

Piezoelectric Energy Generation Technology

송현철 연구원, 강종윤 책임연구원, 윤석진 책임연구원 (한국과학기술연구원 전자재료센터)

1. 서론

최근 화석연료의 고갈 및 이로 인한 지속적인 에너지 가격 상승과 화석연료의 온실가스 배출로 인한 환경문제가 크게 제기됨에 따라 신재생 에너지 및 에너지 효율 향상에 대한 사람들의 관심이 크게 높아지고 있다. 자동차, IT 통신, 환경 등 산업계 전반에 걸쳐 에너지 효율 향상 및 에너지 저감 기술 개발에 노력을 기울이고 있으며, 환경을 훼손하지 않으면서도 안정적으로 공급이 가능한 미래의 새로운 에너지 자원을 개발하기 위해서도 다양한 시도를 하고 있다.

특히, 새로운 형태의 신재생 에너지인 에너지 하베스팅 (Energy harvesting) 기술의 경우 최근에 크게 각광을 받고 있다. 에너지 하베스팅 기술은 우리 주변에서 버려지는 에너지를 우리가 쓸 수 있는 전기에너지로 변환하여 이용하는 것으로서, 전자제품이나 여러 기기들의 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 궁극적으로는 추가적인 에너지 공급 없이 주변의 에너지를 이용하여 독립적으로 (Stand-alone) 구동이 가능하도록 하는 기술이다.

에너지 하베스팅 기술은 크게, 오래전부터 연구되어 오고 있는 태양광 발전과 열전소자의 Zeeback 효과를 이용하여 온도차로부터 전기 에너지를 얻는 열전 발전, 그리고 압전체를 이용하여 주변의 진동이나 충격으로부터 전기 에너지를 얻는 압전 발전으로 나눌 수 있다. 특히, 압전체를 이용한 에너지 하베

스팅 기술은, 압전체에 기계적 변형이 인가되면, 전기 에너지가 발생하는 효과를 이용하여 주위의 버려지는 힘이나 압력, 진동 같은 에너지를 우리가 사용할 수 있는 전기 에너지로 변환하여 주는 것을 말하며, 기존의 Magnetic을 이용한 발전보다 작은 진동을 전기 에너지로 변환 하는데 용이할 뿐만 아니라 에너지 변환 효율 또한 높은 장점을 가지고 있다 [1-4]. 그리고 압전을 이용한 에너지 하베스팅은 태양광이 없는 어두운 곳이나 밤에도 발전을 할 수 있는 이점을 가지고 있다. 그래서 항상 진동이 있거나, 압력이나 힘이 작용하는 곳, 그리고 물의 흐름을 있거나 바람이 부는 곳에서도 사용될 수 있을 것으로 예측된다.

압전을 이용한 에너지 하베스팅의 경우, 소자의 사이즈에 따라서 크게 Macro-scale의 압전 에너지 발전과, MEMS를 이용한 Micro scale 에너지 발전으로 나누어 볼 수 있다. 크기에 따라서 연구 방향과 원리에 차이가 있으며, 그 응용처 또한 차이가 난다. Macro-scale 압전 발전의 경우 사람의 움직임이나 자동차의 진동 등과 같이 큰 움직임이나 진동으로부터 에너지를 발전하여, 충전을 통해 보조 전력으로 사용하거나 대용량 발전을 하는 반면, Micro scale 압전 발전의 경우는 MEMS 공정을 이용하여 제작하여, 소량의 진동이나 충격으로부터 발전하여, 센서나 소형 전자기기의 전원이나 보조전원으로 사용하는 것을 목적으로 한다.

본고에서는 압전 에너지 하베스터의 기술 개념과 원리에 대해서 설명하고, Macro-scale 압전 에너지 발전과, MEMS를 이용한 Micro scale 에너지 발전에



서의 개발 이슈 및 최근 연구 동향에 대해서 소개하고자 한다.

