

# 저전압 대회전을 위한 분리된 압전 구동기에 의한 미소거울

論 文  
55C-3-8

## Micromirrors Driven by Detached Piezoelectric Microactuators For Low-voltage and Wide-angle Rotation

金 成 眞\* · 陳 令 鉉\*\* · 李 源 哲\*\*\* · 曹 永 昊† · 南 孝 鎭§ · 夫 鍾 郁§§

(Sung-Jin Kim · Won Chul Lee · Young-Hyun Jin · Young-Ho Cho\* · Hyo-Jin Nam · Jong Uk Bu)

**Abstract** - This paper presents a torsional micromirror detached from PZT actuators (TMD), whose rotational motion is achieved by push bars in the PZT actuators detached from the micromirror. The push bar mechanism is intended to reduce the bending, tensile and torsional constraints generated by the conventional bending bar mechanism, where the torsional micromirror is attached to the PZT actuators (TMA). We have designed, fabricated and tested prototypes of TMDs for single-axis and dual-axis rotation, respectively. The single-axis TMD generates the static rotational angle of  $6.1^\circ$  at 16 VDC, which is 6 times larger than that of single-axis TMA,  $0.9^\circ$ . However, the rotational response curve of TMD shows hysteresis due to the static friction between the cover and the push bar in the PZT actuator. We have shown that 63.2 % of the hysteresis is due to the static friction caused by the initial contact force of the PZT actuator. Without the initial contact force, the rotational response curve of TMD shows linear voltage-angle characteristics. The dual-axis TMD generates the static rotational angles of  $5.5^\circ$  and  $4.7^\circ$  in x-axis and y-axis, respectively at 16 VDC. The measured resonant frequencies of dual-axis TMD are  $2.1 \pm 0.1$  kHz in x-axis and  $1.7 \pm 0.1$  kHz in y-axis. The dual-axis TMD shows stable operation without severe wear for 21.6 million cycles driven by 16 Vp-p sinusoidal wave signal at room temperature.

**Key Words** : Micromirror, PZT Actuator, Optical Cross Connect, Optical Switch

### 1. 서 론

최근 회전형 미소거울[1-4]은 대용량 광통신용 스위칭소자로 주목을 받고 있다. 대용량 광통신[1] 스위치에 사용되는 회전형 미소거울은 빠른 응답속도, 저전압 구동, 대회전각 및 선형적인 전압-회전 특성이 필요하다. 이에, 회전형 미소거울의 구동방식으로 정전형과 압전형 구동이 제안되었다. 최근 제안된 정전구동 미소거울[2,3]은  $9^\circ$  정도의 큰 회전 각을 보였으나 구동전압이 170 VDC 정도로 높고, 비선형적인 전압-회전 특성을 나타내었다. 반면, 압전구동 미소거울은 저전압 구동이 가능하고 선형적인 전압-회전 특성을 가지고 있다. 그러나 기존의 압전구동 미소거울[4]은 회전 각이 15 VDC 전압 인가 시  $1^\circ$  정도로 대용량 광통신 스위치에 필요한 회전형 미소거울로써 충분한 회전각을 확보하지 못하였다. 압전구동 주사(scanning) 미소거울[5]은 10 VDC 전압 인가 시 공진 주파수에서  $20^\circ$ 의 대회전 특성을 보였으나, 이는 정

적구동이 필요한 대용량 광통신 스위칭용 미소거울로는 부적합하다. 이에 본 논문에서는 압전구동 미소거울의 회전각을 증가시킬 수 있는 방법으로 미소거울과 압전 구동기가 물리적으로 분리되어 접촉하는 구조를 고안하여 저전압에서의 회전각 증대를 꾀하였다.

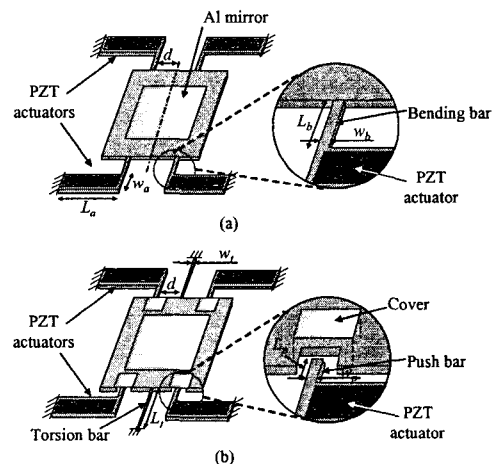


그림 1 압전형 미소거울 설계 비교: (a) 구동기 일체형 미소거울 (TMA); (b) 구동기 분리형 미소거울 (TMD).

