

**研究論文**

## GMAW에서 비드형상제어에 관한 연구

이재범\* · 방용우\* · 오성원\* · 장희석\*\*

### Control of Bead Geometry in GMAW

J. B. Lee\*, Y. W. Bang\*, S. W. Oh\* and H. S. Chang\*\*

**Key Words** : 인공신경회로망 (artificial neural networks), 용접공정변수 (welding process variables), 위빙폭 (weaving stroke), 위빙속도 (weaving speed), 비드형상제어 (bead geometry control)

#### Abstract

In GMA welding processes, bead contour and penetration patterns are criterion to estimate weld quality. Bead geometry is commonly defined with width, height and depth. When weaving is taken into account, selection of welding conditions is known to be difficult. Thus, empirical or trial-and-error method are usually introduced.

This study examined the correlation of welding process variables including weaving parameters with bead geometry using artificial neural networks (ANN). The main task of the ANN estimator is to realize the mapping characteristics from the sampled welding process variables to the actual bead geometry through training. After the neural network model is constructed, welding process variables for desired bead geometry is selected by inverse model. Experimental verification of the inverse model is conducted through actual welding.

#### 1. 서 론

Gas Metal Arc Welding (GMAW)은 일반 아크용접에서 발전한 것으로 보호가스과 전류, 전압 등 용접변수를 적절하게 선택함에 따라 요구되는 품

질의 용접이 가능하고, 자동화의 편리함과 경제적 인 이점 때문에 크고 작은 많은 기계 구조물 제작에 쓰이고 있다. 용접된 부재의 단면을 보면 용접부 품질평가의 주요 기준인 비드형상 (bead geometry)을 볼 수 있는데, 이는 폭 (W:width), 높이 (H:height), 깊이 (D:depth)로 구분할 수 있다

\* 1997년 9월 20일 접수

\* 학생회원, 명지대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정회원, 명지대학교 기계공학과

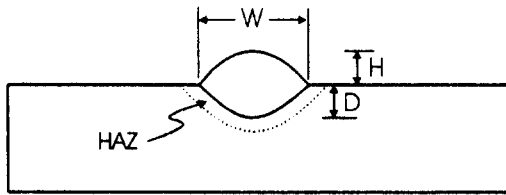
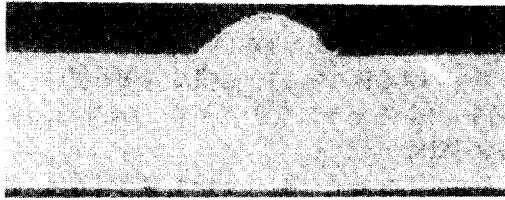


Fig. 1 Bead geometry

(그림1). 이 비드형상을 용접부에서 요구되는 기계적 성질이 만족되도록 제어함으로써 훌륭한 용접품질을 얻을 수 있으며 제품의 신뢰도를 높일 수 있다. GMA 용접을 제어하기 위한 많은 연구가 이루어 졌다. 실제 용접 작업을 행하지 않고 컴퓨터를 이용한 수치해석 방법에 의한 용융부 거동예측<sup>2)</sup>, 용접속도와 단락주파수의 관계 규명을 통한 이면비드제어<sup>4)</sup>, 용접비드형상을 수학적 모델에 의한 예측 및 용접공정변수와 용접비드 폭의 상관관계를 규명한 연구<sup>5,6)</sup>, 용접공정변수로 용접물 표면상 5점의 온도를 이용한 용융지 크기를 예측 제어하는 연구<sup>3)</sup> 등 용접공정변수와 비드형상의 상관관계를 규명하고 비드형상의 예측 및 제어를 위한 많은 연구가 수행되었다. 그런데 위빙(waving)이 수반된 경우 비드형상과 위빙폭 및 위빙속도의 함수관계를 규명한 연구는 아직 이루어지지 못하였다.

본 연구는 용접시 설정된 일련의 용접공정변수에 대응하는 비드형상을 추정하기 위해 이송속도(travel speed), 위빙폭(waving stroke), 위빙속도(waving speed)에 대한 비드형상의 상관관계를 규명하였으며, 최근 비선형 상관관계(nonlinear mapping) 규명에 성공적으로 적용되고 있는 인공신경회로망(artificial neural networks)을 이용하여, 용접공정변수와 이에 대응하는 비드 형상간의 상관관계 모델을 제시하였다. 또한 그 모델의 inverse model을 구하여 원하는 임의의 비드형상을 얻기 위한 용접조건을 선정하였다. 이렇게 선정된

용접조건으로 실제 용접을 수행하여 원하는 비드형상이 구해지는지 실험적으로 검증하였다.

