

◆특집◆ 차세대 지능형 Microfactory 시스템 기술
 초소형 공작기계와 미세가공

배영호*, 김희솔**, 고태조***

Micro Machine Tools and Micro Machining

Young Ho Bac*, Hee Sool Kim** and Tae Jo Ko***

Key Words : Microfactory(마이크로 공장), Micro Machine Tools (초소형 공작기계), Micro Machining(미세가공)

1. 서론

본 특집에서는 Nano/Micro 와 Macro 의 중간단계인 Micro/Meso 크기의 제품에 대해 절삭가공으로 제품을 가공하기 위하여 초소형 공작기계로 가공을 수행할 수 있는 시스템적 접근방법에 관하여 언급하고자 한다. Meso 크기의 정의는 Fig. 1 과 같이 $10^{-2} \sim 10^{-5}m$ 크기의 부품가공으로서, Miniature (Macro) 가공과 micro 가공의 중간가공으로 볼 수가 있다. 가공의 정밀도로 볼 때는 Fig. 5 와 같이 $10^{-5} \sim 10^{-8}m$ 로서 초정밀 가공의 범위에 들어가는 가공공차를 갖는다. 이들 제품군의 가장 대표적인 제품은 마이크로 펀칭가공이나 마이크로 공구를 가공하기 위한 치수 직경 $25 \sim 50 \mu m$ 정도의 Fig. 2 와 같은 환봉 제품군이다. 또한 대표적으로 많이 가공하는 것은 Fig. 3 과 같은 구멍가공을 들 수가 있다. 한편 Fig. 4 는 이러한 공구로 가공한 밀링 가공의 결과이다.

통상적으로 이러한 제품을 생산하기 위한 공정으로는 Removal, Deposition, Molding 공정으로 나눌 수가 있으며, 특히 μ -EDM, Elid grinding, Ion

beam, Laser, Etching(lithography), Electrochemical machining, Diamond machining, Precision grinding, Electroforming, Electro-deposition, Micro injection, Micro extrude 등 다양한 방법들이 개발되어져 왔다.^[2-10]

이와 같은 가공이 달성할 수 있는 가공의 범위와 정밀도는 Table 1 과 같다. 이러한 다양한 공정방법의 개발에도 불구하고, 여전히 제품생산의 신뢰성과 생산속도 및 실현성 때문에 절삭가공에 의한 Micro/Meso 가공에 대한 필요성이 90 년대 후반부터 끊임없이 제기되고 있으며, 실현이 되고 있다.

그러나 Micro/Meso 가공에서 현재 크기의 공작기계로 가공을 실시하는 것은 절삭 에너지 효율문제, 효율문제, 공간문제, 자원절약문제, 그리고 달성

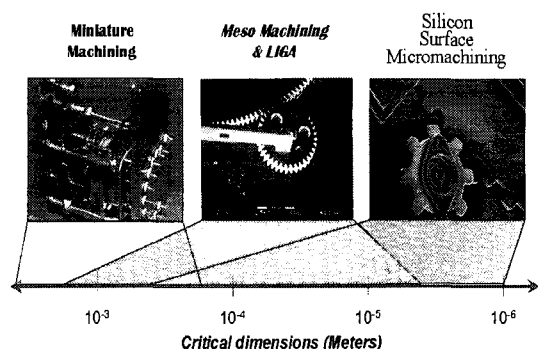


Fig. 1 Bridging the gap between micro and miniature machining^[1]

* 영남대학교 기계공학과 대학원

** 영남대학교 기계공학부

*** 영남대학교 기계공학부

Tel. 053-810-2576, Fax. 053-813-3703

Email tjko@yu.ac.kr

공작기계 및 절삭가공을 전공하였으며, 특히 초정밀 및 미세 가공 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

