

로봇 CO₂ 아크용접 공정변수를 제어하기 위한 수학적 모델 개발
Development of Mathematical Models for Control of Process Parameters
for Robotic CO₂ Arc Welding

임동엽*, 박창언**, 김일수**, 정영재**, 손준식**, 이계정***

*목포기능대학, **목포대학, ***한국산업인력관리공단

ABSTRACT : The demand to increase productivity and quality, the shortage of skilled labour and the strict health and safety requirements have led to the development of the automated welding process to deal with many of the present problems of welded fabrication. To make effective use of the automated arc welding process, it is imperative that a mathematical model, which can be programmed easily and fed to the robot, should be developed.

The objectives of the paper are to develop the mathematical equations (linear and curvilinear) for study of the relationship between process variables and bead geometry by employing a standard statistical package program, SAS and to choose the best model for automation of the CO₂ gas arc welding process. Mathematical models developed from experimental results can be employed to control the process variables in order to achieve the desired bead geometry based on weld quality criteria. Also these equations may prove useful and applicable for automatic control system and expert systems.

1. 서론

자동용접 공정에 제어부분의 효율성은 센서와 수학적 모델의 조합에 달려 있으며, 아크센싱을 통해 비드폭을 제어하고 용접부를 트래킹(tracking) 하는데 적용되었고 GMA 용접의 용입풀내의 운동을 감지 및 GMA 용접의 급속이행 현상을 알아내는데 주로 적용되었다. 시각감지는 트래킹을 결합하고 용착부 윤곽을 감지하며 전극폭을 제어하는데 이용되어 왔다. 적외센서는 다른유형의 갈라진 틈을 트래킹 하거나 침투성을 측정하는데 사용되어 왔고, 초음파 감지는 용착부를 모니터링화하고 감지하는데 적용되어 왔다. 일반적으로 CO₂ 아크용접 공정을 제어하기 위해서는 감지된 정보분석에 기초한 폐루프 제어가 주로 많이 이용되고 있다. 초기에 시스템은 고안된 출력변수를 수신하고 난 후 출력변수에 근거한 필요한 공정변수를 선택해야 했으며, 다음 용접을 초기화하고 마지막으로 용접의 성공여부를 결정하는 용접의 출력을 모니터화 했다. 여태껏 모델링 과정을 위한 많은 분석적 접근이 1981년 Cook¹⁾과 1986년 Doumanidis et al.²⁾ 그리고 Smartt³⁾에 의해 열 전달 관계를 통해 발전해 왔으나 이러한 작업을 합리적으로 정확하게 성립한 사람은 Cook et al.⁴⁾이었다. 대부분 실용적 모델은 실험을 통하여 수행하였고, 용접에 공정변수의 영향을 줄이고자 했다. 왜냐하면 각각의 공정변수들은 다른 변수들에 대해 어느 정도 영향을 미치기 때문이다. 예를 들면 용접전류는 용입깊이뿐만 아니라, 비드높이에도 영향을 끼친다.

대부분 통상적인 실시간 제어할 수 있는 폐루프 용접기는 비드폭과 같은 출력변수를 제어하는 것이다. Hunter et al.⁵⁾은 GMA 용접의 공정변수를 모델링하기 위해 로그방정식과 토치위치를 선정하기 위해 전기용량 변환기 및 와이어 stickout을 모니터화 하기 위해 초음파 센서를 채택했다. Stickout 길이의 감지 정보는 입력에 상응하는 출력의 변화, 와이어 공급율, 토치 이동속도 그리고 일정한 용입깊이를 유지하기 위한 시도의 일환으로 접촉부와의 거리를 만들기 위해 온-라인 시스템을 채택했다.

Rechardson et al.⁶⁾은 비드폭과 위치를 해석하기 위해 컴퓨터 연산방식을 이용하여 반사된 아크 빛의 패턴을 이용하기 위해 GTA 용접의 전극과 동축으로 설치된 광센서를 채택했다.

