

**研究論文**

## 전류 면적차를 이용한 아크 센서의 용접선 추적에 관한 연구

김용재\* · 이세현\*\* · 엄기원\*\*

### A Study of Seam Tracking by Arc Sensor Using Current Area Difference Method

Yong-jae Kim\*, Se-hun Rhee\*\* and Ki-woan Um\*\*

**Key Words** : CO<sub>2</sub> Arc Welding(탄산가스 아크 용접), Arc Sensor(아크 센서), Contact Tube to Workpiece Distance(CTWD, 팁-모재간 거리), Seam Tracking(용접선 추적), Current Area Difference Method(전류 면적 차이법), Moving Average Method(이동평균법), Weighted Factor(가중치), Flat Fillet Welding(플랫 필릿 용접)

#### Abstract

The response of the arc sensor using the welding current and/or welding voltage as its outputs has been obtained by the analysis and/or experiments of the static characteristics of arc sensor. But in order to improve the reliability of arc sensor, it is necessary to know its dynamic characteristics. So in this paper, it is presented the dynamic model of arc sensor including the power source, arc voltage, electrode burnoff rate, and wire feed rate. A numerical simulation of the dynamic model of arc sensor was implemented, computing the welding current with input of CTWD. The results of computer simulations and experiments of CO<sub>2</sub> arc welding showed that a linear relationship between weaving center - weld line distance and current area difference was established. Additionally, a real-time weld seam tracking system interfaced with industrial welding robot was constructed, the result of the weld seam tracking experiment for weld line with an initial offset error of 5° was good.

\* 학생회원, 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\* 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

## 1. 서 론

아크 센서는 용접 토치가 좌우로 위빙(weaving) 하면서 용접전류와 용접 전압값을 측정하여 용접선의 위치를 감지하는 센서로써, 토치에 별도의 부착물을 장착하지 않고서도 용접선의 정보를 얻을 수 있고, 주요 기능이 아크의 특성을 이용하는 소프트웨어(software)로 이루어져 제작비가 저렴하다. 또한 용접위치와 신호감지위치가 동일하여 시간 지연 없이 용접선 추적이 이루어진다는 점에서 용접선이 곡선이거나 기울기가 있는 용접물에도 쉽게 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 토치가 반드시 위빙을 하여야 하고, 용접 조건이 달라지면 용접전류, 전압의 특성이 바뀌므로 신호 처리 방법이 달라져야 하는 단점을 가지고 있다.

국내에서 적분방식과 미분방식, 침두치방식의 아크 센서를 이용한 용접선 추적에 관한 연구<sup>2-4)</sup>가 활발히 진행되었는데, 위빙 도중 아크의 길이는 거의 일정하다는 가정 하에 심선 돌출 길이의 변화량을 톱-모제간 거리의 변화량으로 표현하는 정적(靜的) 해석(static analysis)을 기초로 하였다. 하지만 위빙시 일어나는 아크 현상은 정적인 거동만으로 해석하기에는 매우 복잡한 양상을 가지고 있고, 특히 CO<sub>2</sub> 아크용접처럼 아크 상태가 불안하여 스파터가 발생하고 용접 전류값의 변동도 심한 경우에는 침두치방식이나 단순한 적분방식으로는 아크 센서를 적용하기에 한계가 있다고 판단하여, 본 연구에서는 위빙시 아크 전류값의 동적 거동(dynamic behavior)에 기초한 센싱 방법인 전류면적차이법(current area difference method)을 이용하였다.

전류 면적 차이법은 위빙시 생기는 전류값의 변화 패턴을 비교하여 용접선 정보를 얻는 적분법의 일종으로 이러한 아이디어가 발표된 후 일본에서 여러 가지의 연구<sup>5-7)</sup>가 행해져 왔지만, 아직 국내에서는 연구가 미흡한 상태여서 본 연구에서는 전류 면적 차를 이용하여 아크 센서를 해석하였다. 이에 기초하여 토치의 위빙 중심선과 용접선과의 거리에 따른 전류면적의 차이를 나타내는 실험식을 도출하였고, 현장 적용력을 높이기 위해 별도의 제어기 설계 없이 로봇의 기존 기능을 이용한

아크 센서의 모델을 제시하였다. 그리고 산업 현장에서 가장 보편적으로 사용하고 있는, 보호 가스로 탄산가스를 사용하는 CO<sub>2</sub>아크용접에서 용접선을 감지하고, 6축 용접로봇의 진행중 이동(on-line shift)기능을 사용하여 용접선을 실시간으로 추적하는 시스템을 구성하였다. 이 때 추적 오차를 줄이는 방법으로 이동 평균법을 이용하였고 최적의 가중치를 얻게 되었다.

