

미세 엔드밀에 의한 마이크로 샤프트 가공기술 연구

제태진, 이응숙 (한국기계연구원), 이종찬, 최환 (금오공대)

Study on Micro Machining for Micro Shafts using micro endmill

T.J. Je, E.S. Lee (KIMM),
J.C. Lee, and H. Choi (Kumoh National University of Technology)

ABSTRACT

In these day, fabrication technologies for micro parts become more important with the increase of interest on microsystem and developed through the various approaches in the whole world. Among these technologies; micro mechanical machining is one of the most effective methods for the fabrication of micro parts.

In this study, we fabricated micro shafts using micro endmill and micromachining system and measured the cutting force at the process. Also, Based on the data, we simulated the deformation of micro shafts due to the cutting force. Through the simulation results, it was verified that the cutting force at the process is enough to cause dimensional error at the micro shafts.

Key Words : Micromachining system (미세기계가공기), Micro endmill (미세 엔드밀), Micro shaft (마이크로 샤프트), Cutting force (절삭력)

1. 서 론

최근 마이크로 센서, 마이크로 모터, lab-on-a-chip 등 미소 소자에 대한 관심이 급증함에 따라 다양한 미세구조물을 효과적으로 형성하기 위한 방법에 대한 연구가 미국, 일본 등 기술선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 미세구조물을 제작하기 위한 방법으로는 미세기계가공, 반도체 공정 기술을 적용하는 방법, 레이저가공, LIGA, 미세기계가공 등이 가장 많이 연구, 개발되고 있다. 이중에서도 미세기계가공은 일반 기계가공 기술을 기반으로 하고 있기 때문에 가장 단순하고 안정된 방법이며, 재료와 다양한 가공환경에 대해서 많은 자료가 구축되어 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 가공표면이 우수하지 못하며 수 μm 이하의 형상을 가지는 구조물의 제작이 용이하지 않다. 이러한 미세기계가공은 현재 회절격자, 홀로그래프 렌즈, PDP, LCD 도광판 등의 미세 격벽 형성에 널리 적용되고 있는 실정이다.

Lee 등은 다양한 미소부품 제작을 위한 가공법들 중에서 미세기계가공의 위치를 비교, 분석하였으며¹, Yamagata 등은 미세기계가공을 이용하여 미소 광부품을 제작하였다². 또한, Bao 등은 미세기계가공의

수학적 모델링을 시도하였다³. 국내에서도 다양한 실험적 접근이 활발하게 이루어지고 있다⁴⁻⁸.

이번 연구에서는 미세기계가공의 미세구조물 가공에 있어서 문제점과 그 한계를 제시하고 이를 극복하기 위한 방안을 제시하기 위해 기본적인 미세구조물 중 하나인 마이크로 샤프트(micro shaft)에 대한 가공실험을 수행하였다. 또한 가공결과를 바탕으로 마이크로 샤프트의 변형량을 계산하여 가공시 가공 오차를 유발시킬 수 있는 충분한 변형량이 마이크로 샤프트에 발생함을 확인하였다.

2. 마이크로 샤프트 가공실험

2.1 가공실험

마이크로 샤프트의 가공특성을 분석하기 위해 높이 300, 500 μm , 직경 500, 300, 100, 50 μm 의 마이크로 샤프트를 가공하였다. 공구는 직경 100 μm 평면엔드밀을 이용하였으며 시편은 황동으로 제작하였다. Fig. 1은 가공실험에 사용된 미세기계가공시스템을 나타내고 있으며 Fig. 2는 마이크로 샤프트의 가공에 대한 개략도를 나타내고 있다. 또한, 가공실험에 사용된 절삭조건은 table 1에 정리하였다.