Fig. 1 Comparison of the piezoelectric micromirror designs: (a) TMA (Tilting Micromirror Attached to the actuators); (b) TMD (Torsional Micromirror Detached from the actuators).

† 교신저자, 正會員 : KAIST 바이오시스템學科 副教授 · 工博  
E-mail : mems@kaist.ac.kr

\* 正會員 : 한국전자통신연구원 재직  
\*\* 正會員 : KAIST 기계공학과 박사과정  
\*\*\* 正會員 : KAIST 디지털 나노구동연구단 연구원  
§ 正會員 : LG전자 책임연구원  
§§ 正會員 : LG전자 연구위원  
接受日字 : 2005年 9月 23日  
最終完了 : 2006年 1月 17日

그림 1(a)에 기존의 일체형 구조(TMA: Tilting Micro-mirror Attached to the PZT actuator)[4]가 나타나있다. 제시된 바와 같이 기존의 일체형 구조에서는 압전 구동기가 미소거울에 물리적으로 결합되어 있었다. 이러한 구조에서는 미소거울의 회전운동이 굽힘보(Bending bar)의 굽힘력, 장력, 비틀림력에 의해 제한되어 대회전 유발에 대한 장애요소로 작용한다. 본 논문에서 제안하는 분리형구조 (TMD: Torsional Micromirror Detached from the PZT actuators)는 그림 1(b)에 제시되어 있다. 제안한 구조에서는 미소거울의 회전각을 증가시키기 위하여 기존의 구조에서와 달리 압전 구동기와 미소거울을 물리적으로 분리하여 압전 구동기의 밀침보(Push bar)와 덮개가 접촉하는 방식을 사용하였다. 이를 통하여 미소거울과 구동기 사이의 굽힘력, 장력, 비틀림력을 제거하였다.

2. 이론적 해석 및 설계

본 연구에서는 그림 1과 표 1에 제시된 바와 같이 압전 구동기가 결합된 TMA 구조와 압전 구동기가 분리된 TMD 구조를 설계하였다. 또한, 짐발(gimbals)과 두개의 TMD 구조를 이용한 2축 회전-TMD(표 2)도 설계하였다.

2.1 압전 구동기

본 연구에서 압전구동기는 압전층과 질화막으로 구성된 두 층 모델로 간략화하여 해석되었다. 압전층의 수축에 의한 압전 구동기의 변형[6],  $\delta$ , 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{L_a^2 d_{31} (V/h_{PZT})(h_n + h_{PZT}) A_{PZT} E_{PZT} A_n E_n}{(h_n + h_{PZT})^2 L_a A_n E_n A_{PZT} E_{PZT} + 4 (A_n E_n + A_{PZT} E_{PZT})(E_{PZT} I_{PZT} + E_n I_n)} \quad (1)$$

여기서  $L_a$ ,  $d_{31}$ ,  $V$  는 각각 압전 구동기의 길이, 압전상수, 인가 전압을 나타낸다. 또한  $h_{PZT}$ ,  $h_n$ ,  $A_{PZT}$ ,  $A_n$ 는 각각 압전층의 두께, 실리콘 질화막의 두께, 압전층의 단면적, 실리콘 질화막의 단면적을 의미하며,  $E_{PZT}$ ,  $E_n$ ,  $I_{PZT}$ ,  $I_n$ 는 각각 압전층의 영계수, 실리콘 질화막의 영계수, 압전층의 관성모멘트, 실리콘 질화막의 관성모멘트를 나타낸다.

한편, 압전구동기의 강성[7],  $k_a$ ,은 다음과 같이 계산된다.

$$k_a = \frac{3 E_n (I_n + n_{PZT} I_{PZT})}{L_a^3} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 압전층의 수축에 의한 압전구동기의 구동력,  $F_{PZT}$ , 은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{PZT} = \frac{3 d_{31} (V/h_{PZT})(h_n + h_{PZT})(L_a + n_{PZT} I_{PZT}) A_{PZT} E_{PZT} A_n E_n^2}{(h_n + h_{PZT})^2 L_a A_n E_n A_{PZT} E_{PZT} + 4 L_a (A_n E_n + A_{PZT} E_{PZT})(E_{PZT} I_{PZT} + E_n I_n)} \quad (3)$$

즉, 압전구동기의 강성과 구동력은 표 3에 정리되어 있는 물성치와 식 (2), (3)에 의해 예측될 수 있다.

