

# 마이크로기계 공진 센서의 유체-구조물 상호 작용 해석 Fluid-structure interaction analysis of micromechanical resonance sensor

강인구\*·신윤희\*·임홍재\*\*·임시형†

Ingoo Kang, Yoonhyuk Shin, Hong Jae Yim, Si-Hyung Lim

Key Words : MEMS(멤스), Micromechanical resonance sensor(마이크로기계 공진 센서), FSI(유체-구조물 상호 작용), Modal analysis (모달해석)

## ABSTRACT

A micromechanical resonance sensor detects the resonance frequency shift due to mass or adsorption induced surface stress change during molecular adsorption or interaction on its surface. The resonance sensor is surrounded by gas or liquid solution during operation. To study the resonance shift phenomena depending on its surrounding environment, fluid-structure interaction of the resonance sensor has been analyzed for the different fluid environment and boundary conditions using finite element analysis.

### 기 호 설 명

- $t_s$  = SiNx 의 두께
- $t_a$  = Au 의 두께
- $L_1$  = 마이크로 공진 센서의 길이
- $w_1$  = 마이크로 공진 센서의 폭
- $L_2$  = 유체 영역의 길이
- $w_2$  = 유체 영역의 폭
- $h$  = 유체 영역의 높이
- $E$  = 영의 계수(Young's modulus)
- $\nu$  = 포아송 비(Poisson's ratio)
- $\rho$  = 밀도
- $\kappa$  = 체적 탄성 계수(Bulk modulus)

## 1. 서 론

현재 MEMS(Micro Electro-Mechanical System) 기술을 기반으로 하는 초소형 구조물을 이용한 바이오-화학 센서는 높은 응답성과 소형화, 대량생산에 용이하다는 장점이

있어 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 초소형 구조물의 공진점 변화를 통하여 바이오-케미컬 물질을 감지하는 마이크로 공진센서의 개발이 활발히 이루어지고 있다.[1-8] 마이크로 공진센서는 초소형 구조물 표면에 바이오-케미컬 분자들이 흡착되거나 분자 간 상호작용을 할 때 일어나는 공진 주파수의 변화를 이용하여 분자 인식을 한다. 하지만, 마이크로기계 공진 센서의 연구 중에서 유체의 종류 및 온도, 습도 등 센서 주변 환경에 대한 해석은 상대적으로 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 마이크로기계 공진 센서의 유체-구조물 상호작용 해석을 수행하여, 한쪽이 고정된 마이크로 캔틸레버 구조물과 양쪽이 고정된 마이크로 브리지 구조물로 작동되는 마이크로 공진센서의 주변 환경 변화에 대한 공진 특성을 연구하였다. 초소형 구조물의 주변 유체 영역 변화에 따른 Fluid-structure Interaction 해석을 하게 되면, 실험 상황과 유사하게 공진 주파수 특성을 분석할 수 있다. 본 연구에서는 1) 진공, 공기, 수중에서와 2) 온, 습도 변화를 가지는 공기 중에서의 유체-구조물 상호작용을 상용 유한요소 프로그램인 ADINA를 이용하여 분석하였다.

## 2. 유체 영역 특성에 따른 공진 주파수 해석

### 2.1 모델링

경계조건 변화에 따른 Modal 해석을 위하여 Figure 1 과 같이 한쪽을 고정된 마이크로 캔틸레버와 양쪽끝단을 고정된 마이크로 브리지를 해석 대상으로 하며, 유체 영역 내의 해석을 수행하기 위하여 Figure 2 와 같이 유체 영역

† 교신저자; 국민대학교 기계·자동차공학부  
E-mail : shlim@kookmin.ac.kr  
Tel:(02)910-4672 Fax:(02)910-4839

\* 국민대학교 기계설계대학원

\*\* 국민대학교 기계·자동차공학부

을 모델링하였다.

