

# マイクロ ESPI 기법에 의한 면내 변형 측정 민감도 향상

김동일\*, 허용학#, 기창두\*\*

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

Dong Iel Kim\*, Yong-Hak Huh# and Chang Doo Kee\*\*

### ABSTRACT

Enhancement methods of sensitivity to in-plane strain measurement by micro-ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) technique were proposed using TiN and Au thin films. Micro-tensile strain over the micro-tensile specimens, prepared in micro-scale by those films, was measured by micro-tensile loading system and micro-ESPI system developed in this study. The subsequent measurement of in-plane tensile strain in the micro-sized specimens was introduced using the micro-ESPI technique, and the micro-tensile stress-strain curves for these films were determined. To enhance the sensitivity to measurement of in-plane tensile strain, algorithms of the phase estimation by using curve fitting of inter-fringe and the discrete Fourier Transform with object-induced dynamic phase shifting were developed. Using these two algorithms, the micro-tensile strain-stress curves were generated. It is shown that the algorithms for enhancement of the sensitivity suggested in this study make the sensitivity to measurement of the in-plane tensile strain increase.

**Key Words :** Improvement of Sensitivity (민감도 향상), Thin film(박막), Micro-ESPI(マイクロ-ESPI), Object-Induced Dynamic Phase Shifting(물체-인가 동적 위상 이동)

### 1. 서론

최근, MEMS 기술의 급속한 발전과 더불어 마이크로 변형률/변형 측정 기술을 포함한 시험 방법들이 마이크로/나노 소재의 마이크로 특성을 신뢰성 있게 측정하기 위해 연구되었다. 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(Micro-Tensile Test), 빔 굽힘 시험(Beam Bending Test), 나노-인텐테이션 시험(Nano-Indentation Test), 부풀림 시험(Bulge Test) 등의 몇몇 시험 방법이 제안 되었다. 이를 시험으로부터 탄성 계수, 항복강도, 인장 강도와 같은 인장 물성이 결정될 수 있다. 이 물성들을 좀더 효과적이고 신

\* 접수일: 2005년 8월 10일; 게재승인일: 2006년 6월 16일

# 전남대학교 기계공학과

# 교신처자: 한국표준과학연구원 환경안전계측연구센터

E-mail [yhhuh@kriss.re.kr](mailto:yhhuh@kriss.re.kr) Tel. (042) 868-5386

\*\* 전남대학교 기계시스템공학부

뢰할만하게 측정하기 위해서는 변형률/변형 측정 기술이 필요하다. 스트레인 게이지(strain gage), 연신계(extensometer)와 같은 전통적인 변형률 측정 기법들을 유용하게 사용할 수 있었으나, 이 기법들은 마이크로 소재를 시험하기 위한 기법으로는 적당치 않다. 따라서 미소 재료에 대한 변형률/변형을 측정하기 위해 최근 ISDG(Interferometric Strain Displacement Gage), DIC(Digital Image Correlation), laser 간섭법 등과 같은 비 접촉식 측정 방법이 제안되었다.<sup>1,2</sup>

레이저 간섭 기술의 일종인 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)는 비 접촉식이며 전 영역(full-field)으로 측정할 수 있는 계측 방법으로 마이크로 소재의 기계적인 변형률을 효과적으로 측정할 수 있다.<sup>3,4</sup> 따라서 본 연구에서는 마이크로 소재의 면내 인장 변형률의 연속 측정을 위해 면내 마이크로-ESPI 시스템을 개발하였으며 마이크로 인장 응력-변형률을 연속 변형률 측정 알고리즘(Continuous Strain Measurement, CSM)을 이용하여 결정하였다.<sup>4</sup> 또한 미소 재료의 면내 인장 변형률에 대한 측정 민감도를 향상시키기 위해 곡선 피팅(Curve fitting)에 의한 위상 추정 알고리즘(Enhanced CSM)과 물체-인가 동적 위상 이동 기법(Object-induced dynamic phase shifting, OIDPS)과 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)에 의한 위상 추정 알고리즘을 개발하였으며 각각의 알고리즘에 의한 마이크로 인장 응력-변형률 곡선들과 비교 검토 하여 마이크로 소재의 면내 인장 변형률에 대한 측정 민감도가 향상되었음을 보이고자 한다.

## 2. 면내 ESPI(in-plane ESPI) 변형 측정 민감도 향상 알고리즘

체적(Bulk)재료에 주로 이용되었던 면내 ESPI 기법은 레이저 파장 단위로 측정할 수 있는 고해상도의 측정기법으로 각광을 받았으나, 미소재료의 변위 측정에 대해서는 상대적으로 측정 민감도에 한계를 가지고 있기 때문에 미소재료에 대한 측정 민감도를 증가시키기 위한 알고리즘이 요구된다.

