

수평구동형 정전반발력 마이크로액추에이터

이 기 방* · 조 영 호†

(2000년 5월 25일 접수, 2000년 12월 21일 심사완료)

Laterally-Driven Electrostatic Repulsive-Force Microactuator

Ki Bang Lee and Young-Ho Cho

Key Words: Repulsive-Force(반발력), Electrostatic Force(정전력), Microactuator(마이크로액추에이터), Frequency-Tuning(주파수조정), Quality-Factor(감쇠인자)

Abstract

We present a new electrostatic repulsive-force microactuator using a lateral repulsive force induced by an asymmetric distribution of electrostatic field. The lateral repulsive force has been characterized by a simple analytical equation, derived from a finite element simulation. A set of repulsive force polysilicon microactuators has been designed and fabricated by a 4-mask surface-micromachining process. Static and dynamic micromechanical behavior of the fabricated microactuators has been measured at the atmospheric pressure for a varying bias voltage. The static displacement of the fabricated microactuator, proportional to the square of the DC bias voltage, is obtained as $1.27\mu\text{m}$ for the DC bias voltage of 140V. The resonant frequency of the repulsive-force microactuator increases from 11.7 kHz to 12.7 kHz when the DC bias voltage increases from 60V to 140V. The measured quality-factor varies from 12 to 13 for the bias voltage range of 60V~140V. The characteristics of the electrostatic repulsive-force have been discussed and compared with those of the conventional electrostatic attractive-force.

1. 서 론

표면미세가공에 의해 제작된 수평구동형 정전력 마이크로 액추에이터⁽¹⁻⁴⁾는 크기가 작고, 구조와 제작공정이 간단하며, 점성감쇠가 낮고 빠른 응답 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있어 널리 사용되어 왔으며, 수평구동부의 구조와 동작방식에 따라 측면구동(Edge-drive)⁽¹⁾, 상위구동(Top-drive)⁽²⁾, 빗살구동(Comb-drive)^(3,4) 등으로 분류된다. 이러한 기존의 수평구동 마이크로 액추에이터는 두 전극 사이의 수평방향의 정전인력(electrostatic attractive force)⁽¹⁻³⁾을 이용해 왔다.

본 논문에서는 기판과 수평으로 미소구조물을 구동시키기 위해 기판과 평행한 평면상에서 제3의 미소전극을 추가배치하여 두 전극간의 전기장

분포의 비대칭성을 야기하고 이로부터 유기되는 수평방향의 정전반발력을 이용하는 새로운 형태의 수평구동형 정전반발력 마이크로 액추에이터를 제안한다. 이론적인 연구에서 유한요소법(Finite Element Method)를 이용하여 정전반발력을 해석하였으며, 이를 이용하여 수평구동형 정전기 마이크로 액추에이터의 변위와 공진주파수에 관한 식을 유기전압의 함수로 유도하였다. 이로부터 정전반발력을 이용한 미소정전액추에이터를 설계하여 표면미세가공법으로 제작하였으며, 실험을 통하여 정적인 특성과 동적인 특성을 측정하고 그 결과를 분석하였다.

2. 이론적 해석

2.1 수평방향의 정전반발력

수평 정전반발력은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 하나의 이동전극 I과 고정전극 II에 제3의 고정전극 III을 추가 배치함으로써 얻을 수 있다. 즉, 이동전극에 작용하는 수평정전반발력 F_x 은 유기

* 한국과학기술원 기계공학과
마이크로머신 및 마이크로시스템 연구실
† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : mems@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3038 FAX : (042)869-3050

전압 V 를 인가할 때 x 방향의 비대칭적 전기장에 의해 유기된다. 이때 유기되는 정전반발력의 특성을 알아보기 위해 유한요소법(Maxwell 2D 시뮬레이터)을 이용하여 전기장 해석을 수행하였다. 유한요소 해석을 통하여 이동전극의 폭이 $b=5\mu\text{m}$, 이동전극과 고정전극 사이의 간격이 $d=3\mu\text{m}$ 인 경우, 치수변화에 따른 정전반발력을 Fig. 2와 같이 구하였다. Fig. 2에서 관련변수와 정전반발력의 관계를 살펴보면, 정전반발력(F_r)은 전압(V)과, 이동전극 I과 고정전극 II 사이의 간격(r)과, 이동전극과 고정전극 III 사이의 간격(d)에 크게 관계되고 이동전극의 폭(b)와는 큰 관계가 없음을 알 수 있다. 이러한 경향을 고려하여 단위길이 당 수평정전반발력 F_r 을 다음과 같이 수식으로 표현하였다.

$$F_r = J e^{-\frac{r}{S}} V^2 \quad (1)$$

여기서 J 과 S 는 전극의 기하학적인 형상에 의존하는 상수들이고, r 은 이동전극과 고정전극 II 사이의 간격이다. 식 (1)의 J 과 s 는 Fig. 2의 유한요소 해석결과에서 각각 $1.46 \times 10^{-6} [\text{N/m}^2\text{V}^2]$ 과 $8.68 \times 10^{-6} [\text{m}]$ 로 얻었다. 식 (1)에 의하면 수평정전반발력 F_r 이 이동전극과 고정전극 II 사이에 작용하므로 유기전압 V 가 증가하더라도 이동전극 (Fig. 1)은 고정전극 II에 접촉하지 않음을 알 수 있다.

