

# 미세 초음파 타원궤적 진동절삭

## (II) 타원진동 절삭운동을 이용한 미세 홈 초음파 가공

김기대#, 노병국\*, 황경식\*\*

### Micro Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting

#### (II) Ultrasonic Micro V-grooving Using Elliptical Vibration Cutting

Gi Dae Kim #, Byoung-Gook Loh \* and Kyung-Sig Hwang\*\*

#### ABSTRACT

For precise micro V-grooving, ultrasonic elliptical vibration cutting (*UEVC*) is proposed using two parallel piezoelectric actuators, which are energized by sinusoidal voltages with a phase difference of 90 degrees. Experimental setup is composed of stacked PZT actuators, a single crystal diamond cutting tool, and a precision motorized *xyz* stage. It is found that the chip formed in the process of *UEVC* is discontinuous because of the periodic contacts and non-contacts occurring between the tool and workpiece. It is experimentally observed that the cutting force in the process of *UEVC* significantly reduces compared to the ordinary non-vibration cutting. In addition, the creation of burr during *UEVC* is significantly suppressed, which is attributable to the decrease in the specific cutting energy.

**Key Words** : Ultrasonic elliptical vibration cutting(*UEVC*) (초음파 타원궤적 진동절삭), Piezoelectric actuator(압전 소자), Single crystal diamond cutting tool (단결정 다이아몬드 공구), Discontinuous chip (불연속형 칩), Burr (버), Specific cutting energy (비절삭에너지)

#### 1. 서론

반도체 산업과 광학 산업이 발달함에 따라 미세 부품의 표면을 정밀하게 가공해야 할 필요성이 증대되었으며, 특히 정밀 광학 부품의 원활한 조립을 위해서는 부품 표면에 미세 홈(micro-grooving)을 정밀하게 가공할 수 있는 기술이 더욱 필요하게 되었다. MEMS 기술의 실현과 마이크로머신에

사용되는 극소형 부품, 레이저 프린터에 사용되는 폴리곤 미러(polygon mirror), 자기디스크의 자기디스크기판 등을 정밀하게 가공하기 위해서는 미세 부품 표면의 초정밀 가공 기술이 절실히 요구된다.

이러한 가공 기술을 실현시키기 위해 기존의 고비용, 저효율의 X-ray lithography 가공법, 레이저 가공법, 전해 가공법 그리고 미세 방전 가공법 등

접수일: 2005 년 6 월 30 일; 게재승인일: 2005 년 11 월 10 일

# 교신저자: 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

E-mail gidkim@cu.ac.kr Tel. (053) 850-2724

\* 한성대학교 기계시스템공학과

\*\* 한성대학교 기계시스템공학과 대학원

을 대신할 수 있는 초음파 가공 기술이 필요하게 되었다.<sup>1</sup> 그러나 현재까지 초음파 진동을 이용한 미세 가공 기술은 주로 가공 입자(slurry)로 미세한 크랙을 발생시켜 미세 구멍을 가공하는 데 이용되었다.<sup>1,2</sup> 또한 기존의 밀링, 드릴링 가공에 초음파 진동을 인가하여 정밀 가공에 응용한 사례가 있으나,<sup>3,4</sup> 이는 표면 조도를 향상시키는 것이 주목적이며 미세 부품 가공을 위한 마이크로미터 수준의 미세 가공과는 거리가 먼 것이다.

세라믹 재질인 압전소자(piezoelectric materials)는 전압을 가하면 소량의 변위를 발생시키는 것으로 변위 자체는 작지만 강도(stiffness)가 크기 때문에 변위와 강도에 비례하여 발생하는 힘은 상당히 크다. Shamoto 와 Moriwaki<sup>5</sup> 는 이러한 압전소자를 이용하여 Fig. 1 과 같은 타원계적 절삭경로를 생성시켜 미세 가공에 이용하는 연구를 최초로 발표하였으며, 이 연구는 현재까지 지속적으로 수행되고 있다.<sup>6-8</sup> 한 쌍의 PZT 를 사용하여 생성한 타원계적을 표면 가공에 응용하는 것은 Cerniway<sup>9</sup> 에 의해 처음 제안되었다.

