

# 레이저 슬릿 빔의 경사각과 카메라 자세 추정 알고리즘을 이용한 벽면결함 길이측정

## Defects Length Measurement Using an Estimation Algorithm of the Camera Orientation and an Inclination Angle of a Laser Slit Beam

김영환, 윤지섭, 강이석  
(Young-Hwang Kim, Ji-Sup Yoon, and E-Sok Kang)

**Abstract :** A method of measuring the length of defects on the wall and restructuring the defect image is proposed based on the estimation algorithm of a camera orientation, which uses the declination angle of a laser slit beam. The estimation algorithm of the horizontally inclined angle of CCD camera adopts a 3-dimensional coordinate transformation of the image plane where both the laser beam and the original image of the defects exist. The estimation equation is obtained by using the information of the beam projected on the wall and the parameters of this equation are experimentally obtained. With this algorithm, the original image of the defect can be reconstructed as an image normal to the wall. From the result of a series of experiments, the measuring accuracy of the defect is measured within 0.5% error bound of real defect size under 30 degree of the horizontally inclined angle. The proposed algorithm provides the method of reconstructing the image taken at any arbitrary horizontally inclined angle as the image normal as the wall and thus, it enables the accurate measurement of the defect lengths by using a single camera and a laser slit beam.

**Keywords :** laser slit beam, CCD camera, wall defect, algorithm

### I. 서론

사용 후 핵연료집합체(spent fuel assembly)를 저장하고 있는 저장조는 콘크리트로 보강되어 있고, 저장조 벽면에는 에폭시(epoxy)로 방수 처리되어 있다. 저장조에는 방사선을 차폐하기 위해 물이 채워져 있다. 저장조 30~40년의 수명을 갖도록 설계되었지만, 시간이 지남에 따라 벽면에 결함이 발생할 우려가 있기 때문에 누수에 대비하기 위하여, 에폭시 코팅 면에 발생하는 결함의 성장 진행 정도를 측정하고 있다. 현재 콘크리트 자체에서는 발생하지 않고 있으나, 에폭시 코팅 면의 열화에 따른 표면의 결함이 발생하고 있다. 현재, 결함의 길이를 측정하는 방법은 저장조 천장에 설치되어 있는 크레인에 긴 봉을 부착하고 봉의 하단에 수중 카메라를 설치하여 카메라로부터의 영상을 관찰하면서 카메라의 이동 거리(크레인의 이동 거리)를 측정하는 방법을 사용하고 있다. 즉 모니터의 중심점에 결함의 한 쪽 끝점을 일치시키고 이때의 크레인의 위치를 측정한 후, 다른 끝점이 모니터의 중심점에 위치하도록 크레인을 이동시키고, 크레인의 이동 거리를 측정한다. 이와 같은 방법은 수 작업 방식으로 이동시 카메라를 지지하는 봉이 회전하여 카메라의 렌즈 면과 벽면의 평행상태를 유지할 수 없기 때문에 벽면 결함 길이의 측정 정밀도가 저하되며 긴 작업 시간이 소요된다.

산업 현장에서 사용되는 대상 물체 크기를 측정하는 일반적인 방법으로는 초음파 센서[1], 스테레오 카메라, 레이저 슬릿 빔[2][3] 등의 다양한 방법이 제시되고 있다. 그러나 저장 수조 내는 고 방사선 환경으로 센서류의 사용은 가급적 피해야 하며, 스테레오 카메라를 사용할 경우 좁은 공간에 있는 결함을 측정하기가 어렵고, 기존에 장착된 하나의 내방사선용 CCD 카메라를 사용하여야 하는 구조상의 제약이 있다. 특히, 스테레오 카메라는 두 영상에 맺힌 각각에 대한 영상의 점을 실제 물체 점과 구분하는데 어려움이 있으며[4], 두 영상 점의 좌표 점을 매칭(matching)하기 위해서는 복잡한 반복 과정을 거쳐야 하는 문제점이 있다[5].

본 논문에서는 카메라 회전에 따른 측정 오차를 제거하기 위하여 레이저 슬릿 빔 발생기(beam generator)를 카메라 상부에 설치하여 벽면에 대해 일정한 수평각도로 기울어져 있는 카메라의 자세를 추정하는 카메라 수평각도 추정 알고리즘을 제안하였다[6]. 그리고 이를 적용하여 결함의 영상 회전과 관측 방향에서 본 거리로 복원하여 실제 벽면 결함의 길이를 측정하였다.

또한 크레인의 로프 끝단의 후크(hook)에 매달린 카메라는 수직 방향으로 회전될 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 카메라를 수직으로 고정하고, 카메라의 끝 하단 부에 추를 설치하였다. 한편 크레인 이동시 로프의 흔들림이 발생할 수 있으나, 이는 수조의 물에 의하여 짧은 시간 내에 감쇠된다. 따라서, 초기 가정으로 카메라의 수직 방향의 수직 각도는 수평 수직 수준기(Horizontal & Vertical Level Indicator)로 인식하였고, 중력 방향의 고정 값으로 가정하였다. 실험 방법으로는 슬릿 빔의 경사각 정보와 카메라 수평각도, 및 빔 발생기의 기울임 각의 관계로부터 수평각도 추정 알고리

접수일자 : 2001. 5. 3., 수정완료 : 2001. 9. 10.

김영환, 윤지섭 : 한국원자력연구소(yhkim3@nanum.kaeri.re.kr/njsyun@nanum.kaeri.re.kr)

강이석 : 충남대학교 기계설계공학과(eskang@hanbat.chungnam.ac.kr)

※ 본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

들을 제안하고 검증하였다. 또한, 제안된 수평각도 추정 알고리즘으로 카메라 수평 기울임 각을 알아내고 결합 형상의 길이 측정에 적용하였다.

**II. 카메라와 레이저 슬릿 빔 기하학적 알고리즘**

**1. 슬릿 빔에 의한 카메라 회전각도 추정 알고리즘**

3차원 물체를 인식하기 위해 CCD 카메라와 레이저 슬릿 빔의 각도와 물체의 영상 정보로부터 실제 물체의 크기 및 형상을 인식하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 CCD 카메라에 잡힌 물체의 2차원 영상을 3차원 공간상의 좌표로 변환시키는 기하학적인 관계식으로 구성되어 있다. 벽면 결합 측정 장비인 CCD 카메라와 슬릿 빔으로 구성된 시스템은 다음과 같은 세 가지 가정들을 전제로 하였다.

- 1) 천정 크레인의 로프에 매달려 무한 자유 도를 갖는 측정 장비의 중심 축은 추에 의해서 무게중심이 하단에 작용되기 때문에 중력 방향과 동일하다.
- 2) 천정 크레인의 로프에 매달려 무한 자유 도를 갖는 측정 장비의 흔들림은 물의 댐핑(damping)효과에 의해서 바로 복원된다.
- 3) 천정 크레인의 로프에 매달려 무한 자유 도를 갖는 측정 장비의 중력 방향의 중심 축과 카메라의 측정 방향은 수직이다.