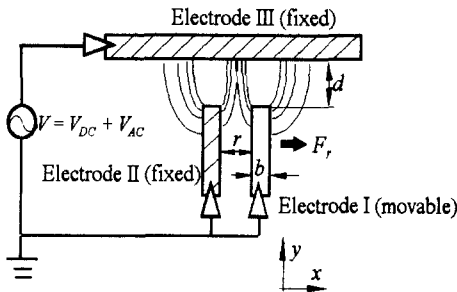
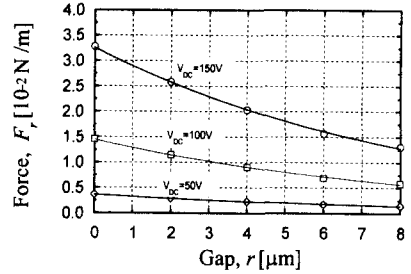
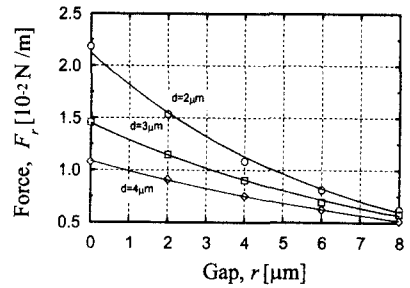


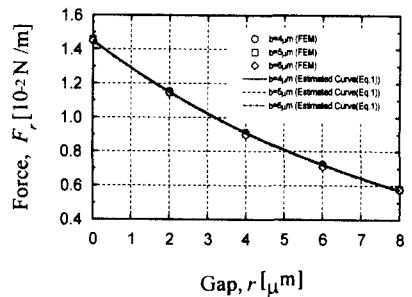
Fig. 1 Origin of an electrostatic repulsive-force: the repulsive force, F_r , is induced by the asymmetric electric field generated by the induction voltage, V ; b , d and r denote the movable electrode width, the gap between the electrodes I and III, and the gap between the electrodes I and II, respectively



(a) Repulsive force vs gap for the varying DC bias voltage, V_{DC} : b and d are $5\mu\text{m}$ and $3\mu\text{m}$, respectively



(b) Repulsive force vs gap for the varying gap, d , between the movable electrode I and the fixed electrode III: b and V_{DC} are $5\mu\text{m}$ and 100V , respectively



(c) Repulsive force vs gap for the varying width, b , of the movable electrode: d and V_{DC} are $3\mu\text{m}$ and 100V , respectively

Fig. 2 Characterization of the lateral electrostatic repulsive-force: F_r indicates the repulsive force per unit electrode thickness depending on the inter-electrode gap, r in Fig.1, the bias voltage and the electrode width

2.2 정전반발력 액추에이터 거동해석

정전반발력을 이용한 수평구동형 마이크로 액추에이터를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 액추에이터의 질량체부분은 스프링구조물에 의하여 지지되어 있으며, 기관과 나란한 수평방향의 정전반발력 F_r 에 의하여 x 방향으로 구동된다. 이 액추에이터는 질량 m , 스프링상수 k , 댐핑계수 c 로 이루어진 1 자유도의 진동계(Fig. 4)로 생각할 수 있다. DC 바이어스전압 V_{DC} 와 AC구동전압 V_{AC} 의 합으로 이루어지는 유기전압 V 를 Fig. 1과 같이 전극에 인가하면, 고정전극 II와 이동전극 (Fig. 4)사이의 간격 r 은 초기간격 r_o 에서 최종간격 r_1 으로 변화한다. 이때 최종 평형간격 r_1 은 수평방향의 정전 반발력과 구조물의 탄성력의 평형식으로부터 구할 수 있다.

DC 바이어스 전압 V_{DC} 에 대한 최종간격 r_1 에서 수평방향의 정전반발력과 구조물의 탄성력의 평형식은 다음과 같이 기술된다.

$$R e^{-\frac{r_1}{s}} V_{DC}^2 = k(r_1 - r_o) \quad (2)$$

여기서

$$R = ntJ \quad (2a)$$

이며 k, n, t, r_o 는 액추에이터(Fig. 3)의 스프링상수, 이동전극의 갯수, 액추에이터 구조물의 두께, 고정전극 II와 이동전극 사이의 초기간격을 각각 나타내며, J 는 식 (1)에서 정의된 상수이다. 식 (2)에서 최종간격 r_1 에 대한 DC 바이어스 전압, V_{DC} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{DC} = \sqrt{\frac{k}{R} (r_1 - r_o)} e^{\frac{r_1}{2s}} \quad (3)$$

최종간격 r_1 상태에서 정전반발력 액추에이터(Fig. 4)의 유효스프링상수 k_{eff} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_{eff} = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ k(r - r_o) - R e^{-\frac{r}{s}} V_{DC}^2 \right\}_{r=r_1} \\ = k + \frac{A}{S} e^{-\frac{r_1}{s}} V_{DC}^2 \quad (4)$$

식 (4)에서 유효스프링상수 k_{eff} 는 최종간격 r_1 과 DC 바이어스전압 V_{DC} 의 함수이다. 식 (2)를 식 (4)에 대입하면, 유효스프링상수 k_{eff} 를 최종간격 r_1 의 함수로 구할 수 있다.