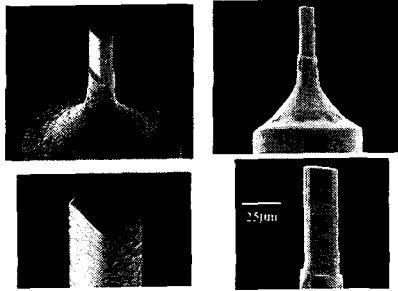


Fig. 2 Tungsten carbide micro-end mills miniature machining [1]

Table 1 Meso-scale machining comparison

Technology / Feature Geometry	Minimum feature size / Feature tolerance	Feature positional tolerance	Material removal rate	Materials
Focused Ion Beam / 2D & 3D	200 nanometers / 20 nanometers	100 nanometers	5 cubic microns/sec	Any
Micro milling or micro turning / 2D or 3D	25 microns / 2 microns	3 microns	10,400 cubic microns/sec	PMMA, Aluminum, Brass, mild steel
Excimer laser / 2D or 3D	5 microns / submicron	submicron	40,000 cubic microns/sec	Polymers, ceramics and metals to a lesser degree
Femto-second laser / 2D or 3D	1 micron / submicron	submicron	13,000 cubic microns/sec	Any
Micro-ECM (Sinker or Wire) / 2D or 3D	25 microns / 3 microns	3 microns	25 million cubic microns/sec	Conductive materials
LIGA / 2D	submicron / 0.02um-0.5 um	~0.3um nom across 3"	N/A	Electroformable: copper, nickel, permalloy (see note)

Note: LIGA can also be used to fabricate parts in polymers, pressed powders, ceramics, and rare-earth magnets with a little degradation in machining performance specifications.

