

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.6.623

유비쿼터스 센서네트워크를 위한 압전효과 기반의 무구속 휴대용 풍력 전원 장치[§]

장형관* · 김대중* · 박정열*†

* 서강대학교 기계공학과

Use of Piezoelectric Effect in Portable Loadless Wind-Power Source for Ubiquitous Sensor Networks

Hyung-kwan Chang*, Daejoong Kim* and Jungyul Park**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received December 30, 2009 ; Revised April 26, 2010 ; Accepted April 26, 2010)

Key Words : Wind Power(풍력), Energy Harvesting(에너지 수확), Piezoelectric(압전), Micropower Source(소형전원 장치)

초록: 본 논문은 풍력에 의해 구동되는 압전효과 기반의 무구속 휴대용 전원 장치를 제안한다. 기계적 에너지를 효율적으로 변환하는 메커니즘의 한가지로 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 압전효과를 이용하는 방법이 있다. 압전효과는 주기적으로 변하는 응력을 필요로 하지만, 자연 바람은 거의 일정한 속도를 보이거나, 변화하더라도 매우 느리고 불규칙적인 주파수를 갖기 때문에, 효과적으로 전기적 에너지를 얻어내기 힘들다. 본 연구에서는 바람을 프로펠러에 통과시켜, 손쉽게 주기적으로 변하는 응력을 만들어내고, 이를 압전외팔보에 전달하여 효율적으로 에너지를 변환하였다. 본 연구결과는 유비쿼터스 센서네트워크 시스템에 대한 에너지 공급의 실질적인 해결책이 되리라고 기대된다.

Abstract: This paper presents a wind-power-driven portable power source based on piezoelectric effect. Positive piezoelectric effect is one of efficient and widely used mechanisms for converting mechanical energy to electrical energy. However, for this mechanism, a periodic mechanical stress with a high frequency, as in the case of AC, has to be exerted; such stress cannot be exerted by the natural wind in the environment. The natural wind has a constant velocity with slow and irregular variations, as in the case of DC. In this paper, we propose a novel and simple mechanism to convert mechanical energy into electrical energy. The DC-like wind flow is passed through a propeller to convert it to an AC-like wind flow; the resultant AC-like periodic flow induces vibrations in a piezoelectric cantilever, thereby, generating electrical power. This system is expected to be one of practical solutions for wireless energy supply to ubiquitous sensor networks (USNs).

1. 서 론

최근 반도체 기술의 비약적인 발전으로 저전력 반도체 소자와 모듈의 개발이 가능하게 됨으로써, 유비쿼터스 센서네트워크(Ubiquitous Sensor Network : USN)의 상용화에 관심이 증가하고 있다.⁽¹⁾ USN에 사용되는 센서노드의 크기와 가격이 감소하고 상용화 가능성이 증가함에 따라 효율적인 에너지

공급이 문제로 떠오르고 있다.⁽²⁾ 하지만 CMOS 전자회로의 소형화가 배터리의 에너지 집약 기술보다 앞서기 때문에⁽²⁾ 크기적 제약이나 환경문제와 경제적인 부담으로 배터리를 이용하는 것이 쉽지 않다.⁽³⁾ 따라서, 최근에는 일상에서 쉽게 얻을 수 있는 태양열, 진동, 열, 풍력, 파력 등을 활용하여 쉽게 전기에너지를 공급할 수 있는 방법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

자연 에너지로부터 에너지를 수확하기 위한 연구의 예로, 기계적 에너지를 손쉽게 전기적 에너지로 변환하기 위해 압전 소자를 이용하는 방식이 있다.⁽⁴⁾ 압전 소자를 이용하여 에너지를 수확하기 위해서는 다음과 같은 3가지 단계를

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, sortpark@sogang.ac.kr

필요로 한다.⁽⁵⁾ (a) 이용 가능한 에너지 자원으로부터 주기적인 응력을 만들고 압전 소자로 전달할 수 있어야 한다. (b) 주기적인 응력을 압전 소자에 전달하여 positive piezoelectric effect를 이용해 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하여야 한다. (c) 변환된 전기적 에너지를 가공하고 저장할 수 있어야 한다. 하지만 일상생활에서 얻을 수 있는 자연 에너지는 그 힘을 제어하여 이용하기가 힘들어 (a) 단계를 만족시키기 어렵다. 특히 풍력을 이용하는 경우에는 바람은 큰 변화 없이 어느 정도 일정한 세기의 속력을 가지고 있어 주기적인 응력을 만들어 내기가 힘들다.

