

# 초미세가공에서 절삭성 고찰

정종운\*, 김재건+, 고태조+, 김희술+, 박종권\*\*

## Research on the machinability in Micro Machining

Jong Woon Chung\*, Jae Geon Kim+, Tae Jo Ko+, Hee Sul Kim+, Jong Kweon Park\*\*

### Abstract

Micro/meso cutting is getting more important in the fields of precision machining technology. A micro-turning lathe is one of parts to consist the Micro Factory. It accepts stepwise motion actuators that are used for feeding system instead of the conventional mechanism. It is consisted of two Piezoelectric ceramics; one is for feeding the slider, and the other is for clamping the slider in the guide way of the body. The linearity and positional accuracy of the actuators are good enough for high precision motion. The spindle unit is operated with DC motor on the top of the slider. The motion is communicated with miniaturized linear encoder attached on each side of axis. A mono crystal diamond tool is used for cutting tool. This micro-lathe has been made a machining experiment to see the characteristics of micro-machining.

**Key Words :** Micro machining(미세절삭), Micro machine(초소형 공작기계), Piezo actuator(압전 구동기), Inchworm(인치웜), Cutting force(절삭력), Surface roughness(표면 조도)

## 1. 서론

근래 Micro/Meso 크기의 부품의 수요가 점차 증대됨에 따라 이러한 미세 가공물을 생산하기 위한 -EDM, ELID, Precision grinding, Ion beam, Laser, Etching(lithography), Electrochemical machining, Diamond machining 등 다양한 가공 방법들이 개발되어 왔다. 그러나 제품생산의 신뢰성과 생산속도 및 실현성 때문에 화학적 에칭 등의 방법에 비해 높은 형상정도를 획득할 수 있는 기계적 초정밀 절삭가공을 통한 Micro/Meso 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 관점에서 기존의 공작기계를 이용한 가공은 자원의 소비, 공간적 여유, 에너지 효율 등의 측면에서 비효율적이다.

그러므로 달성 가능한 가공 정밀도의 향상 및 Micro/Meso 가공의 보편적인 실현을 달성하기 위해서는 미소 부품 가공 전용의 초소형 공작기계의 개발이 우선적이다. 이미 일본에서 시작된 마이크로 머신에 관련한 연구는 미국, 유럽 등의 많은 선진국에서 다양하게 연구되고 있다.[1]

본 논문은 크게 두 부분으로 나누어 초소형 공작기계의 구성에 대한 설명과 Nano/Micro와 Macro의 중간 단계인 Micro/Meso 크기의 제품에 대한 실제 절삭 실험을 수행하여 마이크로 단위의 절삭 가공 특성을 평가하는 부분으로 나누어져 있다.

초소형 공작기계의 구성에서도 장비의 소형화와 고정밀화를 달성하기 위해 고정도, 고강성의 이송계의 설계가 우

\* 정종운, 영남대학교 기계공학부 (wingki@yumail.ac.kr)  
주소: 712-749 경상북도 경산시 대동 214-1

+ 영남대 기계공학부

\*\* KIMM

선시된다. 이에 본 연구에서는 최근 초소형 Positioner, 초소형 측정기구 등의 고정밀 위치 제어가 가능한 Piezo actuator를 이송계로 채택하여 마이크로 머신의 베드로 구성하였다. Piezo actuator는 소형이면서 구동 분해능이 아주 높은 특징을 가지고 있으며 stainless steel로 된 유사한 구조물에 비해 20% 이상의 초과 강성을 가지므로 힘 발생력이 크다. 또한, 구동 에너지(power)가 수milli-watts로 에너지 소비량도 적은 것으로 알려져 있다. 그러나 높은 변위 해상도와 빠른 주파수 응답을 가지고 있지만 비선형적이고, 큰 히스테리시스(hysteresis)가 존재하며 압전소자의 발생 변위가 최대 0.1% strain으로 제한되기 때문에 다소 넓은 영역을 트래킹 할 필요가 있는 위치제어장치에 응용하는 것은 큰 문제점으로 남아있다.[3] 이러한 단점을 극복하기 위해 1075년 Burleigh Instruments 에서 인치워ム 구동방식이 [4] 개발되어진 이 후 압전소자를 이용한 많은 구동 메커니즘들이 개발되어져 왔다. 이 시스템에 대하여 마이크로 위치센서를 이용한 피드백 제어를 통해 구동특성을 검증하고 이를 바탕으로 초소형 공작기계를 이용하여 Micro/Meso 절삭가공을 수행하여 Micro 선반의 가공 특성을 보이고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.[6]

