

## 2차원 고주파 진동을 이용한 미세 밀링가공

김기대<sup>#</sup>

### Micro Milling using High Frequency 2-dimensional Vibration

Gi Dae Kim<sup>#</sup>

(Received 21 October 2010; received in revised form 25 November 2010; accepted 2 December 2010)

#### ABSTRACT

Using two piezoelectric materials orthogonally arranged, 2-dimensional(2D) vibration in a excitation workpiece table was generated. In this study, micro milling using high frequency 2D vibration was proposed, whose locus of cutting tool is combined with original trochoid locus of milling tool and 2D elliptical locus of excitation table. From the cutting results of 2D vibrational micro milling of nickel alloy, it was observed that the machining quality and the roughness of machined surface were enhanced compared to conventional milling in a side cutting whose immersion ration is relatively low, whereas there was little betterment in a slot cutting.

**Key Words** : 2D vibrational micro milling (2차원 진동 미세밀링), Excitation table (가진테이블), Side milling (측면 밀링), Immersion ration (절입비)

#### 1. 서 론

개발 제품의 초소형화 및 초정밀화에 대한 요구를 충족시키기 위해 미세방전가공, 미세전해가공, 레이저가공 등 여러 가지 마이크로 가공기술이 발전하고 있다. 미세 절삭가공 방식은 여러 가지 특수 가공방식에 비하여 가공정밀도가 우수하고 표면 정밀도의 향상을 기대할 수 있지만, 미세한 크기의 공구를 제작하기 어렵고 공구의 수명이 짧으며, 가공되는 부피에 비해 생성되는 버(burr)의 크기가 과다하고 또한 이를 쉽게 제거할 수 있는 방법이 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 미세 절삭가공 방식의 단점을 극복하고자 미세 진동절삭 방안이 도입되었다<sup>[1,2]</sup>.

Shamoto 등<sup>[3]</sup>은 압전소자의 공진현상을 이용하여

공구에 서로 수직한 방향의 진동을 생성시켜 2차원 타원진동절삭을 제안하였다. 저자<sup>[4]</sup>는 생성되는 2차원 타원궤적의 모양과 크기 그리고 가진주파수를 조절할 수 있는 새로운 2차원 진동절삭 방안을 제안하고 이를 이용하여 미세 V 홈 혹은 피라미드 패턴 가공에 관한 연구를 수행하였으며, 이를 통해 2차원 진동절삭을 이용하면 미변형 칩두께 및 절삭 저항이 감소하며 버 생성이 억제되는 등의 효과로 인해 미세가공 정밀도가 크게 향상될 수 있음을 확인하였다.

2차원 진동을 이용한 미세드릴링<sup>[5]</sup>에 관한 연구도 수행되었으나, V 홈 혹은 피라미드 패턴가공과 드릴링은 1차원 혹은 제한된 2차원 가공으로만 수행된다. 따라서 완전한 2차원가공 혹은 자유로운 형상의 3차원 미세형상 가공이 가능하려면 미세 밀링 가공방식의 개발이 필요하며 이를 위해 2차원 진동을 이용한 미세밀링<sup>[6,7]</sup>에 관한 기초 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 2차원 고주파 진동 미세절삭 이론을

<sup>#</sup> 교신저자 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

E-mail : gidkim@cu.ac.kr

미세밀링가공으로 확장하여 적용시키고, 이러한 미세 밀링 방식이 미세 가공 정밀도와 가공면의 표면거칠기를 향상시킬 수 있는지 확인하고자 한다.

## 2. 2차원 진동 미세 밀링가공

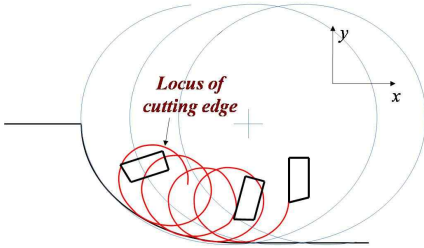
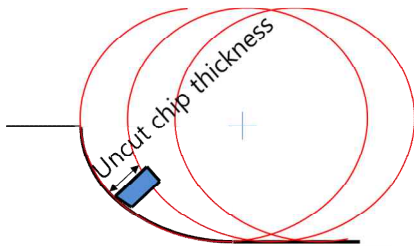
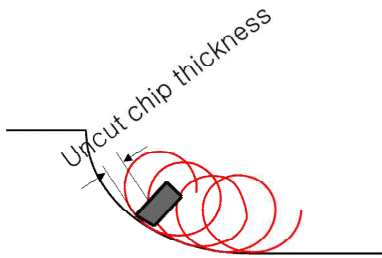


