

## 최적의 비드형상 예측 알고리즘 개발에 관한 연구

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

김일수, 박창언, 김용복, 정영제, 손준식, 송창재  
목포대학교 기계공학과

#### 1. 서론

로봇아크용접은 선박, 플랜트, 교량, 자동차, 항공기, 굴삭기 등의 산업기계에서 냉장고, 컴퓨터 등의 전기, 전자 제품과 부품들에 이르기까지 거의 모든 산업분야에 광범위하게 사용되고 있다. 또한 성형, 체결, 절단, 표면개질 등 생산기술의 모든 방법을 포함하고 있는 접합 기술로서 기계, 금속, 전기, 전자, 화학분야의 지식이 모두 복합적 상호작용하고 있으므로 용접공정을 이론적으로 해석하는데에는 한계가 있다. 일반적으로 용접에는 높은 열과 압력이 가해지며 이로 인하여 재질의 변화와 변형 및 잔류응력 등이 발생하게 되어 용접부에 결함 발생 원인이 된다. 따라서 이러한 문제점들을 방지하거나, 최소화하기 위한 여러 가지 기술적 방법들이 연구되고 있다<sup>1)</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.

공정변수와 비드형상과의 관계를 수학적 모델로 개발하는 연구는 Drayton<sup>2)</sup>에 의하여 최초로 시작되었다. 그 이후 많은 이론적 그리고 실험적 모델들이 개발되었다. Chandel<sup>3)</sup>은 최초로 요인시험 실험방법을 GMA용접공정에 적용하였으며, 공정변수와 bead-on-plate 비드형상과의 관계를 조사하였다. 이 실험결과를 용접전류가 비드형상에 가장 큰 영향을 미치고, 실험결과로부터 개발된 수학적 모델은 정확하게 비드형상을 예측할 수 있다는 것을 입증하였다. Kim et. al.<sup>4)</sup> 등은 공정변수와 비드형상 사이의 관계를 정립하여 완전 자동화된 로봇 용접시스템 개발에 필요한 알고리즘을 개발하였다. 최근에 수학적으로 모델링하기 어려운 분야에 신경회로망을 이용하여 접근하는 연구가 많이 행하여지고 있다. Cook et. al.<sup>5)</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>6)</sup>은 신경회로망을 이용하여 공정변수들(와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량)과 비드형상들(비드폭, 비드높이, 용입깊이, 비드 면적)을 연구하였으며 실험식에 의하여 계산된 값과 실험결과를 비교분석하여 최적의 공정변수를 선정하였다.

본 연구의 목적은 로봇 GMA용접 공정에서 주어진 비드형상에 대하여 최적의 공정변수 예측 알고리즘을 개발하고자 한다. 이 목표를 달성하기 위하여 로봇을 이용하여 GMA용접시 용접중 발생하는 여러 가지 외관을 제어하기 위한 수학적 모델을 개발하기 위하여  $3^3 \times 2$  요인시험(factorial design)방법을 이용하여 실험을 실시하였다. 실험결과를 이용하여 상업용 통계프로그램(SPSS)을 이용하여 공정변수와 비드크기와의 관계를 연구하고 실험 방정식을 개발하였다. 개발된 실험식을 기초로 하여 주어진 비드형상에 공정변수 예측알고리즘을 개발하기 위하여 최소자승법(least square theory)을 이용하여 개발된 실험식을 역변화시켰다. 또한 개발된 알고리즘을 이용하여 추가적인 실험을 실시하고 예측된 공정변수들과 실험값을 비교 분석하였다.

## 2. 실험방법

자동화 용접공정과 로봇을 이용한 용접에 관련된 많은 문제들은 모델링, 센싱 그리고 용접 공정의 제어 등이 포함되며, 이 중에서 모델링은 가장 중요한 부분이다. 일반적인 모델링은 비용절감 및 응답요소의 주 및 상호작용 효과에 관한 요구된 정보를 제공할 수 있는 요인사험(factorial design)방법을 이용하여 실험을 실시하였다.

본 실험을 해 선택한 공정변수들은 와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도 등이며 응답요소는 비드폭, 비드높이, 용입깊이, 비드면적이다. 4개의 공정변수의 실험 level과 한계는 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Welding process parameters and limits

Variable	Unit	Level			Coding		
		Low	Middle	High	Low	Middle	High
Wire diameter	mm	1.2		1.6	0		1
Arc voltage	Volts	20	25	30	0	1	2
Welding speed	cm/min	25	33	41	0	1	2
Welding current	Amps	180	260	360	0	1	2

실험을 위하여 로봇 GMA 아크용접기는 목포대학교 로봇 용접실에 위치한 대우중공업의 6축 로봇(ABB1500)을 선택하였고, 용접 시험편 가공은 휨이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 전단한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 하였다. 실험에 사용된 시험편은 200×70×12mm 두께의 SS400 일반구조용 압연강재로서 시험편에 용접하고자 하는 평면은 표면의 녹, 스케일, 산화물 등 이물질이 용접결함의 원인이 되지 않도록 stainless wire-brush로 깨끗이 닦아냈다.

