온도 변화를 이용한 고분자 막 마이크로 액추에이터의 공진 주파수 튜닝

이승훈* · 이석우* · 권혁준* · 이광철† · 이승섭*

Thermal Frequency Tuning of Microactuator with Polymer Membrane

Seung Hoon Lee, Seok Woo Lee, Hyuk-Jun Kwon, Kwang-Cheol Lee and Seung S. Lee

Key Words : Frequency tuning(주파수튜닝), Polymer membrane(고분자 막), Microactuators (마이크로 액추에이터), Thermal stress(열응력)

Abstract

Resonant frequency tuning of micro devices is essential to achieve performance uniformity and high sensitivity. Previously reported frequency tuning methods using electrostatic force or mass deposition are not directly applicable to non-conducting polymer devices and have limitations such as dielectric breakdown or low tunable bandwidth. In this paper, thermally frequency-tunable microactuators with poly-dimethylsiloxane membranes are proposed. Permanent and/or nonpermanent frequency tunings are possible using a simple temperature control of the device. Resonant frequency and Q-factor variations of devices according to temperature change were studied using a micro heater and laser Doppler vibrometer. The initial resonant frequencies determined by polymer curing and hardening temperatures are reversibly tuned by thermal cycles. The measured resonant frequency of 9.7 kHz was tuned up by ~ 25% and Q-factor was increased from 14.5 to 27 as the micro heater voltage increased from 0 to 70 V.

1. 서 론

마이크로 및 나노 소자의 공진 주파수 튜닝은 일반적으로 소자의 감도를 높이거나 공정상의 오차를 보정하는 등 원하는 성능을 얻기 위하여 반드시 필요하다. 특히 마이크로 자이로스코프나 가속도계, RF 필터와 같은 구조물은 제작이 끝난 후 추가적으로 영구적 또는 비영구적으로 주파수 튜닝공정이 필수적이다.[1,2]

다양한 마이크로 및 나노 소자에 요구되는 성능을 얻기 위한 주파수 튜닝방법에 대한 연구가 널리 진행되어 왔다. 대표적인 방법으로 정전기력을 이용한 유효 스프링 상수의 변화,[3] 추가적인 질량의 증착(deposition)과 식각(etching)을 통한 구조물 형상의 변화,[4] 기판의 휨(bending)을 이용한 내부 응력의 변화,[5] 그리고 국부적인 가열(localized heating)에 의한 구조물 자체의 강성의 변화를 유도하여 주파수를 튜닝한다.[6] 하지만 이러한 주파수 튜닝 방법들은 다음과 같은 단점을 가지고 있다. 첫째, 정전기력을 이용한 튜닝은 비전도성 고분자 소자에 적용하기 어렵고, 비영구적인 튜닝만 가능하다. 둘째, 증착과 식각을 통한 구조물의 형상 변화는 영구적인 주파수 튜닝은 가능하지만, 복잡하고 번거로운 후공정이 따른다. 셋째, 기판의 휨을 이용한 방법은 반복적인 튜닝은 가능하지만, 기판에 굽힘 모멘트를 가하는 매크로한 추가 구조물이 필요하다. 넷째, 열처리를 통한 주파수 튜닝은 한 방향으로의 영구적 튜닝만 가능하여 다시 되돌릴 수 없다는 단점이 있다.

† 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원
E-mail : kclee@kriss.re.kr
TEL : (042)868-5737 FAX : (042)868-5953
* 회원, 카이스트 기계공학과

고분자 소자는 기존의 금속과 실리콘 기반의 소자에 비해 저렴하고, 투명하고, 유연하고, 가볍고, 낮은 공정 온도 등의 뛰어난 특성 때문에 마이크로 및 나노 시스템에서 액추에이터, 센서, 메모리 등 다양한 응용 소자에 적용되어 왔다.[7~9]

본 연구에서는 PDMS(poly-dimethylsiloxane)로 제작한 고분자 막 마이크로 액추에이터(polymer membrane microactuator)의 열응력을 제어하여 공진 주파수를 튜닝하는 방법을 제안한다. 이 방법은 추가 공정이나 복잡한 장비의 도움 없이 간단한 온도 변화만으로 영구적 또는 비영구적으로 주파수를 튜닝할 수 있다. 또한 고분자의 높은 열팽창계수 때문에 넓은 튜닝 범위 내에서 반복적이고 신뢰성 있는 튜닝이 가능하다는 장점이 있다.

