

## 곡률에 근거한 형상 측정기술 개발

김병창<sup>†</sup>

경남대학교 기계자동화공학부  
Ⓣ 631-701 경남 마산시 월영동 449번지

(2006년 5월 10일 받음, 2007년 2월 28일 수정본 받음)

광역의 자유곡면 형상을 나노미터 정밀도로 측정하기 위한 새로운 형상 측정법으로서 곡률에 근거한 형상 측정법을 제안한다. 곡률 형상 측정기는 피측정물을 일정간격으로 스캔하는 간섭계로써 각 국부영역의 형상으로부터 곡률을 획득하여, 이로부터 전 영역의 형상을 복원한다. 제안된 곡률 형상 측정기는 비구면 형상 측정을 위해 개발된 보상 광학계(Null optics)나 국부영역의 형상을 측정하고 결합하는 subaperture-stiching 법에 비해 측정 장비로부터 발생하는 시스템 오차를 근본적으로 제거하는 특징을 가진다. 80 mm × 80 mm × 25 mm 작동구간을 갖는 Stewart Platform과 상용 트와이만 그린 간섭계를 이용하여 곡률간섭계를 구성하였으며, 자유곡면의 형상측정을 위한 첫 단계로서 잘 알려진 구면형상을 측정하고, 기존 장비의 측정값과 비교한 결과 32 mm영역에서 최대 56 nm의 차를 보임을 확인하였다.

주제어 : Profilometry, Curvature, Aspheric surface, Free-form surface

### I 서 론

기존의 정통적인 full-aperture 간섭계는 거듭된 발전을 통해 구면과 평면 형상을 초정밀로 측정하는 대표적인 방법으로 발전되어왔으며, 최근 영상시스템 사용으로 인하여 다양한 영역의 구면과 평면의 형상 정보를 거의 실시간으로 획득하기에 이르렀다. 그러나, 비구면 형상 측정을 위한 많은 어려움들은 여전히 남아 있으며, 더욱이 자유곡면 형상을 측정하기 위한 시도들은 국내적으로 연구가 활발하지 못하다. 기존 구면 또는 평면으로부터 벗어난 비구면 형상의 측정은 “보정광학계(Null optics)” 같은 특별한 장치를 필요로 하는데, 보정광학계 또한 초정밀 가공품으로써 단일 피측정물에 대해서만 특별히 설계된 부품 일 뿐만 아니라, 추가적인 자체 보정문제가 발생한다. 이와 같이 비구면 형상 측정의 기술적 어려운 현실은 저가의 장비를 사용하여 비구면 또는 자유곡면의 형상을 정밀하고 신뢰성 있게 측정하기 위한 대안들이 요구되어진다.

이를 위해 추구될 방법 중 하나가 일련의 국부영역의 곡률(Curvature)을 획득함으로써 피측정물의 전체형상을 복원하는 곡률 형상측정기(Curvature Profilometry)이다.<sup>[1-10]</sup> 이 측정법은 기하학적 관점에서 상당한 장점을 가지고 있어 비구면 또는 자유곡면 형상 측정에 있어 나노미터 측정 정밀도 구현을 위한 대안으로 떠오르고 있다. 기존의 간섭계를 이용해서 비구면 또는 자유곡면형상을 측정하기 위해서는 측정과 해석이 가능한 국부영역에서 측정인자를 획득하여 전체 형상으로 복원하는 기술이 요구되는데, 이때 각각의 국부영역의 측정인자로서 형상(Profile), 일차미분값(Slope), 또는 이차미

