

형상의 이차미분을 이용한 비구면 형상측정기술 개발

김병창[#]

Development of Aspheric Surface Profilometry using 2nd Derivative

Byoung-Chang Kim[#]

(Received 9 March 2011; received in revised form 23 March 2011; accepted 11 April 2011)

ABSTRACT

I present a method of aspheric surface profile measurement using 2nd derivative of local area profile. This method is based on the principle of curvature sensor which measures the local 2nd derivative under test along a line. The profile is then reconstructed from the data on the each point. Unlike subaperture-stitching method and slope detection method, 2nd derivative method has strong points from a geometric point of view in measuring the aspheric surface profile. The second derivative terms of surface profile is an intrinsic property of the test piece, which is independent of its position and tip-tilt motion. The curvature is measured at every local area with high accuracy and high lateral resolution by using White-light scanning interferometry.

Key Words : Aspheric Surface Profiler(비구면 형상측정기), 2nd Derivative(이차미분), Curvature Measurement(곡률측정), White Light Scanning Interferometry(백색광 주사간섭계)

1. 서 론

기존 가공물의 특징은 소형 초정밀 부품과 대형 정밀급 부품으로 대표되었다. 즉, 초정밀 가공정밀도를 요구하는 부품의 경우는 주로 작은 가공물 크기를 요구하는 곳에 사용되었으며, 대형 가공품의 경우는 요구되어지는 정밀도가 높지 않는 특징이 일반적이었다. 상대정밀도 측면에서 본다면 Fig. 1과 같이 가공물 크기 축과 가공 정밀도 축이 형성하는 1사분면에서 우상향-좌하향 방향의 대각선 위에 주로

위치하는 경향을 보여왔다. 하지만, 최근 대형 디스플레이패널(LCD, PDP), 인공위성용 망원거울 등 초정밀 광 부품(optical components)들의 경우 가공물의 크기는 대형화 추세에 있으며, 빛을 반사 또는 투과시키는 특징으로 인하여 광 부품의 표면형상의 가공정밀도는 나노미터급을 요구하고 있다. Fig. 1에서 기존의 대각선 위에 위치하던 가공물들이 우하향 방향의 대각선 위로 이동하는 경향을 보이고 있다. 따라서, 최근의 경향을 만족시키기 위해서는 가공기의 크기는 대형화 되면서, 넓은 영역에 대해 초정밀 가공을 구현해야 하므로, 가공기 프레임의 강성문제, 넓은 영역에 대한 구동정밀도, 위치 반복능 등 다양한 기술이 요구되어지게 되었다.

[#] 교신저자 : 경남대학교 기계자동화공학부
E-mail : bckim@kyungnam.ac.kr

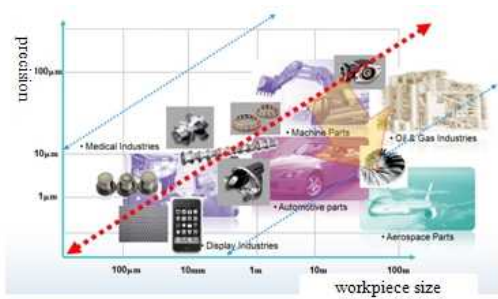


Fig. 1 Trend of workpieces

또한, 광학부품의 경우 최근 제품의 생산단가를 낮추기 위해 여러 장의 구면(spherical surface)으로 구성된 광모듈을 한 장의 비구면(aspheric surface)으로 대체하려는 노력들이 수행되어지면서, 가공기술 뿐만 아니라 측정기술도 새로운 방법들이 요구되어지고 있다.

