

적응 제어기를 이용한 압전 소자로부터의 에너지 회수에 대한 연구

박종수[#], 남윤수^{*}

A Study on the Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting

Jong Soo Park[#] and Yoon Su Nam^{*}

ABSTRACT

A target of this paper is to study on the usefulness of the adaptive piezoelectric energy harvesting device as a wireless electrical power supply when it is driven by mechanical vibrations of low frequency. For this purpose, an adaptive control technique and a step-down converter are used. A THUNDER series a piezoelectric material (TH7-R), which has been developed by a NASA engineer is selected for this study. In order to provide a mechanical energy to the piezoelectric material, a mechanical motion vibrator is designed. The adaptive controller is implemented using a dSPACE DS1104 controller board. The dc-dc converter with an adaptive control technique harvests energy at over five times the rate of direct charging without a converter.

Key Words : Adaptive Controller (적응 제어기), Energy Harvesting (전기에너지 회수), Piezoelectric Element (압전 소자), Step-down Converter (강압 변환기), Vibrator (가진기), Open-circuit Voltage (개 회로 전압)

기호설명

D = duty cycle
 C_p = internal electrode capacitance
 C_{rect} = dc filter capacitance
 v_p = piezoelectric voltage

1. 서론

최근에는 작고 휴대할 수 있는 매우 강력한 기
기들이 아무 곳에서나 음악을 듣고 무선으로 통신
하고 컴퓨팅 하는, 다시 말하여 유비쿼터스 적으로

상용화되고 있다.

그럼에도 불구하고 전원 공급은 대부분 배터
리에 의존하고 있다. 그러나 배터리는 수명에 한
계가 있고 부피가 크며, 충전 횟수가 유한하다. 또
한 무선 기술의 발달로 전자 기기나 센서들이 서
로 먼 곳에 위치하게 되었고, 최근에는 MEMS 기
구의 급격한 발달 등으로 기계적 진동을 전기적
에너지로 변환할 수 있는 압전 소자가 그 대안으
로 떠오르고 있다. 압전 소자는 액추에이터와 같
이 전기적 에너지를 가하여 기계적 에너지를 얻어
낼 수 있고, 반대로 발전기와 같이 기계적 에너지
를 가하여 전기적 에너지를 만들어 낼 수 있는 물

☞ 접수일: 2006년 1월 4일; 게재승인일: 2006년 4월 19일

교신저자: 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학부

E-mail fkmdy@dreamwiz.com Tel. (033) 253-0840

* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

질이다. 압전 소자를 이용한 전기에너지 회수에 관한 개념은 Fig. 1 과 같이 설명 된다.¹ Fig. 1 에 도시된 자동차의 경우 차체의 기계적 진동 에너지는 자동차가 운행 중이면 항상 발생되지만, 이 에너지는 단지 열에너지로 변환되어 소진되어 버린다. 만약 이러한 에너지를 모두 회수할 수 있는 방법이 있다면, 자동차의 연료가 절감된다고 볼 수 있다. 이와 같이 유용한 에너지로 변환되지 않고 버려지는 기계적 에너지는 일상 생활에서 많이 찾을 수 있다.

그러나 이러한 전력 생성 방법은 대부분의 전자 기기에 사용하기에는 압전 소자에서 생성되는 전력이 너무 작다는 문제가 있다. 따라서 이 전기 에너지 회수 기술이 유용한 적용 분야는 센서 응용, 마이크로 컨트롤러 전원, 원격 제어 기기, 저소모 전력의 아날로그 및 디지털 전자 기기, LED, LCD 등과 같은 저 전력으로 작동되는 전자 기기들이다. 대표적 휴대 기기의 소비 전력을 Table 1 에 기능별로 표시하였다. 이 소비 전력은 앞으로 Table 2 에 표시한 바와 같이 점점 감소되는 추세이므로 전기 에너지 회수 기술도 그 적용 범위가 더 넓어질 수 있을 것이다.²

근래에는 Kymissis³ 에 의한 신발에 설치한 압전 소자로부터 얻어진 전기 에너지를 RFID Tag 전원으로 사용하는 연구, Cornwell⁴ 에 의한 선상의 구조물에서 전기에너지 회수를 극대화하는 연구, Jansen⁵ 에 의한 자동차의 원격 제어 장치를 사람 근육의 힘만을 사용하여 배터리 없이 작동함으로써 배터리가 떨어졌을 때의 불안감을 줄이는 연구, Horowitz⁶ 에 의한 Helmholtz 공진기를 사용하여 소리에너지를 재생하여 자체 전력을 가진 마이크로폰 개발 연구, Skinner⁷ 에 의한 MEMS 전원으로 쓰이는 얇은 필름 형태의 압전 박막 발전기의 개발에 관한 연구들과 같이 에너지 회수를 실용화하는 내용들이 학술회의에서 발표되고 있다.

