



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

사람 발걸음에 의해 동작되는 자가발전 무선 스위치 적용을 위한 압전 블록 개발



2019年 02月

釜慶大學校 大學院

消防工學科

洪東佑

工學碩士 學位論文

사람 발걸음에 의해 동작되는 자가발전 무선 스위치 적용을 위한 압전 블록 개발

指導教授：崔 載 旭

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2019年 02月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

消 防 工 學 科

洪 東 佑

洪東佑의 工學碩士 學位論文을 認准함

2019年 02月



委員長 工學博士 李 致 榮



委 員 工學博士 崔 俊 鎬



委 員 工學博士 崔 載 旭



목 차

제 1 장. 서	론	1
1.1. 연구의 배경 및 필요성		1
1.1.1. 압전 에너지 하베스팅 기술		1
1.1.2. 압전 에너지 밀도		1
1.1.3. 압전 에너지 변환 효율		2
1.1.4. 에너지 수확기의 오프 공진 조건		2
1.1.5. 고 에너지 압전 조성 개발		3
1.1.6. 발전소 내 사용 가능한 방폭 설계		4
1.2. 연구의 목적과 방법		7
제 2 장. 압전 에너지 하베스팅 기술		8
2.1. 압전의 역사		8
2.2. 압전 효과 및 원리		11
2.2.1. 압전 분극 효과		11
2.2.2. 압전 MPB 효과		16
2.3. 압전 재료 특성		17
2.3.1. 압전 전하 상수		17
2.3.2. 압전 전압 상수		18
2.3.3. 전기 기계적 결합 계수		20
2.3.4. 기계적 품질 계수		21

2.3.5. 상대 유전 상수	22
2.3.6. 도핑 효과	23

제 3 장. 실험재료 제작 및 특성 25

3.1. 고효율 압전 에너지 하베스팅 조성 개발	25
3.2. 압전 및 전기적 특성	26

제 4 장. 실험 결과 및 고찰 27

4.1. 압전 무선 스위치 개념	27
4.2. PZN _x C 조성 개발	30
4.3. PZN _x C 압전 및 유전 특성 평가	32
4.4. PZN _x C 후막의 전기적 특성 평가	33
4.5. 압전 바닥 타일 제작	37
4.6. 압전 바닥 타일 하베스팅 측정	39
4.7. 압전 바닥 타일 무선 스위치 시스템	44

제 5 장. 결 론 45

참 고 문 헌 46

표 목 차

<표 2-1> 하드너 소프트너에 따른 압전 특성 변화	24
<표 4-1> 950 °C에서 2 시간 동안 소결된 PZNxC 후막의 압전, 유전, 및 에너지 수확 등의 매개 변수 값을 나타냄	36

그 림 목 차

<그림 2-1> 페로브스카이트 구조: (a) ABO_3 페로브스카이트, (b) $BaTiO_3$ 결정구조	10
<그림 2-2> 강유전체 재료의 자발 분극 및 유전율의 온도 의존성	12
<그림 2-3> 압전의 변형 및 전 왜 효과에 따른 변화	13
<그림 2-4> (a) 압전 리드 지르 코 네이트 티타 네이트 (PZT) 기반의 전왜 효과, (b) 마그네슘 니오 베이트 (PMN) 기반 세라믹에 대한 전형적인 변형 곡선	15
<그림 2-5> (a) PZT 세라믹의 상 다이어그램, (b) PZT 시스템의 morphotropic phase boundary (MPB) 근처 조성에 대한 여러 d 상수의 의존성	13
<그림 4-1> 조명을 무선으로 작동 시킬 수 있는 자가 발전형 바닥 타일	27
<그림 4-2> 실제 자가 발전형 바닥 타일이 사람의 발걸음으로 동작되는 무선 스위치	28
<그림 4-3> 조립식 자체 전력 수확기 및 바닥 타일의 구조 설계 그림	29
<그림 4-4> PZNxC 세라믹의 CuO 첨가에 따른 XRD 패턴	30

<그림 4-5> PZNxC 세라믹의 CuO 첨가에 따른 FE-SEM 이미지	31
<그림 4-6> 950 °C 에서 2 시간 소결된 PZNxC 세라믹의 CuO 첨가에 따른 압전 및 유전 특성 그래프	32
<그림 4-7> PZNxC 후막을 포함하는 캔틸레버형 압전 에너지 수확기의 개략도	33
<그림 4-8> PZN _{0.5} C 기반 압전수확기의 부하 저항(Ω)에 따른 출력 전력 (mW)	34
<그림 4-9> PZNxC 기반 수확기의 압전 및 유전 특성	35
<그림 4-10> 압전 자가발전 구동 시스템의 구조 설계	37
<그림 4-11> 압전 유니몰프의 인장 응력 및 압축 응력 모드의 작용 메커니즘	38
<그림 4-12> 제작 된 바닥 타일의 개방 회로의 출력 전압	38
<그림 4-13> 다양한 사람 무게 (50-80 kg) 변화에 따른 압전 수확기의 개방 회로 출력 전압	39
<그림 4-14> 무게 (kg) 변화에 따른 압전 수확기의 개방 회로 출력 전압을 통한 내구성 실험	40
<그림 4-15> 무게 (kg) 변화에 따른 압전 수확기의 개방 회로 출력 전류를 통한 내구성	40
<그림 4-16> 출력 전력 (mW)의 부하 저항 (Ω) 변화에 따른 임피던스 정합	42
<그림 4-17> 다양한 무게 (kg)에서 압전 수확기 에너지로부터 충전된 커패시터 전압	43
<그림 4-18> 바닥 타일에 의해 작동되는 무선 스위치 시스템, 에어컨, 테이블 램프 및 공기 정화기를 무선 스위치 시스템으로 동작한 사진	43

제 1 장. 서 론

1.1. 연구의 배경 및 필요성

1.1.1. 압전 에너지 하베스팅 기술

자가 발전 기술이란 지능형 장치를 사용하여 다기능 특성으로 주변에서 버려지는 에너지를 활용하여 사용이 가능한 전기로 만드는 것을 말한다. 지능형 장치에 전력을 공급하려면 무선 센서 네트워크 (WSN)에 많은 양의 에너지가 필요하며 상업용 배터리는 수명주기 및 주위 환경에 제한적이다 [1-5]. 대안으로, 센서의 자체 전원 공급 기술을 사용하여 주변 환경의 에너지를 사용이 가능하도록 재생시키는 것과 지속 가능한 전력 원으로 변환할 수 있는 시스템이 필요하다 [6-9]. 상업용 배터리가 없는 무선 센서 노드에 전기 에너지를 공급하기 위한 압전 에너지 수확기에 대한 여러 연구가 있다 [10-15].

1.1.2. 압전 에너지 밀도

주변의 기계 에너지를 수확 할 때 소량, 비용 효과 및 높은 효율을 감안할 때 압전 발전기는 많은 관심을 끌고 있다. 에너지 수확시 압전 물질의 적용을 향상시키기 위해서는 다음 식 (1)과 같이 고 에너지 밀도 (u)가 필요하다.

$$u = \left(\frac{1}{2}\right)(d_{ij} \times g_{ij})\left(\frac{F}{A}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 d_{ij} 는 압전 전하 상수, g_{ij} 는 압전 전압 상수, F 는 압전 재료에 가해지는 힘, A 는 압전 재료의 면적이다. 식 (1)에서, 압전 에너지 하베스팅 재료의 높은 변환 계수 ($d_{ij} \times g_{ij}$)를 가질 필요가 있다.

1.1.3. 압전 에너지 변환 효율

일반적으로 캔틸레버형 압전 에너지 수확기는 전기 기계 에너지 변환에 굽힘 진동 모드를 이용하며, 압전 재료에서 요구되는 주요 파라미터는 에너지 변환 효율 (η)이며, 이는 다음 식 (2)으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \left(\frac{1}{2} \frac{k_p^2}{1 - k_p^2} \right) / \left(\frac{1}{Q_m} + \frac{1}{2} \frac{k_p^2}{k_p^2} \right) \quad (2)$$

에너지 변환 효율 (η)은 k_p 는 전기 기계 결합 계수, Q_m 은 기계적 품질 계수로 주어진다.

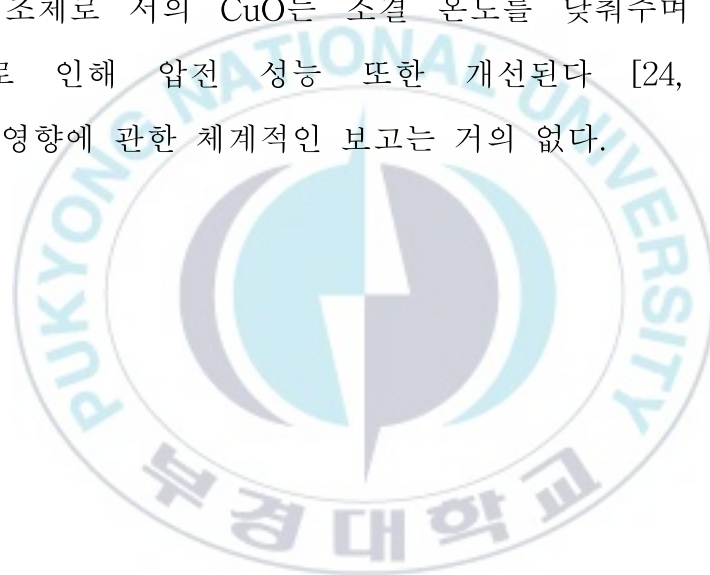
1.1.4. 에너지 수확기의 오프 공진 조건

유전 손실 ($\tan\delta$)이 압전 세라믹의 성능에 영향을 미치므로, 압전 세라믹의 $\tan\delta$ 는 에너지 하베스터용으로 작아야 한다. 따라서, 압전 세라믹 기반의 에너지 수확기의 오프 공진 조건 (FOM_{off})에서의 수치는 다음 식 (3)으로 주어진다 [18].

$$FOM_{off} = \frac{d_{ij} \times g_{ij}}{\tan\delta} \quad (3)$$

1.1.5. 고 에너지 압전 조성 개발

압전 에너지 하베스터는 높은 변환 계수 ($d_{ij} \times g_{ij}$), 전기 기계 결합 인자 (k_p)가 높은 $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3\text{-Pb}[(\text{Zn,Ni})\text{Nb}]\text{O}_3$ 계 조성을 통해서 고효율의 에너지 수확을 위한 연구가 진행중에 있다 [19,20]. 합성 압전 소자의 경우, 압전 세라믹은 용융 온도는 960 °C보다 낮은 온도에서 소결된다. 또한, Rhombohedral-Tetragonal (두상의 경계)에서 높은 압전 전압 상수와 변환 계수 값을 보입니다 [21-22]. 또한, 압전체의 전력 특성을 향상시키기 위해 전형적인 억셉터가 도핑을 위한 이온 Cu^{2+} 를 사용 한다 [23]. 소결 조제로서의 CuO 는 소결 온도를 낮춰주며 조밀한 미세 구조형성으로 인해 압전 성능 또한 개선된다 [24, 25]. 하지만 소결온도의 영향에 관한 체계적인 보고는 거의 없다.



1.1.6. 발전소 내 사용 가능한 방폭 설계

발전소 내에 적용되는 방폭 설계는 다양한 기능의 건축물에 내재되어 있는 화재 위험을 구체적으로 파악하고 효율적으로 관리하고, 화재가 발생하지 않도록 화재가능성에 대한 일괄적이고 체계적인 모델 분석이 가능한 기술을 말한다. 원자력 발전소의 방폭 기술 적용 기준으로 향후 위험에 노출되어있는 건축물의 방폭 기준이 나아가야할 방안을 모색하고자 한다. 원자력발전소는 방사성 물질의 외부 누출 방지를 위한 심층 방호 설계원칙에 따라 다양한 방호 설계 요건이 개발되어왔다. 화재 위험도 분석, 안전정지분석, 확률론적 안전성 분석 등을 통하여 위험요소를 정량적으로 파악하고 대책을 수립하기 위한 다양한 노력이 계속되어 왔다. 하지만 최근 해양 분야 및 발전소의 방폭 설계 적용이 본격화되어 방폭 기술이 접목된 화재 설계를 통한 위험성 파악 및 법 규정에 따른 위험도에 대한 객관적이고 정량적인 검토가 필요하다. 아울러 방폭 설계에 대한 적용기준도 도입되어 건축 관련 기준과 기능적인 요건이 보완을 이루도록 규정검토가 필요하다. 향후 원자력발전소 방폭 설계시 실내외 위험 환경 등에 대한 검토와 폭발 요소(화학적 물질, 가스, 분진)에 대한 데이터베이스를 이용한 내화재선정, 작업공간설계 등에 대한 기술적인 부분의 조화가 이루어 질 수 있도록 개선이 필요하다. 국내의 원자력 발전소의 화재안전기준은 신설 원전에 적용되는 것을 원칙으로 한국 표준형 가압경수로에 적용 가능한 기준으로, 원자력 발전소 화재 안전 규제와 그 대상을 동일하게 적용한 것을 이야기한다. 최근 원자력발전소 화재 설계 기준으로 원자력 안전법과 소방관계법이 하나의 방호 대상으로 적용되고 있으며, 이러한 규제 개선은 소방 법령에 따른 소방시설 설치 기준의 법으로는 하나의 소방대상물로서 인명 안전 및 재산 보호 조치를 취해야 하지만 방사성 물질 누출을 야기하는 사고 발생 시 발전소 주변의 광범

위한 지역에 거주하고 있는 주민에게 피해를 줄 수 있으므로 소방관계법과 원자력안전법의 화재 방호 특성을 고려하여 두개의 법령을 충족시켜야 한다. 소방시설 설치, 유지, 안전관리에 관한 법률 시행령에는 소방대상물을 용도 및 규모 등이 고려된 30개의 특정 소방대상물로 구분하여 소방 시설을 설치하도록 하고 있음. 발전 시설에 설치된 소방 시설은 소방대상물의 규모, 용도, 수용 인원을 고려하여 선정된다.

