

## 초음파 진동절삭기의 펄스폭변조 가진 특성

노병국\*, 김기대#

(\* 한성대학교 기계시스템공학과, # 대구가톨릭대학교)

### Characteristics of Pulse Width Modulation(PWM) Excitation of Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting Device

Byoung Gook Loh\*, Gi Dae Kim#

(Received 24 September 2013; received in revised form 30 October 2013; accepted 11 November 2013)

#### ABSTRACT

To obtain an elliptical trajectory at the cutting edge during elliptical vibration cutting, sinusoidal voltage excitations of two piezoelectric actuators have commonly been used. In this study, PWM excitation, which is relatively simple to generate, was employed and its characteristics were investigated. In experimental and analytical analyses, we found that for PWM excitation, the integer-multiple frequencies of the excitation voltage distorted the shape of the elliptical trajectory, whereas at a duty ratio(DR) of 50%, the distortion of the elliptical trajectory was minimized due to disappearance of the firstovertone. When the magnitude of the maximum excitation voltage was maintained at the same level for both PWM and sinusoidal excitation, PWM (DR=50%) excitation produced a greater vibration amplitude than sinusoidal excitation but resulted in more rapid saturation of a high-frequency power amplifier. .

**Key Words** : 2-dimensional elliptical vibration cutting (2차원 타원궤적진동절삭), Pulse width modulation (PWM, 펄스폭변조), Piezoelectric material(압전소자), Duty ratio(듀티비), Fourier series (푸리에급수)

#### 1. 서 론

가공표면 거칠기와 가공형상정밀도를 개선하기 위해 새로운 절삭 가공법으로 타원궤적 진동절삭(EVC, Elliptical vibration cutting) 혹은 2차원 진동절삭 방식이 개발되었으며 이는 공구를 수직한 양방향으로 가진

시켜 절삭 날에 2차원 타원궤적을 생성시킴으로써 절삭 가공을 수행하는 방식이다.(Fig. 1)<sup>[1-2]</sup> 많은 선행연구<sup>[3-6]</sup>를 통해 이러한 방법으로 절삭가공을 수행하면 일반적인 절삭 방식에 비해 절삭저항이 감소되고, 버(burr) 생성이 억제되며 공구 수명 및 표면 거칠기가 향상되는 등 다양한 절삭 효과를 얻을 수 있는 것이 밝혀졌다. 특히 타원궤적 진동의 가진 주파수와 진동의 진폭이 증가할수록 가공 정밀도 향상 효과는 더욱 크게 증가하는 것으로 보고되고 있다.<sup>[6]</sup>

진동절삭기의 구동원으로는 압전소자가 가장 광범위하게 사용되며, 일반적으로 한 쌍의 압전소자에 위상

\* Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung University

# Corresponding Author : School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu  
E-mail: gidkim@cu.ac.kr

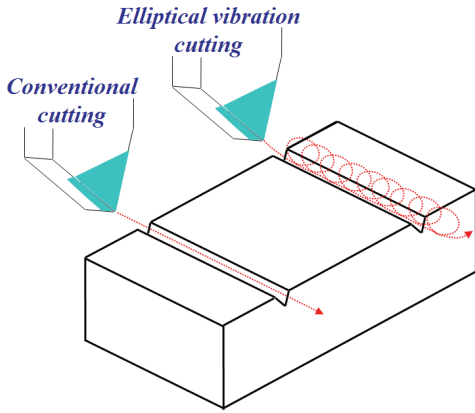


Fig. 1 Comparison of conventional cutting and elliptical vibration cutting in grooving

차를 갖는 정현파(sinusoidal) 전압을 입력하여 절삭날에 마이크로 스케일의 타원궤적을 생성한다. 압전소자의 구동을 위해서는 정현파 발생기와 발생된 정현파를 증폭하는 동력증폭기(power amplifier)가 필요하며 타원 궤적 진동절삭기를 구성할 때 이러한 전기적 구동장치가 매우 큰 비용을 차지한다.

