

도브 프리즘을 이용한 렌즈 성능평가용 2축 총밀리기 간섭계 (Two-axis lateral-shearing interferometer for performance test of lenses using a Dove prism)

김승우(KAIST), 이혁교*, 김병창(KAIST 대학원)

S. W. Kim(KAIST), H. K. Lee*, B. C. Kim(Graduate School, KAIST)

ABSTRACT: Two axes lateral-shearing interferometer(LSI) specially devised for production line inspection lenses is presented. The interferometer composed with four prisms and a dove prism can test the lens performance including asymmetric aspheric lens. The dove prism which rotates the input image with respect to optical axis makes it possible. The wavefront passing through the test lens is reconstructed by the phase derivative obtained from the two axes LSI system. Zernike-polynomials fitting of this wavefront is presented for determining quantitative aberration of aspherical lenses .

Key Word : two axes lateral-shearing interferometer(2축 총밀리기 간섭계), dove prism(도브 프리즘) aberration(수차), wavefront(파면), zernike-polynomials fitting(zernike 다항식 맞춤),

1. 서론

컴퓨터, 광통신기술 등의 발전과 더불어 고밀도, 대용량 기록매체에 대한 요구가 첨단 산업분야뿐만 아니라 일상 생활에서도 대두되고 있다. 영상정보의 전달을 위해 널리 쓰이는 비디오, 카메라에서 CD(compact disk), DVD(digital versatile disk)에 이르기까지 소형, 경량화를 위해 비구면 렌즈가 사용되고 있으며 이에 따라 수요가 급격히 증가하고 있다. 이때 대량생산을 위한 선행기술로 렌즈 성능평가에 대한 기술이 요구된다. 대량생산용 렌즈에 대한 검사는 정밀측정에 있어서는 열악한 환경인 생산라인에서 바로 이루어져야 하며 또한 전수검사가 요구된다. 따라서 신속하고도 안정된 측정을 할 수 있는 측정시스템이 필요하다.

기존의 비구면 렌즈 측정기로는 고가의 기준 렌즈를 필요로 하는 Null Test와 렌즈 표면의 손상이 우려되는 접촉식 표면조도측정기 등이 사용되었으나, 측정환경에 영향을 많이 받고 측정 시간이 많이 걸리는 등의 단점이 있다.⁽¹⁾

또한 생산되는 모든 렌즈가 측대칭으로 사출성형되지 않기 때문에 총밀리기 간섭계를 통한 렌즈

수차 측정에서 측대칭을 가정하는 1축 총밀립 방식은 정확한 렌즈평가를 할 수 없다.⁽²⁾ 따라서 렌즈의 정확한 측정을 위해서는 2축 방향의 총밀립이 구현되어야 한다.

본 연구에서는 dove prism을 이용하여 2축 총밀리기 간섭계를 구성함으로써 이러한 문제를 극복하고자 한다.

본 연구에서 사용한 총밀리기 간섭계는 index matching oil을 사이에 둔 4개의 분할된 프리즘으로 구성되어 있고 파면을 90도 회전시켜줄 수 있는 dove prism을 사용해서 2축 총밀립을 실현하고 있다. 또한 렌즈 성능평가를 위해 2축 총밀립으로 획득된 파면으로부터 Zernike 다항식 맞춤을 하고 수차량을 산출하였다.⁽¹⁾

2. 측정원리

2.1 총밀리기 간섭계의 원리

비구면 렌즈의 성능평가를 위해서는 측정렌즈를

투과한 파면수차를 산출해야 한다. 이를 위하여 집광렌즈와 핀홀을 통과한 발산광을 측정렌즈를 통과시켜 근사화된 평행광을 만든다. 이때 측정렌즈가 수차가 없는 완전한 렌즈라면 평행광이 나오지만, 수차를 포함한 렌즈일 때는 왜곡된 파면을 형성한다. 따라서 투과된 파면의 정량적 수차산출에 의하여 비구면 렌즈의 성능을 평가할 수 있다.

층밀리기 간섭계에서는 측정 렌즈를 통과한 파면이 프리즘을 지나면서 간섭무늬를 형성한다.

