

구조화된 직선빔을 이용한 구조과 전기 저항 용접파이프의 비드 형상 측정에 관한 연구

°고국원*, 김종형*, 조형석*, 공원일**
*한국과학기술원 정밀공학과, **부산파이프주식회사

A Study on Based Shape Monitoring in HERW Pipe Production by using Structured Light Beam

°Kuk Won Ko*, Jong Hyung Kim*, Hyung Suck Cho*, Won Il Kong**
*Department of Precision Engineering and Mechatronics, KAIST, **Pusan Steel Pipe CorpM

ABSTRACT

The bead shape in high frequency electric resistance (HER) pipe welding gives important information on judging current welding state. In most manufacturing process, the heat input is controlled by skilled operators observing color and bead shape. We proposed the bead shape monitoring system in HERW pipe process by using structured light beam. We reconstructe 3-D shape of bead from the measured data, and compare this shape with real 3-D shape obtained by coordinate-measuring machine. This experiment resluts show that the proposed system can monitor the bead shape with good accuracy.

1. 서 론

강관을 생산하는 데 응용되는 용접방법에서 고주파 전기 저항용접은 다른 용접 방법에 비하여 생산성을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 강관의 제조 과정은 크게 핫코일의 절단, 대강(kelp)의 제조, 대강의 성형, 성형된 대강의 용접, 검사 및 후처리 과정으로 나뉜다. 이들 공정 중 성형된 대강을 고주파 전기 저항 용접법으로 제조하는 용접 공정은 용접 강관의 품질과 생산성을 좌우하는 가장 중요한 공정이다.

그러나, 현재 강관의 용접조건은 주로 숙련된 작업자에 의해 용융부의 화색이나, 용접 비드의 형상을 육안으로 관찰하여 손으로 입열량을 조절하여 이루어 지고 있다. 이러한 작업자에 의한 열입열량의 조절은 작업자의 주관적인 판단에 따르므로 고 품질, 고 신뢰성의 강관을 생산하기가 힘들다. 또한, 고 부가가치인 특수용 강관(송유관,유정용 강관 등)의 생산에는 용접부의 품질 요구 조건이 까다로 워 수작업에 의한 생산 방식은 그 요구 조건을 만족시키기 가 힘들고 생산 속도도 떨어져 국제시장에서 경쟁력이 떨어지고 있다. 따라서 그 생산 공정의 핵심기술인 고주파 전기 저항 용접 기술을 연구하여 최적의 용접 조건에서 용접이 이루어 질 수 있도록 입열을 조절하는 자동제어 장치의 개발이 필수적이다.

이러한 연구와 입열 자동제어 장치의 개발은 주로 일본 강관 회사들에 의해 이루어 지고 있다. 신일본 제철의 경우 대강의 두께, 용접속도, contact tip과 용접점과의 거리, squeeze-out양, 용접 개시 시간, impeader core의 온도, metal flow 각도등의 용접 변수들이 고주파 전기 저항 용접에 미치는 영향에 대한 연구를 하기 시작하였다.¹⁻⁵ 또 고주파 용접부의 품질을 나타내는 변수를 가려내기 위해서 고주파 전기저항 용접현상에 대한 기초 연구를 시작 하였다. 그 결과 그들은 고주파 전기 저항 용접을 세가지 특징적인 용접현상으로 분류할 수 있음을 발견하고, 이들을 각 제1종, 제 2종 및 제3종 용접현상으로 칭하였다.¹² 각 용접현상때 생기는 단점점(V-convergencency point)의 위치변화의 주기를 monitoring하여 용접입열을 제어하는 방법을 제안했으나¹⁶⁻⁷, noise 제거 방법상의 문제로 더 이상 발전이 없었다. 다음으로 개발된 방법은 용접전류 및 전압을 monitoring하여 용접 입열을 조절하는 장치를 개발하였다⁸.

일본강관(주)의 경우 대부분의 현장 작업자가 용접시 절삭된 비드의 형태를 관찰하여 입열량을 조절한다는 점에 착안하여 비드의 형상을 on-line에서 image analyzer 를 이용하여 이를 관찰하고 이 정보를 이용하여 입열량을 자동으로 제어하는 장치를 개발하였다⁹. 이는 비드의 높이, 폭 등을 계산하여 plate 전압과의 상관관계를 polynomial 식의 형태로 나타낸 다음 이 식을 이용하여 입열량을 제어 하였다. 그러나, 이 식은 동일 판종에서만 성립하고, 또 이 식들의 각 계수들이 용접속도, 재료의 두께등에 영향을 받는다. 따라서 이 실험식을 구하기 위해서는 각 판종에 대하여 많은 실험과 결과 분석이 필요하다 는 단점을 가지고 있다.

