

# 저주파수에서 고출력을 갖는 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 설계 및 해석

정귀상<sup>+</sup> · 류경일

## Design and Analyses of Vibration Driven Electromagnetic Energy Harvester with High Power Generation at Low Frequency

Gwiy-sang Chung<sup>+</sup> and Kyeong-il Ryu

### Abstract

This paper describes the design and analyses of vibration driven electromagnetic energy harvester with high power generation which is suitable for supplying power generator from human body motion. The proposed harvester consists of magnet, coil, and SM (Soft magnetic Material). In order to generate more induced voltage, the SM to concentrate flux lines from end of magnetic poles was arranged into insert moving magnet. Each model was designed and analyzed by using ANSYS software to simulation. The maximum power is generated when load resistance of 1303  $\Omega$  is equal to coil resistance. The generated maximum power of for harvesters with SM is 677.85  $\mu$ W and 5.46 times higher than without SM at 6 Hz vibration frequency.

**Keywords :** Energy Harvester, Electromagnetic, Vibration, Soft magnetic Material

### 1. 서 론

에너지 하베스팅은 주변 환경으로부터 에너지를 수확하여 이를 이용하는 방법으로 기존의 배터리 충전 및 기기 동작을 위한 에너지원으로 사용이 가능하다. 특히, 무선 자율센서 및 통신 모듈과 같은 소형 전자기기용 전원중 하나로 활발히 연구되고 있다[1]. 더구나, 진동형 에너지 하베스팅은 단순 또는 복잡한 움직임이 발생하는 환경에서 시간적, 공간적 제약 없이 지속적으로 사용 가능하며 집적화, 초소형화, 저가격화가 가능하기 때문에 자가 발전 장치의 발전 방법으로 대단히 유용하다[2].

이러한 에너지 하베스터는 소재와 변환 방식에 따라 크게 정전형, 압전형, 전자기형으로 분류할 수 있으며 정전형은 제작 및 집적화가 용이하지만, 낮은 에너지 변환효율과 초기에 외부 전압원이 필요로 하기 때문에 소형 전원으로 적합하지 않다. 또한, 압전형의 경우에는 소형화가 용이하고 외부 전원이 불필요하지만, 높은 임피던스와 수백 Hz의 높은 주파수에서 동작하기 때문에 압전 물질의 파손의 위험성이 존재한다. 한편, 전자기형은 구조 및 제작이 간단하며 에너지 변환 효율이 비교적 낮음에도 불

구하고 저주파수에서 동작이 가능하기 때문에 최근 휴대용, 착용식 및 이동형 소형 전자기기의 에너지원으로 많은 연구가 이루어지고 있지만, 소형화에는 한계가 있다[3].

현재까지 연구된 원통형 전자기식 에너지 하베스터는 주로 70 Hz 이상의 동작 주파수에서 20 ~ 40  $\mu$ W의 낮은 전력을 발생함으로써 사람의 움직임과 같은 10 Hz 이하의 진동을 이용하는 에너지원으로 실제 사용하기에는 부적합하다[4,5].

따라서, 본 논문은 자석과 자석 사이에 SM(Soft magnetic Material)를 내장함으로써 자기력선을 집중시켜 자속밀도를 증가시키는 원리를 적용한 고효율 진동형 전자기 에너지 하베스터의 모델과 설계에 관한 것이다.

### 2. 모델링

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 SM이 내장된 진동 구동식 원통형 전자기 에너지 하베스터를 도식적으로 나타낸 것으로 하우징의 양단에 자석을 고정시키고 그 사이에 이동자석을 위치시켜 움직일 수 있도록 하였다. 또한, 하우징의 중심에 코일을 감아 외력에 의하여 하우징이 진동할 때 이동자석이 상하로 진동하여 코일에서 유도기전력이 발생하게 된다. 제안한 구조는 빔과 같은 기계적 구조물 없이 자석과 코일만으로 구성되어 있기 때문

울산대학교 전기전자정보시스템공학부 (School of Electrical Eng., University of Ulsan)

<sup>+</sup>Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr

(Received : May. 10, 2010, Revised : Jul. 9, Jul. 26, 2010,

Accepted : Aug. 2, 2010)

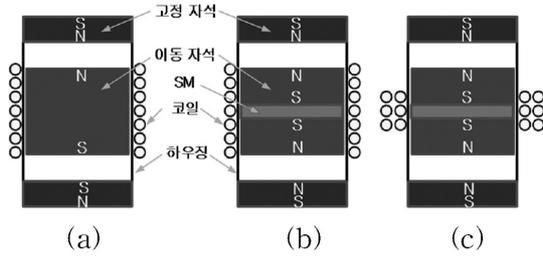


Fig. 1. Schematic structures of vibration driven cylindric electromagnetic energy harvester; (a) without SM, (b) with SM., (c) with SM and changed coil shape.