Fig. 1은 면내 변위를 측정하기 위한 면내 ESPI 간섭계의 기본 개략도를 나타내고 있으며, 물체광과 참조광의 광로차에 따른 위상 변화에 의해 변위를 결정할 수 있으며, 민감도 벡터(sensitivity vector)에 의해 쉽게 결정 될 수 있다.<sup>5</sup>

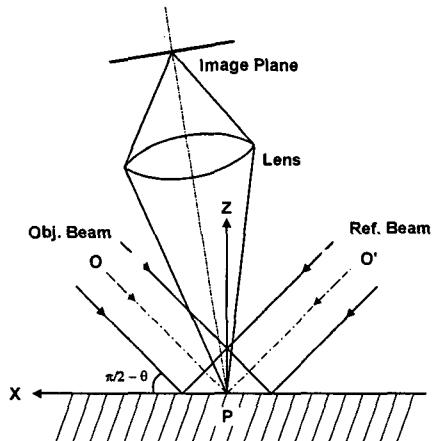


Fig. 1 The basic interferometer for in-plane displacement measurement

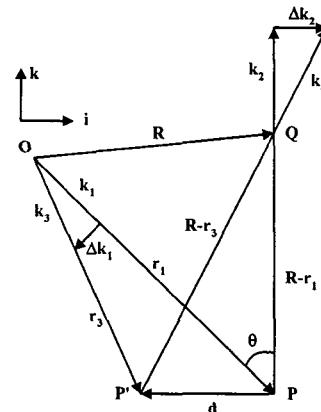


Fig. 2 Position and propagation vectors in holographic and speckle interferometry

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 민감도 벡터는 조사벡터, 변위벡터, 관측벡터의 관계에 의해 결정된다. 만일 P 점에서 P' 점으로 변위가 발생하였다면 물체빔(object beam)은 O 점에서 관측 면까지 광로 변화가 발생하게 된다. 위상과 변위  $d$  와의 관계를 해석하기 위해  $\overline{OQ}$ ,  $\overline{OP}$ 의 벡터를 각각  $\mathbf{R}$ 과  $\mathbf{r}_1$  이라고 하고, 빔의 방향 벡터(propagation vector)를  $\mathbf{k}_1$ ,  $\mathbf{k}_2$ 로 표현한다면 변형 전후의 위상은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_1 = \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \mathbf{k}_2 \cdot (\mathbf{R} - \mathbf{r}_1) + \phi_0 \quad (1)$$

$$\phi_2 = \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r}_3 + \mathbf{k}_4 \cdot (\mathbf{R} - \mathbf{r}_3) + \phi_0 \quad (2)$$

여기서,  $\phi_0$ 는 임의의 위상(arbitrary phase)이며,

방향벡터의 진폭  $|k| = 2\pi/\lambda$  이다.

관측 면에서의 위상 변화는  $\delta = \phi_2 - \phi_1$  의 관계이며,  $\Delta k_1 \perp r_1$ ,  $\Delta k_2 \perp (R - r_2)$  라 할 수 있으므로 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{d} \quad (3)$$

위 관계로 인해 홀로그라피(Holography)와 스페클 간섭법(Speckle Interferometry)의 간섭 줄무늬(fringe)의 정량 해석이 가능해진다. 따라서 면내 면 위에 대한 위상 변화를 얻기 위해 물체빔(object beam)과 참조빔(reference beam)에 대한 각각의 위상 변화를 3 축에 대한 단위벡터에 의해 정리하면 다음과 같다.

$$\delta_o = \frac{2\pi}{\lambda} [\mathbf{k} - (\sin\theta\mathbf{i} - \cos\theta\mathbf{k})] \cdot [d_x\mathbf{i} + d_y\mathbf{j} + d_z\mathbf{k}] \quad (4)$$

$$\delta_r = \frac{2\pi}{\lambda} [\mathbf{k} + (\sin\theta\mathbf{i} + \cos\theta\mathbf{k})] \cdot [d_x\mathbf{i} + d_y\mathbf{j} + d_z\mathbf{k}] \quad (5)$$

두 빔에 의한 위상 변화에 대한 위상차는  $\Delta\phi = \delta_o - \delta_r$  이므로 다음 식(6)과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin\theta \quad (6)$$

이때  $\Delta\phi = 2n\pi$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) 일 때 줄무늬를 형성하므로 최종적으로 구하고자 하는 변위는 다음 식(7)과 같고, 로딩 축에 민감하게 계측된다는 것을 알 수 있다.

$$d_x = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (7)$$

위 식(7)에 나타낸 바와 같이 변위를 측정하기 위한 변형 전후의 1 차 줄무늬 패턴들은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{\text{before}} = I_0 [1 + \gamma \cos\phi] \quad (8)$$

$$I_{\text{after}} = I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + \Delta\phi)] \quad (9)$$

여기서,  $I_0$ 는 주변 광강도(background intensity),  $\gamma$ 는 가시도(visibility)를 나타낸다.

식(7)의 변위를 나타내는 직접적인 2 차 상관

간섭 무늬는 변형 전후에 대한 스페클 패턴의 비교를 통해 얻을 수 있으며 일반적인 방법으로 식(10)과 같이 대비(contrast)면에서 우수한 차분 연산을 이용한다.

$$I_{\text{sub}} = |I_{\text{after}} - I_{\text{before}}| = I_0 \gamma \sin\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (10)$$

위 식(10)에 나타낸 바와 같이 2 차 상관 간섭 무늬는 변조에 의해 고주파 성분을 포함하고 있으므로 스페클 노이즈가 매우 심하여 정확한 위상값은 얻을 수 없으나  $\sin(\Delta\phi/2)$  항에 의해 위상이 sine 함수에 비례하는 결과를 나타낸다. 따라서 변형에 대한 위상을 추정하기 위해서는 적당한 노이즈 제거 기법이 필요하다. 노이즈를 제거하기 위한 기법으로 여러 가지를 들 수 있으나 주로 저주파 필터링 기법(Low-pass filtering)과 위상 이동 기법(phase shifting method)을 이용하여 왔으며, 현재는 정량 해석을 위해서 위상 이동 기법을 주로 이용한다.

