

시각센서를 이용한 벨로우즈 외부 모서리 레이저 용접 시스템의 개발에 관한 연구

이승기* · 유중돈** · 나석주**

A Study on Development of Laser Welding System for Bellows Outside Edge Using Vision Sensor

S.K. Lee*, C.D. Yoo** and S.J. Na**

Key Words : Vision sensor(시각센서), Bellows(벨로우즈), Laser welding(레이저 용접), CW Nd:YAG laser(CW형 Nd:YAG레이저), Edge weld(모서리 용접), Cu-ring(구리링), Geometric modeling(기하학적 모델링)

Abstract

The welded metal bellows is commonly manufactured by welding pairs of washer-shaped discs of thin sheet metal stamped from strip stock in thickness from 0.025 to 0.254mm. The discs, or diaphragms, are formed with mating circumferential corrugations.

In this study, the diaphragms were welded by using a CW Nd:YAG laser to form metal bellows. The bellows was fixed on a jig and compressed axially, while Cu-rings were installed between bellows edges for intimate contact of edges. The difference between the inner diameter of bellows and jig shaft causes an eccentricity, while the tolerance between motor shaft and jig shaft causes a wobble type motion. A vision sensor which is based on the optical triangulation was used for seam tracking. An image processing algorithm which can distinguish the image by bellows edge from that by Cu-ring was developed. The geometric relationship which describes the eccentricity and wobble type motion was modeled. The seam tracking using the image processing algorithm and the geometric modeling was performed successfully.

1. 서 론

벨로우즈는 밸브, 압력 및 온도 센서, 항공기 압력 차단용, 자동차 부품용 등 다양한 용도로 사용되고 있

다. 기존의 벨로우즈 제작 방법으로는 마이크로 GTA 용접을 이용하여 모서리 용접(edge weld)을 수행하면서 할로젠 램프를 용접부에 조사시켜 반사되는 정도를 광전소자(photovoltaic cell)로 측정하며 용접선의 벗어난 정도를 보정해 주는 방법을 쓰거나¹⁾, GTA용

※ 1999년 1월 4일 접수

* 비회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

• 이승기 : leesk@kaist.ac.kr

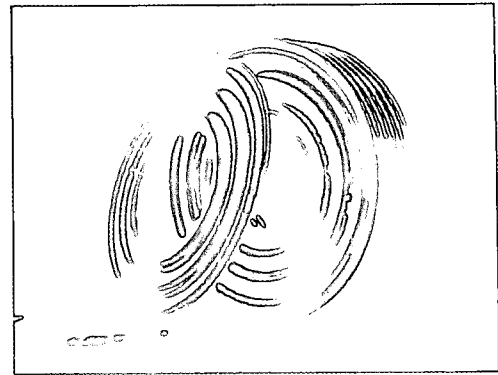
접, 플라즈마 아크용접, 레이저빔 용접으로 수행하여 최적의 용접법을 찾는 연구도 이루어 진바 있고²⁾, CW CO₂, 펄스형 CO₂, 펄스형 Nd:YAG레이저를 이용해서 스테인리스 스틸 박판의 모서리 용접을 수행하고 용접된 단면을 비교함으로써 최적의 용접 방법을 찾는 연구도 수행되었다³⁾.

본 연구의 목표는 스테인리스 스틸 재질의 벨로우즈 외부 모서리를 시각센서를 이용하여 용접선 추적을 하면서 CW형 Nd:YAG레이저로 용접하는 시스템의 개발이다. 대상 용접부는 모서리 용접으로 이루어 지고 한 쌍의 모서리의 두께가 0.2mm 정도로 얇기 때문에 정확한 용접선 추적을 위해서는 높은 분해능의 시각센서와 구동부, 정확한 시각센서의 교정(calibration)이 필요하다. 일반적인 용접부의 형상은 보통 펠릿, 비(vee), 맞대기, 겹치기 용접부로서 이들을 추적하기 위한 알고리즘은 많이 연구되어 왔고^{4~7)}, 모서리 용접에서의 용접선 추적 알고리즘에 대한 연구가 요구되고 있다. 또한 레이저를 이용한 벨로우즈 용접 조건 선정이나 시각센서를 이용한 모서리 용접선 추적에 관한 연구가 필요하다. 따라서 벨로우즈 외부 모서리 용접을 위한 영상처리, 특징점(feature point) 추출, 용접선 추적 알고리즘 등을 제시하였다. 또한 Nd:YAG레이저의 출력과 용접속도, 보호 가스(shielding gas) 등의 용접변수를 영상처리에 소요되는 시간과 용접 품질 등을 고려해서 최적으로 선정해 주었다.

