

# 범용 절삭력 모델을 이용한 마이크로 엔드밀링의 절삭력 예측 Cutting Force Prediction using Conventional Model in Micro End-Milling

\*임정수<sup>1</sup>, #서태일<sup>1</sup>, 우창기<sup>1</sup>, 민경탁<sup>1</sup>, 조희주<sup>1</sup>, 이정원<sup>2</sup>,  
\*J. S. Lim<sup>1</sup>, #T.I.Seo(Tiseo@incheon.ac.kr)<sup>1</sup>, C. G.Woo<sup>1</sup>, K. T. Min<sup>1</sup>, H. J. Cho<sup>1</sup>, J. W. Lee<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> 인천대학교 기계시스템공학부, <sup>2</sup>한국생산기술연구원

Key words : Micro end-milling, Experimentation, Estimated specific cutting force, Micro Machining

## 1. 서론

최근 고유가와 친환경을 위한 대체에너지의 관심이 커지며 연구가 활발하게 진행되고 있는 태양전지와 연료전지, 미래 의료 진료 시스템에서 핵심적으로 사용이 전망되는 바이오칩 및 마이크로렌즈와 마이크로 구조 및 미세 패턴이 사용되고 있다. 최근 핸드폰을 비롯한 모바일 IT제품들의 소형화가 되었으며 그 형상이나 외장케이스의 패턴이 미세해지고 있다. 이러한 형상들을 가공하기 위하여 마이크로 가공에 대한 기술적 수요가 늘어나고 있다. 그중 마이크로머시닝은 가공의 자유도가 높고 여러 가지 재료의 가공이 가능하므로 미세형상가공에 유리하나, 에칭이나 방전 가공에 비하면 가공력이 크며, 고정밀도의 가공 및 미세공구의 제작이 힘들고 가공된 미세부품의 조립수단이 필요한 결점이 있다. 또한 공구의 초소형화로 인한 공구강성 저하로 마모, 파손 우려가 매우 높으며 치수효과, 가공시 소성, 탄성유동 등에 의해 가공면 조도 문제와 버 발생률 높아지는 단점이 있으며 가공메커니즘, 공구 및 가공물 절삭력에 의한 공구변형에 의하여 가공 오차 발생이 나타나게 된다.[1,2] 범용 엔드밀링과는 달리 마이크로 엔드밀링은 절삭 깊이가 매우 작기 때문에 공구 날끝 반경을 무시할 수가 없다.[3] 절삭 깊이가 탄성영역보다 작으면 가공이 이루어 지지 않는 점도 마이크로 절삭 가공에서 중요한 요소가 되고 있다. 그래서 Bao와 tansel은 미변형 칩두께를 정확히 고려한 마이크로 엔드밀링의 절삭력 모델을 개발 하였고 Vogler는 마이크로 엔드밀링의 절삭력을 예측하기 위해 최소칩두께 효과와 직교 절삭 모델을 사용하였다.[4,5] 본 논문에서는 Tlusty 절삭력 모델을 기초한 4날 상향 엔드밀링의 절삭력 모델[6]을 사용하여 절삭력을 예측하였다.

## 2. 실험방법

마이크로 엔드밀링시 절삭력을 측정하기 위하여 Fig.1과 같은 순서에 의하여 진행하였다. 마이크로 머시닝 시스템은 서브 마이크로 단위의 분해능을 가지고 있기 때문에 수 마이크로미터에서 수백 마이크로미터에 이르는 절삭 실험 수행 정확하게 실행할 수 있다. 엔드밀의 경우 0.3mm의 직경을 갖는 엔드밀을 사용하였으며 시편의 경우에는 황동을 사용하였다. 자세한 장비의 사양에 대해서는 Table 1에 나타내었고 마이크로 머시닝과 공구동력계는 Fig.2에 나타내었다. 마이크로 가공 시 측정된 절삭력으로 절삭력 모델에 적용하여 비절삭계수를 구한 후 다른 조건에서의 절삭력을 예측하였다.

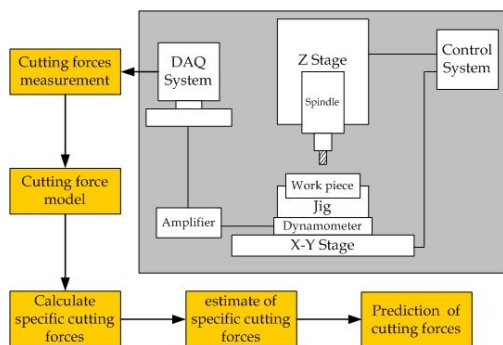
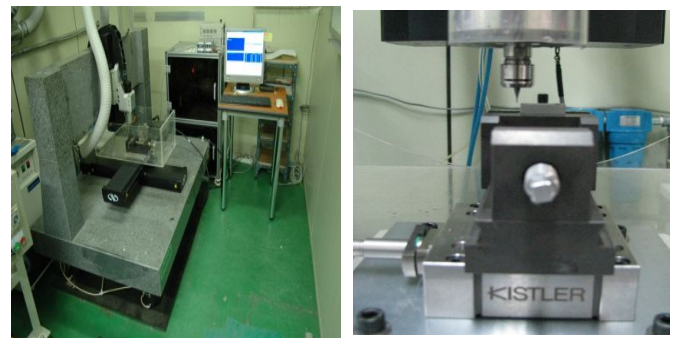


