

압전 캔틸레버 구조와 차량하중 전달방법에 따른 도로용 에너지 하베스터의 설계 및 평가

김창일^{1,5}, 김경범^{1,5}, 정영훈¹, 이영진¹, 조정호¹, 백종후^{1,a},
 강인석², 이무용², 최범진³, 박신서³, 조영봉⁴, 남 산⁵

¹ 한국세라믹기술원 전자소재융합본부

² (주)진우소프트이노베이션

³ (주)센볼

⁴ (주)티오션

⁵ 고려대학교 신소재공학과

Development and Evaluation of the Road Energy Harvester According to Piezoelectric Cantilever Structure and Vehicle Load Transfer Mechanism

Chang-Il Kim^{1,5}, Kyung-Bum Kim^{1,5}, Young-Hun Jeong¹, Young-Jin Lee¹,
 Jeong-Ho Cho¹, Jong-Hoo Paik^{1,a}, In-Seok Kang², Moo-Yong Lee²,
 Beom-Jin Choi³, Shin-Seo Park³, Young-Bong Cho⁴, and Sahn Nahm⁵

¹ Electronic Materials Convergence Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Seoul 153-801, Korea

² JINWOO Soft Innovation, JeJu 690-802, Korea

³ Senbool Inc., Incheon 405-300, Korea

⁴ Tiocean Inc., Incheon 405-848, Korea

⁵ Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received August 10, 2012; Revised September 24, 2012; Accepted September 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 16 piezoelectric cantilevers. We fabricated prototypes using 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 form and underground form. The energy harvester installed in the underground form generated power of 4.52 mJ at the vehicular velocity of 50 km/h. Also, power generation of the energy harvester installed in the vehicle load transfer mechanism form was 48.65 mJ at the vehicular velocity of 50 km/h.

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

1. 서론

진동, 바람 등에 의한 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 압전 에너지 하베스팅에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있으며 [1-5] 저전력의 전자기기가 개발되고 무선화 되면서 배터리를 대체하기 위해 압전 에너지 하베스팅 기술이 주목받고 있다 [6-8]. 압전 에너지 하베스터는 주기적인 진동이 있는 기계류, 건축물, 교량 등에 설치하거나 간헐적인 진동이 있는 차량과 사람의 하중을 이용하기도 한다. 압전재료 물성의 설계를 위해 Priya는 진동원이 공진과 비공진일 때 효과적인 발전량을 얻기 위한 성능 지수를 제시하였으며 [9] 높은 압전 에너지 밀도 특성에 의한 재료적 접근의 연구도 보고되었다 [10,11]. 또한 최대의 발전량을 얻기 위해서 진동원의 공진 주파수에 맞추거나 주파수 대역을 넓게 하려는 연구가 있으며 [12,13] 회로 설계를 통한 발전 에너지를 향상한 연구가 보고되었다 [14,15]. 이에 반해 상대적으로 간헐적인 진동원에 관한 연구가 미비하다. 스마트한 도로를 만들기 위해서 곳곳에 센서가 설치되고 있다. 전기선을 설치하기 어려운 외진 도로에 압전 에너지 하베스터를 설치하여 센서의 전원을 대체 가능하다면 경제적으로 이로운 것이다. 도로용 에너지 하베스터는 압전체를 사용하거나 [16,17] 전자기유도를 사용한 형태의 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 도로용 압전 에너지 하베스터와 차량 하중 전달 장치를 개발하여 압전 에너지 하베스터를 도로에 매설 (수직 힘 전달 방식)하고 동일한 압전 에너지 하베스터를 차량 하중 전달 기구와 결합하여 설치 (수평 힘 전달 방식)하였다. 이를 각각 차량 속도변화에 따라 발전 특성을 비교 및 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 압전 에너지 하베스터 제작

압전 에너지 하베스터는 지면과 수평을 이룬 일반적인 캔틸레버 형태로 제작하였다. 압전체는 변형에 의한 깨짐을 최소화하기 위하여 닥터브레이드로 제작하여 적용하였다. 제작한 압전 시트의 압전 상수 (d_{33})는 419 pC/N이며, 압전 전압 상수 (g_{33})는 22 Vm/N, 전기기계결합계수 (kp)는 0.71, 품질계수 (Q_m)는 80이다. 35 mm × 45 mm × 0.2 mm 크기의 압전

