

마이크로/나노 구조물의 비전통적인 물성 평가 기술

김재현*, 현승민*, 장봉균**, 최현주**, 박정민*, 이학주***, 최병익*** | 한국기계연구원 나노융합기계연구본부 나노역학연구실
| e-mail : jaehkim@kimm.re.kr

이 글에서는 마이크로/나노 구조물의 특성 평가에 유용한 비전통적인 방법 세 가지, 즉 주름 형성을 이용하는 방법, 공진을 이용한 방법, 미소인장시험을 이용한 복합 물성 측정 방법을 소개한다.

마이크로/나노 구조물은 마이크로 및 나노 가공기술을 이용하여 제작된 구조물로서 그 특성길이가 수십 마이크로론에서 수십 나노미터의 범위에 있다. 이러한 마이크로/나노 구조물은 반도체 소자, 유연 전자 소자, MEMS/NEMS, 광학 소자, 반도체 응용 소자 등과 같은 다양한 분야에 응용되고 있다. 예로서 그림 1에는 반도체 소자와 그 패키징 구조물에 대한 개략도와 이러한 마이크로/나노 구조물에 사용되는 주요 소재가 나타나 있다.

미세 소자 내의 각종 마이크로/나노 구조물은 소자의 종류에 따라 전기적, 기계적, 화학적, 광학적 기능 등을 수행하며, 그 신뢰성이 확보되어야 상용화가 가능하다. 마이크

로/나노 구조물의 신뢰성은 구조물이 일정 기간 동안 주어진 조건하에서 부여된 기능을 수행할 수 있는 정도로 정의할 수 있다. 신뢰성의 가장 기본적인 단계는 구조물의 역학적인 특성을 평가하는 것이다. 즉, 소재의 강도와 탄성 계수 등과 같은 역학적인 특성을 측정함으로써 소자가 작동하는 동안 구조물이 파손이나 심각한 소성 변형을 일으키지 않고, 원래의 기능을 수행할 수 있는지를 평가하는 것이다. 마이크로/나노 구조물의 특성은 제작 공정과 구조물 내의 조직(texture), 결정립의 크기, 결합의 분포 등 다양한 요인에 따라 변화되는 경우가 많으며, 특히 거대 소재(bulk material)와는 그 특성이 다른 경우가 많다. 따라

