

## ◆ 특집 ◆ 초정밀가공기술

## 2 차원 평판가공법을 이용한 고세장비 미세 격벽어레이구조물 가공

## Study on Machining High-Aspect Ratio Micro Barrier Rib Array Structures using Orthogonal Cutting Method

박언석<sup>1</sup>, 최환진<sup>1</sup>, 김한희<sup>2</sup>, 전은채<sup>2</sup>, 제태진<sup>1,2,✉</sup>Eun-Suk Park<sup>1</sup>, Hwan-Jin Choi<sup>1</sup>, Han-Hee Kim<sup>2</sup>, Eun-chae Jeon<sup>2</sup>, and Tae-Jin Je<sup>1,2,✉</sup>

1 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스 전공 (Dept. of NanoMechatronics, University of Science and Technology)

2 한국기계연구원 나노공정연구실 (Dept. of NanoManufacturing Technology, Korea Institute of Machinery and Materials)

✉ Corresponding author: jj@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7142

Manuscript received: 2012.10.16 / Accepted: 2012.10.23

*The micro barrier rib array structures have been applied in a variety of areas including as privacy films, micro heat sinks, touch panel and optical waveguide. The increased aspect ratio (AR) of barrier rib array structures is required in order to increase the efficiency and performance of these products. There are several problems such as burr, defect of surface roughness and deformation and breakage of barrier rib structure with machining high-aspect ratio micro barrier rib array structure using orthogonal cutting method. It is essential to develop technological methods to solve these problems. The optimum machining conditions for machining micro barrier rib array structures having high-aspect ratio were determined according to lengths (200  $\mu\text{m}$  and 600  $\mu\text{m}$ ) and shape angles (2.89° and 0°) of diamond tool, overlapped cutting depths (5  $\mu\text{m}$  and 10  $\mu\text{m}$ ), feed rates (100 mm/s) and three machining processes. Based on the optimum machining conditions, micro barrier rib array structures having aspect ratio 30 was machined in this study.*

Key Words: Micro Barrier Rib Array Structures (미세 격벽어레이구조물), High-aspect Ratio (고세장비), Orthogonal Cutting Method (2 차원절삭가공법)

## 1. 서론

최근 디스플레이, 바이오, 에너지 등 각종 첨단 산업에서 미세채널 및 격벽형상의 고세장비 미세 구조물이 널리 사용되고 있다.<sup>1-3</sup> 초기에는 프리즘 패턴과 유사한 모양의 패턴이 많이 사용되었으나 협시야각 보안필름, 마이크로 히터싱크, 광 도파로 등 기능성 고세장비 구조물의 수요증가에 따라 마이크로 간격의 어레이형 분야로 점차 확대되고 있다. 이에 따라 세장비(Asspect ratio = AR) 10 이상의

고종횡비를 갖는 미세 구조물 가공에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다.

고세장비 구조물 가공을 위해 공구의 폭은 좁고 길이가 긴 공구가 필요하기 때문에 절삭가공 중 절삭공구와 공작물 사이에서 발생하는 상대운동의 불안정에 의해 진동(Chattering)이 발생한다.<sup>4,5</sup> 진동은 미세 가공에서 치수 정밀도와 표면조도를 떨어지게 하고 공구의 마모와 파손을 촉진시키며 구조물 형상에 변형 및 파손을 발생시키는 원인이기 때문에 고세장비 구조물 가공에 있어서 반드시

고려할 문제이다. 이에 따라 진동을 일으키는 원인에 대한 분석과 이를 줄이는 연구가 고세장비 구조물의 가공에 필요로 한다. 또한, 고세장비 구조물 가공에는 사각 단면 공구를 사용하기 때문에 공구와 구조물 간의 표면접촉에 의해 상면방향으로 버가 발생되기 쉽다.<sup>6,7</sup> 이러한 상면 버는 공구형상각에 따라 많은 영향을 받기 때문에 공구형상각에 따른 가공표면과 상면 버 간의 상관관계에 대한 연구가 필요하다.

