



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

압전 폴리머 필름을 이용한 비상 전원용  
에너지 하베스터의 전기적 특성에 관한 연구

A Study on the electrical characteristics of energy harvester  
using piezoelectric polyvinylidene fluoride(PVDF) film  
for emergency power system



指導教授 張樂元

2018 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朴世賢

本 論 文 을 朴 世 賢 의  
工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長      全 泰 寅    (印)  
委 員      張 樂 元    (印)  
委 員      金 泓 承    (印)



2018 年    2 月

韓 國 海 洋 大 學 校    大 學 院

# 목 차

목차	i
표 목차	iii
그림 목차	iv
Abstract	vi
제 1 장 서론	1
제 2 장 이론적 배경	3
2.1 압전효과	3
2.1.1 압전소자	4
2.1.2 PVDF	7
2.2 에너지 하베스팅	8
제 3 장 실험 및 특성 측정	11
3.1 PVDF 기반 압전소자 제작	11
3.1.1 압전소자	11
3.1.2 압전소자 방수 처리	14
3.2 전기적 특성 평가	16
3.2.1 변위 및 저항에 따른 출력 특성 측정	16
3.2.2 수중 환경에 따른 출력 특성 측정	17
제 4 장 결과 및 고찰	19
4.1 소자 크기에 따른 출력 특성	19
4.1.1 단일 구조 압전소자 출력 특성	19

4.1.2 전극 크기 변화 구조 압전소자 출력 특성 .....	23
4.1.3 PVDF 필름 및 전극 크기 변화 구조 압전소자 출력 특성 .....	27
4.2 구조에 따른 출력 특성 .....	32
4.2.1 이중 구조 압전소자 출력 특성 .....	32
4.2.2 방수 처리 구조 압전소자 출력 특성 .....	37
4.2.3 다단 구조 압전소자 출력 특성 .....	39
4.3 수중 환경에 따른 출력 특성 .....	42
4.3.1 수조 실험 .....	42
4.3.2 잠수 편 실험 .....	43
제 5 장 결론 .....	44
참고문헌 .....	45



## List of Tables

- Table. 1. 에너지 하베스팅 에너지원의 종류
- Table. 2. 에너지 하베스팅 특성 비교
- Table. 3. 압전소자 구성 요소의 사양
- Table. 4. 압전소자 범위에 따른 전기적 특성 측정 조건



## List of Figures

- Fig. 01. 압전 현상 모식도  
Fig. 02. 역 압전 현상 모식도  
Fig. 03. 압전소자를 이용한 발전  
Fig. 04. PVDF film  
Fig. 05. 단일 구조 압전소자 구조도  
Fig. 06. 이중 구조 압전소자 구조도  
Fig. 07. PVDF 기반 압전소자  
Fig. 08. 방수 처리 압전소자 구조도  
Fig. 09. 방수 처리 압전소자  
Fig. 10. Bending machine과 가변저항(RBOX-406) 이용한 출력 측정  
Fig. 11. 수조 실험  
Fig. 12. 잠수 핀 실험  
Fig. 13. 단일 구조 압전소자 구조도  
Fig. 14. 단일 구조 압전소자 변위 및 부하 저항에 따른 최대 출력 특성  
Fig. 15. 단일 구조 압전소자 최대 출력 특성  
Fig. 16. 전극 크기 변화 압전소자 구조도  
Fig. 17. 전극 크기 변화 압전소자 변위 및 부하 저항에 따른 출력 특성  
Fig. 18. 전극 크기 변화 및 단일 구조 압전소자 최대 출력 특성 비교  
Fig. 19. 전극 크기 변화 및 단일 구조 압전소자 최대 출력 발생 시 전압 비교  
Fig. 20. PVDF 필름 및 전극 크기변화 압전소자 구조도  
Fig. 21. PVDF 필름 및 전극 크기 변화 압전소자 변위 및 부하 저항에 따른 출력 특성  
Fig. 22. 소자 크기에 따른 최대 출력 특성 비교  
Fig. 23. 소자 크기에 따른 최대 출력 발생 시 전압 비교  
Fig. 24. 이중 구조 압전소자 구조도  
Fig. 25. 이중 구조 압전소자 변위 및 부하 저항에 따른 출력 특성  
Fig. 26. 이중 구조 및 단일 구조 압전소자 최대 출력 특성 비교

- Fig. 27. 이중 구조 및 단일 구조 압전소자 최대 출력 발생 시 전압 비교
- Fig. 28. 방수 처리 전후에 따른 압전소자 출력 특성
- Fig. 29. 방수 처리 및 이중 구조 압전소자 최대 출력 특성 비교
- Fig. 30. 다단 구조에 따른 방수 처리 압전소자 출력 특성
- Fig. 31. 방수 처리 압전소자 적층에 따른 출력 특성
- Fig. 32. 수조 실험 시 다단 구조에 따른 방수 처리 압전소자 출력 특성
- Fig. 33. 잠수 풀 실험 시 다단 구조에 따른 방수 처리 압전소자 출력 특성





A Study on the electrical characteristics of energy harvester  
using piezoelectric polyvinylidene fluoride(PVDF) film  
for emergency power system

Se Hyeon Park

Division of Electrical and Electronics Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

**Abstract**

Recently, as resource and environmental problems have emerged all over the world, energy harvesting technology has attracted much attention as a sustainable clean energy source. Energy harvesting refers to the conversion and harvesting of unused, abandoned energy, such as vibration, temperature, light energy, into usable electrical energy. The types include wind and wave, piezoelectric effect using mechanical energy and vibration caused by minute movement of body, photoelectric effect using sunlight and light energy, and energy harvesting using thermoelectric effect using temperature difference. Because of the miniaturization of various electronic devices requiring low power and the development of wireless network sensors, a low output power source is required. Accordingly, it is necessary to develop a low-power source that replaces the existing power source and the battery. Piezoelectric energy harvesting is suitable for energy

harvesting technology that can be used in underwater or indoor environments where sunlight can not be used. It is possible to obtain infinite electrical energy by converting the mechanical energy generated from the fine motion due to wind, water flow, and the like. In this study, a piezoelectric energy harvester for underwater emergency power source was constructed according to the needs of semi - permanent emergency auxiliary power source which can be continuously used for diving equipment such as small flashlights and cameras which are essential for scuba diving and industrial diving. PVDF films were selected as energy harvester materials using flexible piezoelectric polymer films. PVDF films have the material superiority of flexibility and high durability. Accordingly, energy harvesting is possible in various environments, and the production cost is low, which is advantageous in economical efficiency. The piezoelectric energy harvester used in this study was fabricated by attaching a PVDF film as a piezoelectric material and a conductive tape serving as an electrode on a polyimide substrate and analyzing its electrical characteristics. The characteristics of output characteristics according to the size and structure of piezoelectric harvester devices, output characteristics according to waterproof treatment, and output characteristics according to underwater environment were analyzed. The piezoelectric harvesters of the dual structure showed higher output than the piezoelectric harvesters of the single structure. Due to the increased thickness of the harvester in the limited motion displacement in the water, one harvester showed the best output. It is expected that it will be

possible to manufacture energy harvester for underwater emergency power source with better output through subsequent structure, area, and process optimization.

**KEY WORDS:** Energy harvesting, PVDF-based Piezoelectric devices, Emergency power system



# 압전 폴리머 필름을 이용한 비상 전원용 에너지 하베스터의 전기적 특성에 관한 연구

박 세 현

한국해양대학교 대학원  
전기전자공학과

## 초록

최근 자원 및 환경 문제가 전 세계적으로 대두됨에 따라 에너지 하베스팅 기술은 지속 가능한 청정 에너지원으로서 많은 관심을 받고 있다. 에너지 하베스팅은 진동, 온도, 빛 에너지 등과 같이 사용 되지 않고 버려지는 에너지를 사용 가능한 전기 에너지로 변환하고 수확하는 기술을 말한다. 대표적으로 바람과 파도, 신체의 미세한 움직임에 따라 발생하는 진동 및 기계 에너지를 이용한 압전효과, 태양광 및 빛 에너지를 이용한 광전효과, 온도차를 이용한 열전효과를 이용한 에너지 하베스팅이 있다. 저전력을 요구하는 다양한 전자 장치의 소형화 및 무선 네트워크 센서 등의 개발로 인하여 저출력의 전원이 필요하다. 이에 따라 기존의 전원 및 배터리를 대체하는 저출력 전원의 개발이 필요하다. 태양광을 이용 할 수 없는 수중이나 실내 등의 환경에서 이용 가능한 에너지 하베스팅 기술로는 압전 에너지 하베스팅이 적합하다. 풍력 및 조류, 미세한 움직임으로부터 발생 되는 기계 에너지를 변환하여 전기에너지를 무한히 얻을 수 있다. 본 연구에서는 스쿠버 다이빙, 산업 잠수에 필수적으로 사용 되는 소형 플래시 라이트, 카메라 등의 잠수

장비의 지속적으로 사용 가능한 반영구적인 비상 보조전원의 필요에 따라 수중 비상 전원용 압전 에너지 하베스터를 제작 하였다. 유연 압전 폴리머 필름을 이용한 에너지 하베스터의 재료로 PVDF 필름을 선정 하였다. PVDF 필름은 유연성과 높은 내구도의 재료적 우수성을 가진다. 이에 따라 다양한 환경에서 에너지 하베스팅이 가능 하며 또한 생산 단가가 낮아 경제성이 우수한 장점을 가진다. 본 연구에 사용 된 압전 에너지 하베스터는 폴리이미드 기판 상에 압전체인 PVDF 필름과 전극역할을 하는 전도성 테이프를 부착하여 완성하였고 전기적인 특성을 분석 하였다. 압전 하베스터 소자의 크기 및 구조에 따른 출력 특성, 방수 처리에 따른 출력 특성, 수중 환경에 따른 출력 특성을 분석 하였다. 이중 구조의 압전 하베스터가 단일 구조의 압전 하베스터 보다 높은 출력을 나타내었고 소자를 적층 할수록 우수한 출력 특성을 나타내었다. 수중의 한정적인 움직임 변위에는 증가된 하베스터의 두께로 인하여 1장의 하베스터가 가장 우수한 출력을 나타내었다. 추후 구조 및 면적, 공정 최적화를 통해 보다 우수한 출력의 수중 비상 전원용 에너지 하베스터의 제작이 가능 할 것으로 예상된다.

**KEY WORDS:** 에너지 하베스팅, 압전 효과, PVDF 필름, 수중 비상 전원용 에너지 하베스터

# 제 1 장 서 론

최근 화석에너지의 가격상승과 유한성, 환경 문제에 따른 친환경 에너지 개발의 요구에 따라 환경을 훼손하지 않으면서도 안정적인 공급이 가능한 신재생에너지의 개발과 IT 통신, 소형 모바일기기의 발전 등 산업분야 전반에 걸쳐 에너지 효율 향상 및 에너지 저감 기술 개발의 수요 증가에 따라 버려지는 에너지를 수확하여 활용하는 에너지 하베스팅(Energy harvesting) 기술이 관심을 받고 있다. [1]

주변 환경에서 필요한 에너지를 끌어 사용할 수 있는 대표적인 에너지 시스템인 에너지 하베스팅은 수소 원을 얻기 위해 석유를 다시 개질해야하는 연료전지나 생산 과정에서 기존의 녹지가 오히려 줄어들거나 이산화탄소의 배출량이 증가하는 단점이 큰 대체에너지와 달리 자연, 주변의 작은 에너지를 활용할 수 있는 부작용 없는 새로운 대체에너지 기술이다. 전기에너지는 기기를 구동하는 핵심으로 화력발전, 수력발전, 원자력발전 등 다양하게 전기에너지를 얻을 수 있지만 화석연료는 그 원료가 유한하고 공해물질을 배출하며 핵연료는 발전 후 재처리 및 폐기물 보관의 어려움 등의 단점이 있다. 그러나 에너지 하베스팅은 무한정 사용할 수 있는 청정 에너지원으로써 태양광, 풍력, 진동, 열 등과 같은 자연적인 에너지원으로부터 발생하는 에너지를 전기에너지로 변환시켜 수확하는 기술이다. [2-4]

에너지 하베스팅의 종류에는 태양광과 같은 빛에너지를 이용하는 광전효과(photoelectric effect), 열에너지를 이용하는 제백효과(Seebeck effect), 진동에너지를 이용하는 압전효과(Piezoelectric effect)를 이용하는 것이 대표적이다. 물리적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 압전 현상은 소규모의 에너지를 추출 할 수 있는 가장 유용한 방법이다. 최근에 다양한 휴대기기 등에서 충전이 불필요하거나 긴 시간동안 공급이 가능한 에너지 공급원의 필요성이 대두되고 있다. 압전 에너지 하베스팅은 수  $\mu$ W에서 수 mW의 동작전력을 가지는 무선 통신 모듈, 휴대용 전자기기, 차량용 센서, 군사용 센서, 건강 모니터링 기기 등에서 사용할 수 있는 배터리가 필요하지 않은 자가 동력원으로 적합하며 소형전자기기의 전원공급 문제를 해결 할 수 있는 기술이다. 압전 에너지 하베스팅은 태양광, 전자기, 열전 에너지 하베스팅에 비하여 에너지 밀도가 높

으며 기후와 같은 환경에 관계없이 실내외의 기계적인 진동, 인체의 움직임, 파도, 풍력 등 다양한 형태의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있다는 장점이 있다.

