

마이크로 엔드밀링시 공구 변형이 가공오차에 미치는 영향에 관한 연구

서태일*, 손종인⁺, 이학용⁺
(논문접수일 2009. 4. 3, 심사완료일 2009. 4. 23)

A Study of Machining Error Due to Tool Deflection in Micro Endmilling

Tae-il Seo*, Jong-in Sohn⁺, Hak-yong Lee⁺

Abstract

Micro end-milling has been becoming an important machining process to manufacture a number of small products such as micro-devices, bio-chips, micro-patterns and so on. Many related researches have given grand effects to micro end-milling phenomenon, for example, micro end-milling mechanism, cutting force modeling and machinability. This paper strongly concerned actual problem, micro tool deflection, which causes excessive machining errors on the workpiece. Machining error were predicted and measured through a series of test micro cutting and analysis of their SEM images and FEM analysis. Experiments are carried out to validate the approaches.

Key Words : Micro End-milling(마이크로 엔드밀링), Tool Deflection(공구변형), Machining Errors(가공오차), FEM(유한요소법)

1. 서론

산업사회가 날로 고도화됨에 따라서 초소형의 정밀 가공품의 생산이 날로 가속화 되고 있다. 초소형 고정밀화 되는 가공 생산품의 기술 개발과 더불어 이를 대량으로 생산하는 기술에 대한 연구도 같이 진행되고 있다. 대량생산을 위하여 기존에 가장 많이 이용되고 있는 방법은 금형을 제작하여 대량으로 제품을 생산하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다.

초소형 고정밀 금형을 제작하는 방법에는 LIGA 등의 방법을 이용한 MEMS 기법이 활발히 연구되고 있다. 그러나 이 같은 방법은 복잡한 제조방법으로 인하여 비용적인 측면에서 그 효율이 매우 낮게 나타나고 있다. 이 방법과 더불어 많이 이용되고 있는 방법은 공구를 이용한 기계적 절삭가공을 통한 제작방법을 들 수 있다. 기존의 절삭 가공에 대한 인프라가 매우 널리 퍼져 있기 때문에 MEMS 기법에 비하여 비용적으로 매우 유리한 측면을 가지고 있다. 공구를 이

* 인천대학교 기계공학과 (tiseo@incheon.ac.kr)
주소: 402-749 인천광역시 남구 인천대길 319(도화동 177)
⁺ 인천대학교 대학원

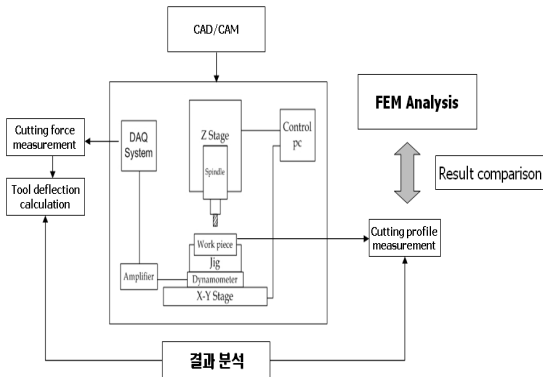


Fig. 1 Schematizing of research processes

용한 기계적 가공은 일반적인 정밀 가공에서 마이크로 정밀 가공까지의 넓은 영역을 모두 소화할 수 있는 장점을 가지고 있으며 이를 위한 공작기계의 제작도 MEMS기법에 비교하여 효율적으로 제작할 수 있다.⁽¹⁾ 마이크로 가공은 500 μm 이하의 공구를 이용한 기계적 가공방법을 의미한다. 이에 따라서 각공 범위 또한 매우 작아지게 된다. 가공 범위가 작아짐에 따라서 범용가공에서는 고려되지 않았던 많은 부분들이 마이크로 가공에서는 크게 부각되고 있다.⁽²⁾ 엔드밀을 이용한 가공에서 Devor는 헬릭스 날과 가공속도, 이송속도에 따라서 절삭저항이 변화한다는 것을 연구하였다.⁽³⁾ 이와 더불어 엔드밀링 가공 동안 절삭력과 칩 두께의 변화에 대한 연구도 기존에 이루어져 왔으며⁽⁴⁾ 엔드밀의 절삭력에 기인한 공구변형과 가공오차의 보상에 관한 연구들이 수행되어 왔다.^(5,6) 기존의 공구변형과 가공오차에 대한 연구는 공구 궤적을 재구성하여 가공 오차에 대하여 보상을 실시하는 연구였다. 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.⁽⁷⁾ 그러나 현재 500 μm 이하의 엔드밀이 상용화 되어 있기 때문에 학술적인 측면이 아닌 경제적 측면에서 기존의 엔드밀을 이용한 가공에서의 공구 변형을 FEM 해석을 통하여 예측하고 실제 마이크로 공작기계를 통하여 가공되어진 공작물에 나타난 공구변형에 의한 가공오차를 통하여 이의 내용을 검증하는 실험을 실시하였다. 전체적인 연구 내용은 Fig. 1과 같은 방법을 통하여 실시하였다.