본 연구의 선행 연구인 (I)편 논문에서 두 개의 평행한 PZT 에 정현파형 초음파 진동을 생성시키고 이들의 위상 차이와 진폭, 그리고 PZT 기구의 구조에서 평행한 PZT 사이의 거리 및 PZT 와 공구 날 사이의 거리를 변화시켜가면서 타원계적 공구경로 생성을 시뮬레이션 한 결과 절삭 방향 또는 배분력 방향으로만 1 차원으로 진동하는 경로를 포함하여 다양한 형태의 2 차원 타원 공구 궤적을 생성시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 연구 결과를 바탕으로 두 개의 평행한 PZT

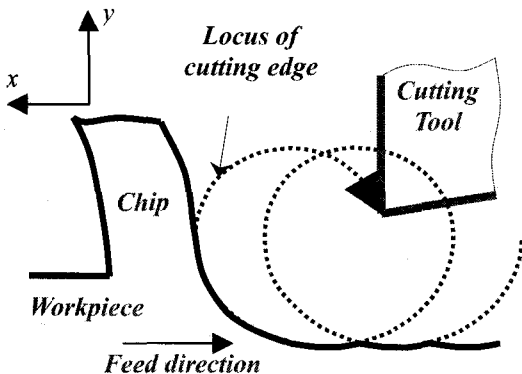


Fig. 1 2-dimensional cyclic elliptical vibration cutting motion

에서 발생하는 60 kHz 의 정현파형 초음파 진동을 합성시켜 타원계적 절삭경로를 생성시키는 PZT 기구를 제작하고, 이를 이용하여 미세 홈을 초음파 가공하는 연구를 수행하였다. 단결정 다이아몬드 공구 및 정밀 xyz 스테이지로 실험 장치를 구성한 후 알루미늄(Al5052)과 황동(brass, Cu60% + Zn40%)을 대상으로 하여 일반 절삭과 초음파 타원계적 진동 절삭 가공을 수행한 후, 이들의 차이를 비교하였다. 절삭 조건이 변화함에 따라 각 절삭 방법에서의 절삭력의 크기와 절삭 표면 상태, 그리고 칩 형상 등이 어떻게 변화하는 지를 관찰하였다.

## 2. 실험 장치의 구성

본 실험 장치는 타원 계적 생성을 위한 PZT 스택 구조물, 단결정 다이아몬드 공구 및 생크, 그리고 이들의 위치를 스텝모터(steping motor)와 선형스케일(linear scale)로 정밀도 1 μm 이내로 제어하는 xyz 3 축 스테이지 등으로 구성된다. Fig. 2 에 전체 실험 장치의 구성도를 보여주고 있다.

Fig. 3 는 절삭 공구에 타원 계적을 생성시키는 PZT 스택 기구의 구조를 나타낸 것이다. 2 개의 평행한 PZT 스택에 60kHz 의 정현파형 전압을 위상 차이를 90° 두고 인가하여 각각 진폭 1 μm 이내의 진동을 발생시키고 이들 운동의 합성으로 타원계적을 생성시켰다. 공구는 미세 V 홈을 가공하기

