

타원궤적 진동절삭 가공기를 이용한 미세 형상 가공

Machining of Micro Structure using Elliptical Vibration Grooving Machine

✉ 김기대¹, 노병국²

✉ Gi Dae Kim¹ and Byoung Gook Loh²

¹ 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic Univ. of Daegu)

² 한성대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung Univ.)

✉ Corresponding author: gidkim@cu.ac.kr, Tel: 053-850-2724

Manuscript received: 2008.6.4 / Revised: 2008.8.26 / Accepted: 2008.9.2

Successive micro-scale V-grooves and a grid of pyramids were machined by elliptical vibration cutting (EVC) to investigate feasibility of using EVC as an alternative method of creating micro-molds to photo-lithography and electroforming, which have been commonly employed. An elliptical vibration grooving machine was developed which consists of two orthogonally-arranged piezoelectric actuators, a diamond cutting tool, and a motorized xyz stage. The micro-scale features were machined on materials of copper, duralumin, nickel, and hastelloy and it was found that EVC significantly reduces cutting resistance and prohibits generation of side burrs and rollover burrs, thus resulting in improving machining quality of micro-molds in all experimented workpiece materials.

Key Words: Elliptical Vibration Cutting (EVC, 타원궤적 진동절삭), V-grooves (V-홈), Pyramid Pattern (피라미드 패턴), Grooving Machine (홈 절삭가공기), Burr (버)

기호설명

CC = Conventional cutting

EVC = Elliptical vibration cutting

$A_c(A_t)$ = Amplitude of elliptical locus of cutting tool in the cutting (thrust) direction

v_f = Feedrate [mm/s]

d = Depth of cut [μm]

f_i = Feed interval between successive V-grooves [μm]

1. 서론

제품이 점차 소형화됨으로써 미세 부품을 초정밀하게 생산해 낼 수 있는 마이크로 몰드의 정밀가공 기술이 매우 필요하다. 특히 마이크로 볼

드 내 일정한 패턴을 가지는 미세 형상을 초정밀하게 가공하는 기술의 중요성이 크게 증가하고 있다. 디지털 가전, 휴대폰 등 IT 기술과 NT 기술, 그리고 BT 기술이 발달함에 따라 LCD 도광판(light guide panel) 금형이나 정밀렌즈 금형 및 연료 전지 분리판 또는 각종 바이오 칩(bio chip) 등의 표면에 V-홈(V-grooving)이나 피라미드 형상의 패턴을 정밀하게 가공하는 기술이 절실히 요구된다.

현재 마이크로 몰드 중에서 피라미드 형상과 같은 미세 패턴을 가진 스탬퍼(stamper)를 제작하기 위해서는 주로 실리콘 웨이퍼 위에 SiO_2 산화층 증착, 감광재(photo-resist, PR) 코팅, 필요형상 패터닝(patterning) 및 에칭(etching) 공정을 거쳐 마이크로 패턴 마스터를 제작한 후, 시드 층(seed layer) 증착 및 니켈 전주도금(electroforming)을 거

쳐야 한다.¹ 만일 절삭가공 방식으로 마이크로 몰드 제작에 필요한 미세형상을 직접 가공할 수 있다면 이러한 복잡한 공정이 필요하지 않을 것이다. 더욱이 절삭가공 방식은 가공 재료에 거의 제한이 없고, 열변형이 적으며 또한 만족할만한 표면거칠기 수준을 얻을 수 있다.

한편, 절삭공구를 절삭방향과 이와 수직인 배분력 방향으로 가진시키면 절삭공구에는 2 차원으로 타원케적이 생성되며, 공구가 이러한 타원케적을 그리며 절삭을 수행하는 방법을 타원케적 진동 절삭(EVC, elliptical vibration cutting)이라 한다.^{2,3} 그동안 많은 연구자들은 일정한 형상의 홈 가공(grooving) 및 선삭에서의 면 가공 등에 타원케적 진동절삭을 적용함으로써 절삭저항의 감소,^{2-5,7-10} 칩 두께의 감소,^{2,3,7-10} 형상 정밀도 향상,^{3,4,6-10} 표면 거칠기 감소,^{5,7-10} 그리고 공구 수명 개선^{5,7} 등의 효과를 거둘 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 선단각(nose angle)이 80° 인 단결정 다이아몬드(single crystalline diamond) 공구를 제작하고 구리, 두랄루민과 같은 연성재질과 상대적으로 강도 및 경도가 커서 마이크로 몰드 재료로 많이 사용되는 니켈 도금강 및 니켈 합금강 재료에 대해 타원케적 진동절삭을 수행하여 미세 홈 및 피라미드 형상의 미세패턴을 가공하였다. 일반적인 가공방법(CC, conventional cutting)과 EVC 가공의 절삭성 및 가공정밀도를 비교하였고, 미세 홈을 수직인 방향으로 교차시켜 가공함으로써 피라미드 형상의 미세 패턴을 정밀하게 가공할 수 있는 방안을 도출하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치의 구성

