

압전 소자를 이용한 에너지 회수에 관한 연구

A Study on the Energy Harvesting Using Piezoelectric Material

박 종 수* 이 영 일** 남 윤 수***
Park, Jong-Soo Lee, Young-Il Nam, Yoon-Su

Abstract

A target of this paper is to get some elementary experimental data on the energy harvesting using a piezoelectric material. A THUNDER series piezo material (TH7-R), which has been developed by NASA engineer is selected for this study. In order to provide a mechanical energy to the piezoelectric material, a mechanical motion vibrator and its driving electronics are designed. Using a simple PWM control, the excitation frequency of vibrating mechanical motion is varied. The generated electric power as a function of the excitation frequency is monitored and analyzed. This initial experiment shows a possible energy source using a piezoelectric material for the application to low-power consumed small electronic devices such as RFID, MEMS, and etc.

키워드 : 압전소자, 전기에너지 회수, 가진기

Keywords : *piezoelectric material, energy harvesting, vibrator*

1. 서론

최근에는 작고 휴대할 수 있는 매우 강력한 기기들이 아무 곳에서도 음악을 듣고 무선으로 통신하고 컴퓨팅 하는, 다시 말하여 유비쿼터스 적으로 상용화되고 있다.

그럼에도 불구하고 전원 공급은 대부분 배터리에 의존하고 있다. 그러나 배터리는 수명에 한계가 있고 부피가 크며, 충전 횟수가 유한하다. 또한 무선 기술의 발달로 전자 기기나 센서들이 서로 먼 곳

에 위치하게 되었고, 최근에 MEMS기구의 급격한 발달 등으로 진동을 전기적 에너지로 변환할 수 있는 압전 소자가 그 대안으로 떠오르고 있다[1].

압전 소자는 전기적 에너지를 가하여 기계적 에너지를 얻어낼 수 있고(액츄에이터로 이용), 반대로 기계적 에너지를 가하여 전기적 에너지를 만들어 낼 수 있는(제너레이터로 이용) 물질이다. 압전 소자를 이용한 전기에너지 회수에 관한 개념도를 그림 1에 나타냈다[2]. 그림 1에 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 절감될 것이다. 이와 같이 유용한 에너지로 변환되지 않고 소모되는 기계적 에너지는 일상생활에서 많이 찾을 수 있다.

그러나 이러한 전력 생성 방법은 대부분의 전자 기기에 사용하기에는 압전 소자에서 생성되는 전

* 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학부, 박사과정

** 강원대학교 산업대학원 정밀기계공학과, 석사과정

*** 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 교수

력이 너무 작다는 문제가 있다. 따라서 이 전기에너지 회수 기술이 유용한 적용 분야는 센서 응용, 마이크로 컨트롤러 전원, 원격 제어 기기, 저 소모 전력의 아날로그 및 디지털 전자 기기, LED, LCD 등과 같은 저 전력으로 작동되는 전자 기기들이다. 다음 표 1은 대표적 휴대 기기의 소모 전력을 기능별 나타내었다[3]. 이 소모 전력은 앞으로 점점 감소될 것이므로 전기에너지 회수 기술도 그 적용 범위가 더 넓어질 것이다.

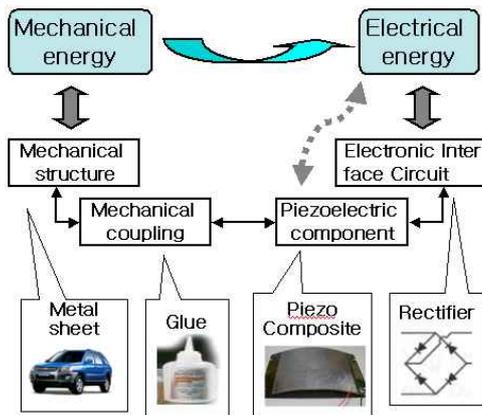


그림 1 압전 소재를 이용한 전기에너지 회수 개념도

표 1 휴대 기기의 기능별 소모 전력의 예

기기	기능별 소모 전력
마이크로 프로세서 (ARM 720T)	작동(50MHz)시: 90mW 대기(50kHz)시: 90μW
Bluetooth System	작동 시: 50mW 대기 시: 30mW 종료 시: 4μW
MP3 player	110mW