## 2. 비드형상제어를 위한 인공신경회로망 모델

본 연구는 용접공정변수와 비드형상의 상관관계를 규명하는 것으로 용접공정변수는 다음과 같다. 위빙 폭(waving stroke), 위빙 속도(waving speed), 용접전류(I), 용접전압(V)을 용접공정변수로 두었다. 비드의 형상은 이 용접공정변수에 따라 변화하게 된다.

용접공정변수와 이에 대응하는 비드형상의 상관관계를 규명하는데는 인공신경회로망을 이용하였다.<sup>11,12)</sup> 본 연구에서 사용된 인공신경회로망은 범용으로 널리 사용되는 semi-linear feed forward net로서 실제 용접공정에서 실시간 측정이 불가능한 비드의 형상을 용접도중 측정된 용접공정변수를 입력패턴으로 하여 추정하는 추정기법이다. 인공신경회로망을 구성하여 운용하는 방법은 크게 학습단계와 생산단계로 나누어지는데 본 연구에서는 학습단계에서 오차가 줄어드는 방향으로 반복학습이 가능한 피이드백학습 알고리즘인 generalized delta rule을 사용하였다.

본 연구에서는 학습단계에서 실험을 통하여 얻어진 용접공정변수인 위빙 폭(Ws), 위빙 속도(Wv), 용접전류(I), 이송속도(Vs)를 입력패턴으로 하고 비드형상인 비드폭(W), 비드높이(H), 비드깊이(D)를 출력패턴으로 하여 인공신경회로망이 반복적으로 이들 사이의 관계를 오차가 줄어드는 방향으로 학습을 진행하여 모델을 구하였다. 또한 역으로 비드형상을 입력패턴으로 하고 용접공정변수를 출력패턴으로 하여 신경회로망으로 구성된 역모델을 구하였다. 이 역모델에 작업자가 원하는 비드형상(폭, 높이, 깊이)을 입력패턴으로 하여 출력패턴인 적정 용접조건을 찾게 된다. 마지막으로 이 용접조건 대로 실험하여 얻은 실측치와 원래 원하는 비드형상의 오차를 비교함으로써 모델에 근거한 비드형상의 제어성능을 검증한다. 그림 2는 비드형상을 추정하기 위한 인공신경회로망을 나타내었다.

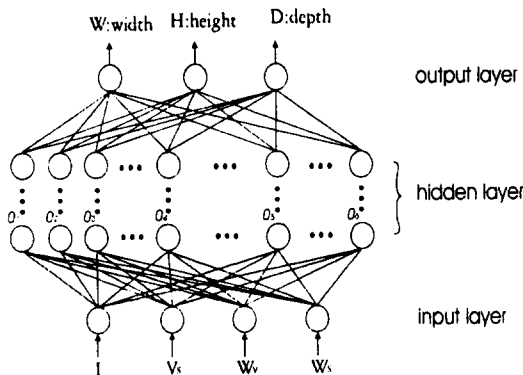


Fig. 2 Schematic diagram of neural network model for GMAW

### 3. 용접실험

본 연구에서는 Transistor Inverter 제어방식의 정격출력 DC 350A, 36V인 CO<sub>2</sub>/MAG 용접기를 사용하였으며 보호가스는 CO<sub>2</sub> 가스로 유량은 22 l/min 이었다. 콘택트 팁(contact tip)과 모재간의 거리(CTWD)는 20mm로 용접전압은 28V로 일정하게 하고, 위빙폭, 위빙속도, 이송속도, 용접전류를 변화시키며 비드용접(bead welding) 방식으로 실험하였다. 이때 용접기의 토치는 위빙 장치에 고정시켜 놓았고, 용접시편을 DC Servo Motor와 ball-screw 이송장치로 구동되는 X-Y 테이블에 설치하여 용접중 외부요인에 의한 토치의 진동을 최소화하였다. 또한 이송속도를 DC 서버 모터의 속도를 조절하여 변화시켰다.