Fig. 1 Locus of cutting edge in 2D-vibrational milling



(a) Conventional milling



(b) 2D vibrational milling

Fig. 2 Comparison of uncut chip thickness between conventional milling and 2D vibrational milling

밀링 공정에서 공구 혹은 테이블에 가공 축 방향( $z$  방향)과 서로 수직한 방향, 즉  $x$  및  $y$  방향으로 위상 차이를 가지는 정현파 진동을 발생시키면  $xy$  평면에서 이들 진동 변위가 합성되어 타원궤적을 그리는 2차원 진동이 생성된다. 공급전압의 크기와 두 진동 간의 위상 차이를 조절함으로써 타원궤적의 형상 및 가진주파수를 변화시킬 수 있다.

한편 밀링공정에서 공구는 주축의 회전운동 및 공구 이송운동이 결합되어 트로코이드(trochoid) 궤적을 그리면서 가공을 수행한다. 이러한 기존의 트로코이드 운동과 2차원 진동에 의한 타원궤적 운동이 합성되면 공구는 Fig. 1 과 같은 자전운동과 공전운동이 결합된 형태의 새로운 가공 궤적을 그리게 된다.

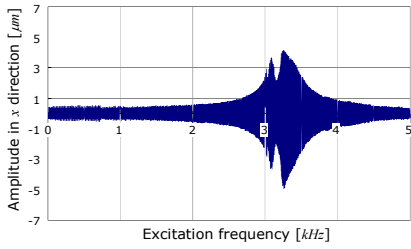
이러한 운동으로 인해 2차원 진동 미세 밀링가공을 수행하면 Fig. 2와 같이 비절삭칩두께(uncut chip thickness)가 감소하여 절삭저항이 감소되고, 이로 인해 가공 정밀도의 향상을 기대할 수 있게 된다.

## 3. 가진테이블 특성

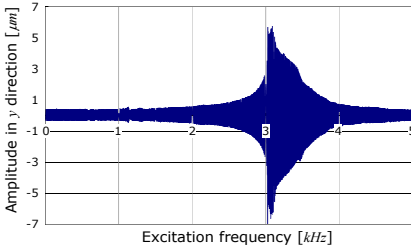
V 홈을 가공하기 위한 기존의 연구<sup>[4]</sup>에서는 회전하지 않는 셰이핑(shaping) 공구에 직접 2개의 압전소자를 부착하여 절삭방향과 칩 배출 방향을 포함하는 평면 위로 2차원 진동을 생성시킬 수 있었다. 그러나 밀링공정에서는 공구가 회전하고 있기 때문에 공구에 직접적으로 2차원 진동을 생성시키는 쉽지 않다. 따라서 공작물이 고정되어 있는 테이블에 수직한 방향의 압전소자(NEC TOKIN, model: AE1010D16)를 부착하고 이에 정현파 전압을 가하여 2차원 진동을 생성시키는 가진테이블(excitation table)을 제작하였다.

제작된 가진테이블의 진동특성을 규명하기 위하여 가진주파수 변화에 따른 진동의 진폭 크기의 변화를 측정하였다. Fig. 3은 함수발생기를 통해 30초 동안 1Hz로부터 5kHz까지의 최대전압진폭( $V_m$ )이 10V인 정현파 전압을 순차적으로 발생시키고, 그 때 생성되는  $x$  축과  $y$  축의 진동 변위의 크기 변화를 나타내는 것으로서, 3~3.5kHz 범위에서 첫 번째 공진모드가 존재함을 알 수 있다.

절삭 공정 중 2차원 진동이 발생하면 공구와 공작물 간에 접촉과 비접촉이 반복된다. 기존 연구결과<sup>[4]</sup>

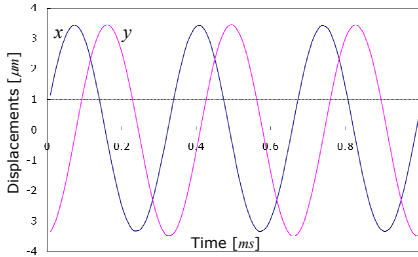


(a) Amplitude in x direction

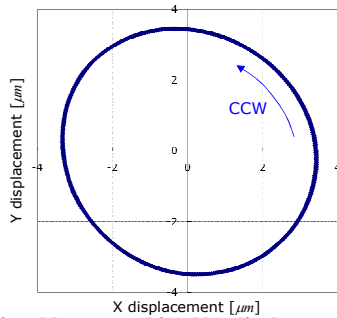


(b) Amplitude in y direction

Fig. 3 Vibrational amplitudes of excitation table according to excitation frequency ( $V_{pp,x}=10V$ ,  $V_{pp,y}=10V$ , phase difference= $90^\circ$ )



