

타원궤적 절삭기의 가진주파수에 따른 절삭 날 회전 진동 특성

Characteristics of Rotational Vibration of Cutting Edge in Elliptical Vibration Cutting by Modulation of Excitation Frequency

노 병 국* · 김 기 대*

Byoung Gook Loh and Gi Dae Kim

(2011년 1월 17일 접수 ; 2011년 2월 9일 심사완료)

Key Words : Elliptical Vibration Cutting(타원 진동 절삭), Resonance(공진), Flexural Vibration(굴곡진동), Longitudinal Vibration(종진동)

ABSTRACT

The direction of the cutting tool plays a critical role in elliptical vibration cutting(EVC) where the cutting tool cuts workpiece in a trochoidal motion. In this study, EVC cutting device was developed using two parallel piezoelectric materials and it was observed that the rotation direction of the tool reverses as the EVC device undergoes resonance at which either flexural(cutting direction) or longitudinal(thrust direction) mode shapes occurs. To analytically explain reversal of the rotation direction, kinematic motion analysis of the tool was modified to incorporate amplification of the vibration amplitude and phase introduced by resonance. It successfully demonstrated, through Matlab simulation, reversal of the rotation direction of the cutting tool as the excitation frequency increases beyond resonance frequencies at which either flexural or longitudinal vibration occurs.

1. 서 론

타원 궤적 진동절삭(EVC, elliptical vibration cutting)은 절삭 공구를 절삭 방향(cutting direction)과 배분력 방향(thrust direction)으로 가진시켜 절삭 공구에 마이크로 스케일의 2차원 타원 궤적을 생성시키면서 절삭 가공하는 방법을 말한다^(1,2). 이러한 가공법을 적용하면 기존의 일반 가공법과 비교하여 절삭력이 감소되고, 가공 형상 정밀도가 향상됨은 이미 많은 선행연구를 통해 검증되었다⁽¹⁻⁹⁾.

절삭 날에 2차원 타원궤적 진동을 생성시키기 위하여 Shamoto 등^(2,3)은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 수직인 방향으로 배열된 압전소자 액추에이터(PZT)

의 공진 특성을 이용하여 공구를 가진시켰다. 이후, Cerniway⁽⁴⁾, Negishi⁽⁵⁾, Brocato⁽⁶⁾, Kim⁽⁷⁾ 등은 한 쌍의 평행한 PZT 액추에이터를 이용하여 타원궤적 진동절삭기를 구성하였다. 우리 연구진은 2채널 합수발생기와 고주파 동력증폭기를 이용하여 가진주파수와 타원궤적의 모양을 변화시켜가면서 다양한 미세가공시험을 수행하였다⁽⁸⁾. 그러나 현재까지 수행한 타원궤적 진동절삭법에 관한 연구는 타원진동 절삭의 절삭 특성에 관한 연구에 한정되었고, 진동 절삭기의 진동 특성에 관련된 연구는 미흡하였다.

이 연구에서는 한 쌍의 평행한 적층형 압전소자와 절삭공구를 볼트 예압에 의해 결합한 타원 궤적 진동 절삭기를 구성하였다. 가진주파수의 변화에 따른 진동절삭의 진동특성 및 회전 방향의 변화를 실험적으로 관찰하였고, 타원궤적의 가진주파수 변화에 따른 회전방향 변화를 이론적으로 해석하였다.

† 교신저자; 정희원, 한성대학교 기계시스템공학과
E-mail : bglo@hansung.ac.kr

Tel : (02)760-5865, Fax : (02)760-4329

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

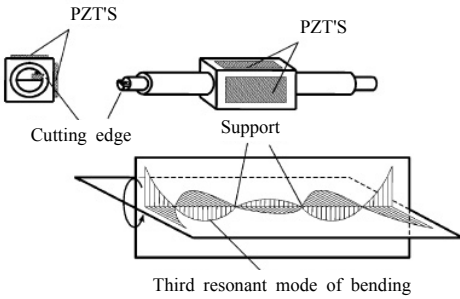


Fig. 1 Superposition of two bending mode generated by PZTs(by Shamoto and Moriwaki^(2,3))

