

평면 공작물 진직도 측정 시스템 개발에 관한 연구

김현수*, 장문주*, 흥성욱**, 박천홍***

Development of Straightness Measurement System for Flat Workpieces

Hyun-Soo Kim*, Moon-Joo Jang*, Seong-Wook Hong**, Chun-Hong Park***

ABSTRACT

This paper presents a straightness measurement system for flat and long workpieces. The measurement system consists of a laser, a CCD camera and processing system, a carrier system with a stylus, and some optical units. 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 a ground surface and a LM guide unit. The experimental results show that the developed system can measure the straightness of flat surfaces and moving systems.

Key Words : Straightness(진직도), Stylus(촉침), Retroreflector(역반사계), Laser(레이저)

1. 서론

제품시장에서의 다품종 소량 요구 확대와 고정도 제품에 대한 수요 증가에 의해 전문 가공 및 정밀 가공의 필요성이 더욱 커지고 있다. 이에 따라 가공물 평가를 위한 정밀 계측 연구가 활발히 진행되고 있다^[1~6]. 그러나 대부분의 측정 장치에서는 측정을 위해 센서 및 측정물을 이동해야 하므로 이송 장치 자체의 오차가 개입될 수 있다. 또한, 이송장치의 이동거리 한계로 인하여 측정영역의 제한을 받고 있다. 특히 각종 공작기계 및 산업기계에서 안내 역할을 수행하기 위해 많이 사용하고 있는 슬라이드 레일(Slide rail)의 경우 대체로 크고 길기 때문에 제품 전체에 대한 측정이 곤란하여 가공정도에 그 품질을 의존하고 있는 실정이다. 그러므로 측정센서 및 측정물 이동에 따른 오차를 무시할 수

있고 넓은 측정 영역을 가지면서 정밀 측정이 가능한 진직도 측정 장치가 개발된다면 그 활용성이 높을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 측정 센서 및 측정물 이동에 따른 오차 개입 효과를 무시할 수 있고 넓은 범위의 측정 영역을 갖도록 측침(Stylus) 및 레이저 광학계를 이용하여 진직도 측정 시스템을 개발하였다. 개발된 진직도 측정 장치를 몇 개의 연삭 가공볼과 상용 LM 유닛에 시험 적용하여 넓은 영역에서 진직도 측정이 가능함을 보였다. 한편, LM 유닛에 대한 적용에서는 이송계 이동에 따른 진직도를 두 방향에 대해서 측정할 수 있음을 보였다. 또한, 진직도 측정 장치의 확장 응용한다는 측면에서 측침과 역반사계를 포함한 탐침부를 여러 측정 목적에 따라 다른 이송계에 장착하여 사용하는 방법을 제시하였다.

* 2001년 8월 16일 접수

* 금오공과대학교 대학원

** 금오공과대학교 기계공학부

*** 한국기계연구원

2. 진직도 측정 시스템

2.1 측정 원리 및 구성

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 진직도 측정 장치의 측정 원리를 설명하기 위한 개념도이다. 편의상 측정물 위에 촉침이 놓이고 촉침 위에는 변위 센서(Position sensor)가 부착되어 있다고 가정한다. 이때 미소 직경을 갖는 레이저빔을 변위 센서로 입사시키고 촉침을 측정물 표면에서 이동시킨다. 촉침은 측정물의 단면곡선(Profile)을 따라 이동하면서 수직 변위가 발생하게 되는데 레이저빔은 별도의 고정된 위치에서 방사되므로 진직도 측정을 위한 기준역할을 수행하게 된다. 그러므로 변위 센서에서의 광 감지 위치가 변하게 되고 따라서 변위 센서의 출력변화를 검출하여 가공물의 진직도를 산출 할 수 있게 된다.

