

## 회절격자와 총밀리기 간섭기술을 이용한 렌즈 굴절률 측정\*

이윤우 · 조현모 · 이인원  
한국표준과학연구원 광학연구실

(1991년 11월 21일 받음)

회절격자와 굴절률을 알고있는 액체내에 있는 렌즈사이의 푸리에 변환관계를 이용하여 렌즈 굴절률에 대한 수식을 유도하였다. 총밀리기 간섭기술을 이용하여 정확한 렌즈의 후면초평면의 위치를 결정하였으며 슬릿을 스텝핑 모터로 구동하는 이동장치에 부착시켜 회절격자의 푸리에 변환 스펙트럼 간격을 측정하였다. 세가지 액체를 사용하여 얇은 렌즈의 굴절률을 측정하였으며 높은 측정정확도를 확인하였다.

### I. 서 론

렌즈의 굴절률을 측정하는 여러방법중 비교적 정확도가 높고 비파괴적인 방법은 miscible liquid-immersion method<sup>[1]</sup>, collimation method,<sup>[2]</sup> focusing liquid-immersion method,<sup>[3,4]</sup> 그리고 grating liquid-immersion method<sup>[5]</sup> 등이다. 앞의 두방법들은 서로 섞을수 있는 특정한 액체들을 준비해야 하고 여러번의 시행착오에 의하여 측정시간이 오래걸리는 결점이 있었다. 세번째 방법은 두개의 서로다른 액체를 사용하고, 중요한 측정변수인 렌즈의 후면초평면의 위치를 한개의 평행평판만 사용하는 Murty 총밀리기 간섭계를 사용하여 매우 정확하게 측정하는 개선된 것이었다. 하지만 초점길이와 렌즈 광축상의 후면점과 용기의 후면창 앞면사이, 후면창 두께, 그리고 후면창 뒷면과 초평면 사이의 거리들의 함으로 주어짐으로써 이들 변수들의 측정과정에서 정확도가 낮아지는 문제가 있었다. R. S. Kasana 등이 제안한 네번째 방법은 회절격자와 굴절률을 알고 있는 액체에 담긴 렌즈사이의 푸리에 변환관계를 이용한 것으로서 측정변수가 렌즈 초평면에 위치한 회절무늬 간격 하나 뿐인 매우 개선된 방법이었다. 하지만 정확한 초평면을 결정 하는데 어려움이 있으며 지루한 회절무늬간격 측정방법을 제시하고 있다.

본 연구에서는 얇은 렌즈의 굴절률을 측정하기 위하여 한개의 평행평판과 회절격자를 사용한 측정장치를 구성하였다. 평행평판의 앞면과 뒷면에서 형성되는 두개의 총밀립 간섭무늬에 의하여 시준광선의 평행도와 정확한

초평면의 위치를 확인 하였다. 슬릿을 미세이동장치에 부착시켜 회절무늬 간격을 측정 하였으며 세가지 액체를 사용하여 실험하였다.

### II. 이론 및 실험장치

Fig. 1과 같이 렌즈앞에 회절격자를 놓고 시준된 광파를 지나가게 하면 렌즈의 후면 초평면 위에 회절격자의 푸리에 변형된 회절무늬가 형성된다. 만약 회절격자 함수를  $g(x,y)$ 로 표현하면 공간주파수 평면  $(x, y)$ 에서 진폭분포는 다음과 같이 주어진다.<sup>[6]</sup>

$$G(x, y) = A \iint g(x, y) \cdot \exp\left[-\frac{-2\pi i}{f} \cdot (xx + yy)\right] dx dy \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 초점길이,  $A = \exp\left[\frac{ik}{2f} \cdot (x^2 + y^2)\right] / (i\lambda f)$ , 그리고  $\lambda$ 는 광원의 파장이다. 입사광파가 평면이고 렌즈의 회절각도가 작을경우 초평면 위의 회절무늬 간격  $\beta$ 는

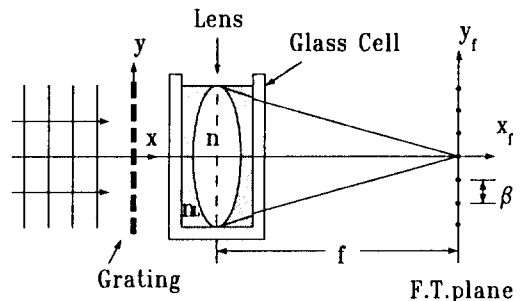


Fig. 1. Fourier transforming configuration.

