

## 광링식 3차원 형상 측정법에 관한 연구

강 영 준\* , 박 정 환\*\* , 김 동 우\*\*

### A Study on the Measurement of the 3-D Object Shapes by Using Optical Ring Method

Young-June Kang\* , Jeong-Hwan Park\*\* and Dong-Woo Kim\*\*

#### ABSTRACT

The optical triangulation method has been used as a non-contact measuring method of three dimensional object shape. But this measuring method has narrow measuring range, non-linearity on steep slope surface and shadow effect. In this study, we discussed a new optical measurement method to overcome these kinds of demerits. The advantage of this new method is that it is possible to measure precisely the object shape having the steep slope surface without shadow effect. As experimental results, maximum displacement error was 200 $\mu$ m over the whole measuring range when the incident angle on the object surface was within 60 degree.

**Key Words:** Optical ring method(광링법), Non-contact measurement(비접촉 측정법), Three dimensional object shape(3차원 물체 형상), Steep slope surface(급경사면)

#### 1. 서 론

현대에는 제품에 대한 소비자의 요구가 다양해서 다품종 소량 생산 방식이 점점 증가하고 있으며 또한 제품의 수명(Life Cycle)도 짧아지고 있어서 단기간내에 신제품의 개발이 필요하다. 이러한 신제품들 중에는 3차원 곡면으로 되어있는 것들이 대부분인데 이 3차원 곡면은 설계자가 도면상에 다 표현할 수 없는 미묘한 부분이 있다. 예를 들면 자동차 보디의 경우 클레이 모델을 제작한 후 형상을 측정하여 NC 데이터를 사용하고 있으므로 3차원 측정 방법이 중요한 부분으로 되어 있다.<sup>(1-2)</sup>

3차원 형상 측정 방법으로서 지금까지는 3차원 측정기에 의한 방법이 주류를 이루어 왔으나 이 방법은 접촉식이기 때문에 피측정물이 손상을 입는 경우도 있으며, Probe의 보정이 필요하고 Probe가 측정면에 직접 닿지 못하는 경우에는 측정이 어려워진다. 또한 측정 시간이 많이 걸리는 단점들이 있다.<sup>(3)</sup> 이러한 단점을 해결하기 위하여 비접촉 측정법, 특히 광학적인 측정 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 제품화된 것들도 있다.<sup>(4-9)</sup> 하지만 현재 제품화되어 있는 방법들중 상당수가 아직까지 단점을 가지고 있어서 실용화에 어려움을 주고 있는 상황이다. 예컨대, 삼각측량법의 경우 피측정물의 급경사

\* 전북대학교 기계설계학과  
\*\* 현대자동차

면에서의 비선형성때문에 오차가 커져서 측정 정밀도가 떨어지는 경향이 있다.

본 연구에서는 이러한 결점을 보완하기 위하여 새로운 방법의 비접촉식 측정법인 광링(optical ring)식 3차원 형상 측정법에 대해서 연구하였고 실제 실험을 통하여 이 방법의 유용성을 평가해 보았다.

## 2. 측정원리 및 광학계의 구성

Fig.1은 본 연구에서 사용된 광학계의 구성 및 측정 원리를 나타낸 것이다.

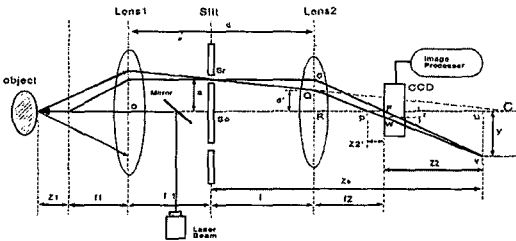


Fig.1 Principle of the measuring system

광학계에서 물체가 렌즈의 전방 초점거리에 있을때 물체의 한 점에서 반사 산란된 광은 렌즈에 의해 집광되어 렌즈 후방에서 평행 광선으로 진행하게 된다. 만일 물체가 초점 거리에서 멀어지면 산란광은 렌즈를 통과한후 평행 광선으로 되지않고 임의의 기울기를 가지고 진행하게 된다. 이 렌즈 후방의 광선이 진행하는 한 지점에 결상면을 놓았을 경우 이 광선의 기울기에 비례해서 결상면에 형성되는 상의 크기는 변하게 된다. 본 연구에서는 이 상을 링모양으로 변화시켜 그의 반경의 크기를 구하므로써 렌즈의 초점 거리에서의 물체의 변위를 구하는 것이 기본 원리이다.