## 2. Stepwise actuator 구동 원리 및 구조

### 2.1 Stepwise 방식의 구동 원리

Stepwise Motion의 전, 후 방향에 대한 구동원리는 Fig. 1 (a) Forward 와 (b) Backward 에서 나타내었다. 가이드 내의 슬라이드는 고정부와 구동부로 나누어지며 서로 탄성힌지로서 연결되어있다. 다시 고정부는 압전소자의 발생 변위에 따라 양쪽의 가이드에 고정될 수 있도록 2개의 블록이 탄성힌지로 연결되어 있다. 고정부와 구동부에 사용되는 각각의 압전소자에 순차적으로 변위를 발생시킴으로써 전, 후 방향의 이송이 이루어지며 이를 위해 Fig. 2와 같이 일정한 타임 스케줄에 따른 두 개의 입력신호를 사용했다. 단위 사이클 당 구동원리는 4개의 과정으로 구성된다. 구동원리는 초기 상태에서 고정부의 압전소자가 전압을 받아 변위가 발생하고 이로 인해 슬라이드가 양쪽 가이드 사이에 클램핑 된다. 다음 단계에서 구동부의 압전소자가 이송 방향으로 팽창한다. 그리고, 고정부의 압전소자가 수축한 후, 구동부의 압전소자가 수축함으로써 결과적으로 초기 상태에서 일정변위 만큼의 이송이 진행되는 것이다.[5]

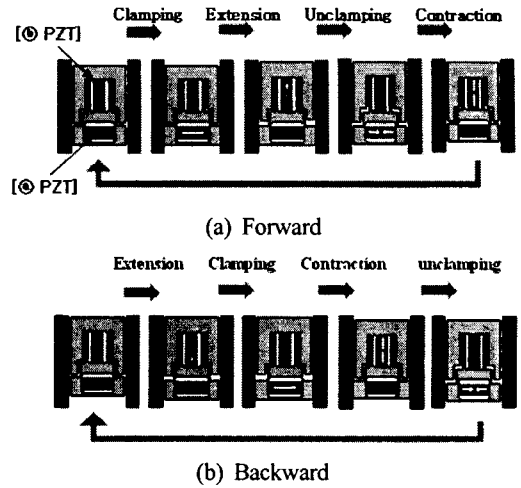


Fig. 1 Stepwise motion of two piezo actuators

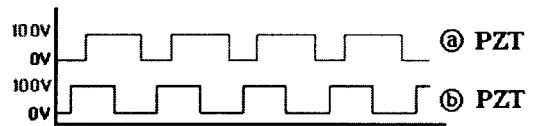
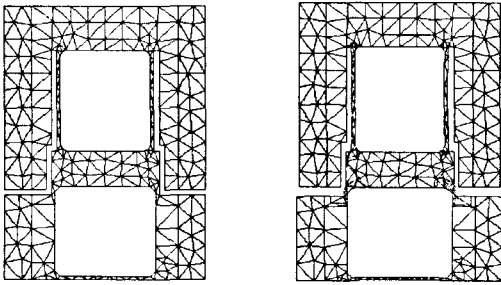


Fig. 2 Signals of two piezoelectric elements for Stepwise motion

압전 구동기에 사용된 Piezo electronics는 독일 PI社 제품(P-802.00)이며 슬라이드 재질은 연성이 큰 황동을, 가이드는 SM 45C를 사용하였다.

