

ESPI 기법을 이용한 미소 인장 특성 측정

허용학*, 김동일**, 윤경진*, 김경석***, 오충석****

Measurement of Micro-Tensile Properties using ESPI Technique

Yong-Hak Huh*, Dong-Iel Kim**, Kyung-Jin Yoon*, Kounng-Suk Kim***, Chung-Seog Oh****

ABSTRACT

An electronic speckle pattern interferometry (ESPI) system for measuring tensile properties under micro-tensile testing has been developed. The system consists of an optical system and an image processing system. In the optical system, optical components for measurement of in-plane deformation are arranged on the path of He-Ne laser. In the image processing system, the window-based program for acquiring speckle pattern interferometric image was developed and deformation in a small specimen is continuously evaluated during the test. Using this system, tensile strain of copper foil was measured during tensile testing. Tensile specimen had the thickness and width of 22 and 500 μm , respectively. Tensile properties, including the elastic modulus, yielding strength and tensile strength, of the copper were evaluated and also plastic exponent and coefficient in the Ramberg-Osgood relationship were evaluated from the stress-strain curve.

Key Words : Thin film (박막), Copper(구리), Strain measurement(변형률 측정), ESPI(전자스펙클패턴 간섭법), Small specimen(미소시편), Tensile test(인장시험)

기호설명

ε = strain (mm/mm)
 λ = wavelength of laser
 σ = stress (MPa)
(subscripts ys and TS mean yield strength and tensile strength, respectively)
 θ = inclined angle to reflecting plane
 E = elastic modulus (GPa)

1. 서론

전자스펙클 패턴 간섭법(ESPI)은 시간·공간적으로 간섭성이 우수한 레이저를 이용하여 비 접촉식으로 물체의 변형 상태를 측정하는 방법으로 변형, 진동, 결함 등의 다양한 측정 분야에 활용되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이는 물체 표면에 레이저로 조사하여 반사되는 여러 파장에 의하여 중첩된 스펙클 정보로부터 측정 대상면에서의 변형을 측정하는 방법으로 측정 해상도와 정밀도에서 우수하다고 알려져 있다.

* 한국표준과학연구원
** (주) 엔아이피
*** 조선대학교 기계공학부
**** 금오공과대학교

이러한 ESPI기법은 산업적인 응용성이 비교적 높아 교량과 같은 대형 시설 구조물에서부터 열적 변형 혹은 진동을 동반하는 소형 전자 기기에 이르기까지 폭 넓은 구조물에서의 변형 특성을 측정하는 연구들에 활용되고 있다.

반도체 산업이 발전함에 따라 박막 재료를 이용한 전자 기계 구조물의 개발 및 응용이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 구조물의 개발에 사용되는 박막 소재의 물성은 신뢰성 확보가 필요한 구조물의 설계와 제작에 있어서 매우 중요한 정보가 된다. 그러나 이러한 재료는 매우 미소한 크기로 사용되고 있어 기존의 상대적으로 큰(bulk) 재료에 적용되는 신뢰성 혹은 역학적 특성의 평가 기법을 사용하는 것은 매우 제한적이다. 또한 이러한 박막 재료는 기존의 큰 재료의 제작 공정과 다르게 제작되고 있어 이에 따른 물성의 변화도 예상되고 있어 기존의 재료의 물성을 사용하는 것도 매우 제한적이다. 박막은 수 혹은 수십 마이크로미터의 얇은 두께를 가지고 있어 박막의 기계적 성질을 측정하기 위한 시험에는 시험편의 준비, 취급 그리고 부하 등에 특별한 기술과 고도화된 기법이 필요하다. 이러한 박막의 기계적 특성을 평가하기 위하여 부풀림 시험(bulge test)⁽⁵⁾, 경도시험⁽⁶⁾, 단축 인장 시험^(4,7-10)과 같은 많은 기법들이 제안되어 있다. 그러나 이들 대부분 시험에서는 부하에 따른 변형을 직접 측정하지 못하고 있어 정확한 기계적 특성의 평가를 위해서는 직접적인 변형의 측정이 요구된다. 박막과 같은 미소 재료에서 미소 변형을 측정하기 위해서는 기존에 사용되는 접촉식에 의한 변형 측정 방법을 사용하는 것은 시험편의 크기와 재료의 특성상 쉽지 않다. 따라서 이러한 박막 재료에서의 변형을 측정하기 위해서는 시험편의 기하학적 제한성으로 비접촉식에 의한 측정 방법이 요구된다.

