

GMA 용접부의 비드폭 예측을 위한 수학적 모델에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Mathematical Model to Predict Bead Width in GMA Weldment

김일수^{1,✉}, 박민호¹, 김학형¹, 이종표¹, 박철균¹, 심지연²
Ill Soo Kim^{1,✉}, Min Ho Park¹, Hak Hyoung Kim¹, Jong Pyo Lee¹, Cheol Kyun Park¹, and Ji Yeon Shim²

¹ 목포대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Mokpo University)

² 한국생산기술연구원 (Korea Institute of Industrial Technology)

✉ Corresponding author: ilsookim@mokpo.ac.kr, Tel: +82-61-454-3455

Manuscript received: 2014.5.21 / Revised: 2015.1.7 / Accepted: 2015.1.16

Generally welding is one of the most important processes to have a strong influence on the quality and productivity from a manufacture-based industry such as shipbuilding, automotive and machinery. The GMA(Gas Metal Arc) welding process involves large number of interdependent welding parameters which may affect product quality, productivity and cost effectiveness. To solve such problems, mathematical models are required to select the welding parameters for GMA welding process. In this study, the GMA welding process was studied using the information generated during the welding. The statistical analysis of a generalized regression approach was conducted by the following three methods: Firstly using the mathematical model (linear regression, 2nd regression); Secondly GA(Genetic Algorithm) with intelligent models; And finally using response surface analysis of models to develop the relationships between welding parameters and bead width as welding quality.

Key Words: GMAW (가스 메탈 아크 용접), Mathematical model (수학적 모델), Regression analysis (회귀분석), Genetic algorithm (유전자 알고리즘), Response surface analysis (반응 표면 분석)

기호설명

I = Welding current

V = Arc voltage

S = Welding speed

D = Gradient angle

k_i = Coefficients for linear model

k = Parameter of measuring group

y = Output parameter

B_w = Bead width

B_{w_i} = Measured bead width

\hat{B}_{w_i} = Predicted bead width

1. 서론

용접은 통상적으로 전기 등과 같은 고에너지를 이용하여 아크를 발생시키고 모재 및 용가재를 용융시켜 접합하는 공정으로, 조선, 자동차, 기계 산업 등 부품·소재의 품질 및 생산성을 좌우하는 생산기반산업에서 매우 중요한 공정의 하나로 알려져 있다. 그러나 최근에 아크열과 아크광, 연기 및 소음 등의 열악한 작업환경으로 인해 작업자가 기피하고 있는 3D업종의 하나로 인식되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 용접공정 자동화에 대한 연구개발 및 상용화가 꾸준히 진행되어 오고 있다. 이를 통하여 생산비용을 절감하는 상업적 목적뿐만 아니라, 용접품질 및 신뢰성향상을 달성하고자 하였다.¹

일반적으로 용접품질은 모재, 용가재, 용접봉, 모재의 예열과 후열 등과 같이 용접 전후에 수행되는 용접 준비작업에 따라 달라진다. 특히 용접 중에 용접품질은 아크의 안정성과 금속이행(Metal transfer) 중에 용접전류, 아크전압, 아크길이, 보호가스, 단락주파수, 와이어 송급속도 등의 변화에 큰 영향을 받는다. 또한 용접공정 변수인 용접전류와 아크전압은 용접상태에 따라 신호파형이 변화하기 때문에 파형 균일성을 가지고 아크의 안정성 및 용접품질을 판단하고 있다. 용접품질을 용접전류와 아크전압의 파형을 이용하여 평가하는 기존의 연구들은 대부분 용접공정 변수의 평균값, 표준편차 및 단락 주파수를 사용하였다.²⁻⁷

Ludwig⁸은 용접전류 또는 아크전압의 표준편차, 단락 주파수 및 신호들의 시간에 대한 변화율의 평균값을 이용하여 용접품질을 평가하였다. Quinn⁹은 용접전류, 아크전압 및 용접저항의 평균값을 사용하여 용접품질을 평가하였으며 Adolffson¹⁰은 용접전류 및 아크전압 신호의 평균, 표준편차, 분산과 단락주파수, 단락시간 등을 분석하여 용접품질을 평가하였다.

Kang¹¹은 GMA용접의 단락이행 모드에서 용접전류와 아크전압 파형을 구성하는 인자들의 값과 스패터 발생량과의 상관관계를 분석하여 아크 안정성 판단지수를 제안하였다. 그리고 음향신호와 아크 빛 신호를 이용하여 용접품질을 평가하는 연구들이 시도되었으며, Reilly¹²은 아크의 음향신호에 신경회로망을 적용하여 용접부의 불연속점을 인식하는 알고리즘을 제안하였다.