바람을 제어하기 위한 기존의 연구 예로써, 바람을 프로펠러의 축의 회전력으로 변환하고 축에 달려있는 stopper가 직접 압전 외팔보에 힘을 가하여 에너지를 수확하는 방식이 제안된 바 있다.^(5,6) 하지만 stopper가 직접 압전 외팔보에 응력을 가해 주어야 하기 때문에 초기 응력이 필요하여 낮은 풍속에서 작동하기가 어렵고 압전 외팔보의 손상문제로 인해 추가적 비용을 필요로 한다.

본 연구에서는 압전 외팔보와 프로펠러를 이용하여 간단하게 바람을 제어하여 내부적인 응력의 구속 없이 자연 바람을 이용하여 전기적 에너지를 수확하는 방법을 시뮬레이션과 실험을 통하여 증명하고 효율을 높이기 위한 방법을 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치 구성

본 연구의 목적은 자연 바람을 에너지원으로 사용하여 에너지를 수확하는 것이다. Fig. 1은 실험의 개략도이다. 실험 장치는 바람을 발생시키는 풍동과 큰 변화 없이 일정한 세기를 갖는 바람을 주기적인 응력으로 변환시켜주는 프로펠러, 전기적 신호를 발생시키는 압전 외팔보, 생성된 전기적 신호를 분석할 수 있는 oscilloscope로 구성되어 있다. 덕트의 모양과 프로펠러의 위치를 Fig. 2에서 볼 수 있다. 덕트의 크기는 입구부가 440 mm×440 mm, 출구부가 220 mm×220 mm, 길이는 250 mm이다. 프로펠러의 지름은 210 mm이다. 압전 외팔보는 매우 민감한 압전 물질인 polyvinylidene fluoride(PVDF)⁽⁷⁾을 폴리에스테르 필름과 접합시켜 제작하였다.

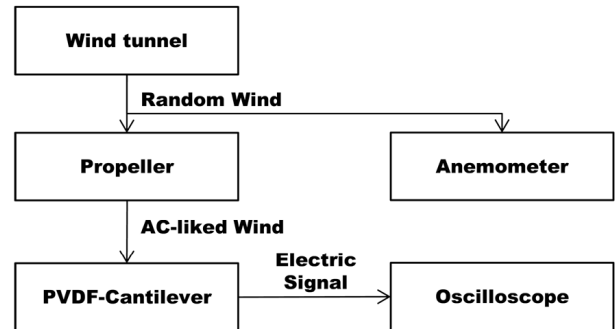


Fig. 1 Block diagram of experiment setup

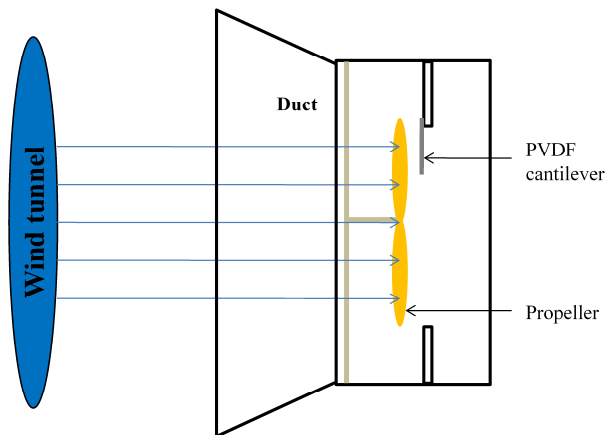


Fig. 2 Schematic of the proposed loadless wind power source

2.2 바람의 주기적 응력 전환

자연 바람으로부터 압전 소자를 이용하여 에너지 수확을 하기 위해서는 큰 변화 없이 일정한 세기를 갖는 바람을 주기적인 응력으로 변환 시켜야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 프로펠러를 이용한다. 주기적으로 변환된 바람의 진동수는 프로펠러의 회전 속도와 날개 개수에 의해서 정해진다. 프로펠러의 회전속도를 측정하기 위해서 프로펠러에 AC electrical generator를 달아 전압을 측정하였다.

