Special Thema

| 진동을 이용한 압전체 에너지 하비스팅

선호정 교수
(군산대 신소재공학)

이재형 교수
(군산대 전자정보공학부)

1. 서 론

에너지 하비스팅 (Energy Harvesting)은 바람, 파도, 태양광, 온도변화, 진동 등 주변 환경으로부터 에너지를 얻어내는 에너지 획득방식을 일컫는다. 자연적으로 흩어져 사라지는 에너지를 취한다는 의미에서 에너지 스카벤징 (Energy Scavenging)이라고도 불린다. 에너지 하비스팅이란 용어를 사용한지는 그리 오래되지 않았지만, 고대로부터 인류가 생각하고 사용하였던 우리에게 친숙한 에너지 획득방식이다. 그 대표적인 예가 흐르는 물을 이용한 수차이고 바람을 이용한 풍차이다. 근래에는 태양광을 이용한 태양광 발전, 풍력발전이 대표적 예이다. 에너지 하비스팅은 자연친화적이기 때문에 공해를 유발하지 않는다는 매력적인 장점을 지니고 있어 대기오염, 지구 온난화 등 화석연료 사용에 따른 폐해가 날로 심각해지고 있는 오늘날 그 중요성이 다시 부각되고 있다.

최근에는 이동 정보통신기술 및 전자기기의 소형화 기술의 급속한 발전에 힘입어 소형 모바일 컴퓨팅 기기의 보급이 비약적으로 증가하고 있다. 특히 입는 컴퓨터의 등장으로 이동 전자 통신기기의 개념은 새로운 국면을 맞고 있으며 인간의 생활 패턴을 크게 바꾸어 놓을 것으로 예상된다. 현재까지 이러한 모바일 기기의 전력은 주로 2차 전지로부터 공급되고 있다. 비록 전자기기의 저전력 소모화가 진행되고 있기는 하지만 하나의 기기 내에 다양한 기능이 추가 통합되고 있기 때문에 전력 소모는 지속적으로 늘어나고 있는 추세이다. 2차 전지 재료, 기술의 발전으로 용량은 지속적으로 증가되고 있지만 전력수요를 충분히 따라가지 못하고 있는 실정이다. 따라서 기존의 전지를 보완하거나 대체할 수 있는 신개념 전원 공급 장치로써 에너지 하비스팅 기술을 개발하여 적용할 필요가 있다.

모바일 컴퓨팅 기기 및 입는 컴퓨터의 경우 인체의 움직임으로부터 에너지를 취하여 전원을 공급하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 실제로 숨쉬기, 체온, 혈액순환, 걷기, 팔 운동, 타이핑 등 인간의 움직임으로부터 상당히 큰 에너지가 발생하기 때문에 이를 이용하고자 하는 시도가 있다[1,2].

여러 인체 움직임 중에 걷기가 가장 큰 에너지를 발생하는 것으로 알려져 있는데 신발 밑창에 압전체를 장착하여 신발뒷굽이 지면에 닿을 때 가해지는 압전체의 변형에 의해 전력을 생산할 수 있다. 그림 1은 그 한 예를 보여준다[3]. 그림에서 볼 있듯이 두 종의 압전체가 사용되었다. 신발 뒤축에는 PZT [$Pb(Zr,Ti)O_3$] 유니몰프 (Unimorph)의 쌍이 장착되어 있고 앞 축에는 신축성있는 고분자 압전체인 PVDF (Polyvinylidene Fluoride) 판이 부착되어 있다. 보행 시 신발 뒤축이 지면에 닿을 때 PZT의 변형으로부터 그리고 몸을 앞으로 밀어줄 때 앞창에 부착된 PVDF의 휨에 의해 전력이 생성된다.

모바일 컴퓨팅 이외에 장기간 전력 공급이 필요한 중요한 분야 중 하나는 구조 안전 진단 시스템 (SHMS, Structural Health Monitoring System)이다.

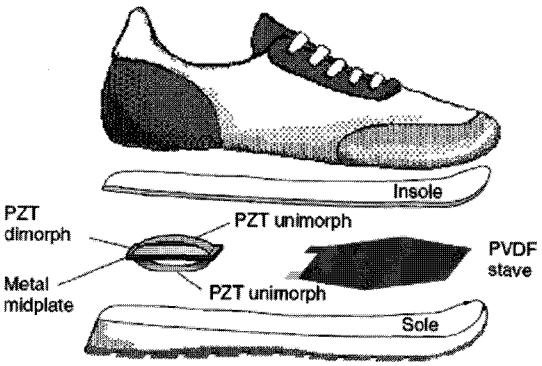


그림 1. 신발에 장착된 압전체 에너지 하비스터[3].

SHMS는 교량, 대형건물, 송유관, 가스관, 비행기 및 자동차 등 수송체의 구조 안정성을 실시간으로 파악 진단하는 시스템으로서 구조의 변위 및 안정성을 측정하는 센서와 센서로부터 전송되는 신호를 처리하여 위험을 판단하는 네트워크로 구성된다. 구조물에는 수 많은 센서가 장착되게 되는데 모든 센서의 전력을 유선으로 공급하는 것은 현실적으로 불가능하다. 전지를 사용하여 전력을 공급하게 되지만 전력 공급기간이 제한적이다. 따라서 영구적 자체 전원을 각 센서마다 장착해주는 방안을 마련할 필요가 있다.

자체 영구 전원공급 장치로 태양광 또는 풍력발전기를 고려할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 장치를 소형 센서에 장착하기에는 비효율적으로 클 뿐만 아니라 가격이 비싸고 일조량과 풍량이 일정치 않은 기상 때문에 안정적 전원공급이 어려워 전원공급 장치로써 적합하지 않다.

구조물에는 고유의 진동이 지속적으로 발생한다. 따라서 이러한 진동을 이용하여 에너지를 발생시키는 에너지 하비스팅 기기를 개발하여 기존 전지의 수명을 늘리기 위한 보조 전원 또는 대체 전원으로 사용하는 방안을 고려해볼 필요가 있다. 진동을 이용한 에너지 하비스팅은 전자기적 (Electromagnetic)방식[4, 5], 정전기적 (Electrostatic)방식[6], 압전체를 이용한 방식 3가지로 구분될 수 있다. 이들 중에서 전자기적 방식과 압전체 이용 방식의 에너지 변환 효율이 우수한 것으로 알려져 있는데 압전체 바의 떨림을 이용한 하비스터(Harvester)는 작은 크기로 제작이 용이하기 때문에 많이 제안되어 개발되고 있다.

