

GMA 용접공정에서 공정변수 선정을 위한 민감도 분석에 관한 연구

김일수*, 심지연⁺, 김인주⁺⁺, 김학형⁺⁺⁺
(논문접수일 2008. 1. 25, 심사완료일 2008. 7. 14)

A Study on Sensitivity Analysis for Selecting the Process Parameters in GMA Welding Processes

Ill Soo Kim*, Ji Yeon Shim⁺, In Ju Kim⁺⁺, Hak Hyoung Kim⁺⁺⁺

Abstract

As the quality of a weld joint is strongly influenced by process parameters during the welding process, an intelligent algorithms that can predict the bead geometry and shape to accomplish the desired mechanical properties of the weldment should be developed. This paper focuses on the development of mathematical models for the selection of process parameters and the prediction of bead geometry (bead width, bead height and penetration) in robotic GMA (Gas Metal Arc) welding. Factorial design can be employed as a guide for optimization of process parameters. Three factors were incorporated into the factorial model: arc current, welding voltage and welding speed. A sensitivity analysis has been conducted and compared the relative impact of three process parameters on bead geometry in order to verify the measurement errors on the values of the uncertainty in estimated parameters. The results obtained show that developed mathematical models can be applied to estimate the effectiveness of process parameters for a given bead geometry, and a change of process parameters affects the bead width and bead height more strongly than penetration relatively.

Key Words : Sensitivity analysis(민감도 분석), Bead geometry(비드형상), Process parameter(공정변수) Factorial Design(요인시험), Optimization(최적화)

1. 서론

로봇 GMA 용접은 선박, 플랜트, 교량, 자동차, 항공기,

굴삭기 등의 산업기계 전분야를 비롯하여, 냉장고, 컴퓨터 등의 전기, 저자 제품 및 부품들에 이르기까지 거의 모든 산업분야에 광범위하게 사용되고 있다. 또한 성형, 체결, 절단

* 목포대학교 기계선박해양공학부 (ilsookim@mokpo.ac.kr)
주소 : 전남 무안군 청계면 도림리 61
+ 한국생산기술연구원 정밀정합팀
++ 한국생산기술연구원 전북연구센터
+++ 목포대학교 기계공학과

등 생산기술의 모든 방법을 포함하고 있는 접합기술로서 기계, 금속, 전기, 전자, 화학분야의 지식이 모두 복합적 상호 작용하고 있으므로 용접공정을 이론적으로 해석하는데 한계가 있다⁽¹⁻⁶⁾.

일반적으로 용접에는 높은 열과 압력이 가해지며 이로 인하여 재료의 변화와 변형 및 잔류응력 등이 발생하게 되어 용접부에 결함발생 원인이 된다.

이러한 문제점들을 해결할 수 있는 유일한 방법은 용접공정 자동화 및 로봇을 이용하여 용접공정을 전자동화 하는 것이다. 현재 이에 대한 많은 연구가 수행되어지고 있다. 하지만 용접조건인 설정, 용접봉의 위치와 방향 등은 전적으로 컴퓨터와 센서 시스템을 장착한 로봇에 의해 결정되어야 함으로 공정 변수와 용접비드사이 관계 및 수학적인 모델이 자동화에 필수적인 인자로 지적되어 용접공정의 전자동화 방향으로 연구가 수행되었다⁽⁷⁻⁹⁾. GMA용접은 주어진 용접 조건에서의 공정 변수에 대한 수학적 모델이 완전히 이해되고 정립되어지지 않아 부분적으로만 수행되어지고 있는 실정이며 공정변수와 비드형상 사이의 관계가 비선형적이고 특정 실험결과에 의존하기 때문에 이러한 모델들이 실제 적용되는 것은 매우 어려운 일이지만 실제 용접공정에서의 결과를 예측할 수 있는 수학적 모델을 정립하는 방법과 특정 제약조건 하에서 최적 용접조건을 선정하는 방법을 아는 것이 중요하다.