비 접촉식 측정방법인 ESPI 기법을 이용하여 미소 부위에서의 변형을 측정하는 연구가 진행되고 있으나, ESPI측정 기술을 연속적 변형의 측정과 미소 시험편에서의 변형 측정에 응용한 사례는 많지 않다⁽⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 미소한 재료에서 면내 인장 변형을 측정하기 위하여 ESPI법을 이용하였으며, 인장시험동안 연속적으로 얻어지는 변형을 측정하기 위한 ESPI 시스템을 개발하였다. 이 시스템을 이용하여 미소 시험편의 인장-변형을 곡선을 얻을 수 있으며, 이로부터 탄성 계수를 비롯한 다양

한 인장 특성을 얻을 수 있다.

2. ESPI에 의한 변형 측정

박막재료로부터 만들어지는 미소 시험편에서 탄성 변형은 매우 작아 이를 측정하기 위해서는 변형 측정 민감도가 매우 우수하며, 비 접촉식의 기법이 필요하다. 스페클 간섭(speckle interferometry)은 평면 내 변형을 측정할 수 있는 잘 개발된 광학적 측정 기법이다.

스페클 패턴은 레이저를 일정한 거칠기를 가지고 있는 조사면에 조사시켰을 때 관측되는 형태이다. 이 스페클의 크기는 국소적인 영역에서 밝기의 최대치와 최소치 사이의 거리를 통계적으로 평균한 값으로 다음과 같이 나타낸다.

$$S_{Subj} \approx 1.22(1+M)\lambda \frac{F}{M} \quad (1)$$

여기서 M은 렌즈의 확대 계수, F는 렌즈계의 조리개비(F-Number)이다. 스페클 패턴의 간섭은 물체광과 참조광의 간섭에 의하여 발생하며, 이들 두 광은 시간의 함수로 표시할 수 있다. 참조광을 E_R , 물체광을 E_O 라 하면, 각각의 광에 있어서 파장 λ 와 위상 δ , 위상속도 C와 시간 t사이의 파동 방정식은 다음과 같다.

$$E_{R,O} = U_{R,O} \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\delta_{R,O} - Ct) \quad (2)$$

여기서 $U_{R,O}$ 은 $E_{R,O}$ 의 진폭을 나타내며, 참조광과 물체광의 파동은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_R = U_R \cos(\phi_R - \omega t) \quad (3)$$

$$E_O = U_O \cos(\phi_O - \omega t) \quad (4)$$

이 두 파를 선형적으로 중첩시킴으로서 얻어지는 합성광 E는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = E_R + E_O = M \cos \omega t + N \sin \omega t \quad (5)$$

M과 N은 시간에 대해 일정하므로 $\tan \phi$ 는

$$\tan \phi = \frac{N}{M} = \frac{U_R \sin \phi_R + U_O \sin \phi_O}{U_R \cos \phi_R + U_O \cos \phi_O} \quad (6)$$

과 같다. 따라서, 합성광 E 는

$$E = \sqrt{M^2 + N^2} \cos(\phi - \omega t) \quad (7)$$

과 같으며, $\sqrt{M^2 + N^2}$ 은 중첩된 두 광의 진폭을 나타낸다. 식(7)로부터 합성광의 세기(Intensity) I 는 다음과 같다.

