

S자형 들보에 의해 지지되는 micromirror의 제작 및 동작특성 분석

論 文
48C-11-6

A Study on the Fabrication and Characterization of Micromirrors Supported by S-shape Girders

金鍾國* · 金鎬成** · 愼炯宰***
(Jong-Kook Kim · Hoseong Kim · Hyung-Jae Shin)

Abstract - Micromirrors supported by S-shape girders were fabricated and their angular deflections were measured using a laser-based system. A micromirror consists of a $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ aluminum plate, posts and an S-shape girder. Two electrodes were deposited on two corners of the substrate beneath the mirror plate. 50×50 micromirror array were fabricated using the Al-MEMS process. The electrostatic force caused by the voltage difference between the mirror plate and one of the electrodes causes the mirror plate to tilt until the girder touches the substrate. Bias voltage of the mirror plate is between 25~35V and signal pulse voltage on both electrodes is $\pm 5\text{V}$. A laser-based system capable of real-time two-dimensional angular deflection measurement of the micromirror was developed. The operation of the system is based on measuring the displacement of a HeNe laser beam reflecting off the micromirror. The resonant frequency of the micromirror is 50kHz when the girder touches the substrate and it is 25kHz when the micromirror goes back to flat position, since the moving mass is about twice of the former case. The measurement results also revealed that the micromirror slants to the other direction even after the girder touches the substrate.

Key Words : micromirror, electrostatic force, S-shape girder, two-dimensional angular deflection measurement, resonant frequency

1. 서 론

Deformable 마이크로미러[1]가 개발된 이후로 양괄의 가늘고 얇은 힌지(hinge)에 의해 지지되는 마이크로미러[2], 우산과 같이 중심부분의 얇은 판 스프링에 의해 지지되는 마이크로미러[3], 길고 얇은 힌지의 중앙에 위치한 기둥에 의해 지지되는 마이크로미러[4], 3개의 플렉서(flexure)에 의해 지지되는 육모꼴의 피스톤형 마이크로미러[5] 등 지금까지 다양한 구조의 마이크로미러가 고안되어 왔다. 이러한 구조의 마이크로미러들을 설계하는데 있어 중요하게 고려되어야 할 사항들은 기계적 강도가 높아야 하고, 제어 전압이 낮아야 함과 동시에 제작공정이 간결해야 한다는 것이다. 본 논문은 그림 1의 구조와 같이 S자형 들보에 의해 지지되는 마이크로미러의 동작원리와 제작공정, 그리고 그들의 동작성능을 측정할 수 있는 측정장치의 개발과 측정결과에 대해 기술한 것이다.

이와 같은 구조를 가지는 마이크로미러의 가장 중요한 장점은 기계적 강도와 광학적 개구율(fill factor)을 증가시킬 수 있다는 것이다. 또한, 이러한 구조의 마이크로미러는

DMD[®](Digital Micromirror Device)[2]와 같은 대형화면 투사장치뿐만 아니라 광섬유 스위치, spatial light modulator, micro-scanner 등의 분야에도 응용이 가능하다. 이와 같이 S자형 들보에 의해 지지되는 구조의 마이크로미러는 향후 수많은 분야에 응용이 가능할 것으로 예견되고, 기존의 실리콘 공정기술과 장비를 그대로 이용하기 때문에 적은 단가를 들여 초소형 크기로 대량생산이 가능하다는 데 그 관심이 집중되고 있다.

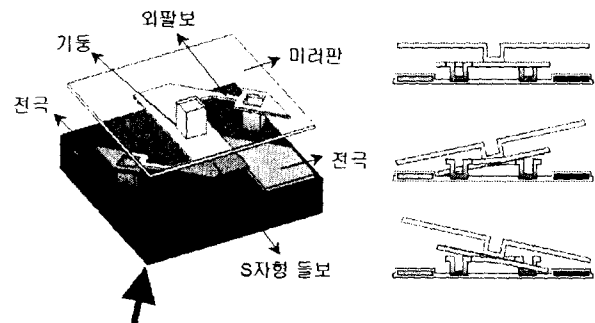


그림 1 마이크로미러의 구조와 동작시의 모습
Fig. 1 Graphical illustration of micromirror

이러한 마이크로미러들은 미러판에 맞고 반사되는 반사광의 변화에 의한 각도변위를 이용하게 되므로 이러한 장치들의 각도변위의 범위, 경사각도, 공진 주파수, 반응시간, 반사율 등을 측정하여 그 데이터를 설계나 개발 및 양산단계에

* 準 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 碩士卒業
** 正 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
*** 正 會 員 : 三星電子 壽石研究員 · 工博
接受日字 : 1999年 7月 30日
最終完了 : 1999年 10月 11日

다시 피드백 시키는 작업은 이들의 동작 신뢰성 향상에 있어 필수적인 과정이라 할 수 있다. 더욱이, 이들 장치들은 웨이퍼 위에 제작되므로 장치의 성능측정은 짧은 시간 동안에 이루어져야 하고, 테스트 공정이 장치에 물리적인 영향을 미쳐서는 안 되며, 반도체 상태의 거의 모든 소자들의 개발 비용 중 많은 부분이 공학적 데이터를 얻기 위한 측정 테스트 및 평가에 소요되는 비용이기 때문에 그 테스트 주기는 반드시 짧아야만 한다.

