

정전기력으로 구동되는 마이크로 캔틸레버 질량 센서의 제작과 특성

이정철* · 최범규

Fabrication and Characterization of Electrostatically Actuated Microcantilever Mass Sensors

Jungchul Lee*, and Bumkyoo Choi

Abstract

Microcantilevers have been actively used in probe-based microscopy and gravimetric sensing for biological or chemical analytes. To integrate actuation or detection schemes in the structure, typical fabrication processes include several photolithographic steps along with conventional MEMS fabrication. In this paper, a simple and straightforward way to fabricate and operate silicon microcantilever mass sensors is presented. The fabricated microcantilever sensors which can be electrostatically actuated require only two photolithographic steps. Resonant characteristics of fabricated microcantilevers are measured with a custom optical-lever and results show size-dependent quality factors. Using a 40 μm long, 7 μm wide, and 3 μm thick cantilever, we achieved sub-femtogram mass resolution in a 1 Hz bandwidth.

Keywords : MEMS, Microcantilever, Electrostatic Actuation, Optical-Lever

1. 서 론

마이크로 캔틸레버 구조는 나노스케일 곡률 반경을 갖는 탐침을 이용하여 임의의 표면의 국소 높낮이를 측정하는 원자력 현미경(atomic force microscopy)이나 바이오 또는 케미컬 물질의 표면 접촉/흡착 시 고유진동수의 변화를 이용하여 질량을 측정하는 센서에 주로 사용되고 있다[1-4]. 최근 이러한 마이크로 캔틸레버 센서의 구동과 측정을 용이하게 하기 위해 캔틸레버 구조물 내에 구동 액츄에이터나 변위 측정 센서를 내장시키는 연구가 활발히 진행되고 있다[5,6]. 액츄에이터나 센서를 내장한 마이크로 캔틸레버는 전체 측정 시스템을 소형 및 경량화시킬 수 있어 휴대용 또는 각종 자원이 제한된 환경에서 사용될 수 있는 장점이 있는 반면에 그 제작이 복잡해지는 단점이 있다. 마이크로 캔틸레버는 주로 전통적인 멤스 공정을 이용하여 제작되는데, 액츄에이터나 센서를 내장한 캔틸레버의 경우 여러 번의 노광 공정을 포함하는 경우가 일반적이다.

본 논문에서는 단 두 번의 노광 공정을 이용하여 정전기력으로 구동되는 마이크로 캔틸레버 센서의 간단한 제작 방법을 고안하였다.

서강대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Sogang University)

*Corresponding author: jayclee@sogang.ac.kr

(Received : Nov. 17, 2010, Revised : Dec. 10, 2010,

Accepted : Dec. 15, 2010)

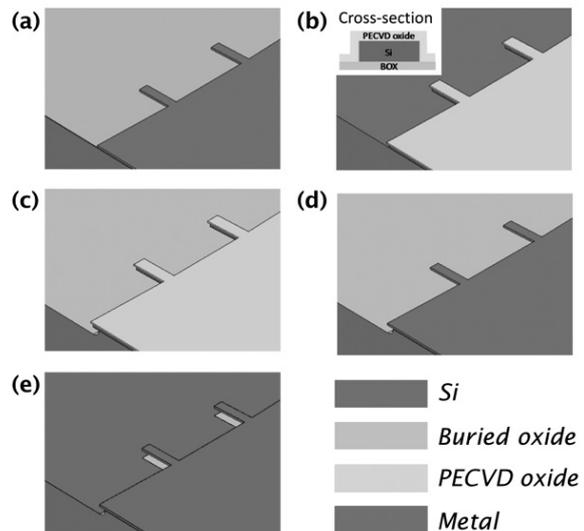


Fig. 1. Fabrication processes. (a) use inductively coupled plasma-deep reactive ion etching (ICP-DRIE) to define the cantilever structure, (b) deposit plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) oxide and pattern the PECVD oxide and buried oxide (Inset: cross sectional view after oxide patterning), (c) use XeF_2 isotropic etching to release the cantilever, (d) use HF vapor to remove the PECVD and buried oxide, (e) deposit metal using E-beam evaporator.