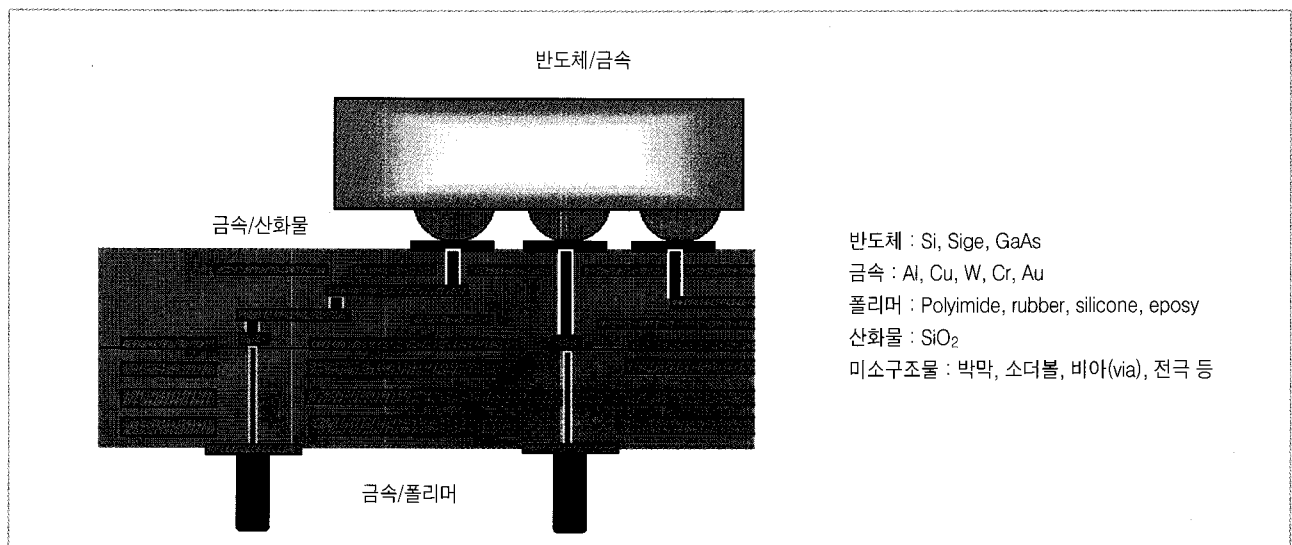


그림 1 반도체 소자의 패키지 구조물과 자주 사용되는 소재의 예

* : 선임연구원 ** : 연구원 *** : 책임연구원

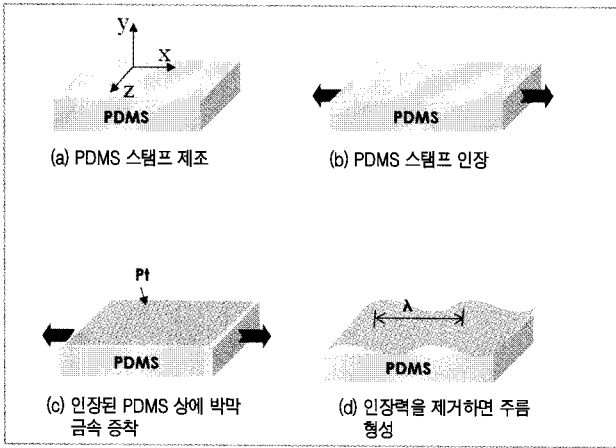


그림 2 박막 구조물에 주름을 형성하는 예

서, 미세 소자에 이용되는 마이크로/나노 구조물의 역학적인 특성은 그 소자를 제작하는 공정과 동일한 공정으로, 동일한 크기를 가지도록 시험편을 제작하여 그 특성을 측정해야 한다.

이 글에서는 마이크로/나노 구조물의 특성을 측정하는 방법 중에서 몇 가지 비전통적인 방법들을 소개하고자 한다. 이들 방법들은 아직 널리 사용되고 있지는 않지만, 그 발전 가능성이 크고 유용한 방법들이다. 가장 먼저 소개할 주름 형성을 통한 나노 스케일 박막 구조물의 물성 측정 방법은 특별한 장비나 시험편 제작 노력을 들이지 않고도, 나노스케일 박막 구조물의 탄성계수를 측정할 수 있는 흥미로운 방법이다. 공진시험을 이용한 물성 측정 방법은 매우 분해능이 높은 측정방법으로서 30nm급의 두께를 지니는 박막에도 적용가능하다. 마지막으로 소개할 시험 기술은 널리 알려진 미소 인장 시험 기술과 전기적 특성 측정 기술을 결합하여 복합 물성을 측정하는 기술이다.

나노박막의 주름 형성을 통한 물성 평가

개요

가늘고 긴 구조를 지니는 구조물이 길이 방향으로 압축 하중을 받을 때, 하중 방향으로 압축 변형

을 하기보다는 좌굴되는 현상이 종종 발생한다. 이것은 구조물의 길이가 길어지고, 굽힘 강성이 작아질 때에 더 자주 발생한다. 주름(wrinkle)도 이와 비슷한 원리로 발생한다. 매우 강성이 작은 모재(substrate) 위에 탄성계수가 큰 박막이 올려진 경우를 생각해 보자. 이 박막에 길이 방향으로 압축하중이 가해지면, 박막은 길이 방향으로 압축 변형을 일으키기보다는 주름진 형태로 변형한다. 만일 모재가 없었다면 좌굴이 일어날 상황이지만, 모재에 의하여 좌굴 대신에 주름이 발생하게 된다. 모재 위에 증착된 나노 스케일 박막 구조물에 주름을 형성하는 방법은 열응력을 이용하는 방법과 기계적인 외력을 가하는 방법, 표면 장력을 이용하는 방법, 국부적인 에너지 조사를 이용하는 방법 등 여러 가지 방법이 있으나, 여기서는 이해를 돕기 위하여 그림 2와 같이 기계적인 외력을 이용하는 방법을 소개한다. 그림 2에 나타난 예와 같이, PDMS라는 매우 유연한 폴리머 모재를 x 축 방향으로 신장시키고, 그 위에 나노 스케일 두께를 지니는 Pt 박막을 증착한다. 박막이 증착된 후에 x 축 방향으로 신장시킨 것을 풀어줌으로써 Pt 박막에 압축 하중이 가해지고, 그에 따라 주름이 형성된다.

