

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.2.211

힘센서를 이용한 나노구조체의 인장물성 측정

전상구* · 장훈식* · 권오현** · 남승훈*†

* 한국표준과학연구원, ** 부경대학교 안전공학부

Measuring the Tensile Properties of the Nanostructure Using a Force Sensor

Sang-Gu Jeon*, Hoon-Sik Jang*, Oh-Heon Kwon** and Seung Hoon Nahm*†

* Korea Research Institute of Standards and Science,
** Division of Safety Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received November 9, 2009 ; Revised November 30, 2009 ; Accepted December 2, 2009)

Key Words: Nanostructure(나노구조체), Multi-walled Carbon Nanotube(다중벽탄소나노튜브), ZnO Nanorod(산화아연나노막대), Force Sensor(힘센서)

초록: 다양한 분야에 활용이 가능한 나노소자의 개발과 나노소자의 수명 및 신뢰성을 결정하기 위해서 나노구조체의 역학물성 측정은 중요하다. 본 연구에서는 다중벽탄소나노튜브(MWCNT)와 산화아연나노막대(ZnO nanorod)의 인장시험을 전자주사현미경(SEM) 내부에서 수행하였다. 챔버내부에 구축된 나노조작기 앞에 힘센서가 장착되었고, 나노조작기는 조이스틱과 컴퓨터로 제어 가능하도록 설계되었다. 반으로 자른 투과전자현미경(TEM)그리드 위에 분산된 나노구조체는 전자주사를 통하여 힘센서와 고정된 후 인장시험이 수행되었다. 인장시험 후 TEM과 SEM을 통하여 파단면을 측정하였고 MWCNT와 ZnO nanorod의 탄성계수는 0.98TPa, 55.85GPa로 각각 측정되었다.

Abstract: It is important to measure the mechanical properties of nanostructures because they are required to determine the lifetime and reliability of nanodevices developed for various fields. In this study, tensile tests for a multi-walled carbon nanotube (MWCNT) and a ZnO nanorod were performed in a scanning electron microscope (SEM). The force sensor was a cantilever type and was mounted in front of a nanomanipulator placed in the chamber. The nanomanipulator was controlled using a joystick and personal computer. The nanostructures dispersed on the cut area of a transmission electron microscope (TEM) grid were gripped with the force sensor by exposing an electron beam in the SEM; the tensile tests were the performed. The in situ tensile loads of the nanostructure were obtained. After the tensile test, the cross-sectional areas of the nanostructures were observed by TEM and SEM. Based on the TEM and SEM results, the elastic modulus of the MWCNT and ZnO nanorod were calculated to be 0.98 TPa and 55.85 GPa, respectively.

1. 서 론

과학 기술이 발전함에 따라 나노기술이 많은 관심사가 되었고 나노소자를 개발하기 위해 나노구조체에 대한 관심도 커지게 되었다. 나노구조체인 탄소나노튜브(carbon nanotube; CNT), 나노선(nanowire), 나노막대(nanorod)등은 크기가 큰 소재보다 뛰어난 물리적, 화학적 특성을 가질 것으로 기대되고 이러한 특성을 이용하여 다양한 분야에 응용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있으며 특히 CNT와 ZnO nanorod/nanowire에 대하여 많은

연구가 진행되었다.^(1~15)

CNT의 경우에는 기계적 강도와 전기전도성이 우수하여 전계방출 재료로 각광 받고 있으며^(1~3) 전계방출디스플레이(field emission display; FED),⁽⁴⁾ 면광원(backlight unit),⁽⁵⁾ X선원(X-ray source),⁽⁶⁾ 마이크로증폭기(microwave amplifier),⁽⁷⁾ 나노메카트로닉스(nanomechatronic),⁽⁸⁾ 나노일렉트로닉스(nano-electronics),⁽⁹⁾ 화학적 검출(chemical sensing)⁽¹⁰⁾ 등에 활용하기 위한 연구가 진행 중이다. ZnO nanorod의 경우 반도체 성질을 이용한 나노레이저(nano-laser),⁽¹¹⁾ FED,^(12,13) 광검출기(photodetector),⁽¹⁴⁾ 가스센서 또는 UV감지기,⁽¹⁵⁾ 등과 같은 소자로 응용하기 위한 연구가 진행 되었다.