제작된 다양한 크기의 마이크로 캔틸레버 센서들을 정전기력을 인가하여 구동하고 외부의 다이오드 레이저 광원과 광 다이오드를 이용하여 동적 변위를 측정하는 시스템을 구축하였다. 공진 주파수 근방에서 구동 주파수를 선형적으로 변화시켜 가면서 (open loop 구동) 각 마이크로 캔틸레버의 동적 특성을 파악하였고, 광학적으로 측정된 동적 변위를 다시 구동부로 되먹임하여 캔틸레버를 항상 공진주파수에서 작동시켜(closed loop 구동) 측정 주파수의 잡음 성분을 실시간으로 측정하였다.

2. 실험 방법

2.1 마이크로 캔틸레버의 제작

본 연구에서는 6인치 silicon on insulator(SOI) 웨이퍼를 시작 재료로 사용하였다. 사용된 웨이퍼는 $3\ \mu\text{m}$ 의 실리콘 디바이스 층, $1\ \mu\text{m}$ 의 실리콘 옥사이드층, 그리고 $600\ \mu\text{m}$ 의 실리콘 핸들 층으로 이루어져 있다. 이 SOI 웨이퍼 위에 첫번째 노광 공정을 통하여 포토리지스트를 패터닝하고 inductively coupled plasma-deep reactive ion etching(ICP-DRIE)을 이용하여 실리콘 디바이스 층을 식각하여 캔틸레버 형상을 구현한다 (Fig. 1a). 다양한 크기의 캔틸레버가 동시에 병렬 제작되는데 그 길이는 $20 \sim 200\ \mu\text{m}$, 폭은 $5 \sim 20\ \mu\text{m}$ 의 값을 가지고 두께는 실리콘 디바이스층의 값($3\ \mu\text{m}$)으로 일정하다. 그 다음 $0.5\ \mu\text{m}$ 의 plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD) 옥사이드를 증착한 후 두 번째 노광 공정을 통하여 포토리지스트를 패터닝하고 증착된 PECVD 옥사이드 박막과 SOI 웨이퍼의 디바이스 층 밑의 옥사이드 층(buried oxide)을 동시에 식각한다(Fig. 1b). 그 다음, XeF_2 etcher를 이용하여 캔틸레버 구조 주위의 실리콘을 $\sim 30\ \mu\text{m}$ 정도 등방성으로 식각하여 캔틸레버를 주변으로부터 분리해낸 후(Fig. 1c) hydrofluoric acid(HF) vapor를 이용하여 캔틸레버를 둘러 쌓고 있던 옥사이드를 제거한다(Fig. 1d). 마지막으로 E-beam evaporator를 이용하여 $0.1\ \mu\text{m}$ 의 알루미늄을 전체 웨이퍼에 균일하게 증착한다(Fig. 1e). 캔틸레버 주변의 실리콘을 등방성으로 식각할 때 생긴 언더컷과 E-beam evaporator의 수직 증착 특성으로 인해 캔틸레버와 캔틸레버 뒤쪽의 평면에 증착된 금속 박막이 자연적으로 분리된다. 캔틸레버를 접지 시키고 캔틸레버 뒤쪽의 평면에 직류와 교류가 혼합된 구동 신호를 입력하여 정전기력을 발생시켜 교류 신호의 주파수에서 캔틸레버를 구동시킬 수 있다. Fig. 2는 제작된 마이크로 캔틸레버들 중 길이가 $40\ \mu\text{m}$, 폭이 $7\ \mu\text{m}$, 그리고 두께가 $3\ \mu\text{m}$ 인 캔틸레버의 전자 현미경 사진이다.

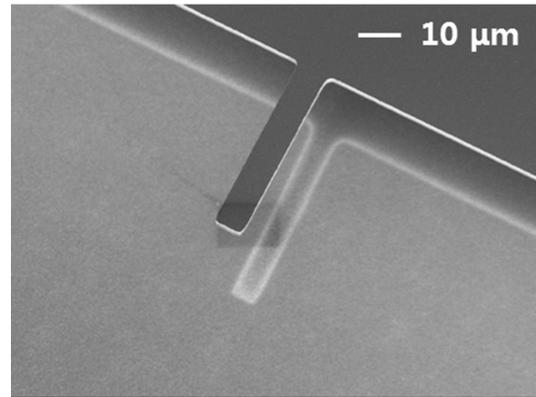


Fig. 2. Scanning electron micrograph of a fabricated microcantilever which is $40\ \mu\text{m}$ long, $7\ \mu\text{m}$ wide, and $3\ \mu\text{m}$ thick.

