

Special

Thema

| Piezoelectric Energy Harvesting

1. 에너지 하베스팅

정대용 선임연구원
(KIST 박막재료연구센터)

송현철 연구원
(KIST 박막재료연구센터)

윤석진 책임연구원
(KIST 박막재료연구센터)

"Energy Harvesting-에너지 하베스팅"은 "Power Harvesting" 또는 "Energy Scavenging"과 같은 뜻으로 사용되는 것으로, "자연의 버려지는 에너지를 수확하여 저장하는 기술"을 의미하며, 무선센서네트워크의 소형 독립전원을 제작하는데 많이 연구되고 있다. 에너지 하베스팅에 관한 많은 연구 배경에는, 전자기술의 발전으로 인한 CMOS의 저전력 구동과 유비쿼터스 센서 네트워크 구축이 있다. 유비쿼터스 센서 네트워크는, 저전력 CMOS를 이용한 무선통신모듈과 센서를 부착한 무선센서노드를 넓은 지역에 임의적으로 분포시켜 센싱하고, 센싱자료를 무선으로 보내는 것을 특징으로 하고 있다. 그런데, 넓은 지역에 임의로 분포된 센서노드를 동작시키기 위해서는 전원이 필요하며, 일반적인 방법으로는 전선으로 연결하거나 Battery를 이용해야 한다. 그러나 넓은 지역에 산재한 센서노드를 전선으로 연결하는 것은 현실적으로 매우 어려우며, Battery를 사용할 경우에는 Battery를 주기적으로 교환해야하는 번거로움과 Battery 교체에 따른 공해문제가 발생하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 제시되는 방법이 "자연의 버려지는 에너지를 유용한 전기에너지로 변환"하여 이용하는 에너지 하베스팅이다.

에너지 하베스팅 방법에는 태양광을 이용한 태양발전, 기계적인 에너지를 이용한 압전발전, 기계적인 운동과 전자기적현상을 이용한 발전 및 Capacitive 발전, 폐열을 이용한 열전발전 등이 있으며, 각각의 방법들은 장, 단점을 가지고 있어 주어진 자연환경에 적합한 방법이 이용되고 있다. 예를 들면, 태양발전의 경우 생성되는 에너지양은 크지만 흐린 날이나 실내에서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면, 압전 에너지 하베스팅은 다른 발전방법에 비해 에너지 밀도가 높고, 기후에 관계없이 실내외의 기계진동을 이용할 수 있으며 풍력, 바다의 파도 등의 다양한 형태의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있어 많은 연구가 되고 있다.

KIST의 본 연구팀은 압전 액추에이터를 지난 20년간 연구한 경험을 기반으로 압전 에너지 하베스팅에 관한 연구를 수행하고 있으며, 본고에는 KIST의 연구결과를 바탕으로 압전 에너지 하베스터의 일반적인 내용과

연구동향 그리고 미래연구방향에 대해서 서술하고자 한다.

2. 압전 에너지 하베스팅

2.1 압전 에너지 하베스팅의 이해

압전 에너지 하베스팅은 그림 1에서와 같이 기본적으로 외부의 기계적 에너지를 압전재료에 전달, 전달된 기계적 에너지를 압전재료를 이용하여 전기 에너지로 변환, 변환된 에너지를 전기적인 회로를 통하여 Super-capacitor나 2차전지에 축전하는 크게 3가지 부분으로 이루어져 있다고 할 수 있다. 따라서 기계적인 에너지를 효과적으로 전기적 에너지로 변환, 저장하기 위해서는 첫째, 외부의 진동을 효과적으로 압전체에 전달할 수 있도록 기계적인 Impedance Matching을 이루어야 하며, 둘째, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 재료의 전기-기계 결합계수가 커야 하며, 셋째, 생성되는 에너지를 외부회로에 전달하기 위해서 전기적인 Impedance Matching이 되어야 한다. 현재까지의 연구를 종합적으로 살펴보면, 위의 3가지 분야, 즉 기계, 재료, 전기회로의 융합적인 형태로 연구가 이루어지고 있으며 참여하는 연구자들의 전문분야에 따라 그 접근방식이 조금씩 다른 특징이 있다.

2.2 압전 하베스터 구조

외부의 진동을 효과적으로 압전재료에 전달하기 위해서는 즉 기계적인 Impedance Matching을 이루기 위해서는, 진동의 종류에 따라 압전 하베스터의 구조가 달라져야 한다. 진동은 표 1과 같이 크게 3가지로 나눌 수 있으며 각 진동에 맞는 압전 에너지 하베스터의 구조가 사용되어야 한다.

표 1. 기계적인 진동 종류.

