

고차 비구면 렌즈의 성능평가 시스템에 관한 연구

A Study on the System of Performance Test for High-order Aspheric Lens

장 남 영*, 최 평 석*, 은 재 정*

Nam-Young Jang*, Pyung-Suk Choi*, Jae-Jeong Eun*

요 약

본 논문에서는 고차 비구면 렌즈의 성능 평가를 위해, Fizeau 형 위상 천이 간섭계(FPSI) 시스템을 제안한다. 제안된 Fizeau 형 위상 천이 간섭계 시스템은 광학부와 신호처리부로 나뉘며 이는 하드웨어 운용 프로그램을 통해 구동된다. 또한, 제안된 시스템으로 획득된 간섭무늬를 해석하기 위해, 위상 천이 알고리즘을 적용한 간섭무늬 해석 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서 제안한 FPSI 시스템의 측정 결과는 업계 표준으로 사용되고 있는 Zygo 사의 간섭계 측정 장치인 Mark IV와 직접 비교함으로써 그 타당성을 입증하였다. 평가된 고차 비구면 렌즈의 표면 오차에 대한 PV(Peak-to-Valley) 및 RMS 값은 각각 0.845 wave 및 0.1871 wave로 측정되었고 Mark IV와 비교한 결과, 측정 오차는 각각 $\lambda/100$ 이하로 계산되었다. 또한, 비구면 렌즈의 성능평가 시스템의 반복능도 $\lambda/100$ 이하의 신뢰할 만한 결과를 얻었다.

Abstract

We propose the Fizeau-type phase shifting interferometer(FPSI) system for the performance test of high-order aspheric lenses. The proposed system is divided into two parts : optical part and signal processing part. Those two parts are operated by a program for hardware control. We also developed an analysis program adopting the phase shifting algorithm to analyze the obtained interferograms. We can confirm that the proposed system is efficient and adequate by direct comparison with the standard criterion in Mark IV interferometric system of Zygo. The peak-to-valley and RMS values of surface errors which are used to characterize high-order aspheric lenses are 0.845 wave and 0.1871 wave, respectively. The measurement errors between the proposed system and Mark IV are less than $\lambda/100$ and the repeatability is also calculated at less than $\lambda/100$.

Keywords : Fizeau-type phase shifting interferometer(FPSI), Aspheric Lens, Phase shifting algorithm, Peak-to-Valley(PV), RMS

I. 서 론

광전자 기술의 발달과 더불어 광 정보기기의 저변 확대로 인해 광학계의 수요가 급증하고 있는 지금, 휴대용 카메라 폰 및 디지털 카메라의 시장 확대와 수요 증가로 인한 소형 광학계의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라, 소형/경량화된 광학계 구현

을 위해 구면 렌즈를 대체할 수 있는 비구면 렌즈에 대한 관심이 증폭되고 있다.[1-3]

일반적으로 구면 렌즈를 이용한 광 정보기기들은 구면 렌즈에 존재하는 구면 수차를 제거하기 위해 여러 장의 구면 렌즈를 사용함으로써 광학계의 부피를 증가시킬 뿐만 아니라 비용 상승의 원인이 된다. 따라서 이러한 구면 렌즈의 단점을 극복하기 위해 구면 수차가 없고 단초점을 실현할 수 있는 비구면 렌즈가 각광받고 있다. 비구면 렌즈의 장점은 상의 질 저하의 원인이 되는 구면 수차나 비점 수차, 왜곡 등을 최소화하거나 제거하여 선명한 영상을 얻을 수 있도록 하며, 4-5면의 구면렌즈를 사용해 구면 수차를 제거했던 것과 달리 1면의 비구면을 사용해 동일한 성능을 유지함으로써 광학계를 소형/경량화 시킬 수 있으며, 광학계 설계 시 많은 설계 변수로 고성능의 광학계

*창원대학교 전자공학과

논문 번호 : 2006-2-23

접수 일자 : 2006. 3. 30

심사 완료 : 2006. 7. 21

※본 논문은 2004년도 창원대학교 연구비와 2005년도 연구교수 연구비에 의하여 연구되었음.

를 구현할 수 있다.[4] 또한 최근에는 DTM(Diamond Turning Machine)과 같은 초정밀 가공기기의 발달로 정밀 금형 가공 기술 및 사출 성형기술로 인해 고분자수지를 직접 사출 성형하여 대량생산함으로써 원가 절감이 가능해 졌다[5]. 하지만, 사출되는 비구면 렌즈는 사출 시, 금형의 마모나 민감한 사출 조건의 변화로 형상의 변형이 유발될 수 있으며[6], 따라서 다양한 광계측 장치로 비구면 렌즈에 대한 표면 오차나 수차량 등을 측정하여 그 성능을 평가하는 것이 요구된다.

일반적으로 비구면 렌즈의 성능을 평가하는 방식에는 접촉식과 비접촉식으로 나뉘며[7-8], 접촉식은 검사 표면에 탐침을 접촉시켜 라인 스캐닝하여 측정하는 방법이다. 따라서 접촉식은 검사 표면에 훼손을 줄 수 있음은 물론 초정밀 형상 측정에는 부적합하며, 넓은 영역을 측정함에 있어서 많은 시간이 걸린다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해, 광학 방식을 적용한 비접촉 방식은 검사면의 훼손 없이 전면 검사가 가능해 측정시간이 빠르고 빛의 파장을 측정자로 사용하기 때문에, 측정 정밀도가 높다는 장점이 있다. 이러한 광학 방식에는 직접형상 측정법과 간섭계를 이용한 방법이 있으며, 직접형상 측정법은 3차원 형상 측정기나 표면 조도 측정기를 사용하지만, 측정 정밀도가 다소 낮고 정밀한 비구면 형상에 대한 정보를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이에 반해, 간섭계를 이용한 측정 방법은 높은 측정 정밀도로 비구면 형상에 대한 정보를 보다 단순한 구조로 얻을 수 있다. 하지만, 널(null) 광학 부품의 제작에 고가의 비용이 소요되고 광학배열이 어렵다는 단점을 가지고 있다.[9]