GMA용접에 의해 형성된 접합부의 성능은 일반적으로 비드크기로 나타내며, 비드폭, 비드높이, 용입깊이 및 비드면적으로 구분된다. 이러한 비드크기에 영향을 미치는 공정변수들은 와이어 직경, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량 등이다⁽¹⁰⁻¹⁶⁾.

본 연구에서는 GMA용접공정의 용접공정이 보다 현실적인 가정 하에 제어시스템의 설계 또는 최적의 공정변수 선정을 위한 알고리즘 개발을 위하여 부분요인 시험(partial factorial experiment)방법을 이용하여 bead-on-plate 방법으로 실험을 실시하였다. 실험결과를 기초로 하여 상업용 통계 컴퓨터 프로그램인 SAS를 이용하여 민감도 방정식(직선방정식 및 곡선방정식)을 개발하였다. 개발된 방정식을 바탕으로 공정 변수와 비드형상 사이의 상호작용을 연구하였다.

2. 실험준비 및 방법

실험에 사용된 재료는 Zircaloy-4이며, 순수 Zr에 Sn, Fe, Cr 등의 합금원소가 첨가되어 있으며 화학성분 및 기계적 성질은 Tables 1~2와 같다. Zircaloy-4 지지격자의 용접부

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield point (MPa)	Elongation (%)	Elasticity (GPa)	Poisson's ratio
Zircaloy-4	413	241	20	99.3	0.37

Table 2 Chemical compositions of base metal

Material \ Element(%)	Cr	Fe	O	Sn	Zr
Zircaloy-4	0.1	0.2	0.12	1.4	98.5

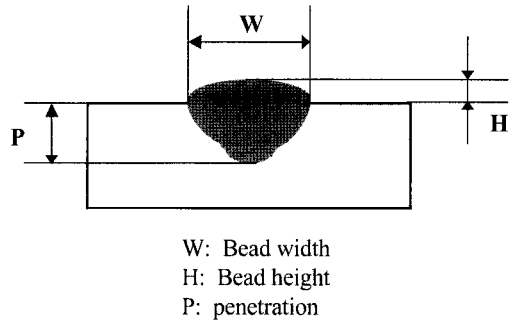


Fig. 1. Schematic diagram for Measurement of bead geometry

위를 부분적으로 절단하여 아세톤으로 세척하고 60C°, 30분간 건조시킨 후 실험에 사용하였다. Fig. 1은 비드크기의 측정을 위한 모식도를 나타낸다.

Zircaloy-4 용접부의 미세조직은 용접된 시편의 교차점 단면을 정밀하게 절단하여 마운팅한 후 연마지로 그리트번호 200, 400, 600, 1000, 1500 순으로 갈아냈다. 그리고 폴리싱된 시편은 중류수로 10분간 초음파 세척하고 건조시킨 후, 부피 비율로 H₂O:45, HNO₃:45, HF:10의 용액에 스웰 에칭하여 용접부의 결정립 크기와 미세조직이 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

부분요인 시험(factorial experiment)을 기반으로 하여 비드의 기하학적 구조를 유의성 검증 방법을 이용한 곡선회귀 분석(curvilinear regression analysis)을 하였다. 본 연구에서는 상업용 통계 프로그램 SAS를 이용하여 모든 다중회귀

분석을 수행한 결과 다음과 같은 예측 방정식을 개발하였다.

비드폭:

$$W = \frac{I^{0.3432} V^{0.6786}}{S^{0.4435} 10^{0.01716}} \quad (1)$$

비드높이:

$$H = \frac{I^{0.5443} 10^{1.1437}}{S^{0.2706} V^{1.1102}} \quad (2)$$

용입깊이:

$$P = \frac{I^{1.5616}}{S^{0.4940} V^{0.1041} 10^{2.3835}} \quad (3)$$

모델의 적합성과 계수의 유의성(significance)은 분산분석 기법(analysis of variance technique)과 T-test를 응용하여 시험하였다. Table 3은 위 모델에 대한 추정치의 표준오차(SEE), 복합상관계수(R), 결정계수(R²)를 나타내고 있다. 개발된 비드 형상의 정확성과 효율성을 판단하기 위해 아래와 같은 백분율 편차 방정식을 사용하였다.

