

MEMS 공정에 의해 제작된 PZT 마이크로 캔틸레버의 전기기계적 거동 및 질량에 대한 공진특성 분석

論文
53C-2-11

Characterization of Electromechanical Properties and Mass Effect of PZT Microcantilever

黃 敎 善* · 李 政 勳** · 朴 廷 浩*** · 金 泰 松§
(Kyo Seon Hwang · Jeong Hoon Lee · Jung Ho Park · Tae Song Kim)

Abstract - A micromachined self-excited piezoelectric cantilever has been fabricated using PZT(52/48) thin film. For the application to biosensor using antigen-antibody interaction, electromechanical properties such as resonant frequency and quality factor of micromachined piezoelectric cantilever were important factors. Electromechanical properties and resonant behaviors of microfabricated cantilever were simulated by FEA (Finite Element Analysis) using Coventorware™2003. And these characterization of microcantilever were measured by using LDV(Laser Doppler Vibrometer) to compare with FEA data. We present the resonant frequency shift of micromachined piezoelectric cantilevers due to combination of mass loading and change of spring constant by gold deposition. Experimental mass sensitivities of microcantilever were characterized by Au deposition on the backside of microcantilever. Mass sensitivities with 100 x 300 μm dimension cantilever from simulation and experimental were 5.56 Hz/ng and 16.8 Hz/ng, respectively.

Key Words : PZT 마이크로캔틸레버, MEMS, 시뮬레이션, 공진주파수, 질량효과

1. 서 론

최근 들어 Microelectromechanical systems (MEMS) 및 Nanoelectromechanical systems (NEMS)를 이용한 바이오 센서 및 면역센서에 관한 연구가 활발히 진행중이며 [1-2] 특히, 압전 물질을 사용한 각종 마이크로 센서 및 액츄에이터가 크게 각광받고 있다.[3] MEMS 및 NEMS를 이용한 센서 및 액츄에이터의 제작에 있어서 압전 물질의 하나인 PZT를 기반으로 한 소자의 경우 높은 에너지 밀도, 큰 힘 및 토크 뿐만 아니라 빠른 응답속도를 갖는 장점이 있으며 [4], 높은 감도를 갖고 있으므로 미세 신호 측정을 가능하게 하는 장점도 가지고 있다. 또한, 캔틸레버의 질량 감도는 Surface acoustic wave (SAW)소자, Quartz crystal microbalance (QCM) 소자, Shear wave 소자, Flexural wave (Lamb)소자 등과 같은 다른 acoustic wave 소자들에 비하여 월등히 높다.[5] (table 1) 이러한 장점을 갖는 PZT와 캔틸레버를 기반으로 PZT 물질을 사용하여 압전 물질이 일체화된 캔틸레버를 제작할 경우 자가 구동 및 센싱이 가능하기 때문에 MEMS구조물에 있어서의 액츄에이터 뿐만 아니라 센서로서의 응용가능성이 매우 높다.

표 1 주파수 소자들과의 중량 측정 감도 비교

Table 1 Gravimetric Sensitivity Comparison of Acoustic Wave Devices[5]

Device	Frequency f_0 (MHz)	Sensitivity S_m (cf/g)	Minimum detectable mass density (ng/cf)
Microcantilever (end loading)	0.01E-5	10000	0.02
Microcantilever (distributed load)	0.01E-10	5000	0.04
SAW	112	151	1.2
QCM	6	14	10
Shear wave	104	65	1.0
Flexural wave I	2.6	951	0.4

캔틸레버를 이용한 센서의 경우 실리콘 또는 실리콘 질화막 등의 단층캔틸레버를 사용하여 pH, 수소, 벤젠, Cs⁺ 이온, DNA, Prostate Specific Antigen(PSA) 등과 같은 화학 물질과 생체 물질의 상태 및 결합 유무를 질량 혹은 힘을 측정하는 바이오센서에 대한 연구가 주로 진행이 되어왔으나, 이러한 바이오 센서의 경우 광학 장치를 통한 측정만 가능하기 때문에 소형화의 한계가 있다.[2,4,6-8] 이러한 광학적 측정에서 오는 한계를 극복하기 위해서 전기적으로 측정 가능한 무게 검출 소자가 요구되며, 전기적 측정과 광학적 측정이 모두 가능한 PZT 박막이 임혀진 마이크로 캔틸레버가 제안되었으며 이에 대한 연구가 진행 중이다. 그러나 PZT 박막을 이용한 마이크로 캔틸레버의 경우 PZT의 열화 문제 등으로 인하여 실리콘 질화막 또는 실리콘 단층만으로 이루어진 캔틸레버에 비해 제조 공정이 복잡하며 기계적인 해석 또한 어려움을 갖는다. 따라서 일체화된 구조의 다층 박막 마이크로 캔틸레버의 제작 및 해석은 매우 중요하다. 이러한 해석을 위해 본 연구에서는 기능성 PZT 박막 증착

