

## 듀얼 반응표면법을 이용한 V-그루브 GMA 용접공정 최적화에 관한 연구

박형진\* · 안승호\*\* · 강문진\*\*\* · 이세현\*

\*한양대학교 대학원 기계공학과

\*\*한국철도대학 운전기전과

\*\*\*한국생산기술연구원 정밀접합팀

### A Study on the Optimization for a V-groove GMA Welding Process Using a Dual Response Method

Hyoung-Jin Park\*, Seungho Ahn\*\*, Munjin Kang\*\*\* and Sehun Rhee\*

\*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*Department of Train Operation & Mechatronics, Korea National Railroad College, Uiwang 437-763, Korea

\*\*\*Advanced Welding & Joining Research Team, KITECH, Incheon 406-840, Korea

#### Abstract

In general, the quality of a welding process tends to vary with depending on the work environment or external disturbances. Hence, in order to achieve the desirable quality of welding, we should have the optimal welding condition that is not significantly affected by these changes in the environment or external disturbances. In this study, we used a dual response surface method in consideration of both the mean output variables and the standard deviation in order to optimize the V-groove arc welding process. The input variables for GMA welding process with the dual response surface are welding voltage, welding current and welding speed. The output variables are the welding quality function using the shape factor of bead geometry.

First, we performed welding experiment on the interested area according to the central composite design. From the results obtained, we derived the regression model on the mean and standard deviation between the input and output variables of the welding process and then obtained the dual response surface. Finally, using the grid search method, we obtained the input variables that minimize the object function which led to the optimal V-groove arc welding process.

\*Corresponding author :srhee@hanyang.ac.kr

(Received February 4, 2008)

Key Words : Central composite design, Dual response surface method, Bead geometry, Object function, Optimization, V-groove GMA Welding

#### 1. 서 론

가스 메탈 아크용접은 용가재로서 작용하는 소모성 와이어를 일정한 속도로 용융지에 공급하면서 와이어와 모재 사이에 아크를 일으켜 용접하는 공정이다. 이러한 가스 메탈 아크용접에서의 용접부의 기계적 성질은 용접비드 형상과 밀접한 관계가 있다.

용접부의 기계적 성질과 용접비드 형상에 관한 연구로는 GMA 용접에서 용접공정변수와 비드형상의 관계를 규명한 연구<sup>1-2)</sup>와 용접비드 형상을 수학적 모델에 의한 예측 및 용접공정변수와 용접비드 폭의 상관관계를 규명한 연구<sup>3)</sup> 등이 있으며 이를 통해 용접부의 기계적 성질을 나타내는 용접비드 형상은 용접공정변수에 의해 결정됨을 알 수 있다<sup>4)</sup>. 즉, 비드 폭(bead width), 비드 높이(bead height), 용입 깊이(penetration),

이면 비드 폭(back-bead width)등과 같은 용접비드 형상은 용접전류, 용접전압, 용접속도, 심선 송급속도, 보호가스 등과 같은 용접공정변수(welding process parameters)에 의해 결정되며, 양호한 용접품질을 나타내는 용접비드 형상을 얻기 위해서는 적절한 용접공정변수의 선택이 필요하다.

