

# Shack-Hartmann 파면분석기와 점광원을 이용한 DVD 픽업 렌즈의 수차 측정

## Wavefront Aberration Measurement of DVD pick-up lenses with a Shack-Hartmann Sensor and a Point Source

강동원 †, 이진석\*, 한재원\*\*

Dong Won Kang, Jin Seok Lee and Jae Won Hahn

### Abstract

Using a Shack-Hartmann sensor and sub-wavelength sized pinhole point source, we develop an optical testing system that measures the wavefront error of high numerical aperture and small sized optical components. The sub-wavelength sized pinhole generates perfect spherical waves with large diffraction angle and this makes possible to test high numerical aperture optics. The Shack-Hartmann sensor reconstructs the wavefront and calculates the aberrations. We make a home-made reference plane wave source which generates nearly perfect plane waves and the calibration with this plane source gives the overall uncertainty of the optical testing system  $0.010 \lambda$  rms

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

### 1. 서 론

광 정보저장기기의 기록 밀도를 높이기 위해서는 광픽업의 분해능과 작은 초점 크기가 중요한데 이를 위해 짧은 파장과 고 개구수(Numerical Aperture)의 광학부품을 사용하고 있다. 예를 들어 CD는 개구수 0.45의 광 픽업과 780 nm 레이저를 사용하여 650 MB의 정보를 저장할 수 있는데 DVD로 넘어오면서 파장은 650 nm으로 짧아지고 개구수는 0.6으로 높아지면서 4.7 GB의 저장 용량을 확보하였다. 현재 블루 레이 디스크(Blu-ray Disc)에서는 405 nm 파장과 개구수 0.85의 픽업을 사용하여 23 GB를 저장할 수 있게 되었다. 현재 차세대 광 정보저장기기로서 활발히 연구되고 있는 근접장 저장장치(near field recording)에서는 SIL(solid immersion lens)를 이용한 개구수 1.84의 픽업과 405 nm의 파장을 통해 100 GB의 기록 용량을 가진 저장장치가 제안되기도 하였다.[1]

이러한 정보저장기기의 광 픽업의 경우 정해진

파장에서 회절한계의 성능을 보여야 하기 때문에 광학 부품들이 설계변수에 맞게 제작되었는지, 그리고 적용하고자 하는 시스템에 맞는 적절한 성능을 나타내는지 확인하는 일은 중요하다. Root mean square(RMS) 파면 수차(wavefront aberration 또는 wavefront error)는 광학적 성능을 나타내는 값이며, Rayleigh 기준에 따르면 파면 수차가  $0.07 \lambda$  rms 이하인 광학 부품은 회절한계의 성능을 가지게 된다.

본 연구에서는 DVD 픽업의 측정 뿐만 아니라 향후 차세대 광 정보 저장장치에서 사용하게 될 고개구수의 광학 부품의 측정에 대비하기 위해 핀홀에서 회절되는 빛을 이용하여 고 개구수의 기준 구면파를 생성하였다. 경험적인 법칙으로 핀홀의 크기는 개구수 NA와 파장  $\lambda$ 에 대하여  $0.5 \lambda / NA$ 로 정해지고, 핀홀에서 회절된 구면파의 정확도는 기존의 여러 연구들을 통해 거의 완벽한 구면파가 생성됨을 알 수 있다. [2-4] 이를 통해 기준 광학계를 이용하지 않고도 광학 부품을 평가할 수 있게 되었다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험 장치 및 오차 분석

† 연세대학교 기계공학과  
E-mail : jaewhahn@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-7790

\* 연세대학교 기계공학과 (현 소속 : 삼성전기)

\*\* 연세대학교 기계공학과

본 DVD pick-up lens 파면 측정 시스템은 크게 레이저 광원부, 핀홀 점광원, relay optics, SH 센서로 구성되어 있으며, 개략도는 Fig. 1 과 같다.

