

PZT 기반 압전 에너지 하베스팅 기술



강중윤 책임연구원 (KIST 전자재료연구센터), 강민규 학생연구원 (KIST 전자재료연구센터)



1. 서론

압전 현상이란 전기적 에너지를 기계적 에너지로 혹은 기계적 에너지를 전기적 에너지로 직접 변환할 수 있는 현상을 말한다. 최근 수년간 이러한 압전 현상을 이용하여 주변에 버려지는 기계적 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 저전력 소자의 자가 동력원으로 사용하고자 하는 압전 에너지 하베스팅에 관한 연구가 재료 공학, 전자 공학, 기계 공학, 생명 공학 등 여러 분야에 걸쳐 연구되고 있다. 압전 에너지 하베스팅은 수 μW 에서 수 mW 의 동작전력을 갖는 휴대용 전자부품, 무선통신 모듈, 건강모니터 장치, 군사용 센서소자, 차량용 센서소자 등에서 사용할 수 있는 배터리가 필요 없는 자가 동력원으로 각광받고 있다 [1,2].

1954년 $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (PZT) 물질에서 거대 압전 현상이 발견된 이래로 현재 PZT는 대표적인 압전 재료로 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이후 환경문제로 인한 $\text{Na}_x\text{K}_{1-x}\text{NbO}_3$ (NKN) 비납계 압전 재료 등이 개발되었지만 현재까지 PZT를 기반으로 한 압전 재료의 성능에 크게 미치지 못하고 있다. 최근에는 압전 에너지 하베스팅 소자 구현을 위해 ZnO 물질을 기반으로 한 유연 압전 에너지 하베스팅 기술들이 소개되고 있다. PZT는 ZnO에 비해 상

대적으로 고온의 온도에서 합성되기 때문에 유연소자를 구현하는데 큰 어려움이 있는데, 때문에 ZnO의 낮은 압전 특성에도 불구하고 현재 유연 압전 에너지 하베스팅 소자에 많이 응용되고 있다 [3]. 하지만 현재까지 발견된 압전 재료 중 PZT를 대체할 만한 압전 성능을 갖는 물질은 보고되지 않고 있으며, 압전 에너지 하베스팅에 관련된 연구도 활발하게 진행되고 있다.

본고에서는 최근 몇 년간 학계에 보고된 PZT를 기반으로 한 압전 에너지 하베스팅 기술 개발 현황에 대해 크게 벌크 소자, Microelectro mechanical system (MEMS) 소자, 유연 소자 기술로 분류하여 소개하고자 한다.

2. PZT 기반 벌크형 압전 에너지 하베스팅 기술

벌크 압전 에너지 하베스팅 기술은 다양한 물질 개발과 소자 디자인으로부터 하베스터의 에너지 변환 효율을 증가시켜 mW 수준의 전기 에너지를 얻을 것을 목표로 연구되고 있다. 압전 에너지 하베스터의 변환 효율은 소자에 인가되는 진동의 가속도, 힘, 주파수와 에 따라 변할 수 있으며, 에너지 변환 전자 회로의 임피던스 매칭, 진동원 주변 환경과 하베스터



의 구조와 압전 소재도 밀접한 관련이 있다. 본 장에서는 다양한 응용 분야를 위해 디자인된 에너지 하베스터들에 대해 소개하고자 한다.

대표적인 벌크형 압전 에너지 하베스팅 구조인 캔틸레버 압전 에너지 하베스터는 그림 1(a)와 같이 벌크 압전 세라믹 (Piezoelectric ceramic), 탄성체 (Elastic body), 그리고 교정추 (Proof mass)로 구성되어 있다. 이와 같이 캔틸레버 압전 에너지 하베스터는 구조가 간단할 뿐만 아니라 외부 진동에 의해 큰 변형을 얻을 수 있기 때문에 압전 세라믹의 31 모드를 이용하여 효율적으로 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있다. 캔틸레버 압전 에너지 하베스터의 성능은 압전 세라믹의 성능뿐만 아니라 이를 구성하는 물리적 요소들 (하베스터의 길이, 면적, 추의 무게, 두께, 압전 세라믹의 위치 등)에 의해 좌우된다. 때문에 에너지 변환 효율 향상을 위한 압전 세라믹 물질 개발과 최적화된 하베스터 디자인에 대한 연구가 활발하게 이뤄지고 있다.

