

# 힘 및 변위 감지기구를 적용한 초정밀 가공시스템 개발

방진혁\*, 권기환\*, 조남규#

## Development of an Ultra Precision Machining System Using a Force and Displacement Sensing Module

Jin Hyeok Bang\*, Ki Hwan Kwon\* and Nahm Gyoo Cho#

### ABSTRACT

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

**Key Words** : Ultra precision machining(초정밀 가공), Nanoindentation(나노인덴테이션), Nanopatterning(나노패터닝), Measurement(측정)

### 1. 서론

최근 선진국에서는 마이크로미터와 나노스케일의 반도체 집적 기술과 초소형 부품 및 기계제조를 위한 MEMS 와 NEMS 기술이 급속히 발전하면서 그에 따른 제작 기법도 발전을 하여 왔다.

현재 가장 널리 사용되고 있는 MEMS 와 NEMS 제작 기술은 포토리소그래피, 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 예칭 공

정을 필요로 하여 제작시간이 많이 소요된다. 뿐만 아니라, 패턴 및 디자인 변경을 위해서는 새로 마스크를 제작해야 하기 때문에 단 품종 대량 생산에는 적합하나 다품종 소량 생산에는 부적합하다. 또한, 가공 가능한 기판 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)

\* 접수일: 2005 년 1 월 12 일; 게재승인일: 2005 년 11 월 10 일

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

# 교신저자: 한양대학교 기계정보경영공학부

E-mail ngcho@hanyang.ac.kr Tel. (031) 400-5286

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 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 장비로써 개발된 것이기 때문에, 시료에 가하는 힘의 크기가 매우 작아(nN~ $\mu$ N) MEMS 구조물 가공을 위한 일반적 해결책으로 보기에는 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 크기는 수 N 에서 작게는 0.1 mN 이하 수준에 이르는 힘으로 가공이 가능하며, 동시에 가공 깊이까지 측정 할 수 있는 미세 가공력 검출기구가 개발 되었으며, 이를 이용한 나노가공 시스템이 구축되었다. 또한 이 시스템을 이용한 나노 인텐테이션 실험과 나노패터닝 실험에 의해 개발된 미세 패턴 가공 시스템의 효용성을 검증하였다

## 2. 초정밀 가공시스템

### 2.1 초정밀 가공시스템의 원리

본 시스템은 크게 인텐테이션 모드(indentation mode)와 스크래칭 모드(scratching mode)의 두 가지 모드(mode)로 작동 된다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 인텐테이션 모드의 작동원리를 개략적으로 나타낸 그림이다. 시료와 접촉하기 전의 상태에서는 다이아몬드 팁이 장착된 평행판 스프링의 변위를 감지하는 정전 용량형 센서 2의 출력  $\Delta x_2$ 의 변화는 없고, Z 축 스테이지의 변위  $\Delta x_1$  만이 정전 용량형 센서 1에 의해 검출된다. 다이아몬드 팁이 시료와 접촉하게 되면 평행판 스프링에 변형이  $\Delta x_2$  만큼 발생하고 이것은 정전 용량형 센서 2에 의해 감지된다. 따라서, 압입깊이  $p$  는 접촉 후 이중 복합 스프링 기구의 이동 변위  $\Delta x_{c1}$  으로부터 팁이 장착된 평행판 스프링의 변형량  $\Delta x_2$  를 뺀 값으로 산출할 수 있다. 또한 기지의 평행판 스프링의 강성계수  $k_f$

와  $\Delta x_2$  를 곱하면 시료에 가해지는 힘의 크기가 측정된다. 따라서, 위와 같이 측정된 힘과 변위로 부터 시료의 압입곡선(indentation curve)이 얻어질 수 있다.

