

양방향 총밀리기 간섭계를 이용한 긴 곡률반경 측정*

이윤우 · 조현모 · 이인원

한국표준과학연구원 광학그룹

(1994년 4월 18일 받음)

구면의 긴 곡률반경을 측정하기 위하여 양방향 총밀리기 간섭계를 이용하는 새로운 방법을 제시하였다. 시준장치의 광원을 미세이동시켜 출사광선의 곡률중심과 시험구면의 초점을 일치시키는 비시준 조명방법을 사용하였으며, 양방향 총밀리기 간섭계를 사용하여 시험구면에서 출사한 광선의 시준 여부를 정확히 확인하였다. 이 방법은 렌즈의 긴 초점길이도 측정할 수 있으며 여러가지 변수에 의한 측정정확도를 자세히 분석하였다.

I. 서 론

오목 혹은 볼록구면의 곡률반경을 측정하는 경우 그 길이가 2~3m 이상이면 긴 광학대가 필요하므로 특별한 연구실을 제외하고는 직접측정이 곤란하다. 이러한 경우에는 Newton 간섭계,^[1] 디지털 구면계(Spherometer),^[2] 레이저 Fizeau 간섭계,^[3] 그리고 Murty 총밀리기 간섭계 등^[4] 좁은 공간에서 편리한 여러가지 간접 측정방법이 사용되고 있다.^[5] 이들 방법중 Newton 간섭계는 시험구면을 평면과 직접 비교하는 것으로 주로 광학가 공실에서 사용한다. 이 방법은 간단하지만 정확도가 낮은 단점이 있다. 매우 정확하게 반경을 교정한 원통 혹은 새개의 다리위 마이크로미터를 사용하는 구면계는 최근에 와서 측정정확도가 매우 향상되었다. 하지만 대부분 접촉식이기 때문에 박막을 입힌 구면에는 사용하기 어렵고 가격도 매우 고가이다. 미국 Zygo사에서 발표한 레이저 Fizeau 간섭계를 이용한 방법은 기존의 방법중 측정정확도가 가장 높은 방법이다. 그러나 이 방법은 오목구면만 측정할 수 있으며 특별히 제작한 기준광학면을 사용해야 하는 문제가 있다. Murty에 의한 가로 총밀리기 간섭계 (Lateral Shearing Interferometer)를 이용한 측정방법은 다른 방법에 비하여 매우 간단하므로 최근에 많이 사용되고 있다. 한개의 평행평판이나 췌기판을 사용하는 총밀리기 간섭계에 시준된 단색광이 입사의 양 혹은 음의 굴절력을 가진 렌즈를 통과하거나

구면에서 반사되어 입사하면 그 굴절력의 정도에 따라 총밀리기 간섭무늬가 변한다. 즉 평행평판을 사용하면 직선의 간섭무늬 간격이 변하며 췌기판의 경우는 간섭무늬가 회전하므로 그 크기를 측정함으로써 곡률을 구한다.^[6] 하지만 입사광선의 시준 여부를 나타내는 간섭무늬를 정확하게 확인하기가 쉽지 않고 시험구면에 수차가 있는 경우에는 간섭무늬가 휘어지기 때문에 회전각을 정확하게 측정하기가 더욱 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 긴 곡률반경을 측정하기 위하여 자동시준장치의 원리를 응용한 새로운 측정방법을 제시하였다. 시준장치의 광원을 광축방향으로 미세이동시켜 출사광선의 곡률중심과 시험구면 초평면을 일치시키며 이것은 레이저 광선의 시준시험을 위하여 종래의 총밀리기 간섭계를 개선한 양방향 총밀리기 간섭계를^[7,8] 사용하여 확인하였다. 먼저 양방향 총밀리기 간섭계 원리와 총밀립 간섭무늬로부터 직접 곡률 측정방법에 대하여 간단히 언급하였다. 그리고 곡률반경 뿐만 아니라 초점길이 측정방법에 대해서 자세히 설명하였으며 실험결과를 제시하고 측정정확도를 분석하였다.

