



# 최근 Micro Piezoelectric Actuator 연구 동향

박준식\*, 박효덕\*, 강성군\*\*

\*전자부품연구원, \*\*한양대

jspark@keti.re.kr

## 1. 서론

최근 micro structure, micro sensor, micro actuator 및 microelectronics 등을 활용하는 microelectromechanical systems (MEMS) 기술은 마이크로 로봇, micro manipulation, 광학 소자 및 시스템, 유체, 열, 바이오 및 화학 공정 등을 위한 시스템 그리고 atomic force와 scanning tunneling microscope 등에 사용되는 다양한 소자 등 많은 잠재력을 가지고 있다. 이들 응용 분야 들은 micro actuator와 같은 mechanical power source가 요구되는 경우가 있다. 압전 특성을 포함하는 강유전체 재료는 이러한 micro actuator를 위해 여러 가지 다양한 장점을 지니고 있는데, 이들을 정리하면 다음과 같다.<sup>1)</sup>

- PZT와 같은 재료의 경우 큰 압전 상수를 갖기 때문에 적당한 입력 전압 하에서도 큰 변위를 나타낼 수 있다.<sup>2,3)</sup>
- Relaxor 강유전체의 경우 큰 유전 상수를 갖기 때문에 큰 electrostrictive strain과 minimal hysteresis를 갖는다.<sup>3)</sup>
- 강유전체 재료는 비휘발성 메모리 및 imaging 등 다른 응용 분야에서 많은 연구 결과들을 갖고 있다.

한편, 이상의 장점뿐만 아니라 actuator 응용에 있어서 다음과 같은 단점도 갖고 있다.

- hysteresis
- creep
- 압전 상수의 fatigue
- 취성 탄성 거동
- 제한적인 변형률 (0.1%)
- 제한적인 기계 강도

그러나, 현재까지 연구된 결과에 의하면 강유전체에 기초된 actuator의 장점들은 부정적인 특성들을 극복하고 있는 많은 증거들이 있다. 그러한, actuator의 예를 들면 아래와 같다.

- Rainbow actuator<sup>5)</sup>
- Moonie, cymbal actuators<sup>6,7)</sup>
- Inchworm motors<sup>4,8)</sup>
- Ultrasonic motors<sup>9-11)</sup>
- Membrane based pumps<sup>12-14)</sup>
- Quasi-shear actuator<sup>15)</sup>
- Meanderline actuator<sup>16,17)</sup>
- Unimorph trellis actuator<sup>18,19)</sup>
- Recurve actuator<sup>20)</sup>
- Ultrasonic pumps, atomizers<sup>21-23)</sup>
- Piezoelectric cantilevers<sup>3,4,24,25)</sup>

본 논문에서는 우선 다양한 micro actuator의 종류 및 기구에 대해 기술하고, 이상에 언급된 다양한 micro piezoelectric actuator 응용 분야 중 일부이기는 하나, 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 MEMS 공정과 압전 재료인 PZT, AlN 등을 이용한 micro piezoelectric actuator에 대한 연구 개발 동향에 대해 언급하고자 한다.

## 2. Micro Actuator의 종류 및 구동 기구

### (1) Micro actuator의 구동 기구들

Micro actuator는 일반적으로 전기적 (혹은 다른) 에너지를 기계적 에너지로 변환시킨다. 불행히도, 완전한 actuator 기술은 없으나, 제조상의 복잡성, 환경에 대한 내구성, 움직임의 범위, 견딜 수 있는 힘 등의 목적에 맞게 특성화할 수는 있다. 이상적인 actuator는 작은 힘을 소비하고, 높은 기계적 효율성을 지녀야 하고, 기계/환경적 조건을 잘 견뎌야 하고, 필요하다면 빠른 작동도가

Table 1. Linear Actuator Materials. After Hunter and Lafontaine (1992)<sup>27</sup>. The Authors Noted that the Values Provided did not always Represent Optimal Materials, as Development is Active in many of these Categories and that the Power Needed for Accessory Systems, Such as Cooling, were not Included in the Calculations

Type of Actuator	Stress(MPa)	Strain(%)	Strain Rate(Hz)	Power Density(W/kg)	Efficiency(%)
Electrostatic (macroscopic composite)	0.04	>10	>1	>10	>20
Cardiac Muscle (human)	0.1	>40	4	>100	>35
Polymer (polyacrylic acid/polyvinyl alcohol)	0.3	>40	0.1	>5	30
Skeletal Muscle (human)	0.35	>40	5	>100	>35
Polymer (polyaniline)	180	>2	>1	>1,000	>30
Piezoelectric Polymer (PVDF)	3	0.1	>1	>100	<1
Piezoelectric ceramic	35	0.09	>10	>1,000	>30
Magnetostrictive (Terfenol-D)	70	0.2	1	>1,000	<30
Shape Memory Alloy(NiTi bulk fiber)	>200	>5	3	>1,000	>3

Table 2. General Comparisons of (macroscopic) Robotics Motors and Human Skeletal Muscle, in Terms of Torque/mass and Power/mass Ratios. After Hollerbach, et al. (1991)<sup>28</sup>

Type of Motor	Torque/Mass (N · m/kg)	Power/Mass (W/kg)
Sarcos Dextrous Arm (electrohydraulic)	120	600
McGill/MIT Electromagnetic Motor	15	200
Polyacrylic Acid/Polyvinyl Alcohol Polymeric Actuator	17	6
NiTi Shape Memory Alloy	20	6
Human Biceps Muscle	20	50
Burleigh Piezoelectric Inchworm	3	0.1

능해야 한다. 무게에 따른 힘의 비율이 높아야 하고, 힘/비틀힘(torque)/속력 사이에 직선적 비례 관계가 있어야 하며 물론 이러한 특성을 제어할 수 있어야 한다. 실제에서는 이 모든 사항들이 필요한 것은 아니다. 일례로, 근육조직과 같이 온도 변화에 항상 견딜 수 있는, 느리지만 강한 actuator를 필요로 할 수도 있다.<sup>26)</sup>

## (2) Electrostatic Actuator

정전기 actuator의 기본 원리는 반대로 전도되어 있는 상판끼리의 인력이다. 이것은 Benjamin Franklin의 실험과 비슷한 원리이다. 원리에 따르면, 정전기 actuator는 비록 힘 대 전압의 관계가 비선형적이지만, 힘의 크기가 매우 작고, 제작이 용이하다. 그리고 반대 극성을 지닌 전도 상판(plates)으로 가까운 거리를 두도록 제작하는 것이 쉽기 때문에, 미세기계장치에서 널리 사용되어 왔다(Muller, 1990). 많은 경우, 전달되는 출력과 효율성이 이론에서 예상되는 값보다 훨씬 작지만(종종 굴절된 전기장이나 표면누전(surface leakage) 등에 기인), 정전기 actuator는 많은 장치들에서 매우 중요하다. 특히, actuator가 대상에

