

구면 간섭계를 이용한 소형 비구면 렌즈 검사 방법에 관한 연구

장남영*, 박광희*, 송희영*, 최평석*, 은재정*, 서정량**
 창원대*, (주)이엠스**

Measurement of Small Aspheric Lens Using the Spherical Interferometer

Nam-Young Jang*, Kwang-Hee Park*, Hui-Young Song*, Pyung-Suk Choi*, Jae-Jeong Eun*, Jung-Rang Seo**
 Changwon National University*, EMS**

Abstract - 본 논문에서는 구면 렌즈 검사를 위해 제작된 Fizeau형 위상 천이 간섭계(Fizeau-type Phase Shifting Interferometer : FPSI)에 비구면 해석 알고리즘을 적용한 소형 비구면 렌즈 해석 방법을 제안한다. 또한 본 논문에서 제안한 방법의 측정 결과와 기존 비구면 검사 시스템의 측정 결과를 비교하여 그 성능을 평가한다.

1. 서 론

최근 광전자 및 광 정보 기기의 발달로 인해 광학계의 수요가 급격히 증가하고 있다. 특히, 소형/경량의 광학계는 휴대폰용 카메라 및 디지털 카메라의 급증으로 인해 그 수요가 날로 증가하고 있으며, 이로 인해 광학계의 성능 저하 없이, 렌즈의 수를 줄일 수 있는 소형 비구면 광학계가 각광받고 있다.

또한, 정밀한 금형 및 사출 성형 기술의 발달로 저가의 소형 비구면 렌즈의 대량생산이 가능해졌지만, 금형의 마모나 사출 조건의 변화로 인한 비구면 광학계의 성능 저하를 유발하는 비구면 형상의 변형 등이 문제가 되고 있다. 이러한 문제는 정량적인 방법으로 비구면을 검사함으로써, 사용된 금형의 마모 정도나 비구면 생산 공정의 보정을 가능하게 한다. 일반적으로 비구면 검사 방법에 보편적으로 사용되는 방식에는 null 렌즈를 이용한 검사 방법[1]과 컴퓨터 재생 홀로그램(CGH)[2-3]을 이용한 방법들이 있다. 하지만, 이들 방법은 보상 광학계를 제작하는데 많은 비용이 소요되며, 매번 서로 다른 비구면을 검사할 경우, 이에 맞는 보상 광학계를 매번 제작해야 한다는 번거로움으로 인해, 다양한 비구면을 검사하는 데에는 그 한계를 지닌다. 따라서 종래의 비구면 검사 방법 보다 쉽고, 단순하게 정량적으로 비구면을 검사할 수 있는 방법이 요구되고 있다[4].

따라서 본 논문에서는 구면 렌즈를 검사하는 간섭계 시스템에 비구면 해석 알고리즘을 적용한 보다 단순하고 가격 효율성이 뛰어난 비구면 검사에 대한 방법을 제안한다.

2. FPSI 구면 검사 시스템

소형 비구면 렌즈를 측정하기 위해, 비구면 해석 알고리즘을 적용한 FPSI 구면 검사 시스템을 설계 제작하였다. 그림 1은 FPSI 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 이 FPSI 시스템은 측정을 자동화하고 그 시간을 줄이기 위해, 광학부와 영상신호처리부를 통합한 컴퓨터 시스템이 요구된다. 광학부는 Fizeau 간섭계에 위상 천이 간섭법을 적용하여 구성하였다. Fizeau 간섭계의 반사형 측정 방식에서 표면 오차 $s(x,y)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

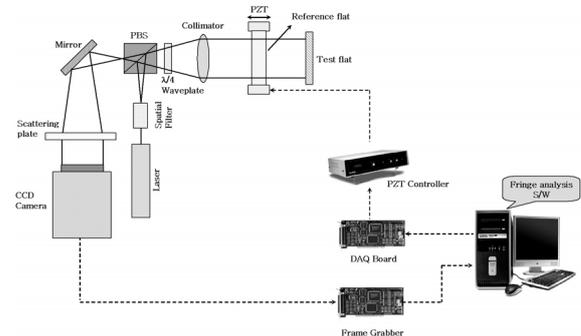
$$s(x,y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x,y) \tag{1}$$

여기서, (x,y) 는 공간 좌표를 나타내고 λ 는 광원의 파장이다. FPSI 시스템의 광학부를 통해 습득된 간섭무늬를 해석하기 위해, 본 논문에서는 5개의 간섭무늬를 필요로 하는 Hariharan 5-step 알고리즘[5]을 적용하였다. 이 알고리즘의 경우, 각각의 step 사이의 선형 위상 천이를 $\pi/2$ 로 가정함으로써 위상 차 또는 위상 파면 $\phi(x,y)$ 을 다음으로 구할 수 있다.

