한국기계가공학회지, 제5권, 제3호, pp.29～35 (2006. 9)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5 No. 3, pp.29～35 (2006. 9)

압전소자의 미세회전운동을 이용한 초정밀 초음파 표면가공기 개발

김기대#, 노병국*, 김정수**

Development of Ultra-precision Ultrasonic Surface Machining Device Using Cyclic Elliptical Cutting Motion of a Couple of Piezoelectric Material

Gi-Dae Kim#, Byung-Gook Loh*, Jeong-Su Kim**

ABSTRACT

Various types of elliptical motions are generated by PZT mechanism which is composed of two parallel piezoelectric actuators. Elliptical vibration cutting(*EVC*) is obtained by attaching single crystal diamond cutting tool to the mechanism, and V-grooving for Brass and Aluminum is carried out by applying the *EVC*. It is experimentally observed that the cutting force in the process of the *EVC* reduces compared to the ordinary non-vibration cutting, which is due to the decrease of undeformed chip thickness and frictional force between the tool and chip. Ultrasonic elliptical vibration cutting(*UEVC*) suppresses burr formation and decreases cutting force still more, so *UEVC* makes it possible to enhance the shape accuracy of machined surface.

Key Words : Elliptical Motion(타원운동), PZT(압전소자), Elliptical Vibration Cutting(EVC)(타원궤적 진동절삭), V-grooving(V홈 가공), Cutting Force(절삭력), Ultrasonic(초음파)

1. 서 론

영상정보산업, 마이크로 금형 등 초정밀 기계산업, 광학 및 통신 산업 등이 발전함에 따라 미세 부품의 초정밀 가공기술은 고부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있으며, 이에 대한 산업계의 기대치도 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 미세가공기술에 대한 수요를 충족시키기 위해서 새로운 가공기술이 필요하게 되었다. 현재까지 수행된 표면의 미세 가공기술로서는 미세방전가공기술, LIGA 공정기술, 레이저 가공기술, 전해가공 기술, 그리고 포토리소그래피 공정기술 등을 들 수 있다. 그러나 각각의 공정들은 재료의 한계, 고비용, 열변형, 비선형성 광학현상, 거친 표면거칠기, 전극 가공의 필요성, 긴 제작시간 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 미세 가공기술에 초음파 기술을 이용하게 되었다.

교신저자 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : gidkim@cu.ac.kr
* 한성대학교 기계시스템공학과
** (주)양정산업 생산기술부

한 쌍의 압전소자를 이용하여 절삭공구에 미소한 타원궤적 진동을 발생시켜 표면을 가공하는 연구는 Shamoto와 Moriwaki[1-3]에 의하여 정립되었다. 이러한 절삭방법으로 절삭저항이 감소되는 것을 확인하였다. 이후 Loh와 Kim[4-5]은 평행한 한 쌍의 압전소자가 생성시키는 타원궤적을 기구학적으로 해석하였고 실험을 통해 초정밀 초음파 타원궤적 진동절삭의 유용성을 증명하였다.

본 연구는 미세부품의 표면을 초정밀하게 가공할 수 있는 초정밀 초음파 표면가공기를 개발하는 것을 목표로 하며 이를 통해 절삭저항의 감소와 가공면의 형상정밀도 향상을 실현시키고자 한다. 본 연구에서는 한 쌍의 PZT를 이용하여 우선 절삭공구에 저주파수로 타원궤적 진동을 생성시키는 기구를 선행 개발하여 타원궤적 진동 시 절삭성능의 변화를 관찰하였고, 이후 초음파로 타원진동을 생성시키는 기구를 구성하여 초음파 타원궤적 진동절삭의 특성을 살펴보았다.