레이저를 단일 모드(single mode) 광섬유에 커플링하여 광원으로 사용하였고, 이를 핀홀에 집광시키면 수차가 거의 없는 회절 구면파를 생성할 수 있다. 핀홀과 측정대상 렌즈와의 거리를 측정 렌즈의 초점거리와 같게 정렬을 하면 구면파는 측정 렌즈를 통과하면서 측정 렌즈의 수차를 포함한 평면파가 되어 진행하게 된다. 이 때 발생한 파면은 수차가 있기 때문에 진행하면서 형태가 조금씩 변하게 되는데 이를 방지하여 relay optics 를 사용하였다. SH sensor 는 relay optics 로부터 받아들인 파면을 분석하여 수차 정보를 제공하게 된다.

광원으로는 일반적인 DVD RW 드라이브에서 사용되는 655 nm 다이오드 레이저를 사용하였고, 단일모드 광섬유를 사용하여 핀홀과 연결하였다. 본 실험에서 사용한 단일모드 광섬유는 개구수 0.1, 코어 직경 4.3 μm 으로 광공간 필터(spatial filter)를 사용하지 않아도 수차가 거의 없는 빛을 만들 수 있다. 따라서 단일모드 광섬유로부터 나오는 빛은 추후 시스템의 오차보정을 위해 사용하는 기준 평행광 렌즈의 점광원으로도 사용이 가능하다.

렌즈 측정을 위한 구면파를 생성하기 위해 핀홀을 사용하는데 그 직경은 PDI(point-diffraction interferometer)에서 사용되는 핀홀 크기를 결정하는 수식을 사용하여 결정하였다.

$$D = \frac{\lambda}{2NA}$$

핀홀의 크기가 작아질수록 발생하는 구면파의 회절 각도는 커지고, 핀홀의 크기가 파장의 절반 이하가 되면 회절 구면파는 반구 형태의 구면파에 가까워진다.[5] 이 빛을 이용하면 개구수가 높은 광학 부품을 측정할 수 있게 된다. 실험에서 사용한 핀홀은 유리 기판에 증발 증착 방식(thermal evaporation)으로 금을 200nm 두께로 코팅하고 이를 이온빔(FIB: focused ion beam) 장비를 이용하여 200 nm 의 크기로 핀홀을 가공하였다. 레이저의 파장보다 작은 크기의 핀홀은 완벽한 구면파를 만들어 주지만 작은 크기로 인해 빛의 투과율이 매우

낮다. 이로 인해 집광 렌즈를 사용하게 되는데 핀홀은 일종의 저역필터 역할을 하기 때문에 [6] 집광 렌즈의 수차를 제거해주는 역할을 하게 된다. 또한 핀홀의 유한한 크기로 인한 수차는 측정에 큰 영향을 끼칠 만한 값이 아닐 것으로 예측하였다.[4]

DVD pick-up lens 의 수차를 측정하기 위해서는 coverlayer 역할을 할 optics 가 필요한데 이를 위해 핀홀과 렌즈 사이에 605 μm, BK7 재질의 coverlayer 보상자를 위치시켰다

Relay optics 는 색수차 보정렌즈(achromatic lens) 2 개 로 구성되어 있으며, SH 센서로 파면을 전달하는 역할을 한다. 또한 relay optics 의 초점 거리는 각각 45mm, 75mm 로 이미지를 약 1.67 배로 확대해준다. 이는 DVD pick-up lens 의 파면의 크기를 SH 센서의 CCD 크기와 비슷하게 확대하여 파면을 더 정밀하게 측정하기 위함이다. 하지만 relay optics 에는 수차가 존재하고 이로 인해 시스템의 측정 정확도가 제한되게 된다. 이는 추후 시스템 오차 보정 과정을 통해 제거할 수 있다.

