

압전형 에너지 수확장치를 위한 통합 해석환경의 적용 및 검증

Jian Liu¹ · Chris Welham¹ · 한승오^{2,+}

Application and Verification of Fully-Integrated Design Environment for Piezoelectric Energy Harvester

Jian Liu¹, Chris Welham¹, and Seungoh Han^{2,+}

Abstract

Vibrational energy harvester based on piezoelectricity has been expected to be the dominant energy harvesting technology due to the advantages of high conversion efficiency, light weight and small size, night operation, etc. Its commercialization is just around the corner but the integration with power management electronics should be solved in advance. In this paper, therefore, fully-integrated design environment for piezoelectric energy harvesting systems is presented to assist co-design with the power management electronics. The proposed design environment is capable of analyzing the energy harvester including the package-induced damping effects and simulating the device and its power management electronics simultaneously. When the developed design environment was applied to the fabricated device, the simulated resonant frequency matched well with the experimental result with a difference of 2.97% only. Also, the complex transient response was completed in short simulation time of 3,001 seconds including the displacement distribution over the device geometry. Furthermore, a full-bridge power management circuit was modeled and simulated with the energy harvester simultaneously. Therefore the proposed, fully-integrated design environment is accurate and fast enough for the contribution on successful commercialization of piezoelectric energy harvester.

Keywords : Energy harvester, Piezoelectricity, Integrated design environment, Lumped parameter modeling, FEA

1. 서론

에너지 수확장치(energy harvester)는 주변 환경에 존재하는 다양한 형태의 에너지를 수확하여 전기적 에너지로 변환시키는 소자로써 친환경적 신재생 에너지원으로 각광 받고 있다. 에너지 수확은 일반적으로 $\mu\text{W}\sim\text{W}$ 범위의 작은 에너지 변환을 지칭하는데, 이는 USN (Ubiquitous Sensor Network)용 센서 노드의 간헐적 동작은 물론 소형 전자기기를 작동시킬 수 있는 수준으로써 전원과의 우선 연결 또는 충전이나 배터리 교환과 같은 불편함이 없는 편리성을

제공한다. 특히, 최근에는 지능형 초고층/초대형 건물관리 시스템, 도로, 송유관 그리고 전력망과 같은 대규모 사회간접자본 시설 등에 대한 USN 기술의 적용 등에 힘입어 에너지 회수장치에 대한 실수요가 급증할 것으로 기대되고 있으며, 이러한 기대에 힘입어 2017년에 약 2,500억원에 이르는 시장이 형성될 것으로 전망된다[1].

태양전지[2], 열전형[3], 전자기형[4] 그리고 기계적 진동형[5]과 같은 다양한 형태의 에너지 회수장치들이 연구되고 있는데, 압전 효과(piezoelectric effect) 즉, 압전 재료를 매개로 기계적 에너지와 전기적 에너지가 상호 변환하는 원리에 기초한 기계적 진동형 에너지 회수장치는 에너지 변환 효율이 높고, 소형·경량화, 그리고 야간동작이 가능하여 39%에 이르는 가장 큰 점유율을 보일 것으로 기대된다[1]. 이러한 압전형 에너지 회수장치의 성공적인 상용화를 위해서는 변환하고자 하는 진동의 특성에 맞춘 소자의 설계 및 제작은 물론 에너지 회수소자와 부하 사이에서 불규칙적으로 얻어지는 전기적 출력 에너지를 부하의 요구특성에 적합하게 관리하고 저장하는, Fig. 1과 같은 전력관리 시스템(power management system)과의 연동 또한 필요하다[6].

압전형 에너지 수확장치의 개발을 위한 설계기법들로는 종래의 유한요소 해석법(FEA: Finite Element Analysis)에 기초한 소자

¹Coventor, Inc.

625 Mount Auburn Street, Cambridge, MA 02138, USA

²호서대학교 융합기술연구소(Fusion Technology Lab, Hoseo University)

20, Hoseo-ro 79, Baebang, Asan 336-795, Korea

⁺Corresponding author: sohan@hoseo.edu

(Received : Aug. 5, 2013, Revised : Sep. 9, 2013, Accepted : Sep. 11, 2013)

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.

