

< 논문 >

박막의 기계적 물성을 위한 새로운 인장 시편 및 인장 시험기

박준협[†], 김윤재^{*}

(2006년 10월 17일 접수, 2007년 5월 18일 심사완료)

A Novel Tensile Specimen and Tensile Tester for Mechanical Properties of Thin Films

Jun-Hyub Park and Yun-Jae Kim

Key Words : MEMS(멤스), Mechanical Property(기계적 물성), Thin Film(박막), Tensile Test(인장 시험)

Abstract

Mechanical property evaluation of micrometer-sized structures is necessary to help design reliable microelectromechanical systems(MEMS) devices. Most material properties are known to exhibit dependence on specimen size and such properties of microscale structures are not well characterized. This paper describes techniques developed for tensile testing of thin film used in MEMS. Epi-polycrystalline silicon is currently the most widely used material, and its tensile strength has been measured as 1.52GPa. We have developed a tensile testing machine for testing microscale specimen using electro-magnetic actuator. The field magnet and the moving coil taken from an audio-speaker were utilized as the components of the actuator. Structure of specimen was designed and manufactured for easy handling and alignment. In addition to the static tensile tests, it is described that new techniques and procedures can be adopted for high cycle fatigue test of a thin film.

1. 서론

초소형 전자기계(Micro-Electro Mechanical Systems)는 낮은 가격으로 대량 생산이 가능하게 하는 일괄 공정을 사용해서 초소형 전자기계시스템을 만드는 새로운 생산 기술이다. 초소형 전자기계로는 마이크로미터(micrometer)에서 밀리미터(millimeter) 단위의 크기를 갖는 센서(sensor)와 액추에이터(actuator) 등이 있다. 이 새로운 기술의 대두에 따라, 초기에는 새로운 재료, 제작, 생산 기술의 개발에 연구가 집중되었다. 그러나 개발된 제품의 상품화를 위해서는 신뢰성 문제가 걸림돌이 되었다.

초소형 전자기계에 나타나는 신뢰성 문제로는 잔류응력, 점착, 피로, 파괴 등이 주로 보고 되고 있다. 따라서 이러한 신뢰성 문제를 설계 초기 단계에서 예측하기 위해서는 재료의 기계적 성질을 확보하는 것이 중요하다. 그런데 재료의 기계적 성질은 크기와 제작 공정에 의존한다고 알려져 있다. 따라서 마이크로 단위의 크기를 갖는 시편을 이용해서 기계적 성질을 구하는 것이 중요하다. 그런데 이러한 마이크로 단위의 기계적 성질을 구하기 위해서는 시편 준비, 하중인가와 측정, 변위 또는 변형률 측정에서의 어려움이 있다. 이러한 마이크로 단위의 기계적 물성을 측정하기 위해서 많은 연구자들이 연구를 수행하였다.

외팔보 굽힘,⁽¹⁾ 3 점 굽힘,⁽²⁾ 벌지(bulge) 시험^(3,4)과 같은 방법들이 마이크로 단위의 기계적 성질을 구하기 위해서 채택되었다. 그러나, 굽힘 형태의 시험에서는 재료에 따라 얇은 박막이 파단되기 전에 큰 변형률이 발생하기 때문에 재료의 특성을 측정

[†] 책임저자, 회원, 동명대학교 메카트로닉스공학과

E-mail : jhyubpark@korea.com

TEL : (051)610-8362 FAX : (051)610-8349

^{*} 회원, 고려대학교 기계공학과

하기에는 어려움이 있다. 또한 벌지 시험 시에는 응력 집중현상이 나타난다. 그래서 인장 시험(tensile test)이 재료 강도를 측정하는 방법으로는 가장 직접적인 방법이다. 그러나, 인장 시험을 수행하기 위해서는 아주 얇은 박막을 시험기에 체결(gripping)하고 정렬(alignment)하기 위해서 손쉽게 다루는 방법의 개발이 선행되어야 한다. 박막의 인장 시험에서, 이러한 어려움을 극복하기 위해서 새로운 기술들이 개발되어 왔다.⁽⁵⁻⁷⁾

따라서, 본 연구에서도 박막의 인장 시험을 편리하게 할 수 있도록 시험편의 구조를 설계/제작하고, 인장 시험을 할 수 있는 시험기를 전자기력을 이용한 동전형 시험기를 개발하였다. 개발된 시편과 시험기를 이용하여 박막의 정적 및 피로 시험을 손쉽게 수행하는 절차(procedure)를 개발하였다. 개발된 시편 및 시험기를 이용하여 에피폴리실리콘(epitaxial polycrystalline silicon) 박막의 인장강도를 측정하였다.

