

튜닝포크형 미소 캔틸레버 센서의 주파수 특성

김충현*, 안효석⁺

(논문접수일 2005. 5. 30, 심사완료일 2005. 8. 10)

Frequency Characteristics of Micro-cantilever Sensor using Tuning Fork

Choong Hyun Kim*, Hyo-Sok Ahn⁺

Abstract

An experimental investigation of the basic characteristics of a micro-cantilever sensor was performed by inspecting the amplitude and frequency characteristics of a commercial tuning fork (TF). Application of acetone and ethanol with a volume of 1 μ l on the tine of a vibrating tuning fork causes immediate response in its amplitude and frequency characteristics. It has been shown that the tuning fork has ability to recognize a chemical agent with high sensitivity. The theoretical sensitivity of mass loading is in the range of ~ 0.1 Hz/ng. Quartz tuning forks are routinely made using standard microfabrication process, thus suggesting the possibility of microfabrication of micro quartz sensors.

Key Words : Sensor(센서), Tuning Fork(튜닝포크), Micro-cantilever(미소캔틸레버), MEMS(Micro Electro Mechanical Systems, (미소전자기계시스템))

1. 서론

최근 급속도로 발전하고 있는 MEMS 가공기술의 발전과 더불어 미소센서(micro sensor)의 대량생산, 소형화, 모듈화가 진행되면서 기계시스템의 작동유체의 물성측정, 화학플랜트의 가스누설검지, 각종 폭발물과 마약 등의 특정 화학물질을 검출하기 위한 센서로 개발되어 기계, 의료, 환경, 군사 등 다양한 분야에 적용하고 있다^(1,2).

미소캔틸레버를 이용한 전자코(electronic nose)는 공기 중에 존재하는 극미량의 특정 화학물질을 분석하기 위한 것으로서 피코그램(pico-gram) 수준의 우수한 분해능을 가지며 극소량의 기체 및 액체의 정량 및 정성 분석에 활용될 수 있어 최근 주목을 받고 있다.

튜닝포크는 자가구동(self-actuating)이 가능하며, 또한 신호를 스스로 계측(self-sensing)할 수 있는 액츄에이터 겸용 센서로서 일반적인 캔틸레버 센서에 비하여 전자회로가 간

* 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터 (chkim@kist.re.kr)

주소: 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

+ 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

편하며 Q인자(Q-factor)와 신호대 잡음비(S/N비)가 커서 진동 등 주변 환경의 영향에 의하여 분해능이 저하되지 않는 우수한 특성을 보유하고 있다⁽³⁻⁷⁾.

따라서, 수정으로 제작된 튜닝포크(quartz tuning fork)는 시계, PDA(personal digital assistant), CDMA(code division multiple access) 등 각종 전자기기의 시간-주파수 기준장치로서 사용되고 있으며, 가속도, 속도, 가스의 압력과 밀도, 액체의 점성 등을 측정하는 센서, 원자력간현미경(atomic force microscope, AFM)의 탐침으로도 활용할 수 있다⁽⁹⁾.

본 연구에서는 공진주파수 변화를 측정하는 방식의 튜닝포크형 초정밀 전자코를 개발하기 위한 준비단계로서 수정으로 제작된 튜닝포크의 진동-진폭특성을 실험적으로 살펴 보았다.

2. 이론적 배경

현재 미소캔틸레버를 이용한 전자코의 측정방식은 캔틸레버의 변형량을 측정하는 방법과 공진주파수의 변화량을 측정하는 방법이 이용되고 있다. 캔틸레버의 변형량을 측정하는 방법은 특정 성분을 흡착하는 기능성 고분자막을 캔틸레버의 한쪽 면에 형성함으로써 측정대상 성분과 고분자막 표면간 응력(interfacial stress)으로 인해 발생하는 캔틸레버의 변형을 측정하는 방법으로서 다수의 캔틸레버를 어레이(array)로 구성할 경우 다양한 성분에 대한 동시분석이 가능하다. 그러나 캔틸레버의 변형량 측정을 위해 사용되는 레이저 측정시스템은 캔틸레버를 교체할 때마다 새로이 정렬(alignment)를 해주어야 하는 불편한 점이 있으며, 특히 외란에 민감한 특성을 가지고 있어 적용범위에 크게 제약을 받는다⁽⁸⁾.

