

**研究論文**

## 박관 맞대기 용접에서 전자기식 센서를 이용한 용접선 자동 추적 시스템에 관한 연구

유 병 희\* · 김 재 응\*\*

### A Study on Automatic Seam Tracking System Using Electro-magnetic Sensor for Sheet Metal Arc Welding of Butt Joints

B. H. You\* and J. W. Kim\*\*

**Key Words** : Eddy current(와전류), Weld seam tracking(용접선 추적), Electro-magnetic sensor(전자기식 센서), Sensor coil(센서코일), 1st order differential method(1차 미분법)

#### Abstract

In this study, a magnetic sensor to make use of eddy current was developed to detect the weld seam of butt joint in the sheet metal arc welding. This system consist of the sensor device for detecting the weld line, the servo control device for driving the weld torch movement and the control unit.

A signal processing was applied to smooth the output signal of the sensor. The weld joint was determined by using a 1st order differential method. To improve tracking accuracy of the system, moving average method which has an effect of proportional and weighted integral control was applied to a series of the weld joint positions obtained above. The weld line for tracking was generated by using data regeneration algorithm. Based on these results, each servo motor was controlled by pulse generator. From experimental results, it was revealed that this system has excellent detecting ability for weld line and seam tracking ability.

---

\* 비회원, 효성중공업 전력사업부 용접기팀

\*\* 정회원, 영남대학교 기계공학과

## 1. 서 론

모든 제품의 생산에 있어서, 자동화는 힘들고 어려운 작업을 기계가 인간을 대신하여 수행하며 품질 및 생산성을 향상시킨다는 관점에서 끊임없이 추구하고 있다. 더욱이 컴퓨터 산업의 발전과 더불어 이들 기계의 능력은 더욱 향상되고 있다. 용접 자동화도 그 예외는 아니어서 용접구조물 제작의 경우, 임의의 용접경로를 추적하는 방법과 공정변수의 제어법등이 현재 연구되고 있다<sup>1,2)</sup>. 이중 용접선 추적 장치는 용접의 자동화에 있어서 가장 기본적인 장치라고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 용접의 자동화를 위해 필수적인 임의의 경로를 용접할 수 있는 용접선 추적 시스템(seam tracking system)에 대한 연구를 그 대상으로 한다. 아크용접 공정은 작업 환경이 매우 열악할 뿐만 아니라 용접사의 숙련도에 따라 품질의 균일성에 많은 영향을 미칠 수 있는 민감한 작업이며, 더욱이 박판의 용접에서 대상물은 주로 두께 1-2mm의 판재이므로, 모재의 열변형에 의한 경로 변화를 보정해 주어야 한다. 따라서 용접공정중 용접선의 경로 변화를 실시간 측정할 수 있는 센서가 용접공정의 자동화에 필수적이다.

박판의 용접선을 감지하는 센서중에는 시각센서, 레이저 변위 센서, 전자기식 센서가 있으며 이중 널리 이용되고 있는 것은 ccd 카메라를 이용한 영상정보를 처리함으로써 토치가 이동해야 할 위치를 찾는 시각센서와 광학삼각법에 의해 자체적으로 거리를 측정할 수 있는 레이저 변위 센서가 있다<sup>3-5)</sup>. 시각센서를 이용하여 용접자동화 장치를 구성할 경우는 2차원의 영상정보로부터 3차원 정보를 얻기 위하여 일반적으로 He-Ne 레이저(laser) 및 다이오우드(diode) 레이저를 구조화된 빛(structured light)으로 쓰고 있으며, 이러한 점광원으로부터 stripe형상의 빛으로 바꾸기 위하여 원통형 렌즈(cylindrical lens) 또는 동기 주사방식(synchronized scanning type)이 이용되고 있다<sup>5)</sup>. 그러나, 시각센서는 레이저와 카메라, 그리고, 카메라용 회로등의 가격이 비싸며 영상처리 프로그램이 복잡하다는 단점이 있다<sup>6)</sup>. 레이저 변위 센서도 고가이면서 아크광에 의한 노이즈(noise)에 상당히 취약하여 여러가지 신호처리 기법을 사용하

야 한다<sup>7)</sup>. 또한 이 센서들은 틈새가 없는 박판의 맞대기 이음을 감지하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 전자기식 센서는 장치가 간단하고 경제적이거나 감지높이(센서와 모재 사이의 거리)가 시각센서에 비하여 낮고 정밀도가 떨어진다는 단점이 있다. 그러나 틈새가 없는 박판의 맞대기 이음을 감지할 수 있고 아크광에 의해 영향을 받지 않는 장점이 있어 맞대기 이음 용접에 적용될 수 있다<sup>8)</sup>.

본 연구에서는 전자기식 센서를 설계, 제작하여 용접선 검출 능력을 확인하고 용접선을 자동추적할 수 있는 시스템을 구축하였다. 전자기식 센서란 교류전압을 인가한 코일을 금속체에 근접시키면 코일에서 형성된 자속에 의해 금속 표면에 링 모양으로 흐르는 와전류(eddy current)<sup>9,10)</sup>가 발생되고, 이 와전류가 다시 자속을 발생하므로써 코일의 인덕턴스(inductance)를 변화시켜 코일과 금속체의 거리, 금속체의 결함등을 검출하는 것을 말한다. 이 원리를 이용하면 박판의 맞대기 용접선과 같은 금속체의 불연속 위치에서 코일의 인덕턴스 값이 변하므로 용접선의 위치를 인식할 수 있다. 여기서, 인덕턴스 값은 코일의 권수, 직경, 자로길이, 인가전압의 주파수등 많은 설계변수에 따라 그 값이 달라지고, 결국 용접선 검출능력에 상당히 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 용접선 검출 능력이 우수한 전자기식 센서를 만들기 위해 실험을 통하여 설계변수를 결정하였다. 이렇게 제작된 전자기식 센서를 이용하여 임의의 용접선을 추적할 수 있는 박판의 용접선 자동 추적 시스템을 다음과 같이 구축하였다. 시스템은 용접선 감지를 위한 센서부와 토치를 이동하는 구동부 그리고, 이를 제어하기 위한 퍼스널 컴퓨터로 구성된다. 용접선 정보를 얻기 위한 전자기식 센서의 출력 신호를 평활시키기 위해 이동평균법(moving average)<sup>12,14)</sup>을 적용하였으며, 신호처리된 데이터로부터 용접선 위치에 해당하는 변곡점을 인식하기 위하여 1차 미분법<sup>15)</sup>을 사용하였다. 이렇게 구한 용접접합부 위치 데이터를 이용하여 용접토치가 추적해야 할 경로를 생성시키고, 시스템 구동부를 제어함으로써 용접선 추적을 수행한다.

