

# 나노스케일에서의 비선형 동역학 Nonlinear Dynamics at the Nanoscale

이수일\*·홍상혁\*\*·박준형\*\*\*·이장무\*\*\*\*  
Soo Il Lee, Sanghyuk Hong, Junhyung Park and Jang Moo Lee

**Key Words :** Nonlinear dynamics(비선형 동역학), AFM(원자현미경), CNT(탄소나노튜브)

## ABSTRACT

AFM(Atomic Force Microscope) becomes a versatile tool in the nanoscale measurements and processes. Especially the tapping mode is a very useful mode in AFM operation to measure and process at the nanoscale. Although the tapping mode has a great potential for the novel techniques such as phase imaging, however, it is not clearly known the fundamental mechanics affected by complex tip-sample interactions. This paper shows the various nonlinear dynamic features in tapping mode AFM microcantilevers including hysteretic jumps and period doublings of the microcantilevers. Also it is discussed the complex dynamics of CNT(Carbon Nanotube) probes and the opportunities on the nanoscale nonlinear dynamics.

## 1. 서론

나노 기술 분야의 다목적 도구로 각광을 받고있는 AFM(Atomic Force Microscopy) [1]은 대상 시료 표면을 나노스케일로 직접 측정할 수 있을 뿐 아니라, 마이크로캔틸레버 기구를 이용하여 나노조작(nanomanipulation), 나노식각(nanolithography)과 같은 작업까지도 가능하다. 측정 관점에서 AFM은 탐침 끝단과 시료 표면 사이의 원자간 상호작용력에 의한 마이크로캔틸레버의 변형을 피드백으로 제어하여 이미지를 재현하는 원리인데, 원자간 상호작용력의 비선형성에 의해 마이크로캔틸레버의 복잡한 비선형 특성이 나타나게 된다.[2] 특히 기존의 연구에서는 이러한 탭핑모드를 이용하여 공진하는 마이크로캔틸레버의 진폭과 위상으로부터 시료의 점탄성 손실을 측정하거나, 공기중 또는 액체 상태에서의 시료의 재질을 측정하는 바 있으며, 최근에는 생체 시료에 까지 적용하였다.[3-6] 이러한 연구와 관련하여 많은 연구자들이 AFM 탭핑모드의 해석을 시도하였으나 [7-11] 팁의 비선형 동특성에 대한 이해나 정확한 분석이 아직 미흡한 상태이다.

한편 기존의 Si 탐침의 한계를 극복하고자 도입된 탄소나노튜브(CNT: Carbon Nanotube) 탐침은 고가임에도 기존 탐침에 비해 월등한 몇가지

장점으로 인해 최근 그 활용도가 높아지고 있다. 즉, CNT 재질이 갖는 작은 팁 반경, 높은 길이 대 지름 비, 그리고 큰 굽힘 강성 등인데 [12-14], 실제 측정에서 발생하는 이미지 불안정 현상이나 CNT 탐침의 예상치 못한 좌굴(buckling) 등 복잡한 현상에 대하여는 아직 뚜렷한 연구 결과가 발표된 것이 없다. 비록 Snow 등 [15, 16]이 비접촉(non-contact) CNT 탐침에 대하여 기초연구를 발표한 바 있으나 CNT의 불안정 현상 등을 포함한 나노스케일의 비선형 동역학적 특성에 대하여 본격적으로 소개되지 않고 있다.

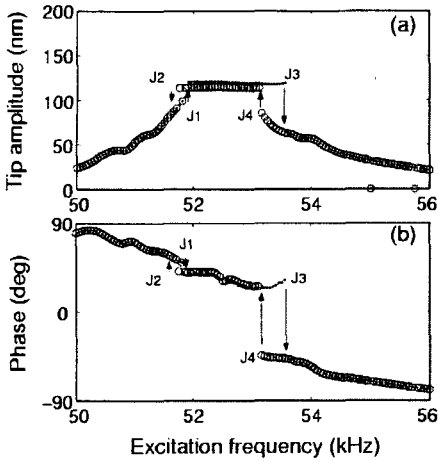
본 논문에서는 최근 새로운 분야로 연구되고 있는 나노스케일에서의 다양한 물리적 현상 중, AFM 탐침/CNT 탐침과 시료 표면간의 비선형 나노 상호작용력에 의한 나노스케일의 비선형 동역학 연구 결과를 정리해 보고자 한다. 특히 저자들에게 의해 기 발표된 내용 [2, 17, 18]과 더불어 최근 추가된 사항에 대해 토의를 하고자 한다.

