

고속카메라를 이용한 공구 절입시 변형 형상에 관한 연구

김건희[†] · 정우철 · 윤길상 · 신광호 · 허영무

대진대학교

(2007. 10. 15. 접수 / 2007. 12 20. 채택)

A study on the tool deflection shape using high speed camera

Kun-hee Kim[†] · Woo-chul Jung · Gil-sang Yoon · Kwang-ho Sin · Yeong-mu Heo

Department of Mold & Die Engineering, Daejin University

(Received October 15, 2007 / Accepted December 20, 2007)

Abstract : The object of this study is a manufacture of buff die using CAM systems. Systems are consist of AutoCAD, CAM software and CNC milling machine. CAM software is purpose of G-code generation for CNC programming. Then CAM software and CNC milling machine are connect to RS-232-C cable for networking.

Key Words : Tool deflection, Machining error, High speed camera, Micro endmill, Micro machining system

1. 서 론

최근 광학, 바이오, 항공·우주 등 산업 전반에 걸쳐 기능적인 초정밀 마이크로 패턴, 형상 등의 필요성이 증대되고 있다. 일반적으로 초정밀 마이크로 패턴, 형상 가공에는 반도체 제조 공정을 응용한 화학적 제거 방법들이 많이 이용되고 있다. 그러나, 화학적인 가공법은 가공 면적, 가공물의 재질, 생산성 등의 제약이 따르므로 기계적인 제거 가공법에 대한 관심이 늘고 있다. 기계적인 제거 가공법은 마이크로 형상 제품의 양산에 필수 요소인 금형 가공에 적합한 가공법이며 화학적 가공법에 비해 가공 재료의 제약, 생산 공정의 유연성, 생산성 측면에서 유리하다. 그러나, 가공정밀도, 품질 재현성 등은 화학적인 가공법과 비교하여 취약한 편이며, 특히 대표적인 기계적 제거 가공법인 엔드밀링 공정의 경우 공구 변형으로 인해 발생하는 가공오차가 매우 심각한 문제로 대두되어 왔으며, 공구 파손 발생 및 고정밀도 구현의 제약의 주요 요인이다.[1~3]

일반적으로 공구 변형은 가공 중 발생하는 절삭력과 단순보(cantilever) 형상의 엔드밀의 탄성변형으로 인하여 야기된다. 공구 변형량은 절삭 깊이에 따른 공구상의 절삭력 작용점에 따라 다르며, 헬릭스 각 등을 포함한 엔드밀의 기하로 인하여 절삭 조건과

공구 변형간의 관계 정립이 매우 어렵다. 0.5mm 이하의 직경을 가진 마이크로 엔드밀의 경우 매우 미세한 공구 크기, 형상으로 인하여 일반적인 엔드밀링 공정(conventional endmilling operation)에서 발생하는 현상 이상으로 심각한 가공상 문제점을 야기한다. 마이크로 엔드밀링 공정이 일반적인 엔드밀링 공정과 매우 유사한 과정을 통하여 진행되지만, 과도한 가공 영역 크기 축소로, 치수효과 등으로 인하여 실제로 발생하는 현상과 절삭 메커니즘은 매우 다른 양상을 가진다.[4] 따라서, 마이크로 엔드밀링 공정을 분석하기 위해서는 일반 엔드밀링 공정과는 차별화된 방법론이 요구된다.

일반적인 엔드밀링 공정에서의 공구 변형에 관한 연구는 그 동안 꾸준히 진행되어 왔으며, 현재에도 계속 진행되고 있다. 공구 변형을 해석하고 보상하기 위해 다양한 방법론들이 제시되어 왔으며, Fig. 1은 관련 연구 내용을 요약한 것이다. 대체적으로 절삭력 모델링과 해석적인 공구 모델링을 선행한 후 공구 변형을 예측하거나 실험적인 데이터를 이용하여 공구 변형을 보상하는 방법들이 제안되었다.