## 2. 전자기식 센서의 원리

2.1 코일의 인덕턴스와 와전류의 발생

Fig. 1의 (a)와 같이 코일의 단자간에 교류 전압을 가하면 자속  $\phi_1$ 이 발생되고 코일이 금속체에 근접하게 되면 금속체 표면에 Fig. 1의 (b)와 같은 동심원 모양의 와전류가 발생한다. 와전류는 Fig. 1의 (c)와 같은 자속  $\phi_2$ 를 금속체 표면에 생기게 하여 자속  $\phi_2$ 가 근접한 코일 본래의 자속  $\phi_1$ 에 영향을 주어 결국 코일에서의 자속은  $\phi_1 - \phi_2 = \phi_3$ 가 된다(Fig. 2). 따라서 금속체에 유기된 자속( $\phi_2$ )에 의해 코일의 인덕턴스값은 결정되며, 이것은 코일과 금속체와의 거리, 금속체의 자성과 전기전도도, 금속체의 연속성 등에 의해 영향을 받는다. 이렇게 코일에 의해 유기된 와전류를 이용하여 코일과 금속체와의 거리, 금속체의 결합등을 검출하는 장치를 와전류를 이용한 전자기식 센서라 한다.

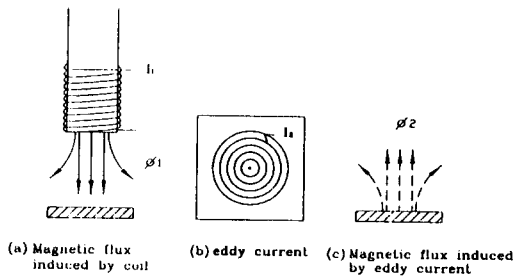


Fig. 1 Principle of eddy current generation

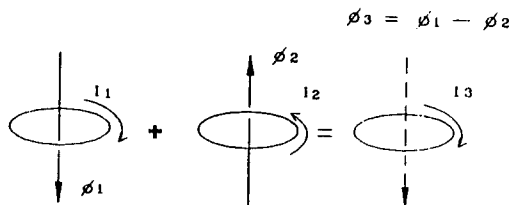


Fig. 2 Magnetic field on sensor coil

2.2 전자기식 센서용 브릿지 회로

코일에서의 미세한 인덕턴스 변화량을 검출하기 위해 브릿지 회로(bridge circuit)를 이용할 수 있다. Fig. 3에서 브릿지 회로가 밸런스(balance)상태라는 것은 CD간의 전압이 0V가 되는 것을 의미한다. 따라서 A-C-B경로로 전류  $I_1$ 이 흐르고 A-D-B의 경로로 전류  $I_2$ 가 흐를 때 AC간의 전압과 AD간의 전압이 같은 상태를 말한다.

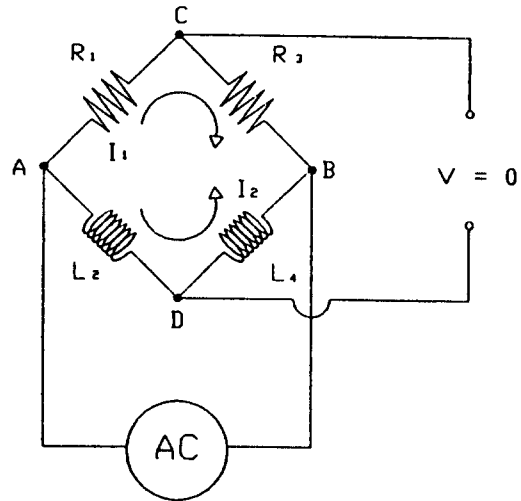


Fig. 3 Balanced bridge circuit

이 때 AC간의 전압은  $R_1 I_1$ , CB간의 전압은  $R_3 I_1$ , AD간의 전압은  $\omega L_2 I_2$ , DB간의 전압은  $\omega L_4 I_2$  이므로

$$R_1 I_1 = \omega L_2 I_2$$

$$R_3 I_1 = \omega L_4 I_2$$

로 된다. 이것으로 부터 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$R_1 \omega L_4 = R_3 \omega L_2 \tag{1}$$

그러나, 센서코일인  $L_2$ 를 금속체에 근접시키면 금속표면에 와전류가 발생하여 이것이 인덕턴스  $L_2$ 를  $L_2 - \Delta L_2$ 로 변화시킨다. 그 때 밸런스는 붕괴되어 Fig. 4에서와 같이 단자 CD간에 전압 V가 발생한다. 이 때 A-C-B로 흐르는 전류는  $I_1'$ 로 변하고 A-D-B로 흐르는 전류는  $I_2'$ 로 변한다. AC간의 전압은  $R_1 I_1'$ , AD간의 전압은  $\omega(L_2 - \Delta L_2) I_2'$  이므로

