

## 계단식 정전빗살구조물을 이용한 수평구동형 미소공진기의 주파수 조정

이기방\* · 서영호\* · 조영호†  
(2002년 6월 14일 접수, 2003년 6월 13일 심사완료)

### Tuning of a Laterally Driven Microresonator using Electrostatic Comb Step Array

Ki Bang Lee, Young Ho Seo and Young-Ho Cho

**Key Words:** Frequency Tuning(주파수 조정), Tunable Microresonator(가변 주파수 미소공진기), Electrostatic Microactuator(정전력 미소액추에이터), Electrostatic Force(정전력), Stiffness Control(강성 조절)

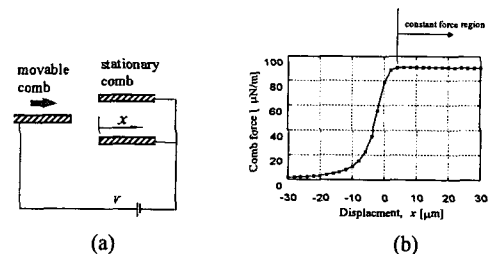
#### Abstract

We present a new post-fabrication frequency tuning method for laterally driven electrostatic microresonators using a DC-biased electrostatic comb array of linearly varied finger-length. The electrostatic tuning force and the equivalent stiffness, adjusted by the DC-biased tuning-comb array, have been formulated as functions of geometry and DC tuning voltage. A set of frequency-tunable microresonators has been designed and fabricated by 4-mask surface-micromachining process. The resonant frequency of the microfabricated microresonator has been measured for a varying tuning voltage at the reduced pressure of 1 torr. The maximum 3.3% reduction of the resonant frequency is achieved at the tuning voltage increase of 20V.

#### 1. 서론

최근 MEMS기술에 의한 정전구동형 미소공진 구조물<sup>(1~8)</sup>은 구조가 간단하고 물리량 변화에 따른 공진주파수의 민감도가 뛰어나 가속도,<sup>(2)</sup> 각속도,<sup>(3)</sup> 힘,<sup>(4)</sup> 압력,<sup>(5)</sup> 온도<sup>(6)</sup> 등의 고감도 센서에 널리 이용되고 있으며, 특히 주파수에 따른 신호의 전달특성과 안정성이 뛰어나 전자소자<sup>(7)</sup> 및 광소자<sup>(8)</sup>에의 응용이 날로 증대되고 있다. 이러한 미소공진기는 응용목적에 따라 특정 공진주파수를 가지도록 설계되지만 마이크로머시닝 공정오차에 의하여 제작된 미소공진기의 공진주파수는 설계치에서 벗어나는 경우가 많다. 또한 미소전자 및 광학소자에서의 응용에서는 미소공진기의 주파수 변화를 통해 소자의 신호전달 특성을 조절하여야 하는 경우가 많다.

따라서 미소공진기를 제작 한 후, 제작된 미소공진기의 공진주파수를 보정하거나 조정할 수 있는 방법이 필요하다. 지금까지 발표된 미소공진기의 주파수 조정방법은 두 개의 평행평판 사이에서 발생하는 비선형 정전력<sup>(9,9)</sup>을 이용하거나, 동일 평면상에서 서로 어긋나게 배열한 한쌍의 빗살구조물 사이에서 발생하는 비선형 정전력<sup>(10)</sup>을 이용하였다.



