

## 자동 아크 용접공정의 용접개선변수 측정을 위한 시각 시스템

김호학\* · 부광석\*\* · 조형석\*\*\*

### Development of a Vision Sensor for Measuring the Weld Groove Parameters in Arc Welding Process

H.H. Kim\*, K.S. Boo\*\*, H.S. Cho\*\*\*

**Key Words** : Vision Sensor(시각센서), Weld Groove Parameter(용접개선변수), Pre-view Sensing(선행측정), Data Processing(정보처리), Dynamic Window(동적윈도우), Piecewise Linear Approximation Algorithm(부분 연속 선형 근사 알고리즘)

#### Abstract

In conventional arc welding, position error of the weld torch with respect to the weld seam and variation of groove dimension are induced by inaccurate fitup and fixturing. In this study, a vision system has been developed to recognize and compensate the position error and dimensional inaccuracy. The system uses a structured laser light illuminated on the weld groove and perceived by a C.C.D camera. A new algorithm to detect the edge of the reflected laser light is introduced for real time processing. The developed system was applied to arbitrary weld paths with various types of joint in arc welding process. The experimental results show that the proposed system can detect the weld groove parameters within good accuracy and yield good tracking performance.

#### 1. 서 론

최근, 아크용접 공정에서 용접품질의 향상, 생

산성의 증가, 용접 단가의 감소 및 균일한 용접상태를 유지하기 위해서 로봇의 이용이 증대되고 있다. 특히, 로봇트를 이용한 아크 용접에 있어서

\* 한국 하이테크  
\*\* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과 박사과정  
\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과 교수

가장 중요한 문제중의 하나로서 용접선의 위치파악 및 개선부의 크기 변화등을 용접선 발견센서로써 측정하고 그 결과에 따라 적절히 용접 조건을 바꾸는 적응제어 기법이 개발되므로써 아크 용접에서의 로봇의 이용은 더욱더 증가될 전망이다<sup>1,2)</sup>. 이러한 용접토치와 용접선간의 위치오차 및 개선부의 크기 변화는 고정구의 마모, 용접부의 탄성 및 열 변형등에 의해서 발생하기 때문에 용접중에 그 크기를 측정하는 측정방법의 개발이 필수적이다.

용접선의 발견 및 추적센서는 크게 비 영상 처리센서(non-vision based sensor)와 영상 처리센서(vision based sensor)로 대별된다. 비 영상처리 센서는 음향센서, 자기센서, 전자기센서 및 아크센서로 나누어지며 이중 아크센서가 그 성능이 가장 우수하여 현재 가장 널리 사용되는 용접선 추적 방법이다. 아크 센서는 보통 through-the-arc센서로 명명되며 용접토치가 용접선의 중심점 주위를 위빙(weaving)할때 용접 전극과 용접물사이의 아크길이의 변화를 용접전류 또는 용접전압을 측정하므로써 예측하여 기준 아크길이내에 머물게 하는 방법으로 용접선의 추적이 이루어진다<sup>3,4)</sup>. 이러한 아크센서는 항상 위빙운동이 수반되어야 하므로 일반적으로 대형 구조물의 용접법에 주로 이용되고 있다. 따라서, 박판의 용접 및 개선의 폭이 작은 겹치기 결합(lap joint)등의 용접에는 적용이 어려운 점이 있으며, 특히 3차원형상의 용접선의 추적시에 위빙방향의 결정등에 어려움이 있다. 이에 비하여 영상처리 센서는 개선부에 대한 다양한 자료를 얻을 수 있기 때문에 박판의 용접에도 매우 유용하게 적용이 가능하다. 영상처리 센서는 용접선의 단면 또는 용융부의 모양을 나타내는 영상을 이용하는 센서로서 선행측정법(preview sensing)과 용접부 직시법(direct are sensing)이 있다. 선행측정법은 용접토치의 선단에서 용접선의 위치, 모양 및 개선의 크기를 측정하는 방법으로, 2차원 영상정보로부터 3차원 용접 개선변수를 파악하기 위하여 별도의 광원으로부터 주사된 입체광(structured light)을 사용한다. 용접부 직시법은 아크(arc)가 발생하는 용접토치 주위를 직접 측정하는 방법으로, 용접시에 발생하는 아크광(arc light)을 직접 조명광으로 사용하기 때문에 별도의 광원이 필요하지 않으나,

스패터(spatter) 및 강한 아크광의 영향을 줄이는데는 많은 어려움이 있다<sup>5,6,7,8)</sup>.

본 연구에서는 로봇트를 이용하여 아크 용접 작업을 수행할 때, 발생 가능한 용접 토치와 용접선과의 위치 오차 및 개선면의 형상변화를 측정하기 위하여 선행측정 영상 센서를 이용하였으며, 처리정보량을 최소화하여 실시간 처리가 가능한 동적 윈도우(dynamic window)방법을 제안하였다. 동적 윈도우에의한 정보처리 방법은 용접중 개선부의 형상 변화가 점진적으로 발생한다는 가정하에 한 단계 이전의 영상정보로부터 현재의 개선의 위치를 계산하는 방법이다. 본 연구에서 측정하는 용접 개선변수는 용접토치와 용접선과의 위치오차, 개선의 형태판별 및 개선부의 요구 용착 부피량이다.

## 2. 용접 개선변수 측정 센서

### 2.1. 용접 개선변수의 측정 원리

본 연구에서 제작한 센서는 선행측정 영상처리 센서이며 광원으로부터 만들어진 입체광을 3차원의 용접 모체에 투사하고 반사된 영상은 영상 카메라에서 그 형상이 인식된다. 용접 모체의 형상에 따라 반사되는 위치가 다르기 때문에 2차원의 영상 카메라면에는 개선부의 모양이 나타나게 되며, 이 정보를 획득하여 처리함으로써 용접모체에 대한 3차원 공간 정보를 얻을수 있다. 선행 측정법 영상 센서의 개념도를 Fig. 1에 나타 내었다.