[5-6]

대부분의 압전 에너지 하베스팅 소자용 소재로는 안정성이 높은 PZT계 세라믹이 널리 연구되어왔으며 사용되고 있다. 그러나 PZT 세라믹 소자는 출력 밀도가 낮고 납이 함유되어 있어 압전소자 생산과정 및 사용 과정에서 환경오염 발생과 인체에 유해성을 띠는 단점을 가지고 있다. 그에 따라 출력 전력 밀도를 높이고 환경오염 방지를 위해 무연 압전 재료 및 폴리머 소재와 복합소재에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 폴리머 소재인 PVDF(Polyvinylidene Fluoride)는  $(-CH_2-CH_2-)_n$  의 반복 단위를 가진 반결정성(semicrystalline)의 열가소성 고분자이며 우수한 열적, 화학적 안정성과 매우 유연하고 가벼운 특성으로 인해 내구성을 동시에 제공한다. 생산 단가도 낮아 경제성이 있는 재료로서 많은 주목을 받고 있다. [7-8]

그러므로 PVDF는 그 고유한 특성으로 인해 압전 에너지 하베스팅 소자로 핵심적인 기능을 할 수 있는 재료이며 동시에 소형 비상 발전 시스템용 압전 하베스터, 무선 네트워크 센서용 발전소자, 신체 삽입형 의료 장치의 보조 전원, 웨어러블 전자 제품 등에 응용할 수 있는 가능성을 지니고 있다. 이미 이전의 연구에서 PVDF 나노섬유(Nanofibers)기반의 유연 압전 에너지 하베스터를 제작하여 연구가 진행 된 바 있고, 유연하고 튼튼한 소자를 만들어 낼 수 있다는 장점을 가지며 소형 전자기기에 전력을 제공할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 PVDF 압전 소자를 기반으로 한 도로용 에너지 하베스팅 시스템의 연구가 진행 되었고 구조적 특성에 따른 특성을 분석 하였으며 응용 가능성을 보인 적이 있다. [9-10]

이에 본 논문에서는 높은 재료적 우수성과 경제성을 가지는 압전 폴리머인 PVDF를 수중 비상 전원용 압전 하베스터의 소재로 선정하고 특성에 관한 연구를 진행하였다. PVDF 기반의 유연 압전 에너지 하베스터를 제작하고 다양한 변위 및 저항에 따른 출력 특성을 분석 하였다. 제작된 에너지 하베스터의 크기 및 구조에 따른 출력 특성을 분석하였으며 우레탄 필름을 이용하여 방수 처리를 하고 수중 환경에 적용 시 움직임에 따른 출력 특성을 분석하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 압전효과

압전효과(Piezoelectric effect)란 물체에 기계적인 압력을 가하면 전압이 발생하고 전압을 가하면 기계적인 변형이 발생하는 현상으로서, 힘을 가해 변형을 주면 표면에 전압이 발생하고, 반대로 전압을 걸면 소자가 이동하거나 힘이 발생하는 현상이다. 압전 현상은 1880년에 프랑스의 물리학자 자크 큐리(Jacques Curie 1856-1941)와 피에르 큐리(Pierre Curie 1859-1906) 형제에 의하여 발견 되었으며 1년 후인 1881년 가브리엘 리프만(Gabriel Lippmann 1845-1921)이 2차 압전효과인 역 압전현상을 발견하였다. 특정한 결정체의 특정 축을 따라 인장력을 가하거나 압력을 가하면 그 힘에 의해 결정 구조가 찌그러진다. 이 때 (+)전하와 (-)전하의 상대적인 위치가 바뀌게 되며 분극현상이 발생한다. 전하의 위치 변화에 따라 결정체 끝면에는 전기장이 형성된다. 인장력이 가해질 때와 압력이 가해질 때에는 전기장의 방향이 서로 반대가 되며 이를 직 압전효과(Direct piezoelectric effect)라고 한다. 반대로 결정체의 끝면에 전압을 인가하면 전기장 내의 (+)전하는 (-)전하를 향하여 이동하고, (-)전하는 (+)전하를 향하여 이동하며 이와 같이 외부에서 가해지는 전압의 방향에 따라 결정체가 늘어나거나 수축하게 되는 것을 역 압전효과(Converse piezoelectric effect)라고 한다. [11]

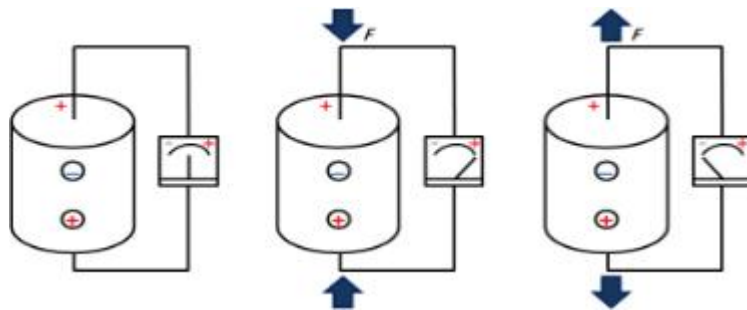


Fig. 01. 압전 현상 모식도



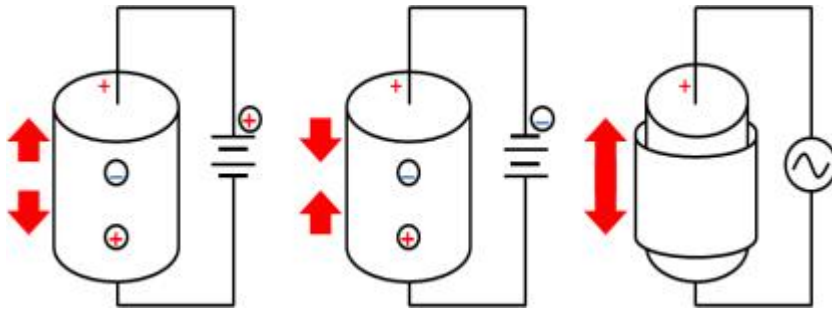


Fig. 02. 역 압전 현상 모식도

### 2.1.1 압전소자

압전소자는 기계적 응력을 걸면 전압이 발생하고 반대로 전압을 걸면 일그러짐이 발생하는 수정이나 압전 세라믹스 등을 사용한 소자들을 말한다. 압력을 가하면 전압이 변화하고, 반대로 전압을 가하면 팽창 혹은 수축하는 성질을 가지는 압전소자를 이용한 전기에너지 수확은 주변의 진동과 같은 기계적 에너지에 의한 에너지를 전기 에너지로 변환해 주는 특성을 이용하여 에너지를 수확한다. 반영구적이고 친환경적이며 높은 에너지변환 밀도, 소형화가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 압전소자에 기계적인 에너지를 전달하는 에너지원으로는 풍력, 조력, 파력 등의 자연에너지와 도로의 차량 통행에 따른 진동, 교량과 같은 대형 구조물, 신체 특정 부위의 움직임에 따른 압력 및 진동 등이 있다. 압전 재료는 큐리 형체가 전기석(Tourmaline Crystal)에 응력을 가하였을 때 표면에 전하가 발생하는 현상을 발견 한 것을 시작으로 수정, 로셀염 등이 발견되었고 이후 전기-음향 변환기에 적합한 압전 재료의 개발에 집중적인 연구가 진행되어 인산이수노암모늄( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )과 인산이수소칼륨( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 등의 합성 압전 재료가 등장하였다. 1940년대 후반 고전압으로 분극 처리 된 티탄산바륨( $\text{BaTiO}_3$ )에서 압전효과가 발견되었으며, 티탄산바륨과 함께 perovskite 결정구조 특성에 착안하여 활발한 연구가 진행되었다. 그 결과  $\text{NaNb}_3$ ,  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{PbZrO}_3$  등 동일 구조의 화합물이 강유전체 또는 반강유전체인 것이 밝혀지면서 티탄산바륨보다 우수한 압전 특성을 가진 PZT 세라믹

스가 개발 되었다. [12]

최근에는 납이나 카드뮴 등의 중금속을 사용하는 재료에 대한 규제가 엄격해지고 있다. 그에 따라 산화납이 함유하지 않은 물리적 성질과 기능이 우수한 고분자 기반의 압전 재료가 개발되고 그 수요가 증가하고 있다. 압전소자는 여러 산업의 근간이 되는 기술로서 소재별로 다양한 분야에서 활용된다. 현재 압전 소재로 응용되어지고 있는 재료로는 단결정 및 다결정 소재, 고분자 재료, 박막재료, 다결정재료와 고분자 재료를 복합한 복합재료로 나눌 수 있다. 단결정 소재는  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>(Quartz),  $\alpha$ -AlPO<sub>4</sub>(Berlinit), LiTaO<sub>3</sub>, Pb<sub>5</sub>-Ge<sub>3</sub>O<sub>11</sub>, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, CdS, ZnO, Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub> 등이 사용되고 있다. 그 중 대표적으로 사용되는 수정은 온도계수가 작고, 공진주파수의 대역폭이 좁다. 또한 가격이 높고 전기-기계결합계수가 작다는 단점을 가지고 있어 오실레이터로 많이 사용되지만 그 응용분야가 제한된다. 단결정 소재는 LiTaO<sub>3</sub> 및 LiNbO<sub>3</sub>가 있고 ZnO 박막소재 등과 더불어 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터에 응용된다. 다결정 소재로는 PT, PZT, BaTiO<sub>3</sub> 등이 있다. PZT 세라믹스는 가공성 및 압전 특성이 우수하고 가격이 저렴하여 레조네이터, 초음파 진동자, 센서 및 착화소자 등에 매우 널리 응용되고 있다. 그리고 박막 소재로는 ZnO, AlN, CdS 등이 있다. ZnO, AlN 등의 소재는 새로이 연구되고 있는 GHz 대역 FBAR(Film Bulk Acoustic wave Resonator) 필터의 재료로 응용되고 있다. 고분자 소재는 PVDF, P(VDFTeFE), P(VDF-TrFe), TGS 등이 있으며, 복합재료로는 PZT-PVDF, PZT-Epoxy, PZT-발포 Polymer, PZT-발포 Urethan 등이 있다. 고분자재료와 PZT계 복합재료는 그 특성상 다양한 형태로 가공이 쉽기 때문에 수중 음향 분야, 의료 분야 등에 주로 응용되고 있다. 이러한 압전 재료들로부터 생성되는 전기에너지는 식 (1) 과 같이 재료 특성인 전기-기계결합계수(electro-mechanical coupling coefficient)에 의하여 결정되며 주어진 진동에서 많은 전기 에너지를 얻기 위해서는 전기-기계결합계수가 큰 재료 개발이 필요하다. [13]

$$u_{\max output} \approx -\frac{1}{4} \frac{k^2}{Y} T^2 \quad \text{식 (1)}$$

u는 생성되는 최대 전기에너지, Y는 재료의 영률(Young's modulus), T는 재료에 가해주는 응력의 크기를 나타내며 재료의 전기-기계결합계수가 큰 재료개발이 필요하다. 식 (2) 에서 d는 재료의 압전상수, e는 재료의 유전율을 나타낸다.

$$k^2 = \frac{\text{Electrical Energy}}{\text{Mechanical Energy}} = \frac{d^2 Y}{\epsilon} \quad \text{식 (2)}$$

대표적으로 많이 사용되는 세라믹 압전 소재는 PZT가 있으며 폴리머 압전 재료는 PVDF(polyvinylidene fluoride)가 있다. 세라믹 압전 재료인 PZT의 기계-전기 결합계수는  $k = 0.5$ 로 PVDF의  $k = 0.2$ 보다 좋은 특성을 가지고 있으나 폴리머에 비해 단단하여 적은 진동으로 에너지가 발생될 수 없으며, 잘 깨져서 큰 변형이 있는 변위에는 사용될 수 없다. 폴리머 압전 재료는 유연하여 큰 변위에 사용 가능하나 전기-기계결합계수가 작다는 단점이 있다. [14]



Fig. 03. 압전소자를 이용한 발전

## 2.1.2 PVDF

대부분의 압전 소자들이 안정성이 높고 특성이 우수한 PZT 기반의 압전소자이나 구성 성분의 60%이상이 납으로 이루어져 있어 인체 및 환경에 유해하다. 본 연구에서는 유연 압전 재료인 PVDF(polyvinylidene fluoride) 필름을 선정하였다. PVDF는 단량체구조인  $(-CH_2-CH_2-)_n$  이 반복적으로 구성되는 선상 고분자로써 분자 내에 존재하는 강한 쌍극자기에 의해서 고분자 재료 중 가장 큰 유전율을 타내는 물질이고 유기질 폴리머로 이루어져 압전소자 재료로 사용 시 우수한 성형성을 가지며 어떠한 형태의 면적에서도 쉽게 구동할 수 있고 고르지 않은 면이나 형태에서도 사용이 가능하다. 또한 넓은 주파수 응답 특성을 보인다. 같은 입력 힘에 대하여 압전 세라믹 재료보다 10배 높은 출력 전압 특성을 보이며 압전 세라믹 재료 보다 높은 절연 강도를 가진다. 기계적인 강도와 충격에 대한 저항이 높으며 강한 내화학성 및 내습성 및 자외선에 대한 안정성이 뛰어난 재료적 우수성을 가지고 있다. 다른 압전 재료에 비해 원재료 및 생산비용이 낮다는 경제성도 가진다. 또한 PVDF 필름 기반의 압전 소자를 이용한 에너지 하베스팅은 변환 효율이 크고 소형, 경량화가 가능하여 센서, 모바일 소형 전자기기에 적합한 에너지원으로 활용 가능하다. [15-17]

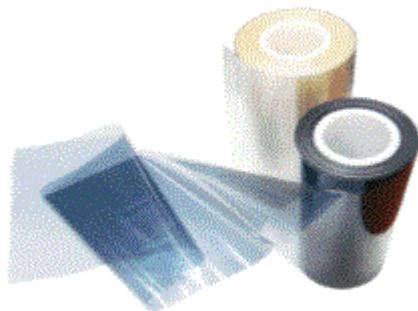


Fig. 04. PVDF film

## 2.2 에너지 하베스팅

에너지 하베스팅이란 주변에 버려지는 빛, 열, 운동, 진동 에너지 등을 모아 저장하여 웨어러블 전자기기 또는 무선 센서 네트워크 등의 유용한 전력원으로 변환하는 기술이다. 중소규모 이상의 출력을 얻을 수 있는 태양광 및 풍력발전과 같은 신재생 에너지 기술과 달리 출력 전력이 매우 작아 효율가치를 찾기 힘들어 크게 주목받지 못하였지만 최근 탄소 배출 감소 의무화, 모바일 기기의 발전 및 사용의 증가, 각종 센서의 소형화, 지능화를 기반으로 한 무선 센서 네트워크 기술의 발달과 더불어 버려지는 에너지를 수확하여 활용하는 에너지 하베스팅 기술이 재평가 되고 있다. 발전소의 경우 에너지원(석탄, 석유, 가스 등)에 대한 막대한 소요 비용이 발생하는 반면, 에너지 하베스팅 기술의 경우 에너지원에 대한 소요 비용이 전혀 없다. 대용량 발전 보다는 응용에 직접적으로 사용 가능한 독립 전원 또는 발전 기술로 다양한 응용분야에 기술 접목을 위해 연구 개발을 매우 활발히 진행 중이다. 자연에서 버려지는 에너지를 전기에너지로 변화하여 이용하는 에너지 하베스팅은 소형 전자기기의 전원공급 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방법으로 제시되고 있다. 에너지 하베스팅은 에너지를 얻기 위해 사용되는 방법 및 소자에 따라 다양하게 구분된다. 빛에너지의 경우 광전효과(photoelectric effect) 및 광기전력효과(photovoltaic effect)를 이용한 것으로 야외의 태양광 또는 실내광을 이용한 에너지 수집을 시도한다. 열에너지의 경우는 제백효과(Seebeck effect) 및 초전효과(Pyroelectric effect)를 이용한 것으로 온도차를 활용한다. 진동에너지의 경우는 압전효과(Piezoelectric effect)을 활용하거나 전자기유도(electromagnetic induction)원리를 이용하는 전기기계식(electromechanical) 발전을 활용한다. [16]

