

민감도 분석을 이용한 겹치기 필릿용접부 비드형상 예측에 관한 연구

정재원*, 김일수⁺, 김학형⁺⁺, 김인주⁺⁺⁺, 방홍인⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2008. 6. 18, 심사완료일 2008. 9. 26)

A Study on the Prediction of Bead Geometry for Lab Joint Fillet Welds Using Sensitivity Analysis

Jae Won Jeong*, Ill Soo Kim⁺, Hak Hyoung Kim⁺⁺, In Ju Kim⁺⁺⁺, Hong In Bang⁺⁺⁺⁺

Abstract

Arc welding process is one of the most important technologies to join metal plates. Robotic welding offers the reduced manufacturing cost sought, but its widespread use demands a means of sensing and correcting for inaccuracies in the part, the fixturing and the robot. A number of problems that need to be addressed in robotic arc welding processes include sensing, joint tracking, and lack of adequate models for process parameter prediction and quality control. Problems with parameter settings and quality control occur frequently in the GMA(Gas Metal Arc) welding process due to the large number of interactive process parameters that must be set and accurately controlled. The objectives of this paper are to realize the mapping characteristics of bead width using a sensitivity analysis and develop the neural network and multiple regression method, and finally select the most accurate model in order to control the weld quality(bead width) for fillet welding. The experimental results show that the proposed neural network estimator can predict bead width with reasonable accuracy, and guarantee the uniform weld quality.

Key Words : Fillet Welding(필릿용접), Sensitivity Analysis(민감도 분석), Process Parameter(공정 변수), Regression Analysis Method(회귀분석기법), Neural Network Model(신경회로망 모델)

* 목포대학교 대학원 기계공학과
+ 교신저자, 목포대학교 기계선박해양공학부 (ilsookim@mokpo.ac.kr)
주소: 전남 무안군 청계면 도림리 61
++ 목포대학교 대학원 기계공학과
+++ 한국생산기술연구원 전북연구센터
++++ 한국폴리텍V대학 익산캠퍼스 컴퓨터응용기계과

1. 서론

최근 조선소의 확장 및 시설투자 그리고 교량제작에 따른 자동용접의 현장적용의 필요성 때문에 필릿용접의 자동화가 상당히 진행되어 왔다. 하지만 용접부재의 다양한 형상에 의해서 혹은 원하지 않은 오차에 의하여 필릿용접부에 간격이 생기는 경우에는 이의 자동화가 거의 이루어지지 못하고 수동용접에 의존하고 있으며 간극이 큰 경우에는 직선용접의 적용성이 떨어지고 위빙 혹은 개선작업을 통한 다층용접을 수행하고 있는 실정이다. 특히 현재 생산 공정에서 가장 많이 사용되는 아크용접의 경우 요구되는 용접 품질을 얻기 위한 최적의 용접조건을 도출하려는 시도가 많이 있어왔다.

용접부 품질 예측을 위하여 수학적 모델 개발, 컴퓨터를 이용한 비드형상 해석, 신경회로망과 퍼지이론 해석을 통해 용접공정에 직접적인 영향을 미치는 공정변수와 용접상태를 대변하는 비드형상과의 상관관계를 도출하는데 대부분의 연구가 집중되었다⁽¹⁻⁸⁾. 용접부 품질에 영향을 미치는 공정변수들과 용접상태를 대변하는 비드형상과의 상관관계를 통해 최적 용접 공정변수의 선택을 위한 수학적 모델개발 방법은 tolerance box기법⁽¹⁾, 요인설계(factorial design)⁽²⁾, 다구찌(Taguchi) 방법을 이용한 회귀분석^(3,4) 등이 있으며 이를 이용하여 용접 공정변수와 비드형상 사이의 상호관계를 정립하여 완전 자동화 로봇 용접시스템 선정에 필요한 알고리즘을 개발하였다.

