

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.7.867

압전-복합재료 발전 소자의 설계 및 특성[§]

띠앵민드리* · 김종화* · 구남서*[†]

* 건국대학교 신기술융합학과

Design of a Piezocomposite Generating Element and Its Characteristics

Minh Tri Tien*, Jong Hwa Kim* and Nam Seo Goo*[†]

* Dept. of Advanced Technology Fusion, Konkuk Univ.

(Received January 11, 2010 ; Revised May 22, 2010 ; Accepted May 26, 2010)

Key Words: Energy Harvesting (에너지 하베스팅), Piezo-Composite Generating Element (압전-복합재료 발전소자)

초록: 자연계에 존재하지만 사용되지 못하고 버려지는 에너지를 효과적으로 채집하여 배터리를 충전하거나 전기 장치에 전기 에너지를 공급하는 에너지 하베스팅에 대한 연구를 수행하였다. 압전재료는 물체의 움직임이나 진동으로부터 에너지를 채집하는 주요한 재료로 널리 연구되고 있다. 본 논문에서는 기존의 PZT 압전 특성을 개량하고자 압전-복합재료 발전소자(Piezo-Composite Generating Element, 이하 PCGE)를 도입하여 성능 예측 모델을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다. PCGE는 탄소/에폭시, PZT, 유리/에폭시 층으로 구성된다. 제작 과정에서 적층된 PCGE는 오토클레이브 안에서 177 °C의 온도에서 성형되는데, 이때 PCGE 내부에 초기잔류응력이 발생하게 되어 압전재료의 성능이 변화하게 된다. 세 종류의 PCGE를 제작한 후 에너지 채집 실험을 수행하여 제안된 성능 예측모델의 타당성과 기계적 진동을 전기적 에너지로 변환되는 성능을 검증하였다. 실험 결과 이론적인 성능 예측모델이 실험 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract: Unused energy derived from sources in nature can be captured and stored for future use, for example, to recharge a battery or power a device; this process of capturing and storing energy is called energy harvesting. Extensive investigations are being carried out in order to use piezoelectricity to harvest the energy generated by body movements or machine vibrations. This paper presents a simple analytical model that describes the output voltage effectiveness of a Piezocomposite Generating Element (PCGE) from vibration and its experimental verification. PCGE is composed of carbon/epoxy, PZT, and glass/epoxy layers. During the manufacturing process, the stacked layers were cured at 177 °C in an autoclave, which created residual stresses in PCGE and altered the piezoelectric properties of the PZT layer. In the experiments, three kinds of lay-up configurations of PCGE were considered to verify the proposed prediction model and to investigate its capability to convert oscillatory mechanical energy into electrical energy. The predicted performance results are in good agreement with observed experimental ones.

1. 서 론

자연계에서 버려지는 에너지를 활용하는 것을 목표로 하는 에너지 하베스팅(energy harvesting)은 지난 몇 년간 전 세계적으로 다양하게 연구되고 있는 주제이다. 태양광을 이용하는 태양 전지, 풍력, 바다의 파도 등을 이용하는 압전 발전, 폐열을 이용하는 발전 등 다양한 형태로 연구되고 있다.⁽¹⁾ 각각의 방법들은 장점과 단점을 동시에 가지고 있어 단점을

보완하고 장점을 살리는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 에너지 하베스팅의 중요한 적용 분야로는 무선 네트워크 시스템(wireless network system)의 주전원 및 보조전원 또는 신체 삽입 기구의 전원을 염두에 두고 있다.

Fig. 1은 압전 재료를 이용한 에너지 하베스팅의 개념을 나타낸다. 다양한 형태의 미활용 에너지를 기계적 진동으로 변환하여 압전 소자의 순방향 압전 성능을 이용하여 발전을 하고 이를 저장 회로를 통하여 배터리에 저장하는 것이 일반적인 개념이다. 에너지 하베스팅 연구에서는 기계적인 진동을 효율적으로 전기적인 에너지로 변

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4-6., 용평리조트) 발표논문임

[†] Corresponding Author, nsgoo@konkuk.ac.kr

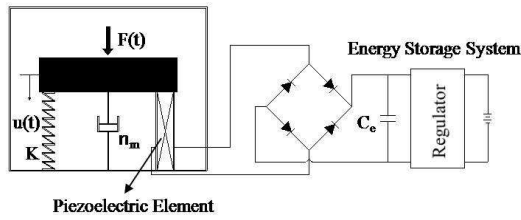


Fig. 1 Schematic of energy harvesting using piezoelectric element

환하는 방법과 변환된 전기적인 에너지를 저장하는 에너지 저장 기술이 두 가지 중요한 주제로 알려져 있다.

