

극미세 광 및 유체 제어를 위한 마이크로액추에이터



조영호

(한국과학기술원 기계공학과 부교수)

1. 머리말

최근 기술선진국들은 미래 지식산업시대를 겨냥한 고부가 가치 지식정보 제품의 경박단소화 기술개발에 집중하고 있으며, 제품 크기의 극소화를 통해 성능(속도, 기능) 고도화와 가격 경쟁력 향상은 물론 에너지와 자원의 경제적 활용을 추구하고 있다. 특히 정보, 생명, 환경, 우주 등 21세기 지식정보 산업 분야에서는 <표 1>에 예측한 바와 같이 20세기 전자정보 매체의 제어 및 처리기능 뿐만 아니라 새로운 광 화학 생물학적 극미세 에너지 및 물질 형태의 정보매체[1,2] 발굴과 이들의 제어 및 처리 기능을 수행할 수 있는 다기능, 대용량, 고속, 저전력 소자[3-29]의 개발이 요구되고 있다.

근래 과학기술자들은 이러한 미래 사회경제적 요구를 충족시키기 위해 극미세 광 및 유체 형태의 다양한 극미세 정보매체와 이들의 활용(검색, 처리, 분석, 표시, 저장, 전달) 방법 및 도구의 개발을 통해 고성능(고속, 다기능, 고정도, 저가 및 저전력) 첨단제품 개발은 물론 새로운 가치창출에 도전하고 있다. 한편 전기적 극미세 정보매체(전자)의 활용방법과 구현 도구(전자소자)의 극소화 기술은 반도체 집적회로 및 메모리 기술의 괄목할 만한 성장에 힘입어 20세기 전자혁명 시대의 주역을 담당한 바 있다. 이에 1980년대 중반 탄생한 MEMS (Micro Electro Mechanical System)기술은 기계부품의 극

소화는 물론 광학 및 열유체 부품의 극소화 기술로 발전하였으며, 이들 극미세 부품과 반도체 집적회로와의 결합을 통해 광 화학 생물학적 극미세 에너지 및 물질 등 다양한 물리량을 취급할 수 있는 마이크로 복합소자의 실현 가능성을 보이고 있다.

미래사회가 요구하는 극미세 복합정보 처리도구의 구현을 위해서는 다양한 극미세 정보매체의 인지를 위한 고성능 감지 소자 뿐만 아니라, 한정된 공간 내에서 극소형 부품을 빠르고 정교하게 움직임으로써 극미세 에너지 및 유체 정보를 능동적으로 가공하고 효율적으로 활용하기 위한 고정도 마이크로액추에이터의 개발이 필연적으로 요구된다.

마이크로액추에이터에 관한 연구는 MEMS 기술의 발생지인 미국 버클리대 BSAC(Berkeley Sensor and Actuator Center)에서 1980년대 후반 세계최초의 회전판 모양의 정전형 마이크로액추에이터와 빗살모양의 정전형 마이크로액추에이터 개발에 성공함으로써 본격적으로 시작되었다. 그 이후 GIT에서 전자기형 마이크로액추에이터를 개발하였고, 최근 MIT와 NASA에서는 극소형 비행체 추진 및 인공위성 자세 제어용 열동력형 마이크로액추에이터 개발에 관한 연구가 진행 중에 있으며, 독일의 Fraunhofer 연구소에서는 열공압형 마이크로펌프를 개발하여 마이크로액추에이터 분야에서 세계적인 연구그룹으로 성장해 왔다. 지금까지 MEMS기술에 의해

표 1. 과거, 현재, 미래 기술혁명의 핵심 및 특성비교 (1,2)

기술연대	산업혁명시대	전자혁명시대	지식혁명시대
시기	18-19세기	20세기	21세기
주 성장산업	기계공업	전자정보산업	지식정보산업
기술 원동력	기계가공기술	반도체미세가공기술	극미세가공기술
핵심 소재	철	반도체	박막금속, 반도체 및 폴리머
주요 제품	동력기 및 기계	집적회로 및 메모리	다매체 정보기기
주 기능	동력 발생 및 변환	전기신호 제어 및 처리	극미세 에너지 및 물질 제어
성능지표	강도/무게	속도/전력소모	기능×용량×속도/전력소모

표 2. 마이크로액추에이터의 구동원리 및 특성의 정성적 비교

구동원리	구조	공정난이도	구동신호	구동력	구동정도	구동범위	구동속도
정전	간단	저	전압	소	고	중	고속
전자기	복잡	중	전류	중	저	중	중속
압전	간단	고	전압	대	고	소	고속
열동력	복잡	중	전류	대	저	대	저속

표 3. 액추에이터 종류별 과학기술적 관심영역 및 특성비교

액추에이터 종류	요소 크기	주요 소재	핵심 학문 및 기술영역
기존 정밀액추에이터	cm~mm	금속(bulk)	공학 영역 (macro)
마이크로액추에이터	(mm~ μ m)	무기 금속(film)	과학과 공학의 융합지대 (micro)
생체운동기관	μ m ~nm	유기	과학 영역 (bio/nano)

개발된 마이크로액추에이터의 구동원리별 종류와 이들의 정성적 특징을 <표 2>에 비교하였으며, 각 구동원리별로 구동방향에 따라 구동 면과 기판이 평행한 수평구동 방식과 기판과 수직인 수직구동 방식으로 세분된다.

한편 미래 첨단제품에서 요구되는 마이크로액추에이터는 <표 3>에서 비교한 바와 같이 기존의 정밀액추에이터 혹은 생체운동기관과는 요소의 크기 뿐만 아니라, 소재, 작동환경 및 제작기술 측면에서 상이하며, 특히 마이크로액추에이터를 구성하고 있는 μ m 크기의 극미세 부품들의 동작원리와 거동특성에 관한 새로운 형태의 "미시공학(microengineering)"이 요구되며, 이는 mm크기의 생체운동세포에 관한 "과학적 지식(scientific knowledge)"과 mm이상 크기의 요소들을 대상으로 한 기존의 "거시공학(macroengineering)" 사이의 미개척 기술융합 지대로서 관련 물리현상의 특성, 소재의 물성 및 거동특성에 관한 원천적 연구가 미흡한 분야이다. 이에 본 논문에서는 광 화학 생물학적 극미세 에너지 및 유체의 가공 및 제어

기능의 구현을 위해 지난 13년간 본 연구팀에서 개발해온 마이크로액추에이터를 소개하고 그 특성과 개발 시 고려점을 토의하고자 한다.

2. 정전형 마이크로액추에이터

정전형 마이크로액추에이터는 크기가 작고, 구조와 제작공정이 간단하며, 빠른 응답 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있어 널리 사용되어 왔다. 기본적으로 두 전극사이에서 발생하는 정전인력(electrostatic attractive force)을 구동력으로 이용하고 있으며, 전극의 구조에 따라 평행평판 및 빔살 구조로 각각 대별된다.

