한국소음진동공학회 2014년 춘계학술대회논문집, pp. 88~89

다중주파수 AFM 원리 및 연구 동향

Principle and Applications of Multifrequency Atomic Force Microscopy

이수일† , 김일광*
Soo Il Lee, Il Kwang Kim

Key Words : AFM(원자현미경), Multifrequency(다중주파수), Bimodal(이중모드)

ABSTRACT

In dynamic force microscopy, the cantilever oscillates at a resonant frequency, and the tip deflection is measured at this frequency. The cantilever deflection is, however, highly nonlinear, and the surface properties can be embedded in the deflection at the frequencies other than the original resonant frequency of the cantilever. Multifrequency atomic force microscopy includes the excitation and detection of the deflection in two or more frequencies which are higher harmonics or eigenmodes. This can overcome the limitations of conventional atomic force microscope. We reviewed the multifrequency atomic force microscopy and its applications in many fields.

원자현미경(AFM: Atomic Force Microscopy)은 1986년 Binning 등[1]에 의해 개발된 이후로 나노기술 분야에서 핵심 측정 및 조작 장비로 활용되어 왔다. 광학현미경이나 전자현미경과는 달리 직접 마이크로 외팔보(microcantilever)형태의 프로브(probe) 팁(tip)을 측정대상 표면에 가져가 원자간 작용력에 의해 발생하는 외팔보의 변형(deflection)을 계측하여 대상표면의 형상을 측정하는 방식이다. 또한 AFM 은 단순히 표면의 나노형상을 측정하는 것 뿐만아니라 표면의 작용력을 직접 탐촉하는 도구로 쓰일 수 있어서 작용력 현미경(force microscopy) 또는 작용력 분광기(force spectroscopy)로의 활용도 가능하다는 특징이 있다.

AFM에는 이러한 성공적인 측면 뿐 아니라 한계도 존재하는데 표면 측정 해상도에 대한 제한과 측정 데이터의 수집시간(acquisition time)이 타 현미경 방법에 비해 오래 걸린다는 것이다.[2] 이러한 단점을 극복하고자 다중주파수를 이용한 방법이 최근에 개발되고 있다. 일반적인 진폭변조(amplitude modulation) 모드의 경우 일정한 주파수로 가진하고 필터링 과정을 통해 해당 가진주파수 성분의 응답만으로 팁의 운동을 고려하고 있기 때문에 이러한 하모닉과 고유모드 효과로 나타나는 표면 특성에 대한 정보는 일반적인 AFM 알고리즘으로는 얻을 수 없다.

다중주파수 AFM 방법은 가진주파수와 함께 프로브의 몇가지 진동 주파수 성분을 탐촉해 내는 것으로, 고차 하모닉 또는 고유모드의 주파수와 연계되어 있다. 따라서 다중주파수 AFM은 기본적으로 팁-표면의 비선형 효과에 의해 나타나는 각종 정보를 처리할 수 있기 때문에 높은 민감도와 보다 나은 해상도를 제공할 수 있다. 그러나 그동안 간과되던 고차 하모닉을 포함하는 다중주파수 방법에 대한 연구가 최근에서야 각광을 받게 된 이유는 고해상도 이미징에서는 약한 팁 작용력을 통해 이미지를 얻는 경우가 많은데 이런 경우는 일반적으로 고차 하모닉의 영향이 상당히 미미하다. 또 이와 관련한 복잡한 이론의 이해와 연구가 많이 진전되지 못한 것도 한 원인이라고 할 수 있다.[2]

고차 하모닉이 발생하는 원인은 팁-표면 사이의 반데르발스 힘과 시료표면의 접촉강성에 의한 비선형 작용력 때문이다.[3] 고차하모닉을 검출하여 이미징을 하는 것은 고차하모닉 진폭 자체가 상당히 작기 때문에 기술적인 어려움이 많이 있다. 따라서 특별하게 설계된 팁을 이용해 고차 하모닉과 고차 고유모드가 일치하도록 하는 등의 방법을 활용한다.[4] Fig. 1은 고차 하모닉 이미징을 박테리아 S-layer에 적용한 사례로 일차 하모

* 서울시립대학교 대학원
† 교신저자; 정회원, 서울시립대학교 기계정보공학과
E-mail : leesooil@uos.ac.kr
Tel : +82-2-6490-2393, Fax : +82-2-6490-2384

닉으로는 표면 형상을, 2차 하모닉으로는 형상 이외의 정보를 얻을 수 있다.[5] 이러한 고차 하모닉 이미징 기법을 이용하면 표면의 국소 강성이나 점탄성 감쇠와 같은 역학적인 정보를 얻는데 도움이 된다.

