

# 임의의 비드형상을 위한 최적의 공정변수 예측 알고리즘 개발에 관한 연구

김일수\* · 차용훈\*\* · 이연신\*\*\* · 박창언\* · 손준식\*

## A Study on Development of Algorithm for Predicting the Optimized Process Parameters on Bead Geometry

Ill-Soo Kim\*, Yong-Hoon Cha\*\*, Youn-Sin Lee\*\*\*, Chang-Eun Park\* and Joon-Sik Son\*

**Key Words** : Process variables(공정변수), Bead geometry(비드형상), Factorial design method(요인 시험 방법), Least square method(최소자승법), Adaptive control(적응제어)

### Abstract

The procedure of robotic Gas Metal Arc(GMA) welding in order to achieve the optimized bead geometry needs the selection of suitable process parameters such as arc current, welding voltage, welding speed. It is required the relationships between process parameters and bead geometry.

The objective of this paper is to develop the algorithm that enables the determination of process parameters from the optimized bead geometry for robotic GMA welding. It depends on the inversion of empirical equations derived from multiple regression analysis of the relationships between the process parameters and the bead dimensions using the least square method. The method not only directly determines those parameters which will give the desired set of bead geometry, but also avoids the need to iterate with a succession of guesses employed Finite Element Method(FEM). These results suggest that process parameter from experimental equation for robotic GMA welding may be employed to monitor and control the bead geometry in real time.

### 1. 서 론

로봇아크용접은 선박, 플랜트, 교량, 자동차, 항공기 등의 산업기계 분야를 비롯해 냉장고, 컴퓨터 등의 전기, 전자 제품과 부품들에 이르기까지 거의 모든 산업 분야에 광범위하게 사용되고 있다<sup>1-3)</sup>. 또한 성형, 체

결, 절단, 표면개질 등 생산기술의 모든 방법을 포함하고 있는 접합기술로서 기계, 금속, 전기, 전자, 화학분야의 지식이 모두 복합적 상호작용하고 있으므로 용접 공정을 이론적으로 해석하는데 한계가 있다. 일반적으로 용접에는 높은 열과 압력이 가해지며 이로 인하여 재질의 변화와 변형 및 잔류응력 등이 발생하게 되어 용접부에 결함발생 원인이 된다. 따라서 이러한 문제

※ 1998년 8월 1일 접수

\* 정회원, 목포대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정회원, 조선대학교 공과대학 기계공학부

\*\*\* 비회원, 송원대학 자동차과

# 김일수 : ilsookim@changkye.mokpo.ac.kr

점들을 방지하거나, 최소화하기 위한 여러 가지 기술적 방법들이 연구되고 있다<sup>4~7)</sup>.

국내의 경우는 인건비 상승과 기능인력 부족으로 인해 최근 들어 고능률화와 고생산성화가 급속히 추진되고 있으며 이를 위한 자동화 및 무인화가 급속히 추진되고 있다. 자동화와 무인화를 위하여 필요한 용접선 추적시스템에는 접촉식 센서가 주로 사용되고 있으나 아크 센서나 광학식 센서의 활용이 조금씩 증가되고 있는 추세이다. 또한 최근 들어서는 퍼지 이론이나 인공지능 시스템을 이용한 용접조건 제어나 결합식별 기술이 개발되고 있다<sup>8~13)</sup>.

로봇 아크용접부의 품질은 차체의 외관뿐만 아니라 내구성과 안정성에 영향을 미치므로 용접부의 재질과 형상에 따른 최적의 용접조건하에서 용접을 수행하여야 한다. 최적의 용접조건은 용접부의 두께 및 형상이 다양하고 적용되는 용접장비의 종류나 상대가 다르고 용접에 영향을 미치는 작업환경도 차이가 있어 제각기 달라지게 되므로 많은 양의 실험과 시행착오를 필요로 하게 된다. 또한 용접조건은 강판의 종류, 용접장비 관련 사항, 용접조건, 품질 등의 많은 항목으로 구성되어 있어서 대단히 방대한 분량이 데이터 베이스로 구성이 필요하다. 이러한 방대한 분량의 용접 데이터를 유효 적절하게 활용하기 위한 방법으로 용접관련 데이터베이스인 Weldsearch를 비롯해서 WPS(Word Process System) 관리용 데이터베이스 시스템, 용접인력관리용 데이터베이스 시스템, 용접시공 데이터베이스 시스템 등 다양한 용접용 데이터베이스 시스템이 개발되어 산업에 활용되고 있다. 용접용 데이터베이스 시스템은 용접과정에서 필요로 하는 기술적 정보를 신속하게 제공하므로써 용접과정에서 생기는 여러 가지 외적변화를 해결하고 적정한 품질의 용접을 수행하는데 큰 역할을 할 수 있다.

