

미세 초음파 타원궤적 진동절삭 (I) 미세 초음파 가공을 위한 타원 절삭경로 생성

노병국*, 김기대#

Micro Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting (I) The Generation of a Elliptical Vibration Cutting Motion for Micro Ultrasonic Machining

Byung-Gook Loh* and Gi Dae Kim#

ABSTRACT

For precise micro-grooving and surface machining, a mechanism for creating elliptical vibration cutting (EVC) motion is proposed which uses two parallel piezoelectric actuators. And based on its kinematical analysis, variations of EVC path are investigated as a function of dimensional changes in the mechanism, phase difference and amplitude of excitation sinusoidal voltages. Using the proposed PZT mechanism, various types of two dimensional EVC paths including one dimensional vibration cutting path along the cutting direction and thrust direction can be easily obtained by changing the phase lag, the amplitude of the piezoelectric actuators, and the dimension of the mechanism.

Key Words : Elliptical vibration cutting(EVC) (타원궤적 진동절삭), Piezoelectric actuator(압전소자), PZT mechanism (압전소자 기구), Phase lag(위상 차이), Amplitude (진폭)

1. 서론

반도체 산업, MEMS, BT 및 NT의 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

압전소자(PZT)를 이용하여 절삭 공구에 타원궤적을 생성시켜 정밀한 절삭 가공을 수행한 연구

접수일: 2005년 6월 30일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

* 한성대학교 기계시스템공학과

교신저자: 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

E-mail gidkim@cu.ac.kr Tel. (053) 850-2724

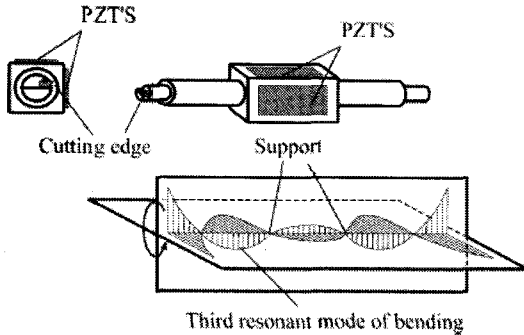


Fig. 1 Superposition of two bending mode generated by PZTs (by Shamoto and Moriwaki^{3,4})

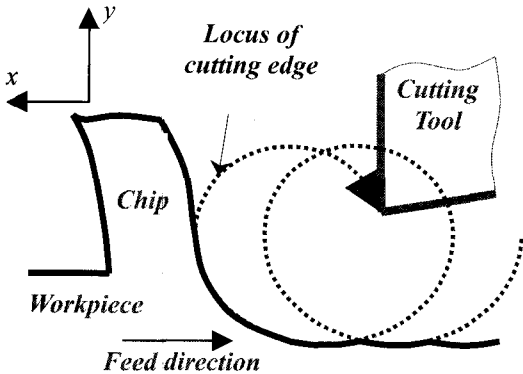


Fig. 2 Principle of elliptical vibration cutting (EVC)

는 일본의 Shamoto 및 Moriwaki^{2,6} 에 의해 최초로 제안되었으며, 현재까지 이 연구가 계속 진행되고 있다. 그들은 두 개의 압전 소자를 직교 방향으로 배치하여 공구에 타원 궤적을 발생시키는 장치를 제안하였으며, 6Hz 이내의 저주파수로 가진하고 표면을 절삭한 결과 일반적인 가공법에 비하여 절삭 저항이 현저히 감소됨을 증명하였다.² 이후 Fig. 1 과 같이 두 쌍의 압전소자를 3 차원적으로 결합시키고 가진 주파수를 약 20kHz 까지 높여서 각각의 압전소자를 공진시킨 후 발생하는 진동모드(mode shape)를 합성하여 공구에 타원 궤적을 생성시킨 연구를 발표하여 타원궤적 진동 절삭시 형상정밀도가 향상된다는 것을 밝혔고,^{3,4} 이후 국내 연구진에 의해서도 같은 연구가 수행되었다.⁷ 2 개의 PZT 를 공진시켜 진동을 발생시키는 이와 같은 방법은 진동의 진폭을 증가시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 타원의 형상 변화를 자유롭게 할 수

