

# 3 차원 초정밀 미세형상 가공기용 기상측정장치의 설계

## The design of the on-machine measurement probe for 3D ultra-precision machine tool

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

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

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

### 1. 서론

최근 제품의 정밀도를 높이고, 품질을 개선하기 위하여 공작기계의 가공정도를 향상시키려는 노력이 급격히 증가하고 있다. 이를 위하여 공작기계가 가지고 있는 3 차원 위치 오차를 측정하고 해석해야 할 뿐만 아니라 가공이 끝난 제품을 측정 및 검사를 통하여 제품 가공 시 제시된 설계를 만족하는지를 검사하고, 여기서 얻어지는 오차 정보를 가공 공정으로 다시 피드백하는 기능이 필요하다. 일반적으로 공작기계의 3 차원 위치오차는 무부하시의 위치정밀도를 나타내는데, 기계의 상태에 따라 가변적으로 변하며, 공작기계의 가공정도에 큰 영향을 끼친다. 3 차원 위치오차가 보상된 후 가공된 가공물을 측정 및 검사를 통하여 가공물의 설계와 일치하는지를 확인하고 분석할 필요가 있다. 현재는 가공이 끝난 제품을 검사하기 위하여 3 차원 좌표 측정기(Coordinate Measuring Machine, CMM)를 사용하여 측정하고 있다. 이는 생산현장의 품질관리에 필수적인 장비로 고도의 정밀도를 요구하는 부품이나 자유곡면과 같은 복잡한 형상을 가지고 있는 금형의 정도 측정을 위한 효과적인 검사설비로 중요한 역할을 하고 있지만, 관리가 어렵고 설치 및 측정시간이 길어져 비경제적이며, 측정을 위한 가공물의 이동시간은 생산성 저하 및 측정 오차 발생의 요인이 되고 있다. 또한 3 차원 측정기의 한정된 크기 때문에 대형 공작물이나 공정 특성상 가공물의 분리가 어려운 경우에는 마땅한 측정 방법이 없는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 가공이 끝난 제품을 공작기계 위에서 떼어내지 않은 상태에서 직접 측정이 가능한 기상측정장치(On-machine Measurement; OMM)를 제안하였다.

### 2. 기상측정장치

기상측정장치는 가공후 공작기계에서 바로 측정을 하므로 가공물 착탈에 의해 발생하는 오차와 생산비용 및 측정시간의 단축시킬 수 있다. 정밀측정을 위해 접촉식 프로브 형태의 기상측정장치를 일반적으로 사용하고 있다.<sup>1</sup> 접촉식 프로브 타입 기상측정장치의 측방향 강성이 크게 되면 측정 시 시편에 소성변형이 발생할 수 있다. 시편과 프로브 사이에 접촉력(측방향 강성)을 최소화 시켜야 시편의 소성 변형을 막을 수 있다. 접촉식 프로브 형태의 기상측정장치는 크게 stylus tip ball과 moving part, 변위센서로 구성된

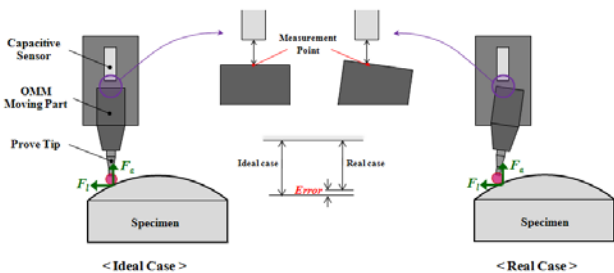


Fig. 1 Influence of the lateral displacement

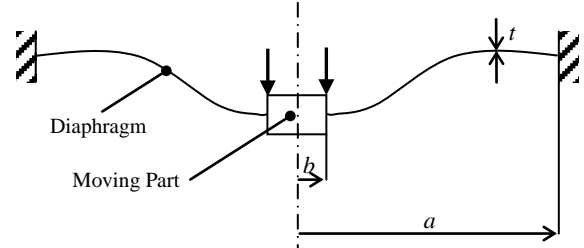


Fig. 2 Schematic cross section of flat circular plates of constant thickness with outer edge fixed and inner edge guided<sup>3</sup>

