

GMA 용접에서 비드단면형상을 예측하기 위한 실험적 모델의 개발

손준식* · 김일수* · 박창언* · 김인주** · 정호성*

*목포대학교, 기계해양시스템공학과 기계시스템전공

*한국생산기술연구원

Development of Experimental Model for Bead profile Prediction in GMA Welding

Joon-Sik Son*, Ill-Soo Kim*, Chang-Eun Park*, In-Ju Kim** and Ho-Seong Jeong*

*Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo National University, Channam, 534-729, Korea

*Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 330-820, Korea

Abstract

Generally, the use of robots in manufacturing industry has been increased during the past decade. GMA(Gas Metal Arc) welding process is an actively growing area, and many new procedures have been developed for use with high strength alloys. One of the basic requirement for the automatic welding applications is to investigate relationships between process parameters and bead geometry.

The objective of this paper is to develop a new approach involving the use of neural network and multiple regression methods in the prediction of bead geometry for GMA welding process and to develop an intelligent system that visualize bead geometry in order to employ the robotic GMA welding processes. Examples of the simulation for GMA welding process are supplied to demonstrate and verify the proposed system developed using MATLAB. The developed system could be effectively implemented not only for estimating bead geometry, but also employed to monitor and control the bead geometry in real time.

* Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received December 17, 2004)

Key Words : Bead geometry, GMA welding, Optimization, Intelligent system, Neural network, Robot

1. 서 론

최근 숙련된 용접인력의 감소, 용접사의 고령화, 용접사의 고임금, 용접부의 균일한 품질유지, 열악한 작업환경 개선 등 용접공정의 문제를 해결하기 위하여 로봇 용접용 공정변수 개발에 관심이 모아지고 있다. 지금까지의 용접공정의 연구 방향은 열전달 관계를 토대로 하여 용접 공정 모델을 개발하기 위한 많은 분석적 접근이 있었지만 대부분 정확한 방법을 제시하지 못하고 있다.

수작업으로 이루어지던 아크 용접공정은 고효율성, 고생산성 및 저비용이라는 효과를 얻기 위해 자동화되고 있다¹⁻²⁾. 자동화의 최초 형태는 1920년대 미국에서

일어났다. 이 용접 시스템은 복잡한 지그와 기계 장치를 이용해 공작물을 움직이고 대신 용접 헤드를 고정시켜 더 높은 효율성과 낮은 비용 성과를 얻고자 했다. 이 시스템은 특정한 한 가지 제조 작업을 하기 위한 용접에만 국한되어 있었다. 이후에는 컴퓨터를 이용한 다축 매니퓰레이터를 이용하는 자동 용접 장치가 개발되었다. 이로 인해 용접 변수 설정 시간이 줄어들고 더 많은 작업을 할 수 있게 되었으며 작업은 저장했다가 나중에 이용할 수 있게 되었다. 하지만 개루프 제어에 의존함으로써 작업자의 경험에 의존하여 토치 경로와 용접 공정변수(용접 전압, 토치 이동 속도, 와이어 이송률)를 선택해야만 했다.

Raveendra와 Parmar³⁾는 CO₂를 차폐 가스로 사용

한 FCW용접(flux cored arc welding)에서의 비드 형상과 비드 형태를 예측하는 수학적 모델을 제시했다. 용접 전압, 아크 전류, 용접 속도, 노즐-모재 간격, 토치 각도 등을 함수로 사용하였고 부분 계수법(fractional factorial technique)과 다중 회귀법(multiple regression technique)을 이용하여 실험을 수행하였다. 그 결과 수학적 모델이 비드 형상 예측에 효과적인 수단이며 좋은 비드 특성을 얻기 위한 제어 변수값을 예측하는데 유용하다는 사실을 보여주었다. 최근에는 인공지능기업을 이용하여 용접공정제어를 위한 모델개발에 연구가 집중되고 있다. Juang et al.⁴⁾은 역전파 네트워크와 counter-propagation 네트워크를 연구하여 용접 공정 변수와 비드 형상 특성 사이의 관계를 규정하고 counter-propagation 네트워크가 역전파 네트워크보다 TIG 용접 공정에서 학습 능력이 더 뛰어나다는 결론을 내렸다. Nagesh와 Datta⁵⁾는 신경회로망의 최적구조에 대한 연구 없이 피복아크용접(SMAW)에서의 비드 형상의 용입을 예측하는데 역전파 신경회로망을 이용했다. 이들은 신경회로망이 비드 형상의 용입을 분석하고 모델링하는 강력한 수단이라고 발표했다. 특히 Ushio⁶⁾등이 비드형상을 기존의 방법과 다른 방식으로 비드형상을 예측하여 용접공정 제어 알고리즘을 개발하였다.

