

# 최소 오차 원 해석을 위한 최적 해상도에 관한 연구

김태현\*, 문영식\*, 한창수\*\*

## The Optimal Resolution for Circle Analysis with the Minimum Error

Tae Hyeon Kim\*, Young Shik Moon\*, and Chang Soo Han\*\*

### ABSTRACT

In this paper, an algorithm for determining the optimal resolution has been described for measuring the actual length of circular objects. As the resolution gets higher, the measurement error in general becomes smaller because of the reduced distance per pixel. However, the higher resolution makes circular objects enlarged, which may produce an ill-conditioned system. That is, a small error in the boundary positions may result in a large error in the analysis of the circular objects. Taking this fact into account, a new measure is proposed to determine the optimal resolution. The actual errors have been calculated with various resolutions and the resolution with the minimum error has been decided as the optimal resolution. The analysis using various circles with different sizes indicates that the minimum measurement error is obtained when the whole circle appears in the screen as large as possible, regardless of the size of circle. The experimental results using real images have verified the validity of our analysis.

**Key Words** : optimal resolution(최적 해상도), circle analysis(원해석), measurement error(측정오차), actual error(실측오차)

### 1. 서론

최근 제조공정에서 주로 인력에만 의존해야 했던 제품의 양호, 불량 체크나 최종 시각 검사 등의 공정을 자동화하고 있다. 고속으로 이송되는 제품의 제조 상태를 명확하게 판정하기 위한 비접촉식 측정기술로서 인공 시각 기술인 머신 비전 기술을 이용한 외관검사, 치수검사 등이 많이 이용되고 있으나, 제품의 높은 정밀도는 실 측정을 어렵게 할 뿐만 아니라, 고가의 장비를 요구한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 시각 검사 장치가 연구되고 있다. 영상 정보를 이용한 원형 물체의 계측 시스템들은 주로 원 영상의 경계 테

이터를 이용하여 원의 방정식과 최소 오차를 갖는 파라미터를 구하는 알고리즘과 부화소(subpixel) 영역에서의 정밀도를 높이는 연구를 기반으로 이루어져 왔다. 원 형상의 계측 알고리즘은 일반적으로 입력 영상을 배경과 분할(segmentation)한 후, 경계 영역의 데이터를 추출하고 이로부터 최소 오차를 갖는 원의 방정식을 구하여 중심과 반지름을 구하게 된다.

이일환<sup>(1)</sup> 등은 기어 영상에서 반지름을 구하는 알고리즘을 연구하였다. 먼저 전체 영상을 취득하여 경계 화소들을 추출한 후 최소 자승법을 이용하여 반지름을 구하게 된다. 이때 불량 기준은  $60\mu\text{m}$  이며 픽셀 당 해상도는  $9.7\mu\text{m}$  로 오차 범위

\* 한양대학교 전자계산학과

\*\* 한양대학교 기계공학과

를 6~7 화소 정도로 정하였다. 이러한 해상도의 결정은 경험적으로 이루어진 것이며 최적의 해상도 인지는 검증되지 않았다. 이성천<sup>(2)</sup> 등은 원 형상을 취득하여 고속으로 반지름을 구하였다. 원 내부에 두개의 축을 구하여 축의 길이와 반지름의 관계식을 이용하여 반지름을 구하였다. 그러나 이는 경계 부분이 절반이상 획득되어야 하며 잡영이 많은 영상에는 사용할 수 없고 고정밀의 원 해석에서는 적용하기 어렵다. A.J.Tabatabai<sup>(3)</sup> 등은 1 차원 모멘트를 이용하여 단 경계(step edge)의 위치를 구하였다. 단 경계는 단조 증가하는 것으로 가정하고 각 경계 내부 부분과 바깥쪽 부분의 확률 분포 및 통계적 수치를 이용하여 경계 위치를 소수점이하 자리까지 구하였다. 이를 원 해석에 적용하였으며 전체 영상을 대상으로 수행하였다. 그러나, 원 해석을 위해 전체 영상을 대상으로 하는 것이 효과적인지는 검증되지 않았으며, 모멘트의 계산에 있어 한 방향에 대해서만 고려하였기 때문에 2 차원 영상에 적용하였을 때는 많은 오차를 갖게 된다. A. Huertas<sup>(4)</sup> 등은 LoG 필터(Laplacian of Gaussian filter)를 사용하여 1/n 해상도의 부화소 위치를 결정하는 알고리즘을 연구하였다. 이 또한 전체 영상을 대상으로 원 해석에 적용하였는데 최적의 해상도인지는 검증되지 않았다.

