

소형 에너지 발전용 압전재료

정대용 교수 (명지대 신소재공학과) | 송현철 연구원 (KIST 박막재료연구센터) |
강종윤 선임연구원 (KIST 박막재료연구센터) | 윤석진 책임연구원 (KIST 박막재료연구센터)

1. 소형에너지 발전

저전력으로 구동할 수 있는 CMOS 개발과 무선 통신기술의 발전에 따라, 소형 에너지를 이용한 센서 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 현재, 무선통신과 소형 에너지 발전을 결합한 대표적인 것으로 RFID가 있으며, 이는 시내버스 태그, 신분증을 포함한 출입증 등에 주로 많이 이용되고 있다. 그러나 RFID는 외부에서 보내는 전자기파를 태그에서 전기에너지로 변환하는 것으로 에너지 밀도가 낮고 사용거리가 짧은 단점이 있다. RFID는 외부에서 미리 입력된 정보만을 처리할 수 있으므로, 유비쿼터스 센서네트워크를 구축하기 위해서는 외부신호를 센싱하고 전달할 수 있는 능동형 센서노드 개발이 필요하다. 능동형 센서노드는 “센서 + 신호처리용 CMOS + 무선통신모듈”로 구성되며 이러한 센서노드를 구동하기 위해서는 일정 크기의 에너지원이 필요하다. 현재 대부분의 경우, Battery를 이용하여 센서노드를 구동하고 있으나, Battery를 주기적으로 교환해야하며 Battery 교체에 따른 공해문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 진동

에너지, 태양광에너지, 온도차에 의한 열에너지 등의 자연환경에서 버려지는 에너지를 유용한 전기에너지로 변환하는 소형 에너지 발전이 제시되고 있다 [1-4].

반도체를 이용한 태양광발전과 전자기 원리를 이용한 풍력발전은 대형으로 제작되어 상업화 되어 있으나, 소형의 센서노드 구동에 이용되기 위해서는 에너지 밀도를 높인 새로운 형태의 소형에너지 발전이 필요한 실정이다. 현재 연구되고 있는 소형에너지 발전으로는 기계적인 에너지를 이용한 압전 발전, 기계적인 운동과 전자기적현상을 이용한 발전 및 Capacitive 발전, 폐열을 이용한 열전발전 등이 있다. 이들 방법은 각각의 장, 단점을 가지고 있으므로, 센서노드가 설치될 자연환경에 적합한 방법이 선택되어야 한다. 언급한 여러가지 방법 중 압전 재료를 이용한 발전은 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 것으로 에너지 밀도가 높고, 기후에 관계없이 실내외의 기계진동을 이용할 수 있어 많은 연구가 되고 있다 [5-7].

본고에서는 소형 에너지 발전을 위한 압전 재료의 일반적인 내용과 연구동향에 대해서 개략적으로 서술하고자 한다.

