

## 마이크로 부품의 물성 및 신뢰성 평가를 위한 시험기 개발

이낙규<sup>†\*</sup> · 최석우\* · 임성주\* · 최태훈\*\* · 이형욱\* · 나경환\*

<sup>†\*</sup>, \*\*한국생산기술연구원

### Development of a Micro Tensile Tester for the Material Characterization and the Reliability Estimation of Micro Components

Nak Kyu Lee<sup>†\*</sup>, Seogou Choi\*, Seong Joo Lim\*, Tae Hoon Choi\*\*  
Hyoung Wook Lee\*, and Kyoung Hoan Na\*

<sup>†\*</sup>, \*\*KITECH

#### ABSTRACT

This paper is concerned with development of a micro tensile testing machine for optical functional materials such as single or poly crystal silicon and nickel film. Two micro tensile testers have been developed for various types of materials and dimensions. One of the testers is actuated by a PZT and the other is actuated by a servo motor for a precise displacement control. The specifications of PZT actuated micro tensile tester developed are as follows: the volumetric size of tester is desktop sized of 710×200×270 mm<sup>3</sup>; the minimum load capacity and the load resolution in the load cell of 1 N are 3 mN and 0.1 mN respectively; the full stroke and the stroke resolution of piezoelectric actuator are 1mm and 10nm respectively. A special automatic specimen installing equipment is applied in order to prevent unexpected deformation and misalignment of specimens during handling of specimen for testing.

**Key Words :** Micro Tensile Tester, Piezoelectric Actuation, Servo Motor Actuation, Automatic Specimen Setting System

#### 1. 서 론

AMA(Active Mirror Array)와 같은 차세대 영상 장치, 광통신 부품, 각종 이·화학 실험분석 장치, 광 접속 어레이, 광 단속기, 광 감쇄기, 유체 입자 필터, 초미세 밸브, 유체 혼합기, 유량 제어기, 칩 냉각기 등의 초미세 광·열유체부품의 수요는 향후 급속히 성장할 것이라고 예측되고 있다. 그러나, 이들의 핵심부품으로 사용되는 최첨단 장비는 고가이며 동시에 고정도성이 요구되므로, 이들 핵심부품에 대한 고정도성, 내구성 등을 포함한 부품의 신뢰성에 관한 평가가 이루어져야 한다. 초소형 부품의 신뢰성 평가는 주로 온도·습도에 관한 부품의 수명 평가, 부품의 내충격도, 부품 제조시에 발생하는 잔류 응력의 영향 평가 등이 있으며, 이를 위하여 사용되는 소재의 물성이 반드시 필요하다. 그러나, 부품의

크기가 작아지게 됨에 따라서 소재 내부의 결정립, 표면에 존재하는 작은 흠집, 마찰력 등의 영향이 커지게 되며, 일반적으로 수행되는 시험 방법에 의한 물성 측정 결과를 적용하는 것이 불가능하게 되었다. 따라서, 마이크로 정도의 크기를 갖는 시험편의 물성 시험에 관한 연구가 최근 활발히 진행되어지고 있다.

소재의 물성을 측정하는 방법으로는 인장 시험, 굽힘 시험, 자기공명 시험, 경도 시험법 등이 있다. 이 중에서 인장 시험법은 직접적으로 탄성계수, 파괴강도 등을 측정할 수 있는 가장 효과적인 방법이며, 또한 특별한 수식을 통한 환산이나 조건 없이도 물성치를 직접적으로 구할 수 있으므로 보편적으로 많이 쓰이고 있는 방법이다. 그러나, 마이크로 인장 시험은 시험편의 소형화로 인하여 정밀한 시편 정렬이 요구되고, 시험장치의 보정 및 신뢰도가 절대적으로 필요하다. 이를 위하여 다양한 시험편과 정렬 방법이 사용되고 있고, 마이크로 시험편에 인장력을 부가하기 위한 그림(Grip-

<sup>†</sup>E-mail : nklee@kitech.re.kr

ping) 방법에 관한 다양한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 그러나 현재까지 대부분의 연구는 단결정 실리콘(SCS, Single Crystalline Silicon)이나 다결정 실리콘 소재의 시험에 집중되어 있어서, 금속이나 폴리머와 같이, 보다 연성이 있는 소재의 수요도 향후 급속히 증가할 것으로 예상되므로 이들 소재에 관한 마이크로 시험도 병행되어야 할 것으로 판단된다.