주름의 해석

모재 위에 올려진 박막의 주름은 박막과 모재 사이의 탄성계수 차이와 박막의 두께, 모재의 두께 등에 의존한다. 박막에 형성된 주름의 파장으로 박막의 탄성계수를 추출하기 위해서는 박막의 주름에 대한 해석 모델이 요구된다. 여러 연구자들에 의하여 다양한 재료 조합에 대하여 선형

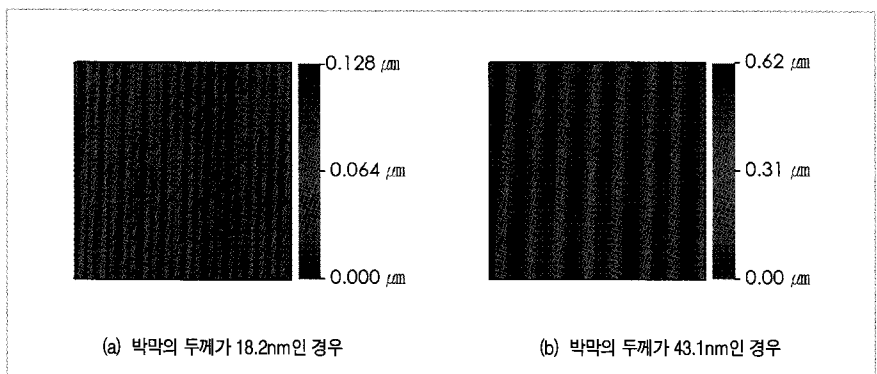


그림 3 백색광 간섭계로 측정된 Pt 박막의 주름(백색광 간섭계의 측정영역은 $30 \times 30 \mu m^2$)

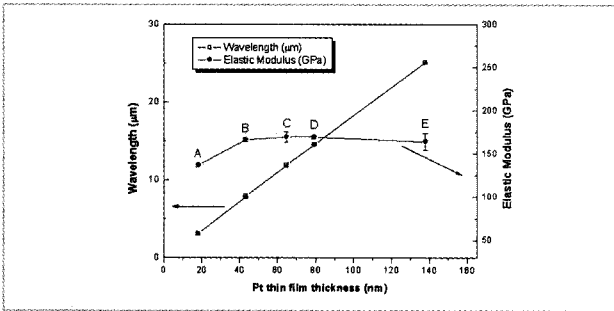


그림 4 Pt 박막의 두께에 따라 형성된 주름의 파장 측정 결과와 그로부터 계산된 Pt 박막의 탄성계수

과 비선형 해석 모델이 연구되었으며, 그 중에서 가장 간단한 모델은 다음과 같이 나타낸다.

$$E_f = 3E_s \left(\frac{1 - \nu_f^2}{1 - \nu_s^2} \right) \left(\frac{\lambda}{2\pi h_f} \right)^3 \quad (1)$$

여기서 E 는 탄성계수, ν 는 포와송비, λ 는 주름의 파장, h 는 두께이며, 아래첨자 f 와 s 는 각각 박막과 모재를 나타낸다. 여기서 모재의 두께는 박막에 비하여 무한히 크다고 가정되었으며, 선형 등방성 탄성 이론이 적용되었다.

주름 형성을 통한 물성 평가의 예

앞서 제시된 그림 2와 같은 방법으로 나노스케일 두께를 지니는 Pt 박막의 주름을 형성하고, 백색광 간섭계를 이용하여 측정하면 그림 3과 같은 결과를 얻는다.

박막의 두께가 두꺼워지면, 식 (1)에서 예측된 바와 같이 주름의 파장도 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 모

재로 사용된 PDMS의 탄성계수 2.06MPa와 포와송비 0.5를 이용하여 Pt 박막의 탄성계수를 계산하면(Pt의 포와송비는 0.38로 가정) 박막 두께에 따라 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 4에 나타난 그래프에서 A, B, C, D, E는 각각 두께가 다른 Pt 시험편을 나타내며, A와 B는 그림 3에 나타난 두께 18.2nm와 43.1nm의 Pt 시험편이다. 그래프의 좌측 수직축은 Pt 박막에 형성된 주름의 파장을 나타내며, 우측 수직축은 식 (1)로부터 계산된 Pt 박막의 탄성계수를 나타낸다. 가장 두께가 얇은 A 시험편을 제외하고는 모든 시험편의 탄성계수가 164에서 170GPa 범위 내에 드는 것을 알 수 있다. A 시험편의 경우에 다른 두께의 시험편에 비하여 탄성계수가 작은 것은 기공성(porosity)이나 조직(texture)과 같은 미세 구조의 차이로 설명할 수 있다.

