

압전 필름의 압전정 효과를 이용한 에너지 저장 시스템에 관한 연구

최범규[#], 이우훈^{*}

A Study on the Energy Harvesting System Using Piezoelectric Direct Effect of Piezo Film

Bumkyoo Choi[#] and Woo-hun Lee^{*}

ABSTRACT

Piezoelectric materials have been investigated as vibration energy converters to power wireless devices or MEMS devices due to the recent low power requirements of such devices and the advancement in miniaturization technology. Piezoelectric power generation can be an alternative to the traditional power source-battery because of the presence of facile vibration sources in our environment and the potential elimination of the maintenance required for large volume batteries. This paper represents the new power source which supplies energy device node. This system, called "energy harvesting system", with piezo materials scavenges extra energy such as vibration and acceleration from the environment. Then it converts the mechanical energy scavenged to electrical energy for powering device This paper explains the properties of piezo material through theoretical analysis and experiments The developed system provides a solution to overcome the critical problem of making up wireless device networks.

Key Words : Piezoelectric (압전효과), Energy harvesting system (에너지 저장 시스템), Impact force (충격력), PVDF (압전 폴리머)

기호설명

S = compliance
d = piezoelectric modulus
 ϵ = dielectric constant
 g_{31} = piezo stress constant

1. 서론

대형 건축물이나 교량은 바람과 같은 주변 환경에 의해 미소한 움직임으로 인해 붕괴의 위험이 있어, 각종 센서를 부착하여 모니터링을 한다. 하지만 미소한 움직임으로 인해 내부적으로 진동을 발생시키는데, 외부의 기계적 에너지로서 진동을 이용한

접수일: 2007년 10월 19일; 게재승인일: 2008년 6월 11일

교신저자: 서강대학교 기계공학과

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

* 서강대학교 기계공학과

에너지 저장 시스템을 적용하기에는 적합한 조건을 갖고 있다. 진동을 이용한 에너지 저장에 대한 연구는 외국의 대학에서도 많이 진행되고 있는데, 미시건 대학의 전기 컴퓨터 공학과에서는 진동을 이용하여 미세 가공된 외팔보로 $1\sim 5\mu W$ 의 전기 에너지를 발생시켰고,⁷ 버클리 주립대학의 기계공학과에서는 빗 구조를 이용하여 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 연구를 하였다.⁸ 그리고 다른 형태의 기계 에너지를 이용하여 메사추세츠공과대학에서는 PZT 스택을 이용하여 사람이 걸을 때 뒷꿈치에서 발생하는 힘을 전기 에너지로 변환, 저장하여 데이터 송신을 한 연구를 수행하였다.⁹

본 연구에서는 진동에 의해 발생시킬 수 있는 기계적 에너지 중 충격을 이용하고자 한다. 에너지 변환을 하기 위해서 사용된 PVDF 필름의 거동에 대해 살펴보고, 압전 필름에 실제 인가되는 기계 에너지에 의해 발생하는 전압을 측정하여 이론값과의 비교를 하였다. 그리고 에너지 저장 시스템을 제작하여 기계 에너지를 인하고 그 때 발생하는 전압과 축전기에 저장되는 시간을 측정함으로써, 향후 에너지원으로써 사용가능성을 알아보았다.

