

광학면 연마기의 OMM을 위한 Hartmann Test 방법 연구

김옥현*, 이응석#, 오창진**, 김용관**

A Study on a Hartmann Test of Optical Mirror for On-Machine Measurement of Polishing machine

Ock-Hyun Kim*, Eung-Suk Lee#, Chang-Jin Oh** and Yong-Kwan Kim**

ABSTRACT

Recently, aspheric optical lenses and mirrors, which are harder to manufacture and measure than the conventional spherical ones, are widely used, particularly in electronic fabrication process. Generally, interferometric optical method is used for the measurement of spherical optical surface. However, the interferometric method for aspheric surface measurement is difficult because it needs a precise null corrector and strict environmental conditions such as constant temperature, humidity and vibrations. We have been studied on the manufacturing of aspheric optics to improve the surface profile accuracy and productivity using a corrective polishing process. For the corrective polishing, a practical method of On-Machine Measurement (OMM) is required. For this purpose, an optical OMM system has been studied using the Shach-Hartmann test, which is very robust to the practical polishing environment. The wavefront has been reconstructed from the measured data using the primary aberration polynomial function by the least squares fitting. The measured result of the OMM system shows that the maximum deviation is less than 200 nm for the one of commercial Fizeau interferometer Wyko 6000.

Key Words : Aspheric surface (비구면 광학면), Shach-Hartmann Test, On-Machine Measurement (OMM, 기상측정), 수차(Aberration), 파면 (Wave front)

1. 서론

다량의 정보를 효과적으로 저장하기위한 통신 기술은 매우 빠른 발전을 거듭하고 있으며 점점 더 고속화, 고집적화 되어가고 있는 추세이다. 광학기술은 이러한 정보 통신 기술의 핵심을 이루고 있는 중심 기술의 한 분야이며 기술의 발전에 따라 기존의 구면

광학 부품을 대신하여 상대적으로 성능이 우수한 비구면 광학 부품의 사용이 증가하고 있다. 비구면 형상의 경우 결함이 없는 대신 구면 형상에 비하여 제작이 어렵고 성능 평가에 어려움이 있다. 일반적으로 광학 부품의 정밀한 측정을 위해서는 간접계를 사용하지만 측정 가능한 광학 부품의 크기가 비교적 소형이고 구면형상에 적합하다. 일반적으로 광학면의 측정에 사

접수일: 2003년 4월 28일; 게재승인일: 2003년 11월 14일
* 충북대학교 기계공학부
교신저자: 충북대학교 기계공학부
E-mail eungsuk@chungbuk.ac.kr Tel. (043) 261-2442
** 충북대학교 대학원

용되는 간섭계는 기준파면과 측정파면의 광경로차에 의한 위상차로 인하여 발생하는 간섭무늬를 해석하여 측정하는 원리이다. 이에 반하여 Hartmann 테스트는 측정파면의 형상에 따라 변화하는 파면의 기울기를 측정하여 파면의 형상을 알아내는 기하학적인 원리를 적용하는 방법이다. 간섭계는 정밀한 평가를 목적으로 하는 곳에 적합하지만 측정 원리상 온도 및 습도의 변화, 광경로상의 기류 변화, 외부 진동 등 주위 환경의 영향에 매우 민감하게 영향을 받는데 반하여 Hartmann 테스트는 간섭계 수준에 근접하는 높은 정밀도 구현이 가능하면서 비교적 주변 환경에 강한 장점을 지니고 있다. 광학부품의 가공정밀도는 보통 1 μm 이하의 오차를 가지며 일반 기계가공에서 이루기 어려운 정도이며 주로 가공이 쉬운 구면형상을 폴리싱 공정을 통하여 제작하고 있다. 그러나 성능이 우수한 비구면 형상을 가지는 광학 부품은 평가가 어려울 뿐만 아니라 제작 또한 시간이 많이 소요되고 주로 숙련공의 수작업에 의해 이루어지고 있어 가격이 매우 고가이다. 이러한 제작 및 평가상의 어려움을 극복하기 위하여 최근에는 제작공정 중에 측정을 위해 소재를 가공기계에서 떼어내지 않고 기계상에서 직접 측정하여 가공오차를 수정하는 기법이 시도되고 있다.^{1,2,3)}

