

# 타원진동절삭가공법에 의한 광학부품용 폴리카보네이트 수지의 초정밀가공

## Ultra-precision Cutting of Polycarbonate for Optical Components by Using Elliptical Vibration Cutting Method

송영찬<sup>1,✉</sup>, 박천홍<sup>1</sup>

Young Chan Song<sup>1,✉</sup> and Chun Hong Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 (Korea Institute of Machinery & Materials)

✉ Corresponding author: ycsong@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7104

Manuscript received: 2008.12.12 / Accepted: 2009.3.5

*The optical elements made of plastics are normally produced by mass production such as injection molding with use of precision dies and molds. It costs to prepare the dies and molds, and it is only justified to prepare such expensive dies and molds when the parts are massively produced. On the other hand, it is too expensive and inefficient when precision plastic parts are needed only in small quantities, such as a case of trial manufacturing of new products. An ultra-precision diamond cutting is one of promising processes to produce the precision plastic parts in such cases. But it is commonly believed that an ultra-precision cutting of plastics for optical components is very difficult, because they are thermo-plastic material. In the present research, an ultra-precision diamond cutting of polycarbonate (PC), that is one of typical optical materials, was tried by using elliptical vibration cutting method. It is experimentally proved that good optical surfaces were obtained by using elliptical vibration cutting in cases of grooving and flat surfaces. The maximum surface roughness of less than 60 nm in peak to valley value is acquired.*

Key Words: Ultra-precision Cutting (초정밀절삭), Plastics for Optical Components (광학용 플라스틱), Polycarbonate (PC, 폴리카보네이트), Elliptical Vibration Cutting (타원진동절삭가공법)

### 1. 서론

최근, 정보기술(IT) 혁명과 그에 따른 고도정보화 사회의 실현을 위해 IT 산업이 급속한 발전을 거듭하고 있다. 이러한 IT 산업을 지지하는 핵심기술은 전기를 대신하는 광기술이며, 이 광기술을 지지하는 근간재료는 무기유리와 투명수지(플라스틱)이다. 종래는 광학특성이 우수한 무기유리가 오랫동안 그 우위성을 점해 왔으나, 메타크릴 수지(PMMA), 폴리카보네이트 수지(PC), 환상폴리오렌 수지(ZEONEX, 제폴명) 등의 광학용 수지재료

가 개발됨에 따라 수지재료도 광학부품으로 많이 사용되게 되었다. 광학부품의 형상도 단순한 구면형상에서 벗어나 플레널 렌즈, 액정용 도광판, DVD 용 픽업렌즈 등의 복잡하고 미세한 형상의 부품이 많이 요구되고 있다. 따라서 최근에서 플라스틱 광학부품의 수요가 급증하고 있다.

플라스틱 광학부품은 일반적으로 초정밀 금형을 사용한 성형가공에 의해 제조되어지나, 시제품을 제작할 경우와 같이 소량의 제품을 생산할 경우에는 극히 비효율적이다. 이러한 관점에서 초정밀 다이아몬드절삭에 의해 플라스틱을 직접 가

공하는 기술을 확립하는 것은 중요하다고 생각된다. 하지만, 광학재료로 대표적으로 사용되고 있는 PMMA, PC, ZEONEX 등은 열에 약하고, 점도가 높은 점탄성재료이며, 공구 형상의 전사성이 좋지 못하기 때문에 절삭가공에 의해 광학부품으로서의 정도를 만족시키기 곤란하다. 한편, Morihiko Sacki<sup>1</sup> 등에 의해 이들 플라스틱재료에 대한 초정밀절삭이 시도되었으며, 그 결과에 의하면 어떤 재료도 건식절삭에서는 만족할 만한 성과를 얻지 못하였다. PMMA의 경우는 절삭유를 사용함으로 크게 향상된 표면정도를 얻을 수 있었으나, 이 경우도 광학용 부품용으로 요구되는 가공정도를 얻기 위하여는 절삭조건에 제한이 있었다.

