

# 나노 박막의 인장 물성 측정을 위한 마이크로 면외 ESPI 시스템

\*김동일<sup>1</sup>, 허용학<sup>2</sup>, 김동진<sup>2</sup>, 기창두<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 전남대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 한국표준과학연구원 안전그룹, <sup>3</sup> 전남대학교 기계시스템공학부

## Micro Out-of-plane ESPI System for Tensile Properties Measurement of Nano Thin Film

\*D. I. Kim<sup>1</sup>, Y. H. Huh<sup>2</sup>, D. J. Kim<sup>2</sup>, C. D. Kee<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Mech. Eng., Chonnam Univ., <sup>2</sup> Safety Group, KRIS, <sup>3</sup> School of Mech. Sys. Eng., Chonnam Univ.

Key words : Micro, Out-of-plane ESPI, Nano Thin Film, Strip-bending Test, Tensile Properties

### 1. 서론

21세기 미래 핵심 기술로서 대두 되고 있는 MEMS/NEMS 기술은 전자 반도체뿐만 아니라 바이오 칩 등 다양한 분야에서 기반 기술이 되고 있으며 MEMS/NEMS 기술의 발전과 더불어 그 시스템의 신뢰성 또한 관심이 높아지고 있다. MEMS/NEMS 기술에 의해 개발되는 마이크로/나노 시스템의 물리적, 역학적 특성은 설계 및 제작과 연결되어 있어, 마이크로/나노 시스템의 구조 재료인 나노 결정 체적 소재나 나노 박막의 물성 특성에 대한 정보는 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 따라서 지난 수년간 많은 연구자들은 마이크로/나노 박막에 대해 다양한 방법으로 기계적인 물성을 평가하고자 하였으며, 대표적인 방법으로 마이크로 인장 시험(micro tensile test), 빔 굽힘 시험(beam bending test), 공진 주파수 시험(resonant frequency), 부풀림 시험(bulge test)과 나노 압입 시험(nano-indentation test)이 알려져 있다. 또한 신뢰할만한 물성을 평가하기 위해 마이크로/나노 소재에 대한 변형 측정 기술이 요구되었으며 소재의 물성 측정에 대한 기하학적, 기술적인 제한성으로 인해 비접촉식 측정 방법이 요구되었으며 레이저 간섭법이 가장 신뢰할 만한 방법으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup>

따라서 본 연구에서는 비 접촉식 계측 방법인 전자 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)을 이용하여 나노 박막의 인장 물성을 측정할 수 있는 마이크로 면외 ESPI 시스템을 개발하였으며, 박막에 대한 띠-굽힘 시험으로부터 시스템의 측정에 대한 신뢰성을 확보하고자 하였다.

### 2. 면외 ESPI 원리

면외 ESPI는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)를 이용하여 균일장(uniform field)인 참조광(reference beam)과 측정 대상체에 의해 발생된 스펙클장(speckle field)인 물체광(object beam)의 중첩에 의해 면외 변위에 대해 레이저 파장 단위의 간섭 무늬로 측정되는 고정밀도의 비 접촉식 검사 방법이다.

나노 박막의 면외 변형에 대한 간섭무늬는 수학적으로 빛의 파동 방정식에 의해 풀이되며 빛의 파동에 대한 진폭은 일반적으로 복소수로 표현 가능하며, 공간적인 복소 진폭만을 고려한다면 물체광과 참조광의 중첩에 의한 빛의 세기  $I$ 는 진폭의 자승의 절대값에 비례하기 때문에 식(1)과 같이 표현할 수 있다.<sup>3)</sup>

$$I = |a_o|^2 + |a_r|^2 + 2|a_o||a_r|\cos\left[\frac{2\pi(l_o - l_r)}{\lambda}\right] \quad (1)$$

$$= I_0[1 + \gamma \cos\phi]$$

여기서,  $I_0$ 는 주변 광강도,  $\gamma$ 는 가시도,  $\phi$ 는 물체광과 참조광의 위상차를 나타낸다. 즉,  $\phi = \phi_o - \phi_r = knL$ , 여기서  $k = 2\pi/\lambda$ 이며,  $n$ 은 매질의 굴절률,  $L$ 은 광경로차를 나타낸다. 또한 변위를 나타내는 직접적인 2차 스펙클 상관 간섭 무늬는 변형 전후에 대한 스펙클 패턴의 비교를 통해 얻을

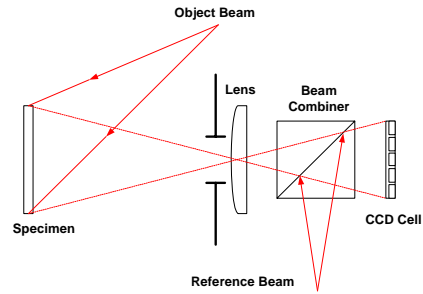


Fig. 1 A Schematic of micro out-of-plane ESPI system using Michelson interferometer.