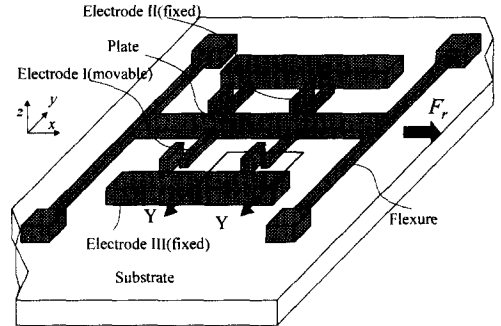


Fig. 3 A schematic model of the laterally-driven repulsive-force microactuator, whose planar mass and movable electrodes are suspended by the flexures: The repulsive force, F_r , is generated by the asymmetric distribution of electrostatic field among three electrodes; the cross-sectional view of Y-Y is shown in Fig. 11

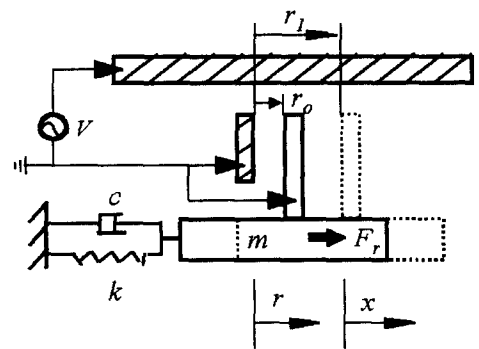


Fig. 4 A dynamic model of the lateral repulsive force microactuator: V denotes the induction voltage, composed of the DC bias voltage, V_{DC} , and the AC drive voltage, V_{AC}

$$k_{eff} = k \left(1 + \frac{r_1 - r_0}{B} \right) \quad (5)$$

따라서 최종간격 r_1 에서 구조물의 공진주파수는 다음과 같이 표시된다.

$$f_r = f_{r0} \sqrt{1 + \frac{r_1 - r_0}{S}} \quad (6)$$

여기서

$$f_{r0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6a)$$

이다. 식 (3), (5), (6)을 물리적으로 살펴보면, DC 바이어스 전압 V_{DC} 이 증가하면 최종간격 r_1 이 증가하고 이에 따라 미소구조물의 유효스프링상수와 공진주파수가 증가한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 정전반발력 액추에이터의 경우 DC 바이어스 전압이 증가함에 따라 유효스프링상수가 증가하는 반면, 기존 정전인력 액추에이터의 경우 전압증가에 따라 유효스프링상수는 감소⁽⁶⁾한다.

한편 구동전압 $V = V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t$ 로 가해질 때 정전반발력 액추에이터(Fig. 4)의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 r}{dt^2} + c \frac{dr}{dt} + k(r - r_0) \\ = J e^{-\frac{r}{S}} (V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 r , r_0 는 고정전극 II과 이동전극 사이의 간격과 초기간격을 각각 나타낸다. $V_{AC} \ll V_{DC}$, $r - r_1 \ll r_1$ 이고 액추에이터의 이동전극이 평형위치 r_1 에서 미소진동할 때, 식 (4)를 이용하여 식 (7)을 다음과 같이 간단하게 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + k_{eff} x \\ = 2J e^{-\frac{r_1}{S}} V_{DC} V_{AC} \sin \omega t \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 ω , r_1 , x 는 구동주파수, DC 바이어스전압 V_{DC} 에서 평형을 이루는 전극간 최종간격, 그리고

평형위치(Fig. 4) r_1 에서의 이동전극의 상대변위 변위($r - r_1$)를 각각 나타낸다.

2.3 정전반발력 액추에이터의 점성감쇠인자 분석

Fig. 5과 같이 대기압하의 공기중에서 기판위에서 진동하는 수평구동형 정전반발력 마이크로 액추에이터의 감쇠는 주로 공기의 점성력에 의하여 발생한다. Fig. 5는 이 액추에이터에서 발생하는 여러가지 감쇠력을 성분별로 도시한 것으로, 다음과 같이 크게 4가지 성분으로 나타낼 수 있다. 첫째, 이동전극 II 중 고정전극에 인접한 부분의 운동에 의해 발생하는 점성감쇠력 성분, 둘째, 이동전극 II 중 고정전극과 겹쳐지진 않은 부분의 운동에 의해 발생하는 것, 셋째, 지지스프링의 운동에 의해 발생하는 것, 마지막으로 평판질량의 운동으로 발생하는 성분으로 나눌 수 있다. 레이놀드수가 아주 작은 경우(보통 1 이하), Fig. 5의 마이크로 액추에이터 주위의 공기의 흐름은 공기의 관성효과가 무시되는 크리핑유동(Creeping flow)⁽⁷⁾으로 볼 수 있다.

먼저 고정전극과 겹쳐지는 이동전극(Fig. 5)의

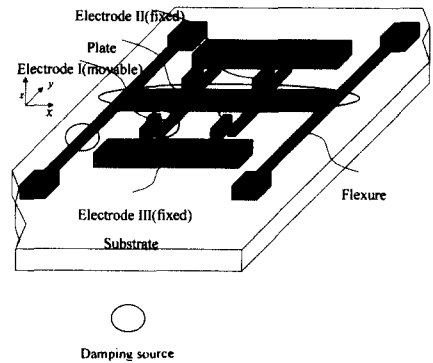


Fig. 5 Possible sources of the damping forces in a laterally-driven repulsive force micro-actuator: 1) damping in the air gap between the movable electrodes overlapped with the fixed electrodes; 2) damping due to the movable electrode portion non-overlapped with the fixed electrodes; 3) damping due to the flexure motion over the substrate; 4) damping due to the plate motion over the substrate

