

ISDG를 이용한 박막의 인장/ 피로시험 장치 개발 및 물성 평가

한승우, 이상주, 김재현, 이학주 | 한국기계연구원

오충석 | 금오공과대학교

1. 서 론

나노 구조물을 이용하여 새로운 제품을 제조하기 위해서는 나노 구조물의 여러 가지 물성들이 파악되어야 한다. 이러한 물성들은 반복성(repeatability)을 가지고 측정되어야 하며, 측정결과는 제품의 설계 및 성능 예측에 활용될 수 있어야 한다. 나노 구조물의 물성은 기존의 거대 구조물 물성 측정 방법으로는 측정할 수 없는 경우가 대부분이다. 일례로 탄소 나노 튜브를 인장 시험하여 그 기계적 물성을 측정하는 경우, 기존의 거대 구조물용 인장 시험기는 무용지물이다. 2000년 Science지에는 다중벽 탄소 나노 튜브의 인장시험 결과가 발표된 바가 있는데, 나노 구조물의 물성 측정은 그 물성의 활용성 뿐만 아니라 그 측정 방법만으로도 기술적인 가치를 인정받고 있다.^[1]

나노 기술을 이용한 제품 개발 및 나노 구조물 제조 공정 개발 시에는 나노 구조물의 물성에 대한 정확한 이해가 필요하다. 같은 재료라도 거대 구조물일 때의 물성과 나노 구조물일 때의 물성은 차이가 있으므로, 실제 공정 및 제품에 사용되는 구조물의 크기와 같은 크기를 가지는 시편을 제조하여 그 물성을 측정할 필요가 있다. 본 과제에서 다루고 있는 나노 구조물의 기계적인 물성은, 나노 공정 및 나노 기술을 적용한 제품의 신뢰성 문제와 깊은 연관이 있으며, 부품(component)이 기계적인 운동을 포함할 때에는 더욱 중요한 역할을 하게 된다. 현재 나노 구조물의 기계적인 물성을 측정하는 기술은 개발 초기 단계에 있으며, 다양한 아이디어를 적용한 측정 기술들이 발표되고 있다.

2. 나노 인장/피로 시험 기술

2.1 개요

인장 시험은 새로운 소재나 새로운 시험 방법이 개발되었을 때에 소재의 기계적 물성 및 시험 방법의 타당성을 검증하기 위하여 시행되는 가장 기본적인 시험 방법이다. 시편의 시험 영역(test section)에 균일한 응력과 변형을 가할 수 있는 장점이 있어서 재료의 구성방정식(constitutive equation)을 결정하는 데에 필요한 응력-변형률 곡선을 직접적으로 얻을 수 있다. 나노 인장시험에 관하여는 Johns Hopkins 대학의 Sharpe 교수 그룹을 중심으로 활발하게 연구되어 왔다.^[2] Sharpe 그룹은 ISDG(Interferometric Strain/Displacement Gage)를 이용한 마

이코 소재의 변형률 측정에 강점을 가지고 있고, 마이크로 인장 시험을 이용하여 다양한 재료들의 인장 물성을 측정하여 발표하였다.^[3] 또한 Haque와 Saif는 MEMS 하중계(load cell)를 이용하여 30 nm 두께의 알루미늄 시편에 대한 인장실험을 통하여 주목할만한 결과를 주고 있다.^[4-5]

마이크로 소재의 주요 사용처인 MEMS 연구 주제로는 공정, 재료물성, 설계의 세 가지를 들 수 있다. 공정이나 설계도 물론 중요하지만 구조물 제작 시 작동 하중과 하중 형태 등을 고려하지 않고 설계하면 구조물 사용 중 쉽게 파손된다. 따라서 설계자들은 각 상황에 맞게 측정된 재료물성을 바탕으로 설계함으로써 제품의 안정성을 높여야 한다. 이러한 필요성들로 인해 지금도 많은 연구자에 의해 미소 재료의 물성 측정에 대한 연구들이 수행되고 있다. 미소 재료 물성 측정의 주요 인자로는 탄성계수, 재료강도, 접착강도, 잔류응력, 피로, 마찰 등이 있다. 그 중 피로는 재료의 반복 하중에 의해 조기 파단 되거나 손상을 입는 일련의 과정으로 피로 시 발생하는 복잡한 금속학적인 과정을 정확히 모델링하기 어렵지만 구조물의 파손은 피로 손상에 의해 많이 발생하므로 반드시 측정해야 할 물성이라 할 수 있다.