캔틸레버 압전 에너지 하베스터의 경우 에너지 변환 효율은 소자의 공진주파수 영역에서 극대화되기 때문에 대부분의 압전 에너지 하베스터는 공진주파수 영역에서 동작되도록 설계되어 있다. 따라서 압전 에너지 하베스터에 가해지는 진동의 주파수, 힘, 가속도에 따라 같은 하베스터라고 하더라도 발생하는 전기에너지의 양은 매우 다르게 된다. 최근 발표된 연구논문에 의하면 캔틸레버 압전 에너지 하베스터는 공진영역에서 약 2 mW/cm^2 의 전기 에너지를 생산할 수 있다고 보고되고 있으며 [4], 일반적인 다결정 세라믹보다 우수한 압전 성능을 갖는 단결정 압전 세라믹을 사용할 경우 약 17 mW/cm^2 의 전기 에너지를 얻을 수 있다고 보고되고 있다 [5].

벌크형 압전 에너지 하베스팅 기술에서 공진주파수는 응용 분야 결정에 있어 매우

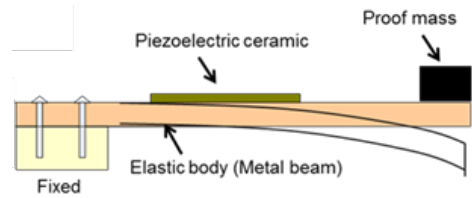


그림 1. 캔틸레버 형태의 벌크 압전 에너지 하베스터의 구조.

중요하다. 우리 주위에 존재하는 대부분의 진동은 약 100 Hz 이하이고 낮은 주파수로 갈수록 응용성이 매우 크기 때문에 낮은 공진주파수를 결정하기 위한 캔틸레버 압전 에너지 하베스터를 디자인하고 있다. 공진주파수는 캔틸레버 에너지 하베스터의 탄성체의 굽힘 강도 (Flexural rigidity)가 낮을수록, 탄성체의 길이가 길수록, 교정 추의 무게가 무거울수록 낮아지는 경향이 있는데 [6], 실제로 그림 2(a)와 같이 탄성체의 길이를 길게 디자인 할 경우 기존 캔틸레버 압전 에너지 하베스터의 공진주파수 보다 매우 낮은 50 Hz의 공진주파수를 얻을 수 있으며 [7], 비대칭의 교정 추를 사용할 때도 마찬가지로 45 Hz의 매우 낮은 공진주파수를 얻을 수 있다고 보고되고 있다 [8]. 캔틸레버 압전에너지 하베스터의 에너지 변환 효율은 공진주파수에 대한 의존도가 매우 강하기 때문에 일반적으로 주변에 존재하는 무질서한 진동 환경에서 응용하기에는 부적합하고, 일정한 진동을 발생하는 기계 장치 혹은 시설물 등에 제한적으로 응용될 수 있다. 이러한 압전 에너지 하베스터의 응용성을 증가시키기 위해서는 광대역의 공진주파수를 갖는 에너지 하베스터의 개발이 필요하다. 그림 2(b)는 저온 동시소성 세라믹 (LTCC) 기술을 이용하여 각각 길이가 다른 3개의 캔틸레버를 내장화한 압전 에너지 하베스터이다. 연구 논문에 따르면 이와 같은 하베스터를 사용했을 경우 공진주파수의 대역폭이 3 dB에서 5.4%로 증가되었다고 보



3. PZT 기반 MEMS형 압전 에너지 하베스팅 기술

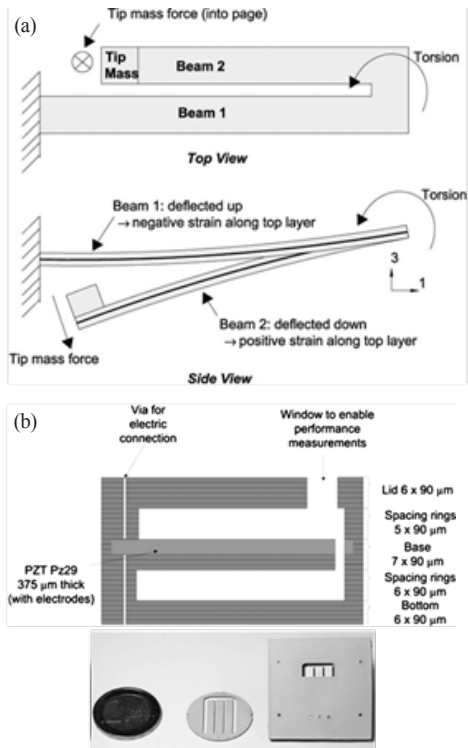


그림 2. (a) Meander형 압전 캔틸레버 에너지 하베스터의 구조, (b) 광대역 LTCC 압전 에너지 하베스터.