- 소화설비: 소화기구, 옥내 외 소화전, 스프링클러 설비, 물분무 소화설비
- 경보설비: 비상경보 설비, 비상방송설비, 자동화 재탐지 설비, 자동화 재속보 설비, 시각경보기
- 피난설비: 피난기구, 인명구조용 공기 호흡기, 피난유도등, 통로유도등, 유도표지, 비상조명등 선정된 소화 설비의 설계는 위험물 안전관리법에서 강화된 요건이나 해당 설비의 화재 안전기준에 따라 설치되고 있다.

원자력 발전소에는 발전을 위한 시설 이외에도 업무시설과 창고 등 다양한 시설물이 있으나 소방법령에서는 원자력발전소를 하나의 특정 소방대상물로 지정하고 소방법령의 소방시설 설치기준이 인명안전 관점에서 불특정 다수가 이용하는 일반건축물의 화재 방호에 중점을 두고 있다. 원자력 발전소와 같이 작업자의 인구 밀도가 높지 않은 산업시설에 대해서는 피난특성과 설비의 중요도 및 방호 공간의 화재 특성을 고려하여 소방 시설이 선정되어야 하며 방호수준을 차등 적용할 수 있는 방안이 필요하다. 원자력발전소에는 발전에 필요한 전산장비, 차단기, 펌프, 터빈 및 발전기 그리고 디젤발전기 등과 같은 설비들이 원자로건물, 보조건물, 터빈건물 및 핵연료건물 등에 분산되어 설치되어 있다. 또한, 원자력발전

소는 작업자의 인구밀도가 낮은 상태로 유지되고 있으며, 설치되는 소화설비도 소화목적으로 2시간 이상 사용할 수 있는 소화수원이 확보되어 있다. 따라서 원자력발전소에 설치되는 소화설비는 인명안전 보다 화재의 조기진압을 통한 설비의 보호관점에서 발전설비의 중요도와 방호공간에서의 화재위험성이 우선적으로 평가되어야 그에 상응하는 적절한 방호수단을 결정할 수 있도록 발전시설(특정소방대상물별)에 대한 세부 규정이 수립되어야 한다.



1.2. 연구의 목적과 방법

$0.72\text{Pb}(\text{Zr}_{0.47}\text{Ti}_{0.53})\text{O}_3-0.28\text{Pb}[(\text{Zn}_{0.45}\text{Ni}_{0.55})_{1/3}\text{Nb}_{2/3}]\text{O}_3 + x \text{ mol } \% \text{ CuO}$ (PZN_xC) 세라믹의 미세 구조 및 전기적 특성에 대한 보고서는 아직까지 존재하지 않으며, 이러한 압전 재료를 활용한 압전 발전기로 구성된 바닥 타일을 제작하여 무선 스위치에 대한 대규모 설치가 가능하다. 스마트 장치의 전원 문제를 해결하고 자체 전원 공급 장치를 구현하려면 이러한 압전 하베스터 유형의 에너지 수확 기술을 개발하는 것이 중요하다 [26]. 인간의 발걸음을 활용한 진동 에너지를 사용하여 최적화된 발전 특성을 관찰하기 위해서 PZN_{0.25}C 세라믹을 활용한 실시간 전송 시스템을 위한 무선 센서 노드의 전원 공급에 대해 연구하였다. $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 의 면적을 가진 바닥 타일을 사용하면 사람의 발걸음으로 최대 출력 12 mW를 생성 할 수 있으며, 발걸음을 멈추지 않으면 지속 가능한 전원 공급원으로 사용 할 수 있다. 스마트 팩토리에서 사람의 발걸음 의해 발생된 에너지는 바닥 타일에 전달되어 에너지 관리 기능 및 무선신호 발생기로 활용이 가능하다. 발전소 내에 설치되는 스위치는 유선으로 설치되어 방폭형으로 설치될 경우 고전압으로 인해 케이블 및 스위치 케이스에 많은 비용이 들어갈 뿐만 아니라 관리에도 많은 어려움이 따른다. 비용 절감 및 설비의 보호관점에서 저 전력(20 V, 250 μA)에서 작동이 가능한 압전 스위치를 통해 방폭 규격에 상응하는 적절한 방호수단으로 개발하고자한다.

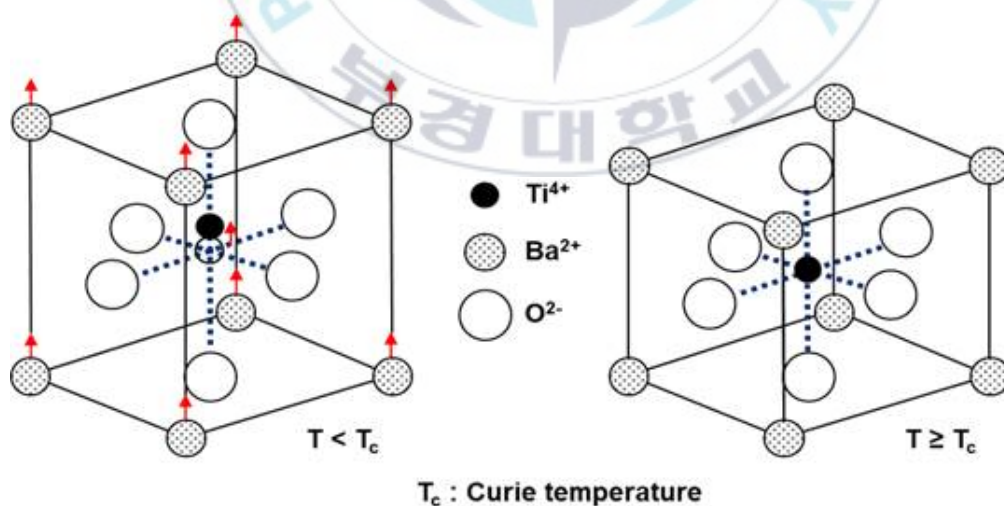
제 2 장. 압전 에너지 하베스팅

2.1. 압전의 역사

마찰 전기와 구별되는 압전은 1880년 Pierre와 Jacques Curie가 소르본에서 발견했다. 18년 후 피에르 (Pierre)는 아내와 함께 라듐을 발견하였고 압전 효과를 최초로 입증하였다. 피에르 (Pierre)의 전기에서 마리 퀴리 (Marie Curie)의 발견은 우연이 아니라 결정질 물질의 대칭에 대한 광범위한 이론 및 실험 연구의 결과라고 이야기 했다. 압전특성을 조절하는 결정학적 및 수학적 관계는 발견된 후 수년 내에 이루어졌으며, 이 초기에 연구된 결정체에는 석영, 토르말린, Rochelle salt이 포함되어 있었으며, 50년 후에 기술적으로 중요해졌습니다. 압전 수정은 Pierre와 Marie Curie의 방사능 연구와 관련하여 정전기 측정에 사용되었다. 공학적 적용을 향한 첫 번째 단계는 강판들 사이에 샌드위치 된 압전 석영 요소로 구성된 수중 초음파 소스를 제작한 Paul Langevin에 의해 프랑스에서 약 1916년에 개발되었다. 이 장치는 잠수함 탐지에 사용된다. 수년이 지난 후에야 압전특성을 이용한 연구가 실용적으로 이용되었으며, 제 1 차 세계 대전 중에 실험이 시작되었는데, Wesleyan University (Middletown, Conn.)의 Walter G. Cady는 진동하는 결정의 전기적 공명 작용에 대한 전기적 거동에 대한 반응을 인식했다. 이러한 현상은 수정에 의한 주파수 제어의 발명에 관한 것이다. 수정 주파수 제어는 곧 방송 및 무선 통신 산업의 성장에 필수적인 요소가 되었다. 제 2 차 세계 대전 중에 미국이 약 5 천만 개의 수정 원소를 사용했으며, 다중 채널 전화를 위한 웨이브 필터에서 압전 크리스탈의 밀접한 사용은 Bell

Telephone 실험실에서 1925년경에 개발되었다. 1917-18년에 초음파 생성을 찾은 또 다른 결과는 예외적으로 높은 유전 상수 및 Rochelle salt의 유전체 히스테리시스 거동이 곧 강자성에 대한 유전체 현상으로 인식되었다. Rochelle salt은 유럽에서 Seignette salt으로 알려 졌으므로, 발견자인 P. Seignette의 이름을 따서 1930년대 초 연구를 주도한 러시아 연구원에 의해 Seignette 전기라고 명명되었다. 그러나 1945년 이후, 강유전성이라는 용어로 일반적으로 받아 들여졌다. Rochelle salt의 강유전성 (ferroelectricity)은 매우 높은 압전 효과 (piezoelectric effect)로 발생되며, 이는 마이크 및 축음기 픽업에서 널리 사용된다. 이러한 응용 분야의 성장은 주로 미국 오하이오 주 클리브랜드 소재 Brush Development Company의 노력에 의해 1930년에 시작되었다. 1940년대 초 Rochelle salt에 쉽게 접근 할 수 있는 수용성 결정체를 찾기 위해 광범위한 연구가 진행되었다. 유전체 이상 및 온도 범위 제한등을 연구하였으며 이러한 노력은 주로 음과 탐지기 응용을 위한 암모늄 디 히드로 겐 포스페이트 (ammonium dihydrogen phosphate)의 도입에 의해 부분적으로 성공하였다. 그러나 주요한 진전은 예기치 못한 방향에서 비롯되었다. 1940년경에 내화물 인 바륨티타네이트 (BaTiO_3)에서 1,000을 초과하는 유전 상수가 발견되었다. 이 화합물의 강유전성 특성은 Arthur von Hippel과 Massachusetts Institute of Technology의 동료들에 의해 발견되었다. 얼마 지나지 않아 강한 자기장에서 세라믹, 다결정 바륨 티타 네이트 몸체의 미결정에서 영구적으로 극성 방향을 바꿔서 강력한 압전 특성이 발견될 수 있음이 밝혀졌다. 이 발견은 Rochelle salt와 화학적으로 안정한 석영으로 비교할 수 있는 압전 소자 개발의 길을 열었다. 바륨 티타 네이트는 강유전체이며 120°C 이하에서만 압전특성을 보인다. 이 한계는 1950년대에 세라믹 PbNb_2O_6 및 티탄산 지르콘 산 납, $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 에서 $\sim 250^\circ\text{C}$ 이상에서도 압전 효과가 발견됨으로써 극복되었다. 1950년대

후반에 바륨 티타 네이트가 미국의 전기 음향 분야에서 지배적이었으며 전기 회로 소자로서의 새로운 응용으로 제시되었다. 주파수 제어 및 고도의 선택성 전파 필터의 경우, 수정은 아무런 영향을 받지 않았다. 그러나 고품질 천연 석영 크리스탈에 대한 의존도는 브라질의 거의 독점이었지만 석영 크리스탈을 생산하기위한 산업 공정 개발로 완화되었으며 이 유형의 크리스탈은 1958년에 상업적으로 이용 가능하게 되었다. 특히, PZT 세라믹은 1954년 Jaffe (미국)에 의해 페로브스카이트 구조와 우수한 압전 특성을 가진 압전 세라믹이 개발되었다. PZT 세라믹은 BT 세라믹보다 높은 T_c 와 우수한 압전 특성을 보였다. 그 후, 복합 페로브스카이트 구조는 Smolensk 등이 1959년에 발견하였고, PZT 세라믹의 압전 특성의 획기적인 향상은 Muchushita의 Ouchi et al에 의해서 이루어졌다. 세 번째 단계는 에너지 추출 회로를 사용하여 2차 배터리 또는 커패시터로 전기 에너지를 전송하는 것이다. 이 단계에서 압전 에너지 수확기와 이차 전지 사이의 회로 임피던스 정합을 고려하면 전기 에너지 손실을 줄일 수 있다.

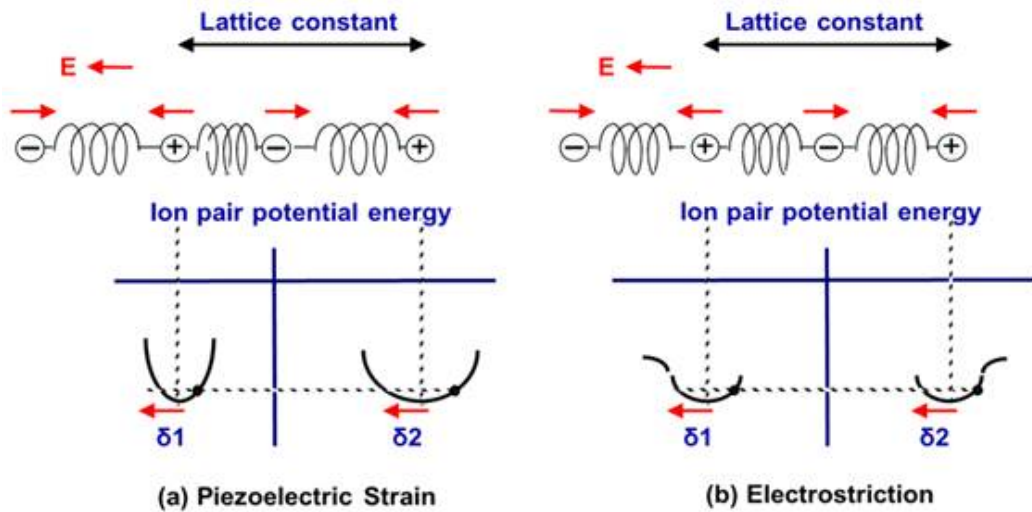


<그림 2-1>. 페로브스카이트 구조: (a) ABO_3 페로브스카이트, (b) $BaTiO_3$ 결정구조.

