

AFM 마이크로 캔틸레버의 상태 공간 방정식 및 유한 요소 진동 해석 비교

Comparison of vibration analyses on microcantilevers for Atomic Force Microscopy by state-space equations and the finite element method

이진우† · 김일광* · 한동희* · 이수일*

Jin Woo Lee · Il Kwang Kim · Dong Hee Han and Soo Il Lee

1. 서 론

원자 현미경용 마이크로 외팔보(microcantilever)는 육안으로 볼 수 없는 마이크로/나노 샘플을 분류해 내는 경우에 널리 사용된다. 일정한 크기나 주파수로 가진되는 외팔보 끝단의 진동 응답이 샘플에 따라 달라지는 특성을 이용한다⁽¹⁾. 이러한 진동 응답 특성에 대한 실험을 통해 얻은 데이터에 신호 분석 기법을 이용하여 설명하려는 연구가 다수 보고되고 있다⁽²⁻⁴⁾. 끝단의 진동 응답이 외팔보를 대표하는 고유 주파수뿐만 아니라 주요 거동에도 영향을 미친다고 알려지고 있으나 외팔보 전체를 해석 모델로 사용하는 연구는 복잡성 때문에 많이 시도되지 못하고 있다.

본 논문에서는 상용 유한 요소 프로그램과 상태 공간 표현법을 이용하여, 비선형 힘이 끝단에 작용하는 마이크로 외팔보의 진동 특성을 파악하고자 한다. 샘플과 외팔보가 떨어진 거리에 따라 변화하는 상호작용력은 VEDA⁽⁵⁾에 의해 계산한다. 상용 유한 요소 프로그램에서는 외팔보의 끝단과 샘플 사이에 갭 요소(gap element)를 사용하여 비선형 상호 작용력을 구현한다. 상태 공간 표현법을 이용한 해석시에는 Lee and Lee⁽⁶⁾가 유도한 상태 공간 방정식을 본 연구에 알맞게 변형하여 사용한다. 두 가지 방법으로 구한 시간 응답 특성을 비교하여, 두 접근 방법의 타당성을 검토한다.

2. 상용 유한 요소 모델을 이용한 외팔보 진동 해석

탭핑모드 AFM의 마이크로 외팔보의 횡방향 변위 $w(x,t)$ 는 식 (1)으로 얻을 수 있다. 여기서, m 은 단위 길이당 질량, EI 는 굽힘 강성, $f(z)$ 는 샘플 간의 상호력, H 는 Hamaker 상수, R 은 팁의 반경, a_0 는 분자간 거리, E^* 는 팁과 샘플의 유효 탄성계수를 나타낸다. 팁이 샘플에 접촉하기 전까지 van der Waals 힘, 샘플과의 접촉 후에는 DMT 접촉력⁽¹⁾을 생각할 수 있다.

$$m(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = f(z) \quad (1a)$$

$$f_{vdw}(z) = -\frac{HR}{6z^2} \quad \text{for } z > a_0$$

$$f_{DMT}(z) = -\frac{HR}{6a_0^2} + \frac{4}{3} E^* \sqrt{R}(a_0 - z)^{3/2} \quad (1b)$$

$$\text{for } z \leq a_0$$

VEDA에서 얻은 팁과 샘플의 상호작용력은 상용 유한 요소 프로그램에서 팁과 샘플 사이에 비선형 스프링 요소로 가정하여 식 (1b)와 같이 거리-힘의 프로파일을 따르도록 하였다.

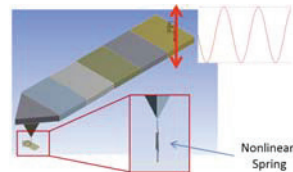


Fig. 2 FE model of tapping mode AFM microcantilever

† 교신저자; 정희원, 아주대학교 기계공학부

E-mail : jinwoolee@ajou.ac.kr

Tel : 031-219-3659, Fax : 031-219-1611

* 정희원, 서울 시립대학교 기계정보공학과

이때, 외팔보는 SOLID186, 비선형 스프링은 COMBIN39 요소를 적용하여 Fig. 2와 같이 상용 유한 요소 프로그램으로 구현하였으며, 모달 및 과도 구조 해석으로 시간 응답 데이터를 얻었다.

3. 상태 공간 방정식을 이용한 외팔보 진동 해석

Lee and Lee⁽⁶⁾가 유한 요소법과 상태 공간 표현법을 이용하여 정식화한 진동 해석 기법을 Fig. 3에 적용한다. 외팔보의 끝단은 고정부와 스프링으로 연결되어 있고, 반대쪽 끝에는 정현파 형태의 변위가 부여된다. 샘플과 끝단의 거리에 의해서 결정되는 미소 힘은 VEDA를 이용하여 계산하였고, 그것으로부터 끝단 변위에 따른 강성값을 계산하였다(Fig. 4 참조). 강성값이 -2에서 7사이 값을 갖는 것을 알 수 있다. 실제 계산에서는 1.8N/m의 강성값을 사용하여 Fig. 5와 같은 POM과 POD를 얻었다.

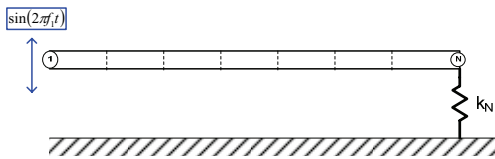


Fig. 3 Analysis model of a microcantilever for AFM

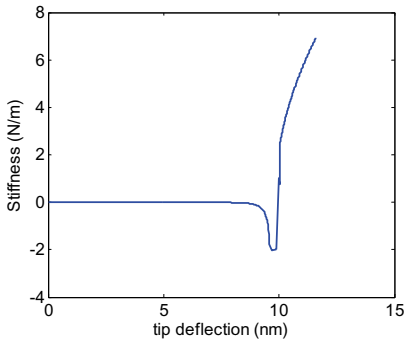


Fig. 4 Relation between stiffness and tip deflection

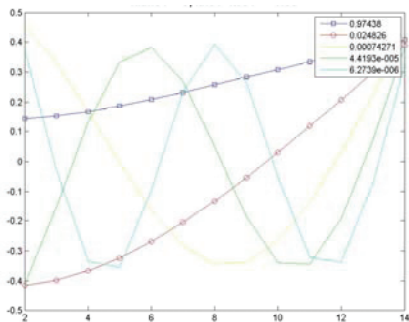


Fig. 5 POD and POV of the microcantilever

3. 결 론

본 연구에서는, 상용 유한 요소 프로그램과 상태 공간 표현법을 이용하여 마이크로 외팔보의 진동 해석을 수행하였다. 향후 두 방법의 장/단점을 비교하여 실험으로 관찰된 마이크로 외팔보의 물리적 현상을 설명하고자 한다.

후 기

이 논문은 2010학년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임 (No. 2010-0005299). 또한, 본 연구는 2012학년도 아주대학교 일반 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) 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, pp. 115409.
- (2) 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.
- (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. Reinfenberer, R., 2010, Spatio-temporal Dynamics of Microcantilevers Tapping on 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.
- (5) Melcher, J., Kiracofe, D., Hu, S., Johnson, S., and Raman, A., 2012, Virtual Environment for Dynamic AFM, First Time User's Manual, Purdue University.
- (6) Lee, J. W. and Lee, S. I., 2012, Vibration characteristics identification of microcantilevers using state-space equation, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, CD-rom.