표 1 제작된 1축 회전 미소거울의 측정치수

Table 1 Measured dimensions of the fabricated single-axis micromirrors\*

Structure	Layer material**	Width × Length $w \times L$
Bending bar (TMA)	SiN <sub>x</sub>	5 μm × 70 μm
Push bar (TMD)	SiN <sub>x</sub>	15 μm × 25 μm
Torsion bar (TMD)	SiN <sub>x</sub>	6 μm × 80 μm
PZT actuator	SiN <sub>x</sub>	70 μm × 230 μm
	Pt	66 μm × 230 μm
	PZT & RuO <sub>2</sub>	62 μm × 230 μm
Micromirror	SiN <sub>x</sub>	500 μm × 500 μm
	Al	320 μm × 320 μm

\*Distance between the torion and push bars(Fig.1),  $d$ , is 45μm.

\*\*Thicknesses of SiN<sub>x</sub>, Pt, PZT, and RuO<sub>2</sub> are 1.23 μm, 0.15μm, 0.38 μm, and 0.10 μm, respectively.

표 2 제작된 2축 회전 미소거울의 측정치수

Table 2 Measured dimensions of the fabricated single-axis micromirrors\*

Structure	Layer material**	Width × Length $w \times L$
x- and y- axis push bars	SiN <sub>x</sub>	15 μm × 25 μm
x-axis torsion bar	SiN <sub>x</sub>	9 μm × 100 μm
	Pt	6 μm × 100 μm
	PZT & RuO <sub>2</sub>	4 μm × 100 μm
y-axis torsion bar	SiN <sub>x</sub>	6 μm × 80 μm
x-axis PZT actuator	SiN <sub>x</sub>	70 μm × 360 μm
	Pt	66 μm × 360 μm
	PZT & RuO <sub>2</sub>	62 μm × 360 μm
y-axis PZT actuator	SiN <sub>x</sub>	70 μm × 230 μm
	Pt	66 μm × 230 μm
	PZT & RuO <sub>2</sub>	62 μm × 230 μm
Micromirror	SiN <sub>x</sub>	500 μm × 500 μm
	Al	320 μm × 320 μm

\*Distance between the torion and push bars(Fig.1),  $d$ , is 45μm.

\*\*Thicknesses of SiN<sub>x</sub>, Pt, PZT, and RuO<sub>2</sub> are 1.23 μm, 0.15μm, 0.38 μm, and 0.10 μm, respectively.

표 3 재료 물성

Table 3 Material properties

Film	E[GPa]	
Silicon nitride	114±4	0.25
PZT*	40±8	0.3

\*Piezoelectric constant,  $d_{31} = 65pC/N$

2.2 TMA 구조

TMA 구조에서는 미소거울과 굽힘보가 물리적으로 결합되어 있다. 따라서 미소거울 회전시 굽힘력, 장력, 비틀림력에 의해 굽힘보의 강성이 증가하게 된다. 이러한 문제를 고려하기 위하여 대변형 요소를 포함한 유한요소 해석을 이용하여 미소거울의 회전각을 계산하였다. 이 해석에서는 단순화를 위하여 압전-실리콘 질화막 층을 등가의 실리콘 질화막 층으로 변환하여 유한요소 해석을 실시하였다. 표 4에서 보는바와 같이, TMA 구조는 16 V의 직류전압이 인가되었을 때 1.2°의 회전을 하는 것으로 계산되었다.

2.3 TMD 구조

그림 2에서 보는바와 같이, TMD 구조에서는 마찰력은 고려하지 않고 압전 구동기를 선형 스프링으로, 비틀림보를 선형 스프링과 회전형 스프링으로 각각 모델링 하였다. 이 모델에서 모멘트 평형은 다음의 식으로 표현된다.

$$F_{PZT} \cdot d - k_b(z_t + d \tan \theta) \cdot d + k_b(z_b - d \tan \theta) \cdot d = K_t \theta \quad (4)$$

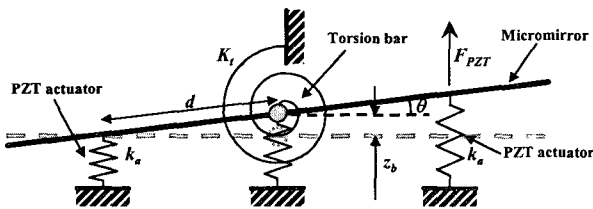


그림 2 1축 회전 압전 구동기 분리형 미소거울(TMD)의 해석적 모델

Fig. 2 Analytic model of the single-axis torsional micromirror switch with detached PZT actuator (TMD).