마이크로 엔드밀링 공정에 관한 연구는 일반적인 엔드밀링 공정에 비해 매우 미미한 실정이다. Uriarte 등은 마이크로 절삭 가공시 가공 정밀도 향상 방법에 관한 연구를 진행하였다. 이 연구에서는

마이크로 가공시 가공오차를 발생시키는 주 요인을 공구를 고정시키는 콜릿(collet)의 변형, 가공 중 공구의 변형으로 선정하였으며, 공작기계, 스피들, 공구 홀더, 공구 자체의 강성 분석을 통하여 마이크로 절삭 가공 오차에 미치는 영향을 분석하였다.[5] Dow 등은 1mm 이하 직경을 가진 엔드밀 공구 변형의 보상 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 절삭력과 배분력 예측, 공구 변형으로 인하여 발생한 가공 오차 분석 등을 이용하여 공구 변형을 최소화할 수 있는 새로운 공구 경로를 생성하는 방법을 적용하였다.[4] 이러한 방법은 일반적인 엔드밀링 공정 시 적용되는 공구 변형 보상법과 매우 유사한 것으로 최근 사용되고 있는 마이크로 가공 공구에 비해 상대적으로 직경이 큰 공구에 적용할 경우 유리할 것으로 판단된다. Miao 등은 마이크로 엔드밀링 공정 중 발생하는 동적 현상들에 대한 연구를 진행하였다. 특히 이 연구에서는 치수효과(size effect), 칩 형성 메커니즘, 가공의 안정성 등을 평가함으로써 마이크로 가공 전반에 대한 동적 이슈들을 다루었다. 그러나, 심각한 가공오차를 야기시키는 공구 변형이나 런아웃(run-out)에 대한 내용은 다루지 않았다.[6] 본 연구에서는 마이크로 공구의 동적 변형 분석을 위한 기초연구로서 마이크로 가공 시스템을 이용하여 마이크로 엔드밀링 공정을 진행하면서 실제 공구 변형 형상을 고속카메라를 이용하여 획득하였으며, 이를 분석함으로써 마이크로 공구 변형에 대한 분석을 진행하였다.

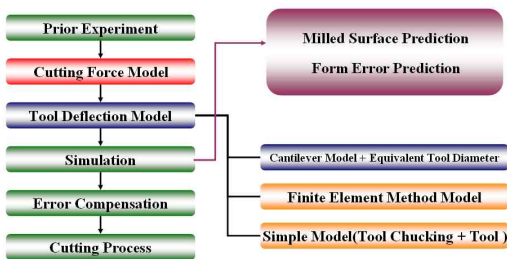


Fig. 1 Studies on tool deflection of conventional end milling process

2. 실험 장비 및 방법

2.1 마이크로 가공 시스템

Fig. 2는 본 연구의 실험에 이용된 마이크로 가공 시스템을 나타낸 것이다. 본 시스템은 일반적인 3축

밀링머신과 동일한 구조로 제작되었으며, 에어 베어링 스피들, 정밀 이송 스테이지, 비전 측정 센서 등으로 구성되어 있다. 시스템이 설치된 지면으로부터의 진동 영향을 최소화하기 위하여 프레임과 아이솔레이터(isolator)를 설치하였으며, 절삭유는 미스트(mist) 타입으로 공급되도록 제작하였다. 주축 스피들의 최대 회전 속도는 100,000rpm이며, 대면적 미세 가공을 수행할 수 있도록 X, Y 축의 최대 이송범위는 600mm로 선정하였으며, 각 이송 스테이지에는 리니어 스케일(linear scale)이 내장되어 있다. 본 시스템은 상용 장비가 아니라 마이크로 엔드밀링 가공을 수행할 수 있도록 각각의 세부 시스템들을 조합하여 제작한 것으로서 기상 측정 장비, 시스템 부수 기자재 등의 설치가 용이하다. Table 1은 본 시스템의 세부적인 사양을 정리한 것이다. 공구 변형 형상 획득에 이용된 고속카메라(FASTCAM ultima APX, Photron™)는 초당 최대 120,000장의 영상 획득이 가능하며 미세 공구 형상 촬영을 위하여 FOV(Field Of View)가 약 1mm인 현미경 렌즈를 장착하였다. Fig. 3은 고속카메라 설치를 나타낸 사진이다.

