

로봇 CO₂ 아크용접 공정변수들이 비드형상에 미치는 영향에
관한 연구
The Effects of Process Variables on Bead Geometry For Robotic
CO₂ Arc Welding

김동규¹, 박창언², 김일수³, 정영재², 손준식², 박준식³
목포기능대학¹, 목포대학교², 대구기능대학³

Abstract : One of the major important tasks in the robotic CO₂ arc welding process is to understand how process variables affected bead geometry and to subsequently develop the mathematical models to predict the desired bead dimensions. Experiment results are compared to outputs obtained using a set of published formulae relating input variables to output parameters and also investigated process variables on bead geometry for robotic CO₂ arc welding process. The university of results obtained using empirical equations taken from existing models provided to be limited in predicting experimental bead shapes.

1. 서 론

용접 기술은 제2차 세계대전을 전후하여 급속도로 발전하여 새로운 용접법 개발과 동시에 자동 용접분야도 많은 발전을 거듭해왔다. 용접자동화의 첫번째 형태는 1920년대 미국에서 시작되었다. 자동화 용접시스템은 복잡한 지그를 이용하였으며, 높은 생산효율과 원가를 낮추기 위하여 고정된 용접헤드로 용접부를 이동시키는 기계적 장치를 포함하고 있다. 이 시스템은 특별한 용접작업에 한정되었다.

유연성을 갖기 위하여 초기에는 아날로그 방식을 선정하였으며, 나중에 용접을 수행하기 위하여 디지털 컴퓨터를 선택하였다. 개발된 시스템은 셋업시간 감소 및 많은 작업이 가능하므로 초기의 시스템보다 상당히 개선된 것이다. 그러나 초기시스템과 같이 후에 자동화된 용접기는 여전히 전기용접 공정이 개루프제어(open loop control)에 의존하였다. 용접경로, 아크전압, 용접전류, 용접속도와 같은 공정변수 선택은 작업자의 책임이었다. 대수적 모델은 비드폭과 용입깊이와 같은 출력변수를 예측하기 위하여 개발되었다.

하지만 이러한 모델링 시스템은 용접중 발생하는 열에 의해 용접부 축변형 및 용접부 모서리 휨등의 불규칙성을 보상할 수 없다. 이러한 개루프시스템의 문제를 교정하기 위해, 작업자는 작동을 멈추거나 용접이 끝날 때까지 시스템을 기다리는 것이다. 이러한 방법의 자동화된 용접 시스템은 수동용접보다 훨씬 효과적이지 못하다. 작업자는 용접정보를 수집하기 위하여 정확한 측정이 필요하다. Kuhne et al.¹⁾은 수동전기 용접 제어 시스템을 개발하였다. 작업자는 바람직한 출력변수를 얻기 위해 필요한 입력변수 선정에 이론적 모델링 또는 실험결과를 이용한다. 결론적으로 이런 단점 때문에 자동화된 전기용접기를 개발하기 위해 센싱과 제어방법에 더 많은 연구 및 개발이 집중되고 있다. 따라서 본 연구에서는 용접공정의 수학적 모델을 직접 개발하지 않고 이론적인 모델 및 실험실 의하여 계산된 값과 실험값과 비교 분석하여 최적의 수학적 모델을 선정하였다.

2. 실험

용접공정 자동화와 로봇을 이용한 용접에 관련된 많은 문제들은 모델링, 센싱, 제어 등이

다. 통계학적으로 고안된 실험은 요인사험 방법(factorial design method)으로, 이 방법은 비 용접감 및 응답요소의 주 및 상호작용 효과에 관한 정보를 제공할 수 있다는 장점 때문에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 용접공정 모델링은 공정제어와 분석 및 적절한 공정변수의 선택 등이 포함된다. 실험은 공정변수와 비드형상 사이의 관계를 조사할 수 있는 수학적 모델 개발에 집중되었다. 요인사험 실험은 응답이 선택된 요소 레벨의 범위의 대략적으로 선형인 두 개 혹은 그 이상 요소의 영향을 연구하는데 효율적 방법으로 드러났다.

완전한 요인사험 실험에 적용될 수 있는 n요소를 갖는 최소한의 처리 콤비네이션(treatment combination)을 제공할 수 있으며, 주 및 상호작용의 영향도 정의할 수 있다. 선택된 요소는 용접전류, 아크전압, 용접속도, 용접각 등이고 응답요소는 비드폭, 비드높이, 용입깊이이다. 주 및 상호작용 영향을 고려한 변수들은 요인사험 실험하여(2⁴실험) 각 방정식을 적용시키고자 총 16회의 실험을 실시하였다. 실험에 이용된 4 공정변수의 레벨과 한계는 Table1.에 나타내었다.

