

정순중 책임연구원 (한국전기연구원 전지안전연구센터)

## 1. 서론

미래 사회는 친환경에너지를 기반으로 하여 에너지와 정보가 통합되고 이들에 병행한 바이오기술의 융합됨으로써 그 효율적 가치가 극대화되는 융합 형태의 사이언스 시대가 될 것으로 예측되고 있다. 즉, 단기적으로는 친환경 및 에너지 효율향상의 가치가 경제적으로도 극대화되는 것이 기본으로 한 에너지, 환경, 전력, 통신, 정보, 보안 및 바이오 기술이 일체화된 퓨전기술로 진화될 것이다. 이러한 미래 에너지산업 변화에 대응하기 위해서는 대용량 녹색 에너지원의 확보뿐만 아니라 미활용 에너지원의 재생과 그 활용에 대한 기술개발의 필요성이 매우 크며, 최근 빠르게 발전하고 있는 나노 기술과 첨단 전기전자기술은 과거에는 활용할 수 없었던 다양한 물리적, 화학적 미소 에너지를 활용할 수 있는 새로운 기술적 바탕을 제공하고 있어 그 활용가능성이 매우 높아지고 있다. 특히 미국 등의 선진국에서는 미활용 소에너지를 적극적으로 수집 (Harvesting or scavenging) 활용하려는 마이크로파워 (또는 나노파워) 기술과 파워 매니징 기술이 융합된 미래 신에너지 기술개발에 대한 연구가 크게 활발해지고 있다. 이러한 빛, 열, 진동 (전파, 소리, 충격) 및 누설 (표유) 전류 등과 같은 미소량의 물리적, 화학적, 전기적 미활용 에너지를 이용 가능한 전기 또는 열 에너지 등으로 수집 (Harvesting)하여 재활용하는 기술을 에너지 하베스팅 기술이라고 명명되고 있다. 이러한

하베스팅 기술의 특징으로는 미활용 미소 에너지를 사용가능한 에너지 형태나 규모로 ① 변환, ② 병합, ③ 저장, ④ 마이크로 전력설계 기술인 통합적으로 시너지화하여야 하는 융합기술이다.

특히, 나노 및 마이크로 기반의 에너지변환 및 저장용 신소재기술, 수집에너지의 고효율 재생을 위한 저손실 전력설계 등의 나노기반 기술이 총체적으로 적용되는 미래기술군으로 각광을 받고 있다. 핵심 기술인 재료기술과 마이크로 파워매니징 기술이 융합된 차세대 에너지기술이며 국가 반도체기술의 시너지를 극대화할 수 있는 고체변환형 친환경 에너지 기술이다. 에너지를 수집하는 주요 기술로는 열전변환기술 (Thermoelectric energy harvesting), 압전변환기술 (Piezoelectric energy harvesting), 생체역학 변환기술 (Biomechanical harvesting), 전자기에너지 변환기술 (Electromagnetic energy harvesting), 정전기에너지변환기술 (Electrostatic energy harvesting) 이 있다. 본 기술 소개에서는 여러 변환 기술 중에서

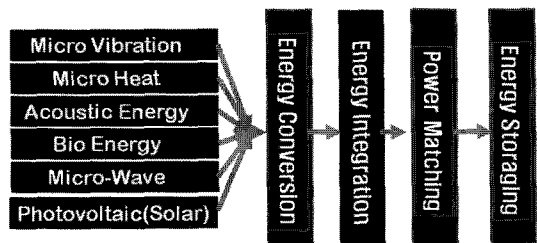


그림 1. 에너지 하베스팅 소자 개념도.

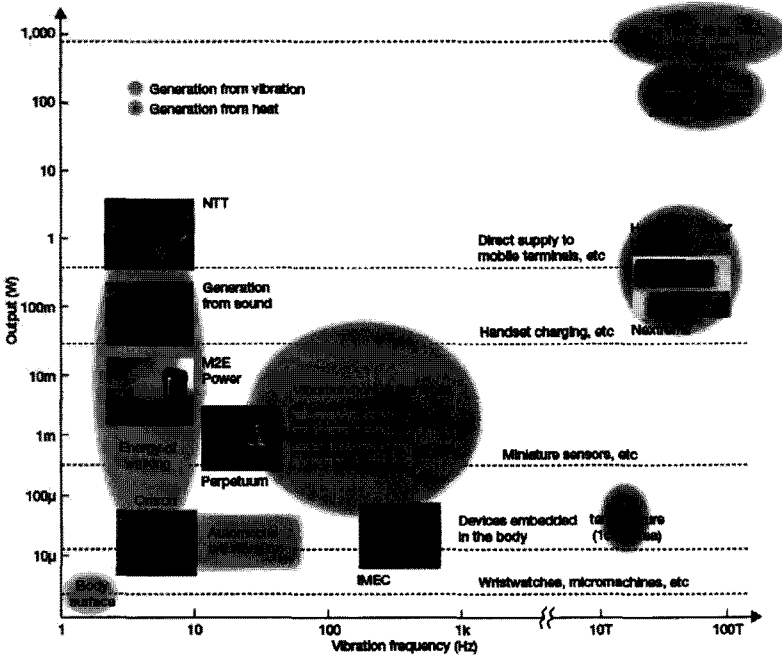


그림 2. 하베스팅 소자 크기 및 용도 [1].