에 구성이 간단하고 제작이 쉽다. 더구나, 고정 및 이동자석간에 발생하는 척력을 가상의 스프링으로 이용할 수 있다.

Fig. 2(a)와 (b)는 Fig. 1(a)와 같이 기존에 제안된 진동형 전자기 에너지 하베스터의 도식도와 전기적 등가회로를 각각 나타낸 것이다. 도식도는 메스 및 댐핑, 전자기력 그리고 스프링 상수로 표현할 수 있다. 한편, 유도기전력과 코일을 따라 발생하는 전류 및 인덕턴스, 코일저항, 부하저항으로 구성된 전기적 등가회로로 나타낼 수 있다.

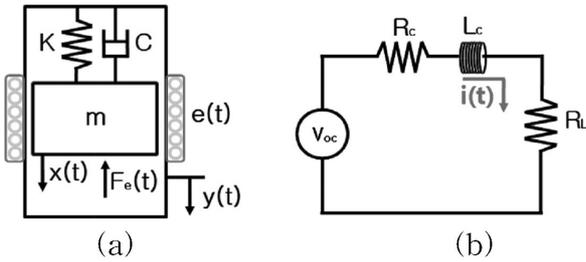


Fig. 2. Schematic structures of vibration driven cylindric electromagnetic energy harvester; (a) without SM, (b) with SM., (c) with SM and changed coil shape.

기계적, 전기적 등가모델의 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m \ddot{z}(t) + c \dot{z}(t) + kz(t) + NBl i(t) = -m \ddot{y}(t) \quad (1)$$

$$NBl \dot{z}(t) - L \frac{di(t)}{dt} - R_{coil} i(t) - R_{Load} i(t) = 0 \quad (2)$$

여기서,  $m$ ,  $c$ ,  $k$ 는 각각 영구자석의 무게, 기계적 감쇠, 스프링 상수를 나타내며  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ 는 각각 영구자석의 절대변위, 하우징의 절대변위, 자석과 하우징 사이의 상대변위를 나타낸다. 또한  $i(t)$ ,  $R_c$ ,  $R_L$ ,  $L$ ,  $N$ ,  $B$ ,  $l$ 은 회로 내에 흐르는 전류, 코일저항, 부하저항, 코일의 인덕턴스, 코일의 권선수, 자속밀도 그리고 코일의 원둘레 길이를 나타낸다.  $f_e(t)$ 는 전자기력으로  $NBl i(t)$ 이며,  $V_{oc}$ 는 유도기전력으로  $NBl \dot{z}(t)$ 로 표현된다.

전기적 댐핑과 상대속도의 곱은 힘인 전자기력으로 나타나며 여기에 다시 속도를 이용하면 일률인 전력으로 나타낼 수 있다.

$$F_e = d_e \dot{z}(t) \quad (3)$$

$$P(t) = F_e \dot{z}(t) \quad (4)$$

외부에서 절대변위( $y(t)=Y_0 \sin(\omega t)$ )로 하우징에 직접 가진하여 진동하는 경우, 발생하는 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P = \frac{m Y_0^2 \zeta r^3 \omega}{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]} \quad (5)$$

여기서,  $r=\omega/\omega_n$ 이며  $\omega$ 는 가진 주파수,  $\omega_n$ 은 시스템 공진 주파수,  $\zeta$ 는 기계적 감쇠비 그리고  $Y_0$ 는 절대변위의 최대진폭을 나타낸다. 발생하는 전력은 가진 주파수, 영구자석의 무게, 최대진폭에 비례함을 알 수 있다.

