

GTA 아래보기 자세 다층용접부의 비드형상 예측에 관한 실험적 연구

박민호* · 김일수*[†] · 이지혜* · 이종표* · 김영수* · 나상오*

*목포대학교 기계공학과

An Experimental Study on Prediction of Bead Geometry for GTA Multi-pass Welding in Underhead Position

Min-Ho Park*, Ill-Soo Kim*[†], Ji-Hye Lee*, Jong-Pyo Lee*, Young-Su Kim* and Sang-Oh Na*

*Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea

[†]Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received September 2, 2013 ; Revised October 21, 2013 ; Accepted February 5, 2014)

Abstract

The automatic arc welding is generally accepted as the preferred joining technique and commonly chosen for assembly of large metal structures such as in areas of automotive, aircraft and shipbuilding due to its joint strength, reliability, and low cost compared to other joint processes. Recently, several mathematical models have been developed and studied for control and monitoring welding quality, productivity, microstructure and weld properties in arc welding processes. This study indicates the prediction of process parameters for the expected welding quality with accordance to the adaptive GTA welding process. Furthermore, the mathematical models is also develop to aid the selection of an optimal welding process as the generation of process controls to predict the bead geometry as a function output parameters in the GTA welding process. The developed models through this study showed comparatively excellent predicted results, and will extend to other welding processes to integrate an optimized system for the robotic welding process.

Key Words : GTAW, Multi-pass welding, Mathematical model, Curvilinear model, Main effects plot

1. 서 론

전자부품과 같은 소형제품부터 대형 구조물에 이르기 까지 산업전반에 걸쳐 각 분야의 제품을 생산하기 위한 필수 기반기술인 용접기술은 모든 작업공정에서 핵심적인 공정으로 자리하고 있으며, 서브머지드 아크용접법, TIG(Tungsten Inert Gas) 용접법, MIG(Metal Inert Gas) 용접법 등이 개발되어 공업화 사회의 중요한 생산기술로 발전되었다. 그러나 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. 따라서 용접공정의 무인화 또는 자동화는 필수적이다¹⁻³⁾.

비드 폭(bead width), 비드 높이(bead height), 용입깊이(penetration)와 같은 용접비드형상 변수는 용접전류, 아크전압, 용접속도, 와이어 송급속도, 보호가스 등과 같은 용접공정 변수에 의해 결정된다. 따라서 양호한 용접품질을 나타내는 용접 비드형상을 얻기 위해서 적절한 용접공정 변수를 설정하는 것이 매우 중요한 작업이다. 용접 공정변수에 따른 실험 결과에 의해 유도된 용접 공정 모델은 제한된 범위 내에서만 타당하기 때문에 어느 정도 양호한 용접 품질을 나타내는 관심 영역을 찾기 위한 선행실험이 필수적이다. 일반적으로 선행 실험은 상대적으로 넓은 영역에서 수행되고, 그로 인해 어떤 용접 실험 영역에서는 용락과 같은 현상에 의해 Bad data가 만들어지기 때문에 최대경사법을 적용하기는 어렵다. 완전요인방법은 용접 공정에 대한 모델을 유도하지 않고 단순히 실험을 수행하여 관심

영역을 결정할 수 있지만, 입력 변수의 개수와 입력 변수의 수준수가 커짐에 따라 실험 횟수가 기하급수적으로 커지기 때문에 용접 공정변수 설정의 초기 단계에서 매우 중요하다. 또한, 용접 공정은 다중 입·출력 공정이고, 용접 비드 형상 변수들은 서로 연계되어 있기 때문에, 시행착오법에 의해 용접 공정변수를 조정하여 원하는 용접 비드 형상을 얻는다는 것은 많은 실험과 노력을 필요로 한다. 이런 문제점을 해결하기 위해 용접 공정의 입력 변수와 출력 변수 사이의 모델을 구하고 이것을 이용하여 용접 공정변수를 결정하는 방법들이 제안되고 있다.

