

마이크로 앤드밀링에 의한 미소 부품 가공기술 연구

제태진*, 이종찬[†], 최 환[†], 이응숙⁺⁺

A Study on the Micro Parts Manufacturing Technology by Micro End-milling

T. J. Je*, J. C. Lee[†], H. Choi[†], E. S. Lee⁺⁺

Abstract

The machining method by using end-milling tool has been applying in machining structures of various shapes because of the availability.

Recently, all kinds of industries based on the parts of micro shape are developing, and the demands of mechanical micro machining technology are increasing suddenly to produce these parts. According to such changes, the technology of the micro end-milling machining is applying as one of the most important machining means.

This research is to aim at developing machining technology for various micro structures using micro end-mill. This paper introduces micro mechanical machining system with ultra precision, and demonstrates methods manufacturing all sorts of parts and moldings for industry and examples of applicable machining by using micro end-milling tool of micro sizes from hundreds to tens in diameter.

Key Words : Micro End-mill, Fabrication System, Machining Process, Micro Parts, Micro Mold, High Aspect Ratio Micro Structure

1. 서 론

앤드밀공구에 의한 가공법은 그 유용성으로 인하여 종래부터 다양한 형상의 공작물 가공에 광범위하게 활용되어 왔다. 최근의 앤드밀링가공기술은 머시닝센터를 비롯한 초정밀 NC 가공기, 5축가공기, 고속가공기등 가공장치의

고도화를 기반으로 복잡 형상의 효율적 가공과 미세 구조물 형상에 대한 연구들이 많이 진행되고 있다. 특히 첨단 미세형상부품을 기반으로 하는 기계, 광, 통신, 전기전자분야의 발전에 따라 이들 분야에 필요한 요소부품 및 양산용 금형 제조에 기계적 마이크로 머신링 기술의 수요가 증가하고 있고, 이들의 주요 가공수단

* 제태진, 국립금오공과대학교 대학원

주소: 730-701 경상북도 구미시 신평동 188

한국기계연구원 나노공정그룹 (jtj@kimm.re.kr)

+ 국립금오공과대학교 기계설계공학과

++ 한국기계연구원 나노공정그룹

으로서 미세 앤드밀 가공기술이 활용되고 있다. 나아가 마이크로 앤드밀 가공기술은 최근 수십 마이크로 급의 직경을 갖는 미세 앤드밀 공구가 개발되어 상용화됨으로서 향후 그 활용성이 급증할 것으로 예측된다.

본 연구는 이러한 마이크로 앤드밀을 이용하여 다양한 마이크로 형상구조물의 가공기술 개발을 목적으로 하고 있다. 본 논문에서는 기계적 방식에 의한 마이크로 부품 제작을 위해 자체 개발된 초정밀 미세 기계가공시스템을 소개하고, 직경 수백에서 수십 마이크로 급의 미세 앤드밀 공구를 이용하여 각종 산업용 부품 및 금형을 가공한 결과들을 보여준다.

2. 마이크로 앤드밀링 가공공구 및 시스템 구성

2.1 마이크로 앤드 밀 공구

마이크로 앤드밀 공구나 소정의 형상으로 만들어진 플라이 컷(fly-cut) 공구를 이용하면 평면 2차원 형상의 마이크로 그루브 및 채널, 오목면 및 볼록면의 가공이 용이하다. 뿐만 아니라 마이크로 샤후트, 그리퍼(gripper), 기어, 팬(fan), 곡면 및 비구면 등의 2.5차원 및 3차원 형상의 복잡 구조물도 효율적으로 가공할 수 있어 이의 활용성이 급증하고 있다. 이러한 미세 앤드밀링 가공기술이 발전하기 위해서는 마이크로 앤드밀과 초정밀 가공기의 개발이 필수적이다.

마이크로 앤드밀 공구는 최근 직경 $40\mu\text{m}$ 수준까지 안정적으로 생산하여 공급하는 단계에 있다. 본 연구에서는 주로 직경 $200\sim100\mu\text{m}$ 급의 공구가 많이 적용되었고, 최저 직경 $40\mu\text{m}$ 공구를 이용하여 실험하였다.

