한국공작기계학회 2002 추계학술대회 논문집 pp. 474~480

하트만 방법에 의한 광학면의 기상측정
On-Machine Measurement of an Optical Surface by Hartmann Test

김용관*, 오창진*, 이응석**, 김옥현**
* 충북 대학교 기계공학과 대학원
** 충북대학교 기계공학부

Yong-Kwan Kim*, Chang-Jin Oh*, Eung-Suk Lee**, Ock-Hyun Kim**
* Chungbuk National Univ. Mechanical Engineering, Graduate school
** Chungbuk National Univ. School of Mechanical Engineering

Abstract

Aspheric optical lenses and mirrors are widely used in recent. It is more difficult to manufacture and measure the aspherical optics compared to conventional spherical ones. The interferometric optical test is common for the measurement of spherical optical surface. But the application of the interferometry to the measurement of aspheric surface is difficult because it needs a precise null corrector and very careful environmental conditions such as keeping constant temperature, humidity, atmospheric pressure and vibrations.

To enhance productivity of optics manufacturing on-machine measurement and correction has been developed in this study. For practical applications, robustness of the measurement method to environments is more important. For the purpose an optical OMM(On-Machine Measurement) system has been developed using Shack-Hartmann test which has robustness to the environment. The wavefront has been reconstructed from the measured data using the primary aberration polynomial function by least square fitting. The measured result of the developed OMM system gives the maximum deviation only in 200 nm from the result measured by a commercial Fizeau interferometer Wyko 6000.

Ⅰ. 서 론

정보화 시대인 현대에서 정보의 효과적인 저장과 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 간섭계를 사용하지만 측정 가능한 광학 부품의 크기가 비교적 소형이고 구면형상에 적합하다.

간섭계는 기준파면과 측정파면의 광경로차에 의한 위상차로 인하여 발생하는 간섭무늬를 해석하여 측정하는 원리이고 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 주변환경에 강인한 장점을 지니고 있다.

광학부품의 가공정밀도는 보통 1 ㎛ 이하의 오차를 가지며 일반 기계가공에서 이루기 어려운 정도이며 주로 가공이 쉬운 구면형상을 폴리싱 공정을 통하여 제작하고있다. 그러나 성능이 우수한 비구면 형상을 가지는 광학 부품은 평가가 어려울 뿐만 아니라 제작 또한 시간이 많이 소요되고 주로 숙련공의 수작업에 의해 이루어 지고있어 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.

본 연구에서는 수정 폴리싱을 위해 기계상에서 소재를 떼어내지 않고 직접 측정하여 수정 가공에 사용할 수 있는 오차정보를 제공할 수 있는 광학식 OMM (On-Machine Measurement)장치를 연구하였다.

II . Hartmann 테스트의 원리

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 큰비용이 소용되고 소형 광학부품의 측정에는 적합하지 않은 단점이 있다.

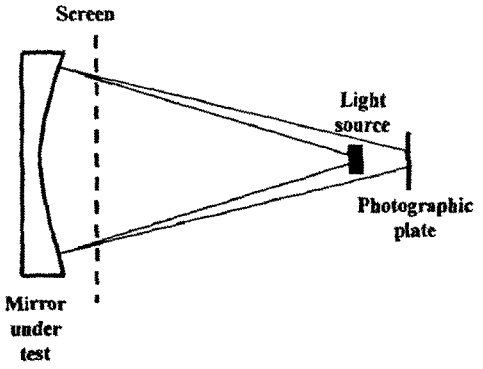

Fig. 1 Hartmann test setup

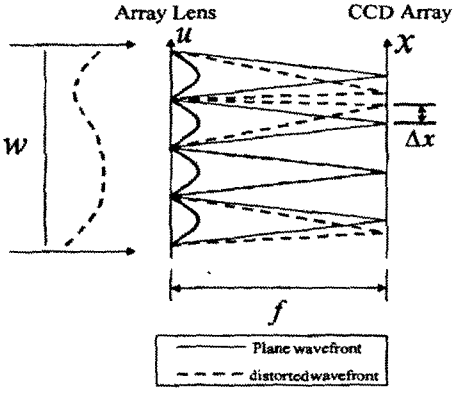

Fig. 2 Principle of Shack-Hartmann Test

근래에는 Fig. 2와 같이 마이크로 렌즈 어레이 (Micro-Lens Array)를 사용하여 측정파면의 기울기 변화에 대한 초점의 위치 변화를 측정하여 파면의 형상을 알아내는 Shack-Hartmann 테스트 방법이 사용된다.

측정 원리는 Fig. 2와 같이 파면이 평면인 경우 렌즈 어레이를 통과하면은 렌즈 어레이와 동일한 간격

으로 CCD 화면에 초점이 맺힌다. 그러나 평면이 아닌 곡면의 파면은 렌즈 어레이를 통과하면 파면의 기울기에 따라 편향된 위치에 초점이 맺히게 된다.