전통적인 광 측정법에 따르면, 광학식 구면형상은 현재 상업화된 피조(fizeau)간섭계를 이용하여 초정밀급으로 측정이 가능하지만, 광학식 비구면 형상 측정기술은 현재까지 절대적인 방법이 제안되지 못하고 있다. 이는 공간섭을 이용한 비교측정에서 절대기준이 존재하는 구면형상 측정과는 달리 비구면의 경우 절대기준 형상이 존재하지 않기 때문이다. 현재 비구면 형상 측정을 위해서 사용되는 방법으로는 보정광학계(null optics) 등과 같은 특별한 보조장치를 추가하여 측정을 수행하고 있다. 하지만, 보정광학계의 경우 단일 피측정물에 대해서만 특별히 설계된 부품 일 뿐만 아니라, 추가적인 자체 보정문제가 발생한다.^[4]

이와 같이 대형화되고, 형상이 복잡해지는 추세에서 절대기준 형상이 존재하지 않는 비구면의 형상을 넓은 영역에 걸쳐 정밀하고 신뢰성 있게 측정하기 위한 대안들이 요구된다.

이를 위해 시도된 방법 중 하나로 일련의 국부영역의 형상을 측정하고 이로부터 형상의 이차미분값을 획득함으로써 피측정물의 전체형상을 복원하는 곡률 측정법(curvature method)이 제안되었다.^[1-4] 곡률 측정법은 Glenn에 의해 처음 시도되었으며^[5], 그 이후 비구면 거울의 형상 측정을 시도했던 독일표준연구소(PTB; physikalisch-technische bundesanstalt)

에서 LACS(large area curvature sensor)로 구체화되어졌다.^[1,2] 최근 미국표준연구소(NIST; National Institute of Standards and Technology)에서 GEMM(geometry measuring machine)과 관련된 곡률 형상 측정기를 개발하였다.^[3,4]

본 논문은 국부형상의 2차미분값을 이용해 상대적으로 넓은 면적의 형상을 측정하는 이차미분법의 장점을 수학적, 수치모사를 통해 증명하였으며, 기존 곡률법 연구에서 사용되었던 트와이만 그린간섭계(twyman-green interferometer) 대신, 백색광 간섭계를 이용함으로써 광축정렬 등의 구동오차를 제거하며, 최종적으로 비구면 형상 측정을 통해 높은 정밀도 측정이 가능함을 증명하고자 한다.

2. 측정이론

2.1 측정원리

Fig. 2는 기존의 간섭계를 이용해 비구면 형상을 측정하는 원리와 결과를 보여준다.

