

## 난쟁이 나라에서의 고온물성 시험

오 충 석 | 금오공과대학교 기계공학부, 부교수 | e-mail : ocs@kumoh.ac.kr

마이크로 및 나노 관련 제품들의 작동 온도 영역을 결정하기 위해서는 신뢰성 높은 기계적 물성 측정법이 요구된다. 이 글에서는 초소형 시험편을 이용한 고온 물성 측정의 어려움, 그동안의 연구 결과 및 향후 연구 동향을 기술하고자 한다.

동장군이 맹위를 떨치는 한겨울이 지나면 눈이 녹는 소리와 함께 많은 생명체들이 기지개를 편다. 곧이어 한여름의 불볕더위가 찾아 오면 더위에 지친 마당 앞의 개는 한바탕의 낮잠 후에 혀를 날름거리며 물을 들이킨다. 정신없이 뛰어 놀던 어린 아이가 갑자기 조용해졌다. 체온을 재보니 38°C다. 엄마는 허겁지겁 해열제를 먹여 진정시킨 후 아이를 급히 병원으로 데려간다. 사람의 체온이 41°C를 넘으면 경련과 고통을 느끼게 되고, 생명 유지를 위한 최대 한계점은 43.3°C라고 한다<sup>(1)</sup>. 보건복지부는 여름이 되면 비상이다. 바로 식중독 때문이다. 왜 이런 변화가 생기는 것일까? 바로 온도 때문이다. 온도에 따라 우주 삼라만상은 모두 변화를 겪게 된다. 모든 물체는 원자로 구성되어 있는데 온도에 따라 원자 거동이 변하기 때문이다.

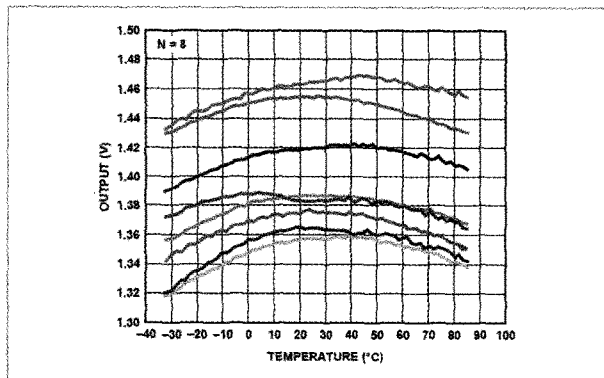


그림 1 온도에 따른 가속도계의 출력 편차

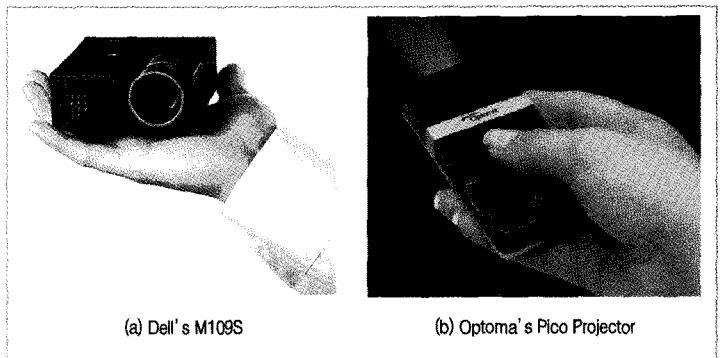


그림 2 초소형 프로젝터

현재 우리 주변에서 사용되고 있는 마이크로 및 나노 구조물들에는 무엇이 있는지 살펴보자. 먼저 마이크로 시스템(MicroElectroMechanical System; 이하 MEMS)의 발전에 크게 공헌한 MEMS 센서들<sup>(2)</sup>이 있다. 이들 센서들의 작동 온도 영역은 대부분 -40~150°C이다. 3축 가속도계(ADXL335)의 일례를 그림 1에 나타내었다. 온도 변화에 따라 상당한 출력 변화가 야기됨을 알 수 있다. TI(Texas Instrument) 사의 마이크로 및 나노 DLP(Digital Light Processing) 기술을 활용하여 Dell 사<sup>(3)</sup>와 Optoma 사<sup>(4)</sup>가 각각 공동 개발한 초소형 프로젝터를 그림 2에 나타내었다. 소형이라 휴대가 간편하지만 작동 온도 영역은 5~35°C에 불과하다. 한여름에는 사용할 수 없게 된다. 왜 작동 온도 영역이 제한될까? 구조물을 구성하고 있는 마이크로 및 나노 구조물들이 온도 변화에 매우 민감하게 반응하기 때문에 35°C 이상에서는 작동을 보장할 수 없기 때문

이다.