없으며, 진동 모드를 3 차원적으로 합성하여 생성시키기 때문에 타원궤적의 평면을 절삭 방향(cutting direction)과 칩 배출 방향(chip flow direction)을 포함하는 평면과 정확하게 일치시키기 어렵다. 또한 진동이 없는 노드점(node point)만 지지할 수 있기 때문에 실제 제작 시 많은 어려움이 따른다. Cerniway⁸ 는 처음으로 한 쌍의 평행한 PZT 를 이용한 타원진동 절삭을 제안하였으나, 타원궤적 생성에 관한 심도있는 기구학적 해석이 부족하였다.

본 연구에서는 먼저 일반적인 절삭 가공법과 타원 공구궤적 절삭경로 가공법의 차이를 해석하였고, 평행하게 배열된 두 개의 PZT 에 위상 차이(phase lag)를 두고 초음파 정현파형(sinusoidal) 변위를 발생시킴으로써 미소 변위의 타원 궤적을 정확하고 쉽게 생성시킬 수 있는 기구를 제안하였다. Fig. 2 에 보이는 바와 같이 PZT 기구는 절삭 방향과 칩 배출 방향을 포함하는 평면 위로 타원궤적을 그리게 되고 여기에 절삭 공구를 결합시키면 절삭날(cutting edge)이 타원궤적을 그리면서 초음파 절삭가공을 할 수 있게 된다. 평행한 두 개의 PZT 가 생성하는 미소 변위에 의해 생성되는 타원궤적을 기구학적으로 해석하였고, PZT 기구의 치수 변화에 따라, 그리고 두 개의 PZT 간의 위상 차이 및 진폭의 변화에 따라 생성되는 다양한 타원궤적의 변화를 살펴보았다.

2. 타원궤적 절삭가공법

절삭 공구가 주기적으로 초음파 타원궤적을 그리

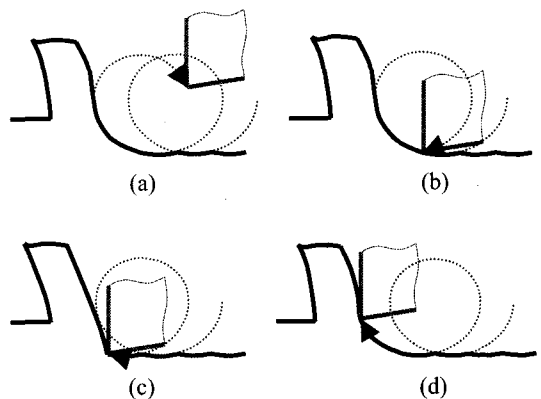


Fig. 3 Procedure of EVC: (a) No cutting (b) Beginning of cutting (c) Cutting (d) End of cutting

면서 이송을 하면 Fig. 3 에서 보이는 바와 같이 공구는 주기적으로 절삭과 비절삭을 반복하면서 가공을 수행하게 된다. 한 주기 중 Fig. 3(a) 시점에서는 공구와 칩, 공구와 공작물은 비접촉 상태이며 Fig. 3(b) 시점에서 공구와 공작물이 접촉되면서 절삭 가공이 시작된다. Fig. 3(b)에서 Fig. 3(c) 시점까지는 일반적인 절삭가공 방법과 마찬가지로 공작물의 이송방향과 공구의 절삭방향이 반대가 되어 가공이 이루어지며, 이 때 칩과 공구 사이에 작용하는 마찰력은 칩 배출 방향과 반대 방향으로 작용하고 있다. Fig. 3(c)에서 Fig. 3(d) 시점까지는 공구가 칩 배출 방향으로 운동을 하고 있기 때문에 공구의 타원 운동속도가 칩 배출 속도보다 큰 초음파 타원 진동의 경우에는 칩과 공구 사이에 작용하는 마찰력이 오히려 칩의 배출을 도와주는 작용을 하게 되며 이러한 효과로 인해 절삭 저항이 감소하게 된다. Fig. 3(d) 시점 이후 공구는 타원궤적을 따라 공작물의 이송 방향과 같은 방향인 $-x$ 방향으로 운동하고, 이 때 타원궤적 운동속도가 공작물의 이송속도보다도 클 경우 공구와 공작물은 분리된다. 이후 Fig. 3(a)를 거쳐 다시 절삭 시작 지점인 Fig. 3(b)의 위치로 오게 되어 위 과정을 반복하게 된다. 따라서 압전소자를 사용하여 타원궤적 절삭경로로 초음파 절삭가공을 하면 공구와 공작물 간에 반복적인 접촉 및 비접촉으로 인해 칩의 형상은 연속형 칩이 아닌 불연속형 칩을 생성한다. 마찰 저항의 감소로 인해 절삭력은 감소하게 되며 비절삭에너지가 감소하여 미소 절삭깊이 가공시 형상정밀도가 향상된다.

