

초정밀 기상측정용 다이아프램 타입 접촉식 프로브의 개발

Development of Diaphragm-type Stylus Probe for Ultra-precision On-machine Measurement Application

이정훈¹, 이찬희¹, 최준명¹, 김호상^{1,✉}

Junghoon Lee¹, Chan Hee Lee¹, Joon-Myeong Choi¹, and Ho Sang Kim^{1,✉}

¹ 고등기술연구원 로봇/생산기술센터 (Center for Robot and Manufacturing Technology, Institute for Advanced Engineering)

✉ Corresponding author: hoskim@iae.re.kr, Tel: 031-330-7332

Manuscript received: 2011.12.26 / Accepted: 2012.5.10

The diaphragm-type stylus probe was developed for ultra-precision on-machine measurement (OMM) application. This probe is equipped with two diaphragms which are parallel and one capacitive sensor is used for detecting the vertical motion of end tip in the stylus when it is contacted to the optical freeform surface. For better performance of proposed probes, several design parameters such as axial stiffness and the lateral deformations were investigated with finite element analysis techniques. To verify the feasibility, the profiles of the master sphere ball were measured on the ultra-precision milling machine. The measurement results show that the proposed probe can calculate the radius of the circle within the accuracy of 0.1 μm for the ultra-precision optical surface.

Key Words: On-machine Measurement (기상측정), Diaphragm (다이아프램), Ruby Tip Stylus (접촉식 루비 팁 볼), Capacitive Sensor (정전용량형 센서), Axial Stiffness (축방향 강성), Least Square Circle Fitting (최소자승 원 정의)

기호설명

E = Young's Modulus

ν = Poisson's ratio

t = Thickness of diaphragm

a = Outer diameter of diaphragm

b = Inner diameter of diaphragm

K_d = Axial stiffness of diaphragm

C_2, C_5 = Plate constants dependent upon the ratio a/b

L_3, L_6 = Loading constants dependent upon the ratio a/b

D = Plate constant

1. 서론

최근 들어 광학산업의 비약적인 발전에 따라

전자광학기기등의 핵심부품으로 사용되는 초정밀 급의 미러, 렌즈 등의 수요가 크게 증가하고 있다. 이러한 광학용 비구면 렌즈를 초정밀 금형의 형태로서 가공하는 경우 형상정밀도의 측정은 이후 사출제품의 성능을 좌우하고 전체 광학기기의 성능을 결정하는 매우 중요한 작업이다. 그러나 측정작업 전에 시편의 착탈에 의한 오차가 발생하여 정밀도 평가에 문제점을 발생시키고 있으며, 이에 대한 대안으로 가공기 상에서 가공 후 직접 형상측정을 수행하는 기상측정법 (On-machine measurement; OMM) 이 큰 관심을 받고 널리 연구되고 있다.¹ 특히, 근래들어 수요가 급증하고 있는 토릭면과 같은 회전 비대칭 비구면 렌즈와 자유곡면 형태의 렌즈에 대한 측정은 시편의 착

탈에 의해 많은 오차를 유발하므로 정확한 측정 결과를 얻어내기 어려운 것으로 알려져 있다. 또한 초정밀 광학면의 가공시 많이 사용되는 수정 가공의 경우 가공경로와 유사한 형태의 접촉식 측정을 통해 형상추출이 이루어지므로 프로파일의 측정과 형상 예측을 포함하는 기상측정의 필요성은 증대되고 있는 실정이다.²