Lesieutre⁸ 는 진동 구조물로부터 기계적 에너지를 제거하면, 즉 에너지 회수 시 필수적으로 나타나는 감쇠 현상에 대한 연구를, Ottman⁹ 은 비 연속 진동 모드에서 Step-down 변환기를 사용하여 에너지 회수를 최적화 시키는 연구를 발표하였다.

또 다른 연구로 Ottman¹⁰ 은 DC-DC 변환기에서 적응 제어기를 최적의 전력이 전송되도록 연속적으로 수행하여, 배터리에 의해 저장되는 전력을 최대화 시키는 전력변환 회로 및 적응 제어기를 제

안하였다. 이 연구에서는 개 회로 전압을 변화시켜가면서 배터리에 저장되는 전력을 실험적으로 구하였는데, 적응 제어기를 사용하여 충전할 경우에 제어기 없이 충전할 때 보다 4 배 이상 에너지 회수가 가능하다는 주목할 만한 결론을 제시하였다.

그러나 이 결과는 개 회로 전압이 비교적 높은 30 V 이상에서 확인하였고, 그 이하의 낮은 개 회로 전압에서는 명확하지 않았다.

개 회로 전압을 높게 얻으려면 주파수를 높여가진 해야 하는데, 휴대 기기 사용시 압전 소자에 적용할 수 있는 기계적 에너지의 가진 주파수는 대부분 저 주파수이다. 즉, 인체나 동물의 움직임, 파도나 바람의 운동 에너지가 많이 사용될 수 있을 것이며 이들에서는 비교적 낮은 주파수의 에너지를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 위의 적응 제어기를 이용한 전력변환 장치를 제작하고, 가진기로 압전 소자 TH7-R 을 4 Hz 이내의 주파수로 가진 시켜서, 저

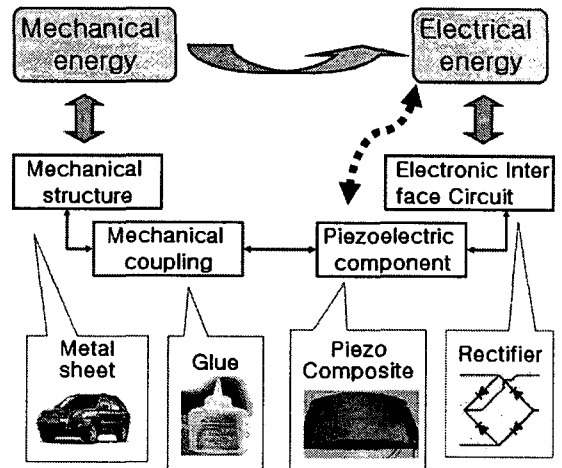


Fig. 1 Energy harvesting using a piezoelectric material

Table 1 Example of the power consumption

Device	Functions & Power consumption
Microprocessor (ARM 720T)	Load mode (50 MHz) : 90 mW Standby mode (50 kHz) : 90 μW
MP3 player	110 mW

주파수로 가진 하는 실제 구조물에서도 이 장치가 휴대 기기 및 무선 원격 장치의 전원으로 응용 가능한지를 타진하고자 한다.

Table 2 Evolution of the power consumption

Device/Year	Low	Typical	Intensive
GSM/1988	17.7 mW	37 mW	110 mW
GSM/2005 max.performance	9 mW	25 mW	70 mW
Bluetooth System/1998	12.5 mW	26.5 mW	48.5 mW
Bluetooth System/2005 max.performance	6.1 mW	19 mW	34 mW

2. 연구 목표 및 방법

2.1 압전 소자의 개요

본 연구에서는 전기에너지 회수를 위한 압전 소자로서 NASA 가 개발하고 FACE 사가 상용화시킨 THUNDER 제품 중 TH7-R 을 사용하였다.

