

[001] 및 [011] 방향 분극의 압전 단결정 PMN-PZT를 이용한 진동 에너지 수확 특성

Performance Characteristics of Vibration Energy Harvesting Using [001] and [011]-Poled PMN-PZT Single Crystals

김재은* · 김영철** · 신경호†

Jae Eun Kim, Young-Cheol Kim and Kyung Ho Sun

(Received September 30, 2014 ; Revised October 24, 2014 ; Accepted October 24, 2014)

Key Words : Vibration Energy Harvesting(진동 에너지 수확), Piezoelectric Single Crystal(압전 단결정), PMN-PZT, Energy Conversion Efficiency(에너지 변환 효율)

ABSTRACT

This work investigated the electromechanical performance of a cantilevered vibration energy harvester incorporating the single crystal PMN-PZT, manufactured with the most recent technology of solid-state single crystal growth. The performances of single crystal PMN-PZTs with two different crystallographic axes such as [011] and [001] are compared with those of PZT ceramics. From the investigations, it is shown that the [001]-poled PMN-PZT is advantageous for the excitations containing single dominant frequency component, while the single crystal [011]- d_{32} is superior in terms of the energy storage density and energy conversion efficiency.

1. 서 론

압전 진동 에너지 수확 기술은 수확 대상 에너지 원인 진동 에너지가 주변 환경 어디에나 존재하여 수집하기 쉬울 뿐만 아니라 수확 장치 구성의 간단함, 소형화를 위한 MEMS 구현의 용이성, 높은 출력 전압, 다른 에너지 변환 수단에 비해 비교적 높은 에너지 밀도와 에너지 변환 효율 등의 장점이 있어 이에 대한 많은 연구가 이뤄져 왔다⁽¹⁻³⁾. 특히, 최근에는 전기 출력량 향상^(2,4,5), 전기 출력 주파수 대역폭의

광역화⁽⁶⁻¹⁰⁾ 및 다축 진동원 가진 방향성⁽⁹⁻¹²⁾ 등을 고려한 연구가 주를 이루고 있다. 또한, 의료 삽입 기기 (medical implants) 등의 특정 응용 분야에서 필요한 소형화를 위해 이에 수반되는 진동 가진 주파수 대역 대비 높은 고유진동수 및 유효 질량 감소로 인한 출력 감소에 대한 연구도 중요하다⁽¹³⁻¹⁶⁾.

압전 진동 에너지 수확 장치의 전기 출력량 향상을 위한 기존 연구는 크게 에너지 밀도 및 변환 효율 향상을 위한 압전 재료의 개발^(15,17,18), 진동 에너지 변환 수단의 조합 적용^(15,19-21), 진동 에너지 수확 장치의 구조 고안/최적화⁽²²⁻²⁷⁾ 및 출력 손실 최소화를

† Corresponding Author ; Member, Department of System Dynamics, Korea Institute of Machinery & Materials
E-mail : sunkh@kimm.re.kr
Tel:+82-42-868-7247, Fax:+82-42-868-7440

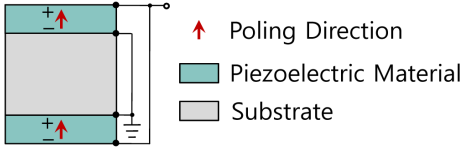
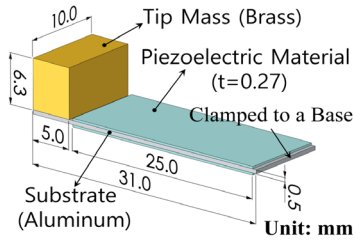
* Member, School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

** Member, Department of System Dynamics, Korea Institute of Machinery & Materials

A part of this paper was presented at the KSNVE 2014 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering



Bimorph Connected in Parallel

Fig. 1 Configuration of the cantilevered bimorph piezoelectric vibration energy harvester with the electrodes connected in parallel

위한 전력 관리 회로 기술^(28,29) 등으로 나눌 수 있다. 이 연구에서는 압전 진동 에너지 수확 장치의 전기 출력 향상을 위한 수단으로서, 단위 부피당 출력 밀도가 높다고 보고되어 있는 압전 단결정 PMN-PZT 기반의 외발보 진동 에너지 수확 장치의 전기 출력 특성을 살펴보았다. 특히, 고상 단결정 성장법(SSCG: solid-state single crystal growth)에 의해 형성된 압전 단결정의 결정 축(crystallographic axis) 방향별 분극에 따른 진동 에너지 수확 특성을 분석하였다. 또한, 기존의 진동 에너지 수확 관련 연구에서 많이 사용되어 온 Pb(ZrTi)O₃ (PZT) 계열의 세라믹 압전 소자의 경우⁽³⁰⁾와도 비교하였다. 분석을 위해 ANSYS 유한요소 해석 결과를 이용하였다.