2. 압전 효과와 에너지 저장

2.1 압전 현상과 압전 필름의 특징

2.1.1 압전 현상

압전 현상은 1880년 피에르와 폴 자크 퀴리 형제에 의해 처음 발견된 현상으로 그들은 어떤 결정 물질은 외부에서 기계적 응력을 받았을 때 전하를 발생시킨다는 사실을 발견했다. 일반적으로 대칭성에 따라 나눈 고체 결정 32정족 중에 20종이 이러한 성질을 가진다. 이러한 성질을 압전 현상이라고 하고, 이러한 성질을 지닌 물질을 압전 재료라 한다. 이러한 압전 재료에 Fig. 1과 같은 전극을 입히고 퀴리 온도 이상에서 높은 전기장을 걸어 주면 압전 재료내의 분자가 전기장 방향으로 쌍극자를 형성하게 되는데, 이러한 처리과정을 극화처리(Poling procedure)라고 한다. 이렇게 극화 처리된 압전 재료는 낮은 전기장을 가해도 수축 및 팽창하는 특성을 갖는다. 또한 이와는 반대로 극화 처리된 압전 재료에 변형을 가해도 수축 및 팽창하는 특성을 가진다. 압전 재료의 이러한 특성을 각각 역방향 효과(Converse effect)와 순방향 효과(Direct effect)라 한다. Fig. 2와 같이 외부에서 응력이나 압

력을 가하면 전하분포나 전기장이 발생하는 현상이 순방향 효과이고, Fig. 3과 같이 외부에서 전기장을 가했을 때 변형이 생기는 현상이 역방향 효과이다. 또한 압전 재료는 하중에 대하여 변형이 생기는 순간에는 전하가 발생하나 변형된 상태에서 압전 재료가 폐회로를 구성하면 곧 전하가 소멸되므로, 주로 동적 거동 해석에 더 적합하다.

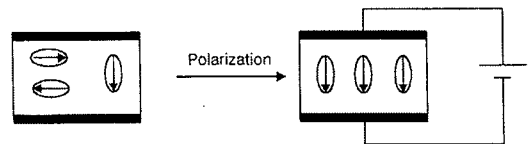


Fig. 1 Polarization of piezo film

압전 재료의 또 하나의 커다란 특징은 전왜성이다. 전왜성(Ferroelectric)이란 대부분의 압전 재료의 경우 온도가 퀴리 온도(Curie Temperature)라는 특정 온도 이상일 때 비압전상(Non-piezoelectric phase)으로의 전이가 일어나는 성질이다.

압전 현상을 이용한 재료는 고분자 압전 재료와 인공적인 다결정 세라믹 압전 재료가 있는데, 대표적인 고분자 압전 재료는 PVDF(Polyvinylidene fluoride)이며, 세라믹 압전 재료는 PZT(Lead zirconate titanate)이다. 고분자 압력 센서는 성형의 용이성, 넓은 주파수 응답성, 우수한 성형성 및 높은 출력 전압 등으로 감지기로 많이 이용되고, 세라믹 압전 재료는 단위 전압에 대한 가진력이 높은 관계로 작동기로 많이 쓰인다.

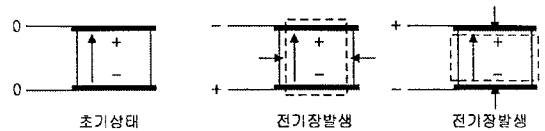


Fig. 2 Direct effect of piezoelectric materials

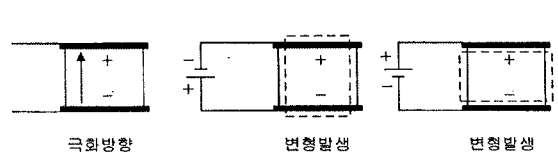


Fig. 3 Converse effect of piezoelectric materials

2.1.2 압전 필름의 특징

고분자 압전 재료(PVDF)의 특징으로는 주파수

영역이 거의 0 ~ 10⁹ Hz로 주파수 대역이 매우 넓어 다른 센서에 비해 동적 사용 범위가 넓은 특징이 있다. 또한, 음향 임피던스가 낮고, 탄성적으로 유연하여 구조물을 이루는 일반적인 재료에 부착하여도 센서로서의 역할을 충분히 수행할 수 있다. 그리고 같은 입력 힘에 대하여 세라믹 압전 재료보다 10배 높은 출력 전압을 나타내고, 세라믹 압전 재료가 파괴되는 75 N/μm의 구간에서도 견딜 수 있는 절연 강도를 가지고 있다. 기계적인 강도와 충격저항이 높으며, 습도 및 화학물, 산화제, 자외선 등에 강한 저항력을 가지고 있어, 안정성이 높고, 다른 센서에 비해 원재료의 가격이 비교적 낮고 제작비용이 낮은 장점이 있다.