최적 용접 공정변수 선택을 위한 기법 중 하나로 컴퓨터를 이용한 FEM 해석 및 실험에 기초한 용융풀의 형상 및 공정변수 제어를 위한 연구가 이루어지고 있다. 용융풀의 열유동 해석을 통하여 일정속도를 갖는 열원이 용접물 위에 존재할 때 주 정상 상태에서의 온도분포에 대한 해석⁽⁵⁾, 아크 빛을 이용한 아크 내의 열유동해석⁽⁶⁾, 전극봉 선단각과 비드형상의 상관관계 규명⁽⁷⁾, 아크에 의한 자기장 부가로 인한 용접비드 형상⁽⁸⁾해석 등을 통해 아크 내에서 발생하는 각종 용접 물리현상에 대한 이론을 정리하여 아크내의 물리적인 현상에 대한 예측 및 평가기반을 제공하였으나 실제 용접비드 형상을 예측하기에 오차가 발생하는 것이 대부분 이었다.

최근에는 인공지능 기법인 신경망을 이용하여 복잡한 시스템의 입력출력 변수 사이의 상호 관계를 모델링 하는 방법이 유용하게 사용되고 있다. 노드와 가중치로 이루어진 네트워크를 통해 입력인자(factor)를 계층적으로 처리하여 출력인자로 내놓는 방식이 광범위하게 이용되고 있다.

신경회로망을 이용하여 용접공정을 모델링하고, 비드크기를 예측⁽⁹⁾하거나 역전파 네트워크와 counter-propagation

네트워크를 연구하여 용접 공정변수와 비드형상 사이의 상관관계를 분석⁽¹⁰⁾ 하고 용접 기하 구조 특성과 용접 공정변수 사이의 비선형 관계를 인공신경망의 구조와 관련된 입력 뉴런의 수, 은닉층의 수, 출력뉴런의 수에 대해 다구찌 방법을 이용하여 오차의 요인에 둔감한 인공신경망 구조에 대하여 직교배열과 신호대 잡음비를 사용하여 수준들의 조합들 중 가장 좋은 인공신경망 구조를 선정할 수 있는 방법⁽¹¹⁾ 등이 적용되었다.

하지만, 용접소재가 불변 상태를 유지한다는 가정 하에서 모델한 관계로 실제 가공된 용접 소재의 이음 부분의 불규칙성이나 공작물의 측면변형 또는 용접공정 동안 발생하는 열 영향은 고려하지 않았다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 많은 연구와 개발이 용접품질을 높이기 위한 모니터링과 제어기법 개발에 집중되어 왔다.

본 연구는 GMA 용접 시에 비드형상에 미치는 용접인자들의 민감도 분석 및 신경회로망을 이용한 용접조건 예측모델 개발을 통하여 최적의 용접조건 선정을 위한 용접조건 예측모델을 개발하고 이를 이용하여 최적의 용접조건을 선정하는 방안을 제시하고자 한다.

2. 겹치기 필릿용접 실험

자동화 용접공정과 로봇을 이용한 용접에 관련된 많은 문제들은 모델링, 센싱 그리고 용접공정의 제어 등이 포함되며, 이 중에서 모델링은 가장 중요한 부분이다. 일반적인 모델링은 비용절감 및 응답요소의 주요 및 상호작용 효과에 관한 요구된 정보를 제공할 수 있는 요인 실험(factorial experiment) 방법을 선정하였다. 용접공정 모델링은 적절한 공정변수 선택과 공정제어와 분석이 포함된다. 본 실험은 완전한 요인시험으로 연구할 수 있는 n개의 요소를 갖는 최소한의 처리 컴비네이션과 주 영향 및 상호작용의 영향도 연구가 가능한 방법을 선정하였다. 이 실험을 통하여 선택한 공정변수들은 용접전압, 용접전류, 용접속도, CTWD(Contact Tip to Workpiece Distance), 용접각 등이며 응답요소는 비드 형상(비드폭)이다.

5개의 공정변수의 실험 레벨(level)과 한계는 관련자료 및 WPS(Welding Procedure Specification)을 기준으로 Table 1에서와 같이 2개의 레벨을 가진 각 공정변수들을 0(low), 1(high)의 2개 레벨로 분류하였다.

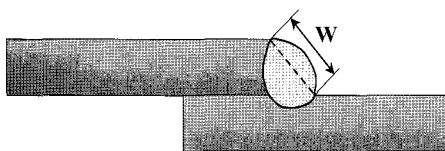
여기서 와이어 직경은 1.2mm로 고정하였다. 공정변수들은 요인 실험을 위한 매트릭스(matrix)를 만들어서 총 32회의 용접을 준비하였다. 공정변수와 비드형상의 상관관계 분석을 위한 실험의 수행을 위하여 범용 수직다관절 6축 로봇

을 선택하고, 용접시험편 가공은 휨이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 절단한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 하였다.

