

## 레이저 간섭계를 이용한 곡률반경 측정에 관한 연구

김수용\*(동아대 대학원 기계공학과), 이승수(동아대 대학원 기계공학과), 박재덕(동아대 대학원 기계공학과), 송영철(동아대 대학원 기계공학과), 전언찬(동아대 기계공학과)

A study on measurement of curvature radius by the using of laser interferometer

S. Y. Kim(Mech. Eng. Dept., DAU), S. S. Lee(Mech. Eng. Dept., DAU),  
J. D. Park(Mech. Eng. Dept., DAU), Y. C. Song(Mech. Eng. Dept., DAU),  
E. C. Jeon(Division of Mechanical, Industrial and Systems Engineering, DAU)

### ABSTRACT

This paper on measurement of curvature radius by the using of laser interferometer and prove. Mean value compared of ball and bearing It is developed program for date creation, and the verification using program. Measurement object center and curvature radius taking of LSC. when it is compared bearing prove with ball prove, the bearing prove can not proper by reason of big uncertainty and If laser setting error decrease, curvature radius get precision radius  $10^{-5}$ .

**Key Words** : 레이저(Light Amplification Stimulated Emission Radiation), 코히런스(Coherence), 간섭계, LSC, VisualLISP

### 1. 서론

최근 설계에서 제품생산까지 CAD, CAE, CAM, CAT 및 RE라는 분야가 자리를 잡고 있으며 과거의 독립적인 분야로 여겨졌던 각각의 분야가 현재는 유기적인 협조체계가 이루어져 CA(Computer aided)부분은 기계공학에서 하나의 축으로 자리잡게 되었다. 특히 CAT(Computer aided test)부분은 측정기술의 발전과 적용프로세서의 발달에 힘입어 길이측정의 경우는  $10^{-10}$ m까지 측정하는 것이 일반화되었으며, 이런 기술을 토대로 반도체산업의 근간을 지원하는 것이 가능하게 되었다. 이와 같은 측정기술의 종류로는 Stylus instrument method, STM, SEM, 광간섭법<sup>1~3)</sup> 등이 있다. 이런 기술들이 현재의 공학발전에 지대한 공헌을 하고 있으며 많은 분야에서 적용되고 있다. 특히 RE(Reverse engineering)는 측정기술의 기반 없이는 불가능한 영역 중에 하나이기도 한다. RE는 물체를 역설계하는 분야로서 접촉식과 비접촉식으로 구분 지을 수 있는데 접촉식의 경우는 CMM(Coordinate measurement machine)<sup>4)</sup>이라는 3차원측정기가 대표적으로 사용된다. 3차원 측정기의 사용은 입체형 물체에 원하는 지점의 좌표를 구하고 이런

좌표값을 조합함으로써 하나의 면을 생성함과 동시에 입체 형상을 생성하는 것이다<sup>5)</sup>. 그리고 비접촉식의 경우는 광간섭법과 광삼각법이 주류를 이루고 있으며, 디지털카메라를 통한 비접촉방법이 최근에 소개되고 있다. 이와 같은 기술들은 각각의 장단점을 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<sup>6~12)</sup>. 그리고 디지털카메라를 통한 비접촉방법의 경우는 카메라 렌즈의 원근오차(Perspective error)<sup>13~14)</sup>와 촬영에 영향을 미치는 광원, 카메라의 거리, 위치등과 같은 촬영 매개변수에 의해 영향을 심각하게 받는다는 각각의 단점이 있다<sup>15~17)</sup>.

그래서 이와 같은 문제를 해결해 줄 수 있는 방법이 필요하게 되었고 본 연구에서는 CMM장비의 고가문제를 해결하고 국한된 제품의 스캔이라는 광간섭법이나, 광삼각법의 문제점을 보완하는 방법으로 레이저 거리 측정장비와 접촉식 포루브를 이용하

여 임의의 반경을 가지는 물체를 스캔하고자 하며, 스캔에 사용된 프루브는 볼과 베어링 타입으로 접촉식의 최대단점이 측정후 제품에 스크래치가 남는 문제이기 때문에 본 실험에서는 베어링타입으로 선접촉시킨 결과의 데이터와 비교해서 어떤 프루브 타입을 선정할 것인지도 제시하고자 한다.