공진시험을 통한 열-기계 물성 평가

개 요

공진시험은 인장응력으로 인가된 박막과 멤브레인의 고유 주파수(resonance frequency)를 측정하여 이 주파수로부터 박막의 응력을 구하는 방식이다. 박막의 두께가 나노 영역으로 작아짐에 따라 박막의 기계적 성질을 정확히 측정하기가 힘들어진다. 공진시험 기법을 사용하면 나노

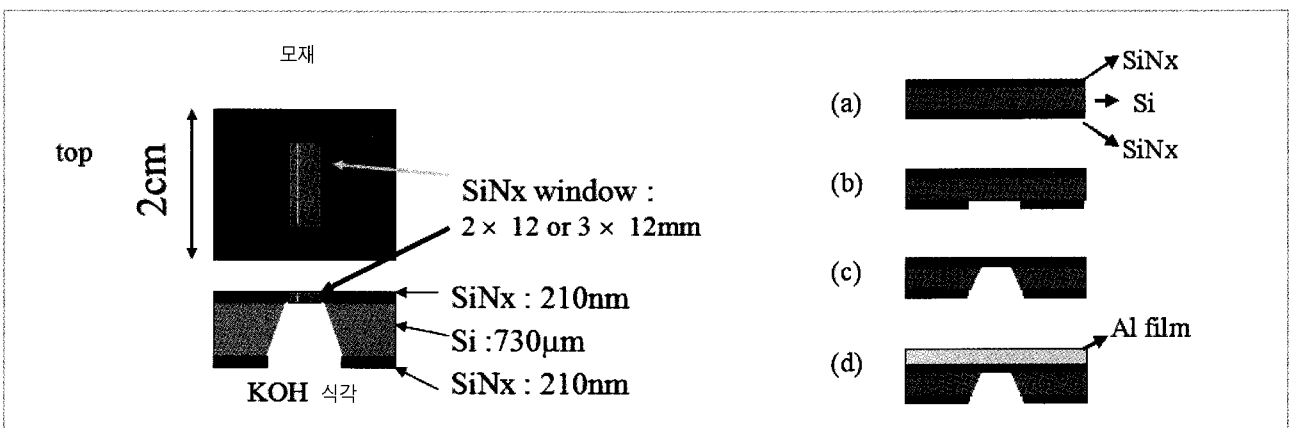


그림 5 공진시험을 위한 시험편과 제작 과정. (a) LPCVD를 사용하여 silicon nitride 박막을 silicon 기판에 증착한다. (b) photolithography와 RIE를 사용하여 silicon 기판 뒷면에 silicon nitride를 제거하여 패턴을 형성한다. (c) KOH용액을 사용하여 자유지지 silicon nitride 멤브레인을 형성한다. (d) 나노 두께의 박막 증착 과정

