

# PC 폴리머 재료의 미세 V-홈 절삭가공 시 패턴 크기 최소화

김기대\*

(논문접수일 2011. 05. 27, 수정일 2011. 07. 18, 심사완료일 2011. 07. 20)

## Minimization of Pattern Size on Polycarbonate Material in V-grooving

Gi Dae Kim\*

### Abstract

Polycarbonate (PC) polymer is an engineering plastic which has large tensile strength and impact resistance and is widely used as functional parts like micro mold. Direct machining of PC materials produces lots of burrs and rough surface due to large ductility and weak heat resistance and hence it is very difficult to machine PC materials using cutting tool to make micro-parts. In this study, elliptical vibration cutting (EVC) or 2-dimensional vibration cutting was performed to minimize the size of micro V-grooves on PC material. From the experimental results, it was observed that as the cutting depth and pattern size become smaller, the better machining quality was obtained, which is attributed to the positive effect of EVC that is dependent on the ratio of vibration amplitude to cutting depth. As the height of V-groove becomes less than  $1.8\mu\text{m}$ , however, the machining quality becomes lower as the pattern size decreases.

**Key Words** : Polycarbonate polymer(PC 폴리머), Pattern Size(패턴크기), Elliptical Vibration Cutting(EVC)(타원궤적진동절삭), V-grooving(V-홈 가공)

## 1. 서론

NT, IT, BT 등의 분야에서 부품의 초정밀화, 고집적화 추세에 따라 다양한 형상의 미세패턴을 가진 폴리머(polymer), 그 중에서도 특히 PMMA(poly-methyl-meth-acrylate), PC(polycarbonate) 소재가 널리 이용되고 있다. 연속적인 V-홈과 피라미드 형상 등 미세형상 패턴을 가진 폴리머 소재는 그 자체로 가공되어 직접 미세 부품으로 이용되기도 하고, 또는 미세몰드(micro mold)의 소재로 사용되기도 한다. 미세 패턴을 가지는 폴리머 소재를 제작하는 가장 일반적인 방법은 우선 다이아몬드 공구를 이용하여 금속 소재 미세금형을 가공(machining)한 후 핫-임보싱(hot-embossing) 등의 복잡한 성형 공정을 통해

최종 폴리머 소재의 미세부품 혹은 미세몰드를 완성하는 것이다. 폴리머 소재는 금속에 비해 연성이 매우 풍부하고 내열성이 매우 취약하기 때문에 직접 절삭공구로 가공을 하면 칩의 전단 변형 및 공구의 마찰작용으로 고온이 발생하여 가공 표면이 거칠고 버(burr)가 과다하게 생성된다. 가공량 혹은 절삭깊이가 감소할수록 이러한 폴리머 소재의 나쁜 절삭성은 상대적으로 더욱 뚜렷하게 나타나서 크기가 수  $\mu\text{m}$  이내의 V-홈, 피라미드 형상 등 미세패턴을 일반적인 절삭가공 방식으로 직접 절삭가공하기는 어렵다.

김국원<sup>(1)</sup>은 절삭 공정에서 절삭깊이가 미세해짐에 따라 공구의 노우즈 반경과 공작물 탄성변형의 영향을 고려하여 유한요소해석을 통해 임계절삭깊이를 정량적으로 계산하였다. 손성

\* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (gidkim@cu.ac.kr)  
주소: 712-702 경상북도 경산시 하양읍 금락리

만 등<sup>(2)</sup>은 단방향 진동절삭을 이용하면 공구와 공작물간의 마찰력을 변화시킴으로써 더 작은 절삭깊이로 절삭가공할 수 있음을 밝히고 절삭깊이를 최소화시키는 연구를 수행하였다. 이 세운 등<sup>(3)</sup>은 1차원 진동절삭을 위한 공구홀더를 설계하고 압전 소자(piezoelectric materials)의 예압과 변위특성, 가진주파수와 입력 전압에 따른 변위특성을 밝히고 진동절삭 시스템의 가공 성능평가를 수행하였다.

한편, 미세패턴을 가공하기 위한 미세가공 기술에 있어서 고주파 2차원 진동을 이용하는 타원궤적진동절삭(EVC, elliptical vibration cutting) 기술이 개발되었다<sup>(4-7)</sup>. 공구에 절삭방향과 배분력방향으로 위상차(phase difference)를 가진 변위를 발생시키고 두 변위를 합성하여 절삭공구가 2차원 타원궤적을 그리면서 절삭하는 방법으로서 선행연구<sup>(6)</sup>를 통해 EVC V-홈 가공(V-grooving) 공정에서 절삭저항이 감소되고 표면거칠기 및 가공정밀도가 향상됨을 확인하였다.

