

미세 폴 구조물 가공을 위한 마이크로 앤드밀링 기술

제태진[#], 최두선*, 이응숙*, 홍성민*, 이종찬**, 최 환**

Micro End-milling Technology for Micro Pole Structures

Tae-Jin Je[#], Doo-Sun Choi*, Eung-Sug Lee*, Sung-Min Hong*, Jong-Chan Lee**, Han Choi**

ABSTRACT

In the case of fabricating micro pole structures such as column, square-pole and gear shaft by the micro end-milling process, it can be useful in the fields of industry, for example, micro parts, electrode for electrical discharge machining and micro mold for injection molding. In this study, machining factors and the process were analyzed. Machining experiments of various micro pole configurations were performed. Analysis of the change and effect of the cutting force according to the machining conditions was carried out. An analytical study of the deformation of the micro pole caused cutting conditions and cutting force through the finite element method and ANSYS program was carried out. As a result, this research presented a method of fabricating the column pole of below 100 μ m diameter with high aspect ratio by using micro end-milling process, and based on that, a method of fabricating a variety of applicable structures. Also the minimum size of the pole capable of fabricating through theory and experiment were demonstrated.

Key Words : Micro Pole Structure(미세폴구조물), High Aspect Ratio(고세장비), Micro End-milling(마이크로 앤드밀링), Cutting Force(절삭력), Analysis of Deformation(변형해석), Applications(응용가공)

1. 서 론

지금까지 기계적으로 미세구조물을 가공하는 방식에서 마이크로 앤드밀링을 이용한 고세장비의 마이크로 폴이나 샤프트, 또는 그 응용구조물을 가공한 예는 극히 적다. 그 이유로는 앤드밀링으로 미세구조물을 가공할 경우 대부분의 다른 가공법 보다 절삭에 의한 변형이 커서 고세장비의 미세구조물을 가공하기가 어려웠기 때문이다. 그러나 최근 들어 나노급의

초정밀 미세가공기와 고속 스피들 및 수 십

미크론 사이즈의 마이크로 앤드밀공구의 등장으로 절삭력을 대폭으로 줄이며 고품질 표면으로 미세형상을 가공하는 앤드밀링공정기술이 개발되면서, 각종 첨단 산업용 미세부품 및 구조물 가공에 마이크로 앤드밀링을 적용하려는 시도가 증가하고 있다.

Adams^[1] 등은 집속 이온빔으로 마이크로 앤드밀 공구를 만들고 이를 이용하여 수 십 미크론 폭의 마이크로 채널 등을 가공하였다. Sawada, Takeuchi^[2] 등은 다이아몬드공구를 이용하여 마이크로 폴 어레이 구조물을 가공하는 실험을 하였다. Je, Lee^[3] 등은 마이크로 앤드밀링에 의한 스텝바이스텝방식 및 사이즈축소방식의 두 가지 가공방법에 대한 분석과 기초적 해석연구를 수행하였고, 마이크로 앤드밀링의 가공특성을 분석하였으며^[4], 마이

교신저자 : 한국기계연구원 나노공정장비연구센터
E-mail : jtj@kimm.re.kr

* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

** 금오공과대학교 기계공학부

크로 앤드밀링에 의한 구조물변형의 해석과 미세구조물 가공에 대한 전반적인 기반을 확립하고, 다양한 미세 구조물의 응용가공에 대하여 그 응용 예를 보였다^[5].

본 연구에서는 마이크로 앤드밀링에서 마이크로 구조물을 제작하는 두 가지 가공방식을 기초로 하여 100 μm 이하 직경의 마이크로 폴 및 응용 구조물을 가공하는 방법을 연구하고, 가공이 가능한 폴의 직경 및 길이의 한계와 세장비 등에 대하여 규명하고자 하였다. 이를 위해 마이크로 폴 구조물가공에 영향을 주는 인자를 분석하고, 가공공정 및 가공조건 의 확립, 절삭력 분석 등의 실험을 수행하였으며, ANSYS 및 유한요소법에 의한 마이크로 폴의 가공 변형해석에 대한 연구를 수행하였다. 또한 이 과정을 통하여 수십 미크론의 직경을 가진 고세장비 마이크로 폴 구조물과 응용 가공 제품들을 제작하고 관련가공기술을 확립하고자 하였다^[6].