2. 타원케적 진동절삭기 구성

타원케적 진동절삭(EVC)은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 절삭공구에서 생성된 2차원 타원케적과 공구의 이송운동이 결합되어 트로코이드(trochoid) 운동을 하면서 가공하는 방식이다. 일반절삭(conventional cutting)의 경우, 칩과 공구 경사면 사이에 발생하는 마찰력은 저항으로 작용하지만, EVC에서는 공구의 운동이 칩의 배출을 도와주는 방향으로 작용하여 마찰력은 절삭 저항을 감소시킨다⁽¹⁾. 따라서 타원케적의 회전방향은 공구의 이송방향과 연동하여 절삭 저항을 감소시킬 수 있는 방향(Fig. 2에서 시계방향)으로 작용해야만 진동절삭의 효과를 볼 수 있다.

한편 타원케적 진동의 가진주파수와 진동의 진폭이 증가할수록 절삭력이 감소하며 표면조도도 향상된다⁽⁸⁾. 그러나 PZT와 같은 액추에이터 성능이 제한되어 있기 때문에 절삭공구의 가진주파수 및 진폭 또한 제한된다.

Fig. 3은 이 연구에서 사용한 마이크로 스케일의 타원케적 고주파 진동을 발생시키는 타원케적 진동 절삭기의 개략적 구조와 실제 사진을 나타낸다. 두 개의 적층형 압전 액추에이터(PZT: P-888.30, PI, Germany), 공구 홀더, 고정용 하부 및 체결용 나사로 구성된다. 공구 홀더와 접촉하는 압전소자의 상부에는 반지름 15 mm의 반구(hemi-sphere)형태의 스테인리스 강을 부착하고 공구 홀더와 PZT는 나사를 이용하여 예압을 걸어 점 접촉 결합시켰다. 이러한 설계 구조로 하나의 PZT에서 발생하는 인장 및 압축 변형이 공구 홀더를 통해 다른 PZT에 압전소자를 파손시킬 수 있는 전단 변형을 최소화하였다.

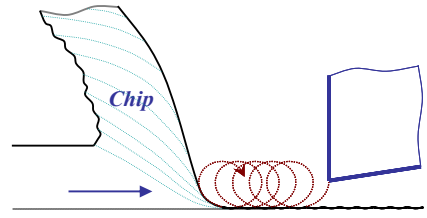


Fig. 2 EVC process with small amplitude of elliptical locus

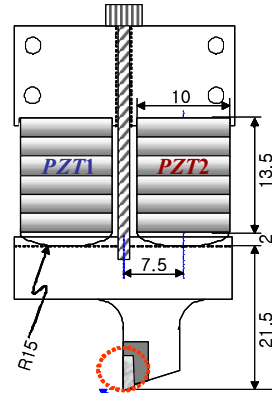


Fig. 3(a) Schematic drawing of EVC device(unit: mm)

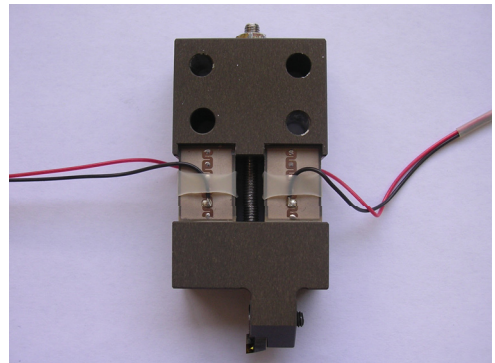


Fig. 3(b) Photograph of EVC device

3. 타원케적 및 회전방향 해석

위상각(ϕ , phase angle)를 갖는 고주파의 정현파(harmonic wave)를 평행하게 배열된 두 개의 PZT에 공급하면 각 PZT에서는 정현파 변위(y_1, y_2)가 발생하며 인장 또는 압축을 반복하게 된다. 이때 Fig. 3에 나타난 절삭 공구의 끝 단의 위치(x_{cr}, y_{cr})는 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

