

무선 상태감시 시스템용 진동 기반 에너지 획득 장치

Vibration-based Energy Harvester for Wireless Condition Monitoring System

조 성 원**·손 종 덕*·양 보 석†·최 병 근**

Sung-Won Cho, Jong-Duk Son, Bo-Suk Yang and Byeong-Keun Choi

(2009년 2월 3일 접수 ; 2009년 3월 17일 심사완료)

Key Words : Vibration Energy Harvester(진동에너지 획득장치), Piezoelectric Element(압전소자), Magnetic Field Generating Coil(자기장발생코일), Resonance(공진)

ABSTRACT

Historically, industrial condition monitoring has been performed by costly hard-wired sensors or infrequent checks by maintenance personnel equipped with hand held monitoring equipment. Self-powered wireless condition monitoring systems provides on-line monitoring of critical plant and machinery providing major operating cost benefits. A vibration energy harvester(VEH) is a device that converts kinetic energy occurred by machine vibration into useable electrical energy. Using VEHs to power wireless monitoring systems can yield significant benefits: increased reliability, lower life time costs and no battery disposal issues, etc. This paper proposes the novel prototype design and manufacturing of a VEH that can eliminate the effect by failed batteries.

1. 서 론

무선센서(wireless sensors)는 이동성, 통합성, 원격 및 접근성 등의 편리함 때문에 최근 기계설비의 정비 관리를 위한 상태감시에 널리 사용되고 있다. 그러나 온라인 상태감시를 독립적으로 구동하기 위해서는 배터리가 필요하고, 배터리 용량의 한계로 인해 주기적으로 교체해야하는 번거로움이 있다⁽¹⁾.

이를 해결하기 위한 방안중의 하나로 에너지 획득장치(EH, energy harvester)를 사용할 수 있다⁽¹⁻³⁾. EH를 위한 에너지원으로는 진동, 온도, 바람, 태양 에너지 등이 다양하게 이용될 수 있다.

대부분의 회전기계는 잔류 불평형에 의해 회전주파수성분의 진동은 필히 발생하고 있기 때문에 이 진동에너지를 이용한 EH 개발은 무선센서용 대체

에너지원으로 유용하게 사용될 수 있다. 기본적으로 진동에너지를 이용한 EH는 압전체 구조물의 고유진동수가 외부 가진주파수와 일치하여 공진을 일으킴으로서 최대 전력을 생산하도록 하는 구조를 가지고 있다. 이와 관련된 종래의 연구는 EH의 고유진동수가 고정된 형태가 제안되었으나⁽⁴⁾, 실제 적용에는 외부 가진주파수가 변경되는 경우 공진영역에서 벗어나 최대 에너지를 발생시킬 수 없는 단점이 있다.

특히 각종 회전기계의 구동기로 가장 널리 사용되고 있는 유도전동기는 극 수(P), 전원주파수(f)에 의해 동기속도($f = 120/P$)가 결정되지만, 부하조건 등에 의해 슬립(slip)이 변화하므로 실제 운전속도는 동기속도보다 약간 낮은 회전속도로 운전되게 된다.

이 연구에서는 설비에서 발생하는 진동에너지를 활용하여 전기에너지를 발생하고, 무선센서와 통합하여 사용할 수 있는 고효율의 EH를 제안한다. 즉, 압전소자(piezoelectric element)와 자기장 발생코일(magnetic field generating coils)을 혼합한 형태로 구성되고 미소 조정을 통하여 EH의 고유진동수를

† 교신저자; 정회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : bsyang@pknu.ac.kr
Tel : (051)629-6152, Fax : (051)629-6150
* 부경대학교 음향진동연구소
** 경상대학교 정밀기계공학과 해양산업연구소

변경할 수 있는 EH를 제안한다. 구조적으로 압전체는 외팔보의 형태로 구성되며 최대 전기에너지를 얻기 위해서는 압전체가 최대진동변위를 발생도록 공진상태가 되하여야 한다. 또한 자기장 발생코일에 설치하여 압전체의 진동 시 발생하는 변위 차이를 이용하여 부가적인 에너지를 얻을 수 있도록 한다.

