

## 유전자 알고리즘을 이용한 GMA 필릿 용접 비드형상 예측에 관한 연구

김영수\* · 김일수\*<sup>†</sup> · 이지혜\* · 정성명\* · 이종표\* · 박민호\* · Reenal Ritesh Chand\*

\*목포대학교 기계공학과

### A Study on Bead Geometry Prediction the GMA Fillet Welding using Genetic Algorithm

Young-Su Kim\*, Ill-Soo Kim\*<sup>†</sup>, Ji-Hye Lee\*, Sung-Myoung Jung\*, Jong-Pyo Lee\*,  
Min-Ho Park\* and Reenal Ritesh Chand\*

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

<sup>†</sup>Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received December 12, 2012 ; Revised December 29, 2012 ; Accepted December 31, 2012)

#### Abstract

The GMA welding process involves large number of interdependent variables which may affect product quality, productivity and cost effectiveness. The relationships between process parameters for a fillet joint and bead geometry are complex because a number of process parameters are involved. To make the automated GMA welding, a method that predicts bead geometry and accomplishes the desired mechanical properties of the weldment should be developed. The developed method should also cover a wide range of material thicknesses and be applicable for all welding position. For the automatic welding system, the data must be available in the form of mathematical equations.

In this study a new intelligent model with genetic algorithm has been proposed to investigate interrelationships between welding parameters and bead geometry for the automated GMA welding process. Through the developed model, the correlation between process parameters and bead geometry obtained from the actual experimental results, predicts that data did not show much of a difference, which means that it is quite suitable for the developed genetic algorithm. Progress to be able to control the process parameters in order to obtain the desired bead shape, as well as the systematic study of the genetic algorithm was developed on the basis of the data obtained through the experiments in this study can be applied. In addition, the developed genetic algorithm has the ability to predict the bead shape of the experimental results with satisfactory accuracy.

Key Words : GMA(Gas Metal Arc) welding, Multiple regression Analysis, Fillet welding, GA(Genetic algorithm)

#### 1. 서 론

최근 산업 발달과 더불어 고도화, 정밀화, 생산성 향상 등에 대한 요구는 갈수록 증가함에 비해 작업 환경과 조건은 비슷한 수준에 머물고 있으며 이에 따라 숙달된 기술자와 공정의 자동화에 대한 필요성이 중요하게 여겨지고 있다. 특히, 선박, 건축, 플랜트 및 고부가가치 산업 등에서 주요 기술로 자리 잡고 있는 용접 분야에서는 공정개선과 최적의 공정변수 선정 및 공정 자

동화 구현에 관련된 연구가 활발히 진행되어 지고 있으며, 용접공정의 자동화를 구현하기 위해 비드형상 및 용접결함을 공정변수로부터 예측할 수 있는 수학적 모델 개발이 필수적으로 요구된다. 이에 대한 연구 방법으로 크게 해석적 방법과 실험적 방법을 들 수 있다<sup>1-8)</sup>. 해석적 방법은 주로 용융부의 크기를 미리 가정하고, 이를 바탕으로, 중력과 표면장력 등의 힘을 고려하여 표면변형에 관한 수학적 모델을 유도하는 방식이 대부분이었으며, 실험적 방법은 다양한 실험을 통하여 용접부 형상과 용접조건 사이의 관계를 수학적으로 모