† Corresponding Author, shnahm@kriss.re.kr

나노소자 개발을 위해서는 나노구조체의 역학 물성 측정이 중요하다. 왜냐하면 나노소자를 상용화할 경우, 나노소자의 강도에 따른 사용수명은 나노구조체의 역학물성과 밀접한 관계를 가지기 때문이고, 또한 상용화된 나노소자의 신뢰성을 판단하는 기준으로 사용할 수 있기 때문이다. 나노구조체의 물성 측정이 중요하지만 소재의 크기가 작기 때문에 현재의 시스템으로 물성을 측정한다는 것은 불가능하다. 그래서 나노구조체에 적합한 역학물성 측정방법과 시스템이 필요하다. 또한 지금까지 나노구조체에 대한 역학물성 측정 표준절차가 확립되어있지 않아서 측정된 역학물성의 신뢰성에 문제가 있다. 그래서 일반적인 방법으로 측정된 역학물성이 그 나노구조체의 역학물성으로 간주되고 있다.

다양한 나노소자에 사용되는 CNT와 ZnO nanorod는 새로운 측정시스템과 방법을 이용하여 역학물성이 평가되었다. CNT에 대하여 Treacy 등⁽⁸⁾은 투과전자현미경(transmission electron microscope; TEM)내부에서 고유한 열진동(thermal vibration)의 진폭(amplitude)을 이용하여 1.8 TPa이라는 탄성계수를 측정하였고 Hernandez 등⁽¹⁶⁾은 tight-binding 계산을 통하여 단일벽탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube; SWCNT)의 탄성계수가 직경 및 chirality에 크게 의존함을 증명하였다. 또한 Salvetat 등⁽¹⁷⁾은 원자힘현미경(atomic force microscope; AFM)을 이용하여 다중벽탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube; MWCNT)의 경우에는 탄성계수가 지름에 크게 의존하지 않고 CNT의 결합 등의 구조적인 면에 크게 의존한다는 결과를 얻었으며, Yu 등⁽¹⁸⁾은 나노스테이지를 이용한 인장시험으로 탄성계수를 0.95 TPa로 측정하였다. ZnO nanorod/wire에 대하여 Jinhui 등⁽¹⁹⁾은 AFM을 이용한 굽힘시험으로 탄성계수를 29 ± 8 GPa로 측정하였고, YunHua 등⁽²⁰⁾은 공명에 따른 진동으로 탄성계수를 58 GPa로 측정하였다. 또한 Desai 등⁽²¹⁾은 실제 나노인장시험을 수행하여 탄성계수를 21 GPa로 측정하였고, Hoffmann 등⁽²²⁾은 탄성계수를 최대 98 ± 18 GPa로 측정하였다.

본 연구의 목적은 역학물성 측정 시스템을 구축하여 각종 나노소자에 많은 활용이 될 것으로 예상되는 CNT와 ZnO nanorod에 대하여 역학물성을 평가하는 것이다. 전자주사현미경(SEM)내부에 나노조작기와 나노하중을 측정할 수 있는 힘센서

를 설치함으로써 나노구조체에 대하여 인장시험이 가능하게 하였다. 일반적으로 역학물성 측정을 위해서 많이 쓰이는 AFM을 사용하지 않고 측정방법이 다른 힘센서를 장착했기 때문에 새로운 측정 시스템이 구축되었다. 또한 TEM 그리드를 이용함으로써 인장시험을 했던 나노구조체는 직접 TME측정 할 수 있기 때문에 효율적인 시스템이 되었다. CNT와 ZnO nanorod의 양 끝을 TEM 그리드의 절단면과 나노조작기 앞에 부착되어 있는 힘센서와 network controller를 이용하여 변위 제어 방식으로 인장시험을 수행하였다. 얻어진 CNT와 ZnO nanorod의 하중-변위 곡선과 TEM 측정으로 계산한 단면적을 이용해 인장강도와 탄성계수를 계산하였다. 아울러 얻어진 결과를 토대로 다른 나노구조체에 대한 역학물성 측정이 가능함을 제시하였다.

2. 실험소재

본 연구에 사용된 나노구조체는 CNT와 ZnO nanorod였다. 전기방전법(arc-discharge)으로 성장된 MWCNT의 지름은 5 ~ 40 nm의 다양한 크기였지만 평균 15 nm였고, 길이는 약 2 μm 였다. ZnO nanorod는 수용액에서 합성하여 사용하였다. Si기판에 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 용액을 뿌리고 spin coating하여 seed layer를 만들었으며, 이 기판을 400 °C에서 3시간 동안 열처리하였다. $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ 와 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 을 혼합한 용액에 기판을 넣고 90 °C에서 반응시켜서 ZnO nanorod를 기판에 성장시켰다. 성장된 ZnO nanorod의 지름은 평균 500 nm였고 길이는 약 7 μm 였다.

3. 실험장비 및 방법

3.1 실험장비

나노구조체에 대하여 인장시험을 수행하기 위해서는 소재의 크기에 적합한 시험장비가 필요하다. 이를 위하여 나노하중을 측정할 수 있는 센서와 나노단위로 움직일 수 있는 조작기를 구축하였다.