Fig. 3은 AC electrical generator에서 전압을 발생시키는 이론적인 과정이다. 그림에서 볼 수 있듯이 AC electrical generator가 발생시키는 전압은 주기를 가지고 주기를 T 라고 하면 프로펠러의 회전 주파수는 $1/T$ 가 되고 프로펠러의 날개 개수는 3이므로 주기적으로 변환된 바람의 주파수는 $3/T$ 가 된다. 서울시내 바람의 평균 풍속 3.5 m/s를 기준으로 실험을 진행하였고, 주파수를 측정하였다.

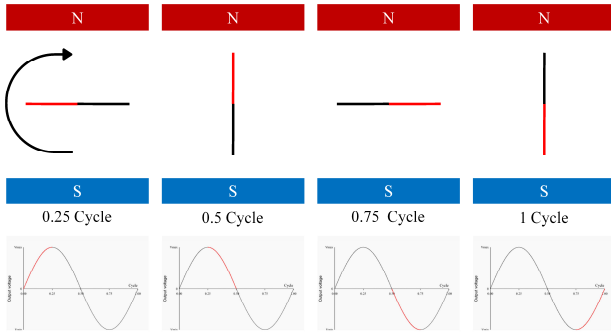


Fig. 3 Theoretical induced voltage form AC electrical generator

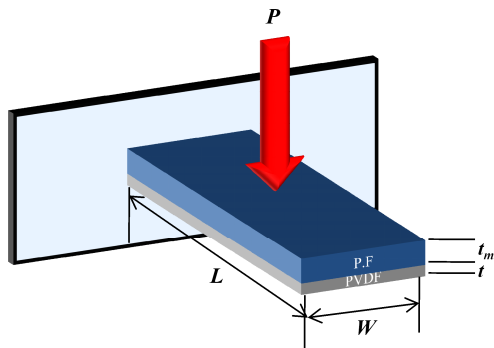


Fig. 4 Schematic of piezoelectric cantilever

2.3 시뮬레이션

Fig. 4 는 실험에서 사용되는 폴리에스테르 필름 (Mylar)에 PVDF 를 부착시킨 외팔보를 나타내었다. L 은 외팔보의 길이, W 는 외팔보의 폭, t 는 PVDF 의 두께 t_m 은 폴리에스테르 필름의 두께를 나타낸다. 외팔보의 폭과 길이의 비는 1:5 이고 PVDF 의 두께 t 는 28 μm , 폴리에스테르 필름의 두께 t_m 은 127 μm 이다. 시뮬레이션을 통해서 주기적인 바람에 의해 공진을 일으켜 압전 효과를 최대화 시킬 수 있는 공진주파수를 가지는 외팔보의 크기를 모델링 하였다.

풍속에 따른 압력을 차이는 프로펠러 익형의 윗단과 아랫단의 압력차이로 가정하여 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\Delta p = C_p \frac{1}{2} \rho V^2 \tag{1}$$

양력계수 C_p 는 1.4⁽⁸⁾ 공기의 밀도는 상온에서 1.169 kg/m^3 , 유체의 속도 V 는 서울시내 평균 풍속 3.5 m/s 로 가정하면, 20.04 Pa 의 압력 Δp 값을 계산할 수 있다. 앞서 모델링한 압전 외팔보와 식 (1)로부터 계산된 압력을 이용하여 유한요소모델의 하모닉 해석을 진행하여 공진이 일어났을 때의 발생하는 전압을 시뮬레이션 하였다.