간섭무늬로부터 위상편이를 시켜서 정확한 위상값을 계산하고 전파상수(K)를 나누면 광경로차 즉, 파면의 기울기 $\Delta W(x,y)$ 가 계산된다. 측정렌즈가 측대칭이면 $\Delta W(x,y)$ 로부터 측정하고자 하는 파면은

$$W(x_i, y_i) = \frac{1}{S} \int \Delta W(x_i, y_i) dx \quad \text{--- (2-1)}$$

로 주어지며 S는 층밀립량이다.

그러나 실제 생산되는 렌즈는 금형 자체, 혹은 사출성형시 수축이나 환경 등의 영향을 받아 완전한 측대칭을 얻기 힘들다.

따라서 측대칭이란 가정이 필요없는 2축 층밀리기 간섭계를 구성하고 x, y 방향으로의 층밀립 구현을 통해 두 프레임의 영상을 얻은 뒤 파면의 기울기가 0인 점, 즉 위상 값이 0인 점을 파면의 중심점으로 잡아 두 영상을 일치시킨다. 다음 중심점으로부터 x, y 방향 중심선의 파면 높이를 먼저 구한다.

점1 에 대해서 적분 경로로 하는 $W(x, y)$ 와 점2 에 대해서 적분 경로로 하는 $W(x, y)$ 는 각각 다음과 같다.

$$W_1(x, y) = W(x_1, y_1) + \Delta x \frac{\partial W(x_1, y_1)}{\partial x}$$

$$W_2(x, y) = W(x_2, y_2) + \Delta y \frac{\partial W(x_2, y_2)}{\partial y} \quad \text{--- (2-2)}$$

그러므로 한 점의 높이를 계산하는 데 있어서 x, y 방향의 기울기를 모두 고려해서 두개의 적분 경로로 적분한 뒤 평균을 취한다.

최종으로 파면은 다음과 같다.

$$W(x, y) = \frac{W_1(x, y) + W_2(x, y)}{2} \quad \text{--- (2-3)}$$

위와 같은 방법으로 각각의 사분면에 대해서 적용하면 측정 전 영역의 파면을 얻는다.

2.2 정량적 수차산출 이론

생산라인에서 사출성형되는 비구면렌즈의 경우

수차량이 양·불 판정의 기준이 된다. 측정렌즈를 통과하면서 왜곡된 파면은 렌즈의 수차 정보를 가지고 있다. 이는 Zernike 다항식 맞춤을 통하여 산출이 가능하며 각각의 Zernike 계수들은 파면의 수차량을 표시한다.

Zernike 다항식은 단위 원 내에서 정의되며, 극좌표계인 각도와 반경함수의 곱으로 표현된다.

각각의 Zernike 다항식 항들이 주어진 측정 데이터에서 직교하게 되면 파면은 다음과 같이 표현되고 최소자승법을 이용하여 다항식 맞춤이 수행되어진다.

$$W(\rho, \theta) = \sum_{r=1}^n A_r U_r \quad \text{--- (2-4)}$$

그러나 일반적으로 측정 시에 노이즈가 발생하고 전체 측정영역에 대하여 균일한 데이터를 얻을 수 없으며 또한 CCD카메라와 컴퓨터를 이용하므로 비연속적인 데이터를 얻게 되어 직교를 보장할 수 없다. 따라서 영역내의 데이터에 직교한 새로운 다항함수를 식(2-5)과 같이 정의한다.

$$W(\rho_i, \theta_i) = \sum_{r=1}^n B_r V_r(\rho_i, \theta_i) \quad \text{--- (2-5)}$$

최소자승법은 식 (2-6)에서처럼 오차함수를 정의하고 이를 최소화 시키는 계수 B_p 를 구하면 식 (2-7)과 같이 된다.

$$E = \sum_{i=1}^N [W_i' - W(\rho_i, \theta_i)]^2 \quad \text{--- (2-6)}$$

$$B_p = \frac{\sum_{i=1}^N W_i' V_p}{\sum_{i=1}^N V_p^2}, \quad W_i' \text{ (측정값)}$$

$$\text{--- (2-7)}$$

여기서 i 는 N개의 측정 데이터 위치이다.

최종적으로 Zernike 계수를 구하기 위해서 Gram-Schmidt orthogonalization 기법을 적용하면 식(2-8)에서처럼 B_p 의 선형조합으로 A를 구할 수 있다.

$$A_r = B_r + \sum_{i=r+1}^n B_i C_{ir} \quad \text{--- (2-8)}$$

2축 층밀리기 간섭계에서는 식(2-3)으로 W_i' 를 구하고 이로부터 수차량을 계산하므로 측대칭이 아닌 경우에도 적용할 수 있다.

