



자기-전기 복합체를 이용한 에너지 하베스터 기술

글 _ 류정호, 최시영, 김종우, 김기훈, 정대용
재료연구소, 서울대학교, 인하대학교

1. 서론

휴대용 전자기기, 무선 센서 네트워크 구동의 핵심동력원은 전기에너지로 일반적으로 배터리에 저장되어 사용되고 있다. 배터리는 휴대성이 우수하여 장소에 관계없이 사용될 수 있으나, 주기적으로 교체되거나 충전되어야 하는 단점이 있다. 특히 매우 많은 수의 센서노드로 구성된 무선 센서 네트워크의 경우에는 일반적으로 사람이 접근하기 어려운 공간에 장착될 뿐만 아니라, 배터리의 수명이 각각의 노드마다 차이가 있을 수 있기 때문에 배터리 교체 시 비용적인 문제가 크다. 또한, 배터리는 일정기간 사용한 후 폐기되어야 하므로 환경 오염물질원이 될 가능성이 존재한다. 이런 관점에서 가능한 장기적인 사용을 위한 다양한 저전력 소자 기술이 등장하고 있으며, 한편으로는 소자의 반영구 전원 기술로 미세 에너지 발전/전환 기술이 필수요소로 인식되고 있다. 일반적으로 이러한 미세에너지 에너지 발전/전환기술은 휴대용 배터리를 보조할 수 있을 정도의 에너지를 생산하는 것

으로 “Energy Harvesting-에너지 하베스팅”, “Power harvesting” 또는 “Energy Scavenging”와 같은 용어로 많은 연구가 이루어지고 있다.^{1,2)} 특히, 21세기 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 열전발전 등이 있으며, 각각의 방법은 장, 단점을 가지고 있으며 주어진 응용환경에 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 적용되는 환



Fig. 1. 자기에너지와 진동에너지가 공존하는 환경.



경에서는 여러 종류의 에너지가 혼재하여 존재하고 있으며, 여러 에너지를 동시에 수확할 수 있는 hybrid 발전이 필요할 수도 있다. 예를 들어, Fig. 1에 보인 다양한 송배전 시스템 및 발전, 고속철, 지하철, 산업기기 등의 경우, 고전류에 의한 자기에너지와 기계적 에너지인 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 에너지 하베스팅 기술이 요구된다.^{2,3)}

한편 풍력, 태양광, 열 등의 에너지원을 하베스팅 하는 기술은 다양한 소자, 기계구조 등을 활용하여 많은 연구가 되어지고 있으나 미세한 자기장을 활용한 에너지 하베스팅 기술은 상대적으로 연구가 그리 활발하지 않은 것이 현재의 상황이다. 우리의 생활환경에서 60 Hz의 저주파수 미세자기장은 전력 인프라에 의해 항상 존재하는 활용가능 에너지 공급원이 될 수 있지만 일반적으로 알려진 자성 코어와 코일을 사용하는 전자기 방식의 에너지 하베스팅은 이러한 낮은 주파수의 미세자기장을 하베스팅 하기에는 변환 효율, 소자의 부피, 전력 선로와의 간섭 문제를 가지고 있다.³⁾ 엄밀히 말하여 전자기 방식의 에너지 하베스팅 기술은 버려지는 자기장을 활용하는 기술이 아니라, 선로의 전력을 차용하여 활용하는 전기 부하에 해당한다고 볼 수 있다.

압전 소재와 자왜소재를 복합화한 자기-전기 복합체 (Magnetolectric Composite; ME)는 상기한 전자기 방식의 자기장 에너지의 단점 (저주파 미세자기장에서의 효율, 부하와의 간섭, 공간적인 부피)를 가지지 않으며, 다른 에너지 하베스팅 기술에 비하여 높은 하베스팅 전력밀도를 가지는 장점을 가지고 있다. 본고에서는 자기-전기 복합체 소재를 이용한 신개념의 미세 자기장 에너지 하베스팅 기술에 대하여 최근의 국내외 연구 동향과 발전 가능성에 대하여 소개하고자 한다.

2. 자기-전기(ME) 복합체

자기-전기 효과 (ME effect)는 최근 세계적으로 널리

연구가 시작되고 있는 연구분야로, 단일상 재료에서 60여년 전 최초로 발견된 이래로, 높은 ME 특성을 가지는 복합체의 연구가 최근 활발히 진행 되고 있다.³⁻¹⁷⁾ ME 효과란 한 물질이 자기장과 전기장에 반응하는 특성을 동시에 가지고 있어 물질이 자기장에 노출되었을 때 전기적 전압이 발생하고, 반대로 물질이 전기장에 노출되었을 때 자기적 특성이 변화되는 현상을 의미한다. 주요 가능한 응용분야로 MAD (Magnetic Anomaly Detector), MRI (Magnetic Resonance Imaging), Scanning Magnetic Probes, MCF (Magnetocardiogram) 등에 사용되는 고감도의 자기센서 및 자기/기계적 진동을 이용하는 복합 에너지 하베스터 등의 소자로 응용이 기대되고 있다.⁷⁾ 이러한 응용을 위하여 미국에서는 ONR (Office of Naval Research), NSF (National Science Foundation) ARL (Army Research Lab.), DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 등에서 연구개발 투자와 소재개발, 시스템개발 연구를 수행하고 있는 것으로 파악된다.

