

필릿용접 구조물의 용접조건 선정을 위한 실험적 연구

나현호* · 김일수*[†] · 김지선* · 이지혜*

*목포대학교 기계선박해양공학부

A Experiment Study for Selection of Welding Condition of fillet Welded Structure

Hyun-Ho Na*, Ill-Soo Kim*[†], Ji-Sun Kim* and Ji-Hye Lee*

*Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo National University, Jeonnam 534-729, Korea

[†]Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received April 15, 2011 ; Revised May 16, 2011 ; Accepted August 24, 2011)

Abstract

GMA welding process is a production process to improve productivity for the provision of higher welding quality of material. These includes numerous process variables that could affect welding quality, productivity and cost savings. Recently, the welding part of construction equipment had frequent failure of major components in the welding part of each subsidiary material due to shock which is very poor according to the welding part. Therefore, the implementation of sound welding procedure is the most decisive factor for the reliability of construction machinery. The data generated through experiments conducted in this study has validated its effectiveness for the optimization of bead geometry and process variables is presented. The criteria to control the process parameters, to achieve a good bead geometry. This study has developed mathematical models and algorithms to predict or control the bead geometry in GMA fillet welding process.

Key Words : Fillet welding, Taguchi method, Mathematical model, Sensitivity analysis

1. 서 론

GMA 용접공정은 소재의 고품질을 제공하기 위한 생산성 향상을 위한 공정이며 용접품질, 생산성, 원가절감 등에 영향을 줄 수 있는 수많은 공정변수들을 포함한다. 최근 건설장비의 로우더 유니트의 필릿(fillet) 용접부는 작업환경에 따른 각 부재의 열악한 충격하중으로 인해 용접부에서 주요 부품의 파괴가 빈번하게 발생하고 있는 현실이다. 따라서 무결함 및 경량화, 고강도 소재의 적용이 가능한 건전한 용접시공 절차의 구현은 건설기계의 용접부 신뢰성에 가장 결정적인 요인이라 할 수 있다. 다양한 산업에서 사용되어지고 있는 GMA 필릿 용접공정은 용접조건에 대한 공정변수의 수학적 모델이 완전히 정립되어지지 않고, 부분적인 용접변수 예측에만 국한되어 있는 실정이며, 최근까지 건설장비의 용접 자동화 관련 연구는 생산성 향상을 통한

경비절감을 위하여 고효율의 용접기술 개발에 집중되어 있다¹⁻⁴⁾. 또한 GMA 필릿용접에서 공정변수의 변화에 따른 비드형상과의 관계를 수학적으로 모델링하여 출력값으로 최적의 비드형상을 예측할 수 있는 모델개발을 통하여 용접 최적화에 대한 연구가 시급한 실정이다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 고에너지 열원을 갖고 있는 레이저 및 플라즈마를 용접시공에 적용되고 있으며, 이외에도 용접공정의 효율을 향상시키기 위하여 로봇용접 등의 신기술이 개발되고 있다. 그러나 고효율의 접합기술을 사용하더라도 용접품질을 확보하지 못하면 실제 생산라인에 적용이 불가능하다. 따라서 고효율과 품질이라는 두 가지 목적을 달성할 수 있는 기술개발이 요구되고 있는 실정이며, 이러한 목표를 달성하기 위해서는 용접공정에서 대상제품의 품질을 제어하기 위한 관련 공정변수들의 측정이 먼저 수행되어야 한다. 기존 연구들은 대부분 용접전류, 용접전압, 용접속도 등과 같이 변수들만으로는 용접품질을 제어한 관계로 실

질적인 현장적용에는 한계가 있었다⁵⁻⁹⁾. Chandel¹⁰⁾은 최초로 요인설계(factorial design) 실험방법을 용접공정에 적용하여 공정변수와 bead-on-plate 비드형상과의 관계를 연구하였으며, Temg et al.¹¹⁾은 신경회로망을 이용하여 레이저 용접시 공정변수 예측에 관한 연구를 수행하였다. 특히, Le et al.¹²⁾은 최초로 CO₂아래보기 용접에서 공정변수를 이용하여 이면비드 형상을 예측하는 연구를 수행하였다. 하지만 기존에 수행된 대부분의 연구가 아래보기 용접에 국한되었으며, 필릿용접시⁽¹³⁻¹⁴⁾ 공정변수의 영향을 분석하기에는 어려운 한계점을 지니고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 필릿용접부의 품질을 직·간접적으로 제어할 수 있는 인자들의 영향을 비교·분석하여 용접공정 중 용접 품질을 제어할 수 있는 기술개발이 시급하다.