2.2. 압전 효과 및 원리

2.2.1. 압전 분극 효과

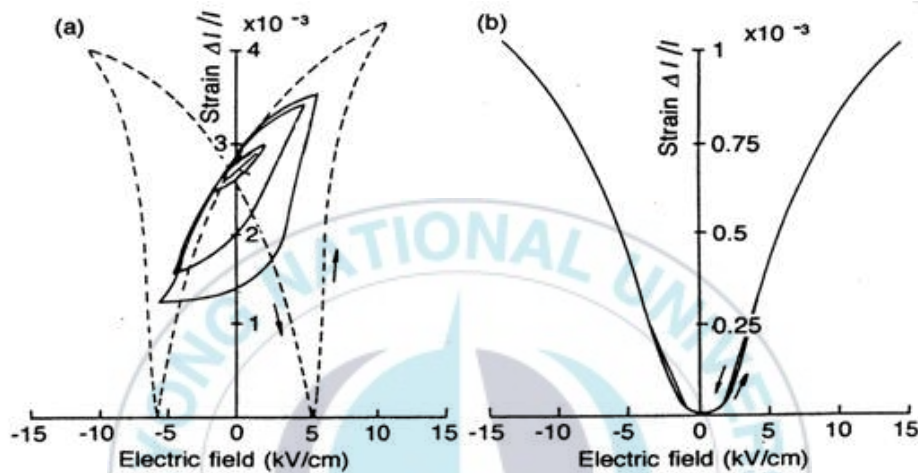
고체, 특히 세라믹 (무기 물질)은 기계적으로 비교적 단단하지만 상태 변수의 변화에 따라 팽창하거나 수축한다. 온도 변화와 응력에 의한 변형률 (변위 ΔL /초기 길이 L 로 정의 됨)은 각각 열팽창 및 탄성 변형으로 알려져 있다. 절연 재료에서, 전기장의 적용은 또한 변형을 일으킬 수 있다. 이것을 전계 유도 변형 이라고 한다. 일반적으로 말하면, "전기 왜곡"이라는 단어는 전기장에 의해 유도 된 변형을 설명하기 위해 일반적인 의미로 사용되기 때문에 종종 "역전 압전 효과"를 의미한다. 그러나 솔리드스테이트 이론에서 반대의 압전 효과는 1 차 전기 기계 결합 효과, 즉 변형이 전계에 비례하는 반면 전기 변형은 변형이 전기의 제공에 비례하는 2 차 결합 인 것으로 정의된다. 따라서 엄밀히 말하면 중심 대칭형 (고온) 인 강 유전체의 압전성은 전 왜 상호 작용에 기인하는 것으로 여겨지므로 두 효과가 관련되어있다. 위의 현상은 대상 물질이 단일 도메인 단결정 이며 그 상태가 발생한다는 가정하에 엄격히 적용된다. 위의 현상은 대상 물질이 단일 도메인 단결정이고 그 상태가 전계의 인가에 따라 변하지 않는다는 전제하에 엄격하게 유지된다. 실용적인 압전 세라믹에서, 강유전성 도메인의 재 배향을 수반하는 추가적인 변형도 또한 중요하다. 우선, 전기장에 의해 유도되는 변형이 설명되어야 한다. 단순화를 위해, NaCl과 같은 이온성 결정이 고려된다.



<그림 2-2>. 압전의 변형 및 전왜 효과에 따른 변화

스프링은 정전기 쿨롱 에너지와 양자 역학적 에너지로 인한 응집력을 등가적으로 나타낸다. <그림 2-2> (b)는 중심 대칭의 경우를 보여 주지만, <그림 2-2> (a)는 보다 일반적인 비 중심 대칭의 경우를 보여준다. (b)에서, 이온을 연결하는 스프링은 모두 동일하지만, (a)에서 이온을 연결하는 스프링은 이온 거리가 더 길거나 짧을 때 다르다. 즉, 번갈아 존재하는 단단하고 부드러운 스프링이 중요하다. 다음으로, 인가 된 전기장 하에서의 결정격자가 (a)의 상태로 고려된다. 양이온은 반대 방향으로 전기장 및 음이온의 방향으로 끌려 당겨 이온 간 거리의 상대적인 변화를 유도한다. 전기장 방향에 따라 경질 스프링의 수축 또는 팽창보다 부드러운 스프링이 팽창 또는 수축하여 전기장 E에 비례하여 변형 x (단위 셀 길이 변화)가 발생한다. 효과. $x = dE$ 로 표현하면 비례 상수 d 를 압전 상수라고 한다. 한편 (b)에서는 스프링의 상수는 거의 동일하고, 2개의 양이온 간 거리 (격자 파라미터)가 거의 동일하기 때문에 변형된다. 그러나, 이온은 그러한 이상화된 스프링 (힘 (F) = 스프링 상수 (k) $\times$ 변위 (Δ)가 유지되는 고조파 스프링)에 의해 연결되지 않는다. 대부분의

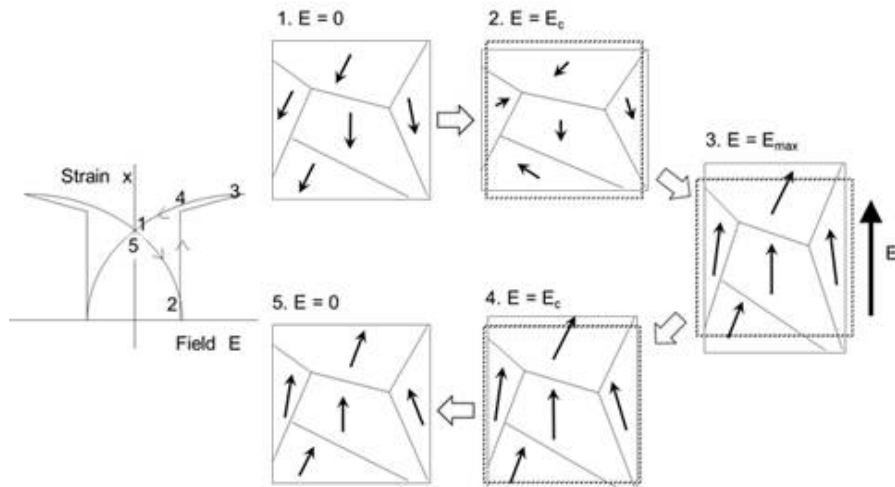
경우, 스프링은 고조파 ($F = k_1\Delta - k_2\Delta^2$)를 가지며, 확장하기는 다소 쉽지만 수축하기 어렵다. 이러한 변위의 미묘한 차이는 격자 파라미터의 변화를 일으켜 인가된 전기장의 방향 (+E 또는 -E)과 무관한 변형을 생성하며, 따라서 전기장의 균일 함수가 됩니다. 이것을 전왜 효과 (electrostrictive effect)라고 하며, $x = ME^2$ 로 표현할 수 있다. 여기서 M은 전왜 상수이다.



<그림 2-3> (a) 압전 리드 지르 코 네이트 티타 네이트 (PZT) 기반의 전왜 효과, (b) 마그네슘 니오 베이트 (PMN) 기반 세라믹에 대한 전형적인 변형 곡선.

<그림 2-2> (a)에 묘사된 1차원 결정은 또한 자발적인 전하의 바이어스 또는 자발적인 쌍극자 모멘트를 가지고 있다. 단위 부피당 총 쌍극자 모멘트를 자발 분극이라고 한다. 특정한 극성 방향에서 자발 분극을 갖는 결정에 큰 역 바이어스 전계가 가해질 때, 이온의 상대 위치가 반전되는 또 다른 안정한 결정 상태인 전이 "상"이 형성된다. 분극 반전이라고 하는 이 전환은 또한 변형에 현저한 변화를 일으킨다. 일반적으로 현장 유도 변형으로 실제로 관찰되는 것은 설명한 세 가지 기본 효과가 복합적으로 결합된 것이다. 압전 PZT 및 PMN 기반 세라믹에 대한

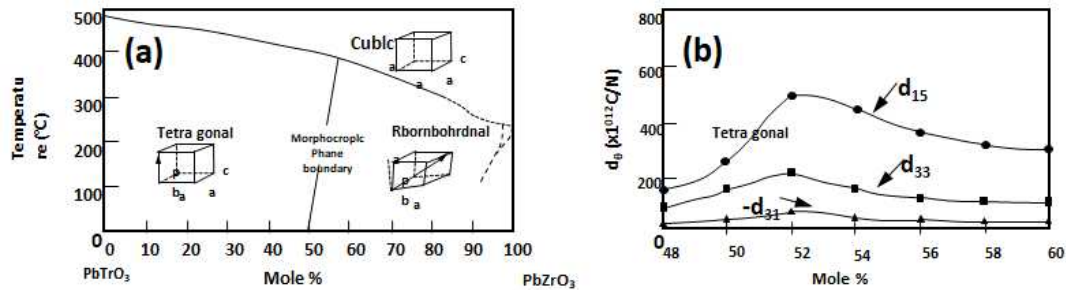
일반적인 변형 곡선을 보여준다. PZT에서 거의 선형 변형 곡선이 왜곡되어 편광 방향으로 재지정으로 인한 증가된 전기장 수준으로 큰 히스테리시스를 나타낸다. 반면, PMN은 전기장 사이클에서 히스테리시스를 나타내지 않는다. 그러나, 변형률 곡선은 높은 전계 레벨에서 이차 관계(E^2)로부터 벗어난다. 정상 또는 직접 압전 효과는 외부 응력 (단위 면적당 힘)을 가함으로써 전하 (단위 면적당 쿨롱)가 생성되는 현상이다. 동일한 압전 계수 d 는 $x = dE$ 에서 사용된 것과 같이 $P = dx$ 관계로 사용된다. 대상 물질은 단일 도메인 단결정이고 전계의 인가는 그 상태를 변화시키지 않는다고 가정했다. 그러나, 이러한 가정은 엄격하게 유지되지 않는다. 실제 압전 재료는 단결정 형태로 다중 도메인 구조를 나타내고, 다결정 세라믹에서는 훨씬 복잡한 구조를 나타낼 수도 있다. 작은 최대 전계가 있는 사이클에서 전계 유도 변형 곡선은 거의 선형으로 나타나며 그림 4에서와 같이 "역전 압 효과"라고 할 수 있다. 그러나, 최대 전계의 증가에 따라, 히스테리시스는 더 커지게 되고, 전계가 특정 임계값을 초과할 때 대칭 버터플라이 형태로 변환된다. 이것은 인가된 전기장 하에서의 강 유전성 도메인의 극성 변화에 의해 야기되어 다른 편광 상태를 유도한다. 엄밀히 말하면, 이 PZT는 각 결정립에서의 도메인 재배향, 다결정 상태 (무작위로 배향된 작은 결정의 복합체)의 두 가지 단계를 고려해야 한다.



<그림 2-4>. 분극 방향과 관련된 강유전체 세라믹의 변형 변화에 대한 개략 설명 [27].

<그림 2-3>은 다결정체에서의 도메인 재 배향을 개략적으로 보여준다. 샘플이 처음에 음의 방향으로 폴링되고 외부 전기장이 양의 방향으로 가해지면, 필드는 잔류 분극 방향과 반대 방향이기 때문에 필드의 증가에 따라 먼저 수축해야 한다. 그런 다음 변형은 각 필드에서 분극 반전이 시작되는 특정 필드 E_c (항복 필드)에서 최소에 도달한다. E_c 위의 결정은 $E = E_{max}$ 까지 확장되기 시작한다. E_{max} 근처에서 모든 가역적 인 편극이 바뀌었고, 크리스탈은 작은 히스테리시스로 "피에조 전기"거동을 다시 한번 나타낸다. 전기장을 감소시키는 과정에서, 내부 응력을 갖는 일부 불안정한 영역을 제외하고 분극 반전에 대한 필요성이 없다. 필드가 0이 될 때까지 변형률은 감소한다. $E = 0$ 에서의 최종 상태는 초기 상태와 동일하지만 편광 방향이 반전 된 상태이다. 결정이 양의 방향으로 폴링 된다고 말할 수 있다.

2.2.2. 압전 MPB 효과



<그림 2-5>. (a) PZT 세라믹의 상 다이어그램, (b) PZT 시스템의 morphotropic phase boundary (MPB) 근처 조성에 대한 여러 d 상수의 의존성

PZT 세라믹의 상태도는 그림 6에 나와 있다. PbTiO_3 에서 Zr^{4+} 의 Ti^{4+} 치환은 정방 왜곡을 감소시키고 궁극적으로 능면면체 인 $R3m$ 대칭의 다른 강유전성 상 (phase)을 일으킨다. 정방 정계와 능면체정 형태 사이의 경계는 온도와 거의 무관하다. Zr^{4+} 가 많을수록 강유전성 PbZrO_3 상이 나타나기 때문에 퀴리점 근처에서 정방 결정 강유전성 위상의 안정성이 낮다. 그것의 정확한 범위는 오히려 불순물에 민감하고 순수한 성분으로 아직 결정되지 않았다. 사방 정계 및 정방 반강유전성상은 상부 구조 선으로 나타낸 다수의 셀을 갖는다. 가장 높은 유전체 및 압전 특성을 나타내는 MPB 영역은 상대적으로 넓고 정방정 및 능면체상은 PZT 세라믹에 공존한다. MPB 영역의 범위는 많은 연구자들에 의해 조사되었지만, 그 결과는 2-3 몰 % 내지 15 몰 %와 같이 서로 매우 상이했다. 이 MPB 영역은 열역학적 안정성, 조성 변동, 내부 응력 및 외부 기계적 응력 및 전기장과 관련 될 수 있다. 그러나 PZT에서는 양질의 단결정의 육성이 결코 쉬운 일이 아니므로 그 타당성을 분명히 하는 것은 매우 어렵다. 격자 파라미터와 물성치가 아니라 위상의 상대 비율이 MPB 영역에 따라 달라진다.

2.3. 압전 재료 특성

2.3.1. 압전 전하 상수

압전 전하 상수를 식 (4)를 통해서 정의하여 얻을 수 있음을 보여줄 수 있다.

$$d = \frac{\text{strain developed}}{\text{applied field}} \quad (4)$$

$$\text{strain} = \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

식 (5)의 Δl 의 관계와 비교해 보면 이는 두 개의 압전 상수 사이의 근본적인 관계를 보여준다. 압전 및 상수의 사용은 플레이트의 길이를 따른 치수 변화로 필드의 방향에 따른 두께 변화에 대해 동일한 수식을 적용 할 수 있다.

