

CO₂ 자동용접의 공정변수와 표면 비드폭의 상관관계에 관한 민감도 분석

서주환*, 김일수, 김인주, 손준식, 김학형(목포대 기계공학과)

Sensitivity Analysis to Relationship Between Process Parameter and Top-bead with in an Automatic CO₂ Welding

J. H. Seo*, I. S. Kim, I. J. Kim, J. S. Son, H. H. Kim(Mech. Eng. Dept., MPU)

ABSTRACT

The automatic CO₂ welding is a manufacturing process to produce high quality joints for metal and it could provide a capability of full automation to enhance productivity. Despite the widespread use in the various manufacturing industries, the full automation of the robotic CO₂ welding has not yet been achieved partly because the mathematical model for the process parameters of a given welding task is not fully understood and quantified. Several mathematical models to control welding quality, productivity, microstructure and weld properties in arc welding processes have been studied. However, it is not an easy task to apply them to the various practical situations because the relationship between the process parameters and the bead geometry is non-linear and also they are usually dependent on the specific experimental results. Practically, it is difficult, but important to know how to establish a mathematical model that can predict the result of the actual welding process and how to select the optimum welding condition under a certain constraint.

In this research, an attempt has been made to develop an intelligent algorithm to predict the weld geometry (top-bead width, top-bead height, back-bead width and back-bead height) as a function of key process parameters in the robotic CO₂welding. 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.

Key Words : 요인시험(factorial experiment), Sensitivity analysis(민감도 분석), top-bead width(표면 비드폭)

1. 서론

최근에 산업발달과 더불어, 용접이 차지하고 있는 비중은 점점 증가하고 있으며, 모든 작업공정에서 용접은 핵심적인 공정으로 자리하고 있다. 가장 많이 사용되는 용접방법중의 하나인 GMA(Gas Metal Arc) 용접은 기계, 금속, 전기, 전자, 화학분야가 복합적으로 상호작용하고 있는 관계로 용접공정을 이론적으로 해석하는데는 한계가 있을 뿐 만 아니라, 변형 및 잔류응력등에 의한 결함의 발생으로 용접 작업시 상당한 주의가 요구된다. 특히, 작업시 수반되는 아크빛(arc light), 스패터(splatter), 매연, 소음 등으로 인해 작업환경이 열악하여 자동화가 절실하게 요구되는 분야중의 하나이다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 광범위한 용접자동화에 관한 연구

가 수행중이며, 최근에는 용접중 용접부 품질을 대변하는 공정변수를 실시간(real-time) 측정하여 용접중 발생하는 여러 외란에 의한 영향을 실시간으로 보상할 수 있는 시스템 개발 및 로봇을 이용한 용접공정의 전자동화 방향으로 연구가 진행되고 있다. 자동 로봇 CO₂ 용접은 생산성을 향상하기 위하여 자동화를 통한 소재의 고품질을 제공하기 위한 생산 공정이다. 다양한 산업에서 사용되어지고 있음에도 불구하고, 자동 로봇 CO₂ 용접은 주어진 용접조건에서의 공정 변수에 대한 수학적 모델이 완전히 이해되고 정립되어지지 않아 부분적으로만 수행되어지고 있는 실정이다. 그러나, 공정변수와 비드형상 사이의 관계가 비선형적이고 특정 실험결과에 의존하기 때문에 이러한 모델들이 실제 적용되는 것은 쉬운 일이 아니다. 실제로 이는 매우 어려

운 일이지만 실제 용접공정에서의 결과를 예측할 수 있는 수학적 모델을 정립하는 방법과 특정 제약 조건 하에서 최적 용접 조건을 선정하는 방법을 아는 것이 중요하다.

본 연구에서는, 자동 로봇 CO₂ 용접에서 중요한 공정변수인 비드형상을 분석하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 이러한 연구목적 달성을 위하여, 공정변수의 최적화를 위한 지표로서 5개의 다른 공정변수(팁 간극, 가스 유출량, 용접속도, 아크전류, 용접전압)를 이용하여 표면 비드폭에 대한 민감도를 분석하였다.

2. 실험

실험의 수행을 위하여 범용 로봇 용접기 Hitachi M6060-2를 선택하고, 용접 시험편 가공은 휨이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 전단 한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 하였다.

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 및 상호작용 효과에 관한 요구된 정보를 제공할 수 있는 요인사험(factorial experiment)방법이 최근에 개발되어 사용되고 있으며 본 연구에서는 이 방법을 선정하였다.