Fig. 2는 진직도 측정 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 진직도 측정 장치의 개념도에서 보인 촉침과 변위 센서는 실제 적용에 있어서 다소 어려움이 있으므로 진직도 측정 시스템의 구성 과정에서는 이들을 다른 요소 품으로 대체하였다. 촉침의 경우 작은 강구(Steel ball, 이하 촉침볼)로 대체하여 가공물의 표면에 흠을 남기지 않고, 뾰족한 촉침에 비해 빠른 측정이 가능하도록 하였다. 변위 센서의 경우는 역반사계(632.8nm, Solid type)와 CCD 카메라로 대체하여 역반사계를 통해서 전달되는 가공물의 수직 변위 정보를 CCD 카메라에서 검출하도록 구성하였다. 실제 구성된 진직도 측정 장치에서 보면 촉침볼은 측정물 표면에 위치하고 촉침볼 위에는 역반사계가 부착되어 있다(이하 촉침볼과 역반사계를 포함하여 탐침부라 한다). 레이저빔은 역반사계에서 입사 및 반사되는데 역반사계의 특성상 반사되는 레이저빔은 입사광과 평행을 이룬다. 소형 이송장치에 의해 표면을 이동하는 탐침부는 가공물의 수직 변위에 따라 변위가 발생되는데, 가공물의 수직 변위 변화는 역반사계를 거치면서 입사광과 반사광의 평행 거리 변화로 나타난다. 그러므로 이러한 입·반사광의 평행 거리 변화를 CCD 카메라에서 검출하여 공작물의 진직도를 산출한다. 입·반사광의 평행 거리 변화가 미소하므로 반사광 경로에 확대 렌즈를 두었다. 또한 확대렌즈와 CCD 사이의 거리를 적당히 조절하여 측정 정도를 결정할 수 있다.

Fig. 3은 개발된 진직도 측정 장치를 보인 것으로

로서 사용한 레이저는 632.8nm, 0.4mW, $\Phi 0.8\text{mm}$, Divergence 1mrad의 사양을 가지며, CCD 카메라 앞에는 스크린을 설치하여 반사광의 상을 만들고 스크린에 형성된 상을 CCD 카메라로 측정하였다.

