

# 나노 가공을 위한 힘·변위 검출시스템 개발

방진혁<sup>†</sup>·권기환<sup>\*</sup>·박재준<sup>\*</sup>·조남규<sup>\*\*</sup>

## Development of Force/Displacement Sensing System for Nanomachining

Jin Hyeok Bang, Ki Hwan Kwon, Jae Jun Park and Nahm Gyoo Cho

**Key Words:** Nanoindentation(나노인덴테이션), Nanopatterning(나노패터닝), Piezoelectric actuator(압전 액츄에이터), Measurement(측정)

### Abstract

This paper presents a force/displacement sensing system to measure penetration depths and machining forces during patterning operation. This sensing system consists of a leaf spring mechanism and a capacitive sensor, which is mounted on a PZT driven in-feed motion stage with 1nm resolution. The sample is moved by a xy scanning motion stage with 5nm resolution. The constructed system was applied to nano indentation experiments, and the load-displacement curves of silicon(111) and aluminum were obtained. Then, the indentation samples were measured by AFM. Experimental results demonstrated that the developed system has the ability of preforming force/depth sensing indentations

### 1. 서 론

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 포토 리소그래피, LIGA, 이온빔, X 선등의 광학 리소그래피 기술이다.<sup>(1)(2)(3)</sup> 이러한 리소그래피 기술은 시설에 대한 초기 투자비용이 너무 높고, 공정 특성상 다단계의 마스크 및 에칭 공정을 필요로 하여 제작시간이 많이 소요될 뿐 아니라, 패턴 및 디자인 변경을 위해서는 새로 마스크를 제작해야 하기 때문에 단 품종 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.<sup>(4)(5)</sup> 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 기술에 의해 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 장비로써 개발된 것이기 때문에, 시료에 가하는 힘의 크기가 매우 작

† 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

E-mail : ccorrk@ihanyang.ac.kr

TEL : (031)418-0748 FAX : (031)418-6645

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 한양대학교 기계정보경영공학부

아(nN~μN) MEMS 구조물 가공을 위한 일반적 해결책으로 보기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 크게 수 N에서 작게는 mN이하 수준에 이르는 힘으로 가공이 가능하며, 동시에 가공 깊이까지 측정 할 수 있는 힘·변위 감지 팁 모듈을 개발하고 시스템을 구축한다. 또한 이 시스템을 이용하여 나노인텐테이션 실험을 하고 측정을 하여 본 미세 패턴 가공 시스템의 효용성을 검증한다.

## 2. 시스템의 구성 및 원리

### 2.1 전체 시스템의 구성

Fig. 1은 힘·변위 감지 팁 모듈을 이용한 미세 패턴 가공 시스템의 개요도를 보인다. 본 연구에서 제안된 시스템은 크게 힘·변위 감지 팁 모듈, 시료의 초정밀 위치결정을 위한 XY축 스캐닝 스테이지, 그리고 미세 힘 및 변위 발생을 위한 Z축 스테이지로 이루어진다.

힘·변위 감지 팁 모듈에서 리프 스프링의 탄성계수를 결정하기 위하여 힘 분해능과 고유진동수를 고려하였다. 힘 분해능을 0.2mN으로 결정하고 Table 1에 나와 있는 압전 액츄에이터와 정전 용량형 센서의 분해능을 고려하여 탄성계수를 170N/mm로 정하였으며, 이때의 고유진동수는 약 8.8kHz이다. 시료에 가해지는 힘과 변위의 양은 정전 용량형 센서로 측정된다. 이때 힘 및 변위측정용 정전 용량형 센서들은 Abbe오차를 최소한으로 줄이기 위해 측정대상의 운동 축과 일직선에 위치한다. Z축 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 XY축 스테이지는 일체형 구조로 설계하여 조립오차를 최소화 하였고, Z축 스테이지와 같이 이중 복합 선형스프링을 사용하여 정밀한 XY운동을 할 수 있도록 설계하였다. 또한 circular hinge와 레버기구는 압전 액츄에이터의 변위를 증폭시키기 위해 사용되었다.