## 2. 아크 센서의 원리

### 2.1 동적 거동 해석

용접과정에서 아크 길이의 변화는 용접 전류값을 결정하는 가장 주요한 요소이다. 따라서 CTWD의 변화에 따른 아크 길이의 변화를 해석하는 것이 용접 전류값의 동적 거동을 이해하는데 필수적이다. 아크 길이는 아크 특성식, 전력 특성식과 아크 평형식을 통하여 결정된다. 여기에 용융 속도식을 더한 후 정해진 용접조건에서 위빙했을 때 생기는 CTWD의 변화를 입력으로 하여 용접 전류값의 출력을 아래와 같이 전개할 수 있다.

아크 특성식(arc characteristic equation)은 식(1)로 주어진다.

$$V = V_0 + \alpha I + \beta La \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 평균 아크전압,  $I$ 는 평균 아크전류,  $La$ 는 아크길이,  $V_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 상수이다.

전력 특성식(power source characteristic equation)은 식(2)와 같다.

$$V = V_{oc} - RI \quad (2)$$

여기서,  $V_{oc}$ 는 개회로 전압,  $R$ 는 회로 저항이다.

아크 평형식(arc maintenance equation)은 식(3)과 같다.

$$\frac{dLx}{dt} = Fr - Br \quad (3)$$

여기서,  $Lx$ 는 심선 돌출 길이,  $Br$ 는 심선 용융 속도,  $Fr$ 는 심선 송급 속도이다.

용융 속도식(wire melting characteristic equation)은 식(4)로 주어진다.

$$Br = aI + bLxI^2 \quad (4)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ 는 상수이다.  
한편, 심선 돌출 길이는 식(5)와 같다.

$$Lx = L - La \quad (5)$$

여기서,  $L$ 은 팁-모재간 거리(CTWD)이다.  
식(1)과 식(2)에서 아크길이는 식(6)으로 표현된다.

$$La = \frac{1}{\beta} \{ V_{oc} - V_0 - (R + \alpha)I \} \quad (6)$$

따라서 식(5)에서 심선 돌출 길이는 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$Lx = L - \frac{1}{\beta} \{ V_{oc} - V_0 - (R + \alpha)I \} \quad (7)$$

식(7)에서 심선 돌출 길이의 시간변화율을 구하면 식(8)을 얻을 수 있다.

$$\frac{dLx}{dt} = \frac{dL}{dt} + \frac{(R + \alpha)}{\beta} \frac{dI}{dt} \quad (8)$$

식(7)을 식(4)에 대입하면 심선 용융 속도는 식(9)로 표현된다.

$$Br = aI + b \left[ L - \frac{1}{\beta} \{ V_{oc} - V_0 - (R + \alpha)I \} \right] I^2 \quad (9)$$

식(8)과 식(9)를 식(3)에 대입하여 정리하면 식(10)을 얻을 수 있다.

$$-\frac{(R + \alpha)}{\beta} \frac{dI}{dt} = aI + b \left[ L - \frac{1}{\beta} \{ V_{oc} - V_0 - (R + \alpha)I \} \right] I^2 - Fr + \frac{dL}{dt} \quad (10)$$

결과적으로 CTWD의 시간변화율에 따른 전류변화율은 식(11)로 정리된다.

$$K_1 \frac{dL}{dt} = aI + b (L - K_0 + K_1 I) I^2 - Fr + \frac{dL}{dt} \quad (11)$$

여기서,  $K_0 = \frac{V_{oc} - V_0}{\beta}$ ,  $K_1 = -\frac{R + \alpha}{\beta}$ 이다.

개선각이 90°인 아래보기 필릿 용접에서 위빙폭이 8mm일 경우에, 용접선 아래의 용융지의 깊이를 2mm로 가정하고, 토치가 위빙하면서 심선이 시편에 닿는 위치까지 용융지가 생긴다고 가정할 후, 위빙 끝단의 좌표를 (-4, 0)과 (4, 0)으로 가정하면 joint type을 식(12)로 얻을 수 있다.

$$y = \frac{3}{8} x^2 - 6 \quad (12)$$

따라서 CTWD의 변화는 포물선을 따라 변화하는 것으로 가정하여, 식(11)의 상수값을  $V_0=10$ ,  $a=1/30$ ,  $\beta=1.5$ ,  $V_{oc}=40$ ,  $R=1/20$ ,  $Fr=7600/60$ ,  $a=0.311$ ,  $b=0.0000463^4$ 으로 결정하고 위빙 주기를 1Hz로하여 식(11)을 수치해석으로 풀었을 때, 토치 위빙 위치에 따른 용접 전류값의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 전류값의 변화는 대칭적인 나비 모양(symmetrical butterfly-like)의 아크전류-위빙 위치의 형태를 보이며, 이 때 생기는 오른쪽과 왼쪽의 전류면적차이는 0이 됨을 알 수 있다.