2. 시편 설계와 제작

2.1 시편 형상

서론에서 언급한 바와 같이, MEMS 구조물은 수 마이크로 미터의 치수를 갖는 박막으로 구성되어 진다. 이러한 MEMS 구조물에 사용되는 재료의 기계적/피로 특성을 얻기 위한 시험을 하여야 한다. 그런데 마이크로 단위의 시편을 이용한 박막 인장시험은 여러 가지 어려움 때문에 수행하기가 쉽지 않다. 특히 박막 시편을 가지고 시험기 장착과 같은 작업을 하기란 쉽지 않아서, 그 동안 재료의 정적/동적 특성을 얻기 위한 가장 정확한

시험 방법인 인장형 시험이 제한적으로 이루어져 왔다.

그래서 본 연구에서는 MEMS 재료의 정적 및 동적 성질의 간편한 측정을 위한 시편 구조를 다음과 같이 제안하였다.

Fig. 1 에서 보는 바와 같이, 이방성 건식 식각 공정으로 몸체(substrate)를 수직으로 식각하여 Sharpe 등⁽⁵⁾에 의해서 제안된 Fig. 2 와 같은 기존 시편 제작 방법인 이방성 습식식각(wet etching)에 의한 경사면을 없앴으로써 체결(grip end) 부분의 면적을 크게 하여 체결력(gripping force)을 증가시킬 수 있다.

그리고 체결(grip end) 부분에 작은 구멍을 두어서 시편을 시험기에 작은 핀으로 장착함으로써 시편 장착을 위해서 UV 본드가 필요없어 장착이 상당히 쉬워지고 시편의 중심 잡기(alignment) 또한 쉽게 할 수 있다.

웨이퍼에서 시편을 하나씩 잘라 낼 때 틈질

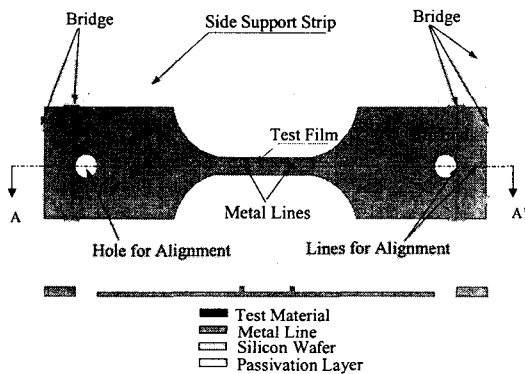


Fig. 1 Structure of suggested specimen

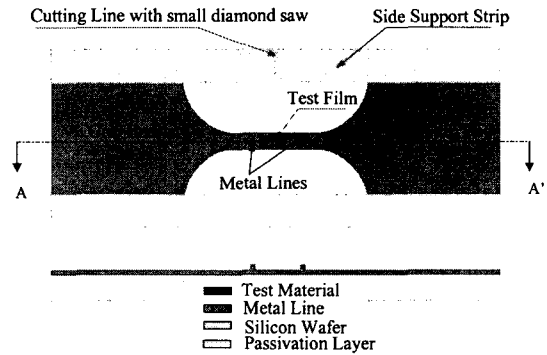


Fig. 2 Structure of existing specimen suggested by Sharpe et al.

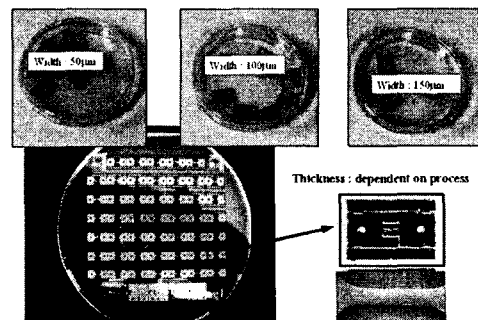


Fig. 3 Fabricated specimen on 4 inch wafer

Table 1 Configuration of specimen

No.	Width	Gage length	Total length	Number of Specimen
1	50	300	800	19
2	100	300	900	14
3	150	300	960	14

