

스태이플 조인트를 이용한 전자력 구동 AI 미러의 제작

임 태선, 김 용권
서울대학교 전기 컴퓨터 공학부

Fabrication of electromagnetically actuated AI mirror with staple joint structure

Tae-Sun Lim, Yong-Kweon Kim
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - In this study, we fabricated AI mirror driven by electromagnetic force. Because the mirror has Ni staple joint, it reduces the deflection angle of torsion spring for the maximum deflection of mirror. Therefore the magnetic field for maximum deflection can be reduced. By additional electrostatic force, the deflection angle of mirror plate can be increased to 90°. The fabricated mirror is actuated by electromagnetic force of a simple solenoid. The maximum deflection angle by magnetic field is about 86° with 1.2×10^4 A/m

1. 서 론

마이크로 미러는 마이크로 머시닝 기술을 광학 시스템에 응용한 대표적인 예로서 지금까지 다양한 구조와 다양한 구동 방식의 마이크로 미러가 제작되었으며[1-4] 많은 마이크로 미러에서 구동중 복원력을 얻기 위하여 뒤틀림 스프링을 사용한다[3,6]. 미러의 구동각이 작을 경우 뒤틀림 스프링이 안정적인 동작을 하지만 구동각이 클 경우 스프링의 변형이 심하여 탄성영역을 벗어나기 쉽고 구동에 필요한 힘도 증가하게 된다. 본 연구에서는 스프링이 스타이플 조인트와 핀을 통하여 미러판에 연결되는 구조의 미러를 제작하여 구동력을 줄이고 스프링이 큰 변위에도 불구하고 탄성영역을 벗어나지 않게 하였다. 스타이플 조인트 구조물은 Ni도금을 사용하여 제작하였으며 전자력과 정전력을 이용하여 큰 변위각을 얻기 위한 실험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 미러의 구조 및 구동 원리

그림 2는 제작된 미러의 개략도를 보이고 있다. 알루미늄으로 제작된 미러면 위에 Ni 도금된 스타이플 구조물이 제작되며 스타이플 안쪽에 알루미늄 핀이 제작된다. 긴 뒤틀림 스프링이 핀과 스타이플을 통하여 미러에 연결되며 post에 의해 스프링과 미러가 지지되는 구조이다. 미러 하부에 전압을 인가하여 정전력을 얻기 위한 전극이 위치하고 있다.

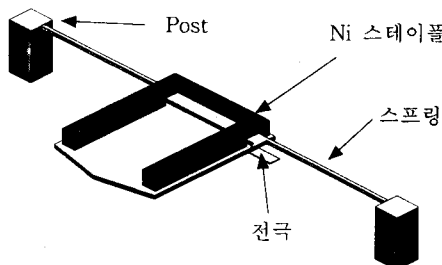
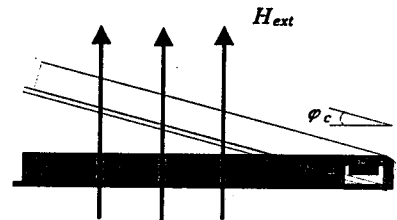
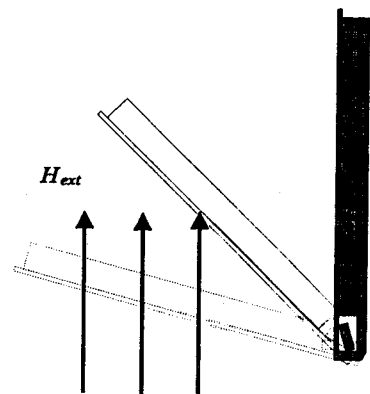


