

나노스케일에서의 진동 및 응용 (2)

이수일 *

(서울시립대학교 기계정보공학과)

이번 호에서는 지난 호에 이어 나노스케일에서의 진동 및 응용 두 번째 순서를 살펴보도록 한다. 지난 호에서는 나노스케일에서의 작용력으로 상대적으로 큰 영향을 미치고 있는 밴더발스(van der Waals) 힘에 의한 나노구조의 진동특성 변화를 살펴보았다. 이번에는 추가적으로 고려해야할 영향들과 대표적인 나노 진동 응용기기인 AFM(원자현미경), 그리고 나노작용력에 의해 발생하는 나노구조의 다양한 진동 현상에 대해 살펴보자.

1. 나노작용력과 AFM프로브

지난 호에는 밴더발스 힘을 포함하는 원자간 작용력 영역에서 프로브의 진동 특성이 인력(attractive force)과 반발력(repulsive force)에 따라 변화하는 양상과 원인을 살펴보았다. 특히 AFM프로브의 경우 그림 1에서와 같이 프로브 끝단과 측정 표면을 각각 구(sphere)-평면(flat surface)으로 모델링하여 밴더발스 힘과 반발력을 포함

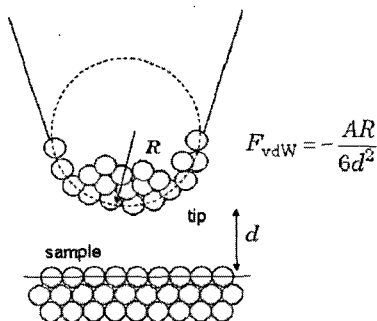


그림 1 AFM프로브 팁과 측정 표면의 모델링
(지난 호 기초강좌 그림 3 참조)

하는 원자간 작용력을 유도하게 된다.

그런데 AFM프로브는 그림 2와 같이 얇은 마이크로 캔틸레버(microcantilever) 끝단에 팁(tip)이 붙어있는 형상으로 캔틸레버의 끝단에 나노스케일의 원자간 힘이 작용하는 마이크로구조물이라 할 수 있다. 즉, 구조적인 강성 및 관성에 의한 특성과 원자간 작용력이 동시에 영향을 미치는 경우에 해당한다. 따라서 전체 AFM 프로브의 진동과 관련한 해석에는 식 (1)과 같이 프로브의 진동변위 z 에 대하여 단순화된 1자유도 진동방정식에 위에서와 같은 팁(tip)-표면(surface) 간 작용력 F_{ts} 을 외력에 추가하는 형태가 이용된다^{(1,2)}}.

$$m\ddot{z} + kz + \frac{m\omega_0}{Q}\dot{z} = F_{ts} + F_0 \cos(\omega t). \quad (1)$$

한편 팁-표면 작용력 F_{ts} 는 다음 그림 3과 식 (2)에서와 같이 일종의 비선형스프링과 같은 영향을 팁에 미치게 되는데 이는 지난 호에 논의된 작용력과 등가강성의 개념과 연결하여 이해할 수 있다. 즉, 전체 계의 강성 k_{total} 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

* E-mail : leesooil@uos.ac.kr / Tel : (02) 2210-5667

기초강좌

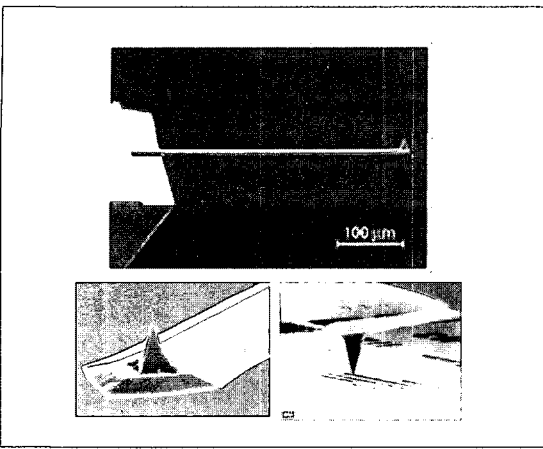


그림 2 AFM 프로브 (마이크로캔틸레버와 팁)

