

반사경 측정을 위한 타워 방식의 Fold Mirror를 이용한 Fizeau 간섭계 시스템 구성

이응석[#], 이기암^{*}, 김옥현^{*}

A Study on the Tower type Fizeau Interferometer System with a Fold Mirror for Measuring Large Optical Lens Profile

Eung-Suk Lee[#], Ki-Am Lee^{*} and Ok-Hyun Kim^{*}

ABSTRACT

Fizeau interferometer is used for inspecting the lens surface profile accurately. This study is focused on the design and optical measuring techniques for large optical components, such as a reflection mirror for large area lithography or astronomical purpose. A tower type Fizeau interferometer is designed and set up in horizontally with a 45° fold mirror which makes easy to align the optical path of heavy interferometer system. To align the optical path, a five-axes stage for the interferometer is required. This study shows a method of the 45° fold mirror alignment by using a three-axis stage instead of adjusting the interferometer itself or measuring object. This system will be installed on the large optics polishing machine during the manufacturing process as an on-machine inspection system.

Key Words : Fizeau Interferometer (피조 간섭계), Fold Mirror (폴드미러), Large Optics (대구경 렌즈), OMM (On Machine Measurement)

1. 연구배경

국내의 경우 대부분 수입에 의존하는 취약한 측정기 분야에서 미래 산업을 선도하는 광학 측정 장비의 연구가 절실히 요구된다. 광학 측정방법에는 레이저를 주로 이용하는데 파면 측정 방식의 간섭계가 측정방법의 기본으로 알려져 있으며 간섭계의 파면 측정법은 측정원리에 따라 크게 기하학적광선 추적법(Ray Tracing)과 광간섭 방법(Interferometry)

이 있다.¹ Fizeau 간섭계는 주로 광학렌즈의 표면 형상 측정용으로 사용되는 대표적인 간섭계중 하나이다. Fizeau 간섭계는 사용상 환경문제 등으로 방진장치가 설치된 실험실 및 산업체인 경우 별도의 환경설비를 갖춘 방에서 사용된다. 상업용 Fizeau 간섭계는 주로 소구경 (φ100mm 이하) 검사 장치로서 모두 외국 업체제품으로 수천만원대의 고가이다.

본 논문은 최근 일부 국내 업체에서도 시도하고

☞ 접수일: 2007년 8월 6일; 게재승인일: 2008년 4월 28일

교신저자: 충북대학교 기계공학과

E-mail: eungsuk@cbnu.ac.kr Tel. (043) 261-2442

* 충북대학교 기계공학부

있는 대구경 반사경 렌즈의 연마가공 중 측정에 관한 내용으로서, 이들 가공업체에 필요한 가공 중 검사장치 설계 및 제작에 관한 내용으로 이들 관련 업체의 대구경 반사경 검사장치 설치에 도움을 주기 위한 목적이며 또한 열악한 광학관련 연구환경 개선에 기여하고자 한다. 대구경 렌즈의 검사장치는 현장에서 보통 다음과 같은 몇가지 문제점을 가지고 있다.

- 1) 대구경 렌즈 가공장치의 구조로 인하여 검사를 위한 대형 렌즈의 이동이 불가능
- 2) 따라서, 대형 렌즈의 가공 중 또는 가공 후 타워형 검사장치가 통상적으로 사용
- 3) 보통의 경우, 연마기 방식 등으로 광학식 레이어 간섭계를 수직형으로 설치하여야 함
- 4) 수직형 방식에서의 간섭계 정렬 문제는, 피측정물의 조정이 불가능함으로 간섭계만을 사용할 경우, 간섭계 장치의 수직하중으로 인한 조정장치의 부하로 간섭계 이송장치가 복잡하게 됨

따라서 본 논문에서는, 이러한 간섭계의 수직형 설치방식에서, 1개의 Fold Mirror만을 사용하여 정렬하는 수평형 조정방법으로 간섭계 이송장치를 간단하게 설계, 제작하였다. 본 연구는 대구경 렌즈 연마 검사장치로 필요한 타워방식의 Fizeau 간섭계 설계에 관한 연구로서, 대구경 렌즈 (φ300mm 이상)의 경우 연마장치에서 측정실로의 이동이 쉽지 않으므로, 연마장치에서 직접적으로 표면 형상을 검사하는 장치가 필요하다. 대구경 및 곡률이 큰 렌즈의 경우 Fizeau 간섭계의 미세조정이 특별하게 필요하며, 본 연구에서는 Fizeau 간섭계를 이용한 대구경 반사경 형상측정을 위한 안정되고 편리한 방법으로 간섭계의 기준렌즈(Reference Lens)를 통해 출사되는 측정 광을 45° Fold Mirror를 이용하여 90° 방향으로 측정하는 방식의 대구경 반사경 렌즈 측정용 장치를 설계하고 제작하였다.