그림 1. 마이크로 미러의 개략도

그림 2에 미러의 동작 원리를 보이고 있다. 스타이플은 세로로 긴 모양으로 형성되어 있어서 전자력 구동을 위한 자성체의 역할을 한다. 스프링에 연결된 핀이 스타이플의 위 아래 벽면에 닿기 전에는 미러판이 자유롭게 회전할 수 있는 구조이므로 초기에는 약한 자계를 인가해도 미러가 회전을 하게 된다. 자계가 증가함에 따라 미러의 변위각은 증가하며 핀이 스타이플의 벽에 닿을 때까지 스프링의 뒤틀림 변위각은 0°이다. 핀이 스타이플 내벽에 접촉한 후 자계를 더욱 증가시키면 스프링도 미러와 함께 뒤틀리게 되며 복원력을 발생시키게 된다. 핀이 스타이플 내벽에 닿았을 때 미러면의 각을 ϕ_c 라고 하면 미러가 90° 변위각을 가질 때 실제 스프링의 변위각은 $90 - \phi_c$ °가 된다. 스프링이 미러판에 직접 연결될 경우 미러판의 변위각이 90°일 때 스프링의 변위각도 90°가 되므로 훨씬 더 큰 자계가 필요하며 스프링이 탄성영역을 벗어날 위험도 더 커지게 된다.



(a) 핀이 스타이플에 닿기 전



(b) 핀이 스타이플에 닿은 후

그림 2. 구동 원리

2.2 구동 토오크 해석

그림 3은 일정한 자계에 있는 미러의 움직임을 나타내고 있다. 외부에서 자계(H_{ext})를 가하면 연자성체의 자화 벡터 M 과의 상호작용으로 토크가 발생하며 그 크기는 아래 식과 같이 표현된다(6).

$$T_H = V_{mag} M H_{ext} \sin(\gamma - \theta - \phi) \quad (1)$$

V_{mag} : 자성체의 부피

연자성체의 경우 자화 벡터 M 이 T_H 에 의해 평형 상태의 방향(easy axis)로부터 θ 만큼 회전하게 되고 이로 인해 식 (2)와 같이 표현되는 토크가 발생한다(6).

$$T_a = -K_a \sin 2\theta \quad (2)$$

K_a : 자화 비대칭 상수

또한 자계에 의한 토크에 의하여 미러가 회전하게 되면 스프링이 뒤틀리게 되며 스프링에 기계적인 토크가 발생하게 된다.

$$T_{mech} = k_\phi \phi \quad (3-1)$$

제작된 미러의 경우 편이 스테이플에 닿기 전에는 스프링이 뒤틀리지 않으므로 기계적인 토크는 오직 미러의 무게, 즉 중력에 의한 토크만 존재한다.

$$T_{mech} = mgl \quad (3-2)$$

m : 미러의 무게

g : 중력 상수

l : 미러의 무게중심에서 회전축까지의 거리

편이 스테이플 벽면에 닿아서 미러와 함께 움직이게 되면 스프링의 실제 변위각은 $\phi - \phi_c$ 가 되므로 기계적인 토크는 아래 식과 같다

$$T_{mech} = k_\phi (\phi - \phi_c) \quad (3-3)$$

자계에 의한 토크와 스프링의 기계적인 토크가 평형을 이루는 점에서 미러의 구동 변위각이 결정되게 되므로 인가된 자계의 크기에 대한 변위각을 알 수 있게 된다.