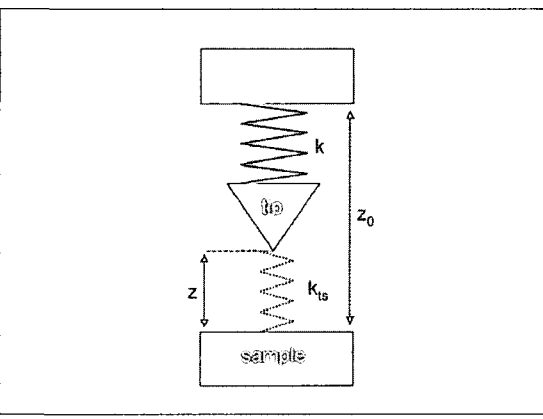


그림 3 팁-표면 간 등가강성을 고려한 AFM프로브 모델⁽³⁾

$$k_{total} = k + k_{ts} = k + \frac{\partial F_{ts}}{\partial z} \quad (2)$$

또한 AFM프로브의 작용력-거리 관계를 살펴보면 그림 4와 같은 것을 알 수 있는데 여기서 점선은 정적(static)으로 프로브를 표면에 접근시키고 다시 이탈시키는 과정에서 발생하는 비선형 이력(hysteresis)현상을 설명하고 있다. 이러한 비선형 이력현상은 프로브 캔틸레버의 구조 굽힘 강성(그림 4에서 점선의 기울기에 해당)와 팁-표면 작용력의 크기에 따라 변화하는 특성을

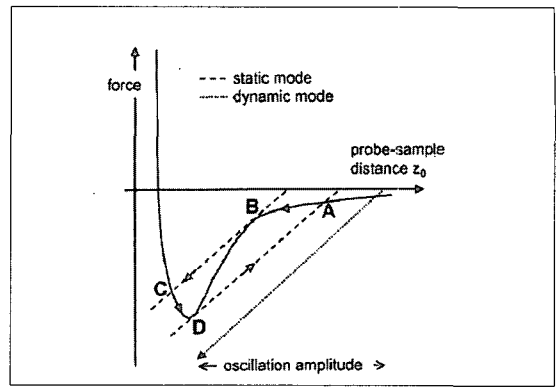


그림 4 전형적인 팁-표면 작용력 곡선⁽³⁾

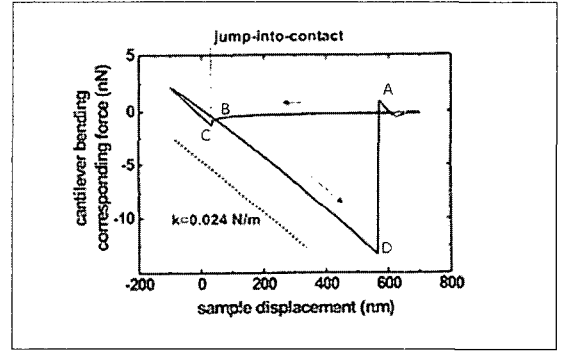


그림 5 AFM으로 측정된 작용력-거리 곡선⁽⁴⁾

가지고 있다. 그림 4에서 팁을 멀리서 서서히 표면에 접근시키면 작용력 곡선을 따라 B점에 이르게 된다. B에서 D에 이르는 작용력 구간은 기울기에 해당하는 등가강성이 프로브 캔틸레버의 강성(점선 BC의 기울기)보다 크게 되어 프로브는 작용력 곡선을 따르지 않고 바로 프로브 강성을 따라 C점으로 점프에서 접촉으로(jump-into-contact) 바로 이동하게 된다. 팁이 표면과 접촉된 상태에서 이탈하는 과정에서 D점까지는 작용력 곡선을 따라오다가 곡선의 기울기가 프로브의 강성보다 크게 되는 D점에서 프로브 강성(점선 DA의 기울기)을 따라 A점으로 점프하여 이탈하게 된다. 이와 같이 프로브 팁과 표면사이에는 기본적으로 이력현상을 포

합하는 나노스케일에서의 비선형 특성이 내재하고 있다. 그리고 AFM에서 측정을 통해 이와 같은 현상을 검증해 볼 수 있는데 그림 5는 프로브 강성이 0.024 N/m인 경우 측정된 작용력-거리 그래프의 예이다⁴⁾. 그림 4와 5에서 각 A-D점을 매칭할 수 있으며, 그림 5에서도 B-C 및 D-A간 점프현상을 확인할 수 있다.

이와 같이 나노스케일 원자간 작용력 범위에서 작동하는 AFM프로브는 원자간 작용력 자체가 갖는 비선형 특성과 프로브 캔틸레버 구조 강성의 조합에 따라 다양한 현상을 보이는 것을 알 수 있다. 혹은 이러한 현상을 바탕으로 나노스케일에서의 여러 가지 물리현상을 파악할 수 있는 또 다른 기회로 활용할 수도 있다.

