

화상처리에 의한 아크용접에서의 용접품질제어에 관한 연구

A Study of Weld Quality Control in Arc Welding Using the Digital Image Processing

김 동철* · 이 세현** · 염 기원**

* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 한양대학교 정밀기계공학과

ABSTRACT

The feedback control systems of welding process using visual information can improve weld qualities. However, it is very difficult to get the visual information of weld pool since welding arc is much stronger than light from weld pool. To explore the possibility of extending the capability of automatic welding machines, a study of a closed loop controlled welding system consisted of a GTA welding machine, a vision system, a stepping motor system and a digital computer was undertaken. Particularly, in this system, a CCD camera with 850nm long pass filter was focused on the weld pool to give a weld pool image. Subsequently, image analysis technique has been developed to measure a weld pool width. Using this weld pool width measurement, a closed loop control system adjusted welding speed to maintain constant weld pool width.

1. 서 론

용접은 조선, 자동차, 항공기, 산업 플랜트설비 등 각종 분야에 널리 활용되는 중요한 접합 공정이다. 특히 보호가스 아크 용접은 재료의 산화를 방지하기 위해 보호가스 분위기에서 아크열에 의해 금속을 용융 접합시키는 고 능률 용접 방법으로 산업체에 널리 사용되고 있다.

그러나 용접 작업은 노동 집약적인 공정이기 때문에 작업자의 기능과 용접 환경 및 용접조건에 따라 용접 품질의 차이가 심하여, 용접 결함 발생률이 높아 반드시 용접 품질 검사가 수행되어야 하고 그에 따라 생산 비용이 증가하고 생산성이 저하하는 문제점을 내포하고 있다.

이러한 문제점의 해결 방안으로 현재 수작업으로 하고 있는 용접 작업을 무인화하고 자동화할 필요가 있지만 용접 공정이 열적 요소, 전자기적 요소, 기계적 요소 등이 결합된 종합적이고 복잡한 공정으로 한 두개의 변수 제어를 통해 양호한 용접 품질을 획득하는 것이 어렵기 때문에 용접공정의 자동화가 더디게 발전하고 있다. 또 열악한 용접 환경이 피드백 제어에 필수적인 센서의 성능을 저하시켜 신호대 잡음비가 낮은 데이터를 피드백하기 때문에 용접 제어를 어렵게 만든다.

그러나 이런 어려운 상황하에서도 아크 용접 공정을 무인화, 자동화할 방법을 고안함으로서 힘들고, 어렵고, 유해한 일을 기계로 대체하여 보다 쉽고 편리하게 용접작업을 수행하게 하고 나아가 용접품질과 생산성 향상을 위해 용접부의 모니터링 작업을 물론 용접 변수 제어를 실현할 필요가 있다^[1~4].

본 연구의 궁극적인 목표는 용접품질을 결정하는 인사 중 하나인 용접 비드폭을 외관에 대해서도 균일하게 유지하도록 디지털 제어기를 설계하여 아크·용접공정을 자동화하는 데 있다. 이를 위해 다음과 같은 연구를 하였다.

첫째로 용접 모재를 연강(SS41)에 한정하여 GTA용접 시 강한 아크광 때문에 획득하기 어려운 용융지 화상정보를 얻기 위해 CCD카메라와 광학필터를 병용하는 방법에 대해 고찰하고, 둘째로 CCD카메라와 적절한 광학필터를 통해 획득한 용융지 화상정보를 화상처리장치와 컴퓨터를 이용해 용접속도를 계산하는 알고리즘을 개발하고, 셋째로 제어입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 용접시스템의 전달함수를 구하였으며, 마지막으로 외관에 대처하여 균일한 비드폭을 얻을 수 있도록 디지털 제어기를 설계하였다.

2. 본 론

2.1 용융지폭 제어를 위한 시스템 구성

2.1.1 GTA용접 시스템

GTA용접에서 용융지폭 제어를 하기 위한 전체 시스템의 개략도를 Fig.1에 보였다. 이 용융지폭 제어 시스템은 일반적으로 산업현장에서 이용되는 GTA용접기 부분과 용융지형상을 관찰 및 제어하는데 필요한 센서부분, 컴퓨터부분, 스텔링모터부분으로 나눌 수 있다. 용융지형상 관찰을 위한 시각시스템은 다음 절에 설명하였다.

