

백색광을 이용한 곡률 측정법 개발

김 병 창[#]

A curvature profilometry using white-light

Byoung-Chang Kim[#]

ABSTRACT

I present a 3-D profiler specially devised for the profile measurement of specular surfaces that requires precision shape accuracy up to a few nanometer. A profile is reconstructed from the curvature of a test part of the surface at several locations along a line. The local curvature data are acquired with White-light Scanning Interferometry. Test measurement proves that the proposed profiler is well suited for the specular surface inspection like precision mirror.

Key Words : 3-D profiler(3차원 형상측정기), curvature measurement(곡률측정), specular surface(유리면)

1. 서 론

최근 휴대폰, 대형 디스플레이패널(LCD, PDP), 광통신, 인공위성 등 기존의 기전공학(Mechatronics) 분야에 광학적(Optics) 요소가 결합된 새로운 트렌드가 현대 전자제품 시장을 주도하고 있다. 소위 옵토메카트로닉스(Opto-Mechatronics)로 불리우는 이 분야의 제품들은 최종적으로 사용자에게 빛을 응용한 정보를 제공하는 특징을 가지며, 광 모듈레이션(optical modulation)을 위한 초정밀 광 부품(optical components)들로 구성되어 있다. 광 부품은 빛이 투과되는 렌즈류(lens)와 빛을 반사하는 거울류(mirror)로 분류되어지는데, 최종단에서 사용자에게 유용한 고급 정보를 주기 위해서는 광 부품의 표면형상 정밀도가 나노미터급까지 요구되기에 이른다. 또한, 최근 제품의 생산단가

를 낮추기 위해 여러 장의 구면(Spherical surface)으로 구성된 광모듈을 한 장의 비구면(Aspheric surface)으로 대체하려는 노력들이 수행되어지고 있다.

정통적인 광 측정법에 따르면, 구면형상의 거울면은 현재 상업화된 피조(Fizeau)간섭계를 이용하여 초정밀급으로 측정이 가능하지만, 비구면 형상을 측정하는 기술은 현재까지 정립되어있지 못하다. 다만, 보정광학계(Null optics)등과 같은 특별한 보조 장치를 추가하여 측정이 가능하나, 보정광학계의 경우 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 요구된다.

이를 위해 추구된 방법 중 하나가 일련의 국부영역의 곡률(Curvature)를 획득함으로써 피측정물의 전체 형상을 복원하는 곡률 측정법이다.¹⁻³ 곡률 측정법은 Glenn에 의해 처음 시도되었으며^{4,5}, 그 이후 비구면 거울의 형상 측정을 시도했던 독일표준연구소(PTB;

* 경남대학교 기계자동화공학부

교신저자 : 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail : bckim@kyungnam.ac.kr

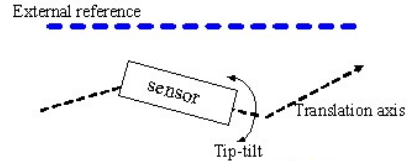
Physikalisch-Technische Bundesanstalt)에서 LACS(Large Area Curvature Sensor)로 구체화 되어졌다.¹⁻³ 최근 미국표준연구소(NIST: National Institute of Standards and Technology)에서 GEMM (GEometry Measuring Machine)과 관련된 곡률 형상 측정기를 개발하였다.^{6,7} 본 논문은 GEMM과제 참여를 통해 획득된 장비의 약점을 보완한 새로운 접근법을 실현한 연구의 결과로써, 장비 개발에 따른 그 첫 번째 단계로 이를 구면 거울 측정에 적용하여 그 타당성을 확인하였다.