2. 타원궤적 진동절삭

2.1 타원궤적 진동절삭 효과

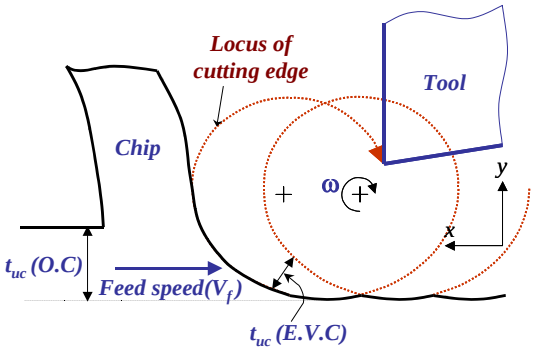


Fig. 1 Principle of elliptical vibration cutting(*EVC*)

절삭공구에 절삭방향과 배분력 방향을 포함하는 평면 위로 주기적인 타원 궤적을 생성시키면서 진행시키면 Fig. 1과 같은 궤적으로 가공을 수행하게 된다. 한 주기 중 공구와 공작물간의 접촉이 시작되어 가공이 시작되는 부분에서는 일반절삭가공(ordinary cutting, *O.C.*)과 같이 공작물의 이송방향과 공구의 절삭방향이 반대이고 따라서 칩과 공구 사이에 작용하는 마찰력은 칩 배출 방향과 반대 방향으로 작용하고 있다. 하지만 공구가 칩 배출 방향인 위로 향하는 시점에서는 칩과 공구 사이에 작용하는 마찰력은 칩의 배출 방향으로 작용을 하게 되며 이러한 마찰력은 절삭저항으로 작용하지 않고 오히려 칩의 배출을 도와주는 작용을 하게 되어 절삭력이 오히려 감소하게 된다.[4]

타원궤적 진동절삭(Elliptical vibration cutting, *E.V.C.*) 시 절삭력이 감소하게 되는 또 하나의 원인은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 미변형 칩두께(undeformed chip thickness, t_{uc})의 감소에서 찾을 수 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 일반적인 절삭방법으로 세이핑(shaping) 가공할 때 미변형 칩두께($t_{uc}(O.C.)$)는 고정된 값이지만, 타원궤적을 생성시키면서 가공하면 미변형 칩두께($t_{uc}(E.V.C.)$)는 타원생성을 주기로 하여 지속적으로 변화하게 된다. 이 때 타원궤적의 생성속도(ω), 즉 타원궤적 생성 주파수가 클수록 미변형 칩두께는 더욱 얇아지게 된다.

이후 타원 궤적은 -x 방향으로 향하고 공작물의 이송방향과 같은 방향이 되어 타원 궤적의 진행 속도가 이송속도보다도 클 경우 공구와 공작물은 분리된다. 이후 다시 절삭 시작 위치로 오게 되며 이러한 과정이 반복된다. 공구와 공작물 간에 반복적으로 접촉과 비접촉이 이루어지면 칩의 형상은 불연속형 칩을 생성할 수 있다.[5]

2.2 타원궤적 진동절삭 해석

Fig. 2와 같이 두 개의 평행한 PZT에 변위가 각각 y_1, y_2가 발생하였을 경우 이들 변위의 합성으로 공구의 위치(x_{CT}, y_{CT})는 2차원적으로 변화하게 된다. 만일 두 PZT 에 각각 진폭이 1이고 주기가 f [Hz]인 정현파형 진동을 위상 차이(ϕ)가 90°나게 발생시키면 절삭공구에는 Eq.(1)~(3)과 같은 타원궤적이 생성된다.[4] 여기서, l_x는 평행한 PZT사이의 거리의 1/2이고 l_y는 PZT 끝부분에서 절삭인선과의 거리이다.

