

# 필릿 용접 구조물의 용접 최적화를 위한 실험적 연구

## A Experiment Study for Welding Optimization of fillet Welded Structure

김일수<sup>1,✉</sup>, 나현호<sup>1</sup>, 김지선<sup>1</sup>, 이지혜<sup>1</sup>  
Il Soo Kim<sup>1,✉</sup>, Hyun Ho Na<sup>1</sup>, Ji Sun Kim<sup>1</sup> and Ji Hye Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 목포대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Mokpo Univ.)

✉ Corresponding author: ilsookim@mokpo.ac.kr, Tel: 061-454-3455

Manuscript received: 2011.1.4 / Revised: 2011.3.10,4.13 / Accepted: 2011.6.7

*GMA welding process is a production process to improve productivity for the provision of higher 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 healthy 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 (필릿 용접), Taguchi Method (다구찌 기법), Mathematical Model (수학적 모델), Sensitivity Analysis (민감도 분석)

### 기호설명

I=Welding current

V=Welding voltage

S=Welding speed

B/W=Bead width

R/H=Reinforcement height

L/L=Left leg length

R/L=Right leg length

$\eta_{ij}$  = ith quality characteristic in the jth experiment

$y_{ij}$  =The experiment value of the ith quality characteristic in the jth experiment

### 1. 서론

GMA 용접공정은 소모성 전극인 와이어를 일정한 속도로 모재에 송급하면서 와이어를 통해 전류를 인가하여 와이어와 모재 사이에서 아크가 발생하는 용접 공정이다. 또한, 소재의 고품질을 제공하기 위한 생산성 향상을 위한 공정이며 용접 품질, 생산성, 원가 절감 등에 영향을 줄 수 있는 수많은 공정변수들을 포함한다.

최근 건설장비의 로우더 유니트의 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 용접 시공 절차의 구현은 건설기계의 용접부 신뢰성에 가장 결정적인 요인이라 할 수 있다. 다양한 산업에

서 사용되어지고 있는 GMA Fillet 용접공정은 용접 조건에 대한 공정변수의 수학적 모델이 완전히 정립되어지지 않고, 부분적인 변수 예측에만 국한되어 있는 실정이며, 최근까지 건설 장비의 용접 자동화 관련 연구는 생산성 향상을 통한 경비 절감을 위하여 고효율의 용접기술 개발에 집중된 한계를 지니고 있다.<sup>1,4</sup> 또한, GMA Fillet 용접에서의 공정변수의 변화에 따른 비드형상과의 관계를 수학적으로 모델링하여 출력값으로 최적의 비드 형상을 예측할 수 있도록 용접 최적화에 대한 연구가 필요한 실정이다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 고에너지 열원을 갖고 있는 레이저, 플라즈마 등의 검토 및 적용이 되고 있으며, 이외에도 용접공정의 효율을 향상시키기 위하여 로봇용접 등의 신기술이 개발되고 있다. 그러나 고효율의 접합기술을 사용하더라도 용접 품질을 확보하지 못하면 실제 생산라인에 적용이 불가능하다. 따라서 고효율과 품질이라는 두 가지 목적을 달성할 수 있는 기술개발이 요구되고 있는 실정이며, 이러한 목표를 달성하기 위해서는 용접 공정에서 대상제품의 품질을 제어하기 위한 관련 공정변수들의 측정이 먼저 이루어져야 한다. 기존의 연구들에서 용접전류, 용접전압, 용접 속도 등과 같이 변수들만으로는 용접 품질을 제어하기에는 한계가 있었다.<sup>5-9</sup> Chandel<sup>10</sup> 은 최초로 요인설계(factorial design) 실험 방법을 용접 공정에 적용하여 공정변수와 bead-on-plate 비드형상과의 관계를 연구하였으며, Terng et al.<sup>11</sup> 은 신경회로망을 이용하여 레이저 용접시 공정변수 예측에 관한 연구를 수행하였다. 특히, Le et al.<sup>12</sup> 은 최초로 CO<sub>2</sub> 아래보기 용접에서 공정변수를 이용하여 이면비드형상을 예측하는 연구를 수행하였다. 하지만 기존에 수행된 대부분의 연구가 아래보기 용접에 국한되어, 필릿 용접에서의 공정변수의 영향을 제시하기에는 어려운 한계점을 지니고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 필릿 용접부의 품질을 직·간접적으로 대변할 수 있는 인자들을 찾아 이를 통하여 용접공정 중 용접 품질을 제어할 수 있는 기술개발이 시급하다.

