

## 평면 공작물의 진직도 측정 시스템 개발

김현수\*(금오공과대 대학원), 조명동(금오공과대 대학원), 장문주(금오공과대 대학원),  
홍성욱(금오공과대), 박천홍(한국기계연구원)

### Development of straightness measurement system for flat workpiece

H.S. Kim\*(Graduate School, KNUT), M.D. Cho(Graduate School, KNUT), M.J. Jang(Graduate School, KNUT), S.W. Hong (KNUT) and C.H. Park (KIMM)

#### ABSTRACT

This paper presents a straightness measurement system for flat and long workpieces. The measurement system consists of a laser optical unit, a CCD camera and processing system, and a carrier system with a stylus. The carrier system accompanies the stylus, which displaces a retroreflector along the surface profile. The optical unit is used to optically amplify the displacement of retroreflector. The CCD camera and processing system finally identifies the vertical displacement of the stylus unit. The developed system is applied to two surfaces: ground surface and LM guide surface. The experimental results show that the developed system can measure the straightness of flat surfaces within sub-micron error.

**Key Words :** Straightness(진직도), Retroreflector(역반사경), Pitch error(경사각 오차), Yaw error(편각 오차)

#### 1. 서론

고정도 제품 수요에 따른 가공 기술의 발달로 정밀한 제품의 품질 평가를 위해 정밀 계측에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1-6)</sup>. 그러나 대부분의 측정 장치는 센서 및 측정물 이동에 따른 이송장치 자체의 오차로 인해 측정영역의 제한을 받고 있다. 특히 각종 공작기계 및 산업기계에서 사용되고 있는 슬라이드 레일(Slide rail)의 경우 대체로 크고 긴 관개로 제품 전체에 대한 측정이 곤란하여 가공정도에 그 품질을 의존하고 있다. 그러므로 측정 영역에 크게 제한 받지 않고 정밀 측정이 가능한 진직도 측정 장치의 개발은 그 활용성이 높을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 대체로 넓은 영역의 평면 공작물에 대해서 진직 오차를 측정할 목적으로 촉침(Stylus) 및 광학계를 이용하여 진직도 측정 시스템을 개발하였다. 개발된 진직도 측정 시스템을 임의의 연삭 가공물에 시험 적용하여 대체로 넓은 영역에서 진직도 측정이 가능함을 보였다. 또한 상용 LM 유닛에도 적용하여 LM 블록의 이동으로 발생하는 진직 오차 및 LM 가이드의 굽힘 정도를 측정할 수 있었다.

#### 2. 진직도 측정 시스템

##### 2.1 측정 원리 및 장치 구성

Fig 1은 평면 가공물의 진직도 측정을 위한 개념도로서 측정물 위에 촉침이 놓이고 촉침 위에는 변위 센서(Position sensor)가 부착되어 있다. 이때 진직도 측정의 기준이 되는 미소 직경의 레이저광이 변위 센서에 입사되고 촉침이 측정물 표면을 이동함에 따라 수직 변위가 발생하게 되는데 레이저광은 고정되어 있으므로 변위 센서에서의 광 감지 위치가 변하게 된다. 따라서 변위 센서의 출력 변화에 의해 가공물의 진직도를 산출할 수 있다.