기존의 원 영상 실측을 위한 연구는 디지털화(digitized)된 전체 영상을 이용하여 수행하고 있다. 이때 계측 오차의 신뢰성을 높이기 위해 화소 당 해상도를 높이게 되는데 이를 위해 부화소 정도(subpixel accuracy)를 이용하거나 고해상도의 카메라를 사용하여 크게 확대하여 영상을 취득하게 되고 보통 유효 오차의 5 배 이상 확대하여 영상을 취득한다. 그러나 이는 경험적으로 선택된 것이며 최적의 해상도인지는 검증된 바 없다. 또한 유효 오차 범위 내에서 측정하기 위해 고가의 장비를 사용해야 하는 어려움이 있다.

본 논문에서는 원형 물체에 대한 실측 원 해석을 위해 최소 오차를 갖도록 하는 해상도 결정에 관하여 기술한다. 이를 위해 2 장에서 전체 시스템에 대해 설명한 후, 3 장에서 경계 위치에 대해 설명하며 4 장에서는 최소자승법을 이용한 원 해석 알고리즘을 기술한다. 5 장에서는 최적 해상도 결정을 위한 측정치와 경계 영역의 비율에 대한 실측 오차를 계산하는 방법에 대해 기술하는데 최적해상도는 실측오차가 최소가 되는 해상도이다.

6 장에서는 제안하는 알고리즘의 타당함을 실험으로 보이고 7장에서 결론을 맺는다.

## 2. 전체 시스템

원 해석을 위한 계측 시스템의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 전체 시스템은 금속으로 가공된 3 차원 구 해석을 위한 시스템으로 물체 구동부와 비전 시스템으로 구성되어 있다. 물체 구동부에서 물체를 정해진 각도만큼 회전시킨 후 카메라를 통해 영상을 취득하여 구의 단면인 원 해석을 하게 되는데 중심 좌표와 지름을 측정한다. 영상 취득 보드, 카메라 및 조명 장치는 주 컴퓨터로부터 제어된다. 조명방식은 백라이트(back light) 기법을 사용하였고 영상 취득, 검사 소프트웨어의 실행 등도 주컴퓨터에서 동작된다.

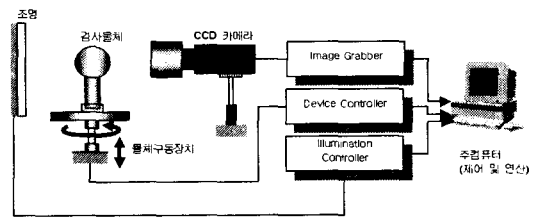


Fig. 1 System Configuration

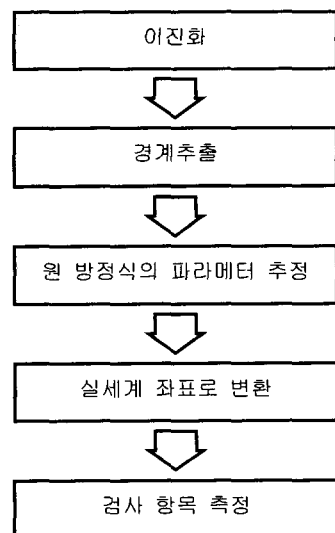


Fig. 2 Measurement Procedure

전체 검사과정은 Fig. 2 와 같다. 영상취득 과정에서 얻은 영상으로부터 이진 영상을 구하고, 경계 추적 알고리즘<sup>(5)</sup>을 사용하여 경계 점의 위치 데이터를 모두 추출한다. 추출된 경계 데이터를 이용하여 원의 방정식을 구하는데 이는 최소자승법을 이용하여 반지름 및 중심 위치를 구한다. 화소 단위로 추정된 3 개의 파라미터를 실세계 값으로 변환하여 원의 반지름에 대한 실측 값으로 정한다.

