

마이크로 ESPI 기법에 의한 면내 변형 측정 민감도 향상

김동일*(전남대 대학원 기계공학과), 허용학(한국표준과학연구원 환경안전계측센터),
기창두(전남대 기계시스템공학부)

Improvement of Sensitivity to In-plane Strain/Deformation Measurement by Micro-ESPI Technique

D. I. Kim(Mecha. Eng. Dept. CNU), Y. H. Huh(Center for Env. and Safety Meas., KRISS),
C. D. Kee (Mecha. Eng. Dept. CNU)

ABSTRACT

Several test methods, including micro strain/deformation measurement techniques, have been studied to more reliably measure the micro properties in micro/nano materials. Therefore, in this study, the continuous measurement of in-plane tensile strain in micro-sized specimens of thin film materials was introduced using the micro-ESPI technique. TiN and Au thin films 1 and 0.47 μm thick, respectively, were deposited on the silicon wafer and fabricated into the micro-sized tensile specimens using the electromachining process. The micro-tensile loading system and micro-ESPI system were developed to measure the tensile strain during micro-tensile test. The micro-tensile stress-strain for these materials was determined using the algorithm for continuous strain measurement. Furthermore, algorithm for enhancing the sensitivity to measurement of in-plane tensile strain was suggested. According to the algorithm for enhancement of sensitivity, micro-tensile strain data between interfringe were calculated. It is shown that the algorithm for enhancement of the sensitivity suggested in this study makes the sensitivity to the in-plane tensile strain increase.

Key Words : Micro-ESPI (마이크로-ESPI), Continuous Strain/Deformation Measurement (연속 변형률/변형 측정), Improvement of Sensitivity (민감도 향상)

1. 서론

최근, MEMS기술의 급속한 발전과 더불어 마이크로 변형률/변형 측정 기술을 포함한 몇몇 시험 방법들이 마이크로/나노 소재의 마이크로 특성을 좀더 신뢰성 있게 측정하기 위해 연구되어 왔다. 마이크로/나노 소재에 대한 물성은 설계, 제조과정, 사용 방법 뿐만 아니라 시스템의 신뢰성을 평가하기 위한 중요한 근간이 된다.

마이크로 특성을 평가하기 위해 마이크로-인장 시험, 빔 벤딩 시험, 나노-인덴테이션 시험, 부풀림 시험 등의 몇몇 시험 방법이 제안 되어 왔다. 위 시험들로부터 탄성 계수, 항복강도, 인장강도 같은 인장 물성이 결정될 수 있다. 이 물성을 좀 더 효과적이고 신뢰할만하게 측정하기 위해서는 변형률/변형 측정 기술이 필요하다. 심지어 strain

gage, extensometer 같은 변형률을 측정하는 몇몇 기술이 편리하게 이용된다 할지라도 이 기술들은 마이크로 소재를 시험하는데는 적당치 않다. 따라서 미소 재료에 대한 변형률/변형을 측정하기 위해 최근 ISDG, DIC, laser 간섭법 등 같은 몇몇 비 접촉식 방법이 제안되었다.^{1,2}

레이저 간섭 기술 같은 ESPI 는 비 접촉식이며 Full-field로 측정할 수 있는 계측 방법이므로 마이크로 소재의 기계적인 변형률을 측정하기 위해 효과적으로 적용될 수 있다.³ 따라서 본 연구에서는 마이크로 소재의 면내 인장 변형률의 연속 측정을 마이크로-ESPI 기법을 이용하여 효과적으로 측정하였고 마이크로 인장 응력-변형률이 연속 변형률 측정 알고리즘을 통해 결정되었다. 더 나아가 미소 재료에 대한 면내 인장 변형률의 측정 민감도를 향상시키기 위한 알고리즘과 물체-인가 동적 위상 이

동 기법을 적용한 알고리즘을 제안하고 이에 의해 계산된 마이크로 인장 응력-변형률 곡선들과 비교 검토 하고자 한다.

