

타원진동절삭가공법에 의한 광학용 플라스틱의 초정밀절삭

송 영찬(고베대학)*, 社本 英二(나고야대학), 森脇 俊道(고베대학)

Ultra-precision cutting of Plastics for Optical Components by Elliptical Vibration Cutting

Y. C. Song(Mechanical Eng. Dept., Kobe Univ.), E. Shamoto(Mechanical Eng. Dept., Nagoya Univ.),
T. Moriwaki(Mechanical Eng. Dept., Kobe Univ)

ABSTRACT

In the present research, a ultra-precision diamond cutting of thermo-plastic materials, polycarbonate (PC) and cyclic olefin polymer (COC), is carried out by applying a method named ultrasonic elliptical vibration cutting developed by the authors. It is experimentally proved that good optical surfaces are obtained by applying the elliptical vibration cutting in cases of machining of flat surfaces and grooves as compared with the conventional diamond cutting. The maximum surface roughness in peak to valley value obtained is less than 60 nm and 20 nm for PC and ZEONEX, respectively.

Key Words : Ultra-precision cutting(초정밀절삭), Plastic(플라스틱), Elliptical vibration cutting(타원진동절삭가공법)

1. 서론

플라스틱계 광학부품은 일반적으로 초정밀 금형을 사용한 성형가공에 의해 제조되어지나^[1], 시제품을 제작할 경우와 같이 소량의 제품을 생산할 경우에는 극히 비효율적이다. 이러한 관점에서 초정밀 다이아몬드절삭에 의해 플라스틱을 직접가공하는 기술을 확립하는 것은 중요하다. 하지만 플라스틱 재료는 종탄성계수가 작아 변형되기 쉽고, 공구인선 형상의 전사성이 좋지 못하기 때문에, 절삭가공에 의해 광학부품으로서의 정도를 만족시키기 곤란하다^[2].

한편 社本 英二 등이 타원진동절삭가공법^[3]이라 이름한 새로운 절삭가공법을 고안하여, 금형용 소결강, 무기유리 등의 고경도재료에 대해 연구성공을 발표해왔다^[4,5]. 이 가공법의 큰 특징 중에 하나는 공구 경사면과 칩 사이의 마찰력 억제효과이다. 이 장점은 플라스틱 재료의 가공정도 향상에 크게 기여하게 될 것으로 생각되어진다.

본 연구에서는 대표적인 광학용 플라스틱재료인 폴리카보네이트(PC), 환상폴리올레핀(COC) 등에 대해 타원진동절삭가공법을 이용하여 초정밀절삭을

시도하였다. 모든 절삭가공실험에 있어 공구를 진동시키지 않는 보통의 초정밀절삭을 함께 행하여 가공결과를 비교하였다.

2. 타원진동절삭가공법

2.1 가공법의 원리

타원진동절삭가공법은 Fig. 1 에 제시한 것 처럼 공구인선에 원 또는 타원진동을 부가하여 단속적으로 절삭을 행한다. 공구진동 1 주기에 있어서, 칩 생성시에는 공구가 주로 칩유출방향 속도를 가지며 순간적으로는 공구진동속도가 칩유출속도보다 빠르

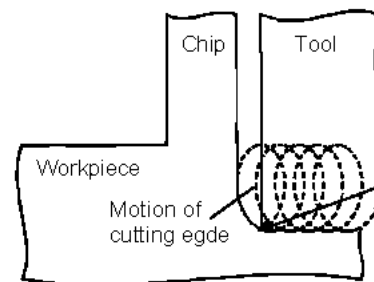


Fig. 1 Elliptical vibration cutting process

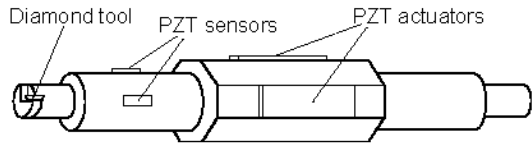


Fig.2 Ultrasonic elliptical vibrator

게 되므로, 마찰력의 방향이 반전되어 칩을 끌어당기며 가공을 행하게 된다. 보통 절삭가공에서는 절삭유 사용 등의 방법에 의해 공구경사면의 마찰력을 감소시키고자 하지만, 본 가공법은 이 마찰력을 역으로 이용하는 적극적인 절삭가공법이다. 그 결과 전단각이 증가하며, 칩두께, 절삭저항 등이 크게 감소된다.

