

## 용접선 자동추적용 전자기유도센서의 개발에 관한 연구

배강열\*

\*진주산업대학교 메카트로닉스공학과

### A Study on Development of an Electromagnetic Inductive Sensor for Automatic Weld Seam Tracking

Kang-Yul Bae\*

\*Dept. of Mechatronics Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

#### Abstract

An electromagnetic inductive sensor consisted of one exciter and three separated (triple) detectors has been developed for both tracking the weld seam of a workpiece and controlling the sensor-to-workpiece distance (height) simultaneously. The left and right detectors are used to track the seam, while the fore and the other two detectors allow the sensor to determine the height and the gap width by being coupled their outputs together. A series of experiments with the proposed sensor located above a mild steel plate containing a weld seam of gap are carried out to examine the feasibility of the sensor. The results revealed that the proposed sensor could fairly well track the desired seam and also well control the height to be constant even when the gap width of the seam varied. The gap width can be also determined during the seam tracking by using the sensor outputs. As a consequence, these can provide the developed sensor with substantial improvement for industrial uses with respect to the previous electromagnetic sensors being used for the weld seam tracking.

\* Corresponding author : kybae@jinju.ac.kr

(Received June 17, 2005)

Key Words : Electromagnetic inductive sensor, Seam tracking, Height control, Gap width, Triple detectors

#### 1. 서 론

여자코일(exciter coil)이 자성 도체 위에 다소의 거리를 두고 위치하고, 교류전압에 의해 코일과 도체 사이에 형성되는 자기장이 변화하게 되면, 전자기 유도에 의하여 도체에는 와전류가 발생한다<sup>1)</sup>. 와전류의 크기는 자속을 생성하는 코일과 도체 사이의 거리 및 도체의 재질과 형상적 특징에 연관되어 변화될 수 있고, 별도의 검지코일(detector coil)에 유도되는 전압에 의해 측정이 가능하다. 이는 코일과 도체의 직접적 접촉 없이, 도체까지의 거리와 도체의 특성을 검지할 수 있게 한다. 이와 같은 원리를 계측에 이용한 전자기유도센서(electromagnetic inductive sensor)는 코어 주위에

감긴 코일을 여자하여 자기장을 형성하고, 측정대상 물리량이 검지코일에서 아날로그 전압출력으로 나타날 수 있도록 설계되며, 센서의 구성이 단순하여 위치나 변위 등의 기계적 변수를 검지하는 데 광범위하게 사용된다<sup>2)</sup>. 전자기유도센서는 기본적으로 자기장을 발생하는 코일과 물리량을 검지하는 검지코일로 구성되나, 검지코일의 유도전압과 도체의 물리량 사이의 관계는 전기전도도, 자기흡수율 그리고 기하학적 형상에 의하여 영향을 받기 때문에 이론적으로 규명하기는 매우 어렵다<sup>3)</sup>. 그럼에도, 산업적 적용을 위한 다양한 형태의 센서가 수치적 또는 실험적 방법으로 연구, 개발되어 오고 있다<sup>4,5)</sup>. 특히 용접공정에서는 부재(workpiece)의 용접선(weld seam)을 검출하는 데 자주 활용되고 있고, 센서의 검지능력 향상을 위해 두 개의 분리된 검지부

(detector)를 사용하는 형태까지 제안되고 있다<sup>6)</sup>. 용접공정의 경우는 변형 등 가능한 변화에 의하여 용접선 추적 중에 부재의 높이 변화가 발생될 수 있으므로, 용접토치의 높이가 제어될 필요가 있다. 이를 위해 용접선 추적용 센서는 용접선을 추적하고 센서-부재간 거리(높이)를 동시에 제어할 수 있도록 설계될 수 있다. 전자기유도센서의 경우에도, 하나의 여자코일과 4개의 검지코일(두 개는 코어 아래 바닥면에 인쇄되어 있고, 두 개는 코어를 싸고 있는 구조)로 구성된 형태의 센서가 개발되어 활용되고 있으며<sup>7)</sup>, 검지코일의 출력을 결합하여 용접선의 추적과 동시에 높이를 제어할 수 있다고 보고 되고 있다<sup>8)</sup>. 그러나 이러한 센서는 사전에 설정한 일정한 간극 폭(gap width)의 경우에 한정되어 높이의 제어가 가능한 단점이 있다. 따라서 간극이나 형상의 변화가 동시에 발생하는 실 부재에서 높이를 제어하기 위해서는 간극의 변화에 대응 가능한 센서의 적용이 필요하다.

