

## 광열유체 마이크로 부품의 신뢰성 평가를 위한 시험법에 관한 고찰

이낙규\* · 나경환\* · 최현석\*\* · 한창수\*\*\*

(2004년 2월 10일 접수)

### Review on Reliability Test Method for Optical/Thermofluidic Micro Component

N. K. Lee, K. H. Na, H. S. Choi and C. S. Han

#### Abstract

Literature review on reliability test method for developing high performance optical/ thermofluidic components. Since the miniaturization by the conventional mechanical process is limited to milli-structure, i.e.  $10^{-3}$ m, new technology for fabricating of mechanical components is needed to match cost, reliability, and integrability criteria of micro-structure. Although numbers of various researches on MEMS/MOEMS devices and components, including material characterization, design and optimization, system validation, etc., the lack of standards and specifications make the researches and developments difficult. For that reason, this paper is intended to propose the methods of reliability test for measuring the mechanical property of optical/ thermofluidic components.

**Key Words** : Micro Tensile Tester, Bending Test, Nano Indenter, Laser Interferometer, Mechanical Property, Reliability

#### 1. 서 론

최근 미세 부품에 대한 개발이 본격화되면서 미세 제작, 박판과 같은 미세형상에서 재료에 대한 신뢰성이나 기계적 물성 측정에 대한 요구가 증가되고 있다. 이러한 요구에 따라 미세 형상에서의 물성의 측정과 신뢰성 실험을 위한 방법들이 여러 형태로 많은 연구가 진행 되고 있다. 각각의 시험법은 각각의 측정 정도와 측정 가능한 항목이 다르며 실험을 위한 시편 제작 방법에서도 각자의 방법을 사용하고 있다. 즉, 현재 미세 부품이나 시편에 대한 표준화 된 시험법은 아직 없으며 표준 시험법의 제안을 위한 노력들이 최

근 시작되고 있다.<sup>(6)</sup>

1955년 Eisner 가 직경  $1\mu\text{m}$ 의 silicon bar 에 대한 인장 실험<sup>(1)</sup> 이후, 초미세 부품에 대한 시험은 매우 다양한 시편과 측정 방법으로 연구되어 왔다. 시험법에는 단순 인장 시험<sup>(1-6)</sup>, 굽힘 시험<sup>(7-18)</sup> 등이 있다. 시험을 통해 파괴인성, fracture strength 탄성계수, young's modulus, 그리고, 탄성계수, 그리고 파괴인성 등에 대한 데이터를 추출하였다. 이외에 크랙의 성장과 파단 특성에 대한 연구와나 미세 시편에서의 미세한 변위 및 미소 힘 측정 방법에 관한 연구 등이 있다.

본 논문에서는 인장시험방법과 굽힘 시험법에 대한 논문 등을 조사하고 제안된 시험법들에 대하여

\* Korea Industrial Technology of Institute  
\*\* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원  
\*\*\* 한양대학교 기계공학과

특징을 비교 분석 하였다.

2 장에서는 인장시험기에 대해 논하였으며, 3 장에서는 굽힘 시험법들을 비교하였으며 각각의 실험법들은 구동방법과 측정법 그리고 시험 재료등으로 연구 내용을 표에서 비교되었다. 마지막으로 4 장에서 결론을 기술하였다

## 2. 인장시험법

마이크로 시험편을 사용하는 인장 시험은 탄성 계수, 포아송 비(Poisson's ratio), 인장 강도 등을 측정하는 것이 목표이다. 초미세 부품의 경우 시험편의 정렬과 정확한 변위 측정이 시험의 정확성에 결정적인 영향을 미치며, 해결하기 어려운 과제이기도 하다. 많은 인장시험법들이 제안되고 있으며 시험법을 구분하는 특징으로는 시험편의 고정방법(grip), 시험인장 방법(loading), 인장력 측정방법, 신장(strain)측정법 그리고 시험편의 형태로 나누어 볼 수 있다. 최근의 연구에서 Toshiyuki<sup>(1)</sup>등은 이러한 여러 항목별 시험 방법에 대한 비교 시험을 수행한 결과도 있다.

