한국정밀공학회지 제17권 제4호 (2000년 4월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 4, April 2000.

에그크레이트(Eggcrate) 격자(Grid)의 내접원 직경 측정을 위한 머신비젼 알고리즘

김채수*, 박광수*, 김우성*, 황학**, 이문규***

A Machine Vision Algorithm for Measuring the Diameter of Eggcrate Grid

Chae-Soo Kim*, Kwang-Soo Park*, Woo-Sung Kim*, Hark Hwang**, and Moon-Kyu Lee***

ABSTRACT

An Eggcrate assembly is an important part to hold and support 16,000 tubes containing hot and contaminated water in the steam generator of nuclear power plant. As a great number of tubes should be inserted into the eggcrate assembly, the dimensions of each eggcrate grid are one of the critical factors to determine the availability of tube insertion. In this paper, we propose a machine vision algorithm for measuring the inner-circle diameter of each eggcrate grid whose shape is not exact quadrangular. The overall procedure of the algorithm is composed of camera calibration, eggcrate image preprocessing, grid height adjustment, and inner-circle diameter estimation. The algorithm is tested on real specimens and the results show that the algorithm works fairly well.

Key Words : Machine Vision Application(머신 비젼 응용), Eggcrate Assembly(에그크레이트 조립품), Camera Calibration(카메라 교정), Diameter Measurement(직경 측정)

1. 서론

그 동안 자동화 분야의 비약적인 발전에 힘입어 생산기술 부문은 대부분의 업종에서 상당한 경쟁력을 갖추고 있는데 반하여 품질관리 분야에서는 아직까지도 많은 부분을 작업자의 목시 검사나 검사용 지그(Jig)에 의존하고 있다. 이로 인하여 검사자는 동일한 작업을 반복해서 검사해야 하기 때문에 판단 오류나 작업의 효율이 떨어지는 경우가 많다.

원자력 발전용 증기발생기(steam generator)의 주요 부품인 에그크레이트(eggcrate)는 그림 1에서 보는 바와 같이 16,000개 이상의 특수한 금속재인 격자(grid)가 서로 그물 모양 형태로 조립되어 있다. 에그크레이트 격자를 구성하는 기본 단위구조는 네 개의 변으로 이루어진 마름모꼴 모양으로 이루어져 있는데 여기에 방사능 물질이 포함된 고온 고압의

* 한국중공업 생산기술연구실
** 한국과학기술원 산업공학과
*** 계명대학교 자동차공학부 산업공학과

물이 흐르는 전열관(tube)이 삽입되는데, 에그크레이트는 이 전열관들이 서로 일정한 간격으로 정렬되고 지탱될 수 있도록 해주는 일종의 유지장치(supporting device)이다. 전열관들은 에그크레이트가 증기발생기 내부에 용접되어 설치되고 나면 각 에그크레이트 격자에 순서에 따라 삽입되게 되는데, 이때 격자의 크기가 작은 경우는 전열관 삽입이 불가능하게 된다. 따라서 전열관의 원활한 삽입과 보호를 위해서는 에그크레이트 격자가 이루는 최대 내접원의 크기가 정해진 사양을 만족하게 제작되어야 한다. 그러나 에그크레이트는 제관 및 용접 공정으로 제작되는 조립품이므로 치수가 정해진 규격을 만족하지 않을 수 있으므로 제작후 철저한 치수검사가 필요한데, 검사대상인 격자의 수가 워낙 많고, 에그크레이트의 크기 또한 직경이 4m에 달하는 대형 구조물이므로 사람이 전수검사하기는 매우 어려운 상황이므로 자동화된 치수검사 장치의 도입이 필요한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 전수 검사가 가능한 머신비젼 시스템(machine vision system)을 하나의 좋은 대안으로 제시하고 이러한 시스템 구축에 필요한 가장 핵심적인 부분인 에그크레이트 격자 내접원의 치수 측정을 위한 머신비젼 알고리즘을 개발하였다.

Fig.1 A part of the eggcrate *assembly*.

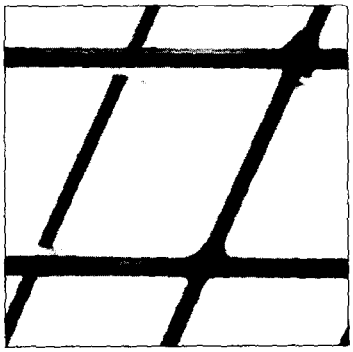
2. 시스템 구성

그림1에 보이는 에그크레이트 단위 구조(eggcrate opening)는 그림2(a)에 주어진 바와 같이 네 개의 변으로 구성되어 있다. 네변중 3개는 상부에 나머지 1변은 25.4mm 만큼 낮은 높이에 있는 하부에 조립되어 있다. 본 연구에서는 이러한 단위 구조에 관통될 수 있는 전열관 내접원의 최대 직경을 추정하기 위한 시각인식 알고리즘 개발을 위하여 실험용 영상처리 시스템을 아래와 같이 구축하였다.