최근 고세장비 구조물은 제품의 성능 및 효율을 높이기 위하여 높은 세장비를 가지는 구조물이 요구되고 있다.<sup>8,9</sup> 세장비가 커지면 상대적으로 구조물을 지지하는 단면적이 줄어들어 약한 외력에 의해서도 굽힘변형 또는 파괴가 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 구조물의 변형 및 파손을 줄이면서 효율적으로 고세장비 구조물을 가공하는 연구가 중요하다.

본 연구에서는 고세장비 미세 격벽어레이구조물을 가공하기 위해 공구길이, 가공속도, 공구형상각, 중첩가공깊이(Overlapped cutting depth = OCD) 등의 가공변수를 변화시켜 가공특성분석과 함께 최적의 가공조건을 확립하고 폭 60 μm, 길이 600 μm의 사각다이아몬드 공구를 이용하여 고세장비(AR 30) 미세 격벽어레이구조물을 가공하는 연구를 수행하였다.

## 2. 고세장비 구조물 가공을 위한 가공조건 최적화

### 2.1 가공조건 영향 분석

실험을 위해 Fig. 1 과 같은 초정밀 평판가공실험 시스템을 구축하였다. 가공장비는 리니어 모터로 구

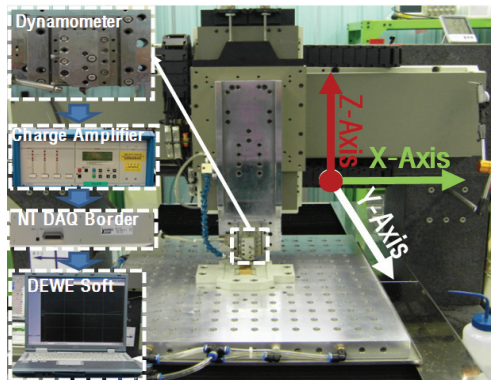
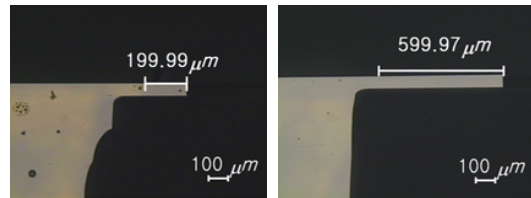


Fig. 1 Experimental system set-up

동되는 X-Y-Z 의 기본 3 축으로 구성되어 있다. 각 축의 스트로크는 900×900×100 (mm) 이며, 0.5 μm 의 반복정밀도를 가지고 있다. 공구를 장착하는 Z 축에 공구동력계(Tool dynamometer)를 장착하여 X-Y-Z 방향의 절삭력을 실시간으로 측정할 수 있게 하였다.

공구길이의 변화에 따른 가공특성 비교 실험을 위해 Fig. 2 와 같이 공구의 폭은 60 μm 으로 동일하고 길이가 200 μm 과 600 μm 인 사각 다이아몬드 공구를 제작하였다. 가공속도는 10, 50, 100 mm/s 으로 구분 하여 가공속도에 따른 영향 분석실험을 수행하였다. 가공 중 1 회 절삭깊이는 모두 10 μm 으로 일정하게 하여 공구길이와 절삭속도의 영향을 분석하였다.



(a) Length 200 μm (b) Length 600 μm  
Fig. 2 Manufactured diamond tools with width 60 μm

고세장비 구조물 가공에서 절삭력의 크기에 따라 버의 발생 정도가 달라질 수 있기 때문에 각 실험 조건 별로 절삭력을 측정하였다. Fig. 3 과 같이 공구길이가 길고 가공속도가 빠를수록 절삭력이 미세하게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 절삭력의 차이가 0.02 N 이하로 매우 미세하기 때문에 가공 시간을 단축하기 위하여 100 mm/s 의 가공속도를 최적의 가공속도로 선정하여 추가 실험을 수행하였다.