압전/자왜 소재의 복합체에서 ME특성의 구현 원리를 Fig. 2에 도시하였다. 그림과 같은 2-2 구조의 복합체에 자기장이 인가될 경우 자왜 재료는 변형을 일으키게 된다. 이 변형의 크기는 인가된 자기장의 크기에 비례하여 나타나며 이를 자왜계수 (d_e/dH)라 한다. 한편 자왜 재료와 결합을 하고 있는 압전 재료는 자왜 재료에서 발생한 변형을 전달받아 압전 계수 ($d=dE/d\epsilon$) 에 의한 전압을 발생시키게 되고, 발생된 전압은 변형의 크기에 비례한다.^{5,6)} 즉 이러한 ME 특성은 자왜 특성과 압전 특성이 결

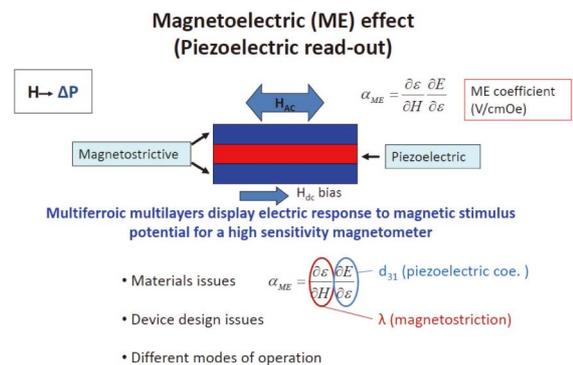


Fig. 2. ME 복합체의 작동 원리⁷⁾.



합하여 나타나는 특성이기 때문에 높은 ME 특성을 얻기 위해서는 우수한 자왜 특성과, 압전특성을 가지는 재료를 각각 선택하여야만 하며, 두 재료간의 계면결합 (k) 이 최적화 되어야만 한다. 따라서 ME 특성은 아래의 식 (1)로 간단히 표현 할 수 있으나, 실제적으로는 적용된 압전, 자왜 재료의 탄성 특성, 압전특성, 자왜 특성등의 방향성 텐서에 의해서 더욱 복잡한 식으로 나타내어질 수 있다.

$$\alpha_{ME} = k \frac{d\epsilon}{dH} \frac{dE}{d\epsilon} \quad (1)$$

ME 복합체는 Fig. 3에 요약한 MCG, MAD, MRI, SMP 등에 사용되는 고감도 자기센서를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.⁷⁾ 각각의 응용에 있어서 자기 감도는 1 pT ~ 1 nT 수준의 매우 높은 감도가 필요한데 현재까지는 고가의 SQUID나 광학 방식의 자기 센서가 사용되고 있으며 필요에 따라 극저온의 냉각이 적용되는 경우도 있다. 최근 미국 버지니아공대 VT의 연구 결과에 따르면, ME 복합체는 1 nT 이하의 자기장을 실제로 감지할 수 있는 것으로 보고된 바 있으며,⁸⁾ 복합체 소재, 구조설계, 신호처리 기술이 융합화 된다면 1 pT 이하의 자기장 변화를 감지 할 수 있을 것으로 예상된다.

단일재료에서의 ME 특성은 강자성특성과 강유전특성을 동시에 나타내는 재료에서 나타나므로 두 재료의 큐리온도 이하에서만 구현이 가능하다. Cr₂O₃로 대표되는 단일상 ME 재료들의 경우에는 매우 낮은 극저온의 큐리온도를 가지기 때문에 상온에서의 사용이 불가능하다.

또한 극저온에서도, 구현되는 ME 출력 계수 (dE/dH) 는 10 mV/cmOe 이하로 매우 미약하므로 실제 사용되지 못하고 있다. 이를 극복하기 위하여, 자기장에 반응하는 자성물질과 전기장에 반응하는 강유전 물질을 복합화하여 상온에서 높은 ME 출력계수를 가지는 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다.

ME복합체는 필립스에서 1970년대 초반에 압전 BaTiO₃ 와 Ferrite를 복합화하는 연구에서 시작했으며 90년대 말까지 입자복합체에 관한 연구가 인도, 러시아 등에서 활발히 이루어졌다. 그러나 이러한 형태의 복합체는 그 특성을 100 mV/cmOe 이상으로 구현하는데 한계가 있어서, 2000년대 초,중반부터 입자복합체의 한계를 극복하기 위한 층상복합체 (2-2 구조)에 대한 연구가 시작되었다.^{4,6)} 현재는 다양한 재료시스템에 관한 연구를 비롯하여, 구조의 최적화를 통한 벌크형 층상복합체에 관한 연구와 소형디바이스 제작을 위한 필름형 ME 복합체에 관한 연구가 진행되고 있는 상황이다. 금속 자왜재료와 매우 높은 압전 특성을 가지는 PZT계 압전 세라믹스 또는 압전 단결정을 층상 구조로 복합화하는 ME 복합체는 이전의 입자형 복합체에 비하여 이종 재료간의 강한 결합과 낮은 상호 확산 가능성, 고효율의 압전/자왜 특성의 이용으로 인하여 수 V/cmOe 의 높은 ME 특성이 저주파에서 얻어질 수 있으며, 특히 전기/자기 기계적 공진에서는 수백 V/cmOe 의 매우 높은 ME 출력 계수가 얻어질 수 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 높은 ME 효과는 자기센서 뿐만 아니라 미세 자기장 에너지 하베스터로의 응용 가능성을 더욱 높여준다.

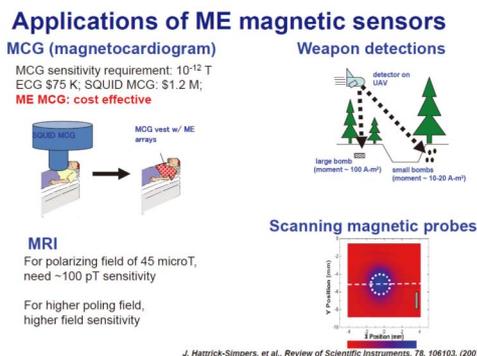


Fig. 3. ME 복합체의 응용 분야⁷⁾.

