

Micro/Nano 재료의 피로시험 방법과 향후 연구 방향

박 준 협 | 동명대학교 메카트로닉스공학과, 교수 | e-mail : jhpark@tu.ac.kr

Micro/Nano 디바이스 또는 시스템의 신뢰성 설계 및 평가에 있어 그 디바이스의 제작에 사용되는 Micro/Nano 크기의 박막 재료의 각종 기계적 특성 파악이 중요하다. 이 글에서는 그러한 재료의 특성 파악을 위한 시험들 중에서도 박막의 피로 특성을 얻기 위한 피로 시험 방법에 대하여 소개하고자 한다.

박막의 피로시험의 필요성

Micro/Nano 디바이스 또는 시스템은 각종 센서, 광 부품, 프린터, 바이오메디컬 등 다양한 용도로 사용되고 있으면 그 사용 범위가 점차 다양해지고 있는 추세이다. Nano/Micro 디바이스 또는 시스템의 응용/상품화 분야는 초기의 움직임이 없는 구조물의 형태에서 반복 운동을 동반하는 구조물 형태로 넓어지고 있다. 그림 1은 미국 샌디아 랩(<http://mems.sandia.gov/>)에서 개발한 '반복 운동을 하고 있는' 멤스 디바이스들(MEMS devices)이다. 그림 1에 나와 있는 디바이스들은 주로 정전력을 이용한 콤드라이브(comb drive)의 구동에 의해서 구조물이 운동을 하고 있다. 현재까지 동력을 얻기 위해서 다양한 액추에이터(actuator)들이 Micro/Nano 구조물에 응용되고 있다. 따라서 이러한 반복운동을 동반하는 구조물의 설계 또는 강도 평가를 하기 위해서는 사용되는 재료의 피로특성을

먼저 파악해야 한다.

그런데 박막의 기계적 특성들은 제조공정, 크기 등의 영향을 받아서 벌크(bulk) 소재와 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 반면에 박막의 피로특성과 같은 기계적 특성을 얻기 위한 시험에는 많은 어려움이 존재한다. 가장 대표적인 것이 시편의 취급 방법과 체결일 것이다. 따라서 많은 연구자들이 다양한 방법들을 제안하고 있다. 이 글에서 지금까지 제안된 피로시험 방법에 대해서 설명하고자 한다.

박막의 기계적 성질의 특성

시편 제작은 MEMS, 반도체 공정 등 박막을 만들 수 있는 모든 공정으로 할 수 있다. 다만 박막의 기계적 특성들은 제조공정에 많은 영향을 받기 때문에 최종 제작하고자 하는 Micro/Nano 구조물과 같은 공정으로 시편이 제작되어야만 시험결과를 활용하여 구조물의 설계 또는 강도 평

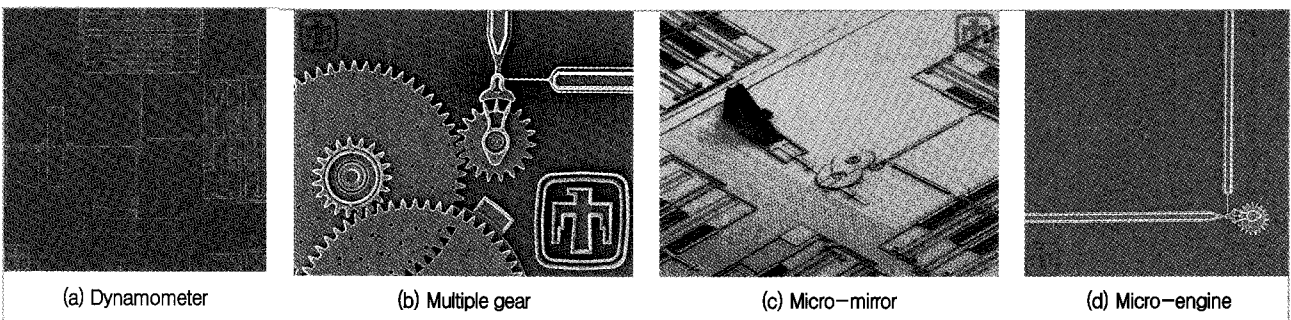


그림 1 동하중이 부하되는 MEMS Device들의 예(<http://mems.sandia.gov/> 참조)

가를 할 수 있을 것이다. 그림 2와 같이 박막을 제작하는 대표적인 공정 방법에는 증착(deposition), 산화(oxidation), 확산(diffusion), 도금(plating) 등이 있다. 이중 증착법에는 습식과 건식 방법이 있고, 건식방법에는 기상 증착법에 따라 화학적 방법과 물리적 방법이 있고 화학 기상 증착법(CVD; Chemical Vapor Deposition)도 여러 가지로 나눌 수 있다. 이와 같이 많은 박막 제조 공정 방법이 있고 각 공정 방법 내에도 공정하는 사람마다 조금씩 다른 조건(예, 온도, 압력, 시간 등)으로 박막을 제작하고 있는 실정이다. 정확히 같은 공정으로 박막을 제작했다더라도 Micro/Nano 구조물의 제작 전후 공정이

다른 경우가 또한 많이 있을 것이다. 그런데 박막의 기계적 물성은 각 공정의 영향을 받는 경우가 허다하다. 따라서 Micro/Nano 구조물의 설계 또는 강도평가에 있어서 재료의 기계적 특성을 사용할 때는 시편의 제작 공정에 주의를 해야 되며, 가장 좋은 경우는 Micro/Nano 구조물과 같은 공정으로 시편을 제작한 경우일 것이다.