실험용 용접재료는 직경 1.2mm의 CO<sub>2</sub> 용접용 와이어(AWS A5.18)로서 화학조성은 표 1에서 보는

Table. 1 Chemical composition (wt. %) of welding wire

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti
0.07	0.78	1.37	0.014	0.009	0.26	not detected

Table. 2 Chemical composition of specimen

Chemical Composition (%)					Mechanical properties		
C×100	Si×100	Mn×100	P×1000	S×1000	Y.P. kgf/mm <sup>2</sup>	T.S. kgf/mm <sup>2</sup>	Elong. (%)
0.19	0.15	0.30	0.03	0.03	25	44	24

바와 같다. 용접모재는 일반 구조용 압연강판(K. S. D. 3504)을 100(W)×300(L)×12mm(t) 크기로 가공하여 사용하였으며 200mm 정도 용접하였다. 표 2에는 사용한 용접모재의 성분과 기계적 성질을 나타내었다.

용접전류는 홀센서를 사용하여 측정하였다. 전 용접시간동안의 전류 파형을 메모리 오실로스코프에 저장한 뒤, 용접시작 10초 후부터 15초동안의 파형을 평균하여 용접전류값을 구하였다. 그림 3은 본 연구를 위한 실험장치의 간략도가 도시되어 있다. 위빙장치로 Bug\_O Systems사의 Speed Weaver II를 사용하여 위빙속도(Wv)와 위빙폭(Ws)을 변화시키면서 실험하였다. 그림 4에는 위빙장치로 토치에 가하는 위빙운동의 폭과 속도가 나타나 있다. 시편의 용접시작점에서 100mm, 150mm지점을 절단하여 연마한 다음 에칭(etching)을 하였다. 에칭작업을 통해 나타난 비드 형상은 SONY社의 XC-711 color CCD 카메라로 촬영하였으며 화상처리 소프트웨어를 사용하여 비드 형상의 크기를 측정하였으며 2개 데이터를 평균하여 비드크기를 구하였다.

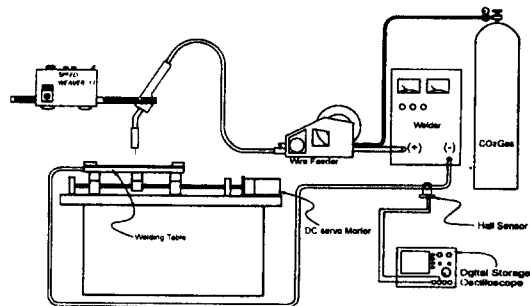


Fig. 3 Diagram of GMA welding experimental system

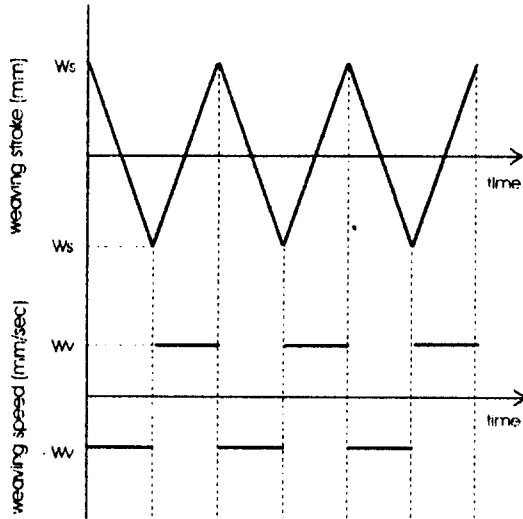


Fig. 4 Weaving stroke and speed

#### 4. 결과 및 분석

다음은 위빙을 수행하며 비드용접방식으로 용접할 때, 용접공정변수와 비드형상간의 모델을 인공신경회로망을 이용하여 구하기 위한 실험결과와 임의의 비드형상을 얻기 위한 용접조건을 역 모델로 구해서 모델을 검증하는 실험결과이다.

그림 5는 이송속도 변화에 따른 비드의 폭, 높이, 깊이의 변화를 나타낸 그래프이다. 전류는 280A, 전압은 28V, 위빙폭은 9.3mm로 고정하였으며 위빙속도를 세가지 조건으로 변화시키며 실험하였다. 이송속도가 증가할수록 폭(W), 높이(H), 깊이(D)는 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전류, 전압, 위빙폭이 일정하여 같은 시간에 모재와 wire의 녹는 양은 일정할 수 밖에 없는데, 이송속도가 증가하므로 비드형상의 크기가 감소할 수 밖에 없다.