TH7-R 의 외형은 Fig. 2 와 같이 아칭 형상이며, 평판 위에 놓고 위에서 눌러 압축과 이완을 반복하는 단순보 형태로 사용할 수도 있고, 기판 한 쪽을 고정시키고 다른 끝이 흔들리 운동을 하는 외팔보 형태로 사용할 수도 있다.

내부 구조는 스테인리스 기판에 압전 세라믹 (PZT) 이 접착제인 LaRC-SI 와 충충이 쌓여 접착되어있고 표면은 알루미늄으로 덮여있다.

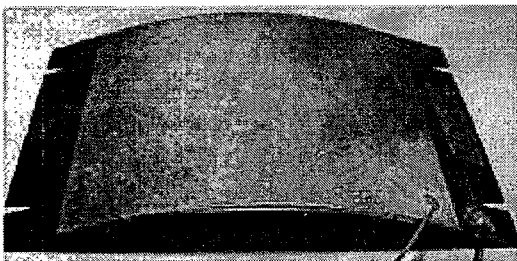


Fig. 2 A configuration of the THUNDER (TH7-R) PZT

압전 세라믹은 압전 특성을 향상시키기 위하여 BaTiO₃ 와 Lead Zirconate Titanate(PZT)와 같이 다 결정질의 강 유전체 물질들로 되어있으며, 구체적인 사양은 Table 3 와 같다.¹¹⁻¹²

Table 3 Specification of the THUNDER (TH7-R)

Model	TH7-R
Weight	18.0 g
Dimensions(L×W×H)	96.52×71.12×0.58 mm
Ceramic Thickness	0.254 mm
Dome/Arch Height	9.57 mm
Capacitance	166 nF
Max. Applied Volts	595 V
Resonant Frequency(Hz)	31(cantilevered) 106(simply supported)
Typical Displacement	7.62 mm
Block Force	133 N

2.2 연구 목표

실제의 구조물에 압전 소자를 이용한 에너지 회수를 적용하기 위한 선행 작업인 본 연구에서는 휴대 기기 사용시 압전 소자에 적용할 수 있는 기계적 에너지의 가진 주파수가 대부분 저 주파수임을 감안하였다. 즉, 인체나 동물의 움직임, 파도나 바람의 운동 에너지 등에서 쉽게 얻을 수 있는 4 Hz 이내의 주파수로 압전 소자 THUNDER (TH7-R)을 가진 한다.

여기에 Ottman¹⁰ 이 제안한 적응 제어기를 이용한 전력변환 장치를 제작하여 실험한 데이터를 통해, 저주파수로 가진 하는 실제 구조물에서도 이 전력변환 장치가 휴대 기기 및 무선 원격 장치의 전원으로 적합한지를 타진하고자 한다.

또한 이를 통하여 실제 구조물에 응용하기 위한 기본 데이터를 수집하고, 보다 성능이 우수한 전력변환 장치 개발을 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

2.3 연구 방법

2.3.1 가진기

실험을 위하여 먼저 Fig. 3(a)와 같은 가진기 (Vibrator)를 설계, 제작하였다. 12 V의 DC 모터로 4 개의 돌출부를 가진 사각 캠을 회전 운동 시킨다. 이 캠에 의해 푸시 로드가 왕복 운동을 하며, 이 푸시 로드에 의해 압전 소자 설치대가 상하 운동을 반복하는 구조이다. 이와 같이 압전 소자 설치대가 상하 운동을 하면 Fig. 2와 같은 아취형의 압