기존의 대부분의 연구들은 용접품질 확보를 위하여 용접변수 변화량 측정 및 모니터링에 집중되었다. 최근에 측정변수와 용접품질 사이의 상관

관계를 분석하기 위해 신경회로망(Neural networks) 혹은 퍼지로지(Fuzzy logic) 등의 다양한 분석기법들이 사용되고 있다. 하지만 많은 시간과 비용이 필요하며, 복잡한 평가절차 관계로 한계를 가지고 있다. 또한 주관적인 평가방법에 치중하여 평가결과에 대한 일관성이 부족하고 정성적인 판별에만 치중하는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 용접공정의 분석에 일반적으로 널리 사용되는 분석방법을 활용하여 선형모델, 곡선모델 및 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용한 지능형 모델을 개발하고 비교·분석을 통해 그 효용성을 검토하고자 하는 방법들이 제안되고 있다.

본 연구에서는 산업현장에서 광범위하게 사용되고 있는 GMA용접법을 사용하여 용접을 실시하였다. 용접품질을 분석하기 위하여 비드폭을 출력 변수로 선정하였으며, 회귀분석을 이용하여 수학적 모델, 유전자 알고리즘을 이용한 지능형 모델과 반응표면분석을 이용한 2차 회귀모델을 개발을 통하여 용접공정 변수와 비드폭의 상관관계를 비교·분석하고자 하였다.

2. 용접데이터 수집을 위한 용접실험

2.1 용접실험 구성 및 방법

용접공정 중에 획득한 용접정보와 수집된 용접 데이터를 기반으로 용접 공정변수와 비드폭의 상관관계를 분석하기 위하여 용접실험을 실시하였다. 용접실험을 위하여 350A급 용접전원, 직선형 용접 캐리지 및 가이드레일, 와이어 송급장치로 구성되고 모재를 고정시키기 위한 틸팅 바이스(Tilting vice)를 이용하였으며, 전체시스템 구성도 Fig. 1과 같다.

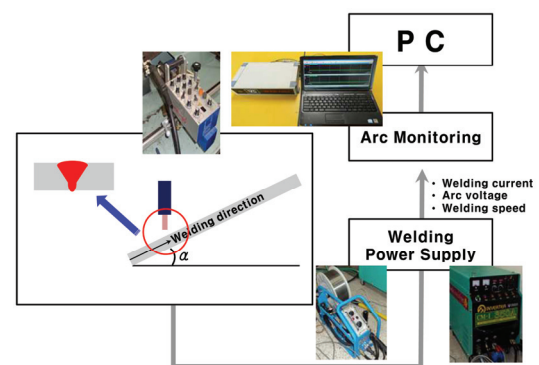


Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup using arc monitoring system

용접시편을 물리적으로 고정하고, 모재의 경사각을 조정하여 틸팅 바이스를 이용하였다. 또한 자력부착 방식의 디지털 경사계를 가이드레일 및 틸팅 바이스에 부착하여 시편 및 가이드레일의 각도 편차를 줄이도록 설정하였다. 용접전류와 아크전압은 모니터링 시스템(Weldte Q system)을 사용하여 PC를 통해 실시간(Real-time)으로 획득하도록 구성하였다.

본 실험을 위하여 용접모재는 SS400재질의 일 반구조용 압연강재를 사용하였으며, 400×200 mm의 크기로 Bead-on-plate 시험편을 제작하였다. 용접 중 변형으로 인한 용접신호 변화의 편차를 줄이고자 시험편의 두께는 16 mm로 선정하였다. 용가재의 경우, 직경 1.2 mm의 용가재를, 보호가스는 100% CO₂를 사용하였다. 실험에 사용된 용접모재의 기계적 성질 및 화학적 조성은 Tables 1~2에, 와이어 기계적 성질은 Table 3에 각각 나타내었다.