마이크로 인장 시험에서 구동기는 보통 피에조액츄에이터(piezoelectric actuator)나 혹은 서보모터가 사용되는데, 어느 쪽을 선택하느냐는 시험하는 소재의 연신률과 관계가 있다. 실리콘 박막은 취성이 있는 재료로서 거의 소성 변형을 하지 않으므로 피에조 액츄에이터와 같이 행정거리가 짧은 구동기를 사용해서 인장 시험을 수행할 수 있으나, 금속이나 폴리머 소재의 경우에는 연신률이 크고 소성변형이 진행되므로 행정거리가 큰 서보모터를 사용하는 것이 일반적이다.

기존의 연구 중 스트레인 게이지를 사용한 Greek 등 [1]은 SEM 챔버 내에서 관찰할 수 있도록 시험기를 구축하였다. 구동기는 PZT를 사용하고 시험편의 형상은 한쪽 끝부분은 사각형이고 다른 끝은 링 모양으로 되어 있어서 링 부분에 시험기의 프로브를 넣고 인장하는 방식을 사용하였다. 이러한 시험편의 구조는 굽힘 하중이나 비틀림 하중과 같은 인장 하중 이외의 하중을 배제하기 위한 시도이다. 하중의 측정은 스트레인 게이지를 부착한 하중 센서를 사용하였다. 1998년 Tsuchiya 등[2]은 이전의 마이크로 인장 시험에서 시험편을 시험기에 부착시키는 방법으로 접착체를 사용하던 것을 정전기력으로 대체하고자 하는 연구를 시도하였다. 그러나 정전기력은 마이크로 인장 시험에서 비교적 작은 시험편의 시험에만 적용해 오고 있는데, 이것

은 정전기력이 감당해 낼 수 있는 파지력의 한계 때문이다.

Ogawa 등[3]은 0.5  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 타이타늄 시험편을 스퍼터링을 이용하여 제작하고 서보모터를 이용한 시험기로 시험하였다. 마이크로스코프와 2대의 CCD 카메라를 이용하여 관측된 표지점들로부터 변형률을 측정하였다.

Chasiotis 등[4]은 시험편에 두 개의 gold marking을 하고 AFM이나 STM을 이용하여 시험편의 형상 정보를 분석함으로써 변형률을 계산하는 방법을 이용하였다.

Sharpe 등[5, 6, 7]은 광선이 작은 슬릿을 통과하거나 혹은 작은 거울에 반사될 때 발생하는 회절과 두 개의 회절 무늬가 중복될 때 발생하는 간섭 이론을 이용하여 변형률을 측정하는 방법(ISDG)을 제안하였다. 시험 소재는 다결정 실리콘 (Poly-silicon)과 니켈을 사용하였고, 간섭무늬를 만들기 위하여 시험편 위에 gold line marking을 증착하였다. Sharpe 등이 제안한 마이크로 인장 시험기의 개략도와 시험편의 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 또한, Yi 등[9]은 Sharpe 등이 제안한 ISDG 시스템을 독자적으로 개발하고, 이를 이용하여 SCS의

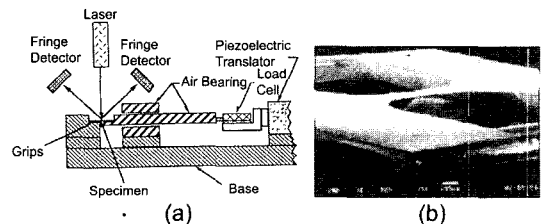


Fig. 1. A schematic view of the measurement system and a tensile testing specimen of SCS thin film developed by Sharpe *et al.*[6].

Table 1. Micro tensile tests with various schemes and their results.