압전소자를 이용한 에너지 하베스팅은 태양광 발전을 할 수 없는 상황이거나 어두운 밤에도 발전을 할 수 있다는 이점을 가지고 있다. 진동이 있거나 압력 혹은 힘이 작용할 수 있는 곳, 물 흐름이 있거나 바람이 부는 상황에서 활용 될 수 있다. 압전 에너지 하베스팅은 에너지 수명이 길고 안정성이 높은 장점을 가진다. 다른 발전 방법에 비해 에너지 밀도가 높고, 기후에 관계없이 기계적인 진동을 이용할 수 있으며, 풍력, 파도

등 다양한 기계적 에너지를 전기에너지로 변환 할 수 있다. 이러한 압전소자를 이용한 에너지 하베스팅은 무선 소형 휴대용 기기에서부터 무선 센서 네트워크에 이르기까지 다양하게 응용이 가능하다. 현재 미국, 독일 등의 선진국을 중심으로 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있으며 시장 규모도 급격하게 성장 하고 있는 추세다. 압전 에너지 하베스팅은 군수분야, 의료분야의 보조 전원 장치, 자동차의 2차 발전장치, 웨어러블 기기 및 무선 센서 네트워크의 동력원으로 활발히 연구가 진행되고 있다. 현재 미국, 유럽 등을 중심으로 에너지 하베스팅 관련 회사들이 출현하고 있으며 미국에서는 압전, 열전, 태양전지 등 다양한 에너지 하베스팅 기술을 바탕으로 무선 센서 네트워크 모듈 개발에 주력하고 있으며, Perpetuum사는 기계적 진동을 전기 에너지로 변환하기 위해 전자기 에너지 하베스팅 기술을 개발하고 이를 철도 산업 등의 안전 진단 모니터링 기술에 활용하고자 하고 있다. Arveni사는 캔틸레버 형태의 압전 에너지 하베스팅 모듈을 개발하여 전지가 필요 없는 리모컨을 구현하였다. 이스라엘의 Innowattech은 압전 에너지 하베스팅 모듈을 교량, 도로 등에 매립하여 차량 통행, 보행등에 의해 발생하는 진동에너지를 전기에너지로 변환하여 주변의 에너지원으로 활용 할 수 있는 연구를 진행 중이다. 국내의 경우 에너지 하베스팅 기술 및 산업에 대한 관심도는 높아졌으나 그와 관련된 시스템 기술개발 수준이 낮으며 중소기업을 중심으로 소규모로 진행되고 있는 실정이며 상용화 단계에 도달하기 까지는 다소 시간이 걸릴 것으로 예상된다. [17-18]

Source	Description
Mechanical Energy	from sources such as vibration, mechanical stress and strain
Thermal Energy	waste energy from furnaces, heaters, and friction sources
Light Energy	captured from sunlight or room light via photo sensors, photo diodes, or solar panels
Electromagnetic Energy	from inductors, coils and transformers
Natural Energy	from the environment such as wind, water flow, ocean currents, and solar
Human Energy	a combination of mechanical and thermal energy naturally generated from bio-organisms or through actions such as walking and sitting

Table. 1. 에너지 하베스팅 에너지원의 종류

Source	Power density[mW/cm <sup>3</sup> ]	efficiency[%]
태양광(Photovoltaic)	500 ~ 5000	5 ~ 40
압전(Piezoelectric)	0.001 ~ 90	25 ~ 60
전자기 (Electromagnetic)	0.1 ~ 50	30 ~ 40
열전 (Thermoelectric)	50 ~ 500	0.1 ~ 10

Table. 2. 에너지 하베스팅 특성 비교

## 제 3 장 실험 및 특성 측정

### 3.1 PVDF 기반 압전소자 제작

#### 3.1.1 압전소자

본 연구에서 출력 특성 분석을 위해 사용한 압전소자는 Table. 3. 에 나타낸 것과 같이 80[ $\mu\text{m}$ ] 두께의 PVDF 필름(Kureha, Inc.)을 니켈 기반의 전도성 직물 테이프(Solueta, Inc.)사이 에 부착하여 완성된다. 니켈 기반의 전도성 직물 테이프는 표면에 얇은 전도성 접착층을 가지고 있으므로 압전소자의 구성 요소 간 단면, 양면 접착 테이프의 역할을 하며 동시에 전극의 역할도 한다. PVDF 필름은 니켈 기반 전도성 접착 테이프를 통해 300[ $\mu\text{m}$ ] 두께의 폴리이미드(PI) 기판의 전면 및 후면에 부착되어 단일 구조 및 이중 구조의 압전소자를 완성한다.

Fator	Size	Tickness
PVDF(Polyvinylidene fluoride)	10.5*7.7cm	80 $\mu\text{m}$
Conductive film	10.2*7.4cm	30 $\mu\text{m}$
PI(Polyimide) film	11*8.2cm	300 $\mu\text{m}$

Table. 3. 압전소자 구성 요소의 사양



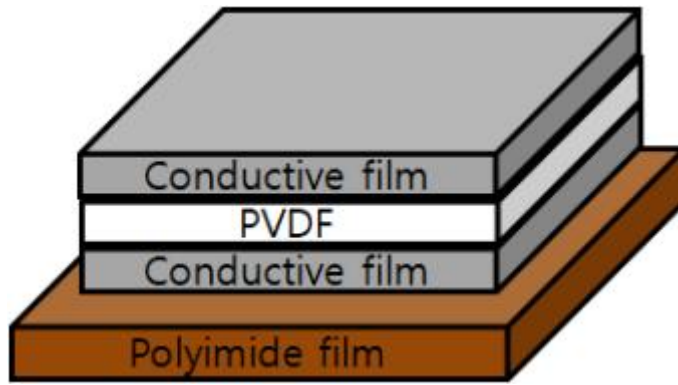


Fig. 05. 단일 구조 압전소자 구조도

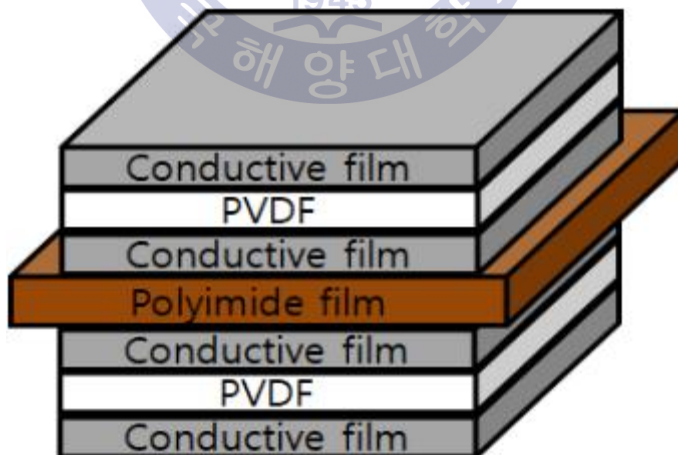


Fig. 06. 이중 구조 압전소자 구조도

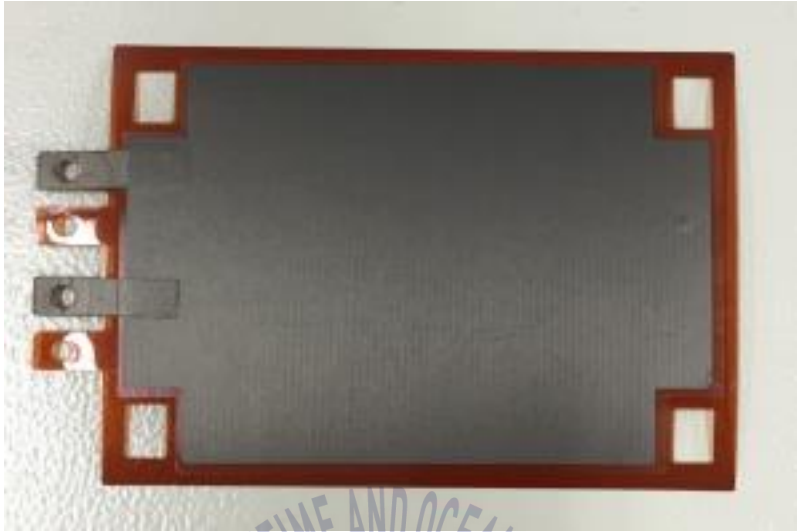
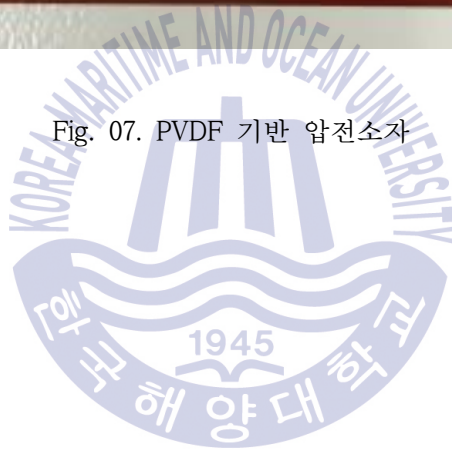


Fig. 07. PVDF 기반 압전소자



### 3.1.2 압전소자 방수처리

제안 된 압전소자를 수중 비상 전원용 에너지 하베스팅 소자로 응용하기 위해서 방수처리를 하였다. 압전소자가 수중 환경에서도 물리적 에너지에 대한 압축과 인장력을 잃지 않게 하기 위해 유연성을 가진 방수재료를 선택하였다. 두께 250[ $\mu$ m], 크기 12\*9[cm] 의 우레탄필름을 이용하여 압전소자 전체를 감싸 접착하여 완성한다.

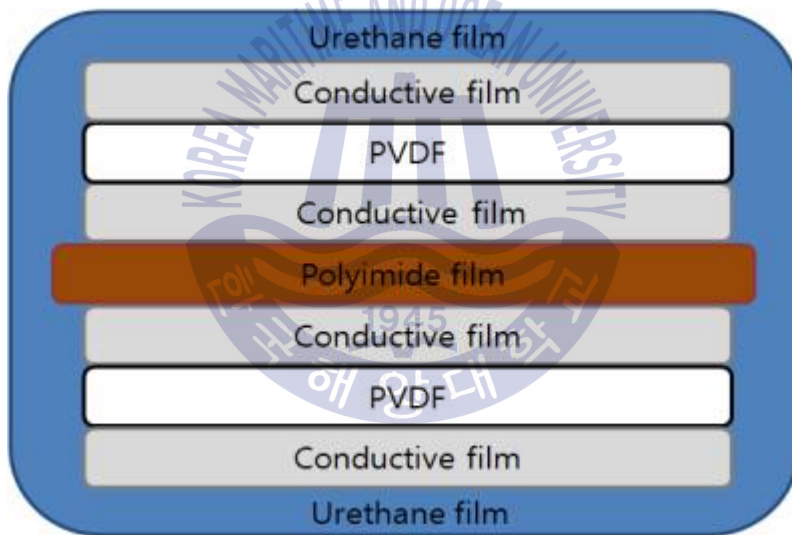


Fig. 08. 방수 처리 압전소자 구조도

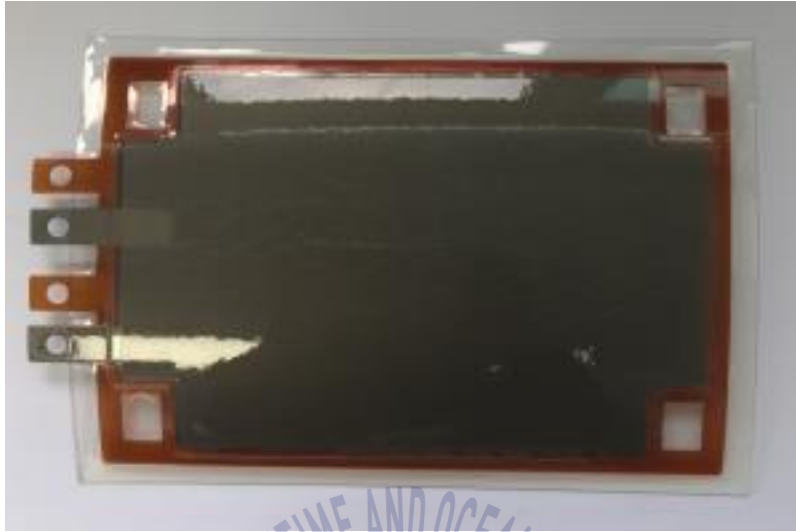


Fig. 09. 방수 처리 압전소자



## 3.2 전기적 특성 평가

### 3.2.1 변위 및 저항에 따른 출력 특성 측정

본 연구에서 수행한 변위 및 가변저항에 따른 출력 특성 분석은 단일 및 이중 구조, 방수 처리 압전소자를 사용하였으며 다양하고 정확한 변위를 입력하기 위해 Bending machine를 이용하였다. 압전소자에 적용되는 저항을 변화시키면서 최적의 출력 특성을 얻을 수 있는 기계적인 임피던스 정합 지점을 찾기 위해 가변저항(RBOX-408)을 이용하였으며 출력 특성을 관찰하고 데이터를 획득하기 위해 오실로스코프(Tektronics-DPO4014B)를 사용하였다.

