

압전 효과를 이용한 에너지 포집 시스템에 관한 연구

최범규[#], 이제윤^{*}, 이우훈^{*}, 오재근^{*}

A Study on the Energy Scavenging System Using Piezoelectric Effect

Bumkyoo Choi[#], Je-yun Lee^{*}, Woo-hun Lee^{*} and Jae-geun Oh^{*}

ABSTRACT

Mostly used sensors have wired powering and two-way cable systems. It is difficult to employ wired sensor network in ubiquitous era because of a number of sensors and cables. Therefore, sensor networks move from wired systems to wireless systems for the future. However, the power source is a critical obstacle for wireless sensornodes. This research represents the new power source which supplies energy sensor node, maintains over 10 years, and thus replaces batteries with limit of lifetime. The system with piezo materials scavenges extra energies such as vibration and acceleration from the environment. Then it converts the scavenged mechanical energy to electrical energy for powering a sensor, a controller and a circuit for regulating voltage and transmitting sensor value. This study explains the properties of piezo material through theoretical analysis and experiments, and demonstrates powering sensor and transmitting data with stored energy (35mJ) for 14 sec. The developed system provides a solution to overcome the critical problem of making up wireless sensor networks.

Key Words : Ubiquitous (유비쿼터스), Piezoelectric (압전효과), Energy conversion system (에너지 변환 시스템), Wireless sensor network (무선 센서 네트워크)

기호설명

S = compliance
d = piezoelectric modulus
 ϵ = dielectric constant
k33 = coupling coefficient

1. 서론

현재 사용되는 대부분의 센서는 유선에 의해 전원 공급을 받고, 안정성이 확보된 유선의 형태로 데이터 송수신이 이루어지고 있는데, 유비쿼터스 시대에는 훨씬 다양한 분야에서 많은 양의 센서를 필요로 하기 때문에 유선으로 센서 네트워크를 구성하는 데는 한계가 있다. 특히, 배선을 위한 비용과 결선에 의해 발생하는 문제, 그리고 유지 보수를 위해 추가적으로 발생하는 비용으로 유발되는 비효율성에 의해 무선 센서 네트워크가 필수적이

접수일: 2007년 6월 19일; 게재승인일: 2007년 11월 23일

교신저자: 서강대학교 기계공학과

E-mail: bkchoi@sogang.ac.kr Tel. (02) 703-5639

* 서강대학교 기계공학과

다. 무선 센서 네트워크의 구현에 있어서 VLSI와 CMOS 공정과 같은 반도체 공정 기술의 발달로 저 전력 통신이 가능해지고, 통신 네트워크에 관한 인프라가 조성되면서 센서의 무선화와 관련된 연구가 진행되고 있다.^{2,4} 기존의 무선 센서는 외부에서 전원을 인가시켜주는 능동형 타입으로 대부분 배터리를 이용하여 센서와 데이터 전송 시스템을 구동한다. 그러나, 배터리 수명의 한계로 장기적인 작동을 요하는 무선 센서 네트워크의 구현에는 적합하지 않다. 무선 센서 네트워크의 이와 같은 문제점을 개선하기 위한 연구로 능동형 센서를 수동형 센서로 대체하고자 표면 탄성파를 이용하여 외부 impedance의 변화에 의해 반사파의 형상이 달라짐을 측정하는 방법과 자외 물질질을 이용하여 센서 외부의 환경 변화로 LC공진을 측정하는 방법이 진행 중이다.^{5,7} 또 다른 대체 방안은 장기적으로 전원을 공급하는 것으로 열전효과(thermoelectric effect)에 의해 에너지를 얻는 연구, 태양 전지처럼 빛을 이용한 광전 효과(photovoltaic effect)에 의해 에너지를 얻는 연구, 그리고 인간의 걸음이나 기계 진동에 의해 에너지를 얻을 수 있는 압전 효과(piezoelectric effect)와 관련된 연구들이 있다.⁸

진동을 이용한 에너지 저장에 대한 연구는 외국의 연구팀에서도 많이 진행되고 있는데, Virginia Polytechnic Institute의 지능형 재료 시스템 센터에서 PZT, Quick pack, MFC cantilever beam을 임의 가진하였을 때 배터리에 충전되는 시간을 측정하는 연구를 통해 PZT의 효율이 가장 좋다는 결과를 얻었고,¹¹ MIT에서는 PZT stack을 이용하여 사람이 걸을 때 뒤꿈치에서 발생하는 힘을 전기에너지로 변환, 저장하여 데이터 송신을 한 연구를 수행하여 500W를 0.9Hz로 인가하여 8.4mW의 에너지를 변환하였다.¹⁰