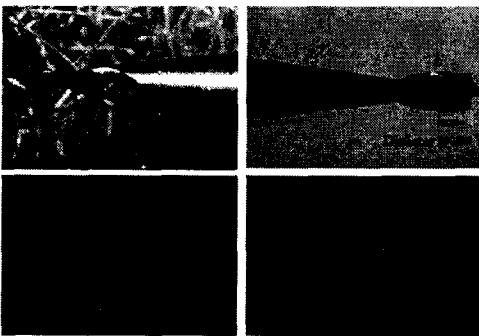


Fig. 1. Feature of micro end-mill

Fig. 1에는 본 연구에서 주로 사용하는 평 앤드밀(flat end-mill)공구들의 끝단 형상을 나타내었다. 또 Table 1에

는 이들 공구들의 직경과 홈부의 길이(flute length) 및 실험에서 자주 적용되는 가공 조건들을 나타내었다.

공구의 형상은 크게 3가지 형식이 많이 사용되고 있는데 홈부의 형상이 곡선이고 길이가 짧은 것, 홈부의 길이가 다소 긴 것이 주로 사용되고 있고, 직선 날 형태로 만들어진 공구의 사용에도 가능 볼 수 있다. 전체 형상으로는 범용 공구와 별다른 차이가 없고 제조메이커에 따라 다소의 차이가 있으며, 직경에 비해 날장이 짧은 특징을 가지고 있다.

Table 1에는 본 실험에 주로 사용되는 공구들의 직경과

Table 1. Specifications of micro machining system

Diameter (μm)	Flute length (μm)	Used revolution (rpm)	Cutting speed (m/min)	Feed Rate (mm/min)
$\varnothing 200$	400	30,000~60,000	37.7~75.4	80~120
$\varnothing 100$	200	30,000~60,000	18.8~37.7	60~80
$\varnothing 50$	150	40,000~60,000	4.7~9.42	20~60
$\varnothing 40$	80	40,000~60,000	3.8~7.5	10~40

2.2 미세 앤드밀링 가공시스템 구성

Fig. 2에 본 연구에 사용된 초정밀 미세 가공시스템 모습을 나타내었다. 시스템의 개략적인 사양은 Table 2와 같다. 시스템의 주요 구동은 X-Y-Z의 3축으로 이루어지며 별도의 터닝(turning) 축이 붙어 있어 선삭 외에 플라이컷팅에 의한 미세 가공을 수행할 수 있다. 각 축은 최고 2nm의 초정밀 제어가 가능하다. Z축은 앤드밀, 드릴과 같이 회전스핀들에 공구를 장착하여 가공하는 방식 외에 단인공구를 고정 치구로 장착하여 세이핑(shaping)가공이 가능하도록 구성되어 있다. 이에 따라 다양한 미세 형상의 초정밀 가공이 가능하다.

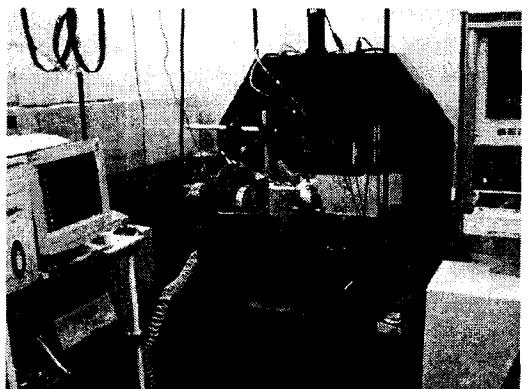


Fig. 2. Micro machining system

Table 2. Specifications of micro machining system

Item	Unit	Specification
X-Y Axis Stage	Moving Stroke	mm 200×200
	Feeding Speed Range	mm/s 0.005~22(Max.45.000mm/min)
	Min. Incremental Move	nm 5 (1mm=20000cts)
	Position Repeatability	μm 0.05 (interferometer 2nm)
Z Axis Slide	Moving Stroke	mm 100 (Lead Screw:1mm/rev)
	Feeding Speed Range	mm/s 0.005~22(Max.45.000mm/min)
	Min. Incremental Move	nm 40 (1mm=25000cts)
	Position Repeatability	μm 0.3
Z Axis Spindle	Speed Range	rpm 0~60.000
	Tool Dimension	mm 0.1~6.0
	Rotational Error	μm <0.05
Turning Axis Spindle	Turning Speed	rpm 0~6.000
	Rotational Error	μm <0.05

시스템의 제어는 PC기반의 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 가공을 할 수 있도록 하였다.