본 연구에서는 수정 폴리싱을 위해 기계상에서 소재를 떼어내지 않고 직접 측정하여 수정 가공에 사용할 수 있는 오차정보를 제공할 수 있는 광학식 기상 측정 OMM (On-Machine Measurement)을 위하여 필요한 Shach-Hartmann 테스트 장치 설계 구성 및 정밀도 분석에 대하여 연구하였다.

2. Hartmann 방법에 의한 광학면의 측정

고전적인 Hartmann 테스트는 Fig.1과 같이 측정하고자 하는 광학 부품에 일정한 간격으로 구멍이 나 있는 스크린을 위치시키고 빛을 비추면 광학부품 표면에서 반사되는 빛이 스크린의 구멍을 통하여 되돌아 나와 감광판에 표시되는 위치를 측정하여 파면의 변화를 측정하는 방법이다. 그러나 측정을 위한 스크린을 만드는 데 많은 비용이 소요되고 소형 광학부품의 측정에는 적합하지 않은 단점이 있다. 근래에는 Fig.2와 같이 마이크로 렌즈 Array를 사용하여 측정파면의 기울기 변화에 대한 초점의 위치 변화를 측정하여 파면의 형상을 알아내는 Shach-Hartmann 테스트 방법이 사용된다. 측정 원리는 Fig.2와 같이 파면이

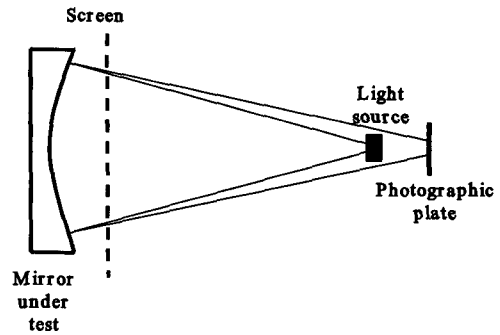


Fig. 1 Classical Hartmann test setup

평면인 경우 렌즈 Array를 통과하면은 Array와 동일한 간격으로 CCD 화면에 초점이 맺힌다. 그러나 평면이 아닌 곡면의 파면은 렌즈 Array를 통과하면 파면의 기울기에 따라 편향된 위치에 초점이 맺히게 된다. CCD 화면상에 맺힌 초점의 편위량과 파면의 기울기의 관계는 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial W(x,y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f}$$

$$\frac{\partial W(x,y)}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f} \quad (1)$$

여기서 $W(x,y)$ 는 파면의 형상을 정의하는 함수이고 f 는 렌즈 Array의 초점거리이다. 광학부품의 평가는 평가하려는 광학부품을 통과한 파면의 형상을 근사한 구면 또는 평면을 기준으로 발생하는 편차를 구하며, 측정하려는 파면오차를 표현하는 방법으로는 다항식으로 표현되는 2차원 함수로 나타낼 수 있다. 특히 측정하는 광학부품이 수차(Aberration)를 가지고 있을 때 파면오차는 식(2)로 표현되는 수차 다항식(Aberration Polynomial)으로 나타낼 수 있다. 식(2)