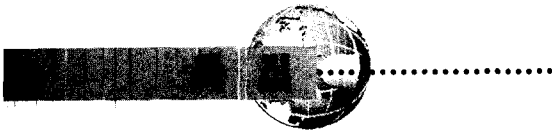
대해서 자신을 움직일 필요가 거의 없는 경우에 더 그러하다. 이러한 정전기적 actuator의 기술로는 cantilever 방식 정전기 actuator (electrostatic cantilever actuator), 비틀림 정전기 actuator (torsional electrostatic actuator), 정전기적 빗살 구동기 (electrostatic comb drive), 정전기 회전 미세모터 (electrostatic rotary micromotor), 정전기 선형 미세모터 (electrostatic linear micromotor) 등이 있다.

## (3) Thermal Actuator

열 actuator는 기본적으로 고체나 액체의 팽창을 이용하는 기술이다. 많은 종류의 기술들이 이미 개발되어 있다. 그 종류들을 살펴보면 thermal expansion of solids, bimorph thermal actuators, thermal array actuators, volume expansion 및 phase-change actuators 등이 있다.

## (4) Shape Memory Alloy Actuator

합금 중에는 열에 노출되면 눈에 띄게 길이가 늘어나는 재료가 몇 가지 있는데, 잘 알려진 것으로 NiTi 합금이 있다. 이런 재료들은 특별히 형상기억합금(shape memory alloys, SMAs)라고 불린다. 이런 몇몇 합금에 대한 최초의 관찰은 1950년대에 이루어졌는데, 기계적 변형을 거친 합금에 열을 가했더니, 변형되기 전 최초의 형태로 형태가 복원되는 것이 관찰되었던 것이다. 그 합금들은 전도성이 있었으며, 단순히 전류를 흘려주는 것으로도 열이 발생되었다. 변형이라는 것은 재료가 어떤 결정상(結晶相)에서 다른 결정상으로 변이하면서 일어나게 되는데, 이런 과정은 가열에 의해서 거꾸로 진행될 수 있다. 이런 형상기억합금의 장점은 상대적으로 선형적인 제어가 가능하고, 매우 높은 스트레스에 적용이 가능(>



200 MPa)하며, 스트레인이 2% 이내일 경우 수백만 번이라도 반복될 수 있다는 장점이 있다. 단점은 특별한 합금을 써야 할 필요가 있다는 것인데, 그런 합금들 가운데 미리 제작된 제어용 회로소자가 견디기 힘든 annealing temperature를 가진 합금인 경우도 종종 발생한다. 그리고 효율이 약 3%에 불과한 매우 높은 동력 소비가 문제가 될 수 있다. 형상기억 특성을 지닌 합금들은 Au/Cu, In/Ti, 그리고 Ni/Ti 등과 같은 재료를 사용하며, 이러한 기호에서 가장 많이 쓰인 재료를 나타내게 된다. 형상기억 효과는 합금재료가 마텐사이트 상(거의 rhombohedral phase)과 오스텐사이트(대칭성 더 높음) 상 사이를 온도에 따라 상전이하면서 나타나게 된다. 마텐사이트 상에서 NiTi 합금은 쉽게 소성변형이 이루어지며, 가열되면 오스텐사이트 상으로 환원되면서 수축한다. 열적 구동 actuator에서는 작동에 대한 시간상수가 열 시간상수에 의해서 결정된다. 그리고 그 값은 박막 미세기계구조에 적용 가능하다. 현재 몇몇 연구단체에서는 미세밸브와 다른 장비들에 사용할 actuator로 박막 NiTi를 조사하고 있다.

#### (5) Pneumatic/Hydraulic Actuator

Actuator의 동력으로 유체의 압력을 이용하는 것도 또 하나의 잠재력이 풍부한 방법이다. 미세기계적인 구조에서 보면 밸브, 유체 공학적 증폭기 (fluidic amplifier), 또는 단순한 유동구조 (flow structure)로써 작동하는 방법들이 있을 수 있다. 이미 몇몇 기구들은 “에어 하키 (air hockey)” 테이블처럼 기체의 흐름을 조절, 제어하여 대상을 떠받치는 방식으로 제작되어 있다. 그러한 actuator에서 중요하게 고려해야 할 점은 압력용기 (pressure vessel)나 일종의 펌프와 같은 압력 제공기기가 될 것이다. 그러한 기기들을 소형화하는 것이 불가능할 수도 있다.

#### (6) Piezoelectric Actuation

압전효과는 actuator에 사용될 수 있을 뿐 아니라, 센서에서도 사용할 수 있다. 압전현상에 의한 actuator에서 전기적으로 발생되는 strain은 적용되는 전기장의 크기에 거의 비례한다. 그리고 그 잠재적인 장점은 높은 스트레스 (수십 MPa), 높은 주파수 영역, 높은 bandwidth, 높은 에너지 밀도, 그리고 (형태적인 의존성 때문에) 정

전기 재료에 비해 비교적 낮은 구동전압 등이다. 단점으로는 상대적으로 복잡한 제조과정 (때때로 poling 과정을 거침)과 동일한 구동력 하에서 훨씬 작은 차원의 변화를 보인다는 점 (0.1% 또는 이하 단위의 스트레인)이다. 그럼에도 불구하고 더 큰 변위를 얻기 위해서는 압전 bimorph 구조체가 필요하다. 거시적인 장치에서는 일반적으로 다층 압전세라믹 재료가 제조되어 전위 특성을 최적화한다. 작은 스트레인을 갖는 특성을 갖고 있는 압전 actuator를 이용한 장치 가운데 흥미로운 것은 압전특성에 의해서 휘어지는 STM (scanning tunneling microscope)의 탐침이다. 전류를 나르는 tunneling tip은  $10^{-10}$  m보다 작은 거리를 상하로 움직일 수 있는 압전성 cantilever 위에 만들어진다. 이 압전 actuator는 알루미늄과 전극사이에 끼인 ZnO 막을 이용하여 만들어졌다. cantilever 그 자체는 이렇게 끼어진 적층들의 두 세트에 구성되었다. 여기서 하나의 cantilever는 tip을 평면의 안쪽과 바깥쪽으로 휘어지도록 하는 기능(tunneling 전류를 감지)을 하며, 다른 하나는 평면적 구도로 이미지를 형성하도록 tip을 주사 (scanning)하는 기능을 한다.

