

◆특집◆ 레이저응용 변형 및 진동해석 기술

레이저 간섭계를 이용한 마이크로/나노 물성 측정

허용학*, 김동일**, 김동진**, 최만용**

Application of Laser Interferometry Technique to Micro/Nano-mechanical Properties Measurement

Yong-Hak Huh*, Dong-Iel Kim**, Dong-Jin Kim** and Man-Yong Choi**

Key Words : Micro-ESPI (마이크로 ESPI), Laser Interferometry (레이저 간섭계), Micro/Nano-Mechanical Properties (마이크로/나노기계적 성질), Micro-Tensile Test (마이크로 인장 시험)

1. 서론

21 세기의 핵심 기술로 떠오르는 나노 기술에 의하여 N(M)EMS 가 개발됨에 따라 이들 시스템의 신뢰성은 많은 관심을 끌고 있다. 특히 나노 결정 체적 소재(nanocrystalline bulk material)와 막 소재(film material)로 개발되는 이들 시스템 구성 재료의 신뢰성은 시스템의 신뢰성과 직접적으로 연결되어 있어, 이들 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 물

성을 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 초박막화에 따라 측정 한계성을 보이기도 한다. Table 1 은 이러한 인장 물성을 측정하는 직접 혹은 간접적인 방법들을 나타낸다.

마이크로/나노 크기의 시험편으로부터 인장 물성을 얻기 위해서는 작은 하중의 부하, 하중 측정 그리고 변형 측정과 같은 시험 시스템의 구성이 요구된다. 특히 이러한 크기 제한을 가지고 있는 시험편에서 변형을 측정하는 것을 쉬운 일이 아니다. 이러한 시험의 기하학적, 기술적인 제한성은 비 접촉식의 측정 방법이 요구되었으며, 이에 대한 대표적인 기법으로는 원자 현미경(Atomic Force Microscope),¹ 디지털 화상 상관법(DIC),² ISDG(Interferometric Strain/ Displacement Gage),³ ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)⁴ 등이 있다. 특히 이러한 방법중 레이저 간섭법을 이용한 방법들이 가장 신뢰성있는 방법으로 알려져 있다. ISDG 기법은 레이저의 간섭을 이용한 기법으로서 시험편 위에 설치되는 측정 표시(marker)의 제작에 다소 어려움이 있으나, 상대적인 측정 우

* 한국표준과학연구원 삶의질표준부 안전그룹

Tel. 042-868-5386, Fax. 042-868-5635

Email yhhuh@kriss.re.kr

마이크로/나노 기계적 특성 측정 기술, 재료 및 구조물 피로 강도 측정 및 평가에 관심을 갖고 있다.

** 한국표준과학연구원 삶의질표준부 안전그룹

Table 1 Comparison of testing methods for micro/Nano-mechanical properties measurement

Test Method	Measurable Properties	Advantage	Disadvantage
Micro-tensile test	- Elastic Modulus - Yielding, tensile strength - Poisson Ratio	- Direct Measurement - Easy interpretation	- difficult in specimen preparation - difficult in micro(nano) deformation measurement
Bending test	- Elastic Modulus - Yielding strength	- Easy interpretation - simple in system	- difficult in specimen preparation - sensitivity in specimen geometry
Resonant frequency	- Elastic modulus	- no mechanical contact to the specimen	- need in modeling boundary condition - effect in environment
Bulge test	- Elastic modulus - biaxial elastic and plastic properties	- insensitivity to edge effects	- difficult in specimen preparation - complicated interpretation
Nano-indentation test	- hardness - elastic modulus - yield strength	- simple specimen preparation - in-situ measurement	- complicated interpretation including substrate effect

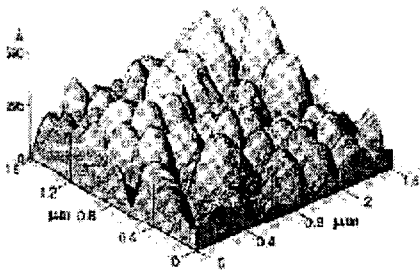
수성이 있는 것으로 알려져 있다. 이에 반하여 ESPI 기법은 상대적인 측정 해상도와 시험편 길이 등에 제한적이나, 시험편에 예비적인 준비가 필요 없는 상대적인 우수성이 있다. 본 논문에서는 이러한 마이크로/나노 물성을 측정하기 위하여 개발되고 있는 레이저 간섭 기술의 응용을 소개한다. 레이저 간섭 기술에 의한 인장 물성 측정 시험 기법과 함께 면내 및 면외의 변형을 측정하기 위한 마이크로 ESPI 기법의 기술적 현황을 기술한다.