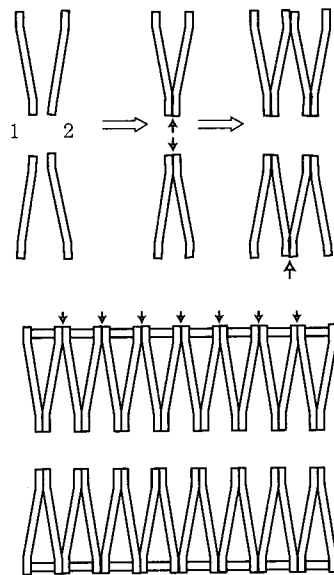
2. 시스템 개요

벨로우즈는 Fig.1(a)와 같이 일정한 길이를 가지게 되므로 여러 개의 모서리를 가진다. 따라서 Fig.1(b)와 같이 하나의 모서리 용접을 한 후에 옆으로 이동시켜서 다음 모서리를 찾은 후 다시 모서리 용접을 수행해야 한다. 이를 위한 시스템의 전체 구성은 Fig.2와 같이 크게 용접 헤드(시각센서와 레이저 집광장치), 영상처리 보드, 레이저 발진기, 구동부 제어기(controller), 지그로 구성하였다.

구동부는 용접선 추적에 필요한 2축 직교 좌표 로봇(2-D Cartesian Robot)과 벨로우즈를 회전시키는 모터로 구성하였다. 용접 대상물인 벨로우즈 모서리의 두께가 레이저 빔의 크기보다 작기 때문에 모서리를 이루는 두 디스크 사이와 각 모서리 사이로 빔이 통과해서 용접부가 아닌 다른 부분에 열영향을 주는 경우가 발생할 수 있고, 일반적으로 레이저 용접에서 허용되는 모서리 용접의 간극인 두께의 1/10을 유지시켜 주어야 한다⁸⁾. 이를 해결하기 위해 구리 링(Cu -



(a) Washer-shaped discs and welded bellows



(b) Welding sequence

Fig. 1 Photographs of bellows and welding sequence

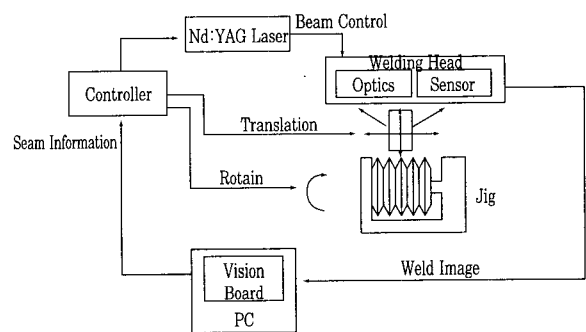


Fig. 2 Overall system architecture

ring)을 각 모서리 사이에 끼워 넣어서 용접이 이루어지는 모든 부분이 강한 압축력으로 밀착되게 하였다.

시각센서는 용접부의 영상을 처리하여 용접선을 추적하기 위해서 CCD카메라, 마이크로 렌즈(micro lens), 레이저 다이오드(laser diode), 대역통과필터(narrow band pass filter), 미러(mirror), 영상처

리 보드(vision board)로 구성하였고, 시각센서는 Nd:YAG레이저와 일체형으로 용접헤드를 이루고 2축 직교 좌표 로봇에 설치되어 제어기와 용접부의 정보를 주고 받을수 있게 하였다.

본 연구에 사용되는 레이저는 CW형 Nd:YAG레이저로서 최대 출력은 140W이고, 광파이버로 전송된 레이저빔의 최소 직경은 약 $600\mu\text{m}$, 초점 거리는 90mm이었으며 보호 가스로는 아르곤(Ar)을 사용하였다.

3. 시각센서

3.1 개요

본 연구에서 사용되는 시각센서의 측정 원리는 구조화된 빔을 이용한 광삼각법에 의한 거리 측정으로서 용접 공정에서 일반적으로 사용되는 시각센서들과 같다^{4,9~13)}. 측정 범위가 $6.5\text{ mm} \times 4.8\text{ mm}$ 인 렌즈를 사용하고 분리각을 90° 로 설계하여 모서리의 경면반사(specular reflection) 성질을 이용하였다. 깊이 방향의 분해능은 약 $10\mu\text{m}$, 측면 방향의 분해능은 약 $9\mu\text{m}$ 정도이다. 사용된 다이오드 레이저는 파장이 670nm인 적색 광원으로 원통형 렌즈를 통과시켜 평면 형태로 조사되도록 하였다. 설계된 용접 헤드는 Fig.3과 같다.

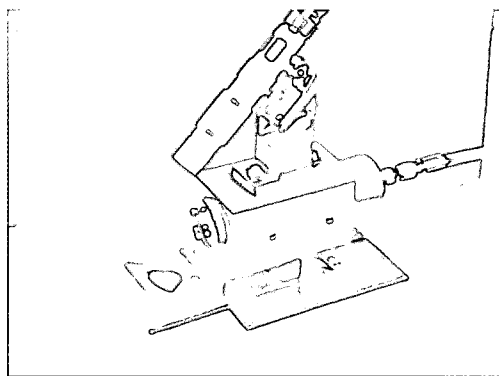


Fig. 3 Photograph of welding head

3.2 좌표계의 설정

본 연구에서의 좌표계는 Fig.4와 같이 벨로우즈가 고정된 지그의 중심축에 고정된 대상물 좌표계(object frame)인 C_o , 용접헤드로 부터 일정한 거리만큼 떨어진 곳에 위치한 센서 좌표계(sensor frame)인 C_s , 카메라의 영상에서 정의되는 가상 좌표계(image frame)인 C_i 로 이루어진다. C_o 와 C_s 의 X축은 지그의 축방향, Y축은 중력의 반대 방향, Z축은 용접헤드 방향으로 정의 되어진다

