

## 가접부를 고려한 필릿 용접조건 선정에 관한 연구

이 준 영\* · 김 재 웅\*\* · 김 철 희\*\*\*

\*영남대학교 대학원 기계공학과

\*\*영남대학교 기계공학부

\*\*\*한국생산기술연구원 정밀접합팀

### A Study on the Selection of Fillet Weld Conditions by Considering the Tack Welds

Jun-Young Lee\*, Jae-Woong Kim\*\* and Cheol-Hee Kim\*\*\*

\*Graduate School of Mechanical Eng, Yeungnam University, Kyongbuk 712-749, Korea

\*\*School of Mechanical Eng, Yeungnam University, Kyongbuk 712-749, Korea

\*\*\*Advanced Joining Technology Team, KITECH, Incheon 406-130, Korea

#### Abstract

In this study, an experimental method for the selection of optimal welding condition was proposed in the fillet weld which was done over the tack weld. This method used the response surface analysis in which the leg length and the reinforcement height were chosen as the quality variables of the weld bead profile. The overall desirability function, which was combined desirability function for the two quality variables, was employed as the objective function for getting the optimal welding condition.

In the experiments, the target values of the leg length and the reinforcement height are 6mm and zero respectively for the horizontal fillet weld of 10mm thickness mild steel. The optimal welding conditions could predict the weld bead profile (leg length and reinforcement height) as 6.00mm and 0.19mm without tack weld and 6.00mm and 0.48mm with tack weld. From a series of welding test, it was revealed that a uniform weld bead can be obtained by adopting the optimal welding condition which was determined according to the method proposed.

\*Corresponding author : jaekim@yu.ac.kr

(Received May 2, 2006)

Key Words : Fillet welding, Response surface methodology, Central composite design (CCD), Desirability function, Leg length, Reinforcement height, Tack welding

### 1. 서 론

용접공정은 생산공정 중에서 없어서는 안 될 필수적인 공정중의 하나이다. 특히 조선분야에서 많이 사용되는 필릿용접(fillet welding) 공정에서 비드의 형상은 용접부의 기계적 성질을 결정하는 중요한 역할을 한다<sup>1-3)</sup>.

필릿용접 구조물 제작에 있어서 용접부재를 정확한 위치에 설정하거나, 용접변형을 감소시킬 목적으로 가접(tack welding)을 실시한다. 가접 후 일정한 용접조건으로 본 용접을 시행하면 가접 비드가 있는 곳과 없

는 곳의 최종 비드형상이 달라지게 되어 비드평활을 위한 후속 공정이 요구될 수 있다. 따라서 최종 비드의 형상을 균일하게 유지하기 위해서는 가접부 유무에 따른 용접조건을 달리하여 각각에 적합한 용접조건으로 용접을 실시해야 한다.

용접비드 형상에 영향을 미치는 용접변수에는 용접전류(welding current), 용접전압(welding voltage), 용접속도(welding speed), 팁 모재간 거리(tip-to-base metal distance), 토치각(torch angle), 가스유량(gas flow), 보호가스(shielding gas), 와이어 직경(wire diameter) 등이 있으며, 이러한 용접변수로부터 용접비

드 형상이 결정된다. 따라서 원하는 비드형상을 얻기 위해 적절한 용접변수를 설정하는 것이 매우 중요하다. 용접공정은 다중입력-다중출력 공정이므로 원하는 비드형상을 얻기 위해서는 용접변수를 조정해가며, 수많은 실험을 실행해야한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 수평필릿 용접부에 대한 탄산가스 아크 용접을 대상으로 하여 반응표면분석법(response surface methodology)<sup>4-8)</sup>을 사용하였으며, 이 때 얻은 데이터들로부터 호감도 함수(desirability function)<sup>9-10)</sup>를 사용하여 최적 용접조건을 선정하였다.

## 2. 반응표면분석과 호감도 함수

### 2.1 반응표면분석법

반응표면분석법은 여러 개의 입력변수(설명변수)  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 출력변수(반응변수)  $\eta$  에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다.

반응표면분석법은 입력변수 변화에 따른 출력변수 값의 변화, 입력변수에 대한 출력변수의 최적화, 적은 수의 실험으로 추정되는 반응표면을 얻는 과정을 통해 반응표면분석을 실시한다.

본 연구에서 출력변수  $\eta$ 를 최적화시키기 위한 반응표면 모형은 회귀분석(regression analysis)방법에 의해 반응표면이 추정되었으므로 2차 회귀모형을 식(1)과 같이 설정하였다.