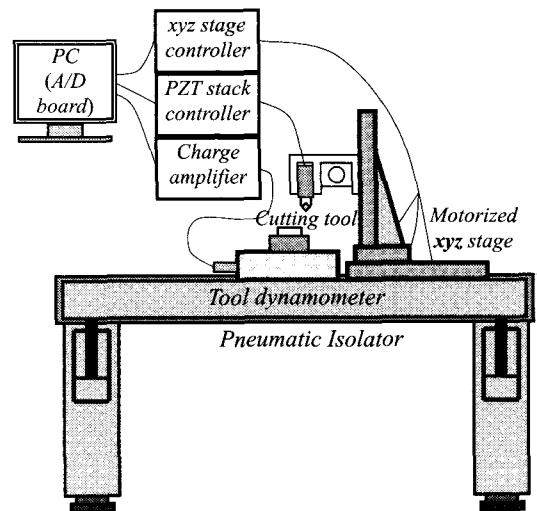


Fig. 2 Experimental set-up

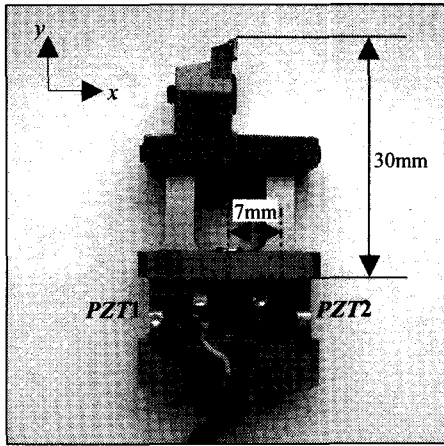


Fig. 3 Photograph of PZT mechanism to generate elliptical vibration cutting motion

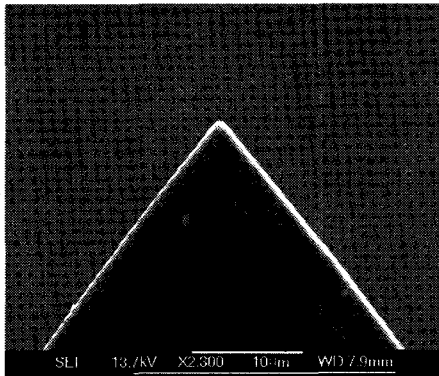
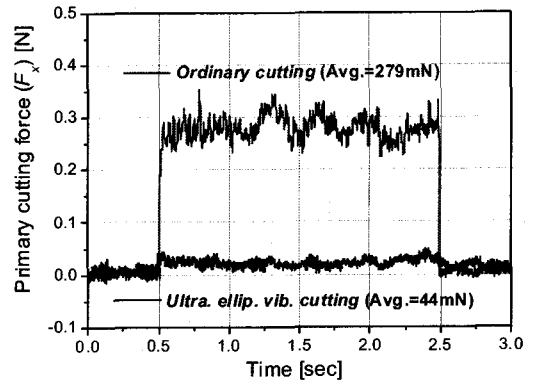


Fig. 4 SEM photograph of the single diamond cutting tool nose

위해 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 노우즈 반경이 600nm 인 단결정 다이아몬드로 제작하였으며, 경사각(rake angle), 여유각(clearance angle) 및 선단각(cutting nose angle)을 각각 0°, 6°, 80° 로 설계하였다. 공구와 결합된 PZT 스택을 xyz 스테이지에 부착하여 구동하였으며, 공구동력계(Kistler 9257B)로 절삭력을 측정하였다. 시편 재질은 알루미늄(Al5052)과 황동(brass, Cu60%, Zn 40%)을 사용하였다. 진동을 주지 않고 1 축 절삭경로로 V 홈을 가공하는 일반 절삭 방법 및 같은 절삭 조건으로 타원케적 진동 절삭을 수행하여 절삭력과 가공면 상태 등을 서로 비교하였다. 미세 V 홈 가공을 위해 시편 표면을 래핑(lapping) 가공하였으며, 전체 실험 장치를 공

기 실린더로 지지되는 제진대(pneumatic isolator) 위에 설치하여 실험의 정밀도를 높였다.