2.2 실험 방법

본 실험에서 사용한 마이크로 엔드밀은 Fig. 4와 같이 $\Phi 200\mu\text{m}$, 날 길이 $400\mu\text{m}$ 인 2날 엔드밀(Union Tools Co., Japan)이다. 공구 변형을 고찰하기 위한 엔드밀링 가공 조건은 절삭부피를 기준으로 피드량을 증가시켰으며, 주축 회전속도와 절삭 깊이는 고정하였다. 식(1)은 절삭부피 계산식을 표현한 것이다.

$$\text{Cutting volume} = \text{Cutting depth} \times \text{Cutting width} \times \text{Feedrate.} \quad (1)$$

공구 변형의 2차원 형상 고찰을 위하여 슬롯(slot) 가공 실험을 진행하였으며, 피드량은 최초 200mm/min에서 40mm/min씩 증가하면서 공구의 파손이 발생할 때 까지 실험을 진행하였다. 절삭 깊이가 클 경우 매우 짧은 공구의 날 길이로 인하여 공구 변형 형상 고찰이 어려울 것으로 판단하여 공구 날 길이의 10%인 $40\mu\text{m}$ 로 설정하였다. Table 2는 실험조건을 나타낸 것이다. Fig. 5는 본 연구에서의 실험 방법을 나타낸 그림이다. 영상 획득의 용이성을 위하여 절삭유 공급은 건식으로

선정하였으며, 매 실험마다 새로운 공구를 사용하였다. 정확한 공구 변형 형상 분석을 위하여 공구 1회전당 12장의 이미지 획득을 할 수 있도록 프레임 속도는 6,000fps(frame per second)로 선정하였으며, 비 절삭(non-cutting) 시 공구 이미지와 절삭시 공구 이미지를 모두 획득할 수 있도록 영상 획득 시간을 조정하였다.

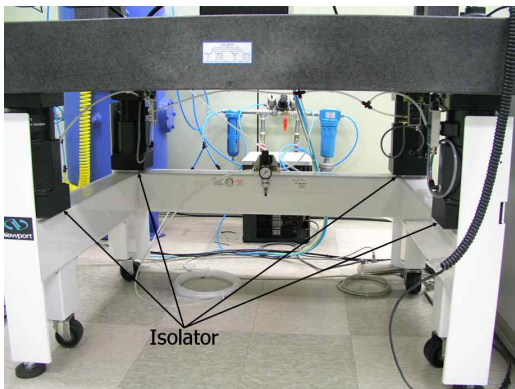
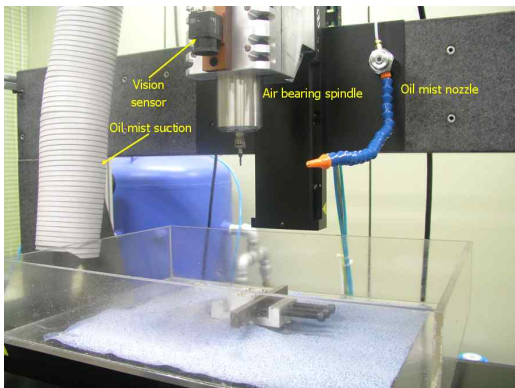
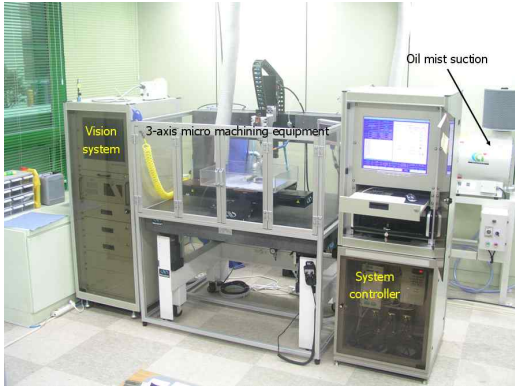


