

Hybrid Mechano–Magneto Electric Energy Harvesting

이정근 · 이수환 · 최민근 · 정대용<인하대학교 신소재공학과> · 류정호<삼성전기 재료연구소>

1 서 론

휴대용 전자기기를 구동한 핵심동력원은 전기에너지로 배터리에 저장되어 사용되고 있다. 배터리는 휴대성이 우수하여 장소에 관계없이 사용될 수 있으나, 주기적으로 충전되어야 하는 단점이 있다. 또한 배터리는 일정기간 사용할 경우 폐기되어야 하므로 환경오염물질원이 될 가능성이 존재한다. 한편, 전자부품이 소형되고 저전력 구동기술이 발전함에 따라 전자기기를 구동하는데 필요한 에너지가 감소함에 따라 미세에너지 (micro-energy)에 대한 관심이 증가하고 있다. 일반적으로 이러한 미세에너지 발전은 휴대용 배터리를 보조할 수 있을 정도의 에너지를 생산하는 것으로 “Energy Harvesting-에너지 하베스팅”, “Power harvesting” 또는 “Energy Scavenging”와 같은 용어로 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 20세기 나노기술이 발전함에 따라, 기존에는 버려졌던 미세한 에너지까지도 효과적으로 수확할 수 있는 단계에 이르고 있다.

소형 에너지 하베스팅 방법에는 에너지원 종류에 따라, 태양광을 이용한 태양발전, 기계적인 에너지를 이용한 압전발전, 기계적인 운동과 전자기적현상을 이용한 발전 및 capacitive 발전, 폐열을 이용한 열

발전 등이 있으며, 각각의 방법은 장, 단점을 가지고 있으며 주어진 자연환경에 적합한 방법이 선택되어 적용될 수 있을 것이다. 예를 들면 태양발전의 경우 생성되는 에너지양은 크지만 흐린날이나 실내에서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면 압전 에너지 하베스팅은 다른 발전방법에 비해 에너지 밀도가 높고, 기후에 관계없이 실내외의 기계진동을 이용할 수 있으며, 또한 풍력, 바다의 파도 등의 다양한 형태의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있어 많은 연구가 되고 있다. 그런데, 실제 접하는 환경에서는 여러 종류의 에너지가 혼재하여 존재하고 있으며, 여러 에너지를 동시에 수확할 수 있는 hybrid발전이 필요하다. 예를 들며 그림 1의 고전압송전선의 경우, 고전류에 의한 자기에너지와 기계적에너지인 진동이 공존하고 있으며 진동에너지와 자기에너지를 전기에너지로 변환시킬 수 있는 발전이 필요하다. 이밖에도 우리 주위에는 여러 종류의 에너지가 공존하는 환경이 다양하게 분포하고 있으며, 여러 에너지를 효과적으로 수확할 수 있는 발전기 개발이 요구된다.

본고에서는 기계적에너지와 자기에너지가 공존하는 환경에서 발전할 수 있는 하이브리드 기계-자기-전기에너지 발전기의 원리를 살펴보고 연구내용을 소개하고자 한다.



그림 1. 고전압선로 (자기에너지와 진동에너지가 공존하는 환경 : 예)

2. 기계(mechano)-자기(magneto) 에너지 수확

자기에너지를 전기에너지로 변환하는 대표적인 방법은 전자기 유도를 이용한 발전기로, 대형 수력-화력-원자력-풍력발전 등이 있다. 그런데 전자기유도를 이용할 경우, 코일을 감는 수에 따라 발전량이 증가하므로, 소형 발전기를 제작하기 위해서는 코일을 가늘게 제작해야 한다. 그런데 코일의 굵기가 가늘어짐에 따라 전기저항이 증가하여 발전량이 급격하게 감소하는 문제점이 있다.

소형으로 제작될 수 있으며 자기장의 변화를 전기에너지로 쉽게 변환할 수 있는 방법으로 재료자체의 자기-전기효과(magneto-electric effect: ME effect) 또는 자왜재료-압전재료 복합체를 이용하는

