

압전효과를 이용한 신발 장착용 에너지 수확기 기술동향

윤소남, 함영복, 박중호 | 한국기계연구원

1. 서 론

1.1 압전소자

압전소자란 기계적 응력에 따라 분극을 일으켜 전하를 발생시키는 재료를 말하는 것으로 피에조전기소자(Piezoelectric)라고도 한다. 압전소자는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하거나, 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 소재로 이러한 현상은 1880년 Curie 형제에 의해 발견된 후, 주위의 민감한 자극에도 반응성이 뛰어난 성질 때문에 정확성이 요구되는 제품들을 위주로 개발되었다. 이와 같이 주위환경의 작은 자극에도 민감하게 정확성을 갖추며 작동하는 재료를 스마트재료라 하는데 압전현상을 갖고 있는 재료들도 스마트재료라 할 수 있겠다.

소재를 이루는 모든 결정은 그 대칭관계에 의해 32개 결정군(Point group)으로 분류된다. 그 중 대칭 중심을 갖는 12개 그룹은 압전성이 없고, 나머지 20개 그룹 중에서 전기적으로 부도체인 결정에서 압전특성이 존재한다. 이 중에서 비대칭성이 큰 10개 그룹은 전계도, 응력도 가해지지 않은 상태 하에서 자발적으로 분극되어 있는데 이를 초전성 결정이라 한다. 결과적으로 압전현상은 결정 구조의 이온(ion) 변형에 의해서 발생한다. 외부 응력이 가해지지 않은 상태에서는 압전재료 내의 전하 분포가 대칭적이고 전기적으로 중성이지만, 외부 응력이 가해지면 전하의 분포가 비대칭적이 되고, 이러한 전기적인 극화(polarization)가 전압으로 관찰되어 지는데, 이러한 성질을 갖는 결정구조를 페로브스카이트(perovskite) 구조라고 한다. 처음 압전소자의 압전효과가 발견되었을 때, 자연상태의 압전소자는 낮은 큐리온도(Curie temperature)와 공진 주파수에 대한 안전성이 떨어져 실용상에 제한을 받아왔지만 백 여년이 지난 후 압전효과가 큰 재료를 인공적으로 합성하는 기술이 개발되어짐에 따라 공학적인 응용이 가능해졌고, 압전재료에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

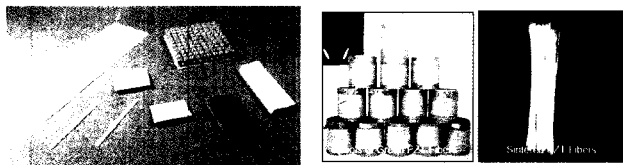


그림 1. 압전소자의 형태

압전효과를 가지고 있는 압전재료를 에너지수확장치에 적용시킬 경우 동일한 기능을 하는 에너지발전장치보다 단위 면적당 발생력이 우수하고, 자기장의 영향을 받지 않아 다른 전기장치들과 같은 공간에 있어도 간섭없이 완벽히 제 역할을 다 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 얇은 판의 형성으로 이루어진 압전소자는 큰 전압을 얻기 위해서 여러개의 압전체를 적층시켜야 하고, 전압은 변형에 비례하여 커지기 때문에 보다 큰 변형을 얻기 위해 더 큰 굽힘 현상을 유발시키려하고, 굽힘이 커짐에 따라 압전체의 파손의 위험이 커지는 단점이 있지만, 최근에 ACI(Advanced Cerametrics, Inc.)등의 업체와 연구소들을 중심으로 이러한 단점들이 개선되고 있으며, 현재는 판형이 아닌 섬유행의 압전소자도 생산되고 있다.

1.2 소형 휴대동력장치

MEMS 기술의 발달로 전자 제품의 소형화·경량화와 통신기술의 발달로 무선통신이 가능해짐에 따라 무선 전자기기는 지난 20여 년간 큰 발전이 이루어졌다. 발전된 무선 전자기기의 동력원으로는 충전 가능한 2차 전지인 리튬-이온(Li-ion)배터리, 니켈-수소(Ni-NH)배터리, 니켈-카드뮴(Ni-Cd)배터리 등을 사용하였다. 그러나 무선 전자장치의 성능이 향상됨에 따라 배터리 소비시간이 짧아지게 되고 이 점은 제품 사용자가 장시간 작업을 하게 될 경우 업무 방해가 된다. 또한 반대로 배터리의 사용시간을 늘릴 경우, 무선 전자장치의 무게보다 배터리의 무게가 무거운 경우도 발생한다.