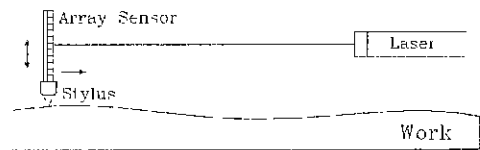


Fig 1 Conceptual diagram of the straightness measurement system

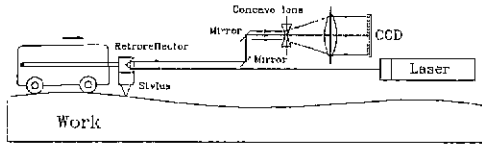


Fig 2 Schematic of the straightness measurement system

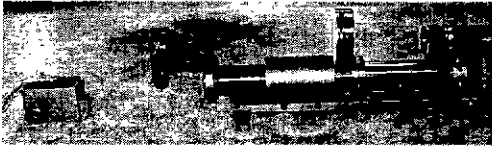


Fig 3 Developed straightness measurement system

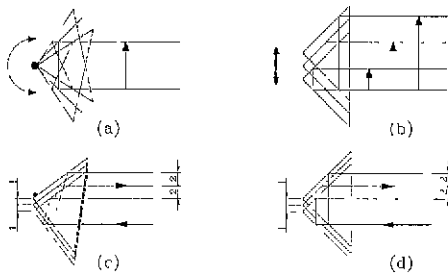


Fig 4 Principles of measurement by using retroreflector

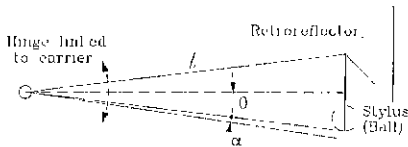


Fig. 5 Stylus mechanism used in the system

Fig. 2는 진직도 측정 장치의 구성을 나타낸 것이며, Fig. 3은 측정장치의 사진을 보인 것이다. 측정 위에 측정물의 수직 변위 피드백용으로 역반사계(Retroreflector)가 부착되어 있는 탐침부는 소형 이송장치에 의해 측정물 표면을 이동한다 레이저광이 역반사계에 입사되고 수직 변위 정보를 포함하여 되돌아오는 광은 정당한 매율을 갖는 오목렌즈(Concave lens)에 의해 확대되고 CCD 영상으로 검출된다. 한편, 오목렌즈와 CCD 사이의 거리를 적당히 조절하여 측정 정도를 결정할 수 있다 측정기를 이동시킬 목적으로 준비된 소형 이송장치는 감속 기어가 장착된 소형 DC모터에 의해 구동되며 디스크형 엔코더(Rotary encoder)가 내장되어 있어서 측정기의 이동

거리를 계산할 수 있도록 구성하였다 또한 이동에 의한 측정의 마모효과를 줄이기 위해 측정으로는 작은 강구를 사용하였다

## 2.2 역반사계의 성질 및 오차 특성

본 연구에서 개발한 진직도 측정장치에서는 측정물의 변위 정보를 피드백 할 목적으로 역반사계를 사용하였다. 역반사계는 항상 입사 광 축과 피드백 광 축이 2차원 평행을 이루도록 고안되었다. Fig. 4는 역반사계의 특성들을 나타낸 것으로서 Fig. 4의 (a)에서 보듯이 두 광 축간 거리는 역반사계 정점에서의 회전오차에 영향을 받지 않으며, Fig. 4의 (b)에서 보인 것처럼 역반사계의 수직 변화에 영향을 받는다. 그러므로 역반사계 아래에 측정물을 붙이고 측정물 표면에서 이동시키면 측정물의 수직 변위에 의해 변화되는 두 광 축간의 거리를 이용하여 가공물의 진직도를 측정할 수 있다. Fig. 4의 (c)와 (d)는 측정 장치를 셋업할 때 역반사계의 정렬오차에 따른 효과를 보기 위한 것이다. 두 그림의 비교에서 알 수 있듯이 역반사계의 수직 정렬 오차는 피드백 광에 영향을 주지 않는다. 또한 피드백 광은 실제 수직 변위를 2배 증폭하는 효과가 있으므로 변위 검출이 용이해지고 이송장치의 Pitch 및 Roll 오차 검출이나 보정이 용이해진다.

가공물 표면을 측정기 이동할 때 측정물 표면 평상에 의해 이송장치는 Pitch, Yaw, Roll현상이 일어나고 이로 인해 역반사계는 실제 수직 변위를 피드백하지 못하게 된다 Fig 5는 이송장치에 연결된 측정기와 역반사계의 메커니즘을 나타낸 것으로서 측정기와 역반사계는 수평선에 대해서  $\theta$ 를 이루고 있다 측정기의 이동으로  $\alpha$ 의 각 변위가 발생하고 이때 측정물의 실제 수직변위  $y$ 와 측정된 변위  $y^*$ 는

$$y = l \cdot \sin \theta - l \cdot \sin(\theta - \alpha)$$

$$y^* = l \cdot \sin(\theta + \alpha) - l \cdot \sin \theta$$

와 같이 표현된다. 그러므로 측정기의 회전 반경( $l$ )이 충분히 클 경우 탐침부의 Pitch 오차는 무시할 수 있는데 본 연구에서 그러한  $l(46.14\text{mm})$ 을 이용하여 시뮬레이션으로 계산 한 결과 수직 변위  $10\mu\text{m}$ 에서 약  $0.25\mu\text{m}$ 정도의 측정 오차를 보였다.

한편, Fig. 6은 역반사계의 Yaw 오차와 Roll 오차를 도식화한 것인데 Fig. 6의 (a)에서 보듯이 Yaw 오차는 수직 변위 측정에 영향을 주지 않는다. Fig 6의 (b)는 Roll 오차 효과를 보인 것인데 Roll의 회전 반경이 짧을 경우 Roll 오차는 작게 나타난다. 그러나 측정 시스템 구성으로 볼 때 Roll 현상을 무시할 수 있다. 대부분의 Roll 오차는 측정물 표면에 의해 발

생하게 되는데 진직도 측정을 목적으로 하는 가공물의 경우 Roll 회전각이 미소하므로 Roll 오차는 염려할 대상이 아니다. 한편, 측정 장치가 정렬된 상태에서 나타나는 CCD영상의 수평 값은 Roll 오차 정보를 가지므로 수직 변위 측정 오차의 보정이 가능하다.