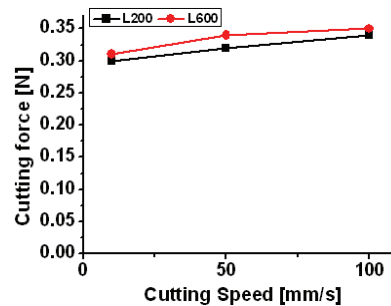


Fig. 3 Comparison of magnitude of cutting force with feed rate

또한 초기절삭깊이는 공구와 피삭재가 접촉되는 면적과 직접 연관되기 때문에 절삭력에 큰 영향을 미친다. 이에 초기절삭깊이에 따른 절삭력과 가공된 표면의 상면 버를 관찰하였다. 가공속도는 앞서 선정된 100 mm/s 으로 하였고 초기절삭깊이는 2, 4, 6, 8, 10  $\mu\text{m}$  으로 구분하였다. 자세한 실험조건은 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Details of cutting conditions

Cutting Tool	Width = 60 $\mu\text{m}$ , Length = 200/600 Tool shape angle = 0° Single crystal diamond tool
Workpiece	6:4 brass, 30×30 mm <sup>2</sup>
Pattern Size	Pitch 80 $\mu\text{m}$
Cutting Speed	100 mm/s
Cutting Depth	2, 4, 6, 8, 10 $\mu\text{m}$ /pass
Cutting Oil	Kerosene

초기절삭깊이에 따른 절삭력을 측정한 결과를 Fig. 4 와 같이 비교하였다. 공구길이에 따른 절삭력 차이는 앞서 가공속도 변화에서와 같이 약 0.02 N 이하의 작은 차이가 발생하였으며, 초기절삭깊이에 따른 절삭력의 차이는 최대 0.27 N 으로 큰 차이가 발생하였다. 공구길이에 따라 절삭력의 차이가 미세한 이유는 실험변수인 초기절삭깊이의 최대값 10  $\mu\text{m}$  이 다이아몬드공구의 길이의 차이에 크게 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 간주된다. 따라서 공구길이에 따른 절삭력의 차이는 미세한 것을 확인하였으며, 초기절삭깊이에 따른 절삭력의 차이는 큰 것을 확인하였다.

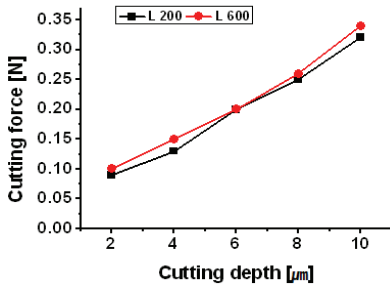


Fig. 4 Comparison of magnitude of cutting force with initial cutting depths

초기절삭깊이에 따른 고세장비 구조물의 상면 버를 비교한 결과 Fig. 5 와 같이 초기절삭깊이가

커질수록 상면 버의 발생이 심해졌다. 이것은 초기 절삭깊이가 커질수록 절삭력이 커졌기 때문이다.

본 실험을 통하여 공구길이 및 가공속도에 따른 절삭력의 차이 및 상면 버의 발생 정도는 영향이 미세한 것으로 나타났다. 그러나 초기절삭깊이에 따른 절삭력은 상면 버 발생에 큰 영향 미치는 것을 확인하였다. 따라서 초기절삭깊이 2  $\mu\text{m}$ , 가공속도 100 mm/s, 공구길이 600  $\mu\text{m}$  을 고세장비 구조물을 가공하기 위한 최적 가공 조건으로 선정하였다.

