

마이크로 에너지 하베스팅 변환 원리

임영택<인하대학교 박사과정> · 박구범<유한대학교 교수>

1. 서 론

우리나라는 에너지 자급률이 3% 미만에 그치는 에너지 부족국가이며 97%의 에너지를 수입에 의존하고 있는 실정이다. 또한 우리나라의 온실가스 배출량은 세계10위에 달하고 있지만, 이것을 쉽게 끌어 내리지 못 하는 것은, 우리나라의 산업구조상 화석연료의 사용이 대다수를 이루고 있기 때문에 쉽게 줄일 수 없는 실정에 있다. 때문에 소모되지 않는 자연 에너지를 그대로 사용할 수 있는 방안과 에너지 저장 장치들의 연구가 활발히 진행되어지고 있다.

그 중 하나가 에너지 하베스팅 기술이다[1,2]. 에너지 하베스팅은 자연을 훼손, 소모하지 않고 주변 환경에서 쉽게 에너지를 취득할 수 있는 청정에너지 기술이므로, 우리나라의 실정에서 특히 유용한 분야이다. 신재생에너지 등 청정에너지 기술의 대표 주자인 태양전지를 비롯하여, 현재 다양한 에너지 하베스팅 기술의 실용화를 위한 많은 연구들이 진행되어지고 있다. 에너지 하베스팅 기술은 특히 모바일 기기의 실용화에서 주목받고 있다. 소형화 · 경량화된 배터리의 전력저장밀도를 최대한 높이는 것이 가시화되고 있으나, 날로 증가하는 모바일 기기의 전력소모로 인하여 배터리의 전력공급능력은 오히려 한계를 보이고 있다. 에너지 하베스팅은 그 한계를 극복할 수 있는 기술로 주목받고 있는 것이다.

2. 마이크로 에너지 하베스팅 변환 원리

마이크로 에너지 하베스팅은 다양한 변환 원리로 가능하며, 진동에너지(Vibrational Energy), 광에너지(Light Energy), 전자기에너지(Electromagnetic Energy) 및 열에너지(Thermal Energy) 등을 전기에너지로 변환하는 것이다. 진동 에너지는 압전효과 또는 정전효과를 이용하여 전기에너지로 변환이 되고, 광에너지는 광전효과를 이용하여 변환되며, 열에너지는 열전효과를 이용하여 전기에너지로 변환이 된다. 전자기 효과 방식은 진동에 의해 전자유도가 발생하면 전기가 유기되는 현상을 이용하는 것으로 에너지 변환효율도 낮은 편이며 또한 초소형화가 어려운 단점을 갖고 있다. 마이크로 에너지 하베스팅에 적용되는 그러한 전기에너지 발생 원리를 개략적으로 살펴보기로 한다.

2.1 Thermoelectric Energy Harvesting

열전변환에 의한 에너지 하베스팅은 제벡 효과(Seebeck Effect) 또는 펠티에 효과(Peltier Effect)를 이용한다. 제벡 효과는 서로 다른 재질의 금속선을 접합시킨 구조에서 한 쪽 끝단과 다른 쪽 끝단 사이에 온도차가 있으면, 두 금속의 일함수 차이에 기인하는 기전력(Electromotive Force)이 발생하

는 것이며, 열전대(Thermocouple)로 제작된 온도 센서로 이용되기도 한다. 펠티에 효과는 그 반대방향의 효과로서, 역시 이종 금속 또는 이종 접합체에 전류를 흘려주면 전자 또는 정공의 흐름에 동반하는 열류가 흐르게 되어, 결과적으로 열의 발생 또는 흡수가 일어나게 되는 것이다. 이 두 가지 현상에 착안한 다양한 연구·개발 사례가 있으며, 열전효과에 기반을 둔 에너지 하베스팅 기술에 관하여는 2010년 J.F. Li 등이 발표한 것을 소개 한다: 우수한 성능을 가진 열전 재료(전기 전도도, Seebeck 계수 및 열전도도의 물리적 파라미터를 조정)를 개발하고 나노구조 물질의 제조와 관련된 제작과정을 발표 했다[3]. 그림 1a는 전력을 생산할 수 있는 열전변환 모듈의 동작원리를 설명하고 있다. 양단에 온도차가 발생하면, 두 재료의 일함수 차에 기인하는 전자 또는 정공의 흐름이 발생하여 전하를 이동시킬 수 있는 기전력이 생성되며, 이는 제벡 효과에 따른 것이다. 동일한 구조체를 응용하여 냉각기능이 구현되는 펠티에 효과의 응용이 그림 1b이다. 열전변환 원리에 의한 에너지 하베스팅 기술에서는 주로 제벡 효과를 응용하여 구현되고 있으며, 열전재료의 물성에서 기인하는 제벡 계수(Seebeck Coefficient)가 열입력에 대한 출력전력의 크기를 결정한다.