2.3.2. 압전 전압 상수

주어진 압력이나 힘에 대해 얼마나 많은 전압이 발생 되어야 하는지 검토해야 한다. 이것은 정확하게 압전 "g"상수의 정의는 주어진 응력에 대해 개발 된 개방 회로 필드로 정의된다. 단순히 전극 표면 사이의 거리에 대한 전압의 비율로 간주 될 수 있다. 가장 간단한 용어는 스트레스가 적용되는 영역으로 나누어 진 힘이다. 끝 부분에 세라믹 판이 있는 경우를 고려하여 힘이 길이 방향을 향하고 전극이 - 면에 길이가 평행하게 가해지도록 한다. 필드와 변형 또는 치수 변화가 서로 수직 인 경우, 31은 압전 상수와 관련된다. (필드와 변형의 상대적인 방향을 나타냄).

$$\frac{v}{F} = N = \frac{g_{31}}{w} \quad (6)$$

N의 단위는 힘의 단위당 전압이다. 현재의 경우 식 (6)를 설명한 플레이트의 경우 적용된 힘에 대해 전압을 쉽게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 필요한 것은 플레이트의 폭(w)이다. 따라서 위에서 설명한 플레이트의 경우 적용된 전기 신호의 길이 변화 또는 두께 변화를 결정할 수 있어야한다.

$$g = \frac{\text{strain developed}}{\text{applied - charge density}} \quad (7)$$

식 (7)은 원래 치수에 대한 치수 변화의 비율이다. 의 경우 길이의 변화 Δl 을 찾고 따라서 변형률은 $\Delta l/l$ 이다. 전하 밀도는 전하가 적용되는 영역 (이 경우 lw)으로 나눈 전하이며 전하 자체는 식 (8)과 같이 전압과

커패시턴스의 곱이다.

$$g_{31} = \frac{\frac{\Delta l}{l}}{\frac{vC}{lw}} = \frac{\text{strain developed}}{\frac{\text{applied charge}}{\text{area of electrode surfaces}}} \quad (8)$$

플레이트의 용량 C는 플레이트의 치수와 관련이 있다. 치수에 대한 이러한 의존성과 함께, 커패시턴스는 또한 재료의 유전 상수의 함수이다.



2.3.3. 전기 기계적 결합 계수

전기 기계 결합 계수는 압전 세라믹의 압전 효율을 나타내는 정수이다. 보다 구체적으로, 전기 에너지 (압전 세라믹의 전극에인가 됨)를 기계적 에너지로 변환하는 효율을 나타내며, 이는 기계적 형태로 결정 내에 축적 된 에너지의 평균 제곱근 (root mean square)으로 정의된다. 이 축적 된 에너지는 전체 전기 입력을 반영한다. 전기 기계 결합 계수 k 는 다음 식 (9)으로 정의된다.

$$\begin{aligned} k^2 &= \frac{\text{Mechanical energy converted}}{\epsilon_{\text{put mechanical energy}}} \\ &= \frac{\text{Electrical energy converted}}{\epsilon_{\text{put electrical engery}}} \end{aligned} \quad (9)$$

2.3.4. 기계적 품질 계수

기계적 품질 계수 (Q_m)는 공진 주파수 및 그 부근에서 기계적 진동의 "급격한 변화"를 나타낸다. Q_m 은 전기 기계 공진 스펙트럼의 날카로움을 특성화하고 전기 신호에서 기계적 또는 기계적으로 전달할 때 에너지 손실을 나타내는 매개 변수이다. 그것은 다음 식(10)으로 측정된다.

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r \times \left(1 - \frac{f_r^2}{f_a^2}\right) \times RC_f} \quad (10)$$

여기서 f_r 및 f_a 는 공진 및 반 공진 주파수이고, R 은 공진 주파수에서의 저항이고, C 는 전극을 통한 자유 캐패시턴스이다.



2.3.5. 상대 유전 상수

유전율은 아무런 응력없이 단일 전계가 가해질 때 발생하는 전기적 변위이다. 이것은 다음 공식에 의해 주어진다.

유전 상수를 진공도 ($8.85410 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$)의 유전 상수로 나눈 것을 비유전율이라고 한다. 그림 2-6 (a)에 보이는 길이 방향 진동 모드의 경우, 1 kHz에서 전극 양단의 자유 전기 용량이 C_f 라고 가정하면, 동일한 분극 방향의 전기장에 대한 비유전율은 다음과 같다.

$$\frac{T_{\varepsilon_{33}}}{\varepsilon_0} = \frac{C_f \cdot t}{l \cdot a \cdot \varepsilon_0} \quad (11)$$

두께에 따른 진동의 경우, 1 kHz에서 전극 양단의 자유 전기 용량이 C_f 라고 가정하면, 분극 방향과 직교하는 전기장의 비유전율은 다음 방정식으로 주어진다.

$$\frac{T_{\varepsilon_{11}}}{\varepsilon_0} = \frac{C_f \cdot t}{l \cdot a \cdot \varepsilon_0} \quad (12)$$

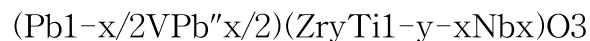
2.3.6. 도핑 효과

일반적으로 도핑 제는 PZT 세라믹의 시편의 소결성 및 압전 또는 전기 특성을 높이기 위해 첨가된다. 또한, PZT와 완화 물질의 고용체도 사용된다. 이들은 표 2-2에 나타난 것처럼 연화제, 경화제 및 안정제로 나뉜다.

소량의 도펀트는 때로 세라믹의 유전체 및 전기 기계적 특성 및 전기 광학 특성을 급격히 변화시킨다. 반도체 바륨 티타 네이트의 PTC 효과는 도판트가 전기적 특성에 미치는 영향 중 가장 주목 할 만한 예이다. 페로브스카이트 결정에서 불순물 도핑으로 인한 결정의 결점을 고려해 보겠다. Fe^{3+} 같은 수용체 이온은 다음과 같이 PZT 격자에서 산소 결핍 (VO)을 발생 시키게 된다.



억셉터 도핑은 결핍과 관련된 쌍극자의 재배향을 쉽게 하게한다. 이러한 쌍극자는 Fe^{3+} 이온 (효과적으로 음전하)과 산소 결손 부위 (효과적으로 양전하)에 의해 생성된다. 결합은 소결중에 고온 ($> 1000^{\circ}C$)에서 생성되지만, 산소와 공극이 인접 (단지 $2.8\text{\AA}$)하기 때문에 산소 이온은 여전히 큐리온도 아래에서도 움직일 수 있다. 도너 이온의 경우에, 예를 들면. Nb^{5+} 으로 인해 Pb 결핍 (VPb)이 발생하게 된다.



도너 도핑은 Pb 이온이 가까운 산소 환경으로 인해 인접한 A- 사이트를 공석으로 쉽게 넘어갈 수 없기 때문에 이동 가능한 쌍극자를 생성하는 데 그리 효과적이지 않다. 반대로, 작은 원자가 $+1 \rightarrow +3$ 의 억셉터형 이

온은 변형을 억제하고 히스테리시스를 증가시킨다. 액추에이터 세라믹을 설계 할 때 액세서형 이온은 피해야하지만 수용체 도핑은 초음파 모터 애플리케이션에 특히 적합한 "하드"형 세라믹을 제작하는 데 매우 필요하다. 이러한 도핑 효과는 도메인 피닝 효과에 기인 할 수 있다.

<표 2-1>. 하드너 소프트너에 따른 압전 특성 변화

Classification	Dopant and ternary system	Dopping effect	Characteristics	Applications
Hardner	Fe, Ni, Co, Al, PSN, PMS	Acceptor	Decreased ϵ' Increased f_N Increased Q_m Large aging effect	Buzzer, Speaker, Probe for medical, Actuator, sensor
Softner	La, Bi, W, Ta, PMN, PNN, PZN	Donor	Lowerer T_c , Increased ϵ Increased k_p , Deacreased Q_m Small aging effect	High power transducer Transformer
Stabilizer	Cr, U		Decreased ϵ , Increased f_N Increased Q_m Large aging effect	SONAR

제 3 장. 실험재료 제작 및 특성

3.1. 고효율 압전 에너지 하베스팅 조성 개발

PbO (99.9%), ZrO₂ (99.9%), ZnO (99.9%), TiO₂ (99.9%), Nb₂O₅ (99.9%) 및 CuO (99.9 %) 분말 고순도 파우더를 출발 물질로 사용 하였다. $0.72\text{Pb}(\text{Zr}_{0.47}\text{Ti}_{0.53})\text{O}_3 - 0.28\text{Pb}[(\text{Zn}_{0.45}\text{Ni}_{0.55})_{1/3}\text{Nb}_{2/3}]\text{O}_3 + x \text{ mol \% CuO}$ (PZNxC)의 조성을 제작하기 위해서 파우더와 지르코니아 볼을 넣은 폴리에틸렌 병에서 24 시간 동안 볼 밀링 하였다. 밀링 후 100도에서 30분 동안 건조시킨 후, 건조 된 분말을 800℃에서 2시간 동안 하소 시켰다. 하소 한 분말을 24 시간 동안 재 밀링 한 다음 건조시켰다. 이어서, 분말을 중합체, 용매, 결합제 및 가소제 (B-73225, FERRO, USA)를 사용하여 세라믹 대 고분자의 상대 중량비를 갖는 슬러리를 2 : 1로 제조하였다. 이어서, 샘플을 진공 하에 30 분 동안 탈포 시키고 점도를 최적화하였다. 약 30 μm 두께의 그린 시트를 테이프 캐스팅 공정으로 제작하였다. 절단기 (DC-5, DH)를 활용하여 적층된 그린 시트를 $30 \times 40 \text{ mm}^2$ 인 사각 모양의 샘플을 얻는 데 사용하였다. 시트를 층과 층으로 총 10 장을 10kg/cm^2 의 압력 하에서 60℃에서 10 분 동안 적층 시켰다. 유기 첨가제를 제거하기 위해 적층 시트를 사용하여 시편을 천천히 600℃로 가열하고 같은 온도에서 3 시간 동안 전기로(AJ-MLBF2, AJEON)에서 유지 하였다. 소결 후막은 실리콘 오일 온도 120℃에서 2 kV/mm의 전계를 2 시간 동안 인가 하였다.

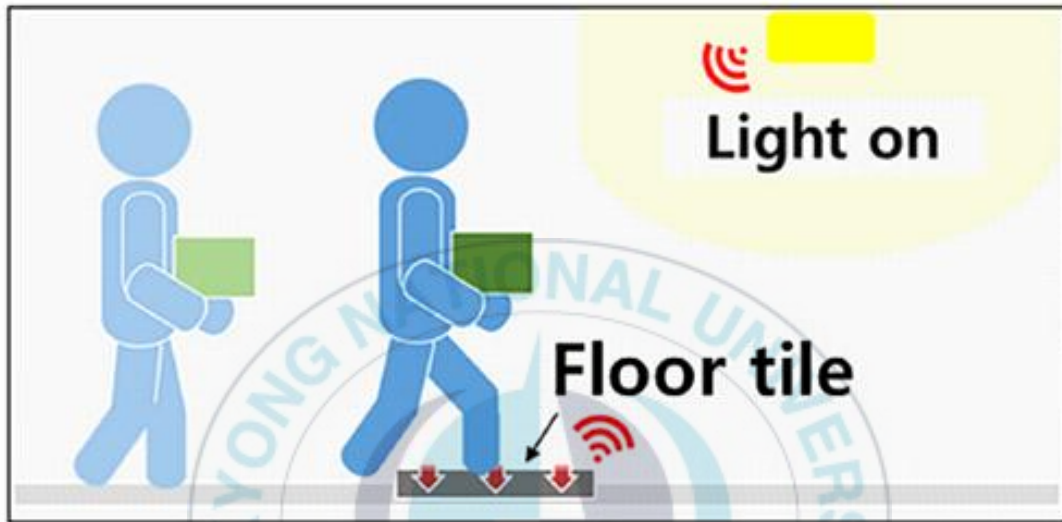
3.2. 압전 및 전기적 특성

압전 전하 상수는 d_{33} 미터 (PM100, Piezotest)로 측정하였습니다. PZN_xC 후막을 스테인리스 강 기판 (SUS 304)의 상부에 접착제를 사용하여 접착하였다. 발진 특성을 평가하기 위해 바닥 타일을 디지털 오실로스코프 (DPO4054B, Tektronix)로 사용하여 측정 하였다.



