

마이크로 앤드밀의 가공특성분석 및 응용가공 연구

제태진*, 이응숙, 최두선(한국기계연구원), 홍성민(한밭대), 이종찬, 최 환(금오공대)

Micro End-Mill Machining Characters and its Applications

T. J. Je, E. S. Lee, D. S. Choi(KIMM), S. M. Hong(Hanbat Univ.), J. C. Lee, H. Choi (KNUT)

ABSTRACT

In the machining process of micro shape by using high-precision machining system and micro end-mill, it is important for machining characters of tools to be grasped in order to stably use tools of micro end-mill. In this study, we carried out an analytical experiment of basic machining features by using end-mill tools for the purpose of damage prevention and manufacture of high quality when the tools of micro end-mill are used. This experiment used a micro machining system with high precision and a variety of end-mill tools commercialized from tens to hundreds microns in diameter.

To establish an optimal machining condition without tool damage, cutting force was analyzed according to the changes of tool diameter and cutting conditions such as cutting speed, feed rate, depth of cut. And an examination was performed for the shape and surface illumination of machining surface according to the changes of machining conditions. Based on these micro machining conditions, micro square pillar, cylinder shaft, thin wall with high aspect ratio, and micro 3-D structures such as micro gear and fan were manufactured.

Key Words : Micro end-mill(마이크로 앤드밀), Machining system and process(가공장치 및 공정), Machining conditions(가공조건), Cutting force(절삭력), Micro structure and parts(미소 구조물 및 부품)

1. 서론

대부분의 마이크로 부품 제조방법은 photolithography 나 에칭기술을 베이스로 한 반도체(LSI)기술, MEMS 기술등에 크게 의존하고 있다. 그러나 이 기술들은 3 차원 구조체 제조에는 적용이 어려운 부분이 많아 이후 LIGA 프로세스, 광조형, 방전가공 등과 같이 새로운 가공방법들이 개발되고 있다.

종래부터 3 차원 구조체의 제작은 절연삭을 기본으로 하는 기계적 가공방법이 광범위하고 유용하게 사용되었지만 최근에 요구되는 미소사이즈의 형상부품을 가공하기에는 많은 문제가 있었다. 이러한 기계가공의 문제점 극복을 위한 노력 결과 나노 메타 정밀도의 다축 고기능 초정밀가공기와 수십 μm 사이즈의 미세형상공구, CAD/CAM 및 NC/CNC 에 의한 가공공정기술의 발달 등 초정밀 미세기계 가공을 위한 기반기술이 급속히 발달하게 되었고, 이를 토대로 한 미소부품 및 마이크로 구조체의 개발이 매우 활발하게 전개되고 있다. [1][2][3][4][5]

본 연구에서는 이러한 기계적 미세 가공기술개발의 일환으로 미세 앤드밀 공구를 이용한 마이크로 부품 가공기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 나노 오더의 정밀도를 갖는 고기능 초정밀 미세가공시스템을 개발하였고, 직경 수백에서 수십 마이크로 사이즈의 다양한 앤드밀 공구가 사용되었다.

미세가공시스템과 마이크로 앤드밀의 효율적 활용을 위해서는 공구파손이 일어나지 않는 최적가공조건을 찾기 위한 기초적 특성분석실험이 필요하다. 본 연구에서는 주로 공구사이즈와 가공조건에 따른 절삭력 분석실험이 수행되었고, 다양한 가공조건에 따른 절삭력의 변화 및 가공표면형상에 대한 조사가 이루어졌다.

