

유연 압전 에너지 하베스팅 기술

임영택<인하대학교 박사과정> · 이선우<인하공업전문대학 교수>

1 서론

현재 인류는 재생 불가능한 화석연료기반 에너지를 사용함으로써 많은 문제를 야기하고 있다. 한계에 다다른 대기오염으로 인한 지구온난화 및 화석연료의 고갈로 인한 에너지 부족현상에 직면하고 있는 것이다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 태양에너지[2], 지열에너지[3], 수소에너지[4] 등 신·재생에너지원에 대한 연구·개발이 전 세계적으로 수행되고 있다. 그러나 이러한 에너지도 날씨의 문제, 지반의 문제 혹은 저장의 문제 등 여러 가지 문제점을 안고 있어 실용화를 위한 개발에 난항을 겪고 있는 것이 현실이다.

때문에 최근 들어 큰 주목을 받고 있는 것이 에너지 하베스팅 기술이며, 가장 대표적 것은 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 압전현상을 이용하는 것이다. 장소 또는 날씨에 구애받지 않는 이유로 다양한 에너지 하베스팅이 소자가 크게 각광을 받고 있으며, 최근에는 유비쿼터스 모바일 혁명의 실현을 위해 가볍고 휘어질 수 있는 유연 에너지 하베스팅(Flexible Energy Harvesting) 소자가 절실히 요구되고 있다.

대표적인 압전재료는 분자구조의 분극이 일정방향으로 배열되어 있는 강유전체(Ferroelectric)로서 전기 쌍극자(Electric Dipole)를 보유하는 재료이다. 일반적으로 전기 쌍극자들은 특별한 배향성이 없

어서 일정 방향으로 정렬되어 있지 않지만, 쿨리 온도 이상으로 열을 가하고 강한 전기장을 가해주면 전기장을 따라 재배열 되는데 이 과정을 분극이라 한다. 이러한 분극 과정을 통해 우수한 압전특성을 띠게 되는 것이다.

현재까지 보고된 우수 연구 사례들은 압전변환 원리를 사용한 에너지 하베스팅 소자에서 높은 출력 전압을 달성하였으나, 출력전류가 낮은 관계로 인해 저장장치 없이 실용화가 가능한 소자를 구현하는 데 부적합한 실정이다. 또한 압전재료의 기계-전기결합계수 k 가 0.9 이상으로 향상되어 81% 이상의 변환효율이 일본의 Kuwata, 미국의 Shroud 등에 의해 보고되었으나, 환경오염물질로 규제 받고 있는 납계 압전 재료를 사용하고 있으며, 쿨리온도가 낮으면서 단결정을 형성하는 재료의 제조가 어려워 가격이 비싸다는 단점도 극복해야 한다.

최근 스마트폰 등 휴대용 전자기기를 선두로 많은 소자들을 웨어러블(Wearable) 디바이스로 구현하기 위해 연구되고 있다. 압전변환 기반 에너지 하베스팅 소자 또한 2006년 미국 조지아 공대의 Z. L. Wang 교수의 제안에 힘입어 유연성(Flexibility)을 구현하기 위해 활발히 연구·개발되고 있으나 실용화를 위한 고출력 전력의 구현이 어렵다는 근본적인 한계를 극복하고 있지 못하는 것이 현실이다.

따라서 유연 압전 에너지 하베스팅 소자를 실용화

하기 위한 새로운 연구들은 충분한 유연성과 우수한 압전특성의 구현이 가능한 복합재료 쪽으로 진행되고 있다. 그림 1은 현재 다양한 응용분야에서 전력 에너지의 필요성을 설명한다. 일반적인 기기 및 시스템뿐만 아니라, 최근 날로 그 저변이 확대되고 있는 스마트폰 등 유비쿼터스형 모바일 기기의 전력에너지 공급에 특히 주목할 필요가 있다. 압전변환(Piezoelectric Conversion), 열전변환(Thermo electric Conversion), 초전변환(Pyroelectric Conversion) 및 광전변환(Photoelectric Conversion) 등 다양한 원리를 응용하는 에너지 하베스팅 소자가 다시 주목 받고 있는 것은 그 때문이며, 그러한 원리들을 이용한 휴대용 전력 공급장치의 연구·개발은 최근 ICT 기반 응용기술의 새로운 트렌드로 자리 잡고 있는 유비쿼터스 및 사물인터넷 시대의 개척을 위해서도 필수적일 것으로 예상된다.

