

◆특집◆ 나노메카트로닉스 분야 측정

나노 임프린트 공정에서의 기계적 물성 측정

김재현\*, 이학주\*\*, 최병익\*\*, 강재윤\*\*, 오충석\*\*\*

Mechanical Property Measurement in Nano Imprint Process

Jae-Hyun Kim\*, Hak-Joo Lee\*\*, Byung-Ik Choi\*\*, Jae-Yoon Kang\*\* and Chung-Seog Oh\*\*\*

**Key Words** : Nano process (나노 공정), Nano imprint (나노 임프린트), Micro tensile test (미소 인장 시험), Nanoindentation (나노 압입), Atomic Force Microscope (원자 힘 현미경), MEMS (미소기전시스템)

1. 서론

나노 임프린트 기술은 기존의 광학적 리소그라피 (optical lithography) 기술보다 저렴한 비용으로 나노 구조물을 대량으로 제조할 수 있을 것으로 기대되고 있는 기술이다<sup>1</sup>. 현재까지 반도체 공정기술의 주류를 이루고 있는 광학적인 리소그라피 기술은, 100 nm 이상의 CD (Critical Dimension)를 가지는 구조물들을 정밀하게 제조하여, 미소전자공학 (microelectronics) 소자, MEMS/NEMS, 광학소자 등의 제품들을 대량으로 생산하는 데에 널리 활용되고 있다. 반도체 소자의 고집적화 경향에 따라 100 nm 이하의 CD 를 가지는 나노 구조물들을 제조할 필요성이 높아지고 있지만<sup>2,3</sup>, 광학적인 방법으로는 광원의 파장보다 작은 구조물들을 제조하기가 어렵다. 보다 짧은 파장을 가지는 광원을 이용하는 리소그라피 장비가 계속적으로 개발되고 있으나, 그에 따른 장비 비용 및 제조 단가가 기하급수적으로 증가하고 있다. 따라서, 보다 저렴하게 100 nm 이하의 CD 를 가지는 나노 구조

물들을 대량으로 제조할 수 있는 공정 기술이 활발하게 연구되고 있다. 나노 임프린트 기술은 이러한 공정 기술 중에서 현재까지 가장 유망한 기술 중 하나이며, 국내에서는 과기부에서 주도하는 21 세기 프론티어 사업으로 이러한 나노 임프린트 공정 기술을 개발하고 있다.

나노 임프린트 기술은 크게 핫엠보싱 리소그라피 (hot embossing lithography), 몰드 보조 리소그라피 (mold-assisted lithography), 미세 접촉 리소그라피 (micro contact printing)로서 분류할 수 있다<sup>1</sup>. 핫엠보싱 리소그라피는 1995 년에 Chou 등<sup>4</sup>에 의해 소개되었으며 고온 고압의 환경에서 마스터를 폴리머 박막 위에 눌러서 패턴을 전사시키는 방법이다. 몰드 보조 리소그라피는 1996 년 Haisman 등<sup>5</sup>에 의해 제안되었으며, UV 경화성 폴리머를 사용하며 비교적 저온 저압에서 마스크의 패턴을 폴리머에 전사시킬 수 있는 방법이다. 미세 접촉 리소그라피는 1993 년 Kumar 와 Whitesides<sup>6</sup>에 의해 소개되었으며, 폴리머 스탬프를 사용하여, 금속이 증착된 모재 위에 SAM (Self Assembled Monolayer)을 형성하여 패턴을 전사시키는 방법이다.

나노 임프린트 기술의 한 예로서, 미세 접촉 리소그라피의 공정을 살펴보면 그 개략도를 Fig. 1 와 같이 나타낼 수 있다. 강성이 작은 폴리머 스탬프를 thiol 용액 속에 넣었다가 금속이 증착된 모재 위에 누른다. 스탬프에 형성된 패턴 형상에 따라 thiol 분자들이 금속 위로 이동하며 이동된

\* 한국기계연구원 구조연구부 마이크로응용역학그룹  
Tel. 042-868-7550, Fax. 042-868-7884  
Email jaehkim@kimm.re.kr

\*\* 한국기계연구원 구조연구부 마이크로응용역학그룹

\*\*\* 금오공과대학 기계공학부

thiol 분자들은 금속 원자와의 화학 결합을 통하여 SAM 을 형성한다. 이러한 공정 기술에서는 여러 가지 기계적인 문제들이 발생한다. 먼저, 폴리머 스탬프는 패턴 마스터 (pattern master)로부터 몰딩을 통하여 제조되는 데, 몰딩 후에 마스터로부터 분리가 잘 되지 않는 문제가 발생한다. 스탬프 소재와 마스터 소재 사이의 접착력 측정 및 평가, 그리고 접착 방지 기술이 필요로 하게 된다. 또한, 폴리머 스탬프는 스탬프 소재의 강도, 탄성계수, 점탄성계수, 세장비 (aspect ratio), 충전비 (fill factor), 외부 압력 등에 따라 의도하지 않은 패턴을 형성하기도 하며, 의도된 패턴이 제대로 전사되지 않는 문제점 들이 발생한다.