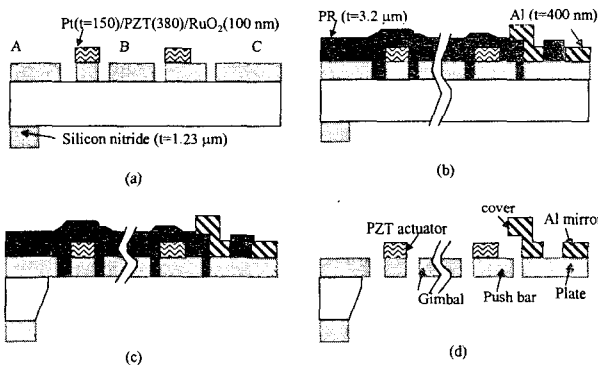


그림 3 그림 9의 A-B-C단면에서 본 제작공정도: (a) 전극, 압전 구동기, 실리콘 질화막의 증착 및 패터닝; (b) PR 패터닝 후 증착된 알루미늄 박막의 패터닝; (c) KOH 습식식각 및 XeF2 건식식각; (d) PR 제거.

Fig. 3 Fabrication process showing the cross section along A-B-C in Fig.9: (a) deposition and patterning of electrodes, PZT and silicon nitride layers; (b) PR lithography followed by the patterning of sputtered Al layer; (c) KOH and XeF2 etching of the back-side silicon; (d) PR ashing.

여기서,  $d$ 는 밀침보와 비틀림보 사이의 간격이며,  $K_t$ 는 비틀림보의 회전 스프링 상수이다. 또한  $\theta$ 와  $z_b$ 는 각각 미소거울의 회전각과 수직으로 움직이는 거리를 의미한다. 비틀림보의 회전 스프링 상수[7],  $K_t$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$K_t = \frac{Gw_t h_t}{L_t} \left\{ \frac{1}{3} - 0.21 \left( 1 - \frac{h_t^4}{12w_t^4} \right) \right\} \quad (5)$$

여기서  $L_t$ ,  $h_t$ ,  $w_t$ 는 각각 비틀림보의 길이, 높이, 너비이며,  $G$ 는 비틀림 탄성 계수이다.

미소거울의 회전각,  $\theta$ ,이 충분히 작아  $\tan \theta$ 과 같다고 가정하면, 미소거울의 회전각,  $\theta$ ,을 다음과 같이 산출할 수 있다. 미소거울의 회전각,  $\theta$ ,과  $\tan \theta$ 는 회전각이 9°이내일 때 3% 이하의 차이를 보이므로, 이 가정은 회전각이 9° 이내인 본 연구에서의 경우에 적용가능하다.

$$\theta = \frac{F_{PZT} d}{2k_s d^2 + K_t} \quad (6)$$

표 4는 16 V의 직류전압이 인가되었을 때, TMD 구조의 회전각의 예측치를 보여주고 있다. 제안된 TMD 구조는 6.8°의 회전각을 출력하는 것으로 계산되어, 1.2°의 회전각을 보이는 종래의 TMA 구조보다 우수함이 이론적으로 입증되었다. 또한, 2축-TMD 구조의 x축 및 y축 회전각도 각각 6.8°와 6.1°로 계산되었다.

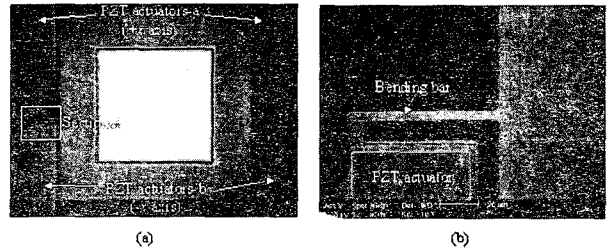


그림 4 제작된 1축 회전-TMA 사진: (a) 전체구조; (b) (a)의 A 구역 확대도.

Fig. 4 Photographs of the single-axis tilting micromirror attached to the PZT actuators (TMA): (a) overall structure; (b) an enlarged view of Section A in (a).

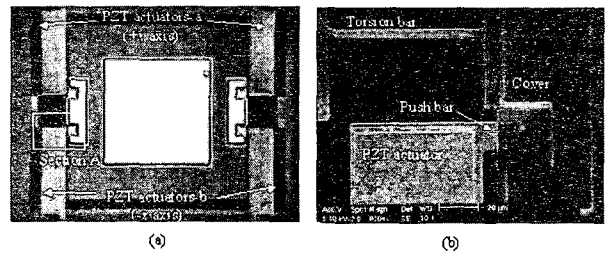


그림 5 제작된 1축 회전-TMD 사진: (a) 전체구조; (b) (a)의 A 구역 확대도.

Fig. 5 Photographs of the single-axis torsional micromirror with detached PZT actuators (TMD): (a) overall structure; (b) an enlarged view of Section A in (a).