본 연구에서는 공정 변수와 비드 형상 사이의 상호작용을 고찰하고, 실험을 통해 생성된 데이터의 분석을 통하여 필릿 용접부의 비드 형상(비드 폭, 덧살 높이, 각장) 예측 및 무결함, 장비의 경량

화등을 도모할 수 있는 필릿 용접 최적화를 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 용접 실험

필릿 용접 구조물의 용접 최적화를 위하여 Table 1 과 같은 다구찌(Taguchi) 방법을 이용한 총 9 회의 실험계획을 수립하였다. 실험 배열은 용접 실험의 입력 변수를 용접 전류(I), 용접 전압(V), 용접속도(S)로 선정하였으며, 각각 3 개의 레벨을 지정하여 구성하였다. 또한, 출력변수는 비드높이, 덧살높이, 각장으로 선정하였으며, 각장은 용접형상의 다리 길이로서 Fig. 3 에서 나타내었다. 각각의 공정변수의 실험수준과 한계는 Table 2 에서 보는 바와 같다.

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

용접 공정은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 350A GMA 용접기와 반자동 오토 캐리지, 시험편 고정 지그, 와이어 피더를 사용하여 실험을 수행하였으며, 보호가스는 100% CO<sub>2</sub>, 가스유량은 18~20l/min, 용가재(Filler Wire)는 1.2mm 플럭스 코어드 와이어 (Flux Cored Wire), 모재와 텃과의 거리(CTWD)는 15mm 를 유지하여 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 시험편(SS400)은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 200×400×20,12mm 의 형태로 제작하여 실험을 수행하였으며, 용접 공정은 작업현장의 Fillet 용접 WPS 를 적용하여 로우더 유닛의 용접방식인 3 패스 적층 용접을 실시하였다. 실험에 사용된 시험편의 물리적, 화학적 성질은 Tables 3~4 에 나타내었다.