#### (7) Magnetic Actuators

자성 actuator의 종류는 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 자기장 actuator (magnetic field actuators)이고, 다른 하나는 자왜 actuator (magnetostrictive actuators)이다. 전류가 흐르는 도체는 자기장을 형성하게 된다. 평행한 전류가 흐르는 두 도체는 서로를 끌어당기게 되고, 반대 방향으로 전류가 흐를 경우 서로 밀쳐내게 된다. 마찬가지로 전류가 흐르는 전선 (또는 코일)도 자기장을 형성하여 자석이나 기계적 힘을 발생시키는 다른 코일에서 비롯되는 외부자기장과 상호작용을 하게 된다. 이것이 바로 자기장 actuator의 구동원리이다. 이런 원리에 의하면 U자 형태의 전선의 경우, 전류가 흐르게 되면 끝은 두 전선 사이에 척력이 발생하게 된다. 마찬가지로 유연성이 있는 전선이나 전류가 흐르는 도체는 자기장 안에서 휘어지게 될 것이고, 이때 도체와 연결되어 있는 지지대가 따라서 변위를 나타내게 될 것이다. 1840년, Joule은 니켈 막대에 길이방향으로 자기장이 형성될 경우 그 길이가 줄어든다는 사실을 발견했다. 이것이 바로 자왜 효과이다.



이것은 바로 외부의 자기장에 의해 재료의 내부에 형성되어 있는 자구 (domain)들이 정렬되고, 그 결과 재료의 실제적 크기도 변화하게 되는 원리에 의한 것이다. 니켈의 자왜는  $-0.033 \times 10^{-3}$  정도의 스트레인을 발생시키고, 몇몇 희토류 금속의 합금들은 훨씬 큰 스트레인을 발생시킬 수 있다. 예를 들면, 테르븀(Tb)-철 과 디스프로슘(Dy)-철 합금, TbFe<sub>2</sub> (Terfenol)과 DyFe<sub>2</sub>는 각각  $-2.46 \times 10^{-3}$ 과  $1.26 \times 10^{-3}$  정도의 최고 자왜 스트레인 값을 보여준다. (전)자기력의 장점은 상대적으로 강한 힘을 얻을 수 있다는 것과 당기고 밀치는 능력 두 가지를 다 지녔다는 점이다. 단점은 큰 동력 소비의 가능성과 근처의 물체(움직이는 전도된 물체나 자기적 자료 저장 매체 같은)와 의도되지 않은 상호작용이 발생할 수 있다는 것이다.

### 3. Micro Piezoelectric Actuator 연구 동향

구동 및 감지에 있어서 높은 잠재력을 갖고 있는 스마트 재료를 이용한 MEMS 분야는 매우 흥미로운 분야이다. 압전 막에 의해 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환해 주는 micro actuator 응용 분야는 매우 전망이 있다고 할 수 있다. 한 예로 micro switch 응용을 위한 압전 소자의 적용은 다른 정전, 자기 그리고, 열적인 구동 방식에 비해 에너지 손실이 적고, 응답 속도가 빠르며, 소요 면적이 작은 장점이 있다. Micro piezoelectric sensors와 actuators는 surface 또는 bulk silicon micromachining 공정 기술 등을 활용하여 매우 다양한 형태의 membranes, bridges 및 cantilevers로부터 개발되고 있다.<sup>29-34)</sup>

#### (1) Micro cantilevers 및 그 응용 소자

가장 단순한 형태의 micro piezoelectric actuator의 형태가 micro cantilever이다. 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있는데, non-piezoelectric layer 상에 압전 막을 형성하는 unimorph 구조와 전극을 사이에 두고 위, 아래에 압전 막을 형성하는 bimorph 형태이다. bimorph 형태가 동일한 전압 하에서 unimorph에 비해 두 배의 변위와 힘을 갖게 된다. 이들 micro cantilever beam은 cantilever based flap valve를 구동시키기에 충분한 수직 운동과 힘

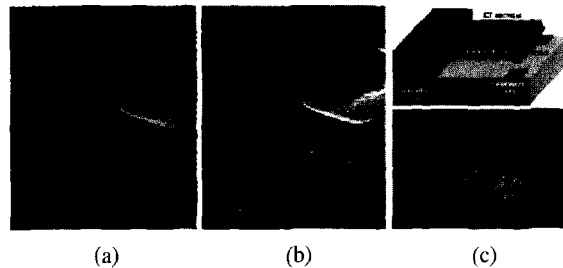


Fig. 1. Piezoelectric d<sub>33</sub> mode cantilever. (a) before and (b) after applying voltages. (c) Schematic illustration of unimorph switch and SEM image of 130-nm cantilever switch with transmission lines.<sup>35,36)</sup>

을 가지고 있다.<sup>12,24)</sup> 일례로 미네소타대학의 D. L. Polla 등에 의하면 길이 100 μm와 폭 50 μm의 micro cantilever를 1.5 μm silicon nitride 상에 0.35 μm의 두께로 제조한 경우 25 V 구동 시 약 3 μm의 변위를 나타내었다.<sup>12)</sup>

Pennsylvania state 대학의 S. Trolier-McKinstry 등은 Bulk 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용하여 d<sub>33</sub> 방식으로 작동되는 압전 cantilever를 제조하였고 실험을 토대로 실제로 응용 가능한 기계적 스위치를 제조하였다.<sup>35,36)</sup> Fig. 1 (a)는 MEMS 공정으로 제작된 micro cantilever의 실제 모습을 나타낸 것이고 (b)는 전압을 인가하여 구동된 상태의 cantilever를 보여주고 있다. 280 μm 길이를 가지는 cantilever에 100 V의 전압을 인가한 경우 cantilever tip의 변위는 최대 30 μm를 나타낸 것으로 보고하였다. Fig. 1(c)는 이를 이용한 마이크로 스위치의 모식도와 실제 모습을 나타낸 것이다.

Micro cantilever beam은 또한 scanning tunneling microscope (STM) 및 atomic force microscope (AFM)의 위치 감지 tip을 제조하는데 활용된다. LG 기술원의 H. J. Nam 등은 PZT로 제조된 cantilever의 tip에 heater를 제작하여 나노미터 크기로 고분자 물질을 패터닝하여 나노 저장 장치로 응용하는 방법을 개발했다.<sup>37)</sup> Fig. 2 (a)에 제조된 PZT cantilever의 구조를 나타내었고 (b)에 제조된 cantilever를 이용하여 PMMA (PolyMethylMethAcrylate) 표면에 데이터 이미지를 저장한 상태를 AFM으로 본 사진이다.

