

초정밀 미세가공을 위한 궤적 변화에 따른 타원 궤적 진동 절삭

김기대[#], 노병국^{*}

Elliptical Vibration Cutting with Variable Trajectory for Ultra-precision Micro-Machining

Gi Dae Kim[#] and Byoung Gook Loh^{*}

ABSTRACT

A cutting device capable of generating various shapes of the cyclic elliptical trajectory of a cutting tool was proposed and micro v-grooving experiments were performed to investigate the characteristics of elliptical vibration cutting (EVC). The proposed cutting device is comprised of a pair of parallel piezoelectric actuators with which harmonic voltages of varying phase difference and magnitude are supplied, creating various shapes of the elliptical tool path. The attributes of the elliptical locus involving the direction of the axis of an ellipse, the rotational direction and amplitudes of a trajectory were fine-tuned for stable operation of the EVC. The EVC characteristics performed with brass and copper revealed reduction in the cutting resistance and suppression of burr formation, resulting in the enhancement of form accuracy of machined micro-features. While the effect of the EVC increases with the increase of excitation frequency and the amplitude, it is found that a change in the cutting force decreases as the amplitude of an elliptical locus increases.

Key Words : Elliptical vibration cutting (타원진동 절삭), Micro v-grooving (미세 V-홈 가공), Excitation frequency (가진 주파수), Shape of ellipse (타원형상), Form accuracy (형상정밀도)

1. 서론

오늘날 초정밀 부품에 대한 수요와 미세 가공 기술의 중요성은 날로 증대되고 있다. 특히 PDP 용 격벽(barrier ribs), LCD 용 도광판(light guide plate), 프레넬 렌즈(Fresnel lens)용 금형 등 미세 홈(micro-groove)을 가진 부품을 정밀하게 가공하기 위해서는 홈의 형상 정밀도, 가공 표면의 거칠기, 가공면 주위의 버(burr) 생성 억제, 공구 수명 향상 등

을 만족시킬 수 있는 미세 홈 가공 기술이 필요하다.

타원 궤적 진동절삭(EVC, Elliptical vibration cutting)은 Moriwaki 와 Shamoto 가 최초로 제안한 가공법으로서 절삭 공구를 2 차원, 즉 절삭 방향과 칩 배출 방향 혹은 배분력 방향으로 가진시켜 결과적으로 공구에 타원 궤적을 생성시키면서 절삭 가공하는 방법을 말한다.¹⁻⁵ 이러한 가공을 적용시키면 절삭력이 감소되고, 형상 정밀도가 향상됨을

접수일: 2007 년 7 월 13 일; 게재승인일: 2007 년 9 월 27 일

[#] 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

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

^{*} 한성대학교 기계시스템공학과

확인하였다. 그러나 이들은 수직한 방향으로 배열된 압전소자(PZT) 액추에이터의 공진 특성을 이용하여 공구를 가진시켰기 때문에 가진 주파수가 공진 주파수로 고정되었고, 실제 절삭 기구 제작 시 진동에 방해가 되지 않는 노드 점(node point)의 위치를 정확히 찾기 어려운 점 등 몇 가지 한계를 가지고 있었다. Cerniway⁶, Negishi⁷, Brocato⁸, Kim 등⁹⁻¹¹은 한 쌍의 평행한 PZT 액추에이터를 이용하여 다양한 미세 가공 시험을 수행하였고, EVC 가정밀 가공 방법으로서 대안이 될 수 있음을 밝혔다. 그러나 현재까지 진행된 EVC에 관한 모든 연구는 고정된 가진 주파수를 사용하였고, 절삭 공구가 그리는 타원 궤적의 진폭과 형상을 변화시킬 수 없었기 때문에 가진 주파수 및 타원 궤적의 형상 변화에 따른 EVC 가공 특성을 설명하지는 못하였다.

본 연구에서는 한 쌍의 평행한 PZT를 절삭 공구에 부착하고 다양한 가진 주파수로 다양한 형태의 타원 궤적 진동을 생성시킬 수 있는 절삭 기구를 제안하였다. 가진 주파수와 입력 전압의 크기, 그리고 각 전압간의 위상 차이를 변화시켜가면서 절삭 날에 생성되는 타원 궤적의 형상이 어떻게 변화하는 지 관찰하였고, 가진 주파수와 타원 궤적 형상의 변화가 EVC 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 황동과 구리를 재료로 하여 가진 주파수와 타원 궤적의 진폭 및 형상을 변화시켜가면서 미세 V 홈을 가공할 때, 절삭력, 가공 표면의 거칠기, 버 생성, 형상 정밀도 등 절삭 특성이 어떻게 변화하는 지를 관찰하였다.