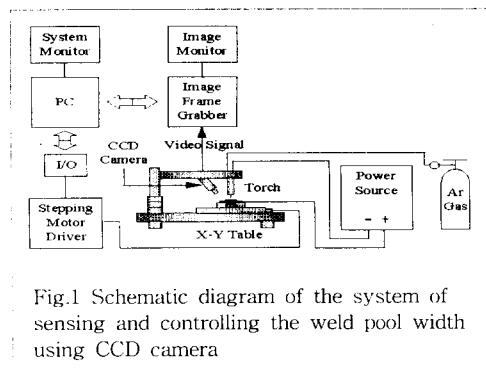


Fig.1 Schematic diagram of the system of sensing and controlling the weld pool width using CCD camera

2.1.2 시각 시스템(vision system)

아크광과 용융지광의 파장분포 및 상대강도비를 Fig.2⁵⁾에 나타내었다. Fig.2에서 알 수 있듯이 아크용접과정에서 발생하는 강한 아크광은 용융자로부터 나오는 광에 비하여 월등히 크기 때문에 단순히 일반 카메라의 광량을 줄이는 방법으로는 용융지 형상 관찰 및 제어를 위한 좋은 시각정보를 제공하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 화상의 질을 향상시키기 위해 대역통과필터(long pass filter)를 이용하였다. 또한 토치에 대한 카메라의 각도선정에 따라 토치캡이 노이즈로 작용하는 아크광량을 줄여주므로 가능한 한 용융지화상의 질을 높이면서도 용융지형상 관찰면적도 크게 하도록 CCD카메라 위치를 설정하였다.

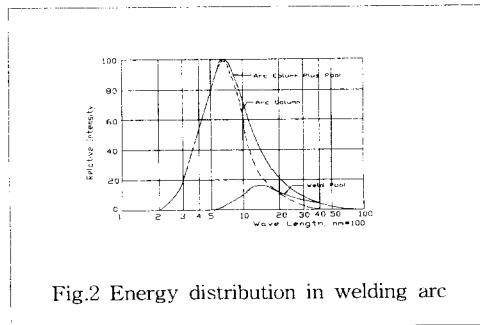


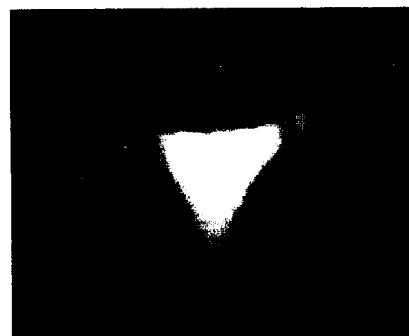
Fig.2 Energy distribution in welding arc

용융지관찰을 위해 사용된 CCD카메라는 768(H)×512(V)의 픽셀로 이루어진 흑백카메라로 표준 CCTV의 아날로그 비디오신호를 출력한다. 이 비디오신호는 화상처리장치(DT2853)에서 A/D 변환하여 512(H)×512(V)의 화상메모리버퍼에 256레벨의 밝기를 가진 화상데이터로 저장된다. 화상메모리버퍼에 저장된 화상데이터는 첫째로, 용융지폭 제어를 위한 데이터로 이용되고, 둘째로, D/A변환하여 이미지모니터상에 인터라인스캔방식에 의해 1/30초마다 한 프레임의 화상을 출력하여 용접부를 실시간으로 모니터링하는 데 사용한다.