2. In-plane ESPI 해상도 향상 기법 개발

Bulk 재료에 주로 이용되었던 In-plane ESPI 기법은 레이저 파장 단위로 측정할 수 있는 고해상도의 측정기법으로 각광을 받았으나 미소재료의 변위에 대해서는 상대적으로 측정 해상도에 한계를 지녀 미소재료에 대한 측정 민감도를 증가 시키기 위한 알고리즘이 요구된다. In-plane ESPI 의 변위에 대한 관계식은 Sensitivity vector에 의해 쉽게 결정 될 수 있으며. 다음과 같이 쓸 수 있다.⁴

$$d_s = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (1)$$

식(1)에 나타낸 변위에 직접적인 변형 전후의 1 차 프린지 패턴은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I_{\text{before}} = I_0 [1 + \gamma \cos\phi] \quad (2)$$

$$I_{\text{after}} = I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + \Delta\phi)] \quad (3)$$

여기서, I_0 는 background intensity, γ 는 visibility 를 나타내며, 변위를 나타내는 2 차 상관 간섭 무늬를 얻기 위해서 contrast 면에서 우수한 차분연산을 이용하면 다음과 같다.

$$I_{\text{sub}} = |I_{\text{after}} - I_{\text{before}}| = I_0 \gamma \sin\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (4)$$

위 식(4)에서 나타낸 바와 같이 2 차 상관 간섭 무늬는 변조에 의한 고주파 성분을 포함하고 있다. 이는 스펙트로노이즈가 심하여 위상을 sine 함수에 비례하는 결과를 주게 되며 정확한 위상값을 얻을 수 없으므로 본 연구에서는 위상값을 추정하고, 더 나아가 면내 변형 측정 민감도를 향상 시키기 위한 알고리즘을 제안하고자 한다. 또한 물체-인가 동적 위상 이동 기법을 적용한 알고리즘을 이용하여 보다 더 정밀한 위상을 얻고자 하였다.

2.1 위상 추정 기법

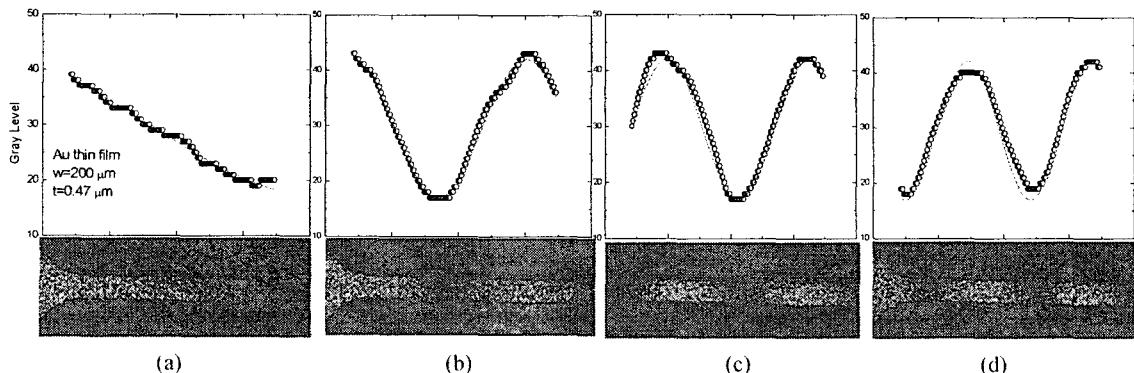


Fig. 2 Variation of intensities of the fringe patterns at the various deformed states.

