

미세 가공력 검출기구를 이용한 나노패터닝

방진혁*, 권기환, 박재준(한양대 대학원 정밀기계공학과), 조남규(한양대 기계정보경영공학부)

Nanopatterning using Machining Force Sensing Module

J. H. Bang, K. H. Kwon, J. J. Park (Prec. Mech. Eng. Dept., HYU), N. G. Cho (Mechanical Eng. Dept., HYU)

ABSTRACT

This paper presents a high sensitive force sensing module to measure machining forces for a tip-based nanopatterning instrument. The force sensing module utilizing a leaf spring mechanism and a capacitive displacement sensor has been designed to provide a measuring range from $80\mu\text{N}$ to 8N . This force sensing module is mounted on a PZT driven in-feed motion stage with 1 nm resolution. The sample can be moved by a X-Y scanning motion stage with 5 nm resolution. In the patterning experiments, the machining forces were controlled and monitored by the force sensing module. Then, the patterned sample was measured by AFM. Experimental results demonstrated that the developed force sensing module can be used as an effective sensing device in the nanopatterning operation.

Key Words : Nanoscratch(나노스크래치), Nanopatterning(나노패터닝), Piezoelectric actuator(압전 액츄에이터), Measurement(측정)

1. 서론

현재 급속하게 발전하고 있는 MEMS 기술의 발전은 미세한 구조의 반도체 소자 및 기계부품의 개발을 가능하게 하였다. 가장 널리 사용되고 있는 미세패턴 및 구조물 제작 기술로서는 포토리소그래피, LIGA, 이온빔, X 선등의 광학 리소그래피 기술이다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 이러한 리소그래피 기술은 시설에 대한 초기 투자비용이 너무 높고, 공정 특성상 다단계의 마스크 및 에칭 공정을 필요로 하여 제작시간이 많이 소요된다. 뿐만 아니라, 패턴 및 디자인 변경을 위해서는 새로 마스크를 제작해야 하기 때문에 단품종 대량 생산에는 적합하나 다품종 소량 생산에는 부적합하다. 또한, 가공 가능한 기반 재료가 대부분 실리콘에 한정되어 있다는 단점을 갖는다. 더구나 광학 리소그래피 기술은 레이저 파장의 한계로 인하여 제작 가능한 최소 선폭의 물리적 한계가 예상되고 있다. 최근에 이러한 단점을 보완하기 위하여 스캐닝 프로브 리소그래피(Scanning probe lithography) 기술을 응용한 초미세 패턴 가공 방법 등이 연구되고 있다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 이 방법은 미세 탐침(tip)을

이용하여 시료표면에 직접 힘을 가하여 형상을 기계적으로 변형하는 방법을 통해 패턴을 가공하기 때문에, 여러 가지 재료에 대해 다양한 패턴을 신속하고 저렴하게 수행할 수 있다는 장점을 갖는다. 따라서 이러한 리소그래피 기술을 적용하여 다양한 형상의 나노 패턴을 제작하기 위해서는, 시료에 가해지는 미세한 힘과 변위를 정밀하게 측정하고 제어하기 위한 초정밀 시스템이 필수적으로 요구된다. 현재, 미세탐침기반 리소그래피 기술에 가장 널리 적용되고 있는 장비로는 원자현미경(AFM)이 있으나, 이러한 장비는 원래 시료의 표면 형상을 평가하기 위한 측정 장비로서 개발된 것이기 때문에, 시료에 가하는 힘의 크기가 매우 작아($\text{nN}\sim\mu\text{N}$) MEMS 구조물 가공을 위한 일반적 해결책으로 보기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 크기는 수 N 에서 작게는 0.1mN 이하 수준에 이르는 힘으로 가공이 가능하며, 동시에 가공 깊이까지 측정할 수 있는 미세 가공력 검출기구가 개발 되었으며, 이를 이용한 나노가공 시스템이 구축되었다. 또한 이 시스템을 이용한 나노패터닝 실험에 의해, 개발된 미세 패턴 가공 시스템의 효용성을 검증하였다.