로 회로 전원의 전압이 E일 때 단자 CD간의 전압 V는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V &= R_1 I_1' - \omega(L_2 - \Delta L_2) I_2' \\
 &= \frac{ER_1}{R_1 + R_3} - \frac{E \omega(L_2 - \Delta L_2)}{\omega(L_2 - \Delta L_2) + \omega L_4} \\
 &= \frac{R_1 \omega(L_2 + L_4 - \Delta L_2) - \omega(L_2 - \Delta L_2)(R_1 + R_3)}{(R_1 + R_3) \omega(L_2 + L_4 - \Delta L_2)} E \\
 &= \frac{\omega R_3 (\Delta L_2)}{\omega(R_1 + R_3)(L_2 + L_4)} E \\
 &= \frac{R_1 R_3 (\Delta L_2)}{L_2 (R_1 + R_3)^2} E \tag{2}
 \end{aligned}$$

여기서, R<sub>1</sub>과 R<sub>3</sub>가 같고 L<sub>2</sub>가 최소값일 때 출력전압이 최대가 된다. 그러므로, R<sub>1</sub>과 R<sub>3</sub>를 같게 하면 ωL<sub>2</sub> = ωL<sub>4</sub> 가 되며,

$$V \propto \frac{\Delta L_2}{L_2} E$$

로 되어 출력 전압은 ΔL<sub>2</sub>/L<sub>2</sub>에 비례하게 된다.

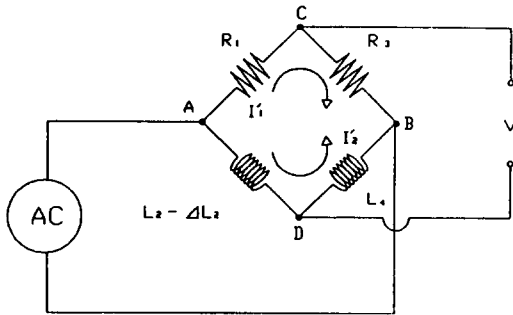


Fig. 4 Unbalanced bridge circuit

### 3. 센서의 설계 및 제작

#### 3.1 센서의 설계 및 제작

브릿지 회로를 이용한 전자기식 센서의 용접선 검출능력에는 여러 인자들이 상당한 영향을 미치므로 여러 인자들의 특성을 파악하여 센서코일(L

)을 설계하는 것이 중요하다. 이러한 인자들은 피검사체의 성질에 의한 인자들과 측정장치의 특성에 의한 인자들로 나누어지며 피검사체의 성질에 따른 인자로는 전기전도도, 피검사체의 크기, 투자율, 균열 및 결함의 존재 유무 등이 있으며 측정장치의 특성으로 인한 인자들은 다음과 같다<sup>10,11)</sup>.

- (1) 센서코일에 흐르는 교류전원의 주파수
- (2) 센서코일의 크기 및 형상
- (3) 피검사체와 센서코일간의 간격

본 연구에서는 센서코일의 설계를 위해 용접선 검출능력에 가장 영향을 많이 끼칠 것으로 생각되는 원통형 철심의 지름(D), 인가전압의 주파수(f), 권선수(N), 피검사체와 센서코일간의 간격(offset)을 주요 인자로 정하고 각각에 따른 검출능력을 측정하였다. 식(2)에서 센서의 출력전압은 전원전압(E)에 비례하므로 전원전압을 최대한 크게 하였다. 데이터 처리에서 샘플링 주파수는 200Hz로 하였으며, Fig.5와 같이 각 위치(metal, gap, no metal) 상에 센서를 고정시키고 1초 동안 채득한 200개의 데이터를 평균하였다. Fig.6에서

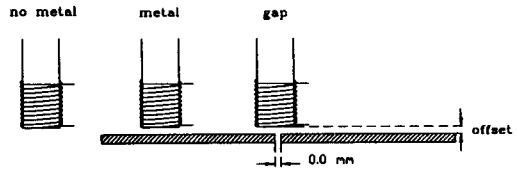


Fig. 5 Sensor position on metal, gap and no metal

센서의 지름과 출력전압의 크기는 비례하며 센서의 지름이 증가할수록 각 위치에 따른 출력전압의 차이가 커 센서의 민감도가 좋다는 것을 알 수 있다. 그러나, 센서의 지름이 증가할수록 무게가 증가하고 용접선 검출을 위한 센서의 주사거리가 길어져서 센서로써의 효용성이 떨어진다. 센서의 지름이 감소할 경우 센서의 민감도가 떨어지므로 적절한 민감도와 효용성을 갖는 것으로 생각되는 9.6mm를 센서의 지름으로 한다. Fig.7은 권선수를 30에서 90까지 20씩 증가시키면서 측정된 출력신호이다. 권선수를 70으로 하였을 때 각 위치에 따른 센서의 출력전압 차가 가장 뚜렷하다. 이것은

전자기식 센서의 출력전압이 센서코일 원래의 인덕턴스값( $L_2$ )에 대한 인덕턴스값의 변이량( $\Delta L_2$ )의 크기에 비례하므로  $L_2$ 에 대한  $\Delta L_2$ 의 크기가 권선수가 70일 때 가장 크기 때문인 것으로 사료된다. 용접선 검출을 위해서는 각 위치에 따른 출력전압의 차가 클수록 유리하므로 권선수를 70으로 한다. Fig. 8에서 offset(센서와 모재 사이의 거리)에 따라 출력전압의 차가 발생함을 볼 수 있다. 이러한 출력전압의 차는 높이제어시 유용한 신호가 되며 정확한 위치 인식을 위해서는 offset을 4mm 이하로 하여야 할 것으로 생각된다. 그리고, Fig. 6, 7, 8에서 인가전압의 주파수가 140kHz~160kHz일때 센서의 민감도가 양호하나 인가전압의 주파수가 높을수록 단위시간당 전압의 변화도 커서 신호를 증폭 및 정류시키기 위해 고성능의 옴