분값(Curvature) 등을 이용할 수 있다. 국부영역의 형상을 측정인자로 선택한 경우 이를 subaperture-stiching법이라 하며, 삼차원측정기(CMM)의 경우와 마찬가지로 외부에 존재하는 절대 기준점(Metrology frame)에 대한 상대 거리 좌표로 측정된 국부형상들을 통합하여 표현한다. 이때 최종적으로 측정 복원된 결과는 측정 시스템을 구성하는 이동기구부의 진직도, 회전, 광축정렬 등의 오차에 비례하게 된다. 그림 1(a)와 같이 형상의 기울기(일차미분)값을 국부영역의 측정인자로 선택할 경우, 전체 형상 복원에 있어 외부 절대기준의 필요성은 사라지지만 여전히 이동기구부의 정렬(Tilt-tip)에 영향을 받는다. 반면 곡률 형상측정기는 일련의 국부영역에 해당되는 형상의 곡률을 각각 측정하는데, 이는 형상 고유의 성질(intrinsic parameters)으로써 외부 절대 기준과 측정시스템 간에 발생하는 중요 시스템오차들에 대해서 독립성을 유지한다. 즉, 그림 1(b)와 같이 국부영역의 곡률값은 측정기의 자세나 위치에 상관없이 항상 일정하게 유지된다.

이러한 기하학적인 개념은 Glenn에 의해 처음으로 형상측정에 시도되었으며,<sup>[1,2]</sup> 그 이후 비구면 거울의 형상 측정을 시도했던 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)에서 LACS(Large Area Curvature Sensor)로 구체화 되어졌다.<sup>[3-8]</sup> 본 논문은 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 차세대 자유곡면 형상 측정을 위해 개발한 GEMM(GEometry Measuring Machine)과 관련된 곡률 형상 측정기 개발의 연구내용이며,<sup>[9,10]</sup> 이는 곡률 측정을 기반으로 한 자유곡면 형상의 나노미터 측정정밀도 구현을 위해 수행되었던 첫번째 단계로써 이를 구면 거울 측정에 적용하여 그 타당성을 확인하였다.

<sup>†</sup> E-mail: bckim@kyungnam.ac.kr

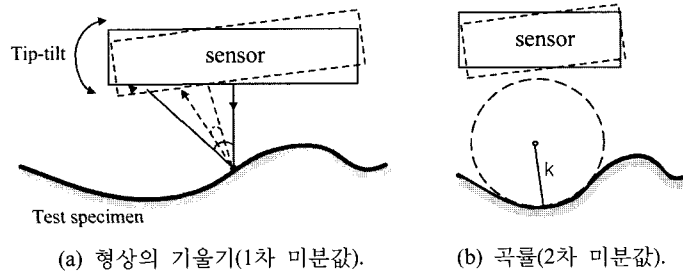


그림 1. 국부영역에서 결정되는 측정인자.

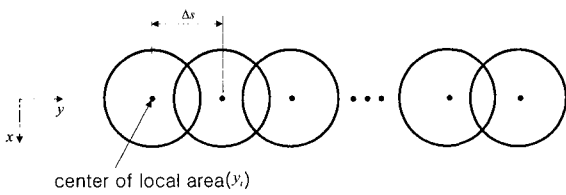


그림 2. 곡률 결정 및 주사방식.

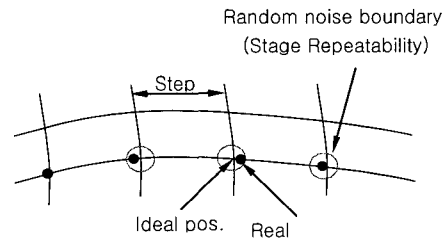


그림 3. 구동부의 반복능에 근거한 위치오차 정의.

## II. 곡률 측정기의 원리

직교 좌표 시스템에서 1차원적 높이형상  $z(y)$ 와 곡률  $k(y)$ 의 관계는 다음의 식(1)과 같은 비선형 미분방정식으로 표현된다.<sup>[11]</sup> 여기에서  $y$ 는 1차원적 위치를 나타낸다.