일반적으로 생산된 구면 및 비구면에 대한 평가는 미국 Zygo 사의 간섭계 측정 장치를 표준으로 하여 평가하고 있지만, 대다수의 중소 렌즈 가공업체의 경우, 측정 장치에 대한 가격 부담으로 정성적인 평가를 주로 하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 소형 비구면 렌즈를 정량적으로 측정할 수 있는 저가형 측정 시스템 개발에 목적이 있으며, 이를 위해, 광학배열이 상대적으로 쉬운 단순구조를 갖는 Fizeau 간섭계에 위상 천이법[10]을 적용한 Fizeau 형 위상 천이 간섭계(Fizeau-type Phase Shifting Interferometer : FPSI)를 제안한다.

본 논문의 구성은, 우선 II장에서 Fizeau 간섭계 및 간섭무늬 형성 원리에 대하여 논의하고, III장에서는 위상 천이 간섭계 및 고차 비구면 렌즈의 성능 평가를 위한 간섭무늬 해석 알고리즘을 소개한다. IV장에서는 고차 비구면 렌즈의 성능 평가 시스템인 FPSI 시스템의 설계 및 제작에 관하여 논의하고, V장에서는 제작된 FPSI 시스템을 이용해 고차 비구면 렌즈의 성능을 평가하고 측정 결과를 업계 표준으로 삼고 있는 Zygo 사의 Mark IV의 측정 결과와 비교한 후, VI장에서 결론을 맺는다.

II. Fizeau 간섭계 및 간섭무늬 형성 원리

2.1 Fizeau 간섭계의 원리[10-11]

일반적으로 간섭현상은, 하나의 광원으로부터 나온 빛이 두 개의 빔으로 분리된 후 다시 중첩할 때 발생하며, 이는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \alpha \tag{1}$$

여기서, $I_1 = \langle \overline{E_1^2} \rangle$, $I_2 = \langle \overline{E_2^2} \rangle$ 그리고 α 는 서로 다른 경로를 진행한 두 광파의 위상차를 나타낸다.

따라서 그림 1에 나타난 Fizeau 간섭계 구성에서 CCD 촬상면에서 전체 강도분포는 다음으로 표현할 수 있다.

$$I(x,y) = I_R(x,y) + I_T(x,y) + 2\sqrt{I_R(x,y)I_T(x,y)} \cos[\phi(x,y)] = I'(x,y) + I''(x,y)\cos[\phi(x,y)] \tag{2}$$

여기서, $I'(x,y) = I_R(x,y) + I_T(x,y)$ 로 평균 강도이고, $I''(x,y)$ 는 강도 변조항을 나타내며, $\phi(x,y) = \phi_T(x,y) - \phi_R(x,y)$ 로 파면 위상차를 나타낸다. 또한, ϕ_R 은 기준 파면의 위상이고 ϕ_T 는 검사 파면의 위상을 나타낸다. (2)식에서 두 빔의 파면 위상차 $\phi(x,y)$ 의 함수로 주어지는 간섭무늬의 강도 분포는 기준 파면과 검사 파면의 광 경로 차(Optical Path Difference : OPD)에 비례하며 이를 그림 2에 나타내었다. 여기서, 두 빔의 파면 위상차 $\phi(x,y)$ 는 두 면사이의 거리 차 또는 검사면의 표면 높이 오차 $h(x,y)$ 에 비례하고 다음으로 표현된다.

$$\phi(x,y) = 2kh(x,y) = \frac{4\pi}{\lambda} h(x,y) \tag{3}$$

여기서, k 는 전파상수, λ 는 광원의 파장을 나타내며, 두 면사이의 거리차 $h(x,y)$ 는 2차원 공간좌표 (x,y) 의 함수로서, 기준면을 투과하여 검사면에서 반사되어 돌아오는 검사 파면이 같은 경로를 두 번 지나기 때문에 상수 2가 곱해진다. 또한, 기준면에 대해 검사면의 높이 변화가 존재할 경우, 표면 높이 오차 함수 $h_T(x,y)$ 는 다음으로 나타낼 수 있다.

$$h_T(x,y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_T(x,y) \tag{4}$$

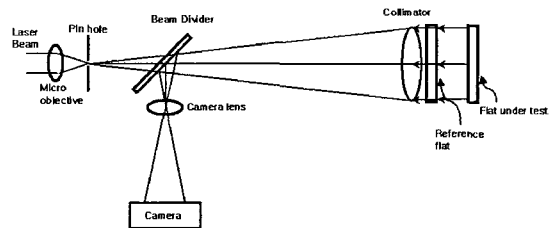


그림 1. Fizeau 간섭계의 기본 원리
Fig. 1. Principle of Fizeau interferometer.

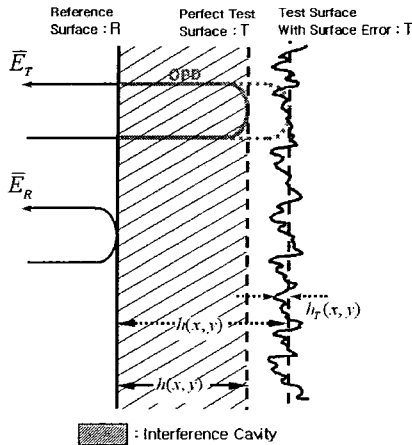
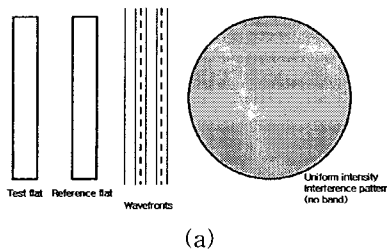


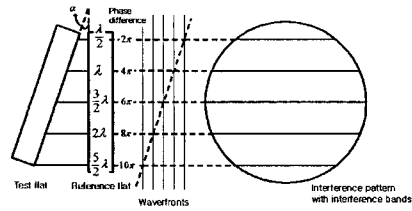
그림 2. 두 면의 거리차 및 표면 높이 변화에 의한 파면 위상차
 Fig. 2. Wavefront phase difference due to distance difference between two surfaces and surface height variations.