2.2 초음파타원진동공구

본 가공실험에 사용한 초음파타원진동공구를 Fig. 2 에 제시하고 있다. 공구진동자 중심부의 직교하는 두면에 붙여져있는 압전소자에 정현파 전압을 가하면, 압전소자의 신축에 의해 진동자는 3 차 모드의 Bending 현상이 발생한다. 이때 절삭방향과 이에 수직인 방향의 진동에 위상차를 가함으로, 진동자 한쪽 끝에 고정되어진 공구의 공구인선에 원 또는 타원궤적의 진동이 부과되어진다. 또한 공구진동자에 붙어있는 작은 압전소자로 공구진동을 측정하여, 피드백제어에 의해 가공중의 공구진동진폭과 위상차를 일정하게 유지한다.

3. 실험방법 및 조건

본 연구에 피삭재로 사용한 PC 와 COC 의 주요 특성을 표 1 에 제시하고 있다. 두 재료는 일반 플라스틱재료에 비해 빛의 투과율, 반사율, 하중변형 온도, 수분의 흡수율 등의 면에서 광학재료로서의 우수한 성질을 가지고 있다.

실험은 항온항습실(실온 $23 \pm 0.1^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 0.3\%$)에 설치된 東芝기계(주)제의 5 축 초정밀가공기

Table 1 Physical properties of plastics

Material		PC	COC
Tensile strength	MPa	58.8-68.6	45
Elongation	%	90-140	60
Young's modulus	GPa	2.1-2.5	1.9-2.5
Vickers hardness	HV	13	15
Deflection temperature under load of 18.6 kgf/cm ²	°C	132-140	103
Thermal conductivity W/(m·K)		0.19	
Permeability	%	85-91	92
Refractive index	%	1.59	1.51
Water absorption	%	0.2	<0.01

Table 2 Experimental conditions of elliptical vibration cutting

Workpiece		PC, COC
Tool	Material	Single crystal diamond
	Rake angle	0 °
	Relief angle	10 °
	Nose radius	1.0 mm (face cut)
	Cutting edge angle	117 ° (V groove)
Cutting conditions	Cutting speed	0.25 m/min
	Depth of cut	1, 10 μm
	Feed of face cut	10 μm
	Feed of V groove	100 μm
Vibration conditions	Locus	Circle
	Frequency	19.8 kHz
	Radius	1.0 μm
Cooling condition		Dry

ULC-100C (H3)를 사용하여, 셰이퍼가공방식에 의해 평면가공과 V 홈경자가공을 행하였다. 표 2 에 타원진동절삭의 실험조건들을 제시하고 있다. 평면가공의 경우, 이송방향의 이론표면거칠기가 약 10 nm 가 되도록 이송량을 결정하였다. 공구는 단결정 다이아몬드공구를 사용하였으며, 플라스틱재료가 수분 흡수율이 비교적 높은 재료이므로 모든 가공은 건식조건에서 행하였다. 공구진동조건을 제외하고 같은 절삭조건에서의 보통 초정밀절삭도 함께 행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 평면가공 결과

