

GMA용접의 최적 비드 높이 예측 알고리즘 개발

김인주* · 박창언** · 김일수** · 손준식* · 안영호*** · 김동규*** · 오영생****

Development of Algorithm for Prediction of Bead Height on GMA Welding

I.J. Kim*, C.E. Park**, I.S. Kim**, J.S. Son*, Y.H. An***, D.K. Kim*** and Y.S. Oh****

Key Words : GMA(Gas Metal Arc), Bead height(비드폭), Neural network(신경회로망), Partial factorial design(부분요인시험), Hidden layer(은닉층)

Abstract

The sensors employed in the robotic are welding system must detect the changes in weld characteristics and produce the output that is in some way related to the change being detected. Such adaptive systems, which synchronise the robot arm and eyes using a primitive brain will form the basis for the development of robotic GMA(Gas Metal Arc) welding which increasingly higher levels of artificial intelligence.

The objective of this paper is to realize the mapping characteristics of bead height through learning. After learning, the neural estimation can estimate the bead height desired from the learning mapping characteristic. The design parameters of the neural network estimator(the number of hidden layers and the number of nodes in a layer) are chosen from an estimation error analysis. A series of bead of bead-on-plate GMA welding experiments was carried out in order to verify the performance of the neural network estimator. The experimental results show that the proposed neural network estimator can predict the bead height with reasonable accuracy and guarantee the uniform weld quality.

1. 서 론

1.1 연구배경

로봇GMA용접은 선박, 플랜트, 교량, 자동차, 항공기, 굴삭기 등의 산업기계 전분야를 비롯하여, 냉장고,

컴퓨터 등의 전기, 전자 제품 및 부품들에 이르기까지 거의 모든 산업분야에 광범위하게 사용되고 있다^{1,2)}. 또한 성형, 체결, 절단 등 생산기술의 모든 방법을 포함하고 있는 접합기술로서 기계, 금속, 전기, 전자, 화학분야의 지식이 모두 복합적 상호작용하고 있으므로 용접공정을 이론적으로 해석하는데 한계가 있다. 일반적으로 용접에는 높은 열과 압력이 가해지며 이로 인

* 1999년 1월 26일 접수

* 비회원, 목포대학교 공과대학 기계공학과 대학원

** 정회원, 목포대학교 공과대학 기계공학과

*** 비회원, 목포기능대학

김일수 : ilsookim@chungkye.mokpo.ac.kr

하여 재질의 변화와 변형 및 잔류응력 등이 발생하게 되어 용접부에 결함발생 원인이 된다. 따라서 이러한 문제점들을 방지하거나, 최소화하기 위한 여러가지 기술적 방법들이 연구되고 있다^{3,4)}.

GMA용접에 의해 형성된 접합부의 성능은 일반적으로 비드크기로 나타내며, 비드폭, 비드높이, 용입깊이 및 비드면적으로 구분된다. 이러한 비드크기에 영향을 미치는 공정변수들은 와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량 등이다^{5,6)}. 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 유일한 방법은 용접공정 자동화 및 로봇을 이용하여 용접공정을 전자동화 하는 것이다. 현재 이에 대한 많은 연구가 수행되어지고 있다⁷⁻⁹⁾. 하지만 용접조건의 설정, 용접봉의 위치와 방향 등은 전적으로 컴퓨터와 센서 시스템을 장착한 로봇에 의해 결정되어야 함으로 공정변수와 용접비드사이 관계 및 수학적인 모델이 자동화에 필수적인 요인으로 지적되었다.

초기의 용접자동화 방법은 용접조건을 미리 정해진 상태에서 용접작업만을 대행하는 기계식 용접기 (mechanized welder)가 있다. 이렇게 미리 정해진 용접조건이 용접중 계속유지되는 용접기는 용접중 발생할 수 있는 공정 중 외란에 대한 보상이 불가능하다. 공정 중 발생할 수 있는 외란은 기계적인 원인, 재료적인 원인, 용접기 전원과 관련된 원인들로 크게 대별될 수 있다. 기계적인 원인은 모재의 가공성의 변화와 부적절한 지그 등을 들 수 있으며, 재료적인 원인은 재료의 불순물, 사용재료의 부적절한 용접조건을 들 수 있다. 마지막으로, 용접기와 관련된 원인은 용접기의 불규칙한 변동에 기인한다. 그러므로 엄밀한 의미에서의 자동화란 것은 용접중 용접부 품질을 대변하는 변수들을 측정하여, 그에 영향을 주는 여러 외란에 의한 영향을 실시간으로 보상해주는 기능을 갖추는 것이다.