운동으로 인하여 발생하는 감쇠력을 얻기 위하여, 이동전극이 고정전극 II에 대하여 수평방향으로 U 의 속도로 움직이는 경우의 감쇠력 모델(Fig. 6)을 생각한다. 이러한 경우에 레이놀드 수는 1보다 작으므로 점성력이 관성력에 비하여 현저히 큰 클리핑유동이 된다. 이러한 유동을 해석하기 위하여 상용소프트웨어인 FLUENT⁽⁸⁾을 이용하였다. Fig. 7은 이러한 해석을 통하여 얻어진 이동전극주위의 공기입자의 유동을 나타낸 것으로서, 공기유동이 시간에 따라 속도가 달라지는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 이동전극의 속도가 0.1m/sec인 경우, 구동전극 중 고정전극 II와 겹쳐지는 부분에 작용하는 감쇠력을 보여준다. Fig. 8의 해석결과를 이용하여, 다음과 같은 무차원 감쇠력 α_g 를 정의하였다.

$$\alpha_g = \frac{F_g}{\mu UL_g} = \frac{D}{rT} \quad (9)$$

여기서 F_g , L_g , U , r , D , T 는 겹쳐진 이동전극의 운동으로 인한 점성 감쇠력, 이동전극의 겹쳐진 부분의 총 길이, 공기의 점성계수, 이동전극의 속도, 이동전극과 고정전극 II 사이의 간격, 그리고 감쇠력을 표시하기 위한 상수들을 나타낸다. Fig. 6의 $h=2.2\mu\text{m}$, $t=3.3\mu\text{m}$, $b=5\mu\text{m}$ 인 경우는, Fig. 8의 감쇠력 곡선에서 식 (9)의 D 와 T 를 각각 $9.6 \times 10^{-6}\text{m}^{1.18}$ 과 1.18로 구하였다.

이와 유사한 과정을 통하여 고정전극과 겹쳐지지 않은 이동전극 부분에 작용하는 감쇠력, F_m , 지지 스프링에 작용하는 감쇠력, F_b , 그리고 평판 질량부에 작용하는 감쇠력, F_p 를 구하였으며, 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

Fig. 9는 정전반발력 마이크로 액추에이터에 작용하는 여러 감쇠력을 보여주며 전체 감쇠력 F 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= F_m + F_g + F_b + F_p \\ &= \alpha_m \mu UL_m + \alpha_g \mu UL_g + \alpha_b \mu UL_b + \alpha_p \mu UL_p \\ &= \mu U (\alpha_m L_m + \alpha_g L_g + \alpha_b L_b + \alpha_p L_p) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 $F=c_{eq}U$ 와 비교하면 Fig. 5의 반발력 마이크로 액추에이터의 등가 감쇠계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

Table 1 A laterally driven electrostatic repulsive-force microactuator

Plate mass*, m_p [kg]	2.8×10^{-10}
Beam mass*, m_b [kg]	2.41×10^{-11}
Lateral stiffness**, k [N/m]	1.43
Resonant frequency**, f_{ro} [kHz]	11.4
Structure thickness, t [μm]	3.3
Gap between structure and substrate, h [μm]	2.2
Electrode width, b [μm]	5.0
Total length of movable electrodes, L_m [μm]	1280
Total overlapped length of movable electrodes, L_g [μm]	1600
Plate width, L_p [μm]	20
Initial inter-electrode gap, r_o [μm]	3.0
Beam width, w [μm]	3.0
Total beam length, L_b [μm]	1120
Number of movable electrodes [ea]	30

*based on $\rho=2.33 \times 10^3\text{kg/m}^3$, **based on $E=100\text{GPa}$

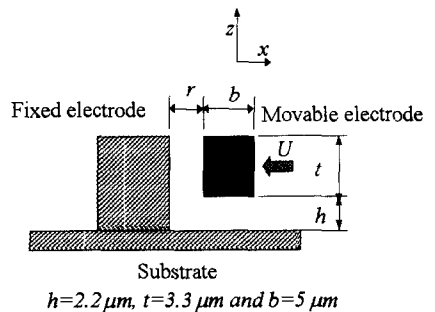


Fig. 6 The numerical simulation model of the damping force due to the air gap between fixed and movable electrodes: the movable electrode moves with the velocity, U , with respect to the fixed electrode; t , h , b , and r are the thickness of the movable electrode, the gap between the movable electrode and the substrate, the width of the movable electrode, and the inter-electrode gap, respectively

$$c_{eq} = \mu(\alpha_m L_m + \alpha_g L_g + \alpha_b L_b + \alpha_p L_p) \quad (11)$$

그러므로 Fig. 5의 마이크로 액추에이터의 쿨인자 Q 를 다음과 같이 구할 수 있다.

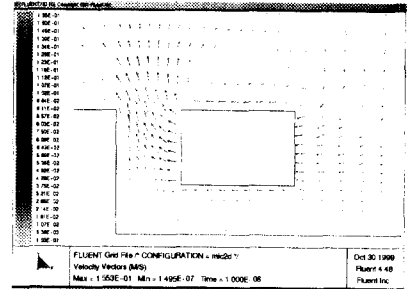
$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{\sqrt{m_{eq} k_{eff}}}{c_{eq}} = \frac{m_{eq} \omega}{c_{eq}} \quad (12a)$$

$$\zeta = \frac{c_{eq}}{2\sqrt{m_{eq} k_{eff}}} \quad (12b)$$

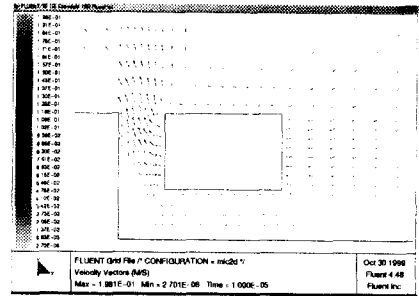
여기서 m_{eq} , k_{eff} , ω 는 각각 평판질량을 포함하는 등가질량,⁽⁹⁾ 식 (5)로 표시되는 유효스프링강성, 구동주파수 $\sqrt{k_{eff}/m_{eq}}$ 를 나타낸다. 식 (11), (12)와 $m_{eq}=m_{plate}+(13/35)m_{beam}$ 의 관계식⁽⁹⁾을 이용하면 마이크로 액추에이터의 쿨인자를 점성계수, 미소구조물의 치수와 공진주파수의 함수로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \frac{\left(m_p + \frac{13}{35}m_b\right)\omega}{\mu(\alpha_m L_m + \alpha_g L_g + \alpha_b L_b + \alpha_p L_p)} \quad (13)$$