공진주파수의 변화를 측정하는 방법은 캔틸레버 표면의 기능성 고분자막이 측정대상 성분을 흡착하면서 발생한 미세한 질량 변화로 인해 유발되는 캔틸레버의 공진주파수의 변화량을 관찰하여 흡착성분의 정성적, 정량적 물성을 측정하는 방법으로서 추가적인 액츄에이터를 필요로 하는 단점이 있다.

한편, Fig. 1에 보인 튜닝포크는 액츄에이터 겸용 센서로서 자가구동이 가능하기 때문에 구조가 간단할 뿐만 아니라 높은 공진주파수 특성을 보유하고 있어 공진주파수 측정방식을 적용할 경우 외란에 강건한 센서를 개발할 수 있다.

튜닝포크를 스프링(스프링 상수 K)에 연결된 등방성(isotropic)재료로 만든 캔틸레버라고 가정하면 공진주파수는 다음과 같이 구해진다^(9,10).

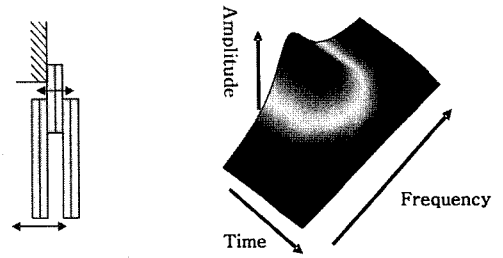


Fig. 1 Dynamic force spectroscopy obtained from a tuning fork type micro-cantilever sensor

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_{eff}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E_q I}{m_{eff} l^3}} \quad (1)$$

여기서

- E_q : Young's modulus of quartz
 $= 7.87 \times 10^{10} \text{Nm}^{-2}$
- I : moment of inertia $= \frac{wt^3}{12}$
- l : length of the cantilever
- w : width of the cantilever
- t : thickness of the cantilever
- m_{eff} : mass of the cantilever⁽⁹⁾
 $= 0.2429(\rho wtl)$
- ρ : quartz density $= 2.65 \times 10^3 \text{kgm}^{-3}$

튜닝포크가 외부로부터 영향을 받으면 공진주파수 값에 변화가 일어난다. 외부로부터 유입된 질량의 크기가 튜닝포크 질량보다 충분히 작고 그 영향이 튜닝포크 표면전체에 골고루 분산되어 흡수된다고 가정하면 식 (1)을 미분함으로써 주파수변화량(frequency shift)를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta(EI)}{EI} - \frac{1}{2} \frac{\Delta(m_{eff})}{m_{eff}} \quad (2)$$

식 (2)의 첫 번째 항은 재료의 탄성특성에 관련된 것으로서 무시할 수 있을 정도로 작은 값이다. 따라서 외부로부터 유입된 질량에 의한 하중효과를 나타내는 두 번째 항만 고려하면 된다. 유입된 질량의 크기가 튜닝포크보다 매우 작다고 가정하였으므로 새로운 주파수값은 다음과 같이 계산된다⁽¹¹⁾.

$$\begin{aligned}
 f'_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_{eff} + \Delta m_{eff}}} \\
 &= f_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta m_{eff}}{m_{eff}} \right) \\
 &= f_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

그러므로 공진주파수 변화량은

$$\begin{aligned}
 \Delta f &= f'_0 - f_0 \\
 &= -\frac{f_0}{2m_{eff}} \Delta m_{eff} = -\frac{f_0}{2m} \Delta m
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

따라서 튜닝포크의 질량계측 분해능은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta m} = -\frac{f_0}{2m} = -\frac{1}{\pi} \frac{1}{\omega l^3} \sqrt{\frac{E_q}{\rho_q}}
 \tag{5}$$

시판되는 튜닝포크의 질량계측 분해능을 식 (5)로 계산하면 약 0.1Hz/ng이다. 이것은 10ng의 질량이 가해졌을 때 공진주파수가 1Hz 변하는 것을 뜻하며 10MHz 대역의 고주파 센서 분해능의 1/10 수준으로서 튜닝포크가 저주파영역에서 작동하는 것을 감안하면 매우 우수한 값이다⁽¹²⁾.