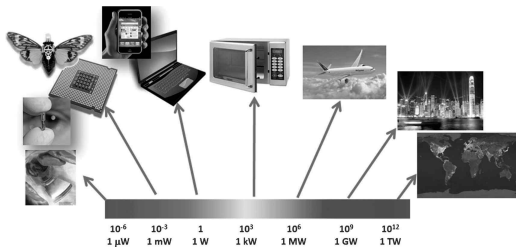


그림 1. 다양한 응용분야에 요구 되는 전력에너지 규모

2. PVDF 기반 유연 압전 에너지 하베스팅

1924년 발견된 고분자의 압전효과는 1970년대에 미국과 유럽을 중심으로 많은 연구가 이루어 졌다. PVDF(Poly Vinylidene Fluoride)는 단량체 구조인 $(-CH_2-CF_2-)_n$ 가 반복적으로 구성되는 선상 고분자로서, 분자 내에 존재하는 강한 전기 쌍극자에 기인하여, 고분자 재료 중 가장 큰 유전율을 나타내는 물질이다. 최근 UC Berkeley의 Liwei Lin 연구팀은 PVDF를 기반으로 하는 유기 나노섬유(Nano-

fibers)를 제작하여 큰 주목을 받고 있다 [5,6]. 그림 2는 그 개요를 보여준다.

Liwei Lin 연구팀에서 제작된 PVDF 기반 나노섬유는 최고 에너지 변환효율 21.8%, 평균 에너지 변환효율이 12.5% 수준이며, 일반적인 PVDF 필름에 비해 약 4% 이상 우수하다[5,7-10].

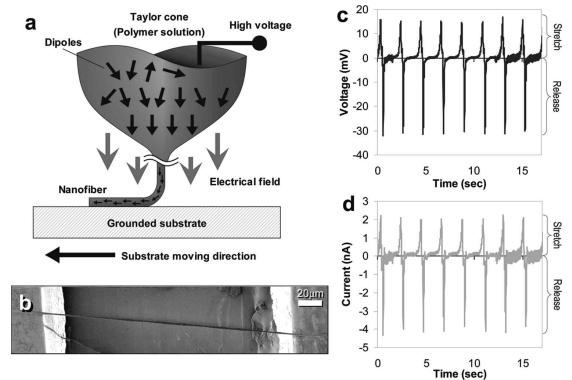


그림 2. Piezoelectric PVDF nanogenerator.

(a) Near-field electrospinning (NFES): 분사과정에서 기판 위에 도포되는 압전필름에 전기적 폴링과 기계적 스트레칭이 가해져서 직접 압전특성을 구현하여 압전 나노제너레이터를 제작하는 공정; (b) 단일 PVDF 나노섬유, 두 개의 전극 및 플라스틱 기판으로 구성된 나노제너레이터의 SEM 이미지 (c) 2Hz로 인가된 스트레인의 시간 변화에 따른 출력 전압 측정치; (d) 2Hz로 인가된 스트레인의 시간 변화에 따른 출력 전류 측정치.

3. PZT 기반 유연 압전 에너지 하베스팅

세라믹 계열 재료 중 압전특성이 가장 우수한 PZT는 물리적 변형에 약하다는 취약성을 갖고 있어 유연 압전 에너지 하베스팅 소자에 적용하기 어려운 단점을 보이고 있다. 표 1에 대표적인 압전재료의 압전특성을 요약했다.

