

# SSHI 기법을 이용한 압전소자로부터의 에너지 회수에 대한 연구

남윤수\*, 박종수#, 박해균\*\*, 이재강\*\*\*

## A Study on the Piezoelectric Energy Harvesting Using SSHI Technique

Yoon Su Nam\*, Jong Soo Park#, Hae Gyoon Park\*\* and Jae Kang Lee\*\*\*

### ABSTRACT

The target of this paper is to study on the usefulness of the SSHI technique as a wireless electrical power supply when it is driven by mechanical vibrations of low frequency. A THUNDER series a piezoelectric material (TH7-R), which has been developed by a NASA engineer is selected for this study. A mechanical motion vibrator supplies piezoelectric material with mechanical energy. An optical fiber sensor and a pulse generating circuit are used to accomplish the parallel-SSHI technique. As a result of this study, energy harvesting using SSHI technique results in a significant increase of the electrical power flow.

**Key Words** : Energy Harvesting (전기에너지 회수), Piezoelectric Material (압전소자), Synchronized Switching Harvesting with Inductor (동기화 스위칭 에너지 회수법)

### 기호설명

- $\epsilon_{33}^S$  = Clamped permittivity
- $e_{33}$  = Piezoelectric coefficient
- $P_{MAX}$  = Maximum harvested power

### 1. 서론

전원 공급 장치로 주로 의존하고 있는 배터리는 수명에 한계가 있고 부피가 크며, 충전 횟수가 유한하다. 또한 무선 기술의 발달로 전자 기기나

센서들이 서로 먼 곳에 위치하게 되었고, 최근에는 MEMS 기구의 급격한 발달 등으로 기계적 진동을 전기적 에너지로 변환할 수 있는 압전소자가 배터리의 대안으로 제시되고 있다.

압전소자는 액추에이터와 같이 전기적 에너지를 가하여 기계적 에너지를 얻어낼 수 있고, 반대로 발전기와 같이 기계적 에너지를 가하여 전기적 에너지를 만들어 낼 수 있는 물질이다. 일상 의 구조물 진동에서 에너지로 변환되지 않고 버려지는 기계적 에너지는 많이 찾을 수 있다. 이를 이용한 연구는 Kymissis<sup>1</sup> 에 의한 신발에 설치한 압

접수일: 2007 년 10 월 1 일; 게재승인일: 2008 년 3 월 17 일

\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

# 교신저자: 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학부

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

\*\* 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학부

\*\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 박사 후 과정

전소자로부터 얻어진 전기에너지를 RFID(radio frequency identification) 태그 전원으로 사용하는 연구, Cornwell<sup>2</sup>에 의한 선상의 구조물에서 전기에너지 회수를 극대화하는 연구 등을 들 수 있다. 그러나 압전소자를 이용한 전력 생성 방법은 대부분의 전자 기기에 사용하기에는 소자에서 생성되는 전력이 너무 작다는 문제가 있다.

압전소자를 이용하여 전력을 변환시키는 선행 연구로 Lesieutre<sup>3</sup>는 진동 구조물로부터 기계적 에너지를 제거하면, 즉 에너지 회수 시 필수적으로 나타나는 감쇠 현상에 대한 연구를, Ottman<sup>4</sup>은 비연속 진동 모드에서 Step-down 변환기를 사용하여 에너지 회수를 최적화 시키는 연구를 발표하였다. 또 다른 연구로 Ottman<sup>5</sup>은 DC-DC 변환기에서 적응 제어기를 최적의 전력이 전송되도록 연속적으로 수행하여, 배터리에 의해 저장되는 전력을 최대화 시키는 전력변환 회로 및 적응 제어기를 제안하였다. 그러나 이와 같은 선행 연구들은 실제의 구조물에 응용하려 할 때, 작은 양의 변환된 전력을 제어기 작동 전력으로 소비하여야 한다는 문제가 있다. 본 연구에서는 Lefevre<sup>6</sup>가 제안한 인덕턴스를 가진 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법(SSHI)을 사용하여, 실 생활에서 얻어질 수 있는 저주파수로 압전소자를 가진다. 그 결과 실제 구조물에서의 적용이 가능한지 타당성을 검토한다.

