

GMA를 이용한 배관용접의 이면비드 형상예측에 관한 실험적 연구

김지선*, 김일수⁺, 나현호⁺, 이지혜⁺

(논문접수일 2011. 1. 5, 심사완료일 2011. 1. 27)

An Experimental study on Prediction of Back-bead Geometry in Pipeline Using the GMA Welding Process

Ji-Sun Kim*, Ill-Soo Kim⁺, Hyun-Ho Na⁺, Ji-Hye Lee⁺

Abstract

In this study, a variety of welding experiments were carried out to optimize root-pass welding process using GMA process. Based on the experimental results, optimal welding conditions were selected after analyzing correlation between welding parameters and back-bead geometry. Then, effectiveness of empirical models developed was compared and analyzed, and optimized empirical models were finally developed for predicting back-bead by analyzing the main effect of each factor which affects back-bead geometry and their influence on interaction. Also, functions proper for expressing the surface of back-bead were selected using diverse quadratic functions, and back-bead geometry was visualized using empirical models developed and quadratic functions.

Key Words : GMA welding(가스메탈아크 용접), Root-pass welding(초층 용접), Empirical model(경험적 모델), Back-bead prediction(이면비드 예측)

1. 서론

최근 고도로 발전된 산업에서 용접이 차지하고 있는 비중은 대단히 높으며, 기계가공, 조립, 제작 등의 모든 공정에서 용접은 필수적인 공정이 되고 있다. 현재 용접과 관련된 연구는 용접부 품질을 대변하는 변수들을 측정하여 그에 영향을 주는 여러 외란에 의한 영향을 실시간으로 보상할 수 있는 시스템 개발 및 로봇을 이용한 용접공정을 전자동화 시키는 방향으로 진행되고 있다.

파이프간의 결합제작 공정은 주로 초층(Root-pass)과 필패스

(Fill-pass) 용접으로 구성되며, 초층 용접은 일반용접에 비해 자동화 공정이 매우 까다롭고, 용접품질을 보장하기 어려운 현실이다⁽¹⁾. 일반적으로 배관용접에는 통상 수동 GTA 용접법이 적용되고 있다. 초층 용접품질은 이면비드의 폭과 높이로 대변될 수 있으며 이면비드의 형상을 예측하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다⁽²⁾. 본 연구에서는 GMA 용접공정을 이용하여 배관 초층 용접공정의 최적화를 위해 다양한 용접실험을 수행하였다.

그 결과를 바탕으로 공정변수와 비드 형상간의 상관관계를 분석하여 최적의 용접조건을 선정하였다. 개발된 수학적 모델

* 목포대학교 기계공학과 (kimjisun@mokpo.ac.kr)
주소: 534-729 전남 무안군 청계면 도립리 61번지
+ 국립목포대 기계공학과 (ilsookim@mokpo.ac.kr)

들의 유효성을 비교·분석하였으며, 이면비드의 형상에 영향을 미치는 각각의 인자의 주 효과 및 교호작용에 대한 영향력을 판별하여 이면비드 예측을 위한 최적화된 수학적 모델을 개발하였다. 또한, 반응표면분석법중 등고선 플롯을 이용하여 이면비드 형성을 위한 적정 용접조건 영역을 확인하였으며, 각각의 자세별 최적 용접조건을 선정하였다.

2. 용접 실험

2.1 실험 방법

본 연구는 평판을 이용하여 각 자세별 용접실험을 수행하였다. 본 연구의 대상물인 파이프에 직접적인 용접실험을 할 경우, 고가의 장비가 필요하고 실험준비에 대한 시간소요가 매우 크므로 평판을 이용하여 용접실험을 수행하였다⁽³⁾. 평판 실험은 파이프를 그림과 같이 3개의 다른 위치에서 용접을 수행하였다.