2.1 입출력 시스템

검사대상물에 대한 영상을 획득하여 컴퓨터에서 처리 가능하도록 디지털 파일로 출력하기 위한 하드웨어로서 사양은 다음과 같다.

a. An eggcrate-opening image under front light



b. A back-lighted image of the eggcrate opening

Fig. 2 Images of an eggcrate opening

카메라: 768(H)× 494(V)해상도의 Teli CS8320B CCD카메라 (RS170 방식, 흑백영상)

렌즈 : 3.0 mm접사링이 부착된 AVENIR 25mm(f) CCTV렌즈

프레임 그래버(frame grabber)

:해상도 640× 480의 흑백화상 전용 MVB03

(명암도 (gray level)수준: 256(0~255))

2.2 조명장치

CCD카메라를 통하여 획득된 영상의 특성은 조명장치의 구조와 조명방법에 따라 크게 좌우된다. 특히 본 연구를 통하여 구축하고자 하는 에그크레이트 격자는 크기가 작고 3차원 구조이며 표면 반사 성질이 큰 금속으로 이루어져 있기 때문에 조명장치의 선택이 중요한 과제중의 하나가 된다. 격자 내접원의 직경과 중심을 추정하기 위해서는 하나의 전열관이 삽입되는 격자 내부의 윤곽을 정확하게 알아내야 한다. 그러나 그림 2(a)에 주어진 영상을 보면 격자 내부의 윤곽을 요구 정밀도 수준으로 추출하기가 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 따라서 격자 내부의 윤곽선 추출을 용이하게 하는 적합한 조명장치가 요구되었다.

본 연구에서 요구하는 치수정밀도를 유지하기 위해서는 에그크레이트 표면의 난반사로 인한 영상의 선명도 및 안정성 저하를 초래하는 전방조명(forward lighting)으로는 어려운 것으로 판단하였다. 따라서 이의 대안으로서 고주파 백열등 (40kHz, SFC FL-20)이 장착된 상자형 조명장치인 후방조명(back lighting)을 사용하였다. 후방조명은 대상물의 후면에서 조명을 비추기 때문에 대상물의 실루엣(silhouette) 영상이 배경과 확연하게 대비되어 드러나게 되는 효과가 있다. 그림 2(b)에는 이와 같이 후방 조명을 받은 단위 구조의 모습이 주어져 있다.

3. 측정 알고리즘

본 연구과제를 위한 에그크레이트 격자의 내접원 직경 측정 알고리즘은 아래와 같이 크게 카메라 교정(camera calibration), 영상처리(image processing), 전열관 내접원의 직경추정의 3단계로 나뉘어 진다.

3.1 카메라 교정

시각인식기법을 이용한 검사 자동화는 여러 가지 형태로 이루어지는 인간의 시각을 이용한 검사 작업을 시각인식기법과 인공지능 기법을 이용하여 자동화하는 기술로서 대부분이 직·간접 측정작업, 표면검사, 검사 및 검사 후 제품의 위치를 이동하기 위한 인도장치(guiding device) 등으로 구성되어 있다. 특히, 측정작업, 즉 정량적인 제품의 특성인 치수나 면적, 직경 등의 측정을 통한 양·불량검사를 위한 머신비젼(machine vision) 시스템을 구축할 때에는 반드시 영상좌표계(image coordinate system)와 실세계 좌표계(world coordinate system)와의 관계를 규명하는 카메라 교정(camera calibration)작업이 선행되어야 한다. 이러한 카메라 교정은 카메라의 광학적인 특성과 내부구조 특성을 나타내는 내부인자(internal parameters)와 물체가 놓여있는 실세계 좌표계(world coordinate system)를 기준으로 하여 카메라의 3차원적인 위치 및 방향을 나타내는 외부인자(external parameters)를 결정하는 과정을 일컫는다[2]. 본 연구에서는 대상 물체와 카메라의 렌즈가 거의 수평상태에 놓여 있기 때문에 카메라 교정의 조건으로는 악조건(ill-conditioned)하의 상태가 된다. 따라서, 통상 30° 이상으로 기울어진 경우에 많이 사용되는 Tsai[5]의 알고리즘은 사용할 수 없기 때문에 여기서는 이정화 & 이문규[2]의 악조건하의 교정 방법을 사용하였다.

3.2 전열관 내접원의 직경 추정

본 연구에서 개발된 전열관 내접원의 직경 및 중심점을 추정하기 위한 절차가 그림 3에 주어져 있다. 여기서는 그림에서 주어지는 순서에 따라 각 세부 단계를 설명한다.

1) 영상 획득

에그크레이트 격자의 영상은 CCD카메라로부터 A/D 변환기 및 LUT(loop-up-table) 변환을 거쳐 프레임 그래버에 저장되고 그 영상이 모니터에 실시간으로 출력되게 된다.

2) 밝기/대비(Brightness/Contrast) 조정

에그크레이트 격자의 내부 윤곽선을 정확하게 추출하기 위해서는 조명장치 부문에서 기술한 바와 같이 정확한 윤곽선 추출이 가능해야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 후방조명에 의하여 획득된 영상에 대하여 우선 LUT를 활용하여 원 영상의 명암도를 반전시킨 반전영상(inverse image)을 실시간으로 취득하도록 한다. 이와 같이 반전영상을 취득하는 이유는 후에 기술된 윤곽선 추출 과정에서 사용된 기법에 적합한 정보를 얻기 위함이다.

3) 명암도 임계치 설정

다음은 취득된 영상에 대하여 윤곽선이 보다 용이하게 추출될 수 있도록 하기 위한 일련의 전처리 과정으로서 배경과 격자 부분을 구별하는데 사용되는 명암도 임계치를 구한다. 이 명암도는 후에 윤곽선 추출을 위한 정보 취득시 주요한 임계치 역할을 하게 된다. 이러한 명암도 임계치를 정확하게 구하기 위하여 영상중심점 (Cx, Cy)를 기준으로 하여 x축상의 좌우 격자 부분의 명암도와 y축상의 상하 격자 부분의 명암도를 총 평균한 평균치와 표준편차를 구하였다. 이 자료를 이용하여 최종적인 임계치는

명암도 임계치 = 평균 명암도 - K*표준편차

를 사용하였는데 여기서 K값은 다수의 실험에 의하여 구한 1.3을 사용하였다.