그림 2는 단적인 예로 노트북의 주요 부품별 발전 속도를 나타내고 있다. 그림 2를 보면 컴퓨터의 하드디스크의 용량과 CPU의 속도는 급격하게 증가한데 반하여 배터리의 충전용량은 X축으로 평행하게 나타나 거의 증가하지 않음을 알 수 있고 배터리의 사용시간 또한 길지 않음을 실생활에서 경험을 통해 알 수 있다. 그림 2의 이러한 패턴은 다른 의미로 기존의 배터리로는 더 이상의 발전을 기대하기 어렵고 새로운 소재의 배터리를 개발해야 한다는 것이다.

이와 관련하여 현재 배터리는 전력으로부터 충전의 개념을 넘어서 압전소자와 같은 신소재를 이용하여 시간과 전원에 대한 제약을 덜 받고, 소형화·경량화 되는 방향으로 개발이 제안되고 있으며 전원은 실생활에서 발생하는 진동, 열을 이용한 에너지 수집(Energy Harvesting or Energy Scavenging)기술을 이용하여 전력을 대체하는 방향으로 개발 및 적용성 관련 기술이 연구되고 있다. 이와 같은 기술을 마이크로 동력 발생장치(Micro Power Generation : MPG)라 하고, 본 고에서는 압전 효과를 이용한 신발 장착용 에너지 수확기 기술 동향에 대해 논하고자 한다.

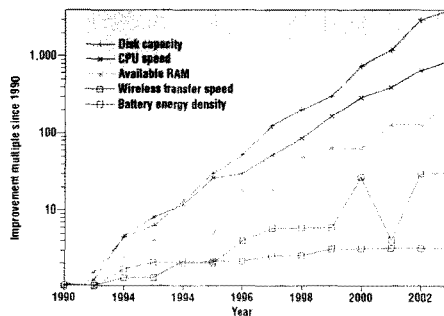


그림 2. 노트북의 부품별 기술 발전(1999-2003)

2. 압전의 연구 동향

국내외적으로 압전의 연구 동향을 살펴보았을 때, 압전기술을 주도하고 있는 미국, 유럽, 일본의 연구 동향을 비교해보면 표 1과 같다. 미국에서는 약 10년 전부터 DARPA를 통해 대학 및 전문 연구기관에 많은 투자를 해오고 있고, 30cm 이상의 비교적 대형 작동기를 사용한 군사용 능동 진동제어에 연구 및 개발의 초점이 맞추어져 있다. 일본은 주로 민간업체에서 1cm 이하의 초소형 압전 작동기와 초음파 모터를 개발해 오고 있으며, 정밀 위치 제어에 관련된 응용에 중점을 두고 있다. 유럽은 정부 주도로 실험장비를 만드는 단계이고, 미국과 일본의 중간 크기를 갖는 작동기에 연구 초점이 맞춰져 있다. 선진국에서 25년 전부터 압전 재료에 대한 연구가 시작되어 현재는 활발한 제품 생산 단계에 들어섰으나, 국내에서는 압전재료가 부착 혹은 삽입된 복합재료 설계와 성형, 최적화에 대한 연구는 많이 되어있으나, 압전 필름 및 압전 세라믹 등의 소재에 관한 연구는 몇 몇 대학들 위주로 기초연구 수준으로 이루어지고 상용화 및 상품화는 미진한 상태이다.

표 1. Piezoelectric 액추에이터의 연구 및 개발 동향

	US	Japan	Europe
Target	Military	Mass consumerproduct	Lab. equipment
Category	Vibration suppressor	Micro motor, Positioner	Vibration suppressor, Micro motor, Positioner
Application field	Space structure, Military vehicle	Office equipment, Camera, Precisionmachine, Automobile	Lab. stage/stepper, Airplane, Automobile, Hydraulic system
Actuator size	Up-sizing(30cm)	Down-sizing(1cm)	Intermediate sizing(10cm)
Major manufacture	AVX / Kyocera, Morgan Matroc Itek Opt. sys. Burleigh Allied Signal	Token, NEC, Hitachi metal, Mitsui chemical, Canon, Seiko Instr.	Philips, Siemens, Hoechst Ceram Tec, Ferroperm, PI

또한 압전의 응용은 전기에너지를 기계에너지로 바꾸는 것과 기계에너지를 전기에너지로 바꾸는 것, 전기에너지를 기계에너지로 바꾼 후 다시 전기에너지로 바꾸는 것, 세 가지로 나눌 수 있다.