## 2. 변환 회로

선행 연구에서 Lefevre는 압전소자를 질량, 스프링 댐퍼 시스템으로 모델링하여, 얻어질 수 있는 최대 전력을 구하였다.<sup>6</sup> 먼저, 다이오드 브리지 회로에 의하여 정류되고, 커패시턴스에 의하여 평활되는 일반적인 기준 회로를 Fig. 1에 표시하였다. 이 기준 회로의 경우 압전소자의 기계적 변위 크기를  $U_M$ , 가진 주파수를  $\omega$ 라 하였을 때 얻어질 수 있는 최대 전력은 식 (1)과 같다.

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 \omega}{2\pi C_0} U_M^2 \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{33}^s$  : 압력을 가했을 때 유전률

$\epsilon_{33}$  : 압전 상수

$$C_0 = \frac{\epsilon_{33}^s A}{L}, \quad \alpha = \frac{\epsilon_{33} A}{L}$$

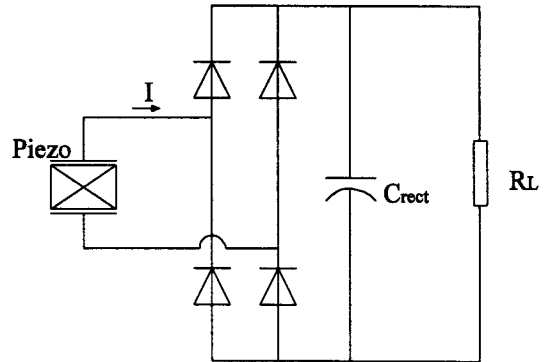


Fig. 1 Standard interface circuit

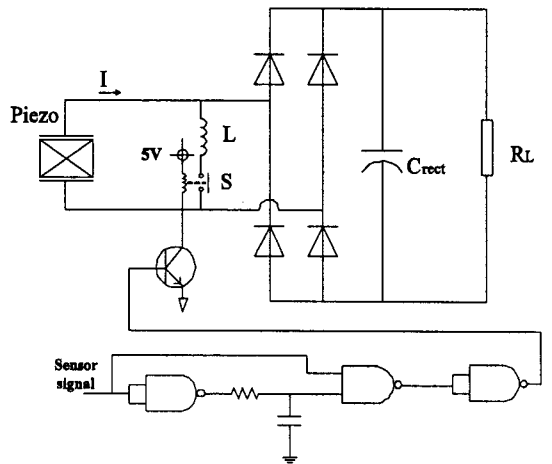


Fig. 2 Parallel-SSHI interface circuit

압전소자와 병렬로 인덕턴스 및 스위치 소자가 추가로 연결된 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법을 적용한 회로를 Fig. 2에 표시하였다. 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법은 인덕터 L과 스위치 S가 직렬로 연결된 회로가 압전소자와 병렬로 연결되어있다. 스위치는 기계적 변위가 최대 또는 최소에 도달할 때 확실하게 닫혀야 한다. 이 최대 또는 최소 변위에서 스위치가 닫힌 후 다시 열리게 되면, 전압 파형은 순간적으로 반전하게 된다. 이 때 반전 전의 전압  $V_{DC}$ 와 반전 후의 전압  $V_m$  사이의 반전 손실은 전기적 특성요소  $Q_i$ 에 의해 식 (2)로 모델링 된다.

$$V_m = -V_{DC} e^{-\pi/2Q} \quad (2)$$

이 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법은 이와 같이 전압 파형을 반전시켜 전체 전압을 높여주게 되는데, 이 방법을 적용하였을 때의 최대 전력은 식 (3)과 같다.

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 \omega}{\pi C_0 (1 - e^{-\pi/2Q})} U_M^2 \quad (3)$$

따라서, 식 (1)과 식 (3)를 비교하면 해석적으로 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법을 적용한 회로에서 얻어진 최대 전력 값은 기준 회로에서의 값보다 크게 됨을 알 수 있다.