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

위 식은 공간에서 임의의 곡선을 표현하는 Frenet's 식으로써 두 가지 측면으로 해석되어 질 수 있다.<sup>[12]</sup> 첫째, 주어진 형상  $z(y)$ 으로부터 각 점의 곡률 계산이 가능하며, 둘째, 각 점의 곡률이 알려져 있으면 수치적 적분법을 통하여 전체 형상의 복원이 가능하다.

따라서, 전체 형상 복원을 위해서는 각 점( $y$ )에서의 곡률 측정이 요구되는데 이 형상인자(curvature)는 그림 1(b)에서 설명한 바와 같이 형상의 고유값으로 위치와 각도 회전에 대해 독립된 변수이다. 각 점( $y$ )에서의 곡률  $k(y)$ 를 결정하기 위해서 그림 2와 같이 측정 프로브가 점( $y_i$ )를 중심으로 하는 국부영역의 형상을 측정하고 이로부터 곡률( $k(y_i)$ )을 기하학적으로 추출한다. 전체 측정 영역을  $\Delta s$  간격으로 주사(scanning)함으로써 각 측정점의 곡률들을 모두 획득하게 된다.

비선형 방정식인 식(1)의 해는 형상함수  $z(y)$ 와 상관없이 간단한 적분의 형태로 나타낼 수 있다. 여기서 곡률의 적분과 초기값( $z'_0$ )에 의해 결정되는 상수를 아래와 같이 각각  $\varphi(y)$ ,  $\alpha$  정의하면

$$\varphi = \int_{y_0}^y \kappa(\zeta) d\zeta, \quad \alpha = \frac{z'_0}{\sqrt{1+z_0'^2}}$$

식(1)의 해는 다음의 식(2)와 같이 유도된다.<sup>[7]</sup>

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

따라서, 각 점에서 측정된 곡률의 적분값( $\varphi$ )과 식(2)를 이용한 일련의 적분을 통해서 전체 형상을 복원할 수 있다.

앞서 언급된 곡률 형상 측정기의 장점 외에 다음과 같은 두 가지의 특징을 살펴 볼 수 있다. 첫째, 측정 국부 영역의 중심간의 거리( $\Delta s$ ) 조절이 가능함으로써 복원된 형상의 횡분해능(lateral resolution)을 높일 수 있으며, 둘째 각 점의 곡률을 결정할 때 국부 영역의 형상을 이용하기 때문에 먼지 등의 노이즈에 강인한 면이 있다.

## III. 곡률 형상 측정기의 오차영향 고찰

곡률 형상 측정기는 형상 고유 성질인 곡률 측정에 기반을 두고 있으므로 외부 기준에 영향을 받지 않는 특징이 있다. 하지만 각 점( $y_i$ )에서 측정된 곡률( $k(y_i)$ )로부터 전체 형상( $z(y)$ )이 복원되기 위해서는 식(1)과 같이 각 점의 1차원적 위치( $y$ )가 결정되어야 하며, 이는 주로 프로브를 이동시키는 스테이지(stage)의 정밀도에 의존한다. 따라서 각 측정점의 위치 결정 오차를 곡률 형상 측정기의 오차 요소로 정의하고, 형상 복원에 미치는 영향을 고찰 할 필요성이 요구된다.

위치오차가 형상복원에 미치는 영향을 고찰하기 위해  $R=200$  mm 반경,  $k=-1.1$  원추상수(conic constant)의 광학특성을 가진 50 mm 측정영역의 쌍곡면 오목거울을 대상으로 하였으며, 오차 정의와 주사방식은 그림 3과 같이 행하였다. 각 국부영역의 중심점들 간의 주사간격(scanning step)은 0.1

mm이고, 위치오차의 최대값은 실제로 시스템 구동부로 사용한 스테이지의 반복능으로 정의하였으며, 최대 오차 내에서 랜덤수(random number)를 발생시켜 각 측정점에서의 위치오차를 결정하였다. 수치모사(simulation) 결과 위치오차와 50 mm 측정영역에서 발생하는 형상복원의 최대오차간의 상관관계는 그림 4와 같이 표현된다. 곡률간섭계는 구동부의 위치 오차가 증가할수록 복원 형상의 최대 오차도 비례적으로 증가 하는 것을 알 수 있으나, 최대 20  $\mu\text{m}$  위치오차에 대해서 형상복원에 미치는 영향은 0.35 nm로 무시할 수 있음을 확신할 수 있다. 따라서, 곡률간섭계는 앞서 언급한 장점들과 더불어 구동부 위치오차에 대한 복원형상 오차의 둔감도(insensitivity) 또한 추가되어 언급될 수 있다.

