

# 듀얼 반응 표면법을 이용한 V-그루브 CO<sub>2</sub> 용접 공정의 최적화

## Optimization for a V-Groove CO<sub>2</sub> Gas Metal Arc Welding Process Using Dual Response surface Method

박 형진\*, 강 문진\*\*, 안 승호\*\*\*, 이 철구\*\*\*\*, 이 세현\*\*\*\*\*

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 한국생산기술연구원 정밀접합팀

\*\*\* 한국철도대학 운전기전학과

\*\*\*\* 서울산업대학교 기계공학과

\*\*\*\*\* 한양대학교 기계공학부

### 1. 서 론

아크 용접은 전극과 모재 사이에 전기 아크를 발생시키고 그것들을 가열시켜 접합시키는 공정이다. 가열 및 응고에 의해 형성된 용접부의 기계적 성질은 용접 비드 형상과 밀접한 관계를 가지고 있다. 용접 비드 형상 변수인 비드 폭, 비드 높이, 용입 깊이, 이면비드 폭은 용접공정변수인 용접 전류, 용접 전압, 용접 속도 등에 의해 결정된다. 따라서 양호한 용접품질을 나타내는 용접 비드 형상을 얻기 위해서는 적절한 용접 공정 변수의 선택이 필요하다.

그러나 용접공정은 다중 입·출력 공정이고, 용접비드 형상 변수들은 서로 커플 되어 있기 때문에 원하는 용접공정변수를 얻는다는 것은 쉽지 않다. 또한, 작업 환경의 변화나 외란이 존재할 경우에는 만족할 수 있는 용접품질을 얻을 수 없다. 이런 문제를 해결하기 위해서 외란에 대해서 용접품질이 크게 영향을 받지 않는 용접 조건을 결정해야 한다.

본 연구에서는 용접공정변수의 평균뿐만 아니라 분산까지 고려한 듀얼 반응표면분석법을 사용하여 작업환경 변화나 외란이 존재하는 경우에도 만족할 수 있는 용접품질을 얻도록 하였다.

### 2. 실 험

#### 2.1 실험방법

본 연구에서 사용한 듀얼 반응표면에 의한 용접 공정 최적화 방법은 다음과 같다. 첫 번째 단계는 관심 영역을 찾기 위한 목적으로 유전자 알고리즘을 이용하여 근사 최적점을 찾았으며<sup>(1)(2)</sup>,

근사 최적점 근방에서 중심 합성 계획법을 이용하여 용접 공정변수를 설정하고, 실험을 수행한 후, 용접 형상변수를 측정하였다. 마지막으로 용접 비드 형상을 최적화하는 용접 공정의 모델을 유도하여 용접 비드형상을 최적화하는 용접 공정 변수를 결정하였다. 본 실험에서 외란을 주기위해 루트면 간격을 0.8~1.2mm의 변동을 주었다.

용접시편은 두께가 8.8mm인 연강으로 루트면 높이가 3mm인 V-그루브 형이다. 전극 와이어는 AWS classification ER 70S-6 이고, 이 전극 와이어의 지름은 1.2mm, CTWD는 20mm이다. 실험에 이용된 보호가스는 100% CO<sub>2</sub> 가스이며, 가스의 유량은 20 l/min 이다. 용접전원은 정전압 특성의 용접기를 사용하였다.

#### 2.2 용접품질함수

용접부의 비드형상은 용접 품질과 직접적인 상관관계를 가지고 있다. 비드형상은 식(1)의 용접 품질 함수값(J)으로 표현하였으며, 함수값이 클수록 용접품질이 좋아진다.

$$J = \hat{j}(W) + \hat{j}(H) + \hat{j}(P) + \hat{j}(B) + \hat{j}(S) \quad (1)$$

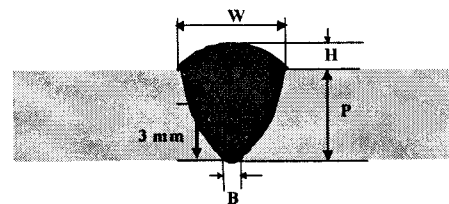


Fig. 1 Weld bead geometry

Fig.1에서 보는 바와 같이 용접 비드의 기하학적 형상인 비드 폭(W), 비드 높이(H), 용입 깊이(P), 이면 비드 폭(B) 및 생산성을 고려한 용접

속도(S)로 표현하였다. 식(2)~식(6)은 식(1)의 각 변수들의 함수를 나타내고 있다.

$$\hat{j}(W) = \begin{cases} \sin((W-5) \times \pi/8) & 5 \leq W \leq 9 \\ \frac{1}{\sin((W-12) \times \pi/8 + \pi/2)} & 9 \leq W \leq 12 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{j}(H) = \begin{cases} \sin(H \times \pi/4) & 0 \leq H \leq 2 \\ \sin((H-2) \times \pi/4 + \pi/2) & 2 \leq H \leq 4 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\hat{j}(P) = \begin{cases} \sin((P-8.8) \times \pi/2) & 8.8 \leq P \leq 9.8 \\ \frac{1}{\sin((P-10.2) \times \pi/4 + \pi/2)} & 9.8 \leq P \leq 10.2 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{j}(B) = \begin{cases} \sin((B-5) \times \pi/10) & 0 \leq B \leq 5 \\ \frac{1}{\sin((B-5.2) \times \pi/5.6 + \pi/2)} & 5 \leq B \leq 5.2 \\ 0 & 5.2 \leq B \leq 8 \\ & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$\hat{j}(S) = S/10 \quad (6)$$