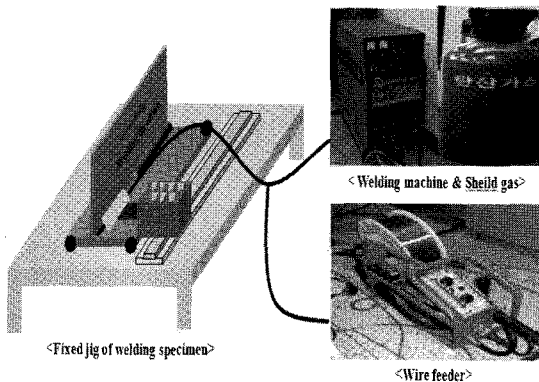


Fig. 1 Schematic diagram for experiment

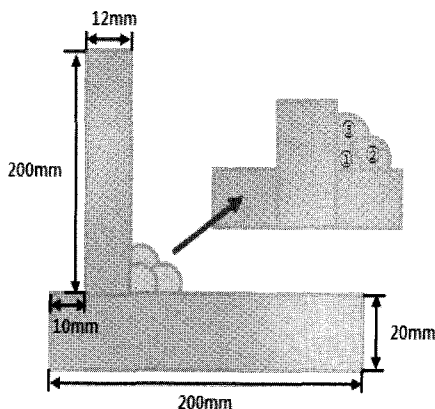


Fig. 2 Configuration of welding specimen

용접부 비드 형상을 측정하기 위하여 용접이 완료된 9 개의 시험편의 가로축을 Laser cutting

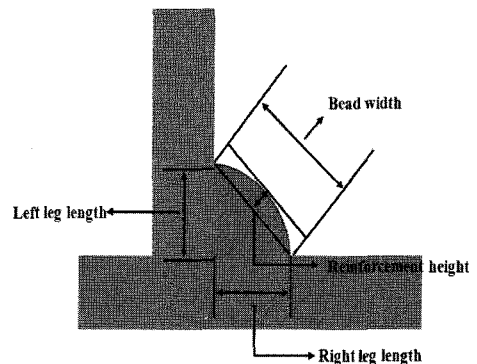
machine 을 사용하여 절단하고 단면부를 연삭한 후 폴리싱하였다. 비드의 단면 마크로(Macro)를 잘 나타나게 하기 위하여 질산 및 에탄올을 혼합하여 에칭 작업을 수행하여, 광학 현미경을 통한 총 18 개의 비드 형상을 측정하였다. Fig. 3 은 비드형상 측정에 관한 모식도를 나타내며, 비드 측정에 사용된 광학 현미경은 Fig. 4 에서 보는 바와 같다. 측정된 용접부 단면 형상 및 치수(로우더 유닛의 내부 용접부)는 Table 5 에 나타내었다.

Table 3 Mechanical properties of base metal

Base metal	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Yield Point (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Impact Value (kgm/cm <sup>2</sup> )	Hardness (Hv)
SS400	435	245	25	6.2	128

Table 4 Mechanical properties of base metal

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



B/W : Bead width, R/H : Reinforcement height, L/L : Left leg length, R/L : Right leg length

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

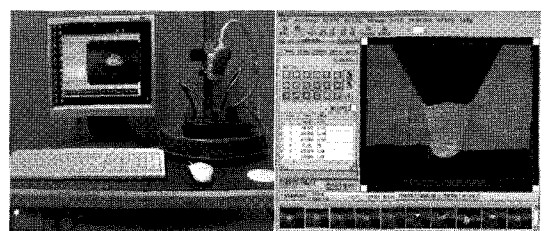





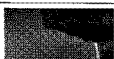

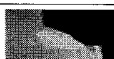



Fig. 4 Measurement of bead geometry

Table 5 Experiment results of fillet welding

No.	Bead geometry	Bead width (mm)	Reinforcement Height (mm)	Left leg length (mm)	Right 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. 결과 및 고찰

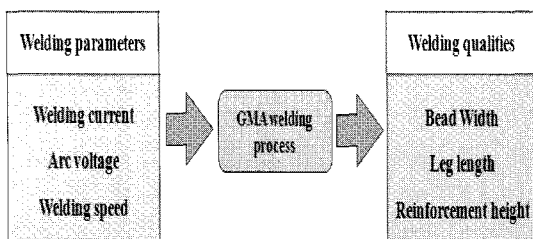


Fig. 5 Schematic diagram for the welding parameters and quality characteristics for experiment

Fig. 5 에서 나타난 공정변수와 비드형상간의 관계를 바탕으로 Table 1 에서 나타난 실험 배열을 적용한 필릿 시험편에서 측정된 비드 형상 정보를 이용하여 비드폭과 덧살높이, 각장의 예측이 가능한 2 차 곡선 모델을 개발하였다. 용접공정의 입력 변수는 용접 전류(I), 용접 전압(V), 용접 속도(S)이며, 출력변수인 비드 폭(B/W), 덧살높이(R/H), 각장(L/L,R/L)에 대한 관계식은 아래에서 보는 바와 같다.

(1) Curvilinear model

1) Bead width(B/W)

$$= -19.30656+0.0367I+2.456V-0.83717S+0.0002I^2 -0.0208*V^2+0.0067S^2-0.0051V+0.0007IS +0.0029VS \tag{1}$$

2) Reinforcement height(R/H)

$$= -38.5589+0.2771I+0.051233V+0.02S-0.0004I^2 -0.0042V^2+0.0033S^2+0.0011IV-0.0013IS -0.0029VS \tag{2}$$

3) Left leg length(L/L)

$$= 3695+0.125933I+1.029803V-1.71144S-0.00017I^2 -0.01667V^2+0.01133S^2-0.0018IV+0.0003IS +0.02VS \tag{3}$$

4) Right leg length(R/L)

$$= -72.3131+0.3088I-0.9869V+2.37853S-0.0005I^2 +0.0417V^2-0.0123S^2+0.0021V-0.0017IS -0.04VS \tag{4}$$