외력에 의해 발생하는 전력인 식 (5)를 전기적 등가회로 모델 식(2)와 결합하면 다음과 같이 주어진다.

$$P = \frac{Y_0^2 \omega^2 S^2}{8\zeta_T^2 (R_L + R_c)} \quad (6)$$

여기서,  $\zeta_T$ 는 기계적 감쇠비( $\zeta$ ), 전기적 감쇠비( $\zeta_e$ )를 포함한 값이다[6]. 이렇게 얻어진 식을 이용하여 기존에 제안된 진동형 전자기 에너지 하베스터의 전력을 예상할 수 있다. 하지만, 실질적으로 식 (6)을 이용하기 위해서는 무시된 요소인 이동자석의 위치에 따라 코일에서 발생하는 자속밀도의 함수, 코일에 전류가 흐를 때에 발생하는 전자기 댐핑에 대한 함수, 자석간에 발생하는 힘을 근사화하여 표현한 스프링 상수로 인하여 오차가 발생하게 된다. 또한 유도기전력을 얻기 위하여 이동자석의 움직임과 같은 고려해야할 사항이 있기 때문에 정확한 예측이 어렵다. 그러나 유한요소 해석법을 통하여 해석을 하게 된다면, 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이므로 실제 제작에 앞서 ANSYS를 이용하여 어느 정도의 전력이 발생하는지 예측하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3(a), (b) 그리고 (c)는 ANSYS를 이용하여 SM이 없는 경우(모델 1), SM 내장형(모델 2) 그리고 SM 내장형 및 코일 형상이 달라진 경우(모델 3)로 각각 설계한 원통형 전자기 에너지 하베스터를 도식적으로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 자기력선을 집중시키기 위해서 이동자석 사이에 SM을 내장했다. 또한, 8032개의 요소와 21215개로 절점으로 구성했다. 경계 조건은 Y축에 대하여 고정 및 대칭 원통형 구조로 가정하였다. 코일영역은 구리의 비저항 및 Fillfactor 0.78을 적용하였으며 코일에서 발생하는 자속밀도를 얻기 위해 코일영역을 통과하는 자기력

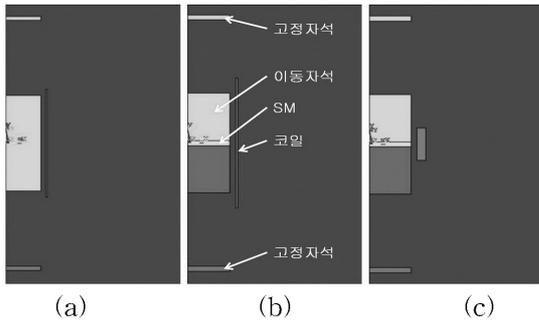


Fig. 3. Schematics of electromagnetic generators; (a) model 1, (b) model 2, (c) model 3.

선의 방향을 x축으로 제한하였다. 또한, SM은 규소강판의 물성 값을 이용하였다.

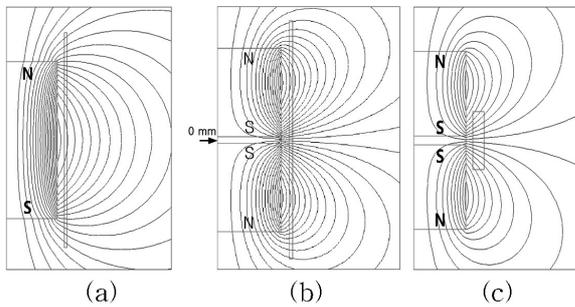


Fig. 4. Concentrated flux lines of each model; (a) model 1, (b) model 2, (c) model 3.

Fig. 4는 코일 주변에서 SM의 유무에 따른 이동자석에서 발생하는 자기력선 분포를 각각 나타낸 것이다. SM이 이동자석의 사이에 내장됨으로써 코일을 수직으로 지나가는 자기력선이 증가함을 알 수 있다. 따라서, SM이 내장된 경우에 코일내의 자속 밀도가 증가할 수 있으므로 더 큰 유도기전력을 얻을 수 있는 것으로 사료된다.

