

피에조 이송기구를 이용한 초소형 선반

고태조#, 정종운*, 정병목**, 김희솔**

A Micro Turning Lathe Using Piezo Feed Driver

Tae Jo Ko #, Jong Woon Jeong*, Byeong Mook Chung** and Hee Sool Kim**

ABSTRACT

Micro-machine tool is essential in the micro/meso cutting for the sake of saving of space, resources, and energy. In this research, a micro-turning lathe was fabricated with piezoelectric feed drive mechanism, and motion of each axis was generated by stepwise mechanism with two piezo actuators. The resolution to drive the axis was $0.05 \mu m$ and position accuracy less than $2 \mu m$ was assured. From the positioning experiment, piezo feed mechanism is good enough for the micro machine tools. Many turning experiments were carried out with diamond-cutting tools to evaluate cutting capability of a machine tool. Continuous flow type chip could be obtained even if the cutting speed was very low due to small diameter of workpiece. However, thorough investigation about machineability in micro/meso cutting is inevitable to assure high quality surface roughness in micro machine tool.

Key Words : Micro machine tools (초소형 공작기계), Piezo(피에조), Stepwise (계단식), Inchworm (자벌레)

1. 서론

본 논문에서는 Nano/Micro 와 Macro 의 중간 단계인 Micro/Meso 크기의 가공물에 대해 초소형 공작기계로 절삭가공을 수행하기 위한 이송기구와 이를 바탕으로 제작된 가공기계, 그리고 미세가공에 관하여 논한다. 현재 이러한 Micro/Meso 크기의 제품을 가공하기 위해서 기계적, 열적, 전기화학적 방법이 다양하게 개발되어 있으며, 대표적인 것들이 레이저 가공, μ -EDM, ELID 연삭, Micro 사출 및 압출, 집속 이온빔, 건식 및 습식에칭, 전해가공, 초정밀 다이아몬드 절삭가공 등이다.¹ 특히 마이크

로 가공에 있어서는 특수가공이 보다 보편화되어 있지만, 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 가공보다는 에너지 절약, 공간절약, 달성 가능한 가공정밀도의 향상 및 Micro/Meso 가공의 보편적인 실현을 달성하기 위해 초소형 공작기계에 대한 연구가 일본을 시작으로 다양하게 연구되고 있다.²⁻⁶

물론 초소형 공작기계가 갖는 한계성, 즉 취약한 정적 동적 특성, 공간의 제약으로 인한 구성유

접수일: 2005년 4월 22일; 게재승인일: 2005년 9월 9일

교신저자: 영남대학교 기계공학부

E-mail: tjko@yu.ac.kr, Tel. (053) 810-2576

* 영남대학교 대학원 기계공학과

** 영남대학교 기계공학부

니트의 소형화, 공작물의 취급난이 등이 문제가 될 수 있으나, 소형으로 인한 발열저감, 가감속 특성의 개선, 운동정밀도의 향상은 큰 장점으로 부각되고 있다.¹

Micro/Meso 크기의 공작물을 가공하기 위한 초소형 공작기계는 크게 주축계, 이송계, 공구계로 나눌 수가 있다. 이 중에서 공작기계의 소형화 및 고정밀화를 달성하기 위해서 가장 크게 고려되는 부분은 이송계 부분이다. 기존의 볼 스크류, 리니어 모터 등은 부피의 한계 때문에 대안이 필요하며, 최근 반도체용 스테이지, Micro 펌프, 초소형 측정기구 등 미세동작분야에서 고정밀 위치 제어가 가능한 주구동원으로서 가장 현실적인 방법으로 피에조(Piezo) 구동기가 널리 이용되고 있다.^{7,8}

