

유한요소법을 이용한 마이크로 평엔드밀링에서의 공구변형 예측

임정수⁺, 조희주⁺, 서태일*

(논문접수일 2010. 4. 29, 심사완료일 2010. 6. 14)

Tool Deflection Estimation in Micro Flat End-milling Using Finite Element Method

Jeong-su Lim⁺, Hee-ju Cho⁺, Tae-il Seo*

Abstract

The main purpose of this study strongly concerned micro machining error estimation by using FEM analysis of tool deflection shapes in micro flat end-milling process. For the precision micro flat end-milling process, analysis of micro cutting errors is mandatory. In general, tool deflection is a major factor which causes cutting error and limits realization of the high-precision cutting process. Especially, in micro end-milling process, micro tool deflection generates very serious problems in contrast to macro tool deflection. Methods which deal with compensation of cutting error by tool deflection in macro end-milling process have been studied plentifully but, few researches transact with micro scaled cutting tool deflection in micro cutting process. Therefore, the trend of micro tool deflection was estimated by using FEM analysis in this paper. Cutting forces were acquired by micro dynamometer and these were utilized in FEM analysis. In order to verify FEM analysis results, micro machining processes were carried out and real machined profiles were compared with FEM results. Finally through the proposed approach well suited FEM results were obtained.

Key Words : Micro Flat End-mill(마이크로 평엔드밀), Tool Deflection(공구변형), Machining Error(가공오차), FEM(유한요소법), Cutting force(절삭력)

+ 인천대학교 기계시스템공학부
* 교신저자, 인천대학교 기계시스템공학부 (tiseo@incheon.ac.kr)
주소: 139-743 인천시 연수구 송도동 12-1

1. 서 론

휴대폰 넷북 PMP를 비롯한 여러 모바일 IT제품들의 소형화 및 고성능화 되어 감에 따라 그에 따른 외장 형상 또한 다양하고 복잡해지고 있으며 디자인의 심미성을 높이기 위하여 미세 형상 패턴의 사용이 늘어나고 있다. 이러한 미세형상을 가공하기 위한 마이크로 또는 나노 가공기술은 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술로부터 발전하였으며 MEMS가공 기술로는 LIGA, 마이크로·나노 머시닝, ECM, EDM 및 레이저 미세가공 등이 있다.

이중 마이크로 머시닝은 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 경면절삭가공기의 개발을 시초로, 현재는 수 nm의 운동 정밀도를 갖는 초정밀 공작기계가 개발되었고, 서브 nm의 인선반경을 갖는 단결정 다이아몬드 공구의 개발로 각종 특수 반사경, 렌즈, 마이크로 부품 등의 가공에 적용하고 있다. 이러한 마이크로머시닝은 가공의 자유도가 높고 여러 가지 재료의 가공이 가능하므로 미세형상가공에 유리하나, 예치이나 방전 가공에 비하면 가공력이 크며, 고정밀도의 가공기 및 미세공구의 제작이 힘들고 가공된 미세부품의 조립수단이 필요한 결점이 있다. 또한 공구의 초소형화로 인한 공구 강성이 저하로 마모, 파손 우려가 매우 높으며 치수효과, 가공 시 소성, 탄성유동 등에 의해 가공면 조도 문제와 벼발생률이 높아지는 단점이 있으며 가공메커니즘, 공구 및 가공물 절삭력에 의한 공구변형에 의하여 가공 오차 발생이 나타나게 된다.⁽¹⁻³⁾