그럼 그림 1과 같은 마이크로 및 나노 기술을 적용한 제품들을 온도 변화에 대해 신뢰성있게 설계 및 제작하기 위해서는 무엇이 필요할까? 구조물을 구성하고 있는 마이크로 및 나노 부품들의 온도 변화, 특히 고온에 따른 기계적 물성을 동일한 크기의 시험편(micro-and nano-sized specimen)을 제작하여 사전에 측정한 뒤, 이를 설계 및 해석에 활용하면 될 것이다. 그러나 거시(bulk) 시험편과 달리 미시(micro 및 nano) 시험편의 경우에는 고온 물성 측정이 매우 어렵다. 본 편에서는 마이크로 및 나노 스케일에서의 고온 기계적 물성 측정의 어려움과 그동안의 연구 결과, 그리고 향후 연구 동향을 기술해 보고자 한다.

### 고온 기계적 물성 측정에 있어서의 난관들 (Bottlenecks)

백설공주가 일곱 난쟁이들을 위해 그들의 찢어진 옷을 꿰매줄 수 있을까? 쉽지는 않지만 현미경, 작은 바늘 및 마이크로 또는 나노 크기 직경의 실이 있으면 가능할 것이다. 걸리버가 난쟁이 나라에서 고온 인장 시험을 할 수 있을까? 걸리버가 난쟁이가 되지 않는 한 상당한 어려움이 따를 것이다. 어떠한 난관들이 걸리버를 기다리고 있을까 생각해 본다.

첫째, 매우 작은 크기의 시험편을 제작하는 것이다 (specimen preparation). 큰 인장 시험편은 선반이나 방전 가공 등을 통해 제작할 수 있지만 두께가 1 $\mu$ m 부근의 시험편은 제작이 용이하지 않다. 둘째, 시험편에 작은 하중을 인가하는 일이다 (precision actuator). 시험편이 작아지면 그에 따라 인가하는 하중도 작아지기 때문이다. 두께 100nm, 게이지 폭이 1 $\mu$ m인 금속 나노 와이어 시험편에 1GPa의 응력을 인가하기 위해서는 100 $\mu$ N의 힘이 필요하다. 이러한 크기의 하중을 정확하게 인가하는 것은 쉽지 않은 일이다. 셋째, 하중을 인가하면서 실제 가해지고 있는 하중을 실시간으로 측정하는 일이다 (high resolution load cell). 위에서 예로 든 100 $\mu$ N의 힘을 정격 용량으로 보았을 때 실제 하중 측정은 이 최대 하중의