II. 양방향 총밀리기 간섭계

레이저 광선의 시준 정도를 정확하게 측정하기 위하여 개발한 양방향 총밀리기 간섭계는 한개의 췌기판과 두개의 평면거울 그리고 두개의 half-aperture로 구성되며 췌기방향에 따라서 서로 반대방향으로 총밀립한 간섭무늬가 나타난다. 만약 췌기방향이 총밀립 방향에 대하여

* 본 연구는 과학기술처 연구비 지원으로 수행된 것임.

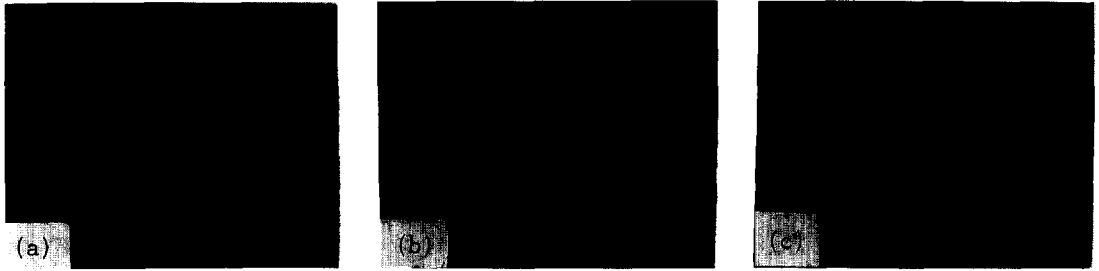


그림 1. 쉐기방향이 총밀림 방향에 대하여 기울어져 있는 경우 양방향 총밀리기 간섭무늬. 단 (a) 발산광선, (b) 평행광선, (c) 수렴광선의 경우이다.

입의 각도만큼 기울어져 있으면 입사광선의 발산정도에 따라서 그림 1과 같이 각각의 간섭무늬 간격과 회전각이 서로 반대로 변하며 평행광선에 대해서는 서로 간격이 같게 되고 또한 평행하게 된다. 하지만 쉐기방향이 총밀림 방향에 수직이면 총밀림 방향에 평행한 간섭무늬의 사이각이 변하며, 쉐기방향이 총밀림 방향에 평행하면 총밀림 방향에 수직인 간섭무늬 간격이 변한다. 만약 초점 종이동 오차계수가 D 인 파면수차를 가지는 광파가 쉐기각이 β 이고 총밀림 크기가 s 인 간섭계에 입사하면 쉐기방향이 수직, 수평인 경우의 간섭무늬 사이각(2α)과 간격 d_1, d_2 는 다음과 같이 표현된다.^[7,8]

$$2\alpha = 2\tan^{-1}(Ds)/(n\beta), \tag{1}$$

$$\Delta d/d = (2Ds)/(n\beta) \tag{2}$$

여기서 n 은 쉐기판의 굴절률, $\Delta d = |d_1 - d_2|$, $d = (d_1 + d_2)/2$ 이다. 위 식에서 평행광선에 대해서는 간섭무늬가 서로 평행하게 되거나 간격이 같게 되므로 self-reference를 가지는 것과 한개의 쉐기판만 사용한 간섭계에 비하여 분해능이 두배인 것을 알 수 있다.

만약 초점길이 f 인 시준렌즈가 광축방향으로 Δf 만큼 미세이동하면 초점 종이동오차에 의한 출사광선의 곡률반경 R 은 초점 종이동 오차계수 D 와 다음 관계가 있다.^[9]

$$R = f^2/\Delta f = 1/2D \tag{3}$$

그러므로 측정가능한 시준렌즈의 최소 초점 종이동오차는 식 (3)을 식 (1)과 (2)에 각각 대입하여 Δf 에 대하여 유도하면 다음과 같다.