먼저 <그림 1> (<그림 3>)에서는 극미세 광신호를 단속(3-5)하기 위해 개발한 평행평판구조의 정전형 마이크로액추에이터 [10]를 소개한다. 이는 <그림 1>과 같은 집적화된 광송수신 모듈에 사용될 수 있는 새로운 SOI 광스위치로서, 주요 구성

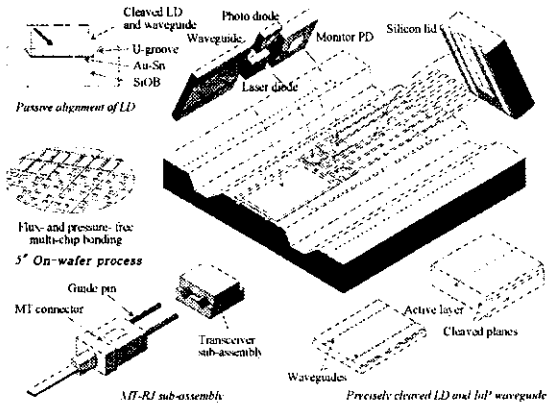


그림 1. 집적화된 광수신 모듈(10)

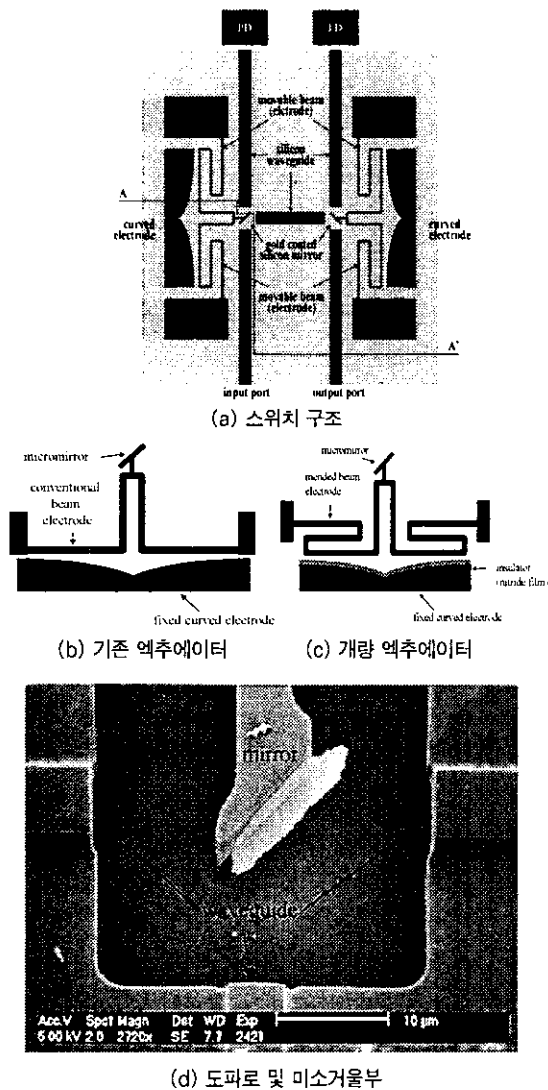


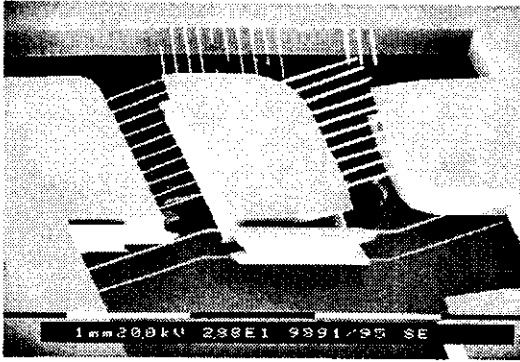
그림 2. 광 수신용 정전형 마이크로 광 스위치(10)

요소인 광도파로(11)와 미소 거울, 그리고 미소거울 구동을 위한 정전 액추에이터를 모두 실리콘으로 제작하고 송신부(LD)와 수신부(PD)와 접속이 가능하게끔 고안된 일체형 광 송수신 스위치이다. (그림 2)는 이러한 광송수신 스위치의 상세구조를 나타낸 것으로, 광단속용 미소거울의 구동을 위해 절연된 이동접촉 보와 곡면전극으로 구성된 정전형 마이크로 액추에이터를 사용하고 있다. 이러한 광 스위치의 특징으로는 SOI 기판을 사용하여 광도파로와 미소 거울, 정전 액추에이터를 모두 실리콘을 소재로 한 ICP 일괄공정으로 동일 wafer상에 제작함으로써, 기존 광스위치에서의 광섬유 조립이나 폴리머 광도파로 제작 등의 추가 공정을 없애고 집적화를 용이하게 하였으며, 마이크로액추에이터를 사용하여 거울을 직접 움직이는 스위칭 방식을 채택하여 기존 전기광학 혹은 열광학 방식의 광도파로 스위치보다 높은 신뢰성을 가질 수 있도록 하였다.

미소 거울을 구동시키기 위한 액추에이터(그림 2)는 스위칭 시간과 전력소모를 최소화하기 위하여 정전형 구동방식을 채택하였으며, 낮은 전압에서의 구동을 위해 기존(12)의 곡면전극 액추에이터(그림 2b)를 변형시켜 실리콘 질화막으로 미소 보와 전극을 절연하고, 구동전압의 감소를 위해 보와 전극 사이에 고정간격이 있는 상태에서 보가 이동하여 전극에 완전히 맞닿을 수 있는 구조(그림 2c)를 고안하였다. 먼저 정전 액추에이터는 (그림 2b)와 (그림 2c)에 도시한 두 가지 종류에 대하여 설계하였고, 각각의 구조에서 보의 길이를 $550\mu\text{m}$, 보의 두께를 $3\mu\text{m}$ 로 하였으며, 전극 사이의 최소 간격은 $2\mu\text{m}$, 거울을 이동시키는 구동거리는 $12\mu\text{m}$ 로 설계하였다. 광스위치용 미소 거울(그림 2d)은 SOI 웨이퍼와 ICP 식각공정을 이용하여 제작하였으며, 미소거울의 표면 경도를 향상시키기 위하여 ICP 식각된 거울면을 금박막으로 도금하였다. 실험적 연구를 통하여 실리콘 광도파로의 도파모드는 x축 방향으로 $2.76\pm 0.01\mu\text{m}$, y축 방향으로 $1.90\pm 0.01\mu\text{m}$ 로 각각 측정되었다. (그림 2b)와 (그림 2c)에 도시한 두 종류의 미소액추에이터의 성능 시험을 통해 개선된 액추에이터(그림 2c)의 구동전압을 기존 액추에이터(그림 2b) 구동전압의 $22.6\pm 3.2\%$ 수준으로 크게 낮출 수 있음을 확인하였으며, 질화실리콘 절연막의 절연막의 잔류응력을 30MPa 이하로 조절할 경우 (그림 2c)의 구동전압은 10 volt 이하로 낮출 수 있음을 입증하였다.

