

띠 굽힘 시험을 이용한 마이크로 / 나노 구조물의 기계적 특성 평가

김재현, 이학주, 최병익 | 한국기계연구원

1. 서 론

지난 수십 년간 반도체 분야에 적용되어온 Moore's law에 의하면, 1~2년 내에 수십 나노 미터 크기의 특성 길이를 가지는 구조물을 이용하여 소자가 제작될 것이 예견되고 있다^[1]. 최근에는 이미 국내 S 전자회사가 60nm급의 공정기술을 이용하여 플래시 메모리를 개발하였다고 발표한 바가 있다. 반도체 공정을 응용하여 작은 구조물을 제작하는 기술(소위 마이크로/나노 머시닝 기술)은, 전자 공학 분야 뿐만 아니라 광전자 공학(optoelectronics) 분야, 양자 계산(quantum computing) 분야, MEMS/NEMS, 바이오 센서(biosensor) 분야 등에 다양한 응용성을 가질 것으로 전망된다^[2]. 그림 1에는 나노 구조물을 공진시켜서 화학센서로 이용한 예가 나타나 있다^[3]. 나노 구조물의 공진 주파수와 나노 구조물에서 일어나는 화학반응 사이의 관계를 이용하여 이러한 센서를 제작하려는 시도는 현재 매우 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 제품을 개발하기 위해서는 수백에서 수십 나노 미터 수준의 특성 길이를 가지는 나노 구조물에 대한 설계 기술이 요구되며, 마이크로/나노 구조물의 기계적인 특성을 평가하는 기술을 확보하는 것이 필요하다. 마이크로/나노 구조물의 기계적인 물성은 거대 구조물 (bulk structure)의 물성과는 다르다는 점이 알려져 있고, 물성 측정 시에 구조물의 크기 효과(size effect)와 제작 공정을 고려하여 측정해야 한다는 어려움이 있다.

수백에서 수십 나노 미터 수준의 특성 길이를 가지는 구조물의 기계적 물성 측정 기술은 아직까지 표준화가 되지 못한 상황이다. 다양한 측정 기술들이 세계 각처에서 개발되고 있지만, 각각의 측정 기술들은 여러 가지 난제들을 포함하고 있다. 현재까지 가장 널리 사용되는 방법은 나노 압입 시험 기술이다. 이 기술은 시편 제작 과정 및 시험 과정이 간단하기 때문에, 역학적인 이해가 깊지 않아도 쉽게 물성을 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 그 측정 결과를 정량적인 물성치와 연관시키는 데에 여러 가지 어려움이 있다. 정량적으로 기계적인 물성을 측정할 수 있는 방법으로는 미소 인장 시험 (micro tensile test)이 있다. 이 시험은 정밀한 변형률 측정 장치, 시편 정렬 (alignment) 및 고정 장치(fixture) 등 정교한 시험 장비 기술이 요구된다는 점과 시편 제작이 까다롭다는 단점이 있다. 그러나 가장 정량적인 기계적 물성치를 얻을 수 있다는 장점이 있으므로 지속적으로 연구되고 있다^[4]. 본 논문에서는 미소 인장 시험과 같이 재료의 인장 특성을 얻을 수 있는 반면에, 시편 제작 및 시편 정렬, 시편 고정 등이 미소 인장 시험보다 훨씬 용이하다는 장점을 지닌 띠 굽힘 시험 (strip bending test)에 대하여 소개한다.

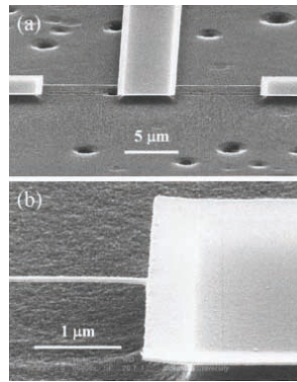


그림 1. Nanomechanical chemical sensor: (a) 공진형 캔틸레버, (b) 한쪽 고정단의 확대 사진^[5]

2. 띠 굽힘 시험의 개요

2.1 시험 원리

띠 굽힘 시험은 길이가 매우 길고, 너비와 두께가 작은 구조물을 그림 2와 같이 변형시키면서, 하중과 변형을 측정하는 시험이다. 이런 시험을 멤브레인 변형 실험 (membrane deflection experiment)^[5]으로 표현하는 연구자도 있다. 멤브레인은 두께가 작고, 면적 (surface area)이 매우 넓은 구조물을 지칭하는 용어로서, 보통 3차원적인 변형 형상을 가진다. 또한, 굽힘 모멘트 (bending moment)를 지탱할 수 없다는 점에서 셸 (shell)과는 구분이 된다. 띠 굽힘 시험에서 사용하는 구조물은 너비가 그다지 넓지 않기 때문에 멤브레인보다는 띠(strip)로서 표현되며, 멤브레인과 마찬가지로 굽힘 모멘트를 지탱할 수 없는 구조물이다. 구조물의 길이에 비하여 너비가 매우 작기 때문에, 3차원적인 변형 대신에 2차원적인 변형으로 단순화할 수 있는 형상을 지닌다.

띠 굽힘 시험에서 측정된 하중과 변위는 시편의 기하학적인 형상 정보를 이용하여 응력과 변형률로서 쉽게 환산된다(이러한 환산에 필요한 제한 조건은 추후에 논의된다). 띠 굽힘 시험에서는 굽힘 모멘트의 영향이 매우 작기 때문에, 구조물 전체에 인장 하중이 지배적으로 발생한다. 따라서, 인장 시험을 모사할 수 있으며, 재료의 응력-변형률 관계를 얻을 수 있다^[6].