중심의 설계 방식[7]과 집중변수 모델링(lumped parameter modeling) 기반의 시스템 설계 방식[8]의 2가지 접근법들이 주로 사용된다. 먼저, 유한요소 해석법은 소자의 형상변화에 따른 성능변화 및 소자에서의 물리량 분포 등을 분석하여 동작조건에 적합한 소자구조를 도출함에는 유용하지만 전력관리 시스템을 구성하는 전기전자 요소들과의 상호작용을 반영할 수 없다는 단점을 지닌다. 반면 집중변수 모델링은 일반적으로 전기전자회로 설계환경인 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 환경에 기반하기 때문에 전력관리 시스템의 설계 및 분석에는 효과적이지만 에너지 수확소자를 몇몇 등가 변수들의 조합으로 치환하기 때문에 FEA에서와 같은 상세한 소자특성 분석은 불가능하다.

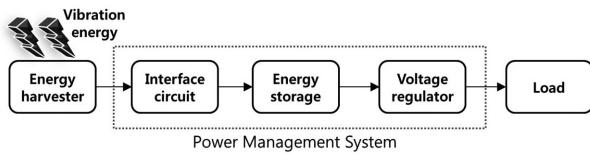


Fig. 1. Energy harvester with power management system.

이에 본 연구팀에서는 FEA의 장점과 집중변수 모델링의 장점을 취합하여 소자단위에서의 상세한 특성분석과 물리량 분포 확인은 물론 에너지 수확소자와 전력관리 시스템의 전기전자 요소들과의 상호작용을 동시에 분석할 수 있는 통합 설계환경을 구축하였다. 이를 통해 보다 효과적인 압전형 에너지 수확소자의 설계 및 분석을 수행할 수 있도록 하였으며, 구축된 통합 설계환경을 실제 제작된 에너지 수확소자에 적용하여 해석결과와 실험결과를 비교함으로써 제시된 통합 설계환경의 타당성을 검증하였다.

2. 통합 해석환경 구축 및 적용

2.1 통합 해석환경

본 연구팀에서 제시하는 통합 해석환경은 Fig. 2와 같이 4개의 부분으로 구성된다. 에너지 수확소자의 모델링은 사용되는 재료들의 물성값과 제작공정을 기술하는 것으로부터 시작된다. 다음으로 에너지 수확소자를 구성하는 3차원 요소 모델들을 선택한 후 앞서 정의한 물성값과 제작공정 관련 정보들을 연계하여 에너지 수확소자의 형상에 따라 3차원적으로 모델링한다. 이를 토대로 소자단위에서 에너지 수확과 관련된 주요 측면들을 분석한다. 여기에는 에너지 수확소자의 고유진동수 분석, 외부로부터 인가되는 진동에 의해 발생하는 변위의 크기, 패키징 구조에 따른 감쇠특성, 그리고 주파수 응답특성 등이 포함된다.

이러한 소자단위 분석이 완료되면 마지막으로 전력관리 시스템

과의 상호작용 분석을 위해, 에너지 수확소자와 전기전자 회로요소들을 포함하는 시스템 차원의 해석을 수행한다. 이를 위해 통합 설계환경은 회로해석이 가능한 시스템 모델링 환경으로 MATLAB Simulink 또는 Cadence Virtuoso와 연동되도록 하였다.

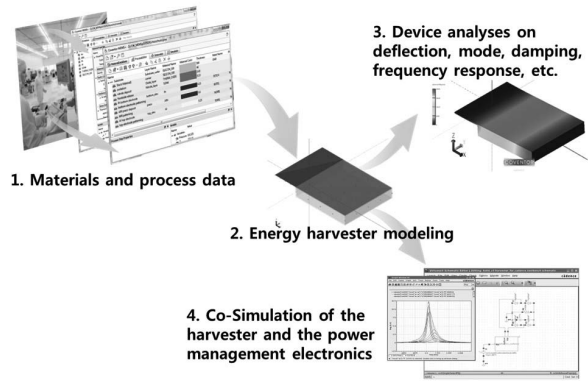


Fig. 2. Integrated design environment for piezoelectric energy harvesting system.

2.2 통합 해석환경의 적용 및 검증

전술한 통합 해석환경의 타당성과 유용성을 검증하기 위해 Fig. 3과 같은 에너지 수확소자[9]를 대상으로 구축된 통합 해석환경을 적용하였다.