2. 마이크로/나노 물성 측정 기법

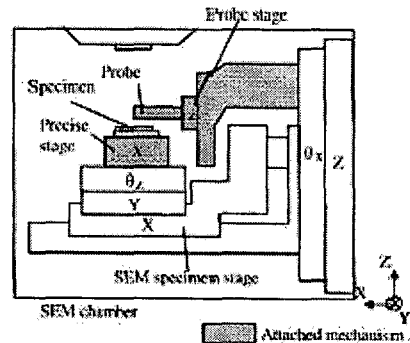
2.1 직접 인장 시험

마이크로/나노 시험편에 인장 하중을 직접 부

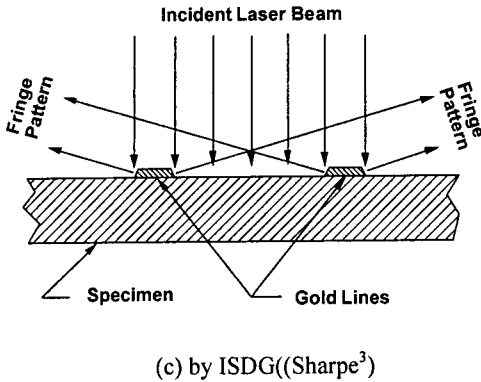
하하기 위해서 비교적 다양한 방법이 사용되었다. Chasiotis 등¹은 AFM 을 이용하여 하중을 부하하여 이미지 해석법으로 변형을 측정하였고, Fig. 1 (a)와 같다. Tsuchiya 등⁵은 Fig. 2(b)와 같이 전자현미경(SEM) 내에서 프루브(probe)로 인장 하중을 부하하여 광학 엔코더로 변형을 측정하였다. Sharpe³는 압전 구동체(piezoelectirc actuator)로 구동되는 인장 시험기로 인장 하중을 가하고, Fig. 1(c)와 같이 인장 변형을 시험편에 표점거리가 되는 작은 표시(markers)에 의하여 레이저의 간섭이 일어나게 하는 ISDG(Interferometric Strain/Displacement Gage)에 의하여 측정하였다. Huh 등⁴도 선형 모터 구동체로 제작한 인장 시험기로 인장 하중을 부하하고 레이저 간섭에 의한 시험편의



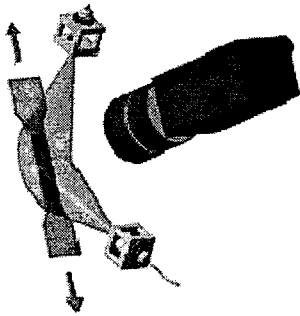
(a) by AFM(Chasiotis et al¹)



(b) by optical encoder((Tsuchia et al⁵)

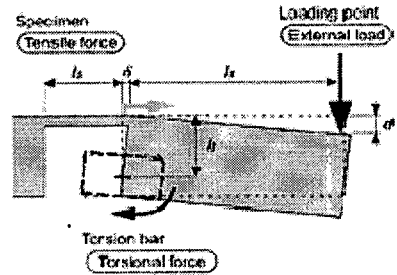
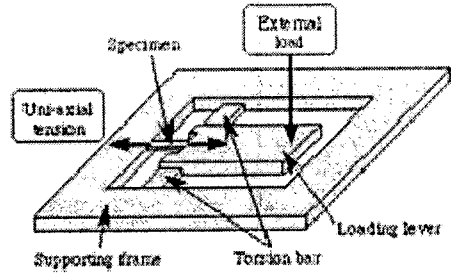


(c) by ISDG((Sharpe³)



(d) by ESPI(Huh⁴)

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.