Fig. 3은 Z축에 70,000rpm의 고속스핀들을 장착하여 미세 앤드밀 공구로 가공하는 모습을 나타내었다.

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.

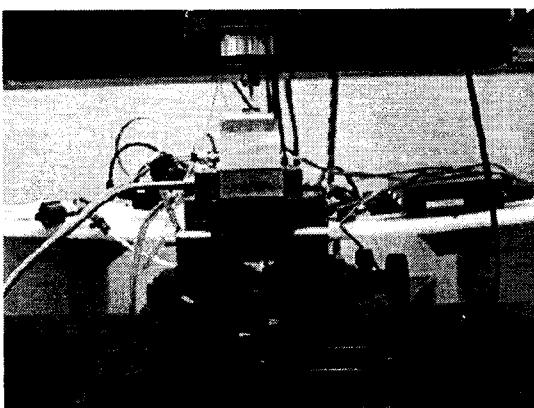


Fig. 3. Equipment set-up for micro end-milling experiments

3. 마이크로 구조물 및 부품 가공 예

3.1 Micro Shaft 구조물 가공

미세 앤드밀링 가공에서 고세장비 마이크로 구조물의 가공은 매우 중요한 분야이다. Fig. 4에 앤드밀에 의한 마이크로 구조물의 두 가지 가공원리를 나타내었고, Fig. 5에 실제의 가공방법을 나타내었다.

먼저, 원주 샤프트 구조물 가공을 예로 들면, Fig. 4의 좌측 그림은 정해진 원의 직경에 따라 원주방향으로 공구를 이송시키며 소정의 깊이 까지 미소 절입을 주며 가공하는 방식으로서 이론적으로는 무한 길이의 샤프트 가공이 가능하나 실제로는 공구의 길이에 의해 제한된다.

Fig. 4의 우측 그림은 좌측그림과 같이 이미 가공된 큰 원주를 직경 방향으로 절입을 주며 마이크로 직경을 갖는 원주 샤프트로 가공하는 방식으로서, 구조물의 치수를 맞추기 위해서 적용되는 공정이다. 이 경우에는 절삭력에 의해 마이크로 구조물이 휘어지거나 부러지기 쉬우므로 가공조건의 선정에 주의 하여야 한다.

사각 각주 구조물이나 다각형 단면형상의 구조물 가공에서도 기본적으로는 이와 같은 두 가지 방법이 적용된다.

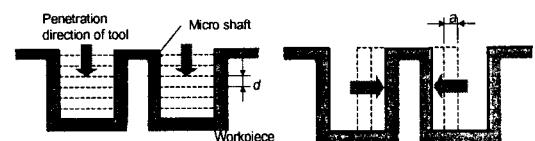


Fig. 4. Principle of micro pole machining

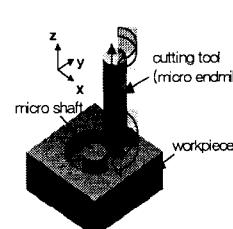


Fig. 5. Machining method

Table 3 Cutting conditions

Cutting tool	Φ200μm flat endmill
Spindle speed	40,000 rpm
Feed rate	100 mm/min
Z-direction feed	50 mm/min
Work piece	brass, Cu-W
Cutting oil	kerosene

이상과 같은 가공원리에서 Fig. 4의 좌측 가공법을 적용하여 가공한 결과를 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. 이때의 개략적인 가공조건은 Table 3과 같다.

Fig. 6은 황동 소재를 사용하여 직경 60μm, 높이 500μm의 고세장비 마이크로 원주 샤프트 구조물을 가공한 것이고, Fig. 7은 단면사이즈 40μm×200μm, 높이 400μm의 방전

전극용 사각 각주 구조물을 가공한 예로서 가공소재는 동-텅스텐(Cu-W)분말 소결합금이다.

