

적합직교분해법을 이용한 AFM 마이크로캔틸레버의 모드해석

홍상혁[†] · 조홍모* · 이수일**

Modal Analysis of the Tapping AFM Microcantilevers Using Proper Orthogonal Decomposition

Sang Hyuk Hong, Hong Mo Cho and Soo Il Lee

Key Words : Atomic force microscopy(원자현미경), Proper orthogonal decomposition(적합직교분해법), Microcantilever(마이크로캔틸레버)

Abstract

The proper orthogonal decomposition(POD) is used to the modal analysis of microcantilever of dynamic mode atomic force microscopy(AFM). The proper orthogonal modes(POM) are extracted from vibrating signals of microcantilever when it resonates and taps the sample. We present recent ideas based on POD and detailed experiments that yield new perspectives into the microscale structures. The linearized modeling technique based on POD is very useful to show the principal characteristics of the complex dynamic responses.

1. 서 론

원자현미경(AFM: atomic force microscope)은 마이크로캔틸레버의 끝에 달려있는 팁을 시료 표면에 접근시켜 팁과 시료간의 원자간 작용력에 의하여 나노스케일의 표면 형상이나 여러 가지 재질 특성을 측정하는 장치이다. 특히 AFM 프로브를 공진시켜 팁과 표면간의 동적 특성 변화를 이용한 비접촉과 탭핑모드는 접촉모드와 같은 정적모드에 비해 위상(phase) 정보 등을 포함하기 때문에 여러 가지 실험의 측정모드로 이용 되고 있다.

적합직교모드(POM: proper orthogonal mode)는 큰 자유도계나 여러 가지 복잡한 물리 현상이 연성된 계의 해석에서 주된 요소(principal component)를 효과적으로 추출할 수 있게 해 주는 방법[1]으로 최근 일반적인 구조시스템 뿐 아니라 AFM 등 미소 시스템 등과 관련한 응용사례가 보고되고 있다.

Kerschen 등[2] 은 선형과 비선형 모델의 구조시스템을 모델링 하여 해석하였으며, Azeez 등[3] 은 캔틸레버의 끝 단에 작용하는 충격에 의해 발생하는 복잡한 진동 현상을 몇 개의 적합직교분해(POD: proper orthogonal decomposition) 모드로 해석한 결과를 보여주었다. 또, Li 등[4]은 AFM 프로브에 부착된 복잡한 고분자의 진동 특성을 POM 으로부터 동정(identification)하는 연구를 진행하였다. 그러나 AFM 마이크로캔틸레버와 같은 미소구조물에서 비선형 작용력에 의한 복잡한 진동현상의 주요 특성에 대한 노력은 부족하다고 할 수 있다. 특히 POD 방법을 통하여 복잡한 비선형 응답으로부터 주요성분을 추출하고 선형화 하는 모델링 기법에 대한 연구는 복잡한 모델을 단순화하여 주요 특성 분석과 해석을 진행하기 위한 기본 단계에 해당한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 실제 이용되는 AFM 마이크로캔틸레버의 비선형 응답을 측정하여 POM 을 추출하고 그에 따른 적합직교값(POV: proper orthogonal value)을 비교하여 추출된 모드의 특성 비교를 시도하였다. 즉 강성의 차이가 매우 큰 두 개의 AFM 마이크로캔틸레버를 AFM 시스템 (XE-

[†] 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail : hughie13@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7152 FAX : (02)876-9493

* 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과

** 서울시립대학교 기계정보공학과

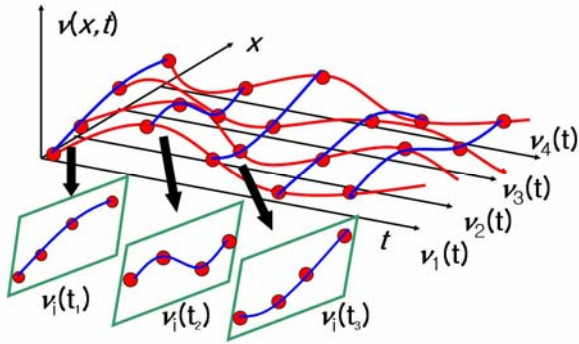


Fig. 1 Snapshot

-100TM)에 장착한 다음 공진시의 신호와 시료를 탭핑시의 신호를 측정하여 주파수 영역 해석을 수행하고 POM 을 추출하였다. 동적모드 AFM 마이크로캔틸레버의 비선형성을 해석하기 위한 방법으로써의 POD 에 대한 가능성을 제시하였다.