$$\Delta f_1 = (n\beta f^2/s) \cdot (2\alpha)_{\min}, \tag{4}$$

$$\Delta f_2 = (n\beta f^2/s) \cdot (\Delta d/d)_{\min}. \tag{5}$$

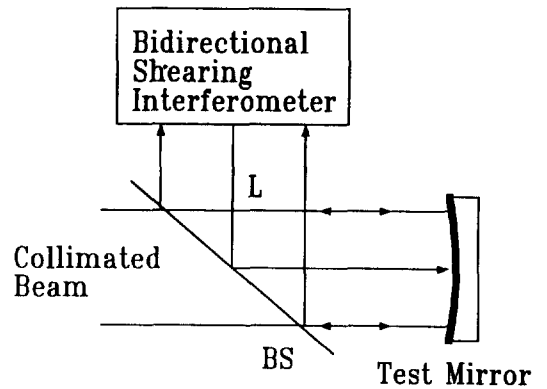


그림 2. 총밀리기 간섭무늬에 의한 구면의 곡률반경 측정장치도.

III. 총밀리기 간섭무늬에 의한 방법

양방향 총밀리기 간섭계에서 입사파면의 곡률반경은 식 (4)와 (5)를 식 (3)에 대입하면 쉐기방향이 따라서 다음과 같이 구해진다.

$$R = (s/2n\beta \tan\alpha), \tag{6}$$

혹은

$$R = (s/n\beta) \cdot (d/\Delta d). \tag{7}$$

즉 간섭무늬의 회전각이나 간격변화를 측정하면 입사파면의 곡률반경을 구할 수 있다.

그림 2는 구면의 곡률반경 측정을 위한 장치도이다. 시준된 광선이 시험구면에서 반사하거나 투과한 다음 간섭계에 입사한다. 이때 시험구면의 곡률반경 R' 은 다음과 같다.^[5]

$$R' = 2(R \pm L), \tag{8}$$

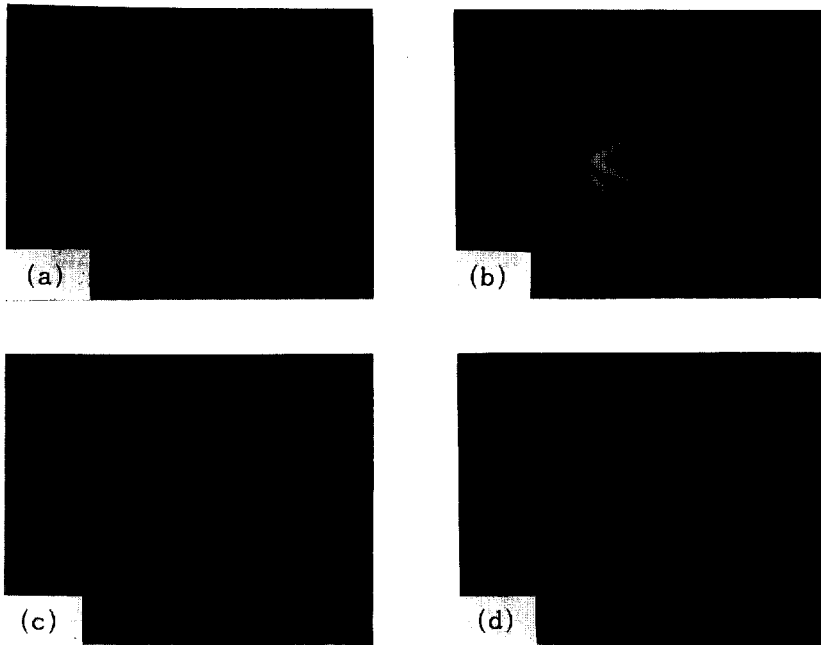


그림 3. 시험구면에 구면수차가 있는 경우 총밀립 간섭무늬. (a) 보통의 총밀리기 간섭무늬, (b) 양방향 총밀리기 간섭무늬.

여기서 L 은 시험구면 혹은 렌즈로부터 간섭계 화면까지의 거리이다. 그리고 식 (8)의 양의 부호는 오목거울, 음의 부호는 볼록거울에 대한 것이다.