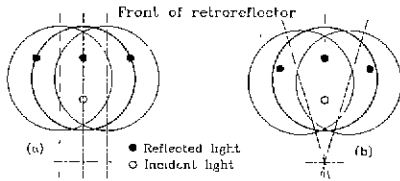


Fig 6 Angular motion effects  
(a)Yaw (b)Roll

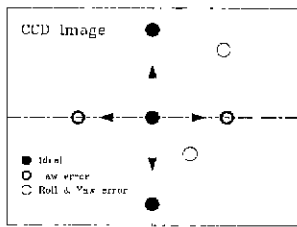


Fig. 7 Variation of measured image due to various errors

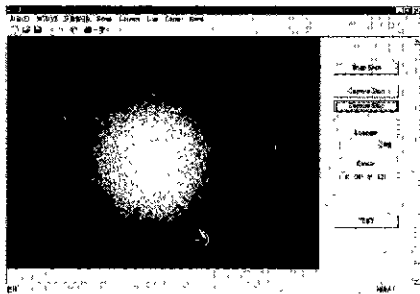


Fig 8 Software for measuring straightness

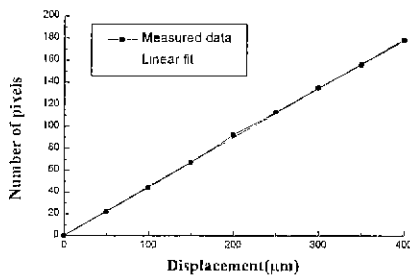


Fig 9 Sensitivity of the developed system

Fig. 7은 CCD에 나타나는 영상의 중심점 변화를 나타낸 것으로서 이상적일 경우 영상은 수직선상을 움직이게 되고, 순수한 Yaw만 있을 경우는 수평선상에 영상이 나타난다. 대부분의 경우 영상은 수직 변위, Yaw, Pitch, Roll, 측정 장치 정렬 오차 등이 혼합되어 나타나므로 사사분면에 위치하게 된다. 본 연구에서 사용된 CCD영상의 크기는 640(H)×480(V)이며 CCD소자(Cell)의 크기는 8.4μm(H)×9.8μm(V)이다

### 2.3 진직도 측정 장치 운용 시스템

본 연구에서 개발된 진직도 측정 시스템의 효율적인 운용을 위해 PC 윈도우 환경에서 전용 소프트웨어를 개발하였다. 시스템 제어 장치로는 범용 AD 보드를 이용하였다. AD 보드에 의해 측정 이송장치를 구동하고 측정의 이동 거리 산출을 위한 엔코더 값이 계산되도록 하였다. Fig. 8은 개발된 운용 프로그램의 주 화면을 보인 것으로서 레이저 발생기에서 방출된 레이저광이 역반사계를 통해 피드백 되고 오목 렌즈에 의해서 확대된 영상을 나타내고 있다. 측정 이동에 의한 변위 정보는 영상의 위치 변화로 나타나는 영상의 중심은 획득된 영상을 이전화면 후 무게 중심 알고리즘을 적용하여 구하였다.

### 3. 진직도 측정 장치의 시험 적용

개발된 진직도 측정 시스템의 성능 평가를 위해 임의의 연삭 가공물과 상용 LM 유닛에 시험 적용하였다. Fig 9는 개발된 측정 시스템의 감도를 나타낸 것으로서 약 2.25μm의 측정 정밀도를 갖는다. 그러나 레이저광의 직경을 충분히 줄일 경우 배율이 높은 오목렌즈를 사용하여 측정 정밀도를 서브 마이크로까지 높이는 것이 가능하다 현재 사용된 레이저광은 1mm의 직경을 갖는다

Fig. 10은 임의의 연삭 가공물을 대상으로 진직도 측정을 위한 셋업 상태를 보인 것이다. 측정 결과를 Fig 11에 나타내었는데 측정 거리 400mm에서 평균 최대 값은 약 25μm의 진직 오차를 갖는 것으로 나타났다