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

이 2차 회귀모형은 최소제곱법에 의해 반응표면은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

이 식에서 입력변수의 수가 3개(k=3) 이면 식(2)는 식(3)과 같이 된다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{33} x_3^2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 \quad (3)$$

여기서  $\hat{y}$ 는  $\eta$ 의 추정량이고,  $x_i$ 는 입력변수들의 coded unit이며,  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_i, \hat{\beta}_{ij}$ 는 각각  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 의

최소제곱추정량을 나타낸다.

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 의 최소제곱 추정값은 식(4)으로부터 구한다.

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_{12} \\ \hat{\beta}_{13} \\ \hat{\beta}_{23} \end{bmatrix} = (X'X)^{-1}X'y \quad (4)$$

여기서  $X$ 와  $y$ 는 각각 식(5)와 같다

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & x_{11}^2 & x_{21}^2 & x_{31}^2 & x_{11}x_{21} & x_{11}x_{31} & x_{21}x_{31} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & x_{12}^2 & x_{22}^2 & x_{32}^2 & x_{12}x_{22} & x_{12}x_{32} & x_{22}x_{32} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & x_{3n} & x_{1n}^2 & x_{2n}^2 & x_{3n}^2 & x_{1n}x_{2n} & x_{1n}x_{3n} & x_{2n}x_{3n} \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

위 회귀모형(regression model) 식(2)를 구하기 위해서는 많은 실험을 통해 관련 데이터를 얻어야한다. 이와 같이 실험을 통해 관련 데이터를 얻으려고 한다면, 수많은 실험의 시행착오와 경제적인 손실이 발생할 수 있으므로, 이러한 손실을 줄이고자 2차 회귀모형을 잘 반영하는 반응표면 실험계획법 중의 하나인 중심합성계획법(central composite design, CCD)<sup>6)</sup>을 사용하였다.

### 2.2 호감도 함수

호감도함수는 다중 응답에 대한 최적 입력값을 찾아주는 효과적인 방법으로 회귀분석을 통해 얻은 회귀모형을 사용하여 각 응답에 대한 호감도함수를 정의한다.

호감도 함수의 범위를 (0~1)로 정의하면, 응답에 대한 만족도가 클수록 1에 접근하고 만족도가 작을수록 0에 접근한다. 응답이 목표값을 가질 때에는 식(6)과 같은 호감도 함수(desirability function)를 이용한다. 이때 만족도 분포는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < A \\ \left[ \frac{\hat{y}_i - A}{B - A} \right]^r & A \leq \hat{y}_i \leq B \\ \left[ \frac{\hat{y}_i - C}{B - C} \right]^t & B \leq \hat{y}_i \leq C \\ 0 & \hat{y}_i > C \end{cases} \quad (6)$$

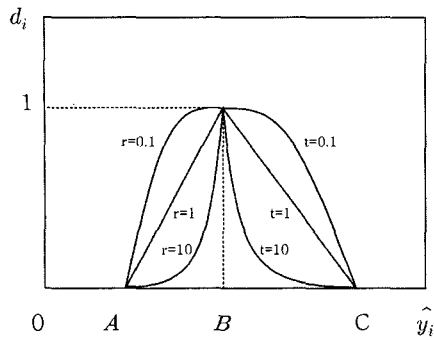


Fig. 1 Desirability function

식(6)과 Fig. 1에서 A, B, C, r, t는 사용자가 결정하며, B는 목적값을 A와 C는 최소값과 최대값을 나타내고 r과 t는 목적값에 대한 기울기를 나타낸다. 다중응답에 대한 각각의 호감도함수를 이용하여 단일 목적함수(single objective function)를 만들기 위해 복합 호감도함수(overall desirability function)를 다음과 같이 정의할 수 있다<sup>9)</sup>.

$$D = (d_1 * d_2 \cdots d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

여기에서 m은 응답(response)의 개수이다. 식(7)을 통해 정의된 복합호감도 함수를 최대로 만족하는 최적조건을 구하여 그 때의 입력변수 값을 구한다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 계획

본 실험에서는 2차 회귀 모델을 이용하였다. 2<sup>k</sup>요인 실험(2<sup>k</sup> factorial experiment)에서는 각 변수의 두 수준에서만 실험이 되므로, 2차 회귀모형에서 제공항 x<sub>i</sub><sup>2</sup>의 계수 β<sub>ii</sub> 등을 추정할 수 없다. 이런 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하기 위하여 중심점(central point)과 축점(axis point)을 2<sup>k</sup>요인 실험에 추가시킨 중심합성계획법을 사용하였다.