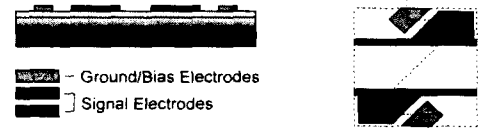
현재까지 이러한 미세구조물의 측정방법에 대해 발표된 논문은 거의 없으며, 그 내용 또한 자세하게 소개되어 있지 않다[1]. 또한, 기존에 제시된 방법[6]으로는 동작하는 마이크로미러에 대해 1차원적으로만 측정이 가능하기 때문에 아주 정확하고 미세한 광축정렬이 선결되어야만 하는데 이는 거의 불가능한 일이고, 더구나 마이크로미러가 2차원적으로 동작하는 경우에는 정확한 측정이 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 모든 요소를 만족함과 동시에 마이크로미러의 각도변위를 실시간으로 2차원적으로 측정할 수 있는 광학 측정장치를 개발하고자 하였다.

2. 동작원리 및 제작

마이크로미러는 그림 1과 같이 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 반사 미러, 기둥, S자형 들보, 2개의 전극으로 구성되어 있다. 알루미늄 미러판은 S자형 알루미늄 들보의 중심부에 위치한 기둥에 의해 지지되며, 그림에 나타나 있듯이 S자형 들보의 중심부분의 폭($10\mu\text{m}$)이 들보의 양끝 부분의 폭($2\mu\text{m}$)보다 더 넓기 때문에 들보의 양끝 부분은 외팔보(길이 $7\mu\text{m}$)와 같이 작동하여 위 아래로 구부러질 수 있다. 회전형 힌지(torsional hinge)는 동작할 때 비틀어지면서 힌지 양쪽 변의 길이가 달라지게 되므로 그만큼 기계적으로 스트레스를 더 받게 되는 반면 이 외팔보 구조는 구조물의 상태를 그대로 유지하면서 단지 구부러만 지므로 회전형 힌지에 비해 기계적으로 더 강하다. 또한, 회전형 힌지는 힌지의 두께에 따라 그 동작특성이 판이한 차이를 보이게 되지만 이 외팔보 구조는 이러한 요인에 큰 영향을 받지 않으므로 회전형 힌지에 비해 더 큰 제작여유를 갖게 되어 더욱 용이한 제작이 가능하다. 실리콘 기판 위에 위치한 두 개의 알루미늄 기둥은 S자형 들보의 양끝을 지지하고 있는데 이 S자형 들보와 미러판 사이의 간격은 $3.3\mu\text{m}$ 이고, S자형 들보가 기판에 닿았을 때 경사각도가 10° 가 되도록 결정하는 요소가 되는 S자형 들보와 기판 사이의 간격도 $3.3\mu\text{m}$ 이다. 2개의 전극은 미러판 밑 부분 기판의 양 모서리에 증착되는데 초기상태에서 미러판은 일정한 간격으로 전극 표면과 평행을 유지하게 되므로 각 전극과 미러판은 커패시터를 구성하게 된다. 이 때, 한쪽 전극에 입력신호가 인가되면 미러판과 전극 사이의 전위차에 의해 정전력이 발생하고, 이 정전력에 의해 미러판은 S자형 들보가 기판에 닿을 때까지 기울어진다. 미러판의 바이어스 전압은 $25 \sim 35\text{V}$ 이고, 전극에 인가되는 입력 펄스 전압은 $\pm 5\text{V}$ 이다.

그림 2에 이 마이크로미러의 전체 공정절차를 나타내었다. 이 마이크로미러의 제작은 어드레스 전극의 전기적 절연을 위해 두께 $1\mu\text{m}$ 의 (100) n형 실리콘 웨이퍼를 열산화시킴으로써 시작한다. 그 다음 $0.2\mu\text{m}$ 의 얇은 알루미늄 층을 스

퍼터 증착하고, 어드레스 전극을 패터닝한다(a). 대략 $0.2\mu\text{m}$ 의 얇은 실리콘 산화 절연층을 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)으로 어드레스 전극 위에 증착한다(b). 그리고, RIE(Reactive Ion Etching)로 패터닝한다(c). 다음으로 1차 회생층(AZ4533, positive photoresist)을 $3.3\mu\text{m}$ 로 회전 도포하고, 지지 기둥의 제작을 위해 패터닝한다(d). 들보와 스프링의 제작을 위한 금속층($0.3\mu\text{m}$, 알루미늄)을 스퍼터 증착하고, 패터닝한다(e). 들보와 기판이 서로 접촉되었을 때 전기적 단락회로가 되는 것을 방지하기 위하여 들보와 스프링의 패터닝을 위해 사용하는 PR층($1.2\mu\text{m}$)은 패터닝한 후에도 제거하지 않는다. 다음으로 2차 회생층($3.3\mu\text{m}$, AZ4533)을 회전 도포하고, 미러판을 지지하는 기둥의 제작을 위해 패터닝한다(f). 다음으로 금속($0.8\mu\text{m}$, 알루미늄)을 스퍼터 증착하고, 미러판의 제작을 위해 패터닝한다(g). 마지막으로, 두 개의 PR 회생층을 반응가스(reactive gas)로 산소(85%)와 Freon14(CF₄, 15%)를 사용한 plasma ashing으로 제거한다(h).