2. 동적 모드 AFM

AFM은 큰 범위에서 SPM(scanning probe microscopy: 주사탐침현미경)의 일종으로 앞 절에서 살펴본 바와 같이 프로브 팁에 작용하는 원자간 작용력으로 발생하는 프로브 캔틸레버의 변형(대표적으로 굽힘 변형)을 이용해 표면형상을 구성하는 기법을 적용하기 때문에 붙여진 이름이라고 할 수 있다. 원리상으로는 팁 끝단의 단일 원자와 표면 원자 사이의 작용력만이 작용한다면 원자 해상도까지도 얻을 수 있다. 그러나 실제 프로브 팁 끝단에는 여러 개의 원자가 덩어리를 이루고 있는 형상이기 때문에 끝단 근처의 여러 원자들이 동시에 표면과 작용력을 형성하게 된다. 따라서 앞 절에서 모델링 한 이상적인 경우와는 달리 실제 AFM에서는 다양한 작용력과 형상에 따른 영향이 개입되게 된다.(그림 6) 그럼에도 불구하고 전체적인 프로브-표면 작용력과 이로 인한 프로브 캔틸레버의 변형은 기본적인 AFM 작동의 메커니즘이라고 할 수 있다.

그렇다면 실제 AFM에서 프로브의 변형 혹은 변위는 어떻게 측정을 하는 것일까? 잘 알려진 바와 같이 레이저를 이용한 비접촉식 변위 측정이 대표적인 방법이다. 현재 상용화된 AFM의 경우는 대부분 레이저 빔과 4분할 포토다이오드를 이용한 방법이 쓰이고 있다.(그림 7)

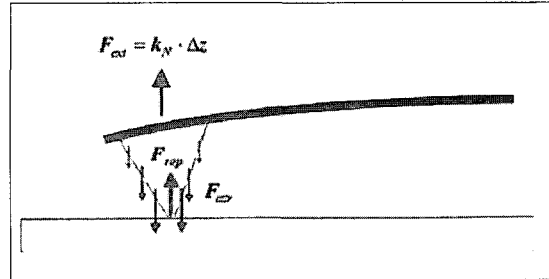


그림 6 팁-표면 접촉 시 힘 평형⁴⁾

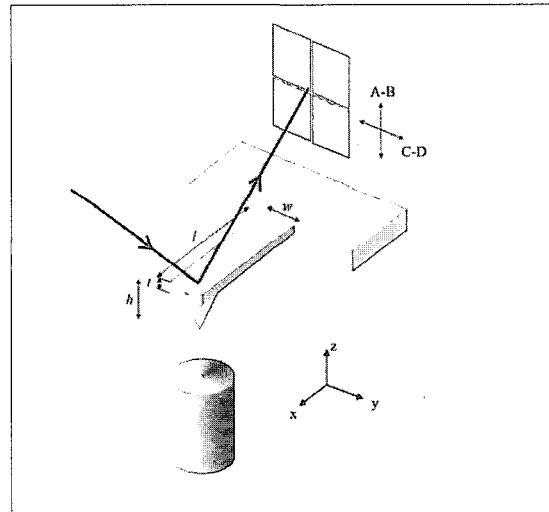


그림 7 프로브 변위 측정 방법⁴⁾

즉, 외부에서 레이저를 프로브 캔틸레버 윗면에 반사시켜 4분할 포토다이오드로 향하게 한 뒤 반사된 레이저 스폿(spot)의 위치 변화로부터 캔틸레버의 상대 변위를 측정하게 된다.

기본적으로 AFM에서 작동 모드는 크게 정적인 방법과 동적인 방법으로 나눌 수 있고, 정적인 방법은 접촉모드(contact mode), 동적인 방법은 비접촉모드(non-contact mode)와 탭핑 혹은 간헐접촉모드(tapping or intermittent contact mode)로 각각 나누어 볼 수 있다. 모든 경우 캔틸레버의 변위 측정 메커니즘은 동일하나 캔틸레버의 어떤 성질을 이용하는가에 따라 달라진다고 할 수 있다.