Table 1 Specification of micro end-mill

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

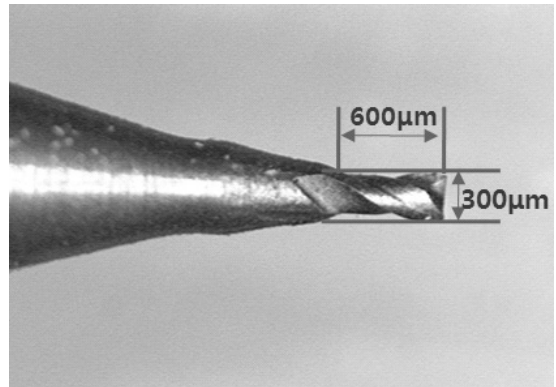


Fig. 2 Micro end-mill

2. 마이크로 엔드밀의 FEM 해석

2.1 마이크로 엔드밀

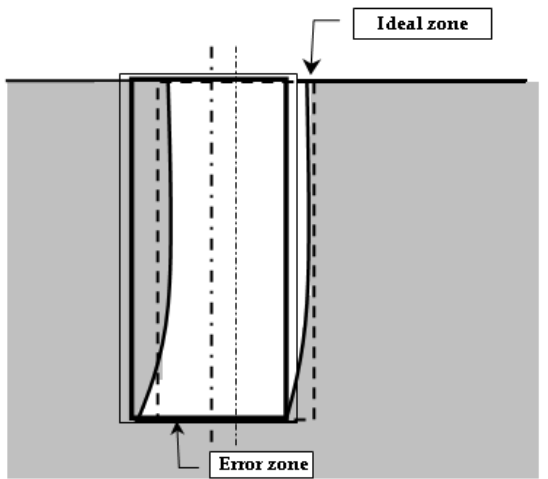
마이크로 엔드밀은 앞서 말한 바와 같이 500 μm 이하의 직경을 갖는 엔드밀의 경우에 사용되는 말이다. 현재 마이크로 엔드밀의 경우 가장 작은 마이크로 엔드밀은 직경 50 μm 의 엔드밀이 상용화 되어 판매되고 있다. 또 마이크로 엔드밀의 직경과 더불어 엔드밀 형상에 따라서 많은 기계적 메커니즘이 발생하게 된다. 본 연구에서는 플랫 타입의 엔드밀을 선정하여 이에 관련된 공구변형과 가공형상 오차에 대하여 연구하였다. 플랫 타입의 엔드밀의 경우 마이크로 채널 형상의 제조에 많이 사용된다. 마이크로 채널은 바이오칩, 연료전지의 분리판 등에 들어가는 미세 패턴으로써 유체를 채널에 흐르도록 하여 이에 나타나는 여러 현상들을 이용하게 된다. 엔드밀의 직경은 $\Phi 0.3\text{mm}$ 을 사용하였다. 엔드밀의 상세제원은 Table 1과 같다. 마이크로 엔드밀의 파라미터는 공구구조사에서 제시되지만 대략적인 부분만 알 수 있으며 자세한 사항에 대해서는 알기가 어려운 단점이 있었다. 이를 해결하기 위하여 비전 시스템을 사용하여 마이크로 엔드밀을 관찰, 측정하였으며 관찰한 엔드밀은 Fig. 2와 같다. 엔드밀의 절삭력에 따른 공구변형에 직접적으로 영향을 미치는 헬릭스 날의 형상과

엔드밀 날의 FEM 해석은 ANSYS Workbench 11을 사용하여 Static 해석을 하였으며 3D 모델은 ANSYS의 디자인 모델러를 이용하였다.