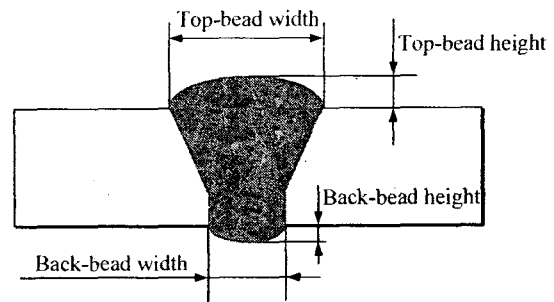
Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Tensile strength (kg/mm ²)	Yield point (kg/mm ²)	Elongation (%)	Impact value (kgm/cm ²)	Hardness (Hb)
SS 330	34-44	20	26	6	126

본 실험은 완전한 요인사험으로 연구할 수 있는 n요소를 갖는 최소한의 처리 콤비네이션과 주 영향 및 상호작용의 영향도 연구가 가능한 방법을 선정하였다. 이 실험을 통하여 선택한 공정변수들은 팁 간극, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량 등이며 응답요소는 표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭, 이면 비드높이이다. 용접재료의 기계적 성질 및 화학적 성분은 Tables 1~2에 각각 나타낸다.

Table 2 Chemical composition of base metal

Element(%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
Material	0.15	0.001	0.6	0.051	0.05	0.04	0.08	0.5	Bal.



W_T : Top-bead width
 W_B : Back-bead width
 H_T : Top-bead height
 H_B : Back-bead height

Fig. 1 Schematic diagram for measurement of weld bead geometry

Fig. 1은 비드크기(표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭, 이면 비드높이)의 측정을 위한 모식도를 나타낸다. 공정변수와 비드형상관계를 모델링하기 위한 로봇CO₂ 용접기는 용접을 실행하기 위한 프로그램 경로를 테스트한다. 150×200×4.5mm 일반구조용 압연강판 시험편을 용접지그에 고정하고 요구된 공정변수를 프로그램 유니트(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시킨다. 용접기와 불활성가스가 공급됨에 따라 로봇은 준비상태가 되고 용접은 실행된다. 새로운 공정변수를 프로그램 유니트를 이용하여 재프로그램화하고 계속하여 용접을 수행한다. 비드크기를 측정하기 위해 용접시험편의 가로축 중간 부분을 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭한후 폴리싱(polishing)한다. 시험편 양쪽 표면 비드폭, 표면 비드높이, 이면 비드폭, 이면 비드높이를 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 stainless wirebrush 및 cloth paper #400, #800, #1500, #2000 순서로 시험편을 광택하고 HNO₃ 3% + H₂O 97% Nital etch용액을 이용하여 에칭한다. 비드크기를 정확히 측정하기 위하여 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경으로 사진을 현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 좌표점을 주어 양쪽을 측정하여 평균값을 나타내었다.

3. 민감도 분석

5개의 공정변수(팁 간극, 아크전류, 용접전압, 용접속도, 가스 유출량)와 비드형상(표면 비드폭) 사이의 상호작용을 연구하기 위한 최적의 방정식은 다중회귀분석(multiple regression analysis)의 통계적 방법을 이용하였다. 다중회귀분석은 상업용 통계

프로그램인 SPSS를 이용하여 비드형상을 예측하고 공정변수와 비드형상 사이의 상호작용을 조사하기 위한 식(1)과 같은 표면 비드폭에 관한 곡선방정식을 개발하였다.

$$W_T = 10^{0.01637} T^{-0.496} G^{-0.0056} S^{-0.519} I^{0.480} V^{0.861} \quad (1)$$

위의 식(1)과 같은 비드형상에 대한 곡선방정식을 기초로 하여 민감도 방정식은 공정변수에 대한 표면 비드폭의 민감도 방정식을 구하기 위하여 식(1)에 대하여 각각 공정변수로 미분하였고, 식(2)~(6)은 팁 간극, 가스 유출량, 용접속도, 아크전류, 용접전압에 의한 표면 비드폭의 민감도 방정식이다.