2. 대구경 렌즈 측정 장치 설계 및 제작

2.1 Fizeau 간섭계 설계

본 연구의 타워방식 Fizeau 간섭계의 설치 방식은 간섭계를 수직으로 설치하는 경우와 수평으로 설치하는 방법을 고려하였으며, 타워 방식의 일반적인 경우인 수직설치의 경우, 대형 간섭계 자체를 5축 이송장치를 이용한 피측정물과의 정렬이 큰 문제로 되었다.² 따라서 본 연구에서는 간섭계를 수평

식으로 설치하고 수직방향의 대구경 렌즈를 측정하기 위해 45° Fold Mirror를 이용한다. 가공 중인 대구경 렌즈는 광축 정렬시 이동 할 수가 없으므로 수직으로 설치한 경우 5축 이송 장치가 반드시 필요하고 이에 따른 무게가 무겁고 또한 제작비용도 비경제적이다. 이 문제점을 극복하는 방안으로 45° 미러를 이용하여 측정 장비는 안정적으로 수평 자세를 유지할 수 있고, 45° 미러의 회전 2축 및 직선 2축 스테이지를 이용하여 간섭계의 정렬 장치를 설계하였다.

Fizeau 간섭계는 일반적인 구조로 구매되는 광학부품을 고려하여 Fig.1과 같은 크기로 하였으며, 시준기(Collimator)는 Zemax s/w를 사용하여 설계하고 렌즈는 국내에서 제작하였다. 구면 수차 등을 없애기 위하여 시준기는 여러 장의 렌즈를 사용하고,³ 제작된 시준기는 모두 3장의 렌즈로 구성되어 시준기의 상세한 사양은 Table 1과 Fig.2에 나타내었다.

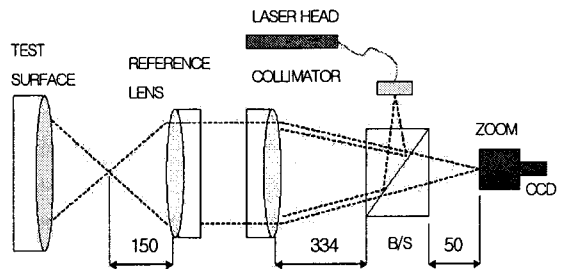


Fig. 1 Fizeau interferometer design

Table 1 Specification of collimator

Surface (R#)	Comment	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass material	Semi-Diameter (mm)
1	L1	239.302	30	BACD15	57.5
2		-313.698	6		
3	L2	-302.360	15	FD140	55
4		-721.442	3.4		
5	L3	-409.478	15	FD140	55
6		-574.117			

자동 4배줌을 CCD앞면에 부착하여 초점조정이 쉽게하였다. Semi-Diameter 항목은 유효구경으로 직경 100mm를 기준으로 설계되었으며, 표시된 것은 유효구경의 절반(반경)이다. 제작을 고려하면 이보다는 충분히 크게 하여 경통과의 조립이 가능하도록

해야 하며, 또한 렌즈 가공의 특성상 에지 부분에서 성능이 급격히 떨어지는 것을 감안하여 크게 한다. Laser Head는 class 3B, 파장 632.8nm를 사용하였다. Table 2는 사용된 기준 렌즈의 사양을 표시하였다.

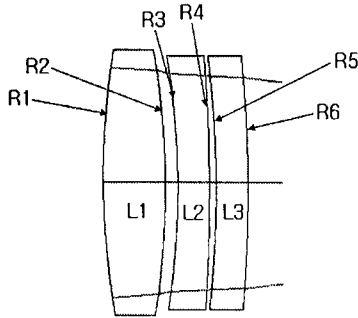


Fig. 2 Collimator design parameter

Table 2 Specification of spherical reference lens

Model : TSC-101.6-1.5 (ZYGO Co.)
Material : Fused Silica
Coating : $R_s > 99.75\%$
Surface : $\lambda/10$ or smaller wave PV at 633nm
Scratch & Dig. : 40-20
F-Number : 1.5
Full Aperture : 101.6mm