공정변수와 비드형상의 관계를 수학적 모델로 개발하는 연구는 Drayton<sup>14)</sup>에 의하여 최초로 시작되었다. 그 이후 많은 이론적, 실험적 모델들이 개발되었다. Chandel<sup>15)</sup>은 최초로 요인사험 실험방법을 GMA용접 공정에 적용하였으며, 공정변수와 bead-on-plate 비드형상과 관계를 조사하였다. 이 실험결과로는 용접전류가 비드형상에 가장 큰 영향을 미치고, 실험결과로부터 개발된 수학적 모델은 정확하게 비드형상을 예측할 수 있다는 것을 입증하였다. Kim et. al.<sup>16,17)</sup>은 공정변수와 비드형상사이의 상호관계를 정립하여 완전 자동화된 로봇 용접시스템 개발에 필요한 알고리즘을 개발하였다. 최근에 수학적으로 모델링하기 어려운 분야에 신경회로망을 이용하여 접근하는 연구가 많이 행하

여지고 있다. Cook et. al.<sup>18)</sup>은 신경회로망을 이용하여 용접공정을 모델링하고 비드크기를 예측하는 방안을 최초로 제시하였다. 공정변수는 용접전류, 아크전압, 토치 이동속도 및 전극선 송급속도를 신경회로망의 입력으로 사용하고, 비드크기 값들을 신경회로망의 출력으로 하여 사상(mapping)관계를 학습한 후 용융지의 크기를 예측하였다. Kim<sup>19)</sup>은 신경회로망을 이용하여 공정변수들(와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량)과 비드형상들(비드폭, 비드높이, 용입깊이, 비드면적)의 관계를 연구하였으며 실험식에 의하여 계산된 값과 실험결과를 비교·분석하여 용접작업에서의 최적의 공정변수를 선정하였다. 하지만 용접품질과 관련된 임의의 비드형상을 위한 용접공정변수 예측에 관하여 언급되지 않았다. 따라서 로봇을 이용하여 용접시 가장 중요한 요인인 전자동 용접 공정변수 예측시스템 개발이 시급한 과제로 대두되고 있다.

본 연구는 로봇을 이용하여 GMA용접시 용접중 발생하는 여러가지 외적요인을 제어하기 위한 수학적 모델을 개발하기 위하여 3<sup>3</sup> 요인사험(factorial design) 방법을 이용하여 실험을 실시하였다. 실험결과를 이용하여 상용용 통계프로그램(SPSS)을 이용하여 공정변수와 비드크기의 상호관계를 연구하고, 실험결과를 기초로 하여 수학적 곡선방정식을 개발하였다. 개발된 실험식을 기초로 하여 임의의 비드형상에 대한 공정변수 예측 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 최소자승법(least square method)을 이용하여 개발된 실험식을 역변환시켰다. 또한 개발된 알고리즘을 이용하여 추가적인 실험을 실시하고 예측된 공정변수들과 실험값들을 비교·분석하였다.

## 2. 실험방법

본 실험디자인은 완전한 부분요인사험(Partial Factorial Design)으로 연구할 수 있는 최소한의 처리 콤비네이션(combination) 과 주 및 상호관계의 영향도 연구가 가능한 방법을 선정하였다. 이 실험을 위해 선택한 공정변수들은 용접전류, 아크전압, 용접속도 등이며 응답요소는 비드크기 이다. 3개의 공정변수의 실험 level과 한계는 Table1에 나타낸다. 실험 데이터를 보다 쉽고 기록 및 저장에 용이하기 위하여 3개의 level을 가진 각 공정변수들을 0(low), 1(intermediate)와 2(high)의 3개 level로 분류하여 matrix형태로 나타내었다. 보호가스는 Ar 80% + CO<sub>2</sub> 20%를 사용하였으며 contact tube의 선단으로

부터 모재(base metal) 까지의 거리 CTWD (Contact Tube Work Distance)는 20mm를 선정 하였다.