실험에 사용된 시험편은 150×200×4.5mm의 SS400 일반 구조용 압연강재를 선정하였으며, 화학조성과 기계적 성질은 참고하였다⁽¹²⁾. 시험편에 용접하고자 하는 표면의 녹, 스케일, 산화물 등 이물질이 용접결합의 원인이 되지 않도록 스테인리스(stainless) 와이어브러시(wire brush) 및 사포(sandpaper)로 시험편을 깨끗이 닦아냈다.

시험편을 미리 제작된 용접지그에 고정하고 요구된 공정 변수를 프로그램 유닛(program unit)을 이용하여 로봇에 입력하여 용접을 수행하였다. 용접이 완료된 시편의 비드형상의 측정을 위해 용접시험편의 가로축 중간 부분을 와이어 커팅기계(wire cutting machine)를 이용하여 절단하고 양쪽을 연삭한 후 폴리싱(polishing)하였다. 시험편의 비드 형상을 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 스테인리스(stainless) 와이어브러시 및 사포 #400, #800, #1500, #2000 순서로 시험편을 광택하고 3% HNO_3 +97% H_2O 니탈 에칭(Nital etching) 용액을 이용하여 에칭 하였다.

비드형상을 정확히 측정하기 위하여 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경으로 사진을 현상하여 스케닝 후 컴퓨터에서 좌표점을 주어 양쪽을 측정하여 평균값을 나타내었다. Fig. 1은 비드형상의 측정을 위한 모식도를 나타낸다.



W : Bead width

Fig. 1 Schematic diagram for measurement of weld bead geometry

Table 1 Welding parameters and limits

Parameter	Symbol	Unit	Limits
Arc voltage	V	Volt	17, 19
Welding current	I	Amp.	100, 130
Welding speed	S	cm/min	45, 50
CTWD	C	mm	12, 20
Welding angle	A	°	50, 70

3. 결과 및 고찰

3.1 수학적 모델 개발

비드폭으로부터 최적의 용접조건 선정을 위한 모델을 선정하기 위하여 실험결과를 이용하였다. 이를 위하여 임의의 비드폭에 최적의 용접조건(아크전압, 용접전류, 용접속도, CTWD, 용접각) 선정을 위한 수학적인 모델 선정은 공정변수들과 비드폭을 각각 콤비네이션 합으로 달성할 수 있다.

먼저 각각 용접변수의 중요성을 평가하고, 용접변수들 사이에 어떤 상호영향이 있는지를 검사하기 위하여 각각의 상수에 용접변수 영향을 평가하는 시차분석(ANOVA)을 이용하였으며, 다중회귀(multiple regressions) 상관관계와 피셔의 비(Fisher's ratio) 1% 레벨모델의 중요성을 분석하기 위하여 이용하였다. 실험결과를 이용하여 비드폭을 예측하고, 입력계수들과 비드폭 사이의 상호관계를 조사하기 위하여 직선방정식과 곡선방정식을 실험결과로부터 다중회귀분석(multiple regression analysis) 방법을 이용하여 선정하였다. 이 방정식을 개발하기 위하여 통계 컴퓨터 프로그램 SPSS를 이용하였으며, 용접공정 변수에 해당하는 상수 값들을 얻을 수 있었다.

실험 결과값을 이용하여 비드폭을 계산할 수 있는 직선 및 곡선방정식을 개발하였으며 다음과 같다.

직선방정식 :

$$W = 3.494 + 0.172V + 0.016I - 0.075S - 0.027C + 0.009A \quad (1)$$

곡선방정식 :

$$W = 10^{0.275} \cdot V^{0.606} \cdot I^{0.365} \cdot S^{-0.706} \cdot C^{-0.085} \cdot A^{0.111} \quad (2)$$

선정된 수학적 방정식의 정확성을 비교·분석하기 위하여 분산분석(variance technique)을 이용하였으며, Table 2는 위에서 선정된 방정식들의 산출표준오차(standard error of estimate), 복합상관계수(coefficient of multiple correlation) 그리고 결정계수(coefficient of determination)를 나타낸다.