이 방법은 장치가 매우 간단하여 사용하기 편리하지만 시험구면에 수차가 있는 경우에는 간섭무늬를 정확히 측정하기가 어렵다. 그림 3에서와 같이 구면수차 등이 있으면 직선의 총밀립 간섭무늬가 비대칭적으로 휘어지므로 간섭무늬 사이의 회전각도 혹은 간격변화 크기를 정확하게 측정할 수 없는 단점이 있다.^[6]

IV. 양방향 총밀리기 간섭계를 이용한 비시준 조명방법

다음은 양방향 총밀리기 간섭계를 광선의 시준 여부를 확인하는 역할에만 사용하는 새로운 측정방법을 제시하였다. 이 방법은 자동시준장치에서 시준렌즈 혹은 광원을 미세이동시켜 출사광선의 곡률중심을 시험구면의 초평면에 일치시킨다.

그림 4는 오목구면의 곡률반경 측정을 위한 장치도이다. 광원이 시준렌즈 (CL)의 초평면에 있으면 평행광선이 얻어진다. 초평면의 위치는 출사광선을 양방향 총밀리기 간섭계에 입사시켜 간섭무늬에 의하여 결정한다.

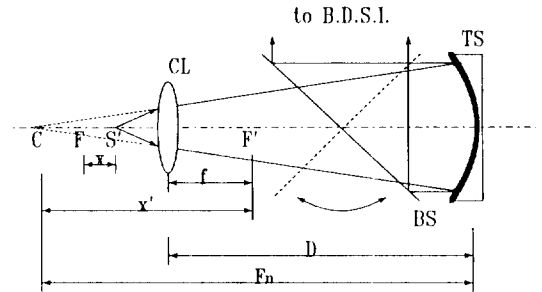


그림 4. 비시준 조명방법에 의한 오목구면의 긴 곡률반경 측정장치도.

만약 광원의 위치를 시준렌즈 방향으로 x 만큼 이동하면 출사광선은 곡률중심이 C 인 발산광이 된다. 그리고 출사광선의 곡률중심이 구면의 초평면과 일치하면 시험구면의 출사광선은 평행광이 되며 광선분할기에 의하여 간섭계에 입사한다. 간섭계에 의하여 평행광선 여부를 확인하면 광원이 이동한 위치(S')를 알 수 있다. 그림에서 시준렌즈의 초점길이를 f 와 f' , 광축상에 있는 시험구면과 시준렌즈의 간격을 D , 광원의 이동거리는 x , 발산하는 광의 곡률중심과 시준렌즈의 제 2 평면의 간격을 x' 라 하면 시험구면의 초점길이 F_n 은 다음과 같이 주어진다.

<연구논문> 양방향 총밀리기 간섭계를 이용한 긴 곡률반경 측정-이윤우·조현모·이인원

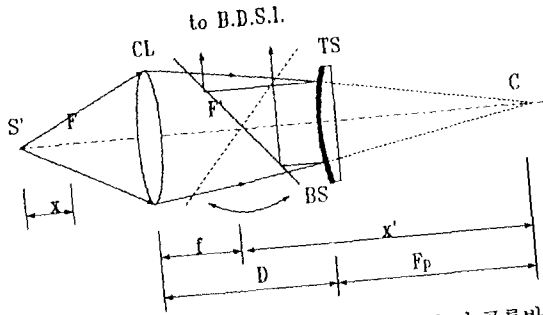


그림 5. 비시준 조명방법에 의한 볼록구면의 긴 곡률반경 측정장치도.

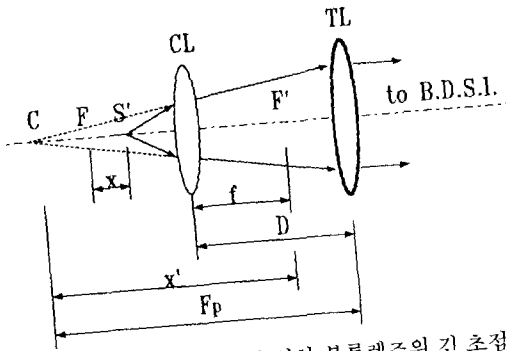


그림 6. 비시준 조명방법에 의한 볼록렌즈의 긴 초점길이 측정장치도.

$$F_n = x' + D - f$$

공기중에서 시준렌즈의 f 와 f' 는 같으므로 기하광학에서 Newton의 결상식은 다음과 같이 된다.^[10]

$$xx' = f^2$$

그러므로 식 (10)을 (9)에 대입하면 구면의 곡률반경은

$$R_n = 2F_n = 2(f^2/x + D - f) \tag{11}$$

이다.