로봇을 이용한 용접시 용접부의 품질은 자체의 외관뿐만 아니라 내구성과 안전성에 영향을 미치므로 용접부의 재질과 형상에 따른 최적의 용접조건하에서 용접을 수행하여야 한다. 이러한 목적을 이루기 위해서는 용접비드 형상과 공정변수들 사이의 상관관계와 최적의 용접조건을 예측할 수 있는 시스템 개발이 요구된다⁽⁷⁻⁸⁾. 이러한 시스템을 이용하여 선정된 적절한 공정변수들을 통하여 용접부에서 요구되는 최적의 용융지가 형성되며, 용접 후에 비파괴검사에서 발견되면 용접부 결함을 방지함으로써 검사와 보수에 드는 비용을 절감할 수 있다. 따라서 공정변수와 비드크기의 상관관계에 대한 연구를 통하여 임의의 비드형상에 대한 최적의 공정변수들을 예측할 수 있는 시스템 개발은 용접공정 자동화에 필수적인 요인이라 할 수 있다.

본 연구는 GMA 용접공정에서 용접 중 발생하는 여러 가지 외란의 영향을 최소화하고 최적의 비드형상을 예측할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다. 이러한 목표를 달성하기 위하여 3³요인실험(factorial design)계획법을 이용하여 비드용접(bead-on-plate)으로 실험을 실시하였다. 실험결과를 이용하여 상업용 통계프로그램(SPSS)을 이용하여 수학적 모델(선형방정식 및 비선형방정식)을 개발하고, 또한 수렴속도가 빠른

Levenberg-Marquardt backpropagation⁹⁾ 학습 알고리즘을 이용하여 신경회로망 모델을 개발하였다. 수학적 모델 및 신경회로망을 기초로 상업용 컴퓨터 프로그램인 MATLAB을 이용하여 예측된 용접비드 형상을 시각화할 수 있는 시스템을 개발하였다. 또한 추가 실험을 통해 얻은 비드형상과 개발된 예측 시스템을 이용하여 예측한 비드형상을 비교·평가함으로써 용접비드 형상 예측용 시스템의 성능을 평가하였다.

2. 실험 방법

본 실험은 3³요인실험계획법을 기초로 하여 용접이 가능한 범위 내에서 최소의 콤비네이션(combination)과 상호작용의 영향을 고려하여 실험준비를 하였다. Fig. 1은 용접품질에 중요한 영향을 미치는 입력변수와 출력변수를 나타낸다. 모델의 정확성 및 신뢰성을 향상시키기 위하여 입력변수들은 용접전류, 아크전압, 용접 속도로 하였으며, Table 1과 같은 조건으로 3³요인실험(factorial design)계획법을 이용하여 비드용접으로 27회의 실험을 실시하였다.

보호가스는 Ar 80% + CO₂ 20%를 사용하였으며, 콘택트 튜브(contact tube)의 선단으로부터 모재(base metal)까지의 거리 CTWD(Contact Tube Work Distance)는 18mm를 선정하였고, 토치각도는 90°로 하였다. 실험을 위하여 로봇 GMA아크용접기는 6축 용접로봇(ABB1400)을 선택하고, 용접 시험편 가공은 힘이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 전단한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 하였다. 실