Fig.1에서 렌즈1과 렌즈2는 각각 초점 거리  $f_1, f_2$  이고 간격  $d$  만큼 떨어져 있으며 그 사이에는 폭  $0.2\text{mm}$ 의 원형 슬릿을 놓았다. 또 렌즈2 후방  $f_2$  지점의 결상면에는 CCD 카메라가 위치해 있다. 그림에서 레이저빔은 Mirror에 의하여 방향을 바꾸어 렌즈1의 증상을 통해 피측정면에 조사된다. 피측정면에서 반사 산란된 광은 렌즈1에 의해 원판 모양으로 집광된 후 원형 슬릿을 통과하면서 링모양을 갖게 되고 이것이 렌즈2에 의해 집광되어 CCD 카메라에 임의의 반경을 가진 광링 형태로 상을 맺는다.

렌즈2가 없는 경우 반사 산란한 광이 렌즈1에 의해 집

광되어 결상하는 점을 C라 하고 슬릿에서 C 점의 거리를  $Z_0$ 라 하면 렌즈1의 전후의 변위와 초점 거리의 관계는 Newton의 결상 공식으로부터 다음과 같이 표시된다.<sup>(10)</sup>

$$Z_0 = f_1^2 / Z_1 \quad (1)$$

여기에서 슬릿의 반경을  $a$ , 슬릿과 렌즈2 사이의 거리를  $l$ 이라 할때, 렌즈1을 통과후 슬릿을 통해 렌즈2에 입사되는 반사광의 spot반경  $d'$ 는 광학계의 기하학적인 관계에 의해 다음과 같은 식으로 된다.

$$d' = a(Z_0 - l) / Z_0 \quad (2)$$

식(1)을 식(2)에 대입하면 다음식이 된다.

$$d' = a - (al / f_1^2) * Z_1 \quad (3)$$

렌즈2 전후의 변위와 초점 거리 관계는,

$$(l - f_2)Z_2 = f_2^2 \quad \text{이며,} \quad (4)$$

Fig1에서  $\triangle cRF \sim \triangle VUF$ 에 의해서  $y/a = Z_2 / f_2$

으로 된다.

C는  $Z_1=0$ 일때 렌즈2에 입사하는 광선과 렌즈축과의 교점이고, F는 렌즈2를 통과한 광선이 CCD카메라에 초점을 맺는 곳이며, V는 CCD카메라가 없을 경우의 두 광선의 교점이다. 또U는 V에서 광축으로 선을 연장하였을 때의 교점이다.

$\triangle QRP \sim \triangle VUP$ 에 의해서

$$y / d' = (Z_2' + Z_2) / (f_2 - Z_2') \quad (6)$$

Fig.1에서 P는  $Z_1=0$ 일때 렌즈2를 통과한 광선이 광축과 만나는 교점이다.

$\triangle QRP \sim \triangle WFP$ 에 의해서

$$r / d' = Z_2' / (f_2 - Z_2') \quad (7)$$

가 된다.

W는  $Z_1=0$ 일때 렌즈2를 통과한 광선이 CCD 카메라에 결상하는 점이다.

위 식들로부터 다음과 같은 관계식이 유도 된다.

$$r = \frac{af_2 - f_2d'}{l} \quad (8)$$

또, 식(3)과 식(8)로부터 광링의 반경  $r$ 과 물체의 변

위  $Z_1$ 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$r = \frac{af_2 - f_2d'}{l} \quad (9)$$

식(3)과 식(9)로부터 광링의 반경  $r$  과 물체의 변위  $Z_1$ 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$r = \frac{a * f_2}{f_1^2} Z_1 \quad (10)$$

식(10)는 원형슬릿의 반경  $a$  와 렌즈의 초점거리  $f_1, f_2$  값이 정해지면 피측정물의 거리는 광링의 반경  $r$  과 선형적인 관계를 갖게됨을 보여주고 있다. CCD카메라에 맺히는 광링의 반경  $r$ 은 화상처리 기법을 통하여 구할 수 있어서 피측정면의 변위  $Z_1$ 을 계산해낼 수 있다.