이 같은 가공오차의 대표적인 요인으로는 단일보(Canti lever) 형상을 지닌 엔드밀이 약한 강성을 가지고 있어 절삭력에 의해 형상이 변형되며 이에 따라 공구의 경로를 변형시키는 가공오차를 들 수 있다.^(3,4) Dow는 직경 Φ1이하의 볼 엔드밀 가공시의 절삭조건과 절삭력의 예측과 측정, 공구변형으로 인한 형상오차분석을 통하여 오차를 최소화 할 수 있는 방법을 제시하였다.⁽⁵⁾ 이는 일반적인 엔드밀에서의 보상방법과 비슷하며 통상적인 엔드밀 보상방법에 적용할 수 있다. 다른 방법으로는 기존 범용 엔드밀의 가공에서 공구변형에 의해 발생하는 가공면 오차를 예측, 측정하여 이에 따른 새로운 공구 경로를 생성하여 오차를 보상하는 연구가 이루어 졌다.⁽⁶⁾ 최근 이용되고 있는 정밀 가공의 방법으로는 가공 중 일어나는 오차 등을 실시간으로 모니터링하고 이를 바탕으로 가공상 보상값을 데이터로 전송하여 정밀한 가공을 구축하는 방법이 연구되고 있다. 그러나 이를 이용할 경우 복잡한 모니터링 장치를 이용하여야 하므로 공작기계 이외의 부

수적인 가공상 비용이 발생하며 생산효율 측면에서 단점으로 지적될 수 있다.⁽⁷⁾ 일반적으로 공구변형에 관한 가공오차를 줄이는 방법으로 이송속도를 줄이는 방법을 선택할 수 있으나 이는 제품의 생산속도의 저하를 가져오기 때문에 공구의 재질, 가공시편의 재질, 가공조건에 따른 가공 특성 변화로 절삭력과 공구의 변형량에 관한 정량적 평가와 이에 따른 가공오차의 보상에 관한 방법의 연구가 진행되었다.⁽⁸⁻¹¹⁾

본 연구에서는 가공오차와 공구의 실질적인 변형에 대한 상관관계를 규명하여 앞으로의 공구변형에 관한 가공오차에 대한 기초적 데이터를 마련하고자 한다. 기존 마이크로 엔드밀의 최적화를 위한 동역학적 해석에 관한 연구가 이루어져 왔다.⁽¹²⁾ 그러나 현재 500μm이하의 엔드밀이 상용화 되어 있기 때문에 학술적인 측면이 아닌 경제적 측면에서 기존의 엔드밀을 이용한 가공에서의 공구 변형을 FEM 해석을 통하여 예측하고 실제 가공되어진 공작물에 나타난 공구변형에 의한 가공오차와의 비교를 통해 이의 내용을 검증하는 실험을 실시하였다.

2. 절삭가공오차 특성화

공구의 변형에 따른 가공오차의 발생은 측면가공의 경우 축방향에 따라 균일하지 않은 양의 가공오차가 분포하게 된다. 이는 공구가 절입되는 깊이에 따라 공구의 회전각에 대하여 절삭력이 변동이 생기고 이로 인하여 공구변형량도 변한다. 또한 절삭면을 만드는 주된 공구날은 헬릭스 각도로 비틀어져 있기 때문에 회전각에 따라 공구변형량과 공구날의 이동에 따라 절삭면을 이루게 된다. 이것은 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차는 축방향에 따라 변하게 되고 가공오차를 감소하기 위한 새로운 공구경로를 결정하는데 어떠한 가공오차를 기준으로 하여야 하는지에 대한 문제를 고려해야한다. 그리고 가공오차의 분포는 비선형 형태(Real Position)로 분포하기 때문에 주어진 설계형상(Ideal Position)과 비교를 위하여 가공오차를 특성화할 필요가 있다. 절삭표면형상을(Ideal Position)과 비교하기 위하여 특성화된 파라미터를 정의 한다. Fig. 1은 파라미터의 기하학적 정의를 보여준다. 첫째로 공구변형량에 의해 발생한 최대오차(E_{max})와 최소오차(E_{min})를 정의한다. 이 파라미터들을 기본으로 오차영역(Error zone)을 정의한다. 이는 표면의 형상과 관계없이 절삭표면전체를 모두 포함하는 최소 폭의 영역을 정의한다. 이 경우 오차영역 폭(W_{err})과 오차영역편차(D_{err})를 정의할 수 있다. 이 두 개의 파라미터들은 식 (1) 과 같이