CO<sub>2</sub>아크용접 공정의 경우, 용접비드 품질의 지표가 되는 각장(leg length), 덧살높이(reinforcement height)를 결정짓는 여러 가지 인자에는 용접전류, 용접전압, 용접속도, 아크길이, 토치각, 보호가스, 용접와이어직경 등을 들 수 있다. 이러한 인자들 중 용접비드에 가장 큰 영향을 미치는 용접전류, 용접전압, 용접속도를 입력변수로 택하여, 이 세 입력변수가 출력변수인 각장, 덧살높이에 어떠한 영향을 끼치는지를 파악하고자 하였다.

실험에 사용한 용접기는 350A 인버터타입 용접기

(inverter type welding machine)이고, 모재는 12mm 두께의 일반강(mild steel)을 사용하였으며, 보호가스는 탄산가스를 사용하였다. 소모성 전극인 용접와이어는 일반 탄산가스 아크 용접용 와이어(KSD7025 YCW12)를 사용하였다. 입력변수 이외의 변수인 텡-모재간 거리, 토치각, 가스유량은 통상적인 현장 적용조건으로 하였으며, 와이어 직경은 Table 1과 같이 고정하였다.

본 연구에서는 가접부 유무에 상관없이 필릿용접비드의 목표 형상치수를 각장 6mm, 덧살높이 0mm로 설정하였다. 일정한 용접조건으로는 본 용접을 시행한 경우 가접 비드가 있는 곳과 없는 곳의 최종 비드형상이 달라지기 때문에, 최종 비드의 형상을 균일하게 할 수 있는 적합한 용접조건을 적용해야 한다. 따라서 가접부가 있을 때의 용접조건과 가접부가 없을 때의 적정 용접조건을 각각 구하기 위하여 중심합성계획법을 적용하였다.

#### 3.2 가접이 없는 경우

##### 3.2.1 실험방법

실험을 위한 용접조건 상/하위 조건은 반복적인 예비실험을 통해 아크가 유지되는 최대/최소값으로 정하였다. 가접부가 없을 때의 입력변수의 용접조건을 Table 2에 나타내었고 이 조건으로부터 중심합성계획을 통해 총 17회의 용접을 수행한 후 얻은 출력변수(response) 값을 Table 3과 같다. 여기서 L과 C는 각각 각장과 덧살높이를 나타낸다.

##### 3.2.2 실험결과

관심 실험영역(region of interest)에서 입력변수인 용접속도, 용접전류, 용접전압에 대한 출력변수 각각(L)과 덧살높이(C)를 회귀식으로 나타내면 식(8), (9)와 같다.

Table 1 Fixed conditions for the experiment

Tip-to-base metal distance (mm)	20
Torch angle ( ° )	45
Gas flow (l/min)	18
Welding wire diameter (Φ)	1.2

Table 2 Factors and levels for the experimental design

Factor	Factor name	Coded value (level)		
		-1	0	1
×1	Welding speed [cm/min]	58	52	46
×2	Welding current [A]	280	300	320
×3	Welding voltage [V]	32	34	36

Table 3 Central composite design and experimental result

No	Coded variables			Natural variables			Response	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	L (leg length)	C (reinforcement height)
1	-1	-1	-1	58	280	32	5.2	0.42
2	1	-1	-1	46	280	32	5.55	1.08
3	-1	1	-1	58	320	32	5.2	2.32
4	1	1	-1	46	320	32	5.6	3.04
5	-1	-1	1	58	280	36	5.55	0.18
6	1	-1	1	46	280	36	6.35	0.31
7	-1	1	1	58	320	36	5.6	1.04
8	1	1	1	46	320	36	6.6	0.83
9	-1	0	0	58	300	34	5.6	0.54
10	1	0	0	46	300	34	6	0.86
11	0	-1	0	52	280	34	5.9	0.43
12	0	1	0	52	320	34	5.7	1.37
13	0	0	-1	52	300	32	5.6	1.14
14	0	0	1	52	300	36	6.05	0.32
15	0	0	0	52	300	34	5.9	0.73
16	0	0	0	52	300	34	5.9	0.63
17	0	0	0	52	300	34	5.85	0.76

$$L = 5.873 + 0.295x_1 + 0.015x_2 + 0.3x_3 - 0.064x_1^2 - 0.064x_2^2 - 0.039x_3^2 + 0.031x_1x_2 + 0.131x_1x_3 + 0.031x_2x_3 \quad (8)$$

$$C = 0.653 + 0.161x_1 + 0.619x_2 - 0.532x_3 + 0.086x_1^2 + 0.286x_2^2 + 0.118x_3^2 - 0.035x_1x_2 - 0.18x_1x_3 - 0.31x_2x_3 \quad (9)$$

추정된 회귀 모델의 타당성은 Table 4와 같은 분산 분석의 F검정(F test), 결정계수(coefficient of multiple determination,  $R^2$ )에 의해서 판단 할 수 있다<sup>5)</sup>.