종류	특징
Quasi-static	<ul style="list-style-type: none"> ● Dominant frequency of excitation is much lower than the fundamental resonance frequency of energy conversion devices.(ex : shoes, push button wireless senders, energy harvesting eel etc) ● Low frequency ● High force input
Harmonic	<ul style="list-style-type: none"> ● ex) rotating machine ● First type : Attaching the piezoelectric on the node point of the vibration structure where strain concentrates. Ex) helicopter blade ● Second type : utilize the proof mass to trap the kinetic energy or acceleration of the vibration body. Tuning the frequency into that of vibration source.
Impulsive	<ul style="list-style-type: none"> ● Shorter period of time than its relaxation time. (ex: rolling automobile tires. ● High speed gives large acceleration and duty cycle is less than 10%.

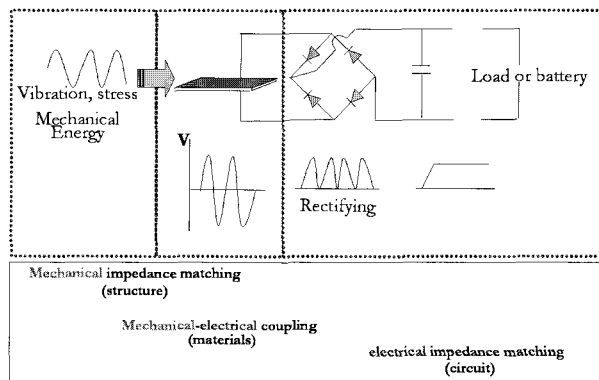


그림 1. 일반적인 압전 에너지 하베스팅 구조.

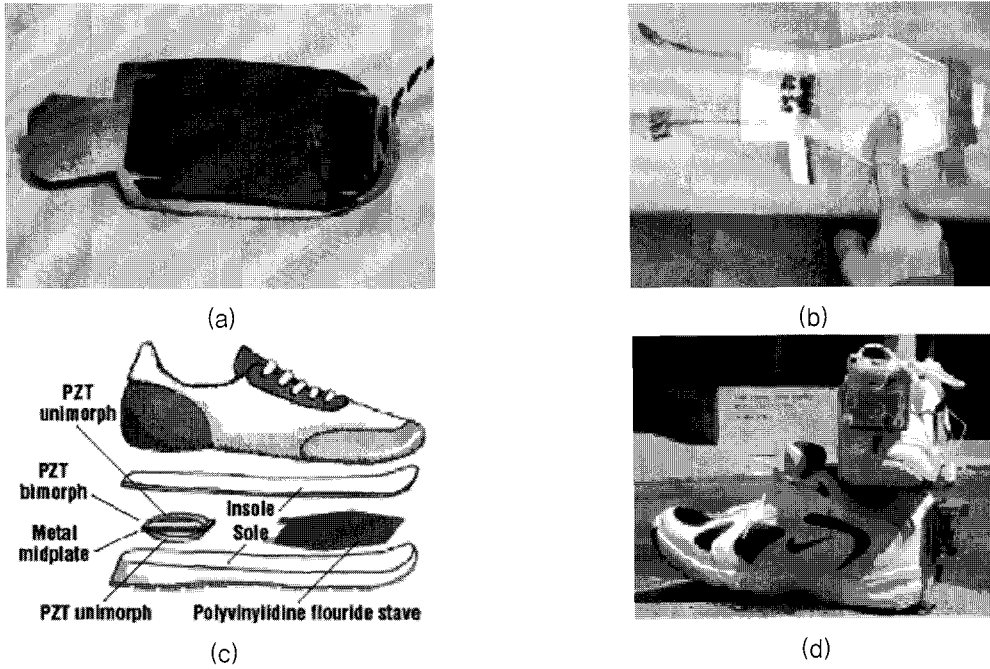


그림 2. (a) A flexible PZT thunder clamshell (b) 16 layer polyvinylidene fluoride bimorph stave (c) The insole of running shoes (d) Power harvesting shoes with heel-mounted electronics[1-2].

기계적인 진동은 식 (1)에서와 같이 힘과 변위의 크기에 의해 에너지양이 결정되므로 힘의 크기와 변위의 크기에 따라 압전 하베스터의 구조가 변경되어야 한다.

$$E = \vec{F} \cdot \vec{l} = m \cdot \vec{a} \cdot \vec{l} \quad (1)$$

여기에서 E 는 에너지, \vec{F} 는 가해주는 힘, \vec{l} 은 변위, m 은 무게, \vec{a} 는 가속도를 나타낸다.