위치별로 용접공정변수 및 수준은 Table 1과 같이 선정하였으며, 아래보기자세의 경우 초층용접의 최적조건을 선정하기 위해 용접전류, 와이어 송급속도를 용접변수로 선정하였다. 수직 자세 및 위보기 자세는 자동용접 공정효율을 위해 용접조건은 고정하고 용접진행각, 용접속도를 용접변수로 선정하였으며 비드 형상변수를 출력변수로 선정하여 실험을 계획하였다. 아래보기 자세를 통해 파이프에 적용될 전체적인 용접조건을 선정하였다. 모든 실험에는 ER70S-G 와이어, CO₂ 100%의 보

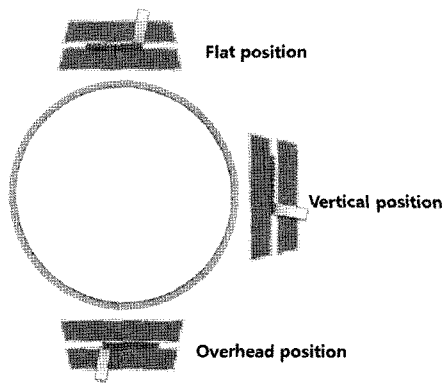


Fig. 1 Schematic of pipe weld experiment with different welding position

Table 1 Process parameter and level for flat position

Process parameter	Symbol	Unit	Level		
			-1	0	1
Peak current	Cp	Ampere	330	360	390
Background current	Cb	Ampere	50	60	70
Wire feed speed	Wf	cm/min	250	300	350

호가스, 18mm의 CTWD로 고정하여 실험을 수행하였으며, 모재는 API-X65를 이용하였다. 모재의 용접부 형상은 루트갭 (Root-gap) 2.5mm, 루트면(Root-face) 1.5mm, 개선각 35°로 선정하여 실험을 수행하였다.

2.2 실험 결과 및 최적조건 선정

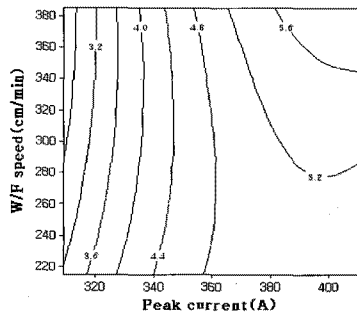
총 36회의 실험을 완료후 용접부의 비드형상을 측정하기 위하여 용접이 완료된 시험편의 가로축 중간부분을 Laser cutting machine을 사용하여 절단하고 단면부를 연삭후 폴리싱(Polishing)하였다. 단면부에 대한 에칭작업을 수행한후 정확한 비드형상을 측정하기 위하여 광학현미경 시스템을 이용하였으며, 측정된 비드의 형상은 Table 2와 같다.

반응표면 분석법중 만족도 함수는 반응 최적화에서 솔루션이 모든 반응에 대한 목표를 전체적으로 만족하는 정도를 측정하는 측도이다. 만족도에는 개별 만족도와 합성 만족도가 있으며, 특히 합성된 만족도의 범위는 0에서 1까지 이며, 1은 이상적인 경우를 나타내고 0은 하나 이상의 반응이 허용 한계를 벗어난다는 것을 뜻한다⁽⁴⁾. 다음의 Fig. 4는 만족도 함수에 대한 요약 을 보여준다.

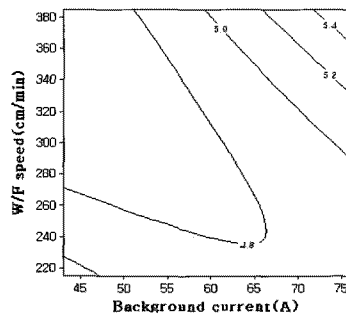
Figs. 2와 3에 나타난 것과 같이 최적 용접조건 선정을 위하여 반응표면 분석법 중 등고선 플롯을 이용하여 이면비드 폭과