Fig. 1 은 절삭공구에 x 방향, 즉 공구 이송방향 혹은 주절삭 방향(primary cutting direction)과 y 방향, 즉 배분력 방향(thrust direction)으로 2 개의 압전 소자를 부착하여 이들 두 방향을 포함하는 2 차원 평면에 타원케적을 생성시킬 수 있는 절삭기구를 보여주고 있다.^{8,9} 두 개의 압전 소자에 다양한 영역의 주파수 및 크기를 가지는 정현파 전압을 위상 차이를 두고 공급함으로써 절삭공구에 여러 가지 형상의 타원케적을 생성시킬 수 있었다.^{8,9} 본 연구에서는 가진 주파수를 18kHz 로 고정하고 절삭 방향 및 배분력 방향 변위의 진폭을 다양하게 변화시켜가면서 미세패턴 가공을 위한 타원케적

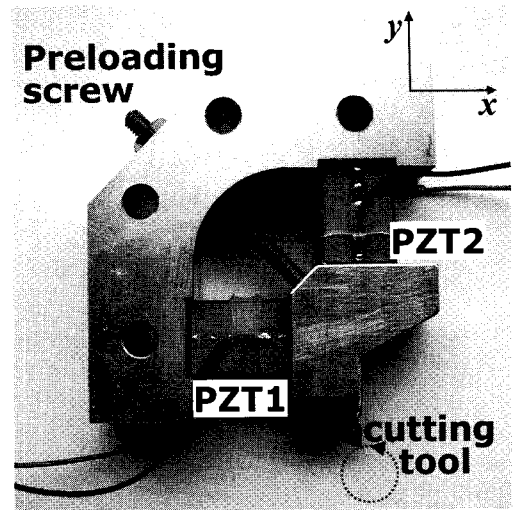


Fig. 1 PZT Cutting structure generating elliptical vibration

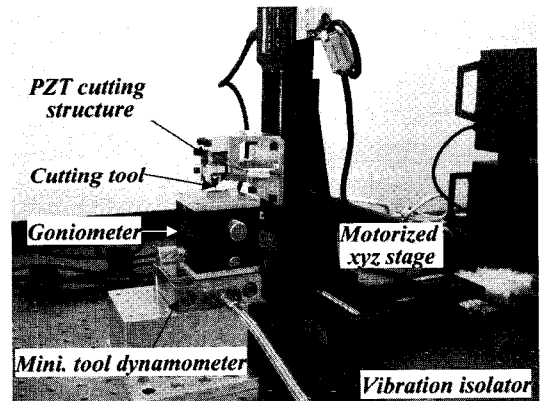


Fig. 2 Elliptical vibration grooving machine

진동절삭을 수행하였다.

정밀 xyz 스테이지 위에 Fig. 1 에 나타난 절삭기구를 부착하여 홈을 가공할 수 있는 타원케적 진동절삭 가공기를 구성하였으며 전체 구성도를 Fig. 2 에 나타내었다. 사용된 절삭 공구는 선단각이 80°, 여유각이 20°, 경사각이 0°, 그리고 노우즈 반경(nose radius)이 1 μ m 인 단결정다이아몬드 공구이다.

공구동력계(Kistler, 9256C)로 가공 중 절삭저항의 변화를 측정하고, 가공된 시편은 SEM 으로 관찰하고 생성되는 칩의 형상은 광학현미경으로 관찰하여 CC 와 EVC 의 절삭성 및 미세형상 가공정밀도를 서로 비교하였다.

