

Optical MEMS에서의 액추에이터 응용



김 옹 권

(서울대학교 전기·컴퓨터공학부 부교수)

1. 서 론

반도체 소자 제조공정을 이용하여 마이크로 미러, 마이크로 렌즈, 스위치 등의 마이크로 광학 부품 및 마이크로 관성 센서, 마이크로 바이오 칩, 마이크로 무선 통신 소자를 제작하는 마이크로머시닝(micromachining) 기술이 개발되고 있다. 그리고, 마이크로머시닝 기술과 이 기술로 제작한 소자 및 시스템을 일컫는 MEMS (Microelectromechanical Systems)[1] 분야가 하나의 제작 기술 분야 및 응용 분야로서 자리잡아가고 있다.

MEMS는 초소형 전기기계 시스템 또는 소자라고 부를 수 있는데, 그 응용의 하나로서 광학 분야에 응용되고 있다(그림 1). 마이크로머시닝 기술을 이용하면 1 mm 보다 작은 광학 부품을 제작할 수 있으며 이들로써 초소형 광 시스템을 구현할 수 있다(그림 2). (2) 별도로 제작한 반도체 레이저를 미리 마이크로머시닝 기술로 제작한 고정대에 장착하고 마이크로 프레넬 렌즈, 빔 스플리터, 45 도 반사 미러를 마이크로머시닝 기술로 제작하여 그림 2와 같이 조립할 수 있다. 기존의 광학 시스템은 크고 무거운 광학대 위에 미러, 렌즈 등을 조립 기구를 이용하여 시스템을 구성한다. 또한 레이저의 크기도 크다. 이렇게 구성된 광학 시스템의 성능을 얻기 위해서는 정밀한 스테이지를 이용하여 광축 및 반사각, 반사면 등을 꽤 많은 노력을 거쳐서 정렬해야 한다.

그러나, 그림 2와 같은 초소형 광 시스템을 이용하게 되면 이러한 기기와 공간, 노력을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 광학 시스템과는 다른 차원의 성능을 기대할 수 있을 것이다. 초소형 광 시스템은 빠른 응답 속도와 적은 손실, 집적화 및 디지털화의 용이성 등의 장점으로 인하여 정보 통신 장치, 정보 디스플레이 및 기록장치에 채택되어 응용되고 있다.

이하, Optical MEMS에서 응용되는 마이크로 미러와 스테이지를 소개하고 이들의 응용을 소개하기로 한다.

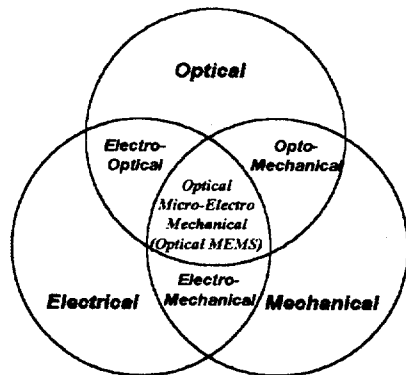


그림 1. 광기술과 MEMS의 상승효과.



그림 2. 마이크로머시닝 기술로 제작한 마이크로 미러, 마이크로 렌즈, 반도체 레이저, 빔 스플리터 등을 수 mm 크기의 칩 위에 집적화한 광 시스템.

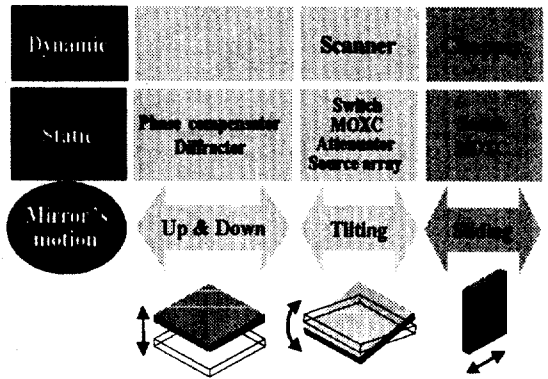


그림 3. 마이크로 미러의 동작으로 분류한 응용.

2. 마이크로 미러와 스테이지

마이크로 미러는 그림 3과 같이 상하방향, 회전방향, 미끄러지는 방향 등의 방향과 동적 및 정적인 운동에 따라 여러 가지로 응용된다. 상하 방향의 운동은 위상 보정기나 회절기 등으로 응용되고, 기울어지는 방향의 운동은 스캐너나 스위치, 광신호 분배기, 광신호 감쇄기, 광원 어레이 등으로, 미끄러지는 방향의 운동은 광 차폐기나 스위치 광신호 분배기, 등으로 응용된다.