### 2.2 힘 및 변위의 검출 원리

초기 상태에는 두 정전 용량형 센서에서는 출력변화가 없게 된다. Z축 압전 액츄에이터가 변

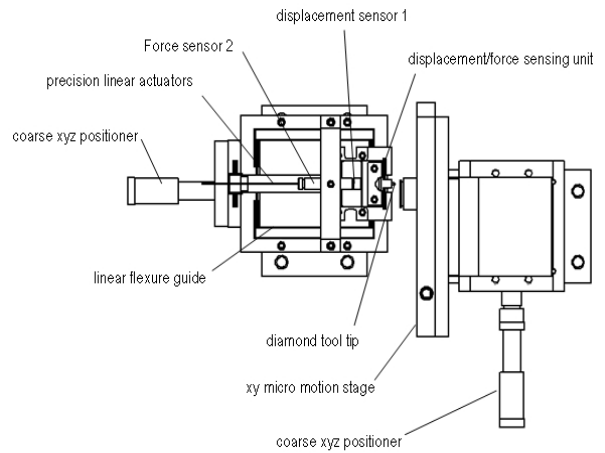


Fig. 1 Schematic of the total system

Table 1 Specification of Experimental Apparatus

|                                 | Specification       |            |
|---------------------------------|---------------------|------------|
| PZT Actuator<br>(P-841.40)      | Travel @0 to 100V   | 60μm       |
|                                 | Stiffness           | 15N/μm     |
|                                 | Resonance frequency | 8.5kHz     |
| [PI]                            | Resolution          | 1.2nm      |
| Cap. Sensor<br>(2805, 4810)     | Range               | ±50μm      |
|                                 | Resolution          | 0.5nm      |
|                                 | Bandwidth           | 1000Hz     |
| [ADE]                           | Sensitivity         | 5μm /      |
| XY Stage                        | Material            | Al 7075 T6 |
|                                 | Max. Motion Range   | 175μm μm   |
|                                 | Resolution          | 5nm nm     |
| Z Stage                         | Material            | Al 7075 T6 |
|                                 | Max. Motion Range   | 50μm       |
|                                 | Resolution          | 1nm        |
| Force / Disp.<br>Sensing Module | Spring Stiffness    | 159.8N/mm  |
|                                 | Resonance Frequency | 8.5kHz     |
|                                 | Diamond Tip Radius  | 5μm        |

위를 발생하게 되면 Fig. 2에서와 같이 힘 감지 모듈의 정전 용량형 센서 1에서는 스테이지의 변위  $x_1$ 이 검출되고 이때, 다이아몬드 팁이 시료와 접촉하지 않은 상태라면 힘 감지 모듈의 다이아몬드 팁 뒤에 장착된 정전 용량형 센서 2에서는 변위가 발생하지 않게 된다. 하지만 다이아몬드 팁이 시료에 접촉하게 된다면 센서 2에서는  $x_2$ 가 검출되게 된다. 이때 다이아몬드 팁이 시료에 가하는 힘  $F_f$ 는 식(1)과 같다.

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

또한 다이아몬드 팁이 시료에 접촉한 상태에서 다이아몬드 팁에 힘이 제거가 되면 시료의 탄성

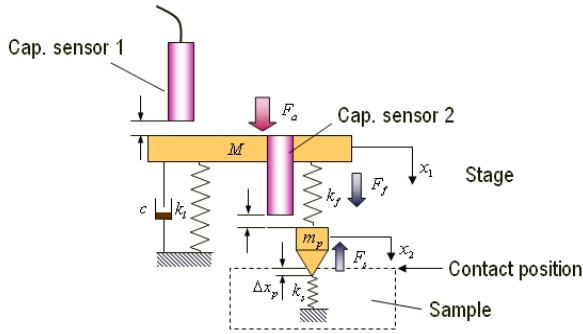


Fig. 2 Measuring principle of force and displacement

력  $F_s$ 에 의해 일부 복원하게 된다. 이때 최종적으로 압입되는 깊이  $p$ 는 식(2)와 같다.

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

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 실험 장치의 구성

Fig.3은 실험 장치의 개략적인 구성도를 보인다. 실험 장치는 압전 액추에이터들이 장착된 XY축 및 Z축 스테이지와 힘과 변위를 감지하기 위한 정전 용량형 변위 센서들로 구성되어 있다. PC에 의해 명령되는 전압은 16bit의 D/A 채널(D-SPACE, DS-1104)과 PZT 전압증폭기를 거쳐 Z축 스테이지의 압전 액추에이터에 인가되고, 이때의 구동 변위 ( $x_1$ )는 정전 용량형 센서 1에 의해 감지된다. 또한, 팁 모듈의 리프 스프링에 장착된 다이아몬드 팁이 시료와 접촉하게 될 때 발생하는 변위 ( $x_2$ )는 정전 용량형 센서 2에 의해 감지되며, 리프 스프링의 탄성계수로부터 시료에 가해지는 접촉력( $F_f$ )이 산출된다. 한편, XY축 스테이지 위에 시편 홀더를 장착하여 실험 시 시료가 정확한 위치로 움직이게 한다.