(그림 3)은 평행판 구조의 정전형 마이크로액추에이터를 이용한 주파수 조정이 가능한 마이크로 광스위치(13)를 도시한 것으로, 최대 구동변위(그림 3b)는 330V 정적구동에서 26.5mm 로 측정되었으며, 단속 주파수(그림 3c)는 590Hz 를 기준으로 바이어스 전압을 $50\text{--}300\text{V}$ 까지 변화시킴에 따라 $585\text{--}450\text{ Hz}$ 범위 내에서 조정이 가능함을 실험적으로 증명하였다.

(그림 4)는 빗살구조의 정전형 마이크로액추에이터(14)를



(a) 스위치 구조

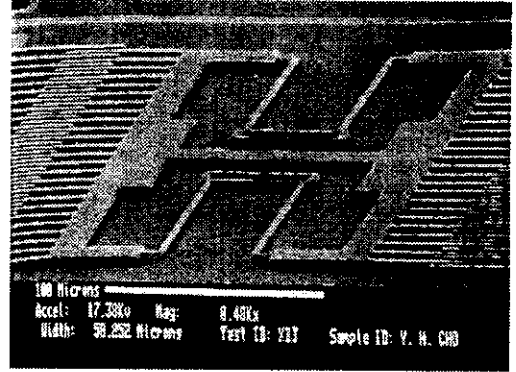
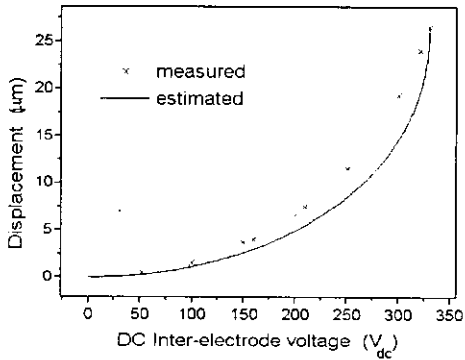
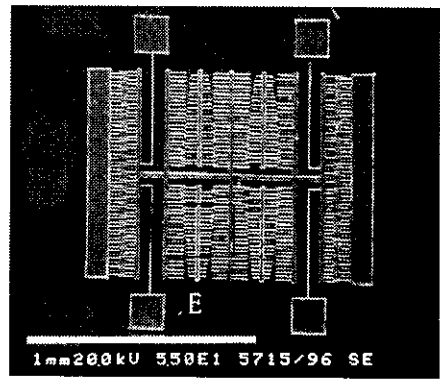


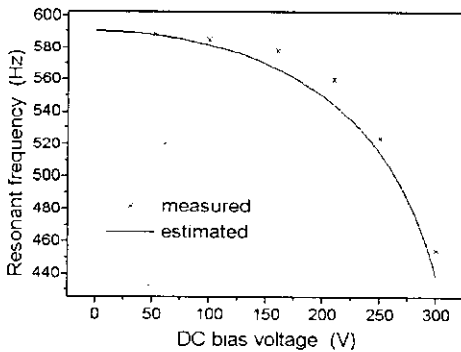
그림 4. 빗살구조의 정전형 마이크로액추에이터(14)



(b) 바이어스 전압에 따른 구동진폭 변화



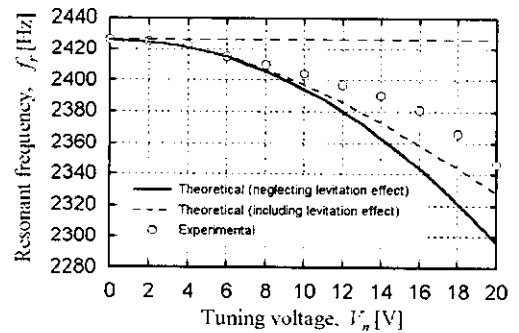
(a) 전체 구조도



(c) 바이어스 전압에 따른 주파수 변화

그림 3. 단속 주파수 조정이 가능한 정전형 마이크로 광 스위치(13)

나타내며 미소 보를 이용하여 구동의 방향을 안정적으로 유도할 수 있게끔 설계된 것이다. 한편 (그림 5)는 빗살구조를 삼각형으로 배열함으로써 변위와 선형적으로 변하는 정전력을 발생시킴으로써 마이크로액추에이터의 기계적 강성을 조정함으로써 구동 주파수의 조정을 가능케 한 정전형 마이크로액추



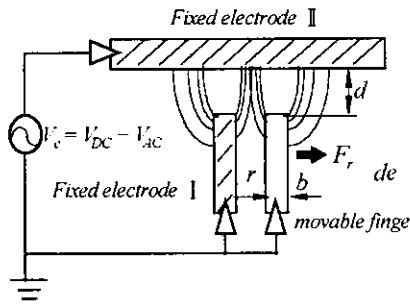
(b) 바이어스 전압에 따른 주파수 변화

그림 5. 주파수 조정이 가능한 정전인력형 마이크로액추에이터(15)

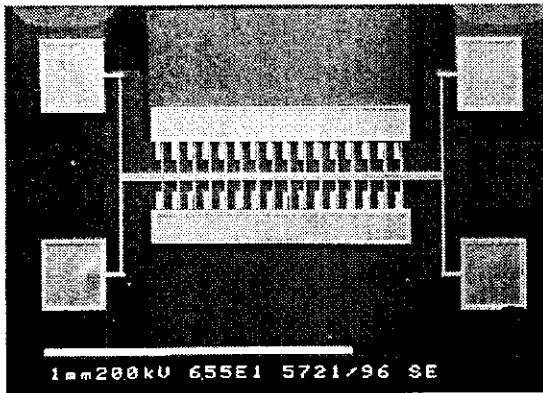
에이터(15)이다.