본 연구에서는 공정변수와 비드형상 사이의 상호작용을 고찰하고, 실험을 통해 생성된 데이터의 분석을 통하여 필릿용접부의 비드형상(비드폭, 덧살높이, 각장) 예측 및 무결함장비의 경량화를 도모할 수 있는 필릿용접부 최적화를 구현하고자한다.

2. 용접실험

필릿 용접 구조물의 용접 최적화를 위하여 Table 1과 같은 다구찌(taguchi) 방법을 이용한 총 9회의 실험계획을 수립하였다. 공정변수의 범위는 기초실험을 통하여 안정적인 비드형성이 가능한 영역을 선정하였으며, 용접실험의 입력변수는 용접전류(I), 용접전압(V), 용접속도(S)로 선정하였다. 각각의 공정변수는 3개의 레벨을 선정하여 구성하였다. 또한, 출력변수는 비드폭, 덧살높이, 각장길이를 선정하였으며, 각장은 용접형상의 다리길이로서 Fig. 3에 나타내었다. 각각의 공정변수의 실험수준과 한계는 Table 2에서 보는 바와 같다. 용접은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 350A GMA 용접기와 반자동 오토 캐리지, 시험편 고정지그, 와이어 피더를 사용하여 실험을 수행하였으며, 보호가스는 100% CO₂, 가스유량은 18~20l/min, 용가재(filler wire)

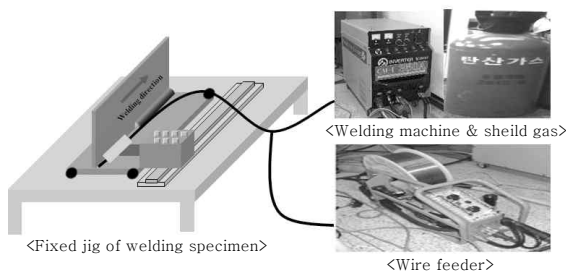


Fig. 1 A schematic diagram for experiment

는 1.2mm 플럭스 코어와이어(flux forced wire), 모재와 팁과의 거리(ctwd)는 15mm를 유지하여 실험을 수행하였다.

용접실험에 사용된 시험편(ss400)은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 200×400×20,12mm의 형태로 제작하여 실험을 수행하였으며, 용접공정은 작업현장의 필릿용접 WPS를 적용하여 로우더 유닛의 용접방식인 3패스 적층용접을 실시하였다. 실험에 사용된 시험편의 물리적

Table 1 Experimental layout using orthogonal array

Number of the trial	Welding Current (Amp.)	Welding Voltage (Volt.)	Welding Speed (cm/min)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Table 2 Process parameters and their levels for fillet welding

Parametets	Symbol	Level		
		Low	Middle	High
Welding Current (Amp.)	I	240	260	280
Arc Voltage (Volt.)	V	23	25	27
Welding Speed (cm/min)	S	40	45	50

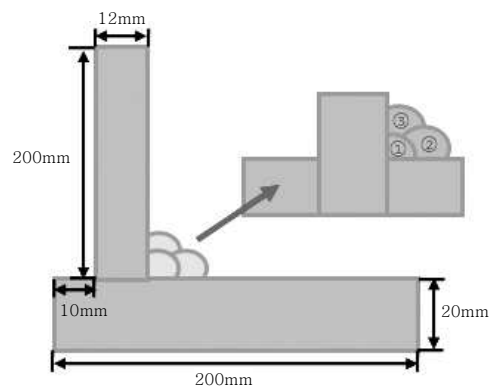


Fig. 2 Configuration of welding specimen

Table 3 Mechanical properties of base metal

Base metal	Tensile Strength (N/mm ²)	Yield Point (N/mm ²)	Elongation (%)	Impact Value (kgm/cm ²)	Hardness (Hv)
SS 400	435	245	25	6.2	128

Table 4 Chemical composition of base metal

Element (%)	C	Mn	Cu	Cr	Ni	Fe
Material						
SS400	0.15	0.69	0.04	0.08	0.50	Bal.

