

Micro 선반을 이용한 Micro/Meso 절삭에 관한 연구

*고태조(영남대 기계공학부), 김희술(영남대 기계공학부), 배영호(영남대 기계공학부 대학원)

Micro/Meso Cutting with Micro Turning Lathe

T. J. Ko(Mech. Eng. Dept., YNU), H. S. Kim(Mech. Eng. Dept., YNU), Y. H. Bea(Mech. Eng. Dept., YNU)

ABSTRACT

In this paper, a micro-turning lathe is introduced for micro machining of aluminum rod. To give feed motion, stepwise motion[2] actuators are used instead of the conventional inchworm mechanism. These are 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 guide is V-form. The linearity and positional accuracy of the actuators is good enough for high precision motion. Since the system is more compact than the conventional system using three Piezoelectric ceramics, it is applicable for the micro-machine or MEMS unit. To fabricate the lathe, a small spindle unit with ball bearings of diameter of 10 millimeter is built-up on the top the slider. The motion is feed backed with miniaturized linear encoder attached each axis slider. The diamond tool bite is used for cutting tool. The machining is tried to make small diameter rod. The possible diameter that can be machined in this machine is presented as well as chip formation, surface roughness, and machinability.

Key Words : Piezoelectric ceramic (압전 소자), Inchworm (인치웜), Micro-feeding mechanism (미세이송기구)

1. 서론

본 논문에서는 Nano/Micro 와 Macro 의 중간 단계인 Micro/Meso 크기의 제품에 대해 절삭가공으로 제품을 가공하기 위하여 초소형 공작기계로 가공을 수행할 수 있는 시스템적 접근방법에 관하여 언급하고자 한다. 현재 이러한 Micro/Meso 크기의 제품을 가공하기 위해서 μ -EDM, Elid, Micro injection, Micro extrude, Precision grinding, Ion beam, Laser, Etching(lithography), Electrochemical machining, Diamond machining 등 다양한 가공 방법들이 개발되어져 왔다. 그러나 제품생산의 신뢰성과 생산속도 및 실현성 때문에 절삭가공에 의한 Micro/Meso 가공에 대한 필요성이 90년대 후반부터 끊임없이 제기되고 있다. 이러한 관점에서 기존의 공작기계를 이용한 Micro/Meso 가공보다 에너지 절약, 공간 절약, 달성 가능한 가공정밀도의 향상 및 Micro/Meso 가공의 보편적인 실현을 달성하기 위해 초소형 공작기계에 대한 연구가 일본을 시작으로 많은 선진국에서 다양하게 연구되고 있다.[2] 먼저 초소형 공작기계를 구성하는 부분은 크게 주축계, 이송계, 공구계로 나눌 수가 있다. 이 중에서 공작기계의 소형화 및 고정밀화를 달성하기 위한 가장 큰 문제점이 이송계 부분이 된다. 최근 초소형

Positioner, Micro pump, 초소형 측정기구 등의 MEMS 분야에서 고정밀 위치 제어가 가능한 주구동원으로서 가장 현실적인 방법으로 Piezo actuator 가 추천되고 있다. Piezo actuator 는 압전소자라고도 불리며 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로 양방향으로 변환을 일으킬 수 있는 것으로 구동기 및 센서로서 모두 사용될 수 있다.[5] 또한 Piezo actuator 는 소형이면서 구동 분해능이 아주 높다는 특징을 가지고 있으며 Piezo ceramics 의 신축이 atomic process 이므로 운동이 부드럽고 연속적이기 때문에 stick-slip 이 없고 stainless steel 로 된 유사한 구조물에 비해 20% 이상의 초과 강성을 가진다. 따라서, 힘 발생력이 크고 구동 에너지(power)가 수 milli-watts 로 에너지 소비량이 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% strain 으로 제한되기 때문에 다소 넓은 영역을 트래킹 할 필요가 있는 위치제어장치에 응용하는 것은 큰 문제점으로 남아있다.[1] 이러한 단점을 극복하기 위해 1075년 Burleigh Instruments 에서 인치웜 구동방식이[4] 개발되어진 이후 압전소자를 이용한 많은 구동 메커니즘들이 개발되어져 왔다. 본 논문에서는 초소형, 고정밀 위치 제어를 위해 2 개의 압전소자를 이용하는 Stepwise

Motion[2] 을 적용하여 Micro 선반을 제작 하는데 있다. 이 시스템에 대하여 마이크로 위치센서를 이용한 피드백 제어를 통해 구동특성을 검증하고 이를 바탕으로 초소형 공작기계를 이용하여 Micro/Meso 절삭가공을 실현하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. Stepwise Motion 의 구동 원리 및 구조

