

압전에너지 하베스팅 소재 및 연구 개발 동향



이승환 연구원 (삼화코덴서공업(주) 신상품개발팀), 윤중락 연구소장 (삼화코덴서공업(주) 연구소), 이영희 교수 (광운대학교 전자재료공학과)



1. 서론

최근 세계적으로 화석연료의 고갈의 결과로 지속적인 에너지 가격 상승과 화석연료의 온실가스 배출로 인한 지구환경 보존 및 인체에 대한 유해문제가 크게 제기됨에 따라 우리 주변에 산재한 에너지원으로부터 에너지를 생성하고 수집하는 기술 즉, 에너지 하베스팅 기술에 대하여 많은 이목이 집중되고 있다. 자동차, IT통신, 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. 현재 사용되고 있는 에너지자원은 환경오염의 심각한 문제를 가지고 있고, 유한에너지로써 언젠가는 고갈이 될 것이다. 이러한 심각한 상황에서 대체하기 위해서 신재생에너지의 연구가 활발히 진행되어야 한다. 특히, 새로운 형태의 신재생에너지인 에너지 하베스팅 (Energy harvesting) 기술의 경우 최근에 크게 각광을 받고 있다. 신재생에너지로는 수력, 풍력, 지열, 태양광, 압전 세라믹스를 이용한 에너지 하베스팅 등 많은 신재생에너지가 있다. 신재생에너지는 자연에서 쉽게 얻을 수 있는 에너지 자원으로 환경오염에 전혀 문제가 되지 않고, 일상에서

버려지는 에너지를 가지고 사용하기 때문에 무한에 가까운 에너지 자원이다. 에너지 하베스팅 기술은 자연의 빛에너지, 인간 신체 또는 연소형 엔진으로부터의 저온 폐열에너지, 휴대용 기기 탑재/부착장치의 미세 진동에너지, 인간의 신체활동으로 인한 소산에너지 등을 흡수하여 에너지 하베스팅 소자를 이용하여 전기에너지로 변환, 전자기기의 전력으로 사용하는 재생형 환경에너지 자원이라 할 수 있다. 21세기는 언제, 어디에서, 누구나 정보를 자유롭게 이용할 수 있는 유비쿼터스 정보사회가 될 것으로 예상되고 있다. 유비쿼터스 정보화 시대에는 휴대형 정보기기 등이 필수적인 기기가 될 것인데 여기에 사용되는 전력 에너지원은 소형, 집적화된 기술이 필수적이다. 이러한 유비쿼터스 사회가 실현되기 위해서 필연적으로 대두되고 있는 과제가 에너지 공급원의 문제다. 정보 기기의 에너지 공급원으로 지금까지 전지가 주로 사용되어 왔고, 또한 전지의 수명을 늘리기 위해서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그런데 최근에 다양한 휴대기기 등에서 연료 교환과 충전이 불필요하거나 아주 긴 시간동안 공급해주는 형태의 에너지 공급원의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 에너지 공급원으로 주위의 환경으로부터 에너지를 수확하여 전력으로 변환하는 에너지 하베스팅 기술과 자체적으로 에너지를 생산해 내는 마이크로 동력 발생장치 기술 등이 본격



적으로 연구 개발되고 있다. 2008년 MIT 선정 10대 유망기술, 2010년 Popular Science에서 향후 3년간 세계를 뒤흔드는 45가지 혁신 기술로 에너지 하베스팅 기술이 선정기도 하였다.

2. 에너지 하베스팅 소자의 종류 및 진동형 에너지 하베스팅 메커니즘

에너지 하베스팅 기술은 주변 환경에서 필요한 에너지를 끌어 쓸 수 있는 대표적인 청정에너지 기술로 기존의 연료전지나 바이오매스처럼 에너지를 획득하기 위해 에너지를 변형하거나 자원을 소모해야 하는 대체 에너지와 달리 우리 주위에 존재하거나 버려지는 에너지를 있는 그대로 활용할 수 있는 친환경 에너지 활용 기술이다. 에너지 발전량에 따라서 매크로 (Macro)와 마이크로 (Micro) 에너지 하베스팅으로 분류되며 에너지 하베스팅 (Energy harvesting) 기술은 단일 기술이 아니라 온도 차 (Thermal energy), 빛의 방사 (Light energy), 전자기장 (Electromagnetic energy), 진동에너지 (Vibration energy) 등 사용된 에너지원의 종류에 따라 구분되는 여러 가지 기술을 포괄한다. 에너지 하베스팅 소자의 종류와 단위면적에서 수확할 수 있는 에너지의 양을 정리하면 표 1 및 그림 1과 같다.

