

비접촉식 방법에 의한 원통형 물체의 지름 측정

임복룡

울산공업고등학교

⊕ 680-013, 울산시 남구 신정3동 167-8 번지

김석원†

울산대학교 물리학과

⊕ 680-749, 울산시 남구 무거2동 산 29 번지 남울산우체국 사서함 18호

(2005년 3월 15일 받음, 2005년 6월 9일 수정본 받음)

원통형 물체의 지름을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 두 가지 비접촉식 방법인 기하광학적 방법과 간섭·회절 방법으로 원통형 물체의 지름을 측정하였다. 기하광학적인 방법은 원통형 렌즈를 이용하여 기울어진 레이저 광선을 원통형 물체의 옆면에 비추어 나타나는 곡선을 CCD 카메라로 포착하고 이 곡선을 기하학적인 방법으로 계산하는 것이며 간섭·회절에 의한 방법은 스크린에 나타난 물체에 의한 레이저광의 간섭·회절무늬를 측정하고 분석하는 방법이다. 버니어 캘리퍼스로 측정한 평균 지름이 0.05 mm ~ 100.50 mm 인 원통형 물체를 기하광학적 방법과 간섭·회절 방법으로 측정한 결과 각각의 상대오차가 2% 와 1% 범위 이내였고 다량의 물체 지름을 신속히 측정하는데 응용될 수 있음을 확인하였다.

주제어 : Cylindrical object, Diameter measurement, Non-contact method, Interference-diffraction, Babinet's principle.

I. 서 론

원통형 물체의 지름을 측정하는 방법은 다양하며 여러 방법 중 측정 기구를 이용하여 직접 측정하는 것이 제일 정확하지만 대량을 측정하거나 측정기구가 도달할 수 없는 곳에 있는 물체를 측정하려면 기하광학적인 방법에 의한 비접촉식 방법이 매우 효과적이다.^[1-3] 또, 가는 철사와 같은 물체의 지름 측정은 높은 정밀도를 요구하므로 다양한 광학적 방법을 이용한 연구가 많이 이루어지고 있다. 가는 철사의 지름은 회절, 산란, 간섭 원리를 이용하여 측정되며 특히 울 섬유의 시각적 검사 및 광섬유의 지름 감시에 이용되기도 한다.^[4-15]

비접촉식 방법에 의한 비교적 큰 원통형 물체의 지름 측정에는 디지털 카메라와 레이저가 사용되며 이러한 장치를 사용하여 광학적 방법으로 물체의 지름을 측정한다는 것은 무척 흥미로운 일이다. 디지털 카메라에 들어가는 CCD(Charge Coupled Device, 전하결합소자)소자는 기존 사진기의 필름 대응으로 반영구적으로 사용되며 이것은 반도체 평면의 표면에 설치한 다수의 절연전극으로 이루어진 집적회로이다.

본 연구에서는 원통형 렌즈를 사용하여 레이저광선을 발산시켜 원통형 물체의 옆면에 기울여서 비추고, 원통형 물체에 형성된 레이저광 곡선을 CCD 카메라로 포착하여 좌표를 정하고 이를 기하광학적인 방법으로 분석하여 지름을 측정하였다. 또 간섭·회절 원리를 이용하여 철사와 같은 가는 원통형 물체의 지름을 측정 한 후, 두 방법으로 구한 측정값을 비교·분석하였다.

II. 이 론

2.1. 원통형 물체의 지름 표현^[3]

Fig 1은 초점 거리 f 에 대하여 물체의 거리가 상당히 멀다고 가정하면 카메라 CCD의 상, $(X_{CCD}, -f, Z_{CCD})$ 는 그 카메라 렌즈의 초점에 맞힌다. Y-Z 평면에서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y \tan \alpha + Z = e \quad (1)$$

X-Y 평면에 대하여 임의의 점 (X, Y) 을 카메라 CCD 화면 상의 점으로 변환하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