Drayton은 공정변수와 비드형상과의 관계를 나타내기 위하여 수학적 모델 개발에 관하여 연구하였으며, 최적 공정변수를 선정할 수 있는 tolerance box 기법을 개발하였으나, 이 방법은 많은 실험이 필요하고 3개 이상의 공정변수 제어가 불가능한 단점이 있다. Chandel은 최초로 요인설계(factorial design) 실험방법을 용접공정에 적용하였으며, 공정변수와 bead-on-plate 비드형상과의 관계를 연구하였다. Kim은 GMA용접 공정에 적용하여 맞대기 용접에서의 공정변수와 비드형상의 관계를 조사하여 아크전류가 비드형상에 가장 큰 영향을 미치며 실험 결과에서 도출한 수학적 모델을 비드형상 예측에 사용할 수 있다는 사실을 확인하였다⁷⁻⁹⁾. 용접자동화에 필수적인 최적의 용접변수 예측을 위한 다양한 기법들이 GMA(Gas Metal Arc) 및 GTA(Gas Tungsten Arc) 용접에 집중적으로 연구되고 있지만 최근 용접 자동화에 이용한 수학적 모델에 관한 연구는 아직 활발하지 않은 실정이다. 특히 자동용접은 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.

본 연구는 V형태의 개선을 갖는 STS316L의 GTA 용접실험(초층 및 다층용접)을 통해 용접공정변수를 선정하고 직선 회귀분석을 이용하여 수학적 모델을 제시함으로써 용접공정변수가 비드형상에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 용접실험

용접공정 변수와 비드형상간의 상관관계 분석을 위하여 GTA 용접실험을 실시하였다. 실험을 위해 먼저 직선 캐리지와 가이드레일, 와이어 송급장치, 모니터링 시스템 등을 통합하여 전체 실험 시스템을 구성하였다. 용접방법은 스테인리스강의 용접에 가장 효율적이고 널리 사용되는 GTA 용접법을 선정하였으며, 500A급 인

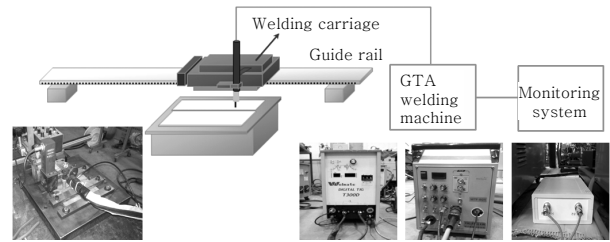


Fig. 1 The apparatus for welding experimentation employed

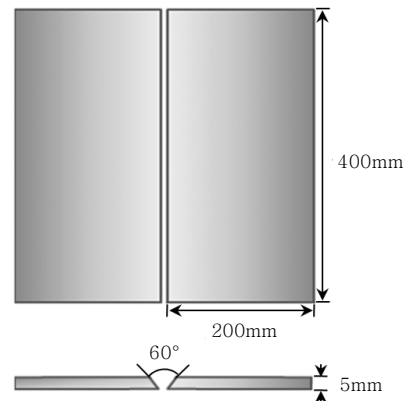


Fig. 2 Configuration of welding specimen

버터 TIG용접기를 사용하여 용접을 수행하였다. 용접 실험을 위한 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다.

체계적인 실험결과 분석을 위하여 출력되는 아크전류 및 용접전압의 정확한 계측은 아크 스타트시 발생하는 고주파의 영향을 고려하여 TIG 용접 전용 모니터링 시스템을 이용하여 아크전압과 용접전류를 측정하였으며, 용접실험 결과 데이터 및 수학적 모델 개발에 사용된 아크전압 및 용접전류값은 이를 통하여 계측된 데이터 값을 사용하였다.

본 실험을 위하여 STS 316L 재질의 스테인리스 강판을 사용하였으며, 400×200×5mm의 규격으로 절단 후 60°의 개선각을 부여하여 맞대기 시험편을 Fig. 2와 같이 제작하였다. 실험에 사용된 시험편의 기계적 성질 및 화학적 조성을 Tables 1~2에 각각 나타내었다.

입력변수는 용접전류, 아크전압, 용접속도, 와이어 송급속도이며, 이에 따른 출력변수로는 비드 폭과 높이로 선정하였다. 고정변수는 V개선각의 특성상 개선부 표면에 입열이 분포되어 충분한 용입이 이루어지지 않음을

Table 1 Mechanical properties of material

Material	Tensile strength (kg/mm ²)	Yield point (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
STS316L	53	21	35	184

Table 2 Chemical compositions of STS316L

Alloying element(%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.02	0.61	0.67	0.02	0.002	17.31	12.00	2.14

