Regular Paper
J. KIEEME
Vol. 27, No. 12, pp. 857-862 December 2014
DOI: http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2014.27.12.857
ISSN 1226-7945 (Print), 2288-3258 (Online)

증속기어 모듈을 이용한 발판형 에너지 하베스터의 설계 및 제작

민철홍[1], 김태선[2,a]

[1] 가톨릭대학교 컴퓨터공학과
[2] 가톨릭대학교 정보통신전자공학부

Design and Fabrication of Scaffold Type Energy Harvester Using Multiplying Gear Module

Chul Hong Min[1] and Tae Seon Kim[2,a]

[1] School of Computer Science and Engineering, The Catholic University of Korea, Bucheon 420-743, Korea
[2] School of Information, Communications and Electronics Engineering, The Catholic University of Korea, Bucheon 420-743, Korea

(Received October 10, 2014; Revised October 28, 2014; Accepted October 31, 2014)

Abstract: In this paper, we designed and fabricated electromagnetic induction based scaffold type energy harvester. For energy harvesting, mechanical energy of vertical motion is transferred to rotational energy using rack gear and multiplying gear was used to maximize energy transfer. To optimize design parameters, physical structure of energy harvester was modeled using finite element method. The effect of multiplying gear ratio and frequency levels of applied mechanical energy on energy generation efficiency are analyzed by computer simulation and experimental test. Experimental results showed that maximum 25.36 W of electric power can be achieved at the frequency of 2 Hz and 1:77 of gear ratio with only 5 mm of vertical changes on scaffold structure.

Keywords: Energy harvester, Electromagnetic induction, Scaffold type, Multiplying gear module

1. 서 론

에너지 하베스터 기술은 자연 및 주변에너지를 환경오염 없이 그대로 활용할 수 있는 친환경 에너지 기술로써 최근 그 소재와 구조의 발전과 저전력 기술이 적용된 각종 전자기기들이 지속적으로 개발되면서 다양한 분야에 이 기술을 적용하려는 연구가 꾸준히 진행되고 있다 [1]. 현재 연구되고 있는 에너지 하베스터는 발생 전력과 응용 분야에 따라 마이크로 스케일 (micro-scale)과 매크로 스케일 (macro-scale)의 에너지 하베스터로 구분할 수 있다 [2].

일반적으로 하베스터의 크기는 발생전력과 직접적인 연관이 있기 때문에 하베스터의 크기가 클수록 큰 전력을 발생시킬 수 있다. 따라서 마이크로 스케일의 에너지 하베스터는 작은 전력을 요구하는 휴대용 전자기기나 센서노드 등과 같은 곳에 활용되고 있으며, 매크로 스케일의 에너지 하베스터는 큰 전력을 요구하는 산업이나 가정용 에너지 수확장치 등으로 응용되고 있다 [3-6]. 그 중 매크로 스케일의 에너지 하베

a. Corresponding author: tkim@catholic.ac.kr

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

스터는 주로 사람이나 자동차와 같이 큰 움직임이나 진동을 통하여 에너지를 수확하기 때문에 자동차나 도로, 인도 (人道) 등에 부착·매립한 형태의 연구가 주로 진행되고 있으며, 대부분은 압전 (piezoelectric) 방식으로 연구가 진행되고 있다 [7-9]. 주로 도로나 인도에 매립목적으로 연구되고 있는 압전방식의 에너지 하베스터의 경우 효율을 높이기 위한 다양한 구조가 연구되고 있지만 현재까지 에너지 변환 효율이 높지는 못한 형편이다.

본 논문에서는 실제 응용이 가능한 높은 에너지 변환효율과 낮은 주파수에서도 전력 발생이 가능한 전자기유도 방식의 기어형 에너지 하베스터를 제안한다. 제안한 기어형 에너지 하베스터는 외부 하중에 의해 하베스터의 발판이 눌리면 이때 발생되는 수직운동을 랙 기어 (rack gear)를 이용하여 회전운동으로 변경하고, 변경된 회전운동은 증속 기어모듈을 통하여 더 높은 회전수로 발전기에 동력이 전달되는 원리를 이용하여 제작되었다. 제작에 앞서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 제안한 하베스터의 구조와 효율을 검증하기 위해 모형화를 하였고, 그 결과를 기반으로 기어모듈을 설계하였다. 증속 기어모듈의 기어비는 1:29, 1:50, 1:77로 설정하여 0.5 Hz에서 2 Hz까지 0.5 Hz씩 주파수를 변화시키며 발판이 눌린 횟수에 따른 발생전력을 실험하였다. 기어비와 발판의 눌림 횟수에 따른 발생전력을 실험한 결과 기어비가 1:77이고 주파수가 2 Hz인 환경에서 최대 25.36 W의 전력이 발생되었다. 제안한 기어형 에너지 하베스터는 건물의 입구나 지하철 개찰구와 같이 유동인구가 많은 곳의 설치를 목적으로 개발하였으며, 높은 에너지 변환 효율을 가지므로 인적이 드믄 도로나 인도 등의 방향지시등 혹은 가로등으로 활용이 가능할 것으로 기대한다.