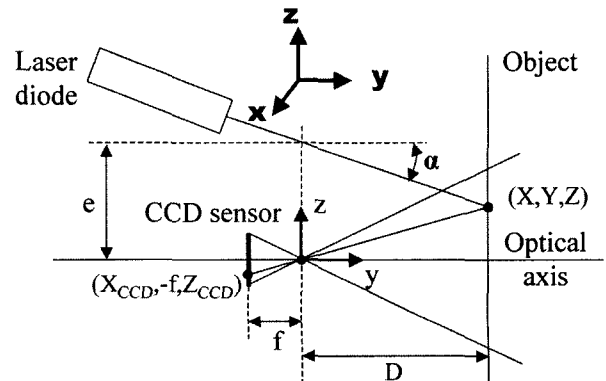


Fig 1. Transposition on the CCD sensor. View in a vertical plane.

† E-mail: sokkim@ulsan.ac.kr

$$X_{CCD} = -f \frac{X}{Y} \quad (2)$$

상의 점을 line과 column 수로 세어서 이미지 평면에서 점의 좌표로 구하고 이 좌표를 실제 사용하는 화소 수로 변환시킨다. 단위 화소의 한 변을 a 로 놓으면 (2)식은 아래의 식으로 쓸 수 있다. 단, 부호는 무시한다.

$$X_{pix} = \frac{X_{CCD}}{a} = \frac{f}{a} \frac{X}{Y} = f' \frac{X}{Y} : \text{pixel number} \quad (3)$$

여기서 $f' = \frac{f}{a}$ 로 치환하였다. 같은 방법으로, Y-Z 평면에서도 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$Z_{pix} = f' \frac{Z}{Y} : \text{pixel number} \quad (4)$$

Z를 제거하기 위해서 (1)식을 사용하여 정리하면 식 (5)가 된다.

$$(X, Y) = \left(\frac{e X_{pix}}{Z_{pix} + f' \tan \alpha}, \frac{e f'}{Z_{pix} + f' \tan \alpha} \right) \quad (5)$$

Fig 2에서 카메라의 렌즈로부터 D만큼 떨어뜨려 수직으로 세운 원통형 물체가 완전한 원통형 물체라고 가정할 때, 기하학적인 방법을 적용하면 아래 식 (6)으로 물체의 반지름이 얻어진다. 여기서 D는 카메라에서 원통형 물체까지의 가장 짧은 거리이고, X_2' 와 X_3' 는 원통형 물체에 나타나는 레이저 직선 양끝의 가장자리 점을 의미한다.

$$R = \frac{D \times W}{OP_2 + OP_3 - W} \quad (6)$$

여기서 $OP_2 = \sqrt{X_2'^2 + D^2}$ 와 $OP_3 = \sqrt{X_3'^2 + D^2}$ 는 카메라 렌즈의 중심에서 물체에 나타나는 레이저 곡선의 양 끝점까지의 직선거리를 의미한다. 그리고 $W = |X_2'| + |X_3'|$ 는 물체에 나타나는 양 끝점 X_2' 와 X_3' 좌표 사이의 거리이다. 이 X_2' 와 X_3' 좌표에 대응하는 PC 화면상의 점은 $X_{2,pix}$ 와 $X_{3,pix}$ 이다.

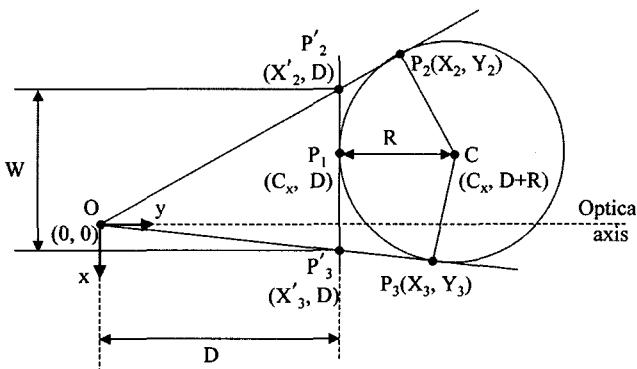


Fig 2. Top view in the object plane.

