

DIC 법을 이용한 구리박막의 인장시험

김정엽^{*†}, 송지호^{**}, 박경조^{*}

* 전남대학교 기계자동차공학부, ** 한국과학기술원 기계공학부

Tensile Tests for Copper Thin Foils by Using DIC Method

Chung Youb Kim^{*†}, Ji Ho Song^{**} and Kyung Jo Park^{*}

* Division of Mechanical and Automotive Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

** Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received July 19, 2012 ; Revised August 16, 2012 ; Accepted August 20, 2012)

Key Words: Mechanical Properties(기계적 물성), Copper Thin Foil(구리 박막), Tensile Test(인장시험), Digital Image Correlation(디지털이미지코릴레이션)

초록: 본 연구에서는 DIC 법을 이용하여 두께 12 μm 의 구리박막에 대한 인장시험을 수행하였다. 시험결과와 정밀한 응력-변형률 곡선의 시험결과를 얻을 수 있었으며, 특히 잉크젯프린터를 이용한 시험편 표면 스펙클패턴의 작성은 DIC 법을 적용하기가 어려운 시험편 표면의 콘트라스트가 낮은 경우에 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 측정된 구리박막의 기계적 물성은 탄성계수 $E = 89.2 \text{ GPa}$, 0.2% 오프셋 항복응력 $S_{0.2\%} = 232.8 \text{ MPa}$, 인장강도 $S_u = 319.2 \text{ MPa}$, 파단연신률 $\epsilon_f = 16.8 \%$, Poisson 비 $\nu = 0.34$ 의 결과를 얻었으며, 탄성계수는 알려진 벌크소재에 대한 결과보다는 작다.

Abstract: In this study, tensile tests for 12- μm -thick copper thin foils were performed by using the DIC method. The DIC method provided precise stress-strain curves for thin film materials, and a commercial inkjet printer can be simply and effectively used for printing speckle patterns on the specimen of Cu thin films whose surface contrast is too low to apply the DIC method. The mechanical properties of Cu thin foils obtained in this study are as follows: elastic modulus $E = 89.2 \text{ GPa}$, 0.2% offset yield stress $S_{0.2\%} = 232.8 \text{ MPa}$, tensile strength $S_u = 319.2 \text{ MPa}$, elongation at fracture $\epsilon_f = 16.8 \%$, and Poisson's ratio $\nu = 0.34$.

1. 서 론

MEMS 기술의 발전에 따라 마이크로(micro) 또는 그 이하의 치수를 갖는 박막(thin film)의 기계적 물성에 대한 관심이 커져 왔다. 지금까지의 많은 연구를 통해 마이크로 이하의 치수를 갖는 박막의 기계적 특성이 벌크(bulk) 소재와는 다른 거동을 보인다는 것은 잘 알려져 있다. 미소시험편의 기계적 특성을 얻기 위한 시험법으로는 굽힘(bending), 벌지(bulge), 인장(tensile)시험 등이 주로 사용되어 왔다.⁽¹⁻⁹⁾ 굽힘이나 벌지시험은 인장시험에 비해 쉽고 간편한 장점이 있으나 기계적 물성을 얻기 위해서는 몇가지 가정이 필요한 단점이 있다. 벌크 소재에서 사용하고 있는 일반적인 인

장시험법은 미소시험편의 경우에는 시험편의 제작이나 시험편의 취급이 어려운 반면에 시험편 단면에 걸쳐 응력이 균일하고 기계적 물성계산을 위한 특별한 가정이 필요 없는 장점이 있다.

미소시험편의 시험에서 가장 어려운 문제는 시험편의 변형률 측정이다. 벌크 소재의 시험에서는 스트레인게이지나 변위계(extenso-meter)와 같은 접촉식 측정법을 이용해 간편하고 높은 해상도의 측정이 가능하다. 그러나 미소시험편에서는 접촉식 측정법의 사용이 불가능하여, 정전용량형변위계(capacitance type displacement gage)⁽⁸⁾나 광학적 측정법^(6,9-11) 등의 다양한 비접촉식 측정법이 사용되고 있다.

