

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.10.803

마이크로 거울의 구동을 위한 저전압 비틀림형 열구동기의 설계 및 제작

김동현* · 박용철* · 박승호† · 권오명** · 최영기*** · 이준식****
(2009년 8월 4일 접수, 2009년 9월 4일 수정, 2009년 9월 4일 심사완료)

Design and Fabrication of Low-Voltage Twisting-Type Thermal Actuators for Micromirrors

Dong Hyun Kim, Yong Chul Park, Seungho Park, Ohmyoung Kwon, Young Ki Choi and Joon Sik Lee

Key Words : Micromirror(마이크로 거울), Thermal Actuator(열 구동기), Twisting-Type(비틀림형)

Abstract

Micromirrors have a wide range of applications such as optical switches, laser scanners, and digital projection displays. Due to their low performances and high costs, however, practical applications of micromirrors are quite limited. At present micromirrors demand not only a better design but also a simple fabrication process. In this study a twisting-type micromirror that can be driven by two thermal bimorph actuators bending in opposite directions is designed from electro-thermo-mechanical theories and fabricated through a simple MEMS process. Each actuator consists of SiO₂ and gold thin-film layers. Simplified analytical model has been built to optimize the performance of micromirror. Due to unexpected resistance increase of metal film and alignment mismatch during fabrication process, experimental rotation angles of micromirrors are about 11° at applied voltages less than 0.6V. From numerical simulation and analytical studies, however, the next design can provide rotation angles over 20° at the same applied voltage

기호설명

<p>A : 바이메탈 구동기의 단면적</p> <p>b : 바이메탈 구동기의 각 층의 폭</p> <p>C : 상수</p> <p>E : 탄성계수</p>	<p>F_b : 바이메탈 구동기의 구동력</p> <p>G : 전단계수</p> <p>H : 대류열전달계수</p> <p>H_{fin} : 핀(fin) 대류열전달계수</p> <p>h : 바이메탈 구동기의 각 층의 두께</p> <p>I : 관성모멘트</p> <p>J : 극관성모멘트</p> <p>K : 스프링 상수</p> <p>K_T : 비틀림 스프링 상수</p> <p>L_b : 바이메탈 구동기의 길이</p> <p>L_c : 연결보 길이의 절반</p> <p>P : 바이메탈 구동기의 둘레길이</p> <p>q_J : 단위체적당 줄(Joule) 가열량</p> <p>R : 비저항</p>
--	--

[이 논문은 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과
E-mail : spark@hongik.ac.kr

TEL : (02) 320-1632 FAX : (02) 322-7003

* 홍익대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 고려대학교 기계공학과

*** 회원, 중앙대학교 기계공학부

**** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

- R_T : 기관의 열저항
 T : 온도
 V : 입력 전압
 x : 바이메탈 구동기의 축방향 좌표

그리스문자(Greek letters)

- α : 열 팽창계수
 δ : 바이메탈 구동기의 처짐
 θ : 회전각
 ρ : 곡률반경
 κ : 열 전도도
 ϕ_{mirror} : 거울의 회전각

하첨자

- 1 : 실리콘 화합물 박막층
 2 : 금속 박막층
 a : 대기
 b : 바이메탈 구동기
 c : 연결보
 sub : 기관

1. 서론

마이크로 거울(micro-mirror) 시스템은 광신호의 경로를 바꾸는 약 $100\mu\text{m}$ 크기의 미세 거울과 이 거울을 회전시키거나 상하 혹은 좌우로 움직이는 미세 구동기(micro-actuator)를 함께 일컫는다. 현재 마이크로 거울 시스템은 디스플레이, 광통신, 의료기기, 논리 소자, 리소그래피(lithography), 바이오 칩(bio-chip) 등의 다양한 분야에서 연구 및 응용되고 있다.

지금까지 연구된 마이크로 거울의 구동은 정전기력(electrostatic), 전자기력(electromagnetic), 열팽창(thermal expansion), 압전(piezoelectric) 방식 등을 기반으로 하고 있다. 정전기력은 가장 많은 연구가 이루어져 있으며 이미 상용화 되고 있다. 그러나 콤드라이브(comb drive) 등의 구조를 이용하여도 수십 볼트의 작동 전압이 요구되며, 혹은 그 이상의 수백 볼트에 달하는 높은 전압을 요구하는 점이 최대 단점으로 꼽힌다.⁽¹⁻³⁾ 전자기력의 경우 정전기력에 비하여 구동전압이 낮고 속도 역시 빠르므로 매력적인 대안으로 평가되지만 아직까지 구동력이 작고 제작과정이 복잡하다.⁽⁴⁻⁶⁾ 압전 방식의 경우 성능은 정전기력에 비하여 우수하지만 전자기력과 마찬가지로 공정이 어렵고 재료의 제약이 있다.^(7,8) 반면 열팽창 방식은 비교적 낮은 작동 전압으로 큰 변위를 얻을 수 있고, 일괄공정에 적용이 가능하지만 응답 속도가 상당히 느리거나 특정주파수의 공진(resonance)