2.2 캔틸레버 변위 측정/구동 장치

제작된 캔틸레버의 동적 변위 측정을 위해 다이오드 레이저 광원과 광 다이오드로 구성된 광학시스템을 구축하였다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 광학시스템으로 원자력 현미경 또는 캔틸레버 센서 등에 주로 사용되는 optical-lever의 일종이다. 이에 다이오드 레이저는 파장이 $635\ \text{nm}$, 빔의 웨이스트가 $1\ \text{mm}$, 그리고 출력이 $5\ \text{mW}$ 의 특성을 가지고 있다. 다이오드 레이저의 출력이 5배의 빔 익스펜더를 통하여 $5\ \text{mm}$ 로 확대되고, 폴라라이징 빔 스플리터와 1/4 웨이브 플레이트를 통과한 후 $10\times$ 의 현미경 집안렌즈 (NA=0.3, WD=17.5 mm)로 포커싱되어 캔틸레버에 입사된다.

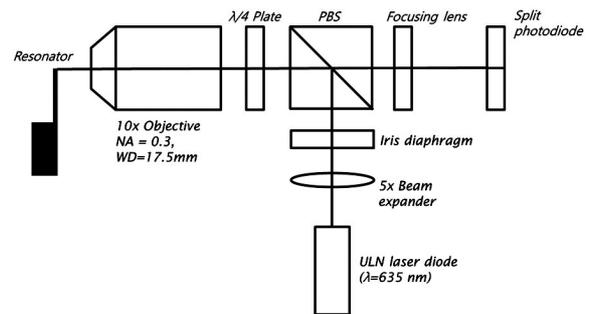


Fig. 3. Schematic of an optical-lever detection setup to ensure a focal spot smaller than the width of fabricated microcantilevers. The collimated beam is expanded with $5\times$ beam expander, sent through a polarizing beamsplitter and a quarter waveplate, and focused on the cantilever. The reflection travels back and is directed onto a segmented photodiode via a quarter wave plate.

이 광학 실험 장치는 최종 포커싱된 빔의 직경이 가장 작은 캔틸레버의 폭 보다 작게 되도록 한다($\sim 5\ \mu\text{m}$). 캔틸레버로부터 반사된 빛은 다시 같은 현미경 집안렌즈와 1/4 웨이브 플레이트를 지난 후 실린더형의 포커싱 렌즈를 거쳐 광 다이오드에

입사된다.

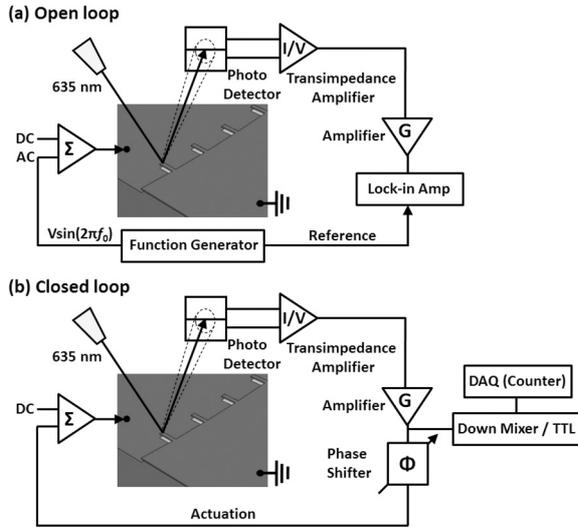


Fig. 4. Schematic diagrams for (a) open and (b) closed loop operations. In open loop operations, the drive frequency is swept near the cantilever resonance frequency and the vibration amplitude and phase are measured with a lock-in amplifier. In closed loop operations, the amplitude measured is 180° phase shifted and fed back to the drive electrode.