델링함으로서 선정된 용접조건이 비드형상을 결정하는데 미치는 영향도를 예측하는 것이었다. Raveendra와 Parmar는 CO<sub>2</sub>를 차폐 가스로 사용한 FCA(Flux Cored Arc)용접에서의 비드형상과 비드형태를 예측하는 수학적 모델을 제시했다. 용접전압, 아크전류, 용접속도, 노즐-모재 간격, 토치각도 등을 함수로 사용하였고 부분 계수법(fractional factorial technique)과 다중 회귀법(multiple regression technique)을 이용하여 실험을 수행하였다. 그 결과 수학적 모델이 비드형상 예측에 효과적인 수단이며 좋은 비드 특성을 얻기 위한 제어 변수값을 예측하는데 유용하다는 사실을 보여주었다.<sup>1)</sup> Chandel은 처음으로 수학적 모델을 GMA(Gas Metal Arc)용접 공정에 적용하여 평판 용접에서의 공정변수와 비드형상의 관계를 조사하고<sup>2)</sup> Kim은 GMA용접 공정에 적용하여 맞대기 용접에서의 공정변수와 비드형상의 관계를 조사하여 아크전류가 비드형상에 가장 큰 영향을 미치며 실험 결과에서 도출한 수학적 모델을 비드형상 예측에 사용할 수 있다는 사실을 확인하였다.<sup>3)</sup> Yang은 다양한 용접 공정변수들이 SA(Submerged Arc)용접 공정에서 비드높이에 미치는 영향을 알아내기 위한 실험을 했다. 용접 비드높이는 용접봉 극성, 용접봉 지름, 용접봉 장력, 용접전류, 용접전압, 용접속도의 영향을 받는다는 사실을 알아냈다<sup>4)</sup>. 용접봉의 굵기, 짧은 용접봉 지름, 긴 용접봉 장력, 높은 아크전류, 빠른 용접속도, 낮은 용접전압은 용접 비드높이에 크게 영향을 미친다는 사실을 확인하였다. 선형 및 곡선형 다중회귀분석 기법을 써서 용접 공정변수로부터 용접 비드높이를 계산하는 회귀방정식(Regression equation)이 제시되었다. 하지만 필릿 용접용 공정변수의 영향에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 GMA 필릿 용접에서의 공정변수 변화에 따른 비드형상과의 관계를 확인하고, 유전자 알고리즘을 통해 수학적으로 용접공정을 모델링하여 최적의 비드형상을 예측할 수 있도록 하여 용접공정을 최적화하고자 하였다.

## 2. 용접 실험

### 2.1 실험 방법

용접 실험은 6축 다관절 로봇을 이용한 자동화 시스템으로 실시하였다. 다축 다관절 로봇의 경우 제어가 어렵고 작업 공간 및 동선이 복잡하지만 유연하고 능숙한 작업 수행능력을 바탕으로 산업 현장에 많이 적용되

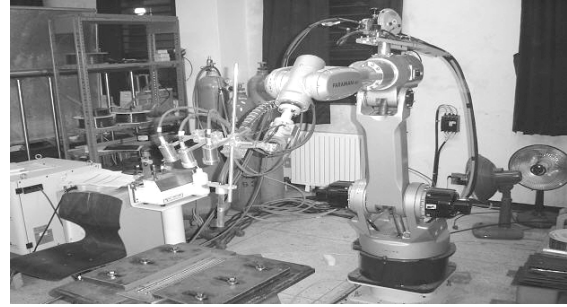


Fig. 1 Robot manipulator employed experiment

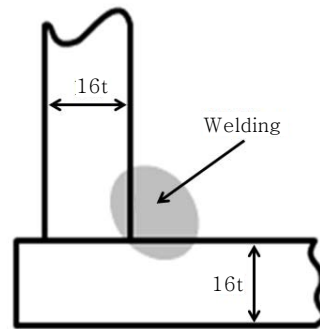


Fig. 2 A schematic diagram of fillet welding

고 있어 작업 위치, 진행각, 위빙과 같은 움직임을 고려하여야 하는 용접공정에 용이하며 실험에 사용된 6축 다관절 로봇의 모습을 Fig. 1에 나타내었다.

용접시험편은 200×400×16t인 SS400 재질의 시험편을 사용하였으며 Fig. 2는 필릿용접을 실시한 개략도를 나타낸 것이다.

높은 품질의 비드형상을 얻기 위해서는 내·외부 노이즈에 대한 공정변수의 제어가 필수적이며 최적공정을 찾기 위한 실험계획으로 다구찌기법을 이용하였다. 본 연구에서는 용접전류, 아크전압, 용접속도를 공정변수로 선정하였고 각각 3가지 레벨로 분류하였으며 Table 1은 다구찌기법의 직교배열방법을 이용한 각각의 시험편에 따른 실험계획표를 나타낸 것이다.