피에조 구동기는 압전소자로 되어 있으며, 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로 양방향으로 변환을 일으킬 수 있기 때문에 구동기 및 센서로서 모두 사용될 수 있다. 피에조 구동기는 소형이면서 구동 분해능이 아주 높다는 특징을 가지고 있으며, 피에조 세라믹의 신축이 atomic process 이므로 운동이 부드럽고 연속적이기 때문에 stick-slip 이 없고 스테인레스 강으로 된 유사한 구조물에 비해 20% 이상의 초과 강성을 가진다. 따라서, 힘 발생력이 크고 구동 에너지가 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. 이러한 단점을 극복하기 위해 1975 년 Burleigh Instruments 에서 인치웸 구동방식이 개발되어진 이후 압전소자를 이용한 많은 구동 메커니즘들이 많이 개발되어져 왔다.⁹

본 논문에서는 소형이면서 정밀한 위치제어가 가능하고, 대변위 이송을 목적으로 2 개의 압전소자로 계단(Stepwise) 운동² 을 하는 구동기를 사용하여 초소형 공작기계에 적용하고자 한다. 이 시스템에 대하여 마이크로 위치센서를 이용한 피드백 제어를 통해 구동특성을 검증하고, 이를 바탕으로 초소형 공작기계를 이용하여 Micro/Meso 절삭가공을 시도하여 초소형 공작기계의 미세절삭 가능성에 대해서 고찰하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 피에조 구동기 설계

2.1 계단구동기구의 원리

계단구동기구의 전진, 후진 방향에 대한 구동 원리를 Fig. 1 에 나타내었으며, Fig. 2 는 이를 구동하기 위한 제어신호의 형태를 간단하게 도식화한 것이다. V 홈 가이드 내에 삽입되어 움직이는 슬라이드는 고정부와 구동운동을 담당하는 구동부로 나뉘어지며, 서로 탄성 힌지로서 연결되어있다. 다시 고정부는 압전소자의 발생변위에 따라 양 가이드에 고정이 될 수 있도록 2 개의 블록이 탄성힌지로 연결되어 있다.² 전, 후 방향의 이송은 두 개의 압전소자에 순차적으로 변위를 발생시킴으로써 계단운동처럼 이송이 이루어지며, 이를 위해 일정한 타임 스케줄에 따른 두개의 입력신호를 사용한다. Fig. 1 에서 보여 주듯이 단위 사이클당 구동원리는 4 개의 과정으로 구성된다. 즉, 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 초

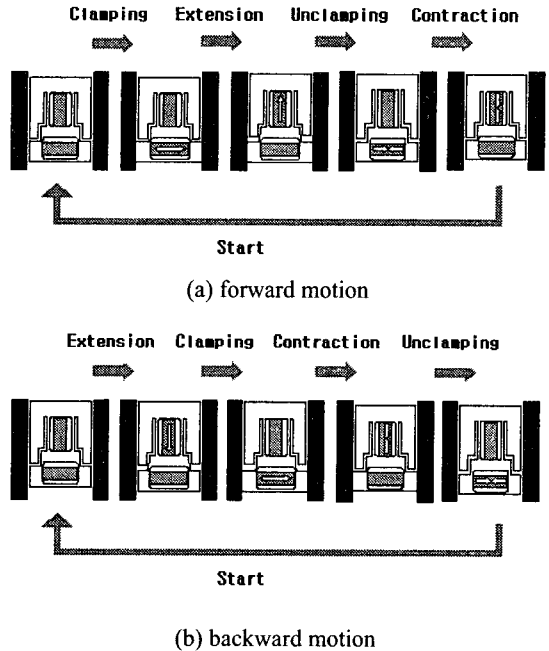


Fig. 1 Stepwise motion of two piezo actuators

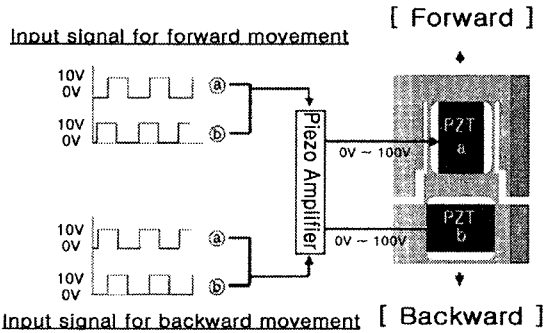


Fig. 2 Signals of two piezoelectric elements for stepwise motion

기 상태에서 일정변위 만큼의 이송이 진행되는 것이다.