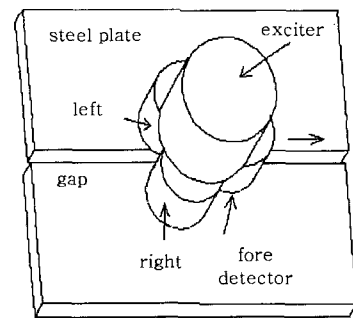
본 연구에서는 한 개의 여자부(exciter)와 세 개의 분리된 검지기(detector)로 구성된 전자기유도센서를 제안하여, 부재 용접선 간극의 변화가 존재하는 경우라도 용접선의 추적과 동시에 용접토치의 높이(센서-부재간 거리) 제어가 가능한 센서와 용접선 추적시스템을 연구하고자 하였다. 제안된 센서의 검지부는 선단검지기(fore detector coil), 좌측(left)검지기, 우측(right)검지기로 구성되는 바, 좌/우 검지기는 용접선을 중심으로 좌우로 위치하여, 대칭적 특징을 이용하여 용접선을 추적하는 데 활용하였고, 선단검지부의 출력과 좌우측 검지부의 평균출력을 결합하여 센서-부재간 거리와 간극의 폭을 측정하는데 활용하였다. 이를 위해 먼저, 간극의 폭이 변화할 때, 센서의 출력과 센서-부재간 거리 사이의 관계를 구축하는 일련의 실험을 수행하였다. 그리고는 용접선 간극의 변화가 있고, 수평과 수직의 경사를 가진 부재를 대상으로 용접선 추적 실험을 실시하여, 제안된 센서가 용접선의 추적과 동시에 높이 제어가 효과적으로 수행가능함을 보이고자 하였다.

## 2. 전자기유도센서 개발

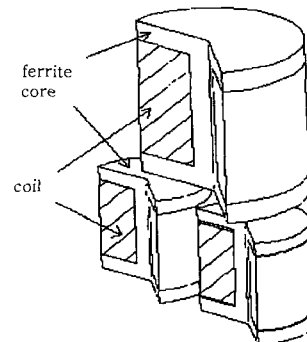
일반적으로 전자기유도센서는 두 개의 분리된 검지기를 가지고, 양 검지기 출력의 차이를 이용하여 용접선의 위치를 결정하게 된다. 이러한 코일 배치는 센서가, 부재에 별도 2개의 와전류 루프를 구성하게 하는 용접선 바로 위에 위치하고, 좌우 출력의 대칭성을 이용하여 용접선을 검지하는 경우에 특히 적합한 것으로 판단되나, 간극의 존재로 인하여 센서와 부재간의 높이에 대한 정확한 정보는 얻을 수 없게 된다. 따라서 센서와

부재간의 높이에 대한 정보를 얻기 위해서는 부가적인 검지 방안이 필요하게 된다.

