

# 비구면 렌즈의 형상 측정을 위한 접촉식 프로브 기술 개발

유승봉\*(KAIST 기계공학과), 장인철(KAIST 기계공학과), 김승우(KAIST 기계공학과)

## Contact Probing Technique for Profile Measurement of Aspheric Lenses

S. B. Yoo(Mech. Eng., KAIST), I. C. Chang(Mech. Eng., KAIST), S. W. Kim(Mech. Eng., KAIST)

### ABSTRACT

This dissertation is concerned with 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 an precision xy-stage whose lateral motions are monitored by a set of two orthogonal plane mirror type laser interferometers. Experimental results show that the contact probing technique developed in this investigation is capable of providing a repeatability of 50 nanometers with a  $\pm 3\sigma$  uncertainty of 300 nanometers. Thermal disturbance is found the most significant factor that should be precisely controlled for accurate measurement.

**Key Words** : Contact probe(접촉식 프로브), Capacitive sensor(정전용량 센서), Leaf spring mechanism(판스프링 구조), Precision stage(정밀 스테이지), Aspheric lenses(비구면 렌즈)

### 1. 서론

비구면 렌즈는 여러 개의 구면렌즈로 이루어진 광학계를 하나의 렌즈로 대체함으로써 광학계의 무게와 부피를 대폭 감소시키는 장점을 갖는다. 최근 산업계에서는 제품 형상의 난이성과 대량생산을 위하여 많은 비구면 렌즈의 생산에 정밀 사출성형 기술이 이용되고 있다. 일반적인 사출성형에 비해 비구면 렌즈의 사출성형은 10 배 이상의 고정밀도가 필요하게 된다. 정밀 사출성형을 통하여 고정밀도의 제품을 생산하는 과정에서 코아의 가공정도, 금형구조, 재료선택, 사출조건, 환경조건 등 여러 원인에 의해 불량 발생할 수 있다. 렌즈의 개발단계에서는 이러한 불량을 제거하기 위하여 수 차례의 시사출을 수행하며 그 결과를 기반으로 금형을 수정한다. 금형수정을 위해서는 사출 성형물의 불량원인을 정확하게 판단하여야 하는데 이를 위해서 생산되어진 렌즈의 형상을 정밀하게 측정하고, 측정데이터로부터 정확한 형상오차를 구해내야 한다.

국내에서 비구면 렌즈 등의 정밀 부품에 대한

측정은 표면 조도기를 사용하나 표면 조도기의 특성상 측정영역에 제한을 받고 전체영역에 대한 측정도 불가능하며, 기존의 삼차원 측정기로 측정을 수행할 경우 측정영역에 대해서는 제한이 따르지 않으나 1  $\mu\text{m}$  미만의 정밀도를 기대할 수 없어 수 백 nm의 치수정밀도를 요구하는 비구면 렌즈의 측정에는 적합하지 않다. 또, 광학식 측정의 경우 측정 영역이 좁고, 측정 대상물의 반사율이 낮은 경우나, 측정 대상물의 경사가 급한 경우에는 측정을 수행하기 어렵다. 이러한 이유에서 지속적으로 발전하는 첨단 전자제품의 고정밀화를 보장하기 위해서는 이러한 요구에 적합한 새로운 삼차원 측정기의 개발이 필요하다.

접촉식 방법을 이용하여 넓은 영역에 대하여 높은 측정 불확도를 갖는 측정기의 개발에 대한 연구는 일본의 렌즈 제작 업체를 중심으로 꾸준히 계속되어 오고 있다.<sup>1, 2, 3</sup> 정밀 측정에 적합한 프로브에 대한 연구들도 이와 동시에 진행되고 있다.<sup>4</sup>

본 연구에서는 비구면 렌즈를 측정할 수 있는 접촉식 프로브를 설계 제작하였고, 이를 이용하여 비구면 렌즈의 삼차원 형상을 측정하기 위하여 렌

즈의 측정 요건에 맞는 접촉식 측정 시스템을 구축하고 표준시편을 측정한 결과를 통하여 제작된 측정 시스템의 성능을 평가하였다.