2. EVC 절삭 기구의 구성

2.1 EVC 특성

Fig. 1은 타원 궤적의 진폭에 따른 EVC 공정의 특성을 나타내고 있다. Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 궤적의 진폭이 일반 절삭(CC, conventional cutting)에서의 미변형 칩두께(undeformed chip thickness)보다 클 경우에는 상향밀링(up milling) 공정과 유사하게 미변형 칩두께가 변화하며 특히 취성 재료를 가공할 경우 불연속형 칩이 발생하게 된다. 이 때 타원 진동 궤적의 주파수가 증가할수록 미변형 칩두께는 더욱 감소하게 되고 이에 따라 절삭력도 감소하게 된다.

그러나 PZT와 같은 액추에이터로 생성할 수

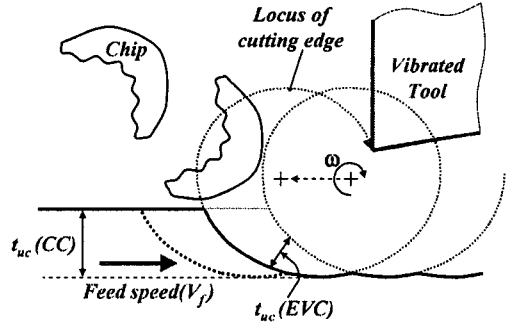


Fig. 1(a) EVC process with large amplitude of elliptical locus (brittle material)

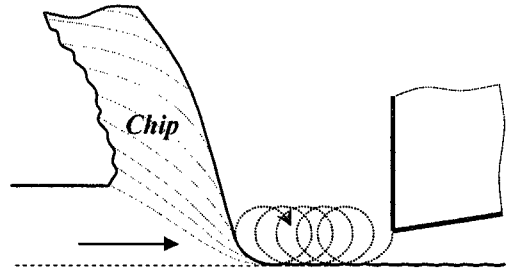


Fig. 1(b) EVC process with small amplitude of elliptical locus

있는 고주파수 진동 변위의 진폭은 한계가 있기 때문에 Fig. 1(b)와 같이 타원 궤적의 진폭이 일반 절삭에서의 미변형 칩두께보다 작은 경우가 많다. 일반 절삭의 경우 칩과 공구 경사면 사이, 즉 부변형영역(secondary deformation zone)에서는 마찰 저항이 작용하여 2차 전단 변형이 발생하지만, EVC에서는 공구의 운동이 칩의 배출 방향으로 향하고 공구 경사면에서의 마찰력은 절삭을 도와주는 작용을 하게 되어 절삭 저항이 매우 감소하게 된다. 뿐만 아니라 이와 같은 공구의 궤적 운동으로 말미암아 칩 내에서 공구 경사면과 접촉하는 부분의 체적흐름률(volume flow rate)은 반대편에 비하여 더욱 증가하기 때문에 EVC에서의 칩의 곡률은 일반 절삭에 비하여 증가하게 된다.⁹ 마찰력의 감소와 공구의 타원궤적 운동으로 인해 전단 각이 증가하게 되고 이는 절삭력의 감소로 이어진다.

2.2 EVC 생성 기구

Fig. 2는 본 연구에서 제안하고 있는 타원 궤

적의 고주파 진동을 발생시키는 PZT 절삭 기구의 구조를 나타내고 있다. 위상과 진폭을 조절할 수 있는 2 채널 함수 발생기로부터 위상 차이를 가지는 두 개의 고주파 정현파형 전압을 발생시키고 이 신호를 고주파 동력증폭기(high frequency power amplifier)를 통해 증폭한 후, 평행하게 배열된 두 개의 PZT 에 공급하면 각 PZT 에서는 인장 또는 압축 변위가 발생하고 이들 변위가 기구학적으로 합성되어 절삭 날(cutting edge)에는 타원 궤적이 생성된다.

