

로봇 GMA용접에 최적의 비드폭 예측 시스템 개발에 관한 연구

김 일 수*, 박 창 언*, 정 영 재*
 김 인 주**, 손 준 식**, 이 진 필**

A Study on Development of System for Prediction of the Optimal Bead Width on Robotic GMA Welding

Ill-Soo Kim*, Chang-Eun Park*, Young-Jae Jeong*
 In-Ju Kim**, Joon-Sik Son**, Jin-Pil Lee**

Abstract

An adaptive control in the robotic GMA welding is employed to monitor information about weld characteristics and process parameters as well as to modify those parameters to hold weld quality within acceptable limits. Typical characteristics are the bead geometry, composition, microstructure, appearance, and process parameters which govern the quality of the final weld.

The main objectives of this thesis are to realize the mapping characteristics of bead width through learning. After learning, the neural estimation can estimate the bead width 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 width with reasonable accuracy and guarantee the uniform weld quality.

* 목포대학교 공과대학 기계공학과

** 목포대학교 공과대학 기계공학과 대학원

1. 서 론

로봇 GMA(Gas Metal Arc) 용접은 소모성 전극과 용접할 모재사이에 전류를 가할 때 발생하는 전기적인 아크를 열원으로 하여 모재와 전극을 녹여서 용접물을 접합하는 용접공정이다. GMA에 의해 형성된 접합부의 성능은 일반적으로 비드크기로 나타내며, 비드크기에 영향을 미치는 공정변수들은 와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량 등이다⁽¹⁻⁵⁾. 이러한 변수들의 적절한 조합에 의해 접합부에서 요구되는 용접부가 형성되며, 만일, 용융지의 결합이 용접 후에 비파괴 검사에서 발견되면 그 결합부는 보수되어야 하는데, 그 검사와 보수에 드는 비용은 전체 제조공정에 드는 비용의 상당한 부분을 차지함으로 국제 경쟁력 상실 및 생산성의 감소의 원인이 된다. 이러한 생산제품의 품질에 관련된 최적의 공정변수 예측 및 공정변수와 비드크기의 상관관계를 조사하여 용접 중 발생하는 여러 외란의 영향을 실시간 보상함으로 가능하다. 1988년 Chandel⁽⁶⁾은 최초로 이 기술을 GMA 용접공정에 적용하였으며, 공정변수와 bead-on-plate 비드형상과 관계를 조사하였다. 이 실험결과는 용접전류가 비드형상에 가장 큰 영향을 미치고, 실험결과로부터 개발된 수학적 모델은 정확하게 비드형상을 예측할 수 있다는 것을 입증하였다. 또한 Yang et al.⁽⁷⁾은 서브머지드 아크 용접방법을 이용하여 비드높이에 대한 공정변수 영향을 결정하기 위하여 실험을 하였다. 비드높이는 용접봉전극, 용접봉지름, 용접봉간격, 용접전류, 아크전압 및 용접속도에 의하여 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 마이너스 용접봉전극, 작은 용접봉지름, 용접봉간격, 높은 용접전류 및 용접속도, 낮은 용접전압은 보다 큰 비드높이를 생성한다고 주장하였다. 다중회귀 분석법을 이용하여 공정변수로부터 비드높이를 계산할 수 있도록 하였다. 최근 Liu et al.⁽⁸⁾은 Nd:Yag레이저 용접법을 이용하여 AA1100알루미늄과 AISI409스테인레스 강철의 접합력을 실험적으로 조사하였다. 와이어지름, 용입깊이, 용융비, 다공성(porosity)과 같은 레이저용접 특징에 레이저 공정변수(레이저 펄스시간과 전력밀도) 및 용접부 변수영향을 조사하였다. 실험결과로부터 비드형상이 레이저빔의 전원에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. Yang et al.⁽⁹⁾은 최초로 용접 용착면적을 연구하였으며 용착면적에 용접봉전극, 간격, 용접봉직경, 전류, 전압, 용접속도 전력원 특성 및 용제의 영향을 조사하였다. 실험의 결과는 작은지름 용접봉, 긴 용접부간격, 낮은 아크전압 및 높은 용접속도는 커다란