최근에는 MEMS (Microelectromechanical Systems) 기술의 발달로 인하여 많은 벌크 (Bulk) 형 센서들이 MEMS화를 통하여 소형화 되고 있다. MEMS 기술로 제작된 에너지 하비스터를 RF회로 및 센서에 SoC (System-on-Chip)로 구현하면 이상적인 센서노드 (Sensor Node)을 구현할 수 있다. 또한 각 부분의 집적기술이 계속 발전하여 능동회로와 센서의 저전력소모화가 상당한 진전을 이룰 것으로 예상되기 때문에 칩에 내장된 에너지 하비스터가 단독 전원역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 본

보고서에서는 진동을 이용한 압전체 에너지 하비스팅 기술개발 동향을 보고하고 현행 또는 잠재된 문제점에 대하여 논의하였다.

2. 압전체 에너지 하비스팅의 원리

외부에서 물리적 힘을 가하면 시편 내부에 분극이 유도되고 이 분극에 의해 전기장이 형성되는 현상을 압전효과 (Piezoelectric Effect)라 한다(그림 2). 즉, 재료의 기계적-전기적 상호작용을 일컫는다. 압전체를 이용한 에너지 하비스팅에서는 이러한 압전현상을 통하여 얻어지는 전류를 전원으로 사용하여 센서 및 회로를 구동시키게 된다.

여러 압전재료가 존재하나 압전특성이 우수하여 센서와 액츄에이터에 가장 널리 사용되어온 대표적인 재료는 PZT [Pb(Zr,Ti)O_3]이다. PZT는 세라믹 압전체로서 $PbZrO_3$와 $PbTiO_3$의 고용체 (Solid Solution)인데 Zr 또는 Ti가 내부에 위치한 산소 팔면체로 구성된 특징을 지니는 페롭스카이트 (Perovskite) 구조를 가지고 있다. 또한 PZT는 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 Zr/Ti 조성과 온도에 따라 입방 (Cubic), 정방 (Tetragonal), 삼방 (Rhombohedral) 결정 격자를 나타낸다. 정방과 삼방 상경계 (Morphotrophic Phase Boundary) 조성인 Zr/Ti, 52/48 조성에서 높은 압전특성을 보이기 때문에 이 조성의 상업적 가치가 매우 높다(그림 4).

일반적으로 압전체 에너지 하비스터는 압전체 바(Bar)의 한쪽 끝을 고정시킨 칸티레버 (Cantilever) 형태로 제작하는데 그림 5과 같이 칸티레버를 지지

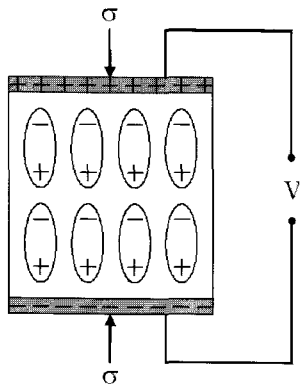


그림 2. 압전 효과.

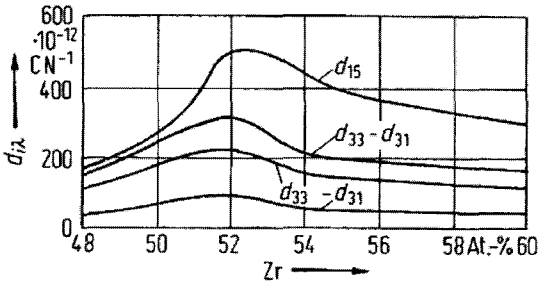


그림 4. Zr 조성 변화에 따른 Pb(Zr,Ti)O_3의 압전 계수 변화 [8].

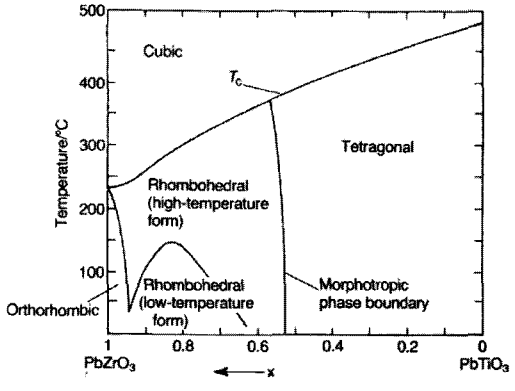


그림 3. $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ 계의 상태도[7].

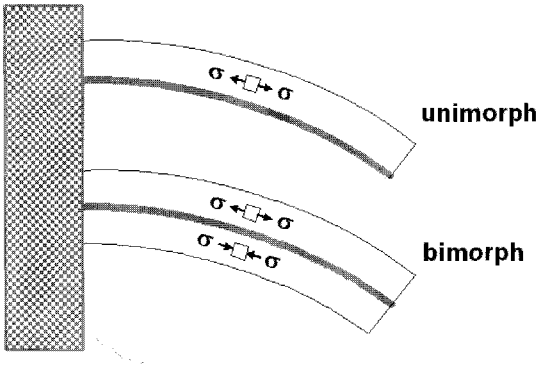


그림 5. 압전체 칸티레버.

하는 지지 바 상부에만 압전체를 배치한 유니몰프 (Unimorph) 형과 상하부에 모두 형성시킨 바이몰프 (Bimorph) 형태로 구분할 수 있다. 압전체 칸티레버는 하비스터가 고정된 구조물의 진동에 의해서 떨리게 되고 칸티레버의 상하 휨에 의해 수평방향으로 압전체의 변형 (Strain)이 발생하게 됨으로 이 변형에 의해 전류가 생성된다. 압전체 바는 상하 방향으로 교대로 휨이 발생하기 때문에 압전체에는 수평방향으로 압축과 인장응력이 번갈아 인가된다. 따라서 생성되는 전류의 방향이 교대로 바뀜으로써 교류가 생성된다. 바이몰프의 경우 두개의 압전체에서 동시에 전력이 생성되기 때문에 보다 높은 출력을 얻을 수 있다.

압전체 에너지 변환방식은 대표적으로 d_{31}과 d_{33} 두가지 모드 (Mode)로 구분된다. d_{31}모드는 그림 6의 1번 방향의 변형에 따라 3번 방향으로 발생되는 전위차에 의한 전류 생성모드를 나타낸다. 즉 기계적 에너지 인가방향과 전기적 에너지 변환방향이 수직인 모드이다. 이에 반해 d_{33}모드는 기계적 변형과 전기장 발생방향이 동일한 모드이다.