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

#### 3.2 측정 실험 및 응용

다이아몬드 팁에 의해 시료에 가해지는 힘을 측정하기 위해서는 팁 모듈의 리프 스프링 탄성계수가 정밀하게 평가되어야 한다. Fig. 5는 정전

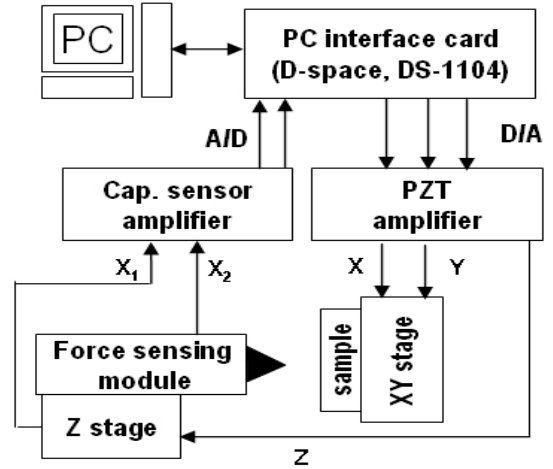


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

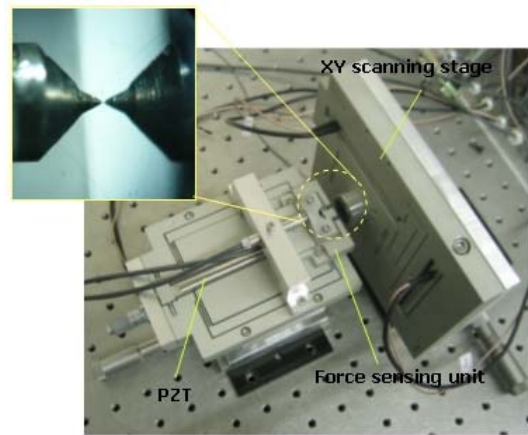


Fig. 4 Photograph of experimental setup

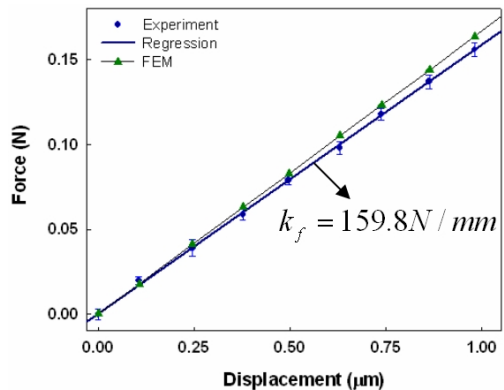


Fig. 5 Force sensor calibration

용량형 센서를 이용하여 측정된 힘 감지 모듈의 리프 스프링의 탄성계수를 평가한 결과를 보여준다. 측정 결과 159.8N/mm로 FEM해석에 의한 강성계수 170.2N/mm보다 약간 작게 나오는 것을 알

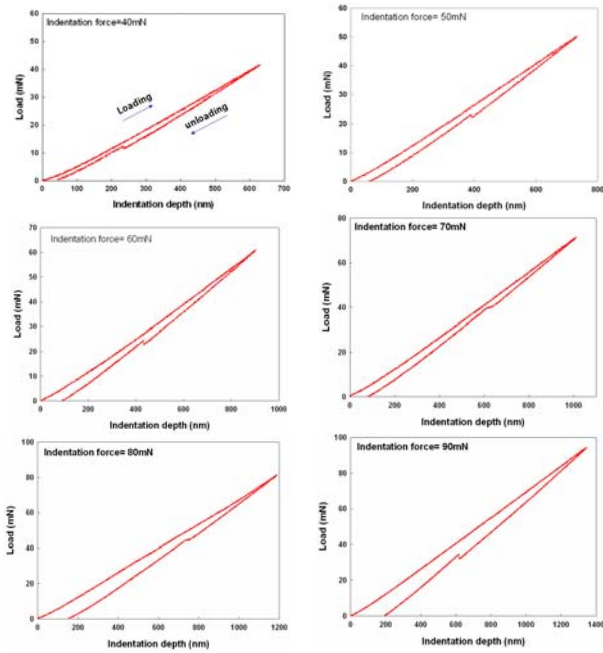


Fig. 6 Indentation curve of Silicon(111)