용융지를 형성하며, 반면에 전력원과 용제형태는 용융지 형성에 그다지 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 최근에 수학적으로 모델링하기 어려운 분야에 신경회로망을 이용하여 접근하는 연구가 많이 행하여지고 있다. Cook et al.⁽¹⁰⁾은 신경회로망을 이용하여 용접공정을 모델링하고 비드크기를 예측하는 방안을 최초로 제시하였다. 공정변수는 용접전류, 아크전압, 토치 이동속도 및 전극 선 송급속도를 신경회로망의 입력으로 사용하고, 비드크기 지수들을 신경회로망의 출력으로 하여 그 사상(mapping) 관계를 학습한 후 용융지의 크기를 예측하였다. 하지만 용접기와 관련된 변수들만 고려하고 용접 중의 외란에 의한 영향이나, 용접재료에 의한 영향 및 열역학적인 요인들을 고려하지 않았으므로 정확한 비드크기 예측평가 및 외란에 의한 영향 고려는 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 다양한 용접조건에 따라 발생하는 비드크기를 예측하고, 복잡한 공정변수와 비드크기의 관계를 신경회로 기법으로 표현하고자 한다.

본 연구에서는 용접공정을 보다 현실적인 가정하에 제어시스템의 설계 또는 공정변수의 최적화를 달성하기 위하여 3⁵ 부분요인사험(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 백프로퍼게이션(backpropagation) 신경회로망 학습을 위하여 실험결과, AWS 및 TWI등에 제공되는 데이터를 이용하여 예측기를 학습시키고 학습이 끝난 후 실제예측을 수행한다. 마지막으로 선정된 신경회로 예측기의 구조로 실제예측을 수행하여 예측성능을 평가한다.

II. 실험 방법

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 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 콤비내이션

과 주 영향 및 상호작용의 영향도 연구가 가능한 방법을 선정하였다. 이 실험을 위해 선택한 공정변수들은 와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스유출량 등이며 응답요소는 비드폭이다. 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, 360 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/min	16, 20, 24
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 휨이나 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.

시험편을 용접지그에 위치한 다음, 실험디자인에서 선정된 공정변수를 프로그램 유니트(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시킨다. 그 후 로봇을 이용하여 용접을 실시한다. 새로운 공정변수 값은 프로그램 유니트를 이용하여 재 프로그래밍하고 계속하여 용접을 수행한다. 비드폭을 측정하기 위해 용접시험편의 가로축을 중간 부분에서 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭한 후 폴리싱(polishing)한다. 비드폭을 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 광택하고 HNO₃ 3% + H₂O 97% Nital 용액을 이용하여 에칭한다. 측정은 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경 및 profile projector로 사진을

현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 비드폭을 측정한다. Fig. 1은 본 연구에서 이용될 비드폭을 나타낸다.

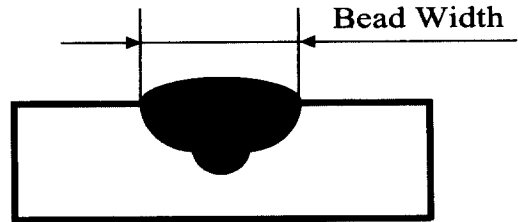


Fig. 1 Bead geometry

III. 실험결과 및 고찰

1. 신경회로망을 이용한 비드폭 예측

Fig. 2는 5개의 공정변수들로부터 다층신경회로망을 이용 먼저 신경회로망을 이용한 비드폭의 예측기를 실제 예측에 사용하기에 앞서, 이러한 목적에 적합한 비드폭의 예측기를 구축하기 위해 신경회로망을 학습시킨다. 이는 학습법칙에 의해 신경회로망 내부의 매개변수를 조절함으로써 이루어진다. 용접물상의 5개의 공정변수들로부터 측정되고 실제로 형성된 비드폭들이 신경회로망의 출력축에 목표값(target value)으로 주어진다. 신경회로망의 입력으로는 5개의 공정변수들에 관한 정보가 들어간다. 이로부터 신경회로 예측기는 비드폭들의 예측값을 계산하게 된다. 이는 실제 측정된 비드폭들과 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 비드폭의 예측값이 다시 계산되어 실제크기와 비교된다. 이러한 반복적인 학습에 의해, 비드폭들의 예측값과 실제 실험된 값과의 차이는 줄어들게 되며, 이들의 차이가 충분히 줄어들 때까지 계속된다.

학습이 끝나면, 신경회로망의 내부에는 5개의 공정변수들과 비드폭과의 관계가 구현되고, 이는 실제 비드폭 예측에 이용된다. 선정된 신경회로 예측기 구조로 실제 용접 중 시스템으로부터 5개의 공정변수 값들이 측정되면 이로부터 신경회로망을 이용하여 비드폭은 실제예측을 수

행하여 예측성능을 평가한다.