Researcher	Method of Measurement		Results			Specimen	
	Load	Displacement	Youngs Modulus (GPa)	Fracture Strength (GPa)	Size w×t ( $\mu\text{m}$ )	Material	Gripping Method
Greek (1997)	Strain Gage	Optical encoder	167	1.25	10×10	Polysilicon	Insertion
Tsuchiya (1998)	Strain Gage	Strain gage		2.5	2~5×2	Polysilicon	Electrostatic
Ogawa (1997)	Load Cell	Microscope	96	0.95	300×0.5	Titanium	Screw
Chasiotis (1998)	Load Cell	AFM	132		50×1.9	Polysilicon	Electrostatic
Sharpe (1989)	Load Cell	Interferometry	176	0.56	200×200	Nickel	Insertion
Sharpe (1997)	Load Cell	Interferometry	168	1.21	600×3.5	Polysilicon	Glue
Suwito (1997)	Sensing Beam	Displacement sensor		1.2	28×15	SCS	Glue
Yi (1999)	Load Cell	Interferometry	169	1.2	10×05	SCS	Glue

탄성계수를 측정하였다. 다결정 실리콘과는 달리 SCS는 단결정이므로 소재의 크기 효과(Size effect)의 영향이 거의 없어지므로 소재 크기와 관계없이 물성 측정 결과가 나타나게 되며, 이러한 관점으로부터 Yi 등은 개발한 마이크로 인장 시험기의 신뢰도를 입증하였다.

그 외에도 많은 연구자들이 측정 방법, 구동 방법, 시험편의 구조 및 소재 등을 달리하면서 마이크로 인장 시험에 관한 연구를 수행해 왔다. 현재까지의 연구 결과들을 비교해 보면 Table 1과 같다. 기존의 연구 결과를 볼 때, Sharpe 등이 제안하여 Yi 등이 검증한 마이크로 인장 시험기가 가장 신뢰할 만하다고 판단된다.

## 2. 마이크로 인장시험기 개발

광학적 미러 어레이, 렌즈 어레이 등에 주로 쓰이는 소재는 크게 금속, 폴리머, 실리콘 등이 있으며 이들 소재에 관한 거시적인 물성치는 기존의 시험 장비를 이용하여 측정할 수 있다. 그러나 미세한 크기의 구조물의 내구성과 신뢰성을 평가하기 위해서는 시험편의 크기도 작아져야 하며 이에 따라서 시험 장비의 정밀도가 크게 요구된다. 또한 금속과 폴리머 등은 주로 다결정립 구조를 가지고 있고 결정립의 변형과 미끄러짐 현상에 의하여 대변형이 가능하지만 실리콘은 탄성 변형에 의하여 파단이 일어나므로 대변형이 불가능하다. 이와 같은 소재에 따른 변형량의 차이는 결국 인장 시험 시험기의 구동 거리와 밀접한 관계가 있게 되는데 일반적으로 구동 거리가 큰 액추에이터를 사용할 경우 정밀도는 반감될 수 밖에 없다. 따라서, 인장변형량이 큰 금속과 폴리머의 경우에는 행정거리가 큰 서보모터를 이용하도록 하며, 인장변형량이 작은 실리콘 소재의 경우에는 행정거리는 작지만 위치 해상도가 뛰어난 피에조 액추에이터를 사용하기로 하였다.

마이크로 인장 시험을 할 때 시험편과 구동기간의 정렬, 시험편 축의 평면 방향과 수직 방향의 직각도 등은 시험편의 크기가 작아짐에 따라서 인장 시험 결과에 미치는 영향이 대단히 크게 된다. 따라서 마이크로 인장 시험기는 자체적인 정밀도 뿐만 아니라 시험편을 장착하는 데 있어서 편리하면서도 정밀도를 유지할 수 있어야 원하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

기존의 인장 시험기에서는 시험편을 정렬하여 장착하기 편하게 하기 위하여 자중에 의한 치짐이 없고 수직 방향의 시험편 정렬이 매우 용이한 수직형 인장 방식이 최근 개발되어 사용되고 있다. 그러나, 앞서 설명한 바와 같이 국외에서 최근 활발하게 연구가 진행중인 마이크로 인장 시험기의 경우 주로 실리콘 소재에