### 3. 실험 장치

본 연구에서는 전기에너지 회수를 위한 압전소자로서 NASA 가 개발하고 FACE 사가 상용화시킨 THUNDER 제품 중 TH7-R 을 사용하였다. TH7-R 의 외형은 Fig. 3 과 같이 아취 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. 또한 그 구체적인 사양은 Table 1 과 같다.<sup>7,8</sup>

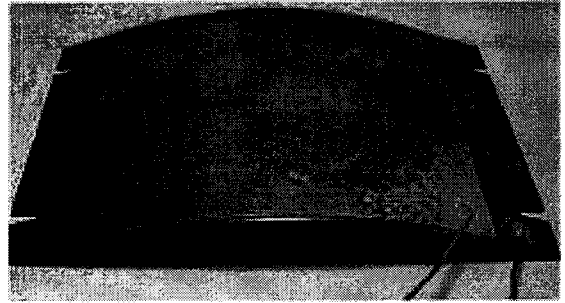


Fig. 3 A configuration of the THUNDER (TH7-R) PZT

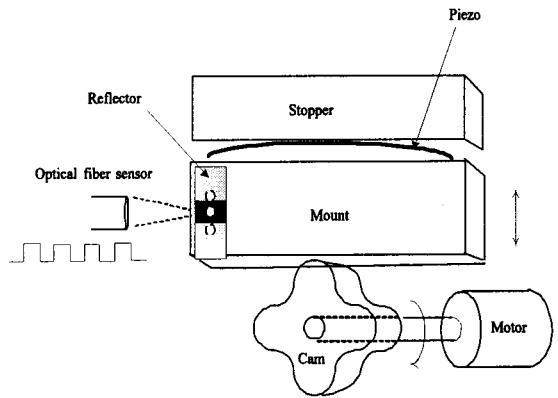


Fig. 4 Experimental setup

Table 1 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)<br>106(simply supported) |
| Typical Cantilevered Displacement | 7.62 mm                                   |
| Block Force                       | 133 N                                     |

실험을 위하여 먼저 Fig. 4 와 같은 가진기 (Vibrator)를 설계, 제작하였다. dSPACE™ DS 1104 에 의해 제어되는 12 V 의 DC 모터로 4 개의 돌출부를 가진 사각 캠을 회전 운동 시킨다. 이 캠에 의해 압전소자 설치대는 상하 운동을 반복한다. 이와 같이 압전소자 설치대가 상하 운동을 하면 Fig. 3 과 같은 아취형의 압전소자는 설치대 위의 투명아크릴로 제작한 고정구와 설치대 사이에서 압축과 이완을 반복하게 된다. 사각 캠의 돌출부의 높이가 아취 형태의 압전소자를 누르는 행정이 되는데, 행정은 4 mm 가 된다. 압전소자 설치대의 왕복 속도, 즉 압전소자를 진동하는 가진 주파수 (Hz)를 측정하고, 변위의 상하 위치를 감지하기 위하여 반사형 광 화이버 센서를 설치하였다. 이를 위해 반사판은 Fig. 4 와 같이 구성 하였다. 또한 이 광 화이버 센서의 출력 신호는 Fig. 2 아래의 펄스 발생 회로에 입력되면 짧은 펄스 신호를

발생한다. 이 신호에 의해 가진기 변위의 상하 변  
 폭점에서 아주 짧은 시간 동안 인덕턴스에 연결된  
 스위치를 닫는다.

#### 4. 결과 및 토의

본 연구에서는 압전소자를 실제의 구조물에서  
 쉽게 얻을 수 있는 저주파수인 1Hz, 2Hz, 3Hz 와 4  
 Hz 로 가진 시켰다. 기준 회로의 경우에 부하 저항  
 $R_L$  을 400k $\Omega$  으로 하였을 때 얻어지는 1200 개 회  
 수 전력의 이산화 데이터를 처리한 에러 바 차트  
 를 Fig. 5 에 표시하였다. 식 (1)과 식 (3)에서와 같  
 이 최대 전력은 가진 주파수가 커짐에 따라 비례  
 하여 증가하는 경향을 보이다가 4Hz 로 주파수가  
 너무 커지면 기계적 손실로 인해 그 증가율이 둔  
 화된 것을 볼 수 있다.