투명한 PC 폴리머 재료는 인장강도, 휨강도 및 내충격성이 큰 대표적인 엔지니어링 플라스틱으로서 가전제품, 전자통신, 정밀기기, 자동차분야 등에서 구조재료 및 기능재료로 널리 사용되고 있으며, 본 연구에서는 PC 재료에 크기가 수  $\mu\text{m}$  이내의 미세 패턴을 직접 절삭가공할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. EVC 방식을 적용하여 SCD(single crystal diamond) 공구로 연속적인 미세 V-홈 패턴을 가공하여 일반 가공방식(CC, conventional cutting)과 비교하였으며, 절삭깊이와 V-홈 경로 간 간격을 줄여 미세 패턴의 크기가 감소함에 따라 미세가공 정밀도가 어떻게 변화하는지, 또 EVC 방법을 적용하면 PC 폴리머 소재에 어느 정도까지 미세한 크기의 패턴을 절삭가공할 수 있는지 살펴보았다.

## 2. 절삭조건의 변화에 따른 EVC 효과

### 2.1 EVC 진동절삭 이론<sup>(6)</sup>

공구에 식 (1)과 (2)와 같은 절삭방향과 배분력방향으로 정현파 변위 $(x(t), y(t))$ 를 발생시키고 이들 변위와 공구 자체가 가지고 있는 이송 혹은 절삭운동( $v_c$ )이 결합되면 절삭날은 절삭방향으로 식 (3)과 같은 트로코이드(trochoid) 궤적을 그리면서 절삭가공한다. 여기서  $A_c(A_t)$ 는 절삭(배분력)방향 진동진폭,  $f$ 는 가진주파수,  $\psi$ 는 절삭방향과 배분력 방향 진동변위 사이의 위상차, 그리고  $v_c$ 는 절삭속도(V-홈가공을 위한 세이핑 공정에서는 이송속도에 해당)이다.

$$x(t) = \frac{A_c}{2} \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

$$y(t) = \frac{A_t}{2} \cos(2\pi ft + \psi) \quad (2)$$

$$x'(t) = \frac{A_c}{2} \cos(2\pi ft) + v_c t \quad (3)$$

식 (3)을 미분하면 식 (4)와 같은 절삭날의 상대 속도( $V_x(t)$ )를 얻을 수 있으며, 절삭날의 상대속도가 양(+)이 된다는 것은 공구 경사면과 칩이 접촉하고 있음을 나타내고, 식 (5)와 같이 음(-)이 된다는 것은 비접촉 상태를 의미한다. 선행연구 결과<sup>(6)</sup>에 의하면 공구와 공작물 혹은 공구와 칩이 비접촉되는 시간이 클수록 EVC 진동절삭의 효과는 더욱 커진다. 따라서 식 (6)과 같이 가진주파수와 진동의 진폭이 클수록, 그리고 절삭속도가 작을수록 일반방식에 비하여 EVC의 효과가 상대적으로 증가하여 미세가공정밀도가 커진다.

$$V_x(t) = \frac{d}{dt}(x'(t)) = -\pi f A_c \sin(2\pi ft) + v_c \quad (4)$$

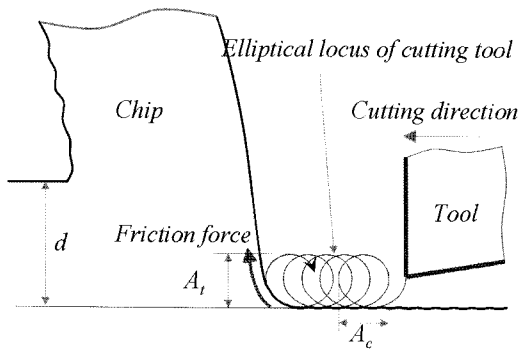
$$V_x(t) < 0 \quad (5)$$

$$\frac{\pi f A_c}{v_c} > 1 \quad (6)$$

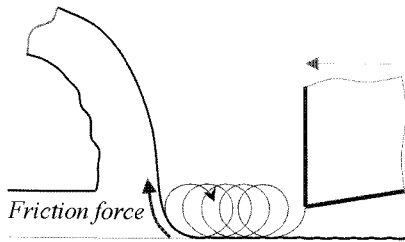
### 2.2 가공깊이의 영향

실제 절삭 표면의 거칠기는 구성날끝(built-up-edge)의 생성과 절삭온도에 영향을 받기 때문에 절삭속도와 절삭깊이의 변화에 영향을 받지만, 절삭 표면의 거칠기를 이론적으로 모델링하면 오직 공구형상(노우즈 반경[mm]에 반비례)과 이송[mm/rev](이송의 제곱에 비례)의 함수로만 나타난다. 이와 마찬가지로 식 (6)를 살펴보면 EVC 공정의 효과는 가공깊이의 변화에 전혀 관련이 없는 것으로 나타난다.