3. 타원궤적 생성 기구

Fig. 4 는 한 쌍의 평행한 압전소자를 이용하여 절삭 공구에 타원 궤적을 생성시키는 PZT 기구의 구조를 나타낸 것이다. 기구 중앙에 위치한 나사를 이용하여 PZT 에 예압(preload)을 인가하여 어느 정도의 초기 압축 상태를 만들었으며, 여러 개의 PZT 를 더미(stack)로 쌓아 압전효과(piezo effect)를 증폭시키는 구조로 설계하였다.

Fig. 5 는 Fig. 4 의 PZT 기구에서 생성되는 타원 궤적을 기구학적으로 해석하기 위해 구조를 단순화해서 나타낸 그림이다. 두 개의 PZT 에서 각각 y_1 , y_2 만큼의 변위가 발생하였을 경우 이들 변위의 합성에 의해 공구의 위치(x_{CT}, y_{CT})가 2 차원적

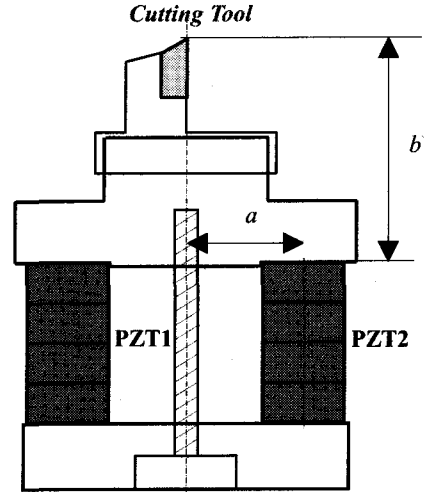


Fig. 4 The structure of stacked piezoelectric actuators generating EVC motion

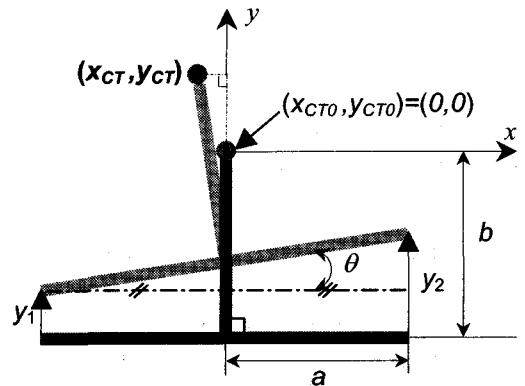


Fig. 5 Kinematical diagram for the analysis of EVC motion

으로 운동하게 되며, 그 궤적은 식 (1)~(3)에 의해 식 (4)~(5) 와 같이 유도된다.