고하고 있다 [9].

별크형 압전 에너지 하베스터는 응용 환경에 따라 다양한 디자인으로 개발되고 있다. 최근 발표된 연구에 따르면 신체의 움직임은 전기에너지로 바꾸는 회전체 형식의 별크형 압전 에너지 하베스터를 이용하여 관절의 움직임으로부터 약 2 mW를 생산할 수 있다고 보고되고 있으며 [10], 캔틸레버 형태의 압전 에너지 하베스터를 튜브 내에 위치시키고 110 dB의 소리를 올렸을 때 약 12 mW를 생산하였다고 보고하고 있다 [11]. 또한, 압력센서, 수압유량센서, 타이어 공기압 센서 (Tire pressure monitoring system, TPMS) 등 다양한 센서 내에 동작소자 혹은 동력원으로 별크형 압전 에너지 하베스팅 기술이 쓰이고 있다 [12-16].

PZT 압전 세라믹은 압전 특성은 우수 하지만 고유의 취성으로 인해 큰 변형에 취약하며, 높은 굽힘 강도 즉, 유연하지 못한 성질로 인해 압전 에너지 하베스터로 제작했을 때 공진주파수가 매우 높다. MEMS형 압전 에너지 하베스팅 기술은 압전 세라믹의 유연성을 높여 낮은 공진 주파수를 구현하고, 큰 변형에도 안정하며, 초소형 전자소자 (Micro-electronics)에 μW 수준의 동력원으로 사용 가능하다는 장점을 갖는다. 대부분의 MEMS 압전 에너지 하베스터는 그림 3과 같이 캔틸레버형으로 개발되고 있으며, 실리콘 기반 지지체에 후막 혹은 박막 PZT 압전체를 형성하여 에너지 변환 소자로 사용한다. 최근에는 MEMS형 압전 에너지 하베스터의 에너지 변환 효율을 높이기 위해 별크형 압전 에너지 하베스터와 마찬가지로 구조 변화를 통한 공진주파수 조절에 관한 연구가 주류를 이루고 있다. 그림 4는 최근 보고된 MEMS형 압전 에너지 하베스터의 구조들이다. 광대역의 낮은 공진주파에서 동작할 수 있는 MEMS형 하베스터를 구현하기 위해 그림 4(a)와 같이 매우 큰 Si 교정추를 이용하여 36 Hz의 매우 낮은 공진 주파수를 얻을 수 있었고, 그림 4(b)의 Spacer로 인해 약 30 Hz~47 Hz 범위의 넓은 공진주파수를 갖는 MEMS형 에너지 하베스터를 구현하였다고 보고하고 있다 [17]. 또한, 그림 4(c)와 같이 S 형태의 캔틸레버와 큰 교정 추를 갖는 하베스터의 공진주파수는 약 3.4 Hz에서 11.1 Hz로 광대역의 매우 낮은 주파수 대역에서 동작할 수 있다고 보고되고 있다 [18]. 그림 4(d)는 양쪽이 고정된 MEMS 하베스터의 비선형 강성 특성을 이용하여 초광대역의 공진주파수를 갖는 압전 에너지 하베스터를 구현하였다 [19].

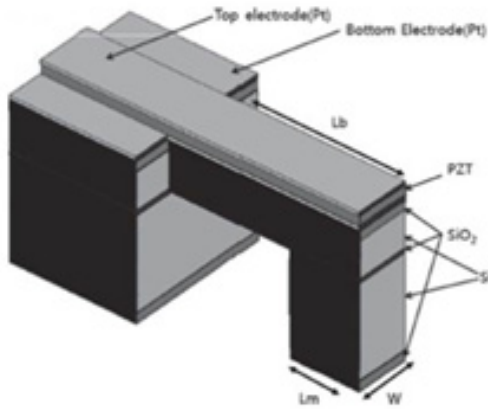


그림 3. MEMS형 압전 에너지 하베스터의 기본 구조.