\*본 연구는 과학기술처 연구비 지원으로 수행된 것임.

$$\beta = \lambda f / 2d \quad (2)$$

이다. 여기서  $2d$ 는 회절격자의 간격이다. 식 (2)로 부터 렌즈의 초점길이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$1/f = B/\beta \quad (3)$$

여기서 상수  $B$ 는  $\lambda/2d$ 이다. 만약 굴절률이  $n$ 인 렌즈가 굴절률이  $n_L$ 인 액체내에 있다면 식(3)과 렌즈방정식에 의하여 초점길이는<sup>[4]</sup>

$$1/f = B/\beta = (n - n_L)(c_1 - c_2) + (n - n_L)^2 t c_1 c_2 / n \quad (4)$$

의 관계가 있다. 여기서  $t$ 는 렌즈의 두께,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 렌즈의 곡률반경 이다.

만약 굴절률이  $n_1, n_2$ 인 두종류의 액체를 각각 사용하 면

$$1/f_1 = B/\beta_1 = (n - n_1)(c_1 - c_2) + (n - n_1)^2 t c_1 c_2 / n \quad (6)$$

$$1/f_2 = B/\beta_2 = (n - n_2)(c_1 - c_2) + (n - n_2)^2 t c_1 c_2 / n \quad (7)$$

의 관계가 있다.

식(6)과 (7)로부터 유도한  $n$ 에 대한 이차 미분방정식은

$$\begin{aligned} n^2(1 + K_{12})(\beta_1 - \beta_2) - n(1 + 2K_{12})(n_1\beta_1 - n_2\beta_2) \\ + K_{12}(n_1^2\beta_1 - n_2^2\beta_2) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

이다. 여기서  $K_{12} = t c_1 c_2 / (c_1 - c_2)$  이다. 굴절률을 나타내는 식(8)의 양의 해는

$$n = (n_1\beta_1 - n_2\beta_2) / (\beta_1 - \beta_2) [1 + (-1 + \sqrt{1 + \alpha}) / (2(1 + K_{12}))] \quad (9)$$

이며  $\alpha$ 는  $K_{12}(1 + K_{12}) \beta_1 \beta_2 [2(n_1 - n_2) / (n f_1 - n f_2)]^2$  이다. 식 (9)는 두꺼운 렌즈에 대한 일반적인 방정식이다. 얇은 렌즈의 경우  $t \approx 0$  이므로  $K_{12} = 0, \alpha = 0$  이다. 즉 식(9)는 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$n = (n_1\beta_1 - n_2\beta_2) / (\beta_1 - \beta_2) \quad (10)$$

또한 평면 볼록형 렌즈의 경우 곡률반경  $c_1$  혹은  $c_2$  중 하나는 영이므로  $K_{12}$ 와  $\alpha$ 는 영이 된다. 그러므로 굴절률  $n$ 은 식(10)과 일치한다. 윗 식으로부터 우리는 얇은 렌즈나 평면 볼록형 렌즈의 굴절률을 측정하기 위해서는 두 종류의 액체내에서 렌즈에 의한 회절무늬 간격만 측정하면 된다는 것을 알 수 있다. 그리고 회절무늬 간격  $\beta$ 는 식(2)에서 렌즈의 초점길이에 관계하므로 정확한 초점면의 결정이 매우 중요하다.

