

# 미세 밀링 공정의 ploughing 발생 모니터링 Monitoring of ploughing in the micromilling processes

\*윤희택, 허세곤, #민병권, 이상조

\*H. T. Yun, S. G. Heo, #B.-K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee  
연세대학교 기계공학부

Key words : Ploughing, Cutting force, Wavelet peak detection

## 1. 서론

미세 밀링 공정은 크기가 10 $\mu\text{m}$ ~10mm 인 금속 재료의 미세 금형 및 세장비가 높은 미세 형상을 가공하는 공정에 주로 사용되고 있다<sup>1</sup>. 하지만 미세 밀링 공정에서 사용되는 공구의 직경이 수십에서 수백 마이크로 미터로 작아지기 때문에 공구의 강성이 감소하고 이로 인해 공구가 파손되기 쉽다. 따라서 가공시 공구 파손을 방지하기 위해 낮은 피드(feed per tooth)를 사용하게 되는데, 이때 피드가 공구 날 끝의 반경보다 작아지면서 플로잉(ploughing) 현상이 발생하게 된다. 플로잉 현상은 공구의 무딘 날 끝에 의해 공작물이 탄성 변형되었다가 공구가 지나간 이후 탄성 복원되는 과정으로, 가공면의 표면 거칠기가 증가한다<sup>2</sup>. 또한 재료를 누르는 힘에 의해 배분력이 공구를 밀면서 공구의 진동을 증가시키고, 이로 인해 동적 안정성이 저하된다<sup>1</sup>. 따라서 미세 밀링 공정에서 표면 품질을 향상시키기 위해서는 플로잉 현상을 피해야 한다.

플로잉 현상을 피하기 위해서는 칩이 생성되기 시작하는 최소 피드인 최소 칩 두께 이상으로 가공해야 한다. 하지만 최소 칩 두께는 공구의 재료와 날 끝의 반경, 재료, 스핀들 속도 등 다양한 요인에 의해 결정되기 때문에<sup>3</sup>, 가공 전에 최소 칩 두께를 예측하는데 많은 시간이 소모된다. 또한, 공구가 마모되면 공구 날 끝이 무디어지므로, 최소 칩 두께 값은 가공이 진행될수록 증가한다<sup>2</sup>.

따라서 본 연구에서는 미세 밀링 가공 중 공구동력계로 절삭력 신호를 수집하고, 웨이블릿 피크 검출 알고리즘을 이용해 수집된 절삭력 신호로부터 플로잉의 발생 여부를 감지하는 알고리즘을 제안한다. 이를 통해 가공 중에 플로잉의 발생 여부를 모니터링하여 최소 칩 두께 값을 예측할 수 있으며, 가공 조건을 수정해 플로잉을 회피할 수 있다.

## 2. 플로잉 발생시 절삭력 신호 분석

플로잉이 발생할 때 절삭력 신호의 특징을 파악하기 위해 피드 값을 바꾸면서 측벽을 가공하는 실험을 진행하였다. 먼저 3 축 밀링 스테이지 위에 공구동력계를 부착하여 가공 중에 절삭력을 측정했고, 측정된 절삭력 신호는 AD converter 로 수집해 PC 에 저장하였다. 기타 실험 조건은 Table 1 과 같다.

Table 1 Experimental Setup

Item	Detail
Tool	$\phi$ 0.5mm, 2flute end-mill, WC
Workpiece	Copper
Spindle Speed	45,000 rpm
Depth of cut(mm)	0.2(axial), 0.1(radial)
Feed per tooth( $\mu\text{m}$ )	0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0
ADC frequency(kHz)	30

Fig. 1 은 0.5  $\mu\text{m}$  피드로 가공할 때, Fig. 2 는 1.0  $\mu\text{m}$  피드로 가공할 때 피드 방향 및 피드 수직 방향의 절삭력 신호를 나타낸다. 두 신호에서 하나의 피크(peak)는 하나의 날이 측벽을 가공할 때를 의미한다. 1.0  $\mu\text{m}$  피드일 때에는 공

구의 런아웃에 의해 피크 변화가 교대로 차이가 나는 것을 제외하면 하나의 날이 발생시키는 피크의 수치는 큰 변화가 없음을 보여준다. 하지만 0.5  $\mu\text{m}$  피드일 때에는 하나의 날이 만드는 피크 변화의 폭이 최대 0.5N 으로 증가함을 알 수 있다. 이는 플로잉에 의해 가공이 되지 않았던 부분이 누적되면서, 최소 칩 두께 이상으로 날이 진행될 때 가공되는 현상이 반복되기 때문이다<sup>4</sup>.