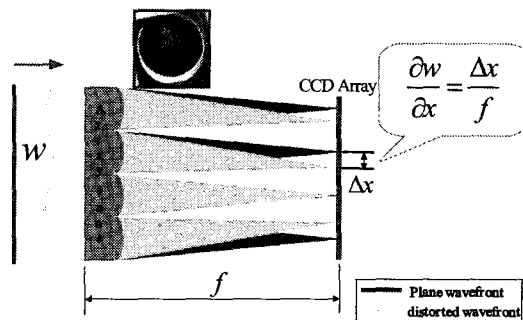


Fig. 2 Method of Shach-Hartmann test

는 광학적으로 의미를 가지는 수차 항목들의 표현이며 이러한 계수들은 광학 부품의 성능을 표현하는데 중요한 항목이며, 다항식을 확장해서 더욱 정밀한 파면의 형상을 얻을 수 있다.

$$W(x, y) = a_1(x^2 + y^2)^2 + a_2y(x^2 + y^2) + a_3(x^2 + 3y^2) + a_4(x^2 + y^2) + a_5y + a_6x + a_7 \quad (2)$$

여기서,

- a_1 : Spherical coefficient (구면 수차)
- a_2 : Coma coefficient (코마 수차)
- a_3 : Astigmatism coefficient (비점 수차)
- a_4 : Defocusing coefficient (탈 초점)
- a_5 : Tilt in the X-axis
- a_6 : Tilt in the Y-axis
- a_7 : Constant or piston term.

3. Shach-Hartmann 테스트 장치 구성

본 연구에서는 Fig.3과 같이 오목 반사거울을 측정 대상으로 하는 Hartmann 테스트 장치를 구성하였다. 레이저 광원으로부터 광선이 공간 필터(spatial filter)와 Collimator를 통과 하면서 노이즈가 제거되어 평면 광으로 만들어지고, Beam Splitter를 통과한다. Beam Splitter와 Condensing 렌즈를 통과한 광선은 테스트 면에서 반사되어 다시 Condensing 렌즈를 거쳐 Beam Splitter를 지나 Array 렌즈를 통과하여 CCD 화면에 맺히게 된다. CCD 화면에 맺힌 영상을 컴퓨터를 이용한 영상 처리와 분석 알고리즘을 적용하여 각 수차항의 계수를 구하여 파면 형상을 구한다. CCD 카메라

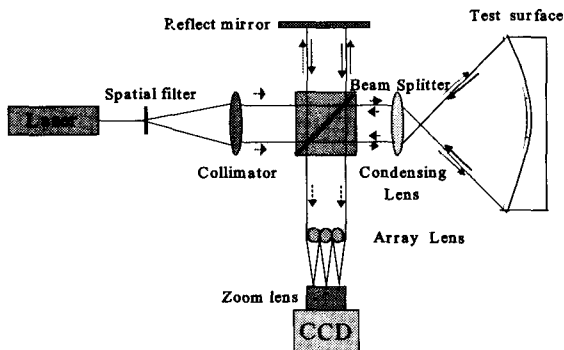
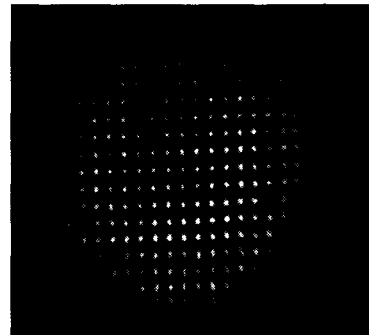
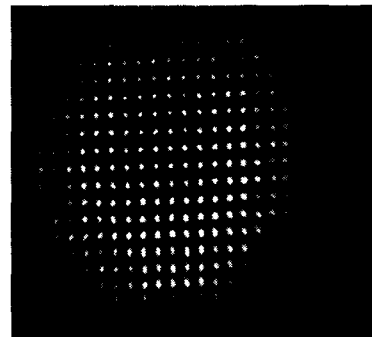


