

## 평면 오차 보정 가공을 위한 측정 방법에 관한 연구

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

### A Measurement Method to Compromise Surface Error in Machined Workpieces

M. J. Jang (Graduate School, KNUT), S. W. Hong (KNUT), C. H. Park (KIMM)

#### ABSTRACT

This paper presents a measurement method to compromise surface error in surface machining processes. In order to compromise the surface error in machining process, on-machine measurement is essential. There are two kinds of on-machine measurement methods available to measure the surface errors in flat workpieces: i.e., surface scanning method and sensor scanning method. However, motion errors are inevitably engaged in both methods. This paper proposes a new idea to measure the surface error for error compensation. The measurement system consists of a laser, a CCD camera and processing system, a carrier system with a stylus, and some optical units. The experimental results show that the proposed method is useful to compensate the surface errors of machined workpieces.

**Key Words** : Surface error (평면오차), Retroreflector (역반사계), Laser (레이저), Error compensation (오차보상)

#### 1. 서론

고정도 제품에 대한 수요 증가에 의해 정밀 가공의 요구가 더욱 커지고 있다. 따라서 가공 정밀도의 향상에 대한 필요성이 커져 왔으며 이를 위한 기상계측 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1-4]</sup>. 공작물의 평면 오차를 측정하는 대부분의 측정 방법에서는 측정을 위해 센서 또는 측정물이 이송장치를 통해 이송됨으로 인해 이송장치 자체의 오차가 개입될 수 있다. 또한, 이송장치의 이동거리 한계로 인하여 측정 영역의 제한을 받아 왔다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 강구와 역반사계, 레이저 광학계와 CCD 등을 활용하는 방식의 평면 공작물 진직도 측정 시스템을 개발하였으며 그 응용 가능성을 제시한 바 있다<sup>[5]</sup>.

평면 오차를 측정하는 관점에서 기존의 측정방법은 몇 가지 한계에 직면하게 된다. 센서를 공간에 고정시키고 공작물을 이송시키면서 측정하면 공작물의 평면오차에 이송계의 오차가 합해져서 나타나게 된다. 따라서 공작물의 평면오차에 대한 올바른 평가가 이루어지기 어렵다. 센서가 이동하는 방식으로 측정하는 경우 센서를 이송하는 이송계에서 공작물을 이송시키는 경우와 동일한 문제점을 갖게 된

다. 그러나 참고문헌 [1]에서 제안한 진직도 오차 측정 시스템을 사용하여 센서를 이동시키면 센서의 이송오차에 의한 효과를 배제할 수 있으므로 일반적인 공작물의 평면 오차를 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 평면오차는 공작물의 평가에는 활용될 수 있으나 곧바로 보정 가공을 위해 활용되지는 못한다. 왜냐하면, 보정 가공을 위해 공작물이 공구 위치로 이송되면 이송계의 오차가 합해져서 나타나기 때문이다. 따라서 보정 가공을 하기 위해서는 공구가 위치한 곳에서의 이송오차를 측정하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 공간상에 고정된 공구 위치에서 관측되는 이송오차를 측정하는 방법을 제안하였다. 공구 위치에서의 이송오차를 측정하게 되면 공구 위치에 고정된 센서에서 측정된 평면 오차에서 이송계 오차 성분을 제거함으로써 실제 평면 오차를 계산할 수 있게 된다. 이를 위해 진직도 측정센서를 공작물 이송계와 함께 동기 시켜 이송시키면서 3개 이상의 서로 다른 점에서 상하 변위를 측정함으로써 공간상에 고정된 좌표에서의 상하 변위를 추정하였다. 실험실에 제작된 XY 테이블을 통해 실험을 실시하였으며 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 평면 오차 측정 및 보정 시스템의 원리 및 구성

Fig. 1은 평면오차 측정 시스템의 실제 측정 시스템을 보여주고 있다. 여기서는 참고문헌<sup>[1]</sup>에서 제안된 방법을 응용한 것으로서 측정에 사용된 센서의 개념도를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 역반사계와 측침이 달린 측정 헤드가 측정물의 단면곡선(Profile)을 따라 이동하여 수직 변위를 가지게 되면 고정된 위치에서 입사된 레이저광이 역반사계에서 반사될 때 2배수의 수직 변위를 갖게 된다. 반사된 레이저광을 증폭을 위한 광학계를 거쳐 CCD카메라로 검출함으로써 수직 변위를 산출한다. 측정헤드를 표면을 따라 이동하면서 수직 변위를 산출하면 평면오차를 구할 수 있다.

