

등온선 반경을 이용한 공정변수 모니터링에 관한 연구

김일수* · 전광석** · 손준식*** · 서주환*** · 김학형*** · 심지연***

*목포대학교 기계·선박해양공학부

**한국폴리텍5 광주대학 컴퓨터응용기계설계과

***목포대학교 대학원 기계공학과

A Study on Monitoring for Process Parameters Using Isotherm Radii

Ill-Soo Kim*, Kwang-Suk Chon**, Joon-Sik Son***, Joo-Hwan Seo***, Hak-Hyoung Kim*** and Ji-Yeon Shim***

*Faculty of Mechanical and Naval Architecture & Marine Engineering, Mokpo University, Jeonnam 534-729, Korea

**Dept. of Computer Advanced Machine Design, Gwangju Polytechnic Collage, Gwangju 500-170, Korea

***Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo University, Jeonnam 534-729, Korea

Abstract

The robotic arc welding is widely employed in the fabrication industry for increasing productivity and enhancing product quality by its high processing speed, accuracy and repeatability. 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. In this paper, the possibilities of the Infrared camera in sensing and control of the bead geometry in the automated welding process are presented. Both bead width and thermal images from infrared thermography are effected by process parameters. Bead width and isotherm radii can be expressed in terms of process parameters(welding current and welding speed) using mathematical equations obtained by empirical analysis using infrared camera. A linear relationship exists between the isothermal radii produced during the welding process and bead width.

*Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received May 9, 2006)

Key Words : Isotherm radii, Bead width, Process variables, Welding quality

1. 서 론

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 해석하는데 한계가 있을 뿐만 아니라, 변형 및 잔류응력 등에 의한 결함의 발생으로 용접작업시 상당한 주의가 요구된다. 하지만, 우리나라에서 용접기술은 이론적인 면 보다는 기능적인 개념으로 인식되어 왔기 때문에 용접기술 개

발이 늦어졌으며 이로 인하여 최근에는 전문적인 용접 기술 인력의 부족현상이 나타나고 있다. 이로 인하여 국내에서 이용되고 있는 전문적인 용접관련 기술들은 대부분 외국으로부터의 도입에 의존하고 있다. 이러한 문제로 용접공정에 소요되는 경비는 막대하게 증가하고 있는 실정이다.

이를 극복하고 고효율, 고생산성 및 저비용 아크 용접의 효과를 얻기 위해 수작업으로만 이루어지던 아크 용접공정을 자동화하기 위한 많은 시도가 이루어졌다¹⁻²⁾. 자동화의 최초 형태는 off-line 용접 시스템으로 복잡한 지그와 기계장치를 이용해 공작물을 움직이고 대신 용접헤드를 고정시켜 더 높은 효율성과 낮은 생산비를 얻고자 했지만, 특정한 제조 작업에만 국한되어지

는 단점을 가지고 있었다. 이후, 컴퓨터를 이용한 다축 매니플레이터를 이용한 아날로그형 용접 장치가 개발되어 용접 센서, 조건설정, 시간감소 등 많은 작업이 동시에 이루어지는 기능을 갖도록 하여 공정 소요시간을 상당히 개선하였다.

최근까지의 용접자동화 기술개발 연구는 생산성 향상을 통한 경비절감을 위하여 고효율의 용접기술 개발에 상당한 노력을 기울였었다. 이런 고효율 접합기술이 적용되면 생산성을 향상시켜 투자비를 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 고효율의 접합기술을 사용하더라도 용접품질을 확보하지 못하면 실제 생산라인에 적용이 불가능하다. 따라서 고효율과 품질이라는 두 가지 목적을 모두 달성할 수 있는 기술 개발이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 최근에는 고에너지 열원을 갖고 있는 레이저, 플라즈마 등이 검토 및 적용되고 있으며 이외에도 용접공정의 효율을 올릴 서보전, 로봇 등의 신기술이 개발되고 있다. 그러나 용접과 같은 생산공정에서 대상제품의 품질을 제어하기 위해서는 이와 연관된 관련 공정변수들의 측정이 먼저 이루어져야 하며 따라서 이러한 관련 공정변수를 측정하기 위한 센서의 개발이 선행되어야 한다. 기존의 연구들에서 용접전류, 용접전압, 이송속도, 와이어 공급속도 등과 같은 공정변수들을 측정할 수 있는 장치에 대한 연구³⁾는 많이 이루어져 왔으나 실제 용접 공정에서는 이와 같은 변수들만으로 용접 품질을 제어하기에는 한계가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 용접부의 품질을 모니터링하기 위하여 용접품질을 직·간접적으로 대변할 수 있는 인자들을 찾는 것이 우선되어야 한다⁴⁻¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 CO₂ 용접품질 모니터링을 위하여 적외선 카메라를 이용하여 측정된 등온선 반경을 통하여 비드폭을 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 CO₂ 용접의 맞대기 용접의 비드폭 및 등온선 반경(1537°C)을 모니터링하기 위하여 2⁴요인사험(factorial experiment) 방법을 이용하여 맞대기 용접방법으로 실험을 실시하였으며, 실험결과를 이용하여 비드폭을 예측할 수 있는 수학적 모델(직선방정식, 곡선방정식)을 개발하였다. 또한, 개발된 수학적 모델을 이용하여 공정변수들(팁간극, 용접전류, 아크전압 및 용접속도)이 비드폭과 등온선 반경에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