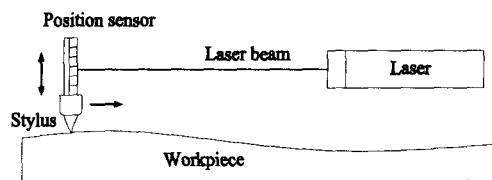


Fig. 1 The conceptual diagram of the straightness measurement system

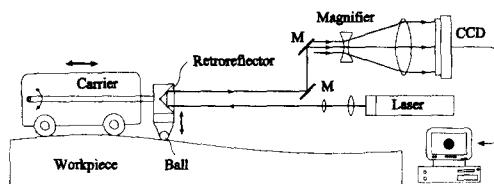


Fig. 2 Schematic of the straightness measurement system

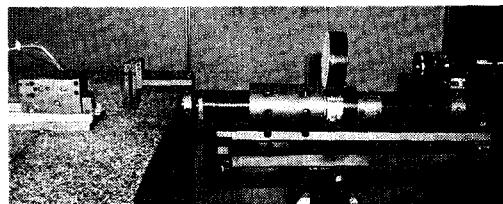


Fig. 3 The developed straightness measurement system

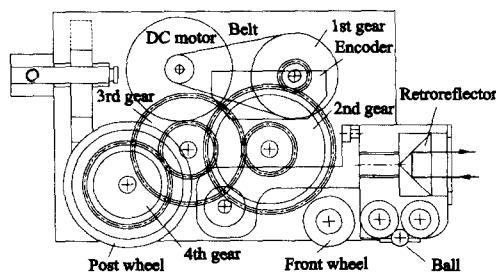


Fig. 4 The moving carrier unit with a stylus

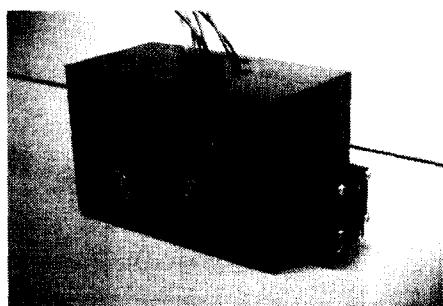


Fig. 5 The developed moving unit

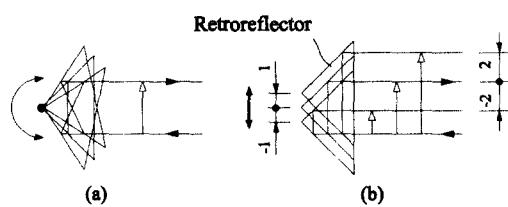


Fig. 6 Characteristics of retroreflector

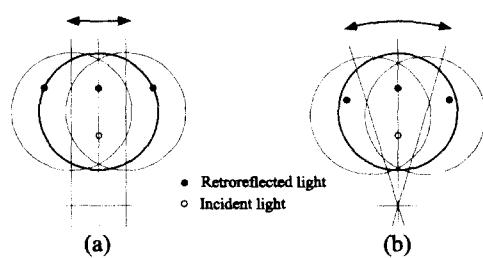
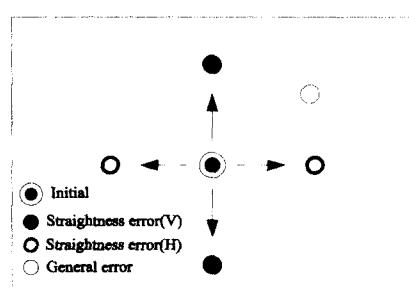
Fig. 7 Motion effects of retroreflector
(a) Horizontal motion & Yaw (b) Roll

Fig. 8 Variation of measured image due to various errors

본 연구에서 개발한 진직도 측정장치는 측정 센서가 이동하는 방식을 선택하고 있다. 그러므로 센서 이동에 의한 이송장치의 오차를 무시할 수 있도록 이송장치 또한 측정 센서와 같이 측정물 표면을 이동할 수 있도록 고안하였다. Fig. 4는 탐침부를 측정물 표면에서 이동시킬 복적으로 준비된 소형 이송장치의 설계도를 보인 것이다. 감속 기어가 장착된 이송장치는 소형 DC 모터에 의해 구동되어 디스크형 엔코더(Rotary encoder)가 내장되어 있어서 촉침의 이동거리를 계산할 수 있으며, 이송장치의 오차를 무시할 수 있도록 탐침부의 회전 중심을 충분히 멀리하였다. Fig. 5는 제작된 이송장치를 보인 것이다.

2.2 역반사계의 성질 및 오차 특성

본 연구에서 개발한 진직도 측정 장치에서는 측정물의 변위 정보를 얻기 위하여 역반사계를 사용하였다. 역반사계는 입사 광축과 되돌아오는 광축이 항상 2차원 평행을 이루게 된다.

Fig. 6은 역반사계의 특성을 나타낸 것인데 입·반사되는 두 광 축간의 거리는 일반적으로 역반사계 정점에서의 회전에 영향을 받지 않으며(a), 역반사계의 수직 변화에 영향을 받는다(b). 본 연구에서는 레이저 광원의 특성에 적합하게 제작된 입체형 역반사계를 사용하여 굴절에 따른 오차를 최소로 하였다. 그러나 굴절률 차이에 의한 미소 오차의 효과를 더욱 줄이기 위해서는 입체형(Solid type) 보다 공동형(Hollow type)을 사용하는 것이 좋다. 역반사계 아래쪽에 촉침을 붙이고 촉침과 함께 측정물 표면에서 이동시키면 측정물의 수직 변위에 의해 두 광 축간의 거리가 변하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 가공물의 진직도를 측정할 수 있다. 역반사계에서 입·반사되는 두 광 축간의 거리가 역반사계 정점에서의 회전과 무관하기 때문에 개발된 진직도 측정 장치를 셋업 할 때 역반사계의 수직 정렬 오차를 무시할 수 있음을 의미한다. 따라서 실제 사용에 있어서 역반사계의 수직 정렬에 대한 정밀한 셋업을 요구하지 않으므로 편리하게 사용할 수 있다. 한편, 반사광은 실제 수직 변위를 2 배 증폭하는 효과가 있으므로 변위 검출이 용이해진다.

한편, 가공물 표면을 촉침과 이송장치가 이동할 때 측정물 표면 형상(Form)에 의해 이송장치가 수직각 오차(Pitch error), 수평 진직도 오차(Horizontal

straightness error), 회전오차(Roll error) 등을 동반할 수 있는데 이로 인해 역반사계는 실제 수직 변위를 전달하지 못하고 측정 오차를 발생할 수 있다. 이 중에서 수직 각오차의 경우 탐침부의 회전 반경이 충분히 크므로 측정 정도에 비교해볼 때 무시될 수 있다.