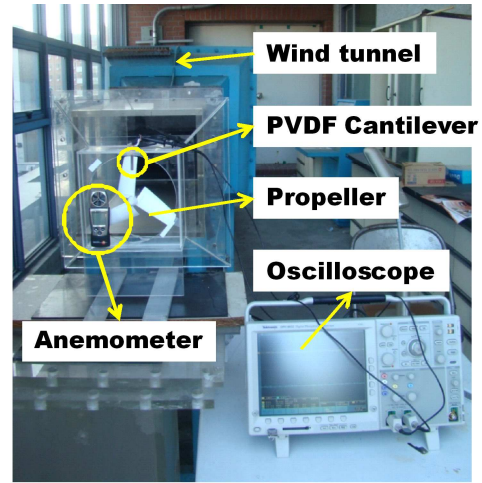


Fig. 5 Photo view of experiment setup

2.4 풍동을 이용한 압전 외팔보 가진 실험

시뮬레이션을 통해서 실험에 가장 적합한 외팔보의 크기를 정하고, 시뮬레이션 결과값을 증명하기 위해서 외팔보에 impulse force 를 가하여 발생하는 전압 신호를 oscilloscope 를 이용하여 FFT(Fast Fourier Transform)을 진행하여 고유진동수를 비교하였다.

Fig. 5 는 풍동을 이용하여 압전 외팔보에서 생성되는 전압을 얻기 위한 실험 장치 구성 사진이다. 풍동에서 발생하는 일정한 세기의 속력을 가진 바람이 덕트를 통과하고 프로펠러에 의해서 주기적인 속력을 가진 바람으로 변환 된다. 주기적인 바람은 압전 외팔보를 진동시켜 전기적 신호를 발생시키고, oscilloscope 를 통해 전압을 측정하게 된다. 풍속계를 이용하여 풍속을 측정하여, 1.0 m/s 에서 3.5 m/s 까지 0.5 m/s 단위로 6 단계의 풍속에서 실험을 진행하였다. 각 풍속마다 압전 외팔보에서 발생하는 전압을 측정하였다.

3. 결 과

3.1 주기적으로 전환된 바람의 주파수

프로펠러에 의해서 변환된 주기적인 바람의 주파수를 측정하기 위해서, 풍속 3.5 m/s 에서 프로펠러에 연결한 AC electrical generator 에서 발생하는 전압을 측정하였다. 실험 결과는 Fig. 6 에 나타나었고 Fig. 3 의 이론적인 AC electrical generator 의 발생 전압과정과 일치하는 것을 알 수 있다. 풍속이 3.5 m/s 일 때 프로펠러의 회전 주기는 0.06356 sec/rev 로 프로펠러의 회전 속도는 15.368 rev/sec 이다. 따라서 주기적인 바람의 주파수는 프로펠러 회전속도에 날개의 개수에 3 배가 되므로 46.104 Hz 이다.

3.2 시뮬레이션

Fig. 4 에 나타낸 압전 외팔보에 대해서 ANSYS 로 모달해석을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용할 재료의 물성치는 Table. 1 과 같다. 폭과 길이의 비율은 1:5 로 폭을 5 mm 부터 10 mm 까지 1 mm 단위로 변화시켜가면서 시뮬레이션 한 결과를 Table. 2 에 나타내었다.

실험 결과로부터 압전 외팔보의 크기가 커질수

Table 1 Material properties of cantilever

Property	Young's modulus	Poisson's ratio	Density
PVDF	2.0GPa	0.29	1780kg/m ³
Mylar	3.79GPa	0.3	1400 kg/m ³

Table 2 Natural frequency of PVDF cantilever from modal analysis by change of cantilever size

Cantilever Width[mm]	5	6	7	8	9	10
Natural frequency[Hz]	58.77	40.82	29.99	22.96	18.15	14.70

