

GMA 초층용접에서 이면비드 생성을 위한 최적용접조건의 선정

윤영길* · 김재웅**† · 윤석철***

*영남대학교 대학원 기계공학과

**영남대학교 기계공학부

***대구미래대학 캐드캠과

Selection of an Optimal Welding Condition for Back Bead Formation in GMA Root Pass Welding

Young-kil Yun*, Jae-Woong Kim**,† and Seok-chul Yun***

*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Yeungnam University, Kyeongsan 712-749, Korea

**School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyeongsan 712-749, Korea

***Dept. of CAD/CAM, Daegu Mirae College, Daegu 712-716, Korea

†Corresponding author : jaekim@yu.ac.kr

(Received April 21, 2010 ; Revised June 10, 2010 ; Accepted June 22, 2010)

Abstract

In GMAW processes, bead geometry is a criterion to estimate welding quality. Bead geometry is affected by welding current, arc voltage, welding speed, shielding gas and so on. Thus the welding condition has to be selected carefully.

In this paper, an experimental method for the selection of optimal welding condition was proposed in the root pass welding which was done along the GMA V-grooved butt weld joint. This method uses the response surface analysis in which the width and height of back bead were chosen as the quality variables of the weld. The overall desirability function, which is the combined desirability function for the two quality variables, was used as the objective function for getting the optimal welding condition.

Through the experiments, the target values of the back bead width and the height were chosen as 4mm and 1mm respectively for the V-grooved butt weld joint. 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.

Key Words : Root pass welding, Gas metal arc welding(GMAW), Response surface methodology, Central composite design (CCD), Overall desirability function(ODF), Back bead

1. 서 론

가스 메탈 아크용접(GMAW; gas metal arc welding)은 보호가스과 전류, 전압, 속도 등 용접변수를 적절하게 선택함에 따라 요구되는 품질의 용접이 가능하고 경제적인 이점 때문에 선박, 플랜트, 교량, 자동차, 중공업 등의 산업기계 전 분야에 광범위하게 사용되고 있다

¹⁾ 일반적으로 용접 접합부의 품질은 용접선 전체에 걸

쳐 균일하게 유지되는 것이 요구되며, 용접비드의 형상과 밀접한 관계가 있다. 특히 다층용접이 요구되는 접합부에서는 초층에 의한 이면비드의 형상이 중요하다.

초층용접(root pass welding)이란 한 번 또는 그 이상의 패스(pass)로 형성된 용착금속의 최초층을 말한다. 최근에 용접구조물의 수요가 증대되고 있고, 이를 제작하기 위해서 생산성과 정밀성이 요구되는 초층용접의 중요성이 부각되고 있다. 한편 고도의 기능을 요구하지도 않으면서 용접속도를 높이기 위하여 이면재

(backing plate)를 이음하부에 두고 용접하는 경우도 있지만, 이렇게 용접한 경우 모재와 용접부에서의 두께 차이를 크게 만듦으로써 응력의 집중을 불러오며, 루트 균열, 슬래그 혼입, 용입부족 등이 생기기 쉬운 결점이 있다. 이런 결점을 줄이기 위해 용접접합부는 주로 표준 V형 맞대기 이음 형상으로 하고, 용접조건은 균일한 이면비드가 형성되도록 적용한다. 이런 초층용접은 대구경 파이프라인, 해저수송관 등의 일반구조용강 용접 시 용접효율을 좋게 하기위해 주로 적용된다²⁾.

용접품질은 일차적으로 용접비드형상에 의해 결정된다. 이는 용접비드형상이 용접부의 기계적 성질을 결정하는 가장 중요한 요소이기 때문이다^{3,4)}. 용접부의 비드형상에 관한 연구로는 GMA용접에서 용접공정변수와 비드형상의 관계를 규명한 연구⁵⁾와 용접비드 형상을 수학적 모델에 의한 예측 및 용접공정변수와 용접비드 폭의 상관관계에 관한 연구⁶⁾ 등이 있으며 이를 통해 용접부의 기계적 성질을 나타내는 용접비드형상은 용접공정변수에 의해 결정됨을 알 수 있다⁷⁾.