2. 미세가공시스템 및 미세 앤드밀 공구

2.1 미세가공시스템

Fig. 1 에 본 연구에 사용된 초정밀 미세 가공시스템 모습을 나타내었다. 시스템의 주요 구성은 X-

Y-Z의 3축으로 이루어지며 별도의 터닝(turning) 축이 붙어 있어 선삭 외에 플라이 커팅에 의한 미세가공을 수행할 수 있다. 각 축은 최고 2nm의 초정밀 제어가 가능하다. Z축은 엔드밀, 드릴과 같이 회전스핀들에 공구를 장착하여 가공하는 방식 외에 단인 공구를 고정 치구로 장착하여 셰이핑(shaping)가공이 가능하도록 구성되어 있다. 이에 따라 다양한 미세 형상의 초정밀 가공이 가능하다.

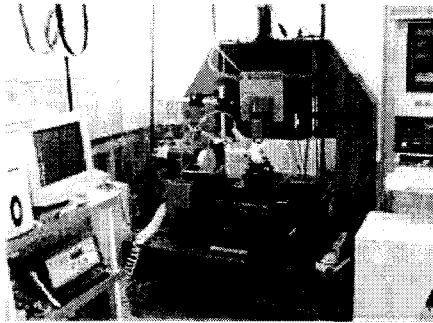


Fig. 1 Micro machining system

시스템의 제어는 PC 기반의 32축 제어형인 Turbo PMAC board를 사용하였고, 3차원 형상의 초소형부품 제작을 위하여 CAD/CAM 기능이 지원되는 PMAC-NC Software를 설치하여 CAM 프로그램으로 생성된 NC data(G code)를 직접 받아 가공할 수 있도록 하였다. Z축은 최대회전수 70,000rpm의 고속스핀들이 장착되어 있고, 공작물 밑에는 0.002N의 미세 절삭력을 측정할 수 있는 공구동력계(Kistler, MiniDyn 9256A2)를 설치하였고, 그 밑에는 공작물의 수평과 회전을 위한 스테이지가 설치되어 있다. 또한 가공물의 미세 치수 확인 및 보정가공을 위한 현미경 측정장치가 부착되어 있다.

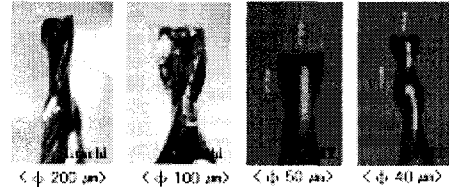
2.2 미세 앤드밀 공구

마이크로 앤드밀 공구는 최근 직경 수십 μm 수준까지 안정적으로 생산하여 공급하는 단계에 있다. 본 연구에서는 주로 직경 200~100 μm 급의 공구가 많이 적용되었고, 최저 직경 40 μm 공구를 이용하여 실험하였다.

Fig. 2 및 Fig. 3에는 본 연구에서 주로 사용하는 평 앤드밀(flat end-mill) 및 볼앤드밀(ball end-mill) 공구들의 끝단 형상과 공구들의 직경, 홈 부의 길이(flute length) 및 본 연구의 가공실험에서 자주 적용되는 개략적인 가공 조건들을 나타내었다.

마이크로 앤드밀 공구의 형상 특징은 크게 3가지 형식이 많이 사용되고 있는데 홈부 형상이 곡선이며 길이가 짧은 것, 홈부의 길이가 다소 긴 것이 주로 사용되고 있고, 직선 날 형태로 만들어진 공구도 종종 사용된다. 전체 형상으로는 범용 공구와 별다른 차이가 없고 메이커에 따라 다소의 차이가

있으며, 직경에 비해 날장이 짧은 특징을 가지고 있다. 공구의 제조방법은 기계적인 압출과 연삭에 의한 것이 대부분 상용화되어 있고, 방전가공 및 전자빔 등의 특수가공을 이용하여 제작하기도 한다.



