

# Shack-Hartmann 파면분석기와 점광원을 이용한 광학부품의 수차 측정

이진석<sup>†</sup>, 김학영\*, 박영필\*, 박노철\*\*, 한재원\*

## Wavefront Aberration Measurement with Shack-Hartmann Sensor and Point Source

Jin Seok Lee<sup>†</sup>, Hak Young Kim\*, Yong Pil Park\*, No Cheol Park\*\*, Jae Won Hahn\*

**Key Words :** Shack-Hartmann wavefront sensor, wavefront aberration, optical testing, pinhole diffraction

### ABSTRACT

Using a Shack-Hartmann sensor, we construct an optical testing system measuring the wavefront error of small optical components. The systematic error of the sensor is compensated with a reference plane-wave system that produces almost perfect plane waves. Several types of lenses are tested using a point source that generates spherical waves emitted from a pinhole. The results of the optical testing obtained with the Shack-Hartman sensor are compared with those measured with Zygo interferometer.

### 1. 서론

광학부품을 제작하고 사용하는데 있어서 설계변수에 맞게 제작되었는지, 그리고 적용하고자 하는 시스템에 맞는 적절한 성능을 나타내는지 확인하는 일은 중요하다. 광학 부품의 성능을 나타내는 대표적인 값으로는 파면 수차(wavefront aberration)를 들 수가 있고, 현재 이러한 수차 측정에는 간섭계 방식의 장비가 많이 사용되고 있다.

본 연구에서 사용한 Shack-Hartmann 파면분석기(이하 SH 파면분석기)는 입사되는 빛의 세기 분포와 파면의 형태를 동시에 측정할 수 있는 장비로, 입사되는 빛을 직접 분석하기 때문에 사용하는 레이저의 가간섭성이나 사용 파장에 크게 영향을 받지 않는다.<sup>1</sup> 또한 실시간으로 파면의 형태를 관찰

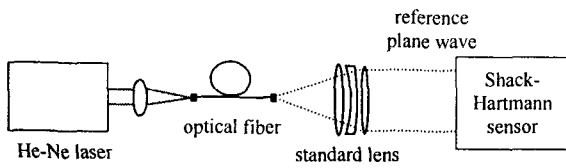
할 수 있고 진동에 민감하지 않으며 상대적으로 저렴하다는 장점을 지니고 있다. SH 파면분석기는 입사되는 빛이 마이크로렌즈 배열(microlens array)을 통과하여 CCD에 초점을 맺는 구조로 되어 있다. 수차가 없는 평행광이 들어왔을 때 맺힌 초점의 위치와 수차를 가진 빛에 의해 맺힌 초점의 위치의 차이를 이용하여 각 마이크로렌즈로 입사된 파면의 기울기를 알 수 있고<sup>2</sup> 이들을 조합하여 전체적인 파면의 형상을 재구성하고 Zernike 다항식을 이용하여 수차의 종류와 크기를 알 수 있다.<sup>3</sup>

### 2. 실험장치

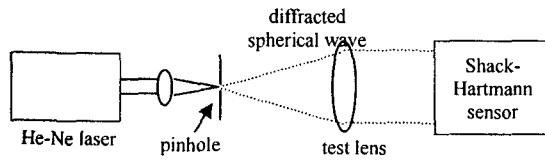
SH 파면분석기는 주변 온도 등의 측정 환경에 영향을 받을 수 있기 때문에 기준이 되는 평행광을 이용하여 시스템의 오차를 보정한다. Fig. 1과 같이 레이저와 광섬유, 표준렌즈를 이용하여 수차가 거의 없는 평행광을 만들어 시스템의 reference를 설정한다.