본 연구에서는 높은 효율과 저렴한 비용으로 모터 구동에 가장 광범위하게 이용되는 펄스폭변조(pulse width modulation, PWM) 구동방법<sup>[7]</sup>을 타원궤적 진동절삭기의 구동에 적용하는 방안을 제안하고자 한다. 초음파 진동절삭기의 펄스폭변조 가진 특성을 검증하기 위하여 정현파형 전압과 펄스 형상의 직각파(square wave) 전압을 평행한 두 개의 압전소자로 구성된 기존의 진동 절삭기에 입력하고 이로 인해 발생하는 2차원 진동의 형태를 비교함으로써 그 특성을 실험적으로 고찰하고 이론적으로 분석하였다.

## 2. 2차원 진동절삭기 구성

절삭 날(cutting tool)에 타원궤적의 2차원 진동을 생성시키기 위하여 Fig 2와 같이 두 개의 직층형 압전 액추에이터(PZT: P-888.30, PI, Germany)를 평행한 구조로 구성하였다.<sup>[8]</sup> 알루미늄 재질의 공구 홀더(tool holder)와 고정용 하부(bottom fixture) 사이에 2개의 압전 액추에이터를 두고 예압 나사(preloading screw)를 이용하여 예압을

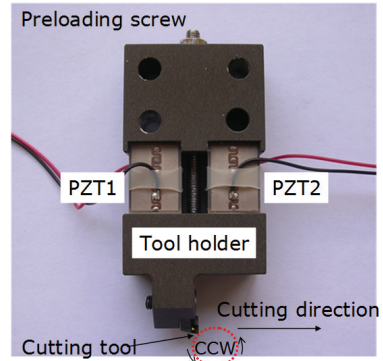


Fig. 2 Elliptical vibration cutting device<sup>[8,9]</sup>

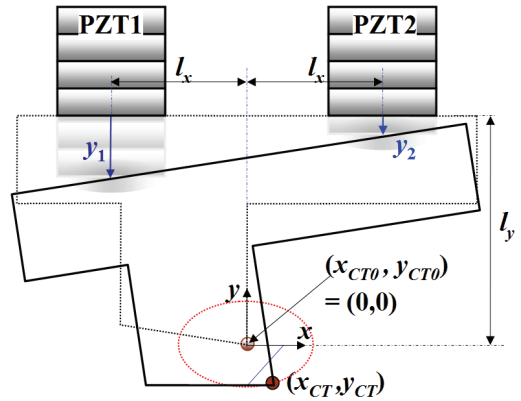


Fig. 3 Generation of elliptical trajectory at the cutting edge<sup>[8,9]</sup>

가하여 PZT가 항상 압축 상태로 구동되도록 하였다.

타원궤적 진동절삭기를 구성하고 있는 평행한 압전 액추에이터(PZT1, PZT2)가 공구홀더에 변위  $(y_1(t), y_2(t))$ 를 발생시키고 이들 변위가 합성되어 Fig. 3에 나타난 것과 같이 공구 날에 2차원 변위  $(x_{CT}, y_{CT})$ 가 발생하게 된다. 따라서 타원진동절삭기에 인가된 정현파 전압  $(V_1(t), V_2(t))$ 과 그로 인해 발생된 절삭 날의 궤적을 Eqs.(1)-(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_1(t) = V_1 \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$V_2(t) = V_2 \sin(2\pi ft + \phi) \quad (2)$$

$$x_{CT}(t) = A_x \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

$$y_{CT}(t) = A_y \sin(2\pi ft + \beta) \quad (4)$$

여기서,  $V_1, V_2$  는 PZT1와 PZT2에 입력하는 정현파 전압,  $f$  는 가진주파수,  $t$  는 시간,  $\phi$  는  $V_1$ 과  $V_2$ 의 위상차,  $A_x, A_y$ 는 절삭방향 및 배분력 방향의 진동 진폭,  $\beta$ 는  $x_{cr}$ 와  $y_{cr}$ 의 위상차를 나타낸다.

### 3. 실험장치

Fig. 4는 실험 장치의 구성도를 나타낸다. 2 채널 신호 발생기(WF-1946B, NF, Japan)에서 발생된 고주파 정현파 전압이 고주파 동력증폭기(HSA4052, NF, Japan)를 통해 증폭되어 진동절삭기의 압전소자에 공급된다.

절삭날에 생성되는 두 방향의 변위를 측정하기 위하여 두 개의 광화이버 변위센서(PM-15E, Nanotex, Japan)를 이용하였으며, 절삭날에 절삭방향 및 배분력 방향으로 서로 수직하게 장착하여 두 변위를 동시에 측정하고 이 두 변위를 합성하여 절삭날의 2차원 궤적을 얻었다.

