

## ESPI 기법을 이용한 동 박막의 인장 특성 측정

김동일\*(전남대 대학원 기계공학과), 허용학(한국표준과학연구원 산업측정표준부),  
김동진(한국표준과학연구원 산업측정표준부), 박준협(동명정보대학교 로봇시스템공학과),  
기창두(전남대 기계공학과)

### Measurement of Tensile Properties of Copper foil using ESPI technique

D. I. Kim(Dep. of Mech. Eng., CNU), Y.H. Huh(KRISS), D. J. Kim( KRISS),  
J. H Park(Dep. of Robot system TIU) , C. D. KEE(Dep. of Mech. Eng., CNU)

#### ABSTRACT

Micro-tensile testing system has been developed and micro-tensile tests for copper foil have been carried out. The system consisted of a micro tensile loading system and a micro-ESPI system for measuring strain. The loading system has a maximum loading capacity of 50N and a stroke resolution of 4.5nm. Stress-strain curves for the electro-deposited copper foil with the thickness of 18 $\mu$ m were obtained, and tensile properties, including elastic modulus, yielding strength and tensile strength, were determined. The tensile properties obtained under three different conditions of testing speed showed a dependency on the speed.

**Key Words :** Thin Film(박막), Copper foil(동 박막), ESPI(전자처리스펙클패턴간섭법), Tensile Properties(인장 특성)

#### 1. 서 론

최근들어 MEMS 저변 기술이 급속히 발달하고, 나노 기술이 미래 핵심 기술로서 기대되고 있다. 이에 따라 박막 재료를 이용한 전자 기계 구조물의 개발 및 응용이 활발히 진행되고 있다. 이러한 구조물의 설계 및 제작 공정 그리고 전체 시스템에서 신뢰성은 매우 중요하며, 이를 확보하기 위해서는 구조물을 구성하는 소재의 물성에 대한 정보는 매우 중요한 의미를 가지고 있다.

이에 따라 많은 연구자들은 마이크로 및 나노 소재의 물성을 평가하기 위한 많은 노력을 하고 있다. 이들 소재의 물성을 측정하기 위한 기법으로는 보 굽힘 시험(*beam bending test*), 나노 압입 시험(*nano indentation test*), 팽창시험(*bulge test*), 그리고 마이크로 인장시험(*micro-tensile test*)등이 제안되어 있다.<sup>(1)</sup> 이들 각 시험으로부터 인장 강도 및 탄성계수 등과 같은 인장 물성 그리고 탄소성 특성이 얻어지고 있으며, 각 시험은 시험편의 준비와 결과의 해석의 용이성 등의 각각 장단점을 가지고 있다. 특

히 마이크로 인장 시험을 제외한 나머지 시험에서 얻어지는 인장 물성은 각 시험 결과와 인장 물성과의 관계에 의하여 얻어지는 간접적인 방법으로 알려져 있다. 이에 따라 직접적인 방법을 좀더 신뢰성이 있게 인장 물성이 얻어지는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서도 이러한 박막 소재의 인장 물성을 얻을 수 있는 미소 인장 시험 시스템을 개발하였고 이를 이용하여 동 박막의 인장 특성을 평가하였다. 본 연구에서는 전해 적층된 동 박막(*electro-deposited copper foil*)이 사용되었으며, 이들 소재는 마이크로 BGA 의 빔 리드(*beam lead*)로 사용된다. 본 연구에서 마이크로 인장 시험기를 설계 및 제작하였으며, 이들 시험 장치로부터 인장 변형을 인장 시험과 동시에 측정하기 위하여 ESPI 기법을 사용하여 변형 측정 시스템을 구성하였다. 이들 시스템을 통하여 동 박막의 인장-변형률 곡선을 결정하였으며, 이로부터 탄성계수를 비롯한 Ramberg-Osgood Relation 에 의한 소성지수와 소성계수 등의 인장 특성을 성공적으로 얻었다. 또한 인장 시험 속도와

인장 특성과의 관계로부터 인장 시험 속도에 대한 의존성을 고찰하였다.

