

## 압전효과를 이용한 기계적 진동 에너지 하베스팅

### Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesting

김미소(한국표준과학연구원)

E-mail: misokim@kriss.re.kr

#### 1. 소개

에너지 하베스팅(energy harvesting)은 빛, 온도 차이, 진동 에너지 등과 같이 우리 주변에 존재하는 미활용 에너지를 유용한 전기 에너지로 변환하여 수확하는 기술을 뜻한다. 태양 에너지를 이용하는 태양 전지(solar cells), 버려지는 열을 활용한 열전 발전기(thermoelectric generators), 바람, 파도, 또는 진동과 같은 기계 에너지를 이용한 진동 에너지 하베스팅(vibration energy harvesting), 그리고 동, 식물이나 사람의 활동 시 발생하는 에너지를 이용하는 바이오 에너지 하베스팅(bio-energy harvesting)과 같은 에너지 하베스팅 기술이 있다. 이러한 에너지 하베스팅은 에너지 자원 문제가 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 가운데 대체 에너지원이자 친환경적인 에너지원으로써 큰 관심을 받으며 활발히 연구되고 있다. 에너지 하베스팅은 랩탑이나 핸드폰과 같은 소형 무선 휴대용 기기에서부터 무선 센서 네트워크(wireless sensor networks)에 이르기까지 다양하게 응용이 가능하다.

특히 에너지 하베스팅을 통하여 무선 센서 네트워크(wireless sensor networks)에 전력을 공급하는 시스템의 개발은 자가 전력 공급 가능한 무선 센서 네트워크(self-powered wireless sensor networks)를 구축하는 토대가 될 수 있다. 현재 무선 센서 네트워크에 전력을 공급하는 배터리는 어느 정도의 시간이 흐르면, 다시 충전을 하거나 교체를 해야 하므로, 정기적인 관리를 필요로 한다. 예를 들어, 교량이나 빌딩과 같은 곳에 설치되어 있는 수천 개의 센서 시스템에 내장되어 있는 배

터리를 교체하는 작업은 많은 비용이 들어가며, 때로는 큰 위험을 감수하여야 하기도 한다. 에너지 하베스팅은 자연에 존재하는 무한한 에너지를 이용하여, 2차 충전 에너지, 충전지 등과 함께 사용되거나, 또는 배터리 자체를 대체하여 무선 센서 시스템에 전력을 공급함으로써 오랜 시간 동안 센서 시스템이 작동할 수 있게 하며, 또한 교체와 같은 관리에 들어가는 비용과 노력을 절감할 수 있도록 한다. 에너지 하베스팅을 이용한 자가 동력의 무선 센서 네트워크(self-powered wireless sensor networks)는 빌딩, 교량, 자동차, 비행기 등의 구조 건전성 감시(structural health monitoring), 동, 식물의 원격 조정(remote-control), 인체의 건강/질병 감지 등 다양한 분야에 응용할 수 있다.

여러 가지 에너지 하베스팅 기술 중 특히 진동 에너지를 이용한 에너지 하베스팅(vibration energy harvesting)은 기계적 진동을 전기 에너지로 전환하는 기술로, 기존의 태양 전지, 풍력, 연료 전지 등과 같은 친환경 에너지와 달리 주변에 존재하는 미세 진동이나 인체 활동 중 발생하는 미세한 움직임으로부터 발생하는 소모성의 기계적 에너지를 전기 에너지로 무한히 추출할 수 있는 에너지 개념이다. 기계적 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방식에는 정전기(electrostatic), 전자기(electromagnetic), 압전(piezoelectric)효과 등을 이용하는 방식이 있다. 압전 물질(piezoelectric materials)에 힘을 가하였을 때 전압이 발생하거나, 역으로 물질에 전압을 가했을 때 수축/팽창하는 현상인 압전 효과(piezoelectric effect)를 이용한 압전 에너지 하베스팅(piezoelectric energy har-

vesting)은 변환 효율이 크고, 소형, 경량화가 가능하다는 장점을 가지므로, 각종 센서, 무선 모바일 소형 전자 기기에 적합한 대체 에너지원으로 활용 가능하다.

본 논문에서는, 압전 에너지 하베스팅 기술에 대하여 전반적인 이해를 도울 수 있도록 기초 배경 지식과 함께 이 분야의 주요 연구 동향 및 전망을 기술하겠다.