2. 적합직교분해법(POD)

적합직교분해(POD: proper orthogonal decomposition)는 Karhunen-Loeve 변환으로도 알려져 있으며 매우 큰 자유도계나 여러 가지 복잡한 물리 현상이 연성된 계의 해석에 활용되고 있다.[1-6] 진동 해석의 경우 Fig.1 과 같이 일반적인 계의 주어진 영역 Ω 에서 진동 신호를 $v(x,t)$ 라고 하고 일정한 시간 t_i 에서 샘플링 된 신호(일종의 snapshot)를 $v_i(x)$ 라 할 때 POD 에서는 이들 snapshot 들로부터 원래 구조 진동 모드에 가장 유사한 $\phi(x)$ 를 구하게 된다. 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \lambda = \sum_{i=1}^n (\phi(x) - v_i(x))^2 \quad \forall x \in \Omega \quad (1)$$

한편, 식(1)을 최대값 문제로 바꾸면 다음과 같다.

Maximize

$$\left\{ \lambda = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\int_{\Omega} \phi(x) v_n(x) d\Omega \right)^2}{\int_{\Omega} \phi(x) v_n(x) d\Omega} \right\} \quad \forall x \in \Omega \quad (2)$$

결국, 최대값 문제는 다음과 같은 적분 고유치 문제로 귀결된다.

$$\int_{\Omega} K(x, x') \phi(x') dx' = \lambda \phi(x). \quad (3)$$

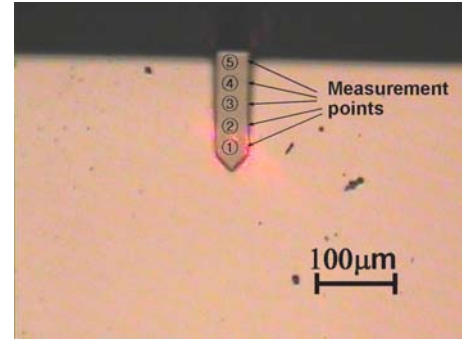


Fig. 2 Atomic Force Microscopy microcantilever in measurement (NanosensorsTM PPP-NCHR)

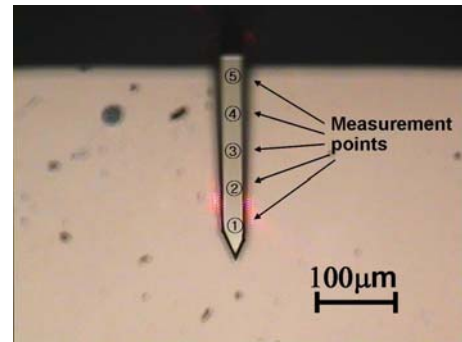


Fig. 3 Atomic Force Microscopy microcantilever in measurement (OLYMPUSTM OMCL-AC240TC)

여기서 K 는 다음 식으로 정의되는 2 점 관계함수(two-point correlation function)이다.

$$K(x, x') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(x) v_i(x'). \quad (4)$$

이상의 과정을 실제 측정 과정에 적용하기 위해서는 m 개의 각 측정점 x_k 에 대한 다음의 관계행렬(correlation matrix)을 구하고,

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} K(x_1, x_1) & \cdots & K(x_1, x_m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K(x_m, x_1) & \cdots & K(x_m, x_m) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

이러한 관계행렬은 다음과 같이 n 번 샘플링한 측정값 행렬로부터 얻을 수 있다.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1(t_1) & \cdots & q_1(t_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_n(t_1) & \cdots & q_n(t_n) \end{bmatrix} = [\mathbf{q}(t_1) \cdots \mathbf{q}(t_n)]. \quad (6)$$

이때, $\mathbf{G} = \frac{1}{n} \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T$ 와 같고, \mathbf{G} 의 고유벡터가 바로 POM 이, 고유치는 POV 가 된다.