공구에 진동 변위를 발생시키기 위해 압전소자와 같은 액추에이터(actuator)를 이용하는데, 압전소자 재료의 특성상 가진주파수가 수십 kHz 대로 높을 경우 진동의 진폭은 대략 1~2  $\mu\text{m}$  이내로 한계가 있다. Fig. 1은 일정한 진동의 진폭에 대해 (a) 가공깊이를 크게 하여 절삭하는 경우와 (b) 가공깊이를 진동의 진폭과 비슷한 크기로 절삭한 경우를 비교한 그림이다. 일반 절삭공정 중 칩과 공구 경사면 사이의 마찰력은 칩의 배출을 방해하는 방향(아랫방향)으로 작용하여 칩 내에는 부변형영역(secondary deformation zone)이 형성된다. 그러나 Fig. 1에 나타난 바와 같이 EVC 공정을 수행하면 공구 경사면과 칩 사이에 작용하는 마찰력은 칩의 배출을 도와주도록 위로 향하는 방향으로 작용하여 절삭저항을 크게 감소시켜준다. 일정한 진동 진폭에 대해 Fig. 1(b)와 같이 가공깊이가 감소한다면 절삭저항의 감소, 칩 곡률의 증가, 버(burr) 생성의 억제 등 EVC 효과가 가공깊이를 크게 가공하는 조건에 비해 더욱 확실히 나타나게 되어 결과적으로 미세가공정밀도가 향상된다.



(a) Large cutting depth compared to vibration amplitude



(b) Small cutting depth compared to vibration amplitude

Fig. 1 Comparison of elliptical vibration cutting according to cutting depth( $d$ : depth of cut,  $A_c(A_t)$ : vibration amplitude of cutting(thrust) direction)

### 3. 실험 방법

선단각(point angle), 경사각, 여유각이 각각  $80^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  인 SCD 공구를 이용하여 PC 재료를 연속적인 셰이핑(shaping) 공정을 수행하여 Fig. 2와 같은 모양의 미세패턴을 가공하였다. 생성되는 V-홈의 높이는 식 (7)과 같이 공구선단각( $\theta$ )과 경로 간 간격( $f_i$ )의 함수가 된다.

$$h_g = \frac{f_i}{2} \cdot \cot\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{f_i}{2} \cdot \cot(40^\circ) \quad (7)$$

공구에 절삭방향과 배분력방향으로 두 개의 압전소자를 장착<sup>(6)</sup> 하고 여기에 서로 위상차를 가진 18kHz 정현파 전압을 입력하

