

## 대면적 공작물의 기하학적 Waviness 측정

강동배\* (부산대 대학원 기계공학과), 손성민(싱가폴대학), 안중환(부산대 ERC)

### Waviness measurement of Workpiece with a Large Surface Area

D. B. Kang(Mecha. Eng. Dept. PNU), S. M. Son (National University of Singapore), J. H. Ahn (PNU)

#### ABSTRACT

A workpiece with a large surface area is likely to be uneven due to form error and waviness. These geometric disturbances can cause inaccurate micro shapes to be formed when micro features are micro-grooved into the surface and cause the resulting workpiece to fail to function as desired. Thus, real-time measurement and compensation is required to guarantee the form accuracy of micro features while machining a workpiece with a large surface area.

In this study, a method is suggested for real-time measurement of geometric error for the micro grooving of a large flat surface using a laser displacement sensor. The measurements are demonstrated for the workpieces with large surface areas and the experimental results show that the waviness and form error are well detected.

**Key Words** : Micro pattern (미세 패턴), Waviness, Form error , Large surface area (대면적), laser displacement sensor (레이저 변위 센서)

#### 1. 서론

광학, 반도체, 디스플레이 등의 분야에서 고정밀도를 필요로 하는 소재, 부품들의 사용이 증가하고 있다. 특히 디지털 디스플레이의 급속한 발전은 고화질, 고회도를 구현하기 위하여 형상정밀도 및 표면거칠기의 높은 수준을 요구하고 있으며, LCD, PDP 와 같은 디스플레이 평판의 대형화 추세는 대면적에서의 정밀도를 요구하고 있다. 이러한 소재, 부품들의 생산을 위해 사용되는 금형이나 소재의 정밀도는 가공을 위한 공구와 공작물의 상대변위에 의해 결정이 되며, 따라서 이러한 상대변위를 일정하게 유지할 때 공차 내에서의 정밀한 가공이 가능하다.

대면적을 가지는 공작물을 장시간 가공하게 될 경우, 공구와 공작물의 상대변위가 허용오차를 벗어나게 될 확률은 더욱 커지게 되며, 고정도의 정밀도를 장시간 동안 유지하기 위해서 공작물과 공구의 상대변위를 실시간 감시하여 보정하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 공구와 공작물의 상대변위는 대면적의 가공기가 매우 잘 설계되고 제작되었다 할지라도, 장시간의 가공중에 발생할 수 있는 열적인 문제를 비롯하여, 공작물의 셋팅, 공구의 마멸 등 예측할 수 있는 요소들과 예측이 어려

운 요소들의 상호작용으로 달라지게 된다.

본 논문에서는 대면적의 미세형상 가공시 발생할 수 있는 상대변위를 일정한 범위내에서 제어할 수 있도록 공작물의 상면에 존재하는 기하학적인 Waviness 를 고정도로 측정할 수 있는 방법을 제안한다. 이 방법을 통하여 공작물의 기하학적인 Waviness 를 실시간으로 측정하고, 이를 이용하여 상대변위를 일정하게 유지할 수 있는 가능성을 평가한다. 본 논문에서 주요하게 고려되는 요소는 대면적 미세형상 가공기가 이상적으로 설계되고 제작되었다는 가정하에, 공작물 자체가 가지는 기하학적 Waviness 와 대형 공작물의 고정시에 발생할 수 있는 공작물의 변형, 그리고 장시간 가공에 따른 주위온도 및 공작물의 온도변화에 의해 생기는 변형이다.

장시간 가공중에 발생할 수 있는 상대변위를 실시간으로 측정하고 보정하기 위하여 공구의 가공 진행방향으로 공구전방에 기하학적 Waviness 를 측정하기 위한 레이저 변위센서를 부착하였고, 가공중에 실시간으로 측정이 가능하도록 하였다. 대면적을 가지는 소재를 사출성형하기 위해 사용되는 금형재료에 대한 Waviness 의 측정과 부품자체에 가공을 요하는 LCD 패널의 PMMA 에 대한 Waviness 및 Form error 를 측정하였다.

## 2. 곡면 프로파일

### 2.1 곡면 프로파일

일반적으로 소재 또는 금형의 곡면은 다양한 파장의 길이를 가지는 성분이 복합적으로 이루어져 있다. 이러한 복합 성분은 구성요소에 따라 여러 가지로 구분될 수 있으나 가장 기본적인 요소로써 Fig. 1 과 같은 세 가지의 성분인 Roughness, Waviness, Form error 로 나눌 수 있다.

