

매설방법과 차량하중에 따른 벤더형 압전에너지 하베스터의 설계 및 평가

김창일¹, 정영훈¹, 윤지선¹, 조정호¹, 백종후^{1,a}, 장용호², 최범진², 박신서², 조영봉³

¹ 한국세라믹기술원 전자융합소재본부

² (주)센볼

³ (주)티오션

Development and Evaluation of the Bender Type Piezoelectric Energy Harvester According to Installation Methods and Vehicle Weight

Chang-Il Kim¹, Young-Hun Jeong¹, Ji-Sun Yun¹, Jeong-Ho Cho¹, Jong-Hoo Paik^{1,a}, Yong-Ho Jang²,
 Beom-Jin Choi², Shin-Seo Park², and Young-Bong Cho³

¹ Electronic Convergence Materials Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Jinju 52851, Korea

² Senbool Inc., Incheon 21639, Korea

³ Tiocean Inc., Incheon 21990, Korea

(Received September 3, 2014; Revised March 17, 2016; Accepted March 28, 2016)

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 20 piezoelectric materials. This study attempted to evaluate output depending on pavement materials when paving road piezoelectric energy harvester in the road. Harvester is the bender type and is the method of supporting the both ends of piezoelectric material and applying the load in the middle part. Harvester was paved in the type paved with asphalt, type paved with cement and in the exposed type not covering the top of harvester. The output characteristics were compared and evaluated depending on changes in vehicle load and vehicle speed changes. As vehicles, truck (11.9 ton), SUV(1.6 ton) and sedan (1.5 ton) were used and the output characteristics when driving at the interval of 10 km/h from 10 km/h to 100 km/h were evaluated.

Keywords: Piezoelectric transducer, Energy harvesting, Vehicle, Paving, Road

1. 서 론

점차 낮은 소비전력을 사용하는 전자기기가 개발되고 무선화되면서 전원으로 사용하는 배터리를 대체하

기 위한 압전에너지 하베스팅 연구가 다양하게 진행되고 있다 [1-15]. 스마트한 도로 환경을 제공하기 위해 도로에는 각종 센서나 전자기기가 설치되고 있다. 도로에는 수많은 차량이 지나감으로 차량의 하중을 에너지원으로 사용하기 쉽다. 이를 통해 에너지를 수확하는 시스템을 상용화하려는 노력이 점차 생겨나고 있다. 현재는 개발단계로 상용화하기에는 많은 연구가 필요하지만 공개된 연구 결과 [16-18]는 미비하다. 또한, 에너지 하베스터를 도로에 설치하여 평가하는 것은 다양

a. Corresponding author; jhpaik@kicet.re.kr

한 변수가 발생하여 예측이 힘들고 실험실에서의 실험과 비교하면 비용이 많이 들며 안전상의 이유로 도로공사에 대한 관공서의 승인이 어려워 연구가 어려운 실정이다. 실제 상황에 적용해 보아야 추가적인 문제나 개선사항이 발견하게 되므로 실제 적용실험이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 도로용 압전에너지 하베스터를 도로에 매설할 때 매설 재질에 따른 발생에너지를 평가하고자 하였다. 동일하게 제작한 압전에너지 하베스터를 도로에 노출형태, 아스콘 형태, 시멘트 형태로 매설하여 차량 하중 변화와 속도에 따른 발생에너지를 비교, 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 도로용 압전에너지 하베스터 제작

도로용 압전에너지 하베스터는 그림 1과 같이 제작하였다.

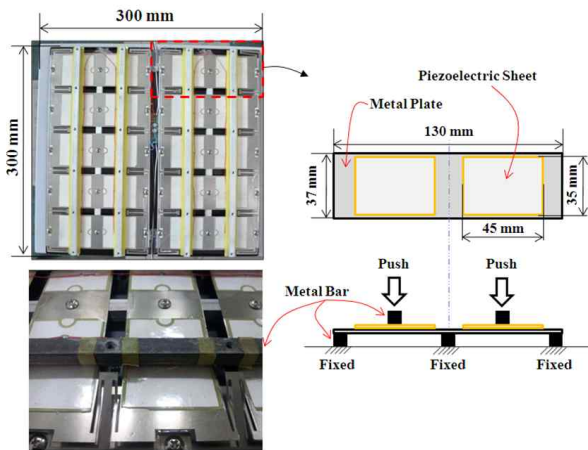


Fig. 1. Schematic diagram and photograph of the bender type piezoelectric energy harvester.