첫 번째, 전기에너지를 기계에너지로 바꾸는 예는 초음파 발생, 음파 발생, 액추에이터 등이 있다. 초음파의 경우는 코일 없이 압전 인가만으로도 구동이 간단하기 때문에 많이 쓰이고 있고, 액추에이터는 압전의 정밀함 때문에 전기 분야의 범위를 벗어나 전자분야 뿐만 아니라 생명과학, 해양 분야 등 여러 분야에 활용 가능성이 증대되어 각종 신제품이 개발되고 있어 수요가 급증할 것으로 예상된다. 음파 또한 저음영역이 개선되고 전반적인 음질을 향상시킬 수 있어 꾸준한 수요가 발생할 것으로 예상된다. 두 번째, 기계에너지를 전기에너지로 바꾸는 예는 지금 현재 많이 쓰이고 있는 가스착화기용의 소자가 대표적으로 압전 착화소자, 음파·초음파 수신, 가속도계 혹은 유량계 등 계측기의 센서에 응용되고 있다. 마지막 세 번째, 압전 효과와 역압전 효과를 동시에 이용한 예는 통신용 부품으로 필터나 공진자에서 압전체 자체의 탄성 공진을 활용한 것이며, 어군 탐지기 등 거리 측정을 목적으로 사용되는 소자는 초음파 발생을 이용한 것이다. 탐지기 같은 경우에는 신호를 발생시켜 대상 탐사 물질에 반사된 신호를 수신하는 하나의 소자로써 송·수신 역할을 동시에 수행해야 하기 때문이다.

3. 재료 선택 및 에너지 획득방법

전력에 의한 충전 없이 자체적으로 발전할 수 있는 소재로는 현재 PZT라 불리는 압전소자가 일반적이다. 에너지 수집기술을 위한 소재를 살펴보면 PZT계열의 소자로 현재 가장 많이 알려져 있다. 그 다음으로 초전기 혹은 파이로전기(Pyroelectric)이라 불리는 에너지 수집 기술로 온도를 전류나 전압으로 변환시키는 것이 있으며, 열전기(Thermoelectrics)를 이용하여 두 지점의 온도차로 전압을 발생시키는 것이 있다. 또 반도체 다이오드 저항기인 Varactors를 이용하여 용량을 변환하는 Electrostatic (capacitive) 에너지 수집기술이 있으며, 최근에는 EAPs(Electroactive polymers)가 에너지 수집기술 소재로 제안되고 있다.

일반적인 압전 세라믹은 보통 PZT계열을 지칭하는 것으로 페로브스카이트(perovskite) 구조로 큰 격자 구조 안에 작은 4가의 금속이온(Titanium or Zirconium), 2가의 금속 이온(Lead or Barium)과 O^{2-} 이온으로 구성되어 있고 결정 내에 사면체 또는 능면체(rhombohedral) 대칭이라 불리는 조건 안에서 각 결정은 쌍극 모멘트를 갖는다. 이러한 결정을 만들기 위해 압전 세라믹은 금속 산화물의 미세한 파우더를 일정 비율로 혼합시켜 열을 가하여 제조하는데, 큐리 온도(Curie temperature)에 해당하는 온도 이상에서 소결된 세라믹의 내부는 페로브스카이트 구조를 갖지 않는 육면체의 대칭을 보인다(그림 3.(a)). 그리고 큐리 온도 이하의 온도에서 소결된 세라믹의 내부는 사면체 또는 능면체의 대칭을 갖고 쌍극 모멘트를 형성하게 되어 압전효과를 발생하는 재료가 된다(그림 3.(b)). 이러한 재료는 평소에는 중성을 띠다가 자극이 가해지면 극정을 가지면서 전류 또는 전압이 발생한다.