$$\partial W_T / \partial T = -0.496 T^{-1.496} G^{-0.0056} S^{-0.519} I^{0.480} V^{0.861} 10^{0.01637} \quad (2)$$

$$\partial W_T / \partial G = -0.0056 T^{-0.496} G^{-1.0056} S^{-0.519} I^{0.480} V^{0.861} 10^{0.01637} \quad (3)$$

$$\partial W_T / \partial S = -0.519 T^{-0.496} G^{-0.0056} S^{-1.519} I^{0.480} V^{0.861} 10^{0.01637} \quad (4)$$

$$\partial W_T / \partial I = 0.480 T^{-0.496} G^{-0.0056} S^{-0.519} I^{-0.520} V^{0.861} 10^{0.01637} \quad (5)$$

$$\partial W_T / \partial V = 0.861 T^{-0.496} G^{-0.0056} S^{-0.519} I^{0.480} V^{-0.139} 10^{0.01637} \quad (6)$$

개발된 민감도 방정식을 각각의 공정변수의 비드형상에 미치는 영향을 평가하는데 사용되었으며, 개발된 민감도 방정식을 이용하여 각 공정변수가 비드형상에 미치는 영향을 평가하기 위하여 용접속도와 아크전류에 비하여 작은 영향을 미치는 팁 간극은 11 mm, 가스 유출량은 12 l/min, 용접전압은 22 Volt로 고정한 상태에서 아크전류는 150 ~ 200 Amp, 용접속도는 18 ~ 30 cm/min으로 변화시키면서 비드형상에 대한 민감도를 분석하였다.

Table 3에서 보는 바와 같이 아크전류와 용접전압에 대한 표면 비드폭의 민감도는 양수이고 팁 간극, 가스 유출량, 용접속도의 민감도는 음수이다. 양수값의 민감도는 공정변수가 증가하면 표면 비드폭이 증가하는 것이고, 음수값의 감도는 공정변수가 증가하면 표면 비드폭이 감소한다는 것을 나타낸다. 따라서, 아크전류, 용접전압이 증가하면 표면 비드폭이 증가하고, 팁 간극, 가스 유출량, 용접속도가 증가하면 표면 비드폭이 감소함을 알 수 있다.

Table 3 Top-bead width sensitivities of process parameters

Tip gap = 11(mm), Gas flow rate = 12(l/min), Welding voltage = 22(Volt)						
Arc current (Amp)	Welding Speed (cm/min)	Sensitivity				
		$\partial W/\partial T$	$\partial W/\partial G$	$\partial W/\partial S$	$\partial W/\partial I$	$\partial W/\partial V$
150	18	-0.4974	-0.0051	-0.3181	0.0353	0.4358
	24	-0.4285	-0.0044	-0.2055	0.0304	0.3753
	30	-0.3816	-0.0039	-0.1464	0.0271	0.3343
175	18	-0.5357	-0.0055	-0.3425	0.0326	0.4692
	24	-0.4614	-0.0048	-0.2213	0.0281	0.4042
	30	-0.4109	-0.0043	-0.1577	0.0250	0.3600
200	18	-0.5711	-0.0059	-0.3652	0.0304	0.5003
	24	-0.4919	-0.0051	-0.2359	0.0262	0.4309
	30	-0.4381	-0.0045	-0.1681	0.0233	0.3838

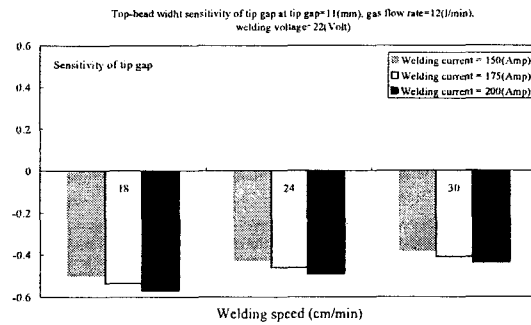


Fig.2 Sensitivity analysis results of tip gap in top-bead width

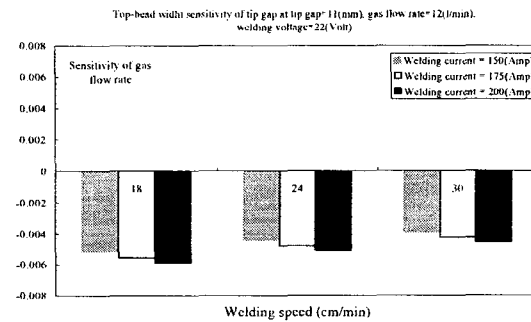


Fig. 3 Sensitivity analysis results of gas flow rate in top-bead width

Fig. 2는 팁 간극에 대한 표면 비드폭의 민감도로써 팁 간극이 증가함에 따라 표면 비드폭이 감소하게 되며, 그 증가의 폭이 공정변수 중에서 가장 크다. 가스 유출량 대한 표면 비드폭의 민감도로써 가스 유출량이 증가함에 따라 표면 비드폭이 감소함을 Fig. 3에 보이고 있다. Fig. 4는 용접속도 대한 표면 비드폭의 민감도로써 용접속도가 증가함에 따라 표

