

## 압전 폴리머를 이용한 마이크로 에너지 포집시스템 설계

손영대, 김동욱  
동서대학교

### Design of Micro Energy Harvesting System using Piezo-Electric Polymer

Young-Dae Son, Dong-Wook Kim  
Dongseo University

**Abstract** - 본 논문은 압전 폴리머를 이용한 마이크로 에너지 포집 시스템을 설계하여 신발에 접목하고, 보행자의 운동에너지로부터 발생된 전기에너지를 포집하여 원하는 부하를 구동하는 시스템을 제시한다. 또한, 시스템으로부터 발생된 전기에너지를 축전지에 저장하고, 최대 에너지 전력점을 보충하기 위하여 전류 불연속 모드(DCM; discontinuous conduction mode)로 동작하는 벡-부스트 컨버터를 이용한다. 즉, 본 논문은 압전 폴리머와 전류 불연속 모드로 동작하는 벡-부스트 컨버터를 이용한 마이크로 에너지 포집 시스템을 설계하여 실험을 통해 본 논문에서 제시한 시스템의 타당성 및 본 논문에서 제안한 자가발전 신발을 위한 적용가능성을 확인한다.

### 1. 서 론

최근, 화석연료 고갈에 따른 유가 상승과 환경오염 문제 직면으로 인해 자연환경에서 버려지는 친환경적 에너지인 진동에너지, 태양광에너지, 풍력에너지 등의 에너지들을 유용한 전기에너지로 변환하는 소형 에너지 연구 및 발전이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있는 실정이다. 특히, 최근 무선 센서 네트워크화가 촉진되면서 현재 상용화 되고 있는 유틸리티스(Ubiquitous)센서네트워크에 적합한 전원 공급원을 보완 및 대체 할 수 있는 방안이 검토 및 연구가 이루어지고 있다. 현재, 전원 공급 장치로 주로 의존되고 있는 이차전지, 연료전지는 수명의 한계가 있고 부피가 크며, 충전 횟수가 유한하다는 문제점이 있다. 또한, 무선 센서 시스템에 적합한 전원공급 장치의 조건은 안정적인 전원 공급이 가능하고, 유지 및 보수를 위한 노력과 비용이 전혀 들지 않으면서 무선 센서 시스템에 전원을 공급할 수 있어야 한다는 것인데, 이러한 조건을 충족시키기 위해서는 시스템 내부에서 자가발전이 가능하면서 작동 수명이 반영구적이고, 설치 후 전원이나 배터리의 교체가 필요 없는 태양광에너지, 진동에너지, 풍력에너지 등과 같은 생활 속에서 무의식적으로 버려지는 에너지를 활용하여 전기에너지로 변환할 수 있는 발전이 요구되고 있는 실정이다. 그리고 최근 전자회로 기술의 발전에 의해 저전력으로 동작 가능한 집적회로의 상용화에 따라 미소 에너지원으로도 전자 부품과 회로시스템이 동작이 가능하게 되어 다양한 에너지 포집기술에 적용되고 있으므로, 본 논문은 소형 에너지의 개발 및 필요성을 인지하여 주변의 무제한 활용되고 있지 않은 진동에너지를 수확하고 전기에너지로 변환 및 활용하는 Piezoelectric Energy Harvesting에 대하여 연구를 하였다. 본 논문에서 선정된 압전 폴리머는 열가소성 폴리우레탄(TPU; Thermoplastic Polyurethane), 폴리프로필렌(PP; Polypropylene) 및 에틸렌아세트산비닐 공중합체(EVA; Ethylene-Vinyl Acetate)가 있다. 이들은 일정한 분극(Poling) 과정을 거치면 압전소자와 유사한 전기적 특성을 지니게 된다. 또한, 압전 폴리머는 내한성과 내마모성이 우수하며 기존의 압전소자로 사용되고 있는 PZT계열의 세라믹에 비해 공정이 간단하고 원하는 모양과 크기로 쉽게 제작할 수 있다는 장점과 함께, 낮은 제작단가 및 높은 내구성을 가지는 신소재이므로 보다 다양한 환경발전 시스템에 접목가능하다. 또한, 압전 폴리머로부터 발생된 전기에너지를 포집하기 위해 전류 불연속 모드로 동작하는 벡-부스트 컨버터를 설계하였으며, 이는 평균 입력전류가 입력전압에 비례하도록 벡-부스트 컨버터를 제어함으로써 컨버터의 입력저항과 압전 폴리머의 내부저항이 매칭되어 최대 전력전달이 가능하게 한다. 그리고 축전지에 저장된 에너지를 통해 마이크로컨트롤러인 ATtiny13V를 이용한 LED 제어 및 LED를 구동하는 Application을 설계 및 구현하였다. 즉, 본 논문에서는 압전 폴리머와 벡-부스트 컨버터를 통해 에너지 발생 및 에너지 저장에 주력하였으며, 실험을 통해 본 논문에서 제안한 시스템의 타당성 및 자가발전 신발을 위한 적용가능성을 확인하였다.