Fig. 1(a)와 (b)는 본 연구에서 제안한 센서의 형태와 단면을 각각 보여주고 있다. 센서는 하나의 여자부(exciter)와 세 개의 분리된 검지기, 즉 선단(fore), 좌측(left) 그리고 우측(right) 검지기(detector)로 구성된다. 한편, 전자기유도 현상을 응용한 기존 연구에서, 도전체 상의 와전류는 여자코일 권선 바로 아래 위치에서 가장 크게 생성되는 결과를 보였다<sup>9)</sup>. 따라서 각 검지기의 중심이 여자코일 권선 바로 아래 위치에 놓일 때, 부재에 생성된 유도전류에 의한, 검지기를 쇠교하는 자기장의 자속이 가장 크게 나타남으로써, 센서의 감도를 향상시킬 수 있게 된다. 이에 따라 두 검지기는 용접선의 좌우 양쪽에 위치하되 여자부 권선 바로 아래 위치에 중심을 두었고, 다른 하나의 검지기는 여자부 권선 바로 아래 위치에 중심을 두고 용접선 바로 위에 놓이도록 센서의 선단에 위치하게 하였다. 좌우 검지기는 양 출력의 차이를 이용하여 용접선을 탐색하는 데 사용이 되고, 선단 검지기 출력값과 좌우 검지기의 평균 출력값을 이용하여 센서-부재간의 거리(sensor-to-workpiece distance)와 용접선 간극의 폭(gap width)을 결정하게 된다. 여자부는 직경 5mm, 길이 11mm의 실린더 기둥과 기둥 상부에 직경 15mm 높이가 2mm의 원형 디스크로 구성된 페라이트 코어로, 기



(a) Sensor configuration



(b) Sectional view

Fig. 1 Schematic view of proposed sensor consisted of exciter and detectors

등 주위로 0.2mm 직경의 코일이 200회권으로 감겨져 있다. 각 검지기는 4mm 직경과 길이 8mm를 가진 실린더 기둥에 직경 10mm와 높이 2mm를 가진 디스크가 양단에 존재하는 페라이트 코어로, 기둥에 0.15mm 직경의 코일이 120회권으로 감겨져 있다.

제안된 전자기유도센서를 포함한 센서시스템은 여자부에, 와전류 크기 증대를 목적으로 고주파 교류전류를 인가하기 위한 여자회로와 각 검지기로부터의 출력을 획득하기 위한 신호조정(signal conditioning)부 및 신호처리(signal processing)부로 구성된다. Max038 칩은 주변 저항, 커패시터와 함께 여자회로를 구성, 정현파의 고주파를 생성하는 데 활용된다<sup>10)</sup>. 여자회로에서는 저항과 용량을 조절하여, 여자주파수를 가변할 수 있다. 이때 생성되는 정현파 신호의 첨두치(peak-to-peak)는 2V이므로, 10V를 갖도록 증폭하였다. 신호조정회로는 전압풀로어, 증폭기, 정류기, 그리고 10Hz 차단주파수의 저주파통과 필터로 구성되어, 각 검지기로부터의 원신호(raw signal)에서 실제 물리량의 계측 신호를 추출 및 조절하도록 설계하였다. 각 검지기 출력 조절신호는 제어용컴퓨터(PC)에 장착된 신호획득보드(PCL-818H)의 아날로그-디지털 변환기(12비트 분해능)로 인가되어, 용접선 결정을 위한 다음 단계의 신호처리에 활용된다.

용접선 추적에 선행하여, 제안된 전자기유도센서에 요구되는 최적의 여자주파수를 결정하기 위하여, 다양한 센서-부재간 거리에서, 400kHz ~ 800kHz 사이의 주파수를 변화하면서 출력전압을 측정하는 일련의 실험을 수행하였다. Fig. 2는 센서-부재간 거리와 센서 출력전압 간의 관계를 보여준다. 이 관계는 제안된 센서

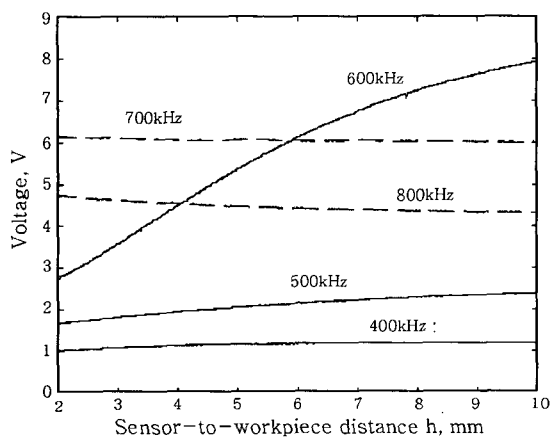


Fig. 2 Change of relationship between sensor-output voltage and sensor-to-workpiece distance with exciting frequency