### 3. 경계 위치

디지털 영상은 실세계의 형상을 영상 평면에 투영하여 샘플링 과정을 거쳐 얻게 되는데 이러한 과정에서 경계의 손실이 있게 된다. 1 차원의 예를 들면, 길이가 약 1.3 화소인 물체의 경우 실제 경계가 Fig. 3 과 같이 화소 내부에 위치하게 되는데 영상 입력 단계에서 샘플링 과정을 거치면서 실제 경계 정보를 잃게 된다.

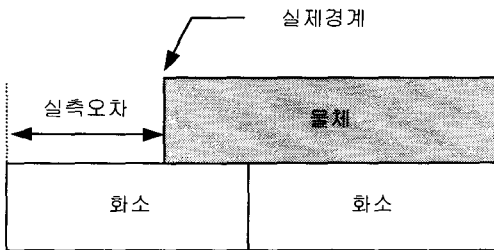


Fig. 3 Real boundary and sampled data

2 차원의 경우도 마찬가지인데 원의 경우 영상 내 위치에 따라 경계데이터의 좌표가 다르게 나타난다. 임의의 원에 대한 경계를 구한 후 0.5 화소 이내에서 이동 시키게 되면 이전의 경계와 다르게 샘플링 될 수 있다. 즉 화소의 정수배 만큼 이동하는 경우에는 같은 경계 데이터를 유지하지만 각 x, y 방향으로  $\pm 0.5$  화소 이내에서 이동시키는 경우는 서로 다른 경계데이터를 만들어내게 된다. 이 관계를 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4(a)는 지름이 9 인 원이 9x9 화소 내에서 영역을 완전히 채운 형태이고 Fig. 4(b)는 가로 방향으로 약 0.5 화소 정도 이동시킨 후의 것으로서 샘플링된 원의 폭이 8 화소로서 원래의 것과 다르게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 실세계의 물체를 디지털화하여

취득하는 과정에서 발생하게 되는데, 카메라의 CCD 에 투영된 신호를 샘플링하고 이진화하는 과정에서 각 픽셀 영역에 절반 이상을 차지할 때 물체의 영역으로 결정된다.

취득된 영상으로부터 실제 반지름을 계산하는 과정은 일반적으로 영상을 이진화한 후 경계 추출 과정을 거쳐 구한 각 데이터들을 이용하여 계산하게 된다. 본 논문에서는 이진화 알고리즘으로 p-tile 방식의 이진화 알고리즘을 사용한다<sup>(6)</sup>. p-tile 방식은 입력 영상의 히스토그램을 이용하여 물체가 차지하는 비율 만큼을 임계값(threshold value)로 정하는 방법으로 안정적인 조명 상태에서는 효과적인 방법이다.

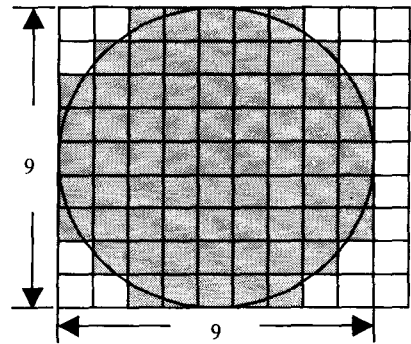


Fig. 4 (a) Original image

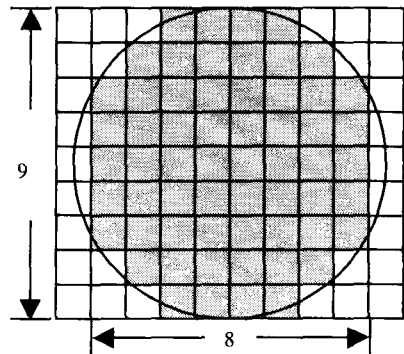


Fig. 4 (b) Original image shifted by 0.5 pixel  
Fig. 4 Edge location of circle image

### 4. 원 해석 알고리즘

최적 해상도 결정을 위해 디지털화 된 경계 화소 데이터로부터 원의 방정식의 각 파라미터를

구해야 한다. 이는 최소자승법을 이용하여 구하게 되며, 중심이  $P_0(x_0, y_0)$ , 반경이  $r$ 인 원의 방정식은 다음과 같다.