**Fig. 1** Electrostatic force characteristics of the conventional comb structure: (a) Conventional electrostatic comb structure; (b) Electrostatic attractive-force curve

\* 한국과학기술원 디지털나노구동연구단  
† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 디지털나노구동연구단  
E-mail : dnc@kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

본 논문에서는 기관과 평행하게 진동하는 미소 공진기의 공진주파수를 조정할 수 있는 새로운 형태의 주파수 조정구조물과 조정방법을 제시한다. 본 논문에서 제시하는 주파수조정구조물 (Fig. 2)은 빗살의 길이를 계단식으로 변화시킨 삼각형 배열의 빗살구조물과 빗살의 길이가 일정한 사각형 배열의 빗살구조물의 쌍으로 구성되며, 전압인가 시 두 빗살구조물 사이에서 발생하는 선형 정전력을 이용하여 미소공진기의 주파수를 조정한다. 또한 계단식 배열의 빗살구조물에서의 정전력과 공진주파수의 변화를 이론적으로 분석하였으며, 표면미세가공법을 이용하여 주파수조정이 가능한 미소공진기를 제작하고 주파수 조정시험에서 얻은 결과와 이론적 예측치를 비교 토의한다.

2. 주파수 조정구조물의 힘특성

기존의 정전 빗살구조물은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 이동빗살이 정지빗살 사이로 완전히 삽입된 상태에서 변위와 무관하게 발생하는 정전력을 이용하여 미소구조를 구동한다. 한편 본 논문에서 제안하는 주파수 조정 구조물은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 일정길이의 빗살을 가지는 이동빗살과 길이가 선형적으로 변하는 빗살을 가지는 정지 빗살로 이루어진 주파수 조정구조물을 이용하고, Fig. 1에서 도시한 바와 같이 이동빗살이 정지빗살 사이로 완전히 삽입되기 전 상태에서의 정전력을 사용하여 주파수 조정을 수행하게끔 고안되었다.

Fig. 2에서 이동빗살과 삼각형으로 배열된 정지 빗살이 겹쳐진 부분의 삼각형의 높이  $j$ 는 다음과 같다.

$$j = \frac{H}{B} \left( \frac{B}{2} + x \right) \tag{1}$$

여기서  $B$ 는 정지된 삼각형빗살의 밑변,  $H$ 는 정지된 삼각형빗살의 높이,  $x$ 는 정지된 삼각형빗살의 중앙위치인  $B/2$ 에서 우측으로 움직이는 이동빗살의 변위를 각각 나타낸다. 하나의 빗살의 대한 정전력이 Fig. 1(b)와 같이 연속적으로 변할 때, 빗살의 피치  $p$ 에 대하여 이동빗살에 삽입된 정지 빗살의 수는  $n=j/p$ 이므로 빗살에 의해 만들어지는 유효한 축전기의 수는  $2n$ 이다. 그러므로 삽입된 빗살에 의해 유기되는 정전력 (Fig. 3)은 다음과

같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$F_e = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) V_i^2 = n \left( \epsilon \frac{t}{s_1} \right) V_i^2 = \left( \frac{\epsilon t}{ps_1} \right) j V_i^2 \tag{2}$$

여기서  $\epsilon$ 는 유전율,  $p$ 는 빗살의 피치,  $t$ 는 빗살구조물의 두께,  $s_1$ 은 이동빗살과 정지빗살사이의 간격,  $j$ 는 삽입된 빗살 삼각형의 높이,  $V_i$ 는 조정전압을 각각 나타낸다.

식 (1)과 식 (2)에서 삽입된 빗살에 의하여 유기되는 정전력은 변위  $x$ 에 관하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_e = \alpha x + \beta \tag{3}$$

한편  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\alpha = \frac{\epsilon t H}{ps_1 B} V_i^2 = \frac{\epsilon t}{ps_1 \tan \theta} V_i^2 \tag{3a}$$

$$\beta = \frac{\epsilon t H}{2ps_1} V_i^2 \tag{3b}$$

여기서  $\theta$ 는 Fig. 2의 주파수조정구조물에서 고정 빗살의 각도를 나타낸다.