Table 2 Results of back-bead geometry measured

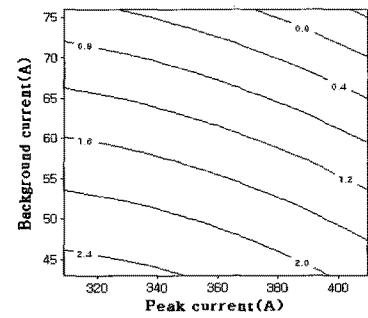
No.	Cp	Cb	Wf	Wb	Hb
1	410	60	330	4.39	0.94
2	360	60	385	4.19	0.76
3	360	76	300	3.17	0.19
4	360	60	215	2.17	0.20
5	330	70	350	2.35	0.35
6	360	43	300	3.24	1.33
7	330	50	250	3.33	0.90
8	330	70	250	3.55	0.62
9	360	60	300	3.45	0.97
10	390	50	250	3.19	1.34
11	390	70	250	3.51	0.76
12	390	50	350	4.84	0.99
13	390	70	350	3.9	0.65
14	309	60	300	2.99	1.52
15	360	60	300	3.37	0.74
16	330	50	250	2.64	0.90
17	390	50	250	2.85	1.30
18	330	70	250	2.51	0.49
19	390	70	250	3.54	0.61
20	330	50	350	3.58	1.46



(a) Back-bead width, W/F speed, peak current

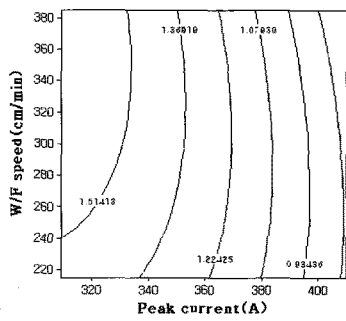


(b) Back-bead width, W/F speed, background current

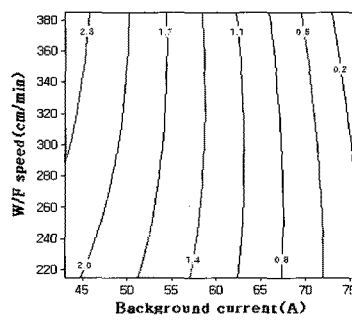


(c) Back-bead width, background current, peak current

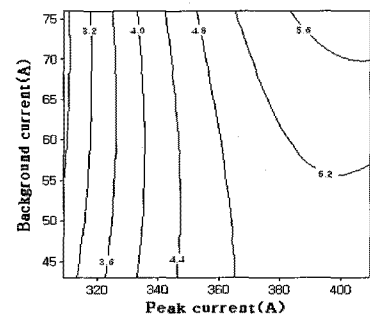
Fig. 2 Contour line for back-bead width



(a) Back-bead height, W/F speed, peak current



(b) Back-bead height, W/F speed, background current



(c) Back-bead height, background current, peak current

Fig. 3 Contour line for back-bead height

Table 3 The target value of the optimal back-bead determined

	Min.	Target	Max.	Weight	Significance
Wb	3	4	5	1	1
Hb	0.5	1.0	1.5	1	1

Table 4 The optimal value of process parameters predicted

Predicted response		Optimal conditions Flat position		
Wb	Hb	Cp	Cb	Wf
4	1.0	397.5	57.46	315

Table 5 Process parameter and level for vertical/overhead position

Process parameter	Symbol	Unit	Level		
			-1	0	1
Torch angle	Ta	Degree	50	60	70
Welding speed	Ws	Cm/min	30	40	50

Table 6 Results of back-bead geometry measured

No	Position	Ws	Ta	Wb	Hb
1	Vertical position	10	70	3.72	0.68
2		15	70	4.76	0.4
3		20	70	3.18	0.08
4		10	60	2.56	0.72
5		15	60	4.1	0.44
6		20	60	2.72	0.36
7		10	50	2.1	0.2
8	Overhead position	15	50	3.32	0.52
9		20	50	3.84	0.36
10		10	70	2.95	0.58
11		15	70	3.08	0.24
12		20	70	4.04	0.14
13		10	60	3.58	0.72
14		15	60	3.18	0.44
15		20	60	3.12	0.32
16		10	50	4.48	0.56
17		15	50	4.5	0.6
18		20	50	3.94	0.56