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$$

여기서 경계상의 점을  $P_i(x_i, y_i)$ 로 놓고 오차 함수 (error function)  $E$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$E = \sum_{i=1}^n [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2]^2,$$

$n$ : 경계 화소의 수

여기서  $z = x_0^2 + y_0^2 - r^2$ 으로 놓으면,

$$E = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z)^2$$

위의 식을 최소화하는  $x_0, y_0$ 를 구하기 위해 각 미지수에 대해 편미분을 한다. 즉,

$$\frac{\partial E}{\partial x_0} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z)(-2x_i) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial y_0} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z)(-2y_i) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i x_0 + y_i^2 - 2y_i y_0 + z) = 0$$

위의 식을 풀면  $x_0, y_0, z$ 를 구할 수 있고, 반경  $r$ 은 아래의 식으로부터 구한다.

$$r = (x_0^2 + y_0^2 - z)^{1/2}$$

### 5. 최적 해상도 결정

원형 물체의 해석을 위한 최적의 해상도는 화소 단위의 오차가 아니라 실측 오차를 최소화 하는 해상도이다. 즉, 해상도가 높아질수록 (좁은 부분을 확대해서 볼수록) 화소당 실측은 감소하므로 오차를 줄일 수 있을 것 같으나, 검사 정밀도를 맞추기 위해 해상도를 너무 높이면 영상의 크기는 고정되어 있으므로 원의 일부만을 이용하여 해석하게 되는데, 이는 원 해석을 위해서는 좋지 않은 조건(ill-conditioned)이다. 좁은 부분을 너무 확대할

경우 원의 경계점들에 오차가 조금만 포함되어 있어도 해석 결과에는 많은 오차가 발생한다. 최적 해상도를 결정하기 위해서는 실측 오차를 구해야 한다. 실측오차는 실제 원의 반지름과 추정된 원의 반지름의 차이로 정의한다. 이때 입력 데이터는 영상 내 경계 좌표이므로 화소 단위를 이용하여 표현될 수 있어야 한다. 본 논문에서는 실측을 위해 사용되는 측정치를 영상의 화소 단위로 유도 하였으며 이를 이용하여 실측 오차를 구한다.

### 5.1 실측 오차를 위한 측정치

반지름의 실측 오차는 실제 원의 반지름과 추정된 원의 반지름의 차이로 정의하며, 실제 원의 반지름은 화소 단위의 반지름과 1 화소 당 거리의 곱으로 표현된다. 따라서 실측 오차는 화소 단위의 자료를 이용하여 유도될 수 있으며 이는 아래 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e_i &= |rad\_real - rad\_est_i| \\ &= |p\_real \times mpp - p\_est_i \times mpp| \\ &= |p\_real - p\_est_i| \times mpp \end{aligned} \quad (1)$$

$e_i$  : 실측 오차

$rad\_real$  : 실제 반지름의 길이

$rad\_est_i$  :  $i$ 번째 위치의 추정 반지름의 길이

$p\_real$  : 원 영상의 화소 단위 반지름 길이

$p\_est_i$  : 화소 단위로 추정된  $i$ 번째 위치의 반지름의 길이

$mpp$  : 1 화소 당 거리(meter per pixel)

### 5.2 최적 해상도 결정

입력 영상의 해상도가 고정된 상태에서 실측 원 해석을 수행할 경우 어느 정도의 영역을 취득 하여야 최소 오차를 구할 수 있는지에 관한 연구는 알려진 바가 없다. 즉, 전체 영상을 취득하여야 하는지 혹은 일부만으로 최적의 해상도를 얻을 수 있는지에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았으며 경험적으로 응용사례에서 요구되는 유효오차의 5 배 이상을 확대하여 검사하고 있으며 주로 전체 영상을 대상으로 하였다. 그러나 이러한 결정 방법이 최적의 해상도인지는 검증된 바 없다.