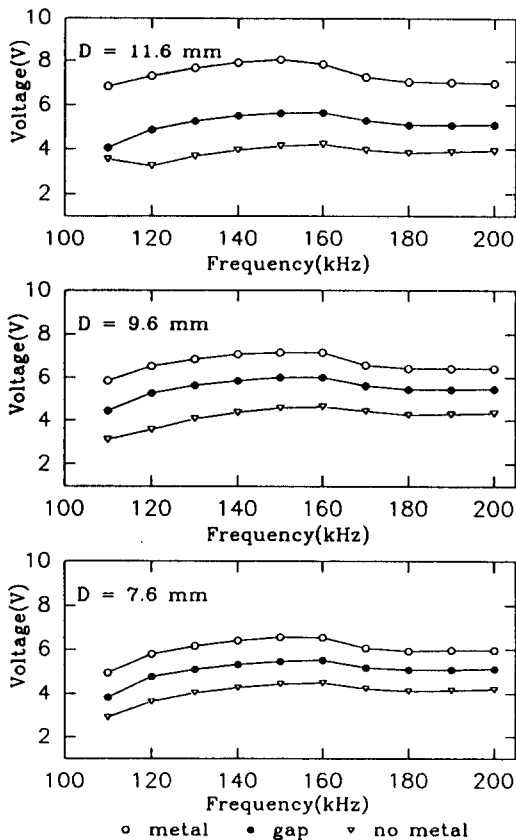


Fig. 6 Sensor output relative to diameter(D) of coil (N=50, Offset=2mm, E=±10V)

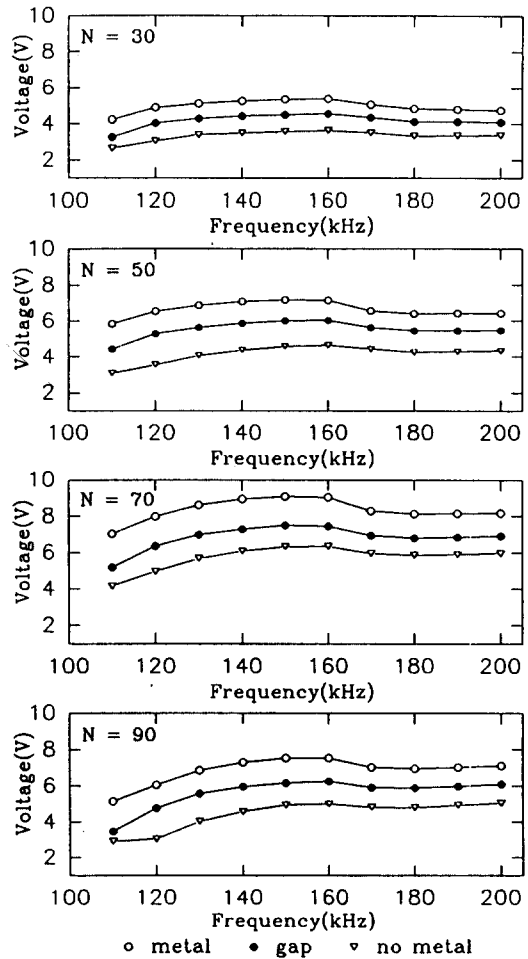


Fig. 7 Sensor output relative to number(N) of winding (D=9.6mm, Offset=2mm, E=±10V)

프(op amp)가 필요하며 또한, 리플(ripple)을 줄이기 위한 정류회로의 제작이 어려워진다. 따라서 본 연구에서는 센서의 민감도가 양호한 인가전압의 주파수 범위(140kHz~160kHz)내에서 140kHz를 센서의 인가 전압 주파수로 결정하였다.

### 3.2 센서의 출력신호

용접공정중에는 용접전류에 의해 형성된 자기장(magnetic field)으로 인해 센서 출력 신호에 노이즈가 포함될 수 있다. 이것은 센서의 조인트에 대

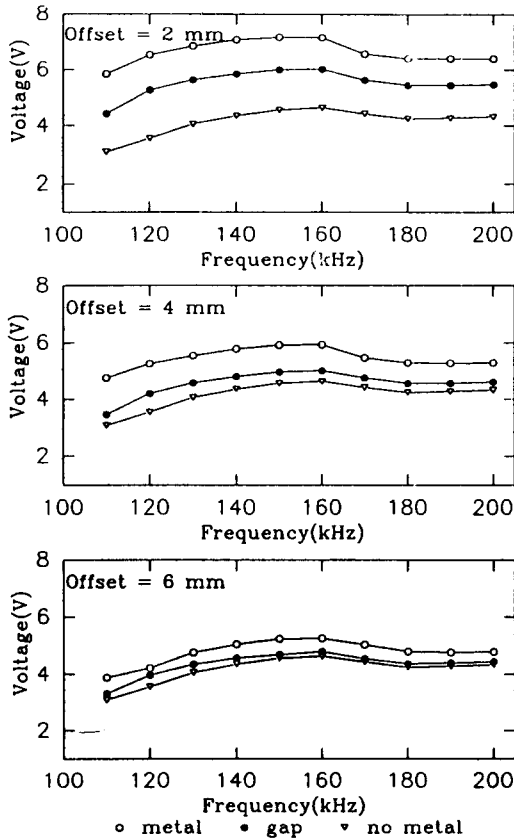


Fig. 8 Sensor output relative to Offset (D=9.6mm, N=50, E=±10V)

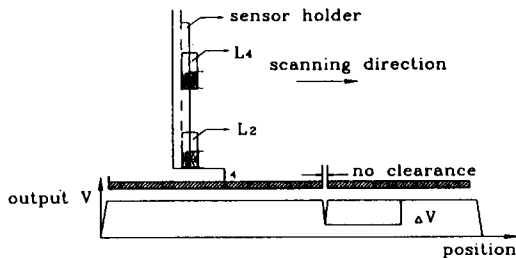


Fig. 9 Schematic of pre-experiment

한 정확한 위치 정보 인식에 영향을 미친다. 그러므로, 전자기식 센서를 용접자동화에 적용 가능한지의 여부를 확인하여야 하며 이를 위해 다음과 같은 실험을 하였다. Fig.9와 같이 맞대기 이음의 용