소재를 관찰하기 위해서 SEM(TOPCON, SM-300)을 사용하였고 내부에는 나노구조체를 부착 할 수 있는 지그(zig)를 설치하였다. 또한 나노구조체에 변형을 가하거나 위치를 조정하는 나노조작기(Klocke)를 챔버(chamber)내부의 왼쪽 상단

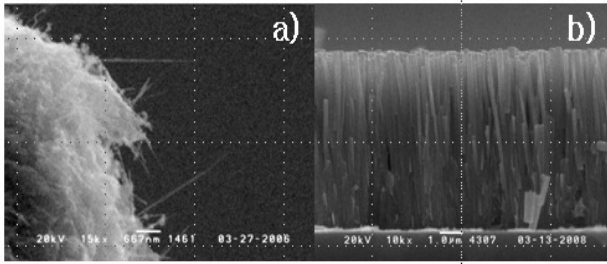


Fig. 1 The SEM image of the nanostructure ; (a) Carbon Nano Tube (b) ZnO nanorod

에 부착하였다. 나노조작기는 정밀구동이 요구되고, 모터에서 발생하는 전자기장이 SEM의 이미지에 영향을 주지 않기 위해서 피에조 모터가 사용되었다. 또한 나노조작기는 X, Y, Z의 3축 구동이 가능하며 최대 120 mm까지 이동이 가능하고 SEM 외부에 있는 조이스틱(joystick)을 이용하여 제어되며, 구동속도 또한 조절이 가능하다.

나노구조체에 가해지는 하중을 측정하기 위해 힘센서(Klocke, force sensor)를 사용하였다. 힘센서는 팁이 없는 캔틸레버 타입과 팁이 있는 AFM타입이 있다. 힘센서 팁의 끝부분은 수 nm이기 때문에 팁에 부착할 수 있는 나노구조체는 제한적이다. CNT의 경우 지름이 팁의 크기와 유사하여 부착이 가능 하기 때문에 AFM타입의 힘센서를 사용하였다. ZnO nanorod는 상대적으로 지름이 크기 때문에 힘센서 팁에 부착이 어렵다. 그래서 캔틸레버 타입의 힘센서를 사용하여 측정하였다. Fig. 2는 실제 역학물성 측정 시스템이 구축된 모습이고 이 시스템은 이전에 구축 하였던 실험장비⁽²³⁾를 그대로 사용하였다.

3.2 실험방법

한 가닥의 CNT와 ZnO nanorod에 대하여 인장시험을 수행하기 위해서 분산과정이 필요하다. CNT는 입자 주위에 붙어있는 분말형태(Fig. 1(a))이고, ZnO nanorod는 기판에 성장(Fig. 1(b))되어 있다. 인장시험을 위해 각각의 소재를 에탄올에 넣고 1분 동안 초음파 처리하여 CNT와 ZnO nanorod의 용액을 만들었다. 이 용액을 수술용 칼을 이용해서 절반으로 절단한 TEM 그리드에 분산시킨 후 상온에서 1시간 자연건조하면, 절단면에 나노구조체가 Fig. 3과 같이 걸치게 된다. 일반적인 칼로 TEM 그리드를 절단하면 단면적이 찢어지는 현상이 발생하여 나노구조체의 정렬에 어려움이 따르기 때문에 수술용 칼을 사용하였다.

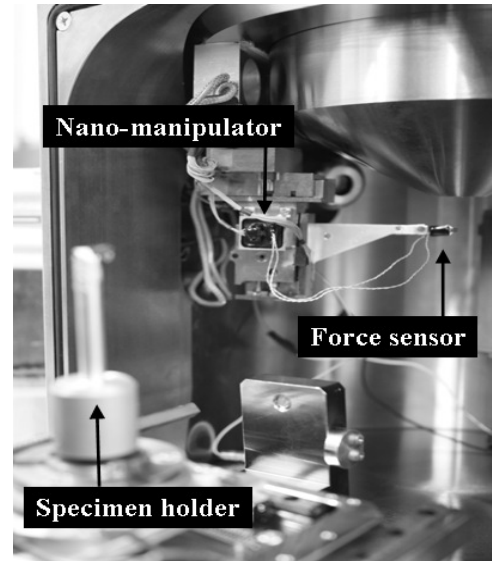


Fig. 2 The image of the experimental setup inside the SEM specimen chamber

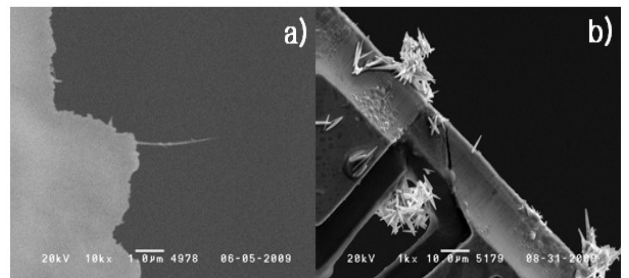


Fig. 3 The dispersed nanostructure on the TEM grid ; (a) CNT (b) ZnO nanorod

또한 반으로 자른 TEM 그리드를 사용한 이유는 나노구조체를 고정할 수 있는 스테이지를 대신할 수 있을 뿐만 아니라 TEM 측정도 할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