마이크로 미러의 크기는 10 ~ 1000 μm 정도이고, 미러의 개수는 1 ~ 10^6 개 정도가 제작되어 응용되고 있다(그림 4). 대형 화상 표시 장치는 크기가 10 ~ 50 μm 정도로 작지만 미러 수가 화소 수만큼 필요하기 때문에 백만 개 정도의 미러가 필요하다. 그러나, 적응광학(adaptive optics)이나 광신호 분배기의 경우에는 미러의 크기는 수 백 μm 정도로 다소 커지나, 개수는 줄어서 수백 개 정도가 필요하다. 스캐너나 광학 픽업 장치의 경우, 미러는 수 mm 정도로 커지고 한 개로도 응용에 충분하다. 이와 같이, 응용에 따라 미러의 크기와 개수가 매우 다르며, 동작 방향 및 동정적인 동작에 따라서 응용이 달라진다. 물론 그에 따른 마이크로 미러의 제작 방법도 달라지게 매우 다른 방법으로 미러를 제작한다.

그림 5는 마이크로 미러의 크기와 기계적인 응답 시간과의 관계를 보여주고 있다. 그림 5에서는 미러의 크기가 커짐에 따라 기계적인 응답 시간이 커진다는 것을 보여준다. 대형 화상 표시 장치의 미러는 크기가 수십 μm 정도인데 응답 시간은 수십 μs 정도로 상당히 빠르고, 적응광학이나 광신호 분배기의 미러는 크기가 수백 μm 정도이고 수백 μs 정도의 응답시간을 가진다. 크기가 수 mm 정도인 미러는 스캐너 등에 쓰이는데 응답 시간은 수 ms 정도이다.

현재 마이크로 미러는 대형 화상 표시 장치, 광신호 분배기, 바코드 스캐너(Bar code scanner) 광신호 감쇄기에 적용되어

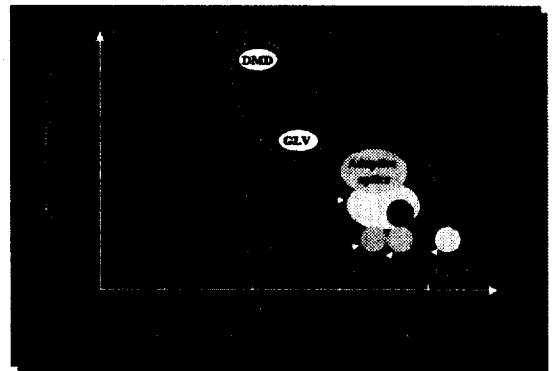


그림 4. 마이크로 미러의 크기와 개수로 분류한 응용.

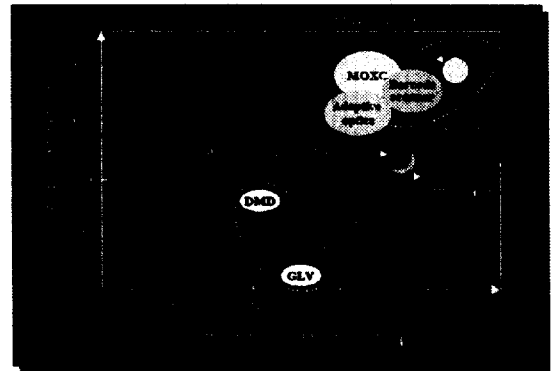


그림 5. 마이크로 미러의 크기와 응답시간으로 분류한 응용.

상용화되어 있거나 상용화 연구가 진행 중이다.[3, 4]

마이크로머시닝 기술로 마이크로 스테이지를 제작할 수 있다. 이러한 마이크로 스테이지로 마이크로 렌즈나 광섬유 등을

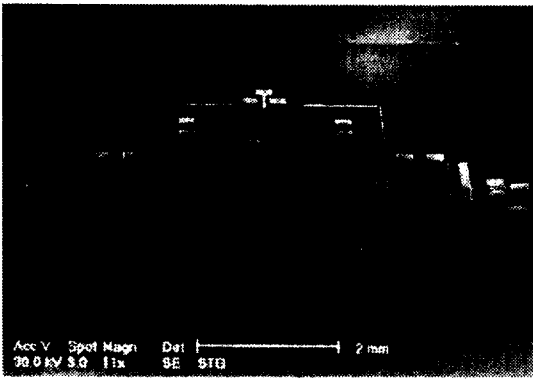


그림 6. 단결정 실리콘으로 제작한 두 방향으로 구동하는 마이크로 스테이지. 가운데의 스테이지에 마이크로 렌즈가 집적화로 제작하여 렌즈를 통과하는 빛의 위치를 제어할 수 있다. 그림에는 마이크로 렌즈가 없음.

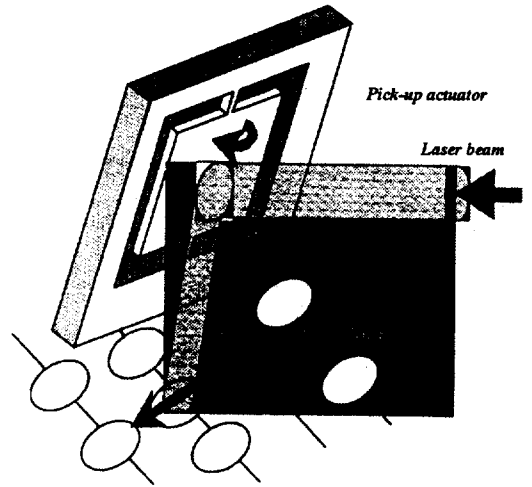


그림 8. 광 기록장치의 광픽업 액추에이터 개념도.