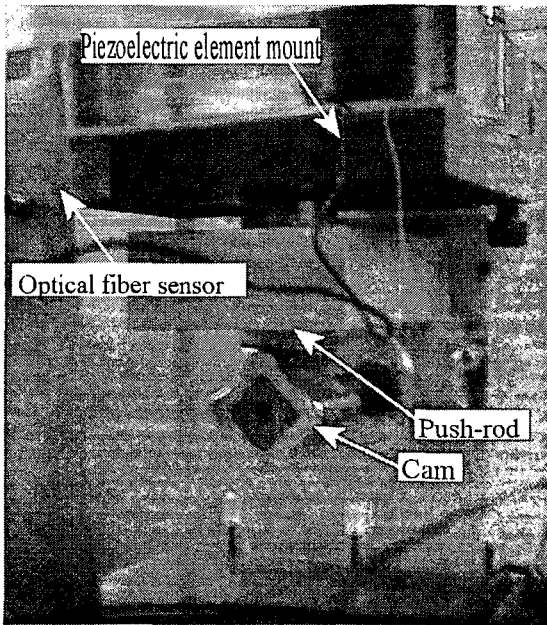


Fig. 3(a) The structure of the mechanical motion vibrator

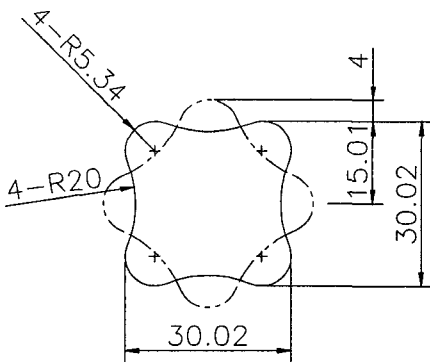


Fig. 3(b) The shape of four corners cam of the vibrator

전 소자는 설치 대 위의 투명 아크릴로 제작한 고정구와 설치 대 사이에서 압축과 이완을 반복하게 된다. 사용된 DC 모터는 구동 토크 증대를 위해 감속 기어가 달려있어 가진 속도가 너무 느리므로, 압전 소자 설치대의 상하 운동 속도를 증대시키기 위해 사각 캠을 사용하였다. 이 사각 캠의 돌출부의 높이가 아취 형태의 압전 소자를 누르는 행정 이 되는데, Fig. 3(b)과 같이 행정은 4 mm가 된다.

압전 소자 설치대의 왕복 속도, 즉 압전 소자를 진동하는 가진 주파수(Hz)를 측정하기 위하여 반사형 광 화이버 센서를 설치하였다.

DC 모터의 구동 속도는 컴파일 테크놀로지사의 마이크로 프로세서 ROVIN 을 사용하여 발생한 PWM 신호에 의해 조정한다.

2.3.2 압전 소자의 최대 전력 흐름

가진기를 실제의 구조물에 쉽게 적용할 수 있는 저 주파수 중 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz 4 가지로 변경해가면서 압전 소자를 가진 하였다. 압전 소자에서 발생하는 교류 파형을 정류하는 AC-DC 변환을 위해 Fig. 4와 같은 단상전파 정류회로를 사용하였는데 평활을 위한 C_{rect} 는 22 μF 의 커패시터를 설치하였다.¹⁰

이 회로에서 부하를 주지 않은 개 회로(open-circuit) 전압, 즉 I_{load} 가 0인 상태에서의 평활 전압 V_{rect} 을 위의 4 가지의 가진 주파수를 주어 오실로스코프 상에서 측정하였다. 이를 데이터 처리한 예러 바 차트는 Fig. 5와 같다.¹³

가진 주파수가 증가하면 개 회로 전압 값도

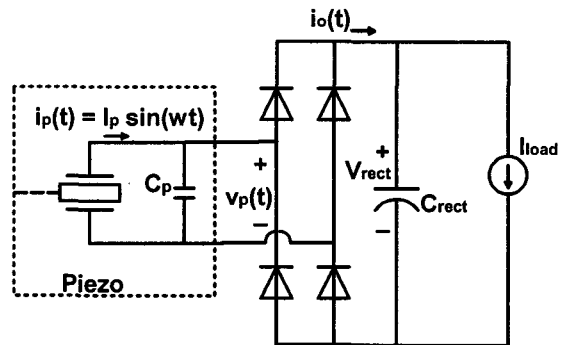


Fig. 4 The rectifier with a capacitor for filtering

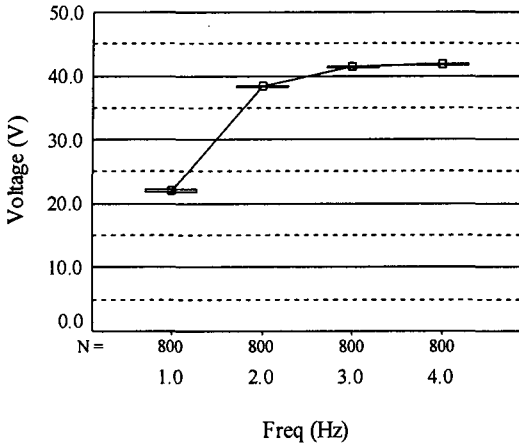


Fig. 5 The error bar chart of the open-circuit voltage filtered with capacitance

증가 하였고, 그 증가율은 주파수가 증가함에 따라 점점 둔화됨을 알 수 있다. 바꾸어 말하면 개 회로 전압을 높게 얻으려면 주파수를 그 만큼 빠르게 가진 해야 함을 의미하기도 한다.