## 2. 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.

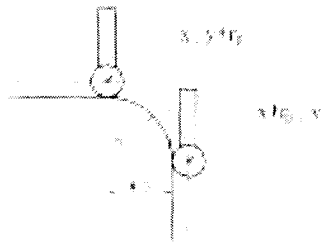


Fig. 1 Path of probe

Fig. 1은 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 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. 2에서 보는 것과 같이 sampling time에 대한 거리와 높이를 측정되는 x값과 y값으로 표현하였다. 측정 대상물의 곡률반경인 R을 측정하기 위한 프루브의 궤적은 Fig. 2에서 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.

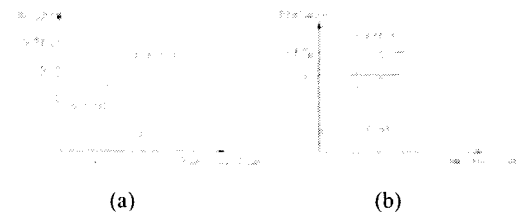


Fig. 2 Graphic of probe controdre

프루브에 의한 오차의 보정은 Fig. 2의 (a)에서 보는 것과 같이 반경이  $y_{real}$ 인 실제값에서 타원의 장

축이  $y_{error}$ 인 오차값을 Fig. 3에서 보는 것과 같이 선형으로 도식화하여 선형적으로 보정해 준다.

Fig. 3 Linear shape of true value and error value

Fig. 3에서 보이는 각각의 기호는 식(1), (2) 및 식(3)과 같이 전개된다. 여기서  $r_{pn}$ 이  $y_{error}$  궤적에서 보정해야 하는 보정값이 된다.

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

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

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

## 3. VisualLISP상에서 프로그램 구현

측정데이터에 LSC를 적용함으로써 역설계할 수 있는 프로그램을 AutoCAD의 사용자 개발프로그램인 VisualLISP으로 개발하였다. 그리고 개발된 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 Fig. 4에서 보는 것과 같이 인위적인 데이터를 작성하여 개발된 프로그램에서 원의 중심좌표와 원의 반경을 구하도록 하였다.

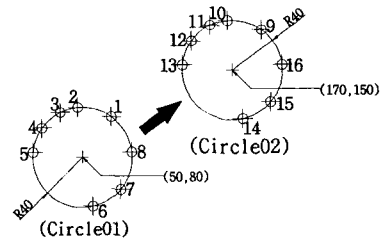
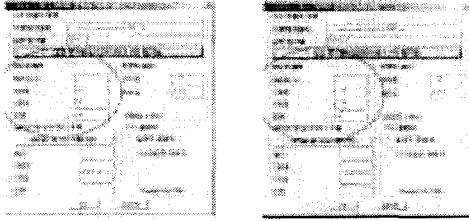


Fig. 4 Artificial data creation of verification

Table 1 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) Circle01 date (b) Circle02 date

Fig. 5 Result of programming

Table 1은 Fig. 4에서 보는 2개의 원의 점 좌표값을 AutoCAD상에서 객체스냅(object snap)으로 랜덤한 위치를 선택해서 표현한 것이고 Fig. 5는 VisualLISP에서 코딩한 LSC프로그램을 나타내고 있다. 여기서 Table 1의 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.

#### 4. 실험장치 및 실험방법

##### 4.1 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치를 Fig. 6에 나타내었다. 각 명칭은 Table 2에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 반사경(②)과 간섭계(③)는 하나의 조합으로 고정되어있어야 하며 반사경과 간섭계의 조합된 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 LSC법에 의해 반경을 얻게 된다. 그리고 본 실험에서 사용된 프루브의 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

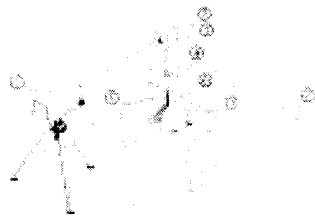


Fig. 6 Schematic diagram of experimental equipment

Table 2 Part list of experimental device

| 번호  | 장치명                 | 번호  | 장치명        |
|-----|---------------------|-----|------------|
| (1) | 레이저(HP 5519A Type)  | (5) | 프루브(Probe) |
| (2) | 반사경(Reflector)      | (6) | 측정대상물      |
| (3) | 간섭계(Interferometer) | (7) | X-Y테이블     |
| (4) | 반사경(Reflector)      | (8) | 바이스        |