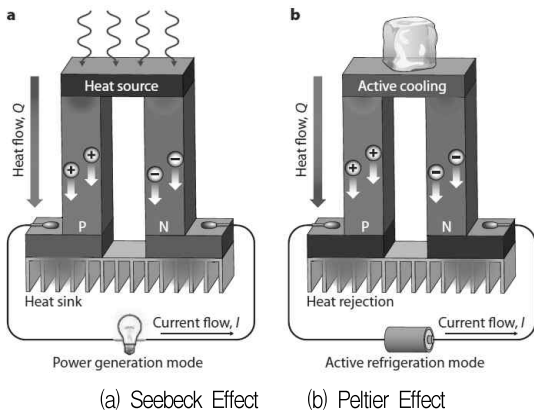


그림 1. 열전변환 모듈의 동작원리[3]

2.2 Light Energy Harvesting

광에너지를 전기에너지로 변환하는 광전변환 원리는 주로 일반적인 태양전지(Solar Cell)에서 이용되고 있다. 여기서는 최근 발표된 광전변환 원리에 의한 전력발생 소자에 관하여 소개하고자 한다.

미국 보스턴 대학의 D. Wang 교수 연구팀은 최근 *Angewandte Chemie* 저널에 게재된 연구 논문에서, 유리 기판 위에 산화철과 니켈산화철의 얇은 막을 증착시켜 제작한 광전변환 에너지 하베스팅 소자를 제안했다[4]. 나노와이어 복합체와 코팅막을 이용하여 제작된 광에너지와 광캐소드 전극 사이에는 광전변환에 기인한 산화-환원 반응에 의해 전하가 생성되고 흐르게 되어 전력을 발생시킨다. 그림 2는 산화철을 사용한 소자에 비해 니켈산화철을 사용한 소자가 더 우수한 출력효율을 나타냄을 보여준다.

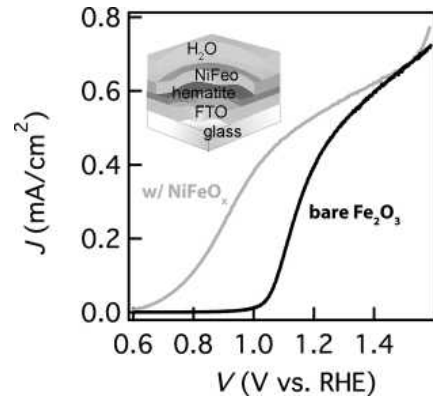


그림 2. 광전변환 에너지 하베스팅 사례[4]

2.3 Electromagnetic Energy Harvesting

전자기유도(Electromagnetic Induction)는 패러데이 법칙(Faraday's Law)에 의해 유도 기전력이 회로를 통과하는 자속의 시간당 변화율에 비례함에 착안한 것이다. 일반적으로 발전기, 전기 모터 등 다양한 전기 구동기의 원리로 이용되며, 전기에너지를 생산하는 마이크로 에너지 하베스팅 분야에도 적

용될 수 있다. 2012년 Northwestern Univ.의 연구진에서 제안한 진동과워(Vibration-powered) 발전기가 그 대표적인 사례이다[6]. 그림 3은 그 원리를 보여준다. 왼편은 에너지 하베스팅 소자에 진동입력을 인가하여 출력 에너지를 평가하는 실험구성 개략도이며, 오른편은 완성된 에너지 하베스팅 구조체의 사진이다.