예를 들면, MIT에서는 그림 2에서와 같이 큰 힘과 적은 변위로 대표되며 재료에 Compressive 힘을 가하는 사람의 걸음걸이와 같은 Quasi-static한 진동에서 효과적으로 에너지를 얻기 위해 THUNDER 구조 또는 적층 폴리머를 이용한 압전 하베스터를 제작하였다. 이밖에도 Pennsylvania State Univ.에서는 자동차 엔진의 큰 힘을 이용한 발전에 이용하기 위하여 그림 3의 CYMBAL구조를 이용한 하베스터를 제작하였다[3].

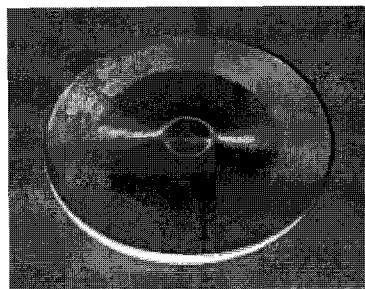
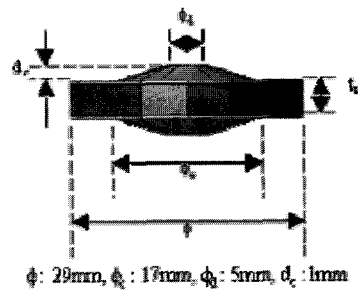
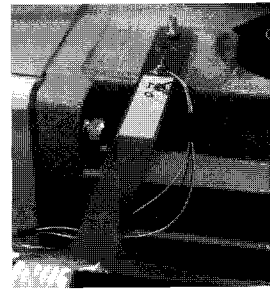


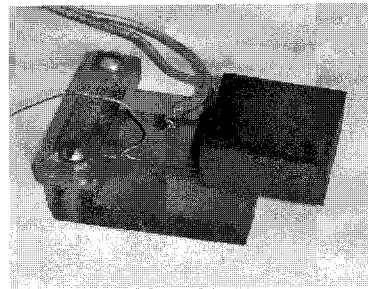
그림 3. Pennsylvania State Univ.에서 제작한 CYMBAL구조의 에너지 하베스터[3].

한편, 세탁기, 전자레인지등의 기계에 의해 발생하는 주기적인 진동은 재료에 Compressive한 힘을 가하기 어렵고, 변위를 최대한으로 확대해야 생성되는 에너지가 증가하므로 캔틸레버형의 에너지 하베스터가 많이 이용되고 있다. 그림 4는 KIST와 미국의 버클리 대학에서 제작한 캔틸레버형 압전 에너지 하베스터를 보여주고 있다. 캔틸레버형 압전 하베스터는 일반적으로 낮은 주파수에서 이용되며, 세라믹의 깨짐을 억제할 수 있으며, 적은 힘으로 큰 변위를 생성하며, 또한 제작비용이 싸다는 장점이 있다.

캔틸레버형 압전 에너지 하베스터의 변위가 최대일 때 압전체에 가해주는 응력이 최대가 되며, 따라서 생성되는 에너지가 최대가 된다. 압전 에너지 하베스터의 최대 변위는 하베스터의 고유 주파수(Natural Frequency)가 진동원의 주파수에 일치할 때 얻을 수 있다. 그러나 표 2와 같이 주위에서 쉽게 접할 수 있는 진동원의 진동주파수는 300 Hz이하이며, 캔틸레버형 압전 에너지 하베스터를 실제 적용하기 위해서는 압전 하베스터의 주파수를 진동원의 주파수에 일치시키는 과정을 거쳐야 한다. 일반적으로, 캔틸레버의 고유 주파수는 그림 4(b)에서와 같이



(a)



(b)

그림 4. KIST에서 제작하여 Vacuum Pump에 부착한 캔틸레버(a), 버클리에서 제작한 캔틸레버(b)[4].

표 2. 진동원의 종류 및 특성[라운드 논문-참고문헌].

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 2ftx3ft) 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

캔틸레버의 끝에 표준무게(Proof Mass)를 가하여 조정한다.

한편, 진동원의 주파수를 캔틸레버의 고유 주파수와 일치시키면 큰 변위를 얻을 수 있으나, 진동원의 주파수가 캔틸레버의 고유 주파수에서 벗어나면 변위가 급격이 줄어들어 출력이 급격이 감소한다. 이러한 캔틸레버의 진동원 주파수에 대해 감도는 캔틸레버의 기계적 품질계수로 표현되며, 진동원의 주파수변화에 따른 출력 특성의 급격한 변화를 방지하기 위해서는 적절한 Bandwidth를 가지는 캔틸레버 구조가 필요하다. 따라서 몇몇 연구자들은 캔틸레버의 진동원 주파수 변화에 따른 출력의 감소를 억제하기 위해 캔틸레버의 형태를 지능적으로 변화시키는 연구를 수행하였다[6].