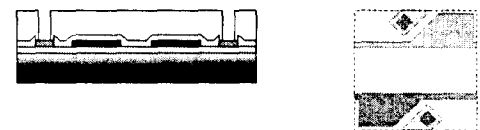
(a) Deposition and patterning of Al for electrode layer



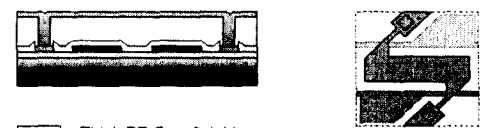
(b) Deposition of silicon oxide for insulation layer



(c) Patterning of oxide and PR removal



(d) PR Coating and patterning for lower sacrificial layer



(e) Deposition of aluminum for spring structure and patterning

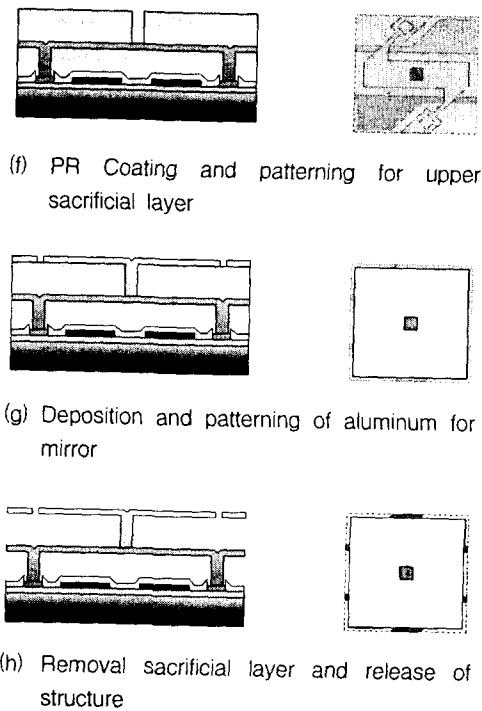


그림 2 제작공정
Fig. 2 Fabrication Process

제작공정이 끝난 후, 전극들을 와이어 본딩하였고, 50개×50개의 마이크로미러 어레이는 밀봉상태로 패키징되어 봉인된다. 그림 3(a)는 마이크로미러 어레이의 모습과 그 중 하나의 미러판이 제거되어 S자형 들보가 드러난 모습을 나타내는 SEM 사진이다. 그림 3(b)는 일부 전극에 신호가 인가되어 해당 마이크로미러들이 대각선 방향으로 기울어진 모습을 나타내는 SEM 사진이다.

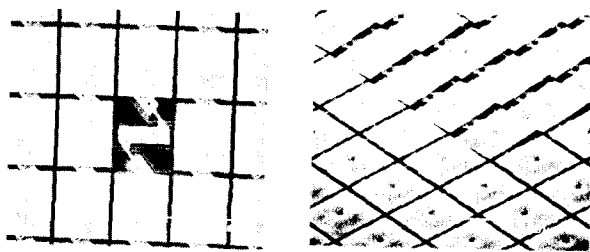


그림 3 마이크로미러의 SEM 사진

Fig. 3 SEM Pictures of micromirror

3. 측정장치

마이크로미러 어레이의 개발 단계에 있어서, 마이크로미러가 반응할 때 S자형 들보의 치수에 의한 효과를 이해하기 위해서 단일 마이크로미러의 동작특성을 얻어내는 작업은 상당히 중요한 과정이라 할 수 있다. 만약 1차원적으로만 측정을 한다면 검출기의 장착방향과 반사되는 레이저 빔의 궤적이 정확하게 일치 되도록 광축정렬을 해야만 정확한 측정이 가능한데 이것은 거의 불가능한 일이고, 마이크로미러

가 2차원적으로 기울어질 때에는 반드시 2차원적 측정이 가능하여야만 정확한 측정을 할 수 있다. 더욱이, 측정을 위해서 마이크로미러 어레이의 모든 전극들을 외부회로와 연결하게 되는데, 이러한 경우에는 매번 샘플을 장착할 때마다 기울어지는 축의 방향이 변할 수도 있고, 마이크로미러의 표면이 입사되는 레이저 빔에 대해 수직에서 벗어날 수도 있다. 그러므로, 측정장치는 마이크로미러가 기울어지는 축의 방향에 관계없이 각도변위를 측정할 수 있어야만 하고, 좌우운동(yaw)과 상하운동(pitch)을 조정할 수 있어야만 한다. 또한, 정확하고 신뢰성 있는 경사각도를 측정하기 위해서는 정밀한 초기 보정(calibration)이 이루어져야만 한다. 본 연구에서는 이러한 마이크로미러의 각도변위를 2차원으로 실시간 측정할 수 있는 광학 측정장치를 개발하였다. 그림 4는 그 측정장치의 구성도를 나타낸 것이다.