의 감지능력이 여자 주파수에 따라 급격하게 변화하고 있음을 보이고 있다. 먼저 여자 주파수가 400kHz에서 500kHz로 증가하면, 센서-부재간 거리의 변화에 점차 민감한 반응을 보여, 센서의 감도가 향상될 수 있음을 알 수 있다. 주파수가 600kHz까지 증가하게 되면, 거리변화에 따른 출력전압의 변화가 매우 뚜렷하게 나타나게 된다. 반대로, 600kHz를 상회하는 주파수에서는 출력의 변화가 거리에 따라 감소하는 현상을 보이고 있으나, 감도가 매우 낮게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 사양과 특성의 센서에 대해서는 600kHz의 여자주파수가 최적의 감도를 나타낼 수 있는 값으로 선정될 수 있었다. 검지코일의 출력전압은, 여자전류의 변화에 의한 전압과 이에 역방향 전압을 유도하는 와전류의 변화에 의해 결정된다<sup>11)</sup>. 선정된 여자 주파수를 가진 제안된 센서가 도전체에 근접하면, 와전류 효과가 증가되고, 따라서 출력전압은 감소하게 된다.

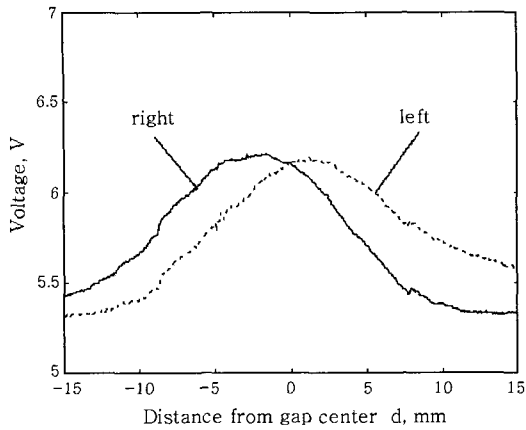
### 3. 용접선 위치, 센서-부재간 거리 및 간극 폭 결정

Fig. 3(a)는 제안된 센서가 연강 부재 위 센서-부재간 거리 4mm 위치에서 간극 폭 1mm를 가진 용접선 주위를 횡단하여 이동한 경우, 좌우 검지기의 출력변화를 보여주고 있다. 검지기가 용접선에 근접하게 되면, 공극(air gap)의 존재로 인해 와전류효과가 감소하여, 출력이 증가되고 있다. 신호의 형태는 용접선을 중심으로 거의 대칭적으로 나타나고 있으나, 다소의 비대칭성은 센서 구성요소 간의 정렬오차(alignment error)에 기인하여 발생한 것으로 판단된다. 센서가 용접선으로부터 다소 떨어진 위치에 놓이면, 좌우 검지기의 출력 차이가 발생하는 것을 보이는 바, 이는 용접선 중심으로부터의 상대적 거리에 차이가 있기 때문이다.

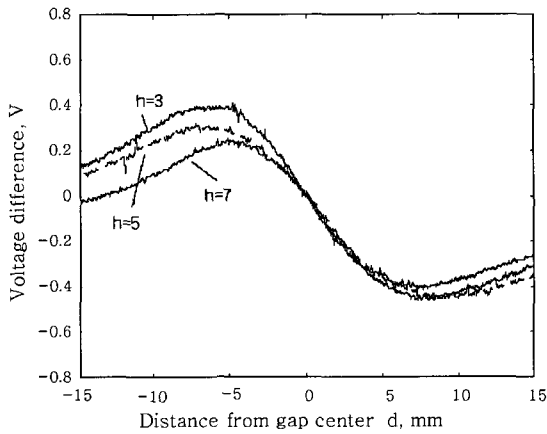
Fig. 3(b)는 용접선까지 센서의 상대적 거리와 좌우 검지기의 출력전압차 사이의 관계를 보이고 있다. 0 ~ ±5mm 에서는 두 양의 상호관계가 거의 선형적으로 나타나므로, 전압차는 용접선 중심으로부터 센서의 상대적 위치를 결정하는 데 사용될 수 있다. 이러한 관계는 다음과 같은 모델로 표현될 수 있다.

$$y = \bar{k} \cdot dV \quad (1)$$

여기서  $y$ 는 용접선 중심으로부터의 거리,  $\bar{k}$ 는 상수,  $dV$ 는 좌우 검지기의 출력차이다. 또한, 상수  $\bar{k}$ 는 다음과 같이  $h$ 에 따라 변화하는 1차식의 단순 모델로 표현할 수 있다.