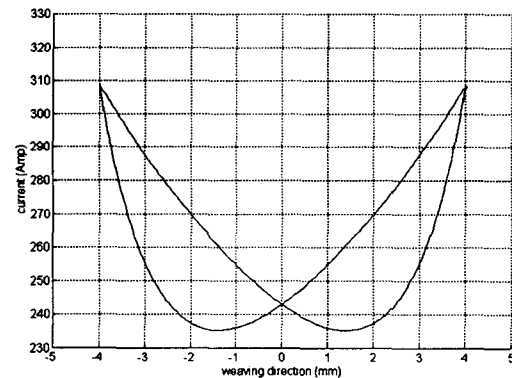


Fig. 1 Relationship between weaving position and welding current

다음은 용접선과 토치 위빙 중심선이 오른쪽 1mm 벗어났을 경우의 전류 파형의 시뮬레이션 결과를 Fig. 2에 나타내었다(○). 이 때 좌우의 전류 면적차이가 생기며 1/4주기 간격으로 그 구간의 전류값을 더해 이를 계산할 수 있다. 실제의 실험에서는 구간마다의 전류값을 2차 최소자승법(least square method)을 통해 커브 피팅(curve fitting)하게 되며, 이 결과를 실선으로 나타내었다. 여기서 ①과 ②의 적분값의 차이에서 ③과 ④의 적분값 차이를 빼 값이 전류면적차이며, 『+』는 오른쪽 전류면적을 그리고 『-』는 왼쪽 전류면적을 나타낸다. 이 경우에 면적  $A_R$ 과  $A_L$ 의 차이( $\Delta A$ )를 구하면 용접선과 토치 위빙 중심선 사이의 치우침 정도를 알 수 있다.

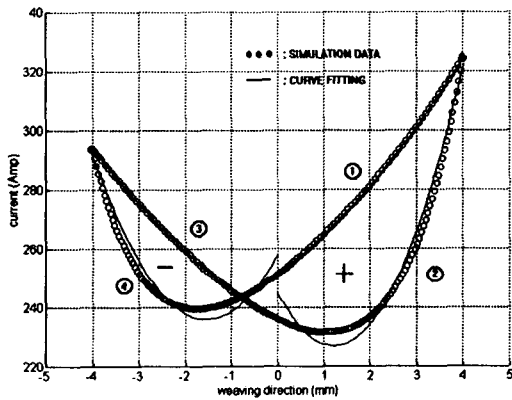


Fig. 2 Difference of current area and comparison of curve fitting data with simulation data(1mm right-shift)

### 3. 용접선 추적

#### 3.1 신호 처리

전류 신호는 션트(shunt) 저항에서 얻거나 홀소자(hall sensor)를 이용하여 얻는다. 측정된 전류를 저역 통과 필터(LPF: low-pass filter, 25Hz)를 거친 후 A/D 변환한다.

이렇게 해서 얻어진 용접전류 신호를 추적 데이터로 사용하기 위해 이동평균법(moving average

method)의 하나인 지수평활법(exponential smoothing)을 이용하여 전류신호의 요동(fluctuation)을 줄이는 디지털 필터 효과를 주었다.

$$I_a(n) = (1 - \sigma)I_a(n-1) + \sigma I(n) \quad (13)$$

여기서,  $\sigma$ 는 가중치(weighted factor),  $I_a(n-1)$ 는 현재 이동 평균값(present moving average value),  $I(n)$ 는 새로 측정된 전류값(new input value),  $I_a(n)$ 는 새로운 이동 평균값(new moving average value)이다. 실험결과 1/4의 가중치가 비교적 정보의 손실이 적으면서도 필터 역할을 효과적으로 할 수 있음을 알 수 있었고, 따라서 본 연구에서는 가중치를 1/4로 정해 사용하였다.

위의 방법으로 처리된 전류신호라도 전류의 노이즈 성분, 아크의 불안정 등 공정의 특성이 포함되어 크고 작은 오차를 여전히 갖고 있어 추적 데이터로 사용하기에는 어려움이 있다. 따라서 마지막 노이즈 제거 처리로써 위빙 1/4주기 간격으로 2차 최소자승법을 사용해 전류신호를 커브 피팅한다.