ESPI는 주로 체적 재료에 적용되어온 측정 기법으로 레이저의 파장 단위로 측정한다는 장점을 가지고 있다. 그러나 ESPI는 정적인 변형 상태에 대해 측정하는 기법으로 연속적으로 일어나는 변형 즉, 대변형 해석에는 다소 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 동적으로 변형되는 시편의 대변형 해석에 적용시키기 위해 연속 변형률 측정 알고리즘(CSM)을 개발하였다.<sup>3,4</sup> 본 알고리즘은 연속적으로 변화되는 시편의 변형에 대한 상대적인 위상 변화를 측정하고, 그 위상 변화 곡선에 대한 극값에서의 변형률을 참조 위상 값으로 변환함으로서 연속적인 변형률을 계산할 수 있었다. 그러나 이 알고리즘은 고전적인 ESPI 기법에 기반을 두었으므로 미소재료에 대한 계측의 해상도가 상대적으로 낮다. 즉, 식(7)에서 나타낸 바와 같이 최대 민감도는  $\lambda/2$  가 된다.

면내 변형 측정에 대한 ESPI 측정 민감도는 조사 각도의 재배열에 의해 최대 민감도 보다 개선될 수 있다. 그러나 작은 크기의 물체에 대한 마이크로-변형률 측정은 이보다 더 증가된 측정 민감도가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 미소 재료에 대한 변형 계측의 민감도를 증가시키기 위한 알고리즘으로 저주파 필터 기법에 의해 식(10)의 고주파 노이즈가 제거된 간섭 줄무늬 패턴의 곡선

피팅에 의한 위상 추정 기법(Enhanced-CSM)과 변형량을 위상 이동량으로 가정하여 위상 지도(phase map)를 추출하는 물체-인가 동적 위상 이동 기법(Object-induced dynamic phase shifting, OIDPS)을 제안하고자 한다.

## 2.1 곡선 피팅에 의한 위상 추정

식(10)에 나타낸 간섭 줄무늬 패턴은 고주파 성분을 포함한다 하더라도 sine 함수에 비례하여 나타나므로 고주파 성분을 제거함으로써 위상 추정이 가능하다. 본 연구에서는 고주파 성분을 제거하기 위해 Gaussian Low Pass Filtering 을 이용하였으며, 이에 의해 식(10)은 다음 식(11)과 같이 표현될 수 있다.<sup>5,6</sup>

$$\left\langle \sin\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right\rangle \approx \frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (11)$$

식(11)에 나타낸 바와 같이 간섭 줄무늬의 광강도는 시험 부위(test section) 전체에 걸쳐 sine 파형으로 변화한다. 만일 진폭이 동일하게 유지한다면 Fig. 3 과 같이 모든 간섭 줄무늬 패턴은 같은 진폭과 위상차를 갖는 정현파형으로 묘사할 수 있다.

변형의 측정 민감도는 정현파형을 가지는 광강도의 피팅 즉, 해석 가능한 최소 간섭 줄무늬 내에서 간섭 줄무늬의 변화에 의해 표현된 변형을 피팅함으로서 증가 될 수 있다. 해석 가능한 최소 간섭 줄무늬 패턴 내에서의 간섭 줄무늬의 변화가

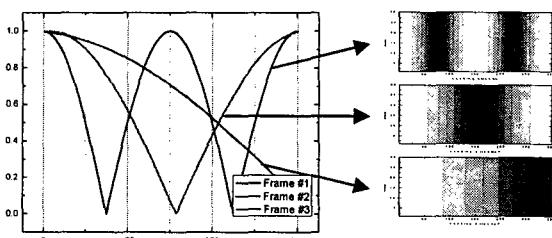


Fig. 3 Profiles and fringe patterns for image frames acquired sequentially

Fig. 3 과 같이 동일한 진폭과 옵셋(Offset)으로 분포되어 있다고 가정하면 일정한 진폭과 옵셋에 대한 관계식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I = A \sin(\omega X - \delta) + y_o \quad (12)$$

여기서,  $X$  는 변곡점간의 거리를 나타내며  $y_o$  는 옵셋을 나타낸다. 따라서 최종적으로 얻고자 하는 미소 변형률을 결정하기 위해서는 각각의 변형된 상태를 나타내는 간섭 줄무늬 패턴의 변화에 대한 위상,  $\omega$ 의 정보가 요구되며 곡선 피팅 위상 추정 알고리즘에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\varepsilon = \frac{\omega\lambda}{4\pi \sin\theta} \quad (13)$$

따라서, 해석 가능한 간섭 줄무늬 패턴 내에서 피팅이 될 수 있는 광강도,  $I(n)$  이 많을수록 측정 민감도는 그 수만큼 향상된다 할 수 있다.