2. 압전 에너지 하베스팅의 에너지 변환 및 Coupling

압전 하베스팅은 그림 1에서와 같이 기본적으로 외부의 기계적 에너지를 압전재료에 전달하는 단계, 전달된 기계적 에너지를 압전재료를 이용하여 전기 에너지로 변환하는 단계, 변환된 에너지를 전기적인 회로를 통하여 Super-capacitor나 2차 전지에 축전하는 단계 등 크게 3단계의 과정으로 이루어져 있다고 할 수 있다. 따라서 기계적인 에너지를 효과적으로 전기적 에너지로 변환, 저장하기 위해서는 첫번째로, 외부의 진동을 효과적으로 압전체에 전달할 수 있도록 기계적인 구조들 사이에 Mechanical to Mechanical coupling이 이루어야 한다. 즉 다시 말해서, Cantilever 구조와 같이 외부의 기계적 에너지를 효율적으로 압전체에 전달할 수 있도록 에너지 하베스터의 구조를 효율적으로 설계하는 것이 필요하다고 할 수 있으며, 외부 진동과 에너지 하베스터가 기

계적 공진을 일으킬 수 있도록 에너지 하베스터의 고유진동수를 외부 진동수에 맞춰주는 Frequency tuning 또한, Mechanical to Mechanical coupling과 관련이 깊다고 할 수 있다.

두번째로, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 효율적으로 변환하는 것이 필요하며, 이는 에너지 하베스터에 사용되는 압전재료의 물성과 관련이 깊다. 그림 1의 2단계에서 얘기하는 Mechanical to Electrical coupling은 압전 재료의 에너지 변환 효율을 나타내는 전기-기계결합 계수를 의미한다고 볼 수 있다. 즉 압전 하베스터의 에너지 변환 효율을 높이기 위해서는 하베스터에 사용되는 재료 자체의 에너지 변환효율을 높이는 것이 필요하며, 하베스터에 적합한 압전 재료를 개발하는 것이 필요하다.

끝으로, 생성된 전기 에너지를 외부회로에 효율적으로 전달하기 위해서 Electrical to Electrical coupling이 되어야 한다. 교류형태로 발생된 전기 에너지를 이용하거나 충전하기 위해서는 정류회로를 이용하여 직류로 변환하기는 것이 필요한데, 이때 정류회로를 지나면서 생기는 에너지 손실을 최소화하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 저손실 정류회로에 대한 연구 또한 이루어져야 된다. 뿐만 아니라

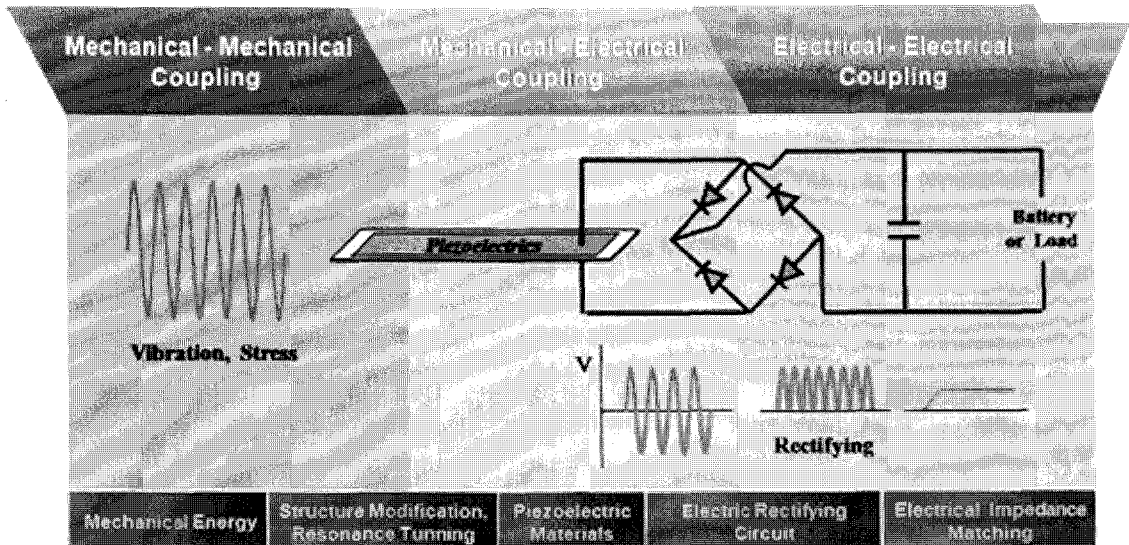


그림 1. 압전 에너지 하베스터 3단계 에너지 변환 및 에너지 Coupling.

회로와 압전체 사이의 Impedance matching 통해 회로와 압전체 사이의 Impedance 불일치에서 오는 에너지 손실을 최소화할 필요가 있다.

현재까지의 연구들을 종합적으로 살펴보면, 위의 3단계와 관련된 분야, 즉 기계, 재료, 전기회로의 융합적인 형태로 연구가 이루어지고 있으며, 에너지 하베스터의 변환효율을 최대화하기 위해서는 위의 어느 한 단계의 연구가 필요한 것이 아니라 각 단계별 에너지 효율을 최대화 시켜야 된다. 즉, 3단계의 총체적이고 융합적인 연구를 통해서만이 높은 에너지 변환 효율을 가지는 에너지 하베스터를 개발할 수 있다.