Table 1 Welding Parameters and Limits

Parameter	Symbol	Unit	Limits
Arc current	I	Amp	180, 260, 360
Welding voltage	V	Volt	20, 25, 30
Welding speed	S	mm/min	250, 330, 410

실험을 위하여 로봇 GMA아크용접기는 6축 로봇 (ABB1500)을 선택하고, 용접 시험편 가공은 휨이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 전달한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 한다. 실험에 사용된 시험편은 200×70×12mm 두께의 SS400 일반구조용 압연강재로서 시험편에 용접하고자 하는 평면은 표면의 녹, 스케일, 산화물 등 이물질이 용접결합의 원인이 되지 않도록 stainless wire-brush 및 sand paper로 깨끗이 닦아낸다.

시험편을 용접지그에 위치한 다음, 실험디자인에서 선정된 공정변수를 프로그램 유니트(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시킨다. 그 후 로봇을 이용하여 용접을 실시한다. 새로운 공정변수값은 프로그램 유니트를 이용하여 재 프로그램화하고 계속하여 용접을 수행한다. 비드크기를 측정하기 위해 용접시험편의 가로축을 중간 부분에서 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭 후 폴리싱(polishing)한다. 비드크기를 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 광택하고 HNO<sub>3</sub> 3% + H<sub>2</sub>O 97% Nital 용액을 이용하여 에칭 한다. 측정은 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경 및 profile projector로 사진을 현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 비드크기를 측정한다. Fig. 1은 본 연구에서 이용될 비드크기를 나타낸다.

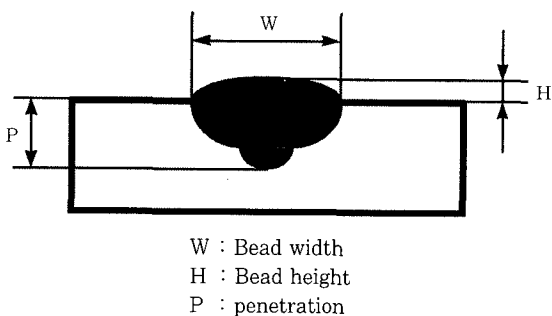


Fig.1 Measurement of weld bead geometry

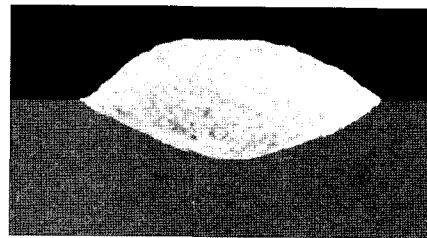
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 1. 수학적 모델 개발

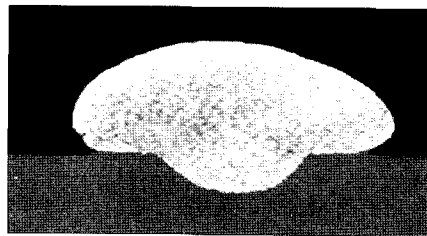
로봇 GMA용접에서 비드크기는 공정변수(용접전류, 아크전압, 용접속도)에 의하여 영향을 받는다는 것을 실험결과 및 Kim<sup>19)</sup>의 연구결과로부터 알 수 있었으며, 최적용접을 위한 수학적 모델개발은 비드크기와 공정변수들과의 상호관계를 수학적 관계식으로 나타냄으로 달성할 수 있다고 kim et. al.<sup>16,17)</sup>은 주장하였다. Photo. 1는 각 시험편의 공정변수변화에 따른 비드형상을 나타낸다. 따라서 응답변수(Y)는 3개의 비드크기(비드폭, 비드높이, 용접깊이) 중 하나이며 다음과 같이 방정식으로 나타낸다.

$$Y=f(IVS) \tag{1}$$

여기서 I는 아아크 전류, V는 용접 전압, S는 용접속도를 나타낸다.



(a) I=180Amp, V=30Voltage, S=250mm/min



(b) I=360Amp, V=20Voltage, S=410mm/min

Photo. 1 Metallurgical sections of welds according to the various combination of process parameters

비드형상에 공정변수들 영향 및 입력과 출력변수 관계를 연구하기 위하여 수학적 곡선 방정식을 개발하고, 개발된 모델을 이용하여 공정변수와 비드크기의 상관관계를 연구하였다.