#### 3.2 추적 데이터

위빙 1주기 동안을 4부분으로 나누어 구간별로 전류값을 적분한다. 처음 위빙 반주기 동안 얻은 2개의 적분값의 차이를 구하면 오른쪽으로 위빙했을 때의 적분면적( $A_R$ )이 식(14)에서 구해진다.

$$A_R = \int_0^{\frac{1}{4}T} I \delta t - \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{1}{2}T} I \delta t \quad (14)$$

여기서 T는 위빙 주기이고,  $\delta t$ 는 샘플링 시간, I는 전류값이다.

다음, 위빙 반주기 동안에 얻은 2개의 적분값의 차이로 왼쪽 위빙시의 적분면적( $A_L$ )을 식(15)에서 구한다.

$$A_L = \int_{\frac{1}{2}T}^{\frac{3}{4}T} I \delta t - \int_{\frac{3}{4}T}^T I \delta t \quad (15)$$

이렇게 얻어진 2개의 적분면적의 차이 ( $\Delta A_R - \Delta A_L$ )는 용접선과 토치의 위빙 중심선이 일치할 경우에는 0의 값을 가진다.

$$\Delta A = A_R - A_L \quad (16)$$

그러나 토치가 오른쪽이나 왼쪽으로 치우치면 각각의 전류면적이 달라진다. 이러한 전류면적의 차이값 ( $\Delta A$ )은 토치의 위빙 중심선이 용접선에서 얼마나 치우쳐 있는가하는 정보를 가지고 있으므로, 이 차이값에 실험을 통하여 얻은 상수값 ( $k$ )을 곱하여 용접선 추적 보정량 (shift value,  $S_x$ )을 결정할 수 있다.

$$S_x = k \Delta A \quad (17)$$

flat 필릿 용접에 대해 토치의 위빙중심을 각각 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3mm 우측으로 이동한 상태에서 용접했을 경우, 좌우의 전류 면적차 ( $\Delta A$ )를 알아보는 실험을 실시하였다. 이 때의 용접조건을 Table. 1에 나타내었고, 얻어진 데이터들은 Table. 2와 같다. 위빙 중심선이 용접선에서 벗어남에 따라 측정된 전류 면적 차이는 Fig. 3과 같다. 여기서 직선은  $\Delta A$ 값들의 최소자승법을 이용한 회귀 직선을 나타낸 것이다.

Table 1. Welding condition

Weld line length	100 mm
Welding Voltage	27 V
Wire Feed Rate	7.6 m/min
CTWD (용접선 위를 기준)	20.0 mm
Welding Speed	4 mm/sec
Weaving Width	8 mm
Weaving Frequency	1 Hz
Groove Angle	90°

이를 통해 얻은 회귀 직선의 기울기의 음의 역수 -1/6.751 (mm/Amp·sec) 값이 상수값  $k$ 가 된다.

$$k = -1/6.751 \quad (18)$$

Table 2. Experimental data according to offset distance

offset distance (mm)	mean current area difference (Amp*sec)	predicted shift value (mm)
0.0	0.8057	0.1193
0.5	2.9847	0.4421
1.0	6.7036	0.9930
1.5	10.4295	1.5449
2.0	14.6072	2.1637
2.5	18.1733	2.6919
3.0	19.5446	2.8951

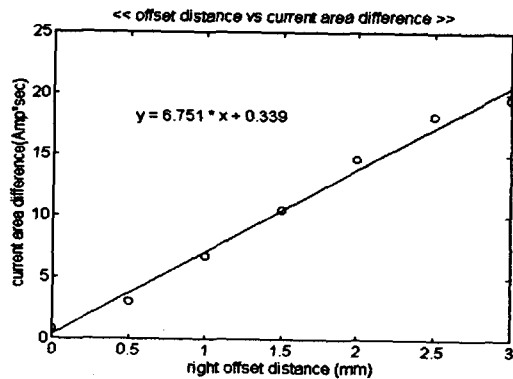


Fig. 3 Experiment for calculation of coefficient  $k$

### 3.3 진행중 이동 기능(on-line shift function)

현재 사용 중인 용접로봇에 별도 제어기의 설계 없이 기존의 진행중 이동 기능(on-line shift function)을 사용하였다.

