

본 연구는 97년도 교육부 학술연구조성비 ME96-E-15에 의하여 연구되었음

진동절삭을 이용한 고정도 미세가공

손성민*, 임한석**, 안중환***

High-precision Micro-machining using Vibration Cutting

Seong Min Son*, Han Seok Lim**, Jung Hwan Ahn***

ABSTRACT

This paper presents 2-dimensional vibration cutting increases dynamic stiffness of tool support and improves the quality of machined surface in micro-machining. 2-dimensional vibration cutting is generated by two piezo actuators arranged orthogonally. A sine-type voltage is input to one actuator and a phase-shifted sine-type voltage is input to the other. Then the vibration device actuates the tool in a 2-D elliptical motion with pulsed cutting force. It is a characteristic of 2-D vibration cutting that some negative thrust force occurs as the direction of friction on a tool rake surface is reversed. It helps not only chip flow smoothly and continuously but also cutting force be reduced. The quality of machined surface by 2-D vibration cutting depends on such parameters as vibration amplitude, frequency, cutting speed, depth of cut, etc. Compared to conventional cutting through tool path simulation and experiments under several conditions, the 2-D vibration cutting is verified to bring forth a great decrease of cutting forces, much better surface roughness and moreover much less burr.

Key Words : 2-Dimensional Vibration Cutting(2차원 진동절삭), Piezo Actuator(압전소자), Elliptical Locus(타원 궤적), High-precision micro-machining(고정도 미세가공)

1. 서론

초정밀 가공 기술은 첨단 전자부품, 정밀 거울 및 렌즈 등의 광학부품 실리콘 웨이퍼와 같은 반도체 부품의 제조 기술을 중심으로 발달해 왔다. 최근에는 정보기기의 발달과 각종 기기의 소형화, 고집적화에 따라 초정밀 가공이 적용되는 형상 혹은 가공물 그 자체의 마이크로 화가 진행되고 있다.

일반적으로 마이크로 부품의 가공 및 마이크로 시스템의 제작에는 반도체 공정기술을 응용한 방법이 주로 연구되어 왔으나, 미세 부품의 치수가 조금 큰 경우에는 가공하기 힘들고 제작된 부품의

구조가 평면적으로 한정되어 3차원인 형상부품의 가공에는 적용이 어렵다^[1].

이에 반해 공구에 의한 절삭가공은 임의의 3차원 형상을 제작하는 것이 가능하고, 중~소의 분해능으로 보다 큰 가공속도와 다양한 피삭재를 가공할 수 있다. 하지만 치수효과에 의한 절삭력 증가, 재료 결정립계(grain boundary)의 영향으로 소성변형과 재료의 국부적 변형이나 탈락 등을 유발할 수 있으며, 이로 인하여 버(burr)의 발생, 가공형상의 변형에 의한 형상품위의 저하를 가져온다. 절삭기구의 관점에서 이러한 문제점을 고려해보면 가공시의 절삭력, 마찰, 경사각들이 요인으로 작용하게 된

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소

*** 부산대학교 기계공학부

다^[2]. 또한, 정밀가공기 개발의 관점에서 보면 가공기는 소재, 공구, 환경 등의 기계 외적인 요소와 부품 및 요소기술 등의 기계 내적인 것으로 이루어지는데 고정도를 위해 정·동강성의 고강성화와 큰 동력을 내기위한 고동력화를 추구하게 되어 비용의 증가를 불가피하게 한다.

이러한 문제에 대응하여 공구에 규칙적인 진동수와 미소진폭을 주어 절삭력이 공작물에 펄스상의 파형으로 가해져 마찰력과 절삭력의 감소, 절삭열 발생의 억제를 가능하게 하는 것으로 알려져 있다 [3], [4], [5].

본 논문에서는 미세 평면형상가공에서 진동절삭을 이용함으로써 기계의 강성을 높이는 효과를 가져와서 일반절삭경우보다 채터와 버 생성을 억제하고 가공면의 품질을 향상시킬 수 있음을 검증하고자 한다. 진동기구로는 두 개의 압전소자를 직교로 배치하고 2차원의 진동을 공구에 가하는 타원궤적의 진동절삭 방법을 활용하였다^[5].