본 연구에 사용된 시편 재질 종류를 Table 1 에

나타내었다. 우선 두랄루민(Al6061)과 무산소동(C1010)과 같은 연성 재질로 미세패턴 가공을 위한 타원케직 진동절삭 가공기의 성능을 확인하였고, 마이크로 볼드 소재로 많이 사용되는 STAVAX 강에 100 μ m 정도의 두께로 니켈이 도금된 니켈 도금강, 그리고 니켈에 몰리브덴과 크롬 성분이 함유된 하스텔로이(hastelloy, C-276) 니켈 합금강을 소재로 하여 타원케직 진동절삭으로 미세패턴을 가공하였다.

Table I Materials used in experiments

Materials	Compositions
Copper(C1010)	Cu (99.99 \uparrow)
Duralumin (Al6061)	Al+Cu(0.15~0.4)+Mg(0.8~1.2) +Si(0.4~0.8)
Nickel	Ni (99.99 \uparrow)
Hastelloy(C-276)	Ni+Mo(16)+Cr(15)+Fe(5.5)

2.2 실험 방법

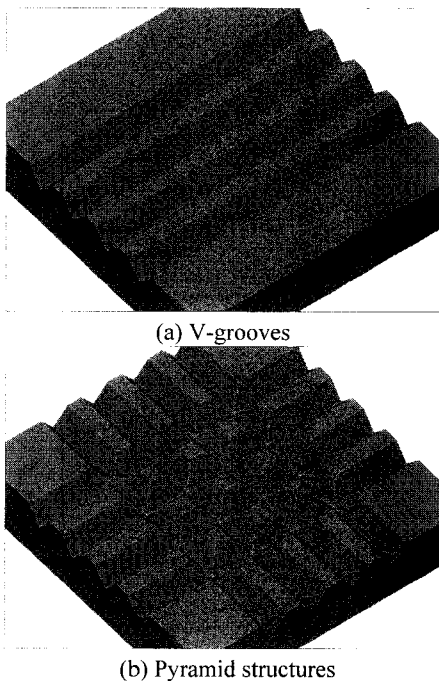


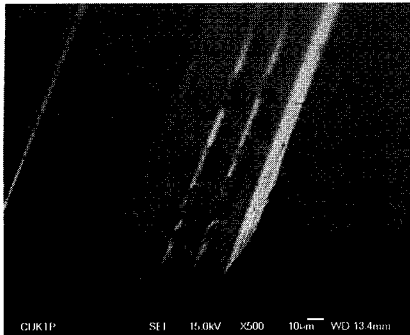
Fig. 3 Machining of successive V-grooves and pyramid structures

Fig. 3(a)와 같이 시편에 연속적으로 V-홈을 평행하게 가공한 후, 공작물을 90° 회전시키고 그 위에 다시 한 번 동일한 공정을 반복수행하면 Fig. 3(b)와 같이 균일하게 분포되어 있는 사각뿔 모양의 피라미드 패턴을 가공할 수 있다. 여기에서 절삭깊이 및 V-홈 간의 간격(feed interval)을 조절하면 피라미드 패턴의 형상 및 크기, 그리고 패턴 사이의 간격을 조절할 수 있다. 기존에 이와 같은 형상의 미세 피라미드 패턴을 가공하기 위해서는 전주도금 방식을 이용하였지만, 이는 초기 투자 비용이 많이 드는 포토리소그래피(photo lithography) 공정이 필요하며, 또한 여러 단계의 마스크킹(masking) 공정과 에칭 공정 등이 필요하기때문에 상대적으로 고비용 저효율 공정이라 할 수 있다. 이에 반하여 절삭공정을 이용하여 마이크로 홈과 다양한 패턴을 가지는 미세 구조물을 제작할 수 있다면 다양한 수요를 신속히 충족시키기 위해 적합한 방법이라고 할 수 있다.