그림 5는 볼록구면의 곡률반경을 측정하기 위하여 구성한 장치이다. 앞에서와 같은 방법으로 유도한 곡률반경 R_p 는 다음과 같다.

$$R_p = 2F_p = 2(f^2/x + D - f) \tag{12}$$

그림 4와 5에서 광분할기는 두께에 의한 광로정차 보정을 고려하여 두께가 수 μm 인 매우 얇은 Pellical 광분할기를 사용하였다.

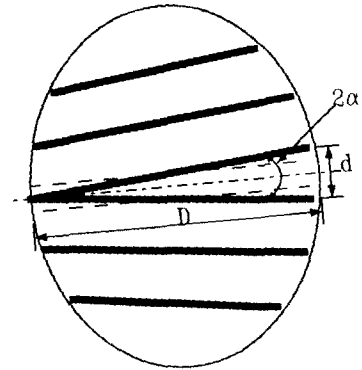


그림 7. 췌기방향이 총밀림 방향에 수직인 경우 측정 가능한 간섭무늬 사이의 최소각.

본 측정방법은 구면 뿐만 아니라 렌즈의 초점길이도 측정할 수 있다. 그림 6은 볼록렌즈의 초점길이 측정을 위한 측정장치이다. 시준렌즈 출사광선의 곡률중심을 시험렌즈 초평면에 일치시키며 이것은 간섭계로 확인한다. 시험렌즈의 초점길이 F_p 는 다음과 같이 주어진다.

$$F_p = f^2/x + D - f \tag{13}$$

오목거울도 같은 방법을 적용하면 측정할 수 있다.

식 (11), (12), (13)에서 f 와 D 는 고정된 값이므로 x 만 측정하면 곡률반경과 초점길이를 구할 수 있다. 그리고 모든 측정장치에서 초점을 종이동시키기 위하여 광원을 고정시키고 시준렌즈를 움직여도 결과는 똑같다.

V. 측정 정밀도 분석

다음은 곡률반경과 초점길이 측정시 발생할 수 있는 오차의 크기에 대하여 알아보자. 식 (11)에서 곡률반경 측정오차는 각각의 변수에 대하여 편미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta R_n = 2\left\{ -\left(\frac{f^2}{x^2}\right)\Delta x + (2f/x - 1)\Delta f + \Delta D \right\} \tag{14}$$

여기서 Δx 는 시준렌즈의 초점 종이동오차와 시준렌즈 시험구면을 결합한 광학계에 의한 초점 종이동오차 합이며, Δf 는 시준렌즈의 초점길이 측정오차이다. 그리고 ΔD 는 렌즈와 거울 사이의 간격 측정오차이다.

먼저 양방향 총밀리기 간섭계의 분해능을 분석하기 위하여 간섭계에서 췌기방향이 총밀림 방향에 대하여 수직인 간섭계에서 췌기방향이 총밀림 방향에 대하여 수직인 측정가능한 두 간섭무늬 사이의 최소각은 그림 7에 같이 간섭무늬 폭(D)과 간섭무늬 한쪽 끝에서 분해한 최소간격(d_{min})에 의존한다. 즉

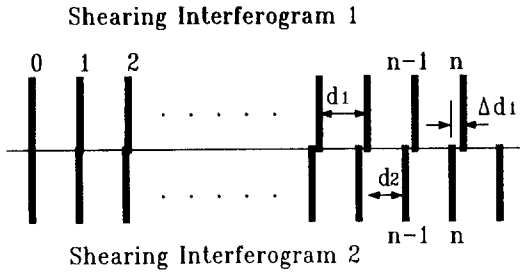


그림 8. 쉐기방향이 총밀립 방향에 평행한 경우 측정가능한 간섭무늬 간격변화.