이러한 기상측정장치에 관한 연구로는 주로 측정된 프로파일의 정밀도 보상이나 데이터 처리 측면의 연구가 집중적으로 진행되어 왔으나 접촉식 프로브의 하드웨어적인 측면의 기술개발은 상대적으로 많이 수행되지 못하고 있다. 특히 광학면의 측정시 발생하는 접촉식 프로브에 의한 가공면의 손상과 곡면측정시 발생하는 프로브의 흔들림 등에 관한 연구는 많이 이루어지지 않고 있다. 대표적인 하드웨어 관련 연구로는 Sohn³ 등은 다이아프램을 이용한 3 차원 측정용 프로브의 제작에 관해 연구하였고 Yoo⁴ 등은 광학면의 측정을 위한 프로브의 하드웨어적인 고려사항들을 연구하였다. 그러나 관련 설계인자에 대한 정량적인 영향분석에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 다이아프램을 이용한 접촉식 프로브의 기계적인 요구조건과 적절한 설계치수를 결정하기 위한 해석과정 그리고 실제 제작시 고려할 점들을 연구하였다. 또한 제안된 기상측정장치의 성능을 예측하기 위한 정밀도 측정을 수행하고 초정밀 광학면의 적용가능성을 확인하기 위해 일정반경을 갖는 초정밀 구면에 대한 반경측정 실험을 수행하였다.

2. 기상측정장치의 요구조건

접촉식 프로브 형태의 기상측정장치는 Fig. 1 과 같이 프로브 팁(Probe tip)과 moving part, 정전용량 센서(Capacitive sensor)로 구성된다. 접촉식 프로브를 사용하는 기상측정장치의 경우 측방향 강성이 크게 되면 측정 시 시편에 소성변형이 발생할 수 있다. 따라서 시편과 프로브 사이의 접촉력(측방향 강성)을 최소화 시켜 시편의 소성변형을 막을 수 있도록 설계해야 한다. 또한 Fig. 1 의 이상적인 경우와 같이 기상측정장치의 측방향으로만 힘이 작용되면 문제가 되지 않으나, 실제 경우와 같이 횡방향으로 힘이 작용하게 되면, 발생하는 모멘트에 의해 moving part 가 흔들리거나 회전하게 되어 측

정 오차가 발생되게 된다.

따라서 접촉식 프로브를 사용하여 구면 및 토릭면과 같은 자유곡면을 측정할 때 측방향 힘 뿐만 아니라 횡방향으로도 힘이 발생되게 되므로 프로브의 횡방향 흔들림을 줄이기 위한 설계사양의 검토가 요구된다.

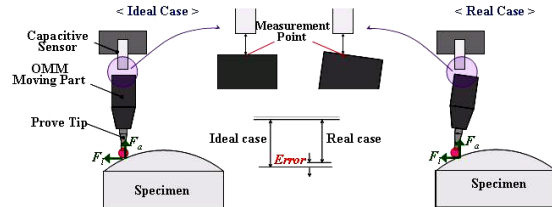
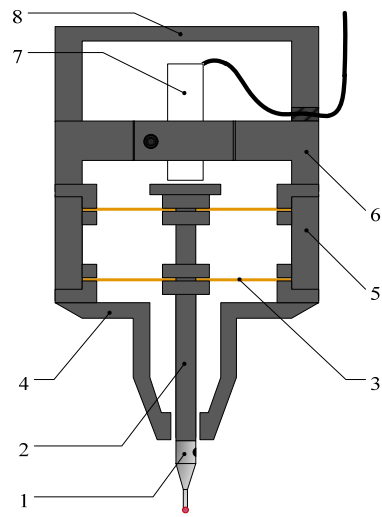


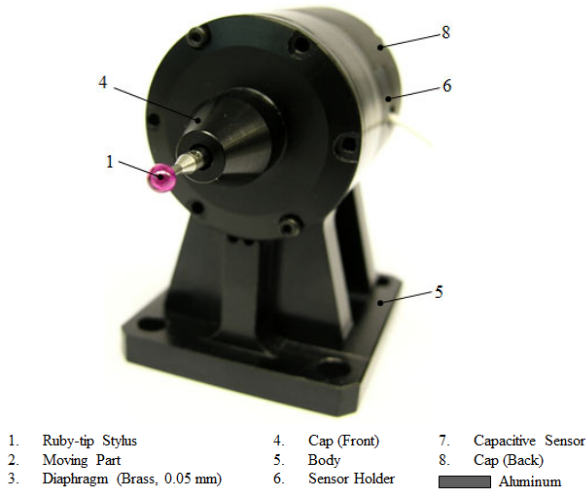
Fig. 1 Influence of the lateral displacement