Fig.3 Configuration of the Shach-Hartmann test

영향을 줄 수 있는 데 이 영향을 제거하기 위해 렌즈 Relay 렌즈가 가지는 수차는 측정 결과에 중요한 Array의 배치 간격을 다음과 같이 보정하였다. Collimator를 통과하여 만들어진 평면광이 Beam Splitter에서 반사되는 오른쪽에 높은 정밀도를 가지는 평면거울을 두어 반사되는 평면파를 렌즈 Array에 통과시켰다. Array 렌즈의 초점이 Relay 렌즈를 통과하여 CCD 화면에 맺히는 초점의 위치에는 Relay 렌즈 수차의 영향이 포함되어있다. 그러므로 이 위치를 기준위치로 하면 측정 면을 거친 파면 역시 Relay 렌즈를 거치게 되므로 동일한 Relay 렌즈 수차의 영향을 받게된다. 이 두 영상을 이용하여 편위량을 구하면 CCD 카메라 Relay 렌즈 수차의 영향을 제거할 수 있다. Fig.4(a)는 Shach-Hartmann 테스트 구성장치를 이용하여 얻어진 초점의 기준 위치를 획득한 영상을 보여주며, Fig.4(b)는 측정 대상인 오목 거울에 반사된 파면을 렌즈 Array에 통과 시켜 얻은 기준 초점 위치에서 편위된(displaced) 영상이 된다.



(a) Reference



(b) Displaced

Fig.4 CCD image of measured spots using the Shach-Hartmann test method

4. 측정 데이터 분석 및 오차함수

Shach-Hartmann 테스트 구성장치에서 얻은 영상을 (Fig4) 이진화 디지털 영상처리를 통하여 각 초점의 중심위치를 구한 다음 편위량 Δx , Δy 를 구한다. 식(1)의 결과로부터 파면을 재구성하는 방법은 적분하는 방법과 근사화(Fitting)하는 방법이 일반적으로 적용될 수 있다. 본 연구에서는 초점의 기준위치로부터 편위된 양 Δx , Δy 와 (1)식의 미분 연산에 의하여 수차 다항식 $W(x,y)$ 의 각 계수들의 값을 최소 자승법 (Least Squares Method)을 적용하여 파면의 형상을 다음과 같이 재구성하였다. 식(2)를 아래와 같이 쓰고,

$$W(x, y) = \sum_{n=1}^N a_n P_n(x, y) \quad (3)$$

다시 식(3)에 대하여 미분연산을 수행하면,

$$\frac{\partial W_i}{\partial x} = \sum_{n=2}^N a_n \frac{\partial P_{ni}}{\partial x} = \frac{\Delta x_i}{f} \quad (4)$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial y} = \sum_{n=2}^N a_n \frac{\partial P_{ni}}{\partial y} = \frac{\Delta y_i}{f} \quad (5)$$

여기서 N은 각 계수항의 개수이며 a_n 은 각 계수들을 P_{ni} 는 다항식을 나타낸다. 따라서 오차함수 $e(a_n)$ 은 식 (6)으로 표현된다.

$$e(a_n) = \sum_{i=1}^I \left[\left(\frac{\Delta x_i}{f} - \sum_{n=2}^N a_n \frac{\partial P_{ni}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y_i}{f} - \sum_{n=2}^N a_n \frac{\partial P_{ni}}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (6)$$

여기서 I는 측정점의 수이며 위의 오차를 계수 a_n 에 대하여 식(7,8)과 같이 최소화하여 각 계수를 구한다.

$$\frac{\partial e(a_n)}{\partial a_n} = \sum_{i=1}^I \left[2 \left(\frac{\Delta x_i}{f} - \sum_{n=2}^N a_n \frac{\partial P_{ni}}{\partial x} \right) \frac{\partial P_{ni}}{\partial x} + 2 \left(\frac{\Delta y_i}{f} - \sum_{n=2}^N a_n \frac{\partial P_{ni}}{\partial y} \right) \frac{\partial P_{ni}}{\partial y} \right] = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{n=2}^N a_n \left[\sum_{i=1}^I \frac{\partial P_{ni}}{\partial x} \frac{\partial P_{ni}}{\partial x} + \frac{\partial P_{ni}}{\partial y} \frac{\partial P_{ni}}{\partial y} \right] = \sum_{i=1}^I \left(\frac{\Delta x_i}{f} \frac{\partial P_{ni}}{\partial x} + \frac{\Delta y_i}{f} \frac{\partial P_{ni}}{\partial y} \right) \quad (8)$$

위의 식들을 행렬의 형태로 표현하면 식(9)와 같다.