표 1. 대표적인 압전재료의 압전상수

재료	d(pC/N)	k
PZT	496	0.5~0.7
BaTiO ₃	242	0.15~0.2
PVDF	23	0.1
Quartz	5	0.1

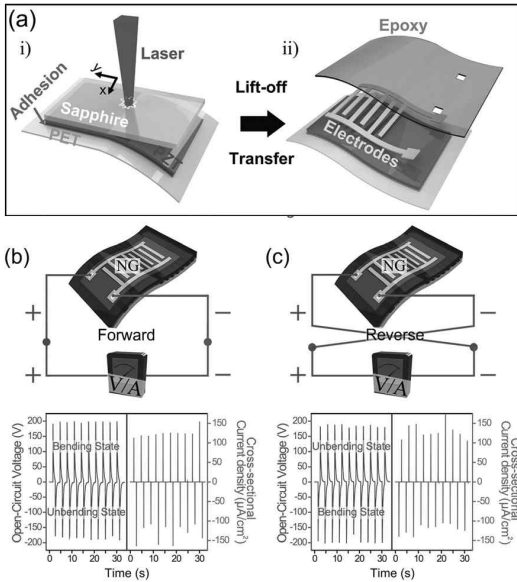


그림 3. 대면적 유연 PZT 기반 나노 발전기

(a) LLO 전사공정을 이용하여 제작된 대면적 플렉서블 PZT 기반 고효율 나노 발전기의 공정 개략도; (b) 개방전압; (c) 전류밀도

얇은 필름의 형태로 적층하는 방식도 있으나, 출력 전압은 인가되는 변형에 비례하여 커지기 때문에 보다 큰 변형을 얻기 위해 굽혔을 시, PZT의 물리적 손상을 초래할 수 있다. 이러한 단점을 극복하고자 하는 연구가 KIST의 이진재 교수팀에 의해 시도되어 Advanced Materials 의 표지논문으로 발표된 바 있으며, 그림 3에 소개한다. 유연 기판 위에 LLO (Laser Lift-Off) 공정을 이용하여 PZT 박막을 제작하였다. LLO 전사공정은 G(N(Gallium Nitride)

박막을 사파이어 기판 위에 올려 수직 배열 LED를 제작하는 기술로 널리 이용되고 있다[11-13].

4. Ceramic Fiber 기반 유연 압전 에너지 하베스팅

세라믹 섬유(Ceramic Fiber)를 이용한 유연 압전 소자는 폴리머 계열의 유연 기판 상에 우수한 압전특성을 보유하는 세라믹 섬유를 삽입하는 유연 복합소재 제작 기술을 이용하여 고효율의 유연 에너지 하베스팅 소자를 구현할 수 있기 때문에 많은 주목을 받고 있다. 압전변환에 의해 고효율을 구현할 수 있는 핵심 원리는 세라믹 섬유의 면적대비 길이를 매우 크게 하는 것이다. 에너지 변환 전압 $V = g_{33} \cdot F \cdot L/A$ (g_{33} : 에너지 변환 전압상수, F: 외부 힘, L: Fiber 길이, A: 세라믹 섬유 단면적)로 결정되는 외부 출력전압이 L/A비의 크기에 비례하여 획기적으로 증대될 수 있기 때문이다.

그 효과를 이용하여 유연 압전 에너지 하베스팅 소자를 개발하는 대표적인 기업으로 Advanced Cermetrics (ACI)와 Smart Materials를 들 수 있다. ACI社에서는 VSSP(Viscous Suspension Spinning Process)로 명명된 공정을 고안하여 15~250µm의 다양한 직경을 갖는 세라믹 섬유를 제조하였다[15]. VSSP는 거의 모든 세라믹 재료 및 페라이트로 섬유화 할 수 있는 기술이다. 그림 4는 ACI社의 세라믹 섬유 기반 유연 압전 에너지 하베스팅 소자이다.