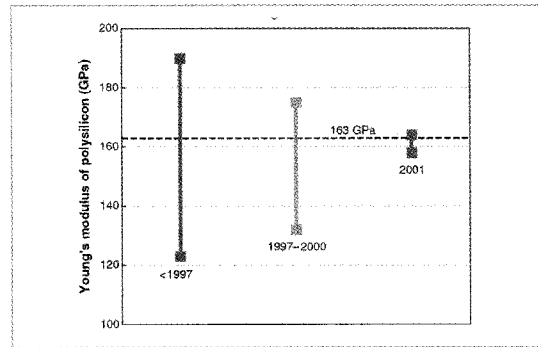


그림 3 전세계 연구자들의 탄성계수 측정 결과

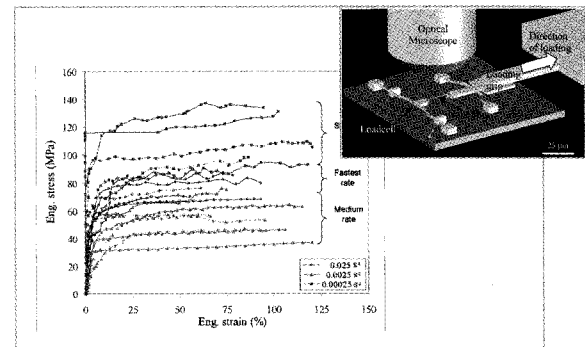


그림 4 변형률 속도에 따른 PAN나노 섬유의 인장거동

1/1,000의 정밀도를 가져야 한다. 그렇다면 100nN의 정밀도를 갖는 하중계가 필요하게 된다. 이 또한 쉽게 구현할 수 없는 영역이다. 넷째, 제작한 시험편을 하중계와 액추에이터에 연결하는 일이다 (fixtures and alignment). 거시 크기 시험편의 시험에 있어서도 시험편과 가중 장치 (load train) 사이의 정렬은 상당한 노력이 요구되는 작업이다. 다섯째, 하중을 인가하면서 시험편에 발생하는 변형률을 비접촉 방식으로 측정하는 일이다 (noncontact strain measurement). 게이지 길이 (gage length) 100 $\mu$ m에 발생하는 변형률을 10 $\mu$  $\epsilon$  정도의 분해능으로 측정하기 위해서는 최소 1nm의 분해능을 갖는 변위 측정 시스템이 필요하다. 여섯째, 시험편의 온도를 제어하는 것이다 (heating & temperature measurement). 앞에서 열거한 다섯 가지 중요한 측정 시스템은 불행하게도 온도에 민감하다. 예로, 매우 우수한 하중 측정 분해능을 갖는 압전 (piezoelectric) 하중계는 온도 변화에 매우 취약하다. 따라서 이들 측정 시스템에 영향을 주지 않으면서 시험편에만

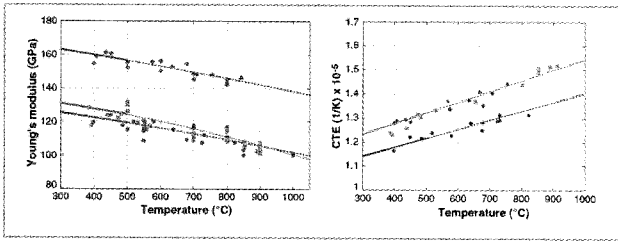


그림 5  $\gamma$ -TiAl 재료의 방향성과 온도에 따른 탄성계수 및 열팽창계수 변화

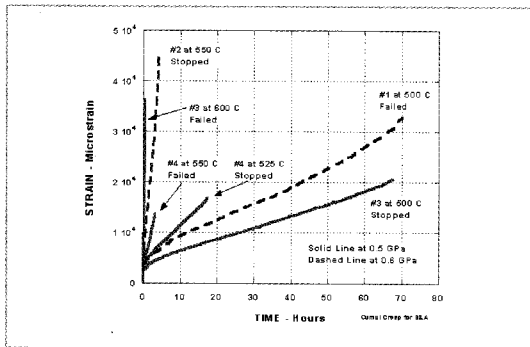


그림 6 다결정 실리콘의 크리프 거동

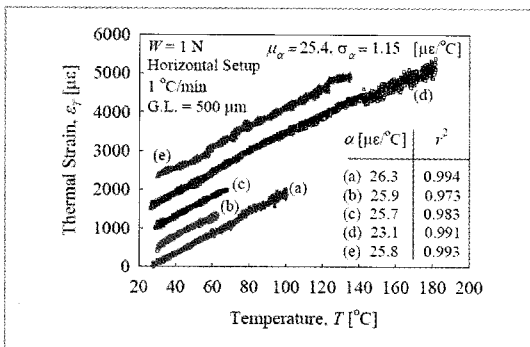


그림 7 금 박막의 열팽창계수

열을 인가하고, 이를 비접촉 방식으로 측정하는 일 또한 실험자로 하여금 미간을 찌푸리게 할 것이다.