박막의 피로시험 방법

Micro/Nano 디바이스 분야의 설계에 소재의 기계적 성질의 중요성에 대해서 Richard Muller가 1990년에 처음으로 언급했다. 역사적으로는 1959년 Menter와 Pashley가 박막에 대한 연구를 수행한 바가 있다. 박막의 피로시험을 포함한 기계적 특성시험에는 3가지의 주요한 이슈가 있다 - 시편의 준비, 하중의 인가와 측정, 변위 또는 변형률 측정. 따라서 이러한 이슈들을 해결하기 위하여 여러가지 시험방법들이 제안되고 있다. 또한 국제전기기술위원회(國際電氣技術委員會; International Electrotechnical Commission)에서 '박막 소재의 인장피로시험 방법(Axial fatigue testing methods of thin film materials)'에 관한 표준화를 위한 활동을 하고 있다.

Read와 Dally(1992)가 미국재료시험규격인 ASTM에 제시된 기존의 벌크 소재의 인장 시편 형상인 아령형(dog-bone) 박막 시편을 쉽게 취급할 수 있게 그림 3과 같은 시편 양측면에 보강 구조를 가진 MEMS 공정의 시편을 제안하였다. 변형률 측정 방법으로는 Sharpe 등이 Interferometric Strain/Displacement Gage(ISDG)법의 비접촉식 측정 방법을 1997년에 적용하여 프와송 비(Poisson's ratio)를 측정하였다.