제시된 에너지 수확소자는 85 μ W의 전기 에너지를 생산할 수 있도록 설계된 소자로서, 에너지 수확소자의 질량체와 이를 지지하는 외팔보는 단결정 실리콘으로 제작되었다. 그리고 외부로부터 인가되는 기계적 진동에 의해 외팔보가 변형될 때, 최대 응력이 발생하는 위치에 Pt 바닥전극과 Al 상부전극을 형성하였으며 이들 사이에 0.8 μ m 두께의 AlN 압전재료를 삽입하였다.

Fig. 3에 제시된 에너지 수확소자에 대한 통합 설계환경 모델링을 통해 0.25 g의 가속도가 인가될 때 변위분포를 해석하면 Fig. 4와 같은 결과가 얻어진다. 외팔보 형태의 지지구조에 따른 당연한 결과로서 질량체가 부착된 구조물 끝단에서 가장 큰 변위인 0.273 μ m가 얻어지며 지지점인 왼쪽에서 고정 변위를 보인다. 이때, 외팔

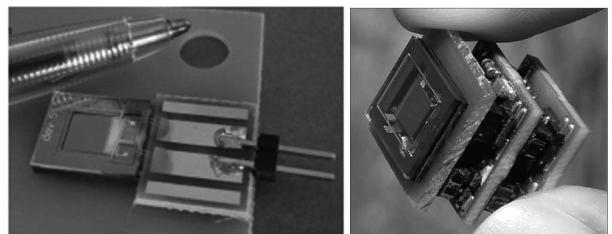


Fig. 3. AlN piezoelectric energy harvester and its possible application of wireless temperature sensor node.

보 지지구조와 질량체 사이에서의 급격한 두께 차이를 효과적으로 반영하기 위해 shell 요소가 외팔보 지지구조 모델링에 사용되었으며 이를 통해 해석시간을 단축시키면서도 해석의 정확도를 유지할 수 있었다.

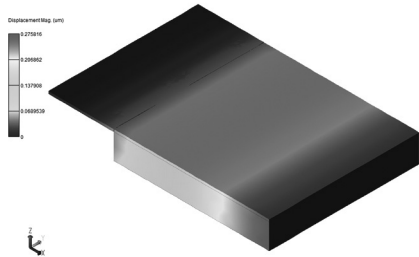


Fig. 4. Displacement distribution due to the applied acceleration of 0.25 g.

에너지 수확소자를 외부환경으로부터 보호하기 위하여 소자의 상하부에 유리기판을 접합시켜 패키지 구조를 형성한다[9]. 이러한 패키지 구조는 소자의 과도 응답특성에서 중요한 요소인 감쇠특성을 좌우하게 된다. 이에 본 모델링에서는 패키지 구조에 의한 squeeze film 감쇠와 소재 및 구조에 의한 Rayleigh 감쇠를 포함하는 감쇠해석을 수행하였다. 이를 토대로 Fig. 5와 같은 주파수 응답특성을 얻을 수 있는데, 이에 의하면 소자의 공진이 1,143 Hz에서 발생함을 알 수 있다.

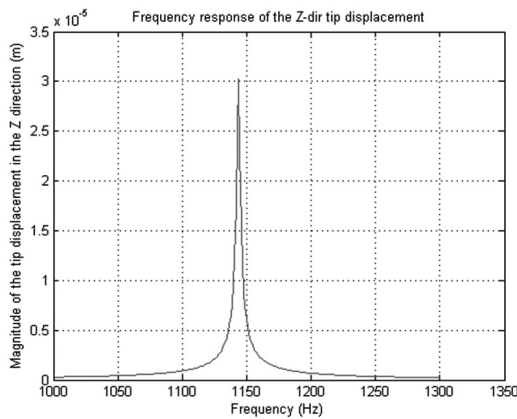


Fig. 5. Frequency response considering the damping effects.