위의 결과를 최적 전력 전송 이론에 적용시켜 보면, Fig. 5 의 데이터 중에서 4 Hz로 가진 시킬 경우에 개 회로 전압이 42 V 이므로, 최적 전력 전송은 평할 전압을 21 V 로 조정하였을 때 발생하며, 그 때의 전력은 42 V 일 때의 전력보다 훨씬 큰 값이 될 것이다.

이 최적 전력 전송 이론은 실험적으로도 증명되며, 가진 시킨 압전 소자를 Fig. 4 에서와 같이 내부 전극 커패시턴스 C_p 와 평행한 사인파의 전류원 $i_p(t)$ 로서 모델링 한 다음의 해석 결과와도 일치한다.¹⁰

분극 전류의 크기 I_p 는 압전 소자의 기계적 가진 정도에 따라 달라지지만 외부 하중을 간주하지 않고 상대적으로 일정하다고 가정하며, 가진 시 압전 소자에서는 교류 전압이 생성되나 배터리 충전 시에는 직류 전압이 요구되므로 AC-DC 변환을 하고, 직류 평할 커패시턴스 C_{rect} 는 출력 전압 V_{rect} 가 일정할 수 있을 만큼 충분히 크다고 가정한다.

부하는 일정한 전류원 I_{load} 로서 모델링 되고, 다이오드들은 이상적인 거동을 나타낸다고 가정하였을 때, 평균 부하 전류는 식 (1)과 같다.

$$i_o(t)|_{aver} = \frac{2}{\pi} (I_p - V_{rect} \omega C_p) \quad (1)$$

출력 전압의 평균값은 식 (2)이므로,

$$V_o(t)|_{aver} = V_{rect} \quad (2)$$

압전 소자의 평균 출력 전력은 식 (1)과 식(2)의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$P(t)|_{aver} = \frac{2V_{rect}}{\pi} (I_p - V_{rect} \omega C_p) \quad (3)$$

그러므로, 최대 전력 값은 식 (4)일 때 발생한다.

$$V_{rect} = \frac{I_p}{2\omega C_p} \quad (4)$$

따라서, 이 최대 전력 값은 식 (1)에서

$$i_o(t)|_{aver} = 0$$

인 개회로 전압 식 (5)의 1/2 에서 발생한다.

$$V_{rect} = \frac{I_p}{\omega C_p} \quad (5)$$

2.3.3 DC-DC 변환 회로 및 적응 제어기

배터리로 흐르는 전력을 최대화하기 위한 전력변환 장치 및 적응 제어기는 Ottman¹⁰ 이 제안한 대로 Fig. 6 과 같이 구성하였으며, 적응 제어기의 제어 방안은 다음과 같다.

가진기가 압전 소자를 가진 시켜 발생한 교류를 정류기에서 정류하고 커패시턴스 C_{rect} 로 평활하여 직류로 변환하였다. Fig. 6 과 같이 Step-down(BUCK) DC-DC 변환기를 사용하고, 이 Step-down DC-DC 변환기에 전계 효과 트랜지스터 (MOSFET) 스위치를 설치하였다.

DSP 보드 dSPACE1104 에서 발생하는 PWM 신호가 전계 효과 트랜지스터 스위치의 gate-source 간 전압 V_{g-s} 을 조절함으로써 drain-source 간 전류 흐름을 제어한다. 인덕턴스 L 은 1.12 mH, 커패시턴스 C_f 는 100 μ F 을 설치하였고, 배터리는 3 V 전압 용을 사용하였다.

배터리로의 전류 흐름 I_{batt} 를 감지하여 DSP 보드에 A/D 입력하기 위해 저항 R_{c-s} 와 OP 앰프 LM747 로 비 반전 증폭기를 설치하였으며, 별도 전원 없이 배터리를 그대로 OP 앰프 전원으로 사용하였다. OP 앰프 관계 식 (6)에서 ($V_{out}-V_{c-s}$)를 측정하여 I_{batt} 를 계산하였다.

$$V_{out} - V_{c-s} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) R_{c-s} I_{batt} \quad (6)$$

배터리 전압이 일정하거나 변화가 매우 느리다고 가정하면, 전력을 최대화한다는 말은 배터리로 흐르는 전류 I_{batt} 를 최대화 한다는 말과 같다. 즉, 전류를 감지하여 그것이 최대화 되도록 듀티 비를 조정하여 최적 전력 전송을 연속적으로 수행하도록 한다.