Johannson 등(1988)은 그림 5와 같이 실

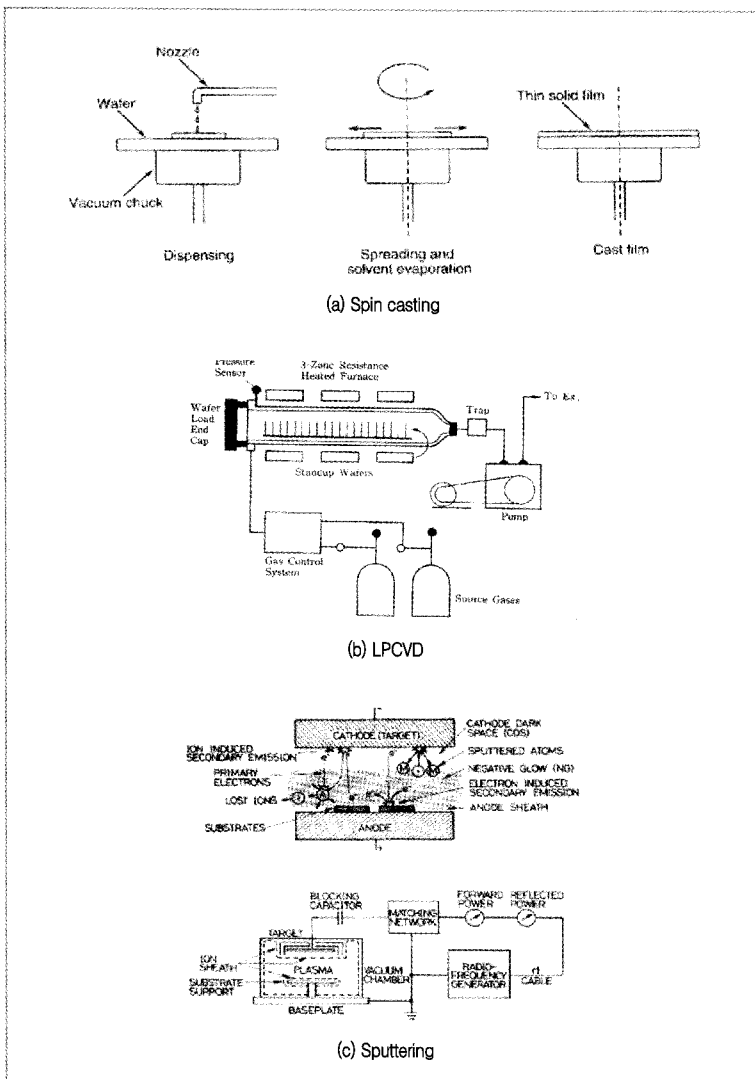


그림 2 대표적인 Nano/Micro 박막 공정

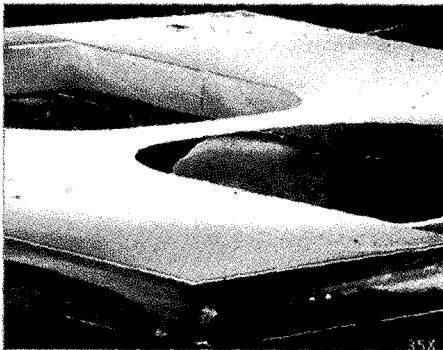


그림 3 Read에 의해 제안된 박막 시편

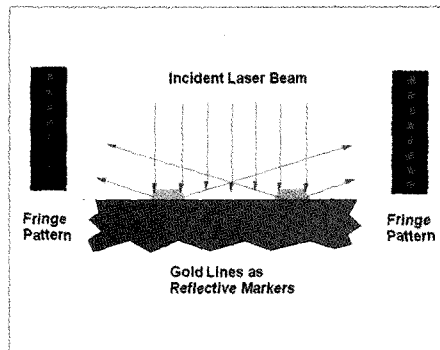


그림 4 ISDG의 원리

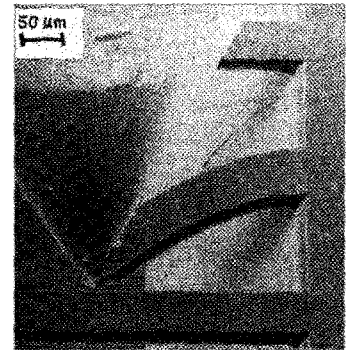


그림 5 실리콘 외팔보

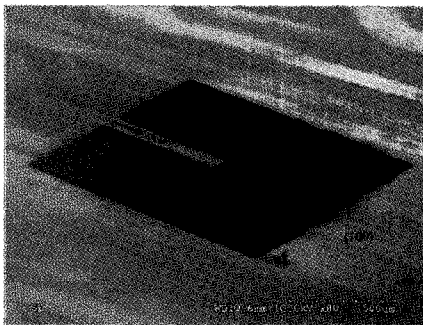
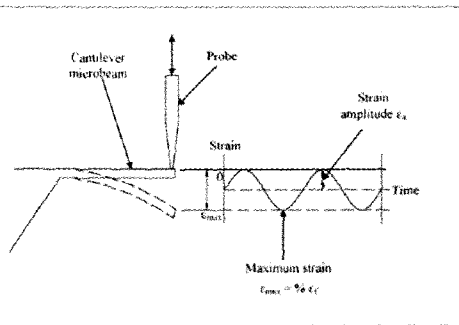


그림 6 Liu의 시편과 시험방법



실리콘에 대한 피로시험을 수행하고 시험결과를 발표하였다. 이러한 외팔보 형태의 시편은 체결과 하중 인가에는 유리하지만 에지 부분의 응력 분포가 예측과 다른 경우가 많다. 또한 연성 재료와 잔류 응력이 발생하는 경우에는 적용이 어려울 수 있다.

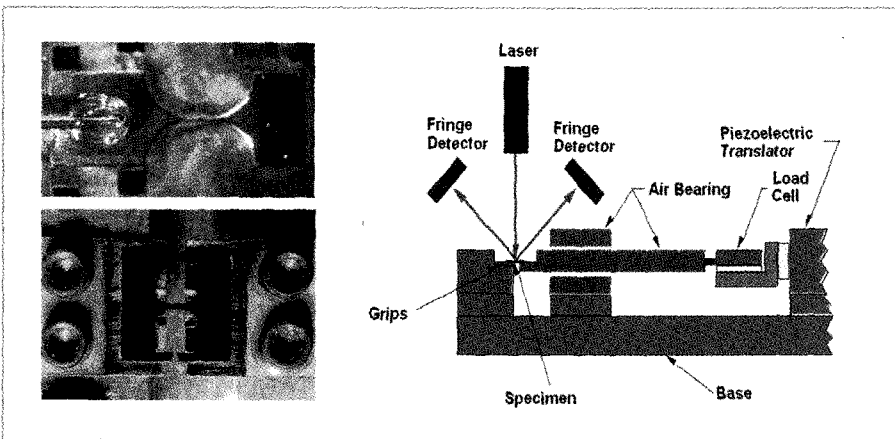


그림 7 Sharpe의 시편과 시험장치

Sharpe 등(1997)은 기존의 굽힘형 시험장치가 아닌 그림과 같은 인장형 박막 시험장치를 개발하고 아령형 시편을 UV 접착제를 사용하여 고정 한 후 하중은 로드셀로, 변형률은 ISDG 법을 사용하여 측정할 수 있는 장치를 개발하고 폴리 실리콘에 대한 인장 시험결과를 발표하였다. 하중 인가는 피에조 액추에이터 (piezo actuator)를 이용하였다.(그림 7)

리콘 외팔보를 MEMS 공정으로 제작하여 모터 액추에이터로 하중을 인가하여 파단시험을 수행한 후 그 결과를 발표하였다. 1990년에는 Ericson 등도 같은 방법으로 실리콘에 대한 파단시험 수행하여 그 결과를 발표하였다(그림 6). Liu 등(2007)은 같은 형상의 외팔보 시편으로 단결정

Ogawa 등(1997)은 알루미늄(aluminum)과 티타늄(titanium) 박막을 그림 8의 사진과 같은 시편을 제작하여 시편의 한쪽은 스크류(screw)로 고정하고 다른 쪽은 그림 8에서 보는 바와 같이 클립 형태의 고정 장치를 한 후 DC 모터를 이용하여 하중을 인가하는 인장시험을 수행하면서