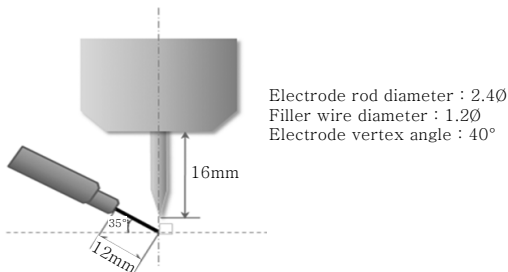


Fig. 3 Dimensions of torch part

확인하고 시험편의 개선각에 관계없이 양호한 이면비드 형상이 도출하기 위한 선행실험을 수행한 결과 토치와 모재와 이루는 각도는 90°이며, 와이어의 송급각도는 35°, 텅스텐 전극봉의 직경과 연마각도는 각각 2.4φ, 40°로 선정하였다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 용접캐리지 토치부의 기구적인 치수를 나타낸다.

2.1 초층 용접실험

본 초층 용접실험은 완전한 요인시험법을 선정하였으며, 4개(용접전류, 아크전압, 용접속도, 와이어 송급속도) 공정변수의 실험 수준(level)과 한계는 Table 3과 같다. 선행실험을 통해 선정된 기타변수를 적용하여 팁과 모재간의 거리(CTWD)는 22mm이며, 모재간의 간격은 1mm, 모재의 개선각은 30° 그리고 토치에 공급되는 보호가스의 유량은 약 18l/min로 설정하였다. 용접부 반대편의 퍼징(purging)작업을 위한 보호가스 또한 아르곤 가스를 사용하였으며 약 10~15l/min의 유량으로 공급하여 퍼징을 위한 사각형태의 구조물에 충분히 채운 후 용접을 수행하였다. 총 16회의 초층용접 조건별로 용접실험을 실시하였으며, 측정된 실험 결과인 이면비드 폭과 높이의 평균값과 측정된 용접부 단

Table 3 Welding parameters and limit for root pass

Welding Parameter	Symbol	Unit	Limit
Welding current	I	Ampere	100~110
Arc voltage	V	Voltage	9~10
Welding speed	S	cm/min	6~7
Wire feeding speed	SWF	cm/min	0.9~1

Table 4 Results of experiment for root pass

No.	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (CPM)	Wire feeding speed (CPM)
1	100	9	6	0.9
2	100	9	6	1
3	100	9	7	0.9
4	100	9	7	1
5	100	10	6	0.9
6	100	10	6	1
7	100	10	7	0.9
8	100	10	7	1
9	110	9	6	0.9
10	110	9	6	1
11	110	9	7	0.9
12	110	9	7	1
13	110	10	6	0.9
14	110	10	6	1
15	110	10	7	0.9
16	110	10	7	1

면 중 각 용접조건에 대한 대표적인 비드형상도 Tables 4~5에 나타내었다.

하지만 용접 진행 중 기구적인 설정에 의한 용락 및 단락이 발생한 구간이 다소 존재함을 확인할 수 있었으며, 실험결과를 기초로 하여 초층 용접공정을 최적화하기 위한 수학적 모델 개발에 이용하였다.

2.2 다층 용접실험

본 용접실험은 초층조건 선정 용접실험과 같은 방법인 완전한 요인시험법을 선정하였으며, 3개의 공정변수(용접전류, 용접속도, 와이어 송급속도)의 실험 수준과 한계를 Table 6에 나타내었다.

GTA 용접에서 정전류 특성으로 인하여 용접전압이 변화하여도 용접전류가 일정하게 유지되기 때문에 4개의 공정변수로 수행한 초층 용접실험과 다르게 다층 용접실험에서는 용접전압을 통제변수로 선정하여 3개의 공정변수로 실험을 수행하였다. 총 8회의 다층용접 조건별로 용접실험을 실시하였으며, 실험을 위한 제반사항의 준비 및 용접공정은 초층 조건선정 용접실험과 동일한 방법으로 실시하였다.

다층용접부의 측정된 표면비드 폭과 높이, 각 평균값과 용접부 단면 중 각 용접조건에 대한 대표적인 비드형상은 Tables 7~8에서 보는 바와 같으며, 각 용접조건에 대한 표면비드 폭과 높이는 전반적으로 안정적인 용접성과 함께 볼록한 표면비드 형상을 나타내었다.