2. 기본개념 및 원리

2.1 PDMS 막의 잔류응력

PDMS 막을 제작하기 위해서는 고분자 양생(polymer curing)과정이 필요하다. 일반적으로 이 공정은 오븐(oven)에서 진행되는데 이때 PDMS와 실리콘 기판의 열팽창계수의 차이로 인해 열응력이 발생하게 된다. PDMS막에 발생하는 응력을 이론적으로 예측하기 위해서 일 차원의 선형 열팽창계수 α(T)를 고려한다. Fig. 1(a)에서 경화되기 전의 PDMS막과 실리콘 기판의 초기 길이를 각각$L_{0,Si}$, $L_{0,PDMS}$라고 두고, 양생온도(curing temperature)에서 PDMS가 완전히 경화된다고 가정하면 다음의 식들이 성립된다.

$$\Delta L_{Si} = \alpha_{Si}(T) L_{0,Si} \Delta T \tag{1}$$

$$\Delta L_{PDMS} = \alpha_{PDMS}(T) L_{0,PDMS} \Delta T \tag{2}$$

$$L_{0,Si} + \Delta L_{Si} = L_{0,PDMS} + \Delta L_{PDMS} \tag{3}$$

(1), (2)식을 (3)식에 대입하고 훅의 법칙(Hooke's law)을 적용하면 제작된 PDMS 막의 잔류 인장응력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t = \left(1 - \frac{1+\alpha_{Si}(T)\Delta T}{1+\alpha_{PDMS}(T)\Delta T}\right) \times E_{PDMS} \tag{4}$$

보고된 실리콘과 PDMS의 열팽창 계수[10,11]를 위의 식에 대입하여 양생온도에 따른 막의 잔류응력을 이론적으로 예측할 수 있다.

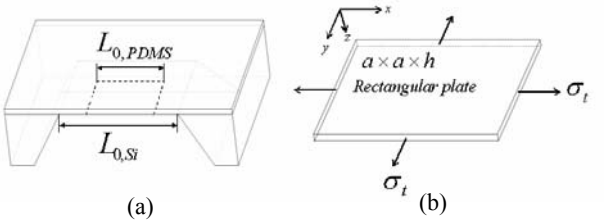

Fig. 1 (a) Cross-sectional schematic view of PDMS membrane on silicon substrate with initial length L_0 before curing and (b) element of plate with tensile stress

2.2 인장응력이 작용하는 막의 공진 주파수

Fig. 1(b)에는 모든 방향으로 균일한 인장응력을 받고 있는 정사각형 판을 보여준다. 모든 모서리가 고정되어 있다고 가정하면 판의 공진 주파수는 다음과 같이 표현된다.[12]

$$f_0 = \frac{2\pi^2}{a^2}\sqrt{\frac{D}{\rho h}} + \frac{\pi}{a}\sqrt{\frac{2\sigma_t}{\rho}} \tag{5}$$

여기서 a, h, D, ρ, σ_t는 각각 판의 폭, 두께, 강성, 밀도, 잔류인장응력을 나타낸다. 낮은 판의 강성을 가지는 고분자 막의 경우에는 잔류응력으로 표현되는 둘째 항이 판의 강성으로 표현되는 첫째 항에 비해서 상당히 크다. 또한 잔류응력은 고분자의 높은 열팽창계수 때문에 온도가 변함에 따라 민감하게 변한다. 그러므로 소자에 열을 가하여 PDMS막의 잔류응력을 제어하고 이를 이용하여 공진 주파수를 쉽게 튜닝할 수 있다.

3. 소자의 제작과 측정장치

3.1 PDMS 막 액추에이터와 마이크로 히터 제작

고분자 막 액추에이터의 공진 주파수 측정을 위해 PDMS 막을 기반으로 한 마이크로 액추에이터와 마이크로 히터를 미세가공 기술을 이용하여 제작하였다. Fig. 2 는 저항성 마이크로 히터(a)와 PDMS 막(b)의 제작과정과 제작된 두 소자를 결합한 개념도(c)를 나타낸다. 단결정 실리콘 기판(4-inch Si P-type (100))위에 열 산화공정을 통해 실리콘 산화막을 600 nm 두께로 증착한 후 기판 뒷면에 포토리소그래피(photolithography)와 반응성이온 식각(reactive ion etching) 공정을 통해 산화막을 선택적으로 제거하였다. 다음으로 기판을 TMAH (tetramethyl ammonium hydroxide)용액에서 약 11 시간(etch rate ~ 0.73 μm/min)동안 실리콘 이방성 식각을 진행한다. 기판 위에 얇은 고분자 막을 형성하