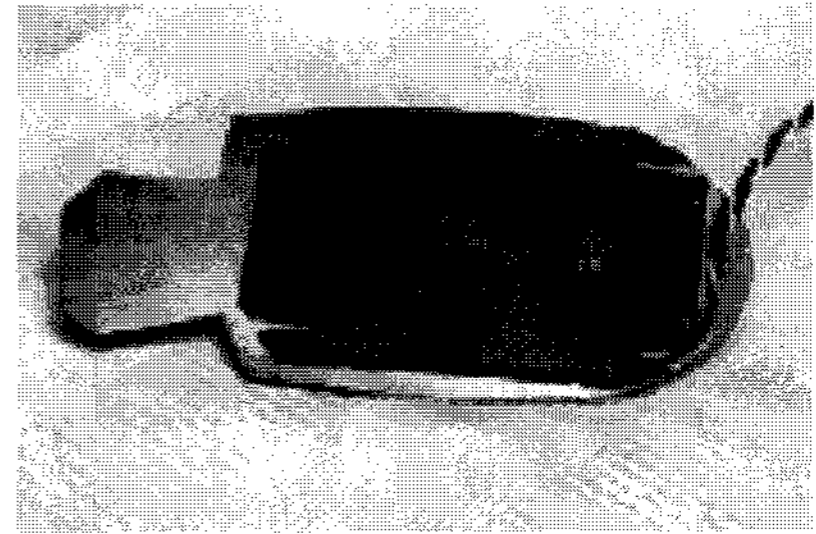
2. 소형 에너지 발전용 압전 재료

2.1 압전 소재

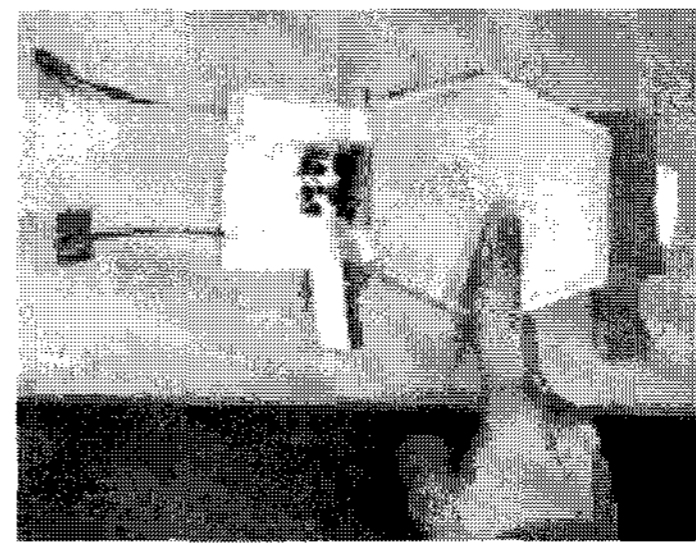
압전 소재란 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 압전 정효과 (Piezoelectric Direct Effect) 와 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 압전 역효과 (Piezoelectric Converse Effect)를 갖는 소재를 말한다. 전기적 에너지를 가했을 때 재료의 수축, 팽창이 발생하는 압전 역효과는 모터, 액추에이터 등에 주로 이용된다. 반면, 진동, 응력 등의 기계적인 에너지를 전기신호로 변환하는 압전 정효과는 착화용 압전소자나 각종 센서에 응용되고 있다. 착화용 압전소자나 센서는 생성된 전기에너지를 방전시켜 바로 이용하거나, 외부 저항에 인가되는 전압을 측정하여 이용하는 것으로 전기에너지를 저장하는 기능은 없다. 그러나 압전 에너지 발전기는 이와 같이 발생한 적은 양의 전기에너지를 저장하여 전자소자를 동작하는데 이용되는 면에서 기존의 압전 응용제품과는 차이가 있다.

2.2 압전 에너지 발전기 구조

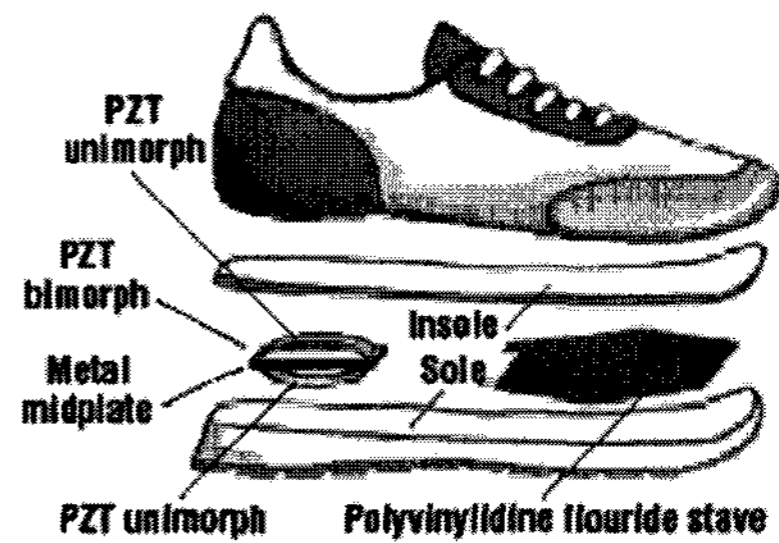
압전 에너지 발전기는 주어지는 진동의 종류와 크기에 따라 재료 및 발전기 구조가 달라진다. 신발에 부착하여 사람의 걸음걸이 (큰 크기의 Compressive Stress)를 전기신호로 변환하는 MIT연구의 경우, 그림 1과 같이 신발 뒤축에는 PZT [Pb(ZrTi)O₃] 계열의 세라믹을 THUNDER 형태로 제작하여 이용하였으며, 앞축에는 유연한 폴리머 압전체인 PVDF (Polyvinylidene Fouride)를 이용하였다. 신발 뒤축의 경우, 앞축에 비해 누르는 힘이 크고 비교적 비틀림이 없으므로, 재료적인 측면에서는 한 방향으로 가해지는 큰 힘을 충분히 견딜 수 있는 세라믹을 이용하고 있다. 그러나 세라믹의 경우 잘 깨지므로 세라믹의 깨짐을 억제하고 세라믹의 변위를 증가시키기 위해 구조면에서는 THUNDER 구조를 채용하고 있다. 신발 앞축의 경우, 누르는 힘이 비교적 적고 누르는 힘뿐만 아니라 앞으로 밀리는 힘이 존재하므로 이를 충분히 이용하기 위해 유연한 폴리머를



(a)



(b)

