

研究論文
------

大韓熔接學會誌  
 第10卷 第4號 1992年 12月  
 Journal of the Korean  
 Welding Society  
 Vol.10 No.4, Dec., 1992

## Flux Cored Arc용접용 아크센서의 개발 및 이를 이용한 용접선 추적에 관한 연구

김수영\* · 이승영\*\* · 나석주\*\*\*

### A Study on the Development of Arc Sensor for Flux Cored Arc Welding Process and its Application for Seam Tracking

S. Y. Kim\*, S. Y. Lee\*\* and S. J. Na\*\*\*

**Key Words** : Arc Sensor(아크센서),  
 FCAW(플럭스 코어드 아크 용접),  
 Tip to Workpiece Distance(팁-모재간 거리),  
 Quadratic Curve-Fitting Method(2차곡선 피팅법)

#### Abstract

Among the variety of welding processes available, the flux cored arc welding is one of the most frequently used process, because of its wide range of application and high productivity. The weld joint tracking is indispensable to improve the flexibility of the arc welding robot application for the flux cored arc welding (FCAW) process.

In this study, an arc sensor which utilizes the electrical signal obtained from the welding arc itself was developed for weld joint tracking in FCAW. Because a model of the welding arc in flux cored arc welding was required to develop the arc sensor, a mathematical model was proposed by analysing the welding arc behaviour, and also an experimental model by using the factorial experiment and least square method. For overcoming the fluctuation in the welding current signal during tracking the weld joint, it was fitted to a curve which is inversely proportional to a trace of tip-to-workpiece distance by using the quadratic curve-fitting method.

\* 정회원, 대우조선공업(주)

\*\* 정회원, 삼성중공업(주)

\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

## 1. 서 론

지금까지 소모성 전극에서 아크센서를 이용한 용접선 추적에 대한 연구는 주로 GMAW 공정에 대해서 이루어져 왔으나, 구조물의 경량화추세로 고장력강의 사용이 급증하고 있고 용접품질향상 및 용접작업의 편리성 때문에 FCAW 공정이 증가하고 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다<sup>1)</sup>. FCAW 공정은 GMAW 공정과 유사하나 차이점은 사용하는 와이어가 다른데 있다. 플럭스 코어드 와이어(flux cored wire)의 구조는 대강의 띠를 원통형으로 만들고 그 내부에 플럭스를 충전시킨 것으로 내부의 충전 플럭스에 의하여 솔리드 와이어(solid wire)로 작업하는 것보다는 우수한 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 가스실드(gas shield) 형식의 플럭스 코어드 와이어를 사용하는 FCA용접 공정에서 팁-모재간 거리 변화에 대한 용접전류의 변화를 수학적, 실험적으로 모델링하고, 이를 이용하여 2차곡선 피팅(quadratic curve fitting)법을 사용한 용접선 추적용 아크센서를 개발하고자 하였다.

## 2. 아크센서 모델링

### 2.1. 수학적 모델링

용접중의 아크 전류는 팁-모재간의 거리가 멀어 질수록 전류는 작게 흐르며, 가까이 질수록 많이 흐른다. 이러한 성질은 용접기의 정전압 특성에 연유하며, 비록 용접 와이어의 재질에 따라 달라 지기는 하지만 팁-모재간의 거리와 용접전류의 크기는 서로 비례적인 관계가 있다. 아크센서란 아크전류를 측정하여 팁-모재간 거리를 산출해 낼 수 있다는 것으로서 아크전류의 측정장치를 말한다. 용접전압은 용접기의 정전압 특성으로서 일정하기 때문에 아크전류는 저항과 반비례하게 된다.

용접전류가 흐를 때의 용접저항은 팁-모재간의 저항이 가장 크며, 이는 다시 용접 와이어의 돌출 길이에서 나타나는 저항과, 아크내에서의 저항으로 나누어 진다. 용접기의 정전압 특성으로 아크저항은 항상 일정하도록 제어되므로서, 용접전류는 팁으로부터 돌출되어 나온 용접 와이어의 저항에 따라 좌우

된다. 이의 저항은 와이어의 단면적이 일정할 때 비저항과 와이어의 길이에 관계되며 길이가 길수록 커지게 된다.

따라서 팁-모재간의 거리가 멀어 질수록 용접 와이어의 저항증가로 인하여 전류는 감소하게 된다. 이것은 전류를 측정하여 토치와 팁-모재간 거리를 산출해 낼 수 있음을 의미하며, 용접전류를 측정하여 용접 그루브(groove)에서의 토치 높이나 위치 등을 산출하면 이를 제어할 수 있으므로 용접선의 추적에 이용할 수 있게 된다<sup>2)</sup>. 아크전류를 측정하여 팁-모재간의 거리를 계산할 수 있으므로, 토치를 용접선에 직각 방향으로 위빙(weaving)하면서 전류를 측정하면, 용접부의 형상을 인식할 수 있고, 이 형상을 기초로 중심점을 찾아 용접선을 추적해 나가게 된다. 이와 같은 원리로 인하여 아크센서는 용접선을 추적할 때 매우 중요한 부품으로서 작용할 수 있다.