수 있으며 빛의 세기의 차분 연산에 의해 식(2)와 같이 정리할 수 있다.

$$I_{sub} = |I_a - I_b| = I_0\gamma \sin\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2)$$

위 식(2)의 2차 상관 간섭무늬는 변조에 의해 고주파 성분을 포함하고 있으므로 스펙클 노이즈가 매우 심하여 정확한 위상 값을 얻을 수 없으나  $\sin(\Delta\phi/2)$  항에 비례하는 결과를 얻음으로써 준 정량적 해석이 가능하다.

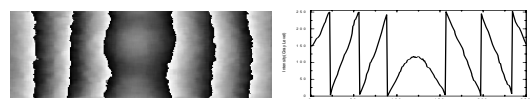
또한 나노 박막의 변위는 민감도 벡터(sensitivity vector)에 의해 결정되며 식(3)과 같이 z-축에 민감한 변위와 위상간의 관계는 조사각도에 의해 결정된다.

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

따라서  $\Delta\phi$ 의 측정이 가능하면 법선 방향에 대한 변위,  $d_z$ 의 정량 해석이 가능해진다.

정량 해석을 위해 본 연구에서는 식(4)와 같이 PZT를 이용한 시간적 위상 이동기법인 N-bucket 위상 이동기법을 이용하였으며 나노 박막에 대한 변형은 Fig. 2와 같은 위상도(wrapped phase map)로 결정되었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 arctangent 함수에 의해  $2\pi$ -모호성을 지녔음을 알 수 있다. 따라서 박막 재료의 변형을 나타내는 위상도를 얻기 위해서는 결핍이 요구된다. 식(5)는 최소 자승법에 대한 이산적인 포와송 방정식을 나타내며 2D-푸리에 변환에 의해 포와송 식의 해를 식(6)으로 정리할 수 있다.<sup>4,5)</sup>

$$\tan(\phi) = -\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I(n) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I(n) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \quad (4)$$



(a) Wrapped phase map (b) profile of (a)  
Fig. 2 Typical fringe pattern and wrapped phase map by 4-bucket phase shifting method.

$$(\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}) + (\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}) = \rho_{i,j}$$

$$\rho_{i,j} = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x) + (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y) \quad (5)$$

$$\Delta_{i,j}^x = \mathcal{W}\{\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}\}, \Delta_{i,j}^y = \mathcal{W}\{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}\}$$

$$\hat{\phi}_{i,j} = \frac{\hat{\rho}_{i,j}}{2\cos(\pi i/M) + 2\cos(\pi j/N) - 4} \quad (6)$$

여기서  $\hat{\phi}_{i,j}, \hat{\rho}_{i,j}$  는  $\phi_{i,j}, \rho_{i,j}$  의 푸리에 변환을 나타내며 식(6)의 역 푸리에 변환에 의해 Fig. 3의 결과를 얻을 수 있다.

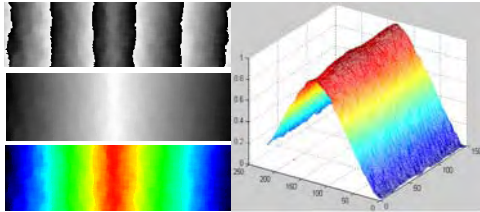


Fig. 3 Phasemaps and its three-dimensional view obtained by unweighted least-squares phase unwrapping algorithm

### 3. 마이크로 면의 ESPI 시스템

나노 박막의 면의 변형을 측정하기 위해 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 portable 면의 ESPI 시스템을 개발하였다. 입력된 레이저 소스(He-Ne, 632.8nm)는 95:5의 비율로 물체광과 참조광으로 분리되며, 참조광은 PZT(Piezo-transducer)에 의해 위상 이동된 각각의 스페클 패턴(speckle pattern)이 얻어지고 시스템 내에서 PZT의 위상 보정이 이뤄질 수 있도록 간섭계를 구성하였으며, 나노 박막의 변형을 나타내는 줄무늬 패턴(fringe pattern)의 실시간 관측이 가능하도록 개발하였다. Fig. 4는 마이크로 면의 ESPI 시스템을 이용하여 나노 박막에 대한 변형을 측정하고 이를 제어하는 시스템과 운영 프로그램을 나타내고 있다. Fig. 5는 본 시스템에 의해 동적인 변형과 대변형 해석에 대한 줄무늬 패턴과 변형 및 인가된 변형량과 측정된 변형량의 오차를 관계를 도시하였으며 나노 박막의 동적인 전체 변형에 대해 98.4%의 측정 정밀도를 갖고 있음을 알 수 있다.

