

레이저 간섭계를 이용한 곡률반경 측정에 관한 연구

이지용*, 김민주⁺, 이승수⁺, 전언찬⁺⁺
(논문접수일 2004. 2. 18, 심사완료일 2004. 7. 16.)

A Study on Curvature Radius Measurement Using Laser Interferometer

Lee Ji Yong*, Kim Min Ju⁺, Lee Seung Soo⁺, Jeon Eon Chan⁺⁺

Abstract

This paper presents studies on curvature radius measurement using the laser interferometer. It is a general practice to measure to 10^{-10} m in length with the recent improvement and innovations in measurement technology and the processor used. The measurement methods can generally be categorized as these two: the contactual method and non-contactual method; and in this study, we will find ways to lower the cost for a CMM, or a coordinate measurement machine, and try to find an alternative. Furthermore, we will discuss some of the ways to improve the non-contactual measurement methods-optical interferometer method and the optical triangulation method. We will measure an object using a laser distance measuring device and get the point-contact result with the ball-bearing type and line-contact result with the bearing type, to decide on which probe type will be used.

Key Words : Laser interferometer(레이저 간섭계), Curvature Radius(곡률반경), LSC(최소자승중심법), VisualLISP

1. 서론

최근 설계에서 제품생산까지 CAD, CAE, CAM, CAT 및 RE(Reverse Engineering)라는 분야가 자리를 잡고 있으며 과거의 독립적인 분야로 여겨졌던 각각의 분야가 현재는 유기적인 협조체계가 이루어져 CA(Computer Aided) 부분이 기계공학에서 하나의 축으로 자리잡게 되었다. 특히 CAT(Computer Aided Test)부분은 측정기술의 발전과

적용 프로세서의 발달로 길이측정의 경우는 10^{-10} m까지 측정하는 것이 어렵지 않게 되었으며, 이런 기술을 토대로 반도체산업의 근간을 지원하는 것이 가능하게 되었다.

이와 같은 측정기술의 종류로는 Stylus instrument method, STM, SEM, 광간섭법^(1,2) 등이 있다. 이런 기술들이 현재의 공학발전에 지대한 공헌을 하고 있으며 많은 분야에서 적용되고 있다. 특히 RE는 측정기술의 기반 없이는 불가능한 영역 중에 하나이기도 하다. RE는 물체를

* 동아대학교 대학원 기계공학과 (ppidae@donga.ac.kr)
주소: 604-714 부산시 사하구 하단동 840번지
+ 동아대학교 기계공학과
++ 동아대학교 기계공학과 교수

역설계하는 분야로서 접촉식과 비접촉식으로 구분 지을 수 있는데 접촉식의 경우는 CMM(Coordinate measurement machine)이라는 3차원측정기가 대표적으로 사용된다. 3차원 측정기의 사용은 입체형 물체에 원하는 지점의 좌표를 구하고 이런 좌표값을 조합함으로써 하나의 면을 생성함과 동시에 입체 형상을 생성하는 것이다⁽³⁾.

그리고 비접촉식의 경우는 광간섭법과 광삼각법이 주류를 이루고 있으며, 디지털카메라를 통한 비접촉방식이 최근에 소개되고 있다. 이와 같은 기술들은 각각 단점을 가지고 있다. CMM의 경우는 기기를 다루는 전문가의 숫자가 적고 좌표값을 얻는데 많은 시간이 소비될 뿐만 아니라 장비가 고가라는 단점을 가지고 있으며, 광간섭법이나 광삼각법의 경우는 난반사가 되는 제품과 투명한 제품의 경우 사용할 수 없으며, 2.5차원이라는 개념으로 전체 모양을 역설계할 수 없다는 단점을 가지고 있다^(3~7). 그리고 디지털카메라를 통한 비접촉방식의 경우는 카메라 렌즈의 원근오차(Perspective error)⁽⁷⁻¹⁰⁾와 촬영에 영향을 미치는 광원, 카메라의 거리, 위치 등과 같은 촬영 매개변수에 의해 영향을 심각하게 받는다는 각각의 단점이 있다⁽¹¹⁻¹⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 CMM장비의 고가문제를 해결하고 국한된 제품의 스캔이라는 광간섭법이나, 광삼각법의 문제점을 보완하는 방법으로 레이저 거리 측정장비와 접촉식 프루브를 이용하여 임의의 반경을 가지는 물체를 스캔하고자 한다. 그리고 접촉식의 단점이 측정 후 제품에 스크래치가 남는 문제이기 때문에 본 실험에서는 볼과 원통형구름 베어링타입으로 선접촉시킨 결과의 데이터와 비교해서 어떤 프루브 타입을 선정할 것인지도 제시하고자 한다.