다른 페루프시스템은 보강면과 냉각율의 실시간 제어를 위해 Smartt et al.⁷⁾에 의해 발전되었다. 또한 Doumanidis et al.²⁾은 비드폭과 용입깊이, 보강면과 열의 영향을 받은 면 그리고 용접 중심축의 냉각율과 비드폭을 제어하기 위해 단순하고 강력한 모델의 추론을 시도했다. 수학적 제어시스템은 분리시킬 수 없고, 과도한 진행시간을 초래하기 때문에 실시간 제어를 하는데 실질적으로 적합하지 않다. 이런 시스템은 발견법과 각 공정변수의 상대적 효과를 계산할 수 없다. 수학적 시스템은 엄격한 제어법칙 때문에 하드웨어 변화가 불가능하며, 성공률과 에러율 역시 알 수 없다. 하지만 이 시스템은 함수를 인지할 수 있는 퍼지 논리나 전문적 시스템만을 고려하여 제어가 가능하다. 본 연구에서는 비드폭에 용접전류, 아크전압, 용접속도, 용접각과 같은 공정변수들의 영향에 관한 상세한 실험 연구를 나타내고, CO₂ 아크용접 공정 자동화에 필요한 수학적 방정식을 개발하였으며 마지막으로 특별한 용접을 위해 적절한 용접조건을 선정하는데 필요한 기준을 제시하고자 한다.

2. 실험

실험 재료는 비드 온 플레이트 (bead-on-plate) 용접 방법을 이용하기 위하여 200×75×12mm의 SS400 일반구조용 압연강판을 사용한다. CO₂ 아크용접 시에 발생하는 외적인 에러 (error)를 줄이기 위하여 양끝 50mm를 제거한 다음 2개의 실험용 샘플을 준비했고, 양쪽 표면은 먼지와 산화물 제거를 위해 깨끗이 닦아냈다. 용접 전극 와이어의 선택은 기계적인 특성, 용재, 용접크기 그리고 현존하는 용접 와이어의 물리적인 특성을 고려하여야 한다. 본 연구를 위해 선택한 용접변수들은 2단계 용접전류(180, 260A), 2단계 아크전압(18, 26V), 2단계 용접속도(250, 460mm/min) 그리고 2단계 용접각(0, 20°)이다. 이러한 변수들을 제외한 다른 변수들은 변하지 않는다고 가정하였다.

시험편은 로봇 조정기를 이용하여 고정지그에 위치시키고 필요한 용접조건 및 로봇의 이동 경로에 따라 특정한 용접단계를 하도록 입력시킨다. 먼저 용접기와 CO₂ 보호가스를 작동시킨 다음 로봇은 준비동작에 들어가고 용접이 시작된다. 이러한 과정은 선결된 실험 작업이 완료될 때까지 계속된다. 비드폭을 측정하기 위해 용접의 가로축을 용접의 중간 부분에서 쇠틀을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭한다. 시험편 비드폭을 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 광택하고 2.5% nital 용액을 이용하여 에칭한다. 비드폭을 정확히 측정하기 위하여 미국 Automatix사가 제작한 Image Analyst라는 프로그램을 사용하였다. Image는 256정도의 Gray스케일로 묘사되고 그 프로그램은 같은 색조의 길이를 검증하는데 그리고 길이, 혹은 각각의 면적간의 거리를 계산하는 데에도 널리 사용되고 있다. 실험의 결과는 CO₂ 아크용접 공정 중 비드폭에 용접변수들의 영향을 및 최적의 방정식을 개발하는데 이용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

비드형상은 용접전류, 아크전압, 용접속도, 용접각에 의하여 영향을 받는다는 것을 실험결과로부터 알 수 있다. 그러므로 최적용접을 위한 수학적 모델 개발은 주어진 품질기준의 제품을 생산하기 위한 공정변수들을 각각 콤비네이션 함으로 달성할 수 있다. 4개의 공정변수를 가지고 응답변수(y)는 비드폭이며 다음과 같이 나타낸다.

$$y = f(C V S A) \quad (1)$$

여기서 C는 용접전류, V는 아크전압 S는 용접속도 A는 용접각을 나타낸다.

실험적인 수학적 모델은 일반적으로 곡선 및 선형방정식 2가지로 분류된다. 이 연구의 근본적인 목적은 비드형상에 공정변수 영향 및 입력과 출력변수 관계를 연구하기 위하여 수학적 방정식을 개발하고, 2개 비드폭에 최적의 수학적 방정식을 선정하는 것이다. McGlone과 Chardwick⁸⁾은 실험 범위내에 선형관계를 가정하고, 곡선 방정식을 도입하였으며 다음과 같

이 나타냈다.

$$y = b_1(C)^{b_2}(U)^{b_3}(S)^{b_4}(A)^{b_5} \quad (2)$$

b_1, b_2, b_3, b_4 와 b_5 는 상수이다.