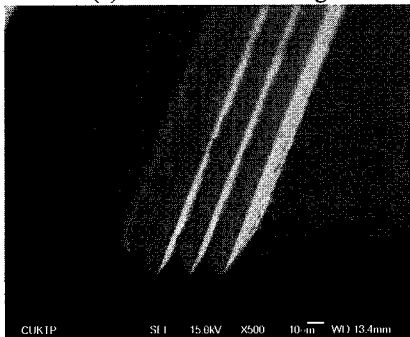
3. 결과 및 토의

무산소동 시편을 단결정 다이아몬드 공구로 절삭깊이(d) 15 μ m, 홈 사이의 간격(f) 20 μ m, 이송속도(v_f) 10mm/s 로 하여 3 번 연속 V-홈 가공한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 CC 방법으로 가공하였을 경우에는 가공 방향(feed direction)과 수직한 방향으로 생성되는 버(side burr) 및 가공 출구 방향으로 생성되는 버(rollover burr)가 많이 발생하여 연속된 V-홈의 형상 정밀도가 크게 저하되었으나, Fig. 4(b)와 같이 가진주파수가 18kHz 이며 절삭 방향의 진폭 1.88 μ m, 배분력 방향의 진폭 0.92 μ m 인 타원케직 진동을 공구에 가진시켜 가공하였을 경우에는 형상정밀도가 크게 향상되었음을 보여준다. Fig. 5 는 이 때 측정된 주절삭력의 변화를 보여주고 있으며 EVC 로 가공하였을 경우 평균 주절삭력이 약 70% 감소하였음을 알 수 있다. 미세가공 시 이러한 절삭저항의 감소는 형상정밀도를 크게 향상시킨다.

Fig. 6 은 타원 장단경 비를 2:1 로 고정하고 타원 진폭의 크기를 변화시켜가면서 V-홈을 가공하였을 때의 절삭력 변화를 보여준다. Fig. 6 에서 알 수 있는 바와 같이 레직의 진폭이 증가함에 따라 절삭저항이 감소하고 있으며, 타원케직의 진폭이 작은 범위일 때는 절삭 저항이 감소되는 비율이 매우 크고 진폭이 어느 정도(여기서는 1 μ m) 이상



(a) Conventional cutting



(b) Elliptical vibration cutting ($A_c=1.88\mu\text{m}$, $A_f=0.92\mu\text{m}$)
 Fig. 4 Comparison of successive V-grooves machined by CC and EVC (material of workpiece : C1010, $d : 15 \mu\text{m}$, $f_i : 20 \mu\text{m}$, $v_f : 10\text{mm/s}$)

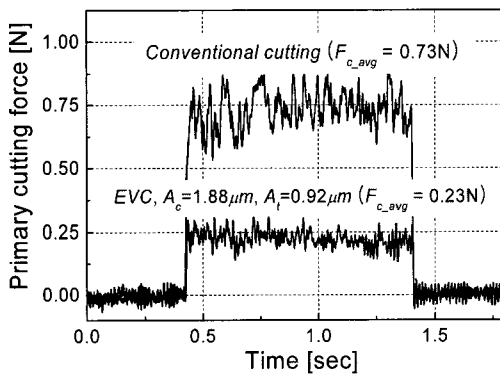


Fig. 5 Comparison of primary cutting force between CC and EVC (C1010, $d : 15 \mu\text{m}$, $v_f : 10\text{mm/s}$)

일 경우 칩의 진폭이 증가하더라도 절삭 저항의 변화가 작다. 이러한 타원궤적의 진폭에 따른 절삭 저항의 변화 경향은 기존의 연구결과와 일치한다.^{8,9}

두랄루민(Al6061) 재료를 절삭깊이 $20\mu\text{m}$, 홈사이의 간격 $68\mu\text{m}$, 이송속도 5mm/s 로 하여 V-홈

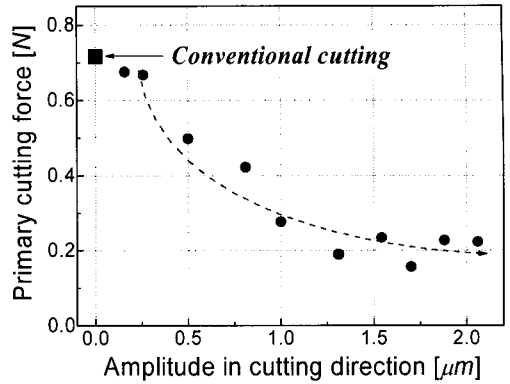
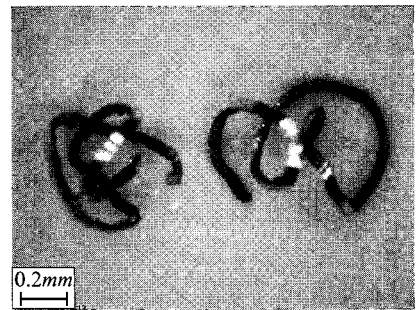
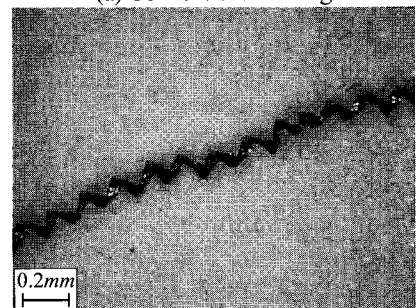