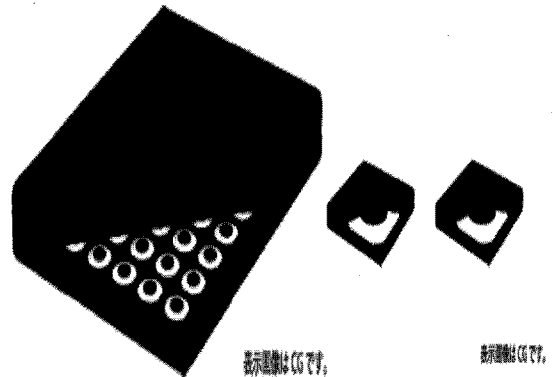


그림 2. 음력을 이용한 압전 발전판 [5].

3. Macro-scale 압전 에너지 발전

Macro scale 압전 에너지 발전 경우 현재 일본이나 유럽의 대학과 벤처기업 중심으로 많이 연구가 진행되고 있으며, 주로 사람이 많이 지나다니는 지하철 개찰구나, 자동차 도로 등의 큰 움직임과 큰 하중이 가해지는 곳으로부터 에너지를 얻는 연구가 활발히 진행되고 있다.

일본의 게이오 대학 출신들이 세운 Soundpower 라는 벤처 기업에서는 공기 중에 발생하는 진동음으로부터 전기 에너지를 발전하는 발전기를 개발하였다. 음력 발전은 압전 스피커가 작동하는 원리를 역으로 이용하여, 사람이 지나갈 때 발생하는 진동음을 압전체를 통해서 전기가 발생되도록 하였다. 그림 2는 Soundpower에서 제작한 발전판을 보여주는 것으로써, 발전판 내부에 여러 개의 압전 스피커가 있어서 진동판에서 발생된 음력이 압전 스피커를 통해서 발전을 하게 된다. 그림 2의 오른쪽 그림은 음력 발전판의 단위 소자를 보여주는 것으로써, 가속도 1 G, 10 Hz의 진동이 가해졌을 때 약 5 mW의 전력이 발생할 수 있다고 밝히고 있다 [5].

현재 일본 철도회사인 JR에서는 사람들이 지하철 개찰구를 통과할 때 일으키는 진동을 이용하여, 자동개찰기를 구동시키는 실험을 하고 있으며, 이 때 하루에 6000 Ws 전력을 생산할 수 있다고 한다. 그리고 도쿄의 고속도로와 고시키자쿠라 대교에 발전판

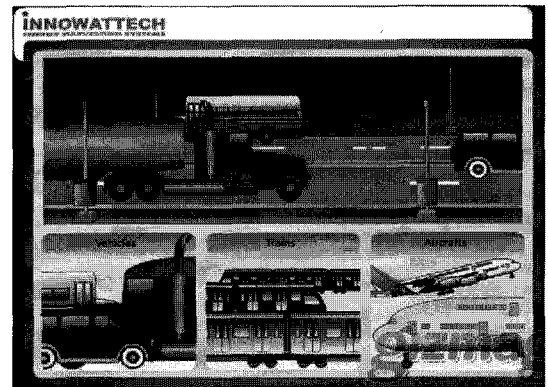


그림 3. 이스라엘 INNOWATTECH의 대형교통수단들의 하중을 이용한 발전 [6].

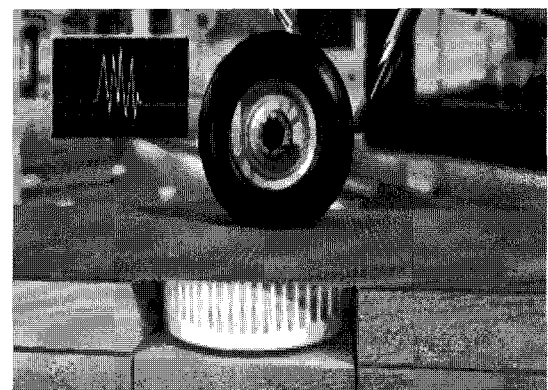


그림 4. INNOWATTECH의 자동차의 하중을 이용한 발전모습 보여주는 모식도 [6].



을 설치하여, 자동차의 진동으로부터 하루 동안 약 0.24 kW의 전력을 생산할 수 있었으며, 이를 이용하여 다리나 거리의 조명을 밝히는 실험을 진행하고 있다고 한다.