2. 마이크로 구조물의 가공방법

앤드밀 공구에 의한 마이크로 구조물의 제조방법은 2가지가 있다. 그 첫 번째 방법은 Fig. 1 과 같이 공구가 원주 각주를 1바퀴 돌아 올 때마다 일정한 절입을 주며 스텝바이스텝 방식으로 원하는 깊이(길이)의 폴 구조물을 만드는 방법이다. 이 방식으로 가공하면 각 스텝마다 절삭되는 미소 부분에서만 절삭력이 작용하고, 먼저 가공된 폴 상단에는 절삭력이 작용하지 않으므로 이론적으로는 거의 무한대 길이의 마이크로 폴을 가공하는 것이 가능하다. 따라서 앤드밀을 이용한 미세 폴 가공에는 대부분 이 방식이 안정적이어서 적용하기 좋다. 그러나 실제 제작 가능한 폴의 길이는 공구의 유효 길이와 가공조건 및 가공 환경 등 여러 가지 원인에 의해 제한 될 수밖에 없다.

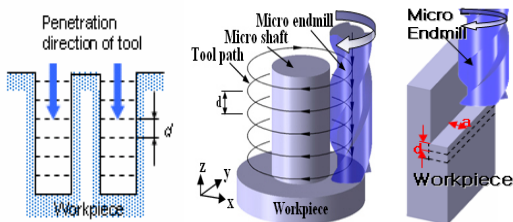


Fig. 1 Step by step machining method

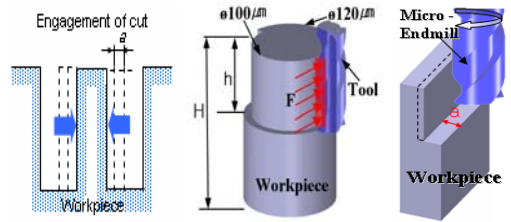


Fig. 2 Size reduction machining method

두 번째 가공 방식은 Fig. 2와 같다. 이것은 사이즈 축소 방식으로서, 첫 번째 방식으로 만들었거나 다른 방식에 의해 이미 만들어져 있던 마이크로 폴이나 샤프트의 직경 또는 각주 폭의 치수를 맞추기 위해 사이즈를 줄이는 가공이 필요한 때에 적용된다. 이 방식에서는 미세 구조물의 종횡비(aspect ratio : AR)가 커질수록 절삭력의 영향이 커지게 되고 변형도 쉽게 발생되어 가공이 어렵게 된다. 즉, 작은 힘에 의해서도 폴이 변형되기 쉽고, 일정량 이상 변형이 되면 가공치수를 맞출 수 없을 뿐만 아니라 결국에는 폴이 변형되어 부러지게 된다. 또, 폴이 변형되거나 부러지면 마이크로 앤드밀 공구를 부러지게 하는 심각한 문제를 발생시킨다. 따라서 이와 같은 마이크로 폴을 가공할 때 재료특성과 가공물의 단면 형상 및 종횡비, 절삭력과의 관계를 통하여 가공 변형량을 아는 것이 필요하다. 이것은 폴의 변형량이 일정 범위를 넘어가면 더 이상의 가공을 불가능하게 하므로 일종의 가공한계를 규명하는 것으로도 볼 수 있다. 그리고 폴 변형을 일으키는 절삭력에는 실제 절삭을 위해 필요한 정동적인 힘뿐만 아니라 공구의 런아웃 정도, 체터링, 노이즈 등의 영향도 포함되어야 할 것이다.