로봇아크 용접부의 품질은 차체의 외관뿐만 아니라 내구성과 안정성에 영향을 미치므로 강관의 재질과 형상에 따른 최적의 용접조건하에서 용접을 수행하여야 한다. 최적의 용접조건은 용접부의 두께 및 형상이 다양하고 적용되는 용접장비의 종류나 상태가 다르고 용접에 영향을 미치는 작업환경도 차이가 있어 제각기 달라지게 되므로 많은 양의 실험과 시행착오를 필요로 하게 된다.

공정변수와 비드형상의 관계를 수학적 모델로 개발하는 최초의 연구는 Drayton¹⁰⁾에 의하여 최초로 시작되었다. 그 이후 많은 이론적, 실험적 모델들이 개발되었다. Chandel¹¹⁾은 최초로 요인사험 실험방법을 GMA용접공정에 적용하였으며, 공정변수와 bead-

on-plate 비드형상과의 관계를 조사하였다. 이 실험 결과는 용접전류가 비드형상에 가장 큰 영향을 미치고, 실험결과로부터 개발된 수학적 모델은 정확하게 비드형상을 예측할 수 있다는 것을 입증하였다. Kim et. al.^{12,13)}은 공정변수와 비드형상 사이의 상호관계를 정립하여 완전 자동화된 로봇 용접시스템 개발에 필요한 알고리즘을 개발하였다. 최근에 수학적으로 모델링하기 어려운 분야에 신경회로망을 이용하여 접근하는 연구가 많이 행하여지고 있다. Cook et. al.¹⁴⁾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. 따라서 로봇을 이용하여 용접시 가장 중요한 요인인 비드크기에 대한 용접공정변수 예측의 연구가 대두되고 있다.

본 연구에서는 용접공정이 보다 현실적인 가정하에 제어시스템의 설계 또는 공정변수의 최적화를 달성하기 위하여 3⁵부분요인사험(partial factorial design) 방법을 이용하여 bead-on-plate 방법으로 실험을 실시하였다. 실험결과를 기초로 하여 상업용 통계 컴퓨터 프로그램인 SPSS를 이용하여 수학적 모델(직선방정식 및 곡선방정식)을 개발하고 실험식에 의하여 계산된 값과 실험결과를 비교 분석하여 최적의 공정변수를 선정하였다. 또한 백프로파게이션(backpropagation) 신경회로망 학습을 위하여 실험결과, 모델의 정확성을 향상시키기 위하여 실험결과, 미국의AWS(American Welding Society) 및 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 제공한 데이터들을 이용하여 예측기를 학습시키고 학습이 끝난 후 실제예측을 수행한다. 마지막으로 선정된 신경회로 예측기의 구조로 실제예측을 수행하여 예측성능을 평가하였다.

2. 실험방법

자동화 용접공정과 로봇을 이용한 용접에 관련된 많은 문제들은 모델링, 센싱 그리고 용접공정의 제어등이 포함되며, 이중에서 모델링은 가장 중요한 부분이다. 일반적인 모델링은 비용절감 및 응답요소의 주(main) 및 상호작용(interaction) 효과에 관한 요구된 정보를 제공할 수 있는 부분요인사험(partial factorial design)방법이 최근에 개발되어 사용되고 있으며, 본 연구에서는 위의 방법을 선정한다. 용접공정 모델링은 적절한 공정변수 선택과 공정제어와 분석이 포함된다.

본 실험디자인은 완전한 부분요인사험으로 연구할 수 있는 최소한의 처리 콤비네이션과 주 영향 및 상호 작용의 영향도 연구가 가능한 방법을 선정하였다. 이 실험을 위해 선택한 공정변수들은 와이어 직경, 용접 전류, 아크전압, 용접속도, 가스유출량 등이며 응답요소는 비드높이 나타낸다. 5개의 공정변수의 실험 level과 한계는 Table 1에 나타낸다. 실험 데이터를 보다 쉽고 기록 및 저장이 용이하기 위하여 3개의 level을 가진 각 공정변수들을 0(low), 1(intermediate)와 2(high)의 3개 level로 분류하여 matrix형태로 나타내었다. 여기서 아크전류는 와이어 직경에 크게 영향을 받으므로, 와이어 직경 0.9 mm인 경우 아크전류는 90, 190, 250 Amp이며, 반면에 직경이 1.2 및 1.6 mm인 경우 아크전류는 180, 260, 300 Amp를 선정한다.