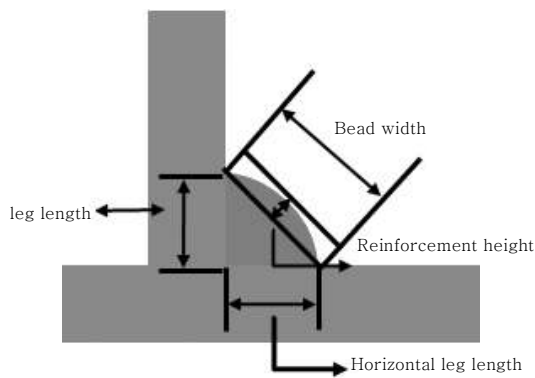


Fig. 3 A schematic diagram of bead geometry for the study

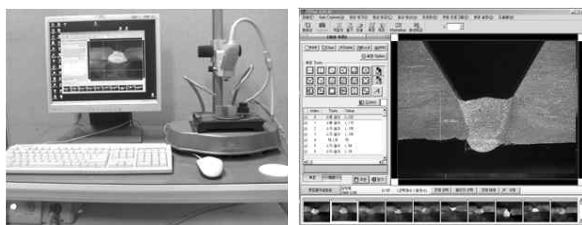


Fig. 4 Measurement of bead geometry

성질과 화학적 조성은 Tables 3~4에 나타내었다.

용접부 비드크기를 측정하기 위하여 용접이 완료된 9개의 시험편의 가로축을 Laser cutting machine을 사용하여 절단하고 단면부를 연삭한 후 폴리싱하였다. 비드의 단면 마크로(macro)를 잘 나타나게 하기 위하여 질산 및 에탄올을 혼합하여 에칭작업을 수행하여, 광학현미경을 통한 총 18개의 비드형상을 측정하였다. Fig. 3은 비드형상 측정에 관한 모식도를 나타내며, 비드측정에 사용된 광학현미경은 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 측정된 용접부 단면형상 및 크기(로우더 유닛의 내부 용접부)는 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Experimental results of fillet welding

No.	Bead geometry	Bead width (mm)	Reinforcement Height (mm)	Vertical leg length (mm)	Horizontal leg length (mm)
1		6.2	0.7	3.85	5.50
2		6.5	0.4	3.60	5.65
3		6.7	0.5	4.25	4.95
4		6.3	0.9	3.40	6.30
5		6.7	0.8	4.05	5.15
6		6.8	1.0	4.50	6.25
7		6.9	0.7	3.25	6.00
8		6.9	1.2	4.30	6.20
9		6.8	0.9	4.25	6.00

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5에서 나타낸 공정변수와 비드형상간의 관계를 바탕으로 Table 1에서 나타낸 실험배열을 적용한 필릿 시험편에서 측정된 비드형상 정보를 이용하여 비드폭, 덧살높이 및 각장길이 예측이 가능한 2차 곡선모델을 개발하였다. 용접공정의 입력변수는 용접전류(I), 용접전압(V), 용접 속도(S)이며, 출력변수인 비드폭(B/W), 덧살높이(R/H), 각장길이(V/L 및 H/L)에 대한 관계식은 아래에서 보는 바와 같다.