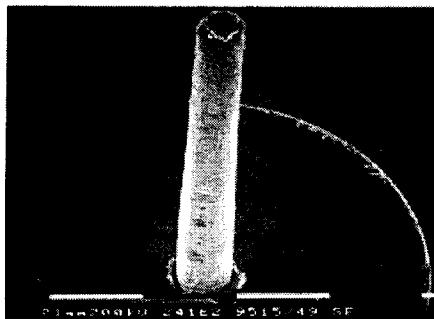


Fig. 6. Machined micro shaft

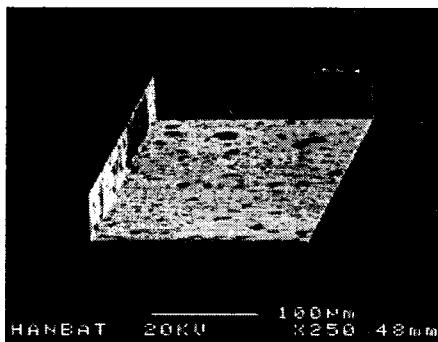
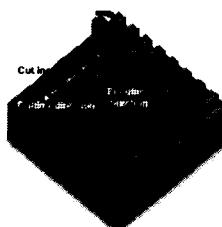


Fig. 7. Machined micro square-structure

3.2 마이크로 격벽 채널 구조물 가공

마이크로 샤프트 구조물 가공의 연장선상에서 마이크로 격벽을 갖는 채널 구조물을 가공하고자 하였다. 마이크로 격벽 채널 구조물은 PDP의 격벽, 소형 열교환기, PZT 구조물, 마이크로 유로, 광통신소자 등 여러 분야에서 활용되고 있다. Fig. 8에 마이크로 채널 구조물의 가공방법과 가공조건에 대하여 나타내었다.



Cutting tool	WC flat end-mill $\phi 200 \mu\text{m}$
Workpiece	Brass
Spindle revolution	40,000 rpm (25 m/min)
Feed rate	5, 2, 0.5 mm/sec
Depth of cut	10 μm /pass (total 200 μm)
Thickness of rib	200, 100, 50, 20 μm
Cutting oil	Kerosene

Fig. 8. Machining method and cutting conditions

Fig. 9에는 직경 200 μm 의 앤드밀 공구로 폭 30 μm , 높이 200 μm 의 마이크로 격벽 채널 구조물의 가공모습과, 직경

100 μm 앤드밀 공구로 격벽 구조물을 크로스로 가공하여 100x100 μm , 높이 200 μm 의 마이크로 각주 구조물 어레이를 가공한 모습을 나타내었다.

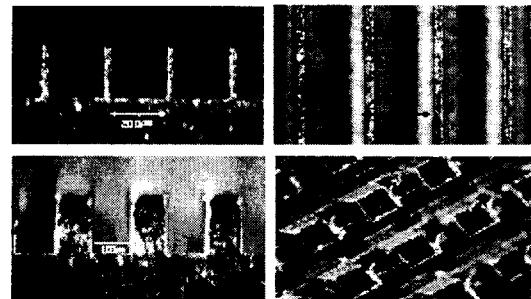


Fig. 10. Micro barrier rib and square-pole array

Fig.11에는 직경 200 μm 의 앤드밀 공구로 Fig.10의 격벽을 가공한 후 바닦면 및 측면의 가공흔적을 조사한 것을 나타내었다. 공구 이송속도를 낮추면 양호한 표면을 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 본 실험에서 얻어진 최고 표면조도는 바닦면 30nmRa, 측면 110nmRa 정도였다. 가공조건에 따른 표면거칠기의 변화를 Fig.12에 나타내었다.

