

기판에 인접한 미소거울의 회전 점성감쇠

Rotational Viscous Damping of On-substrate Micromirrors

金應三* · 韓基鎬** · 曹永昊*** · 金文彦[§]

(Eung-Sam Kim · Ki-Ho Han · Young-Ho Cho · Moon-Uhn Kim)

Abstract - In this paper, we present theoretical and experimental study on the viscous damping of the on-substrate torsional micromirrors, oscillating near the silicon substrates. In the theoretical study, we develop theoretical models and test structures for the viscous damping of the on-substrate torsional micromirrors. From a finite element analysis, we estimate the theoretical damping coefficients of the torsional micromirrors, fabricated by the surface-micromachining process. From the electrostatic test of the fabricated devices, frequency-dependent rotational velocity of the micromirrors has been measured at the atmospheric pressure using the Mach-Zehnder interferometer system. Experimental damping coefficients have been extracted from the least square fit of the measured rotational velocity within the filter bandwidth of 150 kHz. We have compared the theoretical values and the experimental results on the dynamic performance of the micromirrors. The theoretical analysis overestimates the resonant frequency in the amount of 15%, while underestimating the viscous damping in the factors of 10%.

Key Words : Micromirror, Torsional Motion, Tilting Plate, Viscous Damping, Mechanical Q-factor

1. 서 론

기판에 인접한 미소거울의 회전운동은 광 신호를 조정하기 위한 미소 광기계적 소자[1-5]에 널리 사용되고 있다. 미소 거울의 회전 운동은 크게 다음의 두 가지로 분류될 수 있다. 1) 기판과 멀리 떨어진 공중 회전운동(Off-substrate rotation), 즉 운동 거리가 거울의 표면과 기판 사이의 간격에 비해 작은 경우와 2) 기판인접 회전운동(On-substrate rotation), 즉 운동 거리가 거울의 표면과 기판 사이의 간격에 가까운 경우의 두 가지로 분류된다. 이중 기판에 인접한 미소거울의 회전운동 특성은 기판과 거울 사이에 존재하는 유체의 감쇠영향을 더욱 크게 받게 된다. 따라서 기판인접 회전운동 미소거울(그림 1)의 점성감쇠는 회전운동 하는 광기계적 미소소자의 동적 거동에 큰 영향을 미친다.

기존 회전 미소거울의 점성감쇠 연구[1,2]는 주로 공중회전 미소거울의 경우에 한하여 진행되어 왔다. 본 연구에서는 그림 1과 같은 기판인접 미소거울의 점성감쇠에 관해 이론식을 전개하였으며, 이를 실험적으로 검증하였다. 먼저 다결정 실리콘 표면미세가공기술 공정을 이용하여 두 가지 서로 다른 크기의 회전 점성감쇠 시험구조물을 설계, 제작하였다. 이어 제작된 시험구조물로부터 상온 대기압에서 감쇠상수를 측정하였고, 유한요소법에 의한 예측치와 비교·토의하였다.

2. 이론식 전개

그림 1은 기판에 인접하여 각속도 ω 로 회전하는 미소거울을 보이고 있다. 이 미소거울은 기판과의 거리가 d_0 이고 두개의 비틀림 보(torsion bar)에 의해 지지된다. x 방향으로의 평판 길이는 l 이고 y 방향으로의 평판 길이는 b 이다.

먼저 유체의 점성이 상수이고 Newtonian 유체라고 가정하면, Navier-Stokes 방정식[6]은 다음과 같이 표기된다.

$$\rho \frac{\delta \vec{U}}{\delta t} - \rho \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, \vec{U} 는 유체의 속도 벡터, P 는 미소 거울과 기판 사이의 계기압(gauge pressure)이며 μ 는 유체의 점성이다.