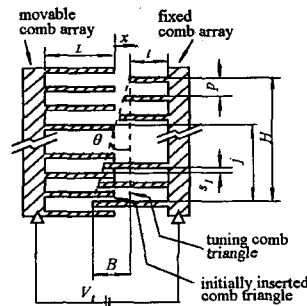


Fig. 2 Frequency tuning comb array with linearly varied finger-length

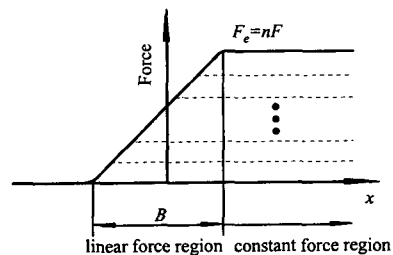


Fig. 3 Electrostatic frequency-tuning force, generated by the tuning-comb array of Fig. 2

식 (3), (3a), (3b)는 제안된 주파수 조정구조물 (Fig. 2)의 정전력의 크기는 변위  $x$ 에 비례하고 조정전압  $V_i$ 의 제곱에 비례하는 것을 나타낸다. 그러므로 전압이 일정할 때 주파수조정구조물에 작용하는 정전력 변화율은 변위  $x$ 에 대하여 일정하다. 주파수조정구조물에 작용하는 정전력이 이동빗살의 변위에 비례하는지를 확인하기 위하여 유한요소법에 기반을 둔 상용소프트웨어인 Maxwell<sup>(11)</sup>을 이용하여 Fringe effect를 고려한 정전력 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4는 주파수 조정구조물의 정전력 해석결과를 보여주며, 이러한 결과를 이용하여 단위전압, 단위 구조물 두께에 대한 정전력 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 공진주파수를 조정하기 위해선 Fig. 5의 곡선에서 보는 바와 같이 변위에 대하여 정전력이 선형으로 증가하는 부분을 이용한다.

식 (3a)와 유한요소법으로 해석한 정전력변화율  $(a/tV_i^2)$ 을 Table 1에서 비교하였다. 빗살사이의 간격  $s_f=3\mu\text{m}$ , 빗살사이의 피치  $p=12\mu\text{m}$ , 주파수조정구조물의 높이  $H=360\mu\text{m}$ 인 경우에 각도  $\theta$ 를 증가시킬 때 정전력 변화율이 감소한다. Table 1에서 보면,  $\theta=0^\circ$ 일 때 식 (3a)에 의한 정전력 변화율은 무한대이지만 유한요소법의 해석결과는  $10.88\text{N/m}^2\text{V}^2$ 임을 알 수 있고,  $\theta=7.1^\circ$ 보다 커지면 이론치와 시뮬레이션결과가 서로 접근함을 알 수 있다. 그러므로 빗살사이의 간격  $s_f=3\mu\text{m}$ , 빗살사이의 피치  $p=12\mu\text{m}$ , 주파수조정구조물의 높이  $H=360\mu\text{m}$ 인 경우에는  $\theta=7.1^\circ$ 보다 커지면, 주파수 조정구조물의 힘은 위의 식 (3a)로 단순화하여 표시할 수 있다. 각도  $\theta$ 가 적어질 때 이론치와 시뮬레이션 결과의 차이가 발생하는 것은 프린지 효과(Fringe effect) 등의 원인에 의하여 정전력이 계단식으로 변하지 못하기 때문이며, 시뮬레이션 결과가 식 (3a)에 의한 이론치 보다 좀더 실제에 가까운 값을 준다.

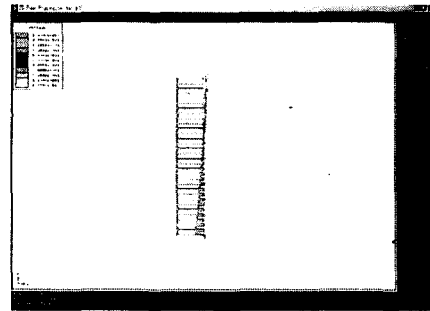
### 3. 주파수조정 미소공진기

미소공진기(Fig. 6)의 구동부분은 스프링구조물에 의하여 지지되어 있고 기존의 구동빗살과 본 논문에서 제안한 주파수 조정 빗살로 구성되어 있다. 전체 미소구조물은 구동빗살에 의하여  $x$  방향으로 구동되며,  $x$  방향의 공진주파수는 주파수조정빗살에 의해 조정된다.