$$I = |\sqrt{M^2 + N^2}|^2 = U_R^2 + U_O^2 + 2U_R U_O \cos \psi \quad (8)$$

물체의 변형이 발생함에 따라 물체광에 대한 위상은 변화되며, 이는 스펙클 패턴에 반영된다. 물체의 변형과 관련되는 간섭 무늬는 변형 전후의 스펙클 패턴의 변화에 의해 구해질 수 있다. 물체의 변형($\Delta\phi_S$)에 의해 위상이 바뀐 물체광과 기준광에 의한 간섭 결과로서 기록되는 정보 I' 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I' = U_R^2 + U_O^2 + 2U_R U_O \cos(\psi + \Delta\phi_S) \quad (9)$$

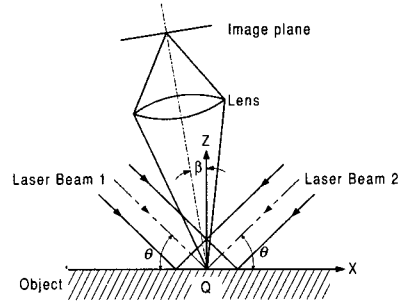
카메라(CCD 카메라)의 수광소자에 입력되는 신호는 빛의 밝기에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = (V - V') \propto (I - I') = 2\beta \sin \frac{\Delta\phi_S}{2} \sin \left(\psi + \frac{\Delta\phi_S}{2} \right) \quad (10)$$

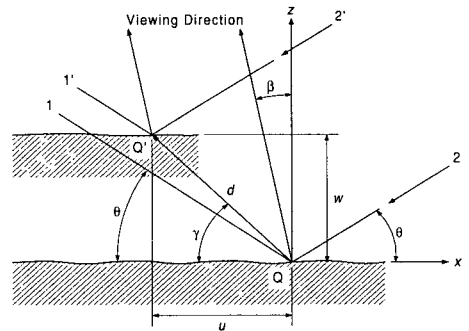
음의 신호를 정류시키기 위해 식(10)에 절댓값을 취하면,

$$B = 2K \left| \beta \sin \frac{\Delta\phi_S}{2} \sin \left(\psi + \frac{\Delta\phi_S}{2} \right) \right| \quad (11)$$

여기서 $\Delta\phi_S = (2n+1)\pi$ 와 $\Delta\phi_S = 2n\pi$ 는 각각 최



(a) The basic interference



(b) changes of optical path length

Fig. 1 Interferometric system for measurement of in-plane deformation.

대 밝기와 어두움을 나타내고, K 는 모니터 상수, $\beta = 2U_R U_O$ 를 나타낸다.

Fig. 1(a)는 스펙클 패턴 간섭계를 이용하여 면 내 변위를 측정하는 기본 개념을 나타내고, Fig. 1(b)는 변위를 측정하기 위한 두 간섭광의 광로차를 나타낸다.

Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 광양이 같은 레이저광이 조사면에 대해 같은 각도 θ 로 두 방향에서 조사되면, 레이저광이 조사된 측정면의 위상 정보들은 카메라(CCD Camera)의 렌즈를 통하여 화상면(Image plane)에 결상된다. 이때 두 방향에서 조사된 광들에 의하여 측정면은 조사면과의 교선방향, 즉 X축 방향으로만 측정감도를 갖게된다. 조사 방향에서의 레이저광과 관측방향이 이루는 광로 길이 변화량 L_1 과 L_2 는

$$L_1 = d \cos(\gamma - \theta) + d \cos(\pi/2 - \gamma - \beta) = u \cos \theta + u \sin \beta + w \sin \theta + w \cos \beta \quad (12)$$

$$L_2 = d \cos(\pi - \gamma - \theta) + d \cos(\pi/2 - \gamma - \beta) = -u \cos \theta + u \sin \beta + w \sin \theta + w \cos \beta \quad (13)$$

두 방향에서 조사된 레이저 광 중 한쪽은 다른 한쪽의 참조광이므로 변형 전후의 광로길이의 변화 Δ 는

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2 u \cos \theta \quad (14)$$

과 같다. 여기서 Δ 는 면의 변형 성분 w 와 관측방향 β 와는 무관하다는 것을 알 수 있다. 광로길이 변화 Δ 가 $n\lambda$ ($n=1, 2, 3 \dots$)이 될 때 간섭 줄무늬를 형성하므로 변위 u 는 식(15)로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{n\lambda}{2 \cos \theta} \quad (15)$$

여기서 n 은 줄무늬 차수이다.