여기서 구해진 Zernike 계수는 광학적인 파면 수차를 나타내며 산출된 수차량을 이용하여 사출성형된 비구면 렌즈를 생산현장에서 전수 검사하여 양·불을 판정할 수 있다.

3. 측정 시스템

3.1 Dove prism을 이용한 간섭계 구성

2축 충밀립을 구현하는 방법에는 프리즘부를 광축에 대해 회전시키는 방법, 렌즈 자체를 회전시키는 방법, 그리고 렌즈에서 나온 파면을 회전시키는 방법이 있을 수 있다.

앞의 두 방법은 시스템이 복잡해지고 광축정렬이 어려우며 안정성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 dove prism을 사용해서 렌즈에서 나온 파면을 회전시켜서 Fig. 1에서처럼 2축 충밀리기 간섭계를 구성했다.

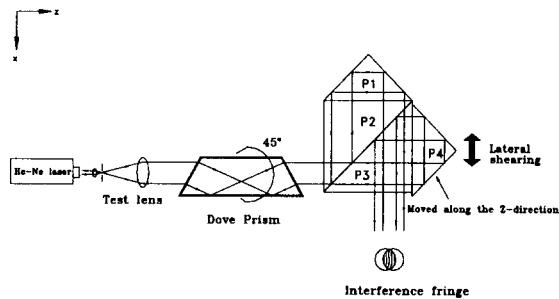


Figure 1. Lateral-shearing by sliding the prism P4 in z-direction and wavefront rotation using dove prism

dove prism은 들어온 상을 x축에 대해 180° 회전시켜준다. 그리고 dove prism을 z축에 대해 회전시키면 상은 x축에 대해서는 180° 회전을 유지한 채 z축에 대해 prism 회전양의 두배로 회전하게 된다.⁽³⁾ 따라서 dove prism을 45° 회전시키면 측정대상인 렌즈를 90° 회전시키는 것과 동일한 효과를 얻는다. dove prism의 이런 기능을 이용하면 $W_1(x_i, y_i)$ 를 먼저 얻고 dove prism을 45° 회전시켜서 $W_2(x_i, y_i)$ 를 얻을 수 있다.

3.2 측정 시스템 구성

Fig. 2는 실제로 구축한 2축 충밀리기 간섭계의 사진이다.

렌즈의 안정적인 장탈착 및 측정을 위해서 직각 반사 거울을 이용해 수직형으로 구성했다. 측정렌즈를 통과한 파면은 dove prism을 통과해서 충밀리기 간섭부로 입사하고 프리즘의 미소 구동에 의해 충밀립이 일어난다. 충밀립에 의해 형성된 간섭 무늬는 간섭계부에 부착된 CCD카메라에 의해 획득되어 파면과 수차를 계산하는데 사용된다. 그런 다음 파면을 90°회전시키고 이를 반복해서 2축 충밀립을 구현한다.

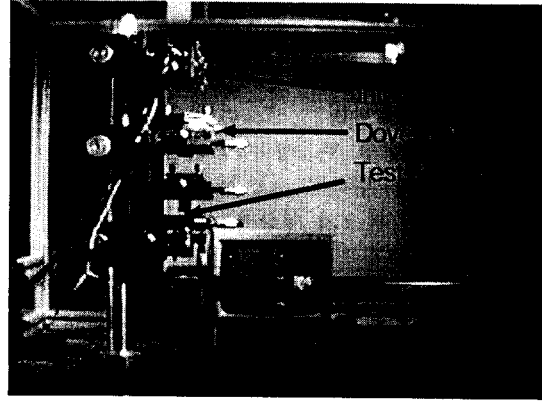


Figure 2. Two axes Lateral-shearing interferometer

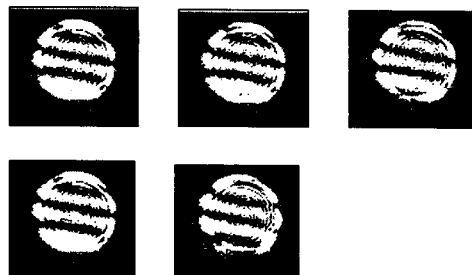
4. 실험결과

본 연구에서는 DVD(digital versatile disk)에 사용되는 Pick-up용 비구면렌즈를 측정하였다. 렌즈 재질은 굴절률 1.505의 플라스틱이며 초점거리는 약 3 mm이다. 구경은 4.5 φ 정도로 작고 개구수가 커서 표면의 경사가 매우 급하므로 접촉식으로는 측정이 어렵다.⁽⁴⁾