Table 1 Welding Parameters and Limits

Parameter	Symbol	Unit	Limits
Wire diameter	D	mm	0.9, 1.2, 1.6
Gas flow rate	G	l	6, 10, 14
Welding speed	S	mm/min	250, 330, 410
Arc current	I	Amp	90, 190, 250, 180, 260, 360
Welding voltage	V	Volt	20, 25, 30,

실험을 위하여 로봇 GMA아크용접기는 목포대학교 로봇 용접실에 위치한 대우중공업의 6축 로봇(ABB1500)을 선택하고, 용접 시험편 가공은 휠이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 절단한 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 용접결함의 원인이 되지 않도록 stainless wire- brush 및 sand paper로 깨끗이 닦아낸다. 또한 보호가스는 Ar 80% + CO₂ 20%를 사용하였으며 contact tube의 선단으로부터 모재(base metal)까지의 거리 CTWD(Contact Tube Work Distance)는 20mm를 선정하였다.

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 재프로그램화하고 계속하여 용접을 수행한다. 비드높이를 측정하기 위해 용접시험편의

가로축을 중간 부분에서 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭한 후 폴리싱(polishing)한다. 비드높이를 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 광택하고 HNO₃ 3% + H₂O 97% Nital 용액을 이용하여 에칭한다. 측정은 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배울 10배의 광학 현미경 및 profile projector로 사진을 현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 비드높이를 측정한다. Fig. 1은 본 연구에서 이용될 비드높이를 나타낸다.

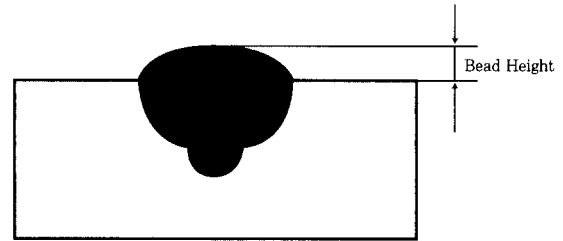


Fig. 1 Bead geometry

3. 실험결과 및 고찰

3.1 신경회로망을 이용한 비드높이 예측

일반적인 신경회로망을 이용하여 함수 근사법을 모델링하는 기법은 기본함수의 선정이 필요 없고 상관관계의 복잡성이 계산상에 영향을 주지 않으며 매우 복잡한 상관관계도 잘 표현해준다는 특징을 갖고 있다.

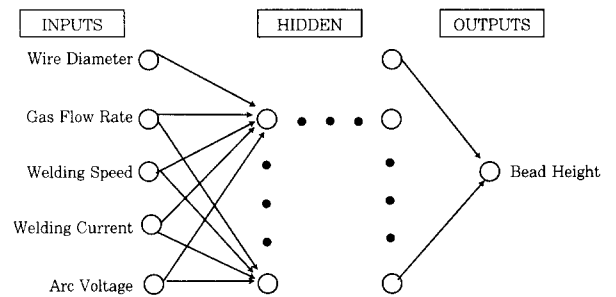


Fig. 2 The architecture of bidding neural networks

Fig. 2는 5개의 공정변수들로부터 다층신경회로망을 이용 먼저 신경회로망을 이용한 비드높이의 예측기를 실제예측에 사용하기에 앞서, 이러한 목적에 적합한 비드높이의 예측기를 구축하기 위해 신경회로망을 학습시킨다. 이는 학습법칙에 의해 신경회로망 내부의 매개변수를 조절함으로써 이루어진다. 용접물상의 5개의 공정변수들로부터 측정되고 실제로 형성된 비드높이들이 신경회로망의 출력측에 목표값(target