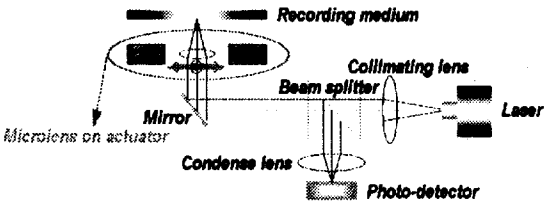


그림 7. 마이크로 렌즈의 위치제어를 통한 광기록 장치로의 응용 개념도. 마이크로 렌즈가 좌우로 움직이면 렌즈를 통과한 빛이 좌우로 위치를 변동하게 되어서 track-following이 가능하다.

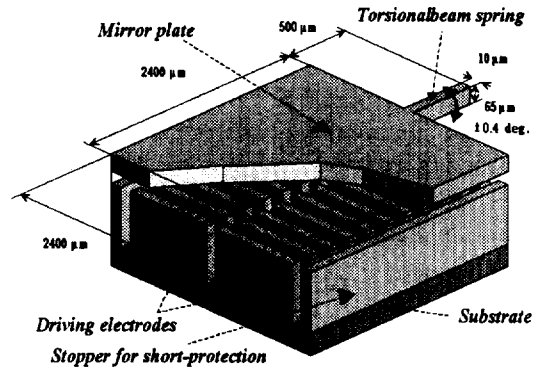


그림 9. 한 변의 크기가 2.4 mm인 미러를 구동시키는 시스템의 예. 미러는 단결정 실리콘이고 0.4 도 정도 회전이 가능하다.

미세하게 움직일 수 있다. 그림 6은 단결정 실리콘으로 머리빗 모양 액추에이터를 제작해서 스테이지를 x-y 양방향으로 움직일 수 있게 한 예이다. [5] 각 방향으로 $\pm 20 \mu\text{m}$ 이상 구동되며 이때의 전압은 15 V의 편향 전압과 7 V 이내의 제어 전압으로 구동된다. 양방향 구동 시의 상호 간섭도 반경 $24 \mu\text{m}$ 이내의 영역에서는 $0.1 \mu\text{m}$ 이내로 측정되었다. 그림 7은 그림 6의 마이크로 스테이지를 이용하여 광기록 장치에 응용한 예를 보이고 있다. 마이크로 렌즈의 위치를 마이크로 스테이지로 좌우로 움직일 수 있으므로 렌즈를 통과한 빛은 좌우로 이동한다. 따라서, 광기록 매체의 트랙 위치 정보가 마이크로 스테이지 제어 전압으로 입력되면 트랙 추종(track-following) 액추에이터로서 응용할 수 있다.

3. 응용

3.1 광기록 장치의 픽업

정보저장 장치는 고 기록 밀도화, 소형화, 고속화가 요구되고 있어서, 마이크로머시닝 기술로 제작된 마이크로 액추에이터가

정보저장 장치에 응용되고 있다. 자기 헤드[6]나, 광픽업 헤드 [7-11], 광자기 헤드, 프로브(probe)를 움직이는 마이크로 액추에이터는 고 기록밀도 정보저장 장치에는 필수적인 핵심 소자로 인식되어 있다.

그림 8은 광기록 장치용 픽업 액추에이터의 개념도를 보이고 있다. 광 트랙 피치는 $1 \mu\text{m}$ 내외이므로 트랙 추종을 위해서는 마이크로미터 이하의 제어가 필요하다. 2차 액추에이터를 마이크로 미러를 이용해서 레이저 빔이 트랙을 따라가도록 제어한다. 이 때 마이크로 미러는 충분한 변위각과 빠른 동특성이 요구된다.

그림 9는 크기가 2.4 mm로 비교적 큰 마이크로 미러를 구동시키는 시스템의 개념도를 보이고 있다. [7] 미러 아래의 전극에 전압을 인가하여 정전력으로 구동시킴으로써 미러를 회전시켜 광 경로를 변화시킨다. 단결정 실리콘 비틀림 스프링에 의

해서 지지되는 단결정 실리콘 마이크로 미러는 정전력에 의해서 구동한다. 마이크로 미러를 접지시키고 마이크로 미러 아래에 설치한 좌우 전극에 번갈아 전압을 인가하면 정전력이 발생하여 미러는 좌우로 기울어지게 된다. 이 때 변위각은 마이크로 미러와 전극과의 거리, 유효 전극 면적, 인가 전압에 의해서 결정된다. 또한 낮은 전압에서 구동시키기 위해서 마이크로 미러와 전극과의 거리를 작게 해야 하는데 이리하면 빠른 움직임을 할 때에는 둘 사이의 공기 저항(댐핑)에 의해서 변위각이 감소한다. 댐핑의 영향을 줄이기 위하여 전극에 꿀을 파서 600 Hz 정도로 빠르게 미러가 동작할 때에도 변위각이 감소하지 않도록 하였다.[8, 9]