국내에서도 압전재료를 이용한 에너지 하베스팅에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 압전 효과로 발생하는 전기의 양이 작기 때문에 MEMS 장치나 신체 삽입 기구의 동력으로 적용하려는 목적으로 연구가 진행되고 있다.⁽²⁻⁴⁾

본 연구에서는 PZT의 발전 성능을 개량시킬 수 있는 압전-복합재료 발전소자(piezo-composite generating element, 이하 PCGE)를 도입하였다. 압전-복합재료 발전소자란 PZT를 복합재료와 같이 적층한 후 복합재료 성형 공정을 통하여 제작하는 것을 의미한다. 이렇게 함으로써 압전-복합재료 작동기^(5,6)에서와 같이 압전재료의 압전 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대하였다.

압전재료의 발전 성능을 나타내는 식으로부터 PCGE의 발전소자상수를 도입하여 발전 성능을 예측할 수 있는 발전성능 예측 모델을 제안하였다. 모델의 타당성을 검증하기 위하여 세 가지 형태의 PCGE를 고려하였다. 가진기를 이용한 에너지 하베스팅 실험 장치를 이용하여 PCGE의 발전성능을 측정하였다. 실험 결과를 성능예측 모델 결과와 비교하여 예측 모델이 타당함을 확인하였다.

2. 압전-복합재료 발전소자

여기에서는 압전재료의 구성식으로부터 압전-복합재료 발전소자의 특성을 예측할 수 있는 간단한 모델을 도입한다.

전기와 하중 사이의 에너지 전환이 일어나는 압전재료의 구성 방정식은 IEEE 표준 176-1987⁽⁷⁾에 따르면 다음과 같다.

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \tag{1}$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ik}^S E_k \tag{2}$$

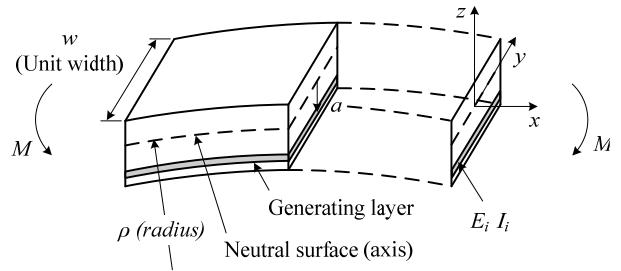


Fig. 2 Schematic of d_{31} mode generating element

여기에서 T_{ij} 는 응력, S_{kl} 은 변형률, c_{ijkl}^E 은 일정 전기장에서 구한 탄성 계수, $e_{kij} = c_{ijlm}^E d_{klm}$ 는 압전응력상수(d_{klm} 은 압전변형률 상수), D_i 는 전기적 변위, ϵ_{ik}^S 는 일정 변형률 상태에서 계측한 유전 상수, E_k 는 전기장을 나타내며, 하첨자 i, j, k, l, m 은 텐서의 방향으로 1, 2, 3의 값을 갖는다.

본 연구에서는 압전-복합재료 작동기의 개발에서 유니모프 작동기 상수 (coefficient of unimorph actuator)를 도입하여 최적의 압전 작동기 설계를 도출한 것과 같이,⁽⁵⁾ 발전소자상수 (coefficient of generating element)를 도입한다.

Fig. 2와 같은 단위 폭 ($w=1$)을 가지는 모델에서 힘 P 에 의하여 발생하는 응력 σ 에 대하여 압전재료 상하에 발생하는 전압 V 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = g_{31} \sigma = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33}^T} \sigma = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33}^T} \frac{a}{D} P \tag{3}$$

여기에서 ϵ_{33}^T 는 일정 변형률 상태에서 계측한 폴링방향 (3 방향) 유전 상수, a 는 모멘트 암으로 중립면에서 압전재료 사이의 거리이며, D 는 중립면에 대한 굽힘 강성으로 다음 식으로 계산된다.

$$D = \Sigma E_i I_i \tag{4}$$

여기에서 E_i 는 i 번째 층의 탄성 계수, I_i 는 i 번째 층의 단면 2차 모멘트이다. 중립면 위치는 복합보에서의 중립면의 위치를 계산하는 방법을 사용하였다.⁽⁸⁾

식 (3)을 고찰하면 PZT에 작용하는 모멘트 ($M = aP$)가 전기를 발생하며, 전압은 힘에 비례하고, 가해지는 힘이 같다면 전압은 $d_{31}, \epsilon_{ij}^T, a, D$ 에 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 식

(3)의 비례상수인 $\frac{d_{31}}{\epsilon_{33}} \frac{a}{D}$ 를 발전소자상수라 명명하였다.