스미모토금속의 경우 contact tip과 대강 edge사이의 온도 분포 pattern과 용접부의 편편성을 연구하였다¹⁰⁻¹¹. 그러나, 측정되는 온도가 재료의 두께, 및 용접 속도등의 용접 조건 변화에 민감하지 않아서 용접의 품질을 감시하는 변수로 사용하는데 어려움이 있다¹⁰. 이들 각 일본 회사들의 각각의 기술에 대한 구체적인 언급이 없어 이 부분에 많은 연구가 필요하다. 국내 강관 업계의 기술 현황은 전문가의 부족과 연구자금의 부족으로 초보적인 연구 만이 진행되었다. 최근 각 업체에서 입열 자동제어 장치에

관심을 보이고 있다.

고주파 전기 저항 용접기의 입열 자동 제어 장치 개발에는 공정상태 및 용접부위의 상태를 나타내는 변수의 측정이 필요하게 된다. 본 연구에서는 이들 공정변수중 하나인 비드의 단면 형상 변화를 시각 센서를 이용하여 측정하였다. 그리고 시간 센서에 의해서 측정된 결과를 비드의 3차원 측정기에 의해서 측정된 결과와 비교하였다.

2. 고주파 전기 저항 용접과 비드 형상

2.1 고주파 전기 저항용접 공정의 개요

강관을 생산하는데 사용되는 고주파 전기 저항용접 공정은 그림 1에서와 같이 성형되는 대강의 양단면에 contact tip 또는 inductance coil을 통하여 고주파를 통전하여 발생하는 열원으로 하여 모재의 양단면에 표피를 재질의 용융점까지 국부적으로 가열하는 동시에 squeeze roll로 양단면을 압착하여 접합한다. 이때 열원은 고주파 전류가 근접되어 있는 대강의 양단면을 따라 흐를 때 발생하는 표피효과(skin effect)와 근접효과(proximity effect)에 의하여 그 전류가 양단면의 표피에 집중되어 흐르게 됨에 따라서 마주보는 양 대강의 표피 부분만이 국부적으로 가열되는 현상을 이용한 것이다.

양대강의 표피부분에 용융된 금속의 대부분은 서로 다른 방향의 전류가 양 대강의 표피에 흐를 때 유도되는 전자기장의 상호작용 때문에 발생하는 전자기 압력(electromagnetic force)에 의해서 대강의 모서리(edge)밖

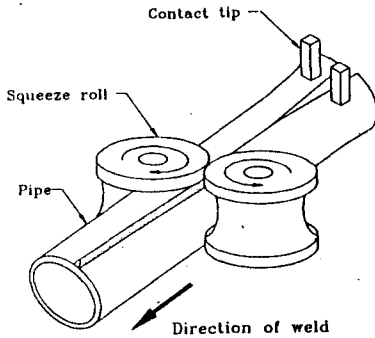


그림 1 (a) Contact type

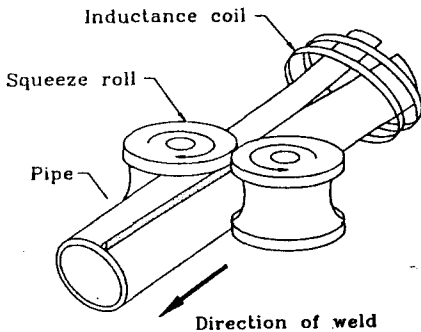


그림 1 (b) Inductance type

그림 1 고주파 전기 저항 용접 공정의 개요

으로 배출된다. 따라서 이 전자기 압력은 용융부의 산화물을 배출하여 불순물에 의한 용접부의 침입 결합(penetrator)을 방지하여 용접부의 질을 높인다.

고주파 전기 저항 용접은 재료의 두께 및 재질, 용접 속도, 성형 조건 등 여러가지 용접 조건에 따라 입열량을 적절히 변화 시켜야 우수한 품질을 얻을수가 있다. 실제 작업 현장에서는 성형조건, 재료의 두께 및 재질등의 용접 조건이 거의 변화하지 않는다. 그러므로 생산업체는 용접 속도와 입열량의 조작으로써 원하는 용접부의 질을 얻고 있다. 그러나, 용접속도는 생산량과 밀접한 관계가 있으므로 보통 입열량의 조작으로 원하는 용접부의 품질을 얻는다.

