

에너지 하베스팅 응용을 위한

압전 세라믹 파이버-폴리머 복합소재의 연구 동향

한승호 선임연구원, 강형원 선임연구원, 이우성 책임연구원, 박성대 책임연구원 (전자부품연구원) | 백동수 교수 (고려대학교 신소재공학과)

1. 서론

최근 에너지 고갈 문제로 인하여 세계적으로 대체 에너지 또는 재생 에너지에 관심을 갖기 시작하였다. 그 중에서 주변에서 버려지는 각종 기계 에너지 (진동, 충격, 풍력, 소음 등)를 이용하여 응용이 가능한 전기 에너지로 변환하는 압전 에너지 하베스팅 분야는 신체활동, 기계 동작 등의 버려지는 에너지, 여유 에너지를 활용하여 소 전력을 생산할 수 있으므로 에너지 위기를 극복할 수 있는 하나의 대안으로 제시되고 있다. 최근 유틸리티 세상의 핵심이라고 할 수 있는 RFID에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데 이를 위해선 외부의 전기선이 없이 독자적인 전원을 갖고 구동되어야 한다. 만약 배터리를 사용하게 되면 그 수명으로 인하여 효율이 저하될 뿐만 아니라 교체 시 많은 비용이 든다는 문제점이 있다. 이러한 점에서 압전 에너지 하베스팅은 배터리가 없이 회로가 동작되도록 한 RFID 및 WPAN 등에 있어서 더욱 간단하면서 값싸게 통신을 할 수 있어서 그 응용 범위가 상당히 넓다고 할 수 있다.

압전 에너지 하베스팅 소재는 전압에 따른 변형과 강한 인장 강도 등을 제공하는 구조적 특성에 우주 항공, 자동차, 진동과 형상 변형 등의 기계적 변위를 나타내는 다양한 분야에서 사용되어 왔다. 과거에는 에너지 하베스팅 소재로 세라믹이 주로 사용되어 왔으나 세라믹의 약한 강도, 곡선 형상 구현에 어려움이 있을 뿐만 아니라 Bulky한 형태로 인하여

일정 공간을 필요로 한다는 단점으로 인하여 최근 세라믹 에너지 변환 소재에 유연성 (Flexibility)을 부여하는 연구가 진행되고 있다. 파이버 형태의 세라믹은 특정 공간을 차지하지 않으면서 고분자와의 복합화를 통해 유연성을 확보할 수 있다. 또한 파이버의 면적 대비 긴 길이로 인하여 에너지 변환 전압 $V = g_{33} \cdot F \cdot L/A$ (g_{33} : 에너지 변환 전압상수, F : 외부 힘, L : Fiber 길이, A : Fiber 단면적)로 표현되는 외부 출력 전압이 높기 때문에 세라믹에 비해 에너지 발전에 효과적이다.

폴리머에 액티브 에너지 변환 세라믹 파이버를 삽입하는 Flexible 복합소재는 위에 언급한 세라믹의 약한 강도, 곡선 형상 구현의 어려움 등의 단점을 해결할 수 있는 물질로서 각광을 받고 있다. Flexible 복합 소재는 파이버 형태일 때 얇고 가벼우며 유연해지는 특성을 가짐에 따라 정보 기기, 우주 항공, 바이오산업 등에 응용되는 곡선 형태의 부품도 쉽게 구현할 수 있다. 최근 크게 부각되고 있는 Flexible 전자 산업과 호응하여 제조 공정 기술에 대한 주변 관련 산업으로의 파급 효과가 매우 클 것으로 기대된다.

2. 압전 세라믹 파이버 제조 기술 동향

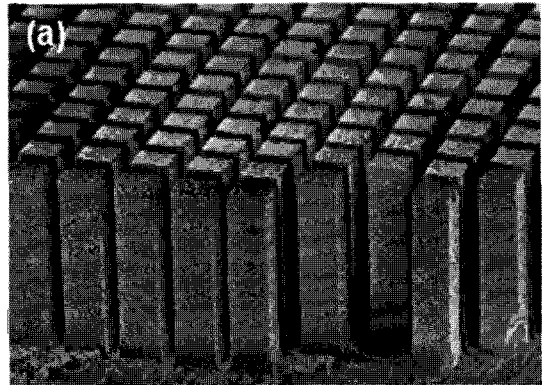
국내에서 세라믹 파이버에 관한 연구는 거의 불모지 상태로 국내·외 학회지에 보고된 횟수는 많지 않으며, 복합 소재를 연구하고 있는 건국대학교, 세