2.2 렌즈 정렬

Step 1. 시준기 정렬

간섭계를 구성하는데 있어서 제일 먼저 광원에서 나오는 구면파의 빛을 평행광으로 만들어주는 것이다. 평행광은 광섬유 케이블에서 출력되는 빛이 점광원에서 나오는 구면파이므로 이것을 시준기의 초점에 위치시킨다. 광섬유에서 출력되는 구면파를 시준기를 사용하여 평행광으로 출력하고, 시준기를 레이저가 출사되는 위치에서 시준기의 초점 거리만큼 떨어진 곳에 위치시킨다. 이것을 확인하는 방법은 평면거울을 이용하여 빛을 돌려보내어 반사된 빛의 초점 위치를 출사되는 곳으로 일치시킨다. 이때 초점의 크기가 가장 작고 밝게 빛나는 정도를 확인하면 비교적 쉽게 알 수 있고, 이렇게 하면 대략적인 평행광을 얻을 수 있으나, 정확한 정렬은 간섭무늬를 확인해서 평행광 정도를 알 수 있다.

Fig. 3과 같이 시준기를 고정하고, 5축 스테이지에 광파이버 케이블을 부착한 다음 초점에 위치시킨다. 평행광이 잘 되었는지는 비틀림(Shear) 간섭 무늬를 보는 방법이 있다. Fig. 4와 같이 평면 렌즈를 시준기 앞에 두고 약간 기울여 보면 투과된 빛과 반사된 빛이 중첩되는데, 이 중첩된 빛 사이에

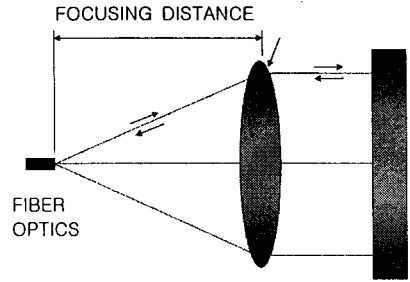


Fig. 3 Collimator focusing for parallel beam

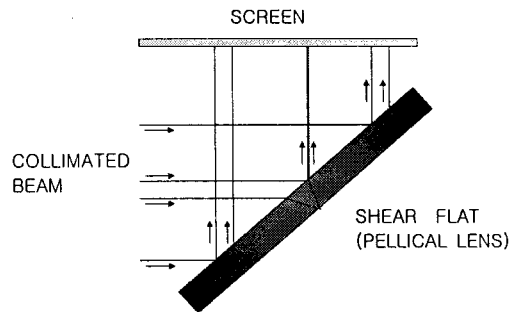


Fig. 4 Collimation beam shear using a Pellicle lens

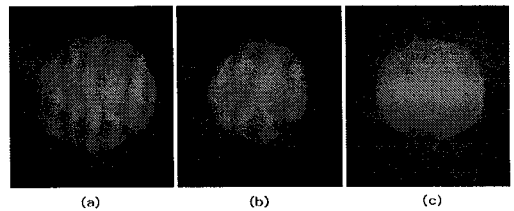


Fig. 5 Null fringe inspection steps (a->c) for adjusting the Collimator

간섭이 발생되고 간섭무늬 (Null fringe) 를 얻을 수 있다. 간섭무늬의 수가 적을수록 평행광이 잘된 것으로 Fig. 5에 간섭무늬를 최소로 하기 위한 과정을 나타내었다.⁴ 본 연구에서는 Fig. 5(c)와 같이 최소화 된 간섭무늬를 얻었다. 이렇게 얻은 간섭무늬를

분석해보면 정량적으로 평행광 정도를 알 수 있다. 이때 주의해야 할 점은 광섬유 케이블을 5축 스테이지에 고정하고 빛이 케이블 연결부에서 광 간섭되어 출력되는 빛이 원형을 이루지 못하는 현상이 생기지 않도록 해야 한다.² “Pellicle beam splitter를 이용하여 간섭무늬를 얻는 방법은 층밀림(Lateral shear) 간섭계 방법을 적용한 것으로, 얻어진 Interferogram을 분석하여 평행광 성능을 평가할 수 있다. 간섭무늬를 얻고자 사용하는 Shear Interferogram 방법은 광원과 시준기사이의 거리를 미세하게 조정하여 간섭무늬의 수가 최소가 되도록 한다. 다만 간섭무늬 자체가 희미하고 가늘면 그것이 진짜 비틀림에 의한 간섭무늬인지 아니면 일부 광학부품 사이에서의 원하지 않는 간섭무늬(Ghost fringe)인지 확인할 필요가 있다.⁶ 만약 광원과 시준기의 간격을 이동하였음에도 간섭무늬의 간격이 변하지 않는다면 Ghost fringe라고 볼 수 있다. 이런 경우에는 시준기의 초점을 일치시키는 과정부터 수정해줄 필요가 있다. 시준기가 기울어져 있거나 광원과 시준기가 하나의 축 상에 일치하지 않을 수 있으므로 정렬을 수정하여 실험한다.

