

ESPI 기법을 이용한 박막의 마이크로 인장 시험 및 평가

허용학, 김동일 | 한국표준과학연구원

1. 서론

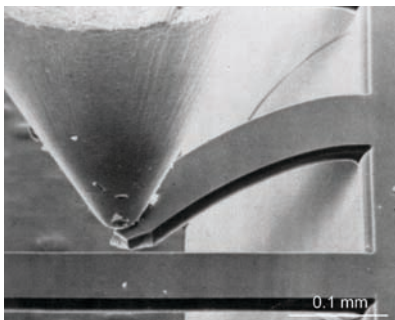
21세기의 핵심 기술로 떠오르는 나노 기술에서 N(M)EMS를 구성하는 재료의 신뢰성은 이들 시스템의 설계 및 제작과 함께 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 이러한 재료는 나노 결정 체적 소재(nanocrystalline bulk material)와 막 소재(film material)로 나노 기술에 의하여 개발되고 있다. 이들 나노 구조 재료의 물리적, 역학적 특성은 나노/마이크로 시스템의 사용 환경에 대한 신뢰성 설계 및 제작과 연결되어 있어, 나노 구조 재료의 물성 특성에 대한 정보는 매우 중요한 의미를 가지고 있다.

마이크로/나노 소재에 대한 기계적 물성 측정에 대한 연구는 비교적 많이 진행되었고, 이들 측정에서는 기존의 체적 소재(bulk material)에서 사용했던 측정 기술의 적용 한계성으로 새로운 실험적 접근이 사용되었다. 이에 따라 시험편 제작, 시험기, 시험 변형 측정, 시험 하중 측정 그리고 시험 조건 등과 같은 실험에 필요한 제반 기술들이 새로운 기법으로 적용되었다. 인장 물성을 측정하기 위하여 직접적인 인장하중의 부하로부터 이들 물성을 결정할 수 있으나, 마이크로/나노 소재에서 시험편의 제작과 측정에서 다소 어려운 점이 있어 이들을 대체하는 시험 방법이 제안되기도 하였다. 이들 시험 방법 가운데 나노 압입(nano-indentation) 시험은 시험의 용이함으로 가장 많이 사용하는 방법중의 하나로 알려져 있으나, 최근 막재료의 초 박막화에 따라 측정 한계성을 보이기도 한다. 표 1은 이러한 인장 물성을 측정하는 직접 혹은 간접적인 방법들을 나타내고, 그림 1은 이러한 시험법을 도식적으로 나타내고 있다.

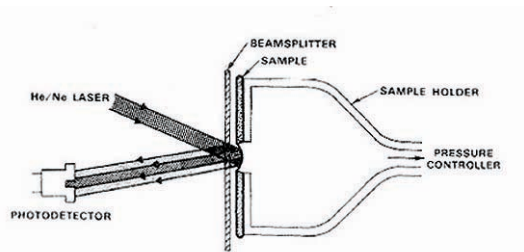
마이크로/나노 크기의 시험편으로부터 인장 물성을 얻기 위해서는 작은 하중의 부하, 하중 측정 그리고 변형 측정과 같은 시험 시스템의 구성이 요구된다. 특히 변형 측정 기술은 인장 측정 기술에서 가장 중요한 요소중의 하나로서 시험 재료의 기하학적, 기술적 제한성으로 비접촉식 기법인 원자 현미경(Atomic Force Microscope)^[1], 디지털 화상 상관법(DIC)^[2], ISDG(Interferometric Strain/ Displacement Gage)^[3], ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometric)^[4] 등과 같은 기법들이 제안되었다. 이들 방법중 ISDG 기법은 레이저의 간섭을 이용한 기법으로서 시험편위에 설치되는 측정 표시(marker)의 제작에 다소 어려움이 있으나, 상대적인 측정 우수성이 있는 것으로 알려져 있다. 이에 반하여 ESPI 기법은 상대적인 측정 해상도와 시험편 길이 등에 제한적이나, 시험편에 예비적인 준비가 필요없는 상대적인 우수성이 있다. 이에 따라 본 논문에서는 레이저 간섭에 의한 인장 성질 측정 시험 기법과 함께 ESPI 기법의 기술적 현황을 소개한다.