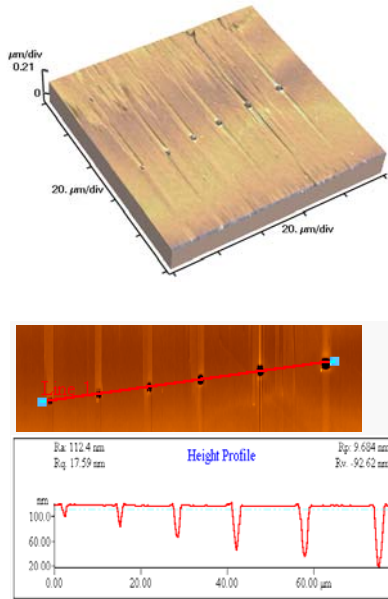


Fig. 7 AFM image of silicon

수 있다. 이것은 가공 상의 오차에 의해 발생한 것으로 기인된다. 평가된 리프스프링의 강성계수와 정전 용량형 센서의 변위 분해능(0.5nm)으로부터 팁 모듈의 힘 측정 분해능은 약 0.08mN 이다.

본 연구에서는 구축된 나노패터닝 시스템의 적용 가능성을 평가하기 위하여 시료의 압입시험을 수행하였다. 압입 실험을 위한 시료로서 수십 Å의 표면 거칠기를 갖는 실리콘(111)과 알루미늄

박막을 이용하였고, 반경 5 $\mu$ m의 다이아몬드 팁을 이용하였다.

Fig. 6은 실리콘을 40mN부터 90mN까지 10mN 간격으로 힘을 증가시키면서 압입 하였을 때 압입 깊이( $p$ )와 시료에 작용하는 힘에 대한 관계를 나타낸 그래프를 보인다. 그림에서, 40mN을 가하였을 때 소성 변형량이 40.1nm가 나오고, 압입하는 힘이 증가함에 따라 소성 변형량도 증가하여, 마지막 90mN을 가하였을 때 소성 변형량이 197.3nm이 나오는 것을 알 수 있다. 또한 결과에서 힘을 제거할 때 순간적으로 힘이 증가하는 킱-백(kick-back)현상을 볼 수 있다.<sup>(6)(7)</sup>

Fig. 7은 압입된 실리콘 시료를 AFM(Thermo Microscopes, M5)을 이용하여 측정한 결과로 힘이 증가함에 따라 소성 변형량이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, Fig.6에서 측정된 소성 변형량과 비슷한 경향을 보임을 확인 할 수 있다.

Fig. 8은 알루미늄을 6mN부터 22mN까지 약 5mN 간격으로 힘을 증가시키면서 압입 하였을 때 압입 깊이( $p$ )와 시료에 작용하는 힘에 대한 관계를 나타낸 그래프를 보인다. 그림에서, 6mN을 가하였을 때 소성 변형량이 149.6nm가 나오고, 압입하는 힘이 증가함에 따라 소성 변형량도 증가하여, 마지막 22mN을 가하였을 때 소성 변형량이 324.4nm이 나오는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 압입된 실리콘 시료를 AFM을 이용하여 측정한 결과로 힘이 증가함에 따라 소성 변형량이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, Fig.8에서 측정된 소성 변형량과 비슷한 경향을 보임을 확인 할 수 있다. 알루미늄의 경우 실리콘에 비해 많이 무름을 알 수 있으며, 버(burr)가 실리콘