아크센서를 개발하기 위해서는 사용할 용접조건에서 팁-모재간 거리와 그에 대한 용접전류 값의 관계를 아는 것이 필수적이라 할 수 있다. 이 관계가 수학적으로 표현될 수 있다면 아크센서 개발시 팁-모재간 거리와 그에 대한 용접전류의 관계를 단순한 실험에 의존하는 것에 비해 능률적일 것이다.

Fig.1에서와 같이 와이어의 금속부분과 플럭스부분에 대해 용접중 발생하는 주울(Joule)열 및 아크열의 영향을 에너지 보존법칙을 이용하여 표시하면 다음과 같다.<sup>3)</sup>.

$$A_m a L v_j^2 + A_m \phi_m j - Q_L - Q_C = V_m (H_m + b_m) \quad (1)$$

$$Q_C + A_r \phi_r j = V_r (H_r + b_r) \quad (2)$$

$$W_m A_m = V_m \quad (3)$$

$$W_r A_r = V_r \quad (4)$$

여기서,

$A_m, A_r$ : 와이어의 금속 및 플럭스의 단면적

[mm<sup>2</sup>]

$W_m, W_r$ : 와이어의 금속 및 플럭스의 공급속도

[mm/s]

$V_m, V_r$ : 금속 및 플럭스가 용융되는 체적 생성율

[mm<sup>3</sup>/s]

$H_m, H_r$ : 용적의 금속 및 플럭스의 단위부피당

보존열량[J/mm<sup>3</sup>]

$b_m, b_r$ : 실온에서 금속 및 플럭스의 단위부피당

보존열량에 의존하는 상수[J/mm<sup>3</sup>]

$\phi_m$ : 아크열에 의해 금속을 녹이는 데 대한

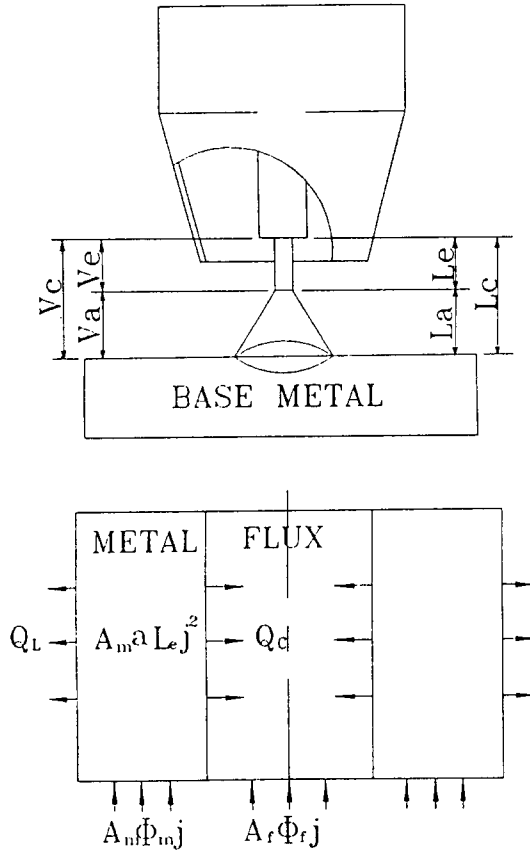


Fig.1 Mathematical Modeling of the Relationship between Welding current and Tip-to-Workpiece Distance

- 등가 전압[V]
- W : 와이어 공급속도[mm/s]
- Le : 와이어 돌출길이[mm]
- a : 와이어 고온 저항율에 상당하는 상수 [Ω mm]
- j : 전류밀도[A/mm<sup>2</sup>]
- Qc : 금속에서 발생한 열량중 플럭스로 빠져 나가는 열량[J/s]
- Ql : 금속에서 발생한 열량중 대기로 빠져나가는 열량[J/s]

식(1)과 식(3)에서,

$$W_m = \frac{(\Phi_m j + a L_e j^2) - (Q_l + Q_c) / A_m}{H_m + b_m} \quad (5)$$

이고, 식(2)와 식(4)에서,

$$W_f = \frac{\Phi_m j + Q_c A_f}{H_f + b_f} \quad (6)$$

이다.