진동을 이용하여 에너지를 변환 시 공진 주파수에서 최대 효율이 나타나기 때문에 진동 주파수에 제약을 가하게 되는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 진동 에너지 자체를 이용하는 것이 아니라 진동 에너지를 이용하여 압전 물질에 Impact를 가하여 에너지를 변환 저장되게 설계를 하였다. 에너지 변환 시스템에 이용한 압전 세라믹은 외력의 방향과 전극의 방향이 같은 것인 33모드로, impact에 의해 인가되는 기계 에너지를 에너지 변환 시스템에 14초 동안 인가시켜 35mJ의 에너지가 저장되었으며, 이것은 2000uF

의 Capacitor를 충전 시키는 용량이다.

2. 압전 효과와 에너지 변환

2.1 압전 효과

압전 물질은 전기적 거동, 기계적 거동을 유발할 수 있는 재료로 그 응용 분야가 매우 광범위하다. 압전 효과는 force 센서 또는 변위 센서와 같은 센서 분야에서 사용될 수 있고, 역압전 효과는 모터나 정밀 이동을 요하는 장비의 액츄에이터 분야에 적용될 수 있으며 초음파와 신호를 생성하는데 이용되기도 한다. 쌍극자 모멘트를 갖는 압전체에 기계 에너지를 인가하였을 때 변환되어 발생하는 전기 에너지, 또는 전기 에너지를 인가하였을 때 발생하는 수축, 신장과 같은 기계적 거동은 압전체 특성에 따라 외부 자극에 선형성을 띠면서 발생하게 된다. 응력과 전압의 관계를 나타내는 압전체의 구성 방정식은 다음과 같다.

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

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

여기에서 S는 스트레인, s는 compliance, E는 전기장, T는 응력, D는 전기적 변위, d는 압전계수, ϵ 는 유전 상수이다. 식 (1)과 식 (2)로부터 압전 효과에 의한 에너지 변환은 Piezoelectric coupling에 의해 발생함을 알 수 있다. 즉, 압전체의 전기장은 압전체의 기계적 변형에 영향을 미치고 반대로 압전체에 가해진 외부의 기계적 응력은 압전체의 유전성질(Dielectric property)에 영향을 주고 있음을 유추할 수 있다. *압전체를 통해 이루어지는 에너지 변환에서 중요한 관계식은 압전체에 가해지는 응력과 분극에 의해 생성되는 전하 사이의 관계이며 식 (2)에서 d로 정의된 성분이다. d는 정적 부하(Static loading)에서는 상수 값을 나타내지만 동적 부하(Dynamic loading) 조건 중 특히 공진 조건에서는 값이 변하게 되고 이것은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (3)$$

여기서 index i, j 는 1부터 6까지의 범위를 갖게 되며 횡방향 응력이 가해지게 될 경우 식 (3)은 다음과 같이 변환된다.

$$D_3 = d_{33}T_3 \quad (4)$$

본 연구에서는 Fig 1과 같은 33-mode의 압전 에너지 변환 장치를 제작하여 기초적인 발전 효율 검증 실험을 수행하였으며, 실제 압전체를 이용한 에너지 변환 시스템은 33-mode의 원통형 PZT를 사용하여 에너지 변환을 수행하였다.¹

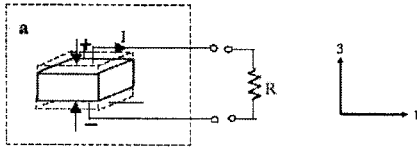


Fig. 1 Schematic for the 33 mode of the piezo system

2.2 33모드 압전체를 이용한 에너지 변환 해석

에너지 변환 시스템은 압전체를 전력 생성원으로 이용하고자 압전체 주변을 open된 상태로 설계하였다. 압전체 외부에서 압축력이 작용할 때 인가되는 외부 에너지(W_D)는 압전체 내부 에너지에서 변형에 의한 기계 에너지(W_m)와 압전체의 응력-전압의 관계에 의한 전기 에너지(W_e)로 변형된다.

$$W_D = W_m + W_e \quad (5)$$

압전체에 작용하는 응력은 다음과 같다.

$$T_3 = \frac{F}{A} \quad (6)$$

여기에서 F는 압축력이고 A는 압전체 상부 면적이다. 이 때 발생하는 전압은 식 (7)과 같다.

$$U_3 = g_{33}hT_3 \quad (7)$$

여기에서 g_{33} 는 압전체의 전압상수이고 h는 압전체의 높이이다. 식 (7)에서 볼 수 있듯이, open circuit에서 압축력이 인가될 때 발생하는 전압은 압축력에 의한 응력에 비례하여 발생하게 됨을 알 수 있다. 또, 인가되는 기계적 에너지(W_D)는 응력과 compliance(s^D)에 의해 식 (8)과 같이 표현된다.

$$W_D = \frac{V}{2} s_{33}^D T_3^2 \quad (8)$$

여기에서 V는 압전체의 부피이고 s_{33}^D 는 poling 방향의 compliance이다.