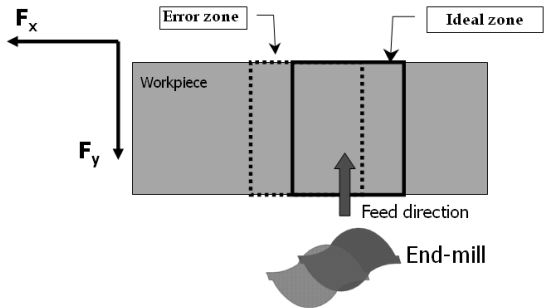
2.2 마이크로 엔드밀의 FEM 해석

마이크로 엔드밀의 공구변형은 우선 엔드밀의 절삭 회전과 이송속도에 따른 절삭력의 변화에 따라서 연속적으로 변화하게 된다. 엔드밀의 절삭력은 아래의 Fig. 3과 같이 F_x , F_y 의 두 절삭력으로 나눌 수 있다. 도식화한 그림은 엔드밀과 공작물과의 절삭을 엔드밀의 상단에서 수평하게 관찰할 경우의 모습이다. 두개의 절삭분력 F_x , F_y 에 의해서 엔드밀의 공구변형이 일어나며 이에 따라서 F_x , F_y 의 방향에 따라서 가공오차

가 발생하게 된다. 그러나 F_y 의 경우에는 이미 엔드밀이 이송 방향과 같은 방향으로 절삭 가공오차가 발생하더라도 이미 가공이 예상된 부분이기 때문에 가공오차가 일어난다 하더라도 크게 영향을 받지 않는 부분이다. 그러나 F_x 의 절삭력에 의하여 예상되는 F_x 방향으로의 가공오차는 계획된 가공영역이 아니며 가공 품질에 영향을 주게 되는 가공 오차가 발생하게 된다. 이에 따라서 FEM해석을 위한 힘의 방향은 X, Y평면에서 한 개의 축 방향으로 고려되는 힘을 적용하였다. 공구의 변형량을 알기 위한 절삭력 값은 기존의 기초 실험을 통하여 얻게 되어진 값을 이용하였다. 절삭력의 최대 피크치를 갖는 값은 약 1.315(N)의 값을 가진다. 이 값을 가질 때의 가공 조건은 다음 절에서 기술하도록 하겠다. 엔드밀의 변형은 날 부분에서 이루어지기 때문에 날 부분의 메쉬(Mesh)의 크기는 $10\mu\text{m}$ 로 하였고 샙크 부분의 메쉬의 크기는 $500\mu\text{m}$ 로 생성하였다. 이에 대한 엘리먼트(Element)는 170868개가 생성되었다. 힘의 방향은 앞서 설명한 바와 같이 절삭력에 따라 생기는 엔드밀의 반력 방향인 F_x 방향으로 주었으며 힘은 엔드밀의 한 포인트에서만 작용하는 것이 아니라 엔드밀의 가공이 일어나는 날 전체에 대하여 분포 하중이 작용됨으로 이에 따라서 힘을 주도록 하였다. 이 내용은 Fig. 4에 나타내었다. 이를 통하여 해석된 결과 엔드밀의 끝 부분에서 최대 변형량 $21.1\mu\text{m}$ 가 발생되는 결과를 얻을 수 있었다. 이에 관한 결과 값은 Fig. 5와 같다.

