한국정밀공학회지 제 23 권 제 3 호 (2006 년 3 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 3, March 2006

# 박막 재료 시험기 개발 및 응용

오충석#, 안현균*, 이학주*

# Development and Applications of Material Testers for the Thin Films

Chung-Seog Oh#, Hyun-Gyun Ahn* and Hak-Joo Lee*

## 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 miniature tester to measure the mechanical properties of a thin film. Two testers are designed and set up in small size of 62 mm width, 20 mm depth and 90-120 mm height to fit in a chamber of scanning electron microscope (SEM). One tester has a homemade 0.2 N load cell and a low-priced electromagnetic actuator. The other has a commercial 5 N load cell, a 52 μm piezoelectric actuator and some novel grips. Two types of 3.5 microns thick polysilicon specimen are tested to prove the testers' applicability. The strain is measured by the two ways. Firstly, it is measured by an ISDG system in the atmosphere for the reference. Secondly, the same test is repeated in a SEM chamber to monitor the strain as an in-situ experiment. The strain is evaluated by observing the gap change between two markers.

**Key Words**: Elastic modulus (탄성계수), In-situ (실시간), ISDG (레이저간섭변위게이지), Material tester (재료시험기), Scanning electron microscope (주사전자현미경), Thin-film (박막), Piezoelectric actuator (압전작동기), Polycrystalline silicon (다결정실리콘)

## 기호설명

$\varepsilon$ = engineering strain
$\sigma$ = engineering stress
$E$ = Young's modulus

## 1. 서론

마이크로 전자 장치 (microelectronic devices) 와 패키지 (packages), MEMS (MicroElectroMechanical 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 물성값들이 설계 범위 내에 있는지를 평가할 필요가 있다. Norton[2] 은 그의 저서에서 일반적인 기계 구조물의 설계에 있어서 가장 기초적인 시험으로

접수일: 2005 년 8 월 05 일; 게재승인일: 2006 년 1 월 13 일
# 교신저자: 금오공과대학교 기계공학부
E-mail ocs@kumoh.ac.kr Tel. (054) 478-7323
* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

인장시험 (tensile test)을 들고 있다. 설계자는 이 시험으로부터 얻어진 탄성계수, 항복강도, 인장강도 등을 이용하여 구조물을 설계할 수 있게 된다. 박막에 대한 인장 시험은 응력-변형률 곡선으로부터 기초적인 기계 물성값을 직접적으로 얻을 수 있다는 큰 장점이 있으나, 거시적 (bulk)인 시험과 달리 시험편 제작, 작동기와 시험편 연결 (gripping), 하중 및 변형률 측정에 있어서 상당한 어려움이 따르고 있다.

박막에 대한 인장시험에 대해서는 통일된 시험 규격 (standard test methods)이 없기 때문에 각국에서 여러 연구자들에 의해 다양한 방법으로 시도되고 있다. 이를 시험기 측면에서 구분해 보면 크게 세 가지 형태로 구분할 수 있다. 첫째로, 정밀하게 제작된 장치 형태의 시험기와 이 시험기에 적합하도록 고안된 시험편을 이용하는 방법이다. Read 와 Dally [3] 는 이러한 종류의 인장 시험법에 대한 기초를 확립하였으며 이를 발전시킨 형태의 연구가 국내에서도 행해지고 있다.[4,5] 이외에도 정밀 저울 (balance)을 개량한 시험기 [6]와 원자현미경 (atomic force microscope)을 이용한 측정 예 [7] 등 상당히 많은 연구가 행해져 왔다. 둘째로, MEMS 제작 공정을 활용하여 시험기와 시험편을 일체화 시켜 시험을 수행하는 LOC (Lab On a Chip) 방법으로서 Haque 와 Saif [8,9]는 이를 이용하여 수십 나노미터 두께의 알루미늄 시험편에 대한 물성 시험을 수행하기에 이르렀다. 마지막으로 MEMS 시험기에 박막 시험편을 집속이온빔 (focused ion beam) 등을 활용하여 직접 증착하여 시험하는 Isono 등 [10]의 연구가 있다.