$$\lambda = \frac{R_A - R_E}{R_E} \times 100 \quad (4)$$

여기서, λ는 백분율 오차, R_A는 산출 결과, R_E는 실험 결과이다. 백분율 방정식의 값들을 0~5%, 5~10%, 10~15%, 15~20%, 20~25%, 25~30% 등 6개의 항목으로 결정하였다. 비드 형상의 분석 결과 GMA용접용으로 개발된 모델이 보다 정확한 비드 크기를 만들어낸다는 것을 발견하였다. Fig. 2와 같이 예비 시험의 결과를 분석해보면 산출된 결과가 정확하게 측정값을 예측할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

또한 위와 같은 비드형상의 구조 계산 방정식으로 미루어 감도 방정식은 아크전류, 용접전압, 용접속도 등 용접 공정 변수에 대해 미분함으로써 구할 수 있다⁽¹⁰⁾. 이러한 조사의 목적은 실험 방정식에 대해 감도 분석 기법을 사용하여 공정 변수의 효과를 보여주는 데 있다. 아크전류에 대한 감도 방정식을 구하기 위하여 식 (1)~(3)을 아크전류에 대해 미분하였고 아크전류의 감도 방정식은 식 (5)~(7)에 표시되어 있다. 아크전류에 대한 비드폭, 비드높이, 용입깊이 등의 감도를 각각 나타낸다.

$$\frac{dW}{dI} = 0.3432I^{-0.6568} V^{0.6768} S^{-0.4435} 10^{-0.0176} \quad (5)$$

$$\frac{dH}{dI} = 0.5443I^{-0.557} 10^{1.1437} S^{-0.2706} V^{-1.1102} \quad (6)$$

Table 3 Analysis of variance tests for mathematical model for bead geometry

Bead geometry	Standard error of estimate	Coefficient of multiple relation	Coefficient of determination (%)
Bead width	0.0237	0.9645	93.02
Bead height	0.0659	0.8389	70.38
Penetration	0.0606	0.9513	90.56

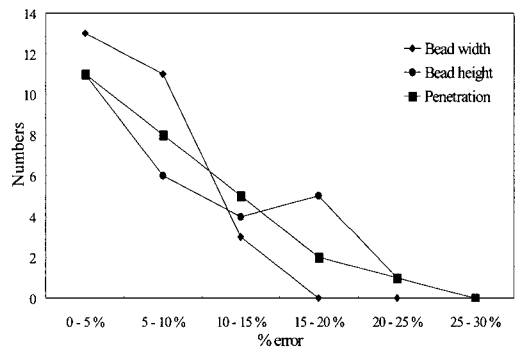


Fig. 2 Accuracy analysis of the mathematical model equations

$$\frac{dP}{dI} = 1.5616I^{-0.5616} 10^{-2.3835} S^{-0.4940} V^{-0.1041} \quad (7)$$

용접전압에 대한 감도 방정식은 식 (1)~(3)을 용접전압에 대해 미분함으로써 결정될 수 있다. 이 방정식은 식 (8)~(10)에 나타나 있다.

$$\frac{dW}{dV} = 0.6786I^{0.3432} V^{-0.3214} S^{-0.4435} 10^{-0.0176} \quad (8)$$

$$\frac{dH}{dV} = -1.1102I^{0.5443} 10^{1.1437} S^{-0.2706} V^{-2.1102} \quad (9)$$

$$\frac{dP}{dV} = -0.1041I^{1.5616} 10^{-2.3835} S^{-0.4940} V^{-1.1041} \quad (10)$$

용접속도에 대한 감도 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dW}{dS} = -0.4435I^{0.3432} V^{0.6768} S^{-1.4435} 10^{-0.0176} \quad (11)$$

$$\frac{dH}{dS} = -0.2706I^{0.5443} 10^{1.1437} S^{-1.2706} V^{-1.1102} \quad (12)$$

$$\frac{dP}{dS} = -0.4940I^{1.5616} 10^{-2.3835} S^{-1.4940} V^{-0.1041} \quad (13)$$