또, 식(10)에서  $r$  과  $Z_1$ 의 미소치를 취해보면 다음과 같이 시스템의 분해능에 관한 식을 구할수 있다.

$$\Delta Z_1 = \left(\frac{f_1^2}{af_2}\right)\Delta r \quad (11)$$

식(11)에서 알 수 있는바와 같이 시스템의 분해능을 좋게 하려면 렌즈1의 초점거리를 작은것으로 선택하고, 렌즈2의 초점 거리와 슬릿 반경  $a$ 는 크게 하면 된다.

광링의 직경과 물체의 거리  $Z_1$ 의 측정 가능한 범위를 살펴보면, 변위  $Z_1$ 은 광링의 직경과 비례하는데, 피측정물의 변위가 0일때 광링의 직경이 최소가 되어 CCD카메라 중심부에 초점을 맺게 되는 경우와, 거리가 증가하여 광링의 직경이 CCD카메라의 Scanning Area를 벗어나는 경우엔 측정이 불가능하다. 본 실험에 사용한 CCD 카메라는 4.8mm(H) \* 3.6mm(V)의 Scanning Area를 가지기 때문에 광링의 직경  $d$ 는 다음의 범위안에 있어야 한다.

$$0mm < d < 4.8mm \quad (12)$$

이때  $Z_1$ 은 식 (10)으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$0mm < Z_1 < \frac{f_1^2}{af_2} * 2.4mm \quad (13)$$

본 실험에서는 피측정물의 측정 변위를 최대 50mm까지 가능하게 하고 측정 정밀도를 200 $\mu$ m보다 좋게하기 위하여 다음과 같은 초기값을 설정하였다.

$$f_1 = 150mm, f_2 = 70mm, a = 16mm$$

위와 같은 초기 값들을 식(5)에 대입하면 다음식으로 된다.

$$r = 4.89 * 10^{-2} * Z_1mm \quad (14)$$

Fig.2는  $r$  과  $Z_1$ 의 선형적인 관계를 보여주는 그래프이다.

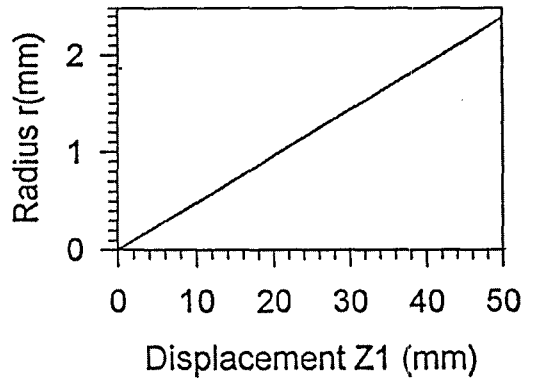


Fig. 2 linearity between the displacement and ring radius

또, 측정 범위는 식 (13)로부터 다음식과 같이 된다.

$$0mm < Z_1 < 48.2mm \quad (15)$$

Fig.3은 전술한 내용을 기초로 하여 구성한 광학실험장치를 나타내는 사진이다.

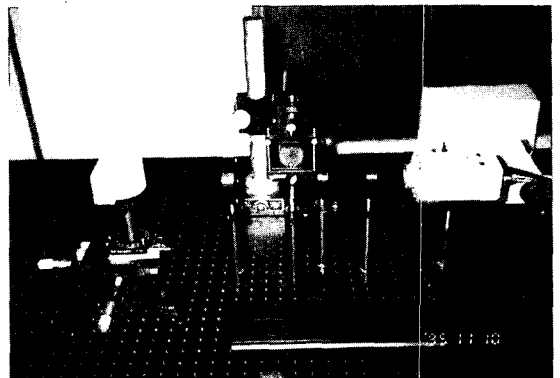


Fig. 3 Photograph of the experimental arrangement

### 3. 광링의 화상정보 및 휘도 분포

#### 3 - 1. 광링의 3차원 휘도분포

다음에 표시된 Fig.4는 광학계를 통하여 CCD카메라에 결상된 광링을 화상 처리 장치를 통하여 모니터에 나타낸 것이다. 아랫부분의 일부가 잘린것은 렌즈1과 슬릿 사이에 놓인 미러마운트가 광의 진로를 가로막았기 때문이다.