Table 6 과 같이 분산분석 테스트를 통하여, 개발된 2 차 곡선 모델의 유의성을 판단 하기 위하여, 각 비드 형상 변수를 수량화 하여 최적의 변수에 대한 유의성을 검증하였다. 그 결과, 곡선 모델의 다중상관계수는 70% 이상 일치함을 확인하였으며, 개발된 모델을 통하여 비드형상 예측에 대한 신뢰성을 입증하였다. 또한, Fisher's F-ratio 를 이용하여 맞춤의 양호성을 측정하고, 오차범위 10% 수준에서 유의성을 표시 함으로써 곡선모델의 논리적 형상을 구체적으로 고려 하였다. 측정값과 예측값의 비교는 Figs. 6~9 에서 보는 바와 같이 비드폭, 덧살높이, 각장의 측정값과 예측값의 교점을 사각 포인트로 표현하였으며, 그림에서 제시된 선은 측정값과 예측값의 오차범위 ±10%를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 오차 범위는 대부분 10% 이내로 수렴함을 확인하였으며, 개발된 수학적 모델의 정확한 비드형상 예측이 가능함을 입증하였다.

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%

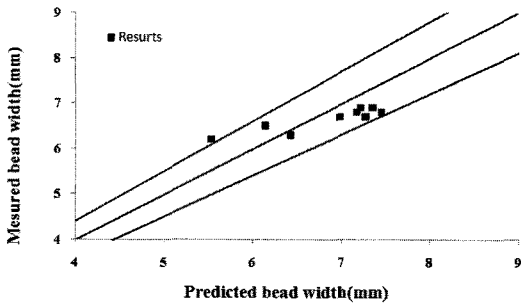


Fig. 6 Analysis of bead width on curvilinear model

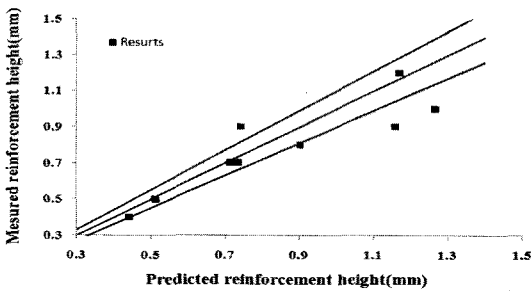


Fig. 7 Analysis of reinforcement height on curvilinear model

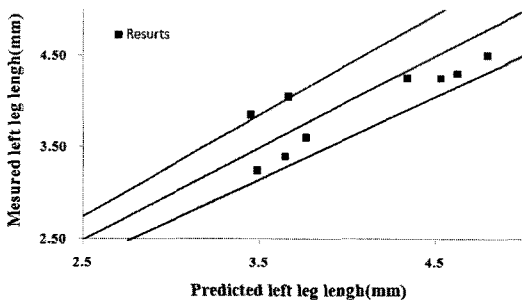


Fig. 8 Analysis of left leg length on curvilinear model

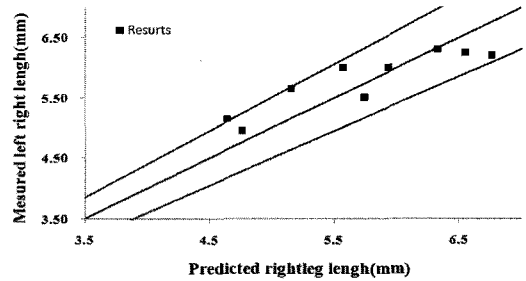


Fig. 9 Analysis of right leg length on curvilinear model

### 3.1 다구찌 이론을 통한 실험 분석

필릿 용접 실험 결과 측정된 비드 형상을 바탕으로 비드형상에 대한 품질특성(Quality Characteristics) 즉, 비드폭, 덧살높이, 각장은 SN 비가 클수록 최적의 비드형상을 형성하는 망대 특성을 사용한 SN 비 공식으로 표현하였다.