SH 파면분석기는 마이크로 렌즈 배열과 CCD 가 결합되어 있는 형태로 마이크로 렌즈의 크기와 초점거리, CCD 의 픽셀 크기 등에 따라 동적 영역, 민감도 등이 결정된다. 본 실험에 사용된 SH 센서는 상용으로 제작된 장치로 크기 198 μm, 초점거리 13.483mm 의 마이크로 렌즈가 가로, 세로 각각 37 개로 배열되어 있고, 그 초점거리 상에 가로, 세로 각각 1004 개의 픽셀 수를 갖는 CCD 가 위치한다. SH 파면분석기는 기준 평행광이 들어왔을 때 맺힌 초점의 위치와 수차가 있는 빛에 의해 맺힌 초점의 위치의 차이를 이용하여 각 마이크로렌즈로 입사된 파면의 기울기를 계산할 수 있다[7]. 이를 이용하여 전체적인 파면의 형상을 재구성하고, Zernike 다항식을 이용하여 수차의 종류와 크기를 알 수 있다.[8] SH 센서는 마이크로렌즈 배열과 CCD 가 결합되어 있기 때문에 온도나 습도와 같은 주변 환경에 영향을 받게 되는데 이는 약 1 시간의 예열 과정을 통해 보정할 수 있다.

## 2.2 시스템 보정

Fig. 1 의 시스템 보정을 위해 기준 평행광 렌즈(이하 표준렌즈)를 제작하였고, Fig. 2 과 같은 방법으로 시스템의 오차를 보정하였다. 표준렌즈는 3 장의 유리 렌즈로 구성되어 있고 개구수는 0.1 이다. Zygo 사의 Fizeau 방식의 간섭계로 수차를 측정한 결과 지름 35 mm 영역에서 0.009 λ rms 의 매우 작은 수차를 가지고 있는 것을 확인하였다.

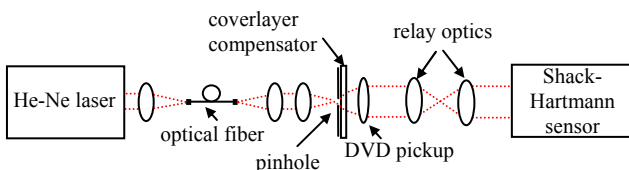
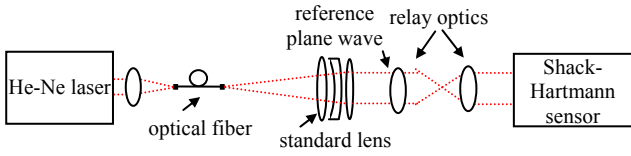


Fig. 1 The system for measuring the wavefront error of DVD pick-up lens with compensator



**Fig. 2** The wavefront sensor calibration with reference plane wave

Fig. 2 에서 보여진 바대로 오차 보정 시스템은 Fig. 1 의 투과파면 측정 시스템에서 측정 렌즈 부분에 표준렌즈를 놓고 핀홀 점광원 대신 단일 모드 광섬유 점광원을 사용한 것이다. 광섬유 점광원에서 퍼지는 구면파는 표준렌즈를 통과하면서 수차가 거의 없는 평행광이 되고 이 기준 평행광을 이용하여 시스템의 오차를 보정하는 것이다. 핀홀 대신 광섬유 점광원을 사용할 경우, 광섬유 점광원의 경우 코어 직경이 수  $\mu\text{m}$  정도로 핀홀보다 다소 크기 때문에 투과율이 높아 초점 거리가 긴 표준렌즈에 사용하기 적합하다.

시스템의 오차를 보정하는 순서는 다음과 같다. 우선 이미지 릴레이를 설치하지 않고 오차를 보정한 뒤 이미지 릴레이를 설치하여 다시 오차를 보정한다. 이는 이미지 릴레이 자체의 수차에 의한 오차를 보정하기 위함이다. 전체 시스템의 측정 오차를 분석해 보면, 시스템에는 SH 센서에서 발생하는 오차의 일반적인 최대값  $0.03 \lambda \text{ rms}$  와,  $1.67\times$  relay optics 의 수차  $0.01 \lambda \text{ rms}$  가 존재하게 된다. 핀홀 점광원에서 회절되는 구면파의 경우 오차가  $0.001 \lambda \text{ rms}$  이하로 다른 오차에 비해 무시할 만한 값이므로 포함시키지 않는다. 이 경우 전체 시스템의 rms 측정 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta W = \sqrt{\sum (w_i)^2} = \sqrt{(\Delta w_{SH-sensor})^2 + (\Delta w_{relay-optics})^2}$$

