

압전빔의 진동을 이용한 마이크로 동력원의 에너지 변환 해석

이헌주[†] · 장영수* · 이윤표*(과기연)

Analysis of Energy Conversion Efficiency in Micro Power Generation using Vibrating Piezoelectric Cantilever

Heon Ju Lee, Young-Soo Chang and Yoon-Pyo Lee

Key Words : micro power generation(마이크로 동력원), piezoelectric(압전현상), energy harvest(에너지 수확), vibration(진동) and resonance(공진)

Abstract

We developed micro power generation system using piezoelectric materials. In our system, the ambient vibrating energy is converting to electric energy by deflection of piezoelectric beams. The system consists of energy generating parts, converting enhancement parts, electric regulation and charging parts ,and interface with small-energy-consuming mobile devices. The geometry of piezoelectric beams, the source of vibrating energy, and the electric load of target application determine the characteristics of generating electric power, such as impedance, voltage, current and power density. Therefore, we made a model for analysis of generating power with given information such as piezoelectric materials, geometry, vibration type, and mass. With this model, we can calculate capacitance of piezoelectric beams, generating voltage, current, and power. To obtain maximum energy transfer efficiency, we approached this study in the view of material, electrical, and mechanical engineering

기호설명

W_m : 압전빔에 전달된 기계에너지 (J)
 W_e : 압전빔으로부터 발생한 전기에너지(J)
 η : 에너지 변환 효율
 η_m : 압전재료의 변환효율, $K^2 (W_m/W_e)$
 η_c : 공진/임피던스 매칭시 회로변환효율
 K^2 : 전기기계결합계수, η
 k : 압전빔의 탄성계수 (N/m)
 R_L : 부하의 저항 (Ω)
 f_n : 고유진동수 (Hz)
 Z_p : 압전체의 내부 임피던스 (Ω)
 S : 변형률 (단위길이당 신축)

s : 영률의 역수, $1/Y$ (m^2/N)
 T : 응력 (N/m)
 E : 전기장의 세기 (V/m)
 d : 압전상수 (압전왜곡 정수)
 ϵ : 유전율
 C : 캐패시턴스 (F)
 Q : 변위전달률, X/Y

1. 서론

변형이 일어나면 전압을 발생시키는 압전물질은 이용한 마이크로 동력원 개발에 관한 연구가 최근 매우 증가하고 있다. 신발 밑바닥에 압전물질을 설치하여 걸음을 걸을 때마다 누르는 기계적 에너지로 변형을 유발하여 전기에너지를 발전하는 방식(1)이나 바람개비를 이용하여 차량이 지나갈 때, 발생하는 바람을 이용하여 압전물질을

[†] 한국과학기술연구원 지능시스템연구본부
E-mail : hlee@kist.re.kr
TEL : (02)958-5697 FAX : (02)958-6709

* 한국과학기술연구원 지능시스템연구본부

변형시켜 고속도로 중앙분리대 표시등을 작동하게 하는(2)등의 기초적인 응용연구 등이 발표 되었다. 여기서 한 단계 나아가 MEMS 기술을 응용하여 초소형 마이크로 발전 시스템을 개발 하려는 연구 또한 한창이다. 열에너지로 기포를 발생시켜 압전물질을 변형시킴으로써 에너지를 얻는 마이크로 동력원 개발 연구도 활발하다(3,4). 이러한 연구들은 군사적 목적의 이동형 전원을 대체하기 위한 것 이외에도 ubiquitous sensor and network (USN or wireless sensor and network, WSN)에 응용이 가능한 이동형 전자기기의 전원으로서의 수요가 증가하고 있기 때문이다. 특히, 능동형 RFID, 자가독립형 센서류, USN 용 센서 등은 많은 수량이 넓은 범위에 걸쳐 설치되기 때문에 배터리의 교체 시기뿐 만 아니라 교체 자체도 매우 번거롭고 때로는 위험한 경우도 있다. 이에 외부로부터의 전기적인 에너지의 공급 없이, 주변에 산재되어 있는 버려지는 에너지(움직임, 진동 이나 열)를 수확하여 스스로 발전하여 반영구적으로 사용이 가능한 동력원에 관한 연구가 관심을 받기 시작했다. Table 1 은 우리주변에 산재한 다양한 종류의 진동원으로 진동을 이용한 마이크로 동력원 연구에 있어서 무한한 응용분야를 제시해 준다(5). 따라서 본 논문에서는 Fig. 1 과 같이 캔틸레버 빔 형태의 압전빔이 진동할 때 발생하는 전력을 정류하고 충전하는 데 있어서, 압전재료의 기계적/전기적 특성, 압전재료의 변환효율, 외부 진동에 따른 압전빔의 공진현상, 정류 및 축전회로, 임피던스 매칭 등에 대해 분석하고, 최대의 변환 효율을 낼 수 있도록 에너지 변환 과정을 추적해보았다.