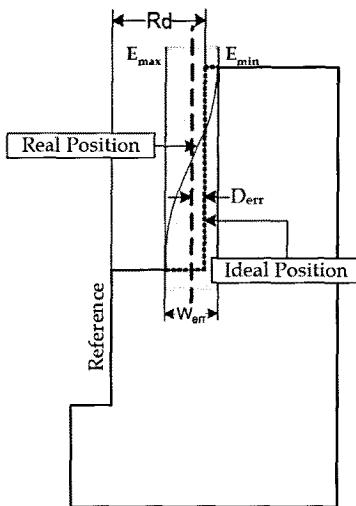


Fig. 1 Characteristic parameter of surface error

계산 할 수 있다.

$$W_{err} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2} \quad D_{err} = E_{min} + \frac{W_{err}}{2} \quad (1)$$

이들은 표면오차의 정량적 분석과 비교를 합리적으로 수행할 수 있도록 한다. 이를 정의된 파라미터들은 실제 절삭 표면에서 측정된 표면오차의 값들을 기반으로 결정된다.⁽⁸⁾

3. 실험방법

3.1 실험방법 및 실험장치 구성

マイクロ 엔드밀링 시 FEM해석에 사용하기 위한 절삭력 측정과 공구변형에 의한 가공오차를 확인하기 위한 연구 방법으로 Fig. 2와 같은 순서에 의하여 진행하였다. 마이크로 가공 실험을 하기 위하여 Fig. 3과 같은 마이크로 머시닝 시스템을 이용하였다. 마이크로 머시닝 시스템은 서브 마이크로 단위의 분해능을 가지고 있기 때문에 수백 마이크로미터에 이르는 절삭 실험 수행을 정확하게 실행할 수 있으며 마이크로 단위의 절삭과 가공정밀도를 위한 100,000 RPM 까지의 회전속도를 가지는 에어 베어링 스플인들을 이용하였으며 그 성능은 Table 1과 같다. 그리고 가공 시 발생하는 절삭력은 미세하기 때문에 범용공구동력계가 아닌 Fig. 4와 같은 마이크로 공구동력계를 이용하여 측정 하였다.

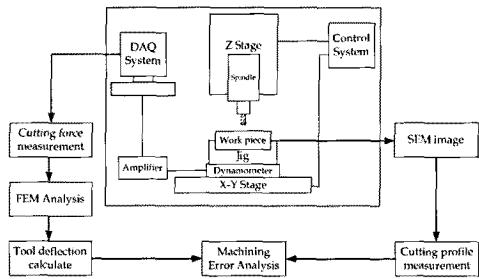


Fig. 2 Schematicizing of research processes

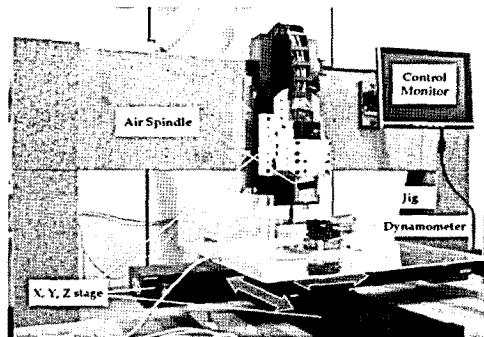


Fig. 3 Micro machining system

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/sec Z-axis : 100mm/sec
Rotational speed	Max. 100,000RPM
Spindle run-out	Max. 0.6μm
Static radial load	Min. 6kgf
Workpiece weight	Max. 45kgf

3.2 가공실험 방법 및 조건

엔드밀의 반경방향의 절입깊이 Rd(Radial depth)값을 실험의 변수로 지정하기 위하여 황동시편에 Fig. 5(a)와 같이 여러 개의 풀을 가공한 후 마이크로 머시닝 시스템에서의 가공 기준을 정하기 위하여 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 기준면은 획득한 Image 상에서 측정