열에너지를 이용하는 기술은 에너지 변환 효율이 너무 낮아 실용성에 의문이 제기되고 있으며 빛 에너지를 이용하는 태양에너지 기술은 연구가 상당히 진행되어 상용

화에 적합하다고 판단되지만 실내와 실외에서 변환 효율차이와 야간 시간의 사용제한 등이 단점이다. 진동을 이용하는 에너지 하베스팅 기술은 에너지 발전량은 미세하나 자가 발전에 의한 반영구적인 충전특성, 최근 소형화, 복합화, 고기능화의 추세에 맞춰 내장화 (Embedded) 소자에 적용이 유리한 장점이 있다. 진동형 에너지 하베스팅 기술의 종류를 그림 2에 나타냈다.

진동형 에너지 하베스팅 기술은 소재와 변환 방식에 따라 정전효과 (Electrostatic), 전자기효과 (Electromagnetic), 압전효과 (Piezoelectric) 방식으로 구분된다. 정전효과과는 전기장에 대해 물체가 움직일 때 커패

표 1. 에너지 변환 소자에 따른 에너지 밀도.

Energy Source	Power Density for 10 Years
Solar (outdoor)	15,000 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Solar (indoor)	6 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Vibrations (piezoelectric)	250 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Vibrations (electrostatic)	50 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Acoustic noise	0,003 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (at 75 db)
Temperature gradient (thermoelectric)	15 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (at 10 $^{\circ}\text{C}$ ΔT)
Batteries (non-rechargeable)	45 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (for one year)
Batteries (rechargeable)	7 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (for one year)
Hydrocarbon fuel (micro heat engine)	333 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (for one year)
Fuel cells (methanol)	280 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (for one year)

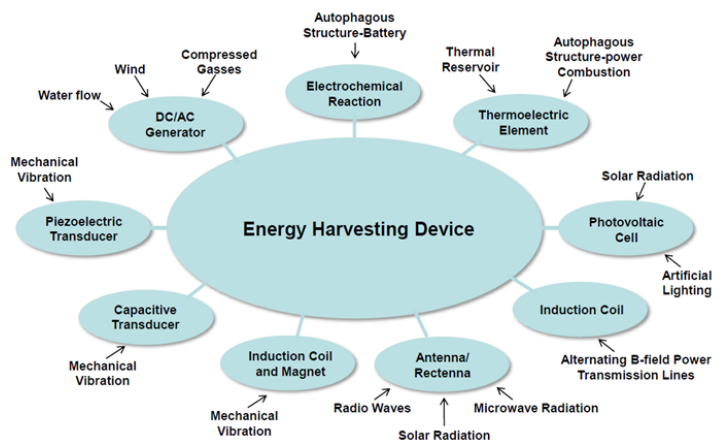


그림 1. 에너지 하베스팅 소자의 분류.

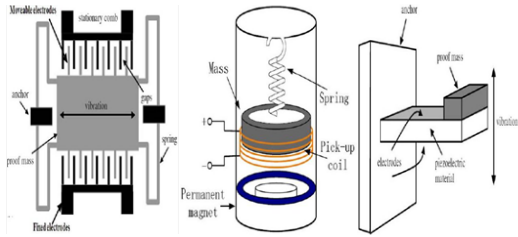


그림 2. 진동형 에너지 하베스팅 기술의 종류
(a) Electrostatic, (b) Electromagnetic, (c) Piezoelectric.

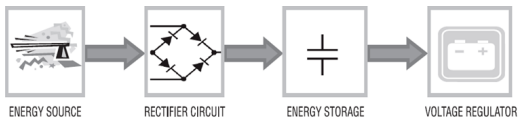


그림 3. 압전에너지 하베스팅 시스템의 구성 요소 및 에너지 변환 단계.