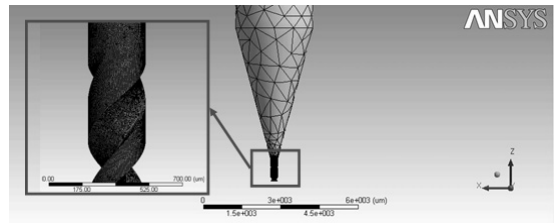


(a) Front side view of machining error due to tool deflection

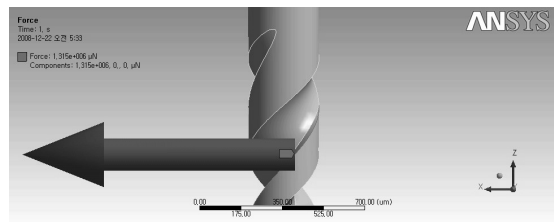


(b) Up side view of machining error due to tool deflection

Fig. 3 Machining error due to tool deflection by different view side



(a) Mesh generation of micro end-mill



(b) Force direction decision of micro end-mill

Fig. 4 FEM process of micro end-mill

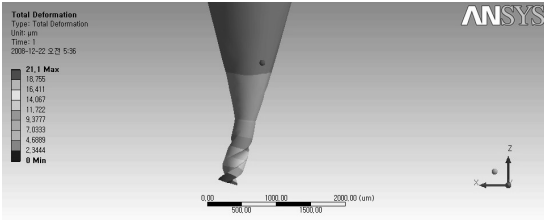


Fig. 5 FEM result of micro end-mill deflection

3. 마이크로 가공 실험

3.1 실험장치

공구의 변형에 대한 FEM 해석결과를 검증하기 위하여 마이크로 가공 실험을 시행하였다. 마이크로 단위의 절삭 실험



Fig. 6 Micro machining system



Fig. 7 Micro dynamometer(KISTLER 9256C1)

을 시행하기 위하여 서브 마이크로 단위의 분해능을 갖춘 스테이지를 이용하여 공작물을 이송하였으며 마이크로 단위의 절삭속도를 갖기 위하여 100,000 RPM까지의 회전속도를 가질 수 있는 에어 베어링 스피ndl을 이용하였다. 이와 더불어 마이크로 단위의 절삭력을 측정할 수 있는 공구 동력계를 사용하여 가공중의 절삭력을 측정하였다. 실험에 사용된 장비의 사진은 Fig. 6, Fig. 7과 같으며 마이크로 절삭 실험에 사용된 마이크로 머시닝 시스템의 사양은 Table 2와 같으며 실험 조건은 Table 3과 같다. 축방향 깊이인 Depth of cut(D. O. C.)의 경우 본 실험과 같이 한번 가공으로 300 μ m를 가공하지는 않는다. 그러나 스텝 없이 한번에 전체 D. O. C.을 가공할 경우 공구변형에 기인한 가공오차의 기초적인 연구를 수립할 수 있다.

3.2 마이크로 엔드밀 가공

마이크로 엔드밀을 이용한 가공은 황동에 300 μ m의 슬롯을 가공하는 형태에서의 공구변형에 관한 연구를 진행하였다. 마이크로 가공 실험에서 본 연구와 같은 슬롯 패턴의 채널을 가공한 이유는 앞서 말한 많은 어플리케이션들이 유체를 흐르게 하는 채널 형상을 가지고 있기 때문에 이와 같은 형상에서

Table 2 Specification of micro machining system

Traveling range	X, Y, Z-axis : 600×600×200(mm)
Resolution	X, Y, Z-axis : 0.1(μ m)
Accuracy	X, Y-axis : 10(μ m) Z-axis : 5(μ m)
Repeatability	X, Y, Z-axis : 0.2(μ m)
Max. velocity	X, Y-axis : 200(mm/sec) Z-axis : 100(mm/sec)
Rotational speed	Max. 100,000(RPM)
Spindle run-out	MAX. 0.6(μ m)
Static radial load	MIN. 6kgf
Workpiece weight	MAX. 45kgf
Lubrication	Dry cutting

Table 3 Cutting condition

RPM	40,000(RPM)
D. O. C	300(μ m)
Feedrate	80(mm/min)
Tool	Φ 0.3(mm), 2-flute flat end-mill
Workpiece	Brass

의 발생하는 문제점에 관한 연구를 진행하기 위해서 이다. Michael⁽⁸⁾의 연구에 의하면 축방향 깊이는 가공면의 조도생성에 큰 영향을 주지 않으므로 공구의 직경과 같은 비율의 축방향 깊이를 선정하였다. 이에 따라서 축방향 깊이를 300/ μm 에서 가공하였으며 이에 대한 이송속도를 80mm/min으로 하였다. 마이크로 엔드밀에 의해서 생성되는 가공오차는 기준면을 중심으로 SEM 이미지를 분석하여 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 절삭력 측정

마이크로 공구동력계를 통하여 측정된 절삭력은 엔드밀이 회전함에 따라서 일정한 사인파를 나타내며 측정되었다. 발생하는 힘의 크기는 전압(Voltage)으로 측정값이 나타나며 2.5N/Voltage의 힘을 나타내고 있다. 측정된 힘을 그래프 형태로 나타낸 것은 다음 Fig. 8과 같다.