0.5  $\mu\text{m}$  이하의 피드에서 플로잉이 발생했는지 확인하기 위해 접촉식 표면 형상 측정기로 각 피드에서 가공된 측벽의 표면 거칠기를 측정하였다. Fig. 3 은 피드 값에 따른 측벽의 Ra 값을 나타낸다. 플로잉을 고려하지 않는 경우 피드가 증가할수록 측벽의 표면 거칠기는 증가한다. 하지만 결과에서 보듯 0.5  $\mu\text{m}$  이하의 피드에서 플로잉에 의해 표면 거칠기가 증가함을 확인할 수 있다.

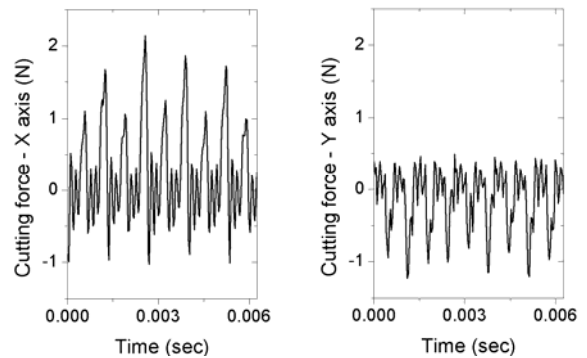


Fig. 1 Measured cutting force at 0.5  $\mu\text{m}$  feed per tooth

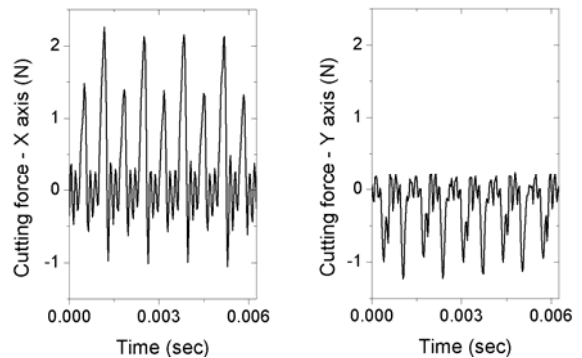


Fig. 2 Measured cutting force at 1.0  $\mu\text{m}$  feed per tooth

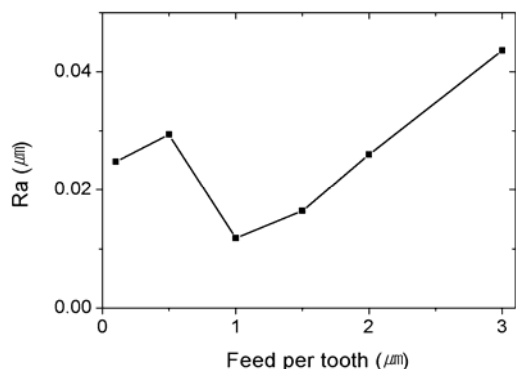


Fig. 3 Surface roughness of sidewall with varying feed per tooth

절삭력 신호와 표면 거칠기 분석을 통해 최소 칩 두께는 0.5~1.0 μm 사이에 있음을 확인했으며, 플로잉 현상이 발생할 때 하나의 날이 만들어내는 절삭력의 피크 값의 변동이 발생함을 확인했다. 따라서 절삭력의 피크 값 변동을 측정함으로써 플로잉 현상의 발생 여부를 확인할 수 있다.

### 3. 웨이브렛 피크 검출을 이용한 플로잉 감지

절삭력 신호의 피크 값을 측정하기 위해 웨이브렛 피크 검출(wavelet peak detection) 알고리즘을 이용하였다. 알고리즘의 기본 원리는 다음과 같다. 먼저 대상 신호를 biorthogonal 3.1 웨이브렛을 이용해 이산 웨이브렛 변환을 수행한다. 여기서 상시 계수(detail coefficient)의 부호가 음에서 양으로 바뀌는 지점이 신호의 피크가 되고, 양에서 음으로 바뀌는 지점이 신호의 골(valley)가 된다. 또한 이산 웨이브렛에서 다해상도 분석을 수행하면 레벨의 값에 따라 검출할 피크의 해상도(sharpness)를 조절할 수 있다. Fig. 4는 절삭력 신호와 웨이브렛 피크 검출을 이용해 검출한 피크 값을 나타낸다. Fig. 4를 통해 웨이브렛 피크 검출을 이용해 실선의 절삭력 신호에서 신호의 피크 값을 검출해 낼 수 있음을 확인할 수 있다.

위와 같은 알고리즘을 이용해 피드가 절삭력의 피크 값의 변동에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 5은 각 피드에서 절삭력 신호의 피크 값의 표준 편차를 나타낸다. 표준 편차는 피드 및 피드 수직 방향의 절삭력에서 웨이브렛 피크 검출 알고리즘을 이용해 하나의 날에서 발생한 피크의 값을 측정하였다. 플로잉이 발생한 0.1 μm 와 0.5 μm 피드에서 표준편차는 0.048~0.095 로, 1.0 μm 와 2.0 μm 피드에서의 표준편차인 0.009~0.025 보다 큼을 확인할 수 있다.