칸티레버형 압전체의 경우 그림 7에서 볼 수 있는 것과 같이 전극을 배치하는 방법에 따라 d_{31}과 d_{33} 모드를 구현할 수 있다. 압전체 빔 상하에 전극을 구성하면 수평방향으로 변형이 발생하고 압전체 두께방향 (수직 방향)으로 형성되는 전기장을 통하여 전류를 취하게 되어 d_{31}모드로 동작하게 된다(그림 7(a)).

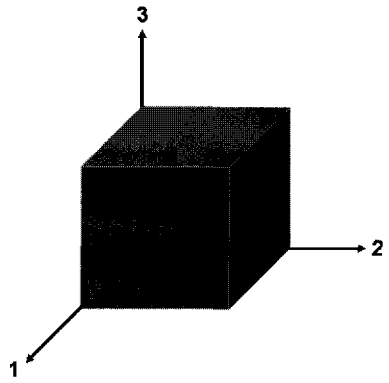


그림 6. 압전체의 축 방향.

반면에 압전체 한쪽 표면에 두 전극을 모두 배치하면 수평 방향으로 전기장이 형성되어 압전체 변형방향과 전기장 방향이 동일하게 됨으로써 d_{33}모드가 된다(그림 7(b)). 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 PZT의 경우 d_{33}모드가 d_{31}모드에 비해 높은 압전특성을 나타낸다[8].

3. 빔 (Beam) 형 에너지 하비스터

3.1 하비스터 제작 및 결과

대부분의 빔형 에너지 하비스터는 PZT 시트 (Sheet)가 기계적으로 유연한 금속이나 고분자 바 (Bar) 상,하부에 부착되어 있는 상용화된 액츄에이터를 사용하여 제작된다. PZT가 부착된 액츄에이터는 Piezo Systems Inc.[9]나 Midé Technology Corp.[10] 등에서 구입할 수 있다. 크기는 하비스터 설계에 따라 다르지만 대략 폭 10 mm 내외, 길이 10-30 mm를 가진다. 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이

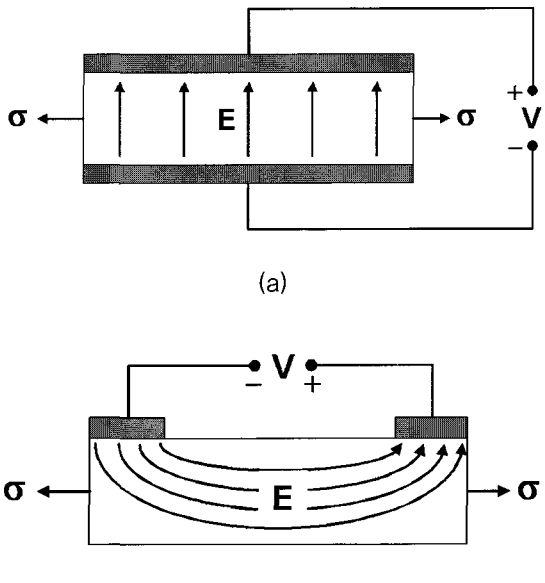


그림 7. 전극 배치 방법에 따른 (a) d_{31} (b) d_{33} 압전 모드.

PZT 바의 한쪽 끝은 진동수와 진폭을 조절할 수 있는 진동기에 고정하고 다른 한 쪽 끝에는 시험 질량(Proof Mass)을 부착한다. 전체적인 하비스터의 부피를 무선 센서노드에 장착할 것을 고려하여 1 cm^3의 제한을 두지만 수 cm^3을 넘지 않는다.

이와 같이 제작된 PZT 바이몰프 하비스터와 시험장치를 사용하여 최대 375 μW의 전력이 출력되었으며[11] 시험질량과 칸티레버의 크기를 조절하여 300 - 650 μW의 전력이 생산됨이 보고 되었다[12].

칸티레버형 하비스터 이외에도 원형 피막(Membrane)형태의 하비스터에 대한 연구도 실시되었는데[13, 14] 이는 황동 막 상부에 PZT 패치 (직경 25 mm, 두께 230 μm)가 부착된 원형 압전체 피막(Membrane) 형태로 제작되었다. 진동시험에 의해 최대 1.7 mW의 전력이 생성됨으로써 칸티레버형태의 하비스터에 비해 상당히 큰 전력이 생산된 결과를 보였다. 그러나 피막 중앙부에 진동기의 끝 단을 직접 부착하여 강제 진동시킴으로써 진동평가를 실시하였기 때문에 압전피막이 구조물에 의해 스스로 진동하게 될 실제상황에서 그와 같은 전력이 생성될 수 있을지는 의문으로 측정방식에 문제가 있는 것으로 생각된다.

세라믹인 PZT 시트는 구조물의 진동이 과도하여 칸티레버의 진폭이 일정 범위를 넘어설 경우 PZT에 인가되는 인장응력이 임계 값을 초과하여 깨어질 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 고분자 메트릭스 (Matrix) 내에 PZT 파이버 (Fiber)를 첨가한 복합체 형태로 칸티레버를 제작하여 유연성을 높인 하비스터에 대한 연구가 이루어진 바 있다[15].

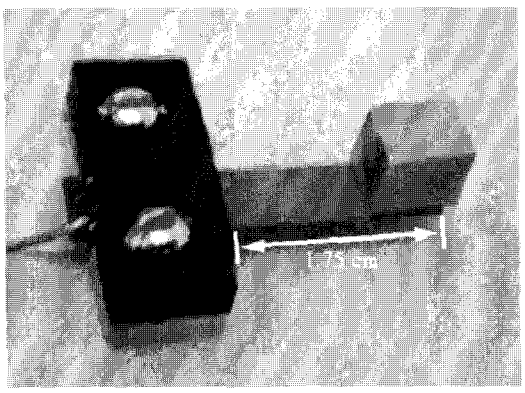


그림 8. 빔형 압전체 에너지 하비스터[11].

3.2 문제점

PZT는 세라믹이기 때문에 응력파괴가 쉽게 발생할 수 있다. 앞에서 세라믹, 고분자 복합체 칸티레버 적용의 예에서 언급했듯이 칸티레버의 진폭이 임계치이상 이상으로 커지면 과도한 응력에 의해 PZT 세라믹이 깨어지는 결과를 초래하게 된다. 따라서 칸티레버의 최대 휨을 제한하기 위해서 일정한 부피의 케이스를 부착할 수 있으며 칸티레버의 길이와 시험무게의 크기도 적절히 조절해야 한다[16].

