

압전 캔틸레버 구조를 이용한 도로용 에너지 하베스터의 개발 및 평가

김창일^{1,2}, 김경범^{1,2}, 전종학¹, 정영훈¹, 조정호¹, 백종후¹, 강인석³, 이무용³,
최범진⁴, 조영봉⁴, 박신서⁴, 남 산², 이영진^{1,a}

¹ 한국세라믹기술원 광·전자세라믹본부

² 고려대학교 신소재공학과

³ (주)진우소프트이노베이션

⁴ (주)센볼

Development and Evaluation of the Road Energy Harvester Using Piezoelectric Cantilevers

Chang-Il Kim^{1,2}, Kyung-Bum Kim^{1,2}, Jong-Hac Jeon¹, Young-Hun Jeong¹, Jeong-Ho Cho¹,
Jong-Hoo Paik¹, In-Seok Kang³, Moo-Yong Lee³, Beom-Jin Choi⁴, Young-Bong Cho⁴,
Shin-Seo Park⁴, Sahn Nahm², and Young-Jin Lee^{1,a}

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

³ JINWOO Soft Innovation, JeJu 690-802, Korea

⁴ Senbool Inc., Incheon 405-300, Korea

(Received April 30, 2012; Revised June 24, 2012; Accepted June 24, 2012)

Abstract: A road energy harvester was designed and fabricated to convert mechanical energy from the vehicle load to electrical energy. The road energy harvester is composed of 24 piezoelectric cantilevers and a vehicle load transfer mechanism. Applying a vehicle load transfer mechanism rather than directly installing energy harvesters under roads decreases the area of road construction and allows more energy harvesters to be installed on the side of the road. The power generation amount with respect to the vehicular velocity change was assessed by installing the vehicle load transfer mechanism and the energy harvester in the form of speed bumps and underground. The energy harvester installed in a speed bump form generated power of 7.61 mW at the vehicular velocity of 20 km/h. Also, power generation of the energy harvester installed in the underground form was 63.9 mW at the vehicular velocity of 28 km/h. Although the number of piezoelectric cantilevers was reduced by 1/3 to 24 in comparison to the previous research results with 72 piezoelectric cantilevers, similar power generation characteristic value was obtained within the vehicular velocity of 20 km/h by altering the vehicle load transfer mechanism and cantilever vibration method.

Keywords: Piezoelectric, Energy harvesting, Cantilever, Vehicle, Paving, Speed bump

1. 서론

도로의 체계적인 관리를 위해서 도로의 기상상황, 차량 통행량, 도로의 파손여부 및 안전 지시 경광등 같은 각종 전자기기가 도로상에 다수 설치되고 있다. 그 외 각종 USN 장치, 기상센서 등의 장착이 늘어나고 있으며, 그에 따라 필요한 소비전력도 증가하고 있다. 경우에 따라 전자기기가 설치되어 있는 곳마다 전력선을 설치하는 것이 어려운 곳이 있으며, 이에 태양광 에너지나 풍력 에너지를 통해 자가 발전하여 전력을 공급하는 시스템이 개발되어 있으나 기상조건에 영향을 받는 단점이 있다. 이를 보완하고자 차량 하중에 의해 압전체를 변형시키거나 [1] 전자기식 발전기를 돌려 전력을 생산하는 자가발전시스템 [2]에 대한 연구가 진행되고 있다. 전자기식 발전기에 비해 압전발전은 응답속도가 빠르고 MEMS 형태로 제작 [3,4]하여 다양한 진동에 의해서도 전력을 생산할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 센서와 무선신호 송출 기술의 발달로 소비전력이 낮아짐에 따라 주변의 진동 에너지를 이용하여 자가 발전하는 압전 에너지 하베스터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [5-8]. 에너지 하베스터를 도로 하부에 설치하여 차량이 직접 밟는 형태일 때, 하중 전달이 적어 발전량이 적으며, 내구성도 떨어진다. 이를 보완하기 위해서는 차량 하중 손실을 줄이고, 도로의 열기나 습기로 인해 압전체의 내구성을 떨어뜨리는 요인을 제거하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 PZT 계열의 압전 세라믹을 테일 캐스팅하여 제작하였으며, 이를 금속판에 붙인 압전 캔틸레버와 차량 하중 전달 기구를 제작하여 도로상에서 차량하중에 의해 자가발전이 가능한 에너지 하베스터를 설계, 제작하였다. 제작한 차량 하베스터를 과속방지턱 형태와 매립형태로 설치하여 차량 속도에 따른 발전량을 비교 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 압전시트 및 에너지 하베스터 제작