2.2 Fizeau 간섭무늬의 형성[12]

그림 1에 나타낸 Fizeau 간섭계 구성으로 형성되는 간섭무늬는 그림 3에 나타내었다. 즉, 기준 파면과 검사 파면이 평행할 경우, 기준면과 검사면 사이의 상대적인 거리변화가 발생하지 않기 때문에 상대적인 위상차 $\phi(x, y)$ 는 변하지 않아 균일한 강도분포를 갖는 널 간섭무늬(null interferogram)가 발생하게 된다. 만약 검사면에 돌출부나 함몰부가 존재한다면, 그 부분에서 광 경로 차가 다르기 때문에 위상차의 변화가 발생해, 형성된 널 간섭무늬상의 강도분포도 변하게 된다. 따라서 널 간섭무늬의 강도분포의 변화를 관찰함으로써 돌출부나 함몰부의 위치를 확인할 수 있지만, 정량적 분석은 어렵다. 이에 반해, 그림 3(b)에 나타낸 것처럼, 기준 파면에 대하여 검사 파면이 기울기를 가질 경우, 간섭무늬 패턴은 일련의 평행한 등간격의 직선의 무늬들이 발생하게 되며, 검사면에 돌출부와 함몰부가 존재한다면, 직선의 무늬는 특정 방향으로 휘어지는 형태로 간섭무늬 상에 반영된다. 따라서 돌출부와 함몰부의 표면 높이 오차는 검사면의 형상정보가 반영된 간섭무늬를 관찰함으로써 정량적인 해석이 가능해진다



(a)



(b)

그림 3. 평면 파면들에 의한 간섭무늬 : (a) 기울기를 갖지 않을 경우, (b) 기울기를 가질 경우
 Fig. 3. Interferogram due to plano wavefronts : (a) with no relative tilt, (b) with relative tilt.

III. 위상 천이 간섭계 및 간섭무늬 해석 알고리즘

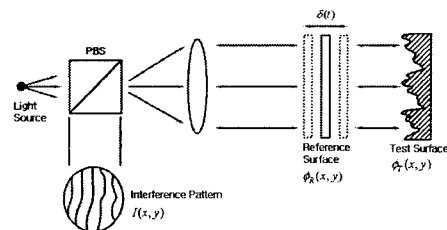
3.1 위상 천이 간섭계[10]

II장에서 설명한 (2)식의 간섭식을 고려해 볼 때, 위상 천이 간섭계(Phase Shifting Interferometer : PSI)의 개념은 단순히 간섭을 일으키는 두 개의 파면들 중 하나의 파면을 강제적으로 변화시켜 상대적 위상차를 갖는 여러 개의 간섭무늬를 획득하도록 하는 것으로, PSI의 강도분포는 다음으로 표현할 수 있다.

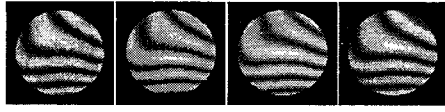
$$I(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta(t)] \tag{5}$$

여기서, $\phi(x, y) = \phi_T(x, y) - \phi_R(x, y)$ 로 기준 파면과 검사 파면사이의 위상차를 나타낸다. 따라서 시간 위상 천이 항 $\delta(t)$ 와 연관된 임의의 파면 위상차 $\phi(x, y)$ 는 점 (x, y) 에서 (5)식의 강도 변화를 측정함으로써 계산할 수 있다. 이와 같이 검사면에 대한 형상 정보를 갖는 파면 위상차 $\phi(x, y)$ 의 정확한 계산을 위한 다양한 알고리즘들이 개발되고 있으며, 이는 다음절에 소개한다.

PSI의 시간 위상 천이 항 $\delta(t)$ 로 위상 변조를 구현하는 방법에는 $\lambda/2$ 파장판이나 회절격자, 압전 변환기(Piezo-electric Transducer : PZT)를 이용한 방법 [13-15] 등이 있으며, 본 논문에서는 PZT를 이용해 위상 천이를 구현하고 이를 통해 얻어진 여러 개의 간섭무늬들로부터 파면 위상차 $\phi(x, y)$ 을 계산한다. 그림 4는 위상 천이 간섭계의 기본 원리와 위상 천이된 간섭무늬의 예를 보여주고 있다.



(a)



$$\delta(t) = (i-1)\frac{\pi}{2}, (i=1, 2, 3, 4)$$

(b)

그림 4. 위상 천이 간섭계의 기본 원리(a) 및 간섭무늬(b)
Fig. 4. Basic principle of PSI(a) and Interferograms(b).