4) 격자 내부의 ROI 설정

격자 내부의 ROI(Region of Interest: ROI)는 그림 4에서 보는 바와 같이 에그크레이트 단위 구조(격자)내에 있는 내부 윤곽선을 축소한 영역을 의미한다. 이 영역은 윤곽선 추출시 각 윤곽점 결정에 사용되는 일련의 명암도 자료를 구하기 위한 영역을 정의하는 데 사용된다. 즉 하나의 윤곽점을 구하기 위해서는 단위 구조 내부의 기준이 되는 중심점으로부터 외부로 나가는 가상의 직선상에 있는 각 화소의 명암도 정보를 추출하여 윤곽점 추출 알고리즘에 적용하게 된다. 이 때 윤곽선 추출에 사용되는 정보의 양을 줄이기 위하여 ROI외부의 화소들만을 사용하고자 하는 것이다. 즉, 그림 4에는 중심점으로부터 외부로 나가는 하나의 직선이 주어져 있는데 직선상에서 점선으로 나타낸 부분을 제외한 나머지 실선 부분만이 윤곽점 추출을 위한 추출의 대상이 된다. 이러한 ROI를 설정하기 위한 과정은 우선 프레임 그레버의 중심점으로부터 시작하여 네변의 가운데 부분에 7개의 윤곽점을 추출하여 이를 회귀분석하여 직선화한다. 여기서 윤곽선 추출방법은 다음절에 설명된 Tabatabai & Mitchell[4]의 기법을 사용하였다. 그림 4에서는 이 결과가 격자 내부윤곽부위에 흰선으로 도시되어 있다. 따라서 ROI는 이 직선들을 안쪽으로 특정량만큼 이동 변환한 다음 서로 연결시켜서 구한 것이다. 이 ROI는 크기가 클수록 윤곽선 추출시 시간이 적게 걸리게 된다. 따라서 실제 시스템 구현시 허용 가능한 최대 크기의 ROI를 사용하는 것이 바람직하다.

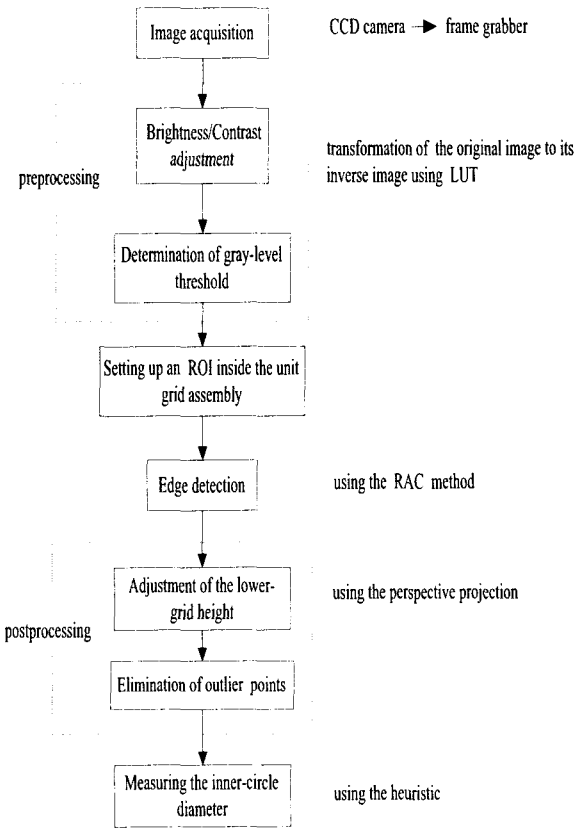


Fig. 3 The procedure of measuring the inner-circle diameter of an eggcrate opening

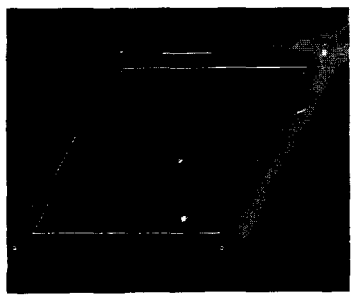


Fig. 4 An eggcrate-opening image with ROI

5) 윤곽선 추출(edge detection)

이상과 같이 전처리된 영상에 대하여 격자 내부의 윤곽선을 추출하게 된다. 윤곽선 추출을 위하여 일반적으로 많이 사용되는 방법은 공간 필터(spatial filter)로서 Sobel, Robert, Prewitt 등을 사용하여 관심영역(ROI)을 변환시키는 것이다. 본 연구의 대상인 에그크레이트 격자에 대하여 이를 적용하면 배경과 격자 부분의 사이에 모두 윤곽선이 추출되게 되어 내접원을 도출하기가 어려워진다. 또한 이와 같이 하여 구한 윤곽선은 2줄 이상이 두껍게 나타나기 때문에 이를 얇게 변환시켜 주는 세선화(thinning) 작업이 요구되는 번거로움이 있을 뿐만 아니라 윤곽선 자체도 정밀하지 못하다는 단점이 있다. 격자 내접원은 0.01mm까지의 정밀도를 요구하고 있기 때문에 이러한 윤곽선 추출 방법으로는 한계가 있다. 그러므로 이를 극복하기 위한 방법으로서 본 연구에서 제안한 것은 격자 내부의 중심으로부터 360° 회전하면서 subpixel수준의 윤곽선을 추출하는 RAC(Rotation-About-Center) 추출법이다.