Table 1 Acceleration magnitude and frequency of fundamental vibration mode for various sources

Acceleration (m/s²) magnitude and frequency of fundamental vibration mode for various sources

Vibration source	A (m/s ²)	F _{peak}
Car engine compartment	12	200
Base of 3-axis machine tool	10	70
Blender casing	6.4	121
Clothes dryer	3.5	121
Person nervously tapping their heel	3	1
Car instrument panel	3	13
Door frame just after door closes	3	125
Small microwave oven	2.5	121
HVAC vents in office building	0.2-1.5	60
Windows next to a busy road	0.7	100
CD on notebook computer	0.6	75
Second story floor of busy office	0.2	100

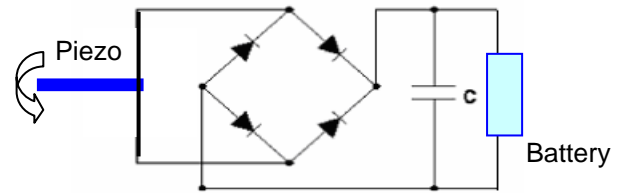


Fig. 1 Schematic of micro power generation using vibrating piezoelectric cantilever beam

2. 압전빔의 형상에 따른 발생전력

압전빔의 형상에 따라 같은 기계적 에너지를 수확 하더라도 발생하는 전기적 에너지의 특성이 달라 질 수 있다. 즉, 발생 전압과 발생 전류는 외부 진 동조건이 정해지면, 압전재료의 형상에만 의존하 게 된다. 개괄적인 시스템의 효율을 계산하고 최 대 효율로 마이크로 동력원을 사용하기 위해서는 압전빔의 형상에 따른 발생전력 분석이 필요하다.

2.1 압전현상에 대한 기본식

압전현상에 대한 기본식은 표현 방식에 따라 여러 가지로 나타낼 수 있지만, 아래와 같은 d-type 이 일반적인 형태이다.

$$S = s^E T + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2)$$

여기서, S 는 strain, s 는 영률의 역수($1/Y$), T 는 stress, E 는 전기장, D 는 전기변위, d 는 압전상 수를 나타낸다(기호설명 참조). 마이크로 동력원으 로 응용되는 캔틸레버 형태의 압전빔의 경우, 전 기장이 없고, 유전변위도 없으므로, 식(1)와 식(2) 는 다음과 같이 정리된다.