2. 레이저 간섭계의 거리측정 원리

레이저 측정기에 의한 거리차 측정원리를 Fig. 1에 나타내었다. 레이저 측정기의 광원은 파장이 안정화된 He-Ne지만 레이저로부터 주파수가 f_1 , f_2 로 서로 약간 다르고 그 편광면이 서로 직교하는 2개의 직선 편광광이 사출된다. 기준 비트 신호를 얻기 위해 광속분리기(Beam-splitter)로 광속의 일부분을 반사시키고 이를 광검출기 D1에 입사시켜 두 주파수 차이의 비트신호를 검출하고 증폭과정을 거친후 주파수 카운터에서 계수된다. 한편 광속 분리기를 통과하여 반사경이 부착된 간섭계로 향한 빔은 간섭계에서 편광방향에 대응하여 투과광(f_1 성분)과 반사광(f_2 성분)으로 분리되어 반사경은 C1(간섭계)에서 반사되고, 투과광은 C2(반

사경)에서 반사된 후 광속은 서로 합쳐져서 광소자 D2에 입사된다. 이때 C2를 속도 V로 이동시키면 주파수 f_1 의 빔은 도플러 효과(Doppler effect)에 의해 $f_1 + \Delta f_1$ 으로 변조되고, 이렇게 바뀐 주파수 $f_1 + \Delta f_1$ 과 f_2 사이에 맥놀이(beat)가 일어나 이 비트 주파수 $|f_1 + \Delta f_1 - f_2|$ 이 광소자 D2에서 검출된다. 여기서 검출된 신호는 증폭과정을 거쳐 주파수 카운터에서 계수된 후 기준 비트신호 $|f_1 + \Delta f_1|$ 와 비교하여 차이 Δf_1 을 구한다. 그런데 Δf_1 은 도플러 효과에 따라 발생한 변조량이므로 도플러 효과에서의 주파수(f_1)와 속도(V)에 대한 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\Delta f_1 = \frac{2Vf_1}{c} \tag{1}$$

여기서 c 는 빛의 속도이다. 그리고 미소거리 L 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \int_0^t V dt = \int_0^t \frac{c}{2f_1} \Delta f_1 dt \tag{2}$$

3. 프루브의 반경 보정치

측정용 프루브 선단의 곡률반경을 0으로 만들 수 없기 때문에 일정한 반경을 갖는 프루브를 사용한 다음 프루브의 반경에 대한 곡률반경을 보정해 주는 식이 필요하다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 측정용 프루브가 곡률반경을 측정할 때의 궤적을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 곡률반경의 측정이 시작되는 위치에서의 좌표가 $(x, y + r_p)$ 이며 끝나는 위치에서의 좌표는 $(x + r_p, y)$ 가 된다. 여기서 r_p 는 프루브의 곡률반경이 된다. MS는

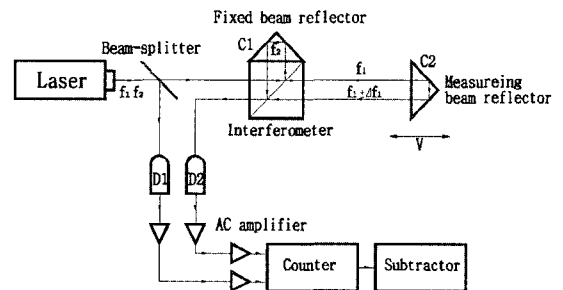


Fig. 1 Principle of laser interferometer applying to the measurement of differential distance

측정구간을 나타내었다. 그림에서는 측정이 완료되는 즉, 90°만큼 회전할 경우에 프루브의 반경에 기인하는 오차가 좌표에 포함된 것을 볼 수 있다.