지난 20년간 전세계의 연구자들은 위에서 열거한 난관들을 극복하기 위해 엄청난 시간과 노력을 기울여 왔다. 그 결과 상온에서의 실험 기법에 있어서는 괄목할 만한 성과를 얻었다. 지난 10여 년 간 마이크로 크기의 다결정 실리콘 박막에 대한 전세계 연구자들의 탄성계수 측정 예를 그림 3에 나타내었다<sup>(5)</sup>. 그림에서 볼 수 있듯이 불과 몇 년 사이에 데이터의 흠어짐이 현저하게 줄어들었음을 알 수 있다. 최근에는 300~600nm 직경의 중합체 (polymer) 나노 와이어에 대한 인장 시험 결과도 보고되

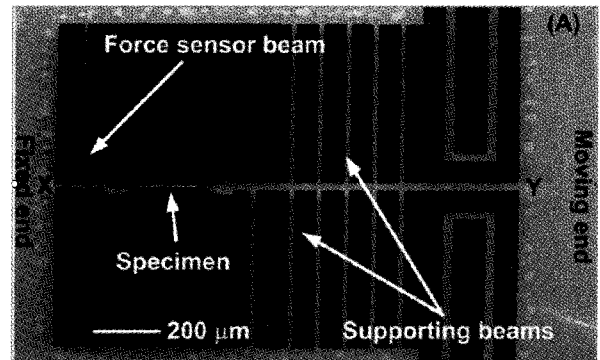


그림 8 MEMS 칩을 이용한 AI 시험 장치

고 있다<sup>(6)</sup>. 이러한 사실은 위에서 열거한 다섯 번째까지의 난관들은 어느 정도 해결이 되었다는 것을 의미한다. 그림 4는 PAN(polyacrylonitrile) 나노 섬유에 대한 인장 시험 결과이다.

## 고온 물성 측정 예

일반적으로 산업계에서 필요로 하는 대표적인 고온 물성으로는 온도에 따른 인장 거동, 크리프 거동, 열팽창계수 등이 있다. Zupan 등<sup>(7)</sup>은 게이지 영역의 폭과 두께가 모두 200 $\mu\text{m}$ 인 단결정  $\gamma$ -TiAl 재료를 저항 가열 (resistive heating)하면서 탄성계수와 열팽창계수를 측정하였다(그림 5). Oh 등<sup>(8)</sup>은 보다 얇은 3.5 $\mu\text{m}$  두께의 다결정 실리콘 재료에 대해 열팽창계수와 크리프 거동을 저항 가열과 ISDG(Interferometric Strain/Displacement Gage)를 이용하여 측정하였다(그림 6). 상온에서는 취성을 갖는 다결정 실리콘 재료가 고온에서는 연성 재료와 같은 거동을 보임을 알 수 있다. 그러나 이들 측정 방법은 가열로 내에서의 직접가열방식이 아닌 저항열을 이용하므로 정확한 온도를 인가하고 측정하기 어려운 문제점을 안고 있다. 이를 해결하기 위하여 Oh 등<sup>(9)</sup>은 두께 1 $\mu\text{m}$  내외의 금속 박막을 가열로 안에 설치하고 온도를 변화시키며 변형률을 직접 측정할 수 있는 방법을 고안하여 신뢰성 있는 결과를 내고 있다.(그림 7)

위의 측정 방법들은 고온 물성 측정법의 발전에 기여했지만 시험편의 두께가 1 $\mu\text{m}$  미만이 되거나 폭이 100 $\mu\text{m}$ 보다 작게 되면 적용하기가 매우 어려운 단점을 안고 있다.

