

# 마이크로 엔드밀링 시 공구 변형에 관한 연구

김건희<sup>#</sup> · 윤길상<sup>2</sup> · 허영무<sup>2</sup> · 정우철<sup>2</sup> · 조병우<sup>3</sup>

## A Study on Micro Tool Deflection in Micro Endmilling Process

G. H. Kim, G. S. Yoon, Y. M. Heo, W. C. Jung, M. W. Cho

(Received November 16, 2006)

### Abstract

In this paper, the real shapes of micro tool deflection were observed. In micro endmilling process, micro tool deflection generates very serious problems in contrast to macro tool deflection. For analyzing the micro tool deflection, the trend of micro tool deflection was observed using real captured images in this paper. To get the real images of micro tool deflection, micro slot cutting processes were executed under cutting volume using micro endmill(Dia. 200 $\mu$ m) and real images of tool deflection were obtained during cutting processing by high-speed camera. Finally, the extent of tool deflection was calculated by the deflection angle according to cutting volume.

**Key Words:** Tool Deflection, Micro Endmilling, Micro Machining System, High-Speed Camera

### 1. 서 론

최근 광학, 전자, 항공우주, 바이오 산업 등의 분야에서 초정밀 마이크로 형상, 패턴 등이 널리 사용되고 있으며, 그 수요는 점차 증가하고 있다. 마이크로 형상, 패턴을 제조하기 위해서는 높은 신뢰성과 반복 정밀도가 보장되는 가공법이 요구된다. 현재 반도체 제조 공정을 기반으로 하는 다양한 마이크로 형상, 패턴 가공법이 널리 사용되고 있으나, 공정의 유연성, 높은 생산성, 다양한 재료 가공이 가능한 기계적인 절삭 가공법이 최근 많은 관심을 끌고 있다.

대표적인 금속의 절삭 가공법인 엔드밀링 공정에서는 구현 가능한 가공 정밀도의 한계, 심각한 가공 오차를 야기하는 공구 변형 현상이 매우 심각한 문제로 대두되어 왔다[1~3]. 일반적으로 공구 변형은 가공 중 발생하는 절삭력과 단순보(cantilever)

형상을 가진 엔드밀 공구의 약한 강성으로 인하여 야기된다. 공구 변형량은 절삭 깊이에 따른 공구 상의 절삭력 작용점에 따라 다르다. 또한, 공구 변형을 예측하기 위한 절삭조건과의 관계 정립은 엔드밀 공구의 기하로 인하여 매우 어렵다. 마이크로 엔드밀링 공정에서 발생하는 공구 변형은 매우 미세한 공구 형상, 크기로 인하여 일반 엔드밀링 공정에서 발생하는 것 이상으로 심각한 가공상 문제점을 야기한다. 마이크로 엔드밀링 공정이 일반적인 엔드밀링 공정과 매우 유사한 과정을 통하여 진행되지만 공구의 크기, 절삭 깊이 등의 매우 큰 차이로 인하여 실제로 발생하는 현상과 메커니즘은 매우 다른 양상을 가진다[4]. 따라서, 마이크로 엔드밀링 공정을 분석하기 위해서 일반 밀링 공정과는 다른 별도의 방법론이 요구된다.

매크로 영역에서의 엔드밀링 공구 변형에 관련

1. 인하대학교 기계공학과 대학원  
2. 한국생산기술연구원 정밀금형팀  
3. 인하대학교 기계공학부  
# 교신저자: 인하대 기계과 대학원  
E-mail: venkey@kitech.re.kr

한 연구는 그 동안 꾸준히 진행되어 왔으며 현재에도 관련 연구는 진행되고 있다. Fig. 1은 매크로 영역에서의 엔드밀 공구 변형 관련 연구 내용을 정리한 것이다. 그러나, 마이크로 엔드밀링 공정의 경우 많은 관심을 끌고 난 후에도 관련 연구는 매우 미미한 실정이다. Uriarte 등은 마이크로 가공의 정밀도 향상에 관련한 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 가공 오차의 주된 원인으로서 공구를 고정하는 콜릿(collet)의 변형과 공구 변형을 선정하였으며 공작기계, 스피들, 공구홀더, 공구 자체의 강성 분석을 통하여 마이크로 밀링 장비의 강성을 실험적인 방법으로 분석하였다[5]. Dow 등은 1mm 이하 직경을 가진 엔드밀 공구 변형에 대한 보상법을 제안하였다. 본 연구에서는 절삭력과 배분력을 예측과 공구 변형으로 인한 가공 형상 오차 분석을 이용하여 오차를 최소화 할 수 있는 새로운 공구 경로를 생성하였다. 이러한 과정은 매크로 영역에서의 공구 변형 보상법과 매우 유사한 것으로서 타 마이크로 가공에 비해 상대적으로 큰 치수의 형상에 적용이 가능하다[4]. Miao 등은 마이크로 엔드밀링 공정 중 동적 현상에 대한 내용을 다루었다. 이 연구에서는 치수효과(size effect), 칩 형성, 가공 안정성 등 가공 중 발생하는 동적 이슈에 대한 내용들을 다루었으나 동적 현상과 직접적인 연관성이 있는 공구 변형은 다루지 않고 있다[6].