3.2 홀로그램 정보저장 장치

마이크로 미러를 크게 회전시켜서 광기록 장치에 응용한 예가 있다.[12, 13] 이런 미러는 주로 자기적인 힘에 의해서 구동된다. 그림 10은 크기가 4 mm 인 단결정 실리콘 미러를 자기장을 인가해서 구동한다.[13] 자성체는 $Ni_{90}Fe_{10}$ 을 전해도금으로 제작하였고 H_c 는 0.79 T 이다. 변위각은 인가 자계의 세기가 80,000 A/m에서 60도를 넘는다. 미러는 실리콘 웨이퍼의 표면을 그대로 사용하므로 표면 거칠기가 10 nm 이하이나, 자성체의 응력으로 인해 미러의 표면이 약간 볼록하다. 이 마이크로 미러를 이용해서 질이 좋은 100 개의 홀로그램을 저장했고, 이 때의 홀로그램 스페이싱(hologram spacing)은 0.143 도이어서 다소 크지만 제어회로 등을 이용하면 이보다 작도록 할 수 있다. 0.7 도의 스텝으로 10.7 도의 변위각을 얻을 때에는 약 200 msec 가 걸리고, 10.7 도의 변위각을 한꺼번에 움직이고자 할 때에는 400 msec 보다 더 걸렸다. 그러나, 0.3 도 변위에 걸리는 시간은 33 msec이어서 모터를 사용하는 기존 장치의 130 msec 보다는 작다. 0 도로부터 53 도까지의 변위각을 20

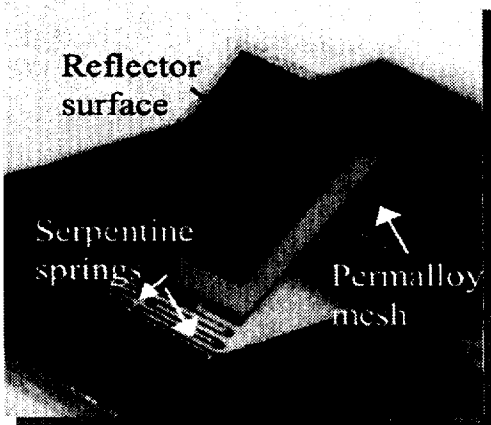


그림 10. 홀로그램 정보저장 장치에 응용하는 4 mm 크기의 마이크로 미러. 자기력에 의해서 구동한다.

번 이상 측정된 결과, 반복 정밀도는 0.003 도로 측정되었다.

3.3 대형 화상 표시 장치로의 응용

대형 화상에 대한 요구는 날이 갈수록 커지고 있다. 현재 대부분의 대형 화상 표시장치(주로 프로젝터)는 액정을 광 스위치로 사용하고 있다. 과거의 CRT(Cathode Ray Tube) 프로젝터에 비해서는 소형이고 가격도 저렴하고 광학계도 간단하여 많이 사용되고 있다. 그러나, 광원으로부터의 빛이 액정 판을 투과하여 스크린에 비추기므로 광 손실이 많다는 것이 단점으로 지적되고 있다. 최근에는 광 효율이 개선되었지만 근본적인 투과시의 효율 저하는 피할 수 없다. 이런 광 효율을 개선하고 보다 선명한 상을 얻기 위하여 마이크로 미러를 사용하여 대형 화상을 표시하는 장치가 제안되어 시판되고 있다.

크기가 수십 μm 인 마이크로 미러를 화상의 화소 수만큼 제작해서 개별적으로 마이크로 미러를 구동하면 화상을 구성할 수 있다. 그림 11은 마이크로 미러 어레이를 이용해서 대형 화상을 구성하는 장치의 개념도이다.[14] 광원의 빛은 렌즈를 통해서 단색(녹색, 청색, 적색)을 만드는 색 필터를 거친다. 색 필터는 회전하기 때문에 마이크로 미러 어레이에 한 색이 비추지는 시간은 한 주기의 삼분의 일이 된다. 마이크로 미러 어레이에 비추진 빛은 다시 반사하고 프로젝션 렌즈를 통하여 스크린으로 확대되어 조사된다. 마이크로 미러 어레이에는 화상의 화소 수만큼의 미러가 만들어져 있고, 각각의 미러는 화면의 각 화소에 일대일로 대응한다. 마이크로 미러 어레이 칩에는 삼색(녹색, 청색, 적색)의 빛이 차례대로 비추어지고, 마이크로 미러는 색깔에 맞추어서 적당한 시간동안 화면 안으로 반사하거나 화면 밖으로 반사한다. 반사한 빛은 프로젝션 렌즈를 통하여 화면으로 크게 확대되어 조사한다. 화상의 크기는 프로젝션 렌즈와 화면의 밝기에 따라 결정되는데 대개 1 - 10 미터 정도의 대형 화상을 만드는 데 적합하다.