(unit : μm)

(sawing) 방법을 사용하지 않고 시편 제작 공정 상에서 측면 지지부(side support strip)를 포함한 시편 주위를 일부분의 연결부(bridge)를 제외하고 미리 식각해 놓음으로써, 시험 박막에 손상을 입힐 위험이 있는 톱질(sawing) 방법을 채택하지 않아도 되고, 완전한 시험 박막으로 만들기 전, 시편을 하나씩 잘라 내어 시편 하나씩 후속 공정을 진행하지 않고 웨이퍼 단위로 모든 공정을 할 수 있으므로 시편을 대량으로 손쉽게 만들 수 있다.

2.2 시편 제작

Fig. 1 과 같은 형상의 47 개 시편이 4 인치 {100} 실리콘 웨이퍼에 동시에 가공되었다. Fig. 3 은 하나의 웨이퍼에 47 개의 시편 가공되어 있는 사진과 웨이퍼로부터 잘라낸 하나의 시편 사진을 보여 주고 Table 1 은 한 장의 웨이퍼에 구성되어 있는 시편의 치수 구성과 개수이다.

시편의 가공은 순서는 다음과 같다. 먼저 4 인치 실리콘 웨이퍼의 양면에 보호막으로 사용할 실리콘 산화막(silicon dioxide)을 $0.1\mu\text{m}$ 이상 쌓은 다음, 앞면에 시험할 대상 재료를 목표의 두께 만큼 쌓는다. 그리고 시편 형상을 만들기 위해서 사진 공정을 한다. 다음 시험할 대상 재료를 재료에 맞는 식각 방법을 통해서 시편 형상으로 만든다. 그리고, 시편을 보호하기 위해서 웨이퍼 앞면에 PR(photo resist)를 코팅(coating)한 후 보강을 위해서 더미(dummy) 웨이퍼를 앞면에 붙인다.

시험할 재료만 남겨두기 위해서 웨이퍼 뒷면을 건식 식각을 통하여 실리콘 몸체를 식각한다. 그리고 최종적으로 더미 웨이퍼와 앞면에 코팅되어 있는 PR 을 제거한다.

위와 같은 공정을 거친 후 제작된 시편들을 가진 웨이퍼의 모습이 Fig. 3 이다.

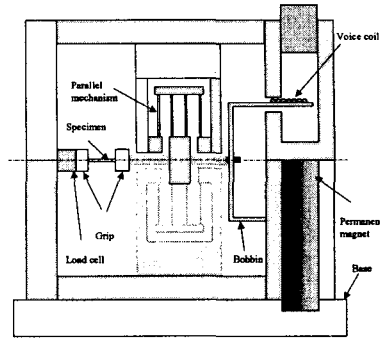


Fig. 4 Structure of the developed testing machine

3. 시험기 제작

3.1 시험기 구동부

마이크로미터급의 시편을 시험할 수 있는 시험기의 액추에이터(actuator)로는 압전(piezo), 모터(motor) 또는, 열변형을 이용한 변위 제어용과 전자장력(electro magnetic force)을 이용한 하중제어용이 있다. 그런데 MEMS 제품은 대부분 고사이클 수(high cycle) 수명을 가지고 MEMS 제품에 사용되고 있는 재료는 금속 계통이 많다. 래칫(ratchet) 현상 때문에 금속 박막의 일정진폭 피로시험을 변위제어로 수행하기는 어렵다. 그래서 금속 박막의 피로시험을 위해서는 하중제어가 가능한 것이 편리하다. 그런데, 변위제어용 액추에이터로 시험기를 만들어서 하중제어 시험을 할 때는 폐루프(closed loop) 제어용 하드웨어나 소프트웨어의 필요성 때문에 높은 주파수에서 피로 시험을 수행하기에는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 하중제어가 쉬운 전자장력 액추에이터를 이용하여 시험기를 제작하였다. 전자장력의 원리는 일정 자장내에 놓여진 구동코일(moving coil)에 전류를 흘려 가진력을 얻는 것이다. 이때 가진력의 크기는 식 (1)과 같이 자장의 세기와 구동코일에 흐르는 전류의 크기에 의해 결정된다.

$$F = \frac{1}{9.8} \cdot B \cdot l \cdot i \quad (1)$$

본 연구에서는 Fig. 4 와 같이 자장 발생부와 구동코일을 시판되고 있는 음향 스피커(speaker)에 사용되고 있는 부품을 이용하기로 하였다.