압전 변환 기술을 이용한 하베스팅 기술을 소개한다. 압전 에너지 하베스팅 기술은 주변의 소음과 진동, 구부러짐과 같은 불연속적인 힘을 전기로 변환해 저장하는 친환경 기술이며 현재 다양한 방향으로 연구되고 있다. 이러한 기술의 용도로는 휴대용 모바일기기의 전원, 소형진단 및 센싱기기용 자가발전원, USN센서노드용 전원, 인체 에너지 활용 발전모듈, 입는 컴퓨터의 보조전원 등 소형 전자 소자의 자가 전원용으로 사용될 수 있다.

자연 속에 그냥 버려지고 있는 에너지를 수확하여 활용하는 압전 에너지 하베스팅 분야는 MIT의 Technology Review를 통해 2009년 10대 유망기술에 선정되기도 하였다 [2]. 특히 앞으로 열릴 유비쿼터스 시대에 있어 센서 네트워크를 구동할 전원 공급장치로 압전 에너지 하베스팅 기술이 가장 가능성 있는 대안으로 제시되고 있다 [3].

현재 많은 형태의 압전 하베스팅 기술이 연구 개발되고 있으므로 에너지 크기나 운동 방식으로 구분하기 어렵다. 이러한 압전 변환 기술 별로 에너지원

및 용도 별로 대별하여 보면, (1) 나노 기술을 이용한 초소형 부품용 자가 전원으로 에너지 하베스팅 기술 활용, (2) 개인 혹은 자동차 등의 이동기기에 부착하여 기기에서의 기계적인 진동으로 부터 에너지를 획득하고 보조 전원으로 활용, (3) 지하철 및 대형 다리 등에 대규모 압전 소자를 설치하고 주위 환경으로 부터 에너지를 획득하는 대형 에너지 하베스팅 획득 기술로 나눌 수 있다. 이에 본고에서는 이러한 용도에 적합한 나노선 압전 소자, 세라믹-고분자 복합 소재, 매크로 세라믹 및 단결정 압전 소자 하베스팅 기술로

나누어서 설명한다.

### 1.1 나노선 기술

최근에 나노선 형태의 압전 물질 제작이 가능해지면서 압전 반도체 커플링 효과를 이용하는 다양한 기관 상에서 성장제어된 나노선 발전소자 개발되었다. 2004년도 최초로 미국 조지아 공대 Zhong Lin Wang 교수 그룹에서 ZnO 나노선을 이용한 성공적인 나노발전소자의 가능성을 보여주었으며, 최근에는 나노선 어레이를 통한 집적화 기술의 향상 및 이에 따른 전력출력 특성 향상이 가능해지고 있다 [4]. 나노 전력 소자의 기본 원리는 (그림 3) 외부의 진동이나 압력으로 인하여 ZnO 나노선이 휘어짐 변형이 발생될 때 나노선 내부에서 발생하는 전위 에너지 (Potential energy) 구배가 나노선 표면에 발생된다. 전극의 나노선의 Schottky 접합 시 전극의 위치에 따라 바이어스(Bias)의 방향이 바뀌게 된다. 이 때 정방향 바이어스 (Forward bias) 발생 시 압전효과에 의한 발전 현상이 발생하게 된다. 또한, 나노선을 이용

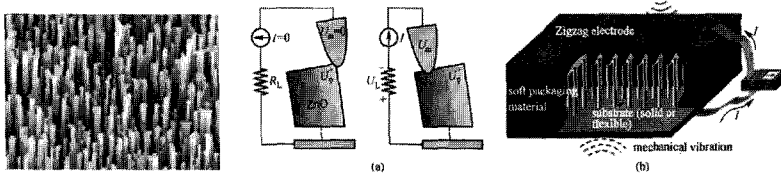


그림 3. 나노선에서의 전력 발생 원리.

나노선 발전 소자 실용화를 위한 데모 연구가 성공을 거듭으로써 나노선 기반 발전소자의 상용화에 대한 기대감이 높아지고 있다 [6~8].

그러나 반도체 산화물인 ZnO (압전전하상수  $d \sim 12 \text{ pC/N}$ )의 압전 특성은 매우 낮다는 단점 때문에 고출력을 위한 압전 나노선 에너지 하베스팅을 위해서는 보다 높은 압전특성을 가지는 나노선 구조의 새로운 압전소재의 개발의 필요성이 제기되었다. 수년 전부터 미국에서는  $\text{BaTiO}_3$  나노선 소재의 에너지 하베스팅 기술 개발 연구가 시작되었으며  $\text{Bi}$ ,  $(\text{Na,K})\text{TiO}_3$ , PVDF 압전소재를 비롯한 다양한 압전 나노선 기반 소재개발에 관한 연구가 진행 중 이다 [9]. 미국의 일리노이 대학의 Ming-