압전체가 공진조건을 만족하도록 하기 위해서는 압전체의 질량, 강성 및 감쇠 등 시스템 파라미터를 조정하는 방법이 있으며, 그 중 길이를 조절하여 압전체의 공진주파수를 변경시키는 것이 가장 현실적이고 편리한 방법이다. 이 연구에서는 이 방법을 이용하고, 간단한 구조해석과 성능을 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 압전체의 해석

압전체는 압전 현상을 나타내는 압전소자로써, 수정, 전기석, 로셀염 등이 일찍부터 이용되었으며, 근래에 개발된 티탄산바륨, 인산이수소암모늄, 타르타르산에틸렌디아민 등의 인공결정도 압전성이 뛰어나다.

압전체란 Fig. 1과 같이 어떤 종류의 결정판에 일정한 방향에서 외력을 가하면 판의 양면에 외력에 비례하여 양·음의 전하가 발생하는 현상을 말한다⁽⁵⁾.

벤드형태 압전체의 경우, 1차 모드에서 가장 많은 양의 전력을 발생하고, 따라서 가진주파수(회전주파수)가 1차 모드의 고유진동수와 공진을 일으키도록 설계하는 것이 중요하다. EH에 이용되는 압전소자의 진동특성을 해석하기 위해, Fig. 2와 같이 부가질량을 부과한 압전소자를 외팔보 요소로 고려하여, CATIA V5R16으로 모델링하고 Fig. 3과 같이 상용 해석 프로그램 ANSYS Workbench Ver.10을 이용하여 모드해석을 수행하였다⁽⁶⁾.

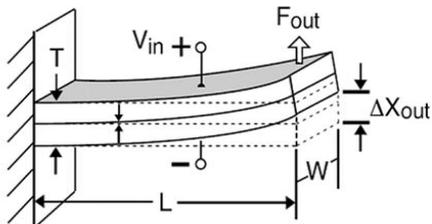


Fig. 1 Cantilever beam with piezoelectric element

부가질량은 일반 강(steel)으로써 메쉬노드(mesh node) 644개, 요소 90개를 부여하였으며, 압전체는 밀도 7800 kg/m, Young계수 5.2×10^{10} N/m로 부여

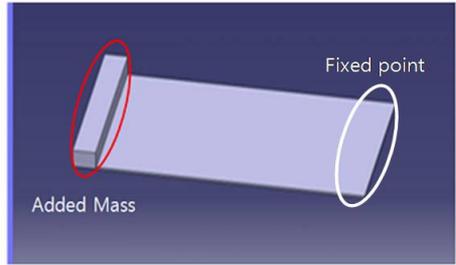


Fig. 2 Modeling of cantilever beam

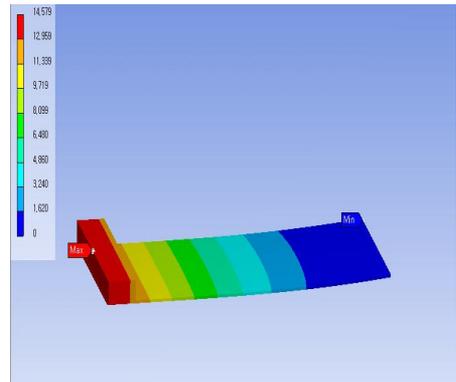


Fig. 3 Analysis result of piezoelectric by ANSYS workbench

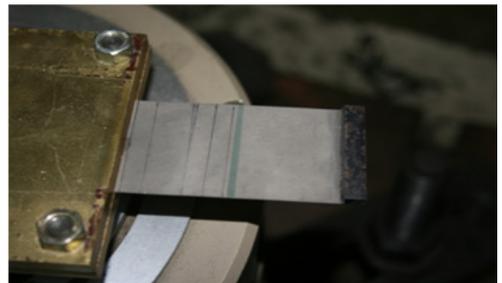


Fig. 4 Experiment on the exciter

Table 1 Comparison between experiment and analysis

	Analysis	Experiment
Add mass weight	3.5 g	3.9 g
Piezo length	34×0.38×44 mm	34×0.38×35 mm

- Excitation frequency : 60 Hz
- Piezo original length : 34×0.38×64 mm

한 후 1,452개 메쉬노드와 187개 요소로 나누었다.