앞서 얻어진 공진주파수 해석결과를 Fig. 6에 제시된 실제 실험 결과 및 FEA 해석결과와 비교하면, 1,110 Hz의 공진주파수를 나타내는 실험결과와는 2.97%의 차이만을 보이고 있으며, 1,122 Hz의 FEA 결과와는 1.87%의 차이만을 보인다. 이러한 차이의 원인은 실제 제작된 소자와의 물성값 차이 그리고 FEA에 비해 매우 작은 계산 절점(node) 수를 고려할 수 있다. 하지만 그 차이는 미미한 수준으로써 제시된 통합 설계환경은 FEA 해석과 비교하여 짧은 해

석시간만을 필요로 하면서도 결과의 정확도는 매우 우수하다고 할 수 있다.

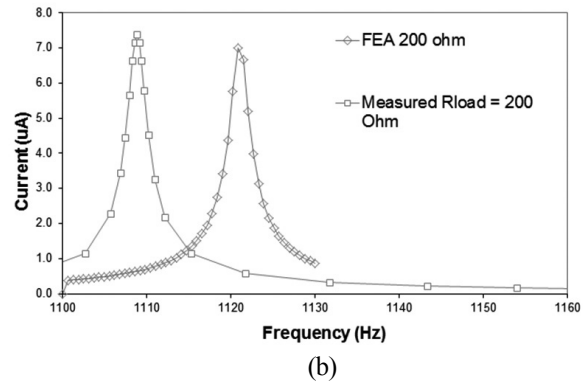
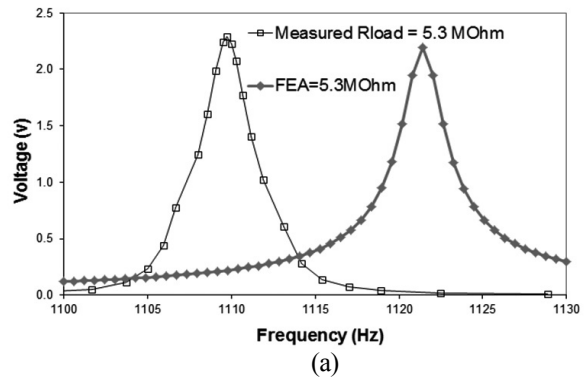


Fig. 6. Experimental and FEA simulation results of frequency response; (a) Open circuit condition with the resistive load of 5.3 MΩ and 0.5 g input acceleration and (b) Short circuit condition with the resistive load of 200 Ω and 0.5 g input acceleration.

짧은 해석시간이 소요된다는 장점은 Fig. 7과 같은 과도응답 특성분석에서 매우 유용하게 사용된다. Fig. 7(b)의 결과는 입력신호인 정현파 신호 주기의 1,000배에 해당하는 매우 긴 시간범위에 대한 결과로서 이를 얻기 위해 단지 3,001초의 해석시간이 소요되었다. FEA 기법에 의한 통상의 과도응답 해석이 수~수십 시간이 소요되는 것과 비교하면 매우 짧은 시간에 해석이 완료됨을 알 수 있다.

Fig. 7의 해석에 사용된 컴퓨팅 자원은 2.67 GHz의 i5 CPU와 8G 메모리를 갖는 일반 개인용 컴퓨터로써 윈도우 7 OS를 사용하였다. 이처럼 과도응답 해석이 컴퓨팅 자원의 부담 없이도 단시간 내에 가능하다는 점은 제시된 통합 설계환경을 통해 보다 일반적인 동작조건 즉, 임의의 진동 파형이 에너지 수확소자에 인가될 때 얻어지는 출력전력 분석이라는 새로운 분석이 가능함을 의미한다. 종래의 에너지 수확소자 설계에서 가장 미흡한 점들 가운데 하나는 가장 이상적인 조건 즉, 에너지 수확소자의 공진 주파수와 동일한 주파수를 갖는 정현파 진동이 인가될 때를 가정하여 설계 및 분석이 진행되었다는 점이다. 하지만 실제 동작시에는 정현파가 아닌 임의

의 진동 파형이 인가되며 그에 따라 공진주파수 이외의 다양한 고조파 신호들이 함께 입력된다. 때문에 실제로 에너지 수확소자를 제작하여 평가하면 설계특성에 크게 못 미치는 성능만을 보이게 된다. 이러한 실제 상황에서의 에너지 수확소자 특성까지도 분석하고 반영하기 위해서는 Fig. 7과 같은 과도응답 특성분석이 매우 유용하게 활용될 것이다.