직사각형 바의 경우 그림 9(a)와 같이 구조물 부착부위에 변형이 집중되기 때문에 그곳에서 압전체의 특성이 열화되어 하비스터의 수명이 단축될 수 있다. 그림 9(b)와 (c)에서 볼 수 있는 것과 같이 칸티레버의 모양을 사다리꼴로 설계하면 변형이 바 전체에 분산되어 하비스터의 수명을 연장시킬 수 있다. 또한 전력생산이 증가되는 효과도 가져온다[16, 17].

유효한 전력을 얻기 위해서는 기계적-전기적 에너지 변환효율이 높아야 한다. 에너지 하비스터의 전력생산에 가장 크게 영향 미치는 요소가 하비스터의 공진주파수인데 에너지 변환 효율은 공진주파수와 매우 밀접한 관계를 지니고 있다. 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 특정한 주파수 (하비스터의 공진주파수)에서 피크형으로 출력이 발생한다. 따라서 의미

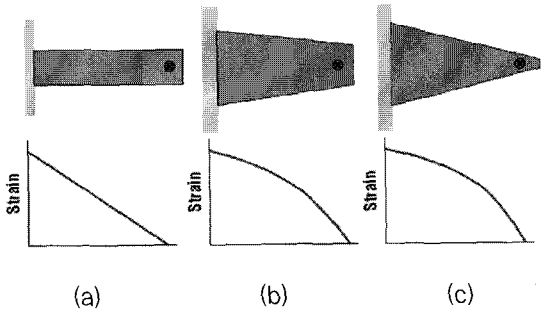


그림 9. 사다리꼴 모양 설계 칸티레버에서의 변형 에너지 분포[16].

있는 전력을 생산하기 위해서는 하비스터의 공진주파수를 구조물의 주파수에 맞추어 설계해야 한다.

교량과 같은 토목 구조물의 진동은 바람, 차량의 움직임 등에 의해 발생하는데 전형적인 고유진동수는 5 Hz이하이며[18] 공조 시스템의 덕트 (Duct), 생산 및 조립기계, 소형 가전제품 등의 고유 진동수는 60- 200 Hz정도로써 낮은 주파수를 나타낸다[11,19]. 하비스터의 공진주파수는 칸티레버의 길이, 경직성 (Stiffness), 시험무게 등에 의해서 결정되는데 저 준위 주파수 (Low Level Frequency)에 대응하기 위해 이들 요소에 대한 세심한 주의가 필요하다.

보다 어려운 문제는 구조물의 주파수가 일정치 않고 계속 변한다는데 있다. 따라서 하비스터의 공진주파수를 구조물의 주파수에 동조시킬 수 있는 고안이 필요하다. 동조방법은 능동동조 (Active Tunning)와 수동동조 (Passive Tunning)로 구분할 수 있는데 능동동조는 지속적으로 변하는 구조물의 진동수에 실시간으로 동조되는 방식을 말하며 수동동조는 필요 시 마다 전원을 끄고 수동으로 주파수를 맞추어주는 방식을 의미한다. 궁극적으로 능동동조 방안이 개발되어야 할 것이지만 아직까지 구체적인 성과가 보고되고 있지 못한 실정이다. 보다 현실적인 방안이 수동동조인데 칸티레버 축 방향으로 압축부하를 인가하는 방식으로 공진주파수를 20 % 정도 낮춘 결과가 보고된 바 있다[12]. 또한 공진주파수 동조 이외에 공진주파수의 대역폭을 증가시킴으로써 구조물 진동수 변화에 대처하고자 하는 노력이 있어 왔다[18].

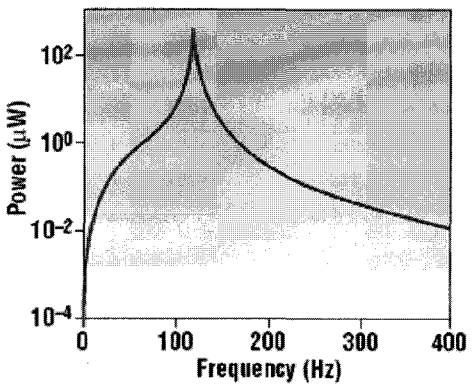


그림 10. 출력 및 주파수의 관계 [16].

하비스터 자체만큼 또는 그 이상으로 중요한 부분이 발생된 전력을 저장하기 위한 변환 회로 설계이다. 구조물의 진동이 불연속적이거나 일정하지 않을 경우 전력발생이 안정적이지 않게 된다. 따라서 발생 전력을 전지 (Battery)에 저장한 후 사용하여야 하는데 센서 및 무선 송수신 단에 안정된 전력을 공급하기 위해서 적절한 변환회로의 구성이 필요하다. 일반적인 정류회로를 통한 직접 충전방식에 비하여 하비스터에 부합되는 하비스팅 회로를 적용하면 4배 정도로 발전량을 증가시킬 수 있다는 결과가 보고된 바 있다[20,21,22].

전기출력은 하비스터의 크기에 직접적으로 관계된다. 크기가 과도할 경우 센서노드의 부분으로 사용되기에 부적절하기 때문에 대개 1 cm^3이내로 그 부피를 제한한다. 이 경우 최적화된 하비스터와 주변회로를 통해서 최상의 전력을 생산하더라도 수백 μW 전력이 생산된다. 무선 센서노드는 센서, 내장 마이크로 프로세서, 디지털 논리회로, 라디오 송수신기, 타이머, 다채널 아날로그/디지털 변환기들의 조합으로 구성되게 되는데 상용화되어 있는 센서노드가 샘플링, 신호처리, 신호전송 의 일련의 기능을 처리하는데 대략 50 mW 정도의 전력이 소모되는 것으로 알려져 있다[18]. 따라서 전체 센서노드를 구동하기에는 아직까지는 생산되는 전력이 충분치 못하다 할 수 있다. 그러나 표 1에 나타난 바와 같이 주변회로의 저 전력 소모화에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있기 때문에 하비스터의 전력 생산량 증가와 주변회로의 저전력 소모화의 발전을 통해 압전체 에너지 하비스터가 단독 전원으로써의 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 일 예로 375 $\mu W/cm^3$의 전력을 생산하는 PZT 칸티레버 하비스터를 사용하여 12 mW의 전력을 소모하는 라디오 송신시험을 실시해 듀티 사이클 (Duty Cycle) 1.6 %의 결과를 얻은 바 있다[11].