45 mm × 35 mm × 0.2 mm의 압전 시트 소자 ((주)셀볼) 2개를 130 mm × 37 mm × 0.2 mm의 금속판 한쪽 면에 에폭시 접착제로 부착하였다. 압전 시트의 압전 상수(d_{33})는 419 pC/N이며, 압전 전압 상수(g_{33})는 22 Vm/N, 전기기계결합계수(k_p)는 0.71, 품질계수(Q_m)는 80이다. 금속판의 양 끝과 가운데 부분을

하베스터 외곽케이스에 고정하고 압전 시트의 중앙 부분을 금속막대가 상단에서 누르는 벤더 형태로 제작하였다. 압전 시트는 20개가 사용되었으며, 하베스터 전체 크기는 300 mm × 300 mm × 60 mm이다. 각각의 압전 시트의 양단을 정류회로에 연결하였으며, 각각의 정류회로의 출력 부분을 병렬로 연결하였다. 이는 각각의 압전 캔틸레버가 진동하여 변형함에 따라 발생하는 전하의 부호가 반대로 되어 서로 상쇄되지 않도록 하기 위해서이다.

2.2 도로용 압전에너지 하베스터의 도로 매설

도로용 압전에너지 하베스터를 도로에 매설할 때 매설 재질에 따른 발생에너지를 평가하기 위해서 압전에너지 하베스터를 아스팔트로 포장한 형태와 시멘트로 포장한 형태 그리고 압전에너지 하베스터 상단을 덮지 않은 노출형태로 매설하였다. 이때 압전에너지 하베스터는 그림 1과 같이 동일하게 3개를 제작하여 그림 2와 같이 매설하였다. 3가지 모두 도로 맨 아랫부분에 시멘트로 약 50 mm 두께로 기초를 다지고 그 위에 압전에너지 하베스터를 설치하였다. 상단 부분은 각각 그대로 둔 노출형태, 시멘트로 약 50 mm 덮은 시멘트 형태 그리고 아스팔트로 50 mm 덮은 아스팔트 형태로 구분하였다. 노출형태의 경우 상단을 테이프로 마감하였다. 차량은 트럭(11.9 ton), SUV(1.6 ton), 세단(1.5 ton)을 사용하였다.

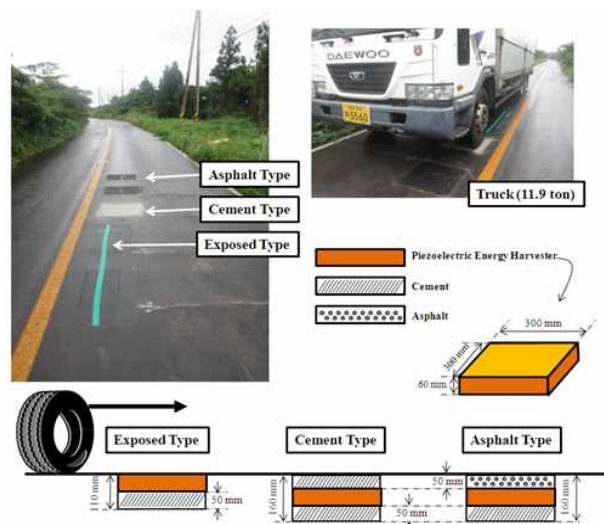


Fig. 2. Schematic diagram and photograph of installation methods of the bender type piezoelectric energy harvester.