시턴스 포지션이 최대, 최소로 변화하며 발생하는 충전 및 방전 현상으로부터 전기에너지를 생성한다. 제작 및 집적화가 용이하지만 높은 동작 전압 및 외부 전압원이 필요한 단점이 있다. 전자기식 에너지 하베스팅 기술은 코일을 통과하는 자기장이 변화하면 코일 주위에 전기장이 형성되고 그 결과 전류가 흐르는 원리이다. 에너지 밀도가 높지만 집적화가 어려운 단점이 있다. 압전 효과를 이용한 발전은 석영, PZT, NKN, BNT, BCT, ZnO 등과 같은 압전 재료에 압력이 가해지면 결정의 표면에 전압이 발생하는 원리를 이용하는 것으로 소형화, 자가발전, 높은 에너지 밀도 등과 같은 장점을 가진다. 압전에너지 하베스팅은 기본적으로 외부의 기계적 에너지를 압전 재료에 전달하는 단계, 전달된 기계적 에너지를 압전 재료를 이용하여 전기에너지로 변환하는 단계, 변환된 에너지를 전기적인 회로를 통하여 커패시터에 축적하는 단계, 축적된 전기에너지가 직류 전압 출력으로 나오는 단계로 총 4 단계로 이루어져 있다. 그림 3은 압전에너지 하베스팅 시스템 및 에너지 변환 단계를 나타내었다.

표 2. 기술적 관점의 압전소재 분류.

대분류	세분류	정의 (범위) 및 적용영역
벌크	압전 단결정	· 인공적, 자연적으로 단결정으로 성장되어 압전특성을 나타내는 소재 · 의료용 고분해능 센서, 고변위 액추에이터 등
	압전 세라믹	· 압전분말의 고온 소결로 제조되는 다결정 압전소재 · 센서, 액추에이터, 압전변압기, 필터 등
	압전 폴리머	· PVDF 등과 같이 응력에 따라 분극이 발생하는 압전소재 · 압전하베스터, 촉각센서 등
	압전 복합체	· 압전단결정 또는 압전세라믹과 폴리머의 결합체 · 수중Sonar, 의료용 센서, 압전공진기 등
필름	압전 박막	· 기관을 가지며 두께가 1 μm 이하인 다결정 또는 일방향성 압전소재 · 광학스위치, 필터, 압전공진기 등
	압전 후막	· 기관을 가지며 두께범위 1~100 μm인 압전소재 · MEMS용 액추에이터, 초음파모터 등

3. 압전에너지 하베스팅 소재의 분류 및 기술동향

기능성 소재중 하나인 압전 (Piezoelectricity) 소재의 성질은 소재의 명칭에서 알 수 있다. Piezo는 "압력을 가하다 (To press)"라는 의미이고 Electricity는 '전기'를 나타낸다. 즉, 소재에 압력을 가해 변형을 시키면 전기적인 극성 (Polarity)을 나타내거나 주어진 전기에너지에 의해 변형이 일어나는 소재를 압전소재라 한다. 압전소재는 종류가 다양하기 때문에 매우 다양한 방법으로 분류할 수 있다. 소재 측면에서는 유연·무연·폴리머 압전소재 등으로 나눌 수 있고, 응용분야 따라서는 센서·액추에이터·필터·압전변압기 등으로 분류할 수 있다. 기술적 관점에 따른 압전소재의 분류를 표 2에 나타냈다.

압전에너지변환 소자용 소재로는 상용화 관점에서 PZT계 세라믹이 널리 연구 중이나 출력 밀도가 낮다는 단점이 있다. 따라서 출력 전력 밀도를 높이기 위해 단결정이나 복합소재에 대한 연구가 현재 활발히 진행 중이며 또한 출력 전압은 낮추고 출력 전류를 높이는 연구도 진행 중이다. 현재 상용화되고 있는 압전에너지변환 소자 소재 종류별



표 3. 소재 종류별 압전 상수 비교.

Property	Units	PZT	PVDF	PZT-PT
Strain coefficient (d_{31})	10^{-12} m/v	320	20	950
Strain coefficient (d_{32})	10^{-12} m/v	650	30	2,000
Coupling coefficient (k_{31})	CV/Nm	0.44	0.11	0.5
Coupling coefficient (k_{33})	CV/Nm	0.75	0.16	0.91
Dielectric constant	ϵ/ϵ_0	3,800	12	4,500
Elastic modulus	10^{10} N/m ²	5.0	0.3	8.3
Tensile strength	10^7 N/m ²	2.0	5.2	8.3

압전 상수 비교를 표 3에 나타내었다.

