

〈 논문 〉

## On-Machine 구면기준 Shack-Hartmann 장치를 이용한 대형 반사경의 가공 정밀도 연구

홍정희\* · 오창진\* · 이응석\*\* · 김옥현†  
(2004년 11월 9일 접수, 2005년 3월 21일 심사완료)

### Machining Accuracy for Large Optical Mirror using On-Machine Spherical Surface Referenced Shack-Hartmann System

Jong Hui Hong, Chang Jin Oh, Eung Suk Lee and Ock Hyn Kim

**Key Words:** Concave Mirror(반사경), Corrective Polishing(수정연마), Interferometry(간섭계방법),  
On-Machine Measurement(기기상 측정), Shack-Hartmann(샤크-하트만)

#### Abstract

A spherical surface referenced Shack-Hartmann method is studied for inspecting machining accuracy of large concave mirror. This method is so strong to the vibration environment for using as an on-machine inspection system during polishing process of large optics comparing with the interferometry. The measuring uncertainty of the system is shown as less than p-v 150 nm. On-machine measured surface profile data with this method is used for feed back control of the polishing time or depth to improve the surface profile accuracy of large concave mirror. Also, the spherical surface referenced Shack-Hartmann method is useful for measuring aspheric such as parabolic or hyperbolic surface profile, comparing that the interferometry needs a special null lens, which is to be a reference and difficult to fabricate.

#### 기호설명

- x : x 방향 초점위치
- y : y 방향 초점위치
- $\Delta x$  : x 방향 편위
- $\Delta y$  : y 방향 편위
- w : 파면 형상
- f : 렌즈 어레이 초점거리

#### 1. 서론

현대의 광학기술은 정보통신분야의 고속화 및

고집적화의 핵심을 이루고 있는 기술이며 따라서 기존의 구면 광학 부품을 대신하여 상대적으로 성능이 우수한 비구면 광학 부품(aspheric lens)의 사용이 증가하고 있다. 비구면 형상의 경우 결함이 없는 대신 구면 형상에 비하여 제작이 어렵고 성능 평가에 어려움이 있다. 일반적으로 광학 부품의 정밀한 측정을 위해서는 간섭계 방법(interferometry)을 사용하지만 측정 가능한 광학 부품의 크기가 비교적 소형이고 주로 구면형상에만 적합하고, 비구면의 경우는 특별한 기준 렌즈(null lens)를 필요로 하는 단점이 있다. 간섭계는 기준파면과 측정파면의 광경로차에 의한 위상차로 인하여 발생하는 간섭무늬를 해석하여 측정하는 원리인 반면 Hartmann 방법은 측정파면의 형상에 따라 변화하는 파면의 기울기를 측정하여 파면의 형상을 알아내는 기하학적인 원리를 적용하는 방법이다.<sup>(1)</sup> 간섭계는 정밀한 평가를 목적으로 하는 곳에 적합하지만 측정 원리상 온도 및 습도의 변화, 광경로상의 기류 변화, 외부 진동

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부  
E-mail : ohkim@cbnu.ac.kr

TEL : (043)261-2447 FAX : (043)263-2441

\* 충북대학교 대학원 기계공학부

\*\* 회원, 충북대학교 기계공학부

등 주위 환경의 영향에 매우 민감하게 영향을 받는데 반하여 Hartmann 방법은 간섭계 수준에 근접하는 높은 정밀도 구현이 가능하면서 비교적 주변 환경에 강인한 장점을 지니고 있다.

광학부품의 가공정밀도는 보통 1 $\mu$ m 이하의 오차를 가지며 일반 기계가공에서 이루기 어려운 정도이며 주로 가공이 쉬운 구면형상을 연마 공정을 통하여 제작한다. 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(on-machine measurement, OMM) 가공오차를 수정하는 기법이 시도되고 있다.