근래에는 신발에 설치한 압전 소자에 의해 얻어진 전기에너지를 RFID Tag 전원으로 사용하는 연구[4], 전상 구조물에서 전기 에너지 회수를 극대화하는 연구[5], 자동차의 원격 제어 장치를 사람 근육의 힘만을 사용하여 배터리 없이 작동함으로써 배터리 떨어졌을 때의 불안감을 줄이는 연구[6], Helmholtz 공진기를 사용하여 소리에너지를 재생하여 자체 전력을 가진 마이크로폰 개발 연구[7], MEMS전원으로 쓰이는 얇은 필름 형태의 압전 박

막 발전기의 개발에 관한 연구[8]들과 같이 에너지 회수를 실용화하는 내용들이 학술회의에서 발표되고 있다.

Ottman등은 진동 구조물로부터 기계적 에너지를 제거하면, 즉 에너지 회수 시 필수적으로 나타나는 감쇠 현상에 대한 연구[9], 비연속 진동 모드에서 Step-Down 변환기를 사용하여 에너지 회수를 최적화 시키는 연구[10], DC-DC변환기에 적응제어 기술을 적용하여 최적의 전력이 전송되도록 연속적으로 수행하고, 배터리에 의해 저장되는 전력을 최대화 시키는 연구[11] 와 같이 전력 회로에 관한 연구를 근래에 발표하였다.

본 연구는 압전 소자에서 발생된 초기 전기에너지를 실제로 사용가능한 전기 에너지로 변환하는 전력변환장치의 개발을 위한 기초 자료를 얻고자 한다. 실제의 기구에 압전 소자를 적용하기에 앞서 에너지변환 장치를 최적화하기 위하여 기계적 진동을 발생할 수 있는 가진기를 제작하였다. 이 가진기에 압전 소자를 설치하고 진동을 가하여 전력 변환장치 개발을 위한 자료를 수집하고자 한다.

2. 연구 목표 및 방법

2.1 압전 소재의 개요

본 연구에서는 전기에너지 회수를 위한 압전 소자로써 NASA가 개발하고 FACE사가 상용화 시킨 제품 중 TH7-R을 사용한다.

그 외형은 그림 2와 같이 아취 형상이며, 내부 구조는 그림 3과 같이 스테인리스 기판에 압전 세라믹(PZT)이 접착제인 LaRC-SI로 적층되어 붙여지고 표면은 알루미늄으로 덮여있다. 압전 세라믹은 압전 특성을 향상시키기 위하여 BaTiO₃ 와 Lead Zirconate Titanate(PZT)와 같이 다결정질의 강유전체의 물질들로 만들어져있다.

여러 THUNDER 제품 중 본 연구에서는 TH7-R을 사용하였으며 구체적인 사양은 표 2와 같다 [12-13].



그림 2 압전 소자 THUNDER TH7-R의 외형

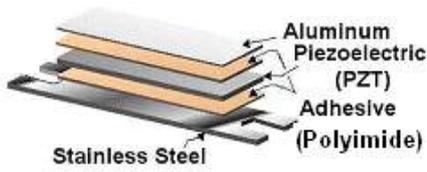


그림 3 압전 소자 THUNDER의 구조

표 2 THUNDER TH7-R의 사양

모델	TH7-R
무게	18.0 g
크기(L×W×H)	96.52×71.12×0.58 mm
세라믹 두께	0.254 mm
Dome/Arch 높이	9.57 mm
정전 용량	166 nF
최대 적용 전압	595 V
공진 주파수(Hz)	31(외팔보로 사용 시) 106(단순보로 사용 시)
표준 변위	7.62 mm
제한 하중	133 N

2.2 연구 목표

실제의 기구에 압전 소자를 적용하기에 앞서 본 연구에서는 압전 소자에서 발생된 초기 전기에너지를 실제로 사용가능한 전기 에너지로 변환하는 전력변환장치의 개발을 위하여 다음과 같은 기초 자료를 얻고자 한다.

