

# 초정밀 미세형상 생성 및 형상 보정을 위한 기상측정장치의 설계 Design of an on-machine measurement probe for three-dimensional optical surfaces and corrective figuring

\*#이정훈<sup>1</sup>, 이찬희<sup>1</sup>, 김호상<sup>1</sup>, 허덕재<sup>2</sup>, 김민기<sup>3</sup>, 임경진<sup>3</sup>, 김태형<sup>3</sup>

\*#J. LEE(jhbg1@iae.re.kr)<sup>1</sup>, C. H. Lee<sup>1</sup>, H. S. Kim<sup>1</sup>, D. J. Hur<sup>2</sup>, M. K. Kim<sup>3</sup>, K. J. Yim<sup>3</sup>, T. H. Kim<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>고등기술연구원 로봇/생산기술센터, <sup>2</sup>고등기술연구원 전략연구센터, <sup>3</sup>두산인프라코어 공기자동차화 선행개발 1팀

Key words : On-machine measurement, Touch probe, Axial stiffness, Diaphragm

## 1. 서론

기상측정(On-machine measurement, OMM)이란 공작기계에 측정장치를 장착하여 가공 도중이나 가공 후 가공물을 기상에서 바로 측정함으로써 공작기계가 가공물의 오차를 그 자리에서 파악하는 시스템을 말한다. 기상측정장치의 사용은 독립측정기 사용시 발생하게 되는 공작기계에서 가공물을 분리시켜 측정하고 오차 보정을 위해 재가공시 다시 공작기계에 가공물을 장착시키는 과정에서 발생하는 오차와 생산비용을 줄일 수 있고 측정 시간의 단축이라는 장점이 있다. 정밀측정을 위해 일반적으로 접촉식 프로브 형태의 기상측정장치가 사용되고 있다.<sup>1</sup> 가공면의 정밀한 측정을 위해서는 프로브의 축방향 강성(Axial stiffness)이 작을수록 유리하고 하고, 측정 시 프로브의 횡방향 흔들림을 줄이기 위해서 횡방향 강성(Lateral stiffness)이 클수록 유리하다.<sup>2</sup> 접촉식 프로브로 Air-bearing 타입 프로브가 주로 사용되고 있으나 횡방향 강성이 작아 구면 및 자유곡면 측정 시 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는 초정밀 미세형상 측정 시 문제가 될 수 있는 기존의 접촉식 프로브의 단점 보완을 목적으로 Diaphragm 을 사용하여 설계한 접촉식 프로브 타입 기상측정장치를 제안하였다.

## 2. 기상측정장치 설계

접촉식 프로브 형태의 기상측정장치는 크게 Stylus tip ball 과 Moving part, 변위센서로 구성된다. Fig. 1 의 (a)와 같이 측정장치 축방향으로의 힘만 작용하면 문제가 되지 않으나 Fig.1 의 (b)와 같이 횡방향으로의 힘이 작용하게 되면 발생하는 모멘트에 의해 Moving part 가 흔들리거나 회전하게 되어 오차가 발생하게 된다. 따라서 정밀 측정을 위해서 횡방향 강성은 클수록 유리하다. 축방향 강성이 크게 되면 측정시 가공면에 소성변이 발생할 수 있으므로 축방향 강성은 작을수록 유리하다. 작은 축방향 강성에 비해 큰 횡방향 강성을 가진 기상측정장치의 제작을 위해 황동 박판을 사용하여 Diaphragm 타입의 프로브를 설계하였고, 2 개의 Diaphragm 을 사용하여 횡방향 흔들림을 줄였다.