본 연구에서는 수정 연마를 위해 기계상에서 소재를 떼어내지 않고 직접 측정하여 수정 가공에 사용할 수 있는 오차정보를 제공할 수 있는 광학식 OMM 장치의 측정 정밀도 향상을 위한 연구하였으며 이 장치를 사용하여 획득한 형상 오차 정보를 이용하여 대형 광학 반사경의 수정 가공 연마에 적용하였다.

## 2. 구면 기준 Shack-Hartmann 장치 구성

### 2.1 측정원리

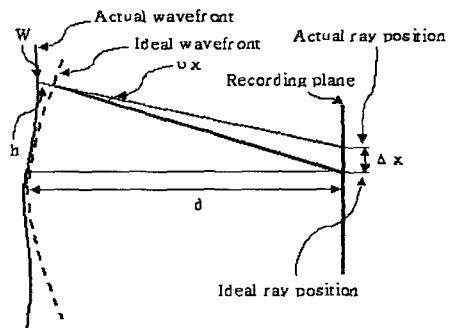
고전적인 Hartmann 방법은 Fig. 1(a)와 같이 측정하고자 하는 광학 부품에 일정한 간격으로 구멍이 나 있는 스크린을 위치시키고 빛을 비추어 광학부품 표면의 굴곡(h)에서 반사되는 빛이 스크린의 구멍을 통하여 되돌아 나와 감광판에 표시되는 위치를 측정하여 파면의 변화(d와의 편차)를 측정 하였다. 그러나 측정을 위한 스크린 제작 비용이 고가이며 새로운 광학부품을 측정할 때마다 스크린을 다시 제작하여야 하며 소형 광학부품의 측정에는 적합하지 않은 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 근래에는 파이버 grating이나 마이크로 어레이 렌즈를 사용한다. 기본 원리는 Fig. 1(b)와 같이 이상적인 파면에 대한 실제 파면의 광 경로 차이를 스크린을 사용하여 평면에 기록하고 편위차  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 를 측정하여

데이터를 분석하고 파면 형상을 재구성하는 것이다.<sup>(2,3)</sup> 스크린을 사용하여 측정하는 방법에서 발전한 것이 마이크로 렌즈 어레이를 사용하여 CCD 화면상에서 이미지를 얻는 Shack-Hartmann 방법이다. 측정원리는 대상 물체의 파면이 이상적인 경우 렌즈 어레이를 통과하면 렌즈 어레이에 따라 동일한 간격으로 CCD 화면에 초점들이 맺히게 되지만 자유 곡면을 가지고 있는 파면이 렌즈 어레이를 통과하면 파면의 기울기에 따라서 편향된 위치에 초점이 맺히게 되고 CCD 화면상에 맺힌 초점의 편위량과 파면의 기울기의 관계식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

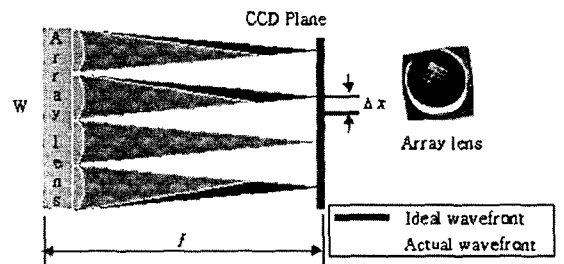
$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f}$$

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

여기서  $W(x, y)$ 는 파면의 형상을 정의하는 임의의 함수이고  $f$ 는 렌즈 어레이의 초점거리이다. 광학부품의 평가 방법은 광학 부품들을 통과한 파면의 형상을 근사한 구면 또는 평면을 기준으로 발생하는 상대적 편차를 구하고  $x, y$  각 방향에 대하여 편미분을 수행하고 각 초점에서의 기울기



(a) Geometric principle



(b) Modified method

Fig. 1 Principle of Hartmann surface measuring method

를 결정하는 과정을 통하여 파면의 오차함수를 최소자승법으로 계수 값을 구하고 파면의 형상을 재구성하여 형상 정밀도를 표현할 수 있다.