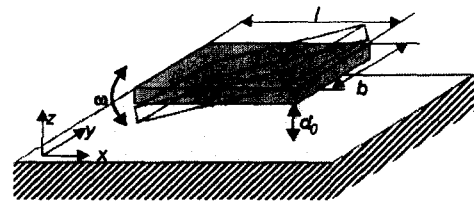


그림 1 기판에 인접한 회전운동 비틀림 평판 미소거울
Fig. 1 An on-substrate torsional micromirror, rotating near the substrate

* 非 會 員 : 韓 國 科 學 技 術 院 機 械 工 學 科 碩 士 卒 業
 ** 正 會 員 : 韓 國 科 學 技 術 院 機 械 工 學 科 博 士 課 程
 *** 正 會 員 : 韓 國 科 學 技 術 院 機 械 工 學 科 副 教 授 · 工 博
 § 非 會 員 : 韓 國 科 學 技 術 院 機 械 工 學 科 正 教 授 · 工 博
 接 受 日 字 : 2000 年 10 月 4 日
 最 終 完 了 : 2001 年 4 月 23 日

한편 Strouhal 수, St ,와 Reynolds 수, Re ,의 정의는 다음과 같다.

$$St = \frac{VT}{L} \quad (2a)$$

$$Re = \rho \frac{VL}{\mu} \quad (2b)$$

여기서 V 는 유체의 특정 속도, T 는 특정 시간 그리고 L 은 특정 길이이다.

Strouhal 수와 Reynolds 수의 비, St/Re ,가 1보다 작은 경우 식(1)의 $\delta \vec{U}/\delta t$ 항은 생략 될 수 있으며, Re 가 1보다 작은 경우 $\vec{U} \cdot \nabla \vec{U}$ 항이 생략 될 수 있다. 이러한 가정들에 의해 식(1)은 다음과 같은 creeping flow 방정식으로 간단히 된다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3c)$$

여기서 x, y, z 는 그림 1에서 정의된 직교 좌표계이고, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향으로의 유체 속도이다.

또한 유체가 비압축 흐름을 가진다는 가정에 의해 다음 식과 같은 연속 방정식을 적용할 수 있다.

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

그림 1과 같은 경우 y 방향의 유속인 v 는 0으로 가정 할 수 있다. 또한 미소거울의 구동각도가 최대 회전각도, $\tan^{-1}(2d_0/l)$,에 비해 작을 경우, z 방향에 비해 x 와 y 방향으로의 u 의 변화가 작다고 가정 할 수 있으며, Reynolds 수가 1 보다 작은 가정에 의해 w 는 단지 z 에 선형적이고 x 와 y 에 독립적인 함수로 간주 할 수 있다. 이에 의해 식 (3)과 (4)는 다음 식들과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5a)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (5b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (5c)$$

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

경계면 $z=0, z=d_0$ 에서 $u=0$ 라는 조건으로부터, 다음과 같이 u 를 구할 수 있다.

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} z(z-d_0) \quad (7)$$

한편, $z=d_0$ 에서 z 방향으로의 유체 속도 w 는 $-x\omega$ 이고, $z=0$ 에서는 0이다. 따라서 z 방향의 속도 w 는 다음과 같이 표현된다.

$$w = -\frac{x\omega}{d_0} z \quad (8)$$

식(7)과 식(8)을 식(6)에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$0 = \frac{1}{2\mu} z(z-d_0) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{xw}{d_0} \quad (9)$$

식(9)을 z 는 0에서 d_0 까지 적분하면 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\frac{d_0^3}{12\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = xw \quad (10)$$

식(10)에 $x=-l/2$ 와 $x=l/2$ 에서 P 는 대기압과 같기 때문에 0인 경계조건을 사용하면 미소거울과 기판 사이 유체의 압력 분포를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(x) = \frac{\mu \omega l^3}{2d_0^3} \left\{ \frac{x}{l} - 4 \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right\} \quad (11)$$

한편 식(1)의 압력 분포에 의한 감쇠 torque는 다음과 같이 표현된다.

$$T_d = \int_{-l/2}^{l/2} xP(x)dA = \frac{\mu \omega b l^6}{60d_0^3} \quad (12)$$

여기서 $dA = b dx$ 이다.