캔틸레버에 적합한 압전조성은 압전상수가 높고, 변형이 쉬운 소프트계열로 선정하였다. 압전조성 $Pb(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3 + 0.2 \text{ wt\% } Cr_2O_3 + 1.0 \text{ wt\% } Nb_2O_5$ 으로 일반적인 세라믹공정을 통하여 불밀 및 하소를 한 뒤 슬러리 상태로 만들어 테일 캐스팅을 하였다.

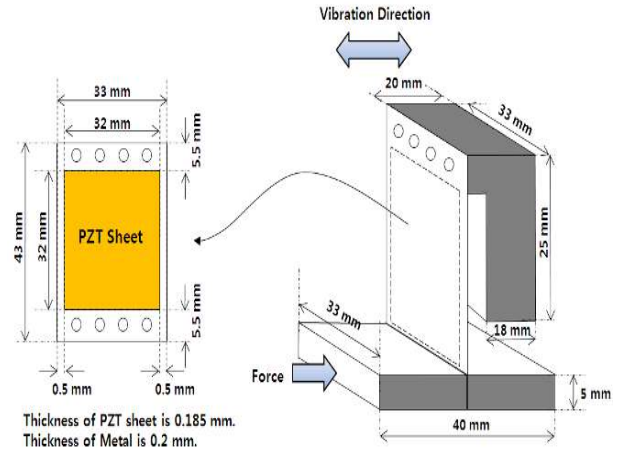


Fig. 1. Schematic diagram of piezoelectric cantilever.

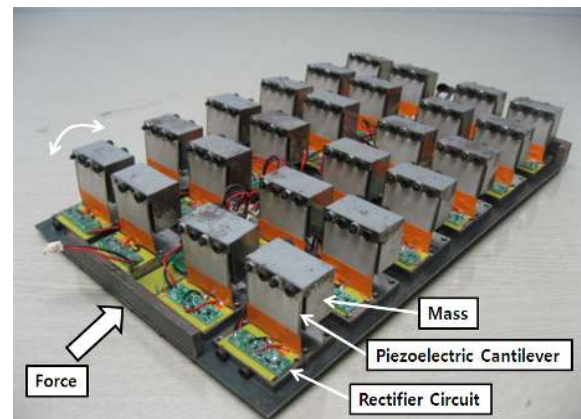


Fig. 2. Schematic diagram of piezoelectric cantilever a piezoelectric cantilever.

두께가 52 μm 가 되는 압전시트를 뽑아서 40 mm \times 40 mm 크기로 절단하여 5층을 적층 및 압착하였다. 이를 1,050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 소결하여 32 mm \times 32 mm \times 0.185 mm의 소결체를 얻었다. 소결체의 양면에 은 전극을 도포한 뒤 2.5 kV/mm의 직류 전계를 걸어서 압전체를 분극하였다. 제작한 압전시트의 압전상수(d_{33})는 379 pC/N이며, 기계결합계수(kp)는 67.2%이었다 [9].