## 2.2 파면함수의 구성

광학부품 성능평가의 결과를 효과적으로 나타내기 위하여 파면의 데이터를 다항식으로 표현할 수 있다. Zernike 다항식(polynomial)은<sup>(1)</sup> 광학식 측정 방법에서 파면 수차를 표현할 수 있는 항들을 자체에 포함하고 있기 때문에 광학 부품 파면의 형상을 재구성하는데 사용된다.<sup>(1)</sup> Zernike 다항식은 필요에 따라  $x, y$ 좌표계를 이용한 단항식(monomial)의 형태로 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^i c_{ij} x^i y^{i-j} \quad (2)$$

여기서  $c_{i,j}$  : 단항식 계수이다. Shack-Hartmann 장치에서 측정된 광학 부품 파면의 초점의 데이터들은  $x, y$ 좌표로 구성되어 있기 때문에 Zernike 다항식을 사용하는 것보다는 단항식의 형태로 변형하여 사용하는 것이 계산과정이 편리하다. 단항식의 0 부터 8번째 항을 사용하여 광학면의 성능을 평가 할 수 있는 기본적인 수차 다항식으로 구성하여 광학 부품의 성능을 평가할 수 있으며 식 (3)과 같다.  $a_0 \sim a_8$ 의 각 항은 수차항의 계수들이다.

$$W(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3(2x^2 + 2y^2 - 1) + a_4(y^2 - x^2) + a_5(2xy) + a_6(3x^2y - 2y + 3y^3) + a_7(3x^3 + 3xy^2 - 2x) + a_8(1 - 6y^2 - 6x^2 + 6y^4 + 12x^2y^2 + 6x^4) \quad (3)$$

$a_0$  : constant or piston term

$a_1$  :  $x$ -tilt about the  $x$ -axis

$a_2$  :  $y$ -tilt about the  $y$ -axis

$a_3$  : defocusing coefficient

$a_4$  : astigmatism with axis at  $\pm 45^\circ$

$a_5$  : astigmatism with axis at  $0^\circ$  or  $90^\circ$

$a_6$  : coma &  $x$ -tilt

$a_7$  : coma &  $y$ -tilt

$a_8$  : spherical & focus

기준구면에 대한 기준초점과 측정 구면 반사경에 대한 렌즈 어레이 초점의 편위차를 각각  $\Delta x, \Delta y$ 로 표현한다. 식 (1)의 결과로부터 구면 반사경의 파면을 재구성하는 방법은 수치적분 하

는 방법과 근사화(fitting)하는 방법이 일반적으로 적용될 수 있다. 수치 적분하는 방법은 기준점  $W(0, 0)$ 을 중심으로  $x$ 축 방향과  $y$ 축 방향으로 각각 기울기  $\Delta x, \Delta y$ 를 가지고 있는 경우 두 가지 경로로 적분하는 것인데 각  $x, y$  좌표에 대하여  $x$  방향과  $y$  방향 대한 기울기를 각 사분면 단위로 계산하여  $W(x, y)$ 를 구하는 방법이다. 이 방법은 비교적 정확한 파면을 얻을 수 있으나 측정시에 오차가 발생하기 때문에 측정시에 오차가 누적되면 정확한 결과를 얻을 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하는 방법으로  $W(x, y)$ 를 미분하여 근사화하는 방법이 일반적으로 많이 적용되고 있다. 본 연구에서는 렌즈 어레이 초점의 기준위치로부터 편위된 양  $\Delta x, \Delta y$ 와 식 (1)의 미분 연산에 의하여 파면 방정식  $W(x, y)$ 의 계수들의 값을 최소화하는 최소자승법(least-squares method)을 적용하여 파면의 형상을 재구성하는 방법을 적용하였다. 파면 방정식  $W(x, y)$ 는 식 (4)로 표현될 수 있고

$$W(x, y) = \sum_{n=0}^N a_n P_n(x, y) \quad (4)$$

위의 식에 대하여  $x, y$ 의 성분에 대하여 각각 미분 연산을 수행하면 식 (5)을 유도 할 수 있다.