이 적응 제어기의 제어 방안은 다음 식 (7)로 요약되는데, 배터리 전류를 최고치에 도달하게 하기 위해서는 배터리 전류의 듀티 비에 대한 변화율, $(\partial I/\partial D)$ 에 의해 듀티 비를 증가시키거나 감소시킨다.

$$D_{i+1} = D_i + K \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial I}{\partial D}\right) \quad (7)$$

여기서, K 는 듀티 비의 변화율, $\operatorname{sgn}()$ 은 $(\partial I/\partial D)$ 값이 0 보다 크면 +1, 0 보다 작으면 - 1인 부호 함수이다.

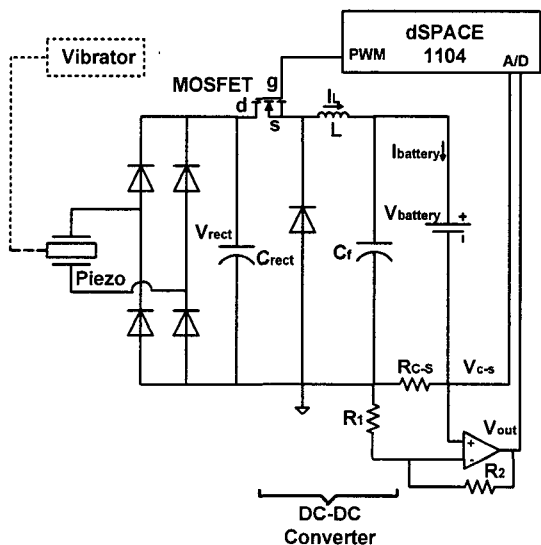


Fig. 6 Energy harvesting circuit setup

이 제어 알고리즘을 DSP 보드 dSPACE DS1104 를 사용하여 Simulink 상에서 모델링 하였고, K 값은 0.021 %/s 로 하였으며, 초기 듀티 비는 10 %에서 시작하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

본 연구에서는 DSP 보드 dSPACE DS1104 를 사용하여 10 초 동안 출력 전류 I_{batt} 를 저장하여 50000 개의 이산화된 데이터를 얻었다.

Fig. 7 은 가진기를 이용해 압전 소자를 주파수 1 Hz 로 가진 시키고, 적응 제어기를 동작시키지 않았을 때의 측정 전류 값이다. 또한, 가진기를 같은 주파수 1 Hz로 가진 시키고, 적응 제어기를 작동하였을 때의 측정 전류 값은 Fig. 8 에 표시하였다. 이 두 그림에서 적응 제어기를 사용한 경우가 사용하지 않을 때보다 전류의 흐름이 증대된 것을 확인할 수 있다.

실제의 구조물에서 쉽게 얻을 수 있는 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz 4 가지의 주파수로 가진기를 구동하였다. 그리고는 각각 적응 제어기를 사용하지 않았을 때와 사용했을 경우에 출력 전류 I_{batt} 를 측정하여 배터리로 흐르는 전력을 구했으며, 이를 데이터 처리하여 에러 바 차트로 표시하였다.

적응 제어기를 사용하지 않았을 때의 각 주파수 별 전력 값에 대한 에러 바 차트를 Fig. 9 에 표시하였다. 측정한 4 Hz 범위 내에서는 가진 주파수에 큰 영향을 받지 않고 비교적 일정한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 배터리 전압이 3 V 로 일정하다고 가정하였을 때 계산한 전력 값은 10 mW 이내임을 알 수 있다.

적응 제어기를 사용했을 때의 각 주파수 별 전력 값에 대한 에러 바 차트를 Fig. 10 에 표시하였다. 마찬가지로 측정한 4 Hz 범위 내에서는 가진 주파수에 큰 영향을 받지 않고 비교적 일정하였고, 전력은 57 mW 정도를 나타냈다.