2.3 압전재료

압전재료의 생성되는 전기에너지는 식 2에서와 같이 재료 특성인 전기-기계결합계수(k , Electro-mechanical Coupling Coefficient)에 의해 결정되며 전기-기계결합계수가 큰 재료의 개발이 필요하다[7].

$$u_{\max, output} \sim -\frac{1}{4} \frac{k^2}{Y} T^2 \quad (2)$$

u 는 생성되는 최대 전기에너지, Y 는 재료의 Young's Modulus, T 는 재료에 가해주는 응력의 크기를 나타낸다. 한편, 재료의 전기-기계결합계수(k)는 식3에서와 같이 표현된다.

$$k^2 = \frac{\text{Electrical Energy}}{\text{Mechanical Energy}} = \frac{d^2 Y}{\epsilon} \quad (3)$$

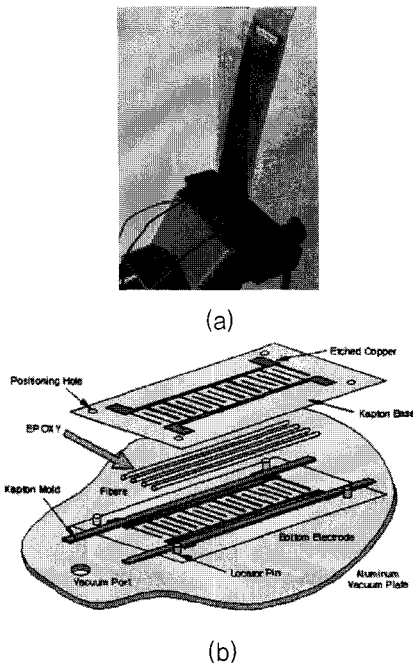


그림 5. Smart Materials社의 Macro-fiber Composite와 이를 이용한 에너지 하베스터[8].

여기에서 d 는 재료의 압전상수, ϵ 는 재료의 유전율을 나타낸다. 대표적으로 많이 사용되는 세라믹 압전재료에는 $Pb(ZrTi)O_3$ (PZT)가 있으며 폴리머 압전재료는 Polyvinylidene Difluoride [PVDF]가 있다. 세라믹 압전재료인 PZT의 전기-기계 결합계수는 $k=0.5$ 로 PVDF의 $k=0.2$ 보다 큰 장점이 있으나, 폴리머에 비해 단단하여 적은 진동에서 에너지를 발생할 수 없으며, 또한 잘 깨져서 큰 변형에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면 폴리머는 유연하여 큰 변위에 사용될 수 있으나 전기-기계결합계수가 작다는 단점이 있다. 따라서 세라믹의 높은 전기-기계 결합계수와 폴리머의 유연성의 장점을 이용한 세라믹-폴리머 컴포지트를 사용한 하베스터를 제작하기도 한다(그림 5)[8].

압전 에너지 하베스팅 특성이 재료내부와 어떤 관련이 있는가를 그림 6에 나타내었다. 강유전특성을 가지는 재료는 일반적으로 압전특성이 우수하며, 그림 6과 같은 이력곡선을 보인다. 강유전재료를 폴

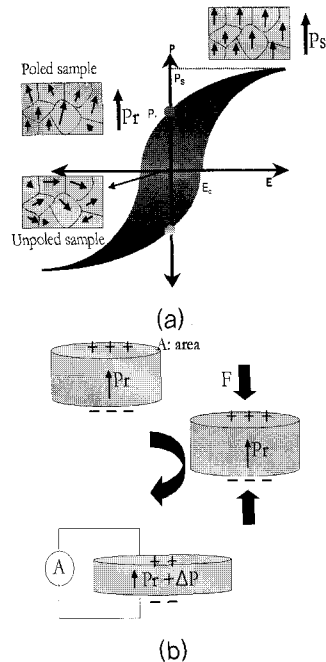


그림 6. 압전재료의 전류생성.

링하여 일정방향으로 자발분극을(P_r) 갖도록 만들고 힘(F)을 가하면 재료의 분극변화는(ΔP) 식 4와 같이 발생하며, 재료를 외부저항과 연결하면 식 5와 같이 전류가 발생한다.