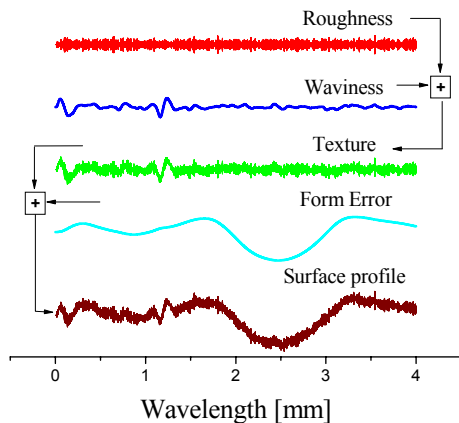


Fig. 1 Various components of surface profile

세 가지 요소 중 Roughness(거칠기) 성분은 가장 고주파 성분으로 짧은 파장의 특성상 대면적의 제품 가공시 형상정밀도에는 커다란 영향을 미치지 않으나 Waviness 나 Form error 의 경우는 상대적으로 긴 파장으로 인해 대면적의 공작물 가공이나 또는 대면적을 가지는 금형을 이용하는 성형에서 제품의 형상정밀도를 저하시키는 역할을 하게 된다.

즉, 미세 패턴의 가공을 위하여 일정한 절입깊이를 유지한 채 대면적의 공작물을 가공하게 될 때, 재료자체가 가지게 되는 표면상의 저주파 성분들로 인해 미세 패턴의 단면 크기가 달라지게 되어, 광학 부품 등이 가져야 하는 휘도, 화질 등의 광특성이 나빠질 수 있다.

기하학적인 성분들을 비롯하여, 대면적의 공작물 측정시 고려되어야 하는 성분으로써 반드시 고려되어야 할 것은 고정시에 발생할 수 있는 공작물의 변형이다. 금형이 아닌 부품 소재를 직접 가공하게 되는 경우, 박판의 대형 부품은 고정시의 작은 힘에 의해서도 비틀어질 가능성은 커진다. 이러한 고정에 의한 미세한 비틀림도 프로파일 측정시에 기하학적인 요소들로 인식이 될수 있으므로 더욱 정확한 형상정밀도를 유지하는 것이 가능하다.

### 2.2 곡면 프로파일 측정

Fig. 1 과 같은 대면적 재료들의 표면에 존재하는 기하학적인 오차 성분들을 측정하기 위하여 Fig. 2 의 개념으로 대면적 공작물에 대한 곡면 프로파일을 측정하였다. Fig. 2 는 공작물이 대면적이라는 특징을 고려하여 가공시간을 절약하기 위한 Waviness/Form error 측정 보정의 개념을 나타낸 것으로 공구진행방향에 대해 레이저 변위 센서를 부착하여 공작물 상면의 기하학적인 오차를 실시간 측정하고, 상대변위가 일정할 수 있도록 절삭 공구의 절삭깊이를 일정하게 조절하는 것을 나타낸다.

공작물이 대형이므로 장시간의 가공에 따른 센서헤드의 보호를 위하여 비접촉식의 레이저 변위 센서를 사용하였으며, 레이저 변위 센서는 가공 재질의 다양화 및 용이한 측정 지점 인식 등의 장점을 가지고 있다. Table 1 은 실험에 사용된 레이저 변위센서의 사양을 나타낸다.

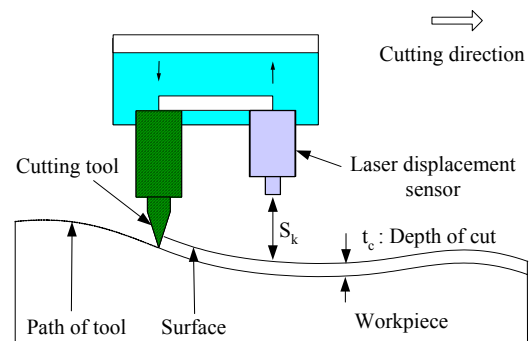


Fig. 2 Concept of waviness measurement

Table 1 Specification of laser displacement sensor

Topics	Description
Resolution	0.1 $\mu$ m
Linearity	0.25% of FS
Measuring Range	$\pm$ 1mm
Spot size	20 $\mu$ m
Sampling cycle	Up to 8kHz

곡면을 구성하는 성분들의 구분이 파장의 길이에 따라 달라지게 되므로 측정하고자 하는 성분의 파장을 달리하게 할 수 있도록 프로파일 측정 시 시간 주기 대신 거리 주기,  $D_s$  를 사용하였다. 또한 프로파일 측정 속도에 따라 적절한 차단 주파수를 사용하여 일정한 성분의 곡면요소에 대한 용이한 검출하도록 하였다. 식 (1)은 측정 속도가 달라졌을 경우, 일정한 파장의 곡면 성분을 추출하기 위한 차단주파수 측정을 구하는 식이다. Fig. 3 은 곡면 측정시의 속도와 파장의 관계를 보여주고 있다.

$$f_c = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

여기서,  $v$  는 공작물 또는 공구의 이송 속도 [mm/s]이고,  $\lambda$  는 곡면성분의 파장[mm]이다.  $f_c$  는 레이저 변위센서 신호에 대한 차단 주파수이다.