Fig. 5는 PWM 가진 실험에 사용된 직각파를 나타낸다. 가진주파수 혹은 주기( $T$ )를 결정하고 한 주기 내에서 직각파 전압이 공급되는 시간(duration,  $\tau$ )을 변화시켜서 듀티비(duty ratio,  $DR = \tau/T$ )를 조절한다. 본 연구에서는 신호발생기의 신호생성, 주기 및 듀티비 조절 기능을 활용하여 특정 주파수의 직각파 전압을 발생시키고 듀티비를 변화시킴으로써 펄스폭을 변조하였다.

진동절삭기는 압전소자와 알루미늄의 결합 구조체로 특정 가진 주파수에서 진동의 진폭이 증폭되는 공진현상이 발생한다. 공진이 발생하면 가진 전압 신호와 공구날의 진동 변위 사이에 큰 위상차가 발생하며 이는 공구날에 생성되는 타원궤적의 형상을 크게 왜곡시킨다.<sup>[8]</sup> 따라서 PWM 가진 신호의 가진주파수를 선택할 때 진동절삭기의 공진주파수는 피해야 한다.

### 4. 실험결과 및 분석

직각파 입력 전압에서 듀티비를 변화시킴에 따라 타원궤적의 형상과 진폭의 크기가 어떻게 변화하는지 개략적으로 관찰하였다. 이를 위해 가진주파수(18kHz)와 압전소자에 입력하는 전압 조건(전압의 크기 및 두 전압간 위상차)을 동일하게 두고 듀티비를 25%, 50%, 75%로 증가시키며 절삭 날에서 발생하는 변위를 측정하였다.

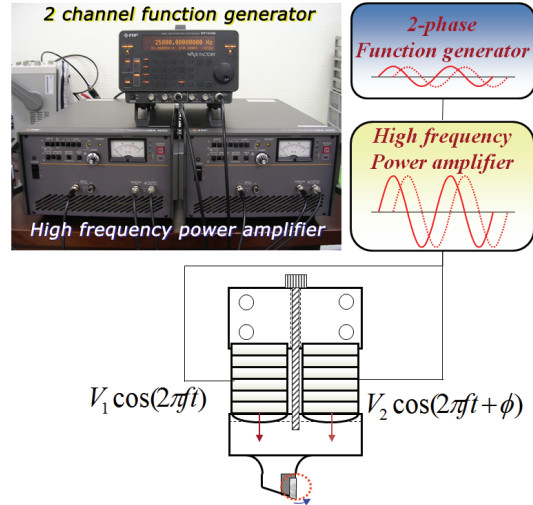


Fig. 4 Experimental setup

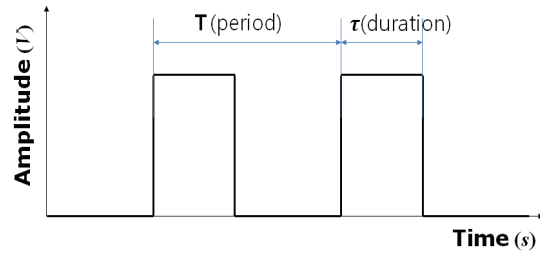
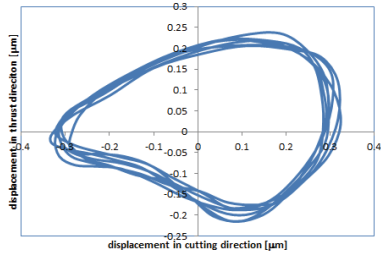


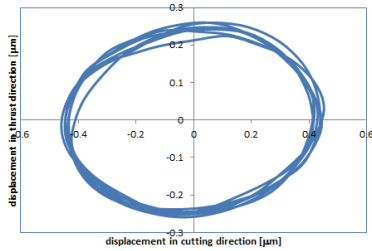
Fig. 5 PWM excitation

실험 결과 Fig. 6에 나타난 타원궤적의 형상변화를 보면 듀티비 (a) 25%와 (c) 75%에서는 타원궤적 형상이 왜곡되었으나, 듀티비 (b) 50%에서는 형상왜곡이 관찰되지 않았다. 또한 타원궤적의 절삭방향 및 배분력방향의 진폭변화를 나타낸 Table 1의 결과를 보면 동일한 실험 조건에서 듀티비 50%가 될 때 절삭방향 및 배분력방향 모두 상대적으로 가장 큰 진폭이 측정되었다.