표 1. 나노 구조 재료의 기계적 물성을 측정하기 위한 시험 방법의 비교

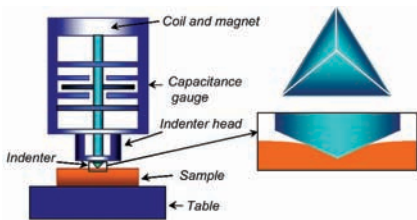
Test Method	Measurable Properties	Advantage	Disadvantage
Micro-tensile test	<ul style="list-style-type: none"> - Elastic Modulus - Yielding, tensile strength - Poisson Ratio 	<ul style="list-style-type: none"> - Direct Measurement - Easy interpretation 	<ul style="list-style-type: none"> - difficult in specimen preparation - difficult in micro(nano) deformation measurement
Bending test	<ul style="list-style-type: none"> - Elastic Modulus - Yielding, strength-Easy interpretation 	<ul style="list-style-type: none"> - simple in system - difficult in specimen preparation 	<ul style="list-style-type: none"> - sensitivity in specimen geometry
Resonant frequency	<ul style="list-style-type: none"> - Elastic modulus 	<ul style="list-style-type: none"> - no mechanical contact to the specimen 	<ul style="list-style-type: none"> - need in modeling boundary condition - effect in environment
Bulge test	<ul style="list-style-type: none"> - Elastic modulus - biaxial elastic and plastic properties 	<ul style="list-style-type: none"> - insensitivity to edge effects 	<ul style="list-style-type: none"> - difficult in specimen preparation - complicated interpretation
Nano-indentation test	<ul style="list-style-type: none"> - hardness - elastic modulus - yield strength 	<ul style="list-style-type: none"> - simple specimen preparation - in-situ measurement 	<ul style="list-style-type: none"> - complicated interpretation including substrate effect



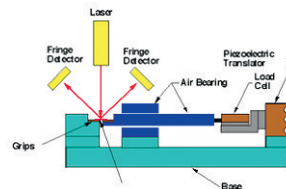
(a) 마이크로 굽힘 시험 (micro beam bending test)



(b) 마이크로 벌지 시험 (micro bulge test)



(c) 나노 압입시험 (nano-indentation)



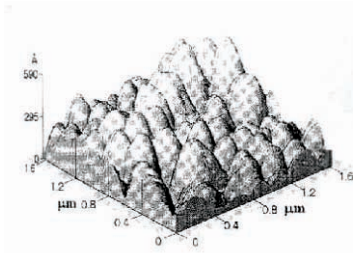
(d) 마이크로 인장 시험

그림 1. 나노 구조 재료의 기계적 성질 측정 기법

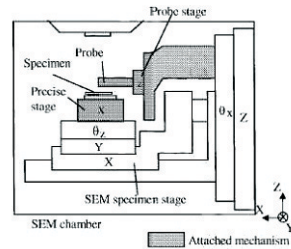
2. 마이크로/나노 크기 인장 물성 측정 기법

2.1 직접 인장 시험 (direct tensile test)

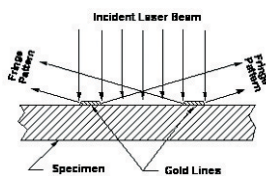
마이크로/나노 시험편에 인장 하중을 직접 부하하기 위해서 비교적 다양한 방법이 사용되었다. Chasiotis 등^[1]은 AFM을 이용하여 하중을 부하하여 이미지 해석법으로 변형을 측정하였고, 그림 2 (a)와 같다. Tsuchiya 등^[5]은 그림 2 (b)와 같이 전자현미경(SEM) 내에서 프루브(probe)로 인장 하중을 부하하여 광학 엔코더로 변형을 측정하였다. Sharpe^[3]는 그림 1 (d)와 같이 압전 구동체(piezoelectirc actuator)로 구동되는 인장 시험기로 인장 하중을 가하고, 그림 2 (c)와 같이 인장 변형을 시험편에 표점거리가 되는 작은 표시(markers)에 의하여 레이저의 간섭이 일어나게 하는 ISDG(Interferometric Strain/ Displacement Gage)에 의하여 측정하였다. Huh등^[4]도 선형 모터 구동체로 제작한 인장 시험기로 인장 하중을 부하하고 레이저 간섭에 의한 시험편의 표면 스펙클 정보를 상대 변형으로 측정하는 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)로 그림 2 (d)와 같이 인장 시험편의 변형을 측정하였다.



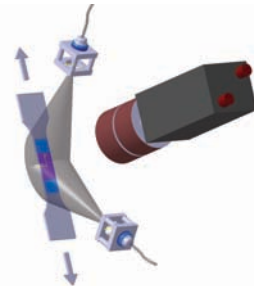
(a) AFM을 이용한 인장 특성 측정 (Chasiotis et al^[1])



(b) 광학 엔코더에 의한 인장 변형 측정 (Tsuchia et al^[5])



(c) ISDG기법에 의한 변형측정 (Sharpe^[3])



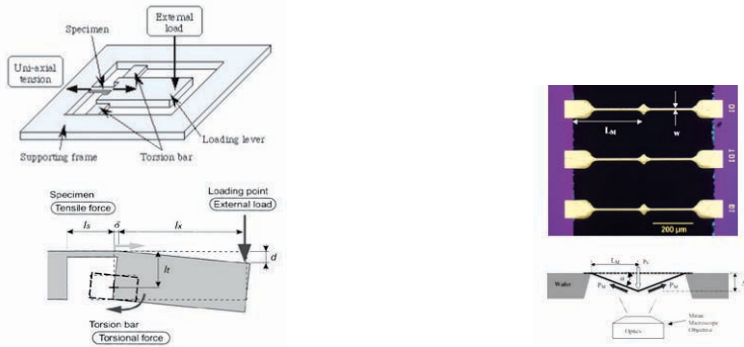
(d) ESPI에 의한 인장 변형 측정 (Huh^[4])