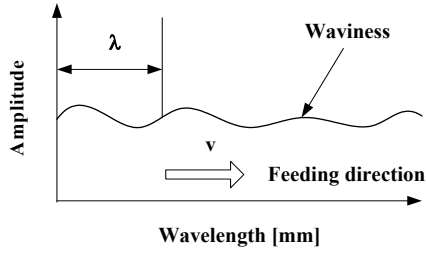


Fig. 3 Waviness measurement at different speeds

### 3. 실험 결과

#### 3.1 실험 장치 및 실험 조건

Fig. 3 은 실험에 사용된 시스템의 개략도를 나타낸다. 시스템은 X, Y, Z 동시 3 축 제어가 가능한 초정밀 세이핑기로, 정밀가공기의 구조에 적합한 문형 구조로 되어 있으며, 진동에 의한 영향을 최소화하기 위하여 4 점 지지의 공기 스프링에 의해 지지 되는 정밀 석정반위에 설치되어 있다.

대면적 공작물의 측정에 있어서 이송 안내면의 영향을 최소화하기 위하여  $0.1\mu\text{m}$  이하의 직진성이 우수한 공기정압 안내면을 사용하였다. 또한 고속, 고정도의 이송을 위하여 코킹 현상이 없는 Coreless 타입의 리니어 모터를 사용하였다.

5 mm 의 파장을 가지는 Waviness 검출을 위하여 측정 주기,  $D_s$  를 0.2 mm 로 설정하여 Aliasing 이 생기지 않도록 하였고, 이송속도가 10 mm/s 에서의 차단주파수는 2 Hz 로, 이송속도가 200 mm/s 에서의 차단주파수를 40 Hz 로 각각 설정하였다.

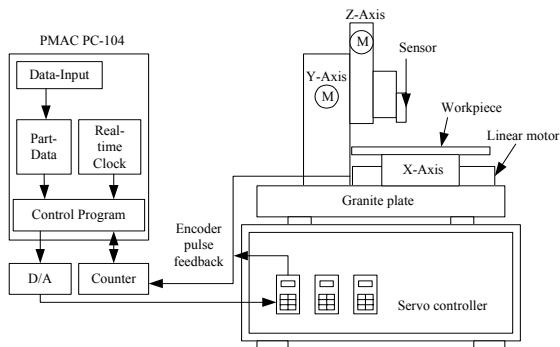


Fig. 4 Schematic diagram of micro grooving machine tool

#### 3.2 경면 측정 결과

레이저 변위센서가 가지는 난반사의 영향을 고려하여 Waviness 측정 실험은 경면과 비경면의 경우로 나누어 수행하였다. 경면의 샘플은 200mm 길이의 거울과 소재에 직접 미세 패턴 가공을 필요로 하는 PMMA 를 사용하였다. PMMA 의 표면이 완전 경면은 아니나, 측정 시에 경면모드로의 측정이 가능하였으므로 경면모드로 사용하여 난반사의 영향을 비교하였다.

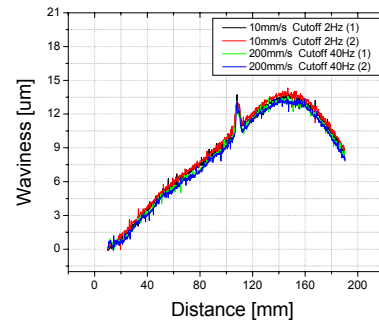


Fig. 5 Measurement result of Mirror

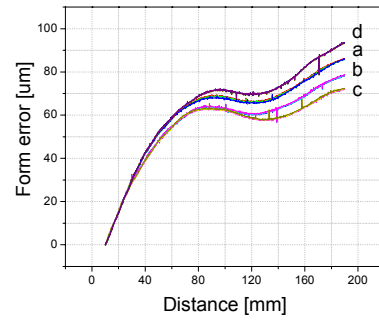


Fig. 6 Measurement results of PMMA plate

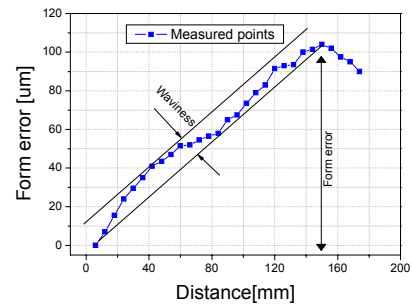


Fig. 7 Measurement result of PMMA plate by CMM

Fig. 5 는 거울에 대한 Waviness 측정 결과를 나타낸 것이다. 경면인 거울면의 경우 고주파성분인

거칠기 성분의 영향이 크게 나타나지 않으며, 이송 속도를 200 mm/s 까지 높게 하여도 측정의 정밀도가 유지가 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6 은 LCD 모니터의 백라이트 소재로 많이 사용되는 PMMA 소재를 측정 한 결과를 나타낸 것이다.