국한되어 적용되고 있고 대부분이 수평형 인장 방식을 사용하고 있는데 그 이유는 시험편 크기가 작아짐에 따라서 시험편이 작은 충격에도 파손될 우려가 있고 취급시 용이성을 증대하기 위한 방안으로 알려져 있다. 본 연구에서는 금속과 폴리머 소재를 대상으로 하는 서보 모터구동 방식의 인장 시험기는 수직형으로 설계하고 제작하였으며, 실리콘 등의 취성이 있는 소재를 대상으로 하는 피에조 구동 방식의 인장 시험기는 수평형으로 설계하고 제작하였다.

### 2.1. 서보모터 구동형 마이크로 인장시험기

서보모터 구동형 마이크로 인장 시험기는 서보모터와 볼스크류(ball screw)를 사용하여 구동하며, 로드셀(load cell)을 슬라이딩 헤드에 붙여서 직접 시험편과 접촉하게 하고 자중에 의한 치짐이 문제가 되지 않으므로 공기베어링이 불필요할 것으로 판단된다. 제작된 마이크로 인장 시험기의 크기는 458x405x440(단위: mm)으로서 역시 데스크탑 형태이다.

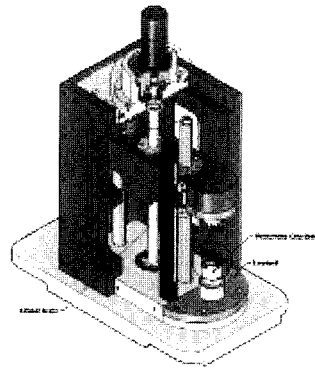


Fig. 2. 3D CAD model of Micro tensile tester with vertical type.

마이크로 인장 시험기의 하중 최대용량은 1N(100 gf), 하중 해상도는 0.1 mN(10 mgf)을 목표로 하였다. 그러나 금속과 폴리머 소재의 강도 차이가 크고, 또한 미소 시험편의 크기도 다양할 수 있으므로 로드셀과 그립을 교체하는 방식으로 최대 하중 50 N(5,000 gf)까지 가능할 수 있도록 구성하였으며 이 경우 하중 해상도는 5 mN(0.5 gf)이다. 서보모터와 볼 스크류 사이에 하모닉 감속기를 삽입함으로써 하중의 세기를 조절하였다. 이때 변위 해상도는 10 μm이며, 총 행정거리는 200 mm이다. Fig. 2에 서보모터 구동형 마이크로 인장시험기의 설계결과인 3D CAD 모델을 도시하였다.

서보모터 구동 방식의 경우 정밀도에 가장 큰 영향

을 미치는 것은 서보모터의 회전 운동을 램의 직진 운동으로 변환해 주는 볼 스크류의 백 래쉬 현상이다. 본 연구에서는 백 래쉬가 거의 없는 예방형 볼 스크류를 적용함으로써 램의 변위 오차를 최소화하고자 하였다.

마이크로 인장 시험용으로 자체 설계한 유압식 그림을 제작하여 시험편의 착탈을 용이하게 하였으며 시험편의 형상마다 다른 지그를 제작하여 호환성을 높이도록 하였다. 또한, 시험편의 뒤틀림 현상을 보정하기 위하여 하단 그림부에 회전 스테이지를 장착하였다. Fig. 3에 시험편 하단 그림부의 상세도를 나타내었다.

마이크로 인장 시험기의 측정 정보는 DAQ(Data Acquisition Board)를 이용한 PC와 인터페이스를 통하여 실시간으로 확인하며 실험을 수행할 수 있다. 이상과 같이 마이크로 인장 시험기의 주요 부분들을 설계하고 제작하여 인장 시험기를 제작하였다. Fig. 4에 제작된 마이크로 인장 시험기의 모습을 나타내었다. 또한, Table 2에 마이크로 인장 시험기의 사양을 나타내었다.