3.2 시험기 몸체

시험기에서 구동코일이 감겨진 보빈(bobbin)을 고정시켜 주는 지지부(flexure)가 중요하다. 이 지지부는 시편에 정밀한 직진운동(rectilinear travel)이 가해질 수 있도록 특별한 접판 스프링(leaf spring) 구조로 되어 있다. 가장 기본적인 접판 스프링 구조는 Fig. 5(a)와 같은 외팔보 형태이다 그러나 외팔보의 자유단(free end)에 하중이 가해질 때 자유단은 곡선 경로(curvilinear path)로 변형된다. Fig. 5(b)와 같이 두개의 외팔보로 만든 지지부는 무시할 수 있는 회전 변위를 가지지만 수평변위(parasitic deflection) q 를 가진다. Fig. 5(b)와 같은 지지부는 작은 변위(displacement)에서는 문제가 없지만 큰 변위가 요구될 때는 Fig. 5(c)와 같은 지지부의 구조가 적당하다. 이 지지부를 구성하고 있는 스프링이 동일한 재질과 크기로 만들어 졌다면 하중이 작용할 때 4 개의 스프링이 똑 같은 형태로 변형할 것이다. 따라서 플랫폼 A 에 대한 플랫폼 B 의 수평 운동은 고정단 C 에 대한 플랫폼 A 의 수평

운동에 의해서 상쇄될 것이다. 따라서 고정단 C 에 대한 플랫폼 B 는 직진운동을 할 것이다.⁽⁸⁾

그러나 앞에서 언급한 것처럼 플랫폼 B 가 수평 변위 없이 직진운동을 하기 위해서는 구성하고 있는 4 개의 스프링이 동일한 재질과 동일한 크기로 만들어져야 된다. 그러나 가공상의 오차는 피할 수가 없을 것이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 6 과 같이 8 개의 스프링을 사용해서 대칭구조로 만들어 줌으로써, 제작 시 발생하는 약간의 가공오차가 있다라도 플랫폼 B 가 수평변위 없이 직진운동을 하도록 하였다.

Fig. 7 은 제안된 접판 스프링 기구를 사용해서 만든 동전형 기계물성 시험기의 사진이다. Fig. 7 은 또한 인장 시험과 피로 시험을 수행할 수 있도록 LabView 를 이용하여 개발한 프로그램도 보여 주고 있다. 시험기는 컴퓨터를 통하여 전압 신호를 보내면 전압을 전류를 변환하고 증폭하는 기기를 통해서 전류가 보이스코일에 인가되면 작동한다. 이와 동시에 액추에이터 반대편의 로드셀을 이용하여 하중을 측정하고 정전용량형 변위 센서

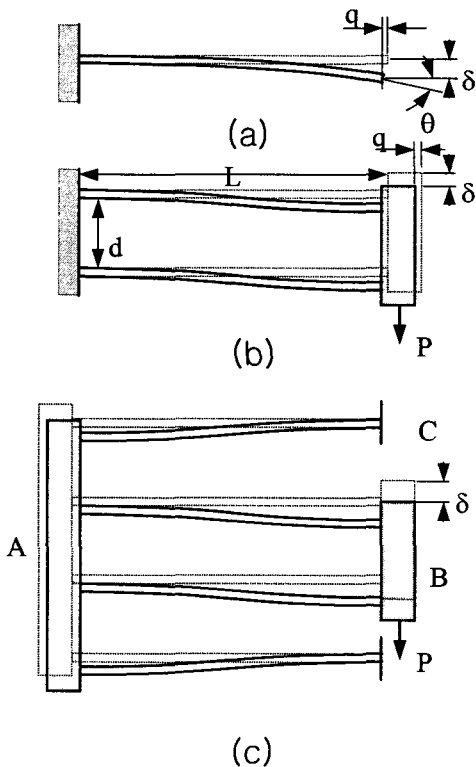


Fig. 5 Leaf spring mechanism (a) Cantilever beam (b) Simple flexure (c) Compound flexure