2.1 Stepwise 방식의 구동 원리

Stepwise Motion 의 전, 후 방향에 대한 구동원리를 Fig.1.(a)와 Fig.1(b) 에서 나타내었으며, Fig. 2 에서 제어신호를 도식화하였다. 가이드 내의 슬라이드는 고정부와 구동부로 나뉘어지며 서로 탄성 힌지로써 연결되어있다. 다시 고정부는 압전소자의 발생변위에 따라 양 가이드에 고정될 수 있도록 2 개의 블록이 탄성힌지로 연결되어 있다. 전, 후 방향의 이송은 두 개의 압전소자에 순차적으로 변위를 발생시킴으로써 이송이 이루어지며 이를 위해 일정한 타임 스케줄에 따른 두개의 입력신호를 사용했다. Fig.1 에서 보여주듯이 단위 사이클당 구동원리는 4 개의 과정으로 구성된다. 구동원리는 초기 상태에서 고정부의 압전소자가 전압을 받아 변위가 발생하고 이로 인해 슬라이드가 양 가이드 사이에 클램핑된다. 다음 단계에서 구동부의 압전소자가 팽창한다. 그리고, 고정부의 압전소자가 수축한 후, 구동부의 압전소자가 수축함으로써 결과적으로 초기 상태에서 일정변위 만큼의 이송이 진행되는 것이다.

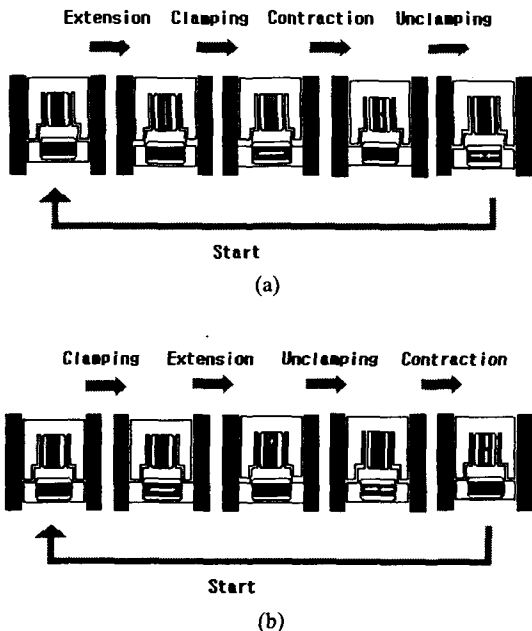


Fig. 1 Stepwise Motion of two Piezo actuators; (a)Forward, (b)Backward

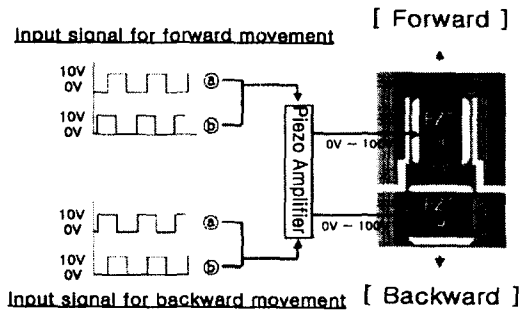


Fig. 2 Signals of two Piezoelectric elements for stepwise Motion

실험에 쓰여진 Piezo actuator 는 독일 PI 社 제품 (P-802.00)이며 슬라이드 재질은 연성이 큰 황동을, 가이드는 SM 45C 를 사용하였다.

2.2 탄성 힌지 메커니즘

압전소자에 전압을 가하면 압전소자의 길이 방향으로 미소변위가 발생한다. 이러한 미소 변위는 고정부와 구동부에 연결된 탄성힌지에 의해 구동부에 전달되어 슬라이드의 미세 이송을 발생시키며, Fig. 3 과 같이 힌지 스프링을 좌우 대칭으로 설계함으로써 압전소자의 변위가 슬라이드 이송 방향에 적합한 구조와 조건을 가지게 하였다. 압전소자에 의해 변형된 슬라이드의 형상을 예측하고 또한 적절하게 구동 될 수 있는가를 확인하기 위해 상용 해석 program 인 ANSYS 5.7 를 사용하여 100 N/μm 의 값을 가지도록 탄성힌지를 설계하였다. Fig. 3 는 이때의 변위를 해석한 결과로서 구동부의 압전소자가 6 μm 늘어났을 때 슬라이드의 변형 모습이다.

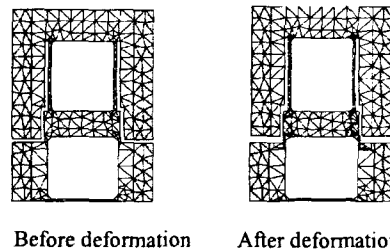


Fig. 3 Finite element analysis of the mechanism with flexure hinges

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

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

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

여기서 힌지 강성을 K_s , 압전소자의 강성은 K_p ,

외부하중이 없을 때의 압전소자 최대변위 D_{max} , 탄성한지에 의한 변위손실을 D_x 로 나타낸다.

