

정전용량형 센서를 이용한 기상계측시스템의 개발

김건희(한국기초과학지원연구원), 박순섭, 박원규(충남대 대학원), 원종호 (충남대 공대)

Development of On-machine Measurement System utilizing a Capacitive-type Sensor

G.H. Kim(KBSI), S.S. Park, W.K. Park(Mech. Eng. Dept., Graduate School, CNU),
J.H. Won(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

This paper described about the ultra-precision profile measurement of aspheric surfaces using contact probing technique. A contact probe has been designed as a sensing device to obtain measuring resolutions in nanometer regime utilizing a leaf spring mechanism and a capacitive-type sensor. The contact probe is attached on the z-axis during measurement while aspheric objects are supported on the single point diamond turning machine(SPDTM). The machine xz-axis motions are monitored by a set of two orthogonal plane mirror type laser interferometers. Experimental results show that the contact probing technique developed of On-machine Measurement System in this investigation is capable of providing a repeatability of 20 nanometers with a $\pm 2\sigma$ uncertainty of 300 nanometers.

Key Words : SPDTM(Single Point Diamond Turning Machine), on-machine measurement(기상측정), contact probe (접촉식 프로브), capacitive sensor(정전용량 센서), leaf spring mechanism(판 스프링 구조), Aspheric lenses(비구면 렌즈)

I. 서론

최근 국내에서도 개발 중인 위성 카메라는 생태계 변화나 환경오염 등의 일반적인 지구관측 뿐만 아니라 정밀한 지도제작 등에도 사용될 수 있는 고해상도 광학계 이므로 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단기술이다.¹⁾ 하지만 독자적인 위성영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 위성카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작 및 평가기술의 확보가 절대적으로 필요하다. 우주시대의 개막에 따라 인공위성용 미러나 렌즈의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 우리나라에서도 인공위성 발사대의 설치와 더불어 인공위성의 제작 수요가 급증하고 있는 추세이다. 위성용 렌즈는 경량 이면서 효율이 높은 광학계를 구축하기 위하여 대부분 비구면 렌즈를 사용하고 있다. 직경120 mm이하의 이미 상

품화된 비구면 측정기(Form Talysurf)를 사용하고 있으며, 그 이상의 대구경 비구면 부품측정을 위해서는 보상 측정용 널(Null)렌즈를 제작하여 측정에 사용되고 있으나, 널(Null)렌즈의 가공시간과 많은 비용이 요구되는 단점이 있다. 본 논문에서는 나노미터 단위의 축 이송 정밀도를 갖고 비구면 광학계 제작에 사용되고 있는 초정밀 가공장비 자체에 정전용량형 센서를 이용하여 접촉식 프로브를 설계 제작하였고, 이를 이용하여 비구면 렌즈의 형상을 측정하기 위하여 렌즈의 측정 요건에 맞는 접촉식 측정 시스템을 구축하고, 평면과 비구면의 시편을 제작하여 비구면 형상측정기인 Form Talysurf와 비교 측정한 결과를 통하여 제작된 측정 시스템의 성능을 평가하였다.

II. 기상계측용 접촉식 프로브

1. 접촉식 프로브의 설계

비구면 렌즈는 반사율이 낮고 측정영역 내에서 측정물의 높이변화가 크기 때문에 접촉식 측정방법이 요구된다. 정밀 접촉식 프로브는 크게 측정물과 접촉하여 운동을 유발시키는 부분과 이 운동을 측정하려는 점까지 전달하는 부분, 그리고 이상에서 유발된 변위를 측정하는 센서로 나뉜다.

Fig 1. 은 본 연구에서 제작한 접촉식 프로브를 보여준다. 접촉식 측정에서 측정물에 훼손을 방지하기 위하여 접촉력을 최대한 줄이는 것이 필요하다. Fig. 1에서 보여지는 프로브는 접촉력 제어와 운동을 전달하는 요소로 한 쌍의 평행한 판 스프링 구조를 이용하였다. 이를 통하여 측정물의 높이방향에 수직인 두 축 방향의 운동과 3 가지 회전운동이 제한되고, 측정물의 높이 방향의 변화만을 프로브 끝단의 센서에서 측정을 하게 된다.



