



## 용접선 자동추적을 위한 이중 전자기센서의 개발에 관한 연구

신준호\* · 김재웅\*\*

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 영남대학교 기계공학부

### A Study of a Dual-Electromagnetic Sensor for Automatic Weld Seam Tracking

Joon-Ho Shin\* and Jae-Woong Kim\*\*

\* Graduate School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea

\*\* School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea

#### Abstract

The weld seam tracking system for arc welding process uses various kinds of sensors such as arc sensor, vision sensor, laser displacement sensor and so on. Among the variety of sensors available, electro-magnetic sensor is one of the most useful methods especially in sheet metal butt-joint arc welding, primarily because it is hardly affected by the intense arc light and fume generated during the welding process, and also by the surface condition of weldments. In this study, a dual-electromagnetic sensor, which utilizes the induced current variation in the sensing coil due to the eddy current variation of the metal near the sensor, was developed for arc welding of sheet metal butt-joints. The dual-electromagnetic sensor thus detects the offset displacement of weld line from the center of sensor head even though there's no clearance in the joint. A set of design variables of the sensor were determined for the maximum sensing capability through the repeated experiments. Seam tracking is performed by correcting the position of sensor to the amount of offset displacement every sampling period. From the experimental results, the developed sensor showed the excellent capability of weld seam detection when the sensor to workpiece distance is near less than 5 mm, and it was revealed that the system has excellent seam tracking ability for the butt-joint of sheet metal.

(Received March 20, 2000)

Key Words : Dual-electromagnetic sensor, Eddy-current, Sensor to workpiece distance, Permeability, Scanning range

#### 1. 서 론

용접선을 실시간으로 감지하는 비접촉 센서에는 아크센서와 시각센서, 전자기식 센서가 있으며 아크센서는 용접시의 텀-모재간의 거리변화에 따른 전압 또는 전류신호를 이용하여 용접선을 추적하는 것으로 토치에 부착되는 별도의 감지장치가 필요 없고 주요기능이 아크특성을 이용하는 소프트웨어로 이루어져 제작비가 비교적 저렴하다는 장점이 있으나 전류신호를 얻기 위해 토치는 반드시 용접선 주위를 좌우로 움직이는

위빙동작을 해야하므로 박판용접에는 적용이 곤란하다는 단점이 있고 아크 노이즈를 처리하기 위한 알고리즘이 복잡하고 용접조건에 영향을 많이 받는다는 단점이 있다. 시각센서는 2차원의 영상정보로부터 3차원 정보를 얻기 위하여 레이저 구조광<sup>1)</sup>을 사용해 용접선의 위치를 비교적 정확히 알 수 있으나 레이저, 카메라, 필터 등의 시스템 구성에 많은 비용이 소모되고 영상처리 알고리즘이 복잡하다는 단점이 있으며 또한, 아크광이나 연기<sup>2)</sup>에 상당히 취약하고 틱새가 거의 없는 박판의 맞대기 이음부를 감지하기 어렵다는 단점이 있다. 이에 반해 전자기식 센서는 장치가 간단하고 저

림하지만 감지높이가 시각센서에 비해 상대적으로 낮아 설치에 제한이 있고 시각센서에 비해 상대적으로 정밀도가 떨어진다는 단점은 있으나 틈새가 없는 박판 맞대기 이음부를 감지할 수 있고 아크광이나 연기에 거의 영향을 받지 않는다는 장점을 지니고 있다<sup>3-5)</sup>.

본 연구에서는 용접선이 센서로부터 벗어난 거리를 인식하기 위한 이중 전자기식 센서를 설계, 제작하여 용접선의 검출능력을 확인하고 자동추적할 수 있는 시스템을 구축하여 추적성능을 검토하였다. 기존의 단일 전자기센서에서는 용접선을 인식하기 위해 센서의 기계적인 좌우 스캐닝 동작이 필수적으로 요구되었으나 본 연구에서는 이중 전자기 센서를 이용하여 이전의 연구에서 필수적으로 요구되어 왔던 스캐닝 동작을 생략함으로써 용접선 검출속도 및 추적의 정도향상을 꾀하고자 하였다.