대류에 의한 열량 Q<sub>l</sub>은 전도에 의한 열량 Q<sub>c</sub>에 비해 무시할 수 있고 정상 상태에서 W<sub>m</sub> = W<sub>f</sub> = W라고 가정하면 식(5)와 식(6)에서 W는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{(\Phi_m + (A_f/A_m)\Phi_m)j + a L_e j^2}{H_m + (A_f/A_m)H_f + b_m + (A_f/A_m)b_f} \quad (7)$$

또는

$$W = \gamma_1 j + \gamma_2 L_e j^2 \quad (8)$$

여기서,

$$\gamma_1 = \frac{(1 + A_f/A_m)\Phi_m}{H_m + (A_f/A_m)H_f + b_m + (A_f/A_m)b_f}$$

$$\gamma_2 = \frac{a}{H_m + (A_f/A_m)H_f + b_m + (A_f/A_m)b_f}$$

으로 표시할 수 있다. 식(8)에서,

$$L_e = \frac{A_m^2 W - A_m \gamma_1 I}{\gamma_2 I^2} \quad (9)$$

이다. Halmoy<sup>4)</sup>와 Oshima 등<sup>5,6)</sup>은 용접전압중 와이어 돌출길이와 아크내에서의 전압강하를 아래와 같이 표현하였다.

$$V_e = \lambda_1 L_e j - \lambda_2 (W/j) = \lambda_1 L_e (I/A_m) - \lambda_2 W (A_m/I) \quad (10)$$

$$V_a = \alpha_1 L_e + \alpha_2 + (\alpha_3 L_e + \alpha_4) I \quad (11)$$

여기서, λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub>, α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>, α<sub>4</sub>는 상수이다.

식(9) - 식(11)에서 양변을 시간에 대해 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dL_e}{dt} = \frac{A_m \gamma_1 I - 2 A_m^2 W}{\gamma_2 I^3} \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{dV_e}{dt} = \frac{\lambda_1 L_e}{A_m} + \frac{\lambda_2 W A_m}{I^2} \frac{dI}{dt} + \frac{\lambda_1 I}{A_m} \frac{dL_e}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{dV_a}{dt} = (\alpha_3 L_a + \alpha_4) \frac{dI}{dt} + (\alpha_1 + \alpha_3 I) \frac{dL_a}{dt} \quad (14)$$

용접 전원의 정전압 특성에서 용접전류와 용접전압의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{dV}{dt} = -n \frac{dI}{dt} \quad (15)$$

여기서, n은 용접기 특성에 따른 상수이다.

식(12)-식(15)를 이용하여 정리하면 용접전류와 팁-모재간 거리에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{dI}{dL_c} = \frac{-(\alpha_1 + \alpha_3 I) \gamma_2^3}{(\alpha_3 L_c + \alpha_4 + n) \gamma_2^3 + (\lambda_2 \gamma_2 - \lambda_1 + \alpha_3 A_m) W A_m - A_m \alpha_1 \gamma_1 + 2 A_m^2 \alpha_1 W} \quad (16)$$

강의 경우 상수  $\lambda_1$ 의 크기는  $1.2 \times 10^{-3}$ , 용접 와이어에서의 상수  $\lambda_2$ 는 3.98, 아크에서  $\alpha_1 = 0.6315$ ,  $\alpha_2 = 15.22$ ,  $\alpha_3 = 1.02 \times 10^5$ ,  $\alpha_4 = 3.07 \times 10^2$ , 용접기 특성에서  $n = 0.02$ 인 값을 이용하여<sup>4-7)</sup>, 식(16)으로부터 전류의 변화를 팁-모재간 거리 변화에 대해 계산하였다. 팁-모재간 거리가 선형적으로 증가함에 따라 용접전류는 런지-쿠타(Runge-Kutta) 방법에 의해 계산하였다<sup>8)</sup>.

Fig.2는 평판용접시 측정된 용접전류의 특성을 나타내고 있다. 적정 용접조건의 구간내에서 용접전압 22~34V, 와이어 공급속도 3.0~8.9m/min로 선택하여 실험한 것으로 각 용접조건에서의 평균전류에 대한 최대편차는 17~20A 정도이다.

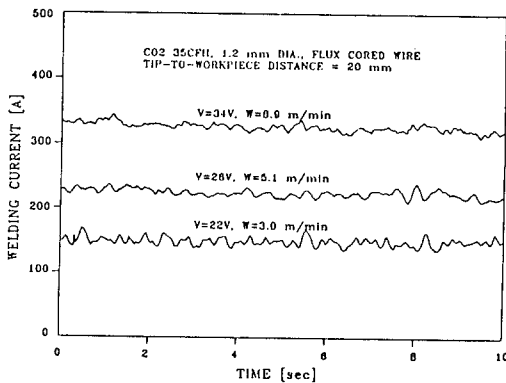


Fig.2 Comparison of Welding Current in Flux Cored Arc Welding with Varing Welding Condition

Fig.3은 Fig.2에서 측정된 평균 전류값과 수학적 모델링에 의한 계산결과를 비교한 것이다. 이것으로부터 수학적 모델링에 의한 팁-모재간 거리에 대한

