타원궤적 진동절삭기의 타원궤적 보정

Compensating the Elliptical Trajectory of Elliptical Vibration Cutting Device

노병국[1,✉], 김기대[2]
Byoung Gook Loh[1,✉] and Gi Dae Kim[2]

1 한성대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung Univ.)
2 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic Univ. of Daegu)
✉ Corresponding author: bgloh@hansung.ac.kr, Tel: 02-760-5865

Manuscript received: 2011.2.16 / Accepted: 2011.5.11

In elliptical vibration cutting (EVC), cutting performance is largely affected by the shape of an elliptical path of the cutting tool. In this study, two parallel piezoelectric actuators were used to make an elliptical vibration cutting device. When harmonic voltages of 90° out-of-phase are supplied to the EVC device, creation of an ideal elliptical trajectory whose major and minor axes are parallel to the cutting and thrust directions is anticipated from a kinematic analysis of the EVC device, however, the paths we experimentally observed showed significant distortions in its shape ranging from skew to excessive elongation of the major axis of the ellipse. To compensate distortions, an analytical model describing the elliptical path of the cutting tool was developed and verified with experimental results, and based on the analytical model, the distorted elliptical paths created at 100 Hz, 1 kHz, and 16 kHz were corrected for skew and elongation.

Key Words: Elliptical Vibration Cutting (EVC, 타원궤적 진동절삭), Elliptical Trajectory Compensation (타원궤적 보정), Precision Machining (정밀가공)

1. 서론

타원궤적 진동절삭(*EVC*, Elliptical vibration cutting) 혹은 2 차원 진동절삭 방식은 공구를 수직 양방향으로 가진하여 절삭 날에 2 차원 타원궤적을 생성시키고 이러한 진동궤적과 공구 자체의 이송운동이 결합되어 트로코이드(trochoid) 운동으로 절삭을 하는 방식이다.[1,2] 그 동안 많은 선행 연구를 통해 이러한 방식을 적용하면 일반적인 절삭 방식에 비해 절삭저항이 크게 감소되고, 버(burr) 생성이 억제되며 공구 수명 및 표면거칠기가 향상되는 등 미세절삭 가공 정밀도 향상에 탁월한 효과를 얻을 수 있는 것으로 밝혀졌다.[3-8] 특히 타원궤적 진동의 가진 주파수와 진동의 진폭이 증가할수록 가공 정밀도 향상 효과는 더욱 증가하는 것으로 나타났다.[7]

절삭 날에 2 차원 타원궤적 진동을 생성시키기 위하여 Shamoto 등[2]은 수직한 방향으로 배열된 압전소자 액추에이터(*PZT*)의 공진 특성을 이용하여 공구를 가진시켰다. 이후, Cerniway,[3] Negishi,[4] Brocato,[5] Kim 등[6]은 한 쌍의 평행한 *PZT* 액추에이터를 이용하여 타원궤적 진동절삭기를 구성하였다.

앞서 밝힌 대로 타원궤적 진동절삭은 진동궤적의 주파수와 진폭에 큰 영향을 받지만 기본적으로 2 차원 타원궤적 자체의 형상이 진동절삭 특성을 결정하는데 매우 중요한 인자가 된다. 절삭성을 고려하면 타원궤적의 축 방향은 절삭방향과 이에 수직한 배분력방향으로 정렬되어야 하고 타원형상의 장축과 단축의 적절한 비를 유지해야 한다. 그러나 현재까지 수행한 대부분의 타원궤적 진동절

삭법에 관한 연구는 타원진동 절삭의 절삭성에 관한 연구에만 한정되었고, 절삭특성에 큰 영향을 끼치는 절삭 날에 생성되는 타원궤적 형상에 관한 구체적인 연구 결과와 특히 이를 보정하는 구체적인 방법을 제시하지는 못하였다.

본 연구에서는 한 쌍의 평행한 적층형 압전소자와 절삭공구를 볼트 예압으로 결합한 타원궤적 진동 절삭기를 이용하여, 가진 주파수, 두 개의 압전소자에 입력하는 전압의 크기 및 두 전압 간의 위상차 변화에 따른 타원궤적의 형상 변화를 실험적으로 관찰하였다. 절삭방향과 배분력방향 진동 진폭의 상대적 크기 및 위상차에 따른 타원궤적의 형상 변화를 이론적으로 해석하였으며 왜곡된 타원궤적의 형상을 보정하는 방법을 제시하였다.