(a) Sensor outputs



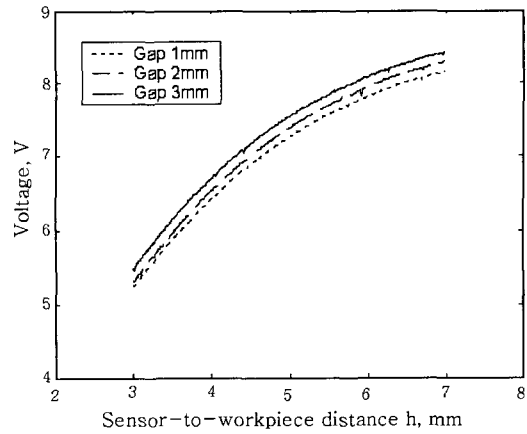
(b) Difference of detector outputs for various heights

Fig. 3 Right and left detector outputs and their difference for various positions around seam

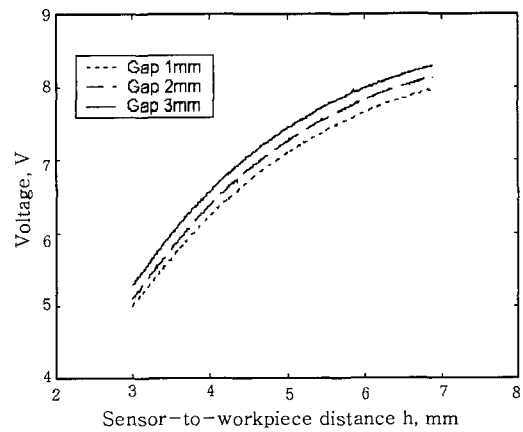
$$\bar{k} = -7 \cdot 10^{-3} h + 0.096 \quad (2)$$

따라서, 두 검지기로부터 출력이 얻어지면, 설정된 모델로부터 용이하게 용접선의 위치를 결정할 수 있게 된다.

센서출력과 센서-부재간 거리의 관계를 수식 모델로 구축하기 위하여, 용접선 중앙의 바로 위에 센서가 위치한 상태에서 다양한 센서-부재간 거리와 용접선 간극 폭에 대하여 선단검지기 출력과 좌우검지기 평균출력을 각각 측정하였다. Fig. 4(a)와 (b)는 다양한 간극과 거리에 따른 센서의 출력을 각각 보여주고 있다. 예상과 같이, 거리와 간극의 증가는 와전류효과를 저감하게 되므로, 양 센서의 출력은 거리 또는 간극이 증가하면 명확하게 증가되고 있다. 좌우검지기 평균출력보다 선단검지기가 다소 높은 출력을 보이는 것은, 선단검지기가 용접선 중앙의 바로 위에 위치하여 와전류 효과가 다소 저감된 결과이고, 좌우측 검지기는 중앙으로부터 다소 떨어진 위치에 놓여지기 때문이다. 센서출력과 거



(a) Fore sensor



(b) Left and right sensor

Fig. 4 Sensor output at seam center for various gaps and heights

리, 센서출력과 간극의 관계를 수식모델로 표현하면 다음과 같은 2차 방정식의 형태로 각각 나타난다.

$$\begin{cases} V_f \\ V_b \end{cases} = \begin{bmatrix} -0.18 & 2.52 \\ -0.19 & 2.66 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h^2 \\ h \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.117 \\ 0.145 \end{bmatrix} \{g\} + \begin{Bmatrix} -0.784 \\ -1.487 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $V_f$ 는 선단검지기 출력,  $V_b$ 는 좌우검지기 평균출력,  $h$ 는 센서-부재간 거리,  $g$ 는 간극의 폭을 각각 나타낸다. 두 함수는, 선단검지기 출력과 좌우검지기의 평균출력이 측정되어 주어질 때 센서-부재간 거리( $h$ )를 먼저 결정하기 위하여, 간극 폭을 소거하여 결합될 수 있고, 다음과 같은 방정식의 형태로 나타낼 수 있게 된다.

$$h^2 - 14.0h + 24.9 = 30.2 V_b - 37.5 V_f \quad (4)$$

나아가, 방정식(4)에서 구한 거리와 측정되어 주어진 출력력을 이용하면, 방정식 (3)에서 간극 폭( $g$ )을 산출할 수 있다.