여기서 순서는 먼저 각각 공정변수의 중요성을 평가하고, 공정변수들 사이에 어떤 상호영향이 있는지를 검사하기 위하여 비드폭에 공정변수 영향을 평가하는 시차분석(ANOVA)을 이용하였다. 두번째로 Fisher's-ratio의 1% 레벨 모델의 중요성을 분석하기 위하여 이용하였다.

선형방정식은 다음과 같이 나타낸다:

$$y = d_1 + d_2C + d_3V + d_4S + d_5A \quad (3)$$

여기서 d_1, d_2, d_3, d_4 및 d_5 상수이다.

3개의 입력계수와 비드형상 사이의 상호작용을 연구하기 위하여 최적의 방정식 유도는 다중회귀분석(multiple regression analysis) 같은 기본적인 통계적 방법을 이용하였다. 이 분석을 위하여 평균통계 컴퓨터 프로그램 SAS를 이용하였다. 비드폭을 예측하고 공정계수들과 비드폭 사이의 상호관계를 조사하기 위하여 직선방정식과 곡선방정식을 실험결과로부터 개발하였으며 다음과 같다 :

직선 방정식:

$$W = -3.1465 + 0.0215C + 0.6664V - 0.1405S + 0.0171A \quad (4)$$

곡선 방정식:

$$W = \frac{C^{0.4548} V^{1.2626} A^{0.0372}}{S^{0.3648} 10^{1.1845}} \quad (5)$$

개발된 수학적 모델의 정확성을 점검 및 분석하기 위하여 분산분석(Variance technique)을 이용하였으며, Table 1.은 위에서 개발한 방정식들의 산출표준오차(standard error of estimate), 복합상관계수(coefficient of multiple correlation) 그리고 결정계수(coefficient of determination)을 보여준다.

Table 1. Analysis of variance tests for mathematical models for bead width

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
4	1.3190	0.9463	89.5440
5	0.0422	0.9590	91.9660

이들 식들의 복합상관계수값은 각각 0.9463과 0.9590이다. 식(5)의 복합상관계수는 식(4)의 복합상관계수보다 높다는 것은 Table 1.로부터 알 수 있다. Figs. 1~2는 실험으로 측정된 값과 이론식으로부터 계산된 비드폭을 산란 그래프(scatter graph)로 나타내고, 선형회귀 방법을 이용하여 플롯점들의 최적의 선을 표시하였다.

비드폭에 공정변수들과의 상호작용을 연구하기 위하여 직선 및 곡선방정식을 이용하여 두 개의 중요한 공정변수를 선정하여 계산한후에 Figs. 3~4으로 나타내었다. Fig. 3은 용접속도,

용접각을 고정시킨 다음 직선방정식을 이용하여 비드폭에 용접전류 및 아크전압과의 상호작용 관계를 나타낸다. 용접속도와 용접각을 고정시킨 다음 곡선방정식을 이용하여 비드폭에 용접전류 및 아크전압과의 상호관계를 Fig. 4에 나타낸다. Figs. 3~4에 따르면 용접전류 상승과 아크전압 감소는 비드폭이 상승한다는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

실험결과 및 수학적 모델개발에 기초한 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

1. CO₂ 아크용접에서 비드폭은 공정변수(용접전류, 아크전압, 용접속도, 용접각)에 의하여 영향 받는다는 것을 실험결과로 알 수 있었다. 용접각은 비드폭에 크게 영향을 미치지 않았다.
2. 실험결과를 이용하여 개발한 수학적방정식들을 비드폭과 공정변수사이의 관계 및 상당히 정확하게 비드폭을 예측할 수 있다.
3. 비드폭은 통계프로그램, SAS을 이용하여 개발한 실험식을 이용하여 공정변수들 및 비드폭과 관계를 연구할 수 있었다. 개발한 직선 및 곡선방정식의 복합상관계수는 큰 차이가 없었다. 결론적으로 개발된 모든 방정식들을 공정제어 및 자동화에 필요한 알고리즘으로 이용된다.
4. 개발된 실험식들은 현재 실험을 위하여 선택한 공정변수 및 비드폭에만 유효한 관계로 이들방정식들은 본 연구에 포함되지 않은 많은 공정변수들의 영향도 연구할수 있도록 추가적인 연구가 필요하다.