본 연구에서는 설치가 복잡하고 변형 상황의 실시간 (in-situ) 관찰이 곤란한 시스템 시험기, 시험편과 시험기의 일체화 제한 조건으로 인해 다양한 재료의 물성 시험에 적용하기 어려운 LOC 시험기 및 정량적인 하중 측정이 어려운 MEMS 시험기 들의 단점들을 보완하여 박막 재료를 포함한 소형 구조물의 기계적 물성 값을 측정할 수 있는 소형 박막 재료 시험기를 개발하는 데 그 목적을 두고 있다. 또한 제작된 시험기의 유용성을 검증해 보기 위해 다결정 실리콘 (polycrystalline silicon) 박막 시험편을 제작하여 대기 환경에서 인장 시험을 수행한 다음 일반적인 주사전자현미경 (scanning electron microscope) 챔버 (chamber) 내에 설치하여 동일한 시험을 반복 수행하였다.

## 2. 재료 시험기 개발

### 2.1 시험기 구성 및 특징

시험기 개발 과정에서 시행오차를 줄이기 위해 3D 모델러 (modeler)의 일종인 CATIA®[11] 소프트웨어를 활용하였다. 이를 이용하여 작성한 시험기 전체 모델을 Fig. 1 에 나타내었다. 시험기 전체 크기는 보편적으로 널리 사용되는 상용 주사전자현미경에서도 사용할 수 있도록 폭 62 mm, 깊이 20 mm 로 하였으며, 높이는 2 개의 강 봉 (steel rod) 기둥 (column; ①)에 의해 안내되는 크로스 헤드 (cross head; ②)를 이용하여 90~120 mm 까지 조절이 가능하도록 하였다. 시험기는 하중계 (load cell; ③), 압전 작동기 (piezoelectric actuator; ④), 하중계 및 작동기 측 그립 (grip; ⑤, ⑥) 및 작동기 측 하중 선 (load line) 정렬 장치 (aligner; ⑦, ⑧)로 구성되어 있다. 또한 그림과 같이 수직 방향뿐만 아니라 수평 방향 및 도립형 (inverted)으로도 설치가 가능하도록 여러 방향으로 고정 구멍들 (fixing holes; ⑨)을 가공해 두었다.

실제로는 위에서 설명한 시험기의 하중계 (③)와 작동기 부분 (④,⑧)을 변경한 또 다른 방식의 시험기도 제작하였다. 다음 절에서는 이들 구성요소들의 특징을 상세하게 기술한다.

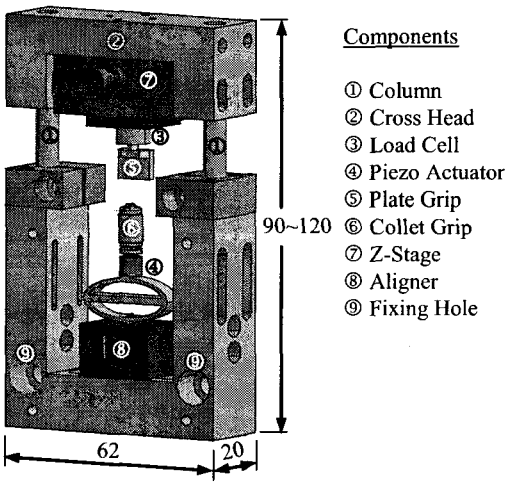
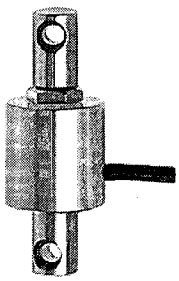



Fig. 1 The assembled 3D model of a miniature tester (Dimensions in mm)

## 2.2 하중계

### 2.2.1 상용 하중계

다양한 방식의 상용 하중계를 이용하여 시험해본 결과 선형성 (linearity), 안정성 (stability) 및 이력현상 (hysteresis) 측면에서 가장 우수한 특성을 보이는 변형률 게이지 (strain gage) 방식의 초소형 하중계를 선택하였다. 이 하중계의 실제 사진과 특징을 정리하여 Fig. 2 에 나타내었다.

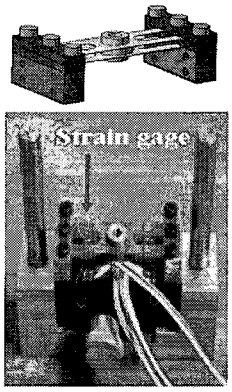


Specifications
- Model: BMDZ (Wazau)
- Rated Capacity: 5 N
- Diameter: 8 mm
- Height: 15 mm
- Sensitivity: 1.5 ± 0.5 %
- Nonlinearity: ± 0.2 % ↓
- Hysteresis: ± 0.1 % ↓

Fig. 2 A commercial metal foil strain gage type miniature load cell[12]

### 2.2.2 자작 하중계

일반적으로 상용 하중계는 사용자의 다양한 요구를 만족시키기 어렵다. 따라서 0.2 N 용량의 하중계를 선형 탄성 유한요소해석을 통해 설계하고 8 장의 120 Ω 변형률 게이지를 굽힘 형식으로 부착하여 하중계를 직접 제작하였다. 이에 대한 모델과 실제 모습, 그리고 F1 급 표준 분동을 이용한 정적 특성 평가 결과를 Fig. 3 에 나타내었다.



