

가접부를 고려한 필릿 용접조건의 선정에 관한 연구

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

이준영 * · 김재웅 * · 김철희 **

*영남대학교 대학원 기계공학과

**영남대학교 기계공학부

***한국생산기술연구원 정밀접합팀

ABSTRACT Positioning the workpiece accurately and preventing the weld distortion, tack welding is often performed before main welding in the construction of welded structures. The weld bead size of the tack weld is determined according to the workpiece thickness, weld length, weld joint type etc. However, this tack weld deteriorates the final weld bead profile, so that the grinding process is usually adopted for the uniform weld bead profile.

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 uses the response surface analysis in which the leg length and the reinforcement height of weld bead were chosen as the quality variables of weld bead profile. The overall desirability function, which was combined desirability function for the two quality variables, was used as the objective function for getting the optimal welding condition. From the result, 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.

1. 서 론

용접공정은 생산공정 중에서 없어서는 안될 필수적인 공정중의 하나이다. 특히 조선분야에서 많이 사용되는 필릿용접(fillet welding) 공정에서 비드의 형상은 용접부의 기계적 성질을 결정하는 중요한 역할을 한다^{1,2)}.

필릿용접 구조물 제작에 있어서 용접부재를 정확한 위치에 설정하거나, 용접변형을 감소시킬 목적으로 가접(tack welding)을 실시한다. 가접 후 일정한 용접 조건으로 본 용접을 시행하면, 가접 비드가 있는 곳과 없는 곳의 최종 비드 형상이 달라지기 마련이다. 따라서 최종 비드의 형상을 균일하게 유지하기 위해서는 가접부 유무에 따른 용접조건을 달리하여 각각에 적합한 용접조건으로 용접을 실시해야한다.

용접공정은 다중입력 대 다중출력 공정이므로 원하는 비드형상을 얻기 위해서는 용접변수를 조정해가며, 수많은 실험을 실행해야한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 수평필릿 용접부에 대한 탄산가스용접을 대상으로 하여 반응표면분석법(response surface methodology)

을 사용하였으며³⁻⁵⁾, 이때 얻은 데이터들로부터 호감도 함수(desirability function)⁶⁾를 사용하여 최적용접조건을 선정하였다.

2. 반응표면분석법

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

본 연구에서 출력변수 η 를 최적화시키기 위한 반응표면은 회귀분석(regression analysis)방법에 의해 추정되었으므로 2차 회귀모델을 식(1)과 같이 설정하였다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

여기서 \hat{y} 는 η 의 추정량이고, x_i 는 입력변수들의 코드변수값(coded unit)이며 $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 는

최소자승법에 의해 구한다. 식 (1)을 구하기 위해 반응표면 실험계획법 중의 하나인 중심합성계획법(central composite design, CCD)을 사용하였다.

3. 실험

3.1 실험계획

탄산가스아크 용접공정의 경우, 용접비드 품질의 지표가 되는 각장(leg length), 덧살높이(reinforcement height)를 결정짓는 여러 가지 인자에는 용접전류, 용접전압, 용접속도, 팁 모재간 거리, 토치각, 가스유량, 보호가스, 와이어 직경 등이 있다. 이러한 인자들 중 용접 비드에 가장 큰 영향을 끼치는 용접속도, 용접전류, 용접전압을 입력변수로 택하여, 이 세 입력변수가 출력변수인 각장, 덧살높이에 어떠한 영향을 끼치는지를 파악하고자 하였다. 입력변수 이외의 변수는 Table 1과 같이 고정하였다.

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

3.2 실험결과

본 연구에서는 가접부 유무에 상관없이 필릿용접비드의 목표형상치수를 각장 6mm, 덧살높이 0mm로 설정하였고, 목표형상치수를 만족하는 용접조건을 찾기 위해 중심합성계획법을 이용하였다.

Table 2 Factors and levels for experimental design

Factor	Factor name	Without tack weld			With tack weld		
		-1	0	1	-1	0	1
x_1	Welding speed [cm/min]	58	52	46	58	52	46
x_2	Welding current [A]	280	300	320	250	270	290
x_3	Welding voltage [V]	32	34	36	31	33	35

가접부 유무에 따른 입력변수의 용접 조건을 Table 2에 나타내었고, 이 조건으로부터 중심합성계획을 통해 총 17회의 용접을 수행한 후 얻은 출력변수 값은 Table 3과 같다.

Table 3 Central composite design and experimental result

No	Coded variables			Without tack weld		With tack weld	
	x1	x2	x3	L	C	L	C
1	-1	-1	-1	5.2	0.42	5.35	0.72
2	1	-1	-1	5.55	1.08	5.55	0.98
3	-1	1	-1	5.2	2.32	5.25	1.39
4	1	1	-1	5.6	3.04	5.95	1.69
5	-1	-1	1	5.55	0.18	5.7	0.37
6	1	-1	1	6.35	0.31	5.75	0.73
7	-1	1	1	5.6	1.04	5.65	0.70
8	1	1	1	6.6	0.83	6.7	0.36
9	-1	0	0	5.6	0.54	5.95	0.39
10	1	0	0	6	0.86	6.05	0.52
11	0	-1	0	5.9	0.43	5.75	0.73
12	0	1	0	5.7	1.37	5.85	0.86
13	0	0	-1	5.6	1.14	5.55	1.08
14	0	0	1	6.05	0.32	5.75	0.83
15	0	0	0	5.9	0.73	5.9	0.53
16	0	0	0	5.9	0.63	5.9	0.63
17	0	0	0	5.85	0.76	5.85	0.66

관심실험영역(region of interest)에서 입력변수 용접속도, 용접전류, 용접전압에 대한 출력변수 각장(L)과 덧살높이(C)의 회귀식은 가접부가 없을 때는 식(2)와 같고, 가접부가 있을 때는 식(3)과 같다.