본 연구에서는 이러한 기초적인 개념을 확인하기 위하여 세 가지 형태를 가진 압전-복합재료 발전소자를 제작한 후 발전 성능을 계측하였다.

3. 발전성능 예측

3.1 세 가지 압전-복합재료 발전소자

2장에서 도입한 성능 예측의 타당성을 검증하기 위하여 세 가지 형태의 압전-복합재료 발전소자를 설계하였다. 복합재료의 설계 다양성을 활용하여 세 가지 형태의 압전-복합재료 발전소자를 제작하여 실험적으로 성능을 비교한다. Fig. 3에는 탄소/에폭시 한 층, 유리/에폭시 세 층, PZT로 구성 가능한 세 종류의 압전 복합재료 발전소자의 적층 형태를 나타내고 있다. Table 1에는 각 재료의 물성치를 나타내었다.

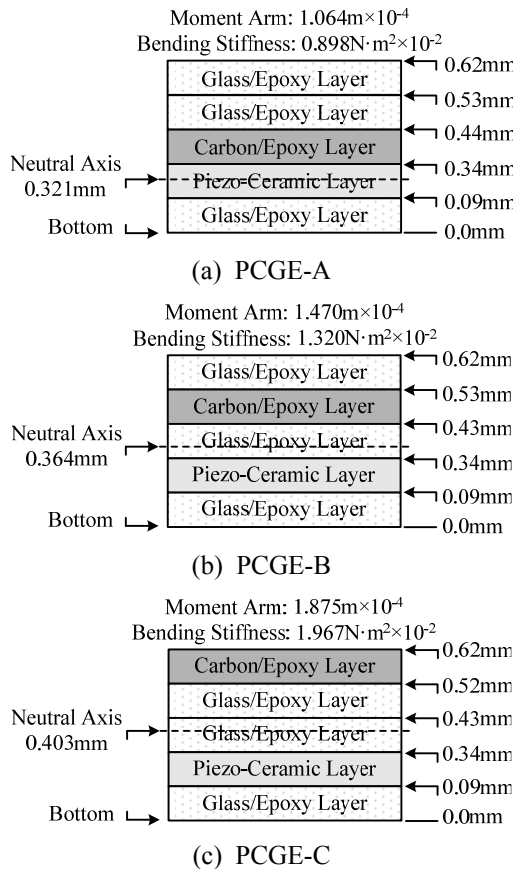


Fig. 3 Three types of piezo-composite generating elements

3.2 모멘트암과 굽힘강성의 비

3.1절에서 도입한 세 가지 적층 형태에 대하여 모멘트 암과 굽힘강성의 비인 a/D 를 계산하였다. 모멘트 암은 중립면에서부터 압전재료까지의 거리이며, 굽힘강성 D 는 식 (4)를 이용하여 계산하였다. Table 2에는 각각의 압전-복합재료 발전소자의 a/D 값을 비교하여 나타내었다. 강성이 큰 탄소/에폭시 층이 가장 바깥쪽에 있는 PCGE-C형이 굽힘강성이 크지만, 모멘트 암도 가장 크기 때문에 a/D 값은 가장 작다.

3.3 잔류응력에 따른 압전 상수 변화

압전-복합재료 발전소자를 복합재료 성형 공정에 따라 제작할 때 구성 재료들 사이의 열팽창 계수의 차이로 말미암아 PZT에 잔류압축응력이 작용한다. 일반적으로 압전상수 d_{31} 과 유전상수 ϵ_{33}^T 는 압축 응력의 함수로 알려져 있고,⁽⁹⁾ 식 (3)을 보면 압전-복합재료 발전소자에서 발생하는

Table 1 Material properties of PZT 3203HD and composite materials

Property		PZT	Carbon/Epoxy	Glass/Epoxy
Modulus	E_1 (GPa)	70	66.42	21.7
	E_2 (GPa)	70	66.42	21.7
	G_{12} (GPa)	23.7	4.35	3.99
	ν_{12}	0.31	0.054	0.13
CTE	α_1, α_2	3.5	-1.58	14.2
	piezo-electric			
	d_{31} ($\times 10^{-12} m V^{-1}$)	320	-	-
	ϵ_{33}^T ($\times 10^{-9} Fm^{-1}$)	33.6	-	-

Table 2 Ratio of moment arm and bending stiffness (a/D) of the three piezo-composite generating elements

	A	B	C
a ($10^{-4} m$)	1.064	1.470	1.875
D ($10^{-2} Nm^2$)	0.898	1.320	1.967
a/D ($10^{-2} N^{-1} m^{-1}$)	1.185	1.114	0.953

전압은 d_{31} 에 비례하고, ϵ_{33}^T 에 반비례하는 특성을 가짐을 알 수 있다.