3. 자기-전기(ME) 복합체의 연구 동향

앞서 기술한 바와 같이 우수한 특성을 가지는 ME 복합체는 2000년대에 들어 활발히 연구/개발이 이루어지고 있으며, Scopus DB를 통한 출판 논문의 연도별 개수를 Fig. 4에 도시하였다. 2001년 미국 Penn State University 와 서울대학교의 공동연구로 최초의 2-2구조의 압전 PZT 세라믹/Terfenol-D 복합체 연구가 보고된 이후로, 발표되는 연구논문의 수가 급격히 증가함을 확인할 수 있

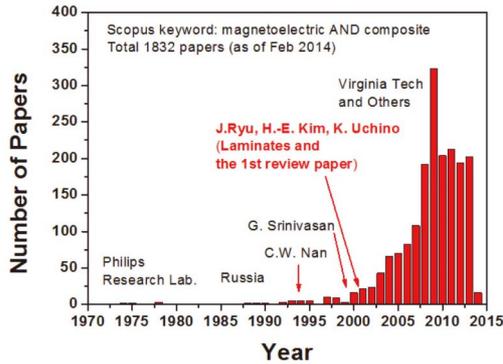


Fig. 4. ME 복합체의 연도별 발표 논문 수.

다. ME 복합체에 관한 연구는 ARL, ONR의 지원을 받고 있는 미국 VT의 D. Viehland 교수, S. Priya 교수와 Oakland 대학의 Srinivasan 교수 등에 의해 주도되고 있으며, 중국의 경우 칭화대의 C. W. Nan 교수 등도 매우 우수한 특성의 ME 복합체를 보고하고 있다. 국내의 경우에는 아직까지 많은 연구가 보고되고 있지는 않는 상황이다.

Fig. 5는 2015년 8월까지 Thomson DB를 통하여 조사된 출원, 등록된 한국, 미국, 일본, 중국, 유럽 및 국제 (PCT) 특허의 연도별 개수를 보여준다. 특허 기술에 있어서 최초의 출원은 1966년도에 있었던 것으로 조사되었고, 90년대 중반 이후에 들어서야 본격적으로 ME 복합체 관련한 특허 기술이 출원되고 있음을 볼 수 있다.

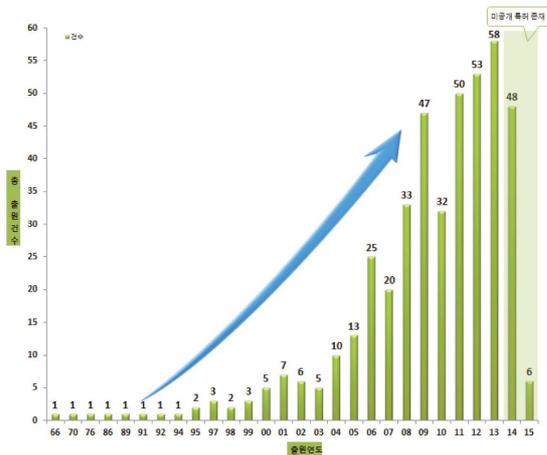


Fig. 5. 연도별 ME 복합체 관련 특허 출원 동향 (재료연구소특허청 특허동향 조사 보고서, 2015).

특히 2000년대 들어 연간 20건 이상의 특허 기술이 출원되고 있고, 2011년 이후 출원 건수가 큰 폭으로 증가하여 매년 50건 이상의 출원되고 있는 것을 볼때, 최근 활발한 연구가 이루어지고 있는 분야임을 알 수 있다. 국내의 경우에 2001년에 최초의 ME 복합체 관련 특허가 출원된 이후 꾸준한 출원이 이루어지고 있으나 최대 출원 건수는 연간 10건 미만으로 국내의 ME 복합체 관련 연구는 특허 기술에 있어서도 활발하지 않은 상태이다. 반면 미국과 중국에서 활발한 특허 출원이 이루어지고 있으며, 특히 중국은 2008년 이후에 매년 10건 이상, 최근의 경우는 매년 30여건 이상의 특허가 출원되고 있으며, 총 출원 건수가 177건으로 세계적으로 가장 활발한 특허 기술이 출원/등록되고 있는 것으로 확인되었다.

4. 자기-전기(ME) 복합체를 이용한 에너지 하베스터

일반적으로 모든 종류의 ME 복합체를 이용한 트랜스듀서는 우리 일상에 존재하는 표유(stray)자기장 에너지를 이용한 에너지 하베스터로 사용될 수 있다. 예를 들면, 산업 기기에 사용되는 제조장비들은 대부분 대형의 전동기를 사용하고 있으며, 이들은 유도 코일로부터 발생하는 주기적인 표유자기장을 항시 발생시킨다. 이런 주기적인 표유자기장은 ME 복합체를 구성하고 있는 자왜 소재에 동일한 주파수의 진동을 유발시키고, 자왜재료에 의해 발생된 진동은 압전 재료에 교류 응력으로 전달되게 된다. 전달된 응력은 정압전 효과에 의해서 전기적인 에너지로 변환되어 에너지 하베스팅이 가능해 지는 원리 (Magneto-Mechano-Electric; MME)이다.^{3,9)} 실제적인 응용을 위해서는 에너지 하베스터의 크기나 무게는 수 mm~cm 정도의 크기를 가지는 센서나 구동부 회로들과 적절히 조합될 수 있어야 할 뿐만 아니라, ME 복합체의 최대 결합 효과가 나타나는 주파수 대역이 일반적으로 상존하는 60 Hz 의 저주파 자기장 주파수와 일치해야만 한다.