(1) Curvilinear model

1) Bead width(B/W)

$$\begin{aligned}
 &= -19.30656+0.0367I+2.456V-0.83717S \\
 &+0.0002I^2-0.0208V^2+0.0067S^2-0.005IV \\
 &+0.0007IS+0.0029VS
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

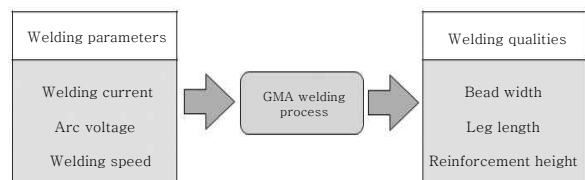


Fig. 5 A schematic diagram for the welding parameters and quality characteristics for experiment

2) Reinforcement height(R/H)

$$= -38.5589+0.2771I+0.051233V+0.02S$$

$$-0.0004I^2-0.0042V^2+0.0033S^2$$

$$+0.0011IV-0.0013IS-0.0029VS \quad (2)$$

3) Vertical leg length(V/L)

$$= 3695+0.125933I+1.029803V-1.71144S$$

$$-0.00017I^2-0.01667V^2+0.01133S^2$$

$$-0.0018IV+0.0003IS+0.02VS \quad (3)$$

4) Horizontal leg length(H/L)

$$= -72.3131+0.3088I-0.9869V+2.37853S$$

$$-0.0005I^2+0.0417V^2-0.0123S^2$$

$$+0.002IV-0.0017IS-0.04VS \quad (4)$$

Table 6에 나타낸 바와 같이 분산분석 테스트를 통하여, 개발된 2차 곡선모델의 유의성을 판단하기 위하여, 각 비드형상 변수에 대한 유의성을 검증하였다. 그 결과, 곡선모델의 다중상관계수는 70% 이상 일치함을 확인하였으며, 개발된 모델을 통하여 비드형상 예측에 대한 신뢰성을 입증하였다. 또한, Fisher's F-ratio를 이용하여 맞춤의 양호성을 측정하고, 오차범위 10% 수준에서 유의성을 표시함으로써 곡선모델의 논리적 형상을 구체적으로 입증하였다. 실험으로 측정값과 개발된 모델로부터 계산된 예측값 비교·분석결과를 Figs. 6~9에 나타내었다. Figs. 6~9에 따르면, 비드폭, 덧살높이, 각장길이 측정값과 예측값의 교점을 사각형 기호로 나타내었으며, 그림에서 제시된 선은 측정값과 측정값의 오차범위 ±10%내에 위치함을 확인하였다. Figs. 6~9에서 보는 바와 같이 오차범위는 대부분 10% 이내로 수렴함을 확인하였으며, 개발된 수학적 모델의 정확한 비드형상 예측이 가능함을 입증하였다.

3.1 다구찌 이론을 통한 실험분석

필릿용접 실험으로 측정된 비드형상을 바탕으로 비드

Table 6 Variance test of curvilinear model on bead geometry

No. of equation	SSE	R Square	Adjusted R Square
(1)	0.87562	93.5%	74.1%
(2)	0.67243	88.7%	54.9%
(3)	0.97468	93.6%	74.4%
(4)	1.19594	79.4%	77.5%