그림 6은 위빙폭 변화에 따른 비드형상의 변화를 나타낸 그래프이다. 용접조건은 전류 250A, 전압 28V, 이송속도 302mm/min 로 고정하였으며 위빙속도는 네가지 조건으로 변화시키며 실험하였다. 비드 폭(W)은 위빙폭이 증가할수록 증가하지만, 높이(H), 깊이(D)는 위빙폭이 증가할수록 감소한다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 위빙속도 변화에 따른 비드의 폭, 높

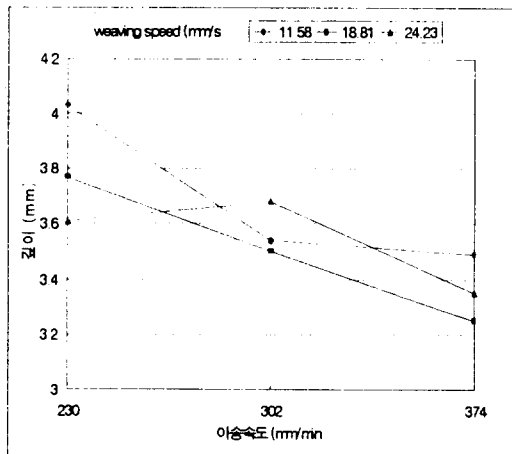
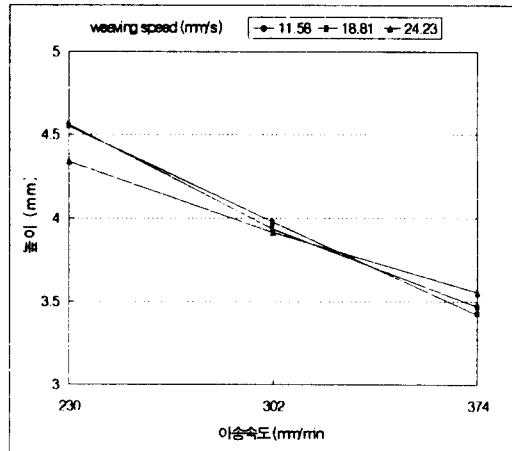
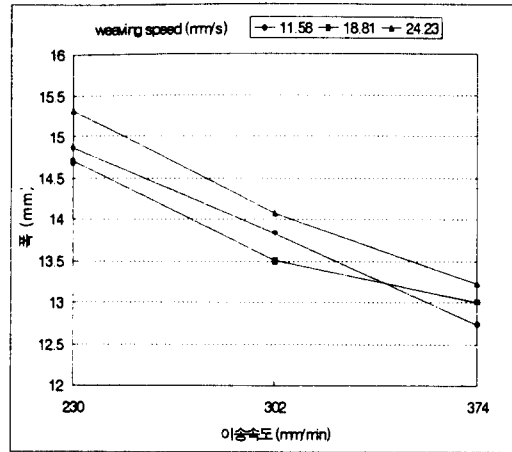