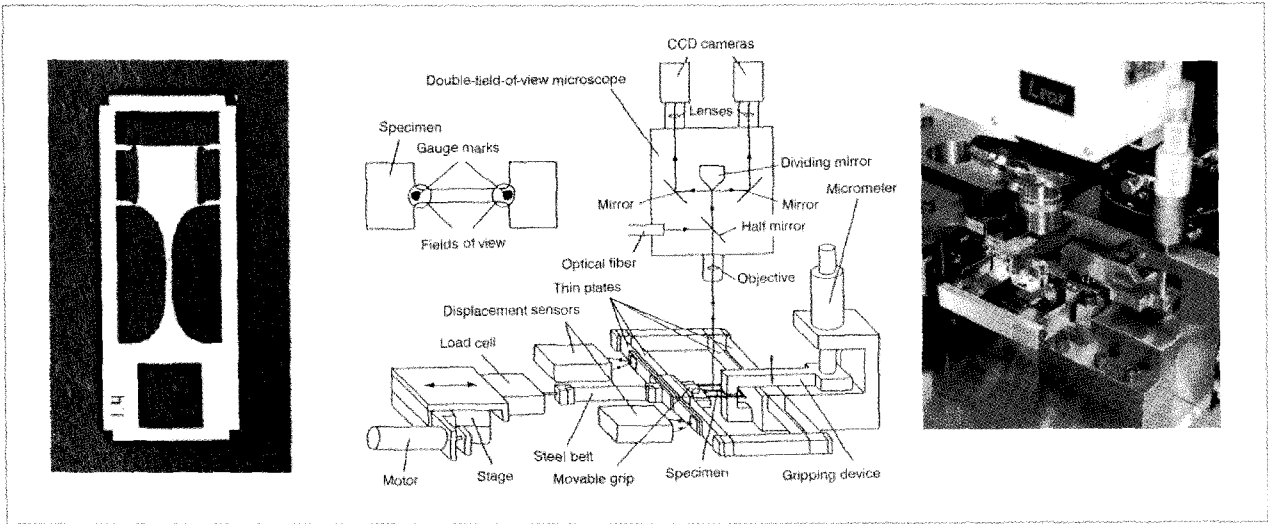


그림 8 Ogawa의 시편과 시험장치

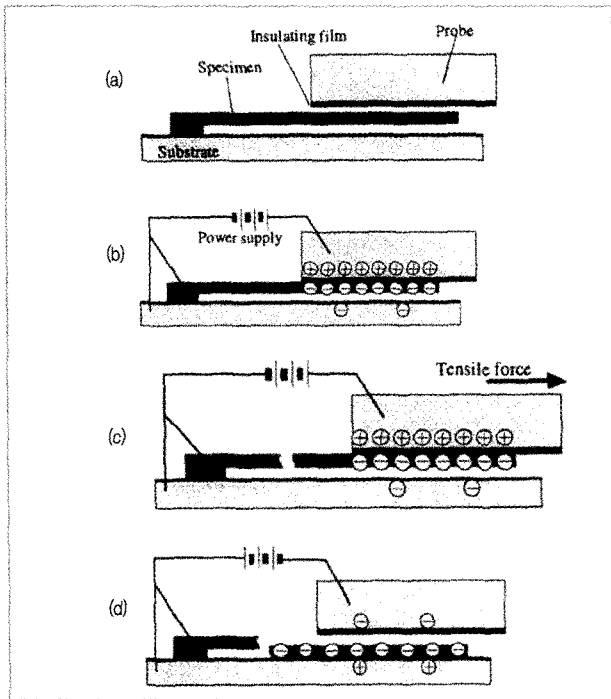


그림 9 Tsuchiya의 시편 고정 방법

두 대의 CCD를 이용하여 변위를 측정하였다. 이 경우에 피로시험 수행 시 체결 부위에서 미끄럼이 발생할 가능성이 있다.

Tsuchiya 등(1998)은 시편을 고정시키기 위하여 그림 9와 같이 정전력을 이용하는 방법을 제안하였다.