4.2 마이크로 엔드밀 가공오차의 측정

300 μm 의 엔드밀을 사용하여 가공한 황동 시편의 가공형상을 살펴보면 플랫 타입의 엔드밀을 사용하였을 경우에도 예상하였던 정확한 가공형태를 보이지 않고 엔드밀의 좌측 부분인 상향 절삭날 쪽으로 가공 오차가 발생한 것을 측정할 수 있다. 엔드밀이 상향 절삭날 쪽으로 공구변형이 일어나면서 가공오차가 발생하는 이유는 절삭이 개시되는 순간에는 상향 절삭 측에서 날끝 절삭날이 제멋대로 파고들어가고, 시간이 경과하는데 따라 절삭 위치가 날끝에서 생크 쪽으로 옮겨감에 따라서 힘량도 감소하게 된다. 이와 같은 현상이 일어남과 동시에 상향 절삭측의 날끝 코너가 절삭을 개시할 때, 홈 전체에 걸쳐서 하향절삭이 진행되고 엔드밀을 크게 상향

절삭측으로 휘게 한다. 이와 같은 현상은 Fig. 9의 SEM 이미지를 분석함으로써 관찰할 수 있다. 이와 같은 이미지 분석을 통하여 날 끝부분부터 생크 부분까지의 아이디얼 존(Ideal zone)과 비교한 가공 오차값은 Fig. 10의 그래프로 나타내었다. 날 끝 부분에서 가장 많은 가공 오차 값을 나타내었다. 이는 공구 형상이 생크 쪽으로 지지되어 있는 단일보 형상에서의 공구 변형으로 생각한다면 쉽게 이해할 수 있는 부분이다. 이때의 가공오차는 앞선 FEM해석 결과와 비교하기 위하여 상향 절삭 부분의 가공오차를 기준으로 나타내었다.

4.3 FEM 해석 결과와 실제 가공 오차의 비교

FEM을 이용한 해석 결과와 실제 가공오차의 최대 변형량은 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 거의 일치함을 볼 수 있다. 그러나 축 방향 깊이에 따른 가공 오차 값에는 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 실제 가공에서 나타나는 여러 변수들을 고려하지 않은 순수하게 절삭력만을 고려하여 엔드밀

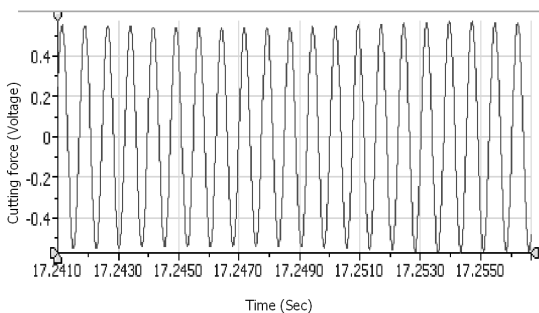


Fig. 8 Cutting force of micro endmilling ($F_x : 2.5\text{N/Voltage}$)

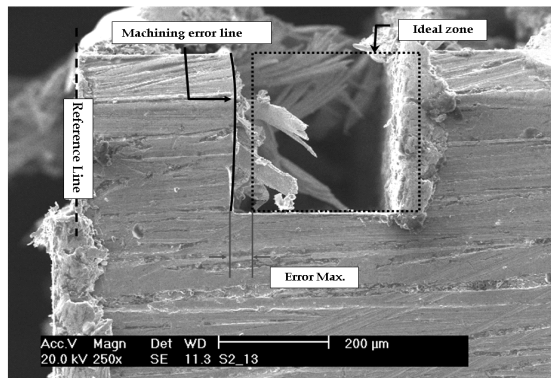


Fig. 9 SEM image of micro machining error

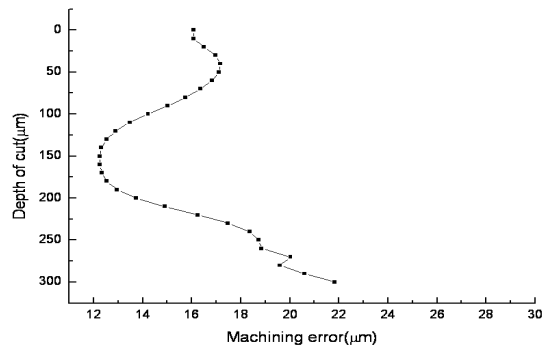


Fig. 10 Machining error according depth of cut

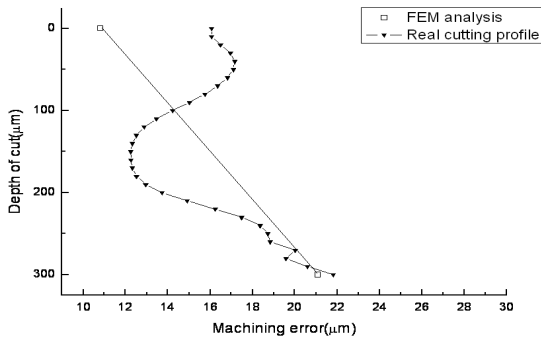


Fig. 11 Machining error between FEM analysis and Real cutting profile according depth of cut