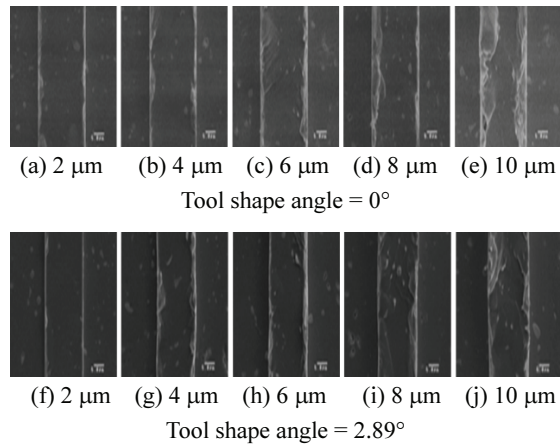


Fig. 5 Comparison of machined surface with initial cutting depths

2.2 공구형상각 영향 분석

공구형상각에 따른 상면 버의 발생차이를 비교하기 위해 Fig. 6 와 같이 형상각이 다른 사각공구를 제작하였다. 공구형상각은 공구와 구조물 측면간의 접촉면적이 달라지게 하기 때문에 상면 버의 발생에 영향을 줄 것으로 판단되어 공구의 폭은 60  $\mu\text{m}$  로 같으나 공구형상각은 2.89°와 0°로 다르게 제작하였다. 초기절삭깊이를 2, 4, 6, 10  $\mu\text{m}$  으로 구분하여 상면 버가 가장 적게 발생한 초기 절삭깊이를

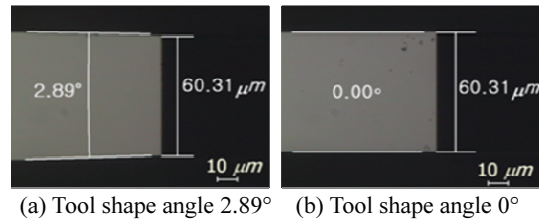


Fig. 6 Manufactured rectangular diamond tools of width 60  $\mu\text{m}$

선정한 후 이를 기반으로 4, 6, 8, 10  $\mu\text{m}$  의 중첩가공을 하였다. 자세한 실험 조건은 Table 2 와 같다.

Table 2 Details of cutting conditions

Cutting Tool	Width = 60 $\mu\text{m}$ , Tool shape angles = 2.89°, 0° Diamond tool	
Workpiece	6:4 brass, 15×15 mm <sup>2</sup>	
Pattern Size	Pitch 80 $\mu\text{m}$	
Cutting Speed	100 mm/s	
Cutting Depth	2, 4, 6, 10 $\mu\text{m}$ /pass	2+4, 6, 8, 10 $\mu\text{m}$ /pass
Cutting Oil	Kerosene	

공구형상각과 초기절삭깊이에 따른 상면 버의 발생을 비교한 결과 Fig. 7 과 같이 비교하였다. 공구형상각 0°의 공구가 2.89° 공구에 비해 상대적으로 상면 버가 적게 발생했지만 그 차이가 크지 않았다. 공구형상각과 관계없이 초기절삭깊이가 깊으면 상면 버의 발생이 심해졌다. 이와 같은 결과는 초기절삭깊이가 커질수록 절삭면적이 증가하여 상면 버의 발생이 심해진 것으로 간주된다. 초기절삭깊이가 작을수록 버가 적게 발생하기 때문에 초기절삭깊이 2  $\mu\text{m}$  을 최적조건으로 선정하여 중첩가공 깊이에 따른 상면 버의 성장상태 고찰실험을 수행하였다.

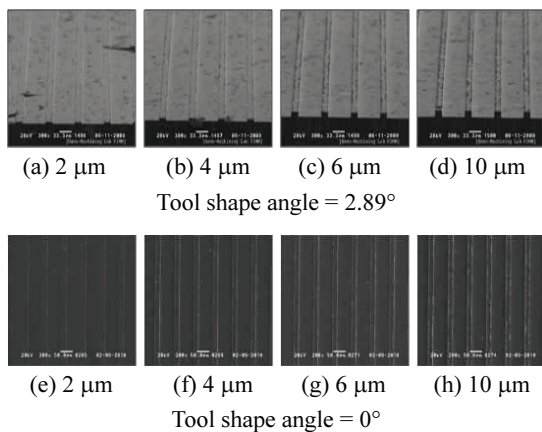


Fig. 7 Comparison of machining surface with tool shape angle and initial cutting depths

초기절삭깊이 2  $\mu\text{m}$  을 적용하여 중첩가공실험을 수행한 결과 Fig. 8 과 같이 형상 각 2.89° 공구의 경우 중첩가공깊이가 증가할수록 버의 성장이