분산분석의 F검정에서  $F_0$ 는 회귀평균제곱과 잔차평균제곱의 비율( $F_0 = \frac{MSR}{MSE}$ )로 나타내며, 이 값이 크면

Table 4 Analysis of variance table

source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of squares	$F_0$	$F(\alpha)$
regression	$SSR = \hat{\beta}' X' y - n(\bar{y})^2$	k	$MSR = \frac{SSR}{k}$	$\frac{MSR}{MSE}$	$F(k, n-k-1; \alpha)$
error	$SSE = y'y - \hat{\beta}' X' y$	n-k-1	$MSE = \frac{SSE}{n-k-1}$		
total	$SST = y'y - n(\bar{y})^2$	n-1			

클수록 회귀방정식의 정도가 좋다고 할 수 있다. 결정계수는 회귀변동과 총변동의 비율( $R^2 = \frac{SSR}{SST}$ )로 나타내며, F검정과 마찬가지로 결정계수의 값이 클수록 회귀식의 정도가 좋다. F-분포표를 이용하여 주어진 유의수준과 자유도( $k, n-k-1$ )에 따른 기각치( $k, n-k-1; \alpha$ )를 구한 다음  $F_0$ 값과  $F(\alpha)$ 값을 비교하여  $F_0 > F(\alpha)$ 이면 회귀식이 유의하다고 할 수 있다.

식 (8), (9)의 회귀식에 대한 분산분석표를 Tables 5~6에 나타내었다. 아크용접공정은 다변수 공정으로 아크 안정성 및 비드형상에 수많은 요인이 작용하기 때문에 재현성 및 정밀도 수준이 높지 않은 특징이 있어 일반적으로 적용하는 유의 수준인 0.05로 선택하면 기각치  $F(9, 7; 0.05) = 3.68$ 이 된다. 이 값을 두 회귀식의  $F_0$ 값과 비교해 볼 때  $F_0$ 값이  $F$ 값보다 크므로 두 회귀식 모두 유의하다는 것을 알 수 있다.

각 회귀식에 대한 결정계수의 값은 0.964, 0.984로 각각 총 변동의 96.4%, 덧살높이 총 변동의 98.4%가 회귀식에 의해 설명된다. 그러므로 용접 공정을 잘 표현하는 모델이라고 할 수 있겠다. 위 회귀모델 식 (8), (9)는 입력변수에 대한 출력값을 예측해 주고 있으

Table 5 Analysis of variance regression model of leg length

source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of squares	$F_0$	F (0.05)
regression	2.005	9	0.222	20.815	3.68
error	0.074	7	0.010		
total	2.080	16			

Table 6 Analysis of variance regression model of reinforcement height

source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of squares	$F_0$	F (0.05)
regression	8.678	9	0.964	47.340	3.68
error	0.142	7	0.020		
total	8.820	16			

므로, 이 두 식을 이용해 각장과 덧살높이를 동시에 최대로 만족하는 입력변수의 최적값을 결정하는데 이용할 수 있다.

본 연구에서는 입력변수의 최적값을 찾기 위해 호감도 함수를 사용하였으며, 각장과 덧살높이 모두 목표값을 갖고 있으므로 양면 호감도 함수를 이용하였다. 5.5mm이하와 6.5mm이상의 각장은 0으로 결정하였고, 덧살높이는 -0.1이하와 1이상이면 0으로 결정하였다.

각장 호감도 함수  $d(\hat{L}(x))$ 와 덧살높이 호감도 함수  $d(\hat{C}(x))$ 는 식(10),(11) 다음과 같다.