용접공정은 다중입력 대 다중출력 공정이므로 원하는 이면비드형상을 얻기 위해서는 용접변수를 조정해가며, 수많은 실험을 실행해야한다. 용접변수 최적화에 관한 연구로는 반응표면 분석법을 이용한 pleated type filter의 용접조건 최적화에 관한 연구⁸⁾와 가접부를 고려한 필릿 용접조건 최적화에 관한 연구⁹⁾ 등 있으며, 본 연구는 선행연구로써 GTA용접공정에 의한 이면비드 최적화¹⁰⁾의 경험을 바탕으로, 와이어 형태의 전극이 일정한 속도로 송급되므로 조건선정이 보다 어려운 GMA 용접공정을 초층용접에 적용할 때의 최적화를 목표로 하였다. 따라서 선행연구의 방법론을 응용하여 맞대기 용접부에 대한 GMA 초층용접을 대상으로 2차 회귀 모델 및 호감도 함수^{11,12)}를 적용한 반응표면분석법¹³⁻¹⁵⁾을 통해 최적용접조건을 선정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 반응표면분석법

반응표면분석법(response surface method)은 여러 개의 인자 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다.

반응변수 η 를 최적화시키기 위해서 반응표면이 회귀 분석방법에 의하여 추정되므로 반응표면 모형은 식(1)과 같이 2차 회귀모델(regression model)을 설정하였다.

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

본 연구에서는 x_i 는 입력변수의 코드화 값(coded unit)이고, \hat{y} 는 출력변수이며, $\hat{\beta}$ 는 최소자승법(the method of least squares)으로 구한 계수이다.

위 모델 식(1)을 구하기 위해서는 실험을 통해 용접 품질과 관련된 자료를 얻어야 한다. 이와 같은 실험도 시행착오나 수많은 실험을 통해 구하고자 한다면 경제적 어려움이 발생할 가능성이 있으므로 효과적인 실험 계획법 중의 하나인 중심합성계획법(central composite design, CCD)을 사용하였다.

3. 실험

3.1 Weaving pattern의 설정

본 실험에서는 이면비드의 형상제어를 위해 수동 용접의 Weaving pattern을 재현하여 이면비드 폭과 이면비드 높이를 형성할 수 있는 진행형 삼각형 패턴을 Fig. 1과 같이 설정하였다.

용접 접합부의 조건은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 250×80×9mm 크기의 판재를 V-접합부로 가공하였고 루트 면과 갭은 각각 2mm, 1.5mm로 설정하였다. 녹과 이물질을 제거하기 위해 루트면과 이면비드 생성 부근은 밀링 가공하였으며 아세톤으로 기름을 제거한 후 용접하였다. Fig. 1과 같이 설정한 위빙패턴을 적용하여 실험한 결과 유효한 이면비드 가능영역을 Fig. 3에 나타내었다. 연강(mild steel)인 모재의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3에서 ◆는 균일한 이면비드가 생성된 조건을

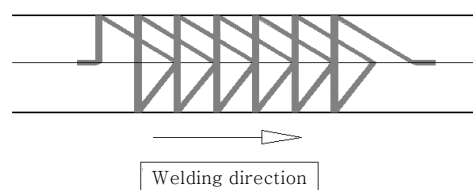


Fig. 1 Weaving pattern for root pass welding

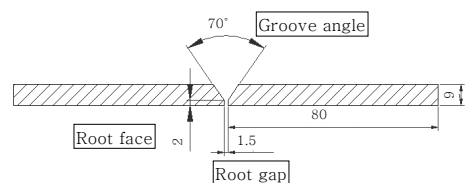


Fig. 2 Configuration of butt welding specimen (250×80×9mm)