압전체의 변형 에너지(W_m)와 발생하는 전기 에너지(W_e)는 coupling coefficient (k_{33})에 의해 아래 식으로 나타낸다.

$$W_m = \frac{V}{2} (1 - k_{33}^2) s_{33}^D T_3^2 \quad (9)$$

$$W_e = \frac{V}{2} k_{33}^2 s_{33}^D T_3^2 \quad (10)$$

식 (9)와 (10)에서 보면 에너지 변환은 압전 상수 외에 압전체의 부피와 인가되는 응력에 영향을 받는다. 정적 부하 조건에서 에너지의 손실이 없다는 가정 하에서 에너지 변환은 식 (10)에서 볼 수 있듯이 인가되는 기계 에너지에 의해 변환되는 전기 에너지는 coupling coefficient의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 대부분 압전체의 k_{33} 값이 약 0.7인 것을 볼 때, 50% 정도가 전기 에너지로 변환됨을 알 수 있다. 압전체의 전기적 성질 변화에 의해 compliance는 s_{33}^E 에서 s_{33}^E 으로 증가하게 된다. compliance s_{33}^D 과 s_{33}^E 의 관계는 식 (11)와 같다.

$$s_{33}^E = \frac{s_{33}^D}{1 - k_{33}^2} \quad (11)$$

결론적으로, 외부 응력의 증가 없이 내부에서 spark에 의해 압전체가 도통이 되고 그 때 전기 에너지를 방출시켜 압전체 내부에 압축 strain을 증가시킬 수 있게 되는 것이다. 하지만 이런 현상은 순간적으로 일어나는 것이 아니라, breakdown이 일어나자마자 acoustic shock wave가 압전체의 끝에서부터 들어오기 시작해서 약 4mm/ms의 속도로 진행을 해나가고 몇 micro초 동안 변형은 일어나게 되는 것이다. 이런 현상에 의해 압전체에 인가된 추가 기계 에너지는 기존에 발생된 전기에너지를 증가시키게 된다. 추가된 전기에너지(W_{ea})는 식 (12)로 나타내고,

$$W_{ea} = \frac{V}{2} s_{33}^E k_{33}^2 T_3^2 = \frac{1}{2} \epsilon_{33}^T k_{33}^2 \frac{A}{h} U_3^2 \quad (12)$$

spark가 발생하는 동안 변환된 총 전기 에너지(W_{ele})는 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} W_{ele} &= W_e + W_{ea} = \frac{V}{2} \epsilon_{33}^T k_{33}^2 T_3^2 \\ &= \frac{1}{2} \epsilon_{33}^T \frac{A}{h} U_3^2 = \frac{1}{2} C_0 U_3^2 \end{aligned} \quad (13)$$

발생한 에너지양이 압전체의 coupling coefficient 에 의한 영향만큼 감소하지 않음을 식 (13)에서 알 수 있고, 인가된 기계 에너지양만큼 이론상으로 전기 에너지로 변환되었음을 말하고 있다. 그러나, 실제의 경우 압전체 자체의 임계 에너지 밀도($\approx 1.2W/cm^3$)가 존재하여 그 이상의 에너지 변환은 일어나지 않는다. 만약 그 이상의 변환이 발생한다면 초과 에너지는 압전체의 감극화 현상을 일으키므로 임계값 이상의 에너지 변환이 일어나지 않도록 설계를 하여야 한다.¹

Impact와 같은 동적 하중에 의해서는 압전체에 인가되는 응력도 동적으로 작용하기 때문에 정적 하중에 의한 응력과 다르다. 동적인 응력은 압전체에 가해지는 hammer의 acoustic impedance와 압전체의 impedance, 그리고 hammer의 속도에 영향을 받게 된다. Impact는 hammer가 압전체와 충돌하였을 때 발생하는 것으로, 일반적으로 두 물체의 충돌이 일어날 때 발생하는 응력을 구하기 위해 1차원 파동 방정식을 이용하면 식 (14)과 같고, 속도와 strain은 식 (15)과 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (14)$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad \epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (15)$$