나노 인장/피로 시험에서는 변위 측정 기술, 하중 측정 기술, 시편 정렬 (alignment) 기술, 시편 고정 (gripping) 기술 등 몇 가지 기본적인 기술이 요구된다. 하중 측정으로는 미소한 용량을 가지는 로드 셀을 이용한 방법이 널리 사용되고 있으며, 나노 인장 시험에서는 AFM cantilever의 변형을 측정하여 시편에 가해진 하중을 결정하는 방법을 사용하기도 한다. 변위 또는 변형률 측정 기술은 나노 인장 시험 기술 중 가장 어려운 부분 중 하나이다. 시편의 크기가 작기 때문에 거대 재료(bulk material)에서 많이 사용되는 스트레인 게이지 방법을 적용할 수가 없고 비접촉식 변위/변형률 측정 방법을 적용해야 한다. 현재 나노 인장/피로 시험에서 많이 사용되는 방법은 ISDG (Interferometric Strain/Displacement Gage)이며,^[6] 이외에도 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), DIC (Digital Image Correlation), E-beam Moire, 마이크로 버니어 등의 방법이 이용되고 있다. 인장 시편은, 그 길이 방향으로 하중 및 변위가 발생하도록 인장 시험기에 정렬되어야 한다. 마이크로 또는 나노 인장 시편은 그 크기가 너무 작아서 시험기 상에서 조작하기가 어렵다. 보통 마이크로 조작기 (micro-manipulator)와 현미경을 이용하여 시편이 시험기 내에서 올바른 위치를 가지도록 한다. 또 한 가지 난제는, 시편을 인장 시험기 상의 적절한 위치에 정렬시키면서 그림에 부착하는 것인데, 현재 UV 경화성 접착제를 이용하여 부착하는 방법이 많이 사용된다.

2.2 시편 제작

본 그룹에서는 Sharpe^[7]등이 사용한 폴리 실리콘 인장 시편과 유사하게 그림 1과 같은 시편을 제작하였다.

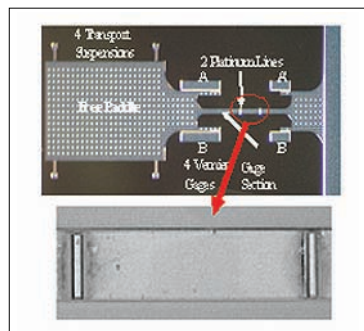


그림 1. MEMS 공정으로 제작된 폴리 실리콘 인장 시편

이 시편의 평행부 길이는 1 mm, 두께는 3.5 μm , 폭은 50 μm 이다. 시편의 오른쪽 끝은 실리콘 모체에 고정되어 있으며, 왼쪽 끝에는 4개의 suspension에 의해 지지되는 free paddle이 있다. 이 free paddle은 나중에 시험기에 접착제로 고정될 부분이며, 한 변이 5 μm 인 etch hole이 있어서 에칭 공정에 의해 실리콘 모체로부터 완전히 분리된 상태이다. ISDG를 이용하여 변위 및 변형률을 측정하기 위하여 gage section에 2개의 platinum 선을 FIB (Focused Ion Beam)로 형성하였다. 또한 gage section 주변에 4개의 Vernier를 형성하여 별도의 변형 측정이 가능하도록 하였다. 이 폴리 실리콘 마이크로 인장 시편은 미국의 MEMScAP을 통하여 제작되었다.^[8]

