

광학적 방법을 통한 마이크로 역학 소자의 공진주파수 측정법과 이를 이용한 마이크로 캔티레버 공진기의 질량 변화 연구

김학성 · 이상욱*

건국대학교 이과대학 물리학부, 서울 143-701

(2011년 6월 19일 받음, 2011년 8월 7일 수정, 2011년 8월 17일 확정)

마이크로미터 크기의 역학적 공진기의 제작과 그 공진 주파수 변화를 이용하여 질량 변화량을 측정하는 방법에 대해 연구 하였다. 공진기의 공진 주파수를 측정하기 위해서 레이저의 간섭효과를 이용한 광학적 측정법을 사용하였는데 이 방법은 나노미터 스케일의 변위까지 감지할 수 있을 정도로 매우 감도가 높은 측정법이다. 공진기는 압전 세라믹(piezo ceramic) 위에 원자현미경(atomic force microscope)의 캔티레버를 붙여서 만들었는데 이 방법은 압전판이 캔티레버의 공진 주파수로 진동할 때 캔티레버의 변위가 가장 크게 변화됨을 이용한 것이다. 또한, 전자 빔 증착기(e-beam evaporation system)를 사용하여 금을 캔티레버 위에 증착하여 질량을 변화시킨 후에 질량 변화량에 따른 공진주파수의 변화량을 측정하였다. 이 공진기는 질량센서의 역할을 수행할 수 있으며 수 마이크로그램을 감지할 수 있는 감도를 가짐을 확인하였다.

주제어 : 공진기, 공진주파수, 변위측정, 캔티레버, 질량센서, 전기 역학 소자

I. 서 론

나노전기역학시스템(nano electromechanical system, NEMS), 그 중 나노 역학 공진기(nano mechanical resonator)를 이용한 역학적 특성 연구로부터 나노 스케일 구조물의 영률, 역학적 변위 응답성, 및 질량 변화 감도 등과 같은 역학적 특성은 여러 연구들에 의해 보고된바가 있다. NEMS 공진기를 이용한 질량센서의 경우 zepto 그램 수준 이하의 매우 작은 질량차이를 측정할 수 있을 만큼 민감한 측정이 이루어질 정도이다 [1,2]. 또한 질량 변화를 응용하여 특정 항원이 항체에 결합할 때 소자의 질량이 변화하는 것을 측정하는 것과 같은 바이오 응용에 마이크로 또는 나노 전기역학 시스템을 활용하는 노력 또한 시도되고 있다 [3]. 이렇게 마이크로, 나노 역학 소자가 감도 높은 센서로 이용이 가능한 이유는 공진주파수 측정에서 얻어질 수 있는 Q인자(Q factor)값이 매우 클 수 있기 때문이다. Q인자는 소자가 얼마나 민감하게 반응하는지를 보여주며 질량 감응도에 역으로 비례하는 값을 갖는다 [4]. 즉, 센서의 질량이 더 작아지면 더 높은 민감도를 갖게 된다. 본 논문에서

서는 전기역학 공진기의 공진 특성을 측정하는 방법 간섭계를 이용한 광학적 방법의 개발을 통해 전기역학 공진기의 역학적 특성을 측정하고 이를 통하여 원자현미경(AFM)의 캔티레버의 질량을 바꾸어 가면서 그 공진 주파수 및 응답 특성이 변화하는 양상을 측정한 결과를 보고하였다. 본 연구결과를 바탕으로 질량 변화 측정기술을 통해서 바이오 센서로서 응용할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

II. 실험 방법

전기 역학 공진기의 공진 특성을 측정하는 방법은 본 논문에서 다룬 광학적 방법 외에도 자기장을 이용한 Magnetomotive technique, 전위차를 이용한 Capacitive displacement detection 등 여러 가지가 보고되고 있다.

광학적 간섭현상을 이용한 방법 [5,6]은 장치의 구성이 비교적 간단하고 상온에서 공진현상을 측정 가능하며 나노미터 스케일의 변위까지도 측정 할 수 있는 높은 감도를 가진다는 장점이 있다. Fig. 1은 우리가 제작한 광학적 간섭

* [전자우편] leesw@konkuk.ac.kr

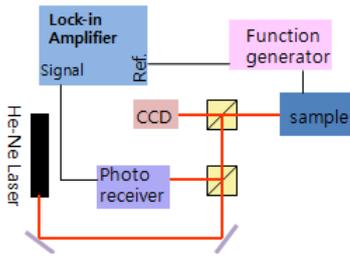


Figure 1. Schematic diagram of our setup based on optical technique using interferometer.