한편 저자 등은 타원진동절삭가공법을 고안하여 급형용 소결강,<sup>2</sup> 무기유리,<sup>3</sup> 열경화성 금속<sup>4</sup> 등의 고정도 재료에 대해 연구성과를 발표해왔다. 이 가공법의 큰 특징 중에 하나는 공구 경사면과 절삭칩 사이의 마찰력 억제효과이며, 이 장점은 플라스틱 재료의 가공정도 향상에 크게 기여하게 될 것으로 판단된다. 본 가공법을 적용함에 있어 초음파진동공구를 사용하여 초음파 타원진동절삭 즉, 초 단속적인 가공을 수행하는 것 또한 점탄성이 강한 플라스틱 재료의 가공정도 향상에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

본 연구에서는 대표적인 광학용 플라스틱재료인 PC에 대해 초정밀절삭가공의 실현을 목표로 타원진동절삭가공법을 적용하였다. 본 논문에서는 여러 가지 형상가공에 바로 적용하기에 앞서, 노즈 반경을 가진 단결정 다이아몬드공구를 사용하여 홈 가공 실험을 수행하여 기본 가공특성을 파악하였으며, 이 결과를 바탕으로 평면가공을 수행하였다. 또한 모든 절삭가공실험에 있어 공구를 진동시키지 않는 보통의 초정밀절삭을 함께 행하여 가공결과를 비교, 분석하였다.

2. 타원진동절삭가공법

2.1 가공법의 원리 및 효과

타원진동절삭가공법은 Fig. 1에 제시한 것처럼 공구인선에 원 또는 타원진동을 부가하여 단속적으로 절삭을 행한다. Fig. 1에서 공구에 부가하는 진동이 절삭방향과 칩 유출방향을 포함하는 면 내에서 이루어질 경우가 지금까지 주로 발표해왔던 타원진동절삭법<sup>5</sup> (이하, 직교형 타원진동절삭)이다. 이 경우, Fig. 2와 같은 원리로 공구 경사면과 절삭

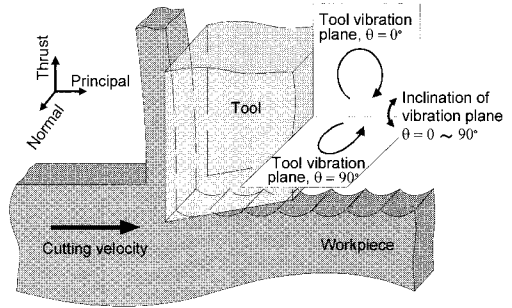


Fig. 1 Elliptical vibration cutting process

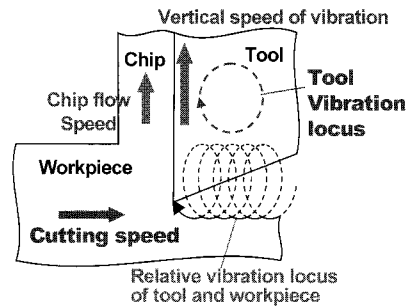


Fig. 2 Orthogonal type elliptical vibration cutting

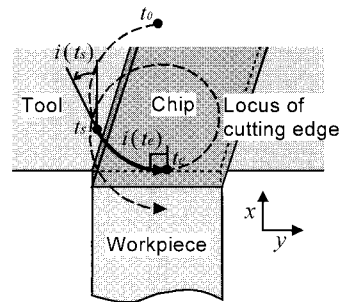
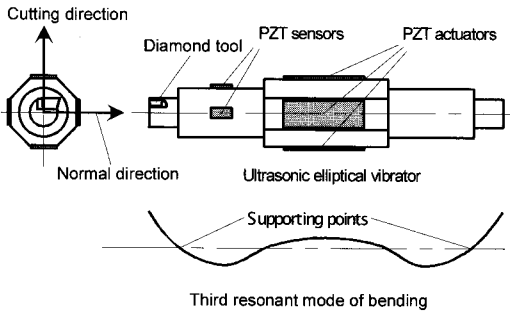


Fig. 3 Oblique type elliptical vibration cutting

칩 사이의 마찰을 역이용하여 칩을 끌어당기면서 가공을 행하게 된다. 그 결과 전단각이 증가하며, 칩두께, 절삭저항 등이 크게 감소된다. 한편, Fig. 1에서 공구에 부가하는 진동이 가공표면의 평면상에서 이루어질 경우는 Fig. 3과 같은 원리로 단속적인 경사절삭(이하, 경사형 타원진동절삭)<sup>6</sup> 방식을 가공을 수행하게 된다. 이 경우도 공구에 진동을 부가하지 않는 보통절삭에 비해 가공성이 크게 향상되는 것을 과거의 연구결과를 통해 이미 확인하였다.