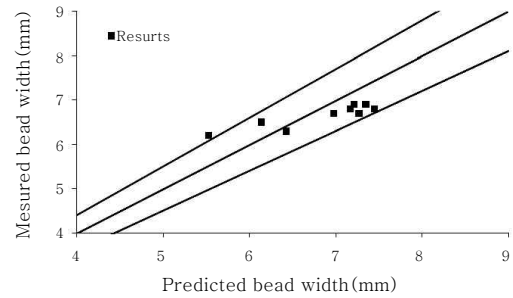


Fig. 6 Analysis of bead width from the curvilinear model

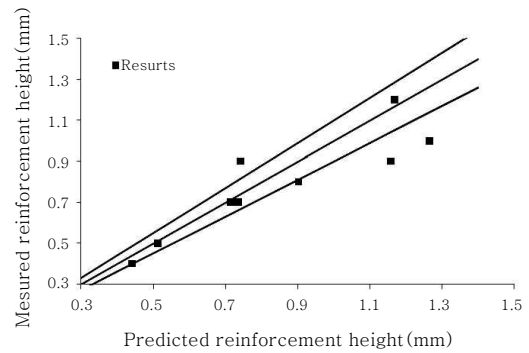


Fig. 7 Analysis of reinforcement height from the curvilinear model

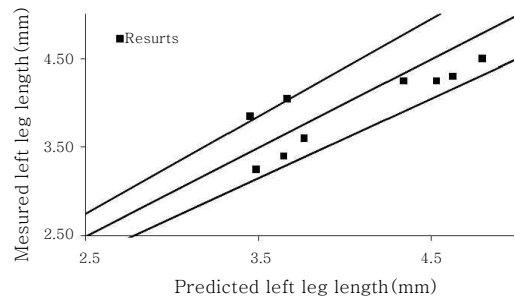


Fig. 8 Analysis of vertical leg length from the curvilinear model

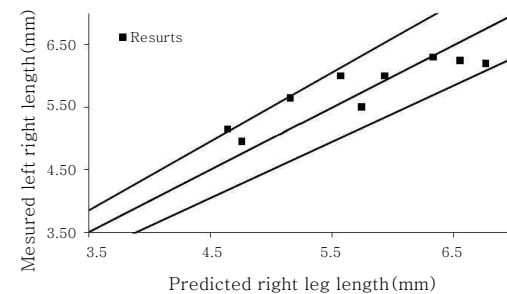


Fig. 9 Analysis of horizontal leg length from the curvilinear model

형상에 대한 품질특성(비드폭, 덧살높이 및 각장길이)은 S/N비가 클수록 최적의 비드형상을 형성하는 망소 특성을 사용한 다음과 같은 S/N비 공식으로 나타낸다.

$$\eta_{ij} = -10 \log y_{ij}^2 \quad (5)$$

여기서, η_{ij} 는 j번째 실험의 I번째 품질특성의 S/N비, y_{ij} 는 j번째 실험의 I번째 품질특성의 실험값을 의미한다. 각각의 비드 형상에 대한 S/N비의 결과는 Figs. 10~13에서 보는 바와 같이 비드폭(실험 1), 덧살높이(실험 2), 수직 각장길이(실험 7), 수평 각장길이(실험 3)의 조건에서 최적의 비드형상을 형성함을 확인하였다. 또한, 그림에서 보는 바와 같이 수행된 실험횟수에 따른 각각의 실험조건에 따른 S/N비를 나타내었으며, 9번의 실험을