이러한 RAC 추출법은 그림 5에서 보듯이 물체 내부에 하나의 빈 공간이 있을 경우 내부 윤곽선을 찾기 위하여 개발되었다. 이 방법은 대상 물체의 중심으로부터 x축과 이루는 각도가 θ가 되도록 외곽으로 직선을 그었을 때(직선의 깊이는 끝점이 W 부분을 넘지 않도록 함) 각 직선에 대한 subpixel 수준의 윤곽을 $0 \le \theta \le 2\pi$ 에 걸쳐서 순차적으로 구하도록 한다. 임의의 θ 에 대하여 앞서 기술된 ROI 외곽 부분의 직선상에 있는 화소들의 명암도를 ROI부터 시작하여 순차적으로 추출하되 W부분에 속한 화소의 수가 일정 개수에 도달할 때까지 반복하여 추출한다. 이렇게 추출된 화소들의 정보를 이용하여 스텝 유형의 윤곽점을 구하기 위하여 가장 대표적인 방법인 Tabatabai & Mitchell[4]의 기법을 사용하였다.

본 연구에서는 대상 소재의 특성에 부합하는 보다 정확한 윤곽점을 찾아내기 위하여 Tabatabai & Mitchell 기법 이외에도 Lyver & Mitchell[3]과 김 길동 등[1]의 기법도 모두 사용될 수 있도록 구현하였다. 그런데, 본 연구진에서 다수의 실험을 해본 결과 3가지 기법 중 Tabatabai & Mitchell[4]의 기법이 다양한 조명환경하에서도 가장 안정적인 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

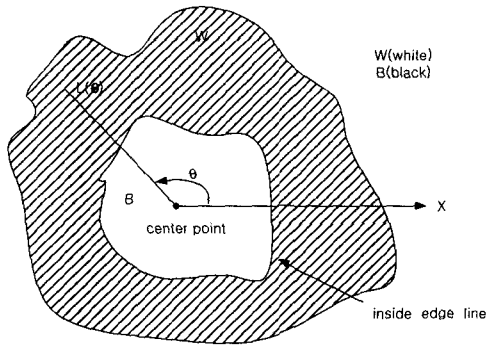
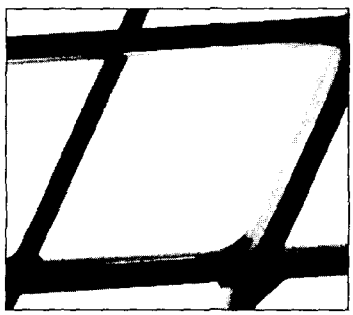


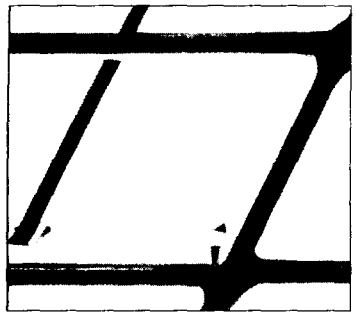
Fig. 5 The RAC edge-detection method

6) 하부격자의 위치 보정

내접원 도출을 위하여 최종적으로 필요한 영상처리 과정은 일종의 후처리로서 하부 격자의 위치 보정과정이다. 그림 2에서 보았듯이 격자의 3변(상부 격자)은 동일 평면에 있으나 나머지 한변(하부 격자)은 그 평면보다 설계상 25.4mm만큼 밑에 위치하기 때문에 카메라 한 대만을 사용하여 영상처리 할 때는 이를 동일 평면으로 위치를 보정해야 한다. 이를 위한 하나의 방안으로서는 물체 깊이를 자동 보정하여 주는 Telecentric 렌즈를 사용할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 검토한 Telecentric 렌즈(Kenko사 KCM-105T)를 시험하여 본 결과, 그림 6에서 보는 것처럼 초점 조정의 정밀도 면에서 일반 렌즈와 큰 차이를 보이지 않았다. 그 이유는 하부 격자의 심도가 너무 깊기 때문으로 해석된다. 따라서 여기서는 일반 25mm 렌즈를 사용하되 영상영역 내에서 최대한 확대되도록 3mm 접사링을 활용하였다.



(a) An eggcrate-opening image obtained by using a Telecentric lens



(b) An eggcrate-opening image obtained by using an ordinary 25mm lens

Fig. 6 Comparison of two images

하부 격자의 윤곽점들을 상부와 동일한 평면에 일치시키도록 위치(높이)를 보정하기 위해서 본 연구에서 사용한 절차는 다음과 같다:

단계 1: 하부 격자 영상에 있는 하나의 윤곽점(Xf, Yf, 0)을 프레임의 중심 (Cx, Cy) = (320, 240) 으로 이동 변환한

$$Xf = (Xf, Yf, 0) - (Cx, Cy, 0)$$
$$= (Xf - Cx, Yf - Cy, 0) \text{ (단, Zf=0)}$$

를 구한다.

단계 2: 이 Xf를 카메라 교정 과정의 수리적 모형을 이용하여 다음 순서대로 역변환하여 그에 해당되는 실세계 좌표 추정치인 $\hat{X}_w$를 구한다.

$$Xf \Rightarrow Xd \Rightarrow Xu \Rightarrow Xc$$
$$\Rightarrow \hat{X}_w = (\hat{x}w, \hat{y}w, 0)$$

여기서, 3.1절의 카메라교정 과정을 통하여 카메라 인자들인 초점거리 f, 카메라의 Z축 좌표 zc, 회전행렬 R, 이동벡터 T, 스케일 인자 sx 등의 값들을 알 수 있게 되므로 이를 이용하면

$$Xd = ((Xf - Cx)d'x/sx, (Yf - Cy)dy),$$
$$Xu = Xd/(1-kr2) \approx (1+kr2)Xd,$$
$$Xc = Xu\ zc / f,$$
$$Xw = R\text{-}1(Xc - T),$$

d'x= 카메라 CCD소자의 X축 해상도/프레임그래버 영상의 X축 해상도

dy = 카메라 CCD소자의 Y축 해상도/프레임 그래버 영상의 Y축 해상도

$r2 = \mu\ 2 \cdot Xd2 + Yd2,$

$\mu = fy/fx,$

$fx = f \cdot sx/d'x,$

$fy = f/dy,$

k = 상수,

(Cx, Cy) = 프레임 그래버 영상의 중심점

로 표현된다.