McGlone과 Chardwick<sup>20)</sup>은 비록 공정변수와 비드크기를 곡선 관계로 가정하여 곡선 방정식을 도입하였으며 다음과 같이 나타냈다.

$$Y=b_1 (I)^{b_2} (V)^{b_3} (S)^{b_4} \tag{2}$$

여기서  $b_1, b_2, b_3, b_4$ 는상수이다.

식(2)의 해를 구하기 위하여 먼저 각각 공정변수의 중요성을 평가하고, 공정변수들 사이에 어떤 상호관계가 있는지를 검사하기 위해 각각 비드크기에 공정변수 영향을 평가하는 시차분석(ANOVA)방법을 이용하였다. 마지막으로 다중 상관계수와 Fisher's ratio의 1% 레벨 모델을 이용하여 각 변수들의 중요성을 분석하였다.

3개의 공정변수와 비드형상 사이의 상호관계를 비교·분석하기 위한 알고리즘 개발은 다중회귀분석(multiple regression analysis) 같은 기본적인 통계적 방법을 이용하였다. 이 분석을 위하여 상업용 컴퓨터 프로그램인 SPSS를 이용하였다.

비드크기의 예측 및 공정변수들과 비드크기 사이의 상호관계를 연구하기 위하여 실험결과로부터 컴퓨터 프로그램을 이용하여 곡선 방정식을 개발하였으며 다음과 같다.

비드폭:

$$W = \frac{I^{0.3432} V^{0.6786}}{S^{0.4435} 10^{0.0176}} \quad (3)$$

비드높이:

$$H = \frac{I^{0.5443} 10^{1.1437}}{S^{0.2706} V^{1.1102}} \quad (4)$$

용입깊이:

$$P = \frac{I^{0.5616}}{S^{0.4940} V^{0.1041} 10^{2.3835}} \quad (5)$$

**Table 2** Analysis of variance tests for mathematical models for bead geometry

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination(%)
3	0.0237	0.9645	93.02
4	0.0659	0.8389	70.38
5	0.0606	0.9513	90.56

개발된 수학적 방정식들의 정확성을 점검 및 분석하기 위하여 분산분석법(variance technique)을 이용하였으며, Table 2는 식(3)~(5)의 산출표준오차(standard error of estimate), 복합상관계수(coefficient of multiple correlation) 그리고 결정계수(coefficient of determination)를 보여준다. 이 식들의 복합상관계수값은 각각 0.9645, 0.8389, 0.9513이다. 또한 모델의 정확성을 평가하기 위한 방

법으로 이론값을 실험결과와 비교하는 백분율 오차법(percentage error method)을 이용하였으며, 방정식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{R_A - R_E}{R_E} \times 100 \quad (6)$$

여기서  $R_A$ 는 비드크기의 계산된 값이며,  $R_E$ 는 비드크기의 측정된 값을 나타낸다.

식(6)을 이용하여 백분율을 계산한 후 백분율을 7개의 범주 0~2%, 2~5%, 5~10%, 10~15%, 15~20%, 20~30%, 31%이상으로 나누어서 비드값에 대한 분석결과를 이용하여 개발된 실험식들의 정확성을 점검하였다. 비드값의 오차 백분율이 10% 범위 내에서 93%정도 분포를 나타내므로 개발된 모델의 정확성이 우수한 것을 알 수 있다.

## 2. 임의의 비드형상에 최적의 공정변수 예측

앞에서 개발한 실험식은 아크전류, 용접전압, 용접속도에 관하여 비드폭, 비드높이, 용입깊이의 상호관계를 나타내고 있다. 적절한 비드크기가 주어지면 이 비드크기로부터 최적의 공정변수들을 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것이다. 최소 자승법<sup>21)</sup>을 이용하면, 공정변수들과 비드크기의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = (\phi^T \theta)^{-1} \phi^T \quad (7)$$

여기서

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_n] \quad \theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n] \quad \phi = \begin{bmatrix} \varphi(x_1) \\ \vdots \\ \varphi(x_n) \end{bmatrix}$$

식(3)~(5)들을 변형시키면 다음과 같다.