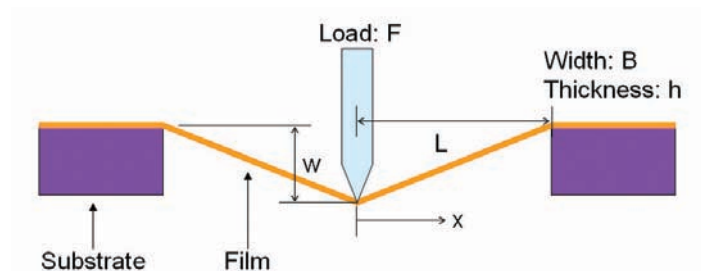


그림 2. 띠 굽힘 시험의 개략도

2.2 띠 굽힘 변형의 해석

그림 2에 나타난 띠 굽힘 시험편의 변형은 다음과 같은 미분방정식으로 모사할 수 있다^[7].

$$\frac{d^2\theta(\xi)}{d\xi^2} - A_1\theta(\xi) = -A_2 \quad (1)$$

여기서 $A_1=NL^2/(EI)$, $A_2=FL^3/(2EIh)$, $\theta(\xi)=d\omega/d\xi$, $\omega = \omega/h$, $\xi = \chi/L$, N 은 띠 시편에 발생한 인장 하중, ω 는 띠의 변형량(deflection), E 는 탄성계수, I 는 관성 모멘트, F 는 띠 시편에 가해진 외력이다. 이제 띠 시편에 발생한 인장 하중 N 이 시편 전체에 균일하다는 가정을 하면(그러나, N 은 가해진 외력 F 에 따라 변화함), 다음과 같은 해석해를 얻을 수 있다.

$$\theta(\xi) = -\frac{A_2}{A_1} \frac{1}{(e^{\sqrt{A_1}}+1)} (e^{\sqrt{A_1}\xi} + e^{\sqrt{A_1}(1-\xi)} - e^{\sqrt{A_1}} - 1) \quad (2)$$

경계 조건으로는, $\theta(0) = \theta(1) = 0$ 를 사용하였다. 이 해석해를 적분함으로써 띠 굽힘 시험편의 변형량 ω 를 얻을 수 있다(경계조건 $\omega(\xi) = 0$ 사용). 이제 띠 굽힘 시험편에 발생한 인장 변형률은 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \frac{du}{d\chi} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{d\chi} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 u 는 χ 방향으로의 변위이다. 마지막으로 선형 탄성 구성 방정식을 적용하면, 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$A_1 = 6 \int_0^1 \theta(\xi) d\xi \quad (4)$$

이 방정식으로부터 띠 굽힘 시험편에 가해진 외력 F 와 띠 굽힘 시험편에 발생한 인장 하중 N 과의 관계를 얻을 수 있다. 만약 띠 굽힘 시험편에 잔류응력 σ_0 이 작용하고 있다면, $\sigma_0 hB$ 를 N 에 중첩함으로써 잔류응력의 영향을 쉽게 평가할 수 있다. 여기서 h 와 B 는 각각 띠 굽힘 시험편의 두께와 너비이다.

띠 굽힘 시험편의 해석해를 이용함으로써, 그림 3과 같은 하중-변위 관계를 얻을 수 있다. 여기서 하중과 변위는 편의상 무차원화 하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 띠 굽힘 시험편의 변형은 “stretching dominant” 영역과 “bending dominant” 영역의 두 극단 사이 존재함을 알 수 있다. “bending dominant” 영역에서는 beam theory를 이용하여 하중과 변위를 해석할 수 있으며, 이 경우에 하중과 변위는 서로 선형적으로 연관된다. 한편, “stretching dominant” 영역에서는 굽힘 모멘트의 영향이 무시되기 때문에, 실(string)의 변형으로 단순화하여 하중과 변위 사이의 관계를 얻을 수 있다. 이 경우에는 하중이 변위의 3제곱에 비례하게 된다. 띠 굽힘 시험편의 거동은 두께와 변위 사이의 비율에 따라 바뀌게 된다. 즉 변위가 두께에 비하여 매우 작을 때에는 “bending dominant” 거동을 보이며, 반대로 변위가 두께보다 10배 이상 커지면 “stretching dominant” 거동을 보인다. MEMS 및 NEMS에 사용되는 자유 지지형 구조물의 두께는 점차 얇아지는 추세이므로, “stretching dominant” 영역에서 시험을 할 수 있도록 시험편을 설계하는 것이 유리할 때가 많다. 본 연구에서 사용하는 띠 굽힘 시험편도 길이가 매우 길고, 두께가 매우 얇기 때문에 “stretching dominant” 영역에서 시험하는 것이 “bending dominant” 영역에서 시험하는 것보다 쉽다.

앞서 제시한 띠 굽힘 시험편의 해석해를 이용하여 잔류응력의 영향을 평가하면, 그림 4와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 이 그래프는 매우 흥미있는 결과를 보여준다. 먼저 잔류응력의 영향은 “stretching dominant” 영역보다

“bending dominant” 영역에서 크다는 점을 알 수 있다. “stretching dominant” 영역에서도 잔류응력에 의한 차이가 나타나지만, 그림 4에서는 쉽게 구별하기 어렵다. 반면에 “bending dominant” 영역에서는 압축 잔류응력의 평가가 잘 되지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 압축 잔류응력이 발생하는 경우에 띠 굽힘 시험편에 좌굴(buckling)이 일어나기 때문이며, “bending dominant” 영역에서는 단순한 해석해로 좌굴이 일어날 때의 하중-변위 관계를 계산할 수 없다. 해석적으로 좌굴이 일어나는 영역을 다루기 위해서는 좌굴에 의한 변형 형상(좌굴 모드)을 고려하여, 변형률을 평가하는 모델이 도입되어야 한다. 본 연구에서는 띠 굽힘 시험편이 “stretching dominant” 영역에서 실험 되도록 설계하는데, 이런 경우에는 압축과 인장 잔류응력 모두를 측정할 수 있다^[8]. 다만, “bending dominant” 영역에서보다는 잔류응력에 의한 영향이 작기 때문에, 보다 분해능이 높은 하중 및 변위 측정 센서를 이용해야 한다. “stretching dominant” 영역에서의 잔류응력 영향은 그림 5에 나타나 있다.