벽면 결합을 측정할 때 위의 세 가지 가정을 전제 조건으로 할 때 실제적으로 결합 측정에 미치는 변수는 벽면에 대한 카메라의 기울어진 수평 각도이다. 이 기울어진 카메라의 수평 각도는 벽면 결합에 대하여 획득된 영상을 측정 방향과 일치되도록 복원시키기 위한 회전 값이다. 따라서 수직 거리에서 보는 것과 같이 영상을 회전하기 위해서는 벽면 결합에 대한 카메라의 수평각도의 일정한 정보가 필요하다.

그림 1에서 보는 바와 같이 벽면의 수직 중심 축으로부터 우측면에 맺힌 슬릿 빔의 경사도를 보여주고 있으며, 카메라와 슬릿 빔 발생 장치는 벽면에 대해  $\theta_1$ 만큼 같은 각도로 벽면을 향하고 있다.

그림 1은 카메라와 슬릿 빔이 벽면의 우측면(Right section)에 주사되었을 때의 도해이다. 여기서  $L$ 은 벽면에서 카메라까지의 수직 거리이고,  $L_{s0}$ 는 슬릿 빔의 길이이다.  $L_1$ 과  $L_2$ 는 카메라가 빔 발생기의 시계각( $\theta_f$ )에 해당하는  $\theta_1$ 만큼 이동했을 때 카메라에서 벽면에 대한 슬릿 빔 양 끝단까지 거리이고,  $L_3$ 는 증분된 슬릿 빔의 길이이다.  $L_4$ 와  $L_5$ 는  $\theta_3$ 만큼 발생 장치를 내렸을 때, 수평으로 증분된 슬릿 빔 길이( $L_3$ )의 양 끝단에서 기울어진 슬릿 빔 길이의 양 끝단까지 깊이이고, 이때 시계각(field of view angle)이 고려된  $\theta_2$ 만큼의 슬릿 빔 경사각이 발생된다. 그림 1에서  $\theta_2$ 는 시계각( $\theta_f$ )만큼의 영향을 받는다. 따라서 벽면에서 거리  $L$ 인 카메라의  $\theta_1$ 을 시계각( $\theta_f$ )만큼 이동하고 빔 발생기를  $\theta_3$ 만큼 하단 방향으로 기울였을 때 슬릿 빔의 시계 각에 의한 최초 길이( $L_{s0}$ )와 각도( $\theta_1$ )가  $\Delta L = \beta L_{s0}$ ,  $\Delta \theta = \beta \theta_1$ 만큼 증가한다( $\beta \cong \frac{1}{3}$ ). 여기서  $\Delta L$ 과  $\Delta \theta$ 의 증가는 그림 2, 3에서 설명되고 있다.

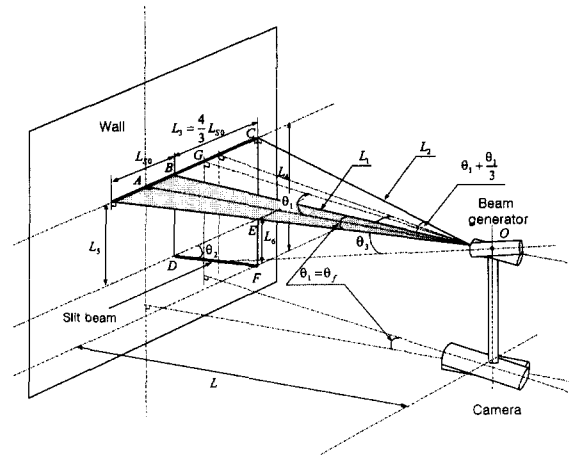


그림 1.  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  그리고  $\theta_3$ 의 관계.

Fig. 1. Relationship of  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  to  $\theta_3$ .

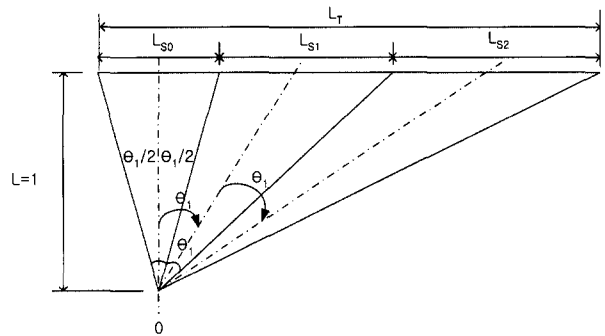


그림 2. 벽면에 대한 카메라의 수평 기울임 각에 따른 슬릿빔 길이의 증분율.

Fig. 2. The increase rate of the projected slit beam length due to the camera inclined horizontally to the wall.

그림 2는 위에서 본 도해이다. 여기서 벽면과 수직 거리를  $L=1$ 이라 하고, 시계 각도  $\theta_f$  만큼 이동한 각도를  $\theta_1$ 이라 할 때 길이의 증분량,  $\Delta L_1 = (L_{s2} - L_{s1})$ 은 다음과 같다. 여기서 벽면에 수직으로 본 슬릿 빔의 길이,  $L_{s0}$ 은  $\frac{L_{s0}}{2} + L_{s1} = \tan(\frac{\theta_1}{2} + \theta_1)$ 이고,  $\theta_1$ ( $\theta_f - \theta_1$ )만큼 이동했을 때 증분된 슬릿 빔의 길이는  $L_{s1}$ 이다. 벽면에서 수직으로 본 슬릿 빔의 길이는 (1)과 같다.

$$L_{s0} = 2 \tan \frac{\theta_1}{2} \tag{1}$$

증분된 슬릿 빔의 길이는 (2)과 같다.

$$L_{s1} = \tan(\frac{\theta_1}{2} + \theta_1) - \frac{L_{s0}}{2} \tag{2}$$

슬릿 빔의 증분율은 (3)과 같다.

$$\frac{\Delta L_1}{L_{s0}} = \frac{L_{s1} - L_{s0}}{L_{s0}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\left\{ \tan\left(\frac{\theta_1}{2} + \theta_1\right) - \tan\frac{\theta_1}{2} \right\} - 2 \tan\frac{\theta_1}{2}}{2 \tan\frac{\theta_1}{2}} \\
 &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tan\left(\frac{3}{2}\theta_1\right)}{\tan\frac{\theta_1}{2}} - 1 \right\} - 1 \tag{3}
 \end{aligned}$$

슬릿 빔의 증분된 길이  $\Delta L_1$ 은 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta L_1 &= \left[ \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tan\left(\frac{3}{2}\theta_1\right)}{\tan\frac{\theta_1}{2}} - 1 \right\} - 1 \right] L_{S0} \\
 (\beta &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tan\left(\frac{3}{2}\theta_1\right)}{\tan\frac{\theta_1}{2}} - 1 \right\} - 1) \\
 \therefore \Delta L_1 &= \beta L_{S0}, \quad (\beta \cong \frac{1}{3}) \tag{4}
 \end{aligned}$$