* 準 會 員 : 高麗大 工大 電子컴퓨터工學科 碩士課程
 ** 正 會 員 : 延世大 工大 세라믹工學科 博士課程
 *** 正 會 員 : 高麗大 工大 電子컴퓨터工學科 教授 · 工博
 § 正 會 員 : 韓國科學技術研究院 마이크로시스템研究센터 責任研究員 · 工博
 接受日字 : 2003年 7月 9日
 最終完了 : 2003年 11月 21日

및 MEMS 공정에 의해 PZT 박막 캔틸레버 어레이를 제작하였으며 공진 특성을 포함한 전기기계적인 특성을 분석하였다. PZT 캔틸레버는 길이, 폭, 두께 등의 변수를 고려하여 제작하였으며, 이론적인 접근을 위해 CoventorWare™ 2003을 이용한 시뮬레이션을 통하여 제작시에 고려된 캔틸레버의 디멘전에 따른 공진 특성을 포함한 전기 기계적 분석을 시행하였으며, 이러한 결과와 Laser Doppler Vibrometer (LDV)를 사용하여 실제로 측정된 공진 특성을 비교 분석하였다. 또한, 생체물질 무게 감지 소자로서 활용을 위한 가능성을 판단하기 위해 금을 캔틸레버의 후면에 두께를 조절하여 증착함으로써 질량의 변화에 의한 공진주파수의 변화를 관찰하였으며, 이를 통해 측정된 질량감도를 CoventorWare™ 2003을 사용하여 얻은 이론치와 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 기본 이론

두께 감지 소자로서 캔틸레버의 공진주파수 변화를 이용할 수 있음을 조화 진동 모델을 통하여 이론적인 접근을 하였다.

모든 주기함수를 가진 시스템은 fourier series를 이용하여 조화함수의 결합으로 해석이 가능하므로 공진모드를 위한 질량과 스프링 상수만 갖는 기계적인 시스템과 같이 진동수가 일정한 조화 진동 모델로 해석하였다. 뉴턴의 가속도 법칙(식1)과 후크의 법칙(식2)을 이용하여

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} = m\ddot{x} = m \quad \text{식(1)}$$

$$F = kx \quad \text{식(2)}$$

으로 정리할 수 있다. 식(1), 식(2)에서 F는 외력, m은 질량, x는 변위, a는 가속도를 나타낸다. 이 때 (식1)과 (식2)를 이용하여 이 시스템에 작용하는 힘을 하나의 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$m \ddot{x} + kx = 0 \quad \text{식(3)}$$

(식3)은 조화 진동 시스템에서 주기함수로 정리 될 수 있고 주파수(ω)와 연관하여 다음 (식4)와 같이 다시 쓸 수 있다

$$x'' + \omega^2 x = \frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad \text{식(4)}$$

(식3)과 (식4)에 의해

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{식(5)}$$

임을 알 수 있다.

또한, 위의 시스템은 조화함수로 표현 되기 때문에 주기함수라 할 수 있고 조화함수(sin 함수 or cos 함수)의 주기는 2π 이므로

$$\omega T = 2\pi \quad \text{식(6)}$$

으로 나타낼 수 있고 주기(T)는 주파수(f)에 반비례하므로 이와 관련하여 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\omega = 2\pi f \quad \text{식(7)}$$

(식7)을 주파수에 관련하여 정리하면

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{식(8)}$$

이 되고 (식5)과 (식8)에 의하여

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{식(9)}$$

과 같은 결론을 얻을 수 있다. 즉, 주파수(공진주파수)의 제곱은 질량에 반비례 한다는 것을 말한다.

식 (9)를 기반으로 질량변화를 주파수의 변화로 나타낼 수 있음을 수식으로 살펴보면, 질량변화 전의 주파수(f_0)와 질량변화 후의 주파수(f_1)로 하여 다음의 (식10)과 (식11)로 나타낼 수 있다. 여기서 스프링 상수의 변화는 질량의 변화에 비하여 미세하다고 가정한다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{식(10)}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m + \Delta m}} \quad \text{식(11)}$$

이를 질량 변화에 관한 식으로 정리하면

$$\Delta m = \frac{k}{4\pi^2} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} \right) \quad \text{식(12)}$$

이 된다. 식(1)부터 식(12)까지 에서 F는 외력, m은 질량, x는 변위, a는 가속도, k는 스프링 상수, ω 는 진동수, f는 주파수, f_1 은 질량 변화 후의 공진주파수, f_2 는 질량변화 이전의 공진주파수이고 Δm 은 질량 변화량이다. 캔틸레버의 공진주파수 변화는 궁극적으로 질량의 변화에 직접적으로 반영할 수 있고, 그 변화량으로 질량변화량을 알 수 있다.