현재 진행된 마이크로 공구 변형에 대한 연구는 매크로 영역에서의 연구를 응용한 것이 대부분이다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 마이크로 엔드밀링 공정에서 나타나는 현상들과 메커니즘을 고려한 차별화된 분석법이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로 공구의 동적 변형 분석을 위한 기초연구로서 마이크로 가공 시스템을 이용하여 마이크로 엔드밀링 실험을 진행하면서 마이크로 공구 변형의 실제 형상을 고속 카메라를 통하여 획득하였고, 획득한 영상을 이용하여 공구 변형각을 각 조건 별로 분석하였다.

## 2. 마이크로 엔드밀링 실험

### 2.1 마이크로 가공 시스템

Fig. 2는 본 연구의 실험에 적용된 마이크로 가공 시스템을 나타낸 사진이다. 본 시스템은 마이크로 엔드밀링 공정 수행이 가능하며, 에어 스피

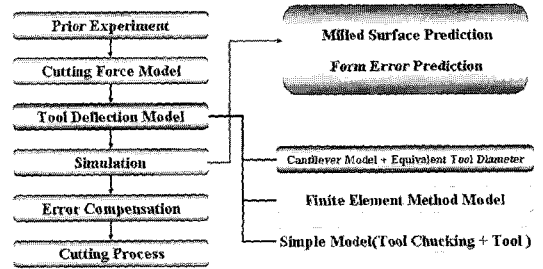


Fig. 1 Studies on tool deflection of conventional end milling process

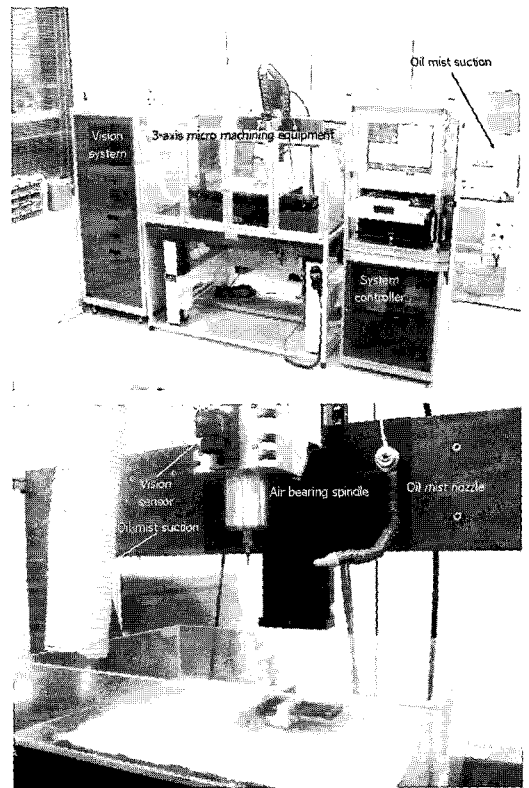


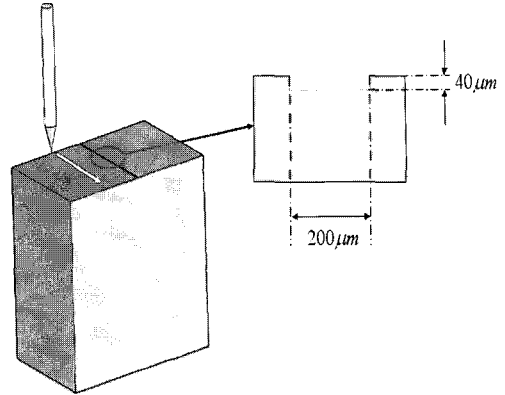
Fig. 2 Micro machining system

들, 3 개의 리니어 스테이지, 미세 형상 측정이 가능한 비전 센서 등으로 구성되어 있다. 또한, 지면에서 전달되는 진동의 영향을 최소화하기 위하여 4 개의 아이솔레이터(isolator)가 시스템 하부에 장착되어 있다.