Smart Materials社는 독일의 Fraunhofer Research Society에서 발명한 Soft-Molding 공정을 이용하여 세라믹 섬유를 제조하였다[16]. 이 방법에서는 최종적으로 구현하고자 하는 구조물의 양각 형태로부터 Soft-Mold를 복사하고, 거기에 압전 세라믹 물질을 채운 후 소결하여 최종적으로 세라믹 섬유를 얻게 된다. 그림 5는 Smart Materials社의 예

너지 하베스팅 소자 구조이다.

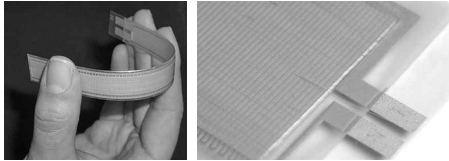


그림 4. ACI社에서 제작한 Ceramic Fiber 기반 유연 압전 에너지 하베스팅 소자

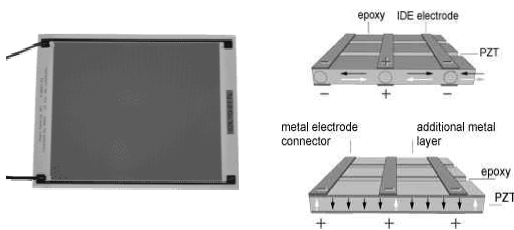


그림 5. Smart Materials社에서 제작한 Macro Fiber Composite 를 이용한 에너지 하베스팅 소자

Smart Material社는 해당 공정을 사용하는 기술 특허의 전세계 사용허가를 2002년 취득하고, 마이크로 섬유 복합체(Micro Fiber Composite; MFC)를 제작하여 유연 압전 에너지 하베스팅 소자에 적용하고 있다.

5. 유연 압전 에너지 하베스팅의 응용 사례

최근 유연 압전 에너지 하베스팅 소자의 응용에 관하여 다양한 연구 사례가 보고되고 있으며, 여기서는 가장 흥미로운 결과 두 가지를 소개한다.

5.1 압전 나노리본 기반 발전기

Univ. of Illinois/Univ. of Arizona 연구팀은 압전 나노리본(Nanoribbon) 기반 발전소지를 암소, 양 및 돼지의 심장에 부착하여 실험한 결과, 심장박동

에 따른 압력만으로 전기에너지를 출력시킬 수 있음을 확인했다. 그림 6은 암소의 심장에 부착된 압전 나노리본 기반 발전소지의 사진이다. 상기 연구진은 “테스트 결과 이 나노리본이 신체 면역시스템의 저항 없이 2천만번이나 심장이 박동하는 동안 유연성을 유지했다”고 밝힌 바 있다[17].