## 2. 센서의 설계 및 제작

### 2.1 전자기식 센서의 원리

전자기 센서는 Fig.1의 (a)와 같이 교류전원을 인가한 여자코일과 검출용(센싱)코일로 구성되며, 여자코일에 흐르는 전류에 의해 자속( $\phi_1$ )이 형성되고 이 자속에 의해 센싱코일에 유기전압( $V_1$ )이 발생한다.

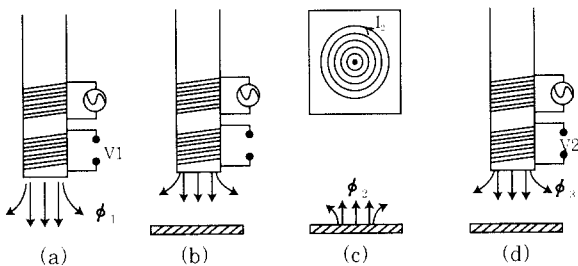


Fig. 1 Principle of eddy current

이 센서에 (b)와 같이 금속체를 접근시키면 이 금속체에는 (c)와 같이 링모양의 와전류(eddy current)가 발생하고<sup>6-10)</sup> 이 와전류에 의해 다시 원래의 자속을 방해하는 방향으로 자속( $\phi_2$ )이 발생되어 결국 (d)와 같이  $\phi_1 - \phi_2$  만큼의 크기에 해당하는 자속( $\phi_3$ )이 형성되고 이로 인해 센싱코일에 유기되는 전압( $V_2$ )이 변하게 되는 현상을 바탕으로 하고 있다<sup>11-13)</sup>. 즉, 맞대기 이음부에서는 이음부가 아닌 지점에 비해서 상대적으로 와전류 발생이 작기 때문에 반자속의 크기가 작아지므로 출력되는 전압신호가 크게 된다. 그러므로 센서를 용접선에 대해 가로질러 스캐닝하면 검출코일의 출력전압이 증가하다가 용접선과 일치했을 때 최대값을 나타

내고 이후 감소하게 된다. 따라서 이 전압신호의 차이를 바탕으로 이음부의 위치를 검출할 수 있게 된다.

Fig.2는 본 연구에 사용된 이중전자기 센서의 개략도이다. 두 개의 센싱코일을 부착한 것으로 검출전압의 차이를 이용하면 센서의 중심이 용접선으로부터 벗어난 거리를 검출할 수 있게 된다. 즉, 센서중심에 용접선이 위치할 경우 각 센싱코일의 출력전압은 동일하므로 차이가 0이 되며 센서의 중심이 용접선의 중심으로부터 벗어나면 두 검출전압의 차이가 발생하고 벗어난 방향(좌우방향)에 따라 전압차는 같으나 부호가 바뀌게 되어 용접선의 위치정보를 알 수 있게 된다.

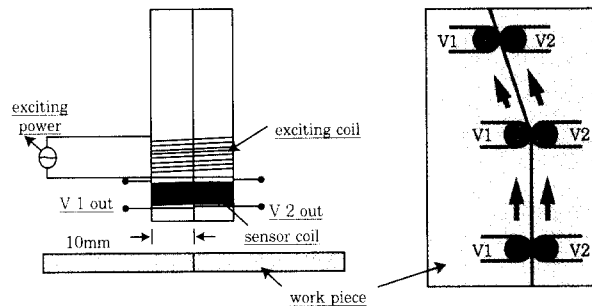


Fig. 2 Structure of electromagnetic sensor

### 2.2 센서 출력신호

센서코일에서 출력되는 교류전압은 수백 mV정도로 매우 미약한 신호이기 때문에 이 신호를 약 13배 증폭 후 직류로 변환하기 위한 정류, 그리고 교류노이즈 성분을 제거하기 위한 저역통과 필터링(절단주파수 : 15Hz)을 거쳐 A/D 컨버터로 안정된 직류신호가 들어가도록 하였다<sup>14)</sup>.