Table 5 Results of experiment for root pass

















No.	Back-bead width(mm)		Back-bead height(mm)		Bead geometry
	1st	2nd	1st	2nd	
	3rd	Avg.	3rd	Avg.	
1	4.67	4.72	0.28	0.26	
	4.68	4.69	0.33	0.29	
2	4.86	4.91	0.35	0.35	
	4.9	4.89	0.41	0.37	
3	4.01	4.06	0.27	0.31	
	4.08	4.05	0.23	0.27	
4	3.49	3.55	0.19	0.23	
	3.58	3.54	0.21	0.21	
5	5.01	4.94	0.55	0.51	
	4.93	4.96	0.53	0.53	
6	4.84	4.91	0.71	0.76	
	4.89	4.88	0.69	0.72	
7	4.87	4.84	0.56	0.55	
	4.84	4.85	0.57	0.56	
8	4.77	4.78	0.33	0.36	
	4.76	4.77	0.36	0.35	
9	5.05	5.1	0.95	1.01	
	5.06	5.07	0.92	0.96	
10	5.66	5.61	0.74	0.79	
	5.68	5.65	0.78	0.77	
11	5.23	5.14	1.04	1.06	
	5.23	5.2	1.08	1.06	
12	5.01	5.06	0.85	0.89	
	5.05	5.04	0.9	0.88	
13	6.94	7.15	1.54	1.59	
	7.21	7.1	1.52	1.55	
14	6.57	6.41	1.26	1.18	
	6.55	6.51	1.16	1.2	
15	6.01	6.11	1.01	1.06	
	5.97	6.03	1.05	1.04	
16	6.04	6.09	1.35	1.36	
	6.11	6.08	1.37	1.36	









Table 6 Welding parameters and limit for 2 pass

Welding Parameter	Symbol	Unit	Limit
Welding current	I	Ampere	190~200
Welding speed	S	cm/min	10~12
Wire feeding speed	SWF	cm/min	3~3.2

Table 7 Results of experiment for root pass

No.	Welding current (A)	Welding speed (CPM)	Wire feeding speed (CPM)
1	190	10	3
2	190	10	3.2
3	190	12	3
4	190	12	3.2
5	200	10	3
6	200	10	3.2
7	200	12	3
8	200	12	3.2

Table 8 Results of experiment for 2 pass

No.	Top-bead width(mm)		Top-bead height(mm)		Bead geometry
	1st	2nd	1st	2nd	
	3rd	Avg.	3rd	Avg.	
1	7.49	7.53	0.59	0.69	
	7.51	7.51	0.7	0.66	
2	7.77	7.83	0.89	0.92	
	7.77	7.79	0.89	0.9	
3	6.82	6.85	0.86	0.91	
	6.76	6.81	0.87	0.88	
4	7.57	7.61	0.75	0.81	
	7.59	7.59	0.78	0.78	
5	8.84	8.85	1.35	1.39	
	8.95	8.88	1.4	1.38	
6	9.71	9.76	1.31	1.25	
	9.66	9.71	1.25	1.27	
7	8.18	8.16	1.25	1.21	
	8.17	8.17	1.14	1.2	
8	8.31	8.24	1.09	1.15	
	8.29	8.28	1.03	1.09	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공정변수와 비드형상 상관관계

3.1.1 초층 용접부 이면비드와 공정변수

초층용접의 이면비드 폭과 높이에 미치는 4개의 공정 변수의 영향을 분석하고자 MINITAB 프로그램을 이용 하였으며, 초층 용접실험 및 결과에 대한 모델링을 통한 근사와 다르게 주효과도만을 분석 수행하였다.