실험에 쓰여진 piezo 구동기는 독일 PI 社 제품 (P-802.00)이며 슬라이드 재질은 연성이 큰 황동을, 가이드는 탄소강(SM 45C)을 사용하였다.

2.2 탄성힌지 설계

압전소자에 전압을 가하면 압전소자의 길이방향으로 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. 이때 탄성힌지를 적절하게 설계하는 것은 매우 중요하며, 이송계의 강성은 피에조의 강성, 힌지의 강성, 그리고 피에조가 조립될 때의 조립예압에 의해 결정된다. 압전소자에 의해 변형된 슬라이드의 형상을 예측하고 또한 적절하게 구동 될 수 있는가를 확인하기 위해 상용해석 프로그램인 ANSYS 5.7 를 사용하여 힌지가 $100 \text{ N}/\mu\text{m}$ 의 강성값을 가지도록 탄성힌지를 설계하였다. Fig. 3 은 이때의 변위를 해석한 결과로서 구동부의 압전소자가 $6 \mu\text{m}$ 늘어났을 때 슬라이드의 변형 모습이다.

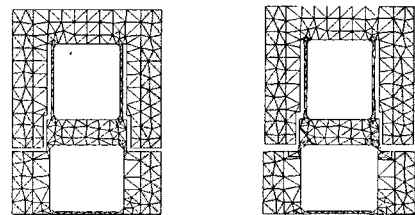
압전소자에 의해 발생하는 변위는 탄성힌지의 복원력에 의한 변위만큼 수축한다. 탄성힌지에 의한 실제 압전소자 변위는 아래 식(1)을 따른다.¹⁰

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

$$D_x = D_{\max} \left\{ k_p / (k_p + k_s) \right\}$$

여기서 힌지 강성을 k_s , 압전소자의 강성은 k_p , 외부하중이 없을 때의 압전소자 최대변위는 D_{\max} , 탄성힌지에 의한 변위손실을 D_x 로 나타낸다.

구동부에서 발생되어지는 변위는 슬라이드의 스텝모션과 직접적인 관계에 있으며, Fig. 4 는 이를 알아보기 위하여 각각의 입력전압 크기에 따라서 구동부에서 발생되어진 변위를 측정 한 결과이다. 그림에서 보듯이 입력전압의 크기에 따라서 변위량은 변하며, 100V 의 입력전압에서 $4 \mu\text{m}$ 인데, 이것은 압전소자의 강성이 $200 \text{ N}/\mu\text{m}$ 인 본 제품에서 식 (1)로 주어진 계산에 의하면 정확하게 $2 \mu\text{m}$ 의 손실변위가 나옴을 볼 수 있다. 또한, 그림에서 30V 이하의 입력전압을 주면 마이크로미터 이하의 스텝모션을 얻을 수 있음을 알 수 있다.



(a) Before deformation (b) After deformation
Fig. 3 Finite element analysis of the flexure hinges

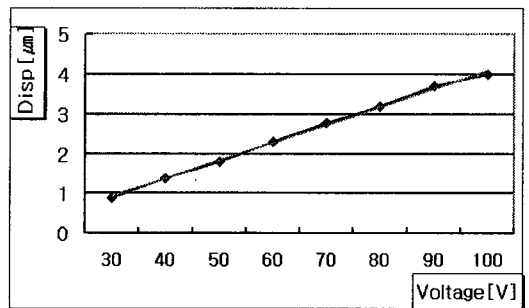


Fig. 4 Slider displacement according to the input voltage

3. 피에조 구동기의 제어

3.1 제어장치의 구성

1 축에 대한 구동특성을 파악하기 위한 전체적인 장치의 구성도를 Fig. 5 에 나타내었다. 구동 신호는 제어특성을 고려하여 여러 형태의 입력신호를 사용할 수 있으며, 다음 절에서 설명한다. 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 분해능 0.05 μm 의 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.