라믹기술원 등에서 해외 기업으로부터 구매 후 변형시키는 소자에 관한 연구를 진행하는 것이 전부일 정도로 기술의 중요성에 비해 연구 개발 빈도나 기술 수준이 매우 낮은 편이다. 반면, 국외에서는 미국을 중심으로 압전 특성이 뛰어난 PZT 소재를 이용하여 기술 개발이 활발히 이루어지고 있는데 대표적인 기업이 Advanced Cerametrics (ACI)社와 Smart Materials社를 들 수 있다.

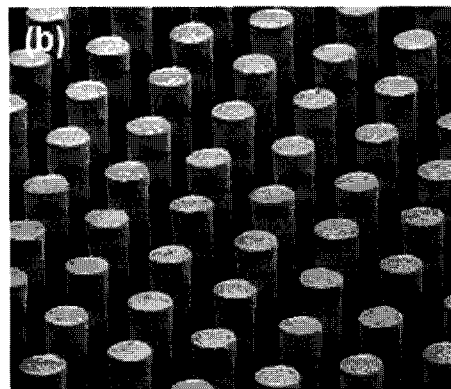
ACI社에서는 Viscous suspension spinning process (VSSP)라는 방법을 고안하여 13~250 μm 의 다양한 직경을 갖는 파이버를 제조하였다 [1]. VSSP법은 레이온 파이버 기술을 이용하여 모든 세라믹 물질을 파이버화 할 수 있게 하는 방법으로 Viscose라고 불리는 점성의 레이온 Precursor를 크산토젠산염화(Xanthation)를 통하여 셀 벽을 허물고, 제조하고자 하는 세라믹 물질의 슬러리와 혼합하여 최종 Solution을 제조하게 된다. 이러한 Solution을 Spinneret이라는 수천 개의 마이크로-홀이 있는 백금 씌움고리통을 통하여 Spinning하게 되고 산-염기 반응을 통하여 굳힌 후 소결하여 최종 파이버를 얻게 된다. 그림 1은 이러한 VSSP법으로 파이버를 얻는 과정을 나타낸 그림이다.

Smart materials社는 독일의 Fraunhofer Research Facility에서 발명한 Soft-몰드법을 이용하여 파이버

를 제조하였다 [2]. 이 방법은 최종 원하는 구조물의 양각 형태로부터 Soft-몰드를 복사하고, 이 몰드에 압전 세라믹 물질을 채운 후 소결하여 최종 파이버를 얻게 된다. Soft-몰드법은 전형적인 Die-and-fill, 인젝션 몰딩, 또는 Dicing법에 비해 많은 장점을 갖고 있다. 첫째로 몰드를 재사용할 수 있어서 하나의 Soft-몰드로부터 수천 개의 파이버를 패턴 할 수 있는 장점이 있다. 두 번째로 몰드 자체가 제조하기 쉽고 비싼 커팅 장비에 비하여 비용이 적게 들기 때문에 비용 효율적인 효과가 있다. 마지막으로 Soft-몰드법은 다양한 형태, 크기, 피치의 파이버를 제조



(a)



(b)

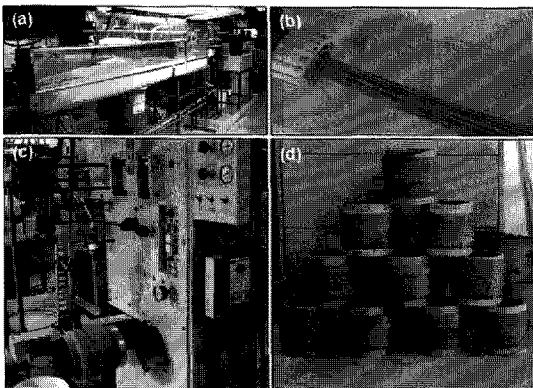


그림 1. VSSP공정 : (a) 일반적인 Spinning 기계, (b) Spinneret을 통한 파이버 형성, (c) 파이버를 감는 과정, (d) Green 파이버를 감은 후 모습.

