이 평가된다. 독립변수 X 에 대한 2차 회귀식이 완성되면, 새로운 데이터 X_{new} 에 대한 예측값 $\hat{y}_{pred}$ 을 식 (3)과 같은 과정을 통해 계산할 수 있다.

$$\hat{y}_{pred} = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i x_i^{new} + \sum_{i=1}^P \beta_{ii} (x_i^{new})^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i^{new} x_j^{new} \quad (3)$$

이와 같은 과정을 통해 도출된 2차 반응 표면 모델은 최적화된 회귀 계수들을 활용하여 예측 성능이 높은 모델을 구축할 수 있으며, 비선형 관계를 효과적으로 학습하여 다양한 변수 간 상호작용을 정밀하게 반영할 수 있다.

3. 열해석을 활용한 실험 설계 및 분석

3.1 실험 방법 및 조건

본 연구에서는 CO₂ 필렛 용접 공정에서 발생하는 용입 깊이를 예측하는 모델을 개발하는 것을 목적으로 한다. 특히, 필렛 용접 시 하판부는 아크 열원이 집중되어 응력 집중 및 내부 결함 발생 가능성이 높은 주요 부위로, 용접부의 구조적 안정성에 직접적인 영향을 미친다. 이에 따라 하판부 용입 깊이를 주요 분석 대상으로 선정하였다.

실험에는 직경 1.4 mm의 JSF-71T 와이어를 사용하였으며, Fig. 2는 본 연구에서 수행된 시험편 제작 및 단면 분석 과정을 도시한 것이다. 두께 8 mm의 SS400 모재 2개를 필렛 용접하여 $200 \times 150 \times 100$ mm 크기의 용접 시험편을 제작한 후, band saw를 이용하여 $40 \times 50 \times 30$ mm 크기의 시편 2개를 절단하였다. 이후 폴리싱과 에칭 과정을 통해 용융부 경계를 명확히 하였으며, 이를 기반으로 하판부 용입 깊이 P_{HP} 를 정밀 측정하였다.

다양한 조건에서 발생하는 P_{HP} 의 변화를 분석

하기 위하여 Table 1과 같이 용접 속도, CO₂ 유량, 전류 및 전압을 공정변수로 설정하였으며, 변수간 상호작용과 2차 반응모형을 효율적으로 추정

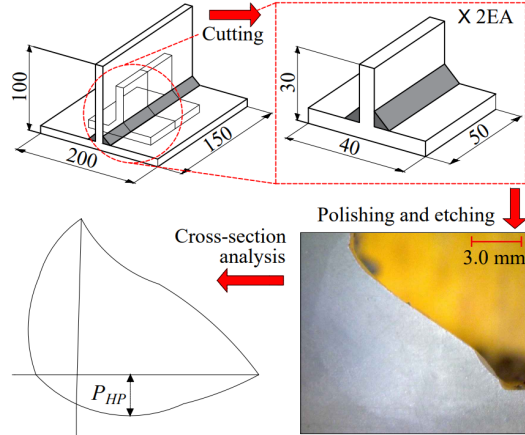


Fig. 2 Preparation of SS400 specimen and cross sectional analysis process

Table 1 Experimental factor and condition

Factor	Value	Unit
Welding speed : A	3.0, 4.0, 5.0	mm/s
CO ₂ flow rate : B	15, 20, 25	l/min
Current : C	190, 210, 230	A
Voltage : D	23, 28, 33	V