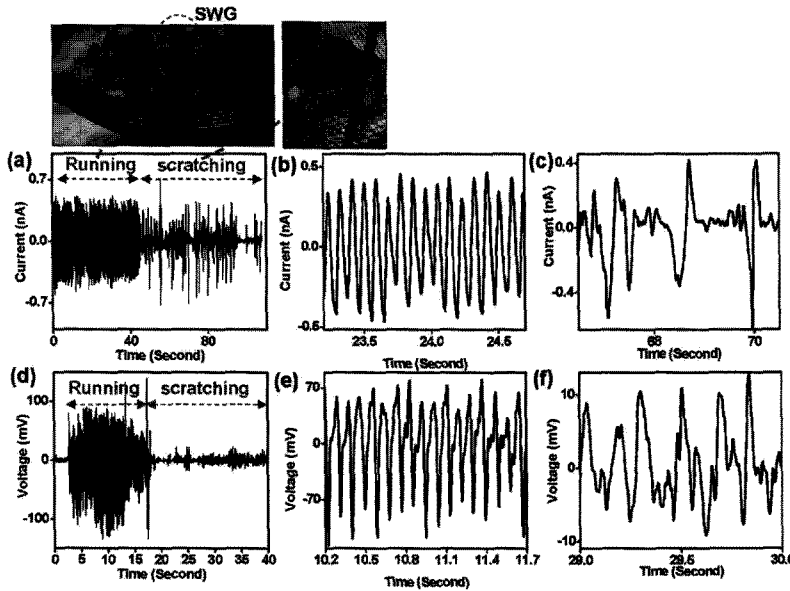


그림 4. 햄스터 근육의 운동에서 유도된 나노선 발전기.

한 전력 발전소자를 제작하기 위한 전극 접합기술, 고출력을 위한 나노선 집적화 기술, 구조적 안정성 확보를 위한 패키징 기술 등 관련된 여러 주변 요소 기술의 개발이 이루어지고 있다.

ZnO 나노선 기반 나노발전기를 햄스터의 근육에 접합시켜 쳇바퀴에서 운동하는 햄스터의 근육이 수축과 이완을 반복하면서 변형되는 ZnO 나노선으로부터 미세한 전류가 발생함을 실험적으로 증명하였다 [5](그림 4). 압전 나노선과 같은 하베스팅 재료의 효율과 수명이 꾸준히 개선되어 왔지만 단일 나노선 소재에서 발생하는 전기적 출력 특성은 너무 적어서 실용화하기 어렵기 때문에 나노선 어레이의 집적화 연구를 통해 출력 효율의 개선을 위한 연구가 수행되어 왔으며 Wang 그룹에서 UV 센서, pH 센서의

Feng Yu 교수팀은  $\text{BaTiO}_3$  나노와이어를 이용하여 나노스케일의 센서에 전원 공급을 위한 압전 나노발전기를 제작하여 출력특성을 평가하였으며 [6], 미국 캘리포니아 대학 버클리 대학의 Liwei Li 교수팀은 PVDF를 이용하여 각종 의류나 직류에 포함될 수 있는 섬유 나노발전기를 생산했다. 이들 나노크기의 발전기들은 미활용되고 있는 신체의 미세한 움직임만으로도 간단한 전자기기를 구동할 수 있으며 이들 나노 섬유들은 유기물질로부터 제작이 가능하여 낮은 단가로 제작이 가능하고 높은 유연성을 가지고 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다 [7]. 하지만 단일 축 우선 배향 특성의 나노선 소재의 합성, 기관 상 나노선 어레이 기술, 후 처리 제작 등 여러 난제가 있으나 새로운 제작 기술을 통해 기술적

진전이 이루어지고 있다.

## 1.2 복합 소재 소자 기술

에너지 하베스팅 소재로 세라믹이 주로 사용되어 왔으나 세라믹의 약한 강도, 곡선 형상 구현에 어려움이 있으므로 이를 극복하기 위하여 최근 세라믹 에너지 하베스팅용 압전 세라믹에 유연성(Flexibility)을 부여하는 연구가 진행되고 있다. 가장 일반적인 형태는 세라믹 파이버를 고분자 기지에 삽입하는 형상의 복합소재이며, 이러한 소재는 세라믹의 약한 강도, 곡선 형상 구현의 어려움 등의 단점을 해결할 수 있는 물질이다. 이러한 복합소재 개발은 Advanced Ceramics (ACI)社와 Smart Materials社를 중심으로 압전 특성이 뛰어난 PZT 소재를 이용하여 기술 개발이 이루어졌으며 압전 센서 및 액추에이터로 사용되어 왔다.