2.3 도로용 압전에너지 하베스터의 발생에너지 평가

도로용 압전에너지 하베스터의 발생에너지를 평가하기 위하여 차량은 트럭(11.9 ton), SUV(1.6 ton), 세단(1.5 ton)을 사용하였으며 차량 속도는 10 km/h에서 100 km/h까지 10 km/h 간격으로 등속 주행하였을 때 발생에너지를 평가하였다. 차량의 한쪽 면 앞, 뒷 바퀴에 의해 연속 2회 하중이 인가되었을 때 커패시터 양단에 발생한 전압을 오실로스코프로 측정하였다. $P=V^2/R$ 식을 사용하여 시간에 대한 전력 그래프를 그린 뒤 이를 시간에 대하여 적분하여 발생에너지를 계산하였다 (그림 3).

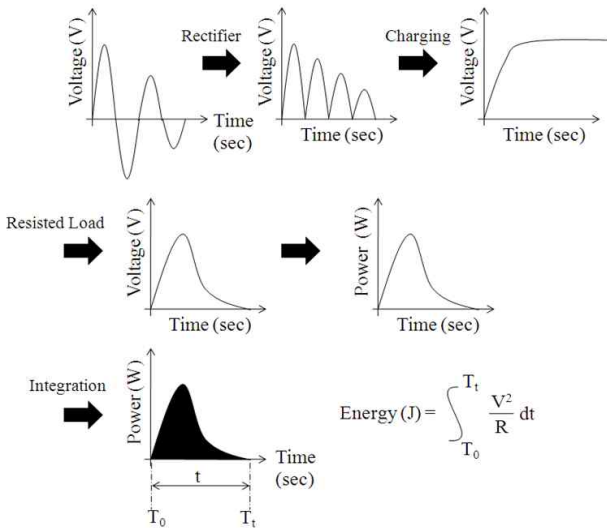


Fig. 3. Calculation method of output power on intermittent vibration.

압전에너지 하베스터의 발생에너지를 평가하기 위해 47 μF 의 커패시터와 10 k Ω 의 저항을 병렬로 연결하였다. 외부 충격으로 압전 시트 캔틸레버가 진동하게 되고 이때 발생하는 전압을 오실로스코프(WaveJet 322, LeCroy, United State)로 측정하고 시간에 대해서 적분하여 발생에너지를 계산하였다. 발생에너지의 계산은 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$Output\ Energy = \int_{t_0}^t \frac{V^2}{R} dt \quad (1)$$

이때, R 은 저항이며, V 는 커패시터 양단의 전압이다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 매설 재질에 따른 발생에너지를 나타낸다. 세단과 트럭의 경우 모두 노출형태가 발생에너지 값이 가장 컸으며, 그다음으로 아스팔트, 시멘트 순으로 나타났다.

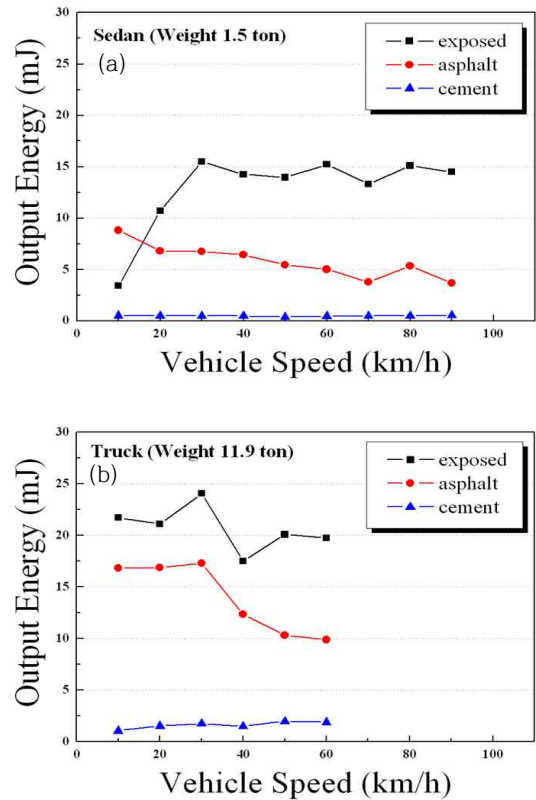


Fig. 4. Output energy versus vehicle speed at various installation methods (10 k Ω). (a) The type of vehicle is sedan, (b) the type of vehicle is truck.