이들 방법중 최근 시험편의 변위측정에 CCD 카메라에 의한 시험편 디지털이미지를 이용한 DIC(digital image correlation)법⁽¹⁰⁾이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 비접촉식 측정법으로 고정밀도의 변위측정이 가능하여 미소시험편의 시험에 적합하

† Corresponding Author, kimcy@chonnam.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

다. 본 연구에서는 DIC 법을 이용한 Cu 박막에 적합한 인장시험법을 개발하고 이를 이용한 인장시험을 수행하여 Cu 박막의 기계적 물성에 대한 검토를 하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험장치 및 시험편

시험장치의 구성은 Fig. 1 과 같다. 시험기는 동전형 액추에이터(electro-dynamic actuator)를 사용하였으며,⁽⁸⁾ 하중측정을 위한 로드셀(load-cell), 시험편 변위측정을 위한 정전용량형 변위계(capacitance type displacement gage)와 광학현미경(optical microscope)이 장착된 CCD 카메라, 하중제어신호(command signal)의 발생과 하중·변위신호의 측정을 위한 D/A 와 A/D 컨버터(converter), 그리고 시험기의 제어와 데이터측정 및 저장을 위한 PC 로 구성되어 있다. 시험은 컴퓨터에 의해 발생된 제어신호가 파워앰프(power amplifier)를 통해 액추에이터를 구동시키며, 여기서 사용된 동전형 액추에이터는 구동력이 공급되는 전류량에 비례하게 되어 시험기는 하중제어로 시험을 하게 된다. 이 때 시험편에 가해지는 하중은 10 N 용량의 로드셀로, 시험편의 변위는 정전용량형 변위계로부터 변위를 측정한다. 또한 CCD 카메라를 이용하여 시험편 상의 변위를 시험 중 연속적으로 측정한다. CCD 카메라는 Point Grey 사 제품(GRAS-50S5M)으로 2,448×2,048 픽셀(pixel)의 해상도와 15 fps(frames per second)의 촬영속도(frame rate)를 갖는다. 시험기 제어와, 하중 등 신호와 시험편 이미지의 측정을 위한 프로그램은 LABVIEW 를 이용하여 작성하였다.

시험편은 Furukawa 사에서 전해도금(electro deposition)법으로 제작된 두께 12 μm 의 구리 박막(Cu foil)을 에칭(etching)법을 이용하여 Fig. 2 와 같은 도그본(dog-bone) 형상으로 제작하였다. 시험단면부(test section)는 폭 0.5 mm, 길이 5 mm 에 걸쳐 균일한 단면을 갖고 있다. 시험은 ASTM E08M⁽¹²⁾에 규정된 절차에 따라 수행하였으며 시험속도는 4.5 MPa/s 로 하였다.

2.2 변위측정

2.2.1 미소시험편에 대한 변위측정법

마이크로(micro) 정도의 미소시험편에 대한 변위측정은 일반적인 매크로(macro) 시험편과는 달리 접촉식 측정이 불가능하다. 따라서 이와 같은 미

소시험편의 경우에는 정전용량형 변위계⁽⁸⁾나 레이저를 이용한 간섭변위계(laser interferometry strain/displacement gage, ISDG)와 같은 광학적 측정법⁽⁹⁾ 등의 비접촉식 측정법이 사용되고 있다. 이 중에서 폭넓게 사용되어 왔던 측정법의 하나는 레이저를 이용한 간섭변위계이다.^(6,9) 이 방법은 시험편 표점거리(gage length)사이의 변형률을 고해상도로 측정할 수 있는 장점이 있다. 다만 시험편의 표면에 레이저를 반사시킬 수 있는 마커(marker)를 만들어야 한다. 정전용량형 변위계는 측정 해상도(resolution)가 매우 높으며, 거의 실시간으로 측정이 가능할 정도로 측정속도가 빠르며 또한 측정범위도 다른 방법에 비해 매우 넓어 널리 사용되고 있으나, 시험편 상에서의 변위를 측정할 수 없어 시험편 그립(grip)간 측정 변위로부터 시험편 표점거리(gage length) 사이의 변위로 환산을 해야 하는 문제가 있다. 저자의 이전 연구⁽⁸⁾에서는 정전용량형 변위계를 박막 시험편의 피로시험기 개발에 응용한 바 있으며, 이를 이용한 인장 및 피로시험에 적용한 예⁽¹³⁾가 있다.