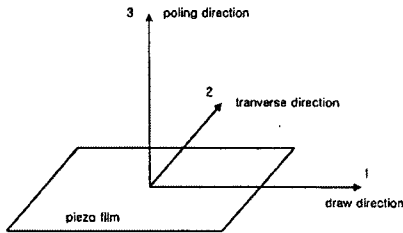


Fig. 4 Directionality

압전 재료는 이방성 재료이므로 그들의 전기적이고 기계적인 반응들은 적용된 전기장이나 기계적 응력, 변형률과 연관된다. 압전 재료의 거동과 관련된 계산들은 방향성을 고려해야만 한다. 센서의 축들은 Fig. 4와 같이 정의할 수 있다. 압전 재료의 재료 상수는 두 개의 첨자를 사용하는데, 첫 번째 첨자는 항상 작용된 전기장 축을 의미하며, 두 번째 첨자는 발생된 기계적인 변형률이나 작용된 응력 축을 나타낸다. 인장은 양의 기계적 작용으로, 압축은 음의 기계적 작용으로 정의하고, 전하의 증가를 양의 전기적 작용으로 정의한다. 고분자 압전 센서에 대해서 극화된 축은 항상 두께 또는 방향이며 기계적 응력이나 변형률은 세 개의 모든 방향에서 발생할 수 있다. Table 1에서 고분자 압전 재료와 다른 지능형 물질(Smart materials)와의 몇 가지 특징에 대하여 나와 있다. 다른 특성들은 대부분 비슷한 성능을 보이고 있지만, 민감도 부분에 대해서는 고분자 압전 재료는 다른 재료에 비해 10배정도 더 민감하게 반응함을 볼 수 있다.¹

Table 1 Characteristics of various smart materials

	고분자 압전재료	형상기억합금	광섬유	ER유체
가격	보통	저렴	보통	고가
기술성숙도	성숙	성숙	양호	미성숙
삽입성	매우우수	매우우수	매우우수	미성숙
반응성	매우우수	양호	매우우수	우수
최대 작동 온도(* C)	250	300	약 300	300
민감도(με)	0.01	0.1	0.11	-
최대변형률(με max)	5500	5000	3000	-

2.2 외팔보(cantilever beam)형 PVDF 필름의 충격력에 의한 압전 해석

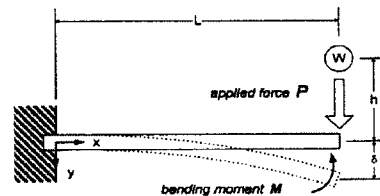


Fig. 5 PVDF cantilever beam

길이 L , 폭 w , 두께 t ,의 보(Beam) PVDF 필름에 충격력 P 를 인가한다. 이 때 모든 위치 에너지 보에 전달된다고 가정하면 최구슬의 위치 에너지 U_p , 충격력에 의한 일(work) U_w , 변형 에너지 U_s 는 모두 같은 값을 가진다. 즉,

$$U_p = U_w = U_s \tag{1}$$

$$U_p = W(h + \delta) \tag{2}$$

$$U_w = \frac{P\delta}{2} \tag{3}$$

$$U_s = \int \frac{M^2}{2EI} dx = \int_0^L \frac{(Px)^2}{2EI} dx = \frac{P^2 L^2}{6EI} \tag{4}$$

