

표면 코일과 영구자석간의 전자기력에 의해 구동되는 마이크로미러 설계

김병민*, 장중현*, 한승오**, 박정호*
 *고려대학교 전기공학과, **호서대학교 융합기술연구소

Design of Micromirror Actuated by Electromagnetic Force Between Surface Coil and Permanent Magnet

Byoungmin Kim*, Jong-hyeon Chang*, Seungoh Han**, and Jungho Pak*

*Department of Electrical Engineering, Korea University, **Institute of Fusion Technology, Hoseo University

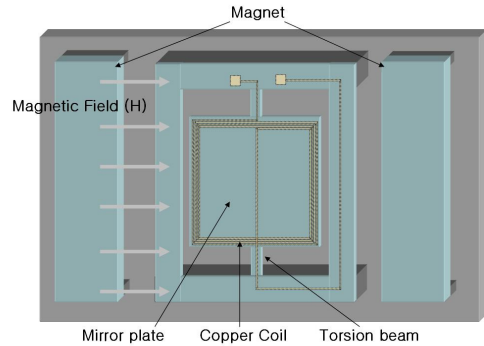
Abstract - 본 논문은 미러 표면에 형성된 코일과 미러 양쪽에 위치한 영구자석간의 전자기력에 의해 구동되는 마이크로미러의 설계 및 결과를 나타낸다. 4 mm x 4 mm 크기를 갖는 미러의 전자기 특성 및 구동을 유한요소해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 4 kHz의 공진주파수 특성을 갖도록 설계된 마이크로미러는 코일에 3.6 A/mm²의 current density 적용 시 x-, y-axis displacement가 각각 1.2 μm, 12 μm가 되는 것으로 나타났다.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\phi}}{I_m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{24KG}{\rho l_m t_m w_m^3}} \quad (4)$$

m 은 mirror plate의 mass이고, K_{ϕ} 는 beam의 torsional stiffness, ρ 는 미러의 density, l_m 은 미러의 길이, t_m 은 미러의 두께, w_m 은 미러의 폭이다.

1. 서 론

Microelectromechanical system (MEMS)를 이용한 미러는 의료용 스케너나 광학용 스위치로 쓰이고 있으며, 광고용이나 프리젠테이션용의 레이저 디스플레이 시스템에도 활용되고 있다. 특히 전자기력에 의해 구동되는 미러는 구동각이 크기 때문에 레이저 디스플레이 시스템에서 큰 각광을 받고 있으며, 저전압으로 큰 힘을 유도할 수 있는 장점이 있으나, 큰 소비전력이 요구된다[1]. 그래픽 애니메이션 등에 활용되는 레이저 디스플레이의 경우 고속 구동이 요구되므로 MEMS 기술을 이용한 미러의 설계에 있어서, 구동 미러의 공진주파수는 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 4 kHz의 공진주파수를 갖는 미러 설계를 위하여 미러 스프링의 길이, 폭, 두께 등의 변수를 고려하였으며, beam spot이 큰 레이저 디스플레이의 적용을 위한 미러의 크기와 외부 자석과 코일의 형태도 함께 고려하였다. 미러는 SOG(silicon on glass) wafer에 Cu 재료의 코일을 형성하는 것으로 설계를 하였고, 미러의 전자기력 특성과 전자기력에 의한 구동은 유한요소해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 시뮬레이션 하였다.



〈그림 1〉 마이크로미러 모식도

2. 본 론

2.1 기본 이론

코일이 형성된 미러 양쪽에 영구자석을 위치시킨 후 코일에 전류를 흘리면 코일은 Ampere's force law에 의해 magnetic field와 코일에 흐르는 전류의 방향과 수직인 방향으로 힘을 받는다[2]. 이때 작용하는 힘은 코일을 회전시킨다. 이는 전기 모터의 동작 원리와 유사하다.

2.1.1 기계적 해석

마이크로미러의 구조는 그림 1과 같다. 구동 각 θ 로 Torsion beam이 비틀리기 위한 기계적 토크는 식 (1)과 같다[3].

$$T_m = 2 \frac{\theta KG}{l_b} \quad (1)$$

$$K = \frac{(2a)^3(2b)}{3} \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \left(\frac{a}{b}\right) \times \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh\left(\frac{n\pi b}{2a}\right)\right) \quad (2)$$

여기서, K는 torsion beam의 a cross-section-dependent factor이고, G는 torsion beam 물질의 shear modulus($G = E/(2(1+\nu))$)이며 l_b 는 torsion beam의 length를 나타낸다. 또 여기서 E는 Young's modulus, ν 는 Poisson's ratio이다. 폭이 w_b , 두께가 t_b 인 사각형의 단면을 가지는 torsion beam은 Hook's law를 따르는 등방성 물질로 이루어져 있다고 가정하면 K는 식 (2)와 같다. 식(2)에서 $2a = \min(w_b, t_b)$, $2b = \max(w_b, t_b)$ 이다[4].