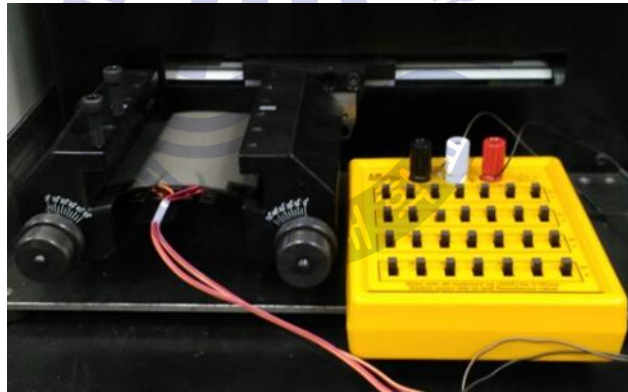


Fig. 10. Bending machine과 가변저항(RBOX-406) 이용한 출력 특성 측정

측정 장비	변위 입력 범위	비고
Bending machine	5mm, 10mm, 15mm, 20mm	2Hz
가변저항(RBOX-408)	0.1 ~ 7M $\Omega$	

Table. 4. 압전소자 변위에 따른 전기적 특성 측정 조건

### 3.2.2 수중 환경에 따른 출력 특성 측정

수중 환경에 따른 출력 특성을 측정하기 위해서 방수 처리 압전소자를 사용 하였다. PVDF 기반 압전소자의 출력 특성으로 나타나는 교류 전압 및 전류를 직류로 변환시키기 위해 정류 다이오드(MB6, Vishay Co.)가 사용되었다. Fig. 11. 과 같이 방수 처리 된 압전 소자를 전극-전선 접합부를 제외한 부분 전체를 폭 26[cm], 깊이 13[cm]의 수조에 담그고 일정한 움직임을 부여하여 출력 특성을 측정하였다. 또한 방수처리 압전소자를 잠수 핀에 부착하여 깊이 5[m]의 잠수 풀에서도 실험을 진행 하였다. 수조실험과 동일하게 방수 처리 된 압전 소자를 잠수용 핀에 부착하고 수 중에서 일정한 움직임을 부여하여 출력 특성을 측정하였다. 전기적인 특성을 분석 하였다. 출력 특성을 관찰하고 데이터를 획득하기 위해 오실로스코프 (Tektronics-DPO4014B)를 사용하였다.

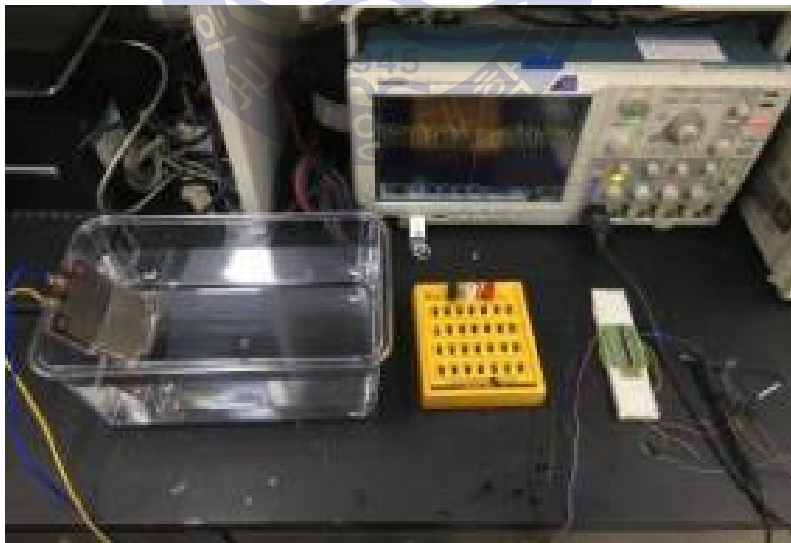
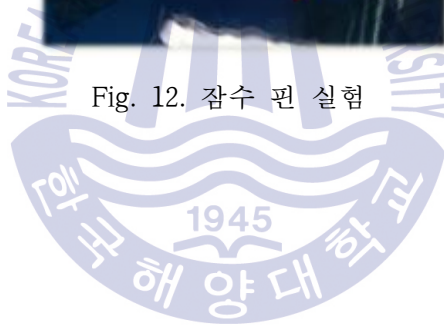


Fig. 11. 수조 실험



Fig. 12. 잠수 핀 실험



## 제 4 장 결과 및 고찰

본 실험에서는 압전소자의 크기 및 구조, 방수 처리에 따른 출력 특성을 알아보았다. 압전소자에 다양하고 동일한 변위를 적용하기 위해 Bending machine을 이용하였고 임피던스 정합지점을 찾기 위해 가변저항을 연결 하였다. 비상 전원용 에너지 하베스팅 소자로서 적용 가능성을 알아보기 위하여 수중 환경 하에서 측정을 진행하였다.

### 4.1 크기에 따른 출력 특성

#### 4.1.1 단일 구조 압전소자 출력 특성

단일구조에 따른 압전소자의 출력 특성을 알아보기 위하여 11\*8.2[cm] 크기의 PI 기판에 압전체인 PVDF 필름을 한쪽 면에만 부착하고 5, 10, 15, 20 [mm]의 변위와 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7 [M $\Omega$ ]의 가변저항을 적용하여 측정을 실시하였다.

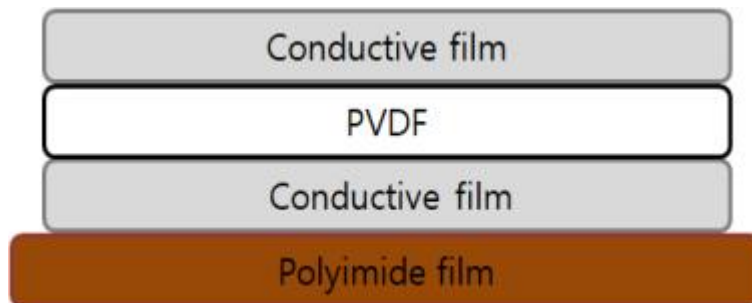
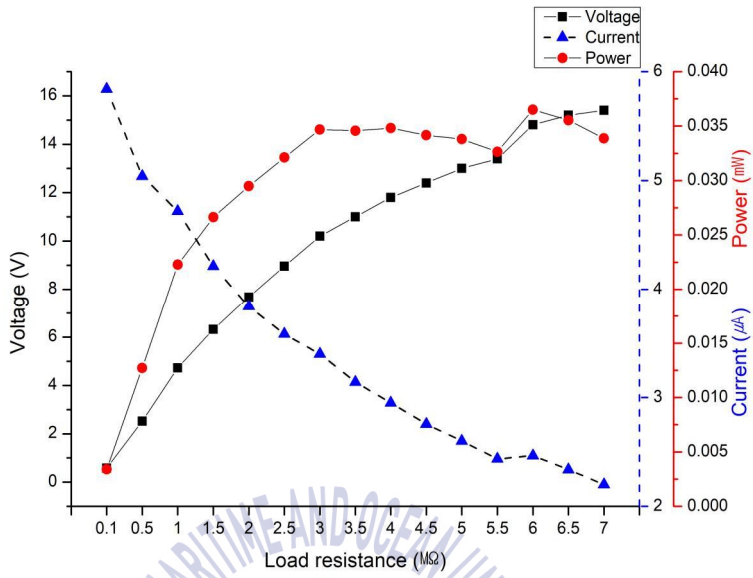
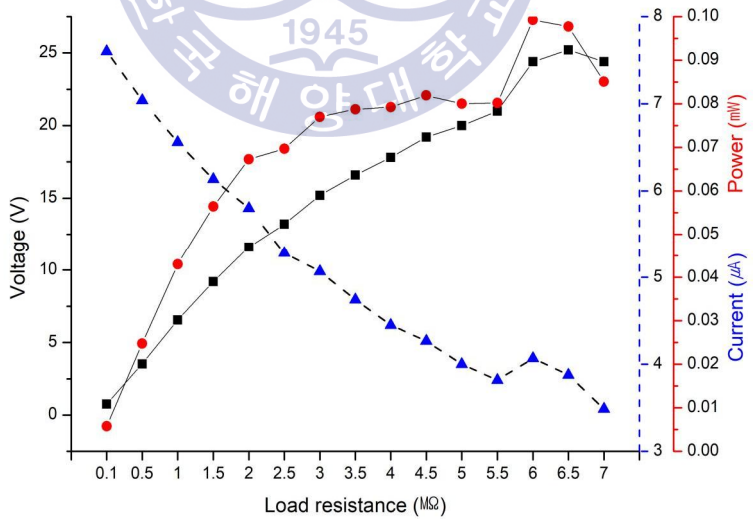


Fig. 13. 단일 구조 압전소자 구조도

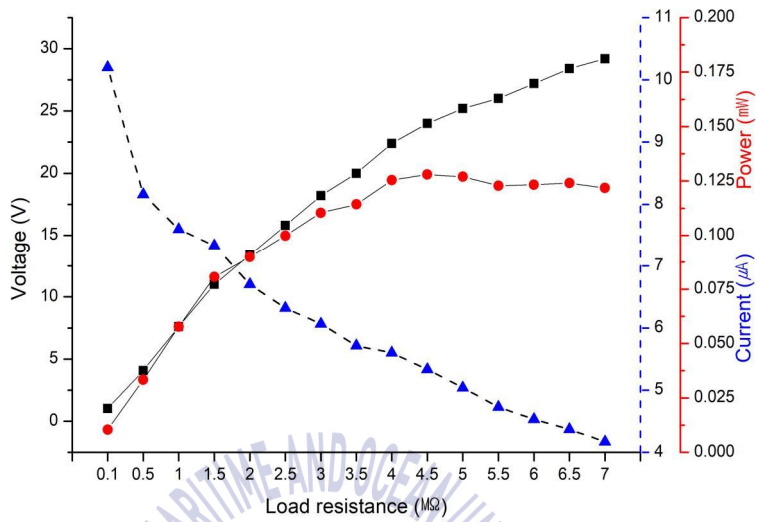




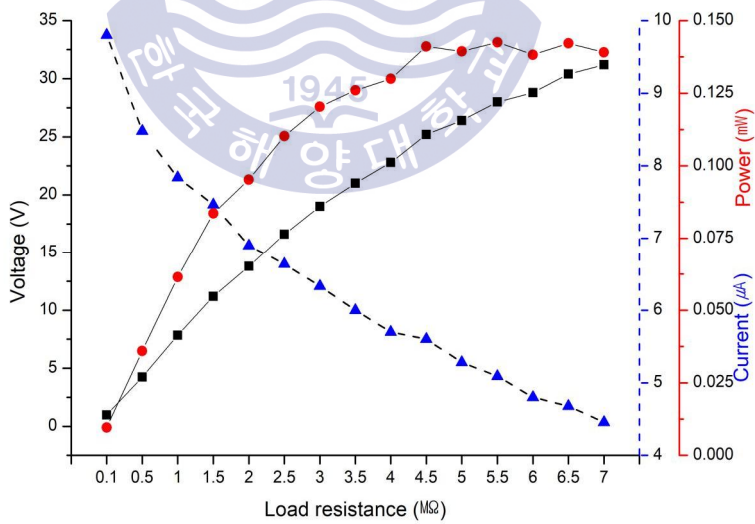
(a) 5mm



(b) 10mm



(c) 15mm



(d) 20mm

Fig. 14. 단일 구조 압전소자 변위 및 부하 저항에 따른 출력 특성

Fig. 14. 는 단일구조 압전소자의 다양한 변위에 따른 출력 특성을 관찰하기 위한 그래프이다. 적용 되는 저항과 변위에 따른 출력 분석을 나타낸다. 변위 5[mm]에서 매칭 저항은 6[MΩ], 최대 14.8[V] 2.46[μA] 0.036[mW], 변위 10[mm]에서 매칭저항 6[MΩ], 최대 24.4[V] 4.06[μA] 0.1[mW], 변위 15[mm]에서 매칭저항 4.5[MΩ] 25.2[V] 5.04[μA] 0.128[mW], 변위 20[mm]에서 매칭저항 5.5[MΩ], 30.4[V], 5.09[μA], 0.142[mW]의 최대 출력을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 적용 변위에 따라 출력이 선형적으로 증가 하는 양상을 나타내었다.

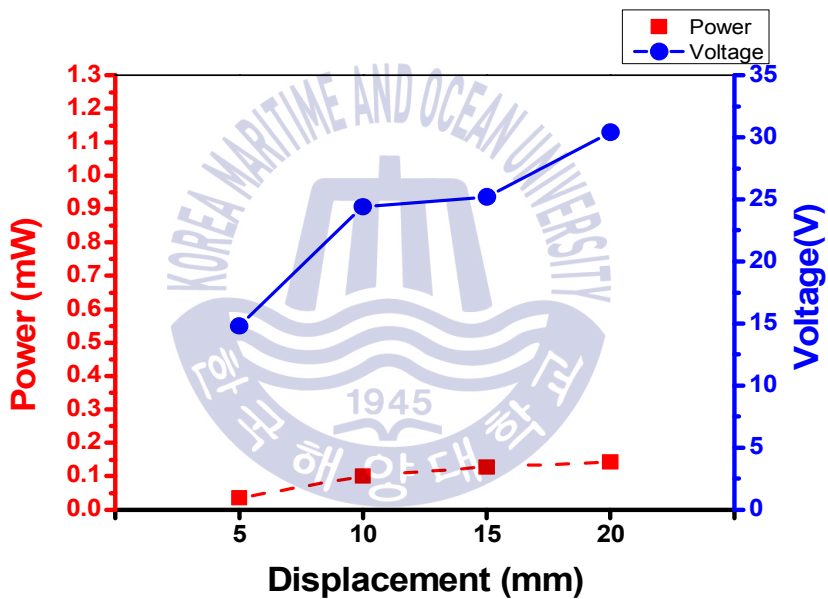


Fig. 15. 단일 구조 압전소자 최대 출력 특성

#### 4.1.2 전극 크기 변화 구조 압전소자 출력 특성

압전소자의 압전체인 PVDF 필름을 제외한 전극 테이프의 크기를 10.2\*7.4[cm]에서 절반 크기인 5.1\*7.4[cm]로 변화시키고 5, 10, 15, 20 [mm]의 변위와 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7 [M $\Omega$ ]의 가변저항을 적용하여 측정을 실시하였다. Fig. 17. 에 다양한 범위의 변위를 적용하고 전극 크기의 변화에 따른 출력 특성 결과를 나타내었다. 변위 5[mm]에서 매칭저항은 6.5[M $\Omega$ ]이고 최대 9.4[V] 1.44[ $\mu$ A] 0.013[mW], 변위 10[mm]에서 매칭저항 6[M $\Omega$ ], 최대 13.4[V] 2.16[ $\mu$ A] 0.028[mW], 변위 15[mm]에서 매칭저항 6.5[M $\Omega$ ], 최대 16[V] 2.46[ $\mu$ A] 0.039[mW], 변위 20[mm]에서 매칭저항 6[M $\Omega$ ], 17.2[V], 2.45[ $\mu$ A], 0.042[mW]의 최대 출력을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다.

