

PCB 일체형 에너지 하베스터의 설계 및 제작

민철홍¹, 김태선^{2,a}

¹ 가톨릭대학교 컴퓨터공학과

² 가톨릭대학교 정보통신전자공학부

Design and Fabrication of Printed Circuit Board (PCB) Integrated Energy Harvester

Chul Hong Min¹ and Tae Seon Kim^{2,a}

¹ School of Computer Science and Engineering, The Catholic University of Korea, Bucheon 420-743, Korea

² School of Information, Communications and Electronics Engineering, The Catholic University of Korea, Bucheon 420-743, Korea

(Received October 11, 2013; Revised October 21, 2013; Accepted October 24, 2013)

Abstract: Recently, energy harvesting technologies are considered as the great alternatives to reduce the dependency on secondary batteries. In this paper, we proposed PCB type energy harvester which can be directly integrated with other electronic components on same board. To form the three dimensional coil structure, two PCBs with patterned metal lines are solder bonded. For magnetic induction, inside of coil structure was filled with magnetic substance and rotary motioned external magnets are applied to near the harvester. The effects of metal wire width on PCB, thickness of magnetic substance, and frequency of rotary motion on energy harvesting performance are analyzed by computer simulation and experiments. Experimental results showed 29.89 μW of power generation performance at the frequency of 5.2 Hz and it is shown that designed harvester can be effectively applied on vibration environment with very limited frequency.

Keywords: Energy harvester, PCB (printed circuit board), Electromagnetic induction, Multiphysics

1. 서론

최근 휴대용 전자기기들은 기술발전과 더불어 그 기능과 성능은 더욱 향상되고 있지만 그에 따른 전력 소모는 오히려 늘어나고 있는 추세이다. 이를 극복하

고자 저전력 기술과 2차 전지 소재의 개선으로 소비 전력의 감소 및 전지의 용량 증가를 위해 노력하고 있지만, 휴대용 전자기기들의 전력소모 증가량에는 못 미치고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각종 휴대용 전자기기들의 배터리 의존성을 줄이거나 대체할 수 있고, 환경오염이 없는 새로운 독립 전원기술인 에너지 하베스터에 대한 다양한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

최근 개발되고 있는 하베스터들은 빛 (solar cell), 열 (solar heat), 그리고 진동 (vibration) 등을 그 에

a. Corresponding author: tkim@catholic.ac.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

너지원으로 사용하고 있다. 이 중 진동을 이용한 에너지 하베스터는 압전 (piezoelectric) 방식과 전자기 (electromagnetic) 방식, 그리고 정전기 (electrostatic) 방식으로 구분된다 [1]. 일반적으로 압전 방식의 에너지 하베스터는 외팔보 (cantilever) 형태로 제작되어 그 구조물의 공진주파수를 맞춘 설계가 필요하다. 이 경우 대체적으로 수백에서 수천 Hz의 높은 진동 주파수를 필요로 하며, 유효전력을 발생시킬 수 있는 주파수 범위도 매우 제한적이라는 단점이 있다 [2,3]. 전자기 유도방식의 경우는 코일이 감긴 구조체 안으로 자석을 진동시키거나 반대로 코일 구조체를 자석의 안쪽으로 진동시키는 형태로, 코일의 구조와 위치에 따라 발생 전력 또한 상이하다 [4-7]. 전자기 방식의 에너지 하베스터는 압전 방식과 달리 공진 주파수를 조절할 필요가 없는 장점이 있으나, 에너지 효율성을 높이기 위해서는 높은 권선수가 필요하기 때문에 소형화가 어려운 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 최근 다양한 구조를 갖는 전자기 유도방식의 에너지 하베스터들이 연구되고 있다 [6,7].

본 논문에서는 PCB (printed circuit board)를 이용하여 저렴한 비용으로 높은 권선수를 확보할 수 있으며, 낮은 주파수의 진동이 발생하는 장소나 이동 중 발생하는 진동에 의한 자연스러운 에너지 수확을 목표로 하는 에너지 하베스터를 제안한다. 제안한 에너지 하베스터는 휴대용 전자기기들의 부품들과 일체형으로 실장하기 위해 PCB 형태로 제작하였으며, 코일 형태로 구성된 PCB의 패턴들에서 유도기전력을 발생시키는 원리를 이용하였다. 그렇기 때문에 PCB로 구성된 휴대용 전자기기들의 회로에 부품들과 일체형으로 실장이 가능하며, PCB 층수에 따라 패턴의 감은 수와 하베스터의 개수 조절이 용이하여 다양한 응용 분야를 가질 것으로 예상된다.