Brown 등(1999)은 그림 10에서 나타난 것처럼 MEMS

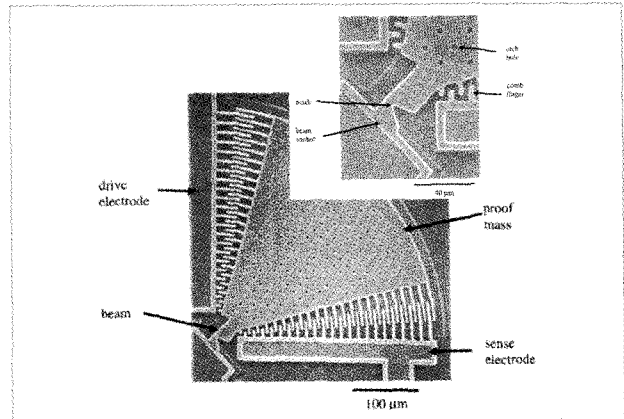


그림 10 Brown의 시험 방법

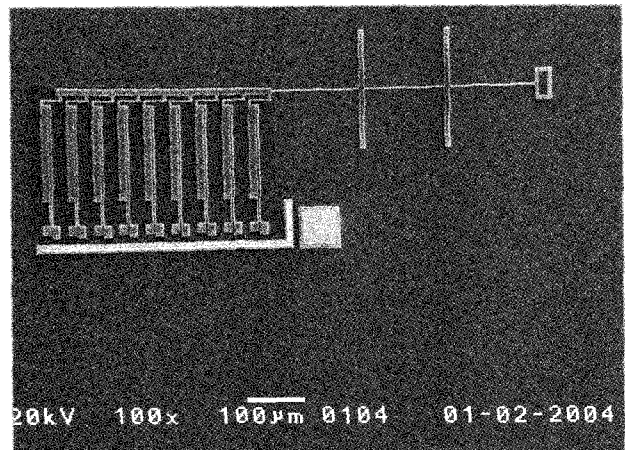


그림 11 Kapels의 시험방법

공정으로 폴리실리콘 소재의 액추에이터로 콤드라이브

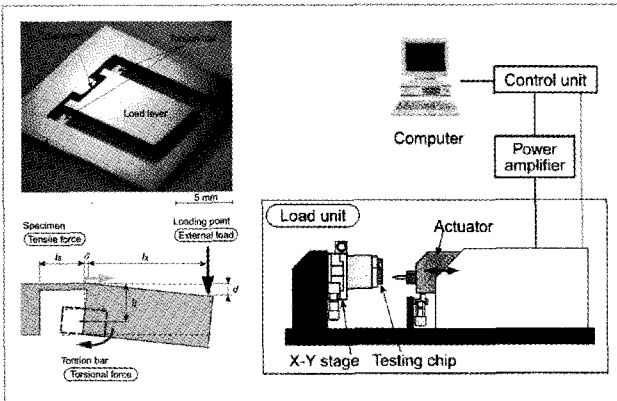


그림 12 Ando의 시험방법

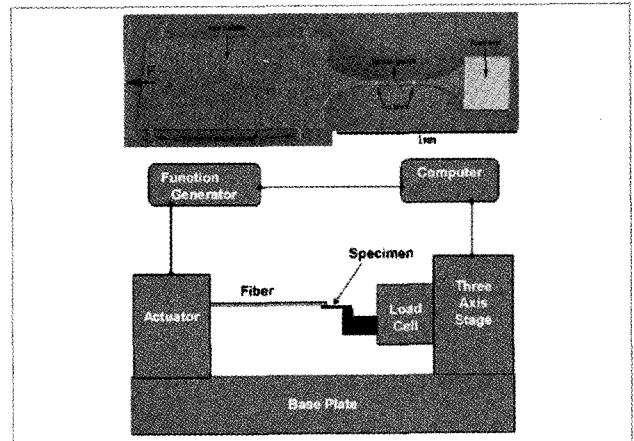


그림 15 Sharpe의 시험방법

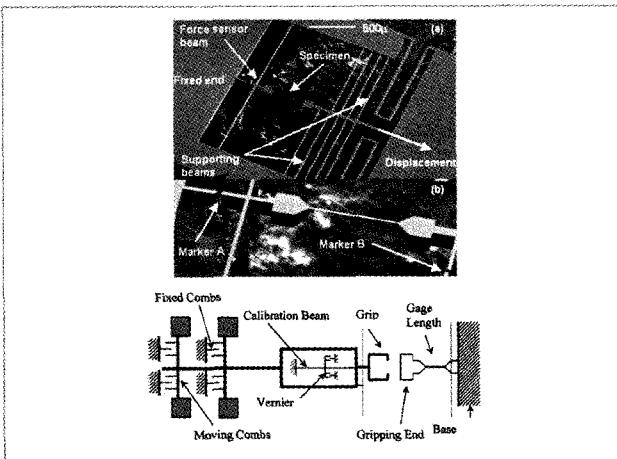


그림 13 Saif의 시험방법

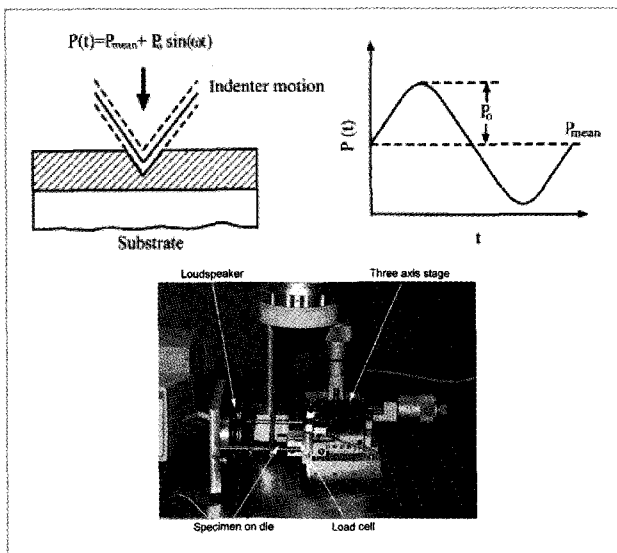


그림 14 Ni의 시험 방법

(comb drive)를 이용하여 액추에이터와 같은 재료인 폴리 실리콘의 피로 균열 진전 시험을 수행하여 발표하고 같은 방법으로 실리콘에 대한 피로시험을 수행하여 2001년에 발표를 하였다.

Kapels 등(2000)은 그림 11과 같이 열 액추에이터 (thermal actuator)의 시험장치를 MEMS 공정으로 만들어 폴리실리콘(polysilicon) 박막에 대한 피로시험 결과를 발표하였다. 이와 같이 시험장치와 일체형의 시편으로 시험을 수행하면 박막의 잔류응력이 피로시험 결과에 영향을 미칠 수 있다.

Ando 등(2001)은 그림 12와 같은 시편에 굽힘 하중을 인가하여 인장 응력이 유발되도록 하는 시험방법을 개발하여 단결정 실리콘에 대한 피로시험을 수행하여 발표하였다.

Saif 등(2001)은 그림 13과 같은 MEMS공정으로 인장형 시험장치를 개발해서 μm 이하의 알루미늄 박막에 대한 시험을 수행한 후 그 결과를 발표하였다. 시험장치 내에 하중과 변위 센서를 같이 고안하여 제작하였다.

Li 등(2002)은 그림 14와 같은 방법으로 나노인덴터 장비를 이용하여 그림과 같이 다층 박막 계면의 피로 시험을 수행하여 발표를 하였다.