## 2. AFM 프로브의 실험

### 2.1 주파수 및 위상 특성

AFM 마이크로캔틸레버의 비선형 주파수 응답을 구하기 위하여 공진주파수 구간을 포함하는 주파수 영역에서 가진 주파수를 증가/감소시키면서 팁의 진동 진폭과 위상을 측정하였다. 실리콘 (Si) 팁과 HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) 시료 사이의 간격이 60nm 일 때 주파수에 따른 비선형 응답을 Fig.1에 나타내었다. Fig.1에서는 특정 가진 주파수(52kHz, 53.4kHz 근방)에서 진폭과 위상이 불연속으로 전이함을 관찰할 수 있으며, 불연속점 사이에 점프(jump)가

\* 서울시립대학교 기계정보공학과  
E-mail : leesooil@uos.ac.kr  
Tel : (02) 2210-5667 Fax : (02) 2248-5110  
\*\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부  
\*\*\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소  
\*\*\*\* 서울대학교 공과대학 기계항공공학부



**Fig. 1** Experimental amplitude and phase (w.r.t. driving frequency) response of the silicon tip on HOPG sample. Nonlinear tip amplitude (a) and phase (b) response with 60nm tip-sample approach distance Dots: response during frequency sweep-up; circles: response during frequency sweep-down.

일어나고 이 점들 사이에서는 포화된(saturated) 진폭 응답을 보인다. 또한 가진 주파수를 증가/감소시킬 때 점프가 일어나는 점이 서로 다른 이력현상(hysteresis)을 볼 수 있다.

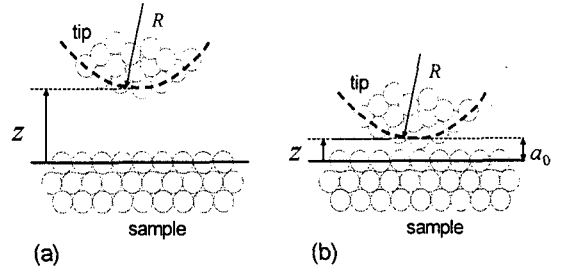
## 2.2 거리-진폭 특성

고정된 가진주파수에서 AFM의 팁이 시료에 접근할 때와 멀어질 때의 진폭 변화를 실험에 의해 구하면 비선형 응답곡선을 얻을 수 있다. 접근할 때와 멀어질 때 서로 다른 거리에서 점프가 일어남을 볼 수 있다. [19]

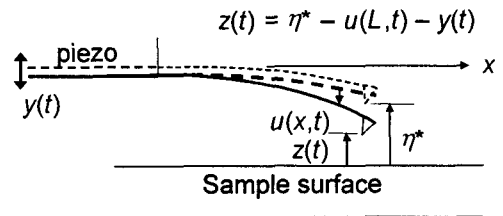
## 3. AFM 프로브의 비선형 동역학 해석

### 3.1 팁-시료 간 상호작용력 모델

AFM 마이크로캔틸레버 팁과 시료 사이의 상호작용을 분석하기 위해서는 구(팁)와 평평한 표면(시료) 사이에 반데르발스힘과 접촉력을 가정하였다. Fig.2에서 보는 바와 같이 팁이 시료와 떨어져 있을 때는 반데르발스힘(Fig.2(a))만을 적용하고 시료와 접촉을 하면 비로소 접촉력(Fig.2(b))이 적용하는 구간별 비선형 모델을 설정하였다. 압전가진기로부터 마이크로캔틸레버의 기저 가진 운동(Fig.3)에 대한 팁의 처짐  $u(t)$ 의 운동방



**Fig. 2** Two different tip-sample interaction regimes: (a) when the tip is located far from the sample; and (b) when the tip-sample contact is initiated



**Fig. 3** Schematic diagram of the cantilever: Dynamic configuration as cantilever vibrates about its electrostatic equilibrium.