on-line shift기능이란 미리 교시된 구간점(step)에서 다음 이동할 새로운 구간점의 정보를 외부로

부터 받아 토치 이동 방향을 수정할 수 있는 기능을 말한다. Fig. 4에 개략도를 나타내었다. 토치가 n번째 구간점 (nth step)으로 이동할 동안 추적 정보를 수집한다. 그리고 n번째 구간점에서 다음 구간점 ((n+1)th step)으로 가는 동안 추적 보정량 (Sx)을 받는다. (n+1)번째 구간점에 오게 되면 로봇은 추적 보정량을 받아 새로운 구간점 (new step point)으로 용접방향을 정한다. 그리고 새로운 구간점 ((n+2)th step)에서 다시 그 다음 구간점의 추적 보정량을 받아 경로를 수정하는 작업을 반복하게 된다.

따라서 토치의 위빙 중심선이 용접선을 벗어나게 되는 경우 PC에서 계산된 토치 추적 보정량을 PC와 로봇 사이의 직렬포트 (RS-232C)를 통해 로봇 콘트롤러에 전달해 용접선을 추적할 수 있게 되는 것이다.

여기서 알 수 있듯이 토치가 위빙 중심을 바꾸려면 3 구간이 필요하게 된다. 이것은 1 구간 늦게 용접선 추적이 이루어진다는 것을 의미하며, 이것이 on-line shift기능에서의 단점이고 용접선 추적은 다소 제한을 받게 된다.

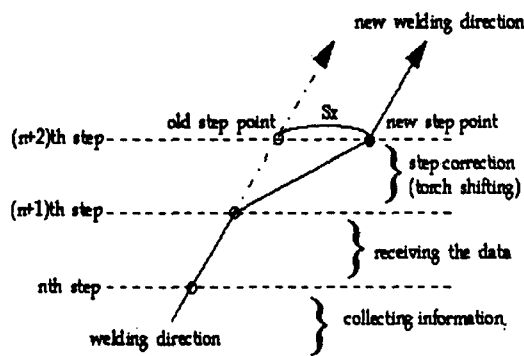


Fig. 4 Schematic diagram of on-line shift function

### 3. 4 제어 소프트웨어

#### 3. 4. 1 시스템의 흐름

용접선 추적 시스템의 프로그램 구성은 C언어를 사용하여 변수 선언부와 인터페이스 보드의 초기화 (initialization), 초기점과 구간점 및 끝점 검출, 용접 전류값 검출, 신호 처리, 용접선 추적부 등의

각 기능별로 모듈 (module) 화하여 구성하였다.

용접전류 측정을 위한 샘플링 주파수는 180Hz로 1/4위빙 주기 동안 전류값을 45번 측정하도록 하였다. 정밀한 시간 측정을 위하여 도스타이머 대신  $\Delta/D$ 보드에 내장된 타이머 (20MHz)를 사용하였다.

용접속도가 4mm/sec이고 위빙 주기가 1초이므로 4mm간격으로 구간점 (step)을 나누었고, 이 구간점마다 로봇은 추적 보정량을 받아 토치의 위치를 수정하게 된다. 용접 초기점에 토치가 오게되면 로봇에서 PC로 동기 신호를 주어 용접 시작을 알리게 되고 용접이 시작된다. PC는 용접 전류값을 받아들여 모니터에 나타내면서 이 값들을 처리하여 토치 추적 보정량을 결정한다. 위빙 1주기마다 구해지는 추적 보정량은 다음 위빙의 1/2주기 끝 무렵에 로봇에게 전달되어 다음 구간점에서의 보정 자료로 이용된다.

용접끝점에서 로봇은 컴퓨터에게 마지막 구간점임을 알리고, 용접이 끝나면 컴퓨터는 데이터를 저장하고 프로그램을 끝낸다.

#### 3. 4. 2 시간 분할

본 프로그램은 용접 전류값을 측정하면서 로봇과 PC간의 통신이 계속적으로 이루어져야 하므로, 프로그램을 각각에 필요한 시간들을 고려하여 데이터 획득 처리시간과 추적 보정량 전송시간으로 시간 분할하였다. 실험을 통해 얻은 전송시간은 평균 0.035초였다. 따라서 위빙 주기 1초 중 0.035초는 전송을 위해 사용하며 나머지 0.965초는 용접 전류값을 모니터링하는데 사용하였다. Fig. 5는 토치의 이동경로와 이에 따른 시간분할을 나타낸다. 여기서 first\_sum은 첫 번째 1/4위빙 주기 동안의 용접 전류값의 합이고, second\_sum은 두 번째, third\_sum은 세 번째, fourth\_sum은 마지막 네 번째 1/4위빙 주기 동안의 용접 전류값의 적분값이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 번째 1/4위빙 주기 동안에는 전송시간이 할애되어 그 시간 동안 용접 전류값을 얻을 수 없다. 이것은 second\_sum을 작게 만들어 식 (14)의  $A_R$ 이 커지게 되고, 식 (16)의  $\Delta \lambda$ 도 일정한 크기로 커진다. 이것은 용접선과 위빙 중심선이 일치하는 용접에 있어서도 전류면적 차이가 발생하게 되는 것을 말하며, 이러한 차이값을 보정해 주어야 올바른 용접선 정보를 얻을 수