기판에 인접한 미소거울의 감쇠계수, b_t ,는 식(12)의 감쇠 torque를 각속도로 나눈 것으로 정의된다.

$$b_t = \frac{\mu b l^6}{60d_0^3} \quad (13)$$

3. 시험 구조물 설계 및 제작

3.1 시험 구조물의 설계

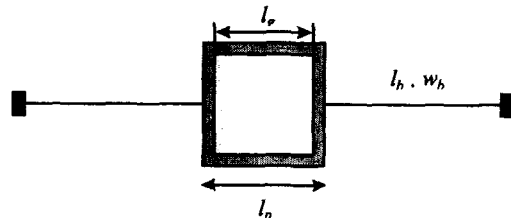


그림 2 한 쌍의 비틀림 지지보에 의해 지지된 회전 미소거울의 평면도

Fig. 2 Top view of the torsional micromirror, suspended by a pair of torsion bars

그림 2는 한 쌍의 비틀림 보에 의해 지지된 미소거울의 점성감쇠 시험구조물을 보이고 있다. 최소 평판의 크기는 평판 아래의 회생층을 식각하는 시간과 laser beam의 spot 크기에 의해 결정되며, 미소거울에서 20 cm 떨어진 곳에서 laser를 쏘았을 때, 광학속도측정기의 spot 크기는 약 62.5 μm 되므로, 미소거울의 크기, l_p 는 이보다 더 커야 한다.

$$l_p \geq 62.5\mu\text{m} \quad (14)$$

평판 밑의 회생층이 BOE(Buffered Oxide Etchant)에 의해 비등방성으로 식각될 때, 첫 번째 다결정 실리콘 또한 다결정 실리콘의 식각율이 9 A/min[7]이므로 약 0.13 μm 식각된다. 만약 회생층을 제거 한 후 다결정 실리콘의 두께가 처음의 것에 비해 반 이상 남아야 한다면, 비틀림 평판의 크기는 다음과 같이 제한된다.

$$l_p \geq 65.0\mu\text{m} \quad (15)$$

식(14)과 (15)를 고려하여, 정방형 회전 미소거울의 한 변의 길이를 각각 80 μm, 113 μm로 결정하였다.

한편 수직 방향으로 보의 굽힘 현상이 정전기력에 의해 유도될 수 있으며, 보의 굽힘운동과 회전운동[5] 사이의 분리를 고려하여야 한다. 따라서 굽힘과 회전간의 coupling이 최소화되도록 굽힘과 회전모드 각각의 고유주파수를 설계하였다.

먼저 x 축에 대한 회전 미소거울의 관성질량모멘트, I_t 와 시편의 유효 질량, m_t ,은 다음과 같다.

$$I_t = \frac{1}{12} m_{poly}(l_p^2 + l^2) + \frac{1}{12} m_{gold}(l_g^2 + l_{gold}^2) \quad (16)$$

$$m_t = m_p + \frac{13}{35} m_{beam} \quad (17)$$

여기서 평판의 질량, m_p ,은 다결정 실리콘 평판의 질량인 m_{poly} 와 다결정 실리콘 평판 위의 도금된 금의 질량 m_{gold} 의 합이다. 사각단면 형상인 보의 유효 비틀림 강성, k_t ,과 유효 굽힘 강성, k_b ,은 아래와 같이[8] 주어진다.

$$k_t = \frac{2GK}{l_b} \quad (18a)$$

$$k_b = \frac{2AEI_y}{l_b^3} \quad (18b)$$

여기서

$$K = \frac{1}{3} tw_b^3 \left[1 - 0.627 \frac{t}{w_b} \tanh \left(\frac{\pi}{2} \frac{w_b}{t} \right) \right] = k_1 tw_b^3 \quad (19)$$

$$I_y = \frac{1}{12} w_b t^3 \quad (20)$$

이고, G 와 E 는 각각 미소거울의 구조체를 이루는 다결정 실리콘의 전단계수와 탄성계수이다. 한편 굽힘모드의 고유주파수, $f_{n,b}$,에 대한 회전모드의 고유주파수, $f_{n,t}$,의 비는

표 1 그림1의 비틀림 미소거울의 감쇠 시편 T1과 T2
Table 1 Damping test structures, T1 and T2, for the torsional micromirror of Fig. 1

Components	Materials	Test structure & dimensions		
		[μm]		
		T1	T2	
Mirror	Au on Ti	width	60	93
		length	60	93
		thickness	0.2	0.2
Plate	polysilicon	width	80	113
		length	80	113
		thickness	4	4
Torsion bar	polysilicon	width	4	4
		length	250	62
		thickness	4	4
Damping gap	air	thickness	1.5	1.5

다음과 같다.

$$\frac{f_{n,t}}{f_{n,b}} = \frac{l_b}{l_p} \sqrt{\left(\frac{t}{t_1} \right) \left(\frac{6k_1}{1+\nu} \right)} \quad (21)$$

여기서 t_1 은 유효 평판 두께이고; l_p 와 l_b 는 각각 평판과 범의 길이이다. 그리고 ν 는 포와송 비(Poisson's ratio)이며, k_1 는 식(19)에서 구할 수 있다.