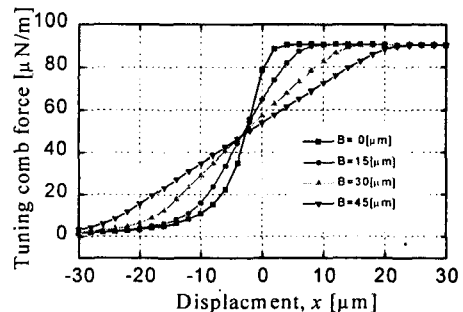
**Table 1** Comparison of the electrostatic force term,  $(a/tV_i^2)_{th}$ , obtained from Eq.(3a), and  $(a/tV_i^2)_{sim}$  from the FEM simulation for the frequency tuning comb array of Fig. 2

$\theta$ [deg]	$B$ [ $\mu\text{m}$ ]	$H$ [ $\mu\text{m}$ ]	$(a/tV_i^2)_{th}$ [ $\text{N/m}^2\text{V}^2$ ]	$(a/tV_i^2)_{sim}$ [ $\text{N/m}^2\text{V}^2$ ]
0	0	360	$\infty$	10.88
2.4	15	360	5.90	5.15
4.8	30	360	2.95	2.11
7.1	45	360	1.97	1.93

\*The term,  $(a/tV_i^2)$ , is estimated when the inter-finger gap of  $s_f = 3\mu\text{m}$ , and the comb of height of  $1\text{m}$  of the comb; the other data for  $\theta$ ,  $B$  and  $H$ , respectively denoting the angle, base and height of the tuning comb triangle, are listed in Table 2



**Fig. 4** Finite element simulation of the electrostatic force generated by the frequency tuning comb array of Fig. 2



**Fig. 5** Finite element simulation of the electrostatic force generated by the frequency tuning comb array of Fig. 2

공진주파수를 조정전압으로 나타내기 위해, 중앙위치에서 우측으로 움직이는 이동부분위에 작용하는 힘 (Fig. 7)을 생각한다. 미소공진기의 이동부분에 있는  $N$ 개의 주파수조정빗살에 의한 복원력  $F_r$ 은  $x$ 방향의 힘 평형식에서 구하면 다음과 같다.

$$F_t = F_s + F_{el} - F_{er} = (k - k_e)x \quad (4)$$

여기서

$$k_e = Na = N \frac{\epsilon t H}{\rho s_1 B} V_t^2 \quad (4a)$$

이며,  $N$ 은 미소공진기의 주파수조정 빗살구조물의 수,  $k$ 는 스프링구조물의  $x$ 방향의 스프링상수,  $F_s$ 는 스프링구조물의 탄성력,  $F_{el}$ 은 좌측부분의 주파수조정 구조물의 정전력,  $F_{er}$ 은 우측부분의 주파수조정 구조물의 정전력,  $a$ 는 한 개의 주파수조정 구조물의 정전 스프링상수(식 (3a)),  $k_e$ 는  $N$ 개의 주파수조정 구조물의 정전 스프링상수를 각각 나타낸다.

미소공진기 (Fig. 6)의 유효스프링상수  $k_{eff}$ 는 복원력  $F_t$ 의 미분으로 구해진다.

$$\frac{k_{eff}}{k} = \frac{1}{k} \frac{\partial}{\partial x} (F_t) = 1 - \frac{k_e}{k} \quad (5)$$

그러므로 미소공진기 (Fig. 3)의  $x$ 방향의 공진주파수는 다음과 같다.

$$\frac{f_r}{f_m} = \sqrt{1 - \left(\frac{k_e}{k}\right)} \quad (6)$$

여기서  $f_m$ 는 주파수조정 전압이 0V일 때 미소공진기(Fig. 6)의 공진주파수를 나타내며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6a)$$

식 (3a), (5)와 (6)은 미소공진기의 유효스프링상수와 공진주파수는 변위  $x$ 의 함수가 아니라 조정전압  $V_t$ 의 함수임을 나타낸다. 또한 식 (3a), (5)와 (6)에서 조정전압을 증가시키면 유효스프링상수  $k_{eff}$ 가 감소하므로, 정전스프링상수는 음의 스프링으로 작용함을 알 수 있다.