$$x_{CT} = -b \sin \theta \quad (1)$$

$$y_{CT} = y_1 + a \sin \theta + b \cos \theta - b \quad (2)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{2a} \right) \quad (3)$$

$$x_{CT} = \frac{b(y_1 - y_2)}{2a} \quad (4)$$

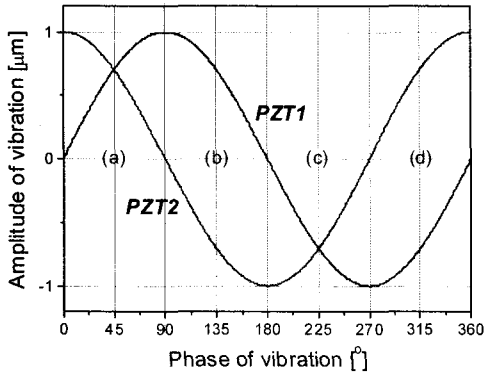


Fig. 6 Sinusoidal vibrations of a couple of PZTs with phase lag (In case of $A_1=A_2=1 \mu m$, $\phi=90^\circ$)

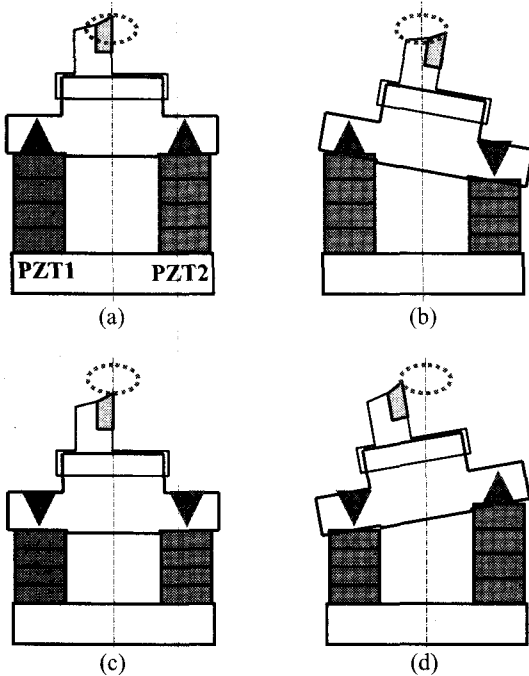


Fig. 7 Generation of the EVC by phase difference of PZTs

$$y_{CT} = \left(\frac{y_1 + y_2}{2}\right) + b \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{2a}\right)\right) - b \quad (5)$$

두 개의 PZT 에 식 (6)~(7) 과 같이 진폭과 위상이 다른 정현파형 진동을 발생시켰을 경우, 각각의 PZT 는 Fig. 6 와 같은 변위를 가지게 된다.

$$y_1 = A_1 \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

$$y_2 = A_2 \sin(2\pi ft + \phi) \quad (7)$$

여기서, f 는 PZT 가 생성하는 정현파 진동의 주파수 혹은 PZT 로 입력하는 정현파 전압의 가진 주파수, ϕ 는 두 개의 PZT 간의 위상 차이, A_1, A_2 는 두 개의 PZT 에서 발생하는 정현파 진동의 진폭을 각각 나타낸다.

두 개의 PZT 에서 주기가 f 이고 진폭(A_1, A_2)이 모두 $1 \mu m$ 이며, 위상 차이(ϕ)가 90° 가 나는 정현파형 진동이 발생하는 경우에 대해서 생각해 보자. PZT 기구의 구조에서 PZT 사이의 거리($2a$) 및 PZT 끝 부분과 공구 날 사이의 거리(b) 에 비하여 PZT 에서 발생하는 변위(y_1, y_2)가 매우 작기 때문에 이들 변위의 차이로 인해 발생하는 각도(θ)는 매우 미소($\theta \approx 0$)하다고 가정할 수 있으므로 식 (4)~(5) 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{CT} = \frac{b(\sin 2\pi ft - \cos 2\pi ft)}{2a} \quad (8)$$

$$y_{CT} = \frac{\sin 2\pi ft + \cos 2\pi ft}{2} \quad (9)$$

절삭 공구의 x, y 방향 운동이 식 (8)~(9)와 같을 때, 이들 운동의 합성으로 나타나는 공구의 궤적(x_{CT}, y_{CT})은 식 (10)과 같이 되며, 이는 단반경이 y 축 방향으로 $\frac{1}{\sqrt{2}} \mu m$ 로 고정되어 있고, 장반경이 x 축 방향으로 $\frac{b}{\sqrt{2a}} \mu m$ 로 가변하는 2 차원 타원 궤적을 나타낸다.