2. 진동절삭기의 구성 및 진동 측정

본 연구에서 사용한 마이크로 스케일의 타원궤적 고주파 진동을 발생시키는 타원궤적 진동절삭기를 Fig. 1 에 나타내었다. 두 개의 적층형 압전엑추에이터(*PZT*: P-888.30, PI, Germany)를 평행하게 배열하고 나사를 이용하여 예압을 걸어주었으며, 두 개의 *PZT* 에 위상차를 주고 정현파 전압을 입력하면 압전(piezo-electricity) 효과에 의해 각 *PZT* 에 인장 및 압축 변형이 발생하고 이 두 가지 변위가 합성되면 절삭 날에 시계 방향 혹은 반시계 방향으로 회전하는 2 차원 타원궤적이 생성된다.

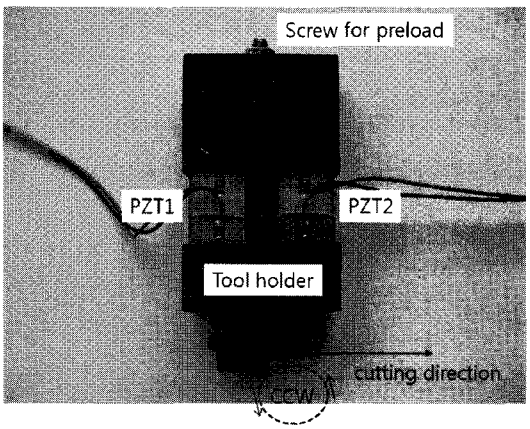

Fig. 1 Photo of *EVC* device

타원궤적을 측정하기 위하여 주파수 대역폭이 100 *kHz* 인 광섬유 비접촉 변위센서(*PM-E, Nanotex corp.*) 두 개를 수직하게 배열하여 절삭방향과 배분력방향으로 발생하는 공구의 변위를 동시에 측정하였다.

Fig. 2 는 두 입력 전압의 진폭을 8 V($V_{p\text{-}p}$:0-8 V), 두 전압 간 위상 차이를 90° 로 고정하고 가진 주파수를 25 *kHz* 까지 점진적으로 변화시켜가며 절삭방향, 배분력 방향, 그리고 위의 두 방향에 모두 수직한 측면 방향의 진동 진폭의 변화를 측정한 것이다. 가진 주파수 12 *kHz* 부근에서 절삭 공구의 절삭 방향의 진폭이 약 23 μm 로 가장 크게 나타났고, 배분력 방향의 진폭은 19 *kHz* 근처일 때 가장 크게 나타났다.

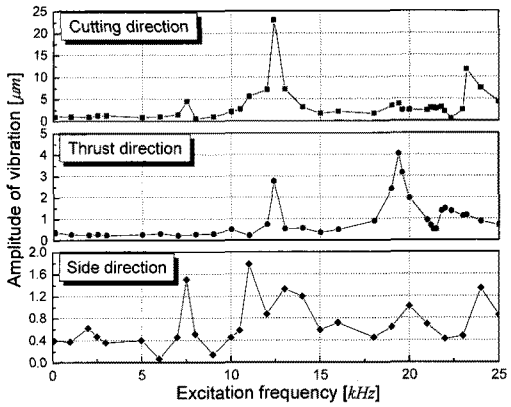

Fig. 2 Vibration amplitudes vs. applied excitation frequency (Vpp = 8V)