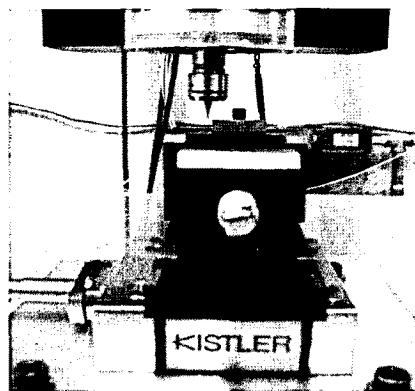


Fig. 4 Micro dynamometer (Kistler 9256C1)

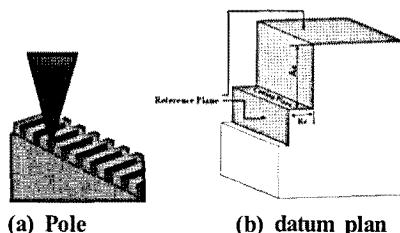


Fig. 5 Pole & datum plan

Table 2 Cutting experiment condition

Micro cutting shape	Side cutting
Feed rate (mm/min)	200
Depth of cut (μm)	0.5
Radial depth (μm)	200, 250
Tool	$\Phi 0.3$ 2 flute Flat End-mill
Workpiece	Brass
Cutting speed	40,000(RPM)
Cutting mode	Down milling

의 원점 역할을 하기 때문에 최대한 공구변형이 발생하지 않는 Feed-rate의 조건으로 가공하였다. 절삭력측정과 가공 오차 측정을 위한 가공조건은 Table 2와 같다.

3.3 마이크로 엔드밀 FEM 해석

마이크로 엔드밀링 시 절삭력에 의한 공구 변형을 알아보기 위해 공구는 YG1사의 2날 평엔드밀을 사용하였으며 형상특성은 Table 3과 같다. 마이크로 엔드밀을 현미경을 통

Table 3 Specification of micro machining system

Tool diameter	300 μm
Flute length	600 μm
End-mill type	Flat type
Flute	2 flutes

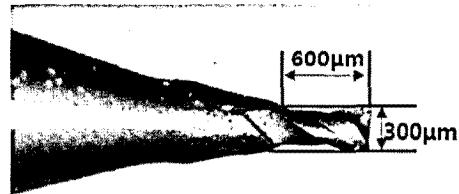
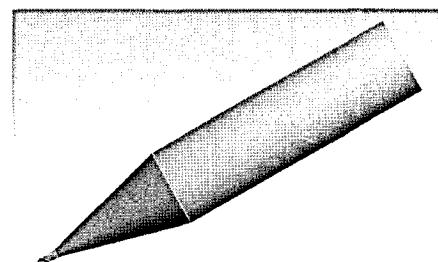
Fig. 6 Micro end-mill($\Phi 0.3$)

Fig. 7 Micro end-mill modeling

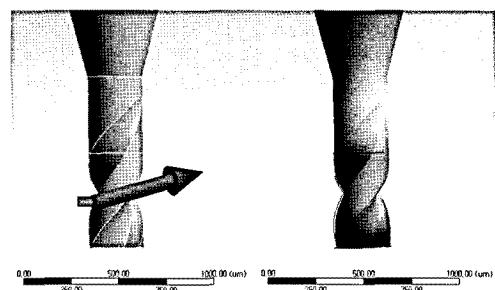


Fig. 8 FEM process of micro end-mill

해 특징 형상을 분석한 후 ANSYS WORKBENCH를 통해 Fig. 7과 같이 설계 하였다.

FEM에 사용된 절삭력은 Fig. 8과 같이 가공실험 시 측정된 절삭력이 최대일 때 가공깊이 만큼의 날부에 적용하는 것으로 가정하여 F_x , F_y , F_z 의 절삭력을 넣어 해석하였다.