비단 미세 접촉 리소그래피뿐만 아니라 모든 종류의 나노 임프린트 공정은 기계적인 하중과 변형을 동반하기 때문에, 역학적인 원인에 기인한 여러 가지 공정 결함이 발생하고 있다. 상업적으로 적용가능한 나노 임프린트 공정 기술을 개발하기 위해서는, 이러한 기계적인 하중과 변형에 근거한 공정 결함들을 해결해야 한다. 나노 임프린트 공정 기술을 개발해온 초기 연구자들은 시행착오법에 의존하여 문제를 해결해 왔지만, 기계공학 분야에서 잘 확립되어진 물성 측정기법과 그에 따른 구조물 해석 기술을 이 분야에 적용함으로써 많은 문제들이 해결될 수 있다.

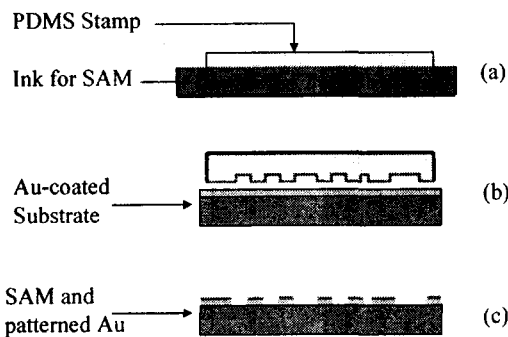


Fig. 1 A schematic of Micro Contact Printing

나노 임프린트 기술에서 다루는 구조물의 크기는 기존의 기계공학분야에서 다루어온 구조물에 비하여 그 크기가 매우 작다. 거시적인 구조물의 기계적인 특성은 그 구조물의 크기와는 거의 무관하다는 점이 알려져 있으나, 미시적인 구조물 (보

통 CD 가 1 마이크로 이하인 구조물)의 기계적인 특성은 크기와 매우 밀접하다. 따라서 나노 임프린트 기술에 적용하기 위한 기계적인 물성은 나노 임프린트 기술로서 제조되는 구조물과 동일한 크기와 공정 조건을 가지는 시료를 이용하여 측정되어야 한다. 나노 임프린트 기술 개발에 필요한 기계적인 물성은 접착/점착 강도, 탄성/점탄성 계수, 항복/인장 강도, 피로 물성 등이며, 이러한 물성이 확보되면 공정 모사 (process simulation)을 통하여 최적의 공정 조건을 적은 비용과 시간을 들여 개발할 수 있는 가능성이 높아지게 된다.

현재 나노 임프린트 기술에서 다루는 나노 구조물은 그 크기가 매우 작기 때문에, 그에 대한 기계적인 물성 측정 기술이 아직 완전히 정립되지 못한 단계이다. 매우 다양한 기술들이 전세계적으로 활발하게 개발되고 있으며, 개발 속도로 매우 빠른 편이다. 본 논문에서는 한국기계연구원 마이크로응용역학그룹에서 연구되고 있는 내용을 중심으로 나노 임프린트용 나노 구조물에 대한 기계적인 물성 측정 기술을 소개하고, 관련된 해외 선진 연구자들의 연구 결과를 소개한다.

먼저 재료 시험의 기본이 되는 마이크로/나노 인장 시험 기술을 소개하고, 가장 널리 활용되고 있는 나노 압입 시험 기술을 소개한다. 그 다음, 나노 압입 시험 기술을 활용한 몇 가지 응용 시험 기술을 소개하고, 마지막으로 AFM 을 이용한 물성 측정 기술을 소개한다.

## 2. 마이크로/나노 인장 시험 기술

### 2.1 개요

인장 시험은 새로운 소재가 개발되었을 때에 소재의 기계적인 물성을 평가하기 위하여 시행되는 기본적인 시험 방법이다. 시험의 시험 영역 (test section)에 균일한 응력과 변형률을 인가할 수 있기 때문에 재료의 구성방정식 (constitutive equation)을 결정하는 데에 필요한 응력-변형률 곡선을 직접적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 마이크로 인장시험에 관하여는 Johns Hopkins 대학의 Sharpe 교수 그룹을 중심으로 활발하게 연구되어 왔다<sup>7</sup>. Sharpe 그룹은 ISDG (Interferometric Strain/Displacement Gage)를 이용한 마이크로 소재의 변형률 측정에 강점을 가지고 있고, 마이크로 인장 시험을 이용하여 다양한 재료들의 인장 물성

을 측정하여 발표하였다<sup>8</sup>. 나노 인장 시험에 관하여는 Yu 등<sup>9</sup>가 지름 20 nm 인 탄소 나노 튜브의 양끝을 AFM 팁 (tip)에 부착하여 강도와 탄성계수를 측정한 바 있다. 또한 Haque 와 Saif<sup>10-12</sup>는 MEMS 하중계 (load cell)를 이용하여 30 nm 두께까지의 알루미늄 시편에 대한 인장 시험을 통하여 주목할 만한 결과를 주고 있다.