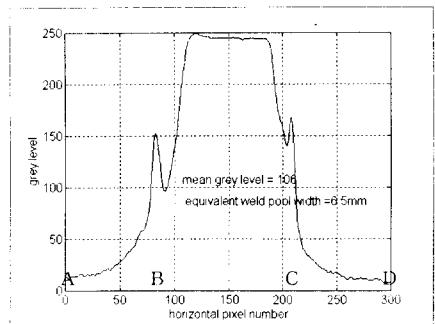
2.2 용융지 화상처리

용융지의 화상을 Fig.3(a)에 나타내었다. 토치 바로 뒤의 직선 AD선상의 각 화소에 대한 밝기분포를 Fig.3(b)에 나타내었다. Fig.3(b)에서 용융지 경계는 B 및 C로 대응한다. 이 경계부분 B 및 C에서 밝기의 레벨이 급격하게 변한다. 우선 이 특성을 이용하여 용융지경계를 검출한다. 선분AD에 대한 평균 grey level을 계산하고, 점 A에서부터 오른쪽으로 각 픽셀의 grey level을 조사하여 최초로 평균값이 되는 픽셀 위치를 검출하여 그 픽셀 위치로부터 순차적으로 다음 위치에 있는 픽셀의 grey level을 비교하여 차가 zero가 되는 점, 즉 정점의 위치 B를 검출한다. 점 D에서부터 왼쪽으로 위의 절차를 반복하여 점 C를 검출한다. 용융지폭에 상당하는 화소수는 B에서 C의 화소수가 된다. 따라서 한 화소에 상당하는 길이를 구하여 선분BC에 해당되는 화소수로부터 용융지폭을 구한다.

그러나 용융지 화상이 항상 Fig.3(b)와 같은 형상을 나타내지 않으므로 점 A에서부터 오른쪽으로 각 픽셀의 grey level을 조사하여 최초로 평균값이 되는 픽셀 위치를 검출하고 그 픽셀 grey level(평균값)보다 일정한 값(본 연구에서는 15)만큼 큰 grey level의 위치를 검출하여 용융지의 왼쪽 경계로 한다. 점 D에서부터 왼쪽으로 위의 절차를 반복하여 용융지의 오른쪽 경계를 검출한다. 실험 결과 첫번째 알고리즘이 두번째 알고리즘이 오차가 작아 본 연구에서는 두번째 방법을 이용하였다.



(a) weld pool & arc image



(b) distribution of brightness

Fig.3 Weld pool image & the distribution of brightness

2.3 GTA용접시스템의 상태방정식

용융지형상은 용접속도, 용접전류, 아크길이, 모재의 조성, 전극팁의 형상, 보호가스의 종류 등에 따라서 변한다⁶⁾. 따라서 본 논문에서는 용융지형상의 기본요소중 하나인 용융지폭을 시각시스템으로 센싱하고, 그것을 용접속도에 따라 제어하는 방법에 대하여 고찰하였다.

우선 정상상태에서 기초실험을 행하였다. 용접 모재는 연강(SS41), 두께 2mm, 폭 50mm, 길이 150mm이고, 용접조건은 용접전류 100A, 보호가스 100%아르곤가스, 아크길이는 용융지 표면에서 3mm 되도록 시스템을 구성하여 비드용접(bead on plate welding)을 하였다. 용접속도 v 에 따른 용융지폭 w 의 관계를 Fig.4에 보였다.

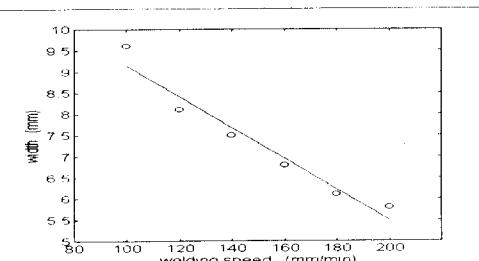


Fig.4 Relationship between weld pool width and welding speed

Fig.4로부터 용접속도와 용융지폭과의 관계는 어느 영역 내에서 직선적으로 반비례한다는 것을 알 수 있다.

스텝입력에 대한 출력값의 변화로부터 시스템의 상태방정식을 유도하기 위해 다음과 같은 실험을 행하였다⁷⁾.