PC 와 COC 에 대해 타원진동절삭과 공구진동을 가하지 않는 보통절삭에 의해 평면가공을 행한 결

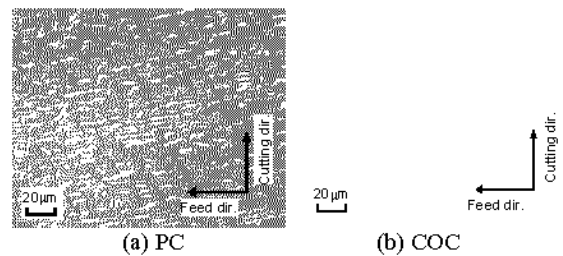


Fig. 3 Micro photographs of finished surfaces machined by conventional cutting

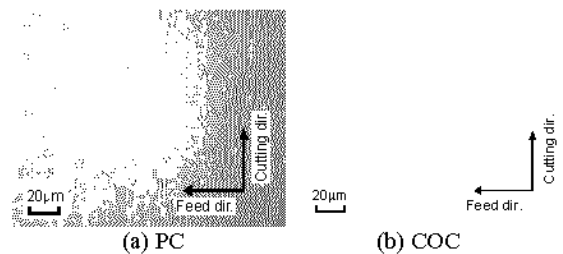


Fig. 4 Micro photographs of finished surfaces machined by elliptical vibration cutting

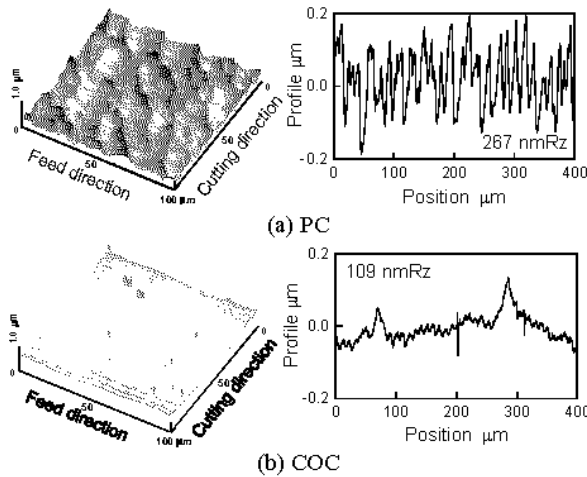


Fig. 5 AFM images and feed direction profiles of finished surfaces machined by conventional cutting

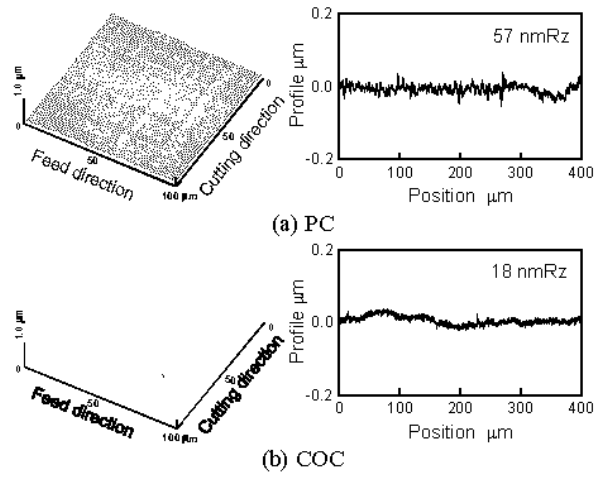


Fig. 7 AFM images and feed direction profiles of finished surfaces machined by elliptical vibration cutting

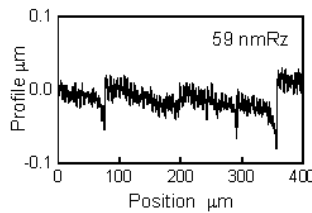


Fig. 6 Cutting direction profile of finished surfaces of COC machined by conventional cutting

과, 각각 Fig. 3 과 4 와 같은 가공면을 얻었으며, 이 그림들은 미분간섭현미경 사진이다. Fig. 3 의 보통절삭의 경우, 두 플라스틱의 가공표면 형상이 크게 차이가 남을 알 수 있다. 표 1 에 제시한 두 재료의 물성치가 종탄성계수, 경도 등은 거의 비슷하지만 연신율, 인장강도가 크게 차이가 나는 것을 알 수 있으며, 이 특성이 가공결과에 영향을 미친 것으로 추측되어진다. 또한 두 재료 모두 광학부품으로 사용하기 위해서는 가공정도의 개선이 필요하다고 생각되어진다. Fig. 4 의 타원진동절삭에 의한 가공표면의 경우, 두 플라스틱재료 모두에 대해 타원진동절삭을 실시함으로 가공표면이 크게 향상된 것이 확인되어진다. 이는 본 가공법의 칩배출 촉진효과에 의해 가공 부하가 감소된 것이 주된 원인이라 생각되어진다.