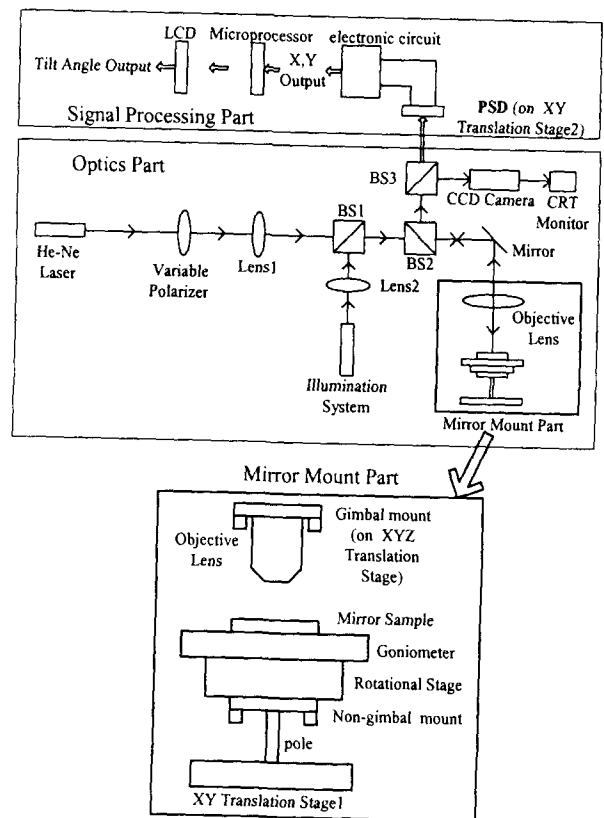


그림 4 2차원 각도변위 측정장치의 구성도
Fig. 4 Schematic diagram of laser-based two dimensional angular deflection measurement system

본 측정장치는 정교하게 초점이 맞은 HeNe 레이저 빔이 마이크로미러의 윗면에 맞고 반사되면서 발생하는 미세 변위를 측정하여 동작특성을 파악하고, 이 미세 변위를 기울어진 각도로 출력하는 장치이다. 10mW 편광 HeNe 레이저로부터 발생하는 레이저 빔(직경 800 μ m)은 미러 장착부분의 작은 진동에 의해 야기될 수 있는 간섭효과를 줄이고, 빔의 유효 크기를 최소로 하기 위해서 가변 편광기를 통과한다. 또한, 레이저 빔의 초점거리와 조명 시스템의 초점거리를 서로 다르게 하기 위해서 렌즈 1을 사용하였다.

PSD(Position Sensitive Detector)에 입사된 빛의 위치에 따라 결정되는 X축과 Y축으로의 변위 결과는 정사각형 PSD의 네 방향을 각각 가로방향 A, B, 세로방향 C, D라 하였을 때 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$e_x = \frac{e_A - e_B}{e_A + e_B + e_N} \quad (1)$$

$$e_y = \frac{e_C - e_D}{e_C + e_D + e_N} \quad (2)$$

대부분의 데이터 표나 참고서적[7]을 보면 위의 식 중 노이즈를 의미하는 e_N 은 무시되어 나타나고 있는데 PSD로 입사되는 레이저 빔의 파워가 충분히 커서 $e_A + e_B$ 나 $e_C + e_D$ 가 클 경우에는 e_N 이 무시되어도 전체 결과에 아무런 영향을 미치지 못하지만 레이저 빔의 파워가 작을 경우에는 이 e_N 의 영향으로 예측할 수 없는 결과를 나타내게 된다. 따라서 PSD로 입사되는 레이저 빔의 파워를 증가시키기 위해서 BS1과 BS3은 편광된 빔 스플리터를 사용하였다. 본 측정장치에서는 일정한 방향으로 편광되어 있는 레이저를 사용하였는데 일반 빔 스플리터를 사용하면 광원 레이저 파워의 50%밖에 이용할 수 없지만 편광된 빔 스플리터를 사용하여 광원 레이저의 편광방향과 이 편광 빔 스플리터의 편광방향이 일치되도록 조정하면 광원 레이저 파워의 거의 대부분을 이용할 수가 있다. 반면, PSD로 입사되는 레이저 파워가 오히려 너무 커지는 경우의 문제발생 가능성은 사용한 광원 레이저의 최대 파워가 PSD의 최대 허용가능 파워 내에 있으므로 고려하지 않아도 된다.

그리고, 레이저 빔의 초점을 최소로 하면서 마이크로미러 표면에 맞고 반사되는 레이저 빔이 퍼지지 않도록 하기 위해서 현미경용 대물렌즈(40배, WD=6.8mm, NA=0.45)를 사용하였다. 본 측정장치를 설계하는데 있어서, 대물렌즈를 통과하는 반사광의 파워가 비네팅(vignetting) 효과에 의해 감소되지 않도록 오프 상태의 마이크로미러에서 반사된 레이저 빔이 모두 대물렌즈로 들어가도록 해야 한다. 또한, 패키징된 마이크로미러 어레이의 창유리 두께(1mm)와 마이크로미러와 창유리 사이의 간격(2mm)을 고려하여 작동거리가 긴 대물렌즈를 채택하여야만 한다. 대물렌즈는 그림에서와 같이 XYZ 이동 스테이지 위에 장착한 짐벌(gimbal) 마운트와 함께 장착한다. 여기서, 짐벌 마운트는 입사되는 레이저 빔이 대물렌즈에 대해 정확하게 수직으로 입사되도록 조정하기 위한 것이고, XYZ 이동 스테이지는 대물렌즈를 통과하는 레이저 빔이 정확하게 대물렌즈의 정중앙을 통과하도록 조정하기 위한 것이다. 마이크로미러에 맞고 반사된 레이저 빔은 BS3에 의해 두 방향으로 나뉘어지게 되는데, 앞에서 언급한대로 레이저 빔 파워의 대부분은 PSD(반응시간 7μs)로 입사된다. 반사된 레이저 빔의 나머지는 전체 측정의 진행과정 검사를 위해 사용되는 CCD 카메라로 입사되고, PSD에서 처리된 신호는 전류-전압 증폭기, 감산 증폭기, 가산 증폭기, 분할기(divider)로 구성된 전자회로와 연결된다. PSD로 입사된 레이저 빔의 위치에 따라 PSD로부터 다르게 출력되는 전류는 이 전자회로의 전류-전압 증폭기를 통과하면서 전압으로 변환되고, 감산 증폭기와 가산 증폭기를 거쳐 분할기에서 최종 변위값으로 변환된다. 전자회로로부터의 출력은 초기 보정 데이터에 따라 전압출력값을 경사각도로