등온선 반경을 통한 비드폭 예측을 통하여 용접품질

을 모니터링 하기 위한 알고리즘 개발을 위하여 용접 실험을 실시하였다. Fig. 1은 본 연구의 실험에 사용된 시스템의 개략도이며, 실험에 사용된 시스템은 크게 로봇, 적외선 카메라, 그리고 용접기로 구성되어 있다.

적외선 카메라는 미국의 SYSTEM AB사에서 제작한 적외선 스캐닝 시스템의 6세대인 적외선 열화상카메라 Thermovision 900를 사용하였다. 이 적외선 열화상 카메라는 2~5.4 마이크로 스펙트럼 응답을 보이며 온도범위는 -10~2000°C, 민감도는 30°C에서 0.1°C, 공간해상도 104원소/line(50%변조), IR라인 주파수는 3.5Khz이다. 또한 점광으로부터 구조화된 광을 만들기 위하여 원통형 렌즈를 사용하였다. 센서와 토치사이의 선행거리(Look Ahead Distance : LAD)는 다양한 위치에서 실험 및 분석을 통해 45mm로 선정하였다. 그리고 모재와 카메라 렌즈간 거리를 125mm로 설정하였다.

실험은 Table 1과 같이 와이어 직경, 모재의 두께, 가스 유출량은 고정된 상태에서 CTWD, 용접전류, 용접속도, 아크전압을 변화시키면서 공정변수의 변화에 따른 등온선 반경의 변화를 확인하기 위하여 2⁴요인사험에 의하여 총 16회의 실험을 실시하였다.

적외선 카메라는 용접하는 동안 적외선이 전기적 비디오 신호로 전환 및 증폭되고 디스플레이 장치로 전송된

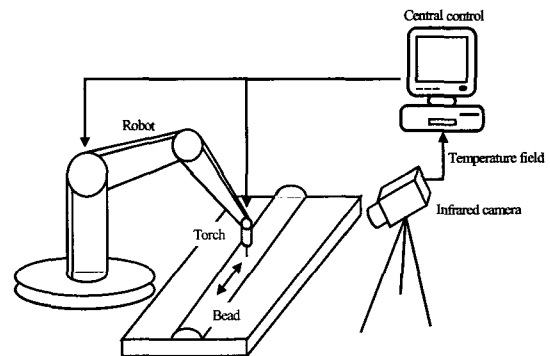


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

Table 1 Welding parameters and limits

Parameter	Symbol	Unit	Limits	
			Low	High
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

다. 출력은 이미지 프레임 그래버(image frame grabber)로 이송되고, 이미지 분석프로그램을 이용하여 모니터링 한다. 전기신호 프레임은 분석과 공정을 위하여 저장장치에 저장되고, 이후 MATLAB 프로그램을 이용하여 필터링한 후에 실시간(real-time)으로 등온선 반경을 측정하였다. 실험에 사용된 시험편은 150×100×6mm SS400 일반구조용 압연강재가 사용되었으며, 용접실험은 용접시편을 가접 후 맞대기 용접을 수행하였으며, 용접시의 변형 방지 및 적외선 카메라 시스템의 추적을 원활히 하기 위해 용접에 맞대기 용접 지그(fixture)를 제작하여 사용하였으며, 보호가스로는 100% CO₂가스를 유량 15 l/min으로 사용하였다.