위의 식들에서 u 는 물체의 변위, v 는 물체의 속도, ϵ 은 strain, 그리고 α 는 compressional wave의 속도를 의미한다. 위 식(14),(15)을 풀어 발생된 응력(T)를 구하면

$$T(x_1, t) = (\lambda + 2\mu)\epsilon(x_1, t) = z\alpha\epsilon(x_1, t) \quad (16)$$

으로 나타낼 수 있는데, 여기서 λ 와 μ 는 Lamé constant이고 z 는 acoustic impedance이다.

Fig. 2 에서처럼 서로 다른 두 물체가 충돌하였을 때 발생하는 응력을 구하면 다음과 같다.⁹

$$T_3 = \frac{z_h z_c A_h}{z_h A_h + z_c A_c} v_h \quad (17)$$

여기서, 아랫첨자 h 는 hammer를 나타내고 c 는 압전체를 의미한다. 이렇게 구해진 응력을 식(13)에 적용시키면 동적 하중에 의해 변환된 에너지는 다음과 같다.

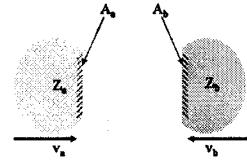


Fig. 2 Schematic for the collision of two bodies

$$W_{ele} = \frac{V}{2} \epsilon_{33}^T g_{33}^2 T_3^2 \quad (18)$$

$$= \frac{V}{2} \epsilon_{33}^T g_{33}^2 \left(\frac{z_h z_c A_h}{z_h A_h + z_c A_c} v_h \right)^2$$

Table 1 Piezo cylindrical material properties and dimensions for the 33 mode

	Symbol	Unit	A type	B type
Length	L	mm	15±0.1	4.5±0.1
Diameter	D	mm	6.3±0.1	2±0.1
Permittivity	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	-	1,800	1,460
Piezoelectric charge coefficient	d33	C/N	450×10-12	367×10-12
Piezoelectric voltage coefficient	g33	Vm/N	27×10-3	29.2×10-3
Coupling factor	k33	-	0.7	0.76

위의 에너지 변환에 관한 해석에서 보면 외부에서 작용하는 힘의 크기는 에너지 변환에 있어서 중요한 외부 인자이고, 압전체의 응력-전압 결합 상수(d33)와 압전체의 정전 용량(ϵT)은 변환의 양을 결정짓는 중요한 내부 인자로 작용함을 알 수 있다. 그리고 또 에너지 변환에 영향을 미치는 요소로는 압전체의 크기와 형상 역시 에너지 변환에 중요한 요소로 작용을 한다. Table 1은 본 논문에서 사용한 33모드 압전체의 물성이다.

3. 에너지 변환 시스템의 설계 및 제작

에너지 변환 시스템은 압전체를 이용하여 외부에서 인가되는 기계 에너지를 전기 에너지로 변환, 저장하여 센서의 데이터 값을 읽어 전송하기 위한 것으로, 그 구성에는 Fig. 3과 같이 에너지 변환부와 에너지 저장부, DC regulating과 MCU(Micro

Controller Unit), 센서, 데이터 전송부로 구성이 되어 있다. 에너지 변환 시스템은 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데, 에너지 변환부에 해당하는 기구 부분과 에너지 저장, DC regulating, MCU, 센서 그리고 Transmitter에 해당하는 회로 부분으로 나눌 수 있다.

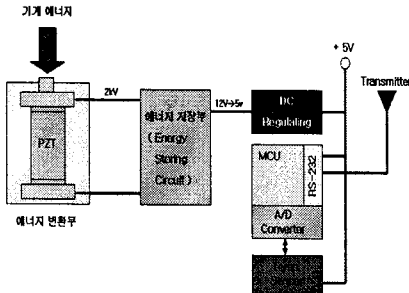


Fig. 3 Schematic for the energy scavenging system

3.1 에너지 변환부의 설계 및 제작

외부에서 인가되는 기계 에너지의 효과적 전달을 위해 압전체와 압전체 상단에 놓이게 되는 head 사이의 acoustic impedance의 차이를 크게 설계하였다. 일반적으로 impact가 발생하는 면에서는 유효 면적이 비슷하다고 가정할 때, 식 (17)를 식 (19)처럼 표현할 수 있다.