Fig. 7은 역반사계에서 예상되는 수평 이동 및 각운동에 의한 측정 오차와 회전에 의한 측정 오차를 도식화한 것인데 수평 운동의 경우 수직 변위 측정에는 영향을 주지 않는다. 회전의 경우는 회전 반경이 짧을수록 오차는 작게 나타난다. 대부분의 회전오차는 측정물 표면의 완만한 형상 변화에 의해 발생하게 되는데 진직도 오차 측정을 목적으로 하는 평면 가공물의 경우 회전각이 미소하므로 회전오차 또한 무시될 수 있다.

Fig. 8은 CCD에서 검출된 반사광 영상의 중심점 변화를 도식화한 것이다. 수평각 오차 없이 진직도 오차만 있으면 영상의 중심은 중앙에 위치한 초기 상태에서 수직선상을 움직이게 되고, 수평각 오차(Yaw)나 수평진직도오차(Horizontal straightness error)가 있을 경우는 수평선상을 움직인다. 따라서 진직도 측정을 위해서는 영상 중심의 수직 변화 값만을 취한다. 본 연구에서 사용된 CCD 영상의 크기는 640(H)× 480(V)이며 CCD 소자(Cell)의 크기는 $8.4\mu\text{m}(\text{H}) \times 9.8\mu\text{m}(\text{V})$ 이다.

2.3 진직도 측정 장치의 운용 시스템

본 연구에서 개발된 진직도 측정 장치의 효율적인 운용을 위해 개인용 컴퓨터 윈도우 환경에서 전용 소프트웨어를 개발하였다. 시스템 제어를 위해 범용 AD 보드를 사용하였으며, 영상 표시 및 획득을 위해 CCD 카메라 전용 보드(Frame grabber)를 이용하였다. 별도의 전원장치에 의해 이송장치 구동 모터에 전원을 공급하고, 엔코더 구동 전원으로는 AD 보드 내부 전원을 사용하였다. 촉침의 이동 거리를 구하기 위해서는 AD 보드에 내장된 카운터를 이용하여 엔코더 값을 카운트하였다.

Fig. 9는 개발된 운용 프로그램의 주 화면을 보인 것으로서 레이저 발생기에서 방출된 레이저광이 역반사계를 통해 반사되어 확대 렌즈에 의해서 확대된 영상을 나타내고 있다. 촉침의 이동에 의한 공작물의 변위 정보는 영상의 위치 변화로 나타나는데, 영상의 중심점을 계산하기 위해 획득된 영상을 적당한 문턱 값(Threshold)으로 이진화한 후 무

게 중심 알고리듬을 적용하였다.

2.4 진직도 측정 장치의 감도 특성

개발된 진직도 측정장치의 측정 분해능은 하드웨어 개선 측면에서 볼 때 레이저광의 직경을 줄이고, 확대 렌즈와 CCD 카메라 사이의 거리를 조정하거나 확대렌즈에 배율을 키우는 것에 의해서 조정이 가능하며, 운용 소프트웨어 개선 측면에서는 CCD 영상의 중심점 계산을 위한 알고리즘에 의해 결정할 수 있다.

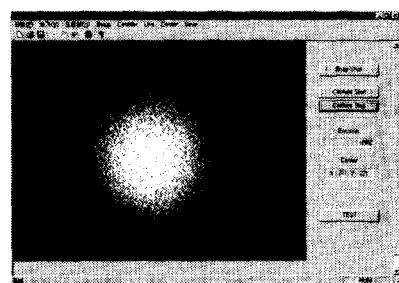
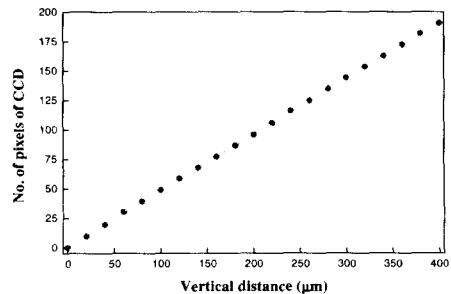
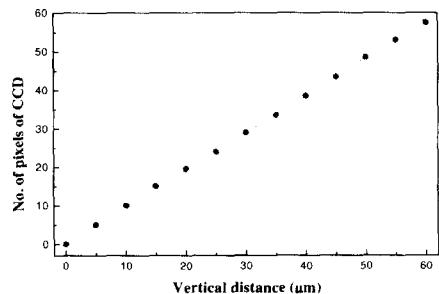