접접합부에 대해 실험하였으며, 실험 조건은 샘플링 주파수 200Hz, 주사속도(scanning speed) 7mm/s로 하였다. 센서를 모재로부터 4mm높이로 고정시키고 단지 용접선을 가로지르는 방향으로만 주사속도로 이동시키면서 용접선을 검출하였다. Fig. 10은 필터링 되기전의 출력신호이다. 이 신호를 그대로 이용하는 데는 문제가 있으므로 차단 주파수(cut off frequency)가 50Hz인 저역통과 필터(low pass filter)를 사용하여 센서 출력 신호를 평

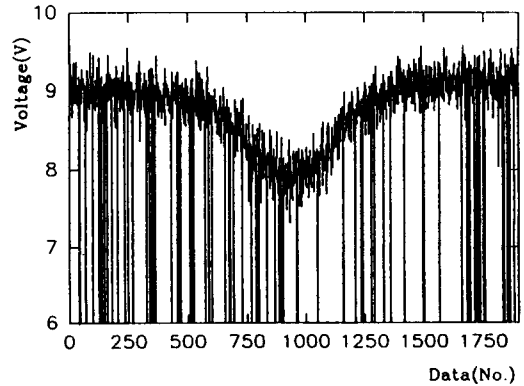


Fig. 10 Sensor signal before filtering

활시켰다. Fig.11에서 (a)는 맞대기 이음의 아크가 없는 상태에서 용접선을 검출한 것이고 (b)는 아크가 있는 상태에서 측정된 출력신호이다. 여기서 가로축은 샘플링한 데이터의 순번을 나타내며 총 66.5mm를 진행한 결과이다. 그림에서 출력전압이 가장 낮은 곳이 용접선의 위치에 해당된다. Fig. 11에서 전자기식 센서는 실제 용접공정중에 발생하는 용접전류로 인한 노이즈에 거의 영향 받지 않는 것을 알 수 있다.

#### 4. 용접접합부의 위치결정

##### 4.1 센서신호의 평활

전자기식 센서로부터 얻은 신호는 저역통과필터를 통해 고주파성분의 잡음은 제거되지만 센서 구동축 및 토치 구동축의 진동, 용접전류등에 의

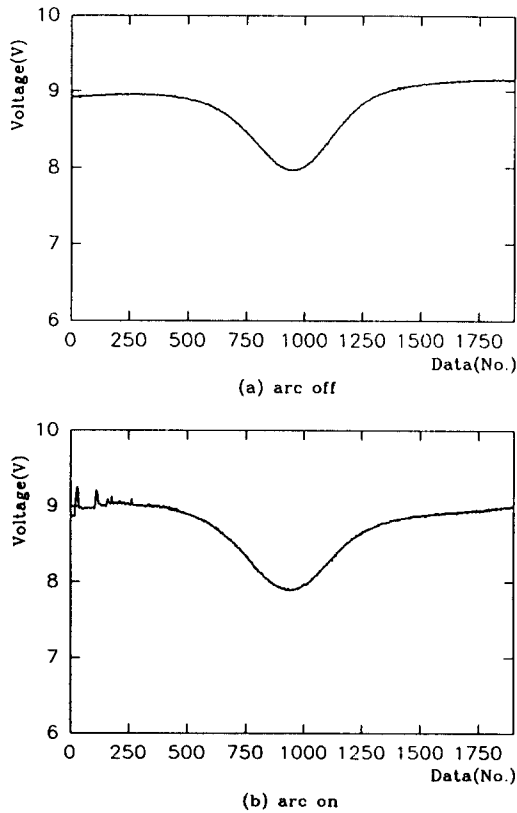


Fig. 11 Sensor performance in butt joint

한 요동 (fluctuation) 성분을 포함하고 있다. 이러한 요동은 변곡점의 위치값에 영향을 미칠 수 있으므로 평활시키지 않으면 정확한 용접선의 위치 검출이 어렵다. 측정된 신호에서 잡음이나 요동을 제거하고 신호의 신뢰도를 높일 수 있는 간단한 방법이 이동평균법이다. 이동평균을 이용해 측정된 신호는 디지털 필터링의 효과를 가지므로 신호에 대한 신뢰도를 향상시키고 제어신호를 보다 안정시킬 수 있다. 이동평균식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(n) = m \cdot V(n-1) + (1-m) \cdot v(n) \quad (3)$$

여기서,

- $V(n)$  : 새로운 이동 평균값
- $V(n-1)$  : 현재의 이동 평균값

- $v(n)$  : 측정치
- $m$  : 가중치

#### 4.2 용접접합부의 위치 결정 방법

센서에서 출력된 한주기의 신호를 이동 평균법을 이용하여 평활을 시켰을 때 조인트 주변에서의 출력신호는 Fig. 12의 (a)에서와 같은 포물선 형태로 나타난다. 이러한 포물선에서 조인트의 위치는 변곡점의 위치에 해당되며 변곡점을 추출하기 위하여 선을 이루는 각 거리 데이터에 대해 1차 미분을 취하면 Fig. 12의 (b)와 같은 형태가 된다. 이때 1차 미분값은 다음과 같다.

$$d(n) = (V(n+k_1) - V(n)) / k_1 \quad (4)$$

여기서, 변곡점은 미분값이 음에서 양으로 바뀌는 점이 된다. 이때 변곡점을 찾는 성능은 이동 평균식에서의 가중치와 1차 미분에서의 미분구간의 크기 ( $k_1$ )에 따라 달라진다. 즉 가중치의 크기에 따라 신호평활의 정도가 달라지며, 미분구간이 작을 경우 선의 국부적인 기울기 변화에 민감하고, 미분구간이 클 경우 선의 전반적인 기울기 변화를 얻을 수 있다.