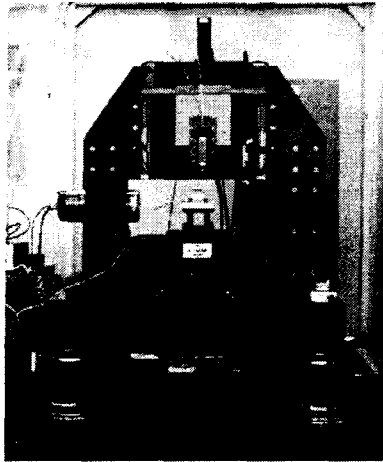


Fig. 1 Micromachining system

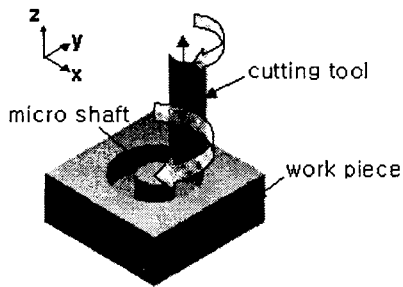


Fig. 2 Schematic of process for micro shafts

2.2 가공결과

Fig. 3은 미세가공시스템을 이용하여 가공된 마이크로 샤프트를 나타내고 있다. 위의 가공결과로부터

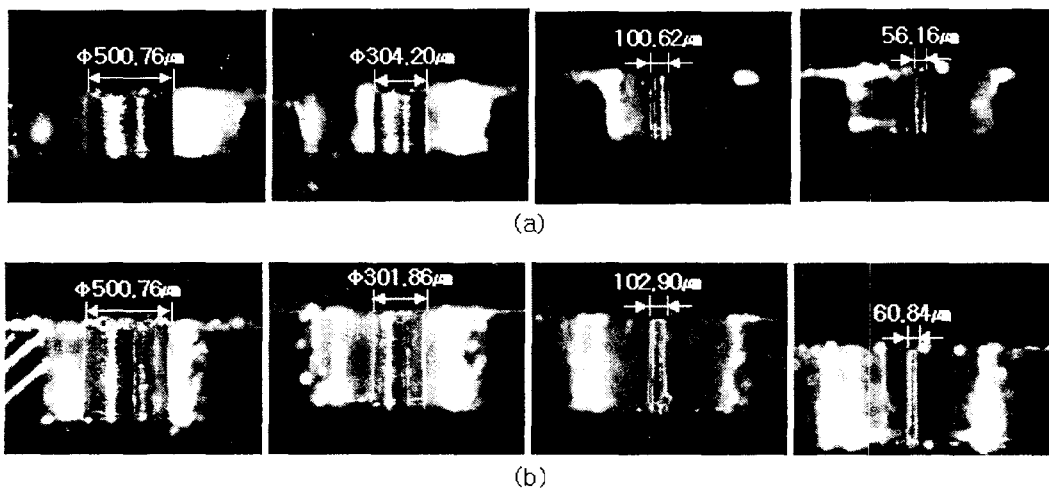


Fig. 3 Micro shafts made by micromachining system: (a) $h=300\mu\text{m}$, (b) $h=500\mu\text{m}$

Table 1 Cutting conditions

Cutting tool	$\phi 200\ \mu\text{m}$ flat endmill
Spindle speed	40,000 rpm
Feed rate	100 mm/min
plunge feed in the z-direction	50 mm/min
Work piece	brass
Cutting oil	kerosene

터 제작된 마이크로 샤프트의 높이가 큰 경우, 즉, 높이가 $300\ \mu\text{m}$ 인 경우보다 $500\ \mu\text{m}$ 인 경우 설정치인 직경값보다 조금씩 더 큰 값을 가지는 경향을 보였고 이는 직경이 작아질수록 그 경향이 더욱 강하게 나타나고 있음이 관찰되었다. 특히, 높이 $500\ \mu\text{m}$, 직경 $50\ \mu\text{m}$ 의 마이크로 샤프트의 경우 최종 직경이 $60.84\ \mu\text{m}$ 로 가공되었다. 이는 마이크로 샤프트의 높이가 커지고 직경이 작아짐에 따라 가공시 발생하는 절삭력에 의한 가공중의 마이크로 샤프트의 변형량이 증가한 결과로 판단된다. 이를 확인하기 위해 마이크로 샤프트 가공시 발생하는 절삭력 측정 실험을 수행하였다.

3. 절삭력 측정실험

절삭력 측정실험은 공구의 가공깊이와 절입양의 절삭력에 대한 영향을 알아보기 위해 공구의 가공깊이와 절입양이 다양한 값을 가지는 조건아래에서 실험을 수행하였다. 먼저, 높이 $500\ \mu\text{m}$, 직경 $500\ \mu\text{m}$ 의 마이크로 샤프트를 가공한 후 공구의 가공깊이는 $100, 300, 500\ \mu\text{m}$, 절입양은 $1, 2, 3, 5, 10\ \mu\text{m}$ 으로 각

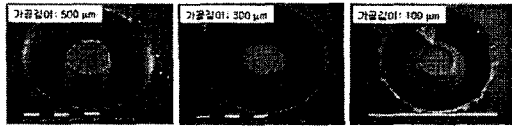


Fig. 4 Micro shafts for measurement of cutting force

각 설정하고 마이크로 샤프트의 최종 직경이 300 μm 때까지 절삭력을 반복 측정하였다. 4는 절삭력 측정이 완료된 이후의 가공깊이에 따른 가공모습을 나타내고 있다. Fig. 5, 6, 7은 공구의 가공깊이와 절입량에 따른 마이크로 샤프트 가공시 절삭력 측정결과를 나타내고 있다.