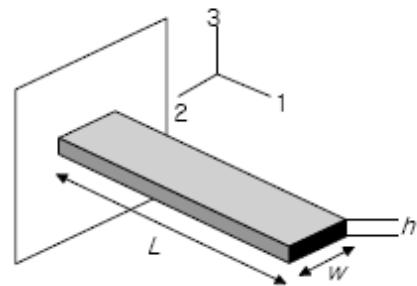


Fig. 2 Geometry of piezoelectric cantilever beam

$$0 = \varepsilon^T E + YdS \quad (3)$$

Fig. 2의 압전빔 형상과 식(3)을 정리하여, strain에 따른 발생전압 식을 유도하면 다음과 같다.

$$E_3 = -\frac{Yd_{31}S_1}{\varepsilon_o\varepsilon_r} \quad (4)$$

$$V = E_3h = -\frac{Yhd_{31}S_1}{\varepsilon_o\varepsilon_r} \quad (5)$$

전극이 빔의 위아래로 퍼져있다면, 압전빔의 전기용량(capacitance)역시 아래와 같이 계산이 가능하다.

$$C = \varepsilon_o\varepsilon_r \frac{Lw}{h} \quad (6)$$

2.2 압전빔의 형상과 발생전력 계산식

식 (5)에서 알 수 있듯이, 발생전력은 압전물질이 정해졌을 경우, strain, S_1 에 의해서 결정이 된다. 이 값은 Fig. 4의 L , w , h 에 의존하는 값으로 외부로부터 가해지는 힘, P 를 알고 있을 경우 수학적으로 계산할 수 있다. 기초 재료역학으로부터 압전빔의 변형에 따른 전압발생 식은

$$V = -\frac{Yhd_{31}}{\varepsilon_o\varepsilon_r} \frac{3\delta(y_2 - y_2)}{4L^2} \quad (7)$$

위와 같이 유도된다. Bimorph 타입으로 제작된 압전빔의 경우, 압전체의 길이, 폭, 두께, 유전율 등의 물성치를 알면, 변형량에 따른 발생 전압, 전류, 전력을 계산 할 수 있다.

3. 고유진동수와 공진

에너지 변환 효율을 최대화하기 위한 가장 효과적인 방법으로 외부의 진동과 공진이 일어나도록 하는 것이다. 사이즈가 작아지면, PVDF 나 MFC 와 같이 영률이 매우 작은 압전물질의 경우에도 상대적으로 고주파의 공진주파수를 갖게 된다. 이에 질량을 빔 끝 단에 매달아 공진주파수를 맞추어 주는 실험을 하였다.

3.1 진동 및 공진 실험

압전빔의 진동은 Fig. 3 과 같이 기저진동으로 놓고 해석이 가능하다. 식 (8)은 기저진동의 경우 주파수에 따른 변위전달률(Q)을 나타내는 식이다. Fig. 4 는 진동 및 공진 실험을 위한 가진 시스템

으로, 주파수와 변위를 임의로 조절할 수 있도록 주파수 변환기와 증폭기로 가진기를 구동하며, 초고속 카메라와 연동되어 빔의 변형량(δ)을 측정할 수 있도록 하였다. 고유진동수, 순간적인 타격으로 정현파로 감쇄되는 전압파형의 푸리에 변환을 통해 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}} \quad (8)$$

PZT, MFC, PVDF 중 영률이 가장 적은 PVDF bimorph 빔으로 공진 시켰을 때, 공진주파수 부근에서 변위전달률이 20 배를 넘는 현상을 볼 수 있었다. 이는 발생전력 또한 변위전달률 만큼 이득을 볼 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 외부진동에 대해 공진 일어나도록 빔형상을 설계해야 변환 효율을 최대로 얻을 수 있다.

3.2 추가 질량에 따른 공진주파수 변화

세라믹 물질인 PZT 는 영률이 50GPa 이상으로 매우 높아 크기가 작아질수록 고유진동수는 고주파영역으로 들어간다. 이는 임피던스가 작아진다는 유리한 면도 있지만, 진폭이 매우 작아져 원하는 만큼의 전압을 얻을 수 없게 된다. PVDF 나 MFC 의 경우에도 크기가 작아짐에 따라 공진 주파수가 증가하는 것을 알 수 있는데, 주변 진동원에 비하여 고유진동수가 많이 높은 경우, 빔 끝 단에 질량을 추가 함으로써 공진주파수를 바꿀 수 있다.