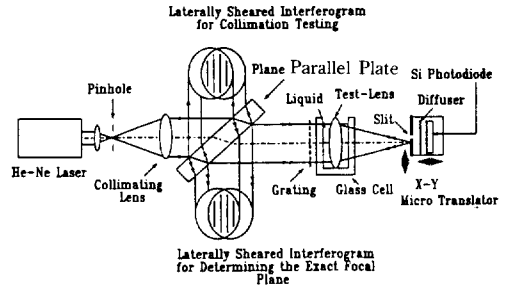


Fig. 2. Schematic diagram of a shearing interferometer for evaluating the refractive index of a lens.

Fig. 2는 본 연구에서 구성한 Murty 층밀리기 간섭 계형 측정장치이다. 공간필터 장치를 통과한 헬륨네온 레이저 광은 시준되어 경사지게 위치한 평면 유리판에 입사하며 일부분은 앞면과 뒷면에서 반사되고 나머지 광은 통과한다. 회절격자를 통과한 광은 시험렌즈가 들어있는 두개의 투명한 창을 가진 용기를 지나 액체와 시험렌즈로 구성된 렌즈계의 초점면에 푸리에 변환된 상을 형성한다. 초점면 부근에 위치한 슬릿은 폭이  $10 \mu\text{m}$ 이며 광학평판 위에 optical lithography 방법으로 제작된 것이다. 슬릿 외의 부분은 반사경 역할을 하므로 초점면에 수렴한 광을 반사시켜 지나온 광로를 다시 되돌아가게 한다. 되돌아온 광은 그림에서와 같이 유리판의 앞면과 뒷면에서 각각 반사되며 서로 겹치는 부분에서는 층밀리기 간섭무늬가 생긴다. 즉 슬릿의 위치에 따라 되돌아 오는 광선이 발산하거나 수렴하게 되므로 직선형태의 층밀리기 간섭무늬가 생기고 만약 슬릿이 정확한 초점면에 위치하면 되돌아 오는 광은 완전한 평행광이 되므로 간섭무늬가 사라져서 전체가 밝게 혹은 어둡게 보인다. 그러므로 우리는 간섭무늬로부터 매우 정확한 초점면의 위치를 알 수 있다. 자세한 이론 및 실험 결과는 참고문헌 [4]에 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다. 그리고 Fig. 2의 윗부분 간섭무늬는 시준장치를 통과한 광에 의하여 형성되므로 입사광의 평행정도를 확인하는 역할을 한다. 슬릿을 광축방향과 초점면 방향으로 미세 이동하기 위하여 분해능과 이동정확도가  $1 \mu\text{m}$  인 (Micro-Control 사의 UT 100 PP) X-Y 이동장치 위에 부착시켰다. 마이크로 컴퓨터를 사용하여 이동장치 조종과 광감지기의 신호처리를 하였으며 이동거리 변화에 의한 회절무늬 강도분포를 측정하여 회절무늬 간격을 구하였다.

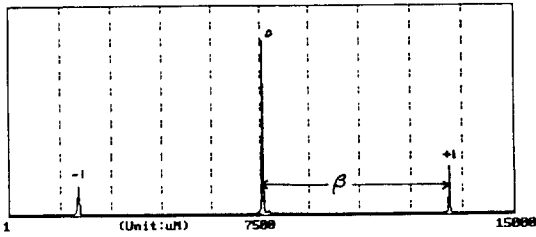


Fig. 3. Intensity distribution in the Fourier plane using a stepping motor translator ( $1\mu\text{m}$  resolution).

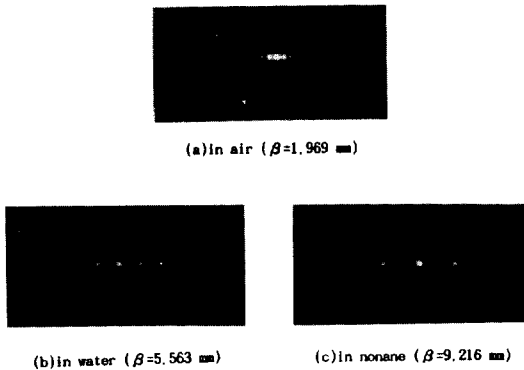


Fig. 4. Grating diffraction patterns corresponding to different media in the glass cell.