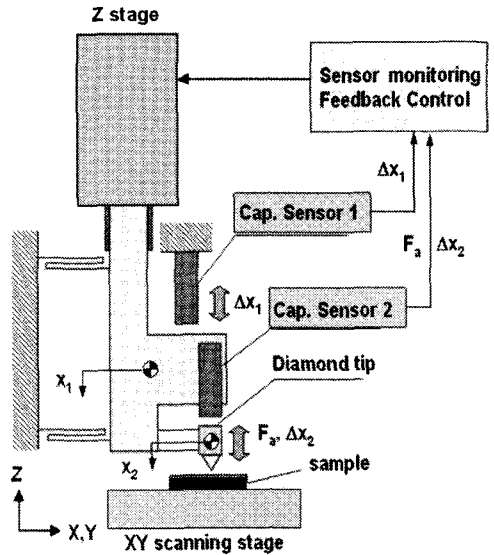


Fig. 1 Schematic design of the proposed system

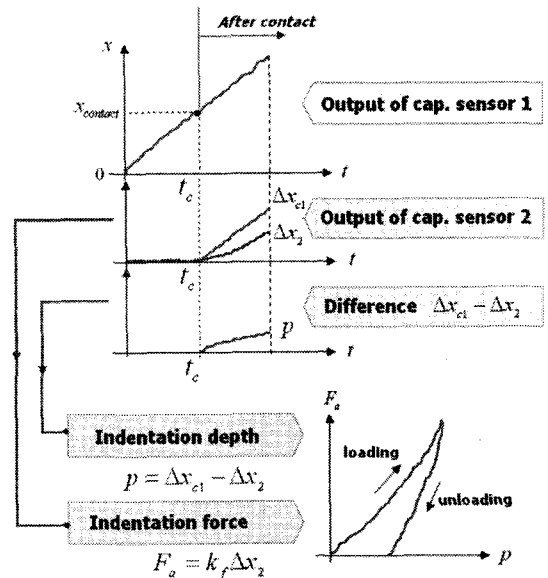


Fig. 2 Operation principle of indentation mode

한편, 스크래칭 모드는 Fig. 4 에서 보이는 바와 같이 시료가 X-Y 축 스테이지에 의하여 이동될 때 시료의 기울어짐과 굴곡을 따라 일정한 깊이로 가공될 수 있도록 PZT 에 의해 발생하는 힘을 제어하는 것이다. 이때의 사용하는 힘센서는 Fig. 1 에서의 정전용량형 센서(Cap. Sensor2)이다. 먼저 앞서 설명된 인텐테이션 모드에 의해 시료에 접촉한 한 후, 시료에 가해지는 힘의 크기를 설정된 힘(set-force)과 같아지도록 한다. 그 다음, 시료가 장착된 X-Y 축 스테이지를 원하는 경로로 이동하면서 설정된 힘을 일정하게 유지할 수 있도록 제어 시스템에 의해 Z 축 PZT 에 인가되는 전압의 양을 제어한다.

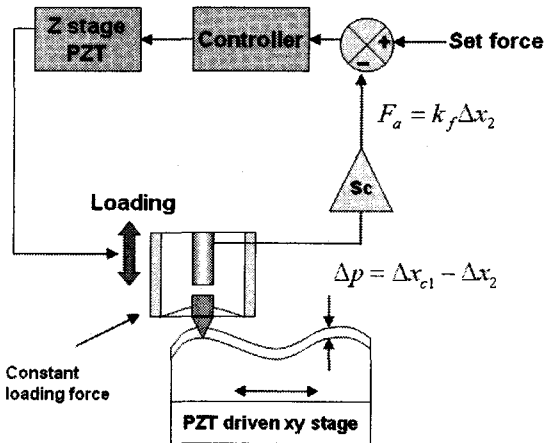


Fig. 3 Operation principle of scratching mode(constant force mode)

## 2.2 전체 시스템의 구성

Fig. 4 은 PZT 액츄에이터를 이용한 극미세 하중 및 변위 제어 시스템의 개략도를 보인다. 본 시스템은 나노 인텐테이션 및 시료의 미세 패턴 가공에 적용되며, 주요 구성요소로는 PZT 액츄에이터와, 이중 복합 선형 스프링 메카니즘(double compound linear spring mechanism)을 적용한 Z 스테이지, 두개의 정전 용량형 센서(capacitance sensor)를 이용한 힘 및 변위 감지기구, 마지막으로 미세 패턴 가공을 위한 PZT 액츄에이터로 구동되는 X-Y 축 스캐닝 스테이지(scanning stage)가 있다. Z 축 스테이지의 PZT 액츄에이터로부터 발생한 힘과 변위는 Z 축 스테이지와 힘 및 변위 감지기구를 거쳐

X-Y 축 스캐닝 스테이지 위에 부착된 시료에 전달된다. 이중 복합 선형 스프링 기구는 1 축의 직선 운동을 가장 신뢰성 있게 구현할 수 있는 구조로 회전이나 병진의 기생운동(parasitic motion)이 발생하지 않는다. 한편, Z 축 스테이지에 장착된 힘 및 변위 감지기구에는 반경 5  $\mu\text{m}$  의 다이아몬드 팁(diamond tip)에 의해 시료에 가해지는 힘과 변위를 검출하기 위해 정전 용량형 센서가 이용된다..