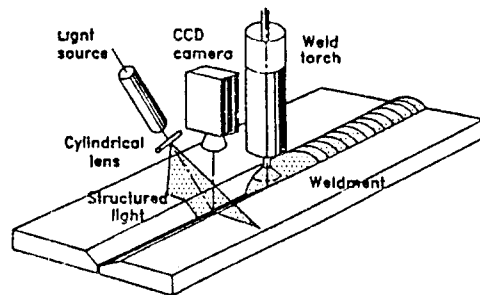


Fig. 1 Principle of preview image sensor for measurement of parameters

### 2.2. 시각 시스템(vision system)의 구성

본 연구에서 제작한 센서 시스템은 입체광을 받

생시키는 광원 및 광학 시스템, 이를 측정하기 위한 카메라와 영상 디지털라이저, 영상 정보처리용 소프트웨어의 수행 및 작업의 흐름을 감독하여 명령, 지시를 하는 관리 제어용 컴퓨터, 용접토치를 구동시켜주는 매니플레이터(manipulator)로 나눌 수 있다.

용접토치와 광학 시스템과의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 그림으로부터, 카메라와 광원 및 렌즈는 보호용 홀더(holder)로 용접토치와 차단되기 때문에 아크광 및 스파터의 영향을 최소화 할 수 있다. 또한 카메라와 용접선의 각도 및 레이저와의 관계에 의하여 정보 처리(data processing) 시간 및 분해능(resolution)을 고려하여 용접 개선 변수 측정센서의 하드웨어 구조를 결정하였다.

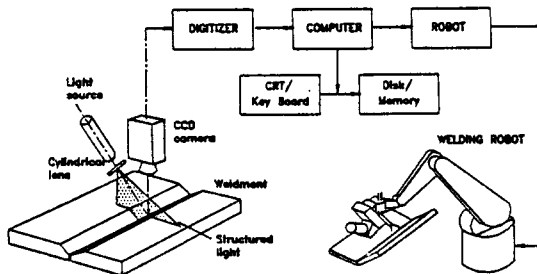


Fig. 2 Schematic of the sensor system

광원으로는 Melles Griot사제 7mW He-Ne 레이저를 사용하였으며, 레이저에서 발생하는 직경 약 1mm의 점광원을 입체광원으로 만들기 위하여 직경 5mm의 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 사용하였다. 카메라는 Takenaka system TM-540H C.C.D 카메라를 사용하고 카메라로부터의 영향 입력은 274D 콜로라도 영상 디지털라이저(Colorado image digitizer)에 512×512 pixel 256 다치값(gray level)으로 1/30초마다 디지털라이즈(digitize)되어 메모리에 저장된다. 카메라는 렌즈와 필터 그리고 C.C.D chip이 부착되는 몸체 부분과 아날로그 회로부분이 분리되어있어 몸체 부분이 소형이기 때문에 용접토치와 함께 움직이기 적합한 구조로 되어 있다. 디지털라이저에 저장된 영상정보는 IBM-PC AT의 확장용 슬롯(extension slot)에 부착한 인터페이스 카드(interface card)를 통하여 컴퓨터로 이동(transfer)되며, 컴퓨터는 정보처리 알고리즘(data processing algorithm)에 의하여 위의 정보로부터 용접 개선변수를

계산한다. 용접토치를 구동하기위한 매니플레이터는 2차원의 X-Y 테이블로 구성되어 있으며, DC 서보모터와 구동용의 서보앰프(servo amp.) 및 위치센서로 로타리 엔코더(rotary encoder)가 부착되어 있다. 알고리즘에 의하여 용접토치의 이동 위치가 결정되면 컴퓨터의 확장 슬롯에 부착된 2 채널의 D/A 변환기(digital to analog converter)를 통하여 DC 모터 구동용 서보 앰프에 구동신호를 발생한다. 토치의 이동변위는 모터의 구동축에 부착된 로타리 엔코더 및 엔코더 카운터(encoder counter)에 의하여 계수되어 컴퓨터로 전달되어 변위신호로 환산된다.

### 3. 영상정보처리(image processing)

본 연구를 수행하기 위한 가정 및 조건은 다음과 같다.

- (1) 용접중 결합의 형태(types of joint)는 변하지 않는다.
- (2) 용접선의 폭은 입체광의 최대길이보다 작으며, 용접선은 항상 입체광내에 존재한다.
- (3) 3차원 용접선은 모든 방향에 대하여 연속적이다.
- (4) 용접 모재가 직각 맞대기 저합(square butt joint type)일 경우 두 모재사이에 시스템의 분해능보다 큰 간격이 존재한다.

용접선 영상의 실시간 처리에 의하여 구해지는 정보는 용접 토치가 위치해야할 용접선상의 좌표, 센서와 용접선의 상대거리 및 각도(Fig. 8), 개선의 형상, 결합의 형태(Fig. 3)등을 들수있다. 이러한 용접 개선변수를 계산하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

#### 3. 1. 영상정보처리

디지털라이저(digitizer)로부터 얻어진 영상정보는 레이저의 반사광에 의한 개선의 정보 뿐만 아니라 다른 부분의 정보도 포함하고 있으므로 이러한 많은 정보로부터 필요로하는 개선의 정보를 분리해내야 한다. 필요한 정보만을 분리하는 방법에는 첫째 다치값을 이치값(binary data)화하는 방법, 둘째 영상정보를 칸(column)으로 검색하여 구하는 방법이 있다. 두가지 방법중에서 첫번째 방법은 주변의 조명상태가 달라지면 문턱값(threshol-

d)이 변해야 하므로 아크광에 의한 조명변화가 심하게 나타나는 곳에는 좋지않은 방법이다. 그러므로 본 연구에서는 영상정보를 간단위로 검색하여 다치값이 가장 큰 위치를 레이저빔에 의한 반사광의 영상으로 간주한다. 이러한 방법을 사용하여 조명조건 및 시편의 조건 변화에 따른 반사광의 강도가 변화한다 할지라도 개선의 정확한 위치를 찾을 수 있었다.

3.2. 결합의 형태

용접을 수행함에 있어서 용접 모재의 형상이나 결합의 형태는 토치의 용접 자세를 결정하는 중요한 요소가 되며, 토치의 용접 자세에 따라 용접 모재의 용착 부위 및 기하학적 형상이 달라진다. 따라서 기하학적 형상을 원하는 모양으로 하기 위해서는 결합의 형태를 판별하여 토치의 자세를 바르게할 필요가 있다. Fig. 3은 결합의 형태에 따른 용접방향, 측정방향 및 영상으로 표현된 개선의 모습을 도시한 것이다. Fig. 8로부터, 결합의 형태는 영상 정보로부터 얻어진 2차원 개선의 정보를 개선이 시작되지 않은 양쪽 가장자리의 영상 정보로부터 각각 2점과 3점까지의 정보를 휴 변환(Hough transform)하여 구하였다. 휴 변환은 다음과 같다. 영상좌표상에 존재하는 직선의 방정식을

$$y = ax + b \tag{3.1}$$

로 하면, a, b는 각각 기울기 및 절편이고 x, y

Joint	Image	Sensing Direction	Welding Direction
Corner			
Lap			
Butt			
Edge			

Fig. 3 Image, sensing and welding direction

는 영상좌표이다.