3. 기상측정장치 설계

제안된 기상측정장치의 개념도는 Fig. 2(a)와 같다. 접촉식 프로브 형태로서 ruby 재질의 프로브 팁이 moving part 에 연결되고 두 개의 평행하게 배치된 다이아프램으로 지지되어 기구적인 직선운동을 구현하였다. 사용된 다이아프램들은 황동재질로서 두께 50 μm 의 금속박판이다. Moving Part 의 상측에 비접촉식으로 고분해능의 정전용량 센서를 장착하여 프로브 끝단의 변위를 측정할 수 있도록 구성하였다. Fig. 2(b)는 제작된 기상측정장치의 사진을 나타낸다.



(a) Schematic of OMM probe



(b) Photograph of OMM probe
Fig. 2 The diaphragm type OMM device

사용한 정전용량형 센서는 측정 시 moving part의 스트로크에 따른 moving part 와 정전용량형 센서 사이의 거리 변화를 측정하여 시편의 형상정보를 받아들이는 역할을 수행한다. ADE Technology社의 분해능 0.36 nm, ±10 μm 측정범위의 정전용량형 센서를 사용하였다. 센서의 구성은 ADE-8810 모듈의 2812 프로브 모델로 구성되어 있으며 사용한 정전용량형 센서의 사양은 Table 1에 정리하였다.

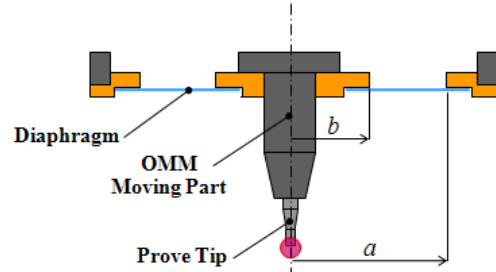
Table 1 Specifications of capacitive sensor

	Unit	Value
Resolution	nm	0.36
Working range	μm	±10
Output signal	V	±10
Bandwidth	kHz	1
Accuracy	nm	±16.70
Linearity	nm	±12.68

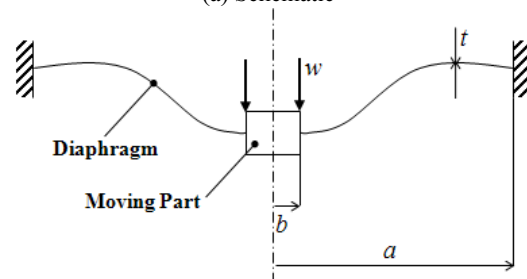
3.1 축방향 강성

평행하게 배열된 두 개의 다이아프램의 경우 축방향 강성은 Roark's formula 이론식을 사용하여 구할 수 있다.⁵ Fig. 3(a), (b)와 같이 최외곽 다이아프램의 가장자리는 구속되어 있고 안쪽으로는 가이드로 되어있는 조건의 형상일 때 강성 계산에 사용한 식은 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 링의 plate function 과 plate constant

이다. Table 2의 주어진 형상으로 가정했을 경우 황동을 사용한 다이아프램 하나의 강성은 약 0.726 mN/μm로 얻어진다. 두개의 동일한 다이아프램을 평행하게 연결하였기 때문에 프로브의 축방향 강성은 약 1.453 mN/μm로 얻어진다.