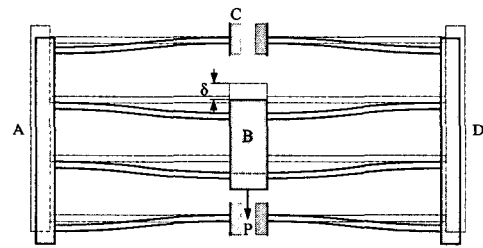


Fig. 6 Suggested leaf spring mechanism

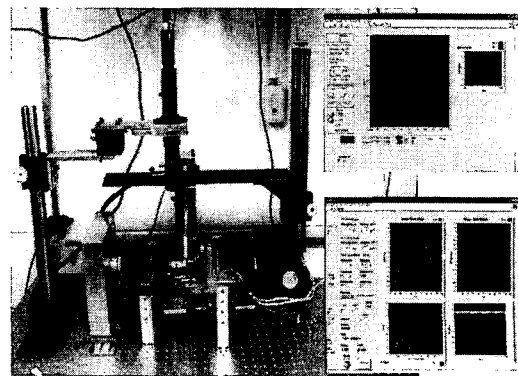


Fig. 7 Developed testing machine for thin film materials

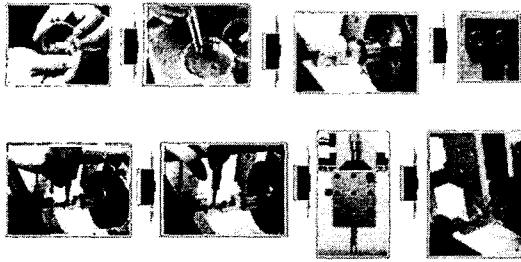


Fig. 8 The process of set-up of specimen

를 이용하여 변위를 측정한다.

3.3 시험 절차

반도체의 제작 공정을 이용한 웨이퍼 레벨의 시편 제작이 완료되면 먼저 1 차적으로 제작 상의 불량 여부 및 정확성 여부를 전자현미경(electron microscope)을 사용하여 시편 불량 및 정확성 여부를 확인하고 개별 시편으로의 절단작업을 위한 부분 절단(dicing) 작업을 통해 시편을 준비를 완료한다.

Fig. 8 에서 보는 바와 같이, 준비된 시편을 핀셋 등을 이용하여 시편의 각 구멍과 시험기에 걸쳐 있는 핀에 장착 한다. 그리고 시편의 중심을 맞추기 위하여 시험기의 액츄에이터를 움직여 약간의 인장 하중을 부가한다. 그리고, 시험편의 체결부에 체결판을 덮고 볼트를 이용하여 조여 준 후 시험기의 액츄에이터를 원상복귀 시켜 부가된 인장하중을 제거한다. 측면 지지부의 제거를 위하여 고안된 브릿지 커터(cutter)는 시험편 좌우에 브릿지로 연결된 지지부(side support strip)를 동시에 제거 하도록 설계 되었다. 이 때, 브릿지는 큰 하중의 인가 없이 쉽게 제거되도록 70% 깊이로 식각되어 있기 때문에 시편 손상 없이 지지부를 제거할 수 있었다.

Fig. 8 은 위의 시편 장착 과정을 흐름도의 형태로 보여준다. 위의 과정을 통하여 시험편의 장착이 모두 완료되면 광학 현미경을 통해서 시험편의 손상여부를 최종 확인 후 인장 또는 피로 시험을 수행한다.

4. 박막의 인장 시험 및 피로시험

MEMS 재료 물성 시험을 위해서 개발된 시험기를 이용해서 자이로(gyroscope) 등 MEMS 장치에 많이 사용되고 있는 에피폴리실리콘(epi-ploy

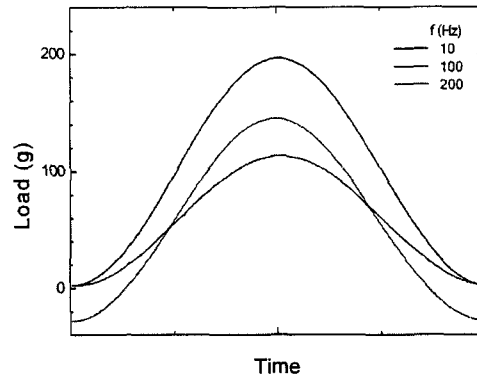
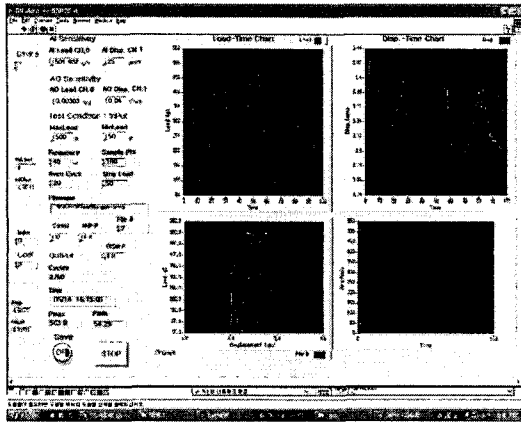