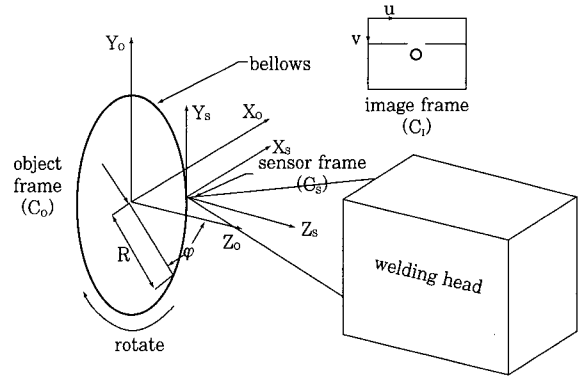
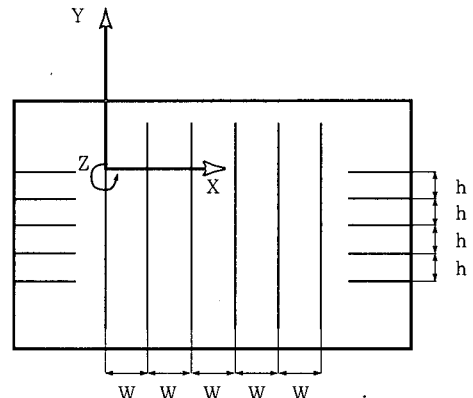


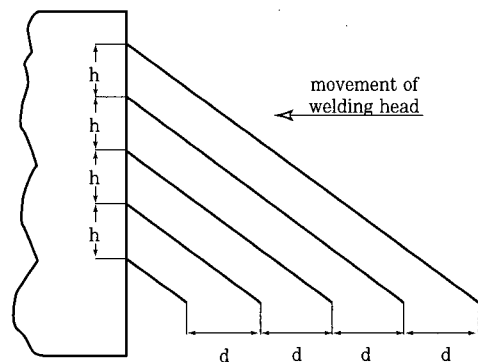
Fig. 4 Coordinates system

3.3 교정

교정은 3차원 공간상의 임의의 좌표와 카메라의 센서에 해당하는 2차원 영상 좌표 사이의 대응 관계를 구하는 것을 말한다. 교정을 하기 위해서는 먼저 3차원 공간 상에서의 한 점의 좌표값을 정확히 알고 그에 대응되는 영상 좌표상의 값을 정확히 알아야 하며 이와 같은 데이터가 적어도 4점 이상에 대해 얻어져야



(a) Calibration target



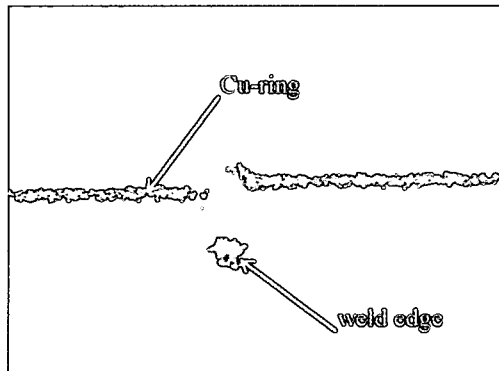
(b) Origin of sensor coordinate

Fig. 5 Calibration target

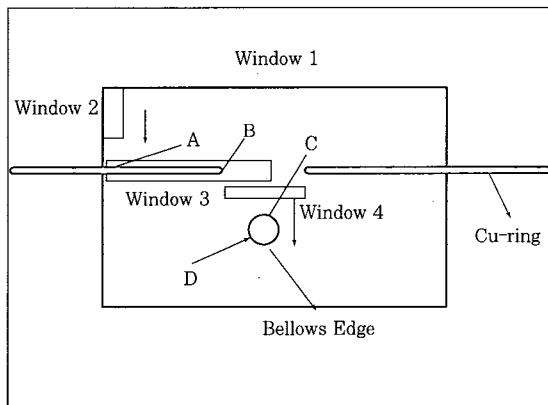
한다. 일반적인 교정 실험은 정확한 치수의 교정 블록(calibration block)을 제작하여 교정 블록을 얹어 놓는 교정대에 올려 놓고 레이저 띠가 교정 블록에 맺히는 영상을 획득하여 교정 행렬을 구하는 방법을 쓴다^{11,13)}. 본 연구에서는 측정 범위가 6.5 mm×4.8mm로 매우 작기 때문에 교정 블록을 제작하는데 어려움이 따른다. 따라서, Fig.5(a)와 같이 X축 방향으로 w, Y축 방향으로 h만큼의 일정한 간격으로 검은 선이 그려진 교정 표적지(calibration target)를 구성하였고, Fig.5(b)와 같이 Z축 방향으로 용접헤드를 d만큼 이동시켜 일정한 간격을 설정함으로써 정확한 3차원상의 공간 좌표계를 확보하였다. Fig.5(a)에서 나타난 것처럼 레이저 띠가 가장 위쪽의 검은 선에 맺히는 왼쪽 첫번째 점을 센서 좌표계의 원점으로 잡았다.

