

마이크로 비틀림 구동기의 페루프 피드백 제어에 관한 연구

최원석\*, 김건년\*\*, 지태영\*, 박효덕\*\*, 허훈\*  
 \*고려대학교 제어계측공학과 시스템/제어 연구실  
 \*\* 전자부품연구원 나노메카트로닉스 연구센터

A Study on Close-loop Feedback Control  
 for Micro Torsional Actuator

Won Seok Choi\*, Kun Nyun Kim\*\*, Tae Young Jee\*, Hyo Derk Park\*\*, Hoon Heo\*  
 \*Dept. of Control & Instrument Eng. Korea Univ  
 \*\* Nanomechatronics Research Center, KETI

**Abstract** - 본 논문은 유리 기판과 실리콘 기판의 양극접합과 CMP공정을 통하여 정전기력으로 구동되는 마이크로 비틀림 액추에이터를 제작하고 이 제작된 액추에이터의 성능을 개선하는 방법과 실험에 관한 것이다. 이 비틀림 액추에이터는 미소 거울로 사용하기 위해 제작하였다. 미소 거울은 영상을 정확히 반사하거나 회절시키는 것이 목적이지만 MEMS 공정의 특성 문제로 인해 일관적인 성능을 나타내는 것이 비교적 힘들다. 따라서 이를 개선하기 위해선 구조적인 접근 보다 실제 구동될 때의 현상을 보상하는 것이 필요하다. 일정한 입력전압에 비례하는 미소 거울의 변위를 알고 이를 기준으로 하여 시스템을 구동하여야 한다. 여기서 인가되는 전압에 비례하는 변위가 정확하지 측정을 해야 하고 만약 오차가 있다면 이를 개선하여야 한다. 또한 구동 시 발생하는 overshoot 현상과 작은 떨림 현상을 줄이고 빠른 시간 내에 응답하도록 시스템을 보상하여야 한다. 본 논문에선 PID 제어기법을 사용하여 0.5°의 각도로 구동할 때를 기준으로 이 때의 구동전압 200V를 인가하고 오차를 측정하여 시스템을 보상하였다.

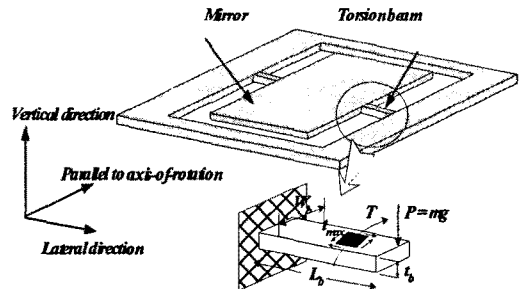
**Key word** : Micromirror (미소거울), Electrostatic Force(정전기력), Pull-In Voltage(풀인 전압), PID Controller (PID 제어기)

1. 서 론

미소거울은 MOEMS 시스템을 구성하는 중요한 부품 중의 하나이다. 이 부품은 디지털 마이크로 거울(DMD), 마이크로 스캐너[1], 광학 스위치[2]와 광학 크로스 커넥터[3] 등과 같은 광학 응용에 주로 사용된다. 이러한 미소 거울의 대부분은 큰 회전각도와 기계적으로 강한 구조를 가지고 있어야 한다. 그러나 기존 논문에선 구동기의 성능 개선을 위해 구조적인 문제 해결과 제작 공정의 새로운 방법으로 접근하였다 즉, 구동전압이 높을 뿐 아니라 적은 힘으로 원하는 회전 각도를 얻기 위해선 두께가 얇은 비틀림 보를 사용해야 하고 이로 인해서 기계적으로 약한 구조를 가지게 된다. 그러나 본 연구에서는 공정의 개선 및 실제적인 구동성능의 개선에 중점을 두었다. 일정 전압에 비례하는 정확한 회전각을 발생시켜, 미소 거울이 소정의 자세를 갖도록 하였다. 하지만 이 때 약간의 오차가 발생하는데 마이크로 영역에선 이 오차가 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 이를 측정 및 보상해야 한다. PID 제어회로를 구성하고 이를 적용하여 이 때 발생하는 오차를 측정하여 실시한

으로 개선하고자 한다. 모델 제작 공정에서 발생되는 제약과 이를 고려하여 만들어진 모델에서 그 면적에 따라 발생하는 풀인 전압을 먼저 구하고 이 전압 내에서 액추에이터를 작동시켜야 한다. 풀인 전압은 수치적 기법과 유한 해석 도구인 ANSYS를 이용하여 얻었다. 그리고 외관과 같은 불규칙 외력에 대해서도 시스템이 안정성을 가지도록 설계하도록 하였다.