정식은 연속 캔틸레버 모델의 단일 모드의 이산화 를 통하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_c A_c \ddot{u}(x, t) + E_c I_c (u''''(x, t) + w''(x)) \\ = F_1 (Z - w(L, t)) \delta(x - L) + \rho_c A_c \Omega^2 Y \sin \Omega t \end{aligned} \quad (1)$$

팁 끝단에 등가 상호력이 작용하고 비선형 강성 요소를 갖는 마이크로캔틸레버의 선형 모드와 고유주파수를 계산하였다. 이 때 첫 번째 굽힘 모드만을 적용하여 이산화하는 갤러킨(Galerkin)방법을 사용하였다. [20]

### 3.2 DMT 접촉 모델 및 해석 결과

AFM 마이크로캔틸레버 팁과 시료가 떨어져 있을 때는 반데르발스힘만을 적용하고 시료와 접촉을 하면 DMT 접촉력[21]이 적용하는 구간별 비선형 모델을 설정하였다.(Fig.4)

### 3.3 JKR 접촉 모델 및 해석 결과

JKR 접촉모델에서 이력현상(hysteresis)을 고려하면 팁이 시료에 접근할 때와 멀어질 때 JKR 접촉력 [22]이 작용하는 구간을 다르게 모델링 할 수 있다.(Fig.4)

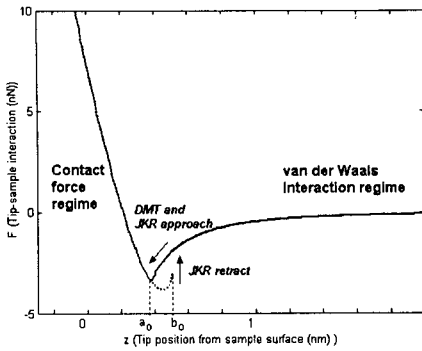


Fig. 4 Interaction model described by DMT, JKR contact forces and van der Waals interaction.

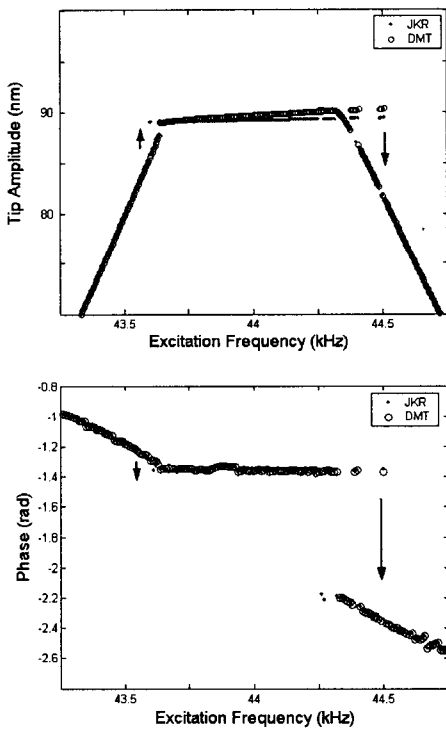


Fig. 5 Tapping mode response prediction: Circle/dotted points indicate DMT/JKR contact model, respectively. Tip amplitude indicates the peak-to-peak tip oscillation amplitude of the microcantilever. Phase between the first harmonic of response and the base excitation is computed.

두 모델의 진폭 응답(Fig.5)은 가진 주파수가 증가함에 따라 증가하다가 어느 순간에 진폭이 점프하는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 점프가 일어난

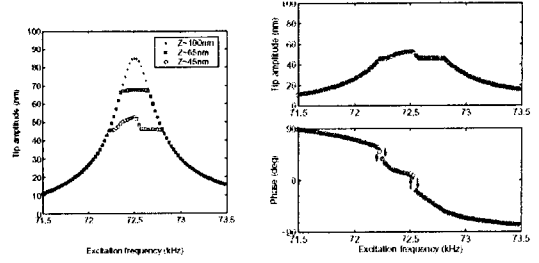


Fig. 6 Cantilever tip amplitude and phase (w.r.t. driving frequency) of the CNT tip over HOPG surface.