3. 타원궤적 형상 이론적 해석 및 보정

3.1 타원궤적 형상 해석 및 측정결과

위상차(α, phase difference)를 갖는 정현파(harmonic wave) 전압을 평행하게 배열된 두 개의

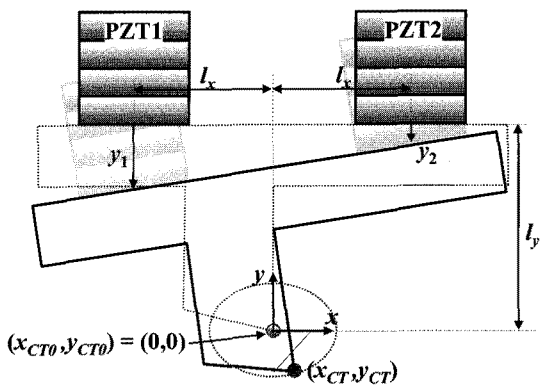

Fig. 3 Kinematic analysis of motion of cutting edge

PZT 에 공급하면 각 *PZT* 에서는 정현파 변위 (y_1, y_2)가 발생하며 인장 또는 압축을 반복하게 된다. 이 때 Fig. 3 에 나타낸 절삭공구의 끝 단의 위치(x_{CT}, y_{CT})는 Eqs. (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$y_{CT}=(\frac{y_1+y_2}{2}) \tag{2}$$

$y_1=\sin(\omega t)$, $y_2=\sin(\omega t+\psi)$, ψ =90°(*PZT* 변위 간의 위상차)를 가정하여 Eqs.(1)과 (2)에 대입하여 정리하면 Eq.(5)와 같은 타원궤적을 얻게 된다.

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

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

$$\frac{x^2{}_{CT}}{(\frac{l_y}{\sqrt{2}l_x})^2}+\frac{y^2{}_{CT}}{(\frac{1}{\sqrt{2}})^2}=1 \tag{5}$$

Eqs.(3)~(5)는 절삭 날의 회전 중심이 y 축 상에 위치한다는 가정 하에, 두 개의 압전소자 변위(y_1, y_2)를 단순히 기구학적으로 합성하여 절삭 날의 운동 궤적을 나타낸 것이다. 이 경우 압전 소자에 의해 발생하는 가진력이 90°의 위상차를 갖는 경우 타원궤적의 두 축이 절삭방향과 배분력방향에 평행한 이상적인 타원궤적이 생성되는 것을 보여준다. 그러나 실제 진동궤적 생성 시 궤적의 진폭이 매우 작기 때문에 공구 홀더의 변형 및 *PZT* 와 공구 홀더 간의 미세한 슬립, 그리고 절삭기 비대칭 구조, 두 *PZT* 성능의 비대칭 등의 영향으로 진동절삭기의 절삭 날에 생성된 공구 궤적은 예측과는 다르게 나타났다. 10 *Hz* 의 저주파로 가진한 경우에도 타원궤적의 주축이 기울어진 형태로 나타나고 있음을 Fig. 4 에서 보여주고 있다. 가진 주파수가 더욱 증가하여 진동절삭기의 공진주파수 부근으로 접근하면 공구에 생성되는 타원궤적의 장단비(aspect ratio) 및 주축(major axis)의 기울기 또한 심하게 왜곡된다.(Figs. 5,6) *EVC* 2 차원 진동절삭의 효과를 증가시키기 위해서는 타원궤적의 주축 방향은 공구의 이송방향(절삭방향)과 평행한 것이 바람직하다. 또한, 큰 대역의 가진 주파수 범위에서 진동절삭을 수행하기 위해서는, 압전 엑추에이터에 공급하는 전압 간의 위상차(α)와 전압의 상대적인 크기 (V_1, V_2)를 조절하여 타원궤적의 형상을 보정할 수 있어야 한다.