시험편을 용접지그에 위치한 다음, 요구된 공정변수를 프로그램 유닛(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시킨다. 그 후 로봇을 이용하여 용접을 실시한다. 새로운 공정변수를 프로그램 유닛을 이용하여 재프로그램화하고 계속하여 용접을 수행한다. 비드크기를 측정하기 위해 용접시험편의 가로축을 중간 부분에서 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭한후 폴리싱(polishing)한다. 비드형상을 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 광택하고 HNO<sub>3</sub> 3% + H<sub>2</sub>O 97% Nital 용액을 이용하여 에칭한다. 측정은 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경으로 사진을 현상하여 스케닝 후 컴퓨터에서 비드크기를 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 수학적 모델 개발

비드크기는 와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도에 의하여 영향을 받는다는 것을 실험결과로부터 알 수 있다. 그러므로 최적용접을 위한 수리적인 모델 개발은 주어진 품질기준의 제품을 생산하기 위한 공정변수들을 각각 콤비네이션 합으로 달성할 수 있다. 4개의 공정변수를 가지고 응답변수( $y$ )는 비드크기(비드폭, 비드높이, 용접깊이, 비드면적) 중 하나이며 다음과 같이 나타낸다<sup>(8,9)</sup>.

$$y = f(D S I V) \quad (15)$$

본 연구의 근본적인 목적은 비드크기에 공정변수들 영향 및 입력과 출력변수 관계를 연구하기 위하여 직선 방정식을 개발하고, 4개 비드크기에 최적의 모델을 선정하는 것이다.

$$y = d_1 + d_2D + d_3S + d_4I + d_5V \quad (17)$$

여기서  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  상수이다.

4개의 입력계수와 비드형상 사이의 상호작용을 연구하기 위하여 최적의 방정식 유도는 다중 회귀분석(multiple regression analysis) 같은 기본적인 통계적 방법을 이용하였다. 이 분석을 위하여 상업용 통계 프로그램 SPSS를 이용하였다.

비드형상(비드폭, 비드높이, 용입깊이, 비드면적)을 예측하고 공정변수와 비드형상과의 상호관계를 조사하기 위하여 직선방정식을 실험결과로부터 개발하였으며 다음과 같다.

비드폭:

$$W = -0.4942 + 4.0935D + 0.3763V + 0.0174I - 0.1855S \quad (1)$$

비드 높이:

$$H = 4.6132 - 0.3611D - 0.0957V + 0.0085I - 0.0232S \quad (2)$$

용입 깊이:

$$P = 1.5613 - 1.5463D + 0.0169V + 0.0168I - 0.0358S \quad (3)$$

비드 면적:

$$A_T = -19.4323 + 12.6498D + 1.3205V + 0.1742I - 0.9690S \quad (4)$$

개발된 수학적 모델의 정확성을 점검 및 분석하기 위하여 분산분석(variance technique)을 이용하였으며, Table 2은 위에서 개발한 방정식들의 산출표준오차(standard error of estimate), 복합상관계수(coefficient of multiple correlation) 그리고 결정계수(coefficient of determination)를 보여준다.

Table 2 Analysis of variance tests for mathematical models for bead width

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
1	0.7315	0.9626	92.67
2	0.5014	0.8465	71.65
3	0.54198	0.9291	86.32
4	4.3913	0.9674	93.59

### 3.2 최적의 공정변수 예측

앞에서 개발한 수학적 모델은 와이어 직경, 아크전류, 용접전압, 용접속도에 관하여 비드폭, 비드높이, 용입깊이, 비드면적과의 상호관계를 나타내고 있다.

로봇용접 시작 시 적절한 비드크기가 주어지면 이 비드크기로부터 공정변수들을 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것이다. 최초 자승법(least square method)을 이용하여, 공정변수들은 비드크기에 관하여 다음 방정식으로부터 계산한다.