2.2 초음파타원진동공구<sup>2</sup>



Third resonant mode of bending  
Fig. 4 Ultrasonic elliptical vibrator<sup>2</sup>

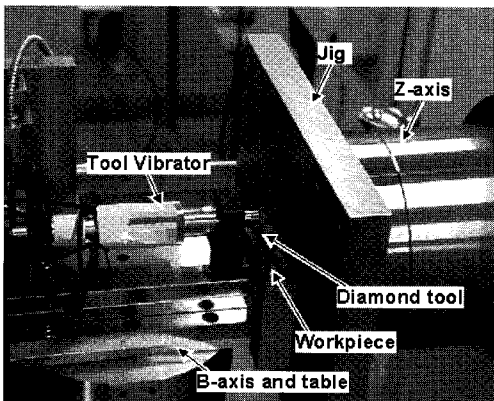


Fig. 5 Experimental setup

본 가공실험에 사용한 초음파 타원진동공구를 Fig. 4 에 제시하고 있다. 공구진동자 중심부의 직교하는 두 면에 붙여져 있는 압전소자에 정현파 전압을 가하면, 압전소자의 신축에 의해 진동자는 굽힘(Bending)현상이 발생한다. 이때 절삭방향과 이에 수직한 방향의 진동에 위상차를 가함으로, 진동자 한쪽 끝에 고정된 공구의 날끝에 원 또는 타원궤적의 진동이 부과된다. 또한 공구 진동자에 붙어있는 작은 압전소자로 공구진동을 측정하여, 피더백 제어에 의해 가공 중의 공구진동 진폭과 위상차를 일정하게 유지한다.

이 진동공구는 약 20 kHz 의 공진주파수와 약 0-10 $\mu$ mP-P 의 진폭을 안정되게 유지할 수 있는 성능을 가지고 있다. 단결정 다이아몬드공구를 사용한 절삭재료의 초정밀절삭을 실현할 수 있었던 것은, 이와 같이 초음파 진동수의 초 단속적인 절삭공정을 이루었기 때문이다.

3. 실험방법 및 조건

Table 1 에 본 연구에서 피삭재로 사용한 PC 의

Table 1 Physical properties of plastics

Material	PC	Steel	Glass
Tensile strength, MPa	59-69	400	30-80
Elongation, %	90-140	20-30	
Young's modulus, GPa	2.1-2.5	210	60-90
Vickers hardness, HV	13		
Permeability, %	85-91		
Refractive index, %	1.59		1.4-1.7
Water absorption, %	0.2		

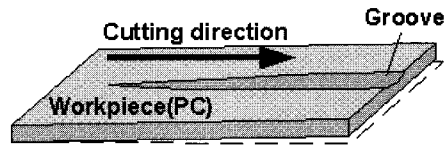


Fig. 6 Schematic illustration of grooving experiment

Table 2 Experimental conditions

Workpiece		PC
Tool	Material	Single crystal diamond
	Rake angle	0 °
	Relief Rngle	10 °
	Nose radius	1.0mm
Cutting conditions of grooving	Cutting speed	0.25, 40m/min
	Depth of cut	Changed continuously
Cutting conditions of face cut	Cutting speed	0.25m/min
	Depth of cut	1, 10m
	Feed	10m
Tool vibration conditions of ellip. vib. cut	Locus	Circle
	Frequency	19.8kHz
	Radius	1.0m
Cooling condition		No cooling

주요특성, 그리고 비교를 위하여 철과 유리의 기계적 성질도 함께 제시하였다. PC 는 일반 플라스틱재료에 비해 빛의 투과율, 굴절율, 수분 흡수율 등의 면에서 광학재료로서 우수한 성질을 가지고 있다. 한편, 기계적 성질을 고려해 볼 때, 인장강도는 유리와 비슷할 정도로 낮으며, 영율은 철의 1/100 정도로 변형되기 쉬운 재료이다. 따라서 초정밀 절삭재료로는 적합하지 않은 재료라는 것을 쉽게 알 수 있다.

실험은 항온항습실(실온 23 $\pm$ 0.1 $^{\circ}$ C, 습도 50 $\pm$ 0.3%)에 설치된 (주)도시바기계사의 5 축 초정밀가공기 ULC-100C (H3)를 사용하였으며, Fig. 5 에 가공실험 셋업 사진을 나타내고 있다. 홈 가공실험에 있어서, 절삭깊이에 따른 가공정도의 변화를 한번의 실험으로 확인할 수 있도록 하기 위하여 Fig. 6 에 나타내는 것처럼 가공표면을 1 $\mu$ m/mm 정도로 미세

하게 기울여 절삭깊이가 연속적으로 변화하도록 하였다. 또한 보통절삭의 경우는 절삭속도에 따른 영향을 알아보기 위하여 3 가지 절삭속도로, 타원진동절삭의 경우는 가공법의 원리를 고려하여 0.25 m/min 의 절삭속도로 가공실험을 수행하였다. 이상의 홈 가공실험 결과를 바탕으로 동일한 형상의 공구를 사용하여 평면형상의 가공을 시도하였다. 주요 가공조건들은 Table 2 에 제시하고 있다.