본 논문에서는 제안한 하베스터의 구조 및 발생전압을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 효율성 분석을 선행하였으며, 이를 기반으로 실제 PCB를 제작하여 특성 분석을 위한 실험을 진행하였다. 그 결과 본 논문에서 정의한 변수의 최댓값 (너비 450 μm , 자성체의 두께 1 mm, 주파수 5.2 Hz)에서 29.89 μW 의 전력이 발생되는 것을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 에너지 하베스터의 구조

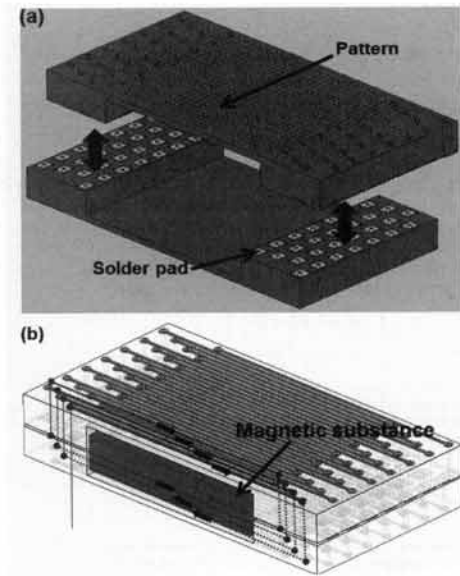


Fig. 1. Structure of designed PCB energy harvester. (a) The outer shape of harvester with boring structure, (b) Schematic of winding patterns on PCB.

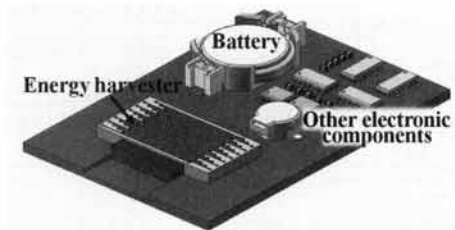


Fig. 2. Conceptual drawing of PCB integrated energy harvester with other electronic components.

본 논문에서 제안한 에너지 하베스터는 그림 1(a)와 같이 “ \cap ”과 “ \sqcup ”모양의 상·하부 두 개의 PCB로 구성되어 진다. 상부 PCB의 바닥면에 형성된 솔더패드 (solder pad)는 비아홀 (via)을 통하여 윗면의 패턴 (pattern)들과 연결되어 있으며 윗면의 패턴들은 좌우의 비아홀을 평행으로 연결하고 있다. 하부 PCB도 상부 PCB와 동일한 형태로 구성되어 있으나 좌우의 비아홀이 대각선으로 연결되어 있어 상·하부 두 장의 PCB를 서로 솔더 본딩 (solder bonding)하게 되면 그림 1(b)와 같이 PCB에 형성된 패턴들이 삼차원 구조로 하나의 코일형태로 연결되어 진다.

그 후 두 장의 PCB를 본딩하여 생기는 내부 공간에 자성체 혹은 자석을 삽입하고, 진동에 의해 외부

자석이 자성체의 극성을 변화시키거나 혹은 내부 자석을 왕복 운동시키면서 유도기 전력을 발생시키는 원리를 갖는다. 제안하는 에너지 하베스터는 그림 2와 같이 시스템 구성을 위해 PCB에 실장된 다른 전자 부품들과 같이 일체형으로 제작이 가능하다는 장점을 갖는다.

2.2 에너지 하베스터의 모형화

제안한 PCB 에너지 하베스터의 구조 및 발전효용성을 검증하기 위해 본 논문에서는 상용프로그램인 Comsol사의 multiphysics를 이용하여 구조 및 효용성 분석을 위한 모형화를 진행하였다. 모형화를 위한 구조는 그림 3과 같이 회전자 (rotor)에 네 개의 극성 (pole)을 갖는 자석을 부착하고 회전자를 회전시켜 에너지 하베스터 내부에 삽입된 자성체의 극성을 변화시키는 형태로 설계하였으며, 주파수는 회전자의 회전 속도 (rpm)를 통하여 조절하였다.