Table 2 A frequency tunable microactuator with the electrostatic comb array of step profile

Microactuator	Mass of movable part	$1.30 \times 10^{-9}$ kg
	Lateral stiffness**	0.30 N/m
	Lateral resonant frequency	2.42 kHz
Tuning Comb	Number of tuning comb triangle ( $N$ )	8 ea
	Base of tuning comb triangle ( $B$ )	$30.0 \mu\text{m}$
	Height of tuning comb triangle ( $H$ )	$360 \mu\text{m}$
	Comb-finger pitch ( $p$ )	$12.0 \mu\text{m}$
	Inter-finger gap ( $s_1$ )	$3.0 \mu\text{m}$
	Finger width ( $s_2$ )	$3.0 \mu\text{m}$
	Structure thickness ( $t$ )	$3.3 \mu\text{m}$

\* $\rho=2,330\text{kg/m}^3$ ; \*\* $E=150\text{GPa}$

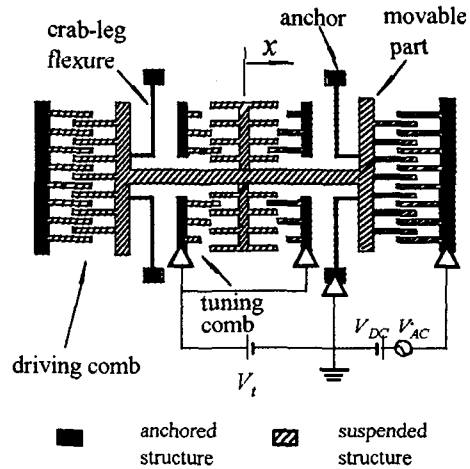


Fig. 6 Schematic view of a frequency tunable electrostatic microactuator using the tuning comb arrays

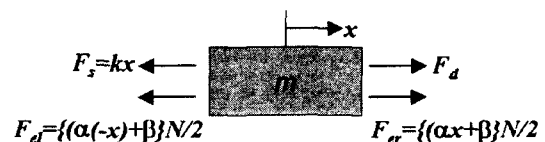


Fig. 7 Force diagram of the microresonator

Table 2는 주파수 조정 미소공진기 (Fig. 6)의 이동부분이 수평방향으로  $\pm 5\mu\text{m}$  움직일 때 정전력이 선형으로 변할 수 있게 설계한 결과를 나타낸다.

4. 제조공정

설계된 주파수조정 미소공진기는 Fig. 8에 도시된 바와 같이 4장의 마스크를 이용한 표면미세 가공(Surface-micromachining)으로 제작했다. 먼저 실리콘기판위에  $2.0\mu\text{m}$  두께의 열산화막을 형성한다.