따라서 적응 제어기를 사용하였을 때 배터리로 흐르는 전력은 제어기 없이 직접 충전할 때 보다 실험한 4 Hz 이내의 가진 주파수 범위에서는 5 배 이상 증가하였다.

또한 전력 변환 장치를 실제의 구조물에 적용할 때에는 얻을 수 있는 가진 주파수가 일정하지 않은 경우가 많을 것이나, 이 주파수의 불균일성은 실험한 저 주파수 범위에서는 배터리로 흐르는 전력에 주는 영향이 적을 것이다.

본 연구 결과 적응 제어기를 사용했을 때 배터리로 흐르는 전력은 Table 1 에 제시한 휴대기기 기능 별 소모 전력의 예와 비교 해 보면 무선

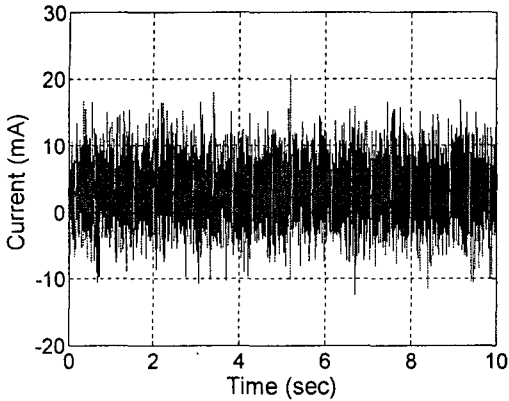


Fig. 7 Measurement of current operating the vibrator (1Hz), not using the controller

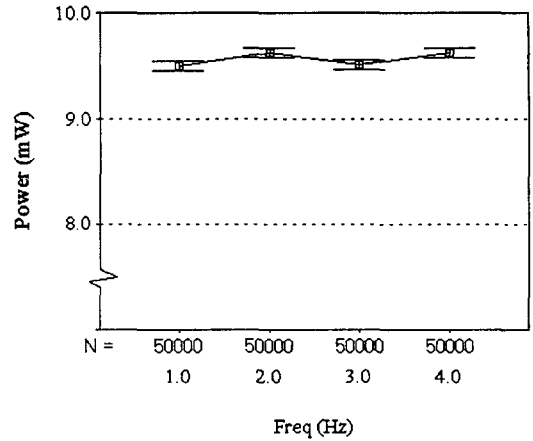


Fig. 9 The error bar chart of the power not using the controller

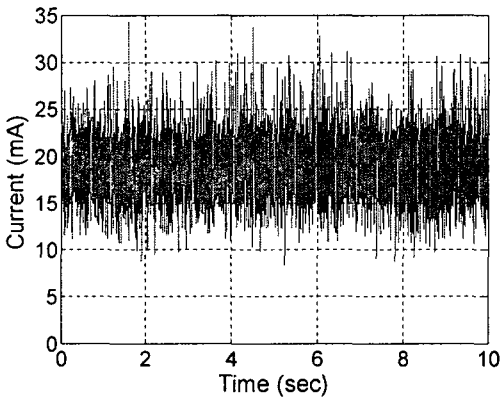


Fig. 8 Measurement of current operating the vibrator (1Hz), using the controller

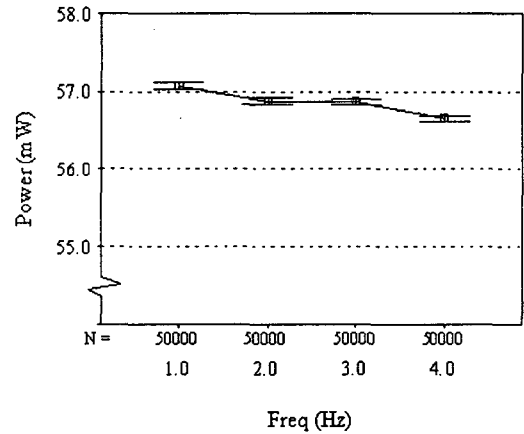


Fig. 10 The error bar chart of the power using the controller

원격 장치 및 휴대 기기의 전원으로는 다소 부족

하다고 생각될 수 있으나, Table 2 에 제시한 바와 같이 휴대 기기들은 소비 전력이 점점 적게 드는 방향으로 진화하고 있다는 점, 그리고 사용 장소에 따라서는 압전 소자를 2 개 또는 그 이상 여러 개 설치할 수 있다는 점 등을 감안한다면 실용화의 적용 범위가 앞으로 크게 늘어날 수 있다고 판단 된다.