Table 1 Constants and properties of the microcantilevers

Description	NCHR	OMCL
Tip radius (nm) R	10	10
Tip height (um) H	15	14
Cantilever thickness (nm) T	4	2.8
Cantilever length (um) L	125	240
Cantilever width (um) W	30	30
Spring constant (N/m) k	42	1.8
resonant frequency (kHz) f_0	330	70

Table 2 Constants and properties of the samples

Description	HOPG	PDMS
Young's modulus (GPa) E_s	200	0.75
Effective elastic modulus E^*	10.2 GPa	1.0MPa
Hamaker constant (J) A	2.96×10^{-19}	2.37×10^{-20}

Where,
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_{tip}^2}{E_{tip}} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s}$$

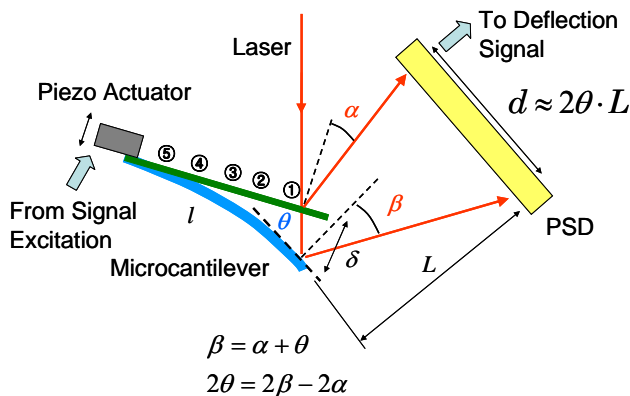


Fig. 4 Cantilever deflection and PSD signals.

3. AFM 실험

비선형성을 가지는 AFM 마이크로캔틸레버 주요 모드를 추출하기 위해서 본 실험에서는 PSIA 사의 XE-100 AFM System 을 이용했으며, XE-100 System controller 에서 추출한 실시간 진동 신호 캡처를 위하여 NI 사의 2-channel 고속 데이터 획득장치 (NI-5122)를 PC 에 장착하여 사용하였다. 복잡한 진동현상 측정을 위하여 우선 Fig.2, 3 과 같이 AFM 마이크로캔틸레버에 대하여 등간격으로 5 개 측정점을 설정하였다. 이용된 마이크로캔틸레버 팁은 Nanosensors 사의 PPP-NCHR 과 Olympus 사의 OMCL-AC240TS 로 제원은 Table 1 과 같다. 마이크로캔틸레버 기저부에서 각각의 고유주파수로

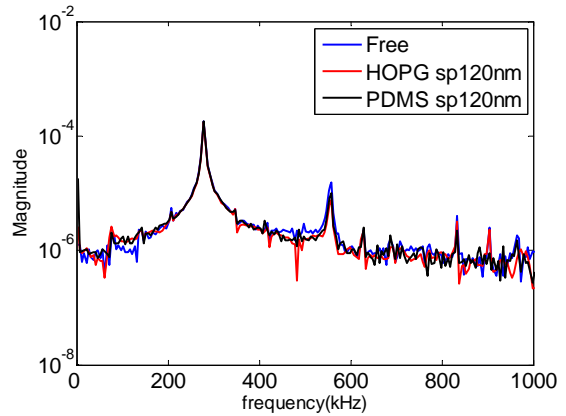


Fig. 5 Frequency spectrum of the NCHR tip deflection signals with and without tapping at the first resonance.

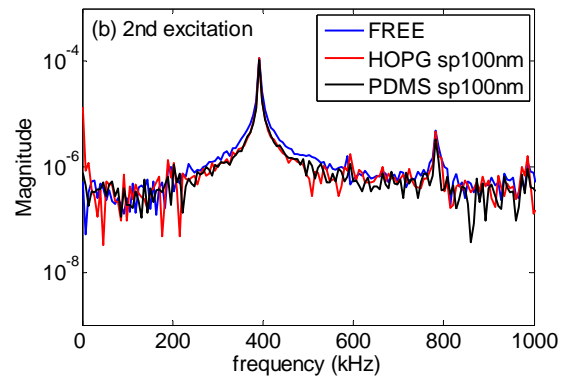
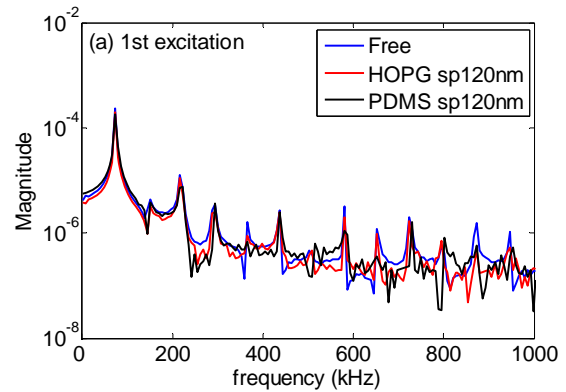


Fig. 6 Frequency spectrum of the OMCL tip deflection signals with and without tapping: (a) at the first resonance; (b) at the second resonance.