방법이 활발하게 연구되고 있다. ME 특성은 외부 자기장크기 변화가 재료내의 분극변화를 일으키는 현상으로 복합현상이다. 좀 더 자세하게 살펴보면 외부자기장이 재료의 크기를 변화시키고, 재료의 크기변화가 다시 재료의 분극변화를 야기하는, 즉 자왜특성과 압전특성이 복합화된 특성이다. 그런데 일반적으로 자기장크기 변화에 민감한 자성재료는 강자성체로, 상전이 온도(T_c) 이하에서 사용될 수 있다. 또한 일반적으로 분극의 크기변화가 큰 재료는 강유전체 재료이며, 강유전체 재료 또한 상전이 온도 (T_c)이하에서 사용될 수 있다. 따라서 상온에서 사용되기 위해서는 하나의 재료가 강자성체-강유전체 특성을 동시에 가져야 하며, 각 상전이 온도가 상온보다 높아야 한다. 그런데 대부분의 재료는 상온보다 매우 낮은 온도에서 상전이 온도를 나타내어 상온에서 에너지변환재

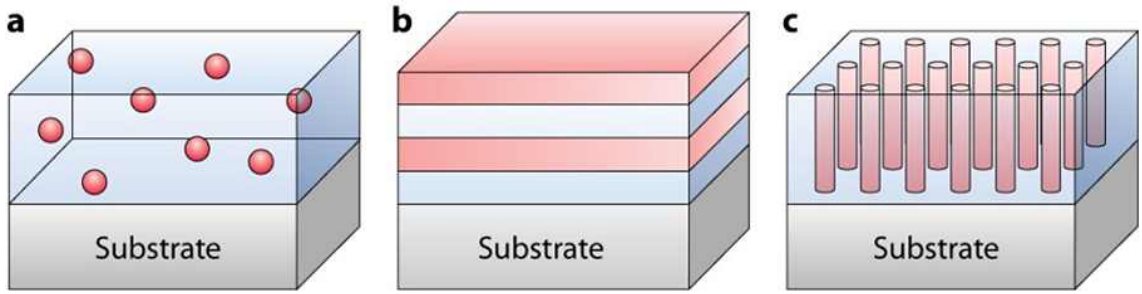


그림 2. ME 컴포지트 종류. (a) 0-3 분말 컴포지트, (b) 2-2 판상형 컴포지트, (c) 1-3 파이버컴포지트[2]

료로 사용할 수 없다. 최근에 보고된 BiFeO₃ 재료는 상온에서 재료 자체가 강자성체-강유전체 특성을 보여주고 있어, 미래 스핀트로닉스 기기, 센서등에 응용하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 그런데 이런 단일상의 ME재료는 아직 ME 상수가 매우 작은 단점이 있어, 자왜재료와 압전재료를 복합화한 다양한 종류의 컴포지트가 많이 연구되고 있다. 컴포지트는 구성하는 재료의 형상에 따라 그림 1과 같이 0-3,

2-2, 1-3 컴포지트로 나뉘며, 표 1에는 각각의 특성을 나타내었다.

다양한 컴포지트 중에서 2-2 컴포지트는 ME특성이 우수하고 제작하기 용이하여 실제 응용을 염두해 둔 연구가 많이 진행되고 있다. 예를 들면 고감도 MRI 센서, 지자기 센서 등에 활용될 수 있으며, 발생하는 전기에너지를 저장할 경우 에너지 하베스팅 기기로 응용될 수 있다. 2-2 컴포지트는 판상의 자왜재료와

표 1. ME 컴포지트의 장단점[2]

Connectivity	Advantage	Disadvantage	Remarks
0-3	Easy processing.	Low resistivity (difficult to pole) Low ME property.	Sintering with ceramic power mixture. Ceramic/polymer composite.
2-2	Easy fabrication. High resistivity. Good ME property.	Inter-diffusion. Thermal expansion mismatch.	Co-firing at hightemperature. All ceramic materials. Tape casting.
	High resistivity. Low temperature processing. Coherent interface. precise control of thelattice mismatching and thickness in the atomic scale.	Weak ME effect.	Thin film process layer by layer. Integrated ME devices.
	Easy fabrication. High resistivity.	Only bulk material. Low mechanical strength from epoxy bonding.	Epoxy bonding at room temperature. Ceramic/magnetic metal alloy.
1-3	Coherent interface in an atomic scale.	Low resistivity. Hard to fabricate.	Large in-plane strain. Thin film process.

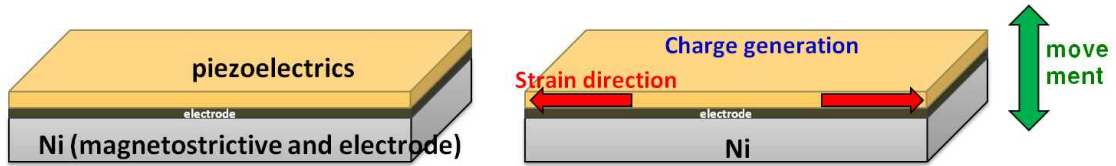


그림 3. 캔틸레버형 ME 히베스터(압전체/전극/자왜재료로 구성되어 있다.) 캔틸레버형 구조에서 진동에너지를, 자왜재료를 이용하여 자기에너지를 수확할 수 있다.