### 2.2 탄성힌지 메커니즘

압전소자에 전압을 가하면 압전소자의 길이 방향으로 미소 변위가 발생한다. 이러한 미소 변위는 고정부와 구동부에 연결된 탄성힌지에 의해 구동부에 전달되어 슬라이드의 미세 이송을 가능케 하며, Fig. 3과 같이 힌지 스프링을 좌우 대칭으로 설계함으로써 압전소자의 변위가 슬라이드 이송 방향에 대해 기구학적 진직도를 성취하도록 하였다. 압전소자에 의해 변형된 슬라이드의 형상을 예측하고 또한 적절하게 구동 될 수 있는가를 확인하기 위해 상용해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 슬라이드의 변위를 해석한 결과로서 구동부의 압전소자가 최대 변위인  $6\mu\text{m}$  늘어났을 때, 슬라이드의 변형 예측 결과이다.



Before deformation      After deformation  
 Fig. 3 Finite element analysis of the mechanism with flexure hinges

압전소자에 의해 발생하는 변위는 탄성힌지의 복원력에 의한 변위만큼 다시 수축한다. 탄성힌지에 의한 실제 압전소자 변위는 아래 식(1)을 따른다.[3]

$$K_s \cdot D_x = K_p \cdot (D_{max} - D_x) \quad (1)$$

$$D_x = D_{max} \cdot (K_p / (K_p + K_s))$$

여기서 힌지 강성을  $K_s$ , 압전소자의 강성은  $K_p$ , 외부하중이 없을 때의 압전소자 최대변위를  $D_{max}$ , 탄성힌지에 의한 변위손실은  $D_x$ 로 나타낸다. 현재 탄성 힌지 강성을  $100 \text{ N}/\mu\text{m}$ 로 설계하여 변위손실  $D_x$ 가  $2\mu\text{m}$ 가 되어 실제 최대 허용 전압 값인  $100\text{VDC}$ 의 입력 하에서 이송 변위는 최대  $4\mu\text{m}$ 가 된다.

### 2.3 이송기구의 구동특성 평가

Fig. 4는 각각의 입력전압에 따른 구동부에 발생되어진 변위를 측정된 결과이다.  $30\text{V}$ 부터  $100\text{V}$ 까지의 전압을  $10\text{Hz}$ 의 주파수로 인가했을 때, 각각의 슬라이드 구동부위의 변위가 발생된다. 또한, 이 입력전압에 따른 변위가 약  $96\%$ 의 선형성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 스텝와이즈 압전 구동기로 X, Z 축을 이루는 베드를 대각선 주행시켰을 경우의 이송 정밀도를 측정된 그래프이다. X100, Y100 좌표로의 이송에서  $R^2$ 값이  $0.9991$ 로 나타났으며, 이송 오차는 약  $2\mu\text{m}$  이내이다.