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (4)$$

D 는 Electrical Displacement로 강유전재료에서 분극(P)와 거의 같은 값을 가지며, d 는 압전상수, T 는 가해주는 응력 (F/A), ϵ^T 는 일정 응력조건에서 유전율을 나타낸다. E 는 재료에 가해주는 전기장의 크기를 나타내며 대체로 압전 에너지 하베스터에 전기장을 가해주지 않으므로 0값을 가진다.

$$i = \frac{\Delta P}{dt} \quad (5)$$

i 는 생성되는 전류의 크기를 나타내며, 압전재료의 면적과 분극변화에 비례하며 시간 변화에 반비례한다. 여기에서 시간의 변화는 진동원의 주파수에 의해 결정된다. 재료의 분극변화는 식 4에서와 같이 재료의 고유특성인 압전상수에 비례하므로 압전상수가 큰 재료를 개발하거나, 재료의 면적을 크게 하여 생성되는 전류량을 크게 할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로, 압전 에너지 하베스터에 의해 생성된 전류는 그 양이 매우 적어 Super-capacitor 또는 2차 전지에 충전한 후 무선센서노드를 구동하는데 이용된다. 그런데, 만약 발생전압이 Super-capacitor나 2차 전지의 전압보다 높다면, 충전시간은 전류량의 크기가 클수록 짧아지므로 발생하는 전류량을 증가시켜야 한다. 본 연구팀에서는 충전시간을 줄이기 위해 분극변화가 큰 재료를 개발하고 있으며, 또한 적층형 압전재료를 이용하여 생성되는 전류량을 증가시킨 연구를 수행하였다[9].

이밖에도 압전체의 표면에 생성하는 전극구조를 변경하여 압전체의 Mode를(d_{31} 또는 d_{33}) 변화시키며 주어진 진동에서 압전 발전 효율을 높이는 연구 등도 활발하게 진행되고 있다[10].

2.4 압전하베스터 전기회로

압전 하베스터에 의해 생성된 교류 전압을 Super-capacitor나 2차전지에 충전하기 위해서는 그림 1에 서와 같이 정류다이오드와 평활화 Capacitor를 이용하여 직류로 변환시켜야 한다. 그런데, 압전재료는 전기적으로 전압발생기, 유전체, 저항의 조합으로 이해되며, 그림 7에서와 같이 외부저항이 변화함에 따라 생성되는 에너지가 변화한다. 생성되는 최대 에너지는 외부 Impedance가(Z_L) 특정주파수에서 진동하는 압전체의 Impedance와 일치할 때, 즉 전기적인 Impedance Matching 조건에서 나타나며, 전기적인 Impedance Matching은 식 6에 의해 결정된다.

$$Z_L = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6)$$

f 는 압전 에너지 하베스터의 진동주파수, C 는 진동주파수에서 압전재료의 Capacitance를 각각 나타낸다.

따라서 생성되는 에너지를 효과적으로 외부에 전달하기 위해서는 외부저항과 압전체의 저항을 일치시킬 수 있는 전기회로의 구성이 필요하다. 현재까지 연구된 전기회로는 크게 그림 8-10의 3가지로, 생성되는 에너지양과 회로를 동작할 때 소모되는 에너지

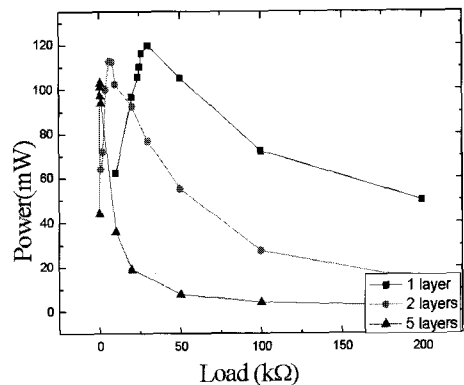


그림 7. 외부저항의 변화에 따른 생성되는 파워변화(예 : KIST에서 제작한 적층형 압전세라믹을 이용하여 측정된 결과).

지양, 제작비용을 고려하여 적절한 회로를 구성해야 한다.

그림 8은 정류다이오드와 평활화 Capacitor를 가지는 것으로 외부의 Impedance의 조정없이 사용하

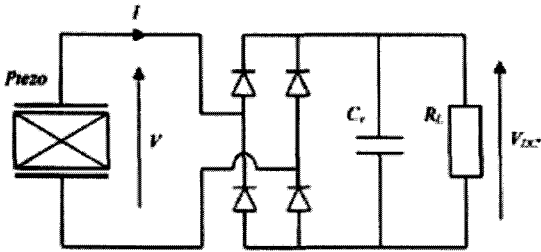


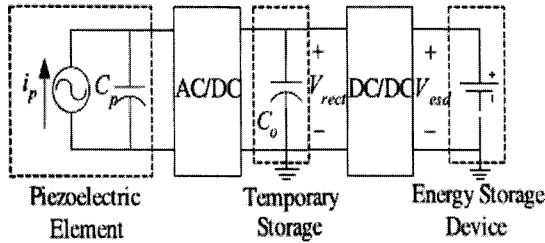
그림 8. 정류다이오드, 평활화 Capacitor(Cr)를 가지는 단순회로[11].