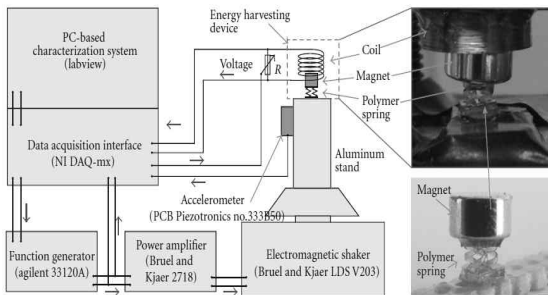


그림 3. 전자기 유도에 의한 에너지 하베스팅 사례[6]

좌측 : 실험계의 구성-PC기반 인터페이스에 의한 특성평가 시스템 및 전자 진동시스템에 의한 진동입력 전달 및 모니터링 시스템
우측 : Projection Microstereo Lithography 공정으로 제작된 HDDA 고분자 스프링 어레이 구조(2×2) 위에 자석을 부착함;

HDDA 계열 고분자 재료를 Projection Microstereo Lithography 공정으로 스프링 어레이 형태로 제작하고 그 상부에 자석을 부착하였다. 기존 실리콘 기반 시스템(Univ. of Southhampton)과 동일한 주파수 대역에서 동작하지만 구조의 크기를 1/3로 획기적으로 줄였다. 고분자 재료를 컴퓨터를 활용한 디지털 마스크를 사용하여 구조체로 미세가공할 수 있는 공정을 사용하고, 자외선(UV)로 고융화시켰다. 이 소자의 최대 정격출력은 약 9.14μW/G ($G=9.81ms^{-2}$)이며, 정격 개방전압 출력은 약 21mV/G이다.

2.4 Triboelectric Energy Harvesting

서로 다른 일함수를 가진 두 가지 재질을 접촉시키거나 마찰시키면, 상대적으로 전자를 더 잘 잃을 수 있는 재료에서 전자를 더 잘 얻을 수 있는 재료로 전자가 이동하는 현상은 오래 전부터 잘 알려진 마찰전기 효과(Triboelectric effect)이다.

미국 Georgia Tech.의 Z. L. Wang 교수팀은 그 효과에 착안하여, 2차원 평면에서 발생하는 마찰전기를 기반으로 대출력 에너지 하베스팅 소자를 설계하고 제작하였다. Nature Communications에 보고된 바에 의하면, 마찰전기 효과에 의해 생산된 전력출력을 실시간으로 사용하여 전자제품의 구동에 성공하였다[7]. 그림 4는 마찰전기 기반 에너지 하베스팅 소자의 개략도이다.

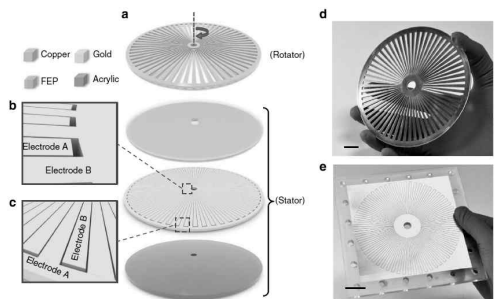


그림 4. 마찰전기 효과 의한 에너지 하베스팅 사례[7]

(a) 로테이터와 스테이터로 구성된 마찰전기 기반 발전기의 개략도; (b) 내부 구조; (c) 외부 구조; (d) 로테이터 사진; (e) 스테이터 사진

서로 다른 재질을 가진 로테이터와 스테이터로 구성된 발전기는 마찰전기 효과에 의해 전력을 출력한다. 유기재료를 이용한 마찰전기 기반 에너지 하베스팅 소자이며, 마찰전기와 전기감응 커플링 효과를 이용하여 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 원리에 기반을 두고 있다. 그림 5는 상기 마찰전기 기

반 에너지 하베스팅 소자의 전기적 출력을 측정된 결과를 보여준다.

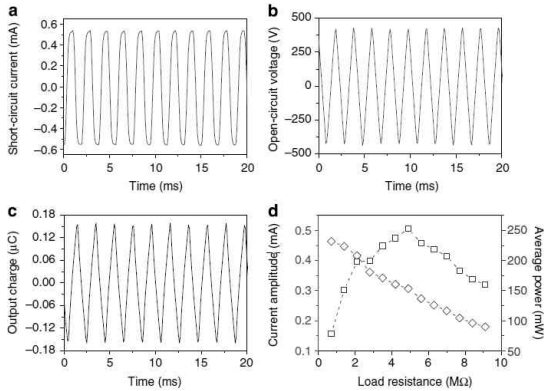


그림 5. 마찰전기 기반 에너지 하베스팅 소자의 출력[7]

- (a)회전속도(500r/min)에서 단락전류 (Isc);
- (b)회전속도(500r/min)에서 개방전압 (Voc);
- (c)회전속도(500r/min)에서 출력전하;
- (d)회전속도(500r/min)에서 부하 매칭 테스트 결과

회전속도(500r/min)에서 단락전류, 개방전압 및 출력전하의 수준을 보여주고 있으며, 부하 매칭 테스트 결과가 나와 있다. 접촉부 표면 위에 마찰전기 효과를 극대화하기 위한 마이크로 섹터들이 방사형으로 배열되어 1.5W(단위 면적 당 19mW/cm²)의 출력, 효율 24%의 성과를 보였다.