입열량에 따른 용접부 변화는 다음과 같다. 입열량이 부족할시에는 양단면의 표피가 충분히 용융되지 않거나, 압접되는 단면에 존재하고 있는 산화물들이 충분히 배출되지 못하여 냉접(cold welding)이라는 용접 결함이 발생한다. 입열량이 과다한 경우에는 배출되었던 용융 산화물이 재 유입되면서 침입결합(penetrator)이 발생하여 용접부의 기계적 성질을 저하시키게 된다. 이러한 결함은 고기능을 요구하는 라인 파이프 유정용강관 기계 구조 강관등의 무결합을 고 부가가치의 강관에 있어서는 더욱 치명적으로 작용하게 된다.

2.2 고주파 전기 저항 용접에서 입열량에 따른 용융 비드의 기하학적 형상 변화

용융부의 비드 형상은 그림 2에서 나타나듯이 비드의 폭, 최고 높이, 중앙 높이, 면적, 경사면의 기울기등 여러가지 기하학적 변수로 나타낼 수 있다. 이러한 기하학적 형상은 입열량에 따라 변화한다.

입열량이 부족할때는 비드의 중앙부에 오목한 형상이 생기고 중앙 높이는 최고 높이보다 낮다. 이 오목한 면은 실제 용접시 입열량 부족으로 대강의 모서리(edge)가 충분히 녹지 않은 상태에서 squeeze roll에 의한 압접 때문에 생긴다. 이때는 용접부의 중앙부만이 용접되어 있을 경우가 대부분이거나 냉접현상이 일어날 가능성이 많다. 이때 비드의 형상은 비드의 폭은 좁고, 경사면의 기울기는 급하다. 입열량이 적당할때는 용융금속이 용융부에 관촬이 된다. 비드 중앙부의 오목한 형상은 사라지게 된다. 열량이 과다할 경우에는 용융금속이 용융부로 부터 넘쳐 나오게 된다.따라서, 비드의 높이는 낮고 폭의 변화량이 크다.

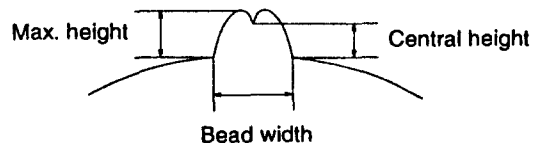


그림 2. 용융부 비드의 단면 형상

2.3. 비드 형상 측정의 어려움점

용접부의 비드면은 경면 반사의 특징을 가진다. 이러한 경면반사의 특징을 가지는 물체의 인식은 컴퓨터 비전에서 매우 어려운 문제이다. 주어진 수평부와 발광부의 위치에서 비드의 형상에 따라 인식이 불가능한 경우도 있다. 비드의 급한 경사면과 spatter의 영향으로 생긴 비드의 급격한 형상 변화에서는 불안정하고 불확실한 영상정보가 얻어지므로 비드의 단면 형상의 측정이 불가능하다. 그리고 용접후 비드의 단면이 아직 가열된 상태이고 주위 용접부에서 나오는 용접광, 냉각수의 영향, 앞에서 말한 spatter 및 용접시 발생하는 용접광이 강한 노이즈로 취급되어 영상처리에 어려움이 있다. 또 고주파에 의한 노이즈도 무시 못할 정도로 강하다. 이런 여러가지 노이즈는 실시간 처리에 큰 장애물이 되고 있다. 본 연구에서는 비드의 형상 측정을 위해 구조화된 직선 빔을 이용하였다. 비드의 크기가 작기 때문에 측정을 위해서는 비드의 크기에 비해 충분히 가는 직선빔을 이용하여야 측정 오차를 줄일 수 있다. 그러나, 가는 직선빔을 만들기 위해서는 비용이 많이 들뿐 아니라 주의의 잠광에 의해서 영향을 많이 받아 영상 처리에 어려움이 있다.