Table 2 Experimental conditions of Box-Behnken

No.	Condition	No.	Condition
1	4.0, 20, 230, 23	15	5.0, 20, 210, 23
2	4.0, 20, 190, 33	16	4.0, 20, 210, 28
3	4.0, 25, 230, 28	17	4.0, 20, 210, 28
4	4.0, 20, 210, 28	18	4.0, 25, 210, 23
5	3.0, 20, 230, 28	19	4.0, 20, 190, 23
6	3.0, 25, 210, 28	20	3.0, 20, 210, 23
7	5.0, 20, 210, 33	21	5.0, 15, 210, 28
8	4.0, 15, 230, 28	22	4.0, 15, 190, 28
9	3.0, 15, 210, 28	23	5.0, 20, 230, 28
10	3.0, 20, 190, 28	24	4.0, 25, 190, 28
11	5.0, 25, 210, 28	25	4.0, 15, 210, 23
12	4.0, 20, 230, 33	26	4.0, 15, 210, 33
13	3.0, 20, 210, 33	27	5.0, 20, 190, 28
14	4.0, 25, 210, 33		

할 수 있도록 공정 요인의 수준 변화를 체계적으로 배치하는 Box-Behnken 반응표면 설계⁹⁾를 Table 2와 같이 적용하여 총 27회의 실험을 수행하였다. 또한 실험 결과의 대표성과 일반화를 높이고 불필요한 변동성을 최소화하기 위하여, 각 조건에서 총 6개의 용입 영역 중 평균에 가까운 4개의 데이터를 선정하여 총 108개의 값을 분석 및 예측에 활용하였다.

3.2 Heat flux를 활용한 열해석

CO₂ 필렛 용접 공정 중 발생하는 열적 거동을 정량적으로 분석하고, 실험 설계의 타당성을 확보하기 위하여 heat flux를 기반으로 열해석을 수행하였다. 실제 아크 용접의 열원은 가우시안 분포나 Goldak 이중 타원 분포와 같이 중심부 집중형 특징을 가지지만, 본 연구에서는 공정변수 변화에 따른 상대적 열 거동 비교를 위하여 식 (4)와 같이 균일 분포 모델을 적용하였다.

$$q = \eta \frac{IV}{A} \quad (4)$$

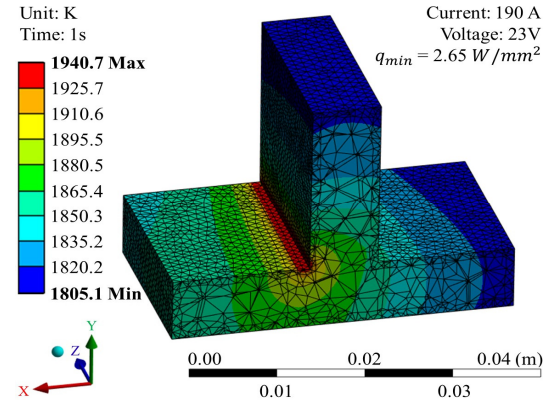
여기서, q 는 heat flux, η 는 용접부의 용접 효율, I 는 전류, V 는 전압, A 는 열이 전달되는 용접 부위의 면적을 나타낸다.

본 연구에서 사용된 JSF-71T 용접부의 용접 효율 η 는 0.85로 적용하였으며, 면적 A 는 상판과 하판 접촉부 전체를 고려하여 계산하였다. 이는 직경 d 인 용접봉이 시편 길이 L 을 따라 이동되며 상판과 하판에 각각 용접이 이루어진다고 가정하여, 식 (5)와 같이 정의된다.

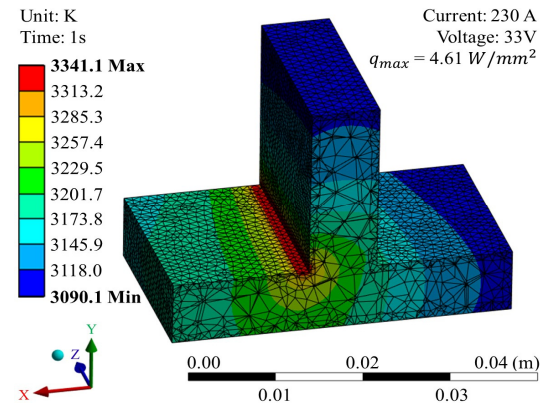
$$A = 2 \times L \times d = 2 \times 50 \times 14 = 1400 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