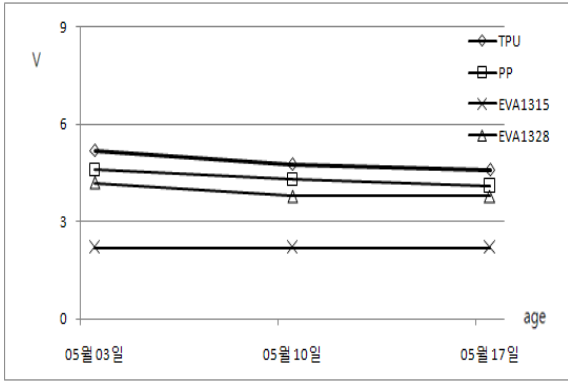
### 2. 압전 폴리머를 활용한 발전 시스템 구현

#### 2.1 압전 폴리머의 분극 및 자가 발전 시험

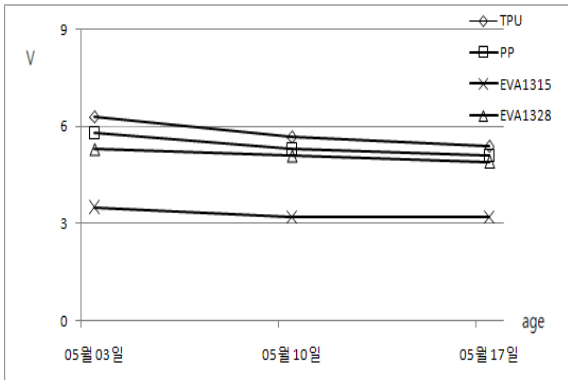
본 논문에서 압전 폴리머를 이용한 마이크로 에너지 포집시스템 설계를 위해 선정된 압전 폴리머는 앞서 언급한 열가소성 폴리우레탄(TPU; Thermoplastic Polyurethane), 폴리프로필렌(PP; Polypropylene) 그리고 에틸렌아세트산비닐 공중합체(EVA; Ethylene-Vinyl Acetate)가 있다. 각 폴리머에 압전특성 및 전왜특성을 부여하기 위해서는 반드시 분극(Poling) 과정을 거쳐야 하는데, 분극이란 폴리머에 전압, 전계 및 온도를 인가하여 강제적으로 구조적인 방향성을 가지도록 분역(Domain)을 일정한 방향으로 배향(Orientation)시키는 과정이다. 이를 통하여 폴리머에 압력을 가하면 폴리머 Sheet에 부분적인 (+)양전하와 (-)음전하의 Charge가 생겨 전위차가 발생하여 전기적인 특성을 띠는 것이다. 그리고 이 분극 조건에 의해 폴리머의 재료적 특성(절연저항, 유전율)이 의존되고 동일 재료라 할지라도 그 형상이나 크기에 따라서 달라질 수 있다. 즉, 분극 후 높은 전기적 특성을 가지는 압전 폴리머를 찾기 위해서는 전압과 전계의 크기, 분극 시간 그리고 온도에 따른 실험적 분석과 시행착오가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 각 압전 폴리머에 대하여 최적의 분극조건을 찾기 위해 분극발생 장치와 신발 장착을 고려한 사이즈로 제작된 각 폴리머를 이용하여 분극을 시행하였다. 아래의 표 1은 각 압전 폴리머에 대한 분극 조건을 나타내고 있으며, 각 폴리머의 연화점(Tc)에 따른 가열 온도 및 서로 다른 분극 시간을 설정하여 실험 하였다. 이는 각 폴리머의 연화점이 다르기 때문인데, 연화점이란 고형물질이 열에 의하여 결정 구조가 변화되는 온도를 말하는 것인데, 연화점의 온도에서 폴리머의 구조변화가 자유로워 분극현상의 특성이 뛰어나기 때문이다. 분극방법은 각 폴리머의 연화점에 따른 설정온도를 유지하고, 이후 DC전압을 설정전압까지 서서히 증가 시킨다. 이후, 설정온도와 설정전압인 상태를 각 1시간 및 2시간을 유지하고, 각 분극시간 경과 후 부터는 가열판(Hot Plate)의 전원을 차단하여 자연 냉각을 통해 상온 30°C가 될 때까지 유지한다. 이는, DC전압과 가열판(Hot Plate) 동시에 전원을 차단하는 것 보다 상온 30°C가 될 때까지 DC전압을 유지하여 분극 배율을 유지함으로써 분극효과가 높아지도록 하기 위함이다. 그림 1과 2는 표 1의 분극 조건에 따른 실험결과에 대한 각 압전 폴리머에서 출력되는 전압 특성을 나타내고 있는데, 분극실험 후 시간의 경과에 따른 압전 폴리머의 전기적인 특성이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 압전 폴리머에 대한 Aging 효과라 할 수 있는데, 분극실험 후 시간이 경과될수록 폴리머의 유리전이온도(Tg; 비정질 열가소성 고분자에서 고체와 액체 간의 두 상태를 구분해 주는 온도)가 상온 이하이기 때문에 분극을 통해 폴리머의 구조적인 방향성을 강제적으로 배향(Orientation)시킨 구조가 시간이 경과됨에 따라 점점 방향성을 잃게 되면서, 분극을 통해 폴리머의 배향된 구조가 분극 전 random한 구조로 돌아가기 때문이다. 또한, 분극 과정을 거친 각 압전 폴리머에 대한 전기적 특성은 1시간 분극시간에 비해 2시간 분극시간에 더 높은 전기적 특성을 띠는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있다. 즉, 분극시간에 따른 압전 폴리머의 전기적 특성의 차이를 확인할 수 있다.