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

여기서,  $\eta_{ij}$  는 j 번째 실험의 I 번째 품질특성의 SN 비,  $y_{ij}$  는 j 번째 실험의 I 번째 품질특성의 실험값을 의미한다. 각각의 비드 형상에 대한 SN 비의 결과는 Figs. 10~13 에서 보는 바와 같이 비드폭(1), 덧살높이(2), 왼쪽 각장(7), 오른쪽 각장(3)의 조건에서 최적의 비드 형상을 형성함을 확인하였다. 또한, 그림에서 보는 바와 같이 수행된 실험횟수에 따른 각각의 실험조건에 따른 SN 비를 나타내었으며, 9 번의 실험을 통하여 평균 SN 비의 평균값의 비교를 통한 비드 형상에 대한 최적조건 선정에 관한 그래프는 Fig. 14 에서 나타내었다. 그 결과, 2 번째 실험조건에서 SN 비가 가장 큰 수치로 나타났으며 최적의 비드 형상이 형성됨을 확인하였다.

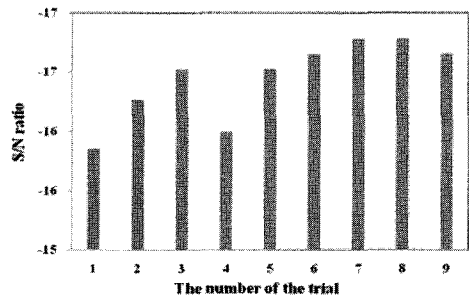


Fig. 10 S/N ratio of the bead width

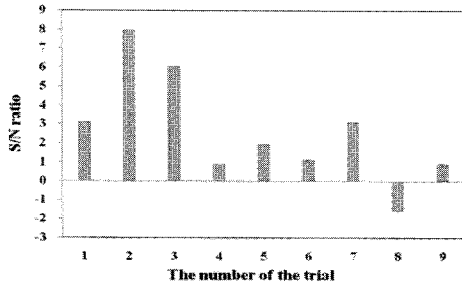


Fig. 11 S/N ratio of the reinforcement height

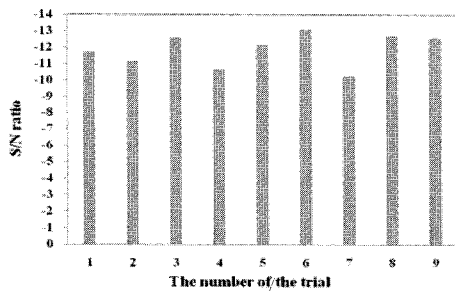


Fig. 12 S/N ratio of the left leg length

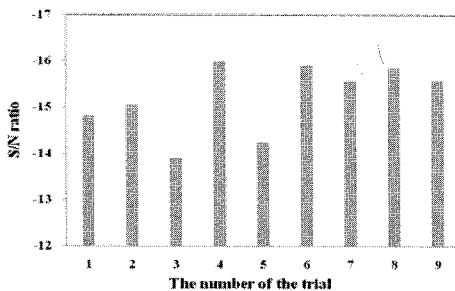


Fig. 13 S/N ratio of the right leg length

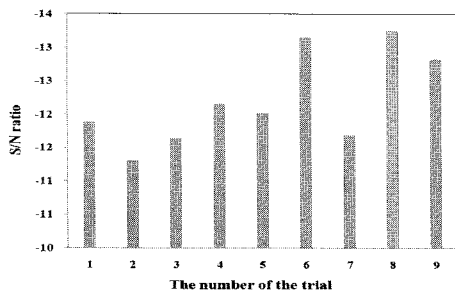


Fig. 14 S/N ratio of the bead geometry

감도 분석을 실시하였다. 비드 형상의 민감도 방정식은 회귀분석법을 통해 생성된 각 비드 형상의 곡선방정식 (1)~(4)를 각각의 공정변수(용접전류, 용접전압, 용접속도)에 대해 편미분함하여 산출하였으며, 개발된 민감도는 아래의 Table 7~10 에서 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. 15~18 은 각 비드 형상에 관한 공정변수의 민감도를 나타내는 그림이다.