3. 마이크로 구조물의 가공변형 해석

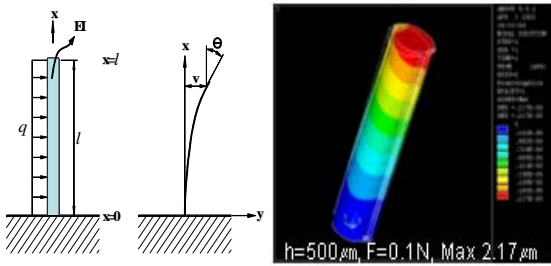
3.1 원주 구조물의 가공변형

마이크로 원주구조물의 가공 변형해석을 위하여 Fig. 2의 중간 그림에 나타난 것과 같은 원주의 가공 모델을 설정하고, 유한요소법과 ANSYS에 의한 해석 및 시뮬레이션 실험을 수행하였다. Fig. 2는 높이 H, 직경 120 μm 인 원주를 절입깊이 h를 적용하여, 직경 100 μm 으로 만드는 가공모델이다. Fig. 3(a)는 절입깊이 h를 폴의 전체 길이 H와 같게 하여 가공할 때의 간략화된 모델로서, 절삭

력을 외팔보에 작용하는 등분포하중으로 가정하였다. 그림에서 E는 폴 재료의 탄성계수이며, I는 폴의 단면에 대한 관성모멘트이다. v는 y 방향으로의 변형량을 의미하며, x=l에서의 변형량은 다음 식으로 표현된다.

$$v_{x=l} = \frac{ql^4}{8EI} \quad (1)$$

그림 3(b)는 이 모델에 의한 유한요소법과 ANSYS 해석 결과의 한 예를 보여준다.



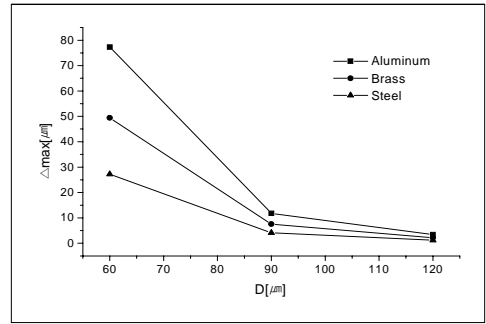
(a) analysis model (b) simulation example

Fig. 3 Example of modeling and simulation in circle pole

절삭력의 크기는 가공조건 및 가공환경에 의해 달라지므로 실제의 마이크로 앤드밀을 이용한 가공실험에서 적절한 가공조건을 설정하고 이때에 측정된 절삭력을 적용하였다. 본 연구에서는 최대 0.1N의 절삭력을 적용하고 알루미늄, 황동, 연강의 3가지 재료에 대해서 폴의 직경(D[μm]), 높이(H[μm]), 폴 끝단으로부터의 작용 힘의 위치를 나타내는 축방향 절입깊이(h[μm]) 및 크기(F N)에 따른 변형량을 시뮬레이션하여 그 결과를 Fig. 4-Fig. 7의 그래프로 나타내었다. 시뮬레이션 결과 공통적인 현상으로는 재료강도가 높을수록 가공시에 변형이 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 고 강도 재료 일수록 고세장비의 폴 가공이 가능할 것으로 예측된다. 그러나 실제 가공에서는 재료강도에 따라 가공 절삭력도 커질 것이기 때문에 그 결과는 다를 수 있다.

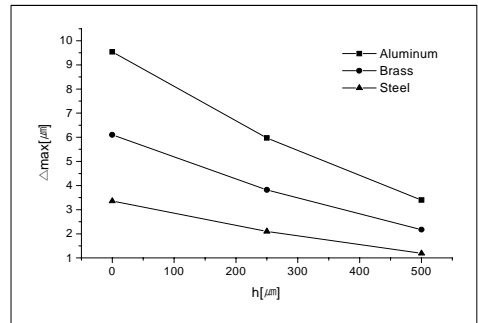
Fig. 4는 0.1N의 힘으로 폴의 전체영역을 가공할 때 폴의 직경이 90μm 이하로 줄어들면 변형량이 급격히 증가하므로 더 미세한 폴 가공을 위해서는 절삭력을 줄이는 가공조건이 필요하다는 것을 보여준다. Fig. 5는 0.1N의 힘으로 폴의 끝단 만 가공할 때의 시뮬레이션 결과로

