

〈논 문〉

## 화상처리에 의한 Gas Tungsten Arc 용접에서의 용융지폭제어에 관한 연구

김동철\* · 이세현\*\* · 엄기원\*\*

(1995년 12월 5일 접수)

### A Study of Weld Pool Width Control in Gas Tungsten Arc Welding Using the Digital Image Processing

Dong-Cheol Kim, Sehun Rhee and Ki-Woan Um

**Key Words:** Arc Welding(아크용접), Image Processing(화상처리), Welding Speed(용접속도), CCD(Charge-Coupled Device), Gas Tungsten Arc Welding(GTA용접), Optical Filter(광학필터)

#### 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 the light intensity of welding arc is much stronger than that of the 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 a long wavelength pass filter was used to get a better weld pool image. Subsequently, an image analysis technique has been developed to measure the weld pool width. Using this weld pool width measurement, a closed loop control system adjusted welding speed to maintain a constant weld pool width.

#### 1. 서 론

아크용접 공정제어는 크게 용융지형상제어, 용접 선추적, 아크길이제어 등으로 나눌 수 있다. 그리고 피드백제어를 수행하는데 필요한 센서로는 아크 센서, 시각센서, 탐촉침 접촉센서 등이 있다.

용접선 추적용으로 개발된 아크센서는 용접시 전극팁-모재간의 거리변화에 따른 전압 또는 전류신호를 이용하여 용접선을 추적하는 것으로 별도의

감지장치가 필요없기 때문에 제작비가 비교적 저렴하다. 그러나 전기적인 신호를 얻기위해 토치가 반드시 위빙(weaving)하여야 하므로 박판용접에는 이용할 수 없는 단점을 지니고 있다. 이에 비하여 시각센서는 용접선 추적에 필요한 용접선의 위치정보를 제공할 뿐만 아니라 용접품질의 기준이 되는 용융지형상에 대한 시각정보를 제공하는 이점을 지니고 있지만 아크용접공정중에 발생하는 강한 아크광의 영향으로 용융지형상의 시각정보를 획득하기 어렵다는 것이 문제가 되고 있다. 이런 강한 아크광때문에 생기는 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 연구가 진행되고 있다.

\*한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*회원, 한양대학교 정밀기계공학과

첫째, 주로 레이저광과 레이저라인필터를 병용하는 방법으로, Nakata<sup>(1)</sup>는 GTA용접에서 용접선을 추적하는 방법으로 CCD카메라와 He-Ne레이저 및 대역통과필터(bandpass filter)를 채용하여 강한 아크 및 용융지광을 상대적으로 줄여 과거에는 용융지 수십밀리미터 앞에 두었던 레이저광 투사지점을 극히 근방(약 3 mm)에 두어 보다 정확한 용접선 정보를 획득할 수 있음을 보였다.

둘째, 아크광에 비해 용융지광을 상대적으로 강하게 하기위해 광학필터를 사용하는 방법으로, Inoue<sup>(2)</sup>는 용접모재를 스테인리스강에 한정하여 CO<sub>2</sub>아크, Ar아크 및 용융지광에 대한 스펙트럼 관찰결과로부터 얻은 특성 스펙트럼에 기초하여 적정 관찰광 및 광학필터를 이용하여 용융지화상의 질을 향상시킬 수 있다는 것을 보였다.

셋째, 아크광이 약하게 되는 순간 시각정보를 획득하는 방법으로, Ohshima<sup>(3)</sup>는 펄스 MIG용접에서 강한 아크광 때문에 획득 불가능한 용융지상을 얻기 위해 펄스 파형에 저전류기간을 설정하여 그 기간과 CCD카메라의 촬영시간을 동기시켜 용융지상을 획득할 수 있었다.

넷째, Richardson<sup>(4)</sup>은 토치와 같은 축에서 용융지를 관찰하는 시스템을 개발하여 용접 공정제어에 이용하였다.

또 아크광의 영향을 받지 않도록 모재의 뒷면에서의 용융지형상을 관찰하는 방법도 있으나 산업현장에 실용화하는에는 문제점이 있다.

위와 같은 방법으로 용접공정에서도 시각시스템을 이용하여 용접부에 대한 좀더 나은 시각정보를 획득하여 입력변수를 전류, 전압, 와이어 송급속도, 용접속도 등으로 하고, 출력변수로 용융지폭, 용융지깊이 등으로 하는 피드백제어 시스템을 구현할 수 있다.

본 연구의 궁극적인 목표는 용접품질을 결정하는 인자중 하나인 용접 비드폭을 외란에 대해서도 균일하게 유지하도록 디지털제어기를 설계하여 아크 용접공정을 자동화하는데 있다. 이를 위해 다음과 같은 연구를 하였다.