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

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
1	0.116	0.958	91.8 (%)
2	0.118	0.960	92.2 (%)

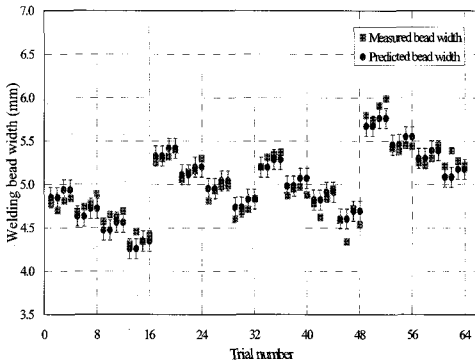


Fig. 2 Comparison between measured and calculated for bead width using linear equation

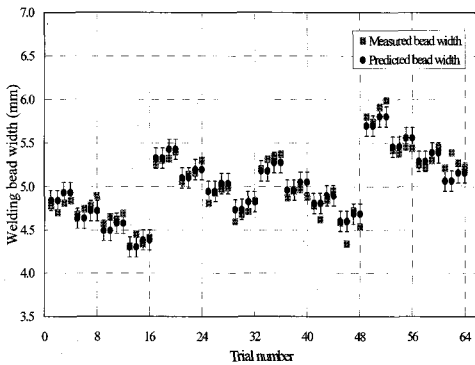


Fig. 3 Comparison between measured and calculated for bead width using curvilinear equation

곡선방정식 (2)의 복합상관계수는 직선방정식 (1)의 복합상관계수 보다 높다는 것은 Table 2로부터 알 수 있다. 또한 Figs. 2~3은 실험으로 측정된 값과 선정된 직선 및 곡선방정식을 이용하여 계산 값을 산란그래프(scatter graph)로 나타내고, 선형회귀 방법을 이용하여 플롯 점들의 최적의 선을 표시하였다.

Table 2와 Figs. 2~3에 따르면 선정된 직선 및 곡선의 방정식을 이용하여 계산된 값이 잘 수렴함을 알 수 있었다.

3.2 비드형상에 대한 용접인자들의 민감도 분석

이와 같은 비드폭에 대한 민감도 방정식은 개발된 곡선방정식을 각각의 공정변수(아크전압, 용접전류, 용접속도, CTWD, 용접각)에 대해 편미분함으로써 구할 수 있다. 민감도 방정식을 각각의 공정변수의 비드형상에 미치는 영향을 평가하는데

Sensitivity of arc voltage for weld bead width at CTWD=16mm, welding angle=60°, welding speed=48cm/min

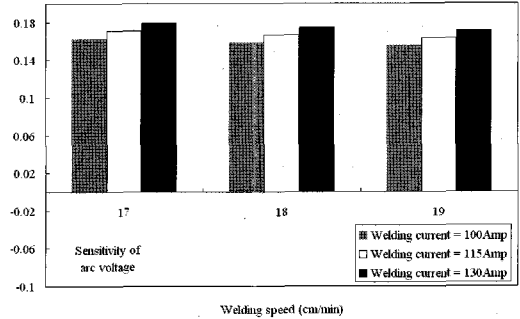


Fig. 4 Sensitivity analysis results of arc voltage in bead width

Sensitivity of welding current for weld bead width at CTWD=16mm, welding angle=60°, welding speed=48cm/min

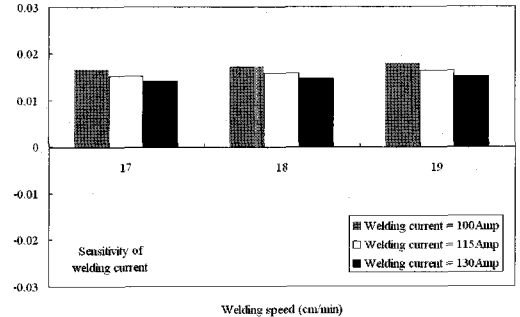


Fig. 5 Sensitivity analysis results of welding current in bead width

사용하였다. 개발된 민감도 방정식을 이용하여 각 공정변수가 비드폭에 미치는 영향을 평가하기 위하여 아크전압과 용접전류에 비하여 작은 영향을 미치는 CTWD는 16mm, 용접각은 60° 용접속도는 48cm/min로 고정한 상태에서 용접전류는 100~130A, 아크전압은 17~19V로 변화시키면서 비드폭에 대한 민감도를 분석하였다.