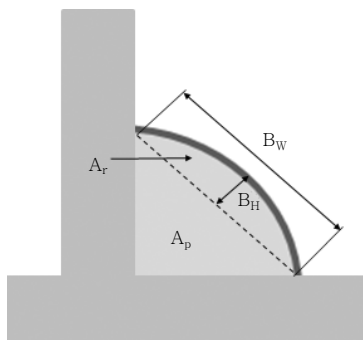
### 2.2 실험 결과

실험 완료 후 비드형상을 측정하기 위해 용접부의 중간 지점을 쇠턑으로 잘라 횡단면을 만들고 끝부분을 절삭하였다.

시험편의 단면을 폴리싱한 후 2.5% 질산용액으로 에칭을 실시하고 현미경을 통해 시험편의 절단면을 관찰하여 비드형상에 대한 각 출력변수들의 데이터를 수집하였다. 용접품질을 평가하기 위하여 공정변수 변화에 따른 비드형상의 상관관계 및 시뮬레이션을 통한 예측값을 비교·분석을 하여 개발된 유전자 알고리즘의 신

**Table 1** Experimental plan

Test No.	Welding current(A)	Arc Voltage(V)	Welding speed (cm/min)
1	260	26	40
2	260	28	45
3	260	30	50
4	280	26	45
5	280	28	50
6	280	30	40
7	300	26	50
8	300	28	40
9	300	30	45



( $B_W$  : Bead width,  $B_H$  : Bead height  
 $A_p$  : Penetration area,  $A_r$  : Reinforcement area)

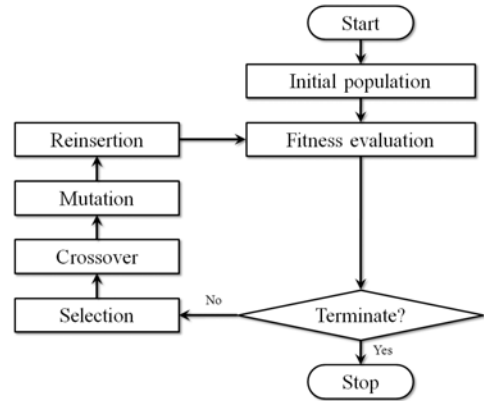
**Fig. 3** Schematic representation of bead geometry

**Table 2** The results of experiment

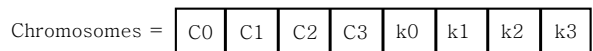
Test No.	Bead width (mm)	Bead height (mm)	Penetration area (mm <sup>2</sup> )	Reinforcement area (mm <sup>2</sup> )
1	3.27	0.43	10.20	4.50
2	3.56	0.41	9.60	4.80
3	3.96	0.43	9.70	4.10
4	3.02	0.31	10.10	5.70
5	3.78	0.43	9.50	5.90
6	4.51	0.70	10.30	4.90
7	3.48	0.54	10.50	5.70
8	3.63	0.64	12.00	6.50
9	4.25	0.65	11.10	5.50

뢰성을 검증하였다.

실험 결과는 GMA 용접공정의 입력변수와 출력변수 사이의 관계를 기초로 하여 분석하였고 Fig. 3에 나타난 바와 같이 비드폭, 비드높이, 비드용입 면적, 비드덧



**Fig. 4** A schematic diagram of genetic algorithm



**Fig. 5** Structure of chromosomes

살 면적에 대한 데이터를 얻고자 하였으며 Table 2는 GMA 필릿용접 실험을 통해 얻은 용접 비드형상에 대한 각각의 출력변수 데이터를 나타낸다.

### 3. 유전자 알고리즘

#### 3.1 지능형 모델 정의

Holland에 의해 제안된 유전자 알고리즘은 탐색 과정의 정보를 이용하여 새로운 탐색에 참고하는 기능과 주어진 판단기준에 따라 해를 탐색하는 적응 기능을 가지고 있다. 이를 응용하기 위해 먼저 염색체 내 인자의 종류와 개수 및 그 값의 범위를 결정하여야 한다. 그리고 주어진 문제를 효과적으로 풀 수 있도록 교집 염색체의 선택과 교집 방법, 돌연변이 방법 등을 결정해야 한다. 그리고 최적의 해를 판단하는 기준을 정하고 이를 적합 함수로 표현하여야 한다<sup>5,6)</sup>. Fig. 4는 최적의 모델을 탐색하기 위한 처리과정을 나타낸다.