ACI社에서는 Viscous suspension spinning

process (VSSP)라는 방법을 고안하여 13~250  $\mu\text{m}$ 의 다양한 직경을 갖는 파이버를 제조하였다 [10]. VSSP 법은 레이온 파이버 기술을 이용하여 모든 세라믹 물질을 파이버화할 수 있게 하는 방법으로 Viscose라고 불리는 점성의 레이온 Precursor를 크산토겐산염화(Xanthation)를 통하여 셀 벽을 허물고, 제조하고자 하는 세라믹 물질의 슬러리와 혼합하여 용액을 제조한다. 이러한 용액을 Spinneret이

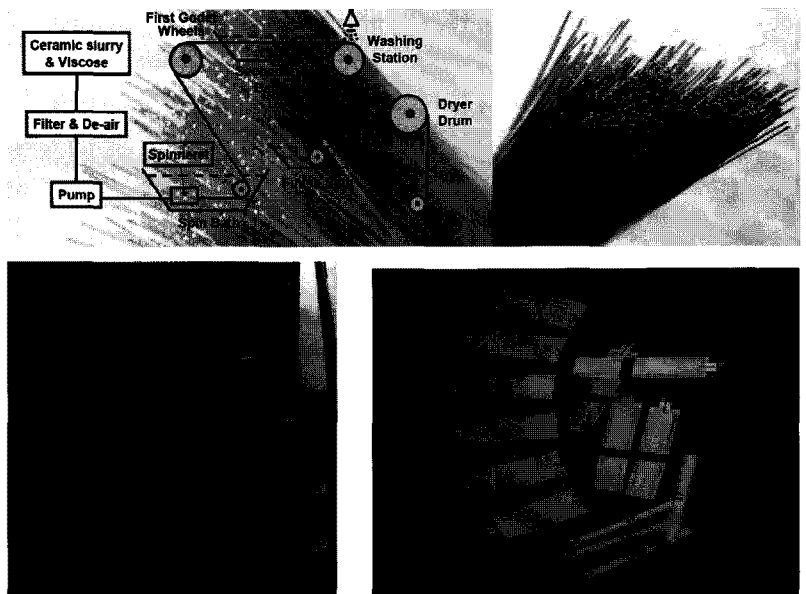


그림 5. VSSP법을 이용한 파이버제조 공정, 제조된 파이버 및 제품.

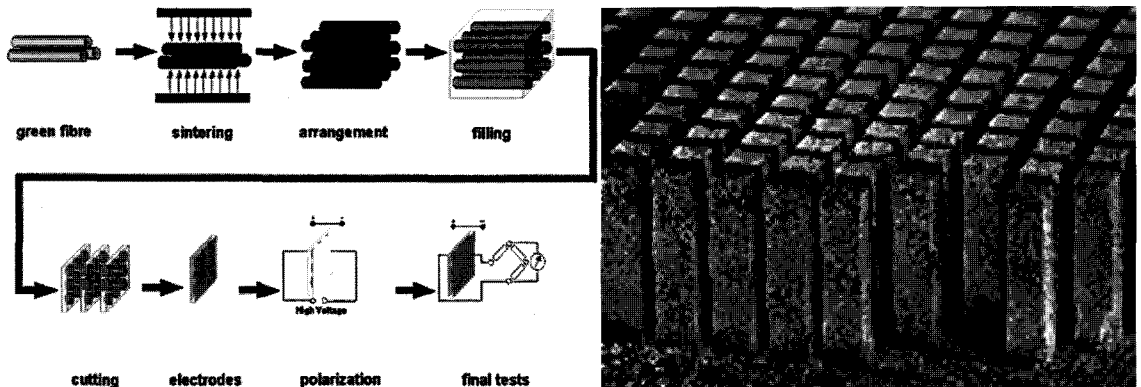


그림 6. 소프트 몰드법을 이용한 압전 복합소재 제작 공정 모식도 및 사용된 직사각형 형상의 압전 세라믹 파이버 [11].

라는 수천 개의 마이크로-홀이 있는 백 금 씩음고리 통을 통하여 Spinning하게 되고 산-염기 반응을 통하여 균한 후 소결하여 최종 파이버를 얻게 된다(그림 5).

Smart materials는 독일의 Fraunhofer Research Facility에서 발명한 소프트-몰드법을 이용하여 파이버를 제조하였다[11]. 이 방법은 최종 원하는 구조물의 양각 형태로부터 Soft-몰드를 복사하고, 이 몰드에 압전 세라믹 물질을 채운 후 소결하여 최종 파이버를 얻게 된다(그림 6: 제작 공정 및 80 μm 직각 형태의 파이버).

MIT에서 예폭시 물질에 에너지 변환 파이버를 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 파이버에 인가되는 전계의 크기는 감소하여 PVDF 정도의 에너지 변환 특성을 얻었다. 1997년 PFC에 IDT 전극 기술이 결합된 Interdigitated electrode Piezoelectric 파이버

Composite (IDEPFC)를 Bent와 Hagood가 개발함으로써 PFC보다 변형력이 증가하고 내구성이 향상된 복합 소재를 얻게 되었다 [12]. 즉 IDEPFCs 구조를 채용함으로써 Free-strain constant는 PFC보다 5배 증가하는 특성 향상을 나타냈고, Transverse 방향보다는 최대 Free-strain 출력이 3배 향상되게 되었다.