더 자세히 표현하기 위해서 Fig. 3에서 보는 것과 같이 샘플링 시간에 대한 거리와 높이를 측정되는 x값과 y값으로 표현하였다. 측정 대상물의 곡률반경인 R을 측정하기 위한 프루브의 궤적은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 x값과 y값은 거리와 높이 대해 프루브의 반경만큼의 오차가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 측정되어진 값에서 각각 거리와 높이에 대한 오차값을 보정해 주어야 정확한 값을 얻을 수 있다.

프루브에 의한 오차의 보정은 Fig. 3의 (a)에서 보는 것과 같이 반경이 y_real인 실제값에서 타원의 장축이 y_error인 오차값을 Fig. 4에서 보는 것과 같이 선형으로 도식화하여

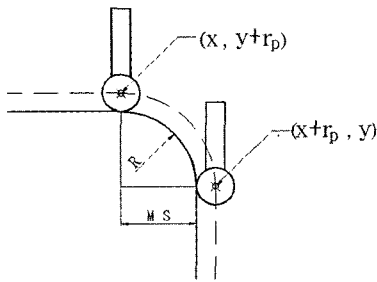


Fig. 2 Compensation of probe path

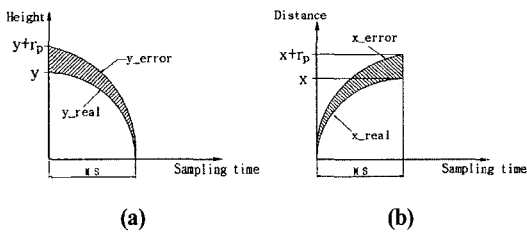


Fig. 3 Graphic of probe contour

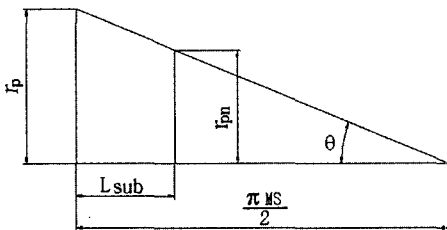


Fig. 4 Linear shape of true value and error value

선형적으로 보정해 준다.

Fig. 4에서 보이는 각각의 기호는 식 (3), (4) 및 식 (5)와 같이 전개된다. 여기서 r_{pm} 이 y_error 궤적에서 보정해야 하는 보정값이 된다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2 \cdot r_p}{\pi \cdot MS} \quad (3)$$

$$L_{sub} = \frac{L_{sub} \text{구간까지의 데이터수}}{\text{전체구간에서의 데이터수}} \times \frac{\pi \cdot MS}{2} \quad (4)$$

$$r_{pm} = \left(\frac{\pi \cdot MS}{2} - L_{sub} \right) \cdot \tan \theta \quad (5)$$

4. 실험장치 및 실험방법

4.1 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도와 설치모습을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 각각의 명칭은 Table 1에 나타내었다.

그림에서 보는 것과 같이 반사경(②)과 간섭계(③)는 하나의 조합으로 고정되어있어야 하며 반사경과 간섭계의 조

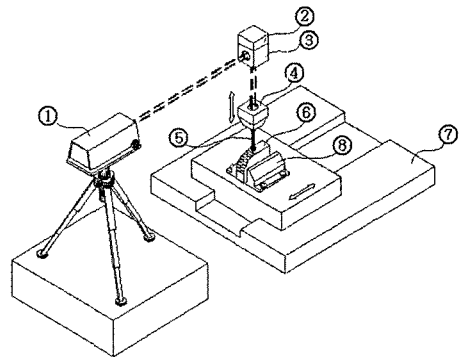


Fig. 5 Schematic diagram of experimental equipment

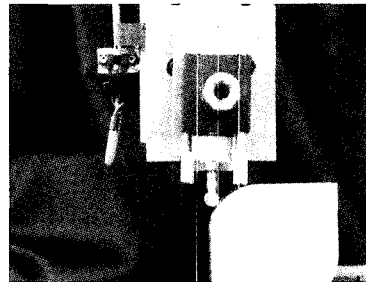


Fig. 6 Setup of experimental equipment

Table 1 Part list of experimental equipment

No.	Instrument	No.	Instrument
①	Laser(HP 5519A)	⑤	Probe
②	Angular Reflector	⑥	Target
③	Angular Interferometer	⑦	X-Y Table
④	Angular Reflector	⑧	Vice