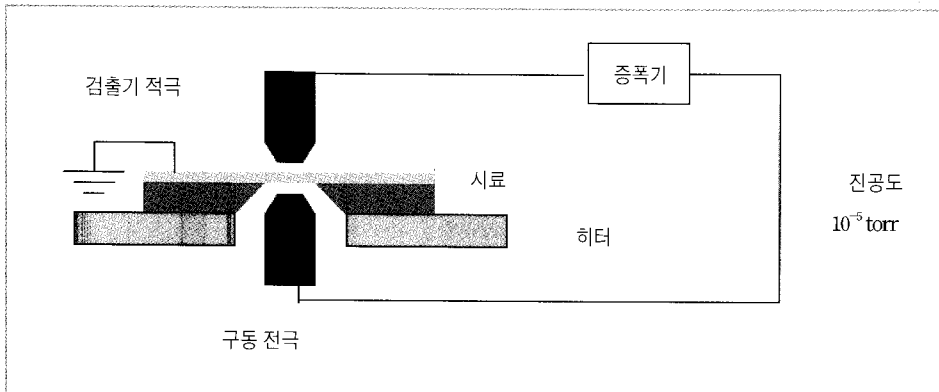


그림 6 공진시험의 개략도

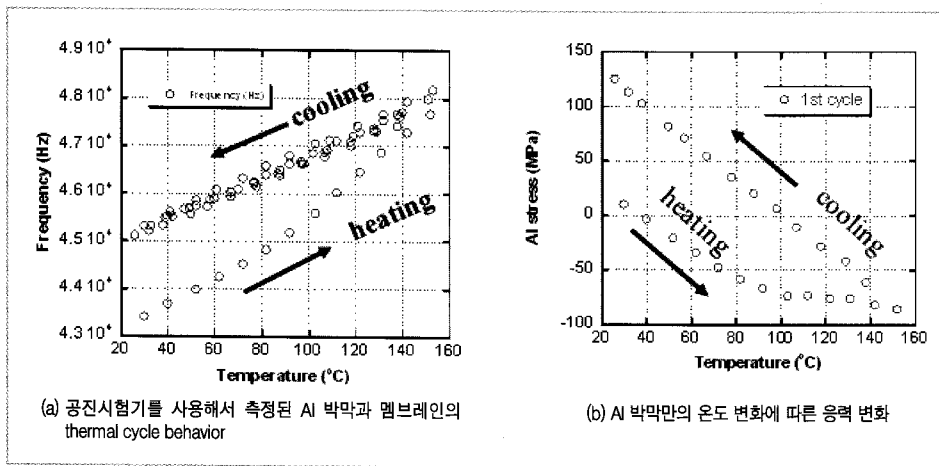


그림 7 32nm 두께의 Al 박막의 열-기계 특성

영역에서의 박막의 온도에 따른 응력 변화 또는 시간에 따른 응력변화를 정확하게 측정할 수 있다. 박막의 공명 시스템(resonance system)을 사용하여 측정하는 공명(resonance)현상과 박막의 응력관계는 다음과 같다.

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

위 식에서 f 는 공명 주파수, σ_c 는 박막과 멤브레인의 잔류응력이다. ρ 는 박막과 멤브레인의 밀도, a 와 b 는 자유지지 멤브레인의 가로와 세로의 치수, m 과 n 은 공명의 모드(주로 $m=1, n=1$)이다. 멤브레인의 잔류응력을 알면 박막의 응력을 계산할 수 있다.

시험 방법

공진시험에 쓰이는 시편들은 MEMS 공정을 사용하여 제

작하였다. 4인치 또는 8인치 Si wafer에 약 210nm 두께의 silicon nitride 박막을 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 사용하여 증착하였다. 뒷면 기판에 증착된 silicon nitride를 photo lithography와 RIE(Reactive Ion Etching) 방법을 사용하여 패턴 및 건식 에칭을 한 후에 86°C의 KOH 용액을 사용하여 패턴된 기판을 습식 에칭하여 직사각형의 자유지지 Silicon nitride 멤브레인을 형성하였다. Silicon nitride membrane 위에 E-beam evaporator를 사용하여 32nm 두께의 나노 사이즈 두께의 Al 박막을 증착하였다. 시편의 제작 과정과 Al 증착 과정은 그림 5에 나타나 있다.

공진시험기를 사용하여 박막의 응력을 측정하는 방법이 그림 6에 나타내었다. 시험편은 진공에서 측정되며, Al film과 silicon nitride 멤브레인이 정전력(electrostatic force)으로 인가될 때 박막 부분에 생기는 변형을 전기적으로 측정한다. 정전력을 Al과 silicon nitride 멤브레인에 인가하기 위하여 sine wave generator를 사용하였다. Drive electrode는 sine wave generator에 연결되어 있고, AC voltage의 주파를 바꾸어 주면서 Al과 silicon nitride 멤브레인의 공진현상이 일어나도록 하였다. 특정한 주파수, 즉 박막의 고유 주파수(natural frequency)와 AC voltage의 주파수가 일치할 때 박막의 공진현상이 일어난다. 공진현상이 일어나면 박막의 z 축 변형이 일어난다. 이때의 변형을 detector electrode가 측정을 하여 박막의 고유 주파수를 결정할 수 있도록 한다.