Fig. 2 Micro machining system

Table 1 Detailed specification of micro machining system

| | |
|----------------------------|--|
| Traveling rage [mm] | X, Y-axis: 600, Z-axis: 200 (resolution: 0.1 μ m) |
| Accuracy [μ m] | X, Y-axis: 0.1, Z-axis: 2 |
| Repeatability [μ m] | X, Y, Z-axis: 0.2 |
| Max. velocity [mm/s] | X, Y-axis: 200, Z-axis: 100 |
| Static radial load [kgf] | Min. 6 |
| Rotational speed [rpm] | Max. 100,000 |
| Spindle run-out [μ m] | Max. 0.7 |
| Oil-mist [cc/shot] | 0.05 |



Fig. 3 Installation of the high-speed camera

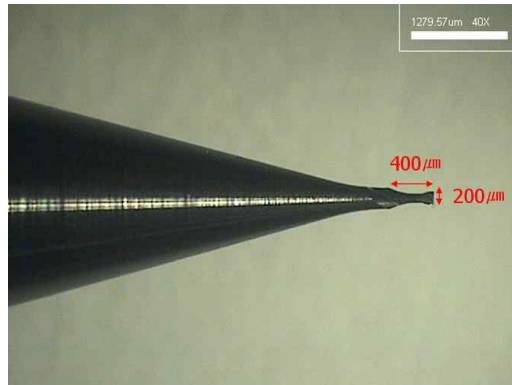


Fig. 4 Used micro endmill in experiments

3. 실험 결과 분석

Table 2 Cutting conditions

| No. | Feedrate (mm/min) | Cutting Vol. (mm ³ /min) | Cutting 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 | | |
| Tool: | | Φ200μm 2-flute flat endmill | | |
| Workpiece material: | | SM45C (W25mm, D40mm, H40mm) | | |

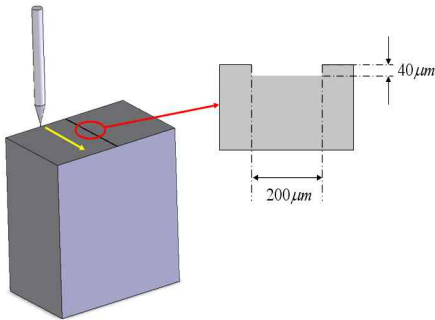


Fig. 5 Cutting process in experiments

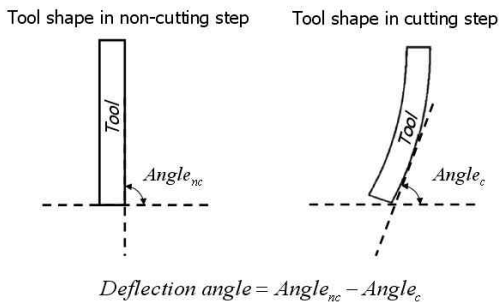


Fig. 6 Definition of tool deflection angle

마이크로 엔드밀링 실험은 피드량 360mm/min에서 공구 파손이 발생하였으며, 가공 중 획득한 마이크로 엔드밀 형상 이미지 중 비 절삭시 공구 이미지와 동일 회전 위치의 절삭시 공구 이미지를 각 조건 별로 선별하였다. 특히, 최초 절삭시 발생하는 공구 변형 이미지를 별도로 선별하여 가공 중 공구 변형 이미지와 비교 분석하였다. 선별된 이미지들은 이미지 측정 S/W를 이용하여 Fig. 6에서 정의된 것과 같이 공구 변형각을 측정하였다. 가공 진행 연속 이