3. 실험

본 연구에서는 화학물질 검출용 튜닝포크형 미소캔틸레버 센서를 개발하기 위해 기존의 AFM을 활용하되 AFM용 캔틸레버를 튜닝포크로 대체하여 작동시키는 방법을 채택하였다. 이 때 튜닝포크를 시료(유기용매, 작동유 등)에 접촉을 시킨 상태에서 동작 모드로 AFM을 가동하게 되면 시료 점도 등의 영향에 의하여 튜닝포크의 진동수와 진폭이 튜닝포크 고유값으로부터 변화하게 되므로 이러한 변화를 감지하여 시료에 따른 진동특성변화를 평가하는 실험을 하였다.

우선, 기존의 AFM에 튜닝포크형 센서를 사용할 수 있도록 Fig. 2와 같은 홀더를 설계, 제작한 후 튜닝포크를 설치하였다. 실험에 사용한 튜닝포크는 손목시계 등에 사용하는 것으로서 시중에서 구입이 가능하며 구입 시에는 보호용 캡슐에 싸여 있으므로 이를 제거한 후 장착하였다. 이 경우 고유진동수값은 원래의 값인 32.768kHz보다 약간 낮아지게 된다.

튜닝포크가 장착된 센서홀더를 AFM에 설치한 후 AFM의 가진장치를 이용하여 튜닝포크에 진동을 가하고 튜닝포

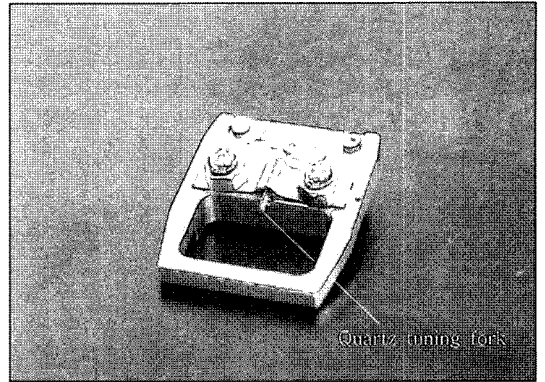


Fig. 2 View of the tuning fork holder and installed tuning fork

크로부터 발생하는 진동수와 진폭의 변화를 감지할 수 있도록 감지부를 개발하여 기존 AFM과 연결함으로써 그 결과를 모니터상에 구현하는 소프트웨어를 개발하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 개발된 측정시스템의 개략도이다. 실험장치는 AFM의 가진장치를 통해 소정의 진동수와 진폭으로 튜닝포크를 구동시키는 구동부, 시료의 영향에 의해 변화된 진동수와 진폭신호를 측정하는 계측부, 그리고 계측된 신호를 변환하고 계산하는 분석부, 그리고 해당결과를 화면을 통하여 보여주는 출력부로 구성되어 있다.

분석결과는 Fig. 1의 우측에 보인 것과 같은 시간에 따른 진폭변화를 보여주는 진폭-주파수-시간(amplitude-frequency-time, AFT) 스펙트럼으로 나타낸다.