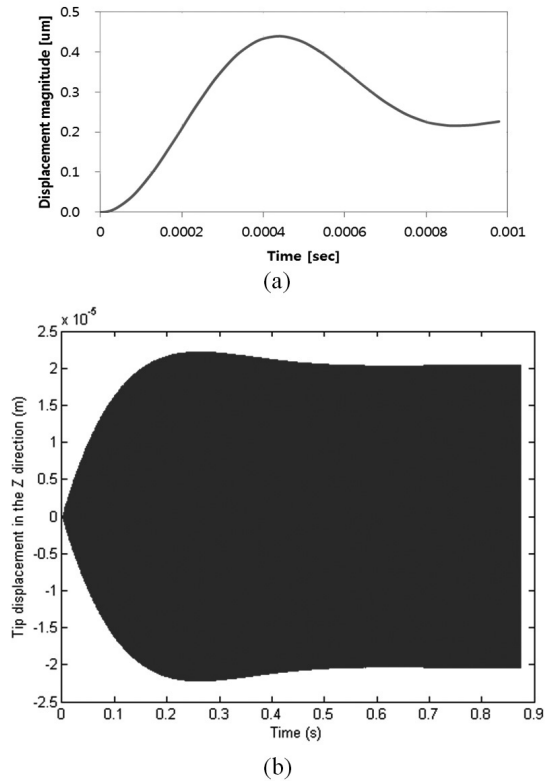


Fig. 7. Transient responses of the energy harvester; (a) Step response of 0.25 g acceleration input and (b) in the case of sinusoidal input at resonance of 1,143 Hz.

짧은 해석시간과 함께 통합 해석환경이 갖는 또 다른 장점은 Fig. 8에 제시된 것처럼 전력관리 시스템과의 통합 모델링 및 해석이 가능하다는 점이다. 제시된 모델에서는 다이오드를 이용한 full bridge 정류회로 및 이에 연결된 저항성 부하만을 포함하였지만 Fig. 1에 제시된 바와 같이 보다 확장된 형태의 전력관리 시스템 모델링 또한 가능하며 이를 통해 Fig. 8(b)와 같이 부하에 따른 출력 전력 변화 분석이 가능하다. Fig. 6(a)와 (b)의 결과는 Fig. 8(b) 결과의 양 끝단에 해당하는 결과로써, 전압과 전류가 부하의 크기에 따라 변화하며 그 최대치의 위치가 동일하지 않기 때문에 두 값의 곱으로 주어지는 전력은 단락회로 조건인 200 Ω 부하조건과 개방회로 조건인 5.3 MΩ 부하조건 중간에서 최대값을 보이게 된다.

Fig. 8(b)에서 확인할 수 있는 것처럼 에너지 수확장치의 출력은 부하 특성에 의해 크게 좌우된다. 따라서, 보다 효율적인 에너지 수

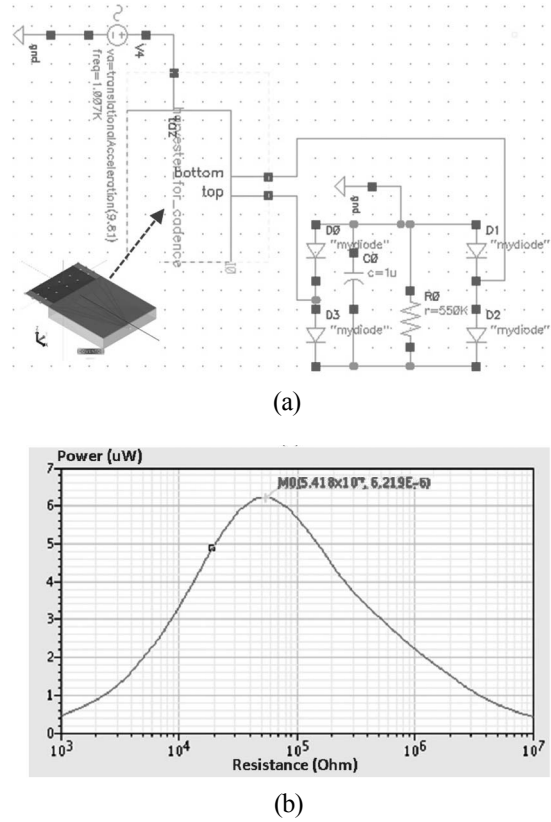


Fig. 8. Co-design of the energy harvester and the power management electronics; (a) Energy harvester model including power management electronics and (b) output power variation due to the load resistor change.