Fig. 9 Preliminary fatigue test using the developed testing machine for MEMS materials

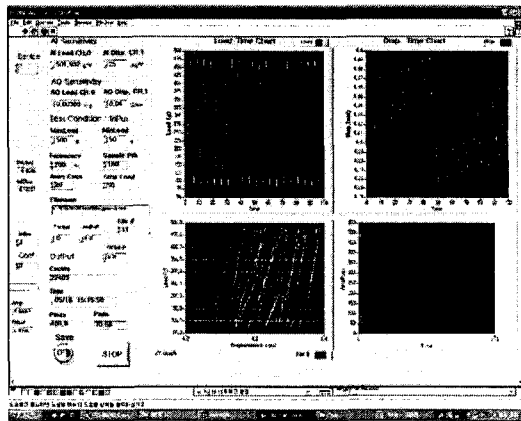
crystalline silicon)으로 앞에서 설계한 형상으로 시편을 만들어서 인장시험을 수행하였고 피로시험에 대한 예비 시험을 수행하였다. 인장 시험에 사용된 시편은 총 7 개이며, 시편 크기는 Table 1 의 3 의 경우, 즉 시편 폭이 $150\mu\text{m}$ 이고 두께는 $11\mu\text{m}$ 이다. 예비 피로시험에서도 Table 1 의 3 의, 즉 폭이 $150\mu\text{m}$ 의 시편이 사용되었다. 본 연구에서 제안한 시편장착 방법으로, 즉 사전에 제작된 구멍과 핀을 이용하여 정렬한 후 연결부를 절단하는 방법으로 시편을 장착하는 방법으로, 총 9 개의 시편 중 7 개의 시편을 성공적으로 장착하여 인장 시험을 수행할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 시편 장착 방법의 활용성을 확인할 수 있었다.

기존의 연구결과 중에는 에피폴리실리콘에 대한 인장시험 결과 없어서 기존의 시험 결과가 있는 폴리 실리콘의 인장 시험결과와 비교를 한 것이 Table 2 이다. 이 표에서 맨 위 행의 Park 의 값이 본 연구에서 시험한 결과이다. 이 Table 의 각 연구자들의 인장강도 값은 참고문헌 [9]로부터 구한 것이며, 또한 이 표로부터 같은 폴리실리콘 재질이라도 연구자들의 시험 결과는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 MEMS 장치 개발에 사용하는 재질에 대한 기계적 물성은 직접 시험을 수행해야 함을 알 수 있다.

Fig. 9 은 본 연구에서 개발한 인장형 시험기의 고되풀이수 피로시험(high cycle fatigue test)의 가능성을 확인한 결과이다. 즉 이 그림은 Table 1 의 제작된 에피폴리실리콘 시편 중 폭이 $150\mu\text{m}$ 이고 두께가 인 시편을 장착하여 10, 100, 200Hz 의 주파수의 정현파를 인가한 후 로드셀로부터 측정된 하중을 측정된 시간에 따라 그린 것이다. 이 그림



(a) Fatigue test at 40Hz



(b) Fatigue test at 200Hz

Fig. 10 Screen of fatigue test using the developed testing machine at 40Hz and 200Hz

이로부터 200Hz 까지 피로시험이 신호의 왜곡이 없이 잘 수행되고 있음을 알 수 있다. 그러나 동전형 시험기의 특성인 주파수가 증가하면 같은 전류에서 신호의 진폭이 작아 진다는 것을 또한 확인할 수 있었다.