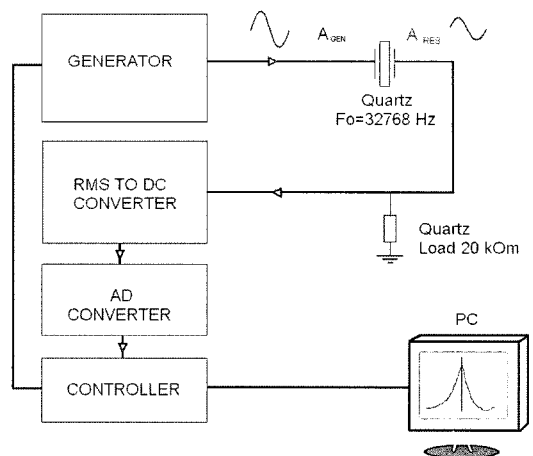


Fig. 3 Schematic of the measurement system

Fig. 4는 일반적인 튜닝포크의 고유진동수인 32.768kHz 인 경우의 부가질량에 의한 고유진동수 변동 결과를 보다 넓은 질량의 변화 범위에서 나타낸 것이다. 부가질량이 10-10g 이하인 경우에는 질량증가에 대한 고유진동수 변화량의 크기가 0.01Hz 이하의 작은 값을 가져 정확한 측정이 용이하지 않을 것으로 보인다.

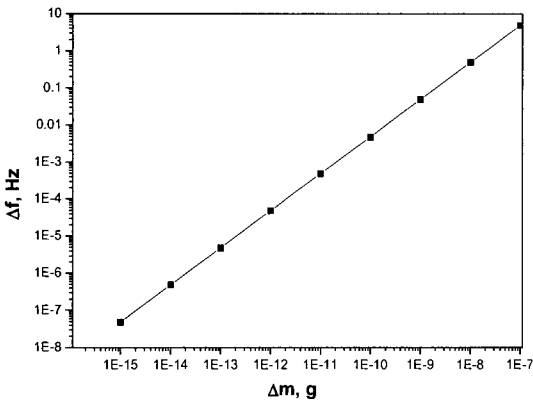


Fig. 4 Variation of resonance frequency due to an added mass for a quartz tuning fork with resonance frequency of 32.768kHz

4. 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 튜닝포크의 제원은 전체 폭 $D=1.4\text{mm}$, 전체 길이 $L=3.8\text{mm}$, 두께 $T=0.25\text{mm}$, 다리(tine)의 폭 $W=0.6\text{mm}$, 그리고 고유진동수 $f_0=32.768\text{kHz}$ 이다.

Fig. 2와 같이 제작된 튜닝포크에 아세톤과 에탄올 약 1 μl 를 튜닝포크 다리에 떨어뜨린 후 시간 경과에 따른 튜닝포크의 진동수와 진폭의 변화를 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5 (a)는 아세톤이 튜닝포크 다리에 묻지 않은 상태에서 서의 스펙트럼, (b)는 아세톤을 떨어뜨린 직후부터의 스펙트럼을 나타내었다. Fig. 5 (a) 상단의 경우에는 튜닝포크에 외부로부터의 교란이 전혀 없기 때문에 시간의 경과에 따른 변화가 나타나지 않으며 하단에 나타난 그래프 또한 원래 튜닝포크의 진동-진폭 특성을 그대로 보여준다.

그러나 Fig. 5 (b)에서와 같이 아세톤을 튜닝포크 다리에 떨어뜨린 후에 측정된 AFT 스펙트럼을 보면 초기에는 아세톤의 영향으로 인하여 전혀 진동이 발생하지 않았으며, 이후 아세톤이 증발함에 따라 튜닝포크가 매우 낮은 진폭과 고유진동수 값으로 다시 진동하기 시작한 후 시간이 경과함에 비례하여 점차 두 값이 증가하여 약 2초 후에는 원래의 진폭과 고유진동수를 거의 회복하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 에탄올을 튜닝포크에 가하기 전 (a)와 가한 후의 스펙트럼변화 (b)를 나타낸 것이다.