2.2 용접실험

본 연구에서 용접실험을 위한 입력변수는 용접 품질에 보편적으로 영향을 미치는 인자로 알려져 있는 용접전류, 아크전압, 용접속도로 선정하였다. 또한 용접시작점의 모재 끝단을 기준으로 용접도 치가 상진할 경우 (+)값을, 하진할 경우 (-)값이 되도록 일정한 기울기를 위하여 경사각(Gradient angle)을 입력변수로 추가하였다. 그리고 본 실험에서는 입력변수 변화에 따른 출력변수의 곡선적인 변화에도 민감하게 대응할 수 있고, 실험횟수

의 최적화를 고려하여 중심합성계획법(Central Composite Design)을 선정하였다. 수준(Level)은 중심점과 2^k요인배치법의 수준값 이외에 각 입력변수마다 측정값 (- α , α)의 값을 포함하도록 구성하였다. 따라서, 입력변수를 4로 설정할 경우에 정방점, 축점, 중심점으로 구성된 31회의 실험조건이 설정되며, 순차적으로 2회 반복실험을 실시하였다. 용접 실험 후 입력변수와 출력변수의 상관관계를 비교·분석하기 위하여, 시편을 절단, 폴리싱(Polishing) 및 에칭(Etching) 등의 전처리 과정이 필요없이 단순히 육안으로 측정이 가능한 비드폭을 출력변수로 선정하였다. 비드폭을 측정을 위하여 먼저 모니터링 시스템을 이용하여, 각 용접조건 별로 획득한 용접전류 및 아크전압 신호파형이 균일한 파형을 갖는 시험편을 선택하였다. 특히 균일한 용접품질을 확인하기 위하여, 비디오 마이크로스코프(Video microscope)를 사용하여, 용접 시작점인 시편 끝단을 기준으로 매 10 mm간격으로 측정하였다. Fig. 2는 첫번째 용접조건으로 용접작업을 통하여 얻어진 비드폭을 나타낸다. 수학적 모델의 개

Table 1 Mechanical properties of base metal

Base metal	Tensile Strength (N/mm ²)	Yield Point (N/mm ²)	Elongation (%)	Impact Value (kgm/cm ²)
SS400	435	245	25	6.2

Table 2 Chemical compositions of base metal

Material	Element (%)	C	Mn	Cu	Cr	Ni	Fe
	SS400		0.15	0.69	0.04	0.08	0.50

Table 3 Mechanical properties of welding wire

Base metal	Tensile Strength (N/mm ²)	Yield Point (N/mm ²)	Elongation (%)	Impact Value (kg·m/cm ²)
E71T-1	560	590	28	8.6

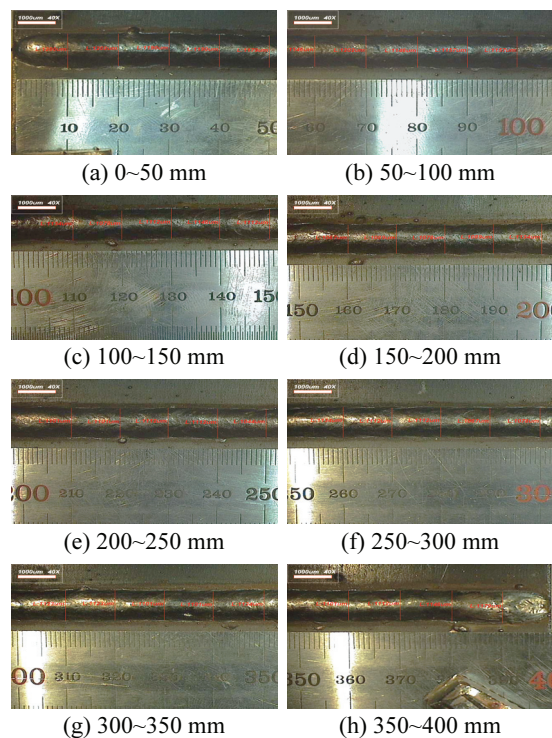


Fig. 2 Measured bead width using video microscope at each position

발에 필요한 용접 비드폭 값을 측정하기 위하여 용접 시작점 및 종료점의 양 끝단을 기준으로 20 mm 지점까지 측정된 비드폭을 제외하고 나머지 지점의 비드폭을 평균으로 계산하였으며, Table 4에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 회귀분석을 이용한 예측모델 개발

회귀분석이란 독립변수와 종속변수들 간의 관련성을 규명하기 위하여, 어떤 수학적 모형을 가정하고 이 모델을 측정된 자료로부터 추정하는 통계적 분석방법이다. 먼저 입·출력 변수들 사이의 상호관계 파악이 중요하며 일반적으로 이러한 변

수들 중에는 다른 변수에게 영향을 주는 변수를 독립변수(Independent variable)로, 반대로 영향을 받는 변수를 종속변수(Dependent variable)라 정의하였다. 본 연구에서는 입·출력 변수 사이의 상호관계를 파악하고자 회귀분석을 이용하여 수학적 모델 개발을 위한 입력변수로 용접전류, 아크전압, 용접속도, 경사각, 출력변수로 용접부 비드형상 중에 비드폭을 설정하였다. 또한 입력변수 변화에 따른 비드폭을 예측하기 위하여, 2가지 형태의 수학적 모델을 선정하였으며, 각 수학적 모델의 형태와 특징은 Table 5과 같다.