여기서 m_p 와 m_b 는 이동전극을 포함하는 평판질량의 질량, 네 개의 지스프링 질량의 합을 각



(a) $r = 3\text{mm}$



(b) $r = 2\text{mm}$

Table 2 Damping forces on the repulsive force microactuator

Damping force	Dimensionless damping force
F_g , damping force on the overlapped movable electrode	$\alpha_g = \frac{F_g}{\mu UL_g} = \frac{D}{r^T}$, $D = 9.6 \times 10^{-6} \text{ m}^{1.18}$, $T=1.18$
F_m , damping force on the movable electrode	$\alpha_m = \frac{F_m}{\mu UL_m} = 12.75$
F_b , damping force on the flexures	$\alpha_b = \frac{F_b}{\mu UL_b} = 5.7$
F_p , damping force on the plate	$\alpha_p = \frac{F_p}{\mu UL_p} = 475$

where m = the viscosity of the air; U = the velocity of the mass, L_g , L_m , L_b and L_p are listed in Table 1.

Fig. 7 The velocity profile between the movable and the fixed electrodes; the movable electrode moves with the velocity of 0.1m/s toward the fixed electrode

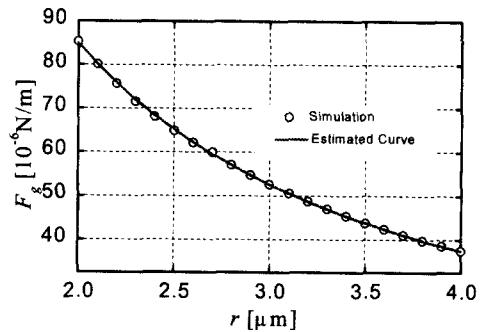


Fig. 8 The simulated damping force due to the electrode motion when the movable electrodes moves with the velocity of 0.1m/s

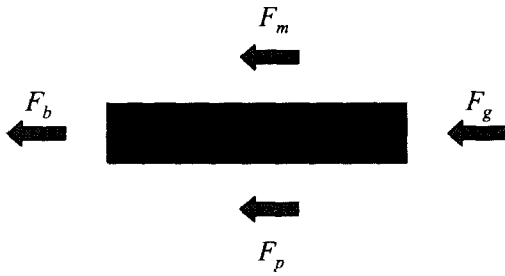


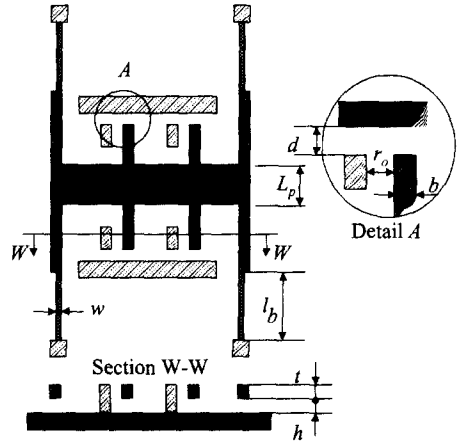
Fig. 9 Damping forces on the repulsive force microactuator: F_m , F_g , F_p , and F_b denote the damping force due to the motion of the movable electrodes, not overlapped by the fixed electrodes, the damping force due to the motion of the overlapped movable electrodes, the damping force due to the plate motion, and the damping force due to the flexure motion, respectively

각 나타낸다. 식 (6)과 (9)에 의하면 ω 와 α_g 가 전극사이의 간격의 함수이고, 전극 사이의 간격은 식 (3)에 의하여 전압의 함수이므로, 식 (13)의 큐인자는 전압의 함수라는 것을 알 수 있다. 즉 수평구동형 정전반발력 마이크로 액추에이터의 경우, 큐인자는 DC 바이어스 전압으로 조정할 수 있다.

한편, 기존 큐인자 모델인 스톱스 유동모델(Stokes' flow model)⁽¹¹⁾ 스퀴즈 유동모델(Squeeze flow model)⁽¹²⁾을 혼합하면 다음과 같이 큐인자 계산식을 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{(m_p + \frac{13}{35} m_b) \omega}{\mu \left\{ \frac{A_p}{h} + \frac{A_p}{h_{eq}} + \frac{1}{2} A_b \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{h_{eq}} \right) + 7.2 L_g \left(\frac{t}{r} \right)^3 \right\}} \quad (14)$$

여기서 A_p , A_b , h , h_{eq} , r , L_g 는 각각 이동전극의 면적을 포함하는 평판질량의 면적, 네 개의 스프링의 면적, 평판질량과 기관 사이의 간격, 스톱스 유동에 의한 등가 높이,⁽¹¹⁾ DC 바이어스 전압이 인가될 때 전극 사이의 간격, 겹쳐진 이동전극의 총길이를 나타낸다.