Fig.1 Schematics of precision contact probe.

스프링 구조에서 접촉력은 유효 스프링 상수와 스프링에 유발되는 변위에 비례한다. 일반적으로 접촉식 프로브에서의 접촉력은 0.1~100 mN 정도이지만 시편의 훼손을 고려하거나 측정물과 프로브팁의 접촉면에서 생기는 탄성변형에 의한 오차 등을 줄이기 위해서 접촉력은 작을수록 좋다. 특히 프로브 팁이 작은 경우에는 아주 작은 접촉력에 대해서도 심각한 문제를 유발하게 된다. 접촉식 프로브를 이용하여 측정을 수행하는 경우, 판 스프링에는 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 의 변위가 유발된다. 이 경우에 측정물에 작용하는 접촉력이 일반적인 접촉식 프로브에서의 값을 넘지 않

위해서는 판 스프링의 유효 스프링 상수가 수 kN/m에서 수십 kN/m의 값을 넘지 않도록 하여야 한다.

판 스프링의 유효 스프링 상수를 결정하는 또 한 가지 요인은 프로브 자체의 고유진동수이다. 연속적으로 측정을 수행하는 과정에서 접촉식 프로브는 외부로부터 여러 가지의 주파수에 해당하는 외력을 받게 된다. 이 과정에서 프로브의 공진이 일어날 수 있게 되는데 프로브의 공진 주파수가 높을수록 측정물에 의한 공진이 일어나는 것을 막을 수 있게 된다. 따라서 프로브의 공진 주파수를 크게 하기 위해서 유효 스프링 상수를 크게 설계한다. 제작한 접촉식 프로브는 한 쌍의 판 스프링이 병렬로 연결되어 있으면 유효 스프링 상수는 약 4.5 kN/m가 되며, 이 경우에 프로브의 공진 주파수는 약 112.5 Hz가 되고 최대 접촉력은 약 23mN이 된다.

연속 주사방식의 측정에서 프로브가 질량과 스프링만으로 이루어진 시스템의 경우에 측정물의 모양변화에 대하여 프로브가 프로브의 표면을 이탈하는 경우가 생길 수 있다. 이러한 영향을 방지하기 위하여 감쇄기를 두어 이러한 영향을 방지하게 된다.

판 스프링 구조에서 접촉력은 운동부의 변위에 비례하게 된다. 따라서 접촉력의 크기를 작고 일정하게 유지하기 위해서는 프로브의 위치를 측정물에 대하여 일정하게 유지하면서 제어하면 된다. 이렇게 접촉력을 작게 유지하기 위해서 초정밀가공 시스템이 갖고있는 X축과 Z축의 이송정밀도(1.25 nm)를 이용하여 상대 변위를 일정하게 유지하면서 제어를 하여 구현하게 된다.

운동부는 판 스프링으로 프로브의 본체와 연결되어서 한쪽 끝단에 위치한 프로브 팁에 측정물이 닿으면 운동부에 변위가 생기게 된다. 운동부의 다른 쪽 부분에는 도체로 된 기준평면이 존재하여 프로브의 본체에 고정된 정전용량센서가 운동부의 움직임을 측정해 측정물에 의해 생기는 운동부의 변위를 측정하게 된다. 운동부는 도체로 이루어져 있기 때문에 정전용량센서가 도체만을 측정할 수 있는데 비해 측정물의 전도도에 상관없이 측정이 가능하게 된다.

2. 접촉식 프로브의 성능평가

Fig. 2는 프로브의 동적 특성을 평가하기 위하여 충격실험을 수행한 결과이다. 아무런 외력이 가해지지 않은 프로브에 한번의 충격을 가하고 프로브의 거동을 살펴보았다.