a, b, c, d 의 네 지점을 설정하여 측정 한 결과이며, PMMA 소재의 경우 약 0.1 mm 정도의 큰 오차를 가지는 Waviness 보다 긴 파장에 큰 레벨을 가지는 Form error 가 나타나는 것을 알 수 있고, 동시에 수  $\mu\text{m}$  의 저주파 Waviness 가 존재하는 것을 알 수 있다. Fig. 7 은, 동일 PMMA 에 대하여 3 차원 좌표 측정기 (CMM)를 이용하여 한 라인을 측정 한 결과이다. 동일한 지점을 측정하기 어려운 관계로 동일한 형상의 Form error 를 찾을 수는 없으나 약 0.1mm 에 달하는 비슷한 크기 레벨의 Form error 가 존재하는 것을 알 수 있다.

### 3.3 비경면 소재 측정 결과

Fig. 8 은 6-4 황동에 대하여 이송속도를 달리하여 측정을 한 결과의 일부를 나타낸 것이다. 차단 주파수를 달리하여 일정한 주기의 성분은 효과적으로 검출이 가능한 것을 알 수 있으며, 약 8  $\mu\text{m}$  정도의 크기를 가지는 Waviness 가 존재하는 것을 알 수 있다. 그러나 연마를 한 황동소재 표면의 거칠기로 인해 이송속도를 빠르게 하였을 경우, 측정의 정도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

이것은 광삼각법을 사용하는 레이저 변위 센서의 특성으로, 고속 이송에서의 안정적인 측정을 위하여 측정시 측정간격을 조밀하게 하고 평균화 필터 등을 사용하여 고주파 성분에 의한 영향을 최소로 할 수 있는 고속 신호처리가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 9 는 Al 6061 에 대한 측정 결과이다. 황동과 비슷한 결과를 나타내며, 약 10 $\mu\text{m}$  정도의 Waviness 가 표면상에 존재하는 것을 알 수 있다.

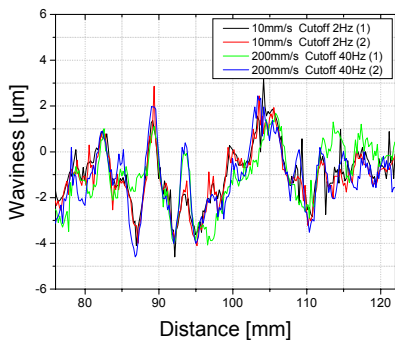


Fig. 8 Measurement result of 6-4 Brass

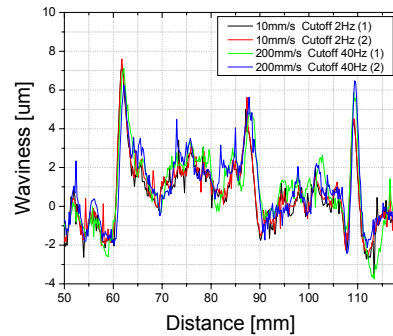


Fig. 9 Measurement result of Al6061

## 4. 결론

본 연구에서는 대면적을 가지는 소재 또는 금형의 상면에 존재하는 기하학적인 오차인 Form error 와 Waviness 를 레이저 변위 센서를 이용하여 고속으로 측정하였다. 본 연구를 통한 결론은 아래와 같다.

- 1) 일정한 길이 성분의 Waviness 를 검출하기 위하여 공간 주기  $D_s$  를 사용하였고, 이송속도에 따른 가변 차단주파수를 사용함으로써, 동일한 파장의 성분을 효과적으로 검출할 수 있었다.
- 2) 거울 및 PMMA 소재와 같은 경면의 경우, 200 mm/s 까지의 고속에서도 반복성이 우수한 측정이 가능하였고, PMMA 에서는 0.1mm 의 큰 기하학적 오차가 측정되었다.
- 3) 비경면인 6-4 황동, Al6061 의 경우, 표면거칠기의 영향으로 고속에서의 반복성이 약간 떨어지는 것을 알 수 있었으며, 약 8-10 $\mu\text{m}$  정도의 Waviness 가 존재하는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 대면적 미세형상의 초정밀/지능화 가공원천 기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Kim, J.D and Kim, D.S., "Waviness compensation of precision machining by piezoelectric micro cutting device," International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol. 38, pp. 1305-1322, 1998.
2. Uda, Y., Kohno, T., Yazawa, T., Suzuki, T., Soyama, A., "Concept of basic study of improvement system of surface roughness, waviness and figure accuracy by WORFAC," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, pp. 423-426, 1996.