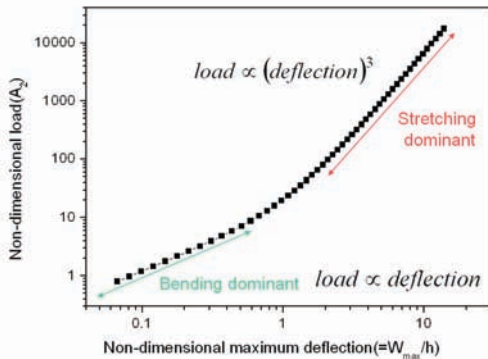


그림 3. 띠 굽힘 시험편의 하중-변위 관계

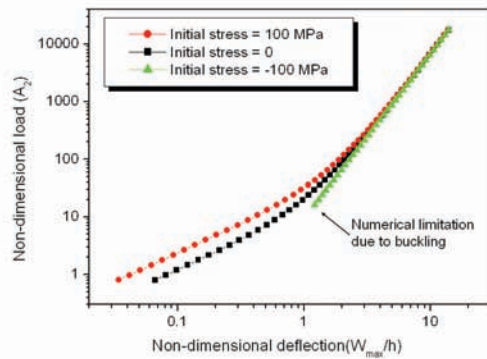


그림 4. 띠 굽힘 시험편에서 잔류응력의 영향

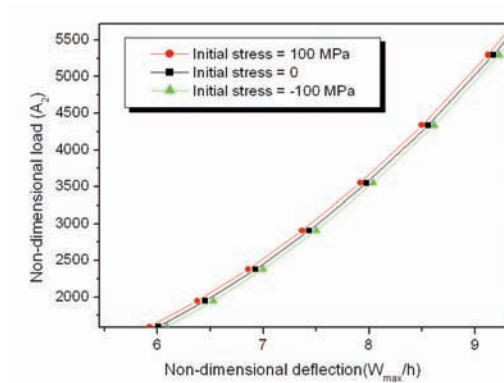


그림 5. “stretching dominant” 영역에서의 잔류응력의 영향

앞서 기술한 띠 굽힘 시험편의 해석하는 실험에서 그대로 이용하기에는 복잡한 형태이다. 실험자들이 띠 굽힘 시험을 통해 얻은 하중과 변위를 해석하기 위해서는 좀더 간단한 식이 필요하다. 본 연구에서는 띠 굽힘 시험편이 “stretching dominant” 영역에서 변형하도록 시험편 및 시험 절차를 설계하는데, 이 경우에는 아래와 같이 간단한

시험식을 다시 유도할 수 있다⁶⁾.

$$\sigma = \frac{F}{2Bhsin\beta} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{L^2+w^2}}{L} - 1 \quad (6)$$

이 시험식을 유도하는 데에는 굽힘 모멘트가 무시할 만큼 작다는 가정과 띠 굽힘 시험편 전체에 인장 변형률이 균일하다는 가정을 사용하였으며, 시험의 구성방정식과는 무관하게 시험의 기하학적인 형상으로부터 유도되었다. 굽힘 모멘트의 영향이 무시할만큼 작다는 가정은 그림 3에서 볼 수 있듯이 띠 굽힘 시험편의 변위가 시험편의 두께보다 10배이상 큰 경우에는 타당한 가정이지만, 시험편 전체에 인장 변형률이 균일하다는 가정은 유한 요소 해석을 통하여 검증해 볼 필요성이 있다.

2.3 시험식의 유한 요소 검증

띠 굽힘 시험편에서 발생하는 변형과 응력을 알아보기 위하여, 유한 요소 해석을 수행하였다⁹⁾. 그림 6에는 길이/두께 비가 200인 띠 굽힘 시험편의 유한요소 해석 결과가 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 시험 전체에 균일한 응력 및 변형률이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 띠 굽힘 시험편의 고정단과 외력이 가해지는 부분에 응력 집중이 발생하고 있음을 알 수 있다. 유한 요소 해석에서는 선형 탄성 구성방정식을 사용하였으며(Young 계수 = 50GPa, 포아송비=0.3), 대칭성을 고려하여 1/4 모델을 사용하였다. 시험식 (5)와 (6)을 검증하기 위하여 다양한 형상비에 따른 유한 요소 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석에서 얻은 하중과 변위를 시험식에 적용하면 응력과 변형률을 얻을 수 있다. 이로부터 역시 탄성계수를 추출할 수 있는데, 이렇게 시험식으로부터 구한 탄성계수와 유한 요소 해석 시에 입력한 탄성계수 사이의 오차가 그림 7에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 띠 굽힘 시험의 길이가 길어짐에 따라 탄성계수 평가 시의 오차는 점차 줄어들며, 길이/두께 비가 350 이상이 되면, 오차는 1.5% 이하로 줄어들음을 알 수 있다.

2.4 시험 설계

본 연구에서 다루고 있는 띠 굽힘 시험은 시험에 가해지는 굽힘 모멘트를 무시할 수 있는 경우에 시험 결과의 해석이 매우 간단해진다. 따라서, 시험 설계 시에 시험에 발생하는 굽힘 모멘트가 무시될 수 있도록 설계하는 것이 필요하다. 이를 위하여 시험의 최대 변위는 시험의 두께 보다 매우 커야 하며(보통 40배이상), 시험의 변위가 커져도 시험이 탄성영역에 있도록 하기 위해서는 시험의 길이가 시험의 최대 변위보다 매우 크도록 설계하는 것이 필요하다. 앞서 제시한 유한 요소 해석 결과로부터 시험의 길이는 시험 두께보다 350배이상 커야한다는 점도 고려해야 한다. 실제 실험을 위하여, 본 연구에서는 시험의 두께를 1000 nm 수준으로 가정하고, 시험의 폭을 0.01 mm, 시험의 길이를 0.4 mm를 기준으로 하여 그림 8과 같은 시험 마스크를 제작하였다. 시험 마스크에는 띠 굽힘 시험뿐만 아니라 미소 인장 시험, 열팽창계수 측정 시험 등 다양한 시험이 들어있으나, 여기서는 띠 굽힘 시험을 이용한 시험과 그 결과를 중점적으로 논의한다.