Box-Behnken 설계에서 도출된 27개의 조건 중 heat flux가 최대 및 최소인 두 조건을 대상으로 정적 열해석을 수행하였다. 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 Ansys workbench를 이용하였으며, 모델은 총 77,042개의 절점 44,667개의 3차원 8절점 열전달 요소 SOLID70으로 구성하였다. 경계 조건은 공기 중 대류를 고려하여 주변 및 초기

온도는 293 K, 대류 열전달계수는 10 W/m²K로 설정하였다. Fig. 3은 heat flux가 가장 낮은 조건과 높은 조건에서의 시편 단면 온도 분포를 나타낸 것이다. 해석 결과, 용접봉과 모재가 접촉하는 영역에서 약 1,940 K에서 최대 3,340 K 사이의 온도 구배가 형성되었으며, 이는 SS400의 녹는점 약 1,700 K을 충분히 초과하는 수준으로 확인되었다. 따라서 Fig. 3에서 확인된 온도 분포는 모든 조건에서 모재의 용융이 안정적으로 발생함을 의미하며, 특히 전류와 전압이 증가할수록 국부 온도가 상승하여 열 입력이 효과적으로 전달되는 것을 보여 준다. 이를 통해 본 연구에서 설정한 전류 및 전압 조건이 열전달 과정에서 적절하게 작용하였음을 확인하였다.



(a) Temperature distribution at q_{min}



(b) Temperature distribution at q_{max}

Fig. 3 Simulation results of temperature distribution

4. 용접 공정 최적화 및 예측 모델 개발

4.1 최적 공정 조건 도출

본 연구에서는 Box-Behnken 실험 설계에 따라 총 27개의 실험을 수행하였으며, 용접 속도, CO₂ 유량, 전류, 전압의 주요 공정변수가 P_{HP} 와 q 에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 4는 다양한 실험 조건에서 P_{HP} 와 q 의 상관관계를 나타낸 것으로, 용접 속도가 5.0 mm/s인 조건인 no. 7, 11, 15, 21, 23, 27 실험을 제외한 대부분의 조건에서 두 변수 간에 뚜렷한 양의 상관성이 존재함을 확인할 수 있었다. 이는 용접 속도가 증가함에 따라 단위 길이당 열 입력이 줄어 용융 영역이 충분히 확장되지 못하여, 다른 조건보다 얇은 용입 깊이가 형성된 것으로 판단된다.

이러한 실험 결과를 기반으로 다중 회귀분석을 수행하여 공정변수와 P_{HP} 및 q 간의 수학적 관계를 모델링하였으며, 두 응답 변수의 동시 최적화를 통해 최적 공정 조건을 도출하였다. 도출된 최적 조건은 용접 속도 3.3 mm/s, CO₂ 유량 20 l/min, 전류 230 A, 전압 33 V로, 해당 조건은 충분한 열 입력과 안정적인 열전달을 가능하게 하여 용입 품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

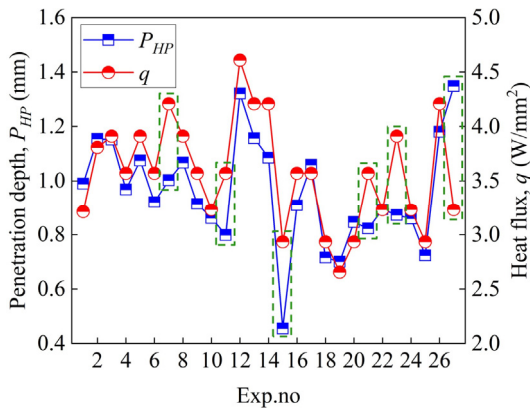


Fig. 4 Correlation between P_{HP} and q

4.2 2차 반응 표면 모델 구축 및 검증

Box-Behnken 실험을 통해 획득한 총 108개의

Table 3 Analysis of variance results for the second-order regression model

Effect	DOF	F-value	P-value
Model	14	3.66	0.015
Linear	4	2.38	0.110
Welding speed	1	0.93	0.354
CO ₂ flow rate	1	0.01	0.935
Current	1	8.53	0.013
Voltage	1	0.07	0.802
Quadratic	4	1.92	0.172
Interaction (2 nd order)	6	1.46	0.272
Welding speed × Current	1	7.21	0.020
Lack of fit	10	3.27	0.257