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \tag{2}$$

여기서, I_1, I_2, I_3, I_4 그리고 I_5 각각은 측정된 5개의 간섭무늬 강도를 나타내고 (x,y) 는 측정된 간섭무늬 각 지점에서 2차원 좌표를 나타낸다. 또한, 위상 천이 간섭법의 구현은, 피에조 압전 변환기

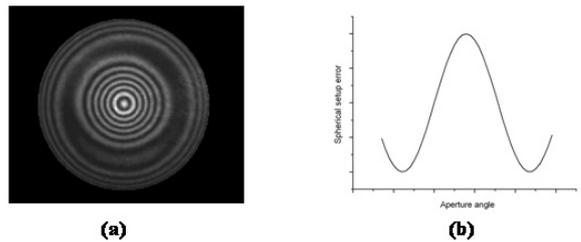
(Piezo-Electric Transducer : PZT)를 사용하여 위상 천이의 시변 특성을 실현하는데 사용하였다. 빠른 시간으로 연속적인 위상 파면을 복원하기 위한 결렬칩 방법은 1차원 위상 결렬칩 방식인 Itoh's 알고리즘[6]을 사용하였다.



<그림 1> FPSI 구면 검사 시스템

3. 비구면 해석 알고리즘

구면 간섭계를 이용한 비구면 측정에 있어서 그림 2에 나타난 것처럼, 시스템 오차를 발생시킨다. 이러한 시스템 오차는 기준 구면과 검사 비구면 사이의 차로 발생하며, 여기에는 비구면의 형상 오차값이 포함된다.



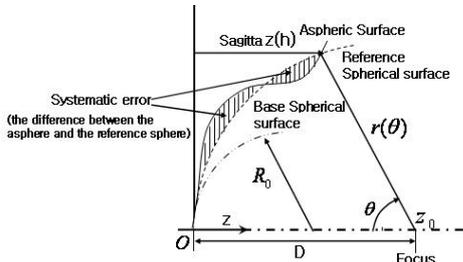
<그림 2> 구면 간섭계로 측정된 비구면의 일반적인 간섭무늬 : (a) CCD 카메라로 측정된 간섭무늬, (b) 비구면의 시스템 오차

FPSI 구면 검사 시스템에 적용된 비구면 해석 알고리즘은 시스템 오차로부터 비구면 오차를 분리하는 방법으로, 비구면 해석의 과정은 다음과 같다. 첫째, 비구면을 불완전한 구면이라 가정하고 구면 검사 시스템을 이용해 구면 검사 셋업으로 간섭무늬의 프링지 수가 최소가 되도록 하여 비구면에 대한 간섭무늬를 측정한다. 그 후, 위상천이 알고리즘 및 위상 결렬칩 알고리즘을 이용하여 시스템 오차를 측정한다. 두 번째, 비구면 방정식을 나타내는 식(3)과 그림 3을 참고하여, 이론적인 시스템 오차는 검사될 비구면의 위치에 의존하는 비구면 원점과 기준 구면의 초점 사이의 거리 D 를 이용해 계산한다. 최적의 비구면 검사 위치에서 D 는 기준 구면과 비구면 사이의 차가 최소가 되는 거리이며 이는 구면 검사 셋업으로 측정된 간섭무늬의 프링지 수가 최소가 되는 경우에 대응한다. 끝으로, 비구면의 형상 오차는 이론적으로 계산된 시스템 오차로부터 측정된 시스템 오차를 뺀으로써, 계산된다. 그림 4는 비구면 해석 알고리즘의 처리과정을 나타내고 있다.

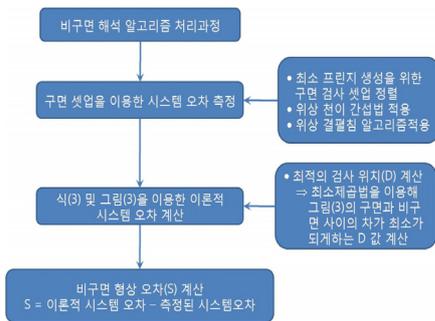
일반적으로 원형 대칭 구조를 갖는 비구면의 경우, 다음과 같은 고차 다항식의 비구면 방정식으로 표현된다[7].

$$z(Y) = \frac{CY^2}{1 + \sqrt{1 - (A_2 + 1)C^2 Y^2}} + \sum_{n=2}^5 A_{2n} Y^{2n} \quad (3)$$

여기서, $z(Y)$ 는 비구면의 sagitta 값을 나타내고, $C=1/R_0$ 는 비구면의 곡률 그리고 R_0 는 기준 구면의 반경을 나타낸다. 또한, A_{2n} 은 비구면 계수를 나타내고 A_2 는 conic 계수를 나타낸다.