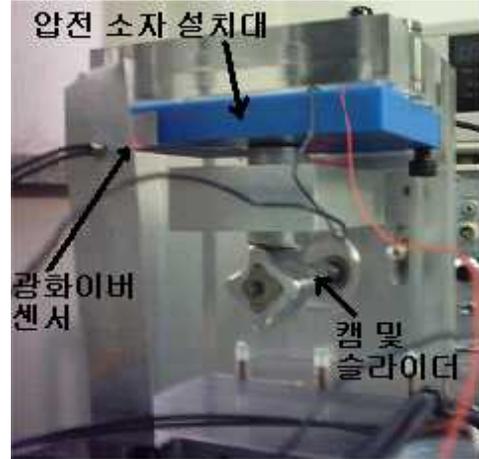
- (1) 가진기 상에서 압전 소자에 속도를 변화시키며 기계적 에너지를 주었을 때 발생하는 전압, 전류의 측정 값.
- (2) 가진기 상에서 압전 소자에 속도를 변화시키며 기계적 에너지를 주고 이를 정류하였을 때의 전압, 전류 값.
- (3) 가진기 상에서 압전 소자에 속도를 변화시키며 기계적 에너지를 주고 이를 정류하고 평활하였을 때의 전압, 전류 값.
- (4) 평활시 측정된 전압과 전류 값으로 출력 전력 계산.

2.3 연구 방법

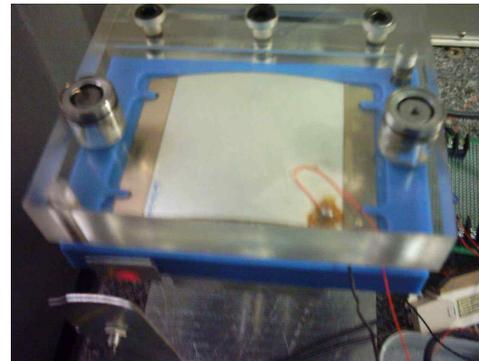
(1) 가진기

실험을 위하여 먼저 그림 4의 (a)와 같은 가진기를 설계, 제작하였다.

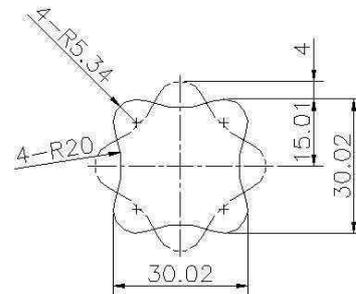
12V의 DC 모터로 4개의 돌출부를 가진 사각 캠



(a) 가진기의 주요 구조부



(b) 가진기에 압전 소자가 설치된 모습



(c) 가진기에 설치된 사각 캠의 치수
그림 4 가진기의 구조

을 회전 운동 시킨다. 이 캠에 의해 슬라이더가 왕복 운동을 하며, 이 슬라이더에 의해 압전 소자 설치대가 상하 운동을 하는 구조이다. 이와 같이 압전 소자 설치대가 상하 운동을 하면 아취형의 압전 소자는 설치대 위의 투명 아크릴로 제작한 고정구와 설치대 사이에서 압축과 이완을 반복하게 된다.

사용된 DC모터는 구동 토크 증대를 위해 감속기가 달려있어 속도가 느리므로, 압전 소자 설치대의 상하 운동 속도를 증대시키기 위해 사각 캠을 사용하였다. 이 사각 캠의 돌출부의 높이가 아취 형태의 압전 소자를 누르는 행정이 되는데, 그림 4의 (c)에서와 같이 행정은 4mm가 된다. 그림 4의 (b)는 가진기에 압전 소자를 설치한 모습이다.

압전 소자 설치대의 왕복 속도(Hz)를 측정하기 위하여 그림 5와 같은 모델명 PG-TR의 반사형 광화이버 센서를 주변에 설치하였다.