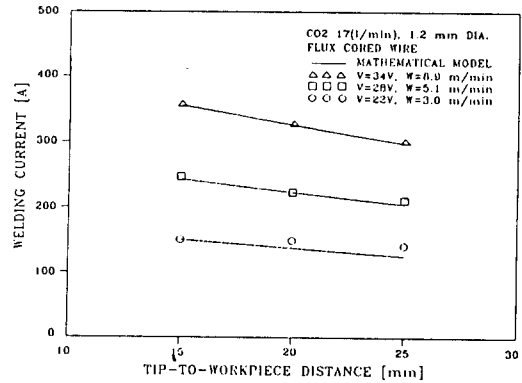


Fig.3 Mathematical Analysis of the Relationship between Welding Current and Tip-to-Workpiece Distance

용접전류의 변화는 1차 선형적으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 또한 위에 사용한 상수를 사용했을 때 글로블라(globular) 금속이행모드 이상의 영역에서는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 아크센서 적용시 사용할 용접조건에서 팁-모재간 거리와 그에 대한 용접전류값을 알고, 있다면 이 모델링은 매우 유효하리라 생각된다.

## 2.2. 실험적 모델링

아크센서 적용시 사용할 용접조건에서 팁-모재간 거리와 그에 대한 용접전류값 및 아크에 대한 제 상수값을 알고 있다면 수학적 모델링은 매우 유효하리라 생각한다. 그러나 실제 용접에서는 용접조건이 달라 지므로 이에 따른 팁-모재간 거리 변화에 따른 용접전류의 변화량이 바뀌어야 효율적인 아크센서의 역할을 기대할 수 있게된다. 따라서 적은 횟수의 실험으로 용접전류와 팁-모재간 거리에 대한 관계를 구하는 것이 필요하였다.

적은 횟수의 실험으로 용접전류와 팁-모재간 거리에 대한 관계식을 구하기 위하여 2<sup>3</sup>법을 사용하여 이들의 관계식을 얻고, 이 결과를 용접선 추적에 이용하였다. 이때 이용한 변수로는 용접전압, 와이어 공급속도, 팁-모재간 거리로 하였다. 인자에 대한 용접전류의 관계는 상호 2인자 까지의 영향을 고려할 때 아래식으로 표현된다<sup>9)</sup>.

$$I = K_1 + K_2 V + K_3 W + K_4 L + K_5 VW + K_6 WL + K_7 VL \quad (17)$$

여기서,

$K_1, \dots, K_7$  : 상수

I : 용접전류

V : 용접전압

W : 와이어 공급속도

L : 팁-모재간 거리

식 (17)을 전용접조건에 대해 나타내면 매트릭스(matrix) 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{I\} = [A]\{K\} \tag{18}$$

여기서 매트릭스[A]는 인자수준을 0, 1로 표현할 때 아래 형태로 정의된다.

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & V_0 & W_0 & L_0 & V_0W_0 & W_0L_0 & V_0L_0 \\ 1 & V_0 & W_0 & L_1 & V_0W_0 & W_0L_1 & V_0L_1 \\ 1 & V_0 & W_1 & L_0 & V_0W_1 & W_1L_0 & V_0L_0 \\ 1 & V_0 & W_1 & L_1 & V_0W_1 & W_1L_1 & V_0L_1 \\ 1 & V_1 & W_0 & L_0 & V_1W_0 & W_0L_0 & V_1L_0 \\ 1 & V_1 & W_0 & L_1 & V_1W_0 & W_0L_1 & V_1L_1 \\ 1 & V_1 & W_1 & L_0 & V_1W_1 & W_1L_0 & V_1L_0 \\ 1 & V_1 & W_1 & L_1 & V_1W_1 & W_1L_1 & V_1L_1 \end{bmatrix}$$

식(18)에서 최소자승법을 사용하면 계수 매트릭스  $\{K\}$ 는 다음식으로 결정되어진다<sup>10)</sup>.

$$\{K\} = \{[A]^T[A]\}^{-1}[A]^T\{I\} \tag{19}$$

실험적으로 위 식에 대한 상수를 결정하기 위한 인자의 구간 및 용접조건은 Table.1과 같다. Table.1과 같은 조건으로 실험을 하여 얻은 데이터는 Table.2이며 이 값을 이용하여 얻은 계수 매트릭스  $\{K\}$ 는 Table.3과 같다. 그러므로 FCAW에서 용접전류와 팁-모재간 거리에 대한 관계식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

**Table 1.** Welding Condition for 2<sup>3</sup> Factorial Experiment

Fator	0	1
Welding Voltage V[V]	28.0	34.0
Wire Feed Speed W[m/min]	5.1	8.9
Tip-to-Work Distance L[mm]	15.0	25.0
Welding Speed	4mm/s	
Shielding Gas	100% CO <sub>2</sub> , 17 l/min	
Welding Wire	ER71T-1, DIA.1.2mm	