현상을 이용한 변위 측정 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 측정 장치에는 633 nm 파장의 10 mW 헬륨-네온 레이저가 사용되었고 소자와 포토다이오드의 손상을 막기 위하여 빔 스플리터와 감광필터를 사용하여 레이저의 세기를 140 μ W로 감소시켰다. 공진기가 진동을 하면 공진기에 반사된 레이저의 회절 무늬가 변하게 되고 그로 인하여 광 검출기에 들어가는 레이저의 세기가 변하게 된다. 광 검출기에서 출력한 전압 신호를 락인-증폭기(Lock-in amplifier)에서 읽어서 광 검출기에서 나오는 전압의 변화량(ΔV)을 통해 공진기가 역학적으로 공명을 할 때 변위가 변화하는 것을 측정함으로써 공진기의 공진 주파수를 측정하게 된다.

전기역학 공진기의 역학적 자극은 공진기 아래에 압전 세라믹(Piezo Ceramic)을 부착하여 압전체의 양단에 교류 신호를 가함에 따라 압전체가 진동할 때 전기역학 공진기에 유도되는 역학적 자극을 이용하였다. 즉 압전체에 인가한 ac 신호의 주파수가 공진기의 역학적 공명주파수와 일치할 때 공진기가 진동할 수 있게 된다.

본 연구에서는 원자현미경(AFM)의 캔티레버를 아래에 압전판을 부착한 구조를 마이크로 공진기로 활용하여 질량 변화에 따른 공진주파수 특성을 분석하였다.

Fig. 2(a)는 실험에 이용한 캔티레버의 광학현미경 사진

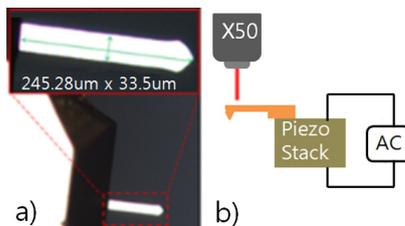


Figure 2. (a) Optical microscope image of a cantilever and (b) schematic diagram for measuring to change resonance frequency according to its mass increase.

이고 (b)는 캔티레버를 진동시키기 위하여 압전판을 이용하여 만든 공진기의 개요도이다. 공진 주파수는 압전판에 교류전압의 주파수를 50 Hz씩 증가시키면서 광 검출기에 나타나는 진폭(amplitude)과 위상(phase) 신호의 변화를 측정함으로써 관찰할 수 있었다.

III. 실험결과 및 고찰

캔티레버를 붙인 압전판에 10 V의 교류신호(sine wave)를 가하여 주파수를 변화하면서 공진주파수를 측정하였다. AFM 캔티레버는 실리콘 재질로 되어있어 반사율이 좋기 때문에 레이저를 이용한 방법으로 비교적 쉽게 공진 주파수를 찾을 수 있다. 또한 AFM 캔티레버는 리소그래피 공정을 통해 만든 금속 바이오센서 [7]나 탄소나노튜브를 이용한 질량센서 [8] 등에 비하여 제작이 매우 간단하고 이미 상업적으로 판매하고 있어 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 3은 캔티레버의 공진 주파수를 측정된 결과인데 이 결과로부터 캔티레버의 공진 주파수가 65.55 kHz에서 나타남을 확인하였고 0.55 kHz의 반가폭(full width half at maximum, FWHM) 값으로부터 Q인자(f_0 /FWHM)가 119.18이라는 것을 계산할 수 있었다.

캔티레버의 변위 ΔV 의 측정 결과와 공진 주파수 전후로 위상이 180도 변하는 것을 통해 압전판을 사용하여 진동시키는 방법으로 캔티레버의 공진 주파수를 측정하는 것이 신뢰할 수 있는 방법이라는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 우리가 실험에 사용한 캔티레버가 외팔보 형식의 구조라는 것 으로부터 캔티레버의 영률(young's modulus, E)이 아래의 식 [9]을 통해 114.12 GPa라는 것을 계산할 수 있다.

$$f_0 = 0.162 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{l^2}, E = \frac{f_0^4 \rho}{(0.162)^2 t^2}$$

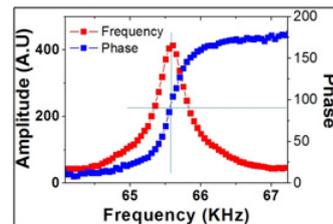


Figure 3. Response curve of a cantilever with 65.55 KHz frequency and phase transition.

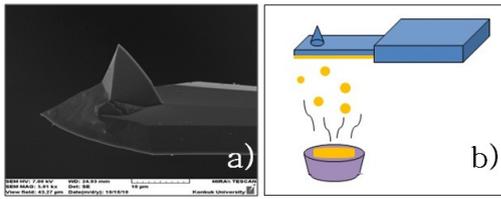


Figure 4. (a) A SEM image of AFM cantilever and (b) gold evaporation on cantilever.

