

압전소자의 미세회전운동을 이용한 초음파 미세 홈 가공

김기대*(대구가톨릭대학교 기계자동차공학부), 황경식(한성대학교 대학원 기계시스템공학과),
노병국(한성대학교 기계시스템공학과)

Micro V-groove Machining Using Cyclic Elliptical Cutting Motion of a Couple of Piezoelectric Material

G. D. Kim(Mecha. and Automotive Eng. Dept., CUD),

K. S. Hwang(Gradu. School of Mecha. Sys. Eng. Dept., HSU), B. G. Loh(Mecha. Sys. Eng. Dept., HSU)

ABSTRACT

For precise micro-grooving and surface machining, ultrasonic cyclic elliptical cutting is proposed using two parallel piezoelectric actuators. The piezoelectric actuators are energized by sinusoidal voltages of varying phase which is essential to generating elliptical cutting. Experimental setup is composed of ultrasonic motor, single crystal diamond cutting tool, and precise motorized xyz stage. It is confirmed experimentally that the cutting performance, in terms of the cutting force, the burr formation, and the discontinuous chip formation is improved remarkably by applying ultrasonic elliptical vibration cutting.

Key Words : Ultrasonic elliptical vibration cutting (초음파 타원궤적 진동절삭), Piezoelectric material(압전소자), Single crystal diamond cutting tool (단결정 다이아몬드 공구), Burr (거스러미), Discontinuous chip (불연속형 칩)

1. 서론

반도체 산업, MEMS, BT 및 NT 의 발전에 따라 초정밀, 초소형 가공 기술에 대한 수요가 급증하고 있으나, 기존의 전통적인 가공 기술로는 이러한 수요를 충족시킬 수 없게 되었다. 현재까지 수행된 미세 가공 기술에 관한 연구로는 미세방전가공(MEDM), 레이저 가공, 전해가공(ECM), 마이크로 드릴링에 관한 기술 등을 들 수 있다. 그러나 가공 재료의 한계, 표면의 열변형, 전극(electrode) 가공의 필요성, 공구 제작의 어려움 등으로 인해 만족스러운 결과를 얻지 못하고 있다.

미세 부품 표면에 미세 홈(micro-grooving) 가공을 비롯한 정밀 표면 가공 기술을 실현시키기 위해 기존의 고비용, 저효율의 가공법 등을 대신할 수 있는 절삭 가공을 바탕으로 하는 새로운 표면 가공 기술이 필요하게 되었으며, 초음파 진동을 정밀 가공에 이용하게 되었다.^{1,2} 현재까지 초음파

진동을 이용한 가공 기술은 대부분 미세 구멍 가공을 위해 가공입자(slurry)의 미세 크랙 발생 원리를 이용한 것이다. 또한 밀링, 선삭, 드릴링 가공에 초음파 진동을 응용한 사례가 있으나, 이는 표면 조도를 향상시키는 것이 주목적이며 미세 부품 가공을 위한 마이크로미터 수준의 미세 가공과는 거리가 먼 것이다.

압전소자(PZT)를 이용하여 절삭 공구에 타원 궤적을 생성시켜 정밀 절삭 가공을 수행한 연구는 일본의 Shamoto 및 Moriwaki 에 의해 최초로 제안되었으며^{3,6}, 이후 국내 연구진⁷을 비롯하여 이 연구가 계속 진행되고 있다. 그는 두 쌍의 압전소자를 직교 방향으로 배치하여 공구에 타원 궤적을 발생시키는 장치를 제안하였으며, 6Hz 이내의 저주파수로 가진하고 표면을 절삭한 결과 일반적인 가공법에 비하여 절삭 저항이 현저히 감소됨을 증명하였다.³ 이후 가진 주파수를 약 20kHz로 높인 후, Fig. 1 과 같이 3 차원적으로

결합된 두 쌍의 압전 소자에서 발생하는 진동모드(mode shape)를 합성하여 공구에 타원 궤적을 생성시킨 연구를 발표하였으나^{4,5}, 이러한 모드 합성 방법으로는 생성되는 타원 궤적의 평면과 절삭 방향과 칩 배출 방향을 포함하는 평면을 정확하게 일치시키는데 어려움이 있다.