value) 으로 주어진다. 신경회로망의 입력으로는 5개의 공정변수들에 관한 정보가 들어간다. 이로부터 신경회로 예측기는 비드높이들의 예측값을 계산하게 된다. 이는 실제 측정된 비드높이들과 비교된다. 예측값이 실제 측정값과 차이가 있으면, 학습법칙에 의해 신경회로망 내부의 매개변수들을 조절하여 오차가 줄어들도록 학습시킨다. 학습의 초기에는 신경회로 예측기가 완전하게 구축되지 않았으므로 이들의 오차가 크다. 따라서, 학습법칙에 의해 오차가 줄어들도록 신경회로망 내부의 매개변수의 교정값이 계산되며, 이를 이용하여 매개변수는 수정되며, 새로운 매개변수에 비드높이의 예측값이 다시 계산되어 실제크기와 비교된다. 이러한 반복적인 학습에 의해, 비드높이들의 예측값과 실제 실험된 값과의 차이는 줄어들게 되며, 이들의 차이가 충분히 줄어들 때까지 계속된다. 중간층의 뉴런(neuron)수는 일반적으로 입력변수의 2배를 정하는 것이 보편적이어서 본 논문에서는 15개로 정하였다. 또한 반복횟수결정은 학습오차가 어느 정도에서 더 이상 줄어들지 않을 때까지 계속 실행하면서 결정하고, 학습율과 모멘텀은 학습과정 중에 발생하지 않는 정도에서 결정하였으며, 본 연구에서는 학습데이터로 백 프로퍼게이션(Backpropagation)을 이용하여 8000회의 반복을 거쳤다. 학습율은 0.01이고, 모멘텀은 0.85로 결정하였다.

학습이 끝나면, 신경회로망의 내부에는 5개의 공정변수들과 비드높이의 관계가 구현되고, 이는 실제 비드높이 예측에 이용된다. 선정된 신경회로 예측기 구조로 실제 용접 중 시스템으로부터 5개의 공정변수값들이 측정되면 이로부터 신경회로망을 이용하여 비드높이들은 실제예측을 수행하여 예측성능을 평가한다.

다양한 용접조건에서 행한 81회의 실험으로부터 5개의 공정변수(와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량)에 대응하는 비드높이가 측정되었다. 총 81개의 실험결과, 미국의AWS 및 영국의 TWI에서 제공한 데이터들은 신경회로 예측기의 학습 및 실험식개발에 사용되었다. 개발한 신경회로 예측기의 예측성능을 평가하기 위하여 Table 2에 나타난 것과 같이 추가로 36회 실험을 실시하였으며, 그 실험 결과는 신경회로망을 이용하여 예측한 비드높이의 예측값과 실험값을 비교, 분석하는데 사용하였다.

비드높이에 대한 신경회로망을 이용하여 계산한 예측값과 실제값들의 산란그래프를 Figs.3~4으로 나타낸다. 오차백분율의 비교에 있어서도 은닉층 1개인 경우와 2개인 경우를 보면 은닉층이 2개인 경우에는 9%의 오차 범위를 초과하지 않지만, 은닉층 1개인 경우에는 18%의 오차 범위를 가진다. 결론적으로

Fig.3, 4에 나타난 바와 같이 비드높이에 대한 예측값들은 은닉층이 1개인 경우보다 2개인 경우를 적용하는 것이 더 높은 신뢰도를 가질 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig.3에 따르면 은닉층 1개인 경우 상당히 산란한 형태의 값을 갖으며, 반면에 은닉층 2개인 경우는 은닉층 1개인 경우보다 더 정확한 형태가 나타나는 것을 Fig.3 으로부터 알 수 있다.

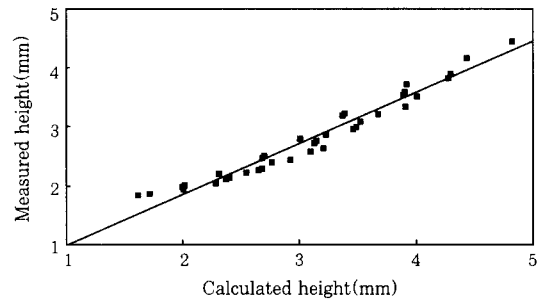


Fig. 3 Comparison of measured and calculated bead height for onehidden layer

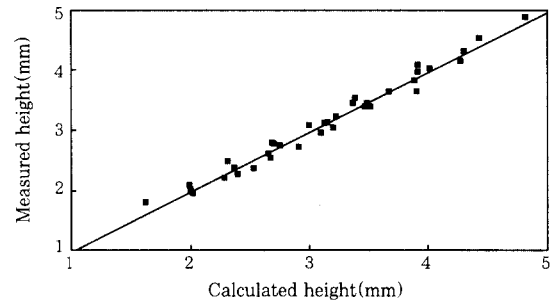


Fig. 4 Comparison of measured and calculated bead height for two hidden layer

3.2 수학적 모델 개발

비드높이를 예측하고 입력계수와 비드높이 사이의 상호관계를 조사하고 비드높이를 예측하기 위하여 5개의 공정변수를 가지고 응답변수(y)는 비드높이 다음과 같이 나타낸다:

$$y=f(DGSIV) \tag{1}$$

선형방정식은 다음과 같이 나타낸다:

$$y=d_1+d_2D+d_3G+d_4S+d_5I+d_6V \tag{2}$$

여기서 $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$ 상수이다.

