

적외선센서를 이용한 용접품질 제어에 관한 연구

김일수[†](기계선박해양공학부, 목포대학교)· 손준식*, 김학형*, 서주환* (기계선박해양공학부, 목포대학교), 김인주** (한국생산기술연구원)

A Study on the Control of the Welding Quality Using a Infrared sensor

I. S. Kim, S. J. Son, I. J. Kim, H. H. Kim, J. H. Seo

Key Words: IR Sensor(적외선 센서), Arc Welding(아크용접), Bead Geometry(비드형상), Welding Quality(용접품질)

Abstract : Optimization of process variables such as arc current, welding voltage and welding speed in terms of the weld characteristics desired is the key step in achieving high quality and improving performance characteristics without increasing the cost. Consequently, incorrect settings of those process variables give rise to deviations in the welding characteristics from the desired bead geometry. Therefore, trainee welders are referred to the tabulated information relating different metal types and thickness as to recommend the desired values of process variables. Basically, the bead geometry plays an important role in determining the mechanical properties of the weld. So that it is very important to select the process variables for obtaining optimal bead geometry. However, it is difficult for the traditional identification methods to provide an accurate model because the optimized welding process is non-linear and time-dependent.

In this paper, the possibilities of the Infra-red sensor in sensing and control of the bead geometry in the automated welding process are presented. Infra-red sensor is a well-known method to deal with the problems with a high degree of fuzziness so that the sensor is employed to build the relationship between process variables and the quality characteristic the proposed above respectively. Based on several neural networks, the mathematical models are derived from extensive experiments with different welding parameters and complex geometrical features. The developed system enables to select the optimal welding parameters and control the desired weld dimensions during arc welding process.

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 용접작업시 상당한 주의가 요구된다. 특히, 작업시 수반되는 아크빛(arc light), 스패터(spatter), 매연, 소음 등으로 인해 작업환경이 열악하여 자동화가

절실하게 요구되는 분야중의 하나이다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 광범위한 용접자동화에 관한 연구가 수행중이며, 특히 최근에는 공정변수와 비드크기와의 상관관계를 조사하여 용접 중 발생하는 여러 외란의 영향을 실시간 보상 및 최적의 공정변수 예측을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 자동 로봇 CO₂ 용접은 생산성을 향상 및 자동화를 통한 소재의 고품질을 제공하기 위해 많이 이용되고 있다. 하지만, 다양한 산업에서 적용되어지고 있음에도 불구하고, 자동 로봇 CO₂ 용접은 주어진 용접조건에서의 공정 변수에 대한 수학적 모델이 완전히 정립되어지지 않아 부분적으로만 수행되어지고 있는 실정이다. 그러나, 공정변수와 비드형상 사

이의 관계가 비선형적이고 특정 실험결과에 의존하기 때문에 이러한 모델들이 실제 적용되는 것은 쉬운 일이 아니다. 실제로 이는 매우 어려운 일이지만 실제 용접공정에서의 결과를 예측할 수 있는 수학적 모델을 정립하는 방법과 특정 제약조건 하에서 최적 용접 조건을 선정하는 방법을 아는 것이 중요하다.

본 연구에서는, 자동 로봇 CO₂ 용접에서 중요한 공정변수인 비드형상을 모니터링하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 이러한 연구목적을 달성하기 위하여, 공정변수의 최적화를 위한 지표로서 용접품질 모니터링 알고리즘 개발을 위한 실험은 5개의 다른 공정변수(CTWD, 가스 유출량, 용접속도, 아크 전류, 용접전압)를 이용하여 공정변수와 등온선 분포 그리고 비드폭의 관계를 확인하고 이를 기초로 하여 알고리즘을 개발하기 위해 적외선 카메라가 설치된 상태에서 설정된 용접선을 따라 용접을 실시하였다. 따라서 본 논문에서는 CO₂용접의 자동화를 위하여 용접품질 모니터링을 위한 알고리즘을 개발하였다.

2. 실험

(장비구성)

실험의 수행을 위하여 범용 용접 로봇인 SAMSUNG 수직다관절 6축 로봇을 선택하고, 용접 시험편 가공은 휨이나 변형을 방지하기 위하여 프레스를 사용하여 전단 한 후 밀링머신으로 마무리 작업을 하였다. 자동화 용접공정과 로봇을 이용한 용접에 관련된 많은 문제점들은 모델링, 센싱 그리고 용접공정의 제어등이 포함되며, 이 중에서 모델링은 가장 중요한 부분이다. 용접품질 모니터링 알고리즘 개발을 위하여 실험디자인은 요인사험으로 연구할 수 있는 n요소를 갖는 최소한의 처리 컴비네이션과 주 영향 및 상호작용의 영향도 연구가 가능한 방법을 선정하였다.