가진이 이루어질 때, AFM 의 기본 레이저 측정기구를 이용하여 각 점 별로 시간 응답을 측정하였다. NCHR 팁의 경우는 1 차 고유주파수에 대해서 OCML 팁의 경우는 1,2 차 고유주파수에 대해 각각 시간 신호를 얻을 수 있었다. 또한 AFM 시스템에 장착된 마이크로캔틸레버를 고유주파수로 가진하면서 딱딱한 시료인 HOPG(highly oriented pyrolytic graphite) 와 폴리머의 한 종류인 소프트한

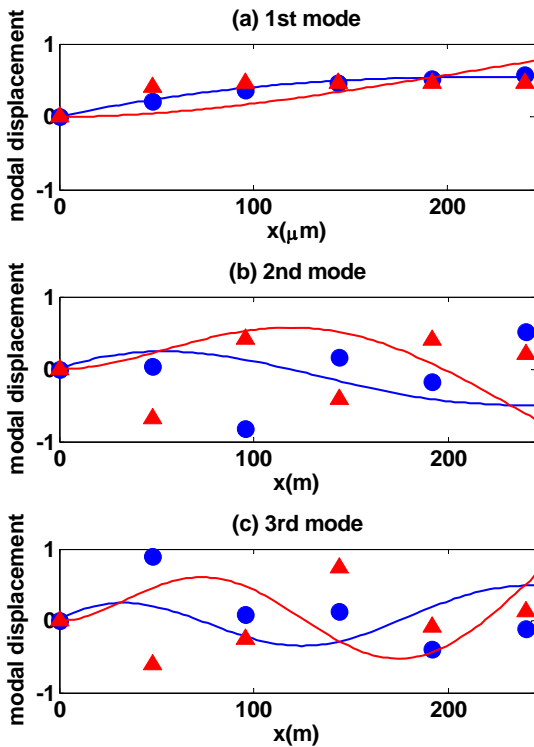


Fig. 7 The POMs at the 1st resonance of NCHR(red ▲) and OMCL (blue ●) microcantilevers.

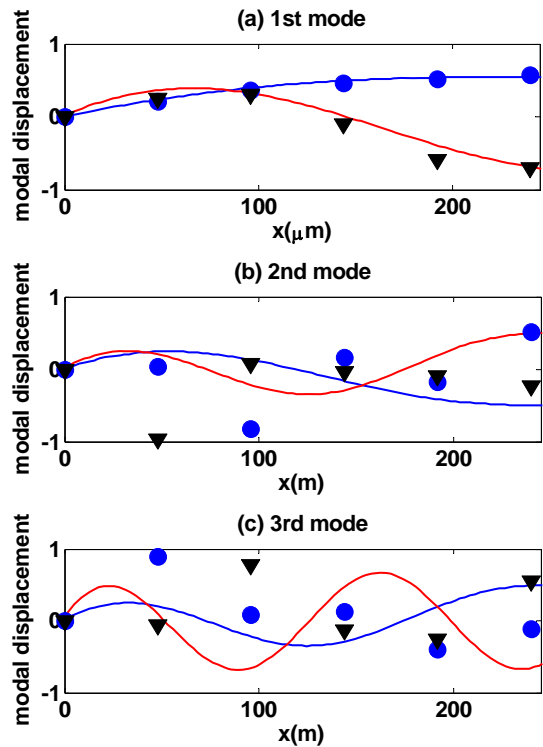


Fig. 8 The POMs at the 1st(blue ●) and 2nd(black ▼), resonances of OMCL microcantilever.

PDMS (poly-dimethylsiloxane) 시료를 탭핑(tapping) 하는 경우에도 역시 각 점에 대해 시간 신호를 측정하였다. 두 시료에 대한 상수와 물성치는 Table 2에 나타내었다.

