

미세 밀링 가공시 절삭력 측정을 통한 공구 휨의 추정 Estimation of tool deflection using measurement of cutting force in micromilling

이민규, *허세곤, #민병권, 이상조
M. K. Lee, *S. G. Heo, #B.-K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee
연세대학교 기계공학부

Key words : Micromilling, tool deflection, cutting force

1. 서론

미세 밀링 공정은 1 mm 이하 영역의 복잡한 3 차원 형상을 재료의 제약없이 빠른 속도로 가공할 수 있다.¹ 그러나 미세 밀링 공정의 공구 직경이 수십에서 수백 마이크로미터로 작아짐에 따라, 미세 밀링 공정에서 공구휨이 중요한 문제로 부각되었다.

공구휨 현상에 대한 기존 연구를 살펴보면, Dow² 와 Rao³ 는 절삭력 모델을 이용하여 그루브와 곡선 가공시 발생하는 공구휨을 추정하고 공구경로를 보정하는 방법을 제시하였다. Saffar 는 FEM 시뮬레이션을 이용하여 절삭력과 공구휨을 해석하고 실험결과와 비교하였다.⁴ 그러나 기존 연구들은 절삭력이 변화할 때의 공구휨을 예측할 수 없다.

본 연구에서는 측정된 절삭력과 공구휨 모델을 이용하여 축방향 가공오차를 예측하였다. 모델의 정확성을 검증하기 위하여 예측한 값을 실험결과와 비교하였다.

2. 축방향 공구휨 모델

미세 밀링 공정 중의 공구휨은 횡방향 가공오차뿐만 아니라 축방향 가공오차도 발생시킨다. Fig. 1 은 공구휨에 의해 발생한 축방향 가공오차를 보여주는 개략도이다. 공구는 피드 반대방향으로 절삭력을 받으며, 절삭력을 받는 방향으로 휨이 발생한다. 공구휨에 의해 절삭날의 한쪽 높이가 절삭깊이(Depth of cut) 보다 깊어지면서 축방향 가공오차, 즉 과절삭(Overcut)이 발생하게 된다.

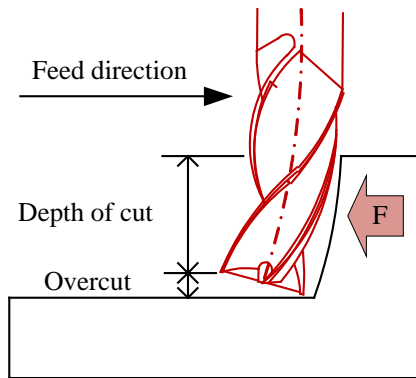


Fig. 1 Schematic diagram of axial tool deflection

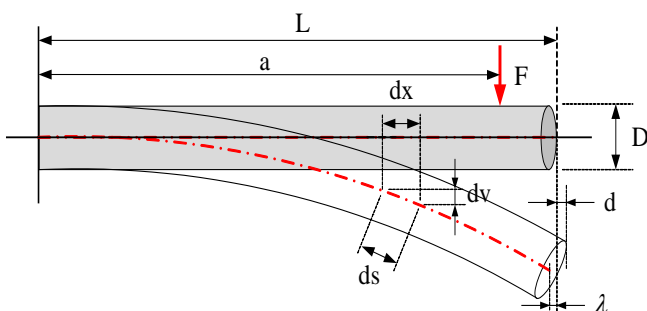


Fig. 2 Schematic diagram of cantilever beam model

공구휨에 의한 축방향 가공오차를 예측하기 위하여 Fig. 2 에 표현된 빔 모델을 이용하였다. 빔 모델에서 평엔드밀의 복잡한 날 형상은 원기둥으로 단순화하였고, 절삭력은 절삭깊이의 중간 위치에서 집중하중으로 작용한다고 가정하였다. Fig. 2 에서 가공오차는 d, 날 길이는 L, 공구 직경은 D 로 표시된다. 가공오차는 공구의 중립면을 기준으로 빔 처짐 기울기 각도와 공구 반지름을 이용하여 식 (1)과 같이 계산된다.

