

백색광간섭계를 이용한 알루미늄 박막의 인장 물성 측정

Measurement of Tensile Properties for Thin Aluminium Film by Using White Light Interferometer

김상교*, 오충석**†, 이학주***

Sang-Kyo Kim*, Chung-Seog Oh**† and Hak-Joo Lee***

초 록 박막은 마이크로 전자 장치, 자기 기록 매체, 미세 기전 시스템 및 표면 코팅과 같은 다양한 응용에 있어서 매우 중요한 역할을 수행하는 재료이다. 이러한 박막의 재료 물성 값은 상용하는 거시 재료의 물성 값과 다를 수 있기 때문에 박막의 기계적 물성 값들을 신뢰성 있게 측정할 수 있는 시험법의 개발이 요구되어져 왔다. 본 연구에서는 종래의 막 처짐 시험법과 단축 인장 시험법의 한계성을 극복하기 위해 나노미터 이하의 면외 변위 측정 분해능을 갖는 백색광 간섭계를 채택한 새롭고 간편한 시험법을 개발하였다. 개발된 시험법의 유효성을 검증해 보기 위하여 스퍼터링을 포함한 마이크로 공정에 의해 자유지지 알루미늄 박막 시험편을 제작한 뒤 이를 이용하여 인장 물성 값을 측정하였다. 폭 0.5 mm, 두께 1 μm인 시험편을 실리콘 다이상에 1~5개 제작하여 사용하였다. 모터 구동 팁, 하중계 및 6 자유도 정렬 장치로 구성된 시험기를 자체적으로 제작한 뒤 막 처짐 시험을 수행하였다. 시험기는 가능한 작게 제작하여 상용 백색광 간섭 현미경 아래에 설치 가능하도록 하였다. 백색광 간섭무늬를 이용하여 시험편과 시험기 사이의 정렬 맞춤을 수행하였다. 영계수는 62 GPa, 항복점은 247 MPa로 측정되었다.

주요용어: 알루미늄 박막, 막 처짐 실험, 인장 물성, 백색광 간섭계, 항복점, 영 계수

Abstract Thin films play an important role in many technological applications including microelectronic devices, magnetic storage media, MEMS and surface coatings. It is well known that a thin film's material properties can be very different from the corresponding bulk properties and thus there has been a strong need for the development of a reliable test method to measure the mechanical properties of a thin film. We have developed an alternative and convenient test method to overcome the limitations of previous membrane deflection experiment and uniaxial tensile test by adopting a white light interferometer having sub-nanometer out-of-plane displacement resolution. The freestanding aluminium specimens are tested to verify the effectiveness of the test method developed and get the tensile properties. The specimens are 0.5 mm wide, 1 μm thick and fabricated through MEMS processes including sputtering. 1 to 5 specimens are fabricated on Si dies. The membrane deflection experiments are carried out by using a homemade tester consisted of a motor-driven loading tip, a load cell, and 6 DOF alignment stages. The test system is compact enough to set it up beneath a commercial white light interferometric microscope. The white light fringes are utilized to align a specimen with the tester. The Young's modulus and yield point stress of the aluminium film are 62 GPa and 247 MPa, respectively.

Keywords: Aluminium Thin Film, Membrane Deflection Experiment, Tensile Properties, White Light Interferometer, Yield Point, Young's Modulus

1. 서론

마이크로 전자 장치(microelectronic devices) 와 패키지(packages), MEMS(micro electro mechanical system) 및 표면 코팅(surface coatings) 등에는 여러 가지 박막 재료들이 사용되고 있으며 이들은 사용 중에 다양한 기능[1]을 수행해야 한다. 특히 이들 박막들이 사용 중에 파손 없이 제 기능을 수행하기 위해서는 실제 제작된 박막의 기계적 물성 값들이 설계 범위 내에 있는지를 평가할 필요가 있다. Norton[2]은 그의 저서에서 일반적인 기계 구조물의 설계에 있어서 가장 기초적인 시험으로 인장시험(tensile test)을 들고 있다. 설계자는 이 시험으로부터 얻어진 탄성계수, 항복강도 등을 이용하여 구조물을 설계할 수 있게 된다. 박막에 대한 단축 인장 시험(uniaxial tensile test)은 응력-변형을 곡선으로부터 기초적인 기계 물성 값을 직접적으로 얻을 수 있다는 큰 장점이 있으나, 거시적(bulk) 시험과 달리 시험편 제작, 작동기와 시험편 연결(gripping), 시험편과 시험기의 정렬(alignment), 하중 및 변형을 측정에 있어서 상당한 어려움이 따르고 있다.