한편 (그림 6)은 기판과 수평으로 미소구조물을 구동시키기 위해 기판과 평행한 평면상에서 제3의 미소전극을 추가배치(그림 6a)하여 두 전극간의 전기장 분포의 비대칭성을 야기하

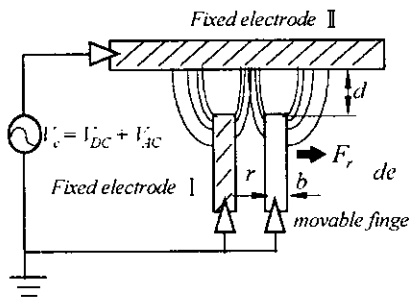
고 이로부터 유기되는 수평방향의 정전반발력을 이용하는 새로운 형태의 수평구동형 정전반발력 마이크로액추에이터[16]를 제안한 것이다. 이러한 정전반발력 마이크로액추에이터는 네 장의 마스크를 이용한 표면미세가공법으로 제작(그림 6b)되었으며, 대기압 하에서 DC 바이어스전압을 60V에서 140V까지 증가시킴에 따라 정전반발력 액추에이터의 공진주파수는



(a) 동작원리



(b) 구조도



(c) 바이어스 전압에 따른 주파수 변화

그림 6. 주파수 조절이 가능한 정전반발형 마이크로액추에이터[16]

11.7kHz에서 12.7kHz까지 증가(그림 6c)하였고 이때 평균 공진주파수 조정감도는 12.5Hz/V이었다. 60~140V의 DC 바이어스전압에 대하여 측정된 큐인자는 12에서 13까지 변화하였다. DC바이어스전압이 증가할 때 기존의 수평구동형 정전액추에이터의 경우 공진주파수와 큐인자는 모두 감소하였지만, 새로이 제안된 수평구동형 정전반발력 액추에이터의 경우 공진주파수와 큐인자가 모두 증가함을 실험적으로 입증하였다. 이러한 수평구동형 정전반발력 구동방법은 극미세 광 및 유체를 제어하기 위한 미소구조물의 공진주파수와 큐인자를 증가시키는 방향으로 조정하거나 반발력을 이용한 비접촉 구동의 구현을 가능케 한다.

3. 압전형 마이크로액추에이터

MEMS 기술을 이용한 프린터, 스캐너, 화면 표시기 등에서 극미세 광신호[3-19]와 유체[20-29]를 제어하기 위한 마이크로액추에이터가 필요하다. 그 중 미소거울을 이용한 광변조 화면 표시기(그림 7)는 광효율 향상 측면에서 관심의 대상이 되어왔으며, TI(Texas Instrument)사가 정전구동형 미소거울을 이용하여 광변조 화면표시기 DMD (Digital Micromirror Device)[17]를 개발한 이래 미소거울의 설계 및 제조공정의 개선이 꾸준히 진행되고 있으며, 최근 국내 기업체에서도 압전구동형 거울을 이용한 광변조 화면표시기[18] 개발에 성공한 바가 있다.

이처럼 다수의 미소거울을 이용한 광변조 화면표시기의 제품화를 위해서는 미소 거울의 구동성능 및 수율의 균질성과 재현성 유지가 필수적이다. 특히 다층박막 구조물을 사용하는 화면표시기의 경우, 다층박막의 잔류응력에 의해 미소 구조물의 초기변형이 발생하기 쉬우며, 이러한 초기변형의 크기와 불균질성은 미소거울의 성능 및 수율의 균질성 유지에 심각한

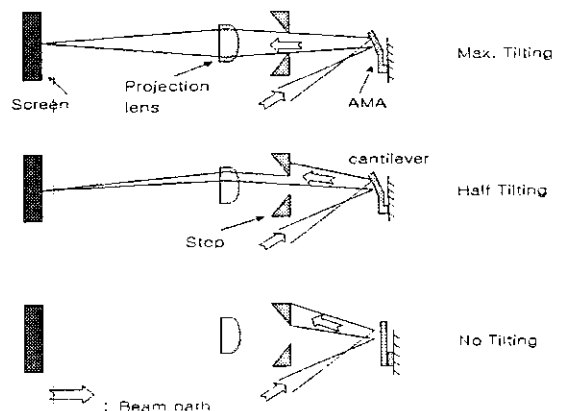
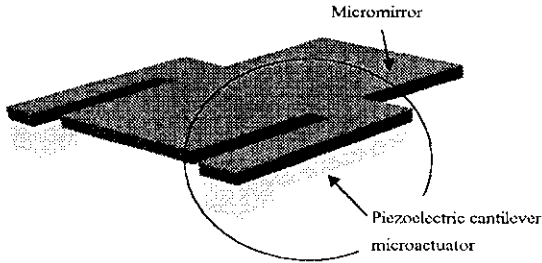
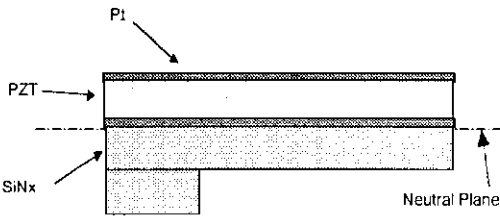


그림 7. 반사형 대화면 디스플레이[19]



(a) 입체도

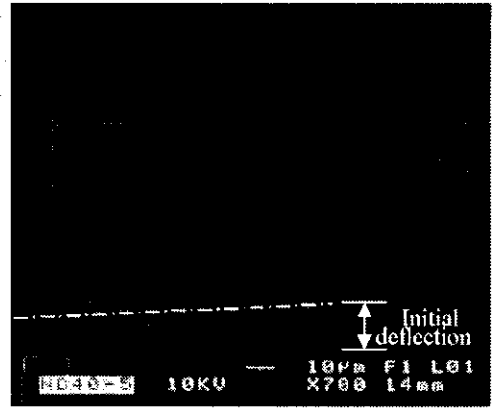


(b) 단면도

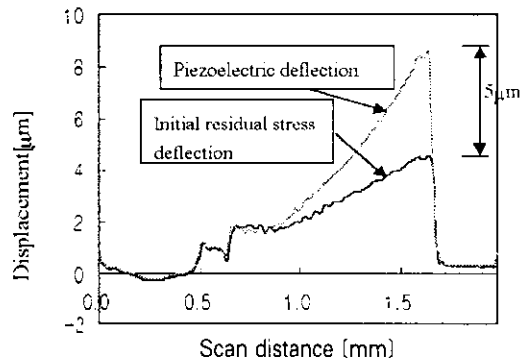
그림 8. 다층박막 압전구동 거울 및 마이크로액추에이터[19]

문제를 발생시킬 뿐 아니라 화면표시기의 광변조 성능과 수명을 줄이는 결과를 초래한다. 따라서 다층박막 구조물을 이용한 화면표시기의 경우, 균질성과 재현성 향상을 위하여 박막 내부의 잔류응력 조절이 매우 중요하다.