그리고 용접자동화를 위하여 주로 임의의 용접 경로를 추적하는 방법과 공정변수를 실시간으로 제어하기 위하여 실험은 용접품질 모니터링 알고리즘 개발을 위해 실험을 실시하였다. 용접품질 모니터링 알고리즘 개발을 위한 실험은 Table 1과 같이 와이어 직경, 모재의 두께, 가스 유출량은 고정한 상태에서 CTWD, 용접전류, 용접속도, 아크전압을 변화시키면서 실험할 수 있도록 디자인하였다. 이 실험은 공정변수의 변화에 따른 용접부의 품질을 알아보기 위하여 Table 6과 같이 2⁴요인사험에 의하여 총 16회의 실험을 실시할 수 있도록 준비하였다.

Table 1 Welding parameters and limits (experiment for quality monitoring)

Parameter	Symbol	Unit	Limits	
			0	1
Wire Diameter	D	mm	1.2	
Plate Thickness	T	mm	6	
Gas Flow Rate	G	ℓ/min	15	
CTWD	C	mm	10	15
Welding Current	I	Amp	150	220
Welding Speed	S	cm/min	20	60
Arc Voltage	V	Volt	20	32

이 실험을 위하여 선택한 공정변수들은 CTWD, 용접전류, 아크전압, 용접속도, 가스 유출량 등이며 응답요소는 표면 비드폭이다.

용접품질 모니터링 알고리즘 개발을 위한 실험은 가로 150mm 세로 100mm, 두께 6mm인 연강 용접시편을 가접 후, CTWD, 용접전류, 용접속도, 아크전압 등 공정변수를 변경하면서 맞대기 용접을 수행하였으며, 용접시 변형방지 및 적외선 카메라 시스템의 추적을 원활히 하기 위해 용접에 맞대기 용접 지그(jig)를 제작하여 사용하였으며, 와이어 직경은 1.2mm의 솔리드 와이어를 이용하였으며, 보호가스로는 100% CO₂가스를 유량 15ℓ/min으로 사용하였으며, 용접기와 불활성가스가 공급됨에 따라 로봇은 준비상태가 되고 용접은 실행된다. 새로운 공정변수를 프로그램 유닛을 이용하여 재프로그램화하고 16회의 맞대기 용접을 수행하였고, 이를 적외선 카메라로 용접부 온도를 측정하였다. 이 실험을 통하여 획득한 용접시편을 적외선 카메라로 획득한 온도분포는 Fig. 1과 같이 MATLAB 프로그램을 이용하여 등온선 반경을 측정하였다.

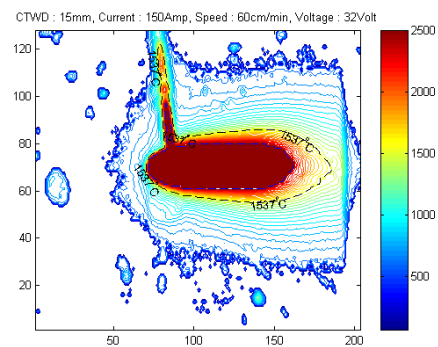


Fig. 1 Isotherm radii measurement using MATLAB program

비드크기를 측정하기 위해 용접시험편의 가로축 중간 부분을 wire cutting machine을 사용하여 자르고

양쪽을 연삭한후 폴리싱(polishing)한다. 공정변수와 등온선 반경의 관계를 파악하여 용접 중 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 10 배의 광학 현미경으로 사진을 현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 좌표점을 주어 양쪽을 측정하여 평균값을 나타내었다.

3. 비드폭 및 등온선 반경 예측모델 개발

공정변수와 등온선 반경의 관계를 파악하여 용접 중 공정변수 변경을 통한 품질향상을 위하여 CTWD, 용접전류, 용접속도, 아크전압 등 공정변수를 변경하면서 16회의 맞대기 용접을 수행하고, 이를 적외선 카메라로 용접부 온도를 측정하였다. 이 실험을 통하여 획득한 용접시편은 절단 후 비드폭을 측정하였고, 용접 중 비드크기를 모니터링하여 원하는 비드크기를 얻기 위하여 최적의 용접조건 선정에 위한 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 임의의 비드크기에 최적의 용접조건(CTWD, 아크전압, 용접전류, 용접속도) 선정에 위한 수학적인 모델 선정은 공정변수들과 비드폭 또는 등온선 반경을 각각 조합함으로써 달성할 수 있다. 4개의 입력 변수를 가지고 응답변수(Y)는 2개의 출력변수의 크기를 나타내는 변화함수로서 다음과 같이 나타낸다.