2. 2차원 진동절삭의 메카니즘

1차원 진동절삭기구에서는 고주파와 대진폭을 얻기 위해 혼(horn)이 주로 이용되었고, 이것은 절삭력 감소로 인한 효과를 얻는데 상당히 유효하였다. 그러나 이 형태는 주로 선삭에 이용되었고 미세한 3차원 형상을 가공하는 데는 적합하지 않다. 이에 반해 2차원의 타원진동절삭은 기존의 1차원 진동절삭에서 얻을 수 있는 절삭력 감소 및 가공면의 향상 효과 등을 더욱 증대시킴과 더불어 2차원이기 때문에 얻을 수 있는 특유의 이점도 갖게 된다.

공구가 진폭 A, 주파수 f, 위상차 ϕ 로 진동하고 공작물이 v의 속도로 이송한다면 공구 궤적은 식 (1)로 표현되고, 이것은 그림 1의 궤적과 같다.

$$\begin{aligned} X &= A \sin(ft + \phi) + vt \\ Y &= A \sin(ff) \end{aligned} \quad (1)$$

공구가 타원 궤적을 따라 움직이기 때문에 구간 C_I에서는 공작물을 절삭하며 깊이방향으로 들어가므로 일반절삭과 같은 (+)의 배분력이 되지만 다시 되돌아 나오는 구간 C_{II}에서는 공구의 속도가 절삭 칩의 유출속도보다 크게 되어 마찰력의 방향이 일반절삭과 반대(-)값의 배분력이 되므로 '공구경사

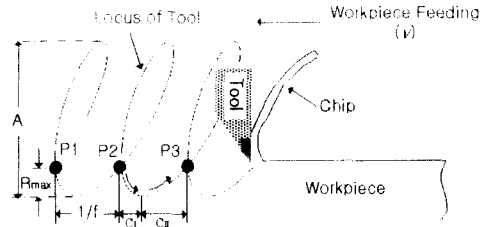


Fig. 1 2-D Vibration Cutting

면 마찰력의 역이용'이 가능하게 된다. 이로 인하여 전단각이 커져 전단면적이 감소하게 되므로 진동절삭의 간헐적 절삭과 더불어 절삭저항이 줄어드는 원인이 되고, 절삭저항의 감소는 가공중에 발생하는 소성변형영역을 감소시켜 버의 발생을 억제하는 효과를 기대할 수 있게 한다. 또, 역전된 마찰력이 칩의 배출을 유도할 뿐만 아니라 공기에 의한 윤활 역할도 하게 된다.

그림 1의 P1, P2, P3는 이론적인 최대 거칠기를 결정하는 점이 되는데, 가공면의 최대거칠기(R_{max})는 이들 변수는 식(1)의 A, f, φ, v 간의 조합에 의해 변화한다. 여기서는 X축과 Y축의 진폭을 동일하게 한다. 위상차는 궤적의 형태와 공구의 운동방향에 영향을 주는데, 위상차가 고정되어진 임의 조건하에서 결정되는 이론적인 최대거칠기는 주파수가 증가하면 P2와 P3의 간격이 좁아져 작아지게 되고, 절삭속도가 증가하면 P2, P3의 간격이 넓어져 커지게 된다. 또 진폭이 증가하게 되면 P2, P3의 간격에는 변화가 없으나 최대거칠기점이 낮아지게 된다. 이것은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$R_{max} \propto \frac{1}{A}, \frac{1}{f}, v \quad (2)$$

이상적으로는 진폭을 크게, 절삭속도를 느리게, 주파수를 무한정 높이는 것이 가공물의 정도를 향상시키는데 도움이 되지만 가공의 효율성 문제와 실제의 진동기구가 재료의 특성과 물리적 형상에 의해 고유주파수와 진폭이 정해지는 점 때문에 진폭과 주파수에 따라 이송속도가 제한될 수밖에 없다.

3. 타원진동절삭 실험장치와 가공조건

제작한 2차원 진동절삭 실험장치의 요약도는 그림 2와 같다. 공구에 2차원의 타원 진동을 부가

하기 위해서 먼저 함수발생기를 이용하여 sine파를 발생시키고 이 신호를 2상발전기(two Phase Signal Generator)에 입력한다. 2상 발전기는 입력된 신호를 ϕ 의 위상차를 가진 두 개의 신호로 만들어 출력한다. 이 신호에 의해 압전소자가 동작할 수 있도록 하기 위해서는 높은 전압의 신호로 바꾸어주어야 하기 때문에 앰프를 통해 100배 증폭시킨다. 그러나 압전소자가 대용량의 콘덴서 역할을 하기 때문에 이 신호를 그대로 입력시키면 신호의 하강이 느려서 원하는 진동을 얻지 못하므로 전류부스터를 연결하여 입력신호의 빠른 추종을 이루도록 하였다. 이렇게 하여 압전소자는 신호에 따라 팽창과 수축을 반복함으로써 공구가 일정한 주기로 진동할 수 있게 된다. 또 기구적으로는 일정한 주기의 2차원 진동형상을 만들기 위하여 압전소자를 서로 직각으로 배치하였으며 두 소자의 진동에 의한 상호 간섭을 줄이기 위하여 십자형태의 홈을 만들어 두었다.