기초공학

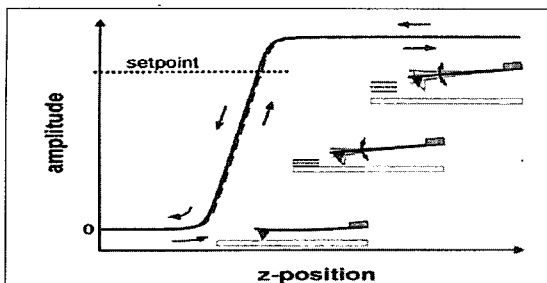


그림 8 탭핑 진폭과 팁-표면 거리⁽³⁾

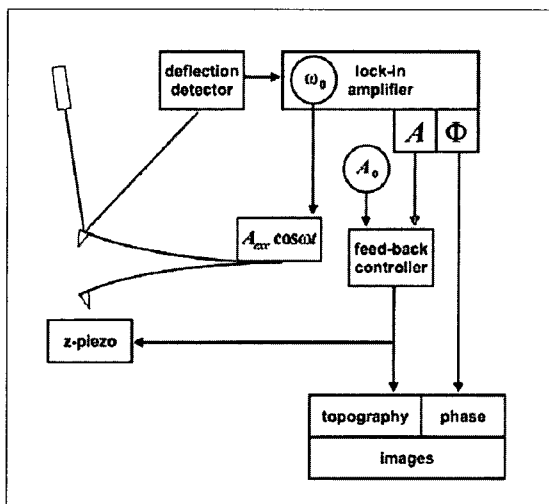


그림 9 탭핑 모드 제어 과정⁽⁴⁾

접촉모드는 프로브 팁을 표면에 접촉시킬 때 발생하는 캔틸레버의 정적 굽힘 변형이 일정하도록 프로브 혹은 표면의 Z 스캐너(Z scanner)에 피드백(feedback)을 주고 XY 스캔의 위치정보와 Z 스캐너의 높이 정보로부터 나노스케일의 표면형상을 구성한다. 동적 모드의 경우는 공진하는 프로브가 팁-표면 거리에 따라 변화하는 동특성(주파수, 진폭, 위상 등)을 피드백 파라미터로 이용한다. 비접촉모드는 문자 그대로 팁을 표면에 접촉시키지 않은 상태로 팁-표면 거리에 따라 변화하는 공진 캔틸레버의 고유진동수 변화에 따른 진폭변화(지난 호기초강좌 그림 5 참조)를 감지하여 피드백 제어를 수행

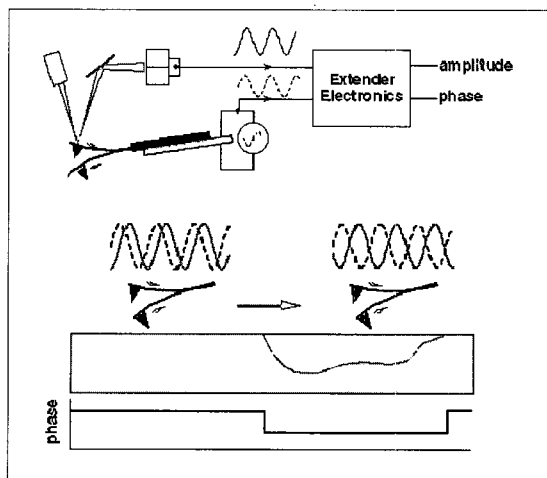


그림 10 탭핑 모드 위상 이미지의 원리⁽⁵⁾

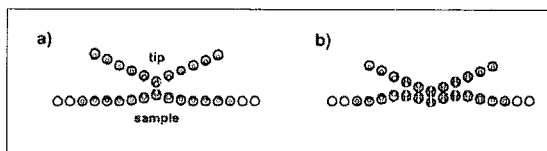


그림 11 팁-표면 작용력에 의한 표면 형상 변화⁽⁴⁾
(화살표는 원자간 작용력의 방향과 크기를 나타냄)

하고 이를 바탕으로 표면형상을 측정한다. 탭핑 모드는 가진력을 크게 하여 비접촉모드 보다 큰 진폭으로 공진하는 프로브를 표면에 가까이 접근했을 때 팁이 표면을 두드리게 되는데 거리에 따라 변화하는 캔틸레버의 진폭을 바로 피드백 파라미터로 이용한다. 그림 8은 탭핑모드에서 프로브의 공진 진폭과 팁-표면 거리의 관계를 나타내며, 그림 9는 이러한 탭핑 모드의 피드백 제어 과정을 보여준다. 한편, 탭핑 모드에서는 실제 표면에 간헐 접촉을 하기 때문에 표면 특성에 따른 위상(phase) 차이에 따라 유용한 표면 물성을 가시화할 수 있는 장점이 있다.(그림 10)