## 2.2 물체 인가 동적 위상 이동 기법에 의한 위상 추정

위상을 추정하기 위한 두 번째 알고리즘으로, 정량화된 위상을 얻기 위해 여러 가지 방법이 제안되어 왔으나 현재 ESPI 같은 레이저 간섭 기술에서는 PZT(Piezotransducer)등을 이용한 시간 위상 이동 기법(temporal phase shifting)을 주로 이용한다. 이러한 시간 위상 이동 기법은 변형 전후의 동일한 정보를 유지한 상태로, 동시에 강제적으로 위상이 이동된 여러 개의 스펙트럼을 이용하여 변형을 가리키는 위상 값을 추정하는 방식으로 주로 정적인 변형 상태에 이용한다. 그러나 정적인 상태에 대한 측정 방식은 연속적으로 일어나는 변형 상태에서는 정확한 위상을 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 동적으로 일어나는 변형에 대한 위상을 측정하기 위해 시간 위상 이동 기법으로서 비교적 이용이 쉬운 물체-인가 동적 위상 이동 기법(object-induced dynamic phase shifting)을 이용하였다.<sup>7, 8</sup> 물체-인가 동적 위상 이동 기법은 물체의 연속적인 변형 상태를 위상 이동량으로 가정하는 방법으로, 본 연구에서는 N-bucket(N=4)방법으로 위상 이동량을 나타내는 N(=4)개의 프레임에 대한 이산 퓨리에 변환을 이용하였다. 물체 인가 동적 위상 이동 기법은 Fig. 4 에서 보여준 바와 같이 시편의 임의의 점에서 변위에 대한 광강도 변화를 이용하여 변형량을 위상 이동량으로 대신할 수 있다. 따라서 인장 변형이 발생되는 동안 시험편의 시험부 임의의 위치에서 광강도의 분포를 측정함으로써 N 개의 위상 이동량이 결정된다.

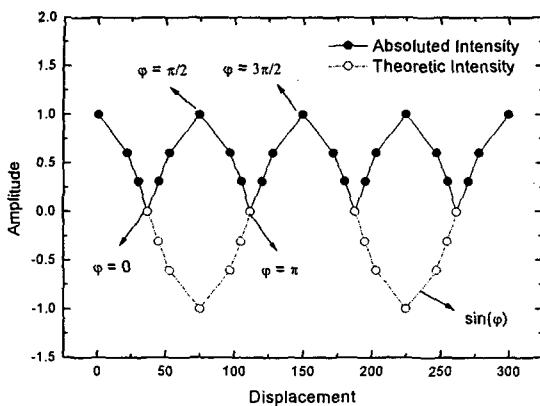


Fig. 4 Theoretic variation of the fringe patterns intensities with progress of the tensile deformation

결정된 위상 이동량인  $\phi_n = 2\pi n/N$  으로 샘플링된 물체에 대한 광강도  $I(n)$  은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I(n) &= I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + \phi_n)] \\ &= I_0 + I_0 \gamma \left\{ \cos \phi \cos \frac{2\pi n}{N} - \sin \phi \sin \frac{2\pi n}{N} \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

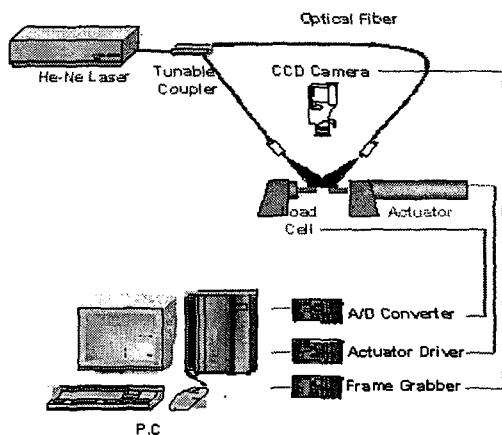
식(14)는 직류성분과 제 1 차 조화성분만을 가진 퓨리에 급수(Fourier Series)이므로 구하고자 하는 위상  $\phi$  는 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>9</sup>

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin \phi_n}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos \phi_n} \right) \quad (15)$$

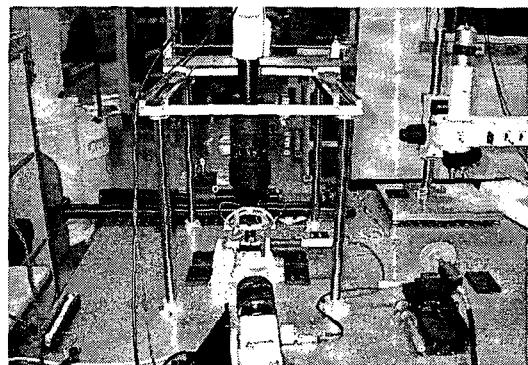
변형 전후에 대한 위상차  $\Delta\phi$  는 식(6)과 같으므로 변형률  $\varepsilon$  은 식(16)으로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\lambda \tan \alpha}{4\pi \sin \theta} \quad (16)$$

여기서  $\alpha$  는 위상 지도(phase map)의 위상각,  $\theta$  는 레이저의 조사 각도를 나타낸다. 본 방법으로 얻어지는 측정 민감도도 2.1 절에서 설명한 곡선 피팅에 의한 위상 추정 방법과 같이 샘플링되는 스펙트럼 패턴의 수에 의해 좌우된다. 샘플링 되는 간섭



(a) Schematic drawing



(b) Photograph

Fig. 5 Schematic drawing and photograph of micro ESPI system developed in this study

줄무늬 패턴의 수는 인장 시험 속도와 하중 장치의 분해능과 관계가 있을 것으로 보며, 본 방법은  $\lambda \tan \alpha / 4\pi \sin \theta M$  만큼의 해상도를 가지게 된다. 여기서  $M$  은 한 파형 내에서 얻어지는 간섭 줄무늬 패턴의 수를 나타낸다.