4 kHz의 공진주파수 특성을 가지는 미러를 설계하기위해 식(3), 식(4)를 이용하여 표 1과 같은 미러 설계 파라미터를 얻을 수 있었다. 식 (3)은 미러의 moment of inertia이고, 식 (4)는 공진주파수를 나타낸다.

$$I_m = \frac{1}{12} m w_m^2 \quad (3)$$

$w_b = 200 \mu m$, $t_b = 60 \mu m$, $l_b = 1 mm$, $E = 190 GPa$, $G = 74.8 GPa$ 의 파라미터를 가지는 torsion beam의 a cross-section-dependent factor의 이론적인 계산값은 $K = 1.17 \times 10^{-17} m^4$ 이고, torsional stiffness

$$K_{\phi} = 2 \frac{KG}{l_b} = 1.75 \times 10^{-3} N \cdot m / rad$$

〈표 1〉 마이크로미러 Mechanical 파라미터

Parameter	Value
Length of mirror l_m	4mm
Width of mirror w_m	4mm
Thickness of mirror t_m	60μm
Length of torsion beam l_b	1mm
Width of torsion beam w_b	200μm
Thickness of torsion beam t_b	60μm
Young's modulus E	190 GPa
Poisson's ratio ν	0.27

2.1.2 전자기 해석

그림 2 처럼 전류 I 가 흐르는 코일이 magnetic field B 내부에 위치할 경우 Ampere's force law에 의해 코일은 magnetic field B 와 전류 I 의 방향에 수직인 방향으로 Electromagnetic force F 를 받고 이 F 는 코일을 회전시킨다. 자기장 B 에 의해 코일의 ab 방향이 받는 힘은 $F_{ab} = -BILa_y$ 이고, 코일의 cd 방향이 받는 힘은 $F_{cd} = BILa_y$ 이다. 그리고 코일의 ab 방향의 moment arm은 $\frac{W}{2} a_x$ 이고, cd 방향의 moment

arm은 $-\frac{W}{2} a_x$ 이므로 코일의 ab 방향으로 들어가는 토크는

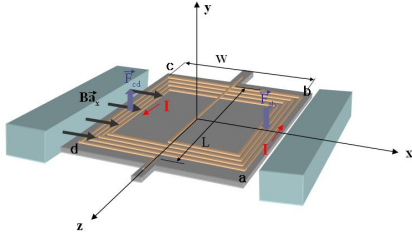
식 (5)와 같고, 코일의 cd 방향으로 들어가는 토크는 식 (6)과 같으며 따라서 코일에 작용하는 총 토크는 식 (7)과 같다.

$$\vec{T}_{ab} = \frac{W}{2} \vec{a}_x \times \vec{F}_{ab} = -\frac{1}{2} BILW \vec{a}_z \quad (5)$$

$$\vec{T}_{cd} = -\frac{W}{2} \vec{a}_x \times \vec{F}_{cd} = -\frac{1}{2} BILW \vec{a}_z \quad (6)$$

$$\vec{T} = \vec{T}_{ab} + \vec{T}_{cd} = -BILW \vec{a}_z \quad (7)$$

여기서 L은 코일이 형성하는 square의 length이고, W는 width이다.



<그림 2> 자기장에 의해 코일이 받는 토크

코일이 y축을 기준으로 θ 만큼 회전하였을 경우 받는 코일의 ab 방향의 토크는 식 (8)과 같고, 코일의 cd 방향의 토크는 식 (9)와 같으며 따라서 코일에 작용하는 총 토크는 식 (10)과 같다[2].

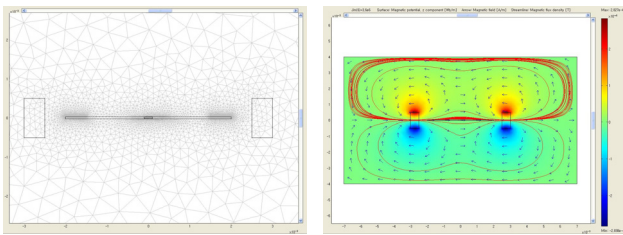
$$\vec{T}_{ab} = \frac{W}{2} [\vec{a}_x \sin\theta + \vec{a}_y \cos\theta] \times (-\vec{a}_y BIL) = -\frac{1}{2} BILW \sin\theta \vec{a}_z \quad (8)$$

$$\vec{T}_{cd} = \frac{W}{2} [-\vec{a}_x \sin\theta + \vec{a}_y \cos\theta] \times (\vec{a}_y BIL) = -\frac{1}{2} BILW \sin\theta \vec{a}_z \quad (9)$$

$$\vec{T} = \vec{T}_{ab} + \vec{T}_{cd} = -BILW \sin\theta \vec{a}_z \quad (10)$$