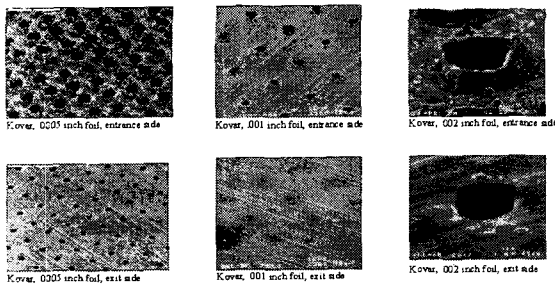


Fig. 3 Micro holes machined with a YAG laser

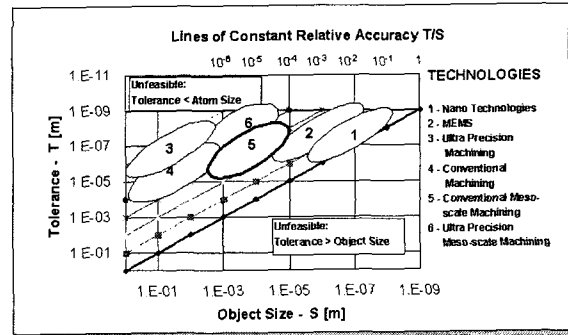


Fig. 5 Relative accuracies of different technologies

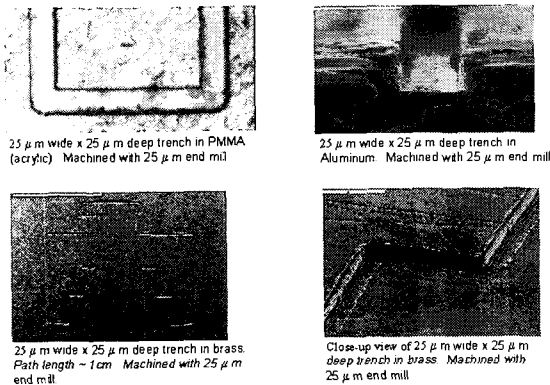


Fig. 4 Micro milling with micro end mills

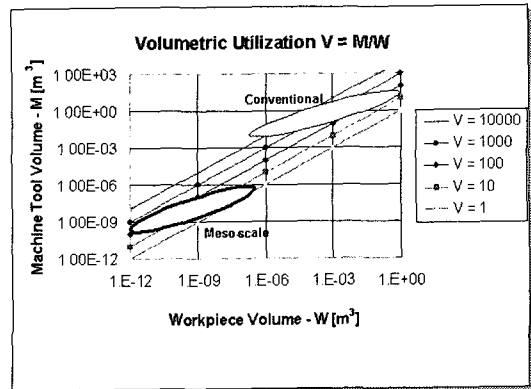


Fig. 6 Volumetric utilization of meso scale machines

가능한 정밀도의 문제로 인하여 작은 기계에서 가공하여야 할 필요성이 제기되었다. 즉, Fig. 6 과 같이 현재의 일반적인 절삭가공이 공작물 체적 $10^{-6} \sim 10^0 m^3$ 의 크기에 대해 공작기계는 $10^{-2} \sim 10^2 m^3$ 정도의 크기로 가공을 하게 된다.

그러나 Micro/Meso 가공에서는 공작물의 체적이 매우 작아지며, 이에 따른 비율로서 공작기계의

의 체적도 매우 작아져도 됨을 알 수가 있다. 이러한 관점에서 일본을 시작으로 하여 많은 선진국에서는 Micro/Meso 가공을 위한 초소형공작기계에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있다.[11]

이상과 같은 관점에서 초소형 공작기계를 이용하여 Micro/Meso 절삭가공을 실현하고자 하는

것이 본 연구의 목적이며, 이를 통하여 에너지 절약, 공간절약, 달성가능한 가공정밀도의 향상 및 Micro/Meso 가공의 보편적인 실현을 달성하고자 한다. 이를 통하여 궁극적으로는 Micro/Meso 가공을 위한 Micro Factory의 요소기술로 발전시키고자 한다.

2. 초소형 공작기계의 개념설계

초소형 공작기계를 구성하는 부분은 크게 나누어서 주축계, 이송계, 공구계로 나눌 수가 있다. 이 중에서 소형화를 달성하기 위한 가장 큰 걸림돌은 이송계 부분이 된다. Fig. 7은 본 연구에서 다루려는 초소형 선반 및 밀링의 전체 개념도를 보이고 있다.

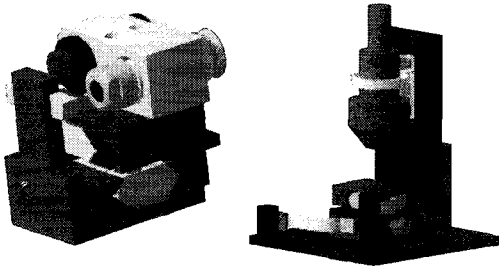


Fig. 7 Micro turning lathe and milling machine

이러한 초소형 공작기계의 이송계로서는 가장 현실적인 방법으로 Piezo actuator가 추천되고 있다. 현재 초소형 Positioner, Micro pump, 초소형 측정기구 등의 MEMS 분야에서는 고정밀 위치 제어가 가능한 주구동원으로서 Piezo actuator를 적용시키기 위한 개발 작업이 한창이다. Piezo actuator는 압전소자라고도 불리며 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로 양방향으로 변환을 일으킬 수 있는 것으로 구동기 및 센서로서 모두 사용될 수 있다.^[13] 본 연구에서는 초소형 공작기계의 이송계로서 압전소자의 전압에 따른 변위를 이용하는 구동기로서의 메카니즘에 관해 주로 논한다.

기존의 전기 유압식 등의 구동기와는 달리 압전소자는 소형이면서 구동 분해능이 아주 높다는 특징을 가지고 있다. 또한, 압전소자의 신축이 atomic process이므로 운동이 부드럽고 연속적이기 때문에 stick-slip이 없으며 stainless steel로 된 유

사한 구조물에 비해 20% 이상의 초과 강성을 가진다. 따라서, 힘 발생력이 크고 구동 에너지가 수 milli-watts로 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% strain으로 제한되기 때문에 다소 넓은 영역을 트래킹 할 필요가 있는 위치제어 장치에 응용하는 것은 큰 문제점으로 남아있다.^[14] 이에 대한 대책으로 최근 Piezo actuator의 모션증폭 기구 또는 인치웸 메커니즘이 계속 개발되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 고정밀 분해능을 얻을 수 있으며 이송범위의 제한을 받지 않는 새로운 형태의 인치웸 메커니즘을 제안한다. 이것은 초소형, 고정밀 위치 제어를 위해 압전소자 두개의 인장과 수축을 타임 스케줄에 따라 조합한 미세 이송 기구이다. 이 시스템에 대하여 마이크로 센서를 이용한 피드백 제어를 적용하여 μm 단위 이하의 위치 정밀도를 실험을 통해 검증한다.