2. 실험 방법

2.1 하베스터의 구조

제안한 기어형 에너지 하베스터는 발전기 모듈, 프레임기어와 랙기어 모듈, 증속 기어모듈, 그리고 정류회로로 분류할 수 있다. 그림 1과 같이 외부에서 구조물의 상단에 수직으로 힘이 작용하게 되면 전체 프레임 (frame)이 수직방향으로 하강운동을 하게 되며 정해진 길이만큼 하강하게 된다. 그리고 프레임을 누르는 외부 힘이 사라지게 되면 프레임 바닥에 위치한 스프링에 의해 원래의 위치로 프레임이 돌아오게 된다. 이때 프레임의 수직운동은 랙기어를 통해서 증속 기어 모듈을 회전시키게 되며, 증속 기어모듈은 발전기와 연결되어 높은 회전비로 발전기를 회전시키게 된다. 이러한 구조로 하나의 프레임에 두개의 발전기가 부착되게 되며, 한 개의 하베스터에 두개의 프레임이 부착되어 한 번의 수직운동에 총 네 개의 발전기모듈이 구동되게 된다. 설계된 크기는 100×100×100 ㎜^{3}이며, 바닥 설치가 용이하게 정육면체 형태로 설계하였다.

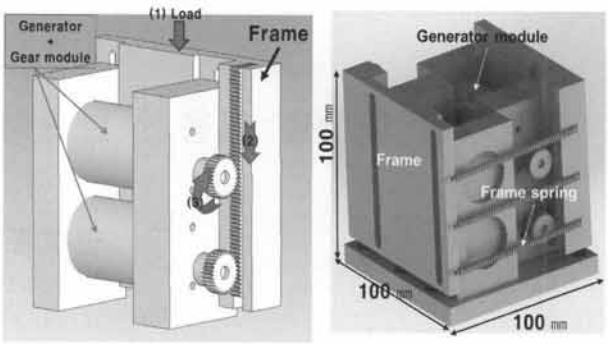

Fig. 1. Structure of designed scaffold type energy harvester.

2.1.1 발전기 모듈

발전기 (generator) 모듈은 솔레노이드 코일 (solenoid coil)과 발전기 코어 (generator core) 그리고 자석으로 구성된다. 자석은 발전기의 외각 케이스와 같이 배치되고, 발전기 코어에 솔레노이드 코일이 감긴 형태로 회전자가 구성된다. 전체 발전기의 크기는 Φ 30×40 ㎜의 원통형이며, 솔레노이드 코일은 직경 0.2 ㎜의 구리선이 사용되었다. 감은 수는 1,400회, 자석의 세기는 0.54 Tesla, 발전기 코어의 두께는 3 ㎜로 설계되었다.

2.1.2 프레임 기어와 랙기어 모듈

제안한 기어형 에너지 하베스터는 사용자가 발판을 밟을 때 발생하는 운동에너지를 전기에너지로 변환할 목적으로 제작되었다. 이때, 하베스터의 프레임을 사용자가 밟을 때 눌리는 변위가 크게 되면 발전량의

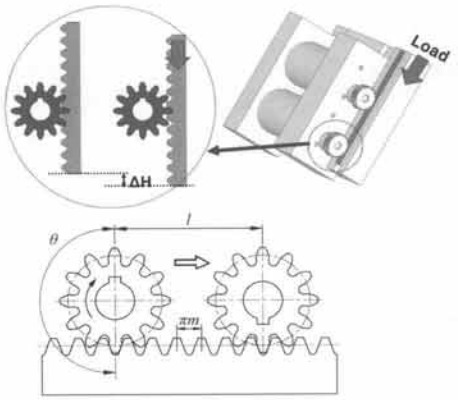

Fig. 2. Relation of moving distance between rack gear and pinion gear.