변형률 ϵ 은 u/L 과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\lambda}{2 \cos \theta D_p} \quad (16)$$

여기서 D_p 는 두 줄무늬간의 간격을 나타낸다.

3. 실험 방법

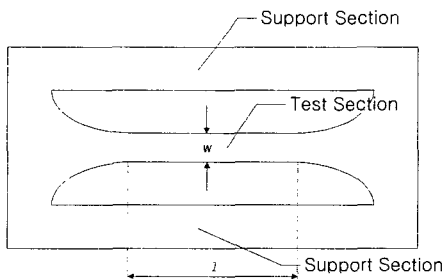


Fig. 2 Small specimen for tensile test

3.1 시험재료 및 시험편

미소 시험편에서 미소 인장 변형 특성을 측정하기 위하여 박막의 동(Copper foil)을 사용하였다. 재료는 22 μ m의 두께를 가지고 있다. 박막의 시험편을 가공하기 위하여 Fig. 2와 같은 시험편 형상을 가공한 후 이 형상에 따라 기계날로 절단하여 가공하였다. 시험편에는 시험부와 지지부로 구성되어 있다. 시험부의 평행부는 길이 3mm, 폭 0.5mm이며, 지지부는 시험부의 작은 강성으로 시험편의 장착시에 소성변형의 발생을 막기 위하여 포함되었다. 이 지지부는 시험부의 양쪽부에 1mm의 폭을 가지도록 가공되었고, 이는 시험편이 장착된후 시험 직전에 절단하도록 하였다.

3.2 시험 방법

인장 시험은 미소하중 재료시험기(Tytron, MTS)를 이용하여 수행하였으며, 시험 최대 하중 범위는 25N, 그리고 변위의 최대 범위는 2mm이고 0.1 μ m의 해상도를 가지고 있다. 인장 시험은 변위 제어로 시험하였으며, 10 μ m/min의 속도로 수행되었다.

Fig. 2와 같이 가공된 미소 시험편의 표면에서 반사도와 거칠기를 고르게 함으로서 레이저에 의한 간섭 무늬가 잘 일어나게 하기 위하여 무광택 백색 도료 처리를 하였다. 도료 처리된 시험편은 본 시험편을 위하여 특수 제작된 시험 그립에 시안화 아크릴레이트 접착제를 이용하여 고정하였다. 도료 처리된 시험편은 인장 시험기에 의하여 인장되어 지고, 이 동안 나타나는 변형은 본 연구에서 개발한 ESPI 시스템을 이용하여 측정되어진다. Fig. 3은



Fig. 3 Tensile testing with ESPI system

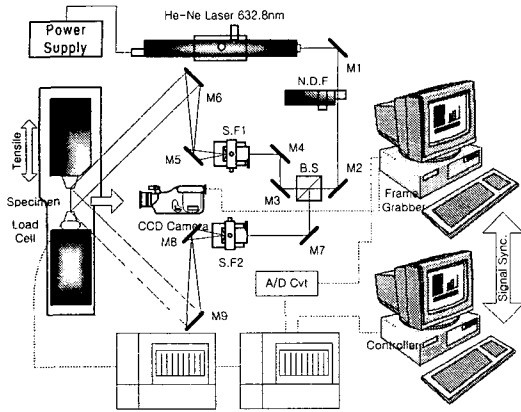


Fig. 4 A schematic diagram for measurement of in-plane deformation using ESPI system

인장 시험기와 ESPI 변형 측정 장치로 구성된 본 시험 장치를 보여준다. 화상 처리 시스템에서 측정되어지는 화상에서 얻어지는 변형 정보와 하중 정보의 동기화를 하기 위하여 시험기에서 얻어지는 하중과 변위 신호는 A/D 변환기(Converter)를 통해 컴퓨터에 입력되도록 하였다.