Figs. 4~5에 나타낸 바와 같이 이면비드 폭은 용접

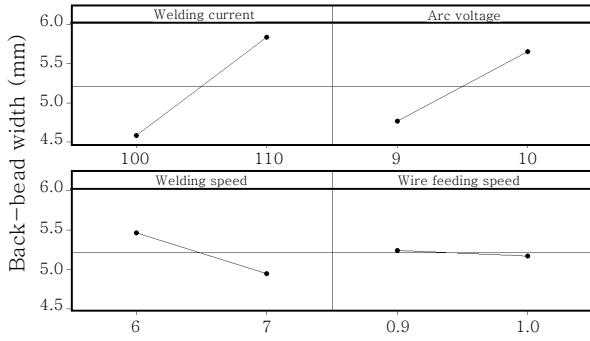


Fig. 4 Main effects plot on back-bead width

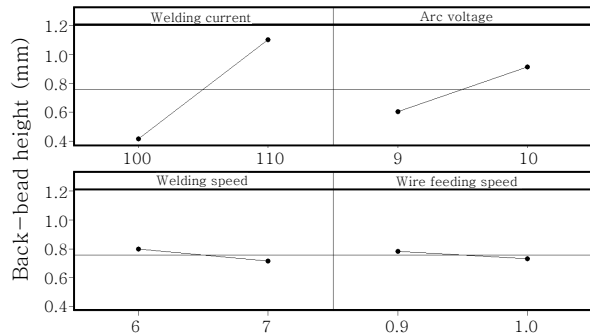


Fig. 5 Main effects plot on back-bead height

공정 변수에 의해 영향을 받으며, 용접전류와 아크전압이 미치는 영향이 가장 크며 두 변수의 값이 증가할수록 이면비드의 폭과 높이도 비례적으로 증가하는 것을 확인하였다.

이면비드 폭과 높이는 용접속도, 와이어 송급속도에 대한 영향력은 미비하게 존재하나, 주효과도 분석만으로는 이면비드에 미치는 용접공정 변수의 영향을 확인하기에 어려움이 있다. Fig. 6~7은 2개의 용접공정 변수가 이면비드 폭과 높이에 미치는 미비한 변화 범위를 확인하였다. 그 결과 그래프에서 보는 바와 같이 느린 용접속도와 빠른 와이어 송급속도 범위에서 이면비드의 폭이 넓은 것으로 확인되고, 느린 용접속도와 느

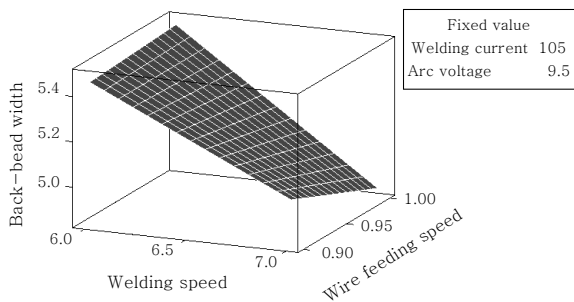


Fig. 6 Surface plot of back-bead width with welding speed, wire feeding speed

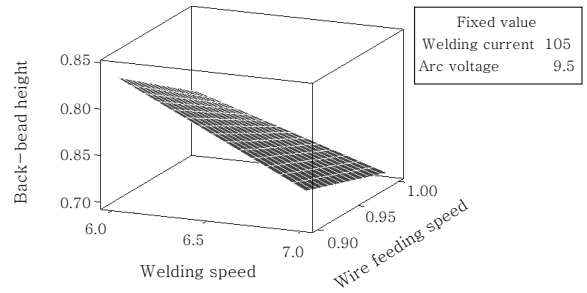


Fig. 7 Surface plot of back-bead height with welding speed, wire feeding speed

린 와이어 송급속도 범위에서는 이면비드의 높이가 크게 나오는 것을 확인하였다.

3.1.2 다층 용접부 표면비드와 공정변수

다층용접의 표면비드 폭과 높이에 미치는 3개 공정변수의 영향을 Figs. 8~9에 나타냈다. 용접전류와 와이어 송급속도가 증가하면 표면비드 폭도 증가하며, 용접속도와 와이어 송급속도가 감소하면 표면비드 높이는 증가함을 확인하였다. 또한 표면비드 폭과 높이에 대해 용접전류, 용접속도, 와이어 송급속도 중 용접전류의 영향이 타 변수에 비해 큼에 따라 미치는 영향이 가장 큼