유전자 알고리즘을 통해 찾아낸 적합 함수는 지능형 모델로 정의되며 본 실험을 통해 예측하고자 하는 비드형상에 대한 지능형 모델의 기본 모델은 식 (1)~(4) 이고 초기 염색체 구조는 Fig. 5와 같다.

$$B_W = 10^{c_0} I^{c_1} V^{c_2} S^{c_3} + k_0 + k_1 I + k_2 V + k_3 S \quad (1)$$

$$B_H = 10^{c_0} I^{c_1} V^{c_2} S^{c_3} + k_0 + k_1 I + k_2 V + k_3 S \quad (2)$$

$$A_p = 10^{c_0} I^{c_1} V^{c_2} S^{c_3} + k_0 + k_1 I + k_2 V + k_3 S \quad (3)$$

$$A_r = 10^{c_0} I^{c_1} V^{c_2} S^{c_3} + k_0 + k_1 I + k_2 V + k_3 S \quad (4)$$

### 3.2 지능형 모델 개발

최적의 예측 모델을 선정하기 위해 유전자 알고리즘의 변수로 제안된 세대수, 교배율, 돌연변이율 등의 설정값은 Table 3과 같고 비드폭, 비드높이, 비드용입 면적, 비드덧살 면적에 대해 개발된 지능형 모델은 식 (5)~(8)에 나타내었으며 Table 4에 추정치의 표준오차와 다중상관계수 및 결정계수를 나타내었다.

$$B_W = 10^{-0.8094} I^{-0.1447} V^{-0.0155} S^{-0.3415} - 0.7055 + 0.0027I + 0.1318V + 0.0093S \quad (5)$$

$$B_H = 10^{-6.5125} I^{0.0063} V^{-0.0042} S^{-0.0177} + 0.6067 + 7.69 \times 10^{-4} I - 0.0034V - 0.0023S \quad (6)$$

$$A_p = 10^{0.7169} I^{-1.3743} V^{0.1302} S^{-2.5419} + 9.0939 + 0.0063I - 0.0465V - 0.0229S \quad (7)$$

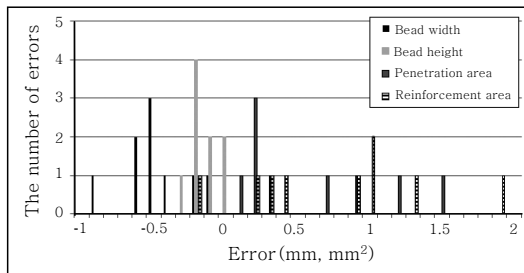
$$A_r = 10^{-22.5367} I^{-0.1391} V^{0.5244} S^{-1.3527} + 5.5714 + 4.77 \times 10^{-4} I - 0.0267V - 0.008S \quad (8)$$

**Table 3** GA parameters and values

Parameter	Value
Population size	40
Generation gap	0.8
Crossover rate	1
Mutation rate	1/12
Insertion rate	0.9

**Table 4** Analysis of variance test for mathematical models

Parameter	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination
Bead width	0.60	0.985	97.1%
Bead height	0.22	0.963	92.8%
Penetration area	1.01	0.957	91.6%
Reinforcement area	1.32	0.962	92.7%



**Fig. 6** The error of the predicted value

Fig. 6은 개발된 지능형 모델을 이용한 예측값과 실험을 통해 얻은 실측값의 편차를 나타낸 것이며 총 9개의 실험 모델을 측정하여 기록하였다. X축은 실측값에 비교한 예측값의 편차범위이고 Y축은 시험편의 개수이며 대부분 -1~2mm 범위 내의 편차를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

### 3.3 비교 모델 개발

유전자 알고리즘을 이용한 지능형 모델의 정확성을 판단하기 위해 통계 프로그램인 MiniTab을 이용하여 비교 모델을 개발하였다. 실험 결과를 토대로 최소자승법을 이용한 회귀분석을 실시하여 비드형상의 중요한 작용과 반작용을 나타내주는 Fisher's F-ratio 중 1%의 유의성 수준에서 식 (9)~(12)와 같은 선형모델과 식 (13)~(16)과 같은 곡선모델을 도출하였다. Figs. 7~14에 도출된 식을 통한 예측값과 실측값에 대한 비교를 나타내었다. 그래프에 나타낸 3개의 실선은 예측능력의 정확성을 알아보기 위한 것으로 가운데 실선에 근접할수록 정확한 예측을 의미하며, 나머지 2개의 실선은 오차범위 10%를 의미한다.