두드러졌다. 이와 같은 결과는 Fig. 9 와 같이 공구형상 각이 격벽의 측면 상면부에 영향을 주어 발생한 것으로 간주된다. 그러나 공구형상각 0°의 경우에는 미세한 버 성장은 확인 되었으나 중첩가공 깊이가 커져도 버의 성장은 적었다. 이것은 Fig. 9 와 같이 공구형상각이 없기 때문에 중첩가공 시 격벽 측면에 적게 영향을 미쳤기 때문이다. 중첩가공깊이가 작을수록 상면 버가 적었지만, 공구형상각 0°에서는 중첩가공깊이 6  $\mu\text{m}$  까지는 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

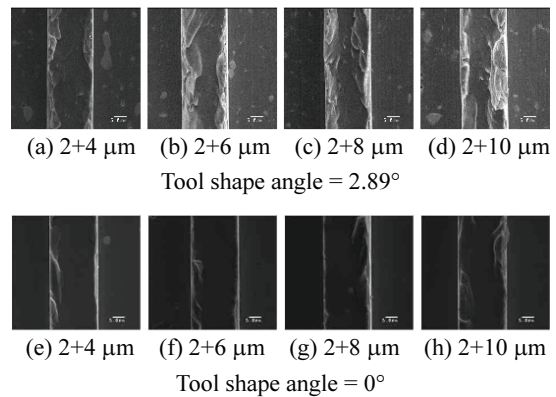


Fig. 8 Comparison of machining surface with tool shape angle and overlapped cutting depths

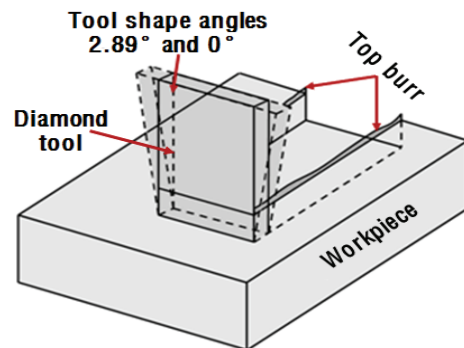


Fig. 9 Analysis on influence of tool shape angles on occurrence of top burr

### 3. 고세장비 격벽어레이구조물 가공 실험

#### 3.1 중첩가공깊이에 따른 고세장비 격벽구조물 변형 실험

중첩가공깊이(Overlapped cutting depth = OCD)에 따른 격벽구조물 변형 및 파손을 분석하기 위해

Fig. 10 과 실험을 수행하였다. 고세장비 구조물 가공조건 실험을 기반으로 다이아몬드공구 폭 60  $\mu\text{m}$ , 길이 600  $\mu\text{m}$ , 형상각 0°의 다이아몬드공구를 사용하였다. 가공속도는 100 mm/s, 초기절삭깊이는 2  $\mu\text{m}$  을 적용하였으며, 중첩가공깊이는 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  으로 설정하였다. 중첩가공깊이 10  $\mu\text{m}$  의 경우에는 앞의 실험에서 상면 버가 발생하였으나, 가공시간을 단축하기 위하여 변수 값으로 설정하였다. 자세한 가공조건은 Table 3 과 같다.

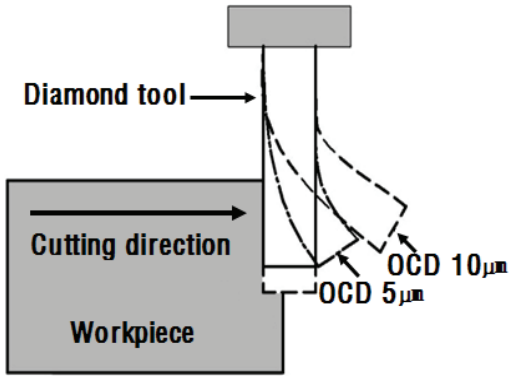
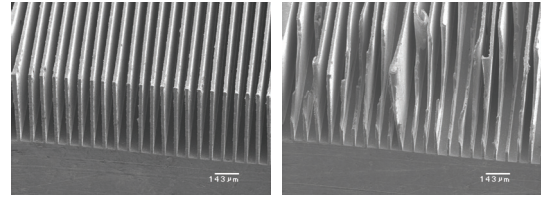