해석 결과 예로, 부가질량 3.5 g, 압전소자 길이 44 mm일 때, 60 Hz에서 공진이 발생함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 해석 결과를 토대로 해석과 동일하게 압전체와 부가질량을 사용하여 실제 제작한 그림이다. 가진실험 결과, 부가질량 가공 시에 정밀 가공이 되지 않은 관계로 부가질량의 무게가 0.4 g 증가한 3.9 g이 되었고, 이에 따라 가진 실험 결과 약간의 오차가 발생하였다. 압전체의 길이를 해석결과에 따라 약 9 mm 정도 짧은 35 mm의 길이로 조정하여 목표 공진주파수인 60 Hz에 맞출 수 있었다.

Table 1은 해석 프로그램을 이용하여 계산한 압전체의 길이 및 부가질량의 결과와 실제 실험에 의해 구한 값을 비교하였다. 정밀 가공이 되지 않아 해석 결과보다 부가 질량이 약간 크고, 따라서 제작상 압전체의 길이가 상대적으로 짧아졌다.

2.2 자기장 발생기의 해석

자기장 발생기는 일반적인 발전기 원리와 같으며 전자기 유도 작용으로 기전력을 발생시키는 원리에 기초를 두고 있다. 이 기전력의 크기는 자기장의 세기와 도체의 길이 및 자기장과 도체의 상대적 속도에 비례하며, 기전력의 방향은 플레밍의 오른손 법칙에 의해 알 수 있다.

자기장 발생기는 Fig. 5와 같이 도체가 자속이 상대운동을 하여 도체가 자속을 끊으면 Faraday의 전

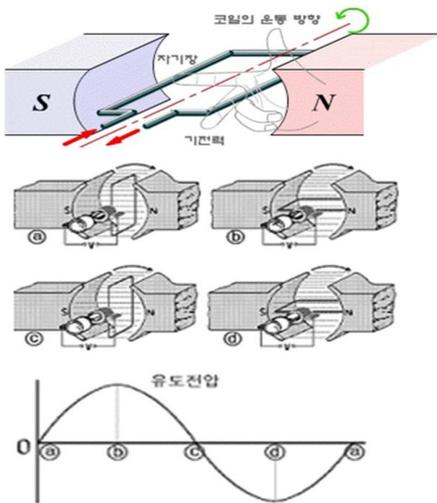


Fig. 5 Basic principle of magnetic generator

자유도법칙에 의하여 기전력이 발생하고 플레밍의 오른손 법칙에 따르는 방향으로 발생한다는 기본적인 이론에서 출발한다. 간단한 직사각형 코일이 균일한 자기장 내에 놓여 있으면서 Fig. 6과 같이 축주위를 회전하면 a와 b양단에는 전위차가 생긴다. 이 전압은 직사각형 코일이 회전하는 진동수만큼 극성이 바뀌게 된다.

이제 출력전압을 코일의 크기, 자기장 및 각속도로 나타내면, Fig. 6에서 표시한 것처럼 Path 1로 표시한 도선을 따라 흐르는 전하가 받는 힘 F 를 고려하면 다음과 같다.