Fig. 9 Main window of a software for straightness measurement system



(a) 1 pixel : $2\mu\text{m}$



(b) 1 pixel : $1\mu\text{m}$

Fig. 10 Sensitivity of the developed system

Fig. 10은 진직도 측정 장치의 측정 분해능을 평가하기 위한 실험 결과를 나타낸 것이다. 레이저빔의 퍼짐(Divergence) 정도와 평균적인 측정물의 거리를 고려하여 탐침부와 레이저 발생기의 거리를 300mm로 하고 확대 렌즈와 CCD 카메라의 거리를 바꾸면서 측정 분해능 평가 실험을 하였다. Fig. 10(a)의 경우 확대 렌즈와 CCD 카메라 사이의 거리를 270mm로 하고 평가한 측정 분해능을 나타낸 것이다. 이 경우 약 2 μm 정도의 측정 분해능을 얻을 수 있었는데 대체로 넓은 범위의 측정 영역을 갖는다. Fig. 10(b)는 확대 렌즈와 CCD 카메라 사이의 거리를 290mm로 했을 때 측정 분해능을 나타낸 것이다. 이 경우 약 1 μm 정도의 측정 분해능을 얻을 수 있는 반면에 측정 영역이 더 작아짐을 알 수 있다. 따라서 측정물의 크기와 측정 정밀도를 고려하여 적절한 분해능을 결정하고 진직도를 측정하는 것이 효율적이다.

3. 진직도 측정 장치 시험 적용

개발된 진직도 측정 시스템의 성능 평가를 위해 임의의 연삭 가공물의 진직도 측정과 상용 LM 유닛의 이송에 따른 진직도 측정에 시험 적용하였다.

Fig. 11은 임의의 박판 연삭 가공물(500mm × 100mm × 10mm)에 대해서 진직도 측정을 위한 진직도 측정 장치의 셋업 상태를 보인 것이다. 탐침부를 이동시킬 목적으로 제작된 이송장치의 직선운동을 확보하기 위해 측정 시에 보조 가이드를 이용하였다. 측정 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 측정 거리 400mm에서 최대 값으로 약 40 μm 의 진직도 오차를 가진 것으로 나타났는데 이같은 큰 값이 얻어진 원인은 대상 측정물이 박판의 긴 공작물이기 때문에 굽곡 형태의 변형이 발생한 것으로 추정된다.

Fig. 13는 상용 LM 유닛의 이송에 따른 진직도 오차를 측정하기 위한 측정 장치 셋업 상태를 보인 것이다. Fig. 14에 LM 유닛의 이송에 따른 진직도 오차 측정 결과를 나타내었다. 측정 결과에서 보면 Y방향(수직방향)의 진직도 오차의 경우 주기 성분이 나타나는데 이는 LM 가이드 고정용 구멍위치와 동조됨을 확인하였다. X방향(수평방향)의 진직도 오차 측정 결과로부터 LM 가이드는 구부러져 있음을 알 수 있다. 그러므로 실제 이송을 위한 가이드로 사용될 경우 고정 시에 보정되어야 한다.

4. 진직도 측정 장치의 확장 응용

개발된 진직도 측정 장치의 탐침부(측침과 역반사계)는 본 연구에서 제작된 이송장치 외에 다양한 이송장치에 장착하여 사용하는 것이 가능하다. 제작된 이송장치를 이용할 경우 기상 측정(On-machine measurement)에 적용할 수 있다는 장점을 가지나 이송장치 만큼의 측정영역 제한이 따른다. 제작된 이송장치를 사용하지 않고 다른 이송계를 이용할 경우 가공물의 전체 길이에 대해서 측정하는 것이 가능해진다.