Fig. 4는 제작된 마이크로 캔틸레버의 구동을 위한 실험 장치의 개략도이다. Open loop의 경우, 파형 발생기로부터 생성된 교류 전압($V_{ac}\sin(2\pi f)$)과 직류 전압으로부터 출력된 직류 전압(V_{dc})를 혼합하여 캔틸레버 뒤 쪽의 구동 전극에 공급하고 캔틸레버는 접지시킨다. 이 때, 다음의 정전기력(F_{ES})이 캔틸레버에 인가된다.

$$F_{ES} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} (V_{dc} + V_{ac} \sin(2\pi f))^2 \quad (1)$$

여기서, C와 z는 각각 캔틸레버와 구동 전극 사이의 정전 용량과 거리이다.

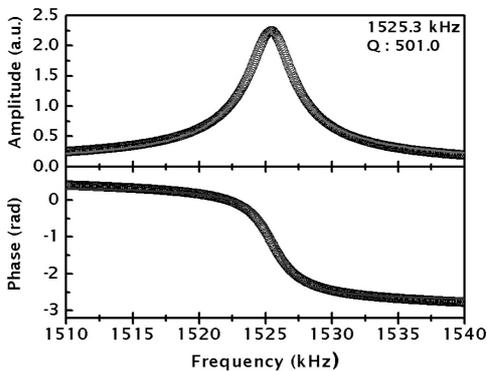


Fig. 5. Resonant characteristics(amplitude and phase) of a fabricated microcantilever which is 40 μm long, 7 μm wide, and 3 μm thick. A simple harmonic oscillator model(solid red and blue lines) is used to extract the resonance frequency of ~1.52 MHz and the quality factor of ~500.

정해진 진폭을 가지는 구형파의 주파수를 측정하고자 하는 캔틸레버의 예측 공진주파수 근처에서 선형적으로 변화시켜 가

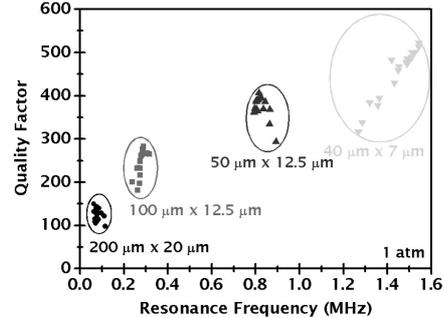


Fig. 6. Extracted resonance frequencies and quality factors for 71 microcantilevers. There are four different types; 200 μm long and 20 μm wide, 100 μm long and 12.5 μm wide, 50 μm long and 12.5 μm wide, and 40 μm long and 7 μm wide. All types have a same thickness of 3 μm. The quality factor generally increases with decreasing cantilever dimension.

며 광 다이오드의 출력을 트랜스임피던스 앰프와 op-amp를 거쳐 최종적으로 lock-in amplifier를 이용하여 진폭과 위상을 측정한다. Closed loop 의 경우는 파형 발생기 대신 캔틸레버의 진동에 의해 발생하는 광 다이오드의 교류 전압 출력을 트랜스 임피던스 앰프와 op-amp를 이용해 증폭하고 phase shifter를 이용해 동적 변위의 위상을 180° 변화 시킨 후 직류 전압과 혼합 하여 구동 전극에 공급한다. 이 되먹임 루프를 이용하면 각 캔틸레버가 항상 고유 진동수에서 구동될 수 있게 된다. 캔틸레버의 변위 신호와 파형 발생기의 기준 구형파를 heterodyne mix-down 하여 샘플링 주파수를 1~2 kHz로 낮추어 이를 다시 TTL 레벨로 변환시킨 후 주파수 카운터를 이용하여 mix-down 된 신호의 주파수를 측정한다. 캔틸레버의 고유 진동수의 시간에 따른 변화는 mix-down된 신호 주파수의 시간에 따른 변화를 기준 구형파의 주파수만큼 평행 이동하여 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Open loop 구동

앞 절에서 설명한 open loop 구동 장치를 이용하여 각 캔틸레버의 공진 특성을 측정하였다. Fig. 5는 길이가 40 μm, 폭이 7 μm, 그리고 두께가 3 μm인 한 캔틸레버의 측정된 진폭과 위상을 보여준다. 측정된 동적 변위 (y)를 simple harmonic

$$y = A_0 + \frac{A_1}{\sqrt{(1 - (x/f)^2)^2 + (x/(fQ))^2}} \quad (2)$$

oscillator(SHO) 모델(7)(식 (2))로 곡선 맞춤하면 공진주파수와 quality factor를 구할 수 있다.