3.2 간섭무늬 해석 알고리즘

빛의 간섭현상으로 인해 발생한 간섭무늬의 강도분포식의 파면 위상차 $\phi(x, y)$ 는 검사면의 형상 정보를 포함하고 있고, 따라서 파면 위상차를 복원함으로써 검사면의 성능을 평가하는 척도로 사용할 수 있다. 이와 같이 파면 위상차를 복원하는 일련의 과정은 간섭무늬 해석을 통해 실현되며 여기에는 다양한 알고리즘이 존재한다. 일반적으로 간섭무늬 해석은 두 가지 범주로 나누어지며, 여기에는 단무늬 해석법(Single interferogram analysis method)[16]과 다중 간섭무늬 해석법(Multiple interferogram analysis method) 혹은 위상 천이법(Phase shifting method)[17]이 있다. 단무늬 해석법은 간섭무늬 상에 반영된 프린지(fringe)의 모양을 이용하는 방식과 Fourier 변환을 이용한 방식이 있다. 전자의 경우에는 단일 간섭무늬의 직선성을 검사하거나 프린지의 중심을 찾아 각각의 프린지에 대한 일정한 표면의 높이를 설정해 간섭무늬를 해석하는 방식으로, 프린지의 중심을 정확히 선택함에 있어서 간섭무늬의 전체 강도 변화에 민감하고 프린지의 중앙을 따라 데이터를 수집하기 때문에 낮은 측정 정밀도를 갖는다. 이에 반해, Fourier 변환법은 잡음에 대한 내성과 그 적용이 매우 간단해 높은 효율성을 달성할 수 있지만, 낮은 공간 분해능에 악영향을 받으며 간섭무늬 데이터 상에 급변하는 오차 성분에 취약하다.

일반적으로 간섭무늬 해석에 가장 널리 적용되고 있는 기술은 위상 천이법으로, 이는 어떤 한 점에서 일련의 간섭무늬들의 강도 변화를 이용해 검사 파면의 위상을 복원하는 기술로, 측정 정밀도가 높고, 연산 속도가 빠르며, 광량의 변화에 무관하다는 장점이 있다. 하지만, 위상 변조를 구현하기 위해 시변 위상 $\delta(t)$ 을 변화시킬 때 발생하는 기준 위상 오차와 저주파 성분의 기계적 진동, 사용 광원의 불안정성 및 CCD 소자의 비선형성 등에 의한 측정 정밀도 오차가 발생하며, 이 중 기준 위상 오차 성분이 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 이를 보완할 다양한 알고리즘들이 개발되고 있으며, 이 중 몇몇을 다음 표 1에 나타내었다.

표 1. 위상 천이 알고리즘의 비교[17-19]

Table 1. Comparison of the phase shifting algorithms.

알고리즘	파면 위상차 $\phi(x, y)$	시간 위상 천이 $\delta(t)$
3-Step	$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3}\right)$	$\delta(t) = \left(\frac{i}{2} - 1\right)\pi, i=1, 2, 3$
4-Step	$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right)$	$\delta(t) = (i-1)\frac{\pi}{2}, i=1, 2, 3, 4$
5-Step	$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1}\right]$	$\delta(t) = \frac{\pi}{2}(i-3), i=1, 2, 3, 4, 5$

표 1에서 보는 바와 같이, 3-Step 및 4-Step 알고리즘은 소요되는 데이터 량이 다른 알고리즘에 비해 최소이고 가장 단순한 경우로 계산의 간편성과 구현의 용이성 때문에 실제 측정에 널리 적용되고 있지만, 프레임 사이의 기준 위상 오차에 대하여 매우 민감하다는 단점이 있다. 이에 반해, 5-Step 알고리즘은 이전 알고리즘에 비해 다소 많은 프레임 수를 필요로 하지만, 기준 위상 오차에 대하여 가장 큰 내성을 가지고 있다. 여기서, $I_i (i=1, \dots, 5)$ 는 (5)식에 나타낸 PSI의 간섭무늬 강도분포식을 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 기준 위상 오차에 영향이 적은 5-Step 알고리즘을 이용해, 간섭무늬 해석을 수행한다.

IV. FPSI 시스템의 설계 및 제작

본 논문에서는 고차 비구면 렌즈의 성능 평가를 위해, 단순구조의 Fizeau형 위상 천이 간섭계를 설계/제작하였다. 이와 같은 계측 시스템은 자동화 및 계측 시간의 단축을 위해 컴퓨터와 통합된 시스템 구성이 필요하며, 검사 파면의 위상 계산 및 형상 복원을 위해 영상신호처리 기술을 기반으로 한 간섭무늬 자동 해석 프로그램을 포함하고 있다. 따라서 전자화된 FPSI 시스템의 전체 구성은 광학부와 간섭무늬 획득 및 해석을 위한 영상신호처리부 등으로 나뉜다. 그림 5는 본 논문에서 설계/제작한 광학부를 나타내는 것으로, 광원과 공간 필터(Spatial filter), 편광 빔 분할기(Polarized Beam Splitter : PBS), $\lambda/4$ 파장판, 시준 렌즈, PZT 및 기준 렌즈 등으로 구성되어 있다. 여기서, 광원은 선편광된 단색광으로 중심파장이 $632.8nm$, 출력 파워가 $4mW$ 로 가간섭(coherent) 길이가 긴 He-Ne 기체 레이저를 사용하였다. 일반적으로 가간섭 길이가 짧은 광원을 사용한 Fizeau 간섭계의 경우, 기준면과 검사면 사이의 cavity 간격이 수 μm 정도로 짧은 거리를 유지해야만 간섭무늬를 얻을 수 있지만, 가간섭 길이가 긴 레이저를 사용함으로써, 기준면과 검사면 사이의 cavity 간격을 적절하게 조절할 수 있는 장점이 있다.

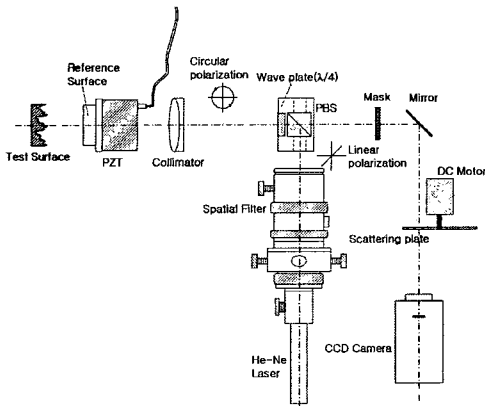


그림 5. Fizeau형 위상 천이 간섭계의 광학부 구성도
 Fig. 5. Schematic diagram of the optical part in the Fizeau-type phase shifting interferometer.