PZT를 각각 6 개씩 쌓아서 PZT 에서 발생하는 인장 및 압축 변위를 증폭시켰고, 공구 홀더와 접촉하는 PZT 스택(stack)의 맨 위층에는 반경이 15mm 인 구(sphere)형의 스테인리스 강을 부착하여 PZT 스택과 공구 홀더 사이에 점 접촉이 이루어지도록 함으로써 하나의 PZT 에서 발생하는 인장 및 압축 변형이 다른 PZT 에서 전단 변형을 유발시키지 않도록 하였다. 절삭 공구와 PZT 는 나사로 결합하였으며 이를 이용하여 PZT 에 예압(preload)을 걸어 주었다.

PZT 에 공급하는 각 전압의 진폭과 위상 차이를 변화시키면 타원 궤적 형상을 변화시킬 수 있다.¹⁰ 즉, 두 개의 평행한 PZT 에 공급하는 각각의 전압의 크기를 변화시키면 타원 궤적의 축의 각도를 조정할 수 있고, PZT1 에 대한 PZT2 의 위상 차이(ϕ)를 변화시키면 타원 궤적의 형상, 즉 타원의 장단경 비를 조정할 수 있다. 본 연구에서는 공급 전압의 크기와 위상 차이를 변화시킴으로써

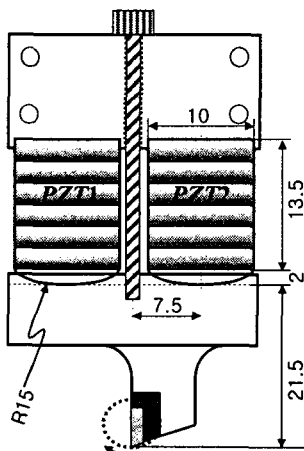


Fig. 2 Cutting structure for EVC

다양한 경로를 가지는 타원 궤적 진동을 발생시켰다.

3. 공구 궤적의 측정 및 궤적 조정 결과

Fig. 3 은 절삭 공구에서 생성되는 절삭 방향 및 배분력 방향의 진동 변위를 측정함으로써 절삭 날의 타원 궤적을 측정하기 위한 장치를 보여주고 있다. 본 실험에서는 분해능이 30nm 이하이고, 주파수대역폭(bandwidth) 100kHz 인 광 화이버 변위 센서(optical fiber displacement sensor) 2 개를 수직하게 배열하여 각 방향의 변위를 측정하였다.

Fig. 4(a)와 같이 공급 전압(V_{pp1} , V_{pp2})이 모두 10V(0V~10V) 이고 가진 주파수가 16kHz 이며 위상 차이가 90° 인 정현파형 전압을 두 개의 PZT 에 공급하였을 때, 절삭 방향 및 배분력 방향의 진동 변위를 측정된 결과를 Fig. 4(b) 에 나타내었다. 측정 결과 절삭 방향으로 약 1.4 μm 및 배분력 방향으로 약 1 μm 의 진동 변위가 측정되었으며, 두 방향의 진동 변위 사이에는 일정한 위상 차가 존재하였다. 이들 두 방향의 변위가 합성되어 절삭 날에서는 Fig. 4(c) 에서와 같이 수평 방향으로부터 약 -25° 기울어진 축을 가지는 타원 궤적을 따라 반시계 방향으로 회전하는 운동이 생성되었다. 공구의 이송 방향을 고려한다면 절삭 날은 시계 방향으로 회전하여야만 EVC 의 효과를 나타낼 수 있으며, 타원 축의 방향도 이송 방향과 평행한 것이 바람직하다. 따라서 공급 전압과 위상 차이를 변화시켜가면서 궤적의 경로를 조정하여 Fig. 5 와 같이 다양한 형상의 타원 궤적을 얻었다.