압전에너지변환 소자는 캔틸레버 구조가 대표적이거나 공진주파수 고정형으로 작동 주파수의 대역폭이 좁다는 단점이 있다. 또한, 상용화 관점에서 벌크형이 주로 연구되고 있지만 초소형 센서 노드 관점에서는 MEMS형도 연구가 활발히 진행 중이다. 압전에너지 변환 소자 구조 및 소재별 특성과 문제점을 표 4에 나타내었다.

기계적인 에너지를 효율적으로 전기적 에너지로 변환 및 저장하기 위해서는 다음과 같은 조건이 성립되어야 한다. 외부의 진동을 효과적으로 압전 재료에 전달할 수 있도록 기계적인 구조들 사이에 기계적 결합이 이루어져야 한다. 즉, 캔틸레버 구조와 같이 외부의 기계적 에너지를 효율적으로 압전 세라믹스에 전달할 수 있도록 에너지 하베스팅의 구조를 효율적으로 설계하는 것이 필요하다. 그 다음 기계적 에너지를 전기적 에너지로 효율적으로 변환하는 것이 필요하다. 이것은 에너지 하베스팅에 사용되는 압전 재료의 물성과 관련이 깊다. 압전 세라믹스의 에너지 변환 효율은 전기 및 기계결합 계수를 의미하는데, 이는 에너지 하베스팅에 사용되는 재료 자체의 에너지 변환 효율을 높이는 것

이 필요하며, 에너지 하베스팅에 적합한 압전 세라믹스의 개발이 절실하다. 마지막으로 생성된 전기에너지를 외부회로에 효율적으로 전달하기 위해서는 효율적인 전기적인 결합이 필요하다. 교류형태로 발생된 전기에너지를 이용하는 에너지 하베스팅 기술은 정류회로를 이용하여 직류로 변환하는 것이 필요하다. 이때 정류회로를 지나면서 생기는 에너지 손실을 최소화하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 저 손실 정류회로에 대한 연구 또한 이루어져야 된다. 에너지 하베스팅에서 사용되는 회로와 압전 세라믹스 사이의 임피던스 매칭을 통해 회로와 압전 세라믹스 사이의 임피던스 불일치에서 오는 에너지 손실을 최소화할 필요가 있다. 이렇게 총체적이고 융합적인 연구를 통해서만이 높은 에너지 변환 효율을 가지는 압전에너지 하베스팅 소자를 개발할 수 있다.

압전 세라믹스를 이용한 에너지 하베스팅의 경우 소자의 사이즈에 따라서 크게 Macro-scale의 압전에너지 발전과, MEMS를 이용한 Micro-scale 에너지 발전으로 나누어 볼 수 있다. 크기에 따라서 연구 방향과 원리에 차이가 있으며, 그 응용 분야 또한 차이가 난다. Macro-scale 압전 발전의 경우 사람의 움직임이나 자동차의 진동 등과 같이 큰 움직임이나 진동으로 부터 에너지를 발전하여, 충전을 통해 보조 전력으로 사용하거나 대용량 발전을 하는 반면, Micro-

표 4. 압전에너지 변환 소자 관련 대표적 제품.

기관	구조/소재	출력전력 (mW@1 grms)	주파수 (Hz)	크기 (cm ³)	출력밀도 (m W/cm ³ grms)	문제점
Adaptiv Energy	캔틸레버형/PZT 벌크	44	2 (@15 Hz)	90.7 (L=8.9 cm)	> 0.5	· 저출력밀도 · 공진주파수 고정
Mide	캔틸레버형/PZT 벌크	17	3 (@50 Hz)	40.5 (9.2 × 4.4 × 1)	> 0.4	· 저출력밀도 · 공진주파수 고정
Elfrink	캔틸레버형/AIN 박막	0.06 (@2 grms)	3 (@572 Hz)	0.01	~ 3	· 저출력밀도 · 공진주파수 고정
Roundy	캔틸레버형/PZT 박막	0.375 (@0.2 grms)	3 (@120 Hz)	1	~ 1.8	· 저출력밀도 · 공진주파수 고정



scale 압전 발전의 경우는 MEMS 공정을 이용하여 제작하여, 소량의 진동이나 충격으로 부터 발전하여, 센서나 소형전자기기의 전원이나 보조전원으로 사용하는 것을 목적으로 한다.