그림 2. Smart materials社에서 제조한 파이버 (a) Rectangular 형태 (b) Round 형태.

할 수 있다는 장점을 갖고 있어서 적은 비용으로 고품질을 유지하면서 많은 부피의 파이버를 생산할 수 있다. 그림 2는 Smart materials社에서 Soft-몰드법으로 제조한 Fiber의 형상을 나타낸 그림이다. 그림 2(a)는 80 μm 의 폭과 120 μm 의 공간을 갖는 Rectangular 형태의 파이버이고 그림 2(b)는 70 μm 직경에 50 μm 공간을 갖는 Round 형태의 파이버이다.

3. Flexible 복합 소재

3.1 Active Fiber Composite (AFC)

Hagood (1995) 등의 연구자들은 d_{33} 에너지 변환 효과를 확대하기 위해 현재 SAW 기술에 많이 사용되고 있는 IDT (Inter-digital electrode)를 적용한 Actuator를 연구하기 시작하였다 [3]. 과도한 변형으로 Brittle한 에너지 변환체가 부서지는 단점도 있지만 이 IDT 전극 형태의 개발이 Actuator 개발에 큰 기여를 하게 되었다. 그림 3은 IDT 전극을 이용한 Actuator의 모식도를 나타내었다.

이와 비슷한 시기에 MIT에서 예폭시 물질에 에너지 변환 Fiber를 삽입하는 Piezoceramic Fiber Composite (PFC)를 개발하였다. IDT를 사용하지 않은 형태로서 전계를 에너지 변환 소재의 상하에 인가하여 두께 방향으로 변형이 발생하는 33 진동 모드를 사용하면 31 진동 모드보다 더 큰 변형을 얻게

된다. 그렇지만 Piezoceramic과 Epoxy 사이의 큰 Dielectric mismatch로 인해 실제 Fiber에 인가되는 전계의 크기는 감소하여 PVDF 정도의 에너지 변환 특성을 얻었다. 1997년 PFC에 IDT 전극 기술이 결합된 Interdigitated electrode Piezoelectric Fiber Composite (IDEPFC)를 Bent와 Hagood가 개발함으로써 PFC보다 변형력이 증가하고 내구성이 향상된 복합 소재를 얻게 되었다 [4]. 즉 IDEPFCs 구조를 채용함으로써 Free-strain constant는 PFC보다 5배 증가하는 특성 향상을 나타냈고, Transverse 방향보다는 최대 Free-strain 출력이 3배 향상되게 되었다. Bent는 박사학위 논문에서 이 IDEPFC를 “Active Fiber composite (AFC)”로 사용하였다. 그림 4는 AFC의 모식도를 나타내었다.

AFC와 관련하여 미국에서는 Active Control eXperts, CeraNova Corporation, Continuum Control Corporation, MIT의 Active Materials and Structures Lab. 등이 AFC Consortium (AFCC)을 구성하여 AFC를 대량생산하여 상용화하기 위한 프로젝트를 수행하였다 [5]. 이 프로젝트에 파이버 생산 업체로 참여한 CeraNova에서는 PZT-5A 분말을 Extrusion법을 이용하여 Mono-filament 파이버로 연속적으로 뽑아내어 1주일에 약 250,000개의 PZT 파이버를 제조할 수 있는 기술을 확보하였다. Actuation 능력을 키우기 위하여 파이버의 직경을 변화하면서 테스트한 결과 약 130 μm 의 직경을 갖는

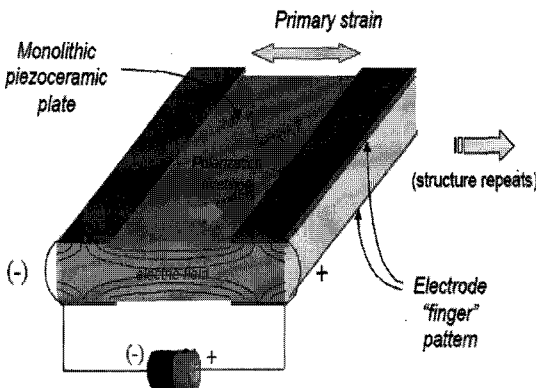


그림 3. Interdigitated 전극을 이용한 액추에이터.