### 2.2 ISDG 를 이용한 마이크로 인장 시험 기술

마이크로/나노 인장 시험에서는 변위 측정 기술, 하중 측정 기술, 시편 정렬 (alignment) 기술, 시편 고정 (gripping) 기술 등 몇 가지 기본적인 기술이 요구된다. 이 중에서 변위 또는 변형을 측정 기술은 마이크로/나노 인장 시험 기술 중 가장 어려운 부분 중 하나이다. 시편의 크기가 작기 때문에 거대 재료에서 널리 사용되는 스트레인 게이지 방법을 적용할 수가 없고 비접촉식 변위 측정 방법을 적용해야 한다.

현재 마이크로 인장 시험에서 많이 사용되는 변형을 측정 방법으로는 ISDG<sup>13</sup>이 있으며, 이외에도 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), DIC (Digital Image Correlation), E-beam Moire, 마이크로 버니어 등의 방법이 이용되고 있다. 본 그룹에서는 ISDG 를 이용한 변위 측정 기술을 이용하여, Fig. 2 와 같은 미소 인장 시험기를 제작하였다. 제작된 시험기를 이용하여 MEMS 공정을 통하여 제조된 폴리실리콘 박막 시편의 응력-변형을 곡선을 Fig. 3 와 같이 얻었다<sup>14</sup>. 측정된 시험 결과는 기존의 타연구자들의 결과와 일관된 경향을 보인다.

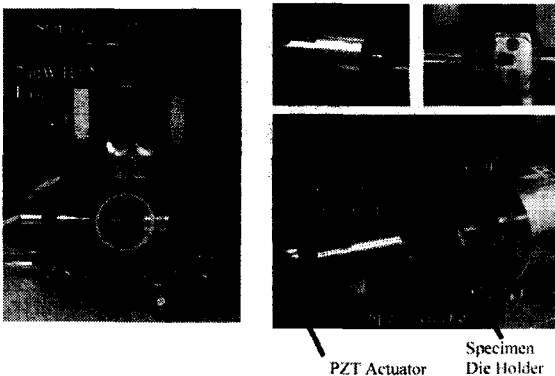


Fig. 2 Micro tensile tester in KIMM

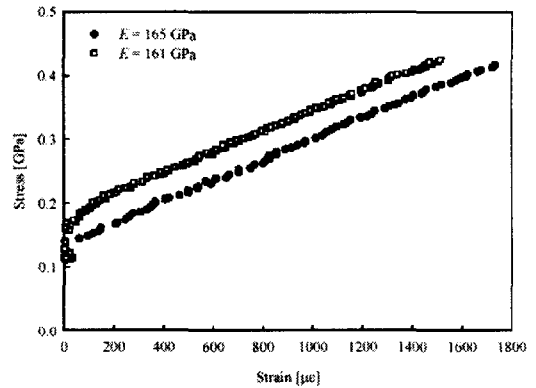


Fig. 3 Stress-strain curves of Polysilicon specimen

### 2.3 MEMS 를 이용한 인장 시험 기술

미소 인장 시험기가 잘 구축된 경우에도, 실험을 위해서는 미소 인장 시편을 제조하고, 그 시편을 시험기에 정렬/장착하는 것은 매우 어려운 작업이다. 더욱이 시편의 CD 가 1 마이크로 이하로 줄어드는 경우에는, 시편을 제조하는 데에 드는 노력을 그다지 증가하지 않지만, 시편을 시험기에 정렬/장착하는 일에 많은 노력이 요구된다. 따라서 쉽게 생각할 수 있는 대안은, MEMS 공정을 이용하여 시편을 제조할 때에 시험기도 함께 제조하는 것이다. 물론 MEMS 공정으로 제조된 시험기에도 시편에 하중을 가할 수 있는 구동기와, 변위 및 하중을 정량적으로 측정할 수 있는 센서 부분이 함께 포함되어야 한다. 이미 여러 선진 연구자들이<sup>10-12,15</sup> 이러한 시편을 제조하여 좋은 결과들을 발표하였고, 본 그룹에서도 Fig. 4 와 같은 시편을 제조하여 연구를 진행하고 있다.