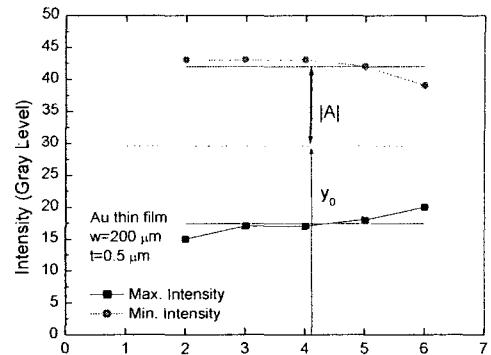


Fig. 1 Maximum and minimum intensities of the fringe patterns acquired at 5 successive deformed states

2.1.1 Gaussian 저주파 필터 기법

변조에 의한 고주파 성분이 포함된 2 차 상관 간섭 무늬를 해석하기 위해서는 고주파 성분을 효과적으로 제거하고 원하는 위상을 추정하기 위한 방법이 필요하다. 본 연구에서는 저주파 필터 방법인 3 Order Gaussian 저주파 필터 기법을 적용하였다. 이 저주파 필터에 의해 식(4)에 나타낸 2 차 상관 프린지 패턴은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\left\langle \sin\left(\theta + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right\rangle \approx \frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (5)$$

2.1.2 Enhancement of Sensitivity

면내 변형 측정에 대한 민감도는 조사 각도의 개별에 의해 개선될 수 있다. 식(1)에서 나타낸 바와 같이 최대 민감도는 $\lambda/2$ 가 된다. 그러나 작은 크기의 물체에 대한 마이크로-변형률 측정은 최대 민감도 보다 더 증가된 측정 민감도가 요구된다. 따라서 간섭 프린지 패턴과 일치하는 변형 측정을 고려해야 할 필요가 있다.

식(5)에 나타낸 바와 같이 프린지의 Intensity 는 시험 색션 전체에 걸쳐 sine 과정으로 변화한다. 만일 진폭이 동일하게 유지된다면 해석될 수 있는 모든 프린지 패턴은 같은 진폭과 위상차를 갖는 사인 함수로 묘사할 수 있다.

또한, 변형 측정의 민감도는 sine 과정을 가지는 Intensity 의 피팅 즉, 프린지 내에서 패턴에 의해 표현된 변형을 피팅함으로써 증가 될 수 있다. 해석 될 수 있는 프린지 패턴 내에서의 프린지 변화는 Fig. 1에 나타냈듯이 같은 진폭과 Offset으로 얻어지며 식(6)에 의해 Fig. 2에 나타낸 붉은 선으로 피팅이 가능하다.

$$I = A \sin(\omega X - \delta) + y_0 \quad (6)$$

따라서, 최종적으로 얻고자 하는 미소 변형률은 위상 ω 에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\omega \lambda}{4\pi f \sin \theta} \quad (7)$$

2.2 물체 인가 동적 위상 이동 기법

정량화된 위상을 얻기 위해 여러 가지 방법이 제안되어 왔으나 현재 ESPI에서는 주로 위상 이동기법을 이용한다. 위상 이동 기법은 위상이 이동된 여러 개의 프린지 패턴을 이용하여 위상 값을 계산하는 방식으로 연속적으로 일어나는 변형의 경우에는 정확한 위상을 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 동적으로 일어나는 변형에 대한 위상을 측정하기 위해 물체의 연속적인 변형 상태를 위상 이동으로 가정하고, N 개의 프레임에 대해 퓌리에 변환을 이용하여 위상을 계산하는 물체-인가 동적 위상 이동 기법을 제안하고자 한다.^{5,6}

N 개로 샘플링된 물체에 대한 인텐시티 값 $I(n)$ 에 대한 이산 퓌리에 변환은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Sigma = \sum_{n=0}^{N-1} I(n) \zeta^{-i}, \quad \zeta = \exp(2\pi i/N), \quad i = \sqrt{-1} \quad (8)$$

따라서 Σ 에 대한 편각 ϕ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = \arg(\Sigma) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\Sigma)}{\text{Re}(\Sigma)} \right) \quad (9)$$

따라서 변형 전후에 대한 $\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin \theta$ 이므로 변형률 ε 은 다음과 같다.