Drayton¹⁰⁾은 실험 범위내에 선형관계를 가정하고, 곡선 방정식을 도입하였으며 다음과 같이 나타낸다:

$$y=b_1(D)^{b_2}(S)^{b_3}(I)^{b_5}(V)^{b_6} \tag{3}$$

Table 2 Experiment results for verification of the neural network estimator

Trial No.	Wire diameter	Gas flow rate	Welding speed	Welding current	Arc voltage	Bead height
1	0.9	6	270	140	22	3.20318
2	0.9	6	270	140	27	2.66168
3	0.9	6	370	140	22	2.68318
4	0.9	6	370	140	27	2.29168
5	0.9	10	270	220	22	4.01226
6	0.9	10	270	220	27	3.47076
7	0.9	10	370	220	22	3.49226
8	0.9	10	370	220	27	3.10076
9	0.9	14	270	300	22	4.82134
10	0.9	14	270	300	27	4.27984
11	0.9	14	370	300	22	4.30134
12	0.9	14	370	300	27	3.90984
13	1.2	6	270	140	22	2.91794
14	1.2	6	270	140	27	2.37644
15	1.2	6	370	140	22	2.39794
16	1.2	6	370	140	27	2.00644
17	1.2	10	270	220	22	3.67578
18	1.2	10	270	220	27	3.13428
19	1.2	10	370	220	22	3.15578
20	1.2	10	370	220	27	2.76428
21	1.2	14	270	300	22	4.43362
22	1.2	14	270	300	27	3.89212
23	1.2	14	370	300	22	3.91362
24	1.2	14	370	300	27	3.52212
25	1.6	6	270	140	22	2.53762
26	1.6	6	270	140	27	1.99612
27	1.6	6	370	140	22	2.01762
28	1.6	6	370	140	27	1.62612
29	1.6	10	270	220	22	3.22714
30	1.6	10	270	220	27	2.68564
31	1.6	10	370	220	22	2.70714
32	1.6	10	370	220	27	2.31564
33	1.6	14	270	300	22	3.91666
34	1.6	14	270	300	27	3.37516
35	1.6	14	370	300	22	3.39666
36	1.6	14	370	300	27	3.00516

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ 는 상수이다.

먼저 각각 공정변수의 중요성을 평가하고, 공정변수들 사이에 어떤 상호영향이 있는지를 검사하기 위하여 비드높이에 공정변수 영향을 평가하는 시차분석(ANOVA) 및 Multiple 상관계수와 Fisher's t -ratio

의 1% 레벨 모델의 중요성을 분석방법을 이용하였으며, 곡선방정식과 직선방정식을 상업용 통계 프로그램, SPSS를 이용하여 실험결과로부터 개발하였으며 다음과 같다.

직선 방정식:

$$H_T = 5.9411 - 1.1584D - 0.0288G - 0.0042S + 0.0109I - 0.0882V \quad (4)$$

곡선 방정식:

$$H_T = \frac{I^{0.7475} IO^{0.8607}}{D^{0.4092} G^{0.0844} S^{0.4327} V^{0.6649}} \quad (5)$$

개발된 직선 및 곡선방정식의 정확성을 점검 및 분석하기 위하여 분산분석(variance technique)을 이용하였다. Table 2은 위에서 표현한 모델들의 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 height

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
Linear	0.406	0.9239	85.36
Curvilinear	0.387	0.9348	87.40

이 방정식들의 복합상관계수 값은 각각 0.9239와 0.9348이다. Figs.5~6는 실험으로 측정된 값과 이론식으로부터 계산된 비드높이를 산란그래프(scatter graph)로 나타내고, 선형회귀 방법을 이용하여 플롯점들의 최적의 선을 표시하였다.