식 (3, 1)을 변수 영역으로 표시하면

$$b = -xa + y \tag{3.2}$$

로 되며, 영상정보상에서 구한(x, y)를 식(3.2)에 대입하여 a, b를 구하는 방법이다.

3.3. 동적 윈도우(dynamic window)

용접 개선변수 측정을 위한 시각 시스템에서는 용접토치에 부착된 카메라의 움직임으로 인하여 용접선과 카메라는 상대운동을 일으키게 된다. 이로 인하여 카메라에 맺히는 개선의 위치 및 크기는 변화하게 되며, 카메라에 맺히는 개선의 위치 및 크기가 달라지면 디지털처로부터 컴퓨터로 읽어오는 영상정보의 위치 및 크기가 달라져야한다. 이러한 변화에 적응하기 위하여 본 연구에서는 개선의 시작점 및 끝점을 찾는 알고리즘을 사용하여 윈도우상에서 정확한 개선의 위치를 파악하고 다음에 읽어들이는 영상정보의 위치 및 크기를 지정하도록 하였다. 이러한 알고리즘에 위하여 디지털처의 컴퓨터로 전달하는 영상정보의 양이 작아지며, 또한 개선의 위치 및 각도, 면적등의 용접 개선변수를 계산하기 위하여 소요되는 시간을 감소시킬 수 있었다. 개선의 시작 및 끝점을 찾는 방법은 부분 연속 선형근사 알고리즘(piecewise linear approximation algorithm)<sup>12)</sup>을 사용했다. 이 알고리즘은 영상 좌표에 존재하는 연속되는 레이저 반사광의 위치 정보에 대하여 각 점들간의 상호 관계에 의하여 부분 선형화(piecewise linearize)하게 된다. 이 알고리즘을 설명하면 Fig. 4로부터, 시작점에서 처음 3개의 점을 취하여 처음과 마지막 점을 연결하는 4각형의 마스크(mask)를 씌우고 중간점에 2번째 점이 마스크 밖에 있으면 2번째 점은 새로운 직선이 시작되는 점(knot point)이 된다. 그러면 다시 2번째와 4번째점을 연결하고 3번째점이 마스크 밖에 있는지를 판정하여 내부에 존재할 경우, 마지막 점을 4번째점에서 5번째 점으로 이동시킨후 2번째와 5번째점을 중심으로 마스크를 씌우고 4번째점을 계산하는 방법이다. 이러한 연속되는 점들간의 거리를 계산하면 Fig. 5로부터

$$Db = |(y - y') \cdot \cos W| \tag{3.3}$$

이므로 (3.3)을 다시쓰면

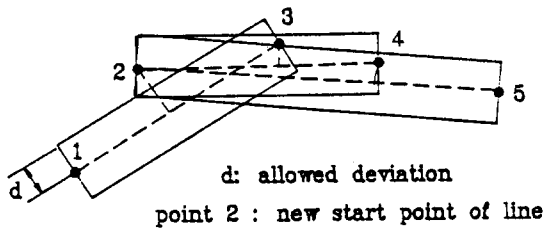


Fig. 4 The start point of a groove

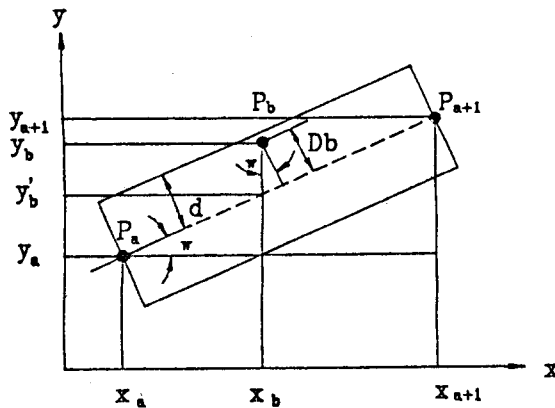


Fig. 5 The calculation of  $D_b$  using an approximation algorithm

$$D_b = \left| \frac{(y_b - (\Delta y / \Delta x)(x_b - x_a) - y_a) \cdot \Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \right| \quad (3.4)$$

여기서  $\Delta x = (X_{a+1} - X_a)$ ,  $\Delta y = (Y_{a+1} - Y_a)$

위의 식(3.4)에서 구한  $D_b$ 와 허용거리  $d$ 를 비교하여  $D_b$ 가 큰 경우 그점은 새로운 직선이 시작되는 점이 된다. 이러한 알고리즘을 연속되는 레이저 반사광의 영상에 왼쪽으로부터 적용하여 처음으로 계산되는 꺾어지는 점이 개선이 시작되는 위치가 된다. 왼쪽이 찾아진 후에는 다시 오른쪽에서 왼쪽을 향해 이 알고리즘을 적용하여 개선의 오른쪽 시작점을 찾아낸다.

이와 같은 방법에 의하여 개선의 시작 및 끝점이 구해지면 디지털이저로부터 다음에 받아 들이게 될 영상 정보의 위치 및 크기를 결정할 수 있게 되며, 이로 인하여 필요없는 정보의 획득 및 처리를 위하여 소비되는 시간이 짧아진다.

### 3.4. 3차원 공간 좌표의 계산

본 연구에서는 입체광을 용접 모재에 투사하고

그 반사광을 C.C.D 카메라로 받아들여 용접 개선 변수를 측정하고 있다. 카메라로 부터 받아들여진 영상 데이터는 2차원 정보이며 이로부터 3차원인 용접 개선변수를 계산하기 위해서는 추가적인 정보를 필요로 한다. 여기서 필요로하는 추가적인 정보는 원통형 렌즈를 사용하여 얻어진 광선면의 방정식(equation of light plane)에 의하여 구해진다. Fig. 6으로부터, 광선면의 방정식을 World 좌표계로 나타내면

$$Y_c = C_1 + C_2 \cdot Z_c \quad (3.5)$$

가 된다. 여기서  $C_1 = y_o + Z_o \cdot \tan 30^\circ$ ,  $C_2 = -\tan 30^\circ$ 이다.