그림 11은 정전력에 의해서 구동하는 텍사스 인스트루먼트사에서 개발한 마이크로 미러의 예이다.[14] 왼쪽 위의 사진을 보면 각 미러에 가운데 구멍이 있는 것을 제외하면 모두가 반사하는 면이라는 것을 알 수 있다. 미러 판을 하나 또는 여러 개를 제거한 것이 그림 12의 다른 그림들이다. 미러를 정전력으로 움직이는 데 필요한 스프링이나 전극 판 등이 모두 미러 판 아래에 숨어있어서 유효 반사 면적이 최대가 되도록 제작되었다. 마이크로 미러의 크기는 16 μm 정도이고 재질은 알루미늄이다. 반사 면적을 최대한으로 크게 하기 위하여 스프링, 기동 등의 구조물을 미러 판 아래로 숨겼다. 스프링이 비틀러지면서 미러 판이 기울어진다. PWM (Pulse Width Modulation) 방식을 이용하여 화상을 얻을 수 있었고, 디지털 제어 방식에 적합하다.

그림 13은 알루미늄을 구조층으로, 감광제를 회생층으로 사용하여 표면 마이크로머시닝 기술에 의해 서울대에서 제작한

Display system using a single digital micromirror device

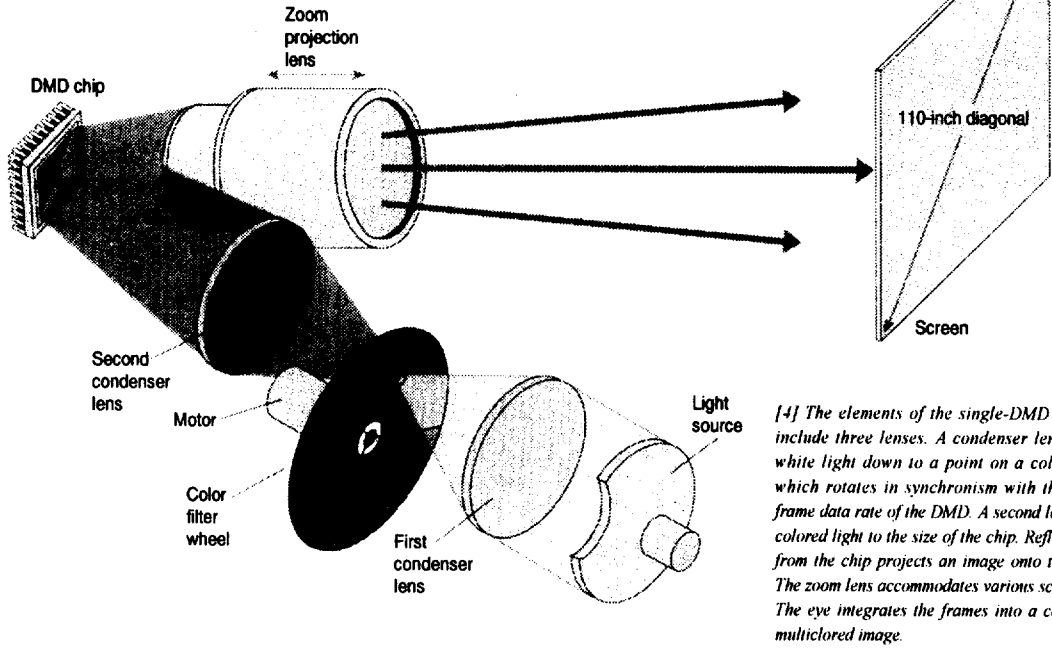


그림 11. 마이크로 미러 어레이를 이용하여 대형 화상을 구성하는 시스템의 개념도.

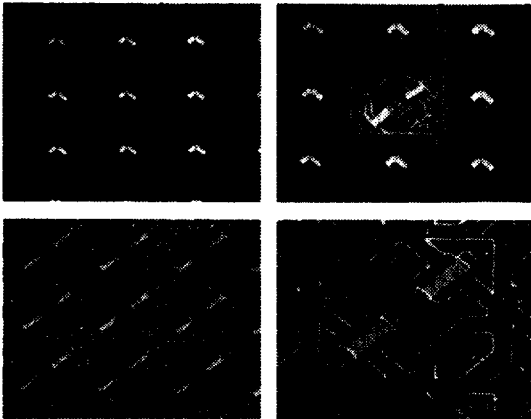


그림 12. 알루미늄 마이크로머시닝으로 제작한 마이크로 미러 어레이.

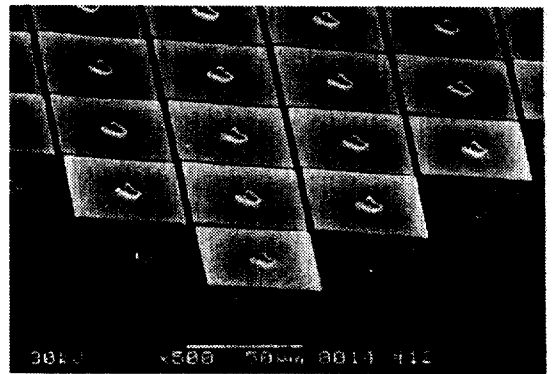


그림 13. 알루미늄 표면 마이크로머시닝 기술로 제작한 마이크로 미러 어레이. 마이크로 미러의 크기는 50 μ m이다.