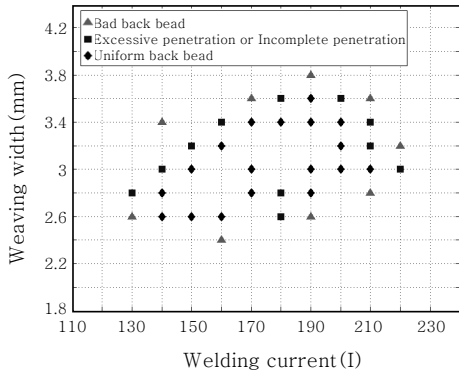


Fig. 3 Back bead formation according to weaving width and welding current

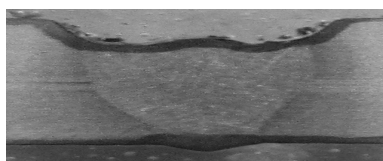
Table 1 Chemical composition of specimen(wt%)

C	Si	Mn	P	Cr	Ni
0.085	0.234	1.28	0.0067	0.026	0.0500

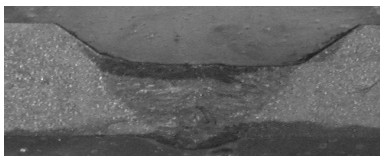
나타내고, ■는 용입불량 또는 용입과다가 된 조건이고, ▲는 이면비드가 생성되지 않은 조건을 나타낸다.

3.2 이면비드 목표 값 설정

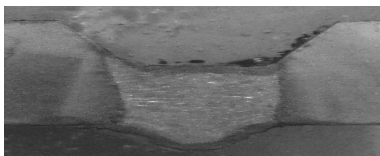
이면 비드의 용착부 단면을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 입열량 부족에 따른 단면을 볼 수 있다. 여기서 이면비드의 형상이 2mm 이하 일 때에는 모재에 들어가는 입열량이 적음에 따라 음의 값을 갖는 비드높이를 나타내었다. 또한 (b)는 4mm정도의 폭을 가진 이면비드를 볼 수 있었으며 충분한 용입으로 결함의 품질등급에 대한 지침에서도 만족할 만한 이면비드를



(a) Back bead width ≈ 2mm



(b) Back bead width ≈ 4mm



(c) Back bead width ≈ 6mm

Fig. 4 Cross section of welds

생성하였음을 볼 수 있다. (c)에서는 필요 이상의 과도한 이면비드의 형상을 보여주고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 데이터를 이용하여 목표치 값을 이면비드의 폭 4mm, 이면비드의 높이를 1mm로 설정하여 최적의 용접조건을 선정하였다.

3.3 실험 계획법

본 실험에서는 2차 회귀 모형을 이용하여 반응량의 곡면적인 변화를 감지하기 위해 중심점(center point)과 축점(axial point)을 2^k 요인 실험에 추가시킨 중심합성계획을 세워 실험을 수행하였다.

일반적으로 이면비드형상에 영향을 미치는 용접 변수에는 용접전류, 용접전압, 용접속도, 위빙폭, 전극과 모재간 거리(CTWD), 보호가스의 종류 및 유량 등이 있으며, 이러한 용접변수에 따라 이면비드형상이 결정된다. 따라서 원하는 비드형상을 얻기 위해 적절한 용접 변수를 설정하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 용접비드에 가장 큰 영향을 미치는 용접속도, 용접전류, 용접전압, 위빙폭을 입력 변수로 택하여, 이 네 입력변수가 출력변수인 이면비드 폭과 이면비드 높이에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고자 하였다. 이외의 변수는 Table 2와 같이 고정하였다.

그런데 입력변수가 많을수록 실험 횟수가 늘어나므로 목표 품질을 내기 위한 상관관계가 큰 변수들에 대해서는 그 관계식을 이용하여 일부를 종속변수로 삼으면 독립적인 입력변수의 수를 줄일 수 있다. 여기서는 네 변수 중에 안정된 아크와 양호한 이면비드를 얻기 위한 용접전류와 용접전압의 관계를 실험을 통해 Fig. 5와 같이 구하였다. 이 실험에서 위빙폭은 3mm로 고정하였으며, 용접속도(3.0 ~ 7.0mm/sec)는 용접전류(140 ~ 210A)의 증가에 따라 비례해서 증가시켰다. 본 실험을 통해서 용접전압은 표면비드의 형상에는 영향을 크게 미치지만 이면비드 형상에 미치는 영향은 적은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 용접전압을 종속변수로 보고, 다음 식(2)과 같은 관계를 이용해, 용접전류를 실험변수로 선정하였다.

