

도로용 압전발전발판 설계 및 발전특성 평가

김창일^{1,2}, 이주희^{1,2}, 김경범^{1,2}, 정영훈¹, 조정호¹, 백종후¹, 이영진^{1,a}, 남 산²

¹ 한국세라믹기술원 광·전자세라믹본부

² 고려대학교 신소재공학과

Design and Electrical Properties of Piezoelectric Energy Harvester for Roadway

Chang-Il Kim^{1,2}, Joo-Hee Lee^{1,2}, Kyung-Bum Kim^{1,2}, Young-Hun Jeong¹, Jeong-Ho Cho¹,
 Jong-Hoo Paik¹, Young-Jin Lee^{1,a}, and Sahn Nahm²

¹ Optic & Electronic Ceramics Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Seoul 153-801, Korea

² Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received May 9, 2011; Revised May 23, 2011; Accepted June 17, 2011)

Abstract: Piezoelectric energy harvester (PEH) as a box type was fabricated in order to harvest mechanical energy imparted to roadways from passing vehicles and convert it into electricity. The PEH was composed of 72 piezoelectric cantilevers with 9 springs with elasticity stick to a bottom of the PEH. For the single piezoelectric cantilever, when a single push with approximately 5 mm displacement was incident to it, power of 0.355 mW was produced at 100 kΩ. It is found that the power from the single piezoelectric cantilever increases when spring constant is high. We investigated power of PEH when the moving vehicle passes in it. Power was increased with increasing vehicle speed. When vehicle speed is 30 km/h, power is 20.6 mW.

Keywords: Piezoelectric, Energy harvesting, Cantilever, Spring, Vehicle

1. 서 론

도로의 체계적인 관리를 위해서 도로의 기상상황, 차량 통행량, 도로의 파손여부 및 안전 지시등 같은 각종 전자기기가 도로 상에 다수 설치되고 있으며, 그에 따라 필요한 소비전력도 증가하고 있다. 이러한 전자기기가 설치되어 있는 곳마다 전력선을 설치함에 따른 인적 물적 자원이 필요하다. 이에 태양광에너지나 풍력에너지를 통해 자가 발전하여 전력을 공급하는 시스템이 개발되어 있다. 태양광에너지나 풍력에

너지는 기상조건에 영향을 받는 단점이 있으며 이를 보완하고자 차량하중에 의해 압전체를 변형시키거나 전자기식 발전기를 돌려 전력을 생산하는 자가발전시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 전자기식 발전기에 비해 압전체는 응답속도가 빠르고 MEMS 형태로 제작 [1,2] 하여 미세 진동에 의해서도 전력을 생산할 수 있는 장점이 있다. 센서와 무선신호 송출 기술의 발달로 소비전력이 낮아짐에 따라 주변의 진동에너지를 이용하여 자가발전하는 압전에너지 하베스터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 여러구조로 압전하베스팅이 연구되고 있다 [3-6]. 본 연구에서는 PZT 계열의 압전세라믹을 테이프캐스팅하여 제작하였으며,

a. Corresponding author: yjlee@kicet.re.kr

이를 금속판에 붙인 압전캔틸레버와 스프링을 이용한 구조를 통하여 외부 진동에 의해 압전캔틸레버의 여진이 오래도록 설계하였다. 다수의 압전캔틸레버를 사용하여 제작된 도로용 압전발전 발판을 과속방지턱으로 고정하여 도로에 설치하고 차량속도에 따른 발전량을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 압전소자 제작, 압전시트 제작

압전조성 $Pb(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3 + 0.2wt\% Cr_2O_3 + 1.0wt\% Nb_2O_5$ 으로 일반적인 세라믹공정을 통하여 불밀 및 하소를 한 뒤 슬러리 상태로 만들어 테잎캐스팅을 하였다. 그림 1과 같은 형태로 두께가 52 μm 가 되는 압전시트를 뽑아서 40 mm \times 40 mm 크기로 절단하여 5층을 적층 및 압착 하였다. 이를 1,050 $^{\circ}C$ 에서 소결하여 32 mm \times 32 mm \times 0.185 mm의 소결체를 얻었다. 소결체의 양면에 은 전극을 도포한 뒤 2.5 kV/mm의 직류전계를 걸어서 압전체를 분극하였다. 압전특성 d_{33} 값은 d_{33} meter (PM100, PIEZOTEST, United Kingdom)을 사용하였으며, k_p , ϵ_r 과 $\tan\delta$ 는 impedance analyzer (impedance analyzer, HP 4,194A, Hewlett Packard, United State)으로 측정 및 계산하여 얻었다.