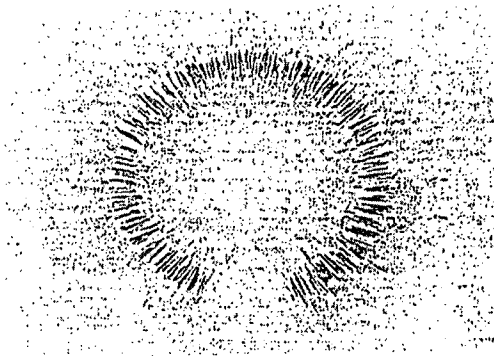


Fig.4 Shape of the optical ring

반사 산란후 렌즈1에 의해 모아진 광은 Fig.5와 같은 원형 slit으로 입사하게 되는데 이 slit을 통과한 후 나타나는 광링의 휘도(Intensity)는 슬릿 중앙부에서 최대값을 가지는 정규 분포에 가까운 형태를 이루고 있다. 슬릿 폭이 크면 최대 휘도값을 구하기가 어렵고 슬릿폭이 너무 좁으면 슬릿을 통과한 뒤의 광의 휘도가 지나치게 작아져 CCD카메라가 감지할 수 없으므로 실험에 의해서 슬릿폭은 0.2mm로 결정 하였다.

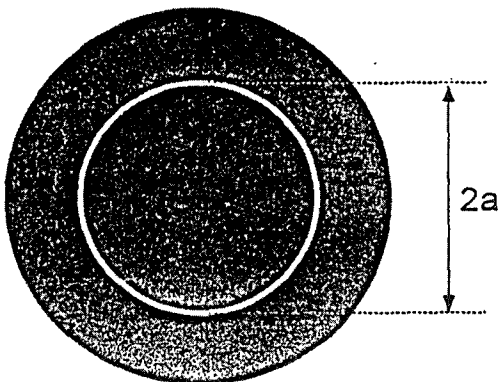


Fig.5 Geometry of the ring slit

Fig.6은 슬릿을 통해 형성된 광링을 CCD 카메라를 통해서 모니터상에 나타난 것을 화상 처리에 의해서 고주파 잡음을 제거한 그림이다.

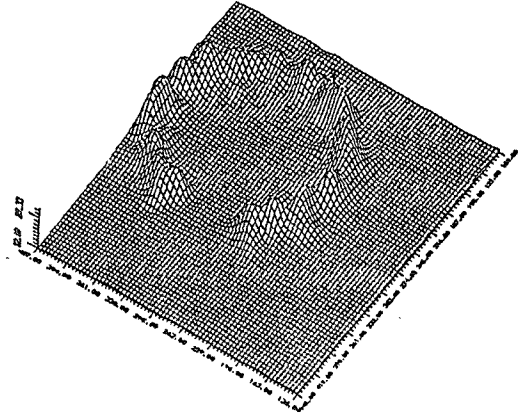


Fig.6 Intensity distribution of the optical ring

#### 3 - 2. 광링상의 최대 휘도점 검출

광학계를 통해 CCD카메라에 형성되는 광링의 크기는 관측자가 측정하기 어렵기 때문에 본 실험에서는 광링을 화상 처리 장치를 통하여 모니터상에 표현하고 그 화상 정보를 해석함으로써 광링의 크기를 구하였다. 일반적으로 2차원 평면상에서 원이 형성되기 위해서는 최소한 원을 구성하는 3개의 점 데이터가 있어야 하기때문에 광링 상에서 최고 휘도점을 갖는 곳의 좌표값을 3점 이상 검출하였다. 검출방법은 Fig.7과 같이 광링의 중심부로부터 반경 방향으로 추적하여 휘도치가 최대인 곳의 좌표값을 찾아내는 방법이다. 미러마운트에 의한 광링 하단부의 질

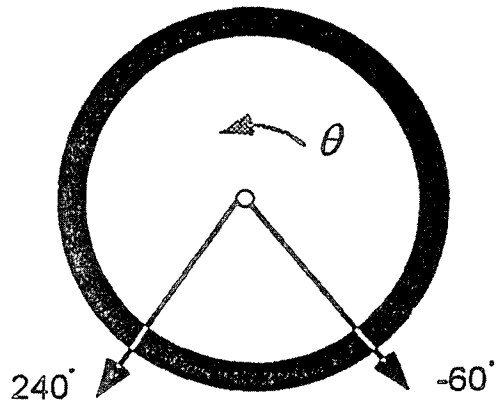
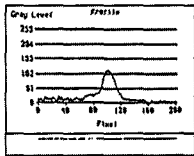


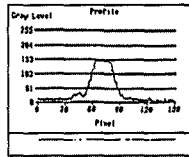
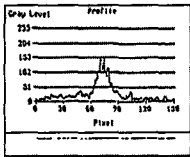
Fig.7 Method of the scanning

단 부분을 고려하여 초기 검색 각은  $-60^\circ$ 로 하였다. 한 Line에 대해 검색이 끝나면 회전각을 반시계 방향으로  $15^\circ$ 씩 증가시키면서 최대  $240^\circ$ 까지 21개 방향의 최대 휘도점들을 검색하였다.