2.2. 가는 원통형 철사 슬릿의 간섭과 회절

가는 원통형 철사에 레이저광을 수직으로 비추었을 때 뒷면 스크린에 나타나는 중심부 무늬는 양쪽 모양의 간섭과 회절 무늬이다. 그것의 중앙 영역은 영의 이중 슬릿 실험에 의한 무늬의 경우와 거의 유사하다. 즉 바비넷 원리로부터,^[14] 철사 슬릿의 Fraunhofer 회절의 무늬는 이중 슬릿의 회절 무늬와 같다. 철사는 negative 슬릿으로 구성되어지고 축에 대하여 θ 만큼 기울어진 곳에서의 세기, $I(\theta)$ 는 아래 식 (7)으로 쓸 수 있다.^{[14][16]}

$$I(\theta) = 4a^2 \left[\frac{\sin B}{B} \right]^2 \cos^2(\delta/2) \quad (7)$$

식 (7)의 $\left[\frac{\sin B}{B} \right]^2$ 항은 회절요소로 작용하고, $\cos^2(\delta/2)$ 항은 간섭의 요소로 작용한다. a 는 진폭, $B = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$, d 는 철사의 지름, δ 는 위상 상수, λ 는 레이저광의 파장을 나타낸다. Fig 3에서 각도 θ 가 매우 작으면 다음과 같이 근사가 가능하다.

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta \quad (8)$$

여기서 θ 는 라디안으로 표시된다. Fig 3로부터 매우 작은 각 θ 에 대하여 식 (9)가 성립한다.

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{y_m}{L} \quad (9)$$

여기서, L 은 철사 슬릿과 스크린 사이의 거리이고 y_m 은 스크린 상의 회절 무늬 사이의 간격이다.

$$\sin \theta \approx \theta = \frac{m\lambda}{d} \quad (m \text{은 회절 무늬의 차수}) \quad (10)$$

식 (9)와 (10)를 이용하여 d 에 대해 풀면

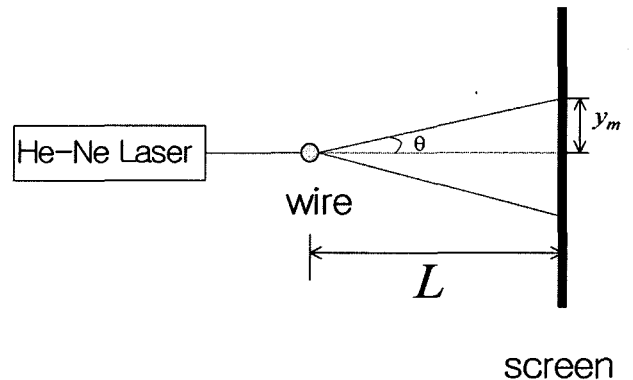


Fig 3. Experimental setup for measurement of the wire diameter.

$$d = \frac{mL\lambda}{y_m} \quad (11)$$

이 된다. 위 식을 이용하여 철사의 지름, d 를 얻을 수 있게 된다.

III. 실험 장치와 방법

3.1. 기하광학적인 방법에 의한 측정

Fig 4는 레이저에서 나온 빛을 원통형 렌즈로 발산시켜 기울이면 원통형 물체에 곡선으로 나타남을 보여준다. 레이저 빛의 기울어진 정도를 보기 위해서 클리노미터(clinometer)를 레이저 몸체 위에 부착한다. 물체에 나타난 곡선 모양의 레이저광을 CCD 카메라로 포착하여 PC로 분석한다. 카메라에 포착된 상은 물체에 나타난 레이저 곡선(laser curve)의 역상이다. 이 카메라의 상의 좌표를 Fig 2에 보여주는 실제 좌표로 변환하여 반지름 R값과 원통형 물체의 지름을 구한다.