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

$$C = 0.653 + 0.161x_1 + 0.619x_2 - 0.532x_3 + 0.086x_1^2 + 0.286x_2^2 + 0.118x_3^2 - 0.035x_1x_2 - 0.18x_1x_3 - 0.31x_2x_3 \tag{2}$$

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

$$C = 0.636 + 0.072x_1 + 0.148x_2 - 0.284x_3 - 0.2x_1^2 + 0.141x_2^2 + 0.297x_3^2 - 0.083x_1x_2 - 0.068x_1x_3 - 0.178x_2x_3 \tag{3}$$

추정된 회귀 모델의 타당성을 분산분석(analysis of variance)의 F검정(F test)과 결정계수(coefficient of multiple determination, R^2)에 의해서 회귀식 모두가 유의하다는 것을 확인하였다⁴⁾.

각장과 덧살높이는 목적값을 가지므로, 식(4)의 양면호감도함수를 이용하여 각각의 응답을 호감도함수로 변환한 다음 식(5)를 이용해 복합호감도함수(overall desirability function)⁶⁾를 구하였다.

격자탐색법(grid search method)을 이용해 복합호감도함수값이 최대가 될 때의 반응표면그

래프를 Fig.1과 Fig.2에 나타내었고, 최적 입력 변수와 복합호감도함수값을 Table 4에 나타내었다.

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < A \\ \frac{\hat{y}_i - A}{B - A} & A \leq \hat{y}_i \leq B \\ \frac{\hat{y}_i - C}{B - C} & B \leq \hat{y}_i \leq C \\ 0 & \hat{y}_i > C \end{cases} \quad (4)$$

$$D = (d_1 * d_2 * \dots * d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

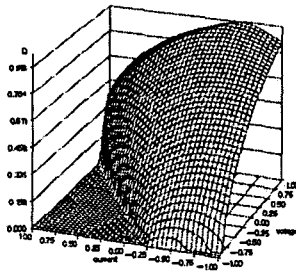


Fig.1 Overall desirability value (without tack weld)

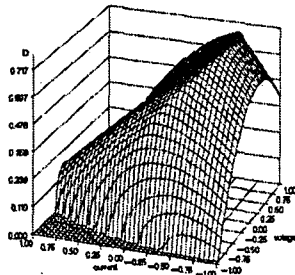


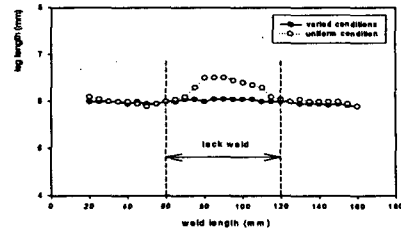
Fig.2 Overall desirability value (with tack weld)

Table 4 Optimal welding conditions

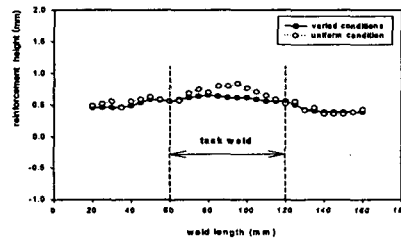
	Coded variables			Natural variables			Overall desirability function
	x_1	x_2	x_3	ξ_1	ξ_2	ξ_3	
Without tack weld	-0.21	-0.56	1	50.74	288.8	36	0.917
With tack weld	1	-0.69	0.39	58	256.2	33.78	0.717

이 조건에서 가접부가 없을 때와 있을 때의 예측된 출력변수는 각각 $(L, C) = (6.00, 0.19)$, $(6.00, 0.48)$ 이고, 검증실험을 통해 얻은 측정값은 $(L, C) = (5.95, 0.36)$, $(6.05, 0.42)$ 이다. 이 값을 비교해보면 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

실험을 통해 얻은 최적 데이터 값을 적용하여 가접부가 있는 곳과 가접부가 없는 곳에서 하나의 조건으로 본용접을 실시한 것과 두 가지의 조건을 각각 적용하여 본 용접을 실시한 결과를 Fig.3(a),(b)에 나타내었다. 이 둘을 비교해볼 때, 가접부를 고려하여 용접한 실험 결과가 비드 평활도에 좋다 것을 알 수 있다.



(a) leg length



(b) reinforcement height

Fig.3 Comparison of weld bead qualities according to the welding conditions

4. 결 론

탄산가스아크 필릿용접공정에서 가접비드가 있는 곳에 본 용접시, 평활한 비드를 얻기 위해 반응표면실험계획법중의 하나인 중심합성계획법을 이용하였다. 가접부가 있는 곳과 없는 곳에서 각 장과 덧살높이를 동시에 최대 만족하는 최적 용접조건을 구하였고, 이 최적데이터들로부터 가접비드가 있는 곳과 없는 곳에서 용접조건을 달리 적용해가며 용접시공을 한 결과, 비드의 균일성을 확인 할 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, Vol.21, No.3, pp.40-45, 2003
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, Vol.5, No.2, pp.111-118 2002
3. R.H. Myers and D.C montgomery, "Response surface methodology, process and product optimization using designed experiments", John wiley & Sons, inc, 1995
4. S.H Park, "Design of experiments", 민영사, 2003
5. 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, Vol.21, No.2, pp.76-81, 2003
6. G. Derringer and R. Suich, "Simultaneous optimization of several response variables", Journal of Quality Technology. Vol.12, pp.214-219 1980