Fig.3은 용접선을 가로방향으로 스캔했을 때 센서코일의 전압신호를 동시에 나타낸 것이다. 그림에서 보면 용접선을 중심으로 전압파형이 대칭이 되며 중심에서 두 센서코일의 전압출력 값이 일치한다는 사실을 알 수 있다. 왼쪽에서 오른쪽으로 스캔했을 때 좌측의 흑색 파형이 우측센서의 출력전압이며 우측의 회색 파형이 좌측센서의 출력전압을 나타내고 있다. Fig.3에 나타난 두 센서의 출력전압신호를 실시간으로 빼게 되면 ( $V_L - V_R$ ) Fig.4와 같은 전압차 파형을 얻을 수 있다. 센서의 중심이 용접선상에 위치하게 될 때 센서의 전압차는 0이 되며 이것을 중심으로 용접선의 좌측은 -, 우측은 + 값으로 나타난다. 우측센서가 용접선상에 위치할 때의 차이값이 최소(-peak)가 되며 좌측센서가 용접선상에 위치하게 될 때의 차이값이 최대(+peak)가 된다.

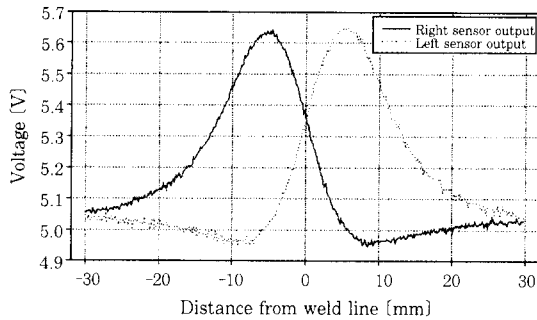


Fig. 3 Left & right sensor output signal

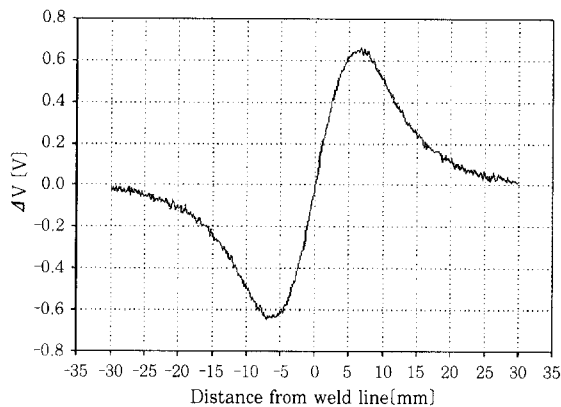


Fig. 4 Differentiation of right sensor & left sensor output

따라서 두 센서의 중심간 거리내에서 용접선의 위치를 검출할 수 있게 되며, 센서-모재간의 거리에 따라서 이 전압파형의 차이가 나타나므로 각각의 높이에 따른 수식을 적용하면 센서의 중심이 용접선으로부터 벗어난 거리를 알아낼 수 있다.

### 2.3 센서 설계변수의 설정

이중전자기센서의 측정범위는 두 센서코일의 중심간 거리에 해당하므로 이 값을 약 10mm로 만들기 위해 세라믹 페라이트계 자심의 직경을 9.6mm로 하였다. 이 두 개의 자심을 동시에 코일을 감아 여자전류를 공급하는데 이 때 센서코일의 권수를 40회로 고정하고 여자코일 권수를 변화시켰을 때 권수에 따른 이중센서의 출력신호에서 최대값과 최소값의 차이(peak-to-peak voltage)는 Fig.5와 같다.

본 실험결과에서 여자코일의 권수가 40회일 경우 출력신호차이는 가장 크게 나타난다. 그러나 권수 40회 이하에서 출력신호에 잡음(noise)이 심하게 나타나므로 그보다 다소 영향이 작은 60회를 적정 여자코일의 권수로 결정하였다. Fig.6은 센서를 용접선에 대해 가로로 스캔했을 때의 이중센서 전압 신호의 최대값과

최소값의 차이가 가진주파수의 변화에 따라 어떻게 변하는가를 보여주고 있으며 약 140kHz 이상에서는 거의 변화 없이 수렴함을 알 수가 있다.