Fig. 5 Bead geometry vs. travel speed

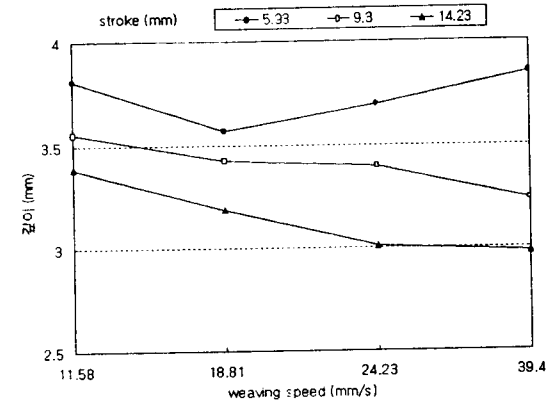
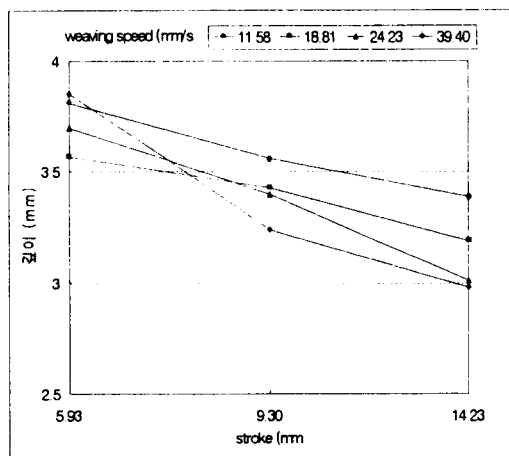
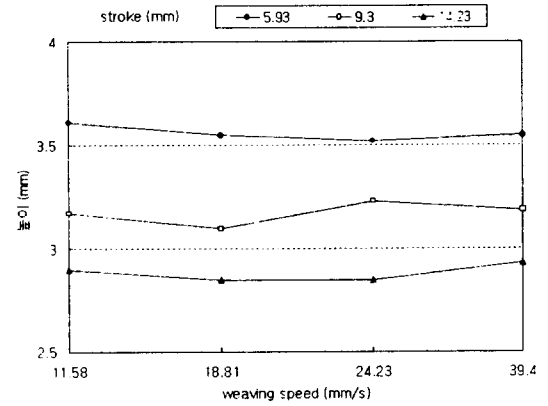
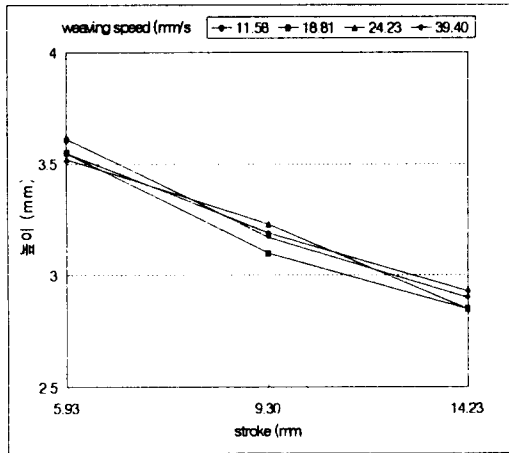
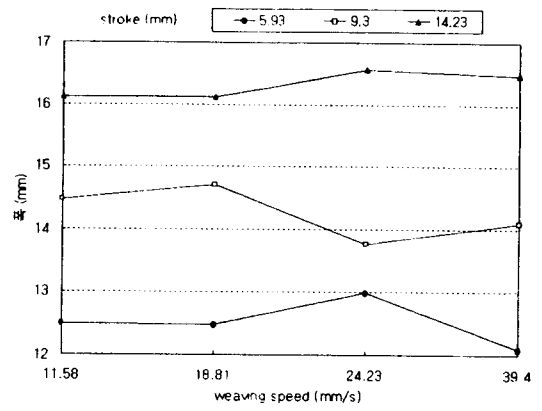
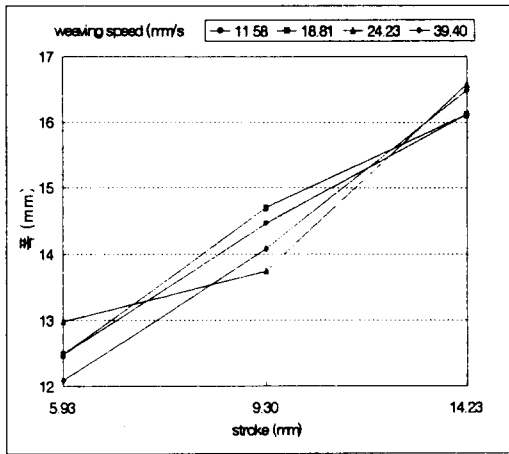


Fig. 6 Bead geometry vs. weaving stroke

Fig. 7 Bead geometry vs. weaving speed

이, 깊이의 변화를 나타낸 그래프이다. 전류는 250A, 전압은 28V, 이송속도는 302mm/min로 고정하였으며, 위빙폭을 세가지 조건으로 변화시키며 실험하였다. 그래프를 통해 알수 있듯이 위빙속도와 비드형상 사이에 선형적인 함수관계를 확인할 수 없었다.

이상의 결과에서 이송속도와 위빙폭은 비드형상과 비교적 단순한 상관관계를 보이나 위빙속도와 비드형상 사이에서는 상당히 복잡한 함수관계가 존재함을 알 수 있다. 이 함수관계를 수학적 이론으로 규명하기는 어려우므로 인공신경회로망을 도입한 결과는 다음과 같다.