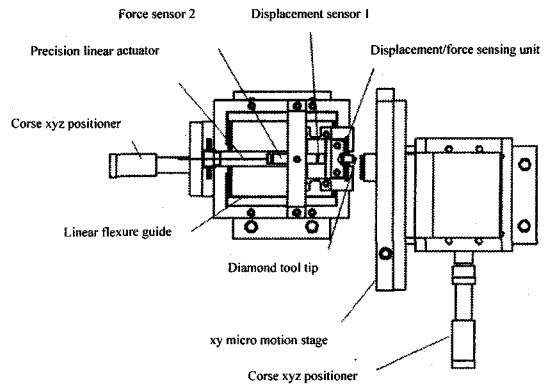


Fig. 4 Schematic diagram of the total system

## 3. 초정밀 가공시스템의 설계 및 제작

### 3.1 힘 및 변위 감지기구의 설계 및 제작

Fig. 5 는 본 연구에서 제안된 힘 및 변위 감지기구의 개략도를 보인다. Fig. 5 에서 보여지는 감지기구는 힘 및 변위를 전달하는 요소로 한 쌍의 평행판 스프링(parallel leaf spring)구조를 이용하였으며, 다이아몬드 팁과 시편과의 접촉에 의한 판 스프링의 1 축 방향의 변형량은 정전 용량형 센서에 의해 감지하게 된다. 스프링 구조에서 팁과 시편과의 접촉힘은 유효 스프링 상수에 유발되는 변위에 비례하며, 판 스프링의 유효 스프링 상수는 식(1)과 같다.

$$k_f = 2 \frac{192Ebt^3}{12l^3} \quad (1)$$

여기서,  $l=16.5 \text{ mm}$ ,  $b=10 \text{ mm}$ , 그리고  $t=0.7 \text{ mm}$ 이며, 스프링의 재질은 Al-7075 가 사용되었으며, 탄성계수  $E$  는 72 GPa 이다. 그러므로, 유효 강성계수  $k_f$ 의 설계치는 175.9 N/mm 로 계산된다.

Fig. 6 은 이러한 설계값들을 적용해 제작된 힘 및 변위 감지기구를 보인다. 판 스프링의 중앙부에는 5  $\mu\text{m}$ 의 선단반경을 갖는 다이아몬드 팁이 장착되었으며, 판 스프링의 변위를 감지하기 위한 정전 용량형 변위 센서는 Abbe 오차를 최소한으로 줄이기 위해 측정 대상의 운동 축과 일직선에 위치해 있다. 판 스프링은 Al-7075 사용하여, 와이어 컷팅(wire-cutting)에 의해 가공 하였다.

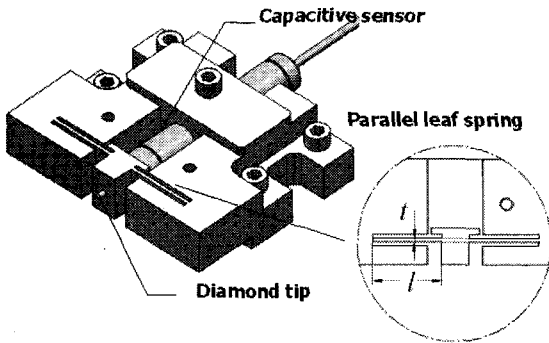


Fig. 5 Schematic design of force/displacement sensing module

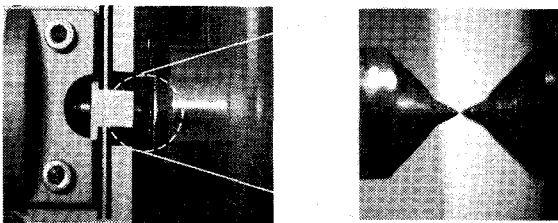


Fig. 6 Photograph of force/displacement sensing module

Fig. 7 은 실험으로부터 얻어진 힘/변위 검출기구에 대한 힘과 변위의 관계를 보인다. 실험값들은 기지의 질량을 갖는 각각의 표준추를 칼럼부 위쪽에 올려놓았을 때 정전 용량형 변위 센서로부터 측정되는 변위 값이다. 실험으로부터 산출된 유효 강성계수는 159.8 N/mm 이며, 설계값 175.9 N/mm 와 약간 다른 값을 보이는데, 이것은 가공 상의 오차에 의해 발생한 것으로 사료된다. 이러한 유효강성계수값과 사용된 정전 용량형 변위센서의 측정범위(100  $\mu\text{m}$ )와 분해능(0.5 nm)을 고려해볼 때, 본 연구에서 제작된 힘/변위 검출기구의 힘 측정 범위와 분해능은 각각 약 15.9 N 와 80  $\mu\text{N}$  이다.