2. PMN-PZT 기반의 진동 에너지 수확 특성

2.1 진동 에너지 수확 장치의 구성

이 연구에서 전기-역학 특성을 분석할 진동 에너지 수확 장치의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 압전 재료는 종류에 상관없이 모두 동일하게 두께 방향으로 분극되어 있으며, 알루미늄 기판의 상·하면에 부착되어 있다. 그리고, 동일 발생 전력에서 더 높은 출력 전류를 얻을 수 있도록 상·하면 압전 재료는 동일한 분극 부호를 갖고 상호 병렬로 연결되어 있다^(30,31). 압전 재료로 사용된 압전 단결정 PMN-PZT

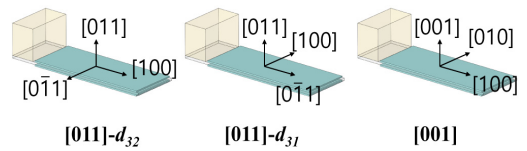


Fig. 2 PMN-PZT single crystals with different crystallographic axes for the present PEH configuration

Table 1 Material properties of the single crystal PMN-PZT (LCSC145-90)⁽³²⁾ for the two crystallographic axes

Crystallographic axis [011]			
Mass density (kg/m ³)	7,400	s_{11}^E (m ² /N)	1.291×10^{-11}
d_{15} (C/N)	8.518×10^{-10}	s_{12}^E (m ² /N)	-2.230×10^{-11}
d_{24} (C/N)	1.197×10^{-10}	s_{13}^E (m ² /N)	0.602×10^{-11}
d_{31} (C/N)	4.374×10^{-10}	s_{22}^E (m ² /N)	8.030×10^{-11}
d_{32} (C/N)	-13.50×10^{-10}	s_{23}^E (m ² /N)	-4.438×10^{-11}
d_{33} (C/N)	7.313×10^{-10}	s_{33}^E (m ² /N)	3.558×10^{-11}
$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	2,555	s_{44}^E (m ² /N)	1.070×10^{-11}
$\epsilon_{22}^T / \epsilon_0$	808	s_{55}^E (m ² /N)	4.976×10^{-11}
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	2,892	s_{66}^E (m ² /N)	0.935×10^{-11}
Crystallographic axis [001]			
Mass density (kg/m ³)	7,350	s_{11}^E (m ² /N)	5.50×10^{-11}
d_{15} (C/N)	1.78×10^{-10}	s_{12}^E (m ² /N)	-2.61×10^{-11}
d_{31} (C/N)	-7.15×10^{-10}	s_{13}^E (m ² /N)	-2.69×10^{-11}
d_{33} (C/N)	15.80×10^{-10}	s_{33}^E (m ² /N)	6.06×10^{-11}
	1,690	s_{44}^E (m ² /N)	1.72×10^{-11}
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	5,690	s_{66}^E (m ² /N)	3.50×10^{-11}

(LCSC145-90)⁽³²⁾는 [001] 및 [011]의 결정 축 방향에 따라 물성치 특성이 서로 다르다. 특히, Table 1에 나타난 바와 같이 [011] 방향의 결정 축을 갖는 경우에는 PZT 계열의 압전 세라믹과는 달리 분극 방향 수직 평면에서 비등방성 특성을 갖는다 ($s_{11} \neq s_{22}$, $d_{31} \neq d_{32}$). 따라서, 이 경우 압전 재료의 부착 방향에 따라 진동 에너지 수확 장치의 전기-역학 특성도 달라지게 된다. Fig. 2에 결정 축 방향별 압전 단결정 PMN-PZT의 부착 상태를 나타내었

으며, [011] 결정의 서로 다른 2가지 경우를 구분하기 위해 [011]- d_{32} 및 [011]- d_{31} 과 같은 표기법을 사용하였다⁽¹⁵⁾. 언급한 바와 같이 [001] 및 [011] 결정축 방향은 분극 방향과 동일하다.

또한, 이 연구에서는 압전 단결정 PMN-PZT (LCSC145-90)의 진동 에너지 수확 특성을 PZT 계열 다결정 세라믹의 경우와도 비교 분석하기 위해 Piezo System, Inc.⁽³³⁾의 PZT 5H (PSI-5H4E) 및 PZT 5A (PSI-5A4E)를 고려하였다.