## 2. 압전 에너지 하베스팅의 기초

### (Fundamentals of Piezoelectric Energy Harvesting)

#### 2.1. 기계적 진동 에너지원과 전력 스펙트럼 (Mechanical Vibration Sources in the Environment & Power spectra)

기계적 진동은 주변 환경에서 가장 광범위하고 다양하게 존재하는 에너지원이다. 기후와 장소에 따라 영향을 많이 받는 에너지원인 태양광에 비해 기계적 진동 에너지원은 실내외로 그 종류가 다양하고, 날씨의 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 이러한 기계적 진동을 이용하는 에너지 하베스팅 기술을 통해 생산해 낼 수 있는 전력의 수준은 마이크로 와트(micro-watts)에서 밀리 와트(mW) 정도로 알려져 있다[1]. 이러한 저전력은 중전에는 쓸모없는(unusable) 수준으로 여겨졌으나, 그간의 VLSI(very large scale integration) 회로 디자인의 괄목할만한 발달과 더불어 저전력에 기반을 둔 시스템의 구동과 에너지 하베스팅을 이용한 전력 공급원으로 사용하는 것이 가능하게 되었다.

일상생활 속에 존재하는 기계적 진동은 산업 환경에서 경험할 수 있는 진동의 수준과 비교할 때 저진동(low-level vibrations)으로 구분된다. 다양한 범위의 응용이 가능하다는 점에서 진동 에너지 하베스팅 기술은 보통 이러한 저진동에 기반을 두는 경우가 많으며, 이에 상응하는 소자를 디자인하는 것에 중점을 두고 있다. Table 1은, Roundy 등[2]이 조사한 주위에 존재하는 다양한 종류의 진동원의 속성, 특히 이러한 진동원의 가속도의 최대값(peak acceleration,  $m/s^2$ )과 피크 주파수(peak frequency, Hz)의 값들이다. du Toit 등 [3, 4]은 주위의 진동원들을 진공 상태와 공기 중

에서의 상태에서 정량적으로 비교, 분석하여, 상당한 수준의 전력은 주로 100-300 Hz 사이에 존재한다는 결론을 끌어냈다. 또한, 0에서 1 kHz 범위에 있는 다양한 진동원들의 파워 스펙트럴 밀도(PSD, power spectral density)를 구하였다. Fig. 1은 이 중 전자렌지의 윗면과 측면의 파워 스펙트럴 밀도 함수를 보여준다.

주어진 진동 환경에 따라 에너지 하베스팅 시스템을 디자인하는 것뿐 아니라 시스템을 작동하는 방법이 달라지므로, 이용하고자 하는 진동원에 대한 속성을 파악하는 것은 에너지 하베스팅 기술 개발에 있어 우선시 되어야 한다. 특히, 진동 환경에서 주어지는 입력 진동 신호 주파수가 시스템의 고유 주파수와 같을 때, 최대 전력이 발생하므로 공진이 일어나는 시스템을 설계하는 것은 중요하다.

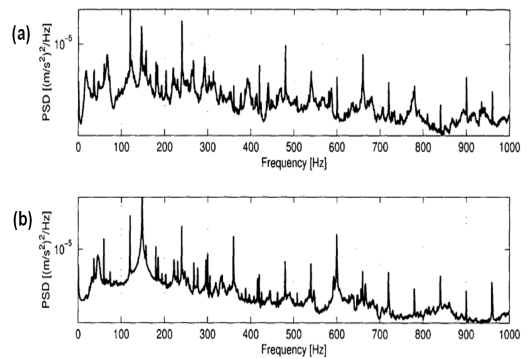


Fig. 1 Power spectral density(PSD) vs. frequency of a microwave oven (a) top and (b) side [4]

#### 2.2. 압전 에너지 하베스팅 시스템 기본 구성

압전 에너지 하베스팅은 기계적 진동을 압전 에너지 시스템에 가하여, 그 구조에 기계적 변형/응력(strain/stress)을 가함으로써 압전 물질 내에 생성된 전하(charge)를 회로를 통해 끌어내어 전력을 생산하는 기술이다.