**Table 2.** Treatment Combination of 2<sup>3</sup> Factorial Experiment

Experiment Number	Treatment Combination	Mean Current [A]	Standard Deviation $\sigma_{n-1}$
1	V <sub>0</sub> W <sub>0</sub> L <sub>0</sub>	243.73	5.43
2	V <sub>0</sub> W <sub>0</sub> L <sub>1</sub>	211.20	6.98
3	V <sub>0</sub> W <sub>1</sub> L <sub>0</sub>	355.94	6.44
4	V <sub>0</sub> W <sub>1</sub> L <sub>1</sub>	303.76	6.18
5	V <sub>0</sub> W <sub>0</sub> L <sub>0</sub>	259.44	5.91
6	V <sub>0</sub> W <sub>0</sub> L <sub>1</sub>	227.18	4.68
7	V <sub>0</sub> W <sub>1</sub> L <sub>0</sub>	356.41	9.22
8	V <sub>0</sub> W <sub>1</sub> L <sub>1</sub>	303.36	4.61

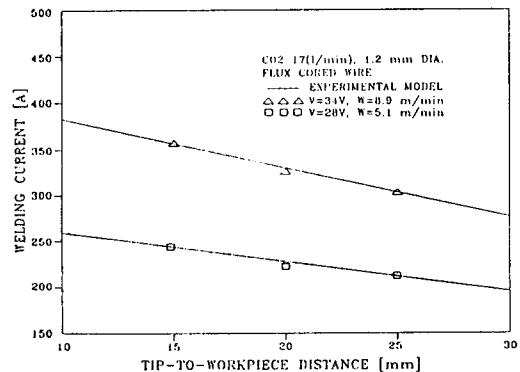
**Table 3.** Calculated Coefficients of Experimental Model

Coefficient	Calculated Value
K <sub>1</sub>	-83.2243
K <sub>2</sub>	6.4980
K <sub>3</sub>	57.3225
K <sub>4</sub>	-0.0278
K <sub>5</sub>	-0.6995
K <sub>6</sub>	-0.5398
K <sub>7</sub>	-0.0145

$$I_{FCAW} = (-83.2243 + 6.4980V + 57.3225W - 0.6995VW) + (-0.0278 - 0.5398W - 0.0145V)L \tag{20}$$

Fig.4에 모델과 실험 결과를 비교하였는데, 이 실험 방법에 의한 용접전류와 팁-모재간 사이의 관계 표현은 양호한 것으로 생각되며, 이 결과를 용접선 추적시 필요한 데이터로 이용하였다.

Table.4에 GMAW의 경우와 FCAW의 경우를 비교하여 보았다. 여기에서 알 수 있듯이 용접조건에 따라



**Fig.4** Experimental Model in Flux Cored Arc Welding Process

**Table 4.** Slope( $\Delta I/\Delta L$ ) of experimental Model in GMAW & FCAW

Welding condition			GMAW	FCAW
welding volt	wire feed	CO <sub>2</sub> (l/min)		
22.0	3.0	17	-4.40	-0.81
28.0	5.1	17	-3.99	-3.25
34.0	8.9	17	-5.86	-5.31

팁-모재간 거리 변화에 대한 전류의 변화는 달라지므로 각 용접조건에 따라 적용해야 할 제어이득의 변화가 있어야 할 것이다.

### 3. 용접선 추적

#### 3.1. 그루브의 형상 인식

용접을 할 때 그루브로부터 토치까지의 높이인 팁-모재간의 거리는 아크센서의 원리에 의해서 전류를 측정해 보면 알아낼 수 있다. V 그루브의 단면을 토치로 위빙하면서 용접전류를 측정하여 보면, 전류는 V자 모양을 할 것이라고 쉽게 추측할 수 있으나, 실제로는 용융풀의 작용으로 U자형에 가깝게 된다. 따라서 2차곡선 피팅법을 이용하면 그루브의 형상인식에 유효할 것이다. 일단 그루브의 형상인식 후에는 그 형상을 이용하여 토치의 위빙이 그루브의 중심에서 이루어졌는지, 그루브로부터 토치의 높이가 적당한지를 알아볼 수 있다. 그루브 위에서 한번 위빙을 하면서 연속적으로 용접전류를 측정하여 시간에 대해 2차 커브 피팅법을 이용한 그루브의 형상인식은 위빙구간 전체에서 얻어진 데이터를 근거로 하여 계산한다. 그러므로 아크센서의 정밀도가 증가되며 노이즈의 크기에 영향을 적게 받으므로 각종 용융금속 이행 모드에서의 작업이 가능하다.