#### (2) Micro valve 및 pump

압전 미세 구조물 중에서 많이 응용되는 구조의 하나는 membrane 구조이다. 이를 이용하면, 두꺼운 구조물에서

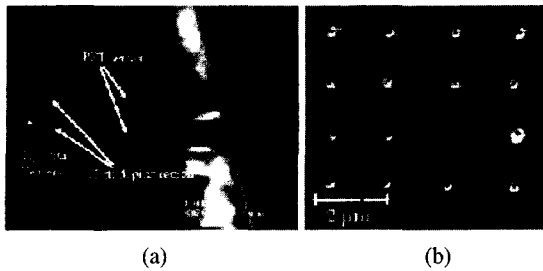


Fig. 2. (a) SEM images of the PZT cantilever with resistive heater. (b) AFM image of sample data tracks written on PMMA Substrate.<sup>37)</sup>

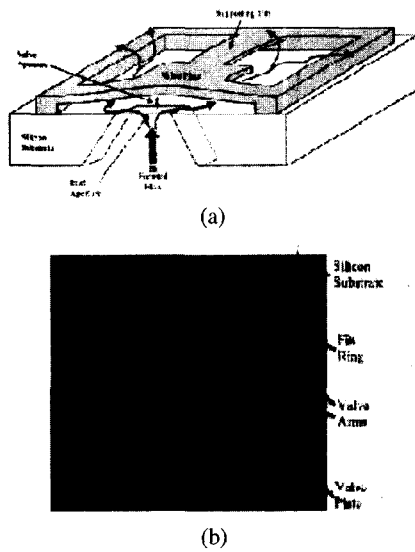


Fig. 3. Schematic diagram (a) and SEM image (b) of piezoelectric micro valve.<sup>38)</sup>

어려웠던 큰 변위를 얻을 수 있고 구동 중 발생하는 열을 쉽게 발산시킬 수 있을 뿐 아니라, heater로 응용할 경우 낮은 구동 전압으로도 높은 온도를 올릴 수 있는 등의 장점을 얻을 수 있다. 압전 membrane을 응용한 가장 좋은 예가 바로 미세 유체 소자로 응용되는 미세 펌프나 밸브이다.

Queen 대학의 H. S. Gamble 등은 압전 membrane을 이용한 유체 밸브를 제작하였고 그 모식도와 실제 소자를 Fig. 3에 나타내었다.<sup>38)</sup> MIT의 David C. Roberts 등은 Fig. 4에 나타낸 것처럼 membrane 구조물을 이용하여 압전 피스톤 구조를 가지는 총 9 층 구조로 이루어진 미세 압전 펌프를 개발하기도 하였다.<sup>39)</sup>

### (3) Micro mirror

압전 actuator를 광학 스위치에 응용하기 위해서는 회

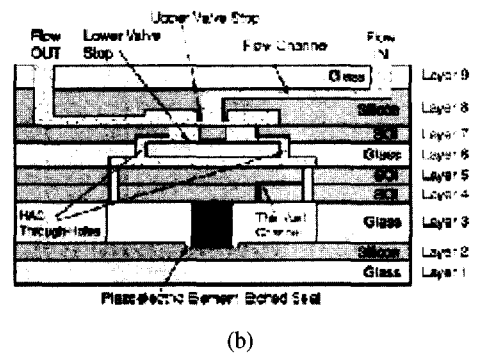
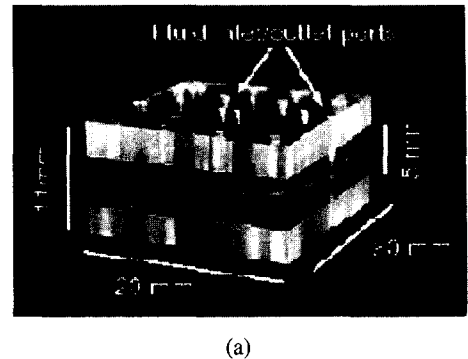


Fig. 4. (a) Photograph of a nine-layer silicon and glass piezoelectrically driven hydraulic amplification micro valve, (b) two-dimensional schematic of the multi-layer silicon and glass micro valve structure.<sup>39)</sup>

전형 미세 거울의 제조가 필수적이다. 지금까지 대부분의 미세 거울에는 정전기적 actuator가 이용되어 왔다. 하지만 정전기력을 이용한 경우 약 9°에 가까운 회전각을 보이는 장점이 있지만 전압에 대한 각도의 비율이 선형적으로 변하지 않기 때문에 각도의 미세 조정이 어렵고 구동 전압이 수 백 V에 이를 정도로 크기 때문에 최근에는 압전 재료를 이용한 actuator의 응용이 활발히 진행되고 있다. 압전 구동 미세 거울의 종류에는 두 가지가 있는데 하나는 TMA (tilting micromirror attached to the actuators)이고 다른 하나는 TMD (torsional micromirror detached from the actuators)라고 불린다. Fig. 5에 두 종류의 미세 거울의 거동을 분류하여 나타내었다.<sup>40)</sup>

### (4) Micro motor

마이크로 모터의 구동 방식은 크게 linear 방식과 rotational 방식으로 나눌 수 있다.<sup>41)</sup> Linear 방식은 관성 구동 방식이라고도 하며 구조가 간단하여 많은 장점을 가

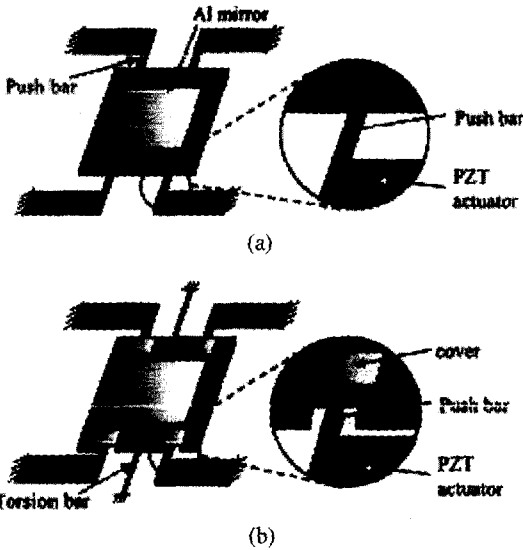


Fig. 5. Comparison of the piezoelectric micro mirror design. (a) TMA (tilting micro-mirror attached to the actuators) (b) TMD (torsional micro-mirror detached from the actuators).<sup>40)</sup>

지고 있다. 관성 모터의 방식은 다시 두 가지로 나뉘보면 impact drive mechanism (IDM) 방식과 stick slip 방식 이라고도 불리는 smooth impact drive mechanism (SIDM) 방식이 있다. IDM 방식은 전압을 천천히 인가하는 동안은 마찰에 의해 stator와 rotor가 함께 움직이고 다시 전압을 빠르게 낮추는 동안 관성에 의해 stator는 제자리로 오고 rotor는 이동한 위치에 그대로 머무르는 원리를 이용한 방식이다. 미세 조작 장치나 STM의 위치 제어 장치, 자동 정렬 시스템 등에 응용되고 있다. 반면 SIDM 방식은 stator가 빠르게 인장되고 느리게 수축되는 과정을 반복하면서 slider를 회전시키는 방식이다. Self moving 방식과 stator 방식으로 나눌 수 있으며 Fig. 6에 두 가지 메커니즘을 그림으로 표현하였다.