합된 지점에서 레이저(①)헤드까지의 거리를 레이저 측정에서 사거리(dead-path)라고 한다. 그리고 또 하나의 반사경(④)은 수직으로 운동할 수 있는 구조에 프루브(⑤)가 설치되어 있다. 프루브의 측정대상물(⑥)은 프루브와 접촉되어 있고 X-Y테이블(⑦)의 구동에 따라 측정대상물의 곡률반경을 따라 프루브의 끝단이 움직이게 되는데 이 움직임이 레이저로 전달되어 그 때의 거리를 측정하여 LSC(Least Square Circle, 최소자승중심법)에 의해 반경을 얻게 된다. 그리고 본 실험에서 사용된 프루브의 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

4.2 실험방법

본 실험의 실험방법의 순서는 Fig. 8에서 보는 것과 같이 우선 X-Y테이블 및 측정대상물을 세팅한다.

측정대상물을 X-Y테이블 상에 놓인 바이스에 물리고 측정거리를 Visual C++을 이용하여 만든 X-Y테이블 구동용 프로그램을 사용하여 프로그래밍하는 과정을 거친다. 그 후 레이저 측정장비의 간섭계와 반사경을 측정하고자 하는 위치에 세팅함과 동시에 레이저 장비의 초기화를 위해 레이저 세팅작업을 수행한 후 구동용 프로그램에 의해 X-Y테이블이 구동하게 되면 레이저 측정장비에서는 샘플링 속도를 1/100으로 하여 스캔된 데이터를 수집하게 된다. 여기서 샘플링 속도는 1초에 받을 수 있는 데이터의 양을 나타내는 것으로 1/100으로 설정하면 1초에 100개의 위치값 데이터

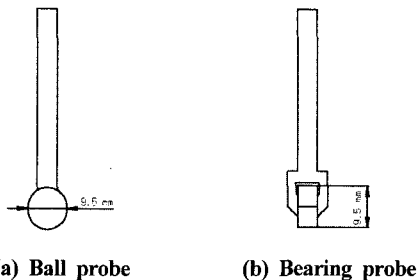


Fig. 7 Shape of probe

를 검출하게 된다. 그런데 스캔된 데이터에는 앞에서 언급한 프루브의 오차가 포함되어 있기 때문에 프루브의 보정치를 삽입하여 새로운 데이터 조합을 만들어야 한다. 본 연구에서 사용된 보정방법인 VisualLISP을 이용한 프로그램에서는 Sampling rate와 측정된 구간의 거리를 계산하여 오차가 포함된 데이터를 기준으로 구간에 따른 프루브의 반경값에 대한 비례치를 구해진 데이터에 빼는 방법으로 보정하였다.

그리고 새로 구성된 데이터를 토대로 LSC법(Least Square Circle Method)에 의한 측정 대상물의 곡률반경을 구하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 VisualLISP상에서 프로그램 구현

측정데이터에 LSC를 적용하여 역설계할 수 있는 프로그램을 AutoCAD의 VisualLISP으로 개발하였다. 그리고 개발된 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 Fig. 9에서 보는 것과 같이 인위적인 데이터를 작성하여 개발된 프로그램에서 원의 중심좌표와 원의 반경을 구하였다.