## 2. 미소 인장 시험 시스템

### 2.1 미소 인장 시험 장치

본 연구에서는 박막과 같은 마이크로 재료의 인장 시험을 수행하기에 적합한 시험기를 개발하였다. 본 시험 장치는 하중 지지대, 하중 구동장치 그리고 하중 센서로 구성되어 있다. 하중 지지대는 수평 방향으로 하중이 부하되도록 설계되었고, 인장 시험편의 크기에 따라 하중 구동체의 위치를 변경할 수 있도록 하중 구동체 및 고정체가 시험 장치의 바닥면(base plate)의 T-홈(T-slot)에 고정되도록 하였다. 하중 구동장치는 최대 50N의 구동력을 가지는 선형 모터형의 구동체(linear motor actuator, PI)이다. 하중 구동체는 최대 이동거리는 10mm 이고, 변위 분해능(stroke resolution)은 4.5nm 그리고 최대 이송 속도는 1.5mm/s 이다. 하중 센서(load cell, SENSOTEC)는 하중 구동체 및 고정체에 연결이 될 수 있도록 하였으며, 본 시스템에서는 하중 고정체에 연결하였다. 하중 센서의 최대 용량은 50N 이며, 인장과 압축이 가능하다. Fig. 1은 본 시험 장치의 모습을 나타낸다. 이러한 하중 구동체는 본 연구에서 사용자 편의 시스템으로 개발한 제어 프로그램으로 PID 방식으로 제어로 되도록 하였다. 시험중 발생하는 하중 및 변위의 변화는 제어용 컴퓨터에 연결된 컴퓨터로 데이터 획득 보드를 통하여 그래픽 처리되도록 하였다.

### 2.2 인장 변형 측정 시스템

일반적으로 인장 시험동안 변형을 측정하기 위해서 변형률 게이지 혹은 연신계를 사용하였으나, 박막과 같은 마이크로 소재에서 이들 방법을 사용하는 용이하지 않다. 이에 따라 박막에서 변형을 측정하는 방법으로 ISDG(Interferometric Strain Displacement Gage)<sup>(2)</sup> 혹은 레이저 간섭계<sup>(3,4)</sup>를 이용하는 방법이 제안되었다. 본 연구에서는 인장 시험 동안 연속적으로 면내 인장 변형(in-plane tensile strain)을 측정하는 방법으로 마이크로 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) 기법을 개발하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 면내 ESPI 방법의 개략도이며, 면내 인장 변형을 측정하는 광학적 연결도를 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 분리기에 의해 같은 광량으로 분리되고 확산되

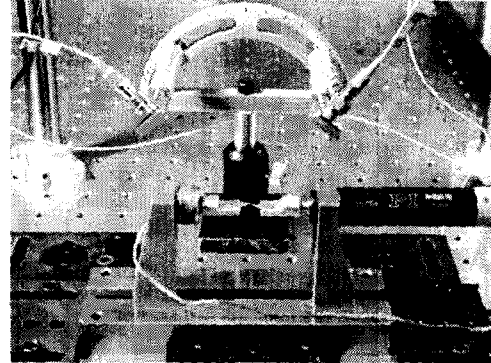


Fig. 1 Micro-tensile testing system including micro actuator and load cell.

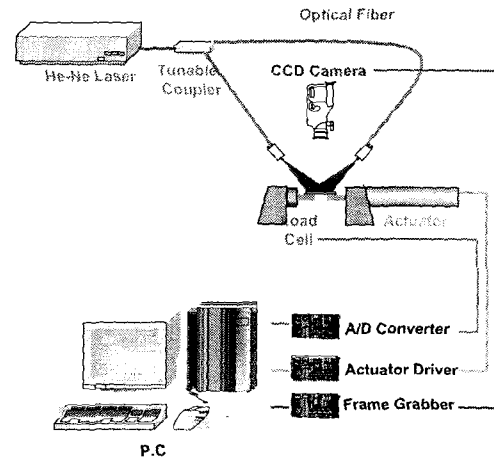


Fig. 2 Schematic diagram of micro-ESPI system for measuring tensile strain during micro-tensile test

도록 하였다. 시험편에 조사된 두 빔에 의해 중첩 반사된 스펙클들은 CCD 카메라의 수광소자에 결상되어 영상보드(Frame Grabber, DT3152)에 의해 실시간으로 측정된다.

Fig. 2와 같은 광학 시스템을 통하여 얻어지는 스펙클 패턴은 인장 시험동안 연속적인 하중 및 변형에 대하여 연속적으로 일정 간격으로 얻어지게 된다. 연속적인 시험편의 변형은 스펙클 간섭이 일어나는 한계를 넘어서게 되어 시험 부하직전의 상태의 변형 기준에 대하여 연속적으로 변형을 측정하기는 어렵다. 따라서 본 시스템에서는 하나의 기준 스펙클 패턴에서 임의의 변형이 발생할 때까지 연속적으로 변형 상태를 측정하고 이후 다시 기준을 선택하여 그 기준에 따른 변형을 측정하는 연속 측정 기법을 사용하였다. 이에 따라 인장 변형의