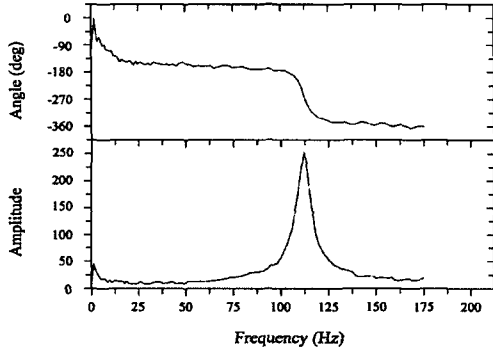


Fig 2, Impact test

프로브를 설계할 때 프로브의 고유진동수를 약 112.5 Hz 정도가 되도록 설계하였다. 실험결과에서 제작된 접촉식 프로브의 고유 진동수는 약 112 Hz로 설계한 데이터와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 프로브의 구조에서 운동부에 해당하는 질량은 약 7 g이다. 이때 제작된 판 스프링의 유효 스프링 상수는 약 4.5 kN/m로 설계 값과 일치한다.

측정을 수행할 때 프로브를 초정밀 가공기의 공구대 장착부위에 설치한 뒤, 프로브의 신호와 초정밀가공기의 축 이송위치 검출을 이용하여 측정물의 형상을 복원하게 된다. 초정밀가공기의 위치검출 정밀도는 레이저 간섭계를 이용하여 반복분해능 1.25 nm를 갖는다. 또, 제작한 접촉식프로브가 프로브의 센서로 사용하고 있는 정전용량센서의 성능을 제대로 수행하고 있는가를 확인하기 위해서 프로브의 신호를 보정할 필요가 있다. 접촉식 프로브의 측정값은 실제 측정을 수행하게 되는 초정밀가공 이송축인 Z축의 변위 값에 대하여 보정하게 된다. 프로브를 공구대위에 장착한 후 Z축스테이지를 접촉식 프로브에 대하여 앞뒤로 움직이면서 그때 해당하는 프로브 값을 읽어서 이 값을 이용하여 보정을 수행한다. 보정을 수행한 결과는 Fig. 3 과 같다. 그림에서 나타나는 것처럼 접촉식 프로브의 측정값과 레이저 간섭계

측 Z축 변위의 측정값은 선형으로 나타나게 된다. 따라서 판스프링 구조로 만든 접촉식 프로브는 Z축 스테이지의 이동에 의한 위치 변화량을 특별한 히스테리시스 없이 측정을 할 수 있음을 보여 준다.

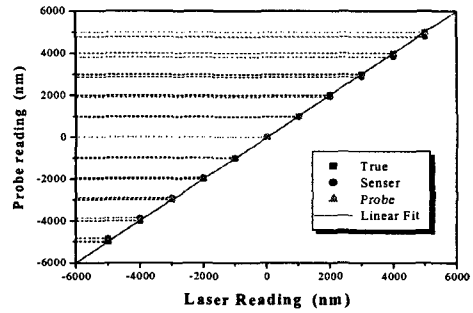


Fig 3. Probe calibration to laser interferometer

III. 측정 결과

1. 측정 시스템

기상측정시스템에 사용된 초정밀가공기는 Nanoform 600 이며, 측정결과와 비교측정은 Form Taly-

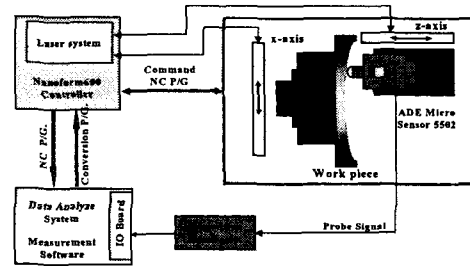


Fig. 4 Block diagram of contact measurement system

surf Series 2를 사용하였다.^{2,3,4,5)} Fig. 4 는 본 연구에서 제작한 접촉식 프로브를 이용한 측정 방법의 개략도이다. 측정 대상물은 Z축 공구대 위에 고정되어 Z축의 이동에 따라 접촉식 프로브의 선단에 위치한 프로브 팁은 측정 물체의 형상에 대하여 그 위치가 변화하게 되고, 이 변화량은 판 스프링 구조로 이루어진 접촉식 프로브를 통해 프로브의 반대쪽으로 전달되게 된다. 측정 물체의 형상에 대한 이 변화량은 프로브 팁의 반대쪽에 위치한 정전용량센서