한편 인장시험과 같이 하중의 변화가 비교적 느린 경우에는 피로시험과 같이 데이터의 측정속도가 문제가 되지 않는다. 따라서 미소시험편에 대한 인장시험에서는 측정속도는 느리지만 해상도가 매우 높고 시험편 상의 변위를 직접 측정할 수 있는 다양한 방법들이 사용되고 있다. 대표적인 방법 중 하나는 DIC(digital image correlation)법⁽¹⁰⁾으로 측정시스템이 비교적 단순하고 간편하게 측정할 수 있다. 본 연구에서는 시험편 그립간 변위를 정전용량형 변위계를 이용하여 측정하고, DIC 법을 이용하여 시험편 표점거리의 변형을 측정한다. 본

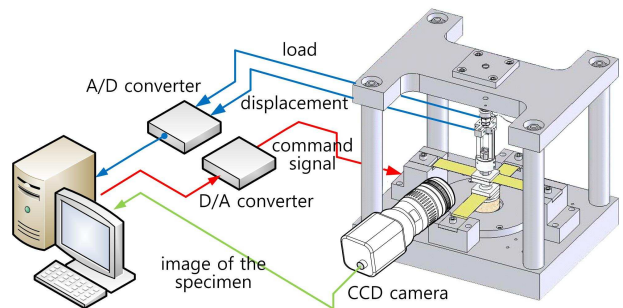


Fig. 1 Testing system

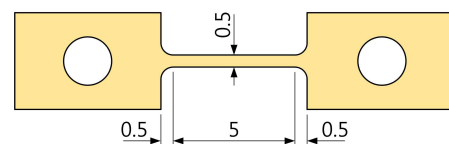


Fig. 2 Schematic of the specimen (unit: mm)

연구에서 사용한 DIC 법의 측정정밀도는 CCD 카메라에 부착한 광학현미경의 배율에 따라 달라지며, 본 연구의 경우 약 $0.3 \mu\text{m}$ 의 해상도로 측정이 가능하며 변형률은 $8 \mu\text{m}/\text{m}$ 의 정밀도로 측정이 가능하다.

시험편의 축방향 변형률은 약 4 mm 정도의 표점거리에 대하여 측정하였으며, Poisson 비 측정을 위한 횡방향 변형률은 약 0.4 mm 정도의 표점거리에 대하여 측정하였다.

2.2.2 스펙클패턴(speckle pattern)의 작성

일반적으로 DIC 법을 사용하기 위해서는 시험편 표면에 시험편과 함께 변형하여 변형을 측정할 수 있도록 불규칙한 스펙클패턴(random speckle pattern)이 있어야 한다. 스펙클패턴은 시험편 표면 자체의 질감(texture)을 이용하거나 인위적으로 스프레이 등을 이용해 만들 수 있다. 본 연구에서 사용한 Cu 박막은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 표면 콘트라스트(surface contrast)가 뚜렷하지 않다. 따라서 DIC 법을 이용한 변위측정에 큰 오차를 발생할 수 있어 표면 자체로는 DIC 법을 적용하기가 적합하지 않다. 또한 시험편이 폭 0.5 mm로 작기 때문에 시험편 표면에 불규칙한 스펙클패턴을 만드는 것도 매우 어렵고 또한 시험편의 강도에 영향을 미칠 수 있다. 다른 연구자에 의해 사용되고 있는 방법은 FIB(focused ion beam)나 증착(deposition) 등의 방법을 이용하여 시험편 표면에 표점(marker)을 만드는 것이다.⁽¹¹⁾ 이 방법은 시험편 상에 정밀한 표점을 만들 수 있으며, 측정된 이미지에 대한 에지 디텍션(edge detection) 등의 이미지프로세싱(image processing)을 통하여, 표점 간의 변위를 산출함으로써 정밀도 높은 시험편 변위를 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 반면에 FIB 등의 공정이 시험편 표면의 물리적, 기계적 특성에 영향을

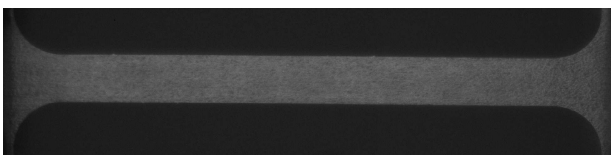


Fig. 3 A surface image of the specimen

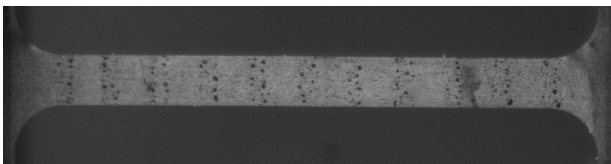


Fig. 4 Speckle pattern by using an inkjet printer

미칠 수 있는 가능성이 있다.