박막에 대한 인장시험에 대해서는 여러 연구자들에 의해 다양한 방법으로 시도되고 있다. 이를 시험법 측면에서 구분해 보면 크게 네 가지 형태로 구분할 수 있다. 첫째로, 정밀하게 제작된 장치 형태의 시험기와 이 시험기에 적합하도록 고안된 시험편을 이용하는 방법이다. Read와 Dally[3]는 이러한 종류의 인장 시험법에 대한 기초를 확립하였으며 이를 발전시킨 형태의 연구가 국내에서도 행해지고 있다[4,5]. 이외에도 정밀 저울(precision balance)을 개량한 시험기[6]와 원자현미경(atomic force microscope)을 이용한 측정 예[7] 등 많은 연구가 행해져 왔다. 이 방법의 경우 정량적으로 정확한 물성 측정이 가능하지만 시험기와 시험편의 설치가 복잡하고 변형 상황의 실시간(in-situ) 관찰이 곤란한 문제점이 있다. 둘째로, MEMS 제작 공정을 활용하여 시험기와 시험편을 일체화시켜 시험을 수행하는 LOC(lab on a chip) 방법으로서 Haque와 Saif[8,9]는 이를 이용하여 수십 나노미터 두께의 알루미늄 시험편에 대한 물성 시험을 수행하기에 이르렀다. 이 방법의 경우 실시간 관찰이 용이하여 변형 기구 파악에 유리하지만 시험편과 시험기의 일체화 제한 조건으로 인해 다양한 재료

의 물성 시험에 적용하기 어려운 단점이 있다. 셋째로, MEMS 시험기에 박막 시험편을 집속이온빔(FIB; focused ion beam) 등을 활용하여 직접 제작하여 시험하는 Isono 등[10]의 연구가 있다. 이 경우 시험기와 시험편을 따로 제작하여 사용할 수 있는 장점이 있는 반면 집속이온빔을 사용함으로써 시험편의 미세구조가 바뀌는 단점이 있다. 마지막으로 막(membrane)이나 띠(strip) 형태의 시험편에 면의 힘(out-of-plane force)을 인가하여 시험편에는 인장 응력이 생기도록 하여 인장 물성을 얻는 막 처짐 시험법(MDE; membrane deflection experiment)[11,12]이 있다. 이 방법의 경우 다른 방법에 비해 응력-변형을 곡선을 비교적 손쉽게 얻을 수 있는 반면 응력과 변형을 측정된 힘과 처짐 데이터만을 가지고 계산하고, 시험편과 시험기의 정렬 오류 등으로 인해 부정확한 물성 값을 얻게 되는 단점이 있다.

본 연구에서는 위에서 열거한 네 가지 시험법들의 장점을 채택한 새로운 시험법 개발에 근본 목적을 두고 있다. 이를 위해 시험이 가장 용이한 막 처짐 시험법을 이용하되, 측정 오차를 야기하는 막 처짐 각과 변형을 측정을 백색광 간섭계를 이용하여 직접적으로 측정하는 방법으로 대체하였다. 개발된 시험법의 유용성을 검증해 보기 위해 알루미늄 박막 시험편을 스퍼터링 공정으로 제작하여 대기 환경에서 인장 물성을 측정하였다.

2. 시험장치 및 방법

2.1. 시험편

시험편은 Fig. 1과 같은 MEMS 공정을 이용하여 제작하였으며 일례를 Fig. 2에 나타내었다. 가로 1 cm, 세로 1 cm인 실리콘 다이(dies)에 1-5개의 시험편을 제작하였다. 시험 부(test section)는 두께 1.1 μm , 폭 500 μm 이며 길이는 2.4 mm이다. 막 처짐 시험 시 게이지 길이(gauge length)를 명확하게 하기 위해 중앙에 제작한 크롬 마커(marker) 외에 FIB 공정을 이용하여 시험편 끝부분에 새로운 마커를 증착하였다. 최종 시험편의 일례를 Fig. 3에 나타내었다. 수평 해상도를 높이기 위해 시험편의 절반만을 사용하였다. 중앙 크롬 마커 사이 영역에 힘을 인가하며 끝단 마커와 중앙 좌측 크롬 마커 사이의 길이 변화를 측정하였다.