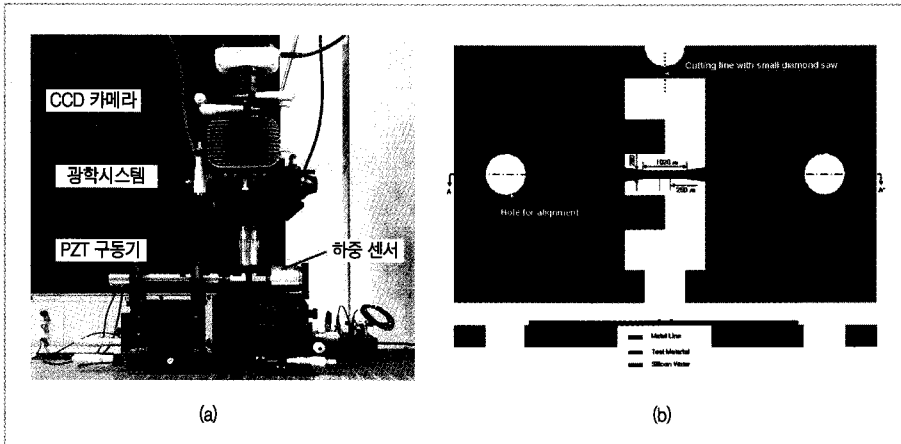


그림 8 (a) 미소 인장 시험기 및 (b) 복합 물성 측정을 위한 미소 인장 시험편의 예

공진시험 결과의 예

공진 시스템을 사용하여 측정한 Al과 silicon nitride 멤브레인의 온도 변화에 따른 공진 주파수 변화를 측정할 결과와 식 (2)를 사용하여 계산한 Al 박막의 온도에 따른 응력변화이다. 모재인 silicon 기판의 열팽창계수와 Al의 열팽창 계수가 다르므로, 온도가 변화함에 따라 자유 지지 복합체(Al과 silicon nitride 멤브레인)의 응력이 변하게 된다.

미소인장시험기를 응용한 전기-기계 복합 특성 평가

개요

기계적 물성과 전기적 물성을 복합적으로 측정하는 것은 반도체 및 유연 전자 소자의 신뢰성 측면에서 중요한 이슈 중의 하나이다. 미소 인장 시험과 동시에, 전기적 저항을 측정하기 위해서는 몇 가지 어려움이 있다. 첫 번째로는, 미소 인장 시험뿐만 아니라 전기적 저항 측정을 고려한 인장 시험편을 설계, 제작하는 것인데, 시험편 제작에 있어서 높은 수준의 공정 기술뿐만 아니라 많은 시간과 비용이 소요된다. 두 번째 문제는 시험편의 변형률을 정확하게 측정하는 것으로서 미세 구조물의 경우에는 ISDG(Interferometric Strain/Displacement Gage), 전자 스펙클 패턴 간섭계(ESPI; Electronic Speckle

Pattern Interferometry), 디지털 이미지법(DIC; Digital Image Correlation), 전자빔 모아레(E-beam Moire), 마이크로 버니어 등을 이용하면 비접촉식으로 실시간 측정이 가능하다. 그리고 시험편의 정렬 문제 또한 중요하다. 시험편의 크기가 작기 때문에 시험편의 하중축과 정확하게 정렬하는 것이 어려운데, 여러 가지 시험 정렬용 스테이지와 이에 따른 운동

가이드(motion guide) 구조를 시험기에 첨가하여 이러한 문제를 해결하기도 한다. 마지막으로, 박막 소재의 저항은 수백 mΩ 정도의 작은 값을 지니기 때문에, 측정 오차를 줄이기 위하여 연결선의 저항을 작게 하거나, Kelvin(4-wire) 저항 측정법을 이용하여 전기적 특성 측정 오차를 최소화할 수 있다.

마이크로 인장 시험 장치 및 시험 결과의 예

그림 8에는 미소 인장 시험기의 예와 복합 물성 측정을 위한 미소 인장 시험편의 예가 나타나 있다. 이 시험기는 변형률 측정 방법으로 DIC를 이용하고 있으며, 시험편의 정렬에 필요한 여러 가지 미세 조정 스테이지가 부착되어 있다. 전류를 흘려준 뒤, 전압을 측정하여 저항 값을 산출하는 방법으로 미소 인장 시험 도중의 저항을 측정하고 있다. 저항을 측정하는 방법으로는 측정 오차를 최소화할 수 있는 Kelvin 저항 측정법을 이용하였다. 그림 9에서는 미소 인장 시험 결과인 응력-변형률 관계와 함께, 저항-변형률 관계를 동시에 그래프로 나타낸 것이다. 이와 같은 방법으로 탄성, 소성 영역에서의 기계적, 전기적 물성 변화를 한눈에 확인할 수 있다.