입력의 비드폭에 최적의 입력변수를 선정하기 위한 수학적 모델을 개발하기 위하여 MINITAB 프로그램을 이용하였다. 또한 다중회귀분석법을 이용한 선형 및 곡선모델의 각 계수의 산정값을 Table 6에 나타내었다.

개발된 선형 및 곡선모델의 정확도를 비교·분석하기 위하여 분산분석(Analysis of Variance)을 수행하였으며 표준편차(Standard error), 결정계수(Coefficient of determination) 및 수정 결정계수(Adjusted coefficient of determination)를 Table 7에 나타내었다. 한편 각 모델의 입력변수를 이용하여 출력변수의 변동(Variability) 정도를 나타내는 선형 및 곡선모델의 결정계수는 각각 81.56%와 81.26%이며, 수정계수도 각각 78.6%, 78.39%로 나타나 개발된 모델의 적합도는 매우 낮아 용접품질 판단에는 부적합함을 확인하였다.

3.2 유전자 알고리즘을 이용한 지능형 모델 개발

유전자 알고리즘은 자연계의 적자생존과 유전학에 근거한 병렬 및 전역적 탐색알고리즘으로 최적화 문제를 해결하기 위하여 광범위하게 이용되

Table 4 Experimental results at each specimen

Test No.	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Gradient Angle (deg)	Average Bead Width (mm)
1	280	28	300	0	10.20
2	250	25	270	1	9.82
3	250	31	270	1	10.54
4	220	22	240	2	8.02
5	250	25	270	1	9.73
6	280	22	300	0	8.99
7	310	25	270	1	10.58
8	280	22	240	0	9.65
9	250	25	270	-1	9.03
10	220	22	300	0	7.44
11	250	25	270	1	9.18
12	220	22	240	0	8.56
13	250	25	270	1	9.63
14	190	25	270	1	8.38
15	250	25	330	1	8.87
16	220	28	240	2	9.68
17	250	25	270	1	9.37
18	220	22	300	2	7.59
19	250	25	270	1	9.34
20	250	19	270	1	8.33
21	280	28	300	2	9.72
22	250	25	270	3	9.22
23	250	25	210	1	9.54
24	250	25	270	1	9.00
25	220	28	240	0	9.40
26	280	28	240	2	10.27
27	280	28	240	0	10.09
28	280	22	300	2	8.17
29	220	28	300	2	8.52
30	220	28	300	0	8.23
31	280	22	240	2	9.03

Table 5 Mathematical model to predict bead width

Model	Equations of Model
Linear	$B_w = k_0 + k_1I + k_2V + k_3S + k_4D$
Curve	$B_w = c_0I^{c_1}V^{c_2}S^{c_3}D^{c_4}$

Table 6 Coefficient for the mathematical model

Model	Coefficient				
	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4
Linear	3.066	0.018	0.178	-0.01	-0.039
Curve	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4
	2.12	0.496	0.479	-0.295	0.001

고 있다. 특히 탐색공간이 미분과 연속이라는 가정이 필요하지 않으며, 해 공간 내에서 동시에 많은 상태들을 평가하여 전역 최적 해를 찾을 수 있다는 특징을 가지고 있다. 일반적인 유전자 알고리즘 순서도는 Fig. 3과 같이 크게 개체군 생성, 적합도 평가, 재생산의 세 과정으로 구성된다.

본 연구에서는 적합도 함수로 비드폭의 측정치의 평균값과 예측치 오차를 설정하였으며, 유전자 알고리즘은 적합도 함수가 최소가 되도록 진화하였다. 사용된 적합도 함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$ObjV = \sum_{i=1}^N (B_{w_i} - \hat{B}_{w_i})^2 \quad (1)$$

지능형 모델의 경우, 선형모델과 곡선모델의 조합형태로 구성하였으며, Table 8와 같이 나타낸다.