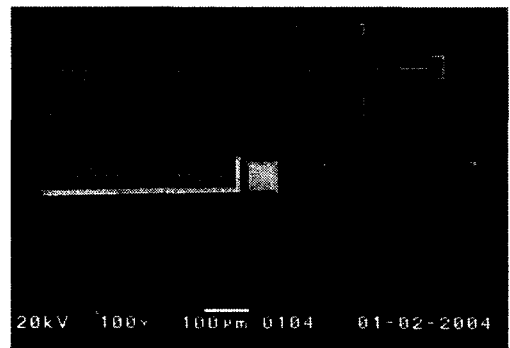


Fig. 4 Tensile specimen and thermal actuator

### 3. 나노 압입 시험 기술

#### 3.1 개요

미소 소재, 즉 특성 길이가 1  $\mu\text{m}$  이하인 구조물은 인장 시험용 시편을 제작하기가 매우 어렵다. 미소 소재에 대한 인장 시험용 시편을 만들기 위해서는 MEMS 제작에서 이용되는 미소 가공 기술 (micro-machining technology)을 적용하지만, 제작하고자 하는 시편의 크기, 형상, 재료에 따라 많은 노력과 비용을 필요로 하는 경우가 대부분이다. 이에 반하여 압입 시험 (indentation test)은 시험 방법이 매우 간단하고, 시편 형상에 대한 제약이 거의 없으므로, 각종 코팅 소재나 반도체와 MEMS 등에서 사용되는 미소 소재 등에 활발하게 적용되고 있다. 압입 시험은 시편 제작이 매우 간단하다는 장점이 있는 반면, 시험 결과의 해석이 인장 시험이나 굽힘 시험 등에 비하여 상대적으로 어렵다는 단점이 있다. 현재까지 여러 연구자들이 압입 시험 결과의 해석에 대한 이론들을 제시하였지만, 소성, 점탄성, 파괴, 점착 등의 복잡한 재료 거동과 모재/박막 상호작용 효과 등을 모두 포함하는 완전한 압입 이론은 아직까지 개발되지 못하고 있다.

나노 압입 시험에서는 압자를 소재에 압입하면서 발생하는 하중과 변위를 연속적으로 측정하고, 측정된 변위와 하중으로부터 압흔을 유추하는 방법을 사용한다. 이것은 압입 시험 시에 발생하는 압흔이 매우 작아서 현미경으로 직접 압흔을 측정하는 것이 쉽지 않은 경우에 유용한 방법이다. 나노 압입 시험에서는 매우 정밀한 하중 및 변위 센서가 사용되며, 나노 소재의 물성을 간편하게 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한 적절한 압입 이론과 결부된다면 탄성계수와 경도뿐만 아니라, 잔류응력, 점탄성 물성, 유동 곡선 (flow curve) 등을 측정하는 데에 이용될 수 있다.

#### 3.2 압입 이론

압입 이론은 기본적으로 접촉 역학 (contact mechanics)에 그 기초를 두고 있다. 19 세기말 Hertz 가 두 개의 구형 표면 사이의 접촉 문제를 해석한 이후에 여러 연구자들에 의해 접촉 역학이 연구되어왔고, 최근까지의 연구 결과에 대한 정리는 Johnson<sup>16</sup>의 저서에서 찾아볼 수 있다. 구형 및 원뿔형 압자를 이용한 압입 시험의 해석에 관하여

는, Sneddon<sup>17</sup>의 연구를 기본으로 여러 연구자들이 이론적, 수치적, 실험적 연구 결과들을 발표하여 왔다<sup>18</sup>. 현재 나노 압입 시험에서 가장 널리 채택되고 있는 이론은 Oliver 와 Pharr<sup>19</sup>의 이론이다.

#### 3.3 나노 압입 시험을 이용한 물성 측정 예

한국기계연구원 마이크로응용역학그룹에서는 나노 압입 시험을 이용하여 각종 반도체 및 세라믹 소재, 금속과 폴리머 박막에 대한 기계적 물성을 측정하고 있다. 한 예로서, Fig. 5 는 나노 임프린트용 폴리머의 일종인 MR-I-8030 박막에 대하여 나노 압입 시험을 수행하여 얻어진 하중-변위 곡선을 나타낸다. 이 때, 최대 압입 깊이는 30-45 nm 이고 최대 압입 하중이 13  $\mu\text{N}$  이다. 측정된 하중-변위 곡선은 유한 요소 해석과 결부되어 폴리머 박막 소재의 물성을 평가하는 데에 중요한 단서가 된다.