이 진동기구와 일반절삭기구의 강성을 실험적으로 구한 결과를 표1에 나타낸다. 정강성의 경우는 주분력 방향과 배분력 방향 모두 일반절삭기구가 진동절삭기구보다 크게 나타나지만 동강성에서는 일반절삭기구의 강성이 두 방향에서 모두 큰 폭으로 작아지는 반면에 진동절삭기구에서는 기계Z축의 지지를 받고 있는 주분력 방향의 동강성은 크게 확대되고, 지지가 없는 배분력 방향은 강성이

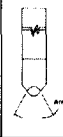
감소되지만 일반절삭기구에서의 보다는 감소의 폭이 작다. Y축의 경우도 공구 반대쪽을 보강한다면, 보다 큰 동강성의 향상이 예상된다. 따라서 진동절삭기구를 이용하면 고강성의 효과 때문에 보다 고 정도의 가공물을 기대할 수 있다.

본 연구에서 진동절삭기구는 두 개의 압전소자가 $\pi/4$ 의 위상차를 갖도록 설정하여 2차원의 타원 궤적을 따라 움직이게 하였고 주파수를 1kHz로 하고, 진폭을 $5\mu\text{m}$ (식에서는 $\pm 2.5\mu\text{m}$)로 하여 최대이송속도는 4mm/sec로 제한된다. 절삭가공실험에서는 Arc 180° (공구 정면에서 보았을 때, 날끝의 각이 180°)와 Arc 90° 인 다이아몬드 공구를 이용하고, 공작물은 7-3황동을 사용하였으며, 절삭깊이를 1~5 μm 로, 공작물 이송속도를 0.5~4mm/sec로 하여 가공실험 하였다. 이를 정리하면 표 2과 같다.

Table 1. Stiffness of the Tool Support for Conventional Cutting and Vibration Cutting :
Unit (N/ μm)

	Conventional Cutting		Vibration Cutting	
	X_axis	Y_axis	X_axis	Y_axis
Static Stiffness	11.93	116.74	9.06	5.77
Dynamic Stiffness	1.43	4.44	21.10	1.53

Table 2. Machining Conditions in 2D Vibration Cutting

Tool	Diamond Tool		Arc 180° Arc 90°
Workpiece	Brass(7-3)		
Cutting Condition	Depth of Cut (t_c)	1, 1.5, 2, 3, 4, 5 [μm]	
	Feed Rate (v)	0.5, 1, 2, 3, 4 [mm/sec]	
Vibration Condition	Vibration Type	Elliptical Vibration	
	Frequency (f)	1kHz	
	Amplitude (A)	5 μm	

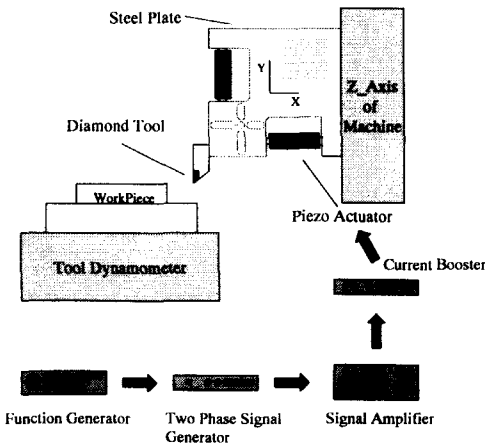


Fig. 2 Schematic Diagram of an Experimental Apparatus for 2D Vibration Cutting

4. 실험결과

4.1 절삭력

2차원 진동절삭에서의 절삭력을 검토하기 위하여 표 1의 조건중 Arc 180° 인 공구를 사용하고, 절삭속도 1mm/sec로 일정하게 하여 2차원 진동절삭과 일반절삭을 비교실험 하였다. 절삭속도가 1mm/sec로 비교적 느리기 때문에 절삭이 불안정한 1, 1.5 μ m에서의 경우를 제외하면 칩의 형태는 다르지만 일반절삭이나 2차원 진동절삭에서나 모두 연속적인 칩의 형태를 보였다. 두 방법의 절삭에 있어서 절삭력의 형태는 그림 3과 같다.