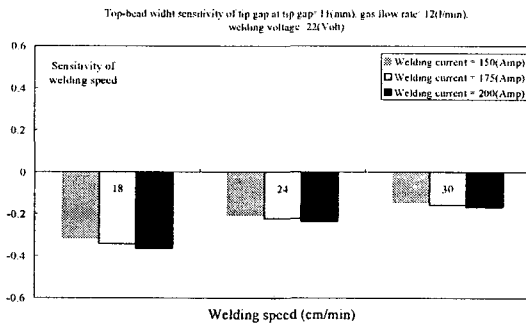


Fig. 4 Sensitivity analysis results of welding speed in top-bead width

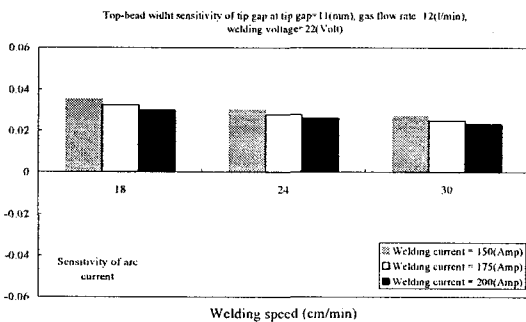


Fig. 5 Sensitivity analysis results of arc current in top-bead width

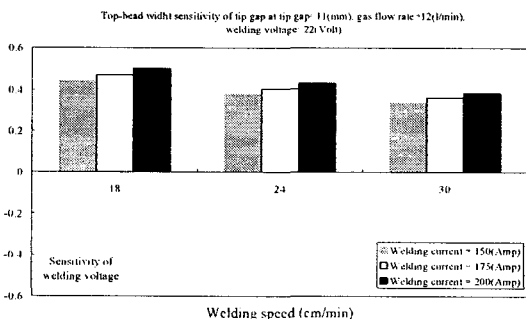


Fig. 6 Sensitivity analysis results of welding voltage in top-bead width

면 비드폭이 감소함을 알 수 있다. 고전류, 저속도에서 그 영향이 더 크다. 아크전류에 대한 표면 비드폭의 민감도로써 아크전류가 증가함에 따라 표면 비드폭이 증가함을 Fig. 5에 나타낸다. 아크전류의 영향은 저전류, 저속도에서 그 영향이 더 크게 나타난다. Fig. 6은 용접전압에 대한 표면 비드폭의 민감도로써 용접전압이 증가함에 따라 표면 비드폭이 증가하게 되며, 팁 간극 다음으로 그 영향이 크게 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는, 자동 로봇 CO₂ 용접에서 중요한 공정변수인 비드형상을 분석하기 위한 알고리즘을 개발하였으며, 공정변수의 최적화를 위한 지표로서 5개의 다른 공정변수(팁 간극, 가스 유출량, 용접속도, 아크전류, 용접전압)를 이용하여 표면 비드폭에 대한 민감도를 분석하였다.

1. 팁 간극에 대한 표면 비드폭의 민감도는 팁 간극이 증가함에 따라 표면 비드폭이 감소하였으며, 그 증가의 폭이 공정변수 중에서 가장 크다. 따라서 표면 비드폭을 제어할 때 팁 간극을 변화시키는 것이 더욱 유용하게 사용될 수 있다는 것을 알 수 있었다.
2. 가스 유출량 대한 표면 비드폭의 민감도는 가스 유출량이 증가함에 따라 표면 비드폭이 감소하였다. 하지만 가스 유출량의 증가량이 미소하여 표면 비드폭을 제어할 때 공정변수로서 가치가 없음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. H. Nomura, Y. Sato, and Y. Satoh, "Back bead width control in one side SAW using flux copper backing", April, 1985.
2. S. Phadke Madhav, "Quality Engineering Using Robust Design," pp. 23 ~ 24, 1989.
3. Heald, P. R., Madigan, R. B., Siewert, T.A. and Liu, S, "Mapping droplet transfer for an ER100S-1 GMAW electrode", Welding Journal, Vol. 73, No. 2, pp.38s ~ 44s, 1994.
4. Y.S. Tarng, W. H. Yang, "Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the taguchi method " The international journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, pp. 549 ~ 554, 1998.