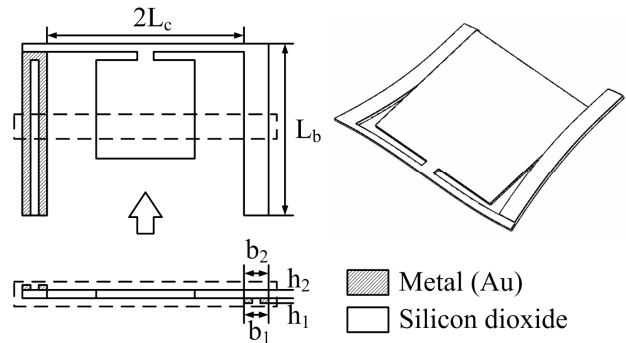


Fig. 1 Schematic diagram for a micromirror actuation system: structures and deformed shape

모드를 활용하고 있다.^(9,10)

이를 개선하기 위해서 본 연구는 두 개의 열팽창 구동기를 이용하여 저 전압에서 비틀림을 통한 큰 회전각과 빠른 응답 속도를 얻을 수 있는 마이크로 거울을 설계하고 제작하였다. 금(gold)과 이산화규소(SiO_2) 박막으로 구성된 길이가 $100\mu\text{m}$ 인 바이메탈 효과 외팔보(cantilever) 구동기 2 개와, 이 2 개의 구동기를 연결하는 연결 보(connecting beam)와, 연결 보 가운데에 붙어있는 $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ 마이크로 거울로 구성된다.

2. 마이크로 거울의 설계 및 제작

2.1 마이크로 거울(micromirror) 시스템의 구조

Figure 1의 마이크로 거울 시스템은 두 개의 구동기(actuator)와 두 구동기를 연결하는 연결 보, 그리고 연결 보에 고정되어 있는 마이크로 거울로 구성된다. 각각의 구동기는 바이메탈 구조의 외팔보로 그 크기나 구조는 동일하지만, 위아래가 서로 반대로 설계되어 있어 구동하는 방향이 반대이다. 두 구동기의 자유단은 연결보를 통하여 연결되어 있고, 각 구동기는 그 움직임이 서로 반대이므로 이로 인하여 두 외팔보의 끝의 높이는 한 개의 외팔보로 얻을 수 있는 변위의 두 배가 될 수 있다. 그리고 두 외팔보 사이에 있는 연결보는 이렇게 얻어진 변위에 의해 휘어짐과 동시에 회전하게 된다. 마이크로 거울은 연결보의 중앙에 고정되어 있으므로 상하 혹은, 좌우의 병진 운동 없이 오직 회전만 하게 되고, 외력에 의한 변형을 최소화할 수 있다.

구동변위는 열팽창에 의한 바이메탈 효과로부터 얻을 수 있고, 따라서 각 구동기는 금속박막과 SiO_2 박막으로 구성될 수 있다. 일반적으로 금속은 열 팽창률이 큰 재료이며 SiO_2 는 열 팽창률이 가장 작은 재료 중 하나로, 두 재료의 조합은 바이

메탈 효과를 적용한 열팽창 구동기로 매우 적합하다. 또한 금속 층은 바이메탈구조에서 동시에 가열기로 사용될 수 있는데 가열은 금속 층에 전류를 흘려 줄(Joule) 가열을 통해 이루어 진다. 따라서 SiO₂ 가 얇은 보(beam)의 형태인 반면, 금속 층은 가열선의 형태를 갖게 된다. 즉, 금속 층은 두께가 일정한 박막형태가 아니고, Fig. 1 에서 개략적으로 제시한 것 같이 SiO₂ 박막의 가장자리를 두르는 선 형태로 설계되었으며, 선 형태로 인한 바이메탈 효과의 감소는 금속 층의 두께를 조절하여 보상할 수 있다.

2.2 해석 모델

본 연구에서 설계 제작할 열팽창 구동기는 금 박막과 SiO₂ 박막의 두 층으로 이루어져 있다. 금의 열팽창 계수는 SiO₂의 열팽창 계수보다 약 40 배 정도 더 크며(Table 1 참조), 가열 시 두 물질의 열팽창의 차이는 전단응력으로 인한 굽힘을 발생시킨다. 이는 보의 끝 단에 집중하중이 작용하는 것과 같은 효과로 이때 바이메탈 효과에 의한 보의 곡률반경 ρ는 보의 탄성이론으로부터 온도증가 ΔT의 함수로 다음과 같이 유도 될 수 있다.

$$\frac{1}{\rho} = \eta \Delta T \quad (1)$$

$$\eta =$$

$$\frac{6E_1E_2b_1b_2h_1h_2(h_1+h_2)(\alpha_2-\alpha_1)}{(E_1b_2h_1^2)^2 + (E_2b_1h_2^2)^2 + 2E_1E_2b_1b_2h_1h_2(2h_1^2 + 3h_1h_2 + 2h_2^2)} \quad (2)$$

위 식은 Chu 등⁽¹¹⁾이 제안한 식으로 재료가 등방성이고, 두 층의 접합이 충분히 강할 경우를 가정하고 있다. 이론적으로 보의 두께가 곡률반경에 비해 매우 작을 때 적용 가능하며, 곡률반경에 대한 두께의 비율이 약 1/15 이하일 경우 매우 정확한 것으로 알려져 있다.