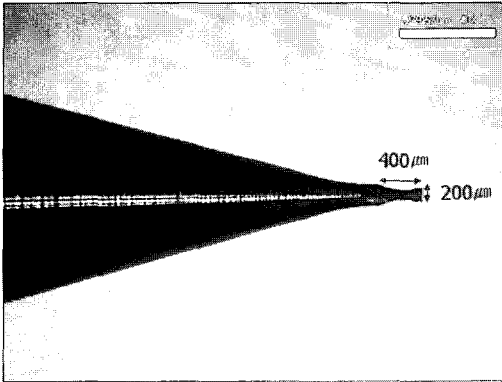
절삭유는 미스트(mist) 타입으로 공급되며, 주축 회전 속도는 최대 100,000rpm 까지 가능하다. 본 시스템의 세부 사양은 Table 1 과 같다.

**Table 1 Specification of the micro machining system**

Traveling range	X, Y-axis (600mm) Z-axis (200mm)
Resolution	All-axes: 100nm
Accuracy	X, Y-axis (6 $\mu$ m) Z-axis (2 $\mu$ m)
Repeatability	All-axes: 0.2 $\mu$ m
Max. velocity	X, Y-axis (200mm/s) Z-axis (100mm/s)
Rotational speed	Max. 100,000rpm
Spindle run-out	Max. 0.7 $\mu$ m
Static radial load	Min. 6Kgf
Oil-mist	0.05cc/shot
Workpiece weight.	Max. 45Kg



**Fig. 4 Cutting process in experiments**



**Fig. 3 Micro endmill(Union Tools CO., Japan)**

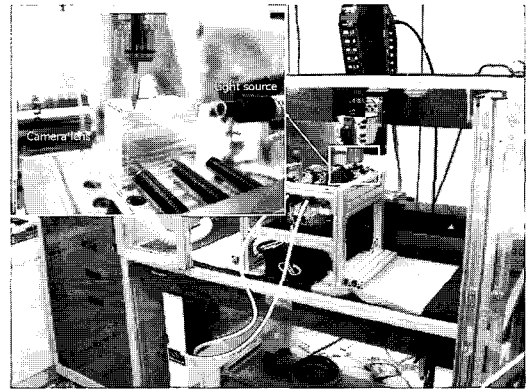
### 2.2 마이크로 엔드밀

일반적으로 마이크로 엔드밀은 약한 강성을 보완하기 위하여 일반 엔드밀에 비해 짧은 직경 대비 날 길이를 가지며, 대부분 초경 재질로 제작된다. 따라서 마이크로 엔드밀 공구는 작은 질량으로 인해 고유 진동수가 높으며 구조적으로 높은 정적 강성을 가진다[7].

공구 변형과 관련한 대부분의 연구에서 실제 공구 변형 형상을 고찰한 경우는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 3의 공구를 이용하여 마이크로 엔드밀링 실험을 진행하였으며, 실험 중 고속 카메라를 이용하여 공구 변형의 실제 형상을 획득하였다. 사용된 공구는 직경 200 $\mu$ m, 날 길이 400 $\mu$ m인 2날 평 엔드밀이며 헬릭스 각은 15°이다.

### 2.3 실험방법

마이크로 엔드밀의 명확한 변형 형상을 획득하기 위하여 다양한 절삭 조건으로 사전 실험을 수



**Fig. 5 Setup of high-speed camera**

행하였다. 절삭조건은 절삭 부피를 기준으로 스피indel 속도, 절삭 깊이, 절삭 폭은 고정된 상태에서 피드량(feed-rate) 변화시켜 설정하였으며, 식(1)은 절삭 부피를 산출하는 계산식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \text{Cutting Vol.} \\ = \text{Cutting depth} \times \text{Cutting width} \times \text{Feedrate} \end{aligned} \quad (1)$$

피드량은 초기 200mm/min에서 40mm/min씩 단계별로 증가시키면서 공구 파손이 발생할 때까지 실험을 진행하였다. 절삭 깊이의 경우 공구 변형 형상 고찰을 위하여 공구 길이의 10%인 40 $\mu$ m로 설정하였다. Fig. 4는 본 연구의 실험에서 진행된 절삭 형상을 나타낸 그림이다. 정확한 절삭 깊이를 적용하기 위하여 micro height sensor를 이용하여 정확한 절삭 깊이 좌표를 산출하였으며, 가공 시편의 재질은 SM45C이다. Table 2는 세부적인 절

**Table 2 Cutting conditions**

No	Feed rate (mm/min)	Cutting vol. (mm <sup>3</sup> /min)	Depth (μm)	RPM (rev/min)
1	200	1.6	40	30,000
2	240	1.92		
3	280	2.24		
4	320	2.56		
5	360	2.88		