Fig.5는 위의 용접 조건에 대하여 용접속도 v 를 시동시 180 mm/min로 하고, 20초후에 120 mm/min로 변화시킬 경우 즉, 스텝입력에 대한 출력인 용융지폭 w 의 과도상태응답을 나타낸다. 시간축을 적당하게 선택하면,

$$w = (w_1 - w_0) (1 - e^{-\lambda t}) + w_0 \quad (1)$$

로 근사하게 된다. 여기서 w_0 는 초기 용융지폭을 나타내며, w_1 은 최종 용융지폭을 나타낸다.

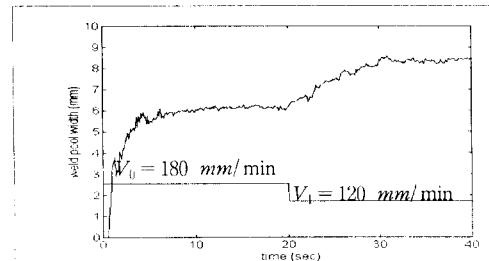


Fig.5 Transient response of weld pool width

위의 과도상태응답특성과 Fig.4로부터 용융지폭 w 를 상태변수로 하고, 용접속도 v 를 입력변수로 하여, 선형근사시키면

$$\frac{dw}{dt} + \lambda w = bv + c \quad (2)$$

여기서 b, c 는 상수

식(2)을 더 간단히 표현하기 위해 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$w = y, \quad v = V_0 + u \quad (3)$$

여기서, $V_0 = -c/b$ 이고, 식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 미분방정식이 얻어진다.

$$\frac{dy}{dt} + \lambda y = bu \quad (4)$$

그러므로 입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 용접시스템의 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$sY(s) + \lambda Y(s) = bU(s)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b}{s + \lambda} \quad (5)$$

여기서 $U(s)$ 와 $Y(s)$ 는 각각 입력 $u(t)$ 와 출력 $y(t)$ 의 라플라스변환이다.

2.4 디지털 제어기 설계

디지털 제어기(digital controller)를 전달함수를 이용하여 설계하는 방법으로는 제어대상에 대하여 원하는 응답특성을 얻기 위해 S영역에서 설계한 제어기를 이산계로 변환하는 에뮬레이션(emulation)설계법과 연속계인 제어대상(plant)을 이산계로 표현하여 z영역에서 직접 제어기를 설계하는 방법이 있다. 그러나 전자는 이산계의 샘플링주파수(sampling frequency), D/A 컨버터와 샘플러의

ZOH(zero-order-hold)의 특성을 충분히 고려하지 못하기 때문에 원하는 응답을 출력하지 못하는 경우가 있으므로 본 논문에서는 z영역에서 제어기를 설계하였다.

입력변수를 용접속도로 하고 출력변수를 용융지폭으로 하는 용융지폭 제어시스템의 블럭선도를 Fig.6에 나타내었다. $D(z)$ 는 디지털제어기, ZOH는 D/A컨버터와 샘플러의 특성, $G(s)$ 은 연속계에 속한 제어대상(plant)의 전달함수, $G(z)$ 는 ZOH와 $G(s)$ 의 특성을 동시에 나타내는 이산전달함수(discrete transfer function)이다.

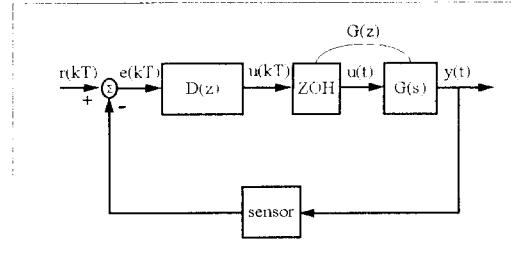


Fig.6 Block diagram of a digital control system for weld pool control

먼저 용접시스템 자체의 시간지연과 컴퓨터 계산시간에 의한 시간지연을 고려하면 식(5)는 다음과 같다.

$$G_D(s) = e^{-T_{D,s}} G(s) \quad (6)$$

여기서 T_D 는 delay time을 나타낸다.

z 영역에서 제어시스템을 해석하기 위해 ZOH가 선형화 연속계인 제어대상 $G(s)$ 을 z 변환하면 다음과 같다⁸⁾.