2.2 PZT 마이크로캔틸레버의 제작

그림 1에 PZT 박막 마이크로캔틸레버의 제작공정을 나타내었다.

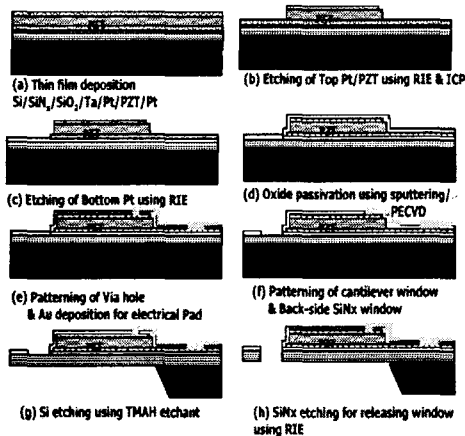


그림 1 PZT 마이크로켄틸레버 공정 모식도
 Fig. 1 Process sequence for fabrication of PZT cantilever

4인치 (100) 실리콘 웨이퍼에 저응력 SiNx막을 증착한 후, 그 위에 PECVD 공정을 사용하여 SiO₂ 2000 Å를 증착하였다. 압전 물질 캐패시터 구조의 하부 전극으로서 Ta/Pt를 sputtering 법을 이용하여 300/1500Å 증착한 후 PZT(52/48)를 스프인 코팅법으로 1µm 증착하였다. MFM (metal-ferroelectric-metal) 구조를 위한 상부전극은 Pt를 사용하였으며 RF sputtering 법에 의해 1000Å 증착하였다. 증착된 다층막은 상부층부터 차례로 RIE 식각공정을 이용한 Pt 식각, ICP 및 wet etching을 이용한 PZT 식각, passivation을 위한 SiO₂ 증착 및 상부전극과 electrical pad 연결 목적의 contact hole을 위한 식각을 거쳤으며, TMAH를 사용한 실리콘 벌크 식각 및 E-beam evaporation 및 lift-off 공정을 이용한 Au/Cr electrical pad 증착 공정을 통해 마이크로 켄틸레버를 제작하였다. 제작한 PZT 마이크로 켄틸레버 어레이의 SEM 사진을 그림2에 나타내었다. 그림2에서 볼 수 있는 제작된 켄틸레버는 두께가 3.5 µm였으며, 폭과 길이가 각각 100µm, 300 µm인 켄틸레버이다.

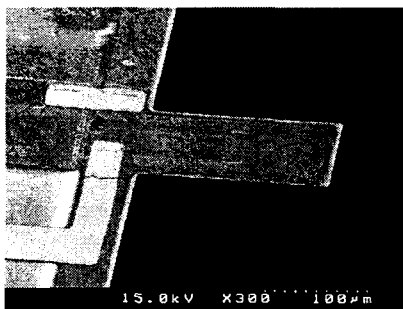


그림 2 PZT 마이크로켄틸레버의 SEM 사진
 Fig. 2 SEM image of PZT microcantilever

2.3 PZT 마이크로켄틸레버의 유한요소해석

PZT 마이크로켄틸레버의 디멘전에 따른 전기기계적 해석 및 공진 해석을 위해 Coventorware™ 2003을 이용하여 유

한요소해석(FEA)을 시행하였다. 유한요소해석을 위해 모델링한 켄틸레버는 100µm의 폭을 가진 것이며, 하부에서 상부까지 SiNx 1.5µm, SiO₂ 0.2µm, Pt 0.15µm, PZT 1µm, Pt 0.1µm, SiO₂ 0.5µm의 순으로 다층박막을 갖는 켄틸레버이었다. 이러한 켄틸레버의 정확한 해석을 위해 켄틸레버 길이 축의 방향으로 10µm, 폭 축의 방향으로 8µm, 높이 축에는 0.5µm의 element size를 정하여 직육면체 모양의 element를 만들었고 각 element의 꼭지점과 변의 중심에 node를 잡고 mesh를 생성하였다. 특히, 높이축에 대하여 element 크기보다 박막의 두께가 얇을 경우에 있어서 부정확한 해석을 막기 위해 CoventorWare™ 2003의 solver setting에서 모든 막에는 높이 축으로 최소한 1개 이상의 element가 생성되도록 하였다. 그리고 그 모델에 대한 공진주파수와 공진 시 켄틸레버의 모양을 Modal 및 Harmonic 해석으로 1차~3차 공진 모드 범위에서 시행하였다.