Table 1은 다양한 인장시험법에 대한 비교를 보여주고 있다.

인장시험편의 고정방법으로 Fig. 1과 같이 정전기력(electrostatic force)을 이용한 시험편 고정 방법과 기계적인 고정방법, 접착제를 이용한 접착 방법 등이 있다. 시험 고정법은 시험편과 고정단과의 미

끄러짐이 없어야 하며 시험편의 고정 작업중에 시험편에 무리한 힘이 가해지지 않아야 한다. 특히 고정후 시험편의 정렬이 잘 이루어져야 신뢰성 있는 실험이 가능하다.

인장방법으로는 일반적인 서보 모터를 이용하거나 PZT 구동기 혹은 VCM을 이용하고 있다. 인장 속도가 실험 결과에 영향을 미치므로 저속의 인장이 가능하고 나노 단위의 정밀한 인장제어가 가능한 구동기와 제어기, 그리고 센서가 필요하다. 시험 재료의 연신률에 따라 적절한 구동 메커니즘을 선택한다. 일반적으로 PZT는 구동거리가 짧아 silicon thin film과 같은 재료에 적합하며 급속이나 폴리머의 경우에는 연신률이 크고 소성 변형을 하므로 서보 모터를 사용한다.

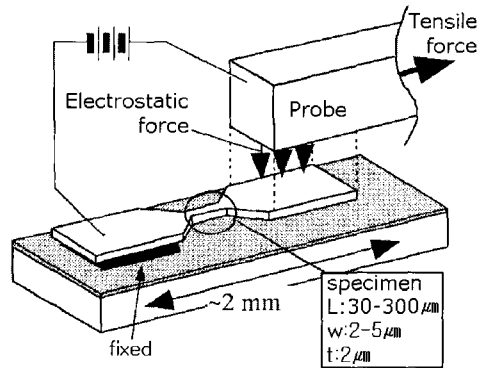


Fig. 1 Tensile testing schematic diagram <sup>(2)</sup>

Table 1 Comparison of tensile test method

Researcher	Method	Tensile loading	Load(stress) measurement	Strain measurement
Tsuchiya et al. <sup>(2)</sup>	Electrostatic grip	Piezo actuator	Strain gauge	Strain gauge
Greek and Johansson et al. <sup>(3)</sup>	Mechanical clamping (insertion)	Motorized microstage	Strain gauge	Optical encoder
Ogawa et al. <sup>(4)</sup>	Mechanical clamping (grip)	Motorized microstage	Load cell	Image processing
Sharpe et al. <sup>(5)</sup>	Glue	PZT	Load cell	Inteferometer
Tetsuo et al. <sup>(7)</sup>	On-chip tensile test	Motorized micrometer	Double cantilever beam	Laser displacement sensor
Yi T et al. <sup>(8)</sup>	Glue	PZT	Load cell	Interferometer

인장력의 측정에는 strain gauge를 이용한 힘 측정이 널리 사용되고 있으며 신장률의 측정에서는 이미지 처리나 시편에 레이저 반사면을 증착하여 발생된 광간섭을 이용한 측정법이 있다.<sup>(5)</sup>

Greek and Johansson<sup>(3)</sup>은 Fig. 2와 같이 시편 끝을 원형 고리로 가공하여, 원형 고리 안에 핀을 넣어 하중을 전달하였다. 그리고 변위의 측정을 optical encoder로 하였으며, 사용 시편은 폭 10 $\mu$  m, 두께 10 $\mu$  m, 길이는 250~1000 $\mu$  m 크기의 polycrystalline silicon을 사용하였다.

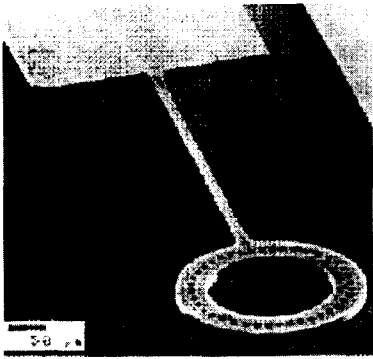


Fig. 2 SEM picture of tensile testing sample<sup>(3)</sup>

Ogawa등의<sup>(4)</sup> 시험에서는 변위 측정 방법에서 시편의 중요한 표점 거리의 이동을 두대의 카메라를 이용해서 동시에 측정하는 방법을 사용하였다. Fig. 3은 연구에 사용된 장치이다.