#### 4. 용접선 추적시스템의 구성 및 실험

직교 3축으로 구성된 이송테이블을 이용하여, 제안된 센서를 상하방향( $z$ )축에 장착하고, 센서의 성능시험을 실시하였다. 각 축은 볼스크류와 스테핑모터로 구성되어 있다. 스테핑모터는 200steps/rev의 분해능을, 볼스크류는 5mm의 리드를 가지고 있어, 각 축의 1 BLU는 0.025mm/pulse가 된다. 이송테이블은 제어용컴퓨터에 장착된 모터제어용보드(PCL-839)에 의해 제어되게 하였다.

Fig. 5는 제안된 센서와 구동시스템의 용접선 추적절차를 보여주고 있다. 용접진행 방향( $x$ 축 방향)으로 일정한 이송속도를 가질 때, 각 시간 단계(추적 주기 시간)에서, 2개의 추적과정이 순차적으로 수행되어, 먼저  $y$ 축으로 용접선을 탐색하여 추적하고, 다음  $z$ 축으로 센서-부재간 거리(높이)를 제어하게 된다. 센서가 좌우검지기의 출력에 의거하여 용접선의 새로운  $y$ 축 위치,  $y$ 를 탐지하게 되면,  $y$ 축 테이블은 용접선( $y$ )과 현재 센서의 위치( $y_c$ ) 차이를 제거하는 방향으로 이동하도록 구동명령을 받게 된다. 최초에는 센서까지의 높이가 알려져 있지 않기 때문에, 센서는 정확히 용접선을 탐지할 수는 없게 된다. 검지 오차(offset distance)가 허용 가능한 0.1mm 이상이 되면, 이를 교정하기 위해

서, 센서는 현재의 위치를 활용하여 비례상수  $k$ 를 다음과 같은 조건에서 새롭게 설정( $k_c$ )하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{If } y_c \geq 0, k_c &= \frac{y + y_c}{y} \cdot \bar{k}, \\ \text{If } y_c \leq 0, k_c &= \frac{y - |y_c|}{y} \cdot \bar{k} \end{aligned} \quad (5)$$

갱신된 상수를 사용하여, 재차 오차를 결정하고,  $y$ 축 테이블은 오차를 제거하기 위해 구동된다. 다음 단계부터는, 전 단계에서 갱신된 비례상수가 용접선을 결정하는 데 사용된다.  $y$ 축 방향의 추적속력은 하나의 추적 시간 간격 이내에서 추적이 수행될 수 있도록 결정한다.

용접선 중앙을 검지한 다음, 선단검지기와 좌우검지기의 출력을 사용하여, 센서의 높이와 간극의 폭을 계산하게 된다. 결과에 따라, 추적 주기 시간의 나머지 절반 이내에, 간극의 폭을 보상하면서  $z$ 축 방향으로의 제어가 수행되어, 센서-부재간의 높이를 일정하게 유지한다. 순간적인 외란에 대처하기 위해, 높이방향 최대의 보정값은 각 제어 단계당 허용치 이내로 한정하였다.  $z$  방향의 이송속도는 테이블이 추적주기의 반주기 이내에 설정된 높이로 이동할 수 있도록 결정하였다. 이러한 추적과정이 설정된 용접선의 길이까지 반복 주기적으로 수행된다. 용접선 추적과 높이제어 알고리즘은 C-언어로 작성된 프로그램으로 구현되었다.