는 가장 간단한 회로이다. 이 회로는 수동소자로만 이루어져 있어 회로를 구동할 전원이 필요 없어 생성되는 에너지양이 적을 때 많이 사용된다.

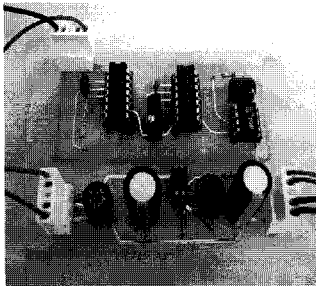
그림 9는 그림 8의 회로에서 평활화 Capacitor와 외부 Load (Super-capacitor 또는 2차전지) 사이에 Buck-type의 DC/DC Converter를 둔 것으로, PWM (Pulse width Modulation)을 이용 Duty Cycle을 조절하여 효율을 높인 회로이다. 그러나 회로를 구동하기 위해서는 전원이 필요하므로 생성되는 에너지가 회로를 구동하는데 사용되는 에너지 보다 클 때 사용할 수 있을 것이다.

그림 10은 압전재료를 이용한 Damping 연구결과를 응용한 회로로, 압전체의 변위와 전기적인 회로(S)의 단락을 Synchronous 시켜서 발생하는 전류를 최대로 만든다.

본 연구팀에서는 이러한 여러 가지 회로를 구성하여 진동조건에 따른 최적의 회로를 얻는 연구를

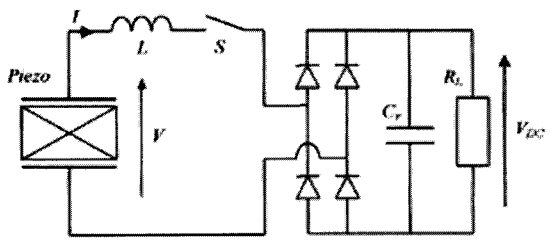


(a)

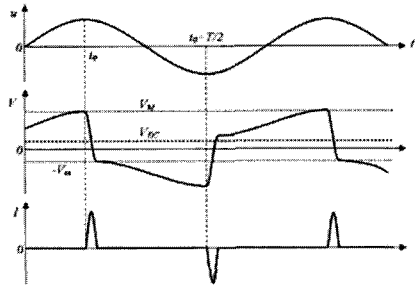


(b)

그림 9. Pennsylvania State Univ.에서 개발한 DC/DC Converter를 이용한 회로의 모식도와 회로[3].



(a)



(b)

그림 10. Series형태의 Synchronous Switch Harvesting on Inductor (SSHI)회로와 발생하는 전압, 전류모양[11].

수행 중에 있다.

3. 응용 및 연구동향

압전 에너지 하베스팅은 큰 규모의 군수용 발전 장치, 자동차 엔진의 진동을 이용한 2차 발전장치, 파도를 이용한 전기생산부터 작은 크기의 유비쿼터스 센서 네트워크(USN)의 에너지원, 인체내부에 이식하여 의료장비를 구동하는 에너지원등 여러 분야에 대한 응용 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국의 경우에는 버클리에서 무선 센서노드인 Smart Dust의 에너지원으로 압전발전전에 관한 연

구가 오래전에 이루어져 왔으며, MIT에서는 위의 그림 2와 같이 신발에 부착하여 어린이, 환자의 위치 파악 등에 응용하는 연구를 수행하여 있다. 그리고 버지니아 공과대학에서는 세라믹-폴리머 압전 킴포지트를 이용하여 2차전지에 충전하는 연구를 수행하였으며, 텍사스의 알링턴 대학에서는 풍차에 압전체를 이용한 발전을 소개하였다[12]. 또한 펜실베이니아 대학에서는 효율을 높일 수 있는 회로연구에 많은 결과를 축적하고 있다[13].

미국의 Smart-materials社에는 세라믹-폴리머 킴포지트를 생산하여 독일의 EnOcean社의 공급하고 있으며[8], Adhoc Electronic社에는 압전체의 충격에 의한 에너지 발생을 이용하여 전선 없는 Wireless Switch를 생산 판매하고 있다[14].

유럽에서는 VIBES (Vibration Energy Scavenging)이라는 컨소시엄을 구성하여 영국, 독일, 프랑스, 이태리 등에서 활발하게 연구하고 있다[15]. 독일의 EnOcean社는 Siemens社에서 분리된 회사로 압전 에너지 하베스터와 센서를 일체화한 센서노드를 판매하고 있다[16]. 또한, 이태리의 Tyndall National Institute에서는 PVDF를 신발에 적용한 연구를 수행하였으며 프랑스 리옹의 INSA에서는 그림 10의 SSHI 회로를 이용한 에너지 하베스팅 회로연구를 활발히 진행하고 있다.