접촉 및 탭핑 모드의 경우 정적 혹은 동적으로 팁과 표면이 접촉을 하게 되는데 실제 접촉이 발생하면 순간적으로 표면은 자체 탄성으로 인해 변형을 하게 된

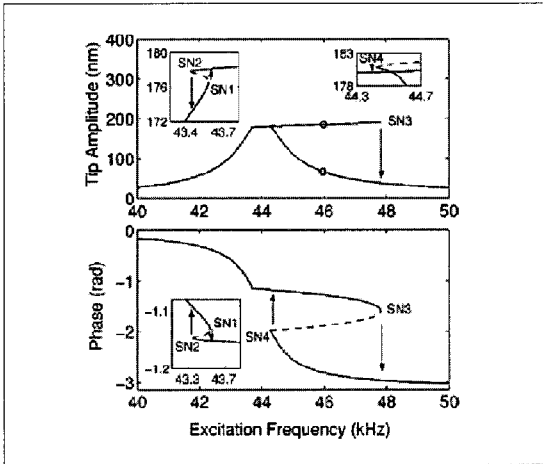


그림 12 탭핑 모드 캔틸레버의 비선형 주파수 응답⁽²⁾

다.(그림 11) 따라서 실제와 좀 더 가까운 팁-표면 작용력을 모델링하기 위해서는 반발력 영역에서 소위 접촉 모델을 포함한 작용력을 이용하는 경우가 많다^(1, 2, 4). 그림 12는 대표적인 접촉모델인 DMT(dejarguin-muller-toporov)접촉 모델을 이용하여 탭핑 캔틸레버의 비선형 공진 특성을 해석한 그래프이다⁽²⁾. 정적인 팁-표면 접근의 경우처럼(그림 4, 5) 주파수 응답의 경우에도 가진주파수 스위핑(sweeping)에 따라 진폭 및 위상응답에 비선형 점프 현상이 발생한다.(그림 12의 SN1~SN4) 동역학계 및 분기(bifurcation)이론에 의하면 소위 안장점(saddle node) 분기점에서 기존 해(solution)가 불안정해져 새로운 안정해 상태로 이동하는 것으로 이해할 수 있다. 또한 탭핑이 발생하는 영역에서는(그림 12 SN2-SN3) 반발력 영역의 캔틸레버 진동으로 진폭이 포화되어 거의 일정한 진폭을 나타낸다.

이 절에서는 AFM의 작동 모드와 동적 모드, 특히 탭핑 모드의 특징과 비선형 현상에 대하여 간략히 살펴 보았다. 탭핑 모드는 AFM에서 많이 이용되지만 복잡한 비선형 특성으로 인해 이론적인 해석이 최근야 비로소 진행되고 있다. 또한 이러한 전통적인 접촉 및 탭핑 모드와는 별도로 프로브 캔틸레버의 가로방향

(lateral) 혹은 비틀림(torsional)에 대한 변형과 진동을 활용하는 방법도 있다. 이와 같이 나노스케일에서 다양한 진동 현상을 활용하는 다양한 시도가 진행되고 있다.

3. 나노구조의 진동 현상 및 응용

앞 절에서는 나노스케일의 작용력에 의한 마이크로 구조물(AFM 프로브)의 진동 특성에 대하여 살펴보았다. 이 절에서는 나노스케일 구조에 해당하는 탄소나노튜브(CNT: carbon nanotube)의 진동 및 응용에 대하여 살펴 보자.

잘 알려진대로 탄소나노튜브는 수 nm에서 수백 nm 지름을 갖는 속이 빈 탄소튜브(한겹 혹은 동심 상의 여러겹 튜브)를 지칭하는 것으로 1991년 일본 NEC의 Iijima⁽⁶⁾에 의해 발견된 이후 특별한 물리적, 화학적 성질로 인해 많은 연구와 응용 사례가 보고되고 있다. 탄소나노튜브는 일반적으로 탄소의 겹 혹은 벽(wall)의 수와 탄소 원자의 결합 배열에 따라 반도체 혹은 도체의 성질을 보이는데 다중벽(multi-walled) 탄소나노튜브의 경우 도체의 특성을 나타낸다. Poncharal 등⁽⁷⁾은 다중벽 탄소나노튜브 역시 일반 도체 구조와 마찬가지로 전기장 내에서 변형을 하거나 공진이 일어나는 것이 실험적으로 발견하였다. 그림 13은 교류 전기장 내에서 탄소나노튜브가 진동하는 모습의 전자현미경(SEM: scanning electron microscope) 이미지이다. 교류전압의 주파수에 따라 나노스케일 구조에서도 각각 다른 모드로 공진하며, 일반적인 구조와 유사한 모드 형성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 탄소나노튜브의 진동 특성을 활용하여 탄소나노튜브에 나노입자 부착 전후의 공진 주파수 차이로부터 나노입자의 질량을 측정할 수 있는 방법 역시 같은 저자^(7, 8)에 의해 발표되었다.(그림 14)