기 위해서 PDMS(Sylgard 184, Dow Corning Co.)와 양생제(curing agent)를 10:1 로 섞어 5000 rpm 으로 스핀코팅을 하였다. 막의 내부에 다양한 초기 잔류응력을 인가하기 위하여 50, 100, 150℃의 양생온도에서 PDMS 를 10 분간 경화시켰다. 마지막으로 막을 지지하고 있었던 실리콘 산화막과 실리콘을 제거함으로 PDMS 막 액추에이터를 완성하였다.

제작된 액추에이터에 열을 가하기 위해 마이크로 히터를 제작하였다. 산화막이 있는 실리콘 기판에 전자빔 증착기(e-beam evaporator)를 사용하여 30 nm 의 크롬과 200 nm 의 금을 증착하고, 올려진 금속을 습식 식각(wet etching)하여 선폭 25 μm 의 저항성 마이크로 히터를 제작하였다. 제작된 마이크로 히터와 그 위에 결합된 PDMS 막 마이크로 액추에이터 사진을 Fig. 3 에 나타내었다.

3.2 공진 주파수 측정장비

제작된 PDMS막 액추에이터의 온도에 따른 공진 주파수 측정을 위해 Fig. 4 에서와 같이 광학적 측정 장비를 구성하였다. PDMS막 마이크로 액추에이터는 아래에 장착된 PZT(PCMA Chip monolithic multilayer piezo actuator, PL055, PI)에 5 V_{pp}의 교류 전압을 인가함으로써 아래위로 구동되고, 교류 전압의 주파수에 따른 막의 변위와 속도는 LDV(laser Doppler vibrometer)를 사용하여 측정하였다. 투명한 PDMS막에서 반사되는 레이저(laser) 신호를 증가시키기 위해 막에 백금을 약 10 nm 두께로 증착하였다.

4. 실험 및 결과

4.1 양생온도에 따른 막의 잔류응력

양생온도에 따라 막 내부에 걸리는 잔류응력을 조사하기 위해 같은 치수(3 mm × 3 mm × 10 μm)를 가지는 PDMS 막들을 각각 다른 온도(50, 100, 150℃)에서 10 분간 양생시키고, LDV를 사용하여 상온에서 공진 주파수를 측정하였다. 각각의 양생온도에 따른 공진 주파수를 Fig. 5 에 나타내었다. 공진 주파수는 양생온도가 증가함에 따라 증가하는데 이는 PDMS와 실리콘기판 사이에 높은 열적 불균형(thermal mismatch)과 고분자화 정도(degree of polymerization)의 차이에 의한 것으로 판단된다. 측정된 공진 주파수는 식 (5)에서와 같이 막 에 작용하는 인장응력의 제곱근에 비례함($f_0 \propto \sigma_t^{1/2}$)을 보였다.

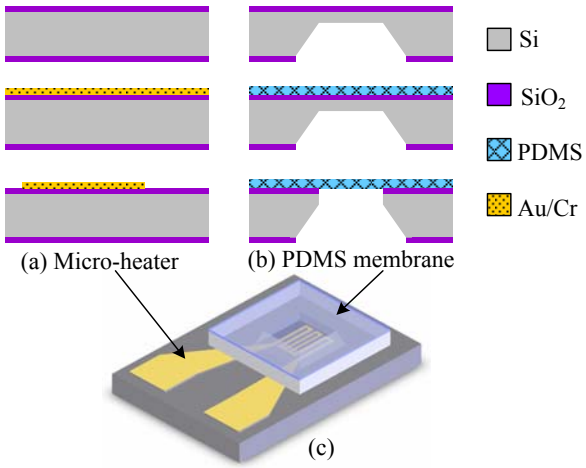

Fig. 2 Fabrication process of (a) resistive micro heater and (b) PDMS membrane. (c) Schematic view of the fabricated PDMS membrane mounted on a gold resistive micro heater.