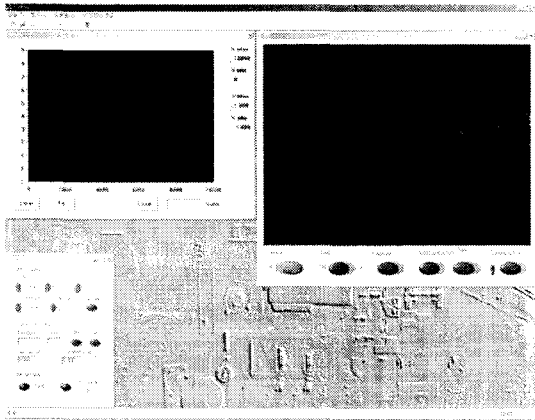


Fig. 3 System for controlling the test machine and processing speckle pattern image. (IPSGv2)

탄성 변형과 소성 변형의 비교적 큰 변형의 상태를 연속적인 간섭 패턴의 형성으로 측정할 수 있도록 하였다. Fig. 3 은 이러한 연속적인 스펙클 간섭 패턴이 측정되도록 본 연구에서 개발한 화상 처리 프로그램(IPSGv2)을 보여준다. 본 프로그램에서는 스펙클 패턴의 화상과 스펙클 패턴이 얻어지는 하중 수준을 동기화하여 기록하게 하였다. 또한 본 프로그램에서는 이러한 화상의 획득과 함께 Fig. 1 에 보여준 시험 시스템을 제어하고 그 하중과 변위에 대한 정보도 동시에 동기화하여 컴퓨터 화면에 가시화하며 저장하도록 하였다. 본 프로그램은 Visual C++6.0 을 사용하여 개발하였다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1 인장 시험

본 실험에는 마이크로 BGA 의 beam lead 로 이용되는 동 박막(copper foil)을 사용하였다. 동 박막은 전해 적층(electro deposition)에 의하여 제작되었으며, 국내 S 사에서 제공되었다. 동 박막의 두께는  $18 \mu\text{m}$  이며, 시험편은 박막 전지로부터 시험편 틀을 이용하여 기계적으로 제작하였다. 시험편은 Fig. 4 와 같은 형상을 가지고 있으며, 평행부가 3mm, 폭이 0.5mm 이다. 제작된 시험편은 조심스럽게 시험 하중 지지대와 구동체에 연결된 인장 그림에 옮겨지고, 접착법에 의하여 시험편이 고정되도록 하였다. 인장 시험은 일정 속도의 변위 제어로 수행되었고, 변위 제어 속도는 10, 50,  $100 \mu\text{m}/\text{min}$  의 인장 속도를 선택하여 인장 속도에 대한 인장 특성의 의존성을 조사하였다.

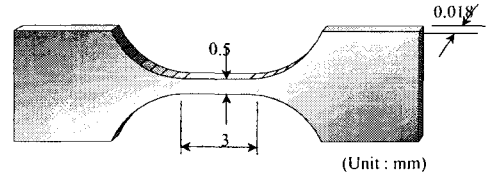


Fig. 4 Dimension and shape of the micro-tensile specimen used in this study.

인장 시험동안 인장 변형을 측정하기 위하여 면내 ESPI 법을 사용하였으며, Fig. 1 과 2 에서 보여준 바와 같이 두개의 레이저 빔이 시험편에 조사되었다. 레이저 빔은 Fig. 1 에서 보여준 바와 같은 조사 각도 조정대를 이용하여 입사각을 조정할 수 있으며, 본 연구에서는  $45^\circ$  를 사용하였다. 조사되는 면은 시험 재료의 표면 상태를 그대로 사용하였다. 조사되는 레이저 빔에 의하여 변형 되는 시험편의 반사 레이저 빔은 두 개의 레이저 빔의 중간에 위치한 CCD 카메라에 의하여 측정되어진다. CCD 카메라에는 측정 해상도를 향상시키기 위하여 줌 렌즈를 부착하였다.

#### 3.2 변형 측정

Fig. 1 에 보여준 바와 같이 면내 변형을 측정하기 위하여 두개의 레이저 빔은 시험편에 대하여 동일한 각도  $\theta$  로 두 방향에서 조사된다. 동일한 광량을 가진 두개의 레이저 빔이 조사된 측정면은 렌즈와 CCD 카메라를 통하여 수광 소자(image plane)에 결상되고 간섭되어진다. 이때 스펙클의 간섭된 무늬는 임의의 간격을 가진 줄무늬로 나타나게 되고, 이들 줄무늬로부터 측정면의 변형을 계산할 수 있다. 시험편의 평행부에서 줄무늬  $n$  개가 측정되어진다면 이때의 시험편의 평행부의 변형은 다음과 같이 계산된다.

$$u = \frac{n\lambda}{2 \cos \theta} \quad (1)$$

여기서  $\lambda$  는 He-Ne 레이저의 파장으로 632.8nm 이고  $\theta$  는 시험편에 대한 조사 레이저 빔의 각도이다. 또한 시험편의 줄무늬 간격으로부터 시험편 평행부의 변형률이 계산되며, 다음과 같은 식으로부터 결정된다.