Fig. 5-7 은 Fig. 3 과 4 의 가공면을 원자간력현미경(AFM)과 표면조도측정기를 사용하여 측정한 결과이다. Fig. 5(a)의 보통절삭에 의한 PC 가공면의 경우는 200 nm 정도의 불규칙한 요철이 확인되어진다. Fig. 5(b)의 보통절삭에 의한 COC 가공면의 경우는 PC 에 비해 양호하지만, 표면거칠기와 형상정도가 100 nm 이상임을 알 수 있다.

Fig. 6 은 보통절삭에 의한 COC 가공표면의 절삭방향의 단면곡선이며, 진동폭은 작지만 절삭방향

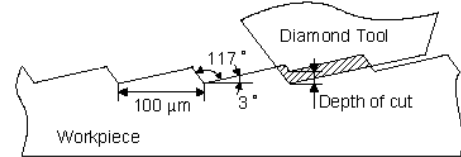


Fig. 8 Cutting process of dissymmetrical V groove

에 대해 주기적인 변동이 확인되어진다. 이 현상과 PC 표면에서 확인되어지는 요철의 원인은 과거의 연구결과^[6]로부터 가공중에 있어서 가공부하에 따른 가공표면의 주기적인 탄성변동 때문으로 생각되어진다.

Fig. 7 의 타원진동절삭에 의한 가공표면의 측정결과에서는 보통절삭에서의와 같은 가공표면의 주기적인 변동은 확인되지 않으며, 표면거칠기가 PC 와 COC 각각 57 nm, 18nm 로, 매우 양호한 상태를 확인할 수 있다.

4.2 비대칭 V 홈격자가공 결과

PC 와 COC 에 대해 Fig. 8 에 제시한 형상의 축비대칭 V 홈격자가공을 실시하여, Fig. 9 와 10 의 결과를 얻었다.

Fig. 9(a)의 보통절삭에 의한 PC 의 V 홈표면의 경우, 절삭방향에 대해 주기적인 변동이 확인되어지며, 이로 인해 가공표면이 악화됨을 알 수 있다. Fig. 9(b)의 COC 의 V 홈표면의 경우는 가공표면의 주기적인 변동은 확인되지 않으나, 마이크로사진과 단면곡선을 통해 면 전체적으로 취성현상이 발생하고 있으며 이로 인해 V 홈의 엣지부분이 미세하게 부서져 있는 것이 확인되어진다.

Fig. 10 은 타원진동절삭에 의한 결과이며, 두 플라스틱 모두에 대해 표면조도와 형상정도가 매우 양호한 V 홈을 얻었다. Fig.10(b)의 COC 의 경우는

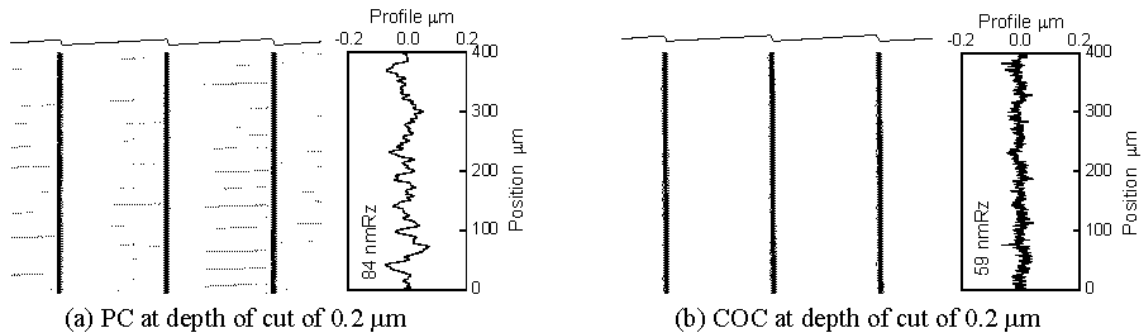


Fig. 9 Micro photographs and cutting direction profiles of dissymmetrical V grooves by conventional cutting