데이터를 기반으로 2차 반응표면 회귀모델을 구축하였으며, 모델의 통계적 유의성을 평가하기 위하여 분산분석을 수행하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이, 전체 모형의 F-값은 3.66, P-값은 0.015로 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의함을 확인하였다. 요인별 분석 결과, 전류가 P-값 0.013으로 가장 큰 영향을 미치는 변수로 나타났으며, 용접 속도와 전류 간의 2차 교호작용 또한 P-값 0.020으로 통계적으로 유의한 항으로 도출되었다. 반면, CO₂ 유량과 전압은 단일 변수로서 통계적 유의성이 없는 것으로 분석되었다.

회귀 계수의 소수점 자릿수가 길어 해석 및 적용에 어려움이 있으므로, 예측식의 종속변수인 P_{HP} 에 10⁴를 곱한 가중 용입 깊이 $\widetilde{P}_{HP}$ 로 회귀식을 재정의하였다. 최종 회귀식은 식 (6)과 같으며, A, B, C, D는 각각 용접 속도, CO₂ 유량, 전류, 전압을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 \widetilde{P}_{HP} &= -2,700 + 19,620A + 540B - 576C \\
 &\quad + 1,480D - 61.3A^2 - 21.4B^2 + 2.36C^2 \\
 &\quad - 10.2D^2 - 15AB - 86.2AC \\
 &\quad + 118AD + 2.98BC - 9.2BD - 3.7CD
 \end{aligned} \quad (6)$$

모델의 예측력 평가는 R^2 와 MSE를 활용하여 수행하였으며, R^2 는 0.810, MSE는 0.017로 비교적 높은 예측 정확도를 보였다. 또한, 적합성 결여 검증에서 P-값이 0.257로 나타나 모델의 적합성도 충분히 확보되었음을 확인할 수 있었다. 모델의 신뢰성 검증을 위하여 최적 조건에서 추가 실험을 수행한 결과, 예측된 P_{HP} 는 1.369 mm, 실제 측정된 P_{HP} 는 1.340 mm로, 두 값 간의 오차율은 2.12%로 나타났다. 이는 제안된 회귀모델이 CO₂ 필렛 용접 공정에서 용입 깊이 예측에 대해 우수한 정확도와 신뢰도를 확보하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 구축된 반응 표면 회귀모델은 Box-Behnken 실험 설계 범위 내에서 검증되었으며, 해당 인자 수준 내에서 적용 가능성이 확인되었다. 범위를 벗어난 조건의 경우, 추가적인 검증이 필요하지만, 인접한 조건에서는 물리적 타당성을 바탕으로 일정 수준의 활용이 가능할 것으로 기대된다. 더 나아가, 향후 연구에서는 인공지능 기법을 결합하여 모델을 확장함으로써 넓은 공정 조건에서도 적용 가능성을 확보할 수 있을 것으로 전망된다.

5. 결 론

본 연구에서는 CO₂ 필렛 용접 공정의 용입 깊이 예측을 위해 반응표면법 기반의 2차 회귀모델을 개발하였다. Box-Behnken 실험 설계를 통해 용접 속도, CO₂ 유량, 전류, 전압 등의 주요 공정변수가 용입 깊이에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며, 열해석을 통한 heat flux 데이터와의 상관관계도 함께 파악하였다.

분석 결과, 전류 및 용접 속도와 전류 간 2차 교호작용이 용입 깊이에 가장 유의미한 영향을 미치는 인자로 확인되었으며, 최적 공정 조건으로는 용접 속도 3.3 mm/s, CO₂ 유량 20 l/min, 전류 230 A, 전압 33 V로 도출되었다. 구축된 2차 반응 표면 회귀모델은 R^2 0.810 및 MSE 0.017로 높은 예측력을 나타냈으며, 최적 조건에서 수행한 검증 실험에서는 실제 측정값과 예측값 간 오차율이

2.12%에 불과하여 모델의 신뢰성과 실용성을 입증하였다.