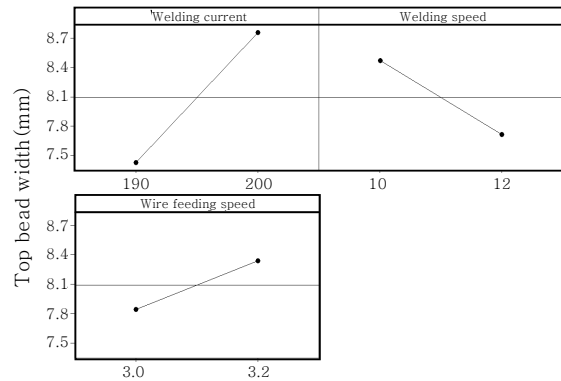


Fig. 8 Main effects plot on top-bead width

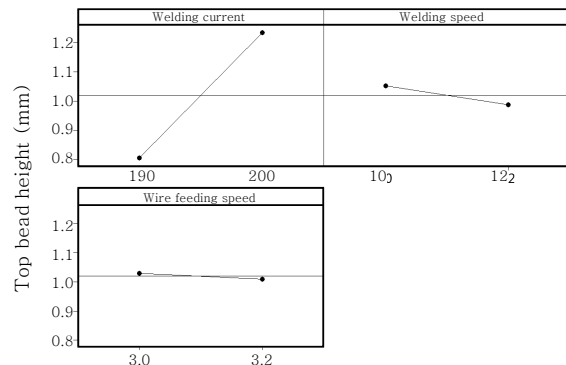


Fig. 9 Main effects plot on top-bead height

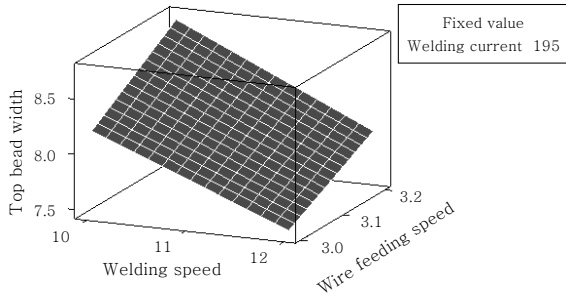


Fig. 10 Surface plot of top-bead width with welding speed, wire feeding speed

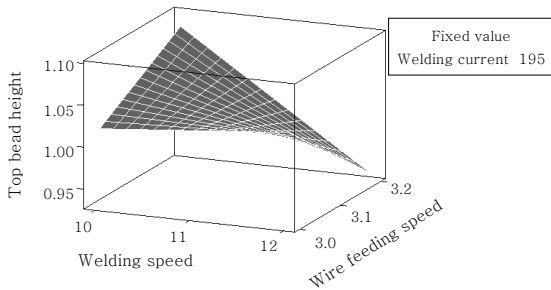


Fig. 11 Surface plot of top-bead height with welding speed, wire feeding speed

을 나타냈다.

표면비드 폭의 경우 용접속도, 와이어 송급속도에 미치는 영향은 확인이 가능하나, 표면비드 높이의 경우 주효과도 분석만으로는 표면비드에 미치는 용접속도, 와이어 송급속도의 영향을 확인하기에 어려움이 있다. 미비한 영향력을 표면반응분석법을 이용하여 표면비드 높이에 미치는 영향력을 용접 공정변수의 영향을 확인하였다. 그 결과 빠른 용접속도와 빠른 와이어 송급속도 범위에서 표면비드 높이가 낮게 나오는 것을 확인하였다. 다층용접부의 표면비드 폭과 높이에 미치는 용접 공정변수에 대한 미비한 영향력을 Figs. 10~11에 나타냈다.

3.2 회귀분석을 이용한 수학적 모델 개발

3.2.1 초층 용접부 수학적 모델 개발

회귀분석을 이용한 수학적 모델 개발을 위하여, 먼저 입·출력변수들 사이의 상호관계 파악이 중요하다. 입력변수 선정은 실험에 사용되지 않은 용접 공정변수를 사용하였을 경우 전혀 다른 도출값이 발생되기 때문에, 용접공정에 영향을 주는 용접전류(I), 아크전압(V), 용접속도(S), 와이어 송급속도(S_{WF})를 입력변수로 선정하고, 출력변수는 이면비드 폭(B_W)과 이면비드 높이(B_H)

Table 9 Analysis variance tests for root pass

Bead geometry	Model	SE (Standard Error)	R ² (coefficient of determination)	Adjusted R ²
Back-bead width	2nd order model	0.42	92.5	77.6
Back-bead height	2nd order model	0.18	93.2	76.6

으로 정의하며, 입력변수와 출력변수 사이의 수학적 모델의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 B_W^{2nd} = & 42.795 - 0.581I - 4.897V - 0.985S \\
 & + 22.475S_{WF} + 0.061IV + 0.0058IS \\
 & + 0.0875IS_{WF} + 0.187VS \\
 & - 2.025VS_{WF} - 2.025SS_{WF}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 B_H^{2nd} = & -2.65 - 0.007I - 0.4375V + 0.2975S \\
 & + 0.6S_{WF} + 0.0115IV + 0.0095IS \\
 & - 0.1IS_{WF} - 0.18VS \\
 & + 0.75VS_{WF} + 0.35SS_{WF}
 \end{aligned} \tag{2}$$

2차 회귀방정식의 결정계수는 각 모델의 입력변수를 이용하여 변동(variability)의 표현정도를 나타낸 지수는 Table 9에 나타냈으며, 개발한 방정식의 검증을 위하여 실험값과 비교·분석을 수행하였다. 분석결과 표준편차가 0.42로 높은 편임에도 불구하고 92.5%, 93.2%의 높은 결정계수 값을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 2차 회귀방정식에 영향을 미치는 입력변수들의 독립적 영향뿐만 아니라 교호작용을 동시에 고려해야 함을 의미한다. Figs. 12~13은 각 실험조건별 측정된 평균값과 예측된 이면비드 폭과 높이의 비교 및 오차를 나타낸다.