압전 에너지 하베스팅을 통한 에너지 변환 과정은 크게 세 단계로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째로는 외부의 기계적 진동 에너지를 압전 에너지 하베스팅 소자에 전달하는 단계이다. 이 단계에서는, 외부의 기계적 에너지가 압전체에 효율적으로 전달할 수 있도록 소자의 구조를 설계하는 것이 중요하다.

Table 1 Acceleration magnitude and frequency of peak for various sources[2]

Vibration Source	Acceleration [ $m/s^2$ ]	Frequency at the peak [Hz]
Car engine compartment	12	200
Base of 3-axis machine tool	10	70
Blender casing	6.4	121
Clothes dryer	3.5	121
Person nervously tapping their wheel	3	1
Car instrument panel	3	13
Door frame just after door closes	3	125
Small microwave oven	2.5	121
HVAC vents in office building	0.2-1.5	60
Windows next to a busy road	0.7	100
CD on notebook computer	0.6	75
Second story floor of busy office	0.2	100

두 번째 단계는 압전 에너지 하베스팅 소자에 전달될 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 단계이다. 이 단계에서 가한 기계적 변형/응력에 따라 유도 전하를 생성하고 전기장(electric field)을 형성하게 되므로, 에너지 변환 효율을 높이는 압전 재료의 선택과 디자인이 중요한 단계라 할 수 있다.

세 번째 단계에서는 변환된 에너지를 전기적인 회로를 통하여 2차 전지 또는 축전기에 전달하여 축전하는 단계이다. 이 단계에서는 회로와 압전체 사이의 임피던스 정합(impedance matching)과 같은 방법을 통해 전달/축전하는 단계에서의 에너지 손실을 최소화하는 노력이 필요하다.

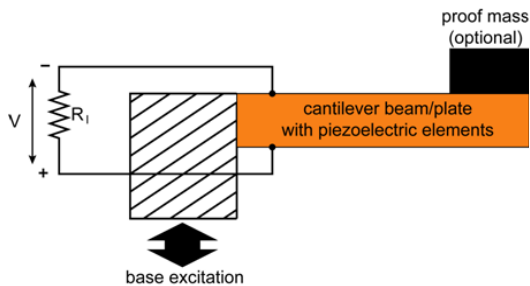


Fig. 2 Schematic of a cantilevered piezoelectric energy harvesting system with simple electrical resistance loading, RI

압전 에너지 하베스팅의 단위 소자는 기본적으로 압전 물질, 구조 물질, 전극으로 구성되어 있다. 적절한 압전 물질을 선택, 사용하는 것뿐 아니라 전체적인 시스템의 기계적 안정성과 전력 생산에 필요한 구조를 제작하기 위해서는 그에 걸맞는 구조 물질을 적절하게 선택하고 설계하는 것이 중요하다. 시스템의 고유 주파수를 저주파로 낮추기 위해 검증 질량(proof mass)을 이용하기도 한다[5]. 이러한 소자의 전극 부분은 와이어를 통하여 전기 회로에 연결하게 된다. Fig. 2에서는 전체적인 이해를 돕기 위해 가장 간단한 기하학적 구조인 외팔보 형태의 압전 에너지 하베스팅 소자가 간단한 저항기(simple resistor)로만 구성된 전기 회로에 연결된 것을 볼 수 있다. 이 시스템의 경우 기반 진동(base excitation)을 가하여 전체 시스템을 가진하게 되며, 시스템이 진동시 외팔보에 굽힘(bending) 응력이 발생하게 된다.

압전 에너지 하베스팅 소자는 압전 물질 층이 하나일 때 unimorph, 두 층 일 때 bimorph, 그 이상의 층으로 구성될 때 multi-layer로 분류한다. 구동 방식에 따라서는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 가하는 변형/응력의 방향과 형성되는 전기장의 방향이 서로 수직할 때 {3-1} 작동 모드(mode of operation), 서로 평행할 때 {3-3} 작동 모드로 분류하게 된다. {3-1} 작동 모드의 경우, 축전기의