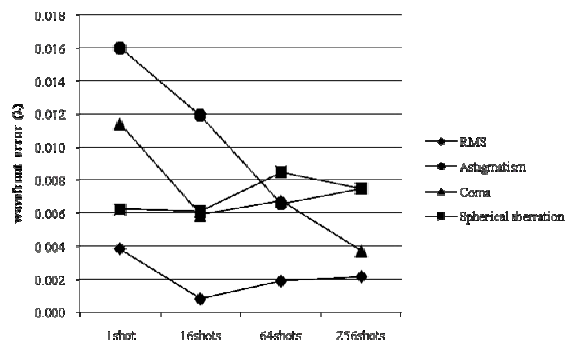
따라서 본 시스템의 전체 오차는  $0.032 \lambda \text{ rms}$  가 된다. 이를 수차  $0.009 \lambda \text{ rms}$  의 표준렌즈를 이용한 기준 평행광 시스템으로 보정한 후에는  $0.003 \lambda \text{ rms}$  의 오차가 나타나게 되었고, 즉 이는 시스템의 반복 측정도라고 볼 수 있다.

### 3. 실험 결과

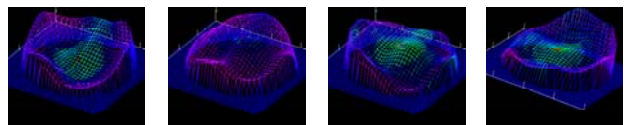
측정 시 발생할 수 있는 노이즈의 영향을 줄이

고자 측정 데이터를 평균화하였다. 측정 데이터는 RMS 수차, 비점 수차, 코마 수차, 구면 수차이며, 평균화할 데이터 수를 정하기 위해 평균화하는 데이터 수에 따른 표준편차 변화를 살펴보았다. 산술 평균 방식으로 1, 16, 64, 256 개 데이터를 평균화 하는 실험을 각각 독립적으로 수행하였고, 이를 4 회 반복하였다. 각각의 데이터 평균 횟수에 대해 표준편차를 구하였고 이를 Fig. 3 에 나타내었다. 각 수차항의 표준 편차를 비교해 본 결과 64 개 데이터 평균치부터 값이 안정화 되는 것을 확인할 수 있었다. 이후 본 논문상의 데이터는 64 회 측정치의 평균값이며, 이로써 측정시 발생할 수 있는 노이즈를 거의 제거할 수 있게 되었다.

총 4 개의 DVD 픽업렌즈의 수차를 측정하였고 측정 데이터는 마찬가지로 RMS 수차, p-v 수차, 비점 수차, 코마 수차, 구면 수차이다. Zernike 다항식은 7 차 항까지 고려하였다. 이 결과와 스펙 sheet 상의 수차 데이터를 Table 1 에 정리하였고, 각 렌즈의 파면 형상은 Fig. 4 와 같다. Table 1 을 보면 각 DVD 픽업렌즈의 RMS 수차는 스펙 상의 수치인  $0.045 \lambda \text{ rms}$  이하의 값  $0.027 \lambda \text{ rms}$  로 측정 되었다. 나머지 수차항들은 다소 차이를 보이고 있는데 이는 렌즈 제작상의 오차 또는 측정 시 광축에 대한 정렬에 의한 오차로 인해 약간의 차이가 생겼다고 볼 수 있기 때문에, 본 장치를 통해 DVD 픽업이 바르게 측정된 것으로 판단된다.



