



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](#)

공학석사 학위논문

Kelvin Water Dropper를 이용한
에너지 하베스팅에 대한 연구

A Study on Energy Harvesting using Kelvin
Water Dropper

2015 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

김 성 환

Kelvin Water Dropper를 이용한 에너지 하베스팅에 대한 연구

A study on energy harvesting using Kelvin
water dropper

지도 교수 김용권

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2015 년 8 월

서울대학교 대학원
전기 정보 공학부
김 성 환

김성환의 공학석사 학위논문을 인준함
2015 년 8 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스팅에 대한 연구

서울대학교 대학원
전기 컴퓨터 공학부
김 성 환

본 논문에서는 소량의 물로도 고전압의 정전기를 발생시키는 Kelvin water dropper를 에너지 하베스팅에 이용하기 위하여 고전압 저전하의 정전기 에너지를 저장할 수 있는 에너지 저장 회로를 제안하고 Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스팅 시스템의 효율을 증대시키기 위한 두 가지 방법을 제시하였다. 또한 이러한 시스템이 가변적인 환경에서도 특정 응용에 맞는 일정한 출력 전압을 낼 수 있도록 전원공급 회로를 도입하였다.

Kelvin water dropper가 안정적이고 효율적으로 동작하도록 Kelvin water dropper를 수학적으로 모델링하여 적합한 배치에 대한 시뮬레이션 및 실험을 진행하여 금속 용기와 금속 링 사이의 거리 h 를 3 cm 로 정하였다.

다음으로 Kelvin water dropper에서 발생하는 정전기 에너지를 저장하기 위해 MEMS 스위치를 이용한 에너지 저장회로를 제작 및 시험하였으나 적합성의 문제와 효율성의 문제로 불꽃 방전 간극을 이용한 에너지 저장 회로를 새로이 설계 및 시험하였다. 제작된 에너지

저장 회로를 이용하여 Kelvin water dropper에서 하베스팅을 진행하였을 경우 리터당 32.56 μJ 의 에너지를 수확할 수 있었다.

더 나아가 시스템의 효율 향상을 위해 Paschen의 법칙에 근거한 불꽃 방전 간극을 증가시킴으로써 에너지 저장 효율을 증가시킬 수 있었는데 방전간극이 3 mm 이하일 때에는 에너지 저장 효율이 증가하는 경향을 실험을 통해 확인할 수 있었으나 3 mm를 초과한 시점에서는 물방울 사이의 반발로 인한 물의 손실로 효율이 감소함을 확인하였다. 또한 Kelvin water dropper의 전압 상승식에서 초당 떨어지는 물방울의 수를 증가시키기 위해 다중 노즐을 도입하였고 그 결과 노즐의 개수만큼의 에너지 충전시간이 감소하였다. 이러한 모든 결과들을 종합하여 3 V의 출력 전압을 낼 수 있는 전원 공급 회로를 추가하였고, 총 5.84 L의 물을 사용하여 3 V의 출력 전압이 1 M Ω 의 부하를 통해 1 s 동안 유지하는 결과를 얻음으로써 시스템의 유효성을 확인하였다.

제안된 Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스팅 시스템은 적은 양의 물로도 발전이 가능한 친환경 에너지원으로 다양한 환경에서의 에너지 수확에 그 분야를 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : Kelvin water dropper, 에너지 하베스팅, MEMS 스위치, Paschen의 법칙