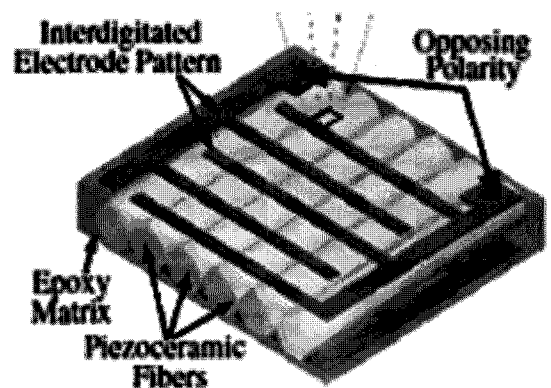


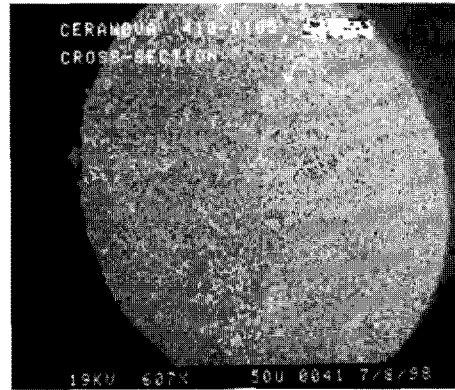
그림 4. Active Fiber Composite 구조.

파이버가 적당한 것으로 나타났다. Extrusion법으로 파이버 제조 시 세라믹 분말과 바인더의 혼합 비율, 유동학 (Rheology), 균질성 (Homogeneity), 장비의 청결도 등이 성공적인 파이버 제조를 위한 중요한 공정 변수가 된다. 파이버의 직경을 제어하기 위해서는 Extrusion 장비의 Screw rotator의 속도와 공정 온도가 중요한 변수가 되고 실험 오차는 $\pm 6\%$ 정도로 보고되었다. 또한 Extrusion 공정을 마친 후 연속적으로 Draw down 프로세스를 거치게 되면 파이버의 직경을 추가적으로 줄일 수 있게 된다. Extrusion 공정을 거쳐 생성된 그린 파이버는 일정한 길이로 Spooling되고 PbO의 휘발을 방지하기 위한 분위기 소결을 통하여 최종적인 파이버가 제조되게 된다. 그림 5는 PZT-5A를 이용하여 제조된 파이버의 단면과 표면 이미지를 나타내었다.

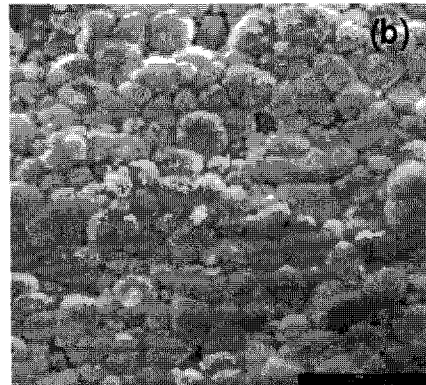
제조한 파이버를 열경화성 내지 열가소성 폴리머 매트릭스에 Embedding한 후 폴리이미드 보호층 사이에 샌드위치하고 IDT 전극 패턴을 형성하면 AFC가 완성되게 된다. 이 때 시뮬레이션을 통한 최적의 IDT 전극 패턴 간격 및 폭을 정해야만 Dead zone의 비율을 낮출 수 있고, 그로 인하여 폴링 및 액추에이션 성능을 향상시킬 수 있다. 그림 6에 보이듯이 PZT AFC는 5 cm \times 15 cm 규격이고 3년간의 AFCC 프로그램 통하여 1년에 약 20,000팩을 생산할 수 있는 기반을 구축하여 상용화에 근접했다고 보고되었다.