여기서 δ 는 처짐량(Deflection), P 는 가해진 힘, M 은 굽힘 모멘트, E 는 영률, I 는 관성모멘트를 나타낸다. 이 식들로부터 가해진 힘 P 는

$$P^2 - 2\phi - \frac{6EIWh}{L^3} \quad (5)$$

$$P = W + \sqrt{W^2 + \frac{6EIWh}{L^3}} \quad (6)$$

평균 굽힘 모멘트 \bar{M} 는

$$\begin{aligned} \bar{M} &= \frac{1}{L} \int_0^L Pxdx = \frac{PL}{2} \\ &= \frac{WL}{2} + \sqrt{\left(\frac{WL}{2}\right)^2 + \frac{3EIh}{L^2} \left(\frac{WL}{2}\right)} \end{aligned} \quad (7)$$

와 같이 구할 수 있다. 보의 굽힘에 의한 길이 방향의 응력 σ 는

$$\sigma = \frac{\bar{M}y}{I} \quad (8)$$

여기서, PVDF 필름의 관성 모멘트 I 를 구해보면, PVDF 필름은 그 양면에 폴리에스테르층과 우레탄 코팅이 있는 조합고이고, 이것을 PVDF 필름에 등가화하면, Fig. 6와 같이 PVDF 필름의 Young률 E_2 에 대하여 m 배의 우레탄 코팅 폭과 n 배의 폴리에스테르층 폭으로 변환되어 단일보(simple beam)로써 해석할 수 있게 된다. 따라서 관성 모멘트 I 는 다음과 같이 유도된다.

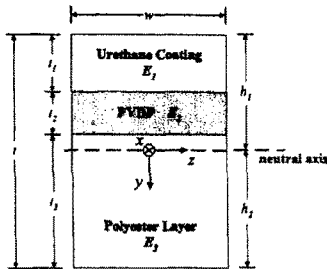


Fig. 6 Cross section and neutral axis of PVDF film

$$\begin{aligned} I &= m \int_{-(t_1+t_2+t_3-h_2)}^{-(t_2+t_3-h_2)} y^2 dA + \int_{-(t_2+t_3-h_2)}^{-(t_3-h_2)} y^2 dA \\ &+ n \int_{-(t_3-h_2)}^{h_2} y^2 dA \\ &= \frac{w}{3} \left\{ (t_2+t_3-h_2)^3(1-m) \right. \\ &\quad \left. + (t_3-h_2)^3(n-1) + h_1^3 + nh_2^3 \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, 영률의 비는 다음과 같다.

$$m = \frac{E_1}{E_2}, \quad n = \frac{E_3}{E_2} \quad (10)$$

또한, h_1, h_2 는 중성 축(Neutral axis)의 위치를 나타내며 다음과 같다

$$h_2 = \frac{mt_1^2 + t_2^2 + nt_3^2 + 2m(t_2+t_3)t_1 + 2t_2t_3}{2(mt_1+t_2+nt_3)} \quad (11)$$

$$h_1 = t - h_2 = t_1 + t_2 + t_3 - h_2 \quad (12)$$

전하밀도 D 와 응력 σ 를 독립변수로 사용한 압전정 효과를 나타내는 압전 방정식의 g 형식은 다음과 같다.

$$E_i = -g_{ij}\sigma_j + \beta_{ik}D_k \quad (13)$$

$(i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, k = 1, 2, 3)$

여기서 E_i 는 전계, g_{ij} 는 압전 상수, β_{ik} 는 역유전율(Impermeability)이다. 이 식에서 우변의 두 번째 항은 전기적인 입력이 없으므로 제거된다. 또한 1방향의 응력에만 관심이 있으므로 2,3방향의 응력 성분을 없애고, PVDF 필름의 구조에 의해 3방향의 전계만을 고려한다면, 출력전압 V 와 응력 σ 의 관계는 다음과 같다.