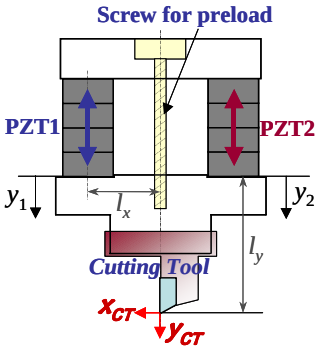


Fig. 2 Structure of *EVC* tool

$$x_{CT} = \frac{l_y(sin2\pi ft - cos2\pi ft)}{2l_x} \quad (1)$$

$$y_{CT} = \frac{sin2\pi ft + cos2\pi ft}{2} \quad (2)$$

$$\frac{x_{CT}^2}{(\frac{l_y}{\sqrt{2}l_x})^2} + \frac{y_{CT}^2}{(\frac{1}{\sqrt{2}})^2} = 1 \quad (3)$$

2.3 공구와 공작물 간의 분리조건

위와 같은 운동 결과로 생성되는 타원궤적의 ±*x* 방향의 최대 변위가 A_x, ±*y* 방향의 최대 변위가 A_y로 측정되었을 경우, 타원궤적 자체의 변위($x_{ellips}(t)$, $y_{ellips}(t)$)는 Eq.(1)과 Eq.(2)를 이용하여 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{ellips}(t) = \frac{A_x}{2}cos(2\pi ft + \phi_x) \quad (4)$$

$$y_{ellips}(t) = \frac{A_y}{2}sin(2\pi ft + \phi_y) \quad (5)$$

공작물에 대한 절삭공구의 *x* 방향 상대위치($x(t)$)는 이송속도(V_f)에 의한 전진과 타원궤적에 의한 위치변화($x_{ellips}(t)$)의 합으로 나타나므로 다음과 같이 표현된다.

$$x(t) = x_{ellips}(t) + V_f t = \frac{A_x}{2}cos(2\pi ft + \phi_x) + V_f t \quad (6)$$

따라서 절삭공구의 *x*방향 운동속도($v_{CT_x}(t)$), 즉 절삭공구와 공작물 사이의 *x*방향 상대 절삭속도는 다음과 같다.

$$v_{CT_x}(t) = \frac{d}{dt}(x(t)) = -\pi f A_x sin(2\pi ft + \phi_x) + V_f \quad (7)$$

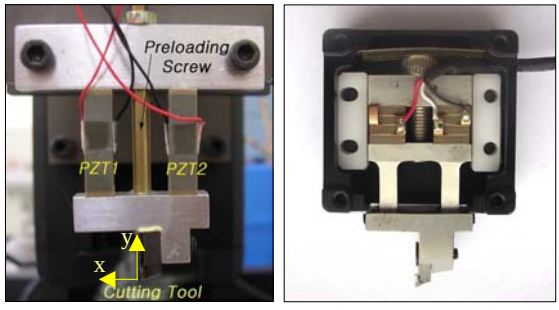
Eq.(7)에서 $v_{CT_x}(t)$ 가 항상 양(+)이 되는 경우에는 비록 절삭공구가 타원궤적을 그리면서 가공하더라도 절삭공구와 공작물(혹은 칩)은 항상 접촉되어 있는 채로 가공된다. 하지만 타원궤적 생성 최대속도가 이송속도보다도 더 큰 경우, 즉

$$\pi f A_x > V_f \quad (8)$$

인 경우에는 $v_{CT_x}(t)$가 음(-)의 값이 될 수 있어 절삭가공 중 공구는 타원궤적 진동으로 인해 공작물과 분리되며, 이 때 공구와 공작물은 접촉과 비접촉을 반복하면서 가공이 이루어진다.

3. 가공기 개발 및 시험방법

Fig. 3(a)는 타원궤적 진동 절삭 특성을 관찰하기 위해 제작한 저주파수의 타원진동을 생성시키는 절삭기구이며, Fig. 3(b)는 초정밀 표면 가공을 위한 절삭기구로 기존의 상용 초음파 PZT 모터 및 콘트롤러를 구입한 후 절삭공구를 부착하여 절삭기구를 완성하였다.