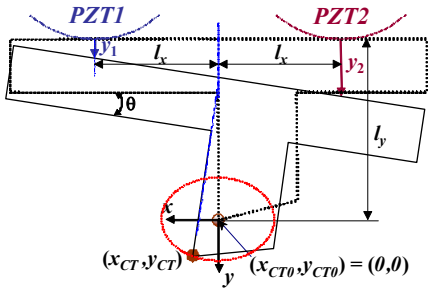


Fig. 4 Kinematic analysis of motion of cutting edge

$$x_{cr} = \frac{l_y(y_2 - y_1)}{2l_x} \quad (1)$$

$$y_{cr} = \left(\frac{y_1 + y_2}{2}\right) \quad (2)$$

$y_1 = \sin(\omega t)$, $y_2 = \cos(\omega t)$ 를 가정하여 식 (1)과 (2)에 대입하여 정리하면 식 (5)와 같은 타원 궤적을 얻게 된다.

$$x_{cr} = -\frac{l_y}{\sqrt{2}l_x} \cos(\omega t + \frac{\pi}{4}) \quad (3)$$

$$y_{cr} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{4}) \quad (4)$$

$$\frac{x_{cr}^2}{\left(\frac{l_y}{\sqrt{2}l_x}\right)^2} + \frac{y_{cr}^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} = 1 \quad (5)$$

식 (3)과 (4)는 두 개의 압전소자 변위(y_1 , y_2)에 대한 단순한 기구학적인 합성으로 절삭공구의 운동을 나타낸 것으로서 PZT의 가진주파수(ω)가 타원 궤적 진동절삭기의 공진주파수(ω_0)보다 현저히 낮아 가진력(excitation force)과 압전소자의 변위가 같은 위상임을 가정한 상태에서 구한 해이다. 그러나 진동절삭에 사용되는 가진주파수는 수 kHz~수 십 kHz이상으로 Fig. 5에 나타난 것과 같은 공진에 따른 가진력과 변위의 위상각(δ) 및 진폭증가비(A)를 고려하여야 한다.

따라서, 식 (3), (4)는 가진주파수 증가에 따른 위상각(δ_x , δ_y) 및 진폭증가비(A_x , A_y)를 포함하는 식 (6), (7)로 변형될 수 있다. 가진주파수가 공진주파수

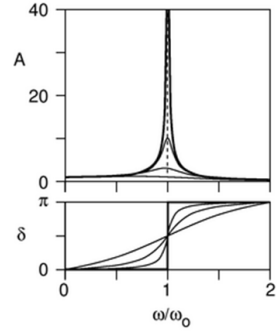


Fig. 5 Change of amplitude and phase with variation of excitation frequency(A : amplitude amplification ratio, δ : phase angle, ω : excitation frequency, ω_0 : resonance frequency)

근처로 접근할수록 진폭은 크게 증가하며 가진력과 변위 사이의 위상각이 발생하기 시작한다. 위상각은 공진주파수 전후로 급격하게 0°에서 180°로 변화한다.

$$x_{cr} = -\frac{A_x l_y}{\sqrt{2}l_x} \cos(\omega t + \frac{\pi}{4} + \delta_x) \quad (6)$$

$$y_{cr} = \frac{A_y}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{4} + \delta_y) \quad (7)$$

4. 시험 결과 및 해석

4.1 공구 진동 측정

분해능이 30 nm 이하이고, 주파수 대역폭 (bandwidth)이 100 kHz인 광섬유 비접촉 변위센서 (optical fiber displacement sensor system)(PM-E, Nanotex corp.) 두 개를 수직하게 배열하여 절삭공구의 진폭을 절삭 방향과 배분력 방향으로 동시에 측정하였다.

Fig. 6은 입력 전압의 진폭을 10 V(V_{p-p} : 0-10 V)로 고정하고 가진주파수를 30 kHz까지 점진적으로 변화시켜가며 절삭 및 배분력 방향의 진동 진폭의 변화를 측정한 것이다. 가진주파수 12 kHz 부근에서 절삭 공구의 절삭 방향의 진폭이 약 23 μ m로 가장 크게 나타났고, 배분력 방향의 진폭은 20 kHz 근처일 때 가장 크게 나타났다. 절삭방향과 배분력 방향에 수직한 측면 방향(side direction)은 원하지