Fig. 3은 측정 및 보정의 원리를 설명하기 위한 2차원적 개념도이다. 가공 조건 등에 영향을 받아 공작물에는 그림과 같이 표면 굴곡이 존재하게 된다. 표면의 굴곡을 측정하기 위해서는 Fig. 2에 보여진 측정 장치를 사용할 수 있다. 즉, 공작물 표면 위로 측정장치가 스캔하면서 상하 변위를 측정하면 그 결과가 표면형상에 대응된다.

한편 공작물이 이송되면 이송계가 갖는 운동오차에 의해 수직 방향으로의 오차가 추가된다. 일반적으로 이 같은 운동오차는 이송위치의 함수이다. 운동오차를 결정하기 위해서 본 연구에서는 공작물과 측정센서를 동기시켜 이송하였다. Fig. 3에 보여지는 바와 같이 공작물 위에 놓인 센서가 공작물과 동기되어 이송되면 공작물의 운동오차가 반영되어 센서가 상하방향으로 이동하게 된다. 따라서 동일한 조건에서 여러 위치에 대해 이와 같은 측정을 반복하게 되면 공작물 전체에 대한 이송 오차를 추정할 수 있다. 즉, Fig. 3에서와 같이 1차원적인 오차의 경우에서는 공작물 위 2개의 점에서 측정된 오차를 이용하면 임의의 위치에서의 오차를 추정할 수 있다. 예컨대  $E_1, E_2$ 를 측정하면 임의의 측정점에서의 오차  $E$ 는 기하학적 조건으로부터 계산할 수 있다. 일반적인 평면오차의 경우에도 같은 원리로 세 곳 이상의 위치에 대한 운동오차를 측정하면 임의의 점에서의 오차를 환산할 수 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 x방향의 오차 측정에 실제 적용한 측정 방식을 개념적으로 구성한 것이다. 공작물 위 4개의 기준점(01, 02, 03, 04) 위에 차례로 측정헤드를 두고 동시 이송시키면서 각 위치에서 이송오차를 측정한다. 측정된 이송오차 중 3개를 선택하여 평면방정식  $ax + by + z = c$ 의 계수  $a, b, c$ 를 구하면, 공작물 위의 임의의 점  $(x_0, y_0)$ 에서의 이송오차  $z_0 (= -ax_0 - by_0 + c)$ 를 연산할 수 있다.

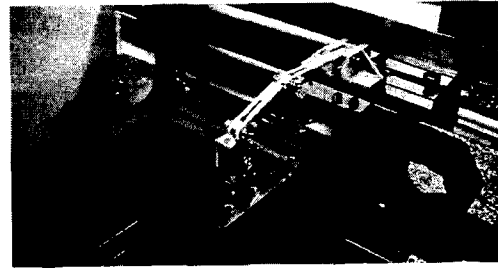


Fig. 1 Experimental setup for measuring Surface error using LM unit

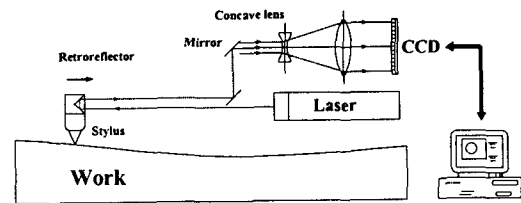


Fig. 2 Schematic of the surface measurement system

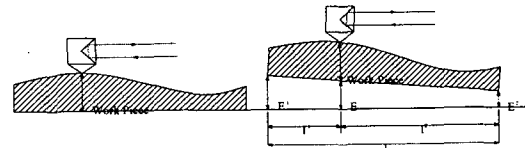


Fig. 3 Combination of surface error and feeding error

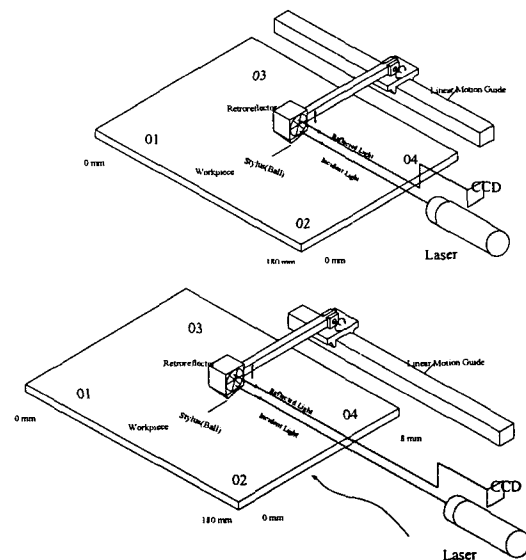


Fig. 4 Schematic for measurement of feeding errors of a XY table

또한 공간에 고정된 좌표에서 관측되는 이송오차는 임의의 점  $(x_0, y_0)$  값을 적절히 변화시키며 연산하면 얻을 수 있다. 이 같이 얻어진 이송오차 값을 이용하게 되면 고정된 좌표에서 얻어지는 겉보기 평면 오차(Apparent surface error) 측정데이터로부터 실제 공작물의 엄밀한 평면 오차(True surface error)를 환산할 수 있다.