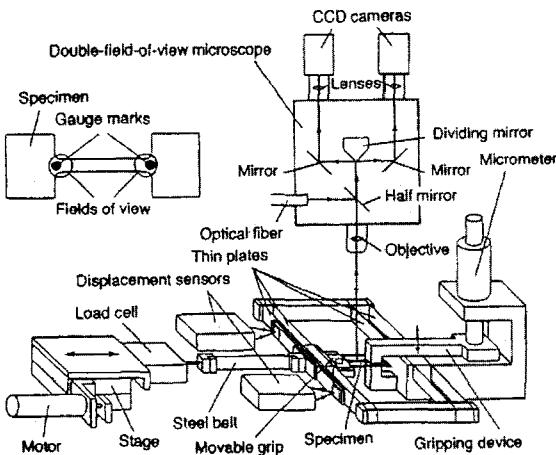


Fig. 3 Tensile Test Machine<sup>(4)</sup>

Sharpe<sup>(5)</sup>은 optical Fig. 4와 같은 실험장치에서 광간섭 현상을 이용하여, 5 $\mu$   $\epsilon$  해상도로 strain을 측정하였다.

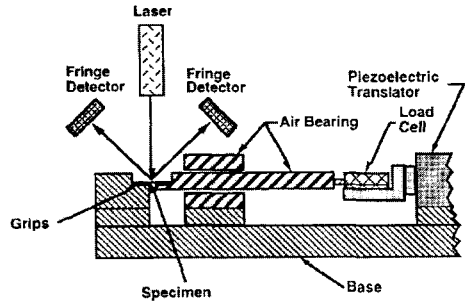


Fig. 4 Schematic of the measurement system<sup>(5)</sup>

M.A.Haque등은 Fig. 5와 같이 MEMS 기술을 이용하여 제작한 구동기를 이용하여 인장시험기와 굽힘시험장치를 개발하여 110nm 두께의 알루미늄 박막에 대한 인장시험을 수행하였다. 인장력과 변위는 개발한 MEMS 구조에서 측정되도록 하였다.<sup>(18)</sup>

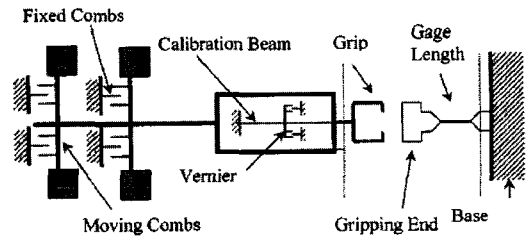


Fig. 5 Schematic of the tensile tester<sup>(18)</sup>

인장시험에서는 시편의 준비에 많은 노력이 필요하다 특히 신장률을 측정하기 위한 기술이 필수적이며 시편의 정렬에 따라 많은 오차가 발생할 수 있다는 특징이 있다.

### 3. 굽힘 시험법

굽힘 시험장치는 파괴 인성 실험이나 피로시험을 할 수 있는 시험 방법이다. 상업적으로 판매된 장비를 응용하는 방법과 개발자에 의해 새롭게

제안된 시험기를 이용한 연구가 있다. 상업적인 장비를 이용한 방법으로는 나노 인텐터를 사용하여 외팔보 형태의 시험재료의 중단부에 힘을 전달하는 방법<sup>(9)</sup>이 많이 사용되고 있으며 AFM을 이용한 연구도 있다.<sup>(13)</sup>

1988년 T.P Weith<sup>(9)</sup>은 SEM 챔버내에서 마이크로 스테이지를 이용하여 외팔보의 시편에 힘을 가하여 박막의 기계적 성질을 측정하였다. 그 후 마이크로 모터로 구동되는 정밀 스테이지를 사용하여 가압하거나,<sup>(12,16)</sup> PZT를 이용한 방법이 제안되었다.<sup>(17)</sup> 또 다른 방법으로 wafer 위에 실험시편과 가압이 가능한 메커니즘을 성형함으로써 실험하는 방법이 있다.<sup>(10,18)</sup>