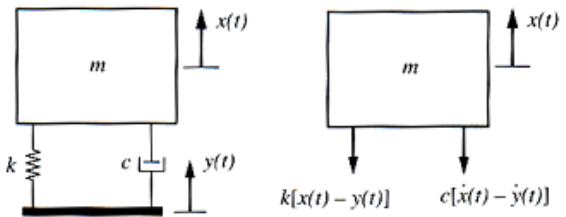


Fig. 3 Simple modeling of piezoelectric beam vibration system

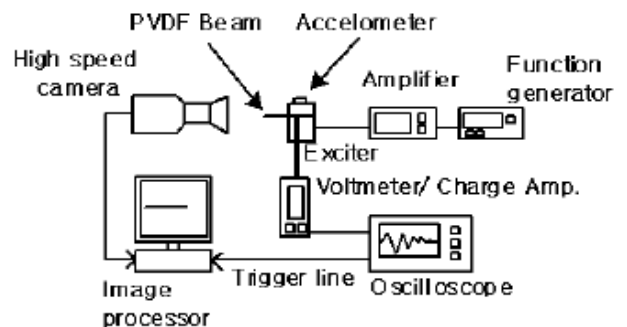


Fig. 4 Experimental apparatus

식(9)은 이에 관한 이론식이고, Fig. 5는 실제 실험을 통해 얻은 결과이다. 질량이 증가함에 따라 공진주파수도 감소하는 것을 볼 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m+m_{add}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{12\pi^2 f_o^2 EI}{3EI + 4\pi^2 f_o^2 L^3 m_{add}}}$$

(9)

Fig. 6은 질량을 증가시키면서 압전빔으로부터 발생하는 전하를 Charge amplifier를 이용하여 측정한 결과이다. 주목할 만한 것은 세가지 경우 모두 질량을 증가함에 따라, 공진 주파수가 낮아지는 반면, 발생 전하량에는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있었다. 이는 압전빔의 변형, 즉 변위전달률이 일정하게 유지되면서 고유진동수 변화가 가

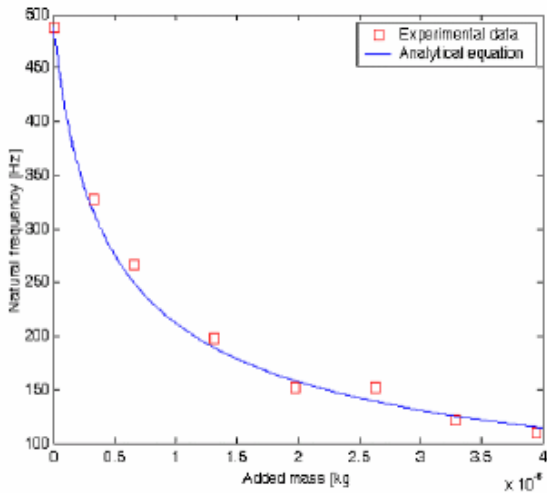


Fig. 5 Decrease of natural frequency by added mass to the tip of the cantilever beam

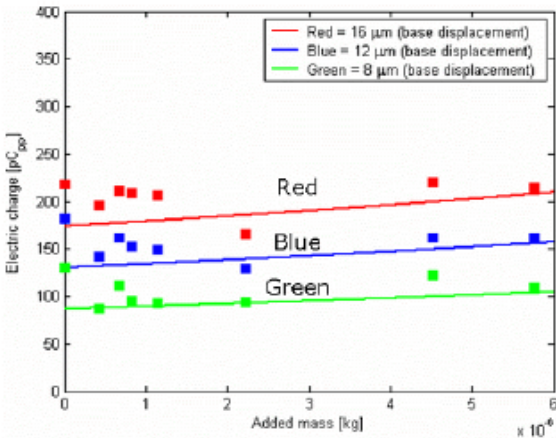


Fig. 6 Generated electric charge from piezoelectric beam with respect to added mass

능함을 보여주는 것으로, 외부의 진동조건에 따라 빔형상 조절 만으로 공진이 불가능할 경우, 질량을 매달으로써 공진이 가능해 진다는데 큰 의미가 있는 현상이다.