Table 2 Fixed condition for the experiment

Tip-to-metal distance (mm)	20
Shielding gas	CO ₂
Shielding gas flow (l/min)	20
Root gap (mm)	1.5
Root face (mm)	2
Electrode wire diameter (mm)	1.2

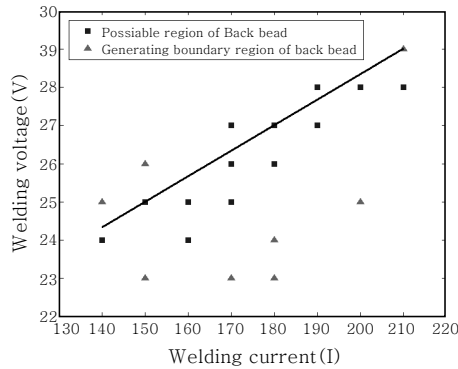


Fig. 5 Relationship between welding current and welding voltage

Table 3 Factors and levels for experimental design

Factor	Factor name	-1	0	1
x1	Weaving width(mm)	2.5	3	3.5
x2	Welding current(A) (voltage)(I)	170 (25)	180 (26)	190 (27)
x3	Welding speed(mm/s)	4.0	5.0	6.0

$$V = \frac{1}{15.4}I + 14.7 \quad (2)$$

본 연구에서는 목표형상치수를 이면비드 폭 4.00mm, 이면비드 높이 1.00mm로 설정하였고, 목표형상치수를 만족하는 용접조건을 찾기 위한반응표면분석에 필요한 2차 회귀모델을 구하기 위해 중심합성계획법을 이용하였다. 이를 위해 이면비드 가능 영역에서의 입력변수 범위를 구하였으며, 각 변수의 수준을 Table 3에 나타내었다.

4. 실험결과

중심합성계획을 통해 17회 용접을 수행한 후 얻은 반응 값은 Table 4와 같다.

관심실험영역에서 입력변수인 위빙폭, 용접전류, 용접속도로부터 얻은 출력변수 이면비드 폭과 이면비드 높이와의 2차 회귀식은 식(3), (4)과 같다.

$$Width = 4.300 - 0.043x_1 + 0.282x_2 - 0.050x_3 + 0.039x_1^2 - 0.226x_2^2 - 0.750x_3^2 - 0.876x_1x_2 + 0.036x_1x_3 - 0.200x_2x_3 \quad (3)$$

$$Height = 1.116 + 0.011x_1 - 0.126x_2 + 0.174x_3 - 0.282x_1^2 + 0.143x_2^2 - 0.026x_3^2 - 0.029x_1x_2 - 0.024x_1x_3 - 0.021x_2x_3 \quad (4)$$

식 (3), (4)의 2차 회귀 모델의 타당성은 분산분석의 F검정과 결정계수에 의해서 판단할 수 있다. 분산분

Table 4 Central composite design and experimental result

No	Coded variables			Response	
	x1	x2	x3	width	height
1	-1	-1	-1	2.64	0.64
2	1	-1	-1	2.75	0.6
3	-1	1	-1	5.75	1.34
4	1	1	-1	5.5	1.27
5	-1	-1	1	2.7	0.55
6	1	-1	1	2.95	0.5
7	-1	1	1	5	1.25
8	1	1	1	4.9	1
9	-1	0	0	4.75	1.2
10	1	0	0	4.7	1.18
11	0	-1	0	4.6	0.8
12	0	1	0	5	1.05
13	0	0	-1	3.75	1.1
14	0	0	1	3.75	1.15
15	0	0	0	4.2	0.92
16	0	0	0	3.9	1.2
17	0	0	0	4	1.09

석의 F검정에서 F_0 는 회귀평균제곱과 잔차평균제곱의 비율($F_0 = \frac{MSR}{MSE}$)로 나타내며, 이 값이 크면 클수록 회귀방정식의 정도가 좋다고 할 수 있다. 결정계수(R^2)는 회귀변동과 총변동의 비율($R^2 = \frac{SSR}{SST}$)로 나타내며, F검정과 같이 결정계수의 값이 클수록 회귀식의 정도가 좋다.