마이크로 미러 어레이의 사진이다. [15] 가로 세로 폭 50 μ m의 마이크로 미러가 3 μ m의 간격으로 50 x 50 개의 어레이(총 2500개)를 이루고 있다.

3.4 광통신 소자로의 응용

마이크로 미러, 마이크로 렌즈, 빔 스플리터, 광 도파로, 광 섬유 고정대 등을 마이크로머시닝 기술로 제작하면 광통신의

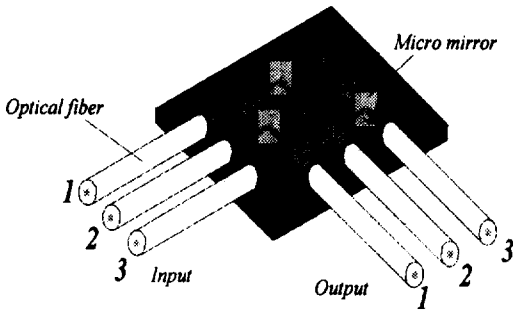


그림 14. 마이크로머싱 기술로 제작하는 광 교환기의 개념도. 누워있던 마이크로 미러가 기판에 수직으로 서면 입력 광섬유로부터의 광을 반사하여 출력 광섬유로 내보낸다.

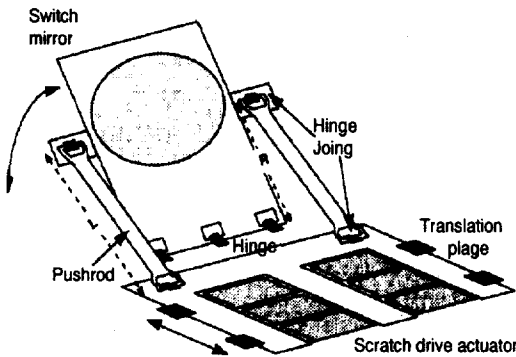


그림 15. SDA로 구동되는 마이크로 미러. 기판에 누워있다가 SDA가 닿으면 힌지 조인트 구조로 인해 마이크로 미러가 기판에 수직하게 서게 된다.

광 스위치, 광 교환기, 광 감쇄기(attenuator) 등에 응용할 수 있다.

현재는 MEMS의 광통신에 대한 응용이 급격히 확산되는 추세로, 기존 기술의 한계점으로 여겨졌던 100 x 100 channel 급 광 교환기를 훨씬 상회하는 1,000 x 1,000 channel MEMS 기반의 광 교환기가 이미 출시된 상황이며, 기술적인 개선에 있어서도 소형화, 저 전력화, 복구기능 강화, 전송품질 누화특성 개선, 레이저 및 수신기 집적화 등 많은 장점을 가진다.

그림 14는 3 x 3 Micro Optical Cross Connect의 개념도를 보이고 있다. 크기가 빔 직경의 두 배 정도인 마이크로 미러(대개 100 - 200 μm)를 2차원적으로 배열하고 미러를 각각 구동하여 광신호를 반사시키려는 미러만을 누워있는 상태에서 일으켜 세워 입력 광섬유로부터의 광신호를 출력 광섬유로 반사시켜 보낸다. 따라서, n 개 입력 광섬유의 입력 신호 각각을 n 개 출력 광섬유로 1:1로 보낼 수 있어 자유로이 신호를 교환

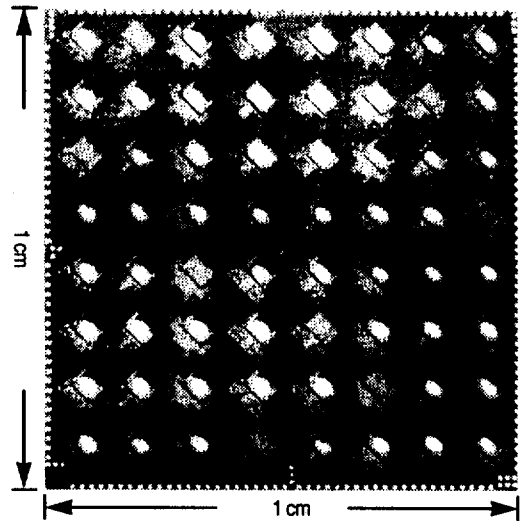


그림 16. 1 cm x 1 cm 의 크기 칩에 8 x 8 개 마이크로 미러가 제작된 예. 각 마이크로 미러의 구조는 그림 15와 같다.

할 수 있다.