### III. 실험결과 및 논의

Fig. 2의 광원은 헬륨네온 레이저( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )이며 회절격자는 홀로그래피 방법으로 제작하였다. 제작된 회절격자의 공간 주파수는  $31.95\text{ lines/mm}$ 이며 본 연구원의 길이실에서 표면 기척기 측정장치로 측정하였다. 본 실험에서는 촛점길이가  $100.13\text{ mm}$ , 곡률반경이  $51.58\text{ mm}$ , 재료가 BK7( $n=1.51509, T=20^\circ\text{C}$ )인 평면 볼록형 렌즈를 사용하였다.

Fig. 3은 렌즈가 물속에 있을때 뷰리에 평면에서 슬릿을 주사시켜 측정한 회절무늬의 광도분포이며 Fig. 4는 용기속의 매질로써 공기, 물, 그리고 NONANE을 각각 사용하였을 경우의 회절무늬 사진이다.

Table 1은 각 매질내에서 측정한 결과이며 Table 2는 각 매질을 서로 조합하여 계산한 것이다. 세가지 경우의 평균값은 실제값에 비하여  $7 \times 10^{-5}$  정도 차이가 났으며 렌즈 제조회사의 측정치와 거의 일치 하였다. 광학렌즈의 온도변화에 의한 굴절률 변화는  $2-6 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$  이고 본 실험실의 온도변화는  $\pm 1^\circ\text{C}$  이므로 매우 정확한 측정치를 구하기 위해서는  $0.1^\circ\text{C}$  이내의 온도 조절이 필요하다.

Table 1. Experimental observations. ( $\lambda=632.8\text{ nm}, T=20^\circ\text{C}$ )

Sample No.	Media L	Refractive index $n_L$	Separation between two diffraction orders $\beta(\text{mm})$
1.	Air	1.0000	1.969
2.	Water	1.3330	5.563
3.	Nonane	1.4051	9.216

Table 2. Calculated lens index.

Sample No.	Liquids sets (i,j)	Predicted lens index	Average value
1.	Air-Water	1.51543	
2.	Air-Nonane	1.51516	1.51516
3.	Water-Nonane	1.51490	

### IV. 결론

본 회절격자를 사용한 liquid-immersion method 는 기존의 방법들에 비하여 매우 간편하고 측정정확도가 높은것을 확인하였다. 그리고 측정장치의 물색화 성질에 의하여 단일파장 뿐만 아니라 여러파장에서도 사용 할 수 있다고 생각된다. 더욱 정확하게 굴절률을 측정하기 위하여 미세온도조절장치가 필요하며 앞으로 오목렌즈와 두꺼운 렌즈에 대하여 연구할 예정이다.

### V. 감사의 글

본 연구를 수행함에 있어 실험장치 제작에 도움을 준 본 연구실의 이회운씨, 회절격자를 제작해준 정만호 박사과 송재봉씨, 그리고 회절격자 간격을 측정해준 길이실의 박병천 박사에게 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] L. Bergamann and C. Schaefer, Lehrbuch der Experimental Physik band III Optik (Walter de Gruyter, Berlin, 1978) pp. 416.
- [2] G. Smith, Appl. Opt. **21**, 755 (1982).
- [3] R. S. Kasana and K. J. Rosenbruch, Appl. Opt. **22**, 3526 (1983).
- [4] 이윤우, 조현모, 이인원, 한국광학회지, **2**, 7(1991).
- [5] R. S. Kasana, S. Boseck and Rosenbruch, Appl. Opt. **23**, 757 (1984).
- [6] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (McGraw-Hill, New York, 1968) pp.85.

**Use of a Grating and a Plane Parallel Glass Plate for  
Determining the Refractive Index of a Lens**

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

(Received: November 21, 1991)

The Fourier transform spectra of a grating have been employed to determine the refractive index of a simple lens. The shearing interferometric technique is used for collimation testing of the expanded laser beam and for determining the exact focal plane. The slit attached to micro X-Y translator has been used to measure the distance between two successive diffraction orders in the back focal plane of the test lens. The experimental equipment is described and results are presented.