Fig. 4 는 각각의 입력전압에 따른 구동부에 발생되어진 변위를 측정된 결과로써 구동부에 발생되어지는 변위는 슬라이드의 스텝모션과 직접적인 관계에 있다. 그림에서 30V 이하에서는 마이크로 이하의 스텝모션을 가질 수 있음을 알 수 있다.

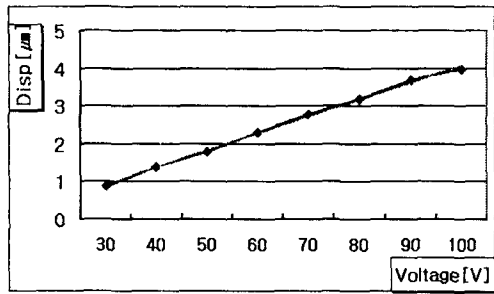


Fig. 4 Slider displacement according to the input voltage

3. 이송계의 구동특성평가

3.1 실험장치 구성도

1 축에 있어서 구동특성을 측정하기 위한 전체적인 장치의 구성도를 Fig. 5 에 나타내었다. 구동 신호는 진동특성 등을 고려하여 여러 형태의 입력신호를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 간단히 사각 펄스신호를 사용했다. 이 신호는 D/A board(PCI-1720, Advantech 社)를 통해 High Voltage Amplifier(Techmack 社)로 증폭된 후 압전소자에 인가된다. Feedback 을 위한 위치센서로서 Linear Encoder (kit LT-5, RSF 社)를 사용하였으며 여기서 나오는 위치정보를 Counter Board(IFC 430R, RSF)를 통해 PC(Pentium III-550Mhz)에서 Feedback 신호로 사용했다. 구동신호 발생과 Feedback 에 필요한 프로그램은 'Visual C++ 6'로 작성하였다.

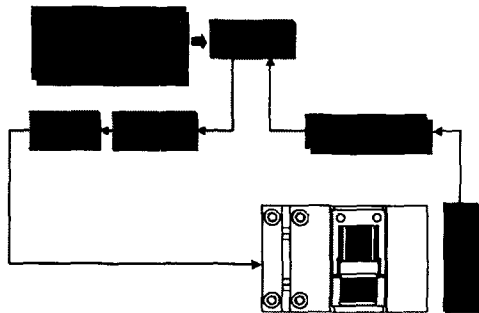


Fig. 5 Schematic diagram of micro translation

3.2 이송계 Feedback 실험

Fig. 6 은 Linear Encoder 를 이용하여 Feedback 제어 했을 때의 슬라이드의 구동특성을 보인 것이다. 실험 조건은 동일한 입력 주파수 100Hz 일 때의 입력전압을 60 -100 V로 하여 정방향/역방향으로 3회 반복 이송 시켜 그 결과를 도표에 나타내었다. Fig. 7 은 이 때의 위치오차 결과를 나타낸다. 도표에서 보듯이 슬라이드의 구동은 선형적이고, 입력 전압에 따라 속도차이가 현저하게 나타남을 알 수 있다. 또한, 이 시스템의 Feedback 신호에 따른 구동에서 평균 위치오차가 2 µm 이하로 나타났다.

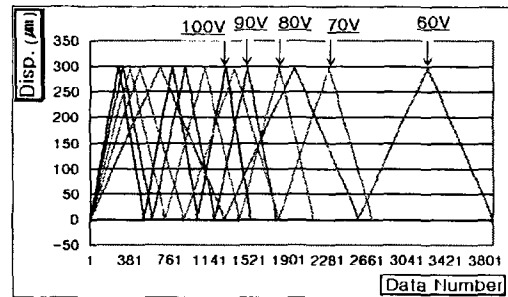


Fig. 6 The feedback test of each voltage

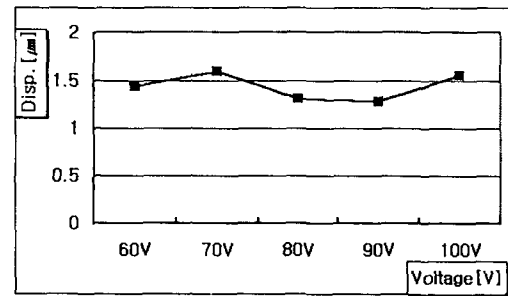
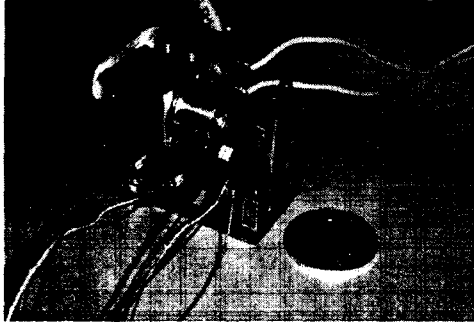