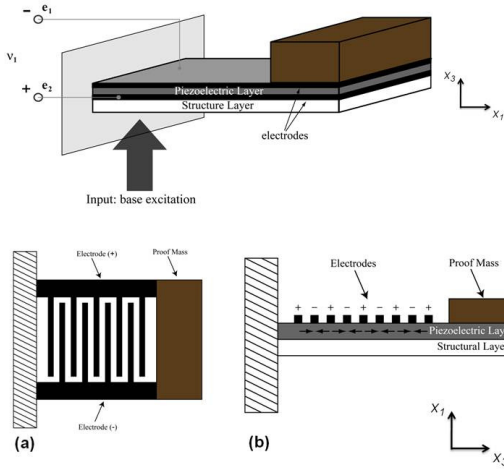


Fig. 3 (top) Unimorph cantilevered piezoelectric energy harvester with a proof mass in {3-1} mode of operation (bottom) Unimorph cantilevered piezoelectric energy harvester in {3-3} mode of operation with interdigitated electrodes

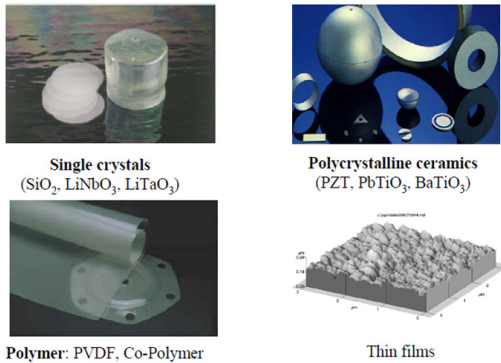


Fig. 4 Commonly used piezoelectric materials: single crystals, polycrystalline ceramics, polymers and thin films

형태와 같은 전극 구성이 필요하며 (Fig. 3 (위)), {3-3} 작동 모드 경우 교차 전극(interdigitated electrodes)를 사용하게 된다(Fig. 3 (아래)). {3-1} 작동 모드에서는 그 구조가 간단하여 제작이 상대적으로 용이하다는 장점이 있다. 이 모드에서는 발생하는 전력이 압전 물질층의 두께에 비례하게 된다. 따라서, 박막을 이용한 마이크로 에너지 하베스팅 시스템의 경우, 증착 기법에 따라 증착할 수 있는 압전 물질층의 두께가 제한되는 단점이 있다. {3-3} 작동 모드 경우, 교차 전극 사이의 간격을 조절함으로써 발생하는 전압

을 조절할 수 있다는 장점이 있으나, 구조의 복잡성으로 인하여 작은 크기의 소자의 경우, 설계와 제작이 쉽지 않을 수 있다. 따라서 두 작동 모드의 장, 단점을 고려하여 응용하고자 하는 대상에 따라 그 모드를 선택하여 소자를 설계하는 것이 필요하다.

### 2.3. 압전 에너지 하베스팅의 특성 평가

#### 2.3.1. 압전 물질과 중요 물성

대표적인 압전 물질로는 lead zirconate titanate (줄여서 PZT)와 같은 세라믹 물질과 polyvinylidene fluoride(줄여서 PVDF)와 같은 폴리머(polymer)가 있으며, 센서와 구동기(actuator)에 활발히 응용되어 왔으며, 현재는 에너지 하베스팅으로 그 활용 범위를 넓혀 가고 있다.

압전 물질의 다양한 물성 중 에너지 하베스팅의 성능과 직접적으로 관련된 물성을 파악하기 위해서는 미소 변형율에 대한 선형 구성 방정식(linear constitutive equations)[6]을 살펴보는 것이 필요하다. 선형 구성 방정식은 압전 물질 내의 기계적 거동과 전기적 거동간의 상호작용을 기술하는 수식이라 할 수 있다. 식(1)은 이러한 압전 구성 방정식 중 한 가지 표현 방법으로 T는 응력, S는 변형, D는 전기적 변위, E는 전기장을 나타낸다. 이러한 거동 인자들은 탄성계수(elastic stiffness), 압전상수(piezoelectric constant), 유전율(dielectric constant)의 물성과 밀접한 관련이 있다. 식(1)에서  $c^E$ 는 일정한 전기장 하에서의 탄성계수,  $e$ 는 전하와 변형 또는 응력과 전기장의 관계를 설명하는 압전상수,  $\epsilon^S$ 는 일정한 변형율을 유지할 때의 유전율로 단위는 각각 [GPa], [C/m<sup>2</sup>], [F/m]을 주로 사용한다. 이 세 가지 물성은 각각 기계적, 전기기계적 결합, 그리고 전기적 특성을 나타내며, 에너지 하베스팅의 성능과 직접적인 관련을 가지는 물성들이다. 따라서 에너지 하베스팅을 위한 소재를 개발하는 경우, 우선시 되는 물성 평가는 이러한 탄성계수, 압전상수, 유전율을 구하는 것이 기본이라 할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & -e^t \\ e & \epsilon^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S \\ E \end{Bmatrix} \quad (1)$$