## 2. 접촉식 프로브의 설계

### 2.1 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.

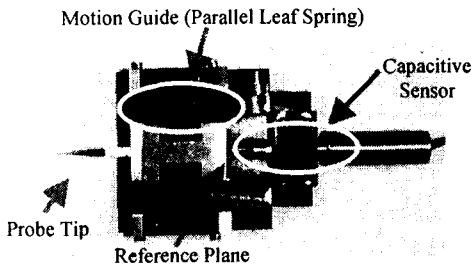


Fig. 1 Structure of precision contact probe

Fig 1 은 본 연구에서 제작한 접촉식 프로브를 보여준다. 접촉식 측정에서 측정물에 훼손을 방지하기 위하여 접촉력을 최대한 줄이는 것이 필요하다. Fig. 1 에서 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.

스프링 구조에서 접촉력은 유효 스프링 상수와 스프링에 유발되는 변위에 비례한다. 일반적으로 접촉식 프로브에서의 접촉력은 0.1~100 mN 정도이지만 시편의 훼손을 고려하거나 측정물과 프로브 팁의 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 않기 위해서는 판 스프링의 유효 스프링 상수가 수 kN/m에서 수십 kN/m의 값을 넘지 않도록 하여야 한다.

판 스프링의 유효 스프링 상수를 결정하는 또 한가지 요인은 프로브 자체의 고유진동수이다. 연속형으로 측정을 수행하는 과정에서 접촉식 프로브는 외부로부터 여러 가지의 주파수에 해당하는 외력을 받게 된다. 이 과정에서 프로브의 공진이 일어날 수 있게 되는데 프로브의 공진주파수가 높을수록 측정물에 의한 공진이 일어나는 것을 막을 수 있게 된다. 따라서 프로브의 공진주파수를 크게 하기 위해서 유효 스프링 상수를 크게 설계한다. 제작한 접촉식 프로브는 한 쌍의 판 스프링이 병렬로 연결되어 있으면 유효 스프링 상수는 약 5 kN/m가 되며, 이 경우에 프로브의 공진주파수는 약 80 Hz가 되고 최대 접촉력은 약 50 mN이 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 위해서는 이미 제작되어있는 정밀 스테이지를 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.

### 2.2 접촉식 프로브의 성능평가

프로브의 동적 특성을 평가하기 위하여 충격실험을 수행하였다. 아무런 외력이 가해지지 않은 프로브에 한번의 충격을 가하고 프로브의 거동을 살펴 보았다. 결과는 Fig. 2와 같다.

프로브를 설계할 때 프로브의 고유진동수를 약 80 Hz 정도가 되도록 설계하였다. 실험결과에서 제작된 접촉식 프로브의 고유진동수는 약 79 Hz로 설계한 데이터와 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 프로브의 구조에서 운동부에 해당하는 질량은 약 20 g이다. 이때 제작된 판 스프링의 유효 스프링 상수는 약 5 kN/m로 설계 값과 일치한다.

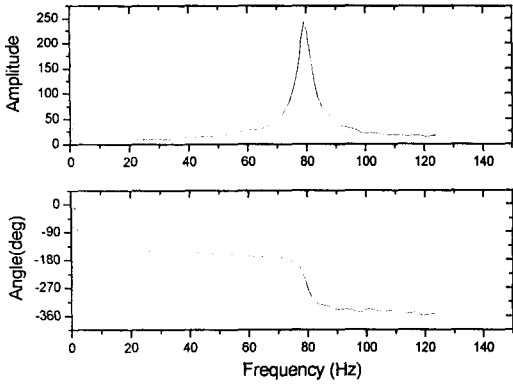


Fig. 2 Impact test of contact probe (natural freq. 79 Hz)

측정을 수행할 때 프로브를 정밀 스테이지에 장착한 뒤, 프로브의 신호와 스테이지의 측정 센서인 레이저 간섭계의 신호를 이용하여 측정물의 형상을 복원하게 된다. 또, 제작한 접촉식 프로브가 프로브의 센서로 사용하고 있는 정전용량센서의 성능을 제대로 수행하고 있는가를 확인 하기 위해서 프로브의 신호를 보정할 필요가 있다.