첫째로 용접 모재를 연강(SS41)에 한정하여 GTA용접시 강한 아크광 때문에 획득하기 어려운 용융지 화상정보를 얻기위해 CCD카메라와 광학필터를 병용하는 방법에 대해 고찰하고, 둘째로 CCD카메라와 적절한 광학필터를 통해 획득한 용융지 화상정보를 화상처리장치와 컴퓨터를 이용해

용융지폭을 계산하는 알고리즘을 개발하고, 셋째로 제어입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 용접 시스템의 전달함수를 구하였으며, 마지막으로 외란에 대처하여 균일한 비드폭을 얻을 수 있도록 디지털 제어기를 설계하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 용융지폭제어를 위한 시스템 구성

#### 2.1.1 GTA용접 시스템

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

#### 2.1.2 시각 시스템

SMA 용접(shielded metal arc welding)에서 발생하는 아크광과 용융지광의 파장분포 및 상대강도비는 Fig. 2(a)<sup>(5)</sup>에 나타내었고, GTA용접(gas tungsten arc welding)에서 발생하는 아크광의 파장분포 및 상대강도비는 Fig. 2(b)<sup>(2)</sup>에 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 아크용접과정에서 발생하는 강한 아크광은 용융지로부터 나오는 광에 비하여 월등히 크기 때문에 단순히 일반 카메라의 광량을 줄이는 방법으로는 용융지 형상 관찰 및 제어를 위한 좋은 시각정보를 얻지 못한다. 따라서 본 논문에서는 화상의 질을 향상시키기 위해 장파

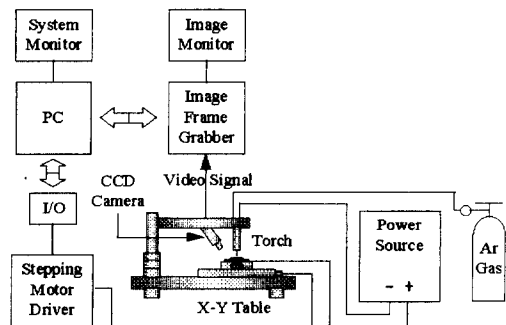
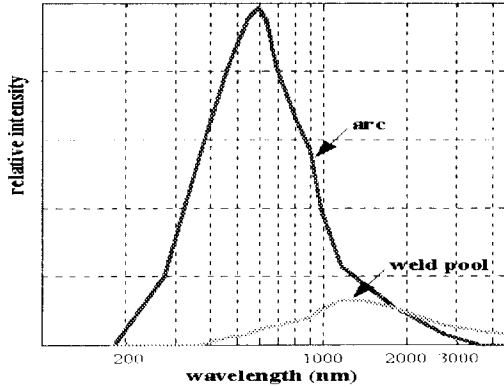
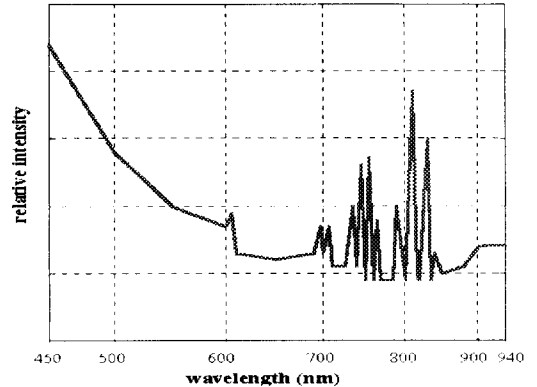


Fig. 1 Schematic diagram of the system of sensing and controlling the weld pool width using CCD camera



(a) Spectrum of SMAW arc and weld pool



(b) Spectrum of GTAW arc

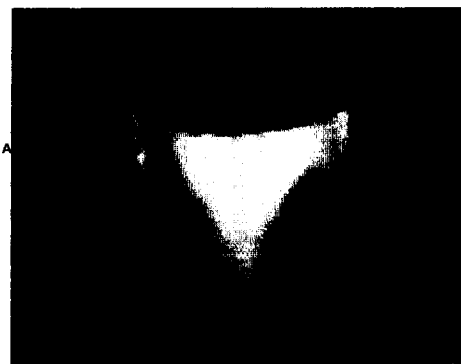
Fig. 2 Energy distribution of welding arcs

장 통과필터(long wavelength pass filter)를 이용하였다. 또한 토치에 대한 카메라의 각도선택에 따라 토치캡이 노이즈로 작용하는 아크광량을 줄여주므로 가능한한 용융지화상의 질을 높이면서도 용융지형상 관찰면적도 크게 하도록 CCD카메라 위치를 선정하였다.