판상의 압전재료를 결합한 형태로, 자왜재료와 압전 재료와의 접촉면적이 넓어 서로 간의 coupling을 크게 할 수 있어 ME 상수가 크게 나타난다. 그림 3은 압전재료/전극/자왜재료로 구성된 2-2 컴포지트 형상을 나타내었다. 압전재료의 양면에는 전극재료가 반드시 필요하며, 자왜재료는 압전재료와 밀착되어 부착되어야 한다. 앞에서 언급한 것과 같이 기본적인 원리는 다음과 같다.

“외부 자기장 변화 --> 자왜재료에 의한 재료의 변형 --> 재료변형이 압전재료에 전달 --> 압전재료 변형 --> 압전현상에 의해 전류 생성”

따라서 발전되는 전류량을 증가시키기 위해서는 ‘자왜특성이 우수한 재료’와 ‘압전특성이 우수한 재료’를 선정해야 하며, 이 ‘두 재료를 효과적으로 coupling’시켜야 한다.

만약, 자기장 에너지만 분포하는 환경일 경우 순수한 ME특성만을 이용하여 에너지를 수확할 수 있다. 그러나 그림 1과 같이 자기장에너지와 외부의 진동에너지가 동시에 존재할 경우 진동에너지를 동시에 수확할 수 있는 발전기 형태가 요구된다. 진동에너지를 전기에너지로 변환 할 수 있는 방법으로 가장 대표적인 것으로 압전현상을 이용한 것으로, 압전발전기를 캔틸레버형태로 제작할 경우 미세한 진동도 효과적으로 수확할 수 있다. 특히 캔틸레버형 압전발전기의 고유 공진주파수가 외부의 진동주파수와 일치할 때 가장 효과적으로 에너지를 수확할 수 있다. 따라서, ME 발전기를 캔틸레버형태로 제작할 경우 자기에너

지와 진동에너지를 동시에 수확할 수 있을 것이다. 결국 진동-자기 에너지를 효과적으로 전기에너지로 변환하기 위해서는 캔틸레버형 ME복합체 제조가 요구된다.

캔틸레버형 압전발전기에 대한 연구는 많이 이루어져 있으며, 이에 관한 내용도 본 학술지에 이미 발표되었다. 본고에서는 하이브리드 기계-자기--> 전기 에너지 발전에 관한 연구결과를 몇 가지 소개하고자 한다.

3. 2-2 복합체의 자왜/압전 계면 coupling 조절을 통한 ME특성 향상

자왜재료와 압전재료를 복합화한 2-2 컴포지트에서 ME특성을 향상시키기 위해서는 자기장에 의해 생성된 변위(자왜 변위)를 효과적으로 압전체에 전달하여 압전체를 변형시켜야 한다. 따라서 자왜재료가 생성하는 힘이 압전체를 변형시킬 힘보다 커야 하며, 자왜재료와 압전재료의 두께비가 결정되어야 할 것이다.

한편 압전재료에서 전기에너지를 수확하기 위해서는 압전재료 양면에 전극이 필요하다. 따라서, ‘자왜재료/전극/압전재료/전극’구조를 가져야 한다. 자왜재료에는 다양한 재료가 있지만, 그중 금속 Ni은 비교적 큰 자왜재료를 가지며 값이 싼 장점을 가지고 있다. 그림 4는 Aerosol deposition (AD)을 이용하여 금속 Ni기판위에 세라믹 LaNiO₃ (LNO) 전극을 형성한 후, 다시 AD를 이용하여 압전 PZT를 형성한 발