실제 분산하였을 때 Fig. 3(a)와 같이 한 가닥의 나노구조체가 걸릴 경우 보다는 Fig. 3(b)와 같이 뭉쳐있는 경우가 대부분이다. 그리고 절단면에 걸쳐있는 나노구조체는 인장방향으로 걸쳐있기도 하지만, 걸쳐있는 얇은 경우에는 나노조작기에 부착되어 있는 힘센서나 텅스텐 팁을 이용하여 인장방향으로 정렬한다. 정렬은 인장방향과 일치되어야 하지만 정확히 일치시키는 것은 어렵다. 인장방향으로 정렬된 나노구조체들을 그리드와 고정하기 위해서 전자빔(E-beam)을 이용한 증착 방법을 사용하였다. 고정할 위치에 전자빔을 고배율로 주사하면 비정질탄소와 탄화수소들이 증착되어 나노구조체가 그리드에 고정된다.

나노구조체의 다른 한 쪽은 나노조작기에 부착

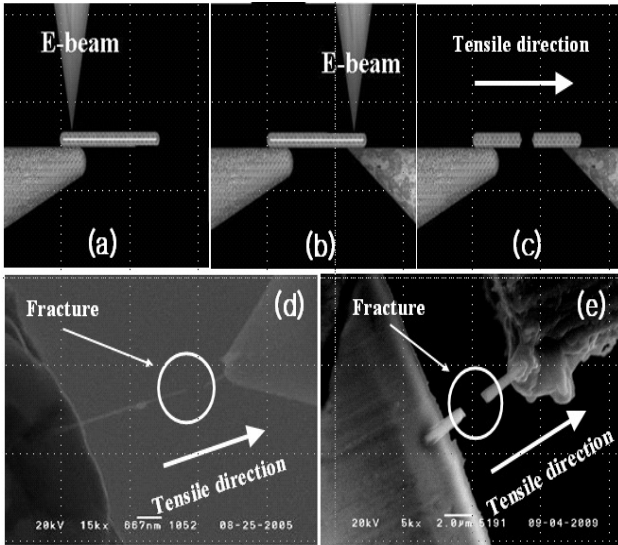


Fig. 4 The procedure of tensile test for the nanostructure; (a) show the nanostructure was gripped on the TEM grid by E-beam (b) show the nanostructure was gripped on the force sensor (c) show the nanostructure was extended to tensile direction (d, e) show the tensile test of CNT and ZnO nanorod, respectively

된 힘센서에 고정시켰다. 나노조작기를 움직여 힘센서를 나노구조체 밑으로 옮긴 후 천천히 위로 움직여 나노구조체와 힘센서를 접촉시켰다. 접촉하면서 발생된 나노구조체의 변형과 센서에 발생된 하중은 상대적으로 작기 때문에 본 연구에서 무시하였다. 접촉이 되면, 전자빔 증착으로 고정시켰다. CNT는 10분이면 인장강도 이상의 강도로 접촉이 되었고, ZnO nanorod의 경우는 지름이 수십 배 두꺼워서 많은 시간이 걸렸다. 본 실험에서는 ZnO nanorod를 평균 8시간 동안 전자빔 증착하였다.

Fig. 4(a~c)는 전체적인 인장시험절차의 모식도이고, Fig. 4(d~e)는 CNT와 ZnO nanorod의 인장시험 모습이다. 나노구조체 양끝이 전자빔에 의해 고정되면 약 10 nm/s의 속도로 인장시험을 진행하여 실시간으로 하중을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 탄소나노튜브 인장물성

한 가닥의 CNT에 대하여 인장시험을 수행하여 Fig. 5와 같은 하중-변위 곡선을 얻었다. 이 곡선의 변위는 나노조작기의 이동거리를 나타내며 하중은 힘센서를 통하여 얻어진 CNT의 인장하중을