## 2.2 물성치

해석에 사용된 마이크로 캔틸레버와 마이크로 브리지는  $50 \mu\text{m}(w_1) \times 150 \mu\text{m}(L_2) \times 2 \mu\text{m}(t_s)$  크기의  $\text{SiN}_x$  표면 위에  $50 \text{ nm}(t_a)$ 의 두께로 Au가 코팅되었다. 유체 영역은  $170 \mu\text{m}(w_2) \times 180 \mu\text{m}(L_2) \times 140 \mu\text{m}(h)$ 이며 각각의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

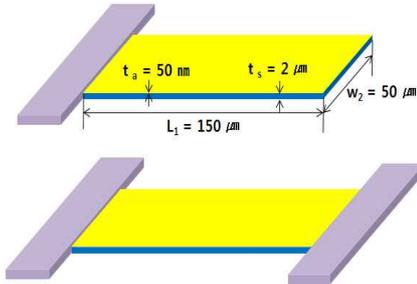


Fig. 1 Schematic diagram of a microcantilever and a microbridge

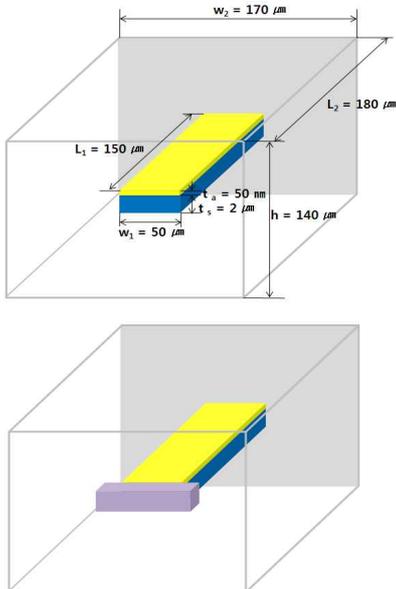


Fig. 2 Schematic diagram of a microcantilever and a microbridge in fluid environment

Table 1 Material and environment media properties

	SiNx	Au	Air	Water
E (GPa)	100	73	N/A	N/A
$\nu$	0.273	0.35	N/A	N/A
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,400	19,300	1.23	999
$\kappa$ (Pa)	N/A	N/A	$1.01 \times 10^5$ (Isothermal process)	$2.15 \times 10^9$

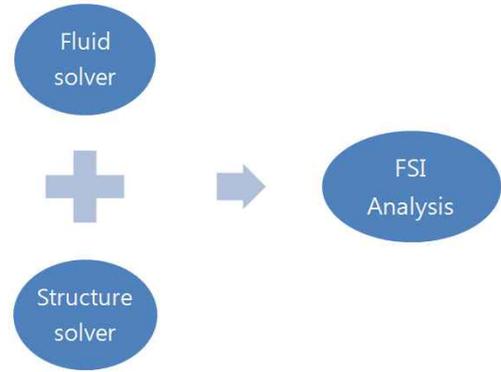


Fig. 3 FSI Analysis

## 2.3 이론적 배경

FSI(Fluid-Structure interaction)는 유체유동과 구조물의 변형이 상호 연계되어 나타나는 물리적인 현상을 말한다. 최근에 CAE(Computer Aided Engineering)는 구조, 유체 등으로 국한된 해석에서 벗어나 다중 물리(Multiphysics) 개념의 해석이 이루어지고 있다. 이러한 해석은 유체와 구조의 상호작용에 대한 이해와 실험을 통해 얻기 어려운 시각적, 물리적 해석 결과를 확인하는데 도움을 준다.[11]

본 연구에서는, FSI 해석 방법 중 하나인 잠재 기반 공식(Potential-based formulation)을 이용하여 Modal 해석을 수행하였다. 일반적인 FSI 해석은 구조해석과 유체해석을 각각 수행한 후, 두 해석을 연동하여 해석하지만 잠재 기반 공식은 구조해석에서 유체효과를 고려하여 동시에 해석할 수 있다. 잠재 기반 공식은 음속이하속도의 유체흐름이나 유체흐름이 없을 때, 비점성이며 열전달이 없고 유체 경계가 상대적으로 작은 변위를 가질 때 이용한다. 또한 구조물과 유체 매개물의 주파수 응답 특성 분석에 이용된다. 따라서 유체 주변 환경이 공진 주파수 변화 특성에 미치는 영향을 연구하는 본 논문에 적합한 해석방법이다.[9]