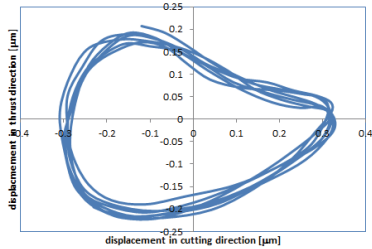
듀티비의 변화에 따른 타원궤적 형상변화 및 진폭변화를 자세히 관찰하기 위해 가진주파수를 23kHz로 증가시키고 듀티비를 10%에서 90%까지 10% 씩 증가시키며 절삭날에 생성되는 타원궤적을 측정하였다. Fig. 7은 듀티비의 변화에 따른 형상변화를 나타내고 Fig. 8은 듀티비의 변화에 따른 양방향 진폭변화를 보여주고



(a) Duty ratio 25 %



(b) Duty ratio 50 %



(c) Duty ratio 75 %

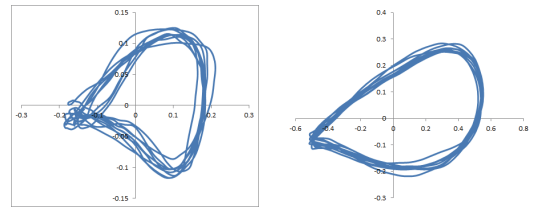
**Fig. 6 Trajectory of cutting edge with PWM excitation**  
( $f: 18kHz, V_1 = 3.5V, V_2 = 4V$ )

있다. 가진주파수  $18kHz$ 의 결과와 유사하게 듀티비 50%에서 형상왜곡이 가장 적었다. 진폭변화를 살펴보면 듀티비가 증가할수록 진폭이 증가하고 듀티비 50% 부근에서 최대가 된 후, 그 이상 증가하면 진폭은 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

직각파를 푸리에 급수(Fourier series)로 나타내면 정현파 신호의 합으로 Eq.(5)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>[10]</sup>

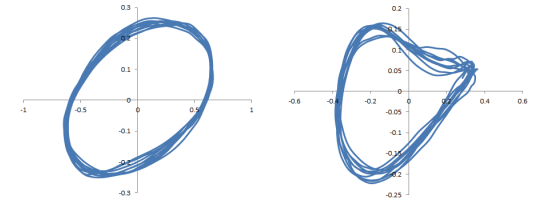
**Table 1 Vibration amplitude variation with respect to change of duty ratio for excitation frequency of  $18kHz$**

Duty ratio(%)	Amplitude ( $\mu m$ )	
	Cutting direction	Thrust direction
25	0.66	0.45
<b>50</b>	<b>0.91</b>	<b>0.52</b>
75	0.63	0.43



(a) Duty ratio = 10%

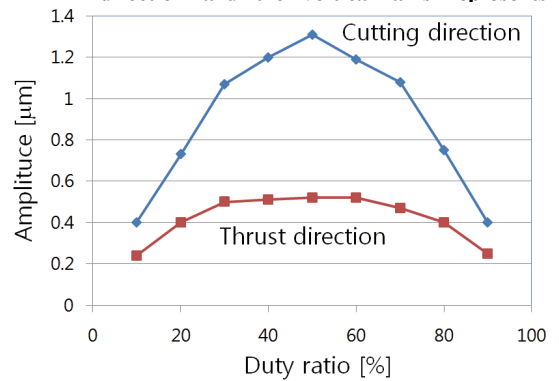
(b) Duty ratio = 30%



(c) Duty ratio = 50%

(d) Duty ratio = 80%

**Fig. 7 Variation of trajectory of cutting edge according to duty ratio variation ( $f: 23kHz, V_1 = 4.0V, V_2 = 2.7V$ ). All scales are in  $\mu m$ . The Horizontal axis in figure represents the displacement in the cutting direction and the vertical axis represents**



**Fig. 8 Amplitude variation with respect to the duty ratio for excitation frequency of  $23kHz$**

$$f(t) = \frac{\tau}{T} + \sum_{n=1}^{k=\infty} \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \cos(2\pi fnt) \quad (5)$$

$$f(t) = DR + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{k=\infty} \frac{\sin(n\pi DR)}{n} \cos(2\pi fnt) \quad (6)$$

$$f(t) = 0.5 + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\sin(0.5n\pi)}{n} \cos(2\pi fnt) \quad (7)$$

여기서,  $T$ 는 주기,  $f$ 는 가진주파수,  $t$ 는 시간,  $\tau$ 는 직각파 전압이 공급되는 시간을 각각 나타낸다.