Linear 방식 모터의 다른 유형으로 초음파 모터가 있다. 이것은 stator transducer의 진동에너지로 slider나 rotor의 운동에너지로 변화시켜주는 원리로서 bending, longitudinal 또는 torsional 진동 방식이 응용되고 있다. Kurosawa 등이 표면 탄성파 (SAW; Surface Acoustic Wave)를 이용한 모터를 구상하기도 하였는데 Fig. 7에 개념도를 나타내었다.<sup>42)</sup>

Rotational motor의 구동 방식은 흔히 inchworm 메커

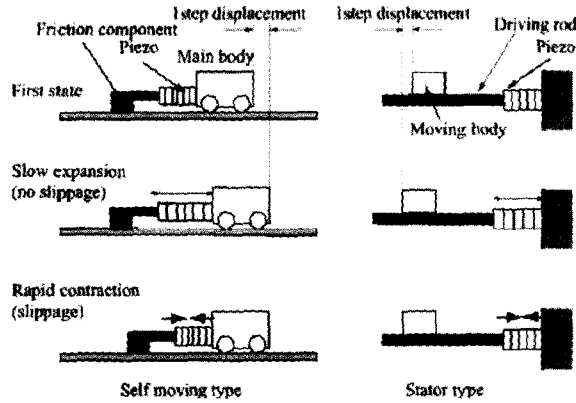


Fig. 6. Principles of a stick slip mechanism.<sup>41)</sup>

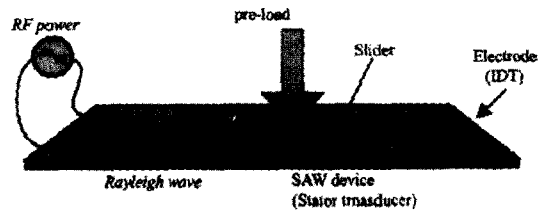


Fig. 7. A surface acoustic wave motor.<sup>42)</sup>

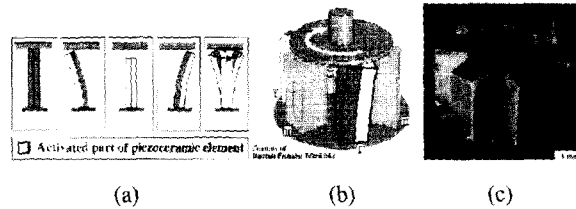


Fig. 8. (a) Working principle of a piezoceramic element, where the two modes of deflection and extension/contraction are indicated. (b) In the motor, the piezoceramic elements are divided in two sets, I and II, which can be controlled separately. (c) Real view of stator for inchworm type micro motor.<sup>43)</sup>

니즘으로 불리는 방식이 응용되고 있다. Fig. 8은 스웨덴 Uppsala 대학의 M. Bexell 등에 의해 제작된 inchworm 방식의 소형 모터의 원리와 stator 부분의 사진을 나타낸 것이다.<sup>43)</sup> Bimorph 형태로 이루어진 각각의 셀이 이웃한 셀과 교차하여 수축되고 변형되면서 rotor를 회전시키는 방식이다. 최대 토크는 1.4 mNm, 최대 속도는 4 rpm을 나타낸 것으로 보고하고 있다.

Elastic fin 방식의 마이크로 모터가 P. Muralt 등에 의해 제조되었는데, 이러한 형태를 정상파 방식의 초음파 모터라고 하며 그 원리는 Fig. 9에 나타난 바와 같다.<sup>44)</sup> 제작된 마이크로 모터의 최대 토크는 0.94  $\mu$ Nm이고 최

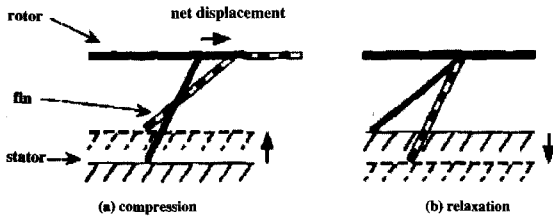
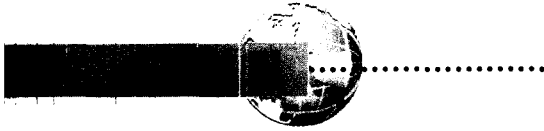


Fig. 9. Actuation principle of elastic fin micro motor.<sup>44)</sup>

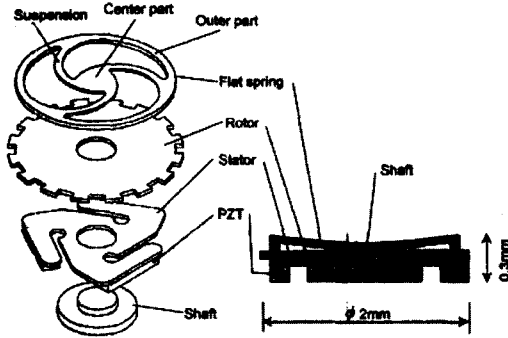


Fig. 10. Standing wave type ultrasonic micro motor.<sup>45)</sup>

대 속도는 1020 rpm까지 나오는 것으로 보고하고 있다.

Suzuki 등에 의해 제작된 정상파 초음파 모터를 Fig. 10에 나타내었다.<sup>45)</sup> 정상파 방식의 경우 구조와 원리가 단순하지만 작동이 비가역적이라는 단점이 있다.