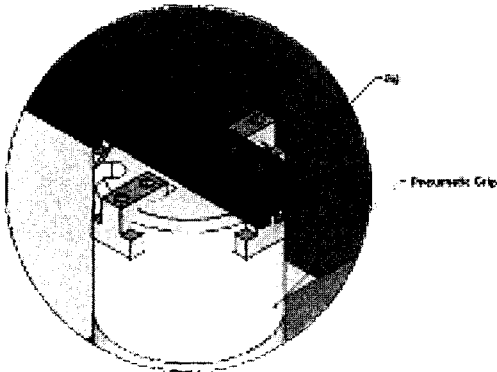


Fig. 3. Specimen gripping components in micro tensile tester with the servo motor actuating type.

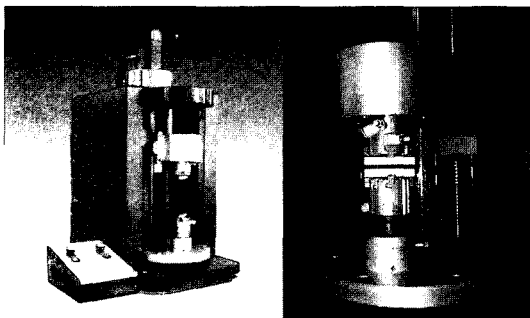


Fig. 4. Micro tensile tester with the servo motor actuating type and the specimen gripper.

Table 2. Specification of servo motor actuated tester.

No.	Description	Contents			
1	Load capacity(gf)	100	500	1000	5000
2	Min. load(gf)	0.1	0.5	1.0	5.0
3	Load resolution(mm)	0.01	0.05	0.1	0.5
4	Total stroke(mm)	200			
5	Stroke resolution(mm)	0.01			
6	Min. velocity(mm/min)	0.2			
7	Max. velocity(mm/min)	100			
8	Data acquisition resolution(bit)	16			

2.2. 피에조 구동형 마이크로 인장시험기

피에조 구동기는 앞서 기술한 바와 같이, 행정거리가 매우 짧은 단점을 가지고 있지만, 적은 변위 구간에서 매우 작은 변위 해상도를 갖는 구동기이다. 구동 발생은 피에조 구동기에 인가하는 전압에 의해 일어나는데, 이 때 전압과 변형간의 관계가 선형적이어야 보다 정밀한 제어가 가능하다. 본 연구에서는 Piezo-electric 구동기에 직접 센서를 부착하여 변위를 알아내는 것이 힘들기 때문에 피에조 구동기의 힘-변위 특성을 이용하여 변위를 알아내는 방법으로 변위센서를 대신하였으며 구해진 변위에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 변위 변화 간격을 구성하여 오차를 보정하였다. 설계된 마이크로 인장 시험기의 규격은 710×200×270 (mm<sup>3</sup>)로서 데스크탑 형태이다. Fig. 5에 피에조 구동 방식의 마이크로 인장 시험기의 설계된 3D CAD 모델을 각각 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 피에조 구동기의 반대편에 로드셀을 달아서 마찰의 영향을 최소화하였다.

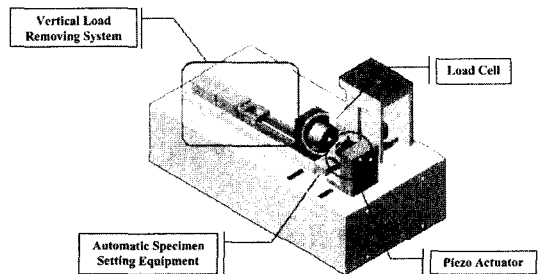


Fig. 5. 3D CAD model of Micro tensile tester with piezoelectric actuating type.

또한 본 시스템은 수평형 인장 방식을 취하도록 설계가 되어 있어서 박판 시험편의 경우 시험편이 자중에 의하여 처지게 될 가능성이 높다. 이러한 처짐 현상을 예방하기 위하여 수직하중 제거시스템(Vertical load

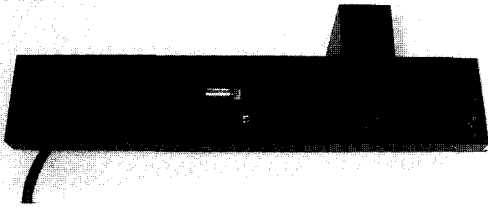


Fig. 6. Vertical load removing system in the micro tensile tester with the piezoelectric actuating type.