그림 2를 보면  $L_{S1}$ 에서  $\theta_1$ 만큼 이동했을 때  $L_{S1}$ 에 대한  $L_{S2}$ 의 증분량( $\Delta L_2=L_{S2}-L_{S1}$ )은 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \Delta L_2 &= \frac{\tan\left(\frac{17}{10}\theta_1\right) - \tan\left(\frac{3}{2}\theta_1\right)}{\tan\left(\frac{3}{2}\theta_1\right) - \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right)} L_{S1} \\
 \therefore \Delta L_2 &= \beta L_{S1}, \quad (\beta \cong \frac{1}{3}) \tag{5}
 \end{aligned}$$

(4)와 (5)의 결과를 통해서  $\theta_1$ 의 변화에 따라 슬릿 빔의 증분량의 관계식은 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \therefore \Delta L_1 &= \beta L_{S0}, \Delta L_2 = \beta L_{S1}, \Delta L_i = \beta L_{S_{i-1}} \\
 (\beta &\cong \frac{1}{3}) \tag{6}
 \end{aligned}$$

그림 3에서 슬릿 빔의 증분량은 (6)과 같고,  $30^\circ$ 의 시계각(field of view angle)을 고려하면 슬릿 빔이 벽면 수직 방향에서  $\theta_1$ 만큼 이동했을 때 슬릿 빔의 증분각( $\Delta\theta$ )이 발생된다. 그 이유는 실제적인 카메라의 수평각도  $\theta_1$ 은 그림 3의 B점을 향하고 있으나, 증분된 슬릿 빔의 중심점은 C점을 바라보고 있기 때문이다. 여기서 증분각( $\Delta\theta$ )의 관계식은 (7), (8)과 같다. 여기서  $L=30, L_{S0}=16$ 이다

(6)에서와 같이  $\Delta L_i = \beta L_{S_{i-1}}$ 이면,

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta &= \angle AOC - \angle AOB \\
 &= (\theta_1 + \Delta\theta) - \theta_1 \\
 &= \tan^{-1}\left(\frac{8 L_{S0}}{5 L}\right) - \theta_1 \tag{7}
 \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta\theta = \beta \theta_1, \quad (\beta \cong \frac{1}{3}) \tag{8}$$

(단,  $\theta_f = 30^\circ$  : field of view)

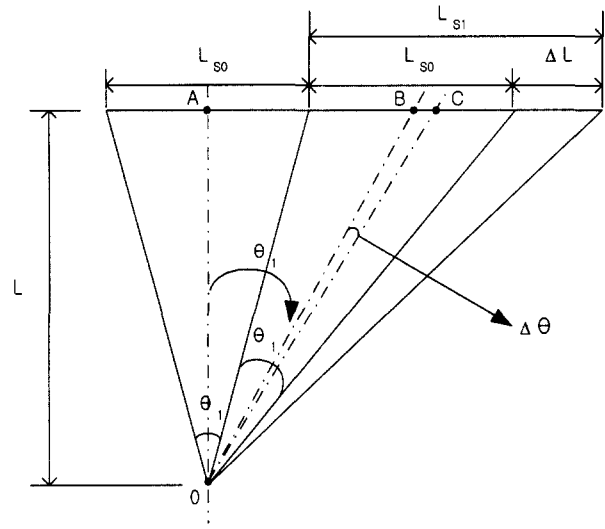


그림 3. 벽면에 대한 카메라의 수평 기울임 각에 따른 슬릿 빔 각의 증분율.

Fig. 3. The increase rate of the projected slit beam angle due to the camera inclined horizontally to the wall.

(6)과 (8)의 관계에서 슬릿 빔 경사각( $\theta_2$ )을 구하고 이것을 카메라 수평각,  $\theta_1$ 값으로 역 변환하였다. 슬릿 빔의 경사각도  $\theta_2$ 는 다음과 같이 구한다. 그림 1에서 수평 상태의 빔 발생기가  $\theta_1$ 만큼 이동했을 때 벽면 중심 0에서 B점까지의 거리는 (9)와 같다.

$$L_1 = \frac{L}{\cos\frac{\theta_1}{2}} \tag{9}$$

그림 1에서 수평 상태의 빔 발생기가  $\theta_1$ 만큼 이동했을 때 벽면 중심 0에서 C점까지의 거리는 (10)과 같다.

$$L_2 = \frac{L}{\cos\left(\frac{3}{2}\theta_1 + \frac{\theta_1}{3}\right)} \tag{10}$$

(10에서 수평 상태의 빔 발생기가  $\theta_1$ 만큼 이동했을 때 (6)과 같이 카메라의 수평 이동 각  $\theta_1$ 은 벽면에서  $\frac{1}{3}\theta_1$ 만큼 증분 된다. (11)의  $L_5$ 는  $\theta_1$ 만큼 이동한 빔 발생기가  $\theta_3$ 만큼 내렸을 때 B점이 D점까지 움직인 거리이다.

$$L_5 = L_1 \tan \theta_3 \tag{11}$$

(12)의  $L_4$ 는  $\theta_1$ 만큼 이동한 빔 발생기가  $\theta_3$ 만큼 내렸을 때 C점이 F점까지 움직인 거리이다.

$$L_4 = L_2 \tan \theta_3 \tag{12}$$

(13)의  $L_3$ 은 빔 발생기가 기울임 없이  $\theta_1$ 만큼 이동했을 때 슬릿 빔이  $\Delta L$ 만큼 증분된 길이이다.

$$L_3 = L \left\{ \left( \tan \left( \frac{3}{2} \theta_1 + \frac{\theta_1}{3} \right) - \tan \frac{\theta_1}{2} \right) \right\} \quad (13)$$

그림 1에서  $L_6$  빔 발생기가  $\theta_1$ 만큼 우측으로 수평 이동하고  $\theta_3$ 만큼 내렸을 때 증분 된 길이로 (14)와 같다.

$$L_6 = (L_4 - L_5) \quad (14)$$

벽면에 맺힌 슬릿 빔의 경사각  $\theta_2$ 는 (15)와 같다.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{L_6}{L_3} \right) \quad (15)$$

(15)에 (13), (14)를 대입하면 (16)과 같다.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{L_4 - L_5}{L \left\{ \left( \tan \left( \frac{3}{2} \theta_1 + \frac{\theta_1}{3} \right) - \tan \frac{\theta_1}{2} \right) \right\}} \right] \quad (16)$$

(16)에 (11), (12)를 대입하면 (17)과 같다.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{\tan \theta_3 (L_2 - L_1)}{L \left\{ \left( \tan \left( \frac{3}{2} \theta_1 + \frac{\theta_1}{3} \right) - \tan \frac{\theta_1}{2} \right) \right\}} \right] \quad (17)$$

(17)에 (9), (10)을 대입하여 정리하면 벽면에 맺힌 슬릿 빔의 경사각  $\theta_2$ 는 (18)과 같다.

$$\therefore \theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{\tan \theta_3 \left( \cos \frac{\theta_1}{2} - \cos \left( \frac{4}{3} \theta_1 \right) \right)}{\sin \left( \frac{4}{3} \theta_1 \right)} \right] \quad (18)$$