$$\frac{x_{CT}^2}{\left(\frac{b}{\sqrt{2a}}\right)^2} + \frac{y_{CT}^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} = 1 \quad (10)$$

이 때 각 PZT 의 위상 및 변위에 따라 타원 공구 궤적의 경로를 보다 상세히 설명하면 다음과 같다 Fig. 6 에서의 (a) 위치, 즉, PZT1 에서 진동이 발생한 후 45° 되는 지점에서는 PZT1, PZT2 모두 같은 크기($0.707 \mu m$)로 인장 변위가 발생한 상태이며 이 때 공구는 Fig. 7 에서의 (a) 위치와 같이 타원 궤적상에서 최상점에 위치한다. Fig. 6 에서의 (b) 지점, 즉 PZT1 에서 진동이 발생한 후 135° 되는

지점에서 PZT1 은 최정점을 지나 여전히 인장을 받고 있는 상태이나 PZT2 는 같은 크기로 압축을 받고 있는 상태이며 이 때 공구는 Fig. 7에서의 (b) 위치와 같이 타원 궤적상에서 최고 오른쪽 위치에 있게 된다. 마찬가지로 (c) 위치에서는 PZT1, PZT2 모두 같은 크기로 압축을 받은 상태로서 공구는 타원 궤적상에서 최하점에 위치하게 되고, (d) 위치에서는 PZT1 은 압축을, PZT2 는 인장을 받은 상태로서 공구는 타원 궤적상의 최고 왼쪽 위치에 있게 된다. 전체적으로 한 쌍의 평행한 PZT 에서 위상이 다른 정현파형 진동을 발생시키면 타원 공구 궤적을 주기적으로 생성하게 된다.

그러나 실제 PZT 에서 생성되는 타원의 반경도 역시 매우 작기 때문에 진동의 진폭(A_1, A_2)이 커지거나, PZT 기구 구조에서 b/a 의 값이 커지면 Fig. 5에서 두 PZT 변위의 차이에 의해 발생하는 각도(θ)는 더 이상 무시할 수 없게 된다. 따라서 식 (8)~(9)에 의해 생성되는 궤적은 미소각을 무시하고 도출하였기 때문에 완전한 타원형이지만, 실제 공구의 운동 궤적은 완전한 타원 궤적이 아니다. Fig. 8는 PZT 진폭 및 설계 치수의 변화에 따라 미소각을 무시하고 유도한 식 (8)~(9)에 의한 타원 궤적과 실제 정확한 공구 궤적을 나타내는 식 (4)~(5)에 의한 궤적을 서로 비교한 것이다. 실제로 생성되는 공구의 운동 경로는 b/a 의 값이 커질수록, 그리고 진동의 진폭이 커질수록 완전한 타원경로와 비교하여 오차가 크게 발생함을 알 수 있다.

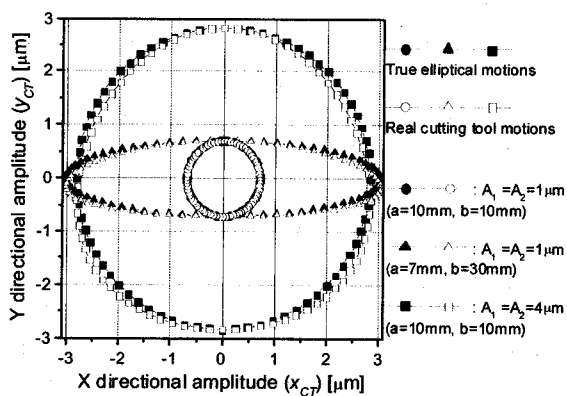


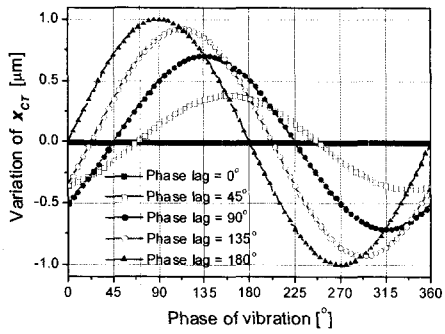
Fig. 8 True elliptical motions vs. real cutting tool motions according to the amplitudes and dimensions of PZTs