또한 적외선 카메라가 설치된 상태에서 CTWD, 용접전류, 용접속도, 아크전압 등을 변화시키면서 용접을 실시하여 공정변수와 등온선 반경 그리고 비드폭의 관계를 확인하고자 하였다. 적외선 카메라는 용접하는 동안 시험편의 온도분포를 측정 및 저장하였으며, 이후 MATLAB 프로그램을 이용하여 저장된 데이터를 기초로 등온선 반경을 측정하였다. Fig. 2는 저장된 데이터를 가지고 MATLAB 프로그램을 이용하여 등온선을 나타낸 그림이다. 마지막으로 공정변수 및 등온선 반경과 비드폭의 관계를 알아보기 위하여 용접작업 후 시험편을 절단 분리한 후 비드폭을 측정하였다.

3. 비드폭 예측모델 개발

적외선 센서를 이용하여 등온선 반경을 측정하여 비드의 크기를 예측함으로써 용접품질을 모니터링하고, 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 용접시험편은 절단 후 비드폭을 측정하였고, 용접 중

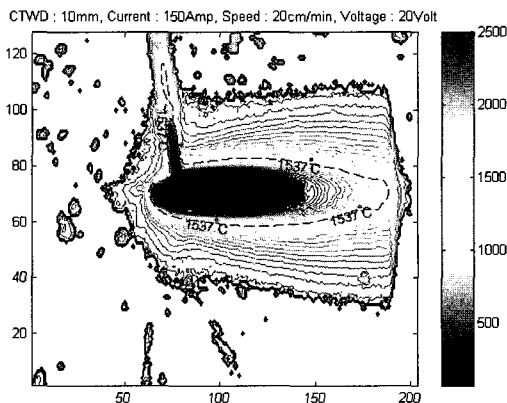


Fig. 2 Isotherm using MATLAB program

등온선 반경을 이용한 공정변수 모니터링을 위한 알고리즘 개발을 하고자 하였다.

이를 위해 실험을 통하여 획득한 데이터를 이용하여 비드폭과 등온선 반경의 관계를 분석하였다. 분석을 위한 수학적 모델 선정은 등온선 반경과 비드폭을 조합함으로써 달성할 수 있으며, 이러한 관계는 다음과 같다.

$$Y = f(I_R) \tag{1}$$

여기서 Y는 응답변수, I_R 는 등온선 반경을 나타낸다.

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

$$Y = k_1 \cdot I_R^a \tag{2}$$

$$Y = k_2 + bI_R \tag{3}$$

여기서, k_1 , k_2 , a , b 는 상수이다.

등온선반경과 비드폭사이의 관계를 확인하기 위하여 다중회귀분석(multiple regression analysis)법을 이용한 직선방정식과 곡선방정식을 실험결과로부터 개발하였다. 방정식은 통계 프로그램인 SPSS를 이용하였으며, 용접공정 변수에 해당하는 상수 값들을 얻을 수 있었다.

실험결과 값과 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 비드폭을 계산할 수 있는 직선방정식과 곡선방정식을 선정하였으며 다음과 같다.

$$W = 10^{0.140} \cdot I_R^{0.708} \tag{4}$$

$$W = 1.904 + 0.511I_R \tag{5}$$

여기서 W는 비드폭을 나타낸다.

선정된 수학적 방정식의 정확성을 비교·분석하기 위하여 분산분석(variance technique)을 수행하였으며, Table 2는 위에서 선정된 방정식들의 산출표준오차(standard error of estimate), 복합상관계수(coefficient of multiple correlation) 그리고 결정계수(coefficient of determination)를 나타낸다. Table 2에 나타낸 복

Table 2 Analysis of variance test for mathematical models for bead width (for isotherm radii)

Equation No.	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination
4	0.445	0.943	0.889
5	0.403	0.950	0.902

합상관계수와 결정계수를 통해 등온선 반경만으로도 상당히 정확하게 비드폭을 예측하고 있으며, 이를 통하여 등온선 반경과 비드폭이 선형적인 관계에 있음을 알 수 있다.