Fig. 1에 나타난 외팔보 진동 에너지 수확 장치의 끝단 질량 및 기관은 각각 황동 (밀도: 8,470 kg/m³, 탄성계수: 10 GPa) 및 알루미늄 (밀도: 2,700 kg/m³, 탄성계수: 69 GPa)으로 만들어졌다.

2.2 에너지 밀도 및 변환 효율 특성

(1) 압전 재료의 에너지 밀도 특성

Islam과 Priya의 연구⁽³⁴⁾에 의하면 응력을 받고 있는 압전 재료의 단위 부피당 에너지(개회로 상태에서 저장되는 전기 에너지) 밀도 u 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{|[011]-d_{31}/PZT} = \frac{1}{2}(d_{31} \cdot g_{31}) \cdot (T_{11})^2 \tag{1a}$$

$$u_{|[011]-d_{32}/PZT} = \frac{1}{2}(d_{32} \cdot g_{32}) \cdot (T_{22})^2 \tag{1b}$$

위 식에서 d 와 g (d/ϵ^T , ϵ^T : 유전 상수)는 각각 압전 변형률 상수(piezoelectric strain constant) 및 압전 전압 상수(piezoelectric voltage constant)를 나타내며, T 는 압전 재료내의 응력을 뜻한다. 따라서, 재료 내의 발생 응력 T 값이 같다면 변환 계수

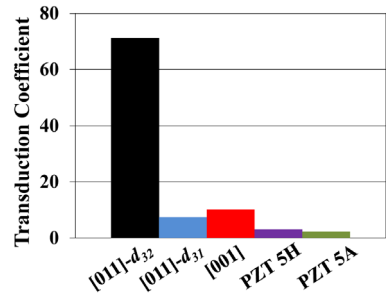
Table 2 Calculated values of n and the product $d \cdot g$ for the piezoelectric materials considered in this work

		$d \cdot g$ ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$)	n
PMN-PZT	[011]- d_{32}	71.18	1.168
	[011]- d_{31}	7.472	1.233
	[001]	10.15	1.253
PZT 5H		3.043	1.270
PZT 5A		2.265	1.247

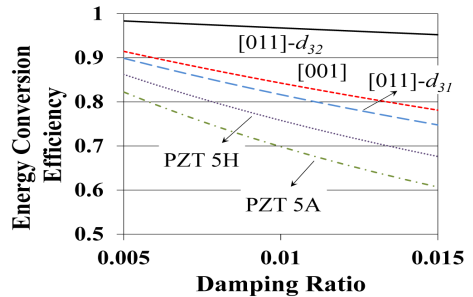
(transduction coefficient)로 정의되는 d 와 g 의 곱이 큰 압전 재료가 높은 에너지 밀도를 갖게 되며, 그 값은 $(\epsilon^T)^{2n-1}$ 로 표현될 수 있다. 이 결과에서 변환 계수의 값이 최대일 때 n 은 이론적인 최소값 0.5를 갖지만, 대부분의 상용 압전 세라믹은 1.1~1.3의 값을 갖는다. 이 연구에서 고려한 압전 재료의 변환 계수 및 n 의 값을 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 n 의 값이 이론 최소값으로 근접할 수록 g 의 값은 커지지만, $d \cdot g$ 의 값은 d 및 ϵ^T 의 비율에 따라

Table 3 Resonant frequencies and energy conversion efficiency of the vibration energy harvester for varying piezoelectric materials

	f_{sc} (Hz)	f_{oc} (Hz)	k^2	η	
				$\xi = 0.005$	$\xi = 0.015$
[011]- d_{32}		222.8	0.545	0.984	0.952
[011]- d_{31}	262.6	285.0	0.151	0.899	0.748
[001]	154.0	169.7	0.176	0.915	0.781
PZT 5H	217.1	230.3	0.111	0.862	0.676
PZT 5A	220.8	230.8	0.084	0.822	0.607



(a)



(b)

Fig. 3 Comparisons of (a) the transduction coefficient ($d \cdot g$) and (b) energy conversion efficiency (η)

반드시 커지지는 않는다. 표에 나타난 바와 같이 변환 계수의 값은 [011]- d_{32} 이 가장 크고, PZT 5A가 가장 작은 것을 알 수 있다. 그러나, 식 (1)에 나타난 바와 같이 에너지 밀도는 재료내의 발생 응력 크기와도 관계가 있는데, 압전 재료마다 강성 및 밀도가 서로 다르므로 동일한 진동 환경하에서 발생 응력이 다를 수 있다. 따라서, 각각의 압전 재료가 실제 진동 에너지 수확 장치에서 사용되었을 때의 발생 전력을 분석하는 것이 필요하다.