### 3. 실험 결과 및 토의



(a) Primary cutting force variation



(b) V-grooved surface by OC



(c) V-grooved surface by UEVC

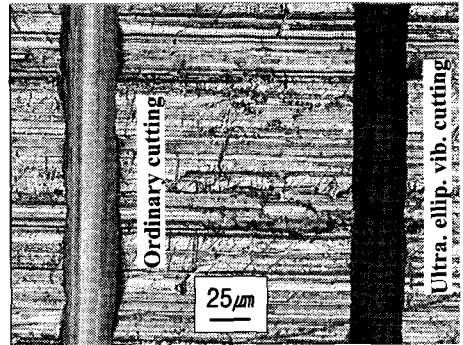
Fig. 5 OC vs. UEVC (Material: Al5052, depth of cut( $d$ ) = 15 $\mu$ m, cutting speed( $V$ ) = 5 mm/s)

Fig. 5 는 알루미늄(Al5052) 재질의 공작물을 공구에 진동을 주지 않고 일반적으로 가공(ordinary cutting, OC)하였을 경우와 초음파 타원케적 진동 절삭(ultrasonic elliptical vibration cutting, UEVC)을 수행하였을 경우에 대해 주절삭력(primary cutting force) 및 가공된 표면 상태를 비교한 것이다. 타원케적의 절삭 경로로 가공한 경우, 칩과 공구 사이에 작용하는 마찰 저항이 크게 감소하여 주절삭력이 80% 이상 감소하였음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Shamoto 와 Moriwaki 의 연구 결과와 일치한다.<sup>5,7</sup> 진동을 주지 않고 연속적으로 절삭 가공하였을 경우에는 가공된 표면이 매끄러웠으나, 초음파 진동을 주고 절삭하였을 경우 가공 표면에 불연속적인 단속 절삭의 흔적이 남아 표면이 상대적으로 거칠었다.

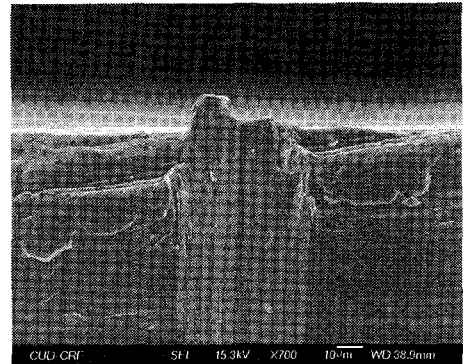
절삭깊이가 작을 경우 치수효과(size effect)에 의해 비절삭에너지(specific cutting energy)가 증가한다. 이러한 저항 에너지는 공작물에 소형 변형을 유발시켜 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 가공면 가장자리에 버(side burr)를 생성시킨다. 그러나 Fig. 5(c)에서 보는 바와 같이 초음파 진동 절삭에 의해 가공된 표면의 가장자리에는 버가 생성되지 않았다. 이는 절삭 공구의 타원케적 경로가 칩과 공구 사이에 작용하는 마찰 저항을 감소시킴으로서 전체 비절삭에너지가 감소한 결과이다.

Fig. 6 은 같은 재질의 알루미늄에 대해서 절삭 깊이를 30  $\mu\text{m}$  로 증가시켜 절삭하였을 때 가공면의 상태를 나타낸 것이다. Fig. 6(a) 는 래핑 가공된 공작물 표면에 초점을 맞추어 광학현미경으로 촬영한 사진인데, 일반 가공 시에는 가공면의 가장자리에 버가 생성되었으나 타원케적 진동을 주어 가공하였을 경우에는 버가 생성되지 않았음이 확연하게 드러난다. Fig. 6(b)와 (c)는 이 두 가지 가공에서 이탈 가공(exit cutting) 시 생성된 면의 상태를 SEM 으로 촬영한 사진이다. 초음파 타원진동 절삭 시 가공면의 표면 조도는 일반 절삭 가공법에 비하여 좋지 않았으나, 이탈 가공 시 일반 절삭 방법으로는 버(exit burr)가 생성되었지만 초음파 타원진동 절삭 시 버가 발생하지 않았음을 알 수 있다. 결국 초음파 타원케적 진동 절삭을 수행하면 가공면의 조도는 상대적으로 나빠지나 버(side/exit burr) 생성을 억제하여 형상 정밀도를 향상시킬 수 있다.