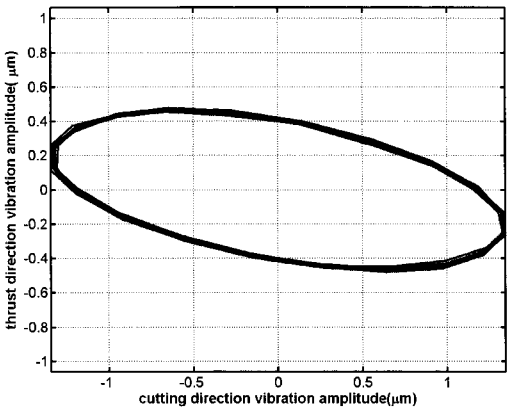

Fig. 4 Measured elliptical trajectory at an excitation frequency of 10Hz

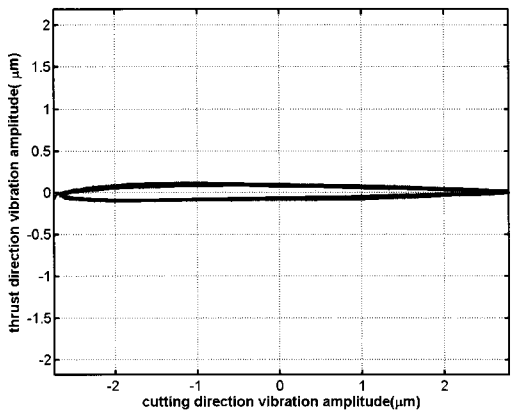

Fig. 5 Measured elliptical trajectory at an excitation frequency of 11 kHz

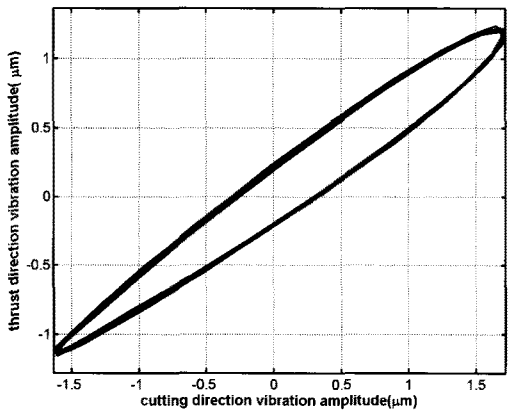

Fig. 6 Measured elliptical trajectory at an excitation frequency of 19 kHz

3.2 타원궤적 형상 보정

압전소자의 가진 주파수(ω)가 증가하면 가진력(excitation force)과 압전소자의 진동 변위 간에 위상차가 생성되며 이는 타원궤적의 형상을 변형시킨다. 또한 가진 주파수가 압전소자의 공진주파수에 이르면 진동 진폭이 크게 증가하고 위상각이 크게 변화한다. Eqs. (3),(4)는 진동 절삭 시 공구 궤적이 타원의 형태를 갖는다는 것을 보여주고 있으나, 이 식만 가지고는 가진 주파수가 증가할 때 위상각이 변화하고, 공진이 발생할 때 타원궤적의 형상이 변화하는 것을 설명하지 못한다. 따라서, 공구의 타원궤적은 절삭방향과 배분력방향 진동의 진폭 및 서로 간의 위상각에 따라 결정된다는 사실에 근거하여 Eqs. (3),(4)는 다음과 같이 보다 일반화시킬 수 있다.

$$x_{CT} = A_x \sin \omega t \tag{6}$$

$$y_{CT} = A_y \sin(\omega t + \beta) \tag{7}$$

여기서 $\beta = f(\omega)$는 가진 주파수의 함수로 절삭방향과 배분력방향 변위 사이의 위상각, $A_y = f_y(\omega, V_1, V_2, \alpha)$, $A_x = f_x(\omega, V_1, V_2, \alpha)$는 각 방향으로 발생되는 진동의 진폭으로 가진 주파수 및 두 개의 *PZT*에 입력하는 전압의 함수이다.

2 차원 궤적을 얻기 위해 Eq. (6)을 (7) 대입하여 정리하면 다음과 같은 궤적을 얻을 수 있다.

$$y_{CT} = \frac{A_y}{A_x}\cos\beta \cdot x_{CT} \pm \frac{A_y}{A_x}\sin\beta \cdot \sqrt{A_x^2 - x_{CT}^2} \tag{8}$$

Eq.(8)은 타원궤적은 좌항의 직선 식과 우항의 타원 식이 선형 결합된 형태로 나타난다는 것을 보여주고 있다. 즉, 타원궤적의 기울기는 직선 식 기울기를 나타내는 첫 번째 항의 계수인 $(A_y / A_x)\cos\beta$에 따라 결정되며 장단축의 비는 타원 식의 계수에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 이 식에서 위상각(β)이 90°에서 타원궤적의 주축은 공구 이송축과 평행하게 되며 위상각이 $90° < \beta < 270°$ 인 경우 주축은 Fig. 4 와 같은 음의 기울기를 가지며 $0° < \beta < 90°$ 혹은 $270° < \beta < 360°$ 인 경우 Fig. 6 과 같은 양의 기울기를 갖게 된다. 위상각은 타원궤적의 장단비에도 영향을 끼치며 절삭방향과 배분력방향의 진폭비 또한 타원궤적의 기울기 및 장단비에 영향을 준다.