Fig.8은 물체의 임의의 변위들에 대해 나타난 광량들을 위의 방식으로 추적한 반경 방향의 휘도 분포들의 예를 나타낸 그림이다.



(a) Intensity distribution with normal profile

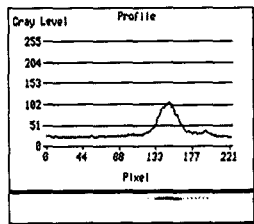
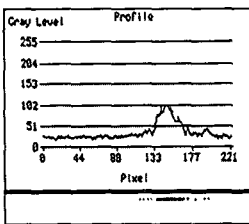
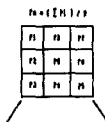


(b) Intensity distribution with profile of noise (c) Intensity distribution with profile of excessive energy

Fig.8 Intensity distribution on a scan line

### 3 - 3. 검출 데이터 전처리

Fig.8 (a)의 경우 최대 휘도치가 양호하게 나타나고 있지만 Fig.8 (b) 및 Fig.8 (c)는 최대 휘도치를 결정하기가 어렵다. 특히 Fig.8 (b) 같은 경우는 광학계에 불규칙한 잡음이 들어가 불규칙성이 증대했기 때문이다.<sup>(11)</sup> 이러한 잡음은 측정 결과에 오차를 가져오기 때문에 고주파 잡음을 제거하기 위해서 Fig.9와 같은  $3 \times 3$  평활화필터(smoothing filter)를 사용하여 검출된 휘도값을 Scan Line을 중심으로 평활화시켜 잡음을 제거하였다.<sup>(12-14)</sup>



(a) Intensity profile before using the filter (b) Intensity profile after using the filter

Fig.9 Removal of the noise using smoothing filter

평활화처리를 한 데이터는 잡음이 제거된 양호한 값을 갖게 되지만 실험에서 얻어진 휘도 데이터중의 일부는 휘도치가 최대치를 중심으로 대칭으로 분포하지 못하고 한쪽으로 치우쳐 나타나는 경우도 있다. 또, Fig.8의 (c)의 경우와 같이 슬릿을 통과하는 광의 휘도가 지나치게 강한 경우 휘도 분포가 포화된 형태로 나타난다. 이러한 경우 휘도치가 최대인 곳의 좌표값이 여러개 존재하여 프로그램 수행상에 어려움을 유발 시키게 된다. 이러한 검출값들을 가지고 원의 최소 자승법에 적용하면 검출값들은 구해진 회귀원에 대해 큰 편차를 가지게 되고 실제로 피측정물의 변위 측정에 있어서 안정적인 값을 얻기가 힘들게 된다.

이를 교정하기 위해 Fig.10과 같이 최대 휘도치뿐만 아니라 최대 휘도치에서 일정한 범위의 휘도치를 포함해서 이 부분의 도심을 구해 이 곳을 최대 휘도치의 좌표값으로 하였다. 본 실험에서는 최대 휘도치로부터 30%되는 지점까지의 휘도치들도 고려해 도심을 구하였다. 그림에서  $I_x$ 가 최초로 검출된 최대 휘도치의 좌표값이고  $X_c$ 가 위의 방법으로 구해진 새로운 최대 휘도치의 좌표값이다.

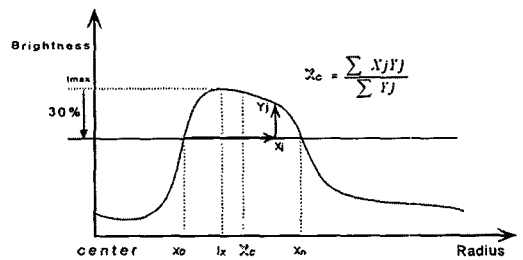
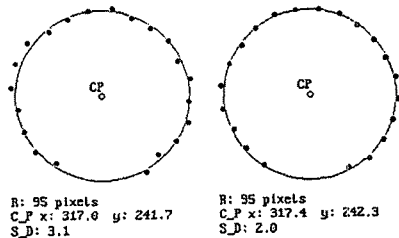