3.4 영상처리 알고리즘

벨로우즈의 모서리에 레이저 띠가 조사될 때의 실제 영상은 Fig.6(a)와 같이 모서리 부분이 점의 형태로 나타나고 구리 링에 조사되는 부분이 띠의 형태로 나타나게 된다. 영상에서 나타나는 특징점(feature point)들은 Fig.6(b)와 같이 윈도우 내의 구리 링의



(a) Image of bellows edge and Cu-ring



(b) Windows and feature points for image processing

Fig. 6 Image and feature points

시작점인 A, 구리 링이 끝나는 부분인 B, 벨로우즈 모서리의 위쪽 시작점인 C, 모서리의 중심인 D로 구분하였고 레이저 띠가 모서리에 맺히는 부분인 D를 찾는 것이 본 연구의 영상처리의 목적이다.

영상신호를 256개의 그레이 레벨(gray level)로 이산화시킨 후 레이저 띠의 두께에 해당하는 칼럼 윈도우(window 2)를 만들어 영상처리를 하는 영역(window 1)내에서 한 픽셀씩 아래로 이동시키며 칼럼 윈도우 내의 그레이 레벨 값을 적산하여 적산한 값이 최대가 되는 위치를 특징점(feature point) A라고 한다. 구리 링의 끝부분인 B는 A를 추출한 후에 긴 윈도우(window 3)를 A에서부터 설정하여 각 열에서의 그레이 레벨의 합을 비교하여 배경과 구분 되는 B를 찾아낸다. 모서리의 시작 부분인 C를 찾기 위해서 위에서 찾은 B로부터 레이저 두께만큼 밑으로 내린 후 그 위치에서 가로 방향으로 긴 윈도우(window 4)를 설정하고 윈도우를 아래쪽으로 일정한 간격만큼 이동시키면서 각 윈도우내의 적산한 값을 비교하여 영상의 배경과 모서리가 시작하는 곳이 구분되는 만큼의 차이가 나면 그 위치를 벨로우즈의 모서리의 시작점으로 인식한다. 모서리의 중심인 D를 추출하기 위해서는 무게 중심법을 사용하였다. 영상처리는 8~10Hz 정도로 수행될 수 있었다.

4. 기하학적 모델링

본 연구에서 용접선 추적이 필요한 이유는 벨로우즈의 내경과 지그의 중심축과의 간격에 의해 발생하는 편심과 모터 축과 지그의 중심축과의 공차에 의해 발생하는 비틀거림 현상(wobble)때문이다. 벨로우즈는 진원이고 장착된 벨로우즈는 지그의 축과 항상 수직을 이룬다고 가정하면 원(circle)인 벨로우즈와 직선인 레이저 띠 사이의 기하학적 관계를 알아낼 수 있다.

4.1 깊이 방향 모델링

벨로우즈가 편심을 가지고 회전하면 벨로우즈의 중심은 원(circle)의 궤적을 그리게 되고 Fig.7에서와 같이 레이저 띠가 맺히는 위치는 Z축 방향(깊이 방향)과 Y축 방향(높이 방향)으로의 변위가 생기게 된다. 용접선 추적은 Z축 방향으로 이루어 지므로 Z축 방향의 모델링이 필요하다. Fig.7에서 반지름이 R인 편심된 벨로우즈의 중심이 원의 궤적을 따라서 ($z_{C(t-1)}, y_{C(t-1)}$)에서 (z_{Ct}, y_{Ct})으로 θ 만큼 회전하면 측정점의 위치는 ($z_{P(t-1)}, y_{P(t-1)}$)에서 (z_{Pt}, y_{Pt})로 변하게 된다. 이때 측정점의 Z축 변위인 Δz_p 에 따른 벨로우즈의 중심의 Z

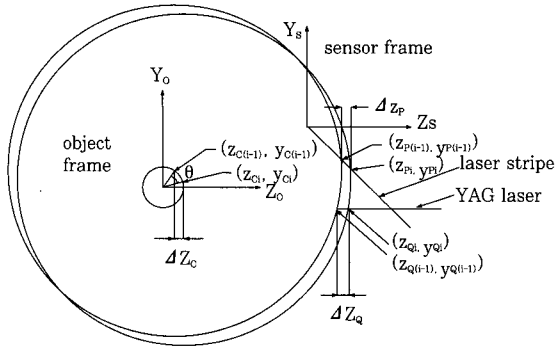


Fig. 7 Geometric modeling in depth variation

축 변위인 ΔZ_c 는 식(1), (2)를 통하여 식(3)의 관계를 가지게 된다.

$$(z-z_{Ci-1})^2+(y-y_{Ci-1})^2=R^2 \quad z=z_{pi-1}, y=y_{pi-1} \quad (1)$$

$$(z-z_{ci})^2+(y-y_{ci})^2=R^2 \quad z=z_{pi}, y=y_{pi} \quad (2)$$

$$\Delta Z_p - \Delta Z_c = \sqrt{R^2 - (y_{pi} - y_{ci})^2} - \sqrt{R^2 - (y_{pi-1} - y_{ci-1})^2} \quad (3)$$