압전-복합재료 발전소자의 잔류압축응력을 계산하기 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYSTM를 사용하였다. Table 1에 나타난 탄소/에폭시, 유리/에폭시 및 PZT의 물성과 성형온도 (177 °C)를 이용하여 열 해석을 수행하면 성형 후 발생하는 변위와 내부 잔류 응력을 계산할 수 있다.⁽⁶⁾

Table 3에는 유한요소 해석을 통하여 계산된 압전-복합재료 발전소자의 잔류압축응력과 참고 문헌⁽⁹⁾의 실험 결과로부터 압전변형률 상수와 유전 상수의 변화를 계산한 결과를 나타내었다. 괄호 안의 %값은 PZT 3203HD의 값에 대한 상대적인 크기를 나타낸 것이다. 예를 들어 PCGE-A형의 경우 PZT 내에 작용하는 잔류압축응력의 영향으로 d_{31} 은 원래 값보다 36.4% 커지며, ϵ_{33}^T 은 1.5% 커지게 된다. 이에 비하여 PCGE-C형의 경우는 d_{31} 와 ϵ_{33}^T 가 동시에 작아지게 된다.

Table 3 Ratio of piezoelectric strain constant and dielectric constant (d_{31}/ϵ_{33}^T) of the three piezo-composite generating elements

	A	B	C
d_{31} ($\times 10^{-12}mV^{-1}$)	436.5 (36.4% ↑)	358.7 (12.1% ↑)	306.5 (4.2% ↓)
ϵ_{33}^T ($\times 10^{-9}Fm^{-1}$)	34.1 (1.5% ↑)	30.5 (9.4% ↓)	29.2 (13.3% ↓)
d_{31}/ϵ_{33}^T ($\times 10^{-3}VmN^{-1}$)	12.8 (34.4% ↑)	11.8 (23.7% ↑)	10.5 (10.5% ↑)

Table 4 Coefficient of generating element of the three piezo-composite generating elements

	A	B	C
a/D ($\times 10^{-2}N^{-1}m^{-1}$)	1.185	1.114	0.953
d_{31}/ϵ_{33}^T ($\times 10^{-3}VmN^{-1}$)	12.768	11.752	10.498
$(d_{31}/\epsilon_{33}^T)(a/D)$ ($\times 10^{-5}VN^{-2}$)	15.131	13.092	10.005

3.4 압전-복합재료 발전소자상수의 계산

Table 2와 Table 3의 결과로부터 PCGE의 발전소자상수를 계산할 수 있으며, 이를 Table 4에 나타내었다. PCGE-A와 B형의 경우 d_{31} 과 ϵ_{33}^T 값이 커지게 되고 이 둘 사이의 비가 커지는 반면, PCGE-C형의 경우, d_{31} 과 ϵ_{33}^T 는 작아지게 되지만 둘 사이의 비는 커지게 된다.

이러한 결과를 종합하면 발전성능은 A형이 가장 우수하고 다음으로 B형, C형의 순으로 우수한 것으로 예측되었으며, C형에 비하여 A형은 51%, B형은 31% 우수할 것으로 예측되었다.

4. 실험

4.1 실험 장치

압전재료를 이용한 에너지 하베스팅은 구조물의 진동에너지를 전기 에너지로 변환하는 것이 기본적인 개념이므로, Fig. 4와 같이 가진기를 사용하여 에너지 하베스팅 실험 장치를 구성하였다.

세 가지 형태의 압전-복합재료 발전소자를 가진기에 장착하고 B&K사의 3560D FFT 해석기를 이용하여 정현 함수를 발생시킨다. 이때 같은 크기의 진동이 PCGE에 가해지도록 유의하면서 Agilent사의 멀티미터를 이용하여 PCGE에서 발생하는 전압을 계측하였다. 같은 크기의 진동을 가하는 것을 확인하기 위하여 가진 부분에 가속도계를 장착하고 B&K사의 3560D FFT 해석기를 이용하여 가진 가속도를 계측하였다.

본 연구는 압전-복합재료 발전소자의 개념을 도입하는 것이므로, 50 Hz 까지의 비교적 낮은 영역의 가진 주파수에 대한 특성을 고찰하였다.