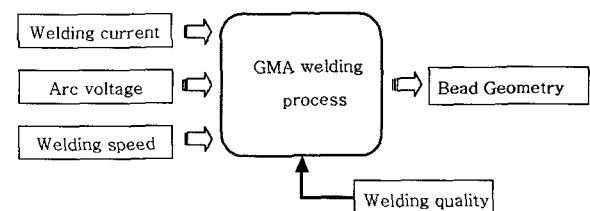


Fig. 1 Input and output parameters of the GMA welding process

Table 1 Process variables and experimental design levels used

Process parameter \ Level	0	1	2
Welding current (A)	150	180	210
Arc voltage (V)	27	28.5	30
Welding speed (cm/min)	28	33	38



Fig. 2 Macro-photograph of a sectioned bead geometry

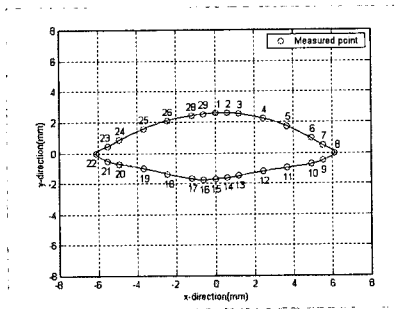


Fig. 3 Measured point in bead geometry

험에 사용한 시험편은 200×70×12mm의 SS400 일반 구조용 압연강재로서, 용접하고자 하는 평면은 표면의 녹, 스케일, 산화물 등 이물질이 용접결합의 원인이 되지 않도록 스테레스강 와이어브러시(stainless wire-brush) 및 사포(sand paper)로 깨끗이 닦아내었다.

시험편을 용접지그에 장착한 다음, 실험계획에서 선정한 공정변수를 프로그램 유닛(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시킨 후 로봇을 이용하여 용접을 실시하였다. 새로운 공정변수 값은 프로그램 유닛을 이용하여 재 프로그래밍하고 용접을 수행하였다. 비드크기를 측정하기 위해 용접시험편의 중간 부분을 가로방향으로 와이어 방전가공기(wire cutting machine)를 사용하여 자르고, 양쪽을 연삭 및 폴리싱(polishing)한 후 HNO₃ 3% + H₂O 97% Nital 용액을 이용하여 에칭하였다. Fig. 2와 같이 비드크기의 측정은 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경 및 profile projector로 사진을 현상하여, Ushio⁶⁾ 등이 비드형상을 예측하기 위하여 측정하였던 방법과 동일한 방법으로 Fig. 3과 같이 비드형상의 29개 지점의 x축과 y축 좌표를 이미지 인식프로그램(SigmaScan Pro5)을 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수학적 모델 개발

로봇 GMA용접에서 비드크기는 공정변수(용접전류, 아크전압, 용접속도)에 의하여 영향을 받는다는 것을

실험결과 및 Kim¹⁰⁾의 연구결과로부터 알 수 있었으며, 최적용접을 위한 수학적 모델개발은 비드크기와 공정변수들과의 상호관계를 수학적 관계식으로 나타냄으로 달성할 수 있다고 Kim et. al.¹¹⁻¹²⁾은 주장하였다. 따라서 응답변수(Y)는 비드형상을 표현하기 위한 29개 지점의 좌표점 중 하나이며, 다음과 같이 방정식으로 나타낸다.

$$Y = f(I, V, S) \quad (1)$$

여기서, I 는 용접 전류, V 는 용접 전압, S 는 용접속도를 나타낸다.

비드형상에 공정변수들의 영향 및 입력과 출력변수 관계를 연구하기 위하여, McGlone과 Chardwick¹³⁾은 공정변수와 비드크기를 선형관계와 비선형관계로 가정하여 선형방정식과 비선형방정식을 도입하였으며 다음과 같이 나타냈다.

선형방정식:

$$Y = b_1 + b_2I + b_3V + b_4S \quad (2)$$

비선형방정식:

$$Y = d_1I^{d_2}V^{d_3}S^{d_4} \quad (3)$$

여기서 b_1, b_2, b_3, b_4 and d_1, d_2, d_3, d_4 는 상수이다.

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 분석하였다¹⁴⁾. 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 이용하였으며, 비드형상이 양쪽으로 대칭하다는 가정하에서 15개의 수학적 모델을 개발하였다.