### (5) FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator)

FBAR 필터는 박막 체적 탄성과 필터로 불리며, 기존의 SAW (surface acoustic wave) 필터 (표면 탄성과 필터) 보다 주파수 대역이 넓고 세라믹 필터에 비해 크기가 10분의 1밖에 안되어 개인 휴대 단말기 (PDA) 등 휴대형 전자기기의 경박화 추세에 적합한 소자로 각광을 받고 있다. 구조를 구현하기 위해서는 air bridge 등의 MEMS 공정을 이용하여야 하므로 FBAR의 추세는 MEMS의 발전을 따르고 있다. Georgia Institute of Technology의 Gianluca Piazza 등은 SOI (Silicon-on-Insulator) 기판 위에 ZnO를 이용한 압전 FBAR를 제조하였다.<sup>46)</sup> Fig. 11에 단결정 실리콘 FBAR의 구조와 SEM 이미지를 나타내었다.

또한 LG 기술연구소의 J. Y. Park 등은 CDMA PCS에 적용할 수 있는 FBAR를 실리콘 마이크로머시닝으로 제작하였다.<sup>47)</sup> 이때 압전 재료는 AlN을 이용하였고 패키징된 FBAR 듀플렉서는 기존의 세라믹 듀플렉서에 비해 크기를 18%로 줄일 수 있었다. Fig. 12 (a)는 제작된 FBAR

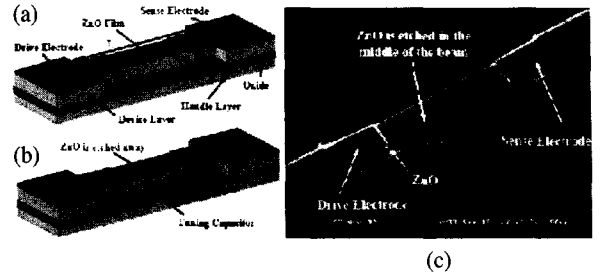


Fig. 11. Voltage-tunable, piezoelectrically transduced SCS (Single Crystal Silicon) resonators: (a) basic configuration, (b) Q-enhanced configuration, (c) SEM images of 100-µm-long piezo-resonator with ZnO etched in the middle area of the beam.<sup>46)</sup>

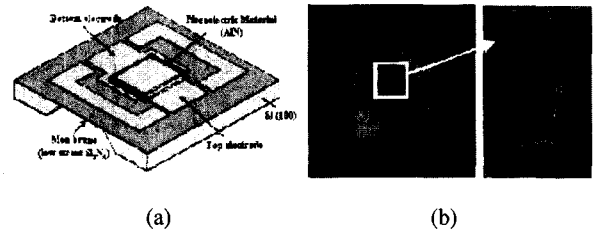


Fig. 12. (a) A schematic drawing of bulk micromachined film bulk acoustic resonator (FBAR). (b) Photomicrographs of packaged 2 stages band pass filters with 6 bulk acoustic resonators and a close up view.<sup>47)</sup>

에 대한 개략적인 모양이고 (b)는 실제로 제작된 소자의 광학 이미지와 근접 이미지이다. 이렇게 제작된 FBAR의 삽입손실은 CDMA PCS에 적용된 경우 안테나의 송신부에서 -1.3 dB, 수신부에서 -2.3 dB로 나타났다.

### (6) Micro ultrasonic transducer

압전 특성을 이용하면 MEMS 공정을 통해 초음파를 발생시키거나 감지하는 것이 가능하여 많은 이점을 가지고 있다. 이를 이용한 가장 좋은 예가 pMUT (piezoelectric micro ultrasonic transducer)이다. MEMS 공정을 이용하면 pMUT의 크기를 현저히 줄일 수 있고 대역폭을 크게 향상시킬 수 있으며, 대량생산으로 원가를 낮출 수 있기 때문에 이를 실현하기 위한 노력이 계속되고 있다. EPFL의 P. Muralt 등은 압전 재료로써 PZT ( $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ )를 이용한 pMUT를 제작하였다.<sup>48)</sup> 졸겔 증착 법으로 4 µm 두께의 PZT를 증착하였고 의료용으로 응용하기 위해 4 MHz 대역에서 응용 가능한 pMUT array를 제작하였다. Fig. 13의 (a)는 3×3 pMUT array의 연결 부분의

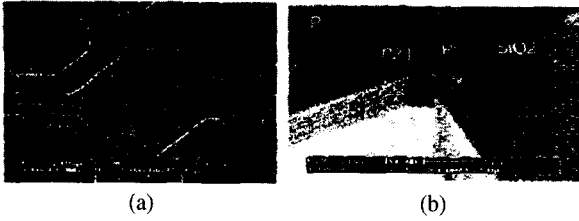


Fig. 13. (a) Part of  $3 \times 3$  array of octagonal cells with a pitch of  $300 \mu\text{m}$ . (b) SEM viewgraph showing the micromachined bridge of a suspended membrane with the etched Pt and PZT layers.<sup>48)</sup>

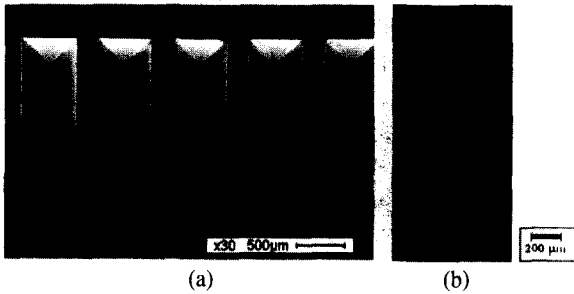


Fig. 14. (a) SEM image of the membranes as seen for the backside. (b) optical image of the top electrodes as seen from the top side.<sup>49)</sup>

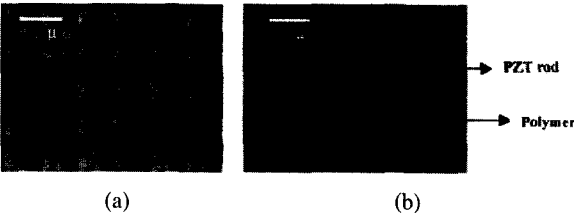


Fig. 15. Optical images (top view) of fabricated rod type PZT arrays by micro pressing method (a) before and (b) after sintering.<sup>50)</sup>

사진이고 (b)는  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  bridge 부분의 확대 이미지이다.

Washington 대학의 Firas Akasheh 등은 최근 MEMS 공정을 이용하여 초음파 transducer를 제조하였다고 보고했다.<sup>49)</sup> 이 논문을 통해 그들은 수중에서 2~6 MHz 대역폭을 가지는 초음파 transducer를 설계, 제작하여 공진 주파수를 측정하였다. 폭이  $44 \mu\text{m}$ , 길이가  $553 \mu\text{m}$ 인 membrane에서 약 6.1 MHz의 공진주파수가 측정된 것으로 보고하고 있다. Fig. 14는 제조된 pMUT의 뒷면의 SEM 사진과 앞면에서 본 광학 이미지를 나타내고 있다.

