

# 나노기술 기반 마이크로 에너지 하베스팅

노임준 <KIST 박사후연구원> · 신백균 <인하대학교 교수>

## 1. 모바일 에너지원의 시대적 요구

인류 문명은 에너지의 수급과 필연적인 관계 속에서 지속적인 발전을 해 왔고, 20세기를 거쳐 21세기로 들어선 현대문명은 전기에너지를 근간으로 유지되고 있다. 화석연료를 주축으로 생산된 전기에너지는 향후에도 상당 기간 현대문명에 생기를 부여하는 필수불가결한 원천이겠지만, 에너지 자원의 고갈과 그 사용에 따른 환경오염 문제는 '지속가능한 발전'의 관점에서 심각한 벽에 직면하고 있다.

신·재생에너지로 통칭되는 청정에너지 발생 기술들은 기본적으로 화석연료가 아닌 대체 원천을 사용하여 전기에너지를 발생하고자 하는 것이다. 수십 년 전부터 주목 받아온 그 대표적인 사례가 태양광발전이며, 실리콘 태양전지를 사용한 대용량 전력생산과 유기박막태양전지를 사용한 소용량 이동형 전력원의 발생까지 가능할 정도로 발전을 거듭하고 있다.

유비쿼터스 혁명을 선도하고 있는 스마트폰 등 지능형 모바일 전자기기들은 현재 현대인이 삶을 영위하는 데 필수품으로 자리 잡았으며, 향후에 그러한 트렌드는 점점 더 거세질 것이 확실하다. 상용전력망에서 공급되는 전기에너지를 2차전지에 충전하여 전력을 공급하는 모바일 전력원은, 충전 에너지 저장기술의 개발을 촉발하여 '저장밀도'를 개선하는 방향으로 눈부신 발전을 거듭하고 있다. '지능화', '컨버전스' 및

'소형화'를 모두 기대가치로 하는 모바일 전자기기는 개선 모델이 출시될 때마다 '저장밀도'가 획기적으로 개선된 2차전지를 장착하고 있지만, 그 보다 훨씬 더 많은 전력수요가 요구되는 이유로 인해 충전주기는 오히려 더 짧아지는 악순환이 계속되고 있다.

유비쿼터스 모바일 기기의 그러한 '에너지 부족' 문제를 해결할 수 있는 요소기술로 에너지 하베스팅 기술이 재조명되고 있다. 압전변환, 초전변환, 열전변환 등 오래 전부터 이론적으로 완성되고 실용화된 에너지 변환 기술은 소위 'Killer Application'의 부재로 인하여 산업적인 면에서는 주류에 자리 잡지 못하고 있는 실정이다. 사물인터넷의 시대로 들어선 유비쿼터스 혁명은 현대 문명의 전반적인 패러다임을 변혁하고 있으며, 유·무선 유비쿼터스 통신망에 '연결되는(connected)' 모든 사물을 위한 전력에너지 공급의 문제가 부각되고 있다. 인터넷으로 연결되는 '사물(Thing)'은 궁극적으로 '만물(Everything)'을 목표로 하고 있지만, 원격 감지센서와 원격 인지태그가 주 대상으로 될 것이며, 상용전력망에 연결되어 있지 않기 때문에 구동전력을 자체적으로 해결하여야 하는 그러한 사물들의 전력에너지 공급을 해결하여야 하는 것이다.

본 총설에서는 압전변환 원리를 이용한 나노기술 기반 에너지 하베스팅 소자의 원리를 개략적으로 살펴보고, 그 응용사례를 몇 가지 소개하고자 한다.

## 2. 나노기술 기반 에너지 하베스팅

유비쿼터스 혁명에 부응하는 모바일 기기용 이동형 전력발생 소자 및 기기는 필연적으로 가벼우면서 휘어질 수 있는(flexible) 기계적 물성을 내재하여 입을 수 있는(Wearable) 또는 부착할 수 있는(attachable) 구조를 가져야 한다. 입고 다니는 옷이나 들고 다니는 가방 등등에 설치될 수 있는 전력발생기기가 가능하다면, 스마트폰 등 모바일 기기에서 문제가 되는 전력부족의 문제를 해소하는 데 큰 기여를 할 것이다. 전철에서 기술한 바와 같이, 날로 증대하는 전력소모량을 감당하지 못하는 2차전지만으로는 모바일 기기의 전력수요를 충족시키기 어려운 현실이다. 들고 다니는 모바일 전력발생기기는 휘어지는 유기박막태양전지 등으로도 구현 가능하지만[1], 여기서는 인간이 활동하는 동작 등에서 필연적으로 발생하지만 그대로 버려지는 진동, 충격 등의 기계적 에너지를 압전변환 원리 등을 이용하여 전기에너지를 생산하는 에너지 하베스팅 기술에 관하여만 논하기로 한다. 그림 1은 압전변환 원리를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 한 사례이다.