Fig. 10 S/N ratio of the bead width

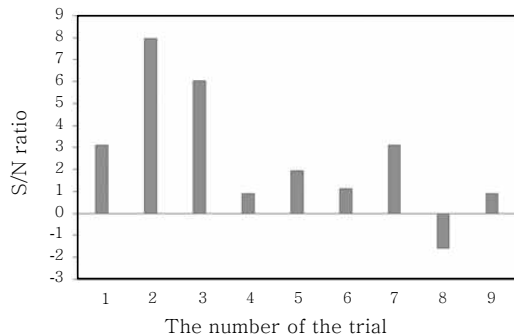


Fig. 11 S/N ratio of the reinforcement height

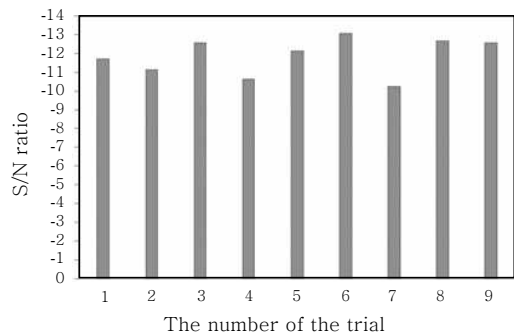


Fig. 12 S/N ratio of the vertical leg length

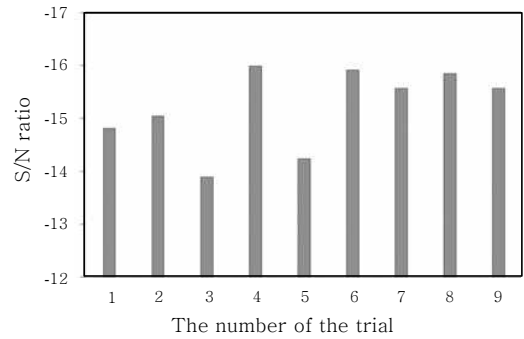


Fig. 13 S/N ratio of the horizontal leg length

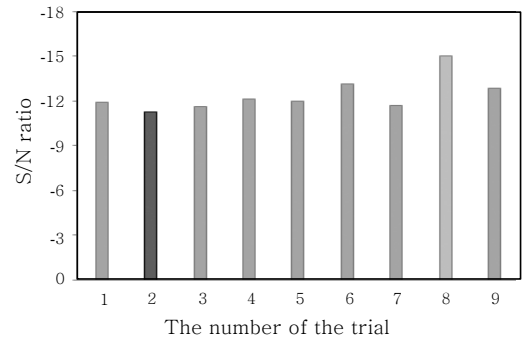


Fig. 14 S/N ratio of the bead geometry

통하여 평균 S/N비의 평균값의 비교를 통한 비드형상에 대한 최적 용접조건 선정에 관한 그래프는 Fig. 14에서 나타내었다. 그 결과 8번째 실험조건에서 S/N비가 가장 낮은 수치로 나타났으며 안정된 비드형상이 형성됨을 확인하였다.

3.2 민감도 분석

개발된 곡선 방정식을 기초하여 비드형상에 대한 각 공정변수의 효과를 분석하기 위해, 민감도 분석을 실시하였다. 비드형상의 민감도 방정식은 회귀분석법을 통해 생성된 각 비드형상의 곡선방정식 (1)~(4)을 각각의 공정변수(용접전류, 용접전압, 용접속도)에 대해 편미분하여 산출하였다. 개발된 민감도는 아래의 Table 7~10에서 보는 바와 같으며 각각의 공정변수의 비드형상에 미치는 영향을 평가하는데 사용하였다. 각 공정변수가 비드형상에 미치는 영향을 평가하기 위하여 용접속도를 45(cm/min)로 고정한 상태에서 용접전류는 240~260(A), 용접전압은 23~27(V)으로 변화시키면서 비드형상에 대한 민감도를 분석하였다. 아래의 Figs. 15~18은 각 비드형상에 관한 공정변수의 민감도를 나타낸다.

민감도 분석결과, 비드폭, 덧살높이, 각장길이는 용접전류의 증가에 따라 비드형상의 치수가 증가하는 것을

Table 7 Sensitivities of process parameter on bead width

Sensitivity analysis of bead width				
Current (A)	Voltage (V)	$\partial W/\partial I$	$\partial W/\partial V$	$\partial W/\partial S$
240	23	24.43035	-4.39865	38.21333
	25	27.59655	-5.23065	38.73433
	27	30.59635	-6.06265	39.08893
260	23	24.43835	-1.13465	38.66133
	25	27.60455	-1.96665	38.98233
	27	30.60435	-2.79865	39.13693
280	23	24.44635	2.28935	39.26933
	25	27.61255	1.45735	39.39033
	27	30.61235	0.62535	39.34493

Table 8 Sensitivities of process parameter on reinforcement height

Sensitivity analysis of reinforcement height				
Current (A)	Voltage (V)	$\partial RH/\partial I$	$\partial RH/\partial V$	$\partial RH/\partial S$
240	23	3.589459	36.99803	48.43086
	25	3.029925	36.98123	48.65233
	27	2.436791	36.96443	48.84019
260	23	3.573459	37.39203	50.45286
	25	3.013925	37.37523	50.71833
	27	2.420791	37.35843	50.95019
280	23	3.557459	37.46603	52.15486
	25	2.997925	37.44923	52.46433
	27	2.404791	37.43243	52.74019