2. 시스템의 구성 및 원리

2.1 전체 시스템의 구성

Fig. 1 은 미세 가공력 검출기구를 이용한 미세 패턴 가공 시스템의 개요도를 보인다. 본 연구에서 제안된 시스템은 크게 미세 가공력 검출기구, 시료의 초정밀 위치결정을 위한 X-Y 축 스캐닝 스테이지, 그리고 미세 힘 및 변위 발생을 위한 Z 축 스테이지로 이루어진다.

미세 가공력 검출기구에서 리프 스프링의 탄성계수를 결정하기 위하여 힘 분해능과 고유진동수를 고려하였다. 힘 분해능을 0.2mN 으로 결정하고 Table 1 에 나와 있는 압전 액츄에이터와 정전 용량형 센서의 분해능을 고려하여 탄성계수를 170N/mm 로 정하였으며, 이때의 고유진동수는 약 8.8 kHz 였다. 시료에 가해지는 힘과 변위의 양은 정전 용량형 센서로 측정된다. 이때 힘 및 변위측정용 정전 용량형 센서들은 Abbe 오차를 최소한으로 줄이기 위해 측정대상의 운동축과 일직선에 위치하도록 하였다. Z 축 스테이지는 정확한 구동을 위하여 압전 액츄에이터가 이용되며 이중 복합 선형스프링 기구를 사용하여 회전이나 병진의 기생운동(parasitic motion)이 없고, 정확한 직선운동을 할 수 있는 구조로 설계되었다. 한편 시료의 이동을 위한 XY 축 스테이지는 일체형 구조로 설계하여 조립오차를 최소화하였으며, Z 축 스테이지와 같이 이중 복합 선형스프링을 사용하여 정밀한 X-Y 운동을 할 수 있도록 설계되었다. 또한 circular hinge 와 레버기구는 압전 액츄에이터의 변위를 증폭시키기 위해 사용되었다.

2.2 힘 및 변위의 검출 원리

초기 상태에는 두 정전 용량형 센서에서의 출력 변화가 없다. Z 축 압전 액츄에이터가 변위를 발생하게 되면, Fig. 2 에서와 같이 힘 감지 모듈의 정전 용량형 센서 1 에서는 스테이지의 변위 x_1 이 검출된다. 이 때, 다이아몬드 팁이 시료와 접촉하지 않은 상태라면, 미세 가공력 검출기구의 다이아몬드 팁 뒤에 장착된 정전 용량형 센서 2 에서는 변위가 발생하지 않게 된다. 그러나 다이아몬드 팁이 시료에 접촉하게 된다면, 센서 2 에서는 x_2 가 검출되게 된다. 이 때 다이아몬드 팁이 시료에 가하는 힘 F_f 는 식(1)과 같다.

$$F_f = k_f x_2 \quad (1)$$

또, 다이아몬드 팁이 시료에 접촉한 상태에서 다이아몬드 팁에 힘이 제거되면 시료의 탄성력 F_s 에 의해 일부 복원된다. 이 때 최종적으로 압

입되는 깊이 p 는 식(2)와 같다.