그러나 용접공정은 다중 입·출력 공정이고, 용접비드 형상변수들은 서로 커플 되어있기 때문에, 시행 착오법에 의해 용접공정변수를 조정하여 원하는 용접비드 형상을 얻는 것은 많은 실험과 노력을 필요로 한다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 유전자 알고리즘을 이용한 용접공정의 최적화를 제안하였다<sup>4)</sup>. 이 방법은 용접공정변수의 근사 최적조건을 설정할 수 있는 단계로써 매우 유용하다. 그러나 이와 같은 용접공정의 최적화에 관한 연구는 유도된 용접공정 모델이 정확하고, 작업환경의 변화나 외란이 없다는 가정 하에 최적조건이 결정되기 때문에 용접 중 작업환경의 변화나 외란이 존재할 경우에는 만족할 수 있는 용접품질을 얻을 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 외란에 의해 용접품질이 크게 영향을 받지 않는 용접조건을 결정해야 한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 다구찌 방법(Taguchi method)을 이용한 용접공정의 최적화 방법이 제안되었다<sup>5-6)</sup>. 다구찌 방법은 출력변수의 평균뿐만 아니라 분산까지 고려하여 최적 공정변수를 결정하는 방법이며, 여러 공정에 적용되어 생산품의 품질 향상에 크게 기여하였다. 그러나 다구찌 방법은 변수들간의 교호작용(interaction)을 충분히 고려하지 못하고 축차실험(sequential experiment)이 불가능하다는 문제점 등을 가지고 있다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해 Vining과 Myers<sup>7)</sup>는 반응표면분석법(response surface method)을 이용하여 다구찌 방법의 목적을 포함하는 방법을 제안하였다. 이 방법에서 그들은 Myers와 Carter<sup>8)</sup>에 의해 개발된 듀얼 반응표면법을 이용하였다. 다구찌 방법에서는 신호 대 잡음비(signal-to-noise, S/N ratio)에 근거하여 최적조건이 결정되지만, 듀얼 반응표면법은 출력변수의 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)에 대한 회귀모델을 유도하고, 이로부터 최적화 문제를 정의함으로써 외란에 의해 용접품질이 크게 영향을 받지 않는 최적 용접조건을 결정할 수 있다.

본 연구에서는 V-그루브 아크용접 공정에서 외란에 의해 크게 영향 받지 않는 양호한 용접품질을 얻기 위해 듀얼 반응표면법을 이용하여 용접공정변수를 최적화하였다. 먼저, 관심영역에 대하여 직교중심합성계획

(orthogonal central composite design)<sup>9-10)</sup>에 의해 실험을 수행하였고 둘째로, 실험결과에 근거한 회귀분석(analysis of regression)을 통해 출력변수의 평균 및 표준편차에 대한 각각의 회귀모델을 획득하였다. 마지막으로 유도된 모델과 제한조건에 근거하여 V-그루브 아크용접 공정의 최적조건을 결정하였다.

## 2. 실험 방법

8.8mm 연강재의 V-그루브 단층 용접(single-pass welding)에서 양호한 용접품질을 얻기 위한 실험조건은 다음과 같다. 모재는 두께가 8.8mm인 연강이고, 이음 형태는 루트면 높이가 3mm 인 V-그루브 형이며, 외란을 고려하여 루트 간격의 변동을 주었으며 변동 범위는 0.8~1.2mm로 선정하였다. 전극 와이어는 AWS 규격 ER 70S-6이고, 이 전극 와이어의 지름은 1.2mm, CTWD(Contact tube to work distance)는 20mm 이다. 실험에 이용된 보호 가스는 100% CO<sub>2</sub> 가스이며, 가스의 유량은 20 l/min이다. 그리고 용접에 사용된 용접전원은 정전압 특성의 용접기를 사용하였다.

## 3. V-그루브 아크용접 최적화

본 연구에서 사용한 듀얼 반응표면에 의한 용접공정 최적화 방법은 다음과 같다. 첫 번째 단계로 관심영역에서 중심합성계획에 의해 용접실험을 수행하였고, 실험 후, 용접형상변수를 측정하였다. 두 번째 단계에서는 용접공정 입력변수와 용접형상변수인 출력변수 사이에서 평균과 표준편차에 대한 회귀모델을 얻어 용접공정의 모델을 유도하였으며, 마지막으로 격자 탐색법을 이용하여 반응표면을 분석하고 목적함수 값을 최소화 하는 입력변수를 구함으로써 V-그루브 아크용접 공정을 최적화하였다.

### 3.1 V-그루브 아크용접 품질함수

일반적으로 용접공정은 작업환경의 변화나 외란에 의해 용접품질이 달라지며, 이러한 영향을 받지 않는 최적의 용접조건을 선정해야 한다. 본 연구에서는 최적 용접조건을 선정기준으로 용접부의 기계적 성질과 밀접한 관계를 가지고 있는 용접부의 비드형상으로 표현하였다. 비드형상은 식 (1)의 용접품질함수 값(J)으로 표현하였으며, 함수 값이 클수록 용접품질이 좋아진다.