2. 설계 해석 및 구동원리

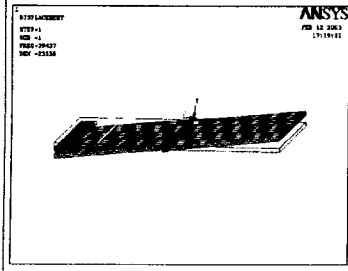


[ Fig. 1 ] Schematic diagram of suspension beam of Micromirror

2.1 구조해석

(Fig. 1)와같이 미소 거울을 두 개의 외팔보로 가진 평판형태로 제작하였다. 이 외팔보의 끝단은 고정 되어있고 구조적인 안정성을 확인하기 위하여 이 보에 생기는 비틀림과 회전각을 분석하였다.[4] 끝단이 고정된 외팔보의 최대 비틀림 응력  $\tau_{max}$ 과 비틀림 각도  $\phi$ 는  $\tau_{max} = 5.1389e+3 \ll G, \phi = 3.1093e-8 \approx 0$ 를 얻었다. 또한 이 보에 생기는 하중에 대한 자연 처짐량도 고려해야 하여야한다. 이 때의 처짐량을  $d$ 라 할 때, 최대 변형량  $d_{max} = 3.21nm$  이다. 따라서  $d_{max}$ 는 무시할만하다 하겠다 [4].

또 이 시스템은 ANSYS 프로그램을 이용하여 해석한 결과 첫 번째 고유진동수  $\omega_1$ 는 39.472kHz인데 이는 작동기의 운용주파수 (2 Hz)보다 매우 높은 점과  $d_{max}$ 의 미미함을 고려할 때 본 액추에이터는 강제로 취급할 수 있다.

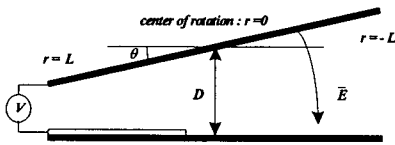


[ Fig. 2 ] First mode shape & natural freq.  $\omega_1$

## 2.2 동작 원리

### 2.2.1 Electrostatic analysis

[Fig. 3]은 정전기력을 이용한 마이크로 액추에이터의 구동원리를 보여주고 있다.



[ Fig. 3 ] Schematic side view of the torsional actuator

마이크로 액추에이터의 미소 거울은 회전 가능한 유연성이 없는 강체로 간주되는바 회전각  $\theta$ 에 대한 1자유도 계 시스템으로 생각하고 구동 전극에 대한 미분 힘은 평형 평판 커패시터의 미분 값과 같은바 다음과 같이 표현한다.

$$dF = \frac{1}{2} \epsilon V^2 \frac{W_P dr}{(D - r \sin \theta)^2} \quad [2-4]$$

미소 거울의 실제 전극에 해당하는 토크  $T$  식을 구하면 아래와 같고

$$T = \int_0^L r dF = \frac{1}{2} \epsilon V^2 \int_0^L \frac{r}{(D - r \sin \theta)^2} dr \quad [2-5]$$

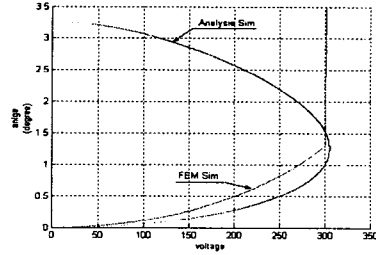
이를 적분하여 입력 전압  $V$ 에 관한 식을 구하면 다음과 같다

$$T = \frac{1}{2} \epsilon \frac{V^2 L^2}{D^2} W_P \frac{1}{\gamma^2} \left( \frac{\gamma}{1-\gamma} + \log(1-\gamma) \right) \quad [2-6]$$

여기서  $\gamma$ 와  $\theta_0$ 는 표준화된 각이다. :