$$E_3 = -g_{31}\sigma_1, \quad V = -g_{31}t_2\sigma_1 \quad (14)$$

따라서 식 (7), (8)로부터

$$\begin{aligned} V &= -g_{31}t_2 \int_{-(t_2+t_3-h_2)}^{-(t_3-h_2)} \sigma dy \\ &= -g_{31}t_2 \frac{\bar{M}}{I} \frac{(t_3-h_2)^2 - (t_2+t_3-h_2)^2}{2} \\ &= A \left\{ \frac{WL}{2} + \sqrt{\left(\frac{WL}{2}\right)^2 + \frac{3EI}{L^2} \left(\frac{WL}{2}\right)h} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$$A = -\frac{3g_{31}}{2w} t_2 \frac{(t_3-h_2)^2 - (t_2+t_3-h_2)^2}{(t_2+t_3-h_2)^3(1-m) + (t_3-h_2)^3(n-1) + h_1^3 + nh_2^3} \quad (16)$$

출력전압 V 가 식 (8)과 같이 낙하물체의 무게 W 와 낙하높이 h 의 함수로 표현되며 PVDF 필름의 외형 치수와 자료 상수를 알면, 출력전압 V 를 구할 수 있다.³

3. 에너지 저장 시스템의 설계 및 제작

에너지 저장 시스템은 압전체를 이용하여 외부에서 인가되는 기계 에너지를 전기 에너지로 변환, 저장하기 위한 것으로, 그 구성에는 Fig. 7과 같이 에너지 변환부와 에너지 저장부로 구성이 되어 있다. 에너지 변환 시스템은 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데, 에너지 변환부에 해당하는 기구 부분과 에너지 저장에 해당하는 회로 부분으로 나눌 수 있다. Fig. 8는 실제 제작된 에너지 변환부와 에너지 저장부의 모습이다.

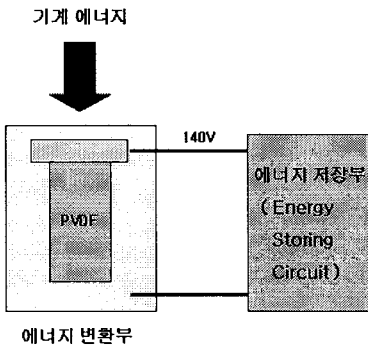


Fig. 7 Schematic for the energy harvesting system

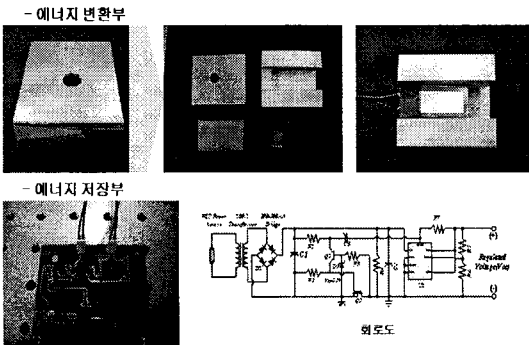


Fig. 8 31-mode the assembled system which absorbs the impact energy and the components of it and the circuit for the conversion of piezo energy

4. PVDF 필름의 Balldrop 테스트

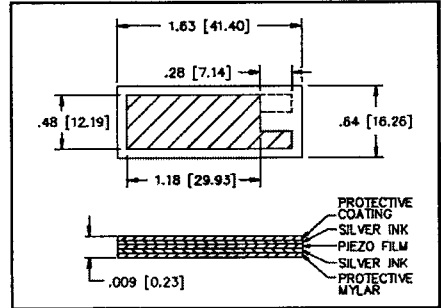


Fig. 9 Structure of PVDF film (mm)

실험에서 사용된 PVDF는 Measurement Specialities, Inc.의 DT1-028K/L로써 $t_1 = 57 \mu\text{m}$, $t_2 = 40 \mu\text{m}$, $t_3 = 133 \mu\text{m}$, $g_{31} = 216 \times 10^{-3} (Vm/N)$, $E_1 = 0.4 \text{ GPa}$, $E_2 = 3 \text{ GPa}$, $E_3 = 3.25 \text{ GPa}$ 이다. Table 2는 실험에서 사용된 변수 값들이다.