### 3. 면내 마이크로 인장 변형률 측정

#### 3.1 마이크로-ESPI 시스템

Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 이용한 마이크로 ESPI 시스템은 마이크로 인장 시험하는 동안 면내 마이크로 인장 변형률을 측정하기 위해 개발되었다.<sup>3,4</sup> 레이저 소스는 22 mW 의 He-Ne 레이저를 이용하였으며 레이저 전달은 광섬유 (optical fiber)를 이용하였다. 또한 광 분리기(Fiber

Pro)에 의해 동일한 광량으로 분리되어 관측 방향에 대칭적으로 미소 인장 시편의 표면에 노광되도록 하였으며, 마이크로 변형에 따른 스펙터 패턴은 영상 획득기(Frame grabber, Matrox MC/4)에 의해 변위 데이터와 함께 순차적으로 획득 저장되어 실시간적으로 변형에 대한 2 차 상관 간섭 줄무늬 패턴이 관측되도록 하였다.

### 3.2 마이크로 인장 시험

Fig. 6은 본 연구에서 이용된 하중 시스템과 시험편의 형태를 나타내고 있다. 이 시스템은 하중 센서와 하중 구동체, 그리고 이들을 지지하는 지지체(supporter)로 구성되어 있으며, 시편은 1  $\mu\text{m}$  의 두께와 100  $\mu\text{m}$  너비의 TiN 박막과 0.5  $\mu\text{m}$ 의 두께와 200  $\mu\text{m}$  너비의 Au 박막으로서, 실리콘 웨이퍼 위에 증착되었고 2 mm의 시험 부위를 갖도록 electromachining에 의해 제작되었다.<sup>10</sup> 제작된 미소 시편은 다루기 쉽도록 가이드 부분이 추가로 설계되었으며 미소 시편은 CCD 카메라와 마이크로 스테이지(micro stage)에 의해 하중 축에 일치하도록

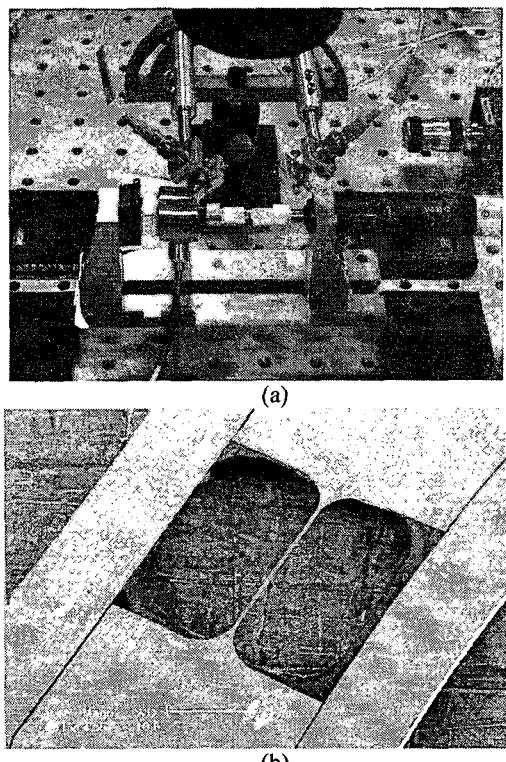


Fig. 6 Photograph of (a)micro-tensile Testing system and (b)typical shape of micro-tensile specimen used

정렬이 된 이후 UV 접착제에 의해 부착되었다. 부착된 미소 시편은 최종적으로 다이아몬드 커터를 이용하여 가이드부분이 절단되도록 하였다. 이용된 로드셀(Load cell)은 500 mN의 하중 용량을 가지며 마이크로 선형 모터(Micro linear step motor)로 구성된 구동체의 해상도는 4.5 nm이다. 구동체는 컴퓨터에 의해 PID 제어로 하중 속도를 가변할 수 있도록 제작하였으며 하중센서의 신호는 DAQ 보드(DAQPad 6020E, National Instruments)에 의해 획득되도록 하였으며 마이크로 ESPI 시스템과 함께 동시에 연동되도록 제작하였다.

### 4. 결과 및 고찰

마이크로 ESPI에 의한 변형률 측정 민감도를 향상시키기 위한 기법으로 본 연구에서는 간섭 줄무늬 패턴의 꼭선 피팅에 의한 위상 추정 기법과 변형량으로부터 위상 지도를 추정하는 물체-인가동적 위상 이동 기법을 제안하고 있다. 이들 기법에서는 간섭 줄무늬에 의한 변형률 측정에 대한 최대 측정 한계와 마이크로 시험편의 동적 변화에 대한 광 이동량은 중요한 정보이다.

Fig. 7은 연속적으로 재료의 변형이 발생되는 동안 시험부 임의의 위치에서 광 세기의 변화를 나타낸다. Fig. 7에서 보여준 연속적인 프레임에서의 광 위상 변화는 레이저의 안정화 등의 문제로 인해 시간에 따라 진폭과 옵셋이 변화될 수 있으나, 미소 변위에서 해석 가능한 줄무늬 패턴 내에서의 진폭과 옵셋의 변화는 매우 작다 할 수 있다.