(18)에서 변수  $\theta_3$ 를 매개변수로 하고  $\theta_1$ 의 변화에 따른  $\theta_2$ 의 변화가, 여기서는  $x$ 축을  $\theta_2$ 로 하고  $y$ 축을  $\theta_3$ 으로 했을 때, 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에 나타난 결과를 관계식으

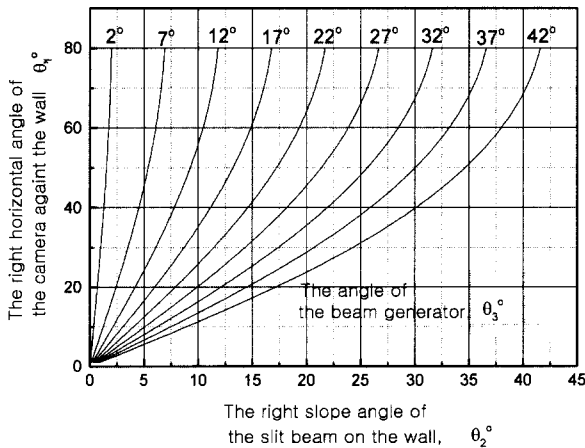


그림 4. 빔발생기 기울임각과 슬릿빔 경사각에 따른 카메라 수평각도의 변화.

Fig. 4. Variations of camera angles with various projected beam angles and generator angles.

로 표현하면 (19)와 같이  $\theta_2$ 에 대한 3차 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\therefore \theta_1 = a_i (\theta_2)^3 + b_i (\theta_2)^2 + c_i (\theta_2) + d_i \quad (19)$$

(단  $0^\circ < \theta_3 < 45^\circ$ )

### 2. 3차원 좌표 변환

그림 5-(a)는 3차원 좌표 변환을 위한 작업 공간 좌표와 CCD 좌표 사이의 영상 기하학적 관계를 보여준다[7]. 여기서 3차원으로 유도되는 위치 계산식에서 다음과 같이 가정을 한다. 첫째 카메라의 왜곡은 무시한다. 둘째 카메라는 이상적인 핀-홀 모델이며, 셋째 CCD 카메라의 렌즈 중심은  $Y_c$ 축 상에 존재한다. 물체 표면에 맺힌 레이저 슬릿 빔의 3차원 공간상의 점  $C_c(x, y, z)$ 는 영상 좌표계상의  $C_i(u, v)$ 로 매핑(mapping)된다. 점  $C_c$ 에서 점  $C_i$ 로의 변환은 렌즈 중심과 CCD 소자간의 거리를 나타내는  $\lambda$ 의 관계로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 점  $C_c$ 에서 점  $C_i$ 의 변환은 다음과 같다.

가.  $Z_c Y_c$  - plane에서

$$\begin{aligned} -v : \lambda &= -y : z \\ \therefore z &= \frac{\lambda}{v} y \end{aligned} \quad (20)$$

나.  $Z_c X_c$  - plane에서

$$\begin{aligned} -u : \lambda &= -x : z \\ \therefore x &= \frac{u}{\lambda} z \end{aligned} \quad (21)$$

다. Laser slit beam이 이루는 평면을 고려하면

$$\tan \theta_3 = \frac{l_{AB} + (-y)}{z} \text{ 이다.}$$

$z$ 에 관해서 정리하면

$$z = \frac{l_{AB} - y}{\tan \theta_3} \quad (22)$$

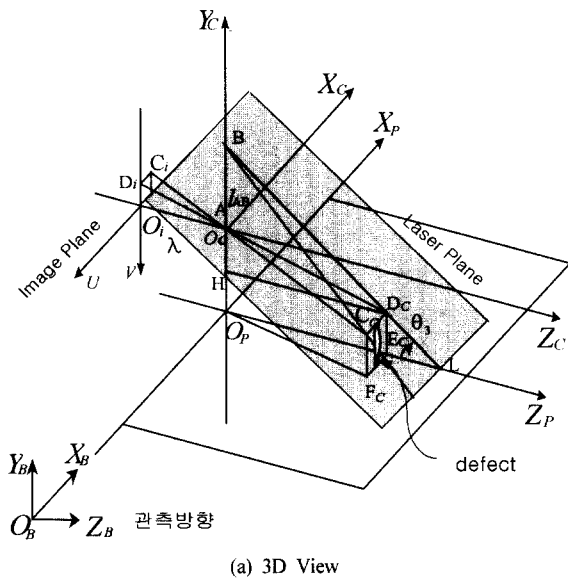
(20)과 (22)로부터

$$\frac{\lambda}{v} y = \frac{l_{AB} - y}{\tan \theta_3} \quad (23)$$

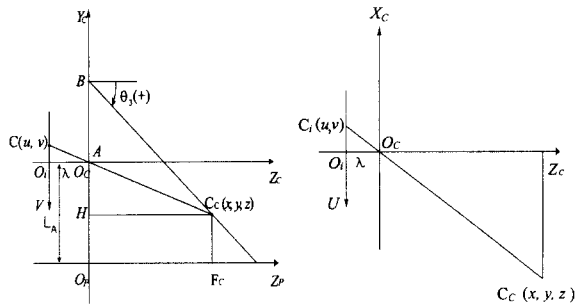
$$y = \frac{v l_{AB}}{v + \lambda \tan \theta_3} \quad (24)$$

(24)를 (20), (21)에 대입하여 정리하면 (25)와 같다.

$$\begin{aligned} z &= \frac{\lambda}{v} y = \frac{\lambda l_{AB}}{v + \lambda \tan \theta_3} \\ x &= \frac{u}{\lambda} z = \frac{u l_{AB}}{v + \lambda \tan \theta_3} \\ y &= \frac{v l_{AB}}{v + \lambda \tan \theta_3} \end{aligned} \quad (25)$$



(a) 3D View



(b) Zc-Yc plane

(c) Zc-Xc plane

그림 5. 카메라와 작업공간의 좌표 변환 모델.  
Fig. 5. Camera coordinate system model.

여기서, 카메라 프레임 좌표계를 카메라 좌표 계로 변환하면 다음과 같다.