4. 압전체의 변환효율

4.1 임피던스 매칭

압전현상을 이용해 진동에너지를 전기에너지로 변환하는데 있어서 가장 중요하게 고려해야 할 것이 바로 임피던스 매칭이다. 압전빔은 변형을 하면 전압을 발생시키고, 내부저항이 매우 크므로 아래 Fig. 7과 같이 내부 임피던스와 전압원으로 가정할 수 있다. 이때, 임피던스와 출력과의 관계를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$Z_{Th} = Z_S = R_S \pm jX_S \quad (10)$$

$$Z_L = R_L \pm jX_L \quad (11)$$

$$P_{avr} = \frac{1}{2} |I|^2 \text{Re}(Z_L) \quad (12)$$

$$I = \frac{V_S}{Z_S + Z_L} \quad (13)$$

위의 식을 간단히 정리하여 발생평균전력, P_{avr} 에 대하여 정리하면 (K 는 상수),

$$P_{avr} = K \frac{R_L}{(R_L + R_S)^2 + (X_L + X_S)^2} \quad (14)$$

식(5) 같이 표현되고, 미분하여 최대일 때의 조건을 구하면,

$$R_L = R_S \quad \text{그리고} \quad \pm jX_L = \mp jX_S \quad (15)$$

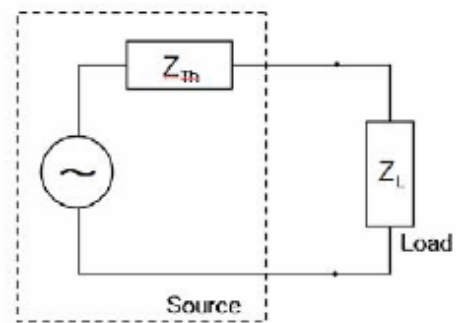


Fig. 7 Equivalent circuit of piezoelectric materials

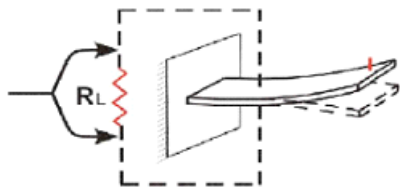
일 때, 최대값을 갖는다. 따라서 압전빔을 설계하는데 있어서, 사용하고자 하는 부하와 진동조건에 따라서 압전재료의 종류나 형상을 설계해야 할 것이다.

4.2 기계에너지/전기에너지 계산식

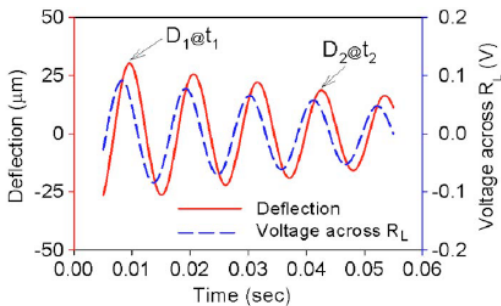
Fig 8 의 (a)와 같은 캔틸레버 형태의 압전빔에 순간적인 충격을 주면, 고유진동수로 진동하면서, Fig 8 의 (b)과 같은 전압파형을 보이면서 감쇄한다(6). 이때, 실선은 빔 끝단의 변형량이고, 점선은 저항 R_L 에 걸리는 전압이다. R_L 은 부하의 저항값이고, 앞절에서 살펴 보았듯이 압전빔의 임피던스와 R_L 이 같은 때 발생 전압이 최대가 된다.