모든 가공표면은 미분간섭원리를 적용한 미세현미경(이하, 미분간섭현미경)과 원자간력현미경(이하, AFM)을 사용하여 평가하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 보통의 절삭가공법에 의한 홈 가공결과

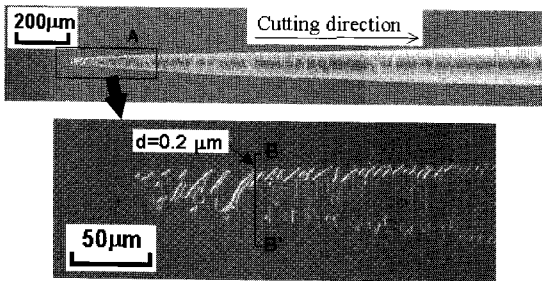


Fig. 7 (a) Micro photographs

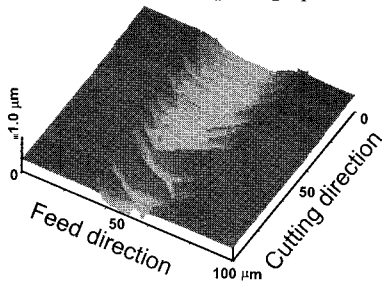


Fig. 7(b) AFM image

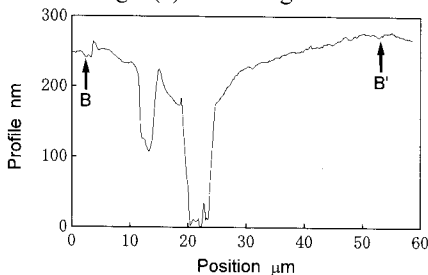


Fig. 7(c) Profile of B-B' in Fig. 7(a) measured with AFM

Fig. 7 The groove formed by conventional cutting at cutting speed of 0.25m/min

먼저 공구진동을 가하지 않는 보통절삭에 의해 홈 가공을 행하였으며, 절삭속도 0.25m/min 의 조건에서 가공한 결과를 Fig. 7 에 제시하고 있다. Fig. 7 을 통하여, 절삭깊이가 0.2µm 이하인 영역에서는 정상적인 홈 가공이 이루어지지 않고 있음을 확인할 수 있다. 여기에서 절삭깊이는 가공되어진 홈의 폭과 가공에 사용한 공구의 노즈반경으로부터 산출한 값이다. 절삭깊이가 0.2µm 이상인 영역에서는 홈 형상이 비교적 안정되게 가공되고 있지만, 광학용 부품으로 사용할 수 있을 정도의 양호한 가공표면은 얻지 못하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8 은 절삭속도 40m/min 의 조건에서 가공한 결과이며, Fig. 7 의 가공표면에 대한 미분간섭현미경사진과 비교해 볼 때, 절삭속도에 따른 영향은 크게 발견할 수 없다. 이러한 사실은 Fig. 9 에 제시한 이들 홈의 절삭방향 단면곡선을 통해 명확히

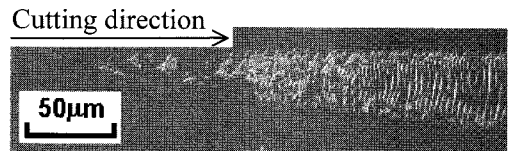


Fig. 8 Micro photographs of grooves formed by conventional cutting of PC at cutting speed of 40 m/min

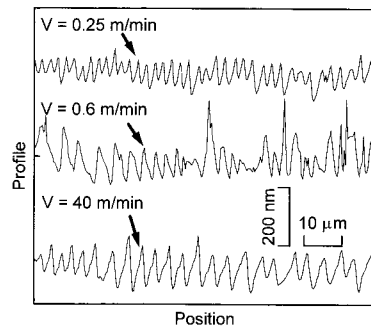


Fig. 9 Cutting direction Profiles of grooves formed by conventional cutting

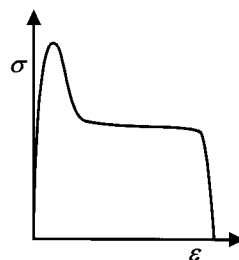


Fig. 10 Stress-strain diagram of PC<sup>7</sup>

알 수 있다. Fig. 9 는 AFM 을 사용하여 측정한 값 들이며, 가공표면은 절삭속도와 관계 없이 유사한 주기의 굴곡이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 결과를 통하여 100nm 이하의 표면정밀도를 얻기는 곤란할 것으로 판단된다.

한편, Fig. 10 은 PC 의 응력-변형률 곡선<sup>7</sup>을 나타내고 있으며, 소성변형이 시작되면 국부적으로 인장이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 재료특성으로 인하여, Fig. 9 와 같이 가공표면에 주기적인 굴곡이 발생하는 것으로 판단된다.