Fig. 10 Experimental methods on overlapped cutting depths

Table 3 Details of experimental conditions

Cutting Tool	Width = 60 $\mu\text{m}$ , Length = 600, Tool shape angle = 0° Diamond tool
Workpiece	6:4 brass, 30×30 mm <sup>2</sup>
Pattern Size	Pitch 80 $\mu\text{m}$
Cutting Speed	100 mm/s
Cutting Depth	(2 $\mu\text{m}$ × 1) + (5 $\mu\text{m}$ × 119 or 10 $\mu\text{m}$ × 79) + (3 $\mu\text{m}$ × 1)
Cutting Oil	Kerosene

중첩가공깊이에 따른 격벽구조물의 가공결과를 Fig. 11 과 같이 비교하였다. 중첩가공깊이 5  $\mu\text{m}$  을 적용하였을 때 구조물의 변형 및 파손이 발생하지 않았다. 그러나 중첩가공깊이 10  $\mu\text{m}$  을 적용하였을 때 공구와 공작물의 초기 진입충격이 커져서 구조물의 변형 및 파손이 발생한 것으로 간주된다. 중첩가공깊이가 고세장비 구조물의 변형 및 파손에 영향이 큰 것을 확인하였다. 따라서 중첩가공깊이 5  $\mu\text{m}$  를 최적의 값으로 설정하였다.

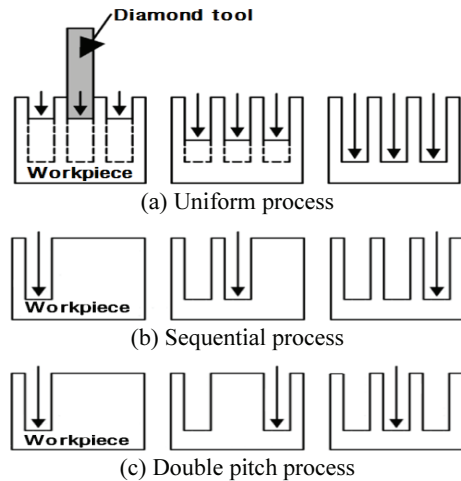


(a) OCD 5  $\mu\text{m}$  (b) OCD 10  $\mu\text{m}$

Fig. 11 Comparison of machined high-aspect ratio micro structures with overlapped cutting depths (OCD)

### 3.2 절삭순서에 따른 고세장비 격벽구조물 변형 실험

고세장비 구조물의 경우에는 구조물의 변형이 쉽게 발생하기 때문에, 구조물을 지지할 수 있는 면적이 달라지게 되는 절삭순서에 따라 구조물의 변형 및 파손이 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Fig. 12 와 같은 가공방법들을 제안하였다. 첫 번째 가공방법은 Fig. 12(a) 와 같이 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법으로 전체의 격벽을 X 축 방향으로 균일하게 일정한 깊이를 가공하는 것이다. 두 번째는 Fig. 12(b) 와 같이 한 개의 격벽을 완성하고 다음 격벽을 가공하는 순차가공 방법이다. 마지막으로는 Fig. 12(c) 와 같이 피치를 두 배로 하여 격벽을 가공한 뒤 사이를 가공하는 교차가공 방법이다. 절삭순서에 따른 고세장비 격벽구조물 변형 실험에서 중첩가공깊이를 5  $\mu\text{m}$  으로 적용하였고, 그 외 자세한 가공조건은 Table 3 과 같다.