디지털 카메라(KOCOM KDC-310)는 고정초점거리 $f = 4.5$ mm, 화소수(pixel number) 640×480 의 저가형을 사용하였다. 그리고 레이저는 파장이 633 nm인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 원통형 물체는 굽기가 다른 알루미늄캔과 유리병에 흰색 페인트를 뿌려서 만들었다. 원통형 물체의 지름이 66.20, 66.70, 100.50 mm 일때, 사용한 조건은 레이저와 카메라의 수직거리 $e = 105$ mm, 디지털 카메라의 고정초점거리 $f = 4.5$ mm, 카메라와 물체까지의 떨어진 거리 $D = 1$ m, 레이저 광선의 기울어진 경사각 $\alpha = 2^\circ$, 화소의 한 변 $a = 0.006$ mm 이었다. Fig 5 (a)는 원통형 물체에 레이저가 비추어진 사진

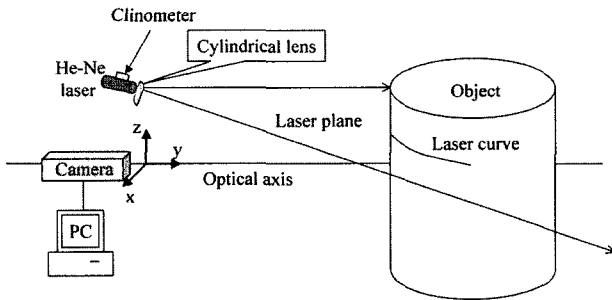


Fig 4. Device configuration for diameter measurement of the cylindrical object.

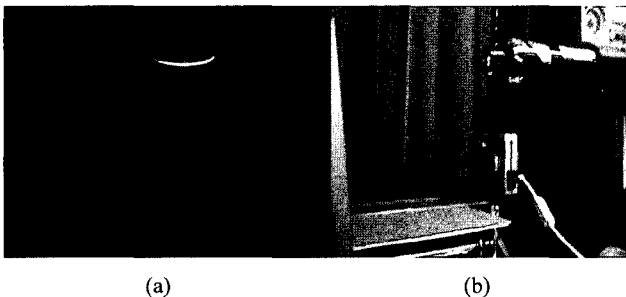


Fig 5. Experimental apparatus. (a) Image captured by the camera. (b) Experimental apparatus composed by the camera, laser, and clinometer.

이며, (b)는 레이저와 클리노미터와 CCD 카메라가 설치되어져 있는 장치사진이다.

한편, 가는 원통형 물체의 지름 측정의 경우는 굽기가 다른 철사에 흰색 페인트를 뿌려서 만들어 사용하였다. 물체의 지름은 0.54 mm ~ 2.00 mm 이었다. 그 때의 측정 조건은 $a = 0.00317$ mm, $\alpha = 4^\circ$, $D = 158.78$ mm, $e = 42.86$ mm, $f = 4.5$ mm 이었다.

3.2. 간섭·회절 방법에 의한 측정

Fig 3에 나타난 바와 같이 가는 철사에 레이저를 조사시켜 스크린에 회절 무늬가 나오게 한다. 철사와 스크린과의 거리, 스크린 상의 회절 간섭무늬를 통하여 차수와 무늬 간격을 측정하고 무늬를 분석하여 철사의 지름을 계산한다.

다양한 종류의 가는 철사를 준비하고, 버니어 캘리퍼스로 지름의 평균값은 0.05, 0.08, 0.12, 0.50, 0.54, 1.21, 1.41 mm 이었다. 광원으로는 파장이 633 nm인 He-Ne 레이저를 사용했다.

IV. 실험 결과 및 분석

기하광학적인 방법과 간섭·회절에 의한 방법으로 실험한 결과는 Table 1에 나타나있다. 기하광학적인 방법은 레이저와 디지털 카메라를 이용하여 비교적 큰 원통형 물체를 측정하는 방법에 용이하며, 그 원리는 렌즈의 굴절현상과 기하광학적인 방법을 이용하는 것이다. 또 비교적 가는 철사나 섬유 같은 물체의 지름을 비접촉식으로 측정하는 방법은 간섭·회절 현상을 이용하는 것이 유리하다.