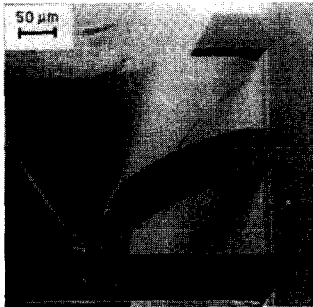


Fig. 6 Large angle of deflection of cantilever beam<sup>(12)</sup>

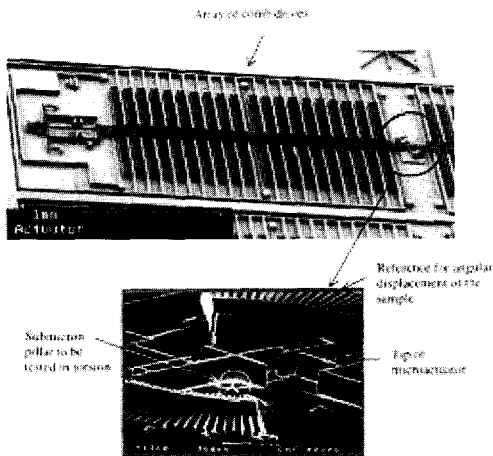


Fig. 7 Integration of Specimen and Testing set-up<sup>(20)</sup>

Johansson<sup>(12)</sup>은 Fig. 6과 같이 굽힘 시험으로 SEM chamber 내에서 파단강도를 측정하였다. 이밖에,

Saif and Macdonald<sup>(20)</sup>는 Fig. 7과 같이 시편과 측정 시스템의 integration을 시도하였다.

M.A Haque<sup>(18)</sup>는 MEMS 구동기를 이용하여 인장 시험과 더불어 굽힘시험을 수행하였으며 시편과 구동기가 독립된 형태로 Fig. 9와 같이 굽힘시험을 하였다. Wilson과 Beck는 Fig. 8과 같이 motorized micro stage를 이용하여 시편의 측면을 가압하는 파괴인성 측정 실험 하고 시험을 통해 측정된 힘-변위 선도와 유한 요소 해석을 통한 분석으로 굽힘 파단 강도를 측정하였다.

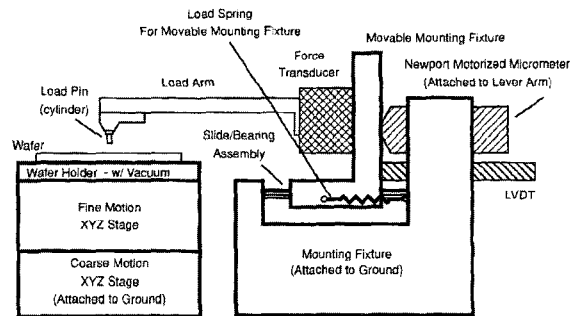


Fig. 8 Integration of Specimen and Testing set-up<sup>(16)</sup>

일본 동경대의 히고야기지등은 오스트리아의 CSIRO와 공동으로 범용적인 굽힘시험장치를 개발하여 반복 피로하중시험, 인장시험등을 할 수 있는 시스템을 개발하였다.<sup>(17)</sup> Fig. 9와 같이 마이크로 노치를 표면에 만들어 시험하였으며 반복하중을 주어 피로시험을 수행하였다.