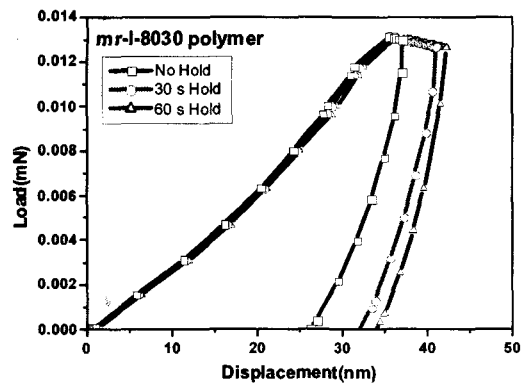


Fig. 5 Load-displacement curve for MR-I-8030 thin film

### 4. 나노 인덴터를 이용한 응용 측정 기술

#### 4.1 개요

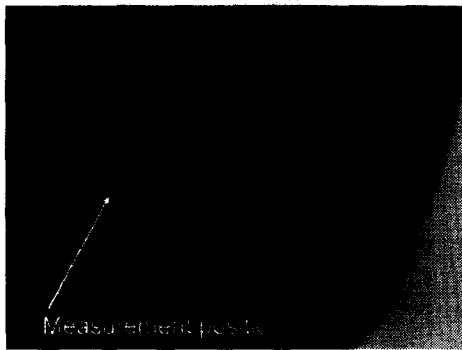
나노 압입 시험은 미소 소재의 탄성 계수와 경도를 측정하는 데에 주로 이용되지만, 본 그룹에서는 나노 인덴터를 활용한 여러 가지 응용 측정 방법에도 연구를 진행하고 있다. 나노 압입 시험을 이용하여 100 nm 이하 두께를 갖는 박막의 물성을 측정하기 위해서는 모재의 영향이 필연적으로 고려되어야 한다. 이를 위하여 나노 스케일

박막의 소성 및 점탄성 물성을 압입 시험과 유한 요소 해석을 연계하여 측정하는 연구를 진행 중이다<sup>20</sup>. 나노 임프린트 공정에서는 폴리머 패턴의 잔류 두께 제어가 매우 중요한 이슈이다. 이를 위하여 나노 압입 시험을 통하여 폴리머 박막의 잔류 두께를 측정할 수 있는 기술을 개발하였다<sup>21,22</sup>. 나노 압입 시험기는 매우 높은 하중 및 변위 분해능을 가지고 있으므로, 미소 재료 시험기로 이용될 수 있다. 본 그룹에서는 나노 압입 시험기를 이용한 락 굽힘 시험 기술을 구현하였으며, 이외에도 계면의 점착 (adhesion) 특성 연구, 박막 접합 강도 측정 연구, 마이크로 빔의 피로 시험 연구 등을 진행하고 있다. 본 논문에서는 나노 압입 시험기를 활용하여 잔류 두께를 측정하는 기술과 나노 스케일 박막 시편의 인장 물성을 측정하는 기술에 대하여 설명한다.

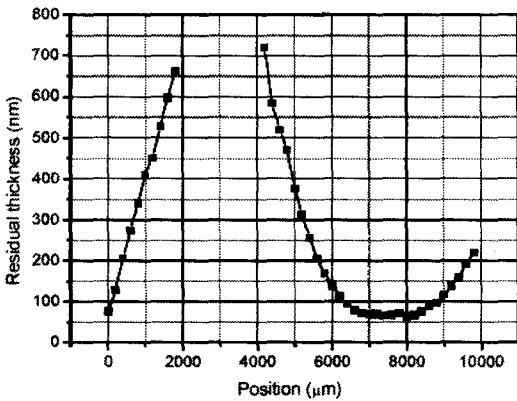
#### 4.2 잔류 두께 측정 기술

잔류 두께는 소재의 기계적인 물성은 아니지만, 나노 임프린트 기술에 있어서는 매우 중요한 의미를 지닌다. 나노 임프린트 기술에서 제조되는 나노 구조물들은 대부분 식각 마스크 (etch mask)의 역할을 하게 되므로, 가능한 한 균일하면서도 얇은 잔류 두께를 가지는 것이 필요하다. 타원계 측기(ellipsometer)를 이용하는 두께 측정방법은 미소 패턴이 있는 국소 부분의 두께를 측정할 수가 없다. 본 그룹에서는 나노 압입 시험에서 발생하는 모재 영향을 이용하여 나노 임프린트 공정을 통하여 형성된 박막의 국부적인 잔류 두께를 측정하는 기술을 개발하여 특허를 출원하였다<sup>22</sup>.

개발된 기술을 이용하여 UV 나노 임프린트 공정으로 제작된 폴리머 박막 구조물의 잔류 두께 측정 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 측정을 위하여 잔류 두께가 매우 불균일하게 형성된 샘플을 선택하였으며, Fig. 6(a)에 나타난 직선을 따라서 나노 압입 시험기를 이용하여 잔류 두께를 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 6(b)와 같이 얻어졌으며 잔류 두께가 750 nm 이상인 곳은 측정되지 않았다<sup>21</sup>.