(a) Schematic



(b) Analytic model

Fig. 3 Flat circular plate of constant thickness with outer edge fixed and inner edge guided⁵

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

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

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

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

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

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

Table 2 Parameters of diaphragm and axial stiffness

Diaphragm Material	Brass
E (GPa)	103
ν	0.33
t (mm)	0.05
a (mm)	14
b (mm)	3.5
K_d (mN/ μ m)	0.726

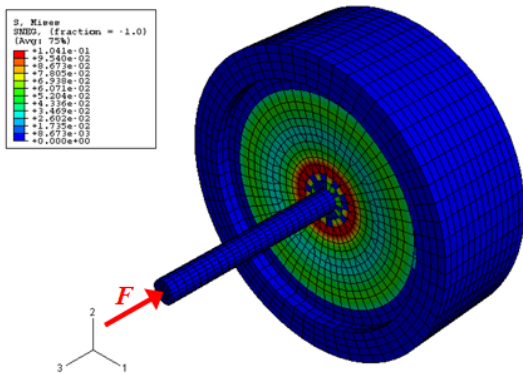


Fig. 4 FE analysis result of the axial stiffness of the diaphragm type OMM

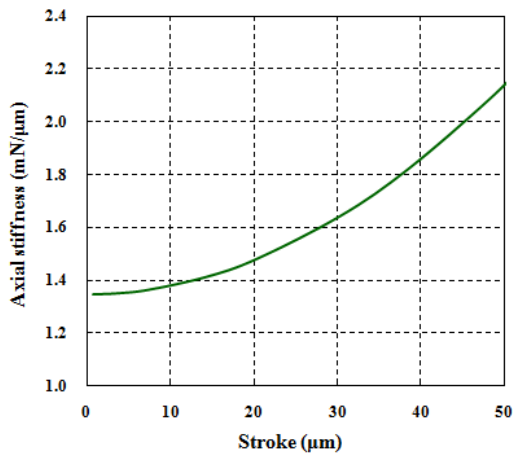


Fig. 5 Axial stiffness of the diaphragm

계산된 강성을 확인하기 위해 유한요소해석 (Finite element analysis; FE analysis)을 통해 축방향 강성을 예측하였다(Fig. 4 와 Fig. 5). 기상측정 프로

브의 스트로크 증가에 따라 다이어프램의 강성 값은 비선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있고, 약 20 μ m의 스트로크에서 1.478 mN/ μ m의 축방향 강성값을 가지며 이는 이론식에 의한 축방향 강성값인 1.453 mN/ μ m와 약 1.7%의 오차를 보인다.

3.2 다이어프램의 두께

다이어프램의 축방향 강성은 박판의 두께에 세제곱에 반비례하여 작아진다(식 (1)). 그러나 지나치게 얇은 금속박판은 박판의 모양을 일정하게 유지하기 매우 어려우며 일정한 강성을 유지하기는 사실상 불가능하다. 따라서 국내에서 생산이 되며 조립시에도 그 형태를 유지하면서 가능한 얇은 두께를 갖는 금속박판으로서 50 μ m 두께의 황동 (Brass) 박판을 선정하였다. 황동박판의 경우 해당 직경으로 커팅을 하고 박판의 고정부에 본딩재료의 원활한 흡수를 위해 V-형상을 가공하여 균일한 장력을 갖는 다이어프램의 제작을 수행하였다. 다이어프램의 축방향 강성은 단면 두께에 민감하므로 정확한 측정을 위해 HITACHI 社의 주사전자현미경(FE-SEM/EDX, HITACHI S-4300 모델)을 사용하여 다이어프램 단면의 두께를 측정하였다. 조립을 위해 가공한 다이어프램 6 개에 대해 각각 두 곳에서 총 12 번에 걸쳐 단면 두께를 측정하였고 평균값은 50.48 μ m로 얻어졌다. 주사전자현미경으로 측정한 다이어프램의 단면은 Fig. 6 과 같고 측정값은 Table 3 에 정리하였다.