최근 중국의 Li 등은 거대 자왜 금속인 Terfenol-D와 다수의 압전 PZT 세라믹 판을 복합화하고 진동을 증폭시킬 수 있는 외팔보 구조를 적용하여 ME 복합체 이용



에너지 하베스터 구조를 이용한 에너지 하베스터 구조를 보고한 바 있다(Fig. 6 (a), (b)) 10) 높은 기계적 품질계수를 가지는 초음파 혼 형태의 ME 복합체 에너지 하베스터 구조를 통하여 최대 하베스팅 출력 6.5 μ W를 26 kHz, 1 Oe 교류 자기장에서 얻을 수 있음을 보였으나 실제적으로 이러한 수십 kHz 대역의 자기장은 일상에서 쉽게 노출되기 어려운 자기장으로 실제 응용 가능성은 크지 않다. 한편 VT의 Gao 등은 압전 PZT 세라믹 섬유와 자왜 금속인 Metglas 소재를 적용하여 Bimorph 구조의 저주파 대응 ME 복합체를 개발한바 있다.¹¹⁾ 이들의 보고에 따르면 복합체 자체의 자기전기 결합계수도 약 400 V/cmOe 이상의 매우 높은 값을 가질 뿐만 아니라 최적의 하베스팅 출력을 낼 수 있는 공진 주파수를 60~220 Hz의 범위에서 튜닝 할 수 있음을 보였다. 비록 저주파수인 60 Hz의 자기장에서 최대의 출력은 16 μ W/Oe, 에너지 밀도는 200 μ W/cm³ 정도로 다른 ME 복합체를 이용한 에너지 하베스터에 비하여 높은 특성을 나타내었지만 최적의 부하 임피던스가 6 M Ω 에 달하고, 출력 자체가 무선센서 네트워크를 구동하기에 충분할 수 준은 아닌 것으로 보인다 (Fig. 6 (c), (d))

ME 복합체는 압전 효과를 이용하기 때문에 기계적 진동에너지에 의한 에너지 하베스팅과 자기장 에너지에 의한 에너지 하베스팅을 동시에 할 수 있을 뿐만 아니라 동일 위상의 기계적 진동과 자기장 변화가 인가되면 하베

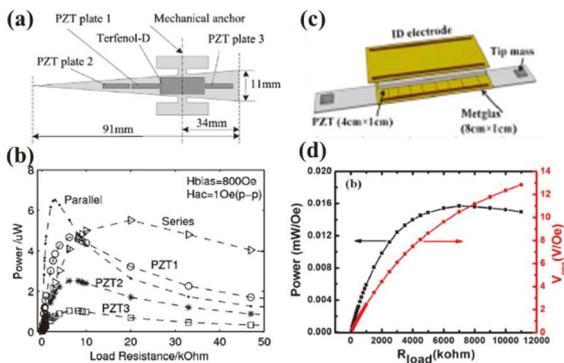


Fig. 6. 응력 집중 구조를 가지는 (a) ME 복합체의 구조와 (b) 부하 저항에 따른 에너지 하베스팅 출력¹⁰⁾. 압전 PZT 섬유 복합체와 Metglas 자왜 금속으로 이루어진 ME 복합체 에너지 하베스터의 (c) 구조와 (d) 부하저항에 따른 에너지 하베스팅 출력¹¹⁾.

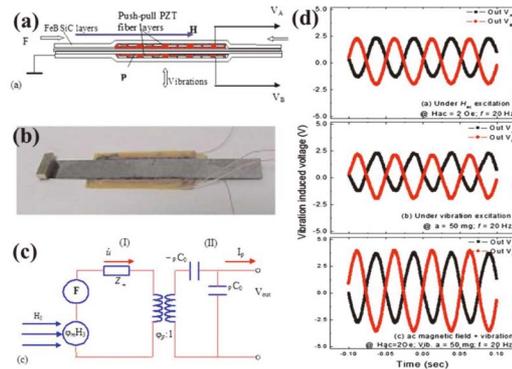


Fig. 7. ME 복합체를 이용한 에너지 하베스터의 (a) 구조와 (b) 샘플 사진, (c) 이론적 등가회로, (d) 자기장, 기계적 진동, 복합 모드에서의 하베스팅 출력 특성¹²⁾

스팅 출력을 매우 크게 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다.^{12,13)} 일례로 미국 VT의 S. Dong교수 (현재 북경대)연구결과를 Fig. 7에 도시하였다. 이들의 ME 하베스터 구조는 압전 섬유형 세라믹을 이용한 ME 복합체를 구성하고 이를 캔틸레버 구조의 하베스터로 제작하였다. 50 mg ($g = 9.8$ m/s; 중력가속도)의 기계적 진동과 2 Oe의 교류 자기장을 인가하였을 때 단일의 기계적 진동이나 자기장 자극이 인가되었을 때에 비하여 월등히 높은 특성의 에너지 하베스팅 특성이 얻어짐을 보고하였다. 이들은 이러한 다중 에너지 하베스터의 등가회로 모델을 통하여 자기장 에너지와 기계적 진동에너지의 특성 향상 효과를 예측할 수 있는 이론을 제시하였으며, 그 결과는 아래 식 (2)로 요약 될 수 있다. (ϕ_p 는 전기기계 결합계수, ϕ_m 는 자기탄성 결합계수, Z_c 는 Capacitive 임피던스, Z_m 은 기계적 임피던스)

$$V_{induced} = -\phi_p \left(\frac{Z_c}{Z_m} \right) (F + \phi_m H) \quad (2)$$

이 식을 따르면 에너지 하베스터의 출력 특성은 두 개의 독립적인 에너지 원에 의해 유도되는 전압 (기계-전기 변환에 따른 출력 전압 F, 자기-기계-전기 (MME) 변환에 따른 출력 전압 H)의 합효과에 의해 나타나는 것을 명확하게 설명할 수 있다. 최근 이러한 원리를 통하여 재료 연구소 연구팀에서는 압전 단결정을 이용하여 매우 높은 하베스팅 출력 특성을 가지는 ME 복합체 에너지 하베스터를 보고하였으며, 이는 다음절에서 설명하도록 한다.