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

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

여기서  $N$ 은 각 계수항의 개수이며  $a_n$ 은 각 계수들을  $P_{ni}$ 는 다항식의 항을 나타낸다. 오차함수  $e^2(a_n)$ 은 아래의 식 (6)으로 표현된다.

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

여기서  $I$ 는 측정점수이다. 위의 오차 계수를 식 (7)과 같이  $a_n$ 에 대하여 최소화 시키는 방법으로 각 계수를 식 (8)을 이용하여 각 계수를 구한다.

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

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

$$= \sum_{i=1}^L \left( \frac{\Delta x_i}{f} \frac{\partial P_{ni}}{\partial x} + \frac{\Delta y_i}{f} \frac{\partial P_{ni}}{\partial y} \right)$$

위의 식들을 행렬식으로 표현하면 식 (9)와 같다.

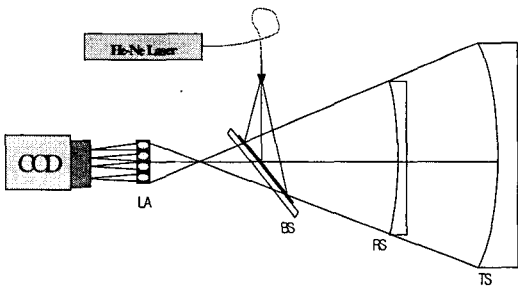
$$\Phi \vec{a} = [\Phi \Phi^T] \vec{a} \quad (9)$$

$\Phi$ 은  $(2L) \times (M)$ 의 행렬,  $\vec{a}$ 는  $(2L) \times (1)$  행렬의 열 벡터(column vector),  $\vec{a}$ 는  $(M) \times (1)$  행렬의 열 벡터이다. 위의 식들에 의해서 구하고자 하는 파면 방정식의 계수  $\vec{a}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

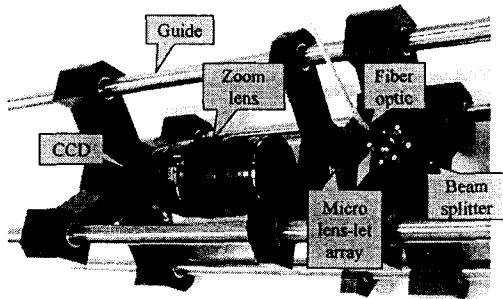
### 2.3 장치 구성

Fig. 2(a)와 같이 오목 반사거울을 측정 대상으로 하는 구면기준 Shack-Hartmann 장치를 본 연구에서 구성하였고 Fig. 2(b)에 제작된 장치의 사진을 나타내었다. Fig. 2에서 기준구면은 마이크로 어레이 렌즈 초점의 기준 위치를 얻기 위하여



LA : Micro lens-let array  
BS : Beam splitter  
TS : Test spherical reflex mirror  
RS : Reference spherical mirror

(a)



(b)

Fig. 2 Configuration of the spherical surface referenced Shack-Hartmann measuring system

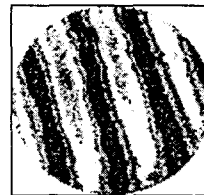
사용하며 실제 측정에서는 제거한 다음 검사면으로 부터 입사되는 파면을 마이크로 어레이 렌즈를 통과시켜 초점의 위치를 획득하여 사용한다. 일반적으로 구면은 정밀가공이 수월하여 기준면으로써의 정밀도 확보가 용이한 장점이 있다. 또한 사용되는 광학부품도 광섬유를 광원으로 사용하므로 종전에 사용하던 콘덴싱(condensing) 렌즈 및 Collimator 등을 사용하지 않으므로 사용되는 광학 부품의 정밀도에 의한 파면 왜곡을 줄일 수 있다.