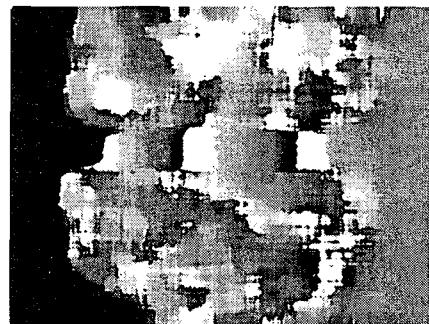
$$\varepsilon = \frac{\lambda \tan \alpha}{4\pi \sin \theta} \quad (10)$$

여기서 α 는 위상각, θ 는 조사각도를 나타내며, Fig. 3은 본 연구에서 제안한 퓌리에 변환과 물체-인가 동적 위상 이동 기법을 적용한 알고리즘에 의해 얻어진 위상도를 나타낸다.

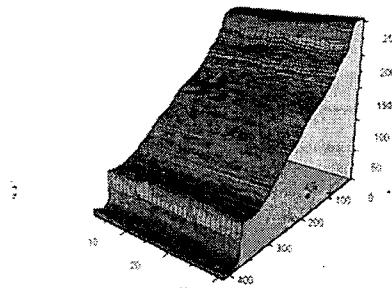
3. In-plane Micro-Tensile Strain 측정

3.1 Micro-ESPI System

본 연구에서 이용된 마이크로 ESPI 시스템은 마이크로 인장 시험하는 동안 면내 인장 변형률을 측정하기 위해 개발되었다. 레이저 소스는 22mW의



(a)



(b)

Fig. 3 Phase map calculated from discrete Fourier transform and unwrapped phase map by the addition of integral multiples of 2π

He-Ne 레이저를 이용하였으며 동일한 광량으로 분리되어 관측 방향에 대칭적으로 인장 시편의 표면에 노광된다. 스페클 패턴은 프레임 그래버에 의해 순차적으로 획득 저장된다.

3.2 Micro-Tensile Testing

Fig. 4는 본 실험에서 이용된 로딩 시스템과 시편의 형태를 나타내고 있다. 이 시스템은 로드셀과 액츄에이터를 위한 두개의 지지블록과 액츄에이터, 로드셀로 구성되어 있으며, 시편은 1파 $0.47\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 TiN과 Au 박막으로서, 실리콘 웨이퍼 위에 증착되었고 $200\mu\text{m}$ 의 폭, 2mm 의 테스트 섹션을 갖도록 electromachining에 의해 제작되었다.⁷

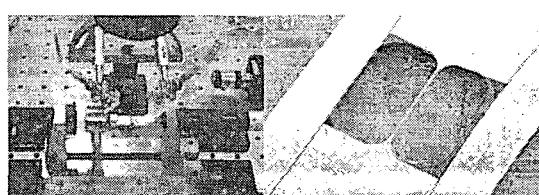
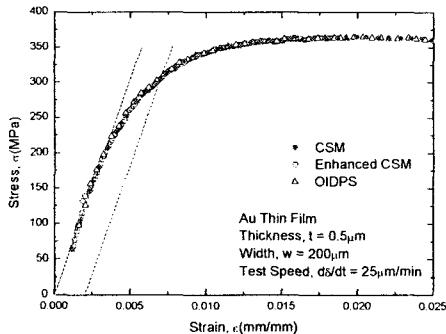


Fig. 4 Photograph of micro-tensile Testing system and typical shape of micro-tensile specimen used