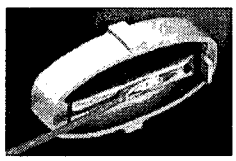

Specifications
- Rated Capacity: 0.2 N
- 8 Strain Gages (120 Ω)
- Sensitivity: 100 mV/V
- Nonlinearity: ± 0.25 % ↓
- Resolution: 1.5 mN
- Hysteresis: 8 % ↓

Fig. 3 A homemade load cell

## 2.3 작동 장치

### 2.3.1 상용 압전 작동기

먼저 소형 시험기의 구동 장치로서 널리 사용되고 있는 상용 압전형 (piezoelectric type) 작동기를 이용하였다. 압전 작동기의 경우 분해능이 우수하지만 이동 거리 (travel)가 짧기 때문에 변위 증폭식 압전 작동기 (amplified piezoelectric actuator)를 이용하였다. 이 작동기와 그 주요 특성을 Fig. 4 에 정리하였다.

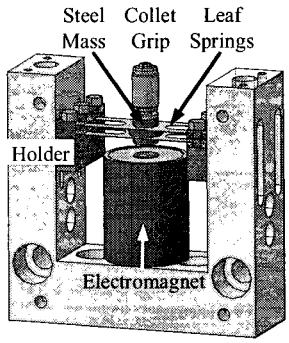


Specifications
- Model: APA50S (Cedrat)
- Displacement: 52 μm
- Resolution: 0.5 nm
- Resonant Freq.: 13.5 kHz
- Force: 45 N
- Size (H×W×L in mm): 12×9×25

Fig. 4 The amplified piezoelectric actuator[13]

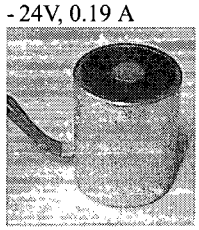
### 2.3.2 전자석 작동기

고가의 압전 작동기를 대체하기 위하여 주변에서 쉽게 구할 수 있는 전자석 (electromagnet)을 재료 시험기용 작동기로 활용하였다. 이를 Fig. 5(a)에 보였다. 콜릿 그립의 하단에 강재 (steel mass)를 부착하고 이를 2 장의 판 스프링 (leaf springs)으로 고정하여 직진 운동을 하도록 유도하였다. 참고적으로 실제 사용한 전자석과 그 주요 사양을 Fig. 5(b)에 나타내었다.




(a)

Specifications
- Force: 200 N
- Size: $\phi$30×40 mm
- 24V, 0.19 A



(b)

Fig. 5 An integrated electromagnetic actuator

## 2.4 그립

박막 시험편의 경우 하나의 다이 (die) 위에 여러 개의 시험편을 설치하는 경우가 많다. 따라서 이들 시험편에 작동기를 일렬로 정렬하기 위해서는 필요에 따라 다이를 이동시켜야 한다. 이를 위해 두 가지 방식의 하중계 측 그립 (⑤)을 고안하였다. 먼저 Fig. 6(a)와 같이 "L"자 형상의 기준 지그 (base jig) 안쪽 모서리에 영구자석을 부착한 뒤, 시험편 다이를 장착한 소형 철판 (steel plate)을 이 자석에 밀착되도록 한다. 시험편의 위치를 변경시킬 필요가 있을 경우 이 철판을 미세 조작기 (micro manipulator)를 이용하여 밀어서 정밀하게 이동시키는 방식이다. 시험편이 한 다이에 양 방향으로 놓여 있는 경우에는 이 철판을 떼어서 반대 방향으로 부착시키면 된다.

시험편의 위치를 빈번하게 바꾸지 않아도 될 경우나 강한 접착력이 필요할 경우에는 Fig. 6(b)와 같은 왁스 그립을 활용하였다. 상온에서는 고체 상태이지만 온도가 65 °C 정도로 올라 가면 액상으로 바뀌는 왁스를 이용하는 방식이다. 그림과 같은 기준 지그를 열판 (hot plate) 위에서 가열한 상태에서 소량의 왁스를 바른 시험편 다이를 올려놓으면 왁스가 녹게 된다. 이 상태에서 다이의 위치를 정확하게 조정한 뒤 온도를 낮추어 시험편을 지그 위에 직접 고정하는 방식이다.