Figs. 3~4는 실험으로 측정된 값과 선정된 곡선방정식과 직선 방정식을 이용하여 계산값을 산란 그래프 (scatter graph)로 나타내고, 선형회귀 방법을 이용하여 플롯 점들의 최적의 선을 표시하여 가시적으로 관계를 표현한 것으로 등온선 반경과 비드폭의 선형적 관계를 보여주고 있다. 분석결과 등온선 반경을 적외선 카메라로 측정할 수 있다면 비드폭을 용접 중 실시간으로 모니터링 함으로써 용접품질을 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

등온선 반경과 비드폭이 상당히 밀접한 선형적 관계를 유지하고 있음을 인식하였고, 이를 기초로 하여 보다 정확한 비드폭 예측모델을 개발하기 위하여 off-line 상에서 설정하는 공정변수를 추가하여 위와 동일한 방법으로 모델을 개발하였다. 먼저 비드폭에 미치는 공정변수의 영향을 파악하기 위하여 각각의 공정변수에 대한 분산분석을 실시하였다. Table 3은 각각의 공정변수와 조합시의 분석결과를 나타낸다. Table 3에 나타

Table 3 Analysis of variance test for mathematical models for bead width (for each parameter)

Included parameters	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination
C	1.391	0.205	0.042
I	1.320	0.371	0.138
S	0.900	0.774	0.599
V	1.335	0.343	0.118
I, S	0.742	0.858	0.736
I, V	1.247	0.505	0.255
S, V	0.769	0.847	0.717
I, S, V	0.561	0.924	0.854
C, I, S, V	0.483	0.947	0.896

Table 4 Analysis of variance test for mathematical models for bead width

Equation No.	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination
6	0.482	0.947	0.896
7	0.416	0.945	0.893

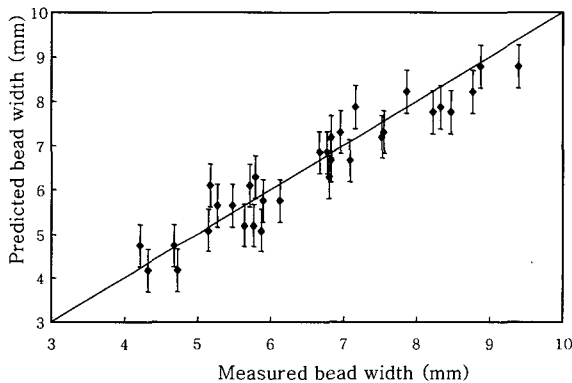


Fig. 3 Comparison between measured and calculated for bead width using linear equation

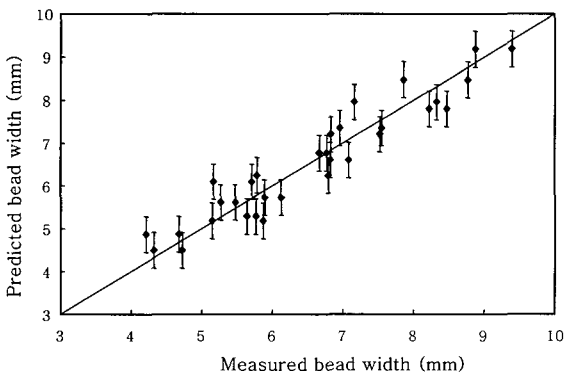


Fig. 4 Comparison between measured and calculated for bead width using curvilinear equation

난 것과 같이 모든 공정변수는 비드폭에 영향을 미치며, 공정변수 중에 용접속도가 비드폭에 가장 큰 영향을, CTWD가 가장 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 실험결과를 이용하여 비드폭을 예측하고, 공정변수와 비드폭 사이의 상관관계를 조사하기 위하여 수학적 모델을 개발하였다. 개발된 곡선방정식과 직선방정식은 다음과 같다.

$$W = 10^{-0.158} \cdot C^{-0.197} \cdot I^{0.372} \cdot S^{-0.300} \cdot V^{0.346} \tag{6}$$

$$W = 5.387 - 0.113C + 0.013I - 0.053S + 0.085V \tag{7}$$

Table 4는 식 (6)~(7)의 모델 정확도를 나타낸 것으로 산출표준오차, 복합상관계수 및 결정계수를 나타낸다. 개발된 직선 및 곡선방정식의 복합상관계수가 거의 동일하였으며, 비교적 정확하게 비드폭을 예측하고 있음을 확인 할 수 있다.