가진 속도를 대략 2Hz 로 하였을 때, 압전소자  
 로부터의 출력 전압 파형을 Fig. 6 에 나타냈다. 인  
 덕턴스와 스위치가 없는 기준 회로에서 압전소자  
 로부터 출력되는 전압 파형이 Fig. 6(a) 이다. 압축  
 할 때 전압이 상승하고, 이완할 때 하강하는 파형  
 으로 나타난다. 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법  
 을 적용한 회로에서 압전소자로부터 얻어지는 출  
 령 전압 파형을 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)에 실선으로 표  
 시하였다. Fig. 6(b)에서 점선은 광 화이버 센서의  
 출력을 나타낸다. 또한, Fig. 6(c) 에서의 점선은 광  
 화이버 센서의 출력 신호를 Fig. 2 하단의 펄스 발  
 생 회로에 입력하여 얻어낸 펄스 신호이다. 병렬

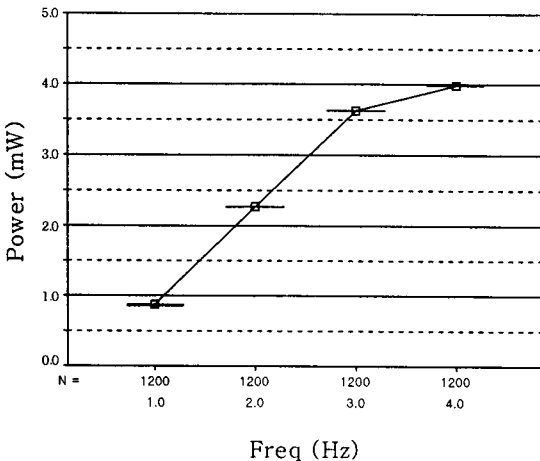
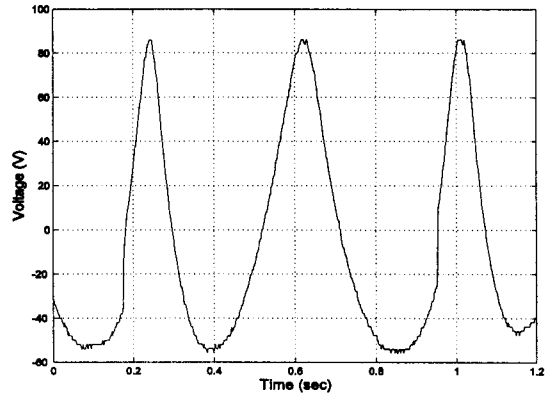
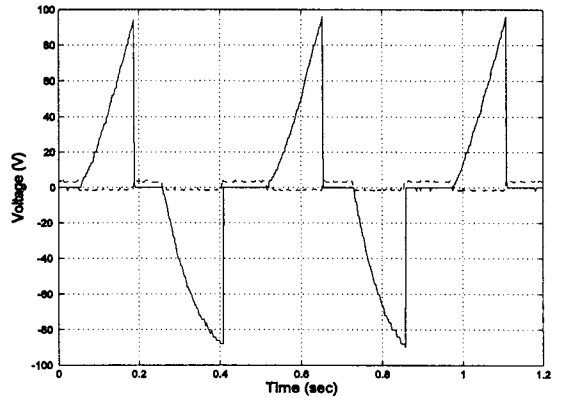


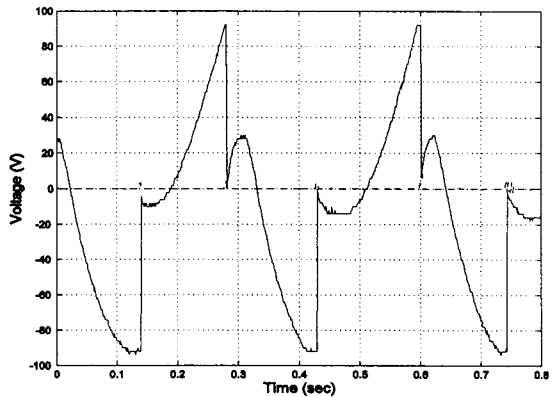
Fig. 5 The error bar chart of the power using the standard interface circuit