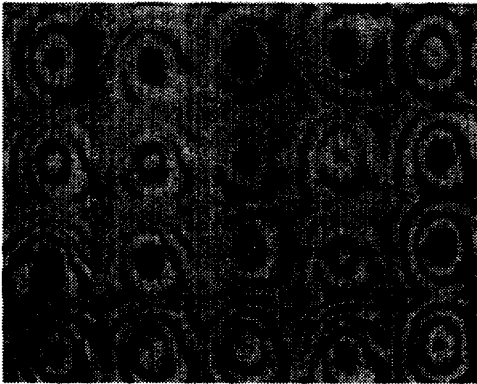
그림 15는 다결정 실리콘으로 제작한 마이크로 미러를 보이고 있고, 마이크로 미러 표면에는 금을 5000 Å 정도 입혀서 표면을 곱게 하였다. 마이크로 미러는 누워있다가 스크래치 드라이브 액추에이터(Scratch Drive Actuator, SDA)에 의해서 구동되면 기판에 수직하게 서게 된다. [16] 마이크로 미러에 힌지 조인트를 제작하여 기판 위의 SDA가 끌어당기면 마이크로 미러를 서게 하였다. 이렇게 기판에 수직으로 서면 그림 14와 같이 입력되는 빛을 반사하여 출력 광섬유로 보내게 된다. 그림 16은 이런 미러를 8 x 8 개, 총 64 개를 1 cm x 1 cm 크기에 제작하여 광신호 교환을 하게 하고 있다. 이 스위치를 이용하여 500 μs 이내에 신호를 스위칭하였다. 8 x 8 스위칭 시 가장 짧은 거리와 가장 긴 거리의 광손실이 3.1 ~ 3.5 dB로 측정되었다.

3.5 적응 광학으로의 응용

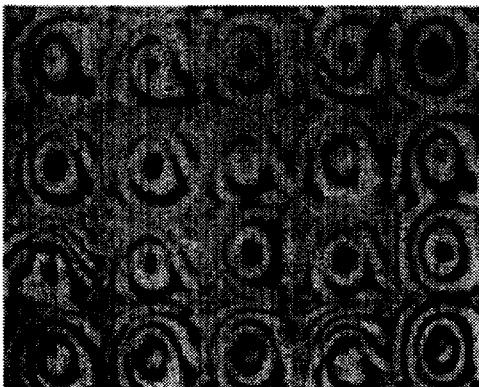
적응 광학(adaptive optics)용 공간 빛 변조기는 대기의 왜곡(turbulence)에 의하여 왜곡된 빛의 위상을 파면 센서(wave front sensor)와 실시간 제어기를 통해 보상하여 바로 잡는 역할을 한다. 입사하는 빛은 우선 미러 면에서 반사한다. 이 미러가 전체 면에서 편평하면 왜곡된 위상을 보정하지 않고 그대로 우리 눈(image camera)에 들어오게 되어서 흐릿한 상을 보게 된다. 상의 각 지점에서 위상이 왜곡된 것은 파면 센서로 측정하여 미러 면을 상하 방향으로 국부적으로 움직인다면 왜곡된 위상을 보정할 수 있다. 그 위치나 양은 파면 센서로부터 알게되고 각 미러는 제어 회로에서의 신호를 받아 움직인



그림 17. 제작한 위상 변조용 알루미늄 마이크로 미러 어레이의 확대도. 크기는 100 μm x 100 μm 이다.



(a) Initial state(0V applied)



(b) Phase inversion (20V applied)

그림 18. 위상 변조 실험. (a)는 전압을 인가하지 않은 상태의 링 패턴이고, (b)는 전압을 인가해서 위상을 180도 변조한 상태의 링 패턴이다. 두 상태의 링을 비교하면 링의 명암이 반전된 것을 알 수 있어서 위상이 변조되었다는 것을 알 수 있다.

다. 이 적용 광학용 공간 빛 변조기를 마이크로머시닝 기술로 제작할 수 있다. 그럴 경우 과거의 적용 광학용 공간 빛 변조기 보다 크기, 무게 및 소비 전력을 크게 줄일 수 있으며 마이크로 머시닝 기술로 대량으로 제작할 수 있으므로 가격을 낮출 수 있다.

그림 17는 위상 및 방향 변조가 동시에 가능한 공간 빛 변조기이다.[17] 10 x 10 개의 마이크로 미러 어레이로 구성되어 있고, 각 미러의 한 변은 100 μm 이다. 마이크로 미러의 재질은 알루미늄이고 회생층은 후막 감광제이다. 유효 반사 면적은 92.6 %이고 마이크로 미러의 제어 가능한 수직 변위는 2 μm 이고, 제어가능한 각 변위는 ± 2 도이다. 제작된 공간 빛 변조기는 이층 구조로 제작된 마이크로 미러의 확대 사진이다. 아래 층은 스프링, 전극 등의 구조물이 제작되어 있고, 맨 위 층은 반사를 위한 미러 판만이 제작되어 있다. 그림 18은 위상 변조 실험의 결과를 보여주고 있다. (a)에서는 전압을 인가하지 않은 상태이고, (b)에서는 전압을 20 V 인가해서 파장의 1/4 만큼 미러를 가라앉힌 예이다. 모든 미러가 가라앉아서 위상이 180도 바뀌어서 링 패턴의 명암이 모두 반전되었다. 제작된 공간 빛 변조기는 위상 및 방향 변조가 동시에 가능하므로 계단과 같은 미러 단면 형상이 아니고 연속적으로 이어지는 전체 미러 단면 형상을 만들 수 있다. 즉, 미러 판이 아래로 가라앉는 운동과 회전하여 미러 판이 기울어지는 운동을 동시에 하면 연속적으로 이어지는 전체 미러 단면 형상을 만들 수 있었다.[18]

4. 결 론

MEMS 기술은 결코 응용과 떨어져서 존재할 수 없는 기술이다. 이것은 MEMS 기술로 제작된 액추에이터나 구조물이 조립할 수 없기 때문에 시스템이나 응용을 염두에 두고 설계와 제작을 해야하기 때문이다. 또한, 같은 구조의 액추에이터라 할지라도 크기와 형상비에 따라 제작 공정도 바뀌어야 하며, 설계도 바뀌어야 한다. 그러므로, 재료, 설계, 제작, 측정, 응용을 동시적이며 종합적으로 검토할 수 있는 연구자를 키우는 것이 매우 중요하다.