유전자 알고리즘을 이용하여 최적의 예측모델을 선정하기 위하여, 유전자 알고리즘의 변수로

Table 7 Results of analysis of variance for developed regression model

Model	Standard Error	Coefficient of Determination	Adjusted R ²
Linear model	0.373	81.56%	78.60%
Curvilinear model	0.042	81.26%	78.39%

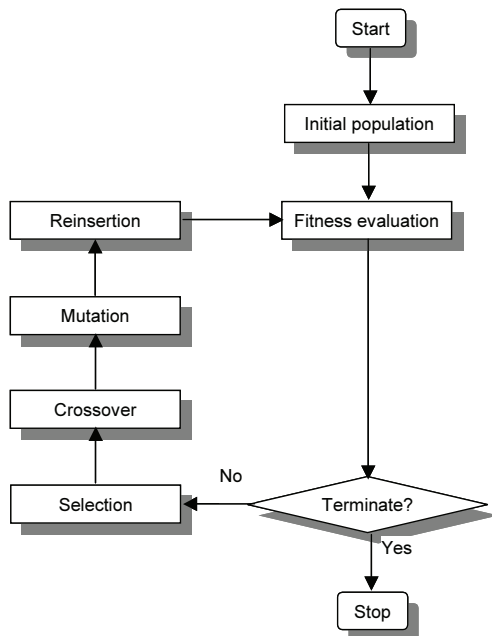


Fig. 3 Schematic diagram of genetic algorithm (GA)

최대 진화수는 50,000세대, 초기 개체수는 40개, 교배확률 0.9, 돌연변이 확률 0.01로 설정하여 실수코딩 유전자 알고리즘을 이용하였다. 유전자 알고리즘 구성 및 실행은 MATLAB GA toolbox를 이용하였으며, 개발된 지능형 모델의 각 계수는 Table 9에 나타내었다.

앞서 개발된 선형 및 곡선모델과 마찬가지로 분산분석을 수행하였으며, Table 10에 결과를 나타내었다. 분산분석 결과에 따르면, 결정계수 값은 83.84%로 선형 및 곡선모델과 비교하여 상대적으로 높게 나타남을 확인할 수 있으며, 유전자 알고리즘 기반의 지능형모델이 선형 및 곡선모델에 비해서는 상대적으로 비드폭을 예측하는데 적합한 것으로 사료된다. 하지만 절대적인 적합도는 여전히 낮은 값을 가지고 있으며 지능형 모델의 경우도 용접품질 판단에는 부적합함을 확인하였다.

개발된 회귀분석모델 및 지능형모델을 통해 예측된 비드폭을 보다 정확하게 평가하기 위하여 백분율오차 λ를 식(2)와 같이 도입하였다.

$$\lambda = \frac{|B_{w_i} - \hat{B}_{w_i}|}{B_{w_i}} \times 100(\%) \quad (2)$$

Fig. 4는 개발된 3개의 모델에서 예측된 비드폭 제곱합의 오차값을 실험조건별로 나타내며, Fig. 5

Table 8 GA intelligent model to predict bead width

Model	Equations of Model
GA intelligent model	$B_w = k_0 + k_1 I + k_2 V + k_3 S + k_4 D + c_0 I^{c_1} V^{c_2} S^{c_3} D^{c_4}$

Table 9 Coefficient for the GA intelligent model

Model	Coefficient				
	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4
GA intelligent model	-4.654	0.040	0.521	-0.016	0.0003
	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4
	0.010	3.045	-4.667	3.045	-0.0005

Table 10 Results of analysis variance for developed GA model

Model	Standard Error	Coefficient of Determination	Adjusted R ²
GA intelligent model	0.202	83.84%	80.02 %

는 각 모델의 실험조건별 비드폭의 예측오차를 나타낸다. 유전자 알고리즘을 이용한 지능형 모델의 오차가 각 실험조건에서 5% 이내에 있음을 확인

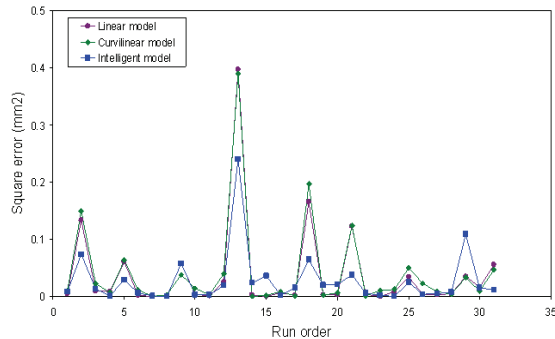


Fig. 4 Comparison on the fitting of three developed models

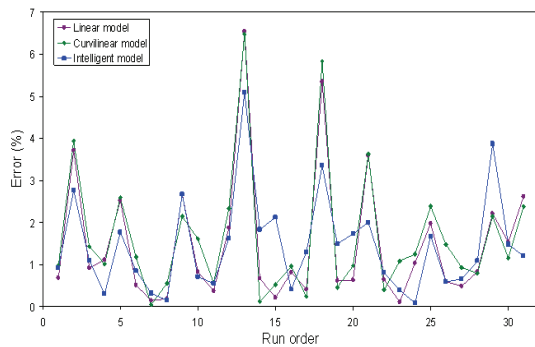


Fig. 5 The predicted errors of three developed models

Table 11 2nd regression model to predict bead width

Model	Equations of Model
2 nd regression model	$B_w = k_0 + k_1I + k_2V + k_3S + k_4D$ $+ k_5I^2 + k_6V^2 + k_7S^2 + k_8D^2$ $+ k_9IV + k_{10}IS + k_{11}ID + k_{12}VS$ $+ k_{13}VD + k_{14}SD$