**4.2 타원진동절삭가공법에 의한 홈가공 결과**

절삭속도 0.25m/min 의 조건에서 직교형 타원진동절삭가공법을 적용해 홈 가공실험을 수행한 결과를 Fig. 11 에 제시하고 있으며, 이들 결과는 Fig. 7-Fig. 9 에서 제시한 보통절삭에 의한 결과에 비해 매우 양호한 홈 형상이 얻어진 것을 명확히 확인할 수 있다. Fig. 11(a)에 있어서 가공된 홈에 미세

한 상흔이 확인되어지며, 가공표면의 표면거칠기는 약 60-70nmRz 의 값을 나타내고 있다. 이 결과는 수치 만으로 볼 때, 광학용 부품의 제작에 적용하기 위해 만족할 만한 수치이다. 하지만, 휘도의 관점에서 생각할 때, 만족할 만한 표면정도라고 할 수는 없을 것으로 추측된다. 한편, Fig. 11(c) 는 홈의 수직(Normal)방향 단면곡선을 제시하고 있으며, 공구형상에 대한 홈 형상의 전사성이 좋지 못한 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 공구형상의 전사성이 좋지 못한 것은 가공 부하에 의한 탄성변형을 타원진동절삭으로도 완전히 억제하지는 못했기 때문으로 판단되며, 이는 공구경사각을 바꾸거나 타원진동절삭의 진동주파수를 더욱 고주파로 바꾸는 것 등의 방법으로 해결될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 12 는 경사형 타원진동절삭가공법에 의한 홈 가공결과를 나타내고 있다. 가공조건은 Fig. 11 에 제시한, 직교형 타원진동절삭가공의 경우와 동

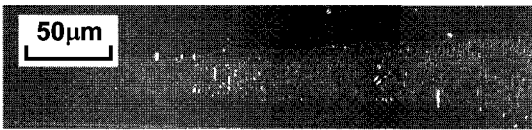


Fig. 11(a) Micro photograph of the groove

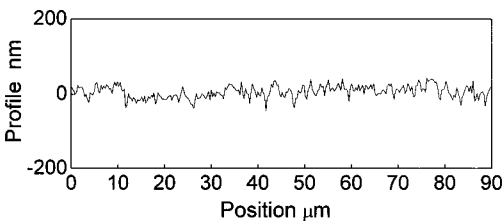


Fig. 11(b) Cutting dir. profile measured with AFM

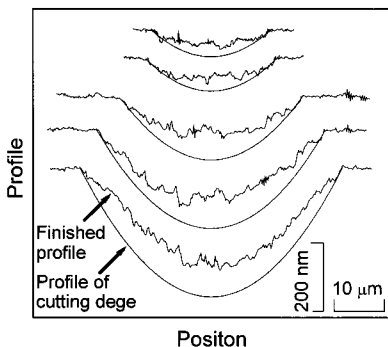


Fig. 11(c) Normal dir. profiles measured with AFM

Fig. 11 The groove formed by orthogonal type of elliptical vibration cutting



Fig. 12(a) Micro photograph of the groove

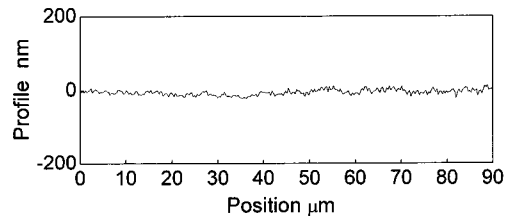


Fig. 12(b) Cutting dir. profile measured with AFM

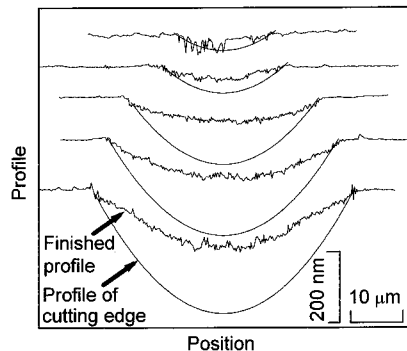


Fig. 12(c) Normal dir. profiles measured with AFM

Fig. 12 The groove formed by oblique type of elliptical vibration cutting

일한 조건으로 수행하였다. 먼저, 가공표면의 미분 간섭사진 Fig. 11(a)와 Fig. 12(a) 그리고 절삭방향 단면곡선 Fig. 11(b)와 Fig. 12(b)를 서로 비교하여 보면, 경사형 타원진동절삭에 의한 가공표면의 경우가 직교형 타원진동절삭가공에 의한 가공표면에 비해 표면거칠기가 향상된 것을 쉽게 확인할 수 있다. 이와 같이 경사형 타원진동절삭에 의한 가공표면이 표면거칠기가 더 양호한 것은, 공구진동 궤적 평면이 절삭방향에 대해 각도를 이루고 있어 칩을 홈의 측면으로 배출하게 되고, 따라서 가공 칩과 공구날 사이의 간섭에 의해 가공 표면을 악화시키는 현상을 억제할 수 있었기 때문으로 생각된다. 한편, Fig. 11(c)와 Fig. 11(c)의 홈의 수직 (Normal)방향 단면곡선을 서로 비교하면, 직교형