Step 2. 기준면 정렬하기

시준기 렌즈의 초점 정렬하는 과정이 끝나면 기준렌즈를 정렬하는 과정에 들어간다. 기준 렌즈의 정렬은 시준기 렌즈의 정렬과 마찬가지로 빔을 반사시켜 정렬한다. 시준기 렌즈를 통과한 빔은 평행광으로 나오게 되는데, 이것을 기준 평면을 사용하여 일부를 광원으로 되돌려 보낸다. 기준렌즈에서 반사된 빔이 시준기 렌즈를 통과하면 초점이 생기게 되는데 이것이 Beam splitter에서 두개로 나뉘어 하나는 광원 쪽으로, 다른 하나는 통과하여 카메라 쪽으로 가게 된다. 이중 광원쪽으로 치우치는 초점을 광원과 일치하도록 맞춘다. 센터링 정렬은 기본적으로 렌즈의 상하좌우에 미세조정나사로 조정이 가능하고, 측정렌즈를 제거하고 별도의 외부 스크린을 이용하여 추가로 확인하였다.

Step 3. 측정 렌즈 정렬

기준 렌즈의 정렬이 끝나면 설치 작업이 끝난 간섭계를 테스트하는 과정이 필요하다. 기준렌즈를 통과하여 나오는 빔에 측정용 렌즈(반사경)를 설치한다. 측정용 반사경에서 반사된 빔이 기준렌즈 → 콜리메이션 렌즈 → 빔스플리터를 통과하여 CCD

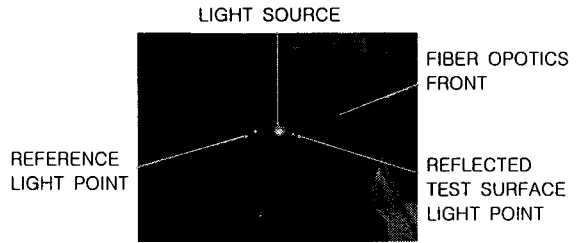


Fig. 6 Adjusting reference and reflected light point at the test surface

쪽으로 입사하고, 여기서 기준렌즈에서 반사된 빔과 측정용 렌즈(평면 반사경)에서 반사된 빔을 일치시켜(즉, 간섭시켜) 간섭무늬를 얻는다. CCD를 통하여 얻어진 이미지를 확인하면서 얻어진 간섭무늬를 분석하면서 정렬상태를 다시 한번검토하여 정렬이 완전히 되었는지를 확인하면 간섭계 정렬과정은 마무리된다. Fig. 6에 보면 광원을 중심으로 양쪽에 기준면에서 반사된 기준빔과 측정면에서 반사된 빔의 초점이 있는데, 이 세 개의 초점을 일치시키면 정렬이 끝나고 측정이 가능한 것이다. Fig. 6에서 보면 초점이 약간 퍼져있는데 이는 사진을 찍기 위해 Beam splitter를 이동시킨 것으로 실제 정렬 작업 때는 더 작고 빔이 밝게 정렬해야 한다.

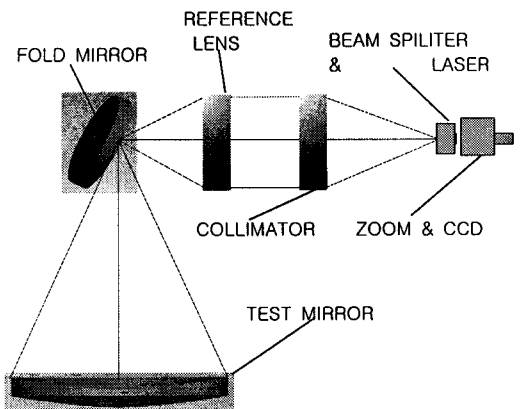


Fig. 7 Laser beam passing diagram for Fizeau interferometer with a 45° fold mirror