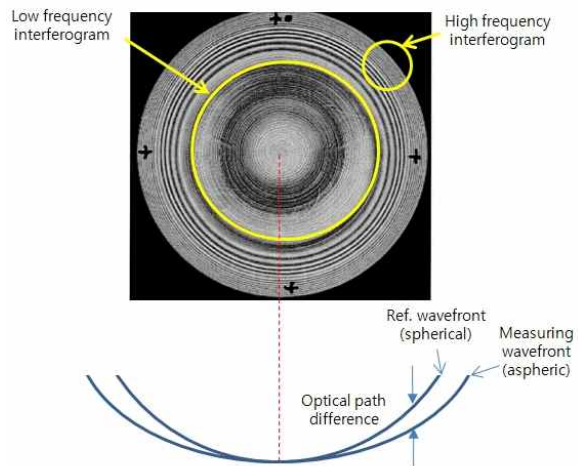


Fig. 2 Measurement results on aspheric surface using conventional interferometer

간섭계는 자신이 가지고 있는 기준면과 외부의 측정면을 비교하여 그 차이를 획득하는데, 이는 빛을 기준면과 측정면에 반사시켜 형성되는 두 개의 파면을 Fig. 2와 같이 간섭시키고 이를 통해 발생하는 간섭무늬를 해석하는 원리를 가지고 있다. 그러나 간섭계는 구면 기준면을 가지고 있기 때문에 Fig. 2와 같이 구면파면과 비구면 파면 사이에 발생하는 광경로차가 가장자리로 갈수록 급격히 증가하여 높은 공간주파수(spatial frequency)를 갖는 간섭무늬가 생성된다. 이때 생성된 고주파 간섭무늬는 CCD 화소분해능(pixel resolution)의 문제로 해석이 불가능해지며, 결과적으로 비구면 형상 전체를 기준형상과 한 번에 비교하여 측정하지 못하게 된다. 기존의 간섭계를 이용해서 비구면을 측정하기 위해서는 측정과 해석이 가능한 국부영역에서 측정인자를 획득하여 전체 형상으로 복원하는 기술이 요구되는데, 이때 각각의 국부영역의 측정인자로서는 형상(profile), 일차미분값(slope), 또는 이차미분값(curvature) 등을 이용할 수 있다.^[6] Fig. 3(a)는 국부영역의 형상을 측정인자로 선택한 경우로 일련의 국부형상을 순차적으로 측정하여 외부에 존재하는 측정좌표계(external reference)에 대해 순서적으로 붙이는 subaperture-stitching법으로, 측정 결과가 이동기구부(sensor)의 진직도, 회전, 광축정렬 등의 오차에 대해 민감하게 비례하는 단점을 가지고 있다. Fig. 3(b)와 같이 측정인자로 형상의 기울기(일차미분)값을 선택할 수 있는데, 국부형상의 기울기만을 측정하므로 Fig. 3(a)와 같이 외부에 존재하는 절대 측정좌표계와는 독립적으로 측정이 가능하지만, 기울기를 측정한다는 측면에서 여전히 이동기구부의 회전정렬(tilt-tip)에 영향을 받게 된다. 반면 Fig. 3(c)는 국부영역 형상의 이차미분값을 측정인자로 선택한 한 방법으로, 형상의 이차미분값은 이동기구부의 자세나 위치에 상관없이 항상 일정한 값을 가지는 형상 고유의 성질(intrinsic parameters)인 특징을 가진다. 따라서, 형상의 이차미분값을 기반으로 측정된 결과는 각종 측정 시스템오차들에 대해서 독립성을 유지할 수 있다. 이차미분값을 이용한 측정법은 기하학적 관점에서 상당한 장점을 가지고 있어 비구면 또는 자유곡면 형상 측정에 있어 나노미터 측정 정밀도 구현을 위한 대안으로 떠오르고 있다.

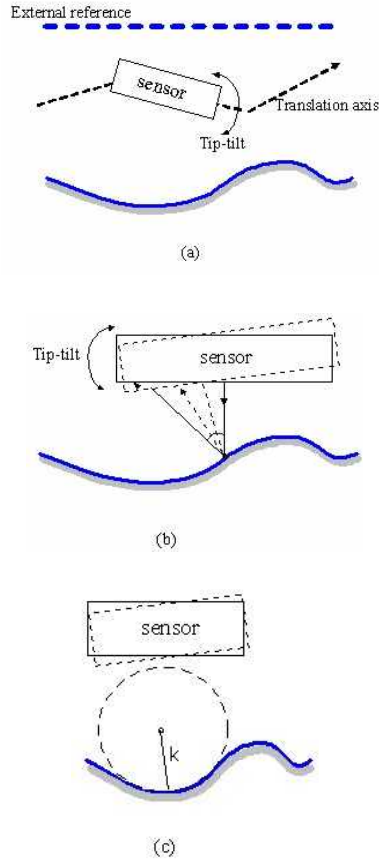


Fig. 3 Three different types of measurand (a)0th order(profile), (b)1st derivative(slope), (c)2nd derivative(curvature)

2.2 측정이론

직교 좌표 시스템에서 높이형상 $z(y)$ 와 곡률 $k(y)$ 의 관계는 다음의 식 (1)과 같이 비선형 이차미분방정식으로 표현되는 Frenet's 식으로 주어진다.^[7]

$$\frac{d^2 z(y)}{dy^2} = k(y) \cdot \left[1 + \left(\frac{dz(y)}{dy} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

여기에서 y 는 1차원적 위치를 나타내며, $z(y)$ 와 $k(y)$ 는 그 위치에서의 형상과 곡률을 각각 나타낸다. 식 (1)을 이용하면, 주어진 형상으로부터 각 위치의 곡률 계산이 가능하며, 역으로 각 위치의 곡률로부터 수치적 적분을 통하여 전체 형상의 복원이 가능하다.