3. 두개의 피에조를 이용한 stepwise 방식의 구동 원리 및 구조

3.1 이송구동원리

두개의 피에조를 이용하여 stepwise로 구동하는 이송장치의 전, 후 방향에 대한 구동원리를 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에 나타내었으며 Fig. 9에서 제어 신호를 도식화하였다. 가이드 내의 슬라이드는 고정밀을 담당하는 고정부와 구동을 담당하는 구동부로 나뉘어지며 서로 탄성 힌지로서 연결되어 있다. 두 개의 압전소자에 순차적인 변위 발생을 위해 타임 스케줄에 따른 두개의 입력신호를 사용했으며 단위 사이클당 구동원리는 4개의 과정으로 구성된다. 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. 실험에 쓰여진 Piezo actuator는 독일 PI社 제품(P-802.00)으로 제반 사항은 Table 2에 기술하였으며^[14], 슬라이드 재질은 연성이 큰 황동을, 가이드는 SM 45C를 사용하였다.

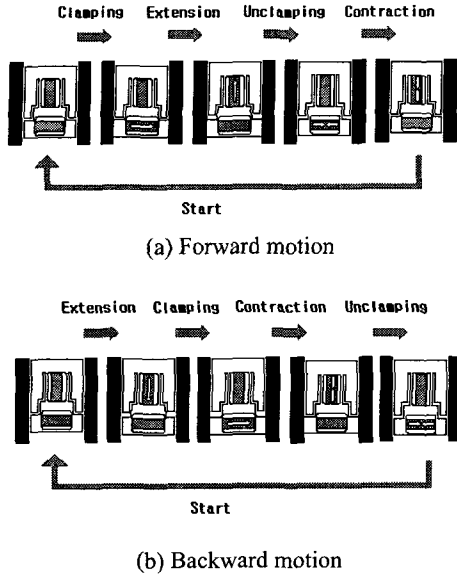


Fig. 8 Stepwise motion of two piezo actuators

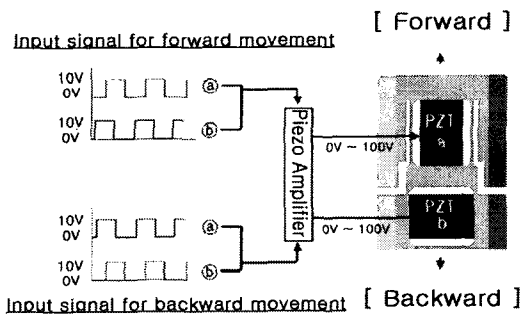


Fig. 9 Signals of two Piezoelectric elements for stepwise motion

Table 2 Properties of P-802.00 from PI

Item	Specification
Open loop travel @ 0 to 100V	6 $\mu\text{m} \pm 20\%$
Open loop resolution	0.06 nm
Stiffness	200 N / μm
Force generation(blocked)	1200 N $\pm 20\%$
Push/pull force capacity	1000/5 N
Dimensions	6 \times 6 \times 9 mm \pm 0.5

3.2 탄성힌지 메커니즘

압전소자에 전압을 가하면 압전소자의 길이 방향으로 미소변위가 발생한다. 이러한 미소 변위는 힌지 스프링으로 고정부에 연결된 구동부에 전달되어 슬라이드의 미세 이송을 발생시키며, Fig. 10 과 같이 힌지 스프링을 좌우 대칭으로 설계함으로써 압전소자의 변위가 슬라이드 이송 방향에 적합한 구조와 조건을 가지게 하였다. 따라서 슬라이드의 길이 방향으로만 변위가 발생 하도록 하였다. 압전소자에 의해 변형된 슬라이드의 형상을 예측하고 또한 적절하게 구동 될 수 있는가를 확인하기 위해 상용해석 program 인 ANSYS 5.7 를 사용하여 100 N/ μm 의 값을 가지도록 탄성힌지를 설계하였다. Fig. 11 은 이때의 변위를 해석한 결과로서 구동부의 압전소자가 6 μm 늘어났을 때 슬라이드의 변형 모습이다.