도로용 에너지 하베스터에 사용될 캔틸레버 1기는 그림 1과 같이 제작하였다. 43 mm \times 33 mm \times 0.2 mm(T)로 절단한 스프링 강판에 32 mm \times 32 mm \times 0.185 mm(T)크기로 제작한 압전 시트를 에폭시 접착제를 사용하여 부착하였다. 차량 하중을 도로 갓길로

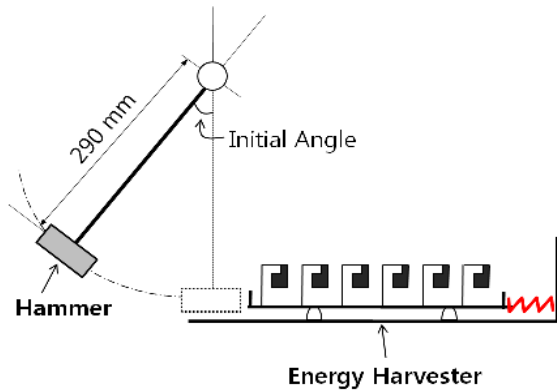


Fig. 3. Experimental setup for power measurement of 1 piezoelectric cantilever.

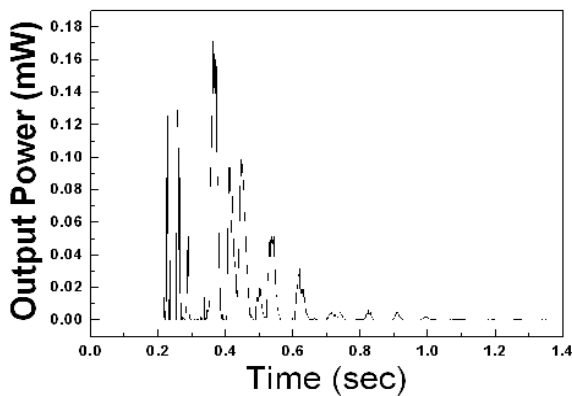


Fig. 4. Output power as a function of initial angle 90 degree at 1 MΩ.

전달하여 에너지 하베스터의 측면을 타격하는 방식이므로 캔틸레버를 도로면과 수평을 이루는 일반적인 캔틸레버 형태 [9]가 아닌, 도로면에 수직방향으로 세운 뒤 지지대로 고정하여 설치하였다 (그림 1). 또한 캔틸레버의 공진주파수를 떨어뜨리고 진동을 오랫동안 유지하기 위해 무게 추를 한쪽 면에만 부착하였다. 무게 추를 양쪽 면에 부착하였을 때 대칭으로 인해 진동시간이 줄어들게 된다. 이와 같은 형태로 캔틸레버를 24개를 선정 제작하여 그림 2와 같이 배열하였다.

2.2 충격에 의한 단위 에너지 하베스터의 발전특성

도로용 에너지 하베스터는 주기적인 진동에 의한

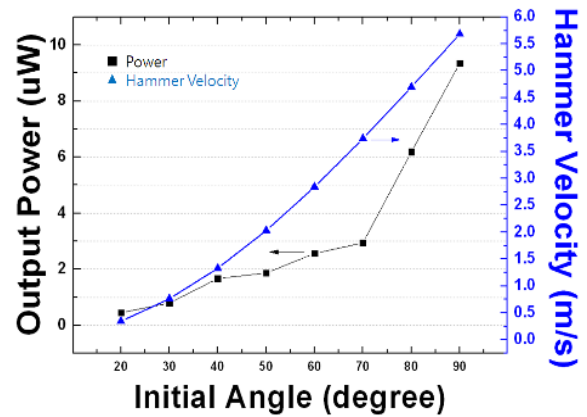


Fig. 5. Output power as a function of initial angle at 1 MΩ.