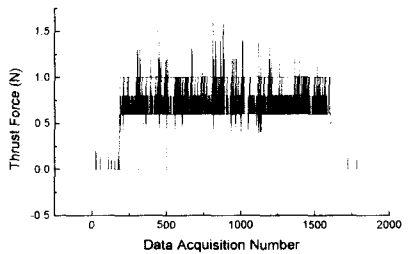
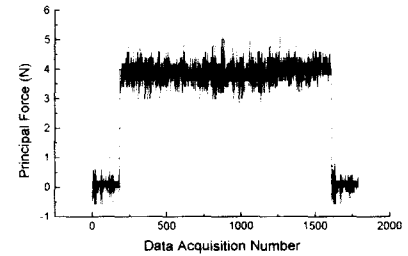
그림 3의 (a)는 일반절삭의 주분력과 배분력이 다. 가공이 시작되면서부터 일정한 값의 절삭력을 가지지만 그림 3의 (b)에서 보이는 진동절삭에서는 주기성을 가진 절삭력 파형을 보인다. 구간 C_I은 공구가 공작물을 절삭해 들어가서 공구궤적의 최저점까지 진행될 때이며 구간 C_{II}는 공구가 최저점을 지나 상승할 때이다. 특히 배분력의 파형에서는

일반절삭과 반대방향의 배분력을 가지는 (-)구간이 존재함을 확인할 수 있다. 이상적인 경우, 2차원 진동절삭에서는 절삭이 행하여지지 않는 구간에서는 절삭력이 0이 되는 구간이 있어야 한다. 그러나 실제로는 이송계의 진동 때문에 0이 아닌 값이 측정되는 것으로 추측된다.

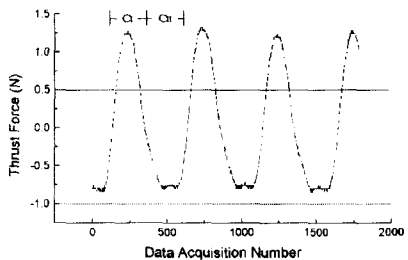
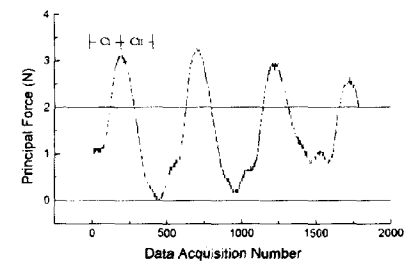
일반적인 절삭의 경우 주분력은 절삭깊이를 증가시키에 따라 1.4N에서 5.7N까지 증가하고, 배분력은 0.3N에서 0.7N까지 증가한다. 이와 비교하여 2차원 진동절삭의 경우에는 주분력이 0.7N에서 2.2N으로 증가하여 일반적인 절삭의 경우에 비해 1/2이하의 절삭력이 요구되고, 배분력은 (-)값의 존재로 인해 거의 0에서 머문다. 이는 절삭칩의 배출을 용이하게 한다는 것 뿐만 아니라 진동절삭이 절삭열의 억제와 공구마모에 영향을 주는 절삭에너지의 감소효과를 기대할 수 있는 근거가 된다. 이를 정리하면 그림 4와 같이 된다.

4.2 표면거칠기

진동절삭의 표면거칠기에 대한 영향을 조사하기 위하여 Arc 180° 공구, 절삭속도 1mm/sec인 조건하에서 절삭깊이를 변화시키는 가공실험과, 동일 공구에 대해 절삭깊이를 2 μ m로 일정하게 하여 절삭속도를 변화시키는 가공실험을 하였다. 각 실험을 통하여 얻어진 표면거칠기 측정 결과는 그림 5, 그



(a) Conventional Cutting



(b) 2D Vibration Cutting

Fig. 3 Measured Cutting Forces; Principal Force, Thrust Force

림 6과 같다.

그림 5에서 절삭깊이가 2 μm 미만에서는 일반절삭의 경우 변화가 심하다. 이것은 공구의 날모서리 반경(edge radius)과 이송기구의 상하 진동에 비해 절삭깊이가 너무 작아 정상적인 절삭이 이루어지고 있지 않기 때문으로 생각된다. 그러나 절삭깊이가 2 μm 를 넘어서면서부터는 2차원 진동절삭과 거의 같은 표면거칠기를 보인다.