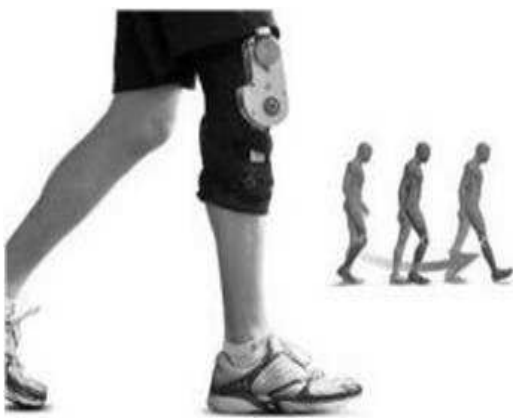


그림 1. 압전 에너지 하베스팅 기술의 예

[출처 : <http://etnew.co.kr>, 2011.01.27]

압전변환 원리를 응용하는 대표적인 에너지 하베스팅 기술로는 그림 1에서 보여주는 바와 같이, 신발 밑창 등에 장착된 압전 제너레이터가 걸거나 뛰는 일상생활 중 발생하는 기계적 충격을 전기에너지로 변환하여 에너지를 발생하는 것이다. 이렇게 생산된 모바일 에너지 발생장치의 전력은 스마트폰 등 모바일 기기의 전력공급용 기기로 이용될 수 있다.

기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 압전특성은 PZT 등 세라믹 재료를 사용하여 응용되어 왔으나, 깨어지기 쉬운 특성과 단단한 특성 등은 입거나 부착하는 응용분야에 적합하지 않으므로, 세라믹 재료에 유연성을 부여하거나 폴리머 계열의 유연재료를 사용하는 쪽으로 관심의 전환이 이루어지고 있다[2]. 세라믹 재료에 유연성을 부여하는 기술은 나노선(Nanowire) 등의 형상의 구현으로 시도되고 있고, 폴리머 재료는 압전특성이 비교적 우수한 PVDF 등을 활용하는 것으로 연구·개발되고 있으며, 이 두 가지를 결합한 복합 압전활성층을 활용하는 기술도 있다. 활용성이 우수한 산화아연(ZnO) 계열의 세라믹 재료를 1차원 형상의 나노선으로 가공하여 압전특성을 구현하는 것이 가능해졌으며, 이를 활용한 다양한 응용기술이 제안되어왔다[3]. ZnO-나노선은 외부의 불규칙한 기계적인 움직임에 기인하는 에너지를 압전변환 원리를 이용하여 전기에너지를 발생시킬 수 있는 나노발전기(Nanogenerator)로 구현될 수 있으며, 그림 2는 그 개발 사례에 관한 개략도이다[4]. 수열합성법을 이용해 ZnO 나노선이 우수한 압전물성을 가지도록 성장시키고, 외부에서 주어지는 기계적 에너지를 압전변환 원리에 의해 전하를 발생시켜 전력을 발생시킬 수 있도록 한다. ZnO-나노선은 일정량의 압전전력을 발생시킬 수 있으나 PZT 등 기존 세라믹 압전재료에 비해 그 출력이 비교적 미약하므로 압전전력을 향상시킬 것이 요구된다. 그림 2에서 소개되는 기술에서는 그러한 단점을 개선하기 위해 ZnO 나노선이 수직 및 수평의 양방향으로 성장되도

록 하여 압전전력 출력을 개선할 수 있도록 시도하고 있다. 또한 그 밀도를 조절하여 수직성장된 ZnO 나노선은 그 위에 스프레이 코팅 기술로 도포되는 PVDF 고분자 압전체의 1차원 템플릿 역할을 수행하기도 한다[5-6]. PVDF는 고분자 계열 재료 중 압전 특성이 가장 우수한 것으로 보고되고 있다. 결과적으로 수직 및 수평 양방향으로 성장된 ZnO-나노선에 의한 전력과 PVDF에 의한 전력이 합하여져서 획기적으로 증대된 전력을 출력하는 에너지 하베스팅 소자의 구현이 가능하다. 그림 3은 ZnO-나노선과 PVDF 압전 폴리머 복합막을 활성층으로 한 에너지 하베스팅 소자의 개략도이다.