(2) 압전 재료의 에너지 변환 효율 특성

에너지 변환 효율은 특정 압전 재료가 진동에너지 수확 장치로 구성되고 폐회로(short circuit) 상태의 고유진동수로 가진 되었을 때의 특성을 알아볼 때 유용하다⁽³⁵⁾. 이는 개회로(open circuit) 상태의 진동 에너지 수확 장치에서 저장되는 전력 대비 큰 사적인 임피던스 정합을 가정할 때의 외부 부하에서 소모되는 전력을 나타낸다. 진동 에너지 수확 장치의 품질 계수(quality factor)를 $Q(=1/2\zeta, \zeta: 감쇠비)$, 전기 역학 연성 계수(EMCC: electro-mechanical coupling coefficient)를 k^2 이라고 하면, 에너지 변환 효율 η 는 다음과 같이 유도된다.

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{k^2}{1-k^2} \bigg/ \left(\frac{1}{Q} + \frac{1}{2} \frac{k^2}{1-k^2} \right) \quad (2)$$

위 식에서 k^2 은 진동 에너지 수확 장치의 폐회로 및 개회로 상태의 고유진동수를 각각 f_{sc} 및 f_{oc} 라고 할 때, 다음 식에 의해 구할 수 있다^(31,36).

$$k^2 = \frac{f_{oc}^2 - f_{sc}^2}{f_{oc}^2} \quad (3)$$

식 (2) 및 (3)을 이용하여 Fig. 1에 나타난 진동 에너지 수확 장치의 에너지 변환 효율을 구할 수 있다. 첫 번째 모드에서의 감쇠비 값은 임의로 0.005 및 0.015의 2가지 경우를 고려하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 참고로 압전 단결정은 일반적으로 댐핑 계수가 PZT 세라믹 계열보다 작다. 그러나, 세라믹 계열에서는 PZT 5A (hard PZT)가 PZT 5H (soft PZT) 보다 감쇠비가 작으므로 동일한 감쇠비 조건에서 비교한 경우와 다를 수도 있다.

지금까지 살펴 본 것을 Fig. 3에 나타내었으며, 이를

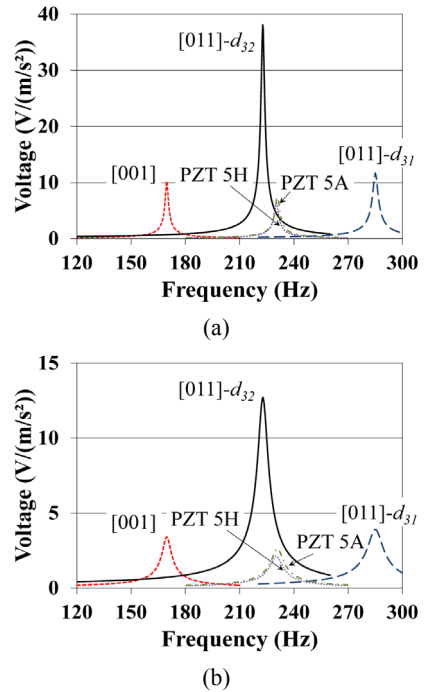


Fig. 4 Open-circuit voltage for the mechanical modal damping ratios of (a) 0.005 and (b) 0.015

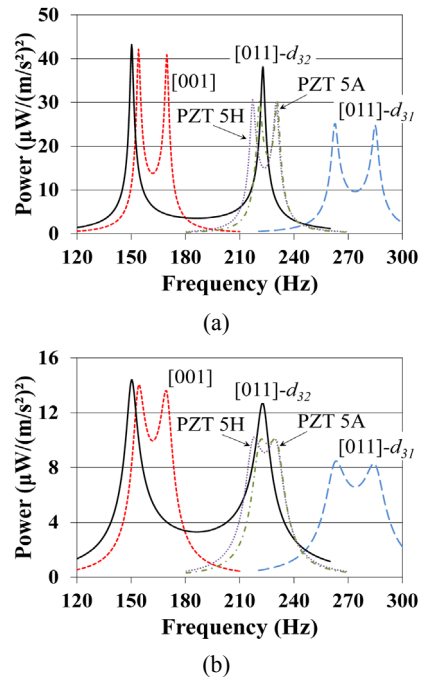


Fig. 5 Output power for the optimal resistance at each frequency in the case of the mechanical modal damping ratios of (a) 0.005 and (b) 0.015

통해 [011]- d_{32} , [001], [011]- d_{31} , PZT 5H, PZT 5A의 순서대로 에너지 저장 밀도 및 변환 효율의 값이 크다는 것을 알 수 있다.