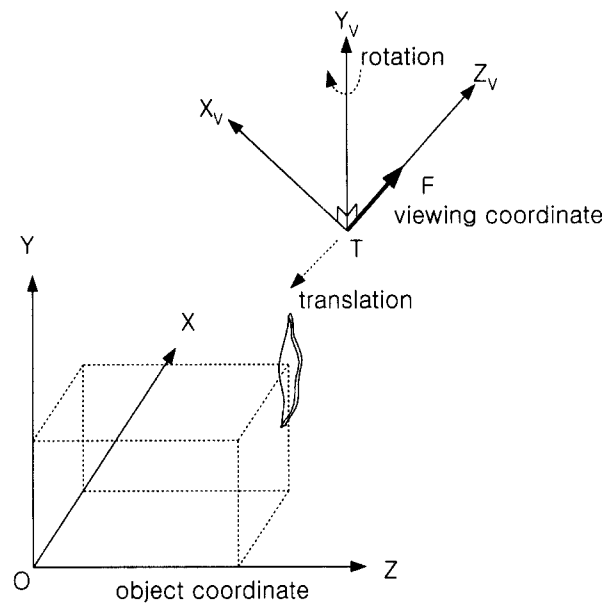
$$u = S_u(320 - u_c), \quad v = S_v(240 - v_c) \quad (26)$$

여기서, 각 방향의 scale factor  $S_u, S_v$ 는 다음과 같다.

$$S_u = \frac{l_u}{640}, \quad S_v = \frac{l_v}{480} \quad (27)$$

### 3. 관측 방향에 따른 3차원 좌표 변환의 회전각도 보정

그림 6에서는 물체 좌표계에 정의된 관측 벡터(viewing vector)를 보여주고 있다. 관측 벡터의 끝점  $F$ 는 카메라의 벽면 결함에 대한 관측 위치에 해당되고 관측 좌표 계의  $X, Y$  평면은 투명한 판에 해당된다. 관측 좌표 계의  $Y$ 축은 관측 벡터의 시작점  $T$ 에서 관측 벡터와 수직인 벡터로서 위를 향하도록 고정된 벡터에 해당된다. 물체 좌표 계 상에 정의된 물체의 좌표 값을 관측 좌표 계(viewing coordinate)에 대한 좌표 값으로 변환시키는 일을 관측 변환(viewing transformation)이라고 말한다. 그림 6에서 보는 바와 같이 관측 변환을 위해서는 초기 가정에서  $Y$ 축인 카메라 고정 붐이 중력 방향으로 작용하기 때문에 카메라의 수평각의  $Y$ 축에 대



object coordinate

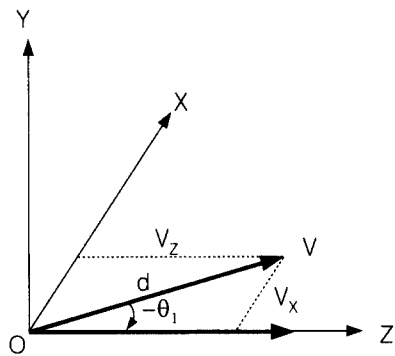


그림 6. 관측벡터의 회전 변환.  
Fig. 6. Rotational transformation of observing vector.

한 회전 변환과 좌표 이동만 요구된다.

여기서 관측 벡터의 끝점  $F$ 와 시작점  $T$ 의 좌표 값이

$$F = (f_x, f_y, f_z), \quad T = (t_x, t_y, t_z) \quad (28)$$

라면 관측 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$V = (f_x - t_x, f_y - t_y, f_z - t_z) = (v_x, v_y, v_z) \quad (29)$$

실제로 관측 변환은 초기 가정으로부터 2단계의 관측 변환을 거친다. 가. 관측 벡터의 시작점  $T$ 를 물체 좌표 계의 원점으로 이동한다. 나. 그림 6에서 보는 바와 같이 관측 벡터가  $YZ$  평면상에 일치하도록  $y$ 축을 기준으로  $-\theta_1$  각도만큼 회전한다.

이상의 좌표 변환에 해당되는 동차 변환 행렬은 다음과 같다.

$$T(-t_x, -t_y, -t_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -t_x \\ 0 & 1 & 0 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 & -t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$R_y(-\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

단,  $\theta_1 = \tan^{-1}(v_x/v_z)$

벽면 결함을 영상 변환하는데 있어서  $R_x$ 와  $R_z$ 은 0이며, 물체의  $p_0$ 점에 대해서 Y축을 중심으로 한 회전  $R_y$ 와 화상 점의 이동  $T$  및 배율  $S$ 를 고려하면 이동 점  $q$ 는 다음과 같다.

$$\therefore q = R_y(\theta_1)STp_0 \quad (32)$$

### III. 실험

#### 1. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 저 장조 벽면의 결함을 측정하기 위한 구조로 실험 장치를 구성하였다. 그림 7은 벽면 결함 검사 측정 장비의 흐름도를 나타낸 것이다.

전체적인 시스템 중 측정 유닛(unit)은 그림 8에서 보는 바와 같다. 시스템의 구조는 화상을 보기 위한 CCD 카메라, 조명, 이들을 조절하는 컨트롤 유닛, 빔을 주사시키는 빔 발생기, 카메라 장비의 수직 도를 유지시켜 주는 추, 벽면의 모의 결함들로 구성된다. 카메라는 획득된 영상 데이터의 처리를 위해 영상 처리 유닛 8비트 그레이 레벨을 갖는 4개의 프레임 그라버(Frame grabber)가 장착된 영상 보드(matrix)를 사용하였다. 라인 레이저 슬릿 빔은 670nm, 10mW의 빔 라인이 일정한 광 강도(non gaussian beam)를 갖는 구조로 되어 있다. 일단 획득된 영상은 이미지 보드를 거쳐 영상 처리를 하게 된다. 일단 영상 처리 방법에 있어서 1차 적으로 2진화 과정을 거쳐 관심 영역을 선택한 후, 카메라 각도와 벽면과의 거리 정보를 가지고 관측 방향으로 회전시켜 결함의 길이를 측정한다[8]. 모의 결함의 분류는 그림 9와 같이 수직, 수평 결함으로 분류하였으며, 2가지로 분류한 이유는 수

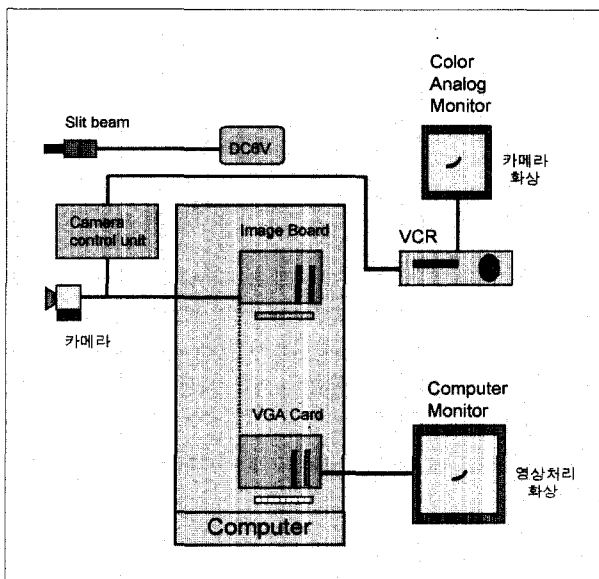


그림 7. 결함 측정 장치의 구성도.  
Fig. 7. Schematics of the wall defect measurement system.