Table 2. Experiment Variable

볼의 질량	0.86g, 2.7g, 3.5g, 4.08g, 8.48g, 11g
볼의 낙하 위치	15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm
인가 에너지	1.2mJ ~ 41mJ

Fig. 10은 볼 낙하 테스트를 위한 장비와 주변 장치들이다. 볼 낙하 테스트를 위한 장비는 상하로 높이가 10cm에서 70cm까지 조절을 할 수 있고, 펌프에 의해 진공을 이용하여 볼 홀더에서 다양한 크기의 볼을 낙하시킬 수 있게 설계를 하였다.

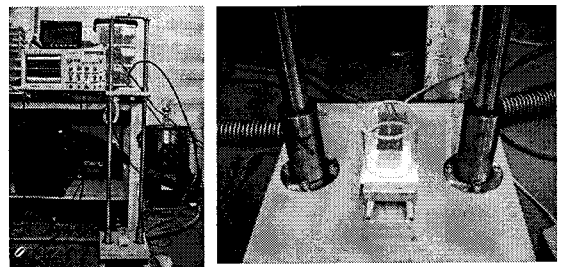
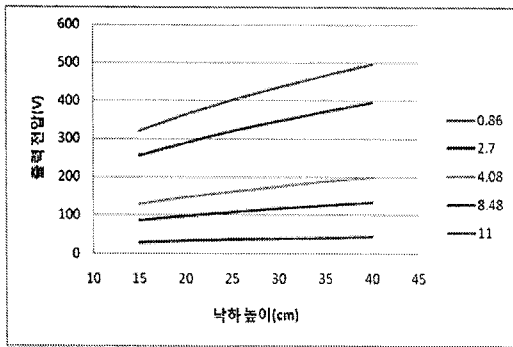


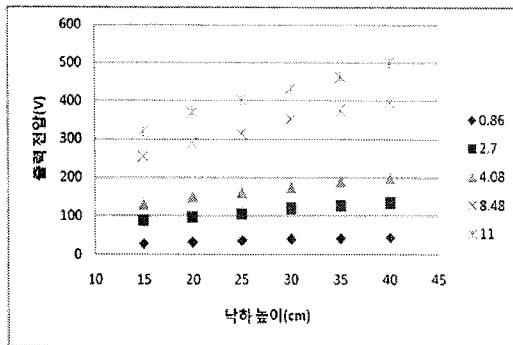
Fig. 10 Balldrop Test

Fig. 11은 볼 낙하 테스트 시 발생한 이론값과 실험값을 나타낸 그래프이다. 압전 필름은 볼 홀더에서 자유 낙하하는 쇠구슬에 의해 굽힘이 발생하

고 이로 인해 전압이 발생하게 된다. 실험에 적용된 조건을 이용하여 이론식을 통해 얻은 값으로, 인가된 에너지가 에너지 변환부를 통해 측정된 값이 이론값과 비슷한 경향을 띄고 있음을 확인할 수 있다. 볼 낙하 테스트는 일회성의 타격에 의해 발생하는 전압을 측정하기 위해 수행한 것으로 공압 가진기를 이용한 에너지 변환 시스템의 설계에 있어 중요한 자료로써, 동일한 에너지가 인가되었을 때 볼 낙하 테스트에서 발생한 전압과 공압 가진기에서 1회 타격시 발생한 전압이 유사함을 알 수 있었고, 이를 통해 에너지를 인가시키는 방법에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.



(a) Theoretical result



(b) Experimental result

Fig. 11 Theoretical and Experimental result of PVDF film

5. 에너지 변환 시스템의 측정

에너지 변환 시스템에 기계 에너지를 인가시키 그 때 발생하는 전압을 측정함으로써, 압전 필름의 실제 거동을 이론적 거동과 비교하고자 한다.