를 통하여 측정한다. 프로브 자체의 측정 영역은 5 μm 에 불과하다. 이러한 문제점은 정밀 스테이지를 이용하여 해결한다. 초정밀가공기기의 위치 변위는 레이저 간섭계에 의해 피드백 제어되며 위치 변위 분해능이 최소 1.25nm까지 가능하다. 따라서 이러한 위치정밀도를 갖는 장비의 공구대 위치에 프로브 시스템을 장착하여 가공한 프로그램과 동일한 프로그램을 이용하여 프로브의 출력 값이 측정영역을 벗어나지 않도록 측정 프로브의 위치를 기계의 Z축 공구대 위치에 장착하였다. 비구면 형상의 측정시 발생하는 에러는 주로 X축 중심위치의 오차로 인한 발생이 크게 영향을 주기 때문에 프로브 끝단의 정확한 위치 설정이 측정오차를 주게되는 주된 요인이 된다. 가공프로그램을 이용하여 각 축 스테이지를 구동하여 전체적인 형상은 스테이지의 프로브를 통해서 읽혀지는 형상정보를 통하여 얻을 수 있다.

2. 측정 결과

접촉식 프로브의 성능을 살펴보기 위하여 초정밀가공한 평면의 표면 형상을 Form talysurf와 비교 측정하였다. Fig. 5 (a)는 Form talysurf로 측정한 결과를 나타내며, 오차 정도가 RMS 8.7 nm, Pv 40 nm 이하의 결과를 보여준다.

Fig.5 (b)는 설계 제작한 접촉식 프로브로 평면을 측정한 결과를 보여준다. 측정 결과를 살펴보면 반복능은 40 nm 평면시편의 측정결과에서 Pv 오차정도가 100 nm이하이다. Fig.5 (b)는 제작한 프로브 시스템을 이용한 측정결과로써 피측정물의 재질이 알루미늄이므로 동일 위치를 측정할 경우 스크래치로 인하여 동일 시편에 대하여 다른 위치를 측정한 결과이다. 따라서 정확한 반복불확도는 분석할 수 없으나 약 20 nm의 반복능을 갖는다. 그리고 평균 표준편차의 분석결과 21 nm의 RMS 오차를 가진 것으로 나타나는데, 이는 접촉식 프로브를 이용한 측정시스템의 오차가 RMS 12.3 nm이하라는 것을 말해 주고 있다. 그리고 측정결과에서 Y 축 방향으로 나타나는

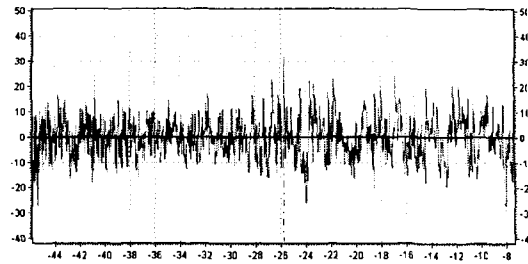


Fig. 5 (a) Roughness measuring by Form talysurf

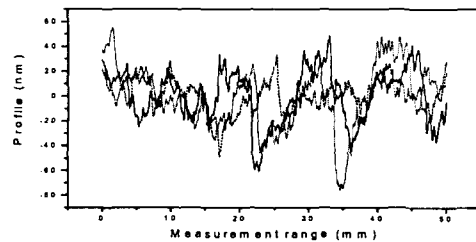


Fig. 5 (b) Roughness measuring by contact measuring system

굴곡은 측정시스템에 사용된 스테이지가 갖는 진폭도 오차성분이 측정결과에 반영된 것으로 해석할 수 있다.