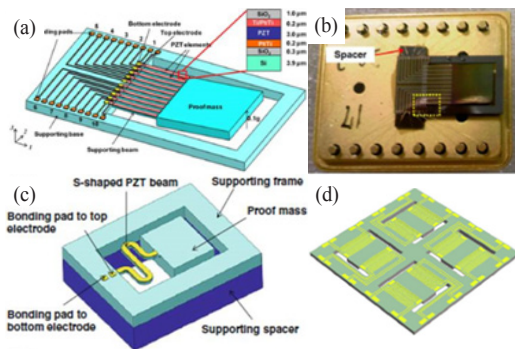


그림 4. (a)~(b) 큰 Si 교정 추와 Spacer를 이용한 저주파 광대역의 공진주파수에서 동작되는 MEMS 에너지 하베스터, (c) S 모양의 캔틸레버를 이용한 광대역 저주파 MEMS 압전 에너지 하베스터, (d) 양측 고정구조를 사용한 광대역 MEMS 압전 에너지 하베스터.

4. PZT 기반 유연 압전 에너지 하베스팅 기술

유연 압전 에너지 하베스팅 기술은 앞서 기술한 벌크형 및 MEMS형 압전 에너지 하베스터와 달리 동작 영역이 공진주파수에 한정되지 않고 모든 불규칙적 진동 환경 하에서 사용하는 것에 초점을 맞춰 개발되고 있다. 공진 주파수 영역에서 동작하지 않기 때

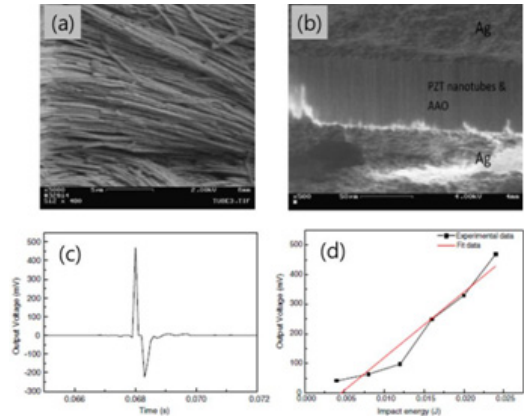


그림 5. (a)~(b) AAO 템플릿 방법으로 합성된 PZT 나노 튜브, (c)~(d) 압전 에너지 하베스터의 출력 전압.

문에 에너지 변환 효율이 적은 반면에 매우 유연한 소재를 사용하기 때문에 에너지 하베스터에 큰 변형을 인가할 수 있고, 이로 인해 큰 전력을 발생할 수 있다. PZT 물질을 기반으로 한 유연 압전 하베스팅 기술은 PZT의 높은 결정화 온도 (600도 이상)로 인하여 일반적인 공정으로 구현하는데 큰 어려움이 있다. 때문에 최근에는 수열합성법 (Hydrothermal)과 같은 저온공정으로 합성된 PZT 나노 구조체 물질 혹은 고온에서 견딜 수 있는 지지체 상에 PZT를 합성한 후 유연한 지지체로 PZT 물질을 옮기거나 Polydimethyl-siloxane (PDMS)과 같은 유연 폴리머 물질과 합성물 (Composite)을 만들어 사용하는 유연 압전 에너지 하베스팅 기술이 활발히 연구되고 있다. 그림 5(a)~(b)는 나노 기공을 갖는 Anodic aluminum oxide (AAO) 템플릿 내에 PZT 용액을 함침시키고 고온 열처리하여 합성한 PZT 나노 튜브이다. 합성된 PZT 나노 튜브 양단에 Ag 전극을 도포하여 압전 에너지 하베스터를 구현하였으며, 전극 상에 금속 추를 낙하시키면 그림 (c)~(d)와 같이 약 0.4 V의 출력 전압을 얻을 수 있다고 보고하고 있다 [20].



수열합성법은 저온에서 효과적으로 PZT 나노 구조체를 합성할 수 있는 방법 중 하나이다. 그림 6(a)~(c)는 수열합성법으로 전도성 기판 상에 단결정으로 합성된 PZT 나노 와이어로 유연한 에폭시 폴리머를 PZT 나노 와이어에 함침 시키고 전극을 형성하여 에너지 하베스터를 구현하였으며, 그림 6(e)와 같이 약 1 V의 전압과 200 nA의 전류를 생산