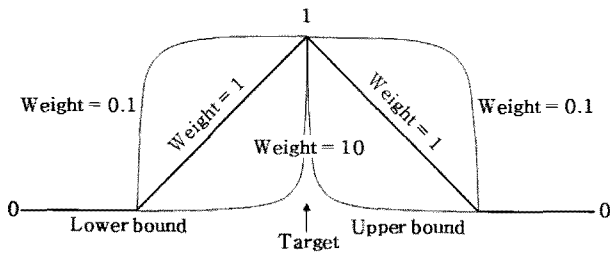


Fig. 4 Concept of satisfaction function

높이에 대한 영역을 확인하였으며, Tables 3과 4에서와 같이 양호한 이면비드 형상을 도출할 수 있는 안정영역에 대한 목표 값을 선정하여 목표 값에 근접한 용접조건을 도출하였다. 아래 보기 실험을 통해 최적화된 용접 조건을 바탕으로 수직자세 및 위보기자세 실험에서 필요한 기본 용접조건을 획득하였으며, 각자세별 용접조건은 Table 5와 같다. 수직자세 및 위보기 자세 실험은 변수에 대한 모든 경우의 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Table 6에 나타난 것과 같다.

3. 예측 모델 개발

3.1 수학적 모델개발

용접공정은 매우 복잡한 비선형적 관계로 이루어져 있다. 이와 같은 용접공정의 이면비드 형상을 정확히 예측한다는 것은 매우 어렵다⁽⁵⁾. 그러나 수학적 모델링을 통해 근사한 이면비드 예측이 가능하다. 용접실험결과를 바탕으로 회귀분석을 이용하여 입력변수와 출력변수에 대한 수학적 모델을 개발하였다. 개발된 수학적 모델의 계수는 Table 7에 나타난 것과 같다.

$$Y_f = a_0 + a_1 C_p + a_2 C_b + a_3 W_f + a_4 C_p^2 + a_5 C_b^2 + a_6 W_f^2 + a_7 C_p C_b + a_8 C_p W_f + a_9 C_b W_f \quad (1)$$

$$Y_{o/v} = a_0 + a_1 T_a + a_2 W_s + a_3 T_a^2 + a_4 W_s^2 + a_5 T_a W_s \quad (2)$$

수식 (1)은 아래보기 자세에서의 회귀 모델이며, 수식 (2)는 수직자세 및 위보기자세에서의 회귀 모델이다.

아래보기 자세의 경우 용접전류(C_p , C_b), 와이어 송급속도 (W_f)를 입력변수로 선정하여 수학적 모델을 개발하였으며, 수직 및 위보기 자세는 아래보기 자세 실험에 의해 선정된 최적조건을 기본용접조건으로 고정하고 용접진행각(T_a) 및 용접속도 (W_s)를 입력변수로 선정하여 수학적 모델을 개발하였다. 개발된 수학적 모델의 유의성을 판단하기 위해 분산분석(ANOVA)의 결정계수(R^2)와 잔차의 제곱합(SSE)을 이용하였다⁽⁷⁾. Table 8은 개발된 모델의 결정계수(R^2) 과 잔차의 제곱합(SSE)을 나

Table 7 Estimated regression coefficients of empirical model for back-bead geometry parameters

Coeff.	Flat position	
	W_b	H_b
a_0	16.727	10.730
a_1	-0.1059	-0.1117
a_2	0.1069	0.0243
a_3	-0.0020	0.0694
a_4	0.0001	0.0001
a_5	0.0001	-3.0783
a_6	0.0001	-0.0001
a_7	0.0003	0.0001
a_8	0.0001	-0.0001
a_9	0.0001	-0.0001
Coeff.	Overhead position	
	W_b	H_b
a_0	-16.8467	36.7511
a_1	-0.1640	-0.8565
a_2	1.1966	0.0009
a_3	0.0036	-0.0001
a_4	-0.0104	0.0009
a_5	-0.0057	-0.0011