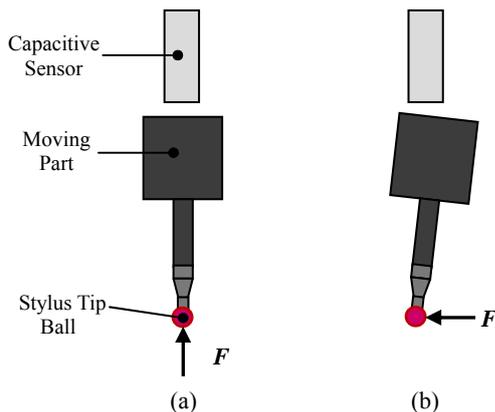


Fig. 1 The influence of the lateral stiffness

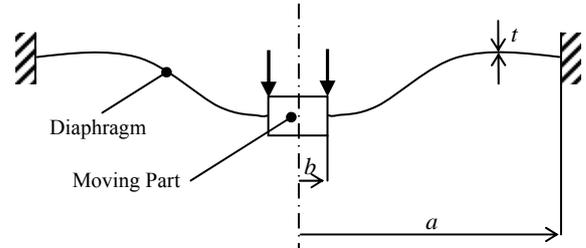


Fig. 2 Schematic cross section of flat circular plates of constant thickness with outer edge fixed and inner edge guided<sup>3</sup>

### 2.1 축방향 강성

첫번째로 Diaphragm 타입 프로브 설계에 있어 축방향 강성을 고려하였다. Stylus tip ball 이 달려있는 Moving part에 두개의 동일한 Diaphragm이 평행하게 연결되도록 설계하였다. 아래의 Roark's formula 이론식을 사용하여 축방향 강성을 계산하였다.<sup>3</sup>

$$K_d = \frac{2\pi b D}{a^3 \left( \frac{C_2 L_6}{C_5} - L_3 \right)} \quad (1)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{1}{4} \left[ 1 - \left( \frac{b}{a} \right)^2 \left( 1 + 2 \ln \frac{1}{b} \right) \right] \quad (3)$$

$$C_5 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{b}{a} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$L_3 = \frac{b}{4a} \left\{ \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 + 1 \right] \ln \frac{a}{b} + \left( \frac{b}{a} \right)^2 - 1 \right\} \quad (5)$$

$$L_6 = \frac{b}{4a} \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 - 1 + 2 \ln \frac{a}{b} \right] \quad (6)$$

Fig.2 와 같이 Outer edge 고정, Inner edge 가이드 조건에서의 Diaphragm 의 축방향 강성은 식(1)과 같다. 식(2)는 plate constant 이고 식(3), (4), (5)와 (6)은 원형 링 solid plate 의 plate function 과 plate constant 이다. Diaphragm 한 개의 강성

Table 1 Parameters of diaphragm and axial stiffness

| Diaphragm Material  | Brass |
|---------------------|-------|
| E(GPa)              | 103   |
| $\nu$               | 0.33  |
| t (mm)              | 0.05  |
| a (mm)              | 30    |
| b (mm)              | 15    |
| $K_d$ (mN/ $\mu$ m) | 0.615 |

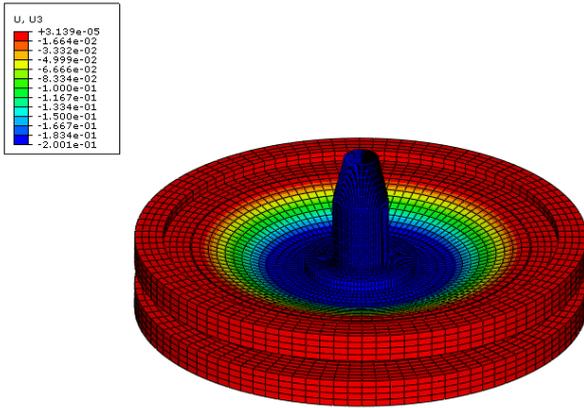


Fig. 3 Contour plot of the FEM analysis: Axial stiffness

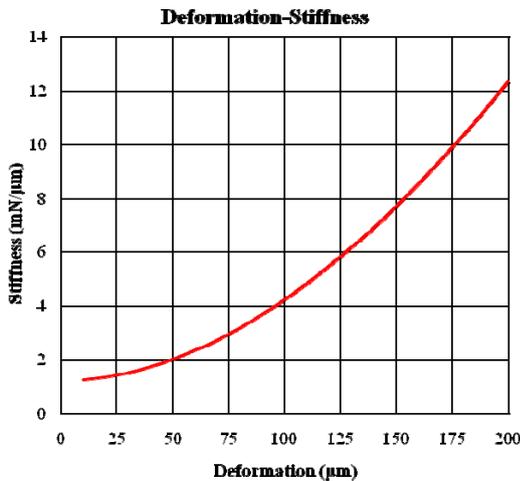


Fig. 4 Axial stiffness of the diaphragm

은 약 0.615 mN/μm 로 얻어졌고, Table 1 에 정리하였다. 두 개의 동일한 Diaphragm 을 평행하게 연결하였기 때문에 프로브의 축방향 강성은 약 1.230 mN/μm 로 얻어진다.