Table 4는 S=330mm/min을 기준으로 비드폭, 비드높이,

용입깊이 등 선택된 공정 변수에 대한 산출 결과를 보여준다. 아크전류, 용접전압, 용접속도에 대한 비드폭의 감도 기준은 Table 5에 나타나 있다. Tables 4~5에서 보는 것처럼 비드폭에 대한 아크전류 및 용접전압의 감도는 양수이고 용접속도의 감도는 음수이다. 양수값의 감도는 비드폭이 증가하면 아크전류나 용접전압이 증가하는 것이고 음수값의 감도는 비드폭이 감소하면 용접속도가 증가한다는 뜻이다.

Fig. 3은 다양한 용접 조건에서 비드 형상(비드폭, 비드높이, 용입깊이)의 용접 전류 감도를 나타내고 있다. 비드폭과

비드높이는 낮은 아크전류 구역에서는 많은 영향을 받고 용입깊이의 감도는 높은 아크전류 구역에서 증가한다. 용접전압 감도는 Fig. 4에 표시되어 있다. 이러한 결과는 비드높이와 비드폭이 용입깊이보다 감도에 영향을 많이 미치는 것을 알 수 있다. 즉 용접전압이 변하면 용입깊이는 적게 변하지만 비드높이와 비드폭은 많이 변하는 것이다. Fig. 5는 용접속도의 감도 분석 결과이다.

Table 4 Selected process parameters and bead geometry

S=330(mm/min)				
Voltage (V)	Current (A)	Width (mm)	Height (mm)	Penetration (mm)
20	180	3.33	0.02	0.72
	260	3.78	0.01	1.28
	360	4.22	0.01	2.13
25	180	3.87	0.02	0.71
	260	4.39	0.01	1.25
	360	4.91	0.01	2.08
30	180	4.38	0.02	0.69
	260	4.97	0.01	1.23
	360	5.56	0.01	2.04

Table 5 Bead width sensitivities of process parameters

S=330(mm/min)					
Voltage (V)	Current (A)	Width (mm)	dW/dI	dW/dS	dW/dI
20	180	3.33	0.0063	-0.0045	0.1124
	260	3.78	0.0050	-0.0051	0.1275
	360	4.22	0.0040	-0.0057	0.1425
25	180	3.87	0.0074	-0.0052	0.1046
	260	4.39	0.0058	-0.0059	0.1187
	360	4.91	0.0047	-0.0066	0.1327
30	180	4.38	0.0084	-0.0059	0.0987
	260	4.97	0.0066	-0.0067	0.1119
	360	5.56	0.0053	-0.0075	0.1251