학 번 : 2013-20765

목 차

초록

목차

제 1 장 서	론.....	1
1.1	연구의 배경.....	1
1.2	에너지 하베스팅의 연구 동향.....	4
1.3	Kelvin water dropper.....	14
1.4	연구의 동기 및 목적.....	15
1.5	논문의 구성.....	17
제 2 장	Kelvin water dropper의 이론적 분석과 구성	19
2.1	Kelvin water dropper의 원리.....	19
2.2	Kelvin water dropper의 구성.....	24
제 3 장	정전기 에너지를 저장하기위한 에너지 저장회로의 설계와 제작	30
3.1	Paschen곡선에 의한 공기의 절연 파괴 전압.....	30
3.1.1	Paschen의 법칙.....	30
3.1.2	수정된 Paschen의 법칙.....	36
3.2	에너지 저장회로의 설계.....	38
3.2.1	MEMS switch를 이용한 에너지 저장회로.....	38
3.2.2	불꽃 방전 간극을 이용한 에너지 저장회로.....	42
제 4 장	시스템의 효율 향상 방법과 전원공급 회로의 제작	47
4.1	시스템 효율 향상 방법	47
4.1.1	불꽃 방전 간극.....	47
4.1.2	다중 노즐	55
4.2	전원공급 회로의 제작	59
제 5 장	결론	63
참고문헌.....		65
Abstract.....		69

표 목차

[표 1-1] 에너지 하베스팅 특성 비교.....	3
[표 2-1] 실험을 통해 측정된 h 의 변화에 따른 C_L 의 변화.....	27
[표 2-2] 시뮬레이션을 통해 측정된 h 의 변화에 따른 C_L 의 변화	28
[표 3-1] 저장된 에너지의 평균 및 분산	45
[표 4-1] d 의 영향을 알아보기 위한 실험조건	49
[표 4-2] $d=0.5, 1.75$ mm 에서의 에너지 저장 효율	52
[표 4-3] 노즐의 변화에 따른 방전 주기	57
[표 4-4] 전원공급 회로에 사용된 소자의 사양	60

그림 목차

[그림 1.1]	우리 주위의 다양한 에너지원.....	1
[그림 1.2]	에너지 하베스팅 소자 종류.....	4
[그림 1.3]	NANSA에서 효율 증대를 위해 제안한 다층 스택 압전 에너지 수확기.....	5
[그림 1.4]	The University of Texas Arlington에서 제작한 풍차 형태의 에너지 하베스터.....	6
[그림 1.5]	일본 NEC-Tokin에서 제작한 에너지 하베스터 응용 예.....	7
[그림 1.6]	프랑스연구자들에 의해 제작된 빗방울 에너지 수확 장치.....	8
[그림 1.7]	POWERleap에서 개발한 발전기 개념도 및 발전기를 이용한 발전.....	9
[그림 1.8]	Dickson이 제안한 압전 트리 발전기의 스케치와 구현화.....	10
[그림 1.9]	University of Michigan에서 제작한 센서 노드 구동을 위한 소형 발전기.....	11
[그림 1.10]	Georgia Institute of Technology에서 제작한 달리는 타이어의 운동을 이용한 발전기.....	12
[그림 1.11]	산화 아연 나노 와이어와 발전 성능에 따라 소리 주도 압전 나노 발전기의 개략도.....	13
[그림 1.12]	Kelvin water dropper.....	14
[그림 2.1]	제작된 Kelvin water dropper.....	20
[그림 2.2]	제작된 Kelvin water dropper의 모식도.....	20
[그림 2.3]	방전구를 통해 발생된 불꽃 방전.....	22
[그림 2.4]	Kelvin water dropper의 등가회로.....	22
[그림 2.5]	C_L 측정을 위한 Kelvin water dropper 배치 구조... ..	25
[그림 2.6]	C_L 측정을 위한 RC 회로.....	25
[그림 2.7]	시정수 측정 결과.....	27
[그림 2.8]	C_L 변화에 대한 시뮬레이션 결과.....	28
[그림 2.9]	실험과 시뮬레이션을 통해 측정된 h 에 따른 C_L	29
[그림 3.1]	전자 증식작용.....	31
[그림 3.2]	전자사태.....	32
[그림 3.3]	압력과 전극 간격의 곱의 값에 따른 절연과괴 전압.....	35