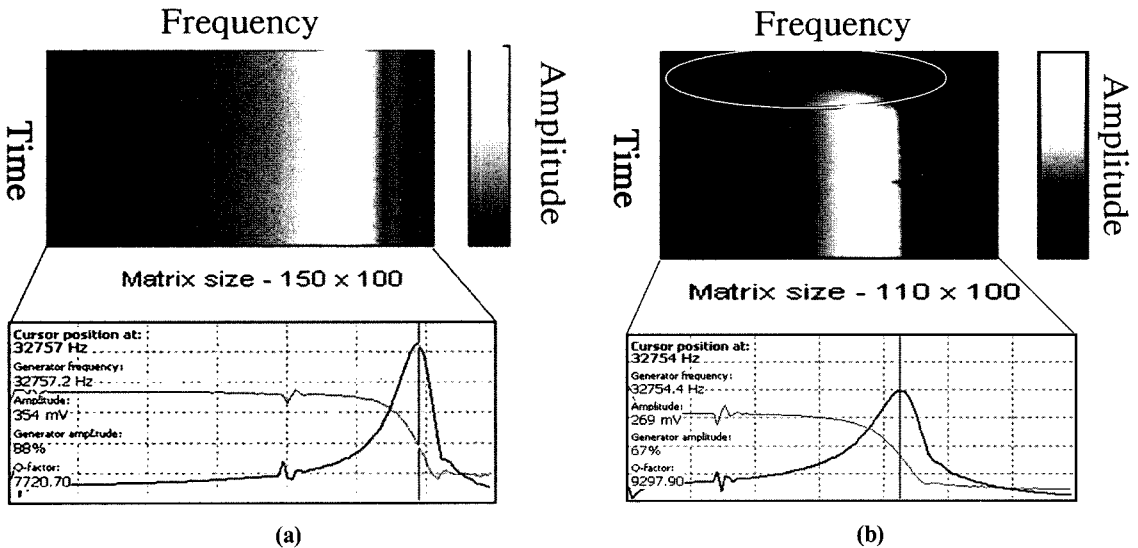


Fig. 5 Amplitude-frequency-time spectroscopy and amplitude-frequency relationship of the quartz tuning fork: (a) before acetone addition; (b) after acetone addition

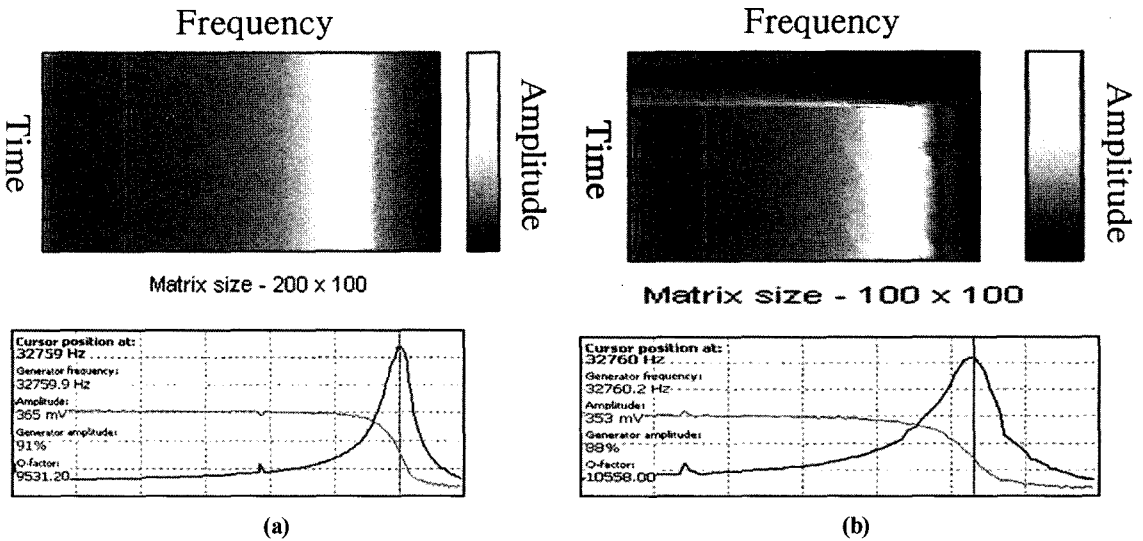


Fig. 6 Amplitude-frequency-time spectroscopy and amplitude-frequency relationship of the quartz tuning fork: (a) before ethanol addition; (b) after ethanol addition

Fig. 6 (b)에서 보인 바와 같이 에탄올을 떨어뜨린 직후에는 아세톤을 적용한 경우와 마찬가지로 진동과 진폭이 거의 없다가 이후 빠르게 원래의 특성을 회복하였다.