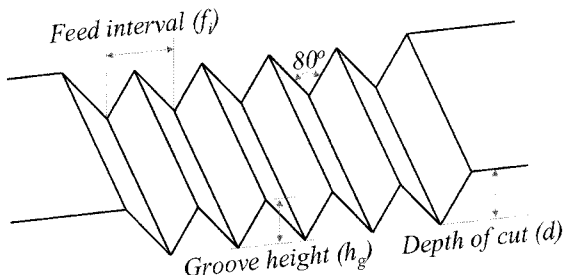


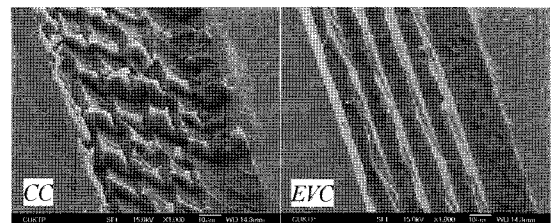
Fig. 2 Shape of successive V-grooves

여 각 방향으로  $1\mu\text{m}$  진폭을 가지는 2차원 원궤적을 생성시켜 EVC 공정을 수행하였다. 절삭깊이를  $15\mu\text{m}$  에서  $1\mu\text{m}$  까지, 그리고 경로간 간격을  $22\mu\text{m}$  에서  $1\mu\text{m}$  까지 변화시켜가면서 다양한 크기의 연속적인 V-홈을 일반절삭과 EVC 공정으로 가공하였을 때 절삭저항의 크기와 미세가공정밀도를 각각 비교하였다. 또한  $1\mu\text{m}$  의 일정한 진폭을 가지는 2차원 진동절삭에서 절삭깊이와 경로간 간격이 감소하여 패턴 크기가 작아짐에 따라 연속 V-홈의 미세가공정밀도가 어떻게 변화하는지 관찰하였다. 절삭 공정으로 PC 폴리머 재료에 미세패턴을 가공할 때 패턴크기를 최소화할 수 있는 방안과 가공할 수 있는 패턴 크기의 한계가 어느 정도인지 밝혔다.

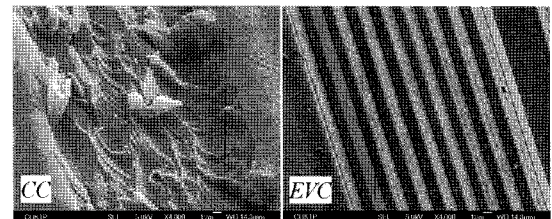
### 4. 실험 결과

PC 폴리머 재료는 금속재료와 달리 기본적으로 연성이 크며 더욱이 절삭 공정 시 폴리머 재료와 공구사이의 마찰로 온도가 상승하여 폴리머 재료 표면의 연성은 더욱 증가한다. 이로 인해 PC 폴리머 재료를 직접 절삭하게 되면 가공 표면에 버가 심하게 생성되고 절삭조건이 과도하게 되면 가공 표면이 용융된다. 크기가 수  $\mu\text{m}$  이내의 미세패턴을 가공하기 위하여 가공깊이를 매우 감소시킬 경우 이러한 표면거칠기 악화 현상은 직접적으로 미세가공정밀도 저하로 이어진다.

Fig. 3(a), (b) 의 각각 왼쪽에 보이는 그림들은 절삭깊이와 경로간 간격을 조절하여 높이가 각각 (a)  $8.9\mu\text{m}$  와 (b)  $1.8\mu\text{m}$  인 연속적인 미세 V-홈 미세패턴을 일반적인 방법으로 절삭가공한 결과로서 패턴의 크기가 작아지면 V-홈의 형상을 전혀 분간할 수 없을 정도로 가공되었음을 보여준다. 이에 반하여 Fig.



(a)  $d=10\mu\text{m}$ ,  $f_i=15\mu\text{m}$   $h_g=8.9\mu\text{m}$



(b)  $d=2\mu\text{m}$ ,  $f_i=3\mu\text{m}$   $h_g=1.8\mu\text{m}$

Fig. 3 Comparison of machining quality of successive V-grooving between conventional cutting(CC) and elliptical vibration cutting(EVC) ( $d$ : depth of cut,  $f_i$ : feed interval,  $h_g$ : height of groove, cutting speed: 5mm/s)

3(a), (b) 의 오른쪽 그림들은 각각의 왼쪽 그림과 똑같은 절삭 조건을 적용하고, 공구에 가진주파수가  $18kHz$  이고 가진 진폭이  $1\mu m$  인 2차원진동을 생성시켜 EVC 방법을 적용하여 가공한 경우로서 연속적인 V-홈 미세가공정밀도가 매우 향상된 것을 확인할 수 있다. 일반적인 방법으로 절삭가공할 동안에는 공구와 칩, 그리고 공구와 공작물 사이가 연속적으로 접촉하고 있지만, EVC 공정을 수행하면 가진주파수 주기로 접촉과 비접촉을 반복하여 일반 절삭공정에 비해 마찰력이 크게 줄어들고 마찰력의 방향 또한 절삭공정을 도와주는 역할을 하게 된 결과이다.

절삭깊이를  $5\mu m$ ,  $10\mu m$ ,  $15\mu m$  증가시켜가면서 일반 절삭공정과 EVC 공정으로 PC 재료를 가공하였을 때 공구동력계(9256C, Kistler) 로 주절삭력(primary cutting force)과 배분력(thrust force)의 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험 결과 EVC 방법을 적용하면 주절삭력과 배분력 모두 크게 감소하고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 황동, 알루미늄, 니켈합금강 등 여러 가지 금속재료를 EVC 가공하였을 때 얻은 선행 연구<sup>(6)</sup>결과와 일치하며, 미세패턴을 가공할 때 EVC 공정은 금속뿐 만 아니라 폴리머 소재까지 적용이 가능하다는 것을 보여준다.