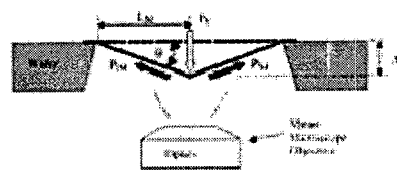
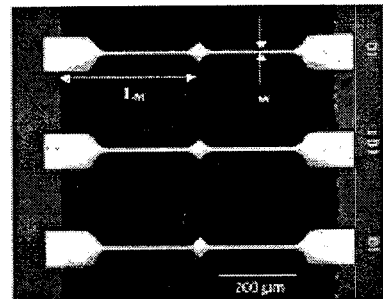
(a)

Fig. 1 Various tensile strain measurement techniques

표면 스페클 정보를 상대 변형으로 측정하는 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)로 Fig. 1(d)와 같이 인장 시험편의 변형을 측정하였다.

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, Fig.2(a)와 같이 비틀림 바와 부하 레버로 하나의 구조체로 된 시스템에서 비틀림 바를 중심으로 레버가 회전함으로써 시험편에 인장 응력이 작용하도록 하는 방법이 제안되었다.⁶ 또한 최근 Espinosa⁷에 의해서는 Fig. 2(b)와 같은 막 인장 시험기법이 제안되었다. 양단이 고정되어 있는 시험편에 시험편의 중앙에 나노 압입자(Nano-indenter)



(b)

Fig. 2 Micro-tensile testing system proposed by (a) Sato et al⁶ and (b) Espinosa et al⁷

3. 레이저 간섭에 의한 변형 측정 기법

3.1 간섭 변형률변위 게이지 기법

간섭 변형률변위 게이지는 마이크로 시험편의 표면위에 올려진 표시(marker)에 레이저 광의 반사에 의한 간섭을 이용하여 이들 표시의 상대 거리를 측정하는 기법이다. Fig. 1©와 같은 마이크로 시험편위에 부착된 두 개의 표시에 간섭을 일으키는 단색 광(coherent monochromatic light)을 조사하면, 각 표시로부터 반사된 광선(beam)이 표시의 간격(d)이 충분히 가까우면 겹쳐서 간섭을 일으키게 된다. 광성이 반사되는 표시가 미소 양만큼 변화하였을 때 일정한 각(θ)에서 간섭 무늬의 차수 변화를 측정하면 표시의 이동을 측정할 수 있게 된다. 마이크로 인장 시험편에서 인장 변형률은 두 표시의 강체 운동에 의하여 표시에서 반사된 간섭 프린지의 이동에 의하여 측정하게 되며, 이 두 프린지의 평균은 두 표시의 초기 간격에 대하여 이동한 양을 나타내게 된다. 따라서 두 표시의 초기 간격에 대한 공칭 변형률은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\epsilon = \frac{\Delta d}{d_o} = \frac{\lambda}{2d_o} \left(\frac{\Delta m_1}{\sin \alpha_1} + \frac{\Delta m_2}{\sin \alpha_2} \right) \quad (1)$$

여기서 Δm_1 과 Δm_2 는 프린지 패턴 1 과 2 의 상대적 프린지 이동을 나타내고, d_o 는 두 표시간의 초기 게이지 길이, λ 는 레이저의 파장, α 는 레이저 광과 프린지 패턴간의 각도를 각각 나타낸다.

이와 같은 미소 변위 측정 시스템을 이용하여 Sharper 등은 마이크로 인장 시험 시스템을 구축하였으며, 이는 Fig. 3 과 같다. 시험기의 한쪽 그림

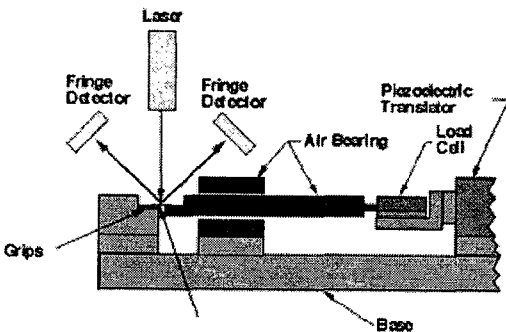


Fig. 3 Micro-tensile testing system including ISDG system (Sharper³)

(grip)은 고정되어 있고, 다른 한쪽은 PZT 로 구동되는 하중 구동장치에 부착된 하중 센서(load cell)에 선형 에어베어링(linear air bearing)을 통하여 연결되도록 하였다. 마이크로 시험편의 인장 변형 혹은 하중이 가해지면 시험편의 변형은 앞에서 설명한 바와 같이 이동량이 측정되어 이는 변형률로 측정되어 응력-변형률의 특성 곡선을 얻게 된다.