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

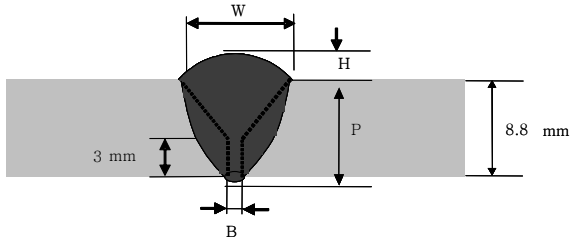
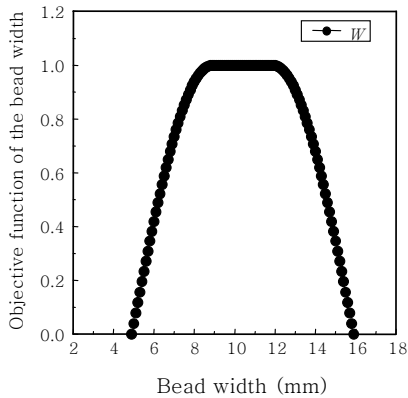


Fig. 1 Weld bead geometry

여기서  $W, H, P, B, S$  는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 용접비드의 기하학적 형상인 비드 폭  $W$ , 비드 높이  $H$ , 용입 깊이  $P$ , 이면비드 폭  $B$  및 생산성을 고려한 용접속도  $S$  로 표현하였다.

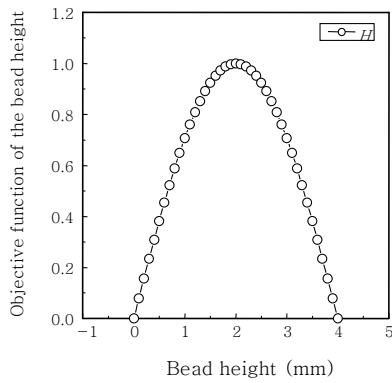
식 (2)~식 (6)은 식 (1)의 각 변수들의 함수를 나타내고 있으며, Fig. 2에서는 각 변수들의 함수를 그래프로 나타내고 있다.

식 (2)~식 (6)에 함수들은 두께 8.8mm의 연강재의 V-그루브 단층(single-pass) 용접부에 이상적인 비



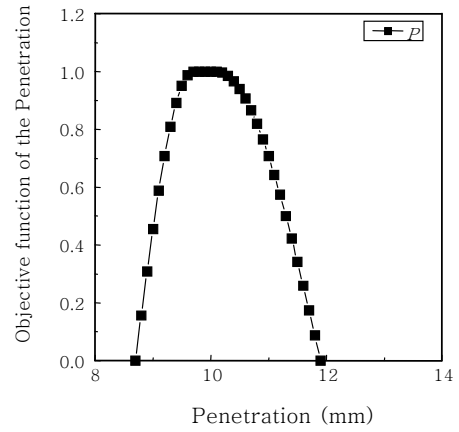
$$\hat{j}(W) = \begin{cases} \sin((W-5) \times \pi/8) & 5 \leq W \leq 9 \\ 1 & 9 \leq W \leq 12 \\ \sin((W-12) \times \pi/8 + \pi/2) & 12 \leq W \leq 16 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

(a) Objective function of the bead width( $\hat{j}(W)$ )



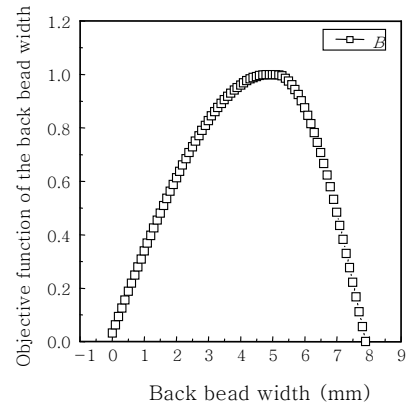
$$\hat{j}(H) = \begin{cases} \sin(H \times \pi/4) & 0 \leq H \leq 2 \\ \sin((H-2) \times \pi/4 + \pi/2) & 2 \leq H \leq 4 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

(b) Objective function of the bead height( $\hat{j}(H)$ )