Fig.10 Correction of the center position

Fig.11은 최대 휘도점 교정의 효과를 나타내고 있다. Fig.11 (a)와 같이 데이터 교정 전에는 검출값의 분포가 산만하여 편차가 크게 나타나고 있으나 위의 방법으로 교



(a) Maximum scanning data before correction (b) Maximum scanning data after correction

Fig.11 Effect of the data correction

정하여 검출한 데이터들은 Fig.11 (b)와 같이 회귀원과 근사하게 일치하고 있고 편차도 상대적으로 작게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 화상 처리

Fig.12는 본 실험의 화상 처리 장치도이다. 광학계를

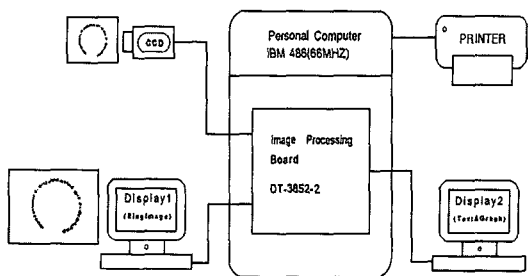


Fig.12 Schematic diagram of the image processing system

통하여 CCD카메라에 결상된 광링은 그림과 같이 컴퓨터에 내장된 화상 처리 장치를 통하여 모니터1에서 관측할 수 있고 이 화상을 해석하여 모니터2에 반경 R의 회귀원으로 나타낼 수 있다.

Fig.13은 광링의 반경을 구하는 흐름도이다. 광링의 중심부로부터 반경방향으로 추적하여 검출된 최대 휘도점들을 가지고 최소 자승법을 이용해 원1의 반경 및 중심좌표를 구한다. 검출 데이터의 수는 5개 이상일 때만 측정 가능하게 하였다. 원1의 반경  $r$ 과 각 최대 휘도점들간의 거리는 편차  $D$ 를 갖게 되는데, 편차가 기준치보다 큰 휘도점은 불량 데이터로 간주하여 제거하였다. 본 프로그램에서는 이 편차를 계산하여 편차가 5 Pixel 보다 크면 해당 데이터를 삭제하였다. 편차가 5 Pixel 미만인 데이터는 양호한 값으로 생각하고 이 데이터들을 가지고 다시 원2를 계산하여 원의 반경을 구하였다. 만일 잔여 데이터가 3개 미만일 경우에는 원이 형성되지 않아 측정이 불가능하다.

#### 5. 실험 결과 및 고찰

##### 5-1. 거리 $Z_1$ 과 광링 반경 R사이의 실험적 관계식

모니터상에 나타나는 광링의 반경 R과 물체의 변위  $Z_1$  사이에 이론식과 같은 선형성이 있는지 확인 하기 위하여 Translation Stage위에 석고 원통면을 설치하여 경사각  $0^\circ$ 인 점을 측정점으로 하여 시료의 거리를 광축 방향에 따라  $1mm$ 씩  $50mm$ 의 범위를 이동시키면서 광링 반경의 변화를 살펴 보았다. 측정 결과 물체의 거리가  $5mm$  미만 이 되면 산란광이 링 모양이 되지 않고 spot형태로 CCD 카메라에 검출되므로 정확한 반경을 구하기가 어려웠고, 또한 피측정물의 거리가  $49mm$  보다 커지면 광링이