3. 제작 공정

그림 3은 1축 회전-TMD 구조의 제작과정을 나타내고 있다. 먼저, 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 실리콘 웨이퍼 양면에 1.23  $\mu\text{m}$  두께의 LPCVD 저 응력 실리콘 질화막을 증착한다. 다시, 하부전극으로 쓰이는 150 nm 두께의 백금층을 증착하고, 압전물질인 PZT를 sol-gel법을 이용하여 380 nm 두께로 도포한 뒤, 압전층의 잔류응력을 650  $^{\circ}\text{C}$ , 1분 동안의 어닐링으로 감소시킨다. 압전층 위에, 상부전극으로 쓰이는 100 nm 두께의 RuO<sub>2</sub>를 sputtering 한 뒤, 다시 Cl<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 플라즈마로 압전층과 전극층을 식각하고, RIE를 이용하여 실리콘 질화막을 건식식각한다. 다음으로, 그림 3(b)에서 회생층으로 쓰일 3.2  $\mu\text{m}$  두께의 PR (AZ 4330)을 전사한 뒤 알루미늄 sputtering 공정시 고열에 견디도록 열처리를 한다. 미소거울 면과 덮개 부분으로 사용되는 400 nm 두께의 알루미늄을 sputtering 하고 습식식각을 행한다. Wafer 곡률 측정으로 행한 알루미늄의 잔류응력은 51 MPa (tensile)이었다. 그림 3(c)에서 실리콘을 KOH 로 이방성 습식식각을 수행하여 시간조절을 통하여 45  $\mu\text{m}$  정도의 두께만 남도록 한다. 다시, 웨이퍼를 개별 단위 소자로 자른 뒤 소자를 보호하기 위하여 XeF<sub>2</sub> 건식 식각을 수행하여 실리콘을 모두 제거한다. 마지막으로 회생층인 PR (AZ4330)을 O<sub>2</sub> 플라즈마로 제거한다 (그림 3(d)). 그림 4와 5는 각각 1축-TMA, TMD 구조의 현미경 사진과 SEM 사진이고, 그림 6은 2축-TMD 구조의 현미경 사진과 SEM 사진이다.

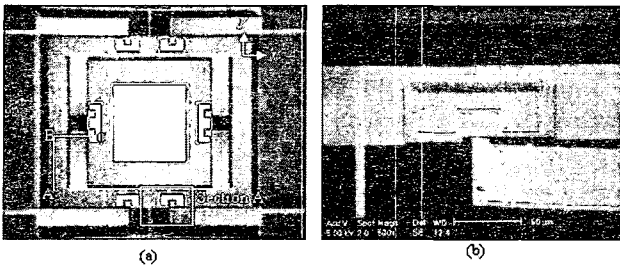


그림 6 제작된 2축 회전-TMD 사진: (a) 전체구조; (b) (a)의 A 구역 확대도.

Fig. 6 Photographs of the dual-axis torsional micromirror with detached PZT actuators (TMD): (a) overall structure; (b) an enlarged view of Section A in (a).

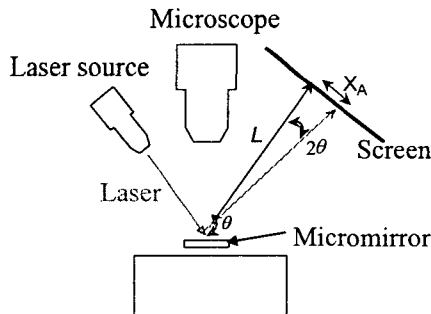


그림 7 미소거울의 회전특성을 측정하기 위한 실험 장치.  
Fig. 7 Experimental apparatus for micromirror rotation measurement.

4. 성능시험 결과

이번 장에서는 1축-TMA와 1축-TMD의 회전특성이 비교되며, 2축-TMD의 회전특성 또한 제시된다. 그림 7은 제작된 소자의 회전 특성을 측정하기 위한 방법과 장치를 보여준다. 제작된 미소거울 소자의 회전각은 레이저를 거울면에 반사시켜 벽면에 투영하는 방법을 사용하여 측정하였다. 이때, 투영된 레이저의 흔들림에 의해 측정오차가 발생하였으며, 그 값은  $\pm 0.07^{\circ}$ 이하였다.