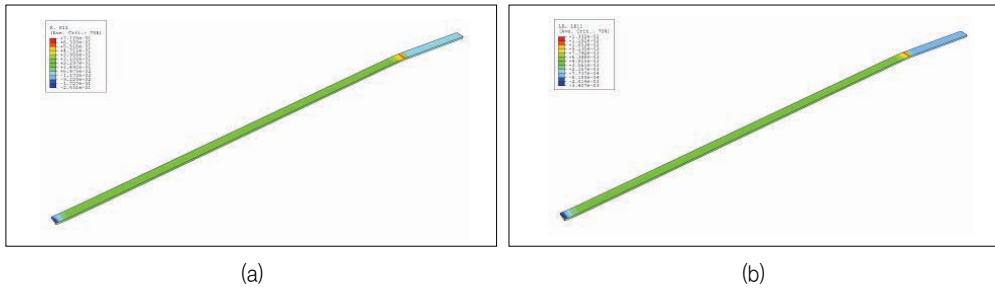


그림 6. 길이/두께 = 200인 띠 굽힘 시험편의 유한 요소 해석 결과:
 (a) 시험편의 길이 방향 수직 응력 분포, (b) 시험편의 길이 방향 수직 변형을 분포

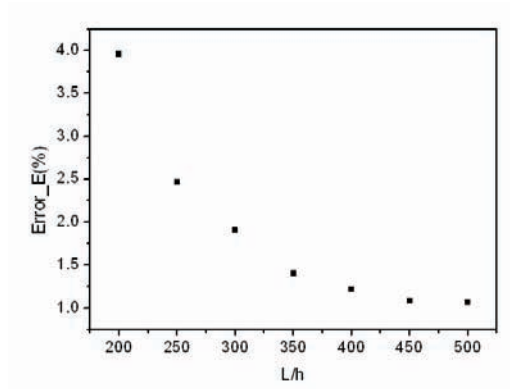


그림 7. 유한 요소 해석을 통한 시험식의 오차 평가

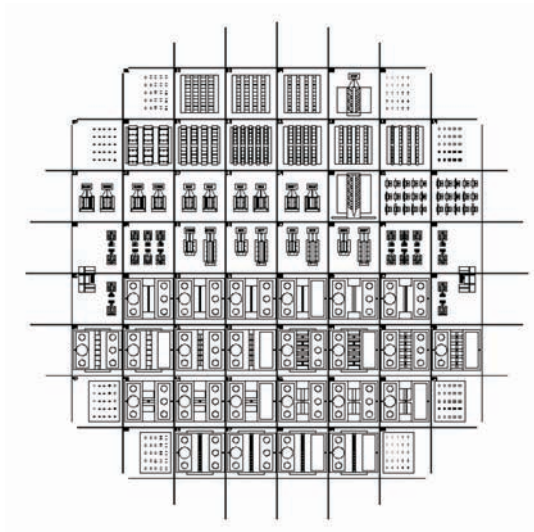


그림 8. 시편 제작용 마스크

3. 시험 방법

3.1 시편 제작

시편의 제조 공정(그림 9)을 좀더 자세히 기술하면 다음과 같다^[10].

- (1) 먼저 웨이퍼 위에 Oxide 박막을 증착한다(실제로는 Oxide 박막, Nitride 박막, 그리고 다시 Oxide 박막을 차례로 증착).
- (2) 그 다음 시편으로 사용될 박막을 증착한다(본 연구에서는 Au, Mo, SiN 가 사용됨). 시편으로 사용될 박막이 모재와 접착력이 좋지 않을 경우에는 접착력을 향상시킬 수 있는 박막을 먼저 증착하는 경우도 있다. 이 경우에는 시편으로 사용될 박막에 미치는 영향이 최소화되도록 주의할 필요가 있다.
- (3) 시편 위에 변형률 측정에 필요한 marker를 증착한 후에 패터닝한다. Marker는 금속 소재로서 레이저 빔을 잘 반사시킬 수 있는 재료이면, 어떤 재료도 상관없다. Marker는 주로 미소 인장 시편에 이용되며, 패터닝이 용이하지 않은 경우에는 FIB (Focused Ion Beam) 증착을 통해서 Marker를 만들 수 있다. 띠 굽힘 시험에는 이 Marker가 직접 사용되지는 않는다.
- (4) 시편으로 사용될 박막을 패터닝하여, 띠 굽힘 시편의 형태로 가공한다. 박막에 PR(Photo Resist)를 입히고, 리소그래피와 식각을 수행하는 전형적인 MEMS 공정이 이용된다.
- (5) 패터닝된 시편을 보호하기 위하여 Oxide 박막을 증착한다.
- (6) 자유지지(freestanding) 박막을 형성하기 위하여, Si-DRIE 공정을 통해 실리콘 모재를 뒤면에서 식각한다.
- (7) 마지막으로 Oxide 박막을 제거함으로써 시편이 완성된다.(그림 10 참조)