Figure 2는 식 (1)로부터 구한 증가 ΔT에 따른 곡률반경 ρ를 박막두께 비 h₂/h₁의 함수로 나타내고 있고, 금 박막의 두께가 SiO₂ 박막 두께의 약 1/2인 경우에서 곡률반경이 최소가 됨을 알 수 있다. 일반적으로 곡률 반경은 두께에 비례하므로 박막의 두께가 얇을수록 처짐은 커지게 되지만, 그러나 너무 얇을 경우 마이크로 거울 시스템의 자중에 의한 처짐이 발생할 수도 있으며, 미세공정이 어려워 지므로 어느 정도의 두께 유지가 필요하다. 이에 따라 두께는 금 박막은 0.3μm 이고 SiO₂ 박막은 0.6 μm 로 결정하였다. 이는 시스템의

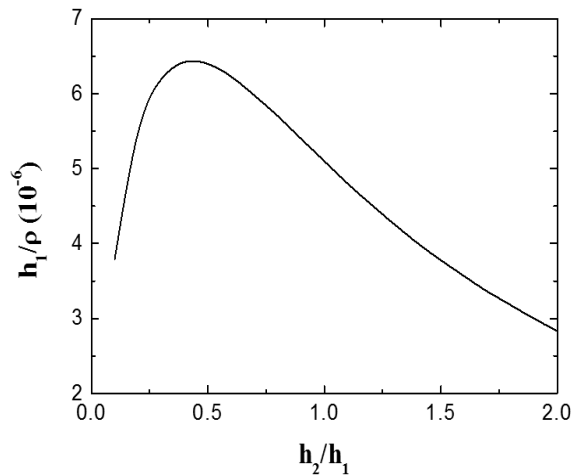


Fig. 2 Radius of curvatures for bimorph beams with respect to thickness ratios of gold and SiO₂ thin-film layers

무게에 의한 처짐을 구동기의 길이의 1%이하로 할 수 있는 두께이다.

구동기의 작동 시 온도에 따른 바이메탈효과 변형은 식 (1)의 곡률반경을 아래의 식에 대입하여 계산 할 수 있다.

$$\frac{d^2\delta(x)}{dx^2} = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

여기서 구동기 외팔보의 처짐에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\delta(0) = 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{d\delta}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (5)$$

이때 구동기의 온도분포가 요구되는데, 다음과 같은 1 차원 열전달 핀-해석을 통하여 구할 수 있다.

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{HP}{A\kappa_b} T = -\frac{q_J}{k_b} - \frac{HPT_a}{A\kappa_b} \quad (6)$$

$$-\kappa_b A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \frac{(T_a - T(0))}{R_T} \quad (7)$$

$$-\kappa_b A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L_b} = H_{fm} A (T(L_b) - T_a) \quad (8)$$

$$R_T = \frac{dT}{\kappa_{sub} A} \quad (9)$$

여기서, 대류 열전달 계수 H 는 자연대류의 경우 수십 W/m^2K 정도로 알려져 있지만, 마이크로 거울 시스템 등의 미세 시스템 내부에서는 대류 열전달이 억제되는 반면에 구조물 사이 매질에 의한 전도 열전달은 크게 증가하여, 이를 대류 열전달 계수로 표현할 경우 대략적으로 $10000 W/m^2K$ 정도인 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾ 열전달 관계방정식 (6)-(9)는 구동기의 변형과는 상관관계가 없다고 가정할 경우 다음과 같은 구동기의 길이 방향에 따른 온도분포를 유도할 수 있다.

$$T(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} + \frac{q_J A}{HP} + T_a \quad (10)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{HP}{A\kappa_b}} \quad (11)$$

$$C_1 = \frac{q_J A}{HP} \frac{[(R_T \gamma + 1)H_{fin} A - (\gamma + H_{fin} A)e^{-\gamma L_b}]}{[(R_T \gamma + 1)(\gamma - H_{fin} A)e^{\gamma L_b} - (R_T \gamma - 1)(\gamma + H_{fin} A)e^{-\gamma L_b}]} \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{q_J A}{HP} \frac{[(R_T \gamma - 1)H_{fin} A - (\gamma - H_{fin} A)e^{\gamma L_b}]}{[(R_T \gamma + 1)(\gamma - H_{fin} A)e^{\gamma L_b} - (R_T \gamma - 1)(\gamma + H_{fin} A)e^{-\gamma L_b}]} \quad (13)$$

이때, 줄 가열 (Joule heating)을 통한 단위체적당 가열량은 다음과 같다.

$$q_J = \frac{V^2}{RA_{cross} L_b} \quad (14)$$

Figure 3는 입력 전압이 0.1 ~ 0.5V 일 때의 온도 분포를 도시하고 있다. 식 (10)을 통해 얻어진 온도분포를 식 (1)과 (3)에 대입하면 구동기의 처짐을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta(x) = \frac{\eta}{\gamma^2} [C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}] + \frac{q_J A}{2HP} x^2 - \frac{\eta}{\gamma} [C_1 - C_2] x - \frac{\eta}{\gamma^2} [C_1 + C_2] \quad (15)$$