절삭깊이를 2 μm 으로 일정하게 하고 절삭속도를 0.5~4mm/sec로 변화시키면서 가공한 결과는 일반절삭의 경우에 있어서는 절삭속도가 증가함에 따라 표면거칠기는 급격히 악화되지만 진동절삭의 경우는 속도가 증가하여도 거의 같은 수준의 표면거칠기를 보인다.

본 실험에서는 행하여진 조건에 따라 시뮬레이션에 의한 최대 거칠기와 실제의 일반절삭 및 2차원 진동절삭을 통해 얻어진 가공물에서 측정된 최대거칠기를 비교하여 그림 7과 같은 결과를 얻었다.

4.3 버 (burr)

진동절삭이 가공중에 발생하는 버에 어떠한 영향을 주는 지 조사하기 위해서 표 1의 Arc 90° 공구의 한쪽 날을 사용하여 두께 1mm의 황동판을 절삭속도 1mm/sec로 고정하여 가공 실험을 하였다. 버의 발생은 절삭속도보다 절삭깊이에 크게 영향을 받기 때문에 절삭깊이만을 1~5 μm 까지 1 μm 씩 증가시키며 가공하였다^[6]. 그 결과 일반절삭에 의해서는 절삭깊이를 1 μm 으로 하였을 경우의 그림 8의 (a)와 같이 절삭깊이를 증가시켜 5 μm 까지 실험한

결과 절삭깊이가 증가함에 따라 버의 크기가 점점 크게 성장하지만 2차원 진동절삭 방법에 의해서는 절삭깊이를 5 μm 으로 하였을 경우에도 그림 8의 (b)에서처럼 버가 거의 발생되지 않는다.

이러한 결과도 2차원 진동절삭이 공구경사면과 칩사이의 마찰력을 역이용 할뿐만 아니라 일반적인

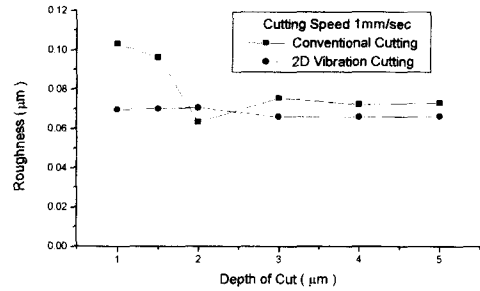


Fig. 5 Surface Roughness versus Depth of Cut

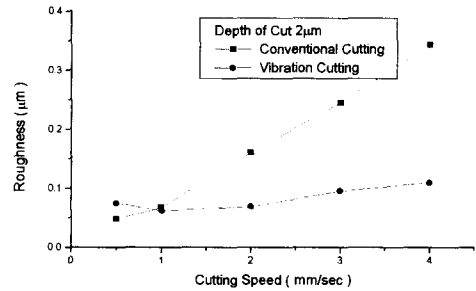


Fig. 6 Surface Roughness versus Cutting Speed

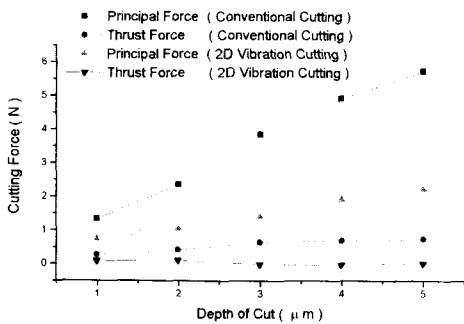


Fig. 4 Comparison of Cutting Forces Between Conventional Cutting and Vibration Cutting

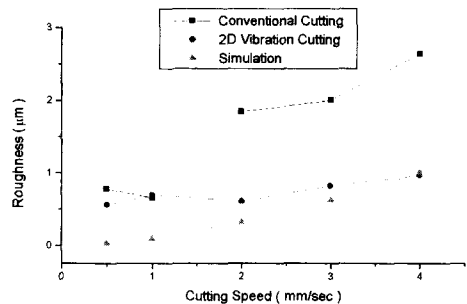
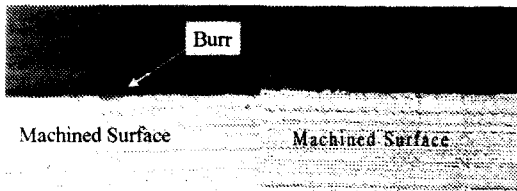


Fig. 7 Surface Roughness(R_{max}) Comparison between Simulation and Experiment



(a) Conventional Cutting ($t_c = 1\mu\text{m}$) (b) Vibration Cutting ($t_c = 5\mu\text{m}$)
 Fig. 8 Comparison of Machined Surfaces

절삭방법과 비교해 보다 작은 절삭력으로 공작물을 제거하기 때문이라고 생각된다.