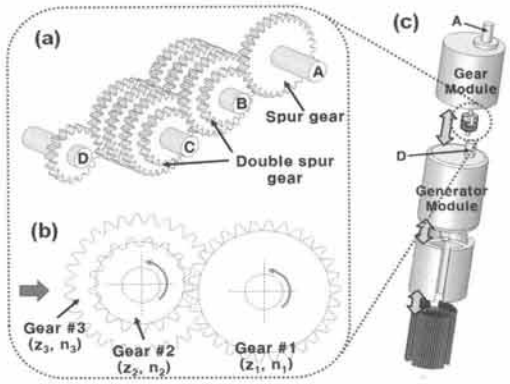

Fig. 3. Structure of generator and speed multiplying gear module. (a) speed multiplying gear module, (b) two-spur gear, and (c) generator module with speed multiplying gear module.

증가에는 도움이 되나 사용자에게 거부감을 줄 수 있다. 따라서 본 시스템에서는 사용자 편이성을 고려하여 발판을 밟았을 때의 프레임이 움직이는 높이 변위(ΔH)를 5 ㎜로 고정하였다. 실제 프레임이 움직인 변위 (ΔH)는 발전기의 회전수와 직접적인 연관이 있기 때문에 본 논문에서는 제안된 프레임 변위 (ΔH)에서 큰 효율을 얻기 위해 발전기의 앞부분에 증속 기어모듈을 추가하여 효율을 극대화 하였다. 그림 2에 보인 바와 같이 프레임에 부착된 랙 기어와 피니온(pinion) 기어와의 운동 관계식은 식 (1)과 같다 [10].

$$l = \frac{z_1\theta}{360} \times \pi m\ , \quad \theta = \frac{360 \times l}{z_1 \times \pi m} \tag{1}$$

여기서, l은 랙기어의 이동량, z_1은 피니온 기어의 잇수, θ는 피니온의 이각도, πm은 기어의 피치를 의미한다. 제안한 에너지 하베스터를 기준으로 피니온 기어와 랙기어 모듈 m을 0.5로 하고, 피니온 기어의 지름을 16 ㎜, z_1을 60으로 설계하고, 프레임 (랙기어)의 이동거리가 5 ㎜라고 가정하였을 경우 피니온 기어의 회전각도는 약 38.46°가 된다.

2.1.3 증속기어 모듈

프레임이 5 ㎜ 눌렸을 때 피니온 기어의 회전은 약 38.46°로 전체 360° 중 약 1/9의 회전만 발생하게 된다. 따라서 랙기어의 작은 변위로 큰 회전수를 얻기 위해 본 논문에서는 발전기의 앞단에 증속 기어모듈을 부착하였다. 증속 기어모듈은 그림 3과 같이 1단 평기어와 2단 평기어로 구성되며, 증속비에 따라 기어의 개수를 조절할 수 있다. 서로 맞물린 두 개의 평기어 속도 전달비 i는 다음 식 (2)와 같다 [10].

$$i = \frac{z_1}{z_2} = \frac{n_2}{n_1} \tag{2}$$

여기서, z는 기어의 잇수이며, n는 기어의 회전수를 의미한다. 여기서 속도 전달비 i의 크기가 1보다 작으면($i<1$) 증속 기어이며, $i=1$이면 등속 기어, $i>1$이면 감속 기어를 의미한다. 만약 그림 3의 (b)에서 Gear #2와 Gear #3가 같은 2단 기어의 경우 기어의 회전수 n_2와 n_3는 같다.

증속 기어모듈은 기어비에 따라 기어의 개수가 변하게 된다. 만약 1:77 비율로 증속 기어모듈을 설계할 경우 그림 3의 (a)와 같이 1단의 평기어 2개와 2단 평기어 6개를 사용하게 된다. 목표로 하는 증속비율과 기어모듈의 크기에 따라 기어의 모듈값 m을 먼저 결정하고, 그 후 기어의 지름에 따른 잇수를 설정하게 된다. 잇수를 설정하면 증속비율에 따라 기어의 개수를 결정하게 되는데 잇수와 기어의 개수에 따른 증속비율 v는 다음 식 (3)과 같은 관계식을 갖는다 [10].

$$v = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{m_i - 1} \tag{3}$$

여기서, z는 기어의 잇수이며, m_i은 기어의 개수이다.