타원진동절삭의 경우가 경사형 타원진동절삭의 경우에 비해 공구형상의 전사성이 좋은 것을 명확히 확인할 수 있다. 이는 직교형 타원진동절삭가공의 경우가 공구진동에 따른 추력(Thrust force)의 억제 효과가 더 크기 때문이며, 따라서 실질적인 피삭성은 직교형 타원진동절삭이 더 좋은 것으로 평가할 수 있다.

**4.3 평면가공 결과**

Fig. 13 과 Fig. 14 는 진동을 부가하지 않는 보통의 절삭가공법으로 평면가공을 수행한 결과이다. 공구는 홈 가공의 경우와 동일한 형상의 공구를 사용하였다. 절삭속도와 이송량은 각각 0.25m/min 과 10 $\mu$ m 으로 동일한 조건으로 설정하고, 절삭깊

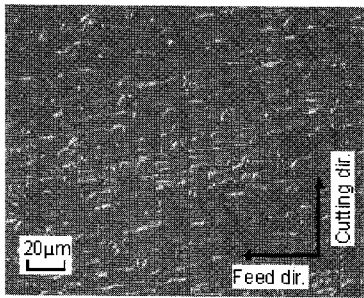


Fig. 13(a) Micro photograph

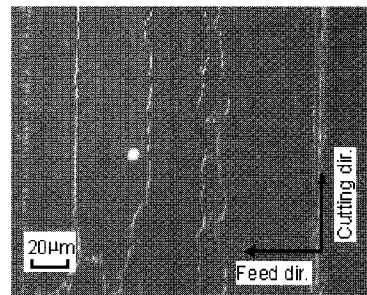


Fig. 14(a) Micro photograph

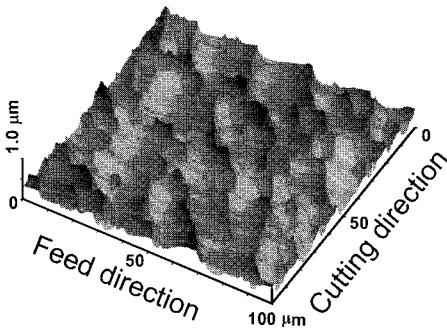


Fig. 13(b) AFM image

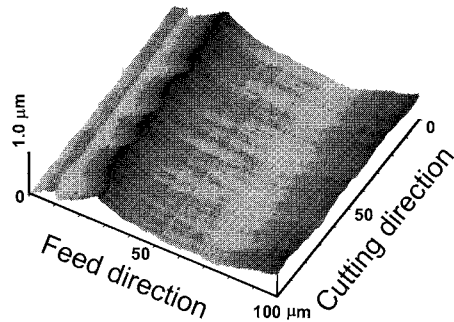


Fig. 14(b) AFM image

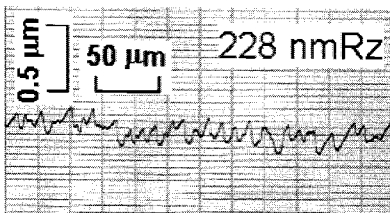


Fig. 13(c) Profile in feed direction

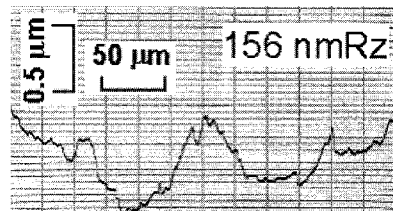


Fig. 14(c) Profile in feed direction

Fig. 13 Finished surface obtained by conventional cutting at a depth of cut of 10  $\mu$ m and feed of 10 $\mu$ m

Fig. 14 Finished surface obtained by conventional cutting at a depth of cut of 1  $\mu$ m and feed of 10 $\mu$ m

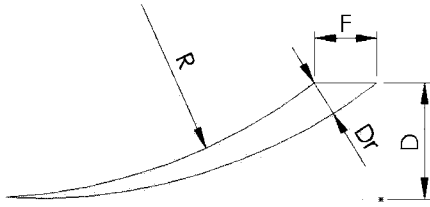


Fig. 15 Schematic illustration of chip formation for face cutting with R bite

이만 각각 10 $\mu$ m 과 1 $\mu$ m 으로 달리하였다. 절삭깊이 10 $\mu$ m 의 조건에서 가공된 가공표면의 경우, Fig. 13(a)의 미분간섭현미경사진 그리고 Fig. 13(b)의 AFM 이미지를 통하여 가공표면에 불규칙적인 굴곡이 심하게 발생하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 Fig. 13(c)에 제시한 바와 같이 표면 거칠기가 200nmRz 이상인 가공표면을 형성하고 있다.