여기서 y 는 동적 변위, x 는 주파수, A_0 와 A_1 은 상수, f_n 는 공진 주파수, 그리고 Q 는 quality factor이다. 실험에 사용된 캔틸레버는 약 1.52 MHz의 공진 주파수와 약 500의 quality factor를 가짐을 알 수 있었다. 캔틸레버의 크기에 따른 quality factor의 변화를 알아보기 위해 다양한 크기의 캔틸레버를 측정하였다. Fig. 6은 대기압 조건에서 측정된 71개 캔틸레버들의 공진 주파수와 quality factor를 보여준다. 측정된 캔틸레버들은 네 개의 다른 크기 그룹으로 나뉘어지는데, 이들은 길이×폭이 각각 $200\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m} \times 12.5\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m} \times 12.5\ \mu\text{m}$ 그리고 $40\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$ 이고 두께는 모두 $3\ \mu\text{m}$ 으로 동일하다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 캔틸레버의 사이즈가 작아짐에 따라 quality factor가 증가하였다. 이는 제작된 캔틸레버의 크기 범위에서는 주변의 공기 damping이 주요한 에너지 손실 원인이기 때문이다. 측정된 공진주파수와 quality factor는 각각 3.5 ~ 16.3 % 와 7.6 ~ 13.7 % 의 정규화된 편차(표준편차/평균)를 보였다. 편차의 주된 원인으로는 초기 SOI 웨이퍼의 불균일한 두께 또는 불균일한 식각공정을 꼽을 수 있다.

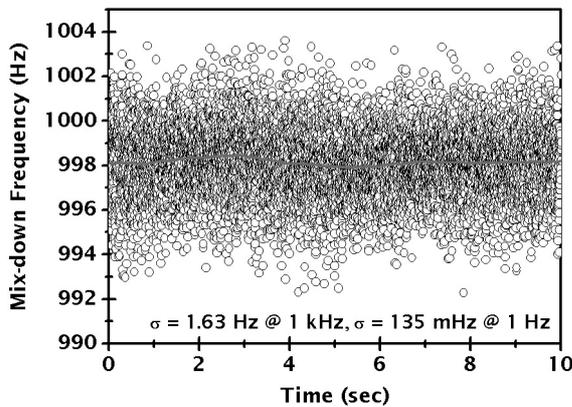


Fig. 7. Resonance frequency vs. time measured for 10 seconds. The standard deviation of the raw data(dots) recorded at a sampling rate of 1 kHz is 1.63 Hz and the standard deviation of the filtered data(red line) is 135 mHz.

공진주파수의 경우는 $50\ \mu\text{m} \times 12.5\ \mu\text{m}$ 의 캔틸레버가 최소의 편차를 그리고 $200\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 의 캔틸레버가 최대의 편차를 나타내었다. Quality factor의 경우는 $50\ \mu\text{m} \times 12.5\ \mu\text{m}$ 의 캔틸레버가 최소의 편차를 그리고 $40\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$ 의 캔틸레버가 최대의 편차를 나타내었다. 정규화된 편차의 캔틸레버의 크기에 대한 상관관계는 없는 것으로 판단된다.

3.2 Closed loop 구동

Closed loop 구동시에는 앞 절에서 설명한 되먹임 회로를 이용한다. 실제 마이크로 캔틸레버를 질량 센서로 사용할 경우

closed loop 구동을 이용하여 공진 주파수를 실시간으로 측정하는 방법이 open loop 구동을 이용하여 주파수 응답을 측정 후 SHO 모델로 곡선 맞춤해서 공진 주파수를 구하는 방법보다 더 간편하고 유용하다. Fig. 7은 10초 동안 측정된 한 캔틸레버 주파수의 잡음도를 보여준다. 여기서 사용된 캔틸레버는 Fig. 5에서 사용된 것과 같다. 캔틸레버의 공진 주파수 보다 약 1 kHz 낮은 주파수의 구형파를 파형 발생기를 이용하여 생성하고 이를 전압을 곱해주는 회로를 이용하여 캔틸레버의 동적 변위와 곱한 후 고주파 성분을 필터링하여 약 1 kHz 대로 변환 시킨다. 1 kHz 샘플링에서 측정된 데이터의 표준편차는 1.63 Hz 이고, 측정 데이터를 이동 평균을 취하여 얻은 1 Hz 대역폭에 상응하는 데이터의 표준편차는 135 mHz 이다.