이에 대한 대안으로 생각할 수 있는 방법은 일반 상용 잉크젯프린터를 이용한 방법이다. 잉크젯프린터는 일반적으로 최소 1200 dpi (dots/inch) 이상의 인쇄해상도를 가지고 있으며, 사양에 따라서는 9,600 dpi 정도로 매우 높은 해상도를 가지고 있다. 이와 같이 고해상도를 갖는 잉크젯프린터를 이용하면 시험편 표면에 패턴을 간편하게 작성할 수 있을 것이다. 다만 잉크젯프린터에 사용되는 잉크는 수성으로 본 연구에서 사용한 재료인 Cu 박막과 같은 금속표면에 정밀한 스펙클패턴을 작성하는 것은 어렵다. DIC 법을 이용하기 위해서는 시험편의 스펙클패턴을 미세하고 불규칙하게 만드는 것이 바람직하다. 박막시험편의 경우 시험편의 두께가 마이크로 정도 또는 그 이하이므로, 이 방법을 이용함에 있어서 무엇보다 고려해야 할 사항은 시험편 표면에 인쇄된 스펙클패턴이 시험결과에 영향을 주지 않아야 한다는 점이다. 통상적인 매크로 시험편의 경우에는 표면에 작성한 스펙클패턴에 의한 영향을 무시할 수 있지만, 본 연구에서와 같은 미소시험편의 경우에는 시험편 표면에 인쇄된 잉크에 의해 시험편 강도에 영향을 미칠 가능성이 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다.

Fig. 4는 잉크젯프린터를 이용하여 시험편 표면에 작성한 스펙클패턴을 보여주고 있다. 여기에 사용한 잉크젯프린터는 9,600 dpi의 해상도를 가지고 있다. 이 그림에서 패턴의 줄간격은 약 0.5 mm 정도이며, 작성된 반점은 대략 5 ~ 40 μm 정도의 크기로 분포하고 있으며, 참고로 시험편의 폭은 앞에서 설명한 바와 같이 0.5 mm이다. 시험편 표면에 작성된 반점은 금속표면에 대한 수성 잉크의 흡착성이 좋지 않아 그림에서와 같이 비교적 반점 크기의 편차가 크지만, 실제 시험에 적용하여 그 유용성에 대해 검토한다.

3. 시험결과 및 검토

3.1 인쇄된 스펙클패턴에 의한 영향

2.2.2 절에서 지적한 바와 같이 본 연구에서 사용한 박막시험편은 두께가 12 μm 로 매우 얇기 때문에, 시험편 표면에 인쇄된 잉크에 의한 시험결과에 미치는 영향에 대한 검토가 필요하다. 이를 위해 시험편에 스펙클패턴이 인쇄되지 않은 시험편과 인쇄된 시험편에 대한 인장시험을 수행하여, 인장강도 S_u 와 시험편 과단변위 δ_s 의 시험결과를 비교하였다. 여기서 시험편 변위는 그림간 변위 (grip-to-grip displacement)를 측정한 정정용량형 변

Table 1 Comparison of tensile test results for the specimens with and without speckle patterns

| No. | without speckle | | with speckle | |
|------|-----------------|------------------------------|--------------|------------------------------|
| | S_u (MPa) | δ_f (μm) | S_u (MPa) | δ_f (μm) |
| 1 | 319.5 | 849.0 | 319.9 | 863.4 |
| 2 | 314.2 | 783.5 | 321.3 | 842.3 |
| 3 | 317.4 | 880.0 | 316.3 | 837.2 |
| Mean | 317.0 | 837.5 | 319.2 | 847.6 |

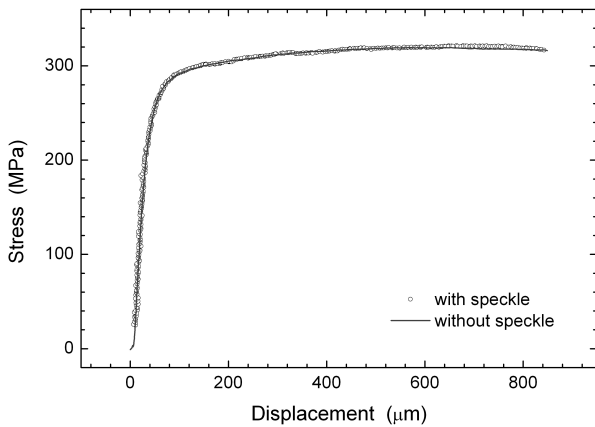


Fig. 5 Stress vs. grip-to-grip displacement curves

위계의 측정결과를 이용하였다.