우변은 매우 작은 값을 가지므로 결국 식(4)가 된다.

$$\Delta Z_p = \Delta Z_c \quad (4)$$

Fig.7에서와 같이 측정점이 $(z_{p(i-1)}, y_{p(i-1)})$ 에서 (z_{pi}, y_{pi}) 로 Z축 방향으로 ΔZ_p 만큼 변할 때 원점에서 -Y방향으로 l 만큼 떨어진 곳에서 조사되는 YAG레이저의 위치의 Z축 방향 변위 ΔZ_p 는 식(5), (6)을 통하여 식(7)의 관계를 가지게 된다.

$$(z-z_{Ci-1})^2+(y-y_{Ci-1})^2=R^2 \quad z=z_{Q(i-1)}, y=-l \quad (5)$$

$$(z-z_{ci})^2+(y-y_{ci})^2=R^2 \quad z=z_{Qi}, y=-l \quad (6)$$

$$\Delta Z_Q - \Delta Z_c = \sqrt{R^2 - (-l - y_{ci})^2} - \sqrt{R^2 - (-l - y_{ci-1})^2} \quad (7)$$

우변은 매우 작은 값을 가지므로 식(7)은 식(8)이 된다.

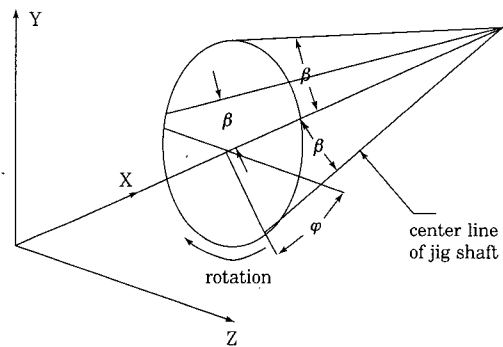
$$\Delta Z_Q = \Delta Z_c \quad (8)$$

따라서 앞에서의 결과와 함께 나타내면, 식(9)와 같이 영상 좌표의 Z축 방향 변화량과 벨로우즈 중심의 Z축 방향 변화량, YAG레이저가 조사되는 위치의 Z축 변화량, 이 세가지가 모두 같은 값을 가지게 된다. 따라서 용접선 추적은 영상 좌표의 Z방향 좌표의 변화량만으로 깊이 방향의 용접선 추적은 가능하게 된다.

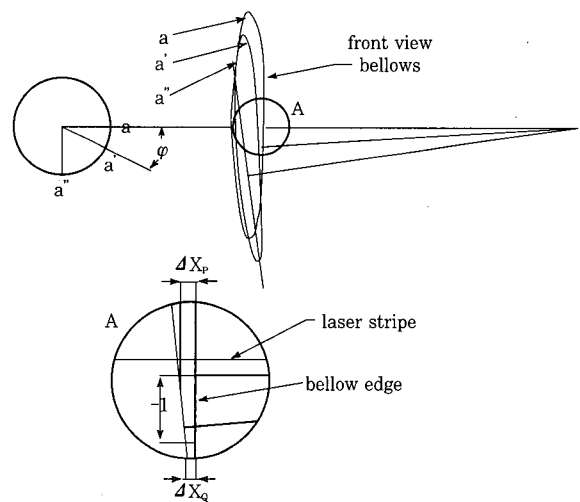
$$\Delta Z_c = \Delta Z_p = \Delta Z_Q \quad (9)$$

4.2 폭 방향 모델링

폭 방향의 변화는 모터의 축과 지그의 축이 공차로 인해 어긋났을 경우에 발생한다. 이런 경우에는 Fig.8(a)와 같이 지그의 축이 X축과 일정한 각도 β 를 유지하며 지그가 회전하게 된다. 이런 경우 φ 가 변함에 따라서, 즉 벨로우즈가 회전함에 따라서 레이저띠가 조사되는 X축 좌표가 변하게 된다. 측정점의 X축 좌표의 변화량과 YAG레이저가 조사되는 위치와의 관계는 Fig.8(b)와 같이 φ 가 변함에 따라서 정면에서 본 벨로우즈의 형상이 타원에서 점점 타원의 폭이 작아지고 기울어 지면서 φ 가 π 의 위치에 오면 직선으로 변하게 된다. 이에 따른 측정점의 X축 변화량인 ΔX_p 는 Fig.8(b)와 같이 용접헤드를 X축 방향으로 이동시켜 줘야 하는 ΔX_Q 와 거의 같은 값을 가지게 된다. 즉, 깊이 방향 모델링의 결과와 마찬가지로 측정점의 X축 변화량만큼 폭 방향으로 용접헤드를 움직여주면 폭 방향의 용접선 추적이 가능하게 된다.