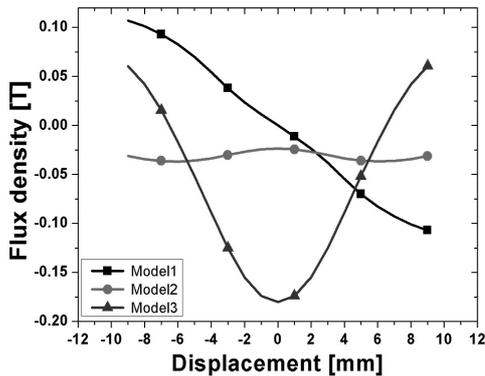


Fig. 5. Variations of magnetic flux density with displacement for each of model.

Fig. 5는 각 모델에 있어서 이동자석의 변위에 따라 코일에서 발생하는 자속밀도의 크기 변화를 나타낸 것이다. 모델 1은 이동

자석이 + 9 및 - 9 mm에 위치하는 경우에 자속밀도의 값이 가장 크게 나타났다. 이는 자기력선이 N극에서 S극으로 향하므로 이동자석의 양극이 코일 근처에 위치하는 경우에 수직방향으로 코일을 통과하는 자기력선을 가장 많이 얻을 수 있기 때문이다. 그러나, 모델 2는 이동자석이 움직이더라도 비슷한 자속밀도를 나타냈다. 자기력선이 통과할 수 있는 코일의 너비가 길기 때문에 코일영역을 통과하는 + X방향의 자기력선과 - X방향의 자기력선이 코일영역 내에 동시에 존재하여 상쇄되기 때문에 자속밀도의 값이 비슷한 크기로 나타났다. 따라서, 모델 2에서 코일영역내의 자기력선이 상쇄되는 문제를 해결하기 위하여 코일의 너비를 달리한 경우에 코일의 전체 면적은 같지만, 너비를 작게 표현한 모델 3을 제시하고 이를 설계 및 분석한 결과, 기존에 제시된 모델 1과 2보다 큰 자속밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

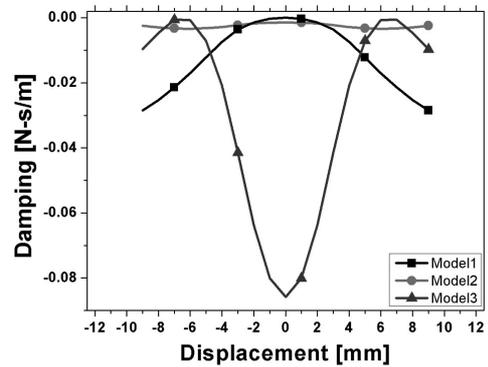


Fig. 6. Variations of damping with displacement for each of model.

Fig. 6은 이동자석의 변위에 따라 코일에서 발생하는 전기적 댐핑을 나타낸 것이다. 모델 1에서 이동자석이 하우징의 양단인 + 9 및 - 9 mm에 위치하는 경우에 코일에서 가장 큰 댐핑이 발생됨을 알 수 있다. 또한, 모델 3에서 이동자석이 하우징의 중심인 0 mm에 위치하는 경우에 가장 큰 댐핑을 나타내는데 이러한 댐핑 발생 경향은 자속밀도의 크기에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 또한, 모델 2에서 모든 영역에서 비슷한 자속밀도를 얻음을 Fig. 5에서 알 수 있듯이 댐핑 값 역시 유사한 형태로 표현됨을 알 수 있다. 따라서, 코일 내부의 자속밀도 변화에 의해 발생하는 전기적 댐핑은 식(3)과 같이 전자기력으로 변환되고 이 힘을 전력으로 바꿀 수 있기 때문에 보다 큰 전기적 댐핑을 얻는 것이 유리함을 알 수 있다.

Fig. 7은 하베스터의 하우징에 6 Hz의 가진 주파수와 3 mm의 가진 변위를 주기적으로 가진 경우에 각 모델에 대하여 변화하는 이동자석의 움직임을 나타낸 것이다. 이동자석의 변위는 모델 1과 3의 경우에 일정한 주기로 규칙적인 반복을 나타내는 반면, 모델 2의 경우에 불규칙하게 나타났다. 이것은 고정자석과 이동자석간에 발생하는 힘을 스프링 상수로 이용하고 이 값으로 얻을 수 있는 시스템 공진주파수가 가진 주파수인 6 Hz와 정확히 일치하지 않아 이동자석의 움직임이 불규칙한 맥동현상