(a) Uniform process

(b) Sequential process

(c) Double pitch process

Fig. 12 Experimental methods for machining high aspect ratio micro barrier rip structures with machining processes

절삭순서에 따른 고세장비 구조물 가공 실험결과를 Fig. 13 과 같이 비교하였다. 균일가공에서는 Fig. 13(a)와 같이 격벽의 변형이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 13(b)와 같이 한 격벽을 완성한 후 다음 격벽을 가공하는 순차가공에서 격벽이 가공진행의 반대 방향으로 변형되는 것을 확인하였다. Fig. 13(c)와 같은 교차가공에서도 격벽의 변형을 확인하였다.

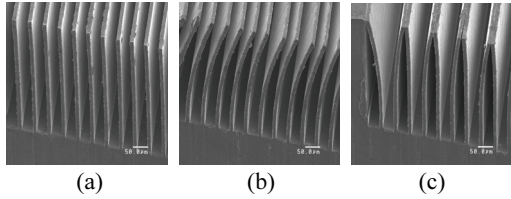


Fig. 13 Experimental results in the deformation of machined high-aspect ratio micro barrier rib structures according to machining processes

첫 번째 가공방법은 가공깊이가 균일하게 깊어지면서 가공되기 때문에 Fig. 14(a)와 같이 격벽구조물을 지지할 수 있는 면적이 계속해서 남아있다. 그러나 두 번째, 세 번째 방법에서는 격벽이 점차 얇아지면서 지지해줄 면적이 부족하여 작은 힘에도 자중에 의해서 Fig. 14(b)와 같이 한쪽으로 쏠리는 변형이 나타나게 된 것으로 판단된다. 또한 세 번째 방법의 경우에는 먼저 한 격벽이 옆의 격벽이 휘는 것을 막아 주어 Fig. 14(c)와 같이 격벽이 번갈아 가며 변형된 것으로 간주된다.

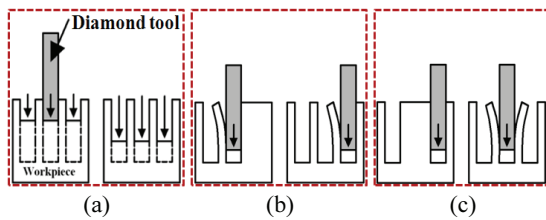


Fig. 14 Analysis on deformation of high-aspect ratio micro barrier rib structures according to machining processes

균일가공을 통해서 격벽이 변형되지 않는 것을 확인하였고, 순차가공과 교차가공에서는 자중에 의해 격벽이 가공순서에 따라 변형되는 것을 확인하였다. 고세장비 미세 격벽구조물 가공에서 균일가공법과 적절한 초기절삭깊이 및 중첩가공깊이를 적용

하였을 때 우수한 가공결과를 얻을 수 있었다.

앞서 실험한 결과를 기반으로 공구길이 600  $\mu\text{m}$ , 공구형상각 0°, 가공속도 100 mm/s, 초기절삭깊이 2  $\mu\text{m}$ , 중첩가공깊이 5  $\mu\text{m}$ , 균일가공법이 고세장비 미세 격벽어레이구조물을 가공하기 위한 최적 조건으로 선정하였다. 이를 바탕으로 세장비 30(폭 20  $\mu\text{m}$ , 높이 600  $\mu\text{m}$ )의 고세장비 미세 격벽어레이구조물을 가공하였고, Fig. 15 와 같이 격벽구조물의 변형 및 파손 없이 성공적인 가공결과를 얻을 수 있었다.

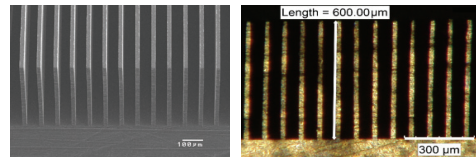


Fig. 15 Machined micro barrier rib array structures having high aspect ratio (width 20  $\mu\text{m}$ , depth 600  $\mu\text{m}$ , AR 30)