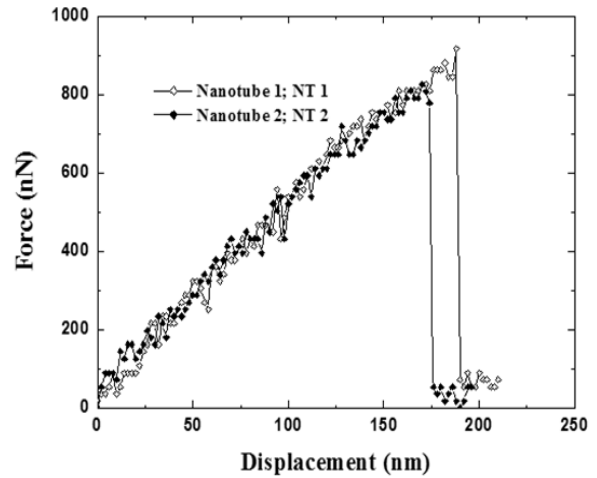


Fig. 5 The force-displacement of CNT

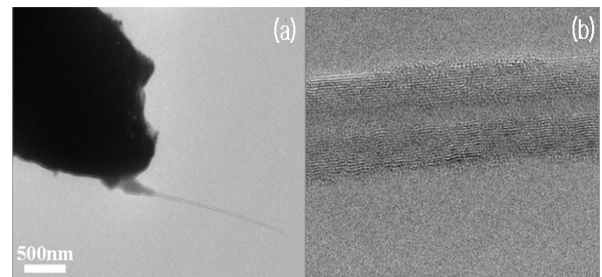


Fig. 6 The TEM image of the area of CNT

나타낸다. CNT의 인장하중은 산란형태로 측정되었는데, 이것은 CNT에 걸리는 하중이 크지 않아 외부에서 전해지는 미세한 진동과 같은 잡음(noise)의 영향을 받은 것으로 판단된다. CNT의 인장하중은 선형적으로 하중이 증가하다가 파단에 이르는 부분에서는 하중증가량이 조금 감소하였다. 파단될 때의 최대하중은 각각 917 nN(NT 1)과 825 nN(NT 2)로 측정되었다.

CNT의 탄성계수를 구하기 위해서는 파단면을 계산해야 한다. 파단된 CNT를 TEM으로 관찰하는 동안 그리드에 걸려있는 CNT는 TEM의 전자들과의 충돌로 인하여 흔들림이 발생하였다. 이 흔들림으로 파단면 측정이 어려워져서 진동이 발생하지 않는 부분의 단면적을 Fig. 6와 같이 측정하였다. MWCNT는 여러 개의 벽을 가지는 형태이기 때문에 단면적을 계산할 때, 여러 벽의 단면적 부분만 고려하였다. 단면적 계산은 외부지름, 내부지름, 탄소원자의 크기, 벽간거리와 벽 수를 통해 계산하였다. CNT의 단면적은 각각 24.5 nm²(NT 1)과 25.1 nm²(NT 2)로 계산되었다.

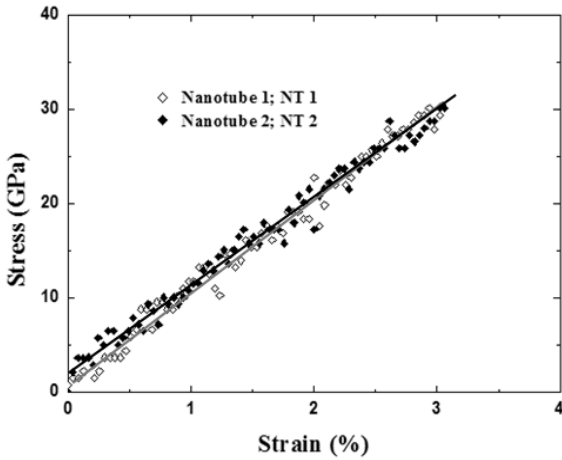


Fig. 7 The stress-strain curve of CNT

CNT의 응력은 Fig. 5의 하중-변위 곡선과 Fig. 6에서 계산된 단면적을 도입하여 계산되었고, 변형률은 스트레인게이지를 부착할 수 없기 때문에 인장전과 후 이미지와 나노제작기의 변위를 이용하여 계산되었다. 계산된 응력과 변형률로 Fig. 7의 응력-변형률 곡선을 얻었다. CNT를 파단에 이르게 하는 극한강도는 각각 37.4 GPa과 32.9 GPa로 측정되었다. Fig. 7에서 탄성계수를 측정하기 위해 탄성구간만을 고려했고, 탄성구간에서의 최대응력은 각각 30 GPa(NT 1)과 30.1 GPa(NT 2)이며 변형률은 각각 3.02 %(NT 1)와 3.06 %(NT 2)로 측정되었다.

탄성계수는 응력-변형률 곡선의 기울기 값으로, $E = \sigma / \epsilon$ 에 의해 계산된다. 여기서 σ 는 응력, ϵ 는 변형률이다. 위의 식으로부터 CNT의 탄성계수는 약 0.99 TPa로 측정되었다.