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Voltage waveforms

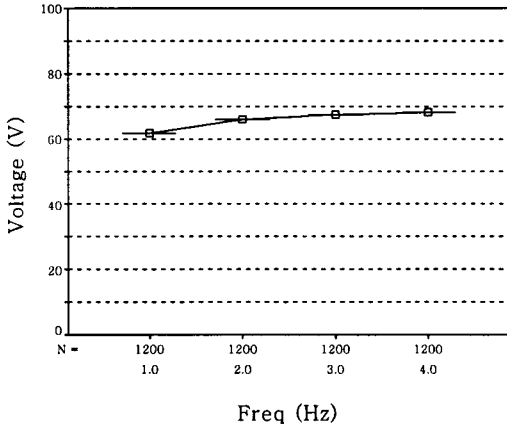


Fig. 7 The error bar chart of the open circuit voltage using the standard interface circuit

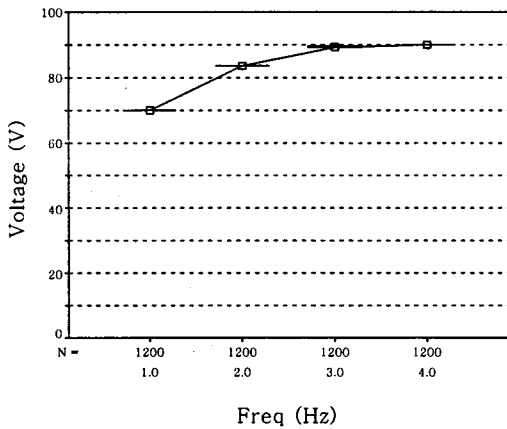


Fig. 8 The error bar chart of the open circuit voltage using the SSHI technique

동기화 스위칭 에너지 회수 회로가 적용되면 Fig. 6(b)에서와 같이, 점선으로 표시된 센서신호 전압이 상승하는 순간, 즉 스위치가 닫히는 순간에 실선으로 표시된 압전소자로부터의 출력은 차단되어 0V로 수렴하게 된다. 그리고, 센서신호 전압이 하강하는 순간, 즉 스위치가 열리는 순간부터 압전소자 출력 전압의 흐름 방향이 반전되어 기준 회로 출력 전압의 방향으로 연장 진행된다. 여기서 스위치의 닫힘 시간을 짧게 가져갈수록, 압전소자 출력 파형은 양과 음의 방향 최대 전압이 기준 회로의 파형에 비해 더 크게 진행된다. 그러면 이 출력 파

형을 정류시 전압 파형에 대한 시간 적분 값이 상승하게 되어 평활하였을 때의 전압도 더 높아지게 된다. 따라서 이 결과로부터 정류 및 평활 후의 전력 회수를 높이기 위해서는 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수 회로에서 인덕턴스에 연결된 스위치의 닫힘 순간을 아주 짧게 가져가야 됨을 알 수 있다. 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수 회로에서 스위치의 닫힘 순간을 짧게 가져가기 위해, 광화이버 센서의 출력 신호를 펄스 발생 회로에서 처리하여 펄스 신호를 얻었다. 이 신호로 스위치를 조작하여 얻은 출력 전압을 Fig. 6(c)에 실선으로 표시하였다. 정류 시의 전압 파형에 대한 시간 적분 값이 커져서 평활 전압이 상승하므로 전력 회수가 Fig. 6(a), Fig. 6(b)의 경우 보다 증대됨을 알 수 있다.

압전소자를 실제의 구조물에서 쉽게 얻을 수 있는 저주파수인 1Hz, 2Hz, 3Hz와 4 Hz로 가진 시, 기준 회로의 경우와 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수 회로를 사용했을 경우의 개회로(open-circuit) 전압을 측정하였다. 기준 회로에서 얻어진 개회로 전압 1200 개 이산화 데이터를 처리한 에러 바 차트를 Fig. 7에 표시하였다. 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수 회로를 사용한 경우 개회로 전압의 에러 바 차트는 Fig. 8이다. 각 주파수 모두에서 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법을 사용했을 때가 기준 회로의 경우보다 전반적으로 개회로 전압이 상승했음을 볼 수 있다.