2.3 45° Fold Mirror 장착 설계

45° 미러를 이용한 광축 정렬 시스템은 Fizeau 간섭계의 수직형 장치² 보완하여 설계된 것이며 조정을 쉽게하여 결국 측정정밀도를 향상시키기 위

한 목적이다. 간섭계의 수직형 방법에서는 5축 스테이지 (2축 각도, 3축 직선이송장치)가 Fizeau 간섭계 자체에 설치되어 빔 정렬에 사용되었으나, 본 연구에서는 간섭계를 수평으로 다시 제작하여 Fizeau 간섭계 자체에는 3축의 직선 이송스테이지에 수평으로 설치하고 측정렌즈에 대해서는 빔이 90° 방향으로 (Fig. 7 참조) 꺾여서 빔이 진행하도록 2축 각도 및 1축 이송이 가능한 45° 미러를 장착하였다. 전술한 바와 같이 타워형 대형 간섭계의 광축 정렬에서 Fig. 8에서와 같이 간섭계를 수직형으로 장착한 방법에 비하여 광축정렬 축수가 5축에서 3축으로 되어 정렬이 용이함을 알 수 있으며, 특히 미소 조정시 대형 간섭계를 직접 이송할 필요가 없으므로 간섭무늬를 얻기 위한 정확한 정렬이 가능하였다. 또한 광축 정렬 과정에서 45° Fold Mirror와 기준렌즈의 초점 위치가 전후 방향으로 벗어나는 경우 간섭계 전후 이송 축에 설치된 수평 이송 축 눈금으로 대구경 렌즈 곡률값 측정시 보상한다.

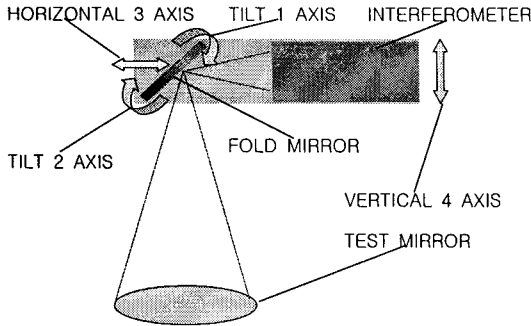


Fig. 8 Tilting and moving axis for measuring lens alignment

2.4 대구경 렌즈 측정 장치 제작 및 설치

제작된 Fizeau 간섭계 자체는 방진테이블에서 상업용 간섭계와의 비교실험을 통하여 검증 작업을 수행하였다.(실험결과 3장 참조) Fig. 9는 현재 실험실 조건상 곡률 반경 R 3,000 ~ 5,000(mm)까지 Tower 방식으로 측정이 가능하도록 제작된 간섭계 설치 사진이다. 실험 장치가 지상고가 높고 실험실 주변 공간이 넓지 않아 위쪽 사진과 아래쪽 사진을 별도로 보여주며, 아래쪽에 측정물인 연마가공이 끝난 $\phi 600\text{mm}$ 오목반사경이 보인다. Fig. 10은 45° Fold Mirror 및 이송 스테이지를 간섭계 출사구에 설치한 사진이다. Fold Mirror의 간섭계 출사구와의

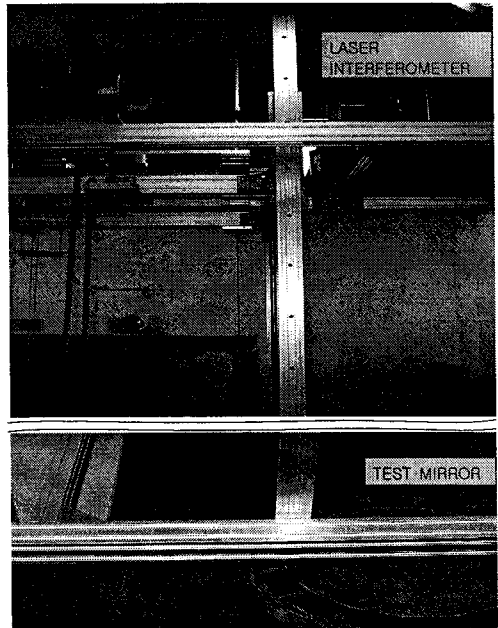


Fig. 9 Tower type laser interferometer system for testing large concave mirror (upper and lower part)