5.1 공압 가진기를 이용한 에너지 변환

연속적으로 인가되는 기계 에너지가 전기 에너지로 변환, 회로의 저장부에 충전되는 양을 측정하기 위한 실험으로, 에너지 변환부 내에 존재하는 압전 필름의 정전 용량이 달라짐에 따라 발생하는 전압과 $10\mu F$ 의 축전기에 저장되는 시간을 알아보았다. 실험에 사용된 측정 장비와 에너지 변환 시스템은 Fig. 11에서 보여주고 있다. 공압 펌프를 이용하여 1기압으로 압력을 고정하고, 공압 가진기를 이용하여 에너지 변환 시스템에 충격을 인가시킬 수 있도록 설계하였는데, 충격은 초당 50~58회 정도로 인가되었고, 해머의 이동 변위는 6mm로 1회 타격 시마다 약 5.5mJ이 인가되었다. 에너지 변환부에는 압전 필름의 개수를 변화시켰는데, 압전 필름의 개수가 변함에 따라 정전 용량이 변하게 된다. Bimorph 형태의 압전 필름을 이용하여 실험을 수행하였는데, 압전 필름의 개수는 1, 2, 4개 일 때에 대해 각각 실험을 수행하였다. 변환된 에너지의 저장을 위해 회로의 저장 축전기로는 $10\mu F$ 를 이용하였다.

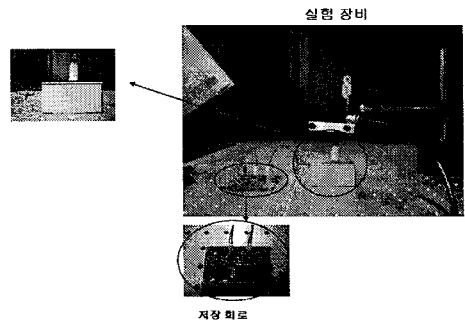


Fig. 12 The experimental setup for measuring the energy harvested

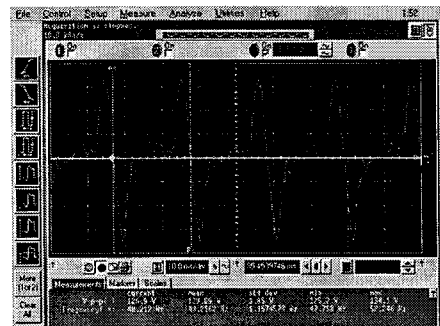


Fig. 13 The measured voltage from the energy

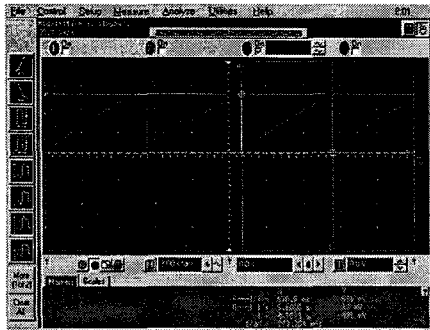


Fig. 14 The charged and discharged energy

인가된 에너지에 의해 발생하는 전압과 저장 축전기에 충/방전이 되는 모습은 Fig. 13과 Fig. 14에서 보여주고 있다. 이 그림들은 PVDF의 압전필름 1개(정전 용량은 1.38nF)를 갖고 있는 에너지 변환부를 이용한 것으로 57.5Hz로 타격 시 5.8mJ이 인가되고 발생 전압은 129V로 측정되었다. 10uF의 축전기를 충전시키기 위해 소요된 시간은 4.90초이다. 압전 필름의 개수를 달리한 실험 결과 값은 Table 3에 정리하였다.