Table 3 Peak to peak voltage from PVDF cantilever by change of wind speed

Wind Speed[m/s]	1	1.5	2	2.5	3	3.5
V _{pp} [V]	2.04	1.94	2.00	2.56	3.68	2.28

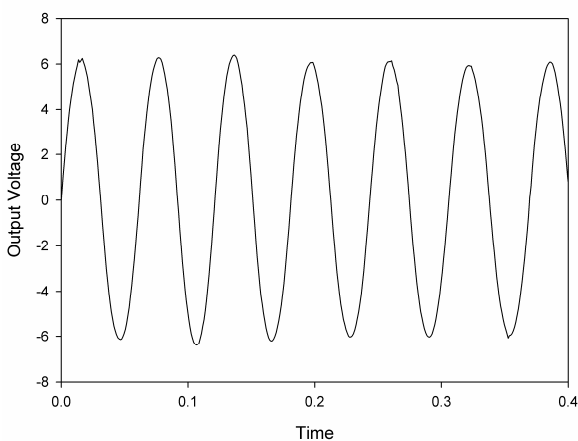


Fig. 6 Output voltage from AC electrical generator at 3.5 m/s wind speed

록 고유진동수가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 6 mm×30 mm 크기의 압전 외팔보의 고유진 동수가 40.819 Hz 로 주기적인 바람의 주파수인 46.103 Hz 와 가장 근접한 것을 볼 수 있다. 앞서 계산한 압력과 6 mm×30 mm 크기의 압전 외팔보에 대한 유한요소모델을 이용하여 하모닉 해석을 통해 발생하는 전압의 크기를 Fig. 7 에 나타내었다.

3.3 압전 외팔보의 에너지 수확

시뮬레이션으로부터 압전 외팔보의 크기를 정할 수 있었다. 6 mm×30 mm 크기의 압전 외팔보를 제작하여 압전 외팔보에 impulse force 를 가한 결과 와 FFT 결과는 Fig. 8 과 같다. 시뮬레이션 결과 (40.819 Hz)와 실험의 FFT 결과(38.8 Hz)의 오차율은 4.9 %으로 두 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

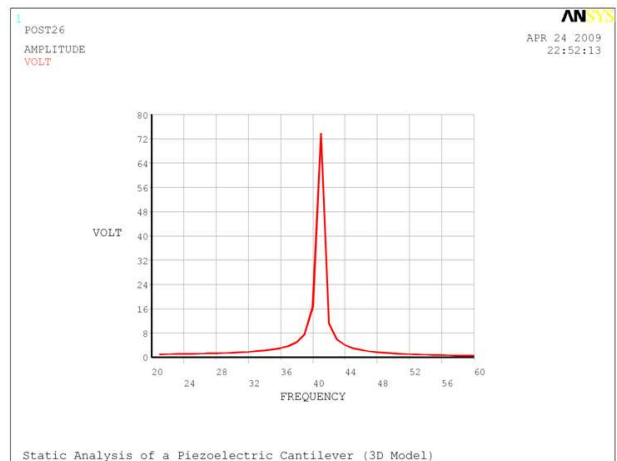


Fig. 7 Result of harmonic analysis

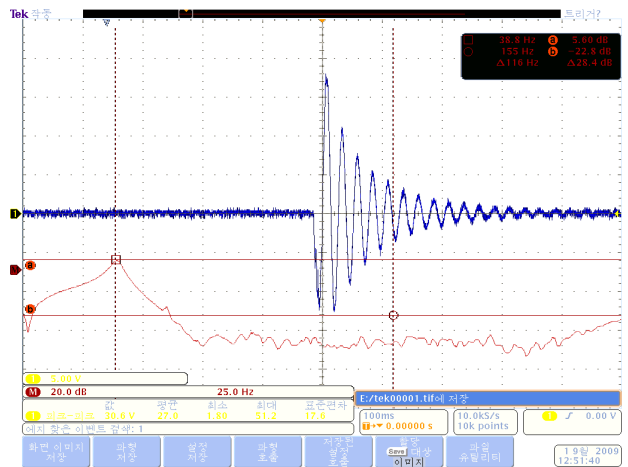


Fig. 8 Result of PVDF cantilever impulse force experiment, output voltage(blue), FFT(red)