### 2.2.2 풀인 전압해석

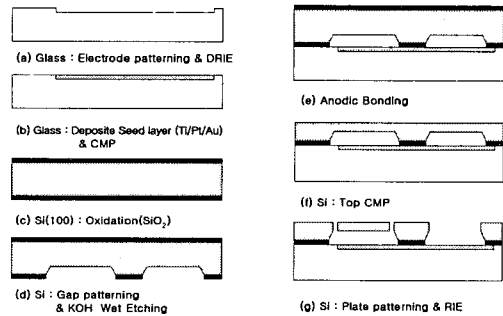
Hornbeck method를 이용하여 수치적 해석하였고 이를 요소 해석(Finite-elements model) 프로그램 ANSYS 6.1을 사용하여 구한 값과 비교하였다. 그 결과는 [Fig. 4]에서 볼 수 있듯 풀인 전압은 300V이다. 또 수치적 해석과 FEM 해석 사이에 약간의 오차가 생기는 것을 볼 수 있다. 앞으로 실험에선 이 보다 작은 200V전압을 사용하여 실행하였다.



[ Fig. 4 ] Analytical solution vs. FEM simulation comparison

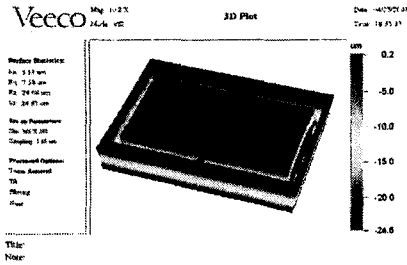
## 3. 마이크로 액추에이터 제작

[Fig. 5]는 마이크로 구동용 액추에이터와 미소 거울 제작공정 순서를 보여주고 있다.

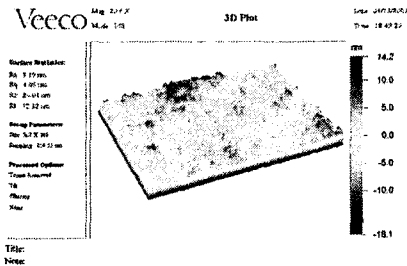


[ Fig. 5 ] Process flow of the proposal structure

- (a) 500  $\mu\text{m}$  두께의 Glass 기판 위에 Au전극을 만들기 위해 전극 패터닝을 한 후 10  $\mu\text{m}$  만큼 DRIE(Dep Reactive Ion Etching)로 식각하였다.
- (b) 전기도금의 Seed layer로 Ti/Pt/Au를 증착하고 전기도금공정으로 10  $\mu\text{m}$ 만큼 Au도금하여 전극을 만들어 주었다. 이 때 나중에 유리기판과 실리콘 기판의 접합을 위해선 표면의 거칠기가 일정하여 한다. 이를 위해 CMP 공정을 수행하였다.
- (c) 실리콘 위에 5000Å만큼 산화막을 증착시킨다.
- (d) 미소 거울이 움직일 수 있는 공간을 만들어 주기 위해 산화된 실리콘 기판 뒷면에 틈 패터닝을 수행한 후 산화 막을 식각한다. 그리고 KOH를 이용하여 8  $\mu\text{m}$ 만큼 습식식각을 수행하여 공간을 만들어준다.
- (e) 공정 (b)의 Glass기판과 (d)의 실리콘 기판을 양극 접합하여 하나의 디바이스로 만든다.
- (f) 거울의 두께를 8  $\mu\text{m}$ 만큼 만들기 위해 CMP공정을 통해 Si 상층부를 472  $\mu\text{m}$ 만큼 식각한다.
- (g) CMP로 식각된 Si 상층부에 패터닝을 수행한 후 RIE 공정으로 거울 평판과 비를림 보를 만들고 전압을 인가할 수 있는 공간을 만들어 주었다.