$E = 0$ 이므로 전기력은 존재하지 않으며, 따라서 경로의 모든 곳에서 전하가 받는 힘은 오직 Lorentz 법칙의 자기력만을 받는다는 것에서 출발한다.

$$F = qv \times B \tag{1}$$

$$F = q\left(\frac{\omega h}{2}\right)B \sin \theta \tag{2}$$

여기서 q 는 전하를 나타내며 v 는 전하의 속도, B 는 자기장을 나타낸다. 전하가 회전하는 속력으로 $\omega h/2$ 를 사용하였으며 여기서 $h/2$ 는 회전 반지름을 나타낸다.

전하 q 가 Path 1을 따라 이동하는데 해준 일은

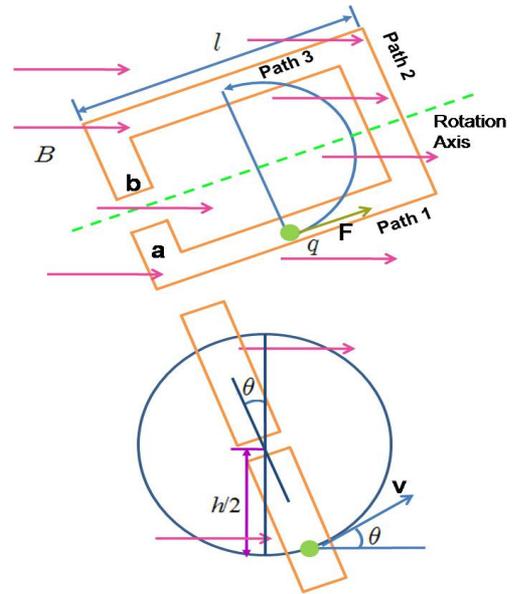


Fig. 6 Basic principle of magnetic induction

$$W_{path1} = F \times l = (q \frac{\omega h}{2} B \sin \theta) l \quad (3)$$

전하 q 가 Path 2를 따라 움직일 때에는 그곳에서의 자기력 F 와 실제로 전하가 움직일 수 있는 도선의 방향이 수직이므로 해준 일은 없다. q 가 Path 3을 따라 움직일 때 해준 일은 Path 1에서와 같다. 그러므로 전하 q 가 a 에서 b 까지 이동하는 동안 자기력이 q 에게 해준 총 일의 양은 Path 1의 2배가 되어 식 (4)와 같이 된다.

$$W_{coil} = qhlB\omega \sin \theta = qBA\omega \sin \omega t \quad (4)$$

여기서 L 은 도선의 길이, W 는 일의 양 그리고 A 는 코일의 면적을 나타낸다.

전하가 도선을 따라 돌아 a 에서 b 까지 움직일 때 해준 단위전하당의 일이 바로 Joule/Coulomb 또는 V 단위의 기전력(emf, electromotive force)이다.

$$emf = W/q = BhL \sin \theta = BA\omega \sin \omega t \quad (5)$$

여기서 θ 전류와 자기장이 이루는 각이며, 이 기전력은 힘의 이름을 하고 있지만 힘이 아니다.

a 와 b 가 외부회로에 연결되었다고 가정하면, 기전력은 전도전자가 회로를 한 바퀴 돌 때마다 주어지는 단위전하당의 에너지이다. 기전력은 전지가 전압원인 것과 같은 의미에서 하나의 전압원이다. 모든 전도전자는 전하가 발전기의 회전코일을 통과할 때마다 기전력과 같은 크기의 에너지를 단위전하당 얻게 된다.

이 부가적인 에너지는 충돌에 의하여 외부회로 내의 원자로 전달되는데, 그 결과 저항에 의한 열이 생긴다. 기전력을 직사각형 코일을 지나는 자속과 관련시켜 보면 자속은

$$\Phi_B = \int B \cdot dA = BA \cos \omega t \quad (6)$$

이의 시간미분과 앞에서의 기전력이 연관되어 있는 것을 확인할 수 있다. 즉,

$$emf = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (7)$$

지금까지 Faraday법칙이 정지된 균일한 자기장 내에서 회전하는 직사각형 코일에 적용된 경우를

나타내었다. 만약 회전코일이 n 회 거듭 감겨 있으면, 기전력은 n 배가 될 것이다. 따라서

$$emf = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (8)$$

만일 축전기가 단자 a 과 b 양단에 연결되어 있으면, + 전하는 b 지점에 급격히 축적될 것이다.