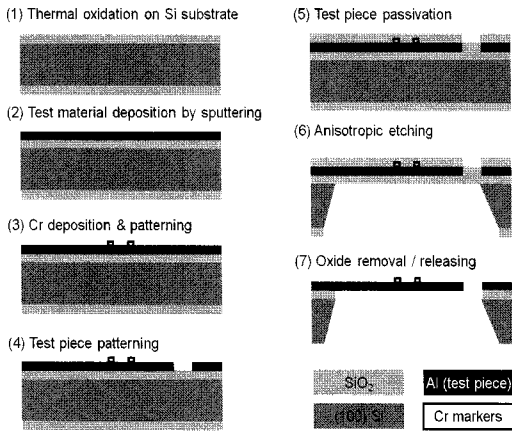


Fig. 1 Schematic microfabrication processes to make sputtered Al specimens with markers

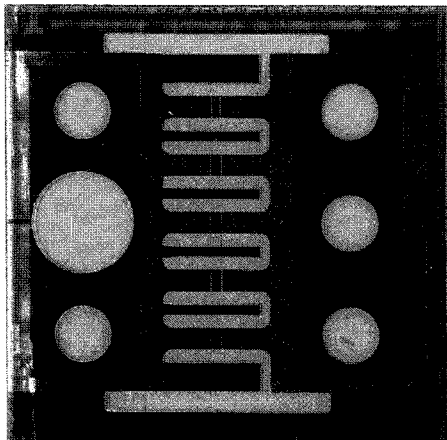


Fig. 2 Five Al specimens on a Si die

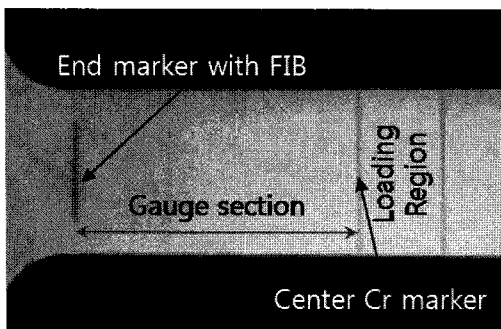


Fig. 3 Enlarged half view of an Al specimen having an FIB deposited end marker and two center Cr markers by microfabrication processes of Fig. 1

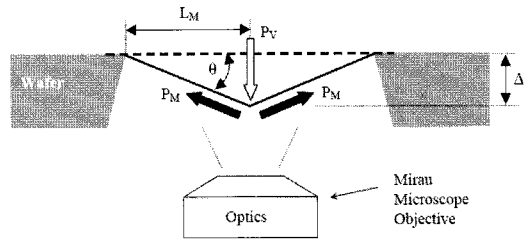


Fig. 4 Side view of the MDE test showing vertical load being applied by the nanoindenter, P_V , the membrane in-plane load, P_M , and the position of the Mirau microscope objective[11]

2.2. 막 처짐 시험법 (MDE)

막 처짐 시험법은 Espinosa 등[11]에 의해 개발된 방법으로서 Fig. 4와 같이 양 끝단이 고정된 자유지지 띠 형상 시험편의 중앙에 쐐기형 팁(wedge tip)을 이용하여 면의 정적 선 힘(static out-of-plane line force, P_V)을 인가하여 시험편에 인장력(tensile force)이 생기도록 하여 인장 시험과 유사한 시험을 수행하게 된다. Fig. 4의 기하학적 형태와 삼각함수를 이용하면 시험편에 걸리는 인장력과 변형량을 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$P_M = \frac{P_V}{2\sin\theta} \tag{1}$$

$$\tan\theta = \frac{\Delta}{L_M} \tag{2}$$

위 두 식으로부터 시험편에 발생하는 응력과 변형률은 아래와 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$S_M = \frac{P_M}{A_M} = \frac{P_V}{2Wt\sin\theta} \tag{3}$$

$$e_M = \frac{\delta}{L_M} = \frac{\sqrt{L_M^2 + \Delta^2} - L_M}{L_M} \tag{4}$$

여기서 S 와 e 는 공칭 응력과 공칭 변형률, W 는 시험편 폭, t 는 두께, δ 는 변형량, Δ 는 처짐량이다.