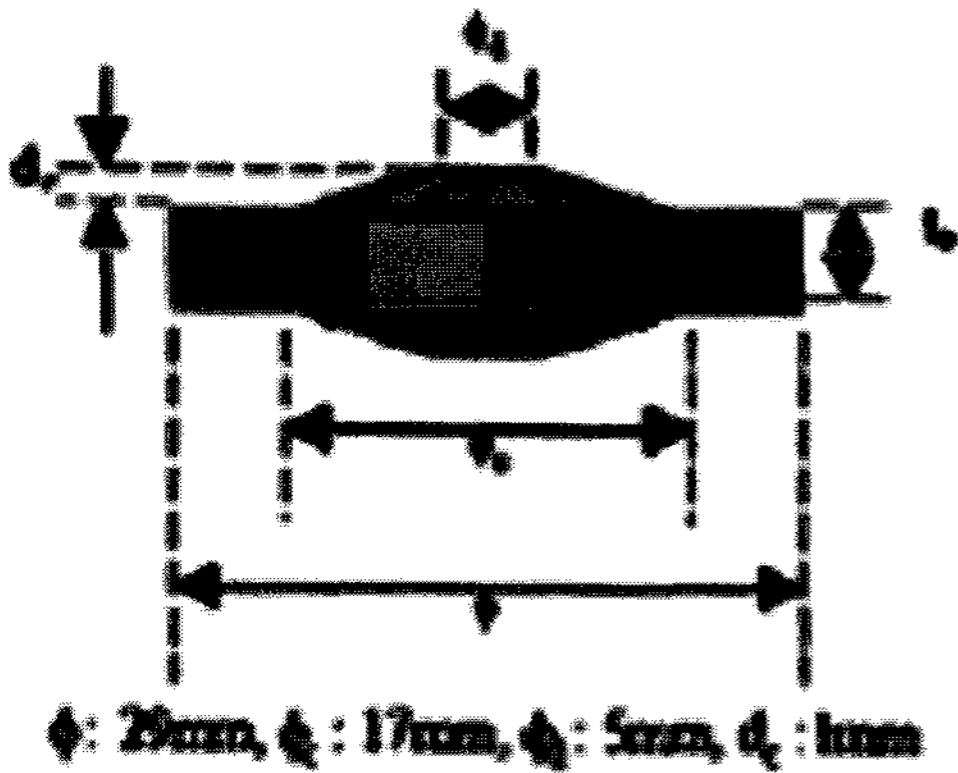
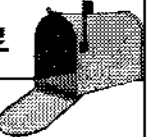


(c)



(d)

그림 1. (a) A flexible PZT thunder clamshell (b) 16 layer polyvinylidene fouride bimorph stave (c) The insole of running shoes (d) Power harvesting shoes with heel-mounted electronics [8-9].



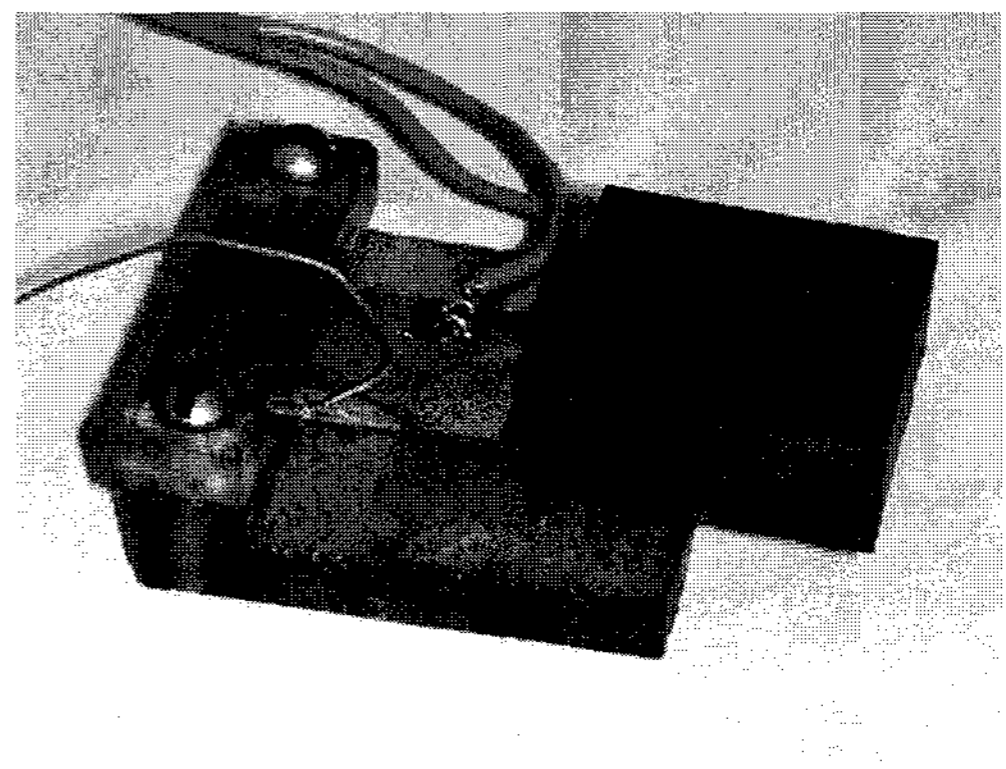
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 2. Pennsylvania State Univ.에서 제작한 CYMBAL 구조의 에너지 하베스터 [10].

그림 3. KIST에서 제작한 압전 캔틸레버와 미국 버클리 대학에서 제작한 압전 캔틸레버.