3.2 신경회로망 모델 개발

일반적인 신경회로망을 이용하여 함수 근사법을 모델링 하는 기법은 기본함수의 선정이 필요 없고 상관관계의 복잡성이 계산상에 영향을 주지 않으며 매우 복잡한

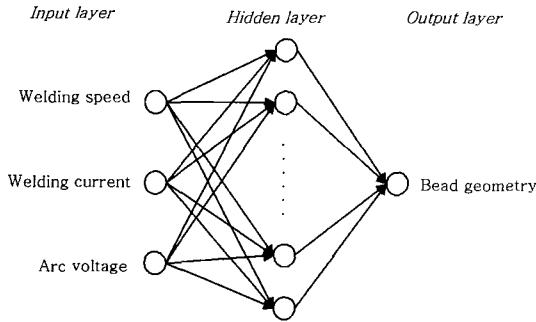


Fig. 4 The neural network used for predicting bead geometry

상관관계도 잘 표현해준다는 특징을 갖고 있다.

신경회로망을 이용하여 비드형상 예측모델을 실제에 적용 사용하기에 앞서, 이러한 목적에 적합한 비드형상 예측모델을 구축하기 위해 신경회로망을 학습시킨다. 학습시킬 신경회로망의 구조는 Fig. 4와 같은 3개의 입력변수와 1개의 출력변수를 갖고 있는 구조로 하였다. 신경회로망의 설계는 다음과 같은 단계를 거쳤다. 먼저 신경회로망의 은닉층은 보통 최적화 문제에서 1개의 은닉층(hidden-layer)만으로도 충분히 정확한 예측을 구현하므로 1개를 사용하였으며, 은닉층 뉴런의 수는 8개로 하였다. 비선형함수는 tangential sigmoid 함수를 사용하고, 입력인자는 비드형상에 가장 영향을 미치는 용접전류, 용접속도, 아크전압의 3가지 인자를 사용하였다. 또한 모든 입력인자는 다음 식으로 정규화하였다.

$$\hat{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

여기서, x 는 입력변수, x_{\max} 는 입력변수의 최대값, x_{\min} 은 입력변수의 최소값이다.

학습을 위해서는 실험에서 얻은 27개의 데이터를 사용하였으며, 신경회로망의 학습알고리즘은 수렴 속도가 매우 빠른 Levenberg-Marquart backpropagation 알고리즘을 사용하였다. 목적함수는 MSE(Mean Squared Error)를 사용하였다. 학습은 MSE가 $1e^{-8}$ 에 도달하면 종료하도록 하였으며, 최대 학습반복은 400회에서 종료하도록 설정하였다. 학습오차에 도달하지 않으며 400회 때의 가중치를 가지도록 하였다.

용접시편의 경우 용접시 외관과 측정오차가 많은 편이라 소량의 학습 데이터를 가지고 은닉층 뉴런의 수를 증가하여 수렴도를 높일 경우 오히려 오차가 증가하는 경우가 발생할 수도 있다. 따라서 보다 우수한 성능의 신경회로망 모델을 개발하기 위해서는 적절한 은닉층 뉴런의 수를 선정하여 학습함으로써 MSE가 낮으면서

Table 2 Process parameters for the additional experiment

Trial No.	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)
1	165	28	30
2	195	29	35

학습시간은 짧은 신경회로망 모델을 개발할 수 있다. 본 연구를 위하여 은닉층 뉴런의 수를 수정하며 학습하였을 때 최적의 은닉층 뉴런의 수는 6개였을 때 최적의 예측성능을 보여 예측 시스템 개발시 신경회로망 모델은 은닉층 뉴런의 수를 6개로 하였다.

3.3 개발된 모델의 성능평가

개발된 2개의 실험식 및 신경회로망 모델의 정확성을 평가하기 위하여 초기 실험범위 내에서 두 가지 조건에 대해 추가 실험을 수행하였다. Table 2은 추가 실험에 사용한 실험조건을 나타낸다. 추가 실험을 통하여 얻은 비드형상과 개발된 모델을 통하여 예측된 비드형상을 비교해 봄으로써 모델의 정확도를 평가하였다.