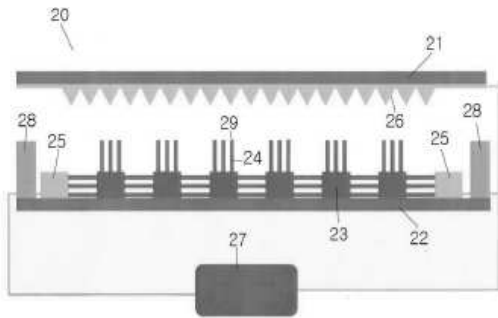


그림 2. ZnO-나노선 기반 나노발전기[4]

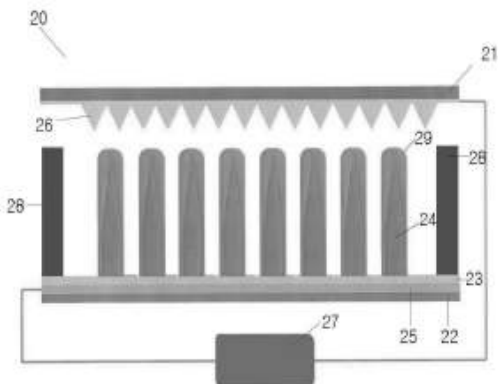


그림 3. ZnO-나노선/PVDF 기반 나노발전기[6]

에너지 하베스팅 소자로부터 발생하는 전력출력의 증대는 압전변환 원리 등 한 가지 원리에 의한 출력을 증대하는 방법도 있지만, 다른 원리에 의한 전력 출력도 동시에 활용하여 증대하는 기술도 활발히 연구·개발되고 있다. 그림 4와 그림 5는 ZnO-나노선에 의해 발생하는 압전변환 기반 전력과 유기박막태양전지 등에 의해 발생하는 광전변환 기반 전력을 동시에 생산할 수 있는 기술의 예이다[7-8].

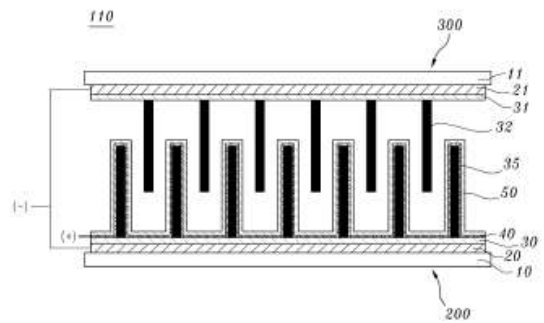


그림 4. ZnO-나노선을 이용한 하이브리드 발전기[7]

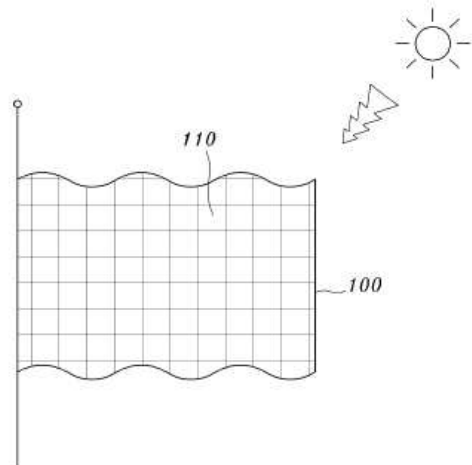


그림 5. 깃발형 태양광/풍력 응용 하이브리드 발전기[8]

플렉시블 기관 위해 형성된 ZnO-나노선은 전술한 압전변환 원리를 이용하여 풍력에 의해 주어지는 기

계적 에너지를 전기적 에너지로 변환한다. ZnO-나노선은 박막태양전지에서 광전변환 원리에 의해 발생하는 전하의 수집효율을 증대하는 역할도 수행한다. 결과적으로 태양광이 조사되면서 바람이 강한 환경에서 보다 전력 출력이 증대된 에너지 하베스팅을 구현하는 것이 가능하다.