3.2.2 다층 용접부 수학적 모델 개발

다층 용접실험을 통하여 도출된 적정 공정변수를 기

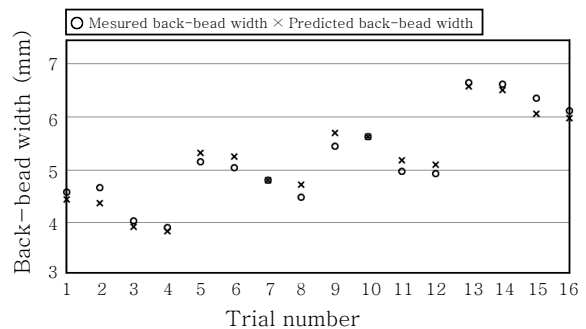


Fig. 12 Relationship between measured and calculated (back-bead width)

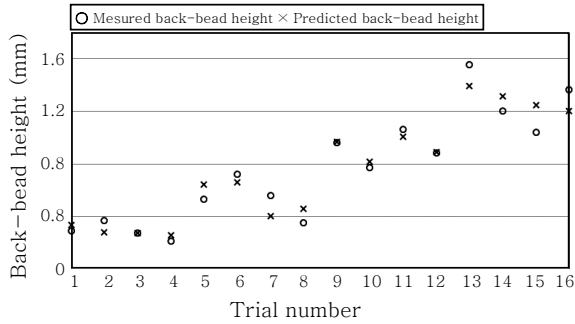


Fig. 13 Relationship between measured and calculated (back-bead height)

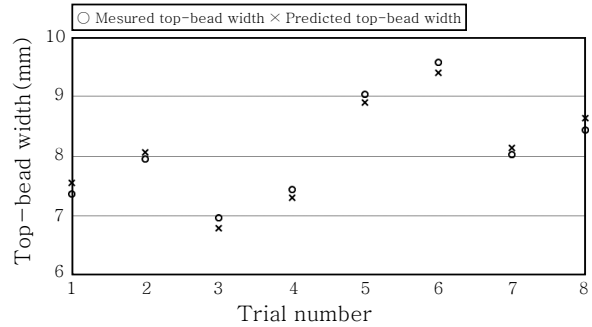


Fig. 14 Relationship between measured and calculated (top-bead width)

Table 10 Analysis variance tests for 2 pass

Bead geometry	Model	SE (Standard Error)	R ² (coefficient of determination)	Adjusted R ²
Top-bead width	2nd order model	0.43	96.6	76.7
Top-bead height	2nd order model	0.12	96.7	77.5

초로 총 8회의 다층 용접실험 결과를 바탕으로 2차 회귀방정식을 개발하였다. 다층 용접실험에 대한 입력변수는 용접전류(I), 아크전압(V), 와이어 송급속도(S_{WF})를 선정하였으며, 출력변수는 표면비드 폭(T_W), 표면비드 높이(T_H)로 선정하였다. 이에 대한 입력변수와 출력변수에 대한 방정식은 아래와 같다.

$$T_W^{2nd} = -115.518 + 0.568I + 6.518S + 11.375S_{WF} - 0.031IS - 0.030IS_{WF} - 0.275SS_{WF} \quad (3)$$

$$T_H^{2nd} = -100.263 + 0.449I + 3.528S + 22.125S_{WF} - 0.012IS - 0.090IS_{WF} - 0.425SS_{WF} \quad (4)$$

개발된 다층용접의 방정식의 정확도를 분석하기 위하여 분산분석을 수행하였으며, 표준편차, 결정계수 및 수정결정계수를 Table 10에 나타내었다. Figs. 14~15은 개발된 방정식의 검증을 위하여 개발한 방정식을 이용하여 실험값과 비교·분석을 수행한 결과를 나타낸다.