각 응답에 대한 호감도함수의 기하학적 평균으로 정의된 복합호감도 함수는 식(12)와 같고, 이 복합호감도 함수를 최대로 하는 입력변수는 실험관심영역(-1 ~ 1)을 0.01로 나누어 모든 값을 비교하여 최적 입력값을 정하였다.

$$d(\hat{L}(x)) = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < 5.5 \\ \left[ \frac{\hat{y}_i - 5.5}{6 - 6.5} \right] & 5.5 \leq \hat{y}_i \leq 6 \\ \left[ \frac{\hat{y}_i - 6.5}{6 - 6.5} \right] & 6 \leq \hat{y}_i \leq 6.5 \\ 0 & \hat{y}_i > 6.5 \end{cases} \quad (10)$$

$$d(\hat{C}(x)) = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < -0.1 \\ \left[ \frac{\hat{y}_i - (-0.1)}{5 - (-0.1)} \right] & -0.1 \leq \hat{y}_i \leq 0 \\ \left[ \frac{\hat{y}_i - 1}{0 - 1} \right] & 0 \leq \hat{y}_i \leq 1 \\ 0 & \hat{y}_i > 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$D(x) = (d(\hat{L}(x)) * d(\hat{C}(x)))^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

통계프로그램인 SAS를 이용하여 구한 입력변수의 최적 코드화 변수값(coded values)은  $(x_1, x_2, x_3) = (-0.21, -0.56, 1)$ 이고, 이 때의 자연 변수값(natural values)은  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = (50.74, 288.8, 36)$ 이며, 복합 호감도 함수는 0.917이다. 이 조건에서 예측된 출력변수  $(\hat{L}, \hat{C}) = (6.00, 0.19)$ 이고, 검증실험을 통해 얻은 측정값은  $(L, C) = (5.95, 0.36)$ 이다. 두 값을 비교해 보면 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Figs. 2~3은 용접속도( $x_1$ )가 -0.21( $\xi_1 = 50.74$  cm/min)일 때, 전류전압에 대한 각장 호감도함수 그래프와 덧살높이 호감도 함수 그래프이다. 각장과 덧살높이를 동시에 적용한 복합호감도 그래프는 Fig. 4에 나타낸 것과 같다.

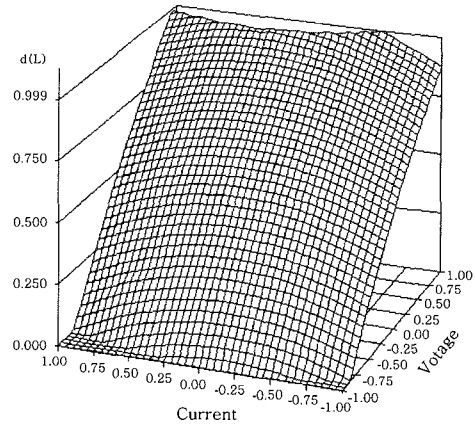


Fig. 2 Result of desirability function for leg length ( $x_1 = -0.21$ )

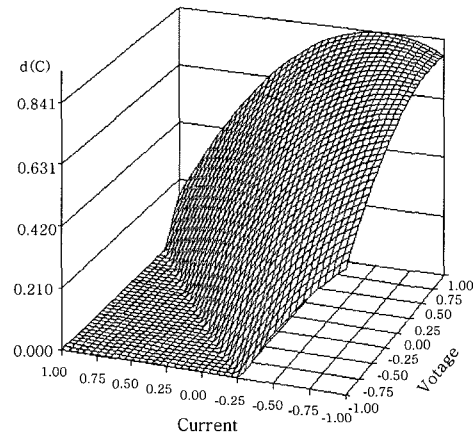


Fig. 3 Result of desirability function for reinforcement height ( $x_1 = -0.21$ )

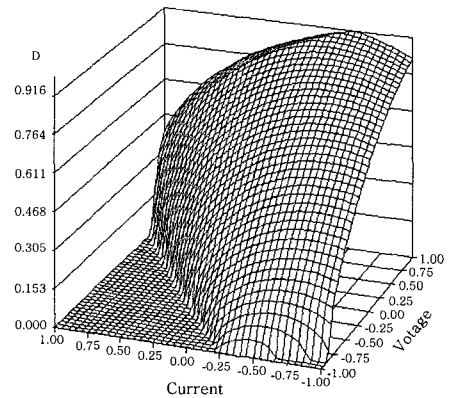


Fig. 4 Result of overall desirability function ( $x_1 = -0.21$ )

이 그래프에서 전류의 코드화 변수값이 -0.53 부근에서 전압이 최대일 때 복합 호감도 함수는 최대가 된다는 것을 나타내고 있다. 따라서 가접부가 없는 용접의 경우 전류 -0.53 부근에서 전압이 최대일 때 복합 호감도 함수는 최대가 된다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 가접부가 있는 경우

#### 3.3.1 실험방법

2.5mm 각장을 갖는 가접부에 본용접을 할 경우 가접부가 없을 때와 용접조건이 달라짐으로 용접조건을 Table 7과 같이 설정하였고, 이 조건으로부터 중심합성계획을 통해 총 17회의 용접을 수행한 후 얻은 출력 변수 값은 Table 8과 같다.