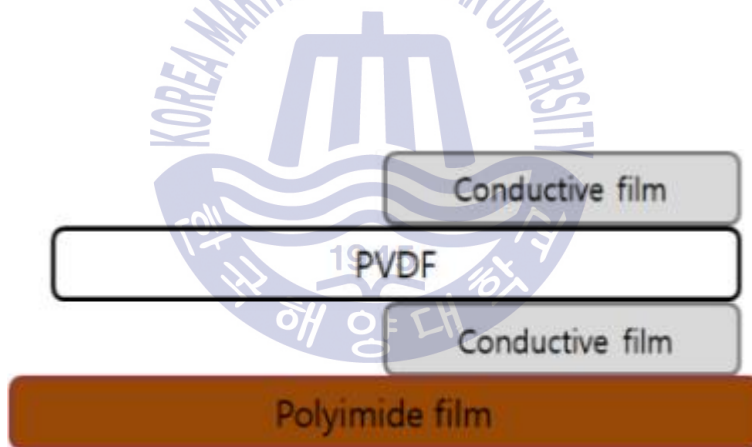
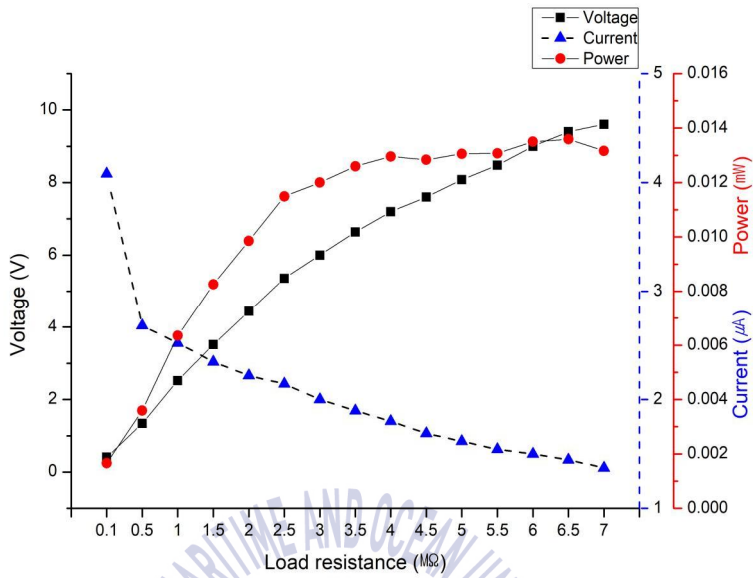
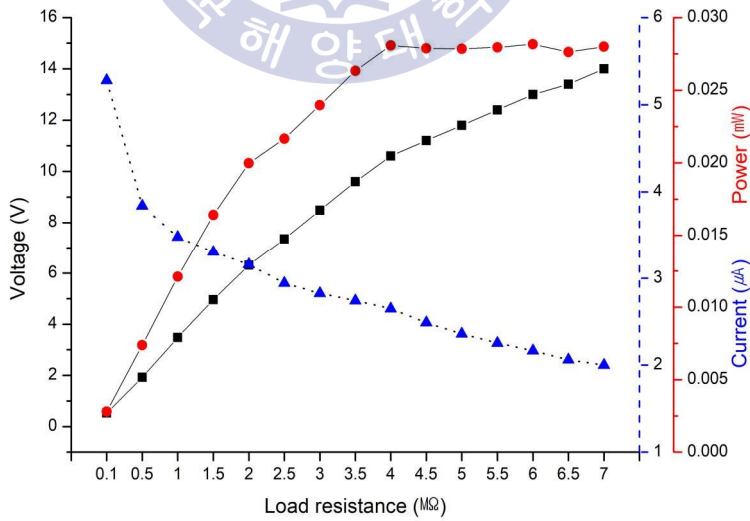


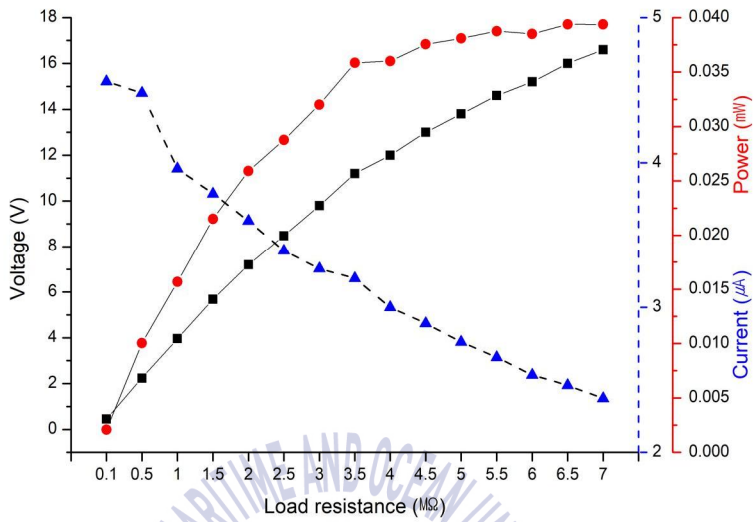
Fig. 16. 전극 크기 변화 압전소자 구조도



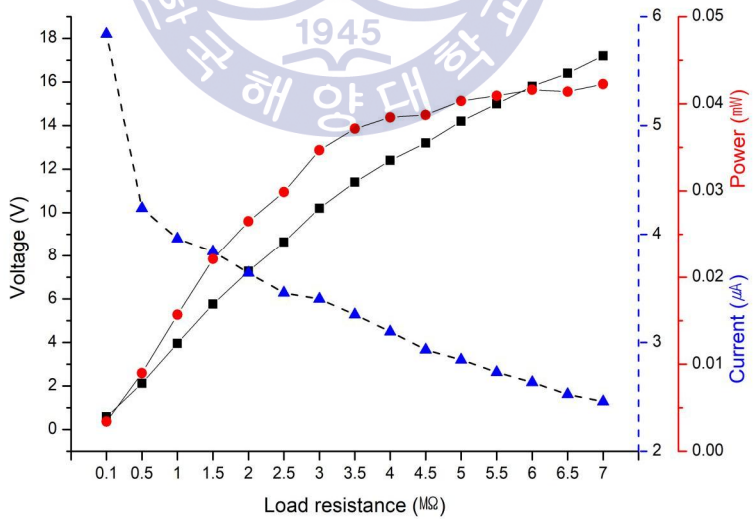
(a) 5mm



(b) 10mm



(c) 15mm



(d) 20mm

Fig. 17. 전극 크기 변화 압전소자 변위 및 부하저항에 따른 출력 특성

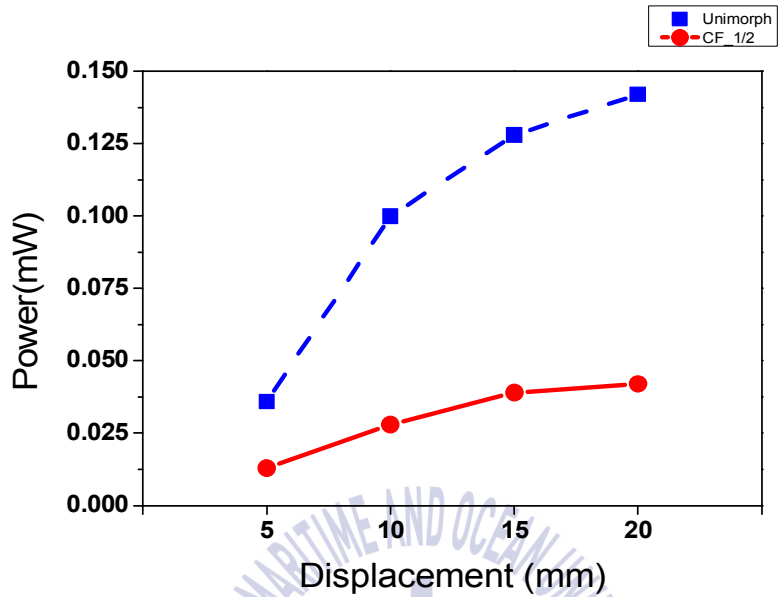


Fig. 18. 전극 크기 변화 및 단일 구조 압전소자 최대 출력 특성 비교

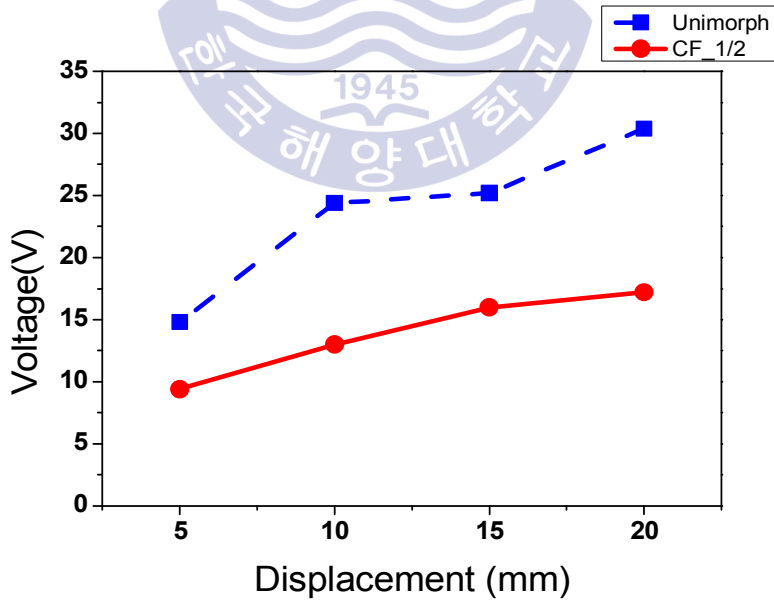


Fig. 19. 전극 크기 변화 및 단일 구조 압전소자 최대 출력 발생 시 전압 비교

이와 같은 결과를 종합 하였을 때, 적용하는 변위가 커짐에 따라 높은 출력 특성을 보이는 것을 알 수 있었다. Fig. 18. 을 통해 단일 구조의 압전소자가 전도성 테이프 크기를 절반으로 줄인 전극 크기 변화 구조 압전소자 보다 약 4배 더 좋은 출력 특성을 나타내었음을 알 수 있다.

### 4.1.3 PVDF 필름 및 전극 크기 변화 구조 압전소자 출력 특성

압전소자의 압전체인 PVDF 필름과 전극 테이프 모두 크기를 단일 구조 소자에 적용 된 크기에서 각각 절반 크기인 5.25\*7.7[cm], 5.1\*7.4[cm]로 변화시키고 5, 10, 15, 20 [mm]의 변위와 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7 [MΩ]의 가변저항을 적용하여 측정을 실시하였다. 출력특성 결과를 Fig. 20. 에 나타내었다. Fig. 20. 은 PVDF 필름 및 전극 크기를 절반으로 줄인 압전소자의 구조도이다.

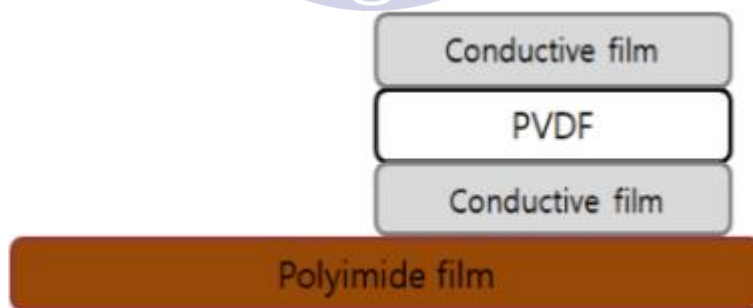
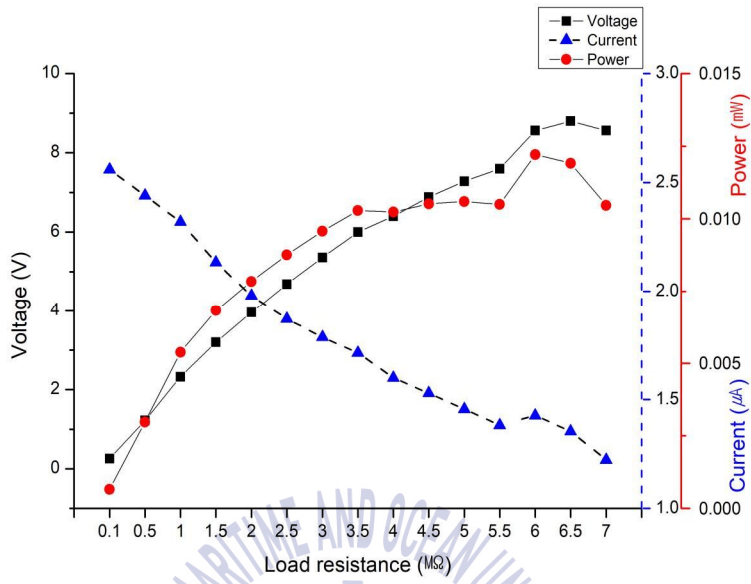
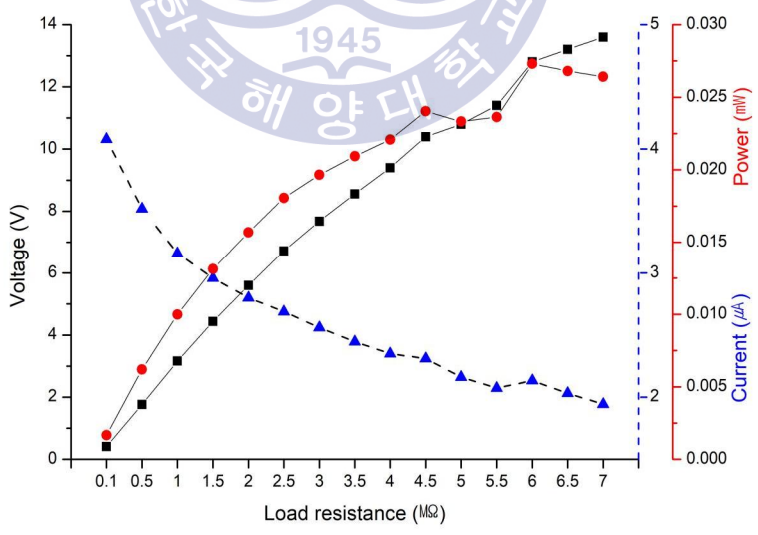