Fig. 6 Primary cutting force vs. amplitude in cutting direction of elliptical locus (C1010, $d : 15\mu\text{m}$, $v_f : 10\text{mm/s}$, $A_c/A_f=2$)



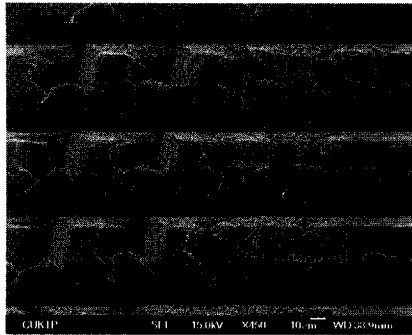
(a) Conventional cutting



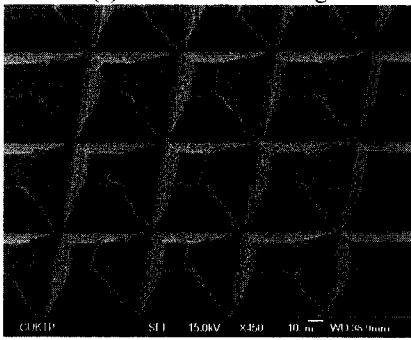
(b) Elliptical vibration cutting ($A_c=A_f=1\mu\text{m}$)

Fig. 7 Comparison of chip shape produced by CC and EVC (Al6061, $d : 20\mu\text{m}$, $v_f : 5\text{mm/s}$)

가공한 후 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 공작물을 수직방향으로 교차 가공하여 피라미드 패턴을 가공하였다. Fig. 7 은 1 차 V-홈 가공 때 생성된 칩의 형상을, Fig. 8 은 교차 가공 후 생성된 피라미드 패턴 형상을 보여주고 있다. CC 방식으로 가공하였을 경우에는 상대적으로 두껍고 곡률반경이 큰

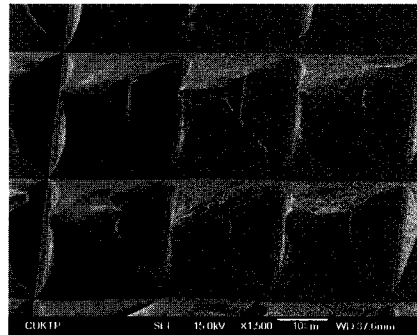


(a) Conventional cutting

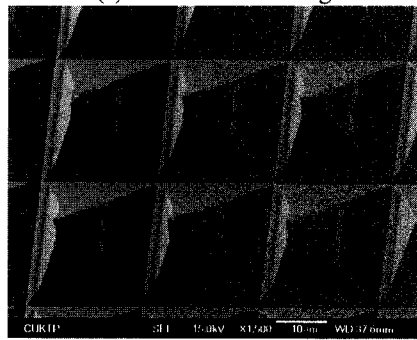


(b) Elliptical vibration cutting ($A_c=A_f=1\mu m$)

Fig. 8 Comparison of pyramid structure(material of workpiece : Al6061, $d : 20\mu m$, $f_i : 68\mu m$, $v_f : 5mm/s$)



(a) Conventional cutting



(b) Elliptical vibration cutting ($A_c=A_f=1\mu m$)

Fig. 9 Comparison of pyramid structure(material of workpiece : Nickel, $d : 20\mu m$, $f_i : 27\mu m$, $v_f : 5mm/s$)

칩이 생성되었지만, EVC 로 가공하였을 경우 곡률 반경이 작고, 또한 EVC 가공 특성상 미변형 칩두께가 얇아지기 때문에 두께가 얇은 칩이 생성되었다.¹⁰

이러한 수직방향 교차가공 방식으로 피라미드 패턴을 가공할 경우 이전에 가공된 V-홈들을 가로질러 절삭하기 때문에 각 패턴 위에 출구 방향으로 발생하는 버(rollover burr)가 생성되며, 이는 전체 피라미드 형상 가공정밀도를 크게 저하시키게 된다. EVC 일 경우 미변형 칩두께 및 절삭저항이 크게 감소되기 때문에 버의 생성이 억제되고 결과적으로 Fig. 8 에 나타난 바와 같이 미세가공 형상 정밀도가 향상되었음을 확인할 수 있다.