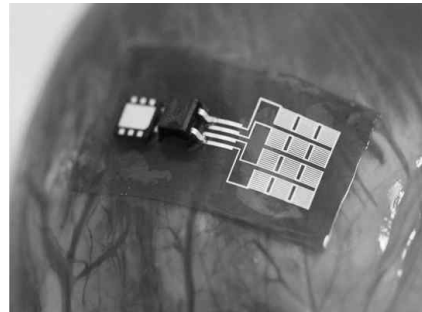


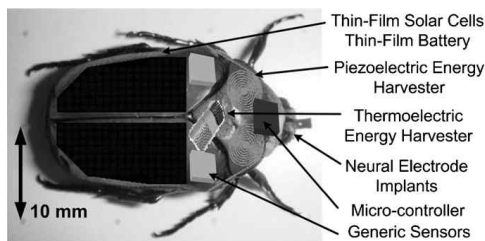
그림 6. 암소 심장에 부착된 압전 나노리본 발전소지

이 초미세 압전 에너지 하베스팅 소자는 일반적으로 신체 내부에 이식되는 심박조절기의 전력공급을 위한 소형 배터리의 기능을 대체할 것으로 기대된다. 소형 배터리는 신체 내부(in vivo)에 심박조절기와 함께 이식되는데, 방전되어 더 이상 전력을 공급할 수 없을 경우 교체되어야 하며, 이를 위해 환자에게 큰 부담을 주는 재수술 과정을 거쳐 다시 심박조절기와 이식되어야 하는 심각한 문제가 있다. 나노리본 기반 에너지 발전소지는 수술로 신체에 이식되는 다양한 의료기기에 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 상기 나노리본 기반 에너지 발전소지는 최근 크게 주목받고 있는 웨어러블 컴퓨터 등 신체 외부(in vitro)에 장착되는 의료 기기에도 사용될 수 있을 것으로 전망된다. 이들은 발표된 논문에서, “실험을 통해 심장박동 모니터, 심박조절기 등 배터리를 이용하는 의료기기 대신 압전 나노리본 기반 에너지 하베스팅 소자로 대체해 실용화될 수 있음을 확인할 수 있었다”고 언급한 바 있다[18].

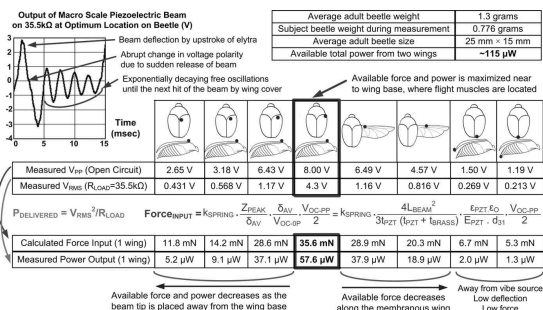
5.2 하이브리 곤충 모델

Univ. of Michigan의 Khalil Najafi 교수 연구팀은 여러 가지 에너지 하베스팅 기술을 응용하여 곤충으로부터 에너지를 수확(Harvesting)하고 소형 사이보그를 구현할 수 있는 기술을 모색하고 있다고 밝혔다[19]. 그림 7은 그 실례이다. 상기 사례는 눈부신 발전을 달성한 에너지 하베스팅 기술 중 두 가지를 응용하는 것으로서, 곤충의 생체 에너지 중 몸체의 열에너지와 운동에너지를 이용하여 전기 에너지를 수확하고자 하는 것이다. 곤충에 부착된 에너지 하베스팅 소자는 날개의 기계적 운동으로부터 전기에너지를 생산하고, 그 에너지는 배터리에 저장된다.

배터리에서 공급되는 전력은 곤충에 장착된 소형 카메라, 마이크로폰 및 가스 센서의 구동에 사용되며, 유해한 환경에 투입되어 비행하는 곤충의 탐색과정에서 유용한 생체 정보를 취득하는 데 이용된다. 제한된



(a) 하이브리드 곤충 모델의 개요 [적용 곤충: Green June Beetle]



(b) 적용 곤충의 비행 중 취득되는 전력 측정 예

그림 7. 곤충에 적용된 에너지 하베스팅 기술

부착 면적에서 생산되는 전력 출력을 극대화하기 위해 나선형의 유연 압전 에너지 하베스팅 소자를 적용하였으며, 펄스 레이저를 사용한 미세가공기법을 소자 제작에 사용하였다.

6. 맺음말

최근 신·재생에너지 기술 개발의 한 축으로 주목 받고 있는 유연 압전 에너지 하베스팅 소자의 기술개발 동향을 소개하였다. 유연 압전 에너지 하베스팅 소자는 우수한 압전계수를 보이지만 기계적으로 취약한 세라믹 재료에 유연성을 부여하는 방향과, 우수한 유연성을 보유하고 있지만 압전계수가 상대적으로 낮은 고분자 계열 재료의 압전특성을 향상시키는 두 가지 방향으로 연구·개발 되고 있다.