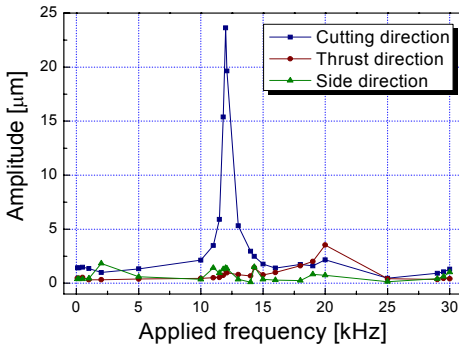


Fig. 6 Amplitude of ellipse vs. applied excitation frequency($V_{pp} = 10\text{ V}$)

않는 진동방향이며 상대적으로 저주파인 2 kHz일 때 가장 큰 것으로 나타났다. Ansys연성해석 결과에 따르면 12 kHz는 진동절삭기의 절삭방향 굴곡진동 모드(bending vibration mode)의 공진주파수 부근이며 20 kHz는 배분력방향 종진동 모드(longitudinal vibration mode)의 공진주파수 부근으로 나타났다.

4.2 타원케적 형상 및 회전방향 변화

Figs. 7(a)~(f)는 두 PZT에 입력되는 정현파 전압(진폭(V_{pp}): 10 V(0~10 V), 위상각: -90°)의 가진주파수를 점진적으로 증가시켜가면서 절삭 날에서 생성되는 다양한 2차원 케적을 측정된 결과이며, 화살표는 공구의 회전 방향을 나타낸다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 저주파수로 가진할 때에는 절삭공구의 회전방향은 시계방향을 유지한다. 가진주파수가 첫 번째 공진주파수인 12 kHz에 근접함에 따라 타원 케적의 절삭 방향 변위가 증가하며(Fig. 7(b)) 12 kHz에 이르렀을 때 타원 케적의 형태는 크게 왜곡되고 공구의 회전 방향이 반시계 방향으로 변한다(Fig. 7(c)). 가진주파수를 더욱 증가시켜 두 번째 공진주파수 부근인 20 kHz가 되었을 때 또 한번 케적이 왜곡되며(Fig. 7(e)) 가진주파수가 두 번째 공진주파수 이상으로 증가될 때 공구의 회전 방향이 다시 반전되어(Fig. 7(f)) 시계 방향으로 되돌아오는 것을 확인할 수 있다.

4.3 타원케적 측정 결과 해석

진동절삭기의 진동 특성 실험(Fig. 6)에 의하면 가진주파수 12 kHz 부근에서 굴곡진동 모드의 공진이 발생한다. 이때, 가진력과 굴곡진동의 변위 사이

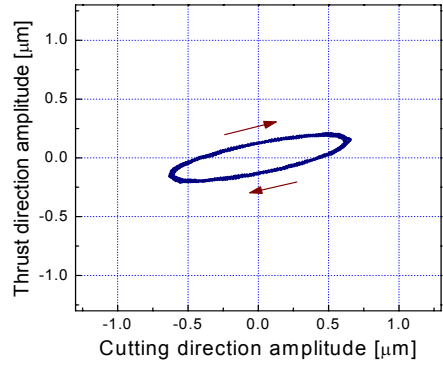


Fig. 7(a) Applied frequency : 1 kHz

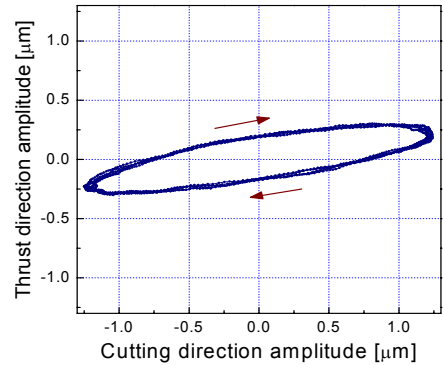


Fig. 7(b) Applied frequency = 10 kHz

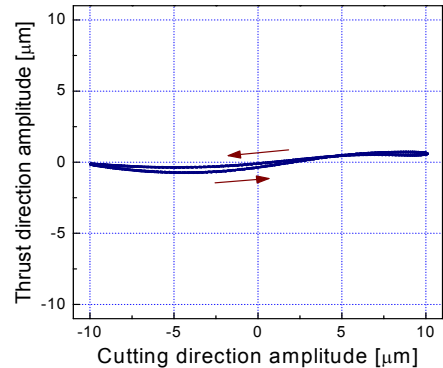


Fig. 7(c) Applied frequency : 12 kHz

에는 공진 시 90° 의 위상각이 발생하므로 식 (6)에서 위상각(δ_x)은 90° 가 되며 가진주파수(ω)가 증가함에 따라 위상각(δ_x)은 180° 로 수렴한다. 식 (6)과 (7)에 근거하여 Matlab을 이용하여 타원케적의 회전방향을 시뮬레이션 한 결과 공진 시($\delta_x = 90^\circ$) 타원케적은 형성되지 않으며 기울어진 직선 형태의