Fig 2 의 (b)에서와 같이 t_1 일 때의 변위(D_1)에서 t_2 일 때의 변위(D_2)로 진동이 감쇄하는 동안 빔으로 전달된 기계에너지는 탄성감소에 의한 에너지 손실로 볼 수 있다. 따라서, t_1 에서 t_2 로 운동하는 동안 빔에 전달된 기계에너지, W_m 은 아래와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 k 는 스프링 상수이다.

$$W_m = k(D_1^2 - D_2^2)/2 \quad (16)$$



(a)



(b)

Fig. 8 Vibrating piezoelectric cantilever beam (a) connecting road resistance and its output voltage when a single impact induced at the beam (b)

또한, 이때 압전빔으로부터 발생한 전기에너지는, W_e , 저항 R_L 에 걸리는 전압을 이용하여 아래와 같이 계산 할 수 있다.

$$W_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_{R_L}(t)^2 dt}{R_L} \quad (17)$$

압전물질의 변환효율, η 은 아래와 같다.

$$\eta = \frac{W_e}{W_m} \times 100 \quad (18)$$

4.3 압전빔의 변환효율

우리에게 널리 알려진 압전물질로는 세라믹 계열의 PZT 가 있다. 고급 라이터의 점화장치나 가습기의 초음파 진동자로 널리 사용되는 물질이다. 폴리머 계열의 PVDF 또한 압전현상을 보이는데, PZT 보다는 열에 약한 단점이 있지만, 탄성이 강하여 커다란 변형이 있는 곳에 응용할 수 있다. Macro Faber composite(MFC)라 하여 독일의 Smart material 사에서 개발한 PZT 중합체가 있는데, 이는 PZT 를 매우 가늘게 가공하여 에폭시로 여러가닥을 방향성있게 접합하는 방식으로 제작된 압전 물질인데, PZT 에 비하여 탄성이 강하며, 같은 힘에 대해 PVDF 보다 발생전압이 높은 특징을 가지고 있다(7). 실험의 편의상, 내부 임피던스가 상대적으로 작으며, 공진주파수도 상대적으로 낮은 'MFC 28H06-011D' 라는 길이 28mm 폭 6mm 의 MFC 두장을 에폭시로 붙인 bimorph 형태의 빔을 사용하였다. R_L 은 진동조건, 압전체의 종류 및 형상에 따라 변하는데, MFC 의 capacitance 를 측정하고, 고유진동수(f_n)는 전압파형을 푸리에변환하여 찾으면, MFC bimorph 의 임피던스 Z_p 는

$$Z_p = Z_R + Z_C \approx Z_C = \frac{1}{2\pi f_n C} \quad (19)$$

이 된다. 압전빔의 변형은 2000 frame/sec 의 초고속 카메라를 이용하여 측정하였다. 스프링 상수는 빔 끝단에 질량을 아는 물체를 매달고 그 변형량을 측정하여 구하였다. Table 2 에 측정된 수치를 정리하였다. 이를 바탕으로 MFC bimorph 빔의 변환효율 η 을 구하면, 기계적 진동에너지의 약 21.5% 가 전기에너지로 변환 가능하다는 것을 알 수 있었다. PZT cantilever 빔의 경우 15~17%에 비하면(6) 변환효율이 다소 좋다고 할 수 있다. 같은 방법으로 PVDF bimorph 빔의 변환효율은 2~5%로 실험결과 다소 낮게 나왔다.

Table 2 Mechanical/Electrical properties of MFC 28H06-011D bimorph beam

f_n	C	Z_P	R_L	k	D_1	D_2
20.8 Hz	326 nF	12 k Ω	12 k Ω	109 N/m	1.38 mm	0.429 mm

5. 전기회로

5.1 배터리 충전효율

MFC 를 이용하여 7V 출력이 나오도록 10 Hz 로 가진시킨 후 2mAh, 4.7V Li-ion 배터리에 충전을 시켰다. 충전되는 전력량은 전류계를 이용하여 배터리에 공급되는 전류를 측정하고, 전압은 배터리 전압과 같다고 가정하여 전력을 계산하였다. Fig. 14 는 충전회로를 거치지 않고 정류회로만 거친 뒤 배터리 충전효율을 나타낸 그림이다. 배터리에 충전된 전압이 낮을수록 효율이 좋은 것을 알 수 있다.