막 처짐 시험은 자유지지 박막의 기계적 물성을 단축 인장 시험에 비해 비교적 적은 노력으로 측정할 수 있는 유용한 방법이지만, 시험편에 발생하는 변형률을 직접 측정하지 않고 하중 선 처짐(load

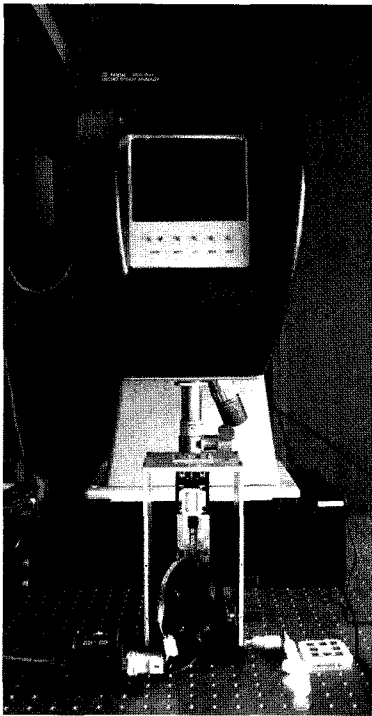


Fig. 5 Modified membrane deflection test system

line deflection; Fig. 4의 Δ)을 이용하여 간접적으로 측정하기 때문에 시험 결과의 해석 시에 주의가 필요하다. 이에 대한 체계적 해석은 Kim 등의 논문[12]에 상세히 기술되어 있다.

2.3. 막 처짐 시험 시스템 구성

시험 시스템은 시험편에 수직 힘을 인가하고 인가된 힘을 측정하기 위한 막 처짐 시험기와 시험편의 변형을 측정하기 위한 백색광 간섭 현미경의 두 부분으로 구성되어져 있으며 이를 Fig. 5에 나타내었다.

백색광 간섭 현미경은 상용 제품(MSA-400, Polytec)을 사용하였고, 면의 분해능은 1 nm 내외이다. 시험기는 백색광 간섭 현미경과의 조합을 위해 Fig. 4에 나타난 개략도와 상하 대칭으로 제작하였다. Fig. 5에서 렌즈 아래 부분에 보이는 것이 직접 제작하여 사용한 시험기이다. 시험기는 전체 크기를 폭 120 mm, 깊이 120 mm, 높이 220 mm로 제작하여 현미경 아래에 설치가 가능하도록 하였다. 시험기는 시험편에 힘을 가하기 위한 모터, 가해지는 힘을 정밀하게 측정하기 위한 1 N 용량 하

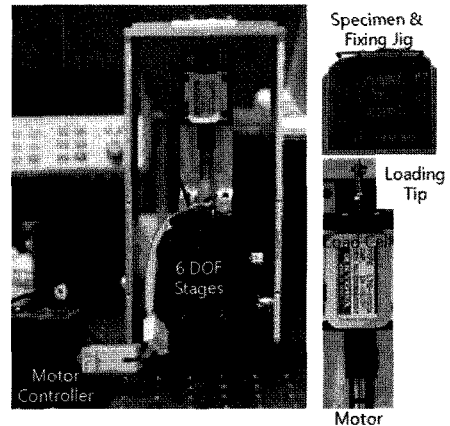


Fig. 6 Details of the homemade membrane deflection tester

중계(load cell; LTS-1000, Kyowa), 시험편을 시험기에 고정하기 위한 고정 지그 및 시험편과 시험기 사이의 정확한 정렬을 위한 6 자유도 이송대(6 DOF stages)로 구성되어 있다. 시험기와 각 부분의 확대도를 Fig. 6에 나타내었다.

2.4. 시험 절차

다음과 같은 절차를 거쳐 시험을 수행하였다. 시험편 다이를 Fig. 6 우측 상단의 그림과 같이 고정 지그 홈에 끼워 넣은 후 자외선 경화 접착제(UV adhesive)를 다이 모서리에 바른 후 자외선을 조사하여 경화시켜 고정시킨다. 시험기 팁을 기준 위치에서 5 mm 가량 내려 시험편 고정 지그와 팁 사이의 간섭을 피한다. 고정 지그를 시험기에 결합한 후 별도의 광학 현미경을 이용하여 시험편과 팁 사이의 정렬을 일차로 수행한다. 시험기를 백색광 간섭 현미경 아래에 설치한 후 재차 정렬한다. 팁을 상승시켜 시험편에 예 하중(pre-load)을 가한 다음 최종 정렬을 수행한다. 팁을 시험편에서 떼 후 하중계의 영점을 맞춘다. 이 상태에서 팁을 정해진 속도로 올리고 내리면서 시험을 수행한다.