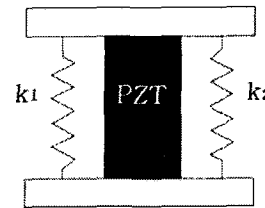
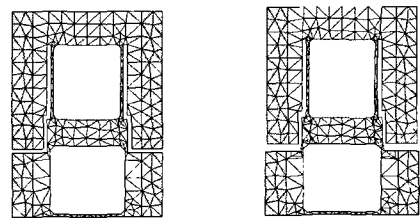


Fig. 10 Free body diagram of slider and Piezo



Before deformation After deformation

Fig. 11 Finite element analysis of the mechanism with flexure hinges

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

$$k_s \cdot D_x = k_p \cdot (D_{\text{max}} - D_x) \quad (1)$$

$$D_x = D_{\text{max}} \cdot (k_p / (k_p + k_s))$$

여기서 힌지 강성 $k_s = 2k_1$ 이며 압전소자의 강성은 k_p , 외부하중이 없을 때의 압전소자 최대변위 D_{max} , 탄성힌지에 의한 실제 변위를 D_x 로 나타낸다.

3.3 이송기구의 구조

본 논문의 미세 이송 기구의 외형도를 3D 모델링 프로그램인 CATIA V5R7로 나타낸 것이 Fig. 12 이다. 가이드에 슬라이드를 조립하여 구동성을 확인하였으나 가이드와 슬라이드의 간격 조절에 상당한 어려움이 존재하였다. 이를 개선하기 위해 가이드와 슬라이드의 마찰면의 래핑 작업과 가이드를 분리형으로 설계하여 일정한 결합력을 줄 수 있는 스프링 볼트를 사용하여 둘 사이의 간극이 1 μm 이내가 되도록 하였다.

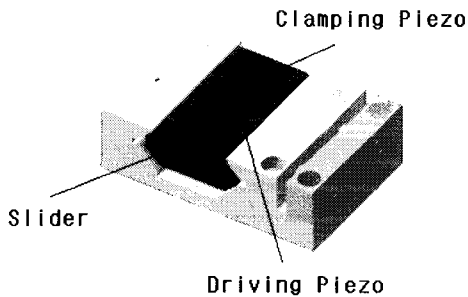


Fig. 12 Modeling of micro inchworm apparatus

4. 구동특성 실험 및 해석

4.1 장치 구성도

전체적인 장치의 구성도는 Fig. 13 에 나타내었다. 구동 신호는 진동특성 등을 고려하여 여러 형태의 입력신호를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 간단히 사각 펄스신호를 사용했다. 이 신호는 D/A board(Advantech 社, PCI-1720)를 통해 High Voltage Amplifier(Techmack 社)로 증폭된 후 압전소자에 인가된다. 슬라이드의 이동량은 Gap sensor(Bently Nevada 社, 127 $\mu\text{m}/\text{V}$)로 측정하였고, 여기서 나오는 위치정보를 A/D board(Darim 8330)를 통해 PC(Pentium III-550Mhz)에서 Feedback 신호로 사용했다. 구동신호 발생과 Feedback 에 필요한 프로그램은 'Visual C++ 6'로 작성하였다.