본 연구에서는 평행하게 배열된 두 쌍의 PZT에 위상차를 두고 변위를 발생시킴으로써 반경이 $1\mu\text{m}$ 이내의 타원 궤적을 생성시켜 Fig. 2 과 같이 타원 절삭 경로로 가공하는 기구를 제안하였다. 실험장치를 구성한 후 알루미늄과 황동(brass)을 대상으로 하여 일반 절삭과 초음파 타원 궤적 진동 절삭의 차이를 비교하였다. 절삭깊이, 절삭속도가 변화함에 따라 각 절삭 방법에서의 절삭력의 변화, 절삭 표면 상태의 변화, 그리고 칩 형상의 변화 등을 관찰하였다.

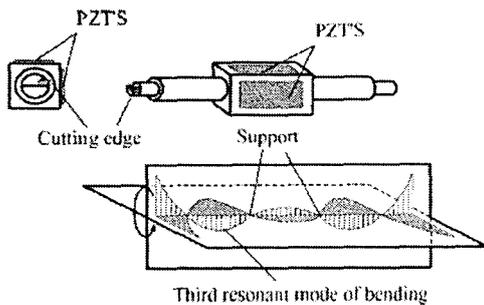


Fig. 1 Two bending mode generated by PZTs (by Shamoto and Moriwaki^{4,5})

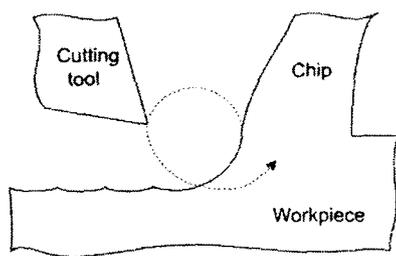


Fig. 2 2-dimensional cutting mechanism by cyclic elliptical motion

2. 실험 장치의 구성

본 실험 장치의 구성은 크게 타원 궤적 생성을 위한 초음파 모터, 공구 및 생크, 그리고 이들을 구동하는 3 축 스테이지 등 3 부분으로 나뉘어진다. Fig. 3 은 진폭은 같으나 위상이 다른 두 쌍의 PZT를 이용하여 절삭 공구에 타원 궤적을 생성시키는

기구를 나타낸 것이며, Fig. 4 에 전체 실험장치 사진을 보여주고 있다. 공구와 결합되어 있는 초음파 모터를 정밀도 1 μm 이내의 xyz스테이지로 구동하였으며, Kistler 공구동력계로 절삭력을 측정하였다. 공구는 단결정 다이아몬드공구로 제작하였으며 노우즈 반경을 600nm, 경사각, 여유각 및 선단각을 각각 0° , 6° , 80° 로 설계하였다. 알루미늄과 황동 재질의 10 \times 10 mm 시편 표면을 래핑 가공하였다. 각 실험당 10 mm 씩을 절삭하였으며, 전체 실험 장치를 공기 베어링으로 지지되는 제진대 위에 설치하여 실험 정밀도를 높였다.