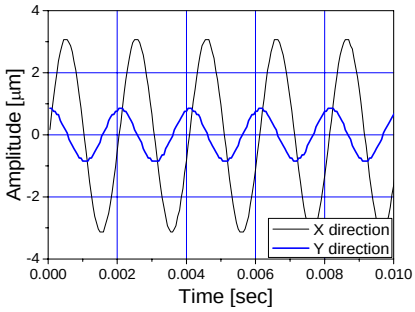
(a) **(b)**

Fig. 3 Cutting mechanism generating elliptical vibration motion (a) For low frequency vibration (b) For ultrasonic vibration

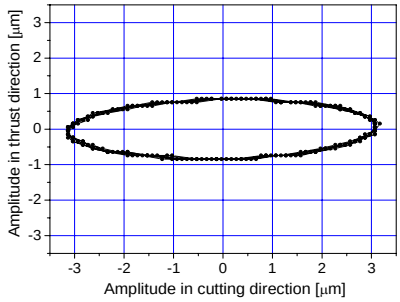
Fig. 4 Photograph of *UEVC* device

Fig. 4는 완성된 초음파 타원궤적 진동절삭(*UEVC*, ultrasonic elliptical vibration cutting) 가공기를 보여주고 있으며, 노우즈 반경이 $1\mu m$ 이내인 단결정 다이아몬드 공구와 초정밀 구동 xyz 스테이지, 제진대(vibration isolator) 등으로 구성되어 있다.

제안된 표면가공기로 황동(brass)과 알루미늄에 대해 타원궤적 진동을 적용하여 V홈(V-groove) 가공 시험을 수행하였다. 공구동력계로 절삭저항의 변화를 측정하였으며, 광학현미경을 이용하여 가공표면의 형상정밀도 변화를 관찰하였다.



(a) Amplitude variations



(b) Resultant elliptical motion

Fig. 5 Measured trajectory of cutting motion (f=500Hz, Input voltage=50V, Phage lag=90o, A_x=6.3μm, A_y=1.7μm)

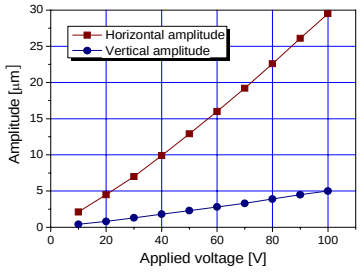
4. 시험 결과

4.1 타원궤적 진동 생성

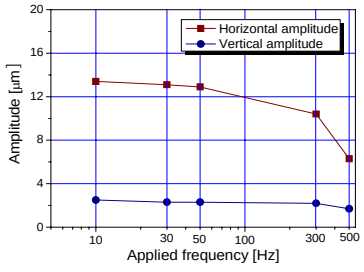
타원궤적 생성 절삭기구의 각 PZT에 위상 차이를 90^o 가지도록 정현파형 전압을 인가하였을 때, *x*, *y* 방향에서 발생하는 진동을 초정밀 레이저 변위센서로 측정하였으며 Fig. 5 에 그 결과를 나타내었다. *x*(수평, 절삭) 방향과 *y*(수직, 배분력) 방향의 변위를 측정한 결과 *x* 방향으로의 진폭이 더 큰 타원궤적을 얻을 수 있었다. Eq.(1)~(3)에 나타난 타원궤적의 기구학적 해석 결과[4]와 비교해보면 실제로 측정된 *y* 방향 변위가 훨씬 더 작았다. 그 이유는 PZT에 예압(preload)을 주기 위한 나사의 강성을 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 진동변위의 엄밀한 해석을 위해서는 기구학적 해석 뿐 만이 아니라 유한요소해석이 필요하다고 판단되며, 향후 이에 대한 연구를 진행할 예정이다.