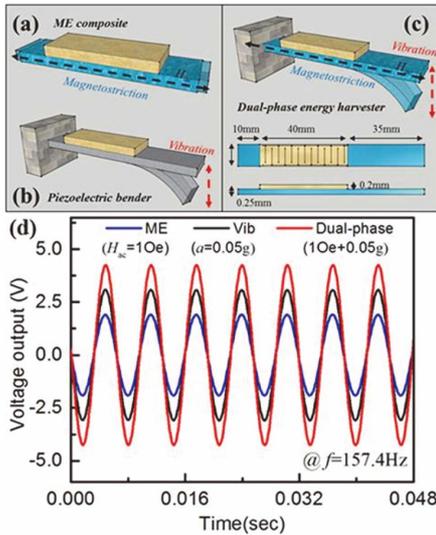


Fig. 8. Self-Biased ME 복합체 에너지 하베스터의 구조와 복합 에너지 하베스팅 출력.¹⁴⁾

ME 복합체에서 압전재료는 응력에 일차원적으로 비례하여 전력을 생성하므로, 자왜재료에서 발생한 변위도 응력에 대하여 일차원적인 관계를 가져야 한다. 그러나, 자왜 소재는 자기장에 대하여 2차함수적인 변형 거동을 나타내므로, 일차원적인 관계를 얻기 위해서는 직류 자기장을 인가한, 즉 Bias 자기장을 가한 상태가 필요하다. 대부분의 ME 에너지 하베스터는 직류 자기장을 하베스터에 인가하기 위하여 부가적인 솔레노이드 코일이나 영구자석을 하베스터 주위에 배치하여 하베스터의 특성을 최적화 시키게 된다. 이는 실제적인 ME 하베스터 소자는 비록 작은 크기와 무게를 가지더라도 전체 시스템 면에서는 부피의 문제와 장착 위치에 큰 제약 요건이 된다. 그러나, 최근 VT의 S. Priya 교수 연구팀은 Self-biased ME 복합체에 관한 개념을 정립하여 직류 자기장 Bias가 없더라도 최적의 ME 결합 효과를 낼 수 있는 복합체를 개발하였고, 이를 에너지 하베스터에 적용한 연구결과를 보고한 바 있다.¹⁴⁾ Fig. 8 에 도시한 바와 같이 일반적인 ME 하베스터와 유사하게 캔틸레버형의 하베스터를 제작하였으나 자왜 소재로서 Ni 금속을 사용하였다. 이때 적용된 Ni 자왜 금속은 크게 두가지의 효과, 압전 소재에 자기장 변화를 진동에너지로 전달하는 효과, 낮은 자기

장 이력 특성을 가지며, 자기장이 없는 상태에서도 자왜 특성을 가지는 강자성 특성 효과를 가지며 이를 활용하면 직류 Bias 자기장이 없더라도 높은 ME 결합 특성을 가지는 것을 확인하였다. 이들의 ME에너지 하베스터는 직류 Bias 자기장이 없는 상태에서 1 g의 기계적 진동으로 약 4.5 mW/cm³의 에너지 하베스팅 출력을 가지고, 여기에 동일 위상의 교류 자기장이 인가되면 ME 출력 전압을 더욱 높일 수 있는 것으로 보고되었다.

5. 압전 단결정을 이용한 자기-전기 (ME) 복합체 소재의 특성 극대화 및 에너지 하베스터

최근 재료연구소 연구팀은 인하대학교, 서울대학교, 미국 VT 등과의 공동 연구를 통하여 ME 복합체를 이용한 고출력 자기장 에너지 하베스터의 연구 개발에 압전 단결정을 적용하였다.^{3,13,15-17)}

원리적으로 ME 복합체를 이용한 에너지 하베스터에서의 전기 생성은 압전현상을 기반으로 하고 있으며, 압전재료의 생성되는 전기에너지는 식 3에서와 같이 재료 특성인 전기-기계결합계수(k , electro-mechanical coupling coefficient)에 의해 결정되기 때문에 전기-기계결합계수가 큰 재료 개발이 필요하다.

$$u_{\max, output} \sim -\frac{1}{4} \frac{k^2}{Y} T^2 \quad (3)$$

u 는 생성되는 최대 전기에너지, Y 는 재료의 Young's modulus, T 는 재료에 가해주는 응력의 크기를 나타낸다. 한편, 재료의 전기-기계결합계수(k)는 식4에서와 같이 표현된다.

$$k^2 = \frac{\text{Electrical Energy}}{\text{Mechanical Energy}} = \frac{d^2 Y}{\epsilon} \quad (4)$$

여기에서 d 는 재료의 압전상수, ϵ 는 재료의 유전율을 나타낸다. 대표적으로 많이 사용되는 세라믹 압전재료는 Pb(ZrTi)O₃(PZT)가 있으며 폴리머 압전재료는 Poly vinylidene 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 작은 크기의 진동에서는 에너지를 발생시킬 수 없으며, 또한 잘



Table 1. PMN-PZT 단결정의 방향에 따른 특성 변화

Orientation		d_{31} (pC/N)	d_{32} (pC/N)	s_{11} (pm ² /N)	s_{22} (pm 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

깨져서 큰 변형에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면 폴리머는 유연하여 큰 변위에 사용될 수 있으나 전기기 계결합계수가 작다는 단점이 있다. 한편 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $PbTiO_3$ (PMN-PT), $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $PbTiO_3$ (PZN-PT) 와 같은 압전 단결정은 Table 1에서와 같이 단결정을 가공하는 결정방향에 따라, 즉 동작하는 mode에 따라 그 특성에 큰 변화가 있다.¹⁵⁾ 이러한 압전 단결정의 결정 방향에 따른 특성변화는 ME 복합체에 적용시 ME 결합 특성을 크게 향상시킬 수 있으며, 고출력의 에너지 하베스팅 소자를 구현할 수 있다. Fig. 9는 압전 PMN-PZT 단결정과 자외재료 Ni를 복합하여 제작된 ME 복합체와 이를 이용한 에너지 하베스터의 개념도, 실제 제작된 샘플