$$W^v = (I^{0.3432} V^{0.6786} S^{0.4435}) \quad (8)$$

$$H^v = (I^{0.5443} V^{1.1102} S^{0.2706}) \quad (9)$$

$$P^v = (I^{0.5616} V^{0.1041} S^{0.4940}) \quad (10)$$

여기서

$$W^v = \frac{W}{0.9603}, \quad H^v = \frac{H}{13.9220}, \quad P^v = \frac{P}{0.0041}$$

위 식들 양변에 자연대수(natural logarithms)를 취하면 다음과 같이 된다.

$$\log W^\nabla = (0.3432\log I + 0.6786\log V - 0.4435\log S) \quad (11)$$

$$\log H^\nabla = (0.5443\log I - 1.1102\log V - 0.2706\log S) \quad (12)$$

$$\log P_V = (1.5616\log I - 0.1041\log V - 0.4940\log S) \quad (13)$$

위의 방정식들은 다음 벡터로 정의되며 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$y_i = \theta_i \phi_i \quad (14)$$

여기서

$$y_i = \begin{bmatrix} \log W^\nabla \\ \log H^\nabla \\ \log P^\nabla \end{bmatrix}, \theta_i = \begin{bmatrix} \log I \\ \log V \\ \log S \end{bmatrix}$$

$$\phi_i = \begin{bmatrix} 0.3432 & 0.6786 & -0.4435 \\ 0.5443 & -1.1102 & -0.2706 \\ 1.5616 & -0.1041 & -0.4940 \end{bmatrix}$$

식(14)을 이용한 시스템결정인자는

$$\begin{bmatrix} \log I \\ \log V \\ \log S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.7771 & -0.5697 & -1.0097 \\ 0.2296 & -0.7812 & 0.2218 \\ -2.5049 & -1.6362 & 1.1208 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log W^\nabla \\ \log H^\nabla \\ \log P^\nabla \end{bmatrix} \quad (15)$$

식(15)로부터 아크전압, 용접전류, 용접속도의 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\log I = -0.7771\log W^\nabla - 0.5697\log H^\nabla - 1.0097\log P^\nabla \quad (16)$$

$$\log V = 0.2296\log W^\nabla - 0.7812\log H^\nabla + 0.2218\log P^\nabla \quad (17)$$

$$\log S = -2.5049\log W^\nabla - 1.6362\log H^\nabla + 1.1208\log P^\nabla \quad (18)$$

위 식을 다시 표현하면

$$I = W^{\nabla-0.7771} H^{\nabla-0.5697} P^{\nabla-1.0097} \quad (19)$$

$$V = W^{\nabla 0.2296} H^{\nabla-0.7812} P^{\nabla 0.2218} \quad (20)$$

$$S = W^{\nabla-2.5049} H^{\nabla-1.1362} P^{\nabla 1.1208} \quad (21)$$

여기서  $W^\nabla$ ,  $H^\nabla$ ,  $P^\nabla$ 은 비드폭, 비드높이, 용입깊이의 함수를 나타낸다.

개발된 모델들은 로봇 GMA용접의 용접선 추적(seam tracking)과 같은 용접자동화 및 제어알고리즘으로 이용할 수 있으며, 특히 다양한 용접조건에서도 쉽게 주어진 비드형상에 공정변수예측이 가능하다는 특징을 갖고 있다. 비록 본 논문은 3개의 공정변수만을 고려하였지만 차후 본 논문에서 고려되지 않은 다른 공정변수들을 시스템에 추가가 필요하다.

### 3. 개발된 시스템 신뢰성 평가

개발된 알고리즘의 신뢰성을 검증하고 평가하기 위하여 추가적인 실험을 실시하였다. Table 3은 임의로 선정한 5개의 공정변수들 값과 모델 개발을 위하여 이용한 동일 용접기계 및 비드크기 측정방법을 이용하여 측정된 실험결과를 나타낸다.