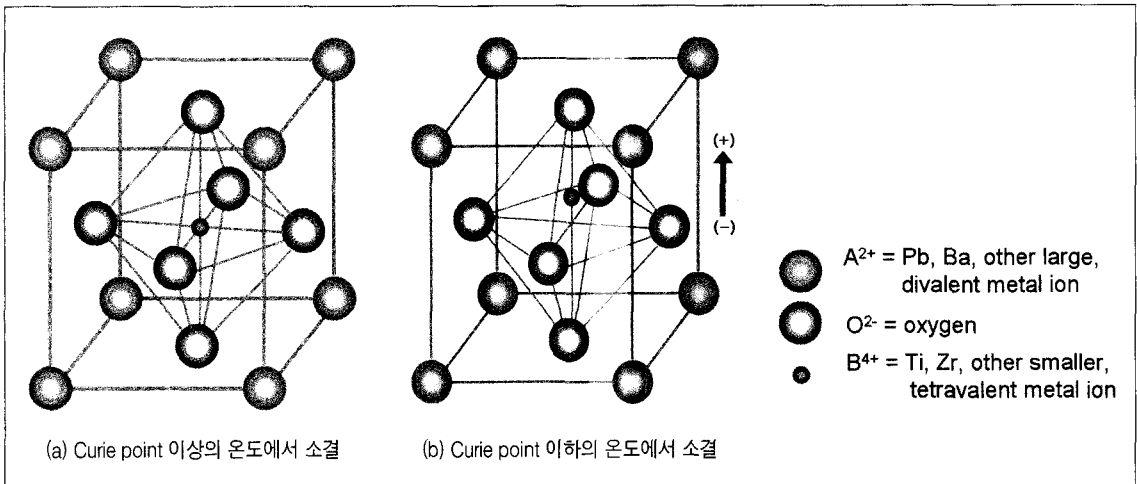


그림 3. 일반 압전 세라믹의 결정 구조

압전 소자로부터 얻은 전류 혹은 전압은 축전장치를 통해 축전되는데 그 회로는 그림 5와 같다. 걸어 다니면서 발생한 전류 혹은 전압은 그 양이 아주 작기 때문에 일정량 이상 충전되면 AC/DC 정류 회로를 거쳐 축전지에 저장되어진다. 또한 PZT이외의 차세대 액추에이터로서 주목을 받고 있는 전기장 응답성 고분자 EAP(Electroactive polymers)도 에너지 수집 기술을 실현시킬 수 있는 소재로 주목을 받고 있다. EAP는 변형률이 크고, 부드럽고, 저밀도의 장점을 갖고 있기 때문에, 이 소재를 갖고 발전기를 제작할 경우 배터리의 무게를 감소시키고 장기간 업무

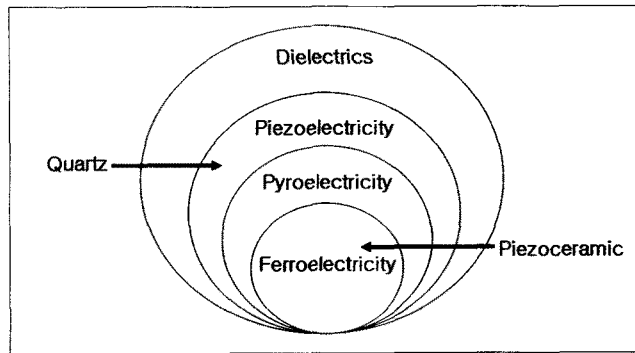


그림 4. 유전, 압전 세라믹스 재료의 결정학적 범위

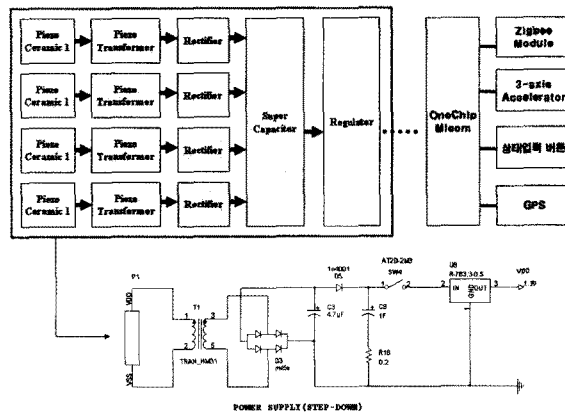


그림 5. 기본 AC/DC 정류 및 저장회로

에도 충전이 필요 없이 자체적으로 에너지 생산할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 6은 PZT 대신 EAP를 사용하게 될 경우 장점을 단적으로 나타낸 것으로 이와 관련 과제는 현재 미국의 DARPA에서 이루어지고 있다.