Table 12 Coefficient for the 2nd regression model

Model	Coefficient				
	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4
2 nd regression model	9.439	0.545	0.545	-0.299	-0.049
	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9
	-0.046	-0.057	-0.115	-0.135	0.014
	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}
	0.12	-0.12	0.019	0.131	-0.01

하였다. 즉 선형 및 곡선모델의 조합한 형태인 지능형모델의 예측능력은 선형 및 곡선모델에 비해 상대적으로 높음을 확인할 수 있다. 이를 통해 용접 입력변수의 독립적 영향뿐만 아니라 입력변수들간 상관관계를 고려하면 용접품질 판별능력이 향상될 것으로 사료된다.

3.3 반응표면분석을 통한 예측모델 개발

본 연구에서는 수많은 시행착오와 경제적인 손실을 줄이고자 실험계획법 중에 광범위하게 이용되는 반응표면분석법을 적용하여 2차 회귀모델을 개발하였다. 개발한 2차 회귀모델의 각항의 계수는 MINTAB을 이용하여 계산하였으며, Table 11과 Table 12에 나타내었다.

개발된 2차 회귀모델의 예측능력 확인을 위한, 각 실험조건별 측정된 비드폭 값과 예측된 비드폭 값은 Fig. 6과 같으며, 오차값의 범위는 대체로 신뢰할만한 결과를 나타낸다.

Table 13은 개발된 2차 회귀분석 모델의 분산분석 결과를 나타내며, 앞서 개발된 직선모델, 곡선모델 및 유전자 알고리즘 기반 모델과 비교하여 보면 표준편차가 0.347로 높은 편임에도 불구하고 90.35%의 높은 결정계수 값을 가지고 있음을 확인

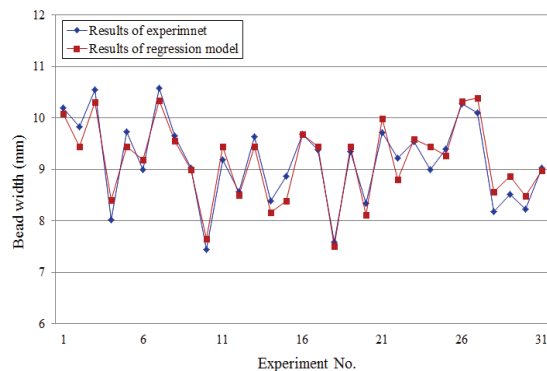


Fig. 6 Comparison between measured and calculated bead width from the developed 2nd regression model

Table 13 Results of analysis of variance for developed 2nd regression model

Model	Standard Error	Coefficient of Determination	Adjusted R ²
2 nd regression model	0.347	90.35%	81.92 %

할 수 있다. 결론적으로 개발한 회귀모델은 입력 변수들의 독립적 영향뿐만 아니라 교호작용도 동시에 고려해야 함을 확인하였다.

또한 비드폭에 대한 입력변수들간 복합적 영향 관계를 확인하기 위해 반응표면분석법 중 등고선도와 표면선도를 작성하여 양호한 비드폭을 도출할 수 있는 안정영역에 대하여 확인하고자 하였다. 또한, 등고선도 및 표면선도의 작성은 MINITAB을 이용하였다.

Fig. 7은 용접전류와 아크전압과의 상관관계의 등고선도 및 표면선도를 나타내고 있다. 용접속도와 모재경사각이 각각 270 mm/min, 1° 일 때 7~11 mm 정도의 비드폭이 형성되며, 용접전류와 아크전압값이 높아지면 균일한 간격으로 큰 비드폭이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 용접전류와 용접속도의 상관관계를 등고선도 표면선도로 나타낸다. 아크전압과 모재경

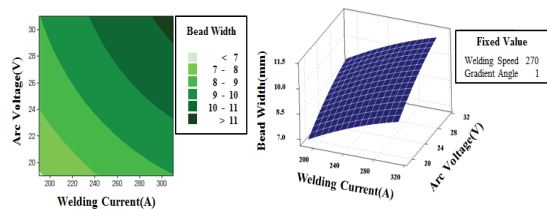


Fig. 7 Contour and surface plots for bead width according to welding current and arc voltage