#### 1) Linear model

$$B_W = -4.21 + 0.00475I + 0.246V - 0.0063S \quad (9)$$

$$B_H = -1.41 + 0.00467I + 0.0417V - 0.0123S \quad (10)$$

$$A_p = 4.27 + 0.0342I + 0.0250V - 0.0933S \quad (11)$$

$$A_r = -1.18 + 0.0358I - 0.117V - 0.0067S \quad (12)$$

#### 2) Curvilinear model

$$B_W = 10^{-2.64} I^{0.338} V^{1.65} S^{0.001} \quad (13)$$

$$B_H = 10^{-7.06} I^{2.21} V^{2.07} S^{-1.00} \quad (14)$$

$$A_p = 10^{-0.403} I^{0.770} V^{0.095} S^{-0.367} \quad (15)$$

$$A_r = 10^{-2.82} I^{1.79} V^{0.545} S^{0.033} \quad (16)$$

## 4. 추가 실험

비드형상의 출력변수 예측을 통한 지능형 모델의 신뢰성 평가를 위해 추가 용접 실험을 실시하였다. 용접 실험에 대한 공정 변수는 본 용접 실험과 마찬가지로 용접전류, 아크전압, 용접속도이며 선정한 용접조건은 Table 5에 나타내었다.

용접부 비드형상의 실측값과 본 연구에서 도출한 선형모델, 곡선모델, 지능형 모델을 이용하여 예측값을 비교·분석 하였다. Fig. 15는 필릿 용접부의 단면 형상을 나타낸 것이고 실측값과 예측값은 Table 6에 나타내었다.

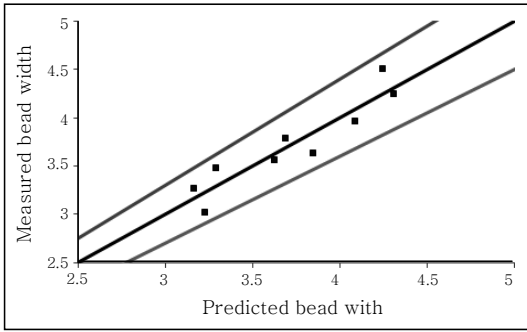


Fig. 7 Linear model analysis for bead width(mm)

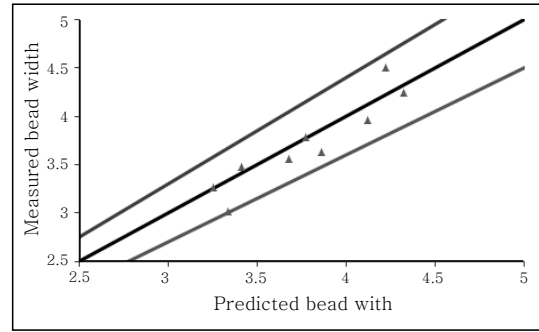


Fig. 11 Curvilinear model analysis for bead width(mm)

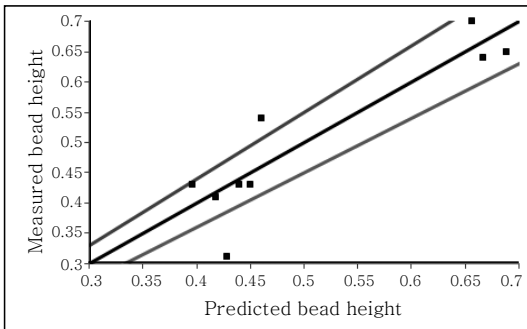


Fig. 8 Linear model analysis for bead height(mm)