이스라엘의 INNOWATTECH 경우에도 압전체에 하중에 가해질 때 전기가 발생하는 원리를 이용하여, Column 형태의 압전체가 여러개 세워져 있는 모양의 압전 발전기를 그림 3과 같이 자동차 도로나 철도 레일, 하중이 있는 기계 등에 설치하여 이로부터 전기 에너지를 생산하는 연구를 진행하고 있다. 그림 4는 INNOWATTECH의 자동차의 하중을 이용한 발전을 하는 원리를 보여주고 있으며, 표 1에서는 INNOWATTECH의 IPEG (Innowattech Piezo Electric Generator)를 자동차 도로와 철도에 설치했을 때 차량 통행량에 따른 발전량을 보여주고 있다. 1 km의 도로에서 시간당 최대 200 kWh를 발전할 수 있다고 하며, 철도에서는 1 km 철길에서 시간당 최대 120 kWh를 발전할 수 있다고 밝히고 있다. 이를 볼 때 앞으로 에너지 가격이 상승함에 따라서 압전체를 이용한 대용량 발전 또한 가능할 것으로 보여진다.

그림 5에서 보는 바와 같이 영국에서는 압전 발전기를 나이트 클럽 바닥에 설치하여 사람들의 움직임으로부터 전기를 생산하여, 나이트클럽의 보조 전력으로 사용하고 있다는 뉴스를 발표하기도 하였다.

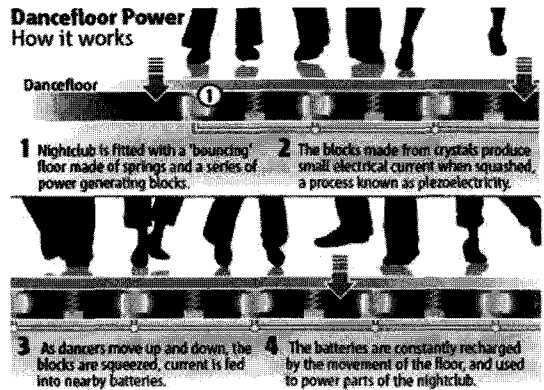
한국과학기술연구원 (KIST)에서는 그림 6과 같이 보도블럭 밑에 설치하여, 사람이 지나갈 때 생기는 하중을 이용하여 발전이 가능한 압전 발전기를 발표하였다. 압전체에서 발생하는 전기량은 변위의 변화 속도가 빠를수록 더 많은 에너지를 발생시키기 때문에, 발생 에너지를 향상시키기 위해 압전체를 직접 누르는 방식이 아니라 캔틸레버를 튕겨주는 방식을 이용하여 제작되었다. 그림 7에서 보이는 것처럼 직선운동을 회전운동으로 바꿔줄 수 있는 베어링을 이용하여 밟을 때 생기는 직선 변위를 회전운동으로 변환하여 캠이 회전하면서 압전 캔틸레버를 튕겨주는 원리를 이용하였다. 약 3 mm의 상하 변위를 발생시켰을 경우 캠의 회전이 1/4 바퀴 회전이 가능하였으며, 30개의 압전 캔틸레버들을 7번 이상 튕길 수 있었다. 그리고 KIST에서 개발된 압전

표 1. INNOWATTECH의 자동차 도로와 철도에서의 차량 통행량에 따른 발전량 [6].

Road		Rail	
Avg. trucks/buses per lane per hour	Output per 1 km (kWh per hour)	Avg. wagons per pair of tracks per hour	Output per 1 km (kWh per hour)
500	200	300	120
400	160	250	100
300	120	200	80
200	80	150	60
100	40	100	40



(a)



(b)

그림 5. 나이트 클럽에서 압전 발전기를 이용한 발전.

하베스터의 경우 1번의 Step으로 300개 이상의 LED 전구를 점등할 수 있었으며, 벌크 압전체를 직접 누를 때에 비해 아주 높은 에너지 발전량을 나타내었다.

대용량의 압전 하베스터를 개발하기 위해서는, 큰 하중이나 무게로부터 최대한의 전기 에너지를 발생시킬 수 있는 구조를 개발하는 것이 중요하며, 실용적인 측면에서 볼 때, 발전량 대비 단위 면적당 가격을 얼마나 낮출 수 있는지에 대한 경제적 측면과 시간에 따른 발전량의 저하 없이 지속적으로 발전할 수 있는 내구성에 관한 문제도 중요한 요소로 고려되어야 한다.