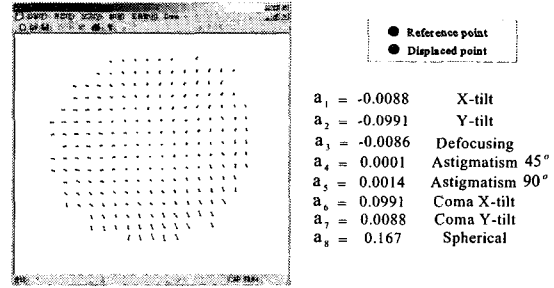
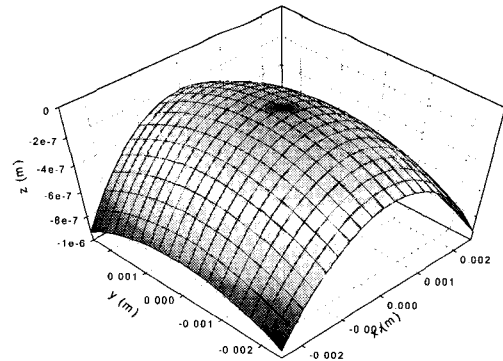


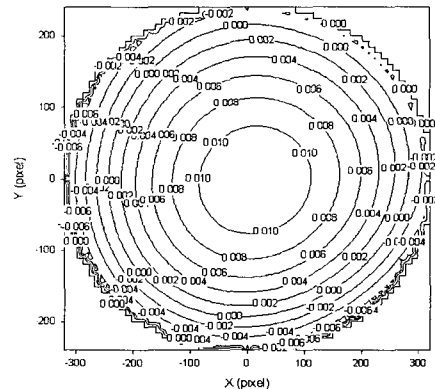
Fig.5 Focusing position display and calculation of polynomial constants

$$\Phi \Phi^T \vec{a} \quad (9)$$

여기서 Φ 는 $(2I) \times (N)$ Matrix, \vec{a} 는 $(2I) \times (1)$ Matrix의 Column vector이고, \vec{a} 는 $(N) \times (1)$ Matrix



(a) 3D error



(b) Error contour

Fig.6 Measured error profile using Hartmann test

의 Column vector이다. 위의 식들에 의해서 구하고자 하는 \vec{a} 는 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{a} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \vec{d} \quad (10)$$

Fig.5는 CCD 카메라를 통하여 얻은 영상 Fig.5를 이용하여 구한 초점의 위치를 나타내었으며 오른쪽에 앞에서 설명한 알고리즘을 적용하여 구한 수차 다항식의 계수가 계산되었다. Fig.6은 Hartmann 테스트 장치에서 측정된 포물면경의 오차 형상을 보여준다.

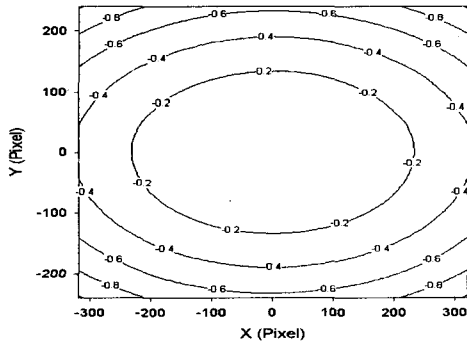
5. OMM 장치 실험 및 정밀도 분석

본 연구에 사용된 Shach-Hartmann 테스트 장치의 정밀도를 평가하기 위하여 직경 100 mm의 구면형상을 가지는 표준 시편을 상용 Fizeau 간섭계(Wyko 6000)의 측정 결과와 비교하였다. Table 1에 Fizeau 간섭계에서 측정한 수차계수와 Hartmann 테스트에서