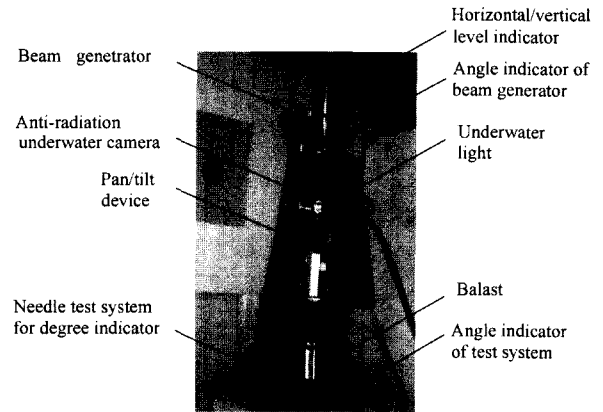


그림 8. 벽면 결함 측정 실험 장치.  
Fig. 8. Experimental setup for the wall defect measurement system.

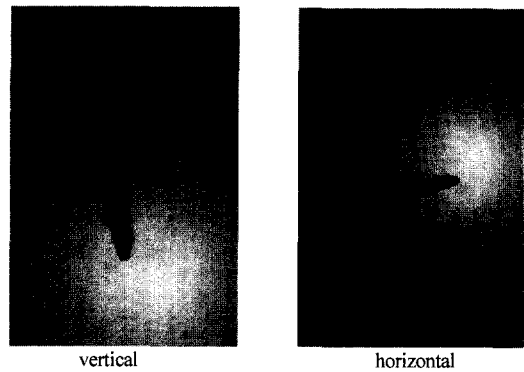


그림 9. 결함 형상.  
Fig. 9. Defect shape.

조 벽면의 결함 형태가 대부분 2가지의 형태로 이루어 졌기 때문이다[9]. 본 논문에서는 명암 값을 가진 그레이 영상 데이터의 문턱 값 처리를 이용하여 결함의 형상을 2진 영상 데이터로 변환하여 사용하였으며[10], 슬릿 빔의 각도와 길이를 추정하기 위하여 Hough 변환을 이용하였다[11].

#### 2. CCD 수중 카메라와 Non-Gaussian 레이저 슬릿 빔

본 논문에서 사용된 CCD 수중 카메라(RCS-3100)는 축소/확대(72 : 1)가 가능한 칼라 카메라로 소형(D 2.8×L 5.22 inch)이며, 높은 해상도(470 주사선)를 갖는다. 대기중에서 카메라의 수평 시계 각도(field of view)는 2.7°에서 48° 범위이다. 본 논문은 일정한 광 강도를 갖는 Non-Gaussian 레이저 슬릿 빔(SNF Class II)을 사용하였다[12]. 일반적인 cylindrical optics는 2가지 문제점을 가지고 있다. 첫째로, 빛의 밝기는 중간 부분이 가장 밝고, 양끝으로 갈수록 흐려지기 때문에 라인 빛의 경우 얻고자 하는 정확한 정보를 얻을 수 없다. 둘째로 라인을 따라 빛의 강도가 다른 Gaussian 분포의 레이저의 CCD와 캘리브레이션은 많은 오차를 발생한다. 이러한 것들을 해결하기 위하여 고른 분포의 광도를 가진 라인 슬릿 빔을 사용하였다.

본 논문에서는 시계 각도(field of view angle)는 카메라의 수평각도 추정 알고리즘에 변수로 작용하기 때문에 레이저 슬릿 빔의 시계 각도를 계산하였다. 여기서 거리를 D, 라인 슬릿 빔의 길이를  $L_{slit}$ , 시계 각도를 F.V라고 하면 식은 다음

과 같다.

$$\phi_{F.V.} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{L_{\infty}}{2D} \right) \quad (33)$$

본 실험에 사용된 빔 발생기의 시계 각도를 구하기 위하여 (33)에 적용했을 때 레이저 슬릿 빔의 시계 각도(field of view)는 30°로 산출되었다.

**IV. 실험 결과**

**1 벽면에 대한 카메라의 추정 각도 실험**

본 논문에서는 카메라의 수평 회전각도 추정하기 위해서 (18), (19)와 같이 수학적 모델 링을 세우고 실험을 통하여 확인하였다. 여기서 임의의 일정한 거리(30cm)에서 빔 발생기의 기울임 각( $\theta_3$ )과 카메라의 수평각( $\theta_1$ )의 변화에 따라 벽면에 맺힌 경사각( $\theta_2$ )의 변화 결과를 실험하였다. 빔 발생기의 기울임 각( $\theta_3$ )을 0~45°까지 변화를 주었으며, 카메라의 수평각은 0~80°까지 변화를 주었다. 실험 결과를 보면 빔 발생기의 기울임 각도( $\theta_3$ )와 카메라 수평각도( $\theta_1$ )의 증가에 따라 벽면에 맺힌 슬릿 빔의 경사각( $\theta_2$ )은 증가하였으며, 카메라가 벽면을 수직으로 보았을 때 우측면에 대한 이론(식 19)과 실험 값들이 3차 곡선 형태로 빔 발생기의 각도에 따라서 동일한 경향으로 일치함을 알 수 있었다. 그림 10은 빔 발생기, 카메라의 좌우 수평각 그리고 슬릿 빔의 경사각 관계를 3차원으로 나타낸 것으로 발생기의 기울임 각과 카메라의 수평각이 클수록 슬릿 빔의 경사각은 점차적으로 곡면 형상을 이루고 있음을 알 수 있다.

**2 카메라의 추정 회전 각도를 이용한 결함 영상 회전**

그림 11은 카메라의 각도 변화에 따라 각각의 결함들에 대한 이진화, 윤곽선 처리, 그리고 관측 방향으로 회전 복원한 결함 영상들이다. 그림 11의 각 결함들은 공히 80° 이상에서는 결함 영상 정보를 거의 얻을 수 없기 때문에 실제적

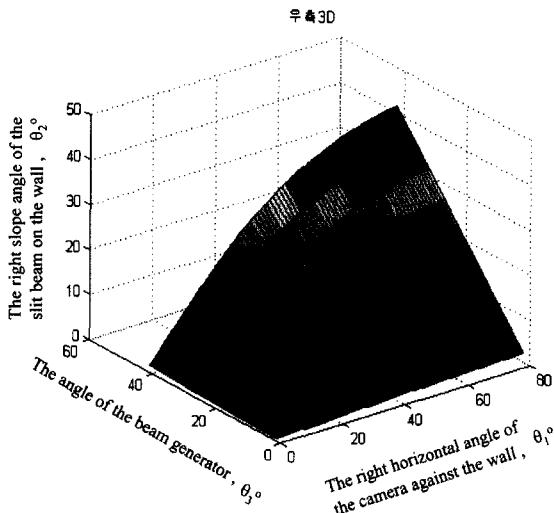


그림 10. 오른쪽 영역에서  $\theta_1$ ,  $\theta_3$  그리고  $\theta_2$ 의 이론 결과.  
Fig. 10. Theoretical results of the projected beam angle ( $\theta_2$ ) obtained with  $\theta_1$ ,  $\theta_3$  on the right section.