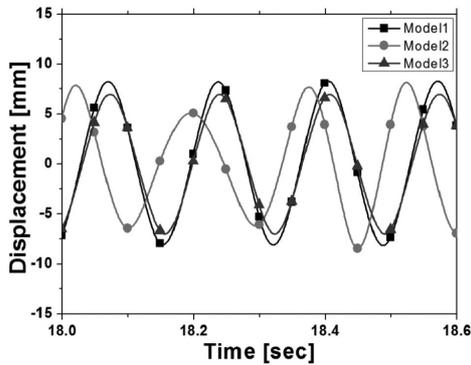


Fig. 7. Variations of displacement with time for each of model.

이 일어난 것으로 사료된다.

Fig. 8은 이동자석의 위치가 변화할 때에 코일에서 유도되는 유도기전력을 나타낸 것이다. 각 모델의 최대 유도기전력은 정상상태시 약 2.27 Vpp, 1.33 Vpp 그리고 5.31 Vpp로 각각 나타났다. 모델 2의 경우에 SM 내장으로 인한 자기력선의 집중으로 모델 1에 비하여 보다 큰 유도기전력을 얻을 수 있을 것으로 예상하였지만, 코일영역 내의 자기력선의 상쇄와 이동자석의 불규칙한 움직임과 같은 요인에 의하여 코일을 수직으로 통과하는 자기력선의 변화가 작으므로 작은 유도기전력이 발생되었다. 본 연구에서는 모델 2의 문제점들을 개선하기 위하여 코일영역의 전체 면적은 같지만, 모델 2에 비해 너비를 작게하는 대신 폭을 증가시켜 설계한 모델 3은 다른 모델에 비해 많은 유도기전력을 얻을 수 있었다. 이는 코일의 너비가 작으므로 코일영역 내의 자기력선 상쇄가 작으므로 보다 큰 자속밀도를 얻을 수 있고, 이동자석의 움직임에 의하여 코일영역을 통과하는 자기력선의 변화가 모델 1과 2에 비하여 빠르게 변화하므로 Faraday 법칙에 의해 큰 유도기전력을 얻을 수 있는 것으로 사료된다.

Fig. 9과 10은 부하저항의 변화에 의하여 부하저항에서 발생하는 각 모델의 전압 및 최대 예상 전력을 나타낸 것이다. 발생

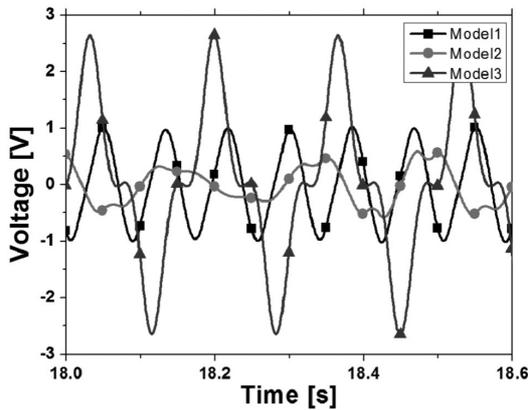


Fig. 8. Variations of open voltage with time for each of model.

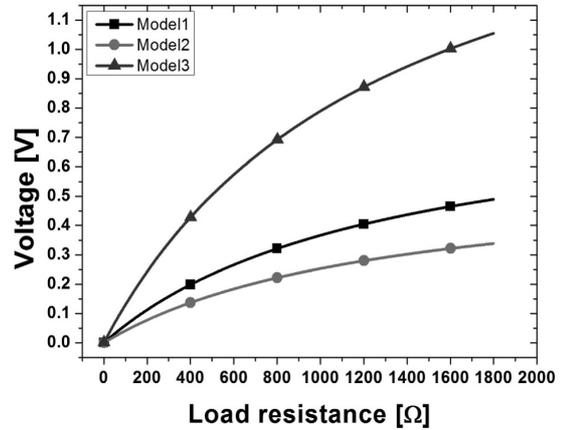


Fig. 9. Variations of load voltage with load resistance for each model.