2.5 Vibrational Energy Harvesting

압전재료에 인가된 충격, 진동 등 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 압전변환 원리는 오래 전부터 연구되어 실용화된 분야이다. 일상생활이나 산업현장에서 다른 발생원에 의해 생산되고 사용되는 과정에서 소비되고 소멸되는 다양한 기계적 에너지를 활용하여 전기에너지를 발생할 수 있는 기술은 에너지 하베스팅 기술로 가장 대표적인 것이라 할 수 있

다. 여기서는 압전변환 에너지 하베스팅 소자 중 진동 에너지를 전기에너지로 변환하는 진동 에너지 하베스팅(Vibrational Energy Harvesting)에 관하여 소개한다.

1924년 고분자 재료에서 압전특성이 발견된 이래 후속 연구가 이어져왔으며, 1970년대에 미국, 유럽을 중심으로 본격적인 가능성을 제시한 연구결과를 발표하였다. Electro-Active-Polymer(EAP)로 알려진 고분자 압전재료는 낮은 구동전압에서 큰 변형을 보이면서도 저밀도인 특성으로 인해 인공근육에 적용 가능한 차세대 액추에이터(Actuator)로 큰 주목을 받은 바 있다. 하지만, 실용화 수준에 미흡한 출력이 항상 문제였다. 세라믹 압전재료가 상대적으로 큰 전력 출력을 보임에도 전력 출력이 미약한 고분자 압전재료에 주목한 것은 고분자 재료가 경량이며 휘어질 수 있는 재료이기 때문이다.

Georgia Tech.의 Z. L. Wang 교수 연구팀은 우수한 전력출력을 보이면서도 휘어질 수 있는 특성을 구현할 수 있는 에너지 하베스팅 소자를 개발하여 큰 반향을 불러일으킨 바 있다. 2007년 Science에 보고된 연구논문에서는 ZnO 나노선 기반 에너지 하베스팅 소자를 발표하였다[8]. 서로 엇갈리는(ZigZag) 구조의 전극과 쇼트키(Schottky) 접합 특성을 개선한 ZnO 나노선 기반 나노발전기(Nano-generator)는 집적화에 의해 출력 효율을 획기적으로 개선하였다. 그림 6은 Z. L. Wang 교수 연구팀에서 발표한 ZnO 나노선 기반 나노발전기의 개략도이다. 초음파로 구동되는 나노 발전기는 고분자 기판 위에 전도성 하부전극과 지그재그 형태로 제작된 상부전극 사이에 ZnO 나노선이 어레이 형태로 성장된 구조이다. 수직으로 정렬된 ZnO 나노선은 초음파로 인가되는 진동에너지에 의해 전하를 출력하는 압전 변환 원리를 구현한다. 상부에 제작된 실리콘 지그재그 전극에는 Pt가 코팅되었으며, 상부전극에 초음파가 인가된다.

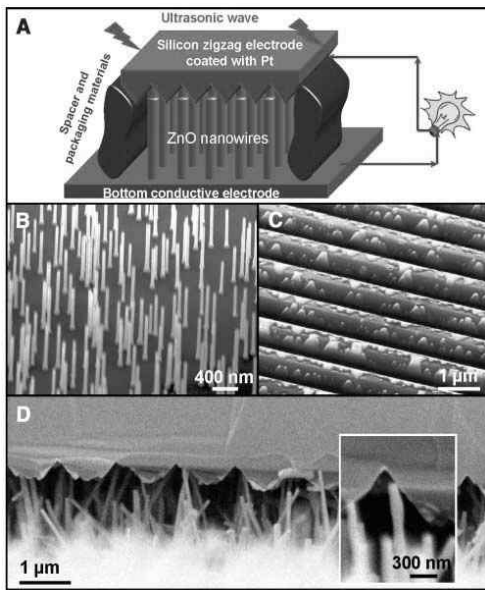


그림 6. 진동 에너지 하베스팅 소자 사례[8]