참 고 문 헌

- [1] M.E.Motamedi, "Micro-opto-electro-mechanical systems", Optical Engineering, Vol.33, No.11, pp. 3505~3517, 1994.
- [2] Ming C. Wu, L.Y. Lin, S.S. Lee and C.R. King, "Integrated devices make an optical bench on a chip", Laser Focus World, February 1996, pp. 64~68.

- [3] Olav Solgaard, "High-Resolution Silicon Surface Micromachined Displays", Proceedings of MOEMS97, pp. 9~14, 1997.
- [4] Richard S. Muller, "Surface Micromachining for Microphotonics", Proceedings of MOEMS97, pp. 109~114, 1997.
- [5] Che-Heung Kim and Yong-Kweon Kim, "Integration of a micro lens on a 2-DOF-in-plane positioning actuator," Proceedings of MOEMS99, pp. 171~177, 1999.
- [6] Bong-Hwan Kim et al., "MEMS Fabrication of High Aspect Ratio Track-Following Micro Actuator for Hard Disk Drive Using Silicon on Insulator," IEEE International Conference on MEMS, Orlando, USA, January 17-21, 1999, pp. 53~56.
- [7] 박근우, 김용권, "광기록 장치의 픽업헤드용 2.4 mm 크기의 미러의 제작과 실험", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2000.7.17-20, pp. 2266~2268, 2000.
- [8] M. Sekimura et al., "Electrostatic Torsion Mirror," Technical Digest of the 16th Sensor Symposium, Kawasaki, Japan, June 2-3, 1998, pp. 167~170.
- [9] Norio Uchida, Kiyotaka Uchimarui, Minoru Yonezawa and Masayuki Sekimura, "Damping of Micro Electrostatic Torsion Mirror Caused by Air-film Viscosity", IEEE MEMS Workshop 2000, Miyazaki, Japan, January 23-27, 2000, pp. 449~454.
- [10] J.U. Bu, J.D. Hwang, J.B. Lee, G. Kim, K.Y. Yang and S. Noh, "Annular Shutter Mirror for a Digital Video Disk Pick-up Module," IEEE MEMS Workshop 1998, Heidelberg, Germany, January 25-29, 1998, pp. 466-469.
- [11] Youngjoo Yee, Hyo-Jin Nam, See-Hyoung Lee, Jong Uk Bu, Young-Sam Jeon, and Seong-Moon Cho, "PZT Actuated Micromirror for Nano-Tracking of Laser Beam for High-Density Optical Data Storage", IEEE MEMS Workshop 2000, Miyazaki, Japan, January 23-27, 2000, pp. 435~440.
- [12] Jack W. Judy and Richard S. Muller, "Magnetically Actuated, Addressable Microstructures," Journal of MEMS, Vol.6, No.3, 1997, pp. 249~256.
- [13] Raanan A. Miller and Yu-Chong Tai, "Micromachined Electromagnetic Scanning Mirrors," Optical Engineering, Vol.36, No.5, pp. 1399~1407, 1997.
- [14] L.J. Hornbeck, "Current Status of Digital Micromirror Device (DMD) for Projection Television Applications", International Electron Devices Technical Digest, 1993, pp. 381-384.
- [15] Jong-Woo Shin, Seok-Whan Chung, Yong-Kweon Kim and Bum Kyoo Choi, "Design and Fabrication of Micromirror Array Supported by Vertical Springs," Sensors and Actuators A 66, pp. 144~149, 1998.
- [16] L.Y. Lin et al., "Free-Space Micromachined Optical Switches for Optical Networking", IEEE Jour. of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.5, No.1, 1999, pp. 4~9.
- [17] 정석환, 김용권, "표면 미세 가공 기술을 이용한 상하 운동 및 회전운동을 하는 광 변조기에 관한 연구," 대한전기학회 논문지 Vol. 49C, No. 2, pp. 140~148, 2000.
- [18] 정석환, 위상 및 방향 변조를 위한 초소형 광 변조기에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 학위논문, pp. 122~127, 2000.

저 자 약 령

성명 : 김 용 권

◆ **학 령**

1983년 서울대 전기공학과(학사)

1985년 서울대 대학원 전기공학과(석사)

1990년 동경대학교 전기공학과(박사)

◆ **경 령**

1990년 - 1992년 일본 히타치제작소 중앙연구소 연구원

1992년 - 1996년 서울대 전기공학부 조교수

1996년 - 현재 서울대 전기공학부 부교수