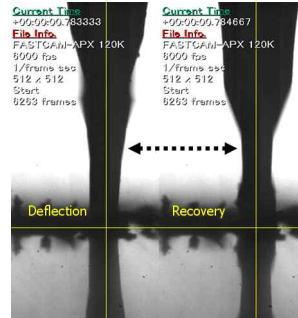
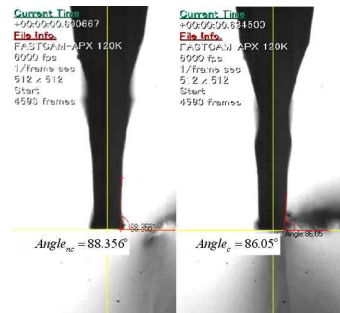
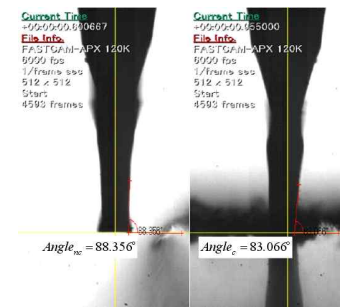


Fig. 7 Tool deflection and recovery



(a) In tool entrance



(b) In cutting process

Fig. 8 Tool deflection angle (feedrate 360mm/min)

미지 분석에서는 공구의 변형과 회복이 반복적으로 발생됨을 확인할 수 있었다. 이를 Fig. 7에 나타내었다.

공구 변형 이미지 분석 결과 최초 절삭시 충격력에 의해 공구 변형량이 가공 중 변형량보다 더 클 것으로 예상하였으나, 이미지 분석 결과 절삭 부피에는 선형적으로 변형량이 증가하나 가공 중 변형량 보다 더 작은 것으로 나타났다. 이는 일반적인 엔드밀링 시 발생하는 현상과 다른 결과로서 절삭력 측정과 세부적인 절삭조건 고찰 등을 동반한 추가 연구를 통하여 재검증할 필요가 있을 것으로 사료된다. Fig. 8은 공구 변형 이미지를 나타낸 것이며, 공구 변형각 측정 결과를 Fig. 10에 그래프로 나타내었다.

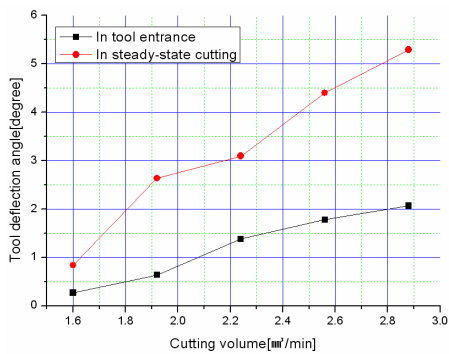


Fig. 9 Variation of tool deflection angle with cutting volume

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로 엔드밀링 시 발생하는 공구 변형에 대한 기초연구로서 고속 카메라를 이용하여 공구 변형 실제 형상을 획득, 분석하였다. 공구 변형의 실제 형상을 고찰함으로써 마이크로 공구 변형 관련 연구의 기반을 마련할 수 있을 것으로 판단되며 실험 방법의 응용을 통하여 일반적인 엔드밀링 가공 중 발생하는 현상에 관련한 연구를 진행할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 일반적인 엔드밀링 공정과는 다른 현상들을 규명할 경우 매우 유용하게 적용할 수 있으며, 추후 진행될 공구 런아웃, 칩 형성 등의 관련 연구에 적극 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Budak, E. and Altintas Y., 1994, "Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 34, No. 7, pp.907~918.
- (2) Kline W.A.m Dever R.E. and Lindberg J.R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *International Journal if Machine Tools & Manufacture*, Vol. 22, No. 2, pp.7~22.
- (3) Matsubara T., Yamamoto H. and Mizumoto H., 1987, "Study on Accuracy in End Mill Operation(1st report)-Stiffness of End Mill and Machining Accuracy in Side Cutting," *Japan Society of Mechanical Engineering A*, Vol. 21, No. 2, pp.95~100.
- (4) Tomas A. Dow, Edward L. Miller and 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 and 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 and C.F. Li, 2006, "Review of dynamic issues in micro-end-milling," *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, on-line published.