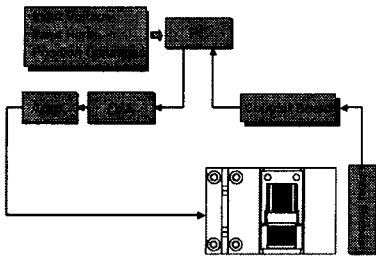


Fig. 5 Schematic diagram of micro translation

3.2 입력파형의 결정

고정부 및 이송부에 가할 전압파형은 수축과 팽창에 따른 변위발생능력, 즉 구동부가 이송을 발생시키고 난 후 고정부가 풀리면서 슬라이드가 앞으로 전진할 때 구동부 스스로가 수축되는 양에 따라서 이송량이 일부 감소하는 값에 의해 결정할 수 있다. 이것을 결정하는 것은 고정부와 구동부

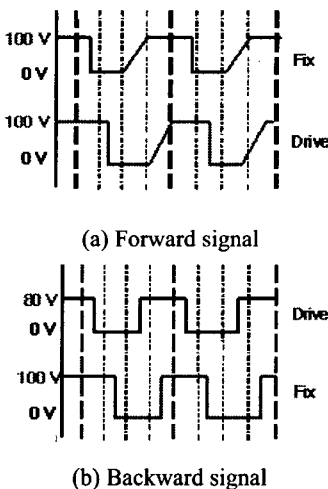


Fig. 6 Optimized input signal pattern

피에조에 가하는 신호의 위상차를 기준인 90° 위상차에서 0°, 45° 로 변화시키면서 실험을 통하여 결정하여야 한다. 실험에 의하면 90°의 위상차를 주는 입력신호가 가장 양호한 이송 결과를 나타내었다.

파형 형태는 사각 펄스파를 기준으로 포물선, 사다리꼴 등의 파형형태에 대해 실험을 하였다. 기초실험에서, 역방향 수축 현상을 줄이기 위해서는 구동 피에조의 수축 타이밍에서 구동부가 충분한 마찰력을 가져야 하며, 피에조의 인장과 수축에 따른 충격 현상을 줄여야 함을 파악하였다. 이에 따라서 비대칭 경사 파형(Asymmetric ramp wave)을 인가하여 위 결과들과 조합한 실험을 실시하였다. 각 이송 방향에 대하여 최적의 이송 신호를 구현한 것이 Fig. 6 이다. 그림에서 보듯이 정방향의 경우는 사다리꼴로, 역방향의 경우는 사각펄스파형으로 결정을 하였는데, 이것은 stepwise 이송계의 정방향과 역방향 이송특성이 다르기 때문이다. 이 신호에 대한 이송 거동은 Fig. 7 이다. 정방향, 역방향 모두 진행방향에 대한 반대 방향으로 이송량의 수축현상은 많은 개선이 있었다.(100V 의 입력파형의 경우 손실변위는 2 μm 에서 0.5 μm 이내)

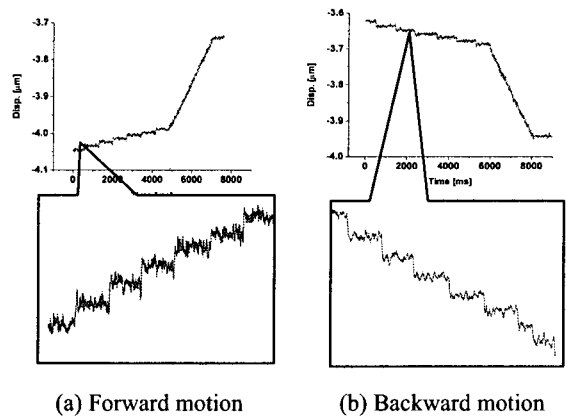


Fig. 7 Motion characteristics with optimized input signals

3.3 이송계의 구동특성

Fig. 8 은 Linear Encoder 를 이용하여 Feedback 제어를 했을 때의 슬라이드의 구동특성을 보인 것이다. 실험 조건은 동일한 입력 주파수 100 Hz 일 때의 입력전압을 60 -100 V로 하여 정방향/역방향