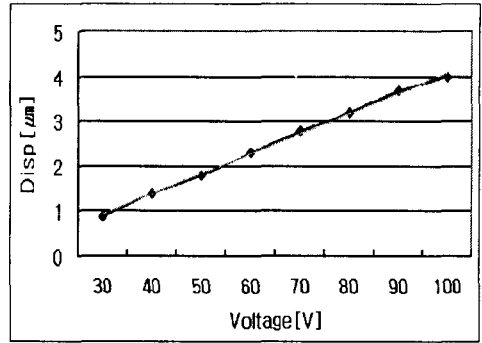


Fig. 4 Slider displacement according to input voltage

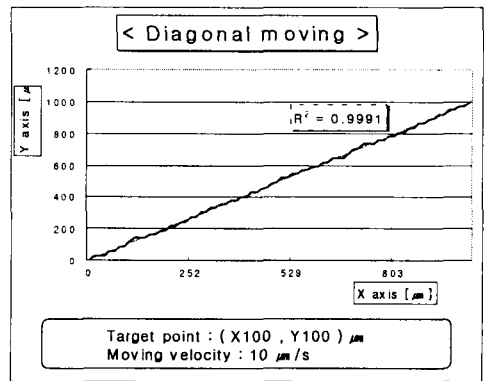


Fig. 5 Diagonal moving in stepwise actuator

### 2.4 이송계 구성도

이송축에 대한 전체적인 장치의 구성도를 Fig. 6에 나타내었다. 구동 신호는 진동특성 등을 고려하여 여러 형태의 입력신호를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는  $90^\circ$ 의 위상차를 가진 사각 펄스신호를 사용했다.

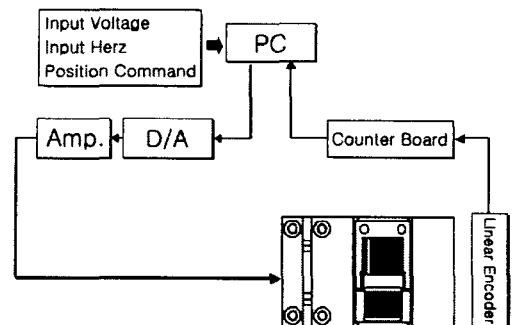


Fig. 6 Schematic diagram of micro translation  $50\text{nm}$ 의 분해능을 지닌 Micro Linear Encoder (kit LT-5,

RSF社)를 사용하여 위치 정보를 Feedback 제어하였다. 구동신호 발생과 Feedback 등 전체적인 시스템 제어 프로그램은 'Visual C++ 6'로 작성하였다.

### 2.5 주축계

머신의 소형화를 위해 베드 위에 소형 주축계를 설계, 제작하여 장착하였다. 주축 회전 구동원으로 Micro DC motor(Max. 10,000 rpm)를 사용하였고, 모터 축과 연계된 풀리를 이용하여 벨트로서 주축을 회전시키는 구조이다. 전체 동작기계의 사이즈는 45 x 44 x 39 mm, 그리고 무게는 150 gr이다. 주축에는 2~4 mm 직경의 피삭재를 장착할 수 있다. 아래 Fig. 7에 실제 완성된 마이크로 선반의 사진을 나타내었다.

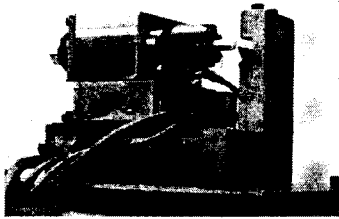


Fig. 7 Micro Turning Lathe

## 3. Micro machine의 가공성 실험

### 3.1 가공 시스템의 구성

초정밀 절삭 영역에서는 특히 공구 날 끝 형상과 공구 형상의 전사성, 내마모성 등의 공구 특징이 요구되므로 다이아몬드 공구가 주로 사용된다. 이에 선삭 실험에서는 노즈 반경이 0.1 $\mu$ m인 PCD 공구와 0.1 $\mu$ m인 MCD 공구를 사용하였다. 피삭재는 미소 절삭성이 양호하고 초정밀 가공품의 재료로 주로 사용되는 알루미늄(Al 1050, 2024)과 황동(무산소동)을 사용하였다.

### 3.2 선삭 실험 방법 및 절삭조건

선삭 실험은 각 시편의 편심과 불균일한 가공면을 제거하기 위한 선가공을 실시하고 난 후 본 선삭을 실시하였다. 선삭 조건은 아래 Table. 1에 나와 있듯이 이송 속도와 절삭 속도에 따른 절삭력과 표면 거칠기 값의 변화를 검증해 보았다. 또한, 실험 순서는 난수표에 의거하여 random하게 실시하여 조건 간의 연계 오차를 방지하였다.