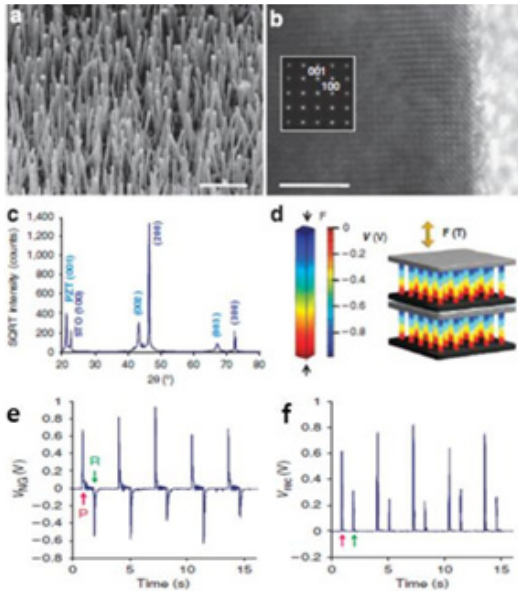


그림 6. (a) 수열합성법으로 합성된 PZT 나노 와이어, (b) TEM image, (c) XRD 패턴, (d) PZT 나노와이어 기반 압전 에너지 하베스터의 전력발생 시뮬레이션, (e) 발생 전압, (f) 정류회로를 거친 발생 전압.

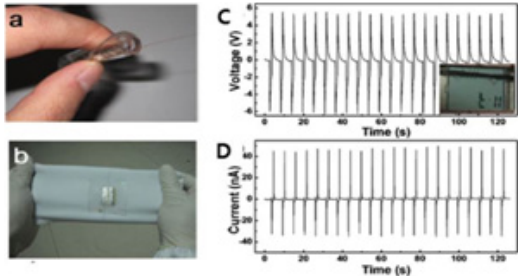


그림 7. (a)~(b) PZT나노 와이어와 PDMS 합성물을 이용한 유연 압전 에너지 하베스터, (c) 발생 전압, (d) 발생 전류.

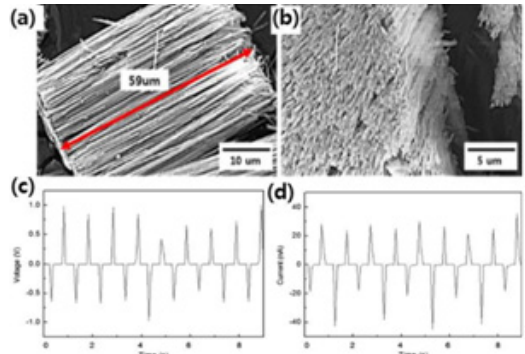


그림 8. (a)~(b) AAO 템플릿 방법으로 이용하여 합성한 PZT 나노 튜브, (c) PZT 나노 튜브 합성물을 이용한 유연 압전 에너지 하베스터의 발생 전압, (d) 발생 전류.

할 수 있다고 보고하였다. 발생된 전력은 그림 6(f)와 같이 정류회로를 거치고 22 μF 용량의 콘덴서에 축적하면 하나의 발광다이오드를 동작할 수 있다 [21]. PZT 나노 와이어를 PDMS와 같은 유연 폴리머 물질과 합성물을 만들면 소자의 유연성 증대와 나노 와이어에 거대한 변형을 기대할 수 있다. 그림 7(a)~(b)는 Electrospinning 방법으로 합성된 PZT 나노와이어와 PDMS 합성물을 이용하여 제작한 유연 압전 에너지 하베스터로 외부의 큰 변형에도 파괴되지 않는 특성을 보여준다. 연구 논문에 따르면, 이와 같은 에너지 하베스터에서 약 6 V의 전압과 45 nA의 전류를 얻을 수 있으며, LCD를 동작할 수 있는 전력을 생산하였다고 보고하고 있다 [22]. 그림 8(a)~(b)는 AAO 템플릿 방법으로 합성한 PZT 나노 튜브이다. 고온에서 합성된 결정상의 PZT 나노 튜브를 얻기 위해 열처리 후 AAO 템플릿을 제거하면 순수 결정상의 PZT 나노 튜브를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 PZT 나노튜브와 PDMS의 합성물을 이용한 압전 에너지 하베스터는 약 1 V의 전압과 30 nA의 전류를 생산할 수 있다고 보고하고 있다 [23].