한편, Fig. 3(a), (b) 의 오른쪽 그림들, 즉 EVC 가공 결과를 자세히 살펴보면 절삭깊이와 경로간 간격이 (a)  $10\mu m$  와  $15\mu m$  에서 (b)  $2\mu m$  와  $3\mu m$  로 감소하여 미세패턴의 크기가 작아질

때 미세패턴의 형상이 더욱 뚜렷하게 가공되어 EVC 가공정밀도가 오히려 더욱 향상되었음을 보여주고 있다. 미세패턴의 크기와 미세가공정밀도의 관계를 구체적으로 검증하기 위하여 높이( $h_g$ )가  $4.8\mu m$  에서  $0.6\mu m$  까지의 연속적 V-홈을 가지는 미세패턴을 EVC 가공하였으며 그 결과를 Fig. 5 에 나타내었다.

Fig. 5 에서 PC 폴리머 재료를 EVC 공정으로 가공하였을 경우 크기가 수  $\mu m$  이내의 미세 패턴을 성공적으로 직접 절삭가공할 수 있음을 보여주고 있다. 또한 V-홈의 높이가  $1.8\mu m$  (절삭깊이  $2\mu m$ , 경로간 간격  $3\mu m$ )가 될 때까지 패턴의 크기가 작아질수록 V-홈의 형상이 점점 더 뚜렷하게 가공되어 가공정밀도가 점차 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 앞서 Fig. 1 에서 설명하였듯이 미세 EVC 공정에서 일정한 진동의 진폭에 대해 가공깊이가 작아질수록 EVC 효과가 증가하기 때문이다. 그러나 Fig. 5 에서 V-홈의 높이가  $1.2\mu m$  (절삭깊이  $1\mu m$ , 경로간 간격  $2\mu m$ )가 되도록 가공하였을 경우 홈과 홈사이의 경계가 조금씩 허물어지는 것이 관찰되더니 V-홈의 높이가  $0.6\mu m$  (절삭깊이  $1\mu m$ , 경로간 간격  $1\mu m$ )가 될 경우 공구가 지나간 방향은 알 수 있으나 V-홈의 형상은 거의 구분할 수 없었다. 즉, PC 폴리머 소재를 EVC 공정으로 가공하면 최고의 가공정밀도를 나타내는 미세패턴의 크기가 존재하며, 이보다 더 작은 V-홈 패턴을 가공하면 미세패턴 형상의 가공정밀도가 다시 감소하는 것으로 나타났다. 크기가  $1\mu m$  이내의 미세패턴을 EVC 공정으로 가공할 때 EVC 의 긍정적 효과가 있음에도 불구하고 가공정밀도가 나빠지는 이유는 앞서 설명한 바와 같이 PC 폴리머 재료의 나쁜 절삭특성(거친 표면거칠기, 버

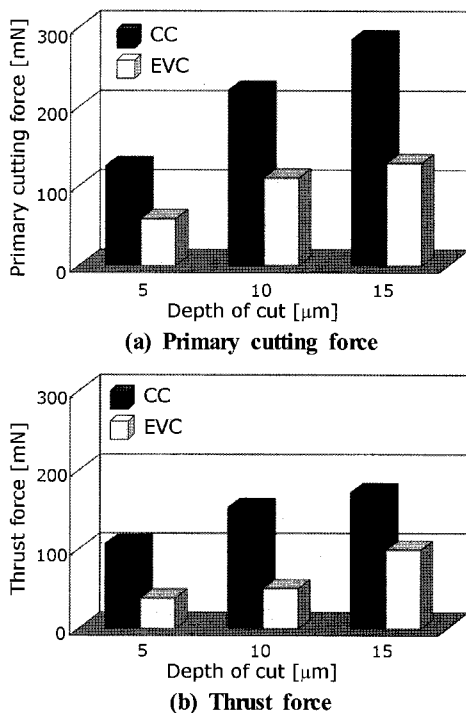


Fig. 4 Variation of cutting resistance according to cutting depth(CC: conventional cutting, EVC: elliptical vibration cutting)