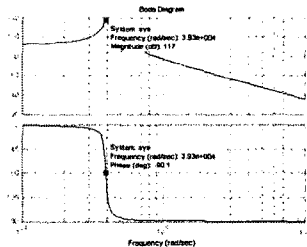
[ Fig. 6 ] 3D plot of Micromirror



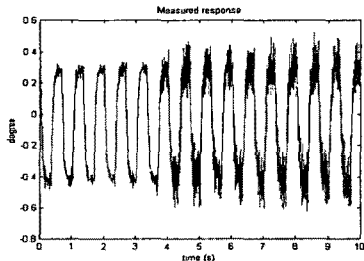
[ Fig. 7 ] 3D plot of Micromirror surface profile

[Fig. 6]은 제작된 모델을 3차원 표면 측정기로 얻은 데이터 값을 plot한 그림이고 [Fig. 7]의 미소 거울의 표면 거칠기를 측정한 그림이다. 표면 거칠기를 나타내는  $R_A$ 가 값이  $3.19\text{ nm}$ 인데 이는 표면이 매우 고르다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 실험



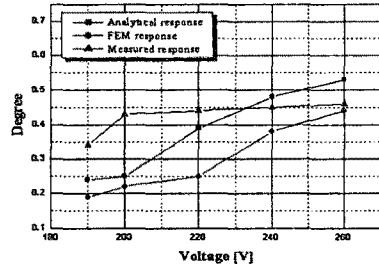
[ Fig. 8 ] Bode plot of torsional actuator



[ Fig. 9 ] The response of designed model

[Fig. 8]는 실제 제작된 모델을 가지고 응답을 고유진동수를 얻은 결과  $39.4\text{ kHz}$ 로 FEM 해석을 통해 얻은 값과 근사한 값을 얻었다. [Fig. 9]은 제작된 거울 모델에 펄스 형태의 전압을 인가하여 얻은 실제 응답이다.

이를 통해서 제작된 거울이 입력되는 전압에 따라 평형 상태를 기준으로 하여 아래위로 잘 스위칭 함을 알 수 있다. 처음 4초까지는  $190\text{V}$ 의 전압을 인가하였고 그 이후로는  $200\text{V}$ 의 전압을 인가하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 전압이 증가함에 따라 거울이 움직인 변위 ( $^\circ$ )는 약  $0.34^\circ$  에서  $0.43^\circ$  까지 증가한 것을 볼 수 있다.



[ Fig. 10 ] The comparison of responses

[Fig. 10]은 인가하는 전압에 따른 마이크로 거울의 변위를 살펴본 그림이다.  $190\text{V} \sim 260\text{V}$  까지 전압을 증가 하면서 FEM 해석과 수치적 해석 그리고 실제 실험에 의해 얻은 응답을 비교한 것이다. 수치적 해석의 변화 폭이 가장 크다. 또한 가장 큰 각도도 얻지만 오차가 크다. 이는 모델링 시 실제 모델을 근사했기 때문에 이런 값이 발생한다. 실제 실험에는 전압의 증가에 따른 각도 증가 값이 미비하다. FEM 해석 결과도  $240\text{V}$  이후에 비슷한 값을 가지지만 그 전의 전압에선 역시 차이가 많이 생기는 것을 볼 수 있다.

#### 5. 결 론

실리콘 기판과 유리 기판을 양극 접합하여 정전기력으로 구동하는 마이크로 액추에이터와 미소 거울을 제작하였다. 구조해석을 통해서 제작된 액추에이터가 안정적인 것을 확인하였고 이를 구동하기 위해 수치적 해석과 유한 요소 해석을 통해서 구동 전압을 구하였다. 이를 가지고 액추에이터를 구동하면서 이에 해당하는 변위를 측정하고 저장하였다. 이 때 오차를 측정하면서 개선하기 위해 PID 제어기를 이용한 성능개선을 하고 있는 중이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] D. L. Dickensheets and R. G. Kino, "Silicon-micromachined scanning confocal optical microscope," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 7, pp. 38-47, Mar. 1998.
- [2] P. M. Zavracky, S. Majumber, and E. McGruer, "Micromechanical switches fabricated using nickel surface micromachining," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 6, pp. 379, Mar. 1997.
- [3] H. Toshiyoshi and H. Fujita, "Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 5, pp. 231-237, Dec. 1996.
- [4] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston Jr. *Vector Mechanics for Engineers static* : McGraw-Hill 2th.
- [5] L. J. Hornbeck, "Deformable-mirror spatial light modulators," in *SPIE critical Review Series-Spatial Light Modulators and Applications III*, 1989, vol. 1150, pp 86-102