다음으로 Fig. 2와 같이 레이저를 편홀에 집광

<sup>†</sup> 연세대학교 기계공학과  
E-mail: jaewhahn@yonsei.ac.kr  
TEL: (02)2123-7790 FAX: (02)312-2159  
\* 연세대학교 기계공학과  
\*\* 정보저장기기 연구센터



**Fig. 1 Calibration the wavefront sensor with reference plane wave**



**Fig. 2 Measurement the transmitted wavefront of a test lens with spherical wave diffracted from**

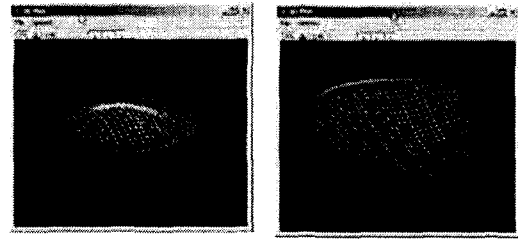
시커 점광원을 만들고 이를 이용해 렌즈의 수차를 측정하는 시스템을 제작하였다. 핀홀에서 회절되어 나오는 구면파는 측정렌즈를 통해 평행하게 되고 그 빛을 SH 파면분석기를 통해 분석하여 측정 렌즈의 수차를 알 수 있다. 핀홀의 크기가 아주 작아지게 되면 측정할 수 있는 렌즈의 NA가 커지고, 오차가 거의 없는 구면파가 만들어지게 된다. 500 nm 크기의 핀홀인 경우 구면파의 FWHM (full width half maximum) NA가 0.65 이상이 되고, 핀홀의 크기에 의한 구면파의 파면 오차가 약  $1/1000\lambda_{rms}$  이하가 되어 무시할 만큼 작은 값이 된다.<sup>4</sup>

### 3. 실험 결과

Fig. 1 과 같은 시스템을 구성하고 기준 평행광을 이용해 파면분석기의 오차보정 실험을 한 결과, 시스템의 전원을 공급한 후 약 한 시간 정도가 지난 후에 안정적인 값을 보여주는 것으로 나타났다. 기준 평행광을 파면분석기로 측정한 결과, 약  $0.0044\lambda_{rms}$  의 파면 수차를 가지는 것으로 나타났다.

**Table 1 Aberration measurement of test lenses**

Test lens		Wavefront aberration	
		SH sensor	Interferometer
microscopic objective lens	rms	$0.095\lambda$	$0.093\lambda$
	p-v	$0.547\lambda$	$0.532\lambda$
aspheric lens	rms	$0.036\lambda$	$0.036\lambda$
	p-v	$0.182\lambda$	$0.200\lambda$



**Fig. 3 3D wavefront shape of microscopic objective lens (left) and aspheric lens (right)**

시스템의 오차가 보정된 후에 Fig. 2 의 시스템을 이용하여 NA 0.65 인 현미경 대물렌즈와 NA 0.25 인 비구면 렌즈의 수차를 측정하였다. 이 결과를 Zygo 간섭계로 측정한 결과와 비교해 보았을 때 (Table 1), rms 파면 수차는 약  $1/500\lambda$  이내, p-v 파면 수차는 약  $1/50\lambda$  이내의 측정값의 차이를 보였다. 또한 테스트 렌즈를 분해, 재조립하여 여러 번 다시 측정해본 결과, 약  $1/500\lambda_{rms}$  ( $2\sigma$ ) 의 측정 반복성을 나타내 안정적인 결과를 보여주는 것을 알 수 있었다.

### 4. 결론

SH 파면분석기와 점광원을 이용한 본 측정 시스템이 안정적으로 정확한 측정 결과를 나타낸다는 것을 확인하였고, 이를 통해 정보저장기의 광학 부품의 성능 평가에도 사용될 수 있을 것으로 보인다.

### 참고문헌

- (1) J.A. Koch, R. W. Presta, et al., 2000, "Experimental comparison of a Shack-Hartmann sensor and a phase-shifting interferometer for large optics metrology application," Applied Optics, Vol. 39, No. 25, pp. 4540-4546
- (2) B. C. Platt, R. Shack, 2001, "History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing," Journal of Refractive Surgery, Vol. 17-2, pp. 573-577
- (3) D. Malacara, 1992, "Optical Shop Testing," John Wiley & Sons Inc.
- (4) K. Otack, I. Nishiyama, T. Yamamoto, Y. Fukuda, S. Okazaki, 2002, "Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography," Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol. 20, No. 6, pp. 2449-2458