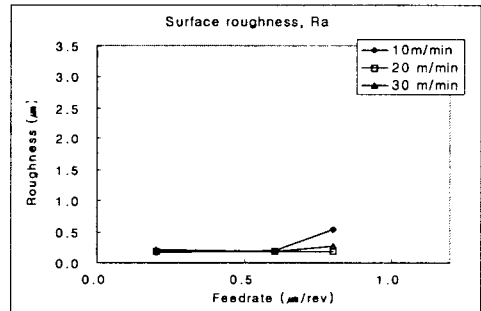
Table 1 Cutting condition of micro turning lathe

Material	Aluminum 2024
Diameter [mm]	3
Depth of cut [ $\mu$ m]	5
Feedrate [ $\mu$ m/rev]	0.2, 0.4, 0.6, 0.8
Cutting speed [m/min]	10, 20, 30

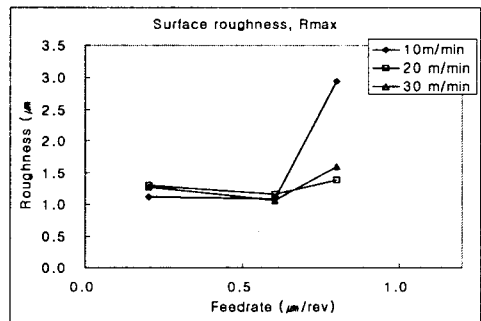
### 3.3 실험 결과

미소 절삭력 측정을 위해 고속 가공용 절삭력 측정 기기인 Kistler社의 9256A2 동력계를 사용했으며, 표면 조도 측정에는 비접촉식 표면 조도 측정기인 Intekplus社의 Optical dimensional metrology center를 사용하였다.

Fig. 8은 각 이송 속도에 따른 가공면의 표면 거칠기 값(Ra, Rmax)을 도식화한 것으로 이송 속도가 빨라짐에 따라 가공면이 거칠어짐을 알 수 있다. 위 선삭 조건 내에서 가장 양호한 조도값을 나타내고 있는 것은 0.6 $\mu$ m/rev의 이송 속도의 조건이며 그 이하의 이송 속도에 있어서는 조도값의 큰 차이가 없다고 볼 수 있으며 이는 상대적으로 절연반경이 큰 공구의 버니싱 작용에 기인한 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 8 Surface roughness according to feedrate, (a) Ra,

(b) Rmax

아래 Fig. 9 에는 각 조건에서 배출된 칩들을 고성능 현미경으로 촬영한 사진이다. 이송속도가 빨라질수록 칩의 두께가 두꺼워지고 연속형 칩이 생성되며, 절삭 속도가 증가함에 따라 파단형 칩이 생성되므로 칩의 길이가 짧아지는 양상을 보인다.

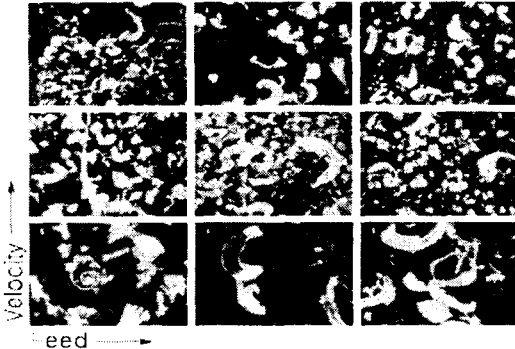


Fig. 9 Chip formation at each condition

실험 조건 내에서는 전체적으로 1N 미만의 힘이 측정되었다. Fig. 10의 그래프는 이송 속도에 따른 주절삭력의 측정값을 도식화한 것이다. 절삭 속도와 이송 속도가 증가함에 따라 주절삭력 또한 증가하는 일반적인 경향을 보였다. 반면, Fig. 11과 Fig. 12의 이송분력과 배분력에 대한 그래프에서는 모든 조건에서 0.1N의 이하의 힘이 측정되었다. 본 실험의 조건 내에서는 이송 속도와 절삭 속도에 증감에 따라 이송분력 및 배분력의 변화가 크게 나타나지 않는다.