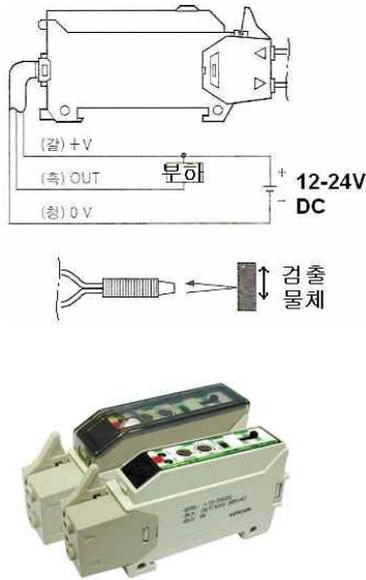


그림 5 광화이버 센서

DC 모터의 구동 회로는 그림 6과 같다. 모터에 DC 12V의 전원을 공급 시 스위칭 작용을 위해 NPN형 트랜지스터 TIP41을 사용하였으며, 베이스 단자에 PWM신호를 주어 모터의 속도를 조정한다. 이 PWM 신호는 컴파일 테크놀로지사의 마이크로 프로세서 ROVIN을 사용하여 발생하였다.

(2) 정류 및 평활 회로

압전 소자에서 발생하는 교류 파형을 정류시키기 위해 그림 7과 같은 단상전파 정류회로(Single-Phase Diode Bridge Rectifier)를 사용하였다. 또한 평활 시에는 $C_0 = 22\mu\text{F}$ 의 콘덴서를 사용하였다.

회수, 정류, 평활 시 각각의 전압 파형을 구하기 위하여 오실로스코프를 사용하였다. 전류는 측정값이 미세하여 직접 측정하는데 어려움이 있으므로 회로에 40 kΩ의 저항을 설치하여 전압 파형을 구해서 오옴의 법칙에 의해 간접적으로 계산하였다.

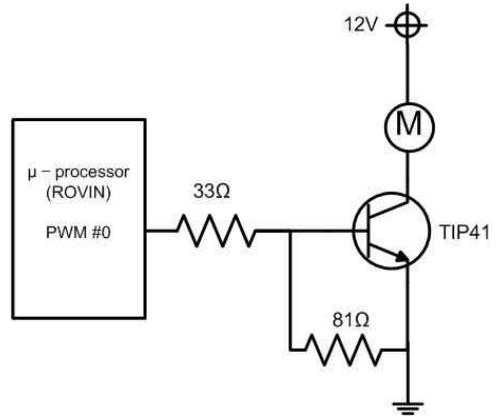


그림 6 DC 모터 구동 회로

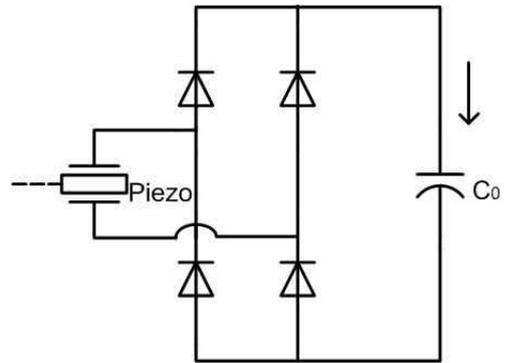


그림 7 정류 및 평활 회로

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 파형 측정 결과

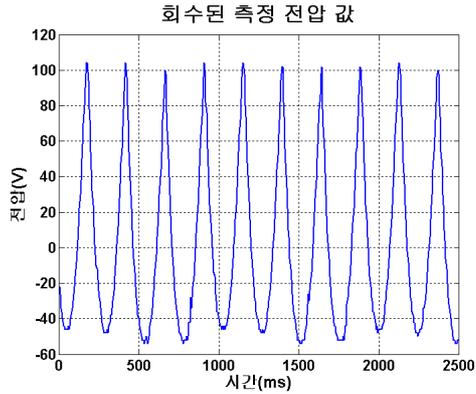
가진기에서 가진 주파수를 1Hz, 2Hz, 3Hz, 4Hz 4가지로 변경해 가면서 각각의 경우에 압전 소자에서 바로 측정된 전압 값, 정류된 전압 값, 평활 까지 거친 전압 값을 측정하였다.