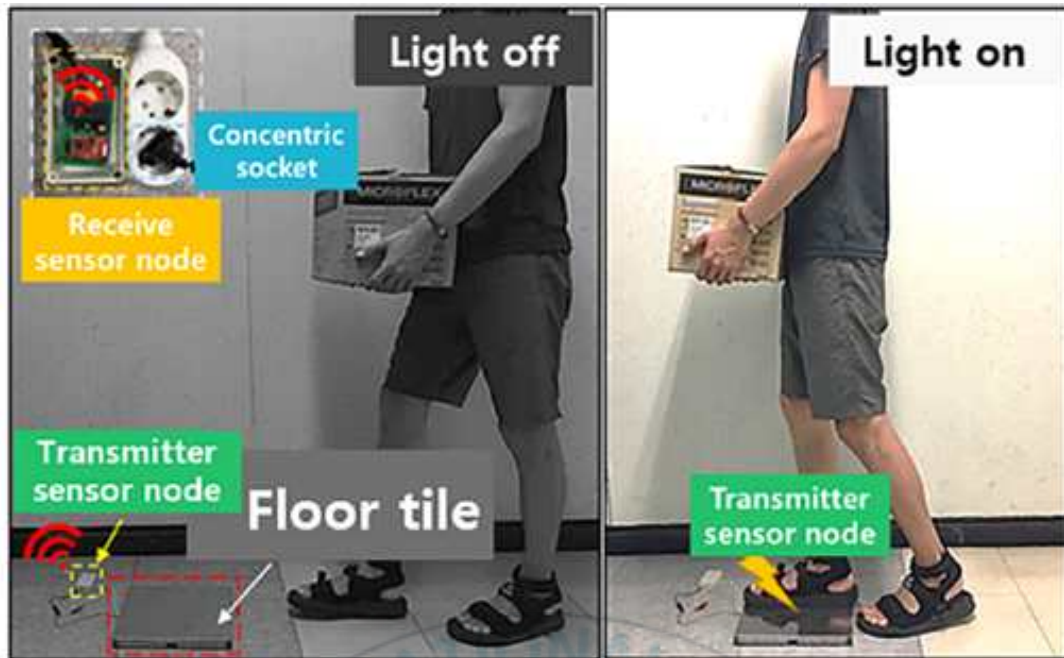
제 4 장. 실험 결과 및 고찰

4.1. 압전 무선 스위치 개념



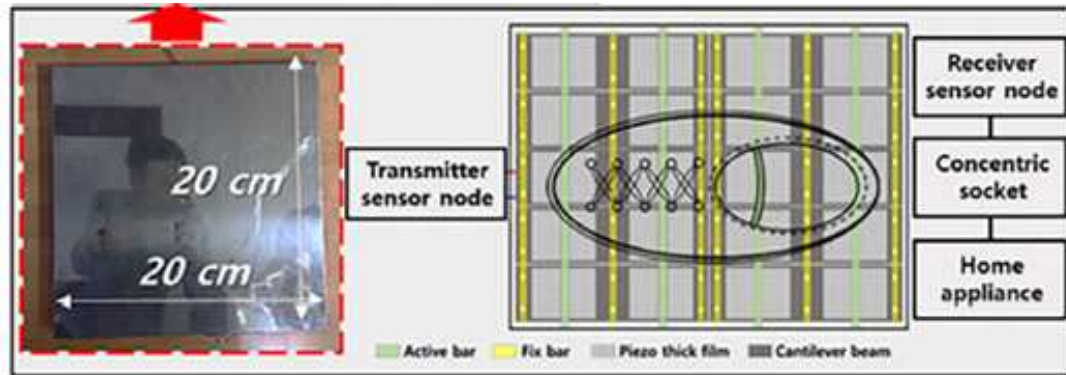
<그림 4-1>. 조명을 무선으로 작동 시킬 수 있는 자가 발전형 바닥 타일

<그림 4-1>은 압전 에너지 하베스팅 기술을 활용하여 바닥 타일을 통한 무선스위치에 필요한 전력 원으로 제작하였다. 최적화된 압전 소자의 조성으로 $PZN_{0.5}C$ 후막을 활용하여 바닥타일을 제작하였다. 사람의 걸음걸이로 무선신호를 활용하여 조명을 작동시키는데 충분한 전력원으로 활용 가능하다.



<그림 4-2>. 실제 자가 발전형 바닥 타일이 사람의 발걸음으로 동작되는 무선 스위치.

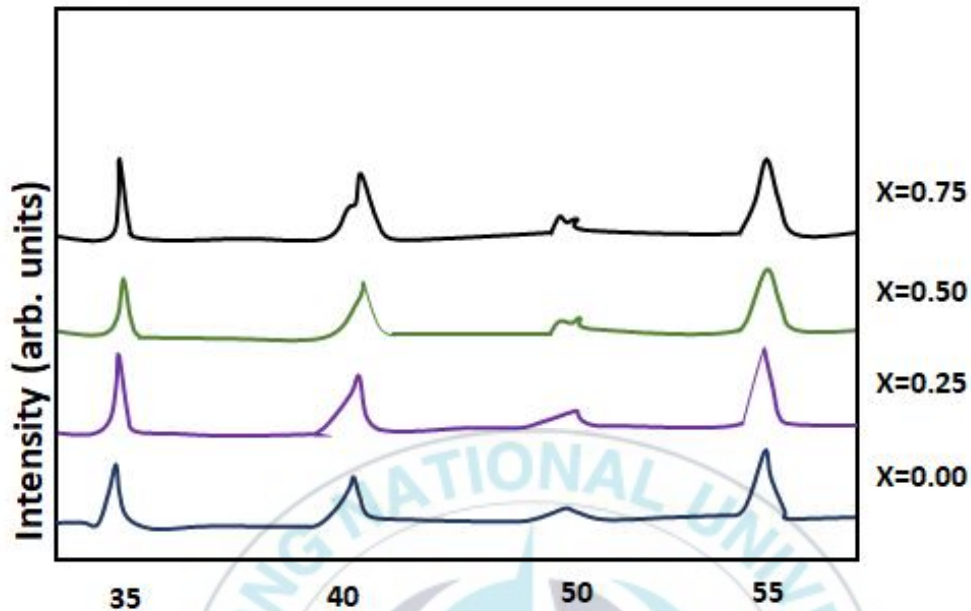
<그림 4-2>는 자가 발전형 바닥 타일을 활용한 무선스위치의 작동 모습을 나타내었다. 버려지는 사람의 발걸음을 이용하여 바닥 타일에 힘이 가해졌을 때 발생된 전력을 활용하여 transmitter sensor node을 동작시켜 receive sensor node에서 신호를 받고 concentric socket에 연결된 조명 및 가전제품의 전원을 켤 수 있다.



<그림 4-3>. 조립식 자체 전력 수확기 및 바닥 타일의 구조 설계 그림

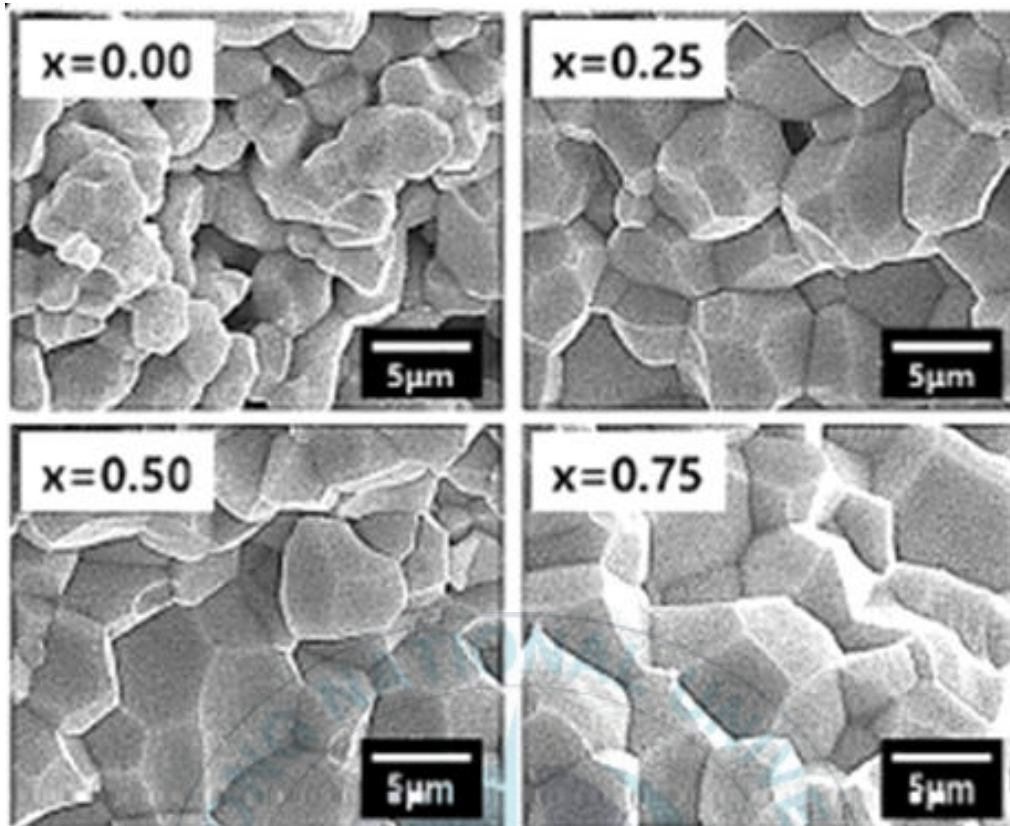
<그림 4-3>은 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 크기의 바닥 타일 사진이다. PZN0.5C 를 (바닥 타일에 20 ea)의 크기는 $3 \times 5 \text{ cm}^2$ 로 구성되어 있으며, 파손을 방지하기 위해 활성 막대가 고정되어 있다. 송신기 센서는 압전 수확기에 연결되어 전원을 공급하며, 수신기 센서에 신호를 보내는 역할로 송신기 센서에서 필요한 전력 원을 공급하게 된다. 수신기에 연결된 전기 제품 등을 작동 시킬 수 있다. 바닥 타일을 구성하는 에너지 소자의 제작을 위해 우선적으로 최적 조성으로 사용된 압전 재료를 디바이스로 활용하였다.

4.2. PZN_xC 조성 개발



<그림 4-4>. PZN_xC 세라믹의 CuO 첨가에 따른 XRD 패턴.

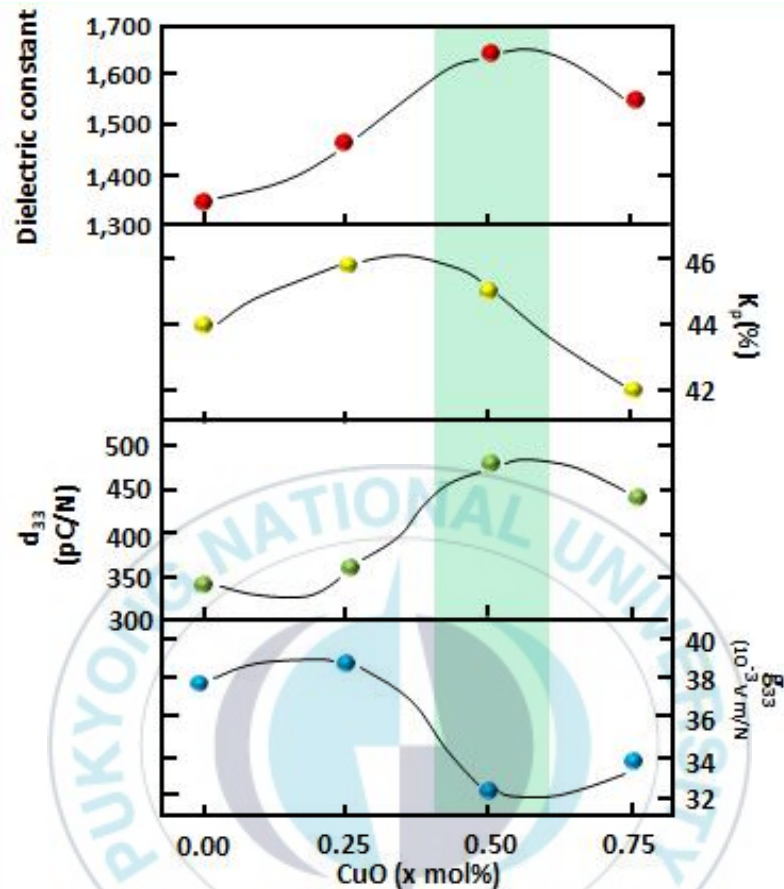
<그림 4-4>은 PZN_xC의 CuO 첨가에 따른 다양한 XRD 패턴을 보여준다. 여기에서 PZN_xC 세라믹은 950°C에서 소결되었으며, 모든 시편은 페로브스카이트 구조를 가지며 2 차상은 발견되지 않았다. CuO 첨가량이 $x = 0.00$ 인 샘플은 마름모면체를 가지고 있으며, $x = 0.75$ 를 갖는 시편은 정방형 구조를 갖는다. 또한, $0.25 \leq x \leq 0.50$ 의 샘플은 마름모면체 구조와 정방형 구조를 가지는 두상이 존재라는 샘플로 확인되었다.



<그림 4-5>. PZNxC 세라믹의 CuO 첨가에 따른 FE-SEM 이미지.

<그림 4-5>와 같이, CuO가 $0.50 \leq x \leq 0.75$ 로 도핑된 시편은 보다 균일하고 크기가 약 $5-8 \mu\text{m}$ 인 큰 입자는 물론 보다 조밀하게 $0.00 \leq x \leq 0.25$ 로 도핑된 것보다 밀도가 높은 구조를 갖는다.