입력 영상의 크기를 고정시킨 상태에서 최적의 해상도를 결정하기 위해 원의 일부 및 전체를

대상으로 실측 오차를 계산하였다. 실제 반지름이  $rad\_real$  인 원이 있다고 가정할 때 이 원의 경계 중 약 15% 부터 전체에 대한 영상을 취득한 후 반지름을 추정하고 이를 5.1 절에서 정한 측정치를 이용하여 실측 오차를 계산한다. 이때 3 장에서 언급한 바와 같이 경계 추출과정에서 발생하는 경계위치의 오차를 고려해야 한다. 영상 취득과정에서 구한 영상데이터는 샘플링(sampling)과정을 거쳐 디지털화 된 데이터이므로 같은 물체라도 영상 취득위치에 따라 경계위치가 다르게 나타난다. 즉, 경계위치가 디지털화 되면서 발생하는 오차는 x, y 각 방향으로  $\pm 0.5$  화소씩 발생할 수 있는데 정확한 오차를 추정하기위해 발생할 수 있는 모든 경우를 고려해야 한다. 따라서 이러한 사항을 모두 고려한 실측 오차를 구하기 위해 x, y 각 방향으로  $\pm 0.5$  화소 구간 내에서 원의 중심 좌표를 이동하면서 각 위치에서의 반지름을 구한 후 오차를 계산한다. 이때 각 지점에서 구한 오차들의 평균을 각 해상도에 대한 실측 오차로 정하며 이를 식(2)에 나타내었다. 전체적인 시뮬레이션 절차를 아래에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |rad\_real - rad\_est_i| \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |p\_real - p\_est_i| \times mpp. \end{aligned} \tag{2}$$

$\bar{e}$ : 평균 실측 오차

N: 서로 다른 위치에서 입력된 영상의 총 갯수

위의 식을 이용하여 실측 오차 계산을 위한 시뮬레이션 절차는 다음과 같다.

For each resolutions // 각 해상도에 대하여  
{

Step 1. 해상도별 화소 단위 반지름  $p\_real$  계산;

Step 2.

for ( $dx=-0.5$ ;  $dx<0.5$ ;  $dx=dx+step$ ) { //중심좌표이동  
for ( $dy = -0.5$ ;  $dy < 0.5$ ;  $dy = dy + step$ ) {

Step 2.1 중심 좌표( $x_0+dx, y_0+dy$ ) 및 화소 단위 반지름  $p\_real$ 을 이용하여

경계 좌표 계산;

Step 2.2 각 경계 좌표를 정수화;

Step 2.3 경계 좌표를 이용하여 추정된 반지름  $p\_est_i$  계산;

}

Step 3. 아래 식을 이용하여 평균 실측오차 계산

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |p\_real - p\_est_i| \times mpp$$

위의 과정에서 step 은 0.03 으로 하여 시뮬레이션 하며, 각 해상도별 실측 오차를 구한 후 이중 최소의 오차를 갖는 해상도를 최적의 해상도로 정한다.

### 5.3 실제 영상을 이용한 실험 절차

앞 절의 결과를 검증하기 위하여 실제 영상을 이용하여 실험하였다. 실제 영상에서 경계 부분에 왜곡이 생길 수 있는 요소는 조명의 상태와 실제 경계의 위치이다. 실제 비전 검사를 위해 정밀하게 만들어진 조명들도 미세하게나마 광도가 계속 변한다. 이로 인해 영상 취득 과정에서 경계 부위에 오차가 발생할 수 있다. 또한 실제 경계의 위치는 앞 절에서 설명한 바와 같이  $\pm 0.5$  화소 구간 내의 실제 경계 위치에 따라 오차가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 앞 절의 시뮬레이션 방법과 동일한 방법으로 실험을 하기 위하여 동일 해상도에서, 여러 장의 영상을 취득하여 실험을 하였다. 이때 각 물체의 위치를 상하좌우의 방향으로 조금씩 이동하여 동일 해상도에서 발생할 수 있는 다양한 경계가 나타나도록 하였다.