Fig. 20. PVDF 필름 및 전극 크기변화 압전소자 구조도

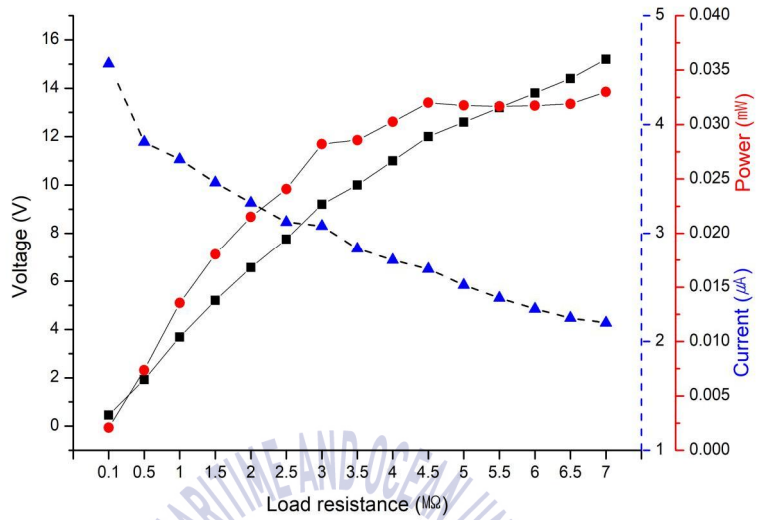




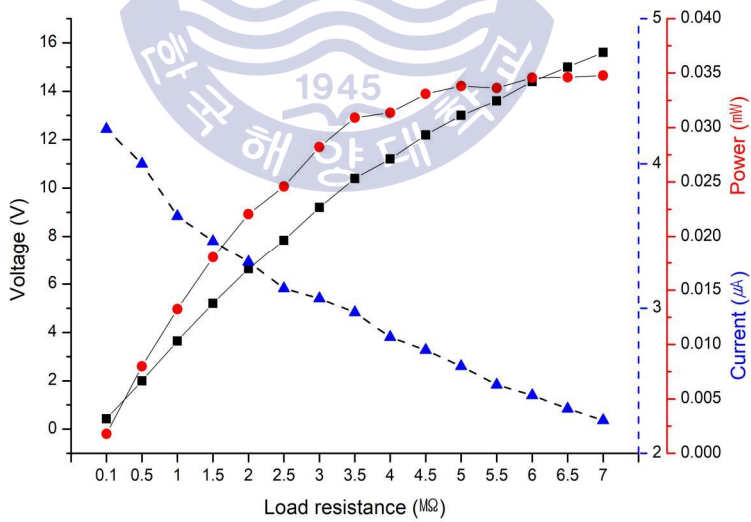
(a) 5mm



(b) 10mm



(c) 15mm



(d) 20mm

Fig. 21. PVDF 필름 및 전극 크기 변화 압전소자 변위 및 부하저항에 따른 출력 특성

변위 5[mm]에서의 매칭저항은 6[MΩ] 이며 최대 8.56[V] 1.42[μA] 0.012[mW], 변위 10[mm]에서 매칭저항 6[MΩ], 최대 12.8[V] 2.13[μA] 0.027[mW], 변위 15[mm]에서 매칭저항 7[MΩ], 최대 15.2[V] 2.17[μA] 0.033[mW] 변위 20[mm]에서 매칭저항 7[MΩ], 15.6[V] 2.22[μA] 0.034[mW]의 최대 출력을 나타내는 것을 Fig. 21. 에서 확인 할 수 있었다. 각 소자별 변위에 따른 최대 출력의 변화를 Fig. 22. 로 부터 알 수 있다. 각 변위 별로 차이가 있으나 단일 구조 압전소자가 PVDF 및 전극 테이프의 크기를 줄인 압전 소자에 비해 약 3~4.2 배 정도 더 높은 출력 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 단일 구조를 제외한 두 종류의 압전소자가 비슷한 출력을 보이므로 전극의 크기가 출력에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

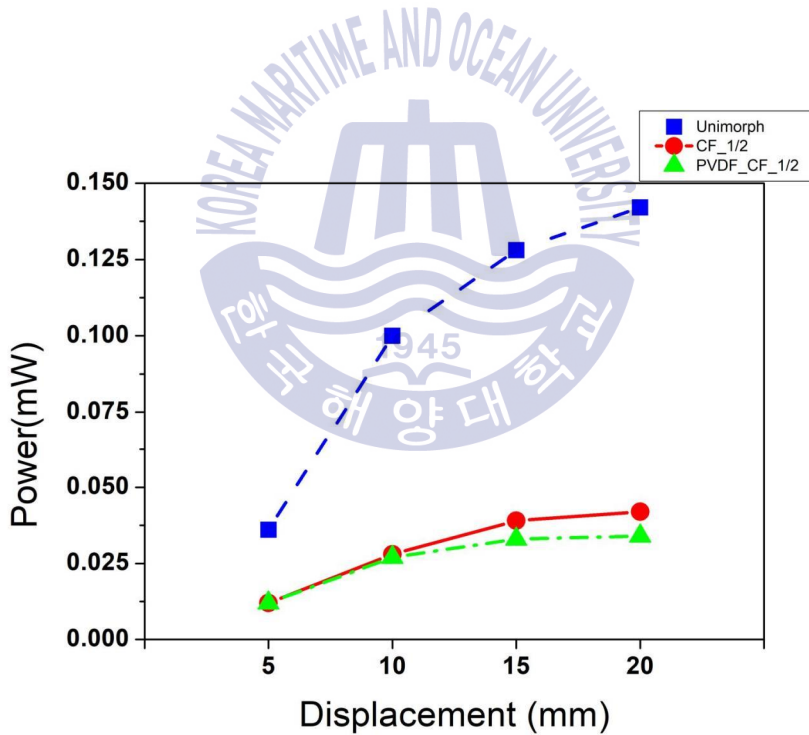


Fig. 22. 소자 크기에 따른 최대 출력 특성 비교

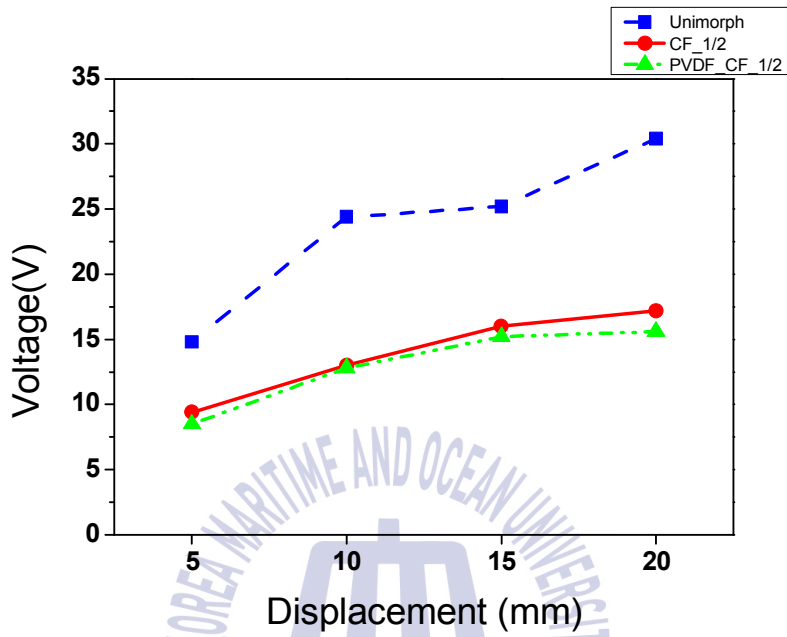


Fig. 23. 소자 크기에 따른 최대 출력 발생 시 전압 비교

## 4.2 구조에 따른 출력 특성

적용되는 변위의 범위와 소자의 크기에 따라 출력 특성 역시 변화 한다는 것을 파악한 뒤 압전소자의 구조에 따른 출력 특성을 알아보기 위하여 실험을 진행하였다. 따라서 본 절에서는 압전소자의 구조로 압전체인 PVDF 필름이 폴리이미드 기판 양단에 2장이 부착 되어있는 이중 구조 압전소자를 선정 하였다. 또한 이중 구조 압전소자를 수중 비상 전원용 에너지 하베스터에 응용하기 위하여 방수 처리에 따른 압전소자의 출력 특성을 분석하였다. 방수 처리가 압전소자의 출력 특성에 어떠한 영향을 끼치고 또한 최적의 출력을 보이는 조건은 무엇인지 알아보았다.

### 4.2.1 이중 구조 압전소자 출력 특성

이중 구조 압전소자의 출력 특성을 알아보기 위하여 제작한 압전소자의 크기는 11\*8.2[cm]이다. 압전체인 PVDF 필름을 폴리이미드 기판 양쪽 면 모두 부착하고 5, 10, 15, 20 [mm]의 변위와 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7 [M $\Omega$ ]의 가변저항을 적용하여 측정을 실시하였다. 출력 특성 결과는 Fig. 25. 에 나타내었다. 압전체는 가해지는 압축과 인장력이 커짐에 따라 발생하는 전기에너지가 커지기 때문에 변위가 커질수록 출력 또한 높아지는 것을 확인 할 수 있었다.

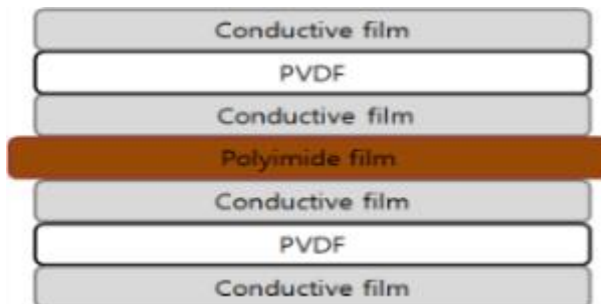
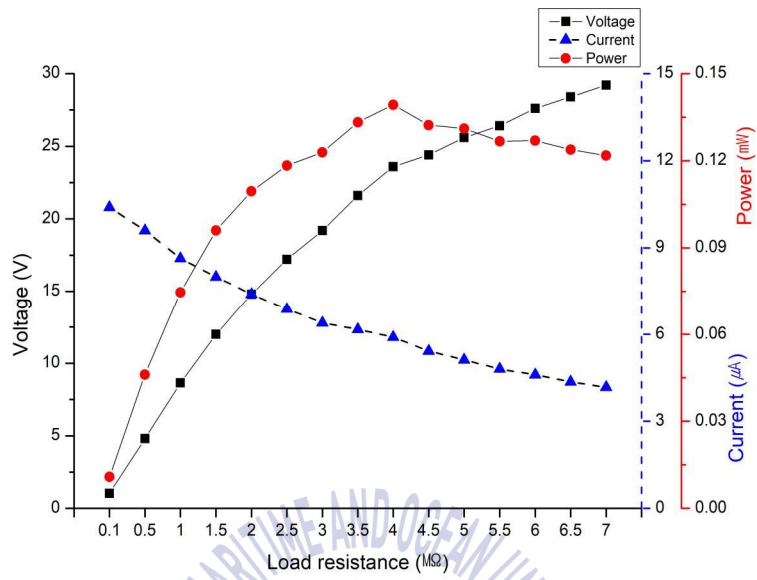
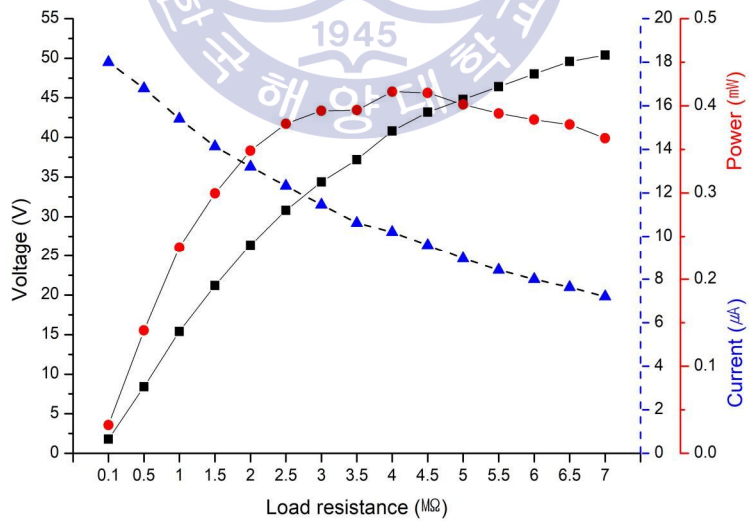


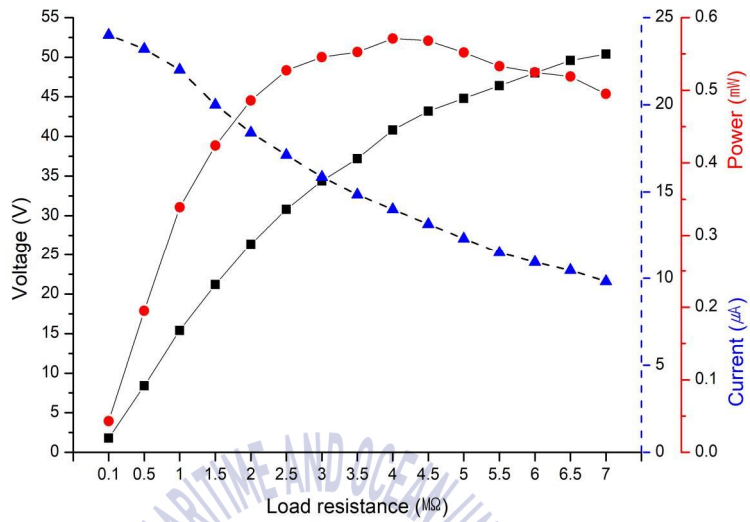
Fig. 24. 이중 구조 압전소자 구조도



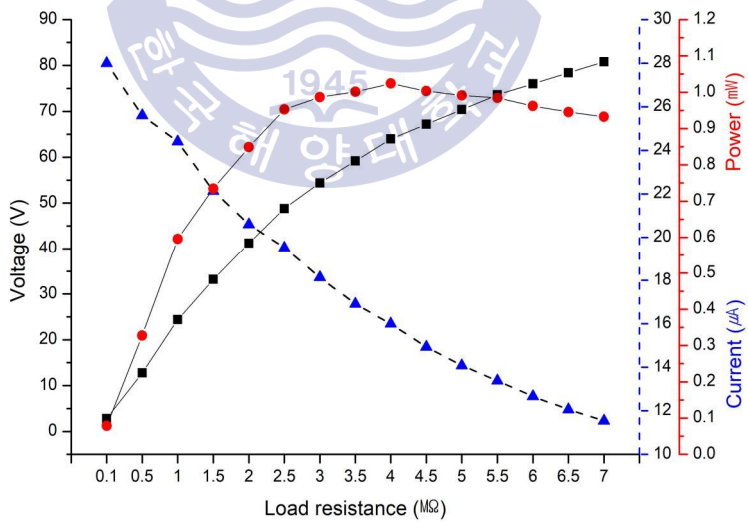
(a) 5mm



(b) 10mm



(c) 15mm



(d) 20mm

Fig. 25. 이중 구조 압전소자 변위 및 부하저항에 따른 출력 특성

변위가 5[mm], 10[mm], 15[mm], 20[mm]일 때 단위소자의 출력 변화 그래프를 나타내고 있다. 각 변위별 단위소자의 매칭저항은 4[MΩ]으로 동일하였다. 변위 5[mm]에서 최대 23.6[V] 5.9[μA] 0.139[mW], 변위 10[mm]에서 최대 40.8[V] 10.2[μA] 0.416[mW], 변위 15[mm]에서 최대 40.8[V] 14[μA] 0.571[mW], 변위 20[mm]에서 64[V] 16[μA] 1.024[mW]의 최대 출력을 나타내는 것을 Fig. 25. 에서 확인 할 수 있었다. Fig. 26. 를 통해 최대 출력의 경우 단일 구조 압전소자 0.142[mW], 이중 구조 압전소자 1.024[mW]로 약 7.2배 출력이 증가 하였다. Fig. 27.을 통하여 전압의 경우 단일 구조 압전소자 30.4[V], 이중 구조 압전소자 64[V]로 약 2배의 전압 증가를 보였다. 이중 구조 압전소자가 단일 구조의 압전소자보다 확연하게 높은 출력 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