Table 2는 Fig. 9에서 보는 2개의 원의 점 좌표값을 AutoCAD상에서 객체스냅(object snap)으로 랜덤한 위치를 선

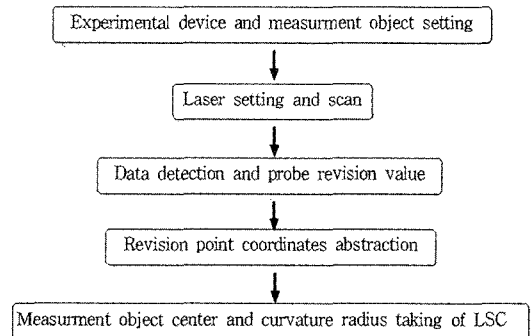


Fig. 8 Flowchart of experiment method

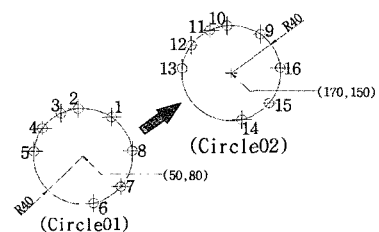
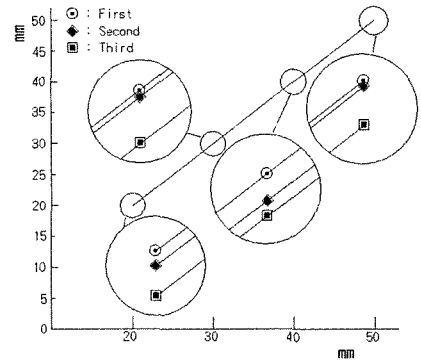


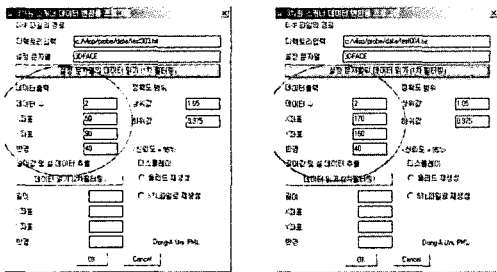
Fig. 9 Artificial data creation of verification

Table 2 Data for verification

Circle01	Circle02
1 : X= 73.4091 Y= 112.4348	9 : X= 193.4091 Y= 182.4348
2 : X= 46.3957 Y= 119.8373	10 : X= 166.3957 Y= 189.8373
3 : X= 32.3626 Y= 115.9016	11 : X= 152.3626 Y= 185.9016
4 : X= 17.4775 Y= 103.2870	12 : X= 137.4775 Y= 173.2870
5 : X= 10.1906 Y= 83.9007	13 : X= 130.1906 Y= 153.9007
6 : X= 58.7367 Y= 40.9658	14 : X= 178.7367 Y= 110.9658
7 : X= 80.8511 Y= 54.5400	15 : X= 200.8511 Y= 124.5400
8 : X= 89.7661 Y= 84.3190	16 : X= 209.7661 Y= 154.3190



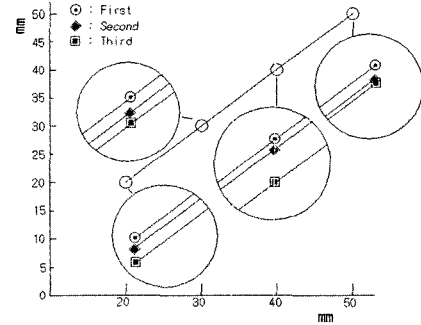
(a) Result of ball probe



(a) Circle01 data

(b) Circle02 data

Fig. 10 Result of programming



(b) Result of bearing probe

Fig. 11 Comparing of radius between ball and bearing type probe

택해서 표현한 것이고 Fig. 10은 VisualLISP에서 코딩한 LSC프로그램을 나타내고 있다. 여기서 Table 2의 좌표값을 토대로 계산된 값은 그림에서 보는 것과 같이 원안에 나타난 데이터이다. 정확한 원의 중심좌표와 반경이 출력되었다. 그렇기 때문에 개발된 프로그램을 사용하여 본 실험에서 측정된 결과를 LSC법에 의해 곡률반경과 원의 중심좌표를 구할 경우 계산에 의한 값들은 정확하다고 판단할 수 있다.

5.2 실험결과

본 실험에서는 동일반경의 시험편을 동일실험방법으로 3번 측정한 결과를 Fig. 11의 (a)와 (b)에 나타내었다. 그리고 측정된 결과값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 보는 것과 같이 볼타입 프루브의 경우가 원통형 구름베어링 타입 프루브보다 측정된 반경값이 작게 나타나 있는데 이것은 측정시 프루브에 부가된 하중이 측정시험편의 표면을 압축하여 측정시험편의 표면이 압축변형된 결과로 추정된다. 그리고 원통형 구름베어링 타입의 경우

측정된 값이 크게 나타나 있는데 이것은 원통형 구름 베어링의 미소한 클리어런스가 레이저 측정장비의 원점 보정시 발생하는 오차가 측정 데이터에 포함되어 나타나는 현상으로 추정된다.