<표 1> 폴리머의 분극 조건

분극 조건	인가 전압	가열 온도	분극 시간	전계
TPU	DC 510[V]	100 [°C]	1 [h] 2 [h]	255[V/mm]
PP	DC 510[V]	100 [°C]	1 [h] 2 [h]	255[V/mm]
EVA1315(15%)	DC 510[V]	40 [°C]	1 [h] 2 [h]	255[V/mm]
EVA1328(28%)	DC 510[V]	60 [°C]	1 [h] 2 [h]	255[V/mm]



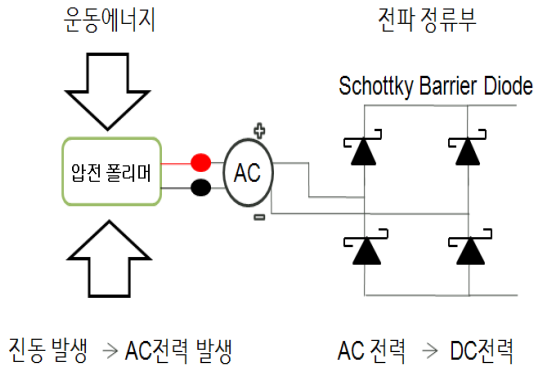
〈그림 1〉 폴리머의 출력전압(1시간 분극)



〈그림 2〉 폴리머의 출력전압(2시간 분극)

2.2 에너지 저장을 위한 회로 설계

본 논문에서 제시한 각 압전 폴리머로부터 발생한 전력을 포집하기 위해서는 압전 폴리머로부터 발생하는 AC전력을 DC전력으로 변환하는 정류과정을 거쳐야한다. 아래의 그림 3은 압전 폴리머로부터 발생한 AC 전력을 본 시스템인 벽-부스트 컨버터에 적용할 수 있도록 DC전력으로 정류하는 전파 정류부를 설명하고 있다. 압전 폴리머를 운동화의 sole 접착 후, 보행자의 운동에너지를 통해 발생된 AC전력은 4개의 Schottky Barrier Diode를 이용한 전파 정류부를 통하여 DC전력으로 정류된다.