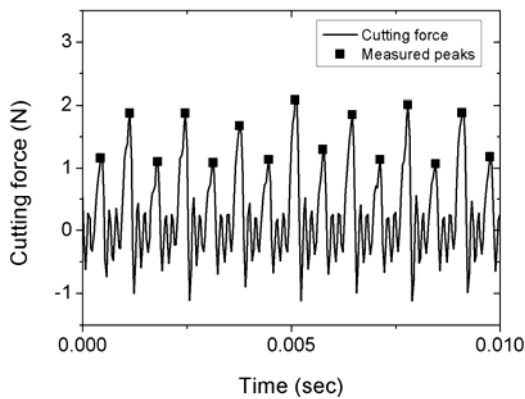


Fig. 4 Measured peaks of cutting force produced by one flute

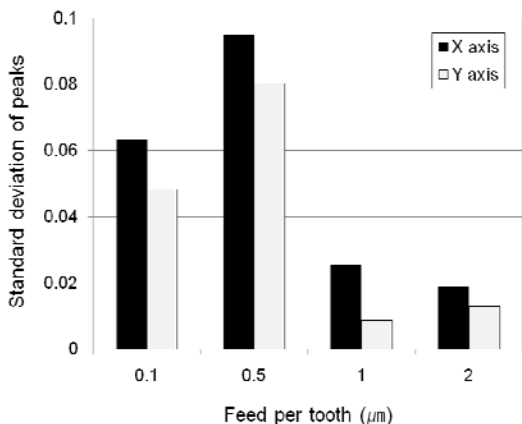


Fig. 5 Standard deviation of measured peaks of cutting force produced by one flute with varying feed per tooth

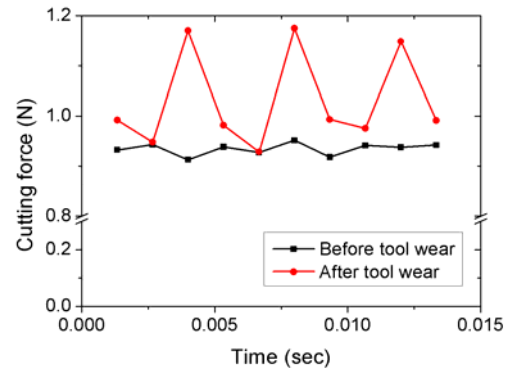


Fig. 6 Comparison of peaks of cutting force produced by tool wear

Fig. 6은 0.5 μm 피드에서 측벽을 가공할 때 하나의 날에서 발생한 절삭력 신호의 피크 값을 공구 마모 전과 후로 비교한 것이다. 마모가 진행된 경우 피크 값의 변동 폭이 마모가 진행되기 전보다 0.02N에서 0.2N으로 증가함을 알 수 있다. 이는 공구 마모에 의해 최소 칩 두께가 증가하면서 플로잉 현상이 발생하기 때문이다.

따라서 미세 밀링 가공 중에 측정된 절삭력 신호를 수집하고, 수집된 절삭력의 피크를 웨이브렛 피크 검출 알고리즘으로 분석함으로써 플로잉 발생 여부를 실시간으로 모니터링할 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 미세 밀링 공정에서 발생하는 플로잉 현상을 절삭력 신호로 모니터링하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 플로잉 현상이 발생할 때 절삭력 신호를 분석하기 위해 날 당 피드값을 인자로 하는 가공 실험을 하였고, 이때 절삭력 신호와 표면 거칠기를 분석하였다. 분석 결과 0.5 μm 이하의 피드에서 플로잉 현상에 의해 표면 거칠기가 증가하며, 절삭력 피크의 변동이 발생함을 확인하였다. 또한 웨이브렛 피크 검출 알고리즘을 이용하여 절삭력의 피크 값을 측정하는 방법을 제안하였으며, 이를 통해 가공 중 실시간으로 플로잉 현상의 발생 여부를 모니터링할 수 있다.

### 후기

본 논문은 지식경제부의 전략기술개발사업 “대면적 미세형상 가공시스템 개발” 과제의 지원 하에 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. J. C. Miao, G. L. Chen, X. M. Lai, H. T. Li, and C. F. Li, “Review of dynamic issues in micro-end-milling,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **31**, 897-904, 2007.
2. X. Liu, R. E. DeVor, and S. G. Kapoor, “The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126**, 666-678, 2004.
3. X. Liu, R. E. DeVor, and S. G. Kapoor, “An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **128**, 474-481, 2006.
4. Chang-Ju Kim, J. Rhett Mayor, and Jun Ni, “A Static Model of Chip Formation in Microscale Milling,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126**, 710-718, 2004.