4.2 ZnO nanorod 인장물성

CNT 인장시험과 같은 방법으로 한 가닥의 ZnO nanorod에 대하여 인장시험을 수행하여 Fig. 8와 같은 하중-변위 곡선을 얻었다.

ZnO nanorod는 CNT보다 큰 지름과 단면적을 가지기 때문에 CNT에 비해 높은 인장하중을 받았다. 그리고 CNT와는 달리 인장하중의 산란형태의 움직임이 거의 없었다. 이는 실험소재가 큰 하중을 받기 때문에 미세한 잡음의 영향이 나타나지 않았던 것으로 보인다. ZnO nanorod의 하중은 선형적으로 증가하다 파단직전에 약간의 소성구간으로 보이는 늘어짐이 생긴 후 파단이 일어났다. 파단에 이르게 하는 최대하중의 값은 각각 38.5 μ N(NR 1)과 52.1 μ N(NR 2)로 측정되었다.

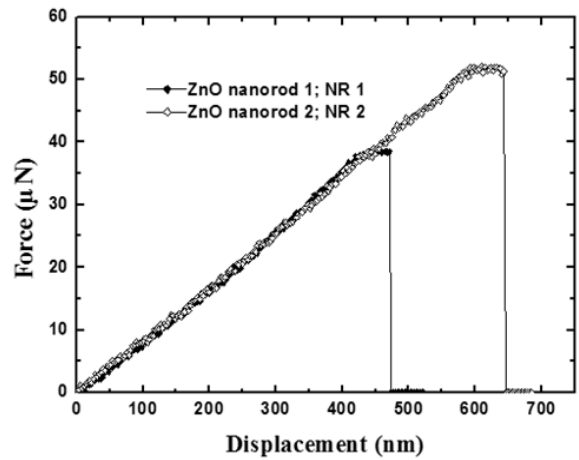


Fig. 8 The force-displacement of ZnO nanorod

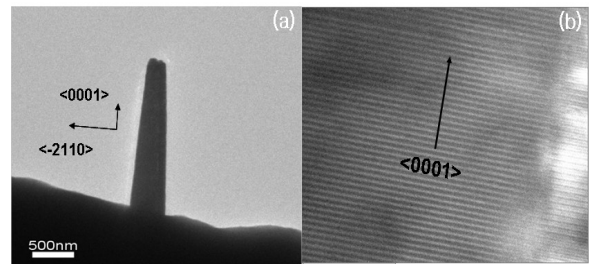


Fig. 9 The TEM image of fracture area of ZnO nanorod

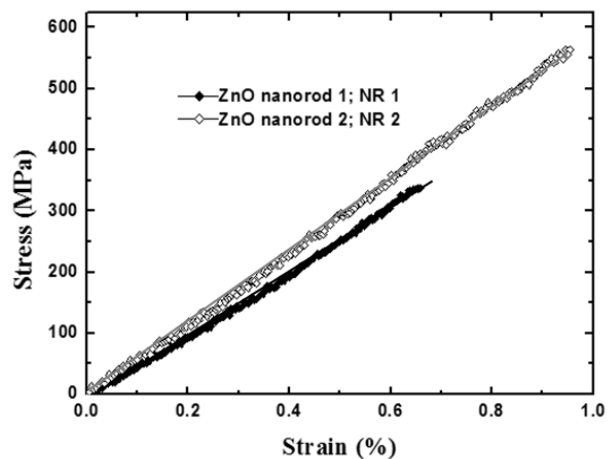


Fig. 10 The stress-strain curve of ZnO nanorod

Fig. 9는 TEM을 이용하여 ZnO nanrod의 성장방향과 파단면을 측정한 것이다. ZnO nanorod는 여러 성장방향을 가지고 있으며, 그 성장방향에 따라 인장물성도 다를 것이다. 왜냐하면 성장방향에 따라 결합구조와 원자간의 결합력이 다를 것이고, 이 결합력이 ZnO nanorod의 인장강도와 탄성계수에 영향을 줄 것으로 판단되기 때문이

Table 1 Mechanical properties of the nanostructures

| Structure | Elongation (%) | Tensile strength (GPa) | Young's modulus (GPa) |
|-----------|----------------|------------------------|-----------------------|
| CNT 1 | 3.02 | 30 | 993.3 |
| CNT 2 | 3.06 | 30.1 | 983.7 |
| ZnO NR 1 | 0.66 | 0.3 | 51.2 |
| ZnO NR 2 | 0.95 | 0.6 | 59.4 |