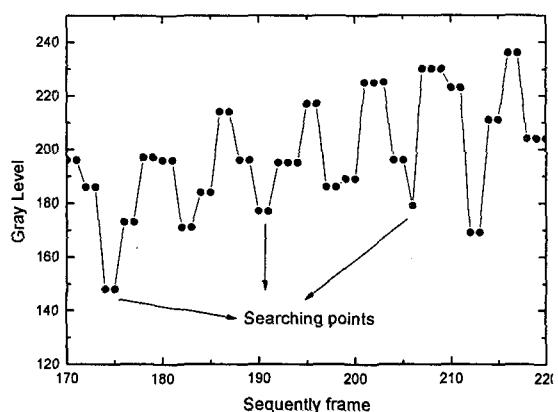


Fig. 7 Experimental variation of intensity at certain point of fringe patterns with progress of the tensile deformation

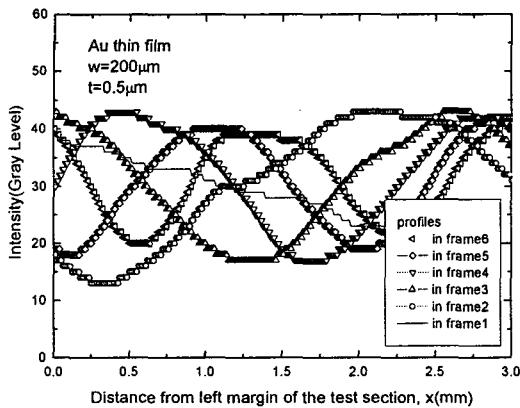


Fig. 8 Variation of the intensities of the fringe patterns acquired at six successive deformed states

Fig. 8 은 이러한 미소 변위가 발생했을 때의 시험부위에서의 광 변화에 따른 로딩축에 대한 프로파일(profile)들을 나타낸다. 본 실험의 조건하에서 얻을 수 있는 하나의 기준에 대하여 측정 가능한 간섭 줄무늬 패턴은 5 ~ 6 개로 측정이 되었으며, 이러한 연속적인 미소변위에 대한 패턴의 프로파일은 Fig. 8에서 보여준 바와 같이 정현파(sine)형태로 나타낼 수 있다. Fig. 9는 이들 각각의 정현파에 대한 진폭과 옵셋을 정량적으로 정리하여 나타낸 결과이다. Fig. 9에서 보여준 바와 같이, 연속된 변형상태에 대한 간섭 줄무늬 패턴의 광 세기의 진폭은 거의 같은 크기를 가지고 있다. 간섭 줄무늬 패턴 광의 옵셋도 같은 경향을 가지고 있음을 Fig. 9는

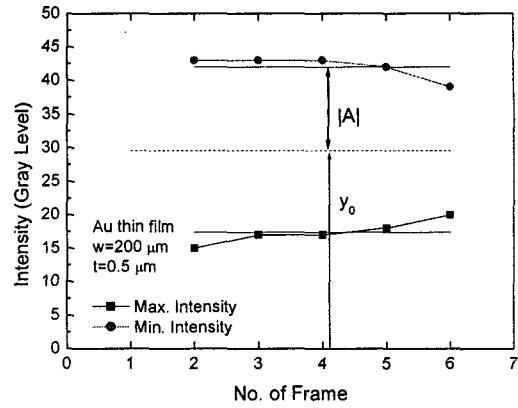


Fig. 9 Maximum and minimum intensities of the fringe patterns acquired at five successive deformed states

보여주고 있다. 이와 같이 거의 같은 크기와 옵셋을 가지는 연속된 변형에 대한 간섭무늬 광의 특성으로부터 간섭무늬의 임의의 변형상태에 대한 위상 추정은 식(13)을 통하여 가능하게 하고 있다. Fig. 10은 곡선 피팅 알고리즘에 의해 추정된 위상 분포를 나타내고 있다. 굵은 점선은 최소 측정 가능한 줄무늬 패턴에서의 줄무늬 패턴들의 프로파일을 나타내며 실선은 곡선 피팅 알고리즘에 의해 추정된 위상 분포를 나타낸다. Fig. 10(a)처럼 명백하지 못한 간섭 줄무늬 패턴의 광 강도도 미리 결정된 진폭과 옵셋을 이용하여 곡선 피팅이 가능하였다. 따라서 모든 간섭 줄무늬 패턴의 광 강도

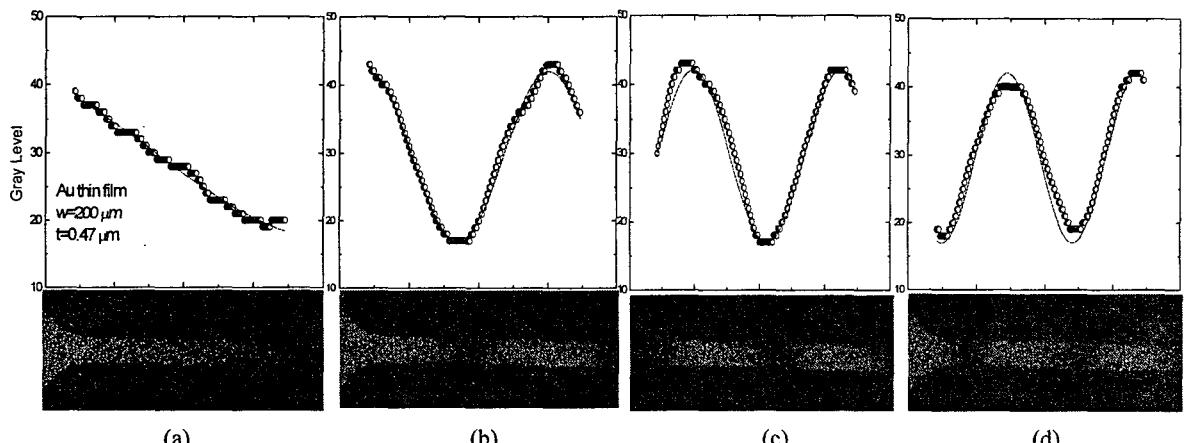


Fig. 10 Variation of the light intensities of fringe patterns corresponding to the various deformed states and fitting by the phase estimation algorithms the phase estimation