**Table 3 Specification of high-speed camera**

Sensor, color	CMOS, gray
Basic resolution	1024 x 1024 at 2,000 fps
Frame rate	60~120,000 fps
Shutter speed	10~0.004 ms

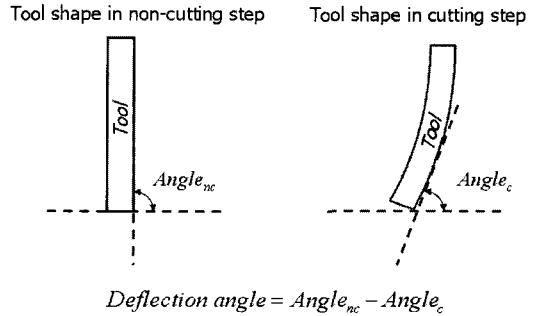
삭 조건을 나타낸 것이다.

고속 카메라(FASTCAM ultima APX, Photoron™)는 Fig. 5와 같이 설치하였다. 고속 카메라의 세부 사양은 Table 3과 같다. 마이크로 공구의 고찰을 위하여 FOV(Field Of View)가 약 1mm 인 현미경 렌즈를 고속 카메라에 장착하였다. 1회전 당 12장의 영상을 획득하기 위하여 고속 카메라의 frame rate은 6,000fps(frame per second)로 설정하였다.

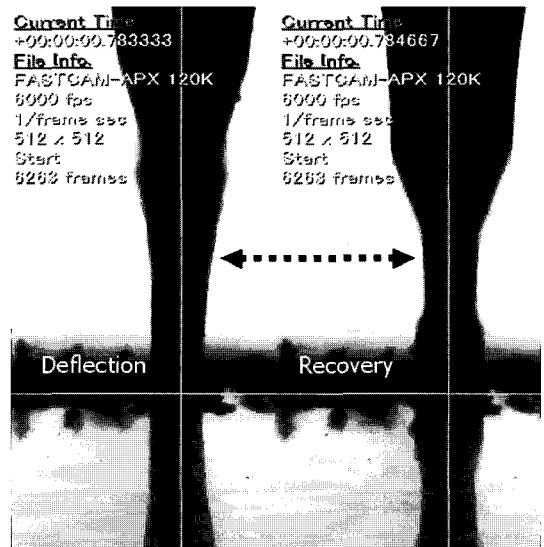
### 3. 실험결과 및 분석

앞서 언급한 실험 조건으로 마이크로 엔드밀링 실험을 수행하였다. 실험 조건 중 최대 피드량인 360mm/min 인 경우 가공 도중 공구 파손이 발생하였다. 획득된 공구 변형 형상은 Fig. 6의 변형각 정의를 통하여 분석하였으며, 연속 현상 분석을 통하여 절삭 가공 도중에는 공구의 변형과 회복이 반복적으로 발생함을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 본 현상을 확인할 수 있는 이미지를 나타낸 것이다.

공구 변형각 분석을 위하여 각 실험조건별로 비 절삭(non-cutting)시 공구 이미지와 절삭 시 공구 이미지 2장씩을 선별하였다. 선별된 이미지에서 Angle<sub>nc</sub>와 Angle<sub>c</sub>를 측정하였으며, 측정결과는 Table 4에 정리하였다. Fig. 8, 9는 피드량 200, 360mm/min일 경우의 변형각 측정 이미지를 각각 나타낸 것이다. Fig. 10의 그래프는 절삭 부피별 공구 변형각을 나타낸 것이다. 그래프에서도 알 수 있듯이 공구 변형각은 절삭부피에 비례함을 확인하였다.



**Fig. 6 Definition of tool deflection angle in this study**



**Fig. 7 Tool deflection and recovery in cutting process**

**Table 4 Measurement of Angle<sub>nc</sub> and Angle<sub>c</sub>**

Feed rate (mm/min)	Angle <sub>nc</sub> (Degree)	Angle <sub>c</sub> (Degree)
200	86.553	85.711
240	87.74	85.101
280	87.763	84.668
320	87.274	82.875
360	88.356	83.066