Table 9 Sensitivities of process parameter on vertical leg length

Sensitivity analysis of left leg length				
Current (A)	Voltage (V)	$\partial LL/\partial I$	$\partial LL/\partial V$	$\partial LL/\partial S$
240	23	-18.4881	-29.6654	24.20322
	25	-16.2324	-28.7318	26.83851
	27	-14.1101	-27.7982	27.34043
260	23	-18.4949	-29.6128	24.19988
	25	-16.2392	-28.6792	25.76317
	27	-14.1169	-27.7456	26.19309
280	23	-18.5017	-29.6961	24.06054
	25	-16.246	-28.7625	25.55183
	27	-14.1237	-27.8289	26.90975

Table 10 Sensitivities of process parameter on horizontal leg length

Sensitivity analysis of right leg length				
Current (A)	Voltage (V)	$\partial RL/\partial I$	$\partial RL/\partial V$	$\partial RL/\partial S$
240	23	40.12525	108.6897	55.6561
	25	38.55865	108.8565	58.5655
	27	37.32565	109.0233	61.8053
260	23	40.10525	108.3757	57.7181
	25	38.53865	108.5425	60.7075
	27	37.30565	108.7093	64.0305
280	23	40.08525	107.6617	59.3801
	25	38.51865	107.8285	62.4495
	27	37.28565	107.9953	65.8525

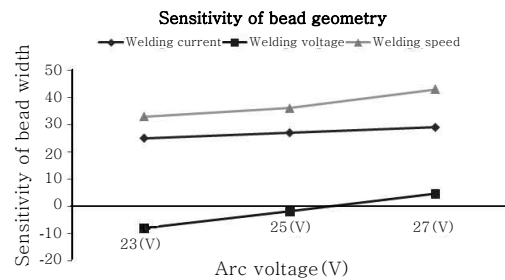


Fig. 15 Sensitivity analysis of bead width

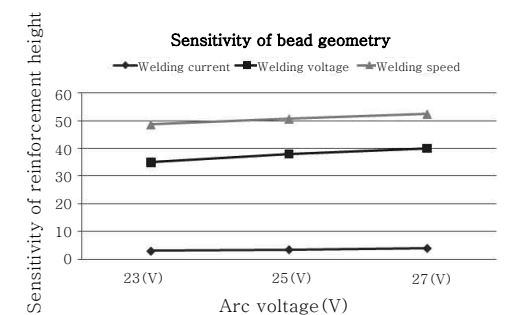


Fig. 16 Sensitivity analysis of reinforcement height

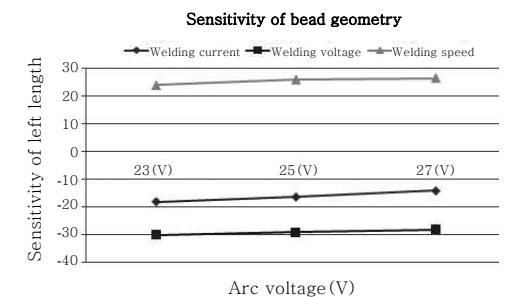


Fig. 17 Sensitivity analysis of vertical leg length

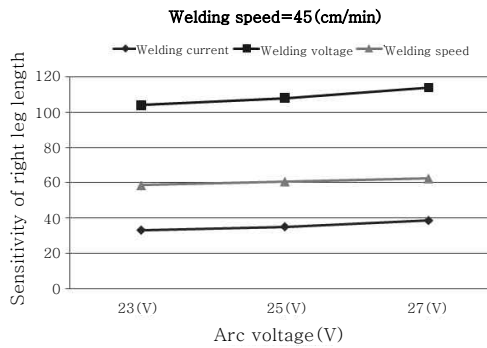


Fig. 18 Sensitivity analysis of horizontal leg length

확인하였으며, 이것은 용접와이어의 증가로 인해 용착량이 증가하여 비드형상의 치수가 증가한 것으로 사료된다. 또한 덧살높이는 용접속도의 변화에 가장 큰 영향을 받는 것을 확인하였으며, 각장길이 제어는 용접전압과 용접전류를 통한 제어가 가장 효과적임을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 GMA 필릿용접 공정에서 비드 형상의 예측 및 제어가 가능한 수학적 모델 및 알고리즘을 개발하였으며, 다구찌 이론을 적용한 S/N비(S/N ratio) 분석과 용접 공정변수에 대한 민감도를 분석을 통하여 최적의 용접조건 선정에 대한 연구를 수행하였다.