## 3. 유체 영역 특성에 따른 공진 주파수 해석

### 3.1 마이크로 캔틸레버 해석 결과

상용 유한요소해석 프로그램 ADINA를 이용하여 마이크로 캔틸레버의 Modal 해석을 수행하였다. 각각 다른 유체 환경에서의 1 차, 2 차 및 3 차 공진 주파수를 Figure 6 에 나타내었다. 마이크로 캔틸레버 표면에 바이오-케미컬 분자가 흡착되지 않은 상태이며 1 차 공진주파수는 진공에서 88.5 kHz, 공기에서 88.2 kHz, 수중에서 35.8 kHz로 나타났으며 각각의 1차 모드 형상은 Figure 4 에 나타내었다. 본 연구의 해석 대상인  $50 \mu\text{m}(w_1) \times 150 \mu\text{m}(L_2) \times 2 \mu\text{m}(t_s)$  크기의 마이크로 캔틸레버는 진공, 공기, 수중에서의 순서로 유체 영역 변화에 따라 1차 공진주파수가 감소하였다. 이는 유체 환경의 밀도가 증가함으로써, 공진

주파수가 줄어들음을 알 수 있다.

### 3.2 마이크로 브리지 해석 결과

3.1절과 동일한 조건에서 경계조건 변화에 따른 마이크로 브리지의 Modal 해석을 수행하였다. 각각 다른 유체 환경에서 1차, 2차 및 3차 공진 주파수를 Figure 7에 나타냈으며 각각의 1차 모드 형상을 Figure 5에 나타내었다. 1차 공진 주파수는 진공, 공기, 수중에서 각각 567.8 kHz, 266.4 kHz, 211.9 kHz로 감소하였다. 진공과 공기에서의 1차 공진 주파수는 마이크로 캔틸레버에서 0.3 kHz 차이가 나며 마이크로 브리지에서는 301.4 kHz 차이가 난다. 따라서, 마이크로 브리지의 변화폭이 약 1000 배 크다. 또한 공기와 수중에서는 마이크로 캔틸레버는 52.4 kHz, 마이크로 브리지는 54.5 kHz 차이가 난다. 이것을 비교해볼 때 마이크로 브리지가 유체 환경 변화에 더 민감하게 반응하는 것으로 확인하였다.

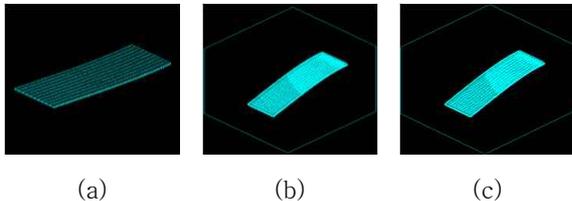


Fig. 4 Mode shape of 1st resonance frequency of a microcantilever. (a) vacuum environment, (b) air environment, (c) water environment.

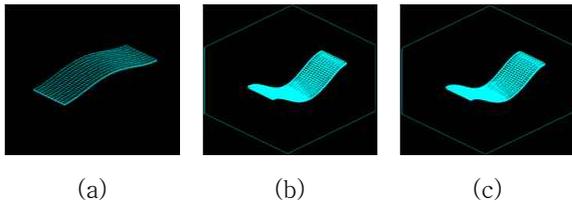


Fig. 5 Mode shape of 1st resonance frequency of a microbridge (a) vacuum environment, (b) air environment, (c) water environment.

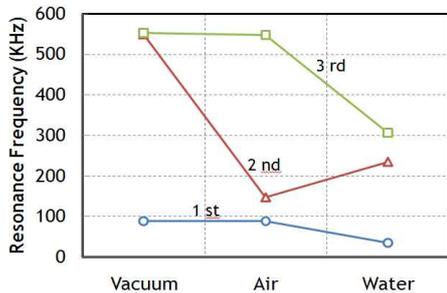


Fig. 6 Resonance frequencies of a microcantilever in different fluid environment conditions.

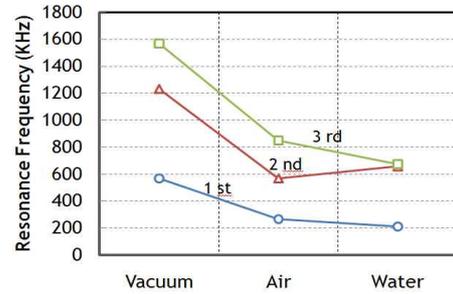


Fig. 7 Resonance frequencies of a microbridge in different fluid environment conditions.