또한 미소 인장 시험기가 구축된 경우에도 실험을 위해서 미소 인장 시편을 제조하고, 그 시편을 시험기에 정렬/장착하는 것은 매우 어려운 작업이다. 더욱이 시편의 임계치수가 1 μm 이하로 줄어드는 경우에는, 시편을 제조하는 데에 드는 노력은 크게 증가하지 않지만, 시편을 시험기에 정렬/장착하는 일에 많은 노력이 요구된다. 따라서 쉽게 생각할 수 있는 대안은 MEMS 공정을 이용하여 시편을 제작할 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^[4-5, 9-10] 이러한 시편을 제조하여 좋은 결과를 발표하였고, 본 그룹에서도 그림 2와 같은 구동기와 시편을 제조하여 연구를 진행하고 있다. 그림 3은 구동기의 내구성 시험을 수행하여 구한 부가 전압-피로 수명 관계를 보여준다.

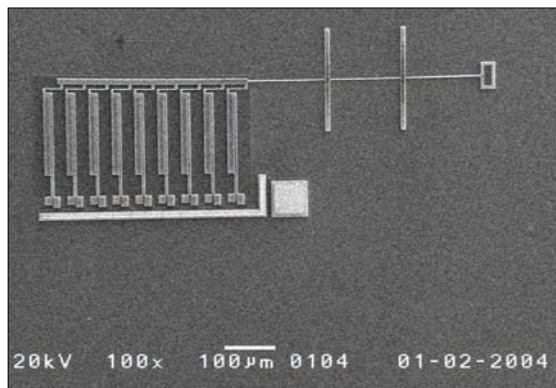


그림 2. MEMS 공정으로 제작된 열 구동기(thermal actuator) 와 시편

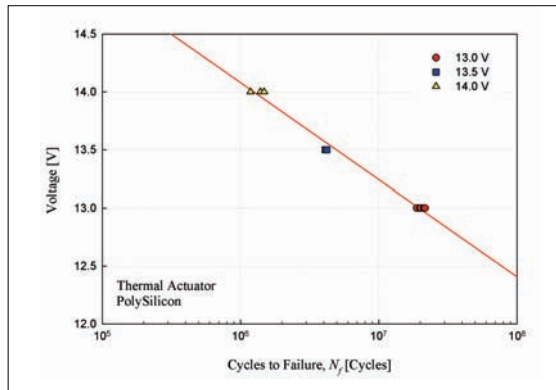


그림 3. 열 구동기의 부가 전압-피로 수명 관계

2.3 ISDG (Interferometric Strain/Displacement Gage)

ISDG는 2중 슬릿 간섭 현상에 기초를 두고 있다. 그림 4와 같이 2개의 라인에서 각각 회절된 레이저 빔이 이루는 간섭무늬는 다음과 같은 관계식을 통하여 라인간의 거리 변화(δd)로 환산된다.

$$\delta d = \frac{\delta m_1 + \delta m_2}{2} \frac{\lambda}{\sin\theta_0} \quad (1)$$

여기서 δm_1 과 δm_2 는 photodiode array 1과 2에서의 간섭무늬 차수 변화이고, λ 은 광원으로 사용된 레이저의 파장, θ_0 는 시편의 수직방향과 시편에서 photodiode array로 향하는 방향 사이의 각도이다. 만일 2개의 라인 사이의 간격(d)를 알고 있다면, 변형률은 $\delta d/d$ 로 표현할 수 있다. 그림 5와 같이 본 연구에서 사용된 2개의 라인은 FIB를 이용하여 platinum을 증착함으로써 얻어졌다. 라인 하나의 폭과 두께는 각각 $10 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$ 이며, 두 라인 사이의 간격은 230에서 $250 \mu\text{m}$ 이다. 두 개의 라인으로부터 형성된 간섭무늬를 photodiode array에서 검출함으로써 인장 시험 중에 발생하는 변형률을 실시간으로 측정 할 수 있다.