서, 폴 전체영역을 가공할 때 보다 변형이 더 크게 나타나는 것을 보여준다. Fig. 6은 같은 절삭력으로 가공하지만 폴의 길이가 길어지면 변형이 급격히 증가하게 된다는 것을 보여준다.



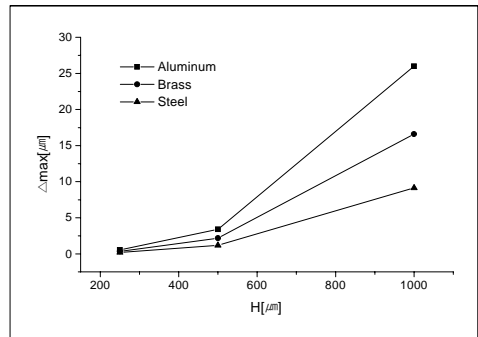
(H=500μm, h=50μm, F=0.1N)

Fig. 4 Deformation by diameter change



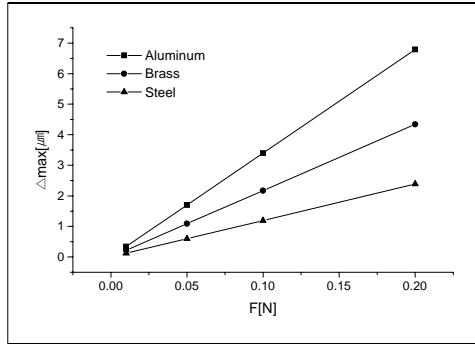
(H=500μm, D=120μm, F=0.1N)

Fig. 5 Deformation by depth of cut



(D=120μm, h=500μm, F=0.1N)

Fig. 6 Deformation by pole height change



(D=120 μ m, H=500 μ m, h=500 μ m)

Fig. 7 Deformation by force change

Fig. 7은 폴의 전체영역을 가공하면서 절삭력을 증가시켰을 때 폴의 변형을 해석한 것으로서, 절삭력이 증가함에 따라 변형량도 일정한 비율로 증가하는 것을 보여준다. 결과적으로 마이크로 폴의 변형을 줄이며 가공하기 위해서는 절삭력이 최소로 되는 조건으로 가공해야 된다는 것을 보여준다.

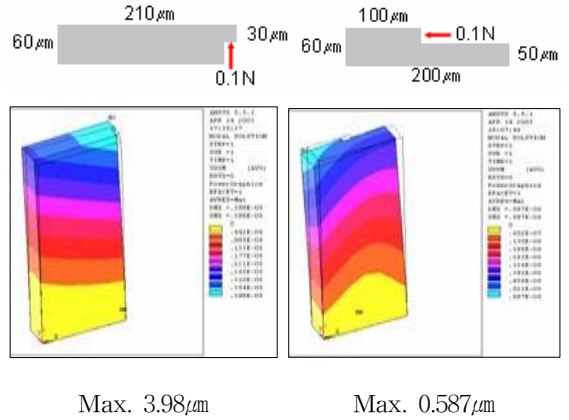
3.2 각주 구조물의 가공변형

원주 폴 해석과 유사 방법으로 사각 각주에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 8과 같이 단면 60 μ m \times 210 μ m, 높이 H=500 μ m의 직사각형 미소 각주를 모델로 하여, 절삭깊이 500 μ m, 물림가공량 10 μ m으로, 각주 끝 단 및 두께를 줄이는 가공을 할 때 0.1N의 힘이 각주의 변형에 미치는 영향을 해석하였다. 가공소재는 황동(E=110GPa, ν =0.3)으로 가정하였다. 시뮬레이션 결과 끝단의 가공에서는 최대 3.98 μ m, 두께 줄임 가공에서는 최대 0.587 μ m의 변형을 보였다. 이 결과는 끝단을 가공할 때에 더 변형이 심하므로 주의해야 함을 알 수 있게 한다.