**Fig. 3** The standard deviation of the wavefront error with the number of averaging data



**Fig. 4** 3D wavefront shape of DVD pick-up lens 1~4(left to right)

**Table 1** The aberration measurement of DVD pick-up lens  
(unit :  $\lambda$ )

	DVD pick-up lens				Spec.
	#1	#2	#3	#4	
rms wavefront error	0.027	0.026	0.027	0.028	<0.045
p-v wavefront error	0.115	0.131	0.163	0.164	-
astigmatism	0.045	0.028	0.075	0.054	<0.025
coma	0.04	0.086	0.06	0.053	<0.025
spherical aberration	0.032	0.047	0.019	0.028	-0.025 ~0.010

#### 4. 결론

SH 파면분석기와 점광원을 이용한 본 시스템이 기준 평행광을 발생시키는 방법을 이용하여 시스템의 측정 오차를 제거하고 0.003 $\lambda$  rms의 반복 측정도와 0.010 $\lambda$  rms의 정확도로 측정 결과를 나타낸다는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 구성된 시스템의 전체 성능을 요약하면, 시스템의 목적은 무한 광학계로 사용되는 렌즈 또는 렌즈 군의 투과파면을 측정하는 것이다. 특히 현미경 대물렌즈나 광 정보저장기기의 픽업 렌즈 등 소형, 고 개구수 렌즈의 평가에 맞춰 제작되어 있고, 광 픽업의 측정 시 cover layer compensator를 사용할 수 있도록 되어 있다. relay optics의 배율을 통해 빔 직경을 변화시키면서 약 2.5 - 10 mm 크기의 파면을 측정할 수 있고, 공기의 유통과 SH 센서의 노이즈 등을 고려한 반복 측정도는 기준 평행광으로 측정 시 0.003  $\lambda$  rms가 된다. 이론적으로 렌즈의 초점거리는 상관이 없지만, 핀홀을 통과한 빛의 광량이 작기 때문에 SH 센서에서 감지할 수 있는 광량에 의해 약 100 mm 정도로 측정렌즈의 초점거리가 제한된다. 레이저 광원은 몇 가지 파장을 사용할 수 있도록 되어 있고, 이는 광학 부품이 실제로 사용될 파장에서 측정이 가능하도록 해 준다.

본 연구를 통해 제작된 파면분석 시스템은 보다 짧은 파장과 높은 개구수의 픽업을 사용하는 차세대 정보저장기기의 광 부품 측정에서 많은 가능성을 보여주고 있다. 또한 파장 이하 크기의 핀홀을 사용하였기 때문에 차후 고개구수의 광학부품 측정에 대응할 수 있으며 광섬유를 이용한 광원 연결 방식으로 인해 광원의 파장 변화에도 대응할

수 있다. 이를 통해 개구수 0.85인 Blu-ray Disc 픽업의 파면 수차 분석에도 사용할 수 있을 것으로 보인다. 사용 파장의 유연성과 큰 동적 영역(dynamic range)을 이용하여 카메라용 광 부품 등의 비구면 측정에서도 응용될 수 있을 것이며, 여러 광학 측정 분야에서 유용한 시스템으로 연구될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, et al, 2004, "High-density near-field optical disc recording using phase change media and polycarbonate substrate," Optical Data Storage 2004, Proc. SPIE, Vol.5380, pp.224-232
- [2] R. N. Smartt, and W. H. Steel, 1975, "Theory and application of point diffraction interferometers," Japan. J. Appl. Phys., Vol.14, pp.351-356
- [3] Y. Sekine, A. Suzuki, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Hara, et al, 2004, "Wave-front errors of reference spherical waves in high-numerical aperture point diffraction interferometers," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 22, pp.104-108
- [4] K. A. Goldberg, E. Tejnil, and J. Bokor, 1996, "A 3-D numerical study of pinhole diffraction to predict the accuracy of EUV point diffraction interferometry," in Extreme Ultraviolet Lithography, G. D. Kubiak, and D. R. Kania, eds., OSA trends in Optics and Photonics, Vol.4, pp.133-137.
- [5] H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux, R. A. Linke, L. Martin-Moreno, et al, 2002, "Beaming light from a subwavelength aperture," Sciences, Vol.297, pp.820-822
- [6] 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
- [7] B. C. Platt, R. Shack, 2001, "History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing," Journal of Refractive Surgery, Vol.17, pp.573-577
- [8] D. Malacara, 1992, "Optical Shop Testing," John Wiley & Sons Inc., pp.464-466