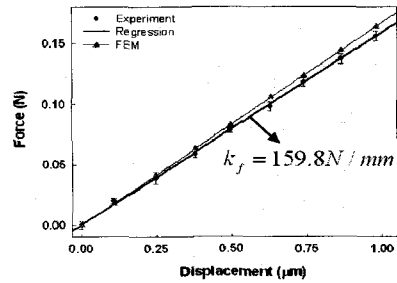


Fig. 7 Experimental result for estimating effective stiffness

### 3.2 X-Y 축 스캐닝 스테이지의 설계 및 제작

극미세 패터닝 가공을 위해서는 시편을 X-Y 축에서 나노미터급의 정밀도로 이동시킬 수 있는 위치 결정 장치가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위하여, 압전형 액츄에이터(PZT actuator)와 유연기구(flexure mechanism)를 이용한 X-Y 축 스캐닝 스테이지(X-Y scanning stage)를 설계/제작하였다.

Fig. 8 은 제작된 스테이지의 실제 모습을 보이고 있다. 스테이지는 단일체 구조(monolithic structure)이며, 재질은 Al-7075 이고, 와이어 컷팅(wire-cutting)에 의해 가공 되었다.

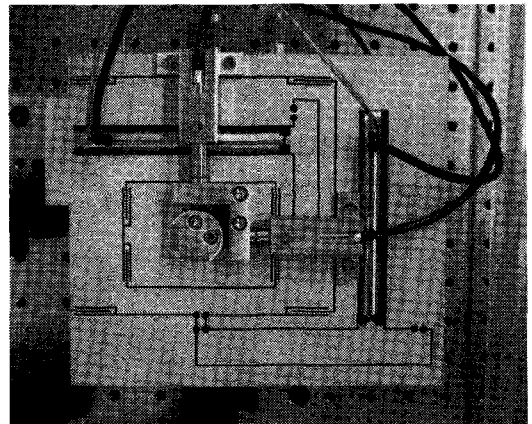


Fig. 8 Fabricated X-Y micro motion stage

Fig. 9 는 본 연구에서 제작된 스테이지의 분해능 평가 실험 결과를 보인다. 분해능 측정을 위해 구동 방향에 따라 연속 계단 응답 특성을 측정하였다. 그 결과, 그림에서 보는 바와 같이 X, Y 축 모두 10 nm 이하의 충분한 분해능으로 구동될 수 있음을 확인 할 수 있다.

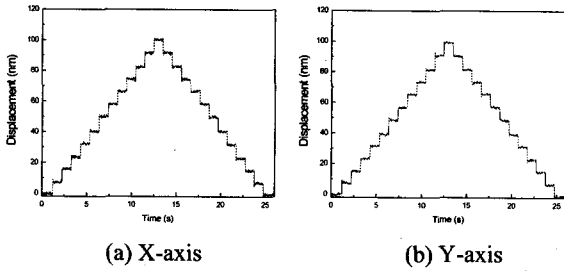


Fig. 9 Resolution of X-Y micro motion stage

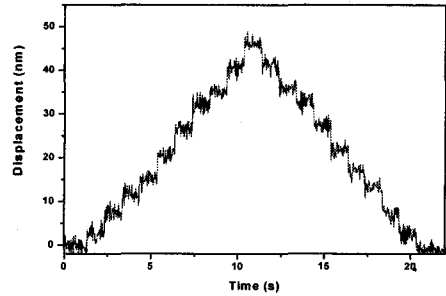


Fig. 11 Resolution of Z stage

### 3.3 Z 축 스테이지의 설계 및 제작

극미세 패터닝 가공을 위해서는 다이아몬드 팁을 나노미터급의 정밀도로 이동시킬 수 있는 위치 결정 장치가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위하여, 압전형 액추에이터(PZT actuator)와 1축의 움직임을 신뢰성 있게 구현할 수 있는 구조인 이중 복합 선형 스프링 기구(double compound linear spring mechanism)<sup>6</sup>를 이용한 Z 축 스테이지를 설계/제작하였다.

Fig. 10은 제작된 스테이지의 실제 모습을 보이고 있다. 스테이지의 재질은 AI-7075 이고, 와이어 커팅(wire-cutting)에 의해 가공되었다.