Diameter (μm)	Flute length (μm)	Used revolution (rpm)	Cutting speed (m/min)	Feed Rate (mm/min)
$\varnothing 200$	400	30,000~60,000	18.8~37.8	80~120
$\varnothing 100$	200	30,000~60,000	9.4~18.8	60~80
$\varnothing 50$	150	40,000~60,000	4.7~9.42	20~80
$\varnothing 40$	80	40,000~60,000	3.8~7.5	10~40

Fig. 2 Micro flat end-mill tool



Diameter (μm)	Flute Length (mm)	Used revolution (rpm)	Cutting speed (m/min)	Feed Rate (mm/min)
R150	0.6	30,000~60,000	28.3~56.5	40~150
R100	0.4	30,000~60,000	18.8~37.8	40~120
R50	0.15	30,000~60,000	9.4~18.8	40~100

Fig. 3 Micro ball end-mill tool

3. 미세 앤드밀 공구의 가공특성 분석

3.1 공구 직경에 따른 절삭력

공구직경에 따른 절삭력을 비교하였다. 사용된 공구는 직경 50 μm , 100 μm , 1mm, 5mm의 4종이고, 공구회전수 40,000rpm, 이송속도 60mm/min, 절입 20 μm 을 적용하였다.

Fig. 4에서 보는 것과 같이 직경 1mm 이하 공구의 절삭력은 모두 0.1N 이하로 나타나며, 50 μm 공구의 경우는 실험에서 0.05N 이하의 절삭력을 보였다. 그러나 실제로는 이러한 미세 공구들의 절삭력을 구분하기는 매우 힘들었다. 이것은 향후 더욱 미세한 절삭력 측정방법이 개발되어야 정확한 실험과 해석이 가능한 부분이었다.

실험비교를 위하여 직경 5mm 공구를 사용한 실험결과가 함께 기록되어 있다. 5mm 공구 가공에서는 동일조건에서 주절삭력은 0.1N으로 비슷한 수준에 있었으나 Z 방향의 분력이 2.5N까지 급격히 상승하였다. 이는 고속가공의 효과로 절삭력은 큰 차이가 없으나 대형공구의 고속회전에 따른 체터와 노이즈의 영향이 컸던 것으로 추측된다.

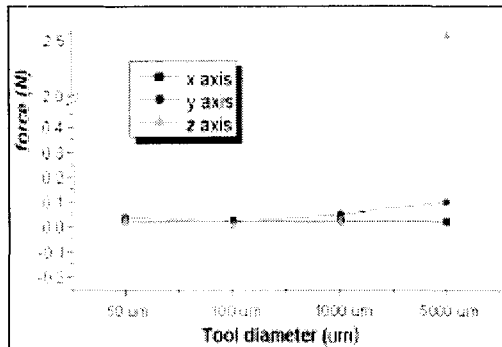


Fig. 4 Comparison of cutting forces with tool diameters

3.2 이송속도 및 절입에 따른 절삭력

Fig. 5 는 직경 50 μm 공구를 사용하여 회전수 40,000rpm, 절입 10 μm 과 20 μm의 가공조건에서 이송속도를 변화시켰을 때의 절삭력을 나타내었다. 이송속도가 빨라지고 절입이 클 수록 절삭력이 증가 함을 알 수 있다. 20mm/min 의 이송속도에서는 절삭력이 0.01~0.1N 정도로 극히 미세하였다.

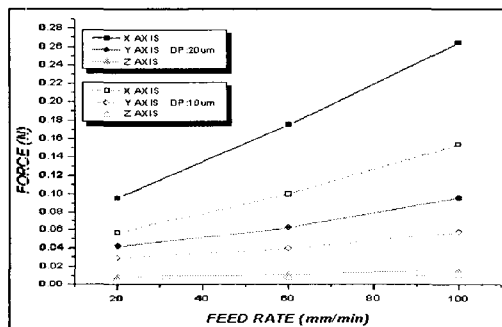


Fig.5 Comparison of cutting forces with cutting conditions

3.3 표면형상 및 표면조도

Fig. 6 은 회전수 25,000rpm, 절입 10 μm의 가공 조건에서 직경 50 μm 앤드밀 공구의 이송속도를 20mm/min 에서 100mm/min 으로 바꾸어 가며 가공한 결과로서, 이송속도의 증가에 따라 상면 버(burr)가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이 결과에서 이송속도가 가공표면 뿐만 아니라 공구 파손에도 큰 영향을 줄 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 7 에는 이 조건으로 가공한 가공면의 표면조도를 나타내었다. 이송속도가 낮을수록 양호한 표면조도를 보였으며, 50nmRa 수준의 준 경면상태로 가공되었다.