으로 측정이 불가능함을 알 수 있었다. 그림 11-(a)은 카메라 수평각도 만큼 기울어진 수직형 결함의 이진화와 회전 복원된 결과이다. 그 결과를 보면 벽면의 좌우 영역의 60°, 70°에서 영상 회전 전에 영상 데이터 손실이 발생되기 때문에 이진화와 관측 방향의 복원과 결함 측정의 정확도에 영향을 미치게 된다. 그림 11-(b)은 카메라 수평각도 만큼 기울어진 수평형 결함의 이진화와 회전 복원된 결과이다. 그 결과를 보면 좌 우측의 60° 이후부터 결함 영상에 대한 관측 방향의 회전에 있어서 영상 데이터의 손실이 발생되며, 수직형 결함보다 대체로 형태를 잘 유지하고 있음 알 수 있다.

그러나 각 모의 결함들을 살펴보면 결함을 정상 상태로 회전 복원하는데 중요한 변수는 각 결함들의 형태와 회전된 각, 결함 깊이, 형상들이 결정적인 요인임 알 수 있었다.

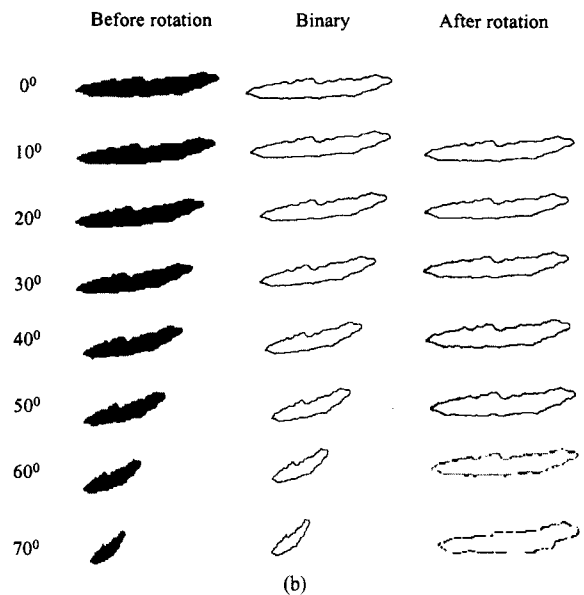
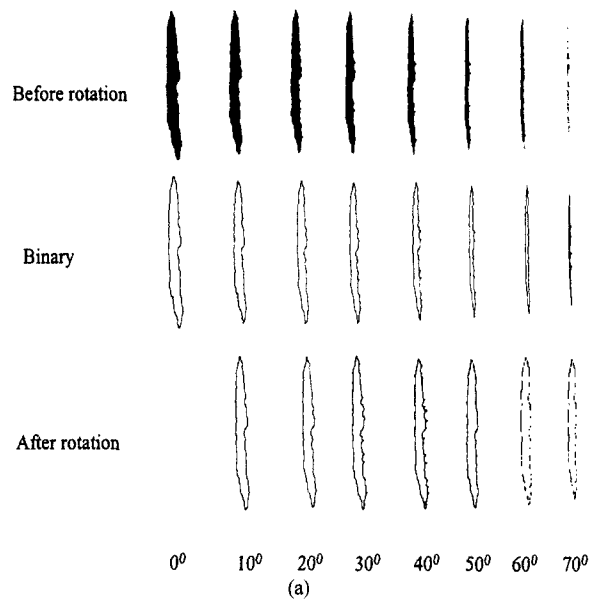


그림 11. 오른쪽 영역의 카메라 수평각도 변화에 따른 수직, 수평 결함에 대한 영상 복원.  
Fig. 11. Image reconstruction for vertical, horizontal defect shapes viewed at right section with various angles( $\theta_1$ ).

3. 카메라의 각도 변화에 따른 결함 크기 측정

본 실험의 측정 거리 범위는 벽면 20 cm에서 40 cm 거리이기 때문에 빔 발생기의 기울임 각은 37°로 고정하였다. 그 이유는 측정 거리 범위가 20cm에서 40cm 움직일 때 레이저 슬릿 빔이 640×480 화소(pixel)의 최대 범위로 들어오기 때문이다. 따라서 벽면에 대한 카메라의 수평각( $\theta_1$ )에 대한 3차 다항식과 계수 값은 (34)와 같다.

$$\therefore \theta_1 = a_i(\theta_2)^3 + b_i(\theta_2)^2 + c_i(\theta_2) + d_i \quad (\text{단 } \theta_{3i} = 37^\circ) \quad (34)$$

$$a = 0.00209, \quad b = -0.07999, \quad c = 2.28365, \quad d = -2.49634$$

그림 12, 13은 제안된 카메라 수평각도 자세 추정 알고리즘을 적용하여 결함 벽면의 좌우 영역에 대한 수직형, 수평형 결함들의 크기를 측정된 결과 값들이다.

그림 12는 좌우 벽면의 수직형 결함 크기를 측정된 결과로서 카메라 수평각이 0°에서 30°까지 오차율이 평균 0.6% 이 발생되며, 30° 이후에서 10° 증가에 따라 평균 1%의 오차 증가율을 보여주고 있다. 그림 13은 수평형 결함 크기를 측정된 결과로서 0°~30° 까지 오차율이 평균 0.8% 발생되며, 수직형 결함과 마찬가지로 30° 이후에서 10° 증가에 따라 평균 1%의 오차 증가율을 보여주고 있다. 그러나 그림 11과 같이 카메라 수평각이 60° 이상에서 수직형 보다 수평형 결함이 회전 복원 정도는 높으나, 수평형 결함이 회전 복원될 때 결함 깊이에 의해서 가려지는 사각 지역이 많기 때문에 결함 크기의 측정 오차 더 크다는 것을 알 수 있었다. 그리고 30도 이내에서 오차율이 적은 이유는 각 결함 공히 카메라 수평 기울임각의 30도와 시계각 30도 이내에 포함되고, 이 각도 범위에서는 슬릿빔의 기울임 정도가 작으며, 슬릿빔의 길이와 기울임각에 대한  $\beta=1/3$ 의 근사값을 무시할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

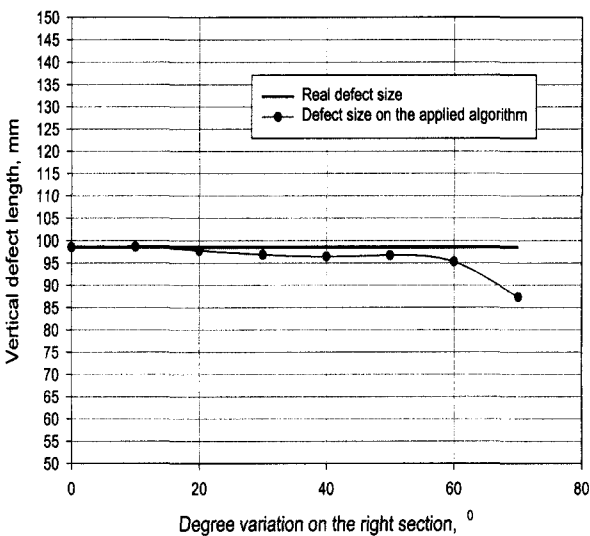


그림 12. 카메라 자세 추정 알고리즘을 이용한 오른쪽 영역의 수직 결함 길이 측정 결과.