제안된 센서의 가용성(feasibility)을 검증하기 위하여, 용접선 간극이 시작위치에서 1.5mm이고 최종위치에서 4mm인 부재를  $y$  방향으로  $2^\circ$ ,  $z$  방향으로  $2^\circ$ 씩 각각 기울인 상태에서, 센서를 이용한 용접선 추적시험을 실시하였다.  $x$  축 방향의 이송속력은 5mm/s로 설정하고 추적과정의 각 시간 간격(추적 주기 시간)은 0.3sec로 설정하였다. 센서-부재간 거리는 초기에 5mm로 설정하고, 추적 중, 일정하게 유지되도록 제어하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

Fig. 6은  $y$  및  $z$  축으로 경사진 용접선을 따라 센서 시스템이 추적한 결과를 보여주고 있다. 각 방향으로 추적된 결과는 설정된 위치로부터 다소의 편차와 요동을 나타내고 있다.

이는 제안된 센서를 이용한 추적은 설정된 경로로부터 편차를 가지고 있고, 센서가 편심된 경로를 반복적으로 왕복한 결과에 의해 요동이 더해져 나타난 결과로 판단된다. 그럼에도, 제안된 센서는 설정된 위치를 상당히 근접하여 추적할 수 있었고, 추적시스템의 편차는 다수의 추가적인 실험과정을 통하여 교정함으로써 제거

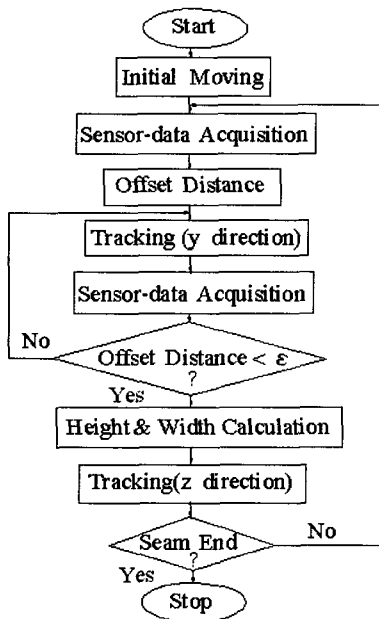


Fig. 5 Flow chart for seam tracking and height control

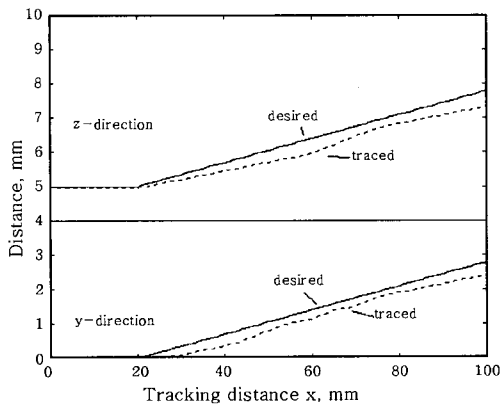


Fig. 6 Comparison between desired and traced seam

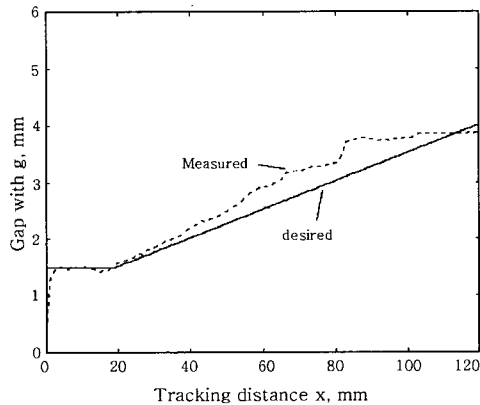


Fig. 7 Comparison between desired and measured gap width

할 수 있을 것으로 판단되었다. 특히 z방향에서는 센서가, 용접선 간극의 폭 변화를 보정하면서, 부재의 높이 변화에 대응하여 높이제어를 할 수 있는 능력을 보여주고 있다.