다양한 용접조건에서 행한 81회의 실험으로부터 5개의 공정변수(와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량)에 대응하는 비드폭이 측정되었다. 총 81개의 실험결과는 신경회로 예측기의 학습 및 실험식개발에 사용되었다. 개발한 신경회로 예측기의 예측성능을 평가하기 위하여 Table 2에 나타난 것과 같이 추가로 36회 실험을 실시하였으며 그 결과는 실제 비드폭의 예측값과 비교하는데 사용되었다.

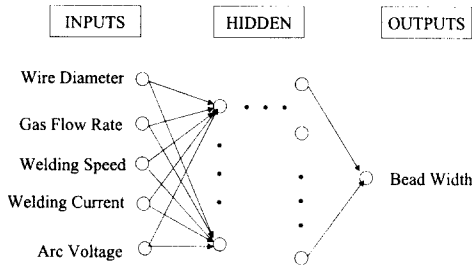


Fig. 2 The architecture of hiding neural networks

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 width
1	0.9	6	270	140	22	8.91779
2	0.9	6	270	140	27	10.64394
3	0.9	6	370	140	22	7.12779
4	0.9	6	370	140	27	8.85394
5	0.9	10	270	220	22	10.56779
6	0.9	10	270	220	27	12.49394
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	10.12779
12	0.9	14	370	300	27	12.55394
13	1.2	6	270	140	22	9.83732
14	1.2	6	270	140	27	11.78802
15	1.2	6	370	140	22	8.01732
16	1.2	6	370	140	27	9.99802
17	1.2	10	270	220	22	11.48732
18	1.2	10	270	220	27	13.63802
19	1.2	10	370	220	22	9.69732
20	1.2	10	370	220	27	11.84802
21	1.2	14	270	300	22	13.13732
22	1.2	14	270	300	27	15.48802
23	1.2	14	370	300	22	11.34732
24	1.2	14	370	300	27	13.69802
25	1.6	6	270	140	22	11.06336
26	1.6	6	270	140	27	13.31346

Trial No.	Wire diameter	Gas flow rate	Welding speed	Welding current	Arc voltage	Bead width
27	1.6	6	370	140	22	9.27336
28	1.6	6	370	140	27	11.52346
29	1.6	10	270	220	22	12.71336
30	1.6	10	270	220	27	15.16346
31	1.6	10	370	220	22	10.92336
32	1.6	10	370	220	27	13.37346
33	1.6	14	270	300	22	14.36336
34	1.6	14	270	300	27	17.01346
35	1.6	14	370	300	22	12.57336
36	1.6	14	370	300	27	15.22346

Figs. 3~4는 비드폭에 대한 Neural Network의 은닉층이 1개인 경우와 2개인 경우의 산란그래프와 오차 백분율을 나타내었다. Fig. 3은 은닉층이 1개인 경우에 있어서 실선은 실험값을 산란점들은 예측값(desired output)을 나타내며, 상당히 정확함을 알 수 있다. Fig. 4는 은닉층이 2개인 경우에 있어서 예측값을 산란그래프 형태로 나타낸 것으로 은닉층이 1개인 경우와 마찬가지로 상당한 정확성을 가짐을 나타내고 있다.

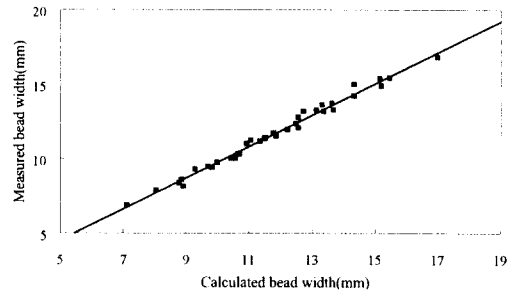


Fig. 3 Comparison of measured and calculated bead width for one hidden layer

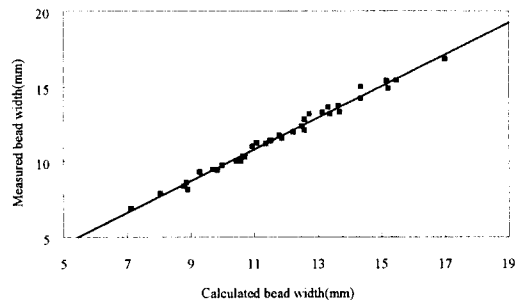


Fig. 4 Comparison of measured and calculated bead width for two hidden layer

2. 수학적 모델 개발

비드폭은 와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량에 의하여 영향을 받는다는 것을 실험결과로부터 알 수 있다. 그러므로 최적용접을 위한 수리적인 모델 개발은 주어진 품질기준의 제품을 생산하기 위한 공정 변수들을 각각 콤비네이션 함으로 달성할 수 있다. 5개의 공정변수를 가지고 응답변수(y)는 비드폭을 나타내며 다음과 같이 나타낸다:

$$y = f(D G S I V) \quad (1)$$

여기서 D 는 와이어직경, G 는 가스유출량, S 는 용접속도, I 는 용접전류, V 는 아크전압을 나타낸다.