따라서 자심재료와 신호처리회로 소자의 성능변수들을 고려해 140kHz를 적정 가진주파수로 설정하였다.

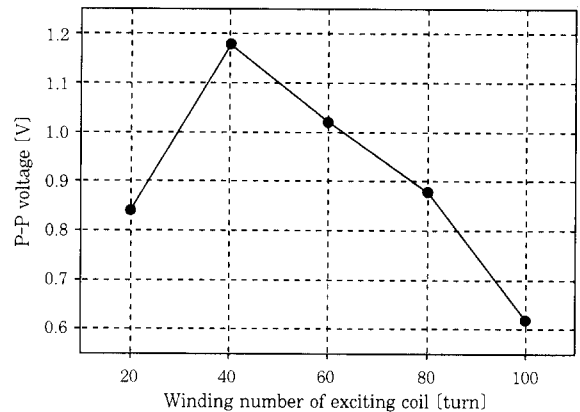


Fig. 5 Sensor output relative to winding number(N) of exciting coil (sensor coil : 40 turn)

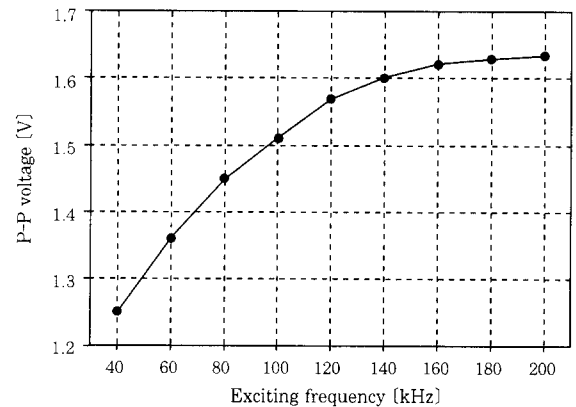


Fig. 6 P-P voltage vs. exciting frequency

### 2.4 센서와 모재간 거리의 영향

Fig.7은 센서와 모재간 거리에 따른 이중센서의 출력전압 파형을 보여주고 있다. 센서와 모재간 거리가 가까울수록 센서의 민감도가 높으므로 최대전압과 최소전압의 차이가 크게 나타나 용접선의 중심에서 전압 신호의 기울기가 급하게 나타나므로 용접선의 인식 성능이 보다 좋아진다는 사실을 유추할 수 있다.

Fig.8은 센서-모재간 거리의 변화에 따른 이중센서의 출력신호의 최대폭을 나타낸 것이다. 센서모재간의 거리가 멀어질수록 민감도가 떨어지므로 신호의 최대폭이 작아짐을 알 수 있다.