이상의 이론식을 근거로 설계한 두 종류의 감쇠시편을 표1에 정리하였다. 미소거울 T1과 T2는 크기가 각각 80×80 μm², 113×113 μm²이며, 영계수, 포와송 비 그리고 다결정 실리콘의 밀도는 각각 150 GPa, 0.23 그리고 2330 kg/m³으로 가정되었다. 유체(1 ATM., 20 °C)의 점성, 밀도, 유전율을 공기의 경우로 가정하여 1.85×10⁻⁵ kg/m·sec, 1.24 kg/m³, 8.85×10⁻¹² F/m의 값을 각각 사용하였다.

3.2 시험 구조물의 제작

회전 점성 감쇠의 측정을 위하여 시편을 그림 3과 같이 총 6장의 마스크와 두 층의 다결정 실리콘 박막을 사용한 표면 미세가공기술로 제작하였다.

먼저 n-type (100) 4인치 실리콘 웨이퍼에 인(phosphorous)을 확산하였다. 그 위에 1 μm 두께의 산화막을 성장시키고, 전기적 절연을 위해 Si₃N₄(2000 Å)를 증착하였다. RIE(Reactive Ion Etching)를 이용하여 Si₃N₄/산화막 층과 확산된 층을 접촉하기 위해 그림 3(a)과 같이 접촉구멍을 형성하였다. 그림 3(b)에서 2000 Å 두께의 LPCVD(Low-Pressure Chemical Vapor Deposition) 다결정 실리콘을 증착하고, 970°C에서 30분 동안 인을 확산한 후, 다결정 실리콘을 RIE 공정으로 식각하여 하부전극을 제작하였다. 그림 3(c)에서 2 μm 두께의 LPCVD PSG(PhosphoSilicate Glass) 회생층을 증착하였다. 그림 3(d)에서는 4.3 μm 두께의 다결정 실리콘과 1.5 μm 두께의 LPCVD PSG를 증착한 후, 다결정 실리콘에 인을 대칭적으로 확산시키기 위해 1,000°C에서 열처리하였다. 그림 3(e)에서는 PSG 패터닝 공정 이후, Cl₂ 플라즈마 RIE를 이용하여 다결정 실리콘 구조물을 형성하였다. 그

림 3(f)에서 희생층을 제거한 후, sticking 문제를 해결하기 위해 이소프로필 알코올과 IR 램프를 사용하였으며, wire bonding을 위한 Ti/Au 패턴을 lift-off 공정으로 형성하였다. 그림 4는 제작된 회전운동에 의한 점성감쇠 시험구조물의 전자현미경 사진이다.

4. 시험 결과 및 토의

유한요소해석과 Block Lanczos 방법으로 시편의 첫 번째에서 세 번째까지의 고유주파수를 계산해 낼 수 있었다. 유한요소해석에서는 변의 길이 4 μm인 8개의 노드를 가진 45개의 solid block 요소를 사용하였다. 또한 유한요소해석에 의해 표2의 T1과 T2의 공진주파수가 각각 97.8±9.7 kHz와 101±10 kHz로 예측되었고, 감쇠계수는 각각 1.01±0.1과 8.06±0.81로 예측되었다. 그림 5는 T2의 모드 형상을 보여 준다.