것이 아닌 간헐적인 진동을 이용하기 때문에 에너지 하베스터의 공진주파수를 찾아 설계하지 않고, 1회 충격에 의해 압전 캔틸레버의 진동이 오래 유지되도록 설계하는 것이 중요하다. 이에 24개의 압전 캔틸레버로 구성된 에너지 하베스터를 충격을 가하여 이에 따른 발전특성을 알아보기 위해 그림 3과 같이 실험 장치를 구성하였다. 24개 중 1개의 압전 캔틸레버만 정류회로에 연결한 뒤 임피던스 매칭에 의해 1 MΩ의 저항을 병렬로 연결하여 충격에 의한 발전특성을 평가하였다. 해머의 한쪽을 고정하고 일정 각도에서 자유낙하하여 에너지 하베스터에 충격을 가하였으며 해머의 충돌직전의 속도를 계산하여 그림 5에 나타내었다.

그림 4는 해머의 초기각도를 90도로 설정하여 에너지 하베스터에 충격을 가했을 때 발전량을 나타내고 있으며 첫 타격시와 하베스터가 뒤로 밀린 뒤 스프링에 의해 다시 돌아올 때 가장 큰 전압 피크가 나타났다. 이후 여진에 의한 발전이 지속되는 것을 볼 수 있으며 충격속도 변화에 대한 압전 캔틸레버 1기의 발전특성은 그림 5에 나타내었다. 해머의 초기 각도의 증가에 따라 충돌 직전의 해머 속도도 증가하였으며 발전량 또한 충격속도에 따라 점차 커짐을 알 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 차량 하중 전달 기구 제작

차량의 하중을 도로 갓길로 전달하여 에너지 하베

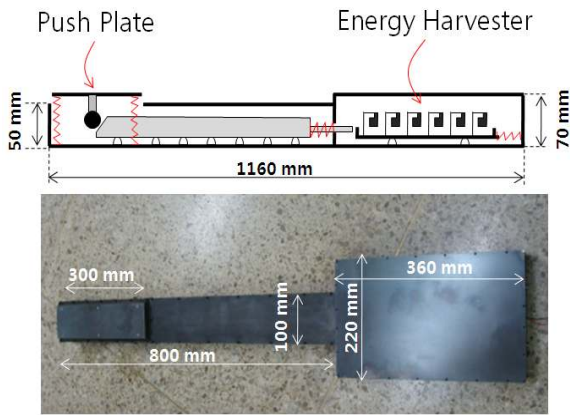


Fig. 6. Schematic diagram of energy harvester for road.

스터를 타격하는 구조물을 그림 6과 같이 제작하였다. 차량의 바퀴가 밟게되는 발판의 면적은 300 mm × 80 mm이며, 이를 포함한 힘 전달 기구의 크기는 800 mm × 100 mm × 50 mm(T)이다. 또한 힘 전달 기구 끝에 연결된 24개의 압전 캔틸레버를 포함하는 에너지 하베스터의 크기는 360 mm × 220 mm × 70 mm(T)이다. 압전 캔틸레버는 4행 6열로 24개를 배열하였다 (그림 2). 캔틸레버 1기 당 1개의 정류회로를 연결하고 이와 같은 24개를 병렬로 연결하였다. 또한 차량 하중에 의해 하베스터를 타격하고 원위치로 돌아가기 위해서 누름판 하부(4개), 타격봉 끝부분(1개)과 하베스터 끝부분(2개)에 스프링(SF14×35, SF20×50, SF20×20, Samsol precision Co. LTD., Namyangju-si, Korea) 7개를 결합하였다. 이 때 사용한 스프링 상수는 각각 1.03, 1.28, 3.22 kgf/mm 이다. 압전 캔틸레버가 진동하는 방식은 먼저, 차량 하중에 의해 누름판이 지면에 수직으로 내려가면, 캠에 의해 힘의 방향이 90도로 바뀌어 도로 갓길로 전달되게 된다. 이때 기구 끝의 봉이 하베스터 이동판을 타격하여 이동판이 밀려나게 되지만, 끝단의 스프링에 의해 하베스터 이동판이 다시 원위치로 돌아와 정지하게 된다. 정지시 관성에 의해 압전 캔틸레버가 좌우로 진동하게 되며, 이 진동에 의해 변형된 압전체에 의해 전기가 발생하게 된다 (그림 6).