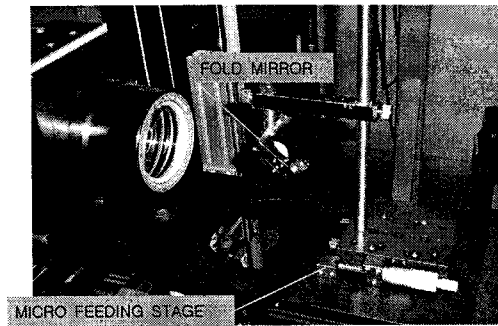


Fig. 10 The 45° mirror set on the beam exit of laser Interferometer

설치거리는 가능한 간섭계 기준렌즈의 초점거리와 일치시켜, 유효면적을 축소시켜 Fold Mirror의 평면도(Flatness) 등에 의한 오차를 최소화하였다. Fig. 11은 Fold Mirror와 5축 이송장치를 함께 촬영한 사진이다.

2.5 측정렌즈의 곡률 측정

간섭무늬를 보기 위해서는 우선 측정렌즈의 곡률(Curvature) 측정이 선행되어야 한다. 타워형간섭

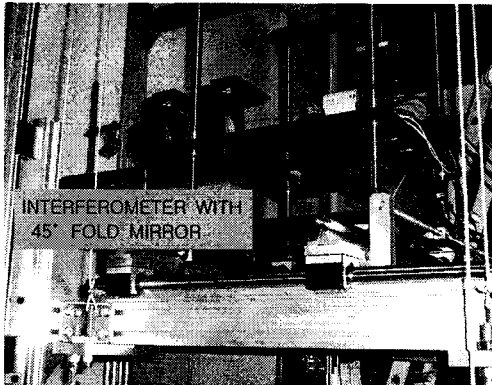


Fig. 11 Tower type Fizeau interferometer and five axis stage with a 45° fold mirror

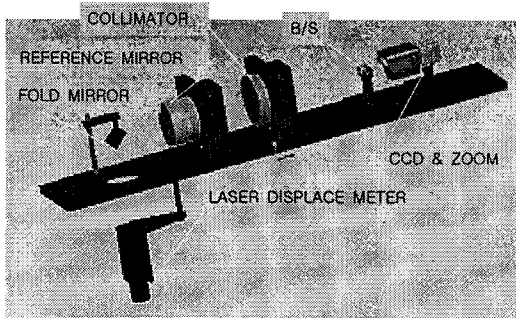


Fig. 12 Laser displace meter with laser interferometer system for measuring radius of optical mirror

계 장치를 위하여 Fig. 12, 13 과같이 레이저거리계 (분해능 0.1mm, Time of flight 방식)가 설치되었으며, 간섭계에 의한 간섭무늬를 보기위하여 측정물의 대략적인 설계 곡률값을 이용한다. 전술한바와 같이 일단 간섭무늬가 보이게 되면 최종적인 측정 렌즈의 곡률은 레이저거리계의 설치거리와 45° Fold Mirror와의 거리를 보상하여 측정렌즈의 곡률값으로 한다. 레이저거리계와 간섭계를 사용한 곡률 측정순서는 다음과 같다.

- Step 1. 대략적인 R(가공 렌즈 도면 기준)값으로 레이저거리계를 이용하여 간섭계 Z축을 설정한다.
- Step 2. 간섭계 Aperture로부터 레이저 거리계를 이동 시켜 레이저 출사 경로를 확보하여 측정하고자 하는 렌즈로부터 최소한의 간섭무늬가 나올 때까지 간섭계의 Z축 미소 스케일을 조정하여 고정시킨다.
- Step 3. 최종적으로 레이저 거리계를 이용하여 측

정 렌즈의 반경(R)을 측정한다. 이러한 방법으로 본 연구에서 사용된 반사경(φ 600mm)의 곡률값은 3,055mm로 측정 되었다.

Fig. 14, 15는 Spherometer를 사용하여 대구경 측정렌즈의 근사적인 반경 측정을 수행한 것이다. Fig. 16은 3회 측정한 연마가공된 구경 φ600mm 미러의 반경값 들의 편차를 보여주는 그래프이다.