입력 전압의 주파수와 입력전압의 크기, 그리고 두 PZT 간의 위상차이 등 입력 변수를 다양하게 변화시켜가면서 각 방향의 타원궤적 진폭의 변화를 관찰하였다. Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 입력 전압이 증가함에 따라 *x*, *y* 진폭은 모두 선형적으로 증가하였다. Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 입력(가진) 주파수가 상대적으로 저주파수일 때는 입력 주파수 변동에 상관없이 거의 일정한 진폭의 진동이 발생하였으나, 상대적으로 고주파수 영역일 때는 제작한 파워앰프(power amplifier)의 용량의 한계(8*Watt*)로 인해 압전소자의 진폭이 감소하였다. Fig. 6(c) 와 같이 위상차가 커짐에 따라 *x* 방향 진폭은 증가하고 *y* 방향 진폭은 감소하였다. 그러나 정확한 기구학적 해석에 의한 시뮬레이션 결과[4]에 의하면 평행한 두개의 PZT에서 발생하는 진동의 위상차가 0^o 가 되면 *x* 방향 진폭이 0이 되어야 하고, 위상차가 180^o 가 되면 *y* 방향 진폭

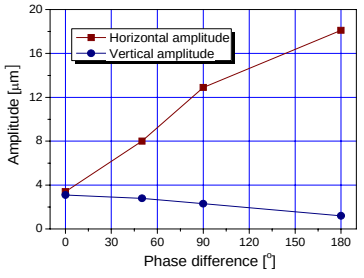
이 0 이 되어야 하는데, 그렇지 않은 이유는 전체 절삭기구부의 낮은 강성, 비대칭 구조, 그리고 가공오차 등에 기인한 것으로 추정된다.



(a) Variations of applied voltage (f =50Hz, ϕ=90°)



(b) Variations of applied frequency (V=50V, ϕ=90°)

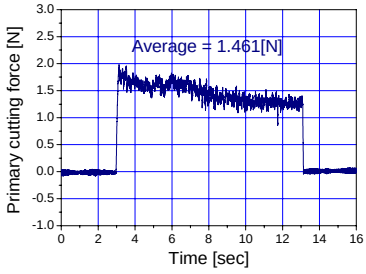


(c) Variations of phase difference(f =50Hz, V=50V)

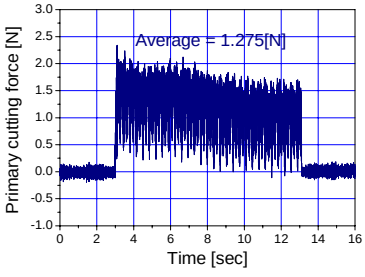
Fig. 6 Amplitude of elliptical motions according to input variables

4.2 저주파 타원궤적 진동절삭 시험 결과

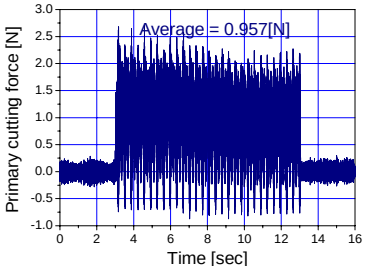
제작한 저주파 타원진동 절삭기구를 이용하여 황동을 재료로 하여 절삭깊이를 20μm, 이송속도를 1*mm/s* 로 V홈을 가공하였다. 이 때 두 개의 PZT에는 90° 위상차이 나는 100Hz 정현파형 진동을 인가하고, 입력 전압의 크기를 순차적으로 증가시켜 타원궤적의 진폭을 증가시켜가면서 가공하였으며, 이때 절삭력의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.



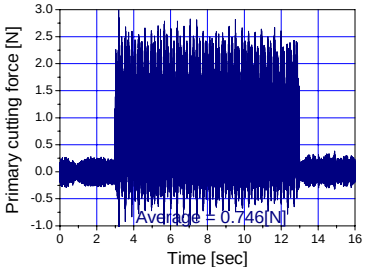
(a) No vibration



(b) A_x=6.9μm, A_y=1.2μm (30V)



(c) A_x=12.2μm, A_y=2.2μm (50V)



(d) A_x=18.5μm, A_y=3.2μm (70V)

Fig. 7 Cutting force variations according to the amplitude of vibration (f =100Hz, ϕ=90°, d=20 μm, feedrate=1*mm/s*, Brass)

위와 같은 가공 조건일 때 Eq.(8)로부터 공구와 공작물이 비접촉 되기 위한 조건을 구하면 Eq.(9)와 같이 된다.