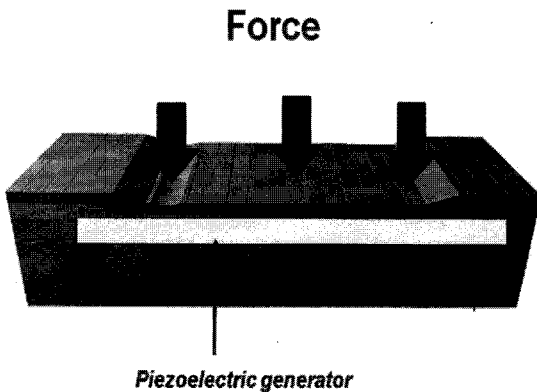


그림 6. 한국과학기술연구원에서 개발한 보도블럭을 이용한 압전 발전기.

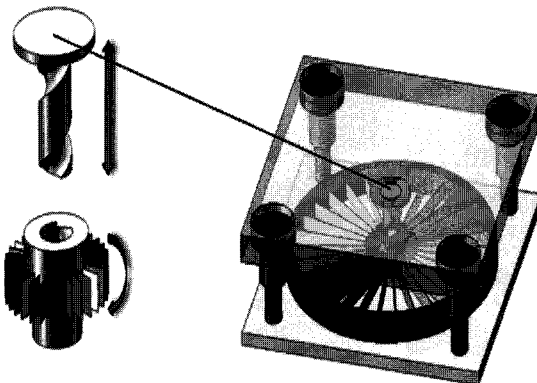


그림 7. 한국과학기술연구원에 개발한 회전운동을 이용한 Stepping 압전 발전기.

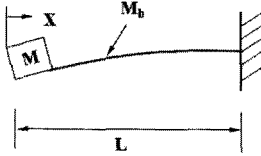
4. Micro scale 압전 에너지 발전

USN (Ubiquitous Sensor Network)란 필요한 곳에 RFID나 센서를 부착하고 이를 통해 기본적인 사물의 인식정보는 물론이고, 주변의 환경정보 (온도, 습도, 오염정보, 건물의 균열 등)까지 탐지해 이를 실시간으로 네트워크에 연결하여 총체적으로 그 정보를 관리하는 것을 말한다. 이러한 USN을 실현하는 데는 많은 기술적 어려움이 있지만, 그 중에서도 USN에 사용되는 공급 전원에 대한 문제점이 가장 크다고 할 수 있다. USN에 이용되는 센서들은 여러곳에 광범위하게 설치되어야 하기 때문에 전력선으로 전력을 공급하거나 주기적인 배터리의 교체에 많은 어려움이 있으며, 특히 산간오지나 바다속 등과 같은 환경에서는 위의 문제가 더욱 부각될 수 있다. 그래서 이러한 센서들은 자체 발전 전원을 가지고 구동되어야 한다고 할 수 있다. 즉, 주변의 버려지는 에너지를 수확하여 전기 에너지로 변환하고 저장하여 USN 센서의 전력원으로 사용되어야 한다는 것이다. 특히 이러한 USN에 사용되는 에너지 하베스터의 경우 Sensor node와 같이 패키징 되어야 하기 때문에 대부분 MEMS를 이용한 Micro-scale의 압전 하베스터의 형태로 개발이 요구되고 있다.

앞에서 언급된 것처럼, 압전 에너지 하베스터에서 최대 에너지를 얻기 위해서는 에너지 하베스터가 주변 진동과 공진을 이루어야 한다. 그리고 표 2에 나타낸 것처럼 우리 주변에 얻을 수 있는 대부분의 진동 에너지들의 주파수는 200 Hz 이하가 거의 대부분이라는 것을 알 수 있다. 그러나 Micro-scale 압전 에너지 하베스터의 경우, 아래의 캔틸레버의 고유진동수를 나타낸 식 (1)에서 알 수 있는 것처럼, 캔틸레버의 고유진동수는 사이즈에 반비례하기 때문에 작은 사이즈의 Micro-scale 에너지 하베스터의 고유진동수는 수백 Hz 이상, 심지어는 수 kHz를 나타내게 된다. 그러므로 Micro-scale의 압전 에너지 하베스터를 실제적으로 적용하기 위해서는 Micro-scale 압전 에너지 하베스터의 고유진동수를 200 Hz 이하로 낮추어서 주변 진동과 진동수를 Matching하는 것이 필수적이다.



$$F = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{3EI}{L^3(M + 0.24M_b)} \right]^{1/2} \quad (1)$$



M = mass, M_b = mass of beam, L = span of beam,
I = area moment of inertia of beam about neutral axis