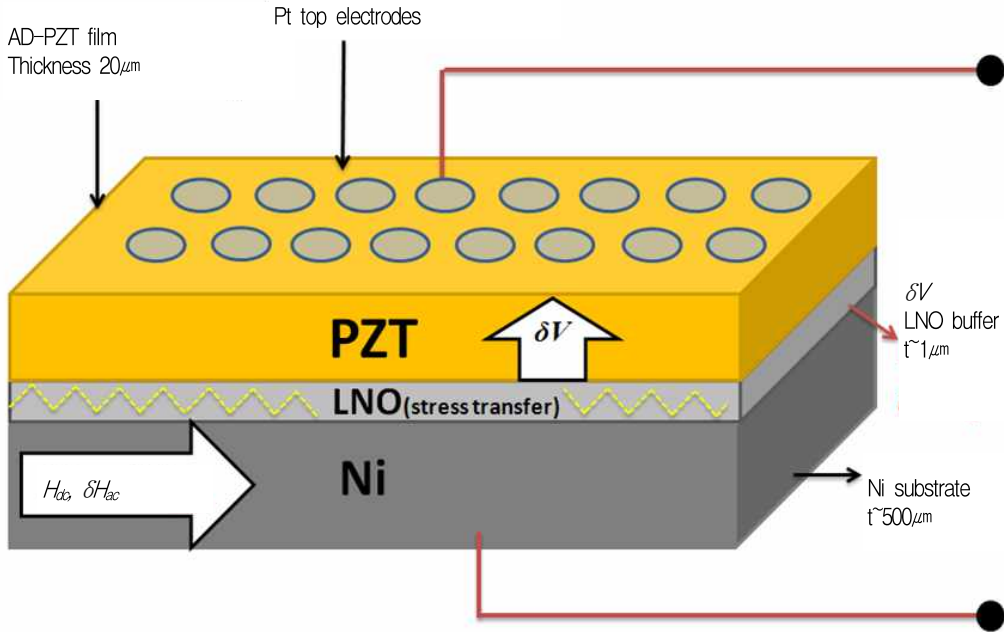


그림 4. 전소재로 Ni위에 Aerosol deposition방법으로 LaNiO₃전극과 압전 PZT막을 형성하여 제조한 기계-자기 → 전기 발전기 구조. 세라믹 LNO는 Ni에서 발생한 응력을 효과적으로 PZT막에 전달할 수 있다[3].

전기 형상이다. 일반적으로 압전재료의 전극으로 Ag를 많이 사용하고 있지만, 금속의 Ag대신 세라믹 LNO를 사용한 것이 특징이다.

그림 4를 살펴보면 자왜 특성을 가진 두꺼운 금속 Ni를 기판으로 사용하였기 때문에, 압전 PZT박막을 변형시킬 충분한 응력은 생성할 수 있을 것으로 판단된다. 그런데 생성된 자왜 변형이 효과적으로 압전 PZT막에 전달되기 위해서는 자왜재료와 압전재료 사이에 형성된 전극의 선택이 매우 중요하다. 예를 들면 자왜 재료 Ni가 생성된 응력을 전극이 감쇄시킬 경우 응력이 압전재료에 효과적으로 전달되지 못하므로, 따라서 Ni와 PZT막 사이의 기계적 임피던스조화가 필요하다. (mechanical impedance matching) 또한 전극재료는 Ni와 PZT사이의 화학반응을 억제할 수 있어야 한다. 그림 5는 Ni/LNO/PZT 계면을 SEM으로 관찰한 것으로 세라믹 LNO가 Ni와 PZT

반응을 효과적으로 억제하고 있음을 알 수 있다.

제작한 발전기에 직류 자기장의 크기를 변화시키면서, $1V\cdot cm^{-1}\cdot Oe^{-1}$ 의 교류 자기장을 걸면서 측정 한 ME 값을 그림 6에 나타내었다. 30Oe의 직류 자기장에서 $1V\cdot cm^{-1}\cdot Oe^{-1}$ 의 큰 ME값을 보였으며, 이 값은 다른 전극재료를 사용한 결과보다 ($\sim 150 mV\cdot cm^{-1}\cdot Oe^{-1}$) 매우 큼을 알 수 있다. 또한 ~ 30 Oe의 교류 자기장하에서 교류 자기장의 주파수를 변화시키면서 측정한 ME값을 그림 7에 나타내었다. 발전기 공진주파수에서 $\sim 8.5V\cdot cm^{-1}\cdot Oe^{-1}$ 의 매우 큰 ME값이 측정되었으며, 이렇게 큰 ME값은 순수한 ME값과 공진주파수에서 확대 생성된 압전 특성에 기인한 것으로 해석되었다. 그러나 Ag전극을 가지는 비슷한 크기의 발전기에 비해 큰 ME특성을 나타낸 것은 Ni와 PZT 사이에 형성된 LNO가 보다 효과적으로 진동을 전달한 결과이다. 재료의