(a) for Au thin Film

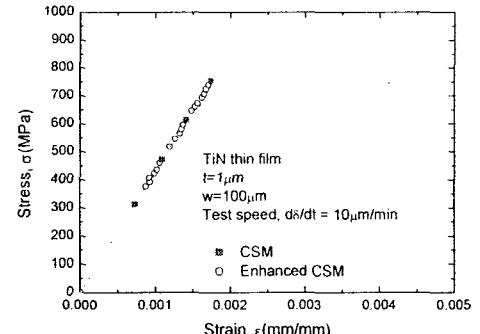


Fig. 5 Typical stress-strain curve

4. 민감도 향상 알고리즘에 의한 변형률 측정

Fig. 2에서 성공적으로 변형된 상태를 나타내는 Intensity 변화를 나타내었다. 이 Intensity 변화로부터 모든 패턴의 Intensity 변화가 sine 과정으로 표현된다 는 것을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 2(a)처럼 명백 하지 못한 프린지 Intensity는 미리 결정된 진폭과 Offset 을 이용하여 sine curve fitting이 가능하였다. 또한 정량적인 변위를 해석하기 위해 동적으로 변 형되는 시편의 한 지점에서 Intensity 변화를 측정하였고 측정된 데이터로부터 λ/N 간격으로 이미지를 추출하여 퓨리에 변환을 이용한 동적 위상 이동 기법을 이용함으로써 위상도를 구할 수 있었다. 제안된 두 가지 방법에 의해 얻어진 각각의 위상은 CSM (Continuous strain Measurement)과 마찬가지로 순차적 으로 연결되어 인장응력-변형률 곡선으로 획득되었다. Fig. 5에 나타낸 인장응력-변형률 곡선은 CSM 과 Advanced CSM, 물체-인가 동적 위상 이동 방법 을 이용하여 TiN 과 Au 박막에 적용한 결과이다. 민감도를 개선하기 위한 알고리즘에 따른 응력 변 형률 데이터 추이는 연속 변형률 측정 알고리즘에 의해 얻어진 응력-변형률 곡선과 상당히 잘 맞았다.

5. 결론

마이크로 ESPI 기법은 TiN 과 Au 박막 소재의 미 소 시험편의 면내 인장 변형률을 측정하기 위해 이 용되었다. 1 과 $0.47\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 TiN 과 Au 박막 시편은 실리콘 웨이퍼 위에 증착되었고 폭 $200\mu\text{m}$, 테스트 섹션 2mm 보다 작게 제작되었고 마이크로 인장 로딩 시스템과 마이크로-ESPI 시스 템은 인장 시험하는 동안 미소시편으로부터 인장 변형률을 측정하기 위해 개발되었다. 또한 이 소재의 마이크로 인장 변형률을 측정하기 위해 연속된 변형률 측정에 대한 알고리즘이 제안되었다. 제 안된 알고리즘에 의해 마이크로 인장 변형률 데이

터가 획득되었고 마이크로-기계적인 물성을 평가하기 위해 요구되는 인장 응력-변형률 곡선이 결정되었다. 또한 면내 인장 변형률의 측정 민감도를 개선하기 위한 알고리즘이 제안되었으며, 물체-인가 동적 위상 이동 기법과 퓨리에 변환을 적용한 알고리즘이 제안되었다. 두 알고리즘에 의해 얻어진 응력-변형률 곡선들은 기존의 CSM 과 잘 일치하였고 민감도가 보다 개선되었음을 보이고 있다. 이것은 본 연구에서 제안된 민감도 개선을 위한 알고리즘이 면내 인장 변형률에 대한 민감도를 향상시킨다는 것을 나타낸다.

후기

나노 소재 개발 사업단(과학기술부 21C 프론티어 사업단)과 한국표준과학연구원의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sharper W.N. Jr., Yuan B., and Edwards R.L., microelectromechanical systems, Vol. 6 No. 3 pp.193, 1997.
2. Espinosa H.D., and Prorok B.C., Fisher M., Proc. of the SEM Annual Conf., pp. 446, 2001.
3. Huh Y.-H., Kim D.I., Kim D.J., Park P., Kee C.D., and Park J.H., Key Eng. Materials, Vol. 270, pp. 744, 2004.
4. Rastogi P. K., "Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques," John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
5. Surrel Y., "Phase stepping; a new self-calibration algorithm," Applied Optics, Vol. 32, No. 19, pp. 3598 - 3600, 1993.
6. Xavier C.d.L, Pierre J., "Deformation measurement with object-induced dynamic phase shifting," Optical Society of America, Vol. 35, No. 25, pp. 5115 - 5121, 1996.
7. Mohamed Gad-el-Hak, *The MEMS Handbook* (CRC Press, 2002).