용접전류를 시간  $t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_m$ 에서 측정하여 그 값을  $i_0, i_1, i_2, i_3, \dots, i_m$ 이라 할때, 위빙시에 측정된 전류값을 2차식으로 표현하면, 그 식은 다음과 같이 된다<sup>11)</sup>.

$$I = k_0 + k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2 \quad (21)$$

여기서,

I : 전류[A]

t : 시간[sec]

$k_0, k_1, k_2$  : 상수

측정한 전류의 데이터로부터 실험식의 상수  $k_0, k_1, k_2$ 를 2차곡선 피팅법으로 구하려면 2차식으로 표현되는  $I_n(n=0,1,\dots, m)$  값에서 실제 측정값  $i_n(n=0,1,\dots, m)$ 의 차이에 대해 최소자승법의 원리를 만족시켜야 한다. 이때 상수  $k_0, k_1, k_2$ 는 아래식으로 결정될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_0 & T_1 & T_2 \\ T_1 & T_2 & T_3 \\ T_2 & T_3 & T_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{n=0}^m i_n \\ \sum_{n=0}^m t_n \cdot i_n \\ \sum_{n=0}^m t_n^2 \cdot i_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서  $T_0 = \sum_{n=0}^m 1, T_1 = \sum_{n=0}^m t_n, T_2 = \sum_{n=0}^m t_n^2,$

$T_3 = \sum_{n=0}^m t_n^3, T_4 = \sum_{n=0}^m t_n^4$  이다.

이 때 상수  $k_0, k_1, k_2$ 는 아래식으로 결정될 수 있다. 한번의 위빙시에 측정된 전류값의 수가  $m+1$ 로 일정하다고 하면  $T_0, T_1, \dots, T_4$ 는 아래식으로 계산된다<sup>12)</sup>

$$T_0 = \sum_{n=0}^m 1 = m+1$$

$$T_1 = \sum_{n=0}^m t_n = m^2/2 + m/2$$

$$T_2 = \sum_{n=0}^m t_n^2 = m^3/3 + m^2/2 + m/6$$

$$T_3 = \sum_{n=0}^m t_n^3 = m^4/4 + m^3/2 + m/4$$

$$T_4 = \sum_{n=0}^m t_n^4 = m^5/5 + m^4/2 + m^3/3 - m/30$$

그러므로 매트릭스[T]<sup>-1</sup>는 상수 매트릭스가 되며 이것은 용접작업에 들어가기 전에 한번만 계산해 두면 되고, 매 샘플링시 측정된 데이터는 한번의 위빙이 끝날 때 마다 2차식으로 표현되는 전류값으로 쉽게 구할 수 있다. 이렇게 표현된 전류값으로 팁-모재간 거리를 예측하고 용접선 추적에 이용하고자 하였다.

#### 3.2. 용접선 추적 알고리즘

용접선 중심에 대해 오차가 발생했을 때 이 오차를

제어하여 용접선을 추적해나가는 과정은 다음과 같다. 측정된 전류값을 이용하여 팁-모재간 거리를 예측하는데 적정 용접조건하에서 용접전류와 팁-모재간 거리에 대한 관계식은 아래 식으로 간략히 표시될 수 있다<sup>13,14)</sup>.

$$I = -\alpha \cdot L + \beta \quad (24)$$

여기서,  
 $\alpha, \beta$ : 상수

위빙끝단에서 측정된 전류(현재 위빙 끝단에서의 전류)와 기준전류(전단 위빙 끝단에서의 전류)와의 차이  $\Delta I$ 를 알 때 팁-모재간 거리의 변화  $\Delta L$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta L = -\Delta I / \alpha \quad (25)$$

그러므로, 위빙 중심이 용접선에서 벗어날 때, 한쪽 위빙 끝단에서의 팁-모재간 거리는 짧아지게 되며, 이 때의 용접전류는 증가한 상태가 된다. 본 연구에서는 용접선 추적 시작에는 위빙폭을 고정하였으므로 원하는 위빙속도  $V_w$ 에 대해 위빙시간  $T_w$ 가 결정된다. 위빙중심이 용접선에서 벗어난 편차  $D$ 는 Fig.5에서 보듯이 그루브의 기하학적 형상과  $\Delta L$ 에 의해 아래와 같이 구해진다.

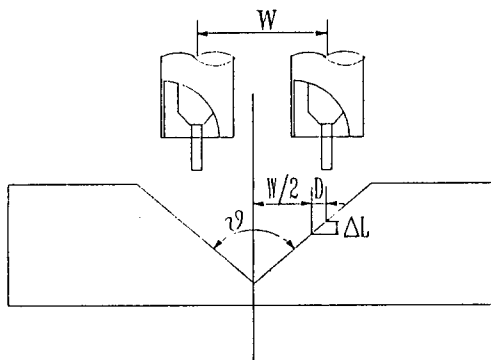


Fig.5 Groove Shape and Deviation of Weaving Center from Weld joint Line

$$D = -\Delta L \cdot \tan(\theta/2) \quad (26)$$

여기서,

$D$ : 편차  
 $\theta$ : 그루브의 각도

위와 같은 편차  $D$ 를 이용해 위빙속도를 변화시키면, 일정한 값으로 유지되는 위빙시간의 조건하에서 토치위치를 수정할 수 있으며, 수정된 위빙속도  $V_w'$ 는 원래의 위빙속도  $V_w$ 로부터 다음과 같이 표현된다.

$$V_w' = V_w + \Delta I \cdot \tan(\theta/2) / (\alpha \cdot T_w) \quad (27)$$

이러한 위빙속도의 변화는 용착량의 변화를 가져와서 용접두께가 고르지 못하나 적용되는 일반적인 용접조건하에서는 그 영향이 작기때문에 무시될 수 있다. 특히 위빙시간과 용접진행 속도를 일정하게 유지하는 본 시스템에서는 용접선 단위 길이당 용착량이 일정하게 유지되는 장점을 가지고 있다.