$b=5\mu\text{m}$, $d=r_o=3\mu\text{m}$, $h=2.2\mu\text{m}$, $w=3\mu\text{m}$, $l_b=280\mu\text{m}$

Fig. 10 A laterally-driven repulsive force microactuator

3. 제조 공정

설계된 정전 반발력을 이용한 수평구동형 미소정전 액추에이터는 Table 1과 Fig. 10에 정리한 바와 같으며, Fig. 11에 도시된 바와 같이 4장의 마스크를 사용하여 표면미세가공(surface-micromachining)으로 제작했다. Fig. 11(a) 공정은 하부전극으로 사용되는 첫 번째 다결정실리콘(POLY1)의 제작까지를 나타낸 것이다. 먼저 실리콘기판위에 $2.0\mu\text{m}$ 두께의 열산화막(thermal oxide)를 형성한 후, 그 위에 2000 \AA 두께의 LPCVD질화막(Low Pressure Chemical Vapor Deposited Nitride)를 형성한 다음, 2000 \AA 두께의 LPCVD POLY1을 증착한다. 첫 번째 마스크를 이용하여 POLY1을 식각하여 하부전극을 형성한다. Fig. 11(b) 공정에서는 $2.2\mu\text{m}$ 두께의 LPCVD PSG 희생층을 증착한 후, Fig. 11(c) 공정에서 지지부를 만들기 위해 두 번째 마스크를 이용하여 PSG를 식각한다. Fig. 11(d) 공정에서 도핑하지 않은 $3.3\mu\text{m}$ 두께의 LPCVD 다결정실리콘층(POLY2)을 625°C 에서 증착하고 POLY2 위에 $1\mu\text{m}$ 두께의 LPCVD PSG를 증착한후 950°C 에서 한 시간 동안 어닐링한다. Fig. 11(e) 공정에서는 세 번째 마스크로 PSG를 식각한 후 Cl_2 플라즈마를 이용한 RIE로 POLY2를 이방성식각을 하여 미세 구조물을 정의한다. Fig. 11(f) 공정에서 희생층

PSG를 HF용액에서 제거하여 떠 있는 구조물을 제작한다. 마지막으로 전기접속을 하기 위해 네 번째 마스크인 샤토우마스크를 이용하여 알루미늄전극을 형성한다. Fig. 12는 제조된 정전반발력을 이용한 미소정전액추에이터의 SEM 사진으로 구조물의 전체적인 크기는 약 1.5mm²이다. Fig. 13은 Fig. 12의 고정전극과 이동전극부분을 확대한 SEM 사진이다.

4. 시험 및 측정 결과

제조된 정전반발력 미소액추에이터 (Fig. 12)의 정적 및 동적 특성을 대기압하에서 측정하였다. 먼저 DC바이어스전압 V_{DC} 를 변화시키면서 초기 간격 $r_0=3\mu\text{m}$ 인 정전액추에이터에서 얻은 정적변위에 관한 이론치와 측정치를 상호 비교하였다.

Fig. 14의 이론적인 정적변위는 Table 1의 미소액추에이터의 치수와 Fig. 2에서 얻어진 힘상수 ($J=1.46 \times 10^{-6} \text{ [N/mV}^2]$, $S=8.68 \times 10^{-6} \text{ [m]}$)를 이용하여 계산하였다. 측정된 정적변위 (Fig. 14)은 DC바이어스전압 V_{DC} 에 따라 증가하였으며, $V_{DC}=140\text{V}$ 일 때 측정된 정적변위는 $1.27\mu\text{m}$ 이었고 계산된 정적변위는 $V_{DC}=140\text{V}$ 에서 $1.3\mu\text{m}$ 이었다. Fig. 14에서 정적변위의 계산치와 측정치의 최대 오차는 $V_{DC}=60\text{V}$ 에서 48%이다. Fig. 14에서 “ \emptyset ” 표시는 측정값의 오차범위를 나타낸다.

Fig. 15은 일정한 AC구동전압 $V_{AC}=20\text{V}$ 하에서 DC바이어스전압이 60V에서 140V까지 증가시킬 때 공진주파수의 계산치와 측정치를 비교한 것이다. V_{DC} 가 60V에서 140V까지 변할 때, 측정된 공진주파수는 11.7kHz에서 12.7kHz까지 증가하였고 계산된 공진주파수는 11.6kHz에서 12.2kHz까지 증가하였다. 이러한 정전반발력 마이크로액추에이터의 공진주파수 측정 실험결과로부터 식 (3), (5), (6)의 이론적인 해석에서 예측한 것과 같은 경향이 확인되었다. 즉 정전반발력 액추에이터의 DC바이어스전압이 증가하면 정전반발력이 증가하고, 이에 따라 정전반발력 액추에이터의 유효스프링상수와 공진주파수가 증가한다. 그러나 기존의 정전액추에이터^(6,10)는 모두 정전인력을 이용한 것으로 DC바이어스전압이 증가함에 따라, 유효스프링상수와 공진주파수가 감소한다.