### 3.3 온도에 따른 해석 결과

온도 및 습도 변화에 따른 마이크로 구조물의 Modal 해석을 수행하였다. 먼저, 공기 중에서 온도에 따른 공진 주파수를 비교하기 위한 해석을 수행하였다. 공기 중의 압력은 1 atm(=760 mmHg)이며 상대습도는 0%로 설정하고 밀도는 습·공기 선도[10]를 이용하여 계산하였다. 체적 탄성 계수  $k$  (Bulk modulus)는 공기 중 등온과정에서의 값인  $1.01 \times 10^5$  값을 입력하였다. 온도는  $-10^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  일 때 5 가지 경우에서 해석을 하였다. 밀도 값은 Table 2에 나타내었다. Figure 8에 나타난 것처럼 마이크로 캔틸레버는 온도가  $10^\circ\text{C}$  씩 증가함에 따라 각 온도별 1차 공진 주파수가 0.009 ~ 0.011 kHz로 선형적으로 변화됨을 확인하였다. 또한 마이크로 브리지는 온도가  $10^\circ\text{C}$  씩 증가함에 따라 각 온도별 1차 공진 주파수가 4.6 ~ 4.8 kHz로 선형적으로 변화됨을 Figure 9를 통하여 확인하였다. 이러한 결과 값은 온도가 상승함에 따라 유체의 밀도가 감소하여 공진 주파수가 상승하였음을 알 수 있다.

### 3.4 습도에 따른 해석 결과

3.3 절에 이어 습도에 따른 마이크로 구조물의 해석을 수행하였다. 앞 절에서와 같이 습·공기 선도를 이용하여 공기 중의 압력은 1 atm(=760mmHg), 온도는  $15^\circ\text{C}$  일 때 각각의 상대 습도에서 밀도를 계산하였다. 체적 탄성 계수는 3.3 절과 같은 값이며 상대 습도 0%, 20%, 40%, 60%, 80%에서 각각의 밀도를 Table 3에 나타내었다. Figure 10에 나타난 것처럼 상대 습도가 0 ~ 80%로 변화함에 따라 마이크로 캔틸레버의 1차 공진 주파수는 0.9 ~ 1 Hz로 증가함을 확인하였다. 또한, Figure 11과 같이 마이크로 브리지의 공진 주파수가 450 ~ 460 Hz 변화됨을 확인하였다. 이러한 결과 값은 습도 상승에 따른 유체 밀도 감소로 인하여 공진 주파수가 상승하였음을 알 수 있다.

Table 2 Density values for the different temperature values

Temperature(°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
-10	1.341457
0	1.292646
10	1.246705
20	1.204177
40	1.164455

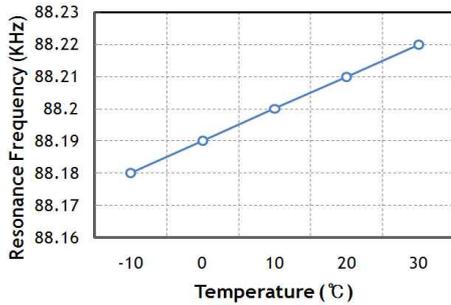


Fig. 8 Resonance frequencies of a microcantilever for temperature changes

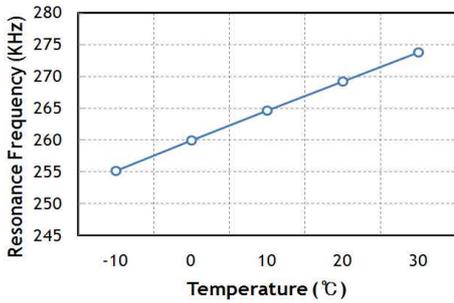


Fig. 9 Resonance frequencies of a microbridge for temperature changes

#### 4. 결 론

본 논문에서는, 유체 환경 변화에 따른 초소형 구조물의 공진 주파수 해석을 수행하였다. 진공, 공기, 수중에서의 초소형 구조물의 공진 주파수를 비교하였으며, 공기 내에서의 온도, 습도 변화에 따른 공진 주파수 변화를 비교하였다. 또한, 경계 조건 변화에 대한 영향을 분석하기 위하여 한쪽 끝단을 고정된 마이크로 캔틸레버와 양쪽 끝단을 고정된 마이크로 브리지에 대하여 비교하였다.