먼저 취득된 영상으로부터 이진화 과정을 통하여 이진 영상을 구하고, 이로부터 경계 추출 알고리즘을 사용하여 경계 점의 위치 데이터를 모두 추출한다. 추출된 경계 데이터를 이용하여 원의 방정식을 추정하게 되는데 최소자승법으로 반지름 및 중심위치를 구한다. 추정된 반지름을 식(2)에 적용하여 실측 오차를 계산한다. 이때, 실측 오차 계산을 위해 사용되는 원 영상의 화소 단위 반지름  $p\_real$  은 영상의 해상도인 1 화소 당 거리를

정확히 알아야만 결정할 수 있는 값으로 이의 정확한 값을 구하는 것은 매우 어려운 문제이다.

본 논문에서는 원 영상의 화소 단위 반지름인  $p_{real}$  과 추정된 반지름  $p_{est_i}$  사이에 발생하는 오차를 가우시안(Gaussian) 분포로 가정하였는데,  $p_{real}$  은 추정된 반지름의 평균 값  $p_{mean}$  과 측정 오차  $\Delta p$  의 합으로 표현할 수 있으며 이를 식 (4)에 나타내었다. 여기서 평균값  $p_{mean}$  은 각 추정 자료들로부터 구할 수 있는 값이나  $\Delta p$  는 해상도와 원의 중심 좌표에 따라 달라지게 되므로 이를 추정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 따라서  $\Delta p$  를 실험적으로 구하기 위하여  $p_{real}$  을  $p_{mean}$  으로 대치한 후 식(2)에 적용하여 동일한 방법으로 실험을 하였다. 실험을 통하여 양측의 결과가 서로 유사함을 확인하였고 이를 Fig. 5.에 나타내었다. 실험 결과로부터 두 그래프의 경향이 유사하며  $\Delta p$  를 무시하더라도 최적 해상도 결정을 위한 전체 결과에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 본 논문에서는 실제 영상을 이용한 최적 해상도 결정의 실험을 위해  $p_{real}$  대신  $p_{mean}$  을 이용하였다.

$$p_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{est_i} \quad (3)$$

$$p_{real} = p_{mean} + \Delta p \quad (4)$$

실제 영상을 이용한 실험 절차를 아래 알고리즘에 나타내었다.

```

For each resolution // 각 해상도 별
{
  For each image // 각 영상에 대하여
  {
    Step 1. 영상 이진화;
    Step 2. 경계 추출;
    Step 3. 경계 좌표를 이용하여 추정된 반지름
            $p_{est_i}$  계산;
  }

  Step 4. 추정된 반지름의 평균  $p_{mean}$  계산;
  Step 5. 아래 식을 이용하여 현재 해상도의
           평균 오차 계산;

```

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |p_{mean} - p_{est_i}| \times mpp$$

## 6. 실험 결과

### 6.1 시뮬레이션 결과

제안된 실측 오차 척도를 이용하여 5.2 절의 시뮬레이션 절차에 따라 실험하였다. 중심이 원점인 여러 원의 물체가 있는 것으로 가정하고 각각의 경계 데이터를 추출한 후 일부분부터 전체에 대해 실측오차를 구하였다. 입력 영상의 크기는 512x512 로 고정하였으며 실험에 사용한 원의 지름은 각각 30mm, 40mm, 50mm 이다. 화소 당 거리는 0.04mm~0.3mm 까지 하여 실측오차를 계산하였다. Fig. 5 에 각각의 실험결과를 나타내었다.