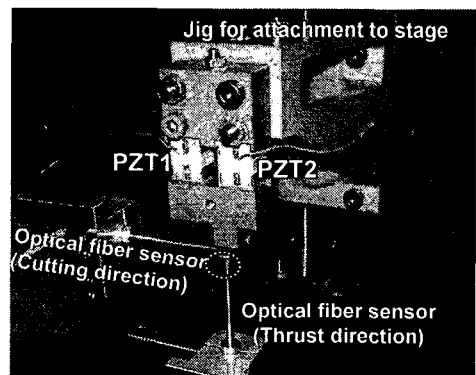


Fig. 3 Measurement of elliptical locus by optical fiber displacement sensors

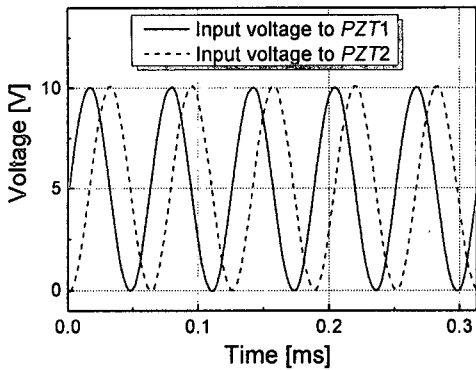


Fig. 4(a) Input voltage to PZTs ($f = 16 \text{ kHz}$, $V_{pp1} = V_{pp2} = 10 \text{ V}$, $\phi = 90^\circ$)

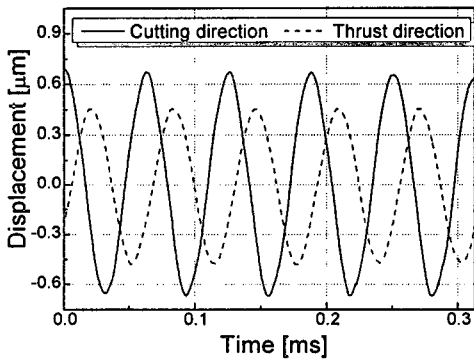


Fig. 4(b) Variations of displacement in cutting and thrust directions

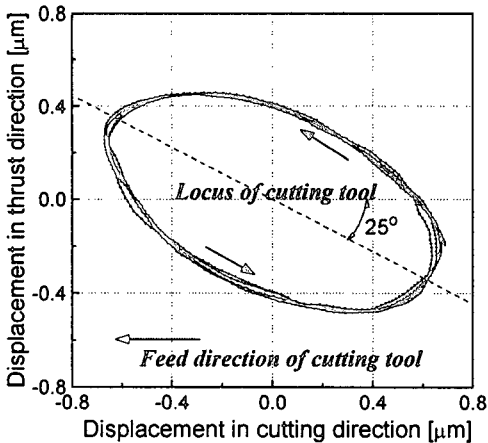


Fig. 4(c) Trajectory of cutting tool

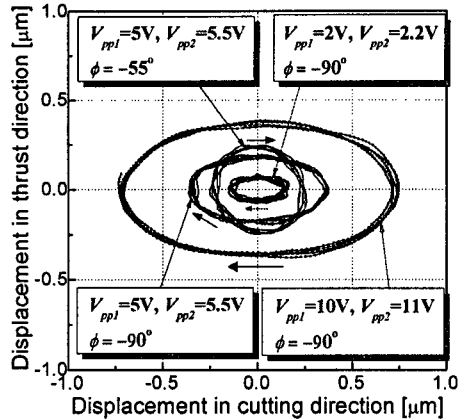


Fig. 5 Modification of trajectory of cutting tool by adjustment of input voltages and phase difference

4. EVC 시험 및 결과

4.1 가공 시스템 구성

Fig. 6 는 초정밀 미세 가공을 위한 타원 궤적 진동 가공 시스템을 보여주고 있다. 가진 주파수와 타원 궤적의 형상에 따른 EVC 가공 시스템의 특성을 살펴보기 위하여 미세 V-홈 가공을 수행하고 일반 절삭 방법과 비교하였다. 외부의 진동을 차단해주는 공압 제진대 위에 정밀 xyz 스테이지를 설치하였고, 스테이지의 z 축 플랫폼 폼 위에 지그 및 타원 궤적으로 진동하는 절삭 기구를 부착하였다. 시편은 황동(C2801)과 구리(C1100)를 사용하였으며, 3 축 공구동력계 (9257B, Kistler)를 이용하여 가공 중 절삭력의 변화를 측정하였다. 시