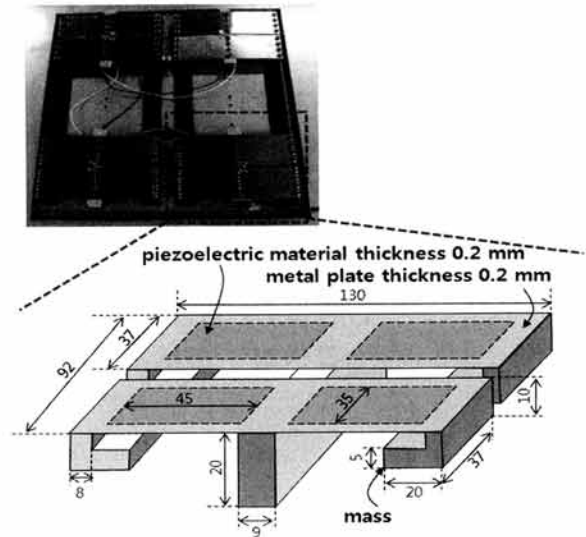


Fig. 1. Schematic diagram and photograph of the piezoelectric energy harvester.

시트 2장을 37 mm × 130 mm × 0.2 mm의 금속판 아래쪽 면에 부착하였다. 진동시간을 길게하기 위하여 금속판 양 끝단에 무게 추를 결합하였으며, 금속판의 가운데 부분을 지지대와 고정하였다. 지지대 4개는 압전 하베스터의 밑판과 결합하였다. 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. 압전 에너지 하베스터의 전체크기는 300 mm × 300 mm × 50 mm이며, 16개의 압전 시트 캔틸레버와 16개의 정류회로로 구성하였다 (그림 1).

압전 에너지 하베스터의 발전특성을 평가하기 위해 47 μ F의 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 발생 에너지를 계산하였다. 발생 에너지의 계산은 식 (1)에 의해 계산하였다.

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

이때, R 은 저항이며, V 는 커패시터 양단의 전압이다.

2.2 무게 추 변화에 따른 발전특성 평가

도로 상에 적용하기 위한 압전 에너지 하베스터의 외부에너지는 주기적인 진동이 아닌 간헐적인 진동원이다. 따라서 외부의 진동원과 하베스터의 공진주파수를 맞추기 보다 외부의 간헐적인 타격으로 압전 캔틸레버의 진동 시간을 늘리는 것이 중요하다. 이에 무게 추의 최적화 작업이 필요하다. 이를 확인하기 위해 그림 2와 같이 무게 추의 수평 길이를 변화시켜 5종류를 제작하였다. 무게 추의 수직 길이를 변화시키면 캔틸레버가 진동할 때 바닥 부분과의 충돌이 예상되어 가로축 방향으로 길이를 변화시켰다. 캔틸레버 끝단과 결합하기 위해 지름 3 mm의 나사골 4개를 냈다. 무게 추 질량과 발전량의 관계를 알아보기 위해 그림 2와 같은 무게 추를 캔틸레버 4개에만 적용하고 회로 연결하여 발전특성을 평가하였다. 발전특성 평가는 압전 하베스터 상단 부분을 수직 방향으로 80 kg의 하중으로 1회 충격에 따른 발전특성을 평가하였다.

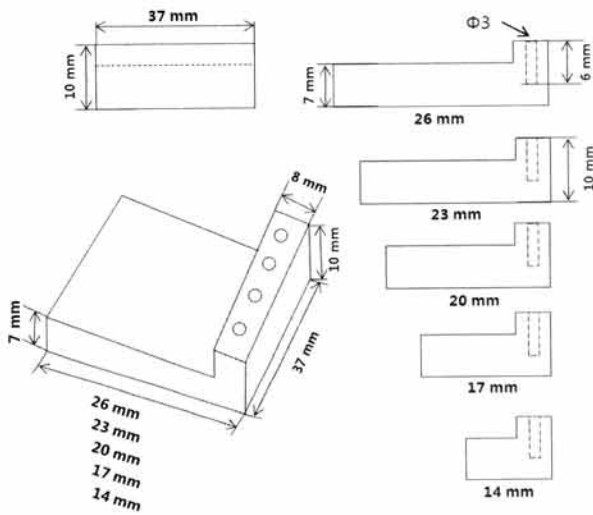


Fig. 2. Schematic diagram of proof mass.