6. 참고문헌

- (1) Cook, G. E., "Feedback and adaptive control in automated arc welding system", Metal Construction, Vol. 13, No. 9, P 551-556, 1981.
- (2) Dumanidis, G., Hale, M. and Hardt, D. E., "Multivariable control of arc welding processes", Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, USA, 18-22, May, P. 449-457, 1986.
- (3) Smartt, H. B., "Arc-welding process", Welding: Theory and Practice, Elsevier Science Publishers, P. 175-208, 1990.
- (4) Cook, G. E., Andersen, K. and Barrett, R. J., "Keynote address: Feedback and adaptive control in welding", Recent Trends in Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, USA, 14-18, May, P. 891-903, 1989.
- (5) Hunter, J. J., Bryce, G. W. and Doherty, J., "On-line control of the arc welding process", Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Technology in Welding, Cambridge, UK, June, P. 37-1 - 37-12, 1988.
- (6) Richardson, R. W., Gutow, A., Anderson, R. A. and Farson, D. F., "Coaxial weld pool viewing for process monitoring and control", Welding Journal, Vol. 63, No. 3, P. 43-50, 1984.
- (7) Smartt, H. B., Einerson, P., Watkins, A. D. and Morris, R. A., "Gas metal arc welding process sensing and control", Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, USA, 18-22, May, P461-465, 1986.
- (8) McGlone, J. C. and Chardwick, D. B., "The submerged arc butt welding of mild steel", The Welding Institute Report 80/1978/PE, 1978.

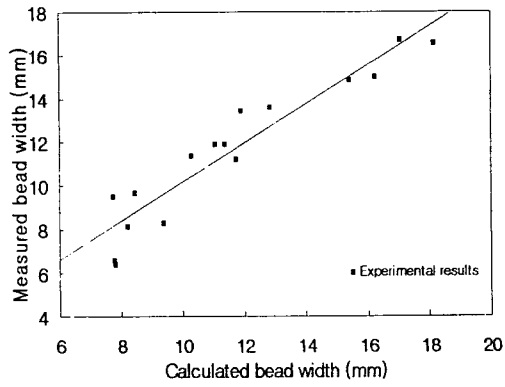


Fig.1 Comparison of measured and calculated bead width using linear equation

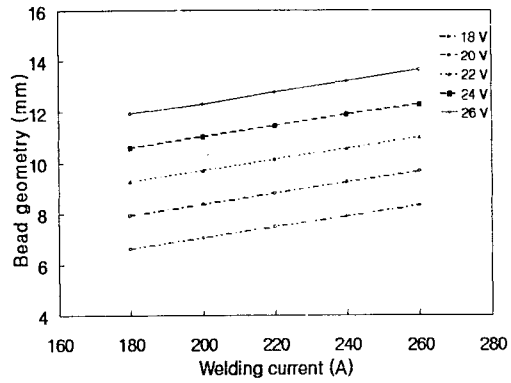


Fig.3 The effect of welding current and arc voltage on bead width using linear equation

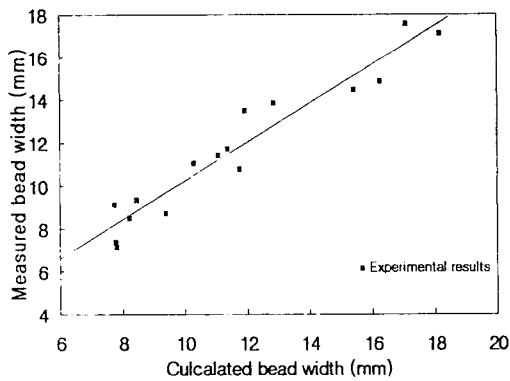


Fig.2 Comparison of measured and calculated bead width using curvilinear equation

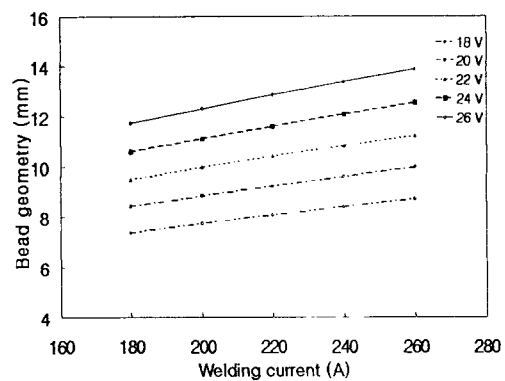


Fig.4 The effect of welding current and arc voltage on bead width using curvilinear equation