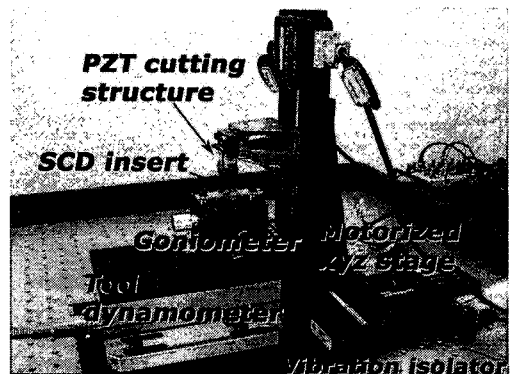


Fig. 6 Photograph of EVC machine

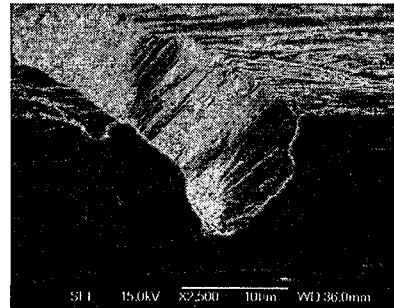
편과 공구동력계 사이에는 시편의 각도를 조절할 수 있는 2 축 고니오미터(goniometer)를 설치하였으며, 가공 전 다이얼 인디케이터(dial indicator)를 이용하여 시편의 수평 상태를 정확하게 조절하였다. 정밀 미세 v 홈 가공을 위해 단결정 다이아몬드 공구를 사용하였으며, 노우즈 반경이 약 $1\mu\text{m}$, 선단각 80° , 경사각 0° , 그리고 여유각을 10° 로 하여 가공 시험을 진행하였다.

4.2 EVC 시험 및 결과

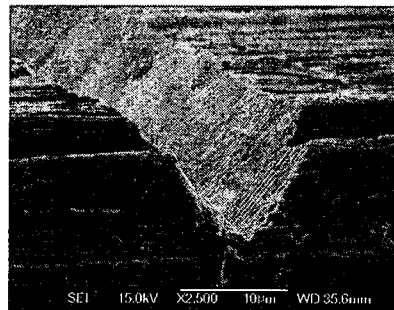
Fig. 7 은 절삭 기구 내의 PZT 에 $5V(0V\sim 5V)$ 의 정현파 전압을 공급하고, 이송속도 1 mm/s , 절삭깊이 $20\mu\text{m}$ 의 조건으로 황동(C2801) 시편을 가공하였을 때, 절삭면의 거칠기와 이탈면의 형상 정밀도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 진동이 없는 일반적인 방법으로 가공할 때에는 이탈면에 버(exit burr)가 생성되었고, 1 kHz 로 가진하였을 경우에는 공구의 주기적인 저주파 진동으로 가공 표면에 궤적의 흔적이 남아 가공 표면이 거칠었으며 여전히 이탈면에 버가 존재한다. Fig. 7(c) 에서와 같이 18 kHz 로 가진하였을 경우 가공면에 공구의 주기적인 궤적이 미세하게 존재하나 고주파로 인해 표면 거칠기에 주는 영향은 미미하였으며, 무엇보다 버가 거의 사라졌음을 관찰할 수 있다. 가진 주파수가 증가할수록 타원 궤적 진동 절삭의 효과가 극대화 되어 표면 거칠기 및 형상 정밀도가 향상될 것으로 기대할 수 있다.

타원 궤적의 진폭에 따른 절삭성의 변화를 살펴보았다. 가진 주파수가 16 kHz 인 정현파 신호를 전압 크기와 위상 차이를 조정하여 절삭 공구에 절삭 방향과 평행한 축을 가지는 타원 궤적 진동을 생성시키고, 이송속도 5 mm/s , 절삭깊이 $25\mu\text{m}$ 의 조건으로 구리(C1100)를 EVC 가공하였다. Fig. 8 은 타원 궤적의 절삭 방향 진폭(A_x)과 배분력 방향 진폭(A_y)의 변화에 따른 주절삭력의 변화를 나타낸 것이다. 진동이 없는 일반 절삭의 경우에는 약 1.65 N 의 주절삭력이 걸렸으나, 절삭 방향 및 배분력 방향으로 궤적의 진폭이 증가할수록 주절삭력은 급격하게 감소되었으며, 절삭 방향 및 배분력 방향으로 각각 $0.76\mu\text{m}$, $0.4\mu\text{m}$ 진폭의 진동을 발생시키면 주절삭력이 약 0.16 N 정도로 일반 절삭에 비하여 절삭력이 90% 이상 감소하는 것으로 나타났다.