$$T_3 = \frac{z_h z_c}{z_h + z_c} v_h \quad (19)$$

이 때, 변환된 에너지는 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned} W_{ele} &= \frac{V}{2} \epsilon_{33}^T g_{33}^2 T_3^2 = \frac{V}{2} \epsilon_{33}^T g_{33}^2 \left(\frac{z_h z_c}{z_h + z_c} v_h \right)^2 \quad (20) \\ &= \frac{V}{2} \epsilon_{33}^T g_{33}^2 v_h^2 z_c^2 \left(\frac{1}{1+x} \right)^2 \end{aligned}$$

위 식에서 x 는 z_c/z_h 를 의미한다. Table 1에서 A type값을 대입하여 식(20)에 대한 값을 그림 4와 같이 그래프로 나타내었다. 압전 에너지 변환량은 Acoustic impedance ratio(Z_c/Z_h)에 따라 $30v^2 \sim 100v^2$ [mJ] 사이의 값을 갖게 된다. Fig. 4의 결과를 볼 때, 효율적인 에너지 변환 장치의 설계를 위해서는 압전체와 head 사이의 Acoustic impedance 차이를 크게($Z_c/Z_h < 0.5$) 할 필요가 있는데 실제의 경우에는 Acoustic impedance 차이를 크게 할 수 없다.

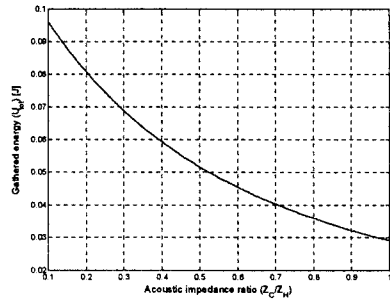


Fig. 4 The energy conversion with the acoustic impedance ratio

Head로 Steel을 사용하였을 경우 Acoustic impedance ratio, $x=0.74$ 이므로 이 값을 식 (20)에 대입하면, 압전 변환 에너지는 $38.6v^2$ [mJ]이다.¹ 두 번째로, 압전체의 특성이 압전체가 놓여진 상태에 따라 영향을 받는데, 변형이 자유롭게 일어날 수 있을 때와 그렇지 못할 때 압전체의 정전 용량(ϵ)이 달라진다. 그 관계는 식(21)에서 나타나는데,

$$\epsilon_{free} (1 - k^2) = \epsilon_{damped} \quad (21)$$

이 식에서 k 는 coupling coefficient이고, ϵ_{free} 는 ϵ^T 로, ϵ_{damped} 는 ϵ^S 로 표현되기도 한다. 위의 식에서 볼 수 있듯이, 변형이 자유롭게 일어날 경우의 정전 용량이 그렇지 못할 경우보다 크기 때문에 압전체의 양단을 자유단 상태로 놓일 수 있게 설계를 수행하였다. 이렇게 제작된 에너지 변환부는 Fig. 5와 같다.

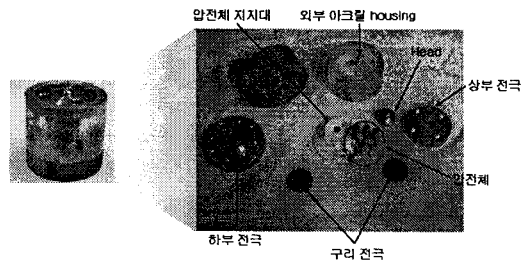


Fig. 5 The assembled system which absorbs the impact energy and the components of it

3.2 에너지 저장 및 공급부의 제작

압전 소자를 이용한 에너지 변환 시스템은 크게 에너지 변환부와 에너지 저장부(C_1) 그리고, 정전압 공급부(Regulated DC voltage)로 나눌 수 있으며

Fig. 6와 같이 나타낼 수 있다.

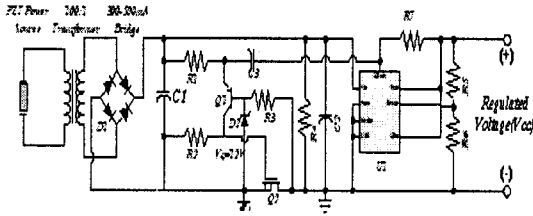


Fig. 6 The circuit for the conversion of piezo energy and the supply of static voltage