결과에서 보면 센서모재간 거리가 가까울수록 센서의 민감도가 높으므로 최대한 가깝게 하는 것이 유리

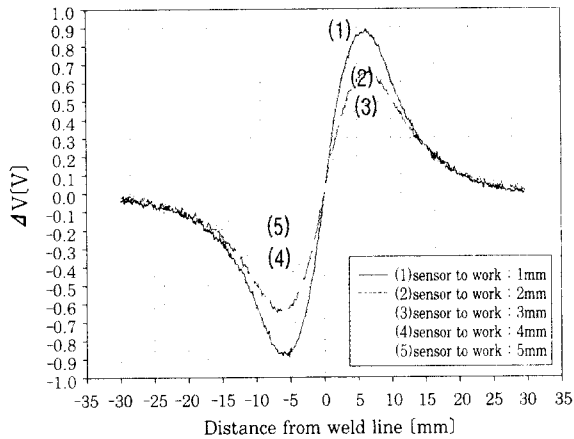


Fig. 7 Sensor output signal relative to sensor to workpiece distance

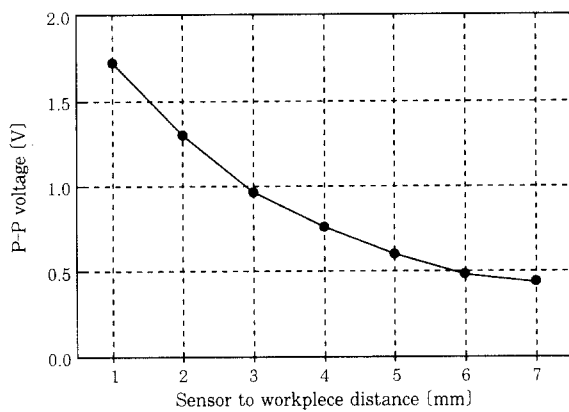


Fig. 8 P-P voltage vs. sensor to workpiece distance

하지만 너무 가까울 경우 모재 또는 가접부와의 충돌 가능성이 있으므로 센서와 모재간 거리를 3mm 이상으로 설정하는 것이 요구된다.

### 3. 용접선 추적원리 및 시스템구성

#### 3.1 수학적 모델링

센서용 자심의 직경에 의해 자심 중심간 거리를 감지 영역으로 설정할 수 있으므로 이 구간에 대한 센서출력신호는 Fig.9와 같다. Fig.9에서 나타내어진 신호는 지수함수(exponential function)의 형태로 용접선 중심으로부터의 거리를  $y$ 라 하면 식(1)과 같이 일반화할 수 있다.

$$\Delta V = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot y)) \quad (1)$$

$$0\text{mm} \leq y \leq 5\text{mm}$$

센서-모재간의 거리에 따라 이중센서의 출력파형이 다르며, 결국 식(1)의 계수  $a$ ,  $b$ 값이 달라진다. 이때

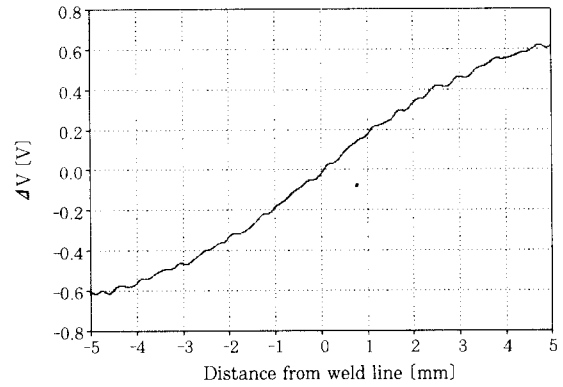


Fig. 9 Sensor output signal at the interesting range

센서와 모재간의 거리에 따른 최대진폭은 Fig.8과 같은 관계를 가지며  $a$ ,  $b$ 값은 최대진폭의 절반값에 선형 비례하는 값을 갖게 된다.

이 관계는 Fig.10, Fig.11과 같고 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$a = -0.8921 \cdot \text{half } p-p \text{ voltage} + 0.4092$$