제안한 에너지 하베스터는 기어의 잇수와 개수를 조절하는 방식으로 1:29, 1:50, 1:77의 증속비율을 갖는 기어모듈을 제작하였으며, 제작된 증속기어 모듈은 그림 3의 (c)와 같이 발전기와 결합되어 발전기 모듈 (generator module)로 구성된다.

2.2 정류회로 구성

제안한 기어형 에너지 하베스터의 경우 다이오드의 문턱전압 이상으로 전압이 발생되므로 상용화된 일반적인 정류소자 (KBPC808)를 이용하여 정류회로를 구성하였다. 정류회로의 구성은 그림 4의 (a)와 같이 네 개의 발전기모듈을 직렬로 연결하고, (b)와 같이 서로 연결된 발전기 모듈은 정류소자를 통하여 교류를 직류로 변환시켰다.

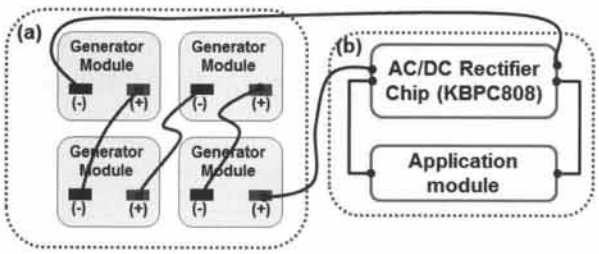

Fig. 4. Block diagram of electrical connection of generator modules and rectifier circuit.

2.3 하베스터의 효율 시뮬레이션

제안한 에너지 하베스터의 구조 및 효율 검증을 위해 COMSOL Multiphysics를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 진행하였다. 제안한 하베스터의 변수 설정은 표 1과 같으며, 한 개의 발전기 모듈만을 고려하여 시뮬레이션을 진행하고 발전기 모듈의 수만큼을 배수하여 효율 검증을 진행하였다.

시뮬레이션을 위한 구조 설계는 코어를 외부에 두고 자석을 회전시키는 방법으로 설계하였으며, 증속기어모듈의 증속비를 감안하여 회전체의 회전수(rpm)를 조절하였다. 기어 증속비가 1:77 경우 프레임이 5 ㎜ 이동하면 발전기 코어는 8.26회 회전하게 되며, 이때의 회전수를 계산하여 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 이와 동일하게 프레임이 원상복귀 되면서도

Table 1. Modeling parameters for computer simulation.

Parameters	Values	Units
Generator size	Φ30 × 40	㎜
Coil thickness	0.2	㎜
Coil material	Copper	
Number of turns	1,400	turn
Magnetic flux density	0.54	T
Magnetic material	Samarium cobalt ($SmCo_5$)	
Frequency	0.5 ~ 2	Hz

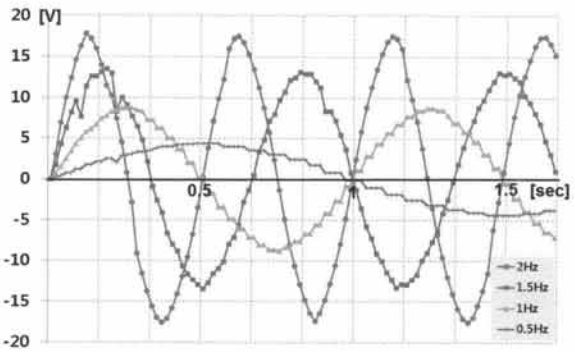

Fig. 5. Simulation results of generated output voltages on various frequency levels.

코어에 반대방향의 회전이 걸리게 되는데 이때도 프레임이 눌렸을 때와 똑같은 회선 수가 가해졌다고 가정하여 회전방향을 반대로 시뮬레이션을 진행하였다.

설계한 발전기 모듈에 대하여 자기유도에 따른 전계의 세기를 계산하면 발전기 모듈에서 발생되는 전압을 식 (4)와 같이 자성체의 자화에 따른 전계강도의 세기와 감은 도선에 따른 관계식으로 표현할 수 있다 [11].

$$V_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{L}{A} \int \boldsymbol{E}_z \, dA \quad [V] \tag{4}$$

여기서, $\boldsymbol{E}_z$는 z방향에 대한 전계강도의 크기이며, L은 도선의 길이, A는 도선의 면적, N은 감은수를 각각 나타낸다.

