# 화상처리에 의한 TIG용접에서의 용융지폭 제어에 관한 연구

Study of Weld Pool Width Control in TIG Welding Using the Digital Image Procesing

김동철*, 이세헌**, 엄기원**,
* 학생회원, 한양대학교 정밀기계공학과
**정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

## 1. 서 론

본 연구의 궁극적인 목표는 용접품질을 결정하는 인자중 하나인 용접 비드폭을 외란에 대해서도 균일하게 유지하도록 디지탈 제어기를 설계하여 아크용접공정을 자동화하는 데 있다. 용접 모재를 연강(SS41)에 한정하여 TIG용접시 강한 아크광 때문에 획득하기 어려운 용융지 화상정보를 얻기 위해 CCD카메라와 광학필터를 병용하는 방법에 대해 고찰하였고, 용융지 화상정보를 화상처리장치와 컴퓨터를 이용해 용융지폭을 계산하였으며, 제어입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 용접시스템의 전달함수를 구하여, 외란에 대처하여 균일한 비드폭을 얻을 수 있도록 디지탈 제어기를 설계하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 용융지폭 제어를 위한 시스템 구성

용융지폭 제어시스템은 Fig.1과같이 TIG용접기부분과 용융지형상을 관찰 및 제어하는데 필요한 시각시스템부분, 컴퓨터부분, 스텝핑모터부분으로 구성하였다.

### 2.2 용융지 화상처리

용융지의 화상을 Fig.2(a)에 나타내었다. 토치 바로 뒤의 직선 AD선상의 각 화소에 대한 grey level 분포를 Fig.2(b)에 나타내었다. Fig.2(b)에서 용융지 경계는 B 및 C로 대응된다. 이 경계부분 B 및 C에서 grey level이 급격하게 변한다. 이 특성을 이용하여 화상처리장치와 컴퓨터를 이용하여 용융지경계를 검출한다.

### 2.3 TIG용접시스템의 상태방정식

본 연구에서는 용융지형상의 기본요소중 하나인 용융지폭을 시각시스템으로 센싱하고, 그것을 용접속도에 따라 제어하는 방법에 대하여 고찰한다.

Fig.3는 정상상태에서 용접속도 $v$에 따른 용융지폭 $w$ 의 관계를 나타낸다.

Fig.4는 용접속도 $v$를 시동시 180mm/min로 하고, 20초 후에 120mm/min로 변화시킬 경우 즉, 스텝입력에 대한 출력인 용융지폭 $w$의 과도상태응답을 나타낸다.

위의 과도상태응답특성과 Fig.3로부터 용융지폭 $w$을 상태변수로 하고, 용접속도 $v$를 입력변수로 하여, 선형근사 시키면

$$\frac{dw}{dt} + \lambda w = bv + c \qquad (1)$$

여기서 b, c 는 상수

식(1)을 더 간단히 표현하기 위해 변수를 다음과 같이 정의 한다.

$$w = y, \quad v = V_0 + u \qquad (2)$$

식(2)을 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 미분방정식이 얻어진다.

$$\frac{dy}{dt} + \lambda y = bu \qquad (3)$$

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

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b}{s+\lambda} \qquad (4)$$

2.4 디지탈 제어기 설계

입력변수를 용접속도로 하고 출력변수를 용융지폭으로 하는 용융지폭 제어시스템의 블럭선도를 Fig.5에 나타내었다. D(z)는 디지탈제어기, 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.

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

$$G_D(s) = e^{-T_D s}\, G(s) \qquad (5)$$

여기서, $T_D$=delay time

z영역에서 제어시스템을 해석하기 위해 ZOH가 선행한 연속계인 제어대상G(s)를 z변환하면 다음과 같다.

$$G(z) = (1-z^{-1})\, Z\{ \frac{G_D(s)}{s} \} \qquad (6)$$

따라서 Fig.7의 제어시스템의 블럭선도에서 기준입력 r(kT)와 출력y(kT) 사이의 이산전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{D(z)\,G(z)}{1+D(z)\,G(z)} \qquad (7)$$

그리고 디지탈 제어시스템의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$1+D(z)\,G(z) = 0 \qquad (8)$$

본 연구에서 사용한 PID(proportional-plus-integral-plus-derivative)제어 방식은 시스템형(system type)을 증가시켜 정상편차를 감소시키는 적분제어(integral control)특성과 감쇠비(damping ratio)를 증가시켜 과도 응답에서 overshoot를 감소시키는 미분제어(derivative control)특성을 가지고 있다. 이산형 PID제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$D(z) = K_p + K_i \frac{Tz}{z-1} + K_d \frac{z-1}{Tz} \qquad (9)$$

여기서,

T: sampling time, Kp:proportional gain, Ki:integral gain, Kd:derivative gain

디지탈제어기의 계수 Kp, Ki, Kd 의 값은 먼저 정상상태에서 정상편차(steady-state error)에 대한 허용조건으로부터 Ki값을 결정한다. 다음에 과도상태응답에 대한 허용조건인 rising time(tr), settling time(ts), overshoot 등으로부터 고유주파수(Wn)와 감쇠비($\zeta$)를 계산하여 식(8)과 식(9)로부터 Kp와 Kd 값을 결정한다. 따라서 제어기의 출력 알고리즘은 식(9)로부터 다음과 같다.

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \qquad (10)$$

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 디지탈 제어기의 입력과 출력의 z변환이다.