Table 3 Thickness of the diaphragm (unit : μ m)

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
1 st	52.59	47.02	53.46	50.98	49.50	49.99
2 nd	51.48	49.50	52.96	49.00	49.78	49.21
Avg	50.48					

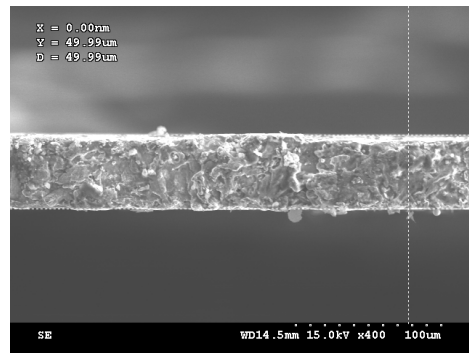


Fig. 6 The SEM image of the diaphragm

3.3 횡방향 흔들림

제안된 기상측정 프로브에서 평행하게 배치된 다이어프램들의 갯수와 거리를 결정하기 위해 유한요소해석을 통해 moving part 를 다이어프램 한 개로 지지할 때와 두 개로 지지할 때에 대해 각각 횡방향 흔들림을 비교하였다. Fig. 7 과 같이 기상측정장치의 프로브 끝단에 횡방향으로 1 mN 에서 100 mN 까지 힘을 증가시키며 횡방향 흔들림을 예측하였다.

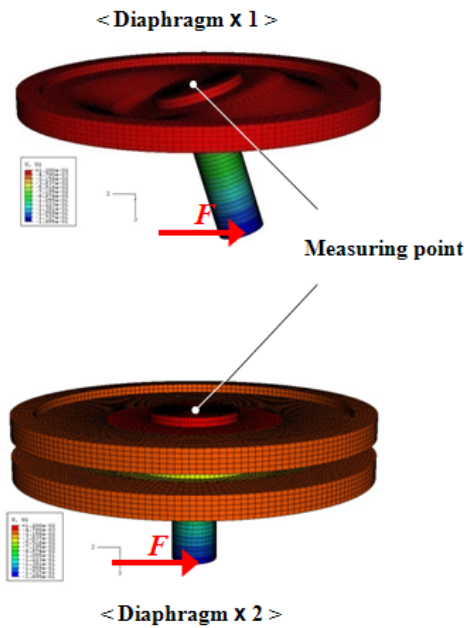


Fig. 7 Deformation shapes of single and double diaphragms

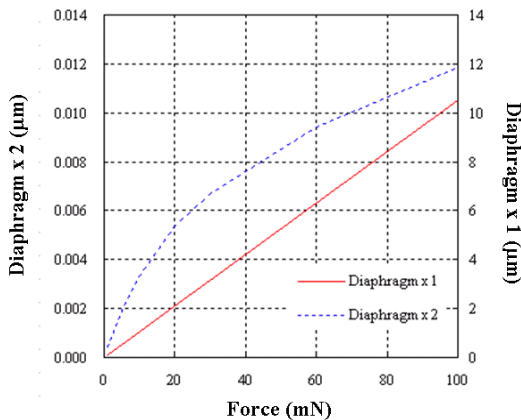
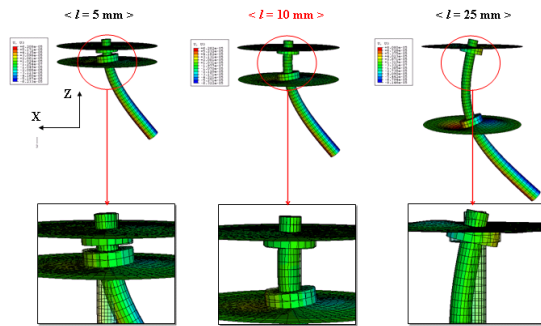