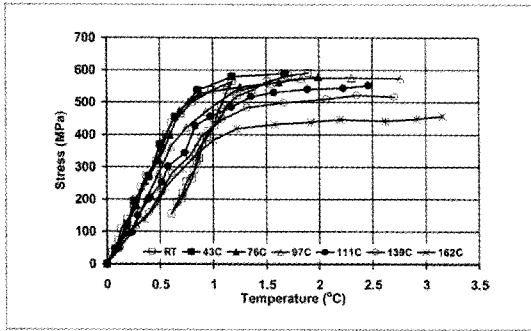


그림 9 온도에 따른 150nm 두께 알루미늄의 거동

Haque 등<sup>(10)</sup>은 150nm 두께의 알루미늄 시험편을 MEMS 시험기와 같이 제작한 뒤 열판(hot plate) 위에서 온도를 변화시켜 가며 인장시험을 수행하였다. 시험 시스템과 측정의 일례를 그림 8과 그림 9에 각각 나타내었다. 수백 나노미터 크기의 시험편에 대해 고온 시험을 했다는 점에서는 가치가 높지만 온도와 변형률 측정에 있어서는 한계가 있는 방법이다.

위와 같은 한계성을 극복하기 위해 Kim 등<sup>(11, 12)</sup>은 두께 1 $\mu$ m, 폭 20~50 $\mu$ m인 금 박막을 가열로 안에 설치하고 온도를 올리면서 늘어나는 시험편의 면외 변형(out of plane deformation)을 백색광 간섭 현미경으로 측정하여 열팽창계수를 측정하는 방법을 고안하였다. 시험편, 시험기 및 측정 예를 그림 10에 나타내었다. 이로부터 13ppm/°C의 열팽창계수가 산정되었다. 이 방법의 경우 시험편 제작 및 설치가 매우 쉽고 변형률을 직접 측정할 수 있

며, 온도를 정확히 인가 및 측정할 수 있다. 게다가 시험편 두께, 폭 등에 있어서 제한이 없기 때문에 향후 다양한 마이크로 및 나노 크기 시험편의 열팽창계수 측정에 활용이 가능할 것으로 생각된다.

### 향후 연구 방향

그동안의 연구 결과를 토대로 마이크로 및 나노 스케일에서의 고온 물성 연구는 다음과 같은 방향으로 진행될 것으로 보인다. 첫째, 가열로를 이용한 직접 가열 방식이 열 인가와 온도 측정에 있어서 유리하기 때문에 많이 연구될 것이다. 그러나 직접 가열이 어려운 상황인 경우에는 저항 가열 또는 복사열 가열 등을 사용하되 적외선 센서 등을 이용하여 온도를 직접 측정하려는 노력이 이루어질 것이다. 둘째, 온도 변화에 따른 변형률을 직접 측정하려는 시도가 계속될 것이다. 이를 위해 다양한 간섭계와 DIC (Digital Image Correlation) 등이 널리 활용될 것이다. 셋째, 데이터의 신뢰성 및 교환성 확보를 위해 표준화가 가능한 방법이 어느 것인지 연구될 것이다. 넷째, 실험역학자들은 학문적인 성취를 위해 시험편의 특징적인 크기를 지속적으로 줄이려는 노력을 경주할 것이다. 다섯째, 재료과학의 견지에서 온도에 따른 물성 변화의 근본적인 원인을 규명하려는 시도가 계속될 것이다.