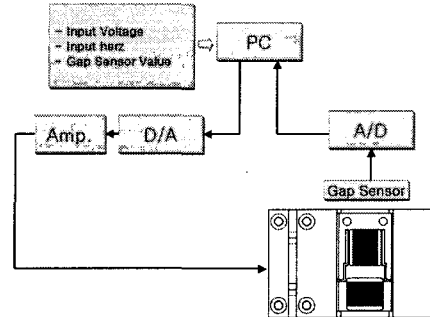


Fig. 13 Schematic diagram of micro translation

4.2 이송장치의 구동특성 평가

Input voltage 에 따른 슬라이드 구동부위 변위 측정을 위해 각각의 입력 전압과 구동 파형을 일정 시간동안 압전소자에 인가하여 그 결과를 Fig. 14 에 도출하였다. 입력 전압은 30V 부터 100V 까지 10 Hz 를 인가했을 때의 슬라이드 구동부위 변위 발생을 측정하였다. 아래 도표에서 보듯이 입력 전압에 따른 구동부위 발생 변위가 96%의 선형성을 가진다.

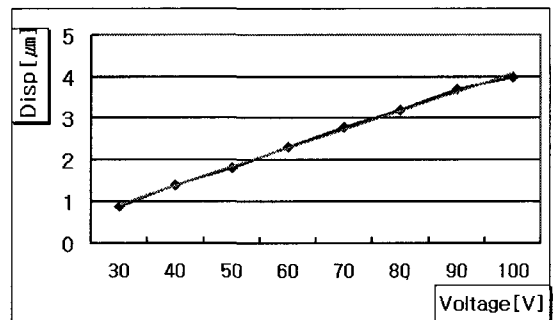


Fig. 14 Slider displacement according to input voltage

4.3 이송장치의 속도실험

Fig. 15 는 각각의 입력 전압에 따른 슬라이드의 속도를 나타낸다. 각각 100Hz 의 같은 조건에서 사용 압전소자의 최대 허용 전압인 100V 이하의 전압을 인가하여 정방향, 역방향의 이송 속도를 비교 분석한 것이다. 그 결과 입력전압이 증가할수록 속도의 방향 오차가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 16 은 같은 입력 전압을 주면서 입력 주파수를 달리하여 정방향, 역방향의 이송 속도를 분석한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 이송 속도는 입력 주파수의 변화보다도 입력 전압의 차이에 의해 보다 큰 방향오차(backlash)를 보여준다.

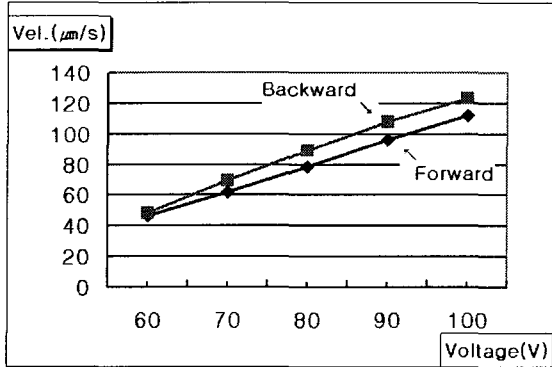


Fig. 15 Slider velocity according to input voltage

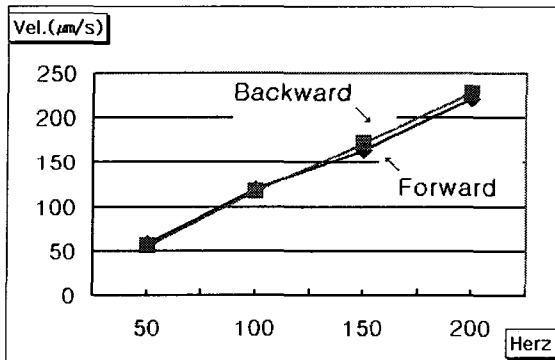


Fig. 16 Slider velocity according to input frequency

4.4 Feedback 실험

Fig. 17 은 Gap 센서를 이용하여 Feedback 제어를 했을 때의 슬라이드의 구동특성을 보인 것이다. 실험 조건은 동일한 입력 주파수 100Hz 일 때의 입력전압을 70-100 V 로 하여 정방향 역방향 3 회 반복 이송시켜 그 결과를 도표에 나타내었다. Fig. 18 은 이 때의 위치오차 결과를 나타낸다. 도표에서 보듯이 슬라이드의 구동은 선형적이고, 입력전압에 따라 속도차이가 현저하게 나타남을 알 수 있다. 또한, 이 시스템의 Feedback 신호에 따른 구동에서 평균 위치오차가 1.43 μm 로 나타났다.