매크로 크기의 파이버를 이용한 복합소재인 Macro fiber Composite(MFC)가 NASA의 Langely Research Center에서 개발되었다 [13]. MFC는 평판형 액추에이터로 Polymer matrix에 단방향 압전 세라믹 파이버를 가공하여 삽입한 것으로 예칭된 IDT pattern을 갖는 Copper-clad Kapton 필름을 샌드위치 형태로 부착한 구조를 갖는다(그림 7). MFC를 제조하기 위한 파이버는 컴퓨터로 셋업이 된 Dicing saw를 이용하여 저가의 압전 세라믹 Wafer를 Machining하여 제조되게 된다.

하베스팅 소자 개발 예로 사이언스 매거진에 캐나다 사이먼 프레이저 대학교 연구팀이 개발한 사람이 걸어다닐 때 발생하는 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 신개념의 충전 장치인 'Knee brace'가 소개되었다 [14]. 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 13 W의 전력을 생산할 수 있어 휴대폰을 30분 사용할 수 있는 분량의 전기를 충전할 수 있다고 보고되었다. 이러한 신개념 충전기는 하이브리드 자동차 등에 사용되는 충전 장치와 흡사한 구조로, 근육 및 뼈로 구성된 인체 자체가 '살아있는 발전기'의 역할을 한다고 보고하였다.

다른 예로는 에너지 변환체를 이용한 발전시스템의 예로 NASA (MIT에

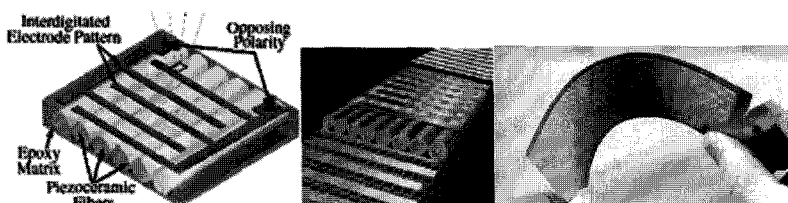


그림 7. 압전 세라믹 파이버로 제작된 Macro fiber Composite의 내부 구조 및 형상.

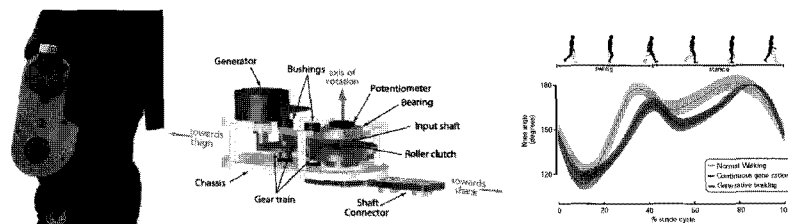
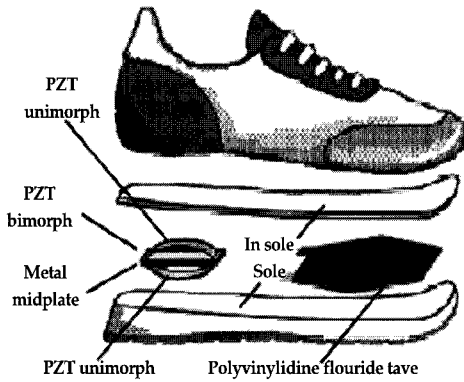


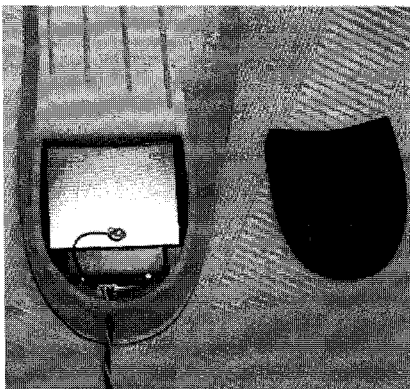
그림 8. Biomechanical energy harvester [14].

연구용역)에서 개발 중인 ‘에너지 변환 발전 시스템’이 [15] 있으며, 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 전원공급을 가능하게 하여 적지에서 군사들을 수개월 동안 활동할 수 있도록 구현되었다.

군사용 이동체에 적용한 예로는 블랙호크 헬리콥터 회전 로터 하단에 연결된 링크 부위에 연결된



(a)

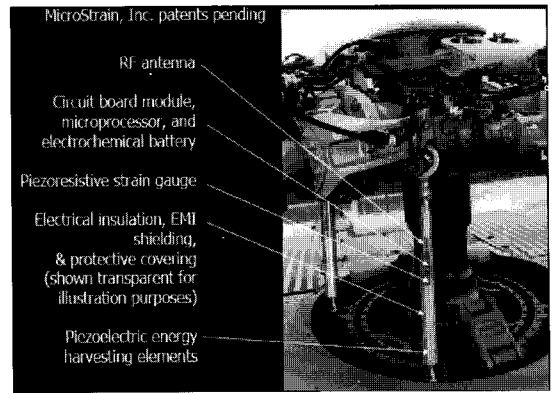


(b)

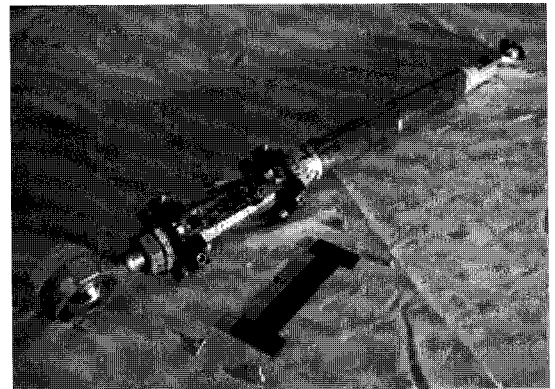
그림 9. 신발 삽입형 압전 세라믹 및 고분자 하베스팅 소자.