(a) Trace of jig shaft with wobble



(b) Variation in width direction

Fig. 8 Geometric modeling in width variation

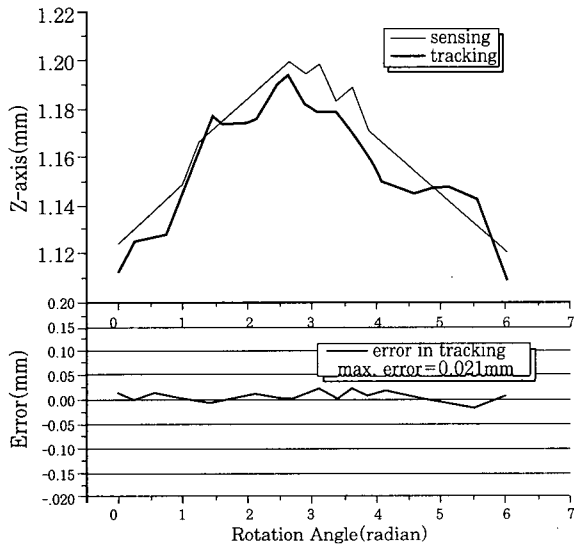
5. 실험

5.1 추적 실험

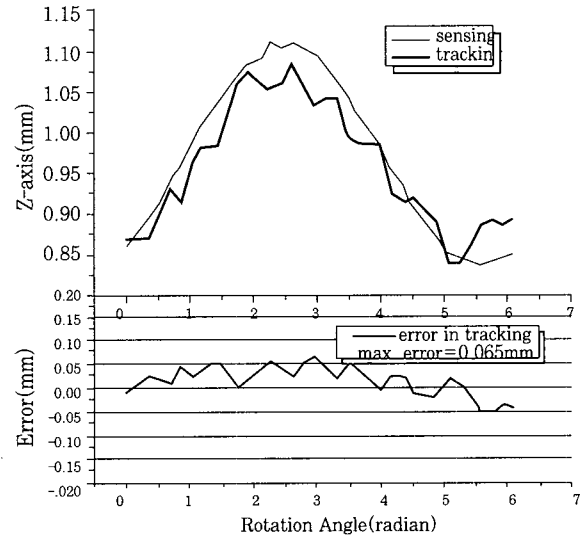
레이저 용접에서는 깊이 방향으로 레이저의 초점 거리에 대상물이 항상 위치해야 하고 초점거리에서 벗어나는 정도는 초점 심도(depth of focus) 내에서 유지되어야 하고, 폭 방향으로 초점거리에서의 빔 직경(spot size) 안에 용접 대상부가 위치해야 한다. 위의 기하학적 모델링에서 기술한 것처럼 편심에 의해 깊이 방향으로의 변위가 생기게 되고 시각센서로 측정점을 찾게 되면 레이저가 조사되는 위치의 깊이 방향

으로의 변위를 알 수 있다. 따라서 대상물을 초점거리에 항상 위치시키기 위해서는 편심에 의한 깊이 방향의 변화량과 폭 방향의 변화량에 따라 2축 테이블을 움직여야 한다.

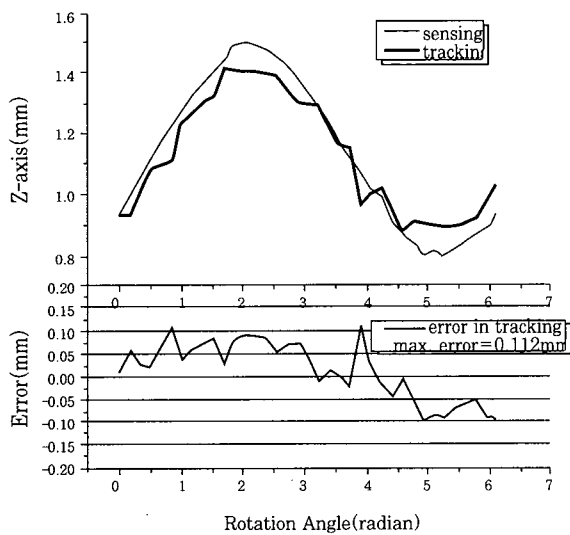
편심이 있는 원(circle)을 추적할 경우의 문제점은 변화량을 측정하여 그 위치로 용접헤드를 이동시키는 동안에 목표로 한 위치가 회전하면서 편심에 의해 다시 변한다는 점이다. 용접하기 전에 벨로우즈의 편심된 양을 미리 알고 있다면 오차가 없이 추적이 가능하지만 그렇지 않을 경우에는 오차는 필연적이다. 위에서 기술한 필연적인 오차의 값과 추적 오차가 초점 심도의 절반보다 작다면 용접 대상물이 항상 초점 심도 안에 용접이 무난하게 이루어 질 수 있다.