식(1)~식(5)에 함수들은 두께 8.8mm의 용접부에서 이상적인 비드 형상이 만들어지도록 전문가의 경험과 실험 데이터에 의해 선정되었다. 또한, 용접속도(S)가 빠르면 생산성이 높다고 할 수 있으므로 선형적 함수로 관계를 구성하였다. 그리고 개발된 함수들은 이전 연구<sup>(1)</sup>에서 용접강도에 대한 실험을 통해 예측함수 값이 높을수록 용접부의 강도가 우수함을 입증하였다.

### 2.3 중심합성계획

본 연구에서는 듀얼 반응표면에 대한 용접 공정의 입력변수는 용접전압(X<sub>1</sub>), 용접전류(X<sub>2</sub>), 용접속도(X<sub>3</sub>)이며, 출력변수는 용접품질함수값의 평균과 표준편차이다.

듀얼 반응표면에 대한 실험계획법으로 중심합성계획법<sup>(3)</sup>을 사용하였으며, Table 1은 중심합성계획에 사용된 각 입력변수의 수준을 나타내고 있다.

Table 1 Central composite design experimental results

NO.	Natural Unit			Coded Unit			Result	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	μ	σ
1	37	330	9	1	1	1	3.0064	0.38053
2	37	330	5	1	1	-1	3.0212	0.40655
3	37	250	9	1	-1	1	3.1257	0.45742
4	37	250	5	1	-1	-1	2.9634	0.23498
5	25	330	9	-1	1	1	2.4090	0.17869
6	25	330	5	-1	1	-1	1.0352	0.28218

7	25	250	9	-1	-1	1	2.9490	0.44132
8	25	250	5	-1	-1	-1	1.2863	0.16312
9	31	290	7	0	0	0	4.2673	0.14910
10	31	290	7	0	0	0	4.3855	0.12710
11	40	290	7	1.5	0	0	2.8038	0.22317
12	22	290	7	-1.5	0	0	1.9113	0.17300
13	31	350	7	0	1.5	0	2.8918	0.40186
14	31	230	7	0	-1.5	0	3.5665	0.30979
15	31	290	10	0	0	1.5	3.0699	0.22506
16	31	290	4	0	0	-1.5	2.1874	0.12162

## 3. 장 실험결과

### 3.1 V-Groove 아크 용접 실험 결과

본 연구에서는 Table 1의 입력변수에 대한 출력변수의 실험결과를 이용하여 2차 회귀모델을 유도하였다. 최소제곱법에 의해 결정된 용접품질함수값의 평균과 표준편차에 대한 회귀모델은 식(7),(8)과 같다.

$$\hat{\mu} = 4.2337 + 0.4621 \times x_1 - 0.1492 \times x_2 + 0.3606 \times x_3 + 0.0912 \times x_1 x_2 - 0.3611 \times x_1 x_3 - 0.0582 \times x_2 x_3 - 0.7789 \times x_1^2 - 0.3915 \times x_2^2 - 0.6584 \times x_3^2 \quad (7)$$

$$\hat{\sigma} = 0.1238 + 0.0392 \times x_1 + 0.0071 \times x_2 + 0.0421 \times x_3 + 0.0298 \times x_1 x_2 + 0.0027 \times x_1 x_3 - 0.0788 \times x_2 x_3 + 0.0415 \times x_1^2 - 0.1116 \times x_2^2 + 0.0305 \times x_3^2 \quad (8)$$

회귀분석을 통해 구해진 회귀모델은 F-검정과 결정계수를 통해 용접공정을 표현하는데 타당함을 확인하였다.

Table 2 Analysis of variance for the mean

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F <sub>0</sub>	F (0.05)
Regression	9	11.8874	1.3208	18.9560*	4.10
Error	6	0.4181	0.0697		
Total	15	12.3055			

Table 3 Analysis of variance for the standard deviation

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F <sub>0</sub>	F (0.05)
Regression	9	0.1922	0.0214	9.2699*	4.10
Error	6	0.0138	0.0023		
Total	15	0.2060			

### 3.2 V-Groove 아크 용접 공정의 최적화

용접품질 함수값의 평균과 표준편차에 대한 회귀함수를 이용하여 다음과 같은 목적함수를 정의하였다.

$$D(X) = (\hat{\mu} - 5)^2 + \hat{\sigma}^2 \quad (9)$$

식(8)에서 목적함수 값에서 평균( $\hat{\mu}$ )이 5에 가깝고, 표준편차( $\hat{\sigma}$ )가 0에 가까울수록 목적함수 값은 작아지며, 가장 작은 목적함수 값이 최적조건이 된다. 최적조건을 구하기 위해서 관심영역에서 목적함수를 최소로 하는 입력변수를 구했다.