4. ESPI 시스템의 개발

4.1 광학계 구성

본 연구에서는 인장 변형을 측정하기 위기 위하여 면내(in-plane)로 광학계를 구성하였으며, 그 개략적인 구성 배열을 Fig. 4에서 보이고 있다. 본 광학계에서 사용된 광원으로는 22mW He-Ne Laser를 이용하였다. 출력된 레이저 빔은 ND 필터(Neutral Density Filter)를 거쳐 빔의 세기가 조절되고 5:5 광분리기(beam splitter)에 의해 물체광과 참조광으로 분리된다. 분리된 두 빔은 각각의 경로상에 있는 거울(mirror)들을 지나고, 공간 필터(Spatial Filter)에 의해 노이즈가 제거된 구면 확산광으로 확산된다. 확산된 빔들은 구면 전체 세기가 일정한 형태로 시험편에 조사된다. 이때 간섭은 두 빔의 광 세기(intensity)가 최대한 같은 조건일 때 잘 일어나므로 또 다른 ND 필터를 이용하여 세기를 조절하였다. 이는 서로 다른 거울(mirror)를 거치는 동안 빔의 세기가 달라지게 되기 때문이다. 그리고 두 방향의 경로를 통해 조사되는 광로의 차는 10cm 이내로

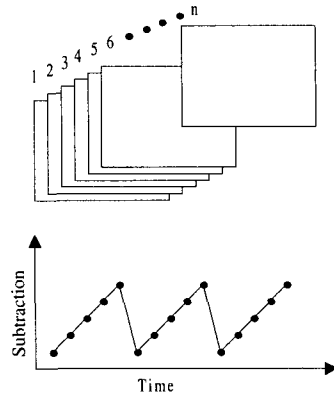


Fig. 5 Algorithm for continuous subtraction

조절하였다. 시험편에 조사된 두 빔에 의해 중첩 반사된 스펙클들은 CCD 카메라의 수광소자에 결상되어 화상획득기(Frame Grabber; Data Translation Co., DT3152)를 거쳐 하나의 정보가 되며 시험편에서 미소한 변형이 발생하였을 경우의 스펙클의 정보와 반응하여 변형량을 얻을 수 있게 된다. CCD 카메라로 입력되는 빔은 20배의 배율을 가지는 렌즈를 통하여 확대되도록 되었다.

4.2 화상 처리 시스템(Image processing system)

화상획득기(Frame Grabber)를 통해 입력되는 변형 정보는 컴퓨터의 실시간적인 처리에 의해 물체의 변형을 측정할 수 있도록 하였다. ESPI 시스템으로 변형을 측정하기 위해서는 기준 화상과 변형된 화상이 필요하다. 인장 시험동안에는 탄성 변형과 소성 변형 그리고 과단 시까지는 매우 큰 변형을 동반하게 된다. 따라서 시험동안 하나의 기준 화상으로 인장 변형을 모두 측정하는 것은 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서 본 연구에서는 어느 기준점을 기준화상으로 취하고 어느 적당한 시간까지의 화상을 감산처리(Real subtraction)을 한 다음 다시 마지막 화상을 기준화상으로 변환시키면서 데이터를 획득하였다. 데이터마다의 시간 간격은 약 1초로 하였다. Fig. 5는 기준 화상을 일정 간격후에 다시 선택하여 얻어지는 데이터의 모습을 도식적으로 표시한 것이다.