$$d = \frac{D}{2} \sin\left(\frac{Fa^2}{2EI}\right) \quad (1)$$

식 (1)은 공구휨 현상에서 중립면의 Z-축방향 길이 변화가 고려되지 않을 때 성립한다. 따라서, 실제 가공오차를 예측하기 위해서는 Fig. 2 에 나타난 λ 를 고려해야 한다. 빔의 미소길이 ds, dx 와 처짐량 dv 를 이용하여 빔의 미소영역에서 Z-축방향 길이 변화, dλ 는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$d\lambda = ds - dx = dx \left[\sqrt{1 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2} - 1 \right] \quad (2)$$

식 (2)를 테일러 정리와 빔처짐 공식을 이용하여 정리하고, 날 길이에 대하여 적분하면 빔 전체의 짧아진 길이, λ 는 식 (3)과 같다.

$$\lambda = \frac{1}{8} \left[(L-a) \left(\frac{Fa^2}{EI}\right)^2 + \int_0^a \left(\frac{Fx}{EI}(2a-x)\right)^2 dx \right] \quad (3)$$

따라서, Z-축방향 가공오차는 식 (1)에서 식 (3)을 뺀 값이 되며, 식 (4)와 같다. 여기서, C 는 모델의 보정계수이다.

$$d = C \left(\frac{D}{2} \sin\left(\frac{fa^2}{2EI}\right) - \frac{(15L-7a)}{120} \left(\frac{Fa^2}{EI}\right)^2 \right) \quad (4)$$

3. 공구의 물성치 측정

미세 밀링 공구의 재료는 텅스텐 카바이드 계열로 구성되어 있으며, 공구의 표면은 코팅되어 있다. 따라서 공구의 정확한 탄성계수를 계산하기 어렵다. 또한 복잡한 절삭날의 형태 때문에 공구의 면적 관성모멘트를 정확하게 계산하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 공구의 탄성계수와 면적 관성모멘트 값을 통합하여 EI 로 정의하고, 실험을 통하여 EI 값을 도출하였다.

Fig. 3 은 공구의 물성치 측정을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 공구는 φ 0.2 mm, 2 날 평엔드밀을 사용하였다. 공구를 공구동력계에 접촉시킨 후, 머시닝센터의 X 축 스테이지를 10 μm 씩 이송시키며 공구에 작용하는 힘을 측정하였다. X 축 스테이지가 10 μm 씩 이송할 때 마다 공구에 작용하는 힘은 약 5N 씩 증가하였다. 빔처짐 공식에 공구 직경, 날 길이, X 축 스테이지 이송량, 절삭력을 각각 대입하여 계산된 공구의 EI 값은 9.14533 × 10⁵ μm² 이다.

4. 공구힘 실험

공구힘 모델의 정확성을 검증하기 위하여 공구힘 실험을 수행하였다. Fig. 4는 공구힘 실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 머시닝센터(Nano-21, Roku-Roku), 공구동력계(9256C1, kistler)로 구성된다. 수집된 절삭력 신호는 Labview 프로그램을 이용하여 분석하였다. 절삭속도와 절삭깊이를 변화시키며 슬롯 가공을 수행하였다. 실험 조건은 Table 1과 같다. 실험에서 축방향 가공오차는 머시닝센터에 설정한 절삭 깊이와 실제 가공된 슬롯의 측정된 깊이를 비교하여 구해진다.

Fig. 5 (a)는 절삭속도의 변화에 따른 실제 실험결과와 모델을 통해 계산된 축방향 가공오차를 나타내는 그래프이며, Fig. 5 (b)는 절삭깊이의 증가에 따른 실험과 모델의 결과를 나타내는 그래프이다. 이를 통해, 절삭속도가 증가하거나 절삭깊이가 커질수록 절삭력은 증가하며, 그에 따라 축방향 가공오차도 증가하는 것을 알 수 있다. 모델에 적용된 절삭력은 피드방향과 피드 수직방향 절삭력의 합력의 RMS 값이다. 모델을 통해 계산된 축방향 가공오차에 보정계수 0.35를 적용함으로써 실험을 통해 측정된 값과 유사한 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 정적 빔 모델과 측정된 절삭력을 이용하여 미세 밀링 공정에서의 공구힘에 의한 축방향 가공오차

Table 1 Experimental condition

Item	Detail
Tool	Φ 0.2mm, 2Flutes end-mill
Workpiece	SKD
Spindle speed	50,000 rpm
Depth of cut (μm)	10, 20, 30, 40 (axial)
Feedrate (mm/min)	20,25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60