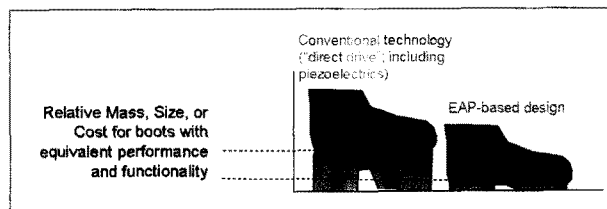


그림 6. EAP 발전기의 장점

4. 신발 및 군화 장착용 에너지 수확기 동향

인력을 이용한 에너지수확시스템을 2가지 종류로 나누면 호흡 및 혈액과 같은 지속적인 활동과 걸음걸이와 상

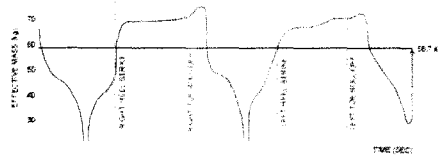


그림 7. 걷는 동안 지표에 걸리는 하중

체 운동과 같은 불연속적인 활동 중 걸음걸이 즉, 불연속적인 활동을 이용한 발전방법으로 구두바닥에 설치한 압전 소자로 보행할 때에 가해지는 힘을 압전 고분자 PVDF와 유니몰프 압전세라믹소자를 신발에 부착하여 걸음걸이를 통해 0.9mJ정도 얻을 수 있다는 결과가 있다. 그림 7은 몸무게가 58.7kg인 사람이 걷는 동안 지표에 걸리는 하중을 나타낸 데이터이고, 그림 8은 사람이 움직이는 동안 얻을 수 있는 전력을 그림으로 표시한 것이다.

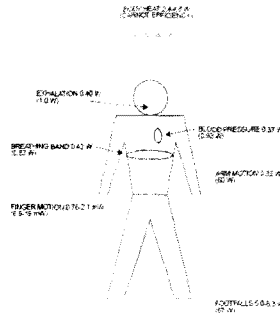


그림 8. 신체가 움직이는 동안 얻을 수 있는 전력

4.1 국외 연구동향

국외의 경우 미국의 MIT공대 및 DARPA(Defence Advanced Research Project Agency)에서는 신발(전투화)에 적용하여 0.9~3mW정도 발전이 가능한 시제품을 제작하였으며, 꾸준한 연구가 진행 중인 것으로 보이며 신발(전투화)에 적용한 사례 중 가장 우수한 결과를 내놓고 있다. 그리고 미국 특허청에 등록돼 있는 신발 발전기에 대한 개념도를 그림 10에 나타내었다. MIT공대에서는 PZT와 PVDF를 사용하여 신발 밑창에 삽입하여 실험한 결과 PZT의 최대 전압은 부하저항이 250kΩ일 때 150V가 발전되며 이때 최대 전력은 80mW가 발생되고 평균 전력은 1.8mW가 발생되고, PVDF의 경우 최대 전압은 60V(부하저항은 250kΩ일 때)이며, 최대 전력은 20mW가 발생되고 평균 전력은 1.1mW가 발전된다는 것을 발표했다. 또한 미국의 Ferro Solutions Inc.는 Energy Harvester라는 이름의 에너지 발전시스템을 개발하여 각종 무선 전자기기, 센서, MEMS 등에 응용하고 있다.