Fig. 7 와 같이 변위센서를 이용하여 절삭공구의 절삭방향과 배분력방향으로 동시에 측정된 각 방향의 변위에서 각 방향 진동 진폭과 변위 간의 위상각(β)을 구하여 Eq. (8)에 대입하였다. 그 결과 10 *Hz* 의 저주파와 19 *kHz* 의 고주파 가진 주파수 모두에서 Eq. (8)은 절삭 공구의 왜곡된 타원궤적의 형상을 정확히 추정하였다(Figs. 8,9).

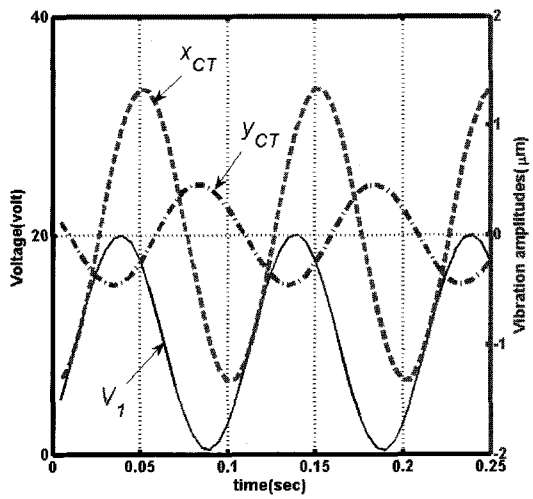

Fig. 7 Measured excitation voltage(V1) and displacements in the cutting(x_{CT}), and thrust(y_{CT}) directions at an excitation frequency of 10 Hz

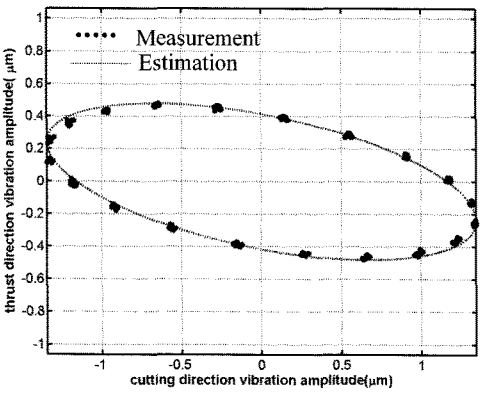

Fig. 8 Measurement and estimation of an elliptical path with an excitation frequency of 10 *Hz* [β = -120°, *V1p-p=V2p-p*=8*V*, α=90°]

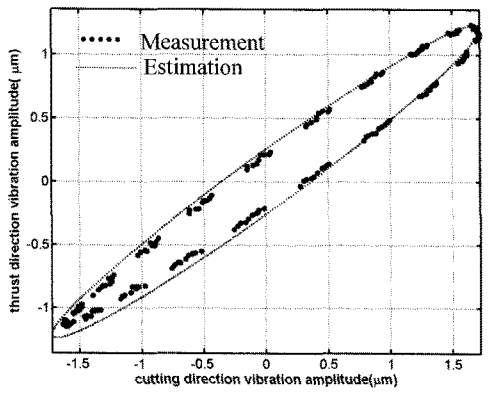

Fig. 9 Measurement and estimation of an elliptical path with an excitation frequency of 19 *kHz* [β = 12°, *V1p-p=V2p-p*=8*V*, α=90°]

3.3 형상 보정 결과

모든 가진 주파수 영역에서 절삭공구에 생성된 타원궤적은 Eq. (5)에 의해 예측된 이상적인 타원궤적에서 벗어난 왜곡된 타원궤적의 행태를 갖는다. 저주파 가진 영역에서는 타원진동절삭기의 탄성변형, 미세한 슬립 그리고 비대칭 구조가 영향을 끼치는 것으로 추정되며 고주파 영역에서는 공진에 의한 진폭 증가와 위상각의 변화가 타원궤적 왜곡에 큰 영향을 끼친다. 따라서 타원궤적 진동절삭의 효과를 극대화하기 위해서는 가진 전압의 위상차(α) 및 가진 전압(V_1,V_2)의 상대적인 크기를 조절함으로써 왜곡된 타원궤적의 형상을 이상적인 타원형상(타원의 장단축 방향이 절삭방향과 배분력방향에 평행)으로 보정하는 과정이 필요하다.