3.2 Mirau 간섭계를 이용한 변위 측정

Espinosa 등⁷은 Fig. 2(b)에서 보여준 바와 같이 막 처짐 시험(membrane deflection experiment)을 통하여 굽힘 하중이 작용하는 동안 막의 처짐을 측정하여 막의 인장 특성을 평가하였다. 나노 인덴터(nano-indenter) 혹은 원자하중현미경(AFM)을 이용하여 막의 중앙에 선 하중(line load)를 가하여 막의 아래에 설치한 Mirau 간섭계를 통하여 처짐을 측정한다. 이 간섭계는 Michelson 간섭 원리를 기본으로 하며, 표면의 프린지는 단색광이 막(membrane)에 입사 및 반사되는 다른 경로에 의하여 기준광에 대한 위상차로부터 얻어진다. 막에 처짐이 발생하였을 때의 막 표면의 프린지는 Fig. 4 와 같으며, 이는 프린지간의 거리, δ 와 수직 변위의 관계를 나타낸다. 두 지점간의 상대 처짐은 전체 프린지 수에 $\lambda/2$ 를 곱함으로써 얻어지며, 이러한 관계로부터 변형률, ϵ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\delta^2 + (\lambda/2)^2} - \delta}{\delta} \quad (2)$$

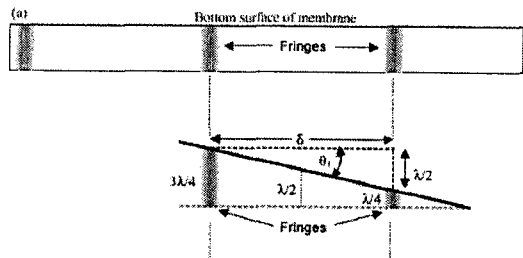


Fig. 4 Relationship between distance between fringes, δ and vertical displacement

4. 마이크로 ESPI 시스템

4.1 면내 ESPI에 의한 인장 변형 측정

ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) 기법에서는 레이저 빔의 조사에 의하여 시험편 표면으로부터 반사된 불규칙한 스페클 패턴을 이용한다. 이러한 스페클 패턴은 시험편에 조사된 두 빔인 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)의 간섭에 의하여 발생한다. Fig. 5는 면내 변위를 측정하는 스페클 패턴 간섭계의 기본 개념을 나타내고, Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 광량이 같은 레이저 광이 조사면에 대해 같은 각도로 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 X 축 방향으로만 측정감도를 갖게 되고, 변형 전후의 광로길이의 변화, Δ 는 $2u\cos\theta$ 와 같다. 두 지점간의 전체 프린지 수가 n 개라고 한다면 변형률은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{n\lambda}{2\cos\theta D_p} \quad (3)$$

여기서 D_p 는 두 프린지 간의 거리를 나타낸다.

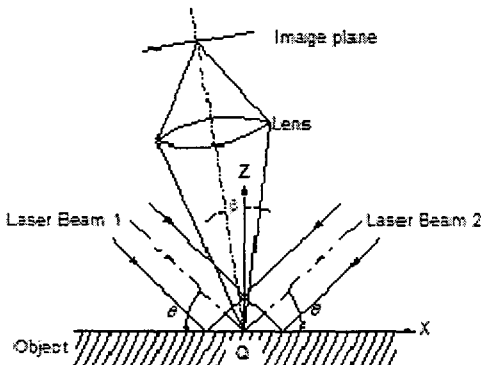


Fig. 5 Speckle pattern interferometry for in-plane deformation measurement

간섭 줄무늬 패턴에 포함되어 있는 노이즈(noise)를 고려하여 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 등⁴은 측정된 줄무늬 패턴을 저주파 필

터링하여 노이즈를 줄였으며, 인장 시험동안 연속적인 부하 및 변형에 대하여 연속적으로 스페클 패턴을 일정 간격으로 얻음으로서 인장 변형률을 측정하였다. 이러한 연속적인 변형률은 Fig 6과 같은 연속 인장 변형 측정 알고리즘을 개발하여 측정하였다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 하나의 기준 스페클 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.