CCD 화면상에 맺힌 초점의 편위량과 파면의 기울기의 관계는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial W(x,y)}{\partial x} = \frac{\triangle x}{f} \qquad (1)$$
$$\frac{\partial W(x,y)}{\partial y} = \frac{\triangle y}{f}$$

여기서 W(x,y)는 파면의 형상을 정의하는 함수 이고 f는 렌즈 어레이의 초점거리이다.

광학부품의 평가는 평가하려는 광학부품을 통과한 파면의 형상을 근사한 구면 또는 평면을 기준으로 발생하는 편차를 구하여 이루어지게 되는데 이렇게 측정하려는 파면오차를 표현하는데 있어 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. 아래의 (2)식은 광학적으로 의미를 가지는 기본적인 수차의 표현이며 이러한 계수들은 광학 부품의 성능을 표현하는데 중요한 항목이다. 그리고 다항식을 확장해서 더욱 정밀한 파면의 형상을 얻을 수 있다.

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

a_1 : 구면 수차(spherical coefficient)

a_2 : 코마 수차(coma coefficient)

a_3 : 비점 수차(astigmatism coefficient)

a_4 : 탈 초점(defocusing coefficient)

a_5 : x방향 기울어짐(tilt about the x axis)

a_6 : y방향 기울어짐(tilt about the y axis)

a_7 : 피스톤 (constant or piston term)

III. Hartmann 테스트 실험 장치의 구성

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 오목 반사거울을 측정 대상으로 하는 Hartmann 테스트 장치를 구성하였다.

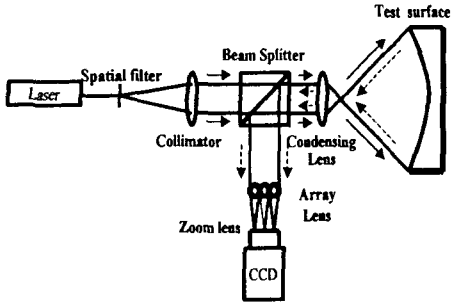

Fig. 3 Configuration of the Hartmann Test

레이저 광원으로부터 광선이 공간 필터(spatial filter)와 콜리메이터(collimator)를 통과 하면서 노이즈가 제거되어 평행광으로 만들어지고, 빔 스플리터(beam splitter)를 통과한다. 빔 스플리터와 콘덴싱 렌즈를 통과한 광선은 테스트 면에 맞고 반사되어 다시 콘덴싱 렌즈를 거쳐 빔 스플리터를 지나 어레이 렌즈를 통과하여 CCD 화면에 맺히게 된다.

CCD 화면에 맺힌 영상을 컴퓨터를 이용한 영상 처리와 분석 알고리즘을 적용하여 각 수차항의 계수를 구하여 파면 형상을 구한다.

Fig. 4에 광학 테이블에서 구현된 Hartmann 테스트 장치가 나와있다.

렌즈 어레이는 48x48개가 0.25 mm 간격으로 배치된 것을 사용하였다.

CCD 카메라 릴레이 렌즈가 가지는 수차는 측정 결과에 중요한 영향을 줄 수 있는 데 이 영향을 제거하기 위해 렌즈 어레이의 배치 간격을 다음과 같이 보정하였다.

콜리메이터를 통과하여 만들어진 평면광이 빔 스플리터에서 반사되는 오른쪽에 높은 정밀도를 가지는 평면거울을 두어 반사되는 평면파를 렌즈 어레이에 통과시켰다. 어레이 렌즈의 초점이 릴레이 렌즈를 통과하여 CCD 화면에 맺히는 초점의 위치에는 릴레이 렌즈 수차의 영향이 포함되어있다. 그러므로 이 위치를 기준위치로 하면 측정 면을 거친 파면 역시 릴레이 렌즈를 거치게 되므로 동일한 릴레이 렌즈 수차의

영향을 받게된다. 이 두 영상을 이용하여 편위량을 구하면 CCD 카메라 릴레이렌즈 수차의 영향을 제거할 수 있다.