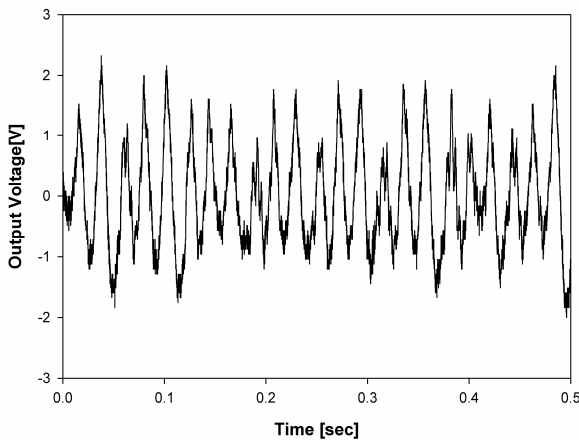


Fig. 9 Induced voltage from PVDF cantilever

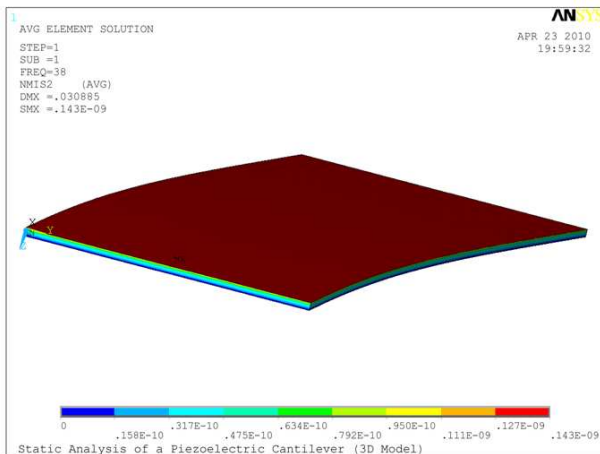


Fig. 10 Simulation result of generated energy from PVDF cantilever at 38Hz

6 mm×30 mm 크기의 압전 외팔보에 풍속을 달리하면서 전압을 측정하였다. Fig. 9 는 3.5m/s 의 풍속에서의 압전 외팔보가 발생시키는 전압을 측정한 결과이다. 전압의 파형이 AC 와 같은 sinusoidal 의 형태를 띄고 압전 외팔보에서 얻어지는 전압의 주파수(43.80 Hz)는 generator 에서 얻어지는 전압의 주파수(15.31 Hz)의 약 3 배가 되는 것을 확인 할 수 있다. 각각의 풍속에서의 바람의 진동수와 최대 전압을 Table. 3 에 정리 하였다. 실험 결과에서 풍속이 증가함에 따라서 V_{pp} 가 증가하는 것을 볼 수 있다. 풍속이 3 m/s 일 때 가장 큰 값을 나타내는데 이때의 압전 외팔보에서 발생하는 전압의 주파수를 측정할 결과는 38.76 Hz 로 공진을 일으키는 압전 외팔보의 고유진동수인 40.819 Hz 근처임을 알 수 있다. Fig. 7 의 하모닉 해석 결과와 실험 결과를 비교해 보면, 해석에서는 38 Hz 에서 4.99 V 의 전압을 얻을 수 있지만

실험 결과에서는 38.76 Hz 에서 3.68 V 로 해석보다 낮은 값이 나왔다. 그 이유로는 해석에서 공기의 감쇠(damping)의 효과를 고려하지 않았기 때문이라고 사료된다.