### 3.3. 용접선 추적 실험

본 실험의 목적은 실제의 용접실험을 통해 본 연구에서 제시한 용접선 추적 알고리즘이 FCAW 공정에 적용되었을 때의 추적 성능을 보고자 하였다. 본 실험에 사용한 재료는 두께 25mm의 연강을 모재로 사용하였다. V그루브 형상으로 개선각도는 60°, 루트면

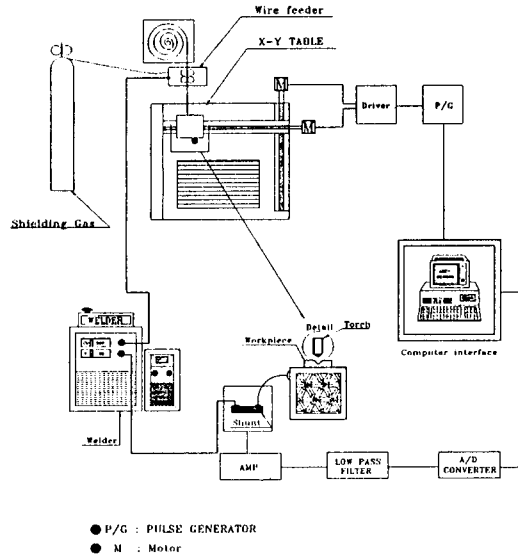


Fig.6 Schematic Diagram of the Seam Tracking System in x-y Table

(root face)은 3mm로 가공하였으며 100% CO<sub>2</sub>가스를 보호가스로 사용하였다. 용접와이어는 직경 1.2mm의 것으로 플럭스 코어드 와이어인 AWS ER71T-1을 사용하였다. 전체적인 실험장치의 개략도를 Fig.6에 나타내었는데 실험장치는 용접기와 전류측정장치 및 컴퓨터 그리고 모터를 구동하기 위한 회로와 모터 및 테이블로 이루어졌다.

와이어 공급속도  $W=7.6\text{m/min}$ , 용접전압  $V=31\text{V}$ 의 용접조건일 때 식(24)에서의 상수  $\alpha, \beta$ 는 식(20)에서  $\alpha=4.58, \beta=389.1$ 로 결정하여 이 값이 식(27)에 의한 용접선 추적시 위빙속도를 수정하는데 사용하였다. 초기의 용접선 방향은 실제 용접부와 5° 정도의 오프셋 에러를 가지게 하였다.

2차곡선 피팅법을 이용한 알고리즘을 사용한 경우의 용접선 추적시 측정된 용접전류 값과 이것을 2차곡선 피팅한 결과를 Fig.7에 나타내고 있다. 그림에서

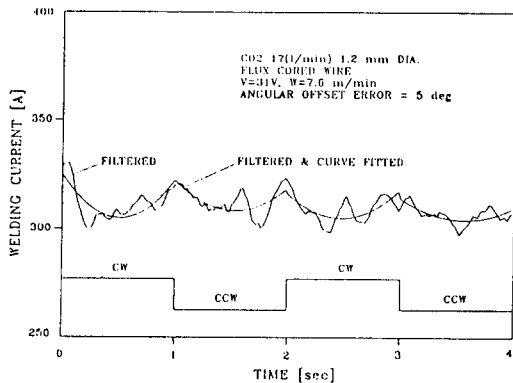


Fig.7 Response of Welding Current during Seam Tracking in x-y Table

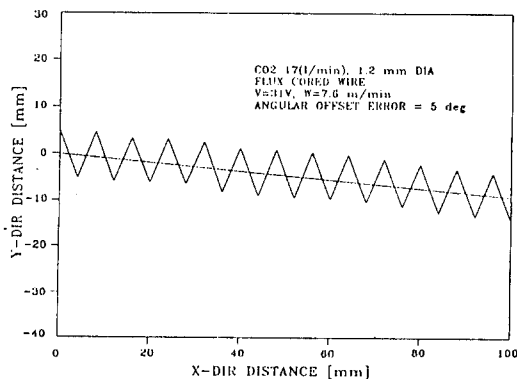


Fig.8 Trace of Torch during Seam Tracking in x-y Table

알 수 있는 바와같이 측정데이터는 심한 변화를 보이고 있으나 이 데이터를 피팅한 결과는 그루브의 형상에 따른 용접전류의 변화를 잘 나타내고 있다.