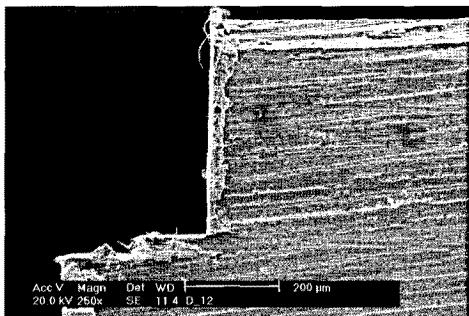


Fig. 9 Side cutting profile

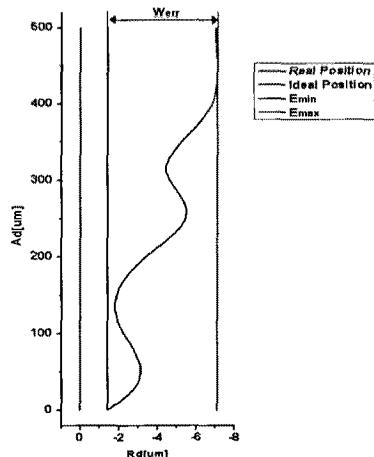


Fig. 10 Machining Error profile

4. 실험결과

4.1 가공형상측정

본 논문에서 제안된 공구변형에 의한 가공오차를 측정하기 위하여 가공된 황동시편을 Fig. 9에 보는 바와 같이 250 배 확대 SEM 촬영을 실행하였고 획득된 Image에서 공구 변형에 의한 가공오차를 특성화하기 위하여 Fig. 10과 같이 그래프화 하여 이상적인 가공위치(Ideal position)와 오차 영역 폭(W_{err})을 계산하였다. 그와 동시에 공구동력계를 이용하여 Fig. 11과 같은 절삭력을 측정하였다.

4.2 가공오차비교

FEM을 이용한 해석 결과와 실제 가공오차를 비교하여 깊이 50 μm 마다 가공오차를 측정하여 Fig. 12에 나타내었다.

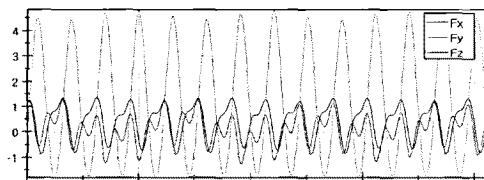


Fig. 11 Cutting force of micro end-milling

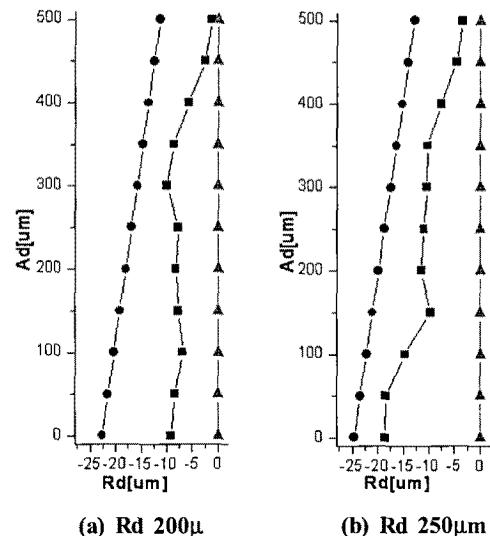


Fig. 12 Comparison between real cutting and FEM analysis profile
 ● FEM Profile ■ Real Profile ▲ Ideal profile

Table 4 Cutting error parameter (Rd 200 μm)

	E_{min}	E_{max}	D_{err}	W_{err}
Real cutting	-1.2	-9.2	-5.2	7.8
FEM analysis	-11.3	-22.7	-17	11.4

Table 5 Cutting error parameter (Rd 250 μm)

	E_{min}	E_{max}	D_{err}	W_{err}
Real cutting	-3.4	-18.6	-11	15.2
FEM analysis	-12.8	-24.6	-18.7	11.8

절삭가공오차를 특성화하여 각각의 조건의 값을 비교한 것이 Table 4와 Table 5이다.

