

Improved Power Output by a Piezoelectric Cantilever after Addition of a Cylindrical Bar

Youngjin Lee[†], Seiki Kim, and Young-Deuk Kim*

*Electronic Materials & Module Team, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Seoul 153-801, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

(Received July 8, 2014; Revised August 19, 2014; Accepted August 20, 2014)

원통 봉을 적용한 압전 캔틸레버의 성능 향상

이영진[†] · 김세기 · 김영득*

한국세라믹기술원 전자소재·모듈팀

*한양대학교 기계공학과

(2014년 7월 8일 접수 ; 2014년 8월 19일 수정 ; 2014년 8월 20일 채택)

ABSTRACT

This paper describes the development of a new piezoelectric unimorph cantilever structure intended to improve electrical output power, compared to a conventional cantilever. The proposed structure employs a cylindrical bar attached to one side of a steel plate, which is a significant factor in forced vibration mode. The feasibility of the proposed methodology was assessed experimentally and theoretically. The influence of three different types of bar material (i.e., stainless steel, silicon rubber, and urethane), and bar position, on the output voltage were examined and compared with those without the bar. The optimal position and material for the bar were identified through experimental and theoretical analyses. It appears that the electrical output power of the proposed cantilever is about 40% higher than that of a conventional unimorph cantilever.

Key words : Piezoelectric transducer, Cantilever, FEM, Boundary condition

1. 서 론

최근 압전소자를 이용한 각종 센서(sensor) 및 에너지 하베스팅(energy harvesting) 연구가 활발히 진행되고 있으며, 소형화 및 출력 증대 등 디바이스의 효율 개선을 위하여 다양한 소재의 조성 및 진동구조의 개선에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻¹⁴⁾ 압전 조성으로는 주로 PZT 계열을 사용하며, 진동의 효율이 상대적으로 높은 유니몰프(unimorph) 또는 바이몰프(bimorph) 구조의 캔틸레버(cantilever)에 대한 연구가 많이 수행되고 있다.

조성 개선에 관한 연구는 기본 PZT 조성에 Mn, Nb 등의 첨가물을 추가하여 전기기계결합계수(Electro-mechanical Coupling Factor, K_p)를 60% 이상 향상시키는 다결정질의 압전 세라믹 조성에 대한 조성⁷⁾ 및 Cr₂O₃의 첨가에 따른 전기전도율과 압전전하상수(Piezoelectric Charge Constant, d_{33}) 개선에 대한 연구 등이 대표적이다.^{8,9)} 그리고 진동

구조 개선에 대한 연구로는 캔틸레버 형상 변화에 따른 출력특성 및 캔틸레버에 S-형태의 빔을 추가로 설치하여 공진주파수의 조절 및 출력 개선에 대한 연구 등이 있다.¹⁰⁻¹²⁾

압전 캔틸레버는 센서, 액추에이터, 에너지 하베스팅 등의 응용에 널리 적용되고 있으며, 금속판의 양면 또는 단면에 얇은 세라믹 판을 접착하고 추가적으로 중심주파수 조절을 위해 한쪽 끝에 무게추가 부착되어 있다. 금속판과 압전소자의 재질과 형상에 의해 결정되는 탄성계수와 무게추의 질량으로부터 정해지는 공진주파수를 캔틸레버의 진동 주파수와 일치시켜 이용하는 공진 모드 응용의 경우, 일정한 진동이 지속적으로 인가되는 구조물에 부착하여 센서 또는 에너지 하베스팅 응용에 주로 적용한다. 비교적 작은 외부 진동변위에 대해 큰 캔틸레버의 진동을 유도할 수 있는 높은 효율성으로 인해 뛰어난 출력 특성을 가지게 된다. 반면 매우 낮은 진동수를 가지는 외부 가진 조건 또는 불규칙한 외부 진동수를 이용할 수밖에 없는 상황에 있어서는 현실적으로 공진주파수 이용이 불가하다. 따라서 캔틸레버의 비공진 대역을 이용할 수밖에 없는 한계를 가지며, 이를 극복하고자 낮은 공진주파수를

[†]Corresponding author : Youngjin Lee

E-mail : yjlee@kicet.re.kr

Tel : +82-2-3282-2477 Fax : +82-2-3282-7762

가지는 구조, 또는 다중 공진주파수를 가지는 구조 등 변형된 구조에 관한 연구가 발표되었으나 근본적인 한계성을 가지고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 이처럼 가공되지 않은 자연 상에 존재하는 대부분의 에너지는 비규칙적이고 비정량적인 경우가 대부분이며, 에너지 하베스팅 및 센서 응용을 위해서는 비공진 대역의 활용이 더욱 중요할 수 밖에 없다.