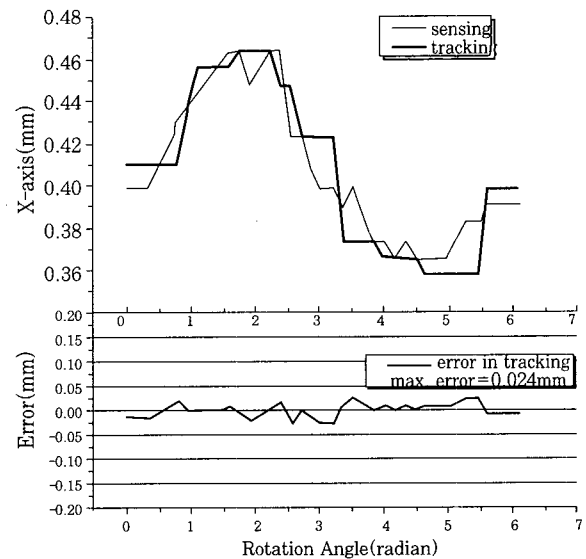
(a) case of $e=0.04\text{mm}$ in Z-axis



(b) case of $e=0.14\text{mm}$ in Z-axis



(c) case of $e=0.35\text{mm}$ in Z-axis



(d) tracking in X-axis

Fig. 9 Results of sensing and tracking

Fig.9의 (a), (b), (c)에서는 용접선의 변화가 현저하게 나타나는 깊이 방향으로 편심량을 각각 0.04mm, 0.14mm, 0.35mm로 주고 시각센서로 센싱한 경우와 센싱한 정보를 이용하여 용접선을 추적한 결과와 오차를 나타내었다. Fig.9의 (d)는 폭 방향으로 용접선을 추적한 결과이다. 용접선 추적이 없다면 (a), (b), (c)에서 y축의 최대, 최소값들의 차이인 깊이 방향의 용접선 오차는 각각 0.08mm, 0.3mm, 1.3mm정도가 된다. 추적한 결과 최대 오차는 각각 0.02mm, 0.07mm, 0.11mm로 나타났는데 이는 실험에 사용한 레이저의 초점 심도인 0.6mm보다 훨씬 작은 값들로서 용접선 추적이 원활히 수행됨을 알 수 있다. 폭 방향의 경우인 (d)에서도 용접선의 오차가 0.1mm일 때 추적을 한 결과 추적 오차가 0.02mm로 매우 작음을 알 수 있다. 이는 초점거리에서의 빔 직경(spot size)이 0.6mm임을 감안할 때 허용할 만한 오차임을 알 수 있다. 편심량이 커질수록 오차가 커짐을 알 수 있는데 이는 측정부의 반사 정도의 차이에 의한 영상처리에서 발생한 오차와 위에서 기술한 편심에 의한 오차 등이 편심량이 커질수록 같이 커지기 때문이다.

5.2 용접 실험

실험 장치의 전체 형상은 Fig.10과 같고 실험을 하기 위해 제작된 시편은 스테인리스 스틸(stainless steel) 박판으로서 두께는 0.1mm, 외경은 50mm, 내경은 20mm이다. 고정시키기 위한 구리 링은 장착, 탈착이 용이하게 두 조각으로 나누었고 외경이 49mm이다.

용접 변수로는 용접 속도, 레이저 출력(power), 보호 가스의 유량 등이 있다. 용접 속도는 23mm/s (8.6rpm)로 하였고 레이저 출력은 110W에서 135W 사이, 보호가스의 유량은 5l/min 이하의 여러 값으로 설정해 주면서 실험을 수행하였다.

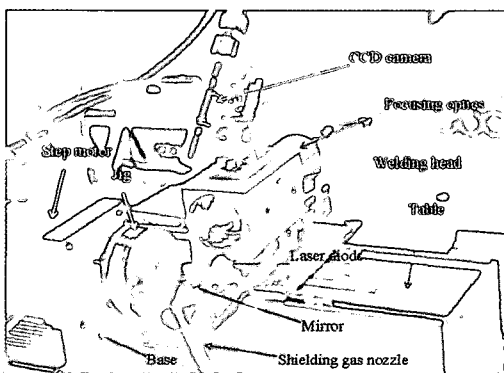


Fig. 10 Overall experimental setup

용접 속도는 영상처리에 소요되는 시간과 용접 품질, 생산성 등에 영향을 미치고 레이저 출력과 보호 가스의 유량은 용접 품질, 비드 형상(bead shape) 등에 영향을 미친다. 용접선 추적을 하지 않았을 경우에는 Fig.11(a)와 같이 용접이 제대로 이루어지지 않았다. 레이저 출력이 110W에서는 Fig.11(b)와 같이 비드가 제대로 형성되지 않는 현상을 보이고 레이저 출력이 125W 이상이면 Fig.11(c), (d)와 같이 비드가 제대로 형성이 되었다. 보호 가스 유량이 너무 크면 가스 압력에 의해 비드의 생성이 힘들게 된다. 용접 후 전채 형상의 변형이 발생하는데 이는 실제 굴곡이 진 벨로우즈를 사용하고 출력이 높은 레이저를 사용하여 용접 속도를 빠르게 하면 해결 될 것으로 보인다.

실험을 통한 적절한 용접 변수는 레이저 출력 125~135W, 보호 가스 유량(flow rate)은 1~2l/min의 조건에서 원활한 용접이 수행되었다.