측정 결과를 살펴보면 마이크로 샤프트 가공시 발생하는 절삭력은 가공깊이보다 절입량에 더 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 가공깊이가 다르더라도 절입량이 같으면 측정되는 절삭력은 비슷한 값을 가지는 것으로 측정되었다. 이는 가공시 공구의 가공깊이가 크더라도 절입량을 제어함으로써 가공시 발생하는 절삭력을 낮게 해줄 수 있음을 의미한다.

또한, 마이크로 샤프트 가공시 원주방향으로 작용하는 힘의 크기가 R로 일정하다고 가정하면 Fig. 8에서 알 수 있듯이 그 힘의 x방향과 y방향 성분인

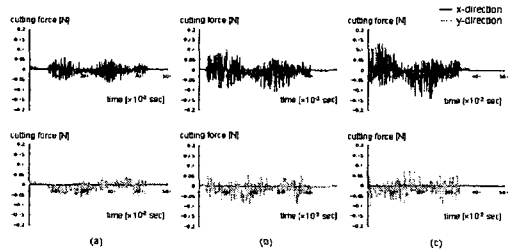


Fig. 5 Cutting force in case of 가공깊이 100 μm: (a) depth of cut 1 μm, (b) depth of cut 5 μm, (c) depth of cut 10 μm

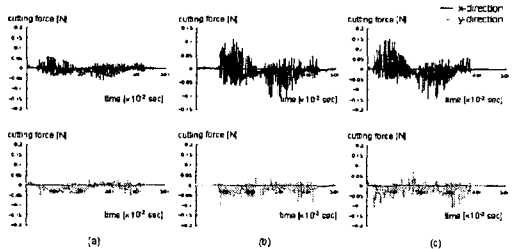


Fig. 6 Cutting force in case of 가공깊이 300 μm: (a) depth of cut 1 μm, (b) depth of cut 5 μm, (c) depth of cut 10 μm

R_x 와 R_y 는 θ 의 변화에 따라 삼각함수의 궤적을 그

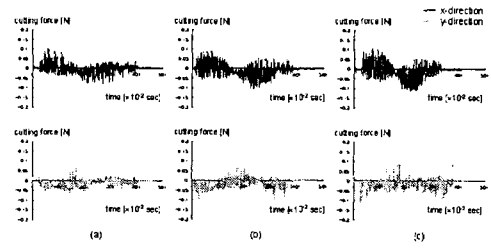


Fig. 7 Cutting force in case of 가공깊이 500 μm: (a) depth of cut 1 μm, (b) depth of cut 5 μm, (c) depth of cut 10 μm

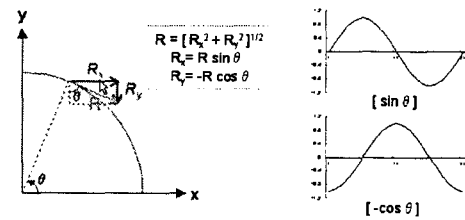


Fig. 8 Analysis of cutting force for processing

리게 된다. 가공실험시 측정된 절삭력의 형태를 살펴보면 삼각함수의 형태를 따르고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 가공깊이 500 μm에서 뚜렷하게 나타났다.

4. ANSYS를 이용한 마이크로 샤프트의 변형 시뮬레이션

가공시 마이크로 샤프트에 발생하는 변형량을 예측하기 위해 절삭력 측정 실험에서 측정된 결과를 바탕으로 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9는 이번 시뮬레이션에 이용된 모델과 하중조건을 보여주고 있다. 이전 실험에서 공구의 가공깊이가 500 μm인 경우 절입량에 크게 관계없이 약 0.1 N의 절삭력이 발생하

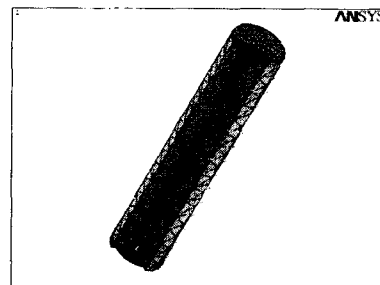


Fig. 9 Model for simulation of micro shafts

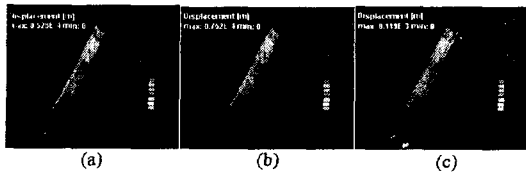


Fig. 11 Deflection of micro pole with respect to depth of cut: (a) depth of cut 1 μm , (b) depth of cut 5 μm , (c) depth of cut 10 μm