한국과학기술연구원 (KIST)에서는 그림 8에서와 같이 Spiral 형태의 MEMS 압전 에너지 하베스터를 고안함으로써, 작은 사이즈에서도 100 Hz 대역의 낮은 고유진동수를 가지는 압전 에너지 하베스터를 구현하였다. 뿐만 아니라 이 경우 비틀림 진동인 전단 모드 (Shear mode) 또는 d₁₅ 모드를 이용할 수 있기 때문에, 식 (2)에서와 같이 에너지 하베스터의 출력이 압전 상수 d에 비례하고, 3 d₃₁ ≈ d₃₃ < d₁₅ 인 관계임을 볼 때, d₃₁ 모드를 사용하는 일반적인 캔틸레버나, d₃₃ 모드를 사용하는 IDT 타입의 에너지 하베스터에 비해서 더 큰 출력을 나타내었다.

$$u_{max,output} \propto -\frac{1}{4} \frac{d_{xy}^2}{\epsilon_0 K_{xy}} T^2 = -\frac{1}{4} \frac{k_{xy}^2}{Y} T^2 \quad (2)$$

k : electro-mechanical coupling factor,
d : piezoelectric constant, Y: Young's modulus,
K : dielectric constant, T: stress (Force/Area),
u_{max,output}: maximum output power

주변 진동과 Micro-scale 압전 에너지 하베스터의 고유 진동수를 Tuning하기 위한 또 다른 방법으로는, Frequency pumping이 있다. 그림 9에 나타낸 것처럼 빗 형태의 구조물을 이용하여, 직접적으로 타격을 하거나 자석을 이용하여 진동을 전달함으로써, 구조물의 가치의 갯수배 만큼 진동을 Pumping시킬 수가 있다. 이 경우 에너지 하베스터의 출력(P)이 진

동수(f)에도 비례하기 때문에 에너지 하베스터의 출력 또한 향상시킬 수 있다.

표 2에서 나타낸 것처럼 우리 주변의 진동은 진동수가 지속적으로 하나에 고정되어 있기도 하지만, 대부분 자연적인 진동의 경우 넓은 주파수 대역을 가지고 진동이 변화하거나, 여러 주파수 대역의 진동이 섞여서 진동을 한다. 그러므로 에너지 하베스터의 고유진동수가 하나의 주파수에 고정되어 있는 경우, 실제적인 적용에 있어서는 공진점을 벗어나서 구동하는 경우가 많기 때문에 높은 에너지를 얻는데 어려움이 있다. 그러므로, Micro-scale 압전 에너지 하베스터를 제작함에 있어서, 넓은 영역의 고유진동수 주파수 대역을 가지거나, 주변 진동원에 따라서 고유진동수가 변화하는 에너지 하베스터에 대한 연

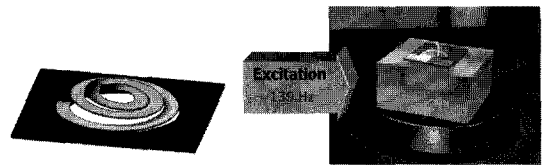


그림 8. 한국과학기술 연구원에 개발한 나선형 구조의 저주파 MEMS 압전 에너지 하베스터.

표 2. 생활주변에서의 진동원의 종류 및 특성 [7].

Vibration Source	Frequency of Peak (Hz)	Peak Acceleration (m/s ²)
Kitchen Blender Casing	121	6.4
Clothes Dryer	121	3.5
Door Frame (just after door closes)	125	3
Small Microwave Oven	121	2.25
HVAC Vents in Office Building	60	0.2-1.5
Wooden Deck with People Walking	385	1.3
Bread Maker	121	1.03
External Windows (size 2ft x 3ft) next to a Busy Street	100	0.7
Notebook Computer while CD is Being Read	75	0.6
Washing Machine	109	0.5
Stairs leading to the Second Story of a Wood Frame Office Building	28 to 100	0.2
Refrigerator	240	0.1