노출형태일 때 세단의 경우 차량 속도가 30 km/h 까지 증가함에 따라 발생에너지는 15 mJ로 증가하는 경향을 보였으며 이후 속도에서는 $15 \pm 10\%$ mJ로 수렴하는 형태를 보였다. 아스팔트 형태일 때는 차량 속도가 증가함에 따라 발생에너지는 감소하는 경향을 보였다. 시멘트 형태일 때는 차량 속도 변화에 0.6 mJ 이하의 특성을 나타내었다. 트럭의 경우 도로의 실험 여건상 70 km/h 이상 속도를 증가시키기 어려워 60 km/h까지만 평가하였다. 트럭의 경우 노출형태일 때 차량 속도가 30 km/h인 경우 발생에너지는 24.055 mJ로 가장 컸으며, 속도가 증가함에 따라 발생에너지가 감소하는 경향을 보였다.

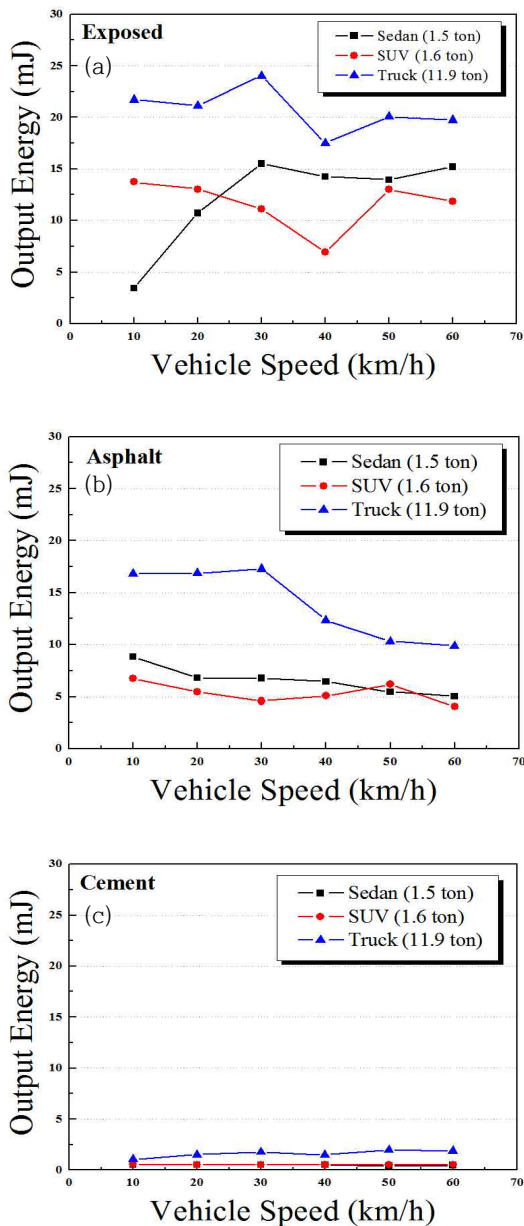


Fig. 5. Output energy versus vehicle speed at various vehicle weight (10 kΩ). (a) The type of vehicle is exposed type, (b) the type of vehicle is asphalt type, and (c) the type of vehicle is cement type.

그림 5는 차량 하중에 따른 발생에너지를 나타낸다. 하중이 가장 큰 트럭의 경우가 모든 매설형태에서 세단이나 SUV보다 발생에너지가 크게 나타났다. 하중이 유사한 세단과 SUV의 경우 속도 변화에 따라서도 대체로 비슷한 발생에너지 값을 나타냈다. 캔틸레버 구조