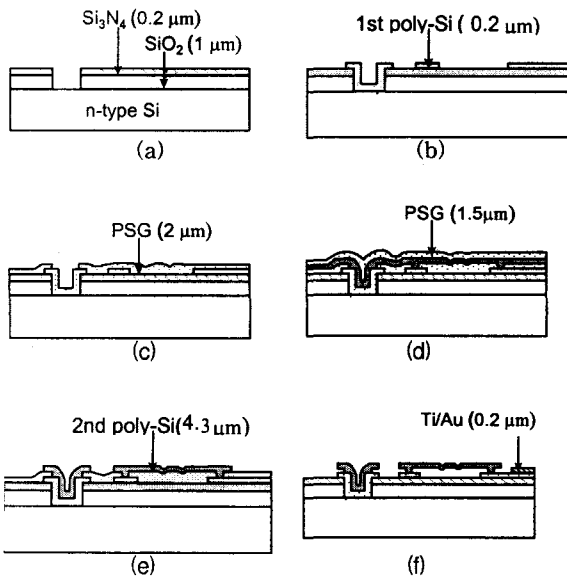


그림 3 제작공정
Fig. 3 Microfabrication process

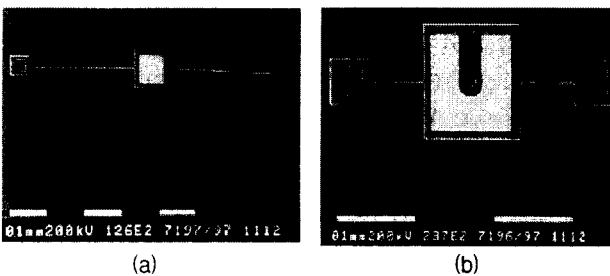


그림 4 비틀림 감쇠시편의 전자 현미경 사진: (a) T1; (b) T2
Fig. 4 SEM photographs of the torsional damping test structures: (a) T1; (b) T2

표 2 시편 T1, T2의 공진주파수, f,의 이론치, 실험치 비교와 감쇠계수, b,의 비교

Table 2 Comparison of the theoretical and experimental values of the resonant frequencies, f, and the damping coefficients, b, for the test structures, T1 and T2

Test structure	T1	T2
f_t [kHz]	97.8±9.7	101±10.0
f_e [kHz]	85.0±0.7	88.5±2.5
b_t [10^{-14} N·m·s]	1.01±0.10	8.06±0.81
b_e [10^{-14} N·m·s]	1.21±0.03	8.68±0.56

단, 하첨자 t는 이론치를 하첨자 e는 실험치를 나타낸다.

그림 6은 LPF(Low Pass Filter)의 감도가 25 mm/sec/V, 임계주파수가 150 kHz인 광학진동계를 사용한 기관인접 회전 미소거울의 속도 측정 장치이다. 감쇠 측정에서는 정전 미소거울에 DC 8 V, AC 10 V_{P-P}를 가하였다.

그림 7은 회전 미소거울에서 측정된 주파수 응답점들과 이로부터 계산된 응답곡선을 보이고 있다. T1, T2의 공진주파수는 각각 85.0±0.7 kHz와 88.5±2.5 kHz로 이론치보다 15% 정도 낮게 측정되었다. 이러한 공진주파수의 측정치와 이론치 사이의 차이는 측정 시 광학속도측정기의 불안정한 감도에 의해 응답점들을 이용해 속도응답곡선을 측정하였고, 이로부터 공진주파수를 유도한 것이 주된 원인으로 판단된다. 그림 7의 응답점들로부터, SES(Sum of Error Square)를 최소화시키는 응답곡선에 해당하는 감쇠계수 ξ 를 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$SES = \sum_{i=1}^N (V_i - V_i(\xi))^2 \tag{22}$$

여기서 V_i 는 i번째 정규화된 출력 전압이고 $V_i(\xi)$ 는 주파수에 대한 속도응답에서의 이론치이다.

따라서 실험에서의 회전 미소거울의 감쇠계수는 다음과 같다.

$$b_{,EX} = 2\xi_{es}(2\pi f_{n,EX})I_e \tag{23}$$

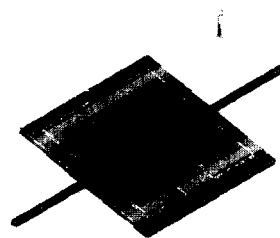


그림 5 미소거울의 비틀림 모드 유한요소 해석
Fig. 5 Finite element analysis of the torsional mode of the micromirror

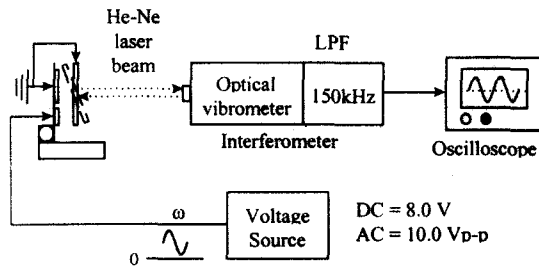


그림 6 회전 미소거울의 회전 속도를 측정
 Fig. 6 Rotational velocity measurement of the torsional micromirror

여기서 I_e 는 고정좌표계에 대한 평판의 유효 질량이다.