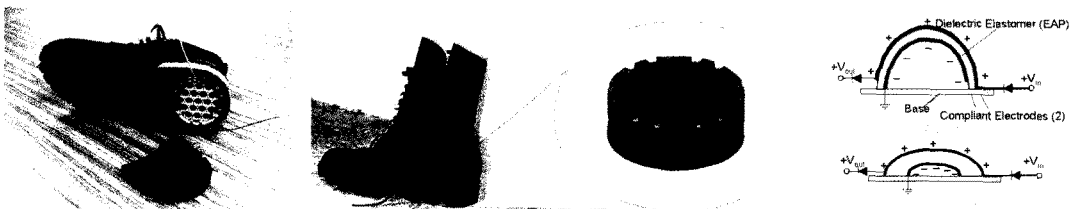


그림 9. DARPA에서 개발한 군화 발전기

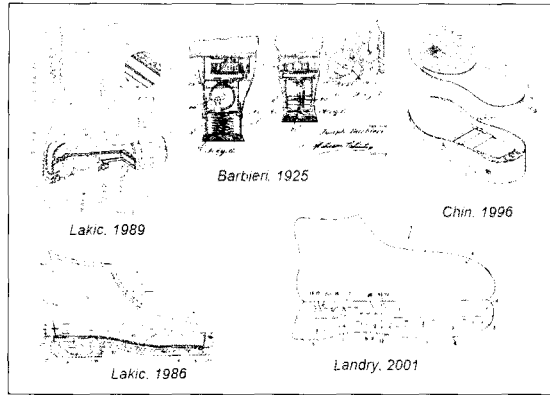


그림 10. 미국 특허로 본 신발 발전기 도안

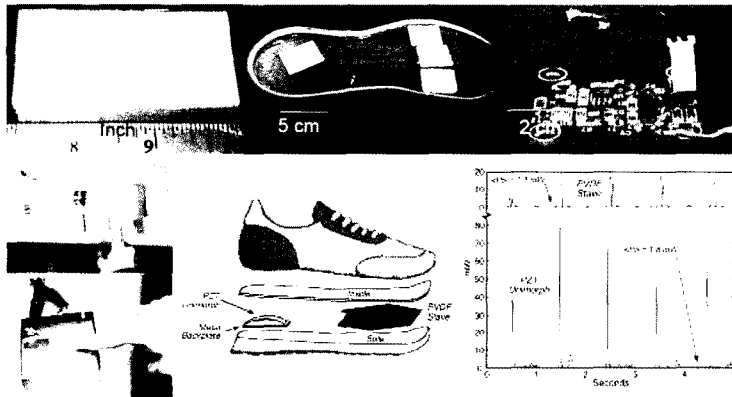


그림 11. PZT와 PVDF를 신발에 삽입한 에너지 수확장치

이와 비슷한 예로, 네브래스카대학교 Stephen R. Platt 교수진에 의해 무릎관절에 에너지 수확장치를 삽입하여 무릎관절에 힘이 가해졌을 때 압전소자에서 출력되는 전력을 이용하여 장치의 상태에 대한 정보를 전달할 수 있는 마이크로프로세서와 센서의 전원으로 사용할 수 있는 압전형 에너지 수확장치에 대한 연구를 수행하였다. 독일의 EnOcean사는 Transmitter Module에 압전 에너지 하베스터를 적용하여 배터리가 필요 없이 스위치를 눌렀을 때 발생하는 에너지를 센서 구동, RF 무선신호 송신, 각종 변환기를 작동시키는데 활용하였으며, 또한 Button push방식의 경우 3mm×5N의 힘을 가하였을 때 200μW의 에너지를 얻을 수 있음을 발표했다. 다른 독일 업체인 nano Net 사는 MFC(Macro Fiber Component)를 풍력발전기의 블레이드에 부착하여 블레이드에서 발생하는 진동에 의해 에너지가 발전을 함과 동시에 RF로 신호를 보내는 기술을 보유하고 있고, 몇 가지 제품을 출시하고 있다.

Advanced Cerametrics에서 제작한 Piezoelectric Fiber Composites를 사용하여 13초 동안 30Hz의 진동으로 880mJ(40V)을 얻을 수 있는 Energy Harvesting System을 제작하였으며, 이와 관련하여 일본의 세이코사에서 는 발전 성능이 1mm의 진폭으로 2Hz 주기로 진동을 가하였을 때 30분에 0.66J정도 발전이 가능하여 전자시계의 전원으로 충분히 확보 가능할 것으로 보고한 바 있다.

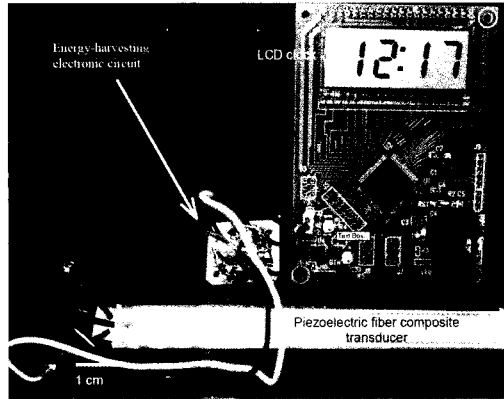


그림 12. Piezoelectric Fiber Composites(Advanced Ceramics)