Fig. 7의 카메라 모델로부터

$$X_c = \frac{x}{\lambda} \cdot (\lambda - Z_c) \quad (3.6)$$

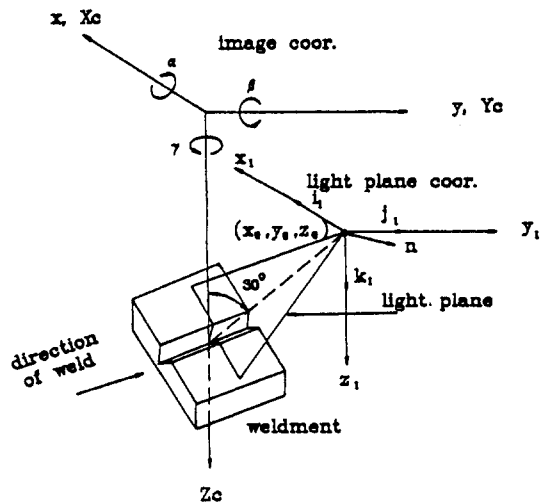


Fig. 6 The image and light plane coordinates

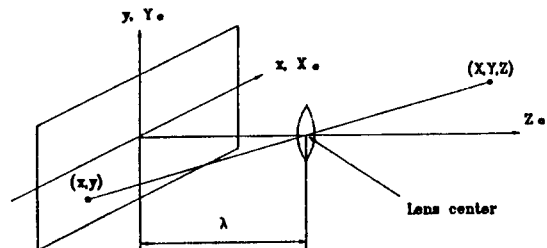


Fig. 7 Basic model of the image process

$$Y_c = \frac{y}{\lambda} \cdot (\lambda - Z_c) \quad (3.7)$$

이고 (3.5), (3.6), (3.7)식으로부터 영상 좌표 (image coordinate)  $x, y$ 와 World 좌표계  $X_c, Y_c, Z_c$ 와의 관계는

$$X_c = \frac{x(c_1 + c_2\lambda)}{c_2\lambda + y} \quad (3.8)$$

$$Y_c = \frac{y(c_1 + c_2\lambda)}{c_2\lambda + y} \quad (3.9)$$

$$Z_c = \frac{\lambda(y - c_1)}{c_2\lambda + y} \quad (3.10)$$

로 구해진다. 위에서 구해진 (3.8), (3.9), (3.10)식에 의하여 2차원 영상 좌표인  $(x, y)$ 가 3차원인 개선(groove)의 위치  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 가 계산된다.

### 3.5. 용접 개선변수의 계산

영상 정보로부터 구해진 2차원 개선의 정보  $(x, y)$ 는 (3.8), (3.9), (3.10)식에 의하여 카메라에 대한 이동 좌표계(moving coordinate)의 3차원 정보인  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 로 변환된다. 이러한 방법으로 변환된 3차원 개선의 정보는 개선에 대한 모든 정보를 포함하고 있으므로 이를 이용하여 모든 용접 개선변수를 계산한다. 개선의 면적은 World좌표계의 연속되는 점들을 수치적으로 적분하여 구한다. Fig.8은 용접시편에서 반사되어 3차원 공간상에 나타난 입체광의 영상을 X, Y, Z축의 각 방향으로 투영시켜 도시한 것이다. 시편의 각도

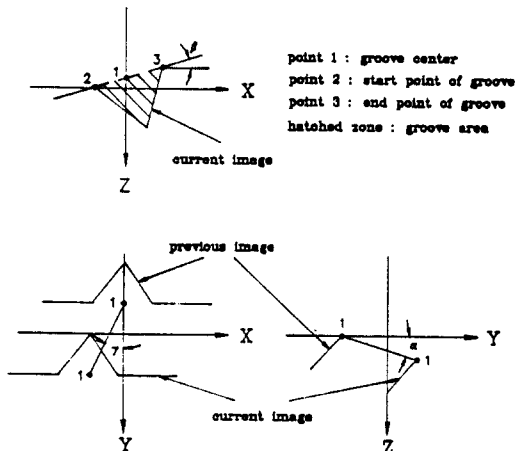


Fig. 8 The groove shape and groove parameter

$\alpha, \beta, \gamma$ 는 각각 X, Y, Z축을 중심으로 회전한 각도를 의미하며, Fig.9의 용접 방향을 기준으로  $\alpha$ 는 피치각(pitch angle),  $\beta$ 는 롤각(roll angle),  $\gamma$ 는 요각(yaw angle)을 나타낸다. Fig.8에 나타난 각도의 방향은 Fig.9에서 용접 방향을 기준으로  $\alpha$ 는 내리막 경사,  $\beta$ 는 왼쪽경사,  $\gamma$ 는 용접선의 진행방향이 오른쪽으로 벗어나고 있음을 도시한 것이다.

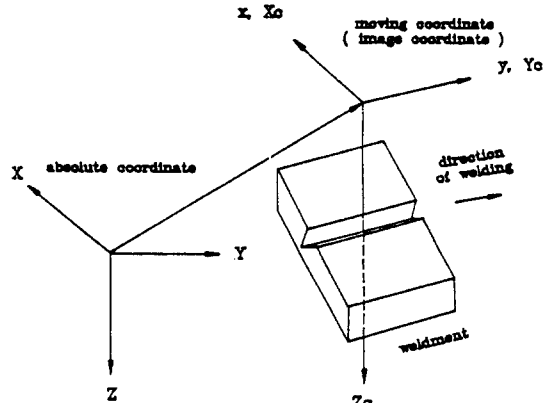


Fig. 9 The absolute coordinate and the moving coordinate

## 4. 용접 개선변수 측정실험

### 4.1. 센서의 성능실험

센서의 성능을 평가하기 위해서는 카메라를 장치하여 고정시키기 위한 고정치구와 용접시편과 카메라를 상대운동 시킬 수 있는 매니플레이터가 필요하다. 이 실험을 위하여 카메라를 로봇트 팔에 부착하여 고정시키고 정반위에 설치된 정밀 X-Y 테이블위에 용접시편을 설치한 후 시편에 대하여 카메라가 상대운동을 일으키도록 한 후 이동한 변화량과 센서로부터 얻어진 결과값을 비교 및 평가하였다.