Fig. 2은 개발한 곡선 방정식을 이용하여 예측한 5개의 용접전류와 실험에 이용된 용접전류와 비교한 결과를 각각 나타낸다. 3, 4번 실험조건에서 미세한 오차(error)가 존재하지만 예측된 결과와 실험조건과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 곡선 방정식을 이용하여 예측한 아크전압 값과 실험조건 값과 비교결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 따르면 곡선 방정식에서 4번의 예측 값에 오차가 존재하지만 상당히 정확하게 아크전압을 예측함을 알 수 있었다. Fig. 4은 식(21)을 이용하여 용접속도 크기를 실제 예측한 결과와 실험조건 값에 대해서 그래프로 나타내었다. 용접속도 크기의 예측값들이 비록 4번 실험조건에서 미세한 오차가 존재하지만 실제 값들과 잘 일치함을 Fig. 4으로부터 알 수 있다.

Table 3. Value of process parameters and experimental results

Trial. No.	Arc voltage (V)	Welding current (A)	Welding speed (mm/min)	W (mm)	H (mm)	P (mm)
1	22	200	300	10.28	3.13	1.93
2	28	200	300	12.88	2.60	2.18
3	22	300	400	10.62	3.80	2.98
4	28	300	300	15.01	3.69	3.39
5	22	200	400	9.35	2.81	1.87

결론적으로 임의의 비드형상을 얻기 위한 용접조건 예측에서 역 모델들(곡선 방정식)에는 4번 실험조건에서 상당한 오차가 존재하고 있으며, 이 오차는 기계적인 설정오차 및 비드형상에서 오는 측정오차 때문이라 추측되며, 앞으로 이에 대한 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. 앞으로 산업체에 적용하기 위해서는 맞대기 혹은 겹치기 용접에서 이용될 수 있도록 추가적인 실험 및 용접방법 선정이 필요하며, 현재 이에 대한 연구가 진행중이다.

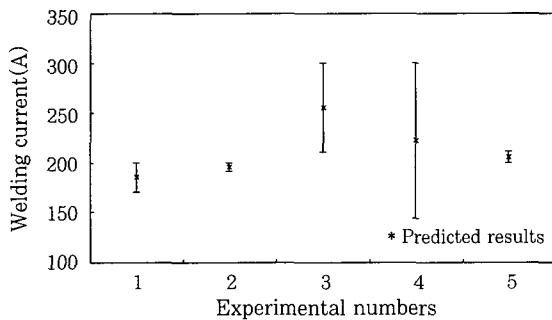


Fig. 2 Comparison of measured and predicted welding current using curvilinear equation

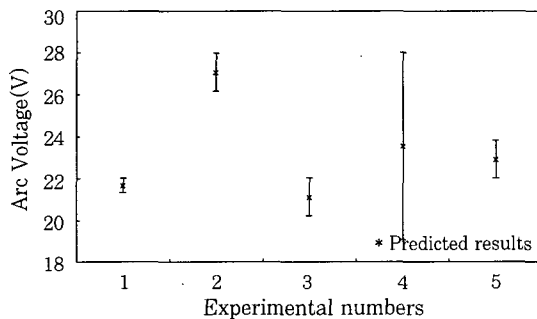


Fig. 3 Comparison of measured and predicted arc voltage using curvilinear equation

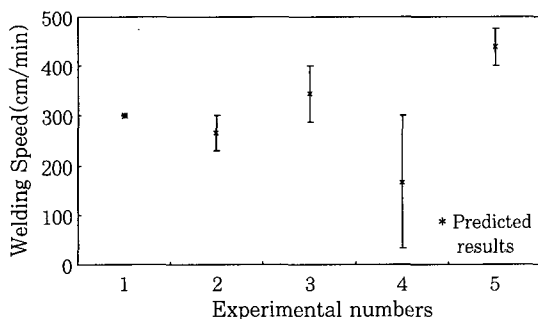


Fig. 4 Comparison of measured and predicted welding speed using curvilinear equation

#### 4. 결 론

로봇GMA 용접기를 이용하여 bead-on-plate용접

을 수행한 후 임의의 비드형상에 대한 최적의 공정변수를 예측할 수 있는 알고리즘 개발을 수행하였으며, 추가적인 실험을 통하여 개발된 모델들을 비교 분석하였으며, 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 비드형상은 공정변수들의 변화에 따라 변화됨을 실험결과로부터 알 수 있다.

(2) 실험결과로부터 개발한 실험식은 공정변수와 비드크기와 상관관계를 연구할 수 있고, 비드크기(비드폭, 비드높이, 용입깊이)은 상당히 정확하게 예측할 수 있었다.