그림 2. 대표적인 마이크로 인장 시험 시스템

2.2 대체 인장 시험 (Alternative tensile test)

시험편 제작, 인장 하중 부하와 변형 측정 등에서 어려움을 가지고 있는 직접 인장 방법을 대체하여 인장 물성을 측정할 수 있는 상대적으로 쉬운 방법들이 제안되었다.^[6,7] 일반적으로 시험편 제작 등이 비교적 용이한 마이크로 빔으로 제작되어 나노 매뉴플레이터 혹은 나노 인덴터 등으로 부하하는 마이크로 굽힘으로부터 인장 물성을 얻거나, 그림 3 (a)와 같이 비틀림 바와 부하 레버로 하나의 구조체로 된 시스템에서 비틀림 바를 중심으로 레버가 회

전함으로서 시험편에 인장 응력이 작용하도록 하는 방법이 제안되었다.^[6] 또한 최근 Espinosa^[7]에 의해서는 그림 3 (b)와 같은 막 인장 시험기법이 제안되었다. 양단이 고정되어 있는 시험편에 시험편의 중앙에 나노 압입자(Nano indenter)나 AFM 구동체로 부하하여 양쪽 시험편에 인장 응력이 작용하게 하였고, 이러한 인장 응력에 의하여 변형되는 부분에서의 변형을 백색광 간섭으로 측정하여 인장 응력과 변형률의 관계를 측정하였고 이로부터 인장 물성을 결정하였다.



(a) Sato^[6]에 의하여 제안된 인장 시험 시스템

(b) Espinosa^[7]에 의하여 사용된 인장 시험 시스템

그림 3. 대체 인장 시험 기법의 예

3. 마이크로 ESPI 시스템

3.1 면내 ESPI에 의한 인장 변형 측정 원리

ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) 기법에서는 레이저 빔의 조사에 의하여 시험편 표면으로부터 반사된 불규칙한 스펙클 패턴을 이용한다. 이러한 스펙클 패턴은 시험편에 조사된 두 빔인 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)의 간섭에 의하여 발생한다. 이 두 빛의 진폭은 다음과 같다.

$$u_o = a_o \exp \left[-j \left(\varphi + \frac{2\pi \ell_o}{\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

$$u_r = a_r \exp \left[-j \left(\varphi + \frac{2\pi \ell_r}{\lambda} \right) \right] \quad (2)$$

여기서, φ 는 레이저의 초기 위상을 나타내고 λ 는 광원의 파장, ℓ_o 와 ℓ_r 은 물체광과 참조광의 경로를 나타낸다. 빛의 세기는 복소 진폭의 제곱으로 결정되므로 시험편에 조사된 두 빔에 의해 중첩 반사된 스펙클들은

$$I = |a_o|^2 + |a_r|^2 + 2 |a_o| |a_r| \cos \left[\frac{2\pi (\ell_o - \ell_r)}{\lambda} \right] \quad (3)$$

과 같이 된다. 물체의 변형이 발생함에 따라 물체광에 대한 위상은 변화되며, 이러한 위상의 변화는 스펙클 패턴

에 반영된다. 물체의 변형과 관련되는 간섭 무늬는 변형 전후의 스펙클 패턴의 변화에 의해 구해질 수 있다. 물체의 변형에 의해 위상이 바뀐 물체광과 기준광에 의한 간섭 결과는 줄무늬 패턴으로 나타나게 되고 이는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_{12} &= I_2 - I_1 \\
 &= 4 |a_r a_0| \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\ell_{02} + \ell_{01}}{2} - l_r \right) \right] \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\ell_{02} - \ell_{01}}{2} \right) \right] \\
 &= I_0 \gamma \sin \left(\phi + \frac{\Delta \phi}{2} \right) \sin \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 $\Delta \phi = (2n+1)\pi$ 이 되면 간섭 무늬는 최대 밝기를 나타내며, $\Delta \phi / 2 = 2n\pi$ 이 되면 어두움을 나타내게 된다. 식(4)로부터 첫 번째 sine항은 줄무늬 패턴에서 스펙클의 특성에 의해 불규칙하나 두 번째 sine항에 의해 전체적으로 비례하는 값을 갖게 된다. 따라서 이러한 불규칙한 값에 의해 스펙클 노이즈가 매우 심하나 전체적인 변형값에 비례하는 패턴을 얻을 수 있다.