### 3. 정밀도 검증

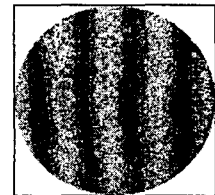
제작된 측정 장치의 정밀도를 확인하기 위하여 직경 100mm의 구면형상을 가지는 기준구면과 표준시편을 상용 Fizeau 간섭계인 Wyko6000 간섭계(Fizeau interferometer)를 이용하여 비교 측정하였다. Fig. 3(a)는 편위량을 구하기 위한 기준면으로 사용된 렌즈의 interferogram(간섭무늬)이며 Fig. 3(b)는 본 측정 장치의 정밀도를 확인하기 위해 비교대상으로 사용된 렌즈의 간섭무늬이다. Fig. 4(a)는 본 연구에서 제작된 구면기준 Shack-Hartmann 장치로 얻은 기준구면과 표준시편의 측정점 위치를 나타내었다. 식 (2)로 파면의 형상은

Table 1 Optics specification for Shack-Hartmann system

Optics	Dia. (mm)	Focal length (mm)	Accuracy ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ )
Beam splitter	50.8		$\lambda/10$
Micro 어레이 lens (48x48, 0.25mm pitch)	25.4	19	$\lambda/4$
Reflect mirror	25.4		$\lambda/20$



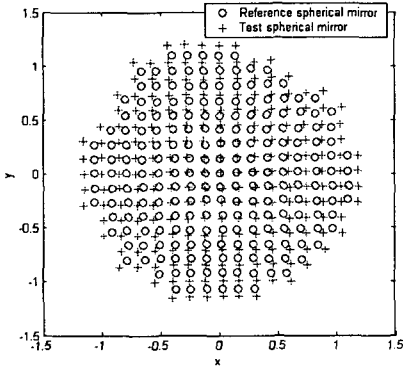
(a) Reference lens



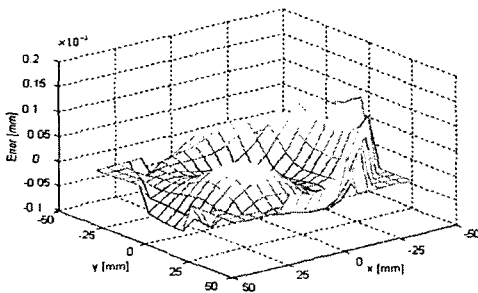
(b) Target lens

Fig. 3 Interferograms measured by Wyko6000 Fizeau interferometer

Fig. 4(b)와 같으며 각각의 수치를 비교해보면 Table 2와 같다. 비교측정결과 제작된 Shack-Hartmann 장치의 정밀도는 Table 2에서 기준면의 파면오차를 감안하면 최대 p-v 82nm, rms 24nm를 가지는 것으로 나타났다.



(a) Spot positions



(b) 3D error deviation

Fig. 4 Compared error with reference and sample lens using the spherical surface referenced Shack-Hartmann method

Table 2 Accuracy result for the reference spherical surface and the target surface by the Wyko6000 Interferometer and Shack-Hartmann method

Primary Aberration & Wavefront Error	Wyko6000 Interferometer		Hartmann Method
	Reference	Target	Target
Spherical	0.039	0.053	0.013
Astigmatism	0.026	0.037	0.010
Coma	0.017	0.022	0.055
p-v	0.068	0.076	0.15
rms	0.010	0.012	0.034

#### 4. 대구경 렌즈 가공 및 측정

광학 부품은 그 형상 정밀도와 표면 거칠기 수준이 수  $\mu\text{m}$ 에서 수  $\text{nm}$ 에 이르는 등 다양하며 최종적으로 연마에 의해 가공이 마무리 된다. 연마 정밀도는 연마제의 량이나 공구의 회전속도, 공구와 소재간의 압력 등의 조건에 따라 그 제거 형상이 영향을 받게 된다. 또한 그 제거되는 량이 미세하기 때문에 연마의 전단계인 연삭 (grinding) 형상가공 또한 중요하다. 예상되는 축대칭 형상오차의 경우 테이블을 회전시키고 공구를 테이블 직경방향으로 왕복시키며 가공하는 거친 연마방법을 사용한다. 대형 반사경 가공을 위하여 Fig. 5에 보인 것과 같이 가공공정을 설정한다. Fig. 6은 연삭 후 곡률을 구면계이지 (spherometer)를 사용하여 검사하는 사진이며 이때 형상정밀도는  $\pm 5 \mu\text{m}$  정도로 가공한다.