〈그림 3〉 압전 폴리머와 전파정류부

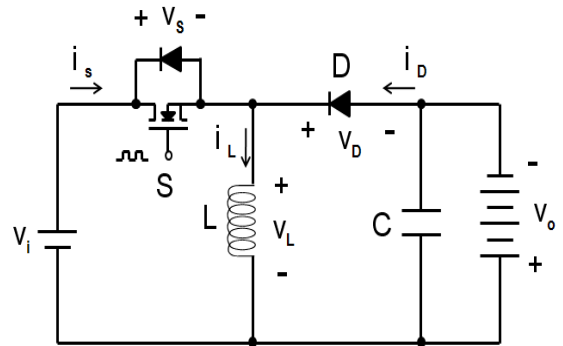
그리고 본 논문에서는 압전 폴리머로부터 발생한 전기에너지 포집을 위해 벽-부스트 컨버터를 선정 및 설계 하였는데, 압전 폴리머는 일정한 압력에 대하여 부하저항의 값에 따라 발생 전압의 변화폭이 크기 때문에, 이를 승압 및 강압하여 사용할 필요가 있기 때문이다. 또한, 벽-부스트 컨버터 회로 동작을 전류 불연속 모드(DCM: discontinuous conduction mode)로 동작을 시키면, 스위치 ON/OFF시 다이오드 역 회

복 손실을 줄일 수 있으며 다이오드 쇼트회로로 인해 발생하는 스위치 피크전류 부담을 줄일 수 있어 본 시스템의 전력 손실을 피할 수 있다. 즉, 벽-부스트 컨버터의 전류 불연속 모드로 동작은 마이크로 에너지 포집시스템 설계를 위한 본 시스템에 적합하고 압전 폴리머의 내부 저항과 벽-부스트 컨버터의 평균 저항을 같도록 설정하면 최대 에너지 전력점 추종이 가능하다.

$$V_i < \frac{1-D}{D} V_{bat} \quad (1)$$

$$R_i = \frac{2Lf_{sw}}{D^2} \quad (2)$$

벽-부스트 컨버터의 전류 불연속 모드의 조건은 식 (1)로 표현되고, 식 (2)를 보면 알 수 있듯이, 회로의 파라미터 값인  $f_{sw}$ (switching frequency),  $D$ (duty ratio),  $L$ (inductor)값들을 조정하여 벽-부스트 컨버터 입력저항을 조정 할 수 있으며, 일정한 듀티비와 스위칭 주파수에서 전류 불연속 모드동작 하는 벽-부스트 컨버터는 입력전압  $V_i$ 가 출력전압  $V_o$ 보다 더 크던지 작아도 관계없이 효과적으로 작동 한다는 것이다. 즉, 이것은 다양한 전압을 가지는 에너지 발전기의 최적화를 가능하게 하고, 마이크로 에너지 포집시스템인 본 시스템에 적합하다.



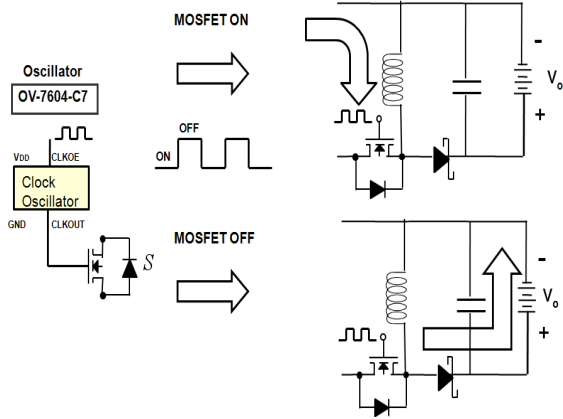
〈그림 4〉 벽-부스트 컨버터

〈표 2〉 회로 파라미터 규격

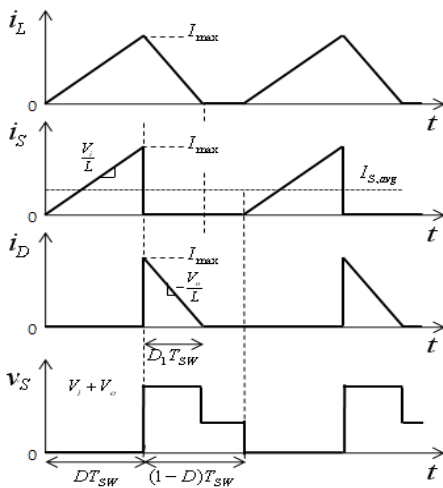
파라미터	값 또는 규격	비고
$f_{sw}$	32.768[kHz]	스위칭 주파수
D	0.5	듀티비
S	30[V]/270[mA]	MOSFET
L	40 [mH]	인덕턴스
C	10 [uF]	칩탄탈
Diode	30[V]/270[mA]	Schottky
Battery	3.6[V]/100[mA]	NiMH