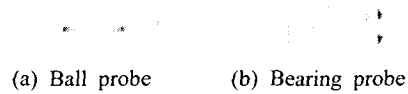


Fig. 7 Shape of probe

##### 4.2 실험방법

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

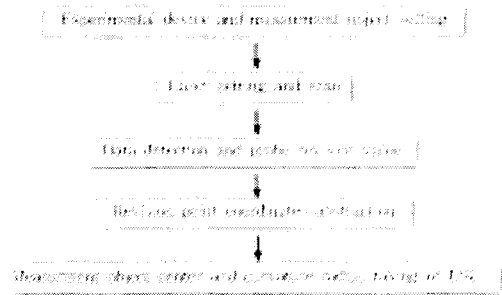


Fig. 8 Flowchart of experiment

측정대상물을 X-Y테이블 상에 놓인 바이스에 물리고 측정거리를 X-Y테이블 구동용 프로그램을 사용하여 프로그래밍하는 과정을 거친다. 그후 레이저 측정장비의 간섭계와 반사경을 측정하고자 하는 위치에 세팅함과 동시에 레이저 장비의 초기화를 위해 레이저 세팅작업을 수행한 수 구동용 프로그램에 의해 X-Y테이블이 구동하게 되면 레이저 측정장비에서는 Sampling rate를 1/100으로 하여 스캔된 데이터를 수집하게 된다. 여기서 Sampling rate는 1초에 받을 수 있는 데이터의 양을 나타내는 것으로 1/100으로 설정하면 1초에 100개의 위치값 데이터를 검출하게 된다. 그런데 스캔된 데이터에는 2.3절에서 언급한 프루브의 오차가 포함되어 있기 때문에 프루브의 보정치를 삽입하여 새로운 데이터 조합을 만들어야 한다. 여기서 사용된 보정방법은 VisualLISP을 이용한 프로그램에서는 Sampling rate와 측정된 구간의

거리를 계산하여 오차가 포함된 데이터를 기준으로 구간에 따른 프루브의 반경값에 비례치를 구해진 데이터에 빼는 방법으로 보정하였다.

그리고 새로 구성된 데이터를 토대로 LSC법에 의한 측정 대상물의 곡률반경을 구하는 것이 본 실험의 실험방법이다.

### 5. 실험결과

본 실험에서는 동일반경의 시험편을 동일실험방법으로 3번 측정된 결과를 Fig. 9의 (a)와 (b)에 나타내었다. 그리고 측정된 결과값을 Table 3에 나타내었다.

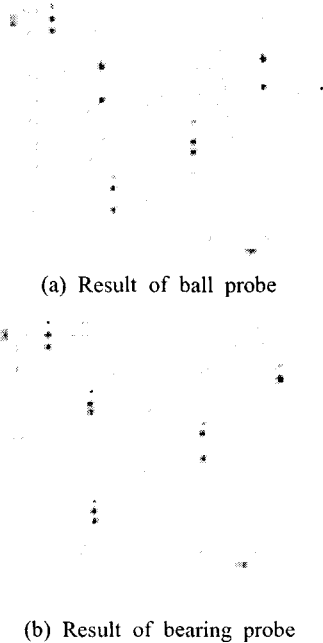


Fig. 9 Radius comparing of ball and bearing type probe

Table 3에서 보는 것과 같이 볼타입 프루브의 경우가 베어링 타입 프루브보다 측정된 반경값이 작게 나타나 있는데 이것은 측정시 프루브에 setting 된 하중이 측정시험편의 표면을 압축하여 측정시험편의 표면이 압축변형된 결과로 추정된다. 그리고 베어링 타입의 경우 측정된 값이 크게 나타나 있는데 이것은 베어링의 미소한 클리어런스가 레이저 측정장비의 원점 setting시 발생하는 오차가 측정 데이터에 포함되어 나타나는 현상으로 추정된다.

Table 3 Measurement data result

| 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                 |

Fig. 10은 볼타입과 베어링타입으로 측정된 3개의 평균값을 측정반경을 기준으로 표시한 것으로 두개의 타입에는 일정한 간격이 오차로서 작용되는 것을 볼 수 있다. 그래서 각 지점의 오차량을 타입별로 Fig. 11에 나타내었고 그림에서 보는 것과 같이 볼타입의 경우 오차의 불확실도(uncertainty)가 베어링 타입의 경우의 오차 불확실도보다 훨씬 적은 것을 볼 수 있다. 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 않된다고 판단된다.