환산하기 위해 사용한 마이크로프로세서와 연결된다. 이 전자회로를 사용하면, 시간과 온도에 따른 레이저 빔의 강도 변화에 의한 영향을 거의 받지 않는다.

그림 4에는 또 미러 장착부가 확대되어 자세하게 나타나 있는데 정밀한 초기 보정을 통해 정확한 데이터를 얻고, 각도변위를 2차원으로 측정하기 위해서 측각기(goniometer), 회전 스테이지, 비짐벌(non-gimbal) 마운트를 XY 이동 스테이지 위에 장착시킨 상태로 조합하였다. 정밀한 초기 보정을 위한 이 미러 장착부의 자세한 사용법은 다음절에 기술되어 있다.

4. 초기 보정(CALIBRATION)

초기 보정의 첫 단계에서는 입사 레이저 빔이 대물렌즈에 대해 정확히 수직을 이루면서 대물렌즈의 정중앙으로 입사되도록 짐벌 마운트와 XYZ 이동 스테이지를 이용하여 미세 조정 하는 것이 상당히 중요하다. 다음 단계는 그림 5에 나타나 있듯이 측각기의 일정 각도마다 전자회로의 출력전압을 측정하고, 둘 사이의 관계를 찾는 것이다.

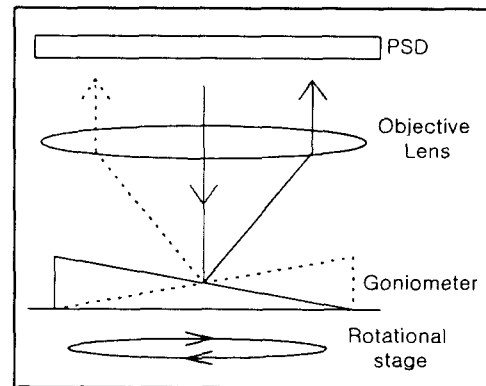


그림 5 경사각도 측정을 위한 초기 보정 방법
Fig. 5 Calibration method for angular deflection measurement

초기 보정을 위한 샘플로는 상용화되어 있는 레이저용 평면거울을 사용하였고, 측각기의 일정 각도에서는 샘플이 360° 회전되어도 전자회로 출력전압의 $\sqrt{X^2 + Y^2}$ 값이 항상 일정하게 나오도록 즉, 반사되는 레이저 빔의 궤적이 정확하게 원을 그리도록 짐벌 마운트와 비짐벌 마운트를 미세 조정하여 초기 보정 데이터를 얻는다. S자형 들보 위에 장착된 기둥에 의해 지지되고 있는 마이크로미러는 어떠한 방향으로도 기울어질 수 있고, 어떠한 회전 스테이지라도 약간의 위블을 가지고 있기 때문에 각도변위의 2차원 측정에 있어서 이 초기 보정 단계는 상당히 중요하다고 할 수 있다. 그림 6은 측각기의 각도별로 초기 보정을 통해 얻은 데이터 중 일부 각도에서의 결과를 나타낸 것이고, 그림 7은 측각기 경사각도와 출력전압과의 관계를 나타낸 것이다. 이론상으로 둘의 관계는 마이크로미러가 기울어지는 θ 에 대해서 $\sin \theta$ 에 비례하는 모습을 보여야 하지만 이 경우는 그 각도 범위가 작기 때문에 그림 7에서 보듯이 0°에서 12°까지의 범위에서 선형적으로 나타나고 있다. 본 측정장치의 측정오

차는 0.19° 이고, 측정 가능한 최대각도는 대물렌즈의 NA (Numerical Aperture)값에 따라 결정된다.