있다. 따라서 다음과 같은 실험을 통해 보정치를 얻어 프로그램 상에서 보정했다.

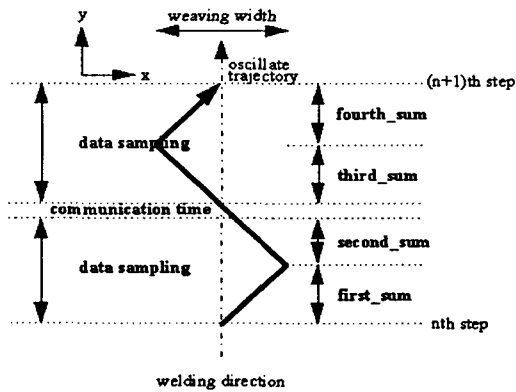


Fig. 5 Relationship between oscillate trajectory and time division

용접선과 토치 위빙 중심선을 일치시킨 상태에서 Table 1의 용접조건으로 용접한 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 처음 2번의 위빙 주기 동안에는 전류면적차가 증가하다가, 나머지 구간에서는 전체적으로 균일한 면적차가 생겼음을 알 수 있다. 이 값들의 평균(26.0Amp. sec)을 구하여 전류 면적 보정치로 사용하였다. 위빙 중심이 용접선에서 벗어난 경우에 동일한 보정치를 사용하는 것에 따른 면적 차이의 오차는 추적시 발생하는 추적 오차를 처리하면서 함께 처리하였다.

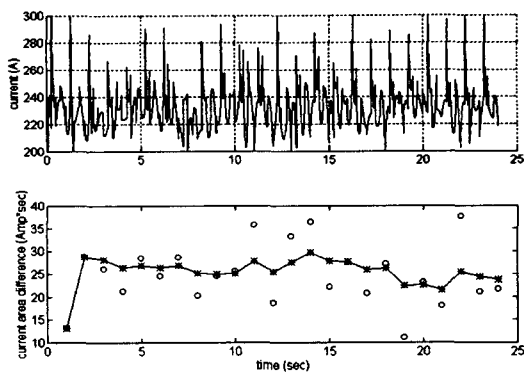


Fig. 6 Experiment for calibration of current area difference

## 4. 실험

### 4.1 실험 장치

실험 장치는 크게 로봇장치, 제어장치 및 용접장비로 구성된다.

로봇장치로는 산업용 6축 로봇(Nacchi : model 7603AR)과 로봇 컨트롤러, PC와 RS232C통신을 위한 포트, 용접기 인터페이스 박스(interface box)가 있다.

제어장치는 intel사의 80486 칩을 장착한 IBM-486 PC를 중심으로 심선 송급 속도와 용접 전압값을 지정하여 주는 DAC보드, 용접 전류값을 받아 디지털값으로 변환시켜주는 ADC 보드(ADVANTECH사의 PCL-812PG, 분해능 12 bit)로 구성되어 있고, 정보화된 용접 전류값을 검출하기 위한 신호증폭회로와 저역 통과 필터 회로, 보호회로를 포함하는 보드로 외부의 신호를 처리하도록 하였다.

용접장비는 용접기와 지그(jig)로 구성된다. 용접기는 CO<sub>2</sub>아크용접기로서 보호가스는 100% CO<sub>2</sub> 가스를 사용하였고, 유량은 20 l/min로 하였다. 직경 1.2mm의 솔리드 와이어를 사용했으며, 용접전원으로는 정전압 방식의 전원공급장치로 되어있는 최대 정격 2차 전류 350A의 용접기를 사용하였다. flat 필릿 용접을 하기 위해서는 포지셔너(positioner)가 필요하지만, 실험조건에 맞는 지그를 제작하여 이를 대신하였다.

### 4.2 이론 검증 실험

용접시편으로 두께 9.0mm, 가로 80mm, 세로 180mm의 연강 2장을 사용하여, 지그에 설치한 후 다음과 같은 실험을 순차적으로 실시하였다.