단계 3: 단계 2에서 구한 하부 격자에 있는 각 점의 실세계 좌표 추정치 중 Z축 값을 실제 하부 격자가 있는 곳으로 위치시킨 수정점 $\hat{X}w = (\hat{x}w, \hat{y}w, -\Delta z)$, (여기서 $\Delta z = 25.4$임)를 구한다. 이 수정점을 카메라 교정과정에 따라 다음 과 같이 변환시켜서 보정된 점 $\hat{X}f$를 구한다:

$$\hat{X}w \Rightarrow Xc \Rightarrow Xu \Rightarrow Xd \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \hat{X}_f = (\hat{X}_f, \hat{Y}_f, 0)$$

여기서, $Xc = R\ Xw + T,$

$Xu = f\ Xc/zc,$

$Xd = (1\text{-}kr2)Xu$

$Xf = (sxXd\ /d'x + Cx,\ Yf/dy + Cy)$

이다.

단계 4: 단계 3에서 구한 $\hat{X}_f$를 원래의 영상 좌표로 이동하기 위하여

$$\hat{X}_f = \hat{X}_f + (Cx, Cy, 0)$$

로 이동 변환시켜서 이를 최종적인 영상좌표 $\hat{X}_f$로 한다.

7) 이상점 제거

영상에 잡음(noise)이 전혀 없으면 윤곽선 추출이 잘되지만 통상 영상에 잡음이 끼는 경우가 대부

분이므로 이를 제거하기 위한 과정이다. 영상에 잡음이 섞여 있으면 그로 인하여 윤곽점 설정 과정이 영향을 받게 되므로 엉뚱한 위치에 잡히게 된다. 이 과정에서는 앞서 구해진 내부 ROI를 축소(80% 정도) 설정하여 그 ROI내에 있는 모든 윤곽점들을 잡음의 영향을 받아 잘못 구해진 윤곽점들로 간주하고 제거하게 된다.

8) 최대 내접원의 직경 및 중심점 추정

본 연구에서 개발된 전열관 내접원의 직경 및 중심점 추정 방법은 일종의 발견적(heuristic) 방법으로서 그 과정은 다음과 같다:

앞 절의 윤곽선 추출 과정을 통하여 추출된 내부 윤곽선안에 허용 공차내의 전열관이 삽입될 수 있는지를 파악하기 위해서 우선 내접원의 중심점이 위치하게 될 대략적인 영역을 설정한다. 이 영역은 편의상 실험적으로 구한 8(l)X7(w) 화소 크기의 직사각형으로 한정하였다. 다음으로는 주어진 최소 직경부터 검토하여 삽입 가능한 최대 직경을 구하도록 한다. 이론적인 허용 직경의 구간이 19.43 -19.71 mm으로 주어져 있지만 실제 직경을 측정하기 위해서 19.09의 직경을 갖는 내접원부터 시작하게 된다.

실세계 상에서 직경 D인 임의의 원이 내부 윤곽선 내에 삽입될 수 있는지를 검토하기 위해서는 우선 프레임 그래버상에 있는 내부 윤곽선들의 좌표를 실세계 좌표 Xw로 변환시켜야 한다. 이것은 앞절의 카메라 교정 중에서 Xf ⇒ Xw로 변환하는 일련의 과정을 이용하면 된다. 다음으로 이렇게 해서 윤곽선상의 실세계상 좌표 Xw점들을 얻게 되면 이들의 무게 중심점을 구하여 중심점 탐색영역의 기준위치로 설정한다. 주어진 직경을 갖는 탐색 대상 내접원의 중심점을 정확하게 모르기 때문에 일정 영역을 설정하여 중심점이 그 영역내에 있는 것으로 간주하고 탐색을 수행한다. 영역내의 임의의 한 점을 중심점으로 가정하고 최소의 직경을 갖는 원이 그림 7에 나타낸 두 곳의 검색 영역에 원의 일부가 침범하는지를 확인한다. 여기서, 검색영역은 탐색시간을 단축시키기 위하여, 주어진 격자의 구조와 내접원의 모양에 대한 특성을 고려하여 설정된 영역이다. 확인결과 모든 영역에 걸쳐 침범하지 않는 것으로 판정되면 그 직경의 전열관은 삽입 가능한 것으로 평가할 수 있다. 그렇지 않으면 중심점 추정이 잘못된 것일 수 있으므로 그림 7에 도시된 중심점 탐색 영역의 다른 한 점을 중심점으로 하여 위의 절차를 반복 수행한다. 다음으로 삽입 가능한 내접원의 최대 직경을 구하기 위해서는 검토 대상의 내접원의 직경을 δ (작은 실수)만큼씩 증가시킨 후 이상의 과정을 반복하여 수행하면 된다. 따라서, 임의의 직경에서 중심점 탐색 영역내에 있는 모든 점들을 탐색하여도 가능한 해가 나오지 않으면 현재의 직경에서 δ 만큼 작은 치수의 직경이 내접원의 최대 직경이 된다.