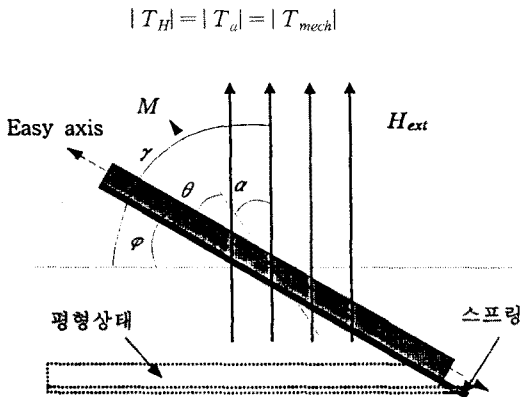


그림 3. 자계 인가시 자성체의 움직임

2.3 마이크로 미러의 제작

설계된 미러는 알루미늄을 구조물로 사용하고 후막 감광제를 회생층으로 사용하여 제작하였다. 그림 4는 마이크로 미러의 제작 공정을 보이고 있다. 먼저 실리콘 기판 위에 SiO_2 절연층을 증착한다. 다음 알루미늄으로 전극을 형성하고 회생층 후막 감광제를 도포한 후 열처리를 한다(a). 회생층으로 사용된 후막 감광제는 AZ4620이며 회생층의 두께는 약 $11 \mu m$ 이다. 열처리된 후막 감광제 위에 미러면 형성을 위한 알루미늄을 증착하고 패터닝한 후 두 번째 회생층을 증착하여 열처리를 한다(b). 다음 SiO_2 식각 마스크를 증착하여 post 제작을 위한 hole을 뚫고 식각 마스크를 제거한 후 스프링 형성을 위한 알루미늄을 증착한 후 패터닝한다(c). 이 위에 스테이플을 도금하기 위한 도금층을 형성한 후 스테이플과 자성체를 도금한다(d). 도금층은 두 층의 후막 감광제를 사용하며 아래층은 O_2 RIE으로, 위층은 사선 현상 공정으로 각각 패터닝한다. 마지막으로 도금층과 회생층을 제거하면 미러가 완성된다(e).

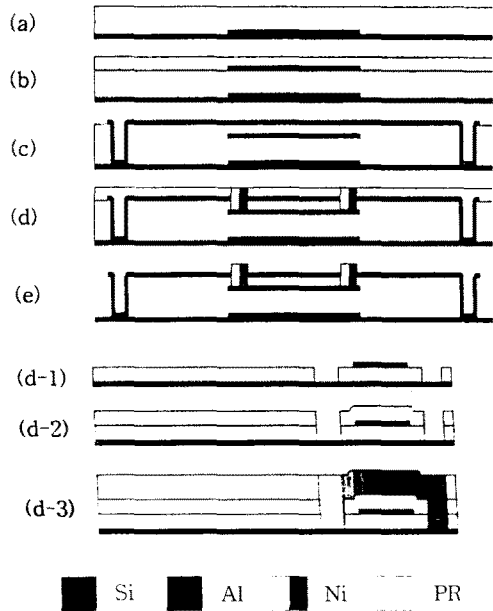


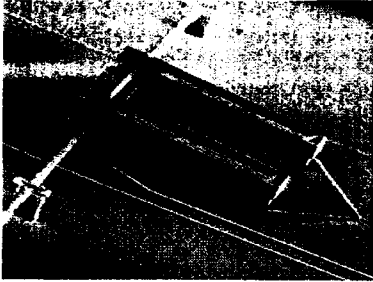
그림 4. 마이크로 미러의 제작 공정

2.3 제작 결과 및 구동 실험

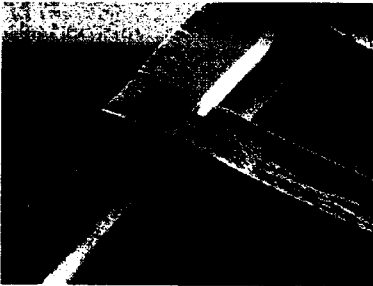
그림 5는 제작된 미러와 스테이플 구조물 및 스프링의 전자현미경 사진이다. 미러의 크기는 $200 \mu m \times 120 \mu m$ 이고 미러 반사면의 넓이는 $120 \mu m \times 110 \mu m$, 스프링의 길이는 약 $240 \mu m$ 두께는 $1 \mu m$ 이다. 도금에 의하여 스테이플이 성공적으로 제작되었음을 알 수 있다.

제작된 미러에 외부 코일에 의한 자장을 인가하여 자계 변화에 따른 구동 변위각을 측정하였다.