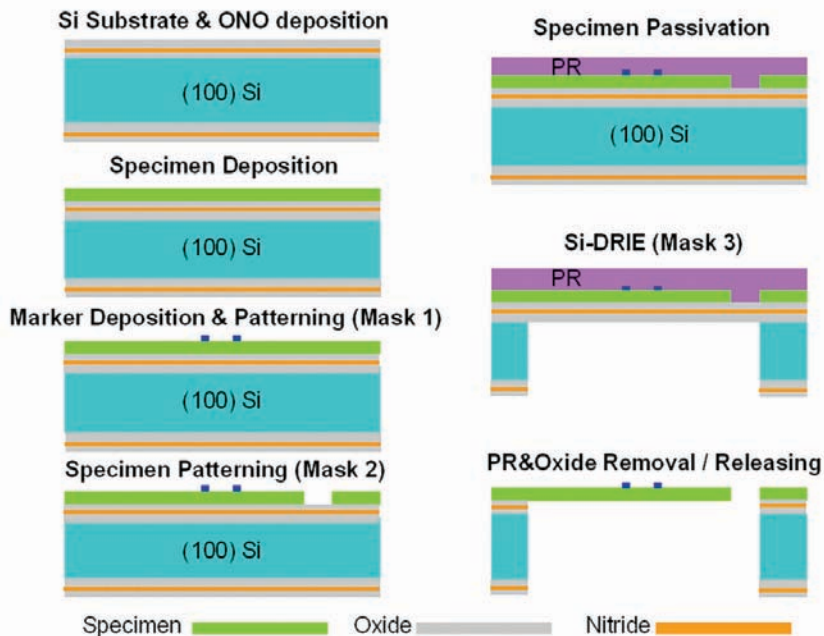


그림 9. MEMS 공정을 이용한 자유지지형 미소 시편 제조 과정

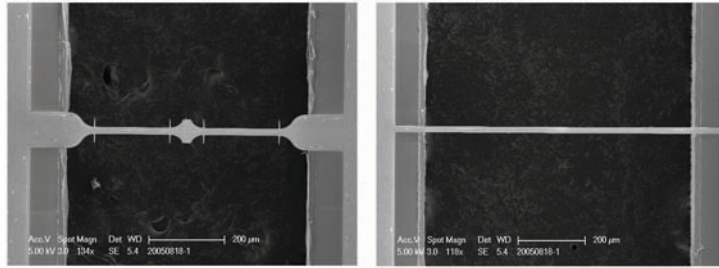


그림 10. 제작된 띠 굽힘 시험편의 주사전자현미경 사진 (재질: Mo)

3.2 시험 절차

자유지지 박막의 물성 측정을 위한 띠 굽힘 시험은 매우 정밀한 하중 및 변위 측정 장비가 필요하다. 변위는 최대 100 마이크로미터까지 변화할 수 있으므로, 이러한 범위에 적용할 수 있는 용량형 또는 LVDT 형 센서가 필요하다. 하중 센서는 수십 nN 정도의 하중 분해능을 가지는 하중 센서가 요구된다. 이러한 변위 및 하중 센서뿐만 아니라 정밀한 운동이 보장되는 구동기 (actuator) 역시 필요하다. 이러한 시험기를 직접 구성하는 것은 쉽지 않은 일이므로, 본 연구에서는 MTS사의 상용 나노인덴터인 XP를 이용하였다(그림 11 참조). MTS사에서 제시하는 나노인덴터 XP의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 띠 굽힘 시험에 사용된 나노압입시험기의 사양

변위 분해능	0.01 nm이하
최대 변위	0.5 mm
최대 하중	500 mN
하중 분해능	50 nN

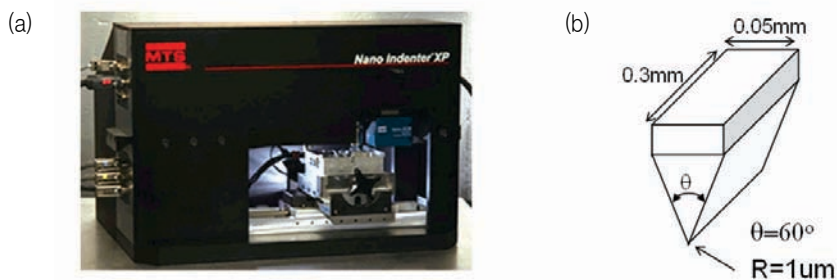


그림 11. (a) 시험기 사진과 (b)띠굽힘 시험용 쐐기형 압입자

나노압입시험기를 이용한 띠 굽힘 시험의 절차는 다음과 같다.

- (1) 먼저 시편을 나노인덴터의 시편 홀더 (sample holder)에 부착한다. 보통의 나노인덴터 실험에서는 고온에서 경화되는 폴리머 접착제를 이용하지만, 본 연구에서는 온도 영향을 줄이기 위하여 상온에서 경화되는 순간 접착제를 이용하여 띠 굽힘 시험편이 형성된 실리콘 모재를 시편 홀더에 부착한다.

- (2) 띠 굽힘 시험편에 선접촉하중을 가하기 위하여 쐐기 형 인덴터 팁 (wedge type indenter tip)을 나노인덴터의 헤드(head)에 장착한다.
- (3) 나노인덴터는 시편의 표면 위치를 미리 인식할 수 없으므로, 시편 변형의 기준 위치를 선정하는 절차가 필요하다. 본 연구에서는 그림 12와 같이 3점 연속 측정법을 이용하였다.
- (4) 쐐기 형 인덴터를 일정 속도(보통 수십 nm/sec)로 시편 쪽으로 이송하며, 시편이 완전 파단에 이르기까지 하중을 가한다.
- (5) 나노인덴터 헤드 내의 인덴터는 판 스프링 (leaf spring)에 의하여 헤드 내에 고정되어 있다. 따라서 나노인덴터에서 검출되는 하중에서 실제 시편에 가해진 하중을 검출하기 위해서는 판 스프링의 강성을 보정하여야 한다. 판 스프링의 강성을 측정하기 위하여, 시편이 없는 상태에서 쐐기형 인덴터를 동일한 거리 동안 이송하면서 판 스프링에 의해 발생하는 하중을 측정한다.

나노압입시험기는 시편의 표면 위치를 미리 인식할 수 없으나, 띠 굽힘 시험에서 시편의 표면 위치는 매우 중요한 역할을 한다. 시편의 표면 위치를 선정하기 위해서는 여러 가지 방법이 사용될 수 있다. 전형적인 나노인덴터 실험에서는, 인덴터의 하중 및 변위 센서에서 검출된 강성을 측정하여, 미리 정의된 값 이상으로 강성이 증가하는 점을 시편의 표면으로 인식하는 방법을 자주 사용한다. 그러나 본 연구에서 다루는 띠 굽힘 시험편은 그 강성이 매우 작기 때문에 이러한 방법으로는 시편의 표면을 인식할 수가 없다. Espinosa 등^[6]은 시편에 하중을 가하는 방향과 반대 방향에서 간섭 대물 렌즈 (interferometric objective lens)로 시편의 표면을 관찰하면서 간섭 무늬가 발생하기 시작하는 순간을 시편의 표면 위치로 선정하였다. 이들의 방법은 시편이 압축 초기 응력을 받는 경우에는 시편의 표면 위치를 정확하게 설정할 수 없다는 단점이 있다.