### 3. 평면 오차 측정 실험

제안된 방법을 검증하기 위해 Fig.1과 같은 실험 장치를 이용하여 실험을 실시하였다.

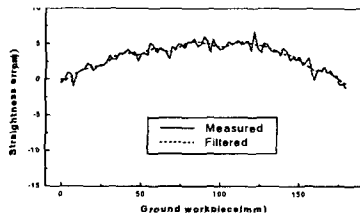


Fig. 5-1 Feeding error at point 1

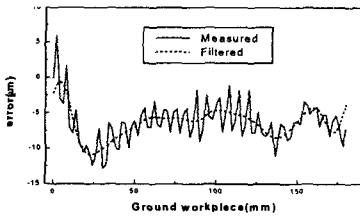


Fig. 5-2 Feeding error at point 2

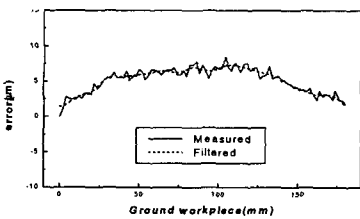


Fig. 5-3 Feeding error at point 3

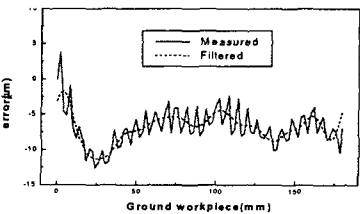


Fig. 5-4 Feeding error at point 4

센서는 이송계와 동기시켜 이동하거나 독립적인 이동이 모두 가능하도록 하였다.

### 3.1 공작물 상의 기준점 이송오차

공작물 상의 기준점에서 이송 오차를 측정하기 위해 역반사계(Retroreflector)와 XY테이블을 동시에 5mm씩 이송하며 측정하였다. 각 측정점 마다 40번씩 데이터를 반복해서 받아 그 평균값을 구하였다. Fig.5는 4개의 측정위치에서 측정된 결과를 보여주고 있다. 각 기준점마다 7 ~ 19 $\mu$ m 정도의 수직 이송 오차를 보이고 있다.

특이사항으로는 전체적인 변화에 고주파 신호가 실려서 나타난다는 점이다. 이와 같은 고주파 신호는 기준점 별로 그 크기는 약간의 차이를 보이지만 항상 관측되는 것으로서 볼스크류의 피치 주기와 동기되는 주파수 성분이다. 특히 2,4위치가 블록으로부터 멀리 떨어져 있어 더 큰 오차가 관측되고 있는 것으로 볼 수 있다.

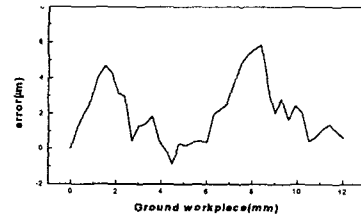


Fig. 6 Detailed measurement of the vertical error due to ball screw pitch error

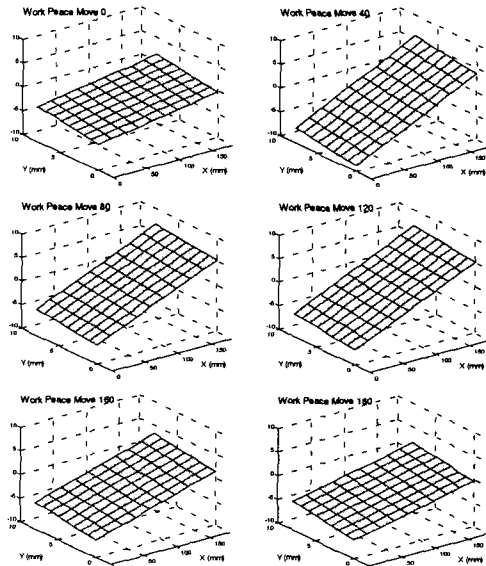


Fig. 7 Workpiece motion along the feeding direction.