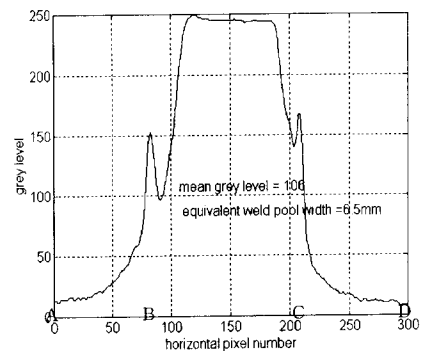
용융지관찰을 위해 사용된 CCD카메라는 768(H)×494(V)의 픽셀로 이루어진 흑백카메라로 표준 CCTV의 아날로그 비디오신호를 출력한다. 이 비디오신호는 화상처리장치(DT2853)에서 A/D 변환하여 512(H)×512(V)의 화상메모리버퍼에 256레벨의 밝기를 가진 화상데이터로 저장된다. 화상메모리버퍼에 저장된 화상데이터는 첫째로, 용융지폭제어를 위한 데이터로 이용되고, 둘째로, D/A변환하여 이미지모니터상에 인터라인스캔방식에 의해 1/30초마다 한 프레임의 화상을 출력하여 용접부를 실시간으로 모니터링하는데 사용한다.

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 grey level이 급격하게 변한다. 우선 이 특성을 이용하여 용융지경계를 검출한다. 선분 AD에 대한 평균 grey level을 계산하고, 점 A에서부터 오른쪽으로 각 픽셀의 grey level을 조사하여 최초로 평균값이 되는 픽셀위치를 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 해당하는 화소수는 B에서 C의 화소수가 된다. 따라서 한 화소에 해당하는 길이를 구하여 선분 BC에 해당되는 화소수로부터 용융지폭을 구



(a) Weld pool & arc image



(b) Distribution of brightness

Fig. 3 Weld pool image & the distribution of brightness

한다.

그러나 용융지 화상이 항상 Fig. 3(b)와 같은 형상을 나타내지 않을 경우 큰 오차를 발생하였으므로 평균 grey level을 기준으로 계산된 결과와 실제 용융지폭과 선형적인 관계를 나타내는 실험결과로부터 다음과 같은 방법으로 용융지폭을 계산하였다. 점 A에서부터 오른쪽으로 각 픽셀의 grey level을 조사하여 최초로 평균값이 되는 픽셀위치를 검출하고 그 위치로부터 실험을 통해 구한 보상 grey level(본 연구에서는 15)만큼 큰 grey level의 위치를 검출하여 용융지의 왼쪽 경계로 한다. 점 D에서부터 왼쪽으로 위의 절차를 반복하여 용융지의 오른쪽 경계를 검출한다. 실험결과 첫번째 알고리즘보다 두번째 알고리즘이 오차가 작아 본 연구에서는 두번째 방법을 이용하였다.

2.3 GTA용접 시스템 컨트롤 모델

용융지형상은 용접속도, 용접전류, 아크길이, 모재의 조성, 전극단의 형상, 보호가스의 종류 등에 따라서 변한다.<sup>(6)</sup> 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 2 mm, 폭 50 mm, 길이 150 mm이고, 용접조건은 용접전류 100 A, 보호가스 100%아르곤가스, 아크길이는 용융지 표면에서 3 mm 되도록 시스템을 구성하여 비드용접(bead on plate welding)을 하였다. 용접속도에 따른 용융지폭의 관계를 Fig. 4에 보였다.

Fig. 4로부터 용접속도와 용융지폭과의 관계는

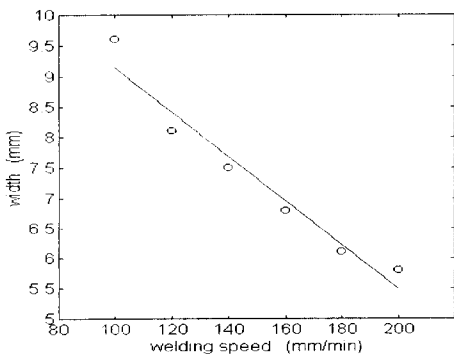


Fig. 4 Relationship between weld pool width and welding speed

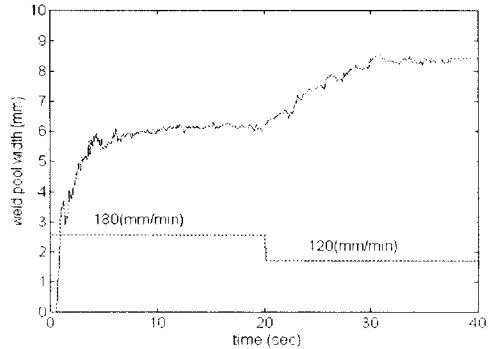


Fig. 5 Transient response of weld pool width

어느 영역 내에서 거의 직선적으로 반비례한다는 것을 알 수 있다.

스텝입력에 대한 출력값의 변화로부터 용접시스템 모델의 계수값을 결정하였다.<sup>(7)</sup> 그리고 그 한 예를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5는 위의 용접조건에 대하여 용접속도를 시동시 180 mm/min로 하고, 20초후에 120 mm/min로 변화시킬 경우, 즉 스텝입력에 대한 출력인 용융지폭의 과도상태응답을 나타낸다.