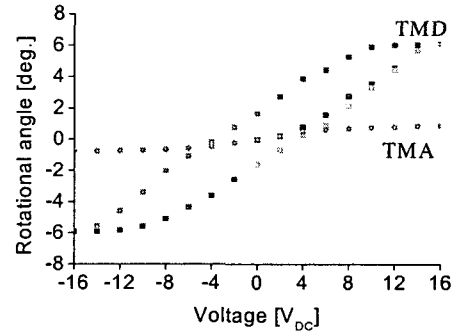
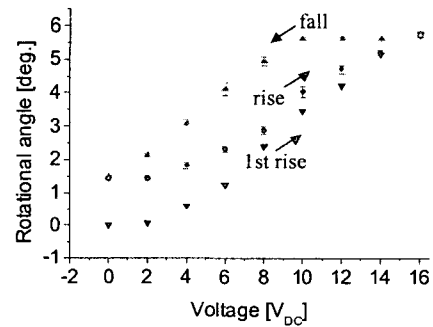
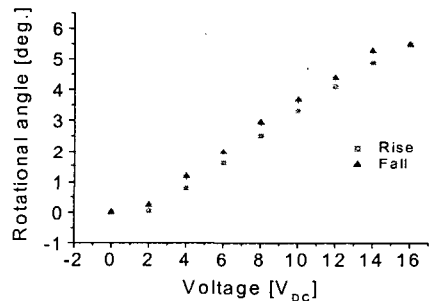


그림 8 DC 전압 변화에 따른 1축 회전-TMA(그림 4)와 TMD (그림 5)의 회전각.

Fig. 8 Rotational angle of single-axis TMA (Fig.4) and TMD (Fig.5) for varying DC voltage.



(a)



(b)

그림 9 DC전압 변화에 따른 1축 회전-TMD의 회전각: (a) 초기힘이 있는 경우; (b) 초기힘을 제거한 경우.

Fig. 9 Rotational angle of single-axis TMD (Fig.5) for varying DC voltage: (a) with initial contact forces; (b) without initial contact forces.

4.1. 1축 회전형 미소거울 구조

제작된 1축-TMA 및 1축-TMD 구조에서 전압을 바꿔가며 측정된 회전각이 그림 8에 도시되어 있다. 그림 8의 회전각은 그림 4와 5에서 보이는 +x방향 압전구동기와 -x방향 압전구동기를 각각 동작시킴으로써 얻어졌다. 제작된 1축 회전형 미소거울 구조의 이론적 회전각과 측정된 회전각을 표 4에 비교하였다. 또한, 표 4에는 동적 특성으로부터 측정된 공진주파수도 도시되어 있다. 즉, 측정된 1축-TMD 구조의 회전각이 16 V<sub>DC</sub> 전압 인가시 6.1°로 0.9°의 1축-TMA 구조의 회전각보다 6배 정도 크게 나옴을 확인하였다.

그러나, 그림 8에 도시된 1축 회전-TMD의 전압-회전 곡선은 영점이동(zero offset)과 이력현상을 보였다. 영점이동과 이력현상의 주된 원인으로서는 압전 구동기의 초기변형으로 인한 밀침보와 미소거울 사이의 마찰이 주된 원인으로 판명되었다. 잔류응력 구배로 인하여 끝단 구속조건이 없는 압전 외팔보 (길이: 230 μm)의 초기변형이 21 μm로 측정되었다. 이러한 초기변형으로 인하여 압전 구동기가 덮개와 접촉할 때 초기힘이 유발됨을 알 수 있다. 따라서, 압전 외팔보의 고정부를 탐침으로 눌러 변형시켜 초기변형을 0 μm로 할 경우 초기힘이 없는 경우의 구동특성을 측정할 수 있다. 그림 9에서는 1축 회전-TMD에 있어서 압전 구동기의 초기힘이 있는 경우와 없는 경우의 전압-회전 특성을 비교하였다. 압전 구동기의 초기힘이 제거된 경우 영점이동과 이력현상이 없는 거의 선형적인 응답 특성을 보여준다. 이력현상 감소비율을 아래의 식과 같이 정의하였을 때 압전 구동기의 초기힘이 없는 경우 이력현상 감소비율이 63.2 %로 나타났다.

$$r_h = \frac{\Delta W_{w/f} - \Delta W_{w/o/f}}{\Delta W_{w/f}} \times 100(\%) \quad (7)$$

여기서 ΔW<sub>w/f</sub>, ΔW<sub>w/o/f</sub>는 각각 초기힘이 있는 경우와 없는 경우의 에너지 손실이다. 이력현상 감소비율, r<sub>h</sub>,은 그림 9의 폐곡선 면적에서 계산된다. TMD의 선형적인 응답은 압전구동기 두께와 영계수의 조절[8]을 통하여 압전 구동기의 초기변형을 감소시킴으로써 구현이 가능하다.