Microstrain社의 wireless sensor이다. 이러한 센서는 헬기로부터 부위의 피로도를 모니터링하는 역할을 수행한다. 링크 부위에서 발생하는 진동에 의한 압전 복합소재에서의 출력으로부터 최대 400  $\mu$ W의 전기 에너지를 공급 받는다 [16].

또한, Virginia Tech.의 Shashank Priya 교수팀에서 바람을 이용한 에너지 변환 방식의 압전 Windmill에 대한 개발을 진행 중이다. 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 주파수



(a)



(b)

그림 10. 블랙호크 헬리콥터 자가 성능 분석용 Wireless sensor 및 압전 복합소재 하베스팅 소자 [16].

는 65 Hz이고 유전상수는 170 nF이다. 영국의 경우 Southamton 대학을 중심으로 9개 기관이 컴소시엄 형태로 "Piezoelectric and Electromagnetic

Energy Harvesting"에 관한 VIBES (Vibration Energy Scavenging) 프로젝트를 수행 중에 있다.

### 1.3 매크로 소자기술

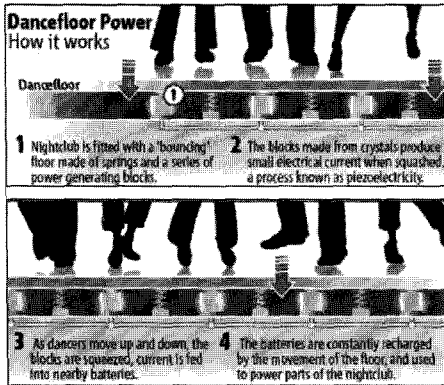
기존의 압전 세라믹을 이용한 에너지 하베스팅 기술에서는 소자당 획득 에너지는 매우 작다. 이러한 적은 에너지를 이용하기 위하여 수백개 이상 배열을 하여 대형 에너지를 획득하는 응용 기술이 개발되고 있다.

유럽의 친환경 나이트 클럽, 일본의 에너지 하베스팅 모듈 설치 다리, 영국의 군사 장비, 미국의 압전 에너지 하베스팅 소자 등이 세계적인 예이다.

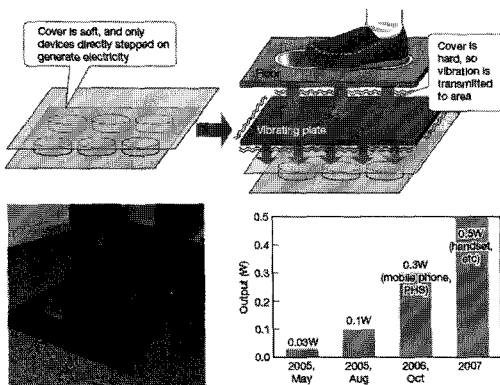
친환경 나이트클럽으로 혁신을 시도하며 에너지를 살뜰히 모아 사용하고 있는 곳으로는 영국의 친환경 클럽 수리야 (Surya)와 네덜란드 클럽 와트 (WATT)가 있다 [17]. 화려한 조명과 음악 소리가 가득한 나이트클럽은 대표적인 에너지 과소비 공간이다. 나이트클럽의 전력 사용량은 일반 가정의 150배나 된다고 한다. 하지만 이 친환경 나이트클럽들은 SDA (Sustainable Dance Club) 즉, 지속가능한 댄스 클럽이라고 불리며, 사람들이 춤을 출 때 바닥에 전달되는 진동을 전기에너지로 변환하는 자가발전 설비를 통해 일반 나이트클럽들에 비해 에너지 소비량을 30%까지 줄이는 것을 목표로 하고 있다.

일본 도쿄 아라가와에 있는 고시키사쿠라대교 (五色大橋)는 다리에 설치한 압전 에너지 하베스팅 모듈을 통해 차량 움직임에 의해 발생하는 진동을 전기 에너지로 저장하고 있다 [18]. 저장된 전기 에너지는 일몰 후 도로, 교량의

전원으로 사용된다. 가로 61 cm 세로 30 cm의 에너지 하베스팅 모듈 10대를 설치하여 얻는 전력은 겨우 0.1 Wh로 일주일동안 충전해도 20 W 전구를 한 시간도 점등할 수 없는 미약한 전력량이다. 그러나 도쿄의 도시 고속도로를 운영하고 있는 (주)수도고속도로는 향후 기술개발



(a)



(b)

그림 11. 압전 발판을 이용한 전력 발생.