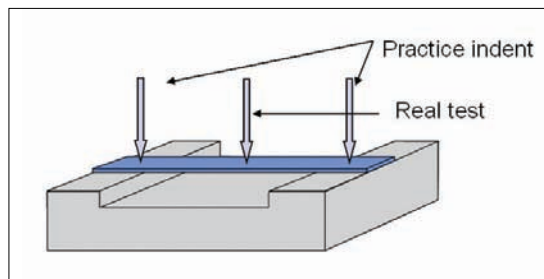


그림 12. 시편 변형의 기준 위치 선정을 위한 3점 연속 측정

본 연구에서는 그림 12와 같이 3점 연속 측정법을 통하여 시편의 표면 위치를 검출한다^[6]. 이 방법은 시편을 지지하고 있는 양단을 연결하는 직선을 기준으로 시편의 변위를 측정하는 방법으로써, 시편에 인장 초기 응력뿐만 아니라 압축 초기 응력이 작용하는 경우에도 그대로 적용할 수 있는 장점이 있다.

3.3 시험 결과 처리

띠 굽힘 시험 결과로서 얻어진 데이터들은 센서의 열적 흐름 (thermal drift), 시편 표면 위치의 모호성, 인덴터 헤드의 판 스프링 강성 등에 따라 영향을 받는다. 따라서 아래와 같은 보정 및 환산 과정을 거쳐서 역학적으로 의미있는 시편의 하중-변위 관계 및 응력-변형을 관계를 얻게 된다.

센서의 열적 흐름은 정밀 센서에 있어서 자주 동반되는 오차이다. 이 오차는 측정 시스템의 열적 요동 (thermal fluctuation)에 기인하는 것으로 알려져 있으며, 원천적으로 제거하기는 어려운 대상 중 하나이다. 본 연구에서는 시편에 하중을 가한 후에, 미리 설정된 하중(최대 하중의 10%)까지 제하한 후 인덴터를 정지시켰다. 그리고, 10초 간 변위 센서에 존재하는 열적 흐름을 측정하여, 시편에 하중을 가하는 동안 발생된 변위 신호에서 이 열적 흐름량을 선형적으로 보정하는 방법을 사용하였다. 이러한 열적 흐름 보정 방법은 전형적인 나노 압입 시험에서 자주 이용되는 방법이다.

시편 표면 위치의 모호성은 앞서 기술된 3점 연속 측정법을 이용하여 해결되었으며, 이렇게 결정된 시편 표면 위치를 이용하여 하중-변위 그래프의 변위 원점을 선정하였다. 그림 13(a)에 나타난 그래프의 변위 원점은 이러한 방법으로 선정된 것이다.

인덴터 헤드의 판 스프링 강성을 보정하기 위해서는 시편이 있을 때와 없을 때의 하중과 변위 신호를 각각 측정하여야 한다. 그 다음 시편이 있을 때의 신호에서 시편이 없을 때의 신호(즉, 판 스프링의 강성 신호)를 빼냄으로써, 순전히 시편에만 작용된 하중 신호를 알아낸다. 그림 13(a)에 나타난 바와 같이 시편이 있을 때와 시편이 없을 때에, 검출되는 하중 신호는 차이가 있다. 시편이 없을 때에 변위 증가에 따라 검출되는 하중 신호는 인덴터를 지지하고 있는 판 스프링의 강성에 의한 것이다. 시편이 있을 때의 하중 신호에서 시편이 없을 때의 하중 신호를 빼냄으로써, 그림 14가 얻어진다. 여기서 한 가지 문제점은 변위의 원점에서 하중이 0이 되지 않는 경우와 띠 굽힘

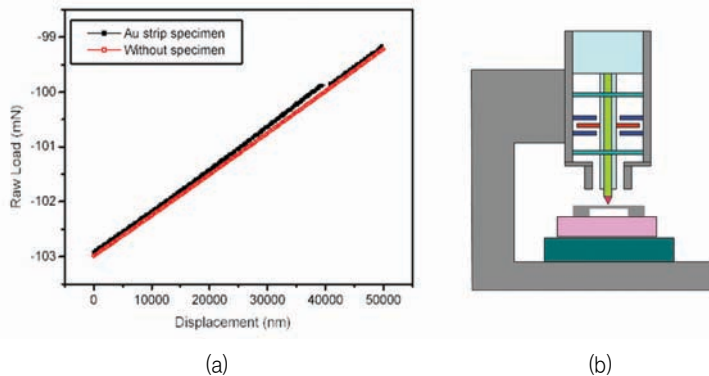


그림 13. (a) 띠 굽힘 시편이 있을 때와 없을 때의 하중-변위 그래프, (b) 나노압입시험기의 내부 구조

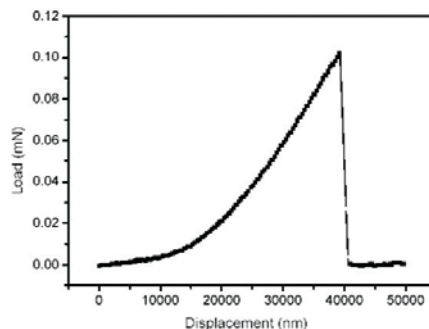


그림 14. 나노압입시험기의 판 스프링 강성을 보정하여 얻은 하중-변위 그래프

시험편이 완전히 파단된 후에도 하중이 0이 되지 않는 경우가 종종 있다는 점이다. 이는 시험편이 있을 때와 없을 때의 시험 시에, 상당한 시간 차이가 있고, 이 시간 차이 동안에 열적 흐름에 의한 노이즈가 누적되었기 때문인 것으로 생각된다. 본 연구에서는 열적 흐름에 대한 선형 보상법 (linear compensation)을 적용하여, 변위의 원점에서 하중이 0이고, 파단 후에도 하중이 0이 되도록 하는 열적 흐름량을 계산하고 이를 원래 하중-변위 그래프에서 보상하는 방법을 사용하였다. 이 후의 실험 결과에서 확인할 수 있듯이, 이러한 데이터 처리 방법을 통하여 상당히 높은 반복성을 가지는 실험 데이터를 얻을 수 있다.