● inflection point

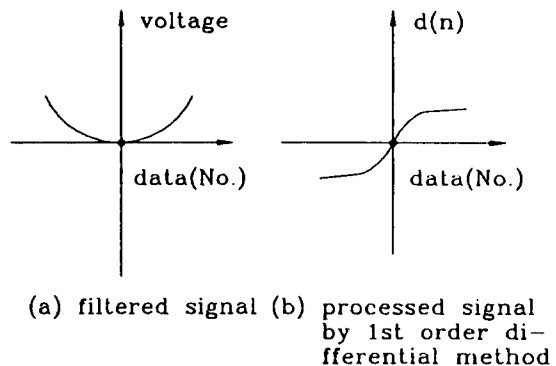


Fig. 12 Signal processing

#### 4.3 용접선 검출 실험 및 결과

Fig. 13은 아크가 없는 상태에서 같은 위치를 20번 반복 측정하여 이동평균법과 1차 미분법을 적용하였을 때 평활의 정도와 미분구간의 크기에 따른 조인트 검출성능을 표준편차(standard deviation)와 평균값(mean value), 최대값(maximum value), 최소값(minimum value)으로 나타낸 것이다. 여기서, 조인트 검출성능은 이동 평균법의 가중치(w)가 0.9이고 1차 미분법에서 미분구간의 크기가 35-40일 때 조인트 검출성능이 가장 좋음을 알 수 있는데 조인트 검출성능은 데이터 평활을 위해 적용되는 이동 평균식의 가중치와 변곡점 인식을 위한 1차 미분법의 미분구간의 크기에 따라 크게 달라진다. 그림에서와 같이 이동평균식의 가중치와 미분구간의 크기가 작을 경우 데이터 평활의 정도가 떨어지며 선의 국부적인 기울기에 민감해져서 인식되는 변곡점의 위치가 일정하지 않게되어 검출성능이 저하된다. 반대로, 가중치와 미분구간의 크기가 커지면 검출성능은 좋아진다. 그러나, 이 때에는 과도한 가중치로 인해 데이터에 시간지연이 발생하는 것을 보정해야 하며 미분구간이 커짐에 따라 검색거리가 작아진다는 문제가 발생된다. 본 연구에서는 용접조인트의 위치결정을 위해 1차 미분법을 적용하는데 있어서 이동평균법의 가중치를 0.9, 1차 미분구간을 35로 설정하였다.

## 5. 용접선 자동 추적 시스템의 구축

### 5.1 시스템의 구성

본 실험에서 사용된 장치는 3축 직선 유니트, 용접기, 전자기식 센서, 센서 구동부, 퍼스널 컴퓨터로 구성되며 그 전체 개략도는 Fig. 14와 같다. 실험의 방법은 전자기식 센서로부터 측정되는 전압 신호를 증폭, 정류, 필터링하여  $\Lambda/D$ -Converter(PCL-812)를 통해 컴퓨터로 받아 들이고 각 한 주기의 신호마다 이동 평균법으로 신호를 평활하여 측정된 신호에 대한 신뢰도를 높인다. 1차 미분법을 사용하여 용접 조인트의 위치를 구한다.

다시 이것을 데이터 재생성 알고리즘을 거쳐 토치가 이동해야할 정확한 위치를 구한다. 이렇게 계산된 데이터를 이용하여 각 축의 서보 모터에 각

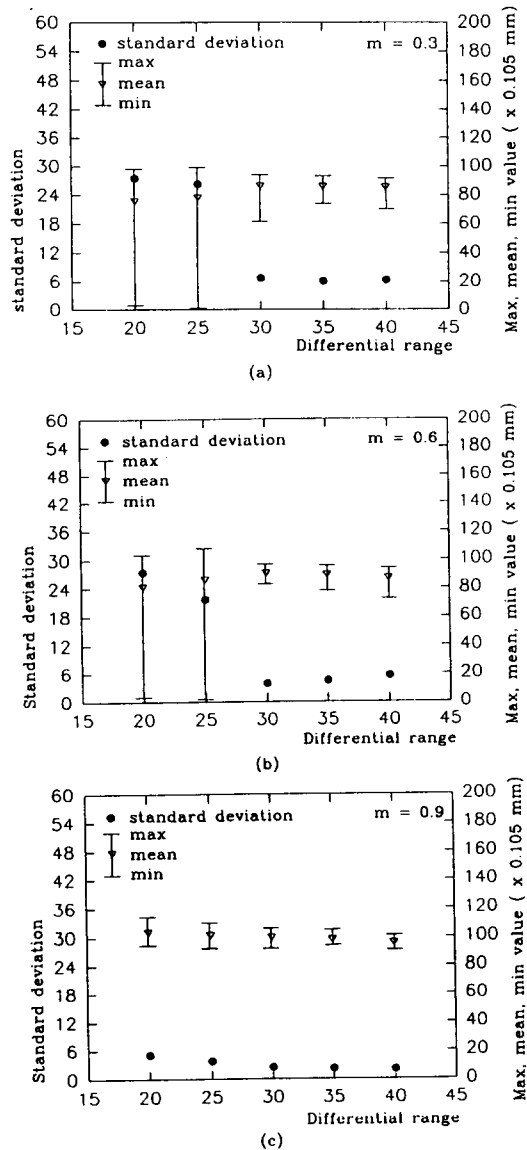


Fig. 13 Joint position by 1st order differential method

축이 이동해야 할 만큼의 펄스(pulse)를 펄스 제너레이터(pulse-generator)를 통하여 출력시키므로써 정확한 용접 경로를 추적한다. 그 알고리즘은 Fig. 15와 같다.



용접선 자동 추적을 위한 실험조건은 아래 Table 1과 같다.