Table 8 Variance test for developed empirical models

Developed models		SSE	R-Square
Flat position	W_b	1.540	0.819
	H_b	0.467	0.842
Vertical position	W_b	0.548	0.901
	H_b	0.046	0.864
Overhead position	W_b	3.620	0.882
	H_b	0.020	0.931

타낸 표이다.

3.2 수학적 모델개발의 수정

개발된 수학적 모델은 입력변수 영향력 판별 및 교호작용에 대한 판별 없이 모든 변수를 고려하여 개발되었다. 본 연구에서는 입력변수의 개별 또는 교호작용이 반응 값에 미치는 영향력을 판별하고 영향력이 낮은 인자를 제외하여 개발된 수학적 모델을 수정함으로써 이면비드 예측을 위한 수학적 모델의 정확도를 향상시키고자 하였다. 이를 위해 검정통계량 T 값과 그에 대한 확률인 P 값을 이용하여 각 변수에 대한 영향력을 평가하였다⁽⁶⁾. Tables 9에서 11까지는 각각의 변수들이 이면비드의 폭과 높이에 미치는 영향력에 대한 검정통계량 분석의 결과를 나타내고 있다.

검정통계량의 확률인 P 값이 0.1 이하인 경우 영향력이 정도가 큰 것으로 판단하고 0.1 이상인 경우 영향력이 미비하다고 판단하였다. 아래보기 자세의 경우 이면비드 폭에 미치는 영향

Table 9 Estimated effects and coefficients of back-bead for flat position

Terms		Results			
		SE Coeff.	Coeff.	T	P
W_b	Constant	0.2764	3.4150	12.356	0.000
	H_b	0.1601	0.6058	3.784	0.004
	C_b	0.1618	-0.2302	-1.422	0.185
	W_f	0.1610	0.6291	3.907	0.003
	C_p^2	0.3556	0.1718	0.483	0.639
	C_b^2	0.3605	-0.1139	-0.316	0.758
	W_f^2	0.3668	-0.1423	-0.388	0.706
	$C_p C_b$	0.3146	0.2801	0.890	0.394
	$C_b W_f$	0.3200	0.7081	2.213	0.051
	$C_p W_f$	0.3306	-0.8971	-2.713	0.022
H_b	Constant	0.2764	3.4150	12.356	0.000
	C_p	0.1601	0.6058	3.784	0.004
	C_b	0.1618	-0.2302	-1.422	0.185
	W_f	0.1610	0.6291	3.907	0.003
	C_p^2	0.3556	0.1718	0.483	0.639
	C_b^2	0.3605	-0.1139	-0.316	0.758
	W_f^2	0.3668	-0.1423	-0.388	0.706
	$C_p C_b$	0.3146	0.2801	0.890	0.394
	$C_b W_f$	0.3200	0.7081	2.213	0.051
	$C_p W_f$	0.3306	-0.8971	-2.713	0.022

Table 10 Estimated effects and coefficients of back-bead for vertical position

Terms		Results			
		SE Coeff.	Coeff.	T	P
W_b	Constant	0.3186	3.8200	11.990	0.001
	T_a	0.1745	0.4000	2.292	0.106
	W_s	0.1745	0.2267	1.299	0.285
	T_a^2	0.3023	0.3600	1.191	0.319
	W_s^2	0.3023	-1.0400	-3.441	0.041
	$T_a W_s$	0.2137	-0.5700	-2.667	0.076
	H_b	Constant	0.09247	0.54222	5.864
T_a		0.05065	0.01333	0.263	0.809
W_s		0.05065	-0.13333	-2.632	0.078
T_a^2		0.08773	-0.13333	-1.520	0.226
W_s^2		0.08773	-0.05333	-0.608	0.586
$T_a W_s$		0.06203	-0.19000	-3.063	0.055