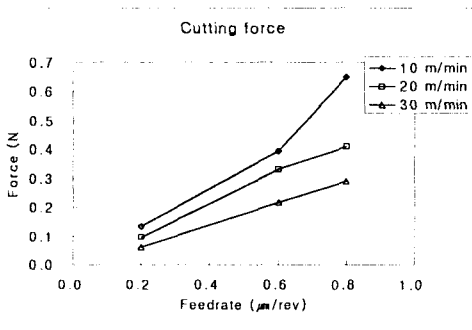


Fig. 10 Cutting force at feedrate

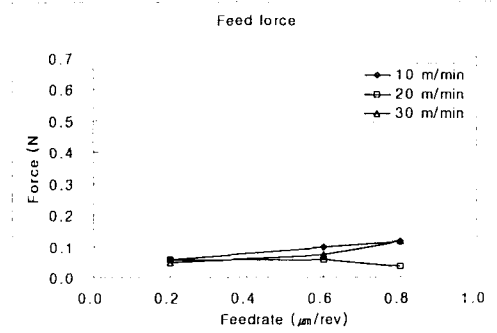


Fig. 11 Feed force at feedrate

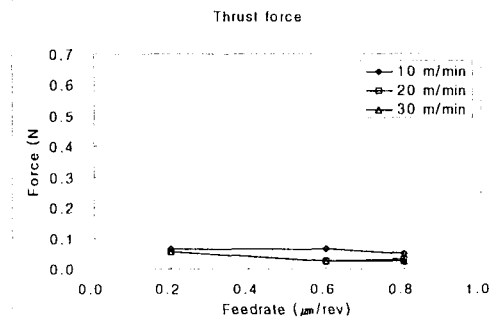


Fig. 12 Thrust force at feedrate

## 4. 결론

초소형 공작기계를 이용한 미세 선삭 실험을 통해 마이크로 단위의 가공성에 대해 고찰해보았다. 이송 속도와 절삭 속도를 변화시키면서 각 조건에서의 절삭력을 측정하고 가공 결과물의 표면 거칠기 값을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 미소 절삭력의 크기는 1N 이하이며, 이송 속도의 증가에 따라 절삭력 또한 함께 증가한다. 이송분력과 배분력은 조건 내에서 큰 변동을 보이지 않는다.

2. 표면 거칠기 값에서도 이송 속도의 증가에 따라 점차 증가하는 양상을 보였다. 조도값이 가장 양호한 조건은 0.6 μm/rev으로 0.16 μm의 표면 거칠기 값이 측정되었다.

이송 속도와 절삭 속도에 따른 선삭 실험에서 일반적인 절삭 이론의 결과를 도출하였으나, 차후 미세 선삭의 범주 내에서 보다 광범위한 이송 속도와 절삭 속도에 대한 실험을 수행하여 미세 선삭의 가공성을 평가할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- (1) T. Kitahara, et. al, "Development of micro-lathe", *Journal of Mechanical Engineering Laboratory*, pp. 50-5, 1996.
- (2) N. Lobontiu, M. Goldfarb, E. Garcia, "A piezoelectric-driven inchworm locomotion device," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 36, pp. 425-443, 2001.
- (3) Z. X. Wang, K. Jouaneh and D. Dornfield, "Design and characterization of a linear motion Piezoelectric microactuator", *IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp. 1710-1715, 1989.
- (4) Burleigh Instruments Inc. Catalogue, *The power of precision in nano positioning*, pp. 388-1295, 1995.
- (5) S. Sakuta, K. Okawa, K. Ueda, "Experimental studies on ultra-precision positioning an inchworm movement method using fine and coarse positionings" *int. J. Japan Soc. Prec Eng.* 27, pp 235-240, 1993
- (6) Y. Okazaki, T. Kitahara, "NC micro-lathe to machine micro-parts," *American Society for Precision Engineering*, Vol. 22, pp. 575-578, 2000