Fig. 5 는 시험결과와 한 예로서 하중-그립간 변위 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 원기호는 스펙클패턴이 있는 시험편이며 곡선은 없는 시험편에 대한 결과를 나타내며, 또한 Table 1 에는 모든 시험결과가 정리되어 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 하중-변위곡선은 두 경우 모두 거의 차이가 없는 것을 알 수 있으며, Table 1 에서도 인장강도와 파단변위의 시험결과에서 두 경우 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터, 본 연구에서 수행한 두께 12 μm 인 Cu 박막의 경우 시험편 표면에 인쇄된 스펙클패턴이 인장시험결과에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 인장시험 결과

Fig. 6 은 Cu 박막에 대한 인장시험 결과로서, Fig. 6(a)는 응력-변형률(σ - ϵ) 곡선을, Fig. 6(b)는 탄성영역 부근의 σ - ϵ 곡선을 상세하게 보여주고 있다. Fig. 6(b)에서 흰색 원 기호는 응력과 축방향 변형률 σ - ϵ_x 곡선을, 검은색 원은 시험편 폭의 80 % 정도의 표점거리에 대한 응력-횡방향 변형률 σ - ϵ_y 곡선을 나타내며, 흰색 삼각형은 시험편 폭방향의 양쪽 에지(edge) 사이에서 측정된 횡방향 변형률로 정리한 결과이다. 이 그림에서 σ - ϵ_y 데이터가

σ - ϵ_x 데이터보다 흠어짐이 큰 것은 축방향 표점거리가 횡방향보다 크며, 표점거리내의 축방향 변형률이 횡방향 변형보다 상대적으로 크기 때문이다.

3 개의 Cu 박막 시험편에 대해 얻어진 시험결과는 Table 2 에 정리되어 있으며 그 평균값으로는, 탄성계수 $E = 89.2$ GPa, 0.2% 오프셋(offset) 항복응력 $S_{0.2\%} = 232.8$ MPa, 인장강도 $S_u = 319.2$ MPa, 파단연신률(elongation at fracture) $\epsilon_f = 16.8$ %의 결과를 얻었다. 한편 Poisson 비는 $\nu = 0.34$ 로서, Fig. 6(b)의 횡방향 σ - ϵ_y 곡선(검은색 원 기호)의 기울기 $E' = 260.8$ GPa 와 탄성계수 $E = 89.8$ GPa 의 비로 Poisson 비를 계산하였다. 즉 $\nu = E/E' = 89.8/260.8 = 0.34$ 의 결과를 얻었다. Fig. 6(b)에서 횡방향 변형률이 측정위치에 따라 다르다는 것을 알 수 있다. 흰색 삼각형으로 나타낸 시험편 에지에서의 측정결과가 시험편 폭의 80 %의 표점거리에 대해 측정된 결과에 비해 변형률이 크다. 이것은 시험편 에지에 의한 효과로 인한 것으로, 시험편 폭에 대한 두께의 비가 작기 때문으로 판단된다.

본 연구에서 사용한 시험편과 같은 시험편에 대해 얻어진 Hwangbo 등의 결과⁽¹³⁾에 의하면, 탄성계수 $E = 84.9$ GPa, 0.2% 오프셋 항복응력 $S_{0.2\%} = 235.0$ MPa, 인장강도 $S_u = 317.0$ MPa, 파단연신률 $\epsilon_f = 13.2$ %의 결과를 얻었다. 이 연구에서는 변형률은 시험편 표점거리간의 변형률을 직접 측정하지 않고, 정전용량변위계를 이용하여 그립간의 변위를 측정하였으며, 이 결과를 탄성변형률과 소성변형률로 나누어 시험편 변형률로 환산한 결과로 정리하였다. 시험결과에서 인장강도는 본 연구의 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있는데, 이것은 시험편 변위와는 관계없는 값이기 때문이다. 탄성계수와 항복응력도 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이 두 값은 탄성변형에 관계된 값으로 탄성변형률의 환산식이 비교적 정확한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 한편 파단연신률은 각각 16.5 %와 13.2 %로 비교적 큰 차이를 보이고 있는데, 이것은 Hwangbo 등의 연구⁽¹³⁾에서 사용한 소성변형률의 환산식이 실제 소성변형을 약간 작게 평가한 결과로 판단된다.