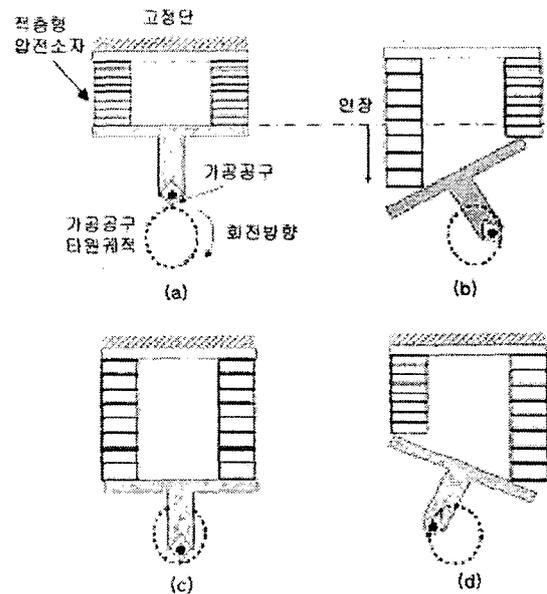


Fig. 3 Generation of elliptic motion by phase difference of PZTs

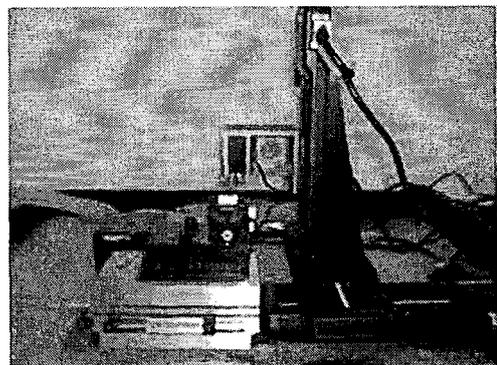
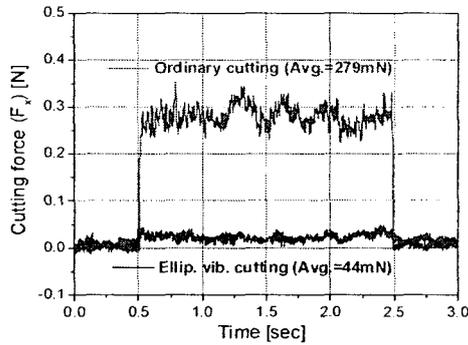


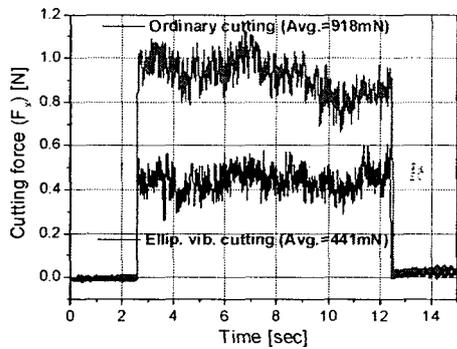
Fig. 4 Experimental set-up

3. 실험 결과 및 토의

3.1 절삭력 비교



(a) Aluminum, $d=15$ 탕, $V=5$ mm/s

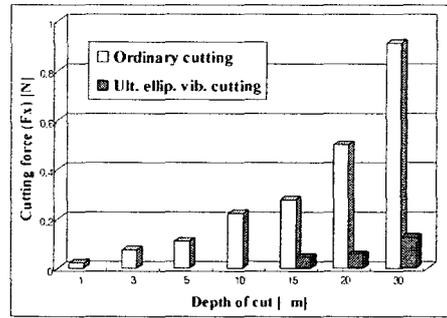


(b) Brass, $d=30$ 탕, $V=1$ mm/s

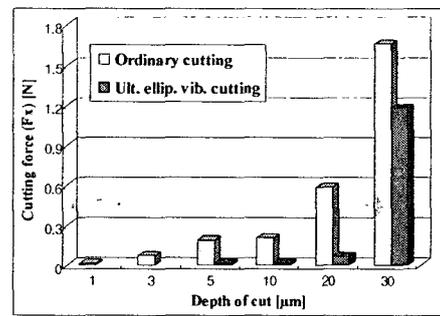
Fig. 5 Comparison of cutting force between ordinary cutting and ultrasonic elliptical vibration cutting

Fig. 5 는 알루미늄과 황동에 대해 V 홈을 두 가지 방법으로 가공하여 서로 절삭력을 비교한 것이다. 하나는 진동을 주지 않는 일반적인 가공 (ordinary cutting)으로 일정한 절삭깊이(15~20 탕)를 주고 공구를 일정한 속도(1~5mm/s)로 직선으로 이동시켜서 가공한 경우이며, 또 하나는 이 공구에 부착되어 있는 초음파 액츄에이터에 전원을 인가하여 1 탕 이하의 반경을 가진 타원 궤적으로 약 60kHz 의 초음파 진동을 생성시켜 가공한 경우이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 일반가공법에 비하여 초음파 타원 진동 절삭의 경우 절삭력이 큰 폭으로 감소하였음을 볼 수 있다. Fig. 6 은 절삭깊이를 1 탕 에서 30 탕 까지 변경시켜가면서 절삭한 후 측정된 절삭력의 평균값의 변화를 나타낸 것이다. 절삭력이 매우 작은 영역에 있어서는 절삭력이 감소하는 정도가 매우 커짐을 확인할 수 있는데 이로부터 초음파 타원 궤적 진동 절삭 시 절삭력이 감소하는 원인은 공구와 칩, 공구와 공작물간의 마찰력 감소로 인한 쟁기력(plowing force)의 감소로 인한 것임을 유추할 수 있다.