Fig. 1 Summary of experimentation

Table 1 Specification of Micro machining system

Traveling range	X, Y, Z-axis : 600×600×200mm
Resolution	X, Y, Z-axis : 0.1μm
Accuracy	X, Y-axis : 10μm, Z-axis : 5μm
Repeatability	X, Y, Z-axis : 0.2μm
Max. velocity	X, Y-axis : 200mm/s, Z-axis : 100mm/s
Rotational speed	Max, 100,00rpm
Spindle run-out	Max, 0.6μm
Static radial load	Min, 6kgf
Workpiece weight	Max, 45kgf
Lubrication	Dry cutting

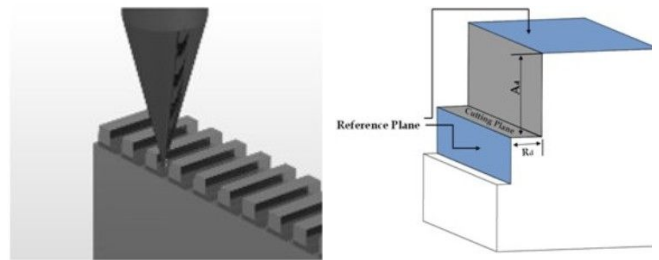


(a) Micro Machining

(b) Dynamometer for Micro Cutting force

Fig.2 Micro Machining System

엔드밀의 반경방향의 절입 깊이 Rd(Radial depth)값을 실험의 변수로 지정하기 위하여 황동시편에 Fig 3 (a)와 같이 여러 개의 폴을 가공한 후 비절삭저항 Kt, Kr을 구하기 위해 Table 2와 같은 실험조건으로 가공하였다. 비절삭저항을 구하기 위한 선행 실험을 Rd(Radial depth) 100, 150, 200um으로 절삭력 예측 비교를 위한 실험은 130, 170um으로 하였다.



(a) Pole

(b) A datum plan

Fig.3 A datum plan & pole

## 3. Micro end-mill 절삭력 예측

엔드밀의 절삭력을 예측하기 위해 마이크로 공구동력계를 이용하여 회전각 2.4°씩 절삭력 신호를 받았다. 측정된 절삭력 데이터를 식 1를 통하여 비절삭저항 Kt, Kr를 구하였다. 비절삭저

항은 공구절입시 압력이 크게 받는 것을 확인 할 수 있는데 이는 미변형 칩 두께가 최소 칩 두께보다 작아 피삭재의 탄성변형과 공구의 마찰력의 증가로 저항이 크게 생기기 때문이다. 선행 실험을 통하여 얻어진 비절삭저항  $K_t$ ,  $K_r$ 을 사용하여 예측하고자 하는 비절삭저항값을 Fig 4, Fig 5와 같이 구하고 이를 식(1)에 대입하여 Rd 130, 170um에 대한 절삭력을 예측하였고 측정된 절삭력과 비교한 값을 Fig 4, Fig 5와 같다. 예측된 절삭력은 실제 절삭력과 진폭과 주기가 유사함을 알 수 있다.

Table 2 Cutting experiment conditions

Micro cutting shape	Side cutting
Feed rate(mm/min)	300
Depth of cut(mm)	0.35
Radial depth(mm)	100, 150, 200(130, 170) $\mu$ m
Tool	$\Phi$ 0.3 2flute Flat End-mill
Workpiece	Brass
Cutting speed	40,000(RPM)
Cutting mode	Down milling