이용하였다. 한편, Pennsylvania 대학에서는 큰 힘이 한 방향으로 주어지는 자동차엔진의 떨림을 이용한 발전기를 제작하기 위해서 PZT 계열의 세라믹을 SYMBOL 형태의 구조로 제작하여 이용하였다 (그림 2). MIT에서 연구한 신발과 비교하면, 큰 힘이 가해지는 측면에서 세라믹을 이용하고 있는 것은 같으나, 세라믹의 변위를 증대시키는 측면에서 서로 다른 구조를 이용하고 있다. 또한 Pennsylvania 대학의 경우, 자동차엔진이 가해주는 힘이 일정한 상태에서 생성되는 전류량을 증가시키기 위해 세라믹을 다층 구조로 제작하여 사용하였다.

세라믹은 매우 단단하여 (Hard) 적은 진동으로는

변형을 일으키기 어려우므로 적은 진동을 효과적으로 세라믹에 전달하여 세라믹의 변위를 확대시키기 위하여 캔틸레버형 발전기구조가 많이 연구되고 있다 (그림 3). 압전 발전기의 최대변위는 압전 발전기의 고유 주파수 (Natural Frequency)가 진동체의 주파수와 일치할 때, 즉 압전 발전기가 진동체와 공진될 때, 발생한다. 그러나 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 진동체의 주파수는 수백 Hz로 1 cm 세라믹이 나타내는 대략적인 공진주파수 100 kHz와 비교해서 매우 낮다 [1]. 세라믹 자체만을 이용하여 캔틸레버를 제작할 경우에는 세라믹의 길이를 크게 하여 주파수를 낮출 수 있으나 소형화란 측면에서 어려움

이 있다. 따라서 적은 진동에서 진동체와 공진을 일으켜 세라믹의 변위를 확대하고 발전효율을 증가시키기 위해서 세라믹을 비교적 유연한 기판에 부착하여 제작한 캔틸레버형 발전기 구조가 많이 이용되고 있다. 캔틸레버형 압전 발전기에 사용되는 기판(Substrate)은 세라믹에 비해 탄성이 우수하며, 세라믹을 어느 정도 변형시킬 수 있는 강도를 가져야 한다. 만약, 기판이 너무 약하면 (Soft) 기판의 진동이 세라믹에 효과적으로 전달되지 못한다. 반면, 압전 폴리머는 매우 유연하여 (Soft) 공진주파수 낮으므로 공진주파수를 높이기 위해서 기판의 강도가 압전 폴리머보다 커야한다. 따라서 이러한 여러 가지 상황을 고려하여 기판 재질, 기판의 길이가 결정되어야 한다 [11].

2.3 압전 에너지 발전 재료

대형 에너지 발전은 태양발전, 풍력, 열발전 등이 경제성을 가지고 이용될 수 있으며, 압전 발전은 생성되는 전류량이 적어 센서노드 등의 구동에 필요한 소형발전에 이용될 수 있다. 압전 발전기 효율은 외부의 진동(기계적) 에너지를 압전 재료에 전달하는 구조의 효율성, 진동에너지를 전기에너지로 변환하는 재료특성, 생성된 전기에너지를 획득하여 저장할 수 있는 회로에 의해 결정된다 [12].

압전 재료에서 발생하는 전기에너지의 크기는 식 1에서 외부의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하는 재료 특성, 전기-기계결합계수 (k , Electro-mechanical Coupling Coefficient)에 의해 결정된다.

$$u_{max, output} \sim -\frac{1}{4} \frac{k^2}{Y} T^2 \quad (1)$$

u 는 생성되는 최대 전기에너지, Y 는 재료의 Young's Modulus, T 는 재료에 가해주는 응력의 크기를 나타낸다. 한편, 재료의 전기-기계결합계수 (k)는 식 2에서와 같이 표현된다.

$$k^2 = \frac{Electrical\ Energy}{Mechanical\ Energy} \propto \frac{d^2}{\epsilon} \propto d \cdot g \quad (2)$$

여기에서 $d(p\ C/N)$ 는 재료의 압전 상수, ϵ 는 재료

의 유전율, $g (= d/\epsilon [V \cdot m/N])$ 는 재료의 압전 전압 상수로 압전 상수를 재료의 유전율로 나눈 값이다.

한편, 전기회로에서 전력(에너지)은 식 3과 같이 전류, 전압, 시간의 곱으로 계산되며, 식 1에서 얻어지는 에너지도 전류, 전압, 시간의 곱으로 표현된다 [13].

$$전력 = 전류(A) \times 전압(V) \times 시간(h) = W \cdot h \quad (3)$$

진공펌프와 같이 규칙적으로 진동하는 진동체의 주파수는 일정하므로 같은 진동체에 부착한 압전 발전기의 출력 에너지는 전류와 전압의 곱에 의해서만 결정된다. 그러나 전체 에너지는 전압이 높고 전류가 작은 경우와 전압이 낮고 전류가 큰 경우가 있다. 소형 센서노드를 구동하기 위한 소형 발전기는 생성된 전류를 2차 전지 또는 슈퍼 커패시터에 저장하므로, 충전시간을 단축하기 위해서는 일정 전압이상에서 전류값이 큰 것이 유리하다.