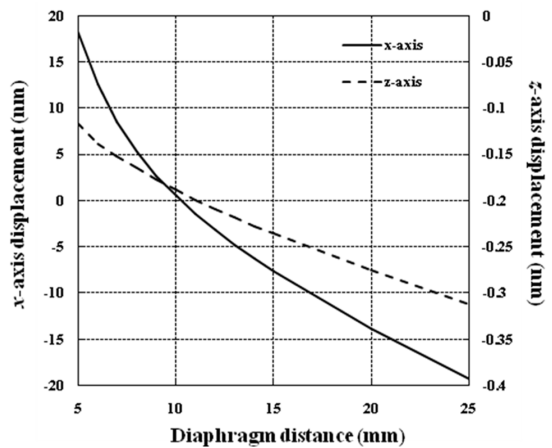
Fig. 8 The x-axis displacement of the diaphragm type OMM

Fig. 8로부터 다이어프램 한 개를 사용한 경우가 다이어프램 두 개를 사용한 경우에 비해 횡방향 흔들림이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 횡방향 흔들림에 따른 측정 오차를 줄이기 위해 다이어프램 두 개로 moving part 를 지지하는 구조를 채택하였다.

Fig. 9 는 다이어프램 사이의 거리를 5 에서 25 mm 까지 증가시켰을 때 유한요소해석을 이용하여 횡방향 흔들림을 계산한 결과를 나타낸다. Fig. 9(a) 에서 볼 수 있듯이 다이어프램 사이의 거리가 10 mm 보다 작을 때에는 기상측정 프로브에 횡방향으로 힘이 작용 했을때 moving part 의 회전으로 인한 변형이 주로 발생한다. 다이어프램 사이의 거리가 약 10 mm 일 때 횡방향 힘에 따른 moving part 의 회전과 다이어프램 사이의 shaft 의 휘어짐이 동시에 나타나기 시작하여 25 mm 일때 휘어짐의 영향이 크게 나타남을 볼 수 있다. Fig. 9(b)에 거리에 따른 횡방향 흔들림을 나타냈으며 이로부터 다이어프램 사이의 거리를 10 mm 로 결정하였다.



(a) Deformation shape of two diaphragms and shaft



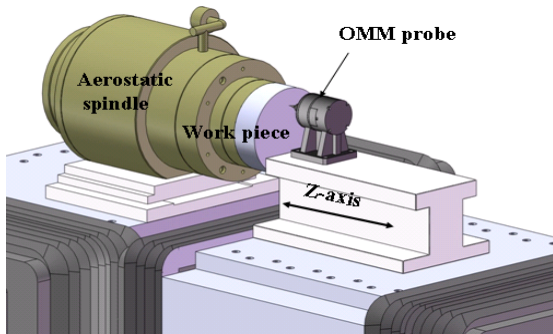
(b) The lateral displacement vs. diaphragm distance
Fig. 9 Lateral deformations of two diaphragms

4. 기상측정장치 성능평가

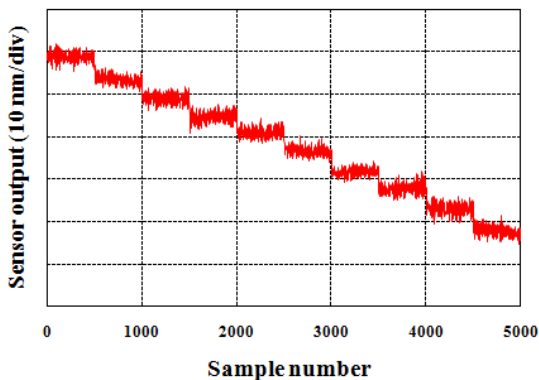
제안된 기상측정장치의 초정밀 광학면에 대한 측정성능을 확인하기 위하여 센서 분해능, 기상측정장치의 선형성, 마스터볼(Master ball)의 형상정밀도 측정실험을 수행하였다.⁶

4.1 센서 분해능 측정 실험

Fig. 10(a)와 같이 각 축별 분해능 0.275 nm 를 갖는 초정밀 선삭가공용 시험장치의 Z 축 슬라이드에 기상측정 프로브를 설치하였다. 기상프로브의 끝단을 스펀들에 고정된 시편에 접촉시키며 10 nm 의 스텝으로 총 10 개의 계단형으로 이동시키며 이에 따른 정전용량형 센서의 출력값들을 측정하였다. Fig. 10(b)에 관련 측정결과를 표시하였으며 측정결과 10 nm 의 스텝으로 총 10 개의 계단을 확인할 수 있었으며, 이로부터 기상측정 프로브가 10 nm 분해능을 만족할 수 있음을 확인하였다.