따라서, 전체 형상 복원을 위해서는 각 위치(y)에서의 곡률 측정이 요구되는데, Fig. 4와 같이 일정국부영역으로부터 측정요소인 곡률값을 획득한 다음 Δs 간격으로 주사(scanning)함으로써 각 국부영역의 곡률값들을 라인을 따라 획득하게 된다.

비선형 이차미분방정식인 식 (1)의 해는 형상함수 $z(y)$ 와 상관없이 간단한 적분의 형태로 나타낼 수 있다. 여기서 곡률의 적분값(φ)과 초기점에서의 일차미분 형상값(z'_0)에 의해 결정되는 상수(α)를 각각 아래와 같이 정의하면,

$$\varphi(y) = \int_{y_0}^y \kappa(\zeta) d\zeta \quad \alpha = \frac{z'_0}{\sqrt{1 + z'^2_0}}$$

식 (1)의 해는 식 (2)와 같이 유도된다.^[6]

$$\frac{dz(y)}{dy} = \frac{\varphi(y) + \alpha}{\sqrt{1 - (\varphi(y) + \alpha)^2}} \quad (2)$$

따라서, 각 국부영역에서 측정된 곡률의 적분값(φ)와 초기 상수(α)로 구성된 식 (2)을 이용한 일련의 적분을 통해 전체 형상을 복원할 수 있다.

2.3 이차미분법의 오차영향 고찰

국부형상의 이차미분값을 이용한 측정법은 외부에 존재하는 절대 측정좌표계에 독립적이므로 구동부의 위치오차에 둔감한 특성을 보인다. 이를 증명하기 위하여 Fig. 4와 같이 구동오차를 의도적으로 부여하여 그로부터 발생하는 복원오차를 수치모사(simulation)하였다.

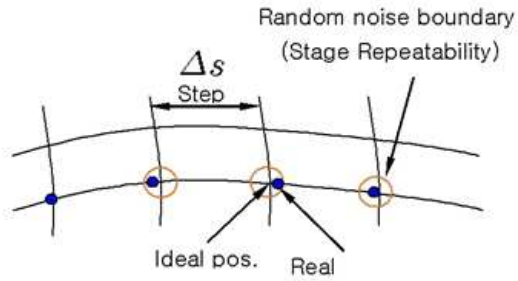


Fig. 4 Definition of position error

위치오차의 영향을 고찰하기 위하여 $R=200\text{mm}$ 반경, $k=-1.1$ 원추상수(conic constant)의 광학특성을 가진 50mm 측정영역의 쌍곡면(hyperbolic surface) 오목거울을 대상으로 하였으며, 오차 정의와 주사방식은 Fig. 4와 같이 수행하였다. 각 국부영역의 중심점들 간의 주사간격(scanning step)은 0.1mm 이며, 위치오차의 최대값은 구동 시스템의 반복능으로 정의하였으며, 최대 오차 내에 랜덤수를 발생시켜 각 측정점에서의 위치오차를 결정하였다. 수치모사 결과 구동부의 최대오차의 증가에 따라 비례하여 증가하는 형상복원 오차량을 Fig. 5와 같이 획득하였다. 실험에 사용한 구동부 반복능($\pm 5\ \mu\text{m}$)의 2배에 해당하는 $20\ \mu\text{m}$ 구동오차에 대한 형상복원오차는 0.35nm 이며, 이는 사용된 구동부의 위치오차에 대해 매우 둔감함을 보여주는 결과이다.