공간 필터는 초점 거리가 6mm인 집광 렌즈와 집광 렌즈의 초점 거리에 위치한 12 μ m의 핀홀로 구성되며, 마이크로미터에 의해 미세조정이 가능하다. 따라서 레이저에서 나온 광은 집광 렌즈에 의해 핀홀 면에 수렴되고 핀홀에 의해 공간 필터링된 구면파가 생성된다. 공간 필터링된 구면파는 다시 PBS를 통과하는데, 여기서 PBS는 입력되는 입력 광의 편광 방향에 따라 즉, 입사면에 대하여 평행한 P(Primary) 편광의 경우에는 투과되고 수직인 S(Secondary) 편광의 경우에는 반사되는 특성을 이용해 투과 또는 반사되는 광의 세기를 조절할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 반사되는 광의 세기를 최대로 하기 위해, 레이저의 편광 방향을 조절하여 PBS의 입사면에 수직이 되도록 하였다. PBS에서 반사된 구면파는 다시, $\lambda/4$ 파장판을 통과하여 선편광된 광을 원편광으로 변환시켜 균일한 광 강도를 얻을 수 있도록 하였다. $\lambda/4$ 파장판을 통과한 원편광된 구면의 발산광은 다시, 시준렌즈를 거쳐 파면 위상이 평면인 평행광으로 변환되어 기준면 및 검사면으로 진행하게 된다. 여기서 사용한 기준면은 Olympus 사의 제품으로 직경이 25.4mm, $f/\# = 0.7$, 파면의 편평도가 $\lambda/15$ 인 구면의 기준 렌즈를 사용하였으며, 이는 비구면 정도가 낮은 비구면을 측정하는데 적용할 수 있다. 또한, 기준 렌즈의 앞/뒤 면에는 다중 반사가 일어나지 않도록 하기 위해 AR 코팅(Anti-Reflection coating)이 되어 있다.

본 논문에서는 PZT를 사용하여 기준면을 파면에 수직인 방향으로 선형 이동시켜 시간 위상 천이 $\delta(t)$ 을 구현하였다. 일반적으로 위상 천이 간섭계의 기준 위상 오차를 최소화하기 위해 초정밀 PZT 및 구동 드라이버가 사용되며, 고분해능을 얻기 위해 인가전압 당 선형 변위가 작아야 한다. 본 논문에서 사용한 PZT의 경우, 개구 직경이 25.4mm, 인가전압 대 선형 이동 거리가 최대 2 μ m/1000V인 Burleigh 사의 PZ-81을 사용하였고, PZT 인가전압은 DAQ 보드를 이용하여 그 출력을 100배 증폭시켜 사용하였다. 따라서 $\pi/2$ 의 위상 천이를 얻기 위해서 $\lambda/8$ 의 선형 이동이 필요하며, PZT 인가전압은 39.55V로 설정해야 한다.

이제, 기준면에서 반사된 기준 파면과 검사면에서 반사된 검사 파면은 진행한 경로를 되돌아가 산란판(Scattering plate)에서 중첩되어 간섭무늬를 형성한다. 이때, 검사면의 한 면이 AR 코팅 처리되지 않은 광학 평판이나 렌즈인 경우, 검사면의 앞/뒤 면에서 이중 반사가 발생하게 되고 따라서 세 개의 파면들이 중첩되어 간섭무늬의 가시도에 악영향을 주게 되므로, 광학 마스크를 사용하여 이중 반사된 검사 파면 가운데 하나의 파면만을 통과시켜 기준 파면과 중첩시킴으로써 양질의 간섭무늬를 얻을 수 있게 하였다. 또한, 산란판에 형성된 간섭무늬에 존재하는 잡음성분들을 제거하기 위해 산란판을 DC 모터로 회전시켜 평균화함으로써 선명한 간섭무늬를 얻을 수 있도록 하였다. 따라서 CCD 카메라의 초점 거리에 위치한 산란판에 평균화된 간섭무늬는 CCD 카메라 및 Frame Grabber를 통해 획득되고, 획득된 간섭무늬 데이터는 3.2절에서 설명한 간섭무늬 해석 알고리즘에 의해 해석된다.

FPSI 시스템의 하드웨어 제어 및 Frame Grabber를 통해 2진화된 간섭무늬의 자동 해석 과정은 그림 6의 FPSI 시스템의 운용 프로그램 흐름도에 나타내었다. FPSI 시스템의 운용 프로그램은 Matlab을 이용하여 개발되었으며, 실시간으로 간섭무늬 데이터를 저장하고 해석할 수 있을 뿐만 아니라 3-D 디스플레이를 효과적으로 수행하기 위해 도입된 Matlab을 이용해 하드웨어 제어 및 간섭무늬 해석을 동시에 수행함으로써, 효율적인 프로그램 운용을 할 수 있도록 하였다.

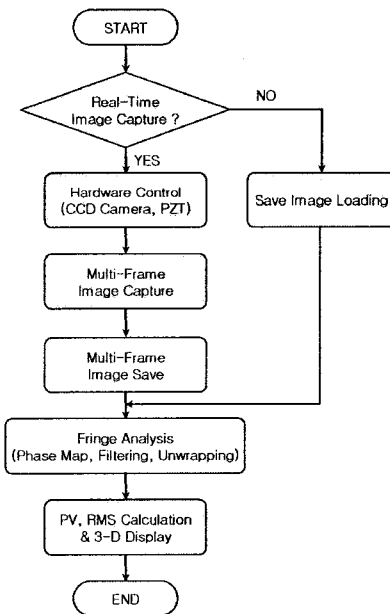


그림 6. FPSI 시스템의 해석 프로그램 흐름도
 Fig. 6. Flow chart of analyzing program for the FPSI system.