removing system)을 장착 하였으며 Fig. 6에 나타내었다. 시험편을 에폭시나 풀 등의 접착제를 이용하여 인장축 양단에 고정된 후에 수직하중 제거시스템을 사용하여 수평 하중이 발생하기 직전까지 시험편의 한쪽 끝을  $0.01\ \mu\text{m}$ 단위로 바깥쪽으로 이동시키는 방식을 취하였다. 이 방법을 이용하여 시험편 인장 이전에 자중에 의한 처짐 현상을 예방할 수 있을 것으로 판단된다. 수직하중 제거시스템의 내부에 선형운동 가이드(LM guide)와 볼 스크류가 예압에 의해 합체되어 백래쉬가 거의 없도록 설계되었으며 마이크로 스텝핑 모터를 이용하여  $0.01\ \text{mm}$  단위의 변위 해상도를 구현하였다.

실리콘 소재를 사용하는 부품들은 최근의 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 공정에 관한 연구에 의하여 마이크로 미터급 혹은 그 이하 수준까지도 가공이 이루어지고 있다. 이와 같은 마이크로급 부품의 신뢰성을 확보하기 위하여 인장 시험편의 크기도 함께 줄어드는 추세이며 이에 따라서 인장 시험편의 취급 및 정렬이 더욱 어려워지게 되었다. 또한, 인장 시험은 소재별, 크기별로 재현성이 확보되어야 하므로 가능한 인장 시험편의 장착에서 사람의 지각 능력에 의존하는 정도를 낮추어야 한다. 본 연구에서는 이와같은 인장 시험편의 장착을 지원하면서 마이크로 인장 시험시에 시험편의 수직 방향 처짐을 방지할 수 있는 시험 자동 장착 장치를 설계하여 적용하였다. 시험 자동 장착 장치는 마이크로 스텝핑 모터를 이용하여  $0.1\ \mu\text{m}$ 단위로 상하운동을 할 수 있도록 되어 있어서 작업자는 미소한 인장 시험편을 취급하는 것이 아니라 보다 큰 자동 시험편 장착 장치를 취급하면서도 인장 시험편의 정렬을 용이하게 성취할 수 있다. Fig. 7에 시험 자동 장착 장치와 장착 어댑터를 도시하였다.

서보모터 구동 방식의 마이크로 인장 시험기와 마찬가지로 피에조 구동 방식의 마이크로 인장 시험기도 DAQ를 이용하여 PC와 데이터를 주고받을 수 있으며 데이터를 처리할 수 있는 프로그램을 제작하고 운영하고 있다. 또한 수평 인장 방식의 장점을 살려서 시험의



Fig. 7. Automatic specimen setting equipment and the gripping adapter in the micro tensile tester with the piezoelectric actuating type.

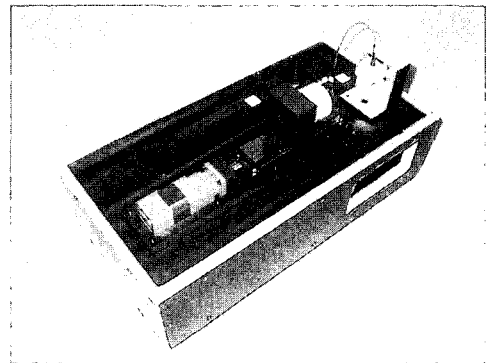
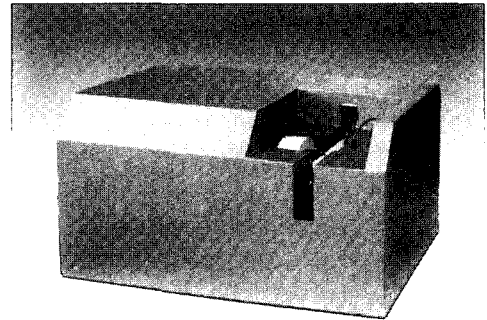


Fig. 8. Micro tensile tester with the piezoelectric actuating type.