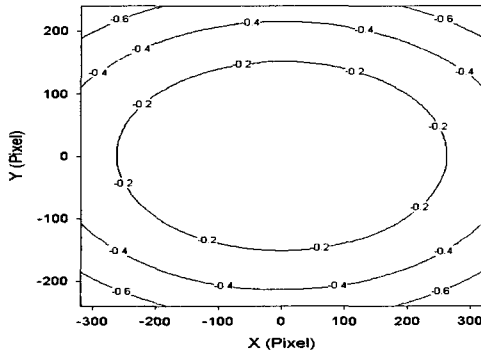
Table 1 Measured wavefront aberration with the comparison of Wyko6000 interferometer

Aberration	Wyko6000	Hartmann test
Spherical	0.113	0.214
Coma	0.031	0.6329
Astigmatism	-0.037	-0.0028

측정한 수차계수의 값을 나타내었다. Fizeau 간섭계에 측정된 수차와 Hartmann 테스트 장치에서 측정된 값들을 정량적으로 직접 비교하기 어려우므로 식(1)에서 나타난 파면 함수와 측정된 계수를 이용하여 재구성된 파면오차를 비교하였다. 연마기용 OMM을 위하여 제작된 Shach-Hartmann 테스트 장치의 측정정밀도에 영향을 줄 수 있는 요인으로는 사용되는 광학 부품의 정밀도 즉 각 부품을 통과할 경우 파면의 왜곡 정도를 계산하여 측정정밀도를 예측하였다. Table 2에 장치구성에 사용한 광학부품의 사양을 표시하였다. 기준파면의 경로는 Beam splitter-기준거울-Beam splitter-렌즈 Array 순서로 기준파면의 왜곡 정도는 약 252 nm 가량이다. 마찬가지로 검사파면의 경로는 Beam splitter-Condensing 렌즈-검사면-Condensing 렌즈- Beam splitter-렌즈 Array 순서이며 검사파면의 왜곡 정도는 약 284 nm 가량이다. 따라서 측정오차의 범위는 기준파면에 대하여 32 nm ~ 536 nm 사이일 것으로 예상된다. Fig.7은 Wyko6000 간섭계에서 측정된 파면형상과 Shach-Hartmann 테스트 장치에서 측정된 파면의 contour 형상을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 매우 근사한 결과를 얻을 수 있었고 가장자리에서 약 200 nm P-V의 차이가 발생하였으며 이것은 앞에서 예측한 오차범위에 포함되는 결과이다. Fig.8은 본 연구에 사용된 광학식 기기상 측정을 위해 광학 유리 연마기계상에 설치할 수 있도록 제작된 Shach-Hartmann 테스트장치이다. 사용된 렌즈 Array는 48x48개가 0.25 mm 간격으로 배치된 것을 사용하였다.



(a) by Wyko6000 Fizeau interferometer

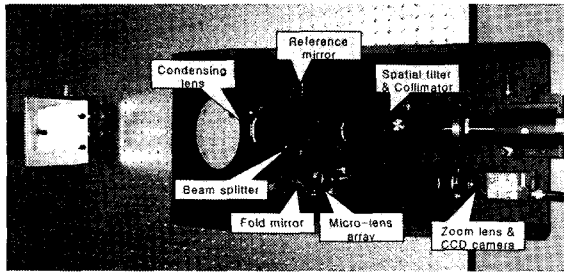


(b) by Shach-Hartmann test

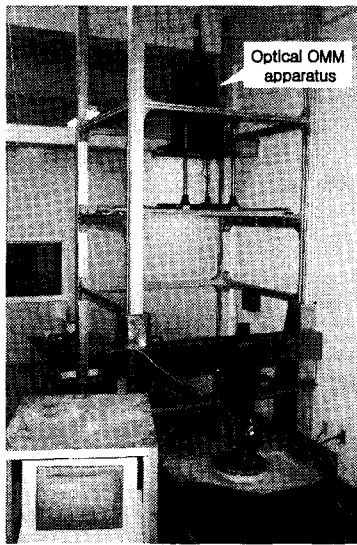
Fig.7 Comparison of measured parabolic mirror contour error (Unit : μm)