그림 6은 자계가 증가함에 따른 미러 변위각의 변화를 보이고 있다. 미러의 변위각이 약 44° 일 때 편이 스테이플의 벽면에 닿은 것을 알 수 있으며 이때의 자계는 약 $1,700 A/m$ 이다. 자계를 더 증가시키면 미러의 변위각도 증가하며 약 $12,000 A/m$ 에서 86° 의 변위각을 얻을 수 있었다. 이 상태에서 하부 전극에 $100V$ 이상의 전압을 인가하면 미러의 변위각을 약 90° 까지 증가시킬 수 있다. 그림 7은 스프링이 직접 미러면에 연결된 구조인 경우 같은 스케일의 미러에서 자계 대 미러 변위각의 관계와 제작된 미러의 경우를 비교한 것이다. 스프링이 직접 미러에 연결된 경우 80° 이상의 변위각을 얻기 위해서는 스테이플구조를 사용하는 경우보다 훨씬 더 큰 자계를 필요로 함을 알 수 있다.



(a) 완성된 미러



(b) 스프링과 스테이플 및 핀 구조물

그림 5 제작된 마이크로 미러의 전자현미경 사진

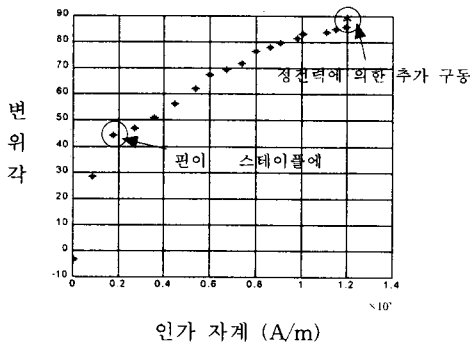


그림 6. 인가 자계에 따른 미러의 변위각

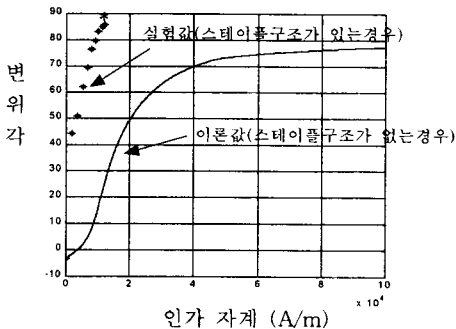


그림 7. 스프링이 직접 연결된 경우와의 비교

3. 결 론

본 연구에서는 전자력을 이용하여 구동되는 AI 미러를 설계하고 제작하였다. 제작된 미러는 구동 자계를 줄이고 스프링의 안정적인 동작을 위해서 Ni 도금된 스테이플 조인트 구조물을 사용하였다. 외부 자계를 인가하여 비교적 적은 자계로 큰 변위각을 얻을 수 있었으며 정전력을 추가로 사용하여 90°에 가까운 변위각을 얻을 수 있었다. 제작된 미러는 큰 변위각이 필요한 다양한 광학 스위치로서 응용될 수 있음을 확인할수 있었으며 추후 제작된 미러의 응용에 관한 연구가 필요하다.

4. 감사의 글

이 연구는 두뇌 한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jack M. Younse, "Mirrors on a chip", IEEE spectrum, pp. 27~31, November, 1993
- [2] Larry J. Hornbeck, "Deformable-mirror spatial light modulators", Spatial Light Modulators and Applications III, SPIE Critical Review, Vol.1150, pp. 86~102
- [3] J. Hornbeck, "Current status of digital micromirror device (DMD) for projection television applications", Technical Digest of IEEE International Electron Device Meeting, pp. 381~384, 1993
- [4] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, and R. W. Tkach, "Free-Space Micromachined Optical Switches for Optical Networking" JSTQE, pp. 4-9, Vol. 5, No. 1, January, 1999
- [5] Behrang Behin, Kam Y. Lau, and Richard S. Muller, "Magnetically Actuated Micromirrors for Fiber-Optic Switching", Tech. digest of Solid-State Sensor and Actuator, pp.273-276, June, 1998
- [6] Jack W. Judy, Richard S. Muller, "Magnetic microactuation of torsional polysilicon structures", Transducers' 95, vol. 1, pp. 332-335