Fig. 14 의 보통절삭가공에 의해 절삭깊이 1 $\mu$ m 의 조건으로 가공된 가공표면의 경우는 Fig. 13 의 절삭깊이 10 $\mu$ m 의 경우와 달리 불규칙적인 굴곡은 확인되지 않는다. 하지만, 가공표면의 평탄도가 절

$$D_r = R - \sqrt{R^2 + F^2 - 2F(2RD - D^2)^{1/2}} \quad (1)$$

Where R : Tool radius

D : Set depth of cut

F : Feed

D<sub>r</sub> : Maximum depth of cut

삭깊이인 1 $\mu$ m 에 이르고 있다. 다시 말해서 절삭깊이 1 $\mu$ m 의 조건에서 가공한 경우는 정상적인 절삭가공이 이루어지지 않았다고 판단되며, 이의 원인은 Fig. 15 를 통하여 설명할 수 있다. Fig. 15 는 R 공구에 의해 평면가공을 수행할 경우에 있어서 공구가 1 회 이송할 때, 실제 절취하게 되는 단면적 형상을 나타내고 있으며, 이 그림을 통하여 실제의 최대 절삭깊이를 구하면 Eq. (1)로 정리된다. 본 가공실험의 조건인 공구반경 R 이 1mm, 이송량 F 가 10 $\mu$ m 이고 설정 절삭깊이 D 가 각각 10 $\mu$ m 과 1 $\mu$ m 인 경우의 실제의 최대 절삭깊이 D<sub>r</sub> 은 1.37 $\mu$ m 과 0.40 $\mu$ m 이 된다. 즉, 설정 절삭깊이가 1 $\mu$ m 인 경우는 공구날 각 점에서의 실제 절삭깊이는 0-0.4 $\mu$ m 사이가 되고, 이 영역에서는 4.1 절의 홈 가공실험에서 확인한 바와 같이 재료의 심한

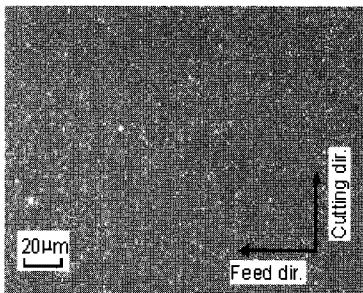


Fig. 16(a) Micro photograph

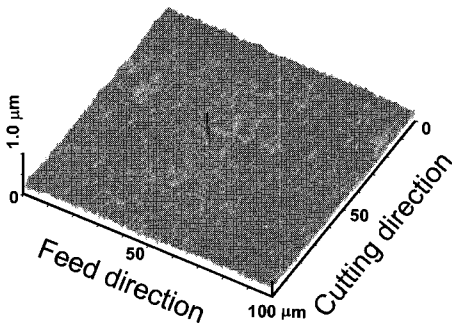


Fig. 16(b) AFM image

Fig. 16 Finished surface obtained by orthogonal type of elliptical vibration cutting at a depth of cut of 10 $\mu$ m and feed of 10 $\mu$ m

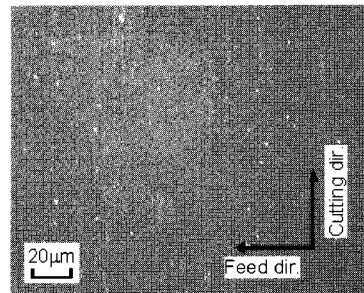


Fig. 17(a) Micro photograph

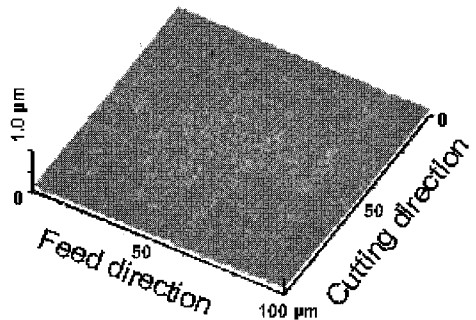


Fig. 17(b) AFM image

Fig. 17 Finished surface obtained by oblique type of elliptical vibration cutting at a depth of cut of 10 $\mu$ m and feed of 10 $\mu$ m