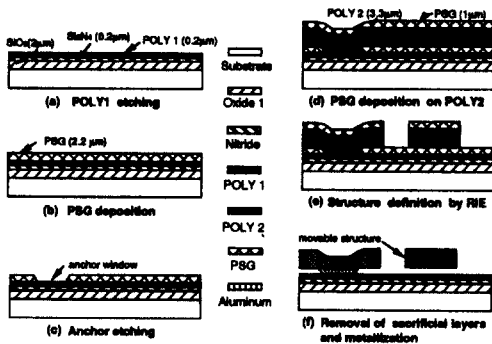


Fig. 11 Microfabrication process for the lateral repulsive force microactuator: a cross-sectional view of Y-Y in Fig. 3

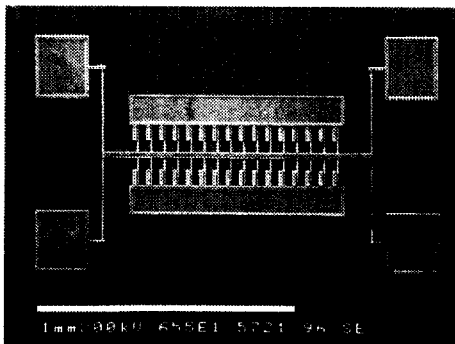


Fig. 12 SEM photograph of the fabricated lateral repulsive force microactuator

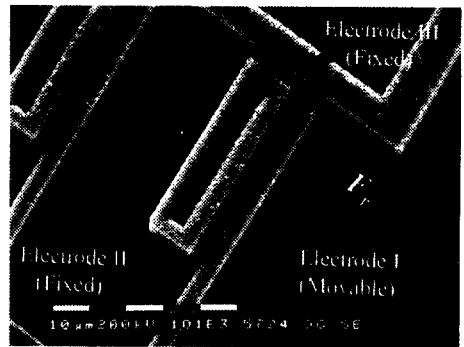


Fig. 13 Enlarged view of the fixed electrode and the movable electrode of the lateral repulsive force microactuator (Fig.12): initial gap between the movable electrode I and the fixed electrode II is $3\mu\text{m}$: the gap between the electrode I (or electrode II) and electrode III is $3\mu\text{m}$

Fig. 12의 제작된 마이크로 액추에이터를 DC 바이어스전압을 변화시키며 구동시켜 대기압 상태에서의 큐인자를 측정하였다. Fig. 16에서 $V_{AC}=20V$ 의 구동전압과 $V_{DC}=60\sim 140V$ 의 DC바이어스전압으로 구동되는 마이크로 액추에이터에 대한 큐인자의 계산치와 측정치를 비교하였다. 실험의 결과에서는 $V_{DC}=60\sim 140V$ 의 DC 바이어스전압에 대하여 큐인자의 측정치는 12에서 13사이에서 변화하였으나 식 (13)으로 계산되는 큐인자의 이론치는 14.9에서 18.7 사이에서 변화하였다. 큐인자의 측정치와 이론치는 $V_{DC}=60\sim 140V$ 의 DC바이어스전압에 대하여 최대 45%의 오차를 보였다.

한편 식 (14)로 계산되는 큐인자는 Fig. 16에서 보는 바와 같이 $V_{DC}=60\sim 140V$ 의 DC바이어스전압에 대하여 37에서 50 사이에서 변화한다. 이 큐인자와 측정치 사이의 오차는 $V_{DC}=60\sim 140V$ 의 DC바이어스전압에 대하여 290%로 대단히 크게 나타난다. 이와 같이 기존의 큐인자 모델에서 오차가 커진 것은 스퀴즈유통의 계산식⁽¹²⁾이 식 (9)와 크게 다른 데 기인한다. 즉 기존의 스퀴즈 유통에 의하여 이론적으로 계산되는 감쇠력⁽¹²⁾은 전극간 간격의 삼승에 반비례하지만 식 (9)에서는 기하학적인 형상에 따라 감쇠력이 삼승에 비례하지 않는다. 또 하나의 오차요인은 스톱스 유통에 의한 감쇠력⁽¹¹⁾은 구조물이 진동할 때 구조물의 옆면에서 받는 감쇠력을 고려하지 못한 것이다. Fig. 16에 따르면 식 (13)의 큐인자 계산식이 기존의 큐인자계산식 보다 더 실험치와 일치함을 알 수 있다.

수평구동형 정전반발력 마이크로 액추에이터에 가하는 DC 바이어스 전압을 증가시키면 이동전극과 고정전극 사이의 간격이 증가되고, 이것은 다시 큐인자를 증가시킨다. 그러나 정전인력 마이크로 액추에이터의 큐인자⁽¹³⁾는 DC 바이어스 전압을 증가시키에 따라 감소한다. 그러므로 수평구동형 정전반발력 마이크로 액추에이터는 구조물의 공진주파수와 큐인자를 증가시키는데 사용될 수 있다.

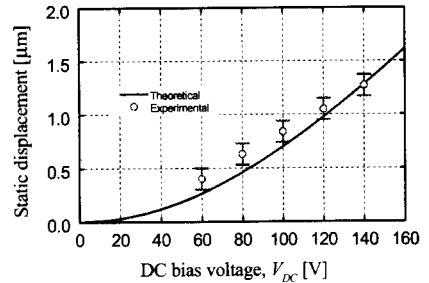


Fig. 14 Estimated and measured static displacement of the movable electrode of Fig. 3 due to the repulsive force, generated by the DC bias voltage, V_{DC} , with no AC drive voltage, $V_{AC}=0$

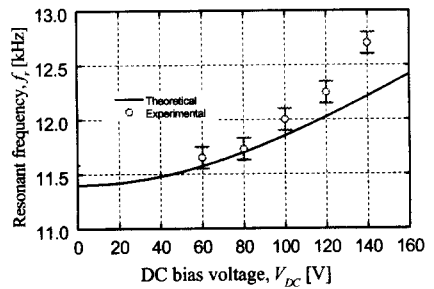


Fig. 15 Estimated and measured resonant frequency, f_r , of the lateral repulsive force actuator, driven by the varied DC bias voltage, V_{DC} , with a fixed AC drive voltage, V_{AC} , of 20V