기본적으로 캔틸레버 팁의 1 차 및 2 차 고유진동수 가짐을 통하여 공진 모드의 위치별 신호를 측정용 PC 에 장착된 2 채널 고속 데이터 수집장치(NI-5122)를 통해 저장한다. 각 채널에서 수집되는 데이터는 Fig.4 와 같이 캔틸레버 기저부 가진 신호와 캔틸레버 측정점에서 들어오는 레이저 변위 신호에 해당하는 PSD(position sensitive detector) 신호이다.[7-8] 일반적으로 AFM 에서 팁의 변위를 측정하는 데는 1 개의 레이저 빔을 사용하는 것이 일반적이어서 동시에 다중 빔으로 5 개 측정점을 커버하도록 구현하는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 개별 진동 특성이 정상상태라고 가정하고 캔틸레버의 각 측정점에서 순차적으로 측정된 신호를 가진신호를 기준으로 위상(phase)을 일치시켜 이후 처리를 진행하였다.

Fig.5, 6 은 두 종류의 AFM 팁이 HOPG 샘플 표면과 PDMS 표면 상을 비접촉/간헐접촉 진동시 팁 변위의 주파수 특성을 나타낸다. 기본적으로 해당 공진모드의 피크와 고차 조화성분이 잘 나타나는 것을 알 수 있다. 단지 샘플의 특성에 따라 피크의 크기에서 미소한 차이가 발생함을 알 수 있다.

4. 적합적고모드(POM) 추출

NCHR 과 OMCL 마이크로캔틸레버의 첫 번째 고유주파수로 가진하여 공기중에서 공진시켰을 때 측정된 AFM 마이크로캔틸레버 5 점에 대한 시간 신호를 이용하여 POM(Fig.7) 을 추출하였다. Fig. 7(a)를 살펴보면 POM 1 차 모드는 가진 모드와 아주 유사한 경향을 나타낸다. 즉 AFM 에서 캔틸레버 변위를 측정하는 레이저 기구의 특성에 의하여 실제 변위모드형상(적색선)이 아니고 기울기 각에 해당하는 각변위 모드형상(청색선)이 얻어짐을 알 수 있다. 그리고 가진 모드보다 고차모드에서는 추출된 POM 이 선형모드로부터 상당히 흐트러져 나타나고, 일정한 경향성이 없음을 볼 수 있다.

OMCL 마이크로캔틸레버를 1 차와 2 차 고유진동수로 가진한 경우 POM (Fig.8)을 구해보면, 가진 모드와 유사한 POM 1 차 모드(Fig.8(a))가 추출된다. 즉 1 차로 가진한 경우는 1 차 모드가 2 차로 가진한 경우는 2 차 모드가 가장 먼저 추출됨을 알 수 있다. 탭핑/간헐 접촉 모드에서의 POM 은 Fig.9 에 나타내었다. Fig.9 (a) 에서 볼 수 있듯이 탭핑이 일어나는 경우에도 첫 번째 POM 은 가진모드와 유사한 형태(청색선)가 추출되는 것을 확인할 수 있다. 가진모드를 제외한 고차모드에서는 일정한 경향을 나타내지는 않지만 탭핑시에는 유사한 POM

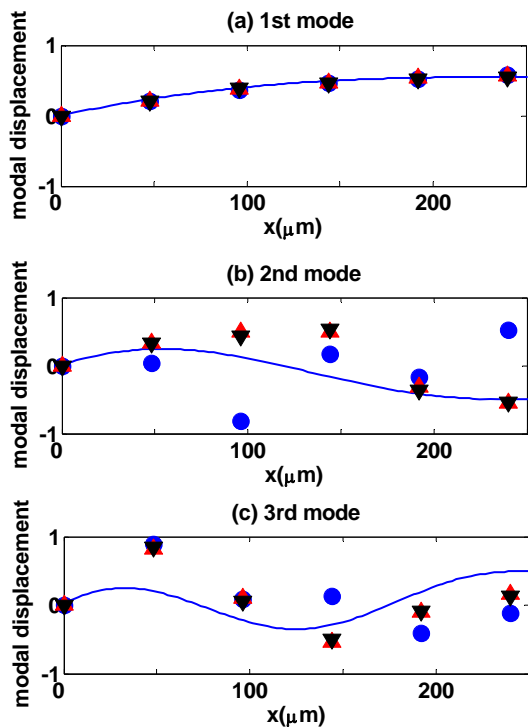


Fig. 9 The POMs at the 1st resonance (excitation at 70 kHz) of OMCL microcantilever with tapping on HOPG (red ▲) and PDMS (black ▼), and without tapping (blue ●).