### 4. 결론

본 연구의 목적은 가공 중 실제 마이크로 공구 변형 형상을 고찰하는 것이다. 이를 위하여 마이크로 머시닝 시스템 상에서 마이크로 엔드밀링 실

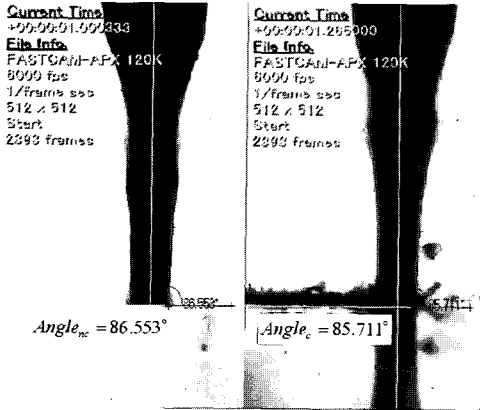


Fig. 8 Tool deflection shape (Feed rate : 200mm/min)

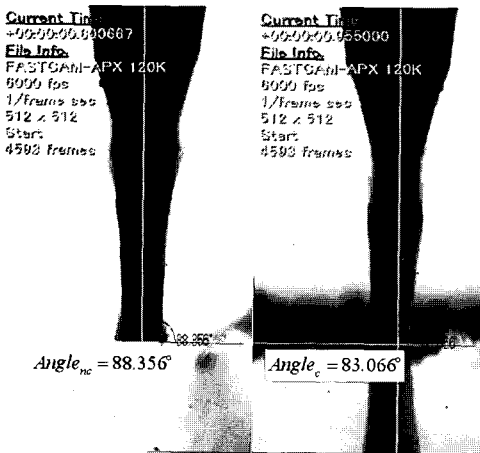


Fig. 9 Tool deflection shape (Feed rate : 360mm/min)

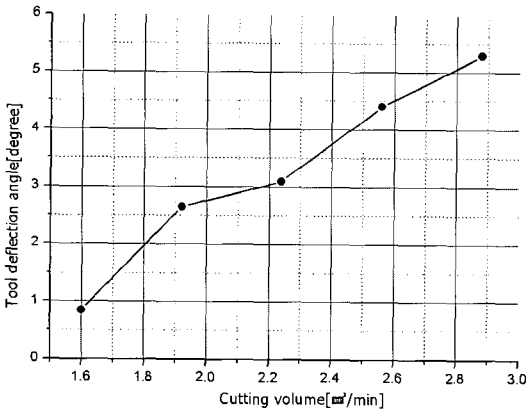


Fig.10 Variation of tool deflection angle

험을 수행하였고, 수행 중 고속 카메라를 이용하여 각 절삭 조건별로 공구 변형 형상을 획득하였다. 획득된 이미지 분석 결과 절삭 가공 중 공구의 변형과 회복이 반복적으로 발생함을 확인할 수 있었고, 각 절삭 조건별 변형각 측정 결과를 통하여 공구 변형량은 절삭 부피에 비례함을 알 수 있었다.

마이크로 엔드밀링 공정의 정밀도 향상을 위해서는 오차 원인에 대한 분석은 필수적인 요소이다. 특히, 공구 변형의 경우 절삭 가공시 오차를 발생시키는 주요 요인으로서 많은 연구가 진행되어 왔고, 앞으로도 많은 연구가 진행될 필요가 있다. 본 연구의 결과는 마이크로 공구 변형 관련 연구의 시작점이 될 것으로 사료되며, 추후 정밀한 마이크로 엔드밀링 공정을 위한 절삭 조건 도출, 공구 런아웃(run-out), 가공 재료 등을 본 연구의 결과를 토대로 공구 변형과 연관시켜 연구를 진행할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] E. Budak, Y. Altintas, 1994, Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, pp. 907~918.
- [2] W.A. Kline, R.E. Dever, J. R. Lindberg, 1982, The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 22, pp. 7~22.
- [3] T. Matsubara, H. Yamamoto, H. Mizumoto, 1987, Study on Accuracy in End Mill Operations(1<sup>st</sup> report)-Stiffness of End Mill and Machining Accuracy in Side Cutting, Japan Society of Precision Engineering, Vol. 21, pp. 95~100.
- [4] Thomas A. Dow, Edward L. Miller, Kenneth Garrard, 2004, Tool force and deflection compensation for small milling tools, Precision engineering, Vol. 28, pp. 31~45.
- [5] L. Uriarte, A. Herrero, M. Zatarain, G. Santiso, L. N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz, J. Albizuri, 2006, Error budget and stiffness chain assessment in a micromilling machine equipped with tools less than 0.3mm in diameter, Precision engineering, On-line published.

- [6] J. C. Miao, G. L. Chen, X. M. Lai, H. T. Li, C. F. Li, 2006, Review of dynamic issues in micro-end-milling, International Journal of Advanced Manufacture Technology, On-line published.
- [7] D. Cox, G. Newby, H. W. Park, S. Y. Liang, 2004, Performance evaluation of a miniaturized machining center for precision manufacturing, Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim California, pp. 13~20.