Fig. 15은 선형 가이드에 탐침부를 결합하여 가

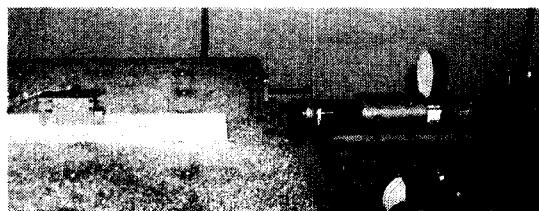


Fig. 11 A experimental setup for straightness measurement of a ground workpiece

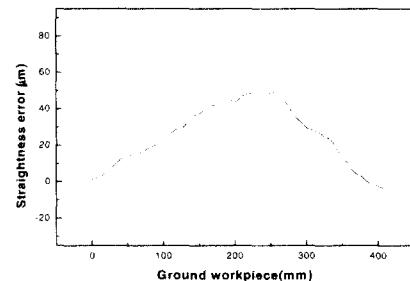


Fig. 12 Measured straightness error of a ground thin plate (500x100x10mm)

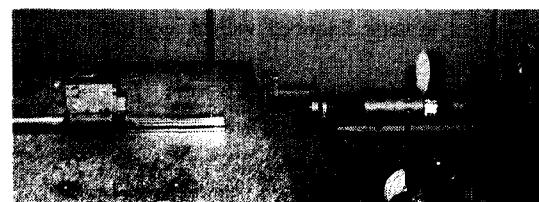


Fig. 13 Experimental setup for measuring straightness of a LM unit

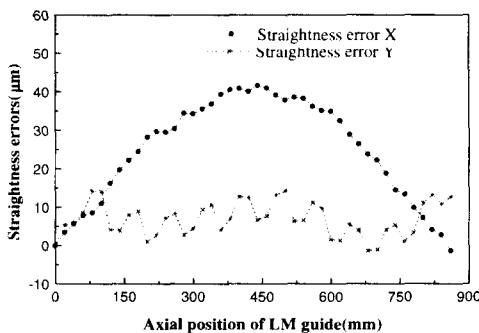


Fig. 14 Measured straightness errors of the LM unit

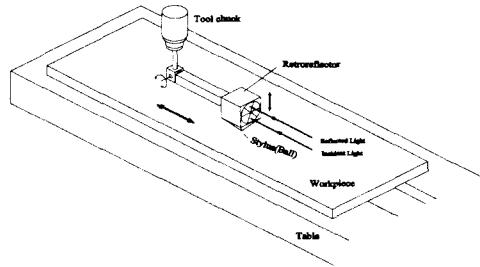


Fig. 17 An application of straightness measurement system : implemented to a tool chuck

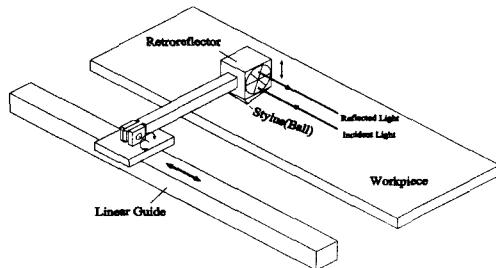


Fig. 15 A modified straightness measurement system equipped with a linear guide

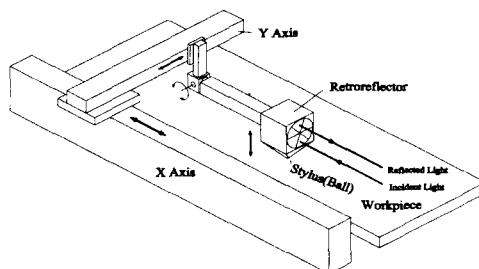


Fig. 16 A modified straightness measurement system equipped with a x-y table

공물의 진직도 오차를 측정하는 방법을 보이고 있다. 선형 가이드 옆에 측정물을 놓고 선형 가이드 블록에 탐침부를 연결한 후 이동하여 가공물의 진직도 오차를 측정한다. 이러한 응용에서 선형 가이드 자체의 오차는 무시될 수 있으나 염려가 되는 경우 선형 가이드 블록에 연결된 탐침부를 고정하

고 미리 선형 가이드의 이동에 따른 진직도 오차를 측정하여 실제 가공물의 진직도 오차를 보정할 수 있다. 그러나 본 응용에서는 구조상 탐침부의 회전 반경이 진직도 오차에 비해 매우 크므로 선형 가이드의 이송오차는 무시할 수 있다. 또한 측정물의 크기가 선형 가이드보다 클 경우 동일한 선형 가이드를 추가로 연결하여 측정 영역을 크게 하여 사용할 수 있다.