2.2 도로용 압전하베스터 제작

도로용 압전에너지 하베스터에 사용될 캔틸레버 1기의 형태를 제작하여 평가하고자 하였다. 43 mm \times 33 mm \times 0.5 mm(T)로 절단된 스프링강판에 32 mm \times 32 mm \times 0.185 mm(T)크기로 제작한 압전시트를 에폭시 접착제를 사용하여 부착하였다. 진동에 의해서 캔틸레버가 휘어질 때 큰 변형이 있는 곳에서 압전시트가 파손되는 문제를 보완하고자 상기와 같이 압전시트의 크기로 조절하였다. 스프링강판 한쪽 끝에 mass를 달고 반대 면에는 지지대를 연결하였다. 최적의 mass를 찾기 위해서 그림 2와 같이 mass 밀 변의 길이를 3 mm씩 변화하여 5종류로 준비하였다. 지지대를 아크릴케이스와 결합한 뒤 아랫면 4군데에 스프링을 결합하였다. 압전캔틸레버 1기의 에너지 하베스터를 제진테이블에 고정하였으며, 압전캔틸레버의 상하 진동에 의한 교류전압을 정류하여 직류전압을

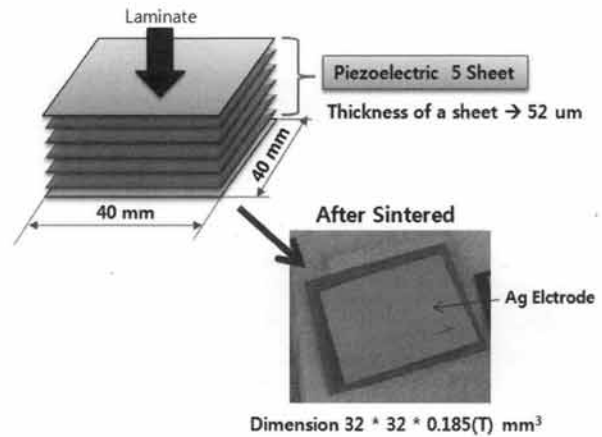


Fig. 1. Schematic diagram of piezoelectric sheet and image of sintered piezoelectric sheet.

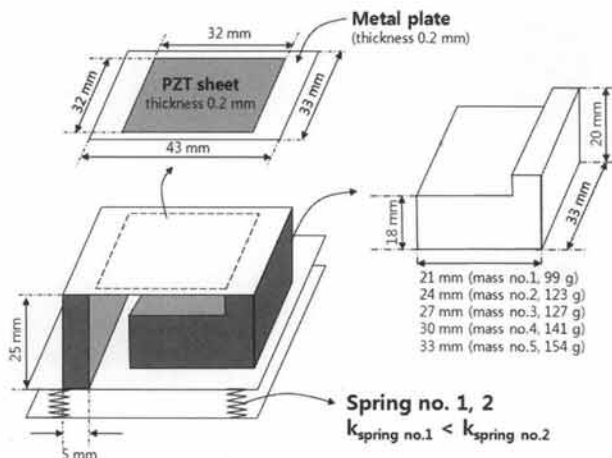


Fig. 2. Schematic diagram of piezoelectric cantilever.

얻기 위해 압전체에 도선을 빼내어 정류회로를 연결하였다. 발전특성을 평가하기 위하여 정류회로에서 나오는 출력부분에 병렬로 저항을 연결하였다. 하베스터 상판이 1회 눌러졌을 때 발생한 전압을 오실로스코프 (WaveJet 322, LeCroy, United State)로 측정하였다.(그림 5) 스프링과 발전량, mass와 발전량의 관계를 알고자 스프링 상수값이 다른 2종류의 스프링을 사용하고 질량이 다른 5종류의 mass를 사용하여 평가하였다. $P = V^2/R$ 식을 사용하여 시간에 대한 power 그래프를 그린 뒤 적분하여 1회 진동인가에 따른 발전특성을 평가하여 최적의 스프링과 mass를 결정하였다.