4.4 칩의 비교

일반절삭과 진동절삭에 의해 생성되는 칩을 비교하였다. 그림 9의 (a)는 일반절삭에 의해 생성된 칩으로 절삭깊이를 $1\mu\text{m}$ 으로 고정하고 절삭속도를 변화시켰을 때 공구형상의 변화에 관계없이 공작물의 이송속도가 비교적 느린 $1\sim 2\text{mm}/\text{sec}$ 에서는 유동형 칩이 발생하였으나 $3\text{mm}/\text{sec}$ 에서부터는 절삭중에 칩이 연속과 불연속을 반복하여 발생하였고 속도를 보다 높일 경우에는 바늘과 같은 형태의 칩이 발생한다. 반면에 그림 9의 (b)에 보이는 진동절삭에 의해 생성된 칩은 이송속도가 $1\sim 4\text{mm}/\text{sec}$ 모두 유동형의 칩이 발생되었는데 이것은 일반절삭에서 유동형 칩과는 다른 모양을 갖는다. 공구진동의 영향으로 칩에 작은 주름이 생겨있고 이 때문에 일반절삭의 유동형 칩 보다 크게 보인다. 또, 공구가 공작물을 45° 로 비스듬히 절삭하는 경우에는 공구와의 마찰력에 의해 이끌려 나가며 길게 성장하는 특이한 현상을 보였다. 따라서 진동절삭에서는 이송속도를 높이는 가공조건 변화에 대해서 항상 유동형 칩을 발생하므로 공구에 가해지는 힘이 안정되어 가공면의 품위 향상에 유효한 것으로 생각된다.

5. 결론

2개의 압전소자를 직각으로 배치하여 생기는 2차원의 진동형태를 공구에 가진하여 절삭깊이와 공작물 이송속도에 따라 평면절삭 가공실험하고 이에 의해 얻어진 가공물을 일반절삭과의 비교 평가에 의해 아래의 사실을 확인하였다.



(a) Conventional Cutting (b) Vibration Cutting
 Fig.9 Comparison of Chips

- 1) 절삭력이 감소하였다.
 - 주분력의 경우 약 $1/2\sim 1/3$
 - 배분력의 경우는 (-)값으로 인해 거의 0
- 2) 표면거칠기가 향상되었다.
 - 절삭속도를 변화시킬 경우 약 $1\sim 3.5$ 배 향상
- 3) 버 발생이 현저히 줄어들었다.
- 4) 유동형 칩이 발생하고 이로 인해 절삭력이 일정하게 되었다.
 - 한계이송속도(공구궤적의 $R_{\text{max}} < t_c$)까지는 유동형 칩 발생

따라서 '2차원 진동절삭 방법은 동일한 강성의 기계에서 절삭기구의 동(動)강성을 향상시켜 미세가공면의 고정도화에 효과가 있다'라는 결론을 얻었다.

참고문헌

1. 山形 豊, 樋口後郎, "精密切削による微細形状創成, 精密工學會誌," Vol.61, No.10, pp.1361-1364, 1995.
2. D.A.Lucca, R.L.Rhorer, R.Komanduri, "Energy Dissipation in the Ultra precision Machining of Copper," CIRP, Vol 1, NO 1, pp.69-72, 1991.
3. 隈部淳一郎, 精密加工 振動切削-基礎と應用-, 實教出版, pp.34-49, 1979.
4. Shamoto, E., Moriwaki, T. "Study on Elliptical Vibration Cutting," Annals of the CIRP Vol. 43/1, pp.35-38, 1994.
5. Shamoto, E., Moriwaki, T., Morimoto, Y., "Elliptical Vibration Cutting(1st Report)," JSPE, Vol62, No.8, pp.1127-1131, 1996.
6. 임한석, "다이아몬드 공구에 의한 미세홈 가공의 정도향상에 관한 연구," 박사학위 논문, pp.135-138, p69, 1997.