각 그림은 실선 및 점선의 두 가지 형태의 그래프가 함께 나타나 있는데 실선은 실제 원 영상의 화소 단위 반지름인  $p_{real}$  을 적용하여 구한 결과이고 점선은  $p_{real}$  대신 평균 반지름  $p_{mean}$  을 적용한 결과이다. 그림에 나타나 있듯이 두 그래프의 차이는 거의 없으며 이로부터  $\Delta p$  의 값을 무시하더라도 전체 결과에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. Fig. 5 (a)는 지름이 30mm 인 원을 이용하여 실험한 것이다. 해상도가 1 화소 당 0.04mm 인 경우에 지름은 30/0.04=750 화소이므로 원의 70% 정도 영역을 이용하여 반지름을 추정한 경우이고, 이때의 실측 오차는 약 0.04mm 이다. 해상도 변화에 따른 오차 그래프에서 오차가 최소가 되는 지점은 해상도가 약 0.06mm 로써 이는 화소 지름이 30/0.06≈512 화소 정도인 지점이다. 즉 물체를 전체 영상에 가득 채워 반지름을 추정할 때 최소 오차를 얻게 됨을 알 수 있다. 또한 최적해상도 보다 큰 구간 (영상의 해상도를 낮추는 구간)에서는 물체의 전체 형상이 영상 내에 모두 취득은 되지만 물체를 작게 취득하여 반지름을 추정하기 때문에 오차가 점차 증가하게 된다.

나머지인 40mm, 50mm 의 경우는 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)에 각각 나타나 있으며 이들 원에 대해서도 최적의 해상도는 40/0.08≈512, 50/0.1≈512 로서 같은 결과를 얻었다. 따라서 최소오차의 위치, 즉 최적의 해상도는 전체 원 형상을 영상 내에 가득 채운 상태로 취득하는 것이며 이는 원 크기에 무

관하다. 즉 실측으로 원 해석을 할 경우, 전체 물체를 대상으로 영상 취득을 하되 가능한한 영상 내에 가득차게 취득하여 반지름을 취득하면 최소의 오차로 결과를 얻을 수 있다.

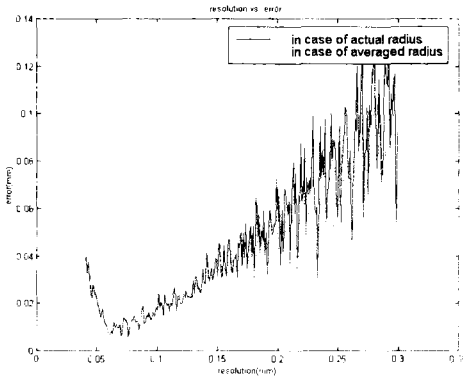


Fig. 5(a) 30mm in diameter

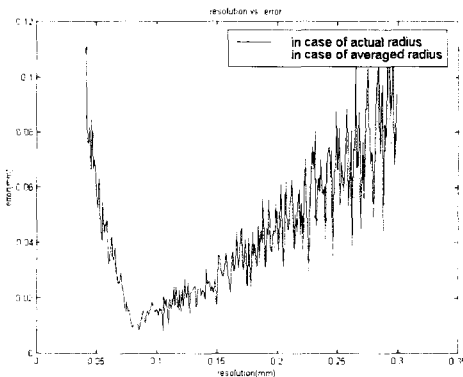


Fig. 5(b) 40mm in diameter

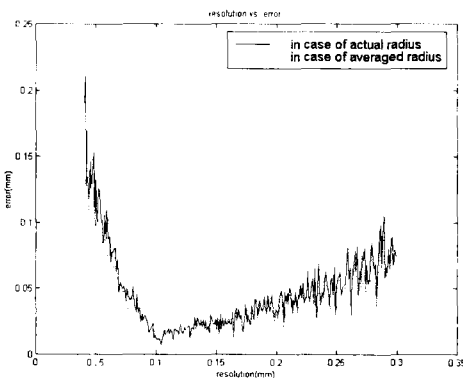


Fig. 5(c) 50mm in diameter

Fig. 5 Actual error measured by simulation

## 6.2 실제 영상을 이용한 결과

시뮬레이션 결과의 검증을 위하여 실제 영상과의 결과를 비교하였다. 실험을 위해 사용한 주 컴퓨터는 IBM-PC Pentium, 영상취득 보드는 Matrox 사의 Meteor 보드, 카메라는 Sony 사의 XC-75CX 를 사용하였다. 검사 영상의 해상도는 512(H) x 480(V) 이다. 실험을 위해 원형 표준 시편 (master ball)을 사용하였는데 모양은 구 형태이고 지름은 30mm 이며 제작 정밀도는 1 $\mu$ m 이다. 이를 Fig. 6.에 나타내었다.