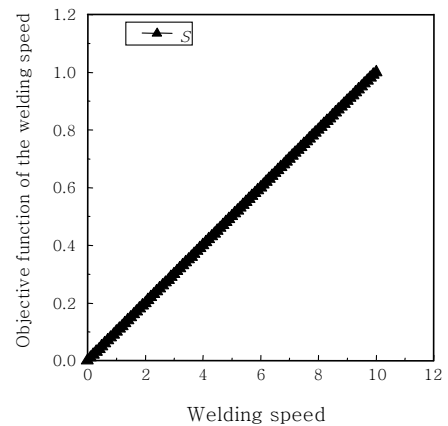
$$\hat{j}(P) = \begin{cases} \sin((P-8.8) \times \pi/2) & 8.8 \leq P \leq 9.8 \\ 1 & 9.8 \leq P \leq 10.2 \\ \sin((P-10.2) \times \pi/4 + \pi/2) & 10.2 \leq P \leq 12.2 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

(c) Objective function of the penetration( $\hat{j}(P)$ )



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

(d) Objective function of the back bead width( $\hat{j}(B)$ )



$$\hat{j}(S) = \{S/10 \quad 0 \leq S \leq 10\} \quad (6)$$

(e) Objective function of the welding speed( $\hat{j}(S)$ )

Fig. 2 Quality function with geometric condition of the weld part

드 형상이 만들어지도록 전문가의 경험과 실험 데이터에 의해 선정되었다<sup>11)</sup>. 용접속도(S)는 생산성에 대한 항목으로 용접속도가 빠르면 생산성이 높다고 할 수 있으므로 선형적 함수관계로 구성하였다.

듀얼 반응표면에 대한 용접공정의 입력변수는 용접전압( $X_1$ ), 용접전류 ( $X_2$ ), 용접속도( $X_3$ )로 선정하였으며, 출력변수는 각 실험 조건에서 2회 용접 후, 시편의 4곳에서 비드의 단면형상을 측정하여 용접품질함수 값 ( $J$ )의 평균과 표준편차를 계산하였다.

### 3.2 직교중심합성계획

본 연구에서는 듀얼 반응표면에 대한 실험계획법으로 직교중심합성계획을 사용하였다. 반응표면분석을 위하여 사용되는 실험 계획법의 대표적인 예는  $2^k$ 요인배치법( $2^k$  factorial design), 심플렉스 계획법(simplex design),  $3^k$ 요인배치법( $3^k$  factorial design)과 중심합성계획법(central composite design)등이 있다<sup>12)</sup>.

$2^k$ 요인배치법과 심플렉스 계획법은 실험 횟수가 적은 장점이 있지만, 각 변수의 두 수준에서만 실험이 되므로 변수의 수준 변화에 따라서 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없으며, 2차 회귀모형에서 제곱항  $x_i^2$ 의 계수  $\beta_{ij}$ 등을 추정할 수 없다. 반면  $3^k$ 요인배치법은 각 변수의 3 수준에서 실험이 되므로 변수의 수준 변화에 따라서 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 있고, 2차 회귀모형에서 제곱항  $x_i^2$ 의 계수  $\beta_{ij}$ 등은 추정할 수 있다. 그러나 실험 횟수는  $k$ 가 클수록 기하급수적으로 많아지는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 적은 횟수의 실험으로 반응량의 곡면적인 변화를 감지하기 위해 중심점(center points)과 축점(axial points)을  $2^k$ 요인배치법에 추가 시킨 중심합성계획을 제안하였다. 중심합성계획은 Box와 Wilson에 의하여 제안된 것으로서<sup>13)</sup>, 적은 실험 횟수로 2차 회귀모형을 유도 할 수 있는 장점이 있어 반응 표면분석법에서 많이 사용되고 있는 실험계획법이다. 중심합성계획법에서는 중심점의 수는 제한 없이 하나 이상이면 되고, 축점의 수는  $2k$ 개가 된다. 여기서  $k$ 의 값은 0이 아닌 양수이면 된다. 중심점의 수를  $n_0$ 개라면 중심합성계획의 실험 횟수( $N$ )는 식 (7)과 같이 되며 이 숫자는  $k > 2$ 인 경우에는  $3^k$ 요인배치법보다 훨씬 적은 실험 횟수를 가지게 된다. 또한 중심합성계획이 갖는 또 하나의 장점은 축차실험(sequential experiments)이 가능하다는 것이다.