J. S. Park 등은 ultrasonic micro transducers arrays를 제작하기 새로운 방법을 제시 하였다. LIGA 공정을 이용하여 제조된 PMMA 마이크로 몰드와 PZT green sheet

을 이용하여 micro-pressing 후 건조 및 소결 공정을 통해 PZT rod array를 제조하고 여기에 고분자 물질을 충전시켜, Fig. 15와 같은 1-3 PZT composites을 제조하는 공정으로 구성되며 제조된 소자는 그 특성을 dicing 방식과 비교 분석하였다.<sup>50)</sup>

## 4. 결론 및 전망

최근에 다양한 종류의 MEMS 기술 및 압전 박막에 기초한 micro actuator가 개발되고 있다. 본 논문에서는 이들 중 micro cantilevers, micro mirror, micro pump, micro motor 그리고, micro transducers 등에 대한 일부 연구 개발 사례를 언급하였다. 현재 macro scale의 actuator가 micro scale의 actuator의 경우보다 많이 존재하기 때문에, 차후에는 압전 막을 이용한 micro actuator의 개발이 보다 많이 있을 것으로 기대된다. 또한, 최근 이슈가 되고 있는 나노기술 분야에 활용될 수 있는 nano scale의 actuator 연구 개발 분야에 있어서도 정밀도 면에서 우수한 piezoelectric actuator가 다른 actuator에 비해 많은 부분을 차지할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부와 정보통신부의 “Electro-0580 사업”과 산업자원부의 “전자부품기반기술개발사업”의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다. 또한, 자료 정리를 도와주신 전 창성 연구원께도 감사드립니다.

## 참고문헌

1. J. T. Deborah, “Ferroelectric Film Devices”, Academic Press (2000).
2. M. E. Lines, and A. M. Glass, “Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials”, Oxford: Clarendon Press (1997).
3. K. Uchino, “Electrostrictive actuators: materials and applications”, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 65: 643-652 (1986).
4. The piezo Book, Burleigh Instruments, Inc., New York, USA.
5. G. H. Haertling, “Ultra-high-displacement actuator”, *Amer. Ceram. Soc. Bull.* 73: 93-96 (1994).





6. K. Onitsuka, A. Dogan, J. F. Tressler, Q. Xu, W. S. Yohikawa, and R. E. Newnham, "Metal-ceramic composite transducer", the "Moonie." *J. Intel. Mater. Syst. Structures* **6** 447-55 (1995).
7. A. Dogan, K. Uchino, and R. E. Newnham, "Composite piezoelectric transducer with truncated conical end-caps", "Cymbal." *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. control* **44** 597-605 (1997).
8. J. Judy, D. L. Polla and W. P. Robbins, "A linear piezoelectric stepper motor with submicron displacement and centimeter travel", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. control* UFFC-37 428 (1990).
9. M. Kuribayashi, S. Ueha, and E. Mori, "Excitation Conditions of Flexural Traveling Waves for a Reversible Ultrasonic Linear Motor", *J. Acous. Soc. Am.* **77** 1431-35 (1985).
10. R. Inaba, A. Tokushima, O. Kawasaki, Y. Ise, and H. Yoneno, "Piezoelectric Ultrasonic Motor", Proc. IEEE Ultrasonics Symposium (1987).
11. R. M. Moroney, R. M. White, and R. T. Howe, Ultrasonic micromotors, Proc. IEEE Ultrasonics Symposium 747-56 (1989).
12. P. J. Schiller, and D. L. Polla, "Ferroelectric micro-mechanical systems (MEMS)", *International Symposium on integrated Ferroelectrics*, Monterey, CA (1994).
13. H.T.G. Van Lintel, F.C.M. Van De Pol, and S. Bouwstra, "A Piezoelectric Micropump Based on Micromachining of Silicon", *Sensors and Actuators* **15** 153-67 (1988).
14. J.W. Judy, T. Tamagawa, and D. L. Polla, "Surface-Machined Micromechanical Membrane Pump", *IEEE int. Conf. on Microelectromechanical Systems* (1991).
15. Q.-M. Wang and L. E. Cross, "A Piezoelectric Pseudoshear Multilayer Actuator", *Appl. Phys. Lett.* **72** [18] 2238-40 (1998).
16. W. P. Robbins, D. L. Polla, and D. E. Glumac, "High Displacement Piezoelectric Actuator Using a Meander Line Geometry - Part I: Experimental Characterization", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. control* **38** [5] 454-60 (1991).
17. W. P. Robbins, "High Displacement Piezoelectric Actuator Using a Meander Line Geometry - Part II: Theory", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. Control* **38** [5] 461-7 (1991).
18. W. P. Robbins, "A Planar Unimorph-based Actuator with Large Vertical Displacement Capability - Part II: Theory" (in preparation).
19. D. E. Glumac, and W. P. Robbins, "A Planar Unimorph-based Actuator with Large Vertical Displacement Capability - Part II: Experiment" (in preparation).
20. J. D. Ervin and D. Brei, "Recurve Piezoelectric-strain-amplifying Actuator Architecture", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics* **3** [4] 293-301 (1998).
21. S. W. Wenzel, B. J. Costello, and R. M. White, "Flexural-plate Waves for Sensors and Micropumps", *Sensors Mag.* **11** 47-9 (1994).
22. R. M. White, "Silicon-based Ultrasonic Microsensors and Micropumps", *Integrated Ferroelectrics* **7** 353-8 (1995).
23. P. Luginbuhl, S. D. Collins, G. Racine, M. Gretilat, N. F. de Rooij, K. G. Brooks and N. Setter, "Microfabricated Lamb Wave Device Based on PZT Sol-gel Thin Films for Mechanical Transport of Solid Particles and Liquids", *J. Micromechanical Systems* **6** [4] 337-46 (1997).
24. J. Yan, "Piezoelectric Microvalves", M. S. thesis, Dept. of Electrical Engineering, University of Minnesota (1992).
25. T. Roger, Howe, Richard, S. Mueller, J. Kaigham, and Timmer, S. N. William, and Gabriel "Silicon Micromechanics: Sensors and Actuators on a Chip", *IEEE Spectrum*, 29-35 (1990).
26. G. T. A. Kovacs, "Micromachined Transducers Source Book", McGraw-Hill: 276-301 (1998).
27. I.W. Hunter, and S. Lafontaine, *Proceedings of the 1992 Solid-state Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, USA: 178-85 (1992)
28. J. M. Hollerbach, I.W. Hunter and J.A. Ballantyne, "The Robotics Review", MIT Press, (eds., O. Khatib, J.J. Craig, and T. Lozano-Perez), Cambridge, USA: 12-7 (1991).
29. M. Hoffman, H. Kupperts, T. Schneller, U. Bottger, U. Schnakenber, W. Mokwa and R. Waser, "A New Concept and First Development Results of PZT Thin Film Actuator", *ISAF 2000. Proceedings of the 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics 2000* **1** 519-524 (2001).
30. E. Stemme, et al., "A valve less diffuse/nozzle Based Fluid Pump", *Sens. Actuator* **39** 159-67 (1993).
31. T. Itoh, and T. Suga, "Self-excited Force Sensing Micro Cantilevers with Piezoelectric Thin Film for Dynamic Force Microscopy", *Transducers'95*: 632-5 (1995).
32. A. Schroth, et al., "Application of Gas Jet Deposition Method to Piezoelectric Thick Film Miniature Actuator", *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** 5342-44 (1998).
33. C.C. Hsueh, et al., "Sol-gel Drives Ferroelectric Thin Films in Silicon Micromachining", *Int. Ferro.*, **3** 21-32 (1993).
34. K.H. Hwang, et al., "High-brightness Projection Display Systems Based on the Thin Film Actuated Micro Mirror Array (TFAMA)", *SPIE* **3513** 171-80 (1998).
35. Q.Q. Zhang, S.J. Gross, S.Tadigadapa, T.N. Jackson, F.T. Djuth, S. Trolier-McKinstry, "Lead Zirconate