상용유한요소 패키지 ABAQUS 해석결과 축방향 강성이 1.272 mN/μm 로 얻어졌다. 이는 이론식에 의한 강성값과 비교했을 때 3.43%의 오차를 보인다. Fig. 3 은 해석결과 얻은 Diaphragm 의 Contour plot 이다. Fig. 4 는 변위증가에 따른 Diaphragm 의 강성증가 그래프이다.

## 2.2 횡방향 강성

Diaphragm 타입 프로브의 횡방향 강성은 유한요소해석을 통해서 구하였다. 해석결과 횡방향 강성이 2037 mN/μm 로 얻어졌다. 이는 축방향 강성과 비교했을 때 약 2000 배 정도의 비율을 보이므로 충분히 큰 값으로 얻어졌다.

## 3. 기상측정장치의 구성

기상측정장치의 개념도는 Fig. 5 와 같다. 접촉식 프로브 형태로서 Ruby 재질의 Stylus tip ball 이 연결된 Moving part 가 50 μm 두께 황동재질의 동일한 Diaphragm 두개에 지지되어 있다. Moving Part 끝에 분해능 0.36 nm 의 정전용량형 센서(Capacitive sensor)를 장착하여 프로브 끝단의 변위를 측정할 수 있도록 구성하였고, 정전용량형 센서의 상세 사양은 Table 2 와 같다. Cap 부분을 제외한 기상측정장치의 솔리드 모델링은 Fig. 6 와 같다.

## 4. 결론

본 연구에서는 3 차원 광학면의 형상보정을 위하여 Diaphragm 을 사용하여 설계한 접촉식 프로브 형태의 기상측정장치를 제안하였다. 제안된 기상측정장치는 Moving part

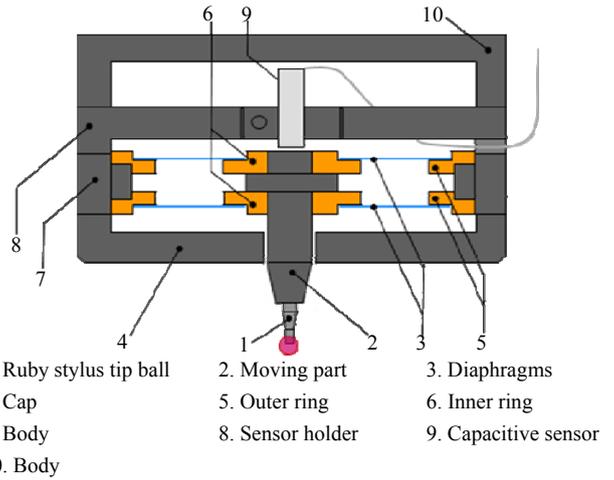


Fig. 5 Schematic cross section of the diaphragm type OMM probe



Fig. 6 Solid modeling of the diaphragm type OMM probe

Table 2 Specifications of capacitive sensor

| Resolution (nm)    | 0.36  |
|--------------------|-------|
| Working range (μm) | ±10   |
| Output signal (V)  | ±10   |
| Bandwidth (KHz)    | 1     |
| Radius (mm)        | 5.58  |
| Length (mm)        | 17.54 |

를 50 μm 두께의 황동박판 두개를 사용하여 지지하여 축방향 강성은 줄이고 횡방향 강성은 크게 하여 횡방향 강성이 작을 시 발생될 수 있는 측정 오차와 횡방향 흔들림을 줄였다.

## 후기

본 연구는 지식경제부의 전략기술개발사업으로 진행중인 대면적 미세가공시스템기술개발과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Choi, J.P., Min, J.P. and Lee, S.J., "Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system," Journal of Materials Processing Technology, **155-156**, 2056-2064, 2004.
- Sohn, A., Dow, T.A. and Marino, E.A., "A new design for a three-dimensional measurement probe," American Society for Precision Engineering Annual Conference, Scottsdale, Arizona, October 22-27, 2000.
- Young, W.C. and Budynas, R.G., Roark's formulas for stress and strain 7<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Inc., 2002.