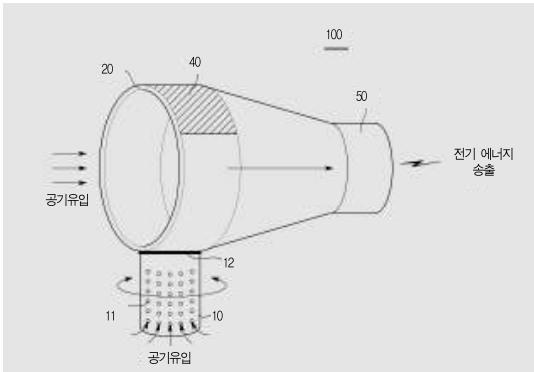


그림 6. 태양광/풍력 응용 하이브리드 발전기[8]

그림 6은 압전변환과 광전변환을 동시에 활용하는 에너지 하베스팅 기술의 개략도이다. 기본 개념은 그림 4 및 그림 5의 하이브리드 발전기와 동일하나 풍력 에너지의 활용을 극대화하기 위해 에너지 하베스팅 소자의 배치를 효율적으로 변경한 것이다. 광전변환에 의해 전력을 생산하는 태양전지를 이용한 ‘무블레이드 풍력발전기’를 구현하여, 풍속에 따라 회전하면서 외부로부터 공기를 흡입하여 제트기류를 형성하여 기계적인 풍력 에너지의 활용을 극대화하면서 외부 몸체에 형성된 태양전지에 의해 발생하는 광전변환 전력도 활용하는 것이다.

ZnO-나노선의 압전변환 원리를 이용하여 발생하는 전력은 비교적 미미하여 실용화를 위해서는 획기적인 전력출력의 증대가 요구된다. 그림 7은 ZnO-나노선에 의해 발생하는 압전변환 전력을 증대하기 위한 연구·개발의 한 사례이다[9-10]. 압전변환에 의해 전력을 생산하는 ZnO-나노선의 단위 셀을 다층형

으로 배치하여 에너지 하베스팅 소자의 면적은 동일하게 하면서 전력출력을 극대화하는 것이며, 다층형 구조의 제작은 스퍼터링 공정을 활용한다[10].

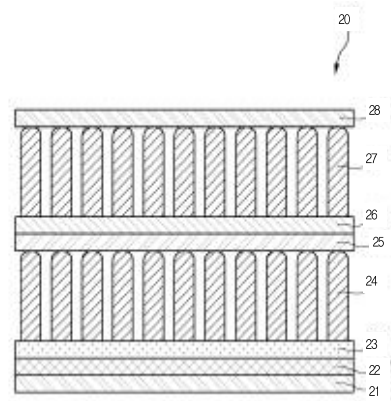


그림 7. 다층형 나노발전기[7]

유연 에너지 하베스팅 소자의 구현에 적용될 수 있는 우수한 고분자 재료인 PVDF의 압전특성은 출력 전력량을 결정하는 주요 요인의 하나이다. 일반적으로 PVDF 필름을 제작한 후, 고전압을 인가하는 전기적 폴링(Polling) 혹은 기계적 연신(Elongation) 과정을 거쳐야만 소정의 압전특성이 발현된다. 대면적 PVDF 필름의 제작공정에 이용될 수 있으면서 상기 폴링 및 연신과정을 거치지 않고도 압전특성을 구현할 수 있는 것이 가능하다[11-12]. 그림 8은 탄소 나노튜브(CNT)가 포함된 PVDF 합성용액을 스프레이 코팅을 통해 분사하여 압전특성을 가지는 대면적 PVDF 필름을 제작하는 공정의 개략도이다. CNT는 스프레이 코팅 공정에 의해 PVDF 필름이 형성되는 과정 중 압전특성의 발현에서 핵심적인 β-상(Phase) 결정구조를 가지는 것에도 관여하며, 제작된 PVDF 필름의 전기적 특성 개선에도 유용하다. 그림 9는 그러한 PVDF 필름을 압전재료로 사용한 에너지 하베스팅 소자의 개략도이다. Al 상부·하부 전극 사이에 삽입된 CNT-PVDF 복합체를 압전재료로

특집 : 마이크로 에너지 하베스팅 기술의 현황과 미래

하고, PDMS 패키지로 봉지하여 유연 압전하베스팅 소자를 제작하는 기술이다.