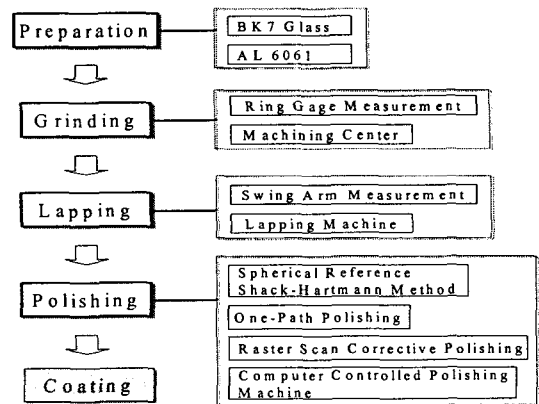


Fig. 5 Manufacturing process for large diameter optical mirror

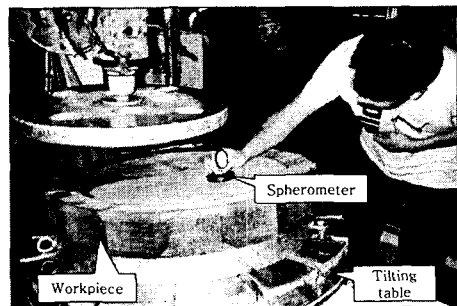
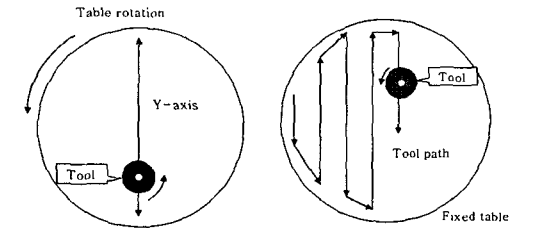


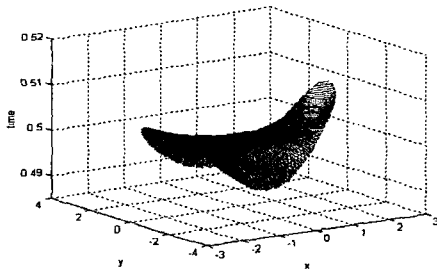
Fig. 6 Measurement of radius of curvature after grinding

연마에 소요되는 시간 절약을 위해 lapping 단계를 거치게 되며 형상정도를  $\pm 2 \mu\text{m}$ 까지 맞추게 된다. 본 가공의 마지막인 연마 단계에서는 광학면을 연기 위한 거친 연마(rough polishing) 및 광학면의 비축대칭 형상 오차를 제거하기 위한 정밀 연마가 수행된다. 본 연구에서는 최종 마무리 연마작업으로 경면 형상 수정을 위해 공구를 가공면 전체 위치에 따라 직교형 점을 설정하고 그 점들을 연결하여 Fig. 7과 같이 공구 경로를 생성한 후 체제시간을 달리하여 가공하는 수정연마(corrective polishing) 방법을 사용한다. 수정 연마를 위해서는 필수적인 기기상 측정 장치(OMM)로 본 연구에서 개발된 구면기준 Shack-Hartmann 장치가 사용된다. Fig. 7(b)에 연마 경로와 그 경로에 따른 가공 체제시간의 예를 보여준다. Fig. 8은 대형 경면가공을 위한 연마 가공기 및 기기상에 설치된 Hartmann 장치를 보여준다. Lapping 가공 후 반복적으로 연마를 수행하여 형상정밀도가 거울 반사면이 되면 Shack-Hartmann 장치를 이용하여 반복 연마 중간에 기기상 감사를 수행한다. 거친 연마에 사용된 공구는 직경 200mm, 초점거리 3056mm이며 축방향 이송거리는 640mm 이다.