Fig. 6와 같은 회로는 “Flyback converter”로써 일정 수준의 전기 에너지가 Capacitor C_1 에 충전될 때까지 부하 방전을 최대한 억제한다. Fig. 6와 같은 에너지 변환 회로에서 압전체가 외부의 힘(혹은 응력)에 대응하여 고전압(통상 수 kV)을 발생시킬 때, 고전압이 회로 내부로 유입될 경우에는 회로의 파손을 야기하므로, 강압기(Down transformer)를 거치도록 한다. 회로에서 브리지 다이오드(D_1)는 전파 정류(Full wave rectifying)를 수행한다. 정류된 AC(압전 발전 시스템에서는 Pulse train에 가까운 신호임) 신호는 충전 Capacitor(C_1)에 저장되게 된다. 이때, 일정 수준의 전압(본 논문에서는 12.6V)에 이르기 전까지는 Zener diode가 동작하지 않으므로, MOSFET은 High impedance 상태이므로 Open circuit로 취급된다. 만약, 충전 Capacitor에 일정 수준의 전압이 충전되게 된다면 Zener diode가 동작하게 되고, Zener diode는 MOSFET의 Gate에 전압을 인가하게 되어 MOSFET의 Drain과 Source 사이가 도통되게 된다. 결국 충전 Capacitor, Zener diode 및 MOSFET은 MOSFET을 기준으로 좌우측 회로의 Ground를 연결하거나 끊어주는 역할을 수행하므로 압전체를 통해 회로에 인가되는 미약한 전력을 축적할 수 있는 것이다. 일단 MOSFET이 통전된다면 DC Regulator가 동작하여 응용 회로로 정전압(3.3V/5V/12V 등)을 공급할 수 있다. 만약, 응용회로의 소비 에너지가 충전 에너지보다 커지면 회로 내부의 MOSFET 좌우측 Ground는 다시 High impedance 상태가 되므로 전기적으로 Open circuit이 된다.¹⁰ 이처럼 동작하는 회로에 의해 정전압으로 MCU(micro control unit)와 센서, Transmitter에 전원을 공급을 해줌으로써 MCU가 센서의 데이터에 대한 호출값을 받아서 Transmitter를 통해 데이터 전송을 하게 된다. 본 연구에서는 Fig. 5와 같은

압전 에너지 변환/저장 및 정전압 공급 장치를 이용하여 실제 응용 실험에 사용하였다.

4. 에너지 변환 시스템의 특징

에너지 변환 시스템에 기계 에너지를 인가시켜 그 때 발생하는 전압 및 전기 에너지를 측정함으로써, 압전체의 실제 거동을 이론적 거동과 비교하고자 한다.

4.1 공압 바이브레이터를 이용한 에너지 변환

연속적으로 인가되는 기계 에너지가 전기 에너지로 변환, 회로의 저장부에 충전되는 양을 측정하기 위한 실험으로, 에너지 변환부 내에 존재하는 압전체의 정전 용량이 달라짐에 따라 변환, 저장되는 에너지의 차이를 알아보았다. 실험에 사용된 측정 장비와 에너지 변환 시스템은 Fig. 7에서 보여주고 있다. 공압 펌프를 이용하여 1bar로 압력을 고정하고, 공압 바이브레이터를 이용하여 에너지 변환 시스템에 impact를 인가시킬 수 있도록 설계하였는데, impact는 초당 50~58회 정도로 인가되었고, hammer의 이동 변위는 6mm로 1회 타격 시마다 약 5.5mJ이 인가되었다. 에너지 변환부에는 압전체 개수를 변화시켰는데, 압전체의 개수가 변함에 따라 압전체의 부피와 정전 용량이 변하게 된다. Type B의 압전체를 이용하여 실험을 수행하였는데, 압전체의 개수는 1,3,5,8개 일 때에 대해 각각 실험을 수행하였다. 변환된 에너지의 저장을 위해 회로의 저장 capacitor로는 100uF를 이용하였다.