Titanate Films for  $d_{33}$  Mode Cantilever Actuators", *Sens. Actuators A* **105** 91-7 (2003).

36. S.J. Gross, S. Tadigadapa, T.N. Jackson and S. Trolier-McKinstry, "Lead-zirconate-titanate-based Piezoelectric Micromachined Switch", *Appl. Phys. Lett.*, **83** [1] 1764-67 (2003).

37. S.Y. Lee, Caroline, W.H. Jin, H.J. Nam, S.M. Cho, Y.S. Kim and J.W. Bu, "Micro Cantilevers with Integrated Heaters and Piezoelectric Detectors for Low Power SPM Data Storage Application", *IEEE MEMS 2003*: 28-32 (2003).

38. D.C.S. Bien, S.J.N. Mitchell and H.S. Gamble, "Fabrication and characterization of a micromachined passive valve", *J. Micromech. Microeng.* **13** 557-62 (2003).

39. D.C. Roberts, H. Li, J.L. Steyn, O. Yaglioglu, S M. Spearing, M.A. Schmidt, "A Piezoelectric Microvalve for Compact High-frequency, High-differential Pressure Hydraulic Micropumping Systems", *J. MEMS* **12** [1] 81 (2003).

40. S.J. Kim, Y.H. Cho, H.J. Nam and J.U. Bu, "Piezoelectrically Pushed Rotational Micromirrors for Wide-angle Optical Switch Applications", *IEEE MEMS 2003* 263-66 (2003).

41. T. Morita, "Miniature Piezoelectric Motors", *Sens. Actuators A* **103** 291-300 (2003).

42. K.M. Kurosawa, "State-of-the-art Surface Acoustic Wave Linear Motor and its Future Applications", *Ultrasonics* **38** 15-9 (2002).

43. M. Bexell and S. Johansson, "Characteristics of a Piezoelectric Miniature Motor", *Sens. Actuators* **75** 118-30 (1999).

44. M.A. Dubois, P. Mural, "PZT Thin Film Actuated Elastic Fin Micromotor", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **45** [5] 1169-77 (1998).

45. Y. Suzuki, K. Tani and T. Sakuvara, "Development of a New Type Piezoelectric Micromotor", *Sens. Actuators A* **83** 244-8 (2000).

46. G. Piazza, R. Abdolvand and F. Ayazi, "Voltage Tunable Piezoelectrically Transduced Single-crystal Silicon Resonators on SOI Substrate", *IEEE the 6th Annual International Conference on MEMS 2003* 149-52 (2003).

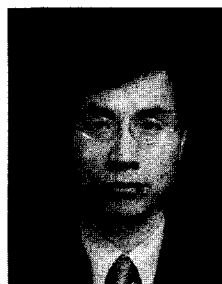
47. J.Y. Park, H.C. Lee, K.H. Lee, H.M. Lee, Y.J. Ko, J.H. Shin, S.H. Moon and J.U. Bu, "Micromachined FBAR RF Filters for Advanced Handset Applications", *Transducers '03 The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*: 149-52 (2003).

48. P. Mural, D. Schmitt, N. Ledermann, J. Baborowski, P.K. Weber, W. Steichen, S. Petitgrand, A. Bosseboeuf, N. Setter and P. Gaucher, "Study of PZT

Coated Membrane Structures for Micromachined Ultrasonic Transducers", *IEEE Ultrasonics Symposium*: 907-11 (2001).

49. F. Akasheh, T. Myers, J.D. Fraser, S. Bose and A. Bandyopadhyay, "Development of Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers", *Sens. Actuators A* **111** 275-87 (2004).

50. J. S. Park, S. H. Lee, S. S. Park, J. W. Cho, S. W. Jung, J. H. Han and S. G. Kang, "Acoustic and Electromechanical Properties of 1-3 PZT Composites for Ultrasonic Transducer Arrays Fabricated by Sacrificial Micro PMMA Mold", *Sens. Actuators A* **108** 201-11 (2003).



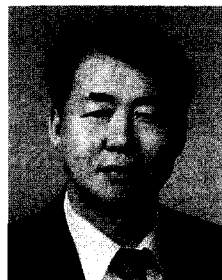
### 박준식

- 2004년 한양대 재료공학과(박사)
- 1994년 한양대 재료공학과(석사)
- 1992년 한양대 재료공학과(학사)
- 1994년 전자부품연구원 나노 메카트로닉스 연구센터 책임연구원
- 현재



### 박효덕

- 1993년 경북대 전자공학과(박사)
- 1986년 경북대 전자공학과(석사)
- 1984년 경북대 전자공학과(학사)
- 1993년 전자부품연구원 나노·융합연구
- 현재 본부 본부장



### 강성군

- 1980년 University of Stuttgart 금속학(박사)
- 1973년 한양대 재료공학과(석사)
- 1970년 한양대 재료공학과(학사)
- 1992년 한국표면공학회 회장
- 1998년 한국 재료학회 회장
- 2001년 한국 재료학회 회장
- 2003년 전기화학회 회장
- 2002년 한국표면공학회 회장
- 2003년 한양대학교 공과대학장
- 현재