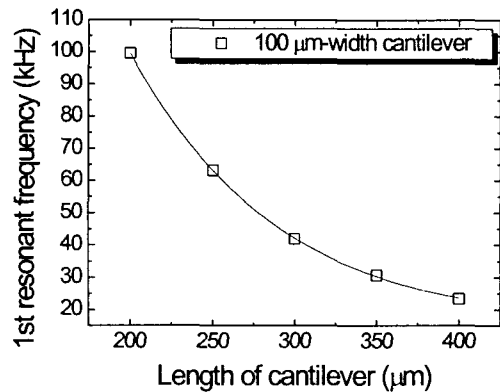


그림 3 켄틸레버 길이에 따른 1차 공진주파수 변화의 시뮬레이션 결과

Fig. 3 Simulated 1st resonant frequency shift as a function of cantilever length

표 2 시뮬레이션에 사용된 물질의 물질특성

Table 2 Material properties for simulation by CoventorWare™ 2003

Material	Process	Density (kg/µm ³)	Young's Modulus (Mpa)	Residual Stress (Mpa)	Poisson Ratio
SiNx	LPCVD	3.0E-15	300E+3	50 (tensile)	0.25
SiO2	PECVD (200°C) Anneal (900°C)	2.3E-15	70E+3	300(compressive)	0.17
Pt	Sputter Anneal (650°C)	2.14E-14	145E+3	187 (tensile)	0.3
PZT	Sol-gel method Anneal (650°C)	7.5E-15	85E+3	355 (tensile)	0.3

마이크로 켄틸레버 모델에서 폭을 100µm로 고정하고 켄틸레버의 길이에 대한 공진주파수의 변화를 시뮬레이션 한 결과를 그림3에 나타내었다. 공진주파수가 켄틸레버 길이의 제곱에 반비례하는 결과를 얻을 수 있었으며 이는 압전 unimorph 켄틸레버에서 공진주파수와 길이와의 관계를 이론적으로 해석한 식(13)에 상응하는 것임을 알 수 있었다.

$$f = \frac{v_n^2}{2\pi} \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{(\rho_{np}h_{np} + \rho_p h_p)}} \quad \text{식(13)}$$

식(13)에서 E는 영률, I는 관성모멘트, h는 캔틸레버 두께, L은 캔틸레버 길이를 나타낸다. 그리고 v_n^2 은 n 번째 공진 모드의 고유 값이며 ρ 는 밀도 이고 아래 첨자의 'np'는 SiNx, SiO2, Pt와 같은 비 압전 물질 층을 의미하고 'p'는 PZT 압전 박막을 의미한다.[9] 다층박막 마이크로캔틸레버의 두께에 대한 공진 주파수의 변화를 알아보기 위해 캔틸레버의 실리콘 질화막 지지층에 실리콘이 지지층으로 남아있는 구조를 가정하여 해석하였다. 디멘전이 100 μm \times 300 μm 인 캔틸레버를 모델링하여 실리콘 두께에 따른 캔틸레버의 공진주파수 변화를 시뮬레이션 한 결과를 그림 4에 나타내었다.

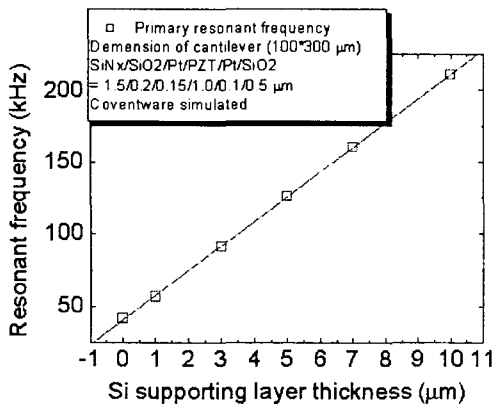


그림 4 실리콘 지지층 두께에 따른 1차 공진주파수 변화의 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulated 1st resonant frequency shift as a function of Si supporting layer thickness