변화는 곡선 피팅으로 위상을 결정 할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 이용한 마이크로 ESPI 시스템으로 해석 가능한 간접 줄무늬 패턴 내에서의 스펙클 패턴은 앞에서 설명한 바와 같이 5~6 개 정도로 획득 되었다. 즉, E-CSM (Enhanced Continuous Strain Measurement)이 기존 알고리즘인 CSM (Continuous Strain Measurement)에 비해 5~6 배 정도의 측정 민감도를 증가시킬 수 있었다. 이는 미소 시험편에 대한 미소 변위량과 하중 속도등과 관계가 있다. 즉, 이것은 측정되는 스펙클 패턴의 증가에 따라 해상도가 증가될 수 있음을 나타낸다. 그리고 앞에서 설명한 바와 같이 물체-인가 동적 위상 이동 기법에서 요구되는 물체 인가된 광 위상 이동량 또한 Fig. 7에서 추출이 가능하였다. Fig. 7에 나타낸 광 강도 분포는 CCD 카메라와 영상 획득기의 양자화에 의해 정류된 신호이다. 따라서 이를 고려하여 위상 이동량을 결정하였다. 본 연구에서는  $N = 4$  인 4-bucket 으로 위상 이동량 ( $\varphi = \pi/2$ )를 결정하였으며 이 위상 이동량에 해당되는 스펙클 패턴을 상대적인 변형 전후에 대해서 각각 4 개의 프레임을 추출하였다. 여기서 상대적인 변형은 최소 줄무늬 생성 간격을 고려하여 약  $\Delta\phi \approx 2\pi$  간격으로 결정하였다. 위상 이동량  $\varphi = \pi/2$  간격으로 추출된 스펙클 패턴은 식(15)에 나타낸 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)에 의해 미소 시험편의 상대적인 변형을 나타내는 위상 지도(phase map)로 획득되었으며 이를 Fig. 11에 나타내었다. 이는 위상지도의 경사각에 의해 미소 시험편의 상대적인 변형량을 얻을 수 있으므로 샘플링되는 스펙클 패턴의 수 만큼 민감도를 향상 시킨다는 것을 알 수 있다.

Table 1 은 본 연구에서 제안한 두 알고리즘을 이용한 TiN 과 Au 에 대한 측정 민감도를 나타낸다. TiN 과 Au 의 시험부는 2 mm이며 인장 시험 속도는  $25\mu\text{m}/\text{min}$ 의 변위 제어로 인장 되었다.

Table 1 Micro-tensile strain measurement resolution for the algorithms suggested in this study

Algorithms	Strain Resolution
CSM	5.02692E-4
E-CSM	7.83529E-5
OIDPS	3.37572E-4

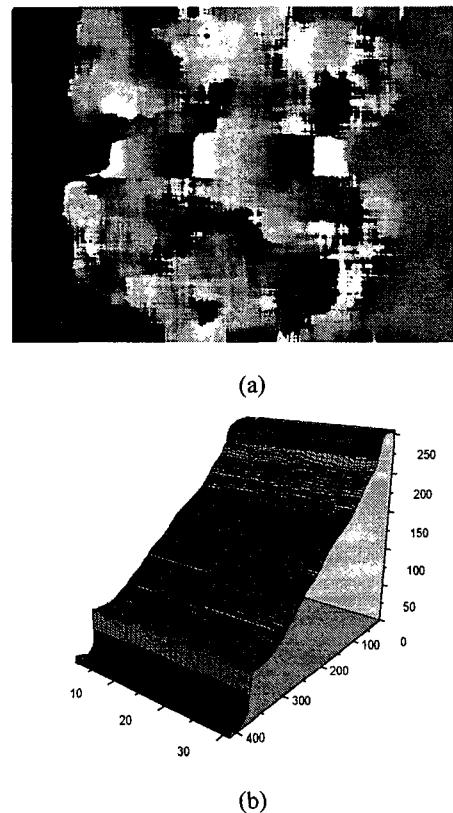


Fig. 11 Phase map calculated from discrete Fourier transform and unwrapped phase map by the addition of integral multiples of  $2\pi$

즉, 샘플링되는 스펙클 패턴의 수에 의존하는 두 알고리즘은 추후에 시험 속도와 시편의 크기 변화에 대한 연구에 의해 보다 증가 될 수 있을 것으로 기대된다. 제안된 두 가지 방법에 의해 얻어진 각각의 위상은 CSM (Continuous strain Measurement)과 마찬가지로 순차적으로 연결되어 인장 응력-변형률 곡선으로 획득되었다. Fig. 12에 나타낸 인장 응력-변형률 곡선은 CSM 과 Advanced CSM, 물체-인가 동적 위상 이동 방법을 이용하여 TiN 과 Au 박막에 적용한 결과이다. TiN은 강성 소재이고 박막이기 때문에 탄성 영역만이 측정되었다. 또한 스펙클 패턴의 광 강도 분포가 선명하지 못해 물체-인가 동적 위상 이동 기법에 의한 위상지도는 결정되지 못했으나 Au 는 TiN에 비해 상당히 연성이 있는 소재이므로 탄-소성 영