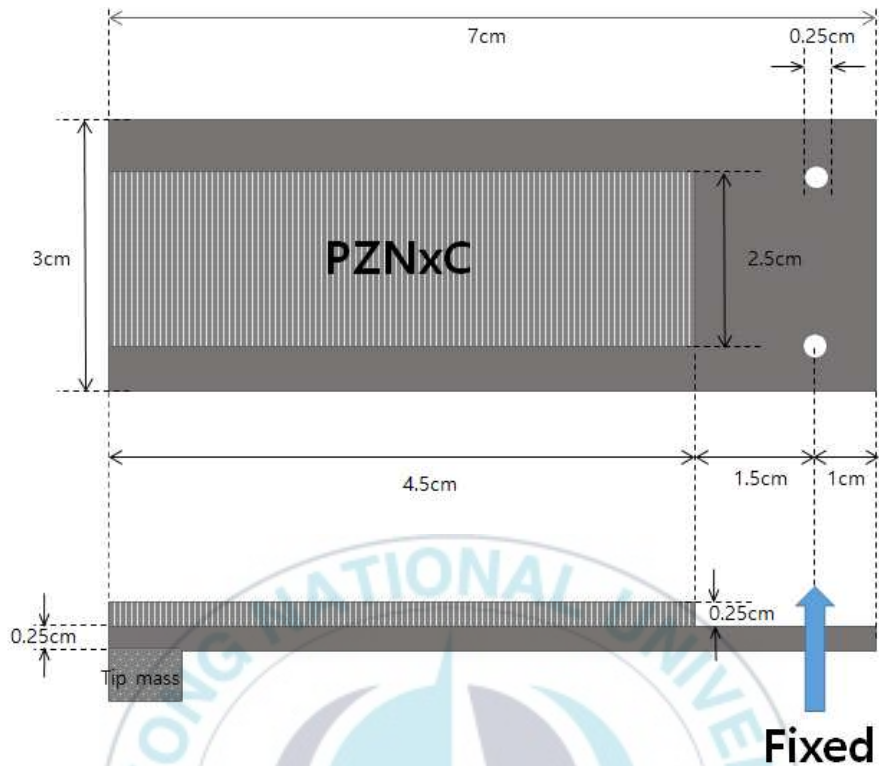
4.3. PZN_xC 압전 및 유전 특성 평가



<그림 4-6>. 950 °C 에서 2 시간 소결된 PZN_xC 세라믹의 CuO 첨가에 따른 압전 및 유전 특성 그래프

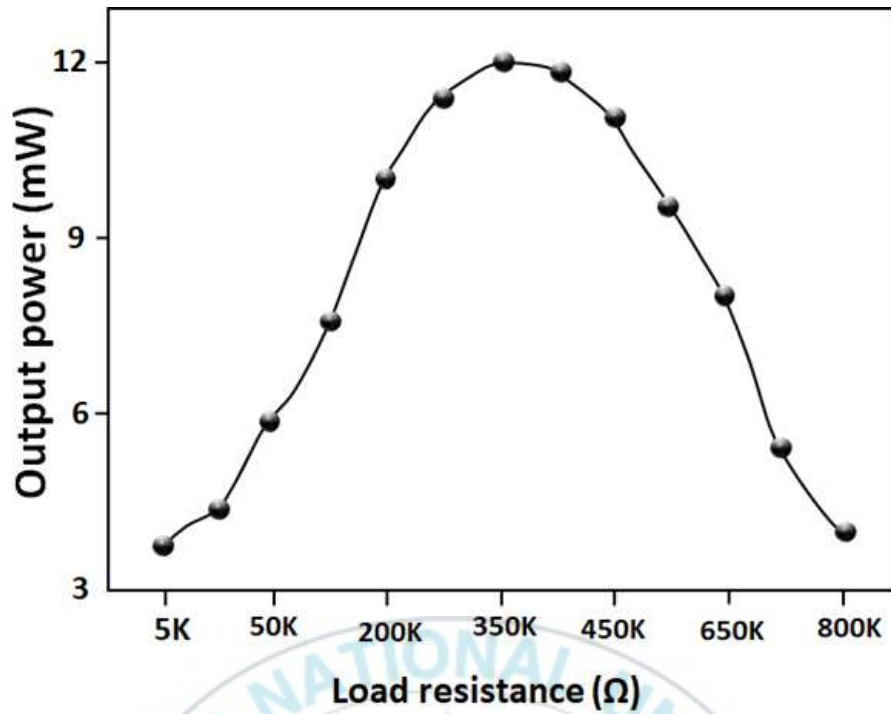
<그림 4-6> 에 나타낸 바와 같이, 압전 상수 (d_{33})는 CuO가 $0.00 \leq x \leq 0.50$ 에서 증가하고, $x = 0.50$ 시편은 480 pC/N의 큰 d_{33} 값을 가지며, k_p 값은 45%, g_{33} 값은 d_{33} /유전 상수로 표현되어 32.5로 관찰되었다. 따라서, $x = 0.50$ 인 샘플에서 압전 하베스팅 재료로 최적인 것으로 확인되었다.

4.4. PZNx C 후막의 전기적 특성 평가



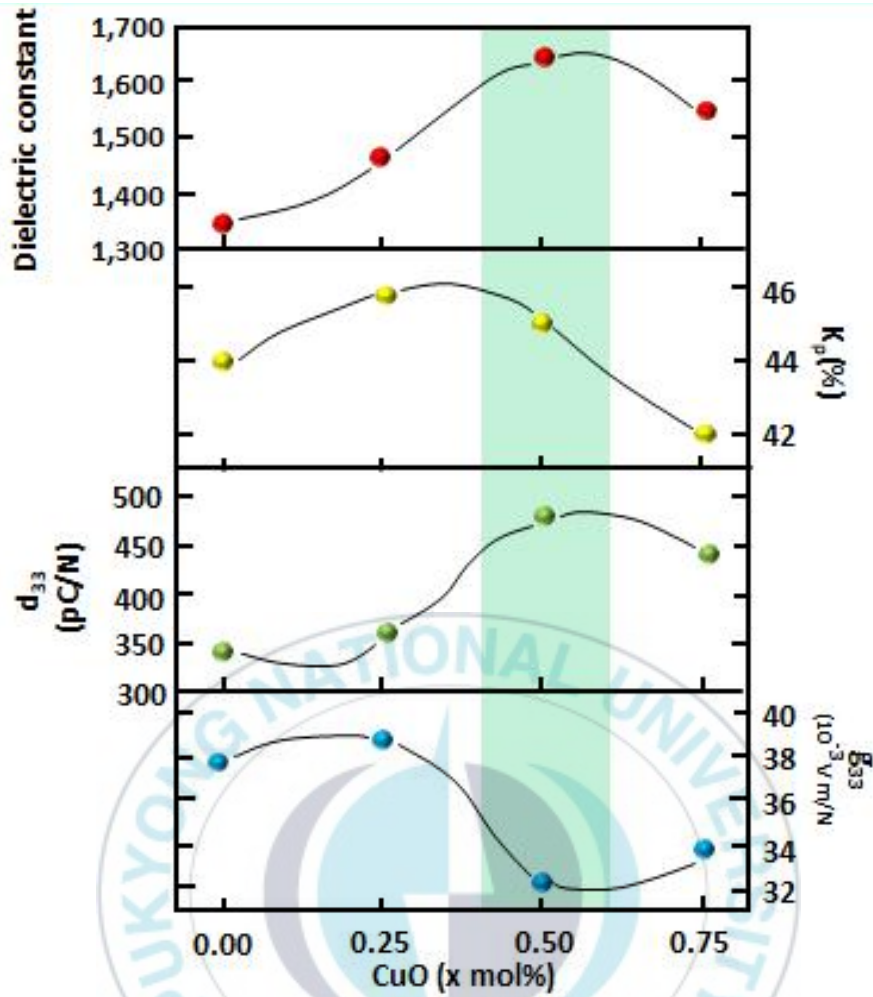
<그림 4-7> PZNx C 후막을 포함하는 캔틸레버형 압전 에너지 수확기의 개략도.

<그림 4-7>은 유니몰프 캔틸레버형 압전 에너지 수확기는 PZNx C 두꺼운 필름을 사용하여 제작되었다. 각 샘플의 크기는 $4.5 \times 2.5 \times 0.25 \text{ cm}^3$ 이고 $7.0 \times 3.0 \times 0.025 \text{ cm}^3$ 의 SUS304로 만들어 졌습니다. 상세한 에너지 수확기는 <그림 4-13>에 나와 있다. 개발된 유니몰프 캔틸레버형 압전 에너지 수확기에 대한 공진 주파수는 11 Hz (가속도: 3.0 m/s^2)에서 관찰되었다.



<그림 4-8>. PZN_{0.5}C 기반 압전수확기의 부하 저항(Ω)에 따른 출력 전력 (mW).

<그림 4-8>을 통해서 임피던스 매칭을 통한 출력 전력을 측정하기 위해서 350 k Ω 에 부하 저항을 최적화했다. 최대 출력 전력은 12 mW 이며, 연결된 부하저항의 최대 출력전압을 통해서 최대출력전압을 제공하여 연결된 부하저항으로 나누어서 출력전력을 계산하였다.



<그림 4-9>. PZN_xC 기반 수확기의 압전 및 유전 특성

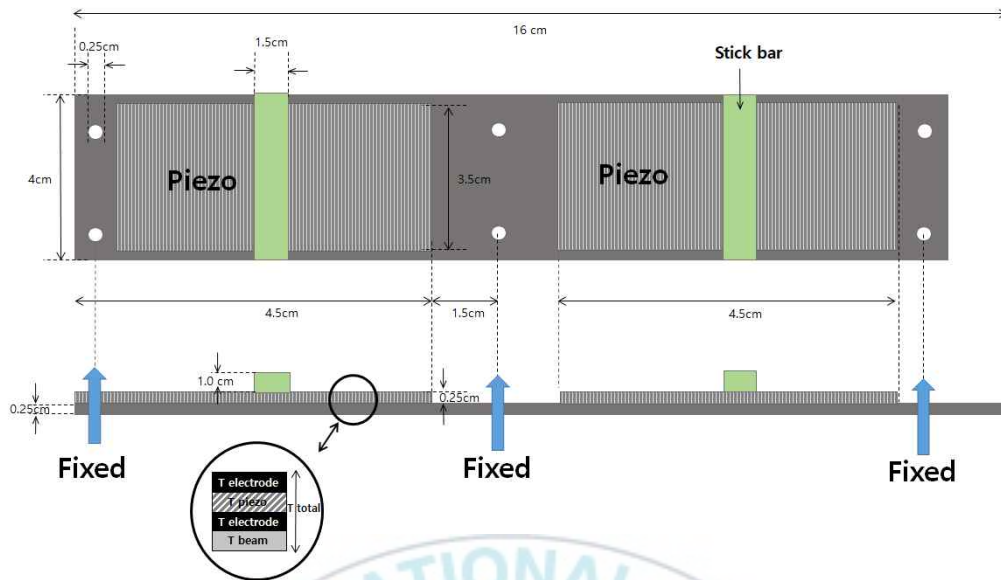
<그림 4-9>는 출력 PZN_xC의 전력 (mW) 및 변환 계수 ($d_{33} \times g_{33}$) ($x = 0-0.75$)는 경향 그래프와 유사하며 높은 출력 12 mW의 전력 및 변환 계수 ($d_{33} \times g_{33}$) $15,647 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ 는 PZN_{0.5}C 후막으로 측정 하였다. 그만큼 PZN_{0.5}C 필름은 에너지 하베스팅 재료의 좋은 조성으로 간주된다. 이는 후막의 이러한 압전 특성이 고출력 특성을 나타내기 때문이다. 표 1은 PZN_xC 에너지 수확기의 $d_{33} \times g_{33}$, 효율, FOM_{off} , $d_{33} \times g_{33} \times (k_p)^2$, 출력 값을 나타낸다. 압전 에너지 수확기의 출력 매개 변수는 유사 변형을 나타내며 $d_{33} \times g_{33}$, FOM_{off} 및 $d_{33} \times g_{33} \times (k_p)^2$ 가 과 밀접한 관련이 있다. 또한, 모든

PZN_xC 후막 ($x = 0-0.75$) 효율 값이 0.9 이상이다. $x = 0.0$ 인 시편은 $k_p, d_{33}, d_{33} \times g_{33} \times (k_p)^2$, 유전율 값은 44 %, 340 pC/N, 3168.5, 및 1350이다. 그러나 g_{33} 및 $d_{33} \times g_{33}$ 은 대체로 낮은 $37.7 \times 10^{-3} \text{Vm/N}$ 및 $12,820 \times 10^{-15} \text{m}^2/\text{N}$ 이다. 하지만 대체로 낮은 유전 상수 값에 의해 $x = 0.50$ 은 상대적으로 높은 g_{33} 및 $d_{33} \times g_{33}$ 값을 나타내며, $32.5 \times 10^{-3} \text{Vm/N}$ 및 $15,647 \times 10^{-15} \text{m}^2/\text{N}$ 으로, 높은 압전 전하 상수 480 pC/N 및 1650의 낮은 유전 상수를 갖는다. 마름모꼴 구조 ($x = 0.0$)에 가까운 표본은 MPB 구조를 갖는 시편 ($x = 0.50$)보다 정방정계 구조가 작다. 이는 MPB 구조에서 정방정계 구조의 밀도가 높으므로 인해 압전 특성이 더 크게 관찰되게 된다. [18]. 따라서, 정방정계 구조의 밀도가 높은 압전 세라믹은 큰 g_{33}, d_{33} 및 k_p 값을 가지게 된다. 그로 인해 제작된 압전 에너지 수확기는 큰 출력 전력 (mW)을 가지며, 사용된 압전 수확기 PZN_{0.5}C는 바닥 타일을 작동시키는 압전 재료로 사용된다. 자세한 데이터는 <표 4-1>에 나타내었다.

<표 4-1>. 950°C에서 2 시간 동안 소결된 PZN_xC 후막의 압전, 유전, 및 에너지 수확 등의 매개 변수 값을 나타냄.

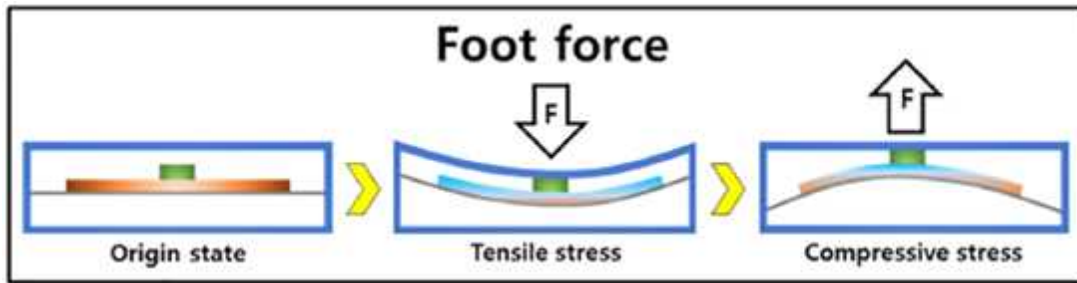
CuOx mol%	Dielectric Content	$d_{33}(\text{pC/N})$	$d_{31}(\text{pC/N})$	Q_m	$\tan \delta$	$K_p(\%)$	$\delta_{33} (10^{-3} \text{Vm/N})$	$d_{33} \times \delta_{33} (10^{-5} \text{m}^2/\text{N})$	$d_{33} \times \delta_{31} (10^{-5} \text{m}^2/\text{N})$	Output power (mW)	Efficiency (η)	POM _{eff} ($10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$)	$d_{33} \times \delta_{33} \times (k_p)^2 (10^{-15} \text{m}^2/\text{N})$
0.00	1350	340	120	78	0.23	44	37.7	12,820	1200	6.2	0.90	5.6	2481.9
0.25	1470	360	135	81	0.24	46	38.7	13,940	1620	7.8	0.91	5.8	2949.7
0.50	1650	480	167	80	0.15	45	32.5	15,647	2505	12	0.91	10.4	3168.5
0.75	1550	440	154	80	0.18	42	33.6	14,800	2156	10.5	0.90	8.2	2610.7

4.5. 압전 바닥 타일 제작



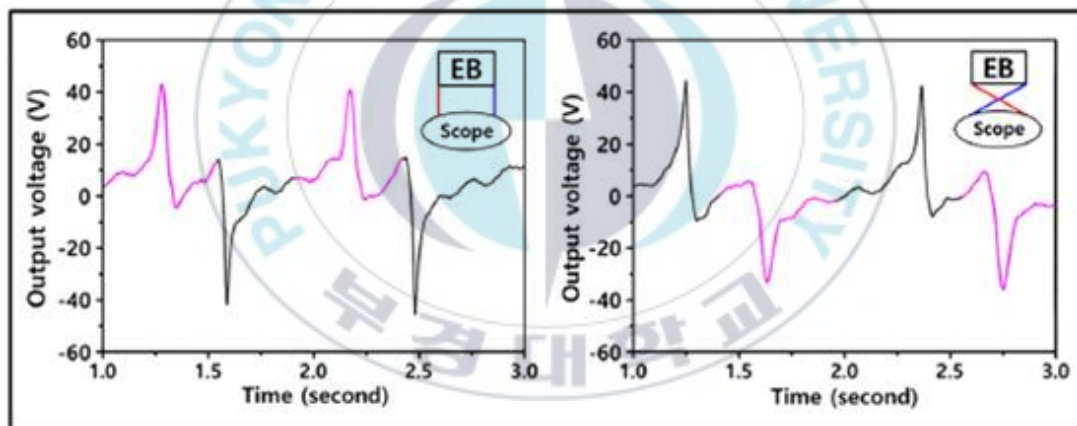
<그림 4-10>. 압전 자가발전 구동 시스템의 구조 설계.