본 논문에서, 간섭무늬 해석을 통한 검사 파면의 복원은 위상 천이법의 5-Step 알고리즘을 적용하여 수행하였으며, 이러한 위상 천이 알고리즘의 특성상 연속 위상을 복원하는 방법을 고려해야만 한다. 이는 파면 위상차 $\phi(x, y)$ 가 arctan 연산에 의

해 $[-\pi/2, \pi/2]$ 의 불연속점들이 필연적으로 발생하는데, 이러한 불연속점들을 제거하여 연속적인 위상값을 구하는 과정을 위상 결렬침(phase unwrapping)이라 한다. 또한, 위상 결렬침 과정에 앞서 불연속점들을 갖는 파면 위상차의 수정 과정이 필요하며, 이를 위상 결점침(phase wrapping)이라 하며, 이는 위상 천이법으로 계산된 파면 위상차 $\phi(x, y)$ 가 $[0, 2\pi]$ 또는 $[-\pi, \pi]$ 의 2π 불연속점들을 갖도록 하는 과정이다.

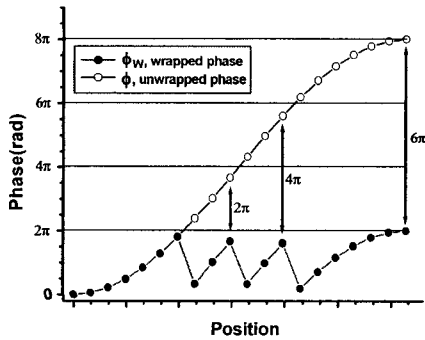


그림 7. 결점침된 위상의 위상 결렬침 과정

Fig. 7. Phase unwrapping process of wrapped phases.

그림 7은 위상 결점침된 파면 위상차의 위상 결렬침 과정을 나타내고 있으며, 이는 불연속적인 면을 미분한 후, 다시 적분하는 것으로 인접한 픽셀사이의 위상차의 절대값이 π 이상이 될 경우, $\pm 2\pi k$ (k :정수)을 해줌으로써 인접한 픽셀사이에 위상차를 π 보다 작아지게 하는 것이다. 본 논문에서 적용한 위상 결렬침 알고리즘은 가장 단순하고 연산 속도가 빠른 1차원 위상 결렬침 방식인 Itoh 법[20]을 사용하였으며, 이 방식을 적용하기 위해, 결점침된 위상값에 존재하는 고주파 잡음 성분을 제거하고 필터링 시, 2π 불연속점 정보의 유실을 최소화하는 sine/cosine 평균 필터링[21]을 적용하여 양질의 결점침 위상을 구하였다.

위상 천이 알고리즘을 적용한 FPSI 시스템을 이용해 파면 위상을 복원하기 위해서는 일련의 간섭무늬들이 필요하며, 2.2절에서 설명했듯이, 이러한 간섭무늬는 기준면에 대하여 검사면에 기울기를 줌으로써 얻을 수 있었다. 따라서 위상 결렬침을 이용해 파면 위상을 복원하게 되면, 복원된 파면 위상값에 기울기 정보도 함께 포함되어 있으므로, 기울기 값을 제거해야만 검사면에 대한 정확한 파면 정보를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 결렬침된 파면 위상값의 x, y 좌표 중심에서 x 축에 대한 기울기 값과 y 축에 대한 기울기 값을 곡선 맞춤법(curve fitting)[22]으로 구하여 전체 파면 위상값으로 뺄으로써 결렬침된 파면 위상을 보상하였다. 그림 8은 결렬침된 파면 위상에 대하여 기울기 값을 제거하지 않은 경우와 기울기 값을 제거한 경우의 한 예를 보여주고 있다. 또한, 그림 9는 본 논문에서 제작한 FPSI 시스템의 전체 구성을 보여주고 있다.

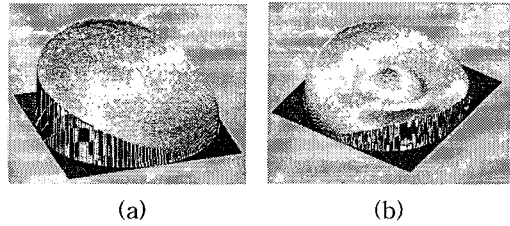


그림 8. x, y 축의 기울기를 갖는 파면 위상 및 보상된 파면 위상의 3차원 이미지 : (a) 기울기 제거 전, (b) 기울기 제거 후

Fig. 8. 3-D image of wavefront phase with x and y axis tilts and compensated wavefront phase : (a) before removing tilts and (b) after removing tilts.

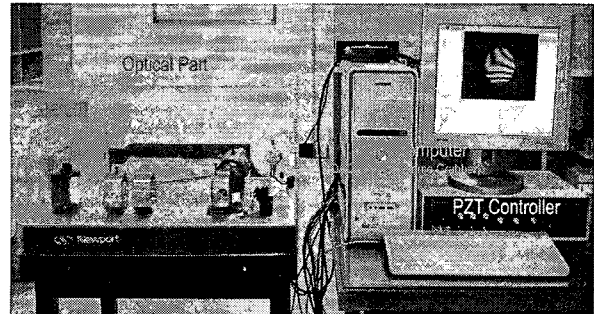


그림 9. FPSI 시스템 사진

Fig. 9. Photograph of the FPSI system.