(A) 정렬된 ZnO 나노선 기반 나노 발전기 소자의 개략도; (B) GaN 기판 위에 성장된 ZnO 나노선; (C) 200nm Pt가 코팅된 지그재그 트렌치 구조의 상부전극; (D) 나노발전기의 SEM 단면도

2.6 RF Energy Harvesting

에너지 하베스팅의 기본 개념은 주변에서 버려지는 에너지를 ‘수확(Harvesting)’하여 재활용하는 것이다. 압전 에너지 하베스팅은 주로 진동이나 충격 등 버려지는 에너지의 수확이다. 통신기술에서 발생되어 대기 중에 전송되는 RF(Radio Frequency) 역시 에너지 수확에 활용될 수 있다. 이를 적극적으로 활용한 것이 RFID(Radio Frequency IDentification)이며, 별도의 내장 배터리 없이 압전변환 원리에 의해 구동 에너지를 얻는 것이 바로 수동형 RF 태그이며, 리더(Reader)에서 전송되는 RF 신호가 에너지원인 것이다.

미국 Intel社의 연구원들은 이와 유사한 원리로 RF 신호에 의해 에너지를 수확할 수 있는 연구결과

를 발표하여 큰 주목을 받고 있다. 4.1km 거리의 TV 송신탑으로부터 60mW 수준의 에너지를 수확할 수 있음을 확인하였으며, RFID/USN 플랫폼에서 원격감지(Remote Sensing) 기능을 수행하는 온·습도 감지 센서 모듈에 연결된 LCD를 구동하기에 충분한 전력 수준이다. 그림 7은 그 시연 사진으로, San Diego에서 개최된 Rawcon Conference에서 발표된 것이다.



그림 7. RF 에너지 하베스팅 사례[9]

Wireless Ambient Radio Power(WARP)라고 명명된 상기 ‘RF 청소(Scavenging)’는 에너지 하베스팅 분야에서 성공적으로 자리 잡고 있는 진동, 태양 및 열 등의 주변 잠재적 에너지를 수확하는 개념을 RF 로 확대한 것이다. RF 에너지 하베스팅은 아직 구체적인 연구개발로 이어지고 있지 않지만, 향후 성장 가능성이 매우 유망한 기술로 주목받고 있다. 현재 다양한 실용화 및 적용이 진행되고 있는 RFID/USN의 플랫폼 기술에 적용되는 것이 가능하기 때문이다. 예를 들어 UHF 범위의 RFID 리더에 의해 전력을 공급 받고 정보를 취득하는 플랫폼인 Wireless Identification and Sensing Platform(WISP)에서도 그 적용 사례를 찾아볼 수 있다. 각각의 WISP는 대략 2μW~2mW 수준의 에너지를 전송하고 있으며, 리더에서 송출되는 그러한 RF 에너지에 의해 수 미터 정도 떨어진 거리에서도 에너지를 수확할 수

있다고 보고되었다[9].

2.7 Plant Energy Harvesting

우리 주변에서 버려지는 다양한 에너지를 수확하고자 하는 또 다른 흥미로운 사례가 식물 에너지 하베스팅(Plant Energy Harvesting)이다. 미국 Univ. of Washington의 연구진은 큰잎단풍나무(Big Leaf Maple)에서 최고 수백 밀리볼트의 전기를 생산할 수 있다는 사실을 발견하고, 이를 전기에너지로 변환하는 장치도 개발하여 IEEE Transactions on Nanotechnology의 최근호에 발표하였다[10]. 그림 8은 그들이 발표한 식물 에너지 하베스팅에 관한 것이다.



그림 8. 식물 에너지 하베스팅 사례[10]

나무가 전기를 전도할 수 있다는 사실은 이미 알려진 것이며, 이에 앞서 MIT 연구진은 나무가 최고 200mV 수준의 전력을 축적할 수 있다는 사실을 발

견하기도 했다. Univ. of Washington의 연구진이 개발한 에너지 전환 장치는 그와는 다른 것으로, 나무에 연결된 부스트 컨버터(Bust Converter)로 20mV의 미소 전기까지 저장함으로써 약 1.1V의 기전력을 생산할 수 있었으며, 이는 전력 소모량이 적은 센서의 구동에 사용될 수 있는 수준이다.