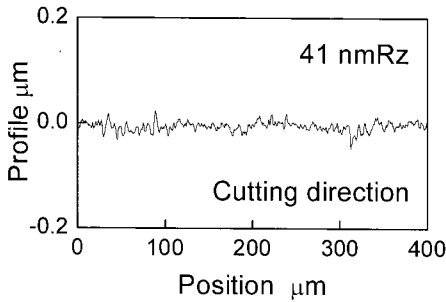


Fig. 18(a) Profile in cutting direction

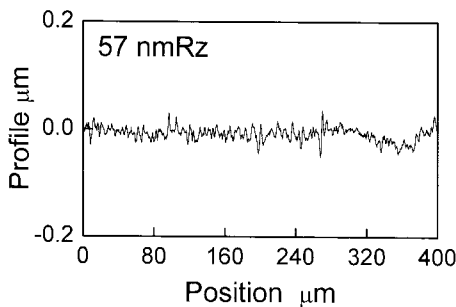


Fig. 18(b) Profile in feed direction

Fig. 18 Finished surface obtained by oblique type of elliptical vibration cutting at a depth of cut of 10μm and feed of 10μm

탄성변형의 영향으로 정상적인 절삭가공이 이루어지지 못한 것으로 판단된다.

한편, 직교형 및 경사형 타원진동절삭가공법에 의해 평면가공을 수행한 결과를 각각 Fig. 16 과 Fig. 17 에 제시하고 있다. 이들 타원진동절삭가공법에 의한 가공결과는 Fig. 13 과 Fig. 14 의 보통절삭에 의한 결과에 비교해 매우 양호한 가공표면을 얻고 있음을 명확히 확인할 수 있다. 직교형 타원진동절삭가공에 의한 가공표면에서는 Fig. 12 와 Fig. 13 에 제시한 흠 가공결과와 동일하게 가공표면에 미세한 상흔이 발생하고 있는 반면, 경사형 타원진동절삭가공에 의한 가공표면에서는 미세한 상흔은 거의 발생하지 않으며, Fig. 18 에 제시한 바와 같이 표면거칠기 60nmRz 미만의 우수한 가공표면을 형성하고 있음을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

이상에서 대표적인 광학용 플라스틱재료인 폴리카보네이트(PC)에 대해 타원진동절삭가공법을 적용하여 초정밀가공을 시도하였다. 먼저, 공구에

진동을 부가하지 않는 보통의 다이아몬드 절삭으로는 재료의 점탄성 성질로 인해 200nmRz 이하의 안정된 평면가공이 곤란하였으며, 이는 절삭속도, 절삭깊이 등의 가공조건을 변경시키는 것으로 개선할 수 없음을 확인하였다. 반면, 타원진동절삭가공법을 적용함으로써, 가공 중에 있어서의 재료의 탄성변형을 크게 억제할 수 있었으며 60nmRz 이하의 초정밀 평면가공을 실현하였다. 본 연구에 의한 연구결과는 서론에서도 언급한 것처럼, 광학부품의 시작품을 제작할 경우와 같이 소량의 제품을 생산할 경우에 대해 실제 적용할 수 있는 매우 유효한 결과로 생각된다.

### 참고문헌

1. Saeki, M., Yasui, H., Kondo, S., Kawada M. and Hosokawa, A., "Experimental Investigation of Surface Roughness in Ultra-Precision Cutting of Plastics," Journal of JSPE, Vol. 67, No. 2, pp. 311-315, 2001.
2. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 1, pp. 441-444, 1999.
3. Shamoto, E., Ma, C. and Moriwaki, T., "Ultra-precision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting," Proceedings of the Euspen International Conference, pp. 408-411, 1999.
4. Song, Y. C., Tanaka, T. and Moriwaki, T., "Mirror Finishing of Co-Cr-Mo Alloy by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting Method," Journal of KSPE, Vol. 25, No. 3, pp. 56-62, 2008.
5. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 43, No. 1, pp. 35-38, 1994.
6. Shamoto, E., Song, Y. C., Sassa, K., Yoshida, H., Hino, R. and Moriwaki, T., "Proposal of Oblique Type of Elliptical Vibration Cutting and Its Basic Performance," Journal of JSPE, Vol. 69, No. 7, pp. 970-976, 2003.
7. Kaneeda, T., Thuwa, R. and Igawa, N., "Study on Cutting Mechanism of Plastics(2nd)," Proceedings of JSPE Spring Conference, pp. 333-334, 1983.