Fig. 16은 가공물 표면 전체에 대한 진직도를 측정하고자 할 경우 진직도 측정 장치의 응용 방법을 보인 것이다. 이 방법의 경우 진직도는 물론 가공물의 평면에 대한 오차 정보를 얻을 수 있다.

Fig. 17는 기상에서 공구 고정 대에 탐침부를 장착하여 가공물의 진직도를 측정하는 방법을 보인 것이다. 이 방법은 기계 본체의 이송 시스템을 이용하여 2차원 진직도 오차 측정하므로 편리함을 제공하지만 이송 테이블 오차가 개입될 수 있으므로 테이블 이송시스템에 대한 오차가 미리 데이터 베이스와 되어서 가공물 측정 시에 보정 없으로 사용되어야 한다.

Fig. 18는 진직도 측정 장치의 탐침부를 확장 응용하는 차원에서 시험적으로 적용한 예를 보인 것이다. LM 유닛과 같은 선형 가이드에 탐침부를 연결하고 탐침부의 회전 중심을 LM 블록 위에 위치시키므로서 LM 가이드 자체오차는 무시되도록 구성하였다. Fig. 19는 LM 유닛을 사용하여 구성한 진직도 측정장치로 측정한 임의의 연삭 가공물에 대해 진직도 오차를 나타낸 것으로서 최대 약 150 μm 의 진직도 오차를 보이는 데 이는 측정 표면 자체의 진직도 보다는 판재형(500mm \times 100mm \times 5mm)이므로 굴곡이 나타나고 있다. Fig. 20은 Fig. 19의 동일



Fig. 18 Experimental setup for measuring flatness and straightness errors by using LM unit



Fig. 19 Straightness error of a ground workpiece

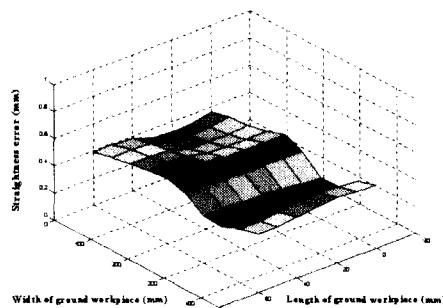


Fig. 20 3D-plot of flatness error of a ground workpiece

조건에서 측정물을 석정반 위에서 측정 방향의 각 방향으로 대략 10mm씩 움직이면서 측정한 것을 3차원으로 나타낸 것이다. 직교 이송계에 탐침부를 장착하여 가공물 전체에 대해서 측정이 이루어 질 경우 본 연구에서 개발된 진직도 측정 장치는 가공물의 평면 오차를 측정하는 것이 가능해진다.

5. 결 론

본 연구에서는 비교적 넓은 영역에서 가공물의 진직도를 측정할 목적으로 측침 및 레이저 광학계를 조합하여 진직도 측정 시스템을 개발하였다. 개발된 진직도 측정 장치를 임의의 연삭 가공물의 진직도 측정과 LM 유닛의 이송에 따른 진직도 측정에 시험 적용하였다. 연삭 가공물의 진직도 측정 결과 가공물 진직도 오차를 효과적으로 검출할 수 있었다. LM 유닛에의 적용 결과 LM 블록 이송에 따른 진직도 오차를 동시에 두 방향에서 측정할 수 있었으며, 측정된 결과로부터 LM 가이드의 굽힘 정도를 효과적으로 측정할 수 있었다. 한편, 진직도 측정 장치의 탐침부를 다른 이송계에 장착하여 다양한 측정 목적으로 활용될 수 있음을 보였다. 진직도 측정 장치의 확장 응용차원에서 탐침부를 LM 유닛에 장착하고 임의의 연삭 가공물에 대해서 적용하였는데 진직도 측정은 물론 가공물 표면 전체에 대한 평면 오차 정보를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Fan, K.C., Zhao, Y., "A laser straightness Fan, measurement system using optical fiber and modulation techniques," Int. J. of Mach. Tools & Manufac., 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. 박천홍, 정재훈, 김수태, 이후상, "서브미크론 진직도 측정장치 개발," 한국정밀공학회지, 제17권 제5호, pp. 124-130, 2000.