이와 같이 나노스케일 구조에서는 변형, 진동 등 기본적인 역학 현상만으로도 많은 새로운 응용을 찾을 수 있을 것이다. 특히 나노구조의 진동은 수십 kHz에서 수백 MHz에 이르는 고주파 대역에 이르기 때문에 단순히 역학적인 진동 뿐 아니라 전기적인 특성과 연계된 여러

기초강좌

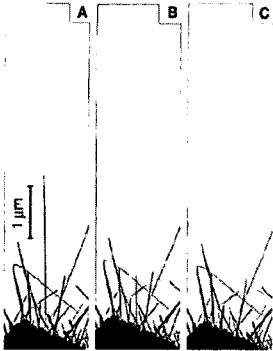


그림 13 전기장에 의한 탄소나노튜브의 공진⁽⁷⁾
(A) 전압인가 전, (B) 1차 모드, (C) 2차 모드

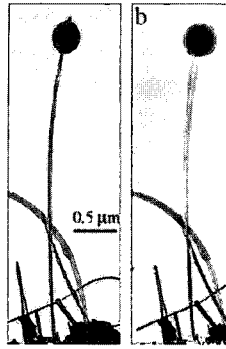



그림 14 나노입자 부착 탄소나노튜브의 공진⁽⁸⁾
(a) 전압인가 전, (b) 1차 모드

응용(전자회로, 통신소자 등)을 찾을 수 있을 것으로 보인다.

4. 맺음말

지금까지 기초강좌 '나노스케일에서의 진동 및 응용' 그 두 번째 순서로 지난 호에 이어 AFM프로브에서의 나노작용력과 마이크로캔틸레버의 진동, 그리고 실제 나노구조인 탄소나노튜브의 진동 및 응용에 대하여 간략하게 살펴보았다. 나노스케일에서의 진동 현상은 좀 더 복잡한 작용력과 비선형 특성 등으로 인하여 몇 가지 추가적인 공부와 고려가 선행되어야 하지만, 기본적으로는 고전적인 진동의 범주에서 대부분 해결이 가능한 문제로 볼 수 있다. 사실 AFM, 탄소나노튜브 각각 주제에 대하여도 책 몇 십 권이 될 만큼 방대한 내용이지만 이번에는 우리 학회지의 기초강좌인 만큼 나노스케일 진동과 관련된 기본적인 이론과 소개 정도로 마무리를 하고 다음 기회에 좀 더 보강된 내용으로 발표할 것을 약속드린다. 

참고문헌

- (1) Garcia, R. and Perez, R., 2002, "Dynamic Atomic Force Microscopy Methods," *Surface Science Reports*, Vol. 47, pp.197~301.
- (2) Lee, S. I., Howell, S. W., Raman, A. and Reifenberger, R., 2002, "Nonlinear Dynamics of Microcantilevers in Tapping Mode Atomic Force Microscopy: A Comparison between Theory and Experiment," *Physical Review B*, Vol. 66, Art. No. 115409.
- (3) Schirmeisen, A., Anczykowski, B. and Fuchs, H., 2004, "Dynamic Force Microscopy," in *Applied Scanning Probe Methods* (Ed. by Bhushan B. etc.), Springer-Verlag, Berlin.
- (4) Meyer, E., Hug, H. J. and Bennewitz, R., 2004, *Scanning Probe Microscopy*, Springer-Verlag, Berlin.
- (5) <http://www.veeco.com> Dimension 3100 Reference Guide, Digital Instruments Inc., Santa Barbara, CA.
- (6) Iijima, S., 1991, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, Vol. 354, pp.56~58.
- (7) Poncharal, P., Wang, Z. L, Ugarte, D. and de Heer, W. A., 1999, "Electrostatic Deflections and Electro-mechanical Resonances of Carbon Nanotubes," *Science*, Vol. 283, pp.1513~1516.
- (8) Wang, Z. L, Poncharal, P. and de Heer, W. A., 2000, "Measuring Physical and Mechanical Properties of Individual Carbon Nanotubes by in Situ TEM," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 61, pp.1025~1030.