본 시스템은 듀티비와 스위칭 주파수를 인가하기 위해 저전력 클럭 오실레이터(OV-7604-C7)을 사용하였으며, 축전지의 전압은 3.6[V]이므로 벽-부스트 컨버터가 전류 불연속 모드의 동작하기 위한 입력전압의 최대값은 식 (1)로부터 3.6[V]가 되는데, 오실레이터와 스위치 및 인덕터의 회로손실, 그리고 최대전력 전달을 감안한다면 항상 3.6[V] 이하에서 동작하므로 컨버터는 불연속모드로 동작하게 된다. 아래의 그림 5와 6은 전류 불연속 모드로 동작하는 벽-부스트 컨버터의 회로 동작 및 회로 동작 파형을 나타내고 있다. 본 시스템에서는 듀티비와 스위칭 주파수를 인가하기 위해 저전력 클럭 오실레이터(OV-7604-C7)을 사용하였다. 듀티비와 스위칭 주파수가 내부적으로 설정된 오실레이터로서, 실제 회로의 입력저항을 결정하는 식 (2)를 보면 알 수 있듯이, 회로의 입력저항을 결정하는 파라미터는 인덕턴스 값이다. 그림 5에서 화살표는 MOSFET의 ON/OFF동작에 따른 회로내의 전류 흐름으로써, 첫 번째 회로는 MOSFET가 ON동작을 하면서 벽-부스트 컨버터의 소자 중 하나인 인덕터(Inductor)에 에너지 저장하는 동작이다. 이와 반대로 아래의 회로는 MOSFET가 OFF동작을 하면서 인덕터에 저장되어 있던 에너지 방출 및 축전지에 에너지를 저장하는 역할을 수행한다. 즉, 앞서 언급한 오실레이터에 의해 MOSFET의 ON/OFF 동작 및 벽-부스트 컨버터가 동작하며, 이를 통하여 본 시스템의 부하인 축전지에 에너지가 저장된다. 그림 6은 MOSFET의 동작에 의한 회로 동작 파형을 나타내고 있

다. 여기서,  $D_1$ 은 스위치 오프 후 인덕터 전류가 영이 될 때까지의 시간 듀티,  $V_O$ 로 표시된 출력전압 부분은 축전지의 양단전압을 나타내고 있으며, 그림 6의 두 번째 파형은 그림 5의 첫 번째 회로 동작인 인덕터에 에너지 저장의 회로 동작 파형을 나타내고 있으며, 그림 6의 세 번째 파형은 그림 5의 두 번째 회로 동작인 인덕터에 저장된 에너지 방출 및 축전지에 이 에너지를 충전하는 회로 동작 파형을 나타내고 있다.