Figs. 4-8은 공정변수에 대한 비드폭의 민감도 분석결과를 나타낸다. Fig. 4는 아크전압에 대한 비드폭의 민감도로써 아크전압이 증가함에 따라 비드폭이 증가하게 되며, 그 증가의 폭이 공정변수 중에서 가장 크다. 따라서 비드폭을 제어할 때 아크전압을 변화시키는 것이 더욱 유용하게 사용될 수 있다는 것을 확인 할 수 있다. 용접전류에 대한 비드폭의 민감도로써 용접전류가 증가함에 따라 비드폭이 증가함을 Fig. 5에 보이고 있다. 용접전류의 영향은 저전류에서 그

Sensitivity of welding speed for weld bead width at CTWD=16mm, welding angle=60°, welding speed=48cm/min

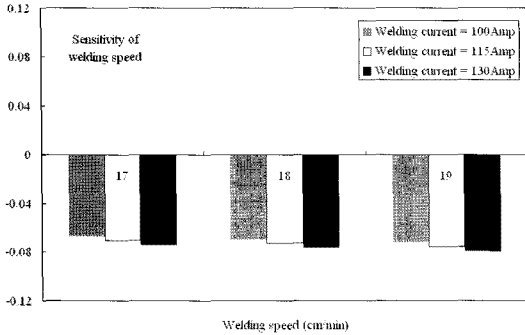


Fig. 6 Sensitivity analysis results of welding speed in bead width

Sensitivity of CTWD for weld bead width at CTWD=16mm, welding angle=60°, welding speed=48cm/min

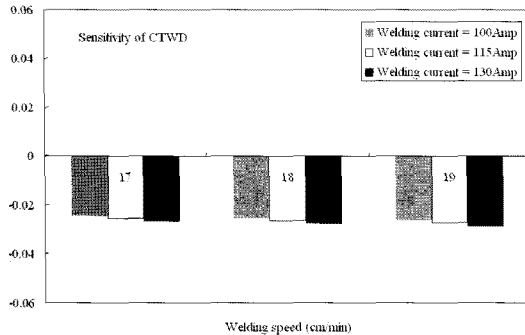


Fig. 7 Sensitivity analysis results of CTWD in bead width

Sensitivity of welding angle for weld bead width at CTWD=16mm, welding angle=60°, welding speed=48cm/min

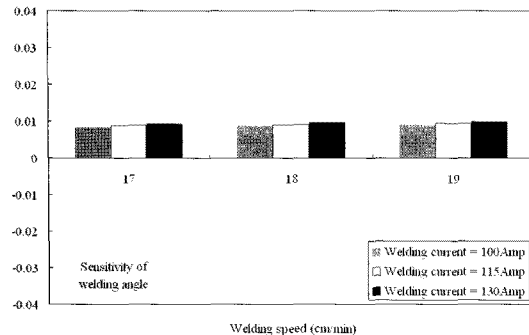


Fig. 8 Sensitivity analysis results of welding angle in bead width

영향이 크게 나타난다. Fig. 6은 용접속도에 대한 비드폭의 민감도로써 용접속도가 증가함에 따라 비드폭이 감소함을 알 수 있다. CTWD에 대한 비드폭의 민감도로써 CTWD가 증가함에 따라 비드폭이 증가함을 Fig. 7에 나타낸다. 하지만 CTWD의 증가량이 미소하여 비드폭을 제어할 때 공정변수로써 가치가 없다. Fig. 8은 용접각에 대한 비드폭의 민감도로써 용접각이 증가함에 따라 비드폭이 증가하게 되며, CTWD 다음으로 그 영향이 크게 나타나고 있다.