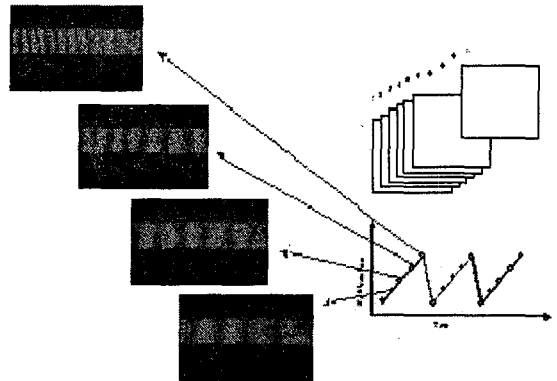


Fig. 6 Continuous strain measurement algorithm for micro-ESPI

Fig.7은 Huh 등⁴이 개발한 면내 마이크로 ESPI(in-plane micro-ESPI)을 이용한 마이크로 인장 시험 시스템을 나타낸다. 본 시스템에 사용된 레이저 광원은 22mW의 He-Ne Laser이며, 광 파이버(optical fiber)를 통해 레이저 빔이 전달되도록 하였다. 시험편에 조사되는 두 방향의 레이저 빔은 특수 제작된 빔 분리기기에 의해 같은 광량으로 분리되고 렌즈를 통해 확산되도록 하였다.

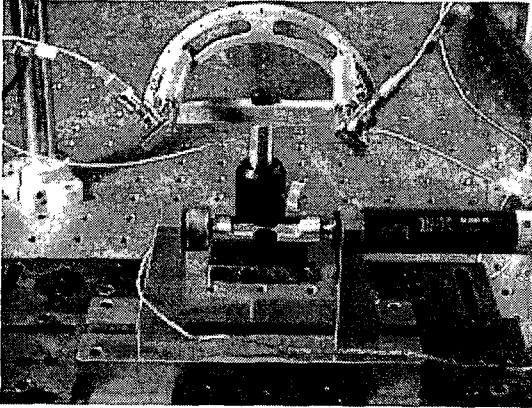


Fig. 7 Photograph for micro-tensile testing system with micro-ESPI developed by Huh et al⁴

4.2 면의 ESPI에 의한 인장 변형 측정

3.2 절에서 언급한 막 처짐의 측정으로부터 인장 변형을 측정할 수 있으며, Espinosa 등⁷은 Mirau 간섭계를 이용하였다. 이에 반하여 Huh 등⁸은 면의 ESPI 시스템을 구성하여 막 처짐을 결정하였다. 면의 ESPI에서는 Michelson 간섭계를 기본으로 하였으며, 연속된 변형에 대하여 기준 광에 대한 물체광의 위상차를 프린지 패턴으로부터 결정하여 면의 처짐, δ_z 을 다음과 같은 관계식으로부터 결정한다.

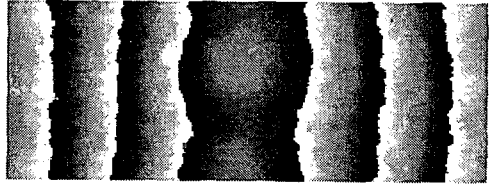
$$\delta_z = \frac{\lambda \cdot \phi}{2\pi(1 + \cos \theta)} \quad (3)$$

여기서 θ 는 물체광과 막 시험편의 표면간의 각도, ϕ 는 물체광의 위상차를 각각 나타낸다. Fig. 8(a)는 막 시험편의 면의 처짐에 대한 스펙클 패턴의 예를 나타낸다. Fig. 8(a)에서 보여준 바와 같이 스펙클 패턴은 고주파 노이즈를 포함하고 있어 정량적인 해석을 하기 위해서는 이러한 노이즈와 비선형 위상 이동 오차를 줄이기 위한 기법이 요구되며 Huh 등⁸은 4-bucket 기법을 사용하였다. Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 스펙클 간섭 패턴을 4-bucket으로 최적화한 위상을 나타낸다.