Figs. 5~6은 off-line에서 설정한 공정변수를 모두 사용하여 곡선방정식과 직선방정식을 이용하여 비드폭을 예측한 값과 측정치 값을 비교한 결과이다. Table 4와 Fig. 5~6에 따르면, 비드폭 예측에 있어서 선정된 직선 및 곡선 방정식을 이용함으로 산출오차도 적으

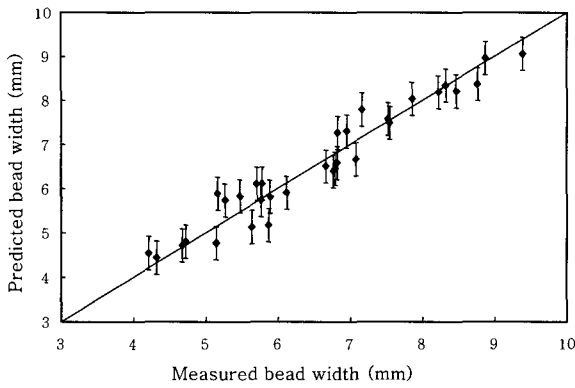


Fig. 5 Comparison between measured and calculated for bead width using linear equation

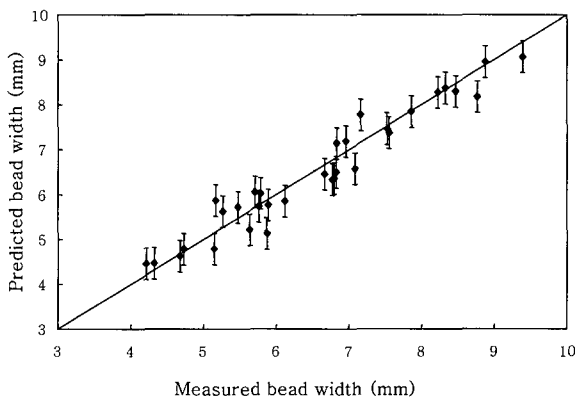


Fig. 6 Comparison between measured and calculated for bead width using curvilinear equation

며, 측정치에 상당히 근접하게 예측하는 것을 알 수 있었다.

4. 등온선 반경을 이용한 공정변수의 모니터링

위의 결과를 기초로 하여 비드폭과 등온선 반경이 선형적 관계를 형성하고 있을 알 수 있었으며 공정변수의 변화에 대하여 같은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 비드폭과 등온선 반경을 제어하기 위해서는 용접전류와 용접속도를 조정하는 것이 가장 바람직한 사실을 확인하였다. 이러한 사실을 기초로 하여 다른 변수는 고정한 상태에서 용접전류와 용접속도를 변경하면서 등온선 반경을 통하여 얼마나 정확하게 비드폭을 모니터링 할 수 있는지 알아보았다.

다른 변수를 고정하고 CTWD를 10mm와 15mm 2가지로 설정한 상태에서 용접전류의 영향을 파악하기 위하여 용접전류를 150A에서 220A까지 10A씩 증가시키면서 용접을 시행하고, 용접속도의 영향을 파악하기 위하여 용접속도를 20cm/min에서 60cm/min까지 5cm/min씩 증가시키면서 용접을 실시하여 그 결과를

