

# 태핑 모드 원자현미경용 마이크로 외팔보의 모달 특성: 근사 빔 모델을 이용한 복소 모드 추출

## Modal Characteristics of Microcantilevers in Tapping Mode AFM: Complex Mode Extraction Using an Approximate Beam Model

이진우† · 이수일\*  
Jin Woo Lee and Soo Il Lee

### 1. 서 론

태핑 모드 원자 현미경(tapping mode Atomic Force Microscope)은 원자 현미경 탐침(probe)의 팁과 시료 표면의 상호 작용에 의해 발생하는 탐침의 동특성 변화로부터 나노 스케일 물질의 재질 특성을 측정한다<sup>(1-2)</sup>. 탐침으로 사용되는 마이크로캔티레버(microcantilever)의 진동 특성은 탐침과 시편간에 발생하는 힘뿐만 아니라 주변 유체와의 상호 작용력에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 간단한 진동 모델이나 쉽게 구할 수 있는 기저 함수(basis function)로 그런 상호 작용력에 의한 특이한 실험 현상을 설명하는 연구들이 진행되고 있다<sup>(3)</sup>.

최근에는 적합 직교 분해 법(Proper Orthogonal Decomposition method)을 사용하여, 가능한 작은 수의 기저 함수로 마이크로/나노 진동계의 거동을 설명하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>(4)</sup>. 특히, 실험 데이터로부터 얻어진 적합 직교 모드(POM: proper orthogonal mode)와 적합 직교 값(POV: proper orthogonal value)으로 원자 현미경용 마이크로캔티레버의 비선형 거동을 기술하려는 시도는 해석 모델의 간략화에 크게 기여할 것으로 기대된다. 이런 해석 기법의 발전을 위해서는 추출된 적합 직교 모드와 적합 직교값에 대한 물리적인 이해가 뒷받침 되어야 한다.

본 연구에서는 질량-스프링-댐퍼로 구성된 수학

적 모델을 이용하여 마이크로 캔티레버의 적합 직교 모드의 특이 거동을 설명하고자 한다. 일반적으로 적합 직교 모드는 해당 시스템의 고유 모드(natural mode)와 비슷하지만, 현재 수행된 실험에서 얻어진 결과는 실 모드(real mode)와 고유 주파수로 설명이 불가능하였다. 이 특이 현상을 설명하기 위해, 주변 유체/시편과의 상호 작용을 고려한 이산 시스템(discrete system)을 구성하고, 상태 공간 방정식(state-space equation)을 이용하여 실험과 유사한 특이 현상이 발생하는 조건을 추정해 보았다.

### 2. 적합 직교 모드의 특이 거동

#### 2.1 원자 현미경 실험

Fig. 1과 같이 Park System사의 XE-100 AFM System과 Controller를 이용하여, 원자 현미경의 마이크로 캔티레버(Olympus사 OMCL-AC240TS)의 5개 지점의 응답을 측정하였다. 실험에 사용된 시편은 HOPG이고, 캔티레버 기저부를 캔티레버의 1차 고유 주파수로 가진하였다.

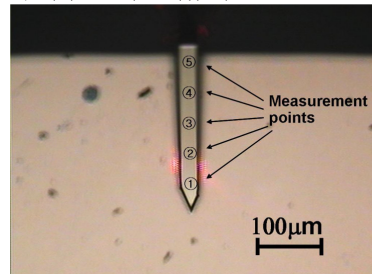


Fig. 1 Microcantilever and measurement points

#### 2.2 적합 직교 모드

Karhunen-Loeve 변환으로 알려진 적합 직교 분해 법을 이용하여 Fig. 2와 같은 적합 직교 모드를

† 교신저자; 정회원, 아주대학교 기계공학부  
E-mail : jinwoolee@ajou.ac.kr  
Tel : 031-219-3659, Fax : 031-219-1611  
\* 정회원, 서울 시립대학교 기계정보공학과