Fig.6 (a)는 초정밀가공기를 이용하여 가공한 비구면 형상을 Form talysurf를 이용하여 측정한 결과이며, Fig.6 (b)는 접촉식 프로브 시스템을 이용하여 비구면 형상을 측정한 결과이다. 검증된 폼 텔리서프와 설계 제작한 접촉식 프로브 측정시스템의 측정 결과 편차가 발생하는데 이는 측정프로브의 끝단에 위치한 볼의 직경 크기의 차이로 인하여 오차가 나타나고 있다. 비구면 형상의 5회 반복 측정결과 제작된 프로브 시스템의 반복정밀도는 Pv 200 nm를 갖으며, 측정된 결과를 기상측정기기인 폼 텔리서프의 측정 데이터와 비교하였을 때 오차가 Pv 값으로 300 nm가 되는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제작된 접촉식 프로브를 이용하여 기상측정장비로 측정이 불가능한 직경 120 mm이상의 대구경 비구면 반사경에 대하여 측정이 가능한 것을 확인 할 수 있다.

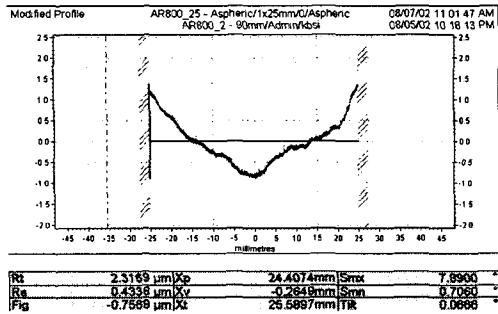


Fig. 6 (a) Aspheric Measuring by Form talysurf

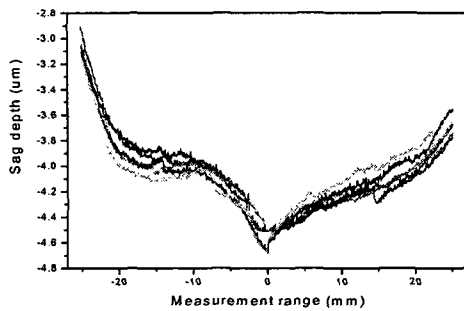


Fig. 6 (b) Aspheric Measuring by probe

IV. 결 론

비구면 렌즈를 포함한 정밀 광학 부품의 형상을 측정하기 위하여 접촉식 프로브를 개발하였다. 판스프링 구조를 이용하여 프로브의 운동을 가이드하고, 측정 센서로는 정전용량센서를 이용하여 초정밀 가공기기의 이송 축인 X축과 Z축의 이송거리(300 mm)와 레이저 간섭계를 이용한 초정밀 위치 분해능(1.25 nm)을 이용하여 대구경 비구면에 대하여 높은 분해능으로 측정물을 측정할 수 있도록 하였다. 또, 제작된 프로브를 이용하여 비구면 형상측정에 널리 이용되고있는 폼 텔리서프와 비교 측정함으로써, 평면 비교측정결과 RMS 12.3 nm의 편차와 반복정밀도 Pv 20nm를 갖으며, 비구면 측정결과 Pv 300 nm의 편차와 Pv 200 nm의 반복정밀도를 가지고 있음을 확인하였다.

향후 본 측정시스템을 이용하여 현재 측정이 불가능한 직경 120 mm 이상 600 mm 이하의 비구면 형상을 가공과 동시에 측정이 가능하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 2001년도 충남대학교 학술연구비 지원으로 수행된 과제이며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이윤우, "고해상도 위성카메라 평가 기술", 측정 표준, 제22권, 제2호, pp. 29-41.
2. Geon-Hee Kim, Kwon-Hee Hong, Sang-Suk Kim, Jong-Ho Won, "Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 1, January pp. 2002.
3. J.B.Ko, G.H.Kim, J.H.Won, "A Study on the cutting characteristics of non-ferrous metals using diamond turning machine", Trans. of KSMTE., Vol.10, No.5, p124-129, 2001
4. Ko, Joon Bin · Kim, Geon hi · Hong, Kweon hi · Song, Hi Duck · Won, Jong Ho, "Nanometer Scale Ultra Precision Machining of Oxygen-free Copper", KOSTET REVIEW Vol.6, No.2, p77-82, September 2001