#### 3.3.2 실험결과

가접부에 본 용접을 시행한 경우 입력값에 대한 출력 값인 각장(L)과 덧살높이(C)에 대한 회귀식은 각각 다음과 같다.

Table 7 Factors and levels for experimental resign (welding on tack weld)

Factor	Factor name	Coded value (level)		
		-1	0	1
×1	welding speed [cm/min]	58	52	46
×2	welding current [A]	250	270	290
×3	welding voltage [V]	31	33	35

Table 8 Central composite design and experimental result (welding on tack weld)

No	Coded variables			Natural variables			Response	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	L (leg length)	C (reinforcement height)
1	-1	-1	-1	58	250	31	5.35	0.72
2	1	-1	-1	46	250	31	5.55	0.98
3	-1	1	-1	58	290	31	5.25	1.39
4	1	1	-1	46	290	31	5.95	1.69
5	-1	-1	1	58	250	35	5.7	0.37
6	1	-1	1	46	250	35	5.75	0.73
7	-1	1	1	58	290	35	5.65	0.70
8	1	1	1	46	290	35	6.7	0.36
9	-1	0	0	58	270	33	5.95	0.39
10	1	0	0	46	270	33	6.05	0.52
11	0	-1	0	52	250	33	5.75	0.73
12	0	1	0	52	290	33	5.85	0.86
13	0	0	-1	52	270	31	5.55	1.08
14	0	0	1	52	270	35	5.75	0.83
15	0	0	0	52	270	33	5.9	0.53
16	0	0	0	52	270	33	5.9	0.63
17	0	0	0	52	270	33	5.85	0.66

$$L = 5.871 + 0.21x_1 + 0.13x_2 + 0.19x_3 + 0.138x_1^2 - 0.062x_1x_2 - 0.212x_2^2 + 0.188x_1x_2 + 0.025x_1x_3 + 0.075x_2x_3 \quad (13)$$

$$C = 0.636 + 0.072x_1 + 0.148x_2 - 0.284x_3 - 0.2x_1^2 + 0.141x_2^2 + 0.297x_3^2 - 0.083x_1x_2 - 0.068x_1x_3 - 0.178x_2x_3 \quad (14)$$

위 회귀식(13), (14)로부터 분산분석표를 Tables 9~10에 나타내었고,  $F_0$  값과 기각치를 비교해 볼 때 두 식 모두 유의하다는 것을 알 수 있으며, 결정계수의 값은 0.917, 0.915로 각장 총 변동의 91.7%, 덧살높이 총 변동의 91.5%가 회귀식에 의해 설명된다. 그러므로 2.5mm가접부에 본용접을 할 경우에도 회귀모델은 용접공정을 잘 표현한다고 할 수 있겠다.

가접부가 없을 때와 마찬가지로 각장과 덧살높이에 대해 양면 호감도 함수를 이용하였으며, 복합호감도 함수를 최대로 만족하는 입력변수를 찾기 위해 관심실험 영역(-1 ~ 1)에서 0.01단위로 나누어 최적의 해를 구하였다.

입력변수의 최적 코드화 변수값은  $(x_1, x_2, x_3) = (1, -0.69, 0.39)$ 이고, 자연 변수값은  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = (58, 256.2, 33.78)$ 이며, 이 때의 복합 호감도함수는 0.717이다. 이 최적조건에서 예측된 출력변수( $\hat{L}, \hat{C}$ ) = (6.00, 0.48)이고, 검증실험을 통해 얻은 실제 측정값은  $(L, C) = (6.05, 0.42)$ 이다. 두 값을 비교해 보면 잘 일치함을 알 수 있다.

Figs. 5~6은 용접 속도( $x_1$ )가 1( $\xi_1 = 46$  cm/min) 일 때, 전류, 전압에 대한 각장 호감도 함수 그래프와

Table 9 Analysis of variance regression model of leg length(welding on tack weld)

source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of squares	$F_0$	F (0.05)
regression	1.477	9	0.164	8.562	3.68
error	0.134	7	0.019		
total	1.611	16			

Table 10 Analysis of variance regression model of reinforcement height(welding on tack weld)

source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of squares	$F_0$	F (0.05)
regression	1.839	9	0.204	8.368	3.68
error	0.171	7	0.024		
total	2.010	16			

덧살높이 호감도 함수 그래프이다. 각장과 덧살높이를 동시에 적용한 복합 호감도 그래프는 Fig. 7에 나타난 것과 같다.