$$(2\alpha)_{\min} = \tan^{-1}(d_{\min}/D) \tag{15}$$

이다. 그러므로 평행한 두 간섭무늬 간격을 좁게 하여 측정할수록 평행도가 깨어지는 것을 관찰하기 쉬우므로 분해능을 크게 할 수 있다. 쉐기방향이 총밀립 방향에 평행한 경우에는 두 간섭무늬 간격 d_1 과 d_2 의 차이가 그림 8에서와 같이 서로 겹친 간섭무늬 숫자 n 에 따라서 다음과 같이 표현된다.

$$d_1 - d_2 = \Delta d_1/n, \tag{16}$$

이다. 그러므로 식 (2)에서 $(\Delta d/d)_{\min}$ 는 Δd_1 의 측정분해능이 클수록, 겹치는 간섭무늬가 많을수록 작게 됨을 알 수 있다.

본 연구에서 광원의 파장은 633 nm, 쉐기판의 굴절률은 1.457, 쉐기각은 22 arc sec, 간섭무늬 직경은 32 mm, 총밀립 크기는 10 mm, 그리고 시준렌즈의 초점길이는 335.3 mm이다. 맨눈으로 측정가능한 d_{\min} 는 0.3 mm이었으며 $(2\alpha)_{\min} = 0.5^\circ$ 이다. 그리고 $(\Delta d_1)_{\min} = d_1/10$ 정도는 충분히 측정가능 하므로 $(\Delta d/d)_{\min} = 0.01$ 이다. 만약 렌즈나 CCD 카메라 등을 사용하여 간섭무늬를 확대하면 분해능은 더욱 증가할 것이다. 각각의 값들을 대입하여 계산하면 $\Delta f_1 = 15 \mu\text{m}$ 와 $\Delta f_2 = 17 \mu\text{m}$ 이다. 그러므로 두가지 방법의 분해능이 비슷함을 알 수 있다. Δx 는 식 (4) 혹은 (5)에서 f^2 대신에 $\{(fR)/(2fR-D)\}^2$ 을 대입하면 된다. 시준렌즈 초점길이가 f 는 본 연구실의 nodal bench (Pearl SP-4L)를 사용하여 측정하였으며 측정오차는 렌즈의 주평면 측정을 위한 nodal point 결정오차 때문에 $\Delta f = 0.1 \text{ mm}$ 이다. 그리고 $\Delta D = 1.0 \text{ mm}$ 이다. 그림 9는 시험구면의 곡률반경과 간격을 변화시켜 계산한 곡률반경 오차의 크기이다. 간격 D 를 크게 할수록 측정 정확도가 높게 됨을 알 수 있으며, $R = 10 \text{ m}$ 이고 $D = 400 \text{ mm}$ 일 때 측정오차는 $\Delta R/R = 0.07\%$ 이었다. 그러나 간섭무늬를 확대하여 측정분해능을 높이고 측정구면의 곡

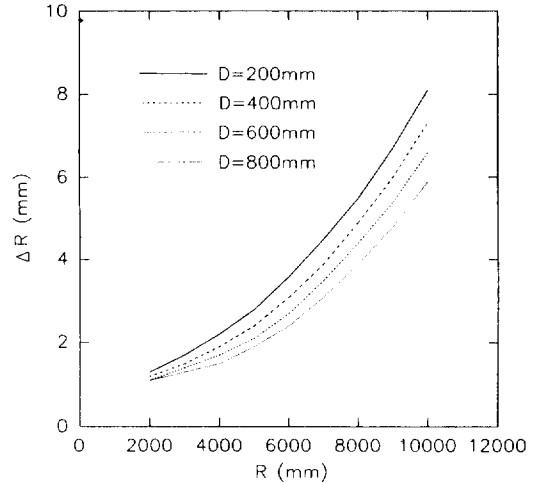


그림 9. 시준렌즈와 시험구면 간격변화에 의한 곡률반경 측정오차. 단, $f = 335.3 \text{ mm}$, $f = 0.1 \text{ mm}$, and $D = 1.0 \text{ mm}$.