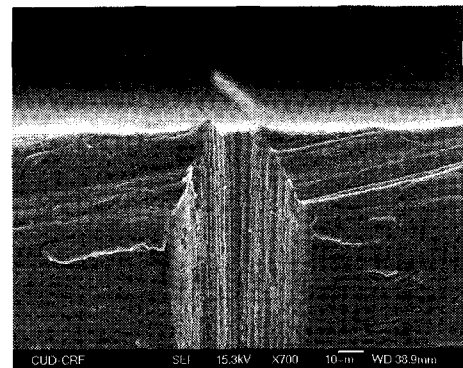
Fig. 7 은 일반 절삭과 초음파 타원케적 진동 절삭 시 생성된 칩의 형상을 보여주고 있다. 연성



(a) Comparison of machined surface



(b) Exit burr formation by OC



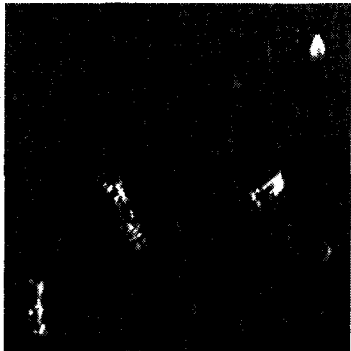
(c) Exit surface by UEVC

Fig. 6 Comparison of machined surface (Material: Al5052, depth of cut( $d$ ) = 30 $\mu\text{m}$ , cutting speed( $V$ ) = 5mm/s)

(ductile) 재질인 황동을 진동을 주지 않고 가공할 때에는 공구와 공작물간의 연속적인 접촉으로 인해 연속형 칩이 발생하였으나, 초음파 진동을 주



(a) Continuous chip formed by OC

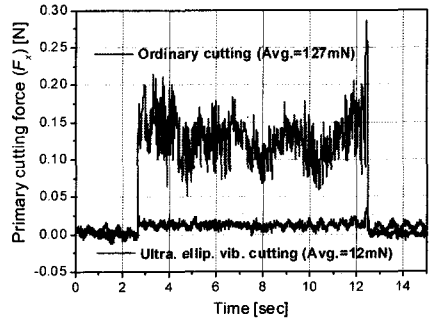


(b) Discontinuous chip formed by UEVC

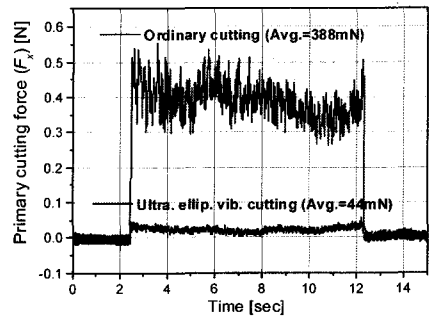
Fig. 7 Comparison of chip shape (Material : Brass, depth of cut( $d$ ) = 20  $\mu\text{m}$ , cutting speed( $V$ ) = 3mm/s)

어 가공할 때에는 공구와 공작물간의 단속적인 접촉, 즉 타원의 한 주기 동안 절삭과 비절삭을 반복하면서 가공함으로써 불연속형 칩이 발생하였다.

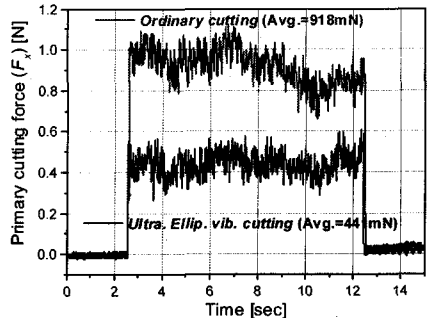
Fig. 8 은 황동 시편에 대해 절삭깊이와 절삭속도를 변화시켜가면서 일반 절삭과 타원케적 초음파 진동절삭 두 가지 방법으로 가공하면서 측정된 주절삭력의 변화를 나타낸 것이다. 모든 실험 결과로부터 타원케적 초음파 진동 절삭을 수행하면 일반 절삭에 비해 주절삭력이 현저히 감소됨을 볼 수 있다. 절삭력이 감소되는 비율을 보다 자세히 관찰하면 일반 절삭으로 가공하였을 때 측정된 절삭력이 작으면 작을수록 같은 조건으로 타원케적 초음파 진동 절삭으로 가공하였을 때 측정되는 절삭력은 더욱 크게 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 8(a) 와 같이 절삭깊이가 10  $\mu\text{m}$  이고 절삭속도가 1mm/s 의 조건으로 가공하였을 때 타원케적 초음파 진동 절삭을 수행하면 일반 절삭가공법에 비해