F-분포표를 이용하여 주어진 유의수준(α)과 자유도에 따른 기각치 $F(\alpha)$ 를 구한 다음 F_0 값과 기각치 [$F(\alpha)$]값을 비교하여 $F_0 > F(\alpha)$ 이면 회귀식이 유의하다고 할 수 있다. 식(3), (4)의 회귀식에 대한 분산분석표를 Table 5에 나타내었다.

아크용접공정은 다변수 공정으로 아크 안정성 및 비드형상에 수많은 요인이 작용하기 때문에 재현성 및 정밀도 수준이 높지 않은 특징이 있어 일반적으로 적용하는 유의수준인 0.05로 선택하면 기각치 $F(9,7;0.05) = 3.68$ 이 된다. 이 기각치와 반응변수에 따른 각각의 Table 5를 비교하면 F_0 값이 F값보다 크므로 식(3), (4)의 회귀식은 모두 유의함을 알 수 있다.

회귀식에 대한 결정계수의 값은 Table 6에 나타 내었으며, 결정계수 역시 회귀식을 잘 표현한다고 볼 수 있으므로 각 회귀모델에 대해 F검정과 결정계수 값을 살펴본 결과 용접공정을 잘 표현하는 모델이라고 할 수 있겠다.

Table 5 Analysis of variance for the regression model of back bead width and height

Back bead width				
Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean of square	F_0
regression	9	1.06	0.117	6.04
error	7	0.136	0.019	
total	16	1.193		

Back bead height				
Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean of square	F_0
regression	9	13.07	1.45	4.31
error	7	2.36	0.34	
total	16	15.44		

Table 6 Analysis of coefficient of determination

R^2	width	0.847
	height	0.886

본 연구에서는 입력변수의 최적 값을 찾기 위해 호감도함수(desirability function)를 사용하였으며, 이면비드의 폭과 높이 모두 목표 값을 갖고 있으므로 식(5)과 같이 양면호감도함수를 이용하였다. 여기서 A는 허용하한값, B는 목표값, C는 허용상한값을 각각 의미한다.

2mm 이하와 6mm 이상의 이면비드 폭일 때 호감도함수 값은 0으로 설정하였고, 목표치인 4mm일 때 호감도함수 값은 1이 된다. 마찬가지로 이면비드 높이는 0mm 이하와 2mm 이상이면 0으로 설정하였다. 각각의 호감도함수는 식(6), (7)과 같다. 이면비드 폭과 이면비드 높이는 목적 값을 가지므로, 식(6), (7)의 양면호감도함수를 각각 구한 다음 합성하여 최종호감도함수 값(D)을 구하는데 이를 식(8)에 나타내었다.

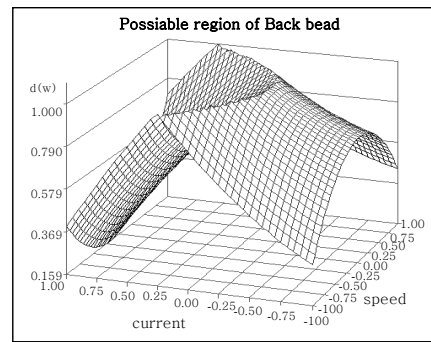
$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < A \\ \left[\frac{\hat{y}_i - A}{B - A} \right] & A \leq \hat{y}_i \leq B \\ \left[\frac{\hat{y}_i - C}{B - C} \right] & B \leq \hat{y}_i \leq C \\ 0 & \hat{y}_i > C \end{cases} \quad (5)$$

$$d(W) = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < 2 \\ \left[\frac{\hat{y}_i - 2}{4 - 2} \right] & 2 \leq \hat{y}_i \leq 4 \\ \left[\frac{\hat{y}_i - 6}{4 - 6} \right] & 4 \leq \hat{y}_i \leq 6 \\ 0 & \hat{y}_i > 6 \end{cases} \quad (6)$$