후 거의 일정하게 진폭이 유지되는데 JKR 모델이 DMT 모델보다 좀 더 작은 기울기를 갖고 있다. 위상의 경우 역시 진폭이 점프가 일어났던 주파수에서 점프현상이 일어나고 JKR 모델이 DMT 모델보다 더 작은 주파수에서 첫 번째 점프현상이 일어나는 것을 관찰할 수 있다.

#### 4. 탄소나노튜브 프로브의 실험 및 해석

CNT AFM 탐침의 비선형 특성 실험을 위하여 AFM 시스템에 추가의 제어장치와 데이터 획득장치를 부착하여 CNT 탐침의 진동 진폭 및 위상을 동시에 측정하였다.[17]

CNT 탐침이 시료와 멀리 떨어져 있을 때 주파수 응답은 전형적인 선형 공진 곡선과 같다. 그러나 Fig. 6 과 같이 간격이 65 nm 정도에서는 진동 진폭이 감소되고 탐침이 비로소 시료 표면을 두드리는(tapping) 특정 주파수 영역에서는 진폭이 포화되어 나타나는 것을 알 수 있다. 좀 더 간격을 감소시켜 45 nm 정도에 이르게 되면 포화된 응답 구간 중에 별도의 블록한 진폭의 증가 현상을 관찰할 수 있다. 이 때 진폭이 갑자기 변화하는 점에서 위상의 점프가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 진폭의 갑작스런 증가와 위상의 점프 현상이 CNT 의 좌굴에 의한 특성으로 예측하고 있다.

여기에서 기존 Si 탐침에서의 연구 결과와는 다른 몇가지 중요한 특성이 발견되는데, 우선 주파수에 따라 단일 진폭 상태만 존재한다는 것이다. 이로부터 CNT 탐침의 경우에는 기본 tapping 모드에서는 불안정 진동 현상이 나타나지 않음을 알 수 있다. 다음으로 CNT 탐침의 경우에 진폭 포화 상태가 끝나는 주파수에서도 위상 점프가 일어나지 않음을 알 수 있다.

한편 이러한 위상에서의 점프가 발생하는 지점

에서는 인력인 반데르발스 힘 영역과 반발력인 접촉 상호작용력 영역 간의 천이 되는 현상으로 이해할 수 있다.

## 5. 토의 및 결론

탐침과 시료 간의 상호작용력은 기본적으로 팁-시료 간격에 의존하는 나노스케일의 비선형력이기 때문에 팁의 진동 응답 역시 팁-시료 간격에 따라 달라지는 비선형 특성을 가지게 된다. 본 연구에서는 일반적으로 탭핑모드의 실험결과를 바탕으로 이 때 발생하는 비선형 특성을 시료에 따라 반데르발스 힘과 DMT 혹은 JKR 접촉 모델을 이용하여 해석하였다. 이러한 모델의 수치 해석 결과, 각 비선형 응답의 특성(포화응답, 불연속점, 점프, 응답이력 등)의 원인을 진단함과 동시에 실험과 이론의 정성적/정량적 비교가 가능하였다.

또한 CNT 탐침의 비선형 동역학 실험을 통하여 또 다른 경향의 복잡한 비선형 거동을 파악할 수 있었으며, 위상 점프가 일어나는 위치에서 반데르발스 힘 영역과 접촉력 영역 간의 천이 현상으로 설명이 가능하였다.

이상의 연구 결과 정리를 통하여 나노스케일에서 발생하는 비선형 동역학의 특성이 매크로스케일에서의 현상과는 상당히 다르다는 것을 확인할 수 있고, 이러한 AFM, CNT 등 나노스케일 역학과 관련한 실험과 해석을 할 때에는 본 논문에서 언급한 내용을 상기하여 진행할 필요가 있다고 하겠다.