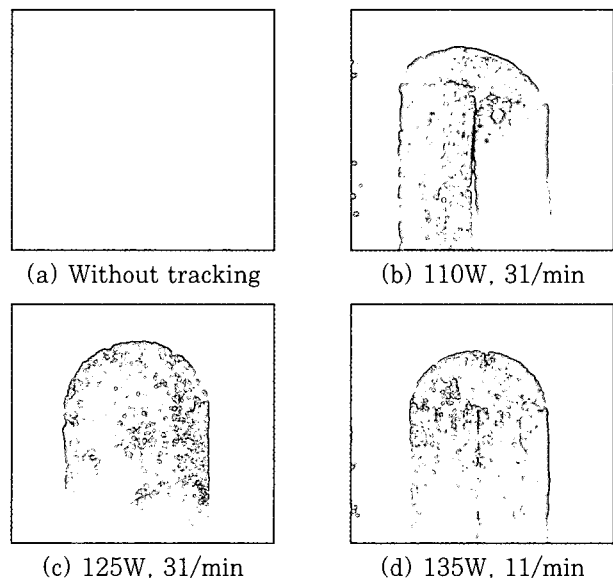


Fig. 11 Cross-sections of representative welds at various conditions

6. 결론 및 향후 과제

두께가 0.2mm인 벨로우즈의 외부 모서리 용접에 있어서 구리링을 모서리 사이에 고정시켜 줌으로써 모서리에 조사되는 레이저빔을 배경에서 구별해내는 기준이 될 수 있었고 모재에 전달된 열을 방출시키는 역할도 할 수 있었다. 구리링의 지름을 벨로우즈 보다 작게 함으로써 모서리에 조사되는 레이저의 영상과 구리링의 영상 구별을 확실하게 하여 특징점을 쉽게 정의 할 수 있었다.

용접선의 변화가 생기는 원인은 지그축과 벨로우즈 내경과의 간격에 의한 편심, 지그축과 모터축과의 공차에 의한 비틀거림 현상 때문이고 이에 의한 영상에서의 용접선 좌표 변화와 실제 레이저 빔이 조사되는 위치 변화와의 기하학적인 관계를 모델링함으로써 용접선 추적에 이용할 수 있었고 발생하는 오차는 시각 센서의 분해능과 교정에서의 오차, 영상처리에서의 오차, 구동부의 분해능에 의한 것이고, 사용된 레이저 빔의 특성상 허용 가능한 오차 범위 안에 속한다.

용접실험을 한 결과 용접선 추적이 필수적임을 알 수 있었고 적절한 용접변수를 선정할 수 있었다.

본 연구는 CW Nd:YAG 레이저를 이용한 결과이다. 따라서 pulsed Nd:YAG 레이저를 이용한 용접실험이 수행되어야 할 것이고 이를 통한 용접변수의 선정이 필요하다. 구리 링과 지그의 장착 및 탈착 등의 자동화 문제가 개선되어야 하고 기존의 출력 보다 큰 레이저 발진기를 사용한다면 용접속도를 좀 더 빠르게 할 수가 있을 것이다. 또한 벨로우즈 내부 모서리 용접은 공간이 좁고 접근이 어려우므로 레이저 광학계의 설계, 센싱 방법 등의 해결해야 할 문제가 많은 부분이므로 이에 대한 연구도 반드시 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술정책관리연구소(STEPI)의 중소기업 기술무상양허 사업의 일환으로 수행되었으며 참여하여 주신 (주)코러스 레이저의 문현덕 사장님과 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R.R.Larsen, "Optical Microtracking of Edge Welds on Welded Metal Bellows", *Welding Journal*, Vol.63, No.5, May, 1984, pp19-23
2. R.K.Holbert, et al, "Fabricating and Testing Stainless Steel Bellows", *Welding Journal*, Vol.68, No.5, May, 1989, pp49-55
3. R.K.Holbert, et al, "Laser Beam Welding of Stainless Steel Sheet", *Welding Journal*, Vol.66, No.8, Aug., 1987, pp21-25
4. J.E.Agapakis, et al, "Joint Tracking and Adaptive Robotic Welding Using Vision Sensing of the Weld Joint Geometry", *Welding Journal*, Vol.65, No.11, 1986, pp33-41
5. P.K.Khosla, et al, "An Algorithm for Seam Tracking Applications", *The Int. J. of Robotics Research*, Vol.4, No.1, 1985, pp27-41
6. J.E.Agapakis, "Approaches for Recognition and Interpretation of Workpiece Surface Features Using Structured Lighting", *The Int. J. of Robotics Research*, Vol.9, No.5, 1990, pp3-16
7. 나석주, 유원상, 이승기, "선박건조를 위한 자동용접시스템용 시각센서의 개발", 한국과학기술원, 삼성중공업 공동과제 최종보고서, 1997
8. T.VanderWert, "Low Power(1kW and Below) Laser Welding", *Industrial Laser Handbook, Annual Review of Laser Processing*, 1986, pp58-68
9. 신정식, "접이기 이음에서의 용접선 추적과 아크 데이터 모니터링 시스템에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1991
10. 최동필, "박판용접에 있어서 시각센서를 이용한 용접선 추적과 용접변수 설정에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1994
11. 박현준, "시각센서를 이용한 비원형 케이스 자동용접시스템 개발에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1996
12. David Nitzan, "Three-Dimensional Vision Structure for Robot Applications", *IEEE Trans. on PAMI*, Vol.10, No.3, 1988, pp291-309
13. 김선일 외, "레이저 슬릿광을 이용한 3차원 계측 장치에 관한 연구", *전자공학회논문집*, Vol.29, No.2, 1992, pp27-39