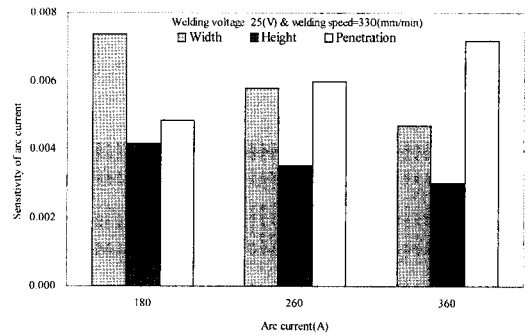


Fig. 3. Sensitivity analysis results of arc current

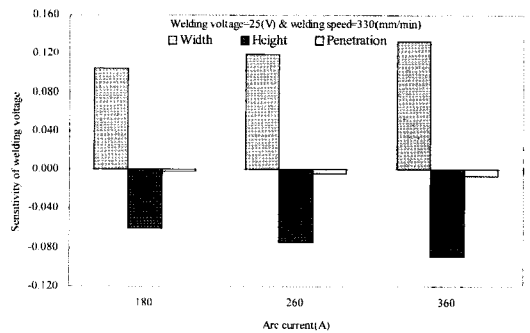


Fig. 4. Sensitivity analysis results of welding voltage

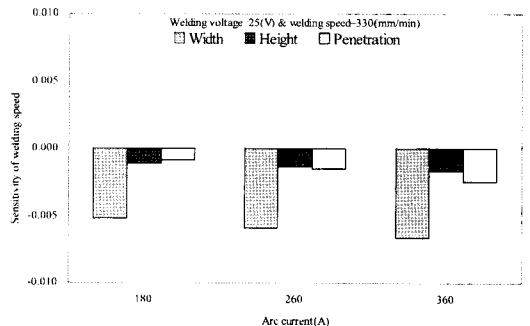


Fig. 5. Sensitivity analysis results of welding speed

일반적으로 비드폭의 감도값은 비드높이와 용입깊이의 감도값 보다 높다. 용접속도가 비드높이와 용입깊이보다 비드폭에 더 큰 영향을 주는 것이다. Figs. 6~8은 공정 변수(아크전류, 용접전압, 용접속도)에 대한 비드 형상(비드폭, 비드높이, 용입깊이)의 감도를 보여준다. Figs. 6~7에 나타난 것처럼 비드폭에 대한 용접전압의 감도는 양수이지만 비드높이에 대한 용접전압의 감도는 음수이다. 비드폭과 비드

높이에 대한 용접전압의 감도가 아크전류와 용접속도의 감도보다 훨씬 크기 때문에 비드폭과 비드높이를 제어할 때 용접전압을 변화시키는 것이 더욱 유용하게 사용되는 것을 알 수 있다. 용입깊이는 다른 비드 형상 변수(비드폭, 비드높이)보다 적은 영향을 미치는 것으로 Fig. 8에서 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 GMA 용접 공정을 위하여 공정변수인 비드형상을 분석하기 위한 알고리즘을 개발하였으며 공정변수의 최적화를 위한 지표로서 3개의 공정변수(아크전류, 용접전압, 용접속도)를 이용하여 표면 비드폭에 대한 민감도를 분석하였다.

Bead-on-plate 용접의 실험 데이터를 기준으로 개발된 회귀 분석 모델을 이용하면 정확도 0~25% 범위 안에서 비드형상을 예측할 수 있다. 감도 분석을 통해 실험 방정식에 대한 용접 공정 변수와 비드 형상의 기하학적 구조 사이의 관계를 파악할 수 있고, 비드 크기(비드폭, 비드높이, 용입깊이)도 정확하게 예측할 수 있다. GMA 용접 공정에서 선형, 곡선 및 회귀 방정식의 다중상관계수를 비교해보면 본 연구에서 사용된 모든 방정식이 상당히 적합함을 알 수 있었다.

비드폭과 비드높이에 대한 용접전압의 감도가 아크전류와 용접속도의 감도보다 훨씬 크기 때문에 비드 형상을 제어할 때 용접전압을 변화시키는 것이 더욱 유용하게 사용되는 것을 알 수 있다.

후기

본 논문은 2005학년도 목포대학교 중형조선산업 지역혁신센터(RIC)에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

- (1) Jones, S. B., 1976, "Process tolerance in submerged arc welding: Initial report," *The Welding Institute Research Report*, Vol. 1.
- (2) Chandel, R. S. and Bala, S. R., 1986, "Effect of welding parameters and groove angle on the soundness of root beads deposited by the SAW process," *Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research*, May, pp. 379~385.