5. 결 론

본 연구에서는 마이크로 평엔드밀링에서의 공구변형을 예측하기 위하여 가공형상 측정 및 분석하였고 FEM을 통한 공구변형량을 예측하여 비교한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

- (1) FEM 해석 결과와 이를 검증하기 위한 마이크로 머시닝을 통한 가공오차 측정 결과를 비교 분석한 결과 실제가 공형상은 가공조건이 $200\mu\text{m}$ 과 $250\mu\text{m}$ 에서의 가공오차 파라미터 값인 E_{\max} , E_{\min} , D_{err} , W_{err} 의 차이가 약 2배로 나타났다.
- (2) FEM해석 결과는 가공조건에 따라 가공오차 파라미터 값들이 많이 차이가 나지 않았으며 프로파일이 선형으로 나타났다. 이는 실제 가공에서 나타나는 여러 변수들을 고려하지 않은 순수하게 절삭력만을 고려한 엔드밀의 변형량을 계산하였기 때문에 FEM 해석 값이 선형으로 나타났다.
- (3) 현미경 측정을 통하여 특징형상을 데이터화 하여 마이크로엔드밀의 모델링을 하였으나 실제 형상과는 약간의 차이를 보였으며, 또한 사용된 절삭력이 최대절삭력을 사용하여 FEM해석결과가 실제 가공형상 보다 더욱 큰 것으로 나타났다.
- (4) 엔드밀의 더욱 정확한 모델링과 최소 침두께를 고려한 회전각도에 따른 절삭력을 적용 시킬 경우 더욱 근접한 공구변형에 의한 가공오차를 계산할 수 있으며 보다 많은 조건을 통하여 데이터를 통하여 가공오차의 예측에 관한 이론적 정립도 가능할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2008년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- (1) Fang, F. Z., Liu, K., Kurfess, T. R., and Lim, G. C., 2006, *MEMS/NEMS Handbook*, Springer Verlag, New York. Vol. 3.
- (2) Lai, X., Li H., Li, C., Lin, Z., and Ni, J., 2008, "Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 1~14.
- (3) Chae, J., Park, S. S., and Freiheit, T., 2006, "Investigation of micro-cutting operations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp. 313~332.
- (4) Donfeld, D., Min, S., and Takeuchi, Y., 2006, "Recent Advances in Mechanical Micromachining," *CIRP Annals*, Vol. 55, pp. 745~768.
- (5) Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts" *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22.
- (6) Cho, M. W., Kim, G. H., Seo, T. I., Hong, Y. C., and Cheng, H. H., 2006, "Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1417~1427.
- (7) Lo, C. C. and Hsiao, C. Y., 1998, "CNC Machine Tool Interpolator with Path Compensation for Repeated Contour Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 55~62.
- (8) Jeon, D. S., Seo, T. I., and Yoon, G. S., 2008, "A Study of Machining Error compensation for Tool Deflection in Side-Cutting Processes using Micro End-mill," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 128~134.
- (9) Jun, M. B. G., Liu, X., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 2006, "Investigation of the Dynamics of Micro end Milling-Part I: Model Development," *Transactions of the ASME*, Vol. 128, pp. 893~900.
- (10) Uhlmann, E., Piltz, S., and Schauer, K., 2005, "Micro milling of sintered tungsten-copper composite materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp. 402~407.
- (11) Filiz, S., Conley, C. M., Wasserman, M. B., and Ozdoganlar, O. B., 2007, "An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1088~1100.
- (12) Uhlmann, E. and Schauer, K., 2005, "Dynamic Load and Strainoadalysis for the Optimization of Micro End Mills," *CIRP Annals*, Vol. 54, Issue 1, pp. 75~78.