3. 시험편 정렬 및 데이터 처리 과정

3.1. 정렬 방법

막 처짐 시험의 경우 단축 인장 시험에 비해서 정렬이 상대적으로 용이한 편이지만 정확한 실험을

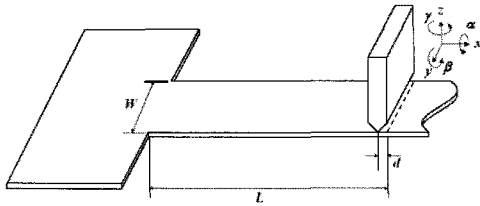


Fig. 7 Configuration of specimen and error sources[13]

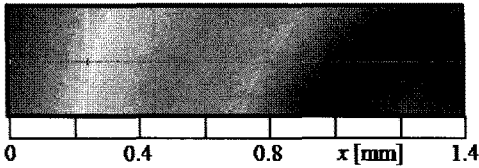


Fig. 8 Fringe pattern for a misaligned specimen

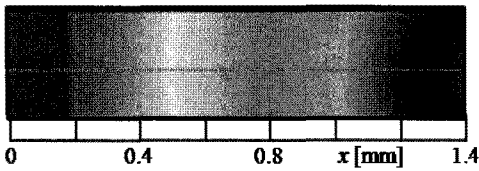


Fig. 9 Fringe pattern for a well aligned specimen

위해서는 이의 영향을 고려해야 한다. 이를 위해 Park 등[13]은 시험 결과에 영향을 줄 수 있는 인자들을 파악하여 각 인자들이 실험 결과에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 연구하였다. 이 연구를 통해 Park 등은 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 시험편과 팁의 정렬 시 시험편 길이방향을 축으로 하는 경사각(Fig. 7의 α)은 시험결과에 5% 이상의 오차를 유발할 수 있으므로 정렬 시 주의가 필요하다. 둘째, 각 α 이외의 다른 요인들(β, γ, δ)은 목적측으로 보정이 가능한 범위(2° 이내) 내에서는 0.5% 이하의 오차를 유발할 수 있으나 이는 무시할 수 있는 수준이다. 셋째, 압자의 곡률 반경은 실험결과에 영향을 미치지 않는다.

위와 같은 연구 결과를 바탕으로 시험편 길이 방향 축에 대한 정렬에 노력을 기울였다. 시험편에 예 하중을 인가하면서 백색광 간섭무늬를 관찰하였을 때 팁과 시험편 사이의 정렬 상태가 좋지 않으면 Fig. 8과 같이 폭 방향으로 비대칭인 간섭무늬가 측정된다.

실험 시 위와 같은 비대칭 간섭무늬가 관찰될 경우 이송대를 조정하여 대칭이 되도록 재차 정렬하

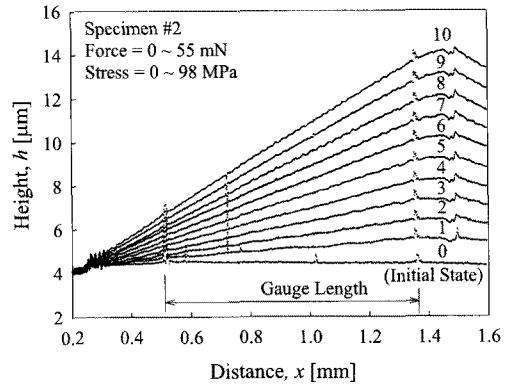


Fig. 10 Height measurement along the specimen length direction in the initial loading stage

였다. 정렬 상태가 양호할 경우 Fig. 9와 같은 간섭 무늬가 관찰된다. 이러한 절차를 통해 시험편을 정확하게 정렬하였다.

3.2. 데이터 처리 과정

팁이 시험편에 닿는 순간부터 일정 변위 증분 (displacement increment)만큼씩 변위를 증가시켜가면서 시험편의 높이 변화와 그 때의 힘을 측정한다. 이때 수평 방향의 해상도를 높이기 위해 시험편의 절반만 면의 방향으로 스캔하였다. 시험 초기에는 일정 변위가 증가할 때 힘 변화가 크지 않으나 시험편이 완전히 퍼진 상태에서는 미소한 변위 변화에도 힘이 크게 변하므로 일정 변위 대신 힘 변화량이 일정하도록 제어하면서 데이터를 획득하였다.