감쇠계수의 실험치는 그림 8에서 이론치와 비교하였다. T1과 T2 모두 감쇠계수의 측정치는 이론치에 비해 10% 정도 높게 나왔으며, T2에 대한 T1의 측정된 감쇠계수의 상대 비는 7.2 정도인데 이론적인 상대 비는 8.0이었다. 이 이유는 식(11)과 같이 감쇠계수의 이론적인 계산에서 미소거울의 경계부분의 유체 압력을 0으로 가정하였기 때문으로 판단된다. 실질적으로 미소거울의 경계부분에서 유체의 압력이 0보다 클 것으로 예상되며, 따라서 감쇠계수의 실험치가 이론치에 비해 크고, 또한 측정된 감쇠계수의 상대 비가 이론치에 비해 작은 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 기판에 인접한 회전 미소거울의 회전점성감쇠에 대한 실험적 연구와 함께 이론과의 비교 연구를 수행하였다. 회전 미소거울의 회전점성감쇠 시험을 위하여 두 개의 다른 크기의 미소거울을 설계, 제작, 측정하였다. 단면적 $4 \times 4 \mu\text{m}^2$, 길이 $250 \mu\text{m}$ 인 사각 비틀림 보에 의해 지지된 크기 $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ 인 회전거울(T1)과 단면적 $4 \times 4 \mu\text{m}^2$, 길이 $62 \mu\text{m}$ 인 사각 비틀림 보에 의해 지지된 크기 $113 \times 113 \mu\text{m}^2$ 인 회전 미소거울(T2)은 각각 공진주파수 $85.0 \pm 0.7 \text{ kHz}$ 와 $88.5 \pm 2.5 \text{ kHz}$ 로 회전구동 할 경우, 각각 감쇠계수가 1.21 ± 0.03 과 8.68 ± 0.56 을 측정하였다. 공진주파수의 측정치는 이론치에 비해 15% 정도 낮게 나타났으며, 감쇠계수의 측정치는 이론치에 비해 10% 정도 높게 나타났다. 이러한 차이는 공진주파수의 경우 광학속도측정기의 불안정한 감도에 의한 실험적 속도응답곡선의 오차와 이로부터 구한 공진주파수에 포함된 오차가 주된 원인으로 판단된다. 감쇠계수의 경우 미소거울의 경계부분의 유체 압력을 0으로 가정하였기 때문으로 판단된다. 실질적으로 미소거울의 경계부분에서 유체의 압력이 0보다 클 것으로 예상되며, 따라서 이론적인 감쇠계수는 실험치보다 작게 예측됨을 알 수 있다.

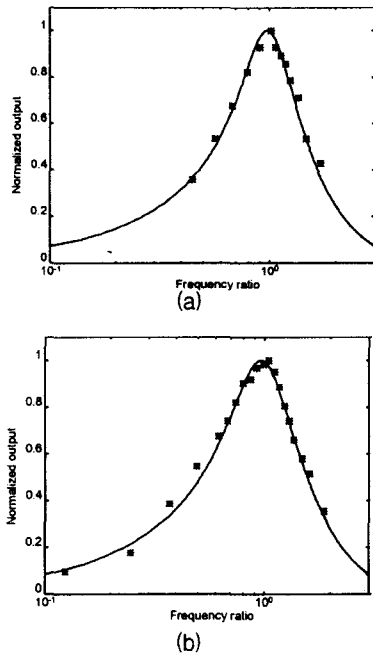


그림 7 제작된 시편 T1, T2로부터 측정된 주파수에 따른 정규화된 회전 속도에서 최소제곱법을 사용한 감쇠계수의 추출방법: (a) T1; (b) T2.