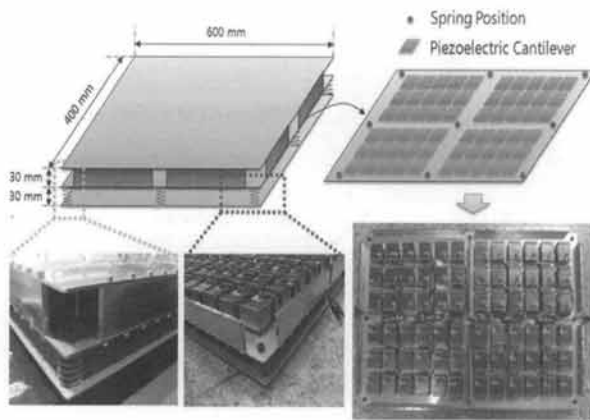


Fig. 3. Inner parts of piezoelectric energy harvester.

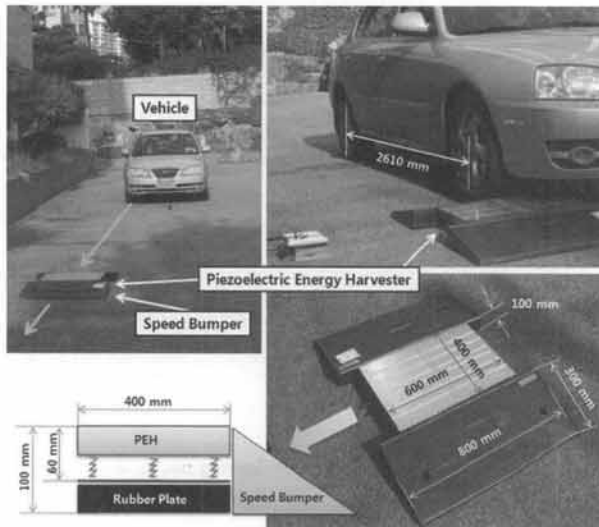


Fig. 4. Experimental setup for vehicle loading test.

최적의 조건을 찾은 mass와 스프링 조건을 통해서 72개의 캔틸레버를 제작하여 도로용 압전에너지 하베스터를 제작하였다. 도로용 압전에너지 하베스터의 전체크기는 600 mm × 400 mm × 60 mm(T)이며, 이 안에 그림 3과 같이 캔틸레버를 배열하였다. 압전 캔틸레버 변형에 의한 전압발생이 서로 상쇄되지 않도록 캔틸레버 1기당 1개의 정류회로를 거쳐서 압전 캔틸레버 72개 전체를 병렬로 연결하였다. 또한 네모서리와 중심부분에 스프링(SL 2,025, Samsol precision Co. LTD., Namyangju-si, Korea) 9개를 결합하였다. 이때 사용한 스프링 상수는 5.40 kgf/mm 이다. 차량의 하중에 버티도록 곳곳에 지지대를 세우고 각 상, 중,

하판 및 지지대등을 SUS로 제작하였다.

그림 4는 차량하중에 의한 발전특성 평가를 위한 실험모습이다. 압전발전발판의 양옆을 과속방지턱으로 고정하여 도로에 설치한 뒤 차량의 조수석쪽 앞, 뒤 바퀴로 1회 밟고 통과할 때 발생하는 발전량을 측정하였다. 발전특성 평가를 위해서 회로에 저항을 연결한 뒤 $P = V^2/R$ 식을 통하여 power를 계산하고 시간에 대하여 적분하여 차량의 조수석 쪽 앞, 뒤 바퀴 1회 밟음에 대한 발전량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 1. Piezoelectric properties of the bulk type and sheet type PZT ceramics.

Piezoelectric Properties	Unit	Bulk	Sheet
Piezoelectric Charge Constant, d_{33}	pC/N	460	379
Piezoelectric Voltage Constant, g_{33}	Vm/N	33	29
Dielectric Constant	-	1592	1478
Electromechanical Coupling Factor, k_p	%	68.6	67.2
Mechanical Quality Factor, Q_m	-	82	78

표 1은 압전캔틸레버 제작을 위한 압전체의 특성값을 나타낸다. bulk 타입의 경우 압전상수 d_{33} 는 460 pC/N이었으며 g_{33} 는 33 Vm/N이었다. 압전시트의 d_{33} 는 379 pC/N이었으며 g_{33} 는 29 Vm/N을 얻었다.

도로용 압전발판에 대한 최적의 스프링과 캔틸레버 1기에 대한 최적의 mass를 결정하기 위해 스프링 상수값이 다른 스프링 2종류와 질량이 다른 5종류의 mass를 사용하여 발전특성을 비교하였다. 스프링이 완전히 압축될 때까지 중력방향으로 힘을 가한 뒤 제거했을 때 스프링복원력에 의해 스프링이 최대로 팽창하게 된다. 이때 관성에 의해서 압전캔틸레버가 흔들리게 되어 발생한 발전량을 측정하였다. 그림 6은 시간에 대한 스프링과 mass변화에 따른 발전량을 나타내며, 이의 최종값을 그림 7에 나타내었다.