일본에서는 업체를 중심으로 아이디어 상품을 많

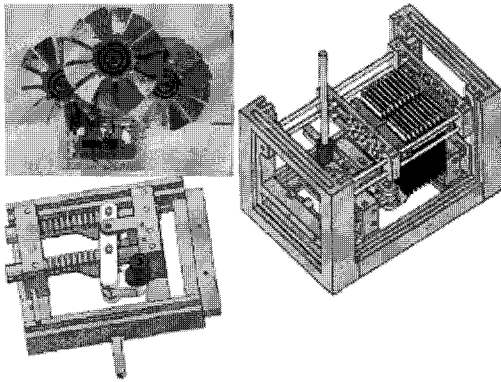


그림 11. 미국의 텍사스 알링턴 대학에서 제작한 압전체를 이용한 풍차[12].

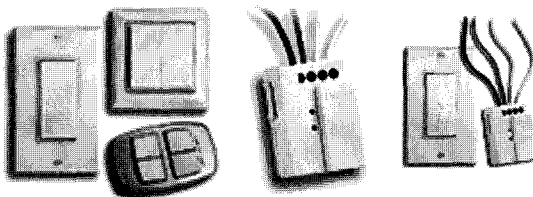


그림 12. Adhoc Electronic社에 제조 판매하고 있는 무선 Switch.

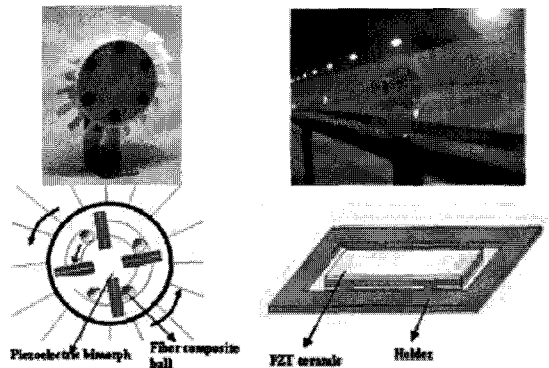


그림 13. 일본 NEC-Tokin에서 제작 설치한 에너지 하베스터 응용 예[From Reference 3].

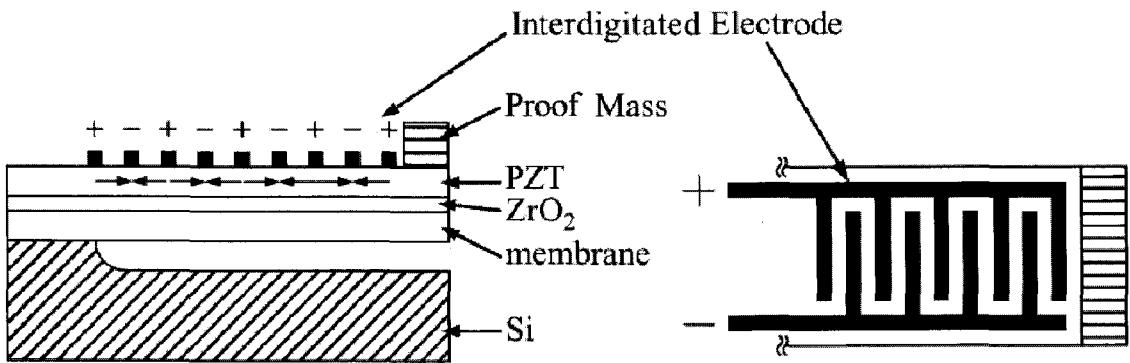


그림 14. 미국 MIT에서 MEMS를 이용하여 제작한 압전 에너지 하베스터의 구조[10].

이 제조하여 판매하고 있으며, 대학을 중심으로 다양한 종류의 연구를 수행하고 있다. 그림 13은 일본의 NEC-Tokin에서 제작하여 설치한 도로 중심선 표시등이다[3]. 한편, 미래에는 환경보호 측면에서 전기자동차의 보급이 확대될 것이며, 배터리 충전시간의 단축을 위해 주행 중이나 공회전 중에도 자동차 엔진을 이용한 압전 발전 시스템에 대한 연구가 미국과 일본의 자동차회사를 중심으로 진행되고 있다.

압전 하베스터 크기는, 현재 대부분의 압전 에너지 하베스터를 큰 크기로 제작하고 있으나, 미래의 유비쿼터스용 센서 네트워크에 이용하기 위해서는 소형화가 이루어져야 하며, 이를 위해서 MEMS공정을 이용한 연구를 미국, 중국 등에서 진행하고 있다 [10, 17]. 이밖에도 미래의 Wearable Computer를 실현하기 위한 고효율 유연한 압전 에너지 하베스터의 개발 연구가 미국을 중심으로 이루어지고 있다.