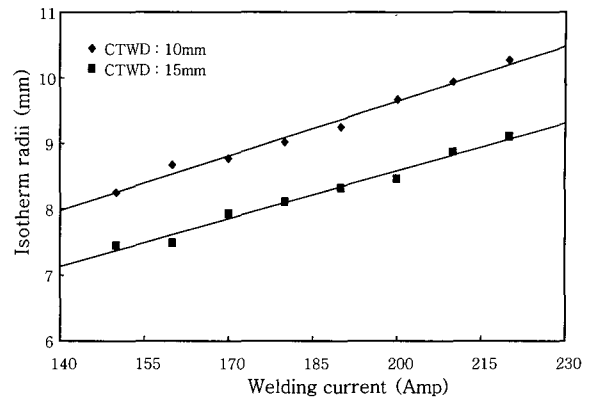


Fig. 7 Comparison between welding current and iso-therm radii

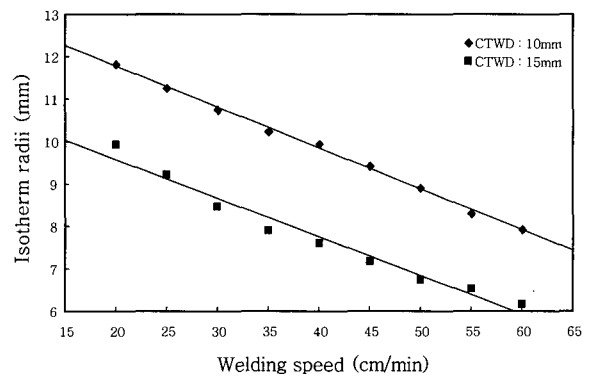


Fig. 8 Comparison between welding speed and iso-therm radii

분석하였다. Fig. 7은 용접전류의 변화에 따른 등온선 반경의 관계를 나타낸 것으로 용접전류의 증가에 따라 등온선 반경이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, CTWD가 증가하면 용접전류의 증가에 관계없이 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 용접속도에 증가에 따른 등온선 반경의 관계를 나타낸 것으로 용접속도의 증가에 따라 등온선 반경이 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있었으며, CTWD의 증가에 대하여 용접전류의 증가와 동일하게 비드폭이 감소하고 있음을 알 수 있었다. 등온선 반경은 비드폭과 선형적 관계를 이루고 있으므로 등온선 반경과 공정변수의 영향을 고려하면 간접적으로 비드폭을 실시간으로 모니터링 할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는, 로봇 CO₂용접품질을 모니터링하기 위하여 적외선 카메라를 이용하여 공정변수와 등온선 반경과 비드폭의 비교·분석을 통하여 용접품질을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

1) 실험을 통하여 획득한 결과를 이용하여 비드폭과 등온선 반경에 대한 상관관계를 분석하였으며, 등온선 반경과 비드폭이 선형적인 관계가 있음을 확인하였다. 또한 CO₂ 용접공정에서 회귀분석기법을 이용하여 직선 및 곡선방정식을 개발 하였으며, 복합상관계수가 90% 이상으로 공정변수(CTWD, 용접전류, 용접속도, 아크 전압)와 비드폭의 상관관계를 연구할 수 있고, 비드폭은 상당히 정확하게 예측할 수 있었다.

2) 등온선 반경에 대한 공정변수의 상관관계를 분석하여 보면, 용접전류 증가에 따라 등온선 반경이 선형적으로 증가하고, 반면에 용접속도 증가에 따라 등온반경은 선형적으로 감소하였다. 이러한 결과로 이는 공정변수 변화에 대하여 등온선 반경이 영향을 받음을 확인하였다. 이러한 결과로 용접 중 적외선 카메라를 이용하여 등온선 반경을 측정할 수 있어 용접의 품질을 실시간으로 모니터링 할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structure, Int. Series on Materials Science and Technology, 33 (1980), 1-10
2. J. F. Lancaster : Metallurgy of Welding(third Edition), WILLEY BOOK Co., 1980, 1-55
3. D. A. Dornfeld and M. Tomizuka : Modeling and adaptive control of arc welding process, Measurement and Control for Batch Manufacturing, ASME, (1984), 53-46
4. R. D. Richardson and R. W. Richardson : The Measurement of Two Dimensional Arc Weld Pool Geometry by Image Anaysis, Measurement and Control for Batch Manufacturing, ASME, WAM, (1982), 65-75
5. 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, 107 (1985), 40-46
6. M. Zackenhause and D. E. Hardt : Weld Pool Impedance Identification for Size Measurement and Control, Journal of Dynamic System Measurement and Control, 105 (1983), 179-184
7. S. I. Rokhlin and A. C. Guu : Computerized Radio - graphic Sensing and Control of an Arc Welding Process, Welding Journal, (1990), 83-97
8. I. S. Kim, C. E. Park, J. S. Son, S. Y. Park, Y. J. Jeong and Y. Prasad : Development of an Algorithm for Controlling Welding Bead Using Infrared Thermography, J of KWS, 18-6 (2000), 726-732 (in Korean)
9. M. Y. Lee and J. W. Kim : A Study of the Infrared Temperature Sensing System for Surface Temperature Measurement in Laser Welding (I) - Surface Temperature Profile According to Bead Shape, J of KWS, 20-1 (2002), 62-68 (in Korean)
10. M. Y. Lee and J. W. Kim : A Study of the Infrared Temperature Sensing System for Surface Temperature Measurement in Laser Welding (I) - Effect of the System Parameter on Infrared Temperature Measurement, J of KWS, 20-1 (2002), 69-75 (in Korean)
11. I. S. Kim and K. Y. Kang : A Study on Development of Sensing System for Welding Automation, J of KWS, 24-3 (2006), 215-220 (in Korean)