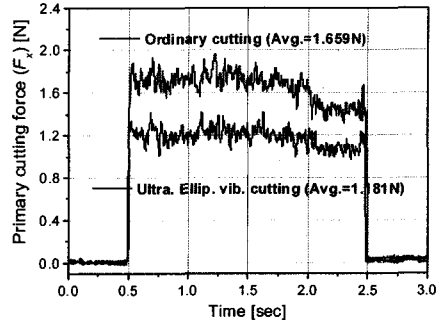
(a)  $d = 10 \mu\text{m}$ ,  $V = 1 \text{mm/s}$



(b)  $d = 20 \mu\text{m}$ ,  $V = 1 \text{mm/s}$

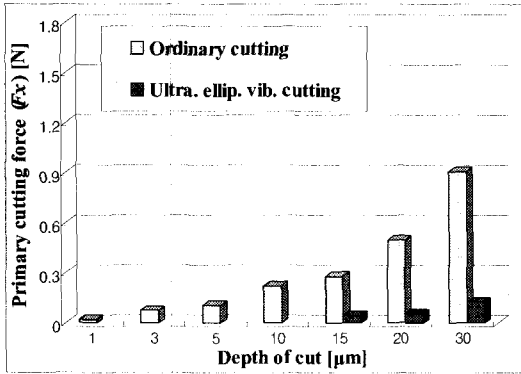


(c)  $d = 30 \mu\text{m}$ ,  $V = 1 \text{mm/s}$

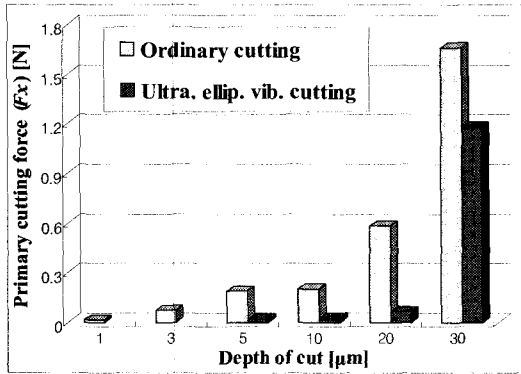


(d)  $d = 30 \mu\text{m}$ ,  $V = 5 \text{mm/s}$

Fig. 8 Comparison of cutting force between OC and UEVC (Material: brass)



(a) Al5052, V=5mm/s



(b) Brass, V=5mm/s

Fig. 9 Comparison of the cutting force between OC and UEVC according to the depth of cut

주절삭력이 약 90.6% 감소하였고, (b) 절삭깊이가 20 μm 일 때는 약 88.7%, (c) 30 μm 일 때는 절삭력이 약 52% 감소하여 절삭깊이가 증가할수록 초음파 진동 절삭시 절삭 저항이 감소되는 비율이 감소하였다. Fig. 10(d)와 같이 절삭깊이가 30 μm 이고 절삭속도를 5mm/s 로 증가시켰을 경우에는 절삭력 감소율은 더욱 떨어져 일반 절삭 가공에 비해 약 29% 정도 절삭력이 감소하였다.