(a) Experimental setup in the ultra-precision lathe



(b) Resolution of the displacement sensor
Fig. 10 Resolution test of proposed probe

4.2 기상측정장치의 선형성 측정 실험

기상측정장치의 선형성을 확인하기 위해 Fig. 10(a)의 시험장치에서 Z 축 슬라이드를 이동시키면서 기상측정장치의 센서 출력 값과 Z 축 슬라이드에 장착된 레이저 인터페로미터(HP5529A)의 거리 값을 비교하였다. 기상측정장치의 정전용량센서의 최대 측정길이 20 μm 를 고려하여 Z 축 방향으로 전체거리 19 μm 에 대해 1 μm 간격으로 5 회씩 이동시키며 기상측정장치를 시편의 동일지점으로 접촉시켰다. 매 1 μm 이송 시 Z 축에 설치된 레이저 인터페로미터를 사용하여 움직인 거리를 구할 수 있다. 측정 결과는 Fig. 11 과 같으며 Z 축상의 동일점에 대해 이송거리에 따른 기상측정장치의 출력 값이 0.2% 이내 에 들어오는 것을 나타냈다.

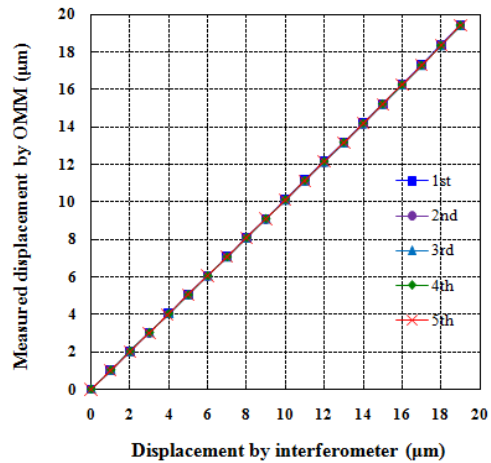
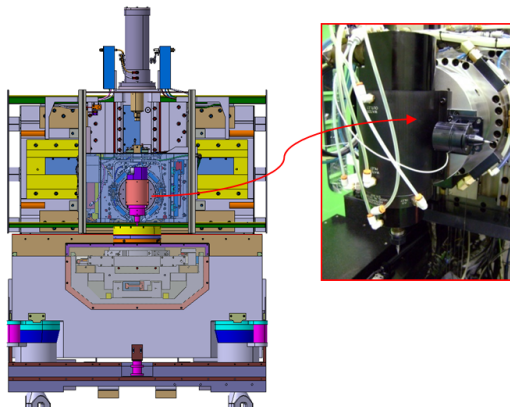


Fig. 11 Linearity of OMM probe

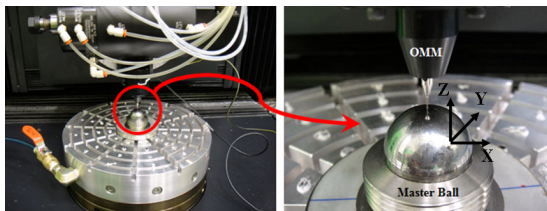
4.3 마스터볼의 형상 정밀도 측정실험

제작한 기상측정 프로브의 초정밀 가공기에서의 적용 여부를 검증하기 위해 R12.7004 마스터볼(Master-ball, Precitech 社)에 대한 반경측정 실험을 수행하였다. 측정 실험은 Fig. 12(a)와 같은 초정밀 밀링 가공기의 수직방향 축에 기상측정장치를 설치하고 가공기의 각축을 움직여서 마스터 볼의 반경 측정을 수행하였다. Fig. 12(b)는 마스터 볼에 접촉되며 반경을 측정하는 기상측정 프로브의 사진을 나타낸다.