4.1 2축 충밀립 시스템에서 파면의 복원



(a) Fringes of x axis



(b) Fringes of y axis

Figure 3. Phase shifted fringes of test lens

Fig. 3은 광 Pick-Up에 사용된 DVD용 비구면 렌즈를 투과한 레이저빔이 층밀리기 간섭계에 의하여 간섭이 일어난 결과이며, 이때 위상천이에 따라 각 축방향으로 5개씩 얻어진 간섭무늬를 보여준다.⁽⁵⁾ 이것은 x축과 y축 두방향으로 층밀림 시켜서 얻은 결과이다.

층밀리기 간섭계에서의 간섭무늬는 측정렌즈를 투과한 파면의 기울기 값을 결정한다. 따라서 파면은 이 기울기 값을 적분해서 얻을 수 있다. Fig. 4는 위에서 얻은 간섭무늬들을 얻고 이를 통해 복원된 파면이다. 복원된 파면의 지름은 약 4 mm이다.

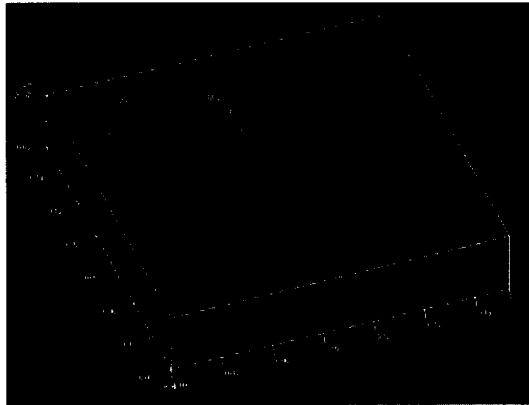


Figure4 (b). Wavefront of DVD lens (2axes)

4.2 측정 수차값

(Unit : λ)

	수 차 값	비 고
1	2.370	piston
2	0.747	y-tilt
3	0.774	x-tilt
4	0.120	45°-astig.
5	0.047	defocus
6	0.184	0,90°-astig.
7	0.020	x°-astig.
8	0.006	x-coma
9	0.004	y-coma
10	0.030	y°-astig.
11	0.003	
12	0.0003	
13	0.0001	spherical
14	0.0003	
15	0.003	

Figure5. Aberration of DVD lens

Fig. 5는 위에서 구한 파면을 이용해서 구한 Zernike 계수이다.

여기에서 13번째 계수 항은 구면 수차량을 나타내고 6, 7번째 항과 10번째 항은 비점수차량을 나타내며 8, 9번째 항은 코마 수차량을 나타낸다. 이 수차량들이 렌즈평가의 척도가 되며 이들의 RMS 값을 구해 양·불을 판정하므로 이 세 수차항이 관리대상이 된다.

5. 고찰 및 결론

본 연구에서는 dove prism을 이용한 2축 층밀리기 간섭계를 비구면 렌즈 측정에 적용하였다. 측정, 계산된 파면의 기울기로부터 2축을 모두 고려해서 파면을 복원했고 이로부터 정량적 수차산출을 위한 Zernike 다항식 맞춤을 구현했다. 실제로 광 pick-up 렌즈를 측정할 결과를 제시하였다.

참고문헌

1. Daniel Malacara, Optical shop testing, Wiley-Interscience Publication, New York (1992)
2. Woo Jong Jo and Seung Woo Kim "A study on the stable lateral-shearing interferometer for production line inspection of lenses." Opt. Eng., Vol.36, No.3, pp.896-900 (1997)
3. Robert H. Ginsberg "Image Rotation" Applied Optics 1 December 1994
4. H.Aoyama, Tomakomai, M. Kawai, T. Kishinami, "A New Method for Detecting the Contact Point between a Touch Probe and a Surface", CIRP, Vol.38, pp.517-524 (1989)
5. In-Bok Kong and Seung-Woo Kim, "General algorithm of phase-shifting interferometer by iterative least-squares fitting." Opt. Eng., Vol.34, No.1, 183-188 (1994)