$$b = -0.2452 \cdot \text{half } p-p \text{ voltage} + 0.0574 \quad (2)$$

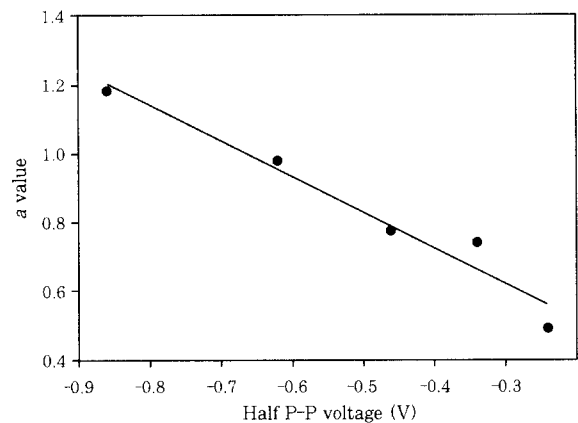


Fig. 10 Variation of value  $a$  relative to half p-p voltage

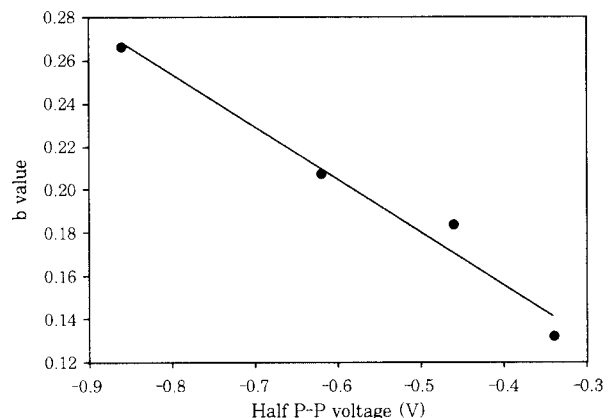


Fig. 11 Variation of value  $b$  relative to half p-p voltage

a, b 계수가 정해지면 위 식에서 얻어진 결과를 토대로 다음과 같은 거리의 식으로 환산된다.

$$y = -\frac{1}{b} \cdot \ln \cdot \left(1 - \frac{1}{a} \cdot \Delta V\right) \quad (3)$$

### 3.2 용접선 추적방법 및 시스템구성

모델링 결과를 바탕으로 센서-모재간 거리 및 좌우 옵셋 차이에 의한 센서출력전압을 거리량으로 환산한 후 벗어난 양만큼 연속적으로 보정하면 용접선을 추적할 수 있게 된다. 입력되는 센서출력 전압이 A/D 컨버터로 샘플링되고, 신호처리 알고리즘을 거친후 벗어난 옵셋량 만큼 펄스 발생기를 통해 모터를 구동해 보정하게 된다. 이같은 일련의 과정을 나타낸 블록선도를 Fig.12에 나타내었다.

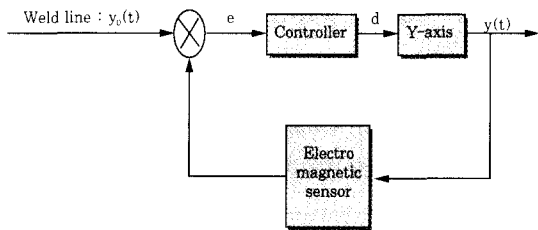


Fig. 12 Block diagram of seam tracking system

용접선추적에 사용된 장치는 2축 직선 유니트, 전자기식 센서, 센서 구동부, 신호처리부, 퍼스널 컴퓨터로 구성되어 있다. 센서구동용 2축 직선 유니트는 X축은 정속도로 움직이며 용접선과 나란한 방향으로 이동하고 Y축은 용접선을 중심으로 좌우로 움직이면서 벗어난 편차량 만큼을 연속적으로 보정하면서 이동한다. 각 축은 직류 스텝모터를 사용하여 400펄스당 모터가 1회전 하도록 하였으며 실험결과 14mm/s의 속도까지는 안정된 모터구동 능력을 보여주고 있음을 확인하였다. 각 축의 모터를 제어하기 위해 자체 제작한 펄스 발생기를 사용하였다. 용접선 자동추적 시스템의 샘플링 속도는 20Hz로 하였다. 따라서 X축이 7mm/s로 이동할 때 0.35mm마다 센서출력전압을 읽어들이어 연속적으로 보정하게 된다.

### 4. 용접선 추적실험 결과

모든 용접선 추적 실험은 최초 80mm의 직선구간 이후 60mm동안 좌측으로 8.5° 꺾인 용접선을 갖는 모재에 대해 수행하였으며, 용접 아크를 켜지않은 상태로 하였다. Fig.13은 X축속도 7mm/s, 센서-모재간 거리 3mm인 경우로서 용접선 추적실험을 수행한 결과이다.

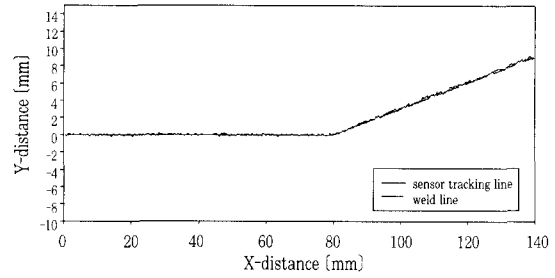


Fig. 13 Weld line tracking result (sensor to workpiece distance : 3mm, velocity : 7mm/s)

용접선 추적성능이 우수한 것을 볼 수 있으며, 이때 용접선 추적오차는 ±0.3mm 이내를 나타내었다.