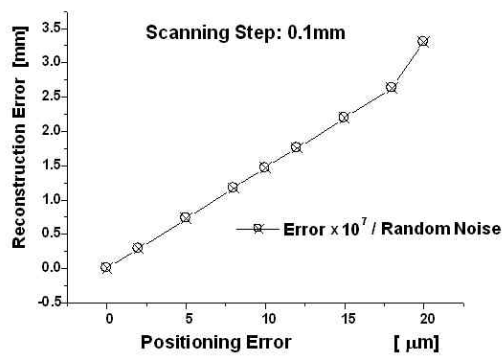


Fig. 5 Reconstruction error caused by position error

3. 측정시스템

일련의 연속적인 곡부형상의 이차미분값을 측정하여 측정물의 전체형상을 복원하는 방법을 구현하기 위해서는 일차적으로 곡부영역의 형상을 측정하기 위한 측정시스템이 요구된다. 이를 위해서는 트와이만 그린간섭계(twyman-green interferometer), 피조간섭계 등 여러 종류의 간섭계들이 대안이 될 수 있지만, 본 논문에서는 Fig. 6과 같이 백색광 주사간섭계(white light interferometry)를 사용하였다. 이는 간섭계가 광축방향으로 이동하며, 백색광의 짧은 가간섭거리(coherence length) 내에서 간섭무늬를 획득함으로써 측정물의 형상을 측정하는 원리를 가지고 있다. 광축 방향의 구동 원리를 가지고 있기 때문에 다른 간섭계에 비해 광축방향에 대한 오차가 발생하지 않는 장점을 보인다.^[6]

100×100×100mm 측정영역을 가지며, 프루브 경통은 최대 ±6°까지 광초점을 중심으로 기울어질 수 있다. 대물렌즈(objective) 선택에 따라, 측정 가능한 최대영역은(FOV : field of view)는 0.4~4mm이며, 모든 구동축은 자동모드로 제어된다.



Fig. 6 Photograph of the instrument used in measurement

일련의 곡부형상으로부터 이차미분값을 연속적으로 획득하고, 이로부터 비구면 형상 전체를 복원하는 것을 목표로 한다. 제안된 이차미분법의 측정 정밀도를 검증하기 위하여 Fig. 7과 같이 카세그레인(cassegrain) 망원경의 주경(primary mirror)용으로 제작된 측정물을 대상으로 신뢰성 평가를 실시하였다. 원추상수 $k=-1.0$ 인 포물면으로 곡률반경은 $R=1680m$ 이며, 구경은 300mm이다.

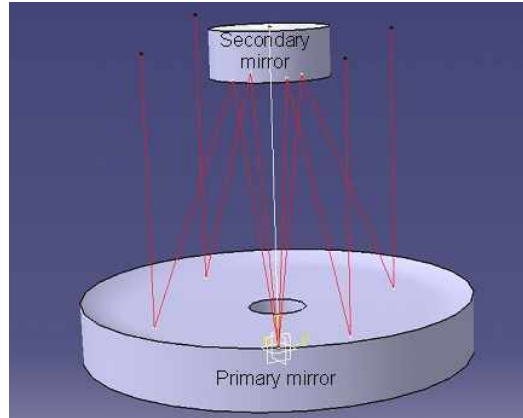


Fig. 7 Optical configuration of the cassegrain type



Fig. 8 Photograph of the test piece with aspheric surface

4. 측정 결과

4.1 비구면거울 시편

백색광 간섭계를 기반으로 구현된 이차미분법은

4.2 비교측정 결과 및 정밀도 진단

이차미분법을 통해 측정된 측정값을 검증하기 위하여 잘 보정된 일본 파나소닉(Panasonic inc.)사의 UA3P(ultra accuracy 3-D profilometer) 접촉식 측정

기와 비교 측정을 수행하였다. 측정영역은 측정물의 중심으로부터 $\pm 36\text{mm}$ 구간을 선정하였으며, 이는 백색광 간섭계의 구동영역과 프루브 경통의 최대 기울임을 고려하여 선정하였다. 비교측정결과 Fig. 9와 같이 최대 25.78nm, 표준편차 8.47nm의 차이를 보임을 확인하였다. 좌우 비대칭 특성은 비교 측정 시 상이한 측정환경적 요인으로부터 발생할 수 있는 현상으로 판단된다.