그림 8, 9는 인공신경회로망을 이용하여 용접공정변수와 비드 형상사이의 상관관계를 추정하였으며 이 결과를 도시하였다. 전류, 이송속도, 위빙폭, 위빙속도를 인공신경회로망의 입력패턴으로

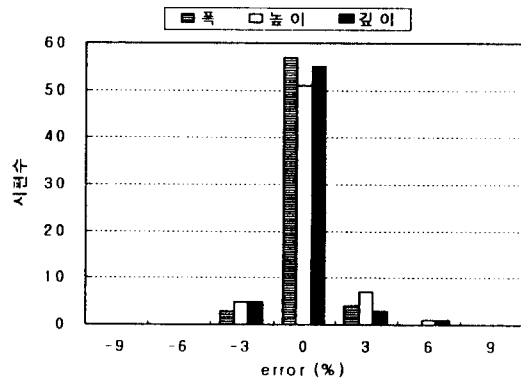


Fig. 8 Error distribution of training phase using neural network model

사용하였으며 비드폭, 높이, 깊이를 출력패턴으로 하였다. 회로망의 은닉층은 14-8로 두개를 주었다. 그림 8은 인공신경회로망을 통한 비드형상 추정오차를 나타낸 막대그래프이다. 비드 형상의 추정오차가 총 65개의 data중에서 높이, 깊이에서 2개씩을 제외하고는 4% 미만인 것을 알 수 있다. 그림 9는 비드크기의 실제 측정치와 인공신경회로망의 추정치를 비교한 분포도 그래프로 실측치와 추정치가 일치함을 알 수 있다.

그림 10은 비드형상인 폭(W), 높이(H), 깊이(D)를 회로망의 입력값으로 하고 용접공정변수를 출력값으로 인공신경회로망(역모델)을 학습시켰을 때의 오차를 나타낸 막대그래프이다. 회로망의 은닉층은 16-10으로 두 개를 주었다. 그래프를 통해서 알 수 있듯이 비드형상에 대한 오차율이 4% 미만으로 정확하게 용접조건을 추정하였다. 여기서 역모델을 구한 이유는 원하는 비드형상에 따른 용접조건을 구하여 비드형상의 제어성능을 검증하기 위해서이다. 이 역모델에 원하는 비드형상을 무작위 입력값으로 하였으며 신경망의 역모델은 각각의 용접조건을 추정하며 용접조건은 회로망의 출력값으로 나오게 된다.

그림 11은 용접공정변수의 실측치와 역모델을 이용한 추정치를 비교 도시한 분포도 그래프이며 양호한 상관도를 보여주고 있다.

그림 12, 13은 임의의 비드형상을 얻기 위한 용접조건을 역 모델로 구해서 모델을 검증하는 실험 결과이다. 그림 12에는 원하는 비드형상을 얻기 위한 용접조건을 인공신경회로망 역모델로 구한 뒤, 구해진 용접조건으로 실험을 하였으며 시편을 절

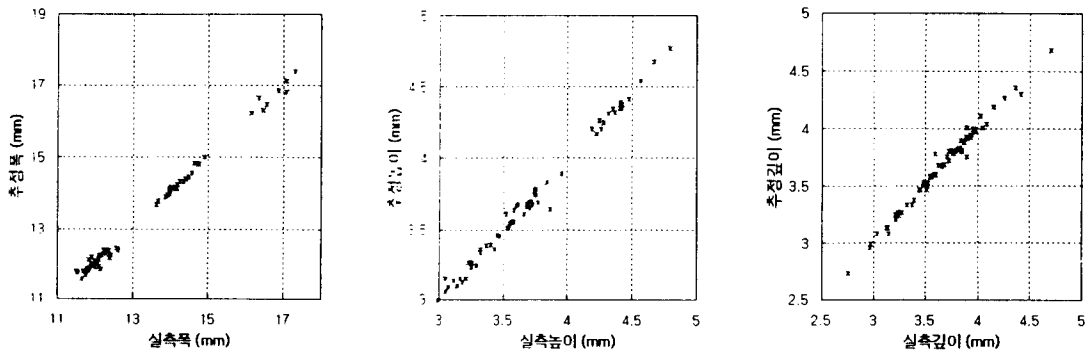


Fig. 9 Actual vs. estimated bead geometry of training phase using neural network model

단하여 실측한 비드형상과 처음 원했던 비드형상 (역모델의 입력값)의 오차를 막대그래프로 나타내었다. 그림 13에는 비드크기의 설정치(원하는 비드크기)와 실측치의 분포도 그래프가 도시되어 있다. 원했던 비드형상과 실측한 비드형상의 오차는 대부분 10%미만으로 구해졌다. 약 10%의 제어오차가 있는데 이는 위빙장치에서 위빙조건을 기계적으로 실현하는 기기의 설정 오차 및 비드형상의 측정 오차가 가장 큰 원인으로 판단된다.