본 연구에서는 일정한 변위의 강제 진동이 간헐적으로 존재할 경우 비공진 대역을 활용하는 캔틸레버의 출력 효율을 높일 수 있는 새로운 구조를 제시하고 그 타당성을 검증하였다. 즉, 일반적인 유니몰프 캔틸레버의 하부에 원통 봉(cylindrical bar)을 추가로 설치하여 제 2의 경계조건을 부여하고, 강제 진동 인가 시 캔틸레버의 거동과 이를 통한 출력 향상을 유한요소해석(Finite Element Method) 및 실험을 통해 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. 일반 캔틸레버

Fig. 1에 나타난 바와 같이, 캔틸레버의 끝단에 압력 P 를 인가할 경우 압전재료 내부에 스트레인(strain) 및 이에 비례하는 전하가 발생된다. 최종 출력 전압은 스트레인과 압전 방정식을 연계하여 전하밀도의 적분을 통해 구할 수 있다. 캔틸레버에서 임의의 지점 x 에서 캔틸레버의 변위 $z(x)$ 와 곡률반경 $R(x)$ 의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.¹⁵⁾

$$R(x) = \left[\frac{d^2 z(x,t)}{dx^2} \right]^{-1}$$

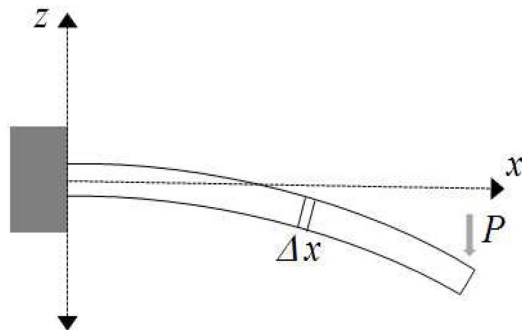


Fig. 1. Schematic of a cantilever beam deformation under load at fixed end.

(1) 이 때 상단 캔틸레버에서 발생하는 스트레인 x_x 는 식 (2)와 같이 구할 수 있으며,¹⁶⁾ 여기서 H 는 캔틸레버의 두께를 나타낸다.

$$x_x = \frac{H}{4R(x)} \quad (2)$$

발생되는 전기장은 식 (3)과 같이 압전상수, h_{31} 와 스트레인의 곱으로 구할 수 있다.¹⁶⁾

$$E_3(x) = h_{31}x_x \quad (3)$$

캔틸레버의 표면에서 전하밀도 $\sigma(x)$ 와 미소전하량 $Q_{\Delta x}$ 는 식 (4)와 (5)를 통해 나타낼 수 있다.¹⁶⁾

$$\sigma(x) = \epsilon_{33}E_3(x) \quad (4)$$

$$Q_{\Delta x} = \epsilon_{33}E_3(x)b \Delta x \quad (5)$$

여기서, b 는 캔틸레버의 폭, ϵ_{33} : 유전계수를 나타낸다. 따라서 총 전하량은 식 (5)의 미소구간 전하량을 구간 길이 L 에 대한 적분을 통해 구할 수 있다.¹⁶⁾

$$Q_{tot} = \int_0^L Q_{\Delta x} dx \quad (6)$$

최종 전하량으로부터 외력이 가해진 캔틸레버의 최종 전압 V_T 는 다음과 같다.

$$V_T = E_3 H = \frac{Q_{tot} H}{\epsilon_{33} b L} \quad (7)$$

2.2. 추가 경계조건이 적용된 캔틸레버

Fig. 2에 나타난 바와 같이 캔틸레버의 한쪽 끝단은 고정되어 있고 다른 쪽 끝단에 일정 힘 또는 변위가 인가되는 통상적인 유니몰프(unimorph) 캔틸레버의 하부에 추가로 원통 봉이 배치될 경우, 봉의 위치 및 탄성계수에 따라 전체 캔틸레버의 거동은 변하게 된다. 수정된 임의의 진동에 대한 변위 $z(x)$ '를 적용하면 봉의 추가로 인한 출력을 계산할 수 있다. 실제 변위 $z(x)$ '는 봉 전후 위치별 운동 형태가 다르며, 특히 z 방향으로 변위가 존재하는 봉의 탄성 운동이 포함된 경계조건을 적용할 경우,