이와 같은 면의 변형을 측정할 수 있는 ESPI 시스템을 포함하여 면의 굽힘 시험 시스템을 Huh 등⁸은 개발하였으며, Fig. 9는 그 개략도를 나타낸다.



(a) wrapped phase map



(b) phase map obtained by 4-bucket phase shifting method

Fig. 8 Examples of out-of-ESPI fringe pattern

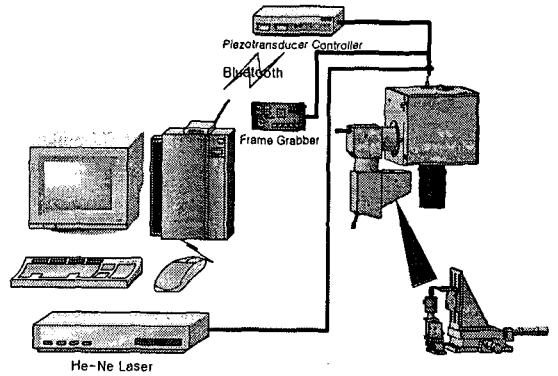


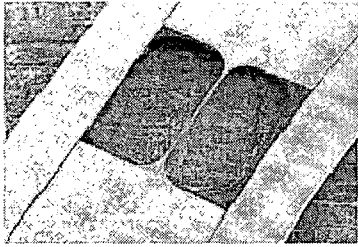
Fig. 9 Micro strip bend testing system with out-of-plane ESPI developed by Huh⁸

5. 마이크로 인장 물성 측정

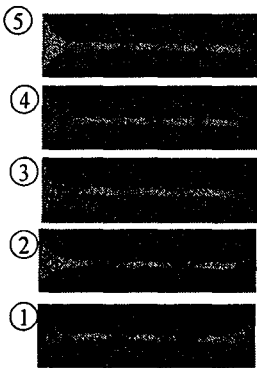
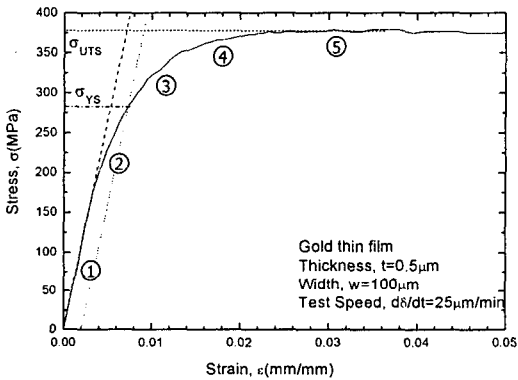
마이크로 인장 물성 측정에 사용되는 기법은 Table 1에서 언급한 바와 같이 다양한 방법들이 제안되고 있다. 본 절에서는 이러한 방법중 Huh 등⁴이 개발한 마이크로 ESPI 기법과 인장 변형 측정 시스템으로 금 박막과 동 막을 이용하여 마이크로 인장 시험을 수행한 결과를 기술한다.

금 박막은 실리콘 웨이퍼위에 스퍼터링으로 증착하였으며, 마이크로 인장 시험을 수행하기 위하여 마이크로 인장 시험편은 Fig. 10과 같이 마

이크로 가공(micromachining) 공정을 사용하여 제작하였다. 시험편의 두께는 1 μm 와 0.5 μm 의 두 종류로 제어하였고, 시험편의 너비는 각각 50 μm , 100 μm 그리고 200 μm 로 제어하여 제작하였다. 시험편의 시험부의 길이는 2mm 로 하였다.



(a) typical shape of micro-tensile specimen



(b) typical micro-tensile stress-strain curve and the corresponding speckle pattern image

Fig. 10 Micro-Tensile properties measurement for Au thin film

Fig. 10 은 Huh 등⁴ 이 실험에서 얻은 금 박막

의 전형적인 응력-변형률 곡선을 나타내고 각 응력 단계에서의 대표적인 마이크로 ESPI 의 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.