$$\begin{aligned}
 A \\
 F_x &= \frac{-s_r r}{2 \tan \beta} \left[ -K_t \alpha + \frac{K_t}{2} \sin 2(\alpha + \Phi_1) - \frac{K_r}{2} \sin 2\Phi_1 - \frac{K_r}{2} \cos 2(\alpha + \Phi_1) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{K_r}{2} \cos 2\Phi_1 \right] \\
 F_y &= \frac{s_r r}{2 \tan \beta} \left[ -\frac{K_t}{2} \cos 2(\alpha + \Phi_1) + \frac{K_t}{2} \cos 2\Phi_1 + K_r \alpha - \frac{K_r}{2} \sin 2(\alpha + \Phi_1) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{K_r}{2} \sin 2\alpha \right] \\
 B \\
 F_x &= \frac{-s_r r}{2 \tan \beta} \left( -K_t \Phi_2 - \frac{K_t}{2} \sin \Phi_1 - \frac{K_r}{2} + \frac{K_r}{2} \cos 2\Phi_1 \right) \\
 F_y &= \frac{s_r r}{2 \tan \beta} \left[ -\frac{K_t}{2} \cos 2(\Phi_2 + \Phi_1) + \frac{K_t}{2} \cos 2\Phi_1 + K_r \Phi_2 + \frac{K_r}{2} \sin 2\Phi_2 \right] \\
 C \\
 F_x &= \frac{-s_r r}{2 \tan \beta} \left[ -K_t (\Phi_2 - \alpha + \delta) - \frac{K_t}{2} \sin (\alpha - \delta + \Phi_1) + \frac{K_r}{2} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{K_r}{2} \cos 2(\alpha - \delta + \Phi_1) \right] \\
 F_y &= \frac{s_r r}{2 \tan \beta} \left[ \frac{K_t}{2} - \frac{K_t}{2} \cos 2(\alpha - \delta + \Phi_1) - K_r (\Phi_2 - \alpha + \delta) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{K_r}{2} \sin 2(\alpha - \delta + \Phi_1) \right] \tag{1}
 \end{aligned}$$

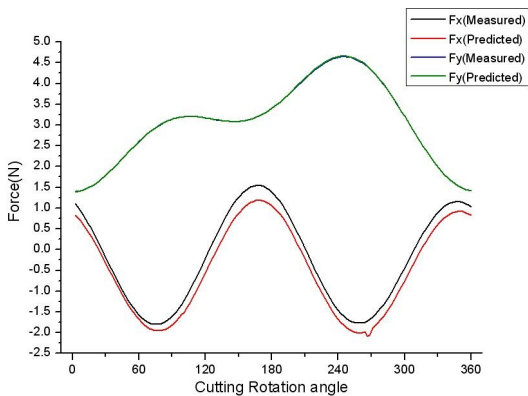


Fig. 5 Estimated specific cutting force(Rd 170um)

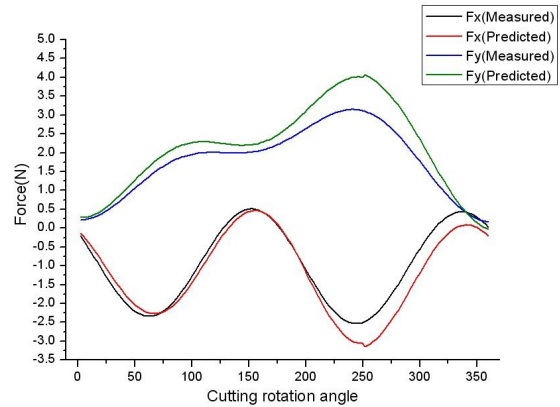


Fig. 4 Estimated specific cutting force(Rd 130um)

#### 4. 결과 및 결론

선행실험으로 얻어진 비절삭저항을 이용하여 절삭력을 예측한 결과 진폭과 주기가 상당히 일치함을 알 수 있어 기존의 범용 엔드밀 절삭력모델로 마이크로 엔드밀링 절삭력을 예측하는데 어려움이 없는 것으로 확인되었다. 따라서 엔드밀의 더욱 정확한 모델링과 최소칩두께를 고려한 회전각도에 따른 절삭력을 적용 시킬 경우 더욱 근접한 공구변형을 계산 할 수 있으며 보다 많은 조건을 통하여 데이터를 통하여 가공오차에 예측에 관한 이론적 적립도 가능 할 것으로 생각된다.

#### 후기

이 논문은 지식경제부에서 지원하는 2009년도 지식경제 기술 혁신사업으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Xinmin Lai and other "Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness." International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1-14, 2008
- J. Chae, S. S. Park, T. Freiheit, "Investigation of micro-cutting operations." Machine Tools & Manufacture, 46, 313~332
- 강익수, 김정석, 서용위 "마이크로 엔드밀링에서 공구선단 반경을 고려한 절삭력 모델" 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, 2006
- Bao, W. Y. and Tansel, I. N. "Modeling Micro-end-milling Operations. part I: Analytical Cutting Force Model." Int. J. Machine Tools & Manufacture, 40, 2155-2173, 2000
- Vogler and other "On the Modeling and Analysis of Machining performance in Micro-endmilling, Part II :Cutting Force Prediction." J. Manufacturing Science & Engineering, 126, 695-705, 2004
- 이영문 외 "인코넬 718의 상향 및 하향 엔드밀링시 헬릭스각에 따른 절삭력 변화." 한국정밀공학회지, 18, 7, 143-148, 2001