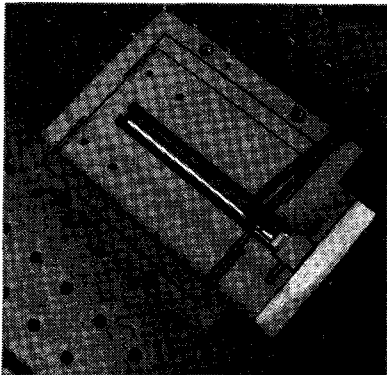


Fig. 10 Fabricated Z micro motion stage

Fig. 11은 본 연구에서 제작된 Z 축 스테이지의 분해능 평가 실험 결과를 보인다. 분해능 측정을 위해 구동 방향에 따라 연속 계단 응답 특성을 측정하였다. 그 결과, 그림에서 보는 바와 같이 5 nm 이하의 충분한 분해능으로 구동될 수 있음을 확인할 수 있다.

## 4. 초정밀 가공시스템의 구축 및 실험

### 4.1 실험장치의 구성

Fig. 12는 실험 장치의 개략적인 구성도를 보인다. 실험 장치는 압전 액추에이터들이 장착된 X-Y 축, Z 축 스테이지, 그리고 힘과 변위를 감지하기 위한 정전 용량형 변위 센서들로 구성되어 있다. PC에 의해 명령되는 전압은 16bit의 D/A 채널(D-SPACE, DS-1104)로 PZT 전압증폭기를 거쳐 Z 축 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

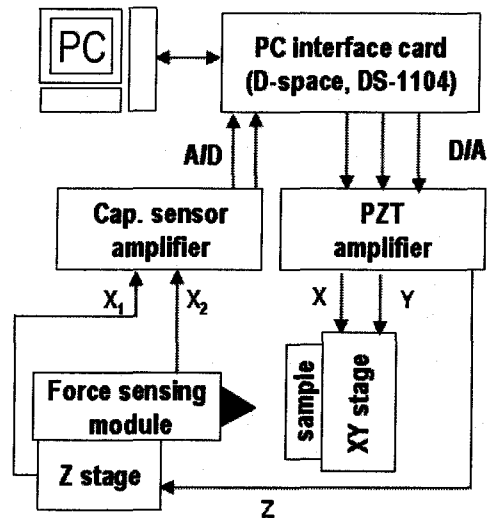


Fig. 12 Schematic diagram of experimental setup

감지되며, 리프 스프링의 탄성계수로부터 시료에 가해지는 접촉력( $F$ )이 산출된다. 한편, X-Y 축 스테이지 위에 시편 홀더를 장착하여 실험 시 시료가 정확한 위치로 움직이게 한다. Fig. 13 은 본 연구에서 설계 제작된 실제의 시스템을 보이고 있으며, 실험장치에 사용된 구성요소의 제원을 Table 1 에 나타내었다.

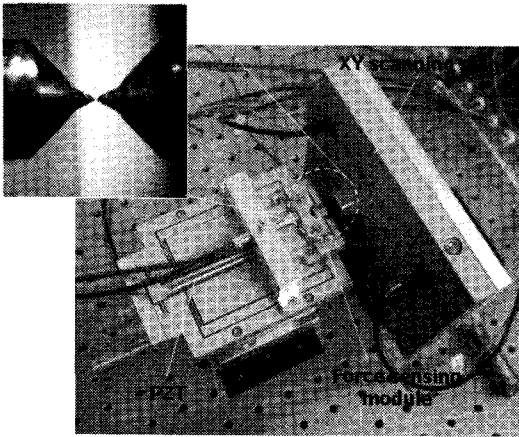


Fig.13 Experimental setup

Table 1 Specification of Experimental Apparatus

	Specification	
PZT Actuator (P-841.40)	Travel @0 to 100V	60 $\mu\text{m}$
	Stiffness	15 N/ $\mu\text{m}$
	Resonance Frequency	8.5 kHz
[PI]	Resolution	1.2 nm
Cap. Sensor (2085, 4810) [ADE]	Range	$\pm 50 \mu\text{m}$
	Resolution	0.5 nm
	Bandwidth	1000 Hz
	Sensitivity	5 $\mu\text{m}/\text{V}$

### 4.2 실험방법

구축된 시스템을 이용하여, 알루미늄 박막과 실리콘에 인덴테이션 실험과 스크래치 실험을 하였다. 또한 시스템에서 가공된 시편을 AFM 으로 측정하여 시스템에서 측정된 가공 깊이와 비교 하는 개념을 Fig. 14 에 도시하였다.