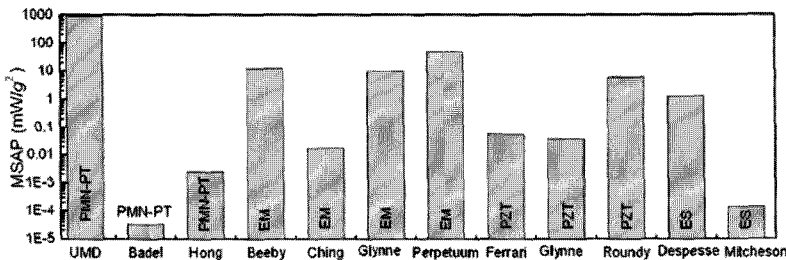
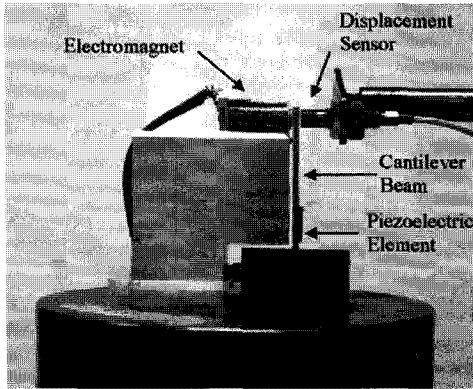
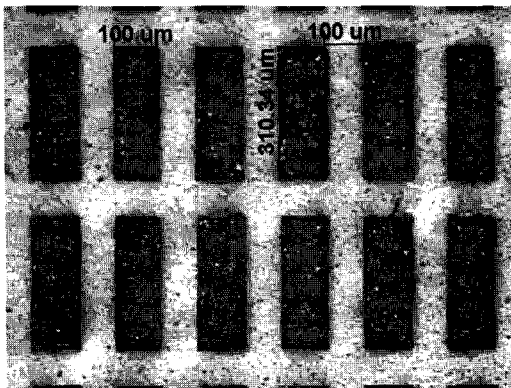


그림 12. PMN-PT 단결정과 다결정 및 다른 형태 소자의 에너지 하베스팅 성능 비교 [20].

에 의해 현재의 100배 정도까지 발전량을 높일 수 있다고 보고 있다. 이 경우 도쿄 수도고속도로의 터널을 제외한 235 km에 에너지 하베스팅 모듈을 설치한다고 가정했을 때 도쿄 23구 약 400만 가구 용 전력의 약 40%를 충당할 수 있게 된다. 또한 압전 소자의 수명이 길기 때문에 일단 에너지 하베스팅 모듈을 설치하기만 한다면 장기적으로는 비용이 절감된다고 보고 있다. 도로의 진동을 에너지원으로 이용하므로 별도의 비용이 들지 않는 자가 발전이라는 측면에서 이산화탄소 감량과도 연결되기 때문에 앞으로 기술 개발을 계속적으로 추진할 것이라고 밝혔다.



(a)



(b)

그림 13. PMN-PT 단결정 복합소재 [21].

영국 Leeds 대학교 연구원들도 행진을 하는 군인들로부터 동력에너지를 획득할 수 있는 시스템을 개발하고 있다 [19]. 150만 달러가 소요되는 이 계획은 인간의 에너지를 군사 분야의 적용을 위한 유용한 전력으로 전환하는 방법을 찾는 데 초점을 맞추고 있다. '배터리가 필요 없는 군인 프로젝트'의 일환으로 수행되고 있는 이 연구는 압전 변환기로서 작동할 수 있는 수정과 고기능 세라믹 재료 무릎 보호대와 배낭 혁대를 포함한 동력화 시스템을 개발하고 있다. 이 압전 부품들은 군인이 걷고 움직이면서 자연스럽게 발생하는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환해 충전하는 역할을 하게 된다. 보통 보병이 들고 다니는 75 kg의 군장 중 배터리 형태의 전원은 10 kg를 차지하고 있다. 따라서 시스템이 개발되면 친환경 신재생 에너지 사용이 가능해짐은 물론 군인의 군장 무게를 15퍼센트나 절감할 수 있게 된다. 또한, 이러한 기술은 군사 분야에서 다양하게 적용 가능한 잠재성을 갖고 있다.

또한 압전 소자의 단위 부피당 에너지 밀도를 높이기 위한 방안으로 세라믹 대신 단결정을 이용한 진동 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구개발도 (그림 12) 관심을 받고 있다 [20]. 미국 Penn. State Univ.에서 단결정의 에너지 하베스팅 출력 밀도가 다결정체 또는, 다른 에너지 하베스팅 소자보다 단위 부피당 출력 밀도가 매우 높다고 보고하였다. 특히, 복합소재의 경우 기존 세라믹 보다 성능이 8배 이상 증가하는 결과를 보여주고 있으며, 단결정을 이용한 여러 형태의 복합소재 개발에 박차를 가하고 있다.