은 피크전류(C_p), 와이어 송급속도(W_f), 백그라운드 전류와 와이어 송급속도사이의 교호작용($C_b W_f$), 피크전류와 와이어 송급속도사이의 교호작용($C_p W_f$)이 0.004, 0.003, 0.051, 0.220의 P 값으로 매우 영향력이 큼을 확인하였다. 그 외 변수는 영향력이 매우 미비하다고 판단하였다. 수직자세의 이면비드 폭의 경우 와이어 송급속도(W_s)와 용접진행각(T_a)의 P값이 0.285, 0.319로 개별인자의 영향력에 비해 교호작용을 통한 영향력이 큼을 확인할 수 있었다. 이와 같은 방식으로 수학적 모델에서 각각의 인자의 개별적 영향력과 교호작용력을 비교 판단하여 영향력이 미비한 인자를 제외하여 수학적 모델을 수정하였다. 수정된 수학적 모델은 전반적으로 기존 모델에 비해 예측성능이 전반적으로 향상되었으며, Figs. 5부터 10까지는 기존 모

Table 11 Estimated effects and coefficients of back-bead for overhead position

Terms		Results			
		SE Coeff.	Coeff.	T	P
W_b	Constant	0.2549	3.22778	12.662	0.001
	T_a	0.1396	-0.47500	-3.402	0.042
	W_s	0.1396	0.01500	0.107	0.921
	T_a^2	0.2418	0.53833	2.226	0.112
	W_s^2	0.2418	0.09833	0.407	0.712
	$T_a W_s$	0.1710	0.40750	2.383	0.097
	H_b	Constant	0.06093	0.45778	7.514
T_a		0.03337	-0.12667	-3.796	0.032
W_s		0.03337	-0.14000	-4.195	0.025
T_a^2		0.05780	-0.04667	-0.807	0.479
W_s^2		0.05780	0.05333	0.923	0.424
$T_a W_s$		0.04087	-0.11000	-2.691	0.074

Table 12 Variance test for modified empirical models

Developed models			SSE	R-Square
Flat position	Empirical model	W_b	1.540	0.819
		H_b	0.467	0.842
	Modified model	W_b	1.787	0.892
		H_b	0.888	0.867
Vertical position	Empirical model	W_b	0.548	0.901
		H_b	0.046	0.864
	Modified model	W_b	0.807	0.854
		H_b	0.088	0.743
Overhead position	Empirical model	W_b	3.620	0.882
		H_b	0.020	0.931
	Modified model	W_b	0.370	0.875
		H_b	0.030	0.897

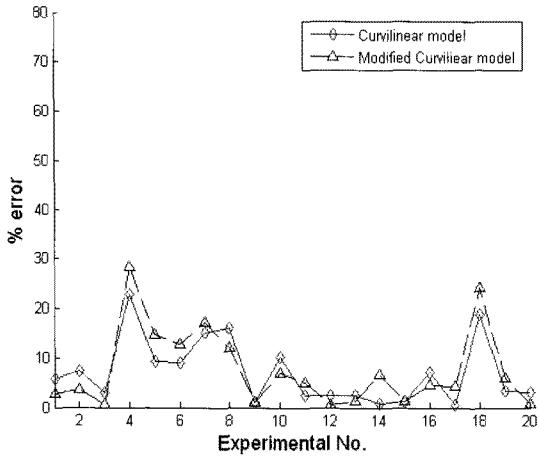


Fig. 5 The accurate prediction of two developed models for back-bead width (flat position)