얻었다. 각 그림의 x축은 측정점의 위치를, y축은 변위를 나타낸다. 일반적으로, 가진 주파수와 근접한 고유 모드 형상이 첫 번째 적합 직교 모드에 추출되고, 다른 적합 모드에 비하여 이 모드에 대부분의 에너지가 집중된다. 하지만, 본 실험에서는 1차 고유 주파수로 가진 되었으나, 전체 에너지의 89.16%만이 1차 적합 직교 모드에 집중되었고, 나머지 10.84%는 2차 적합 직교 모드에 할당되었다. 더욱이, 두 적합 직교 모드에 해당하는 적합 직교값이 일치하였다.

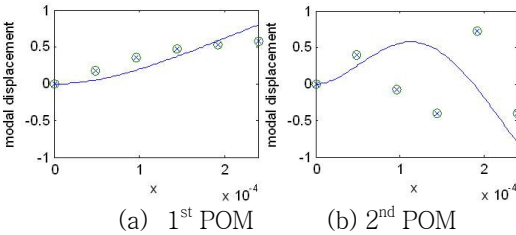


Fig. 2 Proper Orthogonal Modes extracted from experimental data.

### 3. 근사 빔 모델

2.2에서 발견한 특이 현상의 원인을 살펴보기 위해, Fig. 3과 같은 이산 시스템을 이용하였다. 캔틸레버 자체의 감쇠는 무시하고, 끝단의 팁과 시편의 상호 작용에 의해 감쇠력이 발생한다고 가정하였다. 식 (1)의 상태 공간 방정식을 이용하여, Fig. 4와 같은 첫 번째 고유주파수로 가진 되어 발생하는 이산 시스템의 ODS(operating deflection shape)을 얻었다. 이 ODS에 적합 직교 분해법을 적용하니 Fig. 2와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

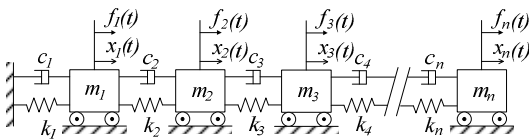


Fig. 3 Discrete system of a microcantilever

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \dot{\vec{u}} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M} \end{bmatrix} \vec{u} = \vec{\mathbf{0}} \quad (1-a)$$

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} \vec{x} \\ \dot{\vec{x}} \end{bmatrix} \quad (1-b)$$

$$\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}^T \quad (1-c)$$

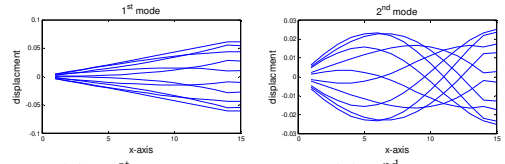


Fig. 4 Operating deflection shape of the discrete system.

### 4. 결론

본 논문에서는 현미경용 마이크로 캔틸레버의 특이 거동을 설명할 수학적 모델을 제시하고, 상태 공간 표현법을 이용하여 특이 현상의 원인을 살펴보았다.

### 후기

이 논문은 2011학년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0005830). 또한, 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과이기도 합니다.

### 참고 문헌

- (1) Hong, S. H. and Lee, S. I., 2010, Vibration Analysis of the Tapping AFM Microcantilevers Using Proper Orthogonal Decomposition, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 414~421.
- (2) 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, pp. 115409.
- (3) Zhang, Y. and Murphy, K. D., 2011, Multi-modal Analysis on the Intermittent Contact Dynamics of Atomic Force Microscope, Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, pp.5569-5582.
- (4) Spletzer, M., Raman, A. Reifengerger, R., 2010, Spatio-temporal Dynamics of Microcantilevers Tapping o Samples Observed under an Atomic Force Microscope integrated with a scanning laser Doppler vibrometer: applications to proper orthogonal decomposition and model reduction, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 20, pp.085024.