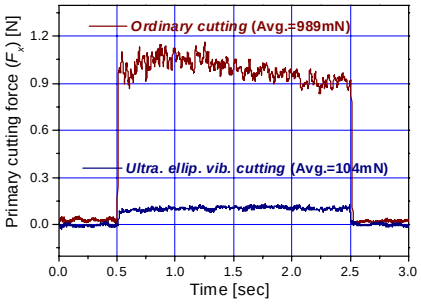
$$A_x > \frac{V_f}{\pi f} = \frac{1000}{\pi(100)} \approx 3.2\,[\mu m] \qquad (9)$$

즉, *x* 축 방향의 최대 진폭이 약 3.2μm 이상이 되면 절삭공구는 타원궤적 1 주기 동안 칩과 공작물로부터 접촉과 비접촉 과정을 거치게 된다. 선행 시험(Fig. 6) 결과, 절삭을 하지 않을 때 30V의 전압을 입력하였을 경우, *x* 축 방향 진폭이 약 6.9μm로 측정되었다. 그러나 이러한 조건으로 가공하였을 경우 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 주절삭력이 음수(-)가 되는 구간이 나타나지 않았으며, 그 이상의 진폭을 발생시키야 비로소 *x* 축 방향 주절삭력이 음(-)의 값을 가져 공구가 접촉과 비접촉을 반복함을 확인할 수 있었다. 이것은 절삭기구에서 생성하는 타원궤적의 진폭이 실제 절삭가공 시에는 진폭이 더 작게 발생한다는 것을 말해주는 것이며, 이는 제작한 절삭기구의 강성이 충분하지 않기 때문이라 판단된다.

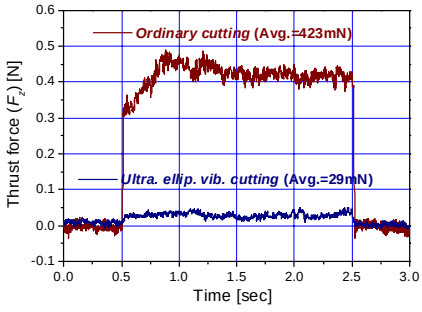
Fig. 7에서 절삭력의 변화를 살펴보면 타원궤적을 생성시키면서 절삭을 수행하는 경우 절입깊이가 변화하여 진동없이 가공하는 일반 절삭방법에 비하여 절삭력의 최대값은 더욱 커졌지만, 평균 절삭력은 감소하였음을 확인할 수 있다. Fig. 7(a)와 같이 일반 가공법으로 가공하였을 경우 평균 절삭력이 약 1.46*N*으로 측정된 것에 비하여 Fig. 7(d)와 같이 100Hz의 주파수로 *x* 방향으로 약 18.5μm, *y* 방향으로 약 3.2 μm의 진폭을 가지는 타원궤적 진동절삭을 수행하면 평균 절삭력이 약 0.75*N* 인 것으로 나타나 평균 절삭력이 약 50% 감소하였음을 확인할 수 있다.

4.3 초정밀 초음파 표면가공 결과

Fig. 1로부터 입력 가진 주파수를 더욱 증가시킬수록 칩 두께는 더욱 감소하게 되고, 따라서 절삭저항이 감소하는 정도는 더욱 증가할 것이라고 유추할 수 있다. Fig. 8은 Fig. 3(b)의 절삭기구를 사용하여 절삭공구에 약 60kHz의 초음파 진동을 가진하여 초음파 타원궤적 진동절삭(*UEVC*)으로 알루미늄을 V 홈 가공하였을 때, 주절삭력 및 배분력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 초음파 타원궤적 진동절삭을 수행함으로써 일반 절삭가공에 비하여 주절삭력은 약 90%, 배분력은 약 93% 감소되었다.