스프링상수가 스프링 1번($k_1 = 0.04$ kgf/mm)보다

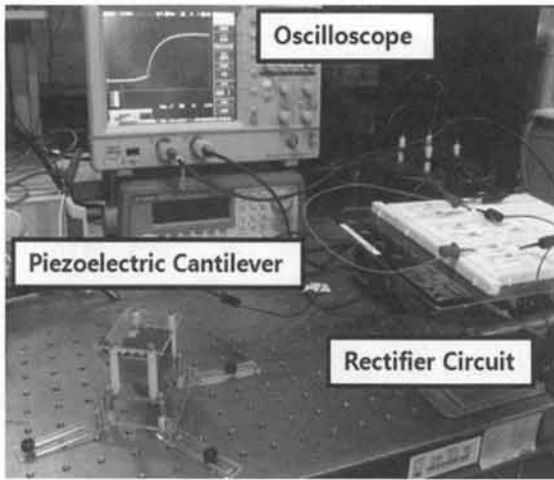


Fig. 5. Experimental setup for power measurement of piezoelectric cantilever.

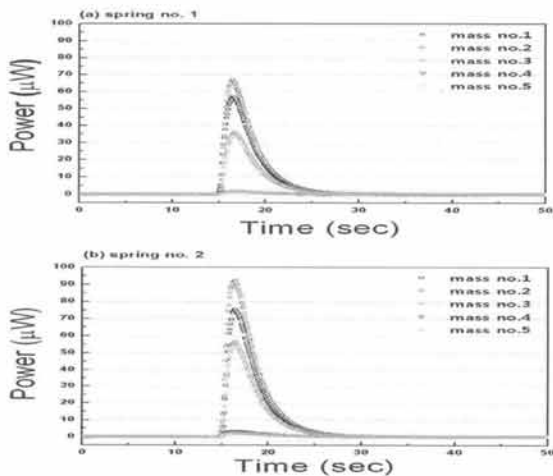


Fig. 6. Output power as a function of weight of mass at 100 kΩ with spring no. 1(a) and 2(b).

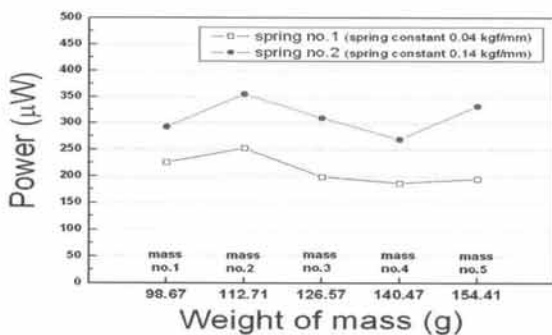


Fig. 7. Power as a function of weight of mass for various spring constant.

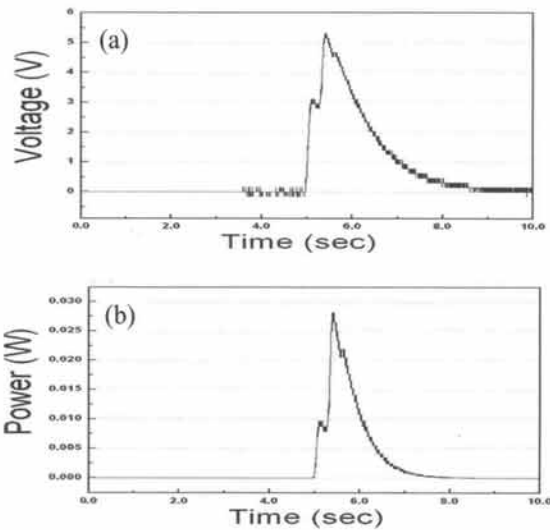


Fig. 8. Output voltage and power as a function of time (a) output voltage for vehicle speed 30 km/h at 1 kΩ, (b) power for vehicle speed 30 km/h at 1 kΩ.