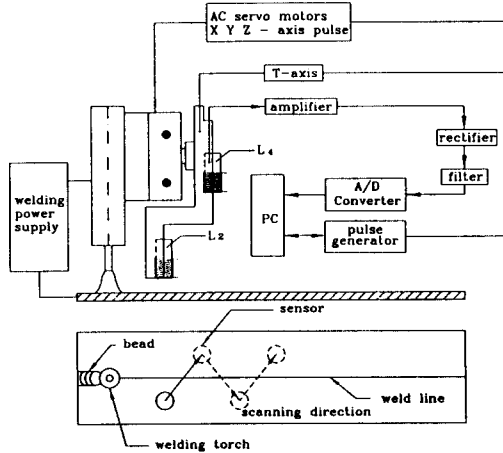


Fig. 14 Diagram of weld line tracking system

Table 1. Experimental Conditions

Workpiece	140kHz cold rolled plate (KSD 3512), thickness 2mm
Welding current/voltage	90A/19V
Diameter of welding wire	1.2mm
Tip-to workpiece distance	15mm
Sensor location offset from-workpiece	3mm
Sampling time	1.25ms
Lead of sensor from torch	38.5mm
Shieldings gas	CO <sub>2</sub> 100%
Weld joint	butt joint
Sensor weaving frequency	4Hz

## 5.2 제어기의 설계

앞에서 설명한 신호 처리 방법을 토대로 용접선을 검출하더라도 검출된 용접선과 실제 용접선 사이에 오차(deviation)가 존재하며 센서가 X축 방향으로 진행하면서 용접선을 검출할 경우 이 오차는 더욱 클 것으로 예상된다. 이러한 오차를 줄이고 비례·적분제어의 효과가 있는 이동평균법을 적용하여 제어기를 설계하기 위해 검출된 용접선에 대해 다음과 같은 이동평균식을 적용하였다.

$$C(n) = wC(n-1) + (1-w)c(n) \quad (5)$$

여기서

$C(n)$  : 새로이 결정된 조인트의 위치

$c(n)$  : 현재 검출된 데이터로부터 얻은 조인트의 위치

$C(n-1)$  : 이전 조인트의 위치

$w$  : 가중치

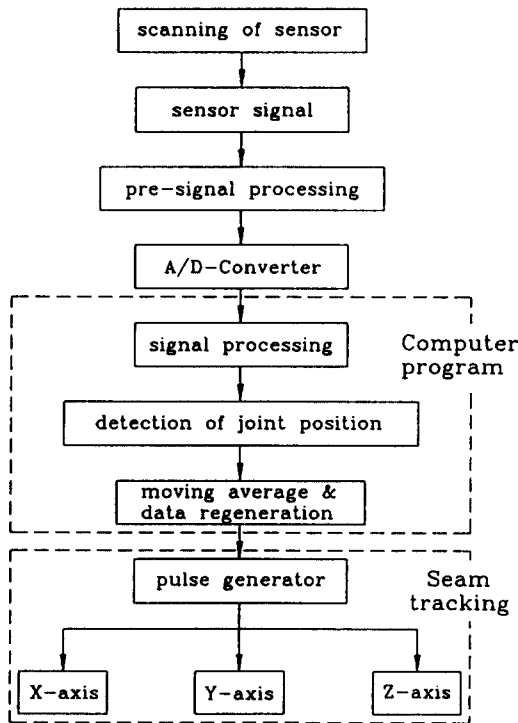


Fig. 15 Each step of seam tracking

Fig. 16은 시스템이 용접선 추적을 수행하지 않고 토치를 X축으로만 일정 속도로 움직이면서 8.5°의 기울기로 벗어난 용접선을 검출하고 검출된 용접선의 위치 데이터에 대해 이동평균법의 가중치(w)를 달리하면서 용접선 위치의 재생성 결과를

검토한 것이다. 여기서 재생성된 용접선의 위치는 가중치에 따라 달라지는 것을 볼 수 있으며 가중치가 0.3일 때 검출된 용접선과 실제 용접선이 가장 잘 일치하며 가중치가 0.3보다 작을 때는 직선부와 직선과 경사각이 만나는 코너 (corner) 부분에서 오차가 존재한다. 가중치가 0.3보다 클 경우 용접선의 직선 부분은 잘 일치 하지만 경사각에서 많은 오차가 발생한다. 이것은 이동평균법의 가중치를 클 경우에 생기는 시간지연의 효과에 기인한 것이다. Fig. 16에서 부분적으로 나타나는 실제 용접선과 검출된 용접선의 오차는 센서 구동축 구동시 발생하는 주사속도의 미소한 오차에 기인한 것으로 사료된다.

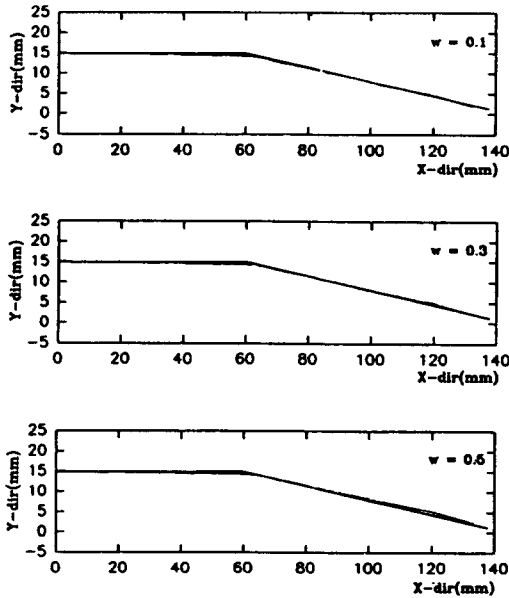
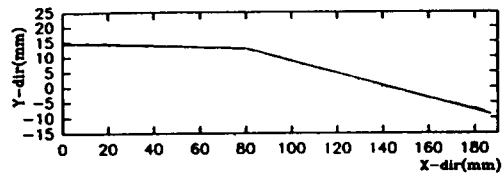


Fig. 16 Sensing result relative to factor of moving averaging

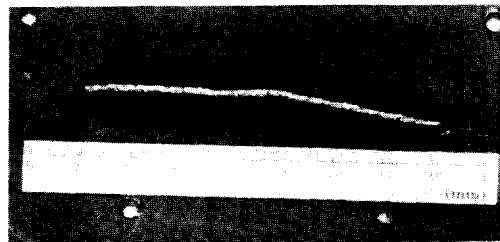
### 5.3 추적 결과

본 시스템에서는 센서와 토치사이의 거리와 센서의 이동범위 등으로 인해 그 추적 한계가 약 25° 이내로 제한된다. Fig. 17의 (a)는 접합부 위치에 대한 이동평균의 가중치를 0.3으로 하여 경사각이 10°인 용접선을 실시간으로 추적하면서 용접을 수행한 결과이다. 그림에서 실선으로 표시된 선이