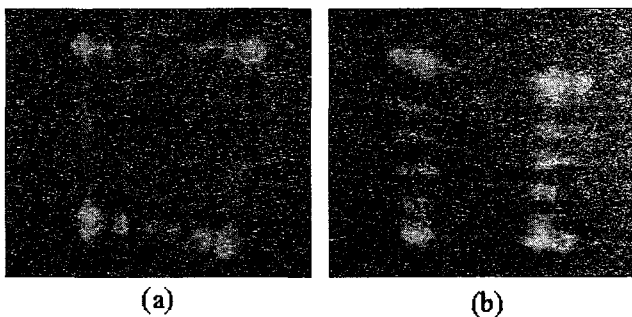


그림 10 16 V<sub>p-p</sub> 정현파 구동에서의 주파수에 따른 2축 회전-TMD(그림 6)의 주사도: (a) x축 400 Hz, y축 20 Hz; (b) x축 20 Hz, y축 400 Hz.

Fig. 10 Scanning patterns of the dual-axis TMD (Fig.6) for the 16 V<sub>p-p</sub> sinusoidal AC drive for the frequencies of: (a) 400 Hz in x-axis and 20 Hz in y-axis; (b) 20 Hz in x-axis and 400 Hz in y-axis.

표 4 1축 회전 및 2축 회전 미소거울의 회전각 및 공진 주파수

Table 4 Rotational angles and resonant frequencies of single-and dual-axis micromirrors

Prototype and rotation axis		Rotational angle (at 16V <sub>DC</sub> )		Resonant frequency (at dynamic test)
		Measured angle	Estimated angle	
Single-axis TMD	+x	0.9°±0.07°	1.2°±0.1°	1.8±0.1 kHz
	-x	0.8°±0.07°		
Single-axis TMD	+x	6.1°±0.07°	6.8°±0.5°	4.1±0.1 kHz
	-x	5.8°±0.07°		
Dual-axis TMD	+x	5.5°±0.07°	6.8°±0.5°	2.1±0.1 kHz
	-x	5.4°±0.07°		
	+y	4.7°±0.07°	6.1°±0.5°	
	-y	5.0°±0.07°		

4.2. 2축 회전형 미소거울 구조

2축-TMD의 회전각은 16V<sub>DC</sub> 전압 인가시 x축, y축으로 각각 5.5°, 4.9°로 측정되었다. 또한, 2축 회전-TMD의 공진 주파수는 x축 및 y축 방향의 회전모드(rotational mode)에서 각각 2.1±0.1 kHz, 1.7±0.1 kHz로 측정되었다. 그림 10에서는 2축 회전-TMD의 주사(scan) 형상을 도시하였다.

상온에서 2축 회전-TMD의 내구성을 시험한 결과, 2 kHz, 16 V<sub>p-p</sub>의 정현파를 y축 회전에 인가한 경우 3시간 동안 주사형상의 변화나 덮개 부분의 마모현상이 관찰되지 않았다(그림 11). 이는 2160만회 동안 정상 동작함을 의미하며 광스위치로 사용가능한 조건인 100만회 이상[9]을 만족하는 것이다.

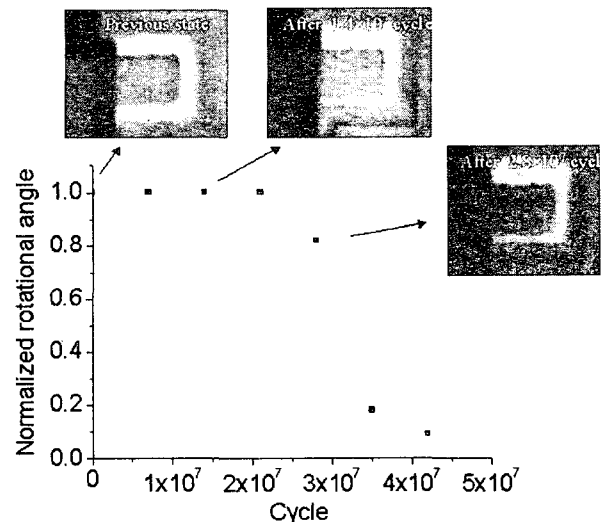


그림 11 2 kHz - 16 V<sub>p-p</sub> 정현파 인가시, 구동횟수에 따른 2축 회전-TMD(그림 6)의 y축 주사진폭 및 덮개 마모 상태의 변화.

Fig. 11 Scanning amplitude change and wear of the cover seen from backside in y-axis of the dual-axis TMD (Fig.6) for applying 2 kHz - 16 V<sub>p-p</sub> sinusoidal wave.