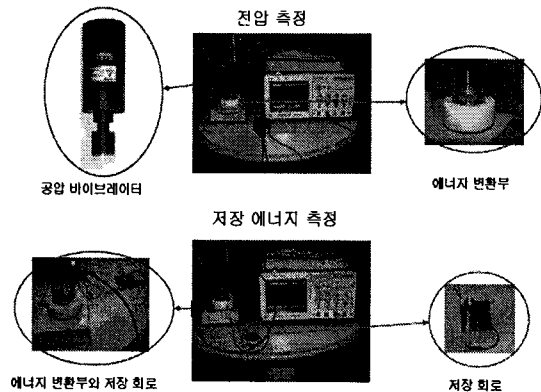


Fig. 7 The experimental setup for measuring the energy converted

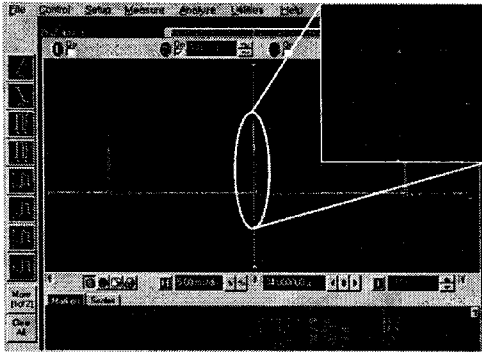


Fig. 8 The measured voltage from the energy

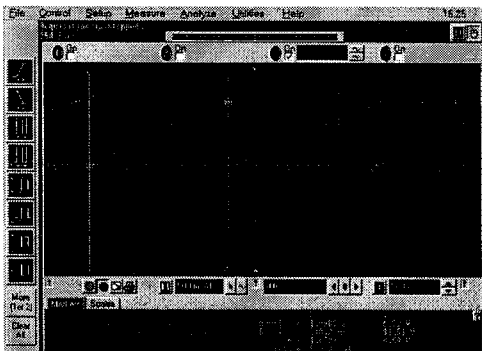


Fig. 9 The charged and discharged energy

인가된 에너지에 의해 발생하는 전압과 저장 capacitor에 충/방전이 되는 모습은 Fig. 8과 Fig. 9에서 보여주고 있다. 이 그림들은 type B의 압전체 5개(정전 용량은 57.2pF, 부피는 70.7mm³)를 갖고 있는 에너지 변환부를 이용한 것으로 54.7Hz로 타격 시 5.7mJ이 인가되고 발생 전압은 1.46kV로 측정되었다. 100uF의 capacitor를 충전시키기 위해 소요된 시간은 1.67초로 방전 시 소모될 수 있는 에너지는 1.245mJ이다. 그리고 1회 타격 시 변환된 에너지는 60.4uJ이고 실제 회로에 저장된 에너지는 13.6uJ이었다. 압전체의 개수를 달리한 실험 결과 값은 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 보면, Type A의 경우 5mJ이 인가되었을 때 약 1.5kV 전압이 발생하였음을 알 수 있고, Type B의 경우에서 압전체 개수의 증가, 즉 압전체의 정전 용량의 증가에 의해 발생 전압과 저장되는 에너지가 Fig. 10, Fig. 11과 같이 증가함을 볼 수 있다. 인가되는 에너지 량의 증가에 의해 발생전압이 증가될 뿐만 아니라, 동일한 에너지가 인가될 경우라도 압전체의 정전 용량과 부피를 증가시킬수

Table 2 The measured values from the vibrator

		Type A	Type B			
		Φ 6.3x15mm	Φ 2x4.5mm			
압전체 특성	압전체 개수	1	1	3	5	8
	정전 용량(pF)	34.0	11.4	34.3	57.2	91.5
	부피(mm ³)	468	14.1	42.4	70.7	113
실험 조건	인가 주파수(Hz)	49	63	55.2	54.7	58
	인가 에너지(mJ) (1회 타격)	4.6	6.9	5.8	5.7	6.4
측정 값	전압(V)	1500	535	1300	1454	1660
	저장 시간(s)	4.38		3.6	1.67	1.4
	전압 강하(V)	5.87		5.92	4.99	5.35
에너지 변환 (1회 타격)	인가 에너지(mJ)	4.6	6.9	5.8	5.7	6.4
	변환 에너지(uJ)	38.3		29	60.4	126
	저장 에너지(uJ)	8.02		8.85	13.6	17.6

록 발생전압이 증가함을 확인하였다. 이 결과를 이용하여 적은 부피에서 더 많은 에너지를 변환, 저장시킬 수 있는 최적화된 설계가 가능함을 예측할 수 있다.