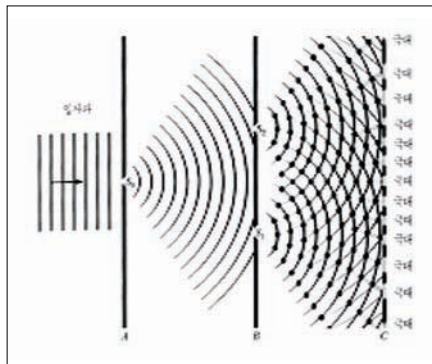


그림 4. 이중 슬릿의 간섭 현상

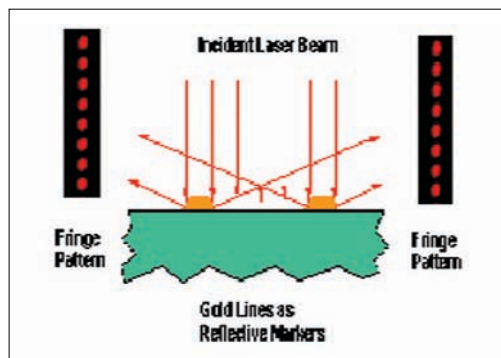


그림 5. ISDG의 측정 원리

본 연구에서는 일반적으로 사용되는 He-Ne 레이저에 비해 파장이 짧아서 정밀도의 향상을 기대할 수 있는 Green 레이저를 이용하였으며, 간섭무늬 검출에는 Photo Sensitive Device를 채택하여 응답시간을 줄였으며, 신

호처리 부분을 디지털화하여서 측정정밀도를 약 5 nm 정도까지 향상시킬 수 있었다.

2.4 나노 인장/피로 시험기

나노 인장 시험기는 그림 6에 나타나 있다.^[11] 구동기(actuator)로는 180 μm 의 stroke를 가지는 압전형 구동기를 사용하였고, 시편 고정을 위하여 0.25 mm 지름의 바늘이 삽입된 소형 collet 그림을 이용하였다. 시편 정렬을 위하여 xy 축과 z축 정밀 이송 스테이지와 회전형 스테이지를 장착하였다. 시편이 포함된 실리콘 웨이퍼 조각을 그림과 같이 시편 홀더(holder)에 접착한다. 현미경으로 관찰하면서, 시편을 미세하게 이동 또는 회전하여 시편의 게이지 영역(gage section)을 바늘의 길이방향에 정렬하였고, UV 경화 접착제를 이용하여 정렬된 시편을 바늘에 고정하였다. 인장 시험 중에 발생하는 하중은 10 N 용량의 로드 셀을 이용하여 측정하고, 변위 및 변형률은 ISDG와 시편 내에 형성된 Vernier를 이용하여 측정하였다. 사용된 레이저 빔은 532 nm의 파장을 가지는 Green 레이저이며, 포토다이오드 배열(photo diode array)은 1024개의 셀(cell)을 가지는 것을 사용하였다.

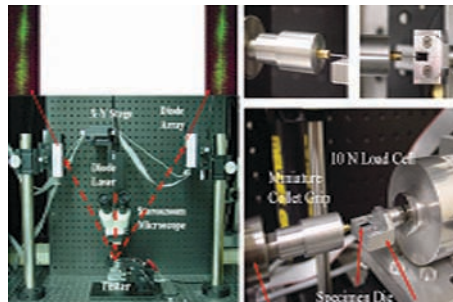


그림 6. ISDG 이용 나노 인장 시험기

나노 피로 시험기는 그림 7에 나타나 있다. 시험기의 구성은 나노 인장 시험기와 유사하며, 구동기로 VCA(Voice Coil Actuator)를 사용하였다. 기존의 거대 재료의 피로 시험에서는 가진 시 큰 힘이 필요하고 10^7 이하의 사이클 수준의 수명에서 사용하므로 주로 유압을 이용한 가진기를 이용하였다. 그러나, 다결정 실리콘 박막의 경우 10^9 이상의 사이클을 반복 하여야 하므로 저주파수 가진으로는 많은 시간이 소요된다.