압전 하베스팅 기술은 여러 분야에서 다양하게 적용 가능한 잠재성을 갖고 있다. 그러나 현재까지의 에너지 하베스팅 기술은 실질적인 상용화 단계라기보다는 실험적 혹은 선제적 차원으로, 상용화를 위해서는 압전 소재의 낮은 발전량의 문제가 극복되어야 한다. 통상적으로 센서의 동작, 신호처리, 무선 통신 등에는 대략 50 mW 정도의 전력이 필요한데 이를 위해서는 현재 기술 수준 대비 최소 100배 이상의 전력이 필요한 상황이다. 따라서 이를 극복하기 위한 신소재 및 대전력 발생구조 등에 대한 집중 연구가 필요하다.





## 2. 결론

과거로부터 태양빛, 인체의 운동에너지, 체열, 진동 등의 물리적 에너지를 이용하여 에너지화 하려는 시도는 꾸준히 진행되었다. 그 예로 1970년대 오토 매트 시계 (Kinetic Watch) 등과 같이 기타 전원을 사용하지 않고 손목의 움직임을 이용하여 내부 동력 (태엽)을 재생하거나 그 이전부터 활용되어온 자전거 바퀴의 회전운동을 이용하여 야간 조명으로 이용한 사례들과 같은 다양한 시도들이 이미 구현되었거나 시도된 바가 있다. 그러나 낮은 에너지의 변환 효율과 생산된 에너지의 낮은 경제성 등으로 제한적 이용만이 가능하였으나, 1990년대에 들어 마이크로 회로 기술의 발달과 각종 모바일기기의 등장에 기반한 유비쿼터스 시대가 본격화 되면서 주변의 미활용 에너지를 이용한 전원공급에 대한 연구가 본격화되기 시작되었다. 본고에서는 주로 압전 기술을 이용한 에너지 하베스팅 기술 및 그 활용에 대한 내용을 소개하였다.

최근에는 재료 분야에서의 나노기술과 전자회로 기술의 획기적 발달이 기존의 기술적 난제들을 해결하기 시작하고, 가속화되는 모바일용 기기 보급 및 IT산업의 발달 등으로 모바일 전원의 수요가 극대화됨에 따라 이것에 대응할 수 있는 에너지 하베스팅 기술에 대한 수요와 개발노력들이 경주되고 있다.

현재 생산에너지의 규모는  $\mu\text{W}\sim\text{mW}$  정도의 규모로 일부 개발품의 경우 상용화에 접근한 수준으로 발전하고 있다. 향후 다양한 기술들의 발달을 통해 휴대용 전화기, 소형 인터넷 단말기, 인체모니터링 센서 등의 전원을 인체의 활동, 체열, 주변의 진동 에너지 등으로부터 손쉽게 공급받아 사용하게 됨으로서 정보와 에너지가 지역이나 공간에 구애받지 않고 소통, 이용할 수 있는 진정한 “유비쿼터스”의 시대가 도래할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

[1] Feb 10, 2009 16:59 Nikkei Electronics Asia

- [2] [http://www.technologyreview.com/read\\_article.aspx?ch=specialsections&sc=tr10&id=22118](http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?ch=specialsections&sc=tr10&id=22118)
- [3] 세라미스트 12[4] (2009) 61
- [4] Z. L. Wang, X. Wang, J. Song, J. Liu, and Y. Gao, "Piezoelectric Nanogenerators for Self-Powered Nanodevice", IEEE CS Press, Vol. 7, p. 49, 2008.
- [5] R. Yang, Y. Qin, C. Li, G. Zhu, and Z. L. Wang, "Converting Biomechanical Energy into Electricity by a Muscle-Movement-Driven Nanogenerator", Nano Lett., Vol. 9, p. 1201, 2009.
- [6] Z. L. Wang, "Energy Harvesting for Self-Powered Nanosystem", Nano Res., Vol. 1, p. 1, 2008.
- [7] 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., Vol. 10, p. 726, 2010.
- [8] X. Wang, J. Song, J. Liu, Z. L. Wang, "Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Wave", Science, Vol. 316, p. 102, 2007.
- [9] Z. Wang, J. Hu, A. P. Suryavanshi, K. Yum and M. F. Yu, "Voltage generation from individual BaTiO<sub>3</sub> nanowires under periodic tensile mechanical load", Nano Lett., Vol. 7, p. 2966, 2007.
- [10] <http://www.advancedceramics.com>
- [11] <http://www.smart-material.com>
- [12] A. A. Bent et al., "Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrodes", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, No. 11, p. 903, 1997.
- [13] H. B. Strock et al., "Active PZT fibers, a commercial production process", Part of the SPIE Conference on Smart Materials Technologies, March 1999.
- [14] J. M. Donelan et al., "Biomechanical energy harvesting: generating electricity during human walking with minimal user effort", Science Vol. 319, (5864) p. 807, 2008.
- [15] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics", IEEE Macro, Vol. 16, p. 835, 2005.
- [16] W. Hankle, "Energy harvesting", American Ceramic Society Bulletin, Vol. 89, No. 1, p. 22, 2010.
- [17] [www.club4climate.com/surya](http://www.club4climate.com/surya), [www.watt-rotterdam.nl](http://www.watt-rotterdam.nl)
- [18] <http://www.tech-shutoko.jp/newtech/topbosyu>