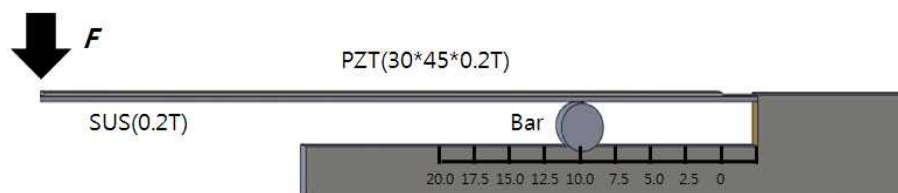


Fig. 2. Diagram of the cylindrical bar-assisted cantilever.

Table 1. Properties of Three Different Types of Bar Materials

Material	Material Properties		
	Steel (SUS)	Silicon Rubber	Urethane
Density (kg/m ³)	7,850	1,320	1,210
Modulus of Elasticity (GPa)	185	0.0275	0.016

$z(x)$ '는 단순히 표현하기가 어렵다. 본 연구에서는 기계적 거동에 대한 세부 운동 방정식에 대해서는 언급하지 않고 대신 유한요소해석을 통해 출력 전압의 변화를 시뮬레이션을 통해 계산하였다.

유한요소해석은 상용 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하였으며, 봉의 위치 및 재질 변화에 따른 캔틸레버의 거동을 과도해석(transient analysis)을 통해 압전소자에서의 발생하는 전압을 계산하였다. 해석 시 3-D Structural Solid 요소(element)인 Solid45 및 3-D Coupled-Field Solid인 Solid5 요소를 적용하였으며, 총 노드(node) 수는 6,025개, 요소는 4,320개로 모델링 하였고, Fig. 3에 모델링 및 시간해석 결과의 한 예를 나타내었다.

0.2 mm의 철판 위에 $30 \times 45 \times 0.2$ mm의 PZT5 물성의 압전소자를 배치하였고, 오른쪽 지지부 및 바의 하단부는 고정(fixed) 경계조건을 설정하였다. 캔틸레버의 왼쪽 끝단 중앙에 2 mm의 일정한 변위를 인가하고, 2.5 mm 간격으로 봉의 위치와 재질 변화에 따른 출력 전압을 계산하였다. 봉의 재질로는 탄성도가 다른 세 가지 재료(SUS, 실리콘 고무, 우레탄)를 선정하여 각각의 조건에 대한 변화를 살펴보았으며, 봉의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

2.3. 캔틸레버 제작 및 평가

앞서 유한요소해석에 적용한 PZT5 물성과 유사하며 압전전하상수(d_{33})와 전기기계결합계수(K_p)가 상대적으로 높은 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3 + \text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ 조성의 압전 세라믹을 후막 공정을 통해 제작하였다. PbO (99.9%), Cr_2O_3 (99.9%), Nb_2O_5 (99.9%) Sigma-Aldrich사의 파우더와 ZrO_2 (99.9%), TiO_2 (99.9%) High Purity Chemical Co.(Japan)사 파우더를 출발 원료로 사용하였고, 기본 조성은 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$ 이며, 후막의 압전 특성의 향상을 위하여 Zr과 Ti 자리에 Nb_2O_5 를 1.0 wt% 치환하였고, 여기에 Cr_2O_3 를 비율을 0.2 wt%로 적용하였다.