4.2 국내 연구동향

한국기계연구원(KIMM)의 경우 풍력을 이용한 에너지획득 기술에 이용하기 위한 에너지 변환기술을 연구 진행 중에 있다. 한국과학기술연구원(KIST)과 고려대학교는 공동으로 주파수 조정에 따른 에너지 하베스팅용 압전 캔틸레버의 특성을 알아보는 실험 장치를 구성하여 실험치와 수식에 의한 계산치를 비교한 결과 두 방법이 비슷함을 알 수 있어, 이 결과를 통하여 고효율의 캔틸레버형 압전에너지 하베스터를 디자인 할 수 있음을 확인하였고, 요업 기술원에서는 Automatic Power Generator System용 압전 세라믹 조성설계 및 제조, 세라믹 구조설계 및 공정개발, 압전 충전 System 개발 및 특성평가에 대한 연구를 진행하여, 에너지 하베스팅용 압전소자(PNN-PZT)를 개발하였다. 또한 서강대학교의 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 연구실에서는 자동차의 주행중 타이어 공기압 감시 장치(TPMS : Tire Pressure Monitoring System)와 같이 실시간으로 압력과 온도를 측정하여 무선으로 자동차의 내부로 전송하는 시스템에 대한 연구를 진행하였으며, 무선으로 압력과 온도의 정보를 전송하기 위한 전원을 압전 하베스터를 통하여 전기 에너지를 얻는 장치에 대한 연구도 수행하였다. 진국대 항공우주정보시스템공학과에서는 압전세라믹층과 탄소/유리섬유 복합재료층으로 구성된 근육작동모방형 작동기(LIPCA)를 개발하여 다양한 연구를 수행하고 있으나, 패치모듈의 유연성 향상 및 저 전압화에 의한 에너지 절감 등을 위해서는 압전화이버 복합재료에 대한 공정기술이 필요하다. 한양대, KAIST 등 대학을 중심으로 압전화이버 내장형 복합재료의 모델링 및 적용연구 등의 기초연구가 이루어지고 있으나, IDE 전극을 외부에 배치한 형태로써 미국, 일본 등에서는 이미 수행된 연구의 초기 단계이며, 이에 대한 실증연구가 필요할 것으로 사료된다.

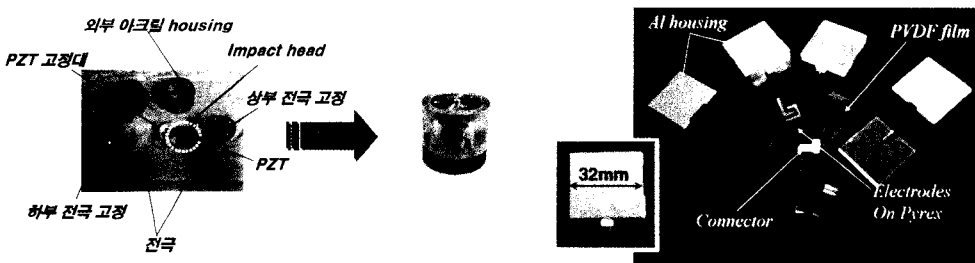


그림 13. 압전 에너지 변환부 분해 및 조립 형태그림



그림 14. 압전세라믹과 탄소/유리섬유 복합재료로 구성된 근육작동모방형 작동기

5. 결 론

지금까지 무선 전자기기의 배터리 분야 개발의 중요성과 함께 압전효과를 이용한 신발 장착용 에너지 수확기 기술의 가능성과 동향에 대해 살펴보았다. 신발에 장착할 수 있는 소재로는 PZT와 EAP를 중심으로 개발이 이루어지고 있는데, EAP인 경우 압전소자에 비해서 에너지 변환 효율 및 내구성 면에서 PZT에 비해 비교적 우수한 것으로 실험적으로 증명되어 알려지고 있지만, 작동능력과 내구성 향상을 높여야 한다는 문제점이 도출되고 있어 이에 대한 대책이 마련되어야 한다고 사료된다. 그리고 한정된 면적에 PZT 혹은 EAP를 적용시킬 경우, 출력을 최대한 높일 수 있는 방안이 또 다른 과제가 될 것이다. 압전재료를 이용한 에너지수확장치는 극지, 오지 및 인간이 직접적으로 투입되어 정보활동이 어려운 곳, 생존위기에 처해있는 어류나 동/식물의 건강상태 모니터링 등과 같이 장시간의 정보수집과 추적이 필요한 곳에서는 배터리 사용이 매우 제한적이기 때문에 대체에너지 및 진동에너지를 이용한 자가발전에 의한 전원 확보 기술이 매우 중요할 것으로 사료된다. 또한 최근의 석유파동과 온실가스 문제와 같은 에너지위기에 대응하는 기술로서 전술한 에너지수확기술들이 일조할 것으로 전망하며, 보다 우수한 성능을 가지는 재료 개발과 에너지를 최적으로 수확하는 기술들이 수년 이내에 개발되어 실생활에 유용하게 활용될 것으로 전망한다.