이중모드 AFM 방법은 두 개의 주파수 성분으로 캔틸레버를 가진하는 AFM 으로 캔틸레버의 1, 2차 굽힘 고유모드 공진주파수에 맞추는 것이 일반적이다.(Fig. 2) 1차 모드의 출력신호는 (진폭 변조 또는 주파수 변조의 경우) 표면 형상을 그리는 데 사용되며, 2차 모드의 신호(진폭 및 위상차)는 역학적(mechanical), 자기(magnetic), 또는 전기적(electrical) 성질의 변화를 측정한다. 이 측정 방법은 공기 중, 액상, 고진공 상태 모두 측정이 가능하다는 장점이 있다. Fig. 3은 이중모드 AFM으로 측정한 세포막 단백질의 표면 형상과 표면 강성변화를 나타낸다.[6]

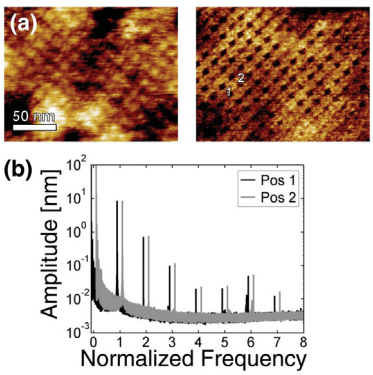

Fig. 1 Bacterial S-layer. (a) Topography (left) and 2nd harmonic image (right). (b) Frequency spectra on positions 1 and 2 of (a).[5]

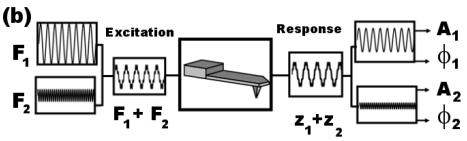

Fig. 2 Bimodal AFM.[3]

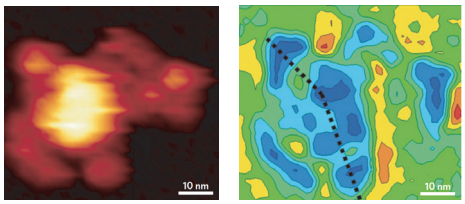

Fig. 3 Bimodal AFM topography and flexibility map of a single immunoglobulin M antibody.[6]

다중주파수 AFM 방법에서 고차 하모닉의 효과를 극대화하기 위해서 단순히 일차 모드를 가진할 때 고차 하모닉에 의한 효과만 보는 것이 아니라 일차와 2차모드를 동시에 가진하고 이 때 나타나는 공진주파수와 하모닉을 동시에 고려하는 방법이 개발되고 있다. 또한 단순히 1, 2차 모드를 동시 가진하는 수준에서 더 나아가 3개 이상의 고유모드를 가진하거나[7] 공진주파수가 아닌 2개의 주파수를 가진하는 등의 여러 가지 새로운 방법으로 확장되고 있다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203260)입니다.

참 고 문 헌

(1) Binnig, G., Quate, C. F. and Gerber, C., 1986, Atomic force microscope, Physics Review Letters, Vol. 56, pp.930~933.

(2) Garcia R. and Herruzo, E., 2012, The emergence of multifrequency force microscopy, Nature Nanotechnology, Vol. 7, pp.217~226.

(3) Garcia, R., 2010, Amplitude Modulation Atomic Force Microscopy, Wiley.

(4) Sahin, O. et al., 2004, High-resolution imaging of elastic properties using harmonic cantilevers, Sensors and Actuators A, Vol. 114, pp183~190.

(5) Preiner, J., Tang, J., Pastushenko, V. and Hinterdorfer, P., 2007, Higher harmonic atomic force microscopy: imaging of biological membranes in liquid, Physics Review Letters, Vol. 99, 046102.

(6) Martinez-Martin, D., Herruzo, E. T., Dietz, C., Gomez-Herrero, J. & Garcia, R. Noninvasive protein structural fexibility mapping by bimodal dynamic force microscopy. Phys. Rev. Lett. 106, 198101 (2011).

(7) Solares, S. D. and Chawla, G., 2010, Frequency response of higher cantilever eigenmodes in bimodal and trimodal tapping mode atomic force microscopy, Measurement Science and Technology, Vol. 21, 125502.