IV. 시스템 구성

실제 제작된 곡률형상 측정기(GEMM)의 시스템 구성도와 실제 사진은 그림 5와 같다. 시스템의 외곽 프레임은 세 개의 기둥으로 연결된 상·하단부로 구성되며, 6축 운동이 가능한 PI사의 Stewart Platform(Hexapod)은 뒤집어져 상판부에

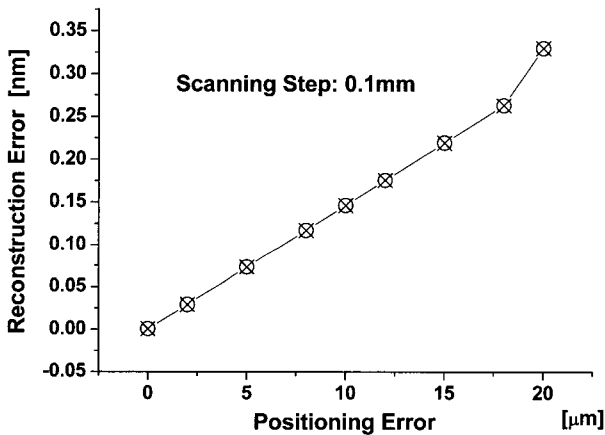


그림 4. 위치오차에 따른 형상복원 오차.

고정된다. 국부영역의 형상을 측정하기 위해 FISBA사의 상용 트와이만 그린(Twyman-Green) 간섭계를 사용하였으며, 이를 Hexapot에 고정시켜 측정물체 전체를 이동하며 측정한다. 국부적인 측정영역은 사용된 대물렌즈의 사양에 따라 2 mm 또는 10 mm으로 선택될 수 있다. Hexapot의 위치 정밀도는 영역 80 mm  $\times$  80 mm  $\times$  25 mm 내에서 최대  $\pm 2 \mu\text{m}$ 의 반복능을 가지며, 공간상 임의점을 회전점(pivot point)으로 하여 6축 제어가 가능하다. 이는 앞서 3절에서 고찰된 위치 결정 오차가 복원형상에 미치는 영향을 고려할 때 고정밀 측정을 위한 곡률 형상측정기의 구동부로서 적당하다고 판단된다. 이동부인 Hexapot과 영상 획득부인 간섭계는 중앙 제어부에서 각각 RS232 통신을 통해 제어와 영상신호를 처리하였다.

V. 측정결과

비구면 또는 자유곡면의 나노미터 측정 정밀도 구현을 위해 개발된 곡률 형상측정기의 검증에 위한 첫번째 단계로 형상을 신뢰성 있게 측정 할 수 있는 구면거울을 이용하여 비교 측정하였다. 비교측정에 사용된 구면 거울은 반경  $R \approx 200 \text{ mm}$ 이며, 표면이 Silver코팅된 구면거울을 사용하였다. 구면 시편은 그림 6과 같이 공간상에 중심점을 가지므로 이 점을 구동부(Hexapot)의 회전점(pivot point)으로 선택하여 피측정물의 일정구간을 측정하였다. 측정 대상 구간은 주사 각도(scanning angle)  $\alpha = 8^\circ$ 로 X방향의 길이는 28 mm에 해당되며,  $0.25^\circ (\approx 0.8 \text{ mm})$  측정 간격으로 주사하여 측정을 수행하였다.