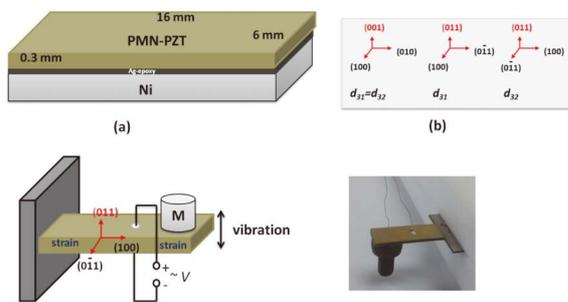


Fig. 9. (a) 압전 PMN-PZT/Ni 구조의 ME 복합체 개념, (b) ME 복합체에 적용된 압전 단결정의 배향 방향 및 압전 모드, (c) ME 에너지 하베스터의 개념도, (d) 실제 제작된 ME 하베스터 샘플 사진.¹⁵⁾

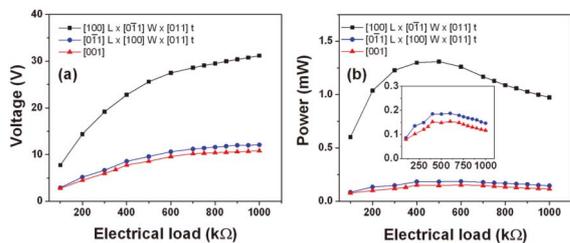


Fig. 10. (압전 PMN-PZT/Ni 구조의 ME 복합체를 이용한 에너지 하베스터의 부하저항에 따른 전압 및 전력 출력 특성.¹⁵⁾

의 사진을 보여준다.¹⁵⁾

Fig. 10은 단결정의 방향에 따른 하베스터의 출력전압을 측정된 것이다. <011> 방향의 단결정은 d_{32} 모드 즉, 횡축으로의 전기-기계결합계수가 커서, 가장 큰 출력전압을 보이고 있다. 또한 외부 저항의 크기를 변경하면서 측정된 전압과 측정된 전압으로부터 계산한 전력결과에 따르면 단결정의 방향을 효과적으로 조절할 경우 소형 에너지 하베스터에서도 비교적 큰 에너지를 수확할 수 있음을 시사하고 있다.¹⁵⁾

압전 단결정이나 세라믹 단판을 이용한 ME 복합체 적용 에너지 하베스터는 가혹한 환경하에서 구동 시 소재의 취성과파괴에 의해 전체 소자가 작동 불능이 될 가능성이 있으며, 상대적으로 낮은 compliance에 의해 낮은 주파수에서의 공진 구동에는 불리한 면이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 재료연구소 연구팀에서는 압전 단결정의 d_{32} 모드의 높은 특성을 유지하며 취성과파괴 문제극복과 낮은 공진주파수 확보를 위해 배향제어된 압전 단결정을 섬유 형태로 제작한 후 고분자 보호층을 라미네이트 한 Single crystal Fiber Composite (SFC)를 (주)세라

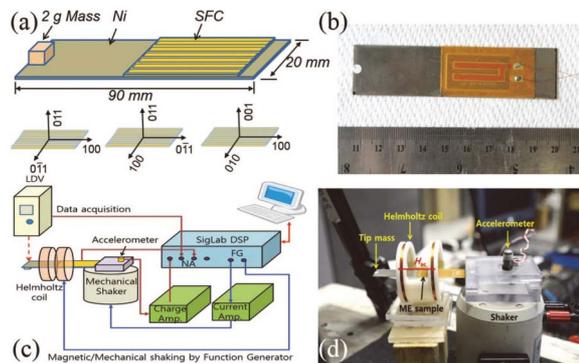


Fig. 11. 압전 단결정 섬유 복합체 (SFC; Single crystal Fiber Composite)를 이용한 Self-Bias ME 복합체 에너지 하베스터의 구조와 샘플 사진, 특성 평가 시스템.¹⁵⁾

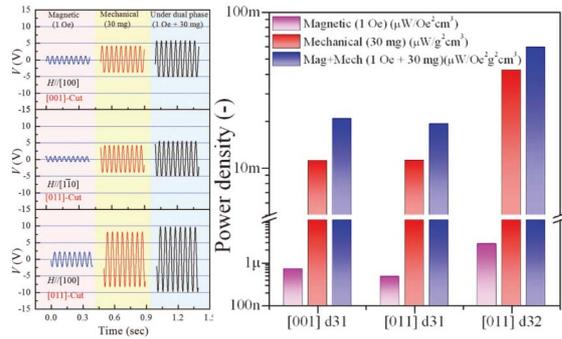


Fig. 12. 압전 단결정 섬유 복합체 (SFC; Single crystal Fiber Composite)를 이용한 Self-Bias ME 복합체 에너지 하베스터의 자기장, 기계적 진동, 자기장 + 기계적 진동 에너지 하베스팅 출력.

콤과 공동 개발하였다.^{3,13)} 개발된 SFC는 저주파수에 유리한 유연성을 가지며 단일 단결정 섬유에서 취성 파괴가 일어나더라도 전체적인 SFC의 특성에는 큰 영향이 가지지 않는 구조로 이루어져 있다. 이를 이용하여 Self-bias 특성에 유리한 Ni 자왜금속을 접착하여 ME 복합체를 제작하고 다양한 환경에서의 에너지 하베스팅 특성을 보고하였다.¹³⁾

Fig. 11은 제작된 ME 복합체 적용 에너지 하베스터의 구조와 사진, 복합 에너지 하베스팅 평가 장치를 보여준다.¹³⁾ SFC에서 압전 단결정의 유효 면적은 약 28 x 14 mm²이며 단일 압전 단결정의 섬유의 두께는 0.2 mm이다. DSP와 연동된 기계적 진동 인가장치, 자기장 인