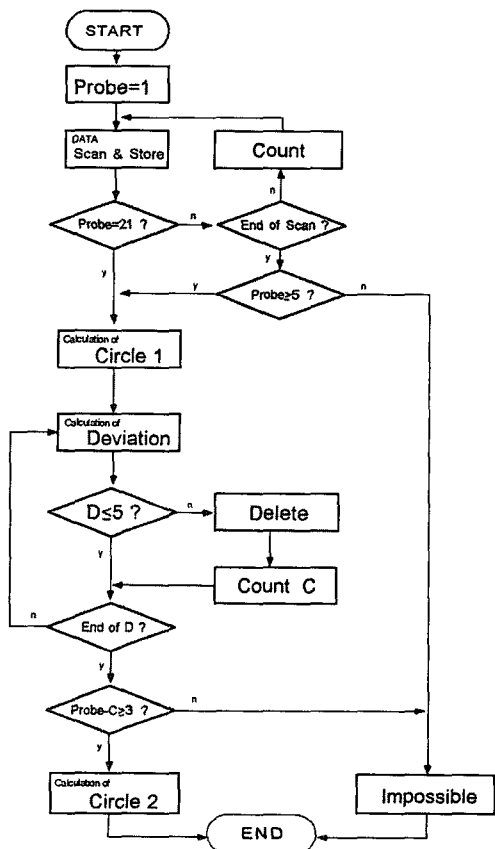


Fig.13 Flow chart of the data processing program

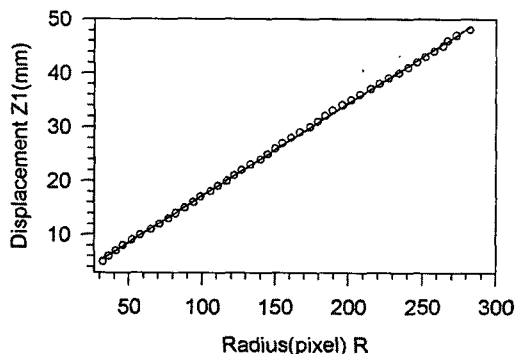


Fig.14 Experimental relation between the displacement and ring radius

CCD카메라를 벗어나므로 검출이 어려웠다. 이에 따라 피측정물의 최소 거리는 5mm로 하고 최대 거리를 49mm로 하여 측정후 얻은 데이터로부터 최소 자승법을 적용하여 관계식을 구한 결과 식 (16)과 같은 선형 관계식을 얻었다.

$$Z_1 = 0.1722 * R - 0.0514 \quad (16)$$

5-2. 시료 및 측정 방법

본 실험에 사용된 피측정물은 Fig.15과 같은 모양의 백색 석고를 사용하였다. 석고면은 확산 반사성이 양호하며 광에 의한 측정에 적합하기때문에 피측정물로 채택하였다. 실험에 사용된 석고표면은 표면 조도계로 측정된 결과  $R_{max}$ 이 10 $\mu$ m였다.

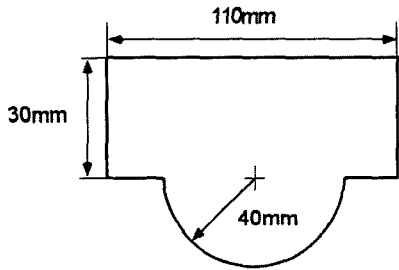
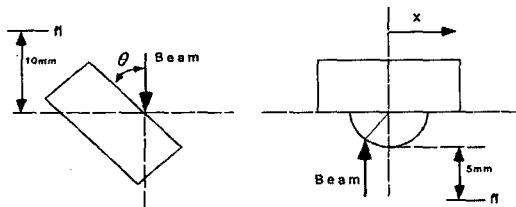


Fig.15 Dimension of the object

시료의 초기위치는 경사면측정의 경우 광축상에서 렌즈 1의 초점 거리로부터 10mm에 두었다. Fig.16 (a)의 경사면에 관한 측정은 시료의 한 점을 선택하여 이 지점의 경사각을 0°에서 5°씩 증가 시키면서 측정가능한 80°까지 실시하였으며, 각도의 증가에 따른 측정 오차의 분포를 구하였다. Fig.16 (b)의 원통면 측정에서는 초기 위치를 초점 거리로부터 5mm에 두고 임의의 한 단면에 대해 경사각 0°인 지점으로부터 시작하여 시료를 좌,우측으로 1mm씩 이동시키면서 원통면을 측정하였다. 측정은



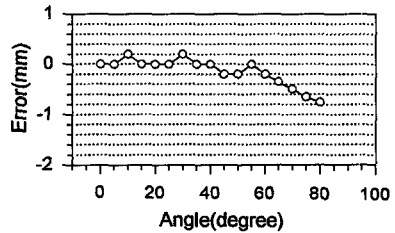
(a)Measuring a Gradient Surface (b) Measuring a Cylinder Surface

Fig.16 Measuring method

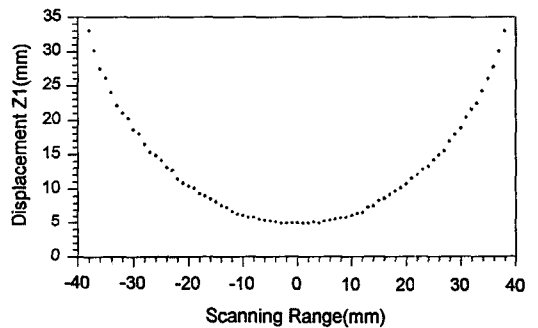
암실에서 행하였고 광학테이블 위에서 실시하여 환경 오차를 최소화 하였다.