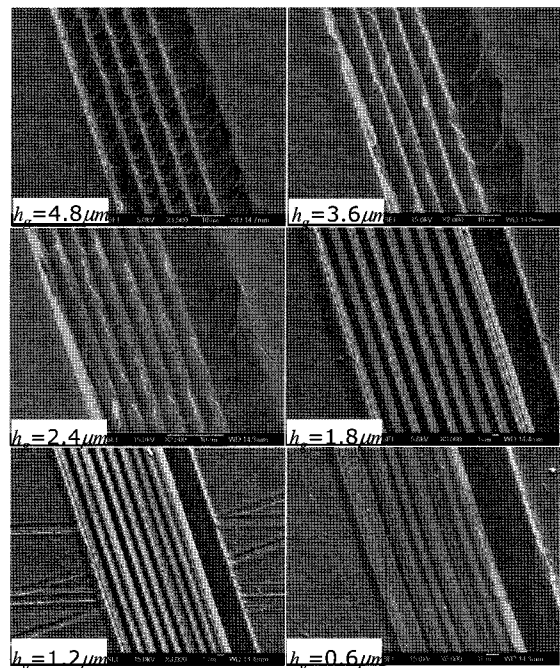


Fig. 5 Variation of machining quality of successive V-grooves according to groove height

생성)이 가공깊이가 감소할수록 상대적으로 더욱 뚜렷하게 나타나기 때문이다. 이러한 실험 결과로부터 EVC 공정으로 PC 폴리머 재료 위에 미세패턴을 가공할 때에는 미세가공정밀도를 향상시킬 수 있는 최적의 미세패턴 크기가 존재한다는 것을 확인하였다.

폴리머와 공구 소재가 달라짐에 따라, 그리고 패턴 형상이 다양해짐에 따라 EVC 방법으로 가공정밀도를 높일 수 있는 미세패턴의 최적 크기가 존재할 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 심도있는 연구가 필요하다.

### 5. 결론

대표적인 엔지니어링 플라스틱 재료인 PC 폴리머 소재 위에 2차원 진동절삭(EVC) 방법으로 연속적인 V-홈 형상의 미세패턴을 가공하여 패턴의 크기에 따른 가공정밀도의 변화를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 금속소재와는 달리 연성이 풍부하고 내열성이 좋지 않은 폴리머 소재의 특성 때문에 일반적인 방식으로 절삭가공하면 가공면의 표면거칠기가 매우 나쁘고 버가 많이 생성되어 미세한 크기의 패턴을 가공할 수 없었지만, 진동의 진폭이  $1\mu\text{m}$  이고 가진주파수가  $18\text{kHz}$  인 EVC 공정을 수행하여 크기가 수  $\mu\text{m}$  이내의 미세패턴을 정밀하게 가공할 수 있었다.
- (2) 발생시킬 수 있는 진동의 진폭이 한계가 있기 때문에 가공깊이가 작아질수록 EVC 효과가 상대적으로 증가하였고, V-홈 형상의 높이가  $1.8\mu\text{m}$  가 될 때까지 가공깊이가 작아질수록 미세가공정밀도가 더욱 향상되었다.
- (3) PC 폴리머 재료의 나쁜 절삭특성을 극복하기 위하여 EVC 공정을 수행하였음에도 불구하고 크기가  $1\mu\text{m}$  이내인 V-홈 미세패턴은 가공이 불가능하였다.
- (4) 위의 결과로부터 EVC 방법으로 PC 폴리머 소재의 가공정밀도를 높일 수 있는 미세패턴의 최적 크기가 존재함을 확인하였다.

### 후 기

이 논문은 2011년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

### 참 고 문 헌

- (1) Kim, K. W., 2002, "A Study on the Critical Depth of Cut in Ultra-precision Machining," *Journal of KSPE*, Vol. 19, No. 8, pp. 126~133.
- (2) Son, S. M., and Ahn, J. H., 2004, "The Minimizing of Cutting Depth using Vibration Cutting," *Journal of KSPE*, Vol. 21, No. 11, pp. 38~45.
- (3) Lee, S. Y., Han J. A., Kim, J. W., Gwak, Y. K., Kang, D. B., and Ahn, J. W., 2011, "Development on Tool Holder of Vibration Cutting System for Ultraprecision Machining," *Journal of KSMTE*, Vol. 20, No. 3, pp. 268~273.
- (4) Shamoto, E., and Moriwaki, T., 1994, "Study on Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 43, No. 1, pp. 35~38.
- (5) Shamoto, E. and Moriwaki, T., 1995, "Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 31~34.
- (6) Kim, G. D., and Loh, B. G., 2008, "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, Paper No. 025002.
- (7) Brehl, D. E., and Dow, T. A., 2008, "Review of Vibration-assisted Machining," *Precision Engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 153~172.