✦ 참고 문헌

- [1] 이인, 압전 재료의 응용에 대한 연구 및 개발 동향, KSCM Journal, Vol. 14, No. 3, pp.90-98
- [2] Cady, W.G. "Piezoelectricity", McGraw-Hill, New York, 1964
- [3] J. A. Paradiso, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics", IEEE Pervasive computing, Vol. 4, No. 1, pp. 18-27, Jan-Mar., 2005
- [4] 압전세라믹스, 한국과학기술정보연구원, 2002.12
- [5] T. Starner, Human-powerd wearable computing, IBM System Journal, Vol. 35, No. 3&4, 1996, pp.618-619
- [6] Uchino, K., "Recent Trend of Piezoelectric Actuator Developments", International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1999, pp 3-9
- [7] 김재환, "Electroactive Polymer (EAP)의 최근 세계연구동향", KOSEN/OSTIN Expert Review, pp.1-13, 2001.
- [8] Yoseph Bar-Cohen, "WorldWide ElectroActive Polymers", WW-EAP Newsletter, Vol. 9, No. 1, pp.1-14, 2007.

- [9] Mohd. Zahid Ansari and Cho Chong du, "A Study in Piezoelectric Properties of PVDF and ITS Copolymers", pp.584589, 2007.
- [10] F Lu, H P Lee and SP Lim, "Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 1, pp. 57-63, 2004.
- [11] Yasser Ammar, Aurelien Buhrig, Marcin Marzencki, Benoit Charlot, Skandar Basrour, Karine Matou and Marc Renaudin, "Wireless sensor network node with asynchronous and vibration harvesting micro power generator", *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence*, Vol. 121 No.2, pp. 287-292, 2005.
- [12] Aman Kansal and Mani B. Srivastava, "Energy Harvesting Projects", *IEEE Pervasive Computing archive*, Vol. 4 Issue 1, pp. 69-71, 2005.
- [13] Je-Yun Lee, "A Study on the Energy Conversion System Using Piezoelectric Effect", *Sogang University*, 1-64, 2005.
- [14] John Kymissis, Clyde Kendall, Joseph Paradiso and Neil Gershenfeld, "Parasitic Power Harvesting in Shoes", *Proceeding of the Second IEEE International Conference on Wearable Computing (ISWC)*, 132-139, 1998.
- [15] Shashank Priya, "Modeling of Electric Energy Harvesting Using Piezoelectric Windmill", *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 87, 18, 184101-1-3, 2005.
- [16] Stephen R. Platt, Shane Farritor, Kevin Garvin and Hani Haider, "The Use of Piezoelectric Ceramics for Electric Power Generation Within Orthopedic Implants", *IEEE/ ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, Vol. 10 No. 4, pp.455-461, 2005.
- [17] Hyeoung Woo Kim, Amit Batra, Shashank Priya, Kenji Uchino, Douglas Markley, Robert E. Newnham and Heath F. Hofmann, "Energy Harvesting Using a Piezoelectric "Cymbal" Transducer in Dynamic Environment", *International Center for Actuators and Transducers (ICAT)*, Vol. 43 No. 9A, pp. 6178-6183, 2004.
- [18] Karla Mossi, Christopher Green, Zoubeida Ounaies and Esther Hughes, "Harvesting Energy Using a Thin Unimorph Prestressed Bender: Geometrical Effects", *Journal of Intelligent Material Systems And Structures*, Vol. 16 No. 3, pp. 249-261, 2005.



윤 소 남

· 한국기계연구원 스마트디바이스응용팀 팀장
· 관심분야 : 스마트 디바이스, Energy Harvesting,
PZT Valve
· E-mail : ysn688@kimm.re.kr



함 명 복

· 한국기계연구원 스마트디바이스응용팀
책임연구원
· 관심분야 : 가능성 재료응용,
액압식 에너지 회수장치
· E-mail : hyb665@kimm.re.kr



박 중 호

· 한국기계연구원 스마트디바이스응용팀
선임연구원
· 관심분야 : 스마트 액추에이터 & 센서,
기능성유체 응용 디바이스
· E-mail : jhpark@kimm.re.kr