Fig. 11 은 마이크로 BGA 의 빔리드 (beam lead) 등의 마이크로 부품 소재로 사용되는 전해 동 박막(electrolytic copper foil)을 이용하여 얻어진 마이크로 인장시험 결과를 나타낸다. 본 시험에 사용한 전해 동 박막 두께는 18 μm 이다. 동 박막에서도 Fig. 10(b)에서 보여준바와 같이 각 하중 수준에서의 마이크로 ESPI 기법에 의하여 얻어진 간섭 스펙클 패턴은 각 하중의 수준에 대응하는 변형이 비교적 잘 나타나고 있을 보여주고 있다. 이러한 ESPI 간섭 무늬 측정과 함께 연속 변형 측정 알고리즘을 사용하여 Fig. 11 과 같은 마이크로 인장 응력-변형률 곡선을 결정하였다. Fig. 11 은 50. $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 속도에서 얻어진 동 박막의 대표적인 인장 응력-변형률 곡선을 나타내며, 이 곡선으로부터 탄성계수, 항복강도, 인장 강도 그리고 탄소성 특성을 나타내는 Ramberg-Osgood 관계식을 결정할 수 있다. 탄성 계수는 선형 직선 기울기를 결정함으로써 얻어지게 되고 항복강도는 0.2% 오프셋 강도로서 결정하였다.

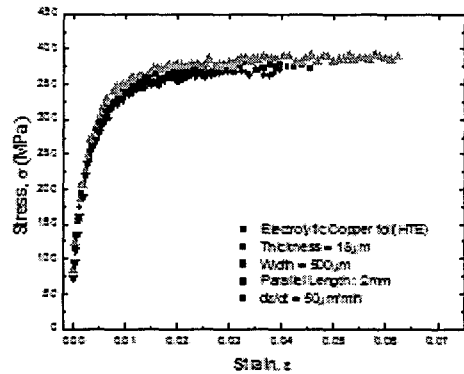


Fig. 11 Typical micro-tensile stress-strain curve for Cu film materials

6. 결론

마이크로/나노 구조물의 최적 설계 및 신뢰성을 위한 마이크로/나노 기계적 물성 측정 기술의 개발이 요구되고 있다. 특히 마이크로/나노 크기의 시험편에서 시험편 제작, 시험기와 시험편의 연결(gripping), 하중인가와 측정, 변위 또는 변형을 측정 등의 실험적 어려움은 국내외 측정 기술의 개발로 극복되고 있으며, 더 작은 크기로 신뢰성을 측정하는 기술의 개발이 도전되고 있다. 본 논문에서는 이러한 마이크로/나노 인장 물성을 신뢰성 있게 측정하기 위하여 레이저 간섭 기술을 이용한 변형 측정 기법에 대한 소개를 하였다. 마이크로 시험편에서의 변형을 측정하는 기법은 매우 다양하게 제안되어 있고, 특히 비접촉식의 레이저 간섭을 이용한 측정 기술이 신뢰성 있게 활용되고 있다. 간섭 변형률 변위 게이지 기법을 이용한 변형 측정 기술이 많이 보고되었고 최근 레이저 간섭을 이용하는 마이크로 ESPI(electronic speckle pattern interferometry) 기법이 개발되었고, 본 논문에서는 이러한 기술에 대하여 자세히 기술하였다. 아울러 이러한 기법에 의하여 박막에서 마이크로 물성을 측정할 결과를 보고하였다. 이러한 마이크로 인장 변형 측정 기술은 나노 기술의 기반 인프라의 확충을 가져오게 되며, 이 분야의 나노 측정 표준의 기반을 구축하는데 기여할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프론티어 연구 개발사업인 '나노소재기술개발사업단'의 지원(과제번호: 05K1501-01110)과 한국표준과학연구원의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kim, D.I, Huh, Y. H. and Kee, C. D., "Out-of-Plane Micro-ESPI System for Measurement of Mechanical Properties of Film Materials," to be published in *Key engineering Materials*, 2006