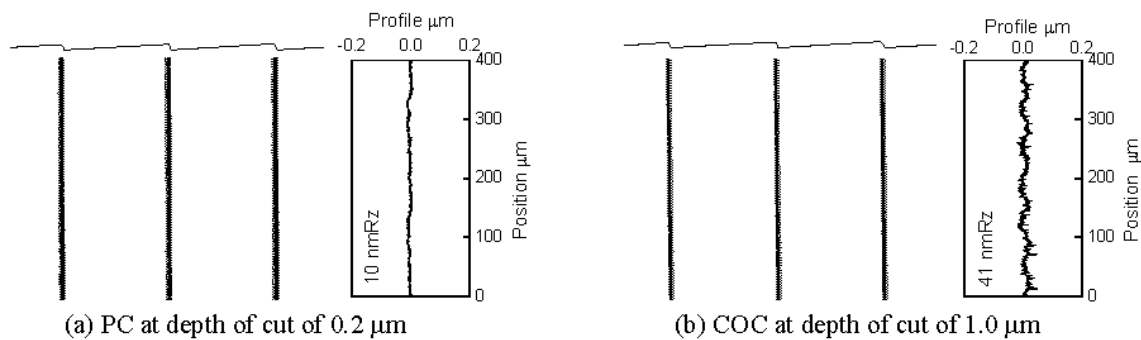


Fig. 10 Micro photographs and cutting direction profiles of dissymmetrical V grooves by elliptical vibration cutting

절입량이 0.2 μm 일 때보다 1.0 μm 일 때가 양호한 V 홈이 얻어졌으므로, 절입량 1.0 μm 의 결과를 제시하였다. 이의 원인으로는 COC 의 경우 취성성질 때문에 생긴 칩 가루가 공구인선과 가공표면사이에 간섭되어 가공표면을 악화시키는 것으로 추측되어진다.

4. 결론

이상에서, 광학용 플라스틱 폴리카보네이트(PC)와 환상폴리올레핀(COC)에 대하여 타원진동절삭가공법과 공구에 진동을 가하지 않는 보통의 절삭에 의해, 평면형상과 비대칭 V 홈격자 형상의 직접 초정밀절삭을 시도하여 이하의 성과를 얻었다.

- 1) 보통절삭에 의해 평면가공과 V 홈격자가공을 실시한 결과, 가공면의 주기적인 변동현상, 취성현상 등의 원인으로 인해 광학부품으로 사용하기에 충분한 가공면을 얻기가 곤란한 것을 확인하였다.
- 2) 타원진동절삭에 의해 평면가공과 비대칭 V 홈격자가공을 실시한 결과, 보통절삭에서 확인되었던 가공정도를 악화시키는 원인들이 억제되어, 표면거칠기와 형상정도가 매우 양호한 가공면을 얻었다.

참고문헌

1. 田村満夫, “実務現場集めたプラスチック射出成形金型のノウハウ”, 型技術, Vol. 17, No. 1, pp. 79-90, 2002.
2. 佐伯守彦, 安井平司, 외 3 명, “プラスチックの超精密切削における仕上げ面粗さの実験的検討”, 精密工学会誌, Vol. 67, No. 2, pp. 311-315, 2001.
3. E. Shamoto and T. Moriwaki, “Study on Elliptical Vibration Cutting”, Annals of the CIRP, Vol. 43, pp. 35-38, 1994.
4. E. Shamoto and T. Moriwaki, “Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting”, Annals of the CIRP, Vol. 48, pp. 441-444, 1999.
5. E. Shamoto, C. Ma and T. Moriwaki, “Ultraprecision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting”, Conference proceedings of euspen, Vol. 1, pp. 408-411, 1994.
6. 金枝敏明, 津和良秀夫, 井川直哉, “プラスチックの切削機構に関する研究(第 1 報) —走査型電子顕微鏡内加工実験装置による分離作用の観察”, 昭和 56 年度精機学会春季大会学術講演会論文集, pp. 858-860