McGlone과 Chardwick⁽¹¹⁾은 실험 범위 내에 선형 관계를 가정하고, 곡선 방정식을 도입하였으며 다음과 같이 나타냈다:

$$y = b_1(D)^{b_2}(G)^{b_3}(S)^{b_4}(I)^{b_5}(V)^{b_6} \quad (2)$$

b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 와 b_6 는 상수이다.

여기서 순서는 먼저 각각 공정변수의 중요성을 평가하고, 공정변수들 사이에 어떤 상호영향이 있는지를 검사하기 위하여 각각 비드크기에 공정변수 영향을 평가하는 시차분석(ANOVA)을 이용하였다. 두번째로 멀티플 상관계수와 Fisher's ratio의 1% 레벨 모델의 중요성을 분석하기 위하여 이용하였다.

선형방정식은 다음과 같이 나타낸다:

$$y = d_1 + d_2D + d_3G + d_4S + d_5I + d_6V \quad (3)$$

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

5개의 입력계수와 비드형상 사이의 상호작용을 연구하기 위하여 최적의 방정식 유도는 다중회귀분석(multiple regression analysis) 같은 기본적인 통계적 방법을 이용하였다. 이 분석을 위하여 평균통계 컴퓨터 프로그램 SPSS를 이용하였다.

비드폭을 예측하고 입력계수와 비드폭 사이의 상호관계를 조사하기 위하여 직선방정식과 곡선방정식을 실험결과로부터 개발하였으며 다음과 같다 :

곡선 방정식:

$$W_T = \frac{D^{0.3647} I^{0.4151} V^{0.9273}}{S^{0.4873} 10^{0.0097}} \quad (4)$$

직선 방정식:

$$W_T = -2.3053 + 3.5131D - 0.0035G - 0.0179S + 0.0213I + 0.4331V \quad (5)$$

개발된 수학적 모델의 정확성을 점검 및 분석하기 위하여 분산분석(variance technique)을 이용하였으며, Table 3은 위에서 개발한 방정식들의 산출표준오차(standard error of estimate), 복합상관계수(coefficient of multiple correlation) 그리고 결정계수(coefficient of determination)를 보여준다.

Table 3 Analysis of variance tests for mathematical models for bead width

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
4	0.712	0.9810	96.24
5	0.832	0.9697	94.04

이들 식들의 복합상관계수값은 각각 0.9697과 0.9810이다. 식 (4)의 복합상관계수는 식 (5)의 복합상관계수보다 높다는 것은 Table 3로 부터 알 수 있다. Figs. 5~6은 실험으로 측정된 값과 이론식으로부터 계산된 비드폭을 산란 그래프(scatter graph)로 나타내고, 선형회귀 방법을 이용하여 플롯 점들의 최적의 선을 표시하였다.

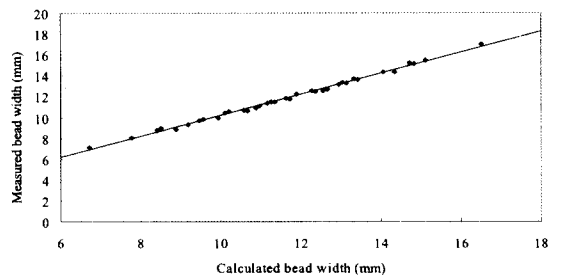


Fig. 5 Comparison of measured and calculated bead width using linear equation

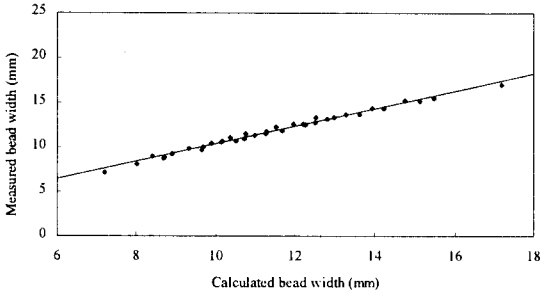


Fig. 6 Comparison of measured and calculated bead width using curvilinear equation