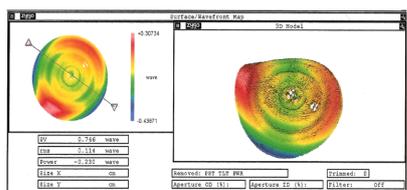
<그림 3> 구면 검사 셋업에서 기준 구면과 비구면 사이의 관계



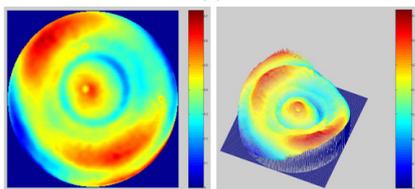
<그림 4> 비구면 해석 알고리즘 처리 과정

4. 측정 결과

그림 5와 표 1은 제작된 FPSI 구면 검사 시스템의 성능을 평가하기 위해 구면렌즈에 대한 Zygo 사의 Mark IV의 측정 결과와 비교하여 나타난 것이다. 본 논문에서 측정에 사용된 렌즈는 Panasonic사의 Dome 감시카메라에 사용되는 구면-비구면 렌즈로, 구면에 대하여 제작된 FPSI 구면 검사 시스템에 의해 측정된 표면 오차의 PV 및 RMS값은 각각 0.7244wave, 0.1070wave 이었고, Mark IV에 의한 결과는 각각 0.746wave, 0.114wave으로 RMS에 대한 측정오차는 $< \lambda/100$ 이었다.



(a)

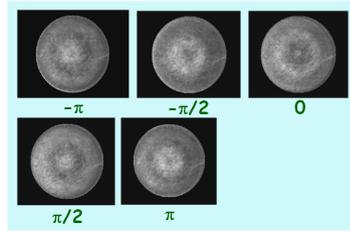


(b)

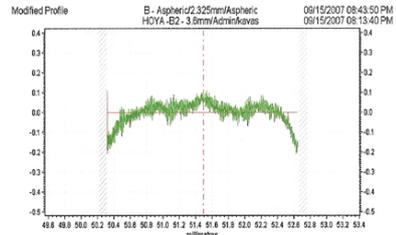
<그림 5> 구면 렌즈 측정 결과 비교 : (a) Zygo사의 Mark IV, (b) 제작된 FPSI 시스템

<표 1> 구면 렌즈 해석 결과 비교

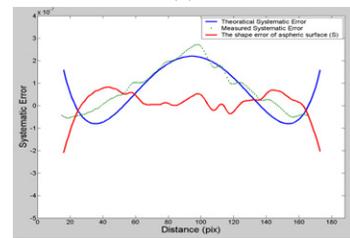
Interferometer	PV	RMS	ΔPV	ΔRMS
Zygo Mark IV	0.746wave	0.114wave		
FPSI System	0.7244wave	0.1070wave	0.017wave	0.007wave



<그림 6> 폰카메라용 소형 비구면 렌즈에 대한 제작된 FPSI 구면 검사 시스템으로 측정된 5개의 간섭무늬



(a)



(b)

<그림 7> 비구면에 대한 측정 결과 비교 : (a) Talysurf, (b) FPSI

그림 6과 7은 각각 제작된 FPSI 구면 검사 시스템에 비구면 해석 알고리즘을 적용해 측정된 폰카메라용 소형 비구면 렌즈의 간섭무늬와 측정된 비구면 오차를 나타낸 것이다. 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검토하기 위해 그림 7에서는 비구면 표면 측정 장치인 Talysurf와 그 결과를 비교하였다. Talysurf에 의해 측정된 폰카메라용 소형 비구면 렌즈의 표면 오차는 각각 PV는 $0.3633\mu m$, RMS는 $0.0631\mu m$ 로 측정되었으며, 본 논문에서 제안한 방식으로 측정된 결과는 각각 PV는 $0.3611\mu m$, RMS는 $0.07163\mu m$ 로 RMS에 대한 측정 오차는 $0.00853\mu m$ 이었다. 이때, 최적 검사 위치 $D=-4.947mm$ 로 계산되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 FPSI 구면 검사 시스템에 비구면 해석 알고리즘을 적용하여 구면 및 비구면의 표면 오차를 측정하였다. 그 결과, 구면의 경우에는 업계표준으로 사용되는 Zygo사의 Mark IV와 비교한 결과, 측정 오차는 $< \lambda/100$ 로 양호한 결과를 얻었으며, 또한 비구면 해석의 결과도 Talysurf 표면 측정 장치와 비교해볼 때, 측정 오차가 $0.00853\mu m$ 로 측정되었다. 이와 같은 결과를 통해, 본 논문에서 제안한 방법이 소형 비구면 측정에 대한 기존 방식에 비해 보다 효과적이고 저가로 빠른 시간에 정량적 측정이 가능할 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. T. Holleran, "Immersion Null Test for Aspherics," Appl. Opt., 2, 1336, 1963.
- [2] J. C. Wyant and V. P. Bennett, "Using Computer Generated Holograms to Test Aspheric Wavefronts," Appl. Opt., 11, 2833, 1972.
- [3] A. J. MacGovern and J. C. Wyant, "Computer Generated Holograms for Testing Optical Elements," Appl. Opt., 10, 619, 1971.
- [4] T. Blumel and M. Bosse, "Interferometric aspheric testing in a spherical test setup," Proc. SPIE, 5965, 351, 2005.
- [5] D. Malacara, Optical Shop Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
- [6] K. Itoh, "Analysis of the Phase Unwrapping Problem," Appl. Opt., 21, 2470, 1982.
- [7] M. Laikin, Lens Design, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995.