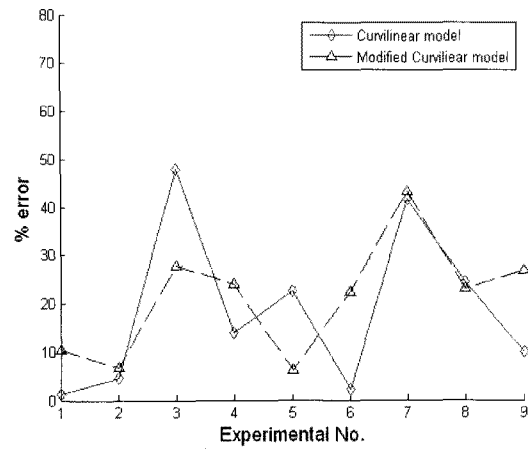


Fig. 8 The accurate prediction of two developed models for back-bead height (vertical position)

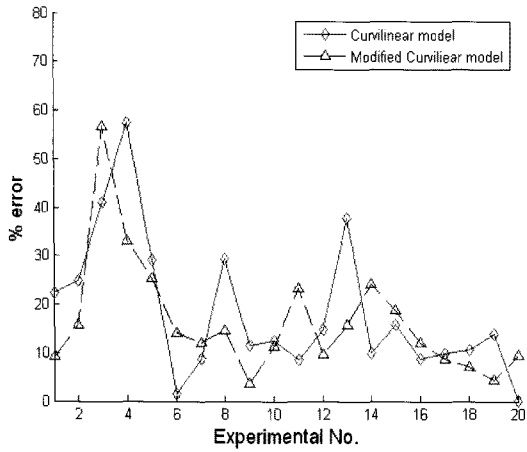


Fig. 6 The accurate prediction of two developed models for back-bead height (flat position)

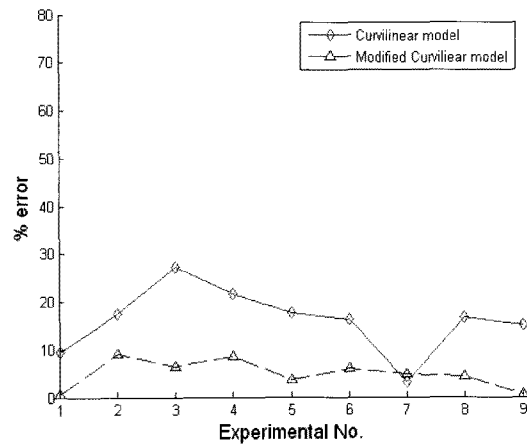


Fig. 9 The accurate prediction of two developed models for back-bead width (overhead position)

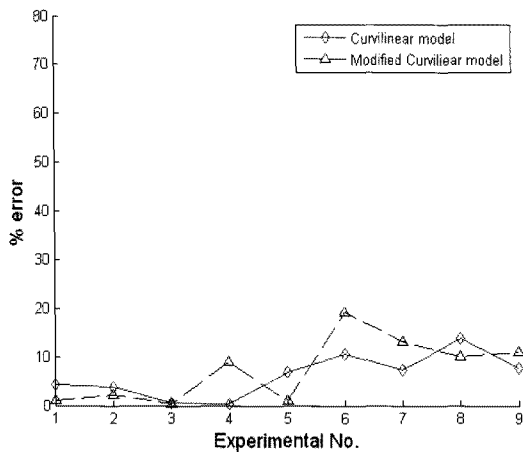


Fig. 7 The accurate prediction of two developed models for back-bead width (vertical position)

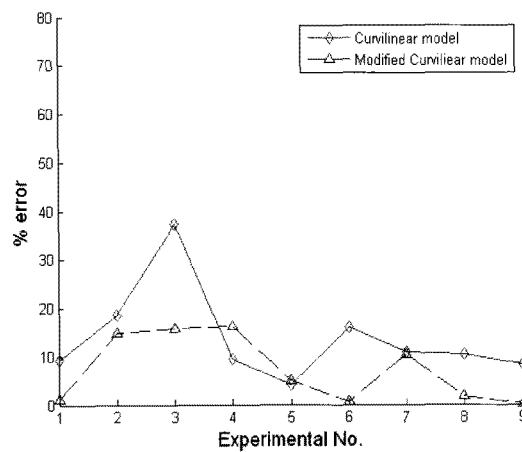


Fig. 10 The accurate prediction of two developed models for back-bead height (overhead position)

델과 수정된 모델의 예측오차를 백분율을 통해 나타낸 그래프이다.