일반적으로 캔틸레버의 지지층의 두께가 증가하면, 캔틸레버의 구조에 의한 스프링 상수가 증가하며, 이를 통해 캔틸레버 공진주파수의 증가와 질량 감도의 증가를 가져올 수 있다. 그러나 캔틸레버 지지층의 두께가 증가함에 따라 전체적인 캔틸레버의 두께가 증가하게 되고 이러한 두께 증가로 캔틸레버의 공진 시 그 구동 크기가 현저히 감소하게 된다. 이러한 구동 크기의 감소는 센서로 응용하는데 있어서 캔틸레버의 공진 시 기계적인 진동에 의해 유기되는 전기적 신호의 감소를 가져오게 하여 여러 가지 전기적인 잡음과 구분할 수 없게 되며 이는 전기적인 측정을 어렵게 만든다. CoventorWare™2003을 이용한 본 시뮬레이션의 결과 실리콘 지지층의 두께가 증가함에 따라 1차 공진주파수의 변화는 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있었으며, 이러한 결과를 통해 스프링 상수에 의한 질량 감도 및 전기적 신호를 측정하는 데에 있어서의 최적화 조건을 유추하는 데에 이용할 수 있다. 본 실험에서는 실리콘 웨이퍼를 사용한 벌크 식각을 통해 캔틸레버를 제작하였으며, 따라서 캔틸레버의 탄성계수를 높이기 위한 방법으로 쉽게 접근할 수 있는 방법으로 실리콘을 일정한 두께로 남기는 방법에 관해 연구하

였다. 그러므로 실리콘의 두께는 실리콘 질화막 하부에 인위적으로 벌크 실리콘 식각을 통해 남긴 실리콘의 두께를 지칭한다. 이러한 실리콘의 두께를 제어함으로써 탄성계수를 향상시킬 수 있으며, 이는 전기적인 신호 및 센서의 특성을 관찰하는데 있어서 중요한 변수이다. 디멘전이 100 μm \times 300 μm 인 캔틸레버를 모델을 사용하여 그림 5에 질량 감도를 계산하기 위해 금의 증착을 통해 일어나는 1차 공진 주파수의 변화를 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다. 본 실험에서는 시뮬레이션을 통해 질량에 의한 영향만을 계산한 후 금의 증착에 의한 실험 결과로부터 스프링 상수의 변화를 유추하고자 하였다. 이는 금의 증착 시 발생하는 잔류 응력에 의한 스프링 상수의 변화를 실험적으로만 계산 가능하기 때문이며, 금의 증착 방법 및 공정 조건에 따라 증착된 박막의 응력이 변화하기 때문이다.

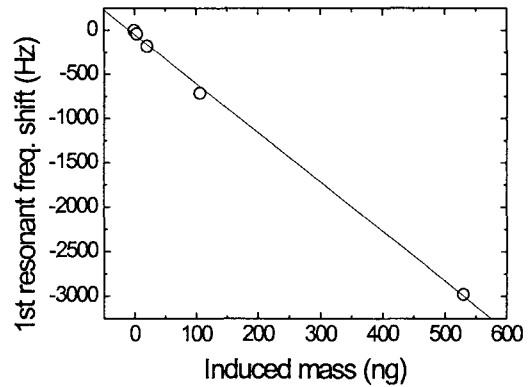


그림 5 캔틸레버에 인가된 금의 질량에 따른 1차 공진주파수 변화의 시뮬레이션 결과

Fig. 5 Simulated 1st resonant frequency shift as a function of induced gold mass

따라서 스프링 상수의 영향을 배제한 후 금의 증착에 의해 발생하는 질량 변화에 의한 공진주파수의 변화를 시뮬레이션 후, 측정 공진주파수의 변화로부터 스프링 상수의 변화를 역으로 추정하고자 하였다. 공진주파수의 변화는 증착한 금의 무게가 각각 4.22 ng, 21.17 ng, 105.92 ng, 529.64ng 일 때 각각 40 Hz, 180 Hz, 710 Hz, 2980 Hz였다. 따라서 시뮬레이션을 통한 데이터의 linear plot의 결과로부터 질량 감도가 -5.56 Hz/ng 임을 계산할 수 있었다. 이러한 결과는 시뮬레이션 및 실제측정값의 차이를 보기위해 origin6.0 프로그램을 사용하여 linear plot한 평균기울기의 변화를 나타낸 것이고, 평균기울기의 변화로부터의 차이를 통해 질량 및 스프링 상수의 차이를 확인할 수 있었다.

2.4 제작한 PZT 박막 마이크로캔틸레버의 공진 특성 및 해석

제작한 PZT 박막 마이크로 캔틸레버의 전기기계적 거동 및 공진 특성은 LDV(레이저 미소 변위 측정기)를 이용하여 측정하였다. 외부에서 신호 인가를 하기 위해 마이크로 캔틸레버의 상부 전극과 하부 전극을 통해 파형 발생기를 사용하였으며, 정현파를 1 Vpp 및 0.5 V의 offset 전압의 조건

으로 1kHz에서100kHz까지 주파수를 연속적으로 인가하였고 구동 속도 및 구동 크기(변위)가 최대인 곳을 나타내는 캔틸레버의 공진주파수를 측정하였다.