따라서 정상상태에 대한 실험결과와 과도응답상태에 대한 실험결과로부터 제어입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 선형화된 용접시스템 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = -\frac{b}{s + \lambda} \tag{1}$$

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

2.4 디지털제어기 설계

일반적인 디지털제어 시스템은 Fig. 6에서처럼

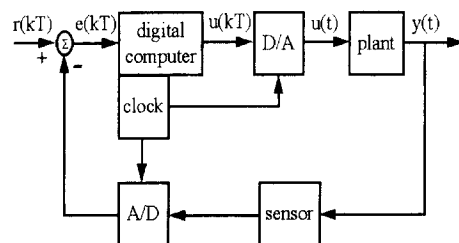


Fig. 6 Block diagram of a basic digital control system

연속계인 제어대상(plant)과 이산계인 컴퓨터부분이 복합적으로 구성되어 있다.<sup>(8)</sup> 그리고 디지털제어기(digital controller)를 전달함수를 이용하여 설계하는 방법으로는 제어대상에 대하여 원하는 응답 특성을 얻기 위해 S영역에서 설계한 제어기를 이산계로 변환하는 에뮬레이션(emulation) 설계법과 연속계인 제어대상(plant)을 이산계로 표현하여 z 영역에서 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 제어 시스템의 블록선도를 Fig. 7에 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.

먼저 용접시스템 자체의 시간지연과 컴퓨터 계산시간에 의한 시간지연을 고려하면 식 (1)은 다음과 같다.

$$G_D(s) = e^{-T_D s} G(s) \quad (2)$$

여기서,  $T_D$ 는 delay time을 나타낸다.

z영역에서 제어시스템을 해석하기 위해 ZOH가 수행한 연속계인 제어대상 G(s)를 z변환하면 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

$$G(z) = (1-z^{-1}) Z \left\{ \frac{G_D(s)}{s} \right\} \quad (3)$$

그리고,  $T_D = lT - mT$ , 단 T는 샘플링타임(sampling time), l은 정수,  $0 \leq m < 1$ 인 조건에서

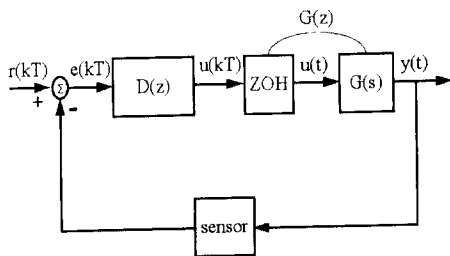


Fig. 7 Block diagram of a digital control system for weld pool control

식 (2)을 식 (3)에 대입하면 용접시스템의 이산전달함수는 다음과 같다.

$$G(z) = \frac{b}{\lambda} \frac{1}{z^l} \frac{(1 - e^{-\lambda m T})z + e^{-\lambda m T} - e^{-\lambda T}}{z - e^{-\lambda T}} \\ = \frac{b}{\lambda} \frac{1 - e^{-\lambda m T}}{z^l} \frac{z + \beta}{z - \alpha} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha = e^{-\lambda T}$

$$\beta = \frac{e^{-\lambda m T} - e^{-\lambda T}}{1 - e^{-\lambda m T}}$$

따라서 Fig. 7의 제어 시스템의 블록선도에서 기준입력  $r(kT)$ 와 출력  $y(kT)$  사이의 이산전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{D(z)G(z)}{1 + D(z)G(z)} \quad (5)$$

그리고 디지털제어 시스템의 특성방정식은 다음과 같다.

$$1 + D(z)G(z) = 0 \quad (6)$$

여러가지 제어방식 가운데 본 논문에서는 PID (proportional plus-integral-plus derivative) 제어방식을 사용하였다. 이 제어방식은 시스템형(system type)을 증가시켜 정상편차를 감소시키는 적분제어(integral control)특성과 감쇠비(damping ratio)를 증가시켜 과도응답에서 overshoot를 감소시키는 미분제어(derivative control)특성을 가지고 있다. 이산형 PID제어기의 전달함수는 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

$$D(z) = K_p \left( 1 + \frac{Tz}{T_i(z-1)} + \frac{T_d(z-1)}{Tz} \right) \quad (7)$$

여기서,

$K_p$  : 비례이득(proportional gain)

$T_i$  : 적분시간(integral time)

$T_d$  : 미분시간(derivative time)

T : 샘플링시간(sampling time)

식 (7)을 다시 표현하면

$$D(z) = K_p + K_i \frac{Tz}{z-1} + K_d \frac{z-1}{Tz} \quad (8)$$

여기서,

$K_i$  : 적분이득(=  $K_p/T_i$ , integral gain)

$K_d$  : 미분이득(=  $K_p \cdot T_d$ , derivative gain)

디지털제어기의 계수  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 의 값을 정하

는 방법은 Ziegler-Nichols 방법<sup>(9)</sup>과 시행착오에 의한 방법 등이 있으나 본 논문에서는 다음과 같은 방법<sup>(10)</sup>으로 계수값을 결정하였다.