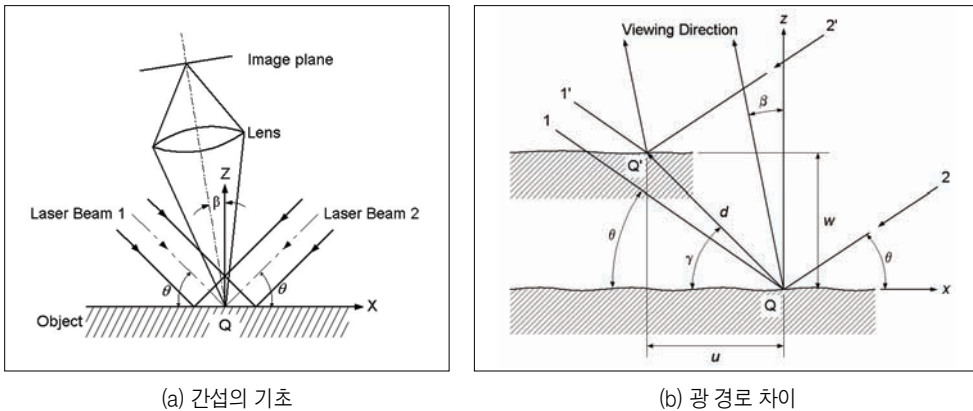


그림 4. 면내 변형 측정을 위한 간섭 시스템

그림 4 (a)는 스펙클 패턴 간섭계를 이용하여 면내 변위를 측정하는 기본 개념을 나타내고, 그림 4 (b)는 변위를 계측하기 위한 두 간섭광의 광로차를 나타낸다. 그림 4에서 나타낸 바와 같이 광량이 같은 레이저 광이 조사면에 대해 같은 각도 θ 로 두 방향에서 조사되면, 레이저 광이 조사된 측정면의 위상 정보들은 수광 소자(CCD 카메라의 렌즈)를 통하여 화상면(Image plane)에 결상된다. 이때 두 방향에서 조사된 광들에 의하여 측정면은 조사면과의 교선방향, 즉 X축 방향으로만 측정감도를 갖게 된다. 두 방향에서 조사된 레이저 광 중 한쪽은 다른 한쪽의 참조 광이므로 변형 전후의 광로길이의 변화 Δ 는

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2 u \cos \theta \tag{5}$$

과 같다. 여기서 L_1 과 L_2 는 조사 방향에서의 레이저 광과 관측방향에 이르는 광로길이 변화량을 나타낸다. 또한 여기서 Δ 는 면외 변형 성분 w와 관측방향 β 와는 무관하다는 것을 알 수 있다. 광로길이 변화 Δ 가 $n\lambda$ ($n = 1, 2,$

3...)이 될 때 간섭 줄무늬를 형성하므로 변위 u 는 식(6)로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{n\lambda}{2 \cos \theta} \quad (6)$$

여기서 n 은 간섭 무늬의 줄무늬 차수이다. 이러한 간섭 패턴으로부터 변형률을 결정할 수 있으며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{2 \cos \theta D_p} \quad (7)$$

여기서 D_p 는 두 줄무늬간의 간격을 나타낸다.

3.2 연속 인장 변형 측정 알고리즘

간섭 줄무늬 패턴은 식(4)의 첫째항에 의해 매우 노이즈가 심하게 되나 물체의 변형 정도를 가시화 하는 것으로 써 안정적인 해석이 가능하다. 노이즈를 고려한 정량적으로 해석하기 위해서는 일반적으로 위상 이동 기법을 사용한다. 그러나 위상 이동 기법은 주로 정적인 변형 상태를 측정하는 방법으로 사용되고 있어, 연속적으로 인장 하중이 가해지는 측정에는 적합하지 않다.

이에 따라 Huh 등^[4]은 측정된 줄무늬 패턴을 저주파 필터링하여 노이즈를 줄이는 방법을 사용하였다. 저주파 필터링은 3 Order Gaussian Convolution을 개발하여 적용시켰다. 그림 5는 줄무늬 패턴에 대한 필터링 적용 전후를 나타낸다. 획득된 간섭 줄 무늬 패턴인 그림 5 (a)에서의 매우 심한 노이즈는 저주파 필터링의 적용을 통하여 잘 제거되었고, 그림 5 (b)은 그 양상을 나타낸다.