Figure 1의 마이크로 거울은 두 개의 구동기로 구동되며 각각의 구동기는 반대 방향으로 작동한다. 연결보는 양 끝에 연결된 구동기가 서로 반대로 움직이면서 회전하게 된다. 이때 구동기의 강성에 의해서 양단이 고정된 부정정보의 굽힘현상이 동시에 발생하게 된다. 따라서 중앙의 거울의 회전각은 연결보의 회전과 굽힘으로 인한 기울기의 합이 된다. 따라서 거울의 회전각은 구동기와 연결보에 대한 응력-변형률 방정식을 연립하여 얻을 수 있다.⁽¹³⁾

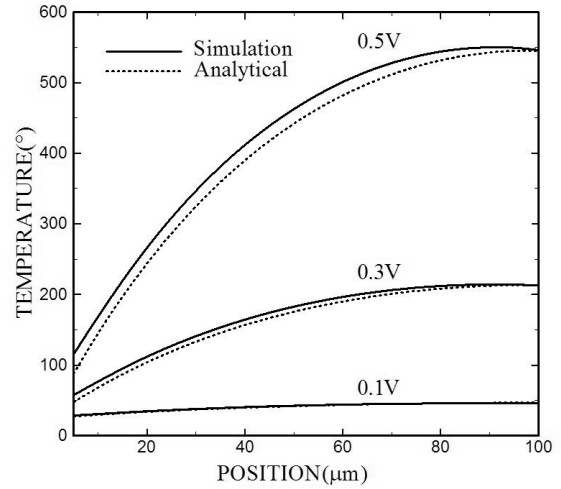


Fig. 3 Temperature distributions along the actuator beam for various input voltages

$$\begin{bmatrix} K_b & K_c & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -L_c & 0 \\ L_b K_b & 0 & 0 & -K_{Tc} \\ 0 & L_c K_c & -K_{Tb} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_c \\ \theta_b \\ \theta_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$K_b = \frac{3EI_b}{L_b^3}, \quad K_c = \frac{3E_c I_c}{L_c^3}, \quad K_{Tb} = \frac{GJ_b}{L_b}, \quad K_{Tc} = \frac{G_c J_c}{L_c} \quad (17)$$

$$EI_b = \frac{(E_1 b_1 h_1^2)^2 + (E_2 b_2 h_2^2)^2 + 2E_1 E_2 b_1 b_2 h_1 h_2 (2h_1^2 + 3h_1 h_2 + 2h_2^2)}{12(E_1 b_1 h_1 + E_2 b_2 h_2)} \quad (18)$$

$$GJ_b = \frac{1}{12} (G_1 h_1 + G_2 h_2) b^3 \quad (19)$$

$$F_b = \frac{3EI_b \delta(L_b)}{L_b^3} \quad (20)$$

여기서 F_b 는 바이메탈 효과에 의한 처짐에 대한 등가 집중하중이다. 식 (16)은 바이메탈보와 연결보에 대한 강성-하중 행렬로 이 행렬을 통하여 바이메탈보와 연결보의 각각의 처짐과 비틀림을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\delta_b = \frac{3EI_b \delta(L_b) (K_{Tb} + L_c^2 K_c)}{L_b^3 (K_b K_{Tb} + K_c K_{Tc} + L_c^2 K_b K_c)} \quad (21)$$

$$\delta_c = \frac{3EI_b \delta(L_b) K_{Tb}}{L_b^3 (K_b K_{Tb} + K_c K_{Tc} + L_c^2 K_b K_c)} \quad (22)$$

$$\theta_b = \frac{3EI_b \delta(L_b) L_c K_c}{L_b^3 (K_b K_{Tb} + K_c K_{Tc} + L_c^2 K_b K_c)} \quad (23)$$

$$\theta_c = \frac{3EI_b\delta(L_b)\left[L_bK_b(K_{Tb} + L_c^2K_c)\right]}{L_b^3K_{Tc}\left(K_bK_{Tb} + K_cK_{Tc} + L_c^2K_bK_c\right)} \quad (24)$$

$$\phi_m = \theta_b + \left.\frac{d\delta_c}{dx}\right|_{x=L_c} = \frac{6EI_b\delta(L_b)L_c^2K_c + 9EI_b\delta(L_b)K_{Tb}}{2L_cL_b^3\left(K_bK_{Tb} + K_cK_{Tc} + L_c^2K_bK_c\right)} \quad (25)$$

여기서 $\delta_b, \delta_c, \theta_b, \theta_c$ 는 각각 바이메탈보(하첨자 b)와 연결보(하첨자 c)의 처짐과 비틀림각이고 ϕ_m 는 마이크로 거울의 회전각이다. 위 식을 통하여 거울의 회전각을 최대화 할 수 있는 연결보의 형상을 결정할 수 있다. 거울의 회전각은 연결보의 강성에 영향을 받게 되므로, 연결보의 폭이 얇을수록 유리하지만 너무 얇을 경우 내구성에도 안 좋은 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 실제 제작 공정을 고려하여 폭은 $5\mu\text{m}$ 로 결정하였고, 바이메탈 구동기의 길이와 폭이 각각 $100\mu\text{m}$ 와 $15\mu\text{m}$ 일 때 연결보의 최적 길이는 식 (25)를 통하여 $60\mu\text{m}$ 로 결정하였다.