Fig.8은 용접속도 4mm/s, 위빙폭 8mm, 위빙속도 8 mm/s의 조건에 대한 용접선 추적 실험 결과이다. 주어진 용접선 에러를 잘 보정해주고 있음을 알 수 있으며, 이것은 용접 중 용접부의 열변형이나 치공 구동 주변기기의 부정확에 의한 용접선의 변화에 대해서 개발된 용접선 추적장치가 효과적으로 적용될 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결 론

FCA용접용 아크센서를 개발하기 위한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수학적 모델링으로 FCA용접에서 틱-모재간 거리에 대한 용접전류의 변화는 1차 선형적임을 알 수 있었고, 글로벌라 금속이행모드 이상의 영역에서는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

(2) 실제 용접에서 용접조건이 변화할 때 효율적인 아크센서의 역할을 기대할 수 있도록 용접전류와 틱-모재간 거리에 대한 관계를 구하기 위해 2<sup>3</sup>법을 사용하여 실험결과와 잘 일치하는 관계식을 도출할 수 있었다.

(3) FCA용접에서 2차곡선 피팅법을 사용한 경우 용접선 추적이 양호하였으며, 이의 적용으로 용접 자동화 구현에 크게 기여할 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 삼성중공업(주)의 연구비 지원으로 이루어졌다. 이에 삼성중공업(주) 기계기술연구소의 안병규 실장, 장영주 대리와 관계자 여러분에게 감사드린다. 또한 실험에 사용된 플럭스 코어드 와이어를 제공해 준 한국알로이로드(주)의 이종영 이사에게도 감사드린다.

#### 참 고 문 헌

- 1) KJ.Kim : *The Characteristics and Handling Method of the Flux Cored Wire*, Journal of the Korean Welding Society, Vol.6, No.3, Sep., (1988), pp.8-20



- 2) G.E.Cook : *Robotic Arc Welding : Research in Sensory Feedback Control*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.IE-30, No.3, (1983), pp.252-268
- 3) M.Ushio, D.Fan, Y.Murata, and F.Matsuda : *Melting Phenomena of Flux Cored Wire*, Transaction of JWRI, Vol.14, No.2, (1985), pp.9-16
- 4) E.Halmoy : *Wire Melting Rate, Droplet Temperature, and Effective Anode Melting Potential*, Arc Physics and Weld Pool Behavior, Cambridge : Welding Institute, (1980), pp.49-57
- 5) K.Ohshima, M.Abe, T.Kubota, and T.Okada : *Sampled-Data Control of Arc Length in MIG Pulsed Arc Welding*, Journal of JWS, Vol.51, No.8, (1982), pp.82-89
- 6) K.Ohshima, M.Abe, and T.Kubota : *Stability of Pulsed Current Consumable Electrode Transfer by Power Source with Periodically Varying Nonlinear Characteristic*, Journal of JWS, Vol.51, No.2, (1982), pp.91-97
- 7) J.W.Kim and S.J.Na : *A Study on Prediction of Welding Current in Gas Metal Arc Welding-Part 1 : Modelling of Welding Current in Response to Change of Tip-to-Workpiece Distance*, Proc. Instn. Mech. Engrs. - Part B : Journal of Engineering Manufacture, Vol.205, (1991), pp.59-63
- 8) S.Kuo : *Computer Applications of Numerical Methods*, Addison-Wesley Publishing Co., (1972), pp. 128-137
- 9) J.W.Kim and S.J.Na : *A Study on Prediction of Welding Current in Gas Metal Arc Welding-Part 2 : Experimental Modelling of Relationship between Welding Current and Tip-to-Workpiece Distance and its Application to Weld Seam Tracking System*, Proc. Instn. Mech. Engrs. - Part B : Journal of Engineering Manufacture, Vol.205, (1991), pp.64-69
- 10) K.J.Astron : *Computer Controlled Systems : Theory and Design*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1984), pp.322-332
- 11) J.W.Kim and S.J.Na : *A Study on an Arc Sensor for Gas Metal Arc Welding of Horizontal Fillets*, Welding Journal, Vol.70, No.8, (1991), pp.216s-221s
- 12) M.R.Spiegel, *Mathematical Handbook*, McGraw-Hill Book Co., New York, (1985), p.108
- 13) J.W.Hur, J.W.Kim, S.J.Na, and S.Y.Lee, *A Study on Seam Tracking with an Arc Signal in GMA Welding with Mixed Gas*, Journal of the Korean Welding Society, Vol.8, No.1, (1990), pp.23-30
- 14) C.G.Seon, J.W.Kim, S.J.Na, H.S.Cho, and C.Y.Choi, *A Study on the Seam Tracking in CO<sub>2</sub> Fillet Welding by Using an Arc Sensor*, Journal of the Korean Welding Society, Vol.18, No.3, (1990), pp.70-78