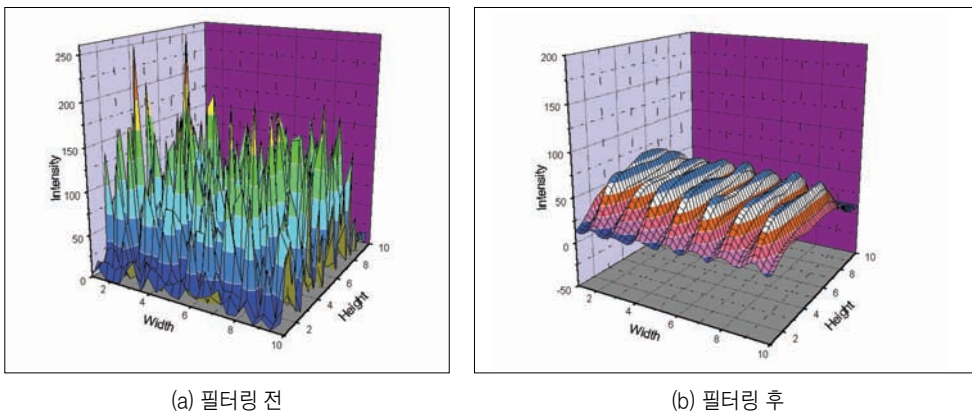


그림 5. 간섭 줄무늬 패턴의 3차원 형상

ESPI 광학 시스템을 통하여 얻어지는 스펙클 패턴은 인장 시험동안 연속적인 부하 및 변형에 대하여 연속적으로 일정 간격으로 얻는다. 이와 같은 연속적인 시험편의 변형은 인장 하중의 증가에 따라 간섭 무늬의 측정 한계를 넘어서게 되어 하나의 변형 기준으로 전체의 변형을 측정하는 것은 매우 어렵다. 이에따라 Huh 등^[4]은 그림 6과

같은 연속 인장 변형 측정 알고리즘을 개발하여 마이크로 인장 시험을 수행하였다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 하나의 기준 스펙클 패턴에서 임의의 변형이 발생할 때까지 연속적으로 상당한 변형 상태를 측정하고, 이후 다시 기준을 선택하여 그 기준에 대하여 상당한 변형까지 측정하는, 이러한 수순을 연속적으로 반복하여 대 인장 변형을 측정하게 하고 인장 파단까지 인장 변형을 연속적으로 측정하였다. 이에 따라 인장 변형의 탄성 변형과 소성 변형의 비교적 큰 대변형 상태를 연속적인 간섭 패턴의 형성으로 측정할 수 있도록 하였다.

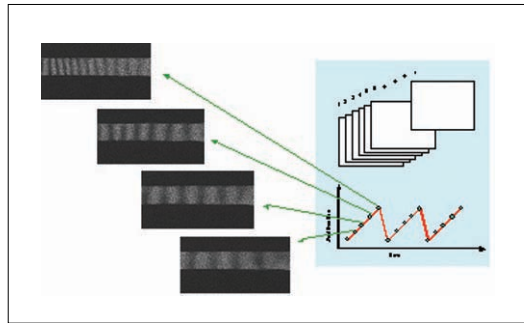
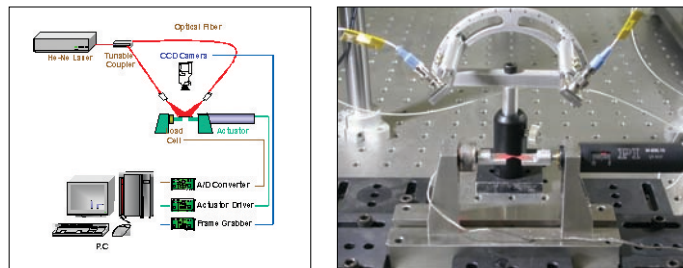


그림 6. 마이크로 인장 시험동안 연속적인 인장 변형 측정 알고리즘

3.3 마이크로 인장 및 ESPI 시스템

그림 7 (a)는 Huh 등^[4]이 개발한 면내 마이크로 ESPI(in-plane micro-ESPI)방법의 개략도이며, 면내 인장 변형을 측정하는 광학적 연결도를 나타낸다. 본 시스템에 사용된 레이저 광원은 22 mW의 He-Ne Laser이며, 광 파이버(optical fiber)를 통해 레이저 빔이 전달되도록 하였다. 시험편에 조사되는 두 방향의 레이저 빔은 특수 제작된 빔 분리기에 의해 같은 광각으로 분리되고 렌즈를 통해 확산되도록 하였다. 이와 같이 구성된 시스템은 그림 7 (b)와 같다.



(a) 마이크로 ESPI의 연결 개략도

(b) 마이크로 인장 시험 시스템

그림 7. Huh 등^[4]이 개발한 마이크로 인장 시험 시스템과 마이크로 ESPI 시스템

4. 박막의 마이크로 인장 특성 측정

마이크로 인장 물성 측정에 사용되는 기법은 표 1에서 언급한 바와 같이 다양한 방법들이 제안되고 있다. 본 절에서는 이러한 방법중 Huh 등^[4]이 개발한 마이크로 ESPI 기법을 인장 변형 측정 시스템으로 마이크로 인장 시험

을 수행한 결과를 기술한다. 본 실험에서는 동 박막, TiN 박막 그리고 금 박막을 사용하였다.