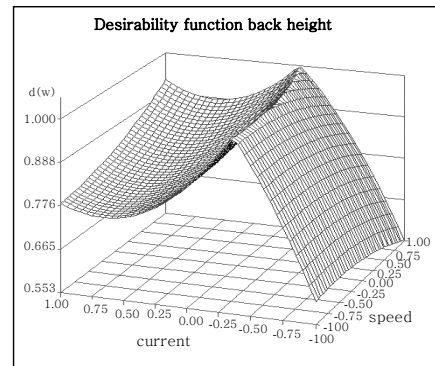
$$d(H) = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < 0 \\ \left[\frac{\hat{y}_i - 0}{1 - 0} \right] & 0 \leq \hat{y}_i \leq 1 \\ \left[\frac{\hat{y}_i - 2}{1 - 2} \right] & 1 \leq \hat{y}_i \leq 2 \\ 0 & \hat{y}_i > 2 \end{cases} \quad (7)$$

$$D = (d(W) \times d(H))^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

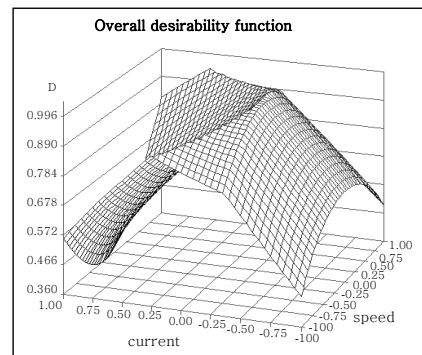
격자탐색법을 이용해 복합호감도함수(overall desirability function, ODF)값이 최대가 될 때의 반응표면 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 (a), (b)는



(a) Desirability function for back bead width (variables : welding current and speed)



(b) Desirability function for back bead height (variables : welding current and speed)



(c) Overall desirability function

Fig. 6 Desirability functions according to welding current and welding speed at $x_1 = -0.90$

Table 7 Optimal welding condition

Coded variables			Natural variables			ODF
x1	x2	x3	Weaving width (mm)	Welding current (A)	Welding speed (mm/s)	
-0.90	-0.46	-0.24	2.55	175.4	4.76	0.993

x1=-0.90일 때의 전류와 속도에 대한 이면비드 폭과 높이의 단일호감도함수 그래프이고, (c)는 복합호감도 함수 그래프를 나타낸다. 그림 (a), (b)에서 용접속도의 영향은 크지 않지만, 용접전류는 증가할수록 단일호 감도함수가 증가하다가 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 호감도 함수가 최대값에 도달한 이후에는 과도한 이면 비드 폭과 비드 높이로 인해 단일호감도 함수 값이 각 각 작아지는 것을 볼 수 있으며, 특히 이면비드 폭의 과도한 증가로 인해 호감도 함수 값이 현저하게 감소하 는 것을 볼 수 있다. 결국 주어진 입력변수 범위 내에 서 격자탐색법을 이용하여 구한 입력변수의 최적조건은 Table 7과 같다.

최적조건에서 예측된 출력변수(이면비드 폭과 높이) 는 각각 4mm, 1mm 이고, Fig. 7에서 보듯이 총 3회 의 검증실험을 통해 얻은 측정값들의 평균은 4.02mm, 1.05mm 이므로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