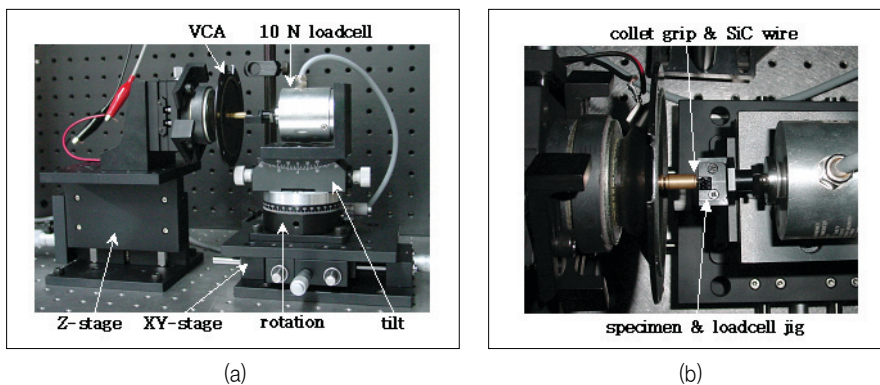


그림 7. VCA를 이용한 피로 시험기

VCA는 일반적으로 다른 가진기에 비해 힘이 약하지만 고 주파수로 가진할 수 있다. 따라서 작은 하중을 필요로 하며 많은 사이클을 가진해야 하는 나노 소재의 피로 시험에 적당한 가진기 이다. 또한 VCA는 특정 주파수에서 큰 진폭을 만드는 공진 특성을 나타내는데 이 부분을 적절히 이용하면 더 큰 힘으로 가진 할 수도 있다.

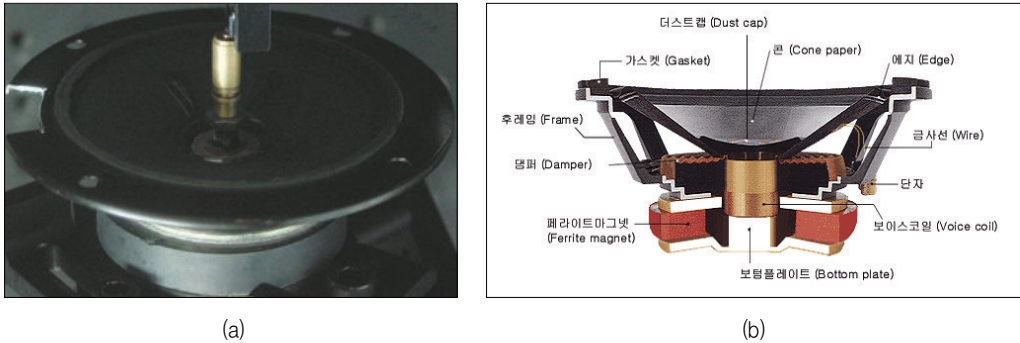


그림 8. Voice Coil Actuator (a) 사진 (b) 내부구조

그림 8(b)는 스피커의 내부 구조를 보여주고 있다. 기본적으로 내부 원통형 자석 외부에 원통형 코일이 감싸져 설치되어 있으므로 전기를 가했을 때 직진운동을 하게 제작되어 있다. 이 상태에서 외부의 댐퍼와 콘 페이퍼가 추가되어 가진 시 가이드 역할을 함으로써 가진의 직진성을 더욱 높여주게 된다. 이런 구조로 볼 때 스피커는 그 자체로 훌륭한 선형 가진기로 이용될 수 있으며, 또한 비교적 저가로 여러 대의 피로 시험 장비를 구성할 수 있으므로 동일 시간 내에 많은 결과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 나노 인장/피로 시험 결과

3.1 인장 시험 결과

앞서 기술된 폴리 실리콘 시편과 나노 인장 시험기를 이용하여 폴리 실리콘의 응력-변형률 관계를 그림 9(a)와 같이 측정할 수 있었다. 그림에서 나타난 두 곡선은 비슷한 기울기를 가지며 일정 거리만큼 떨어져 있다.