### 2.3.2. 압전 에너지 하베스팅의 주요 성능 및 평가 방법

현재 압전 에너지 하베스팅의 연구의 주안점은 ‘어떻게 하면 소자가 낼 수 있는 전력과 같은 성능을 극대화할 수 있을까’이다. 전력의 극대화를 위한 연구 방법으로는 물성이 더 뛰어난 물질의 개발, 소자를 제작하는 과정의 최적화, 또는 에너지 하베스팅 소자에서 발생하는 전력을 끌어내고 저장하는 전기 회로의 효율성 극대화 등의 방법이 있다.

이러한 연구에서 모델링(modeling)은 소자의 성능을 미리 계산으로 정확히 예측하고, 전력을 극대화할 수 있는 시스템 디자인을 위한 가이드라인을 제시하는 데 있어 필수 불가결한 요소라 할 수 있다.

압전 에너지 하베스팅 시스템의 거동을 기술하는 이론으로는 등가 회로 이론(equivalent circuit model)[2]과 선형 진동 모델(mass-spring-damper system)에 기반을 둔 이론[3-5]이 널리 알려져 있다. 등가 회로 이론의 경우, 시스템의 기계적 성분을 그에 상응하는 전기적인 요소로 표현하여 전체 시스템의 거동을 설명하는 식을 유도하는 방법이므로 시스템의 구조 동역학(structural dynamics)적인 측면이 고려되지 않는다는 단점이 있다. 압전체를 설명하는 선형 구성 방정식(piezoelectric constitutive law)과 시스템의 구조 동역학을 포괄하는 베르누이-오일러 빔 이론(Bernoulli-Euler beam theory)을 에너지 보존 법칙에 대입을 하게 되면, 식(2)와 식(3)과 같이 전기 기계적 결합 지배방정식(electromechanical governing equations)을 유도할 수 있다.

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr - \Theta v = -B_f \ddot{w}_B \quad (2)$$

$$\Theta \dot{r} + C_p \dot{v} + \frac{1}{R_l} v = 0 \quad (3)$$

여기서  $M$ 은 시스템 질량,  $C$ 는 감쇠(damping) 상수,  $K$ 는 강성(stiffness) 상수,  $C_p$ 는 정전용량(capacitance),  $R_l$ 은 전기 저항,  $r$ 은 기계적 상대 변위,  $v$ 는 전압을 나타낸다. 주의할 점은, 각각의 항은 시스템의 실질적인 값(effective value)을 나타내고 있으며, 이들은 구조의 모드 형상(structural mode shapes)의 함수로 표현할 수 있다

는 점이다[5]. 하나의 점은 각 항을 시간에 대해 한 번 미분한 것을 표현하며, 두 개의 점은 두 번 미분한 값이다.  $w_B$ 는 밀단에서의 변위이므로, 식(2)의 오른쪽 항은 밀단에 걸리는 가속도와 관련한, 시스템에 걸리는 관성력으로 볼 수 있다. 위의 식(2)는 압전 에너지 하베스팅 소자의 기계적 측면을, 식(3)은 전기적 측면을 기술하는 방정식으로 각각 구동 방정식, 센싱 방정식이라고도 한다. 식(2)와 (3)은  $\Theta$ 라는 전기 기계 연성항(electromechanical coupling term)을 통해 전기 기계적으로 결합이 되어 있다. 특히, 식(2)에서는  $\Theta$ 와 관련된 항을 제외하면 일반적인 구조진동시스템, 즉 MKS(mass-spring damper) 시스템을 기술하는 선형진동모델과 같은 형태라는 것을 알 수 있다.