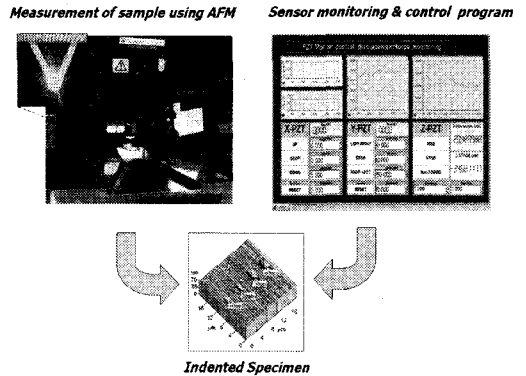


Fig. 14 Process of experiment

### 4.3 실험결과

#### 4.3.1 알루미늄 박막 인덴테이션 결과

압입 실험을 위한 시료로서 수십 Å의 표면 거칠기를 갖는 알루미늄 박막을 이용하였고, 반경 5  $\mu\text{m}$ 의 다이아몬드 팁을 이용하였다. Fig. 15 은 알루미늄을 6 mN 과 22 mN 의 힘으로 압입 하였을 때, 압입 깊이( $p$ )와 시료에 작용하는 힘에 대한 관계를 나타낸 그래프를 보인다. 그림에서, 6 mN 을 가하였을 때 소성 변형량이 149.6 nm 가 나오고, 압입하는 힘이 크면 소성 변형량도 커지므로, 마지막 22 mN 을 가하였을 때 소성 변형량이 324.4 nm 가 나오는 것을 알 수 있다.

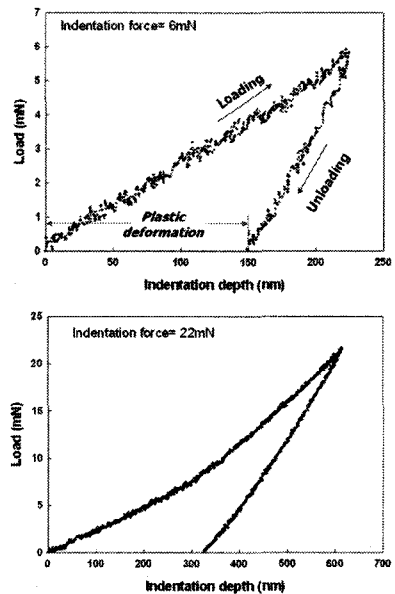


Fig. 15 Indentation curve of Aluminum

Fig. 16 은 압입된 알루미늄 시료를 AFM (Thermo Microscopes, M5)을 이용하여 측정된 결과로 힘이 증가함에 따라 소성 변형량이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 15 에서 측정된 소성 변형량과 비슷한 경향을 보임을 확인 할 수 있다.

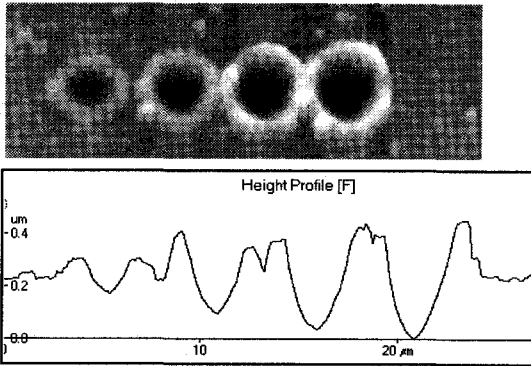
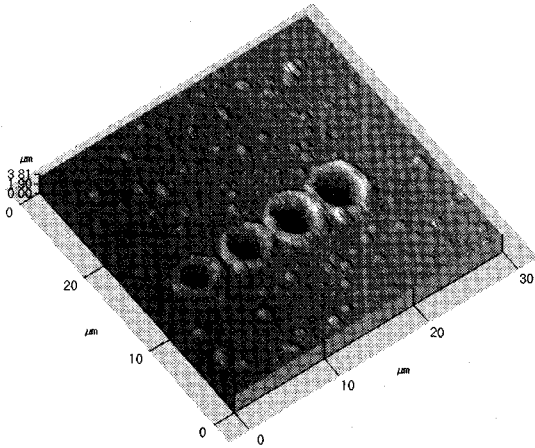