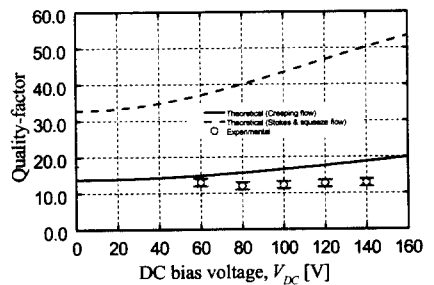


Fig. 16 Comparison of the theoretical and experimental quality-factors of the laterally-driven repulsive force micro-actuator: the quality-factor estimated from the creeping flow model provides more closer fit to the experimental quality-factor than the value estimated from the Stokes and squeeze flow model

5. 결 론

이동전극과 한쌍의 고정전극 사이에서 유기되는 비대칭전기장에 의한 수평방향의 정전반발력을 이용하는 새로운 정전구동방식을 제안하였고, 구조물의 공진주파수와 큐인자를 제어할 수 있는 수평구동형 정전반발력 마이크로 액추에이터를 연구하였다. 먼저 유한요소해석을 통해, 정전반발력에 관한 이론식을 도출하였고, 이를 이용하여 정전반발력 액추에이터의 이동전극의 변위, 공진주파수와 큐인자에 대한 수식을 유기전압에 대하여 유도하였다. 정전반발력 마이크로 액추에이터를 네장의 마스크를 이용한 표면미세 가공법으로 제작하였으며, 대기압하에서 실험하여 마이크로 액추에이터의 이동전극의 변위, 공진주파수 변화 및 큐인자의 변화를 측정하고 이를 이론치와 비교하였다. DC 바이어스전압을 60V에서 140V까지 증가시킴에 따라 정전반발력 액추에이터의 공진주파수는 11.7kHz에서 12.7kHz까지 증가하였고 이때 평균 공진주파수 조정감도는 12.5Hz/V이었다. 60~140V의 DC 바이어스전압에 대하여 측정된 큐인자는 12에서 13까지 변화하였다. DC 바이어스전압이 증가할 때 기존의 수평구동형 정전인력액추에이터의 경우 공진주파수와 큐인자가 감소하였지만, 제안된 수평구동형 정전반발력 액추에이터의 경우 공진주파수와 큐인자는 증가하였다. 제안된 수평구동형 정전반발력 구동방법은 미소구조물의 공진주파수와 큐인자를 증가시키는 방향으로 조정하거나 구조물을 반발력으로 구동시키는데 응용할 수 있다.

후 기

본 연구는 BK21 KAIST 기계 사업단 및 과학기술부 창의적 연구진흥사업의 지원으로 수행한 연구결과의 일부이다.

참고문헌

- (1) Fan, L.-S., Tai, Y.-C. and Muller, R.S., 1988, "IC-Processed Electrostatic Micromotors," Proc. IEDM, San Francisco, CA, U.S.A., pp. 666-669.
- (2) Mehregany, M., Bart, S.F., Tavrow, L.S., Lang, J.H., Senturia, S.D. and Schlecht, M.F., 1990, "A Study of Three Microfabricated Variable-Capacitance Motors," *Sensors and Actuators*, Vol. A21-23, pp. 173-179.
- (3) Tang, W. C., Nguyen, T.-C. H. and Howe, R. T., 1989, "Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures," *Sensors and Actuators*, Vol. A20, pp. 25-32.
- (4) Tang, W.C., Lim, M.G. and How, R.T., 1992, "Electrostatic Comb Drive Levitation and Control Method," *J. Microelectromech. Sys.*, Vol.1, No.4, pp. 170-178.
- (5) 1997, Maxwell solver, Electrostatic Package V.4.20, Ansoft Corp., 4 Station Square, 660 Commerce Court Building, Pittsburgh, Pa, 15219.
- (6) Lee, K.B., Yoon, J.-B., Kang, M.-S., Cho, Y.-H., Youn, S.-K. and Kim, C.-H., 1996, "A Surface-micromachined Tunable Micro-gyroscope," 1996 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA96), Hawaii, pp. 498-502.
- (7) White, F.M., 1974, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill.
- (8) 1997, *Fluent users guide*, FLUENT inc.
- (9) Tang, W.C.-K., 1990, "Electrostatic Comb Drive for Resonant Sensor and Actuator Applications," P.h.D Thesis, Electrical Engineering and Computer Sciences, The University of California, Berkeley.
- (10) Lee, K.B. and Cho, Y.-H., 1998, "A Triangular Electrostatic Comb Array for Micromechanical Resonant Frequency Tuning," *Sensors and Actuators*, A70, pp. 112-117.
- (11) Cho, Y.-H., Kwak, B. M., Pisano, A. P. and Howe, R. T., 1994, "Slide film damping in laterally driven microstructures," *Sensors and Actuators*, A 40, pp. 31-39.
- (12) Kuelnel, W., 1995, "Modeling of the mechanical behaviour of a differential capacitor acceleration sensor," *Sensors and Actuators*, A 48, pp 101-108.
- (13) Lee, K.B. and Cho, Y.-H., 1996, "Electrostatic Control of Mechanical Quality Factors for Surface Micromachined Lateral Resonators," *J. Micromech. Microeng.* Vol. 6 pp. 426-430.