Sharpe 등(2003)은 그림 15와 같은 아령형(dog-bone) 시편을 사용하여 폴리 실리콘에 피로시험을 수행하여 발표하였다. 하중의 측정은 로드셀을 이용하였으나 변위는 별도로 측정하지는 않았다. 하중인가 장치는 스피커를 사

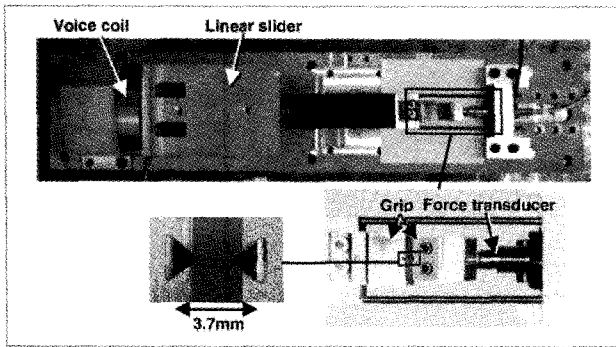


그림 16 Cho의 시편 및 시험방법

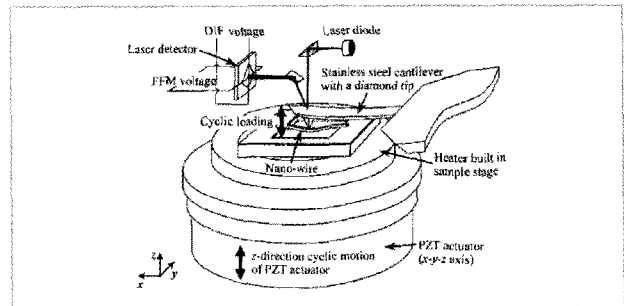


그림 17 Isono의 시험방법

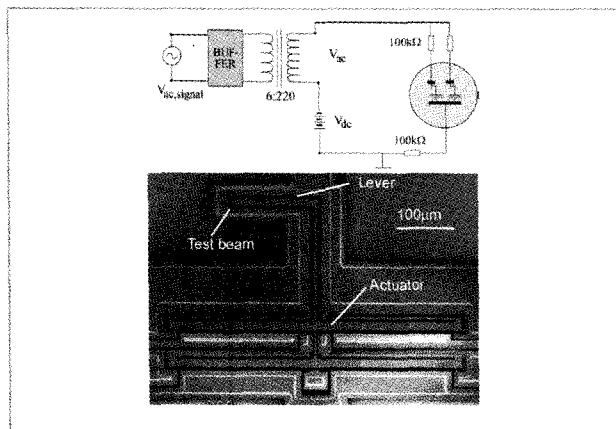


그림 18 Larsen의 시험방법

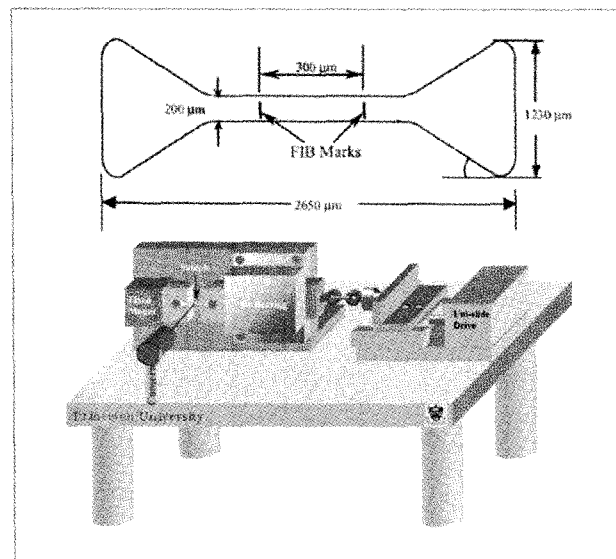


그림 19 Allameh의 시험방법

용하였고 시편의 고정은 UV 접착제(adhesive)를 사용하였다.

Cho 등(2003)은 그림 16과 같이 변형된 아령형(dog-bone) 시편인 그림부가 삼각형의 LIGA 니켈 시편을 피로 시험을 하고 그 결과를 발표하였다. 피로시험 중에는 하중의 측정은 로드셀을 이용하였으나 변위는 별도로 측정하지는 않았다. 하중인가 장치는 보이 코일을 사용하였고 시편의 고정은 그림과 같이 삼각형 그림 형상을 사용하였다.

Isono 등(2003)은 그림 17과 같은 양단 고정 굽힘형 시편에 액추에이터로 가진하는 시험장치를 이용하여 SC-Si(nanoscale single crystal silicon)과 산화 실리콘(silicon dioxide) 박막에 대한 피로시험 결과를 발표했다. 시편의 양단이 고정된 상태에서 굽힘형의 시험인 경우, 시편 만들 때 잔류응력에 의한 시편의 뒤틀림(wapage) 발생과 잔존 잔류응력의 영향이 있는 박막이 있을 수 있다.

Larsen 등(2003)은 MEMS 디바이스를 이용하여 굽힘형 시편과 정전형 액추에이터를 이용하여 전해도금 니켈에 대한 피로시험을 수행한 후 발표를 하였다. 다만 하중과 변위는 별도 측정하지 않고 입력 전압으로 결과를 정리하였다.(그림 18)

Allameh 등(2004)은 Cho와 같은 변형된 아령(dog-bone) 형태의 LIGA(Lithographie, Galvanformung, Abformung) 니켈 시편을 양단을 그림(grip)과 같은 형상의 지그에 기계적으로 고정하여 그림 19와 같이 Sharpe 등의 시험기를 변형한 시험장치로 피로시험을 수행하여 결과를 발표하였다. 변형률 측정은 CCD를 이용하여 하였다.