큰 원통형 물체의 지름을 버니어 캘리퍼스로 여러 번 측정한 지름의 평균값은 60.20, 66.70, 100.50 mm 이고, 카메라와 원통형 물체 사이의 거리가 1 m 일 때 기하광학적인 방법에 의해 측정된 지름의 평균값은 59.8980, 65.8775, 99.1040 mm 였으며 상대오차는 2% 이내였다. 그리고 카메라 셔터를 누를 때 흔들림을 방지하기 위해서 카메라와 컴퓨터를 연결하여 이미지 화면을 포착하였다. CCD 화면상의 경계선에서 정확한 좌표 값 측정이 가능하다면, 물체와 CCD 카메라와의 거리가 멀어질수록 오차가 작게 나타난다. 실험실에서의 재현성 때문에 카메라와 물체 사이의 거리를 1 m으로 했지만 3 ~ 4 m 이상 떨어져 측정하면 높은 정확도로 더 굽은 원통형 물체의 지름 측정이 가능하다.

또 비교적 지름이 작은 원통형 물체의 경우에 지름이 0.54 mm 이상이면 기하광학적인 방법으로 측정이 가능하였다. 그 정밀도를 높이기 위해서는 기본적으로 α , D , e , $X_{2, pix}$ 와 $X_{3, pix}$ 값을 정밀하게 측정해야 하지만 CCD 카메라의 화소 수가 높아야 한다. 즉 단위화소 a 의 값이 정확할수록 CCD 화면의 상에서 물체 경계 면을 더 정확히 분해할 수 있다. 물체의 지름이 가늘어질수록 간섭과 회절 효과가 크게 나타나서 기하광학적인 방법으로 정밀하게 측정하는 것이 어려워졌다.

한편, 간섭·회절의 방법으로 가는 철사와 같은 물체의 지

Table 1. Obtained diameters of cylindrical objects by direct measurement and optical measurements. A: obtained diameter by vernier calipers, B: obtained diameter by geometric optical method, C: obtained diameter by interference and diffraction method, -: not measured

A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	L (mm)	$\frac{A-B}{A} \times 100 =$ (%)	$\frac{A-C}{A} \times 100 =$ (%)
100.50	99.10±0.0040	-	1000.00	-	1.39	-
66.70	65.87±0.0075	-	1000.00	-	1.23	-
60.20	59.89±0.0080	-	1000.00	-	0.50	-
2.00	2.01±0.0090	-	158.78	7100	0.95	-
1.41	1.41±0.0091	1.41±0.0044	158.78	7100	0.65	0.31
1.23	1.22±0.0097	1.22±0.0079	158.78	7100	0.02	0.17
0.54	0.53±0.0028	0.53±0.0096	158.78	7100	1.33	0.07
0.50	-	0.50±0.0013	-	3090	-	0.26
0.12	-	0.12±0.0002	-	1335	-	0.17
0.08	-	0.08±0.0006	-	1275	-	0.75
0.05	-	0.04±0.0099	-	1115	-	0.20

를 측정하였는데, 철사의 지름은 버니어 캘리퍼스로 여러 번 측정한 평균 지름이 0.05, 0.08, 0.12, 0.50, 0.54, 1.23, 1.41 mm 이었고, 스크린과 철사슬릿 사이의 거리가 약 1 ~ 7 m 일 때 측정된 지름의 평균값은 0.0499, 0.0806, 0.1202, 0.5013, 0.5396, 1.2279, 1.4144 mm 이며 상대오차는 1% 이내 였다. 가는 금속 철사에서 빛의 산란은 지름 측정의 정확도에 영향을 줄 수 있다. 하지만 지름이 2 mm 이상 되는 물체의 경우는 레이저 광원의 지름보다 물체의 지름이 더 커져서 스크린에 나타나는 무늬가 정확히 분해되지 않아 간섭·회절 방법으로는 지름 측정이 불가능하였다.