3.2 도로용 에너지 하베스터 평가

제작한 에너지 하베스터를 그림 7과 같이 과속방지턱 형태와 도로 면에 매설하는 형태로 설치하였으며,

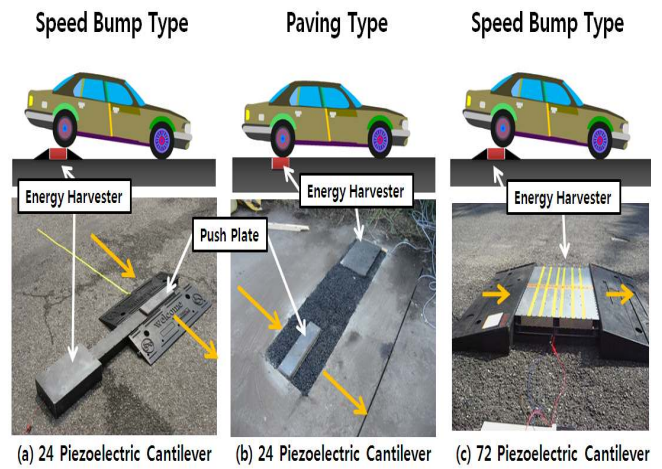


Fig. 7. Experimental setup for power measurement of energy harvester.

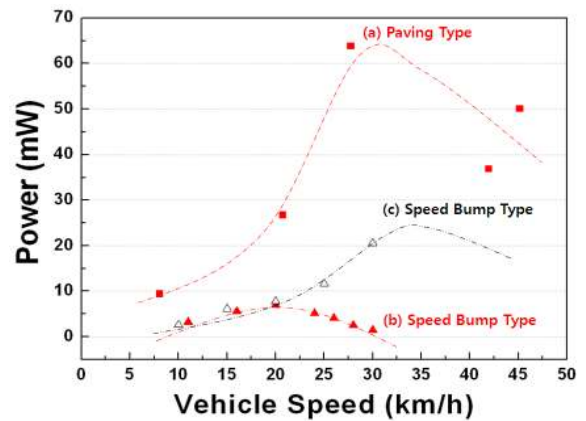


Fig. 8. Output power as a function of vehicle speed at 10 kΩ (a) paving type (24 cantilevers energy harvester), (b) speed bump type (24 cantilevers energy harvester), and (c) speed bump type (72 cantilevers energy harvester [9]).

이를 직접 밟는 구조(그림 7(C)) [9]와 비교하였다. 도로의 발전특성을 평가하기 위하여 정류회로에서 나오는 출력부분에 10 kΩ 저항과 캐패시터 47 μF을 병렬 연결하였다. 이는 주기적인 진동원이 아닌 간헐적인 진동에 의한 압전 에너지 하베스터의 발전특성을 평가하기 위함이다. 에너지 하베스터 이동판이 차량(1.2톤) 한쪽 면의 앞, 뒷바퀴에 의해 2회 타격되었을 때 캐패시터 양단에 발생한 전압을 오실로스코프 (WaveJet 322, LeCroy, United State)로 측정하였다.

$P=V^2/R$ 식을 사용하여 시간에 대한 power 그래프를 그린 뒤 이를 적분하여 발전량을 계산하였다.