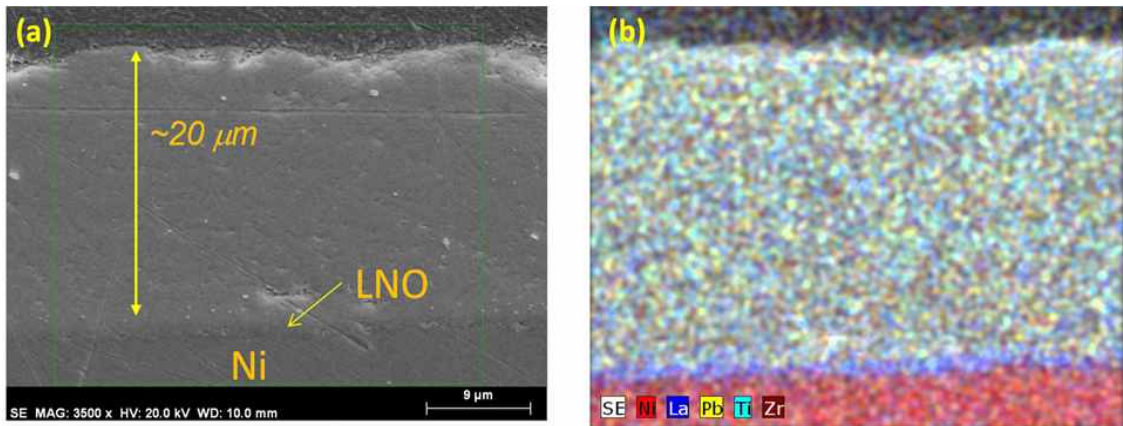


그림 5. Ni/LNO/PZT (a) 계면 형상, (b) 원소분석결과. Ni이 PZT에서 발견되지 않고 있어 LNO가 효과적으로 Ni/PZT반응을 억제하고 있음을 알 수 있다[3].

mechanical impedance Z 를 비교하면, LNO ~ 27 MRayl, PZT 25~30 MRayl, Ni ~27 MRayl으로 3개 재료의 Z 가 비교적 일치함을 알 수 있다. 한편 Ag와 Pt의 Z 는 각각 17 MRayl과 36 MRayl로 Ni와 PZT에 비해 값에서 큰 차이가 남을 알 수 있다.

4. 압전단결정의 다양한 모드를 이용한 발전 효율 증가

기본적으로 하이브리드 기계-자기-->전기 발전기는 압전현상을 기반으로 하고 있으며, 압전재료의 생성되는 전기에너지는 식 (2)에서와 같이 재료 특성인 전기-기계결합계수(k , electro-mechanical coupling coefficient)에 의해 결정되며 전기-기계결합계수가 큰 재료 개발이 필요하다.

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

u 는 생성되는 최대 전기에너지, Y 는 재료의 Young's modulus, T 는 재료에 가해주는 응력의 크

기를 나타낸다. 한편 재료의 전기-기계결합계수(k)는 식 (3)에서와 같이 표현된다.

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

여기에서 d 는 재료의 압전상수, ϵ 는 재료의 유전율을 나타낸다. 대표적으로 많이 사용되는 세라믹 압전재료는 $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ (PZT)가 있으며 폴리머 압전재료는 Polyvinylidene difluoride [PVDF]가 있다. 세라믹 압전재료인 PZT의 기계-전기 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. 한편 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 (PMN-PT), $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 (PZN-PT)와 같은 단결정은 표 2에서와 같이 단결정을 가공하는 방향에 따라, 즉 동작하는 mode에 따라 그 특성에 큰 변화가 있다.