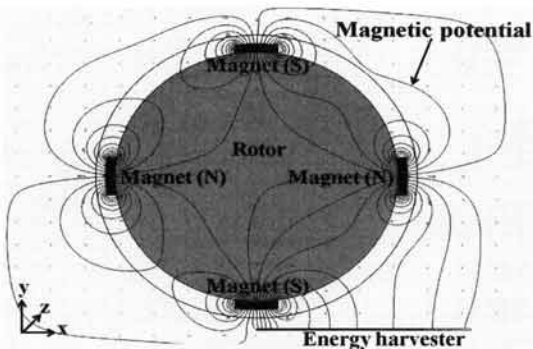


Fig. 3. Geometry design for computer simulation.

효용성 분석을 위한 모형화 변수는 표 1과 같이 코일 구조를 갖는 금속 패턴의 너비로 결정하고, 패턴의 너비는 각각 150 μm , 300 μm , 450 μm 로 세 경우를 고려하였다. 나머지 항목들의 경우, 패턴의 두께는 20 μm , 감은수 (turns) 110회로 고정하여 실제 PCB 에너지 하베스터를 제작하는 조건과 동일하게 설정하였다.

제안한 에너지 하베스터는 전자기유도 방식을 이용하므로 식 (1)과 같이 패러데이의 법칙 (Faraday's law)을 따른다 [8].

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Table 1. Modeling parameters for computer simulation.

Parameters	Values	Units
PCB pattern material	Copper	
PCB pattern(coil) (width×thickness)	150 × 20 300 × 20 450 × 20	μm
Number of turns	110	turns
Magnetic material	Samarium cobalt (SmCo ₅)	
Magnetic size	20 × 10 × 3	mm
Magnetic substance thickness	1	mm
Magnetic flux density	3,000	Gauss

여기서, N 는 PCB의 패턴 수 (감은 수)이고, Φ 와 ϕ 는 각각 코일의 총쇄교자속 및 코일의 회전 당 평균 자속을 나타낸다. 이때, Φ 는 코일의 각 권선 당 자속 밀도 (magnetic flux density) B [T]를 자속 밀도가 작용하는 코일의 면적에 대해 적분한 후 이 값에 코일의 권선수를 곱하여 총쇄교자속을 구할 수 있다. 이때 자속 밀도가 코일의 전체 면적에 균일하게 작용한다고 가정하면 간단한 곱의 식으로 변형이 가능하다. 본 논문에서는 multiphysics를 이용하여 그림 3과 같이 외부 자석의 회전수와 자석의 세기, 자석과 하베스터의 거리 등을 설정하고, 관련 수치들을 입력하여 전체의 세기를 자동으로 계산하였다. 이때 에너지 하베스터에서 발생하는 전압 (V_T)은 식 (2)와 같이 자성체의 자화에 따른 전계 강도 (electric field intensity)의 세기와 감은 도선에 따른 관계식으로 표현할 수 있다 [9].

$$V_T = \sum_{i=1}^N \frac{L}{A} \int \mathbf{E}_z dA \quad [V] \quad (2)$$

여기서, \mathbf{E}_z 는 그림 3에서 z 방향에 대한 전계 강도의 크기이며, L 은 도선의 길이, A 는 도선의 면적을 각각 나타낸다.

이러한 수학적 모형을 기반으로 제안한 에너지 하베스터의 구조 및 효용성 검증을 위해 multiphysics를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 회전자에 부착된 자석의 자속 밀도는 3,600 gauss, 에너지 하베스터 내부의 자성체 두께는 1 mm, 회전자의 자석과 하베스터 내부의 자성체 거리는 1 cm로 구성하였다.

Table 2. Simulation results of output voltage and effective voltage at the frequency of 5.2 Hz.

PCB pattern width	Average output voltage (peak to peak)	Effective voltage
150 μm	12.25 mV	8.66 mV
300 μm	19.87 mV	14.05 mV
450 μm	29.9 mV	21.2 mV

그리고 주파수를 5.2 Hz로 맞추기 위해 회전수를 78 rpm으로 설정하고, 구조 검증 및 발생전압에 관한 시뮬레이션을 진행한 결과 정현파 형태의 교류전압이 주기적으로 발생되는 것을 확인하였다.