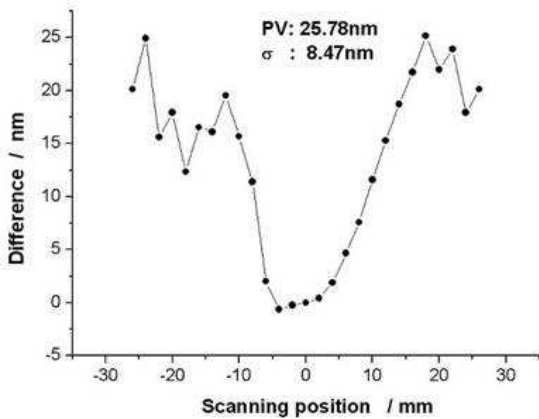


Fig. 9 Measurement result by comparison with UA3P

5. 결론

본 연구에서는 비구면의 형상을 측정하기 위하여 이차미분법을 이용한 형상측정법을 구현하였다. 수치모사를 통해 구동부의 위치오차가 형상복원에 둔감한 사실을 증명하였으며, 이를 구현하기 위해 백색광 간섭계를 사용하였다. 구현된 이차미분법의 신뢰성 검증을 위하여 카세그레안 망원경의 주경용으로 제작된 비구면(포물면)을 대상으로 접촉식 측정기인 UA3P와 비교측정하였으며, 측정결과 52mm영역에 대해 최대 최대 25.78nm, 표준편차 8.47nm의 차이를 보임을 확인하였다.

후 기

이 연구결과물은 2009학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의하여 이루어졌음

참고문헌

1. I. Weingartner, M. Schulz, P. Thomsen-Schmidt, and C. Elster, "Measurement of steep aspheres: a step forward to nanometer accuracy," in *Optical Metrology for the Semiconductor, Optical, and Data Storage Industries II*, Proc. SPIE, Vol. 4449, pp. 195-204, 2001.
2. C. Elster, J. Gerhardt, P. Thomsen-Schmidt, M. Schulz, and I. Weingartner, "Reconstructing surface profiles from curvature measurements," *Optik*, Vol. 113, No. 4, pp. 154-158, 2002.
3. B.C. Kim, T. Saiag, Q. Wang, J. Soons, R.S. Polvani, and U. Griesmann, "The Geometry Measuring Machine(GEMM) Project at NIST," in *Free-Form Optics: Design, Fabrication, Metrology, Assembly, ASPE 2004 Winter Topical Meeting*, North Carolina, USA, pp. 108-111, 2004.
4. U. Griesmann, N. Machkour-Deshayes, J. Soons, B.C.Kim, Q. Wang, J.R..Stoup, and L. Assoufid, "Uncertainties in Aspheric Profile Measurements with the Geometry Measuring Machine at NIST," in *Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies II*, A. Duparre, B. Singh, Z. Gu, eds., Proc. SPIE, Vol. 5878, pp. 112-124, 2005.
5. P.E. Glenn, "Angstrom level profilometry for submillimeter to meter scale surface errors," in *Advanced Optical Manufacturing and Testing*, G.M. Sanger, P.B. Reid, and L.R. Baker, ed., Proc. SPIE, Vol. 1333, pp. 326-336, 1990.
6. ByoungChang Kim, "A Curvature profilometry using white-light," *J. of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 7, No. 3, pp. 81-86, 2008.
7. M.P.do Carmo, *Differential Geometry of Curves and Surfaces*(Prentice Hall, USA, 1976).