고온에서만 합성할 수 있는 박막형태의

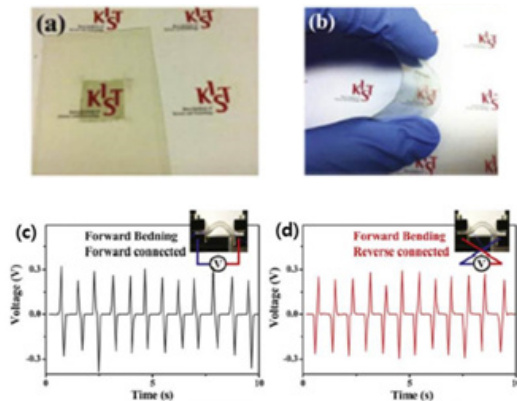


그림 9. (a)~(b) 레이저 전사 기술을 이용한 유연 압전 에너지 하베스터, (c)~(d) 발생 전압.

PZT는 유연 압전 에너지 하베스터 제조에 적합하지 않다. 최근 연구 결과에 따르면, 폴리머 기판 상에 직접 구현할 수 없는 PZT 박막을 먼저 고온에서 견딜 수 있는 사파이어 기판 상에 성장시킨 후 레이저 전사 (Laser transfer) 기술을 이용하여 유연한 기판에 구현할 수 있다고 보고하고 있다. 레이저 전사 기술은 두 물질간 에너지 밴드갭 차를 이용하여, 박리하고자 하는 박막과 기판 계면에서 흡수되는 레이저 광으로 인해 기화된 박막 계면에 박리가 일어나고, 박리된 PZT 박막을 PDMS Stamp를 이용하여 떼어내게 된다. 떼어낸 박막을 유연한 기판 상에 부착시키면 그림 9(a)~(b)와 같은 유연 압전 에너지 하베스터를 구현할 수 있다. 그림 (c)~(d)는 레이저 전사 기술을 적용한 유연 압전 에너지 하베스터의 발생 전압으로 약 0.3 V의 전압을 발생시킬 수 있다고 보고하고 있다 [24].

5. 결론

본고는 지난 몇 년간 보고된 PZT 기반의 에너지 수확 기술을 벌크형 압전 에너지 하베

스터 기술, MEMS형 압전 에너지 기술, 유연 압전 에너지 하베스팅 기술로 분류하여 기술하였다. PZT 기반 벌크 압전 에너지 하베스터는 광대역의 낮은 동작 주파수와 mW 급 동력원을 얻고자 하는 기술들이 제안되었다. 특히 여러 연구 논문에서 보고된 독특한 구조의 에너지 하베스터는 특정 환경에서 높은 에너지 효율을 나타냈다. MEMS 압전 에너지 하베스터 기술 역시 벌크형 하베스터와 마찬가지로 전력 발생 효율증가와 저주파 광대역의 동작 주파수를 얻기 위한 독특한 구조의 하베스터 디자인들이 보고되고 있다. 마지막으로 나노 구조체 혹은 전사 형태의 PZT 물질을 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅 기술은 벌크 혹은 MEMS 하베스터에 비해 가해지는 변형이 매우 크지만 공진 영역에서 동작할 수 없기 때문에 벌크와 MEMS형 하베스터의 발생 전력과 비교했을 때 매우 낮은 성능을 나타내고 있다. 그럼에도 불구하고 유연 압전 에너지 하베스팅 기술은 바람, 물의 흐름, 사람의 움직임과 같은 불규칙적인 진동 환경에서 매우 유용하기 때문에, 추후 지속적인 하베스터의 성능 개선 개발을 통해 그 활용도는 매우 크게 증가할 것으로 사료 된다.

참고 문헌

- [1] H. S. Kim et al., "A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* Vol. 24, pp. 1129-1141, 2011.
- [2] S. P. Beedy et al., "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications," *Measurement Science and Technology* Vol. 17, pp. R175-R195, 2006.
- [3] Z. L. Wang et al., "Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays," *Science* Vol. 14, pp. 242-246, 2006.
- [4] K. B. Kim et al., "Performance of