3. 맺음말

지속가능한 발전(Sustainable Development)은 에너지의 공급이 성숙단계에 접어든 선진국과 날로 그 수요가 증대하는 신흥공업국이 각축을 벌이고 있는 현세에서 인류의 생존을 위해 반드시 해결되어야 할 지상과제로 대두되었다. 신·재생에너지의 연구·개발과 실용화는 그것을 실현하기 위한 구체적인 트렌드이며, 주변에서 버려지는 에너지를 수확하는 개념의 에너지 하베스팅도 그러한 기술 개발의 연장선에서 시작되었다.

여기서 소개된 다양한 에너지 하베스팅 기술 사례들은 기본적으로 주변에서 버려지는 미약한 에너지를 수확한다는 관점에서 마이크로 에너지 하베스팅으로 정의되기도 한다. 빗방울들이 모여 강물과 바닷물이 형성되는 것과 마찬가지로, 그러한 개개의 미약한 에너지들을 수확하여 재활용하는 기술들은 향후 지속적인 관심과 연구·개발과 그에 따른 실용화의 물결로 이어질 것으로 예상된다.

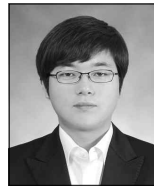
에너지 하베스팅 기술은 기존의 압전변환 원리뿐만이 아니라, 열전변환, 광전변환, 전자기변환, 마찰전기변환 등 다양한 원리에 기반을 두고 인간의 일상생활의 영위과정 및 산업현장에서 버려지는 미약한 에너지를 유용한 전기에너지로 변환하여 재활용하는 것이다. 심지어 마지막에 소개된 식물 에너지 하베스팅의 사례에서도 볼 수 있는 바와 같이, '마른 수건도 짰다'는 경지에까지 그 필요성이 점점 더 증대되고 있는 것이다. 현재 다양한 개별 연구 논문, 기술보고서 및

기술해설 등이 그러한 에너지 하베스팅 분야에서 쏟아져 나오고 있으며, 여기서는 그 중 최근에 발표된 일부를 소개하였다. 본 학회지의 주요 독자들뿐만 아니라 다양한 분야에서 연구·개발에 매진하고 있는 전문가들에게 마이크로 에너지 하베스팅 기술의 중요성을 인식시키고, 그 현황에 관한 관심을 모을 수 있기를 기대해본다.

참고문헌

- [1] Z. L. Wang, J. Song, "Piezoelectric Nanogenerator Based on Zinc Oxid Nanowire Arrays", in Science, 312(2006) 242-246.
- [2] S. P. Beeby, M. J. Tudor, N. M. White, "Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications", in Meas. Sci. Technol. 17 (2006) R175-R195.
- [3] Jing-Feng Li, Wei-Shu Liu, Li-Dong Zhao and Min Zhou, NPG Asia Mater 2(4) 152-158(2010).
- [4] Chun Du, Xiaogang Yang, Matthew T. Mayer, Henry Hoyt, Jin Xie, Gregory McMahon, Gregory Bischoff, and Dunwei Wang, Angew. Chem. Int. Ed. 2013, 52, 12692 - 12695.
- [5] Jin Xie, Xiahui Yao, Ian P. Madden, De-En Jiang, Lien-Yang Chou, Chia-Kuang Tsung, and Dunwei Wang, J. Am. Chem. Soc. 2014, 136, 8903-8906.
- [6] Evan Baker, Timothy Reissman, Fan Zhou, ChenWang, Kevin Lynch, and Cheng Sun, Smart Materials Research, Volume 2012, Article ID 741835, 9 pages.
- [7] Guang Zhu, Jun Chen, Tiejun Zhang, Qingshen Jing & Zhong Lin Wang, NATURE COMMUNICATIONS, DOI: 10.1038/ncomms4426.
- [8] X.D. Wang, J.H. Song, J. Liu and Z.L. Wang, Science, 316 (2007) 102-105.
- [9] P. Mannon, "Intel researchers demo RF energy harvester," EE Times, Jan. 26, 2009. [Online]. Available:
- [10] <http://phys.org/news171643486.html>.

◇ 저 자 소 개 ◇



임영택(林英澤)

1981년 2월 22일생. 2010년 수원대학교 전기공학과 졸업. 2012년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년-현재 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

주요관심분야 : 나노기술, 에너지하베스팅 소자

E-mail : ttsei@naver.com



박구범(朴球範)

1984년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1986년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 하대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년

~현재 유한대학교 전기과 교수.

주요관심분야 : 플라즈마응용, 전기전자재료

E-mail : pgb@yuhan.ac.kr