3.2 Macro Fiber Composite (MFC)

AFC는 등근 Fiber를 사용하기 때문에 전극의 접촉 면적이 감소하여 전계를 PZT fiber에 충분히 전달하지 못하는 단점이 있고 또한, Brittle한 Fiber를 수작업으로 정렬한 후 에폭시를 주입하기 때문에 주입시 발생하는 Bubble로 인하여 전기적 결함이 자주 발생하는 단점이 있다. 이러한 AFC 단점을 보완하기 위하여 Macro fiber Composite(MFC)를 NASA의 Langley Research Center에서 2000년에 개발하였다. MFC는 평판형 액추에이터로 Polymer matrix에 단방향 압전 세라믹 Fiber (PZT-5A)를 가공하여 삽입한 것으로 에칭된 IDT pattern을 갖는 Copper-clad Kapton 필름을 샌드위치 형태로 부착한 구조를 갖는다(그림 7).



(a)



(b)

그림 5. PZT-5A로 제조한 파이버의 SEM (a) 표면 및 (b) 단면 이미지.

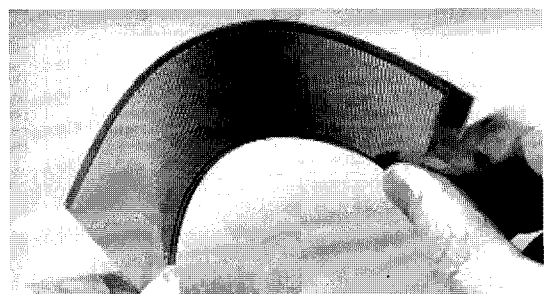


그림 6. Active Fiber Composite.

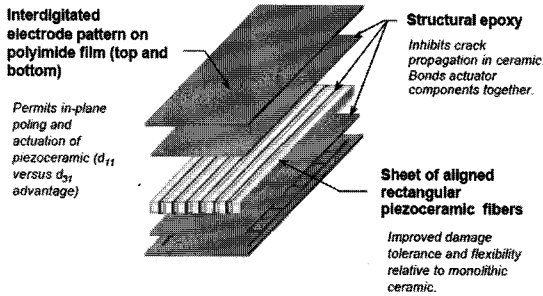
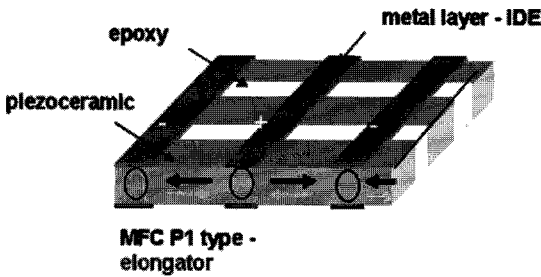
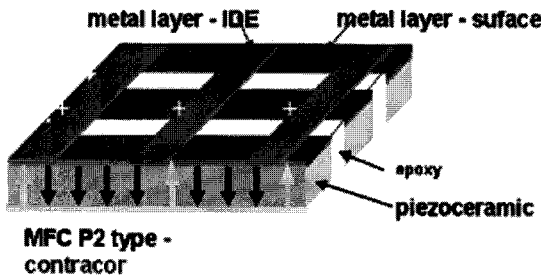


그림 7. Macro fiber composite의 구성.



(a)



(b)

그림 8. 두 개의 다른 모드를 이용한 MFC (1) d_{33} -mode (2) d_{31} -mode.

MFC를 제조하기 위한 파이버는 컴퓨터로 셋업이 된 Dicing saw를 이용하여 저가의 압전 세라믹 Wafer를 Machining하여 제조되게 된다. MFC는 그림 8과 같이 두 개의 서로 다른 전극 패터닝을 통하여 d_{33} -mode 또는 d_{31} -mode로 작동할 수 있게 된다. d_{33} -mode의 경우 높은 에너지 변환율을 나타내지만 전류 발생량이 d_{31} -mode에 비해 떨어지게 되어 에너지 하베스팅 측면에서는 d_{31} -mode에 비해 적당하지 않다. 발생하는 전하량은 변위 주파수에 비례하게 되고, 낮은 변위와 높은 주파수 (>20 Hz)가 연속적인 전하 생성에 적합하다.