$$N = 2^k + 2k + n_0 \tag{7}$$

용접공정 독립변수의 수가  $k$ 인 2차 회귀모형은 식 (8)와 같다. 식 (8)에서  $k$ 는 인자의 개수이며,  $\beta_0$ 는  $y$ 절편,  $\beta_i$ 는 1차항의 계수,  $\beta_{ij}$ 는 2차항의 계수를 나타낸다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \tag{8}$$

식 (8)에서 2차 회귀모형의 회귀계수  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 의 최소제곱 추정치들을 각각  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_i, \hat{\beta}_{ij}$  라고 하면 2차 회귀모형은 식 (9)으로 표현된다.

$$y_u = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_{iu} + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ij} (x_{iu}^2 - x_i^2) + \sum_{i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_{iu} x_{ju} + \epsilon_u \tag{9}$$

Table 1은 중심합성계획에서 사용된 각 입력변수의 수준을 나타내고 있다.

Table 2는 Table 1에 나타난 각 입력변수의 수준을 이용하여 중심합성계획에 의해 구성된 16개의 용접 조건과 실험결과를 보여주고 있다. Table 2에서 세 개의 입력변수  $x_1, x_2, x_3$ 는  $X_1, X_2, X_3$ 를 변환한 것으로 식 (10)과 같은 관계를 갖는다.

$$x_k = \frac{X_k - X_{k,0}}{X_{k,+1} - X_{k,0}}, \quad 1 \leq k \leq 3 \tag{10}$$

식 (10)에서  $X_{k,0}$ 는 입력변수의 0 레벨에 대한 실제 값을 나타내고,  $X_{k,+1}$ 은 입력변수의 +1 레벨에 대한 실제 값을 나타내고 있다.

### 3.3 V-그루브 아크용접 공정모델

Table 2의 입력변수에 대한 출력변수의 실험결과를 이용하여 2차 회귀모형을 유도하였다. 최소제곱법에 의해 결정된 용접품질함수 값( $J$ )의 평균( $\hat{\mu}$ )과 표준편차( $\hat{\sigma}$ )에 대한 회귀모형은 다음과 같다.

**Table 1** Factors and levels for central composite design

Factor	Level				
	-1.5	-1	0	+1	+1.5
( $X_1$ ): Welding voltage[V]	22	25	31	37	40
( $X_2$ ): Welding current[A]	230	250	290	330	350
( $X_3$ ): Welding speed[mm/s]	4	5	7	9	10

**Table 2** Central composite design and 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

$$\hat{\mu} = 4.2337 + 0.4621 \times x_1 - 0.1492 \times x_2 + 0.3606 \times x_3 + 0.0912 \times x_1 x_2 - 0.3611 \times x_1 x_3 - 0.0582 \times x_2 x_3 - 0.7789 \times x_1^2 - 0.3915 \times x_2^2 - 0.6584 \times x_3^2 \quad (11)$$

$$\hat{\sigma} = 0.1238 + 0.0392 \times x_1 + 0.0071 \times x_2 + 0.0421 \times x_3 + 0.0298 \times x_1 x_2 + 0.0027 \times x_1 x_3 - 0.0788 \times x_2 x_3 + 0.0415 \times x_1^2 + 0.1116 \times x_2^2 + 0.0305 \times x_3^2 \quad (12)$$