의 변형량을 계산하였기 때문에 나타나는 현상이다. 그러나 최대 변형량이 거의 일치하는 점에서 절삭력에 의하여 일어나는 공구변형이 가공오차에 큰 영향을 끼치게 된다는 것을 검증할 수 있다.

5. 결과 및 고찰

앞서 실행하였던 FEM 해석 결과와 이를 검증하기 위한 마이크로 머시닝을 통한 가공오차 측정 결과를 비교 분석한 결과 최대 변형값은 큰 오차를 보이지 않고 있다. 그러나 FEM 해석 결과가 선형적으로 나온 반면 실제 가공에서는 날 끝부분에서 섹크 부분까지의 가공오차의 변화가 불규칙적으로 생성된 것을 알 수 있다. FEM 해석결과의 경우 이미지를 통하여 획득한 엔드밀 형상에 대해 3D모델 형성이 완벽하게 일치되지 않았기 때문에 실제 가공 시 발생하는 경계조건에 대한 적용이 정확하게 수립되지 않은 것으로 분석 된다. 추후 보다 정교한 마이크로 엔드밀의 3D모델 형성을 통하여 이를 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 앞서 기술한 불규칙적인 가공오차 형성을 고찰하여 볼 때 엔드밀의 변형이 단순히 일정하게 발생 되는 것이 아니라 가공 시 발생하는 다양한 변수에 영향을 받는 것으로 판단된다. 이 같은 변수로는 가공 중 버(Burr)의 생성, 칩 두께의 변화에 따른 절삭력의 변화, 이송 스테이지와의 진동문제, 가공 스핀들과 공구간의 진동 문제 등 여러 가지 요인으로 분석, 토론되었다. 이러한 가공 변수들은 절삭력에 의한 공구 변형에 비하여 큰 영향을 주지는 않지만 마이크로 머시닝의 가공영역이 매우 작고 이에 대한 공차범위 또한 작을 수밖에 없는 특성상 간과할 수 없는 부분이다. 앞으로 공구변형에 의한 가공오차와 더불어 다양한 가공오차들의 검증을 통하여 CAD/CAM에서 고려되지

못한 실제 가공오차의 원인을 분석하고 이를 해결해 나갈 수 있는 연구를 수행하도록 할 것이며, 본 연구를 확장시켜 이송 방향에 따른 공구의 변형과 가공 오차의 발생에 관한 해석과 검증에 관해서도 심도 있는 연구를 진행해 나갈 예정이다.

후 기

본 연구는 인천대학교 2007년도 자체연구비에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Donfeld, D., Min, S., and Takeuchi, Y., 2006, "Recent Advances in Mechanical Micromachining," *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 2, pp. 745~768.
- (2) Chae, J., Park, S. S., and Freiheit, T., 2006, "Investigation of micro-cutting operation," *Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 313~332.
- (3) Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, J. R., 1982, "The prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22.
- (4) Sabberwal, A. J. P., 1961, "Chip Section and Cutting force during the Milling Operation," *Annals of CIRP*, 10(3), pp. 197~203.
- (5) Hascoët J. Y., Dépiné P., and Seo T. I., 1998, "A Study on the Compensation of Milling Errors by Regenerating of Tool Trajectory," *Journal of the Korean society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 137~144.
- (6) Seo, T. I. and Cho, M. W., 2000, "Study of Machined Surface Error Compensation for Autonomous Manufacturing," *Journal of the Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 4, pp. 75~84.
- (7) Uhlmann, E. and Schauer, K., 2005, "Dynamic Load and Strain Analysis for the Optimization of Micro End Mills," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, Issue 1, pp. 75~78.
- (8) Michael P. Vogler, Richard, E. Devor and Shiv, G. Kappor, 2004, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling Part I: Surface Generation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, pp. 685~694.