으로 3 회 반복 이송 시켜 그 결과를 도표에 나타내었다. Fig. 9 는 이 때의 위치오차 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 슬라이드의 구동은 선형적이고, 입력전압에 따라 속도차이가 현저하게 나타남을 알 수 있다. 또한, 이 시스템의 Feedback 신호에 따른 구동에서 평균 위치오차가 $2 \mu\text{m}$ 이하로 나타났다.

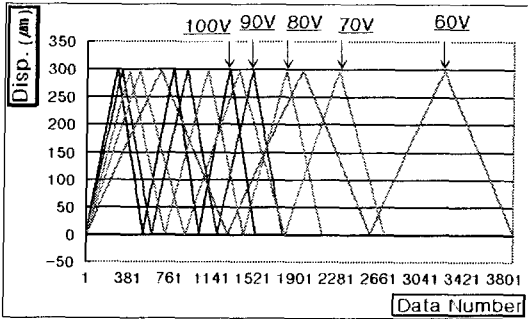


Fig. 8 The feedback test of each voltage

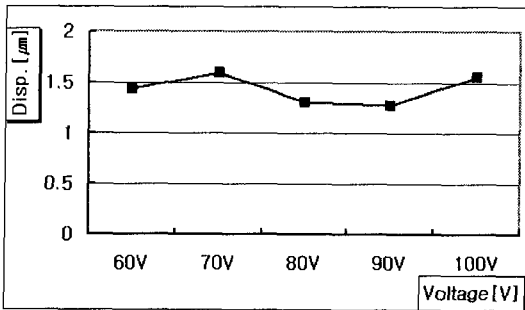


Fig. 9 The position error of the slider

4. 초소형 선반의 제작

Fig. 10 은 본 연구에서 제작한 초소형 공작기계의 한 종류인 선반이다. 이 기계는 전술한 2 개의 피에조 구동기로 구성된 계단구동 이송계를 갖추고 있으며, x 및 z 축인 2 축으로 되어 있다. 주축은 10,000 rpm 의 DC 모터로부터 풀리를 통하여 구동되어 진다. 주축은 전후 두개의 초소형 볼 베어링으로 구성되어 있다. 공구대에는 다이아몬드 공구를 장착할 수 있도록 하였으며, 다이아몬드 공구는 다결정(PCD) 또는 단결정 다이아몬드공구(MCD)이다. 전체 공작기계의 사이즈는 $78 \times 50 \times 52 \text{ mm}$, 그리고 무게는 520gr 으로서 손바닥 크기(palm-top)이

다. Table 1 은 본 연구에서 제작한 초소형공작기계의 전체 사양을 나타낸다.

이송을 위한 제어장치는 3 장에서 기술한 방법으로 제어장치를 구성하게 되며, Fig. 11 은 이송계의 각 축에 따른 이송 방향 버튼과 단위 이송량, 이송 속도를 제어하고, 엔코더 값은 우측에 따로 표시하여 open-loop 타입으로 구성된 JOG mode 제어창을 보여주고 있다.