Fig. 5는 실험을 통하여 얻은 비드형상과 모델을 통하여 예측한 29개 지점의 비드형상 오차를 나타낸다. 개발된 3개의 모델을 통하여 예측된 데이터들은 실험에 의해 측정된 데이터와 비교하여 0.4mm 이내의 아주 작은 오차를 보여 정확한 예측이 가능함을 알 수 있었다. 예측의 정확도는 신경회로망이 가장 좋았으며, 선형방정식과 비선형방정식은 거의 유사한 오차를 발생했지만 비선형방정식이 조금 더 정확한 예측을 나타내었다. 이를 통하여 개발된 모델의 예측을 신뢰할 수 있었다. 그리고 모델의 예측에서 비드의 x-방향에 대한 예측이 비드의 y-방향보다 정확하게 예측하였는데, 이는 입력변수의 변화에 따라 비드의 x-방향이 변화가 적기 때문으로 추측된다.

3.4 비드형상 예측 시스템 구축

Fig. 6은 개발한 전체 시스템의 구성을 나타낸다. 본 프로그램은 MATLAB/SIMULINK 및 MATLAB 내의 GUI 프로그램을 이용하여 코딩하였으며, 프로그램의 구성은 공정변수를 입력받아 사용자가 예측하고자 하는 모델을 선정하면 시스템 상에서 선정된 모델을 이용하여 비드형상을 예측하고 이를 가시화 하도록 구성하였다.

Fig. 7은 시스템의 초기화면으로 용접전류, 아크전압, 용접속도를 입력받는 창으로, 이 창에서 입력된 입력변수 값을 기초로 하여 비드형상을 예측한다. Fig. 8

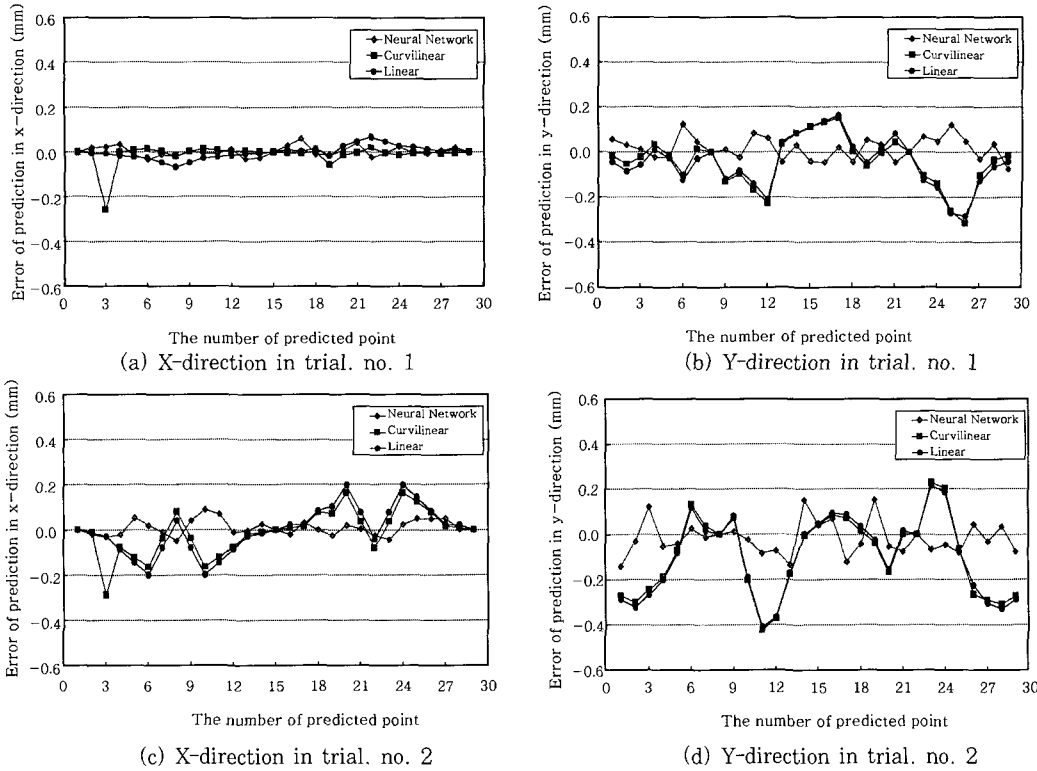


Fig. 5 Comparison of measured and calculated bead geometry using neural network and multiple regression method