2.3 개회로 출력 전압 및 부하 발생 전력 특성

(1) 개회로 출력 전압 및 발생 전력 특성 비교

앞서 살펴본 에너지 밀도 및 변환 효율 특성을 통해서 진동 에너지 수확에 유리한 압전 재료를 선택할 수 있다. 그러나, 가진 주파수에서의 실제 가용한 전압 및 전력의 크기를 알 수 없을 뿐만 아니라, 전력 발생 주파수 대역을 가늠하는 것이 불가능하다. 따라서, 외부 부하 저항이 무한대의 저항을 갖는 경우의 출력 전압 특성 및 임피던스 정합된 외부 부하 저항이 연결된 경우의 가진 주파수 별 발생 전력을 비교하였다. 이를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었으며, 진동 에너지 수확 장치의 감쇠비 값을 미리 알 수 없기 때문에 임의로 2개의 값을 선정하여 각각에 대한 결과를 표현하였다. 압전 단결정 중 [011]- d_{32} 의 경우, 개회로 출력 전압 값이 월등히

높고, 앞서 살펴 본 바와 같이 에너지 밀도 및 변환 효율 역시 높기 때문에 최적 저항에서의 출력 값이 넓은 주파수 대역에 걸쳐 존재함을 알 수 있다.

(2) 고유진동수 정규화를 통한 전기 출력 특성

서로 다른 압전 재료를 이용하여 Fig. 1의 동일한 치수의 구조로 진동 에너지 수확 장치를 구성할 경우, 압전 재료의 물성치가 서로 다르므로 폐회로 및 개회로 상태의 고유진동수 역시 서로 다르다. 특히, Table 1에 나타낸 바와 같이 [011]- d_{32} 의 경우에는 보의 길이 방향 강성이 상대적으로 낮아서 ($s_{22}^E \approx 6s_{11}^E$) 폐회로 고유진동수가 매우 낮게 나오는 것을 Table 3에서 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고, d_{32} 의 값이 상대적으로 높아 개회로 상태의 고유진동수는 매우 높다⁽³¹⁾.

공진형 진동 에너지 수확 장치는 장치의 고유진동수가 외부 가진 주파수와 일치하는 경우에 발생 전력이 최대가 된다. 따라서, 공진형 진동 에너지 수확 장치의 성능 비교를 위해서는 동일한 고유진

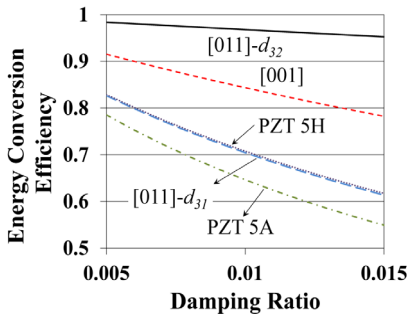
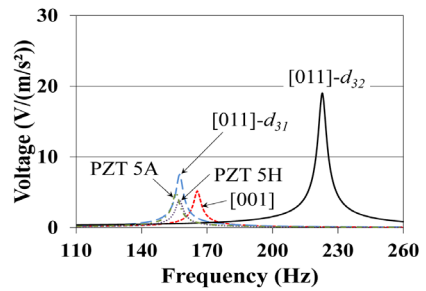


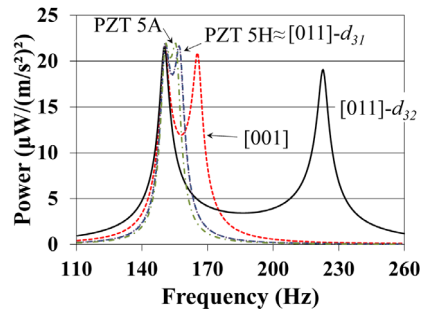
Fig. 6 Comparisons of the energy conversion efficiency(η) for the resonance-tuned vibration energy harvesters by adjusting the thickness