4. 타원궤적 절삭경로 생성 결과

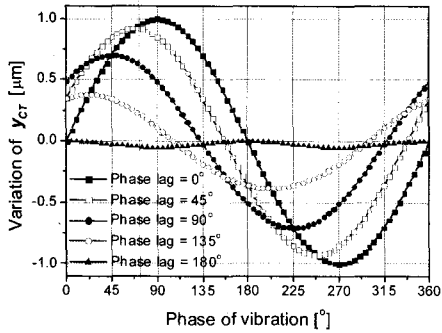
Fig. 9와 Fig. 10은 평행한 한 쌍의 PZT에서 동일한 진폭으로 발생하는 정현파형 진동이 위상 차이(phase lag)가 달라짐에 따라, 또한 PZT 기구의 설계 치수(a, b)에 따라 타원궤적이 어떤 형상으로 생성되는지를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과, Fig. 4에서의 보여진 PZT 구조에서의 설계 치수 a 와 b 의 크기를 동일하게 하고 두 개의 PZT 간 위상 차이(ϕ)를 90° 로 줄 경우에 공구는 Fig. 9(c)에서와 같이 장단 반경($0.707 \mu\text{m}$)이 같은 원의 궤적을 따라 절삭경로를 생성하였다. 기구의 설계 치수와는 무관하게 위상 차이를 주지 않을 경우($\phi=0^\circ$)에는, 배분력 방향(thrust direction)으로만 1차원으로 진동하는 절삭경로를 얻었다. 위상 차이를 180° 로 줄 경우에는 역시 설계 치수와는 무관하게 절삭 방향(x 방향)으로만 진동하는 1차원 진동 절삭경로를 얻을 수 있었는데, 특히 이 경우는 일반적인 1차원 진동절삭과 동일한 절삭경로이다.

PZT 기구 구조에서 PZT 사이의 거리의 반(a)보다 PZT와 공구 날 사이의 거리(b)를 더 크게 하면 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 Fig. 9와 같은 위상 차이를 주더라도 지렛대의 원리에 의해 절삭 방향으로의 변위(x_{CT})가 더 큰 타원 궤적이 생성되었다. 또한 $a=7\text{mm}$, $b=30\text{mm}$ 로 제작하였을 경우에는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 두 PZT 간 위상 차이를 약 28.1° 로 두었을 때 반경이 약 $0.97 \mu\text{m}$ 인 원의 궤적이 생성되었으며, 이는 $a=10\text{mm}$, $b=10\text{mm}$ 로 제작하고 위상 차이를 90° 주었을 때 생성된 반경 $0.707 \mu\text{m}$ 인 원 궤적보다 반경이 더 큰 궤적을 얻었다.