$$p = x_1 - x_2 \quad (2)$$

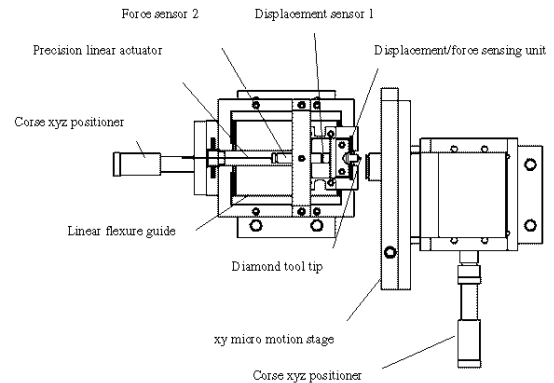


Fig. 1 Schematic of the nanopatterning system

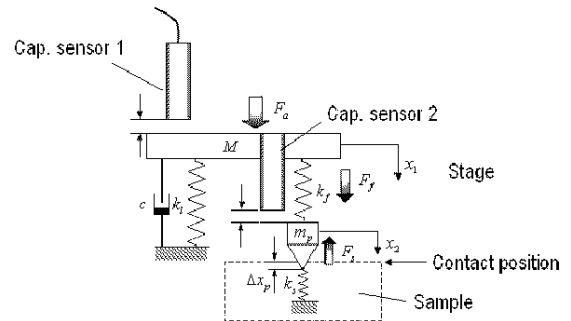


Fig. 2 Principle of force detection

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치의 구성

Fig. 3 은 실험 장치의 개략적인 구성도를 보인다. 실험 장치는 압전 액츄에이터들이 장착된 X-Y 축, Z 축 스테이지, 그리고 힘과 변위를 감지하기 위한 정전 용량형 변위 센서들로 구성되어 있다. PC 에 의해 명령되는 전압은 16bit 의 D/A 채널(D-SPACE, DS-1104)로 PZT 전압증폭기를 거쳐 Z 축 스테이지의 압전 액츄에이터에 인가되고, 이 때의 구동 변위 (x_1) 는 정전 용량형 센서 1 에 의해 감지된다. 또한, 팁 모듈의 리프 스프링에 장착된 다이아몬드 팁이 시료와 접촉하게 될 때 발생하는 변위 (x_2)는 정전 용량형 센서 2 에 의해 감지되며, 리프 스프링의 탄성계수로부터 시료에 가해지는 접촉력 (F_f)이 산출된다. 한편, X-Y 축 스테이지 위에 시편 홀더를 장착하여 실험 시 시료가 정확한 위치로

Table 1. Specification of Experimental Apparatus

	Specification	
	PZT Actuator (P-841.40) [PI]	Travel @0 to 100V
Stiffness		15N/ μm
Resonance Frequency		8.5 kHz
Resolution		1.2 nm
Cap. Sensor (2085, 4810) [ADE]	Range	$\pm 50 \mu\text{m}$
	Resolution	0.5 nm
	Bandwidth	1000 Hz
	Sensitivity	5 $\mu\text{m}/\text{V}$
XY Stage	Material	Al 7075 T6
	Max. Motion Range	175 $\mu\text{m} \times 175 \mu\text{m}$
	Resolution	5 nm \times 5 nm
Z Stage	Material	Al 7075 T6
	Max. Motion Range	50 μm
	Resolution	1 nm
Force / Disp. Sensing Module	Spring Stiffness	159.8N/mm
	Resonance Frequency	8.5 kHz
	Diamond Tip Radius	5 μm

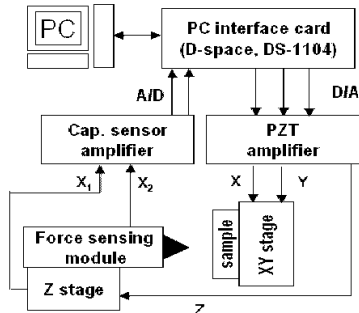


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

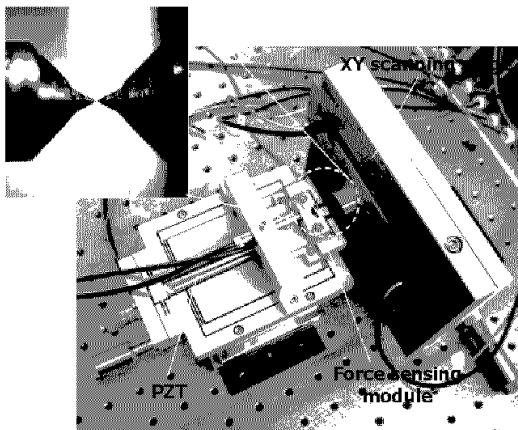


Fig. 4 Experimental setup

움직이게 한다. Fig. 4 는 본 연구에서 설계 제작된 실제의 시스템을 보이고 있으며, 실험장치에 사용된 구성요소의 제원을 Table 1 에 나타내었다.