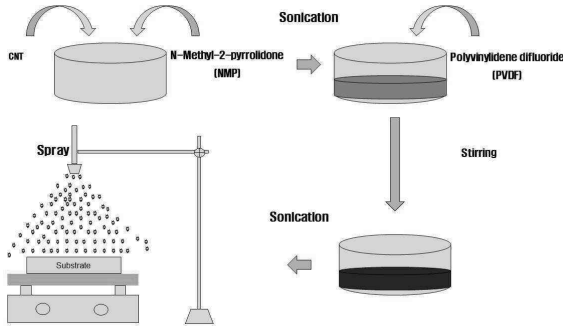


그림 8. 스프레이 코팅을 이용한 β-상 PVDF 압전필름의 제작과정[11]

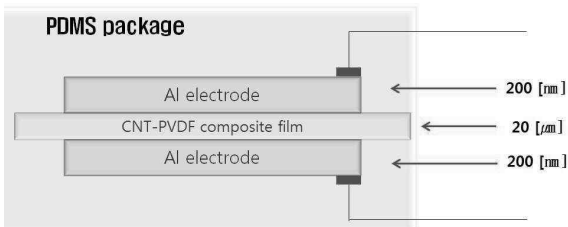


그림 9. β-상 PVDF 압전필름을 포함하는 발전소재[12]

세라믹 압전재료 중 가장 우수한 압전특성을 보이는 것이 PZT이며, 벌크 형태의 압전체로 응용하는 다양한 연구와 개발이 수행되어져왔다. 다만 모바일 기기를 위한 이동형 전원장치를 구현하기 위해 필수적인 유연성이 없으므로, 유연 압전 에너지 하베스팅 소자를 구현하는 데는 부적합하다. ZnO-나노선을 1차원 템플릿(Template)으로 하고, 그 위에 PZT를 코팅하여 결과적으로 고밀도의 나노선 형상으로 구현된 ZnO-나노선/PZT 복합구조를 구현한다면, 우수한 압전특성을 보유하면서 유연한 특성을 보일 수 있다[13-14]. 그림 10, 11은 그 자체가 일정 수준의 압전특성을 가지는 ZnO-나노선 위에 PZT가 코팅된 나노 복합체를 형성하여 압전특성을 획기적으로 개선

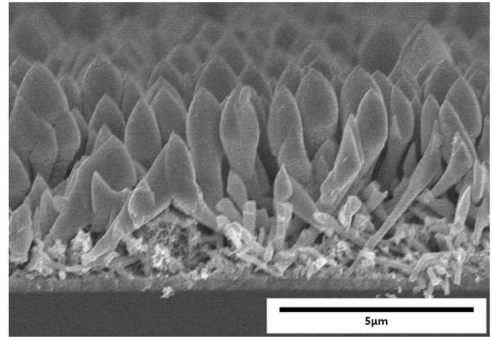


그림 10. PZT/ZnO-나노선 압전복합체[13]

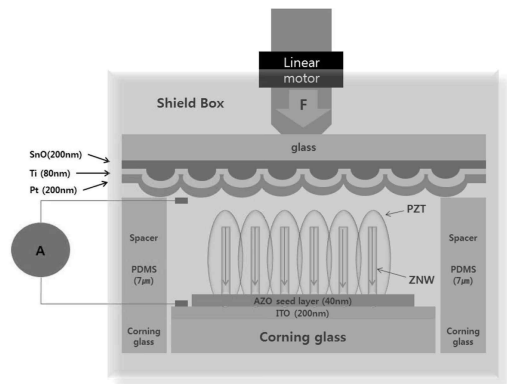


그림 11. PZT/ZnO-나노선 복합체 기반 발전기[14]

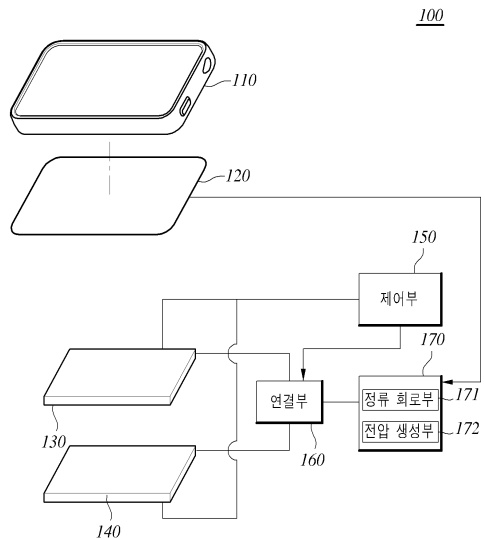


그림 12. 압전원리 응용 휴대용 자체 충전장치[15]

하는 유연 압전 에너지 하베스팅 기술의 사례이다.