현재 산업체의 용접현장에서는 용접설계시 요구된 비드형상을 구하기 위한 위빙폭 및 위빙속도를 경험적으로 설정하고 있는바 본 연구에서는 위빙이 수반되어야 하는 GMA 용접자동화 시스템에서 이송속도와 용접전류 뿐만 아니라 위빙조건을 실험적 모델에 근거하여 설정하는 기법을 제시하였다

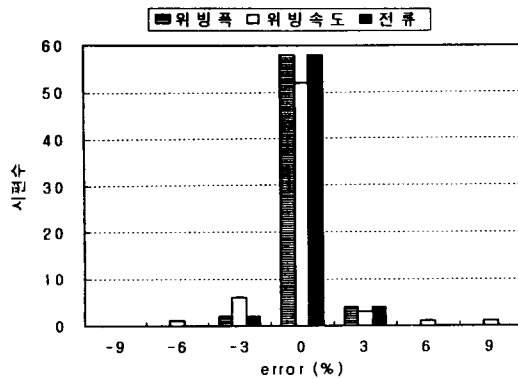


Fig. 10 Error distribution of training phase using inverse neural network model

다. 본 연구결과는 비드용접의 경우에서 도출되었으나 맞대기, 겹치기 그리고 T형 필릿용접이음의 경우에도 본 연구에서 제시한 실험적 모델을 응용할 수 있으리라 생각된다.

### 5. 결 론

위빙을 수반한 GMA 용접에서 용접공정변수와 비드형상의 관계 규명 및 인공신경회로망을 이용한 비드형상의 제어가 본 연구의 목적이며 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 용접 이송속도가 증가할수록 비드의 폭, 높이, 깊이는 감소한다는 것을 확인 할 수 있었다.

둘째, 위빙폭이 증가할수록 비드의 폭은 증가하지만, 높이, 깊이는 감소한다는 것을 알 수 있었다. 한편 위빙속도에 대하여 비드크기는 단순한 경향을 보이지 않고 위빙폭과 연관되어 복잡한 함수관계를 보였다.

셋째, 위빙을 수반한 GMA 용접에서 용접공정변수에 대한 비드형상의 모델 및 비드형상에 대한 용접공정변수의 모델을 인공신경회로망을 사용하여 구할 수 있었다.

넷째, 인공신경회로망 모델을 통해 원하는 비드형상에 대한 용접조건을 찾을 수 있었고 이를 실험적으로 검증하므로써 위빙이 수반되는 GMA용접 자동화시스템에서 비드형상을 제어할 수 있는 방법을 제시하였다.

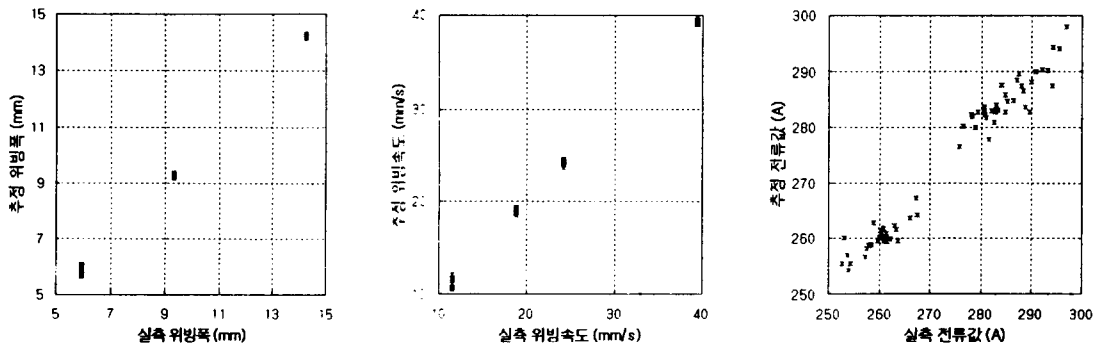


Fig. 11 Actual vs. estimated welding process variables of training phase using inverse neural network model