## 3. 실 험

### 3.1 실험 방법

디지탈제어기의 성능을 평가하기위해 용접진행 중에 용융지폭의 목표값을 스텝상으로 변화시켜 용융지폭의 시간응답을 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

### 3.2 실험 결과

Fig.6는 설계된 디지탈 제어시스템에 기준입력인 용융지폭을 스텝함수로 입력했을 때, 시스템의 출력을 시뮬레이션한 것이다.

Fig.7은 기준입력을 6.5mm로 하고 용접하는 중에 기준입력을 시간 0인 점에서 7.5mm로 변화시켰을 때, 시간의 경과에 따른 용융지폭의 변화량을 보여주고 있다. settling time 이전의 값들이 시뮬레이션 결과와 약간 차이를 가지지만 settling time 에 대해서는 시뮬레이션과 거의 유사하였다.

## 4. 결 론

1> TIG용접 과정중 CCD카메라와 광학필터(long pass filter)를 함께 사용함으로써 강한 아크광의 존재하에서도 용융지를 보다 명확히 관찰할 수 있었다.

2> 화상처리장치와 컴퓨터를 이용하여 짧은 시간 동안(62-64ms)에 용융지폭을 계산하였다.

3> 용접속도를 입력변수로 하고 용융지폭을 출력변수로 하여 스텝입력에 대한 용융지의 동특성을 고찰한 결과, 그 용접시스템의 전달함수는 근사적으로 1차시스템으로 표현되었다.

4> 제어입력을 용접속도로 하고 출력을 용융지폭으로 하는 용접시스템에 대해서 디지탈 제어기를 설계하여 스텝입력의 시간응답에 대한 실험 결과, 디지탈제어시스템은 원하는 용융지폭으로 수렴하였다.

## 5. 참고 문헌


1> K. Inoue, "Image Process for On-Line Detection of Welding Process", 일본용접학회지, Vol 50, No.11, 1981, pp 94-100

2> K. Ohshima, et al, "Observation and Digital Control of Weld Pool in Pulsed MIG Welding", 일본용접학회논문집, Vol.5, No.3, 1987, pp.18-25

3> Coaxial Arc Weld Pool Viewing for Process Monitoring and Control Welding Journal, March 1984, pp.43-50

4> H.E. Pattee, "Effects of Arc Radiation and Heat on Welders", Welding Journal, May 1973, pp.297-308

5> Gene F. Franklin, et al, "Digital Control of Dynamic Systems", Addison Wesley, 2nd Edition

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

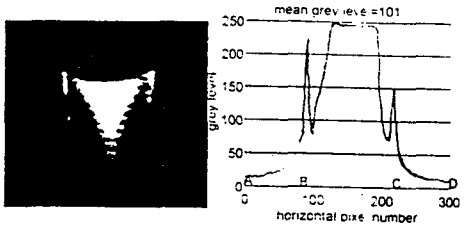


Fig.2 Weld pool image and the distribution of grey level

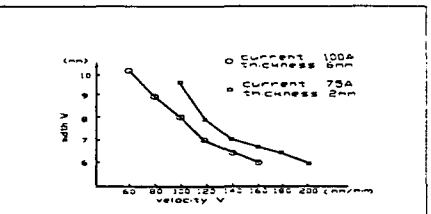

Fig.3 Relationship between weld pool width and welding velocity

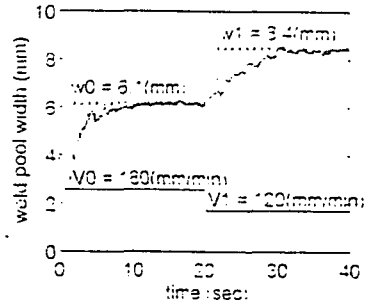


Fig.4 Transient response of weld pool width

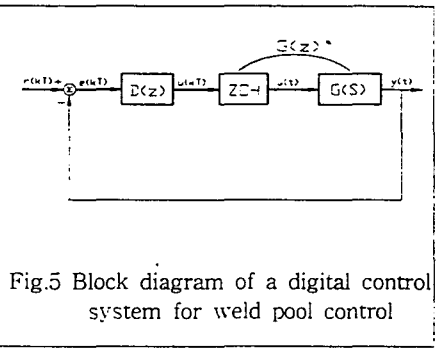


Fig.5 Block diagram of a digital control system for weld pool control

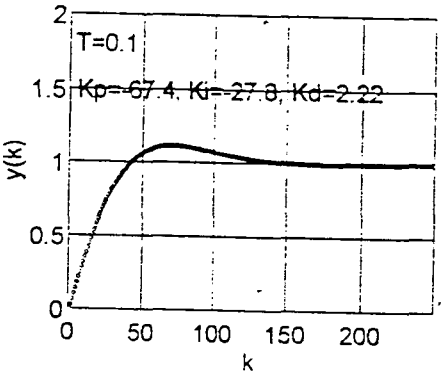


Fig.6 Unit-step response of weld pool width control system

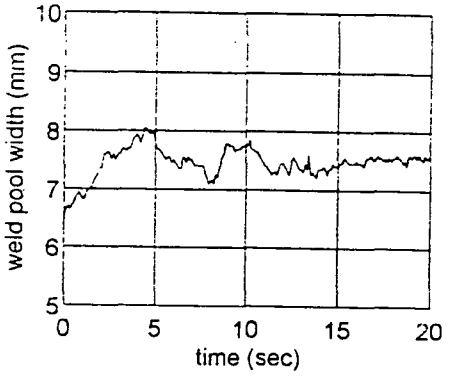


Fig.7 Time response of weld pool width the reference input varying from 6.5 mm to 7.5mm