압전 재료가 생성하는 전류값을 이해하기 위해서는 재료내부에서 일어나는 현상을 이해해야 한다. 일반적으로 강유전체 재료는 우수한 압전 특성을 나타내며 PZT도 강유전 재료중의 하나이다. 강유전 재료는 일정방향으로 자발분극을 가지며 외부에서 가해주는 전압에 의해 자발분극의 배열 방향이 달라지는 특성을 나타내며, 이 때 분극의 재배열에 의해 그림 4와 같이 이력곡선을 나타낸다. 그림 4에서 한 방향으로 배열된 분극의 크기는 P_r 이며 외부에서 응력 ($T = F/A$, 응력 = 힘/면적)을 가하면 분극의 재배열에 의해 약간의 분극 변화가 (ΔP)가 발생한다. 분극 변화는 식 4와 같이 표현되며, 일반적으로 강유전체 재료에서 Electrical Displacement (D)는 분극 (P , Polarization)과 거의 같은 값을 나타낸다.

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (4)$$

여기에서 d 는 압전 상수, ϵ^T 는 일정 응력조건에서 압전 재료의 유전율을 나타내며, E 는 압전 재료에 가해주는 전기장의 크기를 나타낸다.

외부응력에 의해 발생한 분극변화의 시간에 따른

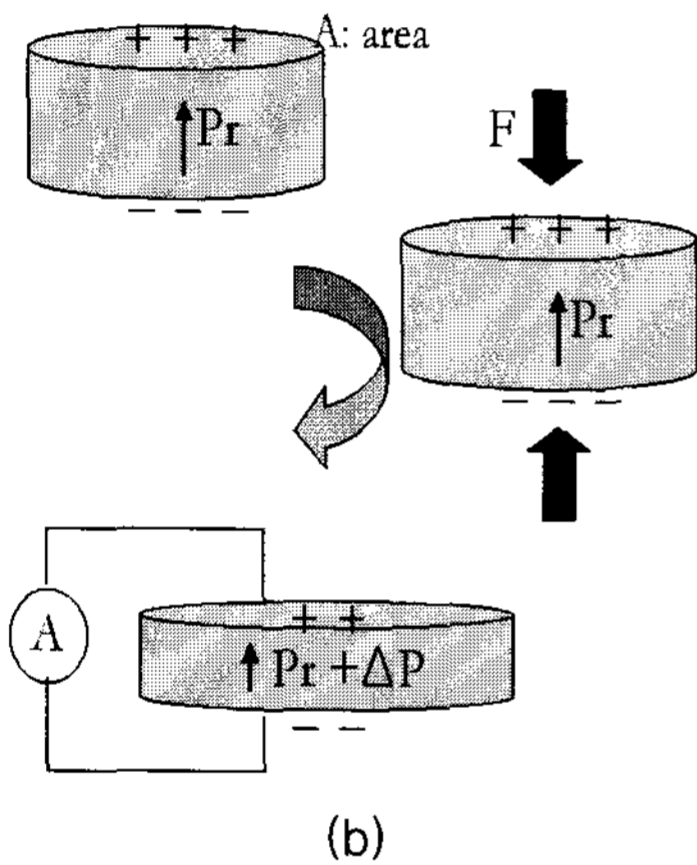
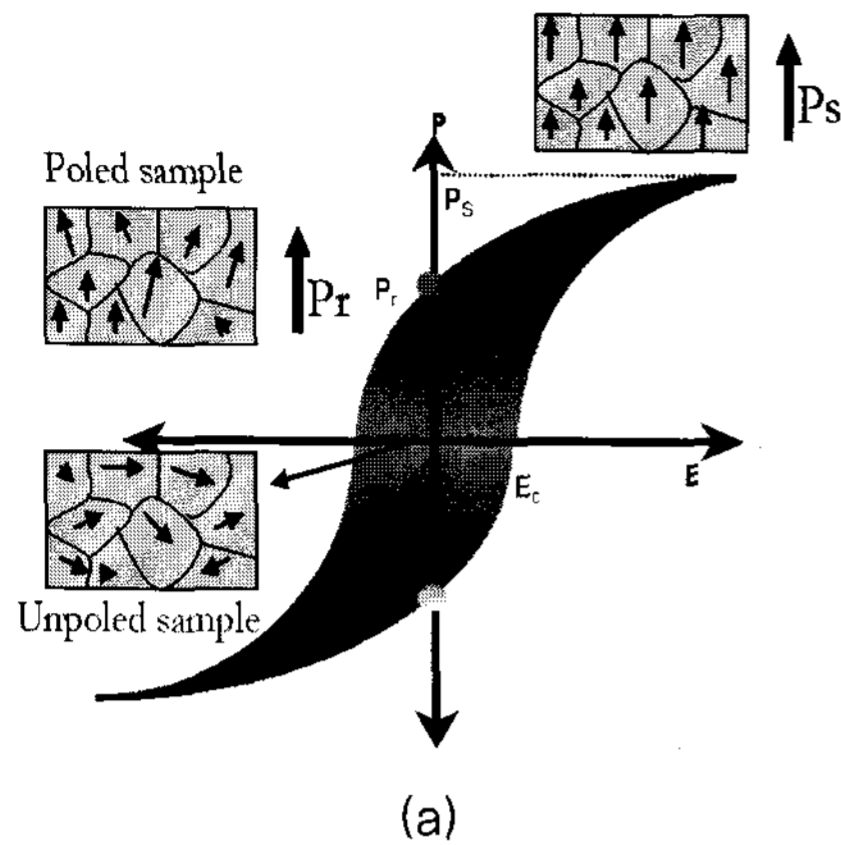


그림 4. 압전 재료의 전류생성.