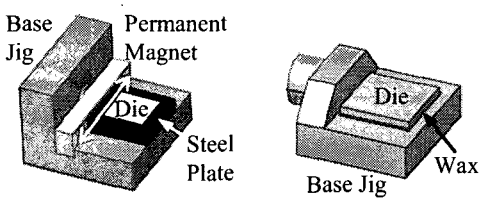



Fig. 6 Two kinds of load cell side jig to fix a specimen to a desired location

자유지지 박막 시험편 (freestanding thin film specimens)의 한쪽은 기지 (substrate)에 고정되어 있는 경우가 많기 때문에 이 시험편에 하중을 인가하기 위해서는 나머지 한쪽을 작동기에 연결하여야 한다. 본 연구에서는 140 μm 직경의 탄화규소 선 (SiC wire)을 작동기와 시험편 연결에 활용하였다. 이를 위해 Fig. 7 과 같은 소형 콜릿 그립을 설계 및 제작하여 작동기 측에 부착한 뒤, 100~200 μm 직경의 와이어를 끼우는 방식으로 하여 탈 부착이 용이하도록 하였다. 시험편과의 세부 연결 방법에 대해서는 실험방법에서 설명한다.

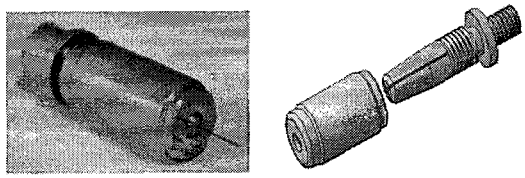
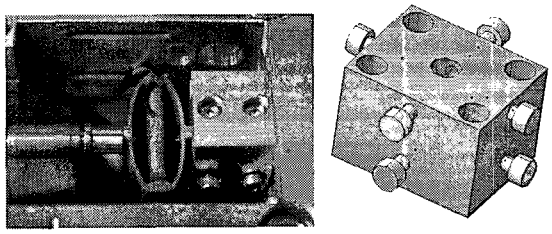


Fig. 7 A miniature collet grip with SiC wire

## 2.5 정렬 장치

최근의 연구 결과 [14] 시험편의 정렬 상태가 박막 재료의 물성 값에 많은 영향을 주는 사실이 밝혀졌다. 따라서 하중계, 하중계측 그립, 시험편, 작동기측 그립 및 작동기에 이르는 하중 선을 일렬로 정렬할 수 있는 정렬 장치가 필요하다. 먼저 하중계 측에는 시험편과의 면외 (out-of-plane) 정렬을 위해 본 시험기에 적합하도록 제작된 소형 스테이지 (Z-stage; ⑦)를 이용하였다. 다음으로 작동기 측과 시험편의 각 정렬 (tilting alignment)을 위해 Fig. 8(a)와 같은 정렬 장치를 이용하였다. 이 정렬 장치의 원리를 보이기 위해 Fig. 8(b)에 모델을 표시하였다. 정렬 장치의 중앙에 작동기를 끼우고 각 정렬이 필요할 경우 그림에 보이는 볼트를 조정하여 작동기의 각을 변화시키는 방식이다. 이상에서 열거된 장치들을 이용하여 세 방향의 위치($x$, $y$, $z$) 정렬과 각($\theta_x$, $\theta_y$, $\theta_z$) 정렬이 가능하게 하였다. 이 각 정렬 장치는 공간 제약 문제로 전자석 방식에는 적용하지 못하였다.

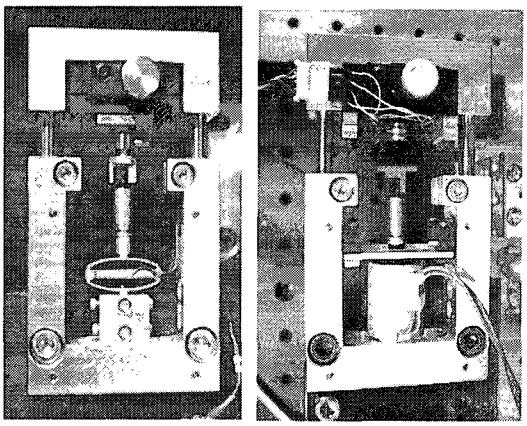


(a) (b)

Fig. 8 A tilting aligner

### 2.6 시험기 조립

이상에서 설명한 모든 구성 부품들을 조립하여 Fig. 9 에 나타내었다. 시험기 본체의 대부분은 통전성이 우수하고 가벼운 알루미늄 합금으로 제작되었다.