곡률 간섭계의 측정 정밀도 검증에 위해 사용된 구면거울은 NIST가 보유한 기존 장비를 통해 함께 비교 측정 되었으며, 기존 장비의 측정결과 구면의 반경이 200.4127 mm로 확인되었다. 기존 간섭계를 통해 획득된 구면 거울의 형상으로부터 곡률간섭계 측정 결과값의 차이는 그림 7과 같이 28 mm 측정 영역에서 최대오차가 37 nm 발생됨을 확인하였다. 본 실험은  $0.1^\circ$  온도제어가 가능한 환경에서 측정되었으며,

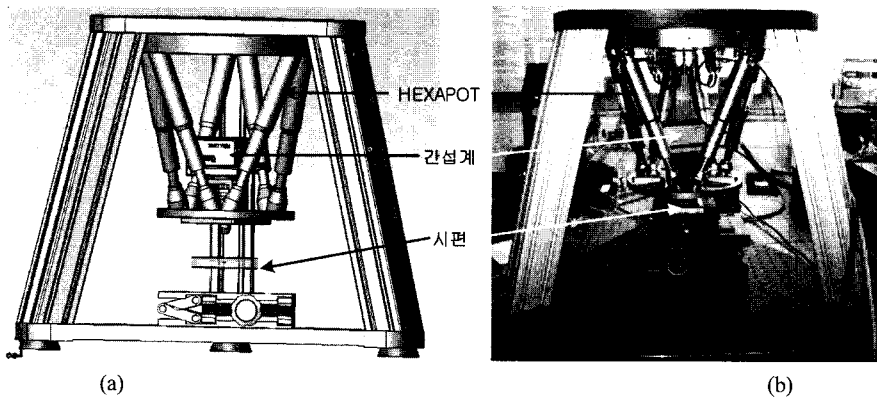


그림 5. 곡률형상 측정기 구성도.  
(a) 시스템 구성도, (b) 실제 시스템 사진.

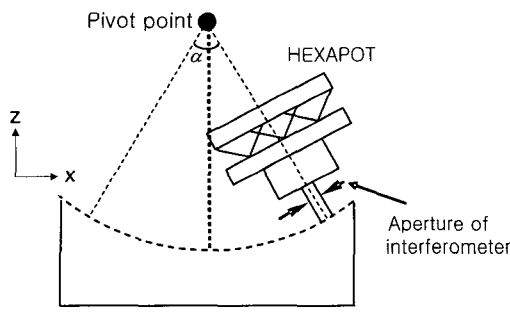


그림 6. 구면거울 측정 주사(scanning)법.

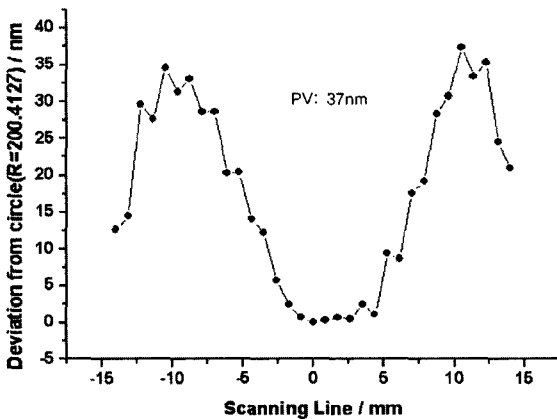


그림 7. 구면형상 오목거울 측정오차.

온도의 변화에 따른 형상 측정 정밀도가 일부 변화하는 현상을 발견할 수 있었다.