2.3 마이크로 거울 시스템에 대한 수치 해석

마이크로 거울 시스템의 구동특성에 대하여 보다 정확한 이해를 위하여 유한요소법을 적용한 상용 FEM 프로그램(Intellisuite)⁽¹⁴⁾을 활용하였다. 해석적 방법은 풀이과정의 어려움을 피하기 위해 재료 물성과 구조, 그리고 경계조건 등을 단순화 하였지만, 유한요소법을 적용한 시뮬레이션을 통해 복잡한 구조나 경계조건 등에 대한 자세한 결과를 얻을 수 있다.

이론적 온도분포와 Intellisuite 를 이용한 시뮬레이션 결과가 서로 잘 일치함을 Fig. 3 에서 확인할 수 있고, Fig. 4 는 입력 전압 0.57 V 에 대하여 마이크로 거울 구동 시스템의 변형시뮬레이션을 통해 얻은 결과이다. 이때 사용한 물성치는 Table 1 에 정리되어 있다.

2.4 마이크로 거울 시스템의 제작

마이크로 거울 시스템의 제작공정은 photomask 2 장을 사용하는 단면 surface-micromachining 공정으로 타 제작공정에 비하여 상당히 단순하고, 또한 이는 차후에 CMOS 공정과 간단히 결합될 수 있다. 본 공정과정은 Fig. 5 와 함께 아래에 간략히 제시되어 있다.

- (a) 알루미늄 박막 증착 공정: 희생층으로 사용될 알루미늄박막을 증착한다. 알루미늄 층은 습식각(wet etching)을 통해 undercut(언더컷)을 유발

Table 1 Properties of materials for microactuators

	Au [14]	SiO ₂ [12]
Elastic Modulus [GPa]	55	70
Poisson Ratio	0.42	0.17
Coefficient of Thermal Expansion [10^{-7}K^{-1}]	142	3.5
Thermal Conductivity [W/mK]	315	0.15
Resistivity [Ωm]	2.2×10^{-6}	1012

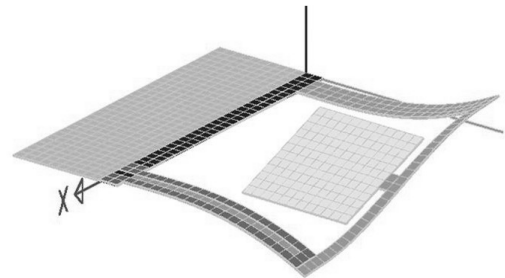


Fig. 4 Deformed shape of micromirror system for input voltage of 0.57 V

하여 lift off 공정의 수율을 향상시킬 수 있다. 희생층으로 알루미늄을 택한 것은 손쉽게 구할 수 있는 재료이면서 식각시약(etchant)이 금과의 선택비(selectivity)가 높기 때문이다.

- (b) 사진공정: 감광제(photoresist)와 웨이퍼(wafer) 사이의 접착력을 향상시키기 위해서 Hexamethyldisilazane(HMDS)를 먼저 코팅하고 감광제를 코팅한 후 사진공정을 통하여 현상한다.
- (c) 알루미늄 박막 식각 공정: 알루미늄 식각 시약을 이용하여 알루미늄 박막을 습식각 한다.
- (d) 실리콘 웨이퍼 식각 공정: 바이메탈구조의 하나인 SiO₂ 층의 평탄도를 유지하기 위하여 증착될 알루미늄 층의 두께만큼 웨이퍼를 비등방(anisotropic) 식각한다.
- (e) 금 박막 증착 공정: 전자 빔 증발기(evaporator)로 금 박막을 증착한다.
- (f) Lift-off 공정: 우선 감광제를 제거하고 희생층으로 사용된 알루미늄 층을 제거하여 금 박막의 일부를 lift-off 한다.
- (g) SiO₂ 박막 증착 공정: TEOS 로 SiO₂ 층을 증착한다.
- (h) SiO₂ 박막 식각 공정: 사진공정 이후 RIE 공

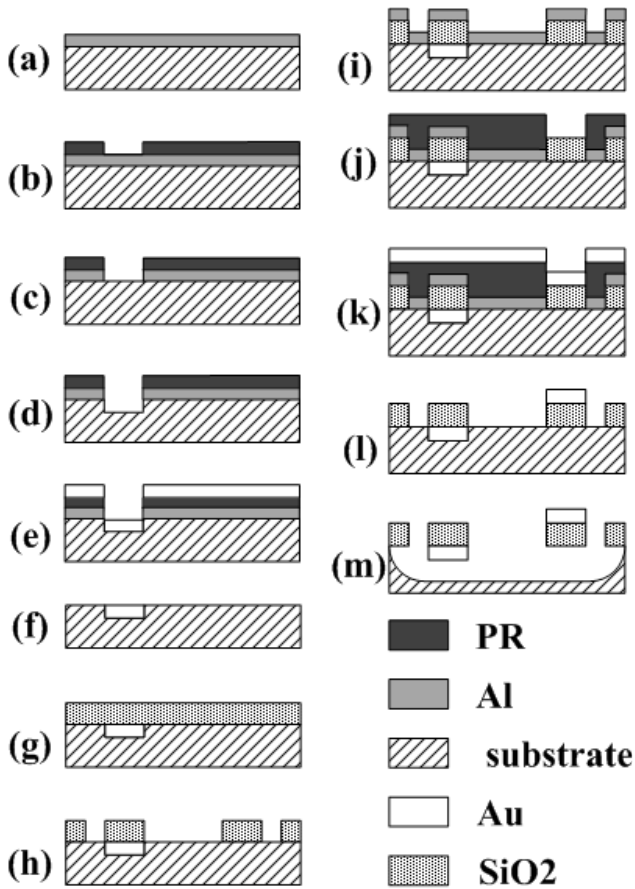


Fig. 5 Fabrication processes for twisting-type micromirror actuation systems

정을 이용하여 SiO_2 층을 식각한다.