$$\frac{\delta f}{\delta m} = -\frac{1}{2} \frac{f}{m_{eff}} \quad (3)$$

실리콘의 밀도와 캔틸레버의 치수를 이용하여 추정된 캔틸레버의 질량과 기측정된 공진주파수를 다음의 식에 대입하여 캔틸레버 공진주파수의 질량에 대한 민감도를 구할 수 있다.

위의 식 (3)은 측정하고자 하는 δm 의 질량을 가지는 물질이 캔틸레버의 자유단에 부착되었을 경우의 공진주파수의 변화를 나타낸다. 여기서, 우변의 m_{eff} 는 캔틸레버의 유효 질량으로 전체 질량의 약 24 % 이다[8]. Fig. 5에서 사용된 캔틸레버의 경우 계산된 유효 질량이 약 4.7×10^{-10} g 이고 공진주파수의 민감도는 약 -161.8 Hz/pg 이다. Fig. 7에서 측정된 1 kHz 와 1 Hz 대역폭에서의 주파수의 잡음도를 고려하면 각 측정 대역폭에서의 분해능을 산출할 수 있다. 산출된 캔틸레버 질량 센서의 분해능은 1 kHz 와 1 Hz 의 측정 대역폭에서 각각 10 fg 과 0.83 fg 였다.

본 논문에서 소개된 공정에서는 실리콘 웨이퍼의 전면에 등방성 식각을 이용하여 캔틸레버 구조물을 분리 제작한다. 따라서, 공정후의 캔틸레버와 정전기력 구동 전극 사이의 간격이 제작하고자 하는 캔틸레버의 폭에 좌우된다. 다양한 크기의 캔틸레버들이 하나의 웨이퍼 위에 동시에 가공 되었기 때문에 가장 폭이 좁은 캔틸레버가 가장 먼저 분리되고 가장 폭이 넓은 캔틸레버가 가장 늦게 분리된다. 따라서 구현 가능한 최소의 간격이 가장 폭이 넓은 캔틸레버에 의해 결정되었다. 또한 제작하고자 하는 캔틸레버가 두꺼워질수록 구현 가능한 최소의 간격이 추가적으로 증가하게 된다. 등방성 식각 과정에서 언더컷이 발생하여 캔틸레버의 고정단에 근접한 부분도 함께 분리가 되는 단점이 있다. 그러나 분리가 된 캔틸레버의 인접 부분의 폭이 캔틸레버의 폭에 비해 상당히 넓으므로 각 캔틸레버의 공진주파수에 미치는 영향은 미비하리라 예상된다. 언더컷을 최소화하려면 하나의 웨이퍼에 동일한 크기의 캔틸레버만을 제작하도록 설계해야 하고 등방성 식각시에 과도 식각이 되지 않도록 시간 조절을 잘 해야 할 것이다.