V. 고차 비구면 렌즈의 성능 평가 및 비교

본 논문에서 그 성능을 평가하는 고차 비구면 렌즈의 모델은 WV-NM100인 Panasonic 사의 소형 Dome 형 감시카메라에 사용되는 QQJ-2133 렌즈 모듈에 장착된 플라스틱 고차 비구면 렌즈로서, 시출성형에 의해 제작된 것이다. 이는 한 면이 구면, 나머지 한 면은 비구면을 갖는 렌즈로 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 보는 바와 같이, $R_1 = -3.259mm$ 의 곡률 반경을 갖는 면은 비구면이고, $R_2 = -3.050mm$ 의 곡률 반경을 갖는 면은 구면이다. 또한 비구면의 직경은 $2.38mm$, 구면의 직경은 $4.4mm$ 이다. 따라서 본 논문에서는 비구면에 대한 파면 위상을 복원하여 그 형상 정보에 대한 높이 오차를 구해, 그 성능을 평가하였다. 일반적으로 렌즈의 성능 평가는 광학적 특성 파라미터인 PSF(Point Spread Function), MTF(Modulation Transfer Function)를 통한 회절 해석이나 수차량 산출 및 검사면의 표면 높이 오차 등으로 이루어지며, 그 중 검사면의 형상 정보가 보다 주요한 특성 파라미터로 간주되고 있다. 따라서 본 논문에서는 비구면의 형상 정보에 대한 높이 오차의 PV(Peak-to-Valley) 및 RMS값을 계산하여 그 성능을 업계 표준으로 사용되고 있는 Zygo 사의 Mark IV의 결과와 직접 비교하였다.

그림 11은 본 논문에서 제안한 FPSI 시스템으로 획득된 간섭무늬와 위상 결렬침 및 기울기 보상을 통해 복원한 비구면의

형상 정보를 2-D 및 3-D 이미지로 나타낸 것으로, 복원된 형상에 대하여 계산된 PV 및 RMS 값은 30회 반복 측정하여 그 값들을 평균하여 구하였으며, 각각 0.845wave, 0.1871wave로 계산되었다. 또한, Zygo 사의 Mark IV를 이용한 비구면 렌즈의 PV 및 RMS는 각각 0.849wave, 0.180wave로 측정되었으며, 그 결과들을 비교해 볼 때, PV 및 RMS의 측정 오차는 각각 0.004 wave, 0.0071wave로 $\lambda/100$ 임을 알 수 있다. 또한, FPSI 시스템의 측정 성능을 평가하기 위해, RMS 값에 대하여 동일한 조건하에서 30회 측정하여 FPSI 시스템의 반복능(repeatibility)을 구하였다. 이때 RMS의 표준편차 σ 는 0.00051wave로 $\pm 2\sigma$ 을 기준으로 할 때, 반복능은 0.002 wave로 $\lambda/100$ 로 계산되었다. 그림 12는 30회 반복 측정에 의해 계산된 PV 및 RMS 값에 대한 그래프를 나타낸 것이며, 제안된 FPSI 시스템의 측정 결과와 Mark IV의 측정 결과 비교는 표 2에 나타내었다.

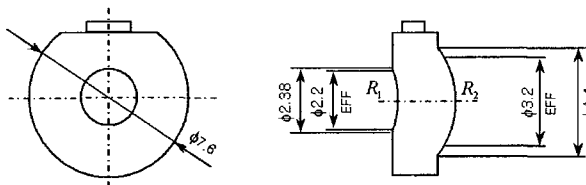


그림 10. 플라스틱 비구면 렌즈의 단면도
Fig. 10. Profile of a plastic aspheric lens.

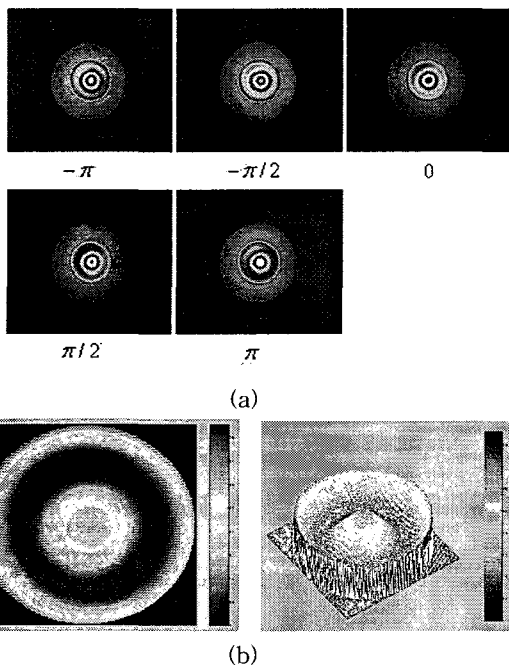


그림 11. 비구면 렌즈에 대한 간섭무늬 해석 결과 : (a) 5-Step 알고리즘의 간섭무늬, (b) 복원된 파면 위상의 2차원 및 3차원 이미지(기울기 성분 제거)
Fig. 11. The result of interferogram analysis for the

aspheric lens : (a) the 5-Step algorithm's interferogram and (b) 2-D and 3-D images of the reconstructed wavefront phase(removed tilt).

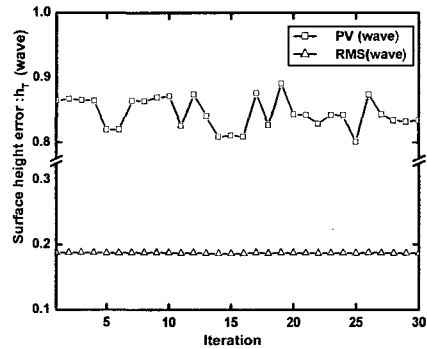


그림 12. 30회 반복 측정에 의해 획득된 비구면 렌즈의 PV 및 RMS 값에 대한 그래프
Fig. 12. Graph of PV and RMS values of the aspheric lens obtained by 30-time iterative measurements.

표 2. FPSI 시스템과 Mark IV의 측정 결과 비교
Table 2. Comparison of measurement results between the Mark IV and the FPSI system.