2.3 차량 하중 전달 기구 제작

압전 에너지 하베스터를 도로 하부에 매설하는 방법과 비교하기 위하여 차량 하중을 도로 갓길로 전달하는 기구를 제작하였다. 차량 하중 전달 기구는 차량이 밟는 누름판 (push plate), 금속 수평 막대 (horizontal metal bar), 타격 봉 (hitting rod)으로 구성되어 있다.

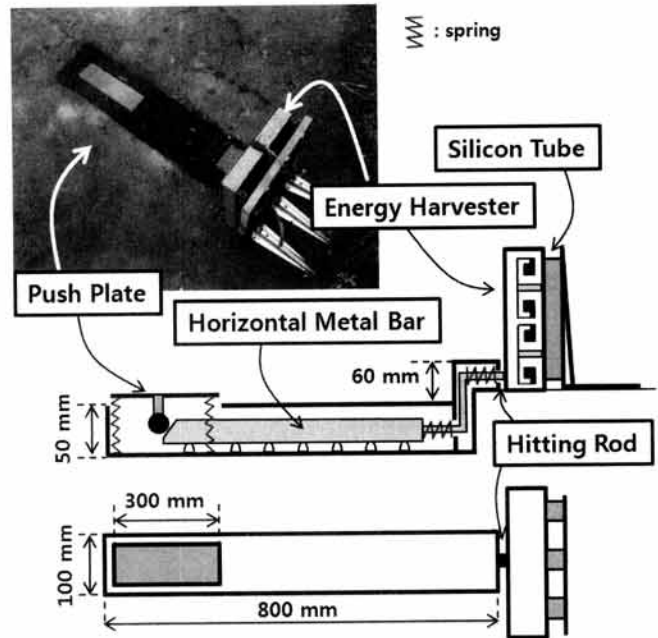


Fig. 3. Schematic diagram and photograph of the vehicle load transfer mechanism and the piezoelectric energy harvester.

누름판, 타격 봉, 압전 에너지 하베스터는 도로상에 노출되어 있으며 금속 수평 막대는 도로 하부에 매설되었다. 차량 하중의 전달 방법은 다음과 같다. 누름판을 차량의 바퀴가 밟게 되면 누름판이 지면에 수직 방향으로 눌러지게 된다. 원형 캠에 의해서 금속 수평 막대가 도로 갓길방향으로 이동하게 되며 이때 금속 수평 막대 하부에 반구의 금속을 설치하여 이동할 때 마찰을 줄였다. 금속 수평 막대 끝단에 연결한 타격 봉이 압전 에너지 하베스터를 타격하여 내부의 압전 시트 캔틸레버가 진동하게 된다. 차량 하중이 제거되었을 때 원래의 상태로 돌아오기 위해서 누름판 하단과 수평 막대 끝단에 스프링을 결합하였으며, 또한 압전 에너지 하베스터 끝단에는 실리콘 고무를 부착하여 타격 후 압전 시트 캔틸레버의 진동시간을 연장하였다. 차량 하중 전달 기구는 도로면 상단에 약 10 mm 가량 돌출되어 있기 때문에 차량 속도가 서행해야 하는 구간, 즉 곡선도로, 고속도로 톨게이트 진입전, 과속방지턱 구간 등에 설치하는 것이 바람직하다.

2.4 도로용 압전 에너지 하베스터 및 차량 하중 전달 기구 매설

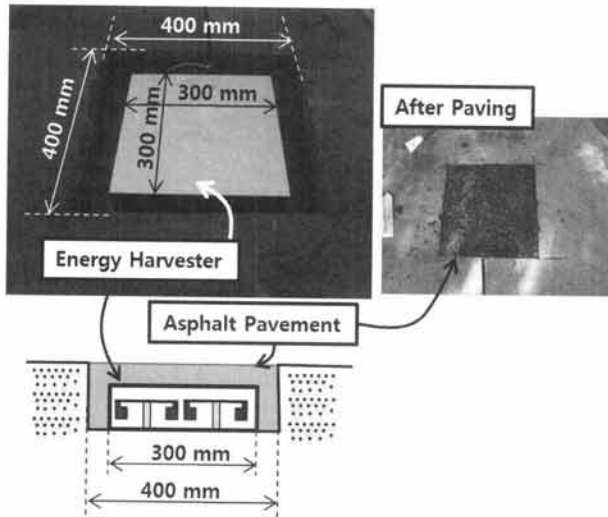


Fig. 4. Schematic diagram and photograph of the piezoelectric energy harvester.