캔틸레버 형태의 압전 소자는 캔틸레버 끝단에 무게 추를 달아 진동을 유도한다. 미국의 Stevens Institute of Technology에서는 원통형의 영구자석을 캔틸레버 끝단에 부착하여 진동을 유도하였다. 이 형태의 압전소자는 22~32 Hz의 저주파 대역에서 240~280 μW의 출력을 얻었다. 하지만 영구자석을 사용한 경우 소자의 소형화에 따라 자석의 자속이 급격히 줄어들기 때문에 초소형 캔틸레버를 형성하기 어렵다. 모든 캔틸레버는 외부에서 진동원이 있어야 진동을 시작하고, 외부 진

동원이 없으면 에너지 생산을 정지한다. 한편, 자가 진동을 할 수 있는 캔틸레버가 제안되었다. 그림 4와 같이 캔틸레버 끝부분 하부에 Beta입자를 방출하는 방사성 동위원소 ⁶³Ni 이미터를 두고 그 위 캔틸레버 끝부분에 전하를 저장할 수 있는 도체 컬렉터를 붙인다. ⁶³Ni은 방사선 붕괴를 하면서 음전하

를 방출하고 자신은 양전하를 갖는다. 방출된 음전하는 위의 컬렉터에 수집되고 컬렉터와 이미터는 정전기력에 의해 서로 끌어당기고 캔틸레버가 아래로 휘게 된다. 충분히 휘어져 이미터와 컬렉터가 접촉하면 전하가 중성이 되고 캔틸레버는 제자리로 돌아온다. 이와 같이 충전과 방전을 반복하면서 캔틸레

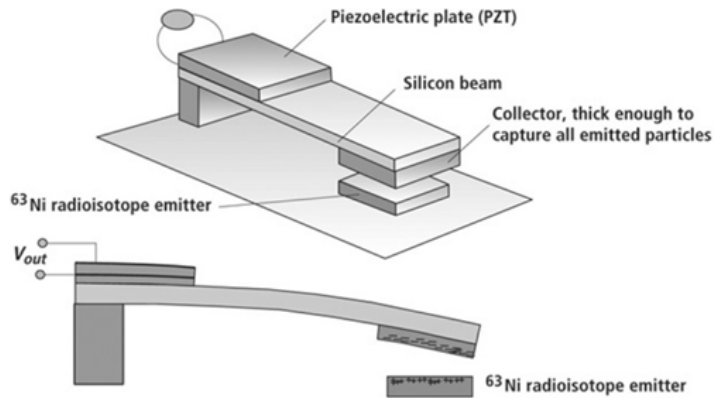


그림 4. 방사선 동위원소를 사용한 자가 진동 캔틸레버 에너지 하베스터.

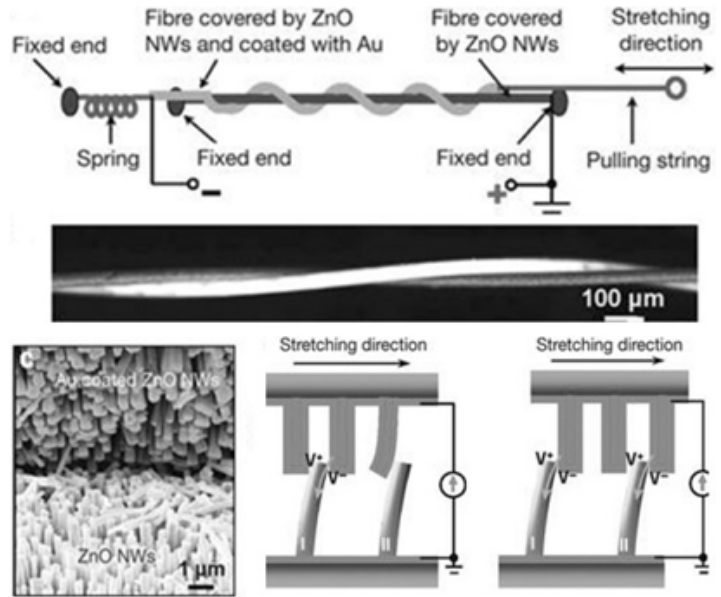


그림 5. 마이크로섬유-나노와이어 복합체.



버는 스스로 진동하게 된다. 동위원소의 수명은 약 30년 가량으로 알려져 있다. 실제로 이 소자를 이용하여 264 MHz의 무선 전원 무선 신호 전송기가 개발되기도 하였다.