표 1. 무선 센서노드의 개략적 에너지 소모 정도[18].

Operation	Commercial	Research
Microprocessor operation[a]	350 μW (TI)	20 μW [4]
Receive 1 bit	200 nJ (Telos)	12 pJ (PicoRadio)
Transmit 1 bit	*200 nJ (X-bow)*	16 pJ (PicoRadio)
Retain volatile memory (VM) - 1 bit	100 pW (TI)	Replaced by NVM
Write 1 bit to NVM	200 nJ (Micron)	25 pJ (Cavendish)
Analogue-digital(A/D) conversion-1 bit	2 nJ (TI)	50 pJ (PicoRadio)
Sleep	300 nW (TI)	5 nW (PicoRadio)
Digital signal processing[a]	200 μW (LSI)	20 μW [4]
Pin leakage	100 nW (TI)	2.2 nW

[a] : Operation is scaled to processor speeds of 500 kHz
Note :
TI : Texas Instrument MSP430 microprocessor.
PicoRadio : University of California Berkeley PicoRadio project.
X-bow : X-Bow Technologies Mica2Dot wireless sensor Mote.
Micron : Micron Technology NOR Flash Memory.
Cavendish : Cavendish Kinetics Corp, MEMS memory.
LSI : LSI Logic Corp - LSI403LC Digital Signal Processor.
Telos : Moteiv Corporation.
NVM : Non-Volatile Memory

4. MEMS형 에너지 하비스터

4.1 하비스터 제작 및 결과

앞 절에서 논의하였듯이 압전체 에너지 하비스터가 독자적인 전원으로서 역할을 수행하기 위해서는 하비스터의 출력개선과 센서 및 주변회로의 저전력 소모화가 동시에 이루어져야 한다. 이는 센서의 MEMS화 및 수동 및 능동회로의 집적화를 통해서 달성될 수 있을 것이다. 따라서 자체 공급전원으로서 에너지 하비스터를 MEMS 공정을 사용하여 마이크로 크기로 구현하여 단일 칩에 내장하는 SoC (System-on-chip)화가 궁극적인 목표가 될 것이다.

MEMS 공정을 이용한 압전체 칸티레버 전력 발생기에 대한 연구는 비교적 최근에 시작되었으며 발표 논문 편수도 적은 실정이다. MEMS형 하비스터 제작은 박막 증착공정과 미세 패턴기술을 기본적으로 이용하는데 이 역시 압전특성이 우수한 PZT를 압전박막으로 사용하고 있다. 비교적 성막이 쉬운 액상 전구체 (Precursor)의 스핀도포와 솔-젤 (Sol-gel)법을 사용하여 1 μm 두께 내외의 PZT 막을 제작한다.

MEMS PZT 하비스터는 d_{33}모드 또는 d_{31}모드 선택과 칸티레버 구현 방법에 따라 제작 방식에 차이가 발생한다. d_{33}모드의 경우 그림 11과 같이 PZT 상부에 깍지낀 손가락 형태 (Interdigitated)로 전극을 형성 킴으로써 PZT 변형 (Strain)의 방향과 전기장 형성의 방향을 일치시킨다. 이 경우 기판 상부로부터 Si 식각을 실시하여 칸티레버를 구현할 수 있기 때문에 패터닝공정이 비교적 단순하지만 PZT 막의 손상을 피하고 Si만 선택적으로 제거하기 위한 식각 방식의 선택에 주의해야 한다.

그림 11 형태로 제작한 170 (길이) × 260 (폭) μm^2 크기의 칸티레버를 통하여 13.9 kHz의 공진주파수에서 1 μW의 출력을 얻을 수 있었다. 칸티레버 형성은 XeF_2 증기 식각을 이용하여 PZT 손상없이 Si 식각을 수행할 수 있었으며, SU-8 포도 리지스트 (Photo Resist)을 사용하여 시험 질량의 형성하였다[23].

d_{31}모드로 하비스터를 구성한 예는 그림 12에서 볼 수 있는데 PZT 막 상하부에 전극을 배치하였다. 이 경우에는 칸티레버를 구현하기 위해서 상부전극

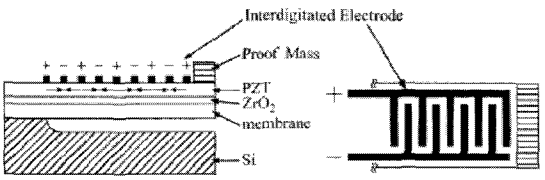


그림 11. d_{33} 모드 PZT 하비스터 구성의 예 [23].

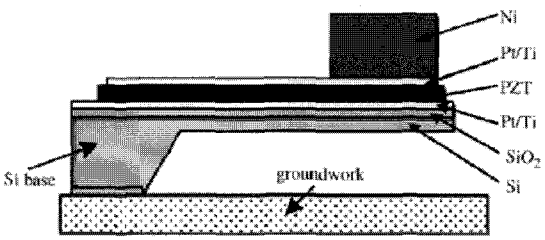


그림 12. d_{31} 모드 PZT 하비스터 구성의 예 [24].

층/PZT층/하부전극층 스택 (Stack)을 형성한 후에 표면에서 스택 패턴공정과 기판 뒷면에서 Si 벌크 식각공정 등 복잡한 공정이 수행되었다. 2000 (길이) × 600 (폭) μm^2 크기의 칸티레버를 제작하고 시험 질량으로 금속 Ni을 적용하여 공진주파수 608 Hz에서 2.16 μW의 출력을 얻었다[24].