폐 경로를 따라 계산된 전기장의 선적분은 자기 기전력과 크기가 같고 방향이 반대인 점에 전하가 오면 전하는 더 이상 흐르지 못할 것이다. 따라서 a, b 양단에 나타나는 전압은 기전력과 같게 된다.

이번 연구에서는 이 원리를 이용하여 피에조 세라믹에 장착된 영구자석이 피에조 세라믹과 함께 상하 운동을 할 때 발생하는 자속력을 전력으로 생산하는 방식으로 제작 하였다.

3. EH 제작 및 적용 실험

3.1 EH 설계 및 제작

압전소자에서 생산되는 전력과 및 자기장 발생기의 원리를 이용하여 생산된 전력을 함께 사용하기 위한 고효율 EH를 제작하기 위하여 Fig. 7과 같이 개념 설계를 하였다. 각 부품에 대한 기능은 다음과 같다.

- ① 마이크로미터 : 정밀 조정용으로 1/1000 mm의 미세 조절이 가능
- ② 길이 조절판 : 좌우로 이동하여 2개의 압전소자 길이를 조절함으로써 고유진동수를 변화시킴
- ③ 압전소자 : 1차적으로 전력을 생산하는 기능
- ④ 영구자석 : 압전 소자 앞부분에 부착되어 부가 질량 역할과 자기장 유도를 위한 자석 역할

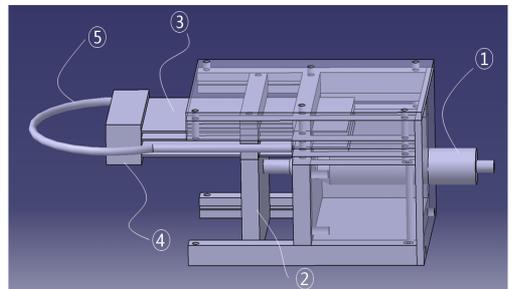


Fig. 7 Conceptual design for energy harvester

⑤ 자기장 발생코일 : 압전소자의 변위가 상하운동을 할 때 전력을 2차적으로 전력을 생산

개념 설계 후, 이를 바탕으로 Fig. 8과 같이 시작품을 제작하였다.

3.2 EH 실험

(1) 개발된 EH의 성능 평가

EH를 무선감시 시스템에 적용 시 성능 확인을 위해, Fig. 9와 같이 웬 구동용 소형 유도전동기 상부에 EH를 부착하고, 4개의 압전소자와 1개의 자기장 발생코일에서 발생하는 각각의 전력을 디지털 멀티미터를 이용하여 출력 전압과 전류를 측정하였다.

Fig. 10은 적용 대상 전동기의 운전주파수를 확인하기 위해 가속도계 신호를 주파수 분석한 결과이다. 탁월주파수인 운전주파수(59 Hz) 성분과 이의 조화성분들이 나타나고 있다.

유도전동기의 경우, 전원주파수는 60 Hz로 설정되어 있지만, 웬(fan) 부하에 의한 슬립(slip) 발생으로 Fig. 10과 같이 실제 운전주파수는 약 59 Hz이며, 이 운전주파수에 맞게 미소조정을 하기 위해

Fig. 11과 같이 길이 조절판을 0~15 mm까지 0.5 mm씩 이동하며 그때 발생하는 전압을 측정하였다.