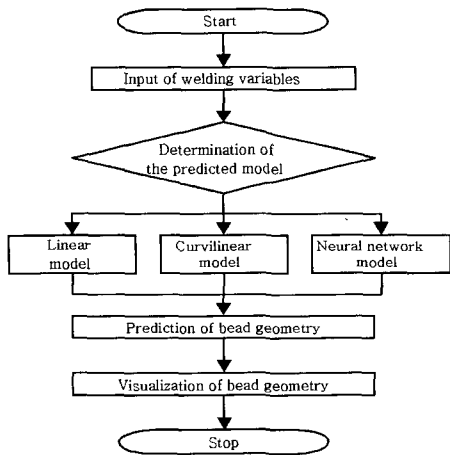


Fig. 6 Structure of the developed intelligent system

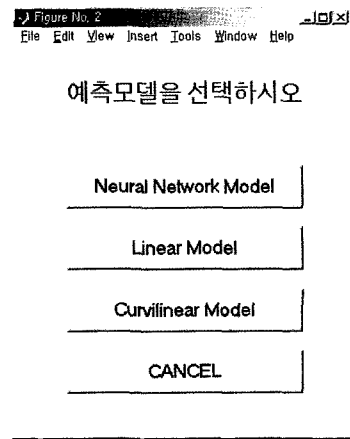


Fig. 8 Dialog Box (predictive model)

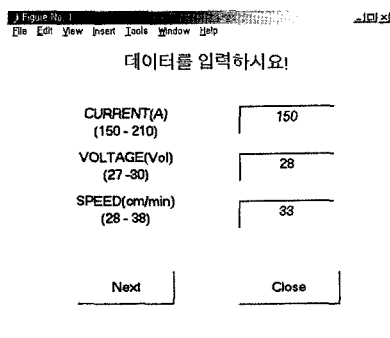


Fig. 7 Dialog Box (parameter value)

은 입력이 완료되면 생성되는 창으로 사용자가 선행방 정식, 비선형방정식, 신경회로망 모델 중에서 원하는 예측모형을 선정하게 되면 시스템은 이를 기초로 하여 비드형상을 예측하게 된다. 비드형상 가시화는 예측모델로부터 예측한 비드 각 부분을 Cubic spline을 통하여 비드형상을 실제 비드형상과 비슷하게 생성시키면 이를 새로운 창에 나타낸다. Fig. 9는 예측결과를 화면에 그림으로 나타낸 것이다.

Fig. 10은 추가 실험에 의해 얻은 비드형상과 개발된 비드형상 예측시스템을 이용하여 예측된 비드형상을

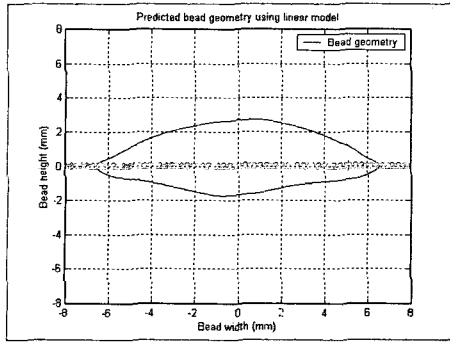
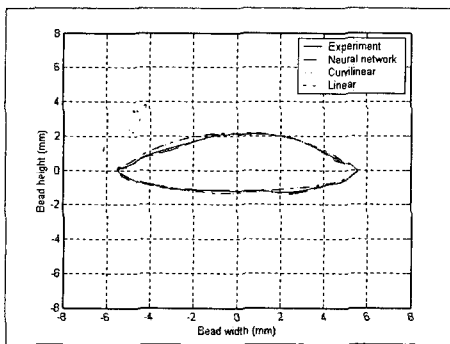
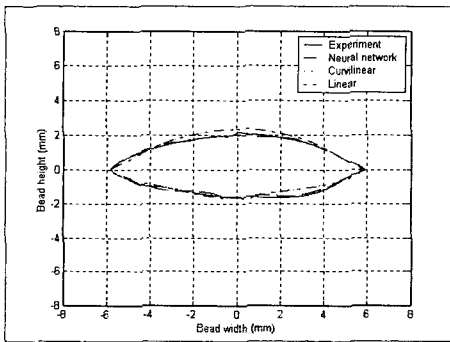


Fig. 9 Result of prediction using the developed system



(a) Trial. no. 1



(b) Trial. no. 2

Fig. 10 Comparison of measured and calculation bead geometry using the developed system

비교한 것으로 선형방정식과 비선형방정식에서는 조금의 차이를 보이고 있지만, 신경회로망 모델의 경우 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다.