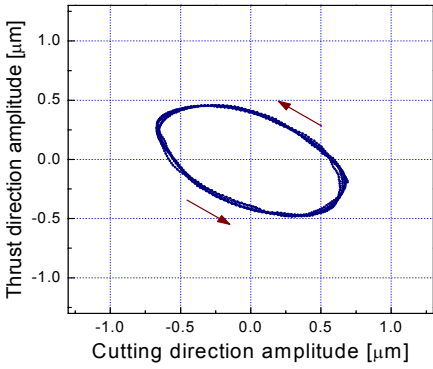


Fig. 7(d) Applied frequency : 16 kHz

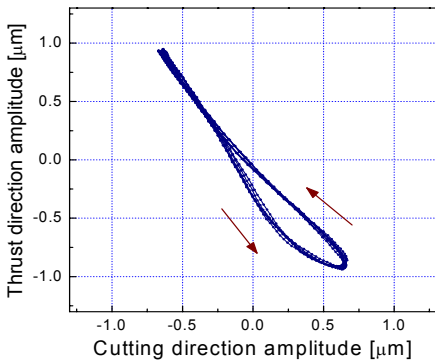


Fig. 7(e) Applied frequency = 20 kHz

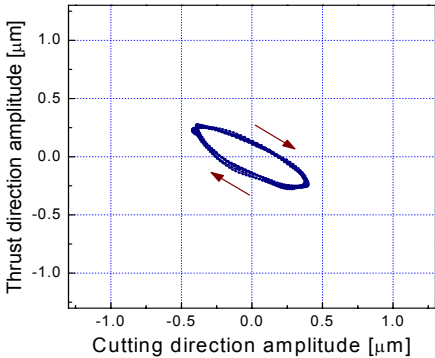


Fig.7(f) Applied frequency = 25 kHz

궤적을 나타냈으며 공진주파수를 전후하여 타원궤적 회전 방향의 반전을 관찰할 수 있었다.

진동절삭기는 가진주파수 20 kHz 부근에서 다시 한번 공진하는데, 이때는 중진동 모드의 공진이 발생하며 가진력과 중진동 변위, 즉 배분력 방향 변위 사이에 위상각(δ_y)이 발생한다. 따라서 가진주파수

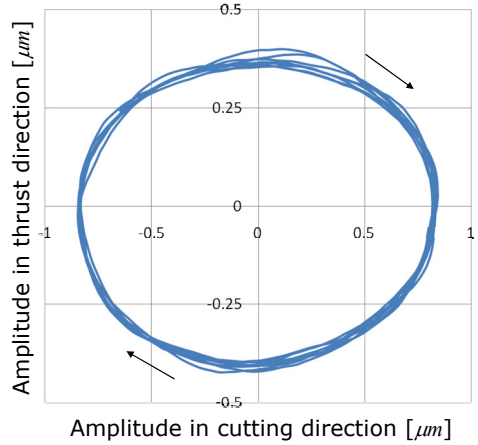


Fig. 8 Variations of elliptical trajectory according to applied voltage(V_{pp}) and phase angle (ϕ)(applied frequency = 18 kHz, $V_{pp1} = 4.9$ V, $V_{pp2} = 8.1$ V, $\phi = 75^\circ$)

20 kHz 전후로 타원궤적의 회전 방향은 다시 한번 반전된다. 이러한 공진으로 발생된 추가적인 위상각(δ_x, δ_y)에 의해 정현파 입력 전압 간의 위상각의 변화 없이도 타원궤적의 회전 방향이 변화하게 된다.