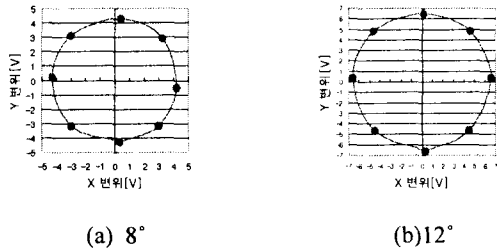


그림 6 경사각도 측정을 위한 초기 보정 결과

Fig. 6 Calibration result for angular deflection measurement

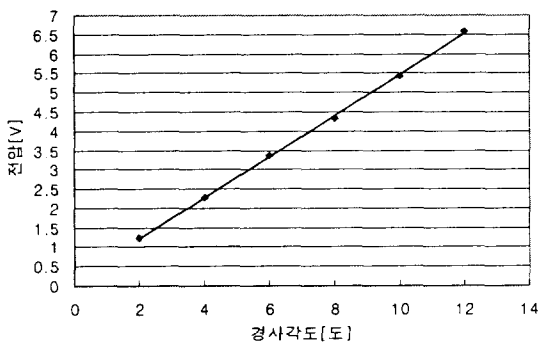


그림 7 초기 보정을 통해 얻어진 측각기의 경사각도와 출력 전압과의 관계

Fig. 7 Voltage versus the tilt angle obtained from calibration

5. 측정결과

그림 8은 S자형 들보가 기판에 닿을 때까지 마이크로미러가 기울어지면서 생기는 X축과 Y축으로의 변위를 오실로스코프로 측정한 것이다. 미러판에 인가된 바이어스 전압은 30V이고, 전극에 인가된 입력 펄스 전압은 5V이다. 그림 8과 같은 경우, 즉 S자형 들보가 바닥에 닿아 그 무게가 포함되지 않은 상태에서의 마이크로미러의 공진 주파수는 약 50kHz, 공진 감쇠시간은 약 $200\mu s$ 임을 확인할 수 있었다. 이러한 외팔보 구조는 공기의 저항이 완충작용을 하고 있는 조화진동자(harmonic oscillator)로 해석할 수 있으므로 감쇠시간은 S자형 들보의 컴플라이언스를 감소시킴으로써 줄일 수 있다. 또한, 입력신호에 대한 마이크로미러의 반응시간은 $10\mu s$ 이하임을 확인할 수 있었다.

한편, 전극에 인가되는 입력신호가 제거되어 미러판이 기판과 평행한 상태로 복귀하는 그림 9와 같은 경우에는 미러판의 무게에 S자형 들보의 무게까지 더해져 공진이 일어나므로 공진 주파수는 그만큼 감소하게 된다. 그림에서 보듯이 이 경우의 공진 주파수는 25kHz임을 확인할 수 있었다. 이 때의 공진 주파수와 그림 8의 경우에서의 공진 주파수를 비교해보면 서로 2배의 차이를 보이고 있는데 이것은 구조 해석용 시뮬레이션 프로그램인 ANSYS를 사용하여 시뮬레이션한 결과에서도 동일하게 나타남을 확인할 수 있었다.

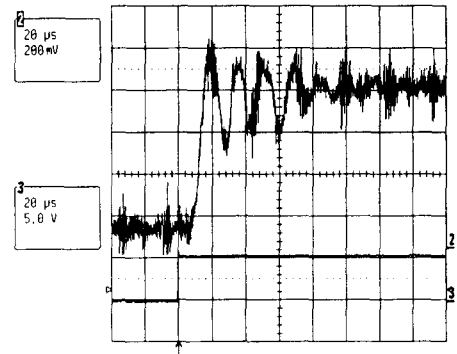


그림 8 마이크로미러가 평행한 상태에서 기울어질 때의 동작특성

(위 : X축변위, 아래 : 입력신호)

반응시간 : $10\mu s$ 이하, 공진 주파수 : 50kHz

Fig. 8 Dynamic response of micromirror when mirror state is changed from flat to tilt(upper : X-axis, lower : input signal)

Rise time : less than $10\mu s$, Resonant frequency : 50kHz

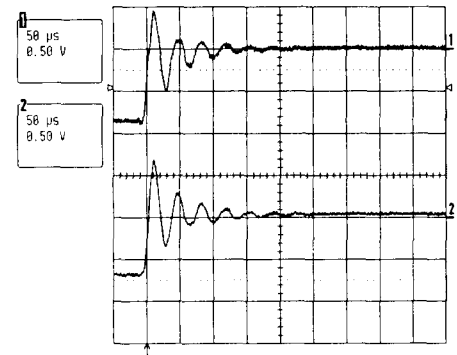


그림 9 마이크로미러가 기울어진 상태에서 평행한 상태로 복귀할 때의 동작특성

(위 : X축변위, 아래 : Y축변위)

입력신호 : 10Hz, 반응시간 : $10\mu s$ 이하, 공진 주파수 : 25kHz

Fig. 9 Dynamic response of micromirror when input signal of 10Hz is applied and mirror state is changed from tilt to flat(upper : X-axis, lower : Y-axis)

Rise time : less than $10\mu s$, Resonant frequency : 25 kHz

그리고, 입력신호의 주파수가 마이크로미러의 공진 주파수 부근까지 증가하는 경우의 출력 파형 모습은 입력신호가 구형파임에도 불구하고 그림 10에 나타나 있는 것처럼 정현파와 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다.