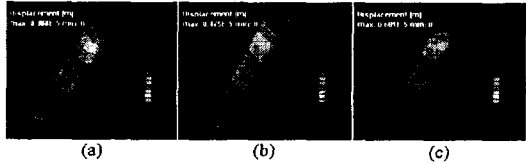


Fig. 10 Deflection of micro pole with respect to advance of endmill: (a) 1/4 revolution, (b) 2/4 revolution, (c) 3/4 revolution

는 것으로 측정되었기 때문에 이 하중이 가공표면의 축방향 중심선에 고르게 분포하는 것으로 가정하였다. 그리고 문제의 단순화를 위해 마이크로 샤프트의 가공면에 걸리는 하중은 정하중으로 설정하였다.

Fig. 10은 가공이 진행중일 때, 즉 엔드밀이 마이크로 샤프트의 원주를 한바퀴 도는 동안의 변형량변화를 계산한 것이다. 엔드밀이 원주 방향으로 진행함에 따라 변형량은 증가하는 경향을 보였고 그 최대값은 대략 4에서 6 μm 으로 나타났다.

Fig. 11은 직경 50 μm 의 마이크로 샤프트 가공시 절입량의 변화에 따른 마이크로 샤프트의 변형량을 예측한 것이다. 절입량을 1, 5, 10 μm 으로 준 경우 최대 변형량이 각각 52.8, 75.2, 119 μm 으로 계산되었다. 이는 가공시 마이크로 샤프트의 상단부에서 상당히 큰 변형이 발생한다는 사실을 알 수 있으며 절입량의 증가에 따라 변형량도 증가함을 알 수 있다. 또한, Fig. 8과 비교해보면 직경이 작아짐에 따라 변형량도 증가했음을 확인할 수 있다. 결과적으로 이러한 변형량의 증가로 인해 특히, 가공깊이 500 μm , 직경 50 μm 의 마이크로 샤프트를 가공했을 경우, 가공오차가 크게 발생할 것임을 예측할 수 있다.

5. 결론

이번에 수행한 마이크로 샤프트 가공실험에서는 미세가공시스템을 이용한 가공시 미세 구조물에 걸리는 절삭력을 측정하고 그에따른 구조물의 변형량을 계산함으로써 초정밀 미세 구조물 가공에 있어서 발생하는 가공오차의 원인을 규명하고 그 가공능력의 한계를 파악하고자 하였다. 그 결과 미세가공시 발생하는 절삭력만으로도 미세구조물에 가공오차를

발생시킬만큼 충분히 큰 변형량이 발생한다는 사실을 확인할 수 있었다. 이에 초정밀 가공을 위해 다양한 조건하에서 계산된 변형량과 가공오차와의 관계를 규명하기 위한 추가실험 및 연구의 진행이 요구된다.

후기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부 과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. L. James Lee, Marc J. Madou, Kurt W. Koelling, Sylvia Daunert, Siyi Lai, Chee Guan Koh, Yi-Je Juang, Yumin Lu, and Liyong Yu, "Design and Fabrication of CD-like Microfluidic Platforms for Diagnostics: Polymer-Based Microfabrication", *Biomedical Microdevices*, Vol. 3, pp. 339-351, 2001.
2. Yutaka Yamagata, and Shin-ya Morita, "Fabrication of blazed holographic optical element by ultrahigh-precision cutting", *RIKEN Review*, No. 34, pp. 6-8, 2001.
3. W. Y. Bao and I. N. Tansel, "Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model", *International Journal of Micro Tools and Manufacture*, Vol. 40, pp. 2155-2173, 2000.
4. 이응숙, 신영재, 강재훈, 제태진, 이재경, 이현용, "미세금형 제작을 위한 가공기술개발", 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp. 1047-1050, 2000.
5. 제태진, 이응숙, 이재경, "초정밀 절삭 가공기술 현황", 금형저널, pp. 170-185, 2000.5.
6. 제태진, 이응숙, 최두선, 이선우, "기계적 미세 가공 시스템 구성 및 응용 연구", 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp. 934-937, 2001.
7. 이선우, 이동주, 이응숙, 제태진, "미세가공 시스템을 이용한 미세 그루브 가공실험", 한국공작기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp. 263-280, 2001.
8. 민승기, 이동주, 이응숙, 강재훈, 김동우, "마이크로 드릴링 M/C에 의한 미세구멍가공 특성에 관한 연구", 한국공작기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp. 275-280, 2001.