Park 등(2005)은 그림 20과 같이 보이 코일(voice-coil) 가진장치를 이용하여 Al-3%Ti, Cu 박막 등의 피로 시험을 수행하고 그 결과를 발표하였다. 시편의 취급을 위

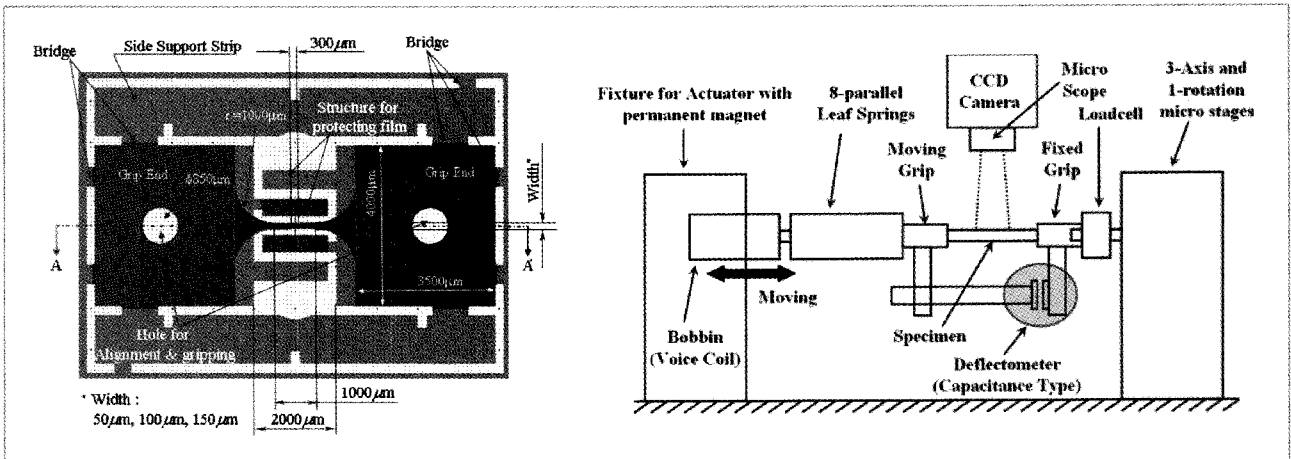


그림 20 Park의 시험방법

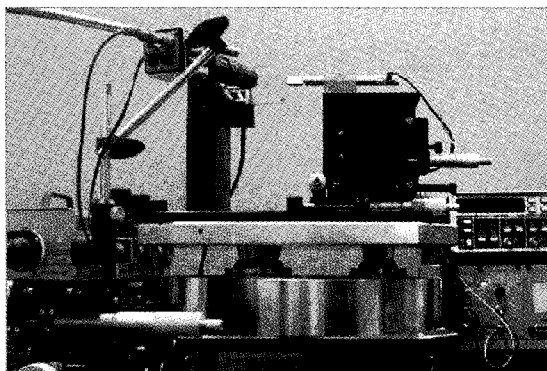


그림 21 Kwon의 시험장치

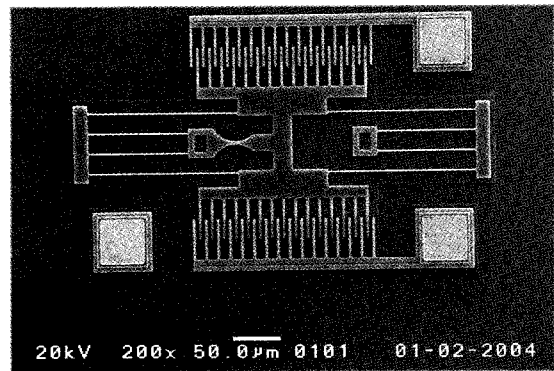


그림 22 Kraft의 시험방법

해서 Read 등의 형상을 변경하였고, 변위의 측정을 위해서 정전용량형 센서, 하중의 측정을 위해서 로드셀을 사용하였다. 시편의 고정은 핀과 볼트를 사용한 것이 특징이다.

Kwon 등(2005)은 아령(dog bone) 형태의 LIGA 니켈 시편을 UV 접착제(adhesive)를 사용하여 한쪽 그립부를 고정하고 다른 쪽은 시편이 실리콘 기판(substrate)에 고정된 Sharpe 등의 방법을 활용하여 하중을 피에조 액추에이터를 이용하여 인가하였다. 변위의 측정은 스펙클(one-dimensional electron speckle interferometry)법을, 하중 측정은 로드셀을 사용하였다.(그림 21)

Kraft 등(2006)은 그림 22와 같은 정전공진장치를 이용하여 알루미늄 박막의 피로시험을 수행하고 박막에서의 피로 메커니즘(mechanism)에 대한 결과를 발표하였다.

Lee 등(2008)은 그림 23에 나타낸 바와 같이 동전형

(electro-magnetic) 가진장치를 이용하여 알루미늄, 구리 박막 등의 피로시험을 수행하고 그 결과를 발표하였다. 시편의 취급을 위해서 Read 등의 형상을 변경하였고 시편의 고정은 UV 접착제를, 하중 측정을 위해서는 로드셀을 사용하였고, 특히 피로시험 중에 시편 표면의 형상을 측정하여 하여 피로손상과의 관련성을 연구하였다.

Song 등(2009)은 그림 24와 같이 보이코일(voice-coil) 가진장치를 이용하여 박막의 피로시험을 수행할 수 있는 수직형 피로시험 장치를 개발하고 그 결과를 발표하였다. 시편의 취급을 위해서 새로운 지그를, 변위의 측정을 위해서 정전용량형 센서를 제작하였고, 하중 측정을 위해서는 로드셀을 사용하였다.