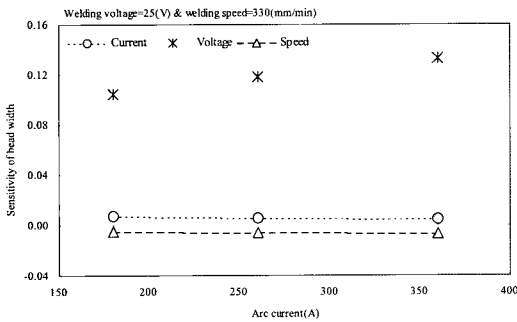


Fig. 6. Sensitivity of bead width

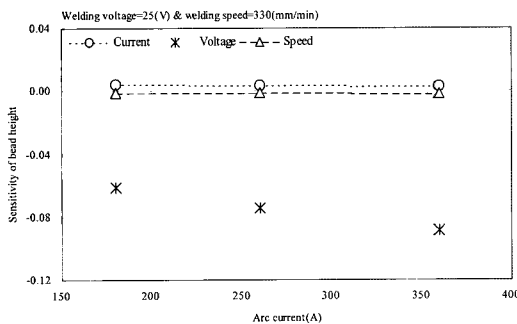


Fig. 7. Sensitivity of bead height

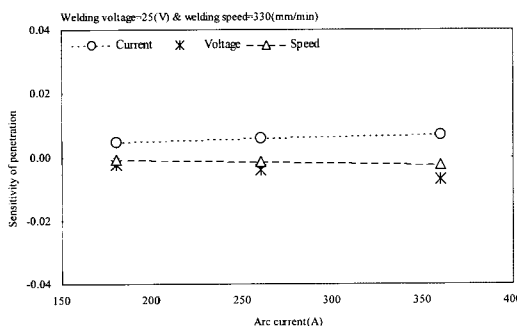


Fig. 8. Sensitivity of penetration

- (3) Shinoda, T. and Doherty, J., 1978, "The relationship between arc welding parameters and weld bead geometry: A literature survey," *The Welding Institute Research Report*, Vol. 74.
- (4) Roberts, D. K. and Wells, A. A., 1954, "Fusion welding of aluminium alloys," *British Welding Journal*, Vol. 12, pp. 553~559.
- (5) Christensen, N., Davies, V. de L., and Gundsén, K., 1965, "Distribution of temperatures in arc welding," *British Welding Journal*, Vol. 23, pp. 54~75.
- (6) Friedman, E. and Glickstein, S. S., 1976, "An investigation of the thermal response of stationary gas tungsten arc welds," *Welding Journal*, Vol. 55, No. 12, pp. 408~420.
- (7) Chandel, R. S., 1988, "Mathematical modeling of gas metal arc weld features," *Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, April 10, pp. 9~12.
- (8) Doumanidis, G., Hale, M., and Hart, D. E., 1986, "Multi-variable control of arc welding processes," *Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research*, Gatlinburg, USA, 18-22 May, pp. 449~457.
- (9) Rozvany, G. N. I. and Z. Mroz, 1977, "Column design: optimization of support conditions and segmentation," *Journal of Structural Mechanics*, Vol. 5, No. 3, pp. 279~290.
- (10) Chuang, C. H. and Hou, G. J., 1999, "Eigen value sensitivity analysis of planar frames with variable joint and support locations," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 2, pp. 2138~2147.
- (11) Choi, B., Park, Y. H., and Choi, K. K., 2000, "Shape design optimization of joining mechanism using doubly curved shell," *International Journal of Computers and Structures*, Vol. 77, pp. 495~507.
- (12) Yoon, S. H., Kim, C. H., and Kim, J. Y., 2006, "The Performance Comparison of Classifier Algorithm for Pattern Recognition of Welding Flaws," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 39~44.
- (13) Lee, J. I. and Koh, B. K., 2007, "A Study on Real-time Control of Bead Height and Joint Tracking," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 71~78.
- (14) Kim, H. G., Kim, Y. S., Yang, S. M., and Nah, S. C., 2005, "A Study on Unit Cell Design for the Performance Enhancement in PEMFC System," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 4, pp. 104~109.
- (15) Kim, C. H., Yu, H. Y., Hong, S. H., and Kim, J. Y., 2007, "A Study on Construction of Automatic Inspection System for Welding Flaws," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 37~42.
- (16) Kim, J. Y., Hong, S. J., Lee, K. T., Kim, B. H., Kim, H. C., and Kim, Y. J., 2000, "A Study on the Application of Digital Signal Processing for Pattern Recognition of Microdefects," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 119~127.