유체 환경 변화에 따라 마이크로 캔틸레버, 마이크로 브리지 모두 진공, 공기, 수중의 순서대로 공진 주파수가 감소하였다. 이것으로 유체의 밀도가 증가함에 따라 공진 주파수가 감소함을 확인하였다. 또한 유체 환경의 온도 및 습도 증가는 밀도 감소를 가져옴으로써 공진 주파수가 증가하는 결과를 보였다. 경계 조건 변화에 대한 분석에서는 마이크로 브리지가 마이크로 캔틸레버보다 유체 환경 영향에 민

Table 3 Density values for the different relative humidity values

Relative humidity (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0	1.225072
20	1.220948
40	1.216824
60	1.2127
80	1.208576

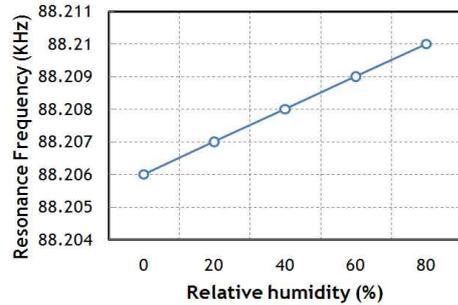


Fig. 10 Resonance frequencies of a microcantilever for relative humidity changes

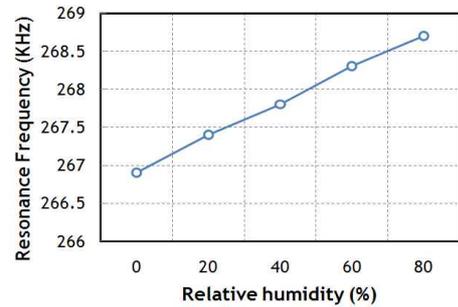


Fig. 11 Resonance frequencies of a microbridge for relative humidity changes

감하였다. 진공에서 공기로 변화 시 마이크로 브리지가 마이크로 캔틸레버보다 1000 배 큰 변화폭을 가졌으며, 공기에서 물로 변화 시 마이크로 브리지가 변화폭이 1.04 배 컸다. 또한 온도, 습도 상승 시 마이크로 브리지가 각각 470 배, 479 배 큰 변화폭을 가지므로 마이크로 브리지가 마이크로 캔틸레버보다 민감함을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 민군겸용기술 사업 및 서울시 산학연 협력사업(과제번호 10583)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Yeo, M. K., Shin, Y. H., Yim, H. J., Lim, S. H., 2008, "Analysis of Resonance Based Micromechanical

Bio-Chemical Sensing Structure", Proceedings of KSME Conference, pp.1767 ~ 1772.

(2) Sader, J. E., 2009, "Dynamics of Cantilever Sensors in Fluid Environments" International Workshop on Nanomechanical Cantilever Sensors. Session VII, L.7.1

(3) Hossain, M. S., Packirisamy, M., Rakheja, S., 2009, "Microfluid-Microstructure Interaction Study under Closed Microfluidic Environment" International Workshop on Nanomechanical Cantilever Sensors, Session VII, L.7.2

(4) Zhang, G., Chu. V., 2007, "Electrostatically actuated conducting polymer microbridges", Journal of applied physics 101, 064507

(5) Lavrik, N. V., Sepaniak, M. J., Datskos, P. G., 2004, "Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors", Review of scientific instruments, Vol. 75, pp. 2229 ~ 2253

(6) Lim. S. H. "Shawn", Raorane. D., Satyanarayana, S., Majumdar, A., 2006, "Nano-chemo-mechanical sensor array platform for high-throughput chemical analysis", Sensors and actuators b, pp 466 ~ 474

(7) Zhou, J., Li, P., Zhang, S., Huang, Y., Yang, P., Bao, M., Ruan, G., 2003, "Self-excited piezoelectric microcantilever for gas detection", Microelectronic engineering, pp. 37 ~ 46

(8) Calleja, M., Nordström, M., Álvarez, M., Tamayo, J., Lechuga, L. M., Boisen, A., 2005, "Highly sensitive polymer-based cantilever-sensor for DNA detection", Ultramicroscopy, pp. 215 ~ 222

(9) Sussman, T., Sundqvist, J., 2003, "Fluid-structure interaction analysis with a subsonic potential-based fluid formulation", Computers & structure 81, pp. 949 ~ 962.

(10) Wylen, V., Borgnakke, Sonntag, 2005, "Fundamentals of thermodynamics", Scitech, pp. 710

(11) [www.ablemax.co.kr](http://www.ablemax.co.kr)