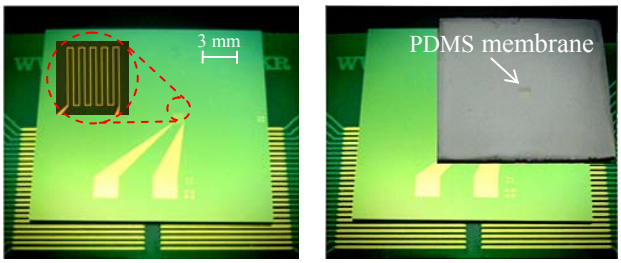

Fig. 3 Photographs of (a) the micro-heater and (b) the PDMS membrane mounted on the heater.

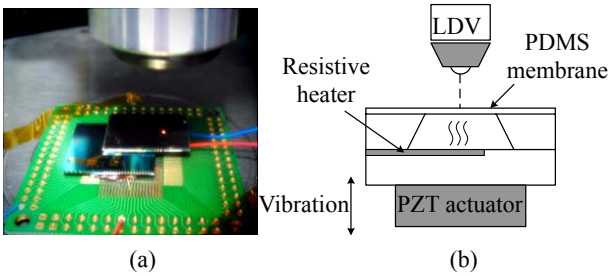

Fig. 4 (a) Photograph and Schematic view of optical measurement system for the PDMS membrane microactuator.

막의 진동이론을 적용하여 측정된 공진 주파수로부터 PDMS막에 인가된 잔류응력을 구할 수 있다. 보고된 PDMS의 밀도는 970 kg/m^{3}이므로 다음 식에 주어진 값들을 대입하여 막의 잔류응력을 구했다.

$$\sigma_t \cong \frac{\rho}{2}\left(\frac{f_0 a}{\pi}\right)^2 \qquad (6)$$

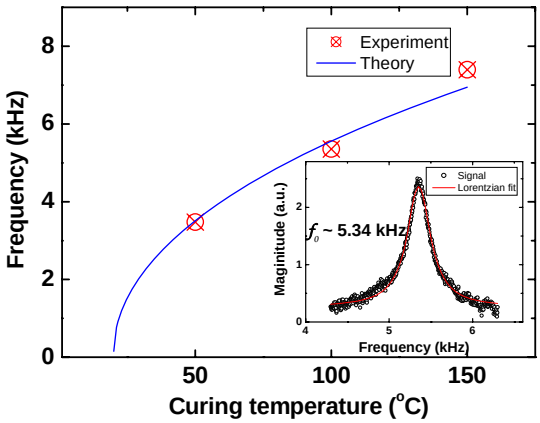

Fig. 5 Measured resonant frequency of a 3 mm × 3 mm × 10 μm membrane after curing at 50, 100, and 150℃ compared with the plate theory, $f_0 \propto \sigma_t^{1/2}$. Inset: Resonant frequency of PDMS membrane cured at 100℃ is 5.34 kHz. The corresponding Q-factor is about 12.7 at room temperature.

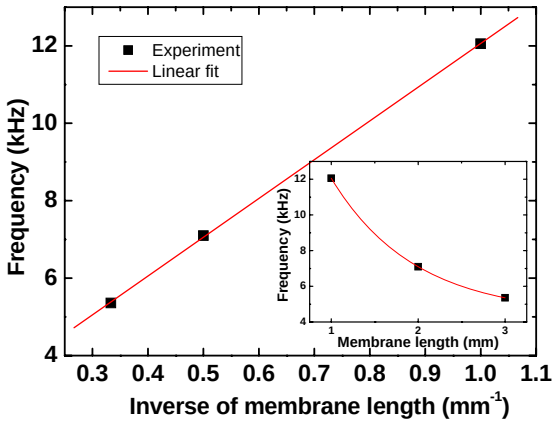

Fig. 6 Measured resonant frequency of the PDMS membrane with respect to the membrane length.

Table 1 Measured resonant frequency, Q-factor and residual stress of PDMS membrane (3 × 3 × 0.01 mm^3) at various curing temperatures

Curing temp. (℃)	*Resonant freq. (kHz)*	*Residual stress (kPa)*	*Q-factor*
50	*3.48*	*5.34*	*11.9*
100	*5.36*	*12.7*	*15.5*
150	*7.40*	*26.4*	*26.4*

양생온도에 따라 달라지는 잔류응력을 측정된 공진 주파수와 양호도와 함께 Table 1 에 나타내었다. PDMS막 마이크로 액추에이터의 공진 주파수와 양호도는 50℃ 에서 양생한 결과 각각 3.48 kHz와 11.9 인 반면, 150℃에서 양생한 것은 7.40 kHz와 26.4 였다. 150℃에서 양생한 PDMS막의 양호도가 더 큰 이유는 막에 인가된 높은 인장응력 때문이다.[13] 기판에 비하여 상대적으로 열팽창계수가 큰 마이크로 고분자 소자들의 경우에 이와 같이 고분자 경화온도인 양생온도를 제어하여 초기 공진 주파수를 쉽게 제어할 수 있다.