도로용 압전 에너지 하베스터의 매설 및 평가는 현장적용을 위해 아스팔트로 포장된 왕복 2차선 도로에서 진행하였다. 편도 1차선 내에 차량의 왼쪽 바퀴가 밟는 부분에 압전 에너지 하베스터를 매립하였고 (수직 힘 전달 방식, 그림 4), 간격을 두고 차량의 오른쪽 바퀴가 밟는 부분에 차량 하중 전달 기구를 매립하고 그 끝단에 압전 에너지 하베스터를 결합 (수평 힘 전달 방식, 그림 3)하였다.

그림 4는 도로에 매설한 압전 에너지 하베스터를 나타낸다. 300 mm × 300 mm × 50 mm 크기의 압전 에너지 하베스터를 매설하기 위해 400 mm × 400 mm × 100 mm로 도로 포장재를 절단하였다. 절단한 곳에 압전 에너지 하베스터를 가운데 위치시키고 빈공간을 아스콘으로 포장하였다. 작동방식은 차량의 하중에 의해 수직방향의 힘이 압전 에너지 하베스터에 전달되면 지면에 수평으로 위치한 압전 캔틸레버가 진동하여 전하가 발생하게 된다. 매립 후 기존의 도로면과 수평을 이루어 포장하였으며, 이는 차량이 고속으로 통행 가능한 설치 방법이다.

2.5 도로용 압전 에너지 하베스터의 발전특성 평가

도로용 압전 에너지 하베스터의 발전특성을 평가하기 위하여 정류회로에서 나오는 출력 부분에 10 kΩ 저항과 캐패시터 47 μF를 병렬 연결하였다. 전체 중량 1.9톤의 차량으로 매설된 압전 에너지 하베스터와

차량 하중 전달 기구의 누름 판에 힘을 인가하였다. 차량의 속도를 각각 10, 20, 30, 40, 50 km/h로 등속 주행하였으며, 이는 압전 에너지 하베스터를 매설한 도로의 최대 주행 속도가 50 km/h 이내의 환경이었다. 차량의 한쪽 면 앞, 뒷바퀴에 의해 연속 2회 하중이 인가되었을 때 캐패시터 양단에 발생한 전압을 오실로스코프로 측정하였다. $P=V^2/R$ 식을 사용하여 시간에 대한 전력 그래프를 그린 뒤 이를 시간에 대하여 적분하여 발생 에너지를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 무게 추 길이 변화에 따른 발전특성

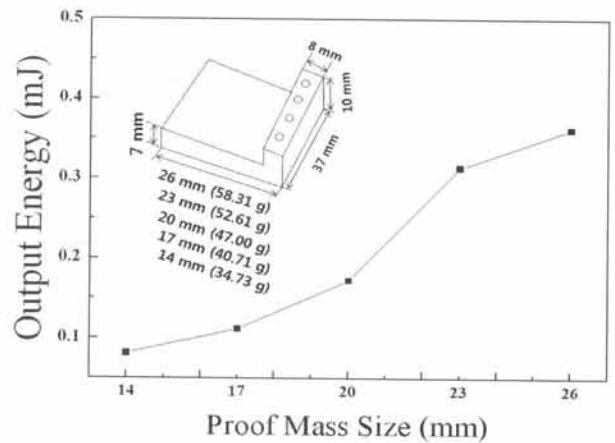


Fig. 5. Output energy as a function of the proof mass size at 10 kΩ.