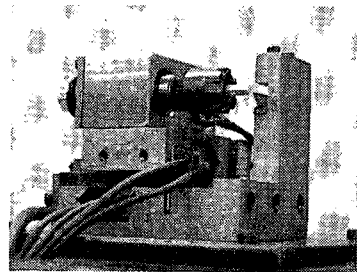


Fig. 10 Photograph of micro turning lathe

Table 1 Specification of micro turning lathe

Specification of Motor driven Micro Lathe		
Max. cutting length		5 mm
Max. chucking diameter		3 mm
Spindle	Type	Micro DC motor
	Max. speed	10,000 rpm
	Torque constant	16.3 mNm/A
	Rated output	2 W
Table	Feed type	PZT actuator [stepwise]
	Table stroke	50 mm
	Min. feed	250 nm
	Max. velocity	300 $\mu\text{m/s}$
	Rigidity (axial)	6.6 N/ μm
Positioning accuracy		< 2 μm
Machine size / weight		78*50*55 mm / 0.52 kg
Cutting speed		30 m/min
Material		Aluminum, Brass
Tool		PCD, MCD bite

초소형 선반의 NC 제어 구동을 위하여 Visual C++ 6.0 으로 다음과 같이 프로그래밍하였다. 압전 구동기의 입력 전압에 따른 이송량과 리니어 엔코더로부터 참조하는 목표 위치 값을 Reference Pulse 방식으로 이송 지령을 전달한다. 또한, Fig. 12 와 같이 모델링 틀에서 출력된 Tool path 파일을 본 시스템에서 사용 가능한 각 축의 목표 좌표 값, 이송 속도, 직선 및 원호 가공 식별자 등으로 구분, 변화시켜 각 압전 소자에 해당하는 포트에 신호를 출력하고 각 G 코드 라인마다 위치 값을 피드백 받으며 이송한다.

위 제어 순서도에 따라 실제 가공과 동일한 형태의 가상 다이얼로그를 추가하여 엔코더 값을 입력받아 실시간으로 피삭재의 직경과 공구의 위치 등을 구현하였다. Fig. 12 에 NC 주행을 위한 프로그램의 다이얼로그 창을 나타내었다. 입력된 NC data 의 이송 좌표 값을 붉은 색의 공구 경로로 표현하였고 공구의 이송에 따라 절삭 포인트인 공구 끝단이 현재 위치를 표현하도록 되어있다.

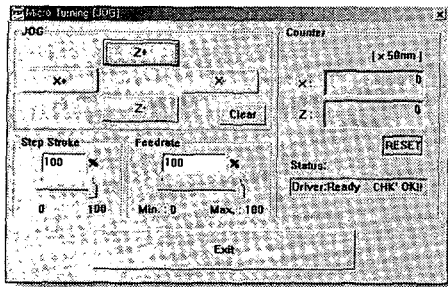


Fig. 11 JOG mode control dialog

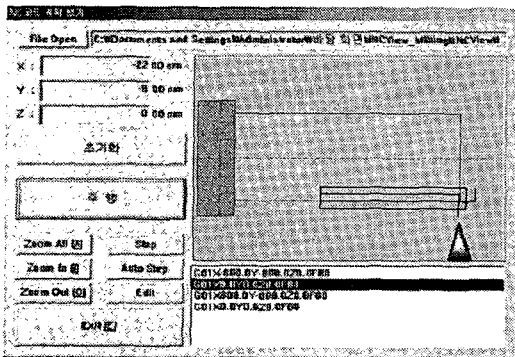
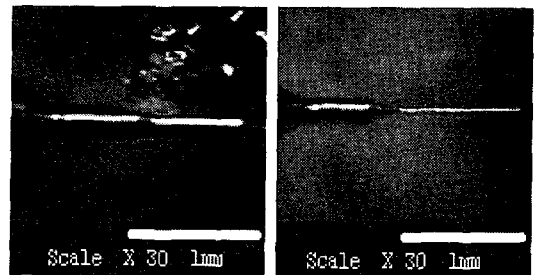


Fig. 12 NC mode control dialog

5. 미세선삭가공

제작된 초소형 선삭가공용 선반의 가공 가능성을 평가하기 위하여 미세환봉을 Fig. 13 과 같이 절삭을 하였다. 주축에 설치된 콜렛형 공작물 지지장치로 지름 2 mm 의 알루미늄 봉을 가공한 것이 Fig. 13 이다. 이 가공에서 이송속도는 $0.12 \mu\text{m}/\text{rev}$, 절삭깊이는 $2 \mu\text{m}$ 이며, 최종가공으로 직경 $66.7 \mu\text{m}$, 길이 1 mm 의 선삭가공을 달성할 수가 있었다.