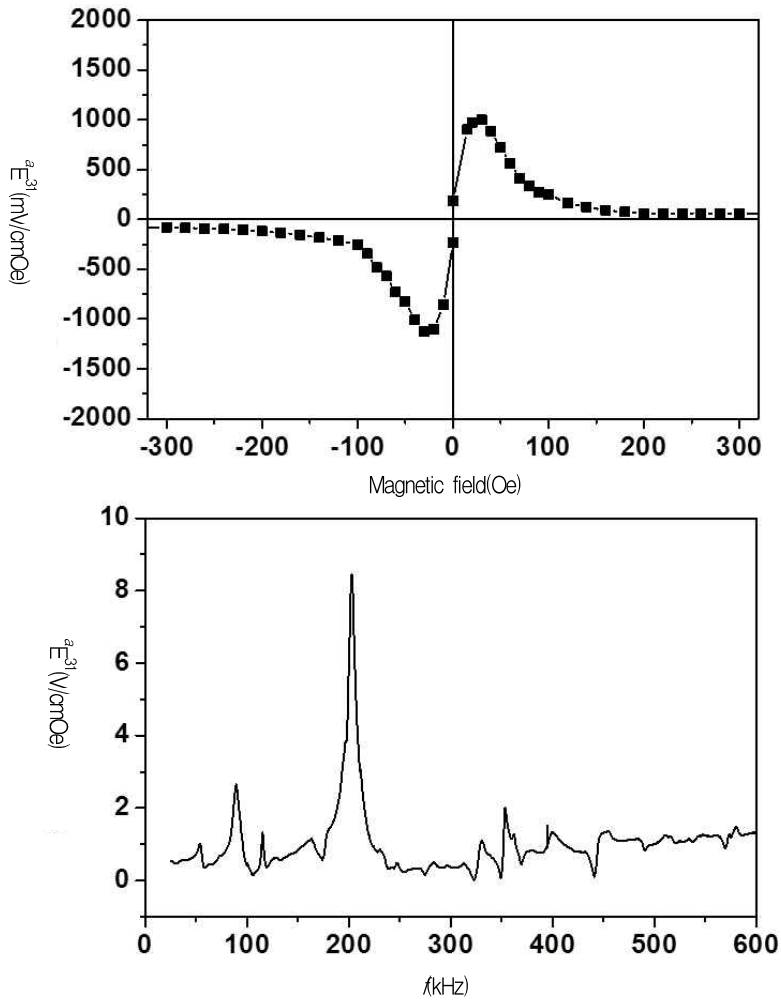
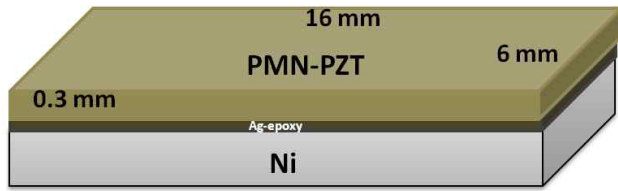


그림 6. Ni/LNO/PZT의 ME 특성. (a) 직류 자기장의 크기변화에 따른 특성. (b) 교류 자기장의 주파수변화에 따른 변화. 발전기(캔틸레버)의 고유진동수가 외부 교류 자기장의 주파수와 일치할 때 공진현상을 보이며 ME 값이 최대값을 보이고 있다[3].

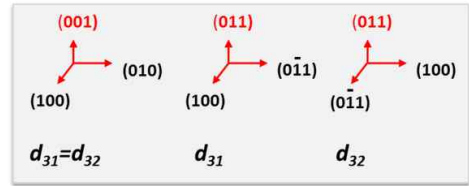
표 2. PMN-PZT 단결정의 방향에 따른 특성 변화

Orientation	d_{31} (pC/N)	d_{32} (pC/N)	s_{11} (pr ² /N)	s_{22} (pr ² /N)	K	k_{31}	k_{32}	g_{31} 10^{-3} (mV/N)	g_{32} 10^{-3} (mV/N)
<001> PMN-PZT		-905	-	69	7200	-	0.62	-	-14.20
<011> PMN-PZT	599	-1850	17.68	110	3962	0.74	0.95	17	-52.73

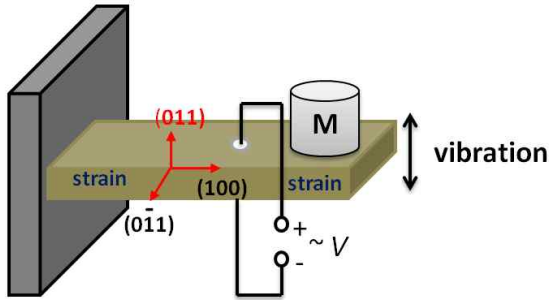
특집 : MICRO 에너지



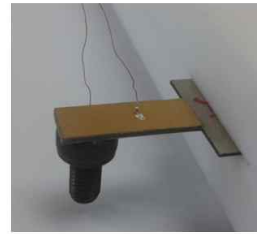
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 압전 PMN-PZT/Ni구조의 기계-자기→전기에너지 발전기 및 단결정 방향. 발전기에 proof mass를 부착하여 캔틸레버의 고유주파수를 외부주파수에 공진시켰다[4].