4. 마이크로 앤드밀링의 절삭력 측정 및 구조물 가공 실험

4.1 실험장치 및 절삭력 측정 실험

마이크로 앤드밀 공구에 의한 절삭력측정과 마이크로 폴 구조물 제작 실험을 위하여 Fig. 9와 같은 마이크로 앤드밀링 가공 시스템을 구축하였다. 가공시스템



Max. 3.98 μ m Max. 0.587 μ m
Fig. 8 Deformation analysis of micro square pole

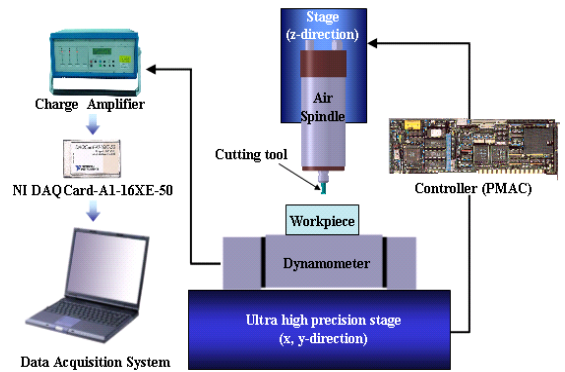


Fig. 9 Schematic of experimental set-up

은 3축 구동을 기본으로 하며, 각축은 5nm의 제어 정밀도를 갖추고 있고, 마이크로 앤드밀을 장착할 수 있는 70,000rpm의 고정밀 에어스핀들이 부착되어 있다. 절삭력의 측정을 위하여 Kistler사의 9257A 타입의 공구동력계를 사용하였고, 신호를 Amplifier로 증폭한 후 12bit의 분해능을 가진 A/D변환기를 사용하여 얻어진 데이터를 컴퓨터에 저장하여 절삭력을 검출하였다. 마이크로 앤드밀 공구에 의한 원주가공시의 절삭력 측정 결과의 한 예를 Fig. 10에 나타내었다. 이 절삭력은 공구가 재료를 가공하는 데에 소요되는 정.동적 힘뿐만 아니라 가공시에 수반된 노이즈 및 체터링의 영향도 포함되어 최대값으로 측정된 것이다. 마이크로 앤드밀의 파손을 방지하며 안전하게 사용하기 위해서는 이러한 최대절삭력의 고려가 필요하다. 절삭력 신호

는 원주를 따라 가공하기 때문에 사인파와 코사인 형태로 나타난다. 실험에는 직경 1mm, 200 μ m, 100 μ m, 50 μ m 의 앤드밀 공구가 사용되었다. 20,000~60,000rpm의 회전속도로 가공 실험 결과 이들 공구의 최대 절삭력은 0.1N 이하로 극히 작았고 거의 비슷하였다. 이것은 공구직경이 작고 고속회전에 의한 미소 물립절삭이 이루어지기 때문이다. 또, 직경이 다소 큰 공구를 사용하더라도 동일 회전속도에서는 고속가공과 미소 물립절삭의 효과로 역시 절삭력은 작아진다. 따라서 본 실험에서는 이러한 미세 절삭력을 근거로 하여 마이크로 원주 및 각주가공시의 변형해석을 수행하였다.