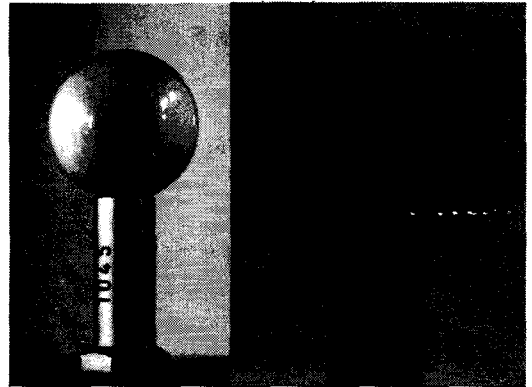


Fig. 6 Master ball and its back light-illuminated image

원 전체 크기의 30%~300% 정도 범위 내에서 해상도를 일정비율 감소 시키면서 실험을 수행하였다. 각 해상도에서 30 장씩 영상을 취득하여 실측 오차를 계산하였는데 각 해상도별 발생 오차를 Fig. 7 에 나타내었다. 실험 결과에서 최소 오차를 보이는 해상도는 전체 형상을 최대 크기로 취득하는 해상도인 30mm/512=0.057mm 와 근사하며 Fig. 5.(a)의 시뮬레이션 결과와도 동일함을 알 수 있다

## 7. 결론

본 논문에서는 실측 원 해석을 위해 최소 오차를 갖는 해상도 결정에 관한 알고리즘을 기술하였다. 이를 위해 최적 해상도 결정을 위한 측정치를 제안하였고 경계영역의 비율에 대한 실측 오차를 계산하는 방법에 대해 기술하였다. 원의 크기에 무관하게 전체영역을 취득해서 처리하여야 오차가 최소화함을 시뮬레이션으로 유도하였고 실험

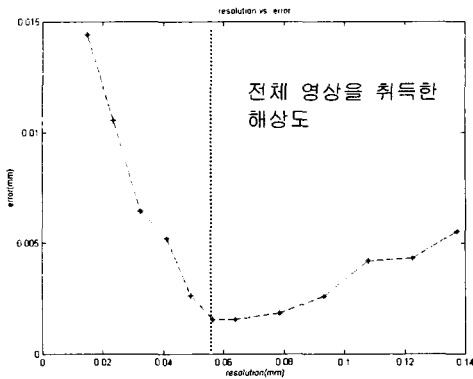


Fig. 7 Actual error measured using real image

을 통해 확인하였다.

향후 연구과제로 원 해석의 정밀도를 높이기 위해 부화소(subpixel) 영역에서의 원의 경계위치를 추출하는 연구를 수행할 계획이며 실시간 검사가 가능하도록 고속의 알고리즘도 연구할 계획이다

## 후 기

본 연구는 (주)센트랄에서 지원하는 “3 차원 비접촉식 검사시스템 개발” 과제의 연구비로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 이일환, 박희재, “비전을 이용한 기어 형상 측정 시스템 개발,” 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 485~489, 1996.
2. 이성천, 김민환, “산업용 비전시스템에서의 빠른 원 인식 방법,” 한국정보과학회 논문지, 제 24 권, 제 12 호, pp. 1419~1427, 1997.
3. A.J.Tabatabai and O.R. Mitchell, “Edge location to subpixel values in digital imagery,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-6, No. 2, pp. 188~201, Mar. 1984.
4. A. Huertas and G. Medioni, “Detection of intensity changes with subpixel accuracy using Laplacian-Gaussian masks,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-8, No. 5, pp. 188~201, Sept. 1986.

5. D. H. Ballard and C.M. Brown, *Computer Vision*, Prentice-Hall, pp. 143~145, 1982.
6. M.Sonka, V.Hlavac and R.Boyle, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, Chapman & Hall Computing, pp. 113~122, 1993.