Fig. 8(a)공정은 하부전극으로 사용되는 첫 번째 다결정실리콘(POLY1)의 제작까지를 나타낸 것이다.  $1\mu\text{m}$ 의 열산화막위에 2000 Å 두께의 LPCVD 질화막(Low Pressure Chemical Vapor Deposited Nitride)을 형성한 후, 2000 Å 두께의 LPCVD POLY1을 형성한다. 하부전극으로 사용하기 위해 첫 번째 마스크를 이용하여 POLY1을 식각한다. Fig. 8(b)공정에서는 희생층으로 사용하기 위한  $2.2\mu\text{m}$  두께의 PSG를 만든 후, Fig. 8(c)공정에서 지지부를 만들기 위해 두 번째 마스크를 이용하여 PSG를 식각한다. Fig. 8(d)공정에서 도핑하지 않은  $3.3\mu\text{m}$  두께의 다결정실리콘층(POLY2)을  $625^\circ\text{C}$ 에서 증착하고 POLY2위에  $1\mu\text{m}$  두께의 PSG를 증착한 후  $950^\circ\text{C}$ 에서 한시간동안 어닐링한다. Fig. 8(e)공정에서 PSG위에 세번째 마스크로 구조물의 패턴을 함으로써 PSG식각한 후  $\text{Cl}_2$  플라즈마를 이용한 RIE로 POLY2를 이방성식각을 하면 미세구조물을 얻었다. Fig. 8(f)공정에서 희생층 PSG를 HF용액에서 제거하여 떠있는 구조물을 제작한다. 마지막으로 전기접속을 하기 위해 네 번째 마스크인 사도우마스크를 이용하여 알루미늄전극을 형성한다.

Fig. 9는 8개의 삼각형 주파수조정 빗살구조물을 이용하는 주파수조정 미소공진기의 SEM사진을 나타낸다. 미소공진기 전체의 크기는 약  $1\text{mm}^2$  정도이다. Fig. 10은 주파수조정 빗살을 확대한 SEM사진으로서 빗살의 길이는  $35\mu\text{m}$ 에서  $65\mu\text{m}$ 까지 변화시킨 것이다.

5. 시험 및 측정

제작된 주파수조정 미소공진기(Fig. 9)의 공진 주파수를 1torr로 감압된 챔버 안에서 측정하였

다. 구동전압을  $V_{DC} + V_{AC} \cdot \sin\omega t$  로 가하여 미소공진기(Fig. 9)의 이동부분을 구동시키면서, 조정 전압  $V_r$ 를 조정하여 미소공진기의 공진주파수를 조정하였다. 이때 AC구동전압  $V_{AC}$ 는 5V, DC바이어스전압  $V_{DC}$ 는 25V로 일정하게 유지하였다.