접촉식 프로브의 측정값은 실제 측정을 수행하게 되는 정밀 스테이지의 레이저 간섭계의 값에 대하여 보정하게 된다. 프로브를 스테이지에 장착한 후 스테이지를 접촉식 프로브에 대하여 앞뒤로 움직이면서 그때 해당하는 프로브 값을 읽어서 이 값을 이용하여 보정을 수행한다. 보정을 수행한 결과는 Fig. 3 과 같다. 그림에서 나타나듯이 접촉식 프로브의 측정값과 레이저 간섭계의 측정값은 선형으로 나타나게 된다. 따라서 판 스프링 구조로 만든 접촉식 프로브는 스테이지의 이동에 의한 높이 변화량을 특별한 히스테리시스 없이 측정을 할 수 있음을 보여준다.

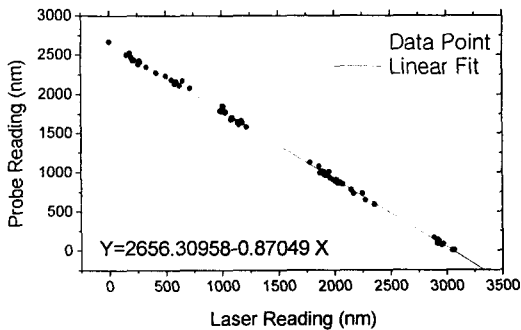


Fig. 3 Calibration of contact probe to laser interferometer

정밀측정에서 가장 큰 오차의 원인으로 나타나

는 것은 온도변화에 따른 구조물의 변형에 의한 오차이다. Fig. 4 는 본 연구에서 제작된 접촉식 프로브가 온도 변화에 대하여 얼마만큼의 오차를 가지고 있는가를 보여준다. 약 1 C 의 온도변화에 대하여 약 1.5 um 의 변형이 유발되는 것을 확인하였다.

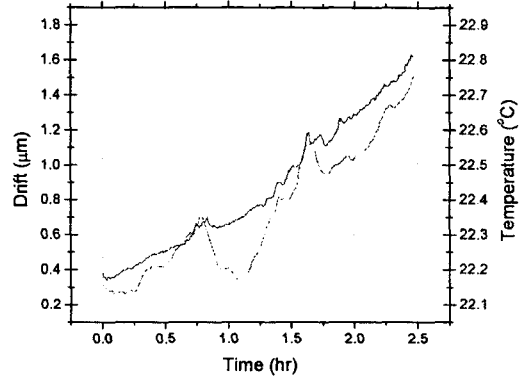


Fig. 4 Stage drift due to temperature change

### 3. 측정 결과

#### 3.1 측정 시스템

Fig. 5 는 본 연구에서 제작한 접촉식 프로브를 이용한 측정 방법의 개략도이다. 측정 대상물은 스테이지 위에 고정되어 스테이지의 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 정전용량센서를 통하여 측정한다

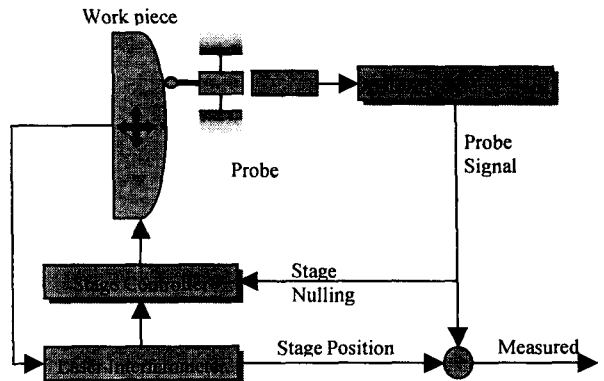


Fig. 5 Block diagram of contact measurement system

프로브 자체의 측정 영역은  $5 \mu\text{m}$  에 불과하다. 이러한 문제점은 정밀 스테이지를 이용하여 해결한다. 앞에서 언급했듯이 위치 분해능이 최소  $1.25 \text{ nm}$  까지 가능한 정밀 스테이지를 이용하여 프로브의 출력 값이 측정 영역을 벗어나지 않도록 스테이지를 구동하여 전체적인 형상은 스테이지의 구동 위치정보와 프로브를 통해서 읽혀지는 형상정보를 더해서 얻을 수 있다.

### 3.2 측정 결과

접촉식 프로브의 성능을 살펴보기 위하여 오차 정도가  $100 \text{ nm}$  이하인 0 등급의 게이지 블록의 형상을 측정하였다. Fig 6 은 10 회 반복 측정한 결과를 보여준다. 측정 결과를 살펴보면 반복능은  $50 \text{ nm}$  이하, 그리고 측정을 수행한  $12 \text{ mm}$  영역 내부에서  $250 \text{ nm}$  의 PV 오차를 가진 것을 확인할 수 있다.