6. 결론

압전빔의 종류와 기하학적 형상에 따라, 내부 임피던스, 고유진동수, 발생 가능한 전압 등이 결정 되기 때문에 압전빔 설계에 앞서 적용하려는 대상에 대한 진동원, 필요전력 등의 구체적인 조사가 앞서야 할 것이다. 공진을 위한 주파수는 압전재료 선정 및 질량추가를 통해서 맞출 수 있고, 임피던스는 압전빔의 폭, 길이, 두께 등을 조절함으로써 어느 정도 맞추어 줄 수 있다.

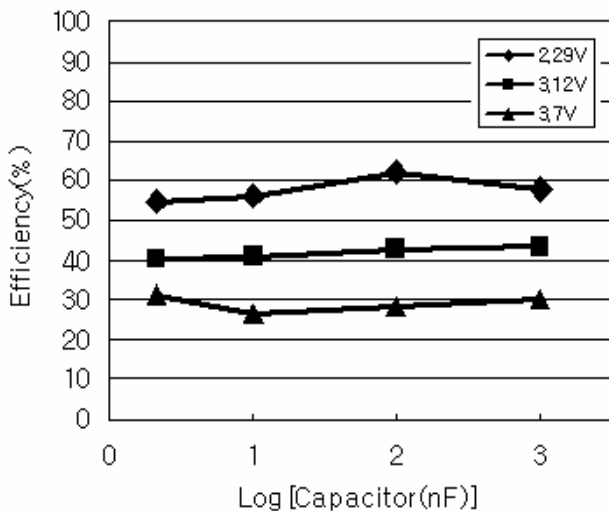


Fig. 9 Circuit charging efficiency of MFC with respect to various capacitors and battery voltages

이렇듯 모든 조건이 잘 만족할 경우 캔틸레버 빔 형태로 제작된 MFC 압전빔의 효율은 재료의 변환효율(21.5%)과 충전효율(30~60%)를 곱했을 때, 6~13%이다.

$$\eta = \eta_m \times \eta_c \quad (20)$$

7. 후기

본 논문은 기초기술이사회 전문연구사업 “유비쿼터스 마이크로 동력원 개발”에 지원을 받아 작성 하였습니다.

참고문헌

- (1) Kymissis, J., Kendall, C., Paradiso, J., Gershenfeld, N., 1998, “Parasitic Power Harvesting in Shoes,” 2nd IEEE conference on wearable computing.
- (2) Priya, S., 2005, “Modeling of electric harvesting using piezoelectric windmill,” Applied Physics Letter, Vol. 87, 184101.
- (3) Kim, H.-Y., Lee, H. J., Chang, Y.-S., and Lee, Y.-P., 2005, “Micro Power Generation Based on Thermal Bubbles,” KSME-JSME 3rd Heat Transfer conference, pp.71-73.
- (4) Weiss, W., Cho, J. H., McNeil, E., Richards, C., Bahr F. and Richards.. 2006, “Characterization of a Dynamic Micro Heat Engine with Integrated Thermal Switch,” Journal of Micromechanics and Micro engineering, Vol. 16, pp. S262-S269.
- (5) Roundy, S., Wright, K. and Rabaey, J., 2002, “A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes,” Computer Communications, Vol. 26, pp. 1131-1144.
- (6) Cho, J. H., Richards, R. F., Bahr, D. F., Richards, C. D. and Anderson, M. J., 2006, “Efficiency of Energy Conversion by Piezoelectrics,” Applied Physics Letter, Vol. 89, 104107.
- (7) Ruggiero, E., Park, G., Inman, D. J., 2001, “Smart Materials in Inflatable Structure Applications,” American Institute of Aeronautics and Astronautics.