Table 4 Short-circuit and open-circuit resonant frequencies of the resonance-tuned vibration energy harvesters by adjusting the thickness

	f_{sc} (Hz)	f_{oc} (Hz)	k^2	η	
				$\xi = 0.005$	$\xi = 0.015$
[011]- d_{32}	150.2	222.8	0.545	0.984	0.952
[011]- d_{31}	150.4	157.4	0.087	0.826	0.614
[001]	150.2	165.5	0.177	0.915	0.782
PZT 5H	150.2	157.3	0.088	0.829	0.617
PZT 5A	150.4	155.8	0.068	0.785	0.549



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Open-circuit voltage and (b) impedance-matched output power for the resonance tuned vibration harvesters with the damping ratio of 0.01

동수를 갖는 경우에 대하여 비교하는 것이 타당하다. 이는 외부 가진 주파수에 따라 에너지 수확 장치로 유입되는 진동 에너지가 다르기 때문이다. 따라서, Fig. 1에 나타낸 치수 중 등가 질량의 증감에 미치는 영향이 제일 적은 기관의 두께를 변경⁽³⁷⁾하여 폐회로 상태의 고유진동수를 모두 150 Hz로 맞추었다.

에너지 밀도는 압전 재료들의 변동이 없으므로 변함이 없으나 폐회로 및 개회로 상태의 고유진동수가 변화하였으므로 전기-역학 연성 계수 및 에너지 변환 효율이 달라진다. 이를 Table 3에 나타내었으며, 각각의 압전 재료 기반 진동 에너지 수확 장치의 감쇠비에 대한 에너지 변환 효율을 Fig. 6에 나타내었다. 에너지 변환 효율의 경향이 앞서의 경우와 비슷하다는 것을 확인 할 수 있다. 단지, 기관의 두께 조절을 통해 폐회로 상태의 고유진동수가 같은 값으로 조정된 경우, PZT 5H 의 에너지 변환 효율이 [011]- d_{31} 보다 약간 높게 나왔다. 그러나, 언급한 바와 같이 실제 감쇠비는 단결정의 경우가 낮으므로 이를 고려하면 [011]- d_{31} 가 조금 더 높거나 거의 비슷하다는 것을 예측할 수 있다. 에너지 변환 효율의 관점에서 여전히 압전 단결정 [011]- d_{32} 의 사용이 매우 유리함을 알 수 있다. 또한, Fig. 7에 나타낸 최적 부하 저항에서의 발생 전력값을 살펴보면, 폐회로 상태의 고유진동수에서의 발생 전력 값은 모든 경우에 대해 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다. 다만, 에너지 변환 효율 값이 클수록 출력 대역폭이 상당히 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 2개의 최대 발생 전력 주파수(폐회로 및 개회로 상태의 고유진동수) 사이의 간격이 넓어짐에 따라 중간 주파수 영역에서의 발생 전력량은 적어지기 때문에, 주변의 진동 가진 환경에 따라 적절한 압전 재료의 선택이 필요할 것으로 판단된다. 각각의 경우에 대한 발생 전력 대역폭을 Table 4에 나타내었다. 모든 경우에 대해 외부 가진 주파수가 150 Hz 일 때를 가정하여 폐회로 상태의 고유 진동수를 맞추었으므로, 반동력 주파수 f_1 및 f_2 는 이 때의 발생 전력의 1/2 이 되는 주파수로 정의하였다. 단, 표의 결과는 감쇠비가 0.01때를 가정하여 해석한 결과이므로 다른 감쇠비에 대해서는 당연히 다른 대역폭의 결과를 갖게 된다. 결과에서 확인할 수 있듯이 비록 [011]- d_{32} 단결정이 에너지 밀도 및 변환 효율에 있어서는

Table 4 Output power (P_{out}) at short-circuit resonances and bandwidth (Δf) using the half-power points f_1 and f_2 ($\zeta=0.01$)

	$P_{out}(\mu W/(m/s^2)^2)$	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	Δf (Hz)
[011]- d_{32}	21.6	146.3	155.0	8.7
		218.2	226.7	8.5
[011]- d_{31}	21.6	147.6	160.3	12.7
[001]	21.5	146.9	168.9	22.0
PZT 5H	21.7	147.4	160.2	12.8
PZT 5A	21.5	147.8	158.5	10.7

우수하나 외부 가진 주파수가 단일 성분으로 구성되어 있으면 오히려 [001]의 경우가 유리하다. 그러나, 외부 가진 주파수가 2개 이상의 주성분으로 구성되어 있는 경우에는 오히려 [011]- d_{32} 단결정이 유리할 수 있다.