후막샘플을 제작하기 위하여 바인더(BUTVAR, FERRO, USA), 분산제(8541-4 100, DAEJUNG, KOREA), 그리고 가소제(B-73225, FE PRO, USA)를 적정 비율로 섞어 슬러리 상태로 제작 후, 탈포, 안정화(Aging) 처리를 거친 다음, 후막용 페이스트를 제작하기 위하여 테이프 캐스팅(tape casting) 장비(TECHGEN, KOREA)를 이용하여 두께

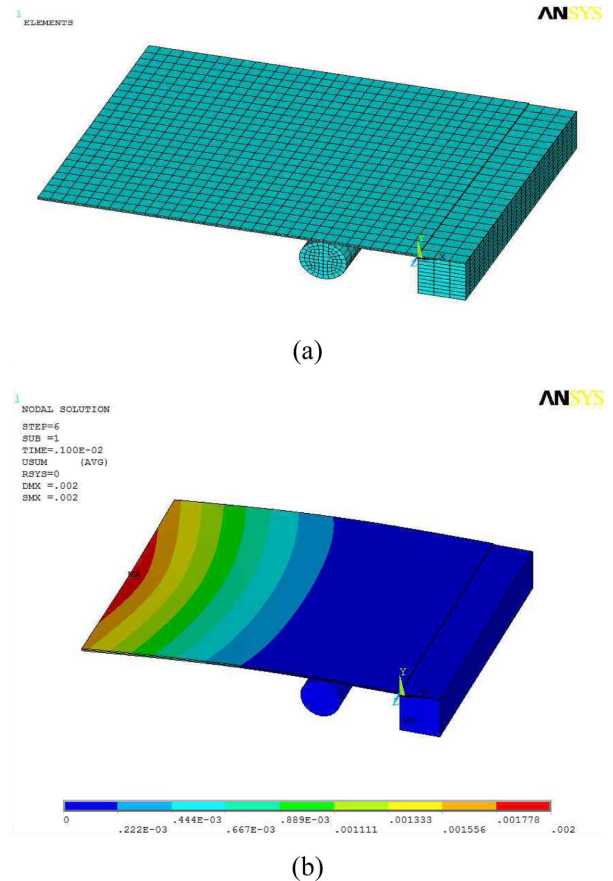


Fig. 3. Numerical analysis of the cylindrical bar-assisted cantilever: (a) grid system and (b) transient analysis result.

45 ~ 50 μm 페이스트를 제조하였다. 제작된 페이스트 5장을 라미네이터(TECHGEN, KOREA)로 60°C에서 5분 동안 50 psi의 압력으로 적층하였다. 약 210 μm 적층 시트를 블레이드 커팅 장비(Automax, KOREA)를 이용하여 압전 특성 평가에 적합한 가로길이 30 mm 세로길이 45 mm로 절단한 뒤, 최적의 소결온도로 선정한 1150°C에서 2시간 소결하였다.

소결작업이 완료된 시편들의 양면을 은(Ag) 전극 처리하였으며, 전극 소부를 통하여 처리된 시편들은 분극 후 압전 특성을 평가하기 위하여 d_{33} 미터(PM-100, United Kingdom)를 사용하였으며, 유전 특성의 측정을 위하여 임피던스 분석기(HP 4194A, Hewlett Packard, United State)를 이용하여 공진, 반공진 주파수 등을 측정, 계산하였으며, 샘플 형상 및 물성을 Table 2와 Fig. 4에 나타내었다.

0.2 mm 두께의 철판위에 0.2 mm 두께의 압전소자를 절단, 접착하여 캔틸레버를 제작한 후, 유한요소해석 조건과 동일한 경계조건을 설정하였다. 원통 바의 형상은 캔틸레버와 접촉면적을 최소화하여 운동 간섭을 최소화하기 위하여 원통구조로 선정하였으며, 직경은 5 mm로 선

Table 2. Properties of the Piezoelectric Ceramic Used in the Experiment

Piezoelectric Ceramic Properties		
Sample Size	mm	30 × 45 × 0.2
Piezoelectric Charge Constant (d_{33})	pC/N	463
Piezoelectric Voltage Constant (g_{33})	$10^{-3}V \cdot m/N$	34
Dielectric Constant (ϵ_r)	-	1,539
Electro-mechanical Coupling Factor (K_p)	%	72.9



Fig. 4. PZT-CN thick film and Fe plate.