(a) under machining (b) machined part

Fig. 13 Micro machining of the small rod

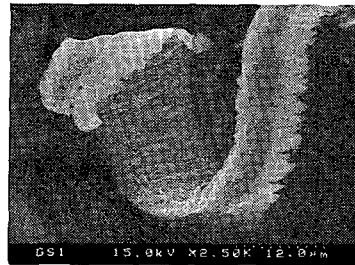


Fig. 14 SEM photo of Al2024 chip

이때 생성된 칩의 SEM 사진이 Fig. 14 이다. 그림에서 보는 것처럼 칩은 연속형 칩으로 절삭이 잘 이루어짐을 알 수 있으며, 초소형 선삭가공기를 이용한 초미세 절삭과정에서도 정밀 절삭이 가능함을 확인할 수 있었다. 가공된 표면의 거칠기를 광학식 비접촉장치로 측정할 결과 Fig. 15 와 같이 이론적인 값($0.1\text{-}0.6 \mu\text{m}R_{\text{max}}$)보다 큰 값($2.47 \mu\text{m}R_{\text{max}}$)으로 측정되었는데, 이 이유는 이것은 기존 알루미늄 절삭 조건에 비해 절삭 속도와 이송이 느리기 때문에 가공 후 공구의 여유면에서 burnishing 효과에 의해 칩이 가공면에 다시 융착 되기 때문이다.¹¹

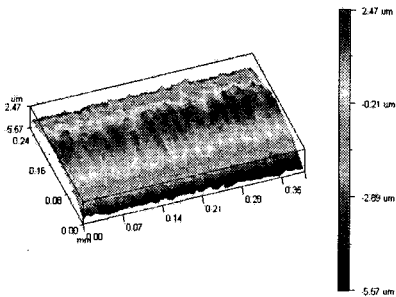


Fig. 15 Surface roughness measured by optical device

따라서 초미세가공에서는 절삭속도의 저감에 따른 대안으로 초고속의 주축이 필요함을 알 수가 있으며, 일반 선삭과는 달리 적절한 절삭속도를 유지하기 위해서는 수십만 rpm 에 달하는 공기주축 등이 필요하다. 따라서 이에 따른 주축계의 동특성 향상에 관한 세심한 주의가 필요할 것으로 보인다.

한편, Fig. 16 은 상기의 실험에 상응하는 가공용 천연다이아몬드의 칩핑 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 절삭속도의 저하로 인하여 일반적인 다이아몬드 선삭의 경우보다 매우 빨리 절삭공구의 소손현상을 관찰할 수 있었다. 이것으로 볼 때에 초소형 공작기계로 미세 치수의 직경을 가공할 시에는 절삭속도 저감에 의한 요소를 고려해야 함을 알 수 있다.

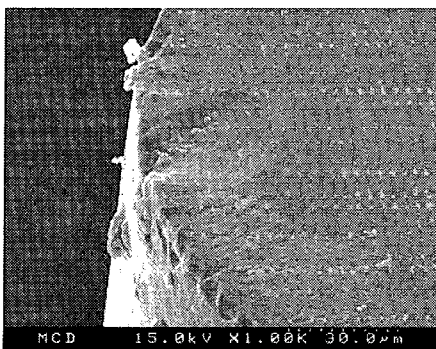


Fig. 16 Chipping of diamond tool observed by SEM

한편 미세직경의 공작물을 가공할 시에는 공작물의 휨현상에 의한 최소가공 가능한 공작물의 직경이 결정된다. Fig. 17 은 최소 직경 가공후 가공물의 사진이다. 가공 결과, 목부에서 $66.7 \mu\text{m}$ 의 직