4.1 동 박막의 인장 물성 측정

본 실험에는 마이크로 BGA의 빔리드 (beam lead) 등의 마이크로 부품 소재로 사용되는 전해 동 박막 (electrolytic copper foil)을 이용하여 시험을 하였다. 본 시험에 사용한 전해 동 박막 두께는 18 μm 이다. 그림 8은 본 소재에 대한 하중-변위곡선을 나타내며, 각 하중 수준에서의 마이크로 ESPI 기법에 의하여 얻어진 간섭 스페클패턴을 나타내고 있다. 그림 8에서 보여준 바와 같이 마이크로 ESPI 기법은 각 하중의 수준에 대응하는 변형이 비교적 잘 나타나고 있음을 보여주고 있다. 이러한 ESPI 간섭 무늬 측정과 함께 그림 6에서 보여준 연속 변형 측정 알고리즘은 마이크로 인장 변형률에 대한 정보를 제공하게 되며 이러한 곡선은 그림 9와 같다. 그림 9는 50 μm/min 의 속도에서 얻어진 동 박막의 대표적인 인장 응력-변형률 곡선을 나타내며, 이 곡선으로부터 탄성계수, 항복강도, 인장 강도 그리고 탄소성 특성을 나타내는 Ramberg-Osgood관계식을 결정할 수 있다. 탄성 계수는 선형 직선 기울기를 결정함으로써 얻어지게 되고 항복강도는 0.2%오프셋 강도로써 결정하였다. 동 박막의 탄소성 특성은 다음과 Ramberg-Osgood관계식으로부터 소성 지수와 계수를 결정함으로써 얻어지게 하였다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + a_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \quad (8)$$

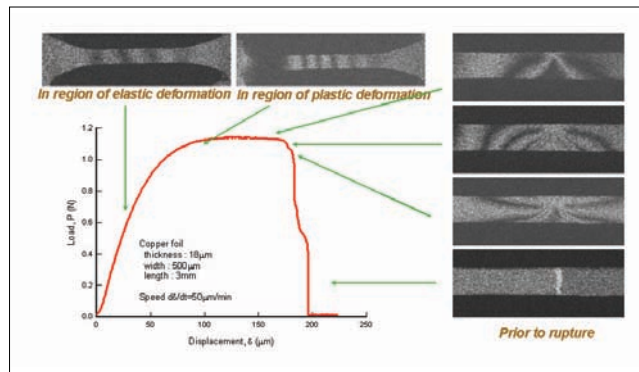
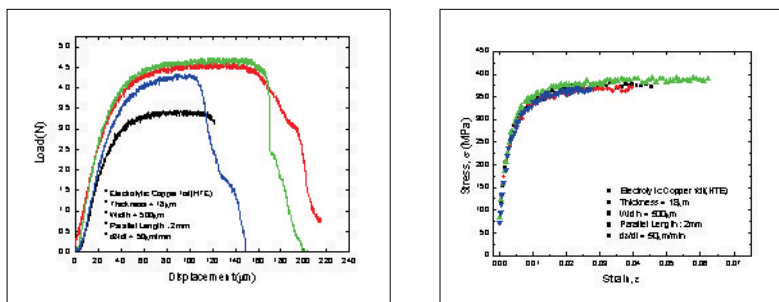


그림 8. 동 박막의 하중-변위 곡선과 각 변형 상태에 상응하는 스페클 간섭 무늬



(a) 동 막재료(HTE)의 하중-변위 곡선

(b) 동 막재료(HTE)의 응력-변형률곡선

그림 9. 동 막재료의 전형적인 마이크로 인장 시험 결과

4.2 TiN 경질 박막의 인장 물성 측정

TiN 박막은 두께 $500 \mu\text{m}$ 의 Si(100) 웨이퍼 위에 스퍼터링(CFUBMS; closed-field unbalanced magnetron sputtering)에 의하여 $1 \mu\text{m}$ 두께로 증착하였다. 마이크로 인장 시험을 수행하기 위하여 마이크로 인장 시험편을 마이크로 가공(micromachining)으로 너비가 $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ 그리고 $500 \mu\text{m}$ 인 세 종류의 시험편을 제작하였으며, 그림 10은 제작된 시험편을 나타낸다.