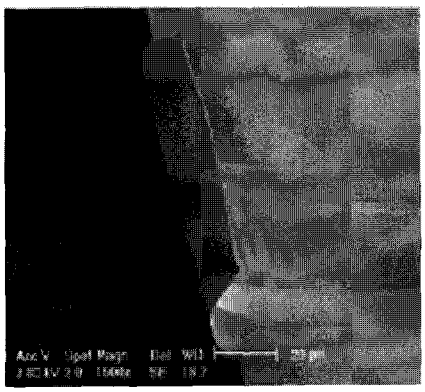
d_{33}모드 적용 예는 PZT d_{33}모드 압전계수가 d_{31}모드에 비해 크다는 점과 실제로 1 μm 내외 두께 PZT 박막의 d_{33}모드 강유전 특성도 우수하다는 결과[25]에 바탕을 둔 것으로 보인다. 그러나 d_{31}모드 예에서 낮은 공진주파수와 고출력을 보임으로써 더 우수한 결과를 나타내었다. 물론 이러한 결과는 칸티레버의 길이가 2000 μm로 길며 시험질량으로 보다 무거운 금속 Ni을 선택했기 때문이라 생각된다. 두 경우의 칸티레버가 동일한 크기와 조건으로 제작되지 않았고 MEMS형 압전체 하비스터의 제작에는 PZT 박막의 증착 및 패턴 형성조건 등 많은 공정변수가 관계하고 있기 때문에 위 결과로부터 어느 방식이 에너지 변환에 더 유리할 것인가에 대한 직접적인 판단은 어렵다.

4.2 문제점

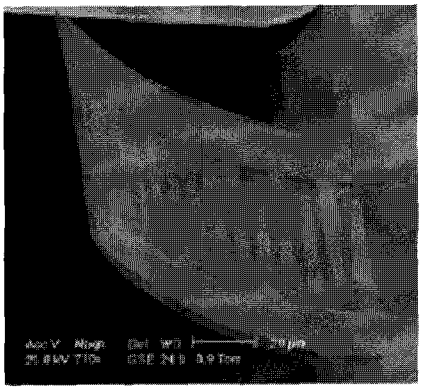
MEMS형 하비스터도 기본적으로 범형 하비스터가 가지고 있는 동일한 문제를 안고 있다. 역시 가장 중요한 문제는 유효출력을 얻기 위한 공진주파수의 동조문제이다. MEMS형으로 하비스터를 제작할 경우 하비스터의 공진주파수가 상당히 클 가능성이 있다. 따라서 칸티레버의 크기 및 시험질량의 설계에 대한 세심한 주의가 요구된다.

그러나 MEMS형의 경우 한번의 집적공정을 통해 다수의 칸티레버를 동시에 같은 기판에 제작할 수 있는 장점이 있다. 이는 각 층의 포토마스크 상에 다양한 크기의 칸티레버 설계를 반영하면 어렵지 않게 구현할 수 있는데 일련의 공진주파수를 지니는 칸티레버가 구조물의 변화하는 진동에 각기 대응하기 때문에 유효전력 생산을 위한 주파수 대역폭을 획기적으로 늘릴 수 있을 것이다.

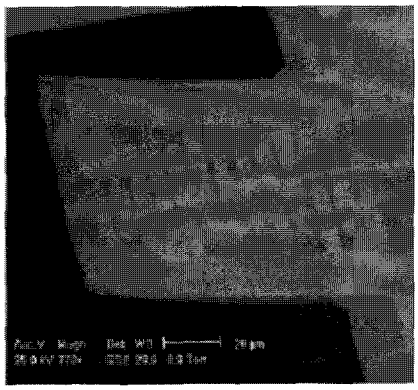
구조적 측면에서는 MEMS 공정의 특성상 칸티레버는 박막의 적층으로 구성되기 때문에 휨에 대처하기 위한 적절한 공정선택이 필요하다. PZT 자체로는



(a) PZT/ZrO_2/SiO_2(열산화)



(b) PZT/ZrO_2/SiO_2(PECVD)



(c) PZT/ZrO_2/SiO_2(PECVD)/SiN_x

그림 13. 응력이 제어된 칸티레버의 SEM 사진[23].

구조 안정성을 확보하기 어렵기 때문에 하지에 지지막이 있어야 한다. 가장 보편적으로 사용할 수 있는 막은 Si기반 공정에 정합성이 우수한 SiO_2와 SiN_x막이다. 칸티레버는 지지층, 전극층 등 복층으로 구성되어 있기 때문에 그림 13 과 같이 각 층의 공정방식에 따라 응력상태가 달라지고 각 응력의 조합이 칸티레버의 휨 상태를 결정한다. 따라서 지지층의 공정방식을 잘 선택하여 각 층의 응력이 서로 상쇄되어 평평한 칸티레버를 구현하여야 한다.

한편 PZT막 내에 포함되어 있는 Pb 원자는 PZT 성막과정에 인가되는 고온에서 SiO_2로의 확산이 쉽게 발생하고 이는 PZT막의 Pb결핍을 유발하여 PZT막의 열화를 초래하는 것으로 알려져 있다[26]. 따라서 Pb 원자의 확산을 방지하고 각 층간 안정성을 유지하기 위하여 PZT와 SiO_2 막 사이에 확산 방지막으로 ZrO_2박막을 적용하기도 한다[23].

기존의 문제점 이외에 하비스터의 장기 사용에 따른 신뢰성 문제가 향후 등장할 가능성이 있다. 특히 압전체의 압전특성 열화가능성을 생각해야 한다. FeRAM (Ferroelectric Random Access Memory)의 제조에 있어서 PZT 강유전체 막은 장기 분극 반전 사이클에 따른 피로특성 (Fatigue) 등에 취약하며 신뢰성 문제를 해결하기 위해서는 PZT 증착 및 전후 공정에 세심한 주의가 필요한 것으로 알려져 있다[27]. 이와 유사하게 장기 진동 사이클에 의해 압전특성의 열화가능성이 있으므로 이를 염두에 두고 신뢰성 평가를 수행할 필요가 있다.

친환경 제품에 대한 관심이 꾸준히 증가하고 있으며 최근에는 세계적으로 환경 유해물질을 법적으로 규제하려는 움직임이 매우 강하게 일고 있다. 이런 측면에서 납 (Pb)을 함유하고 있는 PZT의 사용은 개발자나 생산자에게 있어서 언제나 딜레마이다. 그 이유는 납을 사용하고 싶지는 않지만 PZT을 대체할 정도로 좋은 압전특성을 지닌 재료를 찾기 어렵기 때문이다. 2004년에 PZT특성에 필적할 만한 특성을 지닌 비납계 압전체인 NKN [$(Na,K)NbO_3$] 물질이 발표된 바 있고[28] 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있기 때문에 PZT 대신 이러한 비납계 압전체를 적용한 하비스터의 개발에 관심을 가져볼 만하다.