그림 8은 그 중 가장 빠른 4Hz의 속도로 압전 소자에 기계적 운동을 가한 경우의 전압 파형이다.

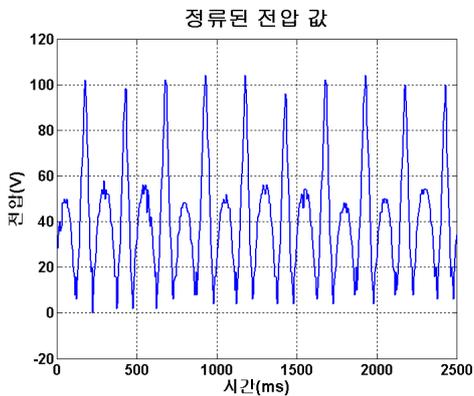
압전 소자에서 바로 측정된 전압 값인 (a) 파형에서 광화이버 센서의 출력 값과 비교해 보면 압전 소자가 압축이 되었을 때 출력 전압 값이 음의 값

이고, 인장되었을 때 출력 전압 값이 양의 값이 됨을 알 수 있었다. 최고 값과 최저 값의 차이는 160V이고, 양의 최고 값은 106V로 측정되었다.

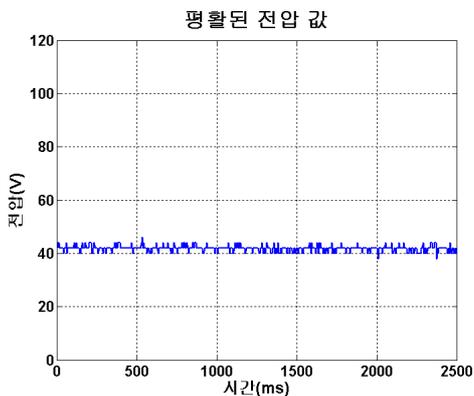
(b) 파형은 단상전파 정류회로를 사용하여 정류된 전압 값이다. 압축이 되었을 때 음의 값이었던 출력 전압 값이 모두 양의 값으로 바뀌었음을 볼 수 있다. $C_0 = 22\mu\text{F}$ 의 콘덴서를 사용하여 평활까지 거친 (c) 파형은 전압이 42V 부근에서 유지되고 있음을 알 수 있다.



(a) 압전 소자에서 회수된 측정 파형



(b) 정류 회로를 거친 파형



(c) 평활 회로를 거친 파형

그림 8 압축 속도 4Hz시의 전압 파형

3.2 측정 결과 분석

가진기에서 4가지의 가진 주파수를 주어 측정된 전압 값들은 각각의 경우에 오실로스코프 상에서 1회 저장 시 1000개의 이산 데이터가 얻어지는데, 이 중 데이터의 유용성이 큰 앞의 200개를 버리고 나머지 800개의 데이터를 처리하여 에리 바 차트를 구하였다.

그림 9에 가진기 각 가진 주파수 별로 평활 전압을 데이터 처리하였다. 전압은 수십 볼트 규모인데 가진 주파수가 빨라짐에 따라 전압도 증가함을 알 수 있다. 그러나 그 증가율은 주파수가 증가함에 따라 점점 둔화 되어 3Hz와 4Hz 사이에는 별 차

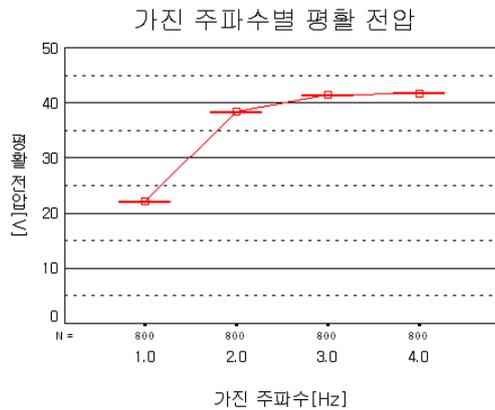


그림 9 평활시 측정 전압의 Error Bar Chart

이가 없음을 볼 수 있다.