4.2 막의 치수변화에 따른 공진 주파수

정사각형 막의 크기 변화에 따른 공진 주파수를 측정하기 위해 1 × 1, 2 × 2, 3 × 3 mm^2 의 다양한 넓이와 10 μm 의 두께를 갖는 PDMS막을 제작하였다. 공정 조건을 같게 하기 위해서 모든 소자를 100℃ 에서 10 분간 양생하였다. 제작된 소자의 경우 측정된 공진 주파수가 식 (5)에서 두 번째 항으로 나타낸 막의 진동이론에 잘 부합했다. 즉, Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 측정된 공진 주파수는 막의 길이에 선형적으로 반비례함을 보였다. Table 2 에는 측정된 공진 주파수와 양호도, 식 (6)을 사용하여 계산한 막의 잔류인장응력을 나타내었다. PDMS막의 넓이가 커질수록 잔류응력이 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 막의 잔류응력이 고분자 양생온도뿐만 아니라 PDMS 수축에 영향을 주는 막의 기하학적 형상에 의해서도 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.[14]

Table 2 Measured resonant frequency, Q-factor and residue stress of PDMS membrane

Length of membrane	*Resonant freq. (kHz)*	*Residual stress (kPa)*	*Q-factor*
1 mm	*12.1*	*7.14*	*12.0*
2 mm	*7.10*	*9.90*	*10.8*
3 mm	*5.36*	*12.7*	*15.5*

4.3 막의 응력제어를 통한 주파수 튜닝

PDMS 막 마이크로 액추에이터의 잔류응력을 구동온도를 조절하여 제어할 수 있다. 즉 온도 변화로 인해 고분자 막에 열응력이 발생하고 변화된 막의 잔류응력 때문에 공진 주파수가 변화한다. 마이크로 히터에 전압을 인가하여 제작된 PDMS 막 액추에이터의 구동 온도를 높이면서 공진 주파수를 측정하였다. Fig. 7 에서 보는 바와 같이, 열에

의한 PDMS 의 추가적 1 차 경화(1st hardening)로 인하여 막의 강성이 증가하여 상온에서 초기 공진 주파수가 6.3kHz 에서 7.9 kHz 로 증가했다. 히터의 온도를 다시 올리면 막에 발생하는 열팽창에 의해서 잔류응력이 감소하므로 공진 주파수가 낮아지게 된다. 감소한 공진 주파수는 온도를 다시 낮추게 되면 수축으로 인한 인장응력의 증가로 막의 공진 주파수가 다시 증가한다. 이 구간에서, 즉, 더 높은 온도에서 PDMS 막이 영구적으로 경화되기 전까지 신뢰성 있는 주파수 튜닝을 반복적으로 할 수 있었다.

두 번째로 PDMS 가 영구적으로 경화되는 온도 이상으로 열을 가하면 PDMS 막의 초기 공진 주파수를 영구적으로 튜닝할 수 있다. 본 실험에서는 약 7.9 kHz 였던 상온의 공진 주파수를 히터에 40 V 의 전압을 인가하여 2 차 경화(2nd hardening)를 유발시키고 상온에서 약 8.8 kHz 의 공진 주파수를 갖도록 영구적으로 튜닝을 하였다. 한번의 영구적 경화 후, 이 구간(0 V ~40 V)에서 온도변화에 따라 주파수가 가역적으로 그리고 반복적으로 튜닝되는 것을 확인 했다.

마지막으로 히터에 70 V 의 전압을 인가하여 3 차 경화(3rd hardening) 후 상온의 공진 주파수를 8.8 kHz 에서 9.7 kHz 로 영구적으로 튜닝하였다. 인가된 전압에 따른 네 번째(▲) 공진 주파수 튜닝은 비영구적, 가역적으로 9.7 kHz 에서 7.3 kHz 로 약 25%의 튜닝 범위를 가지는 것을 반복적인 실험을 통해서 확인하였으며, 양호도는 14.5 에서 27 로 약 2 배가 증가하였다. 결론적으로, 제안된 PDMS 막 마이크로 액추에이터의 공진 주파수는 경화온도에 따라 영구적인 튜닝이 가능할 뿐 아니라 구동 온도를 변화시키면서 비영구적이고 반복적인 튜닝도 가능하다는 것을 보여준다.