측정방법으로서 기상측정 프로브를 마스터볼의 횡방향(X 축)으로 이동시키면서 마스터 볼의 형상에 따른 프로브의 정전용량센서로부터의 출력값을 측정하였다. 최소자승 원 정의로부터 반경 R 을 추



(a) Solid model and photograph of ultra-precision milling machine and on-machine measurement system



(b) Photograph of OMM probe and master ball

Fig. 12 Measurement of the master-ball using diaphragm type OMM

Table 4 Measurement data of the master ball (unit: mm)

	Constrained Radius		Unconstrained Radius	
	Radius	PV-error	Radius	PV-error
1 st	12.7004	0.000090	12.700428	0.000090
2 nd	12.7004	0.000088	12.700369	0.000088
3 rd	12.7004	0.000117	12.700340	0.000155

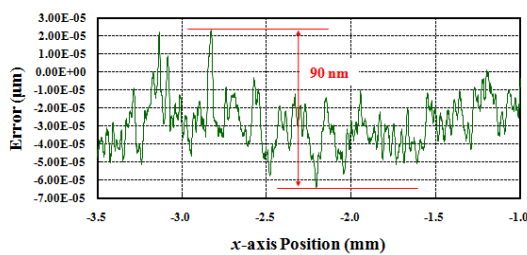


Fig. 13 PV-error of the measurement data (constrained radius)

출할 수 있으며 Table 4 에 정리하였다. Table 4 는 반경을 구속한 경우와 구속하지 않은 경우로 나누어 계산한 결과를 나타낸다. PV-error 는 최소자승

원 정의 알고리즘을 사용할 때 정의된 원과 측정 데이터 사이의 오차를 나타내며 Fig. 13 에 반경을 고정된 경우의 PV-error 를 표시하였다.

Table 4 와 Fig. 13 으로부터 제안된 기상측정 프로브가 R12.7004 의 마스터 볼에 대해 반경을 고정된 경우 PV-error 100 nm 내외로 측정할 수 있음을 알 수 있으며 이로부터 제안된 프로브의 초정밀 가공기에서의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

다이아프램 타입의 초정밀급 기상측정장치를 설계, 제작하였다. 제안된 기상측정장치의 형상을 결정하기 위해 강성 및 횡방향 흔들림 등에 대해 유한요소해석을 수행하여 성능에 대한 영향을 검토하였다. 또한, 제작된 프로브의 성능을 확인하기 위해 마스터 볼에 대한 반경을 측정하였으며 측정 결과 0.1 µm 내외로 반경예측이 가능함을 확인하여 초정밀 가공기에서의 적용가능성을 타진하였다.

후 기

본 논문은 전략기술개발사업과 경기도 기술개발사업의 사업비지원(A101010)에 의해 수행되었습니다.

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, Vol. 155-156, pp. 2056-2064, 2004.
2. Kim, H. S., Lee, K. I., Lee, K. M., and Bang, Y. B., "Fabrication of free-form surfaces using a long-stroke fast tool servo and corrective figuring with on-machine measurement," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 49, No. 12-13, pp. 991-997, 2009.
3. 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, pp. 22-27, 2000.
4. Yoo, S. B., Chang, I. C., and Kim, S. W., "Contact probing technique for profile measurement of

- aspheric lenses,” Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 603-606, 2000.
5. Young, W. C. and Budynas, R. G., “Roark’s formulas for stress and strain, 7th ed.,” McGraw-Hill Inc., 2002.
 6. Shibuya, A., Gao, W., Yoshikawa, Y., Ju, B. F., and Kiyono, S., “Profile Measurements of Micro-aspheric Surfaces Using an Air-bearing Stylus with a Microprobe,” Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 8, No. 2, pp. 26-31, 2007.