실제의 용접경로를 나타내고, 점선으로 표시된 선이 용접선 추적 결과를 나타낸다. Fig. 16과 비교하여 볼때 부분적으로 오차 (deviation)가 다소 크게 나타난다. 이것은 실제 용접선 추적을 수행할 경우 센서 구동축 및 토치 구동축의 진동, 센서 주사속도의 미소한 오차가 용접선 검출시 요동성분으로 작용하기 때문인 것으로 사료된다. 경사각의 추적 정도와 직선부와 경사각이 만나는 코너 (corner)부분에서 용접 결과를 볼 때 전체적인 추적 성능은 상당히 양호하다. 그리고, Fig. 17의 (b)는 실제 사진으로 용접비드가 균일하며 양호한 용접결과를 볼 수 있다. 사진의 오른쪽 끝부분에 발생한 틈은 용접중 열변형에 의한 것이며 이것으로 본 용접선 자동 추적 시스템은 용접공정중 열변형에 의해 발생하는 용접경로 변화를 검출하여 보정할 수 있음을 알 수 있다. 또한 용접조건(용접전류, 전압) 제어를 동시에 수행할 경우 열변형 부분에서도 양호한 용접품질을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 이상의 용접선 검출 실험 및 추적 결과에서 전자기식 센서를 이용한 본 용접선 자동 추적 시스템은 실제 용접공정중에 발생하는 용접전류 및 스파터와 같은 외란에 거의 영향을 받지 않고 시각센서 및 레이저 변위 센서로는 추적이 곤란한 틈새가 없는 박판의 맞대기 이음에서 임의의 용접 경로를 잘 추적할 수 있음을 확인하였다.



(a) Trace of weld torch



(b) Photograph

Fig. 17 Result of seam tracking during welding

## 6. 결 론

본 연구에서는 와전류를 이용한 전자기식 센서를 개발하고 이를 이용한 박판의 용접선 자동 추적 시스템에 관한 연구에서 다음과 같은 결과를 확인하였다.

1. 와전류를 이용한 전자기식 센서의 중요 설계 변수중 코일의 권수, 직경, 전원주파수 등이 용접선 검출능력에 끼치는 영향을 실험을 통하여 확인하였으며, 이들 설계변수를 결정하여 제작하였다.

2. 용접자동화에 대한 전자기식 센서의 적용가능성을 검토한 결과 전자기식 센서는 용접공정에서 발생하는 용접전류 및 스파터와 같은 외란에 거의 영향을 받지않고 용접선을 인식할 수 있음을 확인하였다.

3. 용접선 인식을 위해 센서 신호를 디지털 필터링하므로써 용접선 감지 정밀도 향상 효과를 볼 수 있었으며 1차 미분법에 의한 용접선 위치 결정에서 적정 미분구간의 존재함을 알 수 있었다.

4. 본 용접선 자동 추적 시스템은 박판의 막대기 이음에서 뛰어난 추적성을 나타내므로 컨테이너(container) 및 파이프(pipe) 제작과 같은 산업현장에 적용할 경우 좋은 품질과 높은 생산성이 기대된다.

## 7. 참 고 문 헌

1. T. Araya, and S. Saikawa : Recent Activities on Sensing and Adaptive Control of Arc Welding, 3rd Int 1 Conf. on Trends in Welding Research, Gatlinburg, USA, June (1992), pp. 833-842.
2. H. Nomura and John E. Middle : Sensors and Control Systems in Arc Welding,

CHAPMAN & HALL, 1994, pp.1-17.

3. H. Nomura et al. : Automatic real-time bead height control with arc sensor in TIG. Welding, Trans. of the Japan Welding Society, Vol. 18, No. 2(1987), pp. 35-42.
4. G. E. Cook : Robotic arc welding " Research in Sensory Feedback Control", IEE Trans. on Industrial Electronics, Vol 30, No. 3(1983), pp. 252-268.
5. G. L. Oomen : A real time optical profile sensor for robotic arc welding. in, ROVISEC, Cambridge, MA, USA, November 1983, pp. 679-668.
6. 이철원, 나석주 : 용접자동화를 위한 시각 센서, 대한용접학회지, 제11권, 제3호, 1993, pp. 10-21.
7. 박용환, 김재용 : 레이저 변위센서를 이용한 용접선 검출에서 신호처리에 관한 연구, 대한용접학회지, 제13권, 제4호, 1995, pp. 65-74.
8. H. Nomura, Sensors and Control Systems in Arc Welding, Chapman & Hall, London, 1994, pp. 39-40.
9. 김상진 : 자동화를 위한 센서, 연학사, 1991, pp. 117-119.
10. 박용기 : "와전류 센서", 제어계측, 1991년 3월호, pp. 10-12.
11. 김훈, 임재규 : 교류전류를 이용한 새로운 비파괴탐상법의 개발, 대한용접학회지, 제13권, 제2호, 1995, pp. 42-52.
12. 신정식 : "접지기 이음에서의 용접선 추적과 아크데이터의 모니터링 시스템에 관한 연구", 한국 과학기술원 석사 학위 논문, 1991.
13. 허명희 : 탐색적 방법에 의한 통계 자료 분석론, 자유아카데미, 1993, pp. VII1-VIII3.
14. 박선호 : 디지털 신호처리의 기초와 DSP 응용실무, 국제테크노정보연구소, 1994, pp. 41-47.
15. NHK 방송기술연구소 화상연구부 : C언어에 의한 화상처리 실무, 국제테크노정보연구소, 1994, pp. 78-79.