회귀분석을 통해 구해진 모델은 F-검정(F-test)과 결정계수(coefficient of multiple determination, R<sup>2</sup>)에 의해 타당성을 판단할 수 있다. F-검정은 변량 분석, 분산분석(analysis of variance, ANOVA)이라고도 한다. 이 분석법은 F-값(F-value)을 산출하여 여러 평균치들의 '차의 유의도'를 검정한다. 이 분석법의 주요 기능은 세 개 이상의 집단에서 얻어진 평균치들의 차이가 모집단에 본질적으로 그러한 차이가 있기 때문에 나타난 차이인지 아니면 표본에 의한 우연한 차이인지를 검증하는데 있다. 그러므로 분석결과 어떤 유의도 수준에서 의미 있는 차이라면 '그 차이는 모집단에서 본질적으로 그러한 차이가 있기 때문에 표본에서도 그렇게 나타났다', 반대로 의미 없는 차이라면 '그 차이는 표본에 의한 우연한 차이이지 모집단의 본질과는 관계가 없다'는 식으로 가설을 검증하게 된다. 결정계수는

**Table 3** Analysis of variance for the mean of fitness value

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F <sub>0</sub>	F(0.05)
Regression	9	11.8874	1.3208	18.956*	4.10
Error	6	0.4181	0.0697		
Total	15	12.3055			

**Table 4** Analysis of variance for the standard deviation of fitness value

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			

회귀모형에서 추정된 회귀모델에 의해 반응 변수의 변동이 설명되는 정도를 나타낸다. 결정계수의 범위는 0 ≤ R<sup>2</sup> ≤ 1이며, 결정계수가 1에 가까울수록 추정된 회귀직선이 반응 변수의 변동을 잘 설명할 수 있음을 보여준다<sup>11)</sup>.

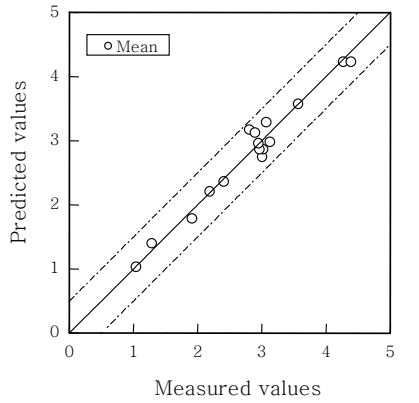
Table 3과 Table 4는 식 (11), (12)에 대한 분산 분석 결과를 나타낸다. 유의수준(level of significance, α)을 0.05로 선택하면 F-검정의 기각치(critical value)는 F(Φ<sub>R</sub>, Φ<sub>E</sub>, α) = F(9, 6, 0.05) = 4.10 이 되고, 식 (11)의 F = 18.956 > 4.10이며, 식 (12)의 F = 9.2699 > 4.10이므로 회귀모델이 유의함을 알 수 있다.

결정계수는 각 모델의 입력변수를 이용하여 출력변수의 변동을 얼마만큼 표현 할 수 있는 정도를 나타내는 지수로서, 본 연구에서 평균과 표준편차에 대한 회귀모델의 결정계수는 각각 0.966, 0.933이다. 즉 회귀모델 식 (11), (12)는 각각 비드형상 적합도 값에 대한 평균의 총 변동의 96.6%, 표준편차의 총 변동의 93.3%를 표현 할 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 3(a) 및 (b)로부터 식 (11), (12)의 회귀모델은 용접공정을 표현하는데 타당하다는 것을 알 수 있다.

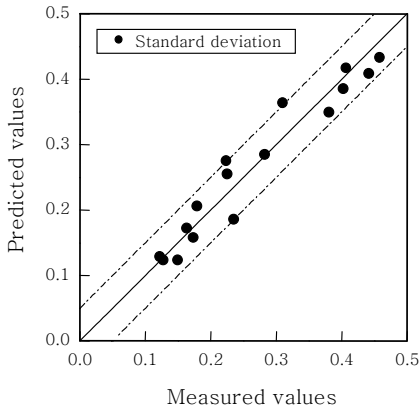
### 3.4 V-그루브 아크용접 공정모델의 최적조건

본 연구에서는 목적함수를 이용하여 V-그루브 아크 용접공정 모델을 최적화하고자 하였다. 목적함수(object function)는 용접품질함수 값의 평균과 표준편차에 대한 회귀함수를 이용하였으며 식 (13)과 같이 정의하였다.