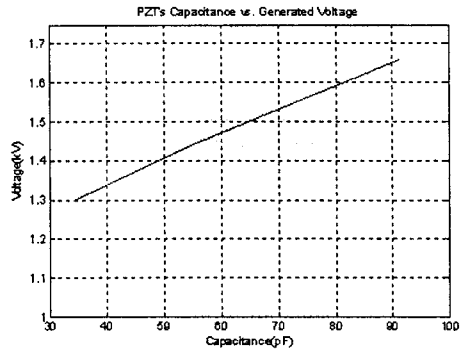


Fig. 10 The voltages with capacitances

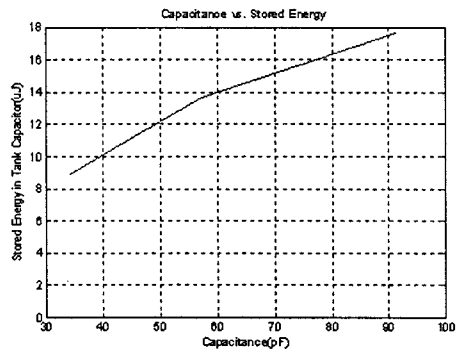


Fig. 11 The stored energy with capacitances

5. 결론

본 논문은 에너지 변환 시스템의 제작과 실험을 통해 무선 네트워크 구성을 위한 센서의 노드에서 필요한 전원 공급 장치를 제안함으로써, 기존 배터리 사용으로 인해 야기되는 사용 기간의 한계, 유선 센서 사용시 발생하는 추가 비용의 문제점을 해결하고자 함이다. 주변 환경에서 얻을 수 있는 기계 에너지를 압전체를 통해 변환, 저장하게 함으로써 필요한 전력원을 얻을 수 있기 때문에 10년 이상의 장기적인 사용을 요구하는 시스템에 적용 가능하다.

압전체의 이론적 해석을 바탕으로 에너지 변환 시스템의 제작과 실험을 통해 인가되는 에너지가 전기 에너지로 변환되는 양을 실험으로 측정값과 이론적 해석을 비교, 검토하여 외부 에너지와 변환 에너지의 관계를 파악함으로써 설계를 위한 기본 인자를 확인하였다. 공압 바이브레이터를 이용하여 에너지가 인가되었을 때, 압전체의 특성 중 압전체의 크기와 정전 용량에 의해 변환되는 에너지양이 달라짐을 확인하였고, 이를 통해 에너지 변환부의 설계 고려해야할 사항으로 인가되는 에너지의 양 뿐만 아니라 압전체의 정전 용량을 높이기 위한 설계를 수행해야함을 알았다. 또, 실제 제작된 에너지 변환 시스템을 이용하여 인가되는 에너지를 변환, 저장하여 실제 회로의 구동을 통해 센서 값을 전송 시키는 실험을 수행함으로써 에너지 공급원으로 본 연구에서 제안하는 시스템의 적용 가능성을 증명할 수 있다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부의 BK21 프로젝트의 지원을 받아 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

본 연구는 서강대학교 교내 연구비의 지원을 받아 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

1. Oh, J. G., "SAW Based Passive Radio Sensors using Energy Gathering Method," Ph. D. Thesis, University of Sogang, pp. 25-29, 2005.
2. Ong, K. G., Grimes, C. A., Robbins, C. L. and

Singh, R. S., "Design and application of wireless, passive, resonant-circuit environmental monitoring sensor," Sensors and Actuators A, Vol. 93, No. 1, pp. 33-43, 2001.

3. Stangel, K., Kolnsberg, S., Hammerschmidt, D., Hosticka, B. J., Trieu, H. K. and Mokwa, W., "A programmable intraocular CMOS pressure sensor system implant," IEEE J. of Solid State Circuits, Vol. 36, No. 7, pp. 1094-1100, 2001.
4. Paradiso, J. A., Hslao, K., Strickon, J., Lifton, J. and Adler, A., "Sensor systems for interactive surfaces," IBM Systems Journal, Vol. 39, No. 5, pp. 892-914, 2000.
5. Pohl, A., "A Review of Wireless SAW Sensors," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, pp. 317-332, 2000.
6. Stoyanov, P. G. and Grimes, C. A., "A remote query magnetostrictive viscosity sensor," Sensors and Actuators, pp. 8-14, 2000.
7. Jain, M. K. and Grimes, C. A., "A Wireless Magnetoelastic Micro-Sensor Array for Simultaneous Measurement of Temperature and Pressure," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 2022-2024, 2001.
8. Roundy, S., Wright, P. K. and Pister, K. S. J., "Micro-electrostatic vibration-to-electricity converter," Proceeding of IMECE 2002 ASME international mechanical engineering congress & exposition, pp. 1-10, 2002.
9. Bedford, A. and Drumheller, D. S., "Introduction to elastic wave propagation," John Wiley & Sons, pp. 43-82, 1996.
10. Shenck, N. S. and Paradiso, J. A., "Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics," IEEE Micro, Vol. 21, Issue 3, pp. 30-41, 2001.
11. Sodano, H. A., Inman, D. J. and Park, G. H., "Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, No. 10, pp. 799-807, 2005.