가 코일을 사용하여 자기장이 인가되었을 때, 기계적 진동이 인가되었을 때, 자기장+기계적 진동이 동시에 인가되었을 때의 에너지 하베스팅 특성을 평가할 수 있는 셋업이다. Fig. 12에 요약된 바와 같이 압전 단결정 섬유를 d₃₂ 방향으로 배향되었을 때 가장 우수한 에너지 하베스팅 특성이 나타나는 것을 확인하였다. 또한 Ni 금속 자왜 재료의 특성에 의해 자기장이 없을 때 95% 이상의 최대 출력이 나오는 Self-bias ME 특성을 가지고, 이에 따라 별도의 직류 자기장 인가 코일이 없는 상태에서도 최적의 자기장 에너지 하베스팅 특성이 나옴을 보고하였다. 또한 자기장과 기계적 진동이 동시에 인가될 때 단일의 에너지원을 하베스팅 할 때보다 월등히 높은 59.78 mW/Oe²g²cm³의 전력 밀도가 하베스팅 될 수 있었다. 이는 세라믹 소재 적용대비 100 배 이상의 높은 전력 밀도에 해당된다.¹³⁾

이러한 SFC적용 ME 복합체 에너지 하베스터의 특성을 활용하여 재료연구소 공동 연구팀에서는 60 Hz, 약 7 Oe의 미세 표유자기장을 활용하여 35개의 고휘도 LED 어레이의 점등이 가능함을 보고하였다.³⁾ 또한 에너지 하베스팅 기술의 최적 적용분야인 무선센서 네트워크 구동 가능성을 전력 관리회로 (LTC3588), 이차전지 충전, 무선센서 네트워크 구동용 마이크로 콘트롤러 (TI430), 내장 온도 센서, 양방향 무선 통신 모듈 (CC2500)로 구성하여 5초 간격으로 실시간 온도 정보를 측정하고 PC와 무선 통신으로 센서 정보를 주고 받을 수 있음을 보였다. 이는 지금까지 ME 복합체를 이용하여 10 Oe 이하의 미세 자기장을 무선센서 네트워크를 구동하는데 충분한 수준으로 에너지 하베스팅 할 수 있음을 보여준 최초의 연구결과이고 기술의 발전을 통하여 더욱 다양한 응용에 활용될 수 있을 것이다.

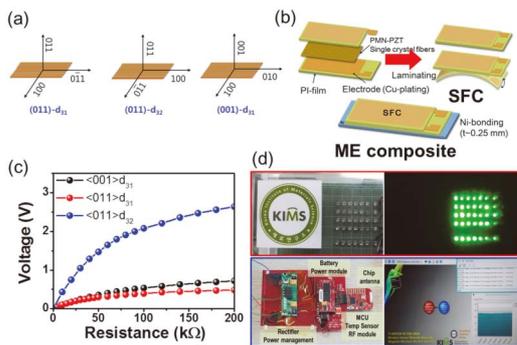


Fig. 13. (a) 압전 단결정 섬유 복합체 (SFC; Single crystal Fiber Composite)의 결정 방향 제어, (b) SFC를 이용한 ME 복합체, (c) MME 하베스터의 60 Hz, 1.6 Oe 자기장에서에서의 하베스팅 전압, (d) MME 하베스터를 이용한 LED 점등 및 무선센서 네트워크 구동³⁾

6. 맺음말

본고에서는 압전소재와 자왜소재의 결합효과를 이용한 자기-전기 복합체 (ME 복합체)의 기본적 동작 원리, 학술 및 특허기술 연구 동향, 에너지 하베스터로서의 응용 연구 동향, 압전 단결정 소재를 이용한 고출력의 ME



복합체 에너지 하베스터기술에 대해서 살펴보았다. 기존의 전자기 방식의 자기장 에너지 하베스팅 기술에 비하여 ME 복합체 에너지 하베스터는 저주파수의 미세한 자기장을 하베스팅 할 수 있을 뿐만 아니라 높은 전력 밀도를 가지는 것으로 보고되고 있다. 또한 ME 복합체를 이용한 에너지 하베스터는 전자기 방식과 달리 자기장을 발생시키는 전력선로에 부하로서 작용을 최소화 할 수 있는 장점과 최근 보고되고 있는 Self-bias 특성, 압전 단결정을 이용한 고출력 ME 복합체 등의 기술을 활용하게 되면 고전압송배전로 및 다양한 고전력 시스템 감시용 무선센서 네트워크를 구동할 수 있는 소형 에너지 하베스터를 실질적으로 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 보다 효율을 높이기 위해서는 고효율 자왜재료 및 압전재료의 개발이 필요하며, 자왜재료와 압전재료를 효과적으로 coupling 할 수 있는 기술이 필요하다. 현재, 기초적인 연구는 학계, 연구계를 중심으로 활발하게 진행되고 있으므로 산업계에서는 실제 적용할 수 있는 환경 발견과 구체적인 적용연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. '압전에너지 하베스팅의 원리 및 응용', *조명 전기설비학회지*, **24** [6] 14-23 (2010).
2. S. Priya, J. Ryu, C.-S. Park, J. Oliver, J.-J. Choi, and D.-S. Park, "Piezoelectric and Magnetolectric Thick Films for Fabricating Power Source in Wireless Sensor Nodes," *Sensors*, **9** [8] 6362-84 (2009).
3. J. Ryu, J.-E. Kang, Y. Zhou, S.-Y. Choi, W.-H. Yoon, D.-S. Park, J.-J. Choi, B.-D. Hahn, C.-W. Ahn, J.-W. Kim, Y.-D. Kim, S. Priya, S. Y. Lee, S. Jeong, and D.-Y. Jeong, "Ubiquitous Magneto-Mechano-Electric Generator," *Energy Environ. Sci.*, **8** 2402-8 (2015).
4. R.C. Kambale, D.-Y. Jeong, and J. Ryu, "Current Status of Magnetolectric Composite Thin/Thick Films," *Adv. Cond. Matt. Phys.*, ID824643:1-15 (2012).
5. J. Ryu, A.V. Carazo, K. Uchino, and H.-E. Kim, "Magnetolectric Properties in Piezoelectric and Magnetostrictive Laminar Composites," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** [8] 4948-51 (2001).
6. J. Ryu, S. Priya, K. Uchino, and H.-E. Kim, "Magnetolectric Effect in Composites of Magnetostrictive and Piezoelectric Materials," *J. Electroceramics*, **8** [2] 107-20 (2002).