<그림 4-10>은 $\text{PZN}_{0.5}\text{C}$ 의 단위 모듈의 개략도를 보여준다. 바닥 타일에 적용된 유니몰프 하베스터 (크기 : $4.0 \times 16.0 \text{ cm}^2$)를 양쪽 끝이 고정되고 보의 중심이 구조물에 고정되었다. $\text{PZN}_{0.5}\text{C}$ 후막 (크기 : $4.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$)이 빔의 윗면에 붙어 있다. 빔과 스틱 바가 $\text{PZN}_{0.5}\text{C}$ 후막에 고정되어 외부 충격으로 인한 파손을 방지하게 된다. 특히 유니몰프에 스틸 케이스와 스틱 바 사이 이용하는 푸쉬-컨택트 모드의 동작 원리를 이용하여 사람이 걸을 때 압전 수확기에 스틱 바에 힘이 전달되고 응력이 $\text{PZN}_{0.5}\text{C}$ 후막을 누르게 되어 인장 응력이 발생하고 빔이 아래쪽으로 구부러진다.



<그림 4-11>. 압전 유니몰프의 인장 응력 및 압축 응력 모드의 작용 메커니즘.

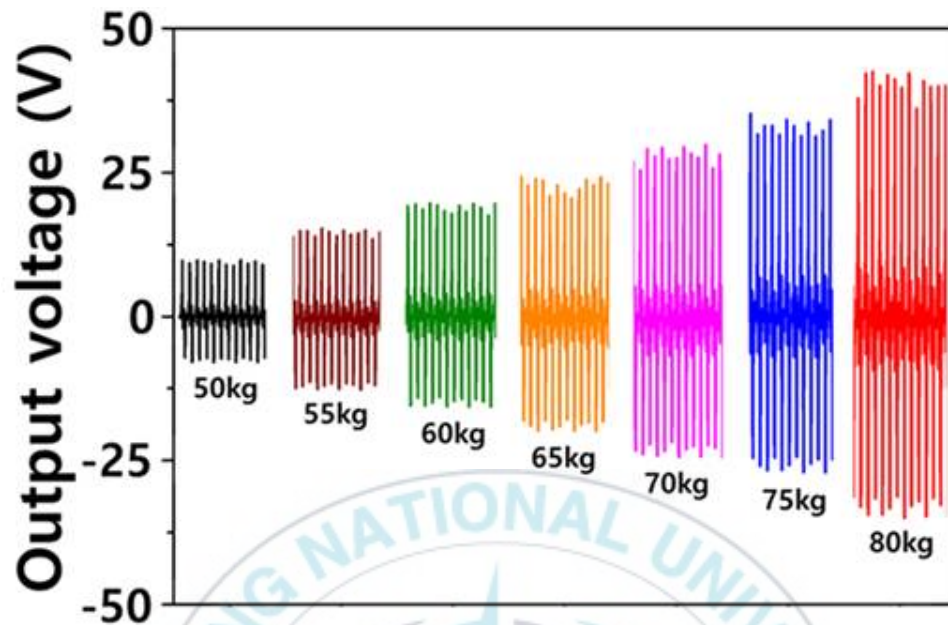
또한, 빔이 원래의 형태로 되돌아가는 특성으로 인해 위 방향으로 움직이게 되어 인장 응력은 양의 전압 (+)을 발생시키고, 음의 전압 (-)은 압축 응력에 의해 <그림 4-11>과 같이 생성된다.



<그림 4-12>. 제작 된 바닥 타일의 개방 회로의 출력 전압.

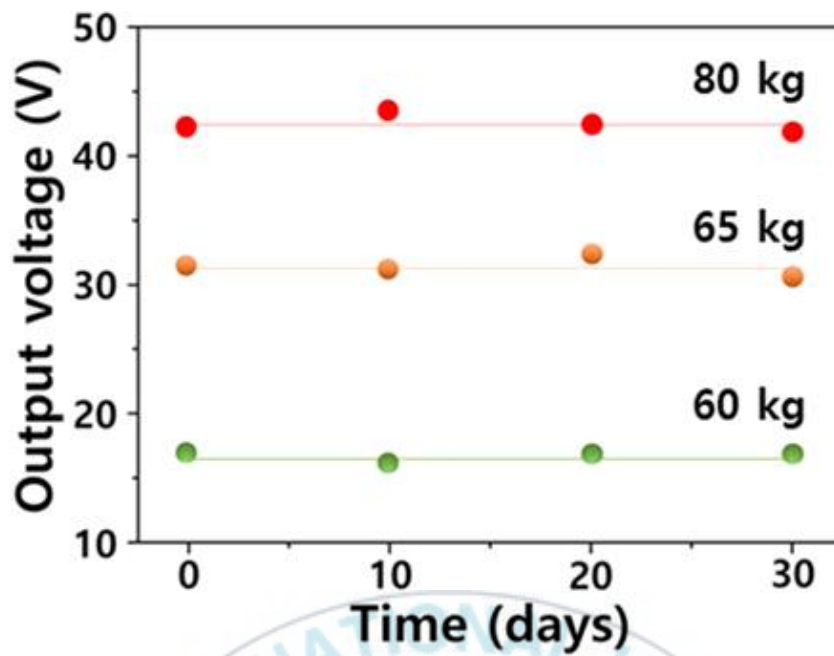
압전 수확기에 사용된 $\text{PZN}_{0.5}\text{C}$ 후막은 사람의 발걸음으로 스위치를 구동하여 에너지를 생성한다. <그림 4-12>에 나타난 바와 같이, 측정 프로브의 방향이 바뀌어도 42 V의 출력 전압 (사람 중량: 80 kg)을 유지한다.

4.6. 압전 바닥 타일 하베스팅 측정

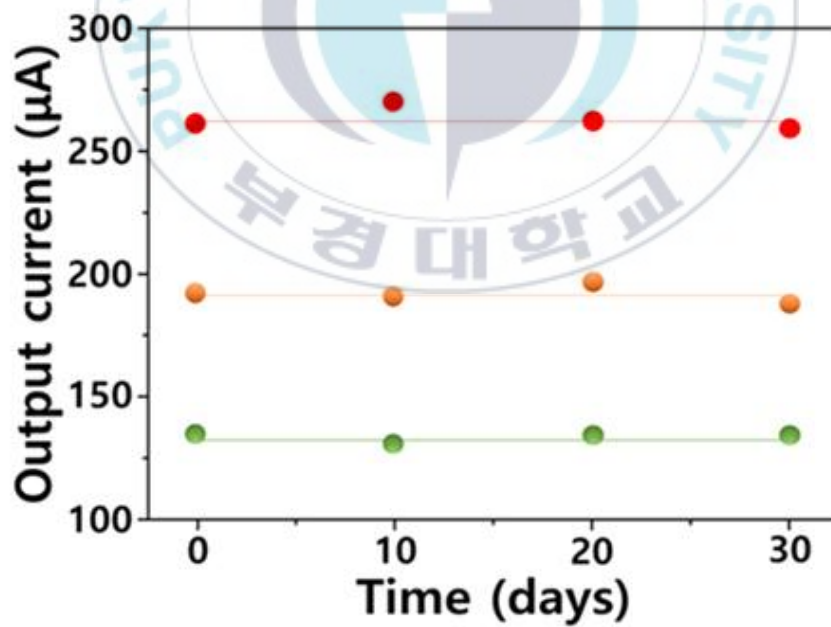


<그림 4-13>. 다양한 사람 무게 (50-80 kg) 변화에 따른 압전 수확기의 개방 회로 출력 전압.

<그림 4-13>은 인간의 체중 증가에 따라 (20-80 kg) 발생하는 출력 전압을 나타내며, 개방 회로 출력 전압은 꾸준히 증가하고 최대 전압은 42 V (중량: 80 kg)에 달한다.



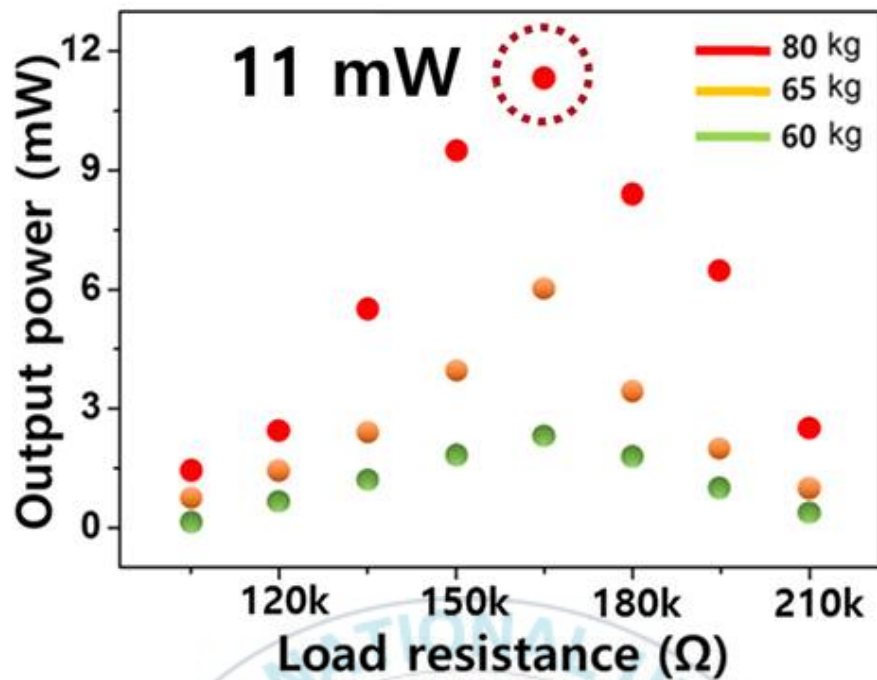
<그림 4-14>. 무게 (kg) 변화에 따른 압전 수확기의 개방 회로 출력 전압을 통한 내구성 실험



<그림 4-15>. 무게 (kg) 변화에 따른 압전 수확기의 개방 회로 출력 전류를 통한 내구성 실험

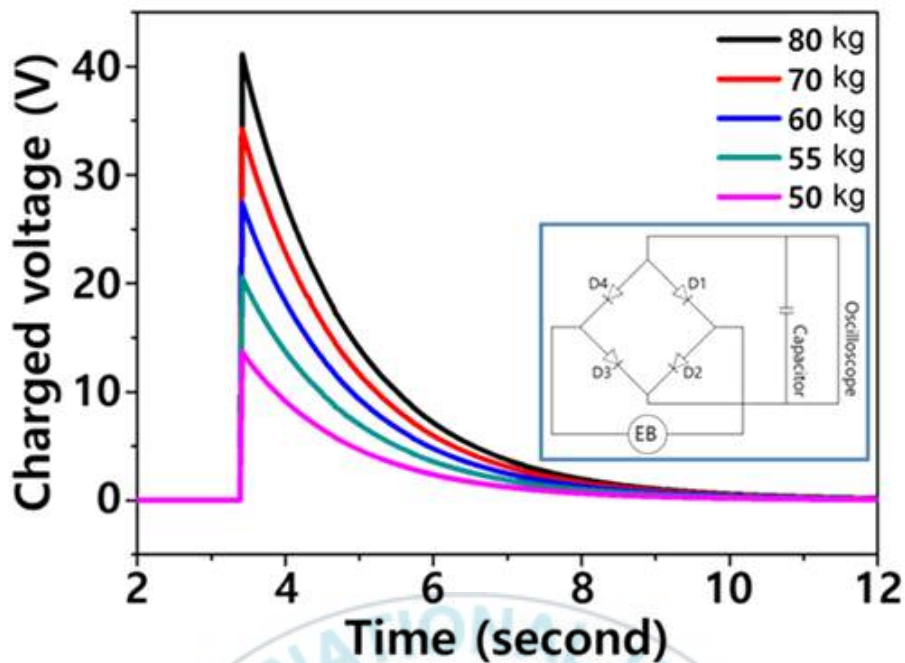
압전 하베스터의 개방 회로 출력 전기의 신뢰성을 관찰하기 위해서 다양한 무게 (kg)하에 피크 출력 전압과 전류를 한 달 동안 다른 날에 테스트를 진행을 하여 <그림 4-14, 15>에 나타난 바와 같이 바닥 타일 연속적으로 힘을 가하여 실험하였다.