캔틸레버의 길이의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 측정하기 위해 제작한 캔틸레버들의 1차 공진 주파수의 변화를 측정한 결과를 그림 6에 나타내었다. 시뮬레이션의 결과와 비교하기 위하여 폭이 100 μm인 캔틸레버를 측정 대상으로 하였다. 캔틸레버의 길이에 따른 공진 주파수의 변화 값을 측정한 결과 시뮬레이션 결과와 식(13)의 압전 unimorph 캔틸레버의 이론적인 계산식의 결과와 마찬가지로 캔틸레버의 길이의 제곱에 반비례하는 경향성을 갖는 결과를 얻을 수 있었다. 수식적인 시뮬레이션의 결과 및 실제 측정치의 결과의 유사성은 관찰이 되지만 비교적 큰 오차가 발생한다. 또한 Origin 6.0을 이용한 fitting 값과도 약간의 차이를 보인다.

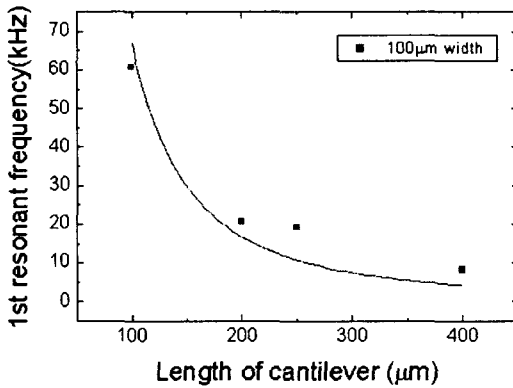


그림 6 캔틸레버 길이에 따른 1차 공진주파수 변화의 측정 결과

Fig. 6 Experimental 1st resonant frequency shift as a function of cantilever length

그 원인은 첫째로 공정상의 이유를 들 수 있다. 이는 photomask의 캔틸레버 디멘전과 차이에서 오는 것으로 실리콘 에칭 시 남아있는 실리콘의 두께를 조절하는데 있어 XeF₂ 에칭을 사용함으로써, 등방성 에칭을 통해 발생하는 오차이다. 둘째 시뮬레이션의 경우 공기 중의 측정 결과와는 달리 감쇠를 무시한 결과이기 때문에, 실제 측정 시 발생하는 공기에 의한 구동크기 감쇠에 의해 오차가 발생하게 되는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 실제 측정치 및 시뮬레이션의 결과와 차이를 보이지만, 같은 소자 내에서 같은 범위의 오차로서 작용하기 때문에 경향의 유사성을 유지하게 되고, 이러한 결과를 통해 시뮬레이션과 계산식을 이용한 이론적 유추와 실험적 결과의 경향이 잘 일치함을 볼 수 있었다. 질량의 증가에 따른 1차 공진 주파수의 변화의 실험적 측정 결과로부터 그림 7에 나타내었다. 사용된 캔틸레버는 디멘전이 100μm × 300μm인 제작된 캔틸레버이다. 증착된 금의 질량은 금의 밀도(ρ=19.32 g/cm³) 및 증착장비에 내장된 thermal evaporator내의 두께 측정기로 측정된 두께 및 캔틸레버의 폭과 길이에 의한 캔틸레버 면적으로부터 계산되었다. 이러한 결과로부터 금의 증착에 의한 공진주파수 변화의 경우 실제 금 질량의 증가에 의한 공진주파수의 변

화를 평균 기울기로부터 유추할 수 있었으며 약 -17 Hz/ng의 값을 나타내었다. 이러한 결과는 그림 5에서의 시뮬레이션에 의한 결과로부터의 평균 기울기인 -5.56 Hz/ng과 큰 차이를 보였다. 이는 시뮬레이션의 경우 스프링 상수에 의한 변수를 고정시킨 후 질량의 변화에 따른 유효질량의 변화에 의한 공진주파수의 변화를 고려했기 때문이다.