$$D(x) = (\hat{\mu} - 5)^2 + \hat{\sigma}^2 \quad (13)$$



(a) Scatter diagram for mean



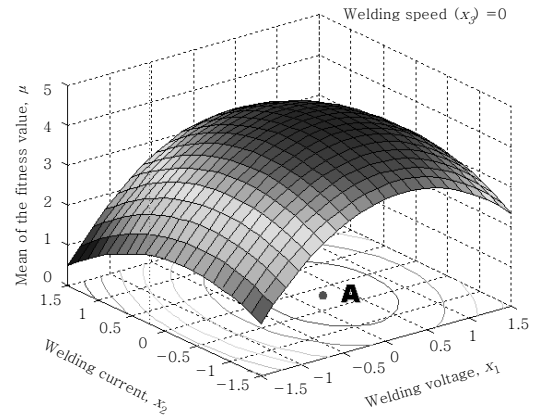
(b) Scatter diagram for standard deviation

**Fig. 3** Relationship between measured and predicted value

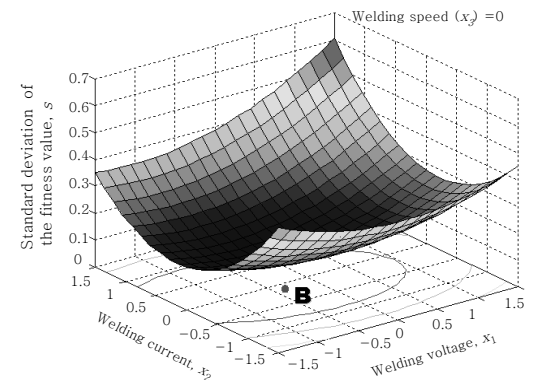
식 (1)에서 용접품질함수의 목표치는 “5”이고, 이로부터 표준편차를 포함한 식 (13)의 목적함수( $D(x)$ )의 목표치는 “0”이 된다. 즉, 식 (13)의 적합도 값에서 평균( $\mu$ )이 5에 가깝고, 표준편차( $\sigma$ )가 0에 가까울수록 목적함수 값은 작아진다. 따라서 이 목적함수 값이 작을수록 용접품질함수 값의 평균이 크고 표준편차가 작은 값이 출력된다는 것을 의미한다.

식 (13)을 이용하여 관심영역에서 목적함수를 최소화 하는 입력변수를 구하기 위하여 격자 탐색법을 사용하였다. 격자 탐색법(Grid-search method)은 관심실험영역을 작은 격자로 나누어 각 격자에서 목적함수 값을 구하는 방법이다. 관심영역의 범위에서 격자 탐색법을 이용하여 구한 최적입력변수의 coded values는  $(x_1, x_2, x_3) = (0.231, -0.168, 0.206)$ 이고, natural values 는  $(X_1, X_2, X_3) = (32.38, 283.3, 7.41)$ 이며, 최적조건에서 예측된 평균과 표준편차는  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}) = (4.341, 0.149)$ 이다. 이때의 목적함수는  $D(x) = 0.4570$ 이다.

Fig. 4(a), (b)는 평균 및 표준편차에 대한 목적함



(a) Response surface of the mean for  $x_1, x_2$  with  $x_3$  held at 0



(b) Response surface of the standard deviation for  $x_1, x_2$  with  $x_3$  held at 0

**Fig. 4** Response surface of overall regression models of the mean value and standard deviation

수의 그래프를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 A 및 B점은 레벨 커브(level curve)상의 극점으로서 최적점에 해당한다. 이로부터 격자 탐색법으로 얻은 평균 및 표준편차의 최적 값은 전역적인 최적점임을 알 수 있다.

격자 탐색법에 의한 최적조건은 용접전압 32.38 V, 용접전류 283.3 A, 용접속도 7.4 mm/s이며, 이를 검증하기 위해 격자 탐색법에 의한 최적조건으로 실험하였다. 실험결과로 평균과 표준편차는  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}) = (4.145, 0.181)$ 이며, 이때의 목적함수 값은  $D(x) = 0.465$ 이다. 격자 탐색법에 의해 예측된 목적 함수 값인  $D(x) = 0.4570$ 와 실제 실험을 통해 얻어진 목적함수 값인  $D(x) = 0.465$ 는 1.2%의 오차를 나타냄으로써 격자 탐색법에 의한 최적용접조건을 검증하였다. Fig. 5는 실제 용접부 단면사진을 나타내고 있다.