인 하베스터를 아스팔트로 매설한 결과는 차량 속도 증가 시 발생에너지도 증가하였지만 [20], 벤더 구조인 하베스터를 아스팔트로 매설한 결과는 차량 속도 증가 때 발생에너지가 감소하는 경향을 보였다. 캔틸레버 구조의 하베스터는 차량 속도가 증가할수록 하베스터에 가해지는 충격량이 증가하여 캔틸레버를 오래 진동할 수 있는데 반하여 벤더 구조의 하베스터는 차량 속도가 증가할수록 압전에너지 하베스터에 힘이 인가되는 시간이 감소하게 되며, 이는 압전체의 변형시간이 짧아지게 되어 결과적으로 발생에너지가 감소한 것으로 판단된다. 하베스터 상단부의 표면을 아스팔트로 매설한 경우 하베스터의 발생에너지가 시멘트로 매설하였을 때보다 크게 나타났다. 이는 아스팔트의 경우 시멘트에 비해 작은 알갱이가 단단히 결합하지 않은 형태이기엔 같은 하중이 인가되었을 때 힘의 전달이 쉬운 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 도로용 압전에너지 하베스터를 도로에 매설할 때 매설 재질에 따른 발생에너지를 평가하고자 하였다. 벤더 형태로 제작한 압전에너지 하베스터를 도로에 노출형태로 매설한 형태와 시멘트와 아스팔트로 매설하였다. 이를 차량 하중과 차량 속도 변화에 따라 발생에너지를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 세단의 경우 차량 속도가 30 km/h까지 증가함에 따라 발생에너지는 15 mJ로 증가하는 경향을 보였으며 이후 속도에서는 15±10% mJ로 유지되었다.
2. 노출형태로 매설하였을 때 발생에너지가 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 아스팔트, 시멘트 순으로 나타났다. 특히, 트럭의 경우 노출형태일 때 차량 속도가 30 m/h인 경우 발생에너지는 24.055 mJ로 가장 컸다.
3. 압전에너지 하베스터의 발생에너지는 차량 하중이 커질수록 증가하였으나, 차량 속도가 증가함에 따라 선형으로 증가하지 않았다.

REFERENCES

[1] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting*

- Technologies* (Springer, New York, 2009).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>]
- [2] A. Erturk and D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting* (John Wiley & Sons, United Kingdom, 2011).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119991151>]
- [3] X. Gao, W. H. Shih, and W. Y. Shih, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 233503 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3521389>]
- [4] H. Shen, J. Qiu, and M. Balsi, *Sens. Actuators A*, **169**, 178 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2011.04.043>]
- [5] W. G. Li and S. He, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **57**, 868 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2030761>]
- [6] H. J. Sun and J. H. Lee, *Bulletin of KIEEME*, **20**, 3 (2007).
- [7] H. C. Song, C. Y. Gang, and S. J. Yoon, *Bulletin of KIEEME*, **23**, 28 (2010).
- [8] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, *Comput. Commun.*, **26**, 1131 (2003).
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7)]
- [9] S. Priya, *IEEE*, **57**, 12 (2010).
- [10] R. A. Islam and S. Priya, *J. Am. Ceram. Soc.*, **89**, 3147 (2006).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01205.x>]
- [11] I. T. Seo, Y. J. Cha, I. Y. Kang, J. H. Choi, S. Nahm, T. H. Seung, and J. H. Paik, *J. Am. Ceram. Soc.*, **94**, 1 (2011).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04210.x>]
- [12] C. I. Kim, Y. H. Jang, Y. H. Jeong, Y. J. Lee, J. H. Cho, J. H. Paik, and S. Nahm, *Appl. Phys. Express*, **5**, 037101 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/APEX.5.037101>]
- [13] I. H. Kim, H. J. Jung, B. M. Lee, and S. J. Jang, *Appl. Phys. Letters*, **98**, 214102 (2011).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3595278>]
- [14] X. Chen, S. Xu, N. Yao, and Y. Shi, *Nano Lett.*, **10**, 2133 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/nl100812k>]
- [15] L. Mateu and F. Moll, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **16**, 835 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X05055280>]
- [16] 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. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 7 (2011).
- [17] C. I. Kim, K. B. Kim, J. H. Jeon, Y. H. Jeong, J. H. Cho, J. H. Paik, I. S. Kang, M. Y. Lee, B. J. Choi, Y. B. Cho, S. S. Park, S. Nahm, and Y. J. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 7 (2012).
- [18] C. I. Kim, K. B. Kim, Y. H. Jeong, Y. J. Lee, J. H. Cho, J. H. Paik, I. S. Kang, M. Y. Lee, B. J. Choi, S. S. Park, Y. B. Cho, and S. Nahm, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 10 (2012).