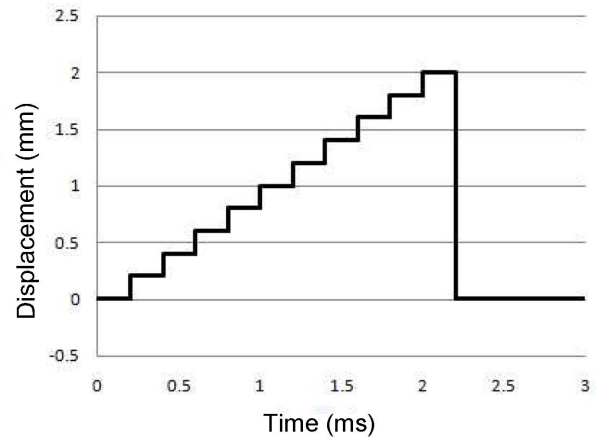


Fig. 5. Test setup of the displacement applying system.

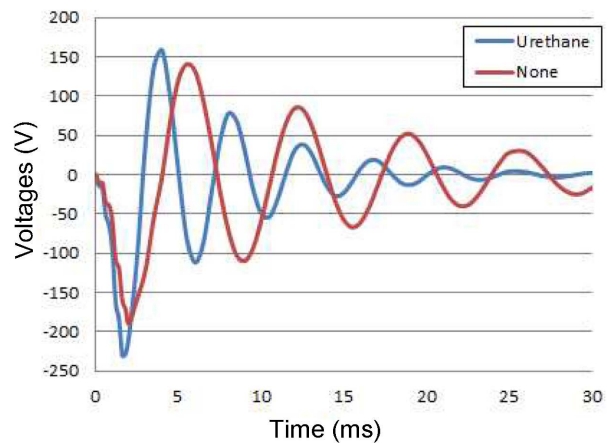
정하여 캔틸레버의 길이 45 mm 대비 최대 10% 가량 변형이 가능하도록 선정하였다. 일정한 변위를 인가하기 위하여 Fig. 5와 같이 PC 제어를 통해 설정된 변위 또는 힘 및 속도를 정밀하게 제어 인가할 수 있도록 변위인가장치를 제작하였으며, 캔틸레버에서 발생된 파형은 오실로스코프를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

우레탄 봉의 설치 유무에 따른 해석 결과를 Fig. 6에 나



(a) Applied external displacement diagram



(b) Generated output voltages

Fig. 6. Temporal profiles of (a) the externally applied displacement and (b) the output voltage simulated with urethane bar at 10 mm.

타내었다. 캔틸레버의 끝단에 인가한 외부 변위의 변화를 Fig. 6(a)에 나타내었으며, 0.2 msec 간격으로 0.2 mm씩 증가시켜 2 msec 동안 최대 2 mm의 변위를 인가한 후, 외부 변위를 제거하는 조건을 적용하였다. Fig. 6(b)는 우레탄 봉의 설치 유무에 따른 출력 전압을 나타낸 것으로, 봉이 없는 기존 캔틸레버에서의 최대전압은 약 -190 V이고, 봉을 10 mm 위치에 설치한 경우 최대전압은 -230 V

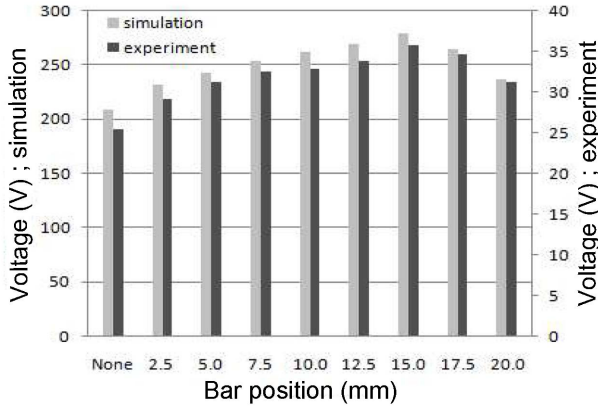


Fig. 7. Effect of the urethane bar position on the output voltage: simulated data with open load and experimental data with 120 kΩ load.

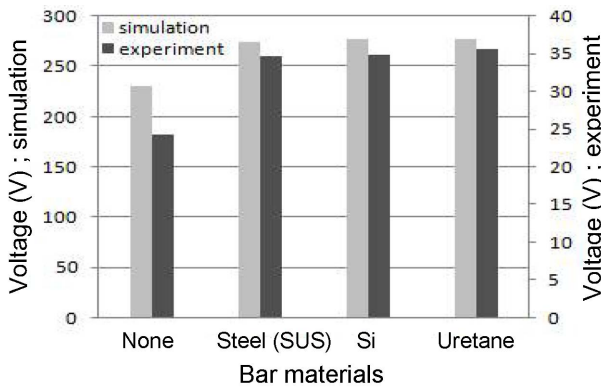


Fig. 8. Effect of the bar material on the output voltage: simulated data with open load and experimental data with 120 kΩ load.