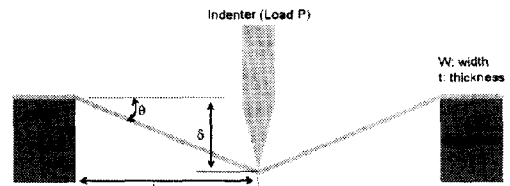


(a)



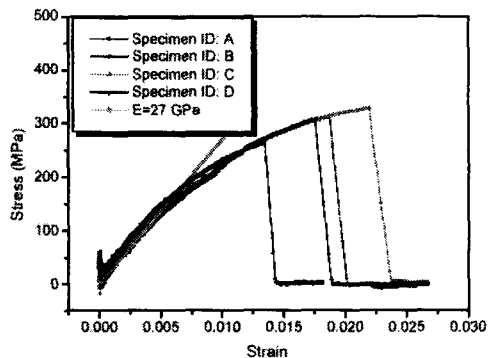
(b)

Fig. 6 (a) Polymer pattern fabricated by nano imprint, (b) residual thickness measurement by nanoindenter



$$\tan \theta = \frac{\delta}{L} \quad \sigma = \frac{P}{2Wt \sin \theta} \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{L^2 + \delta^2}}{L} - 1$$

(a)



(b)

Fig. 7 (a) Strip bending test by nanoindenter, (b) stress-strain curve of 100nm thick Au thin film

### 4.3 띠 굽힘 시험 기술

나노 압입 시험기는 매우 정밀한 하중 및 변위 센서를 보유하고 있으므로, 이를 활용하여 여러 가지 시험 기술을 개발할 수 있다. 나노 압입 시험기를 이용하여 Fig. 7(a)와 같이 자유지지되는 박막(freestanding thin film) 시편에 대하여 띠 굽힘 시험을 수행할 수 있으며, 이를 통하여 시편의 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있다. 이미 2003 년도에 Espinosa 등<sup>23</sup> 이 이와 같은 방식으로 실험한 결과를 발표한 바가 있으며, 본 그룹에서도 같은 방식으로 Espinosa 등이 실험한 시편보다 더 얇은 시편에 대하여 기계적인 물성을 측정하였다.

본 그룹에서는 띠 굽힘 시험을 이용하여 MEMS 공정을 통하여 제작된 100 nm 두께의 금 박막 시편을 실험하였다<sup>24</sup>. 실험에서 측정된 하중과 변위는 Fig. 7(a)에서 나타난 식을 이용하여 응력과 변형률로 변환되었다(Fig. 7(b)참조)

## 5. AFM 을 이용한 물성 측정 기술

### 5.1 개요

AFM (Atomic Force Microscope)은 강성이 매우 작은 외팔보 (cantilever) 끝에 뾰족한 탐침 (끝단 반경이 보통 10-20 nm)을 부착하여 시료 표면을 주사(scan)하는 구조이다. AFM 탐침이 시료 표면에 근접하는 경우에 원자 스케일의 미소한 상호작용력이 발생하며, 이 상호작용력을 측정하여 시료 표면 형상(topography)을 영상화하는 원리이다<sup>25-26</sup>. 시료의 표면 형상을 영상화하기 위해서는 탐침의 끝단 반경이 작을수록 유리하기 때문에, 실리콘이나 실리콘 질화물로 이루어지는 탐침을 많이 사용한다.

AFM 으로 기계적인 물성을 측정하기 위해서는 보다 내구성이 좋은 탐침과 보다 강성이 큰 AFM 외팔보가 필요하다. 이를 위하여 스테인레스 외팔보와 다이아몬드 탐침을 사용하는 경우가 많다. 측정 원리는 AFM 탐침을 시료 표면에 압입하여, 기계적인 물성을 측정하는 방법이 많이 이용된다<sup>27,28</sup>. 이외에도 AFM 을 이용하여 나노 선(wire)<sup>29</sup> 이나 나노 보(beam)의 굽힘 시험을 실시하거나, 탄소 나노 튜브의 인장 시험<sup>9</sup>을 수행한 예도 발표되고 있다. 여기서는 본 그룹에서 진행중인 AFM 을 이용한 압입 시험 기술 (picoindentation)에 대하여 서술한다.