- (i) 알루미늄 박막 증착공정: 희생층으로 사용될 알루미늄 박막을 증착한다.
- (j) 알루미늄 박막 습식각 공정: 사진공정 이후 알루미늄 박막을 습식각 한다.
- (k) 금 박막 증착 공정: 전자 빔 증발기로 금 박막을 증착한다.
- (l) Lift-off 공정: 감광제를 제거하고 희생층으로 사용된 알루미늄 층을 제거하여 금 박막의 일부를 lift-off 한다.
- (m) 실리콘 웨이퍼 식각 공정: XeF 을 이용하여 웨이퍼를 식각한다. XeF 는 등방성 식각을 할 수 있으므로 구동기 및 마이크로 거울의 아래까지 언더컷이 발생하여 결과적으로 마이크로 거울 구조물을 부양하게 된다.

3. 실험

금속을 SiO_2 층위에 증착할 경우 잔류응력에 의한 변형이 발생하는데 적당한 열처리를 통하여 이

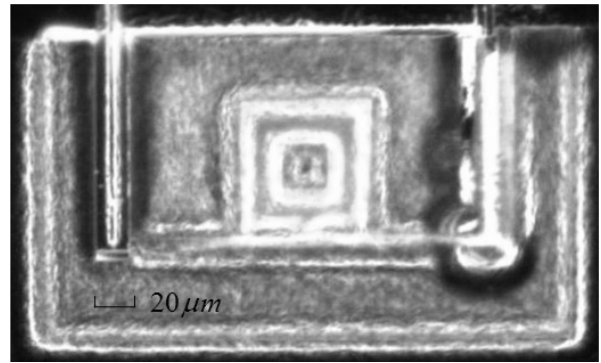


Fig. 6 Top view of a twisting-type micromirror actuation system fabricated through MEMS process

를 제거할 수 있다. 금 박막의 열처리는 보통 400°C 에서 600°C 사이에서 진행되는데 첫 번째 금 박막층은 이후 TEOS 를 이용한 SiO_2 증착 공정이 390°C 에서 진행되어 어느 정도 열처리가 될 수 있다.⁽¹⁵⁾ 그 이후 공정부터는 별도의 열처리가 필요하지만, 열팽창 구동기의 작동 온도가 최대 700°C 까지 올라가기 때문에 소자를 작동시키는 과정에서 저절로 열처리가 될 수 있다. 다만 구동 온도가 너무 높을 경우 내구성 저하 또는 소성변형이 발생 등에 대한 추가 대책이 필요하다.

앞 장에서 제시한 공정에 따라 마이크로 거울 구동 시스템에 대한 결과는 Fig. 7 에 제시되고 이다. 제작된 구동 시스템의 구동기 쌍의 성능이 서로 다른 결과를 보였다. 그 원인은 SiO_2 층과 그 아래의 금속 층간의 정렬(alignment)이 잘 되지 않았기 때문으로 사료된다. Fig. 6 의 오른쪽 구동기를 보면 금속 층과 SiO_2 층이 반정도 어긋나 있는 것을 확인할 수 있다. 이로 인하여 원래 금속 층과 SiO_2 층의 폭의 비는 2:3 이었지만 1:3 으로 감소한 것으로 평가되었다. 감소된 폭의 비는 구동기의 성능 저하로 이어지는데, 식 (15)를 통하여 계산할 경우 약 20%정도 변위가 감소하게 된다. 성능 저하의 원인은 정렬문제 외에도 SiO_2 층 아래의 금속 층의 전기적 저항이 변하였음을 들 수 있다. 윗면 금속 층의 경우 저항이 2.14Ω 인데 반해 아랫면은 87.2Ω 으로 40.7 배나 크게 측정 되었다. 이는 TEOS 증착 과정에서 높은 온도로 인하여 접착층(adhesion layer)으로 사용된 티타늄(Titanium) 층의 영향이 컸거나, 변형이 제한되어 있어 금속 박막층이 팽창하지 못하고 압축 응력을 받아 항복하면서 저항이 증가하였거나, 아니면 여러 번의 식각 과정에서 금속 박막층의 일부가 부식되었을 가능성 때문인 것으로 사료된다.