V-홈 경로간 간격을 조절하여 완전한 피라미드 형상의 패턴이 생성되도록 니켈 재료를 가공하였으며 그 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 니켈 재료는 취성이 상대적으로 커서 버가 생성되는 대신 가공 출구 부분에 시편이 뜯겨져서 파손되는 현상이 발생하였으며, Fig. 9(a) 에서 그 현상을 확인할 수 있다. 이에 반하여 비록 공구의 마모 혹은 부분적

칩핑(chipping)으로 인해 완벽하게 가공되지는 않았지만 EVC 로 가공하였을 경우 Fig. 9(b)와 같이 피라미드 형상의 미세 가공 정밀도를 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

니켈 합금강의 일종인 하스텔로이는 내산화성, 내화성 및 가공성이 좋아 화학공업용으로 널리 사용되는 재료이다. 하스텔로이 재료에 EVC 를 적용하여 미세 패턴을 직접 가공할 수 있는 지 확인하기 위하여 깊이 $20\mu m$ 인 V-홈을 가공하였다. 이때, 단결정 다이아몬드 공구에 무리를 주지 않기 위해 절삭깊이를 $15\mu m$ 와 $5\mu m$ 로 두 번에 걸쳐 나누어 가공하였으며 그 때 측정된 주절삭력(primary cutting force) 및 배분력(thrust force)의 평균값의 변화를 Fig. 10 에 나타내었다. EVC 로 가공하였을 경우 절삭력의 크기가 CC 에 비하여 10~25% 정도의 크기로 감소되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 11 은 하스텔로이 재료에 홈의 깊이를 $20\mu m$, 홈 사이의 간격을 $32\mu m$ 로 하여 연속적으로 4 개의 V-홈을 가공한 결과이다. Fig. 11 에서 알 수 있는 바와 같이 하스텔로이 재료에서도 연속된

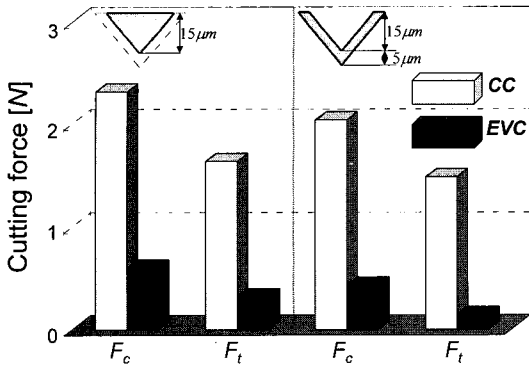


Fig. 10 Comparison of primary cutting force(F_c) and thrust force(F_t) (material of workpiece : *Hastelloy(C-276)*, $d : 15 \mu\text{m}+5 \mu\text{m}$, $v_f : 10\text{mm/s}$, $A_c = A_t = 1 \mu\text{m}$)

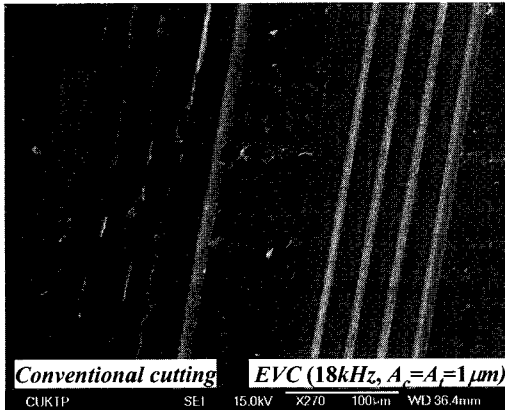
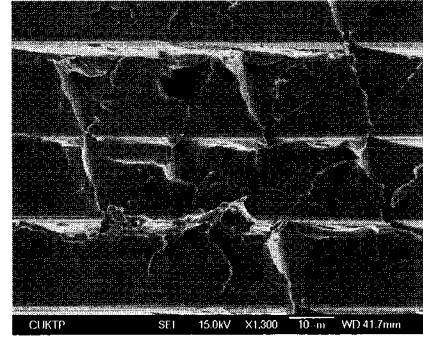