3.3 신경회로망 적용 모델

비드폭을 예측하기 위하여 신경회로망을 이용하였으며, 구체적인 신경회로망에 관한 이론은 참고문헌에 나타나 있다⁽¹³⁾. 비드폭 예측에 보다 우수한 성능을 보이는 신경회로망을 선정하기 위하여 LM(Levenberg-Marquardt) 알고리즘을 적용하여 비드폭을 예측하였다. 각각의 신경회로망 학습에 사용된 데이터는 실험에서 획득한 32개 조건에 대한

Table 3 Training condition for each neural network LM algorithm

Neural network	Training condition	
	Number of neurons	Bead width
MLP (LM)		10
	- Activation function : Tangential sigmoid function	
	- Goal error : 12E-06 - Iteration : 500	

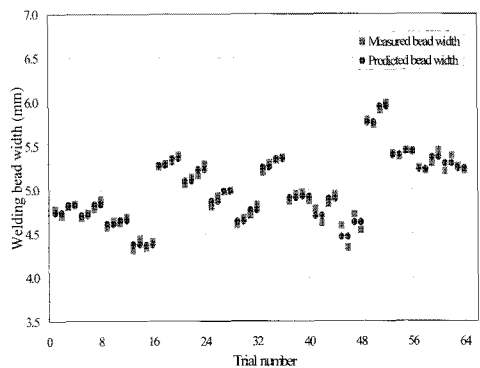


Fig. 9 Comparison of measured and predicted bead width using a neural network

64개의 데이터를 이용하였으며, LM 신경회로망은 Table 3과 같은 학습조건으로 학습이 이루어졌다.

인공 신경회로망을 이용하여 비드폭을 비교·분석하기 위하여 인공 신경회로망 시스템을 이용, 예측한 값과 실험에서 측정된 결과를 비교한 것을 Fig. 9에 나타내었으며, 예측값과 측정값이 비교적 잘 일치함을 확인 할 수 있었다. 5개의 공정변수와 비드형상을 각각 입력변수와 출력변수로 하는 겹치기 필릿용접 공정 조건에서 64개의 실제 실험값과 신경회로망 LM 알고리즘으로 예측한 값이 잘 일치함을 알 수 있었다.

앞서 개발한 직선방정식, 곡선방정식 그리고 신경회로망 모델의 신뢰도를 검토하기 위해 추가실험을 수행하였다. 실험에 사용된 입력조건은 Table 4와 같으며 앞서 진행된 실

험절차와 동일한 과정으로 비드폭의 형상을 계측하였다. 선정된 직선방정식, 곡선방정식 그리고 신경회로망 모델을 이용하여 예측한 값과 실험값을 비교·분석한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서와 같이 개발된 모델을 이용한 예측은 평균 0.1mm정도의 오차가 발생하였으며, 이는 용접 중 발생하는 외란의 영향을 실질적으로 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 10에 따르면 신경회로망 모델은 비교적 잘 수렴하지만 직선 및 곡선방정식을 이용하여 예측한 값은 상당한 오차가 존재함을 확인할 수 있었고, 비드형상 예측에 가장 적합한 모델은 신경회로망 모델임을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 겹치기 필릿용접에서 공정변수와 비드폭과 상관관계를 통해 최적의 공정변수 예측시스템을 개발하였고 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

- (1) 자동용접에 따른 겹치기 필릿용접에 대한 비드형상(비드폭)은 용접전류, 아크전압, 용접속도, CTWD 그리고 용접각을 예측하는데 충분함을 확인하였다
- (2) 공정변수와 비드폭의 상관관계 분석을 위해 개발한 직선방정식과 곡선방정식은 비록 오차가 존재하지만 개발된 모든 방정식이 공정변수 예측에 적용이 가능할 것으로 사료된다.
- (3) 민감도 분석을 통하여 아크전압, 용접전류, 용접각이 증가하면 비드폭은 증가함을 알 수 있었다. 따라서 용접 자동화 시스템을 구축하는데 필요한 공정변수는 아크전압과 용접전류를 확인할 수 있었다.
- (4) 실험에서 획득한 데이터를 이용하여 5개의 공정변수를 입력변수로 하는 5-11-1 구조를 갖는 신경회로망 LM알고리즘을 이용하여 용접 비드형상을 예측하고, 활성함수는 tangential sigmoid 함수를 이용한 결과 실제 측정값과 LM 신경회로망으로 예측한 값이 잘 일치함을 알 수 있었다.
- (5) 개발한 직선방정식, 곡선방정식 그리고 신경회로망 모델의 신뢰도를 검토하기 위해 추가실험을 수행하였으며, 예측한 값과 실험값을 비교·분석하였다. 신경회로망 모델은 비교적 잘 수렴하지만 직선 및 곡선방정식을 이용하여 예측한 값은 상당한 오차가 존재함을 확인할 수 있었고, 비드형상 예측에 가장 적합한 모델은 신경회로망 모델임을 확인하였다.