본 연구에서는 비주얼 C++(Visual C++)을 사용

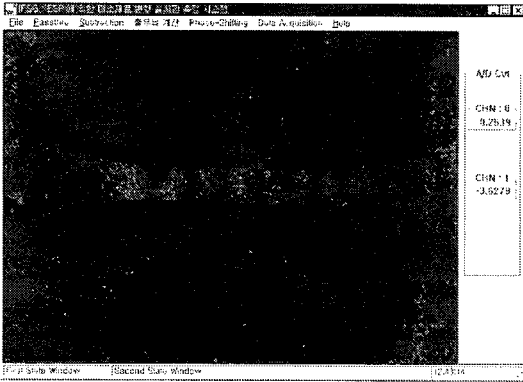


Fig. 6 Image processing system for measurement of strain in small specimen

하여 화상 처리 시스템을 개발하였으며, Fig. 6은 미소 시험편이 변형함에 따라 나타나는 간섭 패턴을 측정하는 본 시스템 화면을 나타낸다. 화상 처리를 위한 프로그램 조정 메뉴는 풀-다운(pull-down) 방식으로 작성하였고, 화상이 획득되는 순간에 미소 시험편에 작용되는 하중과 시험편의 전체 변위의 신호는 A/D 변환기(A/D converter)를 통해 자동 측정되도록 하였다.

본 화상 처리 프로그램을 통해 얻어지는 1차 화상에서 스페클간의 정보의 분산으로 간섭 줄무늬간의 간격을 바로 측정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 이러한 데이터 처리를 용이할 수 있는 필터가 요구되며, 본 연구에서는 처리하고자 하는 화소 값에 연계적인 주위 화소에 3차 가중함수를 가하는 가우시안 회선(gaussian convolution)을 사용하여 고주파 분산(noise)을 제거하였다. Fig. 7은 이러한 방법으로 필터링된 결과를 보여주고 있으며, 본 결과는 일정한 패턴으로 형성되는 하나의 정현파형(Sine wave)으로 나타내고 있다. 이 패턴으로부터 파형의 주기를 측정함으로써 시험편의 변형률을 해석하였다.

5. 결과 및 토의

Fig. 8은 미소 시험편의 인장 시험에서 얻어진 응력-변위 곡선이다. 여기서 변위는 시험편 전체의 변위로서 이는 시험편 전체와 시험편 체결부의 변형 정보를 가지고 있다. 따라서 이들 곡선으로부터

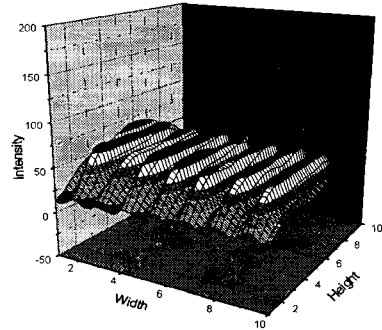


Fig. 7 3-Dimensional shape of the image filtered by gaussian convolution with 15 mask size

는 인장의 특성치인 탄성 계수와 항복 강도를 정확하게 결정하는 것은 용이하지 않다. 이들을 정확하게 평가하기 위해서는 인장 변형 동안 시험편의 시험부에서 실제 변형 정도를 정확하게 측정하는 것이 필요하다.

Fig. 9의 응력-변형률 곡선은 본 연구에서 개발한 ESPI 시스템을 이용하여 변형률을 평가하여 얻어졌다. 본 시험에서 측정된 변형률은 Fig. 2에서 보여준 미소 시험편의 시험 게이지부에서 변형을 측정하여 얻어진 결과로서 시험편의 시험부(gage section)부에서만 측정된 변형률을 의미하고 있다. Fig. 9의 인장 변형률 곡선으로부터 본 시험에 사용한 박막 동(copper foil)의 인장 특성을 평가할 수 있다. 박막의 항복 강도의 평가 방법에 대한 정의가 아직 정확하게 이루어지지 못하고 있으나, 기존의 금속 재료에서와 같이 기계적 특성을 평가하면 표1과 같다. 0.2% 오프셋(offset) 항복 강도는 약 171.3MPa이 얻어지고, 이들 곡선으로부터 탄성 계수를 평가하면 이는 약 80GPa로 얻어지고 있다. 이는 상대적으로 부피가 큰(bulk) 재료에서 얻어지는 탄성 계수보다 다소 작게 평가되고 있다. 그리고 인장 강도는 222MPa이다.