시험 초기의 높이 변화의 일례를 Fig. 10에 나타내었다. 힘을 가하기 전 초기 상태에서 10번째 데이터까지의 형상을 나타낸 것이다. 그래프 안의 숫자는 데이터 번호를 나타낸다. 그림에서 거리 0.5와 1.35 mm 부근에서 높이 값이 튀는 것은 Fig. 3에서와 같이 시험편에 증착한 두 개의 마커에 의한 것이며 이 두 마커 사이의 길이 변화를 이용하여 변형률을 계산하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 게이지 길이 내에서 비 직선적인 형상이 측정되었다. 이는 시험편에 가해진 힘이 적어 시험편이 완전히 편평하게 퍼지지 않았음을 의미한다.

시험편에 가해지는 힘을 계속 증가시키면 시험편은 직선 형상이 되고 동일한 힘 증가에 따른 높이 변화가 크지 않게 된다. 이의 전형적인 예를 Fig. 11

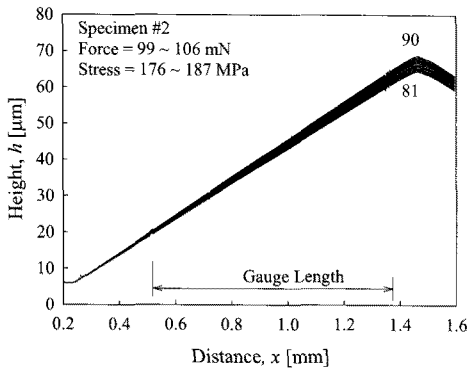


Fig. 11 Height measurement along the specimen length direction in the intermediate loading stage

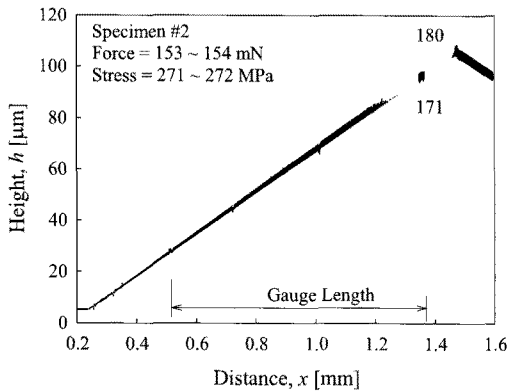


Fig. 12 Height measurement along the specimen length direction in the final loading stage

에 나타내었다. 게이지 길이 내에서 직선적인 거동을 하고 있음을 알 수 있다.

이후 계속해서 힘을 증가시키면 소성 변형이 생기게 되고 이로 인해 변형이 크게 발생된다. 이 경우 백색광 간섭 현미경의 측정 범위를 벗어나게 되어 일부 구간의 경우 측정이 되지 않게 된다. 이를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 높이 부근에서 형상 측정이 되지 않은 것을 알 수 있다. 이 시점에서 실험을 중단하였다.

높이 측정이 가능한 범위에서 얻은 Figs. 10~12와 같은 모든 높이 데이터 중에서 게이지 영역 내의 데이터를 가지고 직선 회귀 근사법(linear least squares method)에 의해 직선 식을 구한 뒤 이를 이용하여 길이 변화를 계산하였다. 이로부터 얻은 변형률과 식 (3)을 이용하여 계산된 응력으로부터 응력-변형률 선도를 얻었다. 이와 같은 과정을 거

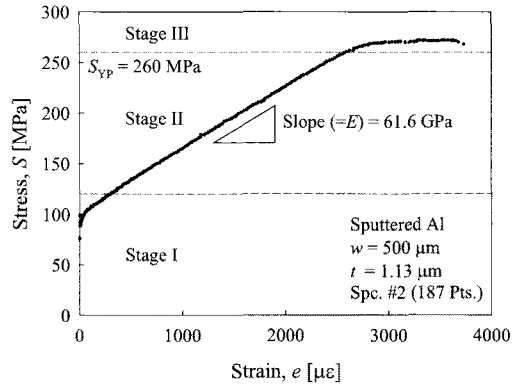


Fig. 13 Stress-strain curve

쳐 얻은 응력-변형률 선도의 일례를 Fig. 13에 나타내었다. 모든 응력-변형률 선도는 그래프에 표시한 것과 같이 세 단계의 하중으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 초기에 보이는 비직선적 거동(Stage I)으로서 Fig. 10에 나타난 것과 같은 높이 데이터로부터 계산된 부분이다. 이러한 거동은 막 처짐 시험뿐만 아니라 대부분의 단축 인장 시험에서도 나타나는 현상으로서 시험편이 편평하게 퍼지는 과정이다. 두 번째는 직선적인 거동(Stage II)을 보이는 단계로서 Fig. 11과 같은 높이 데이터로부터 산정된 구간이다. 마지막 단계(Stage III)는 재료의 소성 변형과 높이 측정의 한계로 인해 나타나는 비선형 구간이다.