로 약 40 V(21%)의 출력 특성이 개선됨을 알 수 있다. 물론, 외부변위 인가 후 자유진동에 의한 출력은 봉이 없는 경우 우수함을 알 수 있으나, 초기 강제 진동조건에서는 봉의 추가로 인한 개선 효과를 효과적으로 활용할 수 있다. 또한, 봉의 추가로 인해 캔틸레버의 유효 길이는 줄어들어 탄성계수가 증가하게 되고, 이로 인해 자유진동의 주파수가 상승함을 알 수 있으며, 봉에 의한 댐핑(damping) 요소의 증가로 링다운(ringdown) 시간이 짧아짐을 확인할 수 있다.

봉의 위치 변화에 따라 출력 특성이 변하며, 우레탄 봉을 적용할 경우 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 15 mm인 위치, 즉 전체 압전소자 길이의 37% 위치까지 출력전압이 지속적으로 상승하고, 이후 감소하는 경향을 보였다. Fig. 7에서 오른쪽 세로축은 120 kΩ의 부하조건에서 측정된 실험 결과를 나타내는 반면, 왼쪽 세로축은 무부하(open load) 조건에서 계산한 해석 결과를 나타낸다.

Fig. 8은 15 mm의 위치에서 봉의 재질에 따른 해석 및 실험 결과로 외부 인가 및 부하 조건은 이전과 동일하다.

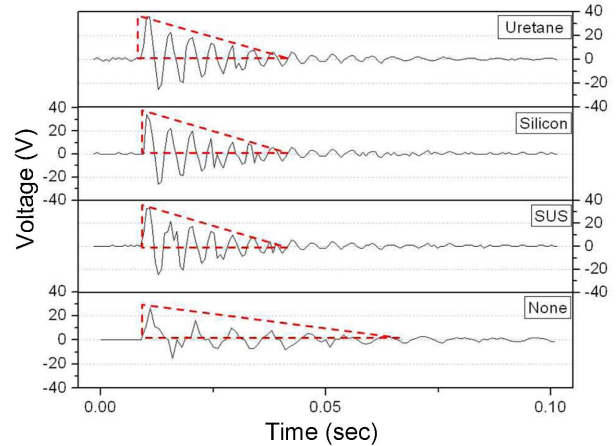


Fig. 9. Transient profiles of the output voltage with respect to bar material: experimental data with 120 kΩ load.

봉의 탄성계수가 높아짐에 따라 캔틸레버의 출력특성이 향상됨을 알 수 있으며, 이는 캔틸레버의 진동 시 봉의 탄성으로 인해 진동변위가 추가적으로 증가되는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

기존 캔틸레버의 경우 압전소자의 휨 변형이 대부분 고정 부분 근처에 집중되고, 반대쪽 압전소자 휨 변형은 미비하여 전체적인 발생 전력의 손실을 야기한다. 적절한 위치와 탄성계수의 봉을 추가적으로 설치할 경우, 압전소자의 휨 변형을 캔틸레버의 중심으로 이동시킬 수 있어 출력이 보다 향상될 수 있으며, 추가적으로 봉의 탄성 특성에 의해 캔틸레버 운동의 변위가 향상될 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 9는 15 mm 위치에 봉을 추가한 캔틸레버의 끝단을 강제로 2 mm 변위를 발생시킨 후 자유진동 실험 결과를 나타낸다. 링다운시간이 약 40% 감소하였으나, 전압은 최대 40%까지 향상된 실험 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 빔이 적용된 캔틸레버를 강제 변위 감지 센서 또는 타격식 에너지 하베스팅 응용에 적용할 경우 큰 효율 향상을 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 압전 캔틸레버에 강제 변위 인가 시 발생하는 전력 특성을 개선하기 위하여 새로운 방식의 경계조건을 추가로 부여하여, 이에 따른 출력개선 효과를 유한요소해석을 통해 미리 분석하고, 이를 실험을 통해 검증하고 그 타당성을 확인하고자 하였다. 기존 유니몰프 캔틸레버의 하부에 원통 봉을 추가로 설치하여 제 2의 경계조건을 부여하고, 강제 진동 인가 시 캔틸레버의 거동을 유한요소해석 및 실험을 통해 조사하여 출력 향상 효과를 확인하였다.