이들 응력 변형률 곡선으로부터 본 소재의 탄소성 변형 특성을 얻을 수 있으며, 이는 다음과 같은 Ramber-Osgood 관계식으로 결정할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right)^m \quad (17)$$

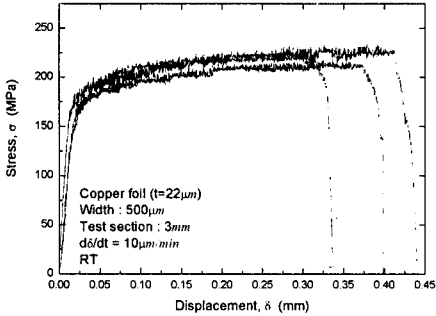


Fig. 8 Stress-displacement curve obtained from tensile test

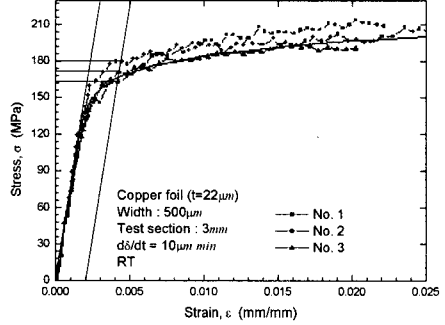


Fig. 9 Stress-strain curve using the strain obtained from in-situ ESPI system

여기서 m 은 소성지수이고 α_0 는 소성 계수이며 표 1은 이들의 각각의 값을 나타낸다. 이들 소성계수와 지수의 값은 각각 1.22×10^{-3} 과 10.78이다. Fig. 9의 실선은 본 평가에서 얻어진 식(17)의 지수와 계수를 사용하여 결정된 곡선을 나타낸다. 본 해석에서 얻어진 소성 지수와 소성 계수는 박막 동(copper foil)의 탄소성 특성을 잘 표시하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9에 표시된 변형률이 얻어진 탄성 변형과 소성 변형 그리고 시험편이 파단되는 시점에서의 ESPI 패턴의 예를 나타낸다. 탄성 변형 상태에서의 간섭 패턴은 시험편의 초기 상태에 민감하여 하중 초기 상태에서는 좋은 간섭 패턴을 얻기 힘들으나 응력이 부가됨에 따라 Fig. 10(a)에서 나타낸바와 같은 응력 방향과 잘 일치된 간섭 패턴이 나타나고 있다. 시험편이 소성 변형이 발생함에 따라 시험편의 측정되는 간섭 패턴은 Fig. 10(b)에 나

타난 바와 같이 매우 명확한 형상을 얻을 수 있다. 또한 계속적인 변형으로 시험편은 파단되기 시작하며 이때의 ESPI 패턴은 Fig. 10(c)와 같이 나타나고 있다. 인장 강도에 도달함에 따라 결함이 발생하게 되고 결함부위에서의 응력 집중과 변형률의 차이로 결함을 중심으로 형성되는 ESPI 패턴이 명확하게 나타난다. 이 결과로부터 균열의 정량적인 평가에도 본 ESPI 시스템의 활용을 기대된다.

6. 결론 및 요약

비접촉식 변형 측정 시스템인 ESPI 시스템을 개발하여 미소 시험편의 미소 변형을 연속적으로 측정하였다. 본 시스템은 박막 동(copper foil)의 인장 시험동안에 시험편의 변형을 연속적으로 측정하는데 사용하였다. 스펙클 패턴 간섭 무늬를 연속적으로 획득하고 처리할 수 있는 윈도우용

Table 1 Tensile properties of copper foil

Specimen No.	Elastic Modulus, E (GPa)	Yield Strength, σ_{ys} (MPa)	Tensile Strength, σ_{TS} (MPa)	Plastic coefficient, α_0 ($\times 10^{-3}$)	Plastic exponent, m
1	80.7	163.7	221	2.05	6.65
2	80.0	179.4	227	3.83	12.85
3	78.2	170.8	217	2.58	15.5
Average	79.6	171.3	222	1.22	10.78