#### 4.1.1. 결합의 형태(types of joint)

결합의 형태를 판별하기 위하여 휴 변환을 이용하여 얻어진 기울기 및 절편의 정보를 Table 1에 나타내었다. 맞대기 결합(butt joint)의 경우  $a_1, a_2$  가 '0'에 가까운 값이고  $b_1, b_2$ 의 차이가 20 이내임을 알 수 있다. 겹치기 결합의 경우  $a_1, a_2$

**Table 1 Hough transformed data**

Types of joint	Slope		Intersection	
	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$
Butt joint	-0.063	-0.093	40	32
T or Corner	-0.797	0.641	32	0
Lap joint	-0.690	-0.563	32	68

가 맞대기 결합에 비하여 큰값이고 부호가 같으며  $b_1$ ,  $b_2$ 의 차이가 20 이상임을 나타낸다. corner 또는 T 결합의 경우  $a_1$ ,  $a_2$ 의 부호가 반대이고,  $b_1$ ,  $b_2$ 의 차이가 20 이상임을 알 수 있다. 이상의 판단기준에 의하여 결합형태를 판정한 결과 100%의 성공률을 얻었다.

#### 4.1.2. 센서의 정밀도

센서의 정밀도를 측정하기 위하여 주어진 개선의 형태에 대한 위치정보를 계산하여 10회씩 측정된 결과를 Table 4에 나타내었다. 각각에 대하여 살펴보면 주어진 X의 위치 '0'mm에 대하여 측정된 평균은 0.35mm이고 표준편차는 0.11이다. Y의 위치는 '5'mm에 대하여 측정평균은 5.21mm이고 표준편차는 0.04이며 Z는 -10mm에 대하여 -10.35mm의 측정평균을 얻었다.

이러한 결과에 의하여 용접선에 대한 3차원 공간상의 위치는 매우 정밀하게 측정할 수 있음을 알 수 있고 또한 표준편차의 결과에 의하면 반복능(repeatability) 역시 우수함을 알 수 있다. 측정된 각도에 대하여 살펴보면  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  모두 주어진 값이 '0'일때 각각 0.02, -2.15, -0.23이 구해졌으며 표준편차는 각각 1.28, 0.57, 1.59가 구해졌다. 측정된 용접선의 각도 역시 높은 정밀도로 측정할 수 있음을 알 수 있다.

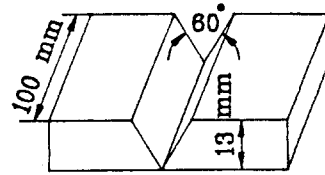
#### 4.1.3. 영상처리 소요 시간

두께가 5mm이고 간격이 2mm인 맞대기 결합의 용접선의 용접 개선변수를 측정하기 위하여 소요되는 시간은 300ms 이었으며, 두께 15mm인 60° V 개선의 용접 개선변수를 측정하는데 소요되는 시간은 450ms 이었다. 이 두 결과로부터 아크용접의 용접속도가 5-10 mm/s인 점을 고려하면 용접공정의 속도에 대하여 실시간화하기에 충분한 시간으로 판단된다.

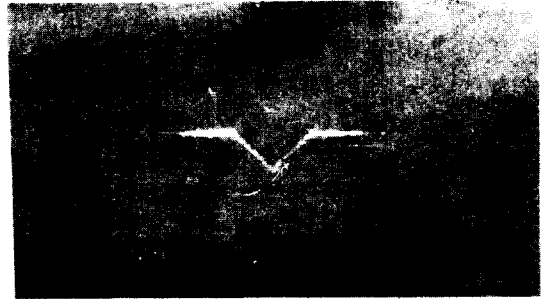
#### 4.1.4. 2차원 형상과 개선(groove)

Fig. 10의 (a)그림은 시편의 크기 및 형상을 나

타낸 것이며, (b)그림은 (a)그림의 시편을 카메라를 사용하여 측정된 가공전 데이터(raw data)이다. Fig. 11의 (a)그림은 raw 데이터를 처리하여 2차원 개선의 정보를 추출하여 나타낸 것이며, (b)그림은 (a)그림의 데이터를 처리하여 3차원 개선의 정보를 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11은 시편으로부터 3차원 개선의 정보를 얻어내기까지의 과정을 순서적으로 나타낸 것으로 60°V 개선된 맞대기 결합을 나타낸 것이다.



(a) Dimension of specimen

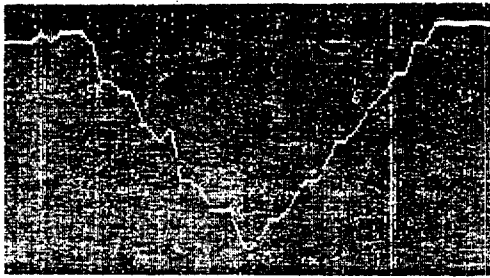


(b) photograph of raw image

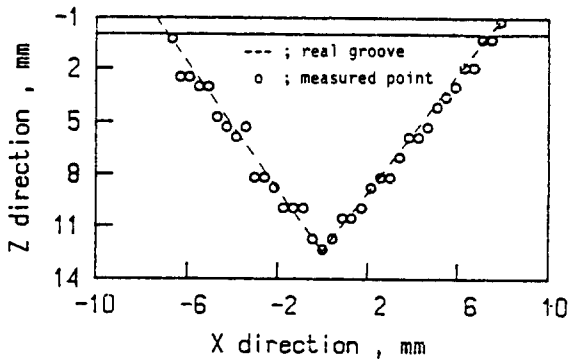
Fig. 10 The specimen and raw image for a 60°V grooved butt joint

#### 4.2. 개선의 면적(groove area)

Table 2는 동일한 개선에 의하여 카메라로부터 거리를 달리하여 개선의 면적을 11회씩 측정된 결과이다. Z=22.5mm는 센서가 측정할 수 있는 가장 가까운 거리에 있는 시편이며 Z=235.5mm는 정상상태(normal state)에서의 시편의 거리이다. Z=245.5mm인 경우는 정상 상태에서 10mm증가한 경우의 실험 결과이다. 개선의 면적은 가공된 시편의 기하학적 형상에 의하여 97.5mm<sup>2</sup>로 일정하다. 측정된 3가지 모두의 경우 주어진 면적 97.5mm<sup>2</sup>보다 큰 값이나 오차의 정도가 3% 이내이며 3가지 경우에 대하여 가장 큰 표준편차가 2.86