(a) Primary cutting force variations



(b) Thrust force variations

Fig. 8 Comparison of cutting force between *OC* and *UEVC* (f =60kHz, Al5052, *d*=30μm, *V*=5*mm/s*)

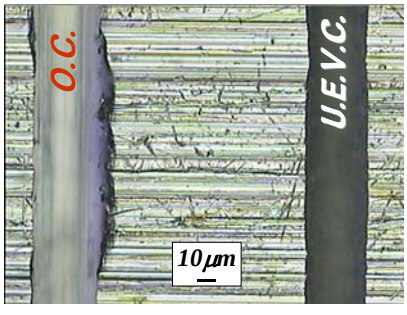


Fig. 9 Comparison of machined surface

Fig. 9는 이러한 가공의 결과로 나타난 가공면의 형상을 광학현미경으로 관찰한 사진을 나타내고 있다. 그

림에서 알 수 있는 바와 같이 일반가공으로 절삭하였을 경우, 가공 표면 자체의 표면거칠기는 우수하였으나, 버(side burr)가 발생하여 미세 가공면의 형상정밀도에 상당히 악영향을 끼쳤다. 반면에 초음파 타원궤적 진동절삭을 수행하였을 경우에는 주기적인 타원진동으로 인해 절삭공구의 흔적(cutter mark)이 가공표면에 남아서 표면거칠기는 다소 나쁜 것으로 나타났으나, 가공면의 측면 및 출구에서의 버(side/exit burr)가 발생하지 않아 미세형상 정밀도는 크게 향상되는 것으로 나타났다.

5. 결 론

한 쌍의 압전소자에 입력 주파수와 위상 차이, 입력 전압 등을 변화시켜가면서 다양한 형상의 타원궤적을 생성시킬 수 있는 기구를 제안하고, 단결정 다이아몬드 공구를 부착시켜 초음파로 타원궤적 진동절삭을 수행할 수 있는 초정밀 초음파 표면가공기를 개발하였다. 500Hz 이내의 저주파수로 선행 시험한 결과 미변형 절삭두께의 감소와 칩과 공구사이의 마찰력의 감소로 절삭저항이 감소함을 확인하였다. 입력주파수를 더욱 증가시켜 60kHz의 타원궤적 진동절삭을 수행하였을 경우 주절삭력과 배분력 모두 90% 이상 감소하였고 버 생성이 억제되어 가공면의 형상정밀도가 향상되었음을 확인하였다. 개발된 타원궤적 초음파 진동 표면가공기를 초정밀 미세가공에 응용한다면 이 부분에 대한 산업계의 높은 기대치를 충족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2004-042-D00010)

참고문헌

1. Shamoto, E. and Moriwaki, T., “Study on Elliptical Vibration Cutting,” *Annals of the CIRP*, Vol. 43, pp. 35-38, 1994.
2. Ma, C., Shamoto, E., Moriwaki, T. and Wang, L., “Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 1305-1310, 2004.
3. Moriwaki, T. and Shamoto, E., “Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting,” *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 31-34, 1995.
4. Loh, B. G. and Kim, G. D., “Micro Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting - (I) The Generation of a Elliptical Vibration Cutting Motion for Micro Ultrasonic Machining,” *Joutnal of KSPE*, Vol. 22, No. 12, pp. 190-197, 2005.
5. Kim, G. D., Loh, B. G. and Hwang, G. S., “Micro Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting - (II) Ultrasonic Micro V-grooving Using Elliptical Vibration Cutting,” *Joutnal of KSPE*, Vol. 22, No. 12, pp. 198-204, 2005.