## 참고문헌

- (1) G. Binnig, C. Gerber, C. Quate, 1986, "Atomic Force Microscope", *Phy. Rev. Lett.* Vol.56, pp. 930-933.
- (2) 이수일, 홍상혁, 이장무 등, 2003, "AFM 마이크로컨틸레버의 나노 비선형 동역학", *추계학술대회 논문집, 대한기계학회*, pp. 1560-1565
- (3) G.Haugstad, R. R. Jones, 1999, "Mechanisms of dynamics force microscopy on polyvinyl alcohol: region-specific non-contact and intermittent contact regimes", *Ultramicroscopy*, Vol. 76, pp. 77-86.
- (4) P. J. de Pablo, J. Colchero, M. Luna, J.Gomez-Herrero, A. M. Baro, 2000, "Tip-sample interaction in tapping-mode scanning force microscopy", *Phys. Rev. B*, Vol. 61, 14179
- (5) M. Lantz, Y. Z. Liu, X. D. Cui, H. Tokumoto, S. M. Linsay, 1999, "Dynamic force microscopy in fluid", *Surf. Interface Anal.* Vol. 27, pp.354-360
- (6) A. San Paulo, R. Garcia, 2000, "High-resolution imaging of antibodies by tapping-mode atomic force microscopy: Attractive and repulsive tip-sample interaction regimes", *Biophys. J.* Vol. 78, pp. 1599-1605
- (7) X. Chen, M. C. Davies, C. J. Roberts, S. J. B. Tendler, P. M. Williams, N. A. Burnham, 2000, "Optimizing phase imaging via dynamic force curves", *Surf. Sci.* Vol.460, pp. 292-300
- (8) R. Garcia, A. San Paulo, 2000, "Dynamics of a vibrating tip near of in intermittent contact with a surface", *Phys. Rev. B*, Vol. 61, R13381.
- (9) R. Garcia, A. San Paulo, 2000, "Amplitude curve and operating regimes in dynamic atomic force microscopy", *Ultramicroscopy*, Vol. 82, pp. 79-83.
- (10) B. Anczykowski, D. Kruger, K. L. Babcock, H. Fuchs, 1996, "Basic properties of dynamic force spectroscopy with the scanning force microscope in experiment and simulation" *Ultramicroscopy*, Vol. 66, pp. 251-259
- (11) L. Nony, R. Boisgard, J. P. Aime, 2001, "Stability criterions of an oscillating tip-cantilever system in dynamic force microscopy", *Eur. Phys. J. B*, Vol. 24, pp. 221229.
- (12) Dai, H., Hafner, J. H., Rinzler, A. G, Colbert, D. T. and Smalley, R. E., 1996, "Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy," *Nature*, Vol. 384, pp 147-150.
- (13) Li, J., Cassell, A. M. and Dai, H., 1999, "Carbon nanotubes as AFM tips: measuring DNA molecules at the liquid/solid interface," *Surface and Interface Analysis*, Vol. 28, pp 8-11.
- (14) Stevens, R. M. D., Frederick, N. A., Smith, B. L., Morse, D. E., Stucky, G. D. and Hansma, P. K., 2000, "Carbon nanotubes as probes for atomic force microscopy," *Nanotechnology*, Vol. 11, pp 1-5
- (15) Snow, E. S., Campbell, P. M. and Novak, J. P., 2002, "Single-wall carbon nanotube atomic force microscope probes," *Applied Physics Letters*, Vol. 80, pp 2002-2004.
- (16) Snow, E. S., Campbell, P. M. and Novak, J. P., 2002, "Atomic force microscopy using single-wall C nanotube probes," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 20, pp 822-827.
- (17) 이수일, 2004, "탄소나노튜브 탐침의 나노 비선형 동역학" *추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회*, pp. 81-84
- (18) 홍상혁, 이수일, 이장무, 2004, "접촉모델에 따른 AFM 팁의 비선형 동역학 비교", *추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회*, pp.73-76
- (19) Lee, S. I., Howell, S. W., Raman, A. and Reifengerger, R., 2002, "Nonlinear dynamics of microcantilevers in tapping mode atomic force microscopy: a comparison between theory and experiment," *Physical Review B*, Vol. 66 No. 115409.
- (20) Lee, S. I., Howell, S. W., Raman, A. and Reifengerger, R., 2003, "Nonlinear dynamic perspectives on dynamic force microscopy," *Ultramicroscopy*, Vol. 97, pp 185-198.
- (21) B. V. Derjaguin, V. M. Muller, Y. P. Toporov, 1975, "Effect of Contact Deformation on the Adhesion of Particles", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.53, pp.314~326
- (22) K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts, 1971, "Surface Energy and the Contact of Elastic Solids", *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, Vol.324, No.324, pp.301~313