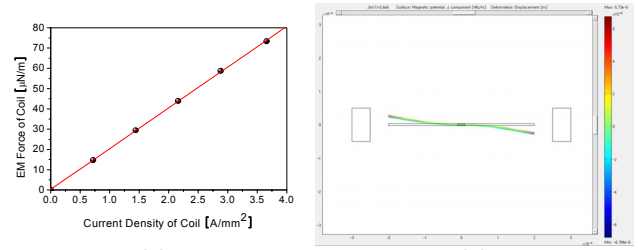
2.2 시뮬레이션 결과

코일의 감기 회수를 4번으로 설계하고 magnet의 세기는 0.4 T(Tesla)로 정하였으며, 코일의 전류밀도는 $0 A/mm^2$ 에서 $3.6 A/mm^2$ 로 setting 하였다. 코일이 형성하는 square의 width와 length는 미러의 width와 length와 같다고 가정하였다. 그림 3은 정자기 특성의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 3의 (a)는 Mesh 결과를 나타내고, (b)는 Solving 결과를 나타낸다.



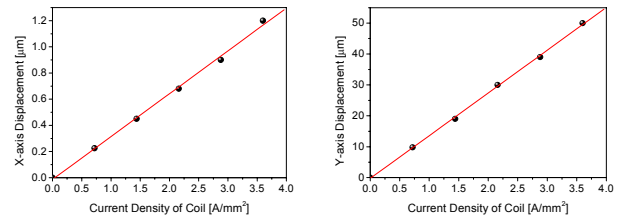
(a) Mesh 결과, (b) Solving 결과
<그림 3> 정자기 특성 시뮬레이션 결과;

Magnet에 의해 코일의 한쪽 면이 받는 electromagnetic force는 코일의 전류밀도를 $0 A/mm^2$ 에서 $3.6 A/mm^2$ 까지 $0.72 A/mm^2$ 씩 증가시킬 경우 그림 4(a)와 같다. 그림 4(b)는 그림 4(a)의 electromagnetic force에 의한 미러의 구동 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션 model의 size와 시뮬레이션 프로그램의 메모리 한계로 인해 2D 시뮬레이션으로 진행하였으며, 2D 시뮬레이션의 한계로 시뮬레이션 프로그램이 torsion beam이 미러를 관통하는 것으로 인식함에 따라 그림 4(b)와 같이 미러의 회전 형태가 부자연스럽게 나타났다.



(a) 코일의 current density와 electromagnetic force 관계, (b) Electromagnetic force에 의한 미러 구동 시뮬레이션 결과

그림 5는 코일의 current density가 $0 A/mm^2$ 에서 $3.6 A/mm^2$ 까지 증가할 경우의 x-axis displacement와 y-axis displacement를 나타낸다.



(a) x-axis, (b) y-axis displacement
<그림 5> 시뮬레이션 결과 II

코일의 current density가 $3.6 A/mm^2$ 일 경우 x-axis displacement와 y-axis displacement는 각각 $1.2 \mu m$, $50 \mu m$ 의 결과를 보였다. 이 결과는 Magnet의 세기를 0.4 T, 코일의 current density를 $3.6 A/mm^2$, 코일의 감기 회수를 4번으로 제한한 결과이다. 미러의 구동 특성은 Magnet의 세기와 코일의 current density, 코일의 감기 회수의 시뮬레이션 파라미터 조건 변경으로 개선할 수 있다. 향후 다양한 미러 material의 변경으로 material 탄성 특성에 따른 구동 비교 실험이 요구되며, 코일의 Joule heating에 의한 미러 표면의 휨 정도 분석이 추가 되어야 할 것이다.

3. 결론

본 연구에서는 spot size가 큰 레이저 디스플레이 시스템에 적용 가능한 4 kHz의 공진주파수를 갖는 4 mm x 4 mm의 마이크로미러를 설계하고 시뮬레이션을 진행하였다. 유한요소해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 사용하였으며 Model size 및 메모리 등의 제약 조건으로 2D로 시뮬레이션을 진행하였다. 본 연구에서 Magnet의 세기와 코일의 current density, 코일의 감기 회수에 따른 미러의 구동 특성을 시뮬레이션을 통해 결과를 예측할 수 있었으며 다양한 시뮬레이션 파라미터의 조건 변경으로 미러의 구동 특성을 개선할 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Chang Liu, Thomas Tsao, Gwo-Bin Lee, Jeremy T.S Leu, Yong W. Yi, Yu Chang Tai and Chih-Ming Ho, "Out-of plane Magnetic Actuators with Electroplated Permalloy for Fluid Dynamics control," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 78, pp. 190-197, 1999.
- [2] Guru, Hiziroglu, *Electromagnetic field theory fundamentals*, 1998.
- [3] R. J. Roark, W. C. Young, *Formulas for Stress and Strain*, 5th edition. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [4] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, *Theory of Elasticity*, 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 1970.