Fig. 11 Comparison of successive V-grooves (material of workpiece : *Hastelloy(C-276)*, $d : 15 \mu\text{m}+5 \mu\text{m}$, $f_i : 32 \mu\text{m}$, $v_f : 5\text{mm/s}$)

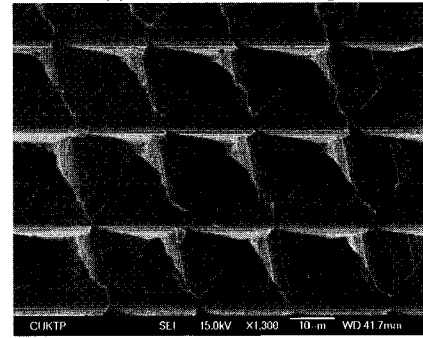
V-홈 가공 시 CC 와 EVC 방식 간에 뚜렷한 형상 정밀도 차이를 발견할 수 있다. Fig. 12 는 하스텔로이 재료를 절삭깊이 $10 \mu\text{m}$, 이송간격 $24 \mu\text{m}$, 이송속도 10mm/s 로 하여 V-홈을 4 번 연속 가공한 후 수직방향으로 교차 가공하여 피라미드 형상을 가공한 결과이다. CC 방식으로 가공한 경우에는 버가 많이 발생하여 피라미드 패턴을 발견하기 어려울 정도로 가공 형상이 왜곡되었지만, EVC 방식으로 가공하면 미세 피라미드 패턴 형상을 상대적으로 정밀하게 가공할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

절삭 공구에 다양한 타원체적을 생성시킬 수 있는 진동절삭 가공기를 제작한 후 무산소동, 두



(a) Conventional cutting



(b) Elliptical vibration cutting ($A_c = A_t = 1 \mu\text{m}$)

Fig. 12 Comparison of pyramid structure(material of workpiece : *Hastelloy(C-276)*, $d : 10 \mu\text{m}$, $f_i : 24 \mu\text{m}$, $v_f : 10\text{mm/s}$)

랄루민, 니켈 도금강, 니켈 합금강 등을 재료로 하여 연속적인 V-홈 및 피라미드 형상의 미세 패턴을 가공하였다. 모든 재료에 대하여 EVC 가공을 수행하면 CC 가공 방식에 비하여 가공 형상정밀도가 크게 개선되었음을 확인하였다. 본 연구 결과는 미세 패턴을 가진 마이크로 몰드 가공에 직접 이용될 수 있으며, 이를 통해 전주도금 및 포토리소그래피 등 복잡한 공정없이 절삭 가공만으로 마이크로 몰드를 정밀하게 제작할 수 있는 기반기술을 확립할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006 년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00013)

참고문헌

1. Kim, S. K., Yoo, Y. E., Seo, Y. H., Jae, T. J., Whang,

- K. H. and Choi, D. S., "Fabrication of Ni Stamper based on Micro-Pyramid Structures for High Uniformity Light Guide Panel(LGP)," *Journal of KSPE*, Vol. 23, No. 9, pp. 174-178, 2006.
2. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 43, Issue 1, pp. 35-38, 1994.
 3. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, Issue 1, pp. 31-34, 1995.
 4. Shamoto, E., Moriwaki, T., Ma, C. and Wang, L., "Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 12-13, pp. 1305-1310, 2004.
 5. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 48, Issue 1, pp. 441-444, 1999.
 6. Shamoto, E., Suzuki, N. and Naoi, Y., "Development of Ultrasonic Elliptical Vibration Controller for Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 51, Issue 1, pp.327-330, 2002.
 7. Brehl, D. E. and Dow, T. A., "Review of vibration-assisted machining," *Precision Engineering*, Vol. 32, Issue 3, pp. 153-172, 2008.
 8. Kim, G. D. and Loh, B. G., "Characteristics of Elliptical Vibration Cutting in Micro V-grooving with Variations of Elliptical Cutting Locus and Excitation Frequency," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, No. 2, 025002, 2008.
 9. Kim, G. D. and Loh, B. G., "Elliptical Vibration Cutting with Variable Trajectory for Ultra-precision Micro-Machining," *Journal of KSPE*, Vol. 24, No. 11, pp. 52-58, 2007.
 10. Kim, G. D. and Loh, B. G., "Characteristics of Chip Formation in Micro V-grooving Using Elliptical Vibration Cutting," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 1458-1466, 2007.