2. 측정이론

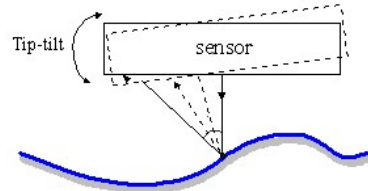
2.1 측정원리

기존의 간섭계는 내부에 존재하는 기준면이 평면 또는 구면이기 때문에 비구면 또는 자유곡면의 피측정물에서 반사되어 돌아오는 측정 파면과 기준면에서 발생하는 기준파면을 서로 간섭시키면 높은 공간주파수(spatial frequency)를 갖는 간섭무늬가 생성된다. 이때 생성된 간섭무늬는 CCD 화소분해능(pixel resolution)의 문제로 해석이 불가능하기 때문에 비구면 형상 전체를 한 번에 측정하지 못한다. 기존의 간섭계를 이용해서 비구면 또는 자유곡면형상을 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.⁸ 그림 1(a)와 같이 국부영역의 형상을 측정인자로 선택한 경우를 subaperture-stitching법이라 하며, 측정 결과가 이동기구부(sensor)의 진직도, 회전, 광축정렬 등의 오차에 대해 민감하게 비례한다. 그림 1(b)와 같이 측정인자로 형상의 기울기(일차미분)값을 선택할 수 있는데, 여전히 이동기구부의 정렬(Tilt-tip)에 영향을 받게된다. 여기에 비해 그림 1(c)는 국부영역의 곡률을 측정인자로 한 것으로, 곡률은 이동기구부의 자세나 위치에 상관없이 항상 일정한 값을 가지는 형상 고유의 성질(intrinsic paramters)이며, 곡률을 기반으로 측정된 결과는 각종 측정 시스템오차들에 대해서 독립성을 유지할 수 있다. 곡률 측정법은 기하학적 관점에서

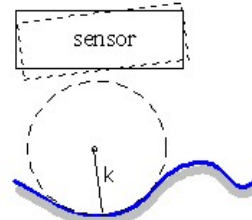
상당한 장점을 가지고 있어 비구면 또는 자유곡면 형상 측정에 있어 나노미터 측정 정밀도 구현을 위한 대안으로 떠오르고 있다.



(a)영차미분값(형상)



(b)일차미분값(기울기)



(c)이차미분값(곡률)

그림 1 국부영역의 측정요소

2.2 측정수식

직교 좌표 시스템에서 높이형상 $z(y)$ 와 곡률 $k(y)$ 의 관계는 다음의 식(1)과 같이 비선형 이차미분방정식으로 표현되는 Frenet's 식으로 주어진다.^{9,10}

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

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, 그림 2와 같이 일정국부영역으로부터 측정요소인 곡률값을 획득한 다음 Δs 간격으로 주사(scanning)함으로써 각 국부영역의 곡률값들을 라인을 따라 획득하게 된다.

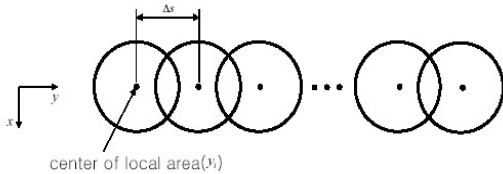


그림 2 국부영역에서의 곡률측정법과 전체 측정 영역을 위한 주사법

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, 식(1)의 해는 식(2)와 같이 유도된다.³

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

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

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.

3. 측정시스템

3.1 백색광 간섭계 원리

곡률 간섭계는 측정 대상물 전체영역을 주사하며,

각 국부영역에서 획득된 곡률을 기반으로 전체 형상을 복원하는 측정원리를 가진다. 국부영역의 곡률을 획득하기 위해서는 기존의 간섭계를 이용하여 측정 가능한 영역(subaperture area)의 형상을 획득하고 일련의 과정을 거쳐 곡률을 결정할 수 있다. 독일표준 연구소나 미국표준연구소는 국부영역의 곡률을 측정하기 위해 트와이만-그린(Twyman-Green)를 채택하였는데, 트와이만-그린 간섭계가 가진 특성으로 인해 곡률을 결정하는 단계에서 많은 문제점이 발생하였다.¹¹ 본 논문에서는 트와이만-그린 간섭계를 사용함에 따라 발생했던 광축정렬문제, 환경노이즈문제 등의 문제점을 제거하기 위한 목적으로 백색광 간섭계를 사용하게 되었다.