가공시간은 약 20시간이었으며, Fig. 9와 같은 양호한 반사면을 얻을 수 있었다. 1차적으로 단일 경로연마방식(one-path polishing)을 반복적으로 4회 수행하여 p-v  $0.9 \mu\text{m}$ 의 형상정밀도결과를 얻었다. 형상정밀도는 Table 3에서와 같이 비점수차(astigmatism)의 영향이 크게 나타났으며, 단일 경로연마 방법으로는 형상 수정이 어려운 것으로 판단되었다.



(a) Tool scan path for axis symmetric and non-axis symmetric



(b) Polishing time for surface profile error

Fig. 7 Corrective polishing method

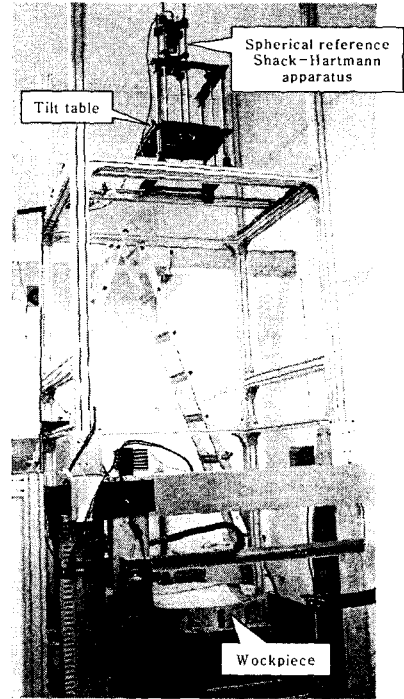
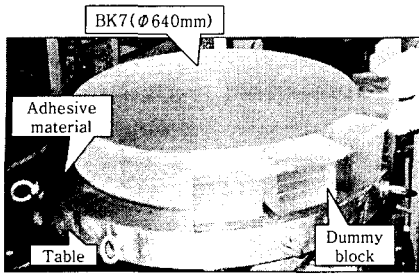


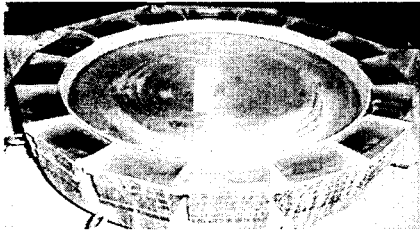
Fig. 8 Large optics polishing machine with Shack-Hartmann on-machine measuring system

Table 3 Measured aberrations and wavefront error by spherical reference Shack-Hartmann method ( $\Phi 640 \text{ mm}$  concave mirror)

Items	Astigmatism	Coma	p-v ( $\mu\text{m}$ )	rms ( $\mu\text{m}$ )
4th one-path Polishing	0.570	0.055	0.9	0.091
Corrective Polishing	0.371	0.045	0.472	0.043

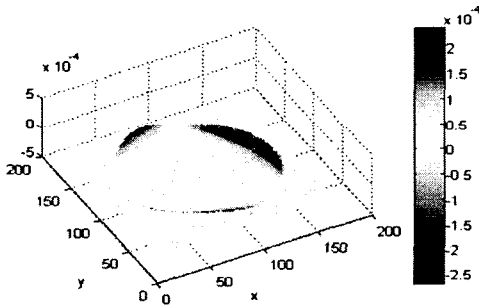


(a) Preparation of work piece for polishing

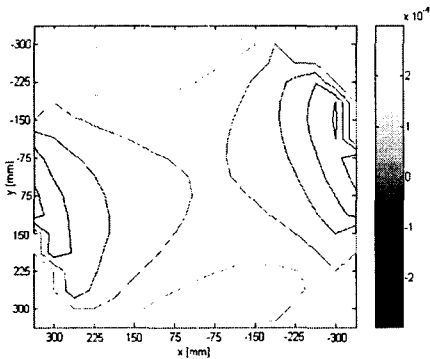


(b) After polishing

Fig. 9 Before and after polishing of 640 mm diameter concave mirror



(a) 3D profile error (Φ150 mm)