<그림 4-16>. 출력 전력 (mW)의 부하 저항 (Ω) 변화에 따른 임피던스 정합.

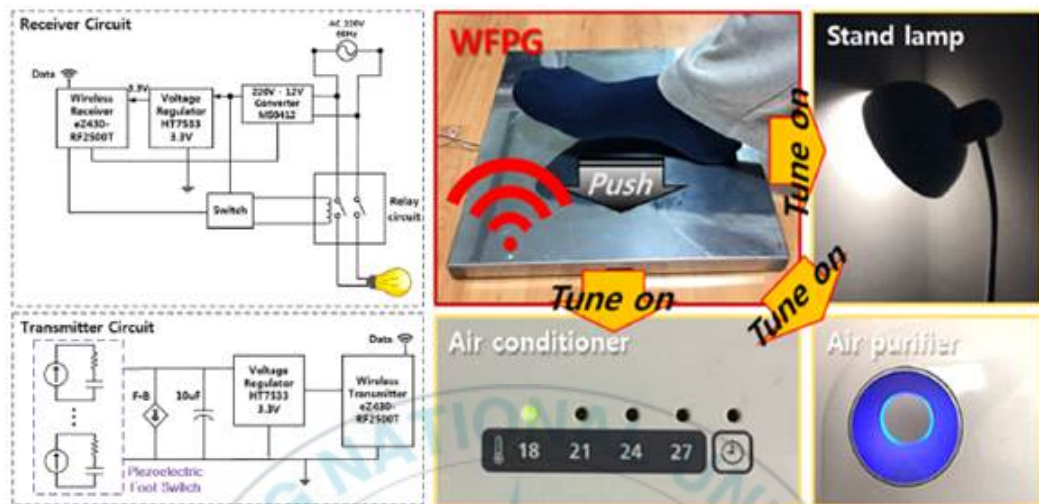
<그림 4-16> 유도 된 출력 전력의 변화를 다양한 외부 저항을 통하여 관찰하였다. 최대 순간적 165 kΩ의 저항에서 11 mW의 전력이 생성되었다. 사람의 걸음걸이로 인해 에너지가 생성되어 압전 하베스터를 통해 전기 AC 신호로 변환된다.



<그림 4-17>. 다양한 무게 (kg)에서 압전 수확기 에너지로부터 충전된 커패시터 전압. 삽화는 에너지 수확기의 충전 회로를 보여줌.

압전 수확기가 눌려 질 때 신호를 풀 브리지 다이오드로 인해 DC로 정류된다. 정류된 신호를 10 μ F 용량의 커패시터를 충전한다. 마찬가지로 <그림 4-17>의 그림과 같이, 중량이 증가하면 전압 피크도 증가한다. 삽입 된 그림은 에너지 수확 충전 회로를 나타낸다. 그림 18는 바닥 타일은 여러 개의 압전발생기로 구성되어있다. 사람이 바닥 타일을 누르면 기계적 에너지는 바닥 타일로부터 전기 에너지로서 수확되고 정류되며 커패시터에 충전된다. 저장된 에너지는 순간적으로 무선 센서에 공급이 된다. 센서 노드에 전원이 공급되면 무선 송신기 노드 (eZ430-RF2500T)가 활성화되어 온/오프 데이터를 무선 수신기 (eZ430-RF2500T)로 전송한다. 마지막으로 220 V에 연결된 전기 제품 등을 제어하드로 켜고 끈다.

4.7. 압전 바닥 타일 무선 스위치 시스템



<그림 4-18>. 바닥 타일에 의해 작동되는 무선 스위치 시스템, 에어컨, 테이블 램프 및 공기 정화기를 무선 스위치 시스템으로 동작한 사진.

<그림 4-18>는, 버려지는 사람의 운동 에너지를 활용하여 압전 수확기를 무선 전송 센서에 직접 연결하고 어떤 종류의 배터리도 사용하지 않는다. 위치를 쉽게 바꿀 수 있는 타일 형태로 무선 센서를 통해서 방폭형 스위치 개발이 가능하여 위험지역 내에 스파크에 의해 발생할 수 있는 폭발 사고 등을 사전에 대비할 수 있다. 타일은 $\text{PZN}_{0.5}\text{C}$ 후막을 활용하여 송신기로 구성된 회로의 전력 소비 센서 노드 등을 장기간에 걸쳐 작동 할 수 있다.

제 5 장 결 론

고효율의 압전 하베스팅 물질을 개발하기 위해 $\text{PZN}_{0.5}\text{C}$ 후막을 이용하여 자체구동 바닥 타일을 성공적으로 제작하여 자가발전 무선 스위치 적용을 위하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. $\text{PZN}_{0.5}\text{C}$ 후막은 대량 생산이 가능한 테이프 캐스팅 방법을 이용하여 균일하게 제작 된 것을 확인 하였다.
2. 압전 수확기는 30일 동안 안정적인 발전 특성을 보였으며 42 V의 출력 전압과 52 μA 의 출력 전류를 나타냈다.
3. 바닥 타일은 일반인 (50-80 kg)의 무게에서 충분히 발전하였으며, 발판에서 얻은 출력 전압은 주 전원의 무선 송신기 센서 노드의 신호 발생기에 전원을 공급하여 스위치 모듈을 성공적으로 작동되었다.
4. 실시간 자체 전원 공급형 바닥 타일 시스템은 신호를 무선으로 스위치 모듈에 전송함으로써 전기 제품 등이 작동 되었다.
5. 현재 스마트팩 토리를 위해 저전력의 최적화된 압전 재료를 사용하였으며, 위험 환경에서 사용 가능한 바닥 타일 시스템이 구현 되었다.

참 고 문 헌

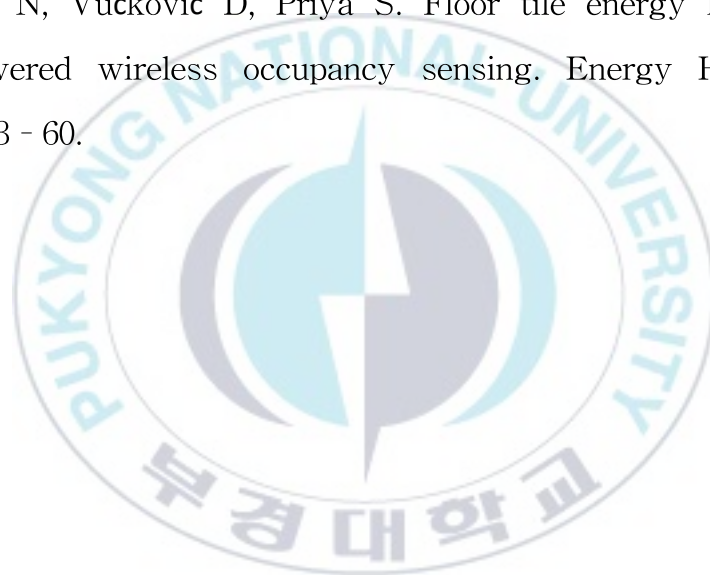
1. Gu L, Cui N, Cheng L, Xu Q, Bai S, Yuan M, et al. Flexible fiber nanogenerator with 209 V output voltage directly powers a light-emitting diode. *Nano Lett* 2012;13:91 - 4.
2. Ryu J, Kang J-E, Zhou Y, Choi S-Y, Yoon W-H, Park D-S, et al. Ubiquitous magnetomechano-electric generator. *Energy Environ Sci* 2015;8:2402 - 8.
3. Panwar N, Kaushik S, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:1513 - 24.
4. Zhang X, Ma C, Song X, Zhou Y, Chen W. The impacts of wind technology advancement on future global energy. *Appl Energy* 2016;184:1033-7.
5. Paradiso JA, Starner T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive Comput* 2005;4:18 - 27.
6. Park C, Chou PH, Bai Y, Matthews R, Hibbs A. An ultra-wearable, wireless, low power ECG monitoring system. In: *Biomedical circuits and systems conference, 2006 BioCAS 2006 IEEE*. IEEE; 2006. p. 241 - 4.
7. Premanode B, Toumazou C. A novel, low power biosensor for real time monitoring of creatinine and urea in peritoneal dialysis. *Sens Actuat, B* 2007;120:732 - 5.
8. Orrego S, Shoele K, Ruas A, Doran K, Caggiano B, Mittal R, et al. Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric

- flag. Appl Energy 2017;194:212 - 22.
9. Lallart M. Nonlinear technique and self-powered circuit for efficient piezoelectric energy harvesting under unloaded cases. Energy Convers Manage 2017;133:444 - 57.
 10. Takemura K, Yoshimi A, Nishikawa H, Tanaka A, Douseki T. Batteryless 900- μ s latency FM transmitter powered by piezoelectric generator for wireless electronic drums. In: SENSORS, 2015 IEEE. IEEE; 2015. p. 1 - 4.
 11. Paradiso J, Feldmeier M. A compact, wireless, self-powered pushbutton controller. In: Ubicomp 2001: ubiquitous computing. Springer; 2001. p. 299 - 304.
 12. Tan Y, Hoe K, Panda S. Energy harvesting using piezoelectric igniter for self-powered radio frequency (RF) wireless sensors. In: IEEE International conference on industrial technology, 2006 ICIT 2006. IEEE; 2006. p. 1711 - 6.
 13. Yang J, Lee M, Park M-J, Jung S-Y, Kim J. A 2.5-V, 160- μ J-output piezoelectric energy harvester and power management IC for Batteryless Wireless Switch (BWS) applications. In: 2015 symposium on VLSI circuits (VLSI Circuits). IEEE; 2015. p. C282 - C3.
 14. Lee J, Choi B. Development of a piezoelectric energy harvesting system for implementing wireless sensors on the tires. Energy Convers Manage 2014;78:32 - 8.
 15. Jiang X-Y, Zou H-X, Zhang W-M. Design and analysis of a multi-step piezoelectric energy harvester using buckled beam driven by magnetic excitation. Energy Convers Manage

2017;145:129 - 37.

16. Islam RA, Priya S. Realization of high-energy density polycrystalline piezoelectric ceramics. Appl Phys Lett 2006;88:032903.
17. Richards CD, Anderson MJ, Bahr DF, Richards RF. Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component. J Micromech Microeng 2004;14:717.
18. Zhu L-F, Zhang B-P, Zhao L, Li S, Zhou Y, Shi X-C, et al. Large piezoelectric effect of (Ba,Ca)TiO₃ - xBa(Sn,Ti)O₃ lead-free ceramics. J Eur Ceram Soc 2016;36:1017 - 24.
19. Lee T-G, Lee H-J, Kim S-W, Kim D-H, Han SH, Kang H-W, et al. Piezoelectric properties of Pb(Zr, Ti)O₃-Pb(Ni, Nb)O₃ ceramics and their application in energy harvesters. J Eur Ceram Soc 2017.
20. Lee TG, Lee HJ, Sj Park, Lee TH, Kim Dh, Hong CH, et al. Structural and piezoelectric properties of 001 textured PZT-PZNN piezoelectric ceramics. J Am Ceram Soc 2017.
21. Lee T-G, Lee H-J, Kim D-H, Xu H, S-j Park, Park J-S, et al. Relation between structure and piezoelectric properties of (1-xy)PbZrO₃-xPbTiO₃-yPb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃ ceramics near triple point composition. J Eur Ceram Soc 2016;36:4049 - 57.
22. Nam Ch, Park HY, Seo IT, Choi JH, Joung MR, Nahm S, et al. Low-temperature sintering and piezoelectric properties of 0.65 Pb (Zr_{1-x}Ti_x) O₃ - 0.35 Pb (Ni_{0.67}Nb_{0.33}) O₃ ceramics. J Am Ceram Soc 2011;94:3442 - 8.
23. Takahashi S. Effects of impurity doping in lead zirconate-titanate ceramics. Ferroelectrics 1982;41:143 - 56.

24. Seo I-T, Lee T-G, Kim D-H, Hur J, Kim J-H, Nahm S, et al. Multilayer piezoelectric haptic actuator with CuO-modified PZT-PZNN ceramics. *Sens Actuat, A* 2016;238:71 - 9.
25. Seo IT, Cha YJ, Kang IY, Choi JH, Nahm S, Seung TH, et al. High energy density piezoelectric ceramics for energy harvesting devices. *J Am Ceram Soc* 2011;94:3629 - 31.
26. Jabbar H, Hong SD, Hong SK, Yang CH, Jeong SY, Sung TH. Sustainable micropower circuit for piezoelectric energy harvesting tile. *Integr Ferroelectr* 2017;183:193 - 209.
27. Sharpes N, Vučković D, Priya S. Floor tile energy harvester for self-powered wireless occupancy sensing. *Energy Harvest Syst* 2016;3:43 - 60.



A Development of Piezoelectric Energy Block for an Self-powered Wireless Switch System

Dong Woo Hong

Department of Fire Protection Engineering, The Graduate School,

Pukyong National University

Abstract

An important factor in Smart Factory's energy management is the location of large factories. This location-based information can be used to control a variety of electrical and electronic devices and devices. Using floor tiles that can be installed in various locations in the factory, the device can generate enough energy by simple human steps. By using the signal when a person stepped on the tile, the appliance can be operated wirelessly. In this study, a new piezoelectric material system that meets the high energy harvesting characteristics of $0.72\text{Pb}(\text{Zr}_{0.47}\text{Ti}_{0.53})\text{O}_3$ - $0.28\text{Pb}[(\text{Zn}_{0.45}\text{Ni}_{0.55})_{1/3}\text{Nb}_{2/3}]\text{O}_3$ + x mol% CuO (PZNxC). The rhombohedral and tetragonal present a clear advantage in terms of stable energy harvesting, which improved performance in terms of energy harvesting. When a person steps on a floor tile, the maximum output voltage is 42 V and the maximum output current is 11 μA . This energy is used to power the wireless sensor nodes that can turn on and off

the appliances' power in real time. The switch installed in an explosion-proof type, a high voltage causes not only a high cost in a cable and a switch case, but also a great difficulty in management. From the cost reduction and facility protection, we developed a suitable protection means corresponding to the explosion proof specification through a piezoelectric switch that can operate at low power.