우선 이론의 검증을 위해 용접선과 토치의 위빙 중심선이 X자 형태로 틀어져 있을 때, 토치의 위치 보정 없이 용접하여 전류면적차를 구하였다. Table 1의 용접조건에서, 용접시작점에서 토치 위치가 용접선에서 왼쪽으로 치우치게 하고 용접끝점에서는 오른쪽으로 치우치도록 용접했다. Fig. 7은 최종적으로 커브 핏팅한 전류값과 전류면적차( $\Delta A$ )를 나타낸다. 여기서 'o'로 나타난 것이 실

제로 얻어진 전류 면적 차이이고, 실선은 실제값에 이동 평균법의 가중치를 1/4로 주어 얻은 값이다. 실험결과 토치의 위빙 중심선과 용접선과의 거리 차이는 전류면적차이와 선형비례관계에 있음을 알 수 있었다.

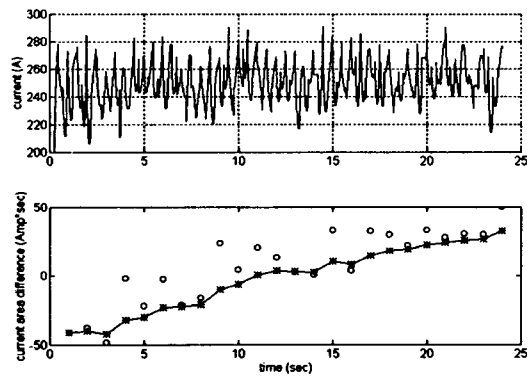


Fig. 7 Experimental results of the relationship between current area difference and weaving center deviation from weld line.

### 4.3 추적 실험

시험편을 약 5° 정도 용접선에서 기울어지도록 지그에 설치시킨 후, 전류 면적을 계산하여 토치 이동량을 결정할 때 사용한 2번째 이동평균법의 가중치를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4로 바꾸가면서 용접선을 추적하는 실험을 하였다. 우선 추적 없이 용접을 한 결과 용접의 끝 무렵에 심한 오버랩(overlap)과 언더컷(undercut)이 발생함을 볼 수 있었다. 다음으로 가중치에 변화를 주어 추적 실험을 하였다. 이 때의 실험결과를 Table 3에 나타냈고, 가중치 각각의 경우에 대한 추적궤적을 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에 나타내었다.

가중치가 0.1과 0.2인 경우에 표준편차, 평균오차 및 최대오차가 모두 ±1mm안에 들었고, 비드 모양도 비교적 양호하였다. 이는 심선의 지름이 1.2mm인 것을 고려할 때 우수한 추적성능을 보인 것으로 판단할 수 있었고, 따라서 주어진 용접조건에서는 0.1과 0.2의 가중치가 추적에 알맞은 값을 알 수 있었다.

가중치가 0.3과 0.4인 경우에는 용접선 추적

Table 3. Results of tracking experiment according to weighted factor in 5° welding line deviation

가중치	표준편차 (mm)	평균추적오차 (mm)	최대추적오차 (mm)
0.1	0.3459	0.0248	0.9430
0.2	0.3570	-0.2239	1.0055
0.3	0.7356	0.1189	1.8996
0.4	1.4523	0.3732	3.0549