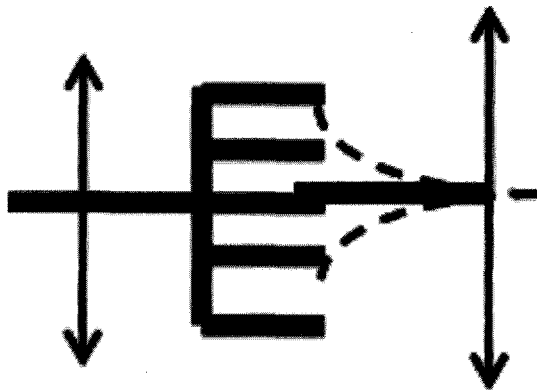
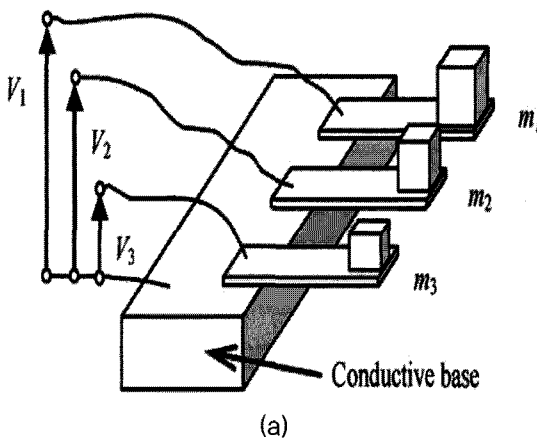
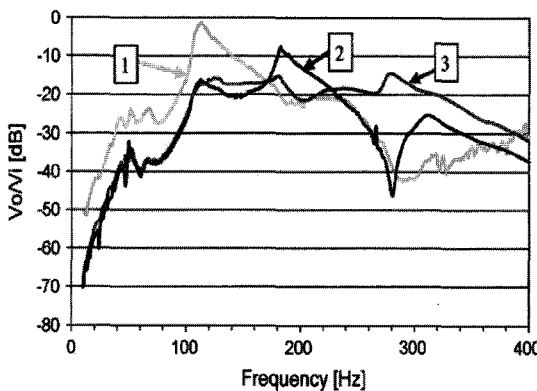


그림 9. 압전 에너지 하베스터의 Frequency pumping 방법.



(a)



(b)

그림 10. 여러 주파수 대역의 캔틸레버 array와 주파수에 따른 출력 전압 그래프 [8].

구가 필요하다.

그림 10은 표준무게 (Proof mass)의 무게가 다른 캔틸레버 타입의 압전 에너지 하베스터 여러개를 한번에 같이 나열 (Array)함으로써, 전체적으로 봤을 때, 광대역의 공진 주파수를 가지는 에너지 하베스터를 제작할 수 있었다 [8]. 공진 주파수가 서로 다른 여러개의 에너지 하베스터를 공진 주파수가 넓은 영역에 걸쳐 서로 이어지게 함으로써, 전체적으로 봤을 때 넓은 주파수 대역 모두에서도 비교적 높은 에너지를 발생시키는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 단일 공진 주파수를 가지는 에너지 하베스터와 달리 비공진 영역에 있는 에너지 하베스터가 항상 존재하기 때문에 출력이 떨어지는 단점이 있다.

캔틸레버 에너지 하베스터의 고유 진동수는 식 (1)에서 나타난 것과 같이 Young's modulus, 즉 Stiffness에 따라서 변할 수 있기 때문에 그림 11에서와 같이, 캔틸레버에 스트레스를 가할 수 있는 구조로 제작하여 Stiffness를 변화시킴으로써, 고유진동수를 변화시켜 주변 진동의 주파수에 따라서 손쉽게 Frequency tuning을 할 수 있게 제작하였다. 그림 12에서 보는 것과 같이 캔틸레버에 가해지는 Preloads의 변화에 따라서 공진 주파수가 연속적으로 변화되는 것을 알 수 있으며, Preloads 변화시킴으로써 광대역의 전체 주파수에서 Frequency tuning을 할 수 있을 보여주었다.

우리 주변에 존재하는 광대역의 주파수 진동으

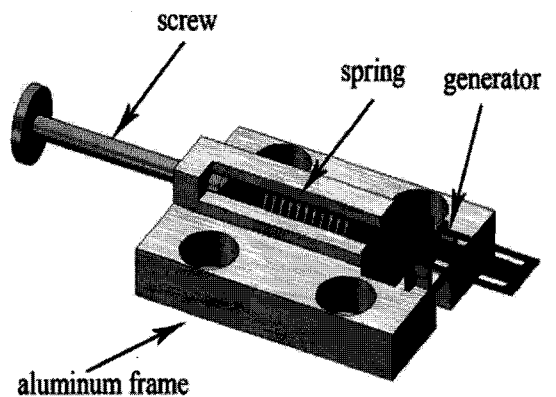


그림 11. 캔틸레버 빔에 가해지는 기계적 스트레스 따라서 고유진동수를 변화시킬 수 있는 구조를 가진 에너지 하베스터의 모식도 [9].