4. 압전 에너지 하베스팅 소자

발전시스템을 구현하는 가장 쉬운 방법은 주변에서 쉽게 얻을 수 있는 각종 기계적 에너지 (Walking, Wind, Automobiles etc.)로부터 전기 에너지를 얻는 것인데, 에너지 변환 소재는 이러한 분야에서 기계 에너지를 직접 전기 에너지로 변환시키므로 별도의 변환 장치가 필요 없이 소형 경량화에 적합한 최적의 발전시스템이다. USN과 로봇 분야에서는 각종 센서나 트랜스듀서의 구동 에너지를 공급하는 배터리의 소형 경량화에 대한 필요성이 증대되고 있다. 또한 교환, 충전의 불편함이 없도록 동작 중에 자체 발전하는 시스템 (On-site generator system)을 만들어 반영구적 에너지를 구현하고자 하는 연구 개발이 현재 진행 중이다. 그림 9는 이러한 압전 에너지 하베스팅을 이용한 발전 시스템을 나타내는 회로도이다.

2008년 2월 9일자 사이언스 매거진에 캐나다 사이먼 프레이저 대학교 연구팀이 개발한 사람이 걸을 때 발생하는 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 신개념의 충전 장치인 'Knee brace'가 소개되었다 [6]. 무릎에 이 충전 장치를 부착하고 걷기만 하면 휴대폰, 노트북 컴퓨터 등을 구동할 수 있는 전기를 '생산'할 수 있다고 소개되었다. 이 충전 장치를 부착하고 1분만 걸으면 13W의 전력을 생산할 수 있어 휴대폰을 30분 사용할 수 있는 분량의 전기를 충전할 수 있다고 보고되었다. 이러한 신개념 충전기

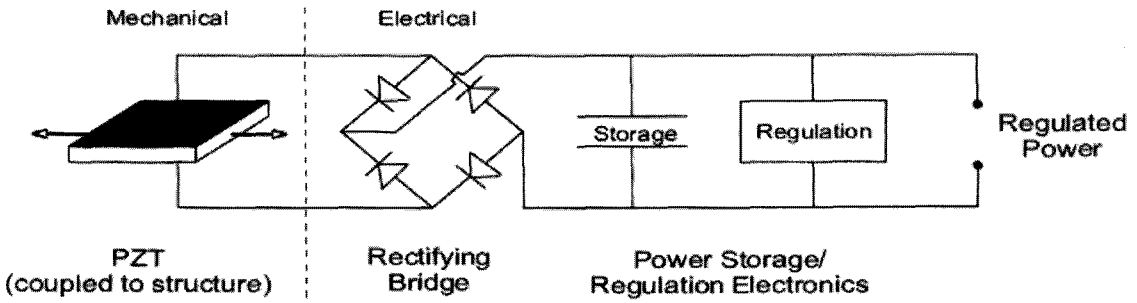
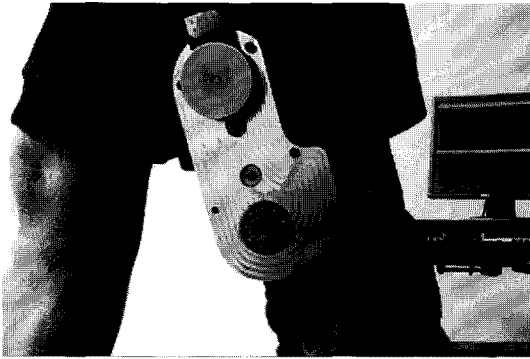
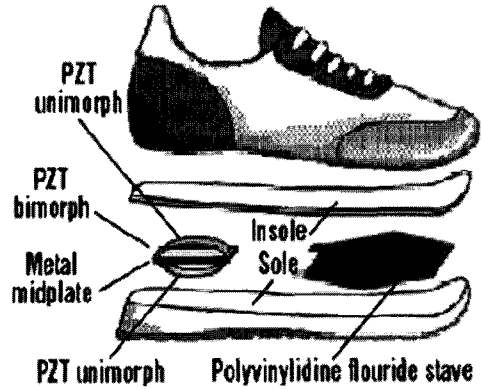


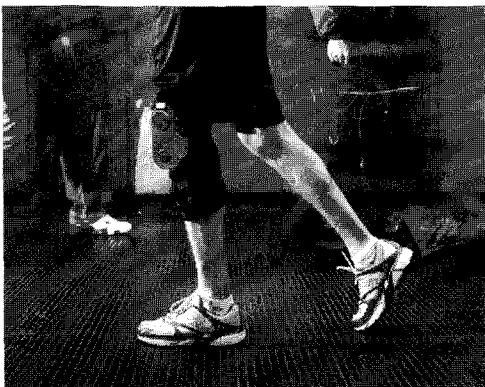
그림 9. 압전 에너지 하베스팅을 이용한 발전 시스템.