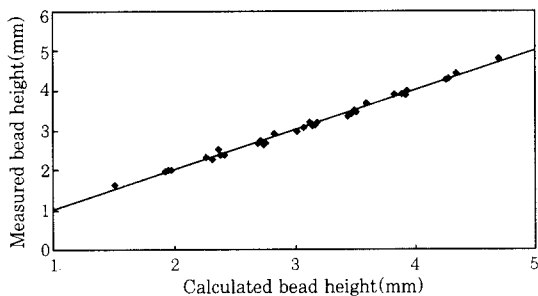


Fig. 5 Comparison of measured and calculated bead height using linear equation

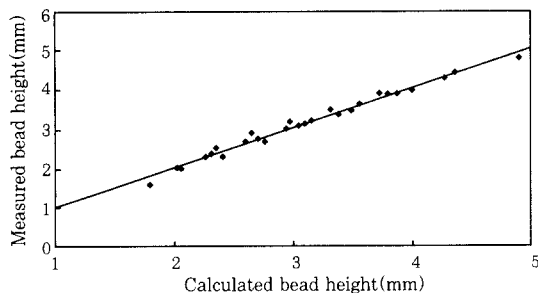


Fig. 6 Comparison of measured and calculated bead height using curvilinear equation

3.3 최적의 비드높이 예측

모델의 정확성을 평가하는 방법으로 상업용 통계프로그램인 SPSS을 이용하여 개발된 선형방정식, 곡선방정식, 및 신경회로망의 은닉층(hidden layer)을 1개나 은닉층을 2개로 했을 경우의 값을 비교하기 위하여 백분율 오차법(percentage error method)을 이용하였다. 비드높이에 대하여 계산된 백분율의 분석결과를 Fig. 7에 나타냈다. 비드높이에 대한 곡선방정식, 경우에 있어서는 상당한 신뢰성을 가지며, 특히 곡선방정식의 경우에는 오차백분율이 6%를 초과하지 않음을 알 수 있다. 하지만 은닉층이 1개인 경우에는 다른 경우와 비교하였을 경우 거의 18%까지의 상당한 오차백분율을 Fig.7에서 알 수 있다. 따라서 비드높이의 예측은 곡선방정식의 경우와 은닉층이 2개인 경우에 상당히 우수함을 알 수 있었다.

따라서 최적의 비드높이 예측은 은닉층이 2인 신경회로망의 모델과 곡선 방정식이 개발된 선형방정식 및 은닉층이 1개인 신경회로망의 모델보다 우수함을 Fig. 7로부터 알 수 있었으며 용접공정의 자동화 및 제어모델로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

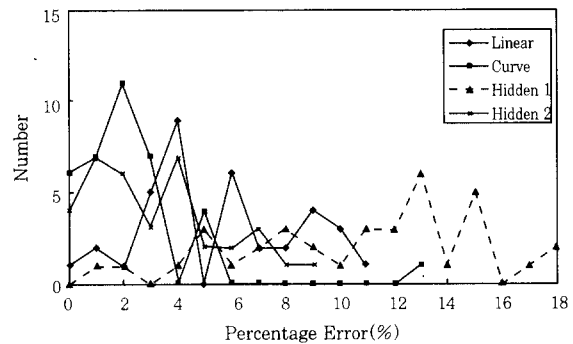


Fig. 7 Accuracy analysis for bead height

4. 결 론

GMA 용접공정에 신경회로망을 이용하여 비드높이를 예측 및 제어할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 비드높이는 5개의 공정변수(와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량) 변화에 따라 변화됨을 실험결과로부터 알 수 있었으며, 실험결과로부터 개발한 실험식은 공정변수와 비드높이의 상관관계를 연구할 수 있었고, 비드높이는 상당히 정확하게 예측할 수 있었다.

(2) GMA 용접공정에서 회기분석법과 신경회로망을 이용하여 비드높이 변화 예측값, 실험결과를 이용하여 개발한 실험식을 이용하여 계산한 이론값과 실험결과

와 비교·분석하였으며, 은익층이 2개인 신경회로망 모델이 최적의 모델인 것을 알 수 있었다.

(3) 산업현장에서 균일한 비드높이를 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.

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. 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
4. V. Ramamurti and S. Suresh, "Residual Stress Analysis in Weldments", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 38, No. 6(1991), pp. 385~391
5. 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
6. R. S. Chandel and S. R. Bala, "Effect of welding parameters and groove angle on the soundness of root beads deposited by the SAW process", Advances in Welding Science and Technology (1986), pp. 379~385
7. 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
8. R. Hecht-Nielsen, "Neurocomputing : Picking the human brain", IEEE Spectrum 25(3)(1988), pp. 2136~2141
9. 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
10. P. A. Drayton, "An examination of the influence of process parameters on submerged arc welding", The Welding Institute Report 4/1972/PE(1972)
11. 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
12. 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
13. 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
14. 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