PZT 에 입력되는 정현파 전압 (*Vpp*=15*V*(0~15*V*), 위상차(α): 90°)의 가진 주파수를 100 *Hz*, 1 *kHz* 및 16 *kHz* 로 증가시켜가며 절삭 날에 생성된 타원궤적을 측정하였고, 이어서 위상차 및 가진 전압 크기를 조정하여 절삭방향으로 약 1.2 μm, 배분력방향으로 약 0.6 μm 의 진폭을 가진 보정된 타원궤적을 생성시켰으며 이의 측정 결과를 Figs. 10~12 에 나타내었다.

정현파의 가진 주파수 100 *Hz* 에서 절삭방향 진폭과 배분력방향 진폭은 -120°의 위상각(β)을 가졌으며, 이로 인해 타원궤적은 절삭방향을 기준하여 13° 정도의 기울기를 가졌다. Eq. (8)에 근거한 타원궤적 형상보정의 첫 단계는 타원궤적 주축의 기울기를 수평축과 평행하도록 하는 것이다. 먼저 절삭 방향과 배분력 방향 변위 사이의 위상각(β)을 90° 혹은 -90° 만들기 위해 *PZT* 에 입력되는 전압 간 위상차(α)를 조절한다. 가진 주파수 100 *Hz* 를 예로 들면 정현파 입력 전압 간 위상차(α)를 90°에서 60°로 조정하여 절삭방향과 배분력 방향 변위 사이의 위상각(β)을 -120°에서 -90°로 변화시켜 타원궤적의 주축을 절삭방향과 평행하게 만든다. 타원궤적의 기울기를 보상한 후 형상보정의 두 번째 단계는 입력 전압 간의 상대적인 크기를 조절하여 타원궤적의 절삭방향과 배분력방향의 크기의 비 즉 장단비를 조절하는 것이다. 다시 한 번 가진 주파수 100 *Hz* 의 예를 보면 *PZT1* 에 입력되는 전압(V_1)의 진폭을 15 *V* 에서 12 *V* 로 감소시켜 타원궤적의 장단비를 1:0.36 에서 1:0.57 로 변화시켰다.

정현파의 가진 주파수 1 *kHz*, 16 *kHz* 에 대해서도 같은 보정 과정을 통해 이상적인 타원 형태의 보정된 타원궤적을 얻을 수 있었으며 자세한 보정 조건은 Table1 에 나타내었다. 가진 주파수 100 *Hz* 에서는 진동 변위의 위상각(β, -30°)의 크기만큼 정현파 전압(V_1,V_2) 간의 위상차(α, 90° => 60°)를 감소시켜 보정된 타원궤적을 얻을 수 있었다. 이 후 가진 주파수를 1 *kHz*, 16 *kHz* 로 증가하였을 때 보정에 필요한 정현파 전압간의 위상차(α)와 변위 간의 위상각(β)이 정확하게 일치하지는 않았으나 비례의 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

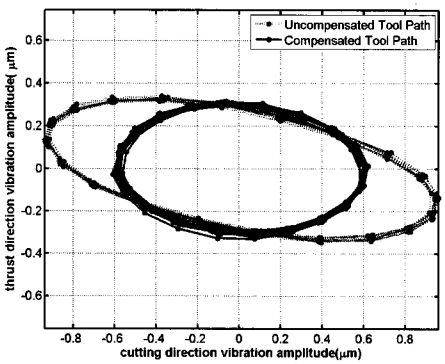

Fig. 10 Compensated vs. uncompensated elliptical path with an excitation frequency of 100 *Hz*(uncompensated (red dotted line) β = -120°, V1p-p=V2p-p=15V, α=90°, CCW rotation)

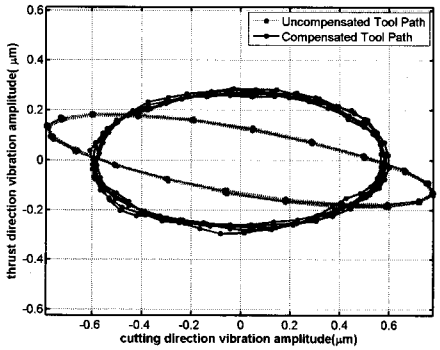

Fig. 11 Compensated vs. uncompensated path with an excitation frequency of 1 *kHz* (uncompensated(red dotted line): β = -135°, V1p-p=V2p-p=15V, α=90°, CCW rotation)