3.2 가공 표면상태 비교



(a) Aluminum, $V=5$ mm/s



(b) Brass, $V=5$ mm/s

Fig. 6 Comparison of cutting force between ordinary cutting and ultra. ellip. vib. cutting according to depth of cut

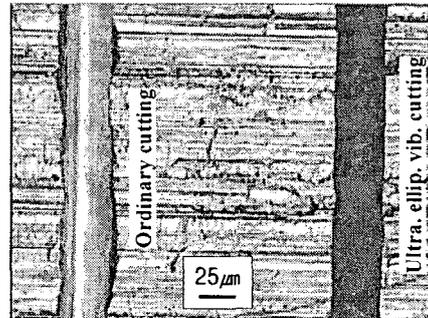


Fig. 7 Comparison of surface texture between ordinary cutting and ultra. ellip. vib. cutting (Aluminum, $d=30$ 탕, $V=5$ mm/s)

Fig. 7 은 알루미늄을 일반절삭 및 초음파 타원 진동 절삭으로 가공한 뒤 광학현미경으로 가공면의 상태를 관찰한 사진이다. 다이아몬드 공구 날에 의해 가공된 홈 내부면의 상태는 일반 절삭 방법으로 가공한 면이 매끄러운 것으로 관찰되었으나, 홈 가공으로 인한 거스러미(burr)가 많이 생성되었음을 확인할 수 있다. 이에 반해 초음파 진동절삭으로 가공된 면에서는 거스러미가 관찰되지 않았다.

3.3 칩 형상 비교

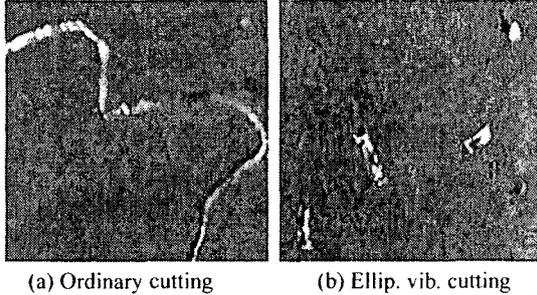


Fig. 8 Comparison of chip shape between ordinary cutting and ultra. ellip. vib. cutting (Brass, $d=20\text{ }\mu\text{m}$, $V=3\text{mm/s}$)

Fig. 8 은 일반절삭과 초음파 타원케적 진동절삭 시 생성된 칩의 형상을 보여주고 있다. 연성(ductile) 재질인 황동을 진동을 주지 않고 가공할 때에는 공구와 공작물간의 연속적인 접촉으로 인해 연속형 칩이 발생하였으나, 초음파 진동을 주어 가공할 때에는 공구와 공작물간의 단속적인 접촉, 즉 타원의 한 주기 동안 절삭과 비절삭을 반복하면서 가공하게 되어 불연속형 칩이 발생하였다.

4. 결론

평행한 두 쌍의 PZT 에 위상차를 두고 변위를 발생시킴으로써 절삭 공구에 타원 케적의 경로를 생성시켜 가공하는 기구를 제안하였다. 노우즈 반경이 $1\text{ }\mu\text{m}$ 이내인 단결정 다이아몬드 공구로 약 60kHz 의 주파수로 1달 이내의 초음파 진동을 생성시켜 알루미늄과 황동 시편에 대해 미세 홈 가공 실험을 수행한 결과, 타원 케적의 초음파 진동을 인가하여 절삭한 경우 단속적 절삭으로 인해 불연속형 칩이 발생하였으며, 진동을 생성시키지 않은 일반 절삭에 비하여 절삭력이 크게 감소되었고, 표면에 거스러미(burr)가 발생하지 않음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2004 년도 한국학술진흥재단의 협동연구지원사업에 의하여 수행되었음. (KRF-2004-042-D00010)

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. 주종남, 한동철, 박희재, 박상신, 제성욱, 초음파 초정밀 가공 및 측정시스템에 대한 연구, 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 7 호, pp.133-140, 2002
3. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 43, pp.35-38, 1994
4. Ma, C., Shamoto, E., Moriwaki, T., Wang, L., Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.44, pp.1305-1310, 2004
5. Moriwaki, T., Shamoto, E., Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP, Vol. 44, pp.31-34, 1995
6. Moriwaki, T., Shamoto, E., Ultraprecision Ductile cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration," Annals of the CIRP, Vol. 41, pp.141-144, 1994
7. 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
8. Loh, B., Ro, P. "An Object Transport System Using Flexural Ultrasonic Progressive Waves Generated by Two-Mode Excitation", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.47, No.4, pp.994-999, 2000