Table 4는 측정된 데이터의 반경에 따른 평균값을 구한 것이며 볼타입 50mm에서 최대 오차가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 볼타입과 원통형 구름베어링 타입으로 측정된 3개의 평균값을 측정반경을 기준으로 표시한 것으로 두 개의 타입에는 일정한 간격이 오차로서 작용되는 것을 볼 수 있다.

그래서 각 지점의 오차량을 타입별로 Fig. 13에 나타내었고 그림에서 보는 것과 같이 볼타입의 경우 오차의 불확실도(uncertainty)가 베어링 타입의 경우의 오차 불확실도보다 훨씬 적은 것을 볼 수 있다.

Table 3 The result of measurement

Ball type probe		Bearing type probe	
Radius (Repeat number)	Measurement value(mm)	Radius (Repeat number)	Measurement value(mm)
20mm(1)	19.981	20mm(1)	20.024
20mm(2)	19.965	20mm(2)	20.011
20mm(3)	19.932	20mm(3)	20.019
30mm(1)	29.973	30mm(1)	30.034
30mm(2)	29.969	30mm(2)	30.052
30mm(3)	29.942	30mm(3)	30.074
40mm(1)	39.997	40mm(1)	40.021
40mm(2)	39.975	40mm(2)	40.035
40mm(3)	39.962	40mm(3)	40.032
50mm(1)	49.976	50mm(1)	50.054
50mm(2)	49.969	50mm(2)	50.033
50mm(3)	49.924	50mm(3)	50.039

Table 4 Mean value of measurement data

Ball type probe		Bearing type probe	
Radius (Repeat number)	Measurement value(mm)	Radius (Repeat number)	Measurement value(mm)
20	19.9593	20	20.018
30	29.9613	30	30.0533
40	39.978	40	40.0293
50	49.9563	50	50.042

그래서 본 실험에서 사용한 2개의 프루브 타입에서 측정 대상물에 스크래치 없이 측정하고자 고려되었던 베어링 타입은 오차의 불확실도가 상대적으로 볼타입에 비해 크게 나오기 때문에 특별한 경우가 아니면 고려해서는 안된다고 판단된다.

볼타입의 경우는 Fig. 13에서 보는 것과 같이 오차값이 평균 0.036mm를 포함한 상태로 측정되었으며 측정데이터의 최대값과 최소값의 차이인 불확실도가 0.0187mm로 나타났다. 이런 오차는 측정시 측정 프루브의 하중이 측정시 힘편에 가해져 발생하는 압축변형과 레이저 세팅시의 세팅 오차로 유추할 수 있다. 그리고 베어링 타입의 경우는 오차값이 평균 0.0357mm를 포함한 상태로 볼타입과 유사한 값을 가지고 있으나, 불확실도는 0.0353mm로 나타나 볼타입