(a) (b)

Fig. 9 The assembled thin film material testers

## 3. 적용 예

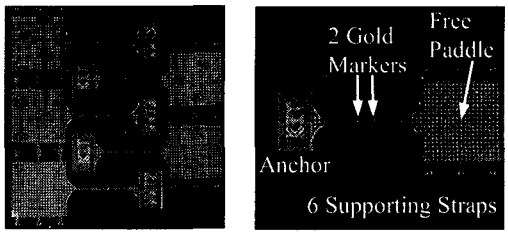
개발된 시험기의 활용성을 검증해 보기 위해 MEMS 용 박막 재료로서 널리 사용되고 있는 다결정 실리콘 시험편을 이용하여 인장 시험을 수행하였다.

### 3.1 대기 환경에서의 실험

일차적으로 실험이 용이한 실온 대기 환경에서 인장 시험을 수행하였다.

#### 3.1.1 시험편

시험편은 두께가 3.5 μm, 폭이 50 μm, 시험부 길이 (length of test section) 1 mm 인 다결정 실리콘으로서 미국 MEMScAP 사의 PolyMUMPs (PolySi Multi-User MEMS Processes) 공정[15]을 이용하여 제작하였다. 제작된 시험편을 Fig. 10(a)에 나타내었다. 일 회의 공정으로 다수의 시험편을 확보하기 위하여 5 mm × 5 mm 의 다이에 5 개의 시험편을 배치하였다. 이 시험편들 중 하나를 확대하여 Fig. 10(b)에 표시하였다.




(a) (b)

Fig. 10 A silicon die (a) containing 5 polysilicon specimens and an enlarged specimen (b)

인장 시험 시 시험편의 변형률을 레이저 간섭 변위계를 이용하여 측정하기 위하여 Fig. 10(b)와 같이 2 개의 금선 (gold markers)을 증착하였다. 금선은 길이 50 μm, 높이 0.5 μm, 폭 10 μm 로 하였으며 간격은 250 μm 로 하였다. 이 간격이 변형률 측정 시 표점 거리 역할을 하게 된다.

#### 3.1.2 레이저 간섭 변형률 게이지 (ISDG)

ISDG 의 측정 원리[4,16]를 Fig. 11 에 나타내었다. 시험편에 부착되어 있는 가는 표시 (markers)에 레이저를 조사하면 2 개의 표시에서 각각 회절 (diffraction)이 생겨 간섭무늬 (fringe patterns)가 생긴다. 시험편에 하중이 인가되어 2 개의 표시 사이 거리 (gage length)가 변화되면 간섭무늬가 움직이게 되고, 이 움직임을 한 쌍의 다이오드 열 (diode array)로 감지하고 소프트웨어 (Agilent VEE)를 이용하여 실시간으로 변형률로 환산하게 된다.

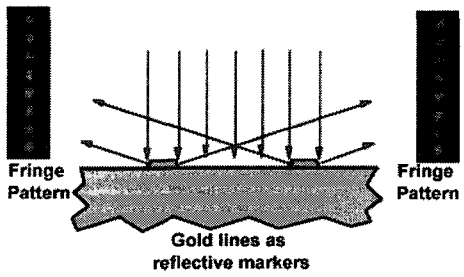



Fig. 11 Schematic of the ISDG

#### 3.1.3 시험 시스템

시험기와 변위 측정 시스템을 결합한 대기 환경 인장 시험 시스템을 Fig. 12 에 나타내었으며, 전체 시스템을 개략적으로 Fig. 13 에 다시 표시하였다.