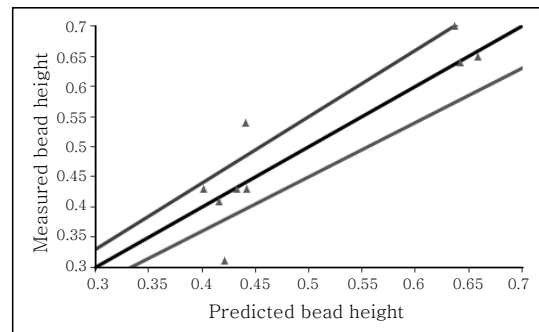


Fig. 12 Curvilinear model analysis for bead height(mm)

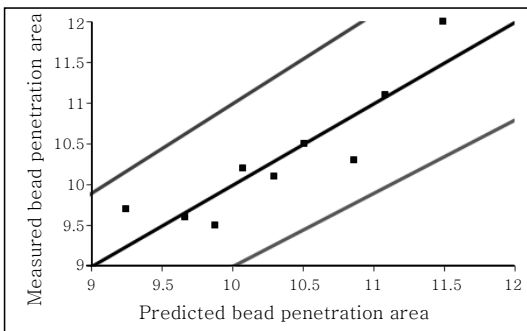


Fig. 9 Linear model analysis for penetration area(mm<sup>2</sup>)

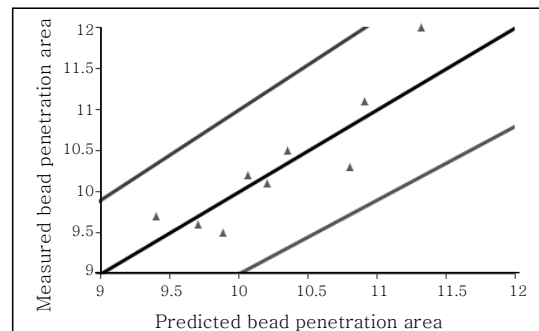


Fig. 13 Curvilinear model analysis for penetration area(mm<sup>2</sup>)

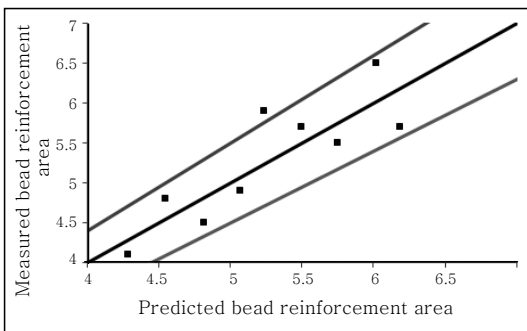


Fig. 10 Linear model analysis for reinforcement area(mm<sup>2</sup>)

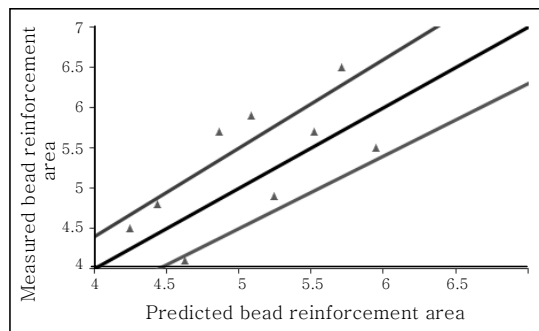


Fig. 14 Curvilinear model analysis for reinforcement area(mm<sup>2</sup>)

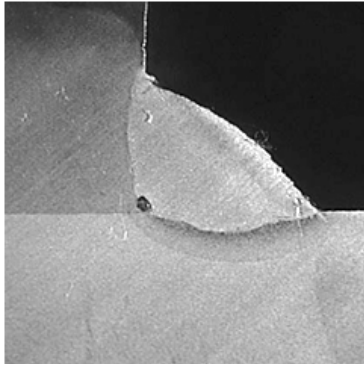


Fig. 15 Bead geometry in the additional experiment

Table 5 Welding parameter in the additional experiment

Welding current(A)	Arc Voltage(V)	Welding speed (cm/min)
280	30	50

Table 6 Data results of bead geometry in the additional experiment

Bead geometry	Measured value	Predicted value		
		Linear model	Curvilinear model	Intelligent model
Bead width (mm)	3.63	4.18	4.19	3.56
Bead height (mm)	0.64	0.53	0.52	0.61
Penetration area(mm <sup>2</sup> )	10.23	9.92	9.92	9.23
Reinforcement area(mm <sup>2</sup> )	4.7	5.02	5.00	4.5