Fig. 4 Energy harvesting experimental setup for piezo-composite generating elements

Table 5 Comparison between prediction and experimental value of generating voltages of the three piezo-composite generating elements

	A	B	C
Prediction	51% ↑	31% ↑	Reference
Experiment	42% ↑	28% ↑	Reference

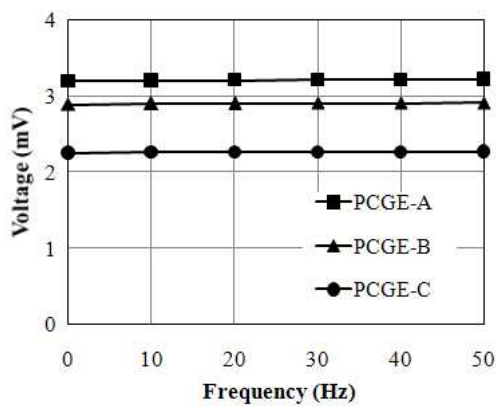


Fig. 5 Voltage results of the three piezo-composite generating elements

4.2 실험 결과

Fig. 5에는 Fig. 4에 나타낸 실험 장치에 세 가지 형태의 압전-복합재료 발전 소자를 장착한 후 계측한 전압을 나타내었다. 가진 주파수는 1 Hz 부터 시작하여 50 Hz까지 증가시켰다. 각각의 압전-복합재료 발전소자에서 발생한 전압을 보면 주파수와 무관하게 일정한 값을 나타내었는데, 이는 가진 주파수의 범위가 낮기 때문이라고 생각된다.

전압값의 크기는 A형이 3.2V, B형이 2.8V, C형이 2.2V이었다. 이 결과는 Table 4에 나타낸 발전소자 상수의 크기 순하고 같음을 확인할 수 있다. C형 발전소자에서 발생하는 전압에 대한 상대적인 값으로 비교한 결과를 Table 5에 나타내었다. 이를 보면 성능향상에 대한 모델 추정과 실험 결과가 3%~9% 정도의 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 압전-복합재료 발전소자는 설계 방법에 따라 PZT의 발전 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 압전-복합재료 발전소자를 도입하였다. 압전-복합재료 발전소자의 특성을 예측할 수 있는 모델을 만들어 발전소자상수를 도입한 후 실험을 통하여 타당성을 검증하였다. 같은 재료를 가지는 세 가지 형태의 압전-복합재료 발전소자를 제작하여 발전 성능을 실험적으로 고찰한 결과 해석 모델이 압전-복합재료 발전소자의 발전 성능의 향상을 잘 나타냄을 확인할 수 있었다.

향후 압전-복합재료 발전소자를 실제 에너지 하베스팅에 적용하기 위해서는 공진 주파수에서의 발전 성능과 적층 형태에 따른 공진 주파수 변화 가능성에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다.

5. 감사의 글

이 논문은 국토해양부의 U-City 석박사과정 지원사업으로 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) Jung, D.Y., Song, H.C. and Yoon, S.J., 2007, "Piezoelectric Energy Harvesting," *Bulletin of Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol. 20, No. 12, pp.45~54.
- (2) Kwak, M.K., Kim K.Y., Kang, H.Y. and Kim, N.S., 2008, "Development of Piezoelectric Energy Harvesting Device," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 32~38.
- (3) Nam, Y.S., Park, J.S., Park, H.G. and Lee, J.K., 2008, "A Study on the Piezoelectric Energy Harvesting Using SSHI Technique," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 6, pp. 92~98.
- (4) Choi, B. and Lee W.H., 2008, "A Study on the Energy Harvesting System Using Piezoelectric Direct Effect of Piezo Film," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 9, pp. 78-85.
- (5) Yoon, K.J., Park, K.H., Lee, S., Goo, N.S. and

- Park, H.C., 2004, "Analytical Design Model for a Piezo-Composite Unimorph Actuator and Its Verification Using Lightweight Piezo-Composite Curved Actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 459~467.
- (6) Goo, N.S., Phan, V.P. and Yoon, K.J., 2009, "Actuation Displacement Performance Change of Prestressed Piezoelectric Actuators Attached to a Flat Surface," *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, 037003 (5pp).
- (7) ANSI/IEEE Std 176-1987, IEEE Standard on Piezoelectricity, 1987.
- (8) Irving H. Shames and James M. Pitarresi, Introduction to Solid Mechanics, Prentice-Hall, 1999.
- (9) Krueger, H.H.A., 1968, "Stress Sensitivity of Piezoelectric Ceramics: Part 3. Sensitivity to Compressive Stress Perpendicular to the Polar Axis," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 43, pp. 583~591.