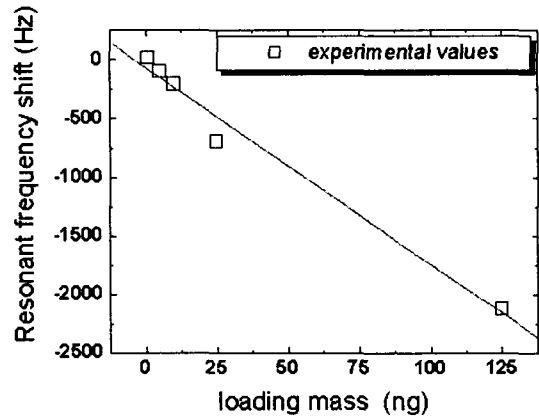


그림 7 인가된 금 질량에 따른 1차 공진주파수 변화의 측정 결과

Fig. 7 Experimental 1st resonant frequency shift as a function of induced gold mass

따라서 이러한 결과로부터 실제 thermal evaporator법에 의해 금의 증착 시 공진주파수의 변화는 시뮬레이션에서의 변수인 질량 효과에 의한 유효 질량의 변화뿐만 아니라 스프링 상수의 변화가 동시에 발생함을 알 수 있었으며, 스프링 상수의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 식(14)에 같이 나타낼 수 있다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k + \Delta k}{m + \Delta m}} \quad \text{식 (14)}$$

시뮬레이션 및 실제 금의 증착에 의한 공진주파수의 변화의 차이로부터, 스프링 상수의 발현을 확인할 수 있었으며, 질량에 의한 시뮬레이션의 공진주파수 변화 값에 비해 스프링 상수의 변화를 동반하는 측정치의 공진주파수 변화 값이 3배정도의 공진주파수 변화를 보임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 식(14)에 있어서의 스프링 상수의 변화량인 Δk의 경우 음수임을 확인할 수 있었다. 스프링 상수의 변화는 캔틸레버 상부 및 하부의 표면 응력 변화로 설명할 수 있다. 표면 응력, σ,는 $\sigma = \frac{\partial(\gamma A)}{\partial A} = \gamma + A \frac{\partial \gamma}{\partial A}$ 로 정의된다. 여기서 γ는 표면장력이고, γA는 면적 A의 표면에 관계된 excess free 에너지이다. 즉, 표면 에너지는 면적 변화량에 대한 면적의 표면에 관계된 excess free 에너지의 변화량으로 정의 될 수 있다. 또한, 스프링 상수의 변화는 $\Delta k \propto \Delta S_1 + \Delta S_2$ 로 나타낼 수 있다.[9] 여기서 Δk는 스프링 상수의 변화량이고 ΔS₁과 ΔS₂는 각각 캔틸레버 상부와 하부의 표면 응력의 변화를 나타낸다. 또한 ΔS_i=(S_i'-S_i)이고