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( $\omega_n$ )와 감쇠비( $\zeta$ )를 계산한다. 따라서  $z$  영역에서 근래적이 지나야 할 점이 다음의 식으로 결정된다.<sup>(8)</sup>

$$z = e^{sT} \quad (9)$$

여기서,  $s = -\zeta\omega_n + j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$

그 점을  $z_1$ 이라고 하면 식 (6)과 식 (8)로부터

$$\left(K_p + K_i \frac{Tz_1}{z_1-1} + K_d \frac{z_1-1}{Tz_1}\right)G(z_1) + 1 = 0 \quad (10)$$

$K_i$ 와  $z_1$ 은 결정된 상수이고,  $K_p$ 와  $K_d$ 가 미지수이다. 윗식을 다시 쓰면

$$K_p + K_d \frac{z_1-1}{Tz_1} = -\frac{1}{G(z_1)} - K_i \frac{Tz_1}{z_1-1} \quad (11)$$

식 (11)는 복소수식이므로 우변을  $R + jX$ 라 놓고,  $\frac{z_1-1}{Tz_1} = A + jB$ 라 하면, 식 (11)은 다음과 같이 표현된다.

$$K_p + K_d(A + jB) = R + jX \quad (12)$$

윗 식으로부터 계수값은 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} K_d &= X/B \\ K_p &= R - AK_d \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 위에서 결정된 계수값을 바탕으로 제어기의 출력 알고리즘을 구할 수 있다. 식 (8)로부터

$$\begin{aligned} D(z) &= \frac{U(z)}{E(z)} \\ &= \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{1 - z^{-1}} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{K_p T + K_i T^2 + K_d}{T} \\ b_1 &= -\frac{K_p T + 2K_d}{T} \\ b_2 &= \frac{K_d}{T} \end{aligned}$$

단,  $E(z)$  및  $U(z)$ 는 각각 디지털제어기의 입

력과 출력의  $z$ 변환이다.

식 (14)을 컴퓨터 프로그램에 의해 구현되도록 차등방정식으로 표현하면

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + b_0e(k) + b_1e(k-1) \\ &\quad + b_2e(k-2) \end{aligned} \quad (15)$$

그리고 시스템의 안정성을 검토하기 위해 단위 스텝입력에 대한 정상편차(steady-state error)에 관해 고찰한다.

시스템오차는  $E(z) = R(z) - Y(z)$ 이므로 식 (5)로부터

$$E(z) = \frac{R(z)}{1 + D(z)G(z)} \quad (16)$$

그리고 기준입력이 단위스텝입력일 때, 시스템오차는

$$E(z) = \frac{z}{z-1} \frac{1}{1 + D(z)G(z)} \quad (17)$$

최종 값정리에 의해 정상편차  $e_{ss}$ 는

$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{k \rightarrow \infty} e(k) = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)E(z) \\ &= \frac{1}{1 + D(1)G(1)} \end{aligned} \quad (18)$$

로 되고, 식 (14)에서 PID 제어기  $D(z)$ 는  $z=1$ 에서 극(pole)을 지니므로 단위스텝입력에 대한 출력의 정상편차는 0이 된다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

본 실험에 사용된 용접기는 GTA(YT-300 2AD GTA)용접기로 직류정극성(DCSP)으로 사용하였고, 용접속도 제어장치는 스텝핑모터(OEM83-62-MO)와 모터구동장치(OEM650) 및 모터제어용보드(AT6400-AUX1)로 이루어져 있고, 시각시스템은 CCD카메라(IK-541RA)와 광학필터 및 화상처리장치(DT2853)로 이루어져 있다. 그리고 사용된 컴퓨터는 IBM-AT 호환기종으로 메인 프로세서는 인텔 80386이었다. CCD카메라(IK-541RA)와 화상처리장치(DT2853)에 대한 특성사양을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

#### 3.2 실험방법

##### 3.2.1 용접부 센싱실험

Fig. 2에 기초하여 GTA용접 진행중 용융지의

Table 1 Specification of the CCD camera

Image pickup element	1/2" lines interline transfer CCD
Image pickup area	6.54 mm(horizontal) × 4.89 mm(vertical)
Effective picture elements	768(horizontal) × 494(vertical)
Scanning frequency	Horizontal : 15.734 kHz, Vertical : 59.94 Hz
Synchronization	Internal/External synchronization mode
Resolution	Horizontal : 570 TV lines, Vertical : 400 TV lines
Standard subject illumination	400 Lux
Minimum subject illumination	0.5 Lux
S/N	50 dB
Ambient operating temperature	10°C ~ 50°C