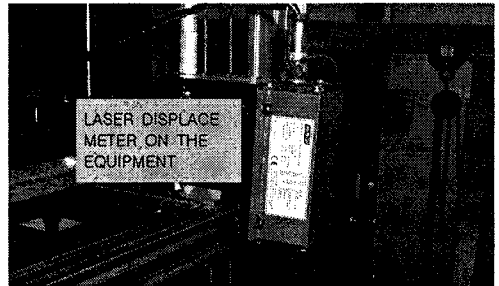


Fig. 13 Laser displace meter set on the laser interferometer system

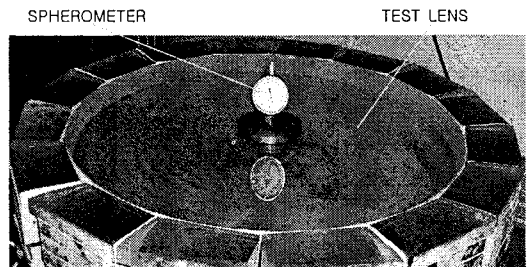


Fig. 14 Measuring large optics radius by spherometer(φ 600mm concave polished mirror)

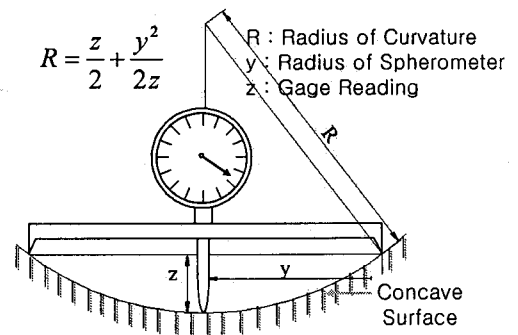


Fig. 15 Principle of Spherometer

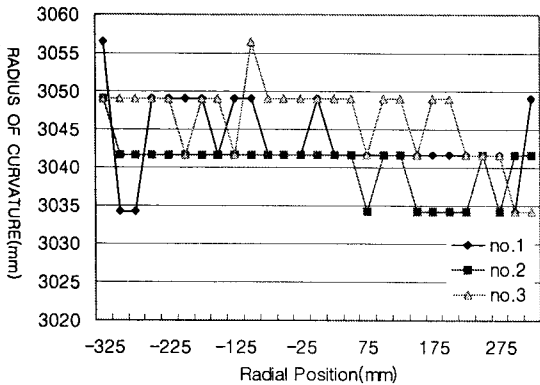


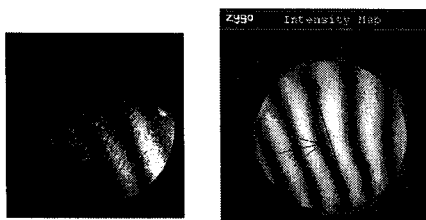
Fig. 16 Measured data by spherometer 3 times for ϕ 600mm concave mirror

레이저 거리계로 측정된 결과(3,055 mm)와 측정 값을 비교하여 보면 근사치에 접근 하는 것을 알 수 있다.

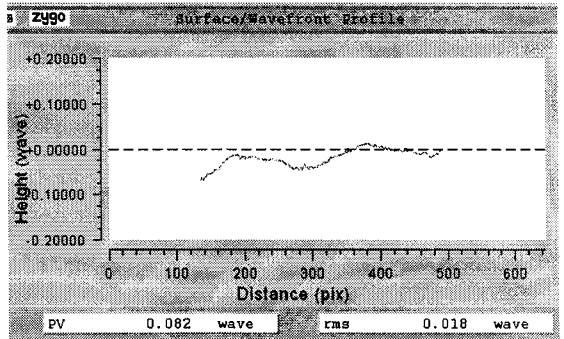
3. 실험 및 결과 분석

3.1 Fizeau 간섭계 검증

제작된 Tower 방식의 대구경 측정용 Fizeau 간섭계 자체의 검증을 위하여 광학 테이블에서 상용 Zygo 간섭계와 비교 실험하였다. Fig. 17은 ϕ 120구경의 오목렌즈를 비교 측정하여 Zygo 간섭계와 비교 측정한 것이며, 간섭무늬의 개수 및 형상에서 비교적 일치하고 있는 것을 보이며, 그림에서 부분적인 렌즈 형상의 높이를 대략 화살표로 표시하였다. Zygo 측정 결과 사진 Fig. 17의 (b)에 따르면 Fringe 무늬가 바람에 날리는 것처럼 보이는데 이는 측정시 주변의 공기의 온도 변화에 따른 것으로 보인다.⁴ Fig. 17에서 보인 바와 같이 제작된 간섭계와 Zygo 간섭계의 측정값은 동일한 렌즈에 대하여 한 개의 간섭무늬 간격에 대한 높이 비교로서 대략적으로 근접하는 것으로 보인다.