따라서, 적응 제어기를 이용한 전력변환 장치를 4 Hz 이내의 저주파수로 가진 하는 실제 구조물에서도 제어기를 사용하지 않았을 때에 비하여 상대적으로 충분히 유용함을 알 수 있다.

4. 결론

적응 제어기를 이용한 전력변환 장치를 제작하여 저주파수로 가진 하는 실제 구조물에서도 이 전력변환 장치가 휴대 기기 및 무선 원격 장치의 전원으로 적합한지를 타진하고자 한 본 연구에서 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 4 Hz 이내 낮은 주파수의 기계적 에너지로 가진 하였을 때, 적응 제어기를 사용하였을 경

우의 배터리로 흐르는 전력이 제어기 없이 직접 충전할 때 보다 실험 결과 5 배 이상 증가하였다.

둘째, 측정된 4 Hz 범위 내에서는 배터리로 흐르는 전력은 가진 주파수의 크기에 큰 영향을 받지 않고 비교적 일정한 분포를 보였다.

셋째, 실험 결과 압전 소자를 이용한 에너지 회수 기술은 향후 실용화 가능성이 충분하며, 그 적용 범위가 크게 늘어날 수 있다고 판단된다.

앞으로 압전 소자에 의해 생산되는 전력으로 경제성이 충분한 실제의 대상 기구 선정 작업 및 선정된 기구에서 독립적으로 작동하는 전력 변환 응용에 관련된 연구, 그리고 회수되는 에너지를 좀 더 극대화할 수 있는 전력 변환 장치의 개발에 대한 후속 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Daue, T., "Energy Harvesting Using Flexible Piezo Fiber Composites," Technical Document, Institut Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe & Smart Materia, p. 4, 2003.
2. Gonzalez, J. L., Rubio, A. and Moll, F., "Human Powered Piezoelectric Batteries Power to Wearable Electronic Devices," Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour., Vol. 10, No. 1, pp. 34-40, 2002.
3. Kymissis, J., Kendall, C., Paradiso, J. and Gershenfeld, N., "Paradistic Power Harvesting in Shoes," 2nd IEEE International Conference on Wearable Computing, pp. 132-139, 1998.
4. Cornwell, P., Goethals, J., Kowtko, J. and Damianakis, M., "Enhancing Power Harvesting Using a Tuned Auxiliary Structure," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, No. 10, pp. 825-834, 2005.
5. Jansen, A. J., Fridstedt, S. and Weernink, A. J. W., "A Batteryless Remote Control for Volvo, results of a feasibility study," ISATA Conference on Automotive & transportation technology, pp.1-9, 2000.
6. Horowitz, S., Kasyap, A., Liu, F., Johnson, D., Nishida, T., Ngo, K., Sheplak, M. and Cattafesta, L., "Technology Development for Self-Powered Sensors," AIAA 1st Flow Control Conference, AIAA2002-7207, pp. 2-10, 2002.
7. Skinner, J., Olson, A., bahr, D., Richards, C. and Richards, R., "A Piezoelectric Membrane Generator for MEMS Power," AIAA Nano Tech Conference, AIAA2002-5745, pp. 1-8, 2002.
8. Lesieutre, G. A., Ottman, G. K. and Hofmann, H. F., "Damping as a result of piezoelectric energy harvesting," Journal of sound and vibration, Vol. 269, pp. 991-1001, 2004.
9. Ottman, G. K., Hofmann, H. F. and Lesieutre, G. A., "Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Step-Down Converter in Discontinuous Conduction Mode," IEEE Transactions on power electronics, Vol. 18, No. 2, pp. 696-703, 2003.
10. Ottman, G. K., Hofmann, H. F., Bhatt, A. C. and Lesieutre, G. A., "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply," IEEE Transactions on power electronics, Vol. 17, No. 5, pp. 669-676, 2002.
11. Face International Co., THUNDER White Paper, 1st Edition, Face International Co., p. 9, 2001.
12. Face International Co., APPLICATION NOTES White Paper, 1st Edition, Face International Co, pp. 2-6, 2002.
13. Park, J. S., Lee, Y. I. and Nam, Y. S., "A Study on the Energy Harvesting Using Piezoelectric Material," Journal of Industrial Technology, Vol. 25, No. B, pp. 141-147, 2005.