위의 두 지배 방정식을 풀게 되면, 주어진 압전 에너지 하베스팅 소자의 전력(power), 전압(voltage), 기계적 변위(mechanical displacement)와 같은 주요 성능지수들을 닫힌 형태의 해(closed-form solution)로 표현할 수 있다. 또한 시스템의 공진 주파수(resonant frequency)와 반공진 주파수(anti-resonant frequency)를 계산할 수 있게 된다.

시스템의 공진과 반공진 주파수는 진동 환경의 입력 진동 주파수와 일치할 시 최대 전력을 발생시키는 지점이므로 압전 에너지 하베스팅 소자의 설계에 있어 가장 중요한 성능 지수들 중 하나라 할 수 있다. 이 밖에도, 지배방정식을 이용하여 압전 에너지 하베스팅 소자의 구동 중 구조의 모드 형상(structural mode shapes)과 정전용량(capacitance)과 같은 시스템 주요 인자를 구하는 것이 가능하다. 궁극적으로는 주어진 소자가 출력할 수 있는 최대 전력을 내는 조건(예. 회로에 걸어주는 전기저항의 최적치, optimal electrical resistance)을 미리 예측할 수 있게 되므로, 그 값에 예측하여 그에 상응하는 시스템을 설계하는 것이 중요하다 하겠다.

앞서 설명한 압전 에너지 하베스팅 모델은 실험적으로 검증[3-5]을 거쳐 실제 소자를 설계하고 제작하는데 유용하게 이용할 수 있다. 압전 에너지 하베스팅 소자의 개발은 고효율 압전 에너지 소재를 개발하는 것으로부터 시작하므로, 압전 에너지 소재의 특성을 먼저 평가하게 된다. 앞서 언급한 탄성 계수(elastic stiffness), 압전 상수(piezoelectric constant), 유전율(dielectric constant)의 물성 평가를 통해 소재의 특성을 파악할 수 있다.

적용 대상에 맞는 압전 소재를 선택하여, 이를 포함한 소자를 설계, 제작한 후 소자/시스템의 특성 평가(device characterization)를 하게 된다. 이때, 기계적 거동으로는 기계적 변위, 전기적 성능으로는 전력과 전압을 측정하게 된다. Fig. 5[4]에 압전 에너지 소자의 특성 평가를 위한 실험 장치의 도식을 나타내었다. 구동 시스템을 통하여 압전 에너지 하베스팅 소자를 가진하면서, laser vibrometer를 이용하여 기계적 변위를 측정하는 동시에, 전기 저항 값을 변화시켜 가며 소자의 전압과 전력 성능을 평가하게 된다. 얻어진 값들은 계산적으로 얻는 값과 비교, 분석하여 주어진 소재와 소자 크기에 대해 전력을 최대화하는 최적치 구동 조건을 찾아내는데 유용하게 이용된다.

3. 주요 연구 동향 및 전망

압전 에너지 하베스팅의 초기 연구는 소자에 충격(impact)를 가하여 압전체에 순간적으로 생성되는 전하를 축전하여 필요할 때 전력을 공급하는 등의 방식으로 시작하여, 지속적인 진동(continuous vibration)을 가하는 조건에서 압전 에너지 하베스팅을 하는 기술로 발전하였다.

대표적인 프로토타입으로는 Fig. 6(a)[7]에서 볼 수 있듯이, 신발의 밑창에 압전 소자를 부착하여 사람이 걸을 때마다 누르는 힘을 전기전력을 생산하는데 사용하는 것이 있다. 이는 2001년 MIT Media Lab의 Shenk 와 Paradiso에 의해 처음 소개된 개념으로, 이들에 따르면 보통 성인 남자

의 걸음으로 250 mW의 전력을 생산할 수 있다.

사람의 보행을 이용한 다른 예로는 Rome 등이 2005년 Science[8]에 발표한 바와 같이 Fig. 6(b)의 책가방을 이용한 경우가 있다. 사람이 걸을 때마다 위아래로 움직이며 위치 에너지가 변하는 것에 착안하여 압전 에너지 소자가 부착된 책가방을 제작한 경우로, 이 책가방을 짰어진 사람의 보행 속도가 6.5 km/h일 때 대략 8W의 전력을 생산하는 것이 가능하다고 한다.