5. 나노 기술

어떤 분야든 나노 기술을 적용하여 성능을 획기적으로 향상시키거나 새로운 적용을 창출해 내려는 시도가 있어 왔다. 압전체를 이용한 에너지 하비스팅 분야에서도 최근에 이러한 움직임이 일부 나타나고 있다.[29,30,31] 그림 14는 AFM (Atomic Force Microscopy) 접촉모드 (Contact Mode)을 이용하여 ZnO 나노 와이어 (Nano Wire)에 변형을 주며 AFM 팁이 나노 와이어를 접촉하여 지나갈 때 발생하는 출력 전압을 측정한 결과이다. 그림에서와 같이 출력전압이 감지되었다. 비록 Pt 금속박막이 입혀진 AFM 팁을 통해 감지된 전압이며 ZnO 나노 벨트가 반도체 특성을 지니고 있지만 나노 크기의 압전체로부터 얻어진 에너지 변환 현상을 관찰했다는데 상당한 의의

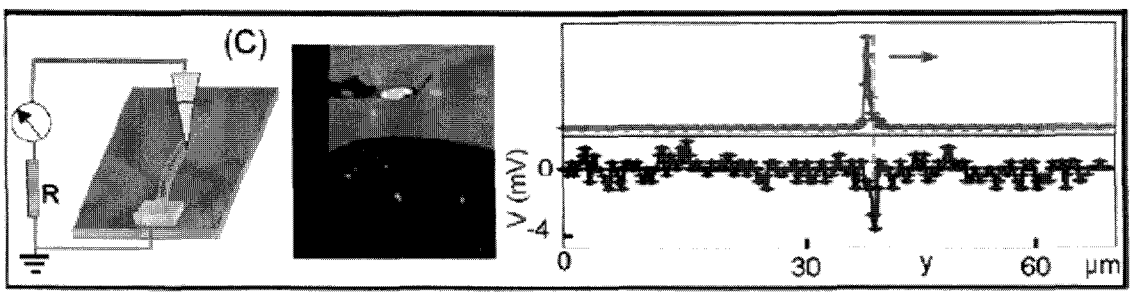


그림 14. AFM 팁에 의해 휘어진 ZnO 압전체 나노 벨트로부터의 기계적-전기적 에너지 변환[30].

가 있다. 또한 최근에는 GaN 나노 로드 (Nano Rod)에서 비슷한 현상을 관찰하기도 하였다[31].

압전체 나노 와이어에 전극을 형성하는 방법을 고안한다면 나노 크기의 에너지 하비스터를 구현할 수 있을 것이다. 아직은 꿈같은 이야기이지만 나노 에너지 하비스터가 혈액의 유동을 이용하여 혈액 내에서 병원체와 싸우는 나노 기계에 전력을 공급하는 것을 상상해 볼 수 있다. 또한 유연성 있는 압전 나노 와이어 또는 나노 섬유의 보풀을 만들면 보풀이 바람에 흔들리거나 접촉에 의한 눌림으로 생성되는 에너지를 이용할 수 있을 것이다.

6. 결 론

앞에서 다양한 크기의 압전체 에너지 하비스팅 기술 동향에 대하여 살펴 보았다. 아직 연구의 저변은 넓지 못하지만 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 본 고에서는 주로 무선 센서 노드의 적용을 언급하였지만 압전체를 이용한 에너지 하비스팅 기술의 적용은 무궁 무진할 것으로 생각된다. 아마도 적용의 한계는 우리의 상상력에 달려있을 것이다.

압전체 에너지 하비스팅은 아직 완성되지 않은 기술이다. 특히 국내에서 이루어진 결과는 아직 찾아보기 어려운 실정이다. 우선, 무선 센서노드의 적용을 고려한다면 MEMS형 하비스터의 개발과 MEMS 센서와 집적 회로에 단일칩화하는 SoC (System-on-Chip) 기술 개발에 노력을 기울일 필요가 있다. SoC 구현이 각 소자 제조 공정의 정합성 측면에서 어려움이 있고 제조비용이 높다면 각 소자를 따로 개발하여 단일 패키지 (Package)에 통합하는 SiP 기술 (System-in-Package)이 좋은 대안이 될 수 있다. 센서와 수동소자의 MEMS화와 CMOS (Complementary Metal-oxide-semiconductor)를 기반으로 하는 집적 회로의 저전력소모화, 그리고 SiP 기술은 이미 상당한 진전을 보이고 있기 때문에 MEMS형 에너지 하비스터의 개발이 관건이 될 것이다.

MEMS형 에너지 하비스터의 개발은 PZT 등의 압전체 박막의 성막뿐만 아니라 집적화 공정상에 여러 가지 어려움이 따른다. 우리나라는 PZT 등 강유전체 박막의 영구분극 특성을 이용한 메모리반도체인 FeRAM 제조기술에 있어서 세계적으로 기술을 선도하고 있다. 삼성전자와 하이닉스반도체는 1990년대 중반부터 꾸준히 FeRAM을 개발해 왔으며 일부 상용화를 실현하고 있다. 따라서 우리는 핵심기술인 PZT 박막과 귀금속 전극 박막기술 그리고 집적화 공정기술에 이미 많은 노하우를 가지고 있으며 여러 경험 있는 유능한 인력을 배출하였다. 이러한 인적 기술적 인프라를 잘 활용하여 MEMS형 압전체 하비스터의 기술 개발에 노력을 기울인다면 단시간 내에 개발이 가능할 것이며 센서, rf 소자 및 능동 회로가 통합 패키지로 구현된 무선 센서노드를 머지 않아 만나게 될 것이다. 또한 다양한 방면으로의 응용을 개화시킬 수 있을 것이다.

참고 문헌

[1] T. Starner, "Human-powered wearable computing", IBM Systems. J., vol. 35, nos. 3 & 4, pp. 618-629, 1996.

[2] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics", IEEE Pervasive Computing, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, 2005.

[3] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics", IEEE Micro, vol. 21, no.3, pp. 30-42, 2001.

[4] R. Amirtharajah and A. P. Chandrakasan, "Self-powered signal processing using vibration-based power generation", J. Solid-State Circuits, vol. 33, no. 5, pp. 687-695, 1998.

[5] E. P. James, M. J. Tudor, S. P. Beeby, N. R. Harris, P. Glynne-Jones, J. N. Ross, and N. W. White, "An investigation of self-powered systems for condition monitoring applications", Sensors and Actuators A, vol. 110, pp. 171-176, 2004.

[6] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. P. Chandrakasan, and J. H. Lang, "Vibration-to-electric energy conversion", IEEE Tran. VLSI Syst., vol. 9, no. 1, pp. 64-76, 2001.