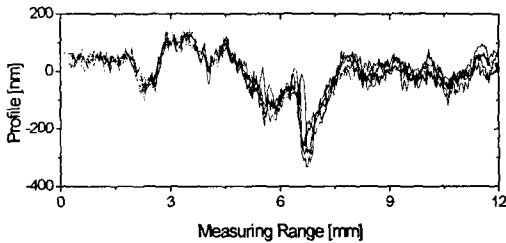


Fig. 6 Repeatability test of contact measuring system

Fig. 7 (a)는 게이지 블록의 3 차원 형상을 측정한 결과이다. 0 등급의 게이지 블록은 평면에서의 오차 정도가  $100 \text{ nm}$  이하이다. 측정결과  $200 \text{ nm}$  의 RMS 오차를 가진 것으로 나타나는데, 이는 접촉식 프로브를 이용한 측정시스템의 오차가  $200 \text{ nm}$  이하라는 것을 말해주고 있다. 그리고 측정결과에서 Y 축 방향으로 나타나는 굴곡은 측정시스템에 사용된 스테이지가 갖는 진직도 오차성분이 측정결과에 반영된 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 7(b)는 레이저 프린터에 사용되는 광학부품 중 하나인 F- $\theta$  렌즈를 측정한 결과이다. 렌즈와 같은 광학 부품은 반사율이 낮고, 최근에 사용되는 대부분의 렌즈들은 일련의 렌즈 군을 하나의 렌즈로 대체하려는 시도가 많기 때문에 렌즈가 비구면으로 높이방향에 대해 큰 변화를 갖게 된다. 본 연구에서 제작된 접촉식 프로브를 이용하여 높이 방향으로 수 mm 의 변화를 갖는 물체에 대하여 측정이 가능한 것을 확인할 수 있다. 측정된 결과를 실제 설계 데이터와 비교하였을 때 오차가 RMS 값으로  $0.58 \mu\text{m}$  가 되는 것을 확인하였다.

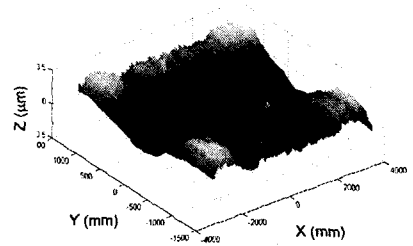


Fig. 7 (a) Measuring example : Gauge block

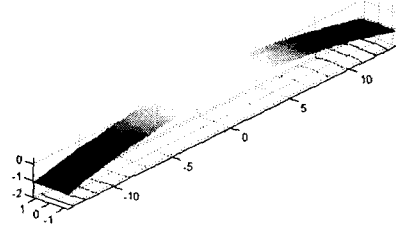


Fig. 7 (b) Measuring example : F- $\theta$  Lens

## 4. 결론

비구면 렌즈를 포함한 정밀 광학 부품의 형상을 측정하기 위하여 접촉식 프로브를 개발하였다. 판스프링 구조를 이용하여 프로브의 운동을 가이드하고, 측정 센서로는 정전용량센서를 이용하여 측정물의 높이방향에 대하여 높은 분해능으로 측정물을 측정할 수 있도록 하였다. 또, 제작된 프로브를 이용하여 형상을 알고 있는 평면을 측정함으로써, 접촉식 프로브를 이용한 접촉식 측정시스템이  $\pm 200 \text{ nm}$  의 측정 불확도와  $20 \text{ nm}$  의 측정 분해능을 가지고 있음을 확인 하였다.

## 참고문헌

1. Becker K and Heynacher E, "A High Resolution Coordinate Measuring Machine for the Testing of X-Ray Mirrors", SPIE vol. 733(Bellingham, WA: SPIE), pp. 149, 1986
2. K. Yoshizumi, et al., "Ultrahigh accuracy 3-D Profilometer Using Atomic Force Probe", National Technical Report, Vol. 39, No. 4, pp.116, 1993
3. Mahito Negishi et al., "A high-precision coordinate measuring system for super-smooth polishing", Nanotechnology, Vol. 6, p139, 1995
4. D. G. Chetwynd, et. al, "A controlled-force stylus displacement probe", Precision Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 105-111, 1996