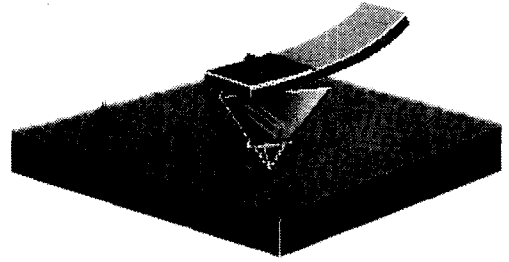


Fig. 8 A schematic of AFM indentation test<sup>30</sup>

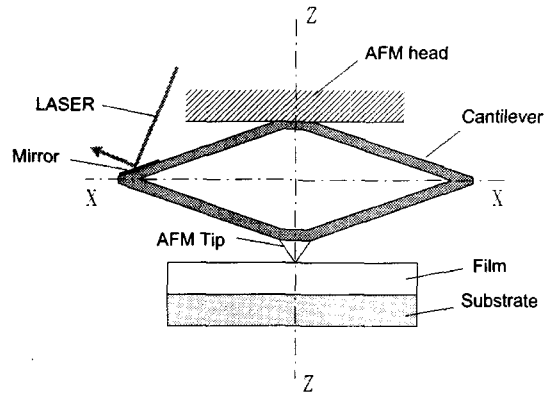


Fig. 9 An AFM cantilever without lateral motion

### 5.2 AFM 압입 시험 기술

AFM 을 이용한 피코 압입 시험 에서 시편에 작용하는 하중은 외팔보의 변형으로부터 측정하고, 외팔보 팁의 압입 깊이는 z 스캐너의 변위와 외팔보의 변형량으로부터 측정된다<sup>25,27,30</sup>. 현재 상용 AFM 중에는 압입 시험 기능을 가지는 제품도 있다(Fig. 8 참조)<sup>30</sup>. AFM 압입 시험 기술은 앞서 기술한 나노 압입 시험 기술과 동일한 방식으로 이루어지지만, 하중과 변위가 나노 압입 시험보다 매우 작다는 특징이 있다.

AFM 압입 시험 기술에서, 현재 가장 이슈가 되고 있는 부분은 AFM 외팔보의 하중 보정 (calibration) 문제이다. AFM 외팔보는 매우 강성이 작기 때문에, 일반적인 방법으로는 그 강성을 보정하는 것이 쉽지 않다. 또한 AFM 외팔보가 AFM 헤드에 장착될 때에도 그 장착 조건에 따라 강성이 변화할 수 있기 때문에, AFM 헤드에 장착된 상태에서 외팔보의 강성을 보정하는 방법이 필요하다. AFM 압입 시험 시의 또다른 이슈는, 압입 시험 중에 발생하는 AFM 탐침의 수평 운동이다.

이러한 수평운동은 AFM 외팔보의 비대칭적인 구조에 기인하는 것으로써 기존의 상용 AFM에서는 소프트웨어적으로 보상하거나 방향이 반대인 수평 방향 운동을 중첩함으로써 보상하는 방법을 사용하고 있다. 본 그룹에서는 Fig. 9 와 같이 AFM 외팔보의 구조를 새로 설계함으로써 압입 시험 중에 발생하는 수평 운동 문제를 근원적으로 제거할 수 있는 방법을 고안하여 국제 특허를 출원하였다<sup>31</sup>.

### 5.3 AFM 을 이용한 물성 측정시의 이슈들

AFM 을 이용한 물성 측정의 가장 큰 문제점은 AFM 이 하중과 변위 측정용으로 개발되지 않았다는 점이다. 원래 AFM 은 시료 표면 형상 (topography) 측정을 목적으로 개발된 것이기 때문에, AFM 외팔보에서 측정되는 하중이 정량적으로 의미를 가질 필요는 없었다. 그러나 기계적인 물성을 측정하기 위해서는, 가해진 하중과 그에 따른 변형량을 정확하게 측정해야 하므로 여러 가지 보완 사항이 필요하다. 우선 AFM 에 수반되는 보정 (calibration) 이슈들은 다음과 같다.

- PSPD 신호와 변위 사이의 보정
- AFM 외팔보의 수직 방향 강성 보정
- AFM 외팔보의 수평 방향 강성 보정
- AFM 탐침의 형상 측정
- z 스캐너의 변위 보정

본 그룹에서는 AFM 의 이러한 문제점들을 해결하는 연구를 계속적으로 진행하고 있다.

## 6. 결론

본 그룹에서는 나노 임프린트 기술 개발에서 요구되는 여러 가지 나노 구조물의 기계적 물성을 측정하는 기술을 개발하고 있다. 특히 마이크로/나노 인장 시험 기술, 나노 압입 시험 기술, AFM 을 이용한 물성 평가 기술에 관심을 기울이고 있으며, 관련 기본 기술 및 응용 기술을 개발하고 있다. 이러한 물성 측정 기술 개발은 그 자체로서 기술적·학술적 가치를 가질 뿐만 아니라 측정장비 상용화를 통하여 부가가치를 창출하는 데에 기여할 것이다. 또한 나노 임프린트 공정 개발에 적용되어 나노 구조물의 대량 생산 및 신뢰성 확보, 기계적 거동 예측 등에 기여하게 될 것이다.