위와 같은 응력-변형률 선도에서 직선 부분(Stage II)의 기울기를 영 계수(Young's modulus)로, 직선 부분에서 벗어나기 시작하는 점(Stage II에서 Stage III로 바뀌는 점)의 응력 값을 항복점(yield point) 응력으로 하였다.

4. 실험 결과 및 토론

4.1. 응력-변형률 선도

여섯 개의 시험편에 대한 응력-변형률 선도를 Fig. 14에 나타내었다. 약간의 흠어짐은 보이지만 전형적인 인장 시험 시의 응력-변형률 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 그래프에서 파단 시까지의 응력-변형률 선도가 없는 것은 백색광 간섭 현미경의 경우 기울기가 5°를 초과할 경우 형상 측정이 어렵기 때문이다.

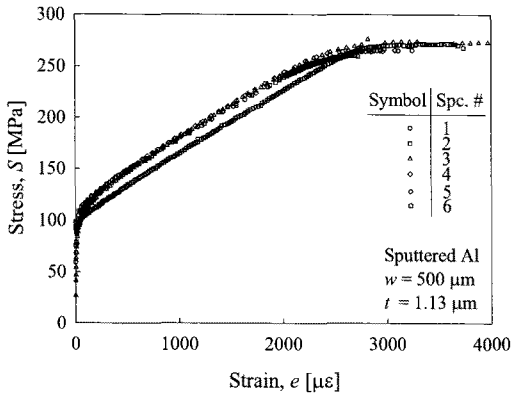


Fig. 14 Stress-strain curves from 6 tests

Table 1 Mechanical properties from 6 tests

Test No.	E [GPa]	S_{YP} [MPa]
1	60	250
2	62	260
3	65	240
4	63	250
5	62	240
6	61	240
Mean \pm S.D.	62 \pm 2	247 \pm 8

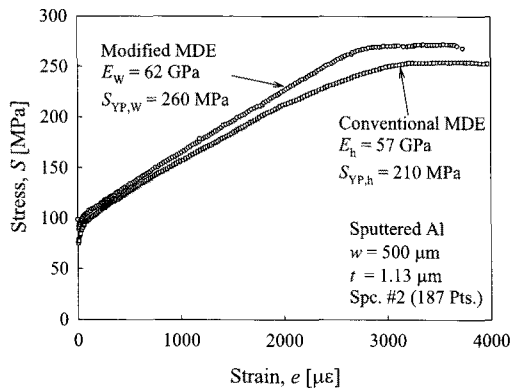


Fig. 15 Stress-strain curves from conventional and modified membrane deflection methods

4.2. 힘-변위 곡선에 의한 응력-변형률 선도

본 연구에서는 백색광 간섭계를 통해 얻은 시험편 형상 변화로부터 변형률을 직접 측정하는 방법을 이용하였다. 그러나 일반적인 막 처짐 시험의 경우 막의 처짐만을 측정된 뒤 식 (4)에 대입하여 변형률을 계산하는 것이 일반적이다. 두 가지 방법의 차이를 보기 위해 변형률을 두 가지 방법으로 각각 산정한 뒤 응력-변형률 선도를 Fig. 15에 함께 나타내었다. 백색광 간섭계를 이용한 응력-변형률 선도의 경우 선형 구간이 더 넓고 이를 이용하여 얻은 Young 계수(E_w)와 항복점($S_{VP,W}$)이 처짐 값을 이용하여 얻은 값(E_r 와 $S_{VP,R}$)에 비해 더 높음을 알 수 있다. 처짐의 경우 게이지 영역의 변형뿐만 아니라 나머지 시험편의 변형까지 고려되기 때문에 더 큰 처짐이 생기게 되고 이로 인해 변형률 값이 더 크게 측정되기 때문이다.