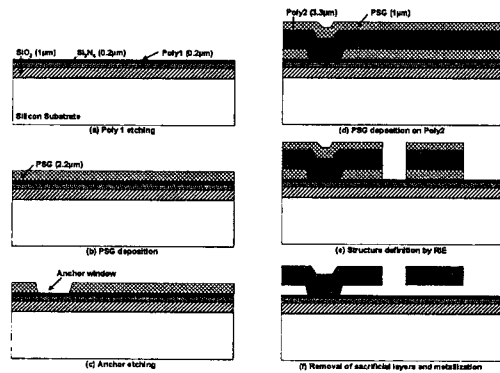


Fig. 8 Fabrication process

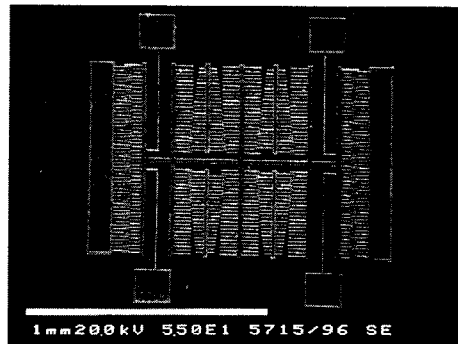


Fig. 9 SEM photograph of the fabricated frequency-tunable microresonator

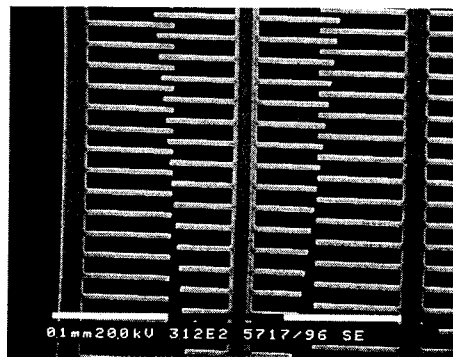


Fig. 10 Enlarged view of the tuning combs of the microactuator shown in Fig. 9

실험에서 공진주파수 조정전압  $V_t$ 이 0V일 때 측정된 구조물의 공진주파수  $f_0$ 는 2.42kHz였고,  $V_t$ 를 0V에서 20V사이로 변화시키면서 제작된 미소공진기의 공진주파수 변화를 측정하였으며, Fig. 11에서 조정전압  $V_t$ 가 변하는 동안 공진주파수의 이론치와 측정치를 비교하였다. 측정된 공진주파수는 조정전압이 20V증가할 때 3.3%(80Hz) 감소하였으나 유한요소법에 이용하여 계산한 공진주파수 감소예상치는 3.8%(92Hz)였고, 이론식 (3a)에 의해서 계산한 공진주파수 감소예상치는 5.3%(140Hz)였다. 유한요소법으로 얻어진 정전력 변화율을 이용하여 계산한 공진주파수 변화율이 측정치에 더 가까운 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11의 공진주파수 측정치에서 얻어진 유효스프링상수와 식 (5)로 계산된 유효스프링상수를 비교한 것이다. 유효스프링상수 (Fig. 12)는 조정전압의 제곱에 비례하여 감소하였으며, 조정전압에 대한 유효스프링상수의 감소율의 측정치와 이론치는 각각  $-4.9 \times 10^{-5} \text{N/mV}^2$  과  $-7.8 \times 10^{-5} \text{N/mV}^2$  이었다. Fig. 5의 유한요소법에서 얻어진 주파수조정구조물의 정전력 변화율을 이용하여 계산한 유효스프링상수의 감소율은  $-5.5 \times 10^{-5} \text{N/mV}^2$ 로서 실험치에 더 가까웠다. 주파수조정 미소공진기의 조정전압을 증가시키면 유효 스프링상수(Fig. 12, 식 5)가 감소하며, 이에 의해 미소공진기의 주파수 (Fig. 11, 식 6)가 감소하였다. Fig. 11과 12에서 프린지효과(Fringe effect)를 고려한 유한요소 해석이 프린지효과(Fringe effect)를 무시한 이론치에 비해 보다 측정치에 가까운 값을 보임을 알 수 있으며, 측정치와 유한요소 해석 결과간의 오차는 대부분 측정 오차에서 기인한다.

### 6. 결론 및 토의

다수 개의 정전 빗살구조물을 계단식으로 배열 함으로써, 제작이 완료된 미소기계구조물의 공진 주파수를 조정할 수 있는 새로운 구조물과 조정 방법을 제시하였다. 제시된 주파수조정 구조물은 빗살구조물의 길이를 선형으로 변화시켜 배열 한 것으로, 이에 대응되는 동일길이의 빗살구조 물과 주파수조정 구조물사이에 인가된 정전압에 의해 발생하는 선형 정전력을 이용하여 구조물의 공진주파수를 변화시킨다. 이론적인 해석과 유

한요소법 해석을 통해, 주파수조정 구조물에 의 해 발생하는 정전력과 이로 인한 계의 유효스프 링상수의 변화를 조정전압의 함수로 표현함으로 써, 수평구동형 미소구조물의 공진주파수 변화를 이론적으로 예측하였다. 조정전압을 인가할 때 주파수조정 구조물에 작용하는 정전력의 변화율 은 계단식 빗살구조물의 배열각도를 크게 할수록 감소하였으며, 주파수조정 구조물의 배열각도가 커질수록, 주파수조정 구조물의 이론치는 유한요 소법으로 얻은 수치해석결과에 점진적으로 접근 하였다. 실험에서 주파수 조정전압이 증가할 때 미소공진기의 유효스프링상수는 감소하였으며 이 에 의해 공진주파수도 감소하였다. 조정전압의 20V 증가시 공진주파수는 3.3%감소하였다. 유효 스프링상수는 조정전압의 제곱에 비례하여 감소 하였으며, 유효 스프링 상수 감소율은  $-4.9 \times 10^{-5} \text{N/mV}^2$ 로 측정되었다.