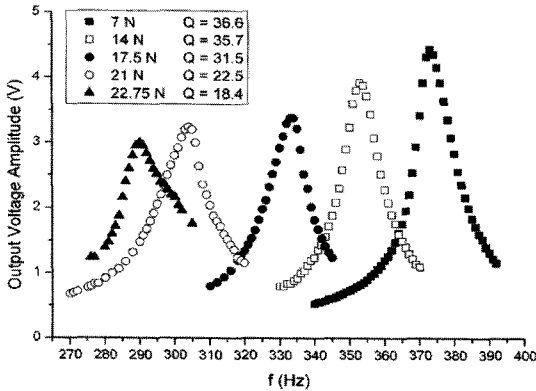


그림 12. Compressive preloads 변화에 따른 캔틸레버의 공진주파수 그래프 [9].

로부터 높은 에너지를 얻기 위해서는 에너지 하베스터의 고유진동수를 주변 주파수에 맞추어 Frequency tuning하는 것이 필수적이며, 실용화적인 측면에서 봤을 때, 그림 11에서와 같이 Passive 형태의 Frequency tuning이 아닌, Active 형태로 주변주파수에 따라 자동으로 Frequency가 Tuning될 수 있는 방법에 대해서 연구가 많이 진행되어야 할 것이다.

5. 결론

압전 에너지 하베스팅은 유비쿼터스 센서 등의 Micro-scale의 소형동력원에서부터 Macro-scale의 자동차의 보조동력원에 이르기까지 전자산업에서 자동차, 에너지 산업 등에 다양하게 활용될 것으로 기대되며, 그 응용가능성은 무한히 많은 아이디어의 창출에 의해서 무한히 실현될 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 많은 응용 가능성을 실현화하기 위해서는 고효율 압전 소재기술, 고효율 압전 하베스터 구조 설계 및 회로설계기술의 융합연구가 필요하며, 이를 위해서는 체계적이고 종합적인 연구, 기술개발 전략과 각각의 응용 분야의 요구물성에 부합되는 각 요소기술 개발이 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Shad. Roundy "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion", Ph.D. Dissertation, U. C. Berkeley 2003.
- [2] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics", IEEE Pervasive Computing, 4:18-27, 2005.
- [3] G. K. Ottman, H. F. Hoffman, A. C. Bhatt and G. A. Lesieutre, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply", IEEE Trans. Power Electron, 18:696-703, 2003.
- [4] M. Philipose, J. R. Smith, B. Jiang, A. Mamishev, S. Roy and K. Sundara-Rajan, "Battery-Free Wireless Identification and Sensing", IEEE Pervasive Computing, 4: 37-45, 2005.
- [5] <http://www.soundpower.co.jp>
- [6] <http://www.innowattech.co.il>
- [7] Roundy, S., Wright, P. K., and Rabaey, J., "A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes", Computer Communications, 26: 1131 - 1144, 2003
- [8] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, A. Taroni "Piezoelectric multifrequency energy converter for power harvesting in autonomous microsystems", Sens. Actuators A, 142: 329-335, 2008
- [9] C. Eichhorn, F. Goldschmidtboeing and P. Woias, "Bidirectional frequency tuning of a piezoelectric energy converter based on a cantilever beam", J. Micromech. Microeng., 19: 094006-094012, 2009

저|자|약|력|



성 명 : 송현철

- ◆ 학 력
 - 2004년 고려대학교 공과대학 재료금속공학부 공학사
 - 2006년 고려대학교 대학원 재료공학과 공학석사

- ◆ 경 력
 - 2006년 - 현재

한국과학기술연구원 전자재료센터 연구원



성 명 : 강종운

- ◆ 학 력
 - 1993년 연세대학교 공과대학 전기공학과 공학사
 - 1995년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사
 - 2000년 연세대학교 대학원 전기컴퓨터공학과 공학박사

- ◆ 경 력
 - 2000년 - 현재
 - 2002년 - 2004년

한국과학기술연구원 전자재료센터 책임연구원
The Univ. of Birmingham, Post-doc.



성 명 : 윤석진

- ◆ 학 력
 - 1983년 연세대학교 공과대학 전기공학과 공학사
 - 1985년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사
 - 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학박사

- ◆ 경 력
 - 1988년 - 현재
 - 1995년 - 1996년
 - 2003년 - 2009년

한국과학기술연구원 전자재료센터 책임연구원
Pennsylvania State Univ., MRL, Post-doc.
한국과학기술연구원 전자재료연구센터 센터장