평활 시 전류는 회로에 40 kΩ의 저항을 설치하여 전압을 구해서 오옴의 법칙에 의해 간접적으로 측정하였는데 이 평활 전류 값을 그림 10에 데이터 처리하였다. 전류 값은 소수점 이하의 mA 규모로 매우 작은 값이었다. 가진기의 가진 주파수를 증가 시킴에 따라 전류 값도 증가하였는데, 그 증가율은 전압과는 달리 크게 줄지 않고 실험한 1Hz-4Hz 범위에서는 거의 선형에 가까운 분포를 유지하고 있었다.

위의 평활 전압과 전류로 계산한 전력 값을 그림 11에 데이터 처리하였다. 출력된 전력은 11mW 이하의 분포를 보였는데, 가진 주파수가 증가 할수록 전력의 출력 값도 급격히 선형적으로 상승함을 관

찰할 수 있다. 그림 12에서 가진기에 의해 압전 소자에 가한 힘을 F [N], 압전 소자의 변형 량(압전 소자 설치대의 행정)을 s [mm], 압전 소자 설치대의 왕복 시간을 τ [sec], 가진 주파수를 f [Hz] 라 하면,

속도 v [mm/s]의 가진기가 압전 소자에 가한 동력

$$\begin{aligned}
 P &= Fv \\
 &= F \frac{s}{\tau} \\
 &= Fsf \text{ [mW]}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

위 (1)식에서 압전 소자에 가한 힘 F 는 일정하고, 행정 s 또한 4mm로 일정하다.

그러므로 압전 소자에 입력한 기계적 에너지는 가진 주파수에 비례한다. 따라서 회수되는 전력의 출력 값 역시 그림 11과 같이 일정 한도에서는 주파수에 비례하는 경향을 나타낸 것으로 분석된다.

표 1에서 제시한 휴대 기기 기능 별 소모 전력의 예와 비교해 보면 압전 소자 하나로는 이용할 수 있는 범위가 마땅치 않으나 사용 장소에 따라서는 압전 소자를 2개 또는 그 이상 설치할 수 있다는 점, 또 휴대 기기의 소모 전력이 앞으로 점점 감소하고 있다는 점 등을 감안한다면 에너지 회수 기술은 실용화 가능성이 충분하다고 할 수 있다.

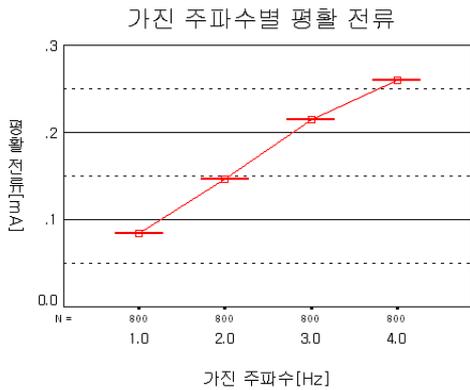


그림 10 평활시 측정 전력의 Error Bar Chart

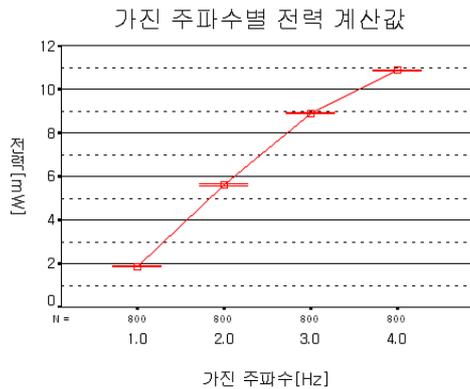


그림 11 평활시 측정 전력의 Error Bar Chart

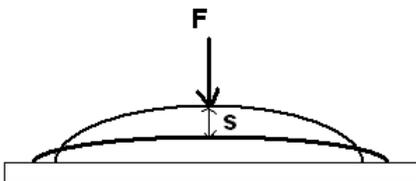


그림 12 압전소자에 가해진 힘과 변위

4. 결론 및 향후 과제

전력변환장치 개발을 위한 기초 자료를 수집하고자 한 본 연구에서는 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 가진 주파수를 증가하면 출력 전압도 증가함을 알 수 있다. 그러나 그 증가율은 속도가 증가함에 따라 점점 둔화됨을 알 수 있다.