3.4 시험 결과

세 종류의 시험편(SiN, Mo, Au)에 대하여 락 굽힘 시험을 수행하여 얻은 결과를 그래프로 나타내면 그림 15와 같다. 이들 세 종류의 박막은 모두 Sputtering 공정으로 증착되었으며, 공칭 두께(nominal thickness)는 1000nm 었다. 그래프를 관찰하면, Mo와 SiN 시험편은 상당히 취성이 강한 것을 알 수 있으며, Au 시험편은 연성이 큰 것을 알 수 있다. 같은 소재에 대하여 여러 시험편을 사용하여 얻은 하중-변위 및 응력-변형률 곡선 간에 큰 차이가 얻는 것으로 보아 시험 방법의 반복성이 매우 높은 것을 알 수 있다. 박막 두께의 영향을 평가하기 위하여, 두께가 다른 세 종류의 Au 시험편을 락 굽힘 시험으로 측정된 결과가 그림 16에 나타나있다. 이 경우에 Au는 E-beam evaporation 공정으로 증착되었다.

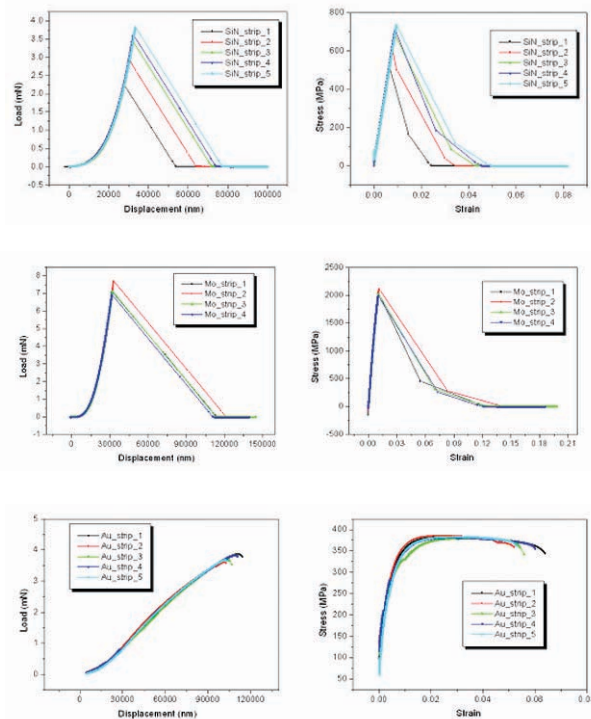


그림 15. 락 굽힘 시험으로 측정된 SiN, Mo, Au 시험편의 기계적 거동

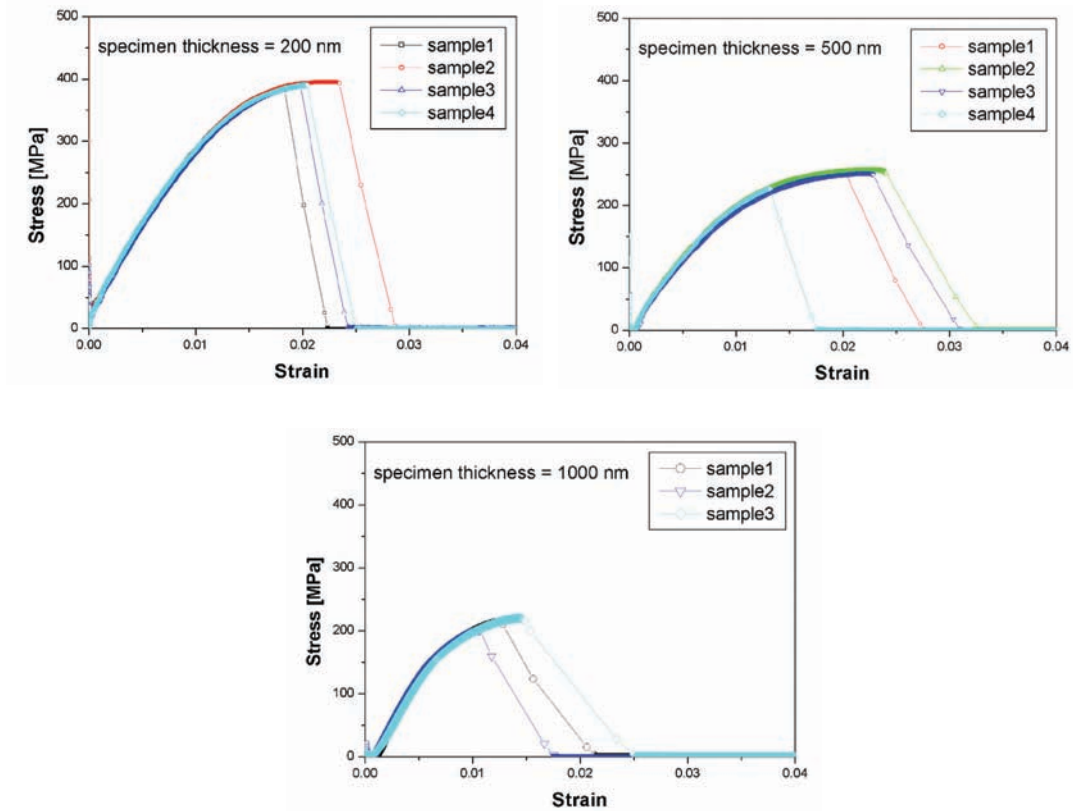


그림 16. 띠 굽힘 시험으로 측정된 E-beam evaporation된 Au의 응력-변형률 관계

4. 토 의

앞서 제시한 응력-변형률 곡선으로부터 탄성계수(E), 초기응력(σ_0), 항복강도(σ_{ys}), 인장 강도(σ_{ts}) 등을 추출할 수 있으며, 이를 표 2에 정리하였다. SiN와 Mo는 Sputtering에 의해 증착되었으며, 그 공칭 두께 (nominal thickness)는 1000 nm이다. 공칭 두께는 실제 시편의 두께와는 약간 차이가 있을 수 있으며, 실제 데이터 처리를 위해서는 단면적을 AFM(Atomic Force Microscope)로 측정하였다. Au 시편은 Sputtering으로 증착된 것과 E-beam evaporation 된 것을 각각 시험하였으며, 공칭 두께는 표에 나타나 있다. 각각의 데이터를 살펴보면, 우선 잔류응력과 연관되는 초기 응력이 압축과 인장일 때 모두 측정이 가능한 것을 알 수 있다. E-beam evaporation된 Au 시편의 경우에는 공칭 두께가 변화함에 따라 시편에 작용하는 초기 응력이 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 시편을 현미경으로 관찰한 결과와 일치하는데, 200nm두께의 Au(E-beam) 시편의 경우는 시편이 시험 전에 매우 팽팽하였다. 그러나 500nm 및 1000nm두께의 시편은 시험 전에 약간 처진 형상을 보였다. 약간 처진 형상은 시편에 압축 잔류 응력이 발생했음을 의미한다. 같은 E-beam evaporation 공정으로 제작한 Au 시편의 경우, 공칭 두께의 변화에 따라 탄성계수는 거의 변화하지 않는 반면에 항복 및 인장 강도는 두께가 얇아짐에 따라 증가하는 거동을 보였다. Au 시편의 경우에 제작 공정이 sputtering일 때와 E-beam evaporation일 때의 기계적인 거동은 매

표 2. 띠 굽힘 시험으로 측정된 기계적 물성의 예

Material	thickness (nm)	E (GPa)	σ_0 (MPa)	σ_{ys} (MPa)	σ_{ts} (MPa)
SiN(Sputter)	1000	72.3	28.6	—	654
Mo(Sputter)	1000	231	-47.5	—	2044
Au(Sputter)	1000	64.7	91.5	—	383
Au(E-beam)	200	32.4	17.7	301	389
Au(E-beam)	500	33.0	-15.9	153	246
Au(E-beam)	1000	30.8	-29.3	—	212

우 다른 것을 알 수 있다. 이로부터 같은 재료이더라도, 공정 및 공칭 두께에 따라 기계적인 물성을 다를 수 있음을 고려하여 소자를 설계해야 함을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

띠 굽힘 시험은 아직 널리 활용되고 있는 방법은 아니지만, 나노 압입 시험기를 활용함으로써 기존의 미소인장 시험보다 훨씬 손쉽게 자유지지 박막의 기계적 물성을 측정할 수 있는 방법이다. 측정할 수 있는 기계적 물성은 탄성계수, 초기응력, 항복강도, 인장 강도이며, 측정된 물성을 이용하여 MEMS/NEMS 구조물의 유한 요소 해석도 가능하다. 보다 정확한 물성 측정을 위해서 띠 굽힘 시험에 대한 해석 모델과 유한 요소 해석을 통한 검증, 시편의 설계 가이드 등을 제시하였으며, 실제 MEMS 공정에서 사용되는 몇 가지 소재에 대하여 시험 결과를 제시하였다. MEMS 공정에서 사용되는 구조물은 제작 공정(즉, 증착 방법) 및 구조물의 크기에 따라 기계적 특성이 변화할 수 있으므로, 이러한 특성을 고려한 MEMS 제품의 설계 및 해석이 필수적이다. 특히 산업 현장에서는 손쉽게 기계적 물성을 측정할 수 있는 방법이 요구되는데, 띠 굽힘 시험은 복잡한 정렬과정이 필요하지 않아서 쉽게 자동화될 수 있고, 한번에 여러 시편을 시험할 수 있는 장점이 있으므로, 매우 유용하게 활용될 수 있다.