따라서 본 연구에서 제안한 2차 회귀모델은 CO₂ 필렛 용접 공정의 용입 깊이 예측 및 공정 최적화에 효과적으로 활용될 수 있으며, 용접 품질 향상 및 생산 효율 증대에 기여할 것으로 기대된다.

Author contributions

M. S. Kim; Conceptualization, Manufacturing, Formal analysis. W. J. Bae; Methodology, Writing-original draft. J. H. Kwak; Simulation, Writing-original draft. J. H. Lee; Data analysis, Writing-review & editing. J. S. Kwak; Supervision, Writing-review & editing.

References

1. G. Chianese, P. Franciosa, J. Nolte, D. Ceglarek and S. Patalano, 2022, "Characterization of Photodiodes for Detection of Variations in Part-to-part Gap And Weld Penetration Depth during Remote Laser Welding of Copper-to-steel Battery Tab Connectors", Journal of Manufacturing Science and Engineering, 144(7), 071004. (<https://doi.org/10.1115/1.4052725>)
2. S. Li, P. Jiang, Y. Gao, M. Song and L. Shu, 2023, "A Penetration Depth Monitoring Method for Al-Cu Laser Lap Welding based on Spectral Signals", Journal of Materials Processing Technology, 317, 117972. (<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117972>)
3. M. Kos, E. Arko, H. Kosler and M. Jezeršek, 2021, "Penetration-depth Control in a Remote Laser-welding System based on an Optical Triangulation Loop", Optics and Lasers in Engineering, 139, 106464. (<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106464>)
4. M. Pan, Y. Li, S. Sun, W. Liao, Y. Xing and W. Tang, 2022, "A Study on Welding Characteristics, Mechanical Properties, and

- Penetration Depth of T-Joint Thin-walled Parts for Different TIG Welding Currents: FE Simulation and Experimental Analysis”, *Metals*, 12(7), 1157.
(<https://doi.org/10.3390/met12071157>)
5. K. D. Lee, S. H. Kang, M. J. Kang, S. Yi, S. K. Hyun and C. H. Kim, 2021, “Modeling of Laser Welds Using Machine Learning Algorithm Part I: Penetration Depth for Laser Overlap Al/Cu Dissimilar Metal Welds”, *Journal of the Korean Welding and Joining*, 39(1), 27-35.
(<https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.1.3>)
6. W. Huang and R. Kovacevic, 2011, “A Neural Network and Multiple Regression Method for the Characterization of the Depth of Weld Penetration in Laser Welding based on Acoustic Signatures”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22, 131-143.
(<https://doi.org/10.1007/s10845-009-0267-9>)
7. Y. Wang, W. J. Lee, S. B. Jang, V. D. Truong, Y. H. Jeong, C. H. Won, J. W. Lee and J. H. Yoon, 2024, “Prediction of Internal Welding Penetration based on IR Thermal Image Supported by Machine Vision and ANN-model during Automatic Robot Welding Process”, *Journal of Advanced Joining Processes*, 9, 100199.
(<https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100199>)
8. A. S. Bahedh, A. Mishra, R. Al-Sabur and A. K. Jassim, 2022, “Machine Learning Algorithms for Prediction of Penetration Depth and Geometrical Analysis of Weld in Friction Stir Spot Welding Process”, *Metallurgical Research & Technology*, 119(3), 305.
(<https://doi.org/10.1051/metal/2022032>)
9. Siswanto et al., 2024, “Box- Behnken Response Surface Methodology: An Analysis of the Effect of Variations in TIG Welding Parameters on Tensile Strength and Hardness Using SUS 304 Material”, *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 48(3), 313.
(<https://doi.org/10.18280/acsm.480302>)