입력전압이 0.57 V 일 때, 금속 층이 위에 있는 구동기의 변위는 $12.5 \mu\text{m}$ 로 예상과 같이 작동하였

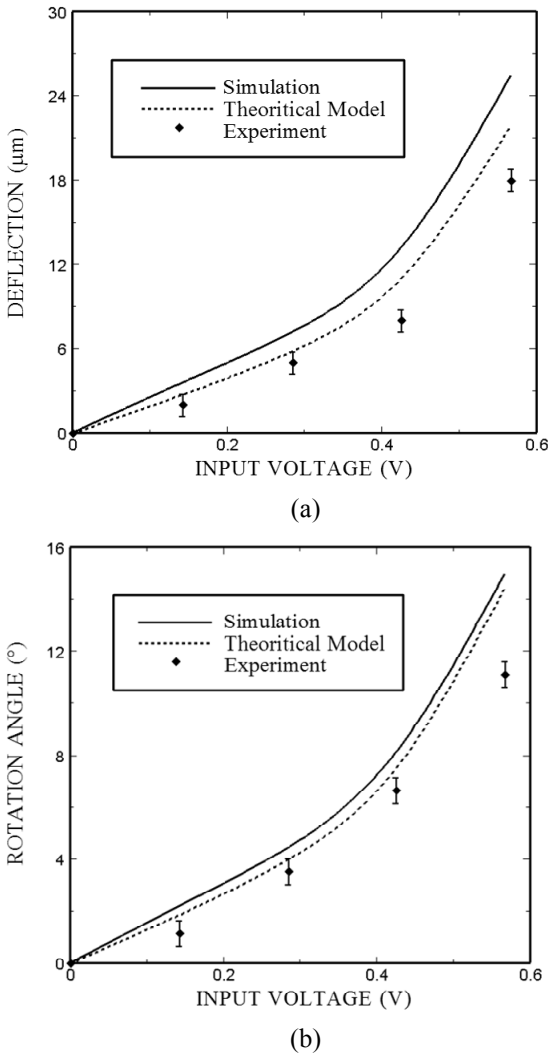


Fig. 7 Results from theoretical model, simulation, and experiments: (a) maximum deflections and (b) maximum rotating angles for input voltages less than 0.6 V

지만, 금속 층이 아래에 있는 경우는 앞서 설명한 바와 같이 금속 층의 저항이 $2.14\ \Omega$ 에서 $87.2\ \Omega$ 으로 증가하였고 또한 SiO_2 층과 금속 층의 정렬 불일치에 기인하여 $5.5\ \mu\text{m}$ 밖에 얻을 수 없었다 (Table 2 참조). Fig. 7(a)는 전압에 따른 구동기의 변위를 시뮬레이션 결과와 이론 값 그리고 실험 결과를 비교한 것이고 Fig. 7(b)는 거울의 회전각을 비교하고 있다. 시뮬레이션과 이론 모두 실제 제작된 구동기의 측정저항을 활용하였고, 결과는 비교적 잘 일치하였지만, 이론 값과 실험값을 비교하면 약 20%의 차이가 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 앞에서 설명한 대로 정렬불일치에 의한 것으로 생각된다.

Table 2 Calculated and measured results of double-actuator actuations of micromirrors

	Analytical	Simulation	Experiment
Voltage[V]	0.57	0.57	0.57
Deflection[μm]	25.5	22.0	18
Angle[°]	15	14.5	11
Temperature[°C]	536.72	531.52	

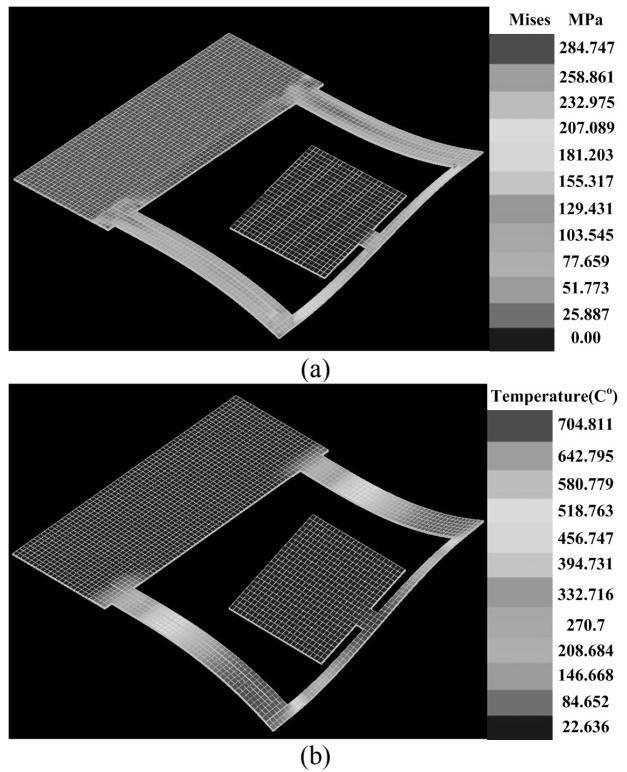


Fig. 8 Results from FEM simulation: (a) stress and (b) temperature distributions of micromirror system at input voltage of 0.5 V

Figure 8 은 구동전압 0.5V 에서 마이크로 거울 시스템의 응력 및 온도 분포를 보여준다. 응력의 경우 연결보가 구동기와 만나는 부위에 매우 높은 집중 하중이 걸리며 이외에는 그다지 높지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 연결보에 작용하는 굽힘 응력에 의한 것으로 비틀림 응력의 경우 보 전체에 고르게 분포되는 반면 굽힘 응력은 고정단에서 최대가 되기 때문이다. 다른 부위의 응력은 상대적으로 매우 낮기 때문에 연결보의 집중 하중만 완화시켜 줄 수 있다면 응력에 대한 제한이 상당

히 낮아질 것으로 보인다.