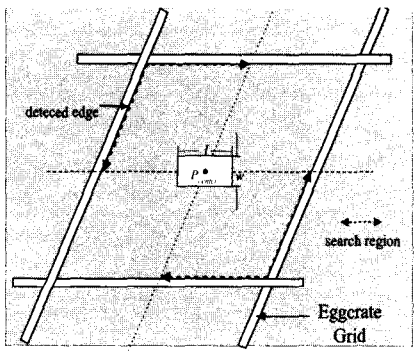


Fig. 7 Search region defiend for finding the center and diameter of tube circle

이상의 알고리즘을 단계별로 정리하면 다음과 같다:

단계 0: <모수 초기화>
중심점 탐색영역 모수인 l, w 값의 초기화; D0 = 0; D1 = 최소 직경; δ = 작은 실수; Iteration index i = 1;

단계 1: <윤곽선상에 있는 점들의 좌표를 실세계 좌표로 변환>
Xf ⇒ Xw 변환

단계 2: <중심점 추정>
추출된 윤곽선의 무게 중심점(Pcenter) 추정:

$$\text{Pcenter}(x) = \sum_{i=1}^{n} Xf/n,\quad \text{Pcenter}(y) = Y \sum_{i=1}^{n} f/n.$$

단계 3: <삽입 가능 여부 판정>
윤곽선 상에 있는 두 곳의 검색 영역에 원의 일부가 침범하는지를 확인; 침범하면 단계 4 수행.

단계 4: <중심점 위치 수정>
Pcenter를 중심점 탐색영역 내의 다른 한 점으로 이동시킨 후 단계 2-3을 수행; 중심점 탐색영역 내의 모든 점들을 검토하여도 가능해가 나오지 않으면 Di-1를 최대 내접원으로 처리하고 종료. 그렇지 않으면 단계 5를 수행.

단계 5: <직경 확대>
아래와 같이 변수들을 재정의한 후 단계 3부터 반복 수행:
$D = D + \delta$;
Pcenter = 단계 2에서 구한 중심점의 추정치;
$i = i + 1$.

이상의 전열관 직경 및 중심점 추정과정을 실제 에그크레이트 격자에 적용한 결과가 그림 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16에 나타나 있다.

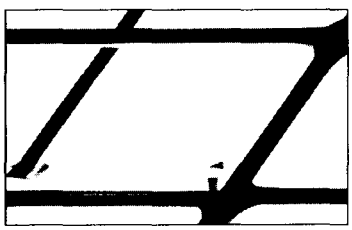


Fig. 8 An original image

Fig. 9 The negative image of Fig. 8

Fig. 10 The negative image on which four intermediate sections searched are depicted

Fig. 11 The negative image with its inner ROI

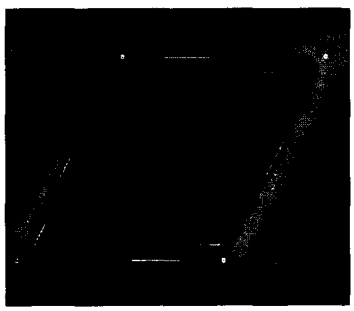


Fig. 12 The negative image with the obtained four partial boundary lines

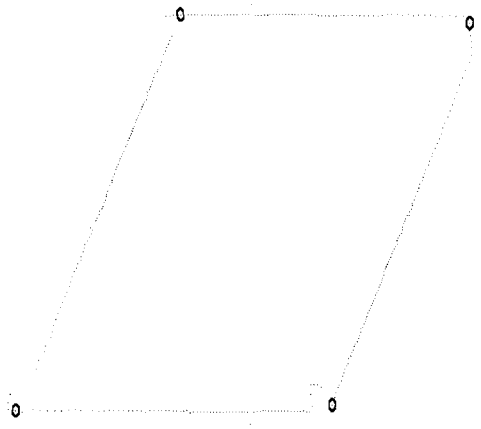


Fig. 13 An image only showing the obtained inside boundary line

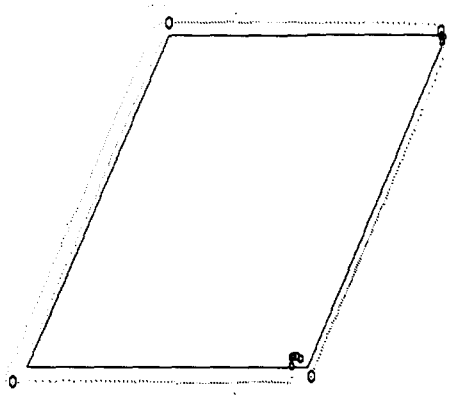


Fig. 15 The modified image showing outlier points are being deleted

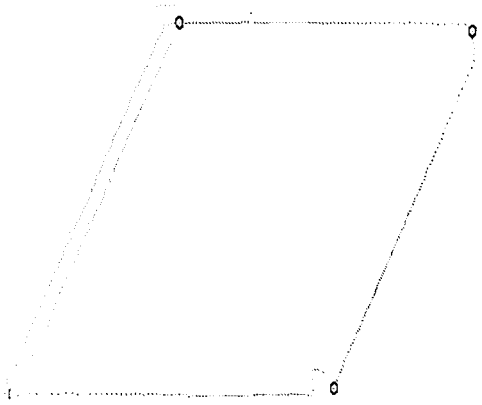


Fig. 14 The modified image after adjusting the lower grid height

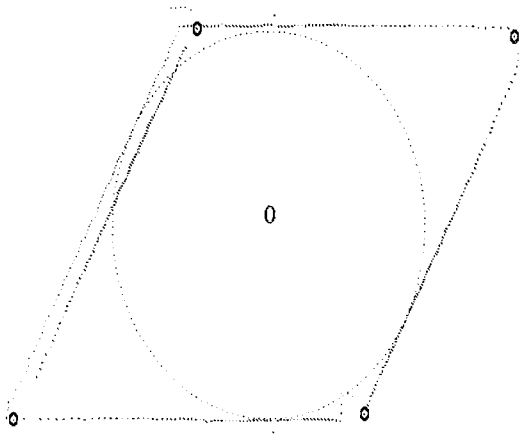


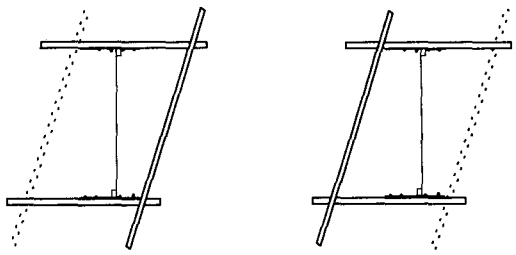
Fig. 16 The modified image with the obtained tube circle and its center