저 차원 나노소재 기반 압전소자 기술도 활발히 개발 중이다. 2001년 미국 조지아 공대의 Z. L. Wang 그룹이 ZnO 나노벨트에 대한 논문을 발표하면서 1차원 나노 압전소자의 연구가 태동되었다. 이 그룹은 현재까지 나노 압전소자와 관련하여 선도적인 결과를 발표하고 있다. 2006년에는 단위소자를 개발하였고, 이듬해 단위소자를 수직으로 직렬 연결한 어레이를 개발하여 직접 전기를 생산하였으며 이 전압을 실용적인 수준까지 향상시켰다. 2008년에는 실용적인 개념으로 섬유 사에 산화아연 나노와이어를 방사형으로 제작하여 마이크로섬유-나노와이어 복합 구조체를 개발하였다. 그림 5는 마이크로섬유-나노와이어 복합체를 나타내었다.

섬유사에 방사형으로 ZnO 나노와이어를 성장시킨다. 한 가닥의 섬유사에는 금을 코팅하고 나머지 한 가닥은 금을 코팅하지 않은 상태에서 두 가닥을 서로 꼰다. 그림 5의 전자 현미경 사진은 톱니 경계면을 전자 현미경으로 본 사진이다. 외력에 의해 상/하부 섬유사가 서로 잡아당기면 압전 전압이 발생하고 ZnO와 Au사이의 Schottky 접합으로 인해 순바이어스일 경우에만 전자가 이동하여 전류가 흐른다. 출력 전류는 모든 나노와이어들에 의한 출력분의 합이 되고 출력전압은 하나의 나노와이어에서 발생하는 것과 같다. 이러한 나노기반의 압전발전기는 사람의 손가락이나 심장박동, 횡경막 근육의 움직임 등에서 적은 양의 전기를 수확할 수 있다.

2001년 미국 미시건 대학은 무릎 장착형 에너지 수확 장치를 선보였다. 이 장치는 걷는 동작으로 핸드폰, 전동 의수 등을 동작시킬 수 있을 정도의 전력을 생산하였다. 같은



그림 6. 압전에너지 하베스팅 소자의 응용 사례.

해 Philips社は 압전발전을 이용하여 배터리가 필요 없는 TV리모컨을 선보이기도 하였다. Nebraska-Lincoln 대학의 Stephen R. Platt 그룹에서는 압전 세라믹을 인공관절에 적용하여 구조 강도 모니터링 전원으로 사용하는 연구를 하고 있다. 무릎 관절에 힘이 가해지면 145층의 압전재료로 구성된 소자는 최대 4.8 mW의 전력을 생산한다. 2011년 벨기에의 IMEC은 타이어 압력센서에 전압을 공급할 수 있는 MEMS기반 압전발전기를 발표했다. Aluminum Nitride 캔틸레버 구조를 사용하였고 상시 42 μW를 발생한다. 공진주파수인 1,011 Hz에서는 최대 489 μW를 생산할 수 있다. 압전에너지 하베스팅 소자의 응용사례를 그림 6에 나타냈다.

또한, 2007년 미국의 MIT는 '군중 발전



소 (Crowd Farm)'라는 에너지 하베스팅 기술을 공개하였다. 이는 압전소자를 미소전력 생산원으로 사용하는 것을 넘어서 중간규모의 발전에 응용하는 것이다. 맨해튼 시내에 전기전환 매트를 깔아놓고 사람들이 지나 다닐 때 생기는 충격에 따라 전기를 생산한다. 성인 한 사람이 한 걸음을 내디딜 때 발 바닥과 바닥면 사이에서 발생하는 압력 에너지는 전구 하나를 순간적으로 반짝 켤 수 있는 양이다. 일본에서는 동경역에 사람이 밟고 지나갈 때 발전을 하는 계단이 실제로 설치되어 시범 운영 중에 있다. 2008년 영국 런던 킹스크로스의 한 나이트클럽에서는 압전 패드를 바닥으로 사용하여 사람들이 춤을 출 때 전력을 생산하고 있다. 이 나이트클럽은 평균 60%의 전력을 사람들의 춤으로 생산한다. 국내에서는 2011년 (주)센볼에서 출시한 '압전에너지블록'을 부산 서면역 대합실에 설치하여 에너지를 수확하고 홍보 전광판의 일부로 활용하고 있다. 이외에도 바람을 이용한 압전 하베스팅 기술로는, 미국 조지아 공대에서 압전소자를 옷에 장착 가능하게 설계하여 전투복에 적용하는 연구를 진행 중이며, 일본 NEC-TOKIN 또한, 바람을 이용한 WINDMILL 개발로 자가 발전 방식으로 도로 램프를 구동하는 기술을 연구 중이다. 또한, 프랑스와 캐나다에서는 각각 빗방울과 해양풍력을 이용한 압전 하베스팅 기술을 연구 중이다. 마지막으로 이스라엘 업체인 이노와텍 (Innowattech)은 발생하는 전기의 수집과 저장이 용이한 효율적인 에너지 저장시스템인 압전발전장치 (Innowattech Piezoelectric Electric Generators, 이하 IPEGs)는 무게, 움직임, 진동, 그리고 온도의 변화에 의해 야기되는 기계적 에너지를 전자의 흐름으로 변환할 수 있는 압전결정체이다. IPEGs는 가격이 저렴하고 설치가 용이한 특징이 있으며 도로 신설 또는 기존 도로의 일상적인 유지·보수 업무 시에도 설치가 가능하기 때문에, 설치비용측면에서 태양