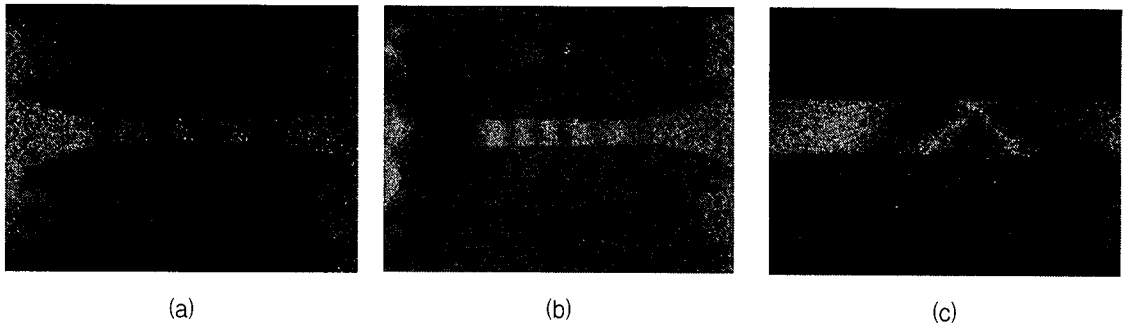


Fig. 10 ESPI patterns obtained during tensile loading: (a) for elastic deformation, (b) for plastic deformation, (c) at rupture instant

(window-based) 화상 처리 시스템을 개발하였으며, 일르 이용하여 미소 시험편의 연속적인 변형을 측정 및 평가하여 미소 시험편의 인장-변형률 곡선을 얻을 수 있었다. 두께 22 μ m의 박막 동(copper foil)의 인장 시험으로부터 80GPa의 탄성 계수, 171.3MPa의 항복강도 그리고 222MPa의 인장 강도를 얻었으며, 탄소성 특성인 Ramberg-Osgood 관계식의 소성지수와 계수를 성공적으로 얻었다. 본 연구에서 개발한 시스템은 MEMS용 소재인 박막 소재의 인장 특성 획득에 활용할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

1. Randy Crane, A simplified approach to Image Processing, Prentice Hall PTR, pp. 67-76, 1997.
2. Pramod K. R(Ed.), Holographic Interferometry principles and Methods, Springer-Verlag, pp. 122-125, 1994.
3. Gary L. C, Optical Methods of Engineering Analysis, 1st ed., Cambridge Univ. press, pp. 395-491, 1995.
4. Read D.T., "Young's Modulus of Thin Films by Speckle Interferometry," Measurement Science and Technology 9 pp. 676-685, 1998.
5. Vlassak J.J. and Nix W.D., "A New Bulge test technique for the determination of Young's Modulus and Poisson's ratio of Thin Film," J. Materials Res., Vol. 7 No. 12, pp. 3242-3249, 1992.
6. Stone D.S. et al, "Indentation Technique to investigate elastic moduli of thin Film on substrate," in thin film: Stress and mechanical properties, Vol. 130, Pittsburgh, PA:Materials Research Soc., pp. 105-110, 1989.
7. Koskinen J., J.E. Steinwall J.E., R. Soave, and Johnson H.H, "Microtensile testing of free-standing polysilicon fibers of various grain sizes," J. Micromech. Microeng., Vol. 3 No. 1, pp. 13-17, 1993.
8. Weihs T.P., Hong S., Bravmann J.C. and Nix W.D., "Measuring the strength and stiffness of thin film materials by mechanically deflecting cantilever microbeams," in Thin films: Stress and mechanical properties, Vol. 130, Pittsburgh, PA:Materials Research Soc., pp. 87-92, 1989.
9. Ding X., Ko W.H., and Mansour J.M., "Residual Stress and mechanical properties of boron-doped p+-silicon films," Sens. Actuators, Vol. A23, No. 1-3, pp. 866-871, 1990.
10. Sharper W.N., Jr., Yuan B., and Edwards R.L., "A New Technique for Measuring the mechanical properties of thin films," J. microelectromechanical Systems, Vol. 6, No. 3, 1997.