다. 위의 Fig. 1의 ideal case와 같이 기상측정장치의 측방향으로만 힘이 작용하면 문제가 되지 않으나, Fig. 1의 real case와 같이 횡방향으로 힘이 작용하게 되면, 발생하는 모멘트에 의해 moving part가 흔들리거나 회전하게 되어 측정 오차가 발생되게 된다. 접촉식 프로브를 사용하여 구면 및 토릭면 측정 시 측방향 힘 뿐만 아니라 횡방향으로도 힘이 발생되게 되므로 횡방향 힘에 의해 발생하는 프로브의 횡방향 흔들림을 줄이기 위해서 기상측정장치 설계 시 횡방향 흔들림의 최소화가 요구 된다.<sup>2</sup>

### 3. 기상측정장치 설계

기상측정장치의 설계 요구조건인 작은 측방향 강성과 높은 횡방향 강성의 성능을 만족할 수 있는 프로브의 개발을 위해 moving part 를 다이어프램으로 지지하는 구조의 기상측정장치를 설계하였다.

#### 3.1 측방향 강성

첫 번째로 다이어프램 타입 기상측정장치 프로브 설계에 있어 측방향 강성을 고려하였다. Moving part를 평행하게 배열된 두 개의 다이어프램으로 지지하는 구조의 기상측정장치를 설계하였다. 다이어프램 타입 기상측정장치의 측방향 강성을 Roark's formula 이론식을 사용하여 구하였다.<sup>3</sup>

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

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

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

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

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

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

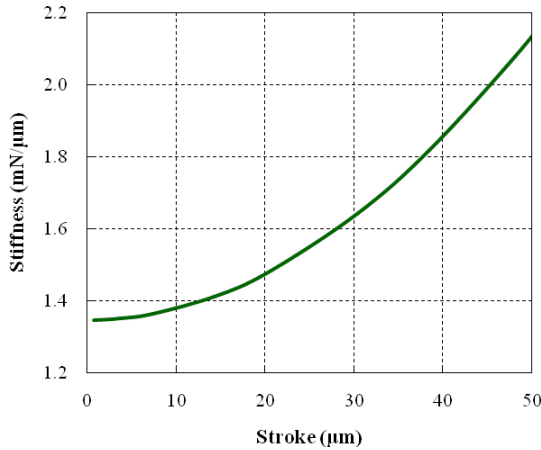


Fig. 3 Axial stiffness of the diaphragm

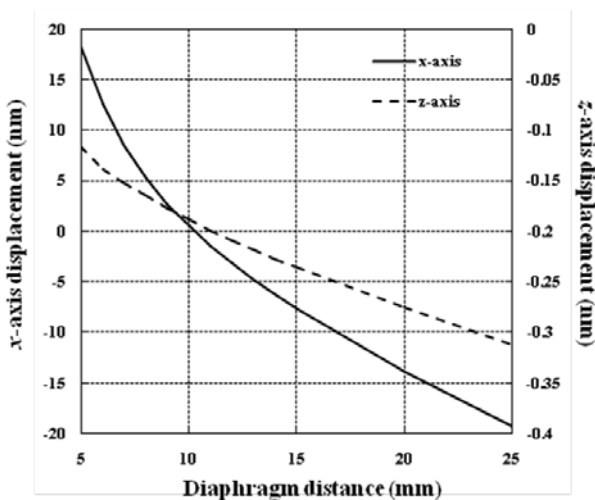


Fig. 4 Lateral direction displacement

Table 1 Parameters of diaphragm and axial stiffness

Diaphragm Material	Brass
$E$ (GPa)	103
$\nu$	0.33
$t$ (mm)	0.05
$a$ (mm)	14
$b$ (mm)	3.5
$K_d$ (mN/μm)	0.726