Fig. 10 은 본 연구에서 개발한 인장형 시험기와 제어용 프로그램을 활용하여 40Hz 와 200Hz 의 고되풀이수 피로시험을 실제로 수행하고 있는 화면이다. 이 그림에서 위 왼쪽은 하중-시간, 위 오른쪽은 변위-시간, 아래 왼쪽은 하중-변위, 아래 오른쪽은 제어 상태를 보여 주고 있다. 고 되풀이수 피로 시험에서 변위의 측정은 중요하지 않기 때문에 변위 센서를 장착하지 않고 피로 시험을

Table 2 Representative strength of MEMS materials

Reference	Material	Strength
Park	Epi-polysilicon	1.52±0.16
Jones	Polysilicon	2.6±0.4
Brown	Polysilicon	2.7±0.2
Koskinen	Polysilicon	2.7±0.3
Tsuchiya	Polysilicon	3.2±0.2
Geek	Polysilicon	1.8
Lavan	Polysilicon	4.3±0.6
Knauss	Polysilicon	1.0±0.1
Sharp(wide)e	Polysilicon	1.2±0.2
Sharp(narrow)e	Polysilicon	1.4±0.2

(unit : GPa)

수행했기 때문에 위 왼쪽 그림 외에는 제대로 된 파형의 모양이 나오지 않고 있다.

5. 결론

본 연구를 통해서 MEMS 장치에 많이 사용되는 박막의 인장시험과 피로시험이 가능한 새로운 시편 구조의 설계와 시험기를 제작하였다. 새롭게 고안된 시편 형상은 체결(gripping)과 중심잡기(alignment)가 용이하여 시편을 시험기에 장착하는 시간과 노력을 줄일 수 있었고, 특히 시편을 시험기에 장착 후 시편과 지지부를 연결하는 연결부들을 절단하는 방식으로 지지부를 제거할 때 약 78%의 시편을 사전 손상이 없이 시험을 진행할 수 있었다.

시험기의 구동기로 기존의 박막 시험기에 많이 사용되는 압전재 대신 보이스 코일(voice coil)을 이용한 동전형 구동기를 활용함으로써, 하중제어가 용이하여 금속 박막을 높은 주파수에서의 피로 시험이 가능하도록 하였다. 개발된 시편과 시험기를 이용하여 에피폴리실리콘의 인장시험을 수행하였고 높은 주파수의 피로시험의 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2005 학년도 동명대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

- (1) Johansson, S., Schweitz, J. A., Tenez, L. and Tiren, J., 1988, "Fracture Testing of Silicon Micro-Elements in Situ in a Scanning Electron Microscope," *J. Appl. Phys.* 62 (10), pp. 4799~4803.
- (2) Komai, K., Minoshima, K., Tawara, H., Inoue, S. and Sunako, K., 1994, "Development of Mechanical Testing Machine for Micro-Elements and Fracture Strength Evaluation of Single-Crystalline Silicon Micro-Elements," *Trans. Jpn. Soc., Mech. Eng. A* 60-569, pp. 52~58.
- (3) Bromley, E. I., Randall, J.N., Flanders, D.C. and Mountain, R.W., 1983, "A Techniqu for the Determination of Stress in Thin-Films," *J. Vac. Sci. Technol. B* 1 (4), pp. 1364~1366.
- (4) Tabata, O., Kawashata, K., Sugiyama, S. and Igarashi, I., 1989, "Mechanical Property Measurement of Thin-Films Using Load-Deflection of Composite Rectangular Membrane," in: *Proceedings of the IEEE Micro-Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 152~156.
- (5) Sharpe Jr., W.N., Yuan, B., Vaidyanathan, R. and Edwards, R. L., 1997, "Measurement of Young's Modulus, Poisson's Ratio, and Tensile Strength of Polysilicon," in: *Proceedings of the IEEE MEMS '97*, pp. 424~429.
- (6) Tsuchiya, T., Tabata, O., Sakata, J. and Taga, Y., 1997, "Specimen Size Effect on Tensile Strength of Surface Micro-Machined Polycrystalline Silicon Thin-Films," in: *Proceedings of the IEEE MEMS '97*, pp. 529~534.
- (7) Cunningham, S.J., Suwito, W. and Read, D.T., 1995, "Tensile Testing of Epitaxial Silicon Films," *Technical Digests of Transducers '95*, pp. 96~99.
- (8) Jones, R. V., 1951, "Parallel and Rectilinear Spring Movements," *Journal of Scientific Instrumentation*, 28, pp. 38~41.
- (9) Mohamed Gad-El-Hak, 2001, *The MEMS handbook*, CRC press