3. 결 론

외팔보 압전 진동 에너지 수확 장치에 사용되는 압전 재료에 따른 전기 출력 특성을 유한요소 해석 결과를 통해 분석하였다. 기존의 PZT 세라믹 계열에 비해 단위 부피당 출력 밀도가 높다고 알려져 있는 PMN-PZT 압전 단결정의 결정 축 방향 별 분극에 따른 전기 출력 특성을 비교하였다. [011]- d_{32} 결정 축 방향을 갖는 단결정의 경우 에너지 밀도 및 변환 효율이 상대적으로 매우 높다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 실제 발생 전력 해석 결과에 의하면, 단일 성분의 외부 가진 주파수에 대해서는 [011]의 경우가, 2개 이상의 성분이 가진 주파수에 포함된 경우에는 [011]- d_{32} 의 경우가 유리함을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 한국기계연구원 자체사업 (KM3510) 및 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 글로벌 프론티어 연구개발 사업으로 수행된 연구임(과제번호: 2014063711).

References

- (1) Roundy, S., Wright, P. K. and Rabaey, J., 2003, A Study of Low Level Vibrations as a Power Sources for Wireless Sensor Nodes, *Computer Communications*. Vol. 26, pp. 1131~1144.
- (2) Cook-Chennault, K. A., Thambj, N. and Sastry, A. M., 2008, Powering MEMS Portable Devices-a Review of Non-regenerative and Regenerative Power Supply Systems with Special Emphasis on Piezoelectric Energy Harvesting Systems, *Smart Materials and Structures*. Vol. 17, 043001.
- (3) Priya, S. and Inman, D. J., 2009, *Energy Harvesting Technologies*, Springer, New York.
- (4) Sodano, H. A., Inman, D. J. and Park, G., 2004, A Review of Power Harvesting from Vibration Using Piezoelectric Materials, *The Shock and Vibration Digest*. Vol. 36, pp. 197~205.
- (5) Sodano, H. A. and Anton, S. R., 2007, A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003-2006), *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, R1-R21.
- (6) Tang, L., Yang, Y. and Soh, C. K., 2010, Toward Broadband Vibration-based Energy Harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, pp. 1867~1897.
- (7) Twiefel, J. and Westermann, H., 2013, Survey on Broadband Techniques for Vibration Energy Harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24, pp. 1291~1302.
- (8) Pellegrini, S. P., Tolou, N., Shenk, M. and Herder, J. L., 2013, Bistable Vibration Energy Harvesters: A Review, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24, pp. 1303~1312.
- (9) Nguyen, S. D., Halvorsen, E. and Paprotny, I., 2013, Bistable Springs for Wideband Microelectro-mechanical Energy Harvesters, *Applied Physics Letters*. Vol. 102, 023904.
- (10) Yang, J., Wen, Y., Li, P., Yue, X., Yu, Q. and Bai, X., 2013, A Two-dimensional Broadband Vibration Energy Harvester Using Magnetolectric Transducer, *Applied Physics Letters*, Vol. 103, 243903.
- (11) Moss, S. D., McLeod, J. E., Powlesland, I. G. and Galea, S. C., 2012, A bi-axial Magnetolectric Vibration Energy Harvester, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 175, 165~168.
- (12) Lumentut, M. F. and Howard, I. M., 2011, Analytical Modeling of Self-powered Electro-mechanical Piezoelectric Bimorph Beams with Multidirectional Excitation, *International Journal of Smart and Nano Materials*. Vol. 2, No. 3, pp. 134~175.
- (13) Hudak, N. S. and Amatucci, G. G., 2008, Small-scale Energy Harvesting through Thermoelectric, Vibration, and Radiofrequency Power Conversion, *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, 101301.
- (14) Karami, M. A. and Inman, D. J., 2011, Analytical Modeling and Experimental Verification of the Vibrations of the Zigzag Microstructure for Energy Harvesting, *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 133, 011002.
- (15) Patil, D. R., Zhou, Y., Kang, J.-E., Sharpes, N., Jeong, D.-Y., Kim, Y.-D., Kim, K. H., Priya, S. and Ryu, J., 2014, Anisotropic Self-biased Dual Phase Low Frequency Magneto-mechano-electric Energy Harvesters with Giant Power Densities, *APL Materials*, Vol. 2, 046102.
- (16) Sun, K. H., Kim, Y.-C. and Kim, J. E., 2014, A Small-form-factor Piezoelectric Vibration Energy Harvesters Using a Resonant Frequency-down Conversion, *AIP Advances*. Vol. 4, 107125.
- (17) Sun, C., Qin, L., Li, F. and Wang, Q.-M., 2009, Piezoelectric Energy Harvesting Using Single Crystal $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-xPbTiO}_3$ (PMN-PT) Device, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol. 20, pp. 559~568.
- (18) Yang, Y., Tang, L. and Li, H., 2009, Vibration energy harvesting device using macro-fiber composites, *Smart Materials and Structures*. Vol. 18, 115025.
- (19) Challa, V. R., Prasad, M. G. and Fisher, F. T., 2009, A Coupled Piezoelectric-electromagnetic Energy Harvesting Technique for Achieving Increased Power Output through Damping Matching, *Smart Materials and Structures*. Vol. 18, 095029.
- (20) Dai, X., Wen, Y., Li, P., Yang, J. and Zhang, G., 2009, Modeling, Characterization and Fabrication of Vibration Energy Harvester Using Terfenol-D/PZT/Terfenol-D composite Transducer, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 151, 1~10.