등방성 실리콘 식각시에 모든 캔틸레버의 구조를 보호하고 유지하기 위해, XeF₂의 실리콘에 대한 식각률과 가장 폭이 넓은 캔틸레버가 분리 완료되는 시간을 고려하여 충분한 두께의 PECVD 옥사이드를 증착하였다. 향후 PECVD 옥사이드 대신 실리콘 캔틸레버의 표면을 고온에서 산화시킨다면 두 번의 노광 공정을 한번으로 줄여 공정을 더 간단하게 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 최소의 노광 공정을 이용하여 간단하게 제작할 수 있고 또한 정전기력을 이용해 구동할 수 있는 캔틸레버 형태의 질량 센서에 대한 설계, 제작 및 특성 파악을 보고하였다. 보편적인 멤스 공정을 이용하여 다수 및 다양한 크기의 질량 센서를 동시에 제작하였다. 최적화된 실험 장치들을 이용하여 대기압 조건에서 캔틸레버의 공진주파수, quality factor, 주파수 잡음도 등을 측정하고 이로부터 질량 센서로서의 분해능을 산출하였다. 제작된 센서 중 가장 작은 길이가 40 μm , 폭이 7 μm , 그리고 두께가 3 μm 인 캔틸레버는 측정 대역폭이 1 Hz 일 경우 1 fg이하의 우수한 분해능을 가짐을 알 수 있었다. 이는 캔틸레버가 대기압 상태에서 측정된 경우 이므로 적절한 진공 패키징이나 진공 챔버 안에서 사용될 경우 quality factor의 증가, 주파수 잡음도의 감소, 구동 동적 범위의 증가 등의 이유로 인해 훨씬 더 작은 질량도 측정 가능하리라 예측된다. 정확한 질량 민감도의 측정을 위해서는 기준이 될 수 있는 미소 질량을 캔틸레버 자유단에 국소적으로 부착할 수 있는 방법이 필요하다. 현재 원자력 현미경을 이용해 구형의 마이크로 beads를 제작된 캔틸레버 질량 센서에 부착하는 방법을 개발하고 있다.

감사의 글

이 연구는 2010년도 서강대학교 교내연구비 지원에 의한 연구임(201010087.01).

REFERENCES

- [1] DongWeon Lee, "A micromachined cantilever for chemically sensitive scanning force microscope applications", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 14, no. 1, pp. 1-6, 2005.
- [2] Huihun Jung, Jinsung Park, Jaemoon Yang, Sang Woo Lee, Kilho Eom, Taeyun Kwon, and Dae Sung Yoon, "Study on the chemical environment for conformational change of i-motif DNA by atomic force microscopy cantilever", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 19, no. 3, pp. 214-220, 2010.
- [3] G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, "Atomic force microscope", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 56, pp. 930-933, 1986.
- [4] B. Ilic, D. Czaplewski, M. Zalalutdinov, H. G. Craighead, P. Neuzil, C. Campagnolo, and C. Batt, "Single cell detection with micromechanical oscillators", *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 19, 2825, 2001.
- [5] B. Rogers, L. Manning, M. Jones, T. Sulchek, K. Murray, B. Beneschott, J. D. Adams, Z. Hu, T. Thundat, H. Cavazos, and S. C. Minne, "Mercury vapor detection with a self-sensing, resonating piezoelectric cantilever", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 74, p. 4899, 2003.
- [6] Y. Lee, G. Lim, and W. Moon, "A piezoelectric micro-cantilever bio-sensor using the mass-micro-balancing technique with self-excitation", *Microsyst. Technol.* 13, pp. 563-567, 2007.
- [7] J. L. Hutter, and J. Bechhoefer, "Calibration of atomic-force microscope tips", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 64, p. 1868, 1993.
- [8] G. Y. Chen, R. J. Warmack, T. Thundat, D. P. Allison, and A. Huang, "Resonance response of scanning force microscopy cantilevers", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 65, p. 2532, 1994.



이정철(Jungchul Lee)

- 2001년 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
- 2003년 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)
- 2007년 Georgia Institute of Technology 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 ~ 2008년 University of Illinois at Urbana-Champaign 기계공학과 연구원
- 2008년 ~ 2010년 Massachusetts Institute of Technology Bioengineering 연구원
- 2010년 ~ 현재 서강대학교 기계공학과 조교수
- 주관심분야 : Atomic Force Microscopy, Microcantilever Sensor, Nanofluidic Resonator



최범규(Bumkyoo Choi)

- 1981년 서울대학교 기계공학과(공학사)
- 1983년 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1992년 University of Wisconsin 기계공학과(공학박사)
- 1984년 ~ 1986년 KIST CAD/CAM 연구실 연구원
- 1986년 ~ 1994년 Pennsylvania State University 연구 조교
- 1992년 ~ 1997년 University of Wisconsin CxRL 근무
- 1994년 ~ 1997년 삼성전자 주식회사
- 1997년 ~ 현재 서강대학교 기계공학과 교수
- 주관심분야 : 구조 해석, Micro Mirror, Sensor