유비쿼터스 혁명 및 사물인터넷 시대로 대변되는 최근의 ICT 기반 기술 플랫폼의 변혁은 대전력 청정 에너지원의 개발과 모바일 전자기기의 전력공급에서 요구되는 이동형 자체 충전소자 및 기기의 개발을 동시에 요구하고 있으며, 본 기술해설에서 소개된 유연 압전 에너지 하베스팅 기술은 그러한 요구에 부응하기 위한 최근 동향에 관한 것이다. 얇고 가벼우면서 휘어질 수 있는 유연 압전 에너지 하베스팅 소자의 실용화는 전 세계적인 연구 과제로 대두되고 있으며, 유비쿼터스 혁명 및 사물인터넷의 실현에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Special Issue on Sustainability and Energy, Science 2007, 315, 721 - 896.
- [2] N. S. Lewis, Science 2007, 315, 798 - 801.
- [3] W. E. Glassley, Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment, CRC, Boca Raton, 2010.
- [4] A. J. Bard, M. A. Fox, Acc. Chem. Res. 1995, 28, 141 - 145.
- [5] C. Chang, Van H. Tran, J. Wang, Y. K. Fuh, and L. Lin, "Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency", Nano Lett., 10 726 (2010).
- [6] Chieh Chang*, Yiin-Kuen Fuh, and Liwei Lin, "A direct-write piezoelectric PVDf nanogenerator", IEEE, Transducers2009,

1485-1488, 2009.

[7] Kymissis, J.; Kendall, C.; Paradiso, J.; Gershenfeld, N. Parasitic Power Harvesting in Shoes. IEEE Int. Conf. Wearable Computing, 2nd 1998, 132 - 139.

[8] Hasler, E.; Stein, L.; Harbauer, G. Implantable Physiological Power Supply with PVDF Film. Ferroelectrics 1984, 60 (1), 277 - 282.

[9] Stamer, T. Human Powered Wearable Computing. IBM Syst. J. 1996, 35 (3-4), 618 - 629.

[10] Schmidt, V. H. Piezoelectric Energy Conversion in Windmills. Proc. Ultrason. Symp. 1992, 2, 897 - 904.

[11] M. K. Kelly, O. Ambacher, R. Dimitrov, R. Handschuh, M. Stutzmann, Phys. Status. Solidi. A 1997, 159, R3.

[12] T. I. Kim, Y. H. Jung, J. Z. Song, D. Kim, Y. H. Li, H. S. Kim, I. S. Song, J. J. Wierer, H. A. Pao, Y. G. Huang, J. A. Rogers, Small 2012, 8, 1643.

[13] R. H. Kim, H. Tao, T. I. Kim, Y. H. Zhang, S. Kim, B. Panilaitis, M. M. Yang, D. H. Kim, Y. H. Jung, B. H. Kim, Y. H. Li, Y. G. Huang, F. G. Omenetto, J. A. Rogers, Small 2012, 8, 2812.

[15] R. Cass et al., "Innovative products and processes based on piezoelectric ceramic.

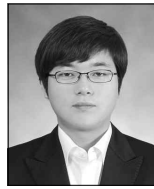
[16] <http://www.smart-material.com/MFC-product-main.html>.

[17] Canan Dagdeviren et al., PANS 2014, 111, 1927-1932.

[18] <http://www.cnet.co.kr/view/44196>.

[19] Ethem Erkan Aktakka, Hanseup Kim and Khalil Najafi, J. Micromech. Microeng 2011., 21, 095016.

◇ 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



이선우(李善雨)

1997년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1999년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 일본 동경대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 2004~2010년 삼성전자 반도체연구소 책임연구원. 2010년~현재 인하공업전문대학 전기정보과 /부교수.

주요관심분야 : CNT/나노기술, 나노반도체

E-Mail : swlee@inhac.ac.kr