Actuators A: Physical. Vol. 156, pp. 350~358.

(21) Cho, S.-W., Son, J.-D., Yang, B.-S. and Choi, B.-K., 2009, Vibration-based Energy Harvester for Wireless Condition Monitoring System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 393~399.

(22) Wang, Z. and Xu, Y., 2007, Vibration Energy Harvesting Device based on Air-spaced Piezoelectric Cantilevers, Applied Physics Letters, Vol. 90, 263512.

(23) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2013, Power Enhancing by Reversing Mode Sequence in Tuned Mass-spring Unit Attached Vibration Energy Harvester, AIP Advances, Vol. 3, 072103.

(24) Kim, J. E., 2013, Performance Study of Diagonally Segmented Piezoelectric Vibration Energy Harvester, Transactions of the Korean Society for Mechanical Engineers A., Vol. 37, No. 8, pp. 983~989.

(25) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2009, Shape Design of a Cantilever-type Piezoelectric Energy Harvester, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 456~457.

(26) Ma, P. S., Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2009, Topology Optimization of a Cantilevered Piezoelectric Energy Harvester Having a Vibrating Base, Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting, pp. 432~434.

(27) Rupp, C. J., Evgrafov, A., Maute, K. and Dunn, M. L., 2009, Design of Piezoelectric Energy Harvesting Systems: A Topology Optimization Approach Based on a Multilayer Plates and Shells, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 20, pp. 1923~1939.

(28) Wickenheiser, A. M. and Garcia, E., 2010, Power Optimization of Vibration Energy Harvesters Utilizing Passive and Active Circuits, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 21, pp. 1343~1361.

(29) Badel, A., Guyomar, D., Lefevre, E. and Richard, C., 2006, Piezoelectric Energy Harvesting Using a Synchronized Switch Technique, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 17, No. 8~9, pp. 831~839.

(30) Erturk, A. and Inman, D. J., 2011, Piezoelectric Energy Harvesting, Wiley, United Kingdom.

(31) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2011, Analysis of Piezoelectric Energy Harvesters of a Moderate Aspect Ratio with a Distributed Tip Mass, ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 133, 041010.

(32) Ceracomp Co., Ltd. (www.ceracomp.com).

(33) Piezo System, Inc. (www.piezo.com).

(34) Islam, R. A. and Priya, S., 2006, Realization of High-energy Density Polycrystalline Piezoelectric Ceramics, Applied Physics Letters, Vol. 88, 032903.

(35) Richards, C. D., Anderson, M. J., Bahr, D. F. and Richards, R. F., 2004, Efficiency of Energy Conversion for Devices Containing a Piezoelectric Component, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. 717~721.

(36) Ikeda, T., 1996, Fundamentals of Piezo-electricity, Oxford University Press, New York.

(37) Patel, R., McWilliam, S. and Popov, A. A., 2011, A Geometric Parameter Study of Piezoelectric Coverage on a Rectangular Cantilever Energy Harvester, Smart Materials and Structures, Vol. 20, 085004.



Jae Eun Kim received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Seoul National University, Korea in 2005. He is on the faculty of School of Mechanical and Automotive Engineering at Catholic University of Daegu. His main research interest is the smart material-based acoustic/vibration energy control and conversion including the computational optimization of multi-physics systems.



Kyung Ho Sun received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Seoul National University, 2010. He is a senior researcher at the department of system dynamics, Korea institute of Machinery & Materials. His main research field is the design of smart materials and structures, ultrasonics and vibration analysis.