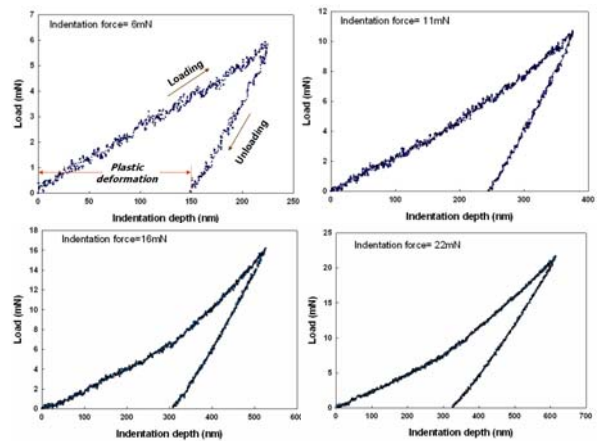
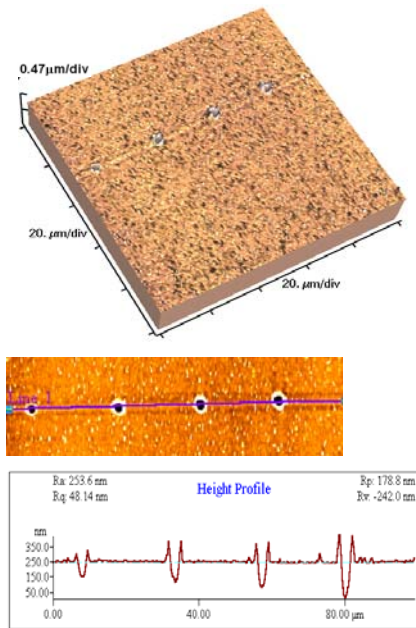


Fig. 8 Indentation curve of Aluminum



**Fig. 9 AFM image of aluminum**

에 비해 많이 생기는 것을 볼 수 있다. 이러한 실험 결과들로부터 본 연구에서 구축된 가공 시스템은 가공 시 발생하는 변위와 힘의 측정이 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 다이아몬드 팁을 이용한 초미세 패턴 가공 시스템이 제시되었다. 팁에 의해 시료에 가해지는 가공력과 변위의 정밀 측정을 위해 새로운 힘 변위 감지 모듈이 고안되었으며, 이것은 압전 액츄에이터와 이중 복합 선형 스프링 기구에 의해 정밀한 직선운동을 하는 Z축 스테이지에 장착된다. 또한, 시료의 초정밀 위치결정을 위해 압전 액츄에이터에 의해 구동되는 XY 스캐닝 스테이지가 설계/제작 되었다. 설계/구축된 나노 패터닝 시스템을 이용하여 실리콘(111)과 알루미늄박막에 나노인덴테이션 실험을 수행하고, 압입 곡선으로부터 산출된 두 시료의 소성 변형량을 AFM의 측정값과 비교하였다. 그 결과, 개발된 시스템은 수 nm의 분해능으로 압입깊이의 측정이 가능하며, 동시에 팁에 의해 시료에 가해지는 미세 가공력을 서브 mN의 분해능으로 감지 할 수 있음이 판명되었다. 향후에는 개발된 시스템을 이용하여 다양한 형상의 초미세패턴 가공 실험이

수행될 것이다.

#### 참고문헌

- (1) Menz, W., 1996, "LIGA and Related Technologies for Industrial Application," *Sensor. Actuat. A-Phys.*, Vol. 54, pp. 785-789.
- (2) Qin, D., Xia, Y., Rogers, J. A., Jackman, R. J., Zhao, X. M., Whitesides, G. M., 1998, "Micro-fabrication Microstructures and Microsystems," *Top. Curr. Chem.*, Vol. 194, pp. 1-20.
- (3) Ashida, K., Morita, N., Toshida, Y., 2001, "Study on Nano-machining Process using Mechanism of a Friction Force Microscope," *JSME International Journal Series C*, Vol. 44, No. 1, pp.244-253.
- (4) Minne, S. C., Adams, J. D., Yaralioglu, G., Manalis, S. R., Atalar, A., and Quate, C. F., 1998, "Centimeter Scale Atomic Force Microscope Imaging and Lithography," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, pp. 1742-1744.
- (5) Snow, E. S., Campbell, P. M., 1994, "Fabrication of Si Nanostructure with an Atomic Force Microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 1932-1934.
- (6) Pharr, G. M., Oliver, W. C., Harding, D. S., 1991, "New evidence for a pressure-induced phase transformation during the indentation of silicon," *J. Mater. Res.*, Vol. 6, pp. 1129-1130.
- (7) Chowdhury, S., Laugier, M. T., 2004, "The use of non-contact AFM with nanoindentation techniques for measuring mechanical properties of carbon nitride thin films," *Applied Surface Science*, Vol 233, pp. 219-226.