변화는 식 5에서와 같이 전류값을 발생하며 압전 재료를 외부저항과 연결하였을 때 전압 값으로 측정할 수 있다.

$$i = \frac{A \Delta P}{dt} \quad (5)$$

여기에서 i 는 생성되는 전류 크기를 나타낸다. 식 5에서 시간 변화는 진동체 주파수의 역수로 진동체가 주어지면 일정한 값을 가진다. 따라서 발생하는 전류를 증가시키기 위해서는 분극 변화를 크게 하거나 압전 재료의 유효면적을 증가시켜야 한다. 분극 변화의 크기는 압전 재료의 압전 상수에 비례하므로 압전 상수가 큰 재료를 개발해야 하거나, 재료를 다

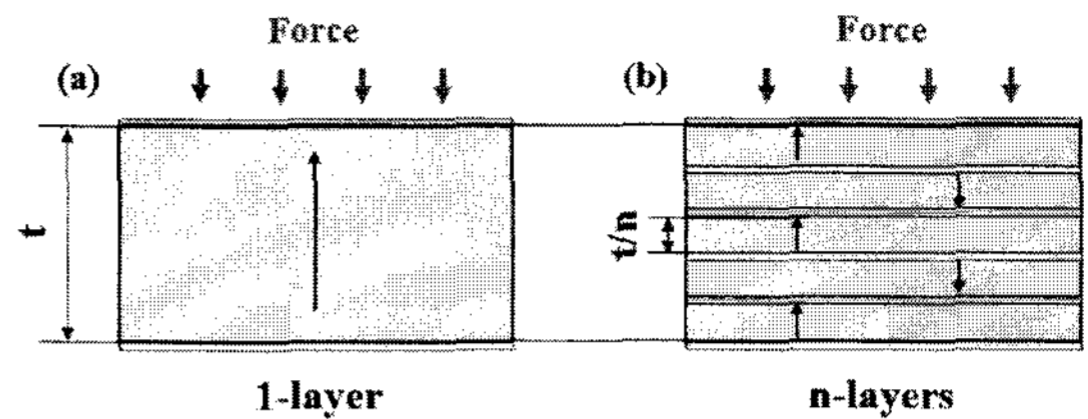


그림 5. (a) 두께 t의 Bulk형 세라믹 (b) 한 층의 두께가 t/n인 n층의 적층 세라믹.

층구조로 제작하여 유효면적을 증가시킬 수 있다 [14]. 그러나 전류량을 증가시키기 위해 다층구조를 제작할 때 한 층의 두께가 얇아지면 발생하는 전압이 적어지므로 2차 전지 또는 슈퍼 커패시터의 충전 전압을 고려하여 한 층의 두께가 결정되어야 한다.

일정한 Electrical Displacement (D)조건 (Open Circuit 상태)에서 압전 재료의 출력 전압은 식 6과 같이 압전 전압상수(g)와 응력의 크기에 의해 결정된다. 만약, 그림 5와 같이 전류를 증가시키기 위해 다층 구조로 제작할 경우, 같은 조성의 압전 재료를 이용하므로 압전 전압상수 (g)는 같은 값을 가지며 응력이 가해지는 면적이 같으므로 출력되는 전기장 (E)의 크기는 같게 된다. 그러나 전기장 ($E = V/t$)은 전압을 두께로 나눈 값이므로 압전 재료의 두께가 얇아지면 출력 전압도 감소하게 된다.

$$E = gT + (1/\epsilon^T)D \quad (6)$$

따라서 압전 발전기를 소형화하기 위해서는 압전 상수 (d)와 압전 전압상수 (g)가 동시에 큰 재료가 개발되어야 한다. 압전 상수를 재료의 기본적인 물질 상수 (Q: 전왜상수)를 이용하여 표현하면 식 7과 같다 [15-16].