Fig. 6 Micro burr on the machined surface edge

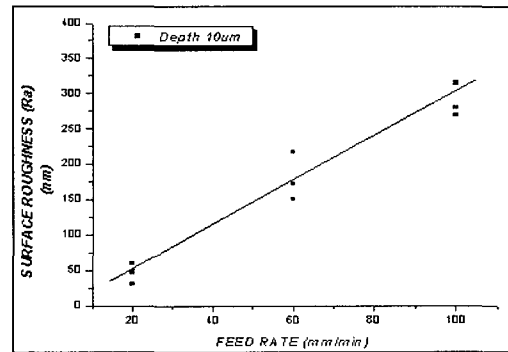


Fig. 7 Surface roughness using by ø 50 μm tool

Fig. 8은 직경 50 μm 공구와 직경 100 μm 공구를 사용하여 회전수 40,000rpm, 절입 20 μm, 이송속도 60mm/min 의 가공조건으로 가공한 표면의 상태를 나타내었다. 표면에는 앤드밀의 피드마크가 선명하게 나타나 있고, 표면 거칠기에서 큰 차이는 없으나 미세 공구가 될수록 불안정한 표면을 보였다.

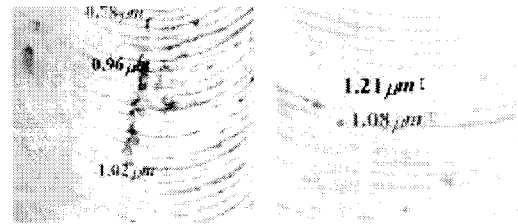


Fig. 8 Machined surfaces by ø 50 μm and ø 100 μm micro end-mill tools

4. 마이크로 앤드밀 응용 가공 예

4.1 고 중형비 샤프트 가공

Fig. 9 는 직경 50 μm, 직경 30 μm, 직경 20 μm의 원주 샤프트를 높이 700 μm 으로 가공한 것이다. 이들의 가공에는 직경 300 μm의 flat endmill 이 사용되었고, 공구회전수 60,000rpm, 원주방향 이송속도 60mm/min, 1회 절입 깊이는 5 μm 의 가공조건이 적용되었다.

Fig. 10 은 동-텅스텐(Cu-W) 분말소결합금 소재를 이용하여 40x200 μm의 사각 각주를 높이 400 μm으로 가공한 결과이다. 가공한 각주는 마이크로 방전가공용 전극으로 사용되었다



(a)ø50μm,H700μm (b)ø30μm,H700μm (c)ø20μm,H700μm

Fig. 9 Machined micro circle shafts

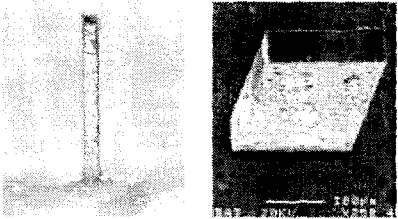


Fig. 10 Machined micro square-pole structure

4.2 복합 형상 가공

Fig. 11 에 마이크로 앤드밀에 의한 미소 기어의 가공 방법 및 가공결과를 나타내었다. 기어는 잇수 9 개, 외경 500 μm , 두께 100 μm 의 치수를 가지고 있고, 중심부에는 샤프트와의 조립을 위해 직경 100 μm 의 구멍이 가공되어 있다. 공작물 소재는 황동이며, 가공 공구는 직경 40 μm 의 flat 앤드밀이 사용되었고 가공조건으로는 앤드밀 회전수 50,000rpm, 공구 이송속도 22mm/min, 1회 절입 깊이가 10 μm 이 적용되었다.