Fig.14는 센서-모재간 거리를 5mm로 한 경우로서 Fig.13과 비교하여 센서-모재간 거리가 길어짐에 따라 센서에 의한 용접선 검출민감도가 낮아지며 추적성능이 저하되는 것을 볼 수 있다. 이때 용접선 추적오차는 ±0.7mm를 나타내었다.

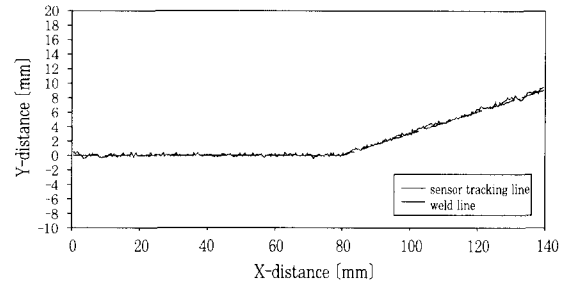


Fig. 14 Weld line tracking result (sensor to workpiece distance : 5mm, velocity : 7mm/s)

Fig.15는 센서-모재간거리 3mm, X축속도 10mm/s로 하였을 때 용접선의 추적결과를 보여주고 있으며 속도의 증가에따라 용접선 추적성능이 저하되는 것을 볼 수 있다. 그러나 이때 용접선 추적오차는 ±0.5mm로 나타나 센서-모재간 거리가 5mm일 때 보다는 양호한 추적성능을 나타내었다. Fig.16은 두 모재의 이음부에 있어 중심부분에 인위적인 높이차이 (mismatch)를 두었을 때 센서의 용접선 추적성능을 실험한 결과이다. 시편의 양쪽 끝 부분에서는 높이를 일치시키고 중심부 (X=70mm위치)에서는 2mm의 높이차이를 두었다.

실제 용접에서 열변형에 의한 높이차이가 나타날 가능성이 많으므로 이러한 조건에서 실험을 수행하였으며 결과로부터 용접선 추적성능은 모재의 높이차이에 거의 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 이중센서의 출력신호 파형에서 높이차이에 의해 그 기울기는 변하더라도 원점의 위치는 거의 변하지 않기 때문이다.

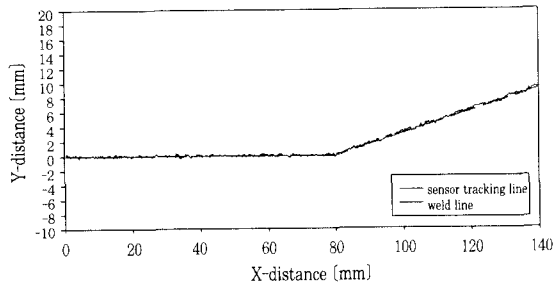


Fig. 15 Weld line tracking result (sensor to workpiece distance : 3mm, velocity : 10 mm/s)

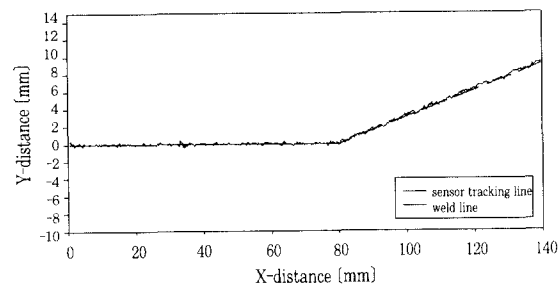


Fig. 16 Weld line tracking result (sensor to workpiece distance : 3mm, velocity : 7mm/s, mismatch of workpiece: 2mm)