그 결과로 길이 조절판을 9.5 mm 움직였을 경우, 출력 전압이 4.5 V로 가장 높게 발생하였다. 이것을 수식적으로 표현하면, 길이 조절판을 움직이지 않은 경우(0 mm)의 43.7 Hz와 길이 조절판을 1 mm 이동할 때 주파수가 1.6 Hz씩 선형적으로 이동한다고 가정할 때 다음과 같은 공식이 성립된다.

$$f = 43.7 + (1.6 \times L_c) \quad (\text{Hz}) \quad (10)$$

여기서 L_c 는 길이 조절판이 이동한 거리이며, 이 식을 이동 거리와 운전 주파수를 적용하여 풀면 다음과 같다.

$$43.7 \text{ Hz} + (1.6 \text{ Hz} \times 9.5 \text{ mm}) = 58.9 \text{ Hz} \quad (11)$$

따라서 계산된 EH의 조정된 주파수는 58.9 Hz이며, 대상 전동기의 운전 주파수인 59 Hz와 가장 근접하므로 길이 조절판을 9.5 mm를 이동하였을 경우, 가장 큰 값이 얻어짐을 계산과 실험을 통하여

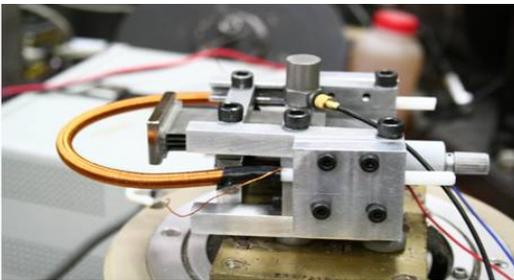


Fig. 8 Energy harvester

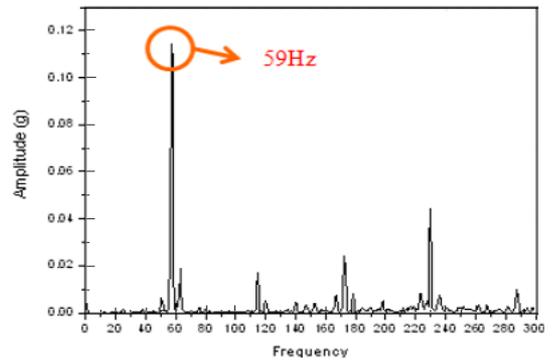


Fig. 10 Frequency spectrum

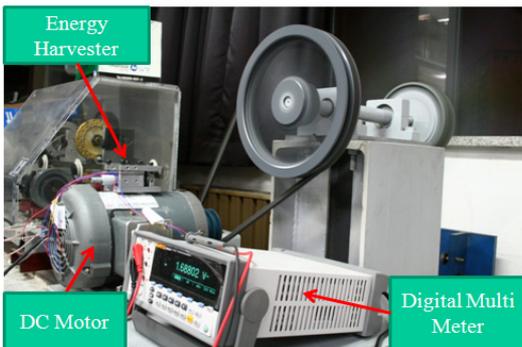


Fig. 9 Application to an induction motor



Fig. 11 Tuning test result

확인하였다.

조정되었을 때의 발생 전압을 알아보기 위해 디지털 멀티미터를 이용하여 Fig. 12와 같이 4개의 압전체과 1개의 자기장 발생기를 1시간 동안 측정하였다. Fig. 12에 보이듯이 4개의 압전체(Piezo1~4)는 비슷한 크기의 전압이 발생하며, 자기장 발생기(MG)가 압전체보다는 높은 전압을 나타낸다.

실험을 통하여 EH의 사용 가능한 주파수는 43.7 ~ 68.1 Hz로 적용 대상 목표인 3상 유도전동기 (60 Hz)에 적용될 수 있음을 확인하였다. 그리고 마이