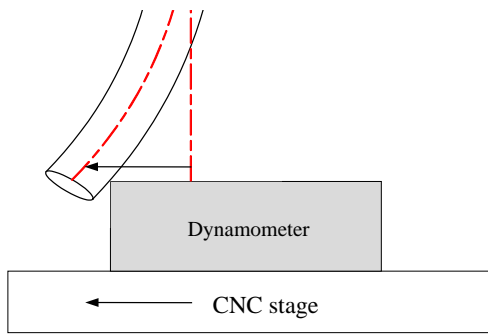


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

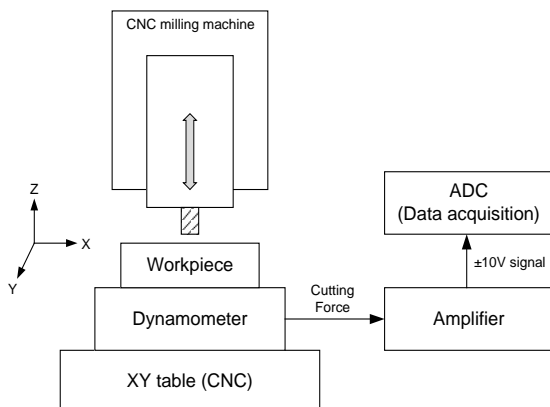
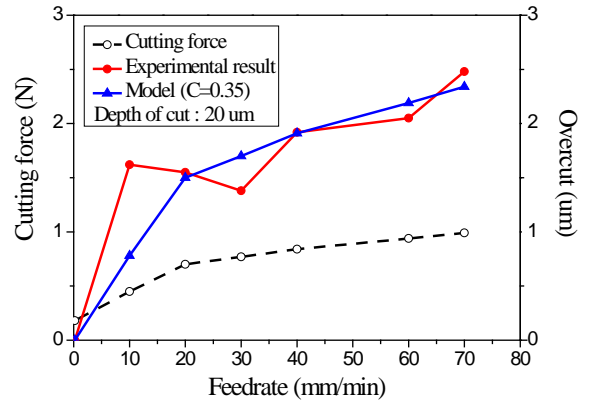
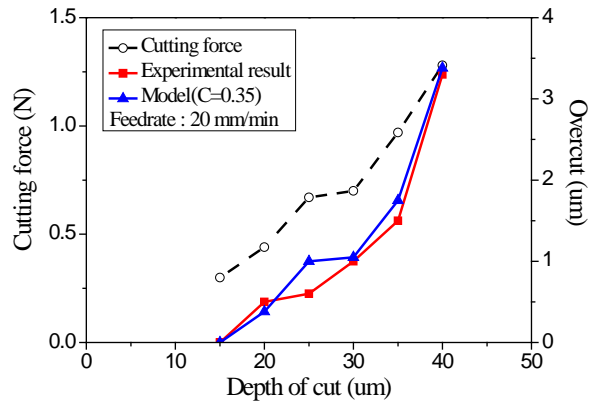


Fig.4 Schematic diagram of experimental setup



(a) Cutting force and overcut according to feedrate



(b) Cutting force and overcut according to depth of cut

Fig. 5 Comparison between the experimental and model results

를 추정할 수 있음을 보였다. 가공오차는 원기둥으로 단순화된 공구힘 모델에 공구의 물성치, 스펙, 측정된 절삭력을 입력하여 계산된다. 모델의 정확성을 검증하기 위하여 다양한 절삭력을 가지는 조건에서 가공실험이 실행되었으며, 모델의 결과에 보정계수를 적용함으로써 실험결과와 유사한 값을 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구결과는 추후 지능형 스테이지를 이용하여 미세구조물의 가공오차를 능동적으로 보정할 수 있는 시스템에 적용될 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, "Review of dynamic issues in micro-end-milling," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 31, 897-904, 2007.
2. Thomas A. Dow, Edward L. Millier, Kenneth Garrard, "Tool force and deflection compensation for small milling tools." Precision Engineering 28, 31-45, 2004.
3. V.S. Rao, P.V.M. Rao, "Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries." International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 2036-2043, 2006.
4. R. Jalili Saffar, M.R. Razfar, O. Zarei, E. Ghassemieh, "Simulation of three-dimension cutting force and tool deflection in the end milling operation based on finite element method." Simulation Modelling Practice and Theory 16, 1677-1688, 2008.