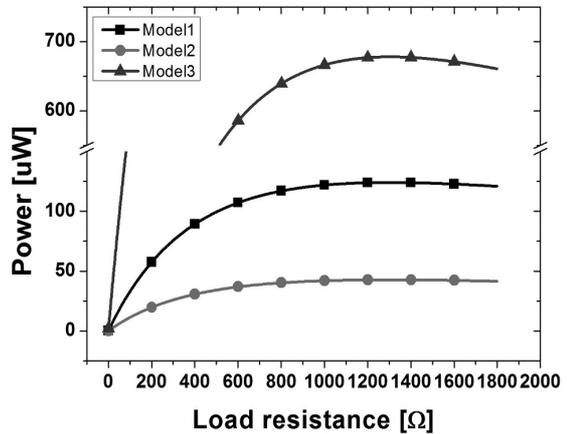


Fig. 10. Variations of generated maximum power with load resistance for each of model.

되는 전압은 부하저항의 증가에 따라서 계속적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 부하저항에서 발생하는 전력은 코일저항과 임피던스 매칭인 1303 Ω 에서 최대 전력이 나타났으며 각 모델에서 발생되는 전력은 각각 124.15 μW, 42.71 μW 그리고 677.85 μW였다. 이러한 결과는 모델 3이 모델 1에 비하여 5.46 배 그리고 모델 2에 비하여 15.87배 더 많은 전력을 발생하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 논문은 SM이 내장된 진동 구동식 원통형 전자기 에너지 하베스터의 설계 및 해석에 관한 것으로 기존의 방식에 비하여 SM을 내장함으로써 코일의 넓은 영역을 통과하는 자기력선의 상쇄 및 이동자석의 움직임이 불규칙하게 되는 맥동현상으로 인하여 부하저항에서 발생하는 전력은 124.15 μW에서 42.71 μW로 크게 줄어들었다. 그러나, 코일의 너비를 줄이고 폭을 늘림으

로써 이동자석이 움직일 때 코일을 통과하는 자기력선이 빠르게 변화할 수 있으므로 큰 유도기전력 발생 한다. 이때 발생된 전력은 기존 방식에 비하여 5.46배 증가한 677.85  $\mu\text{W}$ 였다. 결과적으로 SM을 내장하고 코일 형상을 변경함으로써 큰 유도기전력 및 전력을 얻을 수 있음을 확인하였다. 결과적으로 각 모델의 단위 체적당 발생하는 전력은 12.94  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ , 3.30  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$  그리고 52.39  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 로 각각 나타났다.

따라서, 저주파수 영역에서 보다 큰 에너지 변환 효율을 지닌 진동 구동식 원통형 전자기 에너지 하베스터 개발에 SM 내장 및 코일영역의 변형으로 기존보다 큰 전력을 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

### REFERENCES

[1] R. Torah, P. Glynne-Jones, J. Tudor, T. O'Donnell, S.

Roy and S. Beeby, "Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting", *Sens. & Actu. A*, vol. 145, pp. 336-342, 2008.

[2] P. Wang, K. Tanaka, S. Sugiyama, X. Dai, X. Zhao, and J. Liu, "A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology", *Microsyst. Technol.*, vol. 15, pp. 941-951, 2009.

[3] S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 175-195, 2006.

[4] T. V. Buren and G. Trsster, "Design and optimization of a linear vibration- driven electromagnetic micro-power generator", *Sens. & Actu. A*, vol. 135, pp. 765-775, 2007.

[5] S. C. Yuen, J. M. Lee, W. J. Li. and P. H. Leong, "An AA-sized vibration- based microgenerator for wireless sensors", *IEEE Pervasive Computing*, vol. 6, pp. 64-72, 2007.

[6] N. Awaja, D. Sood, and T. Vinay, "Design and analyses of electromagnetic microgenerator", *Sens & Trans. J.*, vol. 103, pp. 109-121, 2009.



정 귀 상(Gwi-yang Chung)

- 1992년 3월 TUT(공학박사)
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 2009년 8월 Stanford Univ. 방문교수
- 현재 울산대학교 전기공학부 교수
- 주관심분야 : Wireless Sensor Nodes & Energy harvesting based on M/NEMS



류 경 일(Kyeong-il Ryu)

- 2009년 2월 울산대학교 전기전자 정보 시스템공학부(공학사)
- 현재 울산대학교 대학원 전기공학부 석사과정
- 주관심분야 : 에너지 하베스팅