- unimorph cantilever generator using Cr/Nb doped $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$ thick film for energy harvesting device applications," *Journal of the European Ceramic Society* Vol. 33, pp. 305–311, 2013.
- [5] R. C. Kambale et al., "Magnetolectric properties and magnetomechanical energy harvesting from stray vibration and electromagnetic wave by $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ single crystal/Ni cantilever," *Journal of Applied Physics* Vol. 113, pp. 204108 2013.
- [6] S. Priya et al., "Energy Harvesting Technologies," NewYork, NY: Springer, (2008).
- [7] S. F. Berdy et al., "Low-frequency meandering piezoelectric vibration energy harvester," *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* Vol. 59, pp. 846–858, 2012.
- [8] J. C. Park et al., "Asymmetric PZT bimorph cantilever for multi-dimensional ambient vibration harvesting," *Ceramics International* Vol. 39, pp. S653–S657, 2013.
- [9] M. Sobocinski et al., "Monomorph piezoelectric wideband energy harvester integrated into LTCC," *Journal of European Ceramic Society* Vol. 31, pp. 789–794, 2011.
- [10] M. Pozzi et al., "The pizzicato knee-joint energy harvester: characterization with biomechanical and the effect of backpack load," *Smart Materials and Structures* Vol. 21, pp. 075023, 2012.
- [11] B. Li et al., "Low frequency acoustic energy harvesting using PZT piezoelectric plates in a straight tube resonator," *Smart Materials and Structures* Vol. 22, pp. 055013, 2013.
- [12] J. Palosaari et al., "Energy harvesting with a cymbal type piezoelectric transducer from low frequency compression," *Journal of Electroceramics* Vol. 28, pp. 214–219, 2012.
- [13] X. R. Xhen et al., "Vibration energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm," *Ceramics International* Vol. 38S, pp. S271–S274, 2012.
- [14] T. B. Xu et al., "Energy harvesting using a PZT ceramic multilayer stack," *Smart Materials and Structures* Vol. 22, pp. 065015, 2013.
- [15] D. A. Wang et al., "A shear mode piezoelectric energy harvester based on pressurized water flow," *Sensors and Actuators A: Physical* Vol. 167, pp. 449–458, 2011.
- [16] N. Makki et al., "Battery-and wire-less tire pressure measurement system (TPMS) sensor," *Microsystem Technologies* Vol. 18, pp. 1201–1212, 2012.
- [17] H. Liu et al., "Piezoelectric MEMS energy harvester for low-frequency vibrations with wideband operation range and steadily increased output power," *Journal of Microelectromechanical systems* Vol. 20, pp. 1131–1141, 2011.
- [18] H. Liu et al., "A new S-shaped MEMS PZT cantilever for energy harvesting from low frequency vibrations below 20 Hz," *Mirosystems Technology* Vol. 18, pp. 497–506, 2012.
- [19] A. Hajati et al., "Ultra-wide bandwidth piezoelectric energy harvesting," *Applied Physics Letters* Vol. 99, pp. 083105, 2013.
- [20] S. Xu et al., "power generation from piezoelectric lead zirconate titanate nanotubes," *Journal of Physics D: Applied physics* Vol. 42, pp. 085301, 2009.
- [21] S. Xu et al., "Piezoelectric-nanowire-enabled power source for driving wireless microelectronics," *Nature communication* Vol. 93, pp. 1–5, 2010.
- [22] W. Wu et al., "Lead Zirconate Titanate Nanowire Textile Nanogenerator for Wearable Energy-Harvesting and Self-Powered Devices," *ACS Nano* Vol. 6, pp. 6231–6235, 2012.
- [23] W. S. Jung et al., "Energy harvester using PZT nanotubes fabricated by template-assited method," *Current Applied Physics* Vol. 13, pp. S131–S134, 2013.
- [24] Y. H. Do et al., "Preparation on transparent flexible piezoelectric energy harvester based on PZT films by laser lift-off process," *Sensors and Actuators A* Vol. 200, pp. 51–55, 2013.





저자약력



성명 : 강중윤
 ◆ 학력
 • 1993년
 연세대학교 공과대학
 전기공학과 공학사
 • 1995년
 연세대학교 대학원
 전기공학과 공학석사
 • 2000년
 연세대학교 대학원
 전기컴퓨터공학과 공학박사

◆ 경력
 • 2002년 - 2004년 The University of
 Birmingham, Post-doc.
 • 2000년 - 현재 KIST 전자재료연구센터
 책임연구원
 • 현재 고려대학교 KU-KIST
 융합대학원 교수



성명 : 강민규
 ◆ 학력
 • 2008년
 수원대학교 공과대학
 전자재료공학과 공학사
 • 2010년
 고려대학교 대학원
 전자전기공학과 공학석사
 • 현재
 고려대학교 대학원
 신소재공학과 박사과정

◆ 경력
 • 2008년 - 현재 KIST 전자재료연구센터
 학생연구원