본 연구를 기초로 보다 다양한 재질과 용접자세에 대한 용접실험과 데이터 획득을 통하여 용접비드 형상에 적용 시스템을 향상시킨다면 산업현장에서 균일한 비드 크기를 보장하기 어려운 부분을 효과적으로 제어함으로써 안정된 용접결과를 얻을 수 있는 가장 효과적인 수단으로 이용될 것으로 예상된다. 또한, 개발된 시스템을 이용하여 용접함으로써 용접 데이터 및 작업의 표준화, 작업자의 전문가에 대한 의존도 경감, 새로운 용접

조건 결정을 위한 실험 횟수 감소 및 기존 데이터의 공유로 용접작업에 있어서의 용접품질 향상과 생산성을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 3³요인실험계획법 및 다중회귀분석법을 이용하여 비드형상을 예측할 수 있는 선형방정식과 비선형방정식 그리고 신경회로망모델을 개발하였으며, 예측된 비드형상을 그림으로 나타낼 수 있는 프로그램을 개발하였다. 또한 개발된 모델 성능을 평가하기 위하여 추가실험을 통해 얻은 비드형상과 용접비드 형상 예측용 시스템을 통하여 예측한 비드형상을 비교하였을 때 선형방정식과 비선형방정식에서 약간의 오차가 발생하였지만 신경회로망 모델에 의해 예측된 비드형상은 거의 일치함을 알 수 있었다. 향후에 산업현장에 개발된 시스템을 적용하기 위해서는 다양한 용접자세(맞대기 또는 필릿 접합부 포함) 및 용접방법을 포함한 추가적인 실험 및 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. K. Masuchi : Analysis of Welded Structure, International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33 (1980), 1-10
2. J. F. Lancaster : Metallurgy of Welding, Third Edition, (1980), 1-5
3. J. Raveendra and R. S. Parmar : Mathematical Models to Predict Weld Bead Geometry for Flux Cored Arc Welding, Metal Construction, Vol. 19(2), (1987) 31-35
4. S. C. Juang, Y. S. Tarn and H. R. Lii : Comparison Between the Back-propagation and Counter-propagation Works in the Modeling of the TIG Welding Process, Journal of Materials Process Technology, Vol(75), (1998) 54-62
5. D. S. Nagesh and G. L. Datta : Prediction of Weld Bead Geometry and Prediction in Shield Metal-Arc Welding Using Artificial Neural Networks, Journal of Materials Process Technology, Vol. 57, (2002) 1-10
6. M. Ushio and C. S. Wu : Mathematical Modeling of Three-Dimensional Heat and Fluid Flow in a Moving Gas Metal Arc Weld Pool, Metallurgical and Materials, Vol. 28(B), (1997), 509-516
7. 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(6)**, (1990), 893-902
8. V. Ramamurti and S. Suresh : Residual Stress Analysis in Weldments, Engineering Fracture Mechanics, **Vol. 38(6)**, (1991) 385-391
 9. M. T. Hagan and M. B. Menhaj : Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm, IEEE Trans. on Neural Networks, **Vol. 5(6)**, (1994) 989-993
 10. I. S. Kim : Development of Mathematical Models for Prediction of Optimal Weld Geometry for GMA Welding, Journal of Korean Welding Society, **Vol. 15(3)**, (1997), 250-259
 11. J. W. Kim and S. J. Na : 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**, (1991), 59-63
 12. J. W. Kim and S. J. Na : 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**, (1991), 64-69
 13. 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), 80-132
 14. Jeong Ho-Seong: A Study on Development of an expert System to Predict Welding Process Parameters, MS thesis, Mokpo National University, (2004), 1-95 (in Korea)