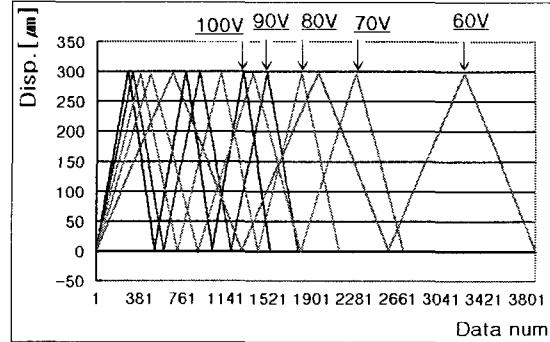


Fig. 17 The feedback test of each voltage

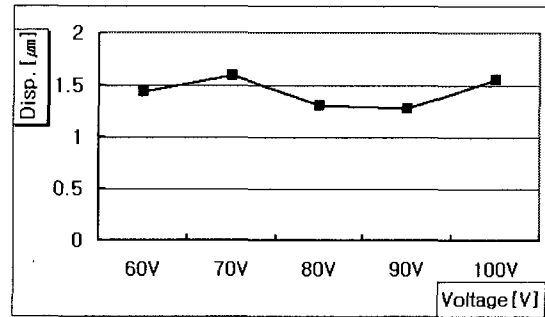


Fig. 18 The position error of the slider

5. 시스템 제작 및 가공실험

Fig. 19 는 본 연구에서 제작한 초소형 공작기계의 모습을 나타내고 있다. 이 기계는 전술하였듯이 피에조 액츄에이터로 구성된 이송계를 갖추고 있으며, x 및 z 축을 가지고 있다. 주축은 10,000rpm 의 모터로 구동되며, 풀리로 구동된다. 주축은 볼 베어링으로 구성된 것이나, 향후 초고속의 공기 터빈으로 교체될 예정이다. 공구대에는 다이아몬드 공구를 장착할 수 있도록 하였으며, 다이아몬드 공구는 PCD 공구이다. 전체 공작기계의 크기는 45 x 44 x 39 mm, 그리고 무게는 150 gr 이다. 주축에 고정된 지름 2mm 의 Copper 봉을 가공한 것이 Fig. 20 이다. 이때 가공되어져 나오는 칩의 모습이 Fig. 21 이다. 이 가공에서 이송속도는 0.12 $\mu\text{m/rev}$, 절삭깊이는 2 μm 이며, 최종가공으로 직경 65 μm , 길이 1mm 의 선삭가공을 달성할 수가 있었다.

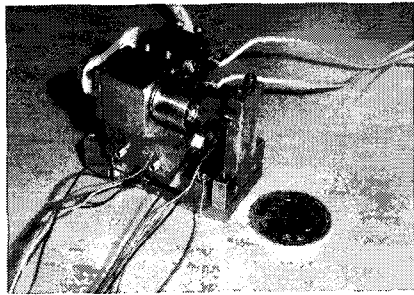
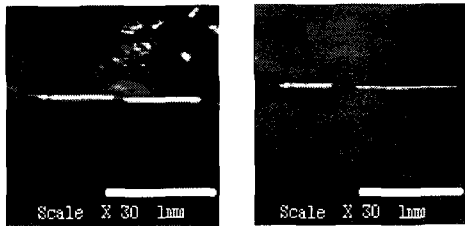