Oh 등(2006)은 그림 25와 같이 박막의 인장 시험 시 시편의 정렬이 재료의 기계적 물성에 어떤 영향을 미치는지

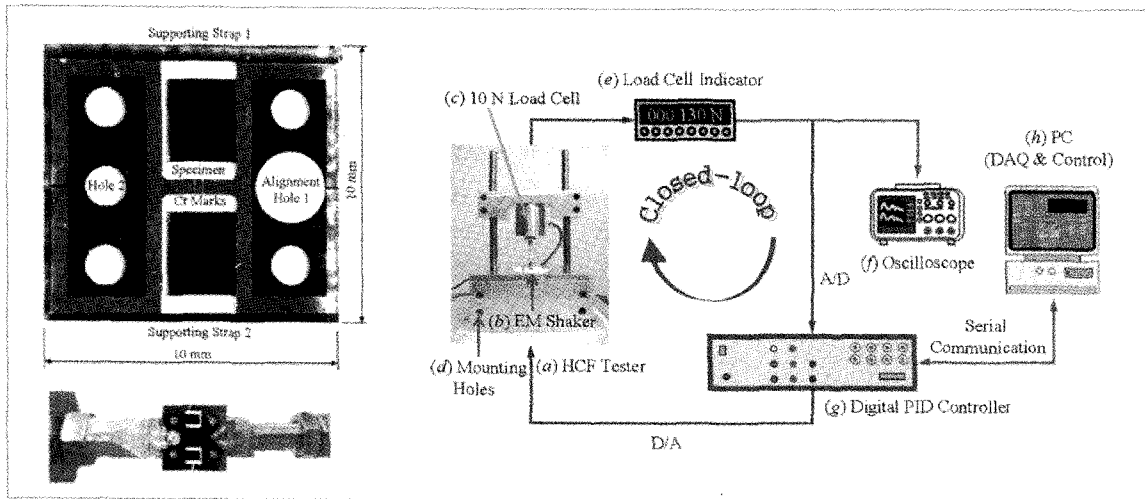


그림 23 LEE의 시편 및 시험장치

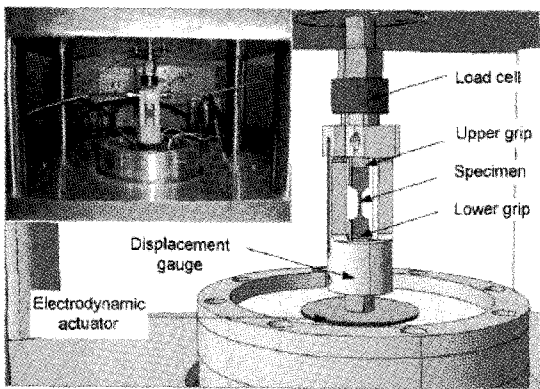


그림 24 Song의 시험장치

연구를 수행하여 발표 하였다.

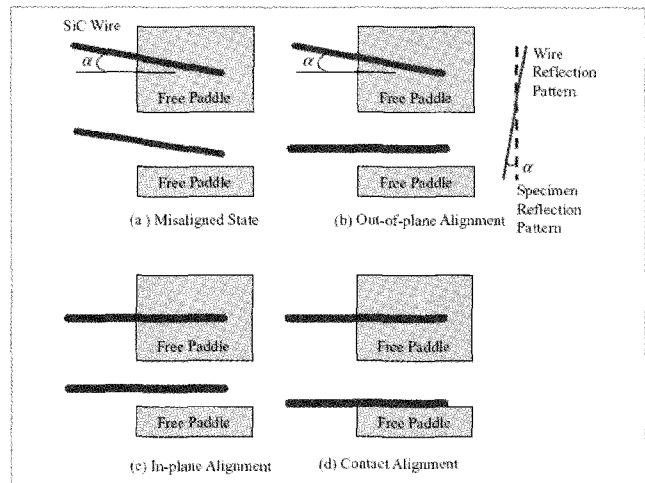


그림 25 Oh의 시편의 정렬

피로시험 방법의 발전 방향

앞에서 많은 연구자들의 박막의 피로시험에 관한 연구 결과에 대해서 아주 간략하게 소개를 하였다. 박막의 피로 시험에는 여전히 이미 제기한 이슈인 시편의 준비(취급), 하중의 인가와 측정, 변위 또는 변형률 측정의 문제가 완벽하게 해결되었다고는 장담할 수 없는 실정이다. 특히 Nano 디바이스의 기술의 발달로 박막의 두께가 점점 얇아지고 있는 추세에서 피로시험에서 새로운 문제점이 대두될 수 있다. 끝으로 박막의 피로시험에서 다음과 같은 해결해야 할 문제점들을 제기하면서 이 글을 맺고자 한다.

- 1) 하중의 다양한 인가 방법의 피로시험 : 인장, 굽힘, 비틀림 시험 등
- 2) 미소 하중, 변형률 측정 방법
- 3) 시편의 취급 및 체결 방법 : 박막의 잔류응력 고려
- 4) 시편의 제작 방법 : 박막의 물성의 공정 영향 존재
- 5) 벌크재의 시험 규격 및 피로 메커니즘 적용 여부 : 시편 형상, 시험속도, damage rule 등
- 6) 시편의 정렬 점검 방법 : 박막의 특성상 벌크재보다 정렬의 영향이 클 가능성 존재
- 7) 다양한 재료에 대한 피로시험 : 한정된 재료에 대한 피로시험 발표, DB 구축 필요