5. 결 론

본 연구에서는 저전압으로 대회전이 가능하고 선형적인 전압-회전 특성을 나타낼 수 있는 압전 구동기와 미소거울이 분리된 분리형 구조(TMD)를 제안하고, 그 원리를 실험적으로 검증하였다. 이를 위하여, 같은 치수의 압전 구동기가 부착된 기존의 구조(TMA)와 제안된 구조를 설계, 제작하여 비교하였다. 16 V<sub>DC</sub> 전압 인가시 실험적으로 측정된 1축 회전-TMD의 회전각(6.1°)이 기존의 1축 회전-TMA의 회전각(0.9°)보다 우수함을 확인하였다. 또한 1축 회전-TMD에서 잔류응력 구배에 의한 압전 구동기의 초기힘을 제거한 경우 이력현상(Hysterisis)이 63.2 % 감소되었고, 거의 선형적인 전압-회전 특성을 보였다. 2축 회전-TMD의 회전각은 16 V<sub>DC</sub> 전압 인가시 x축, y축으로 각각 5.5°, 4.9°로 측정되었다. 또한 2축 회전-TMD의 공진 주파수는 x축, y축으로 각각 2.1±0.1 kHz, 1.7±0.1 kHz이었으며 내구성 시험에서는 2160만 회 동안 정상동작함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 제안된 구조로 빠른 응답 속도, 저전압 구동, 선형적인 전압-회전 특성과 내구성을 가짐을 실험적으로 증명하였으며, 이러한 TMD는 대용량 광통신용 미소거울로서의 활용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동 기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] H. Laor, "MEM Mirrors Application in Optical Cross-Connects," IEEE LEOS '98, pp.II/21-II/22, 1998.  
 [2] H. Toshiyosh, et. al., "Linearization of Electrostatically Actuated Surface Micromachined 2-D Optical Scanner," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.10, No.2, pp. 205-214, June 2001.  
 [3] V. Aksyuk, "LambdaRouter," Proc. IEEE Optical MEMS (Invited Talk), 2001.  
 [4] Y.J. Yee, et. al., "Fabrication and Characterization of a PZT Actuated Micromirror with Two-axis Rotational Motion for Free Space Optics," Proc. IEEE MEMS Workshop 01, pp.317-320, 2001.  
 [5] M. Ikeda, et. al., "PZT Thins-Film Actuator Driven Micro Optical Scanning Sensor by 3D Integration of Optical and Mechanical Devices." Proc. IEEE MEMS Workshop 99, pp.435-440, 1999.  
 [6] D.L. DeVoe and A.P. Pisano, "Modeling and Optimal Design of Piezoelectric Cantilever Actuators," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.6, No.3, pp.266-270, Sep. 1997.  
 [7] W.C. Young, Roark's Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill, 6th edition, pp.348.  
 [8] M.-J. Kim and Y.-H. Cho, "Design, Fabrication and Characterization of Piezoelectric Multi-layer Cantilever Actuators for the Minimum Initial Deflection," Proc. 10th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '99), pp.1758-1761, 1999.  
 [9] Dicon Fiberoptics, 2001 Measurement Products Catalog, 2001

저 자 소 개



**김 성 진 (金 成 眞)**

1977년 11월 1일생. 2000년 서울대 기계항공공학부 졸업(학사). 2002년 KAIST 기계공학과 졸업(석사) 2002년~현재 한국전자통신연구원 재직

Tel : 042-860-1727

Fax : 042-860-6836

E-mail : yahokim@etri.re.kr



**조 영 호 (曹 永 昊)**

1957년 8월 10일생. 1982년 KAIST 기계공학과 졸업(석사). 1990년 UC Berkeley 기계공학과 졸업(박사). 1991년~현재 KAIST 기계공학과 및 바이오시스템학과 교수.

Tel : 042-869-8699

Fax : 042-869-8690

E-mail : mems@kaist.ac.kr



**진 영 현 (陳 令 鉉)**

1976년 9월 29일생. 1998년 KAIST 기계공학과 졸업(학사). 2000년 동 대학원 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 042-869-4354

Fax : 042-869-8690

E-mail : memsace@kaist.ac.kr



**남 효 진 (南 孝 鎭)**

1964년 1월 20일생. 1988년 KAIST 재료공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 재료공학과 졸업(박사). 1988년~현재 LG전자기술원 소재재료연구소 책임연구원

Tel : 02-526-4587

Fax : 02-3461-3508

E-mail : hyojnam@lg-elite.com



**이 원 철 (李 源 哲)**

1978년 5월 1일생. 2001년 KAIST 기계공학과 졸업(석사). 2006년 KAIST 바이오시스템학과 졸업(박사). 2006년~현재 KAIST 디지털나노공동연구단 박사후과정 연구원

Tel : 042-869-4354

Fax : 042-869-8690

E-mail : wclee@kaist.ac.kr



**부 종 옥 (夫 鍾 郁)**

1960년 2월 8일생. 1984년 고려대 금속공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 금속재료공학과 졸업(박사). 1984년~현재 LG전자기술원 소재재료연구소 연구위원

Tel : 02-526-4551

Fax : 02-3461-3508

E-mail : jbu@lg-elite.com