Table 2 Accuracy of optical elements for Hartmann test apparatus

Optical parts	Accuracy ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)
Beam Splitter	$\lambda / 10$
Reference Mirror	$\lambda / 10$
Condensing Lens	$\lambda / 8$



(a) on an optical table



(b) set-up on a polishing machine

Fig. 8 Hartmann test apparatus set-up for OMM

6. 결 론

온도, 습도 변화와 진동 등 외부 환경 변화에 강인한 Shach-Hartmann 테스트 장치를 구성하여 제작 및 측정이 어려운 비구면 광학 부품의 성능 평가를 위하여 측정기를 기계상에 직접 설치하여 가공중 소재를 공작기계에서 떼어내지 않고 직접 측정이 가능한 광학식 OMM 방법이 가능함을 보였다. 사용된 CCD 카메라 Relay 렌즈가 가지는 수차의 영향을 배제하기 위하여 정밀한 평면 거울을 이용하여 Array 렌즈 초점의 기준 위치를 보정하는 방법이 가능하였다.

구성된 Hartmann test 장치의 정밀도 성능 평가를 위하여 상용 Fizeau 간섭계인 Wyko 6000을 사용하여 직경 100 mm의 포물 반사면 형상을 가지는 표준시편에 대하여 측정결과를 비교하였으며 반사경 외곽에서

최대 200 nm의 차이를 나타내었다. 오차발생의 주된 요인으로는 Hartmann 테스트 장치에 사용된 Condensing 렌즈, Beam splitter 등의 광학 부품이 가지는 고유한 오차에 주로 기인하는 것으로 판단된다. 이 정도의 정밀도는 산업용 반도체 노광계의 반사경 등에서는 허용될 것으로 보이나, 향후 본 측정 장치의 정밀도를 향상시키기 위하여 각 hardware 부품들의 오차 발생 요인 및 software 보상 가능성에 대한 검토가 필요할 것이다.

본 연구에서 구성된 Shach-Hartmann 테스트 장치는 광학식 OMM 측정 장치로 사용되어 특히 대형 광학 부품의 경우 간섭계가 설치된 측정실로 이동 중 발생하는 번거로움과, 시간손실 및 재료의 변형(자중에 의한 굽힘 및 열변형)으로부터 안정된 측정값을 제공하여 정밀 광학 부품의 제작이 가능하게 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-000-00262-0(2002))지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Daniel Malacara, Optical Shop Testing - Second Edition, Wiley Interscience. 1983
2. 이호재, "일반화된 론기법을 이용한 비구면 측정," 한국 과학 기술원 박사 학위 논문, 1999
3. 양주룡, 홍경희, 박정덕, "Hartmann Test 방법에 의한 광학 거울의 성능 평가" pp 54-59, 새 물리, 1984
4. N. Takeuchi, T.Mitsuhashi, M. Itoh and T.Yatagai, "Wavefront distortion measurement of a SR extraction mirror for the beam profile monitor using Shach-Hartmann method," IEEE. pp 859-861, 1998
5. Tsuguo KOHNO, Takashi SUAUKI, Ryoji WATANABE and Yasuhiro SOTA, "In-process measurement of concave mirror by fiber grating Line-Hartmann test," SPIE VOL. 2778, pp 1158-1159, 1996
6. Cao Genuri and Yu Xing, "Study on the Hartmann-Shach wavefront sensor," SPIE VOL. 1752, pp 112-119, 1992