그림 8은 매설형 (paving type)과 과속방지턱 형태 (speed bump type)로 에너지 하베스터를 설치 후 차량속도에 따른 발전량을 평가한 결과이다. 이를 캔틸레버 72개로 제작한 압전 에너지 하베스터 [9]의 결과와 비교하였다. 과속방지턱 형태 (speed bump type)로 설치한 24개의 압전 캔틸레버 하베스터는 차량속도 30 km/h 초과 시 차량 속도를 내지 못하여 결과를 얻을 수 없었다. 차량속도가 10~20 km/h일 때 발전량도 증가하였으며, 20 km/h 이후 발전량이 감소하는 경향을 보였다. 이는 차량속도 20 km/h를 넘어서면서 힘 전달 기구의 누름 판을 끝까지 누르지 못하고 통과함에 따라 하베스터 이동판을 제대로 타격하지 못한 것으로 판단된다. 동일한 압전소자 72개로 제작한 압전 하베스터 [9]는 차량속도 20 km/h에서 7.8 mW의 전력이 측정되었다. 압전 캔틸레버의 수가 72개에서 24개로 1/3 줄었지만, 차량하중 전달기구와 캔틸레버 진동방식을 변화시킴으로 차량 속도 20 km/h 이내에서 유사한 발전 특성 값을 얻을 수 있었다.

매설 (paving type)의 경우 차량속도가 5~50 km/h로 증가 시 발전량도 증가하는 경향을 보였으며, 특히 차량속도 28 km/h일 때 최대 발전량 63.9 mW가 측정되었다. 하베스터 이동판을 타격하는 가속도가 커지게 되면 압전 캔틸레버의 변형 또한 커지게 되어 발전량이 커지게 된다. 하지만 차량 하중 전달 기구의 구조에 의해 특정 속도에서 최대의 가속도가 전달 되고 그 지점을 넘어서면 힘의 손실이 발생하여 결과적으로 발전량을 감소시키는 원인이 되는 것으로 판단된다. 동일한 구조의 하베스터이지만, 과속방지턱 형태보다 매설형태의 발전 특성 값이 모든 차량 속도에서 크게 측정되었다. 차량속도가 증가함에 따라 발전량도 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며, 이는 차량 힘 전달기구물의 구조적 인자에 의한 것으로 판단된다. 이를 개선하고 압전 캔틸레버의 수량을 늘리면 더 큰 발전량을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 압전 캔틸레버를 이용한 압전 하베스터와 차량하중 전달 기구를 제작하여 이를 과속방지턱 형태와 매설형태로 설치하여 차량속도에 따른 압전 하베스터의 발전 특성을 조사하여 다음과 같은

결론을 얻었다.

1. 제작한 단위 에너지 하베스터는 타격속도에 비례하여 발전량이 증가하였다.
2. 과속방지턱 형태로 설치한 24개 압전 캔틸레버 하베스터는 차량속도 20 km/h에서 7.61 mW의 전력이 발생하였다.
3. 매설형태로 설치한 24개 압전 캔틸레버 하베스터는 차량속도 28 km/h에서 63.9 mW의 전력이 발생하였다.
4. 24개의 압전 캔틸레버 하베스터를 과속방지턱 형태로 설치했을 때 보다 매설형태로 설치 시 발전 특성 값이 크게 나타났다.
5. 압전 캔틸레버의 수가 72개 [9]에서 24개로 1/3 줄었지만, 차량하중 전달기구와 캔틸레버 진동방식을 변화시킴으로 차량 속도 20 km/h 이내에서 유사한 발전 특성 값을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] <http://www.innowattech.co.il/>
- [2] <http://www.hughesresearch.co.uk/>
- [3] Y. B. Jeon, R. Sood, J. H. Jeong, and S. G. Kim, *Sensor. Actuat.*, **A122**, 16 (2005).
- [4] 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).
- [5] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, *Comput. Commun.*, **26**, 1131 (2003).
- [6] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies* (Springer, New York, 2009).
- [7] H. J. Sun and J. H. Lee, *Bulletin of KIEEME*, **20**, 3 (2007).
- [8] H. C. Song, C. Y. Gang, and S. J. Yoon, *Bulletin of KIEEME*, **23**, 28 (2010).
- [9] C. I. Kim, J. H. Lee, K. B. Kim, Y. H. Jeong, J. H. Cho, J. H. Paik, Y. J. Lee, and S. Nahm, *J. KIEEME*, **24**, 7 (2011).