Fig. 12. Result of length estimation of vertical shape defect in the position tracking algorithm of the camera right angle.

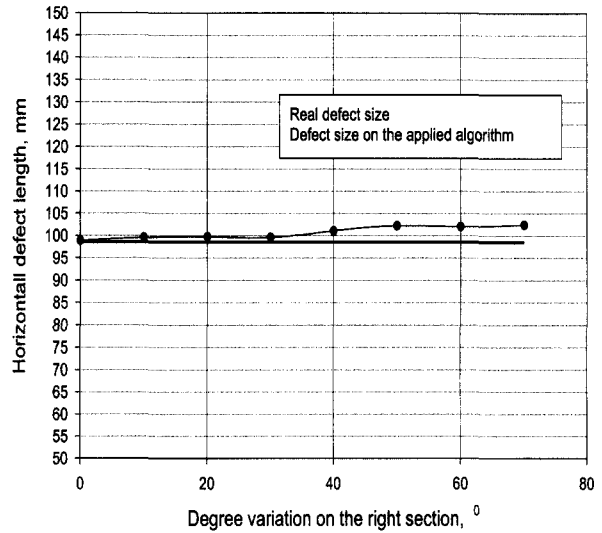


그림 13. 카메라 자세 추정 알고리즘을 이용한 오른쪽 영역의 수평 결함 길이 측정 결과.

Fig. 13. Result of length estimation of horizontal shape defect in the position tracking algorithm of the camera right angle.

V. 결론

본 논문에서는 공간상의 제약 조건에 따른 시스템의 불확도를 축소하고, 스테레오 카메라 방식의 문제점인 두 영점으로부터 어떤 점이 동일한 물체 점의 영상 점인가를 알아내는 대응점 문제(correspondence problem)를 고려할 필요가 없는 라인 슬릿 빔의 경사각을 이용한 카메라의 회전각도 추정 알고리즘을 이용하였다. 그리고 결함 영상 복원을 통하여 결함 크기 측정방법을 제시하였다. 카메라 수평각도 추정을 위한 알고리즘을 제안하고 이를 실험을 통하여 검증하였으며, 회전된 결함들을 3차원 변환과 관측 방향으로 회전, 복원하였다. 그리고 결함 종류와 크기에 따라서 오차 범위를 조사하였으며, 최종적으로 레이저 슬릿 빔의 경사각과 CCD 카메라의 수평각도 추정 알고리즘을 이용한 결함들에 대한 형상 크기 측정에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

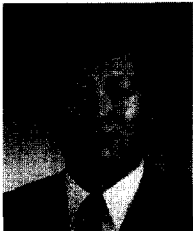
- 1) 슬릿 빔의 경사각( $\theta_2$ )의 정보로부터 카메라 수평각도( $\theta_1$ )를 추정할 수 있는 수식과 계수 값을 도출하였다.
- 2) 각도 별로 결함 영상들을 관측 방향으로 복원함으로써, 카메라 자세 추정 알고리즘의 적용 가능성을 보여주었다.
- 3) 슬릿 빔의 경사각을 이용한 카메라 자세 추정 알고리즘을 이용하여 각 결함의 각도 변화에 따른 오차율을 실험을 통하여 알 수 있었으며, 30° 이내에서는 평균 0.6%의 오차율을 보여주었다.
- 4) 본 논문에서는 라인 슬릿 빔의 경사각을 이용한 카메라의 회전각도 추정 알고리즘의 적용과 결함 영상 회전을 통하여 결함 크기 측정방법을 제시하였다.

참고문헌

[1] Vittorio Murino and Andrea Trucco, "A confidence based approach to enhancing underwater acoustic image forma-



- tion," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 8, no. 2, pp. 270-285, 1999.
- [2] Stephen Tetlow and John Spours, "Three dimensional measurement of underwater work sites using structured laser light," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 10, pp. 1162-1167, 1999.
- [3] Chisato Kanamori, Makoto Kautani, and Tadashi Marauds, "A coordinate measuring method using laser plane scanners(2nd Report)," *情密工學會誌(日本)*, vol. 63, no. 1, pp. 119-216, 1997.
- [4] Kuntal Sengupta and Liyanage C. DeSilva, "A new depth cue based algorithm for back-ground, fore-ground segmentation," *SPIE*, vol. 3653, pp. 1305-1314, 1999.
- [5] Woontack Woo and Antonio Ortega, "Modified overlapped block disparity compensation for stereo image coding," *SPIE*, vol. 3653, pp. 570-581, 1999.
- [6] R. S. Petty, M. Robinson, and J. P. O. Evans, "3D measurement using rotating line-scan sensors," *Meas. Sci. Technol.* vol. 9, pp. 339-346, 1998.
- [7] Toshiyuki Takatsuji, Atsushi Kirita, and Tomizo Kurosawa, "A simple instrument for measuring edge angles using a light sectioning method," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, pp. 782-786, 1997.
- [8] Tom Rezenik, "Tutorial : In-line laser measurement in the assembly process," *Industrial Robot*, vol. 24, no. 1, pp. 16-23, 1997.
- [9] Yong-Hui Fa and Yoel Moalem, "Effective defect detection and classification methodology based on integrated laser scanning inspection and automatic defect classification," *IEEE/ SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, pp. 266-271, 1998.
- [10] Prabir Bhattacharya, Kai Qian, Siqi Cao, and Yi Qian, "Skeletonization with hollow detection on gray image by gray weighted distance transform," *SPIE*, vol. 3460, pp. 746-754, 1998.
- [11] N. C. Krieger and Lassen, "Automatic localization of electron back-scattering pattern bands from hough transform," *Materials Science and Technology*, vol. 12, pp. 837-843, October, 1996.
- [12] James Clark, Emanuele Trucco, and Lawrence B. Wolff, "Using light polarization in laser scanning," *Image and Vision Computing*, vol. 15, pp. 107-117, 1997.



#### 김영환

1959년 12월 4일생. 1988년 대전 산업대학교 기계설계공학과 졸업. 2001 충남대학교 기계설계공학과 석사. 1986년~현재 한국원자력연구소 선임연구원. 주관심분야는 원심분리 제어 기술, 영상신호처리, 인공지능, 원격취급기술, 제어이론의 응용.



#### 윤지섭

1958년 2월 3일생. 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 1987년 동대학원 박사. 1987년~현재 한국원자력연구소 책임연구원. 주관심분야는 산업공정 원격취급기술, 생산자동화 및 계측제어, 로봇 및 센서 적용기술.



#### 강이석

1952년 2월 14일생. 1974년 서울대학교 기계공학과 졸업. 아주대 기계공학과 석사. 한국과학기술원 기계공학과 박사. 1991년~1992년 MIT 대학 방문연구원. 1981년~현재 충남대학교 기계설계공학과 교수. 주관심분야는 제어이론의 응용, 로봇틱스, 인공지능, 공장자동화.