(a) Displacements in x and y directions



(b) 2-dimensional locus combined by displacements in x and y directions

Fig. 4 Generation of 2-dimensional vibration (3kHz)

에 의하면 가진주파수와 진동의 진폭이 클수록 공구와

공작물간 비접촉 시간이 길어지고 따라서 2차원 진동절삭의 효과가 극대화된다. 그러나 압전소자의 구동 특성상 가진주파수와 진폭을 동시에 증가시키는 데는 한계가 있다. 또한 공작물과 지그 등이 결합되어 질량이 큰 공작물 테이블을 가진시켜야 하기 때문에 생성시킬 수 있는 가진 주파수와 가진 진폭이 더욱 제한된다.

Fig. 4(a)는  $x, y$  각 방향으로 서로  $90^\circ$ 의 위상 차이를 가지는  $30V, 23V$ 의  $3kHz$  정현파 신호를 입력하였을 때 가진테이블에서 생성되는 각 방향의 변위를 보여주며 이들 두 변위가  $xy$  2차원 평면 위에서 합성되면 Fig. 4(b)와 같은 반시계방향으로 회전하는 2차원 타원 궤적이 생성된다.

#### 4. 가공시험 결과

실험에 사용된 절삭 조건, 가진 조건 및 공구와 공작물의 속성을 Table 1에 나타내었다. 직경이  $0.3mm$  인 초경 평엔드밀 (flat endmill)을 이용하여 니켈합금의 일종인 하스텔로이(Hastelloy, C-276) 재료를 Fig. 5와 같이 절입비(immersion ratio)가 0.5인 측면(side) 절삭 및 절입비가 1인 슬롯(slot) 절삭을 연속적으로 수행하였다.

Fig. 6는 이송속도  $0.05mm/s$ , 절삭깊이  $0.05mm$  주축 회전속도  $1,600rpm$ 의 조건으로 가공하였을 때 가공된 바닥면의 상태를 보여주고 있으며, 일반적인 밀링방식과 2차원 진동밀링 방식에 의한 가공 결과를 비교해보았을 때, 공구 이송마크와 버 유무 등 확실한 차이를 발견할 수 있다.

Table 1 Experimental conditions

Tool	Diameter	0.3mm
	Material	WC
	No. of teeth	2
Workpiece	Hastelloy (C-276)	
Excitation frequency	5kHz	
Vibration amplitude	2.3μm, 4μm	
Cutting depth	0.05~0.2mm	
Spindle speed	1,600~18,000rpm	
Feed rate	0.05~0.15mm/s	

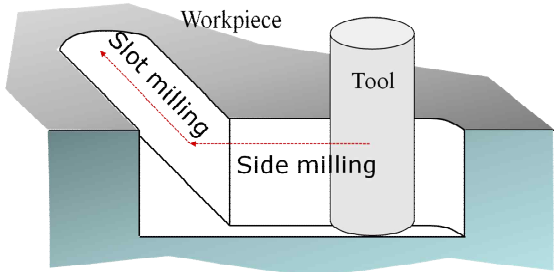
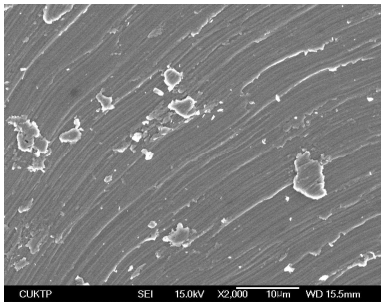
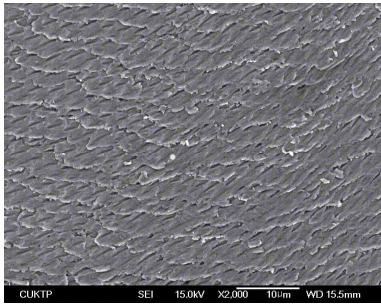


Fig. 5 Side milling and slot milling



(a) By conventional milling

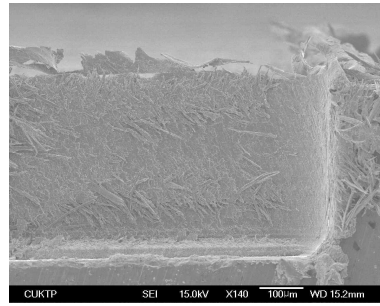


(b) By 2D vibrational milling(5kHz, amplitude: 4µm)