4. 결론

압전 에너지 하베스팅은 유비쿼터스 센서 등의 소형동력원에서부터 자동차의 보조동력원에 이르기까지 전자산업에서 자동차, 에너지 산업 등에 다양하게 활용될 것으로 기대되며, 그 응용가능성은 무한이 많은 아이디어의 창출에 의해서 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 이루어 져야 할 것이다.

감사의 말

본 연구는 KIST 기관고유 사업 (코드번호 2E19860)에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gershenfeld. "Parasitic power harvesting in shoes". In IEEE Intl. Symp. on Wearable Computers, 132-139, October 1998.
- [2] N. S. Shenck and J.A. Paradiso. "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics". IEEE Micro, 21(3):30-42, May 2001.
- [3] Hyeoungwoo KIM, "IMPEDANCE ADAPTATION METHODS OF THE PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING," Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State Univ. 2006.
- [4] Shad. Roundy "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion", Ph. D. Dissertation, U. C.



Berkeley 2003.

[5] Roundy, S., Wright, P. K., and Rabaey, J., "A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes", Computer Communications, vol. 26(11), 1131-1144. 2003.

[6] Roundy S, Leland E L, Baker J, Carleton E, Reilly E, Lai E, Otis B, Rabaey J M, Wright P K and Sundararajan V "Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers" IEEE Pervasive Computing 428-36. 2005

[7] K. Ren, Y. Liu, X. Geng, H. F. Hoffman and Q. Zhang, "Single crystal PMN-PT/epoxy 1-3 composite for energy-harvesting application," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., 53(3), 631-637, 2006.

[8] smart-materials: <http://www.smart-material.com/Smart-choice.php?from=News>

[9] Hyun-Cheol SONG, Hyung-Chan KIM, Chong-Yun KANG, Hyun-Jai KIM, Seok-Jin YOON, and Dae-Yong JEONG, "Multilayer Piezoelectric Energy Harvester for Large Current Generation," J. Electroceramics. Submitted.

[10] Y. B. Jeon, R. Sood, J.-H. Jeong, S.-G. Kim, "MEMS power generator with transverse mode thin film PZT," Sensor and Actuators A 122, 16-22, 2005.

[11] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, L. Petit, D. Guyomar, "A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems," Sensors and Actuators A 126, 405-416, 2006.

[12] Robert Myers, Mike Vickers, Hyeoungwoo Kim and Shashank Priya, "Small scale windmill," Appl. Phys. Lett. 90, 054106 2007.

[13] Steven R. Anton and Henry A. Sodano, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)," Smart Mater. & Struct. 16, R1-R21, 2007.

[14] adhoc: <http://www.adhocelectronics.com/Products/EnOcean>

[15] VIBES: <http://www.vibes.ecs.soton.ac.uk/index.html>

[16] EnOcean: <http://www.enocean.com/en/home/>

[17] 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", Microelectronics Journal 37, 1280-1284, 2006.

저|자|약|력



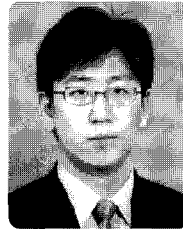
성 명 : 정대용

◆ 학 력

- 1994년 서울대 무기재료공학과 공학사
- 1996년 서울대 대학원 무기재료공학과 공학석사
- 2000년 서울대 대학원 재료공학부 박사 수료
- 2004년 Pennsylvania State Univ. Materials Ph.D.

◆ 경 력

- 1994년 - 1995년 한국과학기술연구원 위촉연구원
- 1996년 - 1997년 COSMO Ind. 연구원
- 2004년 - 2005년 TRS Technologies 연구원
- 2005년 - 2006년 Tohoku Univ. RIEC Post Doc.
- 2006년 - 현재 KIST 박막재료연구센터 선임연구원



성 명 : 송현철

◆ 학 력

- 2004년 고려대 재료금속공학부 공학사
- 2006년 고려대 대학원 재료공학과 공학석사

◆ 경 력

- 2006년 - 현재 KIST 박막재료연구센터 연구원



성 명 : 윤석진

◆ 학 력

- 1983년 연세대 전기공학과 공학사
- 1985년 연세대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1992년 연세대 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경 력

- 1988년 - 현재 KIST 박막재료연구센터 책임연구원
- 1995년 - 1996년 미국 Pennsylvania State Univ., Post Doc.
- 1995년 - 1996년 KIST 박막재료연구센터 센터장
- 2004년 - 2004년 미국 Pennsylvania State Univ., Visiting Professor