둘째, 가진 주파수를 증가시킴에 따라 전류 값도 증가하였는데, 그 증가율은 실험 범위에서는 선형에 가까운 분포를 유지하고 있었다.

셋째, 출력된 전력은 11mW 이하의 분포를 보였는데, 가진 주파수가 증가 할수록 전력의 출력 값도 급격히 선형적으로 상승하였다.

넷째, 실험 결과는 이 기술의 실용화 가능성을 보여주었다.

그리고 후속적으로 다음과 같은 사항이 향후 연구되어야 할 것으로 판단된다.

첫째, 에너지 회수를 최적화 시키고, 배터리에 의해 저장되는 전력을 최대화 시키는 연구[10-11]와 같이 전력 회로에 관한 선행 연구를 벤치마킹하여 기초 기술을 확보하여야한다.

둘째, 전기 에너지 회수 기술을 적용하였을 때 경제성과 실용성이 있는 실제의 대상 기구 선정 작업이 필요하다.

셋째, 실제의 선정된 기구에서 에너지 회수를 최적화시키는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Kamyar Ghandi, *Compact Piezoelectric Based Power Generation*, Technical Document, Continuum Control Co, 2001.
- [2] Thomas Daue, *Energy Harvesting Using Flexible Piezo Fiber Composites*, Technical Document, Institut Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe & Smart Material.
- [3] J. L. Gonzalez, Antonio Rubio, and Francesc Moll, "Human Powered Piezoelectric Batteries Power to Wearable Electronic Devices", *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.*, Vol. 10, No. 1, 34-40, 2002.
- [4] John Kymissis, Clyde Kendall, Joseph Paradiso, and Neil Gershenfeld, "Paradistic Power Harvesting in Shoes", *2nd IEEE International Conference on Wearable Computing*, 1998.
- [5] Michael Damianakis, Jan Goethals, Jeffrey Kowtko, and Phillip Cornwell, "Enhancing Power Harvesting Using a Tuned Auxiliary Structure", *IMAC Conference on Structural Dynamics*, 2004.
- [6] A. J. Jansen, S. Fridstedt, and A. J. W. Weernink, "A Batteryless Remote Control for Volvo, results of a feasibility study", *ISATA Conference on Automotive & transportation technology*, 2000.
- [7] S. Horowitz, A. Kasyap, F. Liu, D. Johnson, T. Nishida, K. Ngo, M. Sheplak and L. Cattafesta, "Technology Development for Self-Powered Sensors", *AIAA 1st Flow Control Conference*, 2002.
- [8] J. Skinner, A. Olson, D. bahr, C. Richards and R. Richards, "A Piezoelectric Membrane Generator for MEMS Power", *AIAA Nano Tech Conference*, 2002.
- [9] G. A .Lesieutre, G. K. Ottman, and H. F. Hofmann, "Damping as a result of piezoelectric energy harvesting", *Journal of sound and vibration*, 269, pp. 991-1001, 2004.
- [10] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, and G. A .Lesieutre, "Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Step-Down Converter in Discontinuous Conduction Mode", *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 18, No. 2, 696-703, 2003.
- [11] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt and G. A .Lesieutre, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply", *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 17, No. 5, 666-676, 2002.
- [12] Face International Co., *THUNDER White Paper*, 1st Edition, Face International Co, 2001.
- [13] Face International Co., *APPLICATION NOTES White Paper*, 1st Edition, Face International Co, 2002.