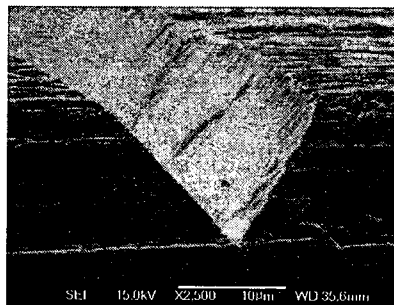
Fig. 9 은 위 실험으로 가공된 V-groove 가공면



(a) Conventional cutting



(b) EVC ($f=1\text{ kHz}$)



(c) EVC ($f=18\text{ kHz}$)

Fig. 7 Roughness of machined surface and form accuracy of exit v-groove according to excitation frequency (material of workpiece : C2801, $V_f=1\text{ mm/s}$, $d=20\mu\text{m}$, $V_{pp}=5V$)

의 이탈부 형상을 SEM 으로 촬영한 사진이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 공급 전압을 증가시켜 타원 진동 궤적의 진폭이 증가할수록 측면 버(side burr) 및 이탈면 버(exit burr) 생성이 억제되어 미세 V 홈의 형상 정밀도는 점차 향상되고 있음을 확인 할 수 있다.

타원 궤적의 진폭 증가에 따른 절삭 저항의 변

화 경향을 보다 자세히 살펴보기 위하여 가진 주파수를 18 kHz 로 고정하고 동력 증폭기의 게인 값을 조정하여 공급 전압을 0.1V 에서 10V 까지 증가시켜 절삭 방향의 진폭이 0.05 μm 에서 1.4 μm 까지 다양한 크기를 가진 타원 궤적을 생성시켰다 생성된 타원 궤적으로 황동 시편을 EVC 가공하였으며, 타원 궤적의 진폭 증가에 따른 주절삭력의 변화를 측정 한 결과를 Fig. 10 에 나타내었다.

가공 시험 결과 작은 진폭이라 할 지라도 절삭 공구를 2 차원으로 고주파 가진시키면 절삭력(절삭저항)이 감소함을 확인하였다. 타원 궤적의 진폭이 점차 증가함에 따라 절삭력은 큰 폭으로 감소하였지만, 궤적의 진폭이 어느 값 이상이 되면 타원 궤적의 진폭이 증가하더라도 절삭력의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 10 에 나타난 조건일 경우에는 공급 전압의 크기가 1.5V 가 되

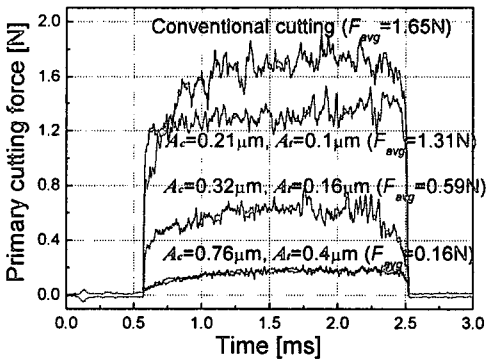
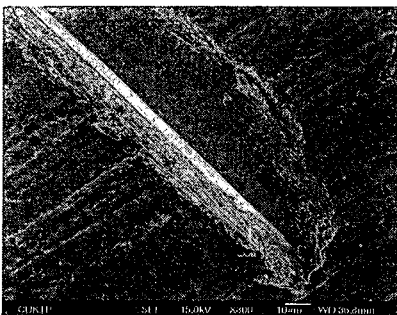
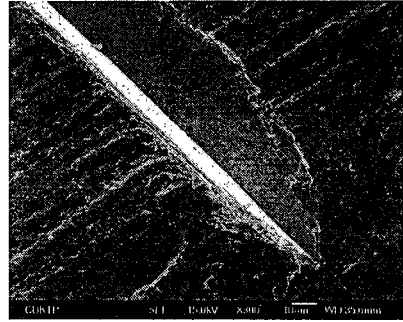


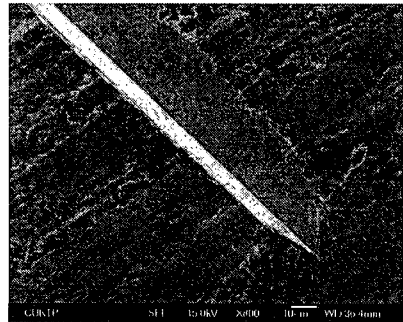
Fig. 8 Primary cutting force variations according to the amplitude of elliptical locus of cutting tool (material of workpiece : C1100, $f = 16 \text{ kHz}$, $V_f = 5 \text{ mm/s}$, $d = 25 \mu\text{m}$)