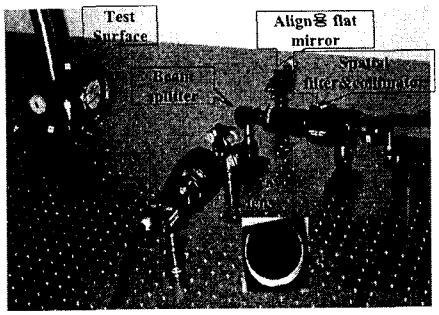

Fig. 4 Photograph of the Hartmann test apparatus on optical table

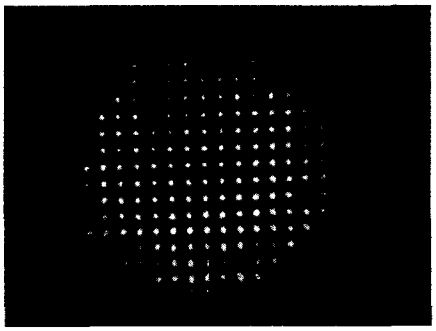

Fig. 5 CCD image of the reference spot

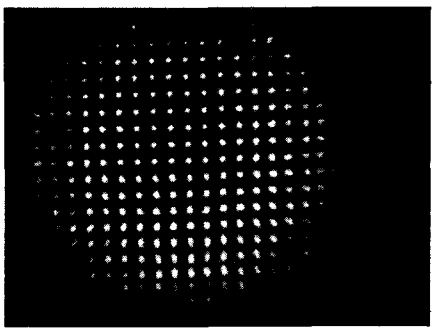

Fig. 6 CCD image of the displaced spot

Fig. 5에 초점의 기준 위치를 획득한 영상을 나타내었다. Fig. 6은 측정 대상인 오목 거울에 반사된 파면을 렌즈 어레이에 통과 시켜 얻은 기준 초점 위치에서 편위된 영상이다.

Ⅳ. 데이터 처리

Fig. 5와 Fig. 6에서 얻은 영상을 이진화 하여 영상처리를 통하여 각 초점의 중심위치를 구한 다음 편위량 △x, △y를 구하였다.

식 (1)의 결과 로부터 파면을 재구성하는 방법은 적분하는 방법과 근사화(Fitting)하는 방법이 일반적으로 적용될 수 있다.

본 연구에서는 초점의 기준위치로부터 편위된 양 △x, △y와 (1)식의 미분 연산에 의하여 수차 다항식 W(x,y)의 각 계수들의 값을 최소 자승법(Least Error Square Method)을 적용하여 파면의 형상을 다음과 같이 재구성하였다.

식 (2)를 아래와 같이 쓰고

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

식 (3)에 대하여 미분연산을 수행하면

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

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

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

$$e(a_n) = \sum_{i=1}^{I} [(\frac{\triangle x_i}{f} - \sum_{n=2}^{N} a_n \frac{\partial P_n}{\partial x})^2 + (\frac{\triangle y_i}{f} - \sum_{n=2}^{N} a_n \frac{\partial P_n}{\partial y})^2] \qquad (6)$$

위의 오차를 계수 a_n에 대하여 최소화 시켜서 각 계수를 구한다.

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

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

위의 식들을 행렬의 형태로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$\Phi \vec{d} = \Phi \Phi^T \vec{a} \qquad (9)$$

Φ은 $(2I) \times (N)$의 행렬, $\vec{d}$는 $(2I) \times (1)$의 행렬의 열 벡터(column vector), $\vec{a}$는 $(N) \times (1)$의 행렬의 열 벡터이다. 위의 식들에 의해서 구하고자 하는 $\vec{a}$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

V. 실험 및 결과

Fig. 7은 CCD 카메라를 통하여 얻은 영상 Fig. 5와 Fig. 6을 이용하여 구한 초점의 위치를 나타내었으며 오른쪽에 앞에서 설명한 알고리즘을 적용하여 구한 수차 다항식의 계수를 나타내었다.

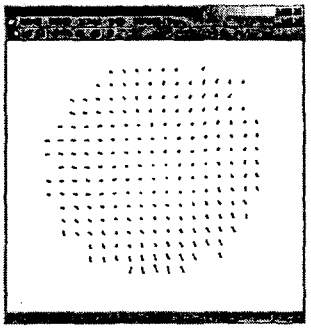

Fig. 7 devloped data processing s/w

Hartmann 테스트 장치의 정밀도를 평가하기 위하여 직경 100 mm의 구면형상을 가지는 표준 시편을 상용 Fizeau 간섭계(Wyko 6000)를 이용하여 측정한 결과와 비교하였다.

Table 1에 Fizeau 간섭계에서 측정한 수차계수와 Hartmann 테스트에서 측정한 수차계수의 값을 나타내었다. Fizeau 간섭계에 측정한 수차와 Hartmann 테스트 장치에서 측정한 값들을 정량적으로 직접 비교하기 어려우므로 식 (1)에서 나타낸 파면함수와 측정된 계수를 이용하여 재구성된 파면오차를 가지고 비교하였다.