그림 5는 압전 에너지 하베스터의 16개 압전 시트 캔틸레버 중 4개만 회로 연결을 하고, 무게 추를 그림 2와 같이 변화시킴에 따른 발전특성을 나타낸다. 무게 추 한쪽 길이를 14, 17, 20, 23, 26 mm로 늘려감에 따라 발전량은 증가하였다.

그림 6은 시간 경과와 무게 추와의 발전특성을 나타낸다. 무게 추 조립 후 초기 측정값에서 시간이 지남에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 특히 50일 경과 후 한쪽 길이가 23, 26 mm인 무게 추는 발전에너지가 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 이는 압전 캔틸레버에 결합한 무게 추에 의해 중력 방향으로 금속판의 변형이 발생하여 발생 에너지를 감소시킨 것으로 판단된다.

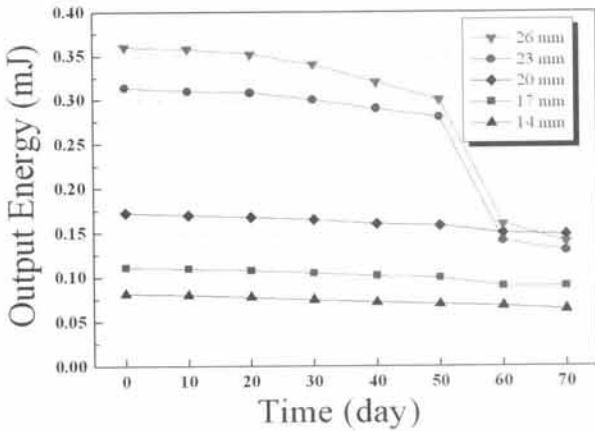


Fig. 6. Output energy as a function of the proof mass size and time at 10 kΩ.

무게 추 길이가 26 mm이었을 때 초기 발생 에너지가 가장 컸지만, 시간에 따른 발전량 감소를 고려하여 압전 에너지 하베스터에 적용할 무게 추 길이를 20 mm로 결정하였다.

3.2 도로용 압전 에너지 하베스터의 발전 특성

그림 7은 수직 힘 전달 방식과 수평 힘 전달 방식의 하베스터를 50 km/h의 속도로 차량의 한쪽 앞, 뒷 바퀴로 밟고 지나갈 때 발생하는 전력그래프를 나타낸다. 2개의 피크가 나타나는 것은 차량이 1회 지나갈 때 차량의 한 쪽면 앞 바퀴와 뒷 바퀴가 밟게되어 압전 에너지 하베스터에 2회의 충격이 가해지게 되어 압전체를 변형시켜 전하가 발생되기 때문이다. 수직 힘 전달 방식은 아스콘으로 매립되어있어서 차량 하중이 상대적으로 전달되기 힘든 반면 수평 힘 전달 방식은 하베스터 끝단에 설치한 실리콘에 의해 하베스터의 진동을 크게 하였으며 결과적으로 압전 캔틸레버의 여진이 상대적으로 오래 지속되어 수직 힘 전달 방식에 비해 발생에너지가 큰 것으로 판단된다.

그림 8은 차량 속도 변화와 압전 에너지 하베스터의 힘 전달 방식에 따른 발생 에너지를 나타낸다. 차량의 속도가 증가함에 따른 발생 에너지는 수평 힘 전달 방식이 수직 힘 전달 방식보다 큰 증가율로 증가하였다. 이는 동일 하중 (차량 1.9 톤)이지만 타격 가속도가 증가하여 압전 에너지 하베스터에 인가된 외부 힘이 세졌기 때문이다. 차량 속도에 따른 발전 에너지의 증가율은 수직 힘 전달 방식은 0.06이었으며,

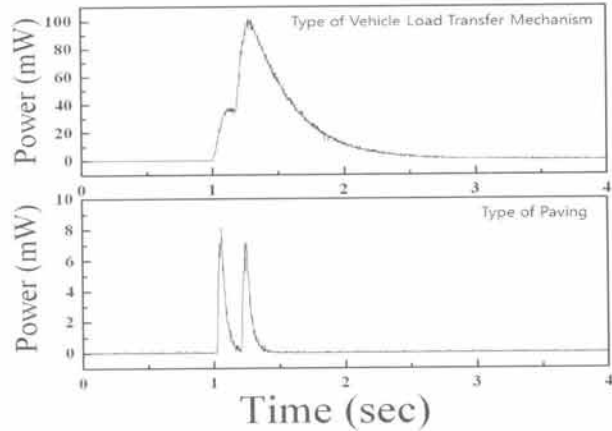


Fig. 7. Output power as a function of vehicle speed 50 km/h at 10 kΩ.