Table1. Welding process variables and limits

Variable	Unit	Level		Coding	
		Low	High	Low	High
Welding current	Amps(A)	180	260	0	1
Arc voltage	Volts(V)	18	26	0	1
Welding speed	cm/min	24	46	0	1
Welding angle	degree	10	20	0	1

실험을 위하여 로봇CO₂ 아크용접기는 목포기능대학교 로봇 용접실에 위치한 대우중공업의 6축 로봇(ABB1500)을 선택하였고, 용접 시험편 가공은 휨이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 전단한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 하였다. 실험에 사용된 시험편은 200×70×12mm 두께의 SS400 일반구조용 압연강재로서 시험편에 용접하고자 하는 평면은 표면의 녹, 스케일, 산화물등 이물질이 용접결함의 원인이 되지 않도록 stainless wire-brush로 깨끗이 닦아냈다. CO₂가스는 대기 중에서는 기체로 존재하며, 공기보다 무겁기 때문에 용기에 충전된 액체 상태의 CO₂가스는 용기상부에서는 기체로 존재하며 많은 양의 CO₂가스가 용기로부터 빠른 속도로 흘러나올 때는 팽창에 의해 온도가 낮아져 고체모양의 CO₂가스가 되어 가스의 흐름을 막는 경우가 있으므로 CO₂가스용기의 압력조정기는 전기 히터에 의하여 밸브의 냉각을 막고 가스의 흐름을 원활하게 하는 장치가 필요하다. 실험에 사용한 용접와이어는 직경1.2mm의 solid 와이어이다.

200×70×12mm일반구조용 압연강판 시험편을 용접지그에 위치한 다음, 요구된 공정변수를 프로그램 유니트(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시킨다. 그 후 용접기와 CO₂가스가 공급됨에 따라 로봇은 준비상태가 되고 용접은 실시한다. 새로운 공정변수를 프로그램 유니트를 이용하여 재프로그램화하고 계속하여 용접을 수행한다. 용입깊이를 측정하기 위해 용접시험편의 가로축을 중간 부분에서 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭한후 폴리싱(polishing)한다. 비드형상을 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 광택하고 HNO₃ 3% + H₂O 97% Nital 용액을 이용하여 에칭한다. 측정은 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경으로 사진을 현상하여 스케닝 후 컴퓨터에서 좌표적을 주어 양쪽을 측정하였다. 실험의 결과는 로봇CO₂ 아크용접 공정변수들이 비드형상에 미치는 영향을 분석하고 수학적 모델 개발에 이용하였다.

3. 실험결과 및 분석

비드형상의 이론적 예측은 열전달 연구들로부터 계산될 수 있다. 이것들은 용접이 평판에 전부 용입되고, 열이 오직 평판의 평면에서만 전달된다는 것을 가정한다. Roberts와 Wells⁴⁾이 아래의 식을 이용하여 비드형상을 산출하였다.

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q}{St_1} \frac{1}{\rho C_p} \frac{1}{T_m} - \frac{4}{5} \frac{\lambda}{S} \quad (1)$$

여기 W는 비드폭을 나타낸다.

용입깊이는 비드폭의 절반과 같다고 가정하였다. 재료변수들의 값들은 $\lambda = 0.091 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $\rho C_p = 4.5 \text{ J/cm}^3 \text{ C}$, $T_m = 1500 \text{ C}$, $k = 0.41 \text{ J/cm C sec}$ 로 가정하였다. 로봇CO₂ 아크용접에서 평판에 열입력률은 ζ 아크전압 그리고 용접전류의 결과에 의해 주어진다. ζ 는 로봇CO₂ 아크용접에 사용되는 전압, 전류, 용접봉 지름, shielding gas형태의 같은 공정변수들에 의하여 결정된다. 이것은 아래와 비교하기 위해 65%로 가정하였다. 실험디자인에 이용된 공정변수들을 식(1)에 대입하여 비드폭과 용입깊이를 계산하였다. 일반적으로 실험으로 얻은 비드폭은 이론적인 계산값보다 크다. 반면 용입깊이는 이론적인 계산값보다 작다는 것을 알 수 있었다. 선형 회귀분석은 2차원 수학적 모델을 위해 실험결과와 이론적 결과를 비교하는데 이용하였으며 얻어진 결과들은 다음과 같다.

$$W_1 = 5.055 + 0.873W \quad (2)$$

$$P_1 = 0.551 + 0.409P \quad (3)$$

따라서 Table2.은 위에서 표현한 모델들을 위해 산출표준오차(Standard error of estimate), 복합상관계수(Coefficient of multiple correlation) 그리고 결정계수(Coefficient of determination)를 보여준다.

Table2. Analysis of models using Roberts and Wells equation

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination
Bead width	0.755	0.8689	0.6962
Penetration	0.451	0.6716	0.5960

이들 식의 복합상관계수값은 각각 0.8689와 0.6716이다.

식(2)에 이용되는 복합상관계수는 식(3)에 이용되는 복합상관계수 보다 높다는 것을 Table2.로부터 알 수 있다.

Figs. 1~2는 실험으로 측정된 값과 이론식으로부터 계산된 비드크기를 산란 그래프(scatter graph)로 나타내고, 선형회귀 방법을 이용하여 플롯 점들의 최적의 선을 표시하였다. 용입깊이는 과대 기울기를 갖는 반면 비드폭은 실험동안 얻어지는 값들보다 전체적으로 약간 크다는 것을 Figs. 1~2로부터 알 수 있다. 또한 Christensen et al.²⁾은 이론적 무차원 그래프가 다양한 비드크기 대 공정변수 n과의 관계를 잘 나타내준다는 것을 발표하였다. 여기서 n은 $n = QS/4\pi\lambda k T_m$ 이다. Christensen et al.²⁾은 보다 큰 직경의 열원이 GTA 용접의공정에서 비드폭을 증가시키고, 용입깊이를 감소시키는 경향을 분석적으로 보여 주었다.