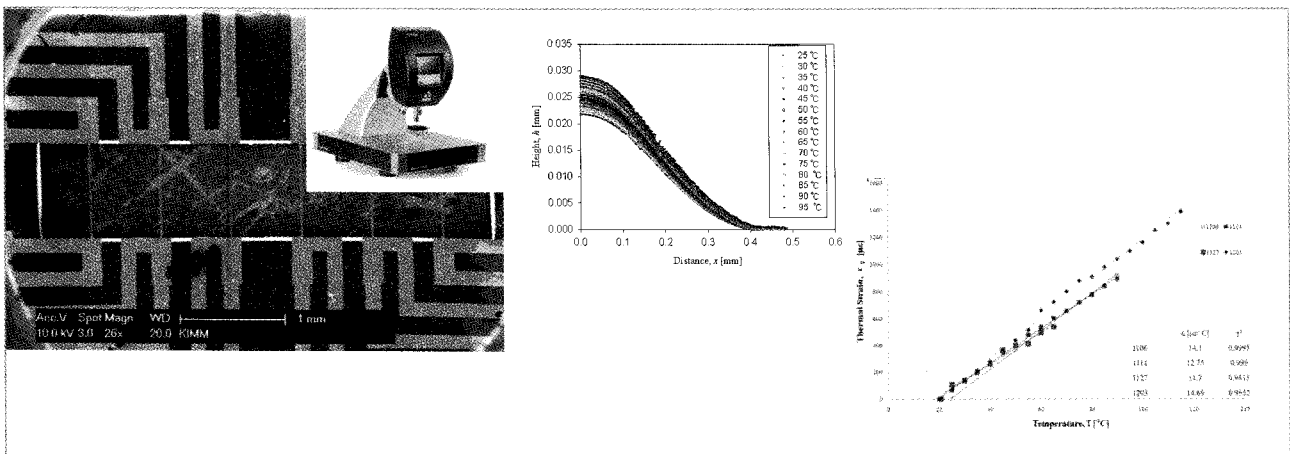


그림 10 금 박막의 열팽창계수 측정 시험편(좌) 및 측정 결과(우)

## 맺음말

그동안의 마이크로 및 나노 관련 연구가 새로운 재료, 부품 및 장치의 개발에 주력했었다면 향후의 연구는 이들의 상품화에 필수적인 신뢰성 확보 측면에서 이루어질 것이다. 신뢰성 확보에 있어서 가장 중요한 환경 중의 하나인 온도는 제품의 작동 영역을 결정하는 중요 요소이므로 이에 따른 신뢰성 높은 기계적 물성 측정법이 요구된다. 걸리버는 난쟁이 나라에서 고온 인장 시험, 크리프 시험, 열팽창계수 측정 등을 위해 누군가의 도움을 간절히 기다리고 있을 것이다. 상당 기간 동안 뜨거운 감자(hot potato) 로만 여겨졌던 고온 물성 연구에 있어서 새로운 아이디어(hot idea)와 열의있는 연구자(hot researcher)의 출현을 기대한다.

### 후기

본 연구는 교육과학기술부의 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 진행되고 있는 나노메카트로닉스 기술개발사업 과제 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Human physiology, 제 5 판, 라이프사이언스, pp. 591~598.
- (2) <http://www.analog.com/en/mems-and-sensors/products/index.html>.
- (3) [http://www.dlp.com/projectors/find\\_dlp\\_notebook\\_companion.aspx](http://www.dlp.com/projectors/find_dlp_notebook_companion.aspx).
- (4) <http://www.optomusa.com/pico.asp>.
- (5) K. J. Hemker, W. N. Sharpe, Jr., "Microscale characterization of mechanical properties," *Annu. Rev. Mater. Res.*, Vol. 37, pp. 93~126, 2007.

- (6) M. Naraghi, I. Chasiotis, H. Kahn, Y. Wen, Y. Dzenis, "Mechanical deformation and failure of electrospun polyacrylonitrile nanofibers as a function of strain rate," *App. Phys. Lett.*, Vol. 91, 151901, 2007.
- (7) M. Zupan, K. J. Hemker, "High temperature microsample tensile testing of  $\gamma$ -TiAl," *Mater. Sci. Eng. Vol. A* 319-321, pp. 810~814, 2001.
- (8) C.-S. Oh, W. N. Sharpe, Jr., "Techniques for measuring thermal expansion and creep of polysilicon," *Sens. & Act. Vol. A112*, pp. 66~73, 2004.
- (9) C.-S. Oh, S.-H. Choa, C.-S. Lee, H.-J. Lee, "Direct CTE measurement technique for the MEMS materials," *Key Eng. Mat.*, Vols. 326~328, pp. 199~202, 2006.
- (10) M. A. Haque, M. T. A. Saif, "Thermo-mechanical properties of nano-scale freestanding aluminum films," *Thin Solid Films*, Vol. 484, pp. 364~368, 2005.
- (11) S.-K. Kim, C.-S. Oh, H.-J. Lee, "Application of white light interferometer in measuring the mechanical properties of thin films," *Int. Conf. on Exp. Mech.*, Nanjing, 2008.
- (12) 김상교, 백색광 간섭계를 이용한 박막의 기계적 물성 값 측정법, 석사학위논문, 금오공과대학교, 2009.