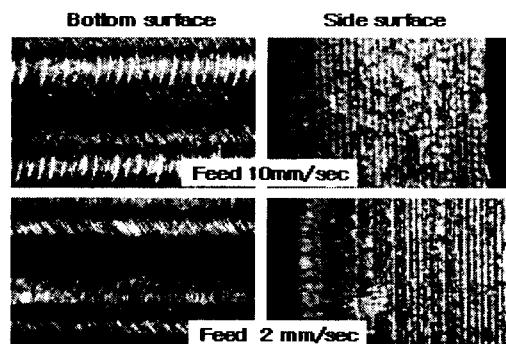


Fig. 11. Machined surface by micro end-mill

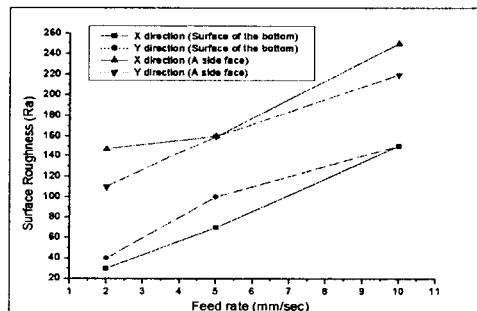


Fig. 12. Machined surface roughness

Fig. 13에는 직경 200 μm 의 앤드밀 공구로 최소 격벽 두께 10 μm , 높이 500 μm 의 마이크로 인벌루트 격벽 채널 구조물을 가공한 모습을 나타내었다. 인벌루트형 격벽채널 구조물은 냉동기 압축용 스크롤 펌퍼의 랩(wrap) 등에 적용되고 있다. 이러한 자유곡선 격벽 채널 구조물의 가공에 의해 2.5 차원 구조물 형상가공이 용이함을 알 수 있다.

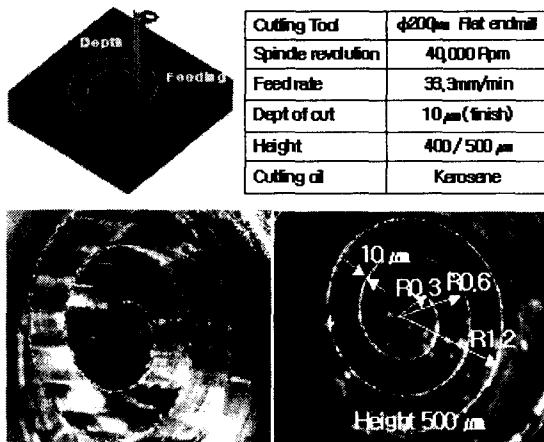


Fig. 13. Machining method and machined micro involute wrap channel structures

3.3 Micro Gear 및 Micro Fan 가공

마이크로 모터 등 미소 구동 기계장치의 동력전달기 구에 적용되는 마이크로 부품의 가공기술 개발을 위하여 미소 기어에 대한 가공실험을 수행하였다.

Fig. 14에 가공된 미소 기어의 SEM 사진을 나타내었다. 가공된 기어의 형상은 기어 잇수 9개로 외경 500 μm , 두께 100 μm 의 치수를 가지고 있고, 중심부에는 샤후트와의 조립을 위해 직경 100 μm 의 구멍이 가공되어 있다.

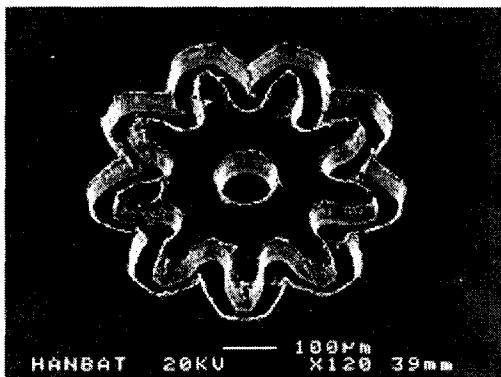


Fig. 14. SEM Photo. of micro gear

공작물 소재는 황동이며, 가공 공구는 직경 40 μm 의 flat 앤드밀이 사용되었고 가공조건으로는 앤드밀 회전수 50,000rpm, 공구 이송속도 22mm/min, 1회 절입 깊이 10 μm 이 적용되었다.

Fig. 14에서 보는 것과 같이 가공 형상 및 표면 조사에서 상면 방향으로 미세한 벼가 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.

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

Fig. 15는 팬 가공을 위한 NC CAM 프로그램 작성결과로서 가공 공구의 경로를 시뮬레이션으로 보여주고 있다. 실제의 가공은 Fig. 16에 나타낸 것과 같이 깊이 방향으로 점진적으로 이루어진다.