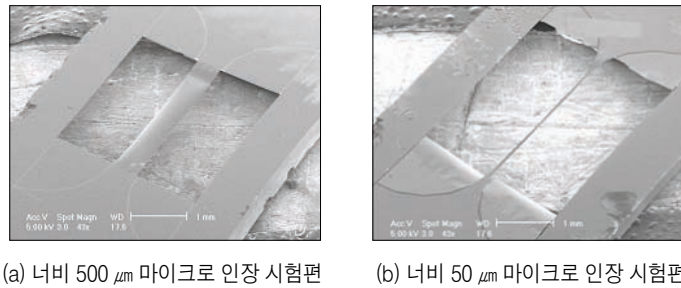


그림 10. 마이크로 가공에 의하여 제작된 TiN 박막 인장 시험편

그림 11은 실험에서 얻어진 TiN 박막의 인장 하중 곡선과 스페클 패턴의 예를 나타낸다. 시험편의 변형이 진행됨에 따라 하중 크기에 따라 프린지 패턴이 비교적 명확하게 나타나고 있으며, 이 패턴으로부터 연속적인 변형 측정 알고리즘을 사용하여 변형률을 계산하였다. 계산된 변형률과 이에 대한 응력으로부터 응력-변형률의 곡선을 그릴 수 있으며, 그림 12는 TiN 박막의 인장 응력-변형률 곡선을 타나낸다. 이들 곡선으로부터 TiN 박막은 소성 변형을 동반하지 않는 선형 탄성체임을 알 수 있다. 따라서 이들 곡선으로부터 인장 강도와 탄성 계수만이 결정되어진다.

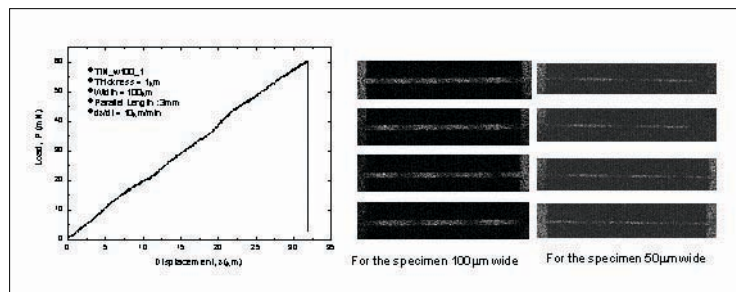
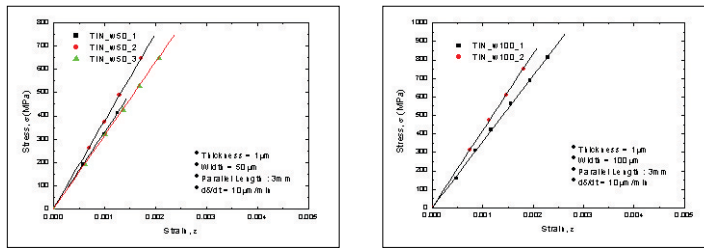


그림 11. 전형적인 하중-변위 곡선과 인장 변형에 따른 스페클 패턴

4.3 금 박막의 마이크로 인장 물성 특성

금 박막은 실리콘 웨이퍼위에 스퍼터링으로 증착하였으며, 마이크로 인장 시험을 수행하기 위하여 마이크로 인장 시험편은 그림 13과 같이 마이크로 가공(micromachining) 공정을 사용하여 제작하였다. 시험편의 두께는 $1 \mu\text{m}$ 와 $0.5 \mu\text{m}$ 의 두 종류로 제어하였고, 시험편의 너비는 각각 $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ 그리고 $200 \mu\text{m}$ 로 제어하여 제작하였다. 시험편의 시험부의 길이는 2mm 로 하였다.



(a) 너비 50 μm 시험편

(b) 너비 100 μm 시험편

그림 12. TiN 박막의 마이크로인장 응력-변형을 곡선

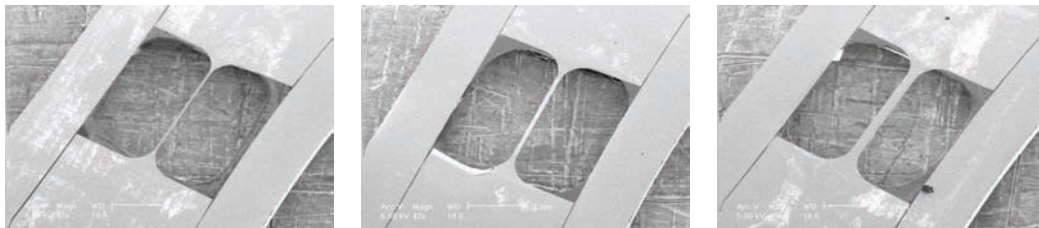


그림 13. 마이크로 가공으로 제작된 금 박막 마이크로 인장 시험편

그림 14는 본 실험에서 얻어진 금 박막의 전형적인 응력-변형을 곡선을 나타내고 각 응력 단계에서의 대표적인 마이크로 ESPI의 간섭 스펙클 패턴을 나타낸다. 시험편의 응력이 증가함에 따라 시험편의 변형을 나타내는 프린지 패턴(fringe pattern)은 시험편의 너비 방향으로 형성되어 있으며, 시험편의 하중축에 직각인 방향의 평행한 프린지가 명확하게 나타나고 있다. 이러한 시험편 너비 방향에 대한 프린지 패턴의 균일한 분포는 본 실험에서 사용한 너비 50 μm , 100 μm 그리고 200 μm 의 시험편에서도 동일하게 관찰되고 있었다.