백색광 간섭계는 짧은 가간섭거리(coherence length)를 갖는 백색광을 광원으로 한 간섭계로서, 그림 3에서와 같이 광원으로부터 출발한 백색광이 간섭대물렌즈 내에 존재하는 광분할기(Beam splitter)에 의해 각각 기준거울(Reference mirror)과 측정시편(Object)의 두 방향으로 분할된다. 기준거울에 의해 반사된 기준광(Reference beam)과 측정시편에 반사된 측정광(Measurement beam)이 간섭하여 결상장치(Photodetector array)에 간섭무늬를 형성시키는데, 백색광의 짧은 가간섭성의 특징으로 인하여, 분할된 두 광의 경로차(Optical path difference)가 수 마이크로를 벗어나면 간섭무늬는 발생하지 않으며, 두 광경로가 정확하게 일치할 때 그림 3과 같이 최고의 간섭무늬를 형성한다. 간섭대물렌즈에 부착된 압전소자(PZT actuator)를 구동시켜 측정광경로를 변화시킴에 따라 최대 간섭무늬가 발생하는 지점을 형상의 높이로 결정한다.

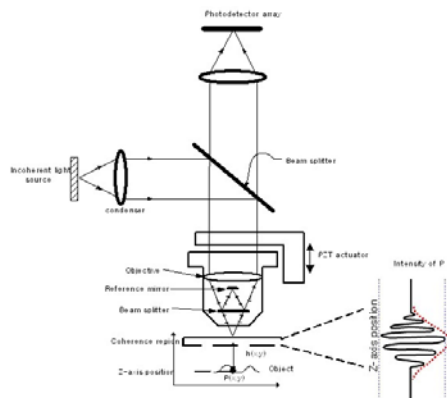


그림 3 백색광 주사간섭계의 작동원리

백색광 간섭계는 압전소자를 이용하여 광축방향으로 주사하며 형상을 측정하는 방식이기 때문에 국부 영역의 곡률을 결정할 때, 간섭대물렌즈의 초기 위치와 곡률값 사이에 상호 독립성이 유지되는 장점을 가진다. 반면, 트와이만-그린 간섭계는 가간섭이 큰 레이저를 사용하며, 평면 측정광을 사용하는 특성이 있어 대물렌즈의 초기위치가 곡률값 결정에 큰 영향을 주는 결과를 준다.¹¹

3.2 측정 장치

실험에 사용된 백색광 간섭계는 기존 상용화 된 제품을 곡률측정이 가능한 형태로 설계 변경 개조되었다.



그림 4 백색광 간섭계 구성

그림 4는 실험에 사용된 백색광 간섭계의 실제 사진으로, 광학식 테이블(Optical breadboard)위에 장착된 간섭계 장비와 이를 제어하는 PC로 구성된다. 시편이 놓이는 스테이지는 2축방향으로 제어가 가능하며, 간섭대물렌즈가 장착된 프루브는 1축 방향으로 PC에서 자동으로 제어가 가능하다. 또한 프루브는 광초점(focal point)을 피벗점(pivot point)으로 하여 회전(Tilt)운동이 가능하도록 구성되었다. 작동 거리는 100X100X100mm이며, 프루브의 회전운동은 $\pm 6^\circ$ 영역을 가진다. 간섭대물렌즈의 배율에 따라 측정영역 변경이 가능한 특징이 있다.

4. 측정 결과

4.1 구면거울 시편

백색광 간섭계를 기반으로 구현된 곡률간섭계는

비구면 또는 자유곡면 형상을 나노미터 정밀도로 측정하는 것을 최종 목표로 하며, 그 첫 단계로 기존 장비와의 검증이 가능한 구면거울을 대상으로 실험을 수행하였다. 측정 대상인 구면거울은 그림 5와 같이 50mm 직경, 은 코팅(Silver coated) 처리된 표면을 가지며, 480~1100nm 파장에 대해 96%의 반사도, 200mm의 곡률반경을 가진다. 측정에 사용된 간섭대물렌즈는 10배 배율을 가지는 미라우(Mirau) 타입으로 0.6mm FOV(Field of View)를 가진다.