3. 비드 형상 측정

3.1 비드 형상 측정 시스템

비드의 형상 측정 시스템의 주요 구성은 그림 3에서와 같이 직선빔을 만드는 원통형 렌즈가 부착된 레이저, Band-pass 필터, 편광 필터, CCD(Charge Coupled

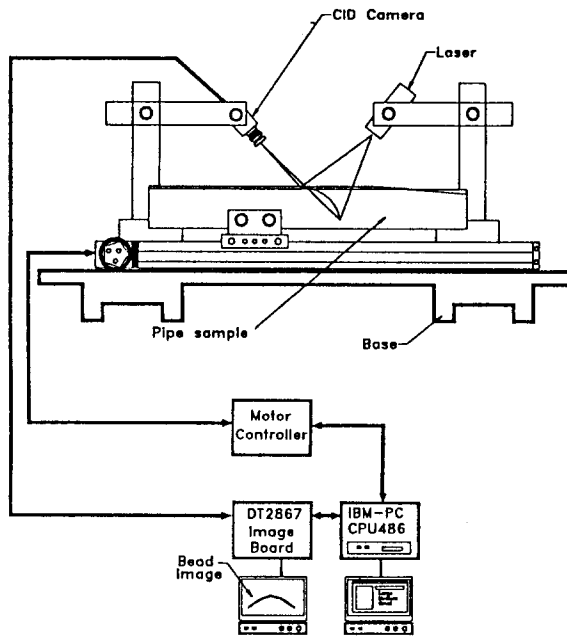


그림 3 비드 형상 측정 시스템의 구성

Device) 카메라, 영상처리 보드(Image processing board)와 486컴퓨터, 파이프 이송용 1축 Linear Module등이다. Linear Module은 실제 용접 공정에서 강관이 움직이는 역할을 하기 위해서 사용하였다. 본 연구에서는정보 처리 시간을 줄이기 위하여 이진 영상 처리(Binary image processing)가 좋은 방법이므로 배경과 구조광의 광도 차이가 명확해야한다. 또 용접 공정의 특성상 스파터 및 강한 용접광이 발생하므로 보다 강한 광원이 요구 된다. 따라서 본 연구에서는 구조화된 직선빔 발생장치가 부착되어 있는 7 mW He-Ne 레이저 발생장치를 사용하였다. 또 측정 오차를 줄이기 위하여 원통형 렌즈를 통하여 나오는 레이저 직선빔을 가는 틸새를 통과시켜 가는 직선빔을 얻을뿐 아니라 직선빔의 퍼짐(Bur)을 줄였다. 용접시 발생하는 여러가지 잠광을 실험실에서는 직접 구현할 수 없으므로 슬라이드 프로젝트를 이용하여 빛을 측정하고자 하는 비드의 표면에 주사하였다. 영상에 섞인 노이즈를 제거하기 위한 영상처리는 실시간 처리에 큰 장애물이 된다. 따라서 실시간 처리를 위해서 용접시 발생하는대부분의 노이즈 제거는 Hardware적인 방법을 이용하여 제거 하여야 한다. 본 실험에서는 레이즈 파장대만 통과하는 Band-pass 필터와 편광 필터를 이용하여 깨끗한 영상을 얻었다.

3.2 측정원리

본 연구에서는 구조화된 빛(structured light)을 사용하여 비드의 표면에 비추고 비드의 형상에 따라 변형된 빛을 C.C.D. 카메라로 받아들여 비드의 단면 형상을 구하고 있다. 카메라로부터 받아들여진 영상 데이터는 2차원 정보이며 이로부터 비드의 단면형상은 삼각법을 이용하여 얻을 수 있다^[12-13].

이러한 관계를 그림 4와 함께 설명하면 다음과 같다.

light plane에 수직(normal)한 벡터(vector)를 \vec{n} 라 하면

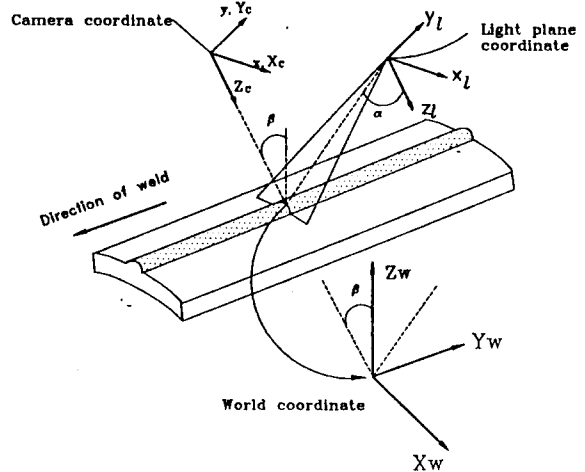


그림 4 측정부의 좌표계

$$\vec{n} = \cos \alpha \cdot \vec{i}_l + \sin \alpha \cdot \vec{k}_l \quad (3.1)$$

이고, \vec{n} 에 수직이고 (x_0, y_0, z_0) 를 지나는 면의 방정식
을

$$\vec{p} = x_l \cdot \vec{i}_l + y_l \cdot \vec{j}_l + z_l \cdot \vec{k}_l \quad (3.2)$$