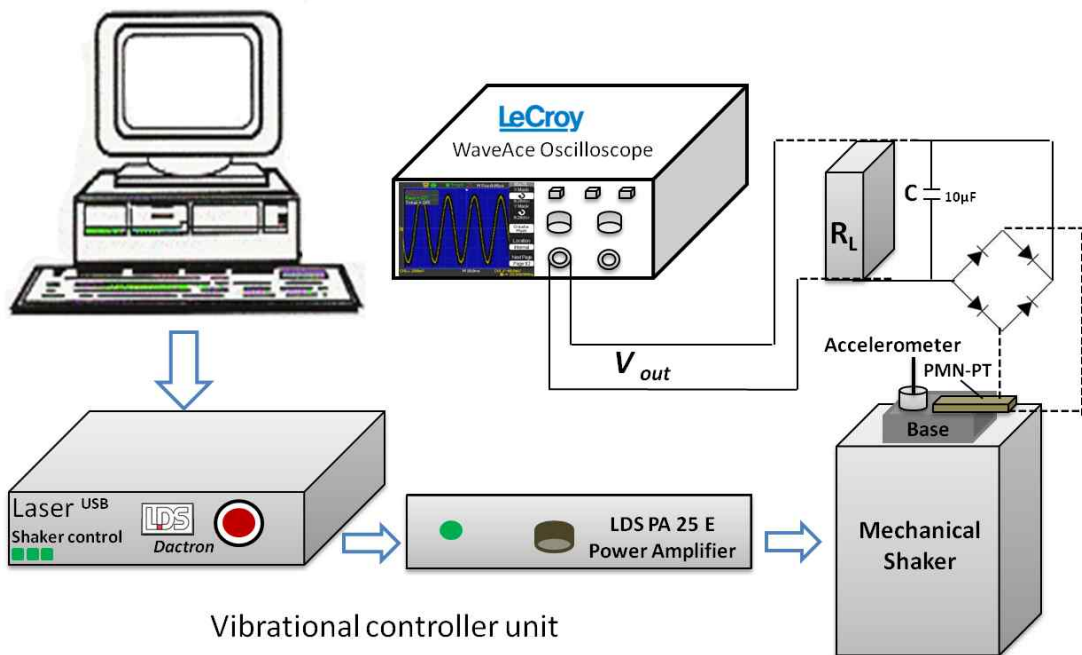


그림 8. 기계-자기→전기 발전기 특성평가 장치 모식도[4]

그림 7은 압전 PMN-PZT단결정과 자왜재료 Ni를 결합하여 제작한 기계-자기-> 전기에너지 발전기이며, 그림 8은 발전기 특성을 평가하는 장치의 모식도이다.

그림 9는 단결정의 방향에 따른 발전기의 출력전압을 측정하는 것이다. <011>방향의 단결정은 d_{32} 모드 즉, 횡축으로의 전기-기계결합계수가 커서, 가장 큰 출력전압을 보이고 있다. 또한 외부 저항의 크기를 변

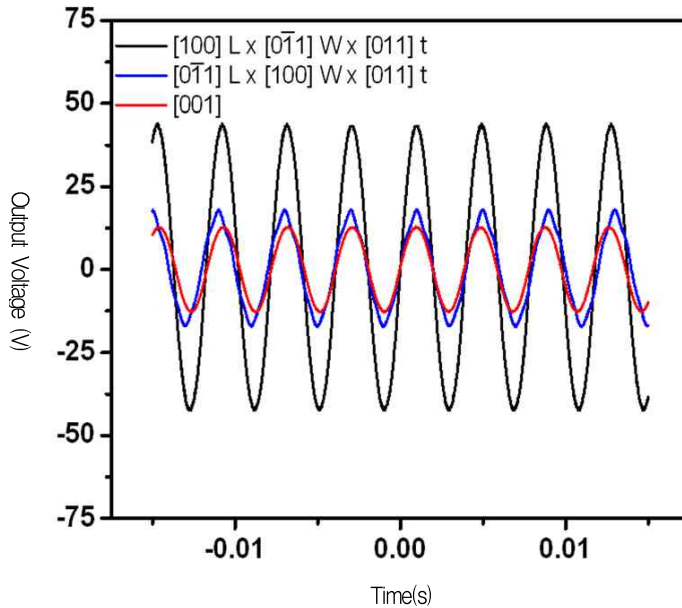


그림 9. 하이브리드 발전기에 3g의 질량을 달고, 0.7G의 힘으로 진동시켰을 때 나오는 전압의 크기[4]