## 후 기

본 연구는 21 세기 프론티어연구개발사업인 나노 메카트로닉스 기술 개발사업단의 연구비 지원 (04K1401-01310)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Scheer, H.-C., Schulz, H., Hoffmann, T. and Sotomayor Torres, C. M., "Nanoimprint techniques," in Handbook of thin film materials Vol. 5 edited by H. S. Nalwa: Academic press, pp. 1-60, 2002.
2. NTSC, "National nanotechnology initiative," 2000.
3. Peercy, P.S. "The drive to miniaturization," Nature, Vol. 406, pp. 1023-1026, 2000.
4. Chou, S.Y., Krauss, P.R. and Renstrom, P.J., "Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymers," Applied Physics Letter, Vol. 67, pp. 3114-3116, 1995.
5. Haisman, J., Verheijen, M., Van den Heuvel, K. and Van den Berg, J., "Mold-assisted nanolithography: A process for reliable pattern replication," J. Vac. Sci. Technol. Vol. B14, pp. 4124-4128, 1996.
6. Kumar, A. and Whitesides, G. M., "Features of gold having micrometer to centimeter dimensions can be formed through a combination of stamping with an elastomeric stamp and an alkanethiol "ink" followed by chemical etching," Appl. Phys. Lett. Vol. 63, pp. 2002-2004, 1993.
7. Gad-el-Hak, M. Eds. The MEMS Handbook, CRC Press, USA, 2002.
8. Sharpe, W.N., Turner, K.T. and Edwards, R.L., "Tensile testing of polysilicon," Experimental Mechanics, Vol. 39, pp. 161-169, 1999.
9. Yu, M.F., Lourie, O., Dyer, M.J., Moloni, K., Kelly, T.F. and Ruoff, R.S., "Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load," Science, Vol. 287, pp. 637-640, 2000.
10. Haque, M.A. and Saif, M.T.A., "Application of MEMS force sensors for in situ mechanical characterization of nano-scale thin films in SEM and TEM," Sensors and Actuators, Vol. A97-98, pp. 239-245, 2002.
11. Haque, M.A. and Saif, M.T.A., "Mechanical behavior of 30-50 nm thick aluminum films under

- uniaxial tension," *Scripta Materialia*, Vol. 47, pp. 863-867, 2002.
12. Haque, M.A. and Saif, M.T.A., "Strain gradient effect in nanoscale thin films," *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 3053-3061, 2003.
  13. Sharpe, W.N., "An interferometric strain / displacement measurement system," NASA Technical Memorandum 101638, 1989.
  14. Oh, C.S., Sharpe, W.N., Lee, H.J., Ko, S.G., Kim, S.W. and Ahn, H.G., "Measurement of the mechanical properties of thin polysilicon films using laser interferometry, microvernier and nanoindentation techniques," APCNDT 2003, Jeju, Korea (to be published in *Sensors and Actuator*).
  15. Zhu, Y., Barthelat, F., Labossiere, P.E., Moldovan, N. and Espinosa, H.D., "Nanoscale displacement and strain measurement," *Proceedings of the 2003 SEM*, 2003.
  16. Johnson, K.L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, New York, 1985.
  17. Sneddon, I.N., "The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 3, pp. 47-57, 1965.
  18. Fischer-Cripps, A. C., *Nanoindentation*, Springer-Verlag New York, 2002.
  19. Oliver, W.C. and Pharr, G.M., "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, pp. 1564-1583, 1992.
  20. Hur, S., Hong, S.I., Lee, H.J., Han, S.W., Kim, J.H., Kang, J.Y., Choi, B.I. and Oh, C.S., "Measurements of mechanical properties of thin polymer films by nanoindentation techniques," APCNDT 2003, Jeju, Korea (to be published in *Key Engineering Materials*).
  21. Kim, J.H., Lee, H.J., Ko, S.G., Han, S.W., Hur, S., Choi, B.I., Jeong, J.H. and Lee, E.S., "Residual thickness estimation of polymeric thin film based on a simplified nanoindentation model," *KSPE 2003 Autumn*, Masan, Korea.
  22. Lee, H.J., Hur, S., Ko, S.G., Kim, J.H., Han, S.W. and Choi, B.-I., "Methods for measuring the thickness of nano-meter sized thin films using indentation test," Patent pending (Korea), 2003.
  23. Espinosa, H.D., Prorok, B.C. and Fischer, M., "A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS materials," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 51, pp. 47-67, 2003.
  24. Kim, J.H., Lee, H.J., Han, S.W., Baek, C.-W., Kim, J.-M. and Kim, Y.-K., "Mechanical characterization of 100 nm-thick Au thin film using strip bending test," *KSME 2004 spring conference*, Kangwondo, Korea, 2004.
  25. <http://www.psia.co.kr>
  26. Garcia, R. and Perez, R., "Dynamic atomic force microscopy methods," *Surface Science Reports*, Vol. 47, pp. 197-301, 2002.
  27. <http://www.bfrl.nist.gov/nanoscience/papers/JAD.html>
  28. VanLandingham, M.R., Villarrubia, J.S. and Meyers, G.G., "Nanoindentation of polymers: Overview," *Polymer Preprints*, Vol. 41, pp. 1412-1413, 2000.
  29. Namazu, T., Isono, Y. and Tanaka, T., "Evaluation of size effect on mechanical properties of single crystal silicon by nanoscale bending test using AFM," *Journal of Microelectromechanical System*, Vol. 9, pp. 450-459, 2000.
  30. <http://www.di.com>.
  31. Lee, H.J., Kim, J.H., Oh, C.-S., Han, S.W., Hur, S., Ko, S.G. and Choi, B.-I., "AFM cantilever with nanoindentation test functionality," *PCT/KR2004/00018*, 2004.