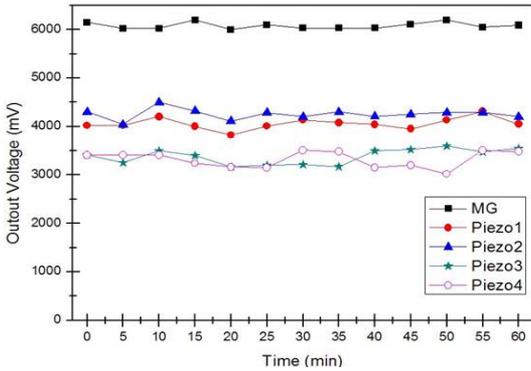


Fig. 12 Output voltage with a tuning

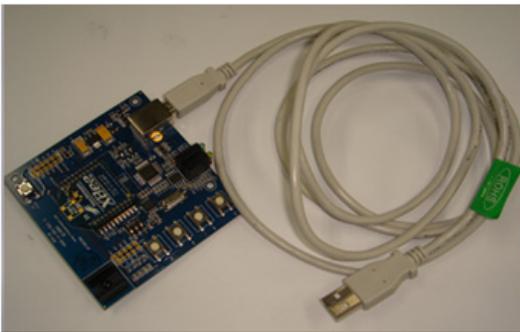


Fig. 13 Zigbee radio module

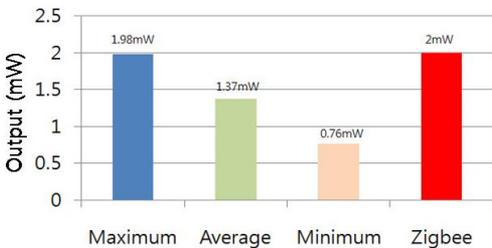


Fig. 14 Electric power of EH

크로미터 헤더의 길이 조절은 0.01 mm까지 가능하며 최대 15 mm까지 움직일 수 있다. 따라서 이를 이용하여 주파수 분해능을 계산하였을 경우 0.016 Hz의 간격으로 정밀조정이 가능함을 알 수 있다.

3.3 무선 감시시스템 적용

이 연구에서 제안한 EH는 각종 산업설비의 상태 감시용 무선센서에 적용을 목표로 하고 있기 때문에 EH에서 발생하는 전력을 사용하여 무선모듈의 운용이 가능한지 여부를 파악하기 위해, Fig. 13에 나타난 Zigbee radio module(ZRM)에 적용하였다.

Zigbee란 저전력, 저가격, 사용의 용이성을 가진 근거리 무선 센서 네트워크의 대표적 기술 중 하나로, 2003년 IEEE 802.15.4 작업분과위원회에서 표준화된 PHY/MAC층을 기반으로 상위 프로토콜(protocol) 및 어플리케이션을 규격화한 기술로서, 사용 주파수는 2.4 GHz ISM band(250 kbps), CFR47 Part 15이며 전송거리는 10~75 m이다.

EH를 ZRM에 적용한 결과, Fig. 14에 나타내듯이 1시간동안 평균 1.37 mW를 발생하고 ZRM의 필요 전력량인 2 mW까지는 얻어지지 않았다. 그러나 무선 감시시스템에 적용 시, 1시간동안 기지국(base station)과 무선 센서사이의 통신시간은 약 1~10분 정도이다. 따라서 Fig. 14의 실험 결과에서 얻어진 전력량을 기초로 비교하였을 경우, 현재 EH에서 발생하는 전력량으로 ZRM의 통신 시간은 최소 25분에서 최대 59분까지 통신이 가능하다. 그러므로 Zigbee 통신 기반의 무선센서의 경우, 제안된 EH에서 발생하는 전력으로 충분히 적용할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 각종 설비의 무선 상태감시용 전원으로 사용하기 위한 정밀조정이 가능함과 에너지 최적화를 하는 것이 목적이다. 따라서 에너지 최적화를 하기 위하여 자기장 발생코일과 피에조 세라믹을 혼용을 하여 사용을 제안하고 이의 설계 및 제작을 수행하여, 그 특성을 실험적으로 확인하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 공진주파수와 일치하도록 길이 조절판의 정밀 조절을 통하여 공진상태에서 압전체가 진동하도

록 함으로서 가장 큰 전력을 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서 실제 유도전동기의 발생하는 부하변동에 따른 슬립 차이에 의한 운전주파수의 차이가 발생하는 경우에도 충분히 적용될 수 있다.