개발한 2차 회귀방정식을 바탕으로 예측한 결과와 실험을 통해 얻은 결과를 비교한 결과, 전반적으로 표면비드의 폭과 높이에 대해 표준편차가 0.43으로 높으나 96.6%, 96.7%의 높은 결정계수 값을 확인하였다. 또한 표면비드의 폭과 높이 모두 오차가 다소 발생하였으나, 전반적으로 표면비드의 폭과 높이에 대해 대체로

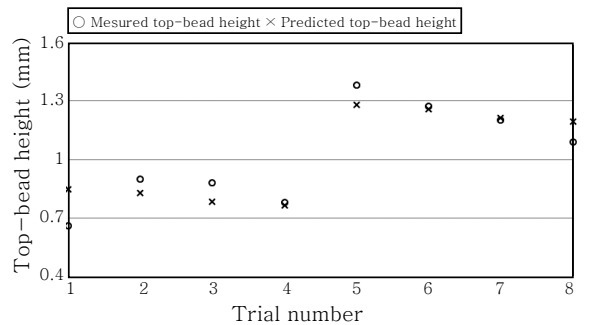


Fig. 15 Relationship between measured and calculated (top-bead height)

신뢰할 만한 결과를 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 V형태의 개선을 갖는 STS316L평판의 GTA 용접실험(초층 및 다층용접)을 수행하고 취득된 데이터를 활용하여 공정변수와 비드형상간의 상관관계 분석 및 개발된 수학적 모델의 정확도를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 용접실험에서 측정된 실험결과를 바탕으로 공정변수와 비드형상(이면 및 표면비드)간의 상관관계를 분석하였으며, 이면비드 폭과 높이 형성율과 형상에 미치는 영향은 용접전류가 가장 크고 표면비드 폭과 높이 형성과 형상에 고려해야 할 사항은 용접전류임을 확인할 수 있었다.

2) 비드형상(이면 및 표면비드)에 대한 최적의 공정변수를 예측하기 위하여 다중 회귀분석을 사용하여, 초층 및 다층 용접부의 수학적 모델을 개발하였다. 개발한 모델의 예측값이 실험값에 대해 다소 오차가 발생하였으나, 전반적으로 비드 폭과 높이에 대해 대체로 신뢰할 만한 결과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

Reference

1. J. S. Park, K. T. Lim, Y. M. Baek, G. S. Ryu, and S. I. Chien : Off-Line Handwritten Hangul Recognition Using Partial Connections of Multilayer Perceptron, Proceedings of JCEANF, (1996), 362~365
2. Doumanidis, G., Hale, M. & Hardt, D. E. : Multi variable control of arc welding processes. Advances in Welding Science and Technology : Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, USA, **18-22** (1986), 449~457
3. K. Homik, M. Stinchcombe, and H. White, : Multilayer feedforward networks are universal approximators, Neural Networks, **2** (1989), 359~366
4. S. Adolfsson, A. Bahrami, G. Bolmsjo, and I. Claesson : On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding, Welding Journal, **78-2** (1999), 59~73
5. M. J. Hermans and G. Den Ouden : Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding, Welding Journal, **78-4** (1999), 137~141
6. W. Wang, s. Liu, and J. E. Jones : Flux cored arc welding: Arc signals, processing and metal transfer characterization, Welding Journal, **74-11** (1995), 369~377
7. R. J. Salter and R. T. Deam : A practical fornt face penetration control system, Proceedings of 2nd interanational, conference on developments in automated and robotic welding, The Welding Institute, London, 1987
8. R. Madigan : Control of gas metal arc welding using arc light sensing, doctorate thesis, Colorado School of Mines, 1994
9. I. S. Kim, C. E. Park, Y. H. Cha, B. S. Seong, Y. M. Park, Y. H. Ahn, K. W. Kim, and Y. J. Jeong : Selection of optimal Process Parameters for Butt Welding, Journal of KWJS, **2** (2001), 3~6
10. Ji-Hye Lee, Ill-Soo kim, Seong-Myeong Jung, Jong-Pyo Lee, Young-Su Kim and Min-Ho Park : A Experiment Study of Torch Distance on Automated Tandem GMA Welding System, Journal of KWJS, **30-6** (2012), 535-514 (in Korean)
11. Yong-Rae Kim, Hyun-byung Chae and Jae-Woong K im : Welding Heat Source Modeling for Heat Flow Analysis of GTA Overlay Welding, Journal of KWJS, **31-4** (2013), 62-66 (in Korean)