

AFM 마이크로캔틸레버의 다중모드 동역학 해석

Multi-Modal Dynamic Analysis of AFM Microcantilevers

김일광*·이수일†

Il Kwang Kim and Soo Il Lee

1. 서론

적합직교분해(POD: proper orthogonal decomposition) 방법을 이용하여 구조 진동 및 유동해석 등에서 비선형 및 다수의 모드가 중첩되어 발생하는 진동 특성을 주요한 몇 개의 적합직교모드(POM: proper orthogonal mode)로 추출하여 모델링할 수 있다[1]. 또한 이를 나노 구조체의 고차 진동해석에 적용할 수 있다[2,3]. 앞선 연구에서는 길이와 강성이 서로 다른 AFM 마이크로캔틸레버를 사용하여 공기 중에서 팁의 유/무와 탭핑의 유/무에 따른 캔틸레버의 다중모드를 해석한 바 있다[3]. 공기 중에서의 실험 결과, 캔틸레버의 강성이 낮을 수록 탭핑의 정도가 높아질 수록 고차 모드의 영향이 증가함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 스캔하는 시료 주위 환경이 마이크로캔틸레버의 진동 모드에 미치는 영향을 분석하기 위해 탄성 계수가 서로 다른 두 시료를 공기와 정제수 중의 서로 다른 두 환경 속에서 지난 연구와 동일한 실험을 진행하였다. 그 후, 실험 데이터를 POD 기법과 통계처리를 통하여 마이크로캔틸레버의 선형화된 POM 분포를 비교하였다.

2. AFM 실험

Park Systems 사의 XE-100 AFM System 을 이용하였으며, System controller 에서 추출한 실시간 진동 신호 취득은 NI 사의 2 채널 고속 데이터 획득장치(NI-5122)를 PC 에 장착하여 사용하였다. 길이와 강성이 서로 다른 3 종류의 마이크로캔틸레버를 공기 및 정제수 내에서 팁의 유/무와 HOPG(highly oriented pyrolytic graphite, Young's modulus: 200 Gpa)와 PDMS(polydimethylsiloxane, Young's modulus: 0.75 Gpa) 시료의 탭핑 유/무 및 그 세기에 따른 주요 모드를 추출하기 위하여 캔틸레버의 5 개의 측정점에서 응답신호를 취득하였다[1]. 실험에 이용한 AFM 마이크로캔틸레버와 시료의 제원은 Table 1 에 나타내었다.

† 교신저자; 서울시립대학교 기계정보공학과
E-mail : leesooil@uos.ac.kr
Tel : (02) 2210-5667, Fax : (02) 2210-5575
* 서울시립대학교 대학원 에너지환경시스템공학과

Table 1 Constants and properties of the microcantilevers

Micro cantilever	# of Cantilevers	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Stiffness (N/m)	Resonance Freq.(kHz)
P/TL-NCH	N=3	125	30	4	42	330
P/TL-NCL	N=5	225	38	7	48	190
P/TL-OMCL	N=4	240	50	2	1.8	70

여기서 P/TL 은 각각 마이크로캔틸레버에 팁이 있는 팁과 팁이 없는 팁리스를 의미한다. 마이크로캔틸레버 기저부에서 P/TL-NCH 와 NCL 은 1 차 공진주파수, P/TL-OMCL 은 1 차/ 2 차 공진주파수로 가진하였으며 공진 응답에서 5 점의 개별 진동 특성을 정상상태라고 가정하였다. 각 측정점에서 순차적으로 측정된 신호를 가진신호를 기준으로 응답신호의 위상(phase)을 정렬시킨 후 POD 를 진행하였다.

3. 적합직교분해법(POD) 결과

공기와 정제수 속에서 Table 1 에서와 같이 물성치가 서로 다른 3 종류의 팁/팁리스 마이크로캔틸레버를 각 측정점에서 시간 신호를 취득하였으며, 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위하여 각각 3 쌍 이상의 마이크로캔틸레버를 사용하였다. 이렇게 얻은 데이터를 개별적으로 4 구간으로 나누어 POD 기법을 통하여 평균화한 POM 과 POV(proper orthogonal value)를 추출하여 Table 3 과 4 에 나타내었다. 여기서 SP 는 탭핑 모드 AFM 의 set point 를 의미하며 숫자가 낮을 수록 탭핑의 세기는 증가한다.