## VI. 결 론

비구면 또는 자유곡면을 나노미터 정밀도로 측정하기 위해 제안된 곡률 형상측정기는 국부영역의 곡률을 측정하고 일정 관계식을 통해 곡률로부터 전체 형상을 복원하는 측정기이다. 이는 형상의 고유 성질인 곡률을 측정하는 원리에 기반함으로 인해 기하학적으로 구동부 오차에 대해 독립적이며, 구동 간격 제어를 통해 횡분해능을 극대화 시킬 수 있는 장점이 있다. 곡률 형상측정기는 국부형상 측정을 위해서 상용화된 트와이만 그린 간섭계를 사용하였으며, 이는 6축 제어 가능한 Hexapod 끝단부에 부착되어 일정 구간을 주사하며 각 국부영역의 곡률을 측정한다. 구현된 곡률 형상측정기의 측정 정밀도를 검증하기 위해 NIST가 보유하고 있는 기준 구면 측정간섭계와 비교 측정하였으며, 측정 결과 28 mm 측정 영역에 대해 최대 37 nm의 측정 오차를 보임을 확인하였다. 구면 측정에 대해 나노미터 측정이 가능함을 보였으며, 2단계로 검증 가능한 비구면 형상에 대해 측정 시도가 요구된다.

## 감사의 글

이 연구결과물은 2006학년도 경남대학교 신진교수연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

## 참고문헌

- [1] 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.
- [2] P. E. Glenn, "Lambda-over-one-thousand metrology results for steep aspheres using a curvature profiling technique," in *Advanced Optical Manufacturing and Testing II*, V. J. D. D. V. M. ed., Proc. SPIE, vol. 1531, pp. 61-64, 1992.
- [3] P. Thomsen-Schmidt, M. Schulz, and I. Weingartner, "A facility for the curvature-based measurement of the nanotopography of complex surfaces," in *Optical Devices and Diagnostics in Materials Science*, D. L. Andrew, T. Asakura, S. Jutamulia, W. P. Kirk, M. G. Lagally, R. B. Lal, J. D. Trolinger, ed., Proc. SPIE, vol. 4098, pp. 94-101, 2000.
- [4] 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*, A. Duparre, B. Singh, ed., Proc. SPIE, vol. 4449, pp. 195-204, 2001.
- [5] M. Schulz, "Topography measurement by a reliable large-area curvature sensor," *Optik*, vol. 112, no. 2, pp. 86-90, 2001.
- [6] M. Schulz and I. Weingartner, "Measurement of steep aspheres by curvature scanning: an uncertainty budget," *Proc. of 2<sup>nd</sup> euspen International Conference*, pp. 478-481, 2001.
- [7] 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.
- [8] M. Schulz, R. D. Geckeler, and J. Illeemann, "High accuracy form measurement of large optical surfaces," in *Recent developments in traceable dimensional measurements II*, J. E. Decker and N. Brown, eds., Proc. SPIE, vol. 5190, pp. 211-219, 2003.
- [9] 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, 2004, pp. 108-111.
- [10] 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.

[11] M. P. do Carmo, *Differential Geometry of Curves and Surfaces* (Prentice Hall, USA, 1976).

[12] J. J. Stoker, *Differential Geometry* (Wiley-Interscience, New York, 1969).

## Development of Profilometry based on a Curvature Measurement

Byoung Chang Kim<sup>†</sup>

*Department of Mechanical Engineering and Automation, Kyungnam University, Wolyoung-dong, Masan 631-701, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: bckim@kyungnam.ac.kr*

(Received May 10, 2006, Revised manuscript February 28, 2007)

I present a novel curvature profilometer devised for the profile measurement of aspheric and free-form surfaces on the nanometer scale. A profile is reconstructed from measuring the curvature of a test part of the surface at several locations along a line. For profile measurement of free-form surfaces, methods based on local part curvature sensing have strong appeal. Unlike full-aperture interferometry they do not require customized null optics. The measurement accuracy of the curvature profilometer was assessed by comparison with a well-calibrated interferometer in NIST. Experimental results prove that the maximum discrepancy turns out to be 37 nm on the 28 mm measurement range for the spherical mirror.

OCIS code : 120.3180, 120.4570, 120.4640, 120.6660.