Fig. 9는 절삭깊이를 1 μm 에서 30 μm 까지 변화시켜가면서 가공한 경우 일반 절삭 가공 및 초음파 타원 진동 절삭 가공 시 측정된 주절삭력의 평균값 변화를 보여주고 있다. V 홈의 기하학적 특성상 절삭 깊이가 증가하면 공구가 이동하는 방향과 수직인 방향의 절삭 폭도 함께 증가하기 때문

에 절삭깊이가 증가함에 따라 작용하는 절삭력의 크기는 지수적으로 증가하고 있다. Fig. 9 에서 알루미늄 가공 실험에서는 절삭깊이가 10 μm 이하일 때, 그리고 황동 가공 실험에서는 절삭깊이가 3 μm 이하일 때 타원케적 초음파 진동 절삭 방법으로는 절삭력을 측정할 수 없었는데, 그 이유는 측정 한계치를 벗어난 너무 미소한 절삭력이 작용하여 가공 구간을 명확하게 구별할 수 없었기 때문이다.

Fig. 8 과 Fig. 9 의 실험 결과에서 초음파 타원 케적 진동 절삭을 수행하면 절삭깊이가 매우 작은 영역에 있어서는 절삭력이 감소하는 정도가 매우 커짐을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과로부터 타원 케적 초음파 진동 절삭 시 절삭력이 감소하는 가장 큰 원인은 공구에 작용하는 마찰 저항이 감소하여 치수효과(size effect)의 감소로 인한 비절삭 저항이 감소하기 때문임을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

평행한 한 쌍의 PZT 에 약 60kHz 의 정현파형의 전압을 90°의 위상 차이를 두고 인가하여 1 μm 의 진동 변위를 발생시키고 이들을 합성시킴으로써 타원 케적의 절삭 경로를 생성시켜 미세 형상을 초음파 가공하는 기구를 제안하였다. 노우즈 반경이 600 nm 인 단결정 다이아몬드 공구로 알루미늄과 황동 시편에 대해 미세 V 홈을 가공한 결과, 타원 케적의 초음파 진동을 인가하여 절삭한 경우 단속적 절삭으로 인해 불연속형 칩이 발생하였으며, 진동을 생성시키지 않은 일반 절삭에 비하여 절삭력이 크게 감소되었고, 가공 표면의 가장자리 및 이탈면에 버(burr)가 발생되지 않음을 확인하였다. 타원 케적 초음파 진동 절삭 시 특히 절삭깊이가 작은 영역에서는 비절삭저항이 감소함으로 인해서 일반 절삭가공법에 비해 절삭력이 80~90% 이상 감소하였으며, 절삭력이 감소하는 비율은 절삭깊이가 증가함에 따라 감소하였다.

#### 참고문헌

1. Thoe, B., Aspinwall, K. and Wise, H., "Review on Ultrasonic Machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.38, No.4,

- pp.239-255, 1998.
2. Chu, C.N., Han, D. C., Park, H. J., Park, S. S., Je, S. U., "A Study on the Ultrasonic Micro-machining and Measurement System, " *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp.133-140, 2002.
  3. Pei, Z. J. and Ferreira, P. M., "An experimental investigation of rotary ultrasonic face milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.39, pp.1327-1344, 1999.
  4. Wiercigroch, M., Neilson, R. D. and Player, M. A., "Material removal rate prediction for ultrasonic drilling of hard materials using an impact oscillator approach," *Physics Letters A* Vol.259, pp.91-96, 1999.
  5. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 43, pp.35-38, 1994.
  6. Moriwaki, T. and Shamoto, E., "Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp.31-34, 1995.
  7. Ma, C., Shamoto, E., Moriwaki, T. and Wang, L., "Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.44, pp.1305-1310, 2004.
  8. Lee, J., Lee, D., Jung, Y. and Chung, W., "A Study on micro-grooving characteristics of planar lightwave circuit and glass using ultrasonic vibration cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.130-131, pp. 396-400, 2002.
  9. Cerniway, M.A., "Elliptical Diamond Milling: Kinematics, Force and Tool Wear," M.S. thesis, North Carolina State University, 2001.