해석 및 실험 결과를 통해, 기존 캔틸레버의 하부에 봉

구조물을 추가로 설치할 경우 약 40%의 출력개선 효과를 실험을 통해 확인하였다. 이는 진동센서, 충격 센서 등에 응용될 경우 감도 향상의 효과를 거둘 수 있으며, 타격식 압전 하베스팅 응용에 있어서도 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. S. Beeby, M. Tudor, and N. White, "Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications," *Meas. Sci. Technol.*, **17** [12] 175-95 (2006).
2. H. Kim, V. Bedekar, R. A. Islam, W. H. Lee, D. Leo, and S. Priya, "Laser Machined Piezoelectric Cantilevers for Mechanical Energy Harvesting," *IEEE Trans UFFC.*, **55** [9] 1900-05 (2008).
3. J.-Q. Liu, H.-B. Fang, Z.-Y. Xu, X.-H. Mao, X.-C. Shen, D. Chen, H. Liao, and B.-C. Cai, "A MEMS-based Piezoelectric Power Generator Array for Vibration Energy Harvesting," *J. Microelectron.*, **39** [5] 802-06 (2008).
4. D. Kim, J. Kim, and C. Cheon, "Effect of Particle Size on Properites of PZT-based Thick Film," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **41** [5] 375-80 (2004).
5. R. Maeda, Z. Wang, J. Chu, J. Akedo, M. Ichiki, and S. Yonekubo, "Deposition and Patterning Technique for Realization of $Pb(Zr_{0.52}, Ti_{0.48})O_3$ Thick Film Micro Actuator," *JJAP.*, **37** 7116-19 (1998).
6. C. Lee, T. Itoh, R. Maeda, and T. Suga, "Characterization of Micromachined Piezoelectric PZT Force Sensors for Dynamic Scanning Force Microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, **68** 2091-100 (1997).
7. J. Park, B. Kim, J. Song, and S. Park, "Piezoelectirc Properties of Nb_2O_5 Doped and $MnO_2-Nb_2O_5$ Co-doped $Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ Ceramics," *J. Mater. Sci., Mater. Electron.*, **6** 97-101 (1995).
8. H. Lian-Xing, M. GAO, and L. Cheng-En, "Effects of Cr_2O_3 Addition on the Piezoelectric Properties and Microstructure of $PbZr_xTi_y(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{1-x-y}O_3$ Ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **21** 703-09 (2001).
9. M. M. Nadoliisky, S. D. Toshec, and T. K. Vasileva, "Study of PZT Ceramics Doped with Cr_2O_3 ," *Phys. Stat. Sol(a)*, **86** 109-11 (1984).
10. Y. Chae, H. Kweon, and S. Kim, "The Study of Characteristics Evaluation for Bimorph PZT Cantilever and Its Application," *J. KSTLE*, **19** 133-38 (2003).
11. H. Liu, C. Lee, T. Kobayashi, C. J. Tay, and C. Quan, "A New S-shaped MEMS PZT Cantilever for Energy Harvesting from Low Frequency Vibrations Below 30Hz," *Microsyst. Technol.*, **18** 497-06 (2012).
12. N. G. Elvin, A. A. Elvin, and M. Sepector, "A Self-powered Mechanical Strain Energy Sensor," *Smart Mater.*, **10** [2] 293-99 (2001).
13. J. Park, S. Lee, and B. Kwak, "Design Optimization of Piezoelectric Energy Harvester Subject to Tip Excitation," *J. Mech. Sci. Technol.*, **26** 137-43 (2012).
14. D. Cha, S. Lee, and S. Chang, "Energy Materials: A Study on Energy Harvester with Cantilever Structure Using PZT Piezoelectric Material," *J. KIEEME*, **24** [5] 416-21 (2011).
15. D. L. Logan, *Mechanics of Materials*; Harper Collins, New York, 1991.
16. A. J. Moulson and J. M. Herbert, "Electroceramics," Chapman & Hall, London, 1993.