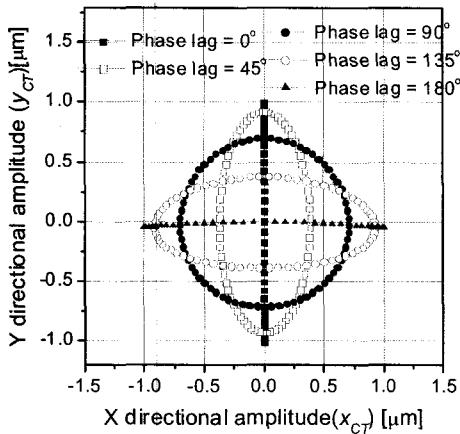
두 개의 PZT 간에 같은 크기의 진폭이 발생할 경우($A_1=A_2$), Fig. 9(a)와 Fig. 10(a)에서 보이는 바와 같이 식 (4)로 표현되는 x 방향 변위(x_{CT})는 두 개의 PZT 간에 위상 차이가 클수록 증가하였고, 진폭의 크기와 위상 차이에 관계없이 항상 (+) (-) 대칭 형상을 나타내었다. 그러나 식 (5)로 표현되는 y 방향 변위(y_{CT})는 Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)에서 보이는 바와 같이 두 개의 PZT 간의 위상 차이가 작을수록 증가하였다. x 방향 변위와는 달리 y 방향 변위는 (+) (-) 비대칭 형상으로 나타나는데 진폭의 크기와 위상 차이가 증가할수록 미소각의 영향이 커져 비대칭 정도가 증가하였다. 결과적으로 x, y 방향 변위의 합성으로 나타나는 공구의 타



(a) Variations of x_{CT}

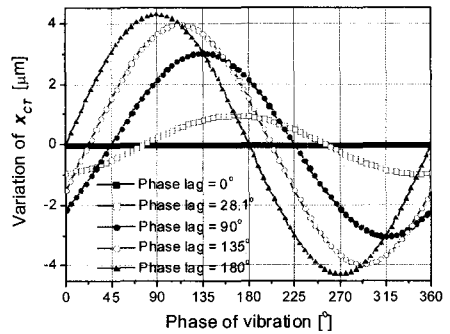


(b) Variations of y_{CT}

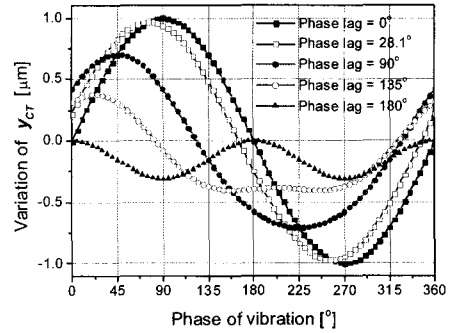


(c) Resultant cutting paths

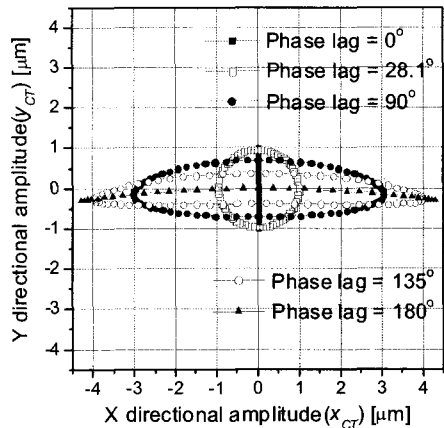
Fig. 9 Simulation results of the elliptical motion according to the phase lag. ($A_1 = A_2 = 1 \mu\text{m}$, $a = 10\text{mm}$, $b = 10\text{mm}$)



(a) Variations of x_{CT}



(b) Variations of y_{CT}



(c) Resultant cutting paths

Fig. 10 Simulation results of the elliptical motion according to the phase lag. ($A_1 = A_2 = 1 \mu\text{m}$, $a = 7\text{mm}$, $b = 30\text{mm}$)

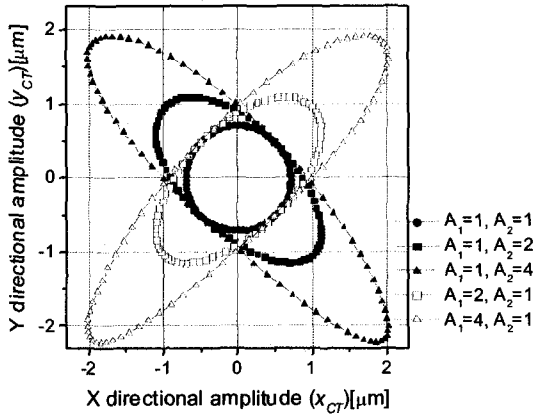


Fig. 11 Simulation results of the elliptical motion according to the amplitude variation. ($b/a=1$, $\phi=90^\circ$)

원래적 절삭경로는 Fig. 9(c) 와 Fig. 10(c) 과 같이 x 방향 (좌우방향, 절삭 방향)으로는 대칭이나 y 방향 (상하방향, 배분력 방향)으로는 비대칭 형상으로 나타나며, PZT 간의 위상 차이(ϕ)가 클수록, y_1 과 y_2 의 변위가 증가할수록, 그리고 b/a 가 커질수록 비대칭 정도는 더욱 증가하는 것으로 나타난다.