화상정보의 질을 향상시키기 위해서는 적절한 광학 필터가 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러나 GTA 용접의 용융지광에 대한 스펙트럼이 Fig. 2(b)에 나타나 있지 않다. 따라서 Fig. 2(a)로부터 아크광과 용융지광에 대한 스펙트럼분포의 성향을 살펴보면 가시광영역에서는 아크광에 대한 용융지광의 상대강도비는 매우 작다는 것을 알 수 있고, 파장이 길어질수록 아크광에 대한 용융지광의 상대강도비가 커지는 경향을 볼 수 있다. 또 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)를 비교해 보면 GTA용접의 아르곤가스의 선스펙트럼을 제외한 아크광의 스펙트럼분포는 SMA용접의 아크광의 스펙트럼분포에 비해 전체적으로 왼쪽으로 이동되어 있고, 용융지광의 스펙트럼분포는 아크용접종류에 대해서는 그 변동량이 작다는 것을 고려하면 GTA용접의 아크광에 대한 용융지광의 상대강도비는 가시광 및 적외선영역에서 SMA용접보다 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 사항을 기초로 최적의 필터를 선택하기 위해 다음

Table 2 Specification of the DT2853 frame grabber

Video input signals	RS 170, RS-330, NTSC
Resolution	Grey scale resolution 256(8bits)
	Geometric resolution- 512(H) × 480(V)
Frame grabber speed	1/30 s
Input look-up tables	8 Tables, 256 × 8-bit
Frame-store memory	2 Frame-store buffers (512 Kbytes total)

과 같은 실험을 실시하였다.

첫째, 광학필터를 사용하지 않고 CCD카메라의 조리개만으로 광량을 조절하여 용접부를 촬영하였다.

둘째, 아크광의 강도를 줄이고, Fig. 2(b)의 750 nm 및 810 nm 근방의 아르곤가스의 선스펙트럼이 카메라에 들어오는 것을 방지하기 위해서 가시광영역의 광학필터는 대역통과필터(FWHM 20 nm인 632.8 nm bandpass filter)를 CCD카메라에 부착하여 용접부를 촬영하였다.

셋째, 적외선영역에서 CCD카메라의 파장감도는 저하되고, 아크광의 강도는 작아지며, 용융지광의 강도는 커지는 것을 고려하여 근적외선영역의 광학필터는 장파장 통과필터(50% cut-on point가 850 nm인 long wavelength pass filter)를 CCD카메라에 부착하여 용접부를 촬영하여 용융지 화상의 질을 비교하였다.

각 실험에서 조리개의 열림상태는 각각에 대하여 가장 선명한 화상이 되도록 하였다. 또 시각시스템에 들어오는 아크광량을 줄이는 것과 용융지형상의 관찰면적을 고려하여 토치에 대한 카메라의 각도를 40°로 하여 시스템을 구성하였다. 그리고 실험에 사용된 용접시편은 언강(SS41)으로서 치수는 두께 6 mm, 폭 50 mm, 길이 150 mm 었다. 용접조건은 용접전류 100A, 용접속도 80 mm/min, 보호가스 100% 아르곤가스, 아크길이는 용융지 표면에서 3 mm 되도록 시스템을 구성하였다.

### 3.2.1 디지털제어기의 성능 실험

제어입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 디

지탈제어기의 성능을 검토하기 위해 용접 진행중에 용융지폭의 폭포값을 스텝상으로 변화시켜 용융지폭제어의 과도응답특성을 관찰하였다. 그리고 이 실험에 사용된 용접시편은 연강(SS41)으로써 치수는 두께 2 mm, 길이 150 mm였다. 용접조건은 용접전류 75A, 보호가스 100% 아르곤가스, 아크길이는 용융지 표면에서 3 mm 되도록 시스템을 구성하였다.

### 3.3 실험결과 및 고찰

#### 3.3.1 용접부 센싱실험

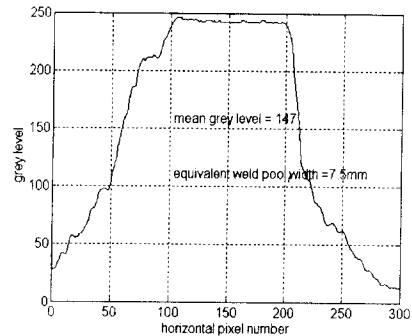
Fig. 8(a)는 광학필터(optical filter)를 사용하지 않은 상태에서 강한 아크광과 용융지광의 광량을 일률적으로 줄인 다음, CCD카메라로 촬영한 용융지화상을 나타내고 있으며, Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 용융지화상에서 용접토치캡의 선단에서부터 40 픽셀(약 2 mm) 떨어진 부분에서 가로방향의 화상

데이터에 대하여 각 pixel number에 해당되는 grey level(0~255)의 분포를 나타내고 있다. 일반적으로 전극팁의 형상이 대칭형이고, 용융지거동이 심하지 않을 때 용융지화상의 grey level 분포는 좌우 대칭형으로 나타나는데, Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 화상의 grey level 분포가 좌우 비대칭을 이루고 있으며, 용융지폭을 검출하는 데이터로 이용하는 데는 거의 불가능하였다. 그리고 실시간으로 용접부를 모니터링할 수도 없었다.