광이나 풍향을 통한 에너지 하베스팅보다 저렴하다.

4. 결론

에너지 하베스팅 기술의 개념 및 종류에 대하여 소개하였고, 그 중 압전 하베스팅 관련 소재 및 최신 연구 동향에 대하여 알아보았다. 향후 압전에너지 하베스팅은 유비쿼터스 센서, 소형전자기기의 전원 등의 Micro-scale의 소형동력원에서부터 Macro-scale의 자동차의 보조 동력원에 이르기까지 전자산업에서 여러 에너지원들로 다양하게 활용될 것으로 기대되지만 그 전에 극복해야 할 기술적 문제가 아직은 산재해 있다. 고 특성을 갖는 물질의 소재 개발에서부터 출력의 안정성 및 연속성 확보, 게다가 반영구성을 보장할 수 있는 신뢰성 등 개발되어야 할 항목들이 아직은 무궁무진하다. 제조공정 기술 수준은 기술 선진국들과 견줄만 하나 소재의 원천기술은 상대적으로 취약한 것이 큰 문제점이다. 압전에너지 하베스팅 소자들의 기술적 한계를 극복하기 위한 연구가 이루어져야 하며 기술 우위를 바탕으로 지적재산권 확보 및 새로운 에너지 시장을 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 윤규형, 진동형 AlN 압전 마이크로 에너지 하베스팅에 관한 연구 2010.
- [2] 광문규, USN 센서 노드를 위한 에너지 Harvest 기술 연구 2008.
- [3] 강진희, 압전에너지 수확 소자를 이용한 DC-DC 컨버터 구동에 관한 연구 2011.
- [4] 한진우, 주변환경에서 발생하는 에너지를 전기에너지로 변환시키는 기술인 에너지 하베스팅 기술 개발 2012.
- [5] Energy Harvesting 기술 교육 2012.



저자약력



성명 : 이승환
 ◆ 학력
 • 2008년
 광운대학교 전자정보대학
 전자재료공학과 공학학사
 • 2010년
 광운대학교 대학원
 전자재료공학과 공학석사
 • 2012년
 광운대학교 대학원
 전자재료공학과 공학박사수료

◆ 경력
 • 2012년 - 현재
 삼화콘덴서공업(주)
 신상품개발팀 연구원



성명 : 윤중락
 ◆ 학력
 • 1991년
 명지대학교 공과대학
 전기공학과 공학학사
 • 1993년
 명지대학교 대학원
 전기공학과 공학석사
 • 1999년
 명지대학교 대학원
 전기공학과 공학박사

◆ 경력
 • 1994년 - 1996년
 한국쌍신전기(주) 선임연구원
 • 1996년 - 현재
 삼화콘덴서공업(주) 연구소
 연구소장



성명 : 이영희
 ◆ 학력
 • 1973년
 연세대학교 공과대학
 전기공학과 공학사
 • 1975년
 연세대학교 대학원
 전기공학과 공학석사
 • 1981년
 연세대학교 대학원
 전기공학과 공학박사

◆ 경력
 • 1981년 - 현재
 광운대학교 전자재료공학과
 교수
 • 2009년 - 현재
 기초전력 연구원 감사