궁극적으로 압전 에너지 하베스팅을 통해 이루고자 하는 목표는 움직일 수 있고(mobile), 선이 필요 없으며(wireless), 가능하다면 배터리가 필요하지 않은(battery-less), 또는 최소한으로 사용할 수 있는 자가 구동형 소형 전자기기 또는 센서 시스템을 구현하는 것이다. IMEC에서는 질화알루미늄(AlN)을 기반으로 한 압전 에너지 소자로 전력을 공급하여 자가 구동이 가능한 무선 센서 시스템을 선보인 바 있다(Fig. 6(c)[9]). 2010에 발표한 바에 따르면, 500 Hz에서 60W 가량의 전력을 생산 가능하다고 한다.

최근에는 나노 소자에 전력을 공급할 수 있는 나노발전기(nano-generators)에 많은 관심이 쏟아지고 있는데, 이 중 가장 대표적인 것은 산화아연(ZnO) 나노와이어를 이용한 나노발전기로 이는 Georgia Institute Technology의 Zhong-Lin Wang 그룹에서 2004년 Science에 발표한 것[10]을 시작으로 현재 전 세계적으로 많은 그룹에서 활발히 연구가 진행 중이다(Fig. 6(d)).

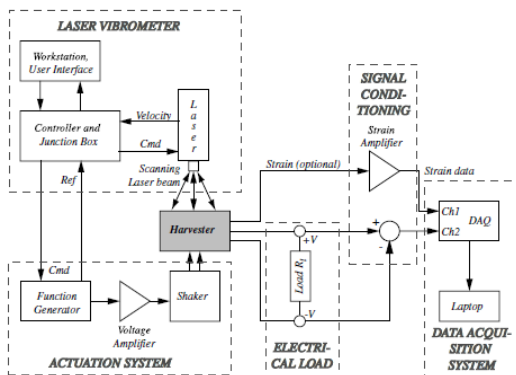


Fig. 5 Illustration of experimental setup for the characterization of a piezoelectric vibration energy harvesting system[4]

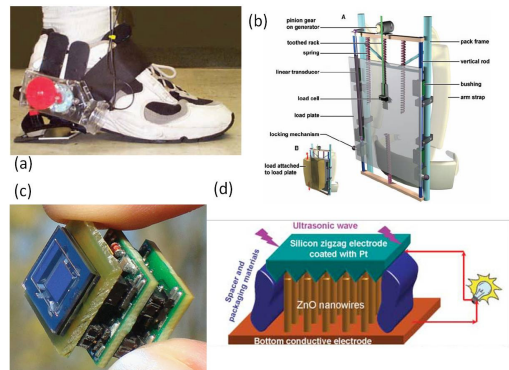


Fig. 6 Prototype devices: (a) shoe-inserted piezoelectric harvester[7], (b) backpack-type piezoelectric harvester[8] (c) self-powered wireless sensor by IMEC[9] and (d) ZnO nanowire-based nanogenerators[10]



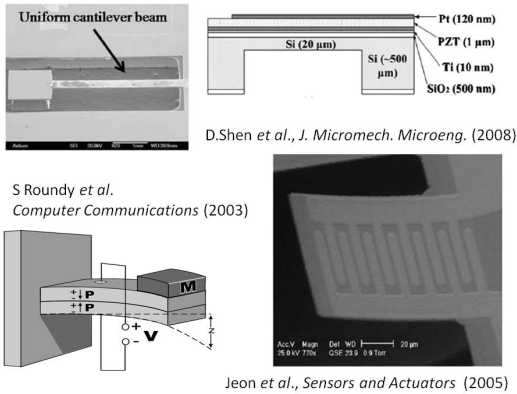


Fig. 7 Cantilevered piezoelectric energy harvester devices reported in the literature[12]

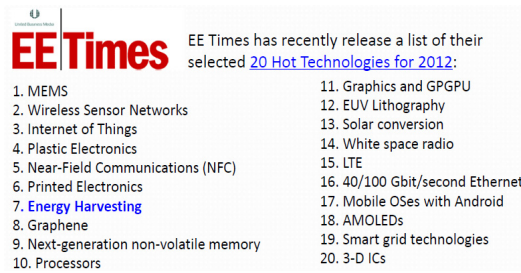


Fig. 8 20 hot technologies for 2012 reported by EE Times[13]

위에서 살펴본 프로토 타입 시스템에 장착되는 단위 소자는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 주로 외팔보(cantilever) 구조를 가지는 경우가 많다. 최근에는 더 넓은 범위의 주파수 영역에서 에너지 하베스팅을 하기 위해 압전과 구조의 비선형성에도 큰 관심이 쏟아지면서 외팔보 이외의 다양한 기하학적 구조를 가지는 압전 에너지 하베스팅 소자를 제작하여 그의 특성을 평가하는 연구가 활발하다[11].