$$d = 2P \cdot Q \cdot \epsilon \quad (7)$$

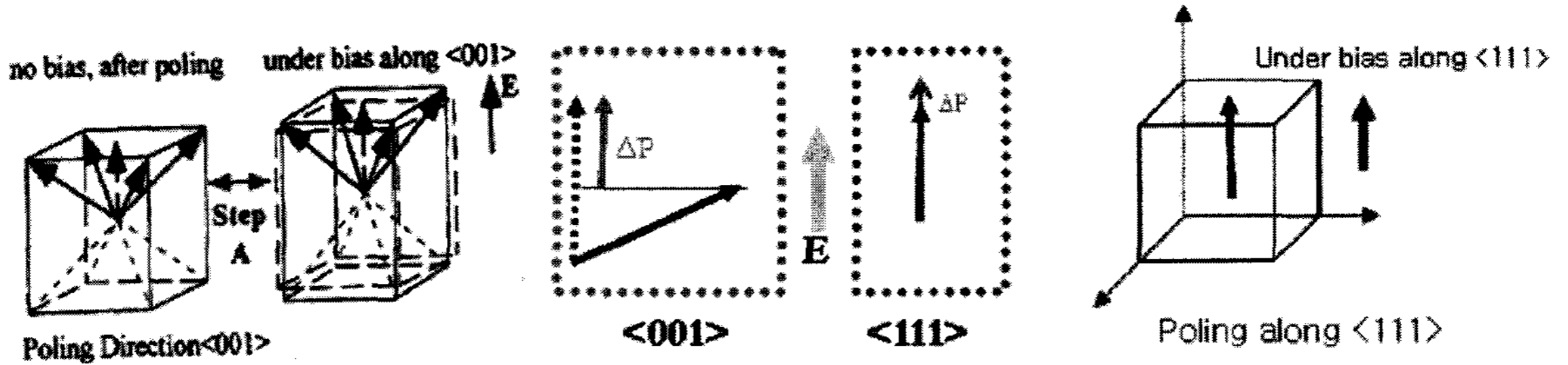


그림 6. Rhombodedral 결정을 <001>방향과 <111>방향으로 분극하여 전압을 가했을 때 나타나는 분극변화.

식 7에서 알 수 있듯이 유전율이 높은 재료는 높은 압전 상수를 보인다. 그러나 압전 전압계수는 압전 상수를 유전율로 나눈 값이므로 유전율을 높이면 압전 전압계수가 적어지므로, 압전 계수와 압전 전압계수를 동시에 높일 수 없음을 알 수 있다. 일반적으로 압전 재료는 매우 작은 전류와 높은 전압으로 대표되는 물질이므로, 소형 에너지 발전에 사용되기 위해서는 전압보다는 전류량의 크기를 높이는 연구가 되어야 할 것이다.

전류를 증가시키는 위해서는, 앞에서 서술한 것과 같이 다층구조의 세라믹을 제조하거나 주어진 응력에서 분극변화를 크게 해야 한다. 외부 응력에 따른 분극크기 변화의 크기는 압전 상수와 비례하는 것으로 압전 재료의 종류에 따라 다르며, 일반 PZT계 압전 재료의 경우 Soft한 재료가 Hard한 재료보다 크다. Hard PZT는 외부에서 가해주는 응력에 의해 자발 분극 크기만 변화하는 반면, Soft PZT는 자발 분극의 크기 변화뿐만 아니라 분극의 회전에 의한 분극 변화가 나타나 큰 분극변화를 얻을 수 있다. 그러나 Soft PZT세라믹에서의 특성은 수많은 Domain이 통계적으로 배열되면서 나타나는 것이므로, 최대의 특성을 얻기 위해서는 분극을 한 방향으로 배열할 수 있는 단결정이 유리하다. 특히, 자발 분극과 다른 방향으로 단결정을 배열하여 전압을 가하면 분극 회전에 의한 분극 변화가 크게 발생한

다고 알려져 있다 [17]. 그림 6은 <111>방향으로 자발 분극을 가지고 있는 Rhombohedral $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbTiO_3$ (PZN-PT) 결정을 <001>방향과 <111>방향으로 배열한 후 전압을 가했을 때 나타나는 분극변화를 보여주고 있다. <111>방향의 자발 분극이 <001>방향으로 가해진 전압에 의해 <001>방향으로 회전하면서 나타내는 분극변화가 <111>방향의 자발 분극을 <111>방향으로 전압을 가했을 때 나타나는 분극 변화보다 큰 것을 알 수 있다. 이와 같이 단결정 상 (Phase)의 종류, 결정 방향, 분극방향에 따라 서로 다른 크기의 분극변화를 얻을 수 있으므로 이를 이용한 압전 에너지 발전기 연구가 요구되고 있다.

3. 결론

압전 재료를 이용한 소형 에너지 발전기는 유비쿼터스 센서 네트워크의 능동형 센서노드의 구동전원으로 많이 연구되고 있다. 일반적으로 압전 재료는 적은 전류와 높은 전압으로 대표되며, 재료의 기본적인 특성상 전류와 전압을 동시에 증가시킬 수는 없다. 따라서 압전 에너지 발전기가 실제적으로 응용되기 위해서는 전류를 높이는 공정 및 재료가 개발되어야 한다. 전류를 증가시키는 위해서는 압

전 재료를 다층형으로 제작하여 전류 발생 면적을 증가시키거나, 분극의 크기 변화가 큰 재료를 개발해야 한다. 특히, 압전 단결정에서 분극방향과 전압 방향을 다르게 하면 분극 회전에 따른 분극변화를 크게 할 수 있으므로, 고효율의 소형 압전 발전기 제작을 위한 압전 단결정 재료에 관한 많은 연구가 기대된다.