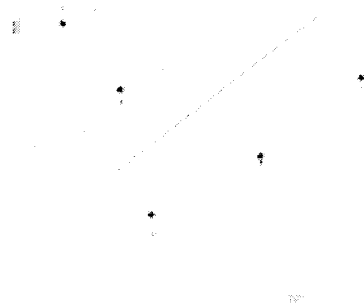


Fig. 10 Mean value comparing of ball and bearing

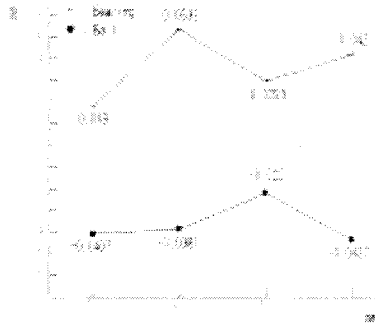


Fig. 11 Linear error of measurement probe

## 6. 결론

레이저 간섭계와 불타입 및 베어링 타입의 프루브를 이용하여 임의의 곡률반경을 갖는 물체의 곡률반경 측정실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 레이저 세팅오차를 줄일 수 있다면 임의의 곡률반경을 가진 물체의 반경을  $10^{-5}m$ 의 정확도로 구할 수 있다.

2) 불타입의 경우는 프루브의 하중에 의한 측정대상물의 미소한 압축변형이 발생되어 원래의 반경보다 최대  $43.7\mu m$ 의 오차가 포함된 반경치를 얻을 수 있었다.

3) 베어링 타입의 프루브는 불타입의 경우와 비교하여 불확실도가 약  $0.0166\mu m$ 의 차이를 보여 상대적으로 크게 나타나기 때문에 정밀측정시 부적합한 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- 1) 市ノ川竹男, "SEMとSTMの複合機", 精密工學會誌, pp. 1835~1840, 1987
- 2) 안근식, 장경영, 문희관 "광간섭법을 이용한 절대높이 측정 정밀도 향상에 관한 연구", 韓國精密工學會 秋季學術大會論文集, pp. 493~498, 1994
- 3) 植木正明, 大岩彰, "ヘテロダイン干渉法による油マノメータの液位差の精密測定", 精密工學會誌, vol. 58, No. 1, pp. 120~126, 1992
- 4) 문준희, 김영삼, 박희재, 주종남 "기구불바를 이용한 가공기계의 정밀도 평가 및 향상 기술개발", 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp.693~700, 1996
- 5) 김진상, 정성중, "레이저 광학장치를 이용한 5차

- 유도 오차측정에 관한 연구", 한국정밀공학회지, pp. 375~378, 1997
- 6) 全彦燦, 廣田康宏, 堤正臣, 周曉光 "CNC工作機械の位置決め精度向上關する研究", 日本精密工學會 第11回學生會員講演會講演論文集, pp. 95~98, 1994
- 7) Robert J.Hocken, Howard P.Layer, Russell D.Young, "Lasers for Dimensional Measurement", CIRP, Vol. 28, pp. 303~306, 1979
- 8) P.H.J.Schellekens, J.Koning, P.C.Veenstra, "Accuracy of Commercially Available Laser Measurement Systems", CIRP, Vol.31, pp. 427~429, 1982
- 9) C. R. Steinmetz, "Sub - micron Position Measurement and Control on Precision Machine Tools with Laser Interferometry PRECISION ENGINEERING, January 1990, Vol. 12, No. 1, pp. 12~24
- 10) P. S. Lingard, "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, 1991
- 11) G. Zhang, C. Wang, "A Laser Interferometric System for Measuring Arbitrary Angles" Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 395~398, 1987
- 12) 강철희, "공작기계 기술의 현재와 미래(14)" 한국정밀공학회지, 제13권, 제5호, pp. 15~29, 1996. 5
- 13) J. G. Mazlof, "Angle Measuring Interferometer", Rev. Sci. Instrum., Vol. 35, No. 9, 1964
- 14) Hu Xiaotang, "A Study on the Laser Interferometric System for Measuring Arbitrary angle", Doctoral Dissertation, Tianjin University, China, 1986
- 15) 박준호 "정밀측정시스템공학", 야정출판사, pp. 205~206, 1993
- 16) Herrmann, L. K, and Campbell, D. M, "A Finite Element Analysis for the Shells", AIAA Journal, Vol. 6, No. 10, pp. 1842~1847, 1968
- 17) J. P. Jeusette, G. Laschet and P. Charpentier, "Finite Element Analysis of Composite Revolution Structures Wound by Wide Plies", pp. 221~237, 1987