Fig. 19 Photograph of micro turning lathe



(a) under machining (b) machined part

Fig. 20 Micro machining of the small rod

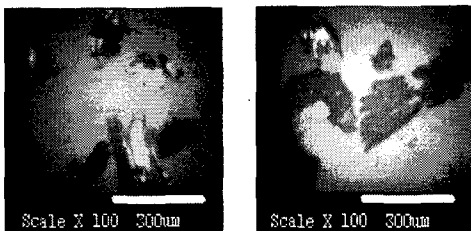


Fig. 21 Chip shapes during machining

6. 결론

본 연구에서는 Micro factory의 기초 단위로 사용될 Micro 공작기계에 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 입력 전압에 따라 정방향과 역방향의 속도가 달라

지는 Hysteresis 특성을 고찰하였다. 이 시스템에서 Feedback을 시켰을 경우에는 이송 정밀도가 $1.43 \mu\text{m}$ 로 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 2mm 의 구리 봉에 대해 다이아몬드 공구로 절삭이 가능하였으며, 최종적으로 직경 $65 \mu\text{m}$, 길이 1mm 의 선삭가공을 실현할 수가 있었다.

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

후 기

본 연구는 과학기술부 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의하여 수행되는 연구내용을 요약한 것입니다.

참고문헌

1. G. Benavides, P. Yang, D. Adams, "Meso-machining capabilities," NSF Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing, May 16, Northwestern University, 2000.
2. Z. Yu, K. P. Rajukar, "Generation of complex micro cavities by micro EDM," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 233-238, 2000.
3. J. Qian, H. Ohmori, T. Kato, "Fabrication of micro shapes of advanced materials by Elid-grinding," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 269-274, 2000.
4. T. Moriwaki, E. Shamoto, "Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration," Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 559-562, 1991.
5. C. R. Friedrich, P. J. Coane, M. J. Vasile, "Micromilling development and applications for microfabrication,"

- MICROELECTRONIC ENGINEERING, Vol. 35, pp. 367-372, 1997.
6. 안치현, 김규만, 주종남, "전기화학적 에칭을 이용한 텅스텐 미세 탐침가공," 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 2, pp. 111-118, 2001.
7. A. C. Wang, B. H. Yan, X. T. Li, F. Y. Huang, "Use of micro ultrasonic vibration lapping to enhance the precision of microholes drilled by micro electro-discharge machining," Int. J. of Mach. Tools & Manufact., Vol. 42, pp. 915-923, 2002.
8. B. Bhattacharyya, S. Mitra, A. K. Boro, "Electrochemical machining: new possibilities for micromachining," Robotics and Computer Integrated Machining, Vol. 18, pp. 283-289, 2002.
9. J. J. Sun, H. G. Huang, Z. Q. Tian, L. Xie, J. Luo, X. Y. Ye, Z. Y. Zhou, S. H. Xia, Z. W. Tian, "Three-dimensional micromachining for microsystems by confined etchant layer technique," Electrochimica Acta, Vol. 47, pp. 95-101, 2001.
10. W. A. Beck, "Recent advances in laser micro-machining," Proc. of SPIE, pp. 2-15, 2000.
11. Y. Okazaki, T. Kitahara, "NC micro-lathe to machine micro-parts," American Society for Precision Engineering, Vol. 22, pp. 575-578, 2000.
12. N. Lobontiu, M. Goldfarb, E. Garcia, "A piezoelectric-driven inchworm locomotion device," Mechanism and Machine Theory, Vol. 36, pp. 425-443, 2001.
13. 박창엽, "전지전자용 압전세라믹스," pp. 174-161, 1995.
14. PI社. "Nanopositioning," pp. 1.6, 4.24-25, 1998.
15. J. M. Paros and L. Weisbord, "How to Design Flexure Hinges," Machine Design, pp. 151-156, Nov., 1965.
16. 김인수, 이홍식, 송준엽, "이송자벌레로의 압전 세라믹 작동기 응용," 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 8 호, pp. 157-163, 2001.
17. Z. X. Wang, K. Jouaneh and D. Dornfield, "Design and characterization of a linear motion Piezoelectric microactuator," IEEE Conf. Robotics and Automarion, pp. 1710-1715, 1989.
18. 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.