참고 문헌

- [1] S. Roundy, P. K. Wight and J. Rabaey, "A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes", *Comput. Commun.*, 26:1131-1144, 2003.
- [2] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics", *IEEE Pervasive Computing*, 4:18-27, 2005.
- [3] G. K. Ottman, H. F. Hoffman, A. C. Bhatt and G. A. Lesieutre, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply", *IEEE Trans. Power Electron*, 18:696-703, 2003.
- [4] M. Philipose, J. R. Smith, B. Jiang, A. Mamishev, S. Roy and K. Sundara-Rajan, "Battery-Free Wireless Identification and Sensing", *IEEE Pervasive Computing*, 4: 37-45, 2005.
- [5] S. Roundy, E. L. Leland, J. Baker, E. Carleton, E. Reilly, E. Lai, B. Otis, J. M. Rabaey, P. K. Wright and V. Sundararajan, "Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers", *IEEE Pervasive Computing*, 4:28-36, 2005.
- [6] A. Badel, A. Benayad, E. Lefeuvre, L. Leburn, C. Richard, and D. Guyomar, "Single Crystals and Nonlinear Process for Outstanding Vibration-Powered Electrical Generators", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 53:673-684, 2006.
- [7] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, L. Peit, D. Guyomar "A Comparison between several Vibration-Powered Piezoelectric Generators for Standalone systems", *Sens. Actuators A*, 126: 405-416, 2006.
- [8] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gershenfeld. "Parasitic power harvesting in shoes". In *IEEE Intl. Symp. on Wearable Computers*, 132-139, October 1998.
- [9] N. S. Shenck and J.A. Paradiso. "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics". *IEEE Micro*, 21(3):30-42, May 2001.
- [10] Hyeoungwoo KIM, "IMPEDANCE ADAPTATION METHODS OF THE PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING," Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State Univ. 2006.
- [11] Analytical Models to Predict Power Harvesting with Piezoelectric Materials - Timothy Eggborn, MS Thesis, VT, 2003
- [12] 정대용, 송현철, 윤석진, "Piezoelectric energy harvesting, 전기전자재료, 20(12):45-54 2007.
- [13] "쉽게 배우는 회로이론", 박건작, 북스힐(주) 2008.
- [14] Hyun-Cheol Song, Hyung-Chan Kim, Chong-Yun Kang, Hyun-Jai Kim, Seok-Jin Yoon, Dae-Yong Jeong, "Multilayer piezoelectric energy scavenger for large current generation", *J Electroceram* DOI: 10.1007/s10832-008-9439-9, 2008.
- [15] J. Zhao, Q. M. Zhang, N. Kim and T. Shrout, "Electromechanical Properties of Relaxor Ferroelectric Lead Magnesium Niobate-Lead Titanate Ceramics", *Jpn. J. Appl. Phys.* 43:5658-5663, 1995.
- [16] J. F. Nye, "Physical Properties of Crystals :Their Representation by Tensors and Matrices", Oxford University Press, New York, 1985.
- [17] S. Park and T. R. Shrout, "Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals", *J. Appl. Phys.* 82:1804-1811, 1997.

저|자|약|력



성 명 : 정대용

- ◆ 학 력
 - 1994년 서울대 무기재료공학과 공학사
 - 1996년 서울대 대학원 공학석사
 - 2000년 서울대 대학원 박사수료
 - 2004년 Pennsylvania State Univ. Materials 공학박사

- ◆ 경 력
 - 1994년 - 1995년 한국과학기술연구원 위촉연구원
 - 1996년 - 1997년 COSMO Ind. 연구원
 - 2004년 - 2005년 TRS Technologies 연구원
 - 2005년 - 2006년 Tohoku Univ. RIEC Post Doc.
 - 2006년 - 2008년 KIST 박막재료연구센터 선임연구원
 - 현재 명지대 신소재공학과 조교수



성 명 : 윤석진

- ◆ 학 력
 - 1983년 연세대 전기공학과 공학사
 - 1985년 연세대 대학원 전기공학과 공학석사
 - 1992년 연세대 대학원 전기공학과 공학박사

- ◆ 경 력
 - 1995년 - 1996년 Pennsylvania State Univ., MRL, Post-doc.
 - 1988년 - 현재 KIST 박막재료연구센터 책임연구원
 - 2003년 - 현재 KIST 박막재료연구센터 센터장



성 명 : 송현철

- ◆ 학 력
 - 2004년 고려대 재료금속공학부 공학사
 - 2006년 고려대 대학원 재료공학과 공학석사

- ◆ 경 력
 - 2006년 - 현재 KIST 박막재료연구센터 연구원



성 명 : 강종윤

- ◆ 학 력
 - 1993년 연세대 전기공학과 학사
 - 1995년 연세대 대학원 전기공학과 석사
 - 2000년 연세대 대학원 전기컴퓨터공학과 박사

- ◆ 경 력
 - 2002년 - 2004년 The Univ. of Birmingham, Post-doc.
 - 2000년 - 현재 KIST 박막재료연구센터 선임연구원