그림에서 보는 것과 같이 가공 형상 및 표면 조사에서 상면 방향으로 미세한 버가 발생하는 경향이 있으나 전체적으로 가공 표면 및 형상이 매우 양호함을 알 수 있다. 따라서 앤드밀 가공으로도 수백 마이크로 사이즈의 미소 기어를 효율적으로 가공할 수 있음을 확인할 수 있다.

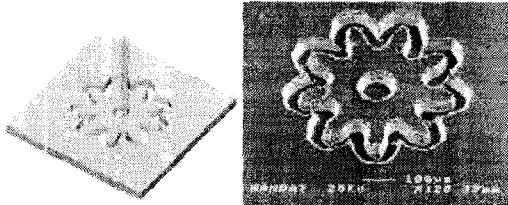


Fig. 11 Machining method and machined micro gear

마이크로 앤드밀링에 의한 미소 3 차원 형상구조물 가공 연구의 일환으로 마이크로 팬(fan)에 대한 가공실험을 수행하였다.

Fig. 12 는 팬 가공을 위한 CAD/CAM 프로그램을 작성하여 공구의 가공 경로를 시뮬레이션하는 모습과 실제 가공된 마이크로 팬의 모습을 나타내었다. 팬의 크기는 외경 3mm 이고, 날개의 높이는 250 μm 이다. 공작물 소재는 황동이며, 가공 공구는 직경 100 μm 의 flat 앤드밀이 사용되었고 가공조건으로는 앤드밀 회전수 40,000rpm, 공구 이송속도 80mm/min, 1회 가공시의 절입 깊이는 황삭에서 10 μm , 정삭에서 5 μm 이 적용되었다.

이와 같은 공정으로 최종 마무리 가공된 표면의 거칠기는 대략 300nmRa 수준을 보였다. 이상과 같은 마이크로 팬의 가공결과로 자유곡면을 갖는 마이크로 3 차원 형상 구조물의 가공에도 마이크로 앤드밀 가공이 유용함을 알 수 있다.



Fig. 12 Tool path generation and machined micro fan

4. 결론

초정밀 미세 가공시스템에서 마이크로 앤드밀의 가공특성을 파악하기 위한 기초적 가공 실험을 수행하였다. 그 결과 마이크로 앤드밀의 가공특성 파악과 더불어 공구 파손을 방지하며 안정적으로 사용할 수 있는 적정 가공조건을 확립하였다. 또한 이러한 분석결과를 바탕으로 다양한 마이크로 구조물의 응용 가공실험이 수행되었다.

후 기

본 논문은 과학기술부와 산업자원부에서 지원한 연구과제수행결과의 일부임을 밝히며, 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. T.Je, J.Lee, D.Choi, E.Lee and B.Shin, "Development of a Micro Machining Technology for Fabrication of Micro parts", Key Engineering Materials, Vol.238-239, pp.383-388, 2003.
2. Computer Aided Ultra-precision Micro-machining of Metallic Material, Yoshimi TAKEUCHI, Kiyoshi SAWADA and Toshio SATA Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nagoya (1995) 67-72.
3. Y.Yamagata and T.Higuchi, "Three-Dimensional Micro Fabrication by Precision Cutting Technique", JSPE, Vol.61, No.10, pp.1361~1368, 1995.
4. Y. Yamagata, and S. Morita, "Fabrication of blazed holographic optical element by ultrahigh-precision cutting", RIKEN Review, No. 34, pp. 6-8, 2001.
5. E.S. Lee, Y.J. Shin, J.H. Kang, T.J. Je, J.K. Lee, and H.Y. Lee, "Development of Micro Mold Machining Technology", KSPE (2000), p. 1047.