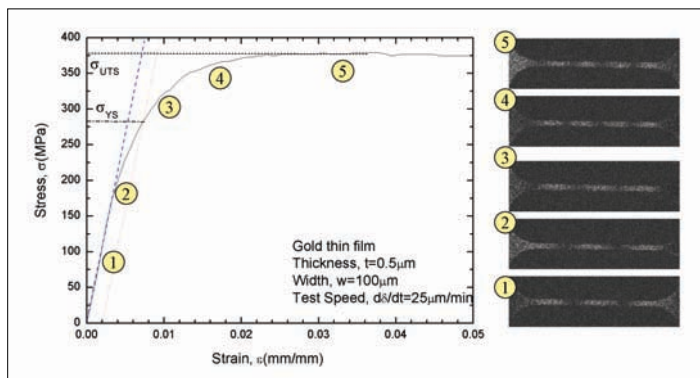


그림 14. 금 박막의 전형적인 응력-변형을 곡선과 인장 변형에 따른 스펙클

그림 14와 같은 인장 응력-변형을 곡선으로부터 금 박막의 항복강도, 인장 강도, 탄소성 특성 등을 결정할 수 있다.

5. 결 론

마이크로/나노 구조물의 최적 설계 및 신뢰성을 위한 마이크로/나노 기계적 물성 측정 기술은 매우 다양한 기법

으로 개발되고 있다. 시험편 제작, 시험기와 시험편의 연결(gripping), 하중인가와 측정, 변위 또는 변형을 측정 등의 실험적 어려움은 국내의 측정 기술의 개발로 극복되고 있으며, 더 작은 크기로 신뢰성을 측정하는 기술의 개발이 도전되고 있다. 본 논문에서는 이러한 마이크로/나노 인장 물성의 변형 측정을 포함한 마이크로 인장 시험 기법에 대한 소개를 하였다. 마이크로 시험편에서의 변형을 측정하는 기법은 매우 다양하게 제안되어 있고, 특히 비접촉식의 레이저 간섭을 이용한 측정 기술이 신뢰성있게 활용되고 있다. 본 논문에서는 레이저 간섭을 이용하는 기법 중 마이크로 ESPI(electronic speckle pattern interferometry) 기법에 대하여 자세히 기술하였다. 아울러 이러한 기법에 의하여 박막에서 마이크로 물성을 측정할 결과를 보고하였다. 이러한 마이크로 인장 물성 측정 기술은 나노 기술의 기반 인프라의 확충을 가져오게 되며, 이 분야의 나노 측정 표준의 기반을 구축하는데 기여할 것으로 기대한다.

✿ 참고 문헌

- [1] Chasiotis, I., and Knauss, W.G., "A New Microtensile Tester for the Study of MEMS Materials with the Aid of Atomic Force Microscopy," *Experimental Mechanics*, Vol. 42, pp. 51–57, 2002
- [2] Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H. Ranson, W.F., McNeil, S.R., "Determination of Displacements Using an Improved Digital Image Correlation Method," *Image Vision Computing*, Vol. 1, pp. 133–139, 1983
- [3] Sharpe, W.N. Jr., Yuan, B., Vaidyanathan, R., Edwards, R.L., "New Test Structures and Techniques for Measurement of Mechanical Properties of MEMS Materials," *Proceedings of the SPIE Symposium on Microlithography and Metrology in Micromachining II*, pp. 78–91, 1996
- [4] Huh, Y.-H., Kim, D.I, Yoon, K.J., Kim, K., Oh, C.-S., "Measurement of Micro-Tensile Properties using ESPI technique". *J. of the KSPE*, Vol. 18, pp. 90–97, 2001
- [5] Tsuchiya T., Tabato O., Sakata J., and Taga Y., "Specimen Size Effect on Tensile Strength of Surface micromachined Polycrystalline Silicon Thin Films," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 7, pp. 106–113, 1998
- [6] Sato K., Shikida M., Yoshoka T., Ando T., and Kawabata T., "Micro Tensile Test of Silicon Film having Different Crystallographic Orientations," *Proc. Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, Chicago, pp. 595–598, 1996
- [7] Espinosa H.D. and Prorok B.C., "A Novel Experimental Technique for Testing Thin Films and MEMS Materials," *Proc. of the SEM Annual Conf. On Exp. And Applied Mech.*, Portland, pp. 446–449, 2001



허 용 학

· 한국표준과학연구원 환경안전계측센터
· 관심분야 : 마이크로/나노 기계적 특성 측정 기술,
재료 및 구조물 피로 강도 측정 및 평가
· E-mail : yhhuh@kriss.re.kr



김 동 일

· 전남대학교 기계공학과 박사과정
· 관심분야 : 레이저 응용 계측 기술, ESPI 측정
· E-mail : yuilmuie@kriss.re.kr