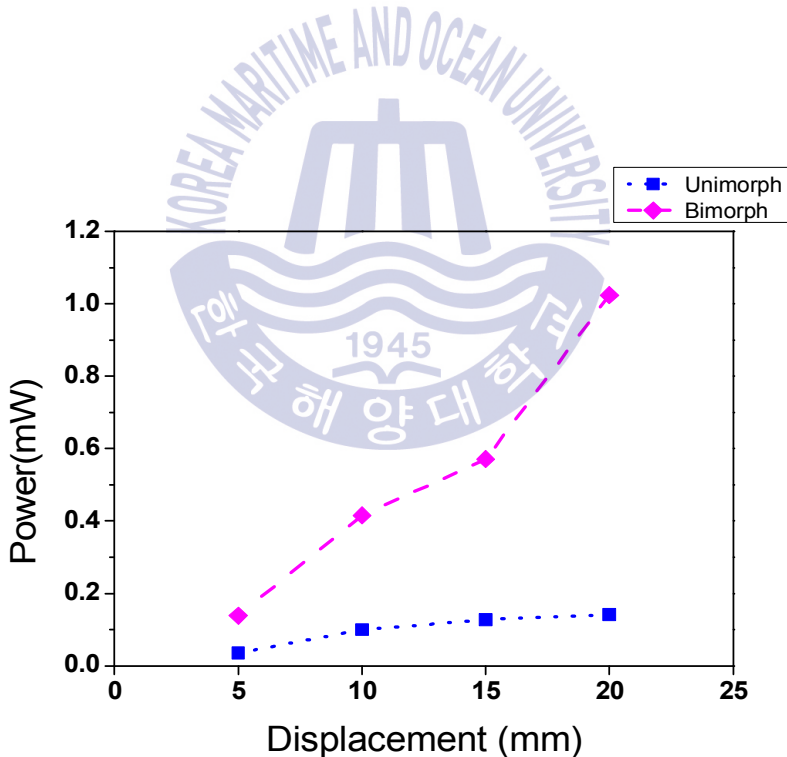


Fig. 26. 이중 구조 및 단일 구조 압전소자 최대 출력 특성 비교



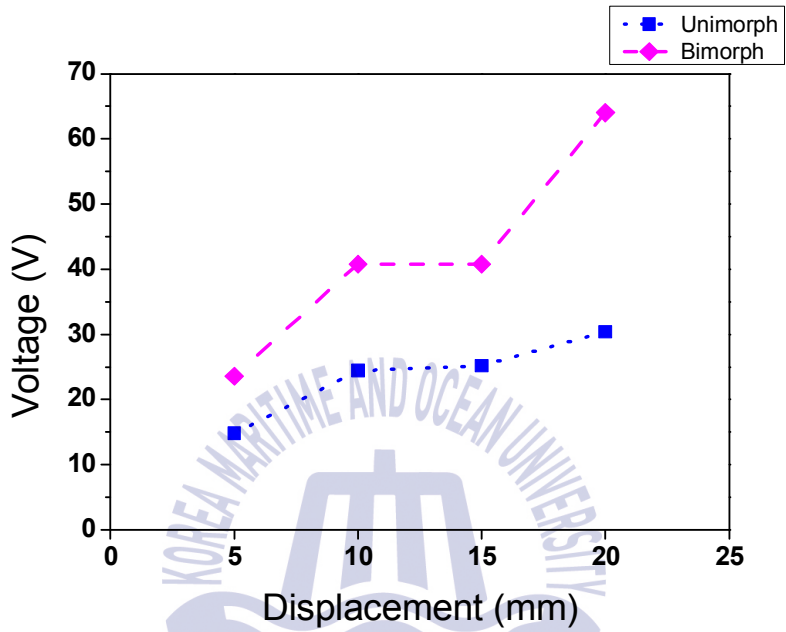
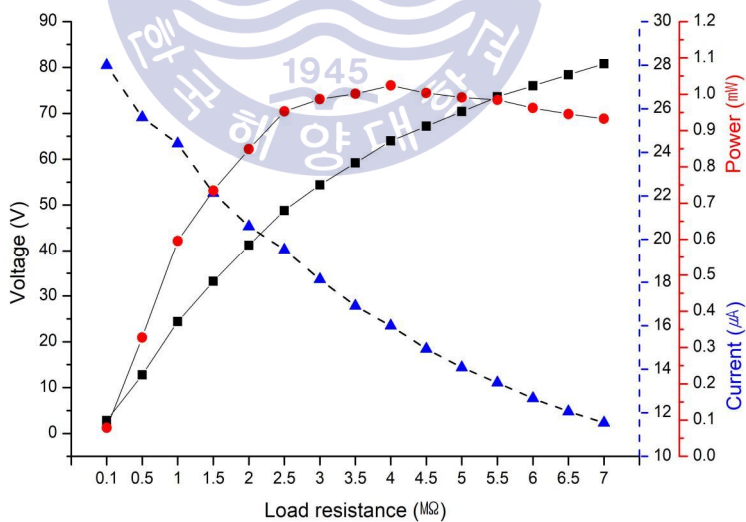


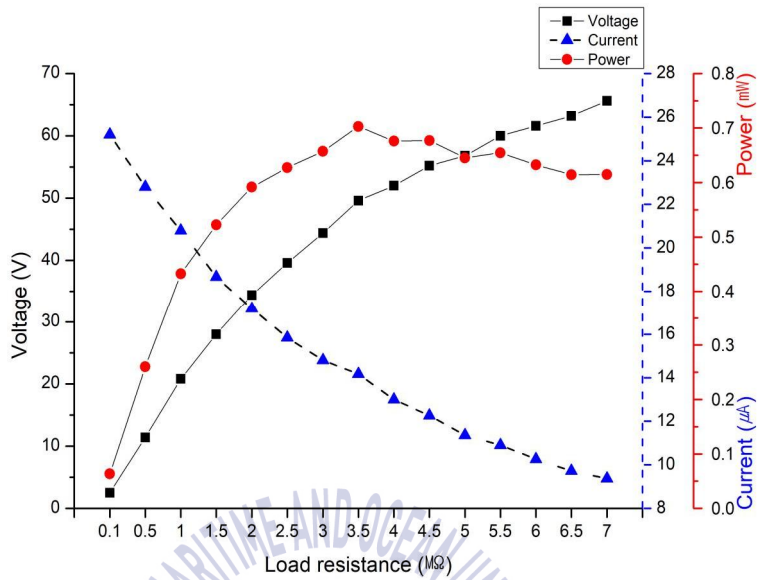
Fig. 27. 이중 구조 및 단일 구조 압전소자 최대 출력 발생 시 전압 비교

## 4.2.2 방수 처리 구조 압전소자 출력 특성

수중 이용 에너지 하베스터를 만들기 위해 이중 구조 압전소자에 크기 12\*9[cm], 두께 250[ $\mu\text{m}$ ]의 우레탄 필름을 이용하여 소자 전체를 감싸 부착하는 방식으로 방수 처리를 하였다. 이에 따른 다양한 변위 및 저항을 적용한 압전소자들의 출력 특성 결과는 Fig. 27. 에 나타내었다. 1개의 이중 구조 압전소자를 방수처리 전, 후 동일하게 가장 큰 출력 특성을 보이는 20[mm] 변위를 적용하여 측정하였다. 방수 처리를 하지 않은 압전소자의 경우 매칭저항 4[M $\Omega$ ]이며 64[V], 16[ $\mu\text{A}$ ], 1.024[mW]의 최대 출력을 보였으며 방수 처리를 한 압전소자의 경우 매칭저항 3.5[M $\Omega$ ], 49.6[V], 14.17[ $\mu\text{A}$ ], 0.702[mW]의 최대 출력을 확인 할 수 있었다. 출력의 경우 방수 처리 전 보다 약 1.5배 더 낮은 출력특성을 나타내었으며 전압은 약 1.2배 감소하였다.



(a) 방수처리 전



(b) 방수처리 후

Fig. 28. 방수 처리 전후에 따른 압전소자 출력 특성

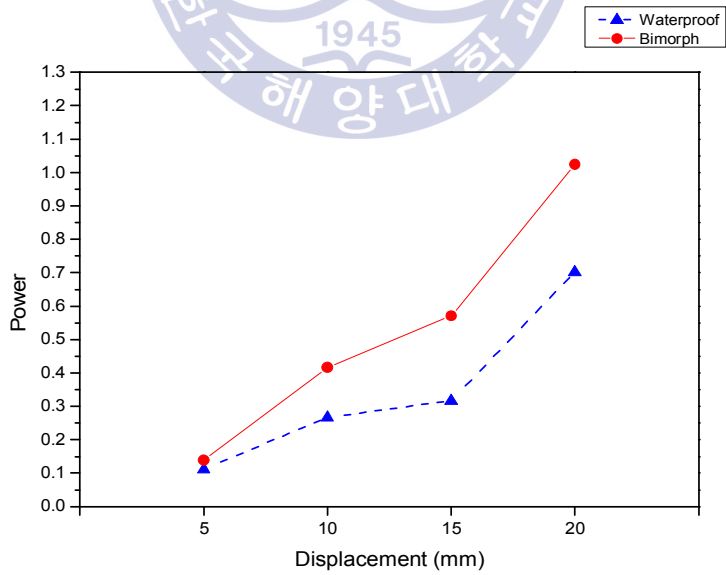
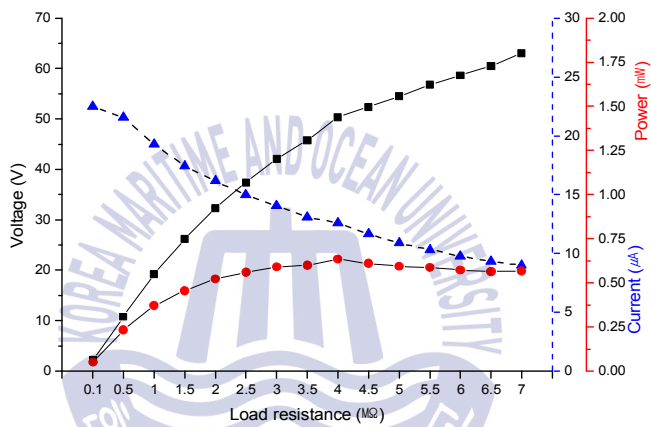


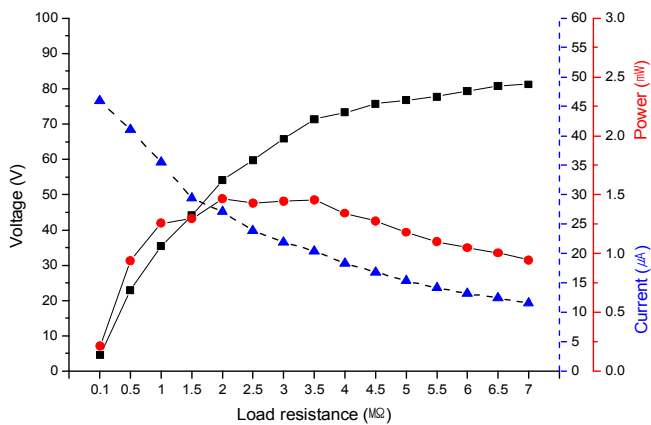
Fig. 29. 방수 처리 및 이중 구조 압전소자 최대 출력 특성 비교

### 4.2.3 다단 구조 압전소자 출력 특성

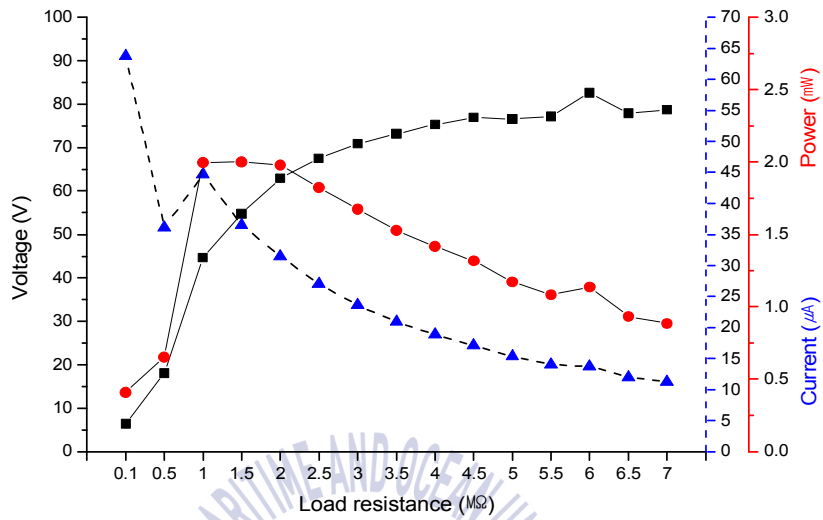
방수 처리 압전소자의 기본적인 출력 특성을 파악 한 뒤 더 높은 출력 특성을 얻기 위해서 소자를 1~4장 까지 적층 하여 다단 구조를 제안하였다. Fig. 30. 은 1~4장 까지 방수 처리 된 단위 소자를 적층하고 그에 따른 출력 변화를 나타내는데, 출력이 가장 높게 나타는 20[mm]의 동일한 범위에서 각각 측정 하였다.