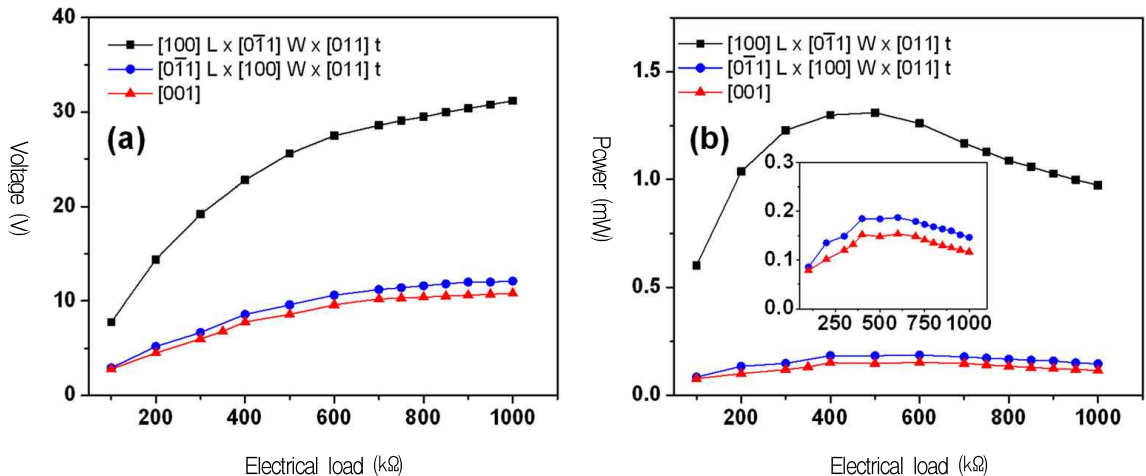


그림 10. 복합 기계-자기->전기 발전기에 3g을 달고, 0.7G로 가속하면서 측정하는 전압 및 측정전압으로부터 계산한 파워[4]

경하면서 측정된 전압과 측정된 전압으로부터 계산한 파워결과를 그림 10은 단결정의 방향을 효과적으로 조절할 경우 소형발전기에서도 비교적 큰 에너지를 수확할 수 있음을 시사하고 있다.

5. 맺음말

기계적에너지와 자기에너지를 동시에 수확할 수 있는 발전기에 대해서 살펴보았다. 기계에너지 또는 자기에너지가 단독으로 존재하는 환경보다는 활용성이 한정될 수 있는 단점이 있지만, 두 가지 에너지를 동시에 활용함으로써 효율적이고 소형화된 발전기를 실질적으로 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들면 고전압송전로 감시용 센서 등의 구동전원이 하나의 예가 될 수 있을 것으로 판단된다. 보다 효율을 높이기 위해서는 고효율 자왜재료 및 압전재료의 개발이 필요하며, 자왜재료와 압전재료를 효과적으로 coupling할 수 있는 기술이 필요하다. 현재, 기초적인 연구는 학계, 연구계를 중심으로 활발하게 진행되고 있으므로 산업계에서는 실제 적용할 수 있는 환경 발전과 구체적인 적용연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) '압전에너지 하베스팅의 원리 및 응용', 조명 전기설비학회지, 24(6), 14-23 (2010).
- (2) 'Current Status of Magnetolectric Composite Thin/Thick Films' Adv. Cond. Matter Phys. 2012, 824643.
- (3) 'Colossal magnetoelectric response of PZT thick films on Ni substrates with a conductive LaNiO₃ electrode', J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 092002.
- (4) 'Magnetolectric properties and magnetomechanical energy harvesting from stray vibration and electromagnetic wave by Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Zr,Ti)O₃ single crystal/Ni cantilever,' J. Appl. Phys. 113, 204108 (2013).
- (5) 'Multiple broadband magnetoelectric response in thickness-controlled Ni/(011) Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Zr,Ti)O₃ single crystal/Ni laminates,' Appl. Phys. Lett. 103, 052907 (2013).

◇ 저 자 소 개 ◇



이정근(李正根)
1983년 1월 17일. 인하대학교 졸업.
인하대학교 졸업(석사). 현재 인하대학교 박사과정.
E-mail : 117jk@inha.edu



이수환(李洙煥)
1983년 4월 16일. 인천기능대 졸업.
현재 인하대학교 석사과정.
E-mail : lsh8304@gmail.com



최민근(崔民根)
1989년 1월 23일. 인하대학교 졸업.
현재 인하대학교 석사과정.
E-mail : hi1023v@naver.com



정대용(鄭大容)
1970년 5월 1일. 서울대학교 무기재료 공학과 졸업. 서울대학교 무기재료공학과 졸업(석사), Pennsylvania State University 졸업(박사). 명지대학교 조교수. 인하대학교 부교수.
E-mail : dyjeong@inha.ac.kr



류정호(柳政湖)
1974년 2월 8일. 서울대학교 졸업(박사). Pennsylvania State University 박사 후 과정. 삼성전기 재료연구소 책임연구원.
E-mail : jhryu@kims.re.kr