(a) Manufactured Interferometer (b) Zygo Interferometer

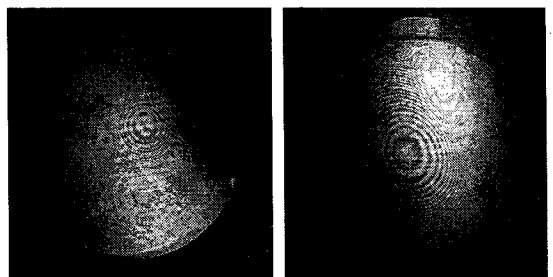


(c) Data by Zygo for the test mirror

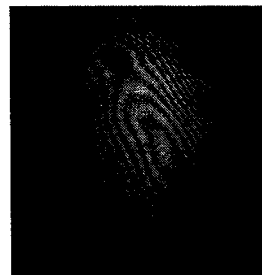
Fig. 17 Compared result with the manufactured and the Zygo interferometer (R 430 mm and ϕ 120 full aperture)

3.2 대구경 렌즈 측정 결과

Fig. 18은 ϕ 600 대구경 오목 렌즈(Fig. 14)의 연마가공 후 본 연구에서 제작된 타워형 Fizeau 간섭계 장치로 측정한 간섭무늬이다. 측정 무늬를 보면 Focused Image의 양쪽 가장자리의 곡률이 급격한 경사를 보여 간섭무늬의 개수가 많은 것을 보이며,



(a) Before focusing (c) After focusing



(b) Focused fringe

Fig. 18 Measured interferogram before, focused and after fringed position (R3,055mm ϕ 600 concave polished mirror)

본 렌즈의 가공시 가운데 부분이 길게 과도하게 연마된 것을 알 수 있다. 또한 초점이 맺히기 전, 후의 간섭무늬를 보면 미세한 흔들림으로 인하여 고정된 무늬를 잡기가 힘들었으며, 향후 바람의 영향, 프레임의 보강 등이 필요할 것으로 보인다. 본 측정 장치에 사용된 Z축 조절나사 피치 정밀도가 미세하지 못한 이유로 초점이 정확히 위치하지 못하여 Fig. 18(c) 측정결과와 간섭무늬의 개수가 다소 많은 것으로 추정된다.

4. 검토 및 결론

수평식 Fizeau 간섭계를 타워형으로 설치하고 45° Fold Mirror를 사용하여 대구경 렌즈의 형상측정에 사용하기 위한 장치 구성방법을 보였다. 본 연구에서 제작된 간섭계는 상용간섭계의 측정치와 비교하여 그 사용가능성을 확인하였으며, 정밀한 레이저 거리계와 간섭계를 동시에 사용하여 정확한 렌즈의 곡률측정이 가능함을 보였다. 간섭계의 자체 중량 때문에 수직식 설치에 비하여 45° Fold Mirror만을 사용한 광축 정렬방법이 보다 용이하게 되었음을 알 수 있었다. 본 측정장치는 대구경 렌즈의 연마 가공 중, 측정 검사를 위한 이동이 쉽지 않은 On-machine 대구경 렌즈 형상 측정 방법으로 이용될 것이며, 측정 환경조건을 고려하여 측정기 구조물의 강성과 특히 민감한 공기의 흐름을 차단하기 위한 장치(커튼막 등)가 고려되어야 할 것이다. 향후 본 측정장치는 Z축 미세초점 조절나사의 정밀도 보강과 함께 산업용으로의 활용을 위한 보강 작업을 거쳐 실제 대구경 렌즈 연마기의 공정 중 표면검사 장치로 장착될 예정이다.

후 기

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Malacara-Hernandez, D. and Malacara-Doblado, D., "Testing of Aspheric Wavefronts," Fabrication and Testing of Aspheres of OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 24 , pp. 74-85, 1999
2. Lee, E. S., Bae, K. H., Lee, K. A. and Kim, O.

- H., "Development of a Fizeau Interferometer System for Measuring the Profile of Large Optical Lens," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 30, No. 5, pp. 1649-1657, 2006.
3. Hecht, E., "Optics," Addison Wesley Longman Inc., pp. 253-258, 2002.
4. Song, J. B., "Phase Shift Shear Interferometer using a Wedge plate," KAIST, PhD Thesis, pp. 15-23, 2004.
5. Kim, D. H., "Profile Measurement and Stabilization using Laser Interferometer," Chousun University, MSc Thesis, pp. 22-30, 2004.
6. Kim, H. Y., "Accuracy Improvement of Fizeau Interferometer," KAIST, MSc Thesis, pp. 7-13, 2001.