Table 3 The measured values from the vibrator

		PVDF		
압전체 특성	압전필름의 개수	1	2	4
	정전 용량(nF)	1.38	2.76	5.52
실험 조건	인가 주파수(Hz)	57.5	56.2	58.9
	인가 에너지(mJ) (1회 타격)	5.8	5.6	6.0
측정 값	전압(V)	129	251	375
	저장 시간(s)	4.90	3.11	1.40
	전압 강하(V)	5.04	4.99	5.21

Table 3에서 보면, 압전 필름의 증가, 즉 압전체의 정전 용량의 증가에 의해 발생 전압은 증가하고 저장 시간은 감소함을 Fig. 15, Fig. 16를 통해 알 수 있다. 동일한 에너지가 인가될 경우에 압전체의 정전 용량이 증가시킬수록 발생전압이 증가함을 확인하였다. 이 결과를 이용하여 압전 필름의 개수를

증가시킴으로써 더 많은 에너지를 변환, 저장 시킬 수 있는 설계가 가능함을 예측할 수 있고, 이를 통해 저장된 에너지를 에너지원으로 사용 가능하게 설계할 수 있음을 알 수 있다.

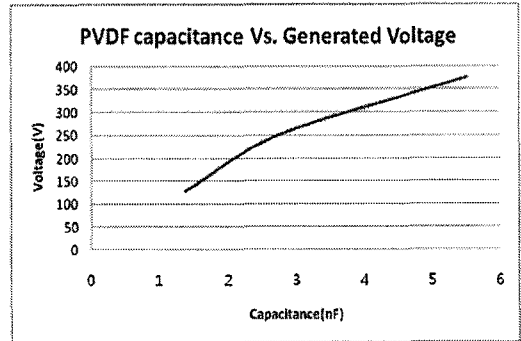


Fig. 15 The voltages with capacitances

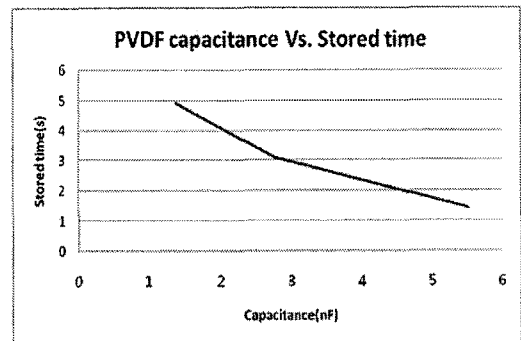


Fig. 16 The stored time with capacitances

6. 결론

압전 필름의 이론적 해석을 바탕으로 에너지 저장 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 가진기를 이용하여 에너지가 인가되었을 때, 압전 필름의 특성인 압전 필름의 정전 용량에 의해 변환되는 발생 전압과 저장 시간이 달라짐을 확인하였고, 이를 통해 에너지 변환부의 설계 고려해야할 사항으로 인가되는 에너지의 양 뿐만 아니라 압전체의 정전 용량을 높이기 위한 설계를 수행해야함을 알았다.

후 기

연구는 교육인적자원부의 BK21 프로젝트 의 지원을 받아 이루어진 연구서로 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

1. Oh, J., "SAW based passive radio sensor using energy gathering method," Ph.D Dissertation, Sogang University, 2004.
2. Lee, J., "A study on the energy harvesting system using the piezoelectric effect of piezo film," Master's Thesis, Sogang University, 2005.
3. Lee, Y. K. and Han D. Y., "Study on the Piezoelectric Direct Effect of PVDF Film," Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 13, pp. 786-790, 2000.
4. 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, Issue 1, pp. 33-43, 2001.
5. Williams, C. B., Pavic, A., Crouch, R. S. and Woods, R. C., "Feasibility study of vibration-electric generator for bridge vibration sensors," 1997 IMAC-XVI Proceedings, pp. 1111-1117, 1997.
6. Roundy, S., Wright, P. K. and Pister, K. S. J., "Micro-electrostatic vibration-to-electricity converter," Proceeding of IMECE2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition November, 2002.
7. Agah, M., Beak, K. and Potkey, J. A., "Design and analysis of a piezoelectric vibration powered microgenerator system," ME553, pp. 1-7, 2002.
8. Shenck, N. S. and Paradiso, J. A., "Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics," IEEE Micro, Vol. 21, Issue 3, pp. 30-42, 2001.
9. <http://www.meas-spec.com>