3.2 측정실험 및 응용

다이아몬드 팁에 의해 시료에 가해지는 힘을 측정하기 위해서는 검출기구의 리프 스프링 탄성계수가 정밀하게 평가되어야 한다. Fig. 5 는 정전 용량형 센서를 이용하여 측정된 검출기구 리프 스프링의 탄성계수 평가 결과를 보여준다. 측정 결과 159.8N/mm로 FEM 해석에 의한 강성계수 170.2N/mm보다 약간 작게 나오는 것을 알 수 있다. 이것은 가공 상의 오차에 의해 발생한 것으로 보여진다. 평가된 리프스프링의 강성계수와 정전 용량형 센서의 변위 분해능(0.5 nm)으로부터 검출기구의 힘 측정 분해능은 약 80 μN 이다.

본 연구에서는 미세가공력 검출기구가 장착된 나노패터닝 시스템의 적용 가능성을 평가하기 위하여 시료의 스크래치실험을 수행하였다. 스크래치 실험을 위한 시료로서 수십 Å의 표면거칠기를 갖는 실리콘(111)을 이용하였고, 반경 5 μm 의 다이아몬드 팁을 이용하였다.

실리콘 시편을 장착한 XY 축 스테이지를 반지름 10 μm 의 나선형 모양으로 구동시키며, 다이아몬

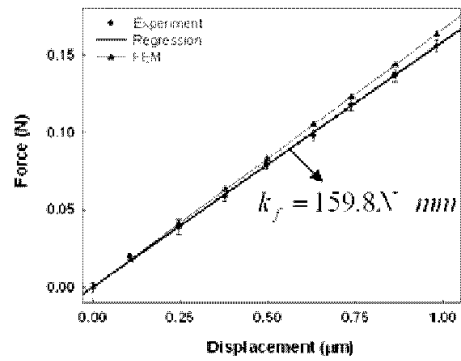


Fig. 5 Input-Output relationships of the force sensor

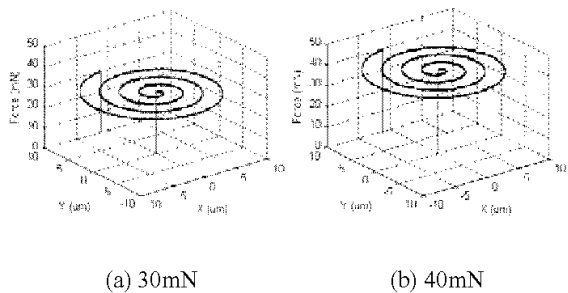


Fig. 6 Machining force monitoring

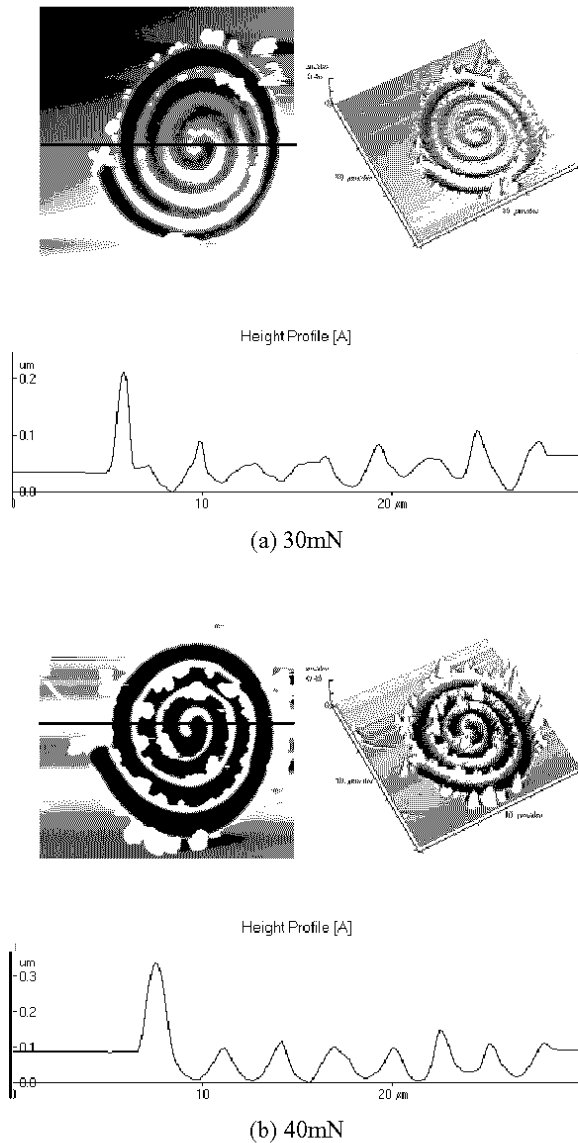


Fig. 7 AFM images of nanopatterned silicon surface

드 팁을 각각 30mN 과 40mN 의 일정한 힘으로 가공할 때, 검출기구로부터 측정된 가공력을 Fig.6 에 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 일정한 힘으로 가공되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7 은 가공된 실리콘 시료를 AFM (Thermo Microscopes, M5)을 이용하여 측정한 결과로 30mN 으로 가공하였을 때는 약 40 nm, 40mN 으로 가공하였을 때는 약 90 nm의 일정한 깊이로 가공되었음을 알 수 있다. 또한 힘이 증가함에 따라 가공 깊이가 증가하고, 버(burr)가 더 많아짐을 알 수 있다. 이러한 실험결과들로부터 본 연구에서 개발된 미세가공력 검출기구는 나노미터급의 극미세 패턴 가공시에 발생하는 가공력의 정밀 측정 및 제어에 적용가능