4. 성능평가

여기서는 본 연구를 통해서 개발된 알고리즘의 성능을 평가하고자 한다. 알고리즘의 성능이란 그를 이용하여 얻어지는 격자 내접원의 추정결과가 얼마나 유효한지를 나타내는 평가지수의 하나이다. 그러기 위해서는 측정결과를 서로 비교할 수 있는 어떤 절대적인 기준치가 있어야 한다. 그러나 본 연구의 대상인 에그크레이트 격자는 3차원의 구조로서 상하면에 각각 세 개의 변으로 구성이 되어 있기 때문에 정확하게 측정할 수 있는 상업용 측정기기를 발견하기가 힘들다. 이를 정확하게 측정하기 위해서는 에그크레이트 격자의 구조적 특성을 고려하여 특별히 제작한 전용의 측정 기기가 필요한 것으로 생각된다.

현재로선 이러한 전용의 측정기기를 제작하기가 힘들기 때문에 우선 본 연구진은 0.001mm의 정밀도를 나타내는 가장 정밀한 측정기기 중의 하나인 3차원 정밀측정기(3 Dimensional Coordinate Measuring Machine: CMM)를 사용하여 측정 기준치를 얻고자 하였다. CMM은 단순히 3차원상의 임의의 점의 위치를 측정 탐침(probe)을 이용하여 측정하는 기기이므로 전열관의 직경을 바로 추정할 수는 없다. 정확하게 측정하려면 에그크레이트의 사면 상에 있는 무수히 많은 점들을 측정하여 이를 토대로 네 개의 자유곡면들을 구성한 다음, 이 곡면들로 이루어지는 공간을 통과하는 최대 직경의 튜브를 구해야 한다. 그러나, 이 방법은 매우 어려운 기하학적 문제로서 아직까지 효과적으로 해를 구할 수 있는 알려진 알고리즘이 발견되지 않고 있기 때문에 사용하기가 힘들다. 따라서, 본 논문에서는 CMM으로 현장에서 비교적 간편하게 구할 수 있는 하나의 기준수치를 제공할 수 있는 다음의 방법(CMM 간이법)을 사용하여 비교해 보았다. 즉, 그림 17에 주어진 바와 같이 에그크레이트 단위 구조의 상부 격자와 하부 격자의 3면 중 서로 마주보고 있는 두면의 최소 거리를 각각 구하여 이들의 최소치를 전열관의 직경으로 추정하였다. 표 1은 총 40개의 격자를 이러한 방식으로 측정한 결과를 정리한 것이다.

이렇게 CMM을 이용하는 것은 격자의 외면을 측정하여 간접적으로 전열관의 직경을 측정하는 방법이라고 할 수 있다. 이와는 달리 직접적으로 가장 단순하게 측정할 수 있는 방법은 전열관의 예상 직경 범위내의 각 직경의 크기를 갖는 게이지(gauge)를 만들어서 직접 측정해 보는 방법이다. 본 연구에서는 이를 위하여 0.001mm의 정밀도를 갖는 NC 선반을 이용하여 전열관 직경으로 19.10부터 19.70까지 0.05mm 간격으로 총 13개의 게이지를 만들었다(그림18 참조).



(a) top grid (b) bottom grid

Fig. 17 Principle of the simple method for measuring tube diameters by a CMM

Table 1 Tube diameters obtained by the simple CMM method for the specimens

	C1	C2	C3	C4	C5
R1	19.21	19.24	19.69	19.70	19.30
R2	19.06	19.19	19.25	19.33	19.21
R3	19.47	19.45	19.52	19.44	19.39
R4	19.35	19.37	19.34	19.13	19.33

	C6	C7	C8	C9	C10
R1	19.42	19.44	19.47	19.23	19.53
R2	19.45	19.18	19.45	19.41	19.35
R3	19.48	19.17	19.54	19.54	19.27
R4	19.45	19.32	19.49	19.48	19.34

Fig. 18 Acryl gauges made for the experiments.

제작된 게이지는 0.01mm 정밀도의 digital vernier caliper로 측정하여 크기를 확인하였다. 이러한 게이지는 손으로 잡고 opening에 넣고 빼기가 쉽도록 길이가 60mm이며 재질은 아크릴로 제작되어 있다. 전열관의 측정치는 최소 직경을 갖는 게이지부터 시작하여 직경을 0.05mm씩 증가시키면서 격자에 들어가는지를 확인해 보아 최종적으로 들어가는 것과 그렇지 않은 것과의 중간치를 어림으로 잡아 산출하였다. 표 2는 이러한 방법으로 추정된 결과를 정리한 것이다. 다음 표 3은 동일한 샘플에 대하여 본 연구에서 개발된 알고리즘을 구현한 컴퓨터 프로그램으로 구한 결과이다.