또한, X축과 Y축 방향으로의 변위 모습에 서로 약간의 차이가 있음을 발견할 수 있었다. 그 차이는 그림 11과 같이 오실로스코프가 X-Y 모드에서 동작할 때 더욱 확실하게 확인할 수 있었다. 만약 마이크로미러가 오직 대각선 방향으로만 정확하게 기울어진다면 출력 파형은 마이크로미러의 장착방향에 관계없이 일정한 기울기를 가지는 직선의 형태

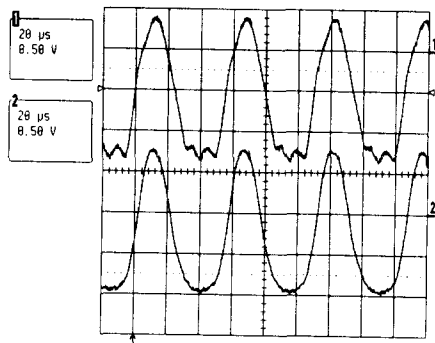


그림 10 입력신호를 18kHz로 인가했을 경우의 마이크로미러의 동작특성

(위 : X변위, 아래 : Y변위)

Fig. 10 Dynamic response of micromirror when input signal of 18kHz is applied

(upper : X-axis, lower : Y-axis)

로 나타나게 될 것이다. 그러나, 그림 11과 같이 출력 파형의 기울기가 변한다는 것은 마이크로미러의 기울어지는 방향이 변한다는 것을 의미한다. 즉, 그림 11은 마이크로미러가 기울어질 때 S자형 들보와 기판이 서로 정확하게 대각선으로 접촉되지 않기 때문에 S자형 들보가 기판에 닿은 후에도 들보가 또 다른 방향으로 기울어지면서 마이크로미러 또한 다른 방향으로 기울어지는 모습을 나타내고 있다.

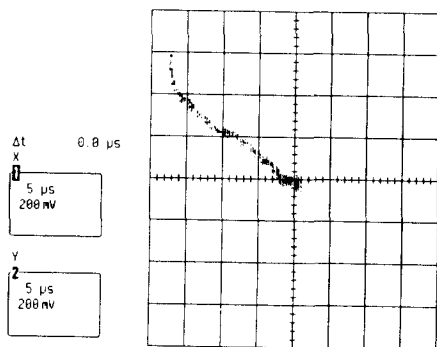


그림 11 오실로스코프를 X-Y 모드로 설정하여 마이크로미러의 각도변위를 2차원으로 측정한 결과

Fig. 11 Two-dimensional display for the micromirror deflection

이러한 X-Y 모드를 사용하면 마이크로미러의 경사방향을 측정할 수 있고, 그래프의 변위가 일정 기울기의 직선을 벗어난 후의 모습을 확인하면 마이크로미러가 기울어지다가 중간에 어느 방향으로 경사축이 변하는지도 측정할 수가 있다. 또한, 마이크로미러가 일정한 기울기로 기울어지다가 그 직선을 벗어나 다른 방향으로 기울어지는 순간의 전압값을 읽은 후, X와 Y로 각각 측정된 그래프와 비교하면 시간적으로 어느 순간에 마이크로미러의 경사축이 변하는지도 측정할 수 있다. 이것은 그림 9, 그림 10과 같이 X축 변위와 Y축 변위를 각각 측정된 그래프를 통해서도 알 수 있는데 동일한 시간상에서 두 축의 변위값이 일정하다는 것은 마이크로미러가 일정한 경사축을 가지고 기울어지고 있다는 것

을 알 수 있고, 만약 같은 시간상에서 한 축의 변위값은 일정한데 나머지 한 축의 변위값이 변하는 경우는 마이크로미러가 기울어지다가 경사축이 변한다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 30개의 서로 다른 마이크로미러에 대해서 경사각도를 측정하였고, 그림 12에 그 측정결과를 나타내었다. 각각의 마이크로미러마다 경사각도에 차이를 나타내고 있는데 이들 경사각도의 표준편차는 0.92°이다.

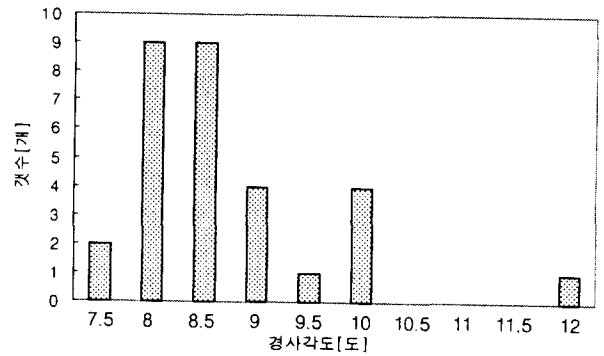


그림 12 30개 마이크로미러에 대한 경사각도의 측정

Fig. 12 Variation of tilt angles of 30 micromirrors

각 마이크로미러마다 이러한 차이를 보이는 원인은 앞에서 언급하였듯이 이 구조의 마이크로미러는 마이크로미러가 바닥에 닿기 전에 마이크로미러를 지지하는 S자형의 들보가 먼저 바닥에 닿은 후에 마이크로미러는 동작을 멈추도록 되어있는데 그림 13에서 보듯이 대각선 방향으로 기울어지는 들보는 정상적인 경우에 A점이 닿으면서 동작을 멈추게 되어 있지만 그렇지 못한 경우에는 들보가 기판에 닿은 후에도 전극과 마이크로미러사이에 작용하는 정전력에 의해 마이크로미러가 계속 밀려나면서 결국에는 들보의 B점이 떨어지는 현상이 발생하기 때문인 것으로 사료된다. 즉, OA와 OB의 길이 차이만큼 각도의 차이를 보이고 있는 것이다. 실제로 OA와 OB의 길이는 각각 25μm, 16μm이고, 기판에서 이 S자형 들보까지의 높이는 3.3μm이다. 이 3.3μm를 기준으로 해서 30개 마이크로미러의 측정결과 범위인 8°에서 12°까지 OA와 OB의 값을 계산해 보면 각각 23.7μm, 15.9μm임을 확인할 수 있다.