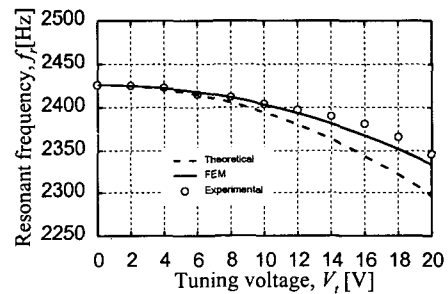


Fig. 11 Theoretical and experimental resonant frequencies for varying tuning-voltage

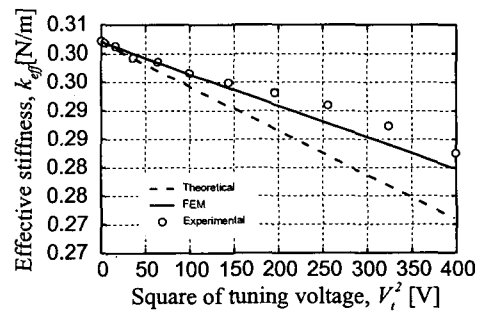


Fig. 12 Theoretical and experimental effective stiffness of the frequency tunable microresonator for varying tuning voltage

본 논문에서 제시된 주파수조정 구조물과 조정 방법은 수평구동형 미소공진기와 미소구동기, 공진형 센서 의 마이크로머시닝 공정오차에 의한 주파수 보정 뿐만 아니라 미소 전기 및 광 신호 조절기의 공진주파수 및 밴드폭을 조정하는데 사용할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 “생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Tang, W.C., Nguyen, C.T.-C. and Howe, R.T. 1989, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures," *Sensors and Actuators*, A20, pp. 25~32.
- (2) Hierold, C., Hildebrandt, A., Naher, U. Scheiter, T., Mensching, B., Steger, M. and Tielert, R., 1996, "A pure CMOS surface micromachined integrated accelerometer," *Proc. Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 174~179.
- (3) Lee, K.B., Yoon, J.-B., Kang, M.-S., Cho, Y.-H., Youn, S.-K., and Kim, C.-H., 1996, "A surface-micromachined tunable microgyroscope," *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA-96)*, Hawaii, pp. 498~502.
- (4) Roessig, T., Pisano, A.P., Howe, R.T., 1995, "Surface-micromachined resonant force sensor," *Proc. the ASME Dynamic Systems and Control Division*, pp. 871~876.
- (5) Habibi, M., Lueder, E., Kallfass, T., Horst, D., 1995, "A surface micromachined capacitive absolute pressure sensor array on a glass substrate," *Sensors and Actuators*, A46-47, pp. 125~128.
- (6) Langdon, R.M., "Resonant sensors-a review," 1985, *J Phys E: Sci Instrum*, 18, pp. 103~115.
- (7) Wang, K. and Nguyen, C.T.-C., 1997, "High-order microelectromechanical electronic filters," *Proc. Micro Electro Mechanical Systems*, Nagoya, Japan, pp. 25~30.
- (8) Sene, D.E., Grantham, J.W., Bright, V.M. and Comtois, J.H., 1996, "Development and characterization of micro-mechanical gratings for optical modulation," *Proc. Micro Electro Mechanical Systems*, San Diego, CA, U.S.A., pp. 222~227.
- (9) Yao, J.J. and MacDonald, N.C., 1996, "A micromachined, single-crystal silicon, tunable resonator," *J. Micromech. Microeng.*, 6, pp. 257~264.
- (10) Adams, S.G., Bertsch, F.M., Shaw, K.A., Hartwell, P.G., MacDonald, N.C. and Moon, F.C., 1995, "Capacitance base tunable micromechanical resonators," *Proc. 8th Inter. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '95)*, Stockholm, pp. 438~441.
- (12) *Maxwell solver*, Electrostatic Package V.4.20, Ansoft Corp., Pittsburgh, PA, U.S.A.