(그림 8)에서는 광변조용 압전 다층박막 액추에이터의 구조와 잔류응력을 조절함으로써 미소거울의 구동성능의 저하없이 초기변형을 최소화할 수 있는 다층박막 액추에이터[19]를 소개한다. 압전형 다층박막 마이크로액추에이터는 RIE 공정에 의해 형성된 지지부와 LPCVD 공정에 의한 실리콘 질화막, 그리고 0.1 μm 두께의 백금막이 바닥전극으로 구성되어 있으며, 압전박막으로는 PZT층을 증결 방식으로 형성하고 그 후속 공정으로 다시 0.05 μm 의 위쪽 백금전극을 증착한 후 RIE 공정을 통하여 외팔보 액추에이터의 형상을 제작하였다. 본 연구에서는 기존의 실리콘 질화막 공정조건의 변화를 통해 실리콘 질화막의 잔류응력을 195MPa에서 610MPa로 변화시키고, 실리콘 질화막의 두께를 기존 0.4 μm 에서 0.5 μm 로, PZT의 경우는 기존 0.4 μm 에서 0.3 μm 로 변화시켰다. (그림 9)에 도시한 바와 같이 기존의 소자와 개선된 소자를 대상으로 외팔보형 구동부의 길이 방향으로의 초기변형 및 압전 구동변형을 광학 표면 측정기(UBM)를 이용하여 측정하였다. 개선된 마이크로액추에이터의 초기변형은 1.5 μm ~3.4 μm 범위로 측정되었고 평균 2.1 μm 의 변형을 보였으며, 기존의 구조와 공정에 의한 외팔보의 초기변형의 평균치(9.2 μm)에 비하여 77%가 감소하였으며 분포의 균일성도 개선되었다. 또한 외팔보 미소액추에이터



(a) 제작도



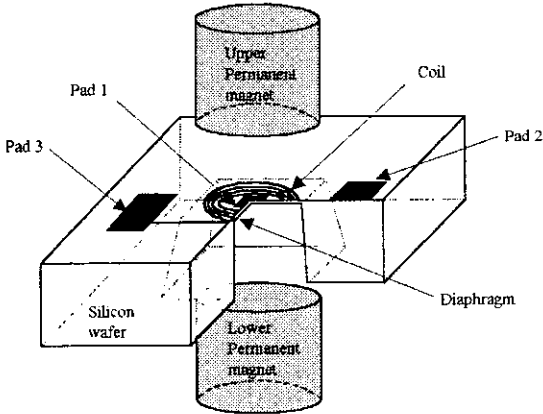
(b) 초기변형 및 구동변위 측정

그림 9. 압전형 마이크로액추에이터의 성능측정[19]

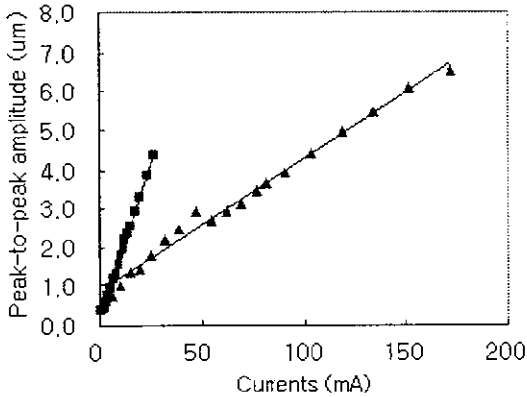
에 DC 7V가 가해졌을 때 두 경우 모두 공히 5 μm 의 변위를 얻었다. 이러한 다층박막 액추에이터의 설계 및 제조공정 기술은 다층박막으로 구성된 MEMS 구조물의 초기변형 최소화과 균질성 향상에도 응용이 가능하다.

4. 전자기형 마이크로액추에이터

(그림 10)은 극미세 바이오유체의 이송 및 제어[20-29]를 위해 방사형 자기장과 전기도금된 평면코일을 이용한 전자기형 마이크로액추에이터[26]이다. 본 액추에이터(그림 10a)는 구동력이 평면코일 반경방향의 자기장 성분에 비례하게끔 고안되었으며, 또한 박막의 아래위로 자석을 대칭적으로 배치하여 반경 방향의 자속밀도를 증가시킴으로써 구동력 증대를 꾀하였다. 본 마이크로 액추에이터는 4.06mm 4.06mm 3.1 μm 크기의 박막위에, 폭 20 μm , 높이 28.8 μm , 간격 30 μm 로 10회 감겨진 코일을 전기도금하여 제작하였다. 제작된 액추에이터의 성능시험을 통해 측정된 공진주파수와 특성인자의 값은 아



(a) 구조도



(b) 전류변화에 따른 구동진폭 변화

그림 10. 대칭적 자석배치를 이용한 전자기형 마이크로액추에이터(26)

래쪽에 자석을 하나만 부착하였을 경우(10.5kHz와 45.9)와 아래위로 자석을 부착하였을 경우(10.5 kHz와 46.6) 모두 근접한 결과를 얻었다. 그러나 동적변위는 26.8 mA의 실로치 교류전류를 흘렸을 때 두개의 자석을 부착한 경우에서 4.4 μ m로 측정되었으며, 이는 한 개의 자석을 부착한 경우에 비해 2.4 배 정도의 변위를 발생시킴을 실험적(그림 10b)으로 확인하였다. 따라서 본 전자기형 마이크로액추에이터는 저온, 저전류, 저전압 구동 특성을 나타내고 있으며, 대칭적 자석 배치를 통해 방사형 전자기장의 자속밀도를 증가시킴으로써 기존의 단일자석 구조에 비해 구동력 증대를 꾀하였다.

5. 열공압형 마이크로액추에이터

(그림 11)은 고압, 극미세 유량제어에 필요한 마이크로액추

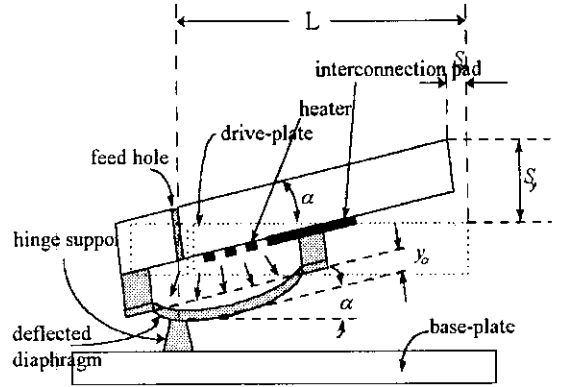
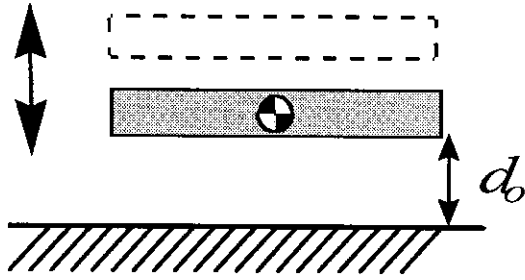


그림 11. 박막의 변형 기술을 이용한 열공압형 마이크로액추에이터(29)