1) 필릿용접 실험을 통하여 측정된 실험값을 바탕으로 비드형상을 예측할 수 있도록 회귀분석법을 사용하여, 수학적 모델을 (2차 곡선 방정식)을 개발하였다. 개발된 수학적 모델을 이용하여 계산한 예측값은 실험값의 오차범위 10% 내의 분포도를 보였으며, 측정값과의 비교·분석을 통한 비드형상 예측에 대해 개발된 방정식의 신뢰성을 검증하였다.

2) 다구찌 방법의 망대특성을 통해 3개의 공정변수(용접전류, 용접전압, 용접속도)와 비드형상(비드폭, 덧살높이, 각장길이)의 실험 데이터를 분석한 결과, 필릿용접시 2번째 실험조건의 내용으로 S/N비가 가장 크고 뛰어난 다중특성을 나타내고 있음을 확인 할수 있었다.

3) 용접 공정변수와 비드형상간의 민감도 분석을 통하여 비드형상은 용접전류의 증가에 따라 형상의 치수가 증가하는 것을 확인하였으며, 덧살높이는 용접속도의 변화에 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 또한, 각장길이 제어는 용접전압과 용접 전류를 변화시키는 것이 효과적임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁

신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참 고 문 헌

1. J. Hanright : Robotic arc welding under adaptive control - A survey of current technology, *Welding Journal*, 65-11 (1986), 19-24
2. S.J. Marburger : Welding automation and computer control, *Welding : Theory Practice*, Elsevier Science Publisher, B. V., 1990, 209-233
3. I.S. Kim and C.E. Park : Use of a neural network to control bead width in GMA welding, *Welding Research Supplement*, 45-3 (2000), 33-37
4. Y.W. Park, H.S. Park, S. Rhee and M.J. Kang : Real time estimation of CO₂ laser weld quality for automotive industry, *Journal of Optics & Laser Technology*, 34-2 (2002), 135-142
5. D.S. Nagesh and G.L. Datta : Prediction of weld bead geometry and prediction in shielded metal arc welding using artificial neural networks, *Journal of Material Processing Technology*, 99 (2002), 1-10
6. J.Y. Jeng, T.F. Mau and S.M. Leu : Prediction of laser butt joint welding parameters using back-propagation and learning vector quantisation network, *Journal of Material Processing Technology*, 79 (2000), 207-218
7. Y.S. Tang, S.C. Juang and C.H. Chang : The use of Grey-based Taguchi method to determine submerged arc welding process parameters in Hardfacing, *Journal of MPT*, 128 (2002), 1-6
8. D. Li and T. Srikanthan : Neural network based self-organized fuzzy logic control for arc welding, *Engineering applications of artificial Intelligence*, 14 (2001), 115-124
9. J.M. Viet et al : Weld pool shape prediction in plasma augmented laser welded steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, 6 (2001), 305-314
10. Chandel R, S : Effect of welding parameters and groove angle on the soundness of root beads deposited by the SAW process *Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, (1988), 109-120
11. Teng et al : Modelling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert Gas welding, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 39 (1999), 1427~1438
12. Le, et al : Modelling of submerged arc welding bead using self-adaptive offset neural network, *Journal of Materials Process Technology*, 71 (1999), 228~298.
13. C.K. Sun, J.W. Kim and S.J. Na : A Study on the Seam Tracking in CO₂ Fillet Welding by Using an Arc Sensor , *Journal of KWS*, 17-6 (1990), 70~78 (in Korean)
14. Y.P. Kim, H.S. Kim, S.H. Hong and W.S. Kim : A Study on Mechanical Properties of Fillet Weldment in Pipeline Repair Welding Using Sleeve, *Journal of KWS*, 19-6 (1996), 49~58 (in Korean)