Table 12에 나타낸 것과 같이 전반적으로 수정된 모델이 기존 모델에 비해 예측성능이 더욱 뛰어남을 나타내고 있다. 그러나 수직자세의 경우, 수정된 모델의 예측성능향상의 뚜렷이 나타나고 있지 않다. 이는 통계적 방법을 사용하여 수학적 모델의 정확성을 개선하기 위해서는 충분한 모집단의 정보가 필요하나, 9번의 수직자세 실험을 통해 모집단의 정보가 불충분하였기 때문이라 판단한다. 모집단의 정보가 충분할 경우, 수직자세 또한 수학적 모델의 예측성능이 향상될 것이라고 예상된다.

4. 결론

본 연구는 오픈갭(Open-gap)형태의 파이프라인 결합공정에서 이면비드 폭과 높이에 대한 수학적 모델개발에 집중되었다. 또한, 개발된 수학적 모델의 정확성을 향상시키기 위해 통계학적 방법을 이용하였으며, 다음과 같은 결론에 얻을 수 있었다.

- (1) 파이프 배관 초층용접 자동화를 위해 GTA 용접공정을 GMA 용접공정으로 대체하여 각 자세별(0°, 90°, 180°) 용접실험을 수행하였다.
- (2) 다양한 자세의 용접실험을 실시하여 수학적 모델을 개발하였으며, 통계학적 분석을 통하여 기존 모델에 비해 예측성능이 뛰어난 모델을 개발하였다.
- (3) 반응표면분석법중 등고선 플롯을 이용하여 이면비드 형성에 관한 최적조건 영역을 확인하였으며, 각각의 용접자세에 따른 최적 용접조건을 선정하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- (1) Jeong, J. W., Kim, I. S., Na, H. H., Lee, J. H., and Hong, S. H., 2010, "A Study on the Selection of Optimal Conditions in V-Groove Root-pass Welding of STS316L," *Proceeding of the KAMES 2010 Joint Symposium*, pp. 275~276.
- (2) Lee, B. W., and Joe, S. M., 2010, "A Study on the Welds Characteristics of Stainless Steel 316L Pipe using Orbital Welding Process," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 71~77.
- (3) Son, J. S., Kim, I. S., Kim, H. H., Kim, I. J. Kang, B. Y., and Kim, H. J. 2007, "A study on the Prediction of Bead Geometry in the Robotic Welding System," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 1726~1731.
- (4) Park, H. S., Kim, T. H., and Rhee, S., 2002, "Optimization of Welding Parameters for Resistance Spot Welding of TRIP Steel using Response Surface Methodology," *Journal of the Korea Welding and Joining Society*, Vol. 2, No. 2, pp. 47~50.
- (5) Cho, D. W., Na, S. J., and Lee, M. Y., 2009, "Exercitation of Bead Shape using Non-linear Multiple Regression and Piecewise Cubic Hermite Interpolation in FCA Fillet Pipe Welding," *Journal of the Korea Welding and Joining Society*, Vol. 27, No. 5, pp. 512~518.
- (6) Olson, J. A., 1982, "Generalized Least Squares and Maximum Likelihood Estimation of the Logistic Function for Technology Diffusion," *Journal of the Technical Forecasting and Social Change*, Vol. 21, pp. 241~249.
- (7) Lee, J. G., and Koh, B. K., 2007, "The Geometry Prediction of Back-bead in Arc Welding," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol.16, No. 5, pp. 84~89.