Table 1. Mass variation according to the amount of gold on cantilever.

Thickness of the gold (nm)	Mass of the gold on cantilever (g)
10	$(1,5875 \pm 0,0002) \times 10^{-5}$
20	$(3,1752 \pm 0,0004) \times 10^{-5}$
30	$(4,7627 \pm 0,0007) \times 10^{-5}$

(공진주파수 f_0 :65.55 kHz, 실리콘의 밀도 ρ :2.329 g · cm, 캔티레버의 두께 t :3.7 μ m, 캔티레버의 길이 l :253 μ m)

이 실험에 사용된 캔티레버는 실리콘웨이퍼(100)를 습식 식각 방법으로 식각하여 만든 것으로 일반적인 실리콘의 밀도 2.329 g · cm를 적용하였다.

다음으로 Fig. 4와 같이 이빔 증착기(E-beam evaporator)를 사용하여 캔티레버 위에 금을 10 nm 두께씩 증착시켜 나가면서 공진기의 질량 변화량에 따라 공진 주파수 변화를 측정하는 실험을 진행하였다.

캔티레버를 직사각형으로 생각하면 본 연구에서 사용된 캔티레버의 윗면의 넓이는 대략 $8,216.88 \pm 1,1 \mu\text{m}^2$ 이고 금의 밀도는 $19,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ 이다. 따라서 Table 1에서 나타난 것처럼 10 nm 두께의 금이 쌓일 때마다 캔티레버의 질량이 $(1,5875 \pm 0,0002) \times 10^{-5} \text{ g}$ 씩 늘어난다는 것을 알 수 있다.

캔티레버에 금을 증착해서 질량을 증가시키면 공진 주파수가 조금씩 내려갈 것이라는 것을 예상할 수 있는데 실제로 Fig. 5에서와 같이 금의 두께가 두꺼워질수록 공진 주파수가 왼쪽으로 이동하고 ΔV 값이 작아지는 것을 확인 할 수 있었다. 금과 캔티레버의 인장력의 차이 또한 이러한 결과에 영향을 줄 수 있지만 두께가 4 μ m 정도인 실리콘 캔티레버 위에 금이 30 nm로 얇게 쌓인 것이 공명 주파수와 변위의 감소에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 생각한다. 그러므로 ΔV 값이 작아지는 것은 캔티레버 위에 쌓인 금의 질량으로 인하여 변위가 줄어드는 것으로 해석할 수 있

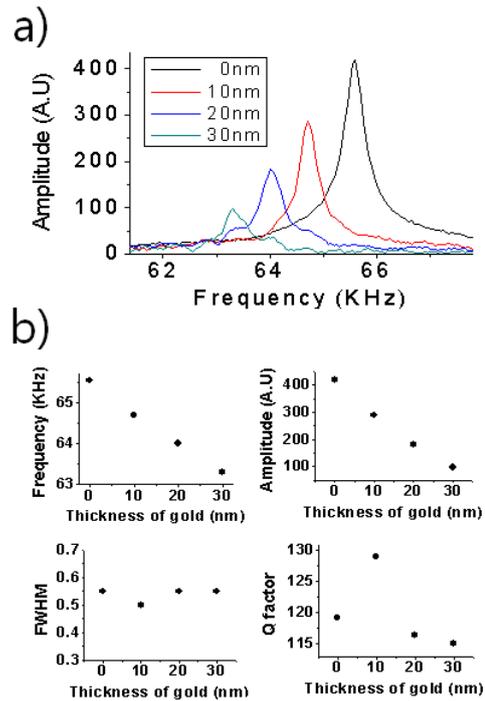


Figure 5. (a) Plot of the frequency response for increasing the mass of gold. (b) Variation of the resonance frequency, amplitude, FWHM and Q factor according to amount of gold attached on cantilever.

는데 금의 두께에 따라 일정하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 공진 주파수는 금이 10 nm 두께로 쌓일 때 대략 700 Hz 정도 비례적으로 감소하는 경향을 보였다.

FWHM은 금을 초기 10 nm 증착했을 때 0.50 khz으로 측정되고 이후의 금 증착에서는 모두 0.55 khz로 측정이 되었다.

FWHM이 조금 다르게 나타나긴 했지만 차이가 크게 나는 값은 아니며 실험에 사용된 AFM 캔티레버가 66.55khz의 낮은 공명 주파수를 갖고 있기 때문에 Q인자(f_0/FWHM)의 값이 FWHM의 수치가 약간 변화 했음에도 크게 변화 하게 되었다고 생각한다. 10 nm 증착을 했을 때에 FWHM의 증가에 의해 Q 인자가 크게 증가한 것처럼 보이지만 전체적으로 금이 증착됨에 따라 Q 인자는 완만하게 감소함을 보였다.