주기적으로 전환된 바람의 주파수가 38.76Hz 일 때, PVDF 에서 발생하는 에너지량을 알아보기 위해 3.2 절의 하모닉 해석에서 38Hz 의 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 에너지 시뮬레이션 결과 PVDF 의 총 에너지량은 0.2628 μJ 이다. PVDF 로부터 생성된 전력은 총 에너지량에 가진되는 주파수배를 함으로써 얻을 수 있다.⁽⁵⁾ 따라서 PVDF 외팔보의 단위면적당 전력은 55.5 mW/m^2 가 됨을 계산 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 프로펠러를 통과한 바람을 이용해 압전소자의 주기적 진동을 유도함으로써, 에너지 수확을 하는 소형발전시스템을 제시하였다. 압전 외팔보를 이용하여 에너지 수확을 하기 위해서 필요한 주기적인 기계적 입력을 바람으로부터 만들어내는 방법으로 프로펠러를 이용하였다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 출력되는 전력이 AC 와 같은 sinusoidal 파형을 띄는 것으로 보아 주변환경에서 발생하는 DC 와 같은 동력원을 단순한 프로펠러로 변환할 수 있는 가능성을 보였다. 또한, 본 연구 결과로 55.5 mW/m^2 의 전력을 생성할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다. 실험에서 사용한 전자기 유도 방식의 소형풍력발전기(Gakken Holdings Co., Tokyo, Japan)는 평균 3.5m/s 풍속에서 1.1780 W/m^2 의 단위면적당 출력을 가진다. 전자기 유도 방식에 비해 압전 소자를 이용한 풍력 전원장치의 출력은 아직 낮은 편이나, 압전소자의 경우 더욱 소형화가 가능하며, 기존의 전자기유도 방식에 추가적으로 쉽게 설치가 가능하기 때문에, 앞으로 전자기유도 및 압전소자에 의한 하이브리드형의 소형발전기를 사용하면 그 효율이 더욱 증대될 것이라 기대된다.

보다 더 많은 에너지를 수확하기 위해서 다음과 같은 방법들이 고려될 수 있다.

(1) 외팔보의 개수를 늘려 발생하는 전압의 중첩 효과를 이용한다면 더 많은 전압을 얻을 수 있다.

(2) PVDF 의 두께를 늘려 positive piezoelectric effect 를 증가 시키면 발생하는 전압을 증가시킬 수 있다.

결론적으로 본 연구를 통해서 wireless 에너지 수확에 대한 가능성을 알 수 있었다. 압전 외팔보

와 프로펠러의 조합을 이용하여 간단하면서도 구속조건 없이 효율적으로 자연 바람을 이용할 수 있어 시스템의 소형화가 가능하다. 이를 통해서 앞으로 저전력 시스템에 응용할 경우, 유비쿼터스 센서 네트워크 시스템의 소형에너지원으로 적극 이용될 수 있으며, 경제적이나 환경적으로도 많은 문제를 해결할 수 있으리라 기대된다.

후 기

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R2008-0062056).

참고문헌

- (1) Hill, J. L. and Culler, D. E., 2002, "MICA: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks," *IEEE Micro*. Vol. 22, No. 6, pp. 12~24.
- (2) Roundy, S., Steingart, D., Frechette, L., Wright, P. and Rabaey, J., 2004, "Power Sources for Wireless Sensor Networks," *Wireless Sensor Networks, Proceedings*. 2920, pp. 1~17.
- (3) Anton, S. R. and Sodano, H. A., 2007, "A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003-2006)," *Smart Materials & Structures*. Vol. 16, No. 3, pp. 1~21.
- (4) Sodano, H. A., Park, G. and Inman, D. J., 2004, "Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting," *Strain*. Vol. 40, No. 2, pp. 49~58.
- (5) Priya, S., Chen, C. T., Fye, D. and Zahnd, J., 2005, "Piezoelectric Windmill: A Novel Solution to Remote Sensing," *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters*. Vol. 44, No. 1-7, pp. 104~107.
- (6) Myers, R., Vickers, M., Kim, H. and Priya, S., 2007, "Small Scale Windmill," *Applied Physics Letters*. Vol. 90, No. 5,
- (7) Yu, K. H., Kwon, T. G., Yun, M. J. and Lee, S. C., 2002, "Development of a Tactile Sensor Array with Flexible Structure Using Piezoelectric Film," *Ksme International Journal*. 16, 10, 1222~1228.
- (8) Wang, S. H. and Chen, S. H., 2008, "Blade Number Effect for a Ducted Wind Turbine," *Journal of Mechanical Science and Technology*. 22, 10, 1984~1992.