다. 인장시험 된 ZnO nanorod는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 C축<0001>방향으로 성장되었고 인장방향과 같은 방향이다. ZnO nanorod의 과단면을 측정할 때도 CNT와 같은 현상이 발생할 것으로 예측했지만, TEM 전자에 영향을 받지 않았다. 이는 상대적으로 큰 직경을 가지기 때문에 전자와의 충돌에 영향을 크게 받지 않는 것으로 추정된다. 그리고 ZnO nanorod는 균일한 지름을 가지는 것이 아니라 부분적으로 서로 다른 지름을 가졌으므로 평균적인 지름을 계산하였다. 그리고 ZnO nanorod는 정육각형의 단면을 가지는데 그 값은 각각 $0.11 \mu\text{m}^2$ (NR 1)과 $0.09 \mu\text{m}^2$ (NR 2)로 계산되었다. Fig. 8에서 작은 단면적을 가지는 ZnO nanorod가 더 큰 하중을 받았는데, 이것은 aspect ratio의 영향으로 인해 나타난 결과로 보인다.⁽²⁴⁾ 아직 표준화된 시험법이 없는 ZnO nanorod의 경우 단면적만이 인장하중에 영향을 주는 것이 아니라, 길이도 인장하중에 영향을 주는 요인이라 생각된다.

ZnO nanorod도 Fig. 8의 하중-변위 곡선과 Fig. 9의 과단면을 이용하여 Fig. 10과 같이 응력-변형률 곡선을 얻었다. 역시 탄성구간만 고려했고, 최대응력은 각각 338 MPa(NR 1)과 564 MPa(NR 2)로, 변형률은 각각 0.66 %(NR 1)과 0.95 %(NR 2)로 측정되었다.

ZnO nanorod의 탄성계수는 응력-변형률 곡선의 기울기 값으로, 각각 51.2 GPa(NR 1)과 59.4 GPa(NR 2)로 측정되었다.

5. 결 론

힘센서를 이용하여 나노구조체인 CNT와 ZnO nanorod에 대하여 인장물성을 평가할 수 있는 시스템을 구축하였다. 반으로 잘린 TEM 그리드를

이용한 방법으로 나노구조체에 대한 인장시험이 가능함을 확인하였을 뿐만 아니라 인장시험 후 과단면 혹은 단면적 계산, 나노구조체의 결정방향과 패턴을 TEM으로 직접 측정할 수 있음을 확인하였다. 구축된 시스템으로 측정된 CNT와 ZnO nanorod의 물성은 Table 1에 나타내었다. CNT의 최대응력은 각각 30 GPa과 30.1 GPa로 측정되었고, 탄성계수는 약 0.99 TPa로 계산되었으며, ZnO nanorod의 최대응력은 각각 0.3 GPa과 0.6 GPa로 측정되었고, 탄성계수는 평균 55.29 GPa로 계산되었다.

본 연구에서 구축된 시스템으로 다양한 나노구조체에 대한 인장실험을 통해 물성측정을 하고, 데이베이스화함으로써 나노구조체의 신뢰성을 확보할 것으로 기대된다. 또한 이를 바탕으로 나노소자 개발에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부가 주관하는 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 나노메카트로닉스기술개발사업단의 연구비지원(2009K000186)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Terrones, M., 2003, "Science and Technology of the Twenty-First Century: Synthesis, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes," *Annu. Rev. Mater. Res.*, Vol. 33, pp. 419~501.
- (2) Xu, N. S. and Huq, S. E., 2005, "Novel Cold Cathode Materials and Application," *Mater. Sci. and Eng. R.*, Vol. 48, pp. 47~189.
- (3) Lim, S. C., Lee, K., Lee, I. H. and Lee, Y. H., 2007, "Field Emission and Applications of Carbon Nanotubes," *Nano : brief reports and reviews*, Vol. 2, No. 2, pp. 69~89.
- (4) Choi, J. H., Zoukarniev, A. R., Park, Y. J., Chung, D. S., Song, B. K., Kang, H. S., Baik, C. W., Han, I. T., Kim, H. J., Shin, M. J., Kim, H. J., Oh, T. S., Jin, Y. W., Kim, J. M. and Lee, N., 2005, "Optimization of Electron Beam Focusing for Gated Carbon Nanotube Field Emitter Arrays," *IEEE Trans. Elec. Dev.*, Vol. 52, No. 12, pp. 2584~2590.