영의 이중 슬릿에서 슬릿 간격이 파장과 거의 같다면 간섭

효과만 나타나지만, 슬릿의 간격이 사용한 광원의 파장보다 큰 경우는 스크린 상에는 회절과 간섭무늬가 합해져서 동시에 나타난다. Fig 6은 스크린 상에 나타나는 여러 가지 철사슬릿의 회절 무늬들이다.

V. 결론 및 전망

본 연구에서는 기하광학적인 방법과 간섭·회절에 의한 방법으로 지름이 0.05 mm ~ 100.50 mm 인 원통형 물체를 측정하였는데, 그 중에서 0.54 mm, 1.23 mm, 1.41 mm 인 원통형 물체는 두 가지 방법으로 측정이 가능하였다.

비교적 먼 거리의 0.54 mm 이상의 원통형 물체의 기하광학적인 방법에 의한 상대오차는 2% 이내였다. 이 방법은, 저렴한 레이저 포인트와 CCD 카메라를 컴퓨터와 연결하면 새롭고 편리한 광학적 방법의 측정 기구를 제작할 수 있으며, 멀리 떨어져 있는 가로수와 숲에서 나무줄기의 지름 측정이 가능하므로 수목을 관리하는데 유용하게 이용할 수 있다.

간섭·회절 원리를 이용한 가는 철사와 같은 지름 측정을 을 섬유외의 시각적 검사 및 광섬유의 지름 감시에 이용되기도 하기 때문에 높은 정밀도를 요구한다. 이 방법으로는 1.41 mm 이하의 지름에서 상대오차는 1% 이내로 측정되었다.

1.23 mm의 물체를 측정한 결과가 보여 주듯이 두 가지 방법으로 측정한 지름은 근사적으로 같다. 기하광학적인 방법으로 측정하는 원리는 렌즈의 굴절과 기하학적인 수학의 원리 등을 이용하고, 가는 철사의 지름 측정의 경우는 간섭·회절과 영의 이중 슬릿 실험 및 바비넷 원리 등을 이용한다. 즉, 떨어져 있는 원통형 물체의 지름을 측정 할 때 그 물체의 크기에 따라 적당한 방법을 선택하여 측정하면 대량으로, 경제적으로, 빠르게, 높은 정밀도로 물체의 지름을 측정할 수 있을 것이다.

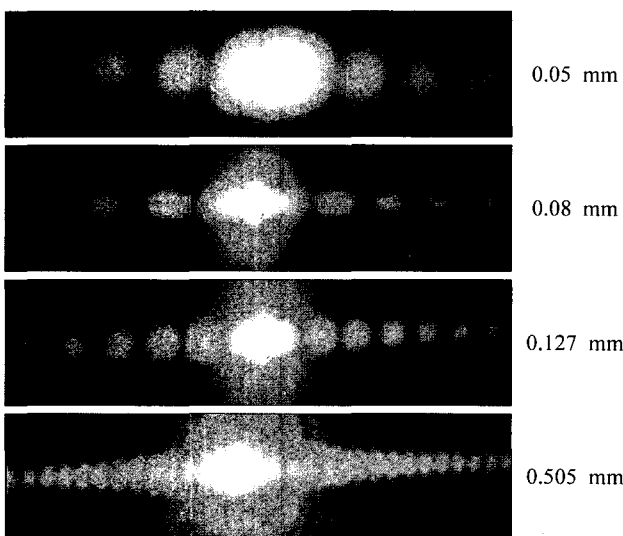


Fig 6. The interference and diffraction patterns of the four investigated wires whose thicknesses are 0.05, 0.08, 0.127, and 0.505 mm.