4.3. 알루미늄 박막의 기계적 물성 값

Fig. 14의 응력-변형률 선도로부터 산출한 Young 계수와 항복점 응력을 Table 1에 정리하였다. Young 계수 산출 시 직선 구간 설정에 따라 물성 값이 달라지므로 일관성을 유지하기 위하여 직선회귀근사 시 상관계수(correlation coefficient) 값이 0.999 이상이 되도록 하였다. Young 계수 값은 거시 알루미늄의 탄성계수인 70 GPa보다 10%정도 낮은 값을 보이고 있으나 박막 형태의 알루미늄에 대한 값[14]인 62 GPa과는 유사함을 알 수 있다.

5. 결론

변의 분해능이 우수한 백색광간섭계를 이용한 막 처짐 시험 시스템 및 시험 절차를 개발하였다. 막 처짐 값을 이용하여 변형률을 계산하였던 종래의 막 처짐 시험 대신 사전에 정의된 게이지 길이 내에서의 길이변화를 백색광간섭계를 이용하여 직접적으로 측정하여 보다 정확한 변형률 값을 얻을 수 있었다. 백색광간섭계는 시험편과 시험기 사이의 정렬에도 매우 유용하게 사용되었다. 스퍼터링에 의해 제작된 1 μm 두께 알루미늄 박막의 응력-변형률 선도를 얻을 수 있었으며, 이로부터 Young 계수 값은 62 GPa, 항복점 응력은 247 MPa로 측정되었다. 백색광간섭계를 이용한 막 처짐 시험법은 종래의 막 처짐 시험의 장점인 시험편 제작 및 시험의 용이성뿐만 아니라, 단축 인장 시험의 장점인 정확한 기계적 물성 측정도 가능한 방법임이 입증되었다. 또한 시험편 두께에 대한 제한이 없기 때문에 마이크로 두께뿐만 아니라 나노 두께를 갖는 시험편에도 손쉽게 적용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

참고문헌

- [1] L. B. Freund and S. Suresh, "Thin film materials," 1st Ed., pp. 1-2, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, (2003)
- [2] R. L. Norton, "Machine design," 2nd Ed., pp. 31-35, Prentice Hall Inc., N. J., USA, (2000)
- [3] D. T. Read and J. W. Dally, "A new method for measuring the strength and ductility of thin films," *Journal of Materials Research*, Vol. 8, pp. 1542-1549 (1993)
- [4] 오충석, W. N. Sharpe, Jr., "ISDG를 이용한 다결정실리콘의 기계적 물성값 측정법", *한국정밀공학회지*, Vol. 27, No. 7, pp. 171-178 (2004)
- [5] 박준협, 김윤제, "박막의 기계적 물성을 위한 새로운 인장 시편 및 시험기", *대한기계학회논문집*, Vol. 31, No. 6, pp. 644-650 (2007)
- [6] T. Tsuchiya, M. Shikida and K. Sato, "Tensile testing system for sub-micrometer thin films," *Sensors and Actuators A*, Vol. 97-98, pp. 492-496 (2002)
- [7] I. Chasiotis and W. G. Knauss, "A new microtensile tester for the study of MEMS materials with the aid of atomic force microscopy," *Experimental Mechanics*, Vol. 42, pp. 51-57 (2002)
- [8] M. A. Haque and M. T. A. Saif, "Application of MEMS force sensors for in situ mechanical characterization of nano-scale thin films in SEM and TEM," *Sensors and Actuators A*, Vol. 97-98, pp. 239-245 (2002)
- [9] M. A. Haque and M. T. A. Saif, "In-situ tensile testing of nano-scale specimens in SEM and TEM," *Experimental Mechanics*, Vol. 42, pp. 123-128 (2002)
- [10] Y. Isono, M. Kiuchi, S. Sugiyama, T. Morita and S. Matsui, "Mechanical characteristic of FIB deposited carbon nanowire by electrostatic actuated nano tensile testing device (EANAT)," 18th International Conference on MEMS, (2005)
- [11] H. D. Espinosa, B. C. Prorok and M. Fischer, "A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS materials," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 51, pp. 47-67 (2003)
- [12] 박정민, 김재현, 이학주, "자유지지 박막의 기계적 물성 측정을 위한 띠굽힘시험기의 개발 및 검증", *대한기계학회 2008년도 추계학술대회*, pp. 49-55 (2008)
- [13] 박정민, 김재현, 이학주, "유한 요소법을 통한 띠 굽힘 시험의 오차 요인에 관한 연구", *한국정밀공학회 2007년도 추계학술대회*, pp. 479-480 (2007)
- [14] ASM, "Metals handbook," Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals, 10th Ed., pp. 1099-1100 (1990)