요약 및 결론

지금까지 마이크로/나노 구조물의 특성 평가에 유용한

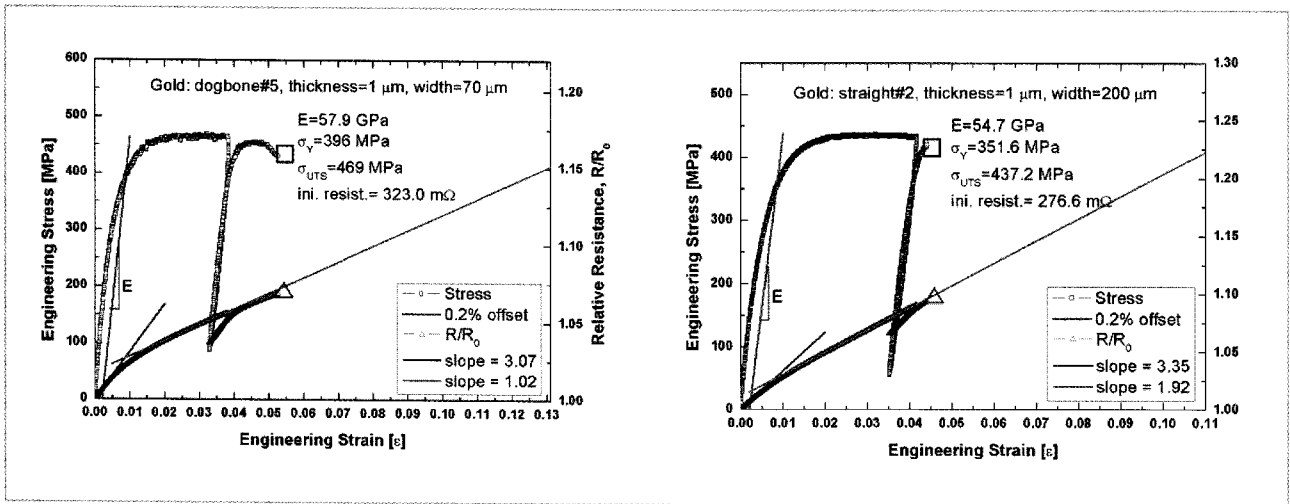


그림 9 복합 물성 측정 결과의 예

비전통적인 방법 세 가지, 즉 주름 형성을 이용하는 방법, 공진을 이용한 방법, 미소인장시험을 이용한 복합 물성 측정 방법을 소개하였다. 주름 형성을 이용하는 방법은 실험 방법이 매우 간단하고, 두께가 20nm 이하인 나노스케일 박막까지 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면에 탄성계수만을 측정할 수 있고, 박막의 포와송비를 가정해야 한다는 단점이 있다. 공진을 이용한 방법은 박막에 발생한 응력과 공진주파수와의 관계를 이용하는 방법으로서 그 측정 분해능이 매우 뛰어나다는 장점이 있지만, 현재까지는 전도성의 시험편만이 측정 가능하다는 단점이 있다. 미소인장 시험을 이용한 복합 물성 측정 방법은 박막의 응력-변형을 관계와 저항 변화를 동시에 측정함으로써 유연 전자 소자가 기계적인 변형 하에서 경험하는 전기적 특성 변화를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 반면에서 물리적으로 의미있는 비저항값을 직접 측정할 수 없으므로, 인장 시험에

따른 형상 변화와 변형률에 따른 비저항의 변화를 구분하기 어렵다는 단점이 있다.

마이크로/나노 구조물의 특성을 평가하는 것은 미세 소자의 설계 및 신뢰성 평가에 매우 중요하지만, 아직까지는 특성 평가에 적용할 수 있는 기술들이 충분히 개발되지 못한 상태에 있다. 기존의 거대 구조물에 적용되는 특성 평가 기술 및 시험 방법 표준을 그대로 마이크로/나노 구조물에 적용하는 것은 여러 가지 문제점을 야기하게 되므로, 마이크로/나노 구조물에 적절한 새로운 특성 평가 기술이 개발되어야 한다. 이 글에서 제시된 세 가지 방법은 일례에 지나지 않으며, 미래 나노 기반 산업에서는 반복성과 정확성이 우수하면서도 손쉽게 특성을 평가할 수 있는 마이크로/나노 구조물의 특성 평가 기술의 개발과 표준화가 요구된다.