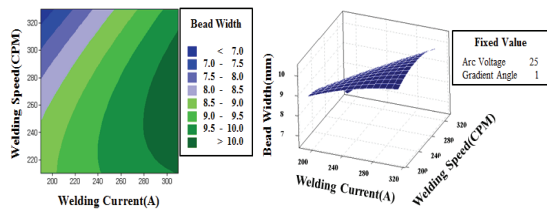


Fig. 8 Contour and surface plots for bead width according to welding speed and welding current

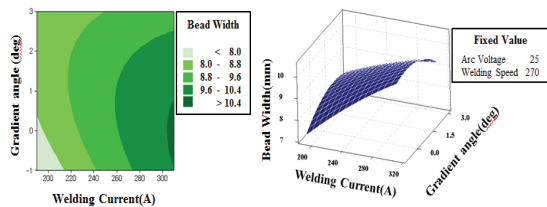


Fig. 9 Contour and surface plots for bead width according to welding current and gradient angle

사각이 각각 25 V, 1°일 때, 7~10 mm의 비드폭이 형성되며, 용접전류와 용접속도가 높아질수록 큰 비드폭이 형성됨을 보여준다. 하지만, 등고선도 상의 등고선 간격이 매우 조밀하게 형성되어 있기 때문에 용접속도와의 교호 시 영향력이 매우 높음을 확인하였다.

Fig. 9는 용접전류와 모재경사각의 상관관계를 등고선도와 표면선도로 보여준다. 아크전압과 용접속도가 각각 25V, 270 mm/min에서 8~10.4 mm의 비드폭이 형성되며, 아크전압이 커질수록 비드폭이 커지게 되나, 모재경사각이 커질 경우 비드폭이 비례적으로 증가하지는 않는 것을 볼 수 있다. 이는 모재경사각이 한계치 이상이 되면 오히려 비드의 생성을 저해하는 요소로 작용하는 것으로 판단할 수 있으며 용접품질이 저하될 수 있음을 나타낸다.

Fig. 10은 아크전압과 용접속도의 상관관계를

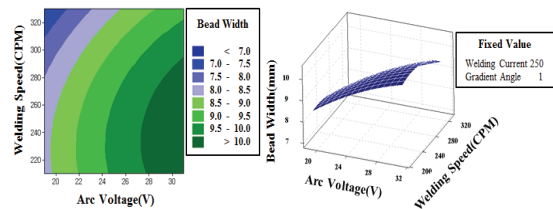


Fig. 10 Contour and surface plots for bead width according to arc voltage and welding speed

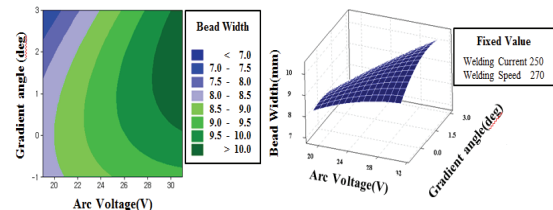


Fig. 11 Contour and surface plots for bead width according to arc voltage and gradient angle

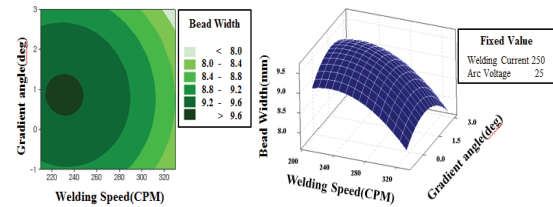


Fig. 12 Contour and surface plots for bead width according to welding speed and gradient angle

나타낸다. 용접전류와 모재경사각이 각각 250A, 1°에서 7~10 mm의 비드폭이 형성되며 아크전압이 커지고 용접속도가 줄어들수록 비드폭이 거의 균일한 간격으로 좁아지는 경향을 나타낸다.