로 놓고 \vec{p} 를 구하면

$$\vec{p} \cdot \vec{n} = 0$$

이므로

$$x_l \cdot \cos \alpha + z_l \cdot \sin \alpha = 0 \quad (3.3)$$

이다. light plane 좌표계를 영상 좌표계(image coordinate)로 변환(transform)하면

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \\ 1 \end{bmatrix} = [T][X_l] \quad (3.4)$$

$[X_l] = [T][X_c]$ 이므로 $[X_c] = [T^{-1}][X_l]$ 이고

$$[T^{-1}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{이므로}$$

$$\begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

이고, $y_0 = 0$ 이 되도록 light plane 좌표계가 존재하므로 (3.5)식으로 부터

$$x_l = X_c - x_0, \quad y_l = Y_c, \quad z_l = Z_c - z_0 \quad (3.6)$$

(3.6)식을 (3.3)에 대입하면

$$(X_c - x_0) \cos \alpha + (Z_c - z_0) \sin \alpha = 0$$

$$X_c = x_0 + z_0 \tan \alpha - Z_c \tan \alpha$$

$$X_c = C_1 + C_2 Z_c \quad (3.7)$$

가 된다. 여기서 $C_1 = x_0 + z_0 \cdot \tan \alpha$, $C_2 = -\tan \alpha$ 이다.

그림 5 의 카메라 모델로 부터

$$X_c = \frac{x}{\lambda} (\lambda - Z_c) \quad (3.8)$$

$$Y_c = \frac{y}{\lambda} (\lambda - Z_c) \quad (3.9)$$

이고 (3.7), (3.8), (3.9)식으로 부터 영상좌표 (image coordinate) x, y 와 카메라 좌표계 X_c, Y_c, Z_c 와

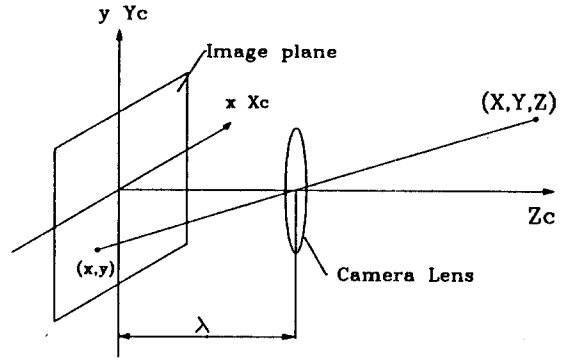


그림 5 카메라 모델

의 관계는

$$X_c = \frac{x(C_1 + C_2 \lambda)}{C_2 \lambda + x} \quad (3.10)$$

$$Y_c = \frac{y(C_1 + C_2 \lambda)}{C_2 \lambda + x} \quad (3.11)$$

$$Z_c = \frac{\lambda(x - C_1)}{C_2 \lambda + x} \quad (3.12)$$

이다. (3.10), (3.11), (3.12)식으로 부터 카메라 좌표계를 world 좌표로 변환하면

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & y_1 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

이다. (3.10), (3.11), (3.12), (3.13)식으로 부터

$$X_w = X_c$$

$$Y_w = \cos \beta \cdot Y_c - \sin \beta \cdot Z_c + y_1$$

$$Z_w = \sin \beta \cdot Y_c + \cos \beta \cdot Z_c + z_1$$

이므로

$$X_w = \frac{x(C_1 + C_2 \lambda)}{C_2 \lambda + x} + x_1 \quad (3.14)$$

$$Y_w = \frac{y(C_1 + C_2 \lambda) \cdot \cos \beta - \lambda(x - C_1) \cdot \sin \beta}{C_2 \lambda + x} + y_1 \quad (3.15)$$

$$Z_w = \frac{y(C_1 + C_2 \lambda) \cdot \sin \beta + \lambda(x - C_1) \cdot \cos \beta}{C_2 \lambda + x} + z_1 \quad (3.16)$$

위에서 구해진 (3.14), (3.16)식에 의해 비드의 단면의 형상 정보 (X_w, Z_w)는 영상 좌표 (x, y)로 구할 수 있다.