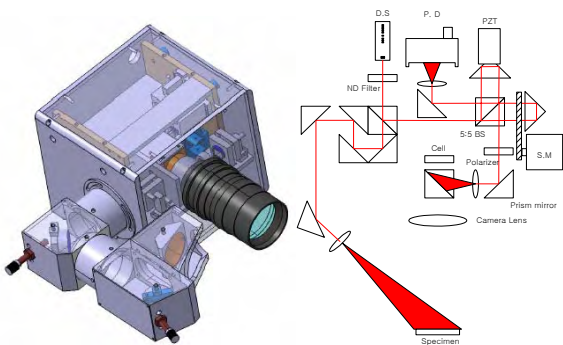


Fig. 3 Micro out-of-plane ESPI system and its optical setup

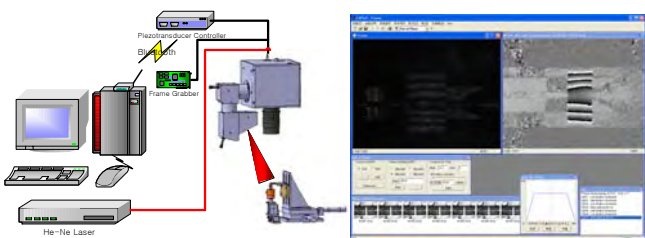


Fig. 4 Schematic diagram for testing system and control and acquisition software developed in this study.

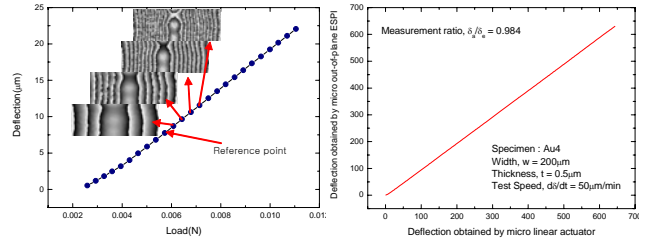


Fig. 5 Relationship of inputted deformation and measured fringe pattern

높은 측정 정밀도를 가진 마이크로 면의 ESPI 시스템을 이용하여 나노 박막의 띠-굽힘 시험에 응용될 수 있었으며, 띠-굽힘이론에 의해 나노 금 박막의 응력과 변형률이 결정되었다. Fig. 6은 나노 금 박막에 대한 응력-변형률 곡선을 나타내고 있으며, Espinosa<sup>1)</sup>, Nix<sup>2)</sup>, Kim<sup>6)</sup>등의 연구와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

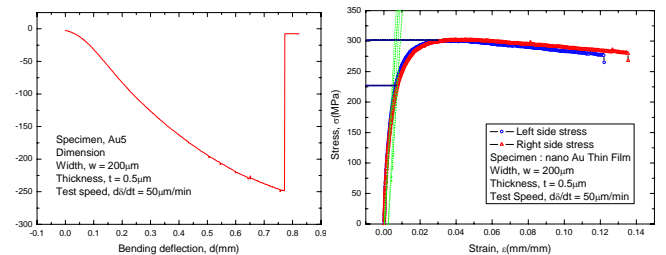


Fig. 6 Strip bend curve and stress-strain curve obtained from strip-bending test.

### 4. 결론

본 연구에 의해 나노 박막의 인장 물성을 평가할 수 있는 마이크로 면의 ESPI 시스템이 개발되었다. 데이터의 정량화를 위해 위상 이동기법을 적용하였으며, 최소 차승 결핍 알고리즘에 의해 동적인 전체 변형에 대해 98.4%의 측정 정밀도로 실제 위상을 구할 수 있었으며, 띠-굽힘 이론에 의해 나노 금 박막의 응력-변형률 곡선을 유도하고 비교한 결과 본 시스템의 물성 측정에 대한 신뢰성을 확보하였다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 21C 프론티어 연구개발 사업인 '나노 소재 기술 개발 사업단'의 지원(과제번호 05K1501-01110)과 한국표준과학연구원 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Espinosa, H.D., Prorok, B.C. and Fisher, M., "A Novel Experimental technique for Testing Thin Film and MEMS Materials," *Proc. of the SEM Annual Conf*, 446-449, 2001.
- Nix, W. D., "Mechanical Properties of Thin Films," *Met. Trans. A.*, **20A**, 2217, 1989.
- Cloud, G. L., "Optical Methods of Engineering Analysis," *Cambridge University Press*, 1994.
- Ghiglia, D.C, Pritt, M.D., "Two-dimensional Phase Unwrapping," *John Wiley & Sons Ltd*, 1998.
- Hunt, B.R., "Matrix formulation of the reconstruction of phase values from phase differences," *J. Opt. Soc. Am.*, **69**, 393-399, 1979
- Kim, D.I., Huh, Y.-H, Kee, C.D., "Out-of-plane Micro-ESPI System for Measurement of Mechanical Properties of Film Materials," *Key Eng. Materials*, **321-323**, 116-120, 2006.