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)	$\partial W / \partial I$	$\partial W / \partial V$	$\partial W / \partial S$
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

### 3.2 민감도 분석

개발된 곡선 방정식을 기초로 하여 비드 형상에 대한 각 공정변수의 효과를 분석하기 위해, 민

Table 9 Sensitivities of process parameter on left leg length

Sensitivity analysis of left leg length				
Current (A)	Voltage (V)	$\partial W / \partial I$	$\partial W / \partial V$	$\partial W / \partial S$
240	23	-18.4881	-29.6654	25.20322
	25	-16.2324	-29.7318	24.83851
	27	-14.1101	-29.7982	24.34043
260	23	-18.4949	-28.6128	25.19988
	25	-16.2392	-28.6792	24.76317
	27	-14.1169	-28.7456	24.19309
280	23	-18.5017	-27.6961	25.06054
	25	-16.246	-27.7625	24.55183
	27	-14.1237	-27.8289	23.90975

Table 10 Sensitivities of process parameter on right leg length

Sensitivity analysis of right leg length				
Current (A)	Voltage (V)	$\partial W / \partial I$	$\partial W / \partial V$	$\partial W / \partial S$
240	23	40.12525	108.6897	55.65613
	25	38.55865	108.8565	58.56553
	27	37.32565	109.0233	61.80853
260	23	40.10525	108.3757	57.71813
	25	38.53865	108.5425	60.70753
	27	37.30565	108.7093	64.03053
280	23	40.08525	107.6617	59.38013
	25	38.51865	107.8285	62.44953
	27	37.28565	107.9953	65.85253

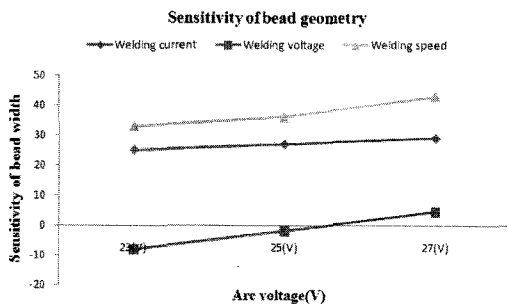


Fig. 15 Sensitivity analysis of bead width

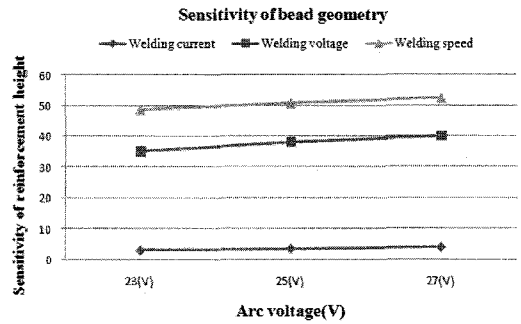


Fig. 16 Sensitivity analysis of reinforcement height

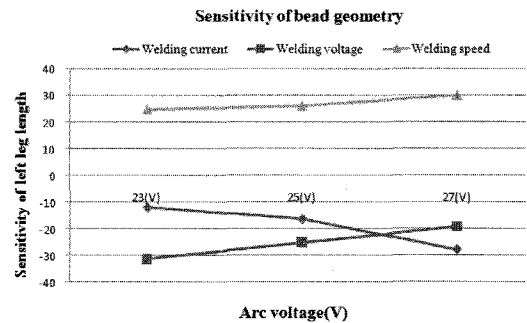


Fig. 17 Sensitivity analysis of left leg length

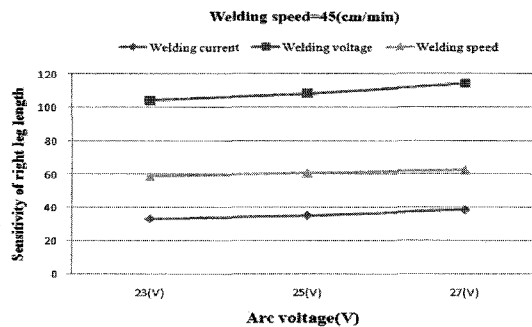


Fig. 18 Sensitivity analysis of right leg length

민감도 분석 결과, 비드폭, 덧살높이, 각장은 용접 전류의 증가에 따라 형상의 치수가 증가하는 것을 확인하였으며, 이것은 용접 와이어의 증가로 인해 용입량이 증가로 비드형상의 치수가 증가한 것으로 사료된다. 또한, 비드 높이와 덧살높이는 용접속도의 변화에 가장 큰 영향을 받는 것을 확인하였으며, 각장의 제어는 용접전압과 용접속도를 통한 제어가 가장 효과적임을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 GMA 필릿용접 공정에서 비드형상의 예측 및 제어가 가능한 수학적 모델 및 알고리즘을 개발하였으며, 다구찌 이론을 적용한 S/N 비(S/N ratio) 분석, 용접 공정 변수에 대한 민감도를 분석하여, 연구를 진행하였다.