실험적 결과들은 3차원 열전달 모델을 가정하여 같은 무차원 변수들을 이용하여 그래프를 그려, Friedman³⁾에 의해 얻어진 이론적 결과들과 비교하였다. Fig. 3은 무차원 비드폭을 보여준다. 실험적인 무차원 비드폭과 이론적인 무차원 비드폭 사이의 어느 정도 일치함을 보여준다.

Robert와 Wells⁴⁾가 연구한 이론적인 계산에 의한 용입깊이를 Fig. 4에 나타내었다. 추가로 여러 가지 모델을 기초로 상당히 정확성을 가지는 비드형상의 예측을 비교함으로써, 실험의 결과와 거의 동일한 값들을 얻기 위해서는 수정을 해야한다는 것을 알 수 있었다. CO₂ 아크용접공정중의 전달, 대류, 방사전열, 물질이동같은 요인 때문에 정확한 모델의 개발에 상당한 어려움이 존재하므로, 아마도 페루프나 적응제어 목적에 이용하기 위하여 지속적인 연구가 요구된다.

4. 결 론

로봇 CO₂ 아크용접기를 이용하여 bead-on-plate 용접을 수행한 후 비드형상에 대한 공정 변수의 영향을 연구하였으며, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) 실험결과로는 로봇 CO₂ 아크용접 중 비드형상은 용접전류, 아크전압, 용접속도 및 용접각에 의하여 영향을 받는다는 것을 보여준다.
- (2) 실험으로 얻은 실험결과와 열전달 모델로부터 계산한 결과의 비교는 이론적인 분석이 용입깊이를 일반적으로 과대평가하고, 비드폭은 비록 전부분에 상당한 산란이 존재하지만 상당히 정확히 예측할 수 있었다.

5. 참고문헌

- (1) Kuhne, A. H., Cary, H. B. and Prinz, F. B., "Expert system improve the robotic welding procedure", Welding Quality, International Institute of welding, Pergamon Press, P. 175-180, 1988.
- (2) Christensen, N., Davies, V. de L. and Gjermundsen, K., "Distribution of temperatures in arc welding", British Welding Journal, No. 2, P. 54-75, 1965.
- (3) Friedman, E., "Analysis of weld puddle distortion and its effect on penetration", Welding Journal, Vol. 57, No. 6, P. 161-s - 166-s, 1978.
- (4) Roberts, D. K. and Wells, A. A., "Fusion welding of aluminium alloys", British Welding Journal, No. 12, P. 533-559, 1954.

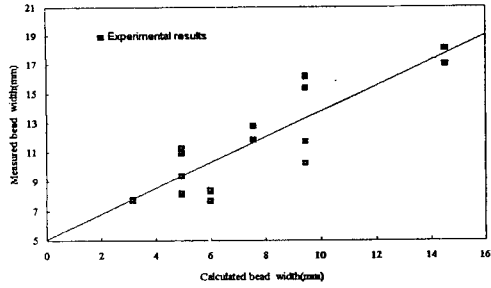


Fig.1 Comparison of measured and calculated bead width

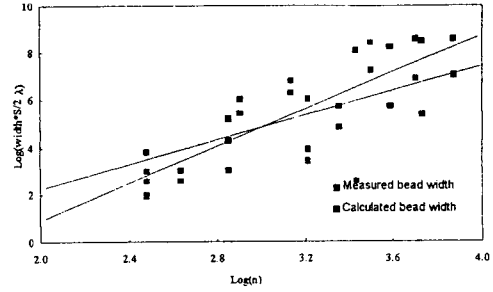


Fig.3 Non-dimensional weld bead measurements versus operating parameter (n) for bead width

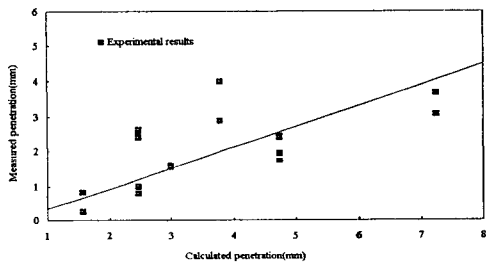


Fig.2 Comparison of measured and calculated penetration

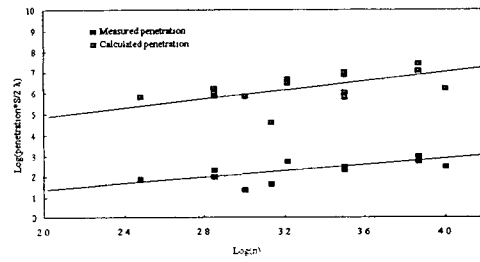


Fig.4 Non-dimensional weld bead measurements versus operating parameter (n) for penetration