큰 스프링 2번($k_2 = 0.14 \text{ kgf/mm}$)이 전체적으로 더 높은 발전량을 나타내었다. 스프링 1과 2의 발전특성 값이 차이가 나는 이유는 낮은 스프링상수일 경우에 스프링이 압축된 뒤 스프링 복원력에 의해 하베스터가 상승한 뒤 고정되지 않고 다시 스프링이 압축되면서 캔틸레버와 함께 진동하게 된다. 따라서 감쇄진동이 되어 진동이 오래가지 못하게 된다. 상대적으로 스프링상수가 큰 경우에는 스프링이 압축 후 팽창했을 때 복원력이 크게 되어 가속도도 클 것이며, 팽창 후 압축의 변화가 적기에 스프링 최대 팽창시의 충격에 의해 캔틸레버가 계속적인 진동을 하게 된다. 따라서 스프링상수가 더 클 때 더 큰 발전량을 얻을 수 있다. Mass의 질량에 따라서도 발전량의 변화가 있었으며 특히 2번 mass(123 g)일 때 최대의 발전량이 측정되었다.

최적의 mass와 차량의 하중에 의해 하베스터가 압축되지만 차량하중이 제거된 이후에 더 이상 압축되지 않는 적절한 스프링상수 값을 가지는 스프링을 선택하여 캔틸레버 72개를 포함한 압전하베스터를 제작하였다. 이를 차량 속도를 10, 15, 20, 25, 30 km/h로 변화시키면서 차량하중에 의한 발전특성을 평가하였다. 그림 8은 차량의 속도가 30 km/h일 때 압전하베스터에 1 kΩ의 저항을 병렬 연결한 뒤 압전하베스터가 차량의 조수석 쪽 앞, 뒤 바퀴에 의해 1회 밟혔을 때 캐패시터 양단에 발생한 전압(그림 8(a))과 파워

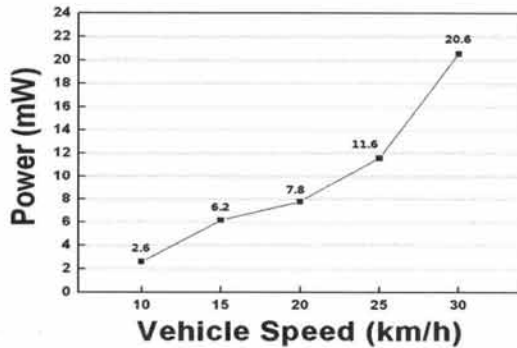


Fig. 9. Output power as a function of vehicle speed at 1 k Ω .

(그림 8(b))를 나타내고 있다. 그림 9와 같이 차량의 속도가 증가함에 따라 발전량도 증가하였으며, 과속 방지턱 형태이기에 30 km/h 이상의 속도에 대해선 평가하지 못했다.

차량의 속도가 증가함에 따라 발전량이 증가한 이유는 차량의 속도가 증가할수록 캔틸레버에 가해지는 충격량이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 압전하베스터의 발전량은 외부에서 가해지는 힘에 비례할 것이며 하베스터에 가해지는 외부힘은 가속력과 질량에 비례할 것이다. 하베스터의 질량은 동일하므로 외부의 힘이 클수록 가속도가 커지게 된다. 따라서 차량의 속도가 빠를수록 더 큰 가속도로 하베스터가 움직이게 되고 결국 발전량도 크게 나오게 됨을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 압전체를 이용하여 차량진동에 의한 자가발전장치를 설계하여 차량속도에 따른 발전 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압전 캔틸레버 1기를 1회 누름에 따라 0.355 mW의 전력이 나왔다.
2. 압전 캔틸레버 1기와 스프링 구조에서 스프링 상수값이 클 때 발전량이 크게 나왔다.
3. 차량속도가 증가함에 따라 발전량도 증가했으며, 차량속도 30 km/h로 차량의 조수석 쪽 앞, 뒤 바퀴로 1회 밟았을 때 발전량 20.6 mW를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원에서 지원하는 교통체계효율화사업인 "Energy Harvesting"을 이용한 도로교통 시설물 제어시스템 개발"사업의 지원에 의한 것입니다.

REFERENCES

- [1] Y. B. Jeon, R. Sood, J. H. Jeong, and S. G. Kim, *Sensor. Actuat.*, A122, 16 (2005).
- [2] H. B. Fang, J. Q. Liu, Z. Y. Xu, L. Dong, L. Wang, D. Chen, B. C. Cai, and Y. Liu, *Microelectr. J.*, 37, 1280 (2006).
- [3] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, *Comput. Commun.*, 26, 1131 (2003).
- [4] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies* (Springer, New York, 2009).
- [5] H. J. Sun and J. H. Lee, *J. KIEEME*, 20, 3 (2007).
- [6] H. C. Song, C. Y. Gang, and S. J. Yoon, *J. KIEEME*, 23, 28 (2010).