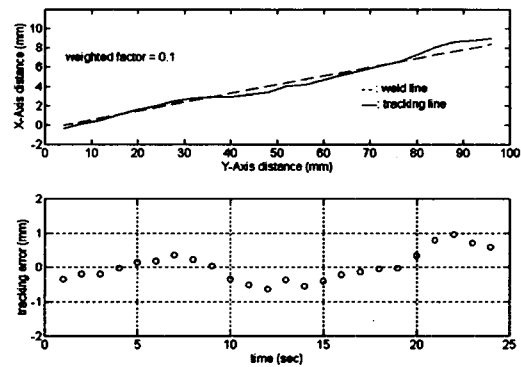


Fig. 8 Experimental results of degree deviation with weighted factor 0.1

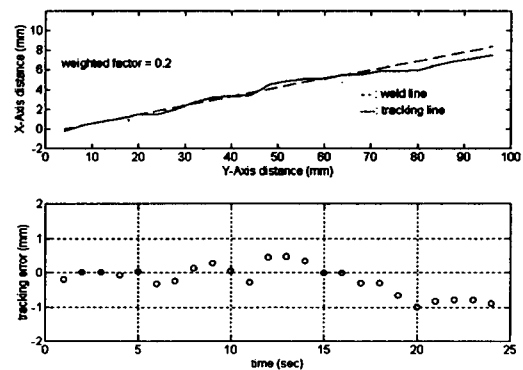


Fig. 9 Experimental results of 5 degree deviation with weighted factor 0.2

은 가능하였으나 용접 중 표준편차와 최대추적오차가 크게 나타났다. 이는 토치 위빙이 불안정하게 되어 오버랩과 언더컷이 발생한 것을 의미하



여, 로봇 제어기에 주어지는 스텝당 토치 이송 보정량이 2mm가 넘을 때 시스템이 매우 불안해 지는 것을 고려할 때, 이러한 가중치는 부적당하다고 판단하였다.

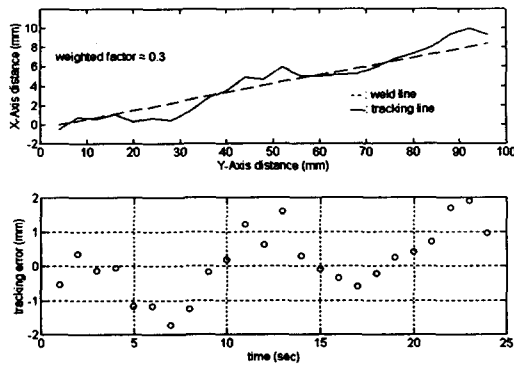


Fig. 10 Experimental results of 5 degree deviation with weighted factor 0.3

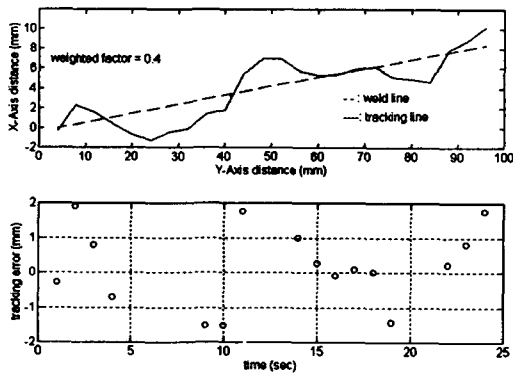


Fig. 11 Experimental results of 5 degree deviation with weighted factor 0.4

### 5. 결 론

아크 센서를 이용한 flat 필릿 용접선 추적장치를 용접로봇에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접전원, 아크전압, 전극의 용융 속도, 심선의 송급 속도 등을 고려한 아크 센서의 동적 모델

을 유도하였고, 이 모델을 이용하여 CTWD의 변화량에 대한 용접 전류값의 변화량을 시뮬레이션 하였다.

2) 위빙시 아크 전류값의 동적 거동에 기초한 센싱 방법인 전류면적차이법을 이용하여 토치의 위빙 중심선과 용접선과의 거리에 따른 전류면적의 차이를 나타내는 실험식을 도출하였다.

3) 현장 적응력을 높이기 위해 별도의 제어기 설계 없이 로봇의 기존 기능 중 진행중 이동 기능을 사용한 아크 센서 모델을 제시하였다.

4) CO<sub>2</sub>아크용접에서 용접선 중심오차가 5°인 경우에 대해 여러 값의 가중치를 적용해 실험하였을 때 0.1과 0.2의 가중치에서 양호한 추적성능을 보였다.

### 6. 참고문헌

1. 엄기원 : 최신용접공학, (1992)
2. 김재용, 나석주 : 아크 센서를 이용한 용접선 추적장치, 대한용접학회지, 제6권, 제4호, (1988), pp 1-6
3. 이승영, 문형순, 나석주 : 소모성 전극을 사용하는 아크용접 로봇을 위한 아크 센서 개발에 관한 연구, 대한용접학회지, 제11권, 제3호, (1993), pp 22-33
4. 선우희권, 유용상, 최상균, 유중돈 : GMA 용접의 아크 빛 모델링 및 용접선 추적에의 응용, 대한용접학회 춘계 학술 발표집, (1996), pp 85-90
5. E. Murakami et al : Dynamic analysis of arc length and its application to arc sensing, *Sensors and Control Systems in Arc Welding*, (1994), pp 216-226
6. M. Otoguro : Groove tracking control by arc-welding current, *Sensors and Control Systems in Arc Welding*, (1994), pp 257-265
7. H. Fujimura et al. : Arc sensing using fuzzy control, *Fuzzy Set and Systems* 32, (1989), pp 221-237
8. J. F. Lancaster : *The Physics of Welding*, (1984)