미세 변형을 관찰하기 위한 Image system을 설치하였다. 이 Image system은 Color CCD camera에 고배율의 광학 현미경을 장착하여 실험하고 있는 시험편을 확대 촬영하여 실시간으로 동영상을 저장할 수 있도록 제작되었다.

이상과 같은 핵심 부분들을 설계하고 제작, 통합하여 피에조 구동 방식의 수평형 마이크로 인장 시험기를 제작하였다. Fig. 8에 제작된 마이크로 인장 시험기의 모습을 나타내었다. Load cell을 교체함으로써 최대 하중이 100, 200, 500, 1,000 gf까지 가능하도록 제작되었으며 이 때 각각에 관한 하중 해상도는 0.01, 0.02,

0.05, 0.1 gf로서 최대 하중의 0.01%이다. 피에조 구동기의 특성상 총 행정 가능 거리는 1,000  $\mu\text{m}$ 이며, 변위 해상도는 10 nm까지 구현하였다.

### 3. 광기능성 소재의 마이크로 인장시험

최근 광기능성 소재로서 많이 쓰이고 있는 니켈 소재를 사용하여 마이크로 인장 시험을 수행하고 구동 방식에 따라서 구분되어 개발된 두 가지 종류의 마이크로 인장 시험기를 이용하여 결과를 비교하여 보았다. 실험에 사용된 시험편은 화학적 증착에 의한 두께 20  $\mu\text{m}$  니켈 박판 소재이다.

Fig. 9에 시험에 사용된 시험편의 규격을 나타내었다. 그림과 같은 시험편을 제작하는 방법은 여러 가지가 있겠으나, 본 논문에서는 초고압과 기계적 금형을 사용하여 버(burr)가 거의 없는 시험편을 제작할 수 있었다.

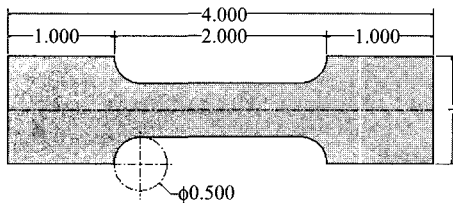


Fig. 9. Dimension of a Nickel specimen for the micro tensile test. (unit : mm)

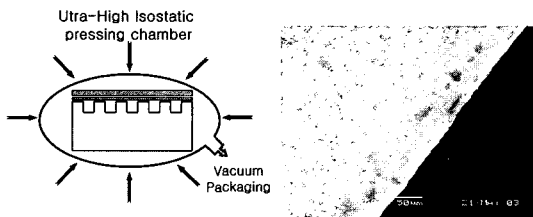


Fig. 10. Schematic view of specimen fabrication process and surface of the fabricated specimen.

Fig. 10에 제작공정 개념도를 나타내었다. 제작된 시험편을 이용하여 각각 다른 마이크로 인장 시험기로 인장 시험을 수행한 결과를 Fig. 11에 비교하여 나타내었다.

Fig. 11에서 볼 수 있는 것처럼 두 가지 방식으로 하였을 때 시험편이 파단될 때의 최대 하중은 서보모터 구동식과 피에조 구동방식에서 모두 0.367 kgf로 측정되었다. 그러나, 파단까지의 변위를 보면 서보모터 방식의 경우 105  $\mu\text{m}$ 이며 피에조 구동식의 경우에는 379  $\mu\text{m}$ 였다. 두 가지 경우에서 구동 특성상 부득이하게 변형 속도가 다르다는 점과 피에조 구동기의 보정