Fig. 7 Extraction of damping coefficients from the least square fit of the frequency-dependent normalized rotational velocity, measured from the fabricated devices, T1 and T2: (a) T1; (b) T2.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업단인 디지털 나노구동연구단의 “생체모사기법을 응용한 디지털나노구동 기관의 구현에 관한 연구” 과제의 일환으로 수행되었음

참고 문헌

- [1] K. E. Petersen, "Silicon Torsional Scanning Mirror," IBM Res. Develop., Vol.24, pp.631-637, 1980.
- [2] R. A. Buser and N. F. de Rooij, "Very High Q-factor Resonators in Monocrystalline Silicon," Inter. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers89), Montreux, Switzerland, pp.1-9, 1989.
- [3] L. J. Hornbeck, "128x128 Deformable Mirror Device," IEEE Trans. Electron Devices, ED-30, pp.539-545, 1983.
- [4] V. P. Jaeklin, C. Linder, N. F. de Rooij, J.-M. Moret and R. Vuilleumier, "Optical Microshutters and Torsional Micromirrors for Light Modulator Arrays,"

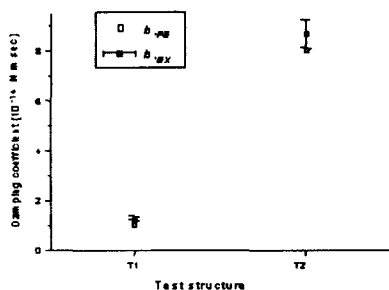


그림 8 감쇠계수의 이론치와 실험치의 비교
 Fig. 8 Comparison of the theoretical and experimental values of the damping coefficients

Proc. IEEE MEMS Workshop, Fort Lauderdale, U.S.A., pp.124-127, 1993.

[5] M. Fischer, H. Graef and W. von Munch, "Electrostatically Deflectable Polysilicon Torsional Mirrors," Sensors and Actuators, Vol.A44, pp.83-89, 1994.

[6] M. J. Novack, "Design and Fabrication of a Thin film Micromachined Accelerometer," M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1992.

[7] K. R. Williams and R. S. Muller, "Etch Rate for

Micromachining Processing, Journal of Microelectromechanical Systems," Vol.5, No.4, December, pp.256-269, 1 996.

[8] A. P. Boresi, O. M. Sidebottom, "Advanced Mechanics of Materials," 4th edition, John Wiely & Sons, pp.175-190, 1985.

저 자 소 개



김응삼 (金應三)
 1974년 1월 5일 생. 1996년 한국과학기술원 과학기술대학 기계공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 관심분야 : 미소구조물의 동적 구동 및 공기 감쇠의 이해와 응용

Tel : 02-599-4129
 E-mail : keslove@hanmail.net



한기호 (韓基鎬)
 1970년 2월 27일 생. 1993년 한국과학기술원 과학기술대학 전기및전자공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1996년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 관심분야 : 마이크로 관성센서, 미소신호감지를 위한 ASIC 설계 및 미소소자와의 on-chip 제작.

Tel : 042-869-5038, Fax : 042-869-3050
 E-mail : hkh@kaist.ac.kr



조영호 (曹永昊)
 1957년 8월 10일 생. 1980년 영남대 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업(석사). 1991년 미국 버클리대 기계공학과 졸업(공학박사). 1982년~1986년 한국과학기술연구원(KIST) CAD/CAM연구실 연구원. 1987년~1990년 Berkeley Sensor & Actuator Center(BSAC) 연구 조교, 1990년~1991년 BSAC Post-doc., 1991년~1994년 KAIST 기계기술연구소 선임연구원. 1994년~현재 KAIST 기계공학과 부교수. 현재 창의적연구진흥산업 디지털나노구동연구단장. 관심분야: 마이크로 관성센서, 마이크로 액추에이터, 미소 광기전복합 소자, 디지털나노구동 기관 및 응용

Tel : 042-869-3038, Fax : 042-869-3050
 E-mail : mems@kaist.ac.kr



김문언 (金文彦)
 1943년 7월 13일 생. 1967년 서울대 문리과대학, 물리학과 졸업. 1969년 동학교 대학원 물리학과 졸업(석사). 1976년 일본 도쿄대 물리학 졸업(공학박사). 현재 KAIST 기계공학과 정교수. 관심분야: 점성유동 및

저속 층류 거동
 Tel : 042-869-3037, Fax : 042-869-3210
 E-mail : mukim@kaist.ac.kr