7. I. Takeuchi, "All-Thin-Film Magnetolectric Sensors and Other Multiferroic Devices," 9th IWPMA, Hiroasaki, Japan, 2012.
8. J. Zhai, S. Dong, Z. Xing, J. Li, and D. Viehland, "Geomagnetic Sensor Based on Giant Magnetolectric Effect," *Appl. Phys. Lett.*, **91** 123513 (2007).
9. R.C. Kambale, J.-E. Kang, W.-H. Yoon, D.-S. Park, J.-J. Choi, C.-W. Ahn, J.-W. Kim, B.-D. Hahn, D.-Y. Jeong, Y.-D. Kim, S. Dong, and J. Ryu, "Magneto-Mechano-Electric (MME) Energy Harvesting Properties of Piezoelectric Macro Fiber Composite/Ni Magnetolectric Generator," *Energy Harvesting Systems*, **1** [1-2] 3-11 (2014).
10. P. Li, Y.M. Wen, and L.X. Bian, "Enhanced Magnetolectric Effects in Composite of Piezoelectric Ceramics, Rare-Earth Iron Alloys, and Ultrasonic Horn," *Appl. Phys. Lett.*, **90** [2] 022503 (2007).
11. J. Q. Gao, D. Hasanyan, Y. Shen, Y. J. Wang, J. F. Li, and D. Viehland, "Giant Resonant Magnetolectric Effect in Bi-Layered Metglas/Pb(Zr,Ti)O₃ Composites," *J. Appl. Phys.*, **112** [10] 104101 (2012).
12. S. X. Dong, J. Y. Zhai, J. F. Li, D. Viehland, and S. Priya, "Multimodal System for Harvesting Magnetic and Mechanical Energy," *Appl. Phys. Lett.*, **93** [10] 103511 (2008).
13. D. R. Patil, Y. Zhou, J.-E. Kang, N. Sharpes, D.-Y. Jeong, Y. Kim, K.H. Kim, S. Priya, and J. Ryu, "Anisotropic Self-Biased Dual-Phase Low Frequency Magneto-Mechano-Electric Energy Harvesters with Giant Power Densities," *APL Mater.*, **2** 046102 (2014).
14. Y. Zhou, D. J. Apo, and S. Priya, "Dual-Phase Self-Biased Magnetolectric Energy Harvester," *Appl. Phys. Lett.*, **103** [19] 192909 (2013).
15. R. C. Kambale, W.-H. Yoon, D.-S. Park, J.-J. Choi, C.-W. Ahn, J.-W. Kim, B.-D. Hahn, D.-Y. Jeong, B. C. Lee, G.-S. Chung, and J. Ryu, "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).
16. D. Patil, R. C. Kambale, Y. S. Chai, W.-H. Yoon, D.-Y. Jeong, D.-S. Park, J.-W. Kim, J.-J. Choi, C.-W. Ahn, B.-D. Hahn, S. Zhang, K. H. Kim, and J. Ryu, "Multiple Broadband Magnetolectric 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).



17. D. Patil, Y. S. Chai, R. C. Kambale, B.-G. Jeon, K. Yoo, J. Ryu, W.-H. Yoon, D.-S. Park, D.-Y. Jeong, S.-G. Lee, J. Lee, J.-H. Nam, J.-H. Cho, B.-I. Kim, and K. H. Kim, "Enhancement of Resonant and Non-

Resonant Magnetolectric Coupling in Multiferroic Laminates with Anisotropic Piezoelectric Properties," *Appl. Phys. Lett.*, **102** 062909 (2013).

●● 류정호



- 1992-1998년 영남대학교 무기재료공학과 학사, 석사
- 1998-2001년 서울대학교 재료공학부 박사
- 2000-2003년 Pennsylvania State University 방문연구원, 박사 후 연구원
- 2003-2006년 삼성전기 OS 사업부 책임연구원
- 2006-현재 재료연구소 책임연구원

●● 최시영



- 1993-1999년 부산대학교 무기재료공학과 학사
- 1999-2004년 한국과학기술원 신소재공학과 석사, 박사
- 2004-2005년 일본 도쿄대학교 박사 후 연구원
- 2005-2006년 영국 옥스퍼드대학교 박사 후 연구원
- 2006-2007년 일본 도쿄대학교 JSPS fellow 연구원
- 2008년-현재 재료연구소 책임연구원

●● 김종우



- 1996-2002년 한양대학교 재료공학과 학사
- 2002-2004년 한국과학기술원 재료공학과 석사
- 2004-2009년 독일 드레스덴 공과대학 재료공학과 박사
- 2010-현재 재료연구소 선임연구원

●● 김기훈



- 1988-1992년 서울대학교 물리학과 학사
- 1992-1994년 서울대학교 물리학과 석사
- 1994-1998년 서울대학교 물리학과 박사
- 1998-1999년 미국 Rutgers 대학 박사 후 연구원
- 2001-2003년 미국 LANL 박사 후 연구원
- 2003-현재 서울대학교 물리천문학부 교수

●● 정대용



- 1988-1994년 서울대학교 무기재료공학과 학사
- 1994-1996년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 2000-2004년 Pennsylvania State University, Ph.D
- 2006-2008년 KIST 선임연구원
- 2008-2011년 명지대학교 조교수
- 2011-현재 인하대학교 부교수