가진주파수가 증가함에 따라 타원궤적의 회전 방향이 변화하지만, 타원진동절삭의 효과를 내기 위해서는 공구의 이송 방향을 고려하여 절삭 날의 회전 방향은 명확히 하나로 결정되어야 한다. 또한 타원축의 방향도 이송 방향과 평행한 것이 바람직하다. 따라서 각 PZT에 공급하는 전압의 크기와 정현파 신호간의 위상각을 변화시켜가면서 최적의 타원 궤적의 경로를 낼 수 있는 조건을 구하는 선행 작업이 필수적이다. Fig. 8은 가진 전압의 크기와 전압 간의 위상각의 보정을 통해 주파수가 18 kHz이며 절삭 방향으로 약 $1.6 \mu\text{m}$, 배분력 방향으로 약 $0.7 \mu\text{m}$ 진폭을 그리는 보정된 타원궤적을 보여주고 있다.

5. 결 론

타원궤적 진동 절삭 시 절삭 날의 회전 방향은 공구 이송 방향과 연동하여 트로코이드 운동을 생성시킬 수 있는 방향으로 결정되어야 한다. 한 쌍의 평행한 PZT로 구성된 타원궤적 진동절삭기의 진동 특성 실험 결과 가진주파수 12 kHz 부근에서 첫 번째 굴곡진동 모드와 20 kHz 부근에서 중진동 모드가 생

성되고 각 공진주파수 부근에서 타원궤적의 형상이 크게 왜곡되고 공진주파수를 전후하여 회전 방향이 반전되는 것을 확인하였다.

굴곡진동 모드로 공진 시 공구 궤적은 절삭 방향으로 20배 가량 증폭되며 가진주파수가 공진주파수 이상으로 증가되면 가진력과 변위 사이에 공진에 의해 발생한 추가적인 위상각에 의해 절삭 방향과 배분력 방향 진동 변위의 위상각은 변화하게 된다. 가진주파수 12 kHz에서 위상각은 157°이며 가진주파수가 13 kHz로 증가하면 -125°로 변화하며 이로 인해 공구의 회전 방향은 반시계 방향에서 시계 방향으로 반전된다. 가진주파수가 더욱 증가하여 종진동 모드 발생 주파수인 20 kHz에 근접하면 공구 궤적은 배분력 방향으로 10배 가량 증폭되며 굴곡진동에서와 같이 가진주파수가 종진동 모드 이상으로 증가하면 공진에 의해 위상각은 -50°(18 kHz)에서 35°(20 kHz)로 변화하며 공구의 회전 방향은 다시 한번 반전되었다. 이러한 공구 궤적의 증폭 및 회전 방향의 반전은 가진주파수가 증가하여 종진동 모드 혹은 굴곡진동 모드를 순차적으로 가진 함에 따라 계속 반복된다.

후 기

이 연구는 한성대학교 교내 연구비 지원과제 임.

참 고 문 헌

(1) Shamoto, E., Moriwaki, T., 1994, Study on Elliptical Vibration Cutting, *Annals of the CIRP*, Vol. 43, No. 1, pp. 35~38.
 (2) Moriwaki, T., Shamoto, E., 1995, Ultrasonic

Elliptical Vibration Cutting, *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 31~34.

(3) Ma, C., Shamoto, E., Moriwaki, T. and Wang, L., 2004, Study of Machining Accuracy in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 12, pp. 1305~1310.

(4) Cerniway, M. A., 2001, Elliptical Diamond Milling: Kinematics, Force, and Tool Wear, M.S. thesis, North Carolina State University.

(5) Negishi, N., 2003, Elliptical Vibration Assisted Machining with Single Crystal Diamond Tools, M.S. thesis, North Carolina State University.

(6) Brocato, B. C., 2005, Micromachining using Elliptical Vibration Assisted Machining(EVAM), M.S. thesis, North Carolina State University.

(7) Kim, G. D. and Loh, B. G., 2007, Characteristics of Chip Formation in Micro V-grooving Using Elliptical Vibration Cutting, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 1458~1466.

(8) Kim, G. D. and Loh, B. G., 2008, Characteristics of Elliptical Vibration Cutting in Micro V-grooving with Variations of Elliptical Cutting Locus and Excitation Frequency, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 1~12.(Doi:10.1088/0960-1317/18/2/025002.)

(9) Lee, K. B., Lim, Y. H. and Lee K. C., 1994, A Study on the Cutting and Vibration Characteristics of Ultrasonic Vibration Cutting, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 147~154.