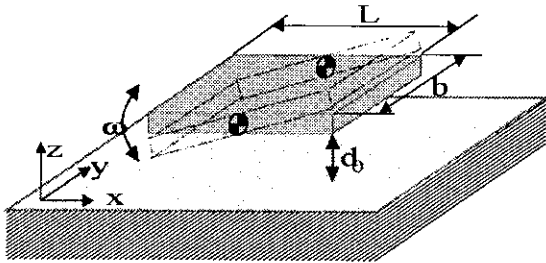
에이터⁽²⁹⁾로서, 밀리미터 범위의 장행정 (long-stroke) 구동을 구현하기 위하여, 박막의 변형 각도를 이용한 열공압형 마이크로액추에이터이다. 평평한 박막과 주름진 박막의 대변형 특성을 해석하였으며, 그 결과 변형의 선형성 측면에서는 주름진 박막이 우수하지만, 단위 변형당 응력발생 측면에서는 평평한 박막이 유리한 것으로 분석되었다. 1 mm 이상 구동변위를 가지는 마이크로액추에이터의 크기와 재료를 설계하였으며, 두께 150 μ m 반지름 1 cm인 베릴륨동 박판과 초기 부피 94.2 mm³인 밀폐된 공동을 설계하였다. 또한, 공동의 내부에 탄탈륨 열선과 팽창물질인 perfluoro normal-hexane (FC-72)를 사용하였으며, 열선과 전기적 연결부위는 표면미세 가공법으로 그 나머지 부분들은 밀링, 샌드블러스터, 전기방전가공 등 기존의 정밀가공법을 이용하였다. 12 V의 직류전원을 2분 동안 탄탈륨 열선에 공급한 결과, 본 액추에이터로부터 400 μ m의 박막변형과 2도의 변형각도를 얻었으며, 이를 이용하여 최종적으로 1.2 mm의 구동판의 행정을 얻었다.

6. 마이크로액추에이터 특성조정 및 개발시 고려점

MEMS기술에 의해 제작된 마이크로액추에이터는 기판에 인접한 위치에서 구동하게 되며, 마이크로액추에이터의 상대운동(그림 12)의 방향에 따라 1) 수직운동, 2) 수평운동, 3) 회전운동 등 세 경우로 대별된다. 이처럼 기판에 인접하여 움직이는 마이크로액추에이터의 동적 거동은 주로 주위 유체의 점성감쇠(30-33)에 의해 지배된다. 특히 동적 거동특성이 주어진 주파수 영역에서 조절되어야 하는 MEMS소자의 경우 주위의 공기에 의한 점성감쇠가 매우 중요하게 된다. 따라서 공기감쇠 특성에 대한 이해는 변위 및 주파수 응답특성에 민감한 마이크로액추에이터의 설계와 성능향상에 매우 중요한 기반을 제공한다.



(a) 수직 및 수평 구동



(b) 회전구동

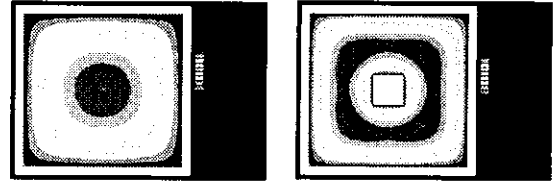
그림 12. 마이크로엑추에이터의 구동방향

AR	No. of holes		
	H1	H4	H9
3.4 %			
6.8 %			
13.6 %			

그림 13. 구멍의 크기와 수량이 다른 다공평판(32)

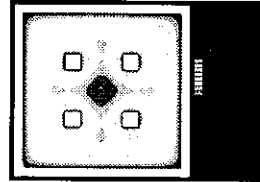
먼저 기판에 수평으로 진동하는 평면 엑추에이터의 경우, 엑추에이터의 상하부 공기층에 의한 점성감쇠 특성이 달라지게 됨은 이미 실험적 연구(30, 31)를 통해 밝혀졌다. 한편 수직 운동에 관한 미소영역에서의 공기감쇠에 대한 기존의 연구는 기판과 막힌 평판 사이의 유체 압축 영향과 점성감쇠 현상에 집중되었으나, 최근 표면미세가공기술에 의해 제작되는 평판 구조물의 대부분은 공기감쇠를 줄이고 회생층 제거공정의 편의를 위해 다공평판 형태를 취하고 있어 다공평판을 대상으로 한 점성감쇠 연구가 요구되고 있다.

본 연구팀에서는 다공평판의 수직운동에 관한 점성감쇠 연

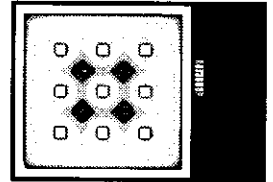


(a)

(b)

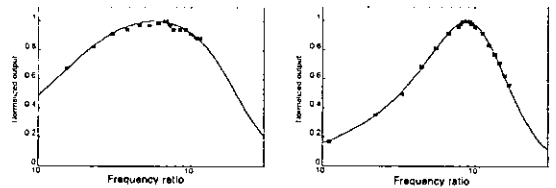


(c)



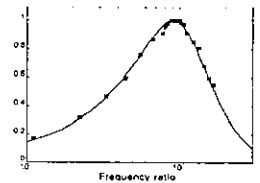
(d)

그림 14. 유한요소해석에 의한 수직구동 다공평판의 압력분포(32)

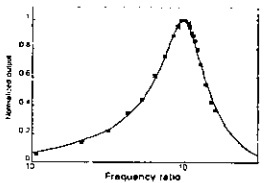


(a)

(b)



(c)



(d)

그림 15. 마이크로엑추에이터의 동적거동 특성곡선 및 감쇠계수의 추출(33)

구(32)를 수행하였으며, 기판과 수직인 다공평판 운동의 주파수 응답을 측정하기 위하여, 무공평판과 (그림 13)에 도시한 9종의 다공평판을 포함하여 총 10종의 시험구조물을 제작하고 이에 대해 20V(peak-to-peak)의 구동 정전압의 주파수를 500 Hz에서 30 kHz까지 변화시키며 평판의 구동진폭을 관찰하였다. 이때 모든 감쇠시험은 대기압 및 20℃의 상온에서 수행하였으며, 평판의 정전구동 시험에서 측정된 동적 거동으로부터 감쇠비(ξ)를 추출하였다. (그림 14)에서는 (그림 13)과 같은 시험구조물에 대하여 유한요소해석으로부터 얻은 이론적 Q-factor와 실험적으로 측정된 감쇠비(그림 15)에서 구한 Q-factor를 상호 비교하였다. 먼저 무공평판의 경우, 유한요소 해석에 의한 결과($Q=0.27$)가 실험치($Q=0.18 \pm 0.2$) 보다 약간 높게 나타났으나, 상호 크기는

비교적 잘 일치하였다. 그러나 다공평판의 경우, 유한요소 해석에 의한 이론적인 Q-factor는 실험치 보다 아주 작게 예측되었으며, Q-factor의 이론치와 실험치간의 불일치 정도가 구멍의 수나 면적비(AR)가 증가함에 따라 그 불일치도가 크게 증가함을 알 수 있었다. 이는 미소영역에서의 다공평판 아래의 공기층의 압력은 평판 혹은 구멍의 경계에 따라 어느 정도 속도를 가지게 되므로 압력 0의 조건을 유지하지 못함에 반해 경계 속도가 0임을 가정한 유한요소해석의 Q-factor 예측치는 실제 Q-factor보다 훨씬 높게 나타난다. 따라서 다공평판의 공기감쇠 현상을 적절히 예측하기 위해 다공평판의 경계를 따라 압력을 구할 수 있는 방안 및 고차원의 유한요소 해석이 필요하다.