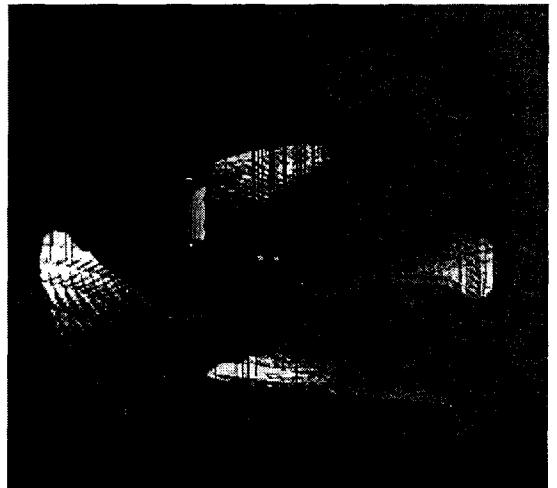


Fig. 15. Tool path generation by NC CAM program

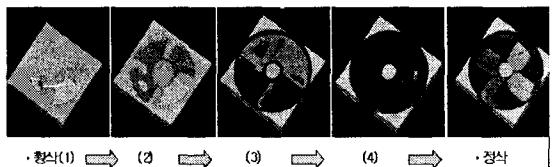


Fig. 16. Machining method

Fig. 17에 가공된 마이크로 팬의 형상을 나타내었다. 팬의 크기는 외경 3mm이고, 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 $10\mu\text{m}$, 정삭에서 $5\mu\text{m}$ 이 적용되었다.

이와 같은 공정으로 최종 마무리 가공된 표면의 거칠기는 대략 300nmRa 수준을 보였다.

이상과 같은 마이크로 팬의 가공결과로 자유곡면을 갖는 마이크로 3차원 형상 구조물의 가공에도 마이크로 앤드밀 가공이 유용함을 알 수 있다.

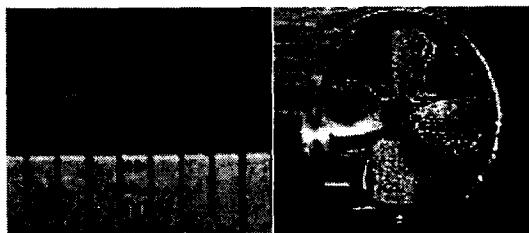


Fig. 17 Machined micro fan(Outer Dia. 3mm)

4. 결 론

본 논문에서는 기계적 마이크로 머시닝 가공기술개발의 일환으로, 마이크로 앤드밀링 공정에 의한 미소부품의 미세 형상 가공기술을 목표로 수행한 다양한 가공방법 및 응용 가공 결과를 보였다. 관련 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 마이크로 앤드밀 공구를 분석하고 미세 앤드밀링 가공을 위한 초정밀 미세 가공시스템을 구축하였다.
- 2) 마이크로 구조물 가공원리 및 공정을 분석하고 고세장 비의 마이크로 샤후트 및 각주를 가공하였다.
- 3) 마이크로 격벽 채널 구조물 및 인벌루트형 격벽 구조물을 가공하였다.
- 4) 마이크로 기어 및 마이크로 팬 형상의 가공을 통하여 미세 앤드밀링에 의한 구동용 요소부품 및 3차원 형상의 마이크로 부품가공기술을 축적하였다.
- 5) 이상과 같은 결과를 종합하여 마이크로 앤드밀링에 의한 고효율적 미세 형상가공기술이 개발되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 및 과학기술부의 연구사업으로 수행된 연구결과의 일부임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Y.Takeuchi,K.Sawada and T.Sata, 1995,"Computer Aided Ultra-precision Micro-machining of Metallic Materials", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Nagoya
- (2) Yutaka Yamagata and Toshiro Higuchi, 1995, "Three-Dimensional Micro Fabrication by Precision Cutting Technique", JSPE, Vol.61, No.10, pp.1361 ~ 1368.
- (3) T. Je, J. Lee, D. Choi, E. Lee and B. Shin, 2003, "Development of a Micro Machining Technology for Fabrication of Micro parts", Key Engineering Materials, Vol.238-239, pp.383-388.
- (4) B.S.Shin, D.Y.Yang, D.S.Chi, E.S.Lee, T.J.Je and K.H.Whang, 2003, "Rapid Manufacturing of 3D Shaped Products by Multi-face High-speed Machining", Key Engineering Materials, Vol.238-239, pp.399-404.
- (5) Y.Yamagata, 1997, "Microfabrication by Ultra Fine Cutting", RIKEN Symposium, Vol. 1.
- (6) Yoshimi Takeuchi, 2002, "마이크로 절삭가공", 일본정밀공학회지, Vol.68, No.2, pp.167~170.
- (7) 제태진, 이응숙, 최두선, 이선우, 2001, "기계적 미세 가공시스템 구성 및 응용 연구", 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp.934~937.
- (8) 이응숙, 제태진, 신영재, 최두선, 이재경, 이현용, 2002, "미세 금형 가공 기술 개발에 관한 연구", 산업자원부, 한국기계연구원연구보고서,