같은 재료인 Cu 박막에 대하여 Han 등⁽¹¹⁾이 VIT (visual image tracing)법을 이용하여 측정한 결과가 있다. 이 연구에서는 탄성계수 $E = 79$ GPa, 0.2% 오프셋 항복응력 $S_{0.2\%} = 206.8$ MPa, 인장강도 $S_u = 252.2$ MPa 의 결과를 얻었다. 이 연구에서는 탄성계수를 100 MPa 이상의 탄성영역에서 결정하였다. Fig. 6(b)의 결과에 의하면 응력이 높을수록

Table 2 Tensile test results for Cu thin foils

| No. | E (GPa) | $S_{0.2\%}$ (MPa) | S_u (MPa) | ϵ_f (%) | ν |
|------|--------------|----------------------|----------------|---------------------|-------|
| 1 | 86.5 | 233.0 | 319.9 | 17.2 | 0.33 |
| 2 | 91.3 | 235.1 | 321.3 | 16.6 | 0.34 |
| 3 | 89.8 | 230.3 | 316.3 | 16.5 | 0.34 |
| Mean | 89.2 | 232.8 | 319.2 | 16.8 | 0.34 |

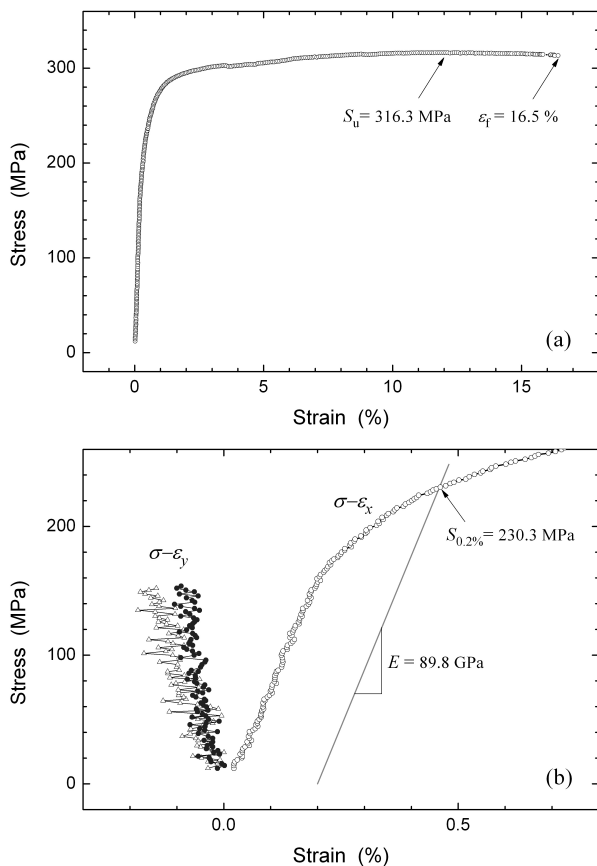


Fig. 6 Tensile test results for Cu thin foil

응력-변형률 곡선의 기울기가 완만하게 감소하므로 탄성계수가 작게 계산되어질 가능성이 있다. 항복응력과 인장강도는 본 연구에서 얻어진 결과에 비해 각각 11.2, 21.0 % 작은 결과를 보여주고 있다.

한편 본 연구에서 얻어진 탄성계수 $E = 89.2$ GPa 은 Cu 벌크 소재에 대해 알려진 125 GPa⁽¹⁴⁾보다는 작은 결과를 보여주고 있다. 이것은 전해도금에 의해 생산된 두께 32 μm 의 구리박막에 대한 Klien 등⁽¹⁵⁾에 의한 결과 92 GPa 와 비슷한 결과를 보여준다.