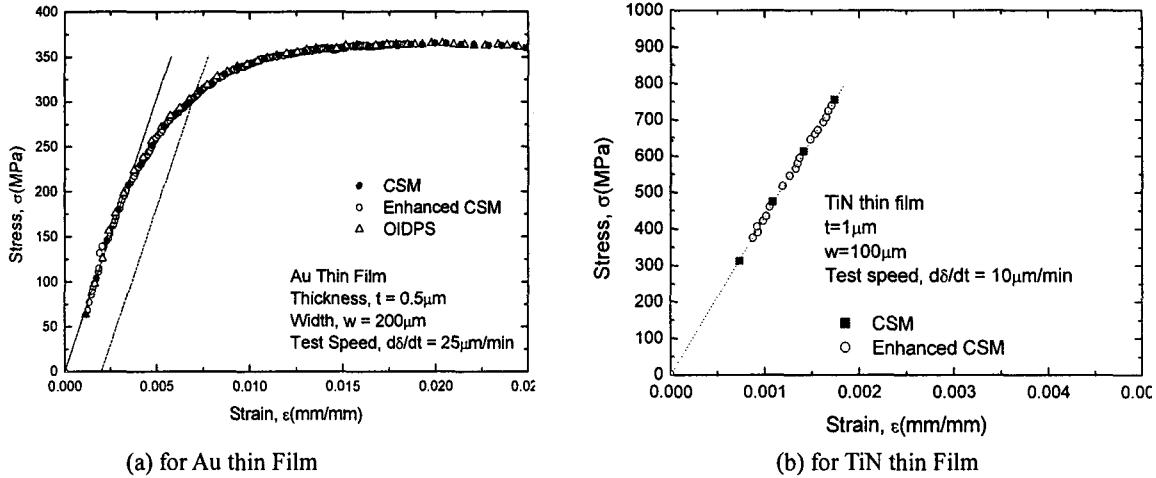


Fig. 12 Comparison of the micro-tensile stress-strain curves generated by continuous strain measurement (CSM) and phase estimation algorithms

역이 모두 결정되었고 영계수(Young's modulus) 뿐만 아니라 항복강도(yielding strength)와 인장강도(tensile strength)까지 결정 할 수 있었다.

Fig. 12에서 보여준 바와 같이 민감도를 개선하기 위한 알고리즘에 따른 응력-변형률 데이터 추이는 연속 변형률 측정 알고리즘에 의해 얻어진 응력-변형률 곡선과 상당히 잘 일치하고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 TiN과 Au 박막을 이용하여 마이크로 ESPI 기법에 의한 면내 인장 변형률의 측정 민감도를 향상시키기 위한 기법을 제안하였다. 1  $\mu\text{m}$ 의 두께와 100  $\mu\text{m}$  너비의 TiN 박막과 0.5  $\mu\text{m}$ 의 두께와 200  $\mu\text{m}$  너비의 Au 박막의 마이크로 인장 시험편에 대하여 마이크로 인장 변형이 본 연구에서 개발한 마이크로 하중 시스템과 ESPI 시스템을 이용하여 측정되었다. 마이크로 인장 시험편에서의 인장 변형 측정을 위하여 ESPI 측정에 의한 마이크로 연속 변형률 측정 알고리즘을 개발하였고 이로부터 두 박막 시험편의 인장-변형률 곡선을 결정하였다. 이러한 연속 변형률 측정 민감도 향상을 위하여 곡선 피팅에 의한 위상 추정 알고리즘과 물체-인가 동적 위상 이동 기법과 이산 퓨리에 변환을 적용한 알고리즘이 제안되었다. 두 알고리

즘에 의해 얻어진 응력-변형률 곡선들은 기존의 CSM과 잘 일치하였고 변형률 측정 민감도가 향상되었다.

## 후기

본 연구는 전남대학교 BK21 사업단과 나노 소재개발 사업단(과학기술부 21C 프론티어 사업단), 한국표준과학연구원의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Sharper, W. N. Jr., Yuan, B. and Edwards, R. L., "A New Technique for Measuring the Mechanical Properties of Thin Films," J. microelectromechn. Syst., Vol. 6, No. 3, pp. 193-199, 1997.
2. 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., pp. 446-449, 2001.
3. Huh, Y. H., Kim, D. I., Kim, D. J., Park, P., Kee, C. D. and Park, J. H., "Application of Micro-ESPI Technique for Measurement of Micro-Tensile Properties," Key Eng. Materials, Vol. 270, pp. 744-

- 749, 2004.
4. Kim, D. I., Huh, Y. H. and Kee, C. D., "Measurement of Tensile Properties of Copper Foil using Micro-ESPI Technique," J. of KSPE, Vol. 21, No. 8, pp. 89-96, 2004.
  5. Rastogi, P. K., "Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques," John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
  6. Madjarova, V., Satoru, T., Rini, W. and Hirofumi, K., "Dynamic ESPI with Subtraction Addition Method for Obtaining the Phase," Optcom, Vol. 212, pp. 35-43, 2002.
  7. Xavier, C. D. L. and Pierre, J., "Deformation Measurement with Object-Induced Dynamic Phase Shifting," Optical Society of America, Vol. 35, No. 25, pp. 5115-5121, 1996.
  8. Xavier, C. D. L. and Pierre, J., "Interferometric Deformation Measurement Using Object Induced Dynamic Phase-Shifting," SPIE, Vol. 2782, pp. 169-179, 1996.
  9. Surrel, Y., "Phase Stepping; A New Self-Calibration Algorithm," Applied Optics, Vol. 32, No. 19, pp. 3598-3600, 1993.
  10. Mohamed, G. E. H., "The MEMS Handbook," CRC Press, 2002.