(b) Contour error (Φ640 mm)

Fig. 10 Surface profile error measured by Shack-Hartmann method for a large concave mirror

비점수차를 최소화하기 위하여 수정연마 가공이 실시되었으며, 5mm 간격으로 수정 가공 시간은 약 4시간이 소요되었다. Fig. 10은 수정연마 후 Hartmann 방법으로 측정된 것이며, Table 3에서 보면 잔류 형상오차는 전체적으로 약 50% 감소한 것을 확인 할 수 있었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 온도, 습도 변화와 진동 등의 외부 환경 변화에 대하여 간섭계에 비하여 상대적으로 강인한 Hartmann 방법을 적용하여 제작 및 측정이 어려운 대형 광학 부품의 성능을 평가할 수 있는 기기상 광학식 측정 장치를 연구하였으며, 광학 경면을 얻기 위해 단일경로연마방법과 수정가공을 위한 수정연마 방법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구면 기준 Shack-Hartmann 장치는 기존의 평면기준 Hartmann 장치로서 광학계를 복잡하게 구성해야하는 단점을 제거하여 측정정밀도를 향상이 가능하다.

(2) 제작된 측정 장치의 성능을 상용 Fizeau 간섭계를 사용하여 구면 반사경에 대하여 측정 결과를 비교하였으며 최대 p-v 0.15 μm 정도의 측정 불확도를 갖는 것을 알 수 있었으며, 정밀한 기준 구면을 사용하여 보다 개선 될 것으로 보인다.

(3) 본 연구에서 사용된 Hartmann 방법은 샘플링된 데이터로부터 곡면을 근사화 하므로 형상측정에 대한 데이터로는 적합하지만 광학면 상태를 보여주는 표면 거칠기 측정값을 제공하지는 못한다.

(4) 재래식 방법에 의한 가공이 어려운 대형 광학계에 대해 기기상에 설치할 수 있는 구면기준 Shack-Hartmann 장치를 사용하여 가공면에 대한 체제시간을 산출하고, 수정연마 방법에 적용하여 형상정밀도 p-v : 0.5 μm 정도로 Φ600mm 급 대형 광학 렌즈 가공이 가능함을 보였다.

(5) 본 연구에 사용된 구면기준 Hartmann 방법으로 구면에 대한 편차 데이터를 이용하여 비구면 계수 K값을 측정하는 연구에 도움이 될 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) Daniel Malacara, 1992, *Optical Shop Testing - Second Edition*, Wiley Interscience.
- (2) Rajiv Bhatia, Adriana Cinani and Piero Rafanelli, 1994, "Results from the Shack-Hartmann Analysis of the 3.5m Primary Mirror of the Galileo telescope," *SPIE*, pp .68~78.
- (3) Johannes Pfund, Norbert Lindlein and Johannes Schwider, 1998, "Misalignment Effects of the Shack-Hartmann Sensor," *APPLIED OPTICS*/Vol. 37, pp. 22~27.
- (4) Takeuchi, N., Mitsuhashi, T., Itoh, M. and Yatagai, T., 1998, "Wavefront Distortion Measurement of a SR Extraction Mirror for the Beam Profile Monitor using Shack-Hartmann Method," *IEEE*, pp. 859~861.
- (5) Walker, D.D., Freeman, R., McCavana, G., Morton, R., Riley, D., Simms, J., Brooks, D. and King, A., 2001, *Proc. Large Lenses and Mirrors Conference*, UCL, pub. *SPIE*, pp. 106~111.
- (6) Bingham, R.G., Walker, D.D., Kim, D.-H., Brooks, D., Freeman, R. and Riley, D., 2000, "A Novel Automated Process for Aspheric Surfaces," *Proc. SPIE 45th Annual Meeting, the International Symposium on Optical Science and Technology*, Vol. 4093; pp. 445~450.