특히 에탄올의 경우 아세톤에 비하여 휘발성이 크기 때문에 원래의 진폭과 고유진동수를 회복하는데 소요되는 시간이 아세톤에 비하여 짧다는 것을 알 수 있다.

실험을 통하여 1 μ l의 유기용매에 의한 작은 질량변화에 대해서도 튜닝포크의 공진주파수는 민감하게 변화하였으며 이는 전술한 바와 같이 튜닝포크의 질량계측 분해능이 매우 우수하다는 사실을 뒷받침하는 것이다.

이러한 실험결과와 전술한 이론을 바탕으로 볼 때 초소형 튜닝포크를 이용할 경우 극소량의 화학물질에 노출되어도 진동 및 진폭의 변화를 크게 일으키는 계측센서를 개발할 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

5. 결론

기존의 반도체 제조기법을 활용하여 저렴한 비용으로 대량생산이 가능한 튜닝포크와 유기용매를 이용한 진동-진폭 특성실험을 통하여 튜닝포크가 외부로부터 유입된 미세한 질량변화에 매우 민감하게 반응한다는 사실을 알 수 있었다.

시판제품의 1/100 수준의 크기를 갖는 초소형 튜닝포크에 화학물질에 반응하는 기능성박막을 도포하여 사용할 경우

Ing이하의 질량변화도 측정이 가능한 초정밀 휴대용 화학센서나 유체점도측정기를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Soloman, S., 1998, *Viscous Fluid Flow Sensors Handbook*, McGraw-Hill, New York, pp. 51.1~51.10.
- (2) Benes, E., Groschl, M., Burger, W., and Schmid, M., 1995, "Sensors based on piezoelectric resonators," *Sensors and Actuator A*, Vol. 48, pp. 1~21.
- (3) Lee, J.-H., Yoo, J.-H., Yim, S.-Y., and Park, S.-H., 2004, "Symmetric and Asymmetric Resonance Characteristics of a Tuning Fork for Shear-Force Detection," *J. of the Korean Physical Society*, Vol. 45, No. 2, pp. 455~459.
- (4) Zeisel, D., Menzi, H., and Ullrich, L., 2000, "A precise and robust quartz sensor based on tuning fork technology for (SF6)-gas density control," *Sensors and Actuator A*, Vol. 80, pp. 233~236.
- (5) Dring, A. L., and Jones, B. E., 2000, "Integrated on-line multisensing of fluid flow using a mechanical resonator," *Sensors and Actuator A*, Vol. 85, pp. 275~279.

- (6) Beeby, S. P., Ensell, G., and White, M., Dec. 2000, "Microengineered silicon double-ended tuning-fork resonators," *Microengineering and Education Journal*, pp. 265~271.
- (7) Nakata, S., Akakabe, S., Nakasuji, M., and Yoshikawa, K., 1996, "Gas sensing based on a nonlinear response: Discrimination between hydrocarbons and quantification of individual components in a gas mixture," *Anal. Chem.*, Vol. 68, pp. 2067~2072.
- (8) Kee, J. Y., 2005, "A study on curvature radius measurement using laser interferometer," *Trans. KSMTE.*, Vol. 13, No. 6, pp. 34~40.
- (9) ea, S. J., and Welland, M. E., 1998, "Atomic force microscopy at solid-liquid interface," *Langmuir*, Vol. 14, pp. 4186~4197.
- (10) Karrai, K., and Grober, R. D., 1995, "Piezoelectric tip-sample distance control for near-field optical microscope," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 66, pp. 1842~1844.
- (11) Buchaillot, L., Farnault, E., Hoummady, M., and Fujita, H., 1997, "Silicon nitride thin film Young's modulus determination by an optical non destructive method," *Japan J. Appl. Phys. Part 2*, 36(6B), L794~L797.
- (12) Greenspon, J. E., "Vibrations of cross-stiffened and sandwich plates with application to underwater sound radiators," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 33, pp. 1485 ~ 1491.