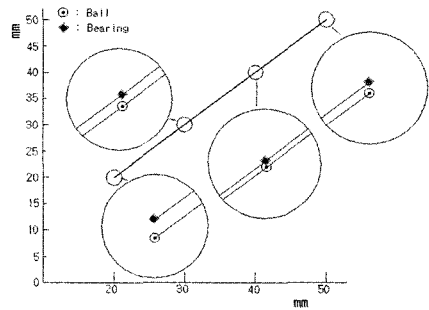


Fig. 12 Comparing of mean value between ball and cylindrical roller bearing

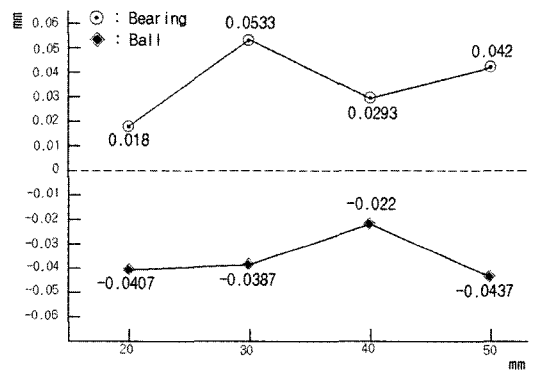


Fig. 13 Linear error of measurement probe

에 비해 정밀하지 못하다. 이런 오차 역시 볼타입과 마찬가지로 레이저의 세팅오차가 포함되어있다고 유추된다. 따라서 레이저 간섭계의 세팅오차를 줄일 수 있는 방법, 예를 들면 방진설비를 측정대상물의 밑면에 설치한다든지, 공기유동 차단장치를 이용하여 측정부위의 공기유동을 최소화하는 방법이 강구된다면 보다 정확한 값을 얻어낼 수 있다고 판단된다.

6. 결론

레이저 간섭계와 볼타입 및 원통 구름베어링 타입의 프루브를 이용하여 임의의 곡률반경을 갖는 물체의 곡률반경 측정실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레이저 세팅오차를 줄일 수 있다면 임의의 곡률 반경을 가진 물체의 반경을 $10^{-5}m$ 의 정확도로 구할 수 있다.
- (2) 볼타입의 경우는 프루브의 하중에 의한 측정 대상물의

미소한 압축변형이 발생되어 원래의 반경보다 최대 43.7 μm 의 오차가 포함된 반경치를 얻을 수 있었다.

- (3) 원통형 구름베어링 타입의 프루브는 볼타입의 경우와 비교하여 불확실도가 약 16.6 μm 차이를 보여 상대적으로 크게 나타나기 때문에 볼타입의 프루브를 사용하는 것이 정밀측정시 본 연구의 실험결과에 따라 적합하다고 판단된다.

참고 문헌

- (1) Ichinokawa, T., 1987, "Combination of STM with SEM," *JSPE*, Vol. 53, No. 12, pp. 1835~1840.
- (2) Ueki, M., and Oiwa, A., 1992, "Precise Measurement of Differential Height of oil Manometer by Means of Heterodyne Interferometer," *JSPE*, Vol. 58, No. 1, pp. 120~126.
- (3) Kim, J. S., Kim, S. C., and Chung, S. C., 1997, "Design and Analysis of Displacement/Length Measuring System Using Laser Interferometry," *KSPE*, Vol. 14, No. 10, pp. 151~156.
- (4) Hocken, R. J., Layer, H. P., and Young, R. D., 1979, "Lasers for Dimensional Measurement," *CIRP*, Vol. 28, pp. 303~306.
- (5) Schellekens, P. H. J., Koning, J., and Veenstra, P. C., 1982, "Accuracy of Commercially Available Laser Measurement Systems," *CIRP*, Vol. 31, pp. 427~429.
- (6) Steinmetz, C. R., 1990, "Sub - micron Position Measurement and Control on Precision Machine Tools with Laser Interferometer," *Precision Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 12~24.
- (7) Lingard, P. S., 1991, "Length-Bar and Step-Gauge Calibration Using a Laser Measurement System with a coordinate Measuring Machine," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 515~517.
- (8) Zhang, G., and Wang, C., 1987, "A Laser Interferometric System for Measuring Arbitrary Angles," *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 395~398.
- (9) Kahng, C. H., 1996, "Machine Tool Technology; The present And The Future(14)," *KSPE*, Vol. 13, No. 5, pp. 15~29.
- (10) Mazlof, J. G., 1964, "Angle Measuring Interferometer," *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 35, No. 9.
- (11) Hu, X., 1986, *A Study on the Laser Interferometric System for Measuring Arbitrary angle*, Doctoral Dissertation, Tianjin University, China.
- (12) Park, J. H., 1993, *Precision Measurement System Engineering*, Yajeongmunhwasa, pp. 201~209.
- (13) Herrmann, L. K, and Campbell, D. M, 1968, "A Finite Element Analysis for the Shells," *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 10, pp. 1842~1847.
- (14) Jeusette, J. P., Laschet, G., and Charpentier, P., 1987, "Finite Element Analysis of Composite Revolution Structures Wound by Wide Plies," pp. 221~237.