입력변수의 Code values는  $(x_1, x_2, x_3)=(0.2312, -0.1675, 0.2061)$ 이고, natural values는  $(X_1, X_2, X_3)=(32.3872, 283.3, 7.4122)$ 이며, 최적 조건에서 예측된 평균과 표준편차는  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})=(4.3405, 0.1487)$ 이며, 이때의 목적함수는  $D(X)=0.4570$ 이다.

Fig. 2(a),(b)는 평균과 표준편차에 대한 목적함수의 그래프이다. A, B점은 레벨 커브상의 극점으로써 최적점에 해당한다.

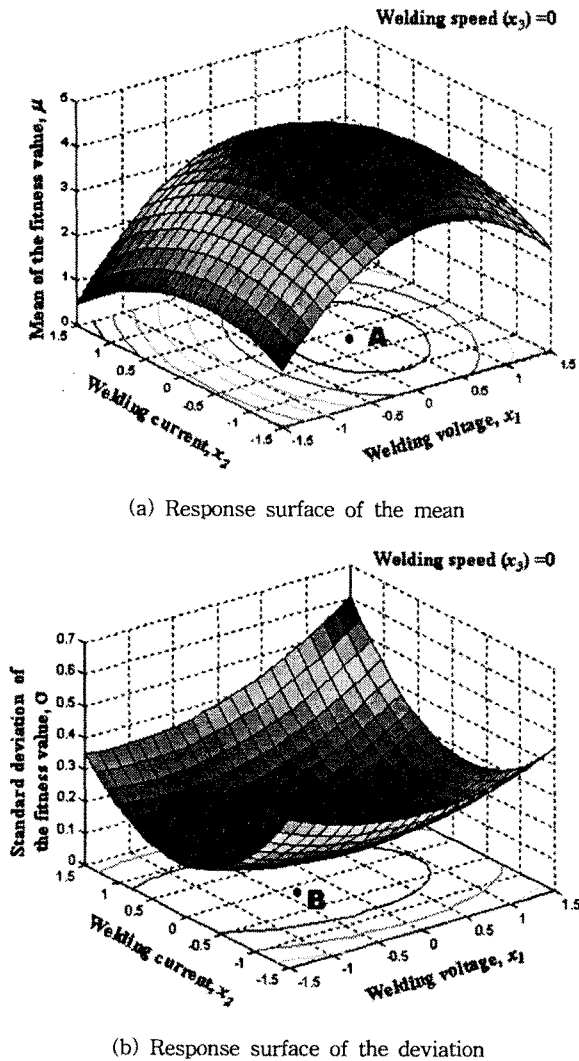


Fig. 2 Response surface of using grid-search method

Fig. 3은 격자탐색법에 의한 최적 용접 조건에서의 실제 용접부 단면 사진이며, 최적의 용접 비드 형상을 얻었음을 확인 할 수 있다.

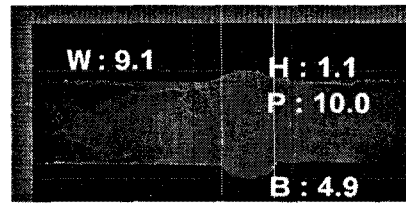


Fig. 3 cross section of optimal welding condition

Table 4는 본 연구에서 제안한 평균과 표준편차를 고려하여 결정된 최적조건과 출력변수의 평균만을 고려하여 결정된 최적조건을 비교하였다. 평균만을 고려한 최적화 방법에서 사용한 목적함수는 식(10)과 같다.

$$D(X) = (\hat{\mu} - 5)^2 \tag{10}$$

Table 4 Comparison of the optimal condition

Object function	Optimal Condition	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
$(\hat{\mu} - 5)^2$	(0.2358, -0.1792, 0.2171)	4.3407	0.1502
$(\hat{\mu} - 5)^2 + \hat{\sigma}^2$	(0.2312, -0.1675, 0.2061)	4.3405	0.1487

Table 4의 결과로부터 듀얼 반응표면에 의한 최적해는 평균만을 고려한 최적해보다 표준편차가 적은 양호한 결과를 얻었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 작업환경 변화나 외란에 민감하지 않도록 출력변수의 평균과 표준편차를 고려한 듀얼 반응표면법을 이용하여 루트면 높이 3mm인 경우에 대한 V-그루브 탄산가스 메탈 아크 용접 공정의 최적조건을 결정하였다.

또한, 평균과 표준편차를 고려한 최적해가 평균만을 고려한 최적해보다 작업환경 변화나 외란에 강건함을 보였다.

#### 참고문헌

1. S.H. Ahn, and S.H. Rhee : "A V-groove CO<sub>2</sub> gas metal arc welding process with root face height using genetic algorithm", international journal of KWS, Vol.3, No.2,(2003)
2. D.C. Kim and S.H. Rhee : "Optimization of welding process parameters for an arc welding process using a genetic algorithm", Welding Journal, 80-6, (2001), 4505-4515
3. S.H. Park : "Design of experiments" MinyoungSa, (2004)