Fig. 16 AFM image of Aluminum

### 4.3.2 실리콘 인덴테이션 결과

Fig. 17 은 실리콘을 40 mN 와 90 mN 의 힘으로 압입 하였을 때 압입 깊이( $p$ )와 시료에 작용하는 힘에 대한 관계를 나타낸 그래프를 보인다. 그림에서, 40 mN 을 가하였을 때 소성 변형량이 40.1 nm 가 나오고, 압입하는 힘이 증가함에 따라 소성 변형량도 증가하여, 마지막 90 mN 을 가하였을 때 소성 변형량이 197.3 nm 이 나오는 것을 알 수 있다. 또한 결과에 서 힘을 제거할 때 순간적으로 힘이

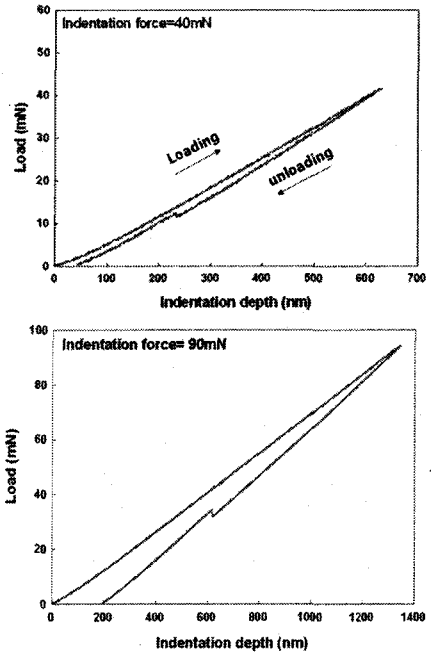


Fig. 17 Indentation curve of Silicon

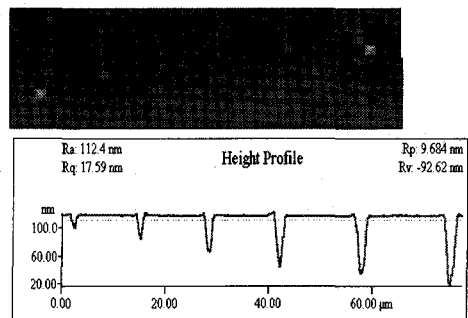
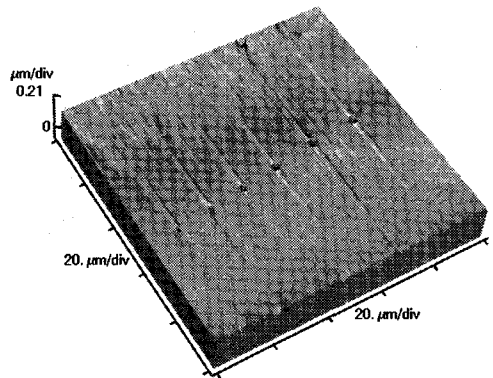


Fig. 18 AFM image of silicon

증가하는 킥-백(kick-back)현상을 볼 수 있다.<sup>7,8</sup>

Fig. 18 은 압입된 실리콘 시료를 AFM 을 이용하여 측정된 결과로 힘이 증가함에 따라 소성 변형량이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 17 에서 측정된 소성 변형량과 비슷한 경향을 보임을 확인 할 수 있다. 또한 실리콘은 알루미늄보다 더 단단함을 알 수 있고, 알루미늄은 실리콘에 비해 버(burr)가 많이 생기는 것을 볼 수 있다.

### 4.3.3 실리콘 스크래치 가공 결과

스크래치 실험을 위한 시료로서 수십 Å의 표면 거칠기를 갖는 실리콘(111)을 이용하였고, 반경 5 μm 의 다이아몬드 팁을 이용하였다. 실리콘 시편을 장착한 X-Y 축 스테이지를 반지름 10 μm 의 나선형 모양으로 구동시키며, 다이아몬드 팁을 각각 30 mN 과 40 mN 의 일정한 힘으로 가공할 때, 검출기로부터 측정된 가공력을 Fig. 19 에 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 일정한 힘으로 가공되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 20 은 가공된 실리콘 시료를 AFM 을 이용하여 측정된 결과로 30 mN 으로 가공하였을 때는 약 40 nm, 40 mN 으로 가공하였을 때는 약 90 nm 의 일정한 깊이로 가공되었음을 알 수 있다. 또한 힘이 증가함에 따라 가공 깊이가 증가하고, 버(burr)가 더 많아짐을 알 수 있

다. 이러한 실험결과들로부터 본 연구에서 개발된 미세가공력 검출기구는 나노미터 급의 극미세 패턴 가공시에 발생하는 가공력의 정밀 측정 및 제어에 적용 가능함을 확인할 수 있다.