이 그래프에서 용접속도( $x_1$ )가 1이고, 전류( $x_2$ ), 전압( $x_3$ )이 -0.69, 0.39부근일 때 복합 호감도 함수는 최대가 된다는 것을 보여준다. 따라서 가접부가 있는 용접의 경우, 전류, 전압이 -0.69, 0.39 이고, 용접속

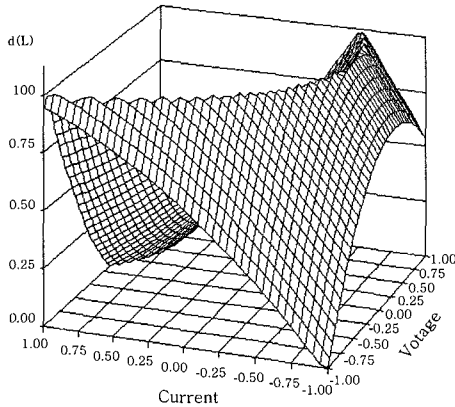


Fig. 5 Result of desirability function for leg length (tack weld,  $x_1=1$ )

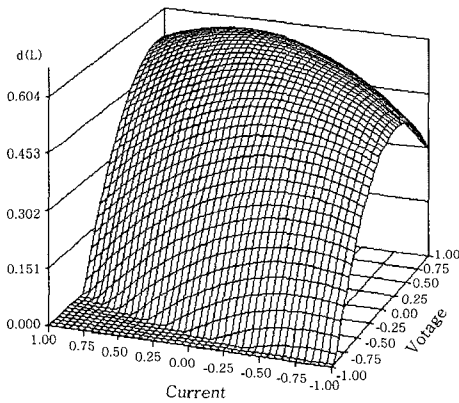


Fig. 6 Result of desirability function for reinforcement height (tack weld,  $x_1=1$ )

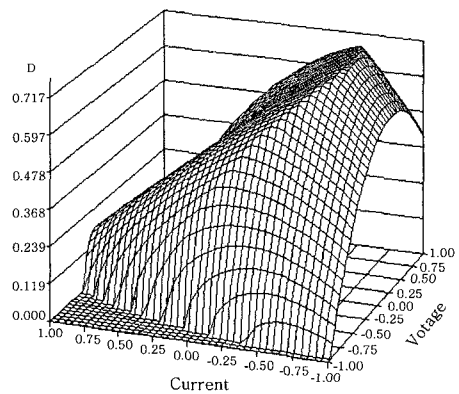


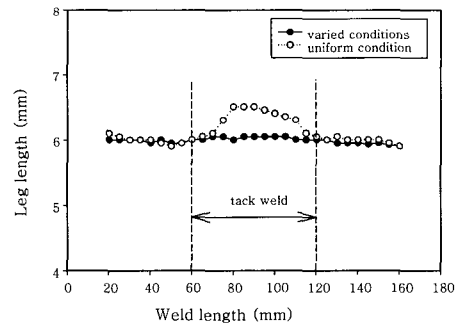
Fig. 7 Result of overall desirability function (tack weld,  $x_1=1$ )

도가 1일 때 복합 호감도 함수는 최대가 된다는 것을 알 수 있다.

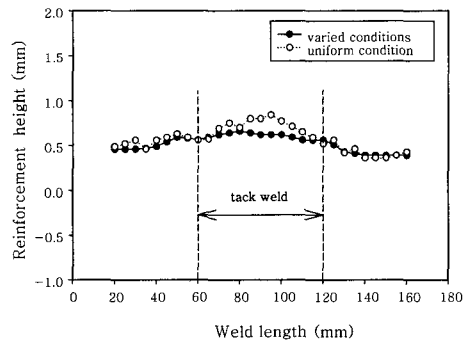
#### 4. 고 찰

실험계획법을 통하여 얻은 최적 입력변수 값을 적용하여 가접부가 있는 곳과 가접부가 없는 곳에서 하나의 조건으로 본용접을 실시한 것과 두 가지의 조건을 각각 적용하여 본 용접을 실시한 결과를 비교·분석하였다. Fig. 8는 총 길이 18cm의 비드에서 비드시작점을 기준으로 6cm에서 12cm까지 각장 2.5mm의 가접 비드가 있는 부분이다. 이 둘을 비교해볼 때, 가접부를 고려하여 최적 용접조건을 변화시켜 용접한 경우, 비드 평활도가 좋아졌다는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 각 조건으로 실험한 용접비드 사진이며, Fig. 9(a)는 단일 용접조건으로 시행한 용접비드이고, Fig. 9(b)는 가접부를 고려한 용접조건으로 시행한 용접비드이다.