(a)

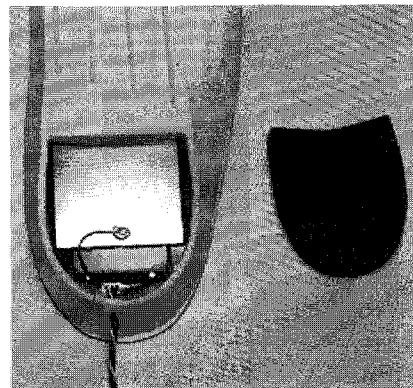


(a)



(b)

그림 10. 걸어 다니는 운동에너지를 이용한 신체 충전 장치.



(b)

그림 11. 에너지 변환 발전 시스템.

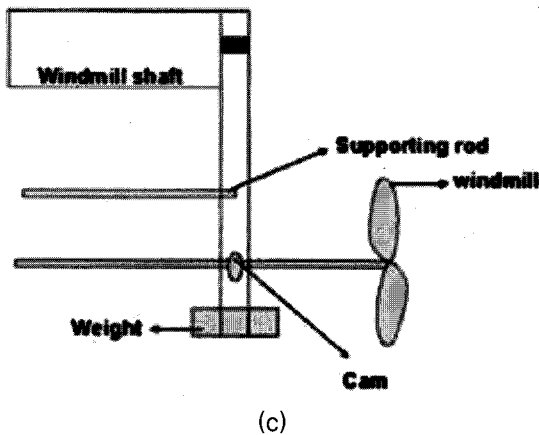
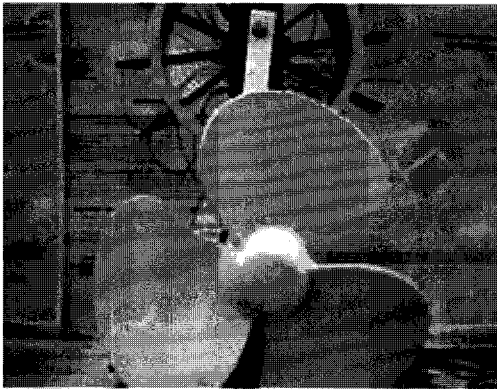
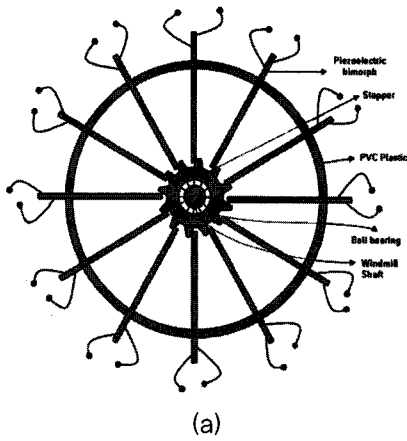


그림 12. 압전 windmill의 개략도 .

는 하이브리드 자동차 등에 사용되는 충전 장치와 흡사한 구조로, 근육 및 뼈로 구성된 인체 자체가 '살아있는 발전기'의 역할을 한다고 보고하였다. 그림 10은 걸어 다니는 운동 에너지를 이용한 신체충전장치를 나타낸 그림이다.

에너지 변환체를 이용한 발전시스템의 예로 NASA (MIT에 연구용역)에서 개발 중인 '에너지 변환 발전 시스템' 이 있다 [7]. 신발의 뒤쪽에는 PZT unimorph와 Bimorph type의 액추에이터를 장착하고, 앞쪽에는 Polyvinylidene flouride (PVDF) stave를 장착하여 에너지 발전을 하도록 한 시스템으로 표준 걸음 시 앞쪽에서 1.3 mW, 뒤쪽에서 8.4 mW의 자체 전력을 발생시켰다. 이러한 개념의 에너지 발전 시스템은 전원이 없는 곳에서도 자체적으로 전원 공급을 가능하게 하여 적지에서 군사들을 수개월 동안 활동할 수 있도록 구현한 시스템이다.