(a) processed image data



(b) processed groove shape & dimension

Fig. 11 Image data and processed result for a 60°V grooved butt joint

Table 2 Groove area of a 60°V grooved butt joint with varying Z-axis position

Z-axis position (mm)	True area (mm <sup>2</sup> )	Measured mean (mm <sup>2</sup> )	Standard deviation (σ <sub>x</sub> )
225.5	97.5	98.7	1.33
235.5	97.5	99.2	2.86
245.5	97.5	100.4	1.20

으로 매우 만족할 만한 결과임을 알 수 있다. 또한 시편까지의 거리 Z가 증가함에 따라 면적이 증가하는 것은 거리 변화에 따른 렌즈 초점거리의 변화에 의한 것으로 판단된다. Table 3은 각각 다른 종류의 개선에 대하여 나타낸 결과이다. 직각홈 맞대기 결합의 경우 주어진 면적 32mm<sup>2</sup>에 대하여 평균 면적은 30.06mm<sup>2</sup>가 얻어졌으며 표준편차가 3.6이었다. 60°V 개선의 경우 주어진 면적 97.5mm<sup>2</sup>에 대하여 평균 면적은 97.7mm<sup>2</sup>를 얻었고 표준편차는 5.34이었다. 한쪽 J홈 맞대기 결합의 경우 주어진 면적 127.3mm<sup>2</sup>에 대하여

Table 3 Groove area of various groove shapes

Groove type	True area (mm <sup>2</sup> )	Measured mean (mm <sup>2</sup> )	Standard deviation (σ <sub>x</sub> )
2mm gap square butt joint	32	30.06	3.63
60°V groove butt joint	97.5	97.7	5.34
single J butt joint	127	133.4	5.98

Table 4 Accuracy of the sensor

Parameter	True value	Measured mean	Standard deviation
X(mm)	0	0.35	0.11
Y(mm)	5	5.21	0.04
Z(mm)	-10	-10.35	0.07
α(°)	0	0.02	1.28
β(°)	0	-2.15	0.57
γ(°)	0	-0.23	1.59

133.42mm<sup>2</sup>를 얻었고 표준편차는 5.98을 얻었다. 이상의 결과로부터 알 수 있듯이 여러 종류의 개선의 형상에 대해서 뿐만 아니라 시편과의 거리 Z가 변화할 때도 정확하게 면적을 계산할 수 있음을 나타낸다.

### 4.3. 용접선 측정실험

본 실험은 센서에 대한 용접선의 상대거리를 측정하기 위한 실험으로 Fig. 10(a)에 나타난 시편을 사용하여 실험하였다. Fig. 12는 용접선을 높이 방향으로 2.7mm씩 이동하면서 측정된 결과이다. 그림으로부터, 개선의 중심이 Z방향으로 약 2.7mm씩 이동하고 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 동일한 시편에 대하여 용접선의 높이를 일정하게 하고 X-Y면에 대하여 1/10만큼 기울여 실험한 결과이다. 그림 (a)로부터, 높이 방향으로의 개선의 중심점은 1 분해능 이내에서 변화하고 있음을 알 수 있으며, 그림 (b)에서는 개선의 중심이 Y방향으로 50mm변화할때 X방향으로 5mm가 변하여 기울기는 1/10이 된다. Fig. 14역시 동일한 시편에 대하여 용접선의 높이를 변화시키면서 Y-X면에 대해서는 Y축에 평행이되게 실험한 결과이다. X축 방향으로서의 개선 중심의 변화는 1 분



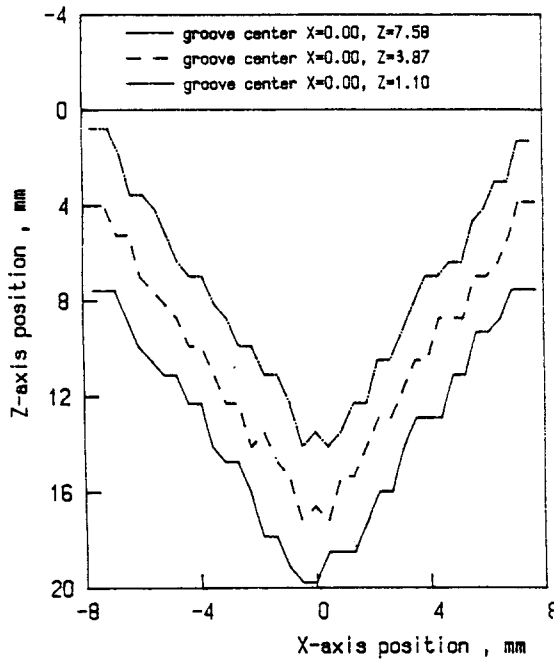


Fig. 12 Processed groove shape and position of a 60° V grooved butt joint for various Z-axis position of groove centers

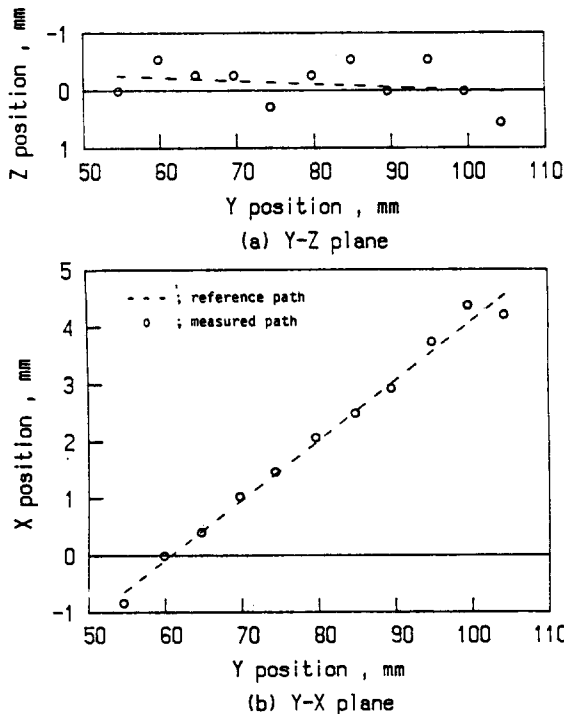


Fig. 13 Position of the groove center of a 60° V grooved butt joint for various X-axis seam positions