한편 회전운동의 점성감쇠[33]인 경우, 다음의 두 가지로 다시 세분된다. 1) 기판과 멀리 떨어진 공중 회전운동(Off-substrate rotation), 즉 운동 거리가 마이크로액추에이터의 표면과 기판 사이의 간격에 비해 작은 경우와 2) 기판인접 회전운동(On-substrate rotation), 즉 운동 거리가 마이크로액추에이터의 표면과 기판 사이의 간격에 가까운 경우의 두 가지로 분류된다. 이중 기판에 인접한 마이크로액추에이터의 회전운동 특성은 기판과 마이크로액추에이터 사이에 존재하는 유체의 감쇠영향을 더욱 크게 받게 된다. 따라서 기판인접 회전운동 마이크로액추에이터(그림 1)의 회전운동 특성은 점성감쇠에 의해 결정된다.

기존 회전 미소거울의 점성감쇠 연구는 주로 공중회전의 경우에 한하여 진행되어 왔으며, 기판인접의 경우에 관한 점성감쇠 연구가 미흡한 상태이다. 이에 본 연구팀에서는 두 가지 서로 다른 크기의 회전 점성감쇠 시험구조물을 설계, 제작한 후 제작된 시험구조물로부터 상온 대기압에서 감쇠상수를 측정하고, 유한요소법에 의한 예측치와 비교하는 연구를 수행하였다. 우선, 단면적 $4 \times 4 \mu\text{m}^2$, 길이 250 μm 인 사각 비틀림 보에 의해 지지된 크기 $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ 인 회전평판(T1)과 단면적 $4 \times 4 \mu\text{m}^2$, 길이 62 μm 인 사각 비틀림 보에 의해 지지된 크기 $113 \times 113 \mu\text{m}^2$ 인 회전평판(T2)에 대하여, 먼저 유한요소해석에서는 변의 길이 4 μm 인 8개의 노드를 가진 45개의 solid block 요소를 사용하여 두 종류의 시험구조물의 공진주파수를 각각 $97.8 \pm 9.7 \text{ kHz}$ 와 $101 \pm 10 \text{ kHz}$ 로 예측하였고, 감쇠계수는 각각 1.01 ± 0.1 와 8.06 ± 0.81 로 예측하였다. 실험을 통해서 측정된 공진주파수는 $85.0 \pm 0.7 \text{ kHz}$ 와 $88.5 \pm 2.5 \text{ kHz}$, 감쇠계수는 각각 1.21 ± 0.03 과 8.68 ± 0.56 이었다. 즉 공진주파수의 측정치는 이론치보다 15% 정도 낮게 측정되었다. 또한 감쇠계수의 측정치는 이론치에 비해 10% 정도 높게 나왔으며, 서로 다른 크기의 두 종류의 시험구조물에서 측정된 감쇠계수의 상대 비는 7.2 정도인데 이론적인 상대 비는 8.0이었다. 이는 감쇠계수의 이론적인 계산에서 미소거울의 경계부분의 유체 압력을 0으로 가정하였기 때문에 판

단되며, 실질적으로 미소거울의 경계부분에서 유체의 압력이 0이 아니어서 감쇠계수의 실험치가 이론치에 비해 큼과 동시에 측정된 감쇠계수의 상대 비가 이론치에 비해 작은 것으로 판단된다.

7. 맺음말

미래 극미세 광 및 유체 형태의 정보매체를 이용한 새로운 개념의 지식정보제품 개발을 위해서는 극미세 광 및 유체부품 뿐만 아니라 이들 극소형 부품의 정교한 구동을 통해 광 화학 생물학적 극미세 정보매체를 효율적으로 가공 활용할 수 있는 고정도 마이크로액추에이터기술의 근원적 확보가 필연적으로 요구되고 있다. 지금까지 MEMS 연구는 주로 기계부품의 극소화 가공기술과 이를 이용한 감지소자의 극소화 개발에 집중하여 온 반면, 최근에 와서 새로운 액추에이터의 개발에 관한 연구가 본격적으로 진행되고 있다. 극미세 광 및 유체 제어를 위한 고정도 마이크로액추에이터 연구는 관련 물리현상의 특성, 가공소재 및 물성, 가공공정에 의한 크기 및 형상 제한, 가공공차 등을 고려하여 신중히 진행되어야 하며, 이는 극미세 영역에서의 과학기술적 지식과 새로운 공학적 지식간의 연결 고리(mapping)를 발견하고자 하는 시도이다. 또한 기계, 전자, 재료 등 “응용공학”과 물리, 생물, 화학 등 “기초과학”간의 고도의 기술융합을 통한 초분자적 혁신기술 창출이 요구된다.

세부적으로는 주파수 조정 등을 통한 구동특성의 균질성과 안정성을 향상시키고 동시에 점성감쇠 등 극미세 물리현상의 원리규명과 극미세 소재 특성에 관한 실험자료 축적 그리고 이를 근거로 한 새로운 구동원리의 발굴을 통해 고정도 마이크로액추에이터에 관한 기술돌파구(breakthrough) 마련이 필요하다. 또한 현재 과학과 공학사이의 미개척 기술영역에서 미시공학(microengineering)이라는 새로운 특화연구분야의 개척과 극미세 영역에서의 광대한 기술공간과 원천기술 기반을 확보함으로써 미래산업에 필요한 실용적이고 검증된 과학기술의 근원을 형성할 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 또한 이러한 고성능 극미세 액추에이터의 구현기술은 기존 첨단기술인 반도체, 정보통신, 마이크로 센서 기술과 결합되어, 미래 지식정보 산업분야에서 새로운 개념의 극소형 첨단 제품 창출과 성능 고도화, 나아가 신규 기술시장 개척과 함께 관련 첨단산업의 경쟁력 향상에 주도적 역할을 담당할 것이다.