Fig. 7은 용접선 간극이 1.5mm에서 4.0mm로 변화될 때, 용접선 추적과정에서 센서가 측정한 간극 폭의 변화를 나타내고 있다. 측정한 크기는 실제의 폭보다 다소 크게 나타나고 있다. 이는 측정한 간극의 폭이 용접선 추적 중 센서-부재간 거리와 연성(couple)되어 있어, 거리가 짧게 측정된 결과에 기인한 것으로 판단 가능하다. 측정한 간극의 폭은 대체적으로 실제의 크기를 잘 추적하고 있어, 이를 기반으로 센서가 센서-부재간 거리를 잘 제어한 결과를 보였다고 판단된다.

## 6. 결 론

용접공정에서 용접선 추적과 용접토치 높이제어를 동시에 실현할 수 있는 전자기유도센서를 제안하고, 이를 사용한 용접선 추적 실험을 통하여, 제안된 센서의 가

용성을 검증하면서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 제안된 센서는 600kHz의 주파수에서 여자될 때 가장 감도가 높은 결과를 보였고, 해당 여자 주파수에서, 검지기 출력은 센서-부재간 거리와 용접선 간극의 폭이 증가함에 따라 각각 선형적으로 증가하는 결과를 보였다.

2) 좌측 및 우측 검지기는 센서 자체가 용접선을 횡단하여 이동할 때 대칭적 출력형태를 보였고, 이들 검지기의 출력차는 용접선 중심으로부터의 거리와 비례관계를 나타내었으며, 이는 용접선의 중앙을 추적하는 데 적합하게 사용될 수 있었다.

3) 선단과 좌우 감지기 출력은 센서-부재간 거리와 간극 폭의 두 변수에 대하여 각각 2차 방정식의 형태로 가정하여 표현할 수 있었고, 두 방정식을 결합하여 거리와 폭을 산출하고 용접토치의 높이제어에 활용할 수 있었다.

4) 제안된 센서를 장착한 추적시스템은 양호한 용접선 추적성능을 나타내었고, 간극 폭이 변화하는 경우에도, 센서-부재간 거리를 제어할 수 있는 능력을 보여 주었다.

## 참 고 문 헌

1. M. Enokizono, T. Todaka, Y. Tuchida and N. Hachiki: Finite Element Analysis of A Moving Magnetic Flux Type Sensor Developed for Non-destructive Testing, IEEE Transactions on Magnetics, 35-3 (1999), 1853-1856
2. Hirokazu Nomura: *Sensors and Control Systems in Arc Welding*, Chapman & Hall, New York, 1994, 39-40
3. C. Baratoletti, R. Buonanni, L.G.Fantasia, R. Frulla, W.Gaggioli and G. Sacerdoti: The Design of A Proximity Inductive Sensor, Meas. Sci. Technol., 9(1998), 1180-1190
4. B.-H. You and J.-W. Kim: A Study on Automatic Seam Tracking System Using Electromagnetic Sensor for Sheet Metal Arc Welding of Butt Joints, Journal of KWS, 15-1 (1997), 81-91(in Korean)
5. O. Mihalache, R. Grimberg, E. Radu and A. Savin: Finite Element Numerical Simulation for Eddy Current Transducer with Orthogonal Coils, Sensors and Actuators A Physical, 59(1997), 213-218
6. J.-H. Shin and J.-W. Kim: A Study of A Dual-Electromagnetic Sensor for Automatic Weld Seam Tracking, Journal of KWS, 18-4(2000), 483-488(in Korean)
7. Weidmueler Inc.: *Inductive Sensor*, German, 1994
8. C.-S. Yoon, S.-M. Yang, H.-C. Park and Y.-H. Han: Seam Tracking System in A Laser Welding - Inductive & Laser Vision Sensor, Journal of KWS, 12-2(1994), 28-38(in Korean)

9. K.-Y. Bae, T.-H. Lee and Y.-S. Yang: A Study of The Effects of Process Variables on Temperature and Magnetic-Flux Distribution in Induction Heating of Steel Plate, *Journal of KWS*, **19-5**(2001), 526-533(in Korean)
10. Maxim Inc.: *Max038-High Frequency Waveform Generator*, 2001
11. S. D. Roach: Designing and Building An Eddy Current Sensor, *Sensor Magazine*, **9**(1998), 1-161