3. 최적의 비드폭 예측

모델의 정확성을 평가하는 방법으로 상업용 통계프로그램인 SPSS를 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. 비드폭에 대하여 계산된 백분율의 분석결과를 Fig. 7에 나타냈다. 비드폭에 대한 곡선방정식, 경우에 있어서는 상당한 신뢰성을 가지며, 특히 곡선방정식의 경우에는 오차백분율이 6%를 초과하지 아니한다. 하지만 은닉층이 1개인 경우에는 1개인 경우에는 다른 경우와 비교하였을 경우 거의 18%까지의 상당한 오차백분율을 Fig. 7에서 알 수 있다. 따라서 비드폭의 예측은 곡선방정식의 경우와 은닉층이 2개인 경우를 적용할 수 있을 것이다.

Fig. 7에서 본 바와 같이 비드폭에 있어서는 오차백분율의 범위가 작아 용접공정의 자동화 모델로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

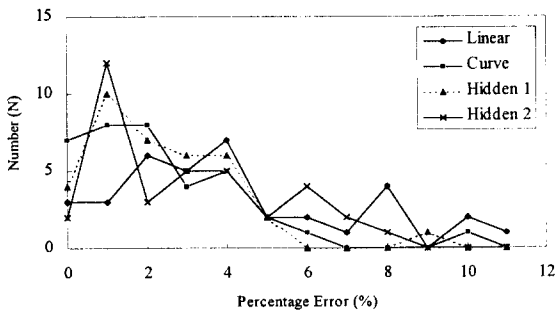


Fig. 7 Accuracy analysis for bead width

IV. 결론

GMA 용접공정에 신경회로망을 이용하여 비드폭을 예측 및 제어할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비드폭은 공정변수들의 변화에 따라 변화됨을 실험결과로부터 알 수 있다.
- (2) 5개의 공정변수(와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량)와 비드폭과의 복잡한 상관관계를 잘 표현할 수 있는 신경회로기법을 사용함으로써 잘 구현할 수 있었다.
- (3) 실험결과로부터 개발한 실험식은 공정변수와 비드폭과의 상관관계를 연구할 수 있고, 비드폭을 상당히 정확하게 예측할 수 있었다.
- (4) GMA 용접공정에서 신경회로망을 이용하여 비드폭 변화 예측값, 실험결과를 이용하여 개발한 실험식을 이용하여 계산한 이론값과 실험결과와 비교·분석하였다.
- (5) 산업현장에서 균일한 비드폭을 보장하기 어려운 부분에 효과적으로 제어 함으로써 안정된 용접결과를 얻을 수 있는 용접의 실시간 계측 및 제어 시스템 그리고 전문가 시스템의 구성에 가장 효과적인 수단으로 이용될 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. K. Masubuchi, "Analysis of Welded Structure", International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33, pp. 1~10, 1980.
2. J. F. Lancaster, "Metallurgy of Welding" Third Edition, pp. 1~5, 1980.
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, pp. 893~902, 1990.

4. V. Ramamurti and S. Suresh, "Residual Stress Analysis in Weldments", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 38, No. 6, pp. 385~391, 1991.
5. 김재열, 김영석, 김병현, 유신, 김훈조, 정진홍, "신경 회로망에 의한 용접 결함 종류의 정량적인 자동인식 시스템개발에 관한 연구", 한국공작기계기술학회지, 제6권, 제1호, pp. 27-33, 1997.
6. R. S. Chandel, "Mathematical modelling of gas metal arc weld features", Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes, Palm Coast, Florida, 17-22, April, pp. 109~120, 1988.
7. L. J. Yang, R. S. Chandel and M. J. Bibby, "The effects of process variables on the bead height of submerged-arc weld deposits", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 31, No. 4, pp. 289~297, 1992.
8. J. T. Liu, D. C. Weckman and H. W. Kerr "The effects of process variables on pulsed Nd: YAG laser spot welding: Part 1. AISI 409 stainless steel", Metallurgical Transactions, Vol. 24B, No. 12, pp. 1065~1076, 1993.
9. L. J. Yang, R. S. Chandel and M. J. Bibby, "The effects of process variables on the weld deposit area of submerged arc welds", Welding Journal, Vol. 72, No. 1, pp. 11_s~18_s, 1993.
10. G. E. Cook, "Feedback and adaptive control in automated arc welding system", Metal Construction, Vol. 13, No. 9, pp. 551~556, 1981.
11. J. C. McGlone, "The submerged arc butt welding of mild steel Part 1: The influence of procedure parameters on weld bead geometry", The Welding Institute Report 79/1978/PE, 1978.