4. 결 론

열팽창 구동기를 이용한 비틀림형 마이크로 거울의 설계 및 제작을 하였다. 두 개의 열팽창 구동기로 제어되는 마이크로 거울은 굽힘과 비틀림을 혼합하여 큰 회전각을 얻을 수 있었다. SiO₂ 와 금 박막으로 제작된 마이크로 거울의 공정은 차후에 CMOS 공정에 통합 적용할 수 있는 장점을 지니고 있다.

제작된 구동시스템은 약 0.6V 의 낮은 구동 전압에도 20° 의 큰 회전각을 얻을 수 있으리라 예측하였다. 그러나 공정과정 중 금속박막의 저항증가 및 정렬불일치 등으로 인하여 먼저 증착된 금속 박막의 성능이 저하되어 11° 의 회전각에 머물렀다. 즉, 시뮬레이션을 통하여 예상하였던 성능은 발휘하지 못하였고, 이는 앞으로의 공정연구를 통하여 해결하여야 하는 문제로 남아있다. 동일한 조건하에서의 시뮬레이션 및 해석 모델의 예측과 실험결과는 비교적 일치하였으며 이를 통해 두 구동기가 원활히 작동할 경우 20° 정도의 큰 회전각을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 마이크로열시스템연구센터와 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2008-313-D00097)로, 제작 공정과정에서 도움을 주신 서울대학교 반도체공동연구소(ISRC)에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Tsou, C., Lin, W. T., Fan, C. C. and Chou, B. C. S., 2005, "A Novel Self-Aligned Vertical Electrostatic Comb Drives Actuator for Scanning Micromirrors," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 855~860.
- (2) Schenk, H., Dürr, P., Kunze, D., Lakner, H., and Kück, H., 2001, "A Resonantly Excited 2D-Micro-Scanning-Mirror with Large Deflection," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 89, No. 1-2, pp. 104~111.
- (3) Krishnamoorthy, U., Li, K., Yu, K., Lee, D., Heritage, J. P. and Solgaard, O., 2002, "Dual-Mode Micromirrors for

- Optical Phased Array Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 97-98, pp. 21~26.
- (4) Nakai, A., Hoshino, K., Matsumoto, K., and Shimoyama, I., 2007, "Double-Sided Scanning Micromirror Array for Autostereoscopic Display," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 135, No. 1, pp. 80~85.
- (5) Judy, J. W., Muller, R. S., 1996, "Magnetic Microactuation of Torsional Polysilicon Structures," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 53, No. 1-3, pp. 392 ~ 397.
- (6) Yalcinkaya, A. D., Ergeneman, O., and Urey, H., 2007, "Polymer Magnetic Scanners for Bar Code Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 135, No. 1, pp. 236~243.
- (7) Kueppers, H., Leuerer, T., Schnakenberg, U., Mokwa, W., Hoffmann, M., Schneller, T., Boettger, U. and Waser, R., 2002, "PZT Thin Films for Piezoelectric Microactuator Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 97-98, pp. 680~684.
- (8) Filhol, F., Defay, E., Divoux, C., Zinck, C. and Delaye, M. T., 2002, "Resonant Micro-Mirror Excited by a Thin-Film Piezoelectric Actuator for Fast Optical Beam Scanning," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 123-124, pp. 483~489.
- (9) Schweizer, S., Calmes, S., Laudon, M. and Renaud, P., 1999, "Thermally Actuated Optical Microscanner with Large Angle and Low Consumption," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 76, No. 1-3, pp. 470~477.
- (10) Liew, L.-A., Tuantranont, A., and Bright, V. M., 2000, "Modeling of Thermal Actuation in a Bulk-Micromachined CMOS Micromirror" *Microelectronics Journal*, Vol. 31, No. 9-10, pp. 791~801.
- (11) Chu, W. H., Mehregany, M. and Mullen, R. L., 1993, "Analysis of Tip Deflection and Force of a Bimetallic Cantilever Microactuator," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 4~7.
- (12) Pichonat-Gallois, E., Petrini, V., de Labachellerie, M., 2004, "Design and Fabrication of Thermal Actuators Used for a Micro-Optical Bench: Application to a Tunable Fabry-Perot Filter," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 114, No. 2-3, pp. 260~266.
- (13) Kim, D. H., Oh, K. S., Park, Y. C. and Park, S., 2009, "Design and Analysis of a Twisting-Type Thermal Actuator for Micromirrors," *Journal of Mechanical Science and Technology* (to appear).
- (14) Intellisuite 8, Intellisense Software Corp, Boston, Massachusetts, USA, 2005.
- (15) Tang, W., Xu, K., Wang P. and Li, X., 2003, "Residual Stress and Crystal Orientation in Magnetron Sputtering Au Films," *Materials Letters*, Vol. 57, No. 20, pp. 3101~3106.