함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 미세 가공력 검출기구를 이용한 미세 패턴 가공 시스템이 제시되었다. 팁에 의해 시료에 가해지는 가공력과 변위의 정밀 측정을 위해 새로운 미세 가공력 검출기구가 고안되었으며, 이것은 압전 액츄에이터와 이중 복합 선형 스프링 기구에 의해 정밀한 직선운동을 하는 Z 축 스테이지에 장착되었다. 또한, 시료의 초정밀 위치결정을 위해 압전 액츄에이터에 의해 구동되는 XY 스캐닝 스테이지가 설계/제작되었다. 설계/구축된 미세 패턴 가공 시스템을 이용하여 나노패터닝 실험을 수행하며, 실시간으로 가공력을 검출하여 일정한 힘으로 실리콘(111)을 가공하였다. 또한 가공된 시료를 AFM 으로 측정하였다. 그 결과, 개발된 시스템은 팁에 의해 시료에 가해지는 미세 가공력을 서브 mN 의 분해능으로 감지 할 수 있었으며, 제어를 통하여 일정한 힘으로 가공이 가능함이 판명되었다. 향후에는 개발된 시스템을 이용하여 다양한 형상의 미세패턴 가공 실험이 수행될 것이다.

참고문헌

1. Menz, W., "LIGA and Related Technologies for Industrial Application," *Sensor. Actuat. A-Phys.*, Vol. 54, pp. 785-789, 1996.
2. Qin, D., Xia, Y., Rogers, J. A., Jackman, R. J., Zhao, X. M., Whitesides, G. M., "Micro-fabrication Microstructures and Microsystems," *Top. Curr. Chem.*, Vol. 194, pp. 1-20, 1998.
3. Ashida, K., Morita, N., Toshida, Y., "Study on Nanomachining Process using Mechanism of a Friction Force Microscope," *JSME International Journal Series C*, Vol. 44, No. 1, pp.244-253, 2001.
4. Minne, S. C., Adams, J. D., Yaralioglu, G., Manalis, S. R., Atalar, A., and Quate, C. F., "Centimeter Scale Atomic Force Microscope Imaging and Lithography," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, pp. 1742-1744, 1998.
5. Snow, E. S., Campbell, P. M., "Fabrication of Si Nanostructure with an Atomic Force Microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 1932-1934, 1994.