표 2는 주파수 5.2 Hz에서 PCB 패턴의 너비에 따른 출력전압을 시뮬레이션한 결과이다. 그 결과를 보면 주파수 5.2 Hz에서 PCB 패턴의 너비가 150 μm , 300 μm , 450 μm 일 때 발생하는 피크 투 피크 전압의 평균은 각각 12.25 mV, 19.87 mV, 29.9 mV이고, 이때의 실효값 $V(\text{eff})$ 는 8.66 mV, 14.05 mV, 21.2 mV가 발생되는 것을 확인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

제작된 PCB 에너지 하베스터는 PCB 패턴의 크기 별로 150 μm , 300 μm , 450 μm 3종류로 각각 설계되어 제작하였으며, 나머지 사양은 표 1과 동일하다. PCB 하베스터의 제작을 위해 두 장의 PCB에 정렬 키 (alignment key)를 두었고, 이를 통해 두 장의 PCB를 고정시킨 후 솔더 본딩하였다. 실험 환경은 그림 4와 같이 회전자에 4개의 네오디움 (Neodymium) 자석을 부착하고, 자석이 부착된 회전자를 스텝 모터와 연결하여 회전시키며 하베스터 내부에 위치한 자성체의 극성을 변화시켰다. 이때 자성체의 극성 변화는 표 3에 나타난 바와 같이 주파수를 0.4 Hz에서 5.2 Hz까지 0.4 Hz씩 증가시키며 실험을 반복하였다. 또한 하베스터 내부의 자성체 두께는 0.2 mm에서 1 mm까지 0.2 mm씩 증가시키며 두께에 따른 발생 전력을 확인하였다. 제안한 PCB 하베스터의 최대 전력전송을 위해 로드단의 저항을 내부저항과 비슷한 40 Ω 으로 연결하고 오실로스코프를 이용하여 주파수와 발생 전압을 확인하였다.

Table 3. Range of experimental parameters.

Parameters	Values	Units
PCB pattern(coil) size	150 \times 20 300 \times 20 450 \times 20	μm
Frequency	0 ~ 5.2 (step 0.4)	Hz
Magnetic substance thickness	0.2 ~ 1 (step 0.2)	mm

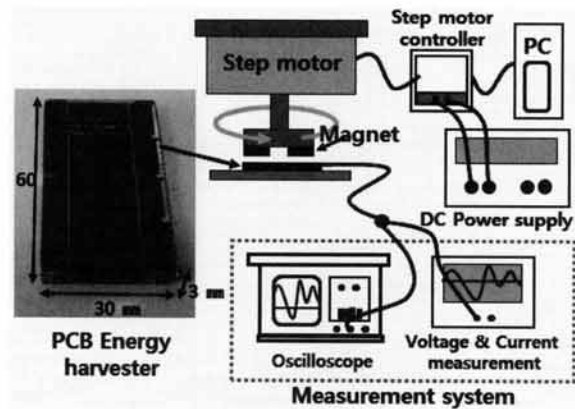


Fig. 4. Measurement equipments setup to power measurement of proposed PCB energy harvester.

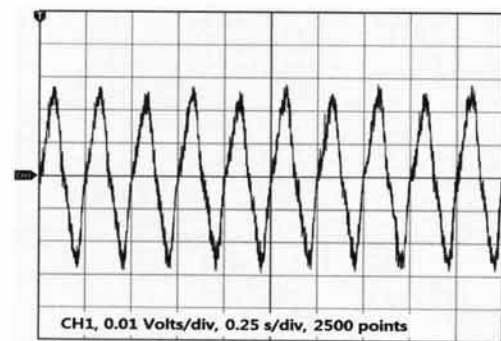


Fig. 5. The peak-to-peak output voltage of PCB energy harvester at the frequency of 5.2 Hz.

그림 5는 PCB 패턴의 너비 450 μm , 자성체 두께 1 mm, 주파수 5.2 Hz에서 발생하는 전압을 오실로스코프로 측정된 결과로, 이때 평균 피크 투 피크 전압은 약 26 mV이고, 실효값 $V(\text{eff})$ 은 약 17.8 mV의 전압이 발생되었다.