❁ 참고 문헌

- [1] NSTC, 2000, National nanotechnology initiative.
- [2] Westmoreland, P.R., Kollman, P.A., Chaka, A.M., Cummings, P.T., Morokuma, K., Neurock, M., Stechel, E.B. and Vashishta, P., 2002, "Application of molecular and materials modeling," WTEC Panel report.
- [3] Huang, X.M., Manolidis, M., Jun, S.C., Hone, J., 2005, Nanomechanical hydrogen sensing, Applide Physics Letters 86, pp. 143104.
- [4] Sharpe, W.N., Turner, K.T., Edwards, R.L., 1999, Tensile testing of polysilicon, Experimental Mechanics 39, pp. 161-169.
- [5] Espinosa, H.D., Prorok, B.C. and Fischer, M., 2003, A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS materials, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 51, pp. 47-67.

- [6] Kim, J.-H., Lee, H.-J., Han, S.-W., Baek, C.-W., Kim, J.-M., Kim, Y.-K., 2004, Mechanical characterization of 100 nm-thick Au thin film using strip bending test, Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting.
- [7] Timoshenko, S.P., Woinowsky-Krieger, S., 1959, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, New York.
- [8] Kim, J.-H., Lee, H.-J., Han, S.-W., Kim, J.-M., C.-W. Baek, 2005, Residual stress evaluation of thin film using strip bending test, ANDE2005, Jeju island, Korea.
- [9] Kim, J.-S., Lee, H.-J., Kim, J.-H., Choi, B.-I., Choa, S.-H., Lee, C.-S., 2005, Finite Element Analysis of the Design for the Strip Bending specimen, Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting, 2005.
- [10] Kim, J.-H., Lee, H.-J., Kim, J.-S., Han, S.-W., Kim, J.-Y., Oh, C.-S., Choa, S.-H., Lee, C.-S., 2005, Mechanical behavior characterization of free-standing microstructures for RF-MEMS applications, 6th Korean MEMS conference, Jeju, Korea.



김 재 현

· 한국기계연구원 나노공정정비연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 설계, 측정 및 평가
· E-mail : jaehkim@kimm.re.kr



이 학 주

· 한국기계연구원 나노공정정비연구센터 책임연구원
· 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 설계, 측정 및 평가
· E-mail : hjlee@kimm.re.kr



최 병 익

· 한국기계연구원 나노공정정비연구센터 책임연구원
· 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 설계, 측정 및 평가
· E-mail : choibi@kimm.re.kr