POD 결과 POM 에서 POV 로 모드별 에너지 분포를 파악할 수 있다. 앞선 공기 중의 실험결과와 같이 정제수 속에서도 마이크로캔틸레버의 길이, 팁의 유/무와 탭핑의 유/무에 따른 POV 변화는 크지 않으며 대부분 저차 모드에 에너지가 집중되어 있음을 알 수 있다. 또한 탭핑의 세기가 증가할수록 고차모드의 영향이 증가함을 알 수 있다. 정제수 내에서 모드별 에너지 분포는 공기중의 실험 결과와 큰 차이가 없지만 5 개의 자유도로 측정된 신호를 식 (1) 과 같이 복원하여 마이크로캔틸레버의 응답을 비교

Table 3 Proper orthogonal values in air

Cantilever	Sample	Tapping	POV1 (%)	POV2 (%)
			Average	Average
TL-NCH	-	-	98.27	1.59
			98.21	1.64
P-NCH	HOPG	SP75	97.47	2.39
		SP45	94.79	5.04
	PDMS	SP75	97.91	1.95
		SP45	96.27	3.31
TL-NCL	-	-	97.73	2.22
			98.53	1.43
P-NCL	HOPG	SP75	97.62	2.35
		SP45	89.75	10.23
	PDMS	SP75	97.95	2.01
		SP45	98.00	1.99
TL-OMCL 1 st resonance	-	-	99.24	0.69
			98.76	1.19
P-OMCL 1 st resonance	HOPG	SP75	98.98	0.95
		SP45	90.72	9.05
	PDMS	SP75	96.94	2.99
		SP45	91.73	8.17
TL-OMCL 2 nd resonance	-	-	98.27	1.38
			98.35	1.21
P-OMCL 2 nd resonance	HOPG	SP75	97.95	1.59
		SP45	71.48	24.80
	PDMS	SP75	92.53	6.20
		SP45	90.98	6.34

Table 4 Proper orthogonal values in liquid

Cantilever	Sample	Tapping	POV1 (%)	POV2 (%)
			Average	Average
TL-NCH	-	-	99.57	0.50
			97.93	2.00
P-NCH	HOPG	SP75	99.07	0.87
		SP45	93.21	6.61
	PDMS	SP75	98.04	1.92
		SP45	89.51	10.35
TL-NCL	-	-	98.91	1.02
			99.70	0.27
P-NCL	HOPG	SP75	98.98	0.59
		SP45	98.45	1.25
	PDMS	SP75	99.58	0.36
		SP45	97.37	2.50
TL-OMCL 1 st resonance	-	-	99.88	0.06
			99.91	0.07
P-OMCL 1 st resonance	HOPG	SP75	99.06	0.69
		SP45	92.79	6.64
	PDMS	SP75	99.57	0.30
		SP45	99.01	0.72
TL-OMCL 2 nd resonance	-	-	99.26	0.69
			96.08	3.83
P-OMCL 2 nd resonance	HOPG	SP75	97.85	1.89
		SP45	93.54	4.63
	PDMS	SP75	98.19	1.68
		SP45	97.07	2.61

하면 공기 중 일 때 보다 고차 모드의 영향이 증가한 것을 Fig. 1 과 같이 알 수 있다. 식 (1) 에서 α_i 는 POV, $\phi_i(x_j)$ 는 POM 과 $u_i(t)$ 특이값분해(SVD: singular value decomposition)로부터 구한 적합적교좌표(POC: proper orthogonal decomposition)를 의미하며 i 는 POM 의 수, j 는 측정점의 수이며 각각 5 이다. Fig 1 과 같이, 정제수 속에서의 마이크로캔틸레버의 팁 쪽에서 고차 모드 영향에 의한 위상변화가 큰 것을 알 수 있다.

$$q(x,t) \approx \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_i \phi_i(x_j) u_i(t) \quad (1)$$

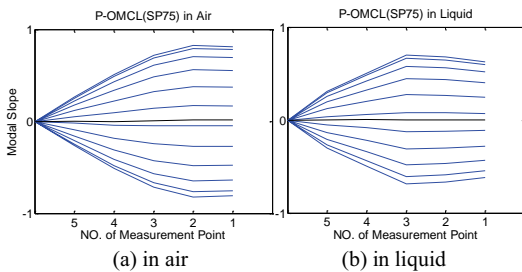


Fig. 1 The 1st bending mode of P-OMCL actuated by 1st resonance excitation from reconstructed data using Eq. (1)

4. 결론

액체 속에서 마이크로캔틸레버의 길이와 강성에 따른 POV 변화 정도는 공기 중의 실험결과와 같이 작았으나 탭핑 시 고차 모드의 영향이 증가함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2012 년도 연구재단 기본연구지원사업 (과제번호 2012-0002982)의 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

- (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, J. W. and Lee, S. I., 2011, Modal Characteristics of Microcantilevers in Tapping Mode AFM: Complex Mode Extraction Using an Approximate Beam Model, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Spring Conference, pp. 44~45.
- (3) Kim, I. K., Han, D. H, Lee, J. W. and Lee, S. I., 2012, Classification of Empirical Orthogonal Mode in Multi-Modal AFM Microcantilevers, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Spring Conference, pp. 167~168.