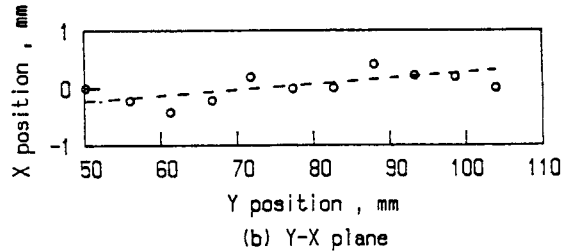
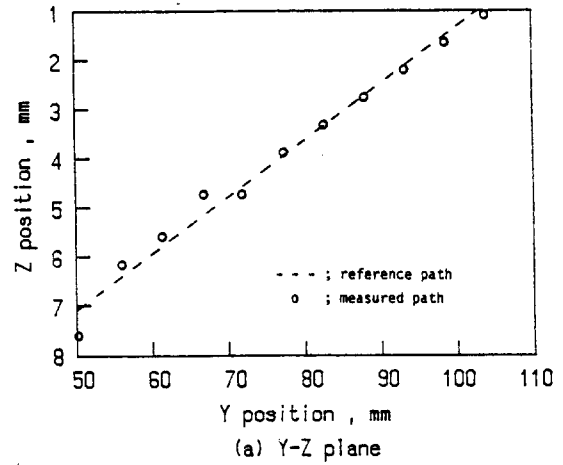


Fig. 14 Position of the groove center of a 60° V grooved butt joint for various Z-axis seam positions

해능이내이고 Y-Z면의 기울기는 1.2/10이며, 이 결과는 주어진 변화량인 1/10보다 크게 측정되었다. 이러한 원인은 Z방향으로의 분해능이 다른방향에 비하여 상대적으로 좋지 않기 때문에 얻어지는 결과로 판단된다.

### 5. 용접선 추적(seam tracking)

#### 5.1. 용접 토치제어(weld torch control)

C.C.D 카메라는 용접토치에 부착되어 토치와 함께 용접선의 위치를 따라가게 된다. 따라서 카메라에 의한 영상 정보에서 구해진 용접선에 대한 3차원 공간 좌표는 원점이 카메라에 있는 이동 좌표계에 대한 것이다.

이러한 이유로 용접토치를 용접선에 위치시키기 위해서는 이동 좌표계에 대하여 구해진 3차원 공간 좌표를 절대 좌표계로 변환할 필요가 있다. 이러한 관계를 Fig.9에 나타내었다. 위의 방법으로 구해진 용접선에 대한 절대 좌표계는 용접 토치를

제어하기 위한 위치정보로 쓰이게된다. 토치제어는 변화 이득 비례제어(variable gain proportional control) 알고리즘을 사용하였으며 이를 설명하면 다음과 같다<sup>13)</sup>. 카메라로부터 구해진 연속되는 용접선의 좌표를  $\vec{P}_s(X(i), Y(i))$ 라 하고, 현재 토치가 위치하고 있는 점을  $\vec{P}_t(X(j), Y(j))$ 라 하자. 여기서  $i, j$ 는 연속되는 점들의 순서를 나타낸다.

토치를  $\vec{P}_t(X(j), Y(j))$ 로 부터  $\vec{P}_s(X(j+1), Y(j+1))$ 점으로 이동시키기 위해서는

$$\vec{E}(X(j), Y(j)) = \vec{P}_s(X(j+1), Y(j+1)) - \vec{P}_t(X(j), Y(j)) \quad (5.1)$$

만큼의 거리를 다음 샘플시간(sampling period)까지 이동시켜야 한다. 여기서  $\vec{E}(X(j), Y(j))$ 는 거리오차이다. 서보 앰프로 내려지는 속도지령은

$$\vec{V}_c(X(j), Y(j)) = K_p \cdot \vec{E}(X(j), Y(j)) / \Delta t \quad (5.2)$$

이며 여기서  $\Delta t$ 는 샘플시간이다. 위의 식에서  $K_p$ 가 일정할 경우  $\vec{E}(X(j), Y(j))$ 의 변화가 직접 속도 변화에 나타난다. 그러나 용접중에 속도변화가 나타나면, 형성된 용접비드의 형상이 달라지므로 바람직스럽지 못하다. 따라서 용접 토치의 속

도  $V_t$ 를 원하는 용접속도인  $V_d$ 로 유지할 필요가 있다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는  $\Delta t$ 가 일정하므로 이득  $K_p$ 가 변해야 하며 반대로

$$V_c(X(j), Y(j)) = V_t = \text{constant} \quad (5.3)$$

이어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 경우  $V_t = V_d$ 가 된다. 그러므로

$$K_p = V_d \cdot \Delta t / \vec{E}(X(j), Y(j)) \quad (5.4)$$

에 의하여  $K_p$ 를 구하고, 여기서 구한  $K_p$ 를 (5.2)식에 대입하여 일정한 속도 지령을 내리게 된다.

### 5.2. 용접선 추적실험

Fig. 15는 아크를 켜진 상태에서 용접선의 추적 실험을 수행한 경우이다. 용접조건은 2mm 간격, 직각 맞대기 결합, 용접속도 5mm/sec, 샘플시간 0.5초이다. 그림에서 알 수 있듯이 Y축의 위치가 180mm, 270mm인 위치에서 용접선의 방향이 급격하게 변화하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 16에서 알 수 있듯이 이 구간에서 용접선은 직선이었으므로 이러한 현상은 아크에 의한 스패터의 영향으로 용접선 측정오차가 발생한 것으로 판단된다. 이 실험에서 사용된 시편의 용접전과 용접