$$G(z) = (1 - z^{-1}) Z\left\{ \frac{G_D(s)}{s} \right\} \quad (7)$$

그리고 $T_D = \ell T - mT$, 단 T 는 챔플링타임(sampling time), ℓ 은 정수, $0 \leq m < 1$ 인 조건에서 식(6)을 식(7)에 대입하면 용접시스템의 이산전달함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{b}{\lambda} \frac{1}{z^\ell} \frac{(1 - e^{-\lambda m T})z + e^{-\lambda m T} - e^{-\lambda T}}{z - e^{-\lambda T}} \\ &= \frac{b}{\lambda} \frac{1 - e^{-\lambda m T}}{z^\ell} \frac{z + \beta}{z - \alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \alpha &= e^{-\lambda T} \\ \beta &= \frac{e^{-\lambda m T} - e^{-\lambda T}}{1 - e^{-\lambda m T}} \end{aligned}$$

따라서 Fig.6의 제어시스템의 블럭선도에서 기준입력 $r(kT)$ 과 출력 $y(kT)$ 사이의 이산전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{D(z)G(z)}{1 + D(z)G(z)} \quad (9)$$

그리고 디지털 제어시스템의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$1 + D(z)G(z) = 0 \quad (10)$$

여러가지 제어 방식 가운데 본 논문에서는 PID(proportional-plus-integral-plus-derivative)제어 방식을 사용하였다. 이 제어방식은 시스템형(system type)을 증가시켜 정상편차를 감소시키는 적분제어(integral control)특성과 감쇠비(damping ratio)를 증가시켜 과도 응답에서 over shoot를 감소시키는 미분제어(derivative control)특성을 가지고 있다. 이산형 PID제어기의 전달함수는 다음과 같다⁸⁾.

$$D(z) = K_p + K_i \frac{Tz}{z-1} + K_d \frac{z-1}{Tz} \quad (11)$$

여기서,

T : sampling time, K_p :proportional gain, K_i :integral gain, K_d :derivative gain

디지털제어기의 계수 K_p , K_i , K_d 의 값은 먼저 정상상태에서 정상편차(steady-state error)에 대한 허용조건으로부터 K_i 값을 결정한다. 다음에 과도상태응답에 대한 허용조건인 rising time(tr), settling time(ts), overshoot 등으로부터 고유주파수(W_n)와 감쇠비(ζ)를 계산하여 식(10)과 식(11)로부터 K_p 와 K_d 값을 결정한다. 따라서 제어기의 출력 알고리즘은 식(11)로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D(z) &= \frac{U(z)}{E(z)} \\ &= \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

$$b_0 = \frac{K_p T + K_i T^2 + K_d}{T}$$

$$b_1 = -\frac{K_p T + 2K_d}{T}$$

$$b_2 = \frac{K_d}{T}$$

단, $E(z)$ 및 $U(z)$ 는 각각 디지털 제어기의 입력과 출력의 z 변환이다.

3. 실험

3.1 실험 장치

본 실험에 사용된 용접기는 GTA(YT-300 2AD GTA) 용접기로 직류정극성(DCSP)으로 사용하였고, 용접속도 제어장치는 스텝팡모터(OEM57-83-MOS)와 모타제어용보드(AT6400-AUX1) 및 모타구동장치로 이루어져 있고, 시각시스템은 CCD카메라(IK-541RA)와 광학필터 및 화상처리장치(DT2853)로 이루어져 있다. 그리고 사용된 컴퓨터는 IBM-AT 호환기종으로 메인 프로세서는 인텔80386이었다.

3.2 실험 방법

제어입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 디지털 제어기의 성능을 검토하기 위해 용접진행도중에 용융지폭의 목표값을 스텝상으로 변화시켜 용융지폭의 시간응답을 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그리고 이 실험에 사용된 용접시편은 연강(SS41)으로써 치수는 두께 2mm, 길이 150mm였다. 용접조건은 용접전류 75A, 보호가스 100%아르곤가스, 아크길이는 용융지 표면에서 3mm 되도록 시스템을 구성하였다.