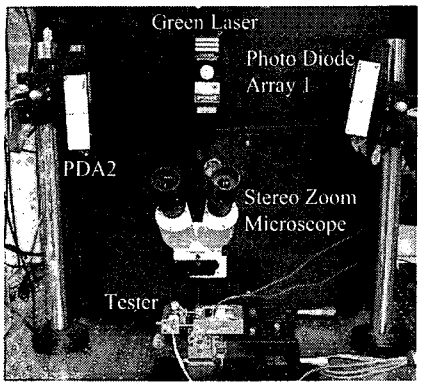



Fig. 12 Atmospheric testing system

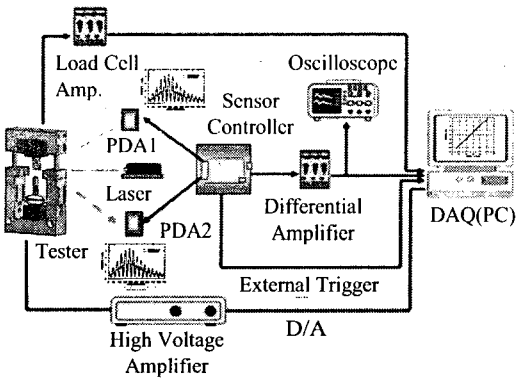
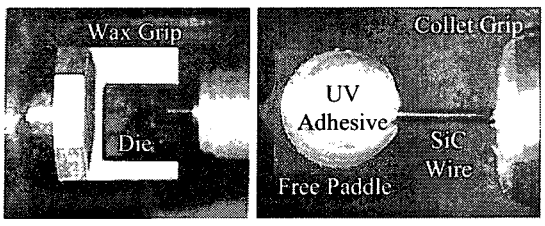



Fig. 13 Schematic of atmospheric testing system

### 3.1.4 실험 방법

Figure 10(a)의 다이 하나를 하중계 측 그립에 Fig. 14(a)와 같이 부착하고, 이 다이 위의 시험편들 중 하나와 콜릿 그립에 끼워진 탄화규소 선을 자외선 경화 접착제 (UV adhesive)를 이용하여 Fig. 14(b)와 같이 연결한다. 이후 작동기에 가해주는 전압을 증가시켜 하중을 인가하면서 변위를 측정하여 응력-변형률 선도를 얻어 탄성계수를 구한다.




(a) (b)

Fig. 14 Connection of SiC wire to a specimen

### 3.1.5 실험 결과 및 고찰

개발된 시험기를 이용하여 대기 환경에서 인장 시험을 수행함으로써 다결정 실리콘의 응력-변형률 곡선을 얻어 Fig. 15 에 나타내었다. 인장 시험 시작 전 측정 가능한 ISDG 용 간섭 무늬를 얻기 위해 시험편에 인장 예 하중 (tensile preload)을 인가하였기 때문에 좌측 그래프의 경우 응력이 0.1 GPa 정도에서 시작되고 있다.

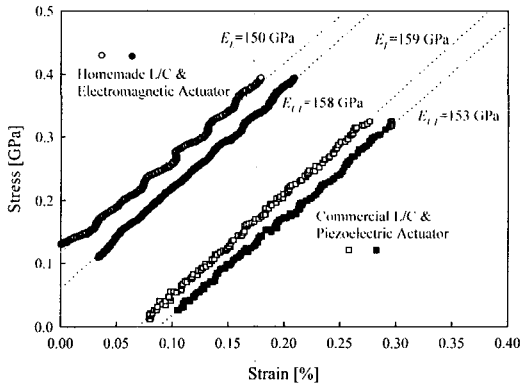



Fig. 15 Stress-strain curves in the atmosphere

그림에서 볼 수 있듯이 부하 (loading) 시에는 상용 하중계와 압전 작동기 (Fig. 9a)를 사용하였을 때 산포 (scatter)가 적은 데이터를 얻을 수 있었다. 그러나 제하 (unloading) 시에는 양 측 모두 흩어짐이 적고 선형적 (linear)인 거동을 보이고 있다. 상용 하중계와 압전 작동기를 이용한 시험기를 사용하여 9 회의 가중 및 제하 과정을 통해 제하 시 얻어진 탄성계수를 통계 처리한 결과 약 154 ± 4 GPa (평균 ± 표준편차)로 평가되었다. 이 값은 많은 시험 결과에 의거한 다결정 실리콘 박막 재료에 대한 핸드북 데이터[17]와 유사함을 알 수 있다.

## 3.2 주사전자현미경 내에서의 실험

재료 시험 결과의 이해를 돕기 위해서는 시험 중 시험편의 거동을 관찰할 필요가 있다. 이를 위한 사전 단계로 앞 절에서와 같은 인장 시험을 동일한 시험편을 이용하여 주사전자현미경 내에서 수행하였다. 전자현미경 내에서는 전자기가 전자빔에 영향을 크게 주기 때문에 압전 작동기를 이용한 시험기만을 이용하였다.

### 3.2.1 시험편

3.1.1 절과 동일한 공정을 통해 제작된 두께 3.5 μm, 폭 20 μm 의 시험편을 사용하였다. 이 경우 ISDG 와 같은 변위 측정 방법을 적용하기 어렵기 때문에 Fig. 16 과 같이 표점 길이 0.5 mm 의 양단에 2 개의 표시를 제작하여 간격 변화를 관찰하는 데 사용하였다.