(2) 발생 전압 및 전류 측정결과, 최대 1.98 mW의 전력이 발생하며, 전압 또한 평균적으로 4 V가 발생함으로 충분히 2차 전지에 충전이 가능함을 확인하였다.

(3) 자기장 발생기가 압전체보다 높은 출력을 발생하지만, 비교적 큰 부피가 필요하고, 압전체와 같은 적층 혹은 많은 코일을 사용해야 하는 단점이 있다. 따라서 공간 및 출력증가 측면에서 자기장 발생기만 사용하는 것보다 압전체와 통합하여 사용함으로써 이 두 전력을 함께 사용할 수 있는 이점이 있다.

(4) 무선 감시시스템에 사용되는 통신 모듈 중 Zigbee 모듈에 적용하였을 때, EH에서 발생하는 전력만으로 충분히 작동할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 부경대학교 2단계 BK21 사업팀의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Jeremy, F., 2007, "Low-cost Vibration Power Harvesting for Industrial Wireless Sensors," DoE STTR Project.

(2) Shamim, N. P., Sukun, K., Gregory, L. F., Steven, D. G., David, E. C. and James, W. D., 2005, "Multi-purpose Wireless Accelerometers for Civil Infrastructure Monitoring," International Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 254~263.

(3) Anwar, S., Hongwei, Q., Chuanzhao, Y., Jiann, S. Y., Huikai, X., 2005, "Low-power CMOS Wireless MEMS Motion Sensor for Physiological Activity Monitoring," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. 52, No. 12. pp. 2539~2551.

(4) Beeby, S. P., Torah, R. N., Tudor, M. J., Glynne-Jones, P., O'Donnell, T., Saha, C. R. and

Roy, S., 2007, "A Micro Electromagnetic Generator for Vibration Energy Harvesting," Journal of Micro-mechanics and Microengineering, Vol. 17, No. 7, pp. 1257~1265.

(5) <http://www.Piezo.com>

(6) Hua, B. F., Jing, Q. L., Zheng, Y. X., Lu, D., Li, W., Di, C., Bing, C. C. and Yue, L., 2006, "Fabrication and Performance of MEMS-based Piezoelectric Power Generator for Vibration Energy Harvesting," Microelectronics Journal, Vol. 37, No. 11, pp. 1280~1284.

(7) <http://physica.gsnu.ac.kr/phtml/electromagnetic/induction/induction/induction.html>

(8) Bernard, C. Y. and Jeffrey, H. L., 2006, "A Variable-capacitance Vibration-to-electric Energy Harvester," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. 53, No. 2, pp. 288~295.

(9) Jiang, S. and Hu, Y., 2007, "Analysis of a Piezoelectric Bimorph Plate with a Central-attached Mass as an Energy Harvester," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 54, No. 7, pp. 1463~1469.

(10) Cardoso, A. J., Rodrigues, C. R., Pippi, R. S., Prior, C. A. and Vieira, F. C. B., 2006, "CMOS Energy Harvester Based on a Low-cost Piezoelectric Acoustic Transducer," IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, pp. 70~74.

(11) Gracewski, S. M., Funkenbusch, P. D., Jia, Z., Ross, D. S. and Potter, M. D., 2006, "Design and Modeling of a Micro-energy Harvester Using an Embedded Charge Layer," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 16, No. 2, pp. 235~241.

(12) Torres, E. O. and Rincón-Mora, G. A., 2006, "Electrostatic Energy Harvester and Li-ion Charger Circuit for Micro-scale Applications," IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, pp. 65~69.

(13) Ching, N. N. H., Chan, G. M. H., Li, W. J., Wong, H. Y. and Leong, P. H. W., 2000, "PCB Integrated Micro-generator for Wireless Systems," International Symposium on Smart Structures and Microsystems, pp. 1~6.