Fig. 9(a),(b)를 비교해 볼 때, 용접조건을 적용하여 시행한 용접 (b)에서 각장, 덧살높이가 (a)에 비해 평활하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법을 적용하면 가접이 있는 용접부에 대해서도 균일한 용접비드를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다. 향후 가접 비드의 형상을 측정하여 그에 적합한 용접조건을 적용할 수 있는 제어시스템을 구축한다면 용접품질 및 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

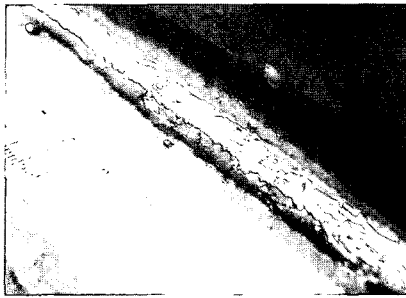


(a) leg length



(b) reinforcement height

Fig. 8 Comparison of weld bead qualities according to the welding conditions



(a) final weld bead with uniform weld condition



(b) final weld bead with varied weld condition

Fig. 9 Photographs of weld bead

## 5. 결 론

탄산가스 아크 필릿용접공정에서 가접 비드가 있어도 균일한 용접비드를 얻기 위해 가접 비드에 적합한 최적 용접조건의 설정방법을 제시하였다.

이 최적 조건을 찾기 위해 실험관심영역을 설정한 다음 중심합성계획법을 이용하여 2차 회귀모델을 얻었으며, 가접이 없을 때의 회귀모델에 대한 분산분석 결과 각장의 경우  $F_0=20.815$ , 덧살높이의 경우  $F_0=47.340$ 을 나타내어 용접공정을 잘 표현하는 모델임을 확인하였다. 또한 가접이 있을 때는 각장의 경우  $F_0=8.562$ , 덧살높이의 경우  $F_0=8.368$ 을 나타내어 가접이 없을 때 보다는 정밀도가 떨어지나 모델이 유의함을 알 수 있었다.

회귀모델과 복합호감도 함수를 사용하여 최적 용접

조건을 구한 다음 예측 값과 실제 측정값을 비교하여 타당성을 검증하였으며, 한 가지 용접조건으로 가접부를 용접하였을 경우, 가접비드가 있는 곳에서의 각장과 덧살높이는 각각 0.6mm, 0.3mm 정도의 차이가 있었으나 용접조건을 달리 적용하여 용접을 실시했을 때에는 가접부에서도 각장과 덧살높이가 균일함을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. C.H Kim, S.J Na : A Study on Horizontal Fillet Welding by Using Rotating Arc(I), Journal of KWS, 21-3 (2003), 40-45 (in Korean)
2. M.H Kim, Y.G Choi, H.S Shin, M.H Lee, T.Y Lee, S.H Lee : The Inference System of Bead Geometry in GMAW, KSIA, 5-2 (2002), 111-118 (in Korean)
3. J.S Son, I.S Kim, C.E Park, I.J Kim, and H.S Jeong, : Development of Experimental Model for Bead Profile Prediction in GMA Welding, Journal of KWS, 23-4 (2005), 41-47 (in Korean)
4. R.H. Myers and D.C Montgomery, : Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, inc, 1995, 208-278
5. D.C. Montgomery, : Design and Analysis of Experiments (2<sup>th</sup> Edition), John Wiley & Sons, inc, 1984, 340-368
6. S.H Park, : Design of Experiments, Minyoungsa, 2003 (in Korean), 453-504
7. H.S Park, T.H Kim, S.H Rhee, : Optimization of Welding Parameters for Resistance Spot Welding of TRIP Steel Using Response Surface Methodology, Journal of KWS, 21-2 (2003), 76-81 (in Korean)
8. D.C Kim and S.H Rhee, : Design of an Optimal Fuzzy Logic Controller Using Response Surface Methodology, IEEE Trans. on Fuzzy systems, 9-3 (2001), 404-412
9. G. Derringer and R. Suich, : Simultaneous Optimization of Several Response Variables, Journal of Quality Technology, 12 (1980), 214-219
10. E.D Castillo, D.C Montgomery, and D.R Mccarville, : Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization, Journal of Quality Technology, 28-3 (1996), 337-345