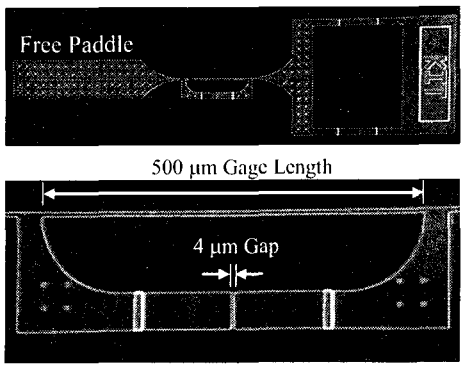



Fig. 16 A specimen for the tensile test in a SEM chamber

### 3.2.2 시험 시스템

Figure 17 과 같이 주사전자현미경(Model; ISI-SX-40)의 진공 챔버 (vacuum chamber) 내에 웨이퍼 시험편 홀더 (wafer specimen holder)를 수정한 고정 지그를 이용하여 시험편이 장착 완료된 시험기를 고정한다. 다음으로 시험기의 하중계 신호선과 작동기용 전원 선을 전기 피드스루 (electrical feedthrough)를 이용하여 외부와 연결시킨다.

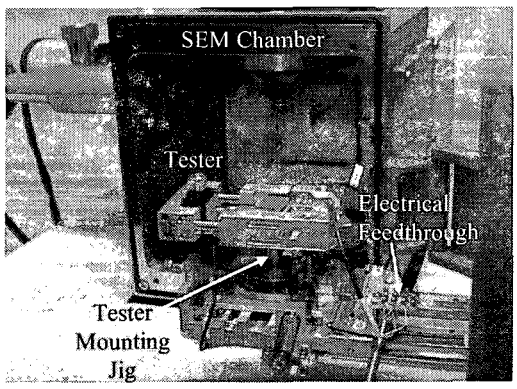



Fig. 17 Combination of the tester and a SEM chamber

### 3.2.3 실험 방법

주사전자현미경의 진공 챔버를 진공 상태로 만든 다음 하중계의 영점을 맞춘다. 하중계의 값이 변하지 않으면 작동기 전압을 증가시켜가면서 하중을 인가하고, 각 단계마다 Fig. 16 의 표시 사이의 거리를 현미경으로 촬영한다. 하중계의 하중 신호와 표시 사이의 간극 변화를 이용하여 응력-변형률 관계를 얻는다.

### 3.2.4 실험 결과 및 고찰

시험편의 초기 간극과 약 0.9 GPa 정도의 응력을 인가한 후의 간극을 전자 현미경으로 촬영하여 Fig. 18 에 나타내었다. 사진 판독을 거쳐 산정한 간극 변화는 약 3.2 μm 이고, 이를 초기 표점 거리 (500 μm)로 나누면 약 6,400 με의 변형률 값을 얻게 된다. 이를 바탕으로 탄성계수를 계산해 보면 약 140 GPa 이 된다. 이 값은 일반적으로 알려진 다결정실리콘 재료의 탄성계수에 비해 상당히 낮은 값이다. 그러나 Fig. 15 에서도 볼 수 있듯이 가중 초기에는 응력과 변형률이 비선형 거동을 보이기 때문에 이 두 점의 변화만을 가지고 탄성계수를 계산하는 것은 무리가 있다고 생각된다.

이를 보완하기 위해서는 분해능이 매우 낮은 단순한 간극 변화 관찰보다 마이크로 버니어게이지와 같이 변위 분해능을 높일 수 있는 측정 방법의 도입이 필요하다고 생각된다. 마이크로 버니어게이지 [18]는 대기 환경에서 0.2 μm 의 변위 분해능을 가지고 있으므로 이를 디지털 화상 상관법 (digital image correlation)과 결합하여 본 실험에 적용하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이에 대한 실험은 향후 진행할 예정이다.

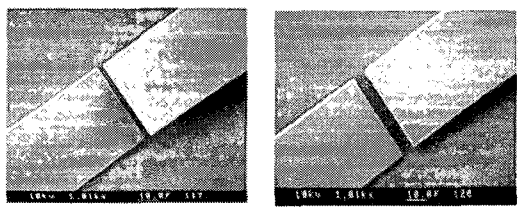


Fig. 18 Gap change before and after the stress of 0.9 GPa

하지만 본 연구를 통해 개발된 시험기는 주사전자현미경 내에서도 별 무리 없이 실험할 수 있음을 알 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구를 통해 두 가지 방식의 소형 재료 시험기를 개발하였다. 시험기는 폭 62 mm, 깊이 20 mm, 높이 90~120 mm 의 크기로 일반적인 전자 현미경에 설치할 수 있다. 시험기에는 새롭게 고안된 여러 가지 그립과 고정 장치들을 구비하고 있어 사용이 편리하다. 압전 작동 방식 시험기의 경우 상용 하중계, 소형 압전 작동기 및 각 정렬 장치를 구비하고 있어 다양한 마이크로 실험에 적용이 가능하며 이력현상이 적고 안정성이 좋다. 전자석 방식의 경우 모든 부품을 직접 제작하였으며 대기 환경에서의 인장 시험에 적합하다. 하중계 용량을 쉽게 바꿀 수 있고, 선형성이 우수하다.