간접계	PV Value	RMS Value	ΔPV	ΔRMS	반복능
Zygo Mark IV	0.849wave	0.180wave	.	.	.
FPSI	0.845wave	0.1871wave	0.004wave	0.0071wave	0.002 wave

VI. 결론

본 논문에서는 고차 비구면 렌즈의 성능 평가를 위해 단순 방식의 FPSI 시스템을 설계/제작하였으며, 하드웨어 운용 및 간섭무늬 해석 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서 제작한 FPSI 시스템을 이용한 고차 비구면 렌즈의 성능 평가는 PV 및 RMS 값을 측정하여 평가하였고, 측정 결과의 타당성은 Zygo 사의 간접계 측정 장치인 Mark IV의 측정 결과와 직접 비교하였다. 또한, FPSI 시스템의 성능 평가를 위해, 비구면 렌즈에 대하여 동일 조건하에서 30회 반복 측정하여 제안된 시스템의 반복능을 구하였다. 그 결과 평가된 고차 비구면 렌즈의 PV 및 RMS 값은 각각 0.845wave, 0.1871wave로 측정되었고 Mark IV와 비교해 볼 때, 측정 오차는 $\lambda/100$ 이하로 계산되었다. 또한, 제작된 FPSI 시스템의 반복능은 $\lambda/100$ 의 신뢰할 만한 결과를 얻었다.

따라서 본 논문에서 제작한 단순방식의 FPSI 시스템은 고차 비구면 렌즈의 성능 평가뿐만 아니라, 다양한 소형 광학 소자의 성능 평가에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] “카메라 폰 산업 동향”, 전자부품연구원 주간 전자정보, 제6권 제7호, 2005.

[2] Leanard E. Chaloux, “Diamond Grinding of Optical Surface on Aspheric Lens Molds,” SPIE Vol. 656, 1986.

[3] D. A. Lucca and Y. W. Seo, “Aspects of Surface Generation in Orthogonal Ultraprecision Machining,” Annals of the CIRP, Vol. 43, 1994.

[4] M. Laikin, Lens Design, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995.

[5] K. Yoshizumi, T. Muraio, J. Masui, R. Imanaka and Y. Okino, “Ultrahigh Accuracy 3-D Profilometer,” *Appl. Opt.*, Vol. 26, pp. 1647-1653, 1987.

[6] 박형준, “비구면 렌즈 전용 CAD/CAM 시스템 ALIS,” 한국CAD/CAM학회 학술대회논문집, pp. 247-252, 2001.

[7] 김승우, “광계측의 기술동향,” 한국정밀공학회지 제17권 제6호, pp. 7-16, 2000.

[8] 정진호, 비구면 렌즈설계 및 평가, 광기술인력교육센터, 2001.

[9] R. T. Holleran, “Immersion Null Test for Aspherics,” *Appl. Opt.*, Vol. 2, pp. 1336 - 1337, 1963.

[10] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.

[11] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, 1980.

[12] *Interferogram Interpretation and Evaluation Handbook*, Zygo 1993.

[13] H. Kadono, N. Takai, and T. Asakura, “New Common-Path Phase Shifting Interferometer Using a Polarization Technique,” *Appl. Opt.*, Vol. 26, pp. 898-905, 1987.

[14] Osuk Y. Kwon, “Advanced Wavefront Sensing at Lockheed,” *Soc. of Photo. -Opt. Instrum.*, pp. 196-211, 1987.

[15] J. C. Wyant and K. Creath, “Advances in Interferometric Optical profile,” *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 32, pp. 5-10, 1992.

[16] T. Kreis, “Digital Holographic Interference-Phase Measurement Using the Fourier Transform Method,” *J. Opt. Soc. Am. A.*, Vol. 3, pp. 847-855, 1986.

[17] P. Hariharan, B. F. Oreb, and T. Eiju, “Digital Phase-Shifting Interferometry : A Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm,” *Appl. Opt.*, Vol. 26, pp. 2504-2506, 1987.

[18] J. E. Gallagher and D. R. Herriott, “Wavefront Measurement,” *U.S. Patent 3,694,088*, 1972.

[19] J. C. Wyant, “Use of an ac Heterodyne Lateral Shear Interferometer with Real-Time Wavefront Correction Systems,” *Appl. Opt.*, Vol. 14, pp. 2622-2626, 1975.

[20] K. Itoh, “Analysis of the Phase Unwrapping Problem,” *Appl. Opt.*, Vol. 21, p. 2470, 1982.

[21] H. A. Aebischer et al, “A Simple and Effective Method for Filtering Speckle-Interferometric Phase Fringe Patterns,” *Opt. Comm.*, Vol. 162, pp. 205-210, 1999.

[22] S. Nakamura, *Numerical Analysis and Graphic Visualization with MATLAB*, Prentice Hall, Inc., 1996.



장 남 영(Nam-Young Jang)

1998년 2월 창원대 전자공학과(공학사)
 2001년 2월 창원대 전자공학과(공학석사)
 2006년 2월 창원대 전자공학과(공학박사)
 현재 창원대학교 시간강사
 관심분야: 광섬유센서, 광계측, 광신호처리, FEM Analysis of Optical Waveguide



최 평 석(Pyung-Suk-Choi)

1978년 2월 성균관대 전자공학과(공학사)
 1980년 2월 연세대 전자공학과(공학석사)
 1985년 2월 연세대 전자공학과(공학박사)
 1979년~1986년 유한공업전문대학 전자과
 조교수
 1986년~현재 창원대학교 전자공학과 교수
 관심분야: 광신호처리, 광섬유센서, 홀로그래피



은 재 정(Jae-Jeong Eun)

1982년 2월 연세대 전자공학과(공학사)
 1986년 2월 연세대 전자공학과(공학석사)
 1994년 2월 연세대 전자공학과(공학박사)
 현재 창원대학교 전자공학과 교수
 주관심분야: 광섬유센서, 광계측, ESPI, 광신호처리