Fig. 11은 아크전압과 모재경사각의 상관관계를 등고선도와 표면선도로 나타낸 그림이다. 용접전류와 용접속도가 각각 250A, 25 mm/min일때, 7~10 mm의 비드폭이 생성되며 아크전압이 커지면 비드폭이 증가하나, Fig. 8의 경우와 마찬가지로 모재경사각이 커질 경우 비드폭이 비례적으로 증가하지 않는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 용접속도와 모재경사각의 상관관계를 나타낸다. 용접전류와 아크전압이 각각 250 A, 25V에서 8~9.6 mm의 비드폭이 형성되며, 용접속도가 220~240 mm/min, 모재경사각이 0.5~1.5° 구간에서 최대 비드폭 생성되나 최소 비드폭과의 편차가 ±0.8 mm로 그 영향은 미비한 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 용접 중 쉽게 취득이 가능한 용접정보를 기반으로 비드폭의 예측이 가능한 수학적 모델을 개발하기 위하여 SS400평판의 Bead-on-plate용접실험을 실시하고 취득된 데이터를 활용하여 공정변수와 비드폭의 상관관계 분석을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 비드폭을 예측하기 위한 용접실험을 통하여 측정된 실험결과 값을 바탕으로 비드폭을 예측할 수 있도록 회귀분석법을 이용한 선형 및 곡선 모델, 지능형모델과 2차 회귀 분석모델을 개발하였다. 개발된 수학적 모델의 결정계수는 각각 81.56, 81.26, 83.84, 90.35%로 나타나 입력변수들간의 상관관계가 고려된 반응표면 분석을 통한 2차 회귀모델이 가장 적합함을 확인할 수 있다.
- 2) 정확한 비드폭을 예측하기 위하여 유전자 알고리즘과 개발된 선형 및 곡선모델과 비교·분석하였다. 지능형모델의 오차가 각 실험조건에서 5% 이내에 있음을 확인하고 선형 및 곡선모델의 조합으로 구성된 유전자 알고리즘 기반 지능형모델의 예측능력은 선형 및 곡선모델에 비해 상대적으로 높음을 확인할 수 있다.
- 3) 용접 공정변수와 비드폭 형상간의 반응 변화가 이루는 반응표면분석을 통하여 비드폭에 대한

입력변수들간의 복합적 영향관계를 분석하였다. 그 결과 용접전류와 아크전압이 높아지면 균일한 간격으로 비드폭이 크게 형성되고 모재 경사각이 커질 경우 비드폭이 비례적으로 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 모재경사각이 한계치 이상이 되면 오히려 비드의 생성을 저해하는 요소로 작용함을 확인할 수 있으며, 용접품질이 저하될 수 있음을 나타낸다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임(No. 2013H1B8A2032082).

REFERENCES

1. Kim, J. M., "Study on Weld Quality Assessment Method of Short-Circuit Gas Metal Arc Welding," M.Sc. Thesis, Mechanical engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2001.
2. Doumanidis, G., Hale, M., and Hardt, D. E., "Multi-Variable Control of Arc Welding Processes," Proc. of Int. Conf. on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, pp. 449-457, 1986.
3. Remwick, R. J. and Richardson, R. W., "Experimental Investigation of GTA Weld Pool Oscillation," Welding Journal, Vol. 62, No. 2, pp. 29-35, 1983.
4. Gonseth, P. M. and Blanc, P., "Optiguide - A New Optical Joint Tracking Device," Welding Journal, Vol. 62, No. 9, pp. 27-29, 1983.
5. Lee, S. H., "Investigation of Metal Transfer in GMAW using Pinch Instability Theory with Arc Pressure," J. Korean. Soc. Precis. Eng., Vol. 11, No. 3, pp. 191-196, 1994.
6. Lukens, W. E. and Morris, R. A., "Infrared Temperature Sensing of Cooling Rates for Arc Welding Control," Welding Journal, pp. 27-33, 1982.
7. Kozono, Y. and Kokura, S., "Relation between Surface Temperature and Reverse Side Bead Width in Girth TIG Welding for Stainless Steel Tube," quarterly journal of the japan welding society, Vol. 4, No. 2, pp. 331-335, 1986.
8. Haytcher, S. A., Kilty, A. L., Ludewig, H. W., Rees,

- D. E., Siwicke, J. H., and Wallace, B. L., "Method for arc Welding Fault Detection," US Patent, No. 5521354, 1996.
9. Quinn, T. P., Smith, C., McCowan, C. N., Blachowiak, E., and Madigan, R. B., "Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding," *Welding Journal*, Vol. 78, No. 9, pp. 322-328, 1999.
 10. Adolffson, S., Bahrami, A., Bolmsjo, G., and Claesson, I., "On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding," *Welding Journal*, Vol. 78, No. 2, pp. 59-73, 1999.
 11. Kang, S. K., Moon, H. S., and Na, S. J., "A study on Determining Arc Stability using Weight of Spatter," *Journal of KWJS*, Vol. 15, No. 6, pp. 41-48, 1997.
 12. Reilly, R., Xu, X., and Jones, J. E., "Neural Network Application to Acoustic Emission Signal Processing," *proc. of the Int. Conf. on the Joining of Materials*, Vol. 31, No. 2, pp. 146-160, 1995.