상기와 같은 압전특성을 이용한 에너지 하베스팅 소자가 다양한 재료와 구조로 제안되어 왔으나, 생산된 전력을 실제 전력생산 또는 에너지 저장 쪽으로 응용하는 사례는 아직 미미한 실정이다. 압전변환 원리를 이용하여 휴대용 자체 충전장치를 구현하는 기술을 소개하는 것으로 마무리하고자 한다. 그림 12는 압전변환 원리에 의해 생산된 전기에너지를 저장하는 휴대용 전력공급 장치에 관한 제안이다[15]. 동일한 구조와 개념을 이용하지만, 열전변환 원리를 이용한 휴대용 전력공급 장치도 가능하다[16].

앞서 소개된 바와 같은 다양한 재료와 구조를 가지는 유연 압전 에너지 하베스팅 소자를 휴대용 자체 충전장치의 외부에 장착하여 미세한 압력이나 충격에 의해 기전력을 발생시키고 내장된 배터리에 저장한다. 일반적으로 압전소자에서는 교류 기전력이 발생되므로, 모바일 기기의 충전을 위해 사용되는 휴대용 자체 충전장치는 직류 전력을 출력으로 내보내야 한다. 따라서 상기 휴대용 자체 충전장치는 교류를 직류로 변환하는 정류회로부를 내장하고 있다. 또한 내장되는 충전용 배터리를 메인 및 서브의 2개로 하고, 그 중 하나는 일반적인 방식으로 상용전원을 사용하여 충전하고 다른 하나는 압전변환 원리를 이용한 자체 충전기능에 의해 충전된다. 상기 휴대용 자체 충전장치는 스마트폰 등 모바일 전자기기의 이동용 전원공급장치의 기능을 충실히 담당하기 위해, 이동 중에도 상시로 압전변환 원리에 의한 자체충전이 가능하도록 고안되었으며, 결과적으로 모바일 전자기기의 사용시간을 획기적으로 늘리는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 맺음말

유비쿼터스 혁명과 사물인터넷 시대의 개막은 ICT 기반 현대 과학기술문명을 전방위적인 규모로 전환시

키고 모든 전자기기 및 사물의 연결을 목적으로 하고 있으며, 신재생에너지 등 청정에너지원에 대한 요구를 보다 더 구체적으로 불러올 것으로 예상된다. 스마트폰 등 모바일 기기의 편리한 이용과 다양한 ‘사물’ 등의 상시 연결 가능성은 그에 호환되는 에너지원을 요구하고 있으며, ‘언제 어디서나’ 충전이 가능하여 에너지를 공급할 수 있는 이동형 전원공급 장치의 필요성이 새삼 절실해 지고 있다.

본 총설에서는 유비쿼터스 시대의 모바일 기기의 ‘상시 구동’ 및 ‘상시 연결 가능성’을 실현시키기 위한 대안으로서의 이동형 전원공급 장치에 적용될 수 있는 나노기반 에너지 하베스팅 소자와 그것을 적용한 휴대용 자체 충전장치에 관한 몇 가지 기술을 소개하였다. 향후 10년 내에 다양한 변환원리를 응용한 에너지 하베스팅 소자의 기술개발이 결실을 거두어 진정한 유비쿼터스 혁명의 실현에 기여할 수 있는 실용화 수준의 에너지 하베스팅 소자의 개발 및 휴대용 자체 충전장치가 사용자에게 널리 보급될 것을 기대해 본다.