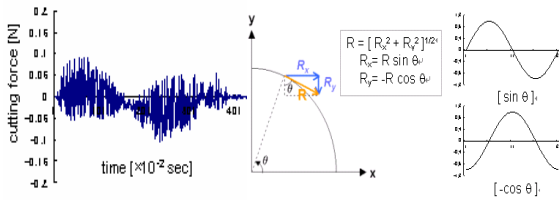
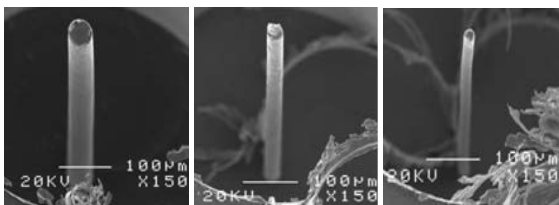


Fig. 10 Result of cutting force measurement

4.2 스텝바이스텝 방식에 의한 원주 가공

Fig. 11은 높이 700 μ m의 원주를 직경 50 μ m(AR 14), 직경 30 μ m(AR 23) 및 직경 20 μ m(AR 35)의 고세장비로 가공한 것이다. 가공방법은 Fig. 1에 나타난 스텝바이스텝 방식을 적용하였다. 이들의 가공에는 직경 300 μ m의 평행 앤드밀이 사용되었고, 공구회전수 60,000rpm, 원주방향 이송속도 60mm/min, 1step 당 절입 깊이는 5 μ m의 가공조건이 적용되었고, 가공 피삭재는 황동이다. 직경 50 μ m 및 직경 30 μ m 폴은 양호한 형상을 유지하고 있고 직경 20 μ m 폴은 미소하게 변형되어 가공되었다. 이 결과로부터 직경이 더 작은 미세 폴의 가공을 위해서는 가공조건이나 가공환경을 개선해야 함을 알 수 있다.

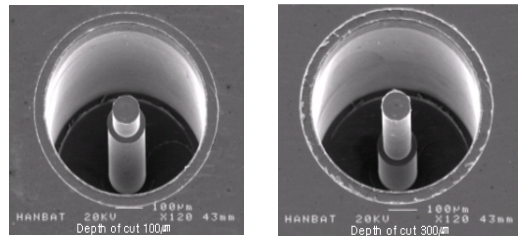


(a)ø50 μ m,H700 μ m (b)ø30 μ m,H700 μ m (c)ø20 μ m,H700 μ m

Fig. 11 Machined micro poles

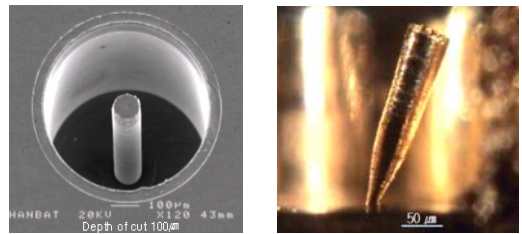
4.3 사이즈축소 방식에 의한 원주 가공

Fig. 12는 황동 폴의 가공 예로서 Fig. 2의 사이즈 축소 가공방식을 적용하였다. 먼저 직경 200 μ m 공구를 이용하여 직경 500 μ m, 높이 500 μ m의 기초 폴을 만들었다. 이 폴의 직경을 300 μ m으로 줄이기 위해 절입 100 μ m으로 가공한 모습(a), 절입 300 μ m으로 가공한 모습(b), 절입 500 μ m으로 가공한 모습(c)을 나타내었다. 이때 적용된 물립절삭량은 1~10 μ m이며, 각각의 조건에 대하여 절삭력의 변동과 구조물 변형을 고찰하였다.



(a) top cutting

(b) middle depth cutting



(c) total depth cutting

(d) deformed micro pole

Fig. 12 Machined micro poles by size reduction machining method and deformed pole