참고문헌

- [1] 조영호, “MEMS 기술의 배경 현황 및 전망.” 대한전기학회 MEMS연구회 학술발표회 논문집, 1995, pp. 43-48

- [2] Y.-H. Cho, "Wireless Distributed Systems for Microenergy Information," Proc. 5th World Micromachine Summit, Glasgow, UK (May. 1999)
- [3] R.A. Miller, Y.-C. Tai, G. Xu, J. Bartha, and F. Lin, "An Electromagnetic MEMS 2×2 Fiber Optic Bypass Switch,," Tech. Dig. of Transducers '97, Chicago, 1997, pp.89-92
- [4] C. Marxer, M.-A. Gretillat, N.F. de Rooji, R. Battig, O. Anthamatten, B. Valk, and P. Vogel, "Vertical Mirrors Fabricated by Reactive Ion Etching for Fiber Optical Switching Applications," Proc. IEEE MEMS Workshop, Japan, 1997, pp.49-54
- [5] L.A. Field, D.L. Burriesci, P.R. Robrish, and R.C. Ruby, "Micromachined 1×2 Optical Fiber Switch," Tech. Dig. of Transducers '95, Sweden, 1995, pp.344-347
- [6] S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama, "An Integrated-Optic Pickup Device, J. Lightwave Technology, Vol. LT-4, No.7 (1986) 913-918.
- [7] T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama, "Waveguide Holograms: A New Approach to Hologram Integration, Opt. Commun., Vol.19 (1976) 353-358.
- [8] M. Miler and M. Skalsky, "Chirped and Curved Grating Coupler Focusing both Outgoing Beam and Guided Wave," Opt. Commun., Vol.33 (1980) 13-16.
- [9] H. Nishihara, M. Haruna and T. Suhara, Optical Integrated Circuits, McGraw-Hill, 1989
- [10] Y.-H. Jin, K.-S. Seo, Y.-H. Cho, S.-S. Lee, K.-C. Song, and J.-U. Bu, "An SOI Optical Microswitch integrated with Silicon Waveguides and Touch-down Micromirror Actuators," Submitted to Proc. 3th Int. Conf. Optical MEMS 2000 (MOEMS'2000), Kauai, U.S.A. (Aug 21-24 2000)
- [11] R.A. Soref, et al., "Large Single-Mode Rib Waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂," IEEE J. of Quantum Electronics, Vol.27, No.8(1991) pp.1971-1974
- [12] R. Legtenberg, et al., "Electrostatic Curved Electrode Actuators," MEMS'95, pp.37-42.
- [13] K.-S. Seo, Y.-H. Cho and S.-K. Youn, "A Tunable Optomechanical Micromirror Switch," Sensors and Materials, Vol.10, No.3 (1998) pp.155-168.
- [14] Y.-H. Cho, Design, Fabrication and Optimization of Micromechanical Flexures, Ph.D. Dissertation, Dec. 1990, University of California at Berkeley, U.S.A.
- [15] K.B. Lee and Y.-H. Cho, "A Triangular Electrostatic Comb Array for Micromechanical Resonant Frequency Tuning," Sensors and Actuators, Vol.A70 (1998) pp.112-117.
- [16] K.B. Lee, and Y.-H. Cho, "Electrostatic Repulsive-force Microactuators using Lateral Electrostatic Field Asymmetry," Proc. Actuator 2000, International Conference on New actuators, Bremen, Germany (June 19-21 2000)
- [17] J.B. Sampsell, "An Overview of the Performance Envelop of Digital Micromirror Device Based Projection Display System," SID '94 Digest, pp. 669-672, 1994.
- [18] S.K. Kim and K.H. Hwang, "Micromachined Thin Film Mirror Array for Reflective Light Modulation," CIRP Annuals, vol. 46/1, pp. 455-458, 1997.
- [19] M.-J. Kim, Y.-H. Cho, "Design, Fabrication and Characterization of Piezoelectric Multi-layer Cantilever Microactuators for the Minimum Initial Deflection," Proc. 10th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '99), Sendai, Japan (June 7-10, 1999) pp.1758-1761
- [20] M. A. Huff, M. S. Mettner, T. A. Lober and M. A. Schemidt, A Pressure-Balanced Electrostatically-Activated Microvalves, Proc. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, 1990, pp.123-127.
- [21] H. Jerman, Electrically-Activated Micromachined Diaphragm Valves, Proc. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, 1990, pp.65-69.
- [22] K. Yanagisawa, H. Kuwano and A. Tago,

- An Electromagnetically Driven Microvalve, Proc. 1993 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 93), Yokohama, Japan, 1993, pp.102-105.
- [23] B. Wagner and W. Benecke, Microfabricated Actuator with Moving Permanent Magnet, Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan, 1991, pp.27-32.
- [24] J. Behrens, A. Meckes and W. Benecke, Micropump and -Valves with Electromagnetic Actuation, Micro System Technologies 96, Potsdam, Germany, 1996, pp.820-822.
- [25] Meckes, J. Behrens and W. Benecke, A Microvalve with Electromagnetic Actuator, Actuators 98, Bremen, Germany, 1998, pp.152-155.
- [26] J.-C. Ryu, T.G. Kang and Y.-H. Cho, "A New Transverse Electromagnetic Microactuator using the Radial Magnetic Field Guided by Symmetric Twin Magnets," Proc. Symposium on Micromechanical Systems, Inter. Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'99), ASME, Livermore, California, U.S.A. pp.105-109 (Nov 14-19 1999)
- [27] S. Shoji, Fluids for Sensor Systems, Topics in Current Chemistry, Vol.194 (1998) 163-188.
- [28] T. S. J. Lammerink, M. Elwenspoek and J. H. J. Fluitman, Integrated Micro-Liquid Dosing System, Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, Florida, 1993, pp.245-59.
- [29] T.G. Kang, K.-S. Seo, Y.-H. Cho, O H. Baek, W. L. Hwang and J. H. Moon, "A Long-Stroke Thermopneumatic Actuator for Applications to Microflow and Pressure Regulation," Proc. Actuator '98, International Conference on New actuators, Bremen, Germany (June. 1998) pp.62-65.
- [30] Y.-H. Cho, A.P. Pisano and R.T. Howe, "Viscous Damping Model for Laterally Oscillating Microstructures," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.3, No.2 (1994) pp.81-87.
- [31] K.B. Lee and Y.-H. Cho, "Electrostatic Control of Mechanical Quality Factors for Surface-micromachined Lateral Resonators," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.6 (1996) pp.426-430.
- [32] E.-S. Kim, Y.-H. Cho and M.-U. Kim., "Effect of Holes and Edges on the Squeeze Film Damping of Perforated Micromechanical Structures," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '99), Orlando, FL, U.S.A. (Jan. 1999) pp.296-301.
- [33] E-S. Kim, Y.-H. Cho, "Viscous Damping of On-Substrate Torsional Micromirrors," Proc. 3th Int. Conf. Micro Opto Electro Mechanical Systems (MOEMS'99), Mainz, Germany (Aug 30 - Sep 1 1999) pp.11-16

저 자 약 력

성명 : 조 영 호

❖ 학 력

1880년 영남대학교 기계공학과(학사)
 1982년 KAIST 기계공학과(석사)
 1991년 미국 버클리대 마이크로머신(MEMS)(박사)

❖ 경 력

1982년-1986년 KIST CAD/CAM 연구실 연구원
 1987년-1990년 미국 버클리대 Berkeley Sensor & Actuator Center (BSAC) Research Assistant
 1991년 미국 버클리대 BSAC Post-doctoral Research Associate
 1991년-1994년 KAIST 기계기술연구소 선임연구원
 1994년-현재 KAIST 기계공학과 조교수, 부교수
 2000년-현재 창의적연구진흥사업 디지털나노구동연구단 단장