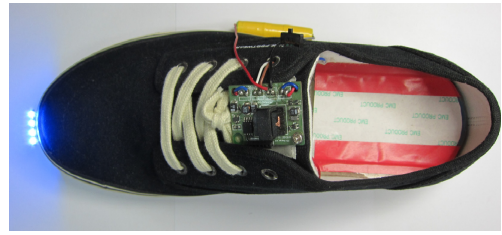
〈그림 5〉 벡-부스트 컨버터 동작



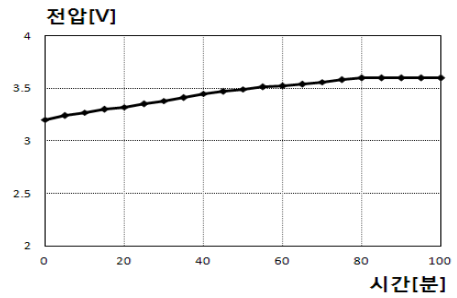
〈그림 6〉 벡-부스트 컨버터 회로 동작 파형

### 2.3 실험결과 및 검토

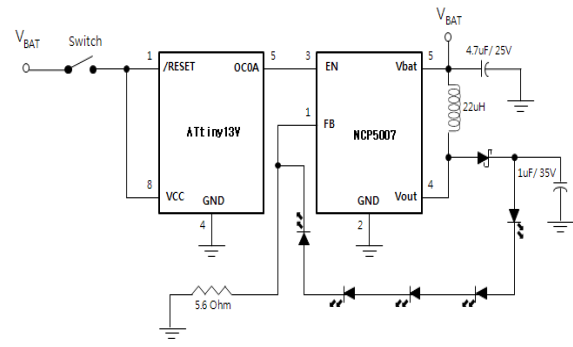
본 논문의 실험을 위해 앞서 제시한 표 1의 분극조건으로 제작된 압전 폴리머 중 전기적 특성을 가장 잘 띄는 열가소성 폴리우레탄을 이용하여 에너지 발생 실험, 벡-부스트 컨버터를 이용한 에너지 충전 실험, 충전된 에너지를 이용한 LED 점등실험을 시행하였다. 아래의 그림 8은 본 논문에서 제한한 압전 폴리머 중 전기적 특성을 가장 잘 띄는 열가소성 폴리우레탄을 이용하여 신발을 제작한 후, 본 시스템에서 발생한 에너지를 벡-부스트 컨버터를 통하여 축전지의 충전상태를 나타내고 있다. 축전지는 초기전압 3.2[V]인 NiMH를 사용하였으며, 초기 에너지에서부터 차정실험 75분까지는 서서히 증가하여 3.6[V]까지 저장 하였지만 80경과 후부터 약 20분 동안 3.6[V]에 수렴하였다. 게다가, 벡-부스트 컨버터를 통하여 축전지에 저장된 에너지의 실제적인 활용을 위하여, 스위치 ON/OFF 동작에 의해 원격 마이크로컨트롤러 (ATtiny13V)를 사용하여 LED의 점멸 루틴동작을 제어 및 LED점등 시험 시행을 통하여 회로 동작을 확인하였다. 즉, 본 논문에서 제한한 압전 폴리머를 이용한 마이크로 에너지 포집 시스템의 적용을 확인할 수 있었고, 실험결과를 통해 본 논문에서 제시한 시스템은 연속적이지 않은 LED 구동을 위한 전력은 충분하다고 판단된다.



〈그림 7〉 본 시스템이 이루어진 신발



〈그림 8〉 축전지 충전상태



〈그림 9〉 마이크로 컨트롤러 및 LED 구동부

### 3. 결론

본 논문은 분극 과정을 거친 압전 폴리머를 이용한 마이크로 에너지 포집시스템을 설계 하여 신발에 접목을 통해 자가발전 신발 구현에 주력하였다. 논문에서 제한한 압전 폴리머 중에서 전기적 특성을 가장 잘 띄는 열가소성 폴리우레탄을 신발의 sole에 접착 후, 보행자의 인위적인 충격에 의해 그 공간 주위에 진동이 발생하게 되고, 이 진동을 통해 전기에너지를 발생 및 발생된 에너지를 축전지에 저장을 하여, 사용자가 원하는 부하를 구동하는 시스템이다. 또한, 압전 폴리머에서 발생하는 전력을 최대 전력전달을 보충하기 위해서 전류 불연속 모드로 동작 하는 벡-부스트 컨버터 설계 및 동작시켰으며, 이를 통해 평균 입력전류가 입력전압에 비례하도록 컨버터를 제어함으로써 컨버터 입력저항과 압전 폴리머 내부저항이 매칭되어 최대 전력전달이 가능하게 하였다. 하지만, 앞서 그림 1과 2의 실험 결과처럼 압전 폴리머는 분극 후 Aging 효과로 인해 시간의 경과에 따른 전기적인 특성이 감소하게 되는데, Aging효과에 대한 해결방안은 현재 연구 중에 있다. 즉, 본 논문에서 구현 하고자한 압전 폴리머를 이용한 마이크로 에너지 포집 시스템의 시험을 통하여 실험 가능성을 확인하였다.

### [참고 문헌]

- [1] 손영대, 김규현, “열가소성 폴리우레탄과 벡-부스트 컨버터를 이용한 마이크로 에너지 포집시스템 설계”, 전기학회논문지 Vol.60, No.3, pp.560~565, March 2011.
- [2] Elie Lefevre, David Audigier, Claude Richard, Daniel Guymar, “Buck-Boost Converter for Sensorless Power Optimization of Piezoelectric Energy Harvester”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.22, No5, pp.2018~2025, September 2007.