$\Delta S_2 = (S_2' - S_2)$ 이며 S_1' 과 S_2' 는 금이 증착된 후의 상부와 하부의 표면 응력을 의미하고, S_1 , S_2 는 각각 금이 증착되기 전의 상부와 하부의 표면 응력을 의미한다. 표면 응력의 경우 금의 증착에 의해 발생하는 잔류 응력으로부터 기인하며, 이는 $\Delta S_1'$ 의 변화를 가져온다. 그로 인하여 스프링 상수 k 의 변화를 유발하게 된다. 캔틸레버 후면의 실리콘 질화막은 막표면에 생성된 수산기(hydroxyl group)에 의하여 높은 표면 에너지를 갖고 있다. 이러한 실리콘 질화막 표면에 금을 증착하게 되면 실리콘 질화막에 접촉하는 금표면의 표면 에너지는 증가하게 되고 동시에 금과 접촉하는 실리콘 질화막의 표면 에너지는 감소하게 되어 캔틸레버는 금이 증착된 반대 방향 즉 캔틸레버의 위방향으로 휘어지게 된다.[10] 실제 질량 및 스프링 상수의 변화가 동시에 발생하는 질측결과의 평균 기울기가 약 -17 Hz/ng 의 값을 나타낸 반면, 질량의 변화만을 고려한 시뮬레이션에 의한 결과의 평균 기울기가 약 -5.56 Hz/ng 의 값을 갖는 것은 질량의 변화인 Δm 에 의해 발생하는 변화 값 보다 스프링 상수의 변화인 Δk 에 의해 발생하는 공진주파수의 변화량이 2배정도 큰 영향을 줌을 유추할 수 있게 하였다. 이러한 결과는 캔틸레버의 거동에 있어서의 표면 응력에 의해 발생하는 스프링 상수와의 관계[9]로부터 본 실험에서의 thermal evaporator에 의한 박막의 증착 시 압축 응력을 동반하여 일어나는 효과인 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 기능성 PZT 박막 증착 및 MEMS 공정에 의해 PZT 박막 마이크로 캔틸레버를 제작하였으며 공진 특성을 포함한 전기기계적인 특성을 분석하였다. CovIntorware™ 2003을 이용한 시뮬레이션과 수식을 통해 다층박막의 공진 특성을 해석 하였으며, 실제 디바이스를 제작하여 그 특성을 LDV로 평가하여 그 결과와 시뮬레이션 결과의 경향이 유사함을 알 수 있었다. 특히 질량 감지 소자로의 응용을 위해 금을 증착을 통해 1차 공진 주파수의 변화를 관찰한 결과 시뮬레이션을 및 실제 실험을 통해 질량감도가 각각 -5.56 Hz/ng 및 -16.8 Hz/ng 임을 알 수 있었으며 이는 실제 측정값에 있어서 질량에 의한 효과 뿐만 아니라 금의 증착에 의한 응력변화 및 이의 변화에 기인한 표면 응력의 영향 때문으로 사료된다. 이러한 결과로부터 PZT 박막 마이크로 캔틸레버를 이용한 질량 감지소자로서의 적용 가능성을 확인할 수 있었으며, 캔틸레버 전체에 질량을 가진 물질이 증착 혹은 흡착될 경우 질량 효과 뿐만 아니라 응력에 의한 효과 또한 고려해야 한다는 것으로 생각할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업인 지능형 마이크로 시스템 연구개발 사업의 연구비를 지원받아 수행되었으며 (과제협약번호 MS 01-113-01) 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Fritz, M.K. Baller, H.P. Lang, H. Rthhuizen, P. Vettiger, E. Meyer, H.-J. Guntherodt, C. Gerber, J.K. Gimzewski, *Science* **288**, 316, 2000
- [2] R. Berger, E. Delamarche, H.P. Lang, C. Gerber, J.K. Gimzewski, E. Meyer, H.-J. Guntherodt, *Science* **276**, 2021, 1997
- [3] Kevin Y. Yasumura, Timothy D. Stowe, Eugene M. Chow and Daniel Rugar, "Quality factors in micron- and submicron-thick cantilever", *J. of MEMS*, **9**, 117-125, 2000
- [4] S. Wakabayashi, M. Sakata, H. Goto, M. Takeuchi and T. Yada, "Static characteristics of piezoelectric thin film bulking actuator", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 5012-5014, 1996
- [5] Friedrich G. Barth, Joseph A.C. Humphrey, Timothy W. Secomb *Sensors and Sensing in Biology and Engineering*, Springer WienNewYork, 2002
- [6] B. Ilic, D. Czaplewski, H. G. Craighead, P. Neuzil, C. Campagnolo and C. Batt, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 450, 2000
- [7] S. Cherian and T. Thundat, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 2219, 2002
- [8] G. Wu, R. H. Datar, K. M. Hansen, T. Thundat, R. J. Cote, and A. Majumdar, *Nature biotechnology* **19**, 856, 2001
- [9] A. K. Kaw, *Mechanics of composite materials*, CRC, 1997
- [10] Suman Cherian and Thomas Thundat, *Appl. Phys. Lett.* vol **80**, No.12, 2002

저 자 소 개



황 교 선 (黃 敎 善)

1980년 1월 31일생. 2002년 고려대 제어
계측공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학
원 전자컴퓨터공학과 석사과정

Tel : 02-958-5458, Fax : 02-958-6910

E-mail : kshwang@kist.re.kr



이 정 훈 (李 政 勳)

1974년 8월 4일생. 1997년 연세대 세라
믹공학과 졸업. 1999년 동 대학원 세라
믹공학과 석사졸업. 1999~현재 동 대학
원 세라믹공학과 박사재학.

Tel : 02-958-5458

Fax : 02- 958-6910

E-mail : next@kist.re.kr

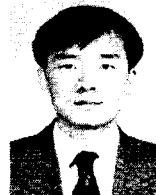


박 정 호 (朴 廷 浩)

1955년 12월 26일생. 1981년 고려대 전
자공학과 졸업. 1987년 Delaware 주립대
대학원 전자공학과 졸업(공학). 1987년~
1990 금성사 중앙연구소 연구실장 1990
~현재 고려대 전자공학과 교수

Tel : 02-924-8021

E-mail : jhpark@korea.ac.kr



김 태 승 (金 泰 松)

1959년 7월 19일생. 1982년 연세대 세라믹
공학과 졸업. 1984년 한국과학기술원 재
료공학과 석사졸업. 1993년 한국과학기술
원 재료공학과 졸업(공학). 1994년~2000
년 한국과학기술연구원 선임연구원 2000
~현재 한국과학기술연구원 책임연구원

Tel : 02-958-5564, Fax : 02-958-6910

E-mail : tskim@kist.re.kr