최적화를 통해 얻은 최적 입력변수 값을 적용하여 용

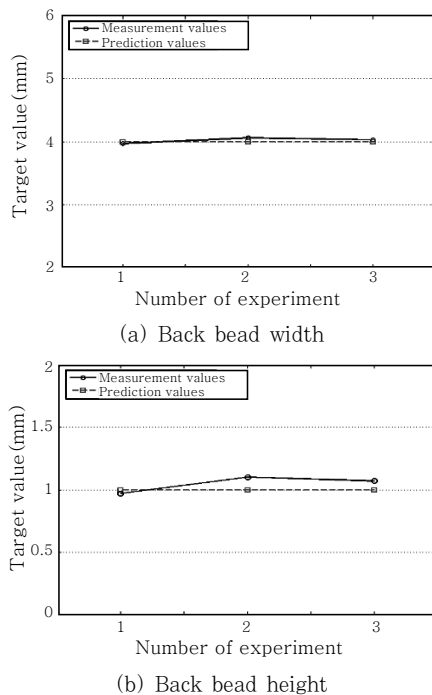


Fig. 7 Comparison of experimental values and predicted ones

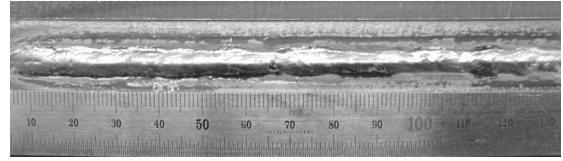


Fig. 8 Back bead appearance of weld by optimal welding condition

접한 시편의 대표적인 이면비드 모양을 Fig. 8에 나타 내었다.

5. 결 론

V-그루브 맞대기 GMA 초층용접시 균일한 이면 비 드를 얻기 위한 최적용접조건의 선정에 관한 연구를 통 해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 실험을 통해 이면비드형상에 영향을 크게 미치는 변수로 용접전류, 용접속도, 위빙폭을 선정하였으며, 이 면비드가 생성되는 이들 변수값의 범위를 정하였다.
- 2) 이면비드형상의 품질을 나타내는 출력변수로 비드 폭과 비드높이를 선정하고 적합한 목표치를 각각 용접 부 단면 검사를 통해 설정하였다.
- 3) 중심합성계획법을 이용하여 반응표면분석을 위한 회귀모델을 구하였으며, 반응표면분석을 통해 최적용접 조건을 선정하였다.
- 4) 최적조건을 적용한 실험을 통해 이면비드의 균일 성을 확인함으로써 반응표면분석법에 의한 용접조건 최 적화 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. H. B. Cary: Modern Welding Technology, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, (1989)
2. S. D. Park: Welding Engineering, Wonchang, (1995) (in Korean)
3. C. E. Bull, K. A. Stacey and R. Calcraft: On Line Weld Monitoring Using Ultrasonic, Journal of Nondestructive Testing, **35-2** (1993), 57-64
4. Y. M. Zhang, R. Kovacevic and L. Li: Characterization and Real-time Measurement of Geometrical Appearance of the Weld Pool, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **36-7** (1996), 799-816
5. J. B. Lee, Y. W. Bang, S. W. Oh and H. S. Chang: Control of Bead Geometry in GMAW, Journal of KWS, **15-6** (1993), 116-123 (in Korean)
6. 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), 8-16
7. Y. S. Tarng and W. H. Yang: Optimisation of the

- Weld Bead Geometry in Gas Tungsten Arc Welding by the Taguchi Method, *Int J Adv Manuf Technol*, **14** (1998), 549-554
8. H. J. Park, M. J. Kang, B. G. Choi and S. H. Lee: Welding Parameters Optimization of Pleated Type Filter Using Response Surface Methodology, 2004 Annual Spring Meeting of KWS, Jeju Korea, 39-41 (in Korean)
 9. J. Y. Lee, J. W. Kim and C. H. Kim: A Study on the Selection of Fillet Weld Conditions by Considering the Tack Welds, *Journal of KWS*, **24-5** (2006), 29-36 (in Korean)
 10. S. C. Yun and J. W. Kim: Selection of Optimal Welding Condition in Root-pass Welding of V-Groove Butt Joint, *Journal of KWJS*, **27-1** (2009), 95-101 (in Korean)
 11. G. Derringer and R. Suich: Simultaneous Optimization of Several Response Variances, *Journal of Quality Technology*, **12** (1980), 214-219
 12. 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
 13. R. H. Myers and D.C Montgomery: *Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons Inc, (1995)
 14. D. C. Montgomery: *Design and Analysis of Experiments*, 2nd Ed, John Wiley & Sons Inc. (1984)
 15. S. H. Park: *Design of Experiments*, Minyoungsa, (2003) (in Korean)