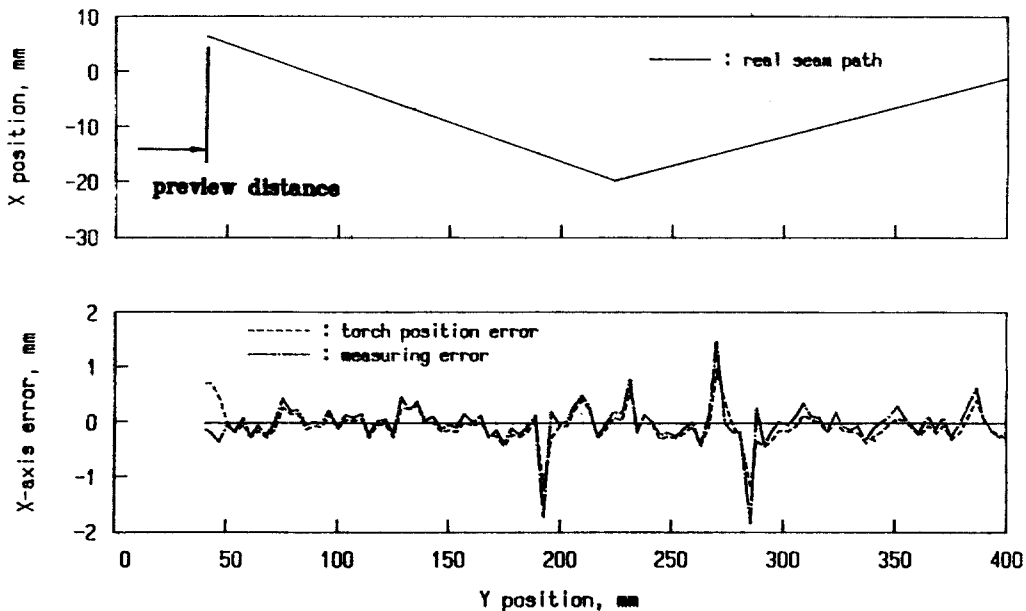


Fig. 15 Result of butt joint seam tracking for a 2mm root gap,  $V_t=5$  mm/s,  $t=0.5s$

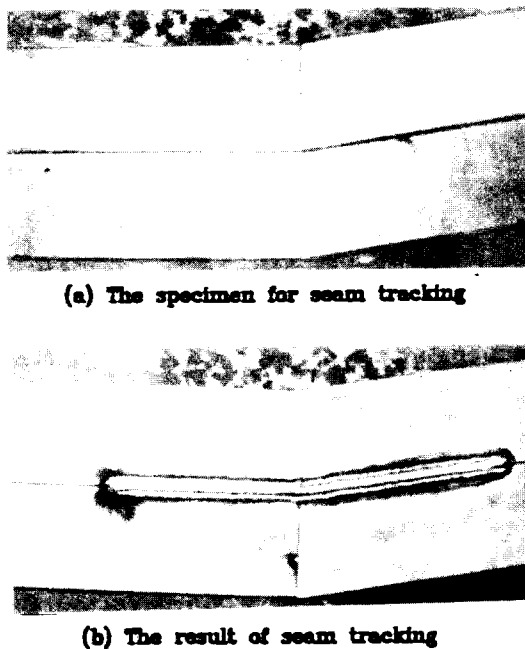


Fig. 16 Photographs of the specimen for seam tracking

후의 상태를 Fig.16에 나타내었다. Fig.16에서 알 수 있듯이 용접후 용접면이 매우 깨끗함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 자동아크 용접에서 토치에 부착된 입체광원과 카메라를 이용하여 용접 개선변수를 측정하고 이를 용접 공정에 적용할 수 있는 용접 개선변수 측정 센서를 개발하였다.

연구 결과 다음과 같은 결론이 가능하였다.

(1) 영상좌표상에서 변화하는 개선의 정보를 추정하면서 최소한의 정보만을 획득하고 처리할 수 있듯이 한 개선의 시작 및 끝점을 찾는 알고리즘을 통하여 영상정보로부터 짧은 시간에 용접 개선변수의 정확한 측정이 가능하였다.

(2) 입체광원에 의한 개선부와 영상카메라의 기하학적 관계식을 사용함으로써 카메라 교정(calibration)을 하지 않고서도 영상정보를 짧은 시간에 매우 정확하게 3차원 공간정보로 변환할 수 있었으며 그 정밀도는 X, Y, Z 방향에 대하여 1 pixel이내로 나타났다.

(3) 실험 조건의 변화에 무관하게 정확한 용접 개선변수의 측정이 가능하였다.

(4) 아크를 현 상태에서 용접선 추적실험을 수행한 결과 정확한 용접선의 추적과 더불어 깨끗한 용접면을 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 과학재단의 목적기초연구 사업의 일환으로 연구비를 지원받아 수행한 연구 결과이다.

## 참고문헌

- 1) D.E. Hardt, et, al.: Improvement of reliavility of welding by inprocess sensing and control, M.I.T second progress report, March, (1980)
- 2) D.A. Dornfeld, H. Tomizuka, and G. Langari: Modeling and adaptive control of arc welding processes, Measurement and control for batch manufacturing, ASME, (1984), pp. 53-64
- 3) H. Nomura, Y. Sugitani, et, al.: The development of automatic seam tracking with arc sensor, Nippon kokan technical report, No.37, (1983), pp. 42-50
- 4) U. Tsach, T.A. Sochor and Y. Raina: Utilizing the arc of multiple electrodes to sense the torch/seam relative positioning, ASME, Sensors for manufacturing, PED-Vol. 26, pp. 139-154
- 5) Takao Bamba, et, al.: Welding sensor uses structured light and 2D photocell, Sensor review, January, (1982), pp. 26-29
- 6) W.F. Clocksin, et, al.: An implementation of model-based visual feedback for robot arc welding of thin sheet steel, The International Journal of Robotics Research, Vol. 4, No. 1, Spring (1985), pp. 45-48
- 7) N. Torii,: The 3-dimensional weld seam tracking by MetaTorch, SICIR-'87, pp. 283-288
- 8) R.W. Richardson, et, al.: Coaxial arc weld

- pool viewing for process monitoring and control, *Welding journal*, Vol. 63, No. 3, (1984), pp. 43-50
- 9) M.J. Carroll and D.E. Powers: Automatic joint tracking for CNC - programmed electron beam welding, *Welding journal*, August, (1985), pp. 34-38
  - 10) E.L. Estochen, et, al. : Application of acoustic sensors to robotic seam tracking, *IEEE Tran. on industrial electronics*, Vol. IE -31, August (1984), pp. 219-224
  - 11) M.P. Howarth and M.F. Guyote: Eddy current and ultrasonic sensors for robot arc welding, *Sensor review*, April, (1983), pp. 90-93
  - 12) J. Roberge: A data reduction algorithm for planar curves, *computer visions, graphics and image processing* 29, (1985), pp. 168-195
  - 13) 김호학 : 아크 용접 공정에서 용접선의 실시간 추적을 위한 시각 시스템, 한국과학기술원, (1989), 석사논문