그림 5 측정시편: 구면거울

동일 피측정물에 대해서 개발된 곡률간섭계와 측정 비교할 기존 간섭계는 그림 6과 같이 한국표준연구원(KRISS: Korea Research Institute of Standards and Science)이 보유하고 있는 피조간섭계로서, 이는 현재 구면형상 측정분야에서 세계기준의 역할을 하고 있는 측정 장비이다.



그림 6 비교측정기: 한국표준연구원 보유 피조간섭계

4.2 비교측정 결과 및 정밀도 진단

피측정물 표면 중 총 32mm 영역을 비교 측정 대상으로 삼았으며, 측정 국부영역 수는 16개이고, 국부영역 간 거리는 2mm로 하였다. 그림 7은 피조간섭계와 개발된 곡률간섭계로 상호 비교 측정된 결과를 보여준다. 동일 영역 측정결과값 간의 차이를 분석한 결과 32mm 영역에서 최대오차는 56nm이며, RMS(Root Mean Square)는 21nm를 보였다.

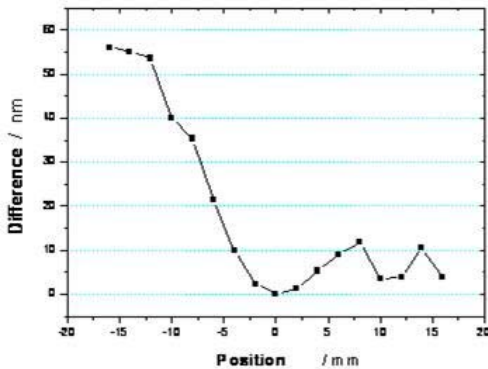


그림 7 구면거울 형상 복원오차: 개발된 곡률간섭계와 기존 구면측정 간섭계인 피조간섭계의 비교측정에 의해 발행된 오차

5. 결 론

본 연구에서는 비구면 또는 자유곡면의 형상에 대해 나노미터 측정 정밀도 구현을 목표로 한 곡률간섭계를 구현하였다. 곡률간섭계 관련 기존 연구에서 사용한 트와이만-그린 간섭계에서 발생하는 오차를 극복하기 위해 백색광 간섭계를 사용하였으며, 최종목표를 달성하기 위한 첫 단계로 잘 정의된 구면거울을 기존 간섭계와 상호 비교 측정함으로써 측정기의 정밀도를 진단하였다. 측정 결과 32mm 측정영역에서 최대오차 56nm, RMS오차 32nm를 획득하였다.

후 기

이 연구결과물은 2008학년도 경남대학교 학술진흥

연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

참고문헌

1. P. Thomson-Schmidt, M. Schulz, and I. Weingartner, "A facility for the curvature-based measurement of the nano-topography of complex surfaces," in *Optical Devices and Diagnostics in Materials Science*, Proc. SPIE, Vol.4098, pp.94-101, 2000.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. P.E. Glenn, "Lambda-over-one-thousand metrology results for steep aspheres using a curvature profiling technique," in *Advanced Optical Manufacturing and Testing II*, Proc. SPIE, vol.1531, pp.61-64, 1992.
6. 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.
7. U. Griesmann, N. Machkour-Deshayes, J. Soons, B.C.Kim, Q. Wang, J.R..Stoup, and L. Assoufld, "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.
8. ByoungChang Kim, SeoHeon Kim, YongKwan Kwon, "A Curvature Sensor using White-Light Scanning Interferometry," Proc. SPIE, Vol. 6292, pp.110-116, 2006.
 9. M.P.do Carmo, *Differential Geometry of Curves and Surfaces (Prentice Hall, USA, 1976)*.
 10. J.J. Stoker, *Differential Geometry (Wiley -Interscience, New York, 1969)*.
 11. ByoungChang Kim, "Development of profilometry based on a curvature measurement," J. of the Optical Society of Korea, Vol.18, No.2, pp.1-5, 2007.