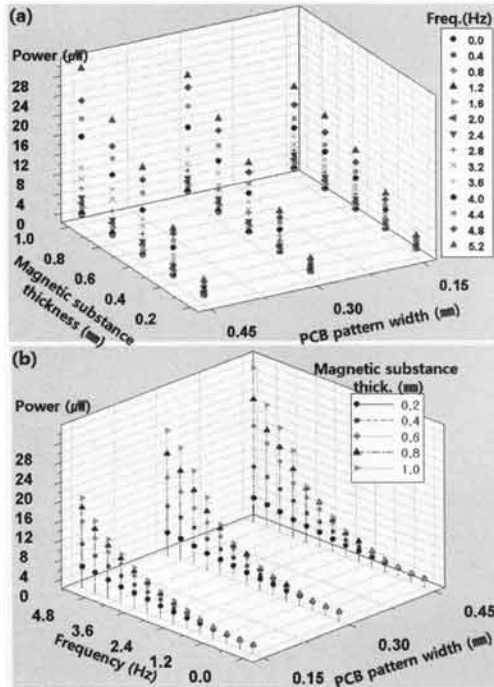


Fig. 6. Characteristic analysis results of proposed energy harvester. (a) effects of magnetic substance thickness and PCB pattern width on output power, (b) effects of frequency and PCB pattern width on output power.

측정된 결과를 이용하여 PCB 패턴의 크기와 자성체 두께, 그리고 주파수에 따른 전압과 전류를 측정하여 발생 전력 (W)을 계산하였다.

그림 6(a)는 PCB 패턴의 너비와 자성체 두께에 따른 발생 전력의 크기를 주파수별로 나타낸 것으로, PCB 패턴의 너비가 넓고 자성체의 두께가 두꺼울수록 선형적으로 증가된 발생 전력이 제작된 하베스터에서 측정되었으며, 자성체의 두께가 두껍고 주파수가 높을수록 주파수 변화에 대한 발생 전력 차이가 점점 커지는 것을 확인할 수 있다.

또한 그림 6(b)는 주파수와 PCB 패턴의 너비, 자성체의 두께에 따른 발생 전력을 보여주고 있으며, 주파수마다 5개의 점들은 자성체의 두께에 따른 전력 발생을 표시한 그래프이다. PCB 패턴의 너비와 자성체의 두께가 증가함에 따라 발생 전력은 선형적인 증가를 보이고 있으며, 주파수가 증가하면서 지수함수 형태의 전력 발생을 보였다. 제안한 하베스터는 PCB 패턴의 너비 450 µm, 자성체 두께 1 mm, 주파수 5.2 Hz에서 29.89 µW의 최대 전력이 발생되었다.

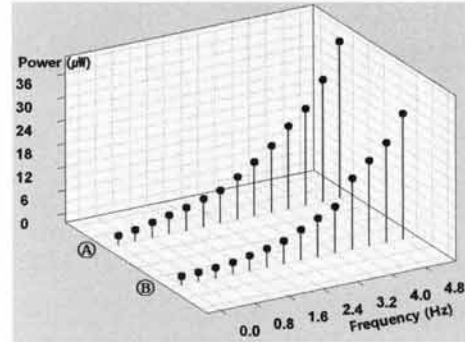


Fig. 7. Power comparison between computer simulation (graph A) and measured outputs (graph B) with structure of 450 µm PCB pattern width and 1 mm of magnetic substance thickness.

그림 7은 PCB 패턴의 너비가 450 µm와 자성체의 두께가 1 mm인 구조체의 발생 전력을 컴퓨터 시뮬레이션 및 수학적 모형화를 통해 분석된 전력값 (A 그래프)과 실제 에너지 하베스터에서 측정된 전력값 (B 그래프)을 주파수 변화에 따라 표시한 그래프이다. 주파수 증가에 따른 발생 전력은 두 그래프 모두 지수함수 (exponential function) 형태로 유사한 경향을 보였으나, 모형화를 통한 예측치와 제작된 하베스터에서 측정된 발생 전력치 사이에는 최소 0.5 mW에서부터 최대 8 mW까지의 차이를 보였다. 특히 저주파 대역에서 그 오차가 상대적으로 컸다. 이는 실제 하베스터의 경우 1.2 Hz 이하의 저주파 대역에서 전력이 불규칙적으로 발생하는 현상이 나타났으나 모형화 결과에서는 전력발생이 가능한 최소 주파수에 대한 분석이 반영되지 않은 이유로 추정된다.