참고문헌

- [1] C. Loughlin, "Distance sensing : making light work," *Sensor Review*, vol 9, no. 3, pp. 131-136, 1989.
- [2] J. Romaine and E. Chaleff, "Object dimensioning using scanned laser and linear CCD triangulation," *Proc. SPIE*, vol. 3131, pp. 232-240, 1997.
- [3] M. Demeyere, E. Dereine, C. Eugene, "Measurement of Cylindrical Objects Through Laser Telemetry : Application to a New Forest Caliper," *IEEE*, vol. 51, no. 4, pp. 645-649, 2002.
- [4] Tang W, Zhou Y, Zhang J, "Improvement on theoretical model for thin-wire and slot measurement by optical diffraction," *Meas Sci. Technol.*, vol. 10, pp. 119-123, 1999.
- [5] Glass M., "Diffraction of a Gaussian beam around a strip mask," *Appl. Opt.*, vol. 37, pp. 2550-2562, 1998.
- [6] Chugui YV, Pavlov AA., "Peculiarities of cylinder diameter determination by diffraction method," Proceedings of XVI IMERO World Congress, Vienna, Austria, 25-28 September, pp. 169-174, 2000.
- [7] Haiming Wang, Valdivia-Hernandez R., "Laser scanner and diffraction pattern detection: a novel concept for dynamic gauging of fine wire," *Meas Sci. Technol.*, vol. 6, pp. 452-457, 1995.
- [8] Glass M., "Fresnel diffraction from curved fiber snippets with application to fiber diameter measurement," *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 1605-1616, 1996.
- [9] Lebrun D, Belaid S, Ozkul C, Kuan Fang R, Grehan G., "Enhancement of wire diameter measurement: comparison between Fraunhofer diffraction and Lorenz-Mie theory," *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 4, pp. 946-950, 1996.
- [10] Zimmermann E, Dandliker R, Souli N., "Scattering of an off-axis Gaussian by a dielectric cylinder compared with a rigorous electromagnetic approach," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 12, no. 2, pp. 398-403, 1995.
- [11] Butler DJ, Forbes GW, "Fiber-diameter measurement by occlusion of a Gaussian beam," *Appl. Opt.*, vol. 37, pp. 2598-2606, 1998.
- [12] Krattiger B, Bruno AE, Widmer HM, Geiser M, Dandliker R, "Laser-based refractive-index detection for capillary electrophoresis: ray-tracing interference theory," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 956-965, 1993.
- [13] Dobosz M, "Measurement of fiber diameter using an edge diode beam of light," *Opt. Commun.*, vol. 58, no. 3, pp. 172-176, 1986.
- [14] Soraya A. Khodier, "Measure of wire diameter by optical diffraction," *Optics & Laser Technology*, vol. 36, pp. 63-67, 2004.
- [15] J. C. Martinez-Anton, I. Serroukh and E. Bernabeu, "On Babinet's principle and a diffraction-interferometric technique to determine the diameter of cylindrical wires," *Metrologia*, vol. 38, pp. 125-134, 2001.
- [16] Kwon Ki Park, Study of the fringes patterns of the Young-Slit and Double-Slit, (Yonsei University, Seoul, 1994), pp. 14-15.

Diameter Measurement of Cylindrical Objects by Non-Contact Method

Bok ryoung Im

Ulsan Technical High School, Ulsan 680-013, Korea

Sok Won Kim[†]

Department of Physics, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

[†]*E-mail: sokkim@ulsan.ac.kr*

(Received March 15, 2005, Revised manuscript June 9, 2005)

Although there are many ways to measure the diameter of a cylindrical object, in this study, the diameter of a cylindrical objects were measured by the geometric optical method and interference-diffraction method which are two kinds of typical non-contact methods. In geometric optical method, the curved laser beam is formed on the cylindrical surface by spreading the inclined laser beam using the cylindrical lens. The curve is captured by CCD camera and the diameter is calculated by geometry. And the interference and diffraction patterns of investigated cylindrical objects are analyzed in interference-diffraction method. In this study, the cylindrical objects, whose diameters are 0.05 mm~100.50 were measured by the geometric optical method and interference-diffraction method. The results show that in each method, the relative errors of the measurement are within 2% and 1%, respectively and these non-contact methods can be applied in the quick measurement of many objects.

OCIS Codes : 050.1960. 120.0280. 120.3940. 280.3420.