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y \quad (4)$$

여기서

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

식(4)을 단순화 하기 위해서 방정식을 다음 형태로 나타내었다.

$$W^\vee = 4.0935D + 0.3763V + 0.0174I - 0.1855S \quad (5)$$

$$H^\vee = -0.3611D - 0.0957V + 0.0085I - 0.0232S \quad (6)$$

$$P^\vee = -1.5463D + 0.0169V + 0.0168I - 0.0358S \quad (7)$$

$$A_T^\vee = 12.8417D + 1.3391V + 0.1757I - 0.9536S \quad (8)$$

여기서

$$W^\vee = W + 0.4942, \quad H^\vee = H - 4.6132, \quad P^\vee = P - 1.5613, \quad A_T^\vee = A_T + 21.0187$$

$$y = \theta \phi \quad (9)$$

여기서

$$y = \begin{bmatrix} W^\vee \\ H^\vee \\ P^\vee \\ A_T^\vee \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} D \\ V \\ I \\ S \end{bmatrix}, \quad \phi = \begin{bmatrix} 4.0935 & 0.3763 & 0.0174 & -0.1855 \\ -0.3611 & -0.0957 & 0.0085 & -0.0232 \\ -1.5463 & 0.0169 & 0.0168 & -0.0358 \\ 12.8417 & 1.3391 & 0.1757 & -0.9536 \end{bmatrix}$$

식(9)을 이용한 시스템결정인자는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} D \\ V \\ I \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.6056 & -0.3224 & -0.8623 & 0.1580 \\ -0.8806 & -9.2056 & 2.3640 & 0.3065 \\ -123.2672 & -94.1992 & -65.6782 & 28.7361 \\ -32.1039 & -34.6249 & -20.3935 & 6.8044 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^\vee \\ H^\vee \\ P^\vee \\ A_T^\vee \end{bmatrix} \quad (10)$$

그러므로, 와이어직경, 아크전압, 용접전류, 용접속도계산은 다음과 같다.

$$D = -0.6056W^\vee - 0.3224H^\vee - 0.8623P^\vee + 0.1580A_T^\vee \quad (11)$$

$$V = -0.8806W^\vee - 9.2056H^\vee + 2.3640P^\vee + 0.3065A_T^\vee \quad (12)$$

$$I = -123.2672W^\vee - 94.1992H^\vee - 65.6782P^\vee + 28.7361A_T^\vee \quad (13)$$

$$S = -32.1039W^\vee - 34.6249H^\vee - 20.3935P^\vee + 6.8044A_T^\vee \quad (14)$$

#### 4. 결 론

GMA 용접기를 이용하여 bead-on-plate 용접을 수행한 후 임의의 비드형상에 대한 최적의 공정변수를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며 추가적인 실험을 통하여 이 모델들을

비교 분석하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 비드형상은 공정변수들의 변화에 따라 변화됨을 실험결과로부터 알 수 있다.
- (2) 실험결과로부터 개발한 실험식은 공정변수와 비드크기와의 상관관계를 연구할 수 있고, 비드폭과 비드높이는 상당히 정확하게 예측할 수 있었으며, 반면에 용입깊이 및 비드면적은 상당한 오차가 존재하였으며 차후에 이에 대한 연구가 계속 수행되어야 할 것으로 사료된다.
- (3) GMA 용접공정에서 최소화승법을 이용하여 임의의 비드형상에 대한 최적의 공정변수 예측 모델을 이용하여 계산한 이론값과 실험결과와 비교·분석하였다.
- (4) 위와 같은 연구결과로 산업현장에서 균일한 비드크기를 보장하기 어려운 부분에 효과적으로 제어함으로써 안정된 용접결과를 얻을 수 있는 용접의 실시간 예측 및 제어 시스템 그리고 전문가 시스템의 구성에 효과적인 판단 기초로 이용될 것으로 판단된다.

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 용접작업의 생산성을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 5. 참고문헌

1. Araya T. and Saikawa S., "Recent actives on sensing and adaptive control of arc Welding", Proceedings of the Third International Conference on Trends in Welding Research, Gatinburg, USA, 1992, pp. 833~842.
2. Drayton, P. A., "An examination of the influence of process parameters on submerged arc welding", The Welding Institute Report 1972, PE/4/72.
3. Chandel, R. S., "Mathematical modelling of gas metal arc weld features", Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes, Palm Coast, USA, 1998, pp. 109-120.
4. Kim, I. S., Basu, A. and Siores, E., "Mathematical models for control of weld bead penetration in the GMAW process", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, pp. 393~401.
5. 김인주, "신경회로망을 이용한 용접공정변수 예측에 관한 연구", 목포대 기계공학과 석사 학위논문, 1998.
6. Cook, G. E., "Feedback and adaptive control in automated arc welding system", Metal Construction, Vol. 13, No. 9, 1981, pp. 551~556.
7. McGlone, J. C. and Chadwick, D. B., "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, 80/1978/PE.
8. Doherty, J., Shinoda, T. and Weston, J., "The relationships between arc welding parameters and fillet weld geometry for MIG welding with flux cored wires", The Welding Institute Report 1978, 82/1978/PE.