미국, 영국, 프랑스, 일본 등지에서는 다양한 형태의 에너지 수집에 대한 연구가 이루어지고 있다. 미국의 경우 2006년도에 연간 10억 달러 이상의 연구비가 압전 에너지 하베스팅 분야에 지원되고 있다. 특히 Virginia Tech.의 Shashank Priya 교수팀에서 바람을 이용한 에너지 변환 방식의 압전 Windmill에 대해 많은 연구를 하고 있다 (그림 12). 압전 Windmill은 10개의 Bimorph type의 에너지 변환기가 장착이 되어 있고 각각의 Bimorph는 $60 \times 20 \times 0.6 \text{ mm}^3$ 의 규격을 갖고 있는데 이때의 공진 주파수는 65 Hz이고 유전상수는 170 nF이다. 영국의 경우 Southhamton 대학을 중심으로 9개 기관이 컴소시엄 형태로 "Piezoelectric and Electromagnetic Energy Harvesting"에 관한 VIBES (Vibration Energy Scavenging) 프로젝트를 수행 중에 있다.

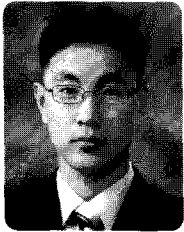
참고 문헌

[1] R. Cass et al., "Innovative products and processes based on piezoelectric ceramic fibers", ICC Symposium Manuscript, July, 2006.
 [2] <http://www.smart-material.com>
 [3] N. W. Hagood IV et al., "Modeling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor," IEEE Trans.

Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., Vol. 42, No. 2, p. 210-224, 1995.

- [4] A. A. Bent et al., "Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrodes", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, No. 11, p 903-919, 1997.
- [5] H. B. Strock et al., "Active PZT fibers, a commercial production process", Part of the SPIE Conference on Smart Materials Technologies, March 1999.
- [6] J. M Donelan et al., "Biomechanical energy harvesting: generating electricity during human walking with minimal user effort", Science Vol. 319, (5864) p. 807-810, 2008.
- [7] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics", IEEE Macro, Vol. 16, p. 835, 2005.

저|자|약|력|



성 명 : 한승호

- ◆ 학 력
 - 2004년 고려대학교 공과대학 재료금속공학부 공학사
 - 2006년 KAIST 신소재공학과 공학석사
 - 2010년 KAIST 신소재공학과 공학박사

- ◆ 경 력
 - 2009년 - 현재

전자부품연구원 선임연구원



성 명 : 강형원

- ◆ 학 력
 - 1997년 연세대학교 공과대학 전기공학과 공학사
 - 1999년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사
 - 현재 연세대학교 대학원 전기공학과 박사과정

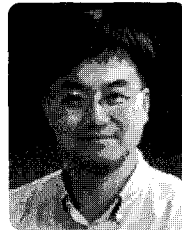
- ◆ 경 력
 - 1999년 - 2002년 삼화콘덴서공업(주) 연구원
 - 2002년 - 2004년 대우일렉트로닉스 주임연구원
 - 2004년 - 현재 전자부품연구원 선임연구원



성 명 : 이우성

- ◆ 학 력
 - 1990년 고려대학교 공과대학 금속공학과 공학사
 - 1992년 고려대학교 대학원 금속공학과 공학석사
 - 2008년 고려대학교 대학원 금속공학과 공학박사

- ◆ 경 력
 - 1992년 - 1997년 (주)유유 부설연구소 과장
 - 1997년 - 현재 전자부품연구원 책임연구원



성 명 : 박성대

- ◆ 학 력
 - 1993년 서울대학교 공과대학 무기재료공학과 공학사
 - 1995년 서울대학교 대학원 무기재료공학과 공학석사
 - 현재 한양대학교 대학원 응용화학과 박사과정

- ◆ 경 력
 - 1995년 - 1997년 쌍용양회 중앙연구소 연구원
 - 1997년 - 1999년 대우 고등기술연구원 주임연구원
 - 1999년 - 2000년 대우전자 주임연구원
 - 2001년 - 현재 전자부품연구원 책임연구원



성 명 : 백동수

- ◆ 학 력
 - 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학박사
 - 1995년 Pennsylvania State University 박사후 연구원

- ◆ 경 력
 - 2000년 (주)이투에스 대표이사
 - 2007년 - 현재 고려대학교 신소재공학과 연구교수