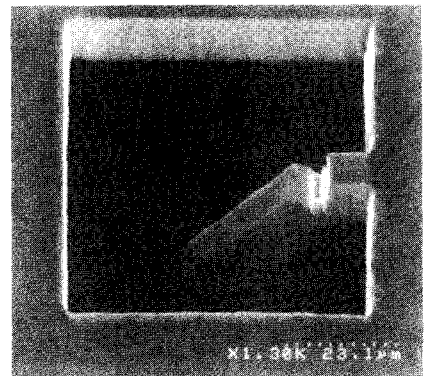


Fig. 9 Fatigue test specimen<sup>(17)</sup>

Table 2 Comparison of bending test

Researcher	Loading type	Material	Measurement method	Measured Property
Johansson et al. <sup>(12)</sup>	Stylus in SEM	Single crystal silicon	Strain gauge	Fracture strength
T.P Wehs et al. <sup>(9)</sup>	Nanoindenter	Au, SiO <sub>2</sub>	Nanoindenter	Young's moduli, Yield strength
S.Roy et al. <sup>(11)</sup>	MEMS	Nickel	Optical microscope	Young's modulus, residual stress
Carol J.Wilson et al. <sup>(16)</sup>	Motorized Micrometer	Single crystal silicon	Force transducer / LVDT	Fracture strength
Christophe Serre et al. <sup>(13)</sup>	AFM	SiC	AFM	Young's modulus
Yoshitada Isono et al. <sup>(15)</sup>	AFM	Single crystal silicon	AFM	Young's modulus ( temperature effect)
M.A. Haque et al. <sup>(18)</sup>	MEMS actuator	Aluminum	MEMS	Yield strength
Takahiro et al. <sup>(14)</sup>	AFM	SC-Si, SiO <sub>2</sub> Wire	AFM	Young's modulus Fracture stress

굽힘시험은 단순 외팔보를 이용할 경우 비교적 시편의 가공에 용이하다. 하지만 인장시험에서 보다 시편의 반력이 약하여 높은 정밀도의 힘 센서가 필요하다. 굽힘 시험 장치와 실험에 대한 비교를 Table 2에서 정리하였다.

굽힘 시험장치에서는 재료의 피로시험이나 파괴 인성 실험을 할 수 있다. MEMS 기술을 이용한 굽힘시험의 경우에는 미세한 힘의 측정과 안정된 시편의 정렬에서 장점이 있으나 시험재료의 제한과 시험 비용이 높다는 단점을 가지고 있다. 가반하중을 한번 가하여 측정하는 방법과 피로 특성을 측정하기 위해 일정 주파수로 하중을 반복적으로 가하는 방법이 있다.

#### 4. 결론

마이크로 재료 시험법에 대해 인장시험법과 굽힘 시험법에 대해서 발표된 논문을 중심으로 연구 동향과 연구 결과 비교하였다.

굽힘 시험법은 힘의 인가가 단순하여 시험이 비교적 용이한 것으로 알려져 있다. Nanoindenter나 AFM을 응용하여 정밀한 하중을 측정하고 인가할 수 있으며 반복 피로하중 시험등 다양한 조건의 실험을 할 수 있다.

인장시험의 경우에는 시편의 정렬과 측정에 해결해야 할 기술적 문제점이 있으나 Young's modulus나 fracture strength를 직접적으로 측정할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다.

반도체 제조 공정을 통해 웨이퍼에 시험편과 구동기와 센서를 성형시킨 방법들을 인장시험과 굽힘 시험에서 볼 수 있다. 이러한 방법은 다른 방법에서 나타난 시편 정렬의 문제나 미세 센서의 문제를 해결하고 있으나 가공단가가 높고 시험준비 기간이 많이 필요하다. 이러한 시험법을 이용하여 온도나 시편의 크기에 대한 물성 영향을 평가하고 있다.

검토한 논문의 저자들은 향후 미세부품을 이용한 제품의 개발이 보다 확대될 것으로 예상하고 있으며 개발/생산된 미세부품의 신뢰성을 확보하기 위해 미세 부품이나 재료에 대한 안정된 실험법이 기본적으로 필요함을 강조하고 있다.