1) 필릿용접 실험을 통하여 측정된 실험결과값을 바탕으로 비드형상을 예측할 수 있도록 회귀 분석법을 사용하여, 수학적 모델을 (2 차 곡선 방정식)을 개발하였다. 개발된 수학적 모델의 예측값은 실험값의 오차범위 10% 내의 분포도를 보였으며, 측정값과의 비교를 통한 비드형상 예측에 대해 개발된 방정식의 신뢰성을 검증하였으며, 필릿용접 공정에 대한 최적의 용접조건의 범위를 선정하였다.

2) 다구찌 기법의 망대 특성을 통해 3 개의 공정변수(용접전류, 용접전압, 용접속도)와 비드형상(비드폭, 덧살높이, 각장)과의 실험 데이터 분석 결과 필릿 용접시 2 번째 실험조건의 내용으로 S/N 비가 가장 높고 뛰어난 다중 특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이를 통하여, 20t-12t 필릿용접시 적용이 가능한 용접조건을 도출하였다.

3) 용접 공정변수와 비드형상간의 민감도 분석을 통하여 비드형상은 용접 전류의 증가에 따라 형상의 치수가 증가하는 것을 확인하였으며, 비드높이와 덧살높이는 용접속도의 변화에 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 또한, 각장의 제어는 용접 전압과 용접 속도를 변화시키는 것이 효과적임을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

#### 참고문헌

- Hanright, J, "Robotic arc welding under adaptive control - A survey of current technology," *Welding Journal*, Vol. 65, No. 11, pp. 19-24, 1986.
- Rosenthal, D., "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting," *Welding Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 22-24, 1946.
- Kim, I. S. and Park, C. E., "Use of a neural network to control bead width in GMA welding," *Welding Research Supplement*, Vol. 45, No. 3, pp. 33-37, 2000.
- Park, Y. W., Park, H. S., Rhee, S. and Kang, M. J., "Real time estimation of CO2 laser weld quality for automotive industry," *Journal of Optics & Laser Technology*, Vol. 34, No. 2, pp. 135-142, 2002.
- Nagesh, D. S. and Datta, G. L., "Prediction of weld bead geometry and penetration (prediction) in shielded metal arc welding using artificial neural networks," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 123, No. 2, pp. 303-312, 2002.
- Jeng, J. Y., Mau, T. F. and Leu, S. M., "Prediction of laser butt joint welding parameters using back-propagation and learning vector quantisation network," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 99, No. 1-3, pp. 207-218, 2000.
- Tang, Y. S. Juang, S. C. and Chang, C. H., "The use of Grey-based Taguchi method to determine submerged arc welding process parameters in Hardfacing," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 128, No. 1-3, pp. 1-6, 2002.
- Li, D. and Srikanthan, T., "Neural network based self-organized fuzzy logic control for arc welding," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 115-124, 2001.
- Viet, J. M., David, S. A., Richey, M. W., Biffin, J., Blundell, N. and Page, C. J., "Weld pool shape prediction in plasma augmented laser welded steel," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 6, No. 5, pp. 305-314, 2001.
- Chandel, R. S., "Mathematical modelling of gas metal arc weld features," *Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, pp. 109-120, 1988.
- Tarng, Y. S., Tsai, H. L. and Yeh, S. S., "Modelling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert Gas welding," *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol. 39, No. 9, pp. 1427-1438, 1999.
- Li, P., Fang, M. T. C. and Lucas, J., "Modelling of submerged arc welding bead using self-adaptive offset neural network," *Journal of Materials Process Technology*, Vol. 71, No. 2, pp. 228-298, 1997.