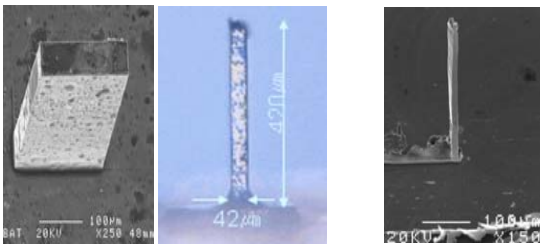
실험 결과 폴의 상단을 가공할 때(a)가 가장 심한 절삭력의 변동을 가져왔다. 이것은 가공 중 폴의 변형을 뜻하는 것으로서 앞의 해석 결과와 일치하고 있다. 이때에 측정되는 절삭력은 비정상적인 것으로 변형으로 발생한 체터링을 포함하였다. 이 절삭력의 변화는 절삭영역의 길이, 즉 절입깊이 보다는 물립절삭량의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 또, 가공되는 폴의 직경이 더욱 작아져서 폴에 작용하는 가공절삭력이 상대적으로 커지게 되면, 점차적으로 Fig.12(d)와 같이 폴의 상단은 공구의 반대방향으로 밀려 가공이 되지 않고 하단만 가공되다가, 최후의 순간에 폴의 하단이 절삭되는 현상이 발생

하였다. 결과적으로 사이즈를 줄이는 방식으로 고세장비의 미세 풀을 가공하기 위해서는 변형에 영향이 큰 물립절삭량을 최소로 줄이고 공구길이 허용하는 최대 길이로 한번에 가공하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

4.4 마이크로 각주 가공

Fig. 13(a)는 사출성형용 금형의 미세 게이트 제작을 위한 방전가공용 전극으로 사용하기 위해 단면 $42\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$, 높이 $420\mu\text{m}$ 의 사각 각주를 스텝바이스텝 방식으로 가공한 것이다. 가공 소재는 동-텅스텐(Cu-W) 합금이며, 사용 공구는 직경 $300\mu\text{m}$ 의 평행 앤드밀이다. 가공 조건은 공구회전수 $50,000\text{rpm}$, 이송속도 40mm/min , 1 스텝 당 절입 깊이는 $20\mu\text{m}$ 이 적용되었다.

같은 조건으로 Fig. 13(b)와 같은 $10\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 의 극소 단면을 갖는 각주를 높이 $300\mu\text{m}$ 으로 가공하였다. 단면이 극소화되고 고종횡비를 갖는 구조물이 되면서 가공력에 의해 풀 구조물이 변형되는 모습을 보여주고 있다. 이러한 미세구조물의 변형을 줄이는 가공을 위해서는 더욱 미세한 절삭물립량을 적용해야 할 것으로 보인다.

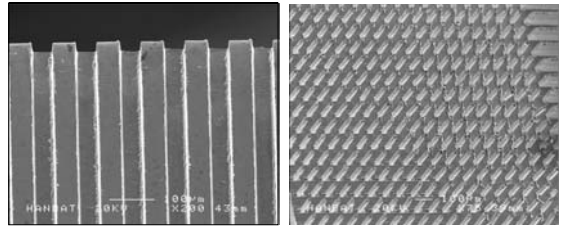


(a) $42\mu\text{m} \times 200\mu\text{m} \times 420\mu\text{m}$ (b) $10\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$

Fig. 13 Machined micro square poles

4.5 마이크로 구조물 응용 가공

Fig. 14(a)는 직경 $50\mu\text{m}$ 의 평행 앤드밀공구로 피치 $100\mu\text{m}$, 높이 $50\mu\text{m}$ 의 마이크로 채널을 가공한 모습이다. 이것은 각종 유체 마이크로 채널 및 PDP 격벽 성형용 금형에 활용된다. Fig. 14(b)는 단면 $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$, 높이 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 사각각주 어레이를 가공한 모습이다. 이것은 방전전극 및 마이크로 센서 구조물 성형용 금형으로 활용 가능하다. 이들의 가공에는 공구회전수 $60,000\text{rpm}$, 이송속도 40mm/min , 1 스텝 당 절입 깊이는 $50\mu\text{m}$ 의 가공조건이 적용되었다.