률에 따라서 알맞은 변수값을 선택하면 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 다음은 본 연구실 광학공실에서 BK7으로 제작한 곡률반경이 4 m인 평면 오목형 렌즈를 사용하여 실험하였다. 본 연구에서 제시한 측정방법을 사용하여 각각 다섯번 측정한 곡률반경은 $R = 3,962 \pm 2 \text{ mm}$ 이고 초점길이는 $F = 7,688 \pm 10 \text{ mm}$ 이었다. 이때 구면과 시준렌즈 간격 D 는 377 mm이다. 측정된 곡률반경으로부터 계산한 초점길이는 측정치와 거의 일치하였다.

본 연구실에는 긴 곡률반경을 절대측정하는 방법이 없으므로 정확도는 알 수 없지만 측정 재현성은 매우 높음을 알 수 있다. 기존의 곡률반경 측정방법중 Digital spherometer와 Laser Fizeau interferometer 방법이 정확도가 가장 높지만 렌즈의 초점길이는 측정하지 못하며, 가격이 매우 고가인 관계로 실제로 사용하기에는 어려운 단점이 있다.^[5] 하지만 본 측정방법은 장치가 비교적 간단하고 거울과 렌즈를 모두 측정할 수 있으므로 광학변수 측정연구 등에 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

VI. 결 론

양방향 총밀리기 간섭계를 사용하여 렌즈와 구면의 긴 초점길이가 곡률반경을 측정하는 새로운 방법을 개발하였다. 양방향 총밀리기 간섭계를 사용하여 시준광학계의 광원에 의한 초점 이동거리를 매우 정확하게 측정하는 비시준 조명방법은 여러가지 측정변수를 알맞

계 선택함으로써 더욱 측정정확도를 높일 수 있으며 간섭무늬로부터 측정하는 렌즈나 구면의 파면수차등도 알 수 있다. 본 측정방법은 기존의 다른 방법을 사용할 수 없는 경우에 대체할 수 있는 매우 정확하고 편리한 방법으로 생각된다.

감사의 글

본 연구를 수행함에 있어 광학부품을 제작해 준 광학가공실의 이재협씨에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] E. James Tew, *Appl. Opt.*, **5**, 695(1966).
 [2] Oliverio, D. D. Soares and Jose F. Fernandez,

SPIE, **954**, 234(1988).
 [3] Mark C. Gerchman and George C. Hunter, *Opt. Engineer.* **19**, 843(1980).
 [4] M. V. R. K. Murty, *Appl. Opt.*, **3**, 531(1964).
 [5] M. V. R. K. Murty and R. P. Shula, *Opt. Engineer.* **22**, 231(1983).
 [6] D. Malacara, *Optical Shop Testing* (John Wiely & Son, New York, 1978) Ch. 4.
 [7] 이윤우, 조현모, 이인원, *한국광학회지*, **3**, 172(1992).
 [8] Y. W. Lee, H. M. Cho, and I. W. Lee, *Opt. Engineer.* **32**, 2837(1993).
 [9] 이상수, *기하광학(교학연구사, 서울, 1985)* pp. 10.
 [10] M. Born, and E. Wolf, *Principles of Optics* 6th edition, (Pergamon press, Oxford, 1989) pp. 152.

Measurement of Long Radius of Curvature by Using Bidirectional Shearing Interferometer

Yun-Woo Lee, Hyun-Mo Cho and In-Won Lee
*Optics Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science
Taejon 305-606, Korea*

(Received: April 18, 1994)

An improved method for the mesuement of very long radius of curvature by using a bidirectional shearing interferometer in a noncollimated light beam is given. This method can be used for both lenses and surfaces with positive or negative power. Detailed analyses for optical arrangements and achievable accuracy are presented.