Fig. 7 The position error of the slider

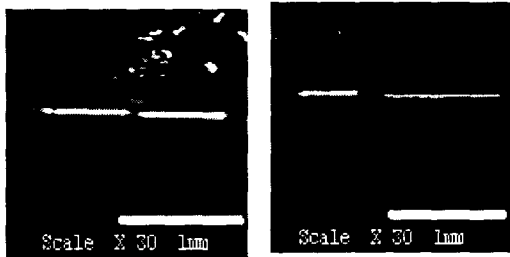
4. 시스템 제작 및 가공실험

Fig. 8 은 본 연구에서 제작한 초소형 공작기계의 모습을 나타내고 있다. 이 기계는 전술하였듯이 2 개의 Piezo actuator 로 구성된 이송계를 갖추고 있으며, x 및 z 축을 가지고 있다. 주축은 10,000 rpm 의 DC 모터로부터 풀리를 통하여 구동되어 진다. 주축은 볼 베어링으로 구성되어 있다. 공구대에는 다이아몬드 공구를 장착할 수 있도록 하였으며, 다이아몬드 공구는 PCD 공구이다. 전체 공작기계의 사이즈는 45 x 44 x 39 mm, 그리고 무게는 150 gr 이다. 주축에 고정된 지름 2 mm 의 aluminum 봉을 가공한 것이 Fig. 9 이다. 이때 가공되어져 나오는 칩의 모습이 Fig. 10 이다. 이 가공에서 이송속도는

0.12 $\mu\text{m}/\text{rev}$, 절삭깊이는 2 μm 이며, 최종가공으로 직경 65 μm , 길이 1 mm의 선삭가공을 달성할 수가 있었다.



Size : 45mm(W)× 44mm(D)× 35mm(H)
Fig 8 Photograph of micro turning lathe



(a) under machining (b) machined part
Fig. 9 Micro machining of the small rod

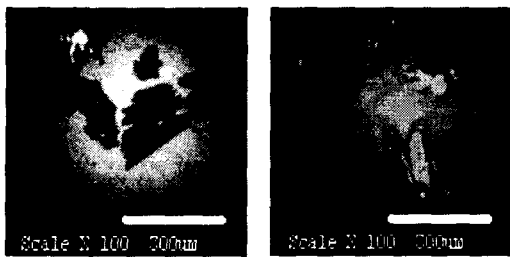


Fig.10 Chip shapes during machining

5. 결 론

본 연구에서는 Micro factory의 기초 단위로 사용될 Micro 선반에 관하여 연구를 하였다. 이 공작기계는 Micro와 Macro의 중간단계인 Meso 크기의 공작물을 가공하는데 사용이 된다. 이 공작기계는 매우 소형이기 때문에 특별한 형태의

구동계를 갖추어야 한다. 따라서 본 연구에서는 두 개의 압전소자를 이용한 Stepwise 구동방식의 고정밀 이송기구를 제안하였다. 이송기구의 기본적인 성능 실험을 수행한 결과 입력 전압에 의해 선형적인 변위와 속도의 분포를 보임을 알 수 있었으며, 이 시스템에서 Feedback을 시켰을 경우에는 이송 정밀도가 2 μm 이하로 나타났다. 따라서, 제시된 이송기구는 전압의 크기와 입력 주파수를 조정함으로써 이송거리와 위치 정밀도를 향상시킬 수 있는 특성을 가지고 있기 때문에, 향후 보다 빠른 이송과 정밀한 위치 이송 능력을 부여하기 위한 Feedback 제어를 적용하여 이를 정밀 가공분야에 응용가능토록 개선할 계획이다. 한편 제안된 이송계를 기본으로 하여 공작기계인 초소형 선반을 제작하고 가공실험을 한 결과 직경 2 mm의 알루미늄 봉에 대해 다이아몬드 공구로 절삭이 가능하였으며, 최종적으로 직경 65 μm , 길이 1 mm의 선삭가공을 실현할 수가 있었다.

향후 본 연구는 공기 터빈 주축을 장착하고, 보다 소형으로 구성하여 초소형 선반의 실현가능성을 구체화하며, Micro factory 분야로의 연구로 확대될 예정이다.

참고문헌

1. PI社. "Nanopositioning", pp. 1.6, 4.24-25, 1998.
2. Okazaki, T. Kitahara, "NC Micro-lathe to machine micro-parts", Proc. ASPE Annual meeting 2000.
3. T. Kitahara, et.al, "Development of micro-lathe," Journal of Mechanical Engineering Laboratory, pp. 50-5, 1996.
4. Burleigh Instruments inc. Catalogue, The power of precision in nanopositioning, pp. 388-1295, 1995.
5. 박창엽, " 전지전자용 압전세라믹스"; pp. 174-161, 1995.