$$Y = f(C, I, V, S) \tag{1}$$

실험결과를 이용하여 실험범위 내에 선형관계로 가정하고, 곡선방정식을 도입하였으며 다음과 같이 나타냈다.

$$Y = k_1 \cdot C^{a_1} \cdot I^{a_2} \cdot V^{a_3} \cdot S^{a_4} \tag{2}$$

실험결과를 이용하여 비드폭을 예측하고, 공정변수들과 비드폭 사이의 상호관계를 조사하기 위하여 직선방정식과 곡선방정식을 실험결과로부터 다중회귀분석(multiple regression analysis) 방법을 이용하여 개발하였다. 이 방정식을 개발하기 위하여 통계 컴퓨터 프로그램 SPSS를 이용하였으며, 용접공정 변수에 해당하는 상수 값들을 얻을 수 있었다.

실험결과 값과 식(1)과 식(2)를 이용하여 비드폭과 등온선반경을 계산할 수 있는 곡선방정식을 선정하였으며 다음과 같다.

$$W = 10^{-0.158} \cdot C^{-0.197} \cdot I^{0.372} \cdot S^{-0.300} \cdot V^{0.346} \tag{3}$$

$$I_R = 10^{0.628} \cdot C^{-0.486} \cdot I^{0.462} \cdot S^{-0.422} \cdot V^{0.320} \tag{4}$$

선정된 수학적 방정식의 정확성을 비교·분석하기 위하여 분산분석(variance technique)을 이용하였으며, Table 3은 위에서 선정된 방정식들의 산출표준오차(standard error of estimate), 복합상관계수(coefficient of multiple correlation) 그리고 결정계수(coefficient of determination)를 나타낸다. 또한 Figs. 2~3은 실험으로 측정된 값과 선정된 곡선방정식을 이용하여 계산 값을 산란 그래프(scatter graph)로 나타내고, 선형회귀 방법을 이용하여 플롯 점들의 최적의 선을 표시하였다.

Table 3 Analysis of variance test for mathematical models for bead width

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
3	0.416	0.945	89.3
4	0.467	0.978	95.6

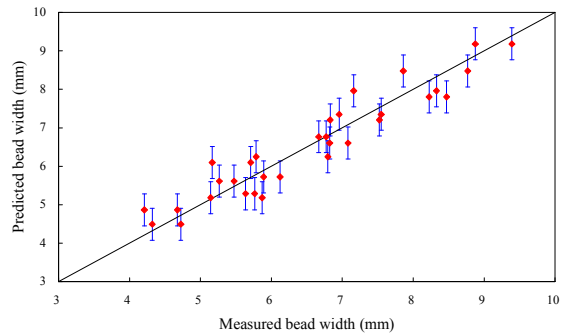


Fig. 2 Comparison between measured and calculated for bead width using curvilinear equation

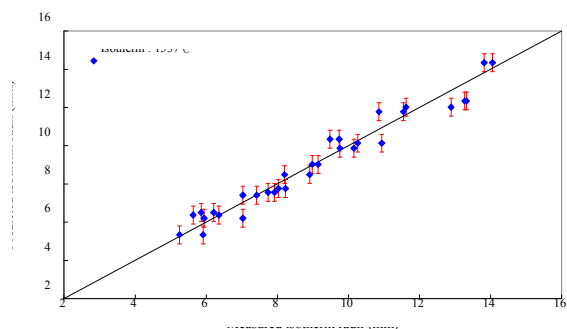


Fig. 3 Comparison between measured and calculated for isotherm radii using curvilinear equation

4. 용접품질 모니터링 알고리즘 개발

위의 결과를 기초로 하여 비드폭과 등온선 반경이 공정변수의 변화에 대하여 같은 경향을 보이는 것을 알았으며, 또한 비드폭과 등온선 반경을 제어하기 위해서는 용접전류와 용접속도를 조정하는 것이 가장 바람직한 사실을 확인하였다. 이러한 사실을 기초로 하여 다른 변수는 고정된 상태에서 용접전류와 용접속도를 변경하면서 등온선 반경을 통하여 얼마나 정확하게 비드폭을 모니터링 할 수 있는지 알아보았다.