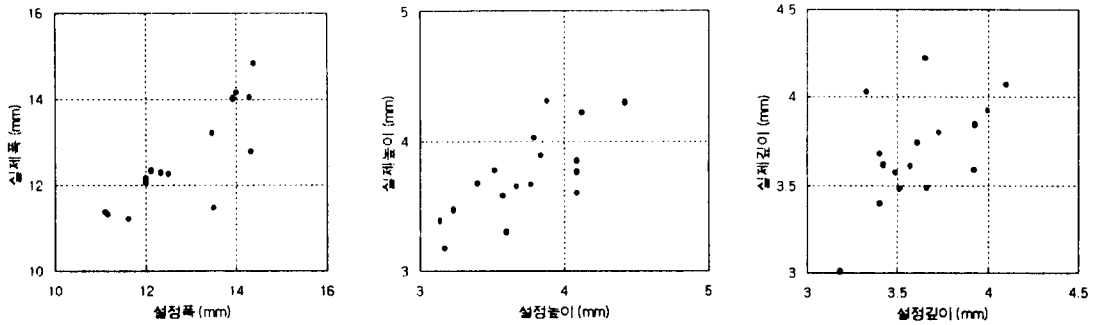


Fig. 13 Actual vs. desired bead geometry

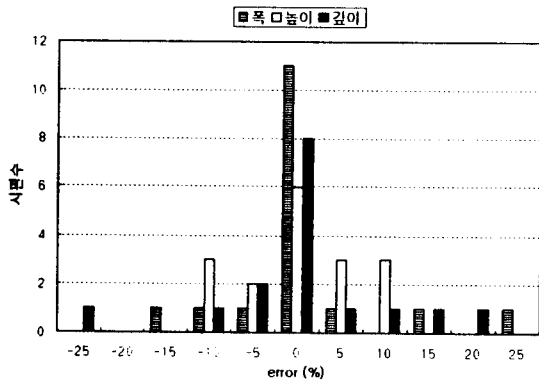


Fig. 12 Error distribution of bead geometry control by inverse neural network model

후 기

본 연구는 명지대학교 부설 산업기술연구소의 '97고내연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. AWS, "Welding Handbook", 1991, pp. 110~155
2. 김원훈, 나석주, "용접 아크 및 용융 풀의 유동을 고려한 용접부 수치 해석", 대한용접학회지 15권 1호, 1997, pp. 26~35
3. 임태균, 조형석, 부광석, "신경회로를 이용한 GMA 용접 공정에서의 용융지의 크기 제어",

- 대한용접학회지 12권 1호, 1994, pp. 59~72
4. 안재현, 김재웅, "박판 GMA 용접에서 단락 주파수를 이용한 이면비드의 제어에 관한 연구", 대한용접학회지 13권 4호, 1995, pp. 330~339
5. 김일수, 권옥현, 박창언, "GMAW 공정중 용접변수들이 용접폭에 미치는 영향에 관한 연구", 대한용접학회지 14권 4호, 1996, pp. 204~213
6. 김일수, "GMA 용접에 최적의 용접비드 형상을 예측하기 위한 수학적 모델개발", 대한용접학회지 15권 3호, 1997, pp. 250~259
7. 강봉용, 김희진, "CO<sub>2</sub> 용접의 스파터 발생에 미치는 용적이행모드의 영향", 대한용접학회지 15권 2호, 1997, pp. 140~148
8. T. Shinoda and J. Doherty, "The relationship between arc welding parameters and weld bead geometry", The Welding Institute Report 74/1978/PE
9. 경규담, 천홍정, 이정현, 강봉용, 김희진, "고용착 GMA 용접의 Arc 안정성 및 용적이행 현상에 미치는 보호 Gas의 영향", 대한용접학회지 15권 1호, 1997, pp. 64~70
10. J. Doherty, T. Shinoda and J. Weston, "The relationships between arc welding parameter and fillet weld geometry for MIG Welding with flux cored wires", The Welding Institute Report 82/1978/PE
11. Patrick K. Simpson, "Artificial neural systems", Pergamon Press, 1990, pp. 7~135
12. Mariln McCord Nelson, W. T. Illingworth, "A practical guide to neural nets", Addison - Wesley, pp. 152~196