이러한 문제점은 대각선으로 기울어진 들보의 A점이 기판에 닿은 상태에서 A점의 연장선과 만나는 길이만큼의 돌기를 B점에 제작하면 해결될 것으로 사료된다.

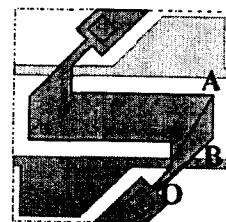


그림 13 경사각도 차이의 분석

Fig. 13 Analysis for variation of tilt angle

5. 결 론

본 논문에서는 S자형 들보에 의해 지지되는 구조의 마이크로미러에 대한 동작원리, 제작공정, 그 마이크로미러들의 동작특성 및 경사각도를 2차원으로 측정할 수 있는 광학 측정장치, 그리고 그 측정결과에 대하여 기술하였다. 이 마이크로미러는 50 μ m \times 50 μ m 알루미늄 미러판, 기둥, S자형 들보, 전극으로 구성되어 있고, 50개 \times 50개의 마이크로미러 어레이를 Al-MEMS 공정을 사용하여 제작하였다. 마이크로미러와 전극 사이의 전위차에

의해 발생하는 정전력은 S자형 들보가 기판에 닿을 때까지 마이크로미러를 기울어지게 한다. 마이크로미러에 인가되는 바이어스 전압은 25~35V이고, 전극에 인가되는 입력 펄스 전압은 $\pm 5V$ 이다. HeNe 레이저를 광원으로 하여 마이크로미러의 각도변위를 실시간으로 2차원 측정할 수 있는 광학 측정장치는 레이저 빔이 미러판에 맞고 반사되면서 발생하는 미세 변위의 측정을 토대로 동작한다. 마이크로미러가 기울어지면서 S자형 들보가 기판에 닿은 상태에서의 공진 주파수는 50kHz이고, 반대로 마이크로미러가 기판과 평행한 상태로 복귀하는 경우는 앞의 경우에 비해 동작 무게가 약 2배이기 때문에 이 때의 공진 주파수는 25kHz이다. 또한, 마이크로미러가 기울어져 S자형 들보가 기판에 닿은 후라 할지라도 마이크로미러는 다른 방향으로 기울어질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 G7 project에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] L. J. Hornbeck, "Deformable-Mirror Spatial Light Modulators," Spatial light Modulators and Applications III, SPIE Critical Reviews, Vol. 1150, pp. 86-102, 1989.

[2] L. J. Hornbeck, "Current Status of the Digital Micromirror Device(DMD) for Projection Television Applications," International Electron Devices Technical Digest, pp. 381-384, 1993.

[3] H. Kim, K. C199ho, Y. K. Kim, J. W. Shin, H. J. Shin, and J. H. Moon, "Automatic Test Equipment for the Micromirror Array," SPIE proceedings, Vol. 3276, pp. 103-110, 1997.

[4] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass, "A MEMS-Based Projection Display," Proceeding of the IEEE, pp. 1687-1704, 1998.

[5] J. H. Cotois, V. M. Bright, S. C. Gustafson, and A. Michalick, "Implementation of Hexagonal Micromirror Arrays as Phase-Mostly Spatial Light Modulators," SPIE proceedings Vol. 2641, pp. 76-87, 1995.

[6] Kenneth A. Honer, Nadim I. Maluf, Edwardo Martinez, and Gregory T. A. Kovacs, "A High-Resolution Laser-Based Deflection Measurement System for Characterizing Aluminum Electrostatic Actuators," The 8th international Conference on Solid State Sensors and Actuators and Eurosensors IX, 71-PB1, pp. 308-311, 1995.

[7] E. O. Doebelin, "Measurement Systems," 4th edition, McGraw-Hill, pp. 282, 1990

저 자 소 개



김 종 국(金 鍾 國)

1969년 9월 4일 생. 1994년 중앙대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1997년 쌍용 자동차 종합기술연구소. 현재 박사과정.
Tel : (02)824-5816, Fax : (02)824-5271
E-mail : oslal@ms.cau.ac.kr



김 호 성(金 鎬 成)

1957년 10월 11일 생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 SUNY at Buffalo 공학박사. 1983년~1986년 금성 전기 기술연구소. 1993년~현재 중앙대 전기공학과 부교수.
Tel : (02)820-5292, Fax : (02)825-9210
E-mail : hkim@cau.ac.kr



신 형 재(愼 炯 宰)

1961년 9월 17일 생. 1984년 한양대 무기재료공학과 졸업. 1992년 University of Maryland 재료공학과 공학박사. 1991년~1994년 NIST 초빙연구원. 1994년~현재 삼성전자 중앙연구소 수석연구원.

Tel : (0331)200-3351
Fax : (0331)200-3307
E-mail : hjshin@md.sec.samsung.co.kr