Table 4 Additional experiment results for verifying the developed three models

Test No.	Arc voltage (Volt)	Welding current (Amp.)	Welding speed (cm/min)	CTWD (mm)	Welding angle (°)	Bead width (mm)
1	17	110	46	15	65	5.07
2			48	18	55	4.49
3		120	46	18	55	5.12
4			48	15	65	4.98
5	19	110	46	18	55	5.06
6			48	15	65	5.37
7		120	46	15	65	5.39
8			48	18	55	5.30

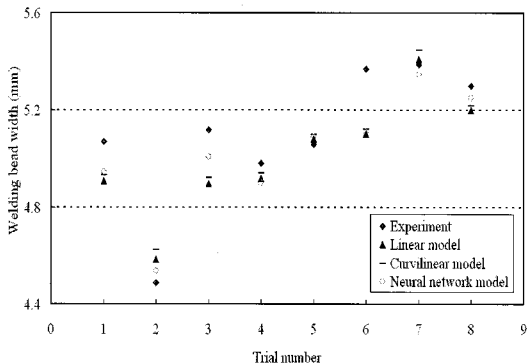


Fig. 10 Comparison between measured and calculated bead width using a neural network and multiple regressions

참고 문헌

- (1) Drayton, P. A., 1972, "An examination of the influence of process parameters on submerged arc welding," The Welding Institute Report 4/1972/PE, The Welding Institute, UK.
- (2) Chandel, R. S., 1988, "Mathematical modelling of gas metal arc weld features," *Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, pp. 109~120.
- (3) Kim, J. W., and Na, S. J. 1991, "A study on prediction of welding current in gas metal arc welding-part 1:modelling of welding current in response to change of tip-to-workpiece distance," *Proc. IMechE*, Vol. 205, pp. 59~63.
- (4) Kim, J. W. and Na, S. J., 1991, "A study on prediction of welding current in gas metal arc welding-part 2:experimental modelling of relationship between welding current and tip-to-workpiece distance and its application to weld seam tracking system," *Proc. IMechE*, Vol. 295, pp. 64~69.
- (5) Rosenthal, D., 1941, "Mathematical theory of heat distribution during welding cutting," *Welding Journal*, pp. 220~224.
- (6) Lancaster, J. F., 1984, *The physics of Welding II. DC: W. First Edition*, Institute of Physics and IOP Publishing Limited.
- (7) Key, J. F., 1980, "Anode/cathode geometry and shielding gas interrelation ship in GTAW," *Welding Journal*, Vol. 59, No. 12, pp. 364~379.
- (8) Hichen, G. K., 1996, "The effect of applied magnetic fields on welding arcs," *Welding Journal*, Vol. 45, pp. 504~524.
- (9) Cook, G. E., Andersen, K., and Barrett, R. J., 1989, "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*, pp. 891~903.
- (10) Juang, S. C., Tarng, Y. S., and Lii, H. R., 1998, "Comparison between the back-propagation and counter-propagation works in the modeling of the TIG welding process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 75, pp. 54~62.
- (11) Carpia, V., Akbay, K. S., and Rudraraju, R., 1991, "Application of neural network for compliant tool polishing operations," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 28, pp. 241~250.
- (12) Sung, B. S., Kim, I. S., Xue, Y., Kim, H. H. and Cha, Y. H. 2007, "Fuzzy regression model to predict the bead geometry in the robotic welding process," *ACTA Metallurgica Sinica*, Vol. 20, No. 6, P. 391~397.
- (13) Tarng, Y. S., Tsai, H. L., and Yeh, S. S. 1999, "Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding," *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol. 39, pp. 1427~1438.
- (14) Yoon, S. H., Kim, C. H., and Kim, J. Y., 2006, "The performance comparison of classifier Algorithm for pattern recognition of welding flaws," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 39~44.
- (15) Lee, J. I. and Koh, B. K., 2007, "A Study on Real-time control of bead height and joint tracking," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 71~78.