유한요소법을 이용한 분석 도구인 Multiphysics를 이용하여 제안한 에너지 하베스터의 구조와 내부 변수, 그리고 외부운동에 따른 구조 변화 등을 정의하고 관련수치들을 입력하여 자기유도에 따른 전계의 세기를 추출했다. 이와 같은 방법으로 시뮬레이션을 진행

한 결과 그림 5와 같이 정현파 (sine curve) 형태의 교류전압이 주기적으로 발생되는 것을 확인하였다.

그림 5는 네 개의 발전기에서 발생되는 하베스터 전체의 발생전압을 주파수에 따라 시뮬레이션을 진행한 결과이며, 이때 부하저항은 없다고 가정하였다. 분석결과를 보면 발판 (프레임)을 누르는 초 당 횟수가 2회 (2 Hz)의 경우 최대 발생전압이 약 18 V이고, 이때 실효값 V(eff)은 12.72 V가 발생하였다. 또한, 초당 횟수가 0.5회의 상황에서 발생되는 최대 전압은 약 4.5 V이며, 실효값은 3.18 V가 발생되는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과 발판을 누르는 횟수가 빠를수록 즉, 전력발생 주파수가 증가할수록 발생전압 또한 증가하는 것을 볼 수 있다.

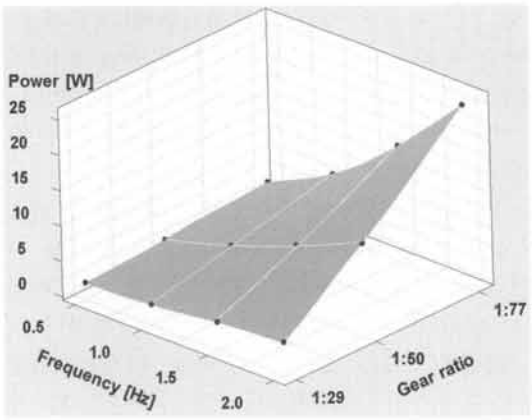

Fig. 6. Effects of frequency and speed multiplying gear ratio on output power.

3. 결과 및 고찰

3.1 효율 분석

제작한 에너지 하베스터의 발생전력을 실험하기 위해 1:29, 1:50, 1:77의 비율을 갖는 세 가지의 발전기 모듈을 제작하였고, 일반적으로 사용자가 하베스터를 밟을 때 발생하는 주파수를 감안하여 0.5~2 Hz까지 0.5 Hz씩 주파수를 증가시키며 실험을 진행하였다 [10]. 실험에 사용한 부하저항은 최대 전력전달 조건에 따라 내부저항과 동일한 33 Ω의 저항을 사용하여 발생되는 최대 전력을 측정하였다. 발생된 전력값은 식 (5)를 이용하여 실효전압을 계산한 후 그 값을 이용하여 식 (6)과 같이 실효전력을 계산하였다.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{L+1}\sum_{k=0}^{L}(V_L[k])^2} \tag{5}$$

$$P_{RMS} = V_{RMS}^2 \ / \ R \tag{6}$$

여기서, L은 실험 횟수이며, R은 부하 저항이다.

그림 6은 부하저항 33 Ω에서 주파수와 증속 기어비에 따른 유효전력을 분석한 그래프이다. 분석 결과를 보면 기어비가 증가할수록 발생전력은 기어비에 비례하여 증가하는 특성을 보이며, 주파수가 증가할수록 지수함수 형태로 전력이 발생하는 것을 확인하였다. 제안한 에너지 하베스터의 최대전력은 증속 기어비 1:77, 부하저항 33 Ω, 주파수 2 Hz에서 최대 25.36 W의 유효전력이 발생되었다.

Table 2. Experiment results of output power at load resistance with 33 Ω. (Unit : W)

Gear ratio	Frequency (Hz)			
	0.5	1	1.5	2
1:29	1.88	2.39	3.50	4.19
1:50	2.53	5.25	8.90	12.81
1:77	3.59	8.34	15.91	25.36

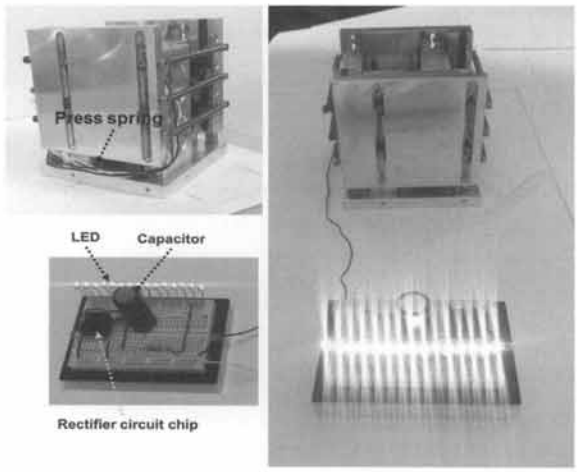

Fig. 7. Picture of the developed energy harvesters.