(a) Conventional cutting



(b) $A_e = 0.21 \mu\text{m}$, $A_r = 0.1 \mu\text{m}$



(c) $A_e = 0.76 \mu\text{m}$, $A_r = 0.4 \mu\text{m}$

Fig. 9 Burr formation and form accuracy of exit v-groove according to the amplitude of elliptical locus (material of workpiece : C1100, $f = 16 \text{ kHz}$, $V_f = 5 \text{ mm/s}$, $d = 25 \mu\text{m}$)

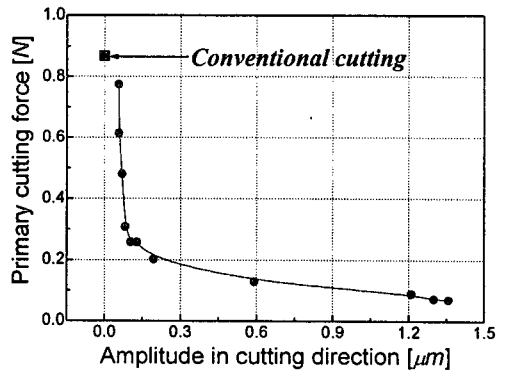


Fig. 10 Primary cutting force variations according to the amplitude of elliptical locus (material of workpiece : C2801, $f = 18 \text{ kHz}$)

어 절삭 방향으로의 타원 궤적 진폭이 약 $0.2\mu\text{m}$ 이 될 때까지 타원 궤적의 진폭이 증가함에 따라 절삭력이 크게 감소하지만, 이후 궤적 진폭이 증가하더라도 절삭력의 변화는 크지 않음을 확인할 수 있다.

5. 결론

한 쌍의 평행한 PZT 에 주파수, 진폭 및 위상 차이를 변화시켜가면서 정편파 전압을 공급하여 절삭 공구에 다양한 형태의 타원 궤적 진동을 생성시킬 수 있는 절삭 기구를 제안하였다. 두 개의 PZT 에 공급하는 전압의 크기와 위상 차이를 조정함으로써 타원 궤적의 진폭과 타원의 축 방향, 그리고 궤적의 회전 방향을 조정할 수 있었다. 황동과 구리 시편을 대상으로 미세 V-홈 가공 시험을 수행한 결과, 가진 주파수를 증가시키면 표면 거칠기가 향상되고 버의 생성이 억제되어 가공 정밀도가 향상되었다. 동일한 가진 주파수에서 타원 궤적의 진폭을 증가시키면 절삭 저항이 감소되어 가공 정밀도가 향상되었으나, 궤적의 진폭이 일정 값 이상으로 증가하면 절삭력의 크기 변화는 감소하는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2006 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00013).

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. 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, Issues 12-13, pp. 1305-1310, 2004.
4. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 1, pp. 441-444, 1999.
5. Shamoto, E., Suzuki, N., Moriwaki, T. and Naoi, Y., "Development of Ultrasonic Elliptical Vibration Controller for Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 1, pp. 327-330, 2002.
6. Cerniway, M. A., "Elliptical Diamond Milling: Kinematics, Force, and Tool Wear," M.S. thesis, North Carolina State University, 2001.
7. Negishi, N., "Elliptical Vibration Assisted Machining with Single Crystal Diamond Tools," M.S. thesis, North Carolina State University, 2003.
8. Brocato, B. C., "Micromachining using Elliptical Vibration Assisted Machining (EVAM)," M.S. thesis, North Carolina State University, 2005.
9. Kim, G. D. and Loh, B. G., "Characteristics of Chip Formation in Micro V-grooving Using Elliptical Vibration Cutting," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 17, No. 8, pp. 1458-1466, 2007.
10. 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," Journal of KSPE, Vol. 22, No. 12, pp. 190-197, 2005.
11. Kim, G. D., Loh, B. G. and Hwang, G. S., "Micro Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting - (II) Ultrasonic Micro V-grooving Using Elliptical Vibration Cutting," Journal of KSPE, Vol. 22, No. 12, pp. 198-204, 2005.