이와 같은 특성을 확인하기 위해 Fig. 6은 0.3mm의 미세한 간격으로 12mm를 측정하여 수직오차를 보다 정밀하게 얻어낸 결과이다. 볼스크류의 피치 길이인 6mm정도의 주기를 가지는 오차가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 볼스크류 오차는 가공 오차에 의한 것이 아니라 보정이 가능하지도, 또한 필요하지도 않은 항이므로 엄밀한 분석이 필요하지 않다. 따라서 적절한 방법으로 제거하는 것이 바람직하다. Fig. 7은 측정값으로부터 고주파성분을 제거한 후 공작물의 상태를 보인 것으로, 이송하며 변화하는 수직 이송 오차의 형상을 잘 보여준다.

### 3.2 공간고정점에서의 평면오차

측정잡음이 없다면, 측정헤드의 위치를 고정시키고 XY 테이블을 이송시키면서 표면 굴곡을 측정할 시에는 측정물의 평면오차와 XY 테이블의 이송오차가 합쳐져 나타나는 겉보기 평면오차가 측정되지만, XY 테이블을 고정하고 측정헤드를 이송할 시에는 XY 테이블에 의한 이송오차가 없으므로 측정물의 실제 평면오차가 측정된다.

Fig. 8은 앞 절에서 얻어진 세 기준점에서의 이송오차를 이용하여 이송 단계마다 공간에 대한 고정점에 대해 추정된 이송오차 추정값과 측정헤드 위치를 공간에 대해 고정하고 테이블을 이송시키며 측정된 겉보기 평면오차값을 보여주고 있다. 추정오차는 XY 테이블의 이송오차와 같은 값이어야 한다.

Fig. 9는 Fig. 8의 겉보기 평면오차와 이송오차 추정값의 차이값과, 공작물 전체에 대해 스캔하여 측정된 실제 평면오차값을 비교해서 보여주고 있다. 얻어진 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 방법을 통해 얻어진 고정점에서의 이송오차가 효과적으로 계산되고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 제안된 방법을 통해 임의의 점에서의 이송오차를 얻어낼 수 있음을 물론 고정점에서 측정된 겉보기 평면오차로부터 실제 평면오차를 얻어낼 수 있음을 확인하였으며 이는, 실제 평면가공시 기상에서 평면가공 상태를 확인하거나 가공정도 개선 작업을 위해 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 이송오차가 포함된 상태에서 실제 평면오차를 측정하는 방법을 제안하였다. 또한 제안된 방법을 실험적으로 구현하여 그 타당성을 확인하였다. 제안된 방법은 공구가 위치한 지점에서 이송계에 의한 오차를 추정할 수 있도록 할 뿐만 아니라 공구 위치에서 측정된 겉보기 평면오차로부터 실제 평면오차를 측정할 수 있도록 한다.

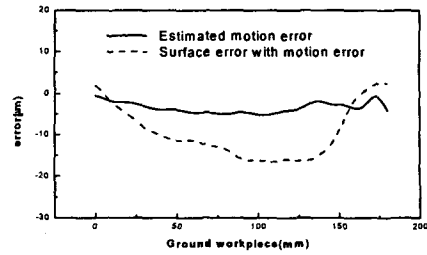


Fig. 8 Estimated motion error and surface error by sensor scanning

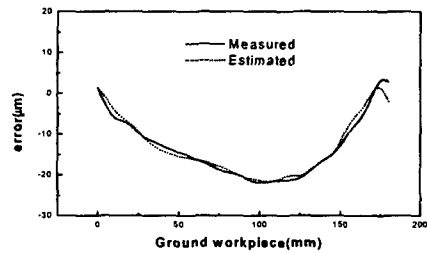


Fig. 9 Surface errors at a spatially fixed point

제안된 방법을 이용하면 평면오차에 대해 효과적인 평가가 가능해질 것으로 생각된다.

## 후기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단기계류 부품”사업 중 “연삭메카니즘의 핵심부품 설계 기술 개발”과제로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. 김현수, 장문주, 홍성욱, 박천홍, "평면 공작물 진직도 측정 시스템 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제19권, 제3호, pp. 107-113, 2002.
2. Eric H.K. Fung, S.M. Yang, "An approach to on-machine motion error measurement of a linear slide," Measurement Vol.29 pp. 51-62, 2001.
3. K.C. Fan, Yang Zhao, "A laser straightness measurement system using optical fiber and modulation techniques," International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol.40 pp. 2073-2081, 2000.
4. G.H.J. Florussen, F.L.M. Delbressine, M.J.G. van de Molengraft, P.H.J. Schellekens, "Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements," Measurement Vol.30 pp. 241-255 2001.