Eq.(5)를 듀티비를 변수로 하여 다시 나타내면 Eq.(6)와 같다. 듀티비가 0.5일 경우 푸리에 급수의 짝수 항은 0이 되어 모두 사라지며 Eq.(7)과 같이 듀티비 0.5의 직각파의 푸리에 급수를 나타낼 수 있다.

Fig. 9는 듀티비 50%의 직각파를 푸리에 급수로 표현한 것으로 급수에 포함되는 항의 개수를 1, 3, 5로 증가할수록 직각파에 가까운 형상이 됨을 확인할 수 있다.

단일 주파수를 가진 정현파 가진과 달리 직각파 가진의 경우에는 다수의 주파수 성분이 포함되므로 이를 확인하기 위해 측정된 공구날 진동 변위를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT) 분석하였다. Fig. 10은 듀티비 25%, 50%, 75% 직각파의 FFT 분석 결과인 주파수 스펙트럼(spectrum)을 나타낸다. Eq.(5)에서 알 수 있듯이 가진주파수의 정수배의 배음(harmonic overtone)이 나타남을 확인할 수 있다. 단일 가진주파수를 갖는 정현파 가진과 달리 직각파 가진의 경우 배음의 주파수가 타원케지의 형상에 영향을 끼치며, 특히 가진주파수의 2배음 주파수의 영향이 가장 크다. 그러나 듀티비 50%의 경우 Eq.(7)에서 밝혔듯이 가진주파수의 2배음은 모두 사라지고, 이는 Fig. 10(b)에서 확인할 수 있다. 이러한 배음의 영향으로 직각파 가진 시 타원케지의 형상이 왜곡되었으며 듀티비 50%의 경우 2배음 영향이 사라져서 형상 왜곡이 최소화되는 것을 확인하였다.

정현파 가진과 PWM 가진 특성을 비교하기 위해 가진주파수는 23kHz로 고정된 채로 가진 전압을 증가시켜가며 절삭 날에 생성되는 진폭을 측정하였다. 가진 전압이 증가하면 고주파 동력증폭기가 압전소자에 공급할 수 있는 전류는 한계(current overload)에 도달하는

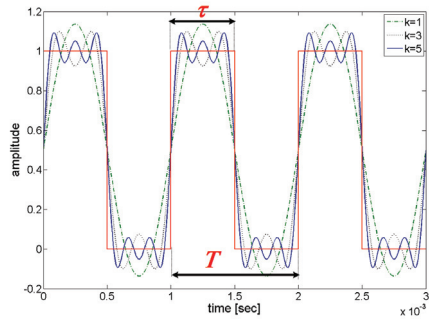
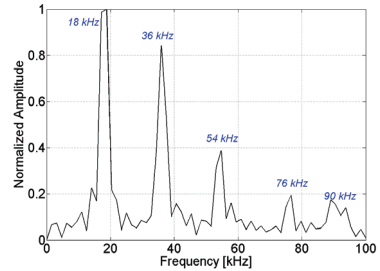
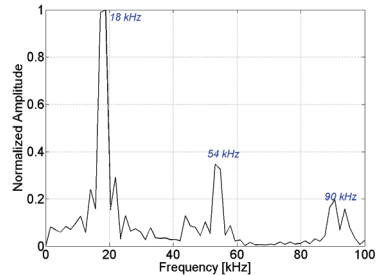


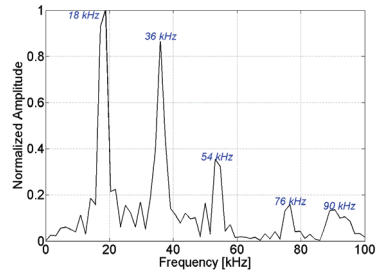
Fig. 9 Fourier series expansion of squarewave. ( $DR = \tau/T=0.5$ )