3.3 실험 결과 및 고찰

Fig.7는 설계된 디지털 제어시스템에 기준입력인 용융지폭을 스텝함수로 입력했을 때, 시간에 따른 시스템에 대한 제어입력과 시스템의 출력의 변화량을 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다.

Fig.8은 기준입력을 6.5mm로 하고 용접하는 중에 기준입력을 시간 0인 점에서 7.5mm로 변화시켰을 때, 시간의 경과에 따른 용융지폭의 변화량을 보여주고 있다.

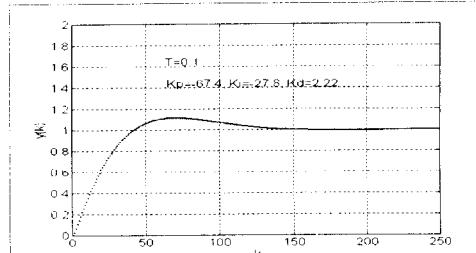


Fig.7 Unit-step response of weld pool width control system

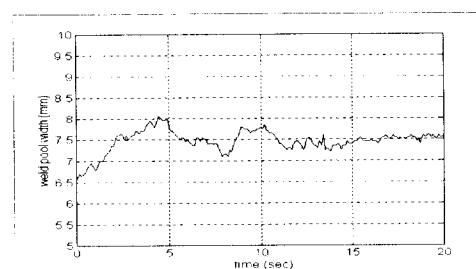


Fig.8 Time response of weld pool width, the reference input varying from 6.5mm to 7.5mm

4. 결 론

GTA-용접시스템에서 제어입력을 용접속도로 하고 출력을 용융지폭으로 하여 외관에 대처하여 균일한 비드폭을 얻도록 피드백 디지털 제어시스템을 구현한 결과는 다음과 같다.

(1) 화상처리장치와 컴퓨터를 이용하여 용융지의 가장자리를 인식하여 매우 짧은 시간 동안(62-64ms)에 용융지폭을 계산하여 디지털컨트롤의 센서 출력 데이터로 이용할 수 있었다.

(2) 용접속도를 입력변수로 하고 용융지폭을 출력변수로 하여 스텝입력에 대한 용융지의 동특성을 고찰한 결과, 그 용접시스템의 전달함수는 극사적으로 1차시스템으로 표현되었다.

(3) 제어입력을 용접속도로 하고 출력을 용융지폭으로 하여 용접시스템에 대해서 디지털 제어기를 설계하여 스텝입력의 시간응답에 대한 실험 결과, 디지털제어시스템을 원하는 용융지폭으로 수렴하였다.

REFERENCE

- (1) S. Nakata, et al, 1988, "Fundamental Investigation on Detecting the Information on Weld Line and Molten Pool by Combination of Laser and Interference Filter with Narrow Half Width", 일본용접학회논문집, Vol. 6, No. 1, pp. 123-127.
- (2) K. Inoue, 1981, "Image Process for On-Line Detection of Welding Process", 일본용접학회지, Vol. 50, No. 11, pp. 94-100.
- (3) K. Ohshima, et al, 1987, "Observation and Digital Control of Weld Pool in Pulsed MIG Welding", 일본용접학회논문집, Vol. 5, No. 3, pp. 18-25.
- (4) R. W. Richardson, et al, 1984, "Coaxial Arc Weld Pool Viewing for Process Monitoring and Control", Welding Journal, Vol. 63, No. 3, pp. 43-50.
- (5) H. E. Pattee, 1973, "Effects of Arc Radiation and Heat on Welders", Welding Journal, Vol. 52, No. 5, pp. 297-308.
- (6) H. R. Saedi, 1986, "Transient Response of Plasma Arc and Weld Pool Geometry for GTAW Process", M.I.T. Ph.D. thesis.
- (7) Gene F. Franklin, et al, 1991, "Feedback Control of Dynamic Systems", Addison Wesley, 2nd Edition.
- (8) Gene F. Franklin, et al, 1990, "Digital Control of Dynamic Systems", Addison Wesley, 2nd Edition.