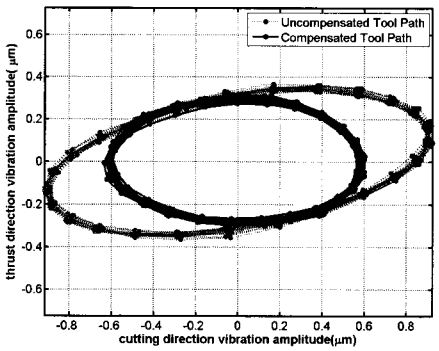

Fig. 12 Compensated vs. uncompensated path with an excitation frequency of 16 *kHz* (uncompensated(red dotted line):phase angle β= -290°, V1p-p=V2p-p=8V, α=90°, CCW rotation)

Table 1 Phase angles and excitation voltages for correcting distorted elliptical path (UC: uncompensated trajectory, C: compensated trajectory)

f(kHz)		α(deg.)	β(deg.)	V_1(V)	V_2(V)
0.1	UC	90	-120	15	15
	C	60	-90	12	15
1	UC	90	-135	15	15
	C	37	-90	11	15
16	UC	90	-290	8	8
	C	280	-90	6.6	6.6

4. 결론

두 개의 평행한 *PZT* 로 구성된 타원궤적 진동 절삭기에 위상차를 갖는 정현파를 가진 주파수를 증가시켜가며 입력하여 절삭 날에 생성되는 타원궤적의 형상의 변화를 관찰하였다. 타원진동절삭의 효과를 극대화하기 위해서는 타원 축의 방향이 절삭 방향과 배분력 방향을 향하도록 궤적의 형상을 보정해주어야 한다. 이를 위해 타원궤적 형상의 이론적 모델을 제시하였으며 측정한 타원궤적과 비교 검증하였다.

타원궤적 주축의 기울기 및 장단비는 독립적으로 조절할 수 있으며 먼저 입력 전압 간의 위상차(α)를 조절하여 기울기를 보정한 후 전압의 상대적인 크기를 조절하여 타원궤적의 장단비를 보정한다. 제안한 타원궤적 형상보정 방법을 검증하기 위해 10 *Hz*~16 *kHz* 까지 다양한 주파수 영역에서 생성된 왜곡된 타원궤적에 대해 절삭방향과 배분력 방향 변위의 위상차(β)를 실험적으로 측정한 후 입력 전압 간의 위상차(α)를 측정된 변위의 위상차(β)에 비례하도록 변화시켜 타원궤적의 기울기를 절삭방향과 평행하게 보정하였다. 입력 전압의 위상차(α) 의 변화는 최대 15 %의 오차 범위 내에서 변위 간의 위상차(β)의 선형적인 변화를 유발하였다. 또한 기울기가 보정된 타원궤적에 대해 입력 전압의 상대적인 크기 조절을 통해 타원궤적의 기울기의 변화 없이 타원궤적의 장단비를 조절할 수 있음을 입증하였다.

후 기

본 연구는 2010 년도 한성대학교 연구년 지원 과제임.

참고문헌

1. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 43, No. 1, pp. 35-38, 1994.
2. Moriwaki, T. and Shamoto, E., "Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 31-34, 1995.
3. Cerniway, M. A., "Elliptical Diamond Milling: Kinematics, Force, and Tool Wear," Mechanical Engineering, M.S. Thesis, North Carolina State University, 2001.
4. Negishi, N., "Elliptical Vibration Assisted Machining with Single Crystal Diamond Tools," Mechanical Engineering, M.S. Thesis, North Carolina State University, 2003.
5. Brocato, B. C., "Micromachining using Elliptical Vibration Assisted Machining (EVAM)," Mechanical Engineering, M.S. Thesis, North Carolina State University, 2005.
6. Kim, G. D. and Loh, B. G., "Elliptical Vibration Cutting with Variable Trajectory for Ultra-precision Micro-Machining," Journal of KSPE, Vol. 24, No. 11, pp. 52-58, 2007.
7. 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, Vol. 18, No. 2, Paper No. 025002, 2008.
8. Brehl, D. E. and Dow, T. A., "Review of vibration assisted machining," Precision Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 153-172, 2008.