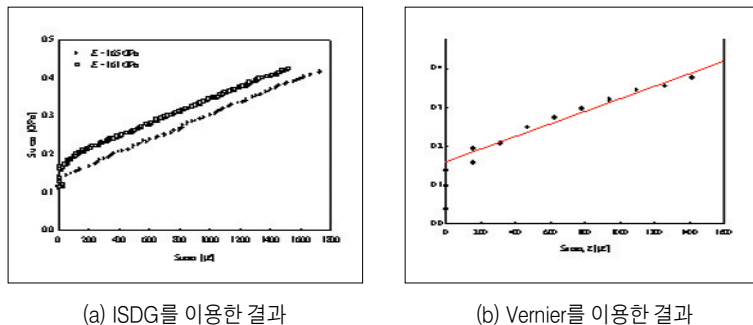


그림 9. 폴리 실리콘의 인장시험 결과

곡선의 기울기는 재료의 탄성계수에 해당하고, 변형률이 작을 때에 나타나는 비선형적 거동은 시편의 정렬이 완전하지 못하여 발생하는 것으로 판단된다. 그림 9(b)는 Vernier를 이용하여 변위를 측정하고, 하중-변위 곡선을 그릴 것이다. 이 그래프에서 탄성계수를 구하면 162 GPa이 얻어진다.

3.2 피로 시험 결과

저강도 카본, 철합금, 폴리머 같은 경우 내구한도가 나타나지만, 알루미늄, 마그네슘, 구리 같은 경우는 10^7 사이클을 지나서도 피로강도가 지속적으로 낮아지는 경향이 나타난다. 본 연구에서 측정한 폴리실리콘 또한 지속적으로 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그 결과를 그림 10에 나타내었다.

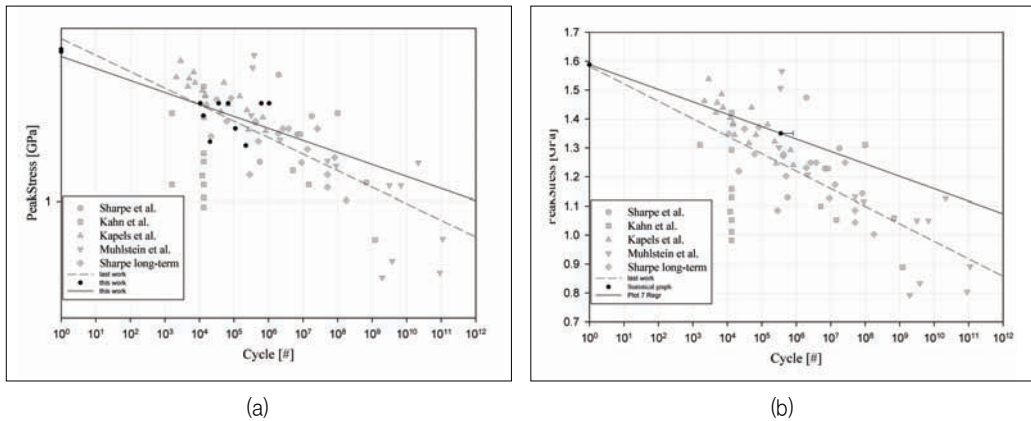


그림 10. 폴리 실리콘의 S-N curve : (a) simple regression (b) statistical regression

4. 개발효과 및 향후 전망

본 연구에서는 나노스케일 박막의 인장 시험 시 비접촉식으로 변형률 (Strain) 을 측정할 수 있는 비접촉식 변위/ 변형률 측정 장치 (ISDG: Interferometric Strain /Displacement Gage) 를 개발하였다. ISDG는 박막의 기계적 물성 측정에 매우 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있었으며, 분해능은 5 ~ 20 nm 이다. ISDG는 박막의 물성 측정 뿐 아니라 고온 환경 등 다양한 분야에 활용이 가능하다.

향후의 연구에서 ISDG는 나노 인장/피로시험기와 결합되어 고온 등의 환경에서 다양한 종류의 박막시험 및 평가기술 개발에 활용될 수 있도록 응용 분야를 확대할 예정이며, 이를 통하여 마이크로/나노 구조물의 신뢰성 증가에 기여할 것으로 기대된다.

물성 측정 기술 개발은 그 자체로서 기술적 학술적 가치를 가질 뿐만 아니라 측정 장비 상용화를 통하여 부가가치 창출에 기여할 수 있을 것이다. 또한 나노 임프린트 공정 개발에 적용되어 나노 구조물의 대량 생산 및 신뢰성 확보, 기계적 거동 예측 등에 기여하게 될 것이다.