Table 1 Measured wavefront aberration

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

Fig. 8에 Wyko 6000에서 측정된 파면의 형상을 나타내었고 Fig. 9에 Hartmann 테스트 장치에서 측정된

파면의 형상을 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 매우 근사한 결과를 얻을 수 있었고 가장자리에서 약 200 nm의 차이가 발생하였는데 이것은 Hratmann 테스트 장치를 구성하는데 사용된 광학 부품이 가지는 오차에 의해 파면이 왜곡된 것으로 판단된다.

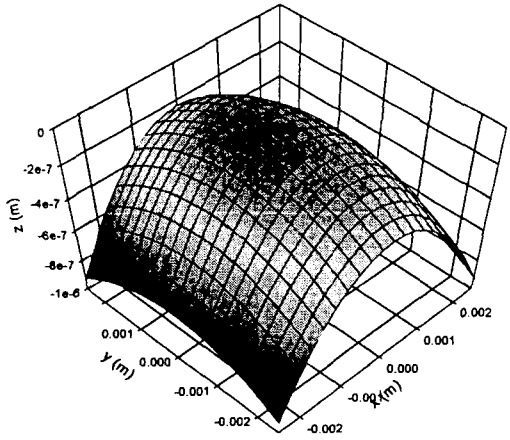

Fig.8 Measured result by Wyko6000 Fizeau interferometer

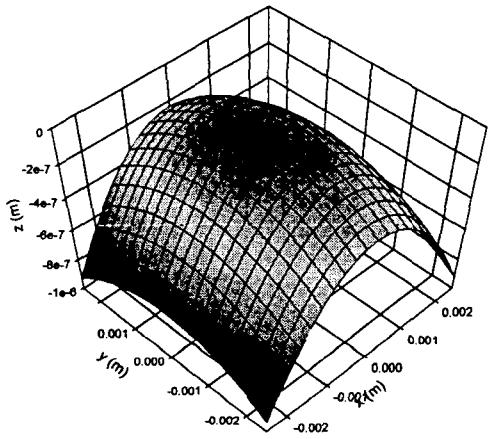

Fig.9 Measured result by developed Hartmann test apparatus

Fig. 10은 본 연구의 목표인 OMM 측정을 위해 공작기계상에 설치할 수 있도록 제작된 Hartmann 테스트 장치이다.

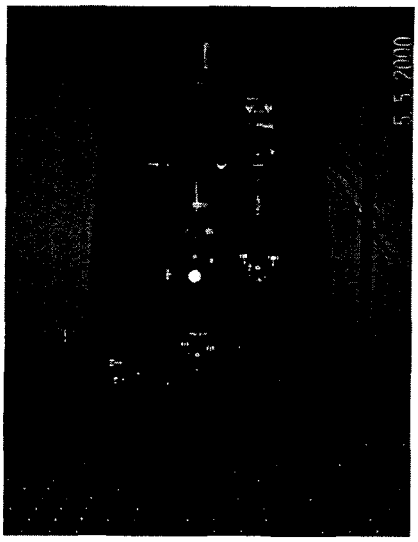

Fig. 9 photograph of developed on-machine Hartmann test apparatus

Ⅵ. 결 론

본 연구에서는 온도, 습도 변화와 진동 등 외부 환경 변화에 강인한 Hartmann 테스트 방법을 적용하여 제작 및 측정이 어려운 비구면 광학 부품의 성능을 평가할 수 있으며, 특히 공작기계상에 설치하여 가공 중 소재를 공작기계에서 떼어내지 않고 직접 측정이 가능한 광학식 OMM 측정장치를 연구하였다.

CCD 카메라 릴레이 렌즈가 가지는 수차의 영향을 배제하기 위하여 정밀한 평면 거울을 이용하여 어레이렌즈 초점의 기준위치를 보정하였다.

제작된 측정 장치의 성능을 상용 Fizeau 간섭계인 Wyko 6000을 사용하여 직경 100 mm의 구면형상을 가지는 표준시편에 대하여 측정결과를 비교하였으며 그 결과 최 외곽에서 최대 200 nm 가량의 차이를 나타내었다.

오차발생의 주된 요인으로는 Hartmann 테스트 장치에 사용된 콘덴싱렌즈, 빔스플리터 등의 광학 부품이 가지는 고유한 오차에 주로 기인하는 것으로 판단되었다.

본 연구를 통하여 제작된 Hartmann 테스트 장치는 광학식 OMM 측정 장치로 적용되어 가공소재의 오차정보를 200 nm 이하의 정밀도 수준으로 측정하여 제공할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Daniel Malacara, *Optical Shop Testing - Second Edition*, Wiely Interscience.
2. 이호재, *일반화된 론끼법을 이용한 비구면 측정*, 한국 과학 기술원 박사 학위 논문, 1999.
3. 양주룡, 홍경희, 박정덕, "Hartmann Test 방법에 의한 광학 거울의 성능 평가", 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 Shack-Hartmann method", IEEE, 1998