2 mm × 2 mm × 10 μm 의 치수를 가지는 PDMS 막의 1 차 경화 후 마이크로 히터에 인가한 전압에 따라 가역적으로 튜닝되는 공진 주파수와 양호도를 Fig. 8 에 나타내었다. 소자의 온도가 증가할수록 열팽창으로 인한 막의 잔류인장응력이 감소하므로 식 (5)의 관계에 의해 줄어든 응력으로 초기 7.9 kHz 의 공진 주파수가 40 V 의 히터전압에서 6.5 kHz 까지 낮아졌다. 양호도는 온도가 증가할수록 같이 증가하는 경향을 보였다. 이는 온도가 높아질 수록 주위로 손실되는 에너지가 적고 막 주변에 공기의 팽창으로 인한 손실경로의 감소 때문인 것으로 판단된다.

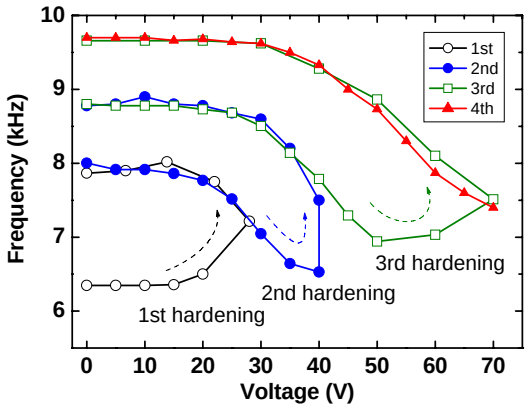

Fig. 7 In-use frequency tuning by heating up the device. Initial resonance can be tuned by annealing which causes the polymer hardening permanently. Reversible tuning behavior was showed before each hardening process.

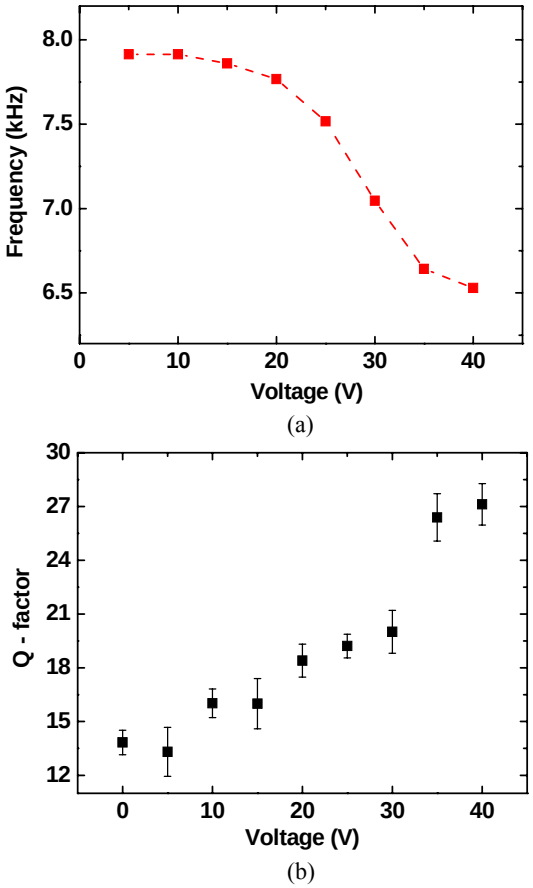

Fig. 8 Reversible resonant frequency (a) and Q-factor (b) with respect to applied voltages. Resonance of a 2 mm × 2 mm × 10 μm device with f of 7.9 kHz was tuned up in frequency by ~ 20%. Inset: Q-factor increases with the device temperature.