#### 4. 결론

본 연구에서는 고세장비 미세 격벽어레이구조물을 가공을 위해 공구길이, 가공속도, 공구형상각, 중첩가공깊이 등의 가공변수를 변화시켜 가공특성 분석과 함께 최적의 가공조건을 확립하고 고세장비 (AR 30) 미세 격벽어레이구조물을 성공적으로 가공하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 공구길이 및 가공속도는 고세장비 격벽구조물 가공에 큰 영향을 주지 않았다.
- 2) 초기절삭깊이, 중첩가공깊이, 공구형상각이 커질수록 상면 버가 많이 발생하였다.
- 3) 고세장비 미세 격벽구조물 가공에서 중첩가공깊이가 커졌을 때 구조물의 변형 및 파손이 발생된 것을 확인하였다.
- 4) 고세장비 미세 격벽구조물 가공에서 절삭순서에 따라 격벽구조물의 변형이 발생할 수 있으며, 균일 가공을 통해 이를 최소화할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Davies, M. A., Evans, C. J., Patterson, S. R., Vohra, R., and Bergner, B. C., "Applications of Precision Diamond Machining to the Manufacture of Micro-Photonics Components," Proc. of SPIE, Vol. 5183,

- pp. 94-108, 2003.
2. Yan, J., Oowada, T., Zhou, T., and Kuriyagawa, T., "Precision Machining of Microstructures on Electroless-plated NiP Surface for Molding Glass Components," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 4802-4808, 2009.
  3. Lee, T. H., "Imprinted bidirectional waveguide platform for large-core optical transceiver," *Optics Letter*, Vol. 36, pp. 2324-2326, 2011.
  4. Je, T. J., Lee, K. W., Park, S. C., Kim, J. G., Choi, D. S., Park, K. T., and Whang, Y. H., "Influence of Tool Deflection on Micro Channel Pattern of 6:4 brass with Rectangular Tool," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 19, pp. 164-170, 2009.
  5. Hamdan, M. N. and Bayoumi, A. E., "An approach to study the effects of tool geometry on the primary chatter vibration in orthogonal cutting," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 128, pp. 451-469, 1989.
  6. Le, D., Lee, J. M., Kim, S. J., Lee, D. Y., and Lee, S. W., "Burr analysis in microgrooving," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, pp. 569-577, 2010.
  7. Hung, D. T., Kim, H. C., Lee, D. Y., Lee, S. W., Park, E. S., and Je, T. J., "Study on the Deformation of Rectangular Pattern in Micro Machining," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 529-530, 2011.
  8. Ding, X., Jarfors, A. E. W., Lim, G. C., Shaw, K. C., Liu, Y. C., and Tang, L. J., "A Study of the Cutting Performance of Poly-crystalline Oxygen Free Copper with Single Crystalline Diamond Micro-tools," *Precision Engineering*, Vol. 36, pp. 141-152, 2012.
  9. Je, T. J., Choi, D. S., Jeon, E. C., Park, E. S., and Choi, H. J., "Trends of flat mold machining technology with micro pattern," *Journal of the Korea Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 2, pp. 1-6, 2012.
  10. Tansel, I. N., Arkan, T. T., Bao, W. Y., Mahendrakar, N., Shisler, B., Smoth, D., and McCool, M., "Tool wear estimation in micro-machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 599-608, 2000.
  11. Noh, Y. J., Arai, Y., Tano, M., and Gao, W., "Fabrication of Large-area Micro-lens Arrays with Fast Tool Control," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 9, No. 4, pp. 32-38, 2008.
  12. Duong, T. H., Kim, H. C., Lee, D. Y., Lee, S. W., and Je, T. J., "A theoretical deformation prediction of micro channel in ultra-precision machining," *Proc. of the 12th Euspen International Conference*, pp. 311-314, 2012.
  13. Biddut, A. Q., Rahman, M., Neo, K. S., Rezaur Rahman, K. M., Sawa, M., and Maeda, Y., "Performance of single crystal diamond tools with different rake angles during micro-grooving on electroless nickel plated die materials," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, pp. 891-899, 2007.
  14. Dornfeld, D., Min, S., and Takeuchi, Y., "Recent Advances in Mechanical Micromachining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 55, pp. 745-768, 2006.