3.3 비드 형상 측정 결과

그림 6-8은 입열량이 파다 적정 과소일때의 대표적인

비드의 형상에 대하여 비드의 표면에 레이저를 조사한 후 얻은 영상과 이때 직선법만을 추출한 영상이다. 국부적으로 직선법의 영상이 끊어진 부분이 발생하는데 이는 비드의 경사면의 기울기가 급해서, 시각 센서로 그 면을 볼 수 없는 경우이다. 이러한 경우는 실제 3차원 측정이 불가능하므로 Linear Interpolation 기법을 이용하여 추정하였다. 그림 9-11은 이들 대표적인 비드에 대하여 비드의 길이 방향으로 1mm 단위로 3차원 측정 한 결과와 시각 센서를 이용하여 구한 비드의 단면 정보를 3차원으로 재구성한 결과이다. 그림 9는 입열량이 부족한 경우 비드 형상 측정 결과이다. 이 경우에는 비드 경사면의 기울기가 급하여 시각 센서로 측정이 불가능한 부분이 있었으나, 형상 변화가 작고 표면이 매우 매끄러워 본 연구에서 사용한 시각 센서로 측정 한 결과와 3차원 측정 결과를 비교해 볼 때 실제 비드의 형상에 유사한 결과를 얻었다. 그림 10은 입열량이 적정할 때 비드 형상 측정 결과이다. 비드의 경사면을 제외한 나머지 형상은 실제 형상과 유사함을 알 수 있다. 또 입열량이 과다한 경우(그림 11)에도 비드 경사면의 일부분을 제외하고는 실제 비드 형상과 유사한 경우를 얻었다. 모든 경우에 있어서 비드의 급격한 경사면을 제외하고는 비교적 안정된 측정 결과를 얻을 수 있었다.