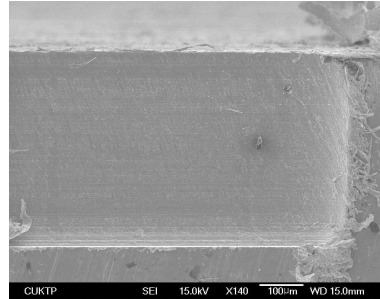
Fig. 6 Comparison of machined surface between conventional and 2D vibrational milling ( 0.05mm/s, 1,600rpm, cutting depth: 0.05mm)

Fig. 7은 이송속도 0.15mm/s, 절삭깊이 0.2mm, 주축회전속도 18,000rpm 으로 측면 절삭을 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이 가진주파수가 5kHz 이고 타원케릭의 진폭 2.3µm 인 2차원 진동미세 밀링을 수행하면 측면밀링 가공 시 일반적인 밀링가공 방식과 비교하여 표면정밀도가 향상하고 버 생성이 억제되어 가공정밀도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8 은 고주파 2차원 미세밀링 가공 시 측면밀링과 슬롯밀링의 가공 정밀도를 비교한 것이다. 슬롯밀링은



(a) By conventional milling



(b) By 2D vibrational milling(5kHz, amplitude: 2.3µm)  
Fig. 7 Comparison of side milling between conventional and 2D vibrational milling (0.15mm/s, 18,000rpm, cutting depth: 0.2mm)

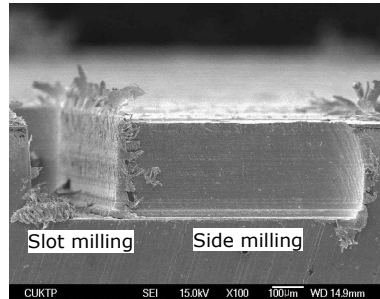


Fig. 8 Comparison of machining quality between side milling and slot milling in 2D vibrational milling ( 0.13mm/s, 12,000rpm, 5kHz, 2.3µm, cutting depth: 0.2mm)

절입비가 커서 절삭저항의 증가로 인해 공구에 무리가 가고 미세 밀링 시 칩 배출이 상대적으로 어려운 점 등 여러 가지 이유 때문에 가공정밀도 향상을 측면밀링 만큼 기대하기 어려울 수 있다. 그러한 이유를 감안함에도 불구하고 Fig 8 에서 보는 바와 같이 측면밀링 결과와 비교하여 볼 때 슬롯밀링 시에는 2차원 진동절삭 효과가 거의 없다고 할 수 있을 정도로 측면밀링과 슬롯밀링

시 가공정밀도에 큰 차이가 났다. 이에 대한 원인규명을 위해서는 향후 보다 심도 깊은 연구가 필요하다고 판단된다.

## 5. 결 론

고주파 2차원 진동 미세밀링을 수행하기 위해 두 개의 압전소자를 수직한 방향으로 배열하여 가진주파수와 진동의 진폭을 변화시킬 수 있는 가진테이블을 제작하였다. 0.3mm 초경공구로 니켈합금인 하스텔로이 금속을 5kHz 가진주파수를 가진 2차원 진동 미세밀링가공을 수행한 결과, 절입비가 1인 슬롯밀링을 수행할 때는 큰 효과를 보지 못하다가 절입비가 0.5인 측면밀링을 수행할 때에는 일반적인 밀링 가공방식에 비해 가공면의 표면거칠기가 개선되고 버 생성이 억제되는 등 가공정밀도가 향상되었음을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

## 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. Brehl, D. E. and Dow, T. A., "Review of vibration-assisted machining," Precision Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 153-172, 2008.
3. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol.43, pp.35-38, 1994.
4. Kim, G. D. and Loh, B. G., "Characteristics of Elliptical Vibration Cutting in Micro V-grooving with Variations of Elliptical Cutting Locus and Excitation Frequency." Journal of Micromechanics

and Microengineering, doi:10.1088/0960-1317/18/2/025002, 2008.

5. Kim, G. D., "Micro Milling using 2-dimensional Vibration," Journal of KSMPE, Vol. 9, No. 4, pp.38-43, 2010
6. Moriwaki, T., Shamoto, E., Song, Y. C. and Kohda, S., "Development of a Elliptical Vibration Milling Machine," Annals of the CIRP, Vol. 53, No. 1, pp. 341-344, 2004.
7. Chern, G. L. and Chang, Y. C., "Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling." International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 6, Issue 6, pp. 659-666, 2006.