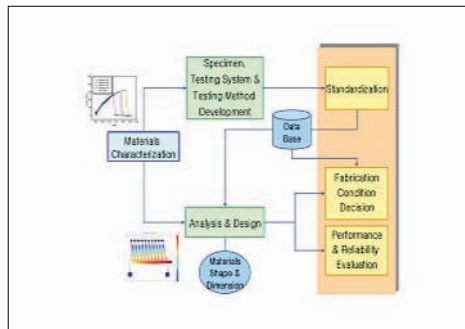


그림 11. 박막 기계적 물성 측정 기술의 역할과 추후 연구 방향

그림 11은 박막 인장시험 기술의 역할과 추후 연구 방향을 보여 준다.^[12] 시편 제작, 시험 장치 및 시험 방법을 개발하여 물성 측정 기술 표준화를 추진하고, 표준화된 방법으로 시험을 수행하여 신뢰성 있는 박막 물성 데이터베이스를 구축한다. 측정 또는 구축된 데이터는 구조물의 재료설계 및 형상 설계에 이용되며, 나아가 공정조건 결정 및 구조물의 성능 예측, 신뢰성 평가에 이용되어 미세 구조물의 신뢰성 향상, 나아가 미세 구조물의 상업화에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원(05K1401-00913)에 의해 수행되었습니다.

❖ 참고 문헌

- [1] Yu, M.F., Lourie, O., Dyer, M.J., Moloni, K., Kelly, T.F., Ruoff, R.S., "Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes under Tensile Load," *Science*, Vol. 287, pp. 637 - 640, 2000.
- [2] Gad-el-Hak, M. Eds. *The MEMS Handbook*, CRC Press, USA, 2002.
- [3] Sharpe, W.N., Turner, K.T. and Edwards, R.L., "Tensile testing of polysilicon," *Experimental Mechanics*, Vol. 39, pp. 161-169, 1999.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Sharpe, W.N., "An interferometric strain / displacement measurement system," *NASA Technical Memorandum 101638*, 1989.

- [7] Sharpe, W.N. Jr., "Measurements of Young's modulus, Poisson's ratio, and tensile strength of polysilicon", in Proc. MEMS 97 - Tenth IEEE International Workshop on Microelectromechanical Systems, Nagoya, Japan, pp. 424-429, 1997.
- [8] Koester, David, et. al. PolyMUMPs Design Handbook, rev. 9.0, July 2003.
- [9] Harque, M.A. and Saif, M.T.A., "Strain gradient effect in nanoscale thin films," Acta Materialia, Vol. 51, pp. 3053-3061, 2003.
- [10] Zhu, Y., Barthelat, F., Labossiere, P.E., Moldovan, N. and Espinosa, H.D., "Nanoscale displacement and strain measurement," Proceedings of the 2003 SEM, 2003.
- [11] Oh, C.S., Lee, H.J., Ko, S.G., Kim, S.W., Ahn, H.G., "Comparison of the Young's modulus of polysilicon film by tensile testing and nanoindentation," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 117, No. 1, pp. 151-158, 2005.
- [12] Lee, H.J., Kim, J.H., Oh, C.S., Hur, S., Han, S. W. and Choi, B. -I., "Characterization of Mechanical Behaviors of Nanopatterning Materials," 2004 Gordon Research Conference (GRC) on Thin Film & Small Scale Mechanical Behavior, July 18-23, ME, USA, 2004.



한 승 우

· 한국기계연구원 나노공정연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 해석, 물성 측정 및 평가
· E-mail : swhan@kimm.re.kr



이 상 주

· 한국기계연구원 나노공정장비연구센터 연구원
· 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 물성 측정 및 평가
· E-mail : sjl@kimm.re.kr



김 재 현

· 한국기계연구원 나노공정장비연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 나노구조물 설계, 측정 및 평가
· E-mail : jaehkim@kimm.re.kr



이 학 주

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



오 충 석

· 금오공과대학교 기계공학부 교수
· 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 물성 측정 및 평가
· E-mail : ocs@kumoh.ac.kr