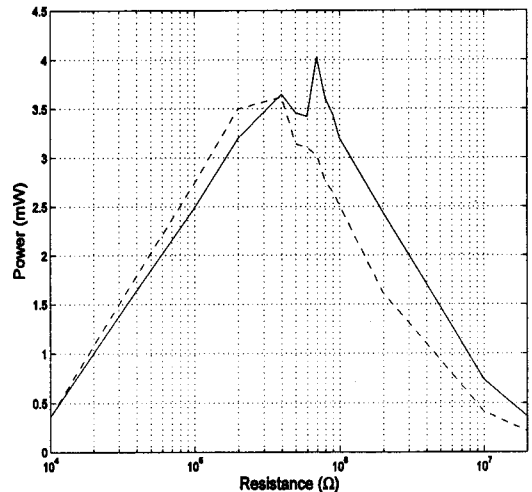


Fig. 9 Energy harvesting power

압전소자를 3Hz 로 가진하고 부하 저항  $R_L$  을 변화시키면서, 기준 회로와 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수 회로를 사용했을 때의 회수 전력을 Fig. 9 에 비교하여 표시하였다. 점선은 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법을 사용하지 않은 기준 회로에 대한 결과이고, 실선은 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수 회로에서 얻어진 회수 전력이다. 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법을 사용했을 때의 회수 전력이 기준 회로에서 얻어진 전력 보다 다소 컸다. 그리고 그 결과는 부하 저항이 클 경우 뚜렷하였다. 최적 전력 전송 이론에 따르면 Fig. 1 과 Fig. 2 에서 부하 저항  $R_L$  을 변화시키면서 평활 전압  $V_{rect}$  을 조정하였을 때, 조정한 평활 전압  $V_{rect}$  가 개회로 전압의 1/2 이 될 때 최대 전력이 발생한다.<sup>5</sup> 즉, 부하로의 최적 전력 전송은 부하 저항  $R_L$  을 이용하여 조정한 평활 전압이 개회로 전압의 절반일 때 발생한다. Fig. 9 에서 보면 기준 회로의 경우에 회수 전력이 최대가 되는 부하 저항은 300-400 k $\Omega$  부근이 된다. 이것은 이 부하 저항 값으로 조정된 평활 전압이 Fig. 7 에 표시된 개회로 전압의 1/2 에 해당하기 때문이다. 또한 Fig. 7 과 Fig. 8 에서 3Hz 로 가진 시 개회로 전압을 비교하면 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법을 사용했을 때가 기준 회로의 경우보다 개회로 전압이 더 크다. 그러므로 최대 전력이 발생하는 평활 전압도 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법을 사용했을 때가 더 크게된다. 따라서, 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법을 사용한 경우가 Fig. 9 에서와 같이 부하 저항  $R_L$  이 더 큰 값에서 최대 전력이 발생한다. 그리고 기준 회로와의 최대 전력 차이는 부하 저항이 클 경우가 더 뚜렷할 것이다.

## 5. 결론

저주파수의 실제 구조물에서 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수법(SSHI)의 적용에 대한 타당성을 검토하기 위한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 압전소자를 저주파수로 가진 시 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수 회로를 사용했을 때가 기준 회로의 경우보다 모든 주파수에서 개회로 전압이 상승하였다.

둘째, 부하 저항이 가해질 경우에 얻어진 회수 전력도 기준 회로의 경우 보다 병렬 동기화 스위

칭 에너지 회수 회로를 사용한 경우가 의미 있게 증가하였다.

셋째, 병렬 동기화 스위칭 에너지 회수 회로에서 전력 회수를 높이기 위해서는 인덕턴스에 연결된 스위치의 닫힘 순간을 아주 짧게 가져가야 됨을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-521-D00033)

## 참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 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, No. 3, pp. 991-1001, 2004.
4. 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.
5. 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.
6. Lefevre, E., Badel, A., Richard, C., Petit, L. and Guyomar, D., "A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems," Sensors and Actuators A, Vol. 126, No. 2, pp. 405-416, 2006.
7. Face International Co., "THUNDER White Paper,

1st Edition,” Face International Co., p. 9, 2001.

8. Face International Co., “APPLICATION NOTES White Paper, 1st Edition,” Face International Co., pp. 2-6, 2002.