확을 위해서는 응용분야의 부하특성을 고려하여 부하 정합 (impedance matching) 및 전력관리가 이루어지도록 전력관리 시스템을 설계하여야 한다. 따라서, 본 통합 해석환경은 Fig. 8(a)와 같이 에너지 수확소자 및 전력관리 회로, 그리고 저항성과 용량성 부하 모두를 동일 환경에서 함께 모델링함으로써 이들 사이의 상호작용을 반영한 에너지 수확장치 개발을 가능케 한다.

3. 결론

본 논문에서는 에너지 수확소자와 전력관리 회로 모두를 포함하는 에너지 수확장치의 모델링 및 해석을 효과적으로 수행할 수 있는 통합 설계환경을 제시하고 실제 소자에 대한 적용을 통해 제시된 설계환경의 정확도를 검증하였다.

제시된 통합 설계환경은 종래의 FEA 해석법과 집중변수 모델링 기법의 장점들을 취합하여 소자 단위에서의 물리량 분포는 물론 전력관리 회로요소들과의 동시 해석을 수행할 수 있다. 이를 통해 정상상태에서의 변위분포 결과, 다양한 감쇠 현상들을 반영한 주파수 응답은 물론 과도응답 결과 또한 얻을 수 있었다. 얻어진 결과의 타

당성을 검증하기 위해 측정된 주파수 응답결과 및 FEA 기법에 의한 주파수 응답 결과와 비교할 때, 통합 해석환경으로부터 얻어진 공진주파수는 각각 2.97%와 1.87%의 차이만을 보였다. 또한 과도 응답 해석의 경우 입력 정현파 주기의 1,000배에 해당하는 긴 시간 영역에 대해 0.83시간(3,001초)만에 해석결과를 얻을 수 있었다.

이처럼 매우 빠른 해석속도와 높은 정확도를 갖춘 통합 설계환경을 활용한다면 소자의 공진주파수와 동일한 주파수를 갖는 정현파 입력을 가정한 이상적 동작 조건이 아닌, 다양한 주파수를 갖는 임의 파형에 대한 에너지 수확소자의 응답을 분석할 수 있으며 소자 단위에서만이 아닌 전력관리 회로까지를 포함하는 시스템 차원의 분석이 가능해지므로 이를 통해 보다 실제적인 에너지 수확소자의 개발에 일조함으로써 압전형 에너지 수확소자의 성공적인 상업화에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구결과입니다(과제번호: 2011-0248).

REFERENCES

- [1] <http://www.i-micronews.com/> (retrieved on July 27, 2013).
- [2] T. J. Kempa, R. W. Day, S. K. Kim, H. G. Park, and C. M. Lieber, "Semiconductor nanowires: a platform for exploring limits and concepts for nano-enabled solar cells", *Energy Environ. Sci.*, Vol. 6, pp. 719-733, 2013.
- [3] V. Leonov, "Thermoelectric energy harvesting of human body heat for wearable sensors", *IEEE Sens. J.*, Vol. 13, No. 6, pp. 2284-2291, 2013.
- [4] A. Munaz and G. S. Chung, "Design and analysis of a vibration-driven electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 21, No. 3, pp. 172-179, 2012.
- [5] G. S. Chung and B. C. Lee, "Fabrication of AlN piezoelectric micro power generator suitable with CMOS process and its characteristics", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 19, No. 3, pp. 209-213, 2010.
- [6] S. Beeby and N. White, *Energy Harvesting for Autonomous Systems*, Artech House, 2010.
- [7] G. H. Feng and J. C. Hung, "Development of wide frequency range-operated micromachined piezoelectric generators based on figure-of-merit analysis", *Microsyst. Technol.*, Vol. 14, pp. 419-425, 2008.
- [8] J. Ajitsaria, S. Y. Choe, D. Shen, and D. J. Kim, "Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 16, pp. 447-454, 2007.
- [9] R. Elfrink, T. M. Kamel, M. Goedbloed, S. Matova, D. Hohlfeld, Y. van Anandel, and R. van Schaijk, "Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 19, pp. 094005-094014, 2009.