이 측정 결과를 평가하기 위하여 앞서 측정된 결과 중 게이지를 이용한 것을 기준으로 다음과 같이 정의되는 오차를 비교하였다:

오차(%)={[CMM간이법 측정치(또는 알고리즘에 의한 측정치) - 게이지 측정치] / 게이지 측정치} × 100%

(단, 오차 계산 시 19.1 이하는 19.1로 두고 계산하였음)

이러한 오차의 평균과 분산을 CMM 간이법과 본 연구의 알고리즘에 의한 측정치에 대하여 구한 결과를 정리하면 표 4에 주어진 바와 같다. 이 표에서 보는 바와 같이 본 연구를 통하여 개발된 알고리즘이 평균 오차, 표준 편차 및 최대 오차의 모든 면에서 우월한 결과를 나타내고 있다. 그러나, 이러한 비교는 CMM 자체의 성능이 열등한 것을 의미한다고 할 수 없고 앞서 지적한대로 CMM으로 현장에서 용이하게 구할 수 있는 한가지 기준치와의 비교결과로 해석될 수 있다.

Table 2 Tube diameters obtained by using the gauges for the specimens

	C1	C2	C3	C4	C5
R1	≤19.10	19.22	19.53	19.68	≤19.10
R2	≤19.10	19.20	19.26	19.40	≤19.10
R3	19.30	19.43	19.42	19.43	≤19.10
R4	19.32	19.33	19.28	19.13	19.18
	C6	C7	C8	C9	C10
R1	19.42	19.27	19.31	19.23	19.50
R2	19.40	≤19.10	19.50	19.43	19.38
R3	19.43	≤19.10	19.48	19.47	19.23
R4	19.36	19.12	19.42	19.42	19.28

Table 3 Tube diameters obtained by using the machine-vision algorithm suggested in this paper

	C1	C2	C3	C4	C5
R1	≤19.10	19.33	19.48	19.48	≤19.10
R2	19.18	19.33	19.27	19.36	≤19.10
R3	19.21	19.48	19.18	19.45	≤19.10
R4	19.27	19.30	19.27	19.21	≤19.10
	C6	C7	C8	C9	C10
R1	19.54	19.21	19.36	19.27	19.45
R2	19.45	≤19.10	19.48	19.48	19.48
R3	19.54	≤19.10	19.54	19.60	19.21
R4	19.21	≤19.10	19.39	19.36	19.24

Table 4 Performance comparision between the simple CMM method and the machine-vision algorithm

	Average	STD Deviation	Max. Error	Min. Error
simple CMM Method	0.399	0.350	1.518	0
Machine-Vision Algorithm	0.324	0.293	1.236	0

5. 결론

본 연구에서는 원자력 발전용 증기발생기의 주요 부품인 에그크레이트에 있는 격자들의 내경 치

수를 측정하기 위한 시각인식 알고리즘을 개발하였다. 에그크레이트 격자의 단위 구조는 얇은 금속제로 만들어진 바가 마름모의 네 변을 이루며 용접된 형태를 띄고 있는데, 그 중 세개의 변은 상부와 동일한 평면상에 있으나 나머지 하나는 25.4mm 밑에 조립되어 있기 때문에 머신비젼을 이용하여 마름모의 내경을 측정하기 위해서는 카메라로 영상을 취득한 후에 네 변이 갖는 높이의 차이를 보정해야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 위하여 카메라 교정의 수리적 개념을 활용한 보정방법을 개발하였으며 이를 바탕으로 하여 격자 단위 구조의 가운데 공간을 통과할 수 있는 최대 내접원의 직경을 측정하는 영상처리 알고리즘을 개발하였다. 또한 이의 성능을 평가하기 위하여 3차원 정밀측정기에 의한 간이법과 측정 결과를 비교한 결과 본 연구에서 제시된 알고리즘이 우월한 것으로 평가되었다. 그러나, 본 연구에서 제안된 알고리즘으로 구한 측정결과는 게이지를 이용한 측정치와 평균 0.324mm의 오차를 나타내고 있으므로 게이지 제작 및 측정에 따른 오차를 감안하더라도 향후 개선의 여지를 보여 주고 있다. 이것은 알고리즘의 개선뿐만 아니라 프레임그래버와 카메라 등의 하드웨어를 보완을 통해서 대폭 향상될 것으로 기대되며 본 연구에서 제시된 알고리즘은 이를 위한 기초자료로서의 역할을 할 것으로 믿는다.

개발된 알고리즘은 유사하거나 관련된 분야에 다양하게 적용될 수 있는데 에그크레이트 격자와 유사한 형태의 홀(hole)에 대하여 치수측정 및 가공상태 검사 등에 직접적으로 응용될 수 있고, 나아가서는 불규칙한 윤곽 형상을 갖는 2차원 물체의 면적, 윤곽선 길이, 무게 중심, 주축(major axis)등과 같은 주요한 형상특징을 추출하고자 할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 김길동, 이만희, 최종주, 장동식, 자동시각검사시스템을 위한 새로운 서브픽셀(subpixel)알고리즘, '97 대한산업공학회 추계학술대회발표논문집, 1997.
2. 이정화, 이문규, "A Camera Calibration Algorithm for an ill-Conditioned Case," 한국정밀공학회지, Vol.16, No. 2, pp.164-175, 1999.
3. Lyvers, E. P. and Mitchell, O. R., "Subpixel Measurements Using a Moment-Based Edge Operator," IEEE Trans on PAMI, 11(12), pp.1293-1308, 1989.
4. Tabatabai, A. J. and Mitchell, O. R., "Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery," IEEE Trans. on PAMI, PAMI-6(2), pp. 188-201, 1984.
5. Tsai, R. Y., "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344, 1987.