(a) micro channel (b) micro square pole array

Fig. 14 Machined micro barrier rib and square pole array

Fig. 15는 마이크로 폴과 마이크로 기어 복합구조물의 가공 예를 나타내었다. 양측의 미세 기어 축은 직경 $50\mu\text{m}$, 길이 $100\mu\text{m}$ 이며, 양측의 작은 기어는 외경 $300\mu\text{m}$, 잇수 8, 모듈 3.7이고, 중앙부에 있는 큰 기어는 외경 $500\mu\text{m}$, 잇수 9, 모듈 5.5로 설계 제작되었다. 가공소재는 황동이고, 직경 $40\mu\text{m}$ 의 앤드밀 공구로 회전속도 $50,000\text{rpm}$, 이송속도 20mm/min , 1 스텝 당 절입 깊이 $10\mu\text{m}$ 의 가공조건이 적용되었다.

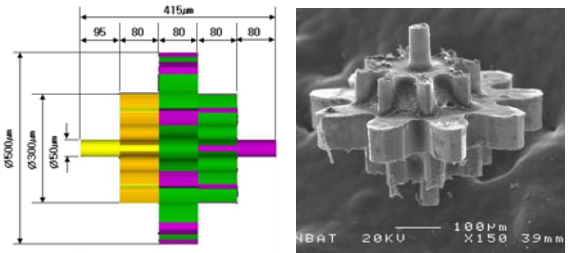


Fig. 15 Complicated structure of micro pole and gear

5. 결론

1. 본 연구에서는 마이크로 앤드밀링에 의한 마이크로 구조물의 제조방법을 제시하고, 마이크로 구조물 가공시의 변형에 대한 해석 및 실험적 연구를 수행하였으며, 고종횡비 구조물가공 및 응용 예를 보였다.
2. 사이즈축소방식에 의한 미세구조물 가공해석을 통하여 동일한 절삭력이 작용할 경우 재료강도가 높을수록 가공변형이 적고, 풀의 끝단 가공시 변형이 커며, 직경이 작을수록 변형이 커지고, 길이가 길어 길수록 변형이 커지는 것을 보였다.
3. 고세장비 구조물 가공에는 스텝바이스텝방식이

유리하였다. 이 방식으로 직경 20 μm , 길이 700 μm 의 마이크로 폴 및 10 μm ×20 μm ×300 μm 의 미세 구조물을 가공하였으며, 마이크로 각주 폴어레이 및 직경 500 μm 이하의 미세기어복합구조물을 가공하였다.

4. 사이즈축소방식으로 고세장비 미세구조물을 가공하기 위해서는 구조물의 변형을 방지하기 위하여 절삭력이 최소화되는 가공조건의 확립이 필요하다는 것을 알 수 있었다.
5. 마이크로 앤드밀로 수십 마이크로 직경의 고세장비 구조물을 효율적으로 가공할 수 있는 것을 확인하였고, 이의 응용가공을 통하여 복합형상의 다양한 마이크로 구조물을 가공할 수 있다는 것을 보여주었다.

참고문헌

1. Adams, D. P., Vasile, M. J., Benavides, G., Campbell, A. N., "Micromilling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools," Precision Engineering 25, pp. 107-113, 2001.
2. 澤多 潔, 竹内芳美, "超精密 マシ-ニング センタと マイクロ 加工," 日刊工業新聞社, ISBN 4-526-04196-3, 1998.
3. Je, T. J., Lee, J. C., Choi, D. S., Lee, E. S., Shin, B. S., and Whang, K. H., "A Study of the Micro Pole Structure Fabrication and Application Technology by Micro End-Milling Process," Key Engineering Materials, Vol. 257-258, 2004.
4. 제태진, 이응숙, 최두선, 홍성민, 이종찬, 최 환, "마이크로 앤드밀의 가공특성분석 및 응용 가공 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 589-592, 2003.
5. 제태진, 이종찬, "마이크로 부품제조를 위한 미세 절삭공정 연구," 금오공대박사학위논문, 2004.
6. 제태진, 최두선, 이응숙, 홍성민, 이종찬, 최 환, "마이크로 앤드밀링을 이용한 미세 구조물 가공 기술," 한국기계가공학회 2005년도 추계학술대회 논문집, pp. 63-68, 2005.