### 5. 결 론

본 연구에서 용접선 검출을 위한 이중전자기 센서를 설계, 제작하여 용접선 검출성능을 확인하고, 이를 이용한 용접선 자동추적 장치를 구성하여 용접선 추적성능을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

- (1) 용접선의 위치를 감지하기 위한 이중전자기 센서의 중요변수를 실험을 통하여 구하였다. 즉 양호한 용접선 검출능력을 위하여 가진코일과 센싱코일의 권수를 각각 60, 40으로 하였고 가진주파수는 140kHz를 설정하였다.
- (2) 수학적 모델링을 통하여 센서-모재간 거리에 따른 이중센서의 출력전압과 용접선-센서간 거리를 수식으로 나타낼 수 있었다.
- (3) 단일 센싱코일을 갖는 전자기센서는 좌우스캐닝 동작이 필요하나 이중센서를 채용함으로써 스캐닝 동작 없이 출력신호를 토대로 신속한 용접선의 추적이 가능했다.
- (4) 본 연구에서 구성한 시스템으로 용접선을 추적한 결과 이송속도 7mm/s, offset angle : 8.5°, sensor to work : 3mm의 조건에서 ±0.3mm 이내의 용접선 추적오차를, 이송속도 10mm/s, sensor to work : 3mm의 조건에서 ±0.5mm 이내의 용접선 추적오차를 보여 우수한 추적성능을 나타내었다. 그러나

7mm/s, sensor to work : 5mm의 조건에서 ±0.7mm 이내의 용접선 추적오차를 보여 센서-모재간 거리가 멀어짐에 따라 추적성능이 저하되는 것을 볼 수 있었다.

(5) 최대 2mm의 높이차이가 있는 용접선에서도 ±0.3mm이내의 오차를 보여 우수한 용접선 추적성능을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 센서를 이용하는 경우 특히 이음틈새가 없거나 틈새값이 불균일한 박판의 맞대기 용접선을 추적하는데 매우 적합한 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 정규철, 김재용 : 아크용접용 비전 시스템에서 화상처리에 관한 연구, 대한용접학회 추계학술발표대회(1998), 168-171
2. R.W. Richardson and C.C. Conrardy : Coaxial vision-based control of GMAW, ASM International, (1993), 957- 961
3. Ismail Abu Baker Md, and katsunori Shida : Application of eddy current technique for the non-contact sensing of low concentration of electrolytic solution. Proceeding of the 12th KACC, October (1997), 1310-1313
4. 박영우, 원문철 : 자기변형재료를 이용한 절삭공구용 마이크로 포지셔너의 개발, 한국정밀공학회지, 15-3(1998), 75-81
5. 이갑진, 박기환, 류제하 : 비접촉식 와전류형 제동장치의 최적 토오크 제어, Proceeding of the 12th KACC, October (1997), 261-264
6. M. P. Howarth and M. F. Guyote : Eddy current and ultrasonic sensors for robot arc welding, Sensor Review, 4 (1983), 90-93
7. Wakamatsu: Development of ultra heat-resistant electromagnetic sensing device and its application to welding apparatuses, Mitsubishi Juko Giho(1984), 48-54
8. E. Hanova : Magnetic arc blow, Welding International, (1991), 995-999
9. 유병희, 김재용 : 박판 맞대기 용접에서 전자기식 센서를 이용한 용접선 자동 추적 시스템에 관한 연구, 대한용접학회지, 15-1 (1997), 81-91
10. 김영선, 조형석 : 전자기 센서를 이용한 용접선 위치결정 시스템, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집(1998), 490-493
11. H. Fujiyama, H. Sonoda, T. Miyajima, H. Ichimura, K. Okuyama : Seam tracking and height control method of plasma gouging, Automation Technology of Arc Welding (JWS), (1996), 37-42
12. Steven D. Roach : Designing and building an eddy current sensor, Sensor Magazine, September (1998), 1-16
13. 김상진 : 자동화를 위한 센서, 연학사(1991), 117-122
14. Robert F. Coughlin, Frederik F. Driscoll : Operational amplifiers & linear integrated circuits, Prentice Hall, (1991), 6-7