그림 7 (a) Original raw image

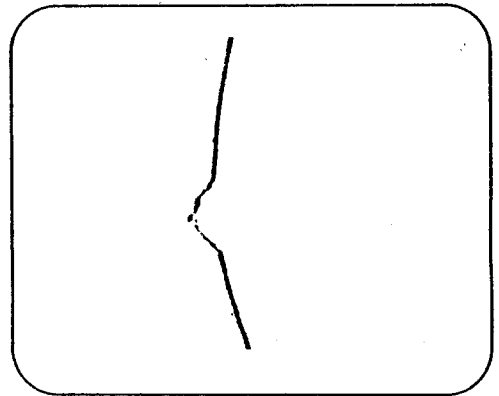


그림 7 (b) Stripé pattern image
그림 7 입열량이 적정할때의 비드 영상

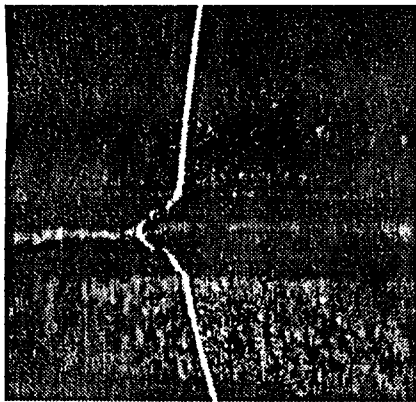


그림 6 (a) Original raw image

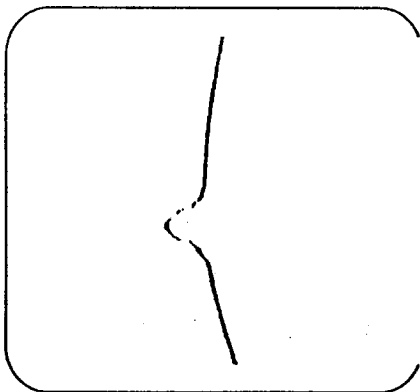


그림 6 (b) Stripe pattern image
그림 6 입열량이 부족할때의 비드 영상

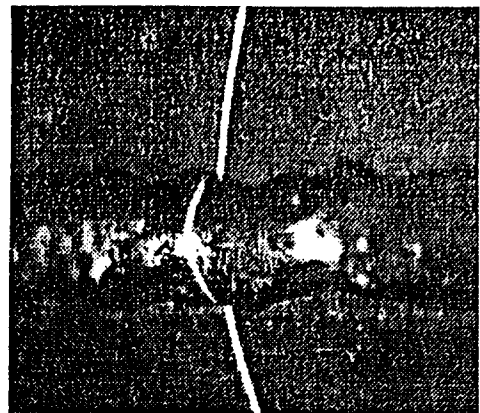


그림 8 (a) Original raw image

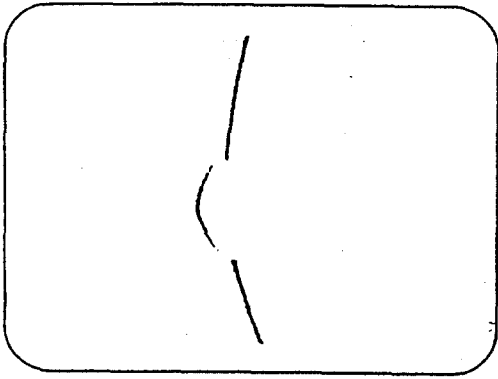


그림 8 (b) Stripe pattern image
 그림 8 입열량이 과다일때의 비드 영상

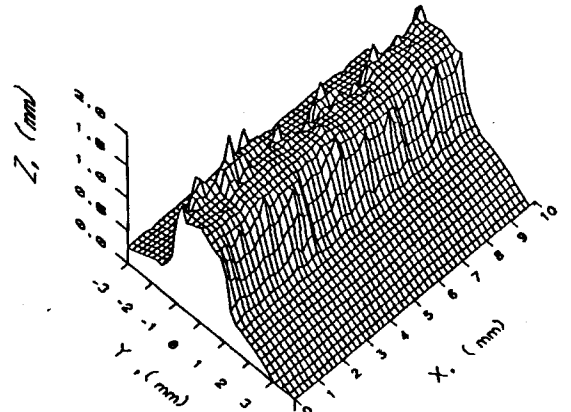


그림 10 (a) 3차원 측정기에 의한 비드형상 측정 결과

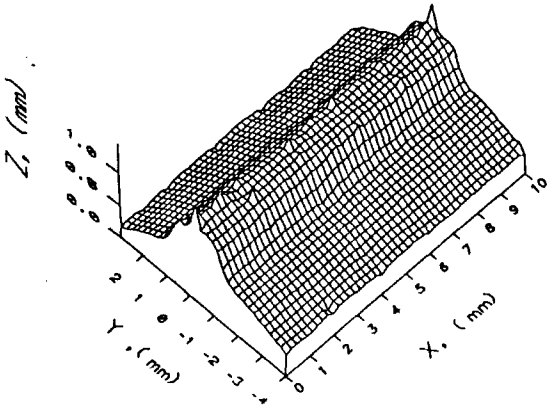


그림 9 (a) 3차원 측정기에 의한 비드 형상 측정 결과

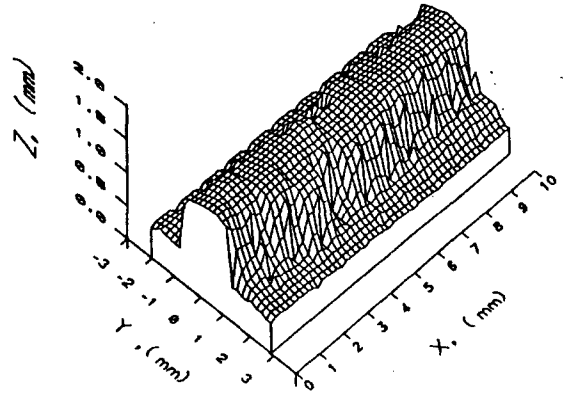


그림 10 (b) 시각센서에 의한 비드 형상 측정 결과
 그림 10 입열량이 적정할때의 비드 형상 측정 결과

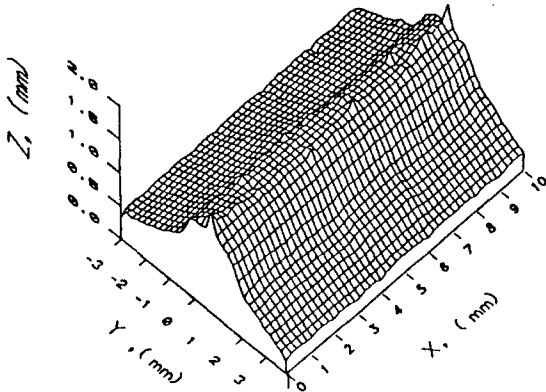


그림 9 (b) 시각센서에 의한 비드 형상 측정 결과
 그림 9 입열량이 부족할때의 비드 형상 측정 결과

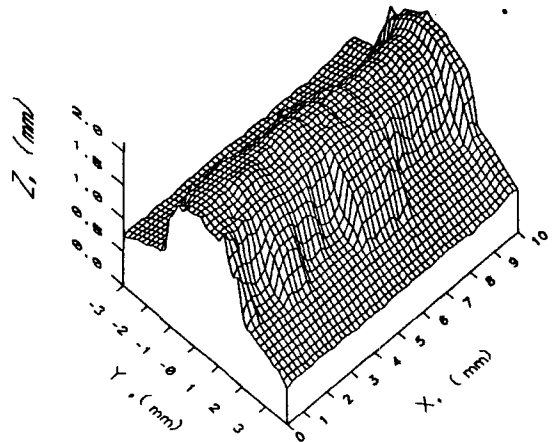


그림 11 (a) 3차원 측정기에 의한 비드 형상 측정 결과

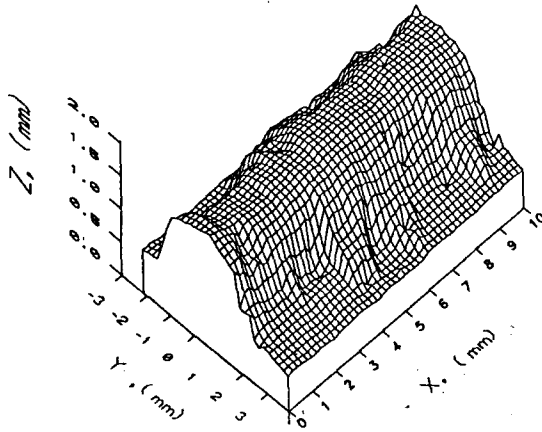


그림 11 (b) 시각센서에 의한 비드 형상 측정 결과
그림 11 입열량이 과다일때의 비드 형상 측정 결과

4. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 구조화된 직선빔과 카메라를 이용하여 고주파 전기 저항 용접 파이프의 비드의 형상을 실시간으로 측정하는 시스템을 구성하고 실제 측정하였다. 표면의 경면 반사의 특징으로 인하여 완전한 비드의 형상 정보를 얻기가 힘들었으나, 3차원 측정기에 의해 측정된 비드의 형상과 비교적 유사한 형상을 얻을 수 있었다. 향후에는 측정을 위해 사용한 영상의 명암에 근거한 특징치와 3차원 형상과의 관계를 추출하고 비드의 형상과 용접 입열량과의 관계를 규명해야 할 것이다.

참고문헌

[1] Hisashi Gondo. et. al. , "Welding Mechanisms in High-Frequency Electric Resistance Welding", Nippon Steel technical reprot No. 14, December 1979
 [2] Hiroyo Haga, Nobuo Mizuhashi, "High-Frequency ERW Phenomena and Weld Defect Ratio under High-speed and Large V-convergence angle condition" Teansaction ISIJ, Vol. 25, 1986