국내에서도 미세 부품에 대한 신뢰성 시험법의 연구가 확대되고 있으며 많은 발전기 기대되고 있으며 표준화된 시험법의 제안이 요구되고 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대

신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중입니다. 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) R. L. Eisner, 1955, "Tensile tests on silicon whiskers", *Acta. Metal*, Vol.3, pp. 414~415.
- (2) T. Tsuchiya, S. Tabata, J. Sakata and Y. Taga, 1998, "Specimen Size Effect on Tensile Strength of Surface-Micromachined Polycrystalline Silicon Thin Films", *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 7, No. 1, pp. 106~113.
- (3) S. Greek, S. Johansson, 1997, "Tensile testing of thin film microstructures", *Proc. SPIE* vol.3224, Austin, TX, pp. 344~351.
- (4) H. Ogawa, K. Suzuki, S. Kaneko, Y. Nakano, Y. Ishikawa and T. Kitahara, 1997, "Measurement of Mechanical Properties of Microfabricated Thin Films", *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Nagoya, pp. 430~435.
- (5) W. N. Sharpe Jr., B. Yuan and R. L. Edwards, 1997, "A New Technique for Measuring the Mechanical Properties of Thin Films", *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 6, No. 3, pp. 193~199.
- (6) Toshiyuki et. At., Jan.2003, "cross comparison of thin film tensile testing methods examined with single crystal silicon, polysilicon, nickel, and titanium films", *Micro electronical systems, MEMS-03*, Kyoto, IEEE the 16<sup>th</sup> Annual International conf., pp. 19~23.
- (7) Tetsuo Yoshioka et al., 2000, "Tensile testing of SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> films carried out on a silicon chip", *Sensor and actuators, Physical A*, Vol.82, pp. 291~296.
- (8) Taechung Yi and Chang-Jin Kim, 1999, "Measurement of mechanical properties for MEMS materials", *Meas.Sci. Technol*, Vol.10, pp. 706~716.
- (9) T. P. Weiths et. al.,1988, "Mechanical deflection of cantilever microbeams: A new technique for testing the mechanical propertie of thin films", *J.Mater. Re -s.*, Vol.3, No.5, pp. 931~942.
- (10) Tsuchiya et. Al., 1998, *Fatigue test of single crystal silicon resonator technical digest 16<sup>th</sup> sensor symp.*, Kawasaki, June, 1998, pp. 277~280.
- (11) S. Roy, S. Furukawa, M. Mehregany, 1996, "Determination of Young's modulus and residual stress of electroless nickel using test structures fabricated in a new surface micromachining process", *Microsyst. Technol.*, Vol. 2, pp. 92~96.
- (12) Stefan Johansson, et. Al., 1988, "Fracture testing of silicon microelements in situ in a scanning electron microscope", *J. Appli. Phys*, pp. 4799~4803.
- (13) Christophe Serre, et. al., Sep. 1999, "Test microstructures for measurement of SiC thin film mechanical properties", *J. Micromech. Microeng.*, pp. 190~193.
- (14) Takahiro Namazu, et. Al., 2003, "high cycle fatigue test of nanoscale Si and SiO<sub>2</sub> Wires Based on AFM Technique", *Micro electro mechanical systems MEMS2003*, The 16<sup>th</sup> IEEE Int. Conf., pp. 662~665.
- (15) Yoshitada Isono, et. Al., 2001, "AFM bending testing of nanometric single crystal silicon wire at intermediate temperatures for MEMS", *Micro electro mechanical systems MEMS2001* The 14<sup>th</sup> IEEE Int. Conf., pp. 135~138.
- (16) Carol J.Wilson, et.al, 1996, "Fracture testing of bulk silicon microcantilever beams subjected to a side load", *J. Microelectromechanical System*, Vol5, No.3, pp. 142~150.
- (17) 히고야기지, 더거사머거즈키, Jan. 2003, "마이크로/나노테크놀로지를 뒷받침하는 평가, 계측기술", Vol.2, No.1, *기계&자동화*, pp. 14~22.
- (18) M. A. Haque, 2001, "Microscale Material Testing Using MEMS actuator", *J. Microelectromechanical systems*, Vol.10, No.1, pp. 146~152.
- (19) K. Sato, T. Yoshioka, T. Ando, M. Shikida and T. Kawabata, 1998, "Tensile testing of silicon film having different crystallographic orientations carried out on a silicon chip", *Sensors and Actuators A*, Vol. 70, pp. 148~152.
- (20) M.T.A. Saif and N.C. MacDonald, 1996, "Micro Mechanical Single Crystal Silicon Fracture Studies - Torsion and Bending", *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, San Diego, CA, pp. 105~109.