Fig. 11 은 두 개의 PZT 에서 90° 의 위상 차이를 가지고 서로 다른 크기의 진폭으로 진동이 발생할 경우 ($A_1 \neq A_2$), 이 들 운동의 합성으로 나타나는 타원 궤적의 형상을 나타낸 것이다. 두 개의 PZT 간에 진폭이 같을 경우에는 원의 궤적을 생성시키고, 다를 경우에는 $y = \pm \frac{a}{b}x$ 를 장단축으로 하는 타원 궤적을 생성시켰다. Fig. 11 에 나타난 바와 같이 타원의 단반경은 일정하였으나 두 개의 PZT 간에 진폭의 차이가 증가할수록 타원의 장반경이 커지는 타원 궤적이 생성되었다.

위와 같은 시뮬레이션 결과들로부터 두 개의 평행한 PZT 에 정현파형 초음파 진동을 생성시키고 이들의 위상 차이(ϕ)와 진폭(A_1, A_2), 그리고 PZT 기구의 구조에서 PZT 사이의 거리(a) 및 PZT 와 공구 날 사이의 거리(b)를 변화시키면 절삭 방향 또는 배분력 방향으로만 1 차원으로 진동하는 경로를 포함하여 다양한 형태의 2 차원 타원 공구 궤적을 생성시킬 수 있다.

5. 결론

공구에 타원궤적의 절삭 경로를 생성시켜 초음파 가공을 수행하면 공구에 작용하는 마찰 저항이 감소하여 절삭력이 감소하며 형상 정밀도가 향상된다. 평행한 두 개의 PZT 에 위상 차이를 가지는 정현파형 초음파 진동을 발생시킴으로써 미세 초음파 가공에 응용할 수 있는 타원궤적의 절삭경로를 생성시키는 기구를 제안하고 제안된 기구로 타원궤적 생성 시뮬레이션을 수행한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 두 개의 PZT 에서 진동의 진폭이 같을 경우, 위상 차이(ϕ)가 달라짐에 따라 배분력방향 ($\phi=0^\circ$) 및 절삭방향 ($\phi=180^\circ$) 으로만 진동하는 1 차원 진동 절삭경로, 원경로 ($\phi=90^\circ$) 등을 포함한 다양한 타원 절삭경로를 얻을 수 있었다.

(2) PZT 기구의 설계 치수(a, b)를 변화시키면 같은 진폭과 위상차이를 가진다고 할지라도 타원의 장단반경의 크기가 다른 타원궤적을 얻을 수 있었다.

(3) 두 개의 PZT 에서 발생하는 진폭이 서로 달라지면 타원의 축의 방향이 변화하는 타원궤적 절삭경로를 얻을 수 있었다.

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. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 43, pp.35-38, 1994.
3. Moriwaki, T., Shamoto, E., "Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 44, pp.31-34, 1995.
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., "Ultraprecision Ductile cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration," Annals of the CIRP, Vol. 41, pp.141-144, 1994.

6. Shamoto, E., Suzuki, N., Moriwaki, T., Naoi, Y.,
"Development of Ultrasonic Elliptical Vibration
Controller for Elliptical Vibration Cutting," *Annals of
the CIRP*, Vol. 51, No.1, pp.327-330, 2002.
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. Cerniway, M.A., "Elliptical Diamond Milling:
Kinematics, Force, and Tool Wear," M.S. thesis,
North Carolina State University, 2001.