표 2는 증속 기어비와 주파수에 따라 측정된 발생전력을 정리한 데이터이다.

그림 7은 제작된 에너지 하베스터에 정류회로 칩을 부착하고 3,200 μF 용량의 커패시터 (capacitor)를 이용하여 발광다이오드 (LED)를 점등하는 사진으로 제안한 기어형 에너지 하베스터의 발판을 1회 밟았을 때 15개의 발광다이오드를 약 20초 정도 점등할 수 있다. 본 논문에서 제안한 기어형 에너지 하베스터의 경우 실제 1:77 이상의 기어비를 갖는 모듈을 제작하여 실험을 진행하였으나 1:77 이상의 기어비에서는 일반 성인이 하중을 주었을 때 원활한 회전이 이루어지지 않았다. 이는 높은 회전비에 따른 기어모듈의 부하로 분석하고 있으며, 이러한 증속기어의 부하는 기어의 마모, 즉 기어의 수명으로 이어지기 때문에 추후 기어의 내구성에 대한 추가 실험이 필요할 것으로 본다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존 압전방식의 에너지 하베스터 대비 높은 에너지 효율과 낮은 주파수에서도 전력 발생이 가능한 전자기유도 방식의 에너지 하베스터를 제안하였다. 제안한 에너지 하베스터는 외부 하중에 의해 발판이 눌리면 이때 발생되는 수직운동을 랙기어를 이용하여 회전운동으로 변경하고, 변경된 회전운동은 증속 기어모듈을 통하여 더 높은 회전수로 발전기에 동력을 전달하는 원리로 제작되었다. 제안한 에너지 하베스터의 효율을 검증하기 위해 시뮬레이션을 통한 모형화를 진행한 후 증속기어 모듈의 기어비 (1:29, 1:50, 1:77)와 주파수에 따른 발생전력을 실험하였다. 제안한 에너지 하베스터는 부하저항 33 Ω, 기어비 1:77, 주파수 2 Hz에서 최대 25.36 W의 전력이 발생하였으며, 이때 정류회로에 커패시터와 발광다이오드를 연결하여 발광다이오드의 점등을 확인하였다. 제안한 하베스터는 캔틸러버 타입의 압전에너지 하베스터처럼 공진주파수를 맞출 필요가 없고, 낮은 주파수에서도 유효전력 발생이 가능하여 유동인구가 많은 건물이나 지하철, 도로와 같은 곳에 설치하여 에너지를 수확할 수 있을 뿐만 아니라 화재나 비상시에 공공시설의 비상 전력원으로 활용이 가능할 것으로 기대하며 현재 본 구조는 '전자기 유도 방식을 이용한 발판형 에너지 하베스터'의 명칭으로 특허출원 중이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2011-0006648). 본 연구는 2014년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

REFERENCES

[1] S. Roundy, E. S. Leland, J. Baker, E. Carleton, E. Reilly, E. Lai, B. Otis, J. M. Rabaey, P. K. Wright, and V. Sundararajan, *Pervasive Computing*, 4, 28 (2005).
[2] A. Toprak and O. Tigli1, *Appl. Phys. Rev.*, 1, 031104 (2014).
[3] X. Wang, J. Song, and Z. L. Wang, *Science*, 316, 102 (2007).
[4] M. T. Penella and M. Gasulla, *IMTC Proc.*, 1 (2007).
[5] A. Phipps, *2011 IEEE Sensors*, 24 (2011).
[6] K. F. Mihaj and K. B. Ching, *Technical Vocational Education & Training (CiE-TVET)*, 2 (2013).
[7] C. Cepnik, *International Solid-State Sensors*, 661 (2011).
[8] 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).
[9] 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. KIEEME*, 25, 773 (2012).
[10] Techno-Engineering Technology Lab., *Engine- erbooks*, 290 (2013).
[11] C. H. Min and T. S. Kim, *J. KIEEME*, 22, 918 (2009).