한편, 상용 LM 유닛에 대해서도 시험 적용하였는데 Fig. 12는 LM 유닛의 이송 오차를 측정하기 위한 측정 장치 셋업 상태를 보인 것이다. Fig. 13은 LM 유닛의 이송오차를 개발된 측정 시스템으로 측정된 결과를 보인 것으로서 LM 가이드의 굽힘 현상이 잘 나타나고 있으며, 진직 오차의 경우 주기 성분이 나타나는데 이는 LM 가이드 고정용 구멍위치와 동조됨을 확인하였다

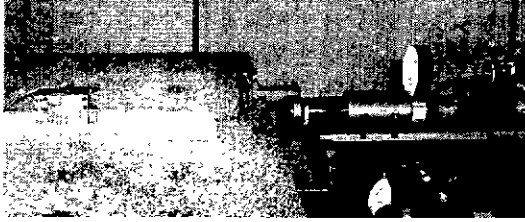


Fig 10 Experimental setup for measuring straightness of flat workpiece

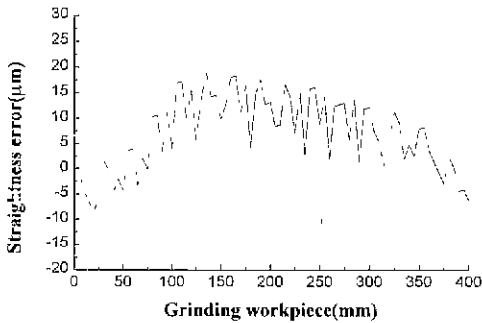


Fig. 11 Measured error for the grinding workpiece

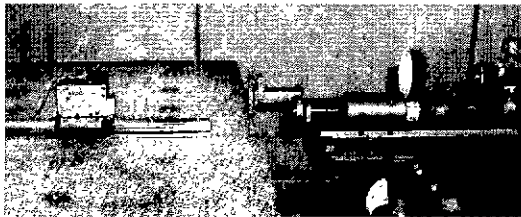


Fig 12 Experimental setup for measuring straightness of an LM unit

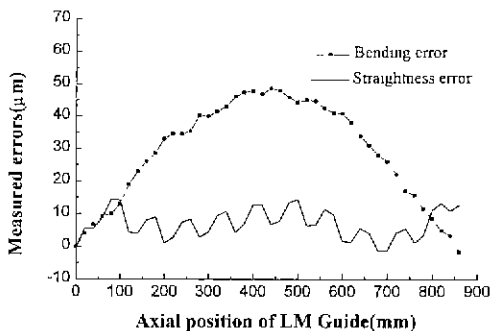


Fig 13 Measured straightness and bending errors of the LM unit

#### 4. 결론

본 연구에서는 비교적 넓은 영역에서 평면 가공물의 진직 오차를 평가할 목적으로 촉침 및 광학계를 조합하여 진직도 측정 시스템을 개발하였다. 개발된 진직도 측정 장치를 임의의 연삭 가공물과 LM 유닛에 시험 적용하였다. 연삭 가공물의 진직도 측정 결과 표면 미소변화는 물론 전체 측정 영역에 있어서 진직 오차를 효과적으로 검출할 수 있었다. LM 유닛의 이송 오차 측정 결과에서는 LM 블록 이송에 따른 진직 오차 및 LM 가이드의 굽힘 정도를 효과적으로 측정할 수 있었다. 개발된 진직도 측정 시스템은 사용되는 광원의 직경이 대체로 큰 관계로 측정 정밀도의 제한이 있었으나 광원의 직경을 충분히 줄일 수 있다면 서브 마이크로까지 측정이 가능할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. Fan, K.C., Zhao, Y., "A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques," *Int. J. of Mach. Tools & Manufact.*, Vol. 40, pp. 2073-2081, 2000.
2. Huang, J., "An exact minimum zone solution for three-dimensional straightness evaluation problems." *Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 204-208, 1999
3. Chou, C., Chou, L.Y., Peng, C.K., Huang, Y.C. and Fan, K.C., "CCD-based CMM geometrical error measurement using fourier phase shift algorithm" *Int. J. of Mach. Tools & Manufact.*, Vol. 37, No. 5, pp. 579-590, 1997
4. Zhang, Q., Fan, K.C., Li, Z., "Evaluation method for spatial straightness errors based on minimum zone condition." *Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 264-272, 1999
5. Samuel, G.L., Shunmugam, M.S., "Evaluation of straightness and flatness error using computational geometric techniques," *Computer Aided Design*, Vol. 31, pp. 829-843, 1999
6. 김현수, 홍성욱, "2축 이송계 정밀도 측정을 위한 레이저 간섭계 4축 자동정렬장치 개발," *한국정밀공학회지*, 제17권 제9호, pp. 75-80, 2000