(a) Duty ratio 25 %



(b) Duty ratio 50 %



(c) Duty ratio 75 %

Fig. 10 Amplitude spectrum of 18kHz square wave (sampling frequency = 400kHz)

**Table 2 Comparison between sinusoidal excitation and PWM excitation(frequency: 23kHz, DR: 50%)**

Overload voltage(V)	Sinusoidal excitation		PWM excitation	
	$V_1$	$V_2$	$V_1$	$V_2$
	9	6.5	4.7	4
Amplitude ( $\mu m$ )	Cutting	Thrust	Cutting	Thrust
	2.40	0.98	1.85	0.68

데, 이럴 경우 정현파 혹은 PWM 입력 전압의 형상 자체가 왜곡되어 2차원 타원궤적을 얻을 수 없게 된다. 가진 전압을 증가시키다가 고주파 동력증폭기의 전류 한계에 이르기 직전에 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다. 실험 결과 PWM 전압 가진 시 동일한 크기의 전압을 입력하면 정현파 전압을 입력하였을 때에 비하여 더 큰 진폭을 얻을 수 있었으나, 정현파 전압 가진 대비하여 왜곡이 발생하지 않는 최대 가진 전압은 약 38(V2) ~ 48%(V1) 정도 감소했으며, 생성되는 진폭은 약 23%(절삭방향)-31%(배분력방향) 감소하였다.

### 5. 결론

2차원 진동절삭기의 공구 날에 타원궤적을 얻기 위해 두 개의 압전소자에 정현파 전압을 입력하는 기존의 방법을 대신하여 직각과 전압을 입력하여 PWM 가진 특성을 측정하고 푸리에급수를 이용한 이론적 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PWM 가진 시 가진주파수의 정수배의 배음의 영향으로 타원궤적의 형상이 왜곡되었다.
2. 듀티비 50%를 적용하면 타원궤적 형상 왜곡이 최소로 나타났으며 이는 푸리에 급수 분석을 통해 가진주파수 2배음이 소멸하였기 때문인 것으로 확인되었다.
3. 최대 전압의 크기를 동일하게 입력하였을 경우 PWM 가진(DR=50%)시 정현파 가진에 비하여 더 큰 진폭을 얻었으나, 동력증폭기의 전류한계로 인해 더 빨리 포화되는 것으로 나타났다.
4. 정현파 전압을 생성시키기 위해서는 함수발생기가 필요하지만, PWM 가진 시 신호발생을 위해 요구되는 전자 장치는 DC 모터 구동을 위해 일반적으로 이용되는 부품을 활용할 수 있으므로 진동절

삭기의 제작비용을 크게 줄일 수 있다. 본 연구를 통하여 향후 진동절삭기 제작의 상용화를 위한 토대를 마련하였다.

### 후 기

이 논문은 2013년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것입니다. 이 논문은 또한 한성대학교 교내 연구비 지원 과제입니다.

### 참고문헌

1. Shamoto, E., Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting, Annals of the CIRP", Vol. 43, pp.35~38, 1994
2. Moriwaki, T., Shamoto, E., "Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting", Annals of the CIRP, Vol. 44, pp.31~34, 1995
3. Cerniway, M. A., "Elliptical Diamond Milling: Kinematics, Force, and Tool Wear", M.S. thesis, NorthCarolinaStateUniversity, 2001
4. Negishi, N., "Elliptical Vibration Assisted Machining with Single Crystal Diamond Tools", M.S. thesis, NorthCarolinaStateUniversity, 2003
5. Brocato, B. C., "Micromachining using Elliptical Vibration Assisted Machining (EVAM)", M.S. thesis, NorthCarolinaStateUniversity, 2005
6. Kim, G. D., 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.
7. Alciatore, D. G., Hiestand, M. B., Introduction to Mechatronics and Measurement Systems, pp.408~409, 2007.
8. Loh, B. G., Kim, G. D., "Correcting distortion and rotation direction of an elliptical trajectory in elliptical vibration cutting by modulating phase and relative magnitude of the sinusoidal excitation voltages", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,

Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 226,  
No.5, pp.813-823, 2012

9. Loh, B. G., Kim, G. D., "Compensating the Elliptical Trajectory of Elliptical Vibration Cutting Device", Journal of KSPE, Vol. 28, No.7, pp.789-795, 2011
10. [en.wikipedia.org/wiki/Pulse\\_wave](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse_wave)