#### 4. 맺음말

지금까지 압전 물질을 이용하여 주위에 다양하게 존재하는 기계적 진동에너지를 유용한 전기 에너지로 변환하여 사용할 수 있는 압전 에너지 하베스팅에 대하여 소개하였다. 압전 에너지 하베스팅의 입력 에너지원인 기계적 진동 에너지원과 생산 가능한 전력의 범위를 살펴본 후, 기본

적인 압전 에너지 하베스팅의 시스템 구성과 소재와 소자의 특성 평가 방법에 대해 기술함으로써 압전 에너지 하베스팅에 대한 전반적이고 근본적인 이해를 돕고자 하였다.

압전 에너지 하베스팅은 압전 물질이 오랜 기간 연구되고, 구동기와 센서 등에 이미 상용화되어 사용된 것에 비해, 그 연구 기간이 그리 길지 않지만 현재 에너지라는 주제와 관련하여 큰 관심을 끌고 있는 분야이다. 압전 물질에 대한 기존의 탄탄한 이론과 응용 기술을 압전 에너지 하베스팅 기술에 적용이 가능하다는 것도 큰 이점이라 할 수 있다. EE Times[13]에서 2012년의 가장 유망한 기술 20선을 지정하였는데, 에너지 하베스팅이 그 중 7번째라는 것은 주목할 만한 사실이며, 태양광 전지, 열전과 더불어 압전 에너지 하베스팅의 기술의 발달에 큰 기대를 걸어볼 수 있다. 압전 에너지 하베스팅 연구는 기계, 재료, 전기/전자의 다양한 분야의 융합 연구가 요구된다. 근본적인 물성의 이해에서부터 시스템의 최적화까지 아우르는 연구를 통해 좀더 지속적이고, 안정적으로 충분한 전력을 생산하는 압전 에너지 하베스팅 시스템을 구현하는 것이 필요하겠다.

#### 참고문헌

- [1] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi and A. M. Sastry, "Powering MEMS portable devices-a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems," *Smart Mater. Struct.*, 17, 043001, (2008)
- [2] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabeey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Computer Communications*, 26, pp. 1131-1144 (2003)
- [3] N. E. duToit, B. L. Wardle and S-G. Kim, "Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters," *Integr. Ferroelectr.*, 71, 121-60, (2005)
- [4] N. E. du Toit, "Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester," Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology (2005)

- [5] M. Kim, M. Hoegen, J. Dugundji and B. L. Wardle, "Modeling and experimental verification of proof mass effects on vibration energy harvester performance," *Smart Mater. Struct.*, 19 045023, (2010)
- [6] T. Ikeda, "Fundamentals of Piezoelectricity." (New York: Oxford University Press), (1996)
- [7] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics," *IEEE Micro.*, 21, pp. 30-42 (2001)
- [8] L. C. Rome, L. Flynn, E. M. Goldman and T. D. Yoo, "Generating electricity while walking with loads," *Science*, 309, 1725 (2005)
- [9] imec news - imec, 2008 ([http://www2.imec.be/be\\_en/press/imec-news/imec-reports-record-power-for-micromachined-piezoelectric-energy-harvester.html](http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/imec-reports-record-power-for-micromachined-piezoelectric-energy-harvester.html))
- [10] Z. L. Wang and J. Song, "Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays," *Science*, 312, 242 (2006)
- [11] D. Zhu, M. J Tudor and S. P. Beeby, "Topical review: Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvester," *Meas. Sci. Technol.*, 21, 022001 (2010)
- [12] M. Kim, "Materials and device design for MEMS piezoelectric mechanical vibration energy harvesters," Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2012)
- [13] <http://magazine-directory.com/Electronic-Engineering-Times.htm>