(3) GMA 용접공정에서 최소자승법을 이용하여 임의의 비드형상에 대한 최적의 공정변수 예측 모델을 개발하였으며, 추가적인 실험을 통하여 계산한 이론값과 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

(4) 본 연구의 결과는 산업현장에서 균일한 비드크기를 보장하기 어려운 부분에 효과적으로 제어함으로써 안정된 용접결과를 얻을 수 있는 용접의 실시간 계측 및 제어 시스템 그리고 전문가 시스템의 구성에 가장 효과적인 수단으로 이용될 것으로 예상된다.

개발된 시스템을 이용하여 용접함으로써 용접 데이터 및 작업의 표준화, 작업자의 전문가에 대한 의존도 경감, 새로운 용접조건 결정을 위한 실험 횟수 감소 및 기존 데이터의 공유로 용접작업에 있어서의 생산성을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Masubuchi, "Analysis of Welded Structure", International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33, (1980) pp. 1~10
2. J. F. Lancaster, "Metallurgy of Welding" Third Edition, (1980) pp. 1~5
3. 熔接學會編, "熔接便覽", 丸善株式會社, (1966) pp. 1213~81492
4. Y. W. Shi and B. Y. Chen, "Effects of Welding Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Behaviour in Butt Welds of a Pipeline Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 36, No. 6, (1990) pp. 893~902
5. V. Ramamurti and S. Suresh, "Residual Stress Analysis in Weldments", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 38, No. 6, (1991) pp. 385~391

6. 이보영, "국내화학플랜트 설비의 용접부 손상 사례 보고", 대한금속학회 제9차 재료강도 심포지엄, (1995) pp. 403~410
7. 백광기, 임채선, 최기영, "중공업 설비용 금속소재의 파손사례연구", 1996 대한용학회 추계학술대회, (1996) pp. 51~53
8. T. Araya and S. Saikawa, "Recent actives on sensing and adaptive control of arc welding", 3rd Int. Con. on Trends in welding Research, (1992) pp. 833~842
9. S. Budgifvars, "Computer Aided Welding (CAW) -The State-of-the-Art", IIW Doc, Vol. XII-1226, (1991) pp. 325~360
10. 日本容接協會, 容接データシステムに関する講習會テキスト, 昭和 57年
11. R. W. Richardson, A. Gutow, R. A. Anderson and D. F. Farson, "Coaxial weld pool viewing for process monitoring and control", Welding Journal, Vol. 63, No. 3, (1984) pp. 43~50
12. R. Hecht-Nielsen, "Neurocomputing Picking the human brain", IEEE Spectrum Vol. 25, No. 3, (1988) pp. 2136~2141
13. T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 15, No. 1, (1985) pp. 116~132
14. P. A. Drayton, "An examination of the influence of process parameters on submerged arc welding", The Welding Institute Report, (1972) pp. 472~510
15. R. S. Chandel, "Mathematical modelling of gas metal arc weld features", Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes, (1988) pp. 109~120
16. J. W. Kim and S. J. Na, "A study on Prediction of Welding Current in Gas Metal Arc Welding-part1 : Modelling of Welding Current in Response to Change of Tip-to-Workpiece Distance", Proc. IMechE, Vol. 205, (1991) pp. 59~63
17. J. W. Kim and S. J. Na, "A study on Prediction of Welding Current in Gas Arc Welding-part2 : Experimental Modelling of Relationship between Welding Current and Tip-to-Work-piece Distance and Its Application to Weld1 Seam Tracking System", Proc. IMechE, Vol. 295, (1991) pp. 64~69
18. G. E. Cook, K. Andersen and R. J. Barrett, "Keynote address : Feedback and adaptive control in welding", Recent Trends in Welding Science and Technology : TWR '89 : Proceeding of the 2nd International Conference on Trends in Welding research, (1989) pp. 891~903
19. 김일수, "GMA 용접에 최적의 용접비드 형상을 예측하기 위한 수학적 모델 개발", 대한용접학회지, (1997) pp. 118~126
20. J. C. McGlone, and D. B. Chadwick, "The submerged arc butt welding of mild steel Part 2: The prediction of weld bead geometry from the procedure parameters", The Welding Institute Report, (1980) pp. 80~132
21. C. L. Lawson and R. J. Hanson, "Solving least squares problems", Englewood Cliffs, NJ, USA, (1974) pp. 471~501