위의 Fig. 2 와 같이 최외각 다이아프램의 최외각 가장자리는 구속되어 있고 안쪽으로는 가이드로 되어있는 조건의 Roark's formula 식을 사용하였고 강성 계산에 사용한 식은 위의 식(1) ~ (6)과 같다. 축방향 강성은 식(1)과 같으며, 식(2)는 plate constant 이고 식(3), (4), (5)와 (6)은 원형 링 solid plate 의 plate function 과 plate constant 이다. 황동을 사용한 다이아프램 하나의 강성은 약 0.726 mN/μm 로 얻어졌고 Table 1 에 정리하였다. 두개의 동일한 Diaphragm 을 평행하게 연결하였기 때문에 프로브의 축방향 강성은 약 1.453 mN/μm 로 얻어진다. 유한요소해석(Finite element analysis; FE Analysis)을 통해 기상측정장치의 축방향 강성값을 구하였다. Fig 3 에서 볼 수 있듯이 기상측정장치 프로브의 스트로크 증가에 따라 다이아프램의 강성 값은 비선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있고, 약 20 μm 의 스트로크에서 1.478 mN/μm 의 축방향 강성값을 가지며 이는 이론식에 의한 축방향 강성값인 1.453 mN/μm 와 약 1.7 %의 오차를 보인다. 유한요소해석에는 상용패키지 ABAQUS 를 사용하였다.

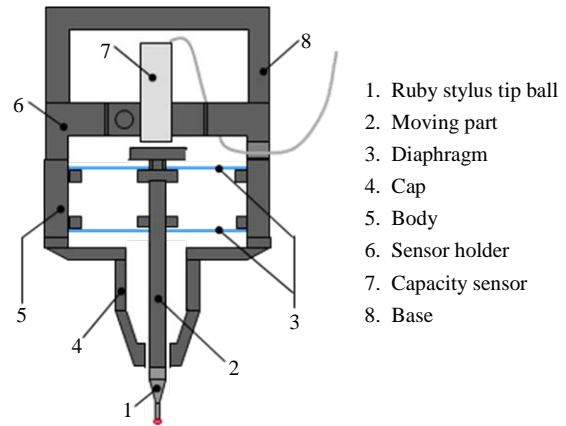


Fig. 5 Schematic cross section of the diaphragm type OMM probe

### 3.2 횡방향 흔들림

앞에서 횡방향 흔들림을 줄이기 위해 moving part 를 평행하게 배열한 동일한 다이아프램 두 개로 지지하였고, 유한요소해석을 통해 횡방향 흔들림이 가장 작은 다이아프램 사이의 거리를 구하였다. 다음의 위의 Fig. 4 와 같이 다이아프램 사이의 거리가 약 10 mm 일 때 횡방향 흔들림이 최소인 것으로 구해졌다.

### 3.3 기상측정장치 구성

기상측정장치의 개념도는 Fig. 5 와 같다. 접촉식 프로브 형태로서 ruby 재질의 stylus tip ball이 연결된 moving part가 황동재질의 50 μm 두께의 동일한 diaphragm 두 개에 지지되어 있다. Moving Part 끝에 분해능 0.36 nm의 정전용량형 센서를 장착하여 프로브 끝단의 변위를 측정할 수 있도록 구성되어 있다. Cap 부분의 필요 없는 부분을 제거하여 측정시 간섭의 영향을 줄였다. 유한요소해석 결과 1 차 고유진동수가 약 174.81 Hz로 구해졌다. 이는 가공장비의 고유진동수 보다 크며, 가공기에서 오는 노이즈의 영향없이 충분한 정도를 낼 수 있음을 나타낸다.<sup>4</sup>

## 4. 결론

본 연구에서는 3 차원 초정밀 미세형상 가공기용 기상측정장치의 개발을 위해 다이아프램 구조를 도입하여 축방향 강성과 횡방향 흔들림을 줄여 측정 오차를 줄일 수 있는 기상측정장치를 설계하였다.

## 후기

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

## 참고문헌

1. 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.
2. 이정훈, 이찬희, 김호상, 허덕재, 김민기, 임경진, 김태형, "초정밀 미세형상 생성 및 형상 보정을 위한 기상측정 장치의 설계," 한국정밀공학회 2009 년도 춘계학술대회 논문집, 231-232, 2009.
3. Young, W.C. and Budynas, R.G., *Roark's formulas for stress and strain 7th Edition*, McGraw-Hill Inc., 2002.
4. 김건희, 원종호, "정전용량센서를 이용한 대구경 비구면 형상의 기상측정에 관한 연구," 한국기계가공학회지, **2**, 3, 56-61, 2003.