- (5) Lee, S. and Jeon, D. Y., 2006, "Effect of Degassed Elements on the Degradation Behavior of Carbon Nanotube Cathode in Sealed Field Emission-Backlight Unit," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, No. 6, pp. 063502.
- (6) Yue, G. Z., Qiu, Q., Gao, B., Cheng, Y., Zhang, J., Shimoda, H., Chang, S., Lu, J. P. and Zhou, O., 2002, "Generation of Continuous and Pulsed Diagnostic Imaging X-ray Radiation using a Carbon-Nanotube-based Field-Emission Cathode," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 81, No. 2, pp. 355~357.
- (7) Bower, C. Zhu, W., Shalom, D., Lopez, D., Chen, L. H. and Gammel, P. L., 2002, "On-Chip Vacuum Microtriode using Carbon Nanotube Field Emitters," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, No. 20, pp. 3820~3822.
- (8) Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W. and Gibson, J. M., 1996, "Exceptionally High Young's Modulus Observed for Individual Carbon Nanotubes," *Nature*, Vol. 381, No. 6584, pp. 678~680.
- (9) Li, H., Zhang, Q. and Li, J., 2006, "Interpretation of Coulomb Oscillations in Carbon-Nanotube-based Field Effect Transistors," *Phys. Rev. B*, Vol. 73, No. 23, pp. 235431.
- (10) Da Silva, L. B., Fagan, S. B. and Mota, R., 2004, "Ab Initio Study of Deformed Carbon Nanotube Sensors for Carbon Monoxide Molecules," *Nanoletter*, Vol. 4, No. 1, pp. 65~67.
- (11) Duan, X., Huang, Y., Agarwal, R. and Lieber, C. M., 2003, "Single-Nanowire Electrical Driven Lasers," *Nature*, Vol. 421, No. 6920, pp. 241~245.
- (12) Tseng, Y. K., Huang, C. J., Cheng, H. M., Lin, I. N., Liu, K. S. and Chen, I. C., 2003, "Characterization and Field-Emission Properties of Needle-like Zinc Oxide Nanowires Grown Vertically on Conductive Zinc Oxide Films," *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 13, No. 10, pp. 811~814.
- (13) Li, S. Y., Lin, C. Y. and Tseng, T. Y., 2004, "Field Emission and Photofluorescent Characteristics of Zinc Oxide Nanowires Synthesized by a Metal Catalyzed Vapor-Liquid-Solid Process," *J. Appl. Phys.*, Vol. 95, No. 7, pp. 3711~3716.
- (14) Kind, H., Yan, H., Messer, B., Law, M. and Yang, P., 2002, "Nanowire Ultraviolet Photodetectors and Optical Switch," *Adv. Mater.*, Vol. 14, No. 2, pp. 158~160.
- (15) Li, Q. H., Liang, Y. X., Wan, Q. and Wang, T. H., 2004, "Oxygen Sensing Characteristics of Individual ZnO Nanowire Transistors," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, No. 26, pp. 6389~6391.
- (16) Hernandez, E. and Gaze, C., 1999, "Elastic Properties of single-wall Nanotubes," *Appl. Phys A*, Vol.68, No. 3, pp. 287~292.
- (17) Salvétat, J. P., Kulik, A. J., Bonard, J. M., Briggs, G. A. D., Stockli, T., Metenier, K., Bonnamy, S., Beguin, F., Burnham, N. A. and Forro, L., 1999, "Elastic Modulus of Ordered and Disordered Multiwalled Carbon Nanotube," *Adv. Mater.*, Vol. 11, No. 2, pp. 161~165.
- (18) Yu, M.F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F. and Ruoff, R. S., 2000, "Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load," *Ame. Assoc. Adv. Sci.*, Vol. 287, No. 5453, pp. 637~640.
- (19) Song, J., Wang, X., Riedo, E. and Wang, Z. L., 2005, "Elastic Property of Vertically Aligned Nanowires," *Ame. Chem. Soc.*, Vol. 5, No. 10, pp. 1954~1958.
- (20) Hiang, Y., Bai, Xuedong and Zhang, Y., 2006, "In situ Mechanical Properties of Individual ZnO Nanowires and the Mass Measurement of Nanoparticles," *J. Phys: Condens. Matter.*, Vol. 18, No. 15, pp. L179~L184.
- (21) Desai, A. V. and Haque, M. A., 2007, "Mechanical Properties of ZnO Nanowire," *Sens. Act. A: Phys.*, Vol. 134, No. 1, pp. 169~176.
- (22) Hoffmann, S., Östlund, F., Michler, J., Fan, H. J., Zacharias, M., Christiansen, S. H. And Ballif, C., 2007, "Fracture Strength and Young's Modulus of ZnO Nanowires," *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 20, pp. 205503.
- (23) Jang, H. S., Kwon, S. H., Kim, A. K. And Nahm, S. H., 2006. "Tensile Test of Individual Multi Walled Carbon Nanotube Using Nano-Manipulator inside Scanning Electron Microscope," *Key. Eng. Mater.*, Vol. 326, No. 1, pp. 326~328.
- (24) Chen, C. Q., Shi, Y., Zhang, Y. S., Zhu, J. and Yan, Y. J., 1996, "Size Dependence of Young's Modulus in ZnO Nanowires," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 96, No. 7, pp. 075505.