5-3. 측정 결과

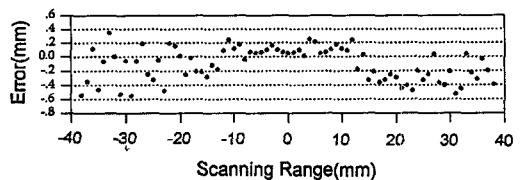
Fig.17(a)는 경사각에 대한 측정 오차의 그림이며 그림에서 알 수 있듯이 경사각이 60°이내이면 측정 오차가 200 $\mu$ m 보다 작게 나타나고 있으나 경사각이 80°이면 오차가 커져서 800 $\mu$ m에 가까운 값을 보이고 있다. Fig.17(b)는 직경 80mm인 원통면의 측정 결과를 보여 주고 있으며 전체적으로 반원형 모양을 잘 나타내고 있으나 양쪽 측면에서 오차가 큰 것을 알 수 있다. Fig.17(c)는 측정 범위에 대한 오차를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이, 측정 범위 10mm내에서는 측정 오차가 200 $\mu$ m이내로 비교적 양호한 결과를 나타내고 있으나 이 범위를 넘어서면 최대 측정범위 40mm 지점에서는 오차



(a) Error profile of the sloping surface



(b)Profile of the cylinder surface



(c) Error profile of the cylinder surface

Fig.17 Results of the measuring experiment

가 커져서 600 $\mu$ m에 가까운 값을 보이고 있다. 이러한 큰 오차값은 피측정면의 경사각과 변위가 커져서 생긴 오차로 생각 된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 광링식 비접촉 3차원 형상 측정 시스템에 관한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 측정 전 구간에 대해서 광링의 반경과 피측정물의 거리 사이의 관계는 실험 결과 우수한 선형성을 나타냈다.
2. 본 시스템으로 측정할 수 있는 최대 측정 범위는 실험 결과 약 50mm이었고 피측정물의 경사각은 80°까지 측정 할 수 있었다.
3. 측정 오차는 피측정물의 급경사면에서 크게 나타났으나 경사각 60° 이내에서는 오차가 200 $\mu$ m를 넘지 않는 양호한 값을 나타냈다.

본 실험에서 사용된 측정 시스템의 광학 부품인 렌즈들의 초점 거리가 작은 것을 사용해서 정밀도를 높이고 자동 이송이 가능한 X-Y-Z 스테이지를 사용한다면 보다 고속으로 정밀한 3차원 형상측정이 가능하리라 생각한다.

## 7. 참 고 문 헌

1. George Schaffer., "Machine Vision : A Sense of CIM", American Machinist, Special Report 767, pp. 101 - 120, June 1984.
2. Mikell P. Groover and Emory W.Zimmers.,

CAD/CAM, Prentice Hall, 1984.

3. Lavole.R., "Shopping Intelligently for CMM", Manufacturing Engineering, Vol.102/4, PP.67 - 70, 1989.
4. Shirai. Y., Three Dimensional Computer Vision. Springer Verlag, Berlin, 1987.
5. 한국표준연구소, "비접촉식 형상 측정기술 개발", 제3차년도 연차 보고서, 1991.
6. 官本紘三, 接觸式と非接觸式による表面形態測定, 精密機械, 第 51卷, 第 4號 pp. 674 - 680, 1985.
7. 신성국, 강영준, "3차원 곡면의 비접촉 측정법에 관한 연구", 전북대학교 논문집 제 35집, pp. 17 - 22, 1993.
8. H.Takasaki., "Moire Topography", Applied Optics, pp.845, 1973.
9. 小原 直, "非接觸測定技術の 三次元 測定への 應用", 機械と工具, pp.83-86, 1986.12
10. Max Born, Emil Wolf, "Principles of Optics", Maxwell Macmillan, 1980.
11. 南茂夫, "科學計測のための 波形データ處理", CQ 出版社 pp. 69 - 110, 1986.
12. 南茂夫, "科學計測のための 畫像データ處理", CQ 出版社 pp. 106 - 177, 1994.
13. 이문호, "퍼스컴을 이용한 화상처리", 技多利, pp. 15 - 23, 1992.
14. Craig A.Lindly, "Practical Image Processing in C", John Wiley & Sons, Inc., pp. 385 - 421, 1991.