다른 변수를 고정하고 CTWD를 10mm와 15mm 2가지로 설정한 상태에서 용접전류를 150Amp에서 220Amp까지 10Amp씩 증가시키면서 총 16회의 용접을 시행하였으며 비드폭과 등온선 반경을 측정하였다. Fig. 4는 용접전류의 증가에 따른 비드폭의 관계를 나타낸 것으로 용접전류의 증가에 따라 비드폭이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, CTWD가 증가하면 용접전류의 증가에 관계없이 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 용접전류의 증가에 따른 등온선 반경의 관계를 나타낸 것으로 용접전류의 증가에 따라 비드폭과 동일하게 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, CTWD에 대하여서도 동일한 경향을 보였다. 이러한 결과를 기초로 하여 비드폭과 등온선 반경의 관계를 나타낸 결과를 Fig. 6에 나타내었다. CTWD의 증가에 따라 비드폭과 등온선 반경은 감소하지만, 비드폭과 등온선 반경이 선형적으로 분포하고 있는 것을 명확하게 보여주고 있다.

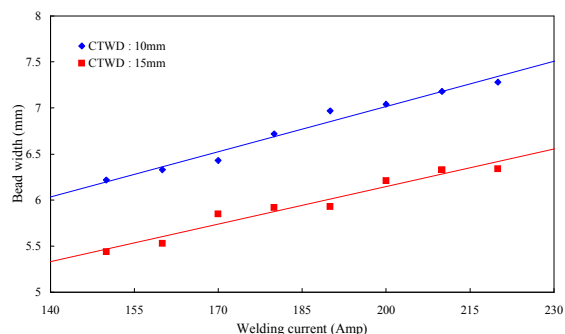


Fig. 4 Comparison between welding current and bead width

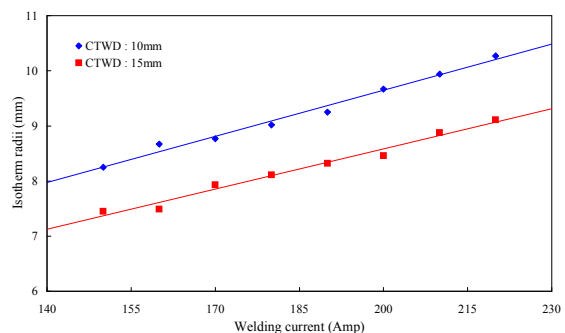


Fig. 5 Comparison between welding current and isotherm radii

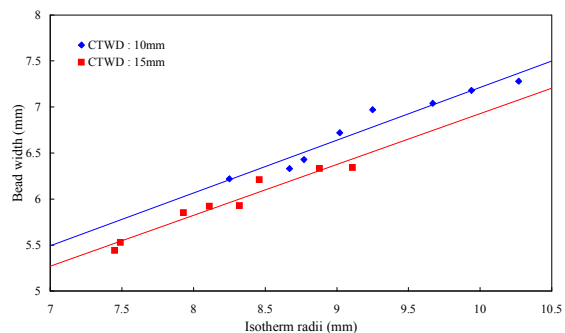


Fig. 6 Comparison between isotherm radii and bead width according to an increase in welding current

5. 결론

본 연구에서는, 로봇 CO₂ 자동 용접공정에 적외선 카메라를 이용하여 공정변수와 비드폭 및 등온선 반경의 비교·분석을 통하여 용접품질을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

1. 실험 결과값을 기초로 회귀분석기법을 이용하여 곡선방정식을 개발하였으며 복합 상관계수가 90%이상으로 공정변수(CTWD, 용접전류, 용접속도, 아크전압)와 비드폭 및 등온선 반경이 선형적임을 보여 주었다.
2. 용접전류의 증가에 따라 비드폭과 등온선 반경이 선형적으로 증가하는 반면에, 용접속도의 증가에 따라 비드폭과 등온선 반경은 선형적으로 감소하였다. 또한 등온선 반경과 비드폭이 선형적인 관계를 이루고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과로 용접 중 적외선 카메라를 이용하여 등온선 반경을 측정할 수 있어 용접의 품질을 실시간으로 모니터링 할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. D. A. Dornfeld, M. Tomizuka, "*Modeling and adaptive control of arc welding process*", Measurement and Control for Batch Manufacturing, ASME, pp53 ~ 64, 1984.
2. A. R. Vroman and H. Brandt, "*Feedback control of GTA welding using puddle width measurement*", Welding Journal, pp. 742 ~ 749, 1976.
3. R. D. Richardson and R. W. Richardson, "*The measurement of two dimensional arc weld pool geometry by image analysis*", Measurement and Control for Batch Manufacturing, ASME, WAM, pp. 65 ~ 75, 1982.
4. D. E. Hardt, D. A. Garlow, and J. B. Weinert, "*A model of full penetration arc welding for control system design*", ASME Trans. Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 107, pp. 40 ~ 46, 1985.