Table 3 POVs with respect to the samples and the resonance.

Excitations and tapping surfaces		POV (%)			
		1 st	2 nd	3 rd	4 th
NCHR 1 st resonance	FREE	97.25	2.63	0.06	0.03
	HOPG	93.90	5.92	0.09	0.05
	PDMS	91.81	8.02	0.07	0.06
OMCL 1 st resonance	FREE	99.75	0.21	0.03	0.01
	HOPG	93.58	6.38	0.02	0.01
	PDMS	91.71	8.25	0.02	0.01
OMCL 2 nd resonance	FREE	91.56	8.27	0.09	0.06
	HOPG	85.62	14.11	0.19	0.05
	PDMS	84.07	15.75	0.07	0.06

이 추출됨을 볼 수 있다. Table3 은 해당 POM 의 POV 값을 나타내었는데 이로부터 추출된 POM 의 상대적인 모드에너지 분포를 파악할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 POM 추출과 POV 값을 통하여 AFM 마이크로캔틸레버 팁과 같은 미소구조물의 복잡한 비선형 진동 특성을 유한 개의 유효한 선형 직교모드로 추출하였고, 그 진동특성의 차이를 정량적으로 도시하였다. 그리고 동적모드 AFM 에

서 고차모드 효과는 일반적으로 예상보다 크지 않음을 알 수 있었으며, 이를 통하여 아주 특별한 경우를 제외하고는 1 차모드나 혹은 1,2 차 모드 근사를 통한 모델만으로도 충분히 해석 가능함을 예상할 수 있었다. 비접촉/간헐접촉 모드에서는 공진 모드에서보다 고차모드의 에너지 분포가 증가함을 확인할 수 있었다. 비접촉/간헐접촉에서 샘플의 특성에 따라서도 POV 값이 변화함을 알 수 있었다. 즉, 이러한 실험적 적합직교모드 추출을 통하여 복잡한 동적 응답을 나타내는 복잡한 구조물의 특성이더라도 효과적으로 모델링할 수 있는 가능성을 확인하였다고 할 수 있다. 향후 개별 모드의 정량적 비교와 함께 저차원(low dimension) 모델링을 통한 현상의 기본적인 이해를 도울 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Kerschen, G., Golinval, J. C., Vakakis, A. F., Bergman, L. A., 2005, "The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: an overview," *Nonlinear Dynamics*, Vol.41, pp. 147~169.
- (2) Kerschen, G., Golinval, J. C., 2002, "Physical interpretation of the proper orthogonal modes using the singular value decomposition," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.249, pp. 849~865.
- (3) Holmes, P., Lumley, J. L., Berkooz, G., 1996, "Turbulence, coherent structures, dynamical systems and symmetry," *Cambridge University Press*.
- (4) Azeez, M. F. A., Vakakis, A. F., 2001, "Proper orthogonal decomposition (POD) of a class of vibroimpact oscillations," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 240, pp. 859~889.
- (5) Moreno, D., Barrientos, B., Perez-Lopez, C., Mendoza Santoyo, F., 2005, "Modal vibration analysis of a metal plate by using a laser vibrometer and the POD method," *Journal of Optics A*, Vol. 7 pp.S356-S363.
- (6) Lin, W. Z., Lee, K. H., Lim, S. P., Liang, Y. C., 2003, "Proper orthogonal decomposition and component mode synthesis in macromodel generation for the dynamic simulation of a complex MEMS device," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, pp. 646~654.
- (7) Sone, H., Fujinuma, Y., Hieda, T., Hosaka, S., 2003, "Pico-gram mass deviation detected by resonance frequency shift of AFM cantilever," *SICE Annual Conference*, pp. 2121~2124.
- (8) Beaulieu, L. Y., Godin, M., Laroche, O., Tabard-Cossa, V., Grütter, P., 2007, "A complete analysis of the laser deflection systems used in cantilever-based systems," *Ultramicroscopy*, Vol. 107, pp. 422~430.