5. 결 론

PDMS 막을 구비한 마이크로 액추에이터의 공진 주파수를 측정하여 고분자 소자에 있어서 피할 수 없는 양생과정 중에 생기는 막의 잔류응력을 구하여 이론 식과 비교하였다. 다양한 양생온도와 막의 형상에 따라 다르게 인가되는 잔류응력을 막의 진동이론을 통해 예측하고 실험적으로 측정하였다. 또한 제작된 고분자 소자에 마이크로 히터를 사용하여 열응력을 제어하고 공진 주파수를 영구적, 비영구적으로 튜닝하였다. 온도가 증가할수록 공진 주파수는 약 25%의 가역적인 튜닝범위를 가지며 감소했고, 양호도는 약 2 배로 증가하였다. 열을 이용한 고분자 소자의 공진 주파수 튜닝 방법은 추가 공정이나 복잡한 장비의 필요 없이 간단한 온도 변화만으로 영구적 또는 비영구적으로 주파수를 튜닝 할 수 있고, 고분자의 장점인 높은 열팽창계수로 인해 넓은 튜닝 주파수 범위를 가지고 반복적으로 빠르게 튜닝이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구는 공진 주파수가 내부에 작용하는 응력에 의해 크게 변화하는 마이크로/나노 막이나 선(string)을 구비한 소자나, 상대적으로 큰 열팽창계수를 갖는 고분자 소자의 공정 후 공진 주파수를 빠르고 쉽게 튜닝하는 방법을 제시한 것으로 앞으로 다양한 응용소자에 적용될 것으로 기대되어 진다.

참고문헌

(1) Kim, J.-M., Lee, S., Park, J.-H., Kim, J.-M., Baek, C.-W., Kwon, Y. and Kim, Y.-K., 2006, "Digitally Frequency-Controllable Dual-Band WLAN Filters Using Micromachined Frequency-Tuning Elements," *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Istanbul, Turkey.*

(2) Leland, R. P., 2001, "Adaptive Tuning for Vibrational Gyroscopes," *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control.*

(3) DeMartini, B. E., Rhoads, J. F., Turner, K. L., Shaw, S. W. and Moehlis, J., 2007, "Linear and Nonlinear Tuning of Parametrically Excited MEMS Oscillators," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 16, No. 2, pp. 310~318.

(4) Enderling, S., Brown III, C. L., Balakrishnan, M., Hedley, J., Stevenson, J. T. M., Bond, S., Dunare, C. C., Harris, A. J., Burdess, J. S., Mitkova, M., Kozicki, M. N. and Walton, A. J., 2005, "Integration of a Novel Electrochemical Tuning Scheme with MEMS Surface Micromachined Resonators," *18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Miami, Florida*.

(5) Verbridge, S. S., Shapiro, D. F., Craighead, H. G. and Parpia, J. M., 2007, "Macroscopic Tuning of Nanomechanics: Substrate Bending for Reversible Control of Frequency and Quality Factor of Nanostring Resonators," *Nano Letters*, Vol. 7, No. 6, pp. 1728~1735.

(6) Remtema, T. and Lin, L., 2001, "Active Frequency Tuning for Micro Resonators by Localized Thermal Stressing Effects," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 91, No. 3, pp. 326-332.

(7) Ling, Q.-D., Liaw, D.-J., Teo, E. Y.-H., Zhu, C., Chan, D. S.-H., Kang, E.-T. and Neoh, K. –G., 2007, "Polymer Memories: Bistable Electrical Switching and Device Performance," *Polymer*, Vol. 48, No. 18, pp. 5182~5201.

(8) Johansson, A., Blagoi, G. and Boisen, A., 2006, "Polymeric Cantilever-based Biosensors with Integrated Readout," *Applied Physics Letters*, Vol. 89, 173505.

(9) Lee, S. W. and Lee, S. S., 2007, "Focal Tunable Liquid Lens Integrated with an Electromagnetic Actuator," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, 121129.

(10) Okada, Y. and Tokumaru, Y., 1984, "Precise Determination of Lattice Parameter and Thermal Expansion Coefficient of Silicon between 300 and 1500 K," *Journal of Applied Physics*, Vol. 56, No. 2, pp.314~320.

(11) Shih, H. and Flory, P. J., 1972 "Equation-of-State Parameters for Poly(dimethylsiloxane)," *Macro-molecules*, Vol. 5, No. 6, pp.758~761.

(12) Harris, C. M. and Crede, C. E., 1976, *Shock and Vibration Handbook*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.

(13) Verbridge, S. S., Parpia, J. M., Reichenbach, R. B. Bellan, L. M. and Craighead, H, G., 2006, "High Quality Factor Resonance at Room Temperature with Nanostrings under High Tensile Stress," *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, No. 12, 124304.

(14) Lee, S. W. and Lee, S. S., 2008, "Shrinkage Ratio of PDMS and Its Alignment Method for the Wafer Level Process," *Microsystem Technologies*, Vol. 14, No. 2, pp.205~208.