본 연구에서는 Cu 박막에 대한 인장시험을 DIC 법을 이용하여 수행하였다. 이 방법은 Fig. 6 에서 볼 수 있는 바와 같이, 전 영역에 걸쳐 정밀한 시

험결과를 얻을 수 있으며, 특히 탄성영역에서 응력-변형률 곡선의 선형성이 우수하다는 것을 알 수 있다. 따라서 미소시험편에 대한 정밀한 시험 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용한 잉크젯 프린터를 이용한 스펙클패턴의 작성은 실리콘이나 매끄러운 표면을 갖는 금속과 같이 낮은 시험편 표면 콘트라스트로 DIC 법을 사용하기가 어려운 소재에 대해, 시험편 표면에 FIB 또는 증착 등의 추가 공정이 필요없이 간편하고 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 두께 12 μm 의 Cu 박막에 대한 인장시험을 DIC 법을 이용하여 수행하였다. 시험 결과 정밀한 시험결과를 얻을 수 있었으며, 특히 잉크젯프린터를 이용한 시험편 표면 스펙클패턴의 작성은 DIC 법을 적용하기가 어려운 시험편 표면의 콘트라스트가 낮은 경우에 유용하게 사용할 수 있다.

측정된 Cu 박막의 기계적 물성은 탄성계수 $E = 89.2$ GPa, 0.2% 오프셋 항복응력 $S_{0.2\%} = 232.8$ MPa, 인장강도 $S_u = 319.2$ MPa, 파단연신률 $\epsilon_f = 16.8$ %, Poisson 비 $\nu = 0.34$ 의 결과를 얻었으며, 탄성계수는 알려진 벌크소재에 대한 결과보다는 작다.

후 기

이 논문은 2009 년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고문헌

- (1) Weihs, T. P., Hong, S., Bravman, J. C. and Nix, W. D., 1988, "Mechanical Deflection of Cantilever Microbeams: a New Technique for Testing the Mechanical Properties of Thin Films," *J Mater Res*, Vol.3, pp.931~942.
- (2) Schweitz, J. A., 1992, "Mechanical Characterization of Thin Films by Micromechanical Techniques," *MRS Bull*, XVII, pp.34~45.
- (3) Beams, J. W., 1959, *Structure and Properties of Thin Films*, New York: Wiley, pp.183~192.
- (4) Bromley, E. I., Randall, J. N., Flanders, D. C. and Mountain, R. W., 1983, "A Technique for the Determination of Stress in Thin Films," *J Vac Sci Technol B*, Vol.1, pp.1364~1366.
- (5) Tsuchiya, T., Tabata, O., Sakata, J. and Taga, Y., 1998, "Specimen Size Effect on Tensile Strength of Surface

- Micromachined Polycrystalline Silicon Thin Films," *J Microelectromech Syst*, Vol.7, pp.106~113.
- (6) Sharpe, W. N., Yuan, B. and Edwards, R. L., 1997, "A New Technique for Measuring the Mechanical Properties of Thin Films," *J Microelectromech Syst*, Vol.6, pp.193~199.
- (7) Greek, S., Ericson, F., Johansson, S., Furtsch, M., Rump, A., 1999, "Micro Characterization of Thick Polysilicon Films: Young's Modulus and Fracture Strength Evaluated with Microstructure," *J Micromech Microeng*, Vol.9, pp.245~251.
- (8) Kim, C. Y., Song, J. H., and Lee, D. Y., 2009, "Development of a Fatigue Testing System for Thin Films," *Int J Fatigue*, Vol. 31, pp. 736~742.
- (9) Kim, C. Y. and Sharpe, W. N., 2010, "Development of a Fatigue Testing System for Micro-Specimens," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 34, pp. 1201~1207.
- (10) Pan, B., Qiam, K., Xie, H. and Anand, A., 2009, "Two-dimensional Digital Image Correlation for In-plane Displacement and Strain Measurement: A Review," *Meas Sci Technol*, Vol. 20, pp. 1~17.
- (11) Han, S. W., Lee, S. J., Seo, K. J., Kim, J. H., Lee, H. J., 2006, "Measurement of Young's Modulus and Poisson's Ratio for Copper Thin Film Using Visual Image Tracing Method," *Trans. of the KSME 2006*, pp. 7~10.
- (12) ASTM E08M-04, 2004, *Annual book of ASTM standards*, vol. 03.01. Philadelphia (PA), p. 419.
- (13) Hwangbo, Y., Song, J. H., 2010, "Fatigue Life and Plastic Deformation Behavior of Electrodeposited Copper Thin Films," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, pp. 2222~2232.
- (14) ASM Handbook, Vol. 2, *Properties & Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, 1990, ASM International, Materials Park, OH.
- (15) Klein, M., Hadrboletz, A., Weiss, B., Khatibi, G., 2001, "Size Effect on the Stress-Strain, Fatigue and Fracture Properties of Thin Metallic Foils," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 321, pp. 924~928.