경을 획득할 수 있었으며, 이 때 끝단에서는 $86.11 \mu\text{m}$ 로 나타났다. (세장비 - 목부 : 15.2, 끝단 : 11.7) 이것은 단위 이송량이 250 nm 로 아주 느린 이송 속도임에도 불구하고 심압대를 장착하지 않아 끝단부에서는 가공이 이루어지지 않고 재료의 탄성 변형으로 인해 피삭재에 처짐이 발생하기 때문이다. 따라서 micro/meso 선삭에서는 최소직경 가공을 위해서는 공작물의 처짐현상에 대한 보다 세심한 배려가 필요하다.

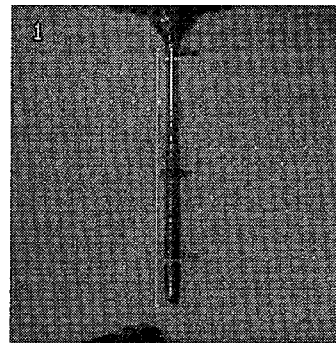


Fig. 17 Photo. of minimum diameter machining

6. 결론

본 연구에서는 초소형 공작기계 중 소형선반을 구성하고, 이를 통하여 미세절삭 가공능력을 평가하기 위한 것이다. 초소형 가공기에 있어서 핵심적인 부분은 이송계이며, 본 연구에서는 소형화와 정밀성이 보장될 수 있는 피에조 구동기를 활용하였다. 기존의 인치웸 이송기처럼 3 개의 피에조를 사용하지않고 2 개의 피에조를 이용한 계단형 이송기구를 이용하여 보다 소형화를 이루는 것이 가능하였다. 본 연구를 통하여 미세절삭을 수행해본 결과 연결류의 금속에 대해서는 비록 초소형 공작기계일지라도 미세절삭이 가능하며, 경질류 등 보다 미세절삭부분에 대해서는 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2003 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2003-002-D00031)

참고문헌

1. Adams, D. P., Vasile, M. J., Benavides, G., Campbell, A. N., "Micromilling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools," Precision Engineering, Vol. 25, pp. 107-113, 2001.
2. Okazaki, Y., Kitahara, T., "NC micro-lathe to machine micro-parts," American Society for Precision Engineering, Vol. 22, pp. 575-578, 2000.
3. Kussul, E., Gaidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Velasco, G., Kasatkina, L., "Development of micromachine tool prototypes for microfactories," J. Micromech. Microeng., Vol. 12, pp. 795-812, 2002.
4. Okazaki, Y., Mishima, N., Ashida, K., "Microfactory and micro machine tools," The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology, Daejeon, Korea, pp. 1-6, 2002.
5. Lu, Z., Yoneyama, T., "Micro cutting in the micro lathe turning system," Int. J. of Mach. Tools & Manuf., Vol. 39, pp. 1171-1183, 1999.
6. Wang, W., Kweon, S. H., Yang, S. H., "A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool," J. of Materials Processing Technology, to be appeared, 2005 .
7. Li, J., Sedaghati, R., Dargahi, J., Waechter, D., "Design and development of a new piezoelectric linear inchworm actuator," Mechatronics, Vol. 15, Issue 6, pp. 651-681, 2005.
8. Tenzer, P. E., Mrad, R. B., "On amplification in inchworm precision positioners," Mechatronics, Vol. 14, Issue 5, pp. 515-531, 2004.
9. Burleigh Instruments Inc. Catalogue, The power of precision in nanopositioning, pp. 388-1295, 1995.
10. Paros, J. M., Weisbord, L., "How to design flexure hinges," Machine Design, Vol. 37, pp. 151-157, 1965.
11. Seong, C. H., Kim, H. C., Kim, K. S., "Characteristics of surface roughness in the high speed micro turning of aluminum alloy," Journal of the KSPE, Vol. 16. No. 7, pp. 94-100, July 1999.