개발된 시험기를 이용하여 대기 환경과 주사전자현미경 내에서 다결정실리콘 박막 시험편에 대한 인장 시험을 수행하였다. 대기 환경에서는 두 가지 시험기 모두 사용이 가능했으며 탄성계수는 대략 154 ± 4 GPa 로 측정되었다. 주사전자현미경 내에서는 압전 작동기 방식만 적용 가능하며 인장 시험 결과 정확한 탄성계수 값을 얻지는 못했으나 부하에 따른 변형량을 관찰할 수 있었다.

본 시험기는 박막뿐만 아니라 소형 구조물의 인장, 압축 및 피로 시험에도 적용 가능하다.

## 후 기

본 연구는 2004 년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문임.

## 참고문헌

1. Freund, L. B., Suresh S., "Thin Film Materials," Cambridge, 2003.
2. Norton, R. L., "Machine Design, Prentice Hall," Ch. 2, 2000.
3. Read, D. T., Dally, J. W., "A New Method for Measuring the Strength and Ductility of Thin Films," J. Mater. Res., Vol. 8, pp. 1542-1549, 1993.
4. Oh, C.-S., Sharpe, W. N. Jr., "Techniques for Measuring Mechanical Properties of Polysilicon using an ISDG," J. of the KSPE, Vol. 27, No. 7, pp. 171-178, 2004.
5. Kim, D. I., Huh, Y. H., Kee, C. D., "Measurement of Tensile Properties of Copper Foil using Micro-ESPI Technique," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 8, pp. 89-96, 2004.
6. Tsuchiya, T., Shikida, M., Sato, K., "Tensile Testing System for Sub-micrometer Think Films," Sensors & Actuators A, Vol. 97-98, pp. 492-496, 2002.
7. Chasiotis, I., Knauss, W. G., "A New Microtensile Tester for the Study of MEMS Materials with the Aid of Atomic Froce Microscopy," Exp. Mech., Vol. 42, pp. 51-57, 2002.
8. Haque, M. A., Saif, M. T. A., "Application of MEMS Force Sensors for in situ Mechanical Characterization of Nano-scale Thin Films in SEM and TEM," Sensors & Actuators A, Vol. 97-98, pp. 239-245, 2002.
9. Haque, M. A., Saif, M. T. A., "In-situ Tensile Testing of Nano-scale Specimens in SEM and TEM," Exp. Mech., Vol. 42, pp. 123-128, 2002.
10. Isono, Y., Kiuchi, M., Sugiyama, S., Morita, T., Matsui, S., "Mechanical Characteristic of FIB Deposited Carbon Nanowire by Electrostatic Actuated Nano Tensile Testing Device (EANAT)," 18th Int. Conf. on MEMS, 2005.
11. CATIA, V5R10, Dassault Systemes.
12. http://www.wazau.com/en/sensors/druck_zug.html
13. http://www.cedrat.com/
14. Kim, S.-W., Oh, C.-S., Lee, H.-J., "Effects of Specimen Alignment on the Mechanical Properties of Polysilicon Film," MRS Symposium O81, 2005.
15. Koester, D., Cowen, A., Mahadevan, R., Stonefield, M., Hardy, B., "PolyMUMPs Design Handbook," Rev. 10.0, MEMScAP, 2003.
16. Sharpe, W. N. Jr., "An Interferometric Strain/ Displacement Measurement System," NASA Technical Memorandum 101638, 1989.
17. Sharpe, W.N. Jr., "Mechanical Properties of MEMS Materials," The MEMS Handbook, CRC Press, pp. 3-1 to 3-33, 2001.
18. Oh, C.-S., Lee, H.-J., Ko, S.-G., Kim, S.-W., Ahn, H.-G., "Comparison of the Young's Modulus of Polysilicon Film by Tensile Testing and Nanoindentation," Sensors & Actuators A, Vol. 117, pp. 151-159, 2005.