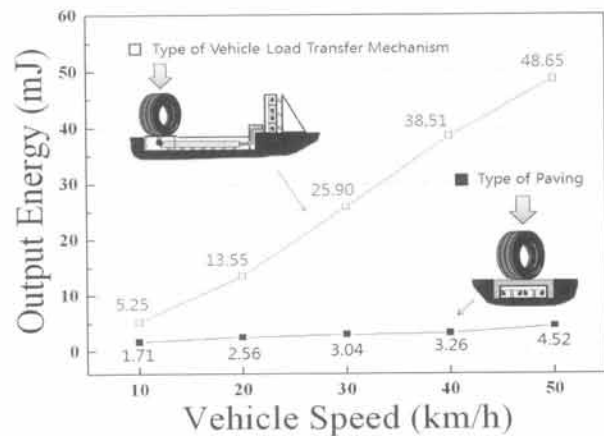


Fig. 8. Output energy as a function of vehicle speed at 10 kΩ.

수평 힘 전달 방식은 1.12이었다. 수직 힘 전달 방식의 압전 에너지 하베스터의 발생에너지가 적은 것은 아스콘으로 도로 포장되었기에 차량 하중 전달이 어렵기 때문으로 판단된다. 무게 추 한쪽 면 길이가 20 mm이고 차량 속도가 50 km/h 일 때 수직 힘 전달 방식은 4.52 mJ의 발생 에너지를 얻었으며 수평 힘 전달 방식은 48.65 mJ의 발생 에너지를 얻었다.

4. 결론

본 연구에서는 압전 캔틸레버를 이용한 압전 에너지 하베스터와 차량 하중 전달 기구를 제작하였으며,

압전 에너지 하베스터를 도로에 직접 매설한 형태 (수직 힘 전달 방식)와 차량 하중 전달 기구를 통하여 압전 에너지 하베스터를 타격하는 형태로 설치한 형태 (수평 힘 전달 방식)를 차량 속도 변화에 따라 발전 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수직 힘 전달 방식과 수평 힘 전달 방식 모두 차량 속도가 증가함에 따라 발전량도 증가하였다.
2. 차량 속도가 증가함에 따라 발전량은 수평 힘 전달 방식이 수직 힘 전달 방식보다 모든 차량 속도에서 크게 나타났다.
3. 무게 추 한쪽 면 길이가 20 mm이고 차량 속도가 50 km/h일 때 수직 힘 전달 방식은 4.52 mJ의 발생 에너지를 얻었으며 수평 힘 전달 방식은 48.65 mJ의 발생 에너지를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 일부 저자는 본 연구가 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 부분적 지원을 받아 수행한 신재생 에너지 기술개발사업 연구과제 (No. 2010T100101097)임을 알리며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies* (Springer, New York, 2009).
- [2] A. Erturk and D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting* (John Wiley & Sons, United Kingdom, 2011).
- [3] X. Gao, W. H. Shih, and W. Y. Shih, *Appl. Phys. Lett.*, 97, 233503 (2010).
- [4] H. Shen, J. Qiu, and M. Balsi, *Sensor. Actuat.*, A169, 178 (2011).
- [5] W. G. Li and S. He, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57, 868 (2010).
- [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).
- [9] S. Priya, *IEEE*, 57, 12 (2010).
- [10] R. A. Islam and S. Priya, *J. Am. Ceram. Soc.*, 89, 3147 (2006).
- [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).
- [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).
- [13] I. H. Kim, H. J. Jung, B. M. Lee, and S. J. Jang, *Appl. Phys. Lett.*, 98, 214102 (2011).
- [14] X. Chen, S. Xu, N. Yao, and Y. Shi, *Nano Lett.*, 10, 2133 (2010).
- [15] L. Mateu and F. Moll, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 16, 835 (2005).
- [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. KIEEME*, 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. KIEEME*, 25, 7 (2012).