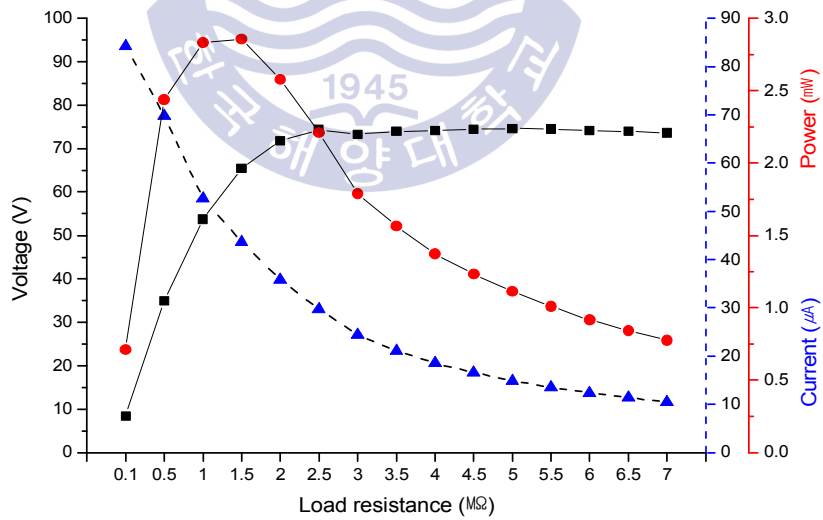
(a) 1장



(b) 2장 적층



(c) 3장 적층



(d) 4장 적층

Fig. 30. 다단 구조에 따른 방수 처리 압전소자 출력 특성

압전소자 1장은 매칭저항 4[MΩ]이며 50.3[V] 12.6[μA] 0.63[mW], 2장 적층 시, 매칭저항 2[MΩ] 54.1[V] 27[μA] 1.46[mW], 3장 적층 시, 매칭저항 1.5[MΩ] 54.7[V] 36.51[μA] 2[mW], 4장 적층 시, 매칭저항 1[MΩ], 65.4[V] 43.6[μA] 2.85[mW]의 최대 출력을 확인 할 수 있었다. 방수 처리 압전소자가 다단 구조를 형성 하면 더 높은 출력 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 총 4장의 방수 처리 압전소자를 적층 하였을 때, 1장의 방수 처리 압전소자와 비교하여 약 4.5배 더 높은 출력을 나타내었다.

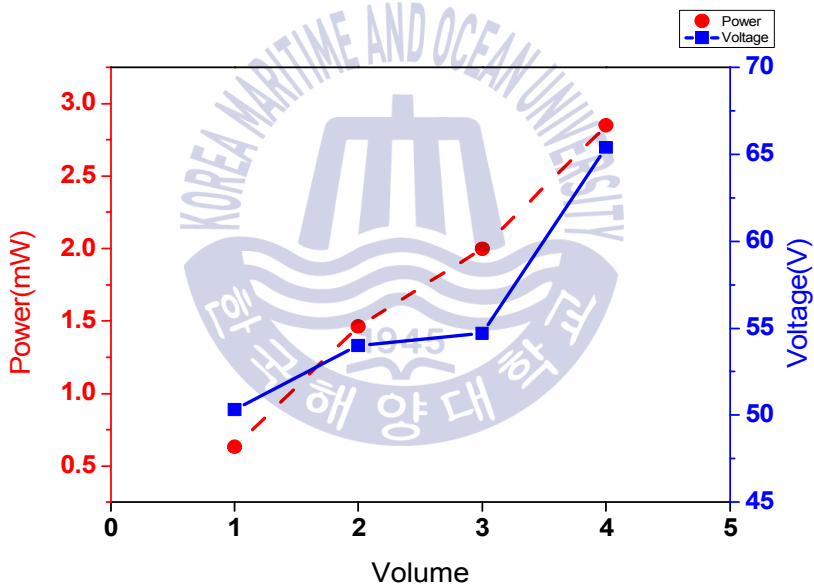


Fig. 31. 방수 처리 압전소자 적층에 따른 출력 특성 변화

### 4.3 수중 환경에 따른 출력 특성

수중 비상전원용 에너지 하베스터로 적용 가능성을 파악하고 수중 환경에서 압전 소자의 출력 특성을 알아보기 위하여 수조 및 잠수 풀에서 일정한 간격의 움직임을 부여하고 그에 따라 발생하는 출력 특성을 측정 하였다.

#### 4.3.1 수조 실험

방수 처리 된 압전소자를 전극-전선 접합부를 제외한 부분 전체를 폭 26[cm], 깊이 13[cm]의 수조에서 움직임에 따른 출력 특성을 측정 하였으며 출력 특성을 Fig. 31에 나타내었다. 수조 실험에서는 1장의 압전소자가 21.2[V] 5.3[ $\mu$ A] 0.112[mW], 2장 11.6[V] 5.8[ $\mu$ A], 0.067[mW], 3장 4.8[V] 3.69[ $\mu$ A] 0.017[mW], 4장 4.8[V] 4.8[ $\mu$ A], 0.02[mW]의 출력을 보였다. 4.2.3의 측정과 달리 1장의 방수 처리 압전소자가 가장 좋은 출력 특성을 보였다.

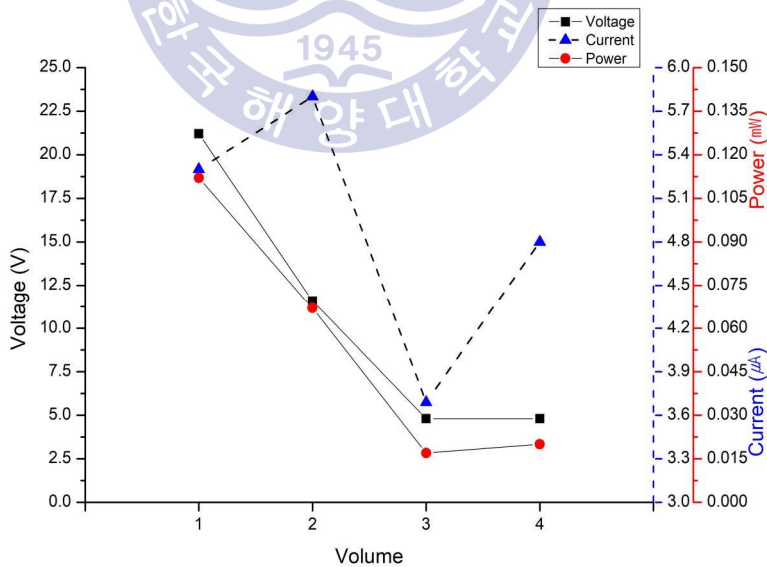


Fig. 32. 수조 실험 시 다단 구조에 따른 방수 처리 압전소자 출력 특성

### 4.3.2 잠수 핀 실험

방수 처리 된 압전소자를 잠수용 핀에 부착하고 깊이 5[m]의 풀에서 움직임에 따른 출력 특성을 측정 하였으며 출력 특성을 Fig. 에 나타내었다. 잠수 핀 실험에서는 1장의 압전소자가 21.4[V], 2장 13[V], 3장 6.3[V], 4장 0.9[V]의 출력을 보였다. 4.3.1 수조 실험과 동일하게 적층 될수록 출력 값이 감소하는 양상을 보였으며, 1장의 방수처리 압전소자가 21.4[V]로 가장 높은 출력 특성을 나타내었다. 핀에 압전소자 전체 면적이 부착 되므로 핀 고유의 유연성에 따른 영향을 받으며 수중 환경에서는 움직임에 따른 변위의 변화가 제한적이므로 압전소자의 적층 보다 면적을 넓게 하는 것이 효과적이라 판단된다. 실험을 통하여 1장의 압전소자가 가장 높은 출력 특성을 나타내며 수중 비상전원용 에너지 하베스터로 적용하기에 가장 적합함을 알 수 있었다.

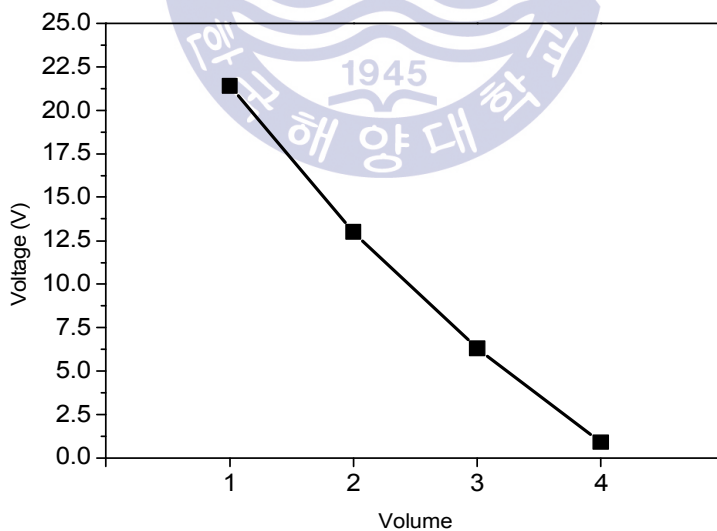


Fig. 33. 잠수 풀 실험 시 다단 구조에 따른 방수 처리 압전소자 출력 특성



## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 PVDF 기반 압전소자를 수중 비상전원용 에너지 하베스터로써 적용 가능성을 알아보기 위해 출력 특성에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 PVDF 기반 압전소자에 대한 출력 특성을 다양한 변위에 따라 분석을 하였으며 압전소자의 크기에 따른 출력 특성과 비교 분석 하였다. 또한 압전소자 구조에 따른 출력 특성을 분석하였고, 방수 처리의 유무에 따른 출력 특성을 분석하였다. 더 높은 출력을 얻기 위해 소자들을 적층한 다단 구조 압전소자의 출력 변화를 분석하였으며 수중 환경에 따른 압전소자의 출력 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. PVDF 필름과 Ni 기반의 전극으로 제작한 유연 압전 하베스터 단일 구조의 경우 0.142mW, 전극 크기 변화 구조의 경우 0.042mW, PVDF 및 전극 크기 변화 구조의 경우 0.034mW의 최대 출력을 나타내었으며 단일 구조가 약 4배 더 높은 출력을 나타내었다.

2. 면적 당 출력 증가를 위해 제안 된 이중 구조의 최대 출력은 1.024[mW], 단일 구조의 경우 0.142[mW]로 이중 구조가 약 7.2배 더 높은 출력 특성을 보였다.

3. 이중 구조의 최대출력은 1.024[mW] 이나, 우레탄 필름을 이용하여 방수 처리를 하면 증가한 소자의 두께로 압축 및 인장력이 감소하여 0.702[mW]의 최대 출력을 나타내며 방수 처리 전 보다 약 1.5배 더 낮은 출력을 보인다.

4. 수중의 한정적인 움직임 범위에서는 하베스터의 두께로 인하여 다단 구조를 이루어도 출력이 감소하였다. 압전소자의 구조가 아닌 면적을 확대하는 것이 효과적이다.

5. 수중 환경에 따른 출력 특성 결과를 봤을 때, 수중에서의 유연 압전 하베스터로 응용이 가능하다.

## 참고 문헌

- [1] Pike Research Reports
- [2] S P Beeby, M J Tudor, N M White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications," "Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. R175-R195 (2006)
- [3] Z.L. Wang, J. Song, "Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays", in Science, 312, pp 242-246 (2006)
- [4] J. Marciszewski, S. Leschin, "에너지 수확 기술로 구현하는 자가 발전 시스템", 전자엔지니어, Dec, pp. 16-31 (2005)
- [5] A. Erturk and D. J. Inman, Piezoelectric Energy Harvesting, Wiley, New York (2012)
- [6] J. E. Doherty and L. E. Robb, "Polyvinylidene fluoride", in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, R. E. Kirk and D. F. Othmer, Editors, Wiley, New York, Vol 11 (1980).
- [7] V.A. Isupov, Comments on the paper "X-ray Study of the PZT Solid Solutions Near the Morphotropic Phase Transition," Solid State Communications, 17, 1331-33 (1975)
- [8] Chieh Chang, Van H Tran, Junbo Wang, Yiin-Kuen Fuh, Liwei Lin. "Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency", nano Letters, Vol. 10, p. 726 (2010)
- [9] Jung Inki, Shin Youn-Hwan, Kim Sangtae, Choi Ji-young, Kang Chong-Yun, "Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications", Applied Energy Vol. 197, p. 222 (2017)
- [10] Niezrecki, C., Brei, D., Balakrishnam, S. and Moskalik, A., "Piezoelectric Actuation: State of the Art", Shock and Vibration Digest, Vol. 33, No. 5, pp. 269-280 (2001)
- [11] KISTI, 압전 세라믹스 심층 정보 분석 보고서, 2002
- [12] 포항산업과학연구원, 압전세라믹스의 기술 및 시장 분석, 2003
- [13] KISTI, 압전결정소자(Piezo-electric crystal), 2009
- [14] KISTI 정보 분석 연구소, 압전 에너지 하베스팅 기술동향 및 전망, 2013
- [15] Juhyun Yoo, Kookjin Kim, Changae Lee, Lakhon Hwang, Dongsoo Paik, Hyunsang Yoon and HyungWook Choi, "Electrical properties of low temperature sintering multilayer piezoelectric transformer using  $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zr, Ti)O_3$  ceramics", Sensors and

- Actuators A: Physical, Vol 137, 1, pp. 81-85 (2007)
- [16] R. Yang, Y. Qin, C. Li, G. Zhu, and Z. L. Wang, Nano lett., 9, 1201 (2009)
- [17] Y. H. Yun, S. J. Kim, Y. C. Lee, K. H Yu, S. C Lee, “Characteristic Evaluation of PVDF Tactile Sensor”, 韓國精密工學會 99年度 秋季學術大會 論文集(1) , p. 211-214 (1999)
- [18] 강중윤, 정우석, “에너지 하베스팅 산업화 동향”, 세라미스트, 17(2), p. 38-41 (2014)
- [19] 최성진, “에너지 하베스팅 기술과 전력전자”, 전력전자학회지, 18(2), p. 31-36 (2013)
- [20] 손광철, “핀테크 기술을 활용한 하베스트 전기 에너지 활성화 방안 연구”, 경기도의회 (2016)