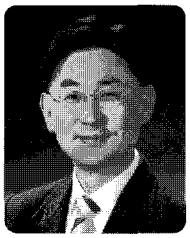
[7] A. J. Moulson and J. M. Herbert, Electroceramics, John Wiley & Sons Ltd., 2003.

[8] G. Gautschi, Piezoelectric Sensorics, Springer-

Verlag, 2002.
[9] www.piezo.com
[10] www.mide.com
[11] S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics", Smart Mater. Struct., vol. 13, pp. 1131-1142, 2004.
[12] E. S. Leland and P. K. Wright, "Resonance tunning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload", Smart Mater. Struct., vol. 15, pp. 1413-1420, 2004.
[13] E. Minazara, D. Vasic, F. Costa, and G. Poulin, "Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting", Ultrason., vol. 44, pp. E699-e703, 2006.
[14] M. Ericka, D. Vasic, F. Costa, and G. Poulain, "Predictive energy harvesting from mechanical vibration using a circular piezoelectric membrane", Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 946-949, 2005.
[15] H. A. Sodano, J. Lloyd, and D. J. Inman, "An experimental comparison between several composite actuators for power generation", Smart Mater. Struct., vol. 15, pp. 1211-1216, 2006.
[16] S. Roundy, E. S. Leland, E. Reilly, E. Lai, B. Otis, J. M. Rabaey, P. K. Wright, and V. Sundararajan, "Improving power output for vibration-based energy scavengers", IEEE Pervasive Computing, vol. 4, no. 1, pp. 28-36, 2005.
[17] N. M. White, P. Glynne-Jones, and Beeby, "A novel thick-film piezoelectric micro-generator", Smart. Mater. Struct., vol. 10, pp. 850-852, 2001.
[18] N. G. Elvin, N. Lajnef, and A. A. Elvin, "Feasibility of structural monitoring with vibration powered sensors", Smart Mater. Struct., vol. 15, pp. 977-986, 2006.
[19] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low vibrations as a power source for wireless sensor nodes", Comput. Commun., vol. 26, pp. 1131-1144, 2003.
[20] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A. Lesieutre, "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply", IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 5, pp. 669-676, 2002.
[21] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, and G. A. Lesieutre, "Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode", IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 2, pp. 696-703, 2003.
[22] G. A. Lesieutre, G. K. Ottman, and H. F. Hofmann, "Damping as a result of piezoelectric energy harvesting", J. Sound Vibr., vol. 269, pp. 991-1001, 2004.
[23] Y. B. Jeon, R. Sood, J.-h. Jeong, and S.-G. Kim, "MEMS power generator with transverse mode thin film PZT", Sensors and Actuators A, vol. 122, pp. 16-22, 2005.
[24] H.-B. Fang, J.-Q. Liu, Z.-Y. Xu, L. Dong, L. Wang, D. Chen, B.-C. Cai, and Y. Liu, "Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting", Microelectr. J., vol. 37, pp. 1280-1284, 2006.
[25] B. Xu, Y. Ye, and E. Cross, "Dielectric hysteresis from transverse electric fields in lead zircornate titanate thin films", Appl. Phys. Lett., vol. 74, no. 23, pp.3549-3551, 1999.
[26] H.-J. Sun, E. S. Choi, S. Y. Kweon, N. K. Kim, S. J. Yeom, J.-S. Roh, and H. Sohn, "$Pb(Zr_XTi_{1-X})O_3$ Thin film fabricated on heterogeneous under-Layer of Pt and SiO_2 in high density ferroelectric random access memory (FeRAM) capacitor", Jpn. J. Appl. Phys., part 2, vol. 42, no. 12B, pp. L1504-L1506, 2003.
[27] H. M. Duiker, P. D. Beale, J. F. Scott, C. A. Paz de Arauzo, B. M. Melnick, J. D. Cuchiaro, and L. D. McMillan, "Fatigue and switching in ferroelectric memories: Theory and experiment", J. Appl. Phys., vol. 68, no. 11, pp. 5783-5791, 1990.
[28] Y. Saito, H. Takao, T. Tani, T. Nonoyama, K. Takatori, T. Homma, T. Nagaya, and M. Nakamura, "Lead-free piezoceramics", Nature, vol. 432, no. 7013, pp. 84-87, 2004.
[29] Z. L. Wang and J. Song, "Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays", Science, vol. 312, no. 5771, pp. 242-246, 2006.
[30] J. Song, J. Zhou, and Z. L. Wang, "Piezoelectric and semiconducting coupling power generating process of a single ZnO belt/wire. A technology for harvesting electricity from the environment", Nano Lett., vol. 6, no. 8, pp. 1656-1662, 2006.
[31] W. S. Su, Y. F. Chen, C. L. Hsiao, and L. W. Tu,

"Generation of electricity in GaN nanorods induced by piezoelectric effect", Appl. Phys. Lett., vol. 90, p. 063110, 2007.

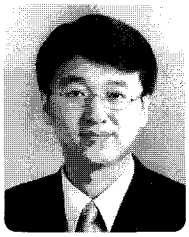
저|자|약|력



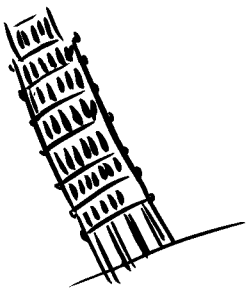
성 명 : 선호정

◈ 학 력
· 1988년
고려대 재료공학과 공학사
· 1990년
고려대 대학원 재료공학과 공학석사
· 2002년
고려대 대학원 재료공학과 공학박사

◈ 경 력
· 1990년 - 2004년
하이닉스반도체 연구소 책임연구원
· 2005년 - 현재
군산대 신소재공학 조교수



성 명 : 이재형

◈ 학 력
· 1991년
성균관대 전기공학과 공학사
· 1994년
성균관대 대학원 전기공학과 공학석사
· 1998년
성균관대 대학원 전기공학과 공학박사

◈ 경 력
· 1996년 - 2002년
성균관대 정보통신공학부 시간강사
· 2000년 - 2002년
성균관대 과학기술연구소 선임연구원
· 2002년 - 2003년
성균관대 정보통신공학부 연구교수
· 2003년 - 2005년
군산대 전자정보공학부 전임강사
· 2005년 - 현 재
군산대 전자정보공학부 조교수