Fig. 9(a)는 대역통과필터(bandpass filter)을 CCD카메라에 부착한 상태에서 용접부를 촬영하였을 때의 용융지화상을 나타내고 있으며, Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)의 용융지화상에 대하여 각 pixel number에 해당되는 grey level(0~255)의 분포를 나타내고 있다. Fig. 9(a)에서 알 수 있듯이 용융지화상의 질은 광학필터를 사용하지 않을 때보다 향상되었다. 그러나 아크에서 나오는 가시영역의



(a) Weld pool & arc image

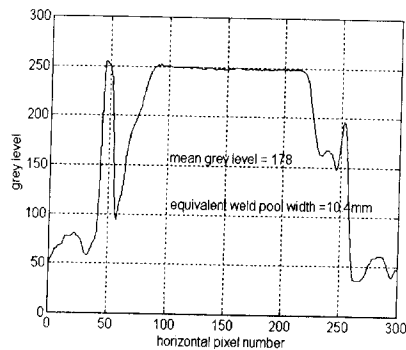


(b) Distribution of brightness

Fig. 8 Weld pool & arc image without a optical filter



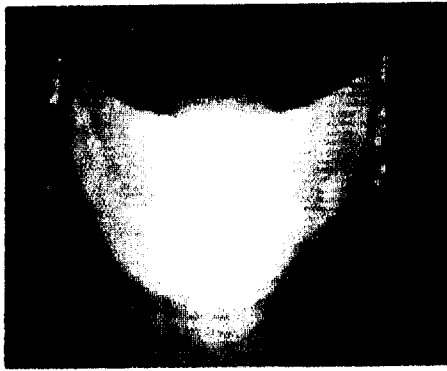
(a) Weld pool & arc image



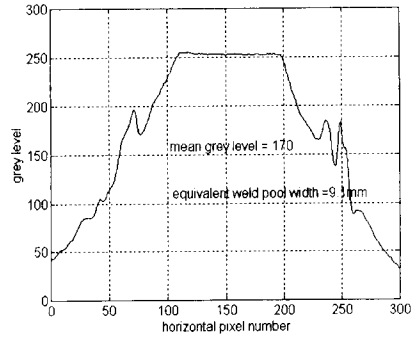
(b) Distribution of brightness

Fig. 9 Weld pool & arc image with a bandpass filter





(a) Weld pool & arc image



(b) Distribution of brightness

Fig. 10 Weld pool & arc image with a long wavelength pass filter

광이 용융지에서 나오는 광보다 상대적으로 크기 때문에 용융지경계선에서 반사 및 확산되어 CCD 카메라로 들어오므로 용융지에 대한 명확한 화상정보를 제공하지 못한다.

Fig. 10(a)는 장파장 통과필터(long wavelength pass filter)를 CCD카메라에 부착한 상태에서 용접부를 촬영하였을 때의 용융지화상을 나타내고 있으며, Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)의 용융지화상에 대하여 각 pixel number에 해당되는 grey level(0-255)의 분포를 나타내고 있다. Fig. 10(a)로부터 용융지화상의 질은 광학필터를 사용하지 않을 때보다는 현저하게 향상되었으며, 대역통과필터(bandpass filter)를 사용했을 때보다 향상되었다는 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과로부터 GTA용접부에 대한 화상정보는 광학필터를 CCD카메라에 부착하여 사용하면 향상된다는 것을 알 수 있었다. 또 본 실험과 Inoue<sup>(2)</sup>의 실험으로부터 아크광과 용융지광의 상대강도비는 용접실험조건(아크용접 종류, 용접모재, 보호가스 등)에 따라 변하기 때문에 향상된 화상정보를 얻기 위해서는 각각의 경우에 대하여 적절한 광학필터를 선정할 필요가 있다. 그래서 본 연구의 디지털제어기 성능실험에서는 CCD카메라를 이용하여 양호한 용융지화상 정보를 얻기 위해 CCD카메라의 과감도, 아크광 및 용융지광의 스펙트럼분포와 아르곤가스의 선스펙트럼분포를 고려하여 최적의 필터로 장파장 통과필터(850 nm long wavelength pass filter)를 선택하여 용융지화상을 획득하여 용융지폭을 계산하였다. 그러나 적외선카메라에 비해 상대적으로 저가인 CCD카메라의 과

감도 특성상 아크광의 영향은 완전히 제거할 수 없기 때문에 실제 용융지폭 계산에서는 화상처리에 의해 용융지폭의 계산값을 보정하였다.