 [3] Hichio Saito, et. al., " Relation between Currentm Voltage and Power in Oscillator and Load Circuit during HF ERW" Transactions ISIJ, Vol. 24, 1984
 [4] Shigeyuki Sugimura, Hiroo Matsuda, "Welding Technology in Manufacture of Large-Diameter Line Pipe" Nippon Steel Technical reprot No. 20, December 1982
 [5] H.Haga, K.Aoki and T.Sato, "Welding Phenomena and Welding Mechanisms in High Frequency Electric Resistance Welding - 1st Reprot" Nippon steel Technical report , 1986

[6] Narumi Andou, et. al., "A new ERW-SAW Process for Spiral Manufacture", Nippon Steel Co. Technical reprot, 1986.
 [7] Nobuo Watanable, et. al., "An Automatic Power Input Control System in High Frequency Electric Resistance Welding" Nippon Steel Technical reprot 1986
 [8] Norio Tanaka, et. al., "High Frequency Induction Welded High-strength Steel Pipe", Nipoom Steel Technical report No.30, July 1986
 [9] Yutuka MIHARA, "A New Automatic Heat Input Control for Production of Electric Resistance Welded Pipe" Transaction ISII Vol, 26, 1986
 [10] Tetsuo Kyogoku, et. al., "Automatic Welding Control System for Electric-resistance Weld Tube Mill", Sumitomo Technical report, 1983
 [11] Osamu Sugiyama, et. al., "Recent Progress in Automatic Welding Control System for ERW Tubue Mill", The Sumitomo SEArch No.49, April 1992.
 [12] Steven J. GORDON "Real-Time Part Position Sensing" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol. 10. NO.3, May 1988
 [13] J.Paul, "Active, Optical Range Image Sensors" Machine Vision and Application Vol. II p127-152, 1988
 [14] 김호학, "아크 용접 공정에서 용접선의 실시간 추적을 위한 시각 시스템", 한국과학기술원, 석사논문, 1989
 [15] 신정식, "접치기이음에서의 용접선 추적과 아크 데이터 모니터링 시스템에 관한 연구", 한국과학기술원, 석사논문, 1991
 [16] Rafael C.Gonzalez, Richard E. Woods, "Digital Image Processing", Addison_Wesley Publishing Company, 1992