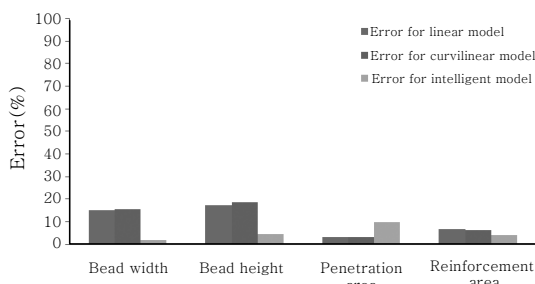


Fig. 16 Comparison between measured and predicted values

추가 실험 데이터를 이용한 실제 비드형상의 실측값을 선형모델, 곡선모델, 지능형 모델을 통한 예측값과 비교하여 분석한 결과 Fig. 16에 나타낸 것과 같이 지능

형 모델의 예측 능력이 10%이내의 오차범위에서 실제 비드형상을 가장 잘 나타내고 있음을 확인하였다.

### 5. 결 론

본 연구를 통해 GMA를 이용한 필릿용접에서 공정변수의 변화에 따른 비드형상을 통해 고정변수와 비드형상과의 상관관계를 비교·분석하여 비드형상 예측을 위한 지능형 모델 개발에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1) 16t-16t의 시편을 사용한 필릿용접 실험을 통하여 측정된 데이터를 바탕으로 입력 변수에 따른 비드형상 예측이 가능한 유전자 알고리즘 모델을 도출하였고 10%이내의 정확성을 가진 비드형상을 예측할 수 있음을 확인하였다.

2) 비드형상을 예측하고자 개발된 지능형 모델을 이용하여 실측값과의 비교를 통해 오차값의 대부분이 0인 지점 부근에 분포하며 실제 비드형상을 비교적 잘 표현하고 있음을 알 수 있었고 일부 데이터로 인해 크기는 2mm 이내에서 오차가 발생함을 확인할 수 있었다.

3) 추가 실험을 통하여 선형모델, 곡선모델, 지능형 모델의 비드형상 예측값을 실측값과 비교한 결과 전반적인 출력변수에서 지능형 모델이 오차범위 10%이내의 비드형상을 예측하였으며, 이는 공정 최적화를 위해 가장 적합한 수학적 예측 모델임을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

### 참 고 문 헌

1. J. Raveendra and R.S. Parmar : Mathematical models to predict weld bead geometry for flux cored arc welding, *Metal Construction*, **19-2** (1987), 31~35
2. Chandel, R. S. : Mathematical modelling of gas metal arc weld features, *Modeling and Control of Casting and Welding Processes IV, Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, Palm Coast, Florida, **17-22** (1988), 109~120
3. I.S. Kim, C.E. Park, Y.H. Cha, B.S. Seong, Y.M. Park, Y.H. Ahn, K.W. Kim, and Y.J. Jeong : Selection of optimal Process Parameters for Butt Welding, *The Korean Welding and Joining Society*, **2** (2001), 3-6 (in Korean)
4. L.J. Yang, R.S. Chandel and M.J. Bibby : The effects of process variables on the bead height of

- submerged-arc weld deposits, Canadian Metallurgical Quarterly, **31-4** (1992), 289-297
5. David E. Goldberg : Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989
  6. T. S. Li, C. T. Su, T. L. Chiang : Applying robust multi-response quality engineering for parameter selection using a novel neural-genetic algorithm, Computers in Industry, **50-1** (2003), 113-122
  7. I.J. Kim, C.E. Park, I.S. Kim, J.S. Son, Y.H. An, D.K. Kim and Y.S. Oh : Development of algorithm for Prediction of Bead Height on GMA Welding, Journal of KWS, **17-5** (1999), 304-310 (in Korean)
  8. S.J. Park, S.K. Nam and C.G. Kweon : Prediction of Weld Penetration and Deposited Metal Area in Accordance with Weld Parameters in Tandem Submerged Arc Welding Process, Journal of KWJS, **29-2** (2011), 691-696 (in Korean)