### 3.3.2 디지털제어기 성능실험

Fig. 11는 설계된 디지털제어 시스템에 기준입력인 용융지폭을 스텝함수로 입력했을 때, 시간에 따른 시스템에 대한 제어입력과 시스템의 출력의 변

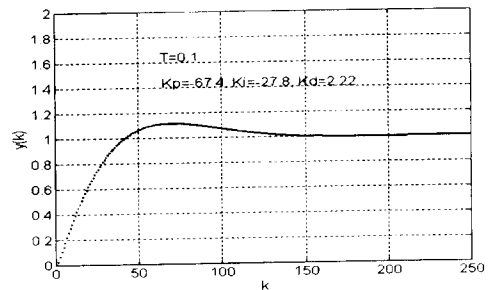


Fig. 11 Unit-step response of weld pool width control system

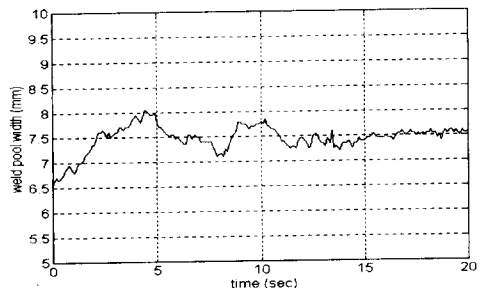


Fig. 12 Time response of weld pool width, the reference input varying from 6.5 mm to 7.5 mm

화량을 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 12은 기준입력을 6.5 mm로 하고 용접하는 중에 기준입력을 시간 0인 점에서 7.5 mm로 변화시켰을 때, 시간의 경과에 따른 용융지폭의 변화량을 보여주고 있다.

### 5. 결 론

GTA용접 시스템에서 제어입력을 용접속도로 하고 출력을 용융지폭으로 하여 외란에 대처하여 균일한 비드폭을 얻도록 피드백 디지털 제어시스템을 구현한 결과는 다음과 같다.

(1) GTA용접 과정에서 CCD카메라와 장파장 통과 필터(long wavelength pass filter)를 함께 사용함으로써 강한 아크광의 존재하에서도 용융지폭을 보다 명확히 관찰할 수 있었다.

(2) 화상처리장치와 컴퓨터를 이용하여 용융지의 가장자리를 인식하여 매우 짧은 시간 동안(62~64 ms)에 용융지폭을 계산하여 디지털컨트롤의 센서 출력데이터로 이용할 수 있었다.

(3) 용접속도를 입력변수로 하고 용융지폭을 출력변수로 하여 스텝입력에 대한 용융지의 동특성을 고찰한 결과, 그 용접시스템의 전달함수는 근사적으로 1차 시스템으로 표현되었다.

(4) 제어입력을 용접속도로 하고 출력을 용융지폭으로 하는 용접시스템에 대해서 디지털 제어기를 설계하여 스텝입력의 시간응답에 대한 실험결과, 디지털 제어 시스템은 원하는 용융지폭으로 수렴함을 알 수 있었다. 용접선 추적만을 다룬 기존의 용접시스템에 비하여 용융지폭을 실시간으로 제어함으로써 정밀한 용접비드를 얻을 수 있는 기반을 형성하였다.

(5) 향후 용접시스템과 같이 복잡하고 비선형적인 시스템을 좀더 정확하게 제어하기 위해서는 시스템식별(system identification)법의 도입과 함께 비선형성을 고려한 제어알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

### 후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계

공학 : MH95-H-21)에 의해 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Nakata S., 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) Inoue K., 1981, "Image Process for On-Line Detection of Welding Process," 일본용접학회지, Vol. 50, No. 11, pp. 94~100.
- (3) Ohshima K., et al, 1987, "Observation and Digital Control of Weld Pool in Pulsed MIG Welding," 일본용접학회논문집, Vol. 5, No. 3, pp. 18~25.
- (4) Richardso, R. W., et al, 1984, "Coaxial Arc Weld Pool Viewing for Process Monitoring and Control," *Welding Journal*, Vol. 63, No. 3, pp. 43~50.
- (5) Pattee, H. E., 1973, "Effects of Arc Radiation and Heat on Welders," *Welding Journal*, Vol. 52, No. 5, pp. 297~308.
- (6) Saedi, H. R., 1986, "Transient Response of Plasma Arc and Weld Pool Geometry for GTAW Process," M. I. T. Ph. D. Thesis, pp. 12~27.
- (7) Gene F. Franklin, et al, 1991, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Addison Wesley, 2nd Edition. pp. 85~90.
- (8) Gene F. Franklin, et al, 1990, *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison Wesley, 2nd Edition. pp. 222~224.
- (9) Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, 2nd Edition, pp. 592~599.
- (10) Bahram Shahiam, et al, 1993, *Control System Design Using Matlab*, Prentice Hall. pp. 278~289.