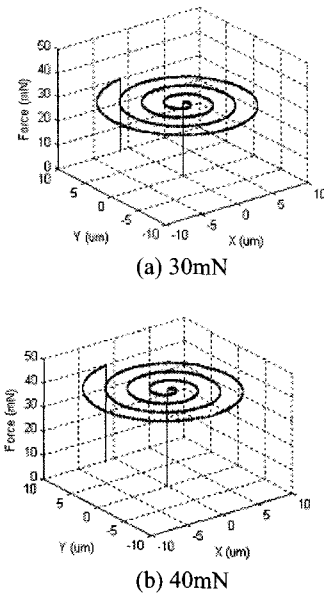


Fig. 19 Machining force monitoring

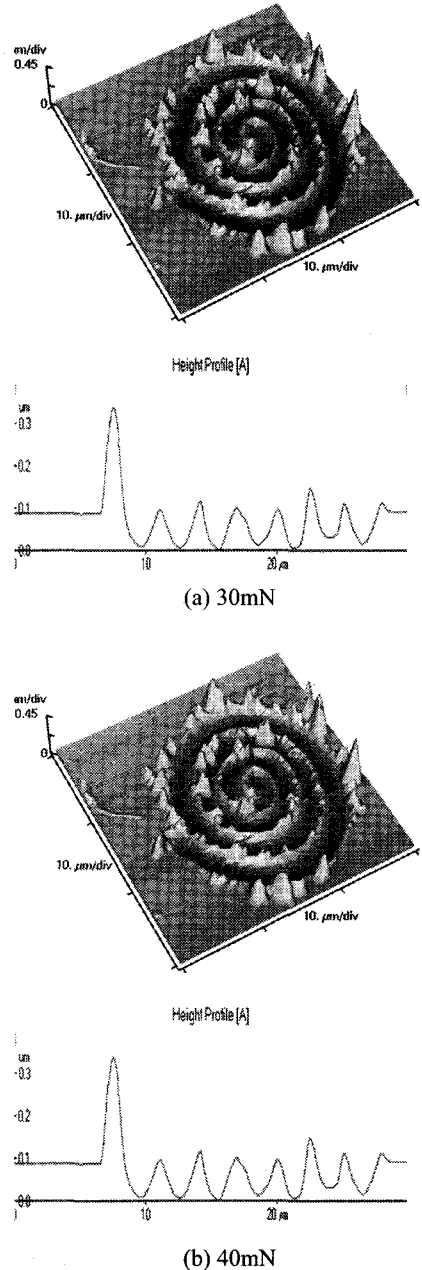


Fig. 20 AFM images of nanopatterned silicon surface



## 5. 결론

미세 힘으로 가공이 가능하며, 동시에 가공 깊이까지 측정 할 수 있는 힘 및 변위 검출기구의 개발과, 이를 이용한 나노가공 시스템의 구축을 목표로한 주요연구 결과는 다음과 같다.

1. 힘 및 변위 검출기구, X-Y 축 스테이지, Z 축 스테이지를 이용한 미세 패턴 가공 시스템이 제시되고 설계 / 제작 하였다.
2. 실리콘과 알루미늄 박막에 제안된 시스템을 이용하여 인텐테이션 실험과 나노패터닝 실험을 수행한 결과, 가공되는 힘을 서브 mN 의 분해능으로, 가공깊이를 수 nm 의 분해능으로 실시간 검출 가능함을 확인하였다.
3. 실리콘에 제안된 시스템을 이용하여 제어를 통하여 나노패터닝 실험을 수행한 결과 일정한 힘으로 가공 가능함을 확인하였다.
4. 가공된 시료를 AFM 으로 측정한 결과와 개발된 시스템의 결과가 같은 경향을 가짐을 확인하였다.

## 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.
6. Smith, S. T., Chtwynd, D. G., Bowen, D. K., "Design and assessment of monolithic high precision translation mechanisms," J. Phys. E:SCI. Instrum. Vol.20, pp.977-988, 1987.
7. Pharr, G. M., Oliver, W. C., Harding, D. S., "New evidence for a pressure-induced phase transformation during the indentation of silicon," J. Mater. Res., Vol. 6, pp. 1129-1130, 1991.
8. Chowdhury, S., Laugier, M. T., "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, 2004.