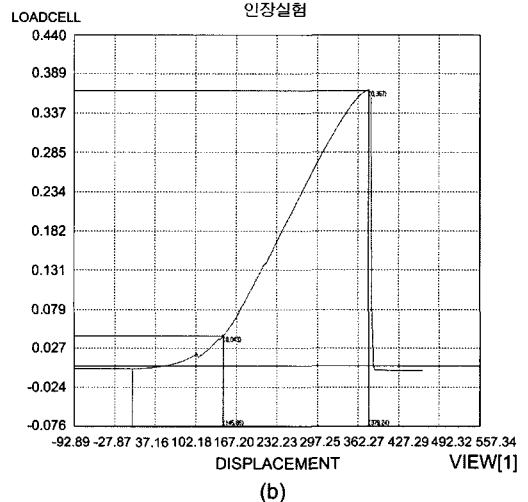
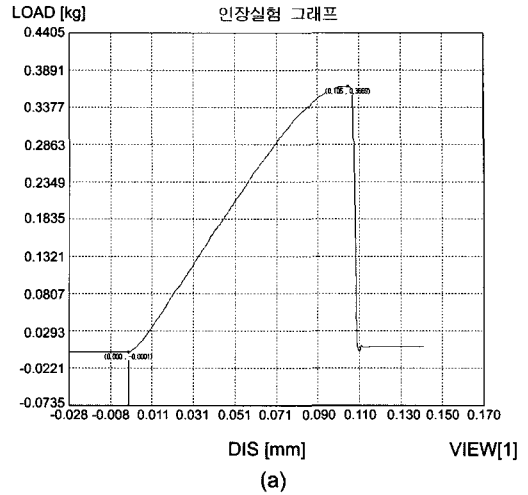


Fig. 11. Load-displace curve: (a) from piezo actuating type; (b) from servo motor actuating type.

등에서 오차를 분석해 보고 있다. 향후 레이저 인터페로미터를 사용하여 변위대신 변형률을 직접 측정하게 되면 그림핑 시스템에서 발생하는 슬립현상에 의한 오차를 배제할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

광열유체 기능성 소재의 물성을 측정하기 위한 마이크로 인장 시험기를 개발하였다. 변형 양상이 다른 실리콘과 같은 취성재료와 금속과 같은 연성 재료에 관하여 각각 별도의 시험기를 제작하고 실험을 수행하였다. 각각의 시험기는 목표한 바의 변위 및 하중 해상도를 가지고 있는 것으로 검증되었다. 향후 실험을 수행

하면서 실험적 기법을 발전시키고 시험 정밀도를 높이기 위한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

### 참고문헌

1. Greek, S. and Johansson, S., "Tensile Testing of Thin Film Microstructures", Proc. SPIE, Vol. 3224, pp. 344-351, 1997.
2. Tsuchiya, T., Tobato, O., Sakata, J. and Taga, Y., "Specimen Size Effect on Tensile Strength of Surface-micromachined Polycrystalline Silicon Thin Films", J. Microelectromech. Syst., Vol. 7, pp. 106-113, 1998.
3. Ogawa, H., Susuki, K., Kaneko, S., Nakano, Y., Ishikawa, Y., and Kitahara T., "Measurement of Mechanical Properties of Microfabricated Thin Film", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 430-435, Nagoya, January, 1997.
4. Chasiotis I. and Knauss W., "Mechanical Properties of Thin Polysilicon Films by Means of Probe Microscopy", Proc. SPIE, Vol. 3512, pp. 66-75, 1998.
5. Sharpe Jr. W.N., "An Interferometric Strain/Displacement Measurement System", NASA Technical Memorandum 101638, August, 1989.
6. Sharpe Jr. W.N., Yuan B. and Edwards R.L., "A New Technique for Measuring the Mechanical Properties of Thin Films", J. Microelectromech. Syst., Vol. 6, pp. 193-199, 1997.
7. Sharpe Jr. W.N., LaVan, D.A. and Edwards, R.L., "Mechanical Properties of LIGA-Deposited Nickel for MEMS Transducers", Proc. Int. Conf. Solid-State sensors and Actuators, pp. 607-610, Chicago, IL, June, 1997.
8. Suwito, W., Dunn, M.L. and Cunningham, S.J., "Mechanical Behavior of Structures for Microelectromechanical Systems", Proc. Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, pp. 611-614, Chicago, IL, June, 1997.
9. Yi, T. and Kim, C.J., "Microscale Material Testing: Etchant Effect on the Tensile Strength", Proc. Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, pp. 518-521, Sendai, June, 1999.
10. Yi, T., "Microscale Material Testing of Single Crystalline Silicon", A dissertation for the degree of doctor of philosophy, University of California, LA, 2000.