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

여기서  $D_p$  는 두 줄무늬 간의 간격을 나타낸다.

#### 4. 인장 시험 결과

본 연구에서는 앞에서 언급한 마이크로 인장 시험 시스템을 이용하여 동 박막의 인장 시험을 수행하였으며, Fig. 5는 본 시험에서 얻어진 응력-변형률 곡선의 한 예이다. 스페클 간섭 무늬 화상으로부터 3 차 가중 함수에 의한 Gaussian 회선(convolution) 필터를 사용하여 간섭 줄무늬의 간격이 명확히 나타나도록 처리를 하여, 이 간격으로부터 식 (2)를 사용하여 변형된 시험편의 변형률을 계산하였다. 따라서 응력과 이에 대응하는 변형률을 계산함으로써 Fig. 5와 같은 응력-변형률 곡선을 얻었다. Fig. 5의 인장-변형률 곡선과 인장 곡선으로부터 전통적인 인장 특성 결정법에 따라 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. 동 박막의 탄소성 특성은 다음과 Ramberg-Osgood 관계식으로부터 소성 지수와 계수를 결정함으로써 얻어지게 하였다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{YS}} \right)^m \quad (3)$$

Table 1은 본 시험에서 수행한 세 인장 시험 속도에 대한 인장 특성의 평균 값을 나타낸다. 이들 결과는 인장 시험 속도에 따라 다소 차이를 보이고 있다. 즉 인장 시험 속도의 증가에 따라 인장 강도는 증가하는 경향을 보이고 있으며, 항복 강도는 10 $\mu\text{m}/\text{min}$ 와 50 $\mu\text{m}/\text{min}$ 에서는 비슷하나 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ 에서는 크게 증가하고 있었다. 이러한 인장 특성의 인장 속도에 대한 의존성은 표준 시험 조건의 설정에 매우 의미가 있다. 따라서 이러한 속도의 영향에 대해서는 추후 좀더 연구되어야 할 필

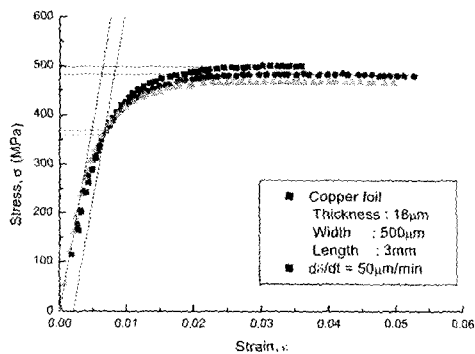


Fig. 5 An example of stress-strain curve for copper foil.

Table 1. Tensile properties for copper foil with variation of testing speed.

	Speed $d\delta/dt$ ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )		
	100	50	10
Elastic Modulus, E (GPa)	77.6		
$\sigma_{YS}$ (MPa)	406.9	365.9	364.3
$\sigma_{TS}$ (MPa)	491.4	481.9	466.4
$\alpha_0$ ( $\times e^{-3}$ )	0.131	0.040	0.103
M	32.83	25.72	25.04

NOTE)  $\sigma_{YS}$ : yielding strength,  $\sigma_{TS}$ : tensile strength.  
 $\alpha_0$ : plastic exponent, m: plastic coefficient

요가 있다.

#### 5. 결론

미소 인장 시험 시스템을 개발하여 동 박막의 인장 특성을 측정하였다. 본 시스템은 미소 인장 시험 장치와 변형을 측정하는 마이크로 ESPI 시스템으로 구성하였다. 미소 인장 시험 장치는 최대 하중 50N과 4.5nm의 변위 해상도를 가지고 있다. 마이크로 ESPI 시스템은 레이저 광학 시스템과 화상처리 프로그램(IPSGv2)으로 구분하여 개발하였다. 본 시스템을 활용하여 두께 18 $\mu\text{m}$ 의 동 박막의 탄성 계수, 항복 강도, 인장 강도 그리고 탄소성 특성을 포함한 인장 특성이 측정되었고, 측정된 특성은 시험 속도에 대한 의존성을 보이고 있었다.

#### 참고문헌

1. Mohamed Gad-el-Hak, The MEMS Handbook, CRC Press, 2002
2. 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.
3. Read D.T., "Young's Modulus of Thin Films by Speckle Interferometry", Measurement Science and Technology 9, pp. 676-685, 1998.
4. H.D. Espinosa, and B.C. Prorok, M. Fisher, "A Novel Experimental technique for Testing Thin Film and MEMS Materials, Proc. of the SEM Annual Conf. Pp. 446-449, 2001