그러나 30 nm의 금을 증착할 때까지는 질량 센서로서의 민감도를 급격히 줄일만큼의 Q 인자의 감소는 없는 것으로 판단되었다.

이 결과를 통해서 AFM 캔티레버를 이용하여 만든 공진기를 50 hz 간격으로 공진 주파수를 측정하고 있는 본 실

힘 장치에서 1.07×10^{-6} g의 차이를 감지할 수 있는 질량 센서로 사용 가능함을 확인하였다. 질량 센서로서의 감도는 측정 간격을 줄이는 방법, Q 인자를 크게 할 수 있는 기계적 강도가 큰 물질을 사용하는 방법, 공진 주파수를 증가시키는 방법 등이 있을 수 있다. 향후 질량 센서로서 더 발전된 소자를 만드는 연구를 진행할 계획이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 간섭계를 이용한 광학적 방법을 이용하여 소자의 공진 주파수를 측정하는 방법을 설명하고 원자현미경의 캔티레버를 이용하여 간단한 공진기를 만들어 질량에 따른 공진 주파수 변화를 측정하는 센서로 이용 가능함을 확인해 보았다. 압전판을 사용하여 캔티레버를 진동시켰을 때 예상대로 캔티레버의 오차 범위 내에서 진동하였고, 금을 조금씩 증착시켜서 캔티레버의 질량을 늘려보았을 때 공진주파수가 낮아지고 진동하는 변위가 줄어드는 것을 확인하였다. 50 Hz 간격으로 측정한 것이기 때문에 1.07×10^{-6} g의 질량 변화까지 감지할 수 있었지만 이 공진기를 더 작은 간격으로 측정한다면 조금 더 높은 감도를 가질 수 있을 것이라고 생각한다. AFM 캔티레버는 이전에 보고된 연구들에 사용된 센서들 [7,8]에 비하여 제작이 쉽다는 장점이 있는 반면에 측정 감도가 수 μ g 정도로 낮다는 문제점이 있다. AFM 캔티레버보다 더 작고 가벼우며 높은 Q인자를 가진 나노와이어를 이용하여 센서를 만든다면 수십 kDa 이하의 바이오 물질도 감지할 수 있는 우수한 감도를 가진 센서를 만들 수 있을 것이라는 가능성을 보았다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임.

참고문헌

- [1] M. Nishio, S. Sawaya, S. Akita, and Y. Nakayama, *Applied Physics Letters* **86**, 133111 (2005).
- [2] J. Zhou, C. S. Lao, P. Gao, W. Mai, W. L. Hughes, S. Z. Deng, N. S. Xu, and Z. L. Wang, *Solid State Communications* **139**, 222-226 (2006).
- [3] A. S. Sadek, R. B. Karabalin, J. Du, M. L. Roukes, C. Koch, and S. C. Masmanidis, *Nano Lett.* **10**, 1769-1773 (2010).
- [4] S. S. Verbridge, H. G. Craighead, and J. M. Parpia, *Applied Physics Letters* **92**, 013112 (2008).
- [5] K. L. Ekinici, *small* **1**, No.8-9,786-797 (2005).
- [6] T. Kouh, D. Karabacak, D. H. Kim, and K. L. Ekinici, *Applied Physics Letters* **86**, 013106 (2005).
- [7] M. Calleja, M. Nordstrom, M. Alvarez, J. Tamayo, L. M. Lechuga, and A. Boisen, *Science Direct* **105**, 215-222 (2005).
- [8] Y. T. Yang, C. Callegari, X. L. Feng, K. L. Ekinici, and M. L. Roukes, *Nano Lett.* **6**, 4 (2006).
- [9] K. L. Ekinici and M. L. Roukes, *Review of Scientific Instruments* **76**, 061101 (2005).

Detection of Resonance Frequency of Micro Mechanical Devices Using Optical Method and Their Application for Mass Detection

Hakseong Kim and Sang Wook Lee*

School of Physics, Konkuk University, Seoul 143-701

(Received June 19, 2011, Revised August 7, 2011, Accepted August 17, 2011)

We have developed the detection method of the resonance frequency of micro/nano mechanical resonator using optical method. The optical interferometry method enabled us to detect the displacement change of resonators within several nm scale. The micro mechanical resonator was produced by attaching a micro mechanical cantilever to a piezo ceramic. The mass of cantilever was increased by evaporating Au using electron beam evaporator and the mass variation was estimated by detecting the resonance frequency changes.

Keywords : Resonator, Resonance frequency, Displacement detection, Micro cantilever, Mass sensor, Micro mechanical device

* [E-mail] leesw@konkuk.ac.kr