### 참고문헌

- [1] 신백균, “유기박막 태양전지의 현재와 미래”, 조명전기설비학회지 제27권 제6호, 2013.
- [2] 송현철 외, “Flexible Piezoelectric Energy Harvesting”, 세라미스트 제15권 제2호, 2012.
- [3] Z. L. Wang, Z. C. Kang, “Functional and Smart Materials: Structural Evolution and Structure Analysis”, Springer, 2013.
- [4] 노임준, 신백균, “나노와이어의 전체가 코팅되고 발전량이 향상된 나노발전기 및 그 제조방법”, 대한민국 등록특허 제 10-1172278호, 인하대학교 산학협력단, 2012.
- [5] 노임준, 신백균, “발전량이 향상된 나노발전기 및 그 제조방법”, 대한민국 등록특허, 제10-1172279호, 인하대학교 산학협력단, 2012.
- [6] 노임준, 신백균, “나노와이어 전체에 코팅막이 형성된 나노발전기 및 그 제조방법”, 대한민국 등록특허 제10-1220433호, 인하대학교 산학협력단, 2013.
- [7] 노임준, 신백균, “ZnO 나노선을 이용한 깃발형 하이브리드 솔라셀 제조 방법”, 대한민국 등록특허 제10-1271158호, 인하대학교 산학협력단, 2013.
- [8] 노임준, 신백균, “태양광 및 풍력을 이용한 하이브리드 발전기”, 대한민국 등록특허 제10-1277645호, 인하대학교 산학협력단, 2013.

## 특집 : 마이크로 에너지 하베스팅 기술의 현황과 미래

- [9] 노임준, 신백균, “다층형 나노발전기 및 그 제조방법”, 대한민국 등록특허 제10-1293781호, 인하대학교 산학협력단, 2013.
- [10] 노임준, 신백균, “스퍼터링 공정을 이용한 다층형 나노발전기의 제조방법 및 이를 이용한 다층형 나노발전기”, 대한민국 등록특허 제10-1293782호, 인하대학교 산학협력단, 2013.
- [11] 노임준, 신백균, “스프레이 코팅을 이용한  $\beta$ -상 PMDF 필름을 포함하는 발전소자의 제조방법”, 대한민국 등록특허 제10-1348902호, 인하대학교 산학협력단, 2013.
- [12] 노임준, 신백균, 정대용, 이선우, “스프레이 코팅을 통해 제조된  $\beta$ -상 PMDF 필름을 포함하는 발전소자”, 대한민국 등록특허 제10-1384643호, 인하대학교 산학협력단, 2014.
- [13] 노임준, 신백균, 정대용, 이선우, “PZT가 코팅된 나노와이어를 압전소자로써 포함하는 나노발전기 및 그의 제조방법”, 대한민국 등록특허 제10-1409326호, 인하대학교 산학협력단, 2014.
- [14] I.-J. No, D.-Y. Jeong, S. Lee, S.-H. Kim, J.-W. Cho, P.-K. Shin, “Enhanced charge generation of the ZnO nanowires/PZT hetero-junction based nanogenerator”, *Microelectronic Engineering* Vol.110, pp.282-287, 2013.
- [15] 노임준, 신백균, 정대용, 이선우, “압전소자를 이용한 휴대용 자체 충전장치”, 대한민국 등록특허 제10-1391278호, 인하대학교 산학협력단, 2014.
- [16] 노임준, 신백균, 정대용, 이선우, “열전소자를 이용한 휴대용 자체 충전장치”, 대한민국 등록특허 제10-1391279호, 인하대학교 산학협력단, 2014.



신백균(申白均)

1967년 1월 16일생. 1990년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1992년 2월 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 12월 독일 Friedrich-Alexander-Universitaet Erlangen-Nuernberg 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1992년 12월~2000년 11월 독일 Fraunhofer Inst. of Integrated Systems & Device Tech. (FhG-IISB) 객원연구원. 2002년 12월~2004년 2월 일본 Kumamoto Univ. 외국인방문연구원. 2004년 3월~현재 인하대학교 전기공학과 교수. 2008년 9월~2010년 8월 인하대학교 IT공과대학 부학장. 2008년 1월~2011년 12월 한국조명전기설비학회 평의원. 2012년 1월~2013년 12월 한국조명전기설비학회 이사.

주요관심분야 : OLED, OTFT, 유기박막태양전지, 유기메모리, 에너지 하베스팅 소자, 화학/바이오센서 등

E-mail : shinsensor@inha.ac.kr

## ◇ 저 자 소 개 ◇



노임준(魯林俊)

1979년 1월 3일생. 2006년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2008년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2013년~현재 KIST 박사후 연구원.

주요관심분야 : 나노 기술, 에너지 하베스팅 소자

E-mail : oknhij@hotmail.com