본 논문에서는 휴대용 전자기기 등에 적용을 위한 에너지 하베스터를 목표로 PCB를 제작함에 따라 일상생활에서 발생될 수 있는 저주파 대역에서 실험을 진행하였기 때문에 다소 낮은 발생 전력을 보였다. 또한 단층으로 PCB를 설계하여 패턴 수 (감긴 수)가 110회로 제한적 이었지만 다층 PCB로 제작할 경우 더 높은 효율의 에너지 하베스터 제작이 가능할 것으로 기대한다.

4. 결론

본 논문에서는 PCB를 이용한 에너지 하베스터를 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 하베스

터의 유효성을 검증하였다. 두 장의 PCB에 패턴을 서로 엇갈리게 설계한 후 정렬키를 이용하여 두 장의 PCB를 고정시켜 솔더 본딩하는 방식으로 삼차원 형태의 코일이 감긴 구조로 전자기 유도 방식의 에너지 하베스터를 제작하였다. 제작된 하베스터 내부에 자성체를 삽입하고 자석이 부착된 회전체를 회전시키며 주파수 변화에 따른 하베스터의 발생 전력을 실험하였다. 또한 PCB에 형성된 패턴의 너비와 자성체의 두께에 따른 전력 변화도 동시에 확인하였다.

그 결과 PCB 패턴의 너비가 넓고, 자성체의 두께가 두꺼울수록 발생 전력은 선형적인 형태의 증가를 보였으며, 주파수가 높을수록 지수함수 형태의 증가를 보였다. 제안한 에너지 하베스터의 최대 전력은 본 논문에서 정의한 변수의 최댓값, 즉 PCB 패턴 450 μm , 자성체의 두께 1 mm, 주파수 5.2 Hz에서 29.89 μW 의 전력이 발생되었다. 이는 타 연구 결과와 비교할 때 전력 발생주파수가 매우 낮은 상태에서도 동작이 가능하므로 휴대용 기기에 응용되어 걸음걸이 및 움직임 등 자연스러운 신체활동에 따른 운동에너지를 활용할 수 있다는 장점을 가질 것으로 본다.

또한 본 논문에서 제안한 하베스터는 PCB 형태로 구성되기 때문에 휴대용 전자기기들의 부품들과 함께 실장할 수 있으며, 하베스터의 크기와 PCB 층수에 따라 감은수의 조절이 쉽다는 장점이 있어 RFID 센서 태그용 전원, 센서 노드 및 스마트 더스트용 전원 등의 다양한 편제형 컴퓨팅에 적용 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2011-0006648).

본 연구는 2013년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

REFERENCES

- [1] M. T. Penella and M. Gasulla, *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings (IMTC, 2007)* p. 1.
- [2] P. G. Jones, S. P. Beeby, and N. M. White, *Sci. Meas. Technol.*, 148, 68 (2001).
- [3] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, *Comput. Commun.*, 26, 1131 (2003).
- [4] N. N. H. Ching, G. M. H. Chan, W. J. Li, H. Y. Wong, and P. H. W. Leong, *Intl. Symp. on Smart Structures and Microsystems (IS3M 2000)* p. 19.
- [5] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. G. Jones, T. O'Donnell, C. R. Saha, and S. Roy, *J. Micromech. Microeng.*, 17, 1257 (2007).
- [6] H. S. Kim, S. P. Hong, M. H. Choi, H. J. Kim, I. H. Lee, N. R. You, J. H. Yi, and S. C. Chung, *Applied Mechanics and Materials*, 392, 738 (2013).
- [7] B. C. Lee and G. S. Chung, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, 14, 143 (2013).
- [8] S. Priya and D. J. Inman, eds., *Springer*, 130 (2009).
- [9] C. H. Min and T. S. Kim, *Trans. KIEE*, 22, 918 (2009).