본 연구는 루트 간격에 대한 변동만을 고려하였으며 루트 페이스의 변동과 개선각의 변동 및 Misalign-

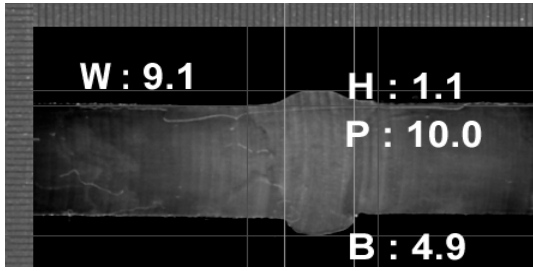


Fig. 5 Cross section in the welded part derived optimal welding condition

ment 등과 같은 다른 비드형상 인자에 대해서는 고려하지 않았으며 이러한 항을 고려할 시에는 다른 최적조건을 도출 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 V-그룹브 탄산가스 메탈 아크용접 공정의 최적화를 위해 평균과 표준편차를 고려한 듀얼 반응표면을 이용하여 작업환경의 변화나 외란에 강건한 최적조건을 구하였다.

용접공정의 입력변수는 용접전압, 용접전류, 용접속도이며, 출력변수는 용접비드 형상에 대한 용접품질합수를 사용하였다. 적은 횟수의 실험과 관심영역에서의 효과적인 회귀모델을 위해 중심합성계획을 설계하였으며, 용접실험을 수행한 후 얻어진 데이터를 사용하여 용접품질합수의 평균뿐만 아니라 표준편차에 대한 회귀모델을 얻었다. 구해진 회귀모델을 이용하여 듀얼 반응표면을 구하였으며, 격자 탐색법을 이용하여 용접공정의 최적조건을 결정하였다. 또한, 듀얼 반응표면에 의한 최적조건에서 실험을 통해 검증함으로써 양호한 용접품질을 보여주고 있음을 확인하였다.

#### 후 기

본 논문은 서울시 산학연 협력사업인 전략산업 혁신 클러스터 육성 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### 참 고 문 헌

1. J.B. Lee, Y.W. Bang, S.W. Oh and H.S. Chang : Control of Bead Geometry in GMAW, Journal of KWS, **15-6** (1997), 116-123 (in Koorea)
2. L.J. Yang, R.S. Chandel and M.J. Bibby : The effects of process variables on the weld deposit area of submerged-arc welding process, Welding Journal, **72-1** (1993), 11-18
3. C.E. Park, C.S. Li and I.S. Kim : Mathematical models for optimal bead geometry for GMA welding process, International Journal of KWS, **3-1** (2003)
4. 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), 184-189
5. I.A. Mc Connell and N.A. Mc Pherson : The application of statistical process design to a FCAW process, Welding Journal. **76-10** (1997), 412-416
6. Y.S. Tarng and W.H. Yang : Optimization of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **14** (1998), 549-554
7. G.G. Vining and R.H. Myers : Combining Taguchi and response surface philosophies - A dual response approach, Journal of Quality Technology, **22** (1990), 38-45
8. R.H. Myers and W.H. Carter : Response surface techniques for dal response systems, Technometrics, **15** (1973), 301-317
9. D.C. Kim and S.H. Rhee : Modeling and optimization of a GMA welding process by a genetic algorithm and response surface methodology, International Journal of Production Research, **40-7** (2002), 1699-1 711
10. D.C. Kim and S.H. Rhee : Optimization of a GMA welding process using the dual response approach, International Journal of Production Research, **41-18** (2003), 4505-4515
11. ANSI/AWS D1.1-2006, Structural Welding Code - Steel, 20<sup>th</sup> Ed., American Welding Society., (2006)
12. R.H. Myers and D.C. Montgomery, Response surface methodology Process and product optimization using designed experiments, John Wiley & Sons, Inc., (1995)
13. G.E.P. Box and K.B. Wilson : On the experimental designs for exploring response surface, Journal of Royal Statistical Society, B13 (1951), 1-45