[그림 3.4] 수정된 Paschen의 절연파괴 곡선.....	36
[그림 3.5] MEMS 스위치를 이용한 에너지 저장회로.....	38
[그림 3.6] 수정된 Paschen 곡선에 의한 안전한 MEMS 설계 영역.....	40
[그림 3.7] Kelvin water dropper의 전압 상승 곡선.....	41
[그림 3.8] 불꽃 방전 간극을 이용한 에너지 저장회로	43
[그림 3.9] 제작된 에너지 저장회로.....	43
[그림 3.10] 물의 양에 따른 에너지 충전 양.....	44
[그림 3.11] 물의 양에 따른 리터당 저장된 에너지.....	46
[그림 4.1] Kelvin water dropper의 시간에 따른 전압 변화....	48
[그림 4.2] $d=0.5$ mm 일 때의 전압 변화.....	50
[그림 4.3] $d=0.5$ mm 일 때 저장된 에너지의 방전 그래프	51
[그림 4.4] $d=1.75$ mm 일 때의 전압 변화	51
[그림 4.5] $d=1.75$ mm 일 때 저장된 에너지의 방전 그래프 ..	52
[그림 4.6] 방전 간극 조절장치.....	53
[그림 4.7] 방전 간극의 변화에 따른 저장된 에너지의 변화....	54
[그림 4.8] 다중 노즐 모식도.....	56
[그림 4.9] 다중 노즐을 적용한 Kelvin water dropper의 전압 변화.....	57
[그림 4.10] 노즐의 수에 따른 방전 주기의 변화	58
[그림 4.11] 전원공급 회로	59
[그림 4.12] 제작된 에너지 저장회로 및 전원공급 회로.....	61
[그림 4.13] 전원공급 회로의 출력 파형.....	62

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

에너지 하베스팅은 우리 주위에서 버려지는 에너지를 모아 사용가능한 전기에너지로 변환·이용하는 기술을 일컫는다. 그림 1.1 에서와 같이 에너지 하베스팅의 주요 에너지원으로는 자연환경의 빛·열·바람 등에서부터 사람의 움직임이나 진동에 이르기 까지 그 범위가 광범위하다 [1].



그림 1.1 우리 주위의 다양한 에너지원

한편, 전자기술의 발전으로 기존 대형 전자기기가 소형화되고 있으며 이러한 소형화된 전자기기를 구동하는 에너지도 감소하였다.

일반적으로 전기기기는 배터리를 통하여 구동되며, 외부의 전력공급원을 이용하여 배터리를 충전한다. 그러나 현재 배터리가 차지하는 부피와 무게가 상당하고, 배터리가 모두 방전되면 충전하거나 교체해야 하는 문제점이 있다. 특히, 가까운 미래에 많이 사용될 것으로 예측되는 유비쿼터스 센서 네트워크는 저전력 CMOS를 이용한 무선통신모듈과 센서를 부착한 센서노드를 넓은 지역에 임의적으로 분포시켜 센싱하고 센싱자료를 무선으로 보내는 것을 특징으로 하고 있으나 주기적으로 배터리를 교체해야 하는 근본적인 문제점을 가지고 있다. 넓은 지역에 임의로 분포된 센서노드를 전선으로 연결하는 것은 현실적으로 불가능하며 배터리를 사용할 경우에는 넓은 지역에 산재한 배터리를 주기적으로 교환하는 어려움과 배터리 교체에 의한 공해문제가 발생하는 단점이 있다 [2].

여기에 자연에서 버려지는 에너지를 전기에너지로 변환하여 이용하는 에너지 하베스팅은 이러한 소형 전자기기의 전원공급 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방법으로 제시되고 있다. 소형 에너지 하베스팅 방법에는 태양광을 이용한 태양발전, 기계적인 에너지를 이용한 압전발전, 기계적인 운동과 전자기적현상을 이용한 발전 및 용량성 발전, 폐열을 이용한 열전발전 등이 있다. 각각의 방법은 장단점을 가지고 있으며 주어진 자연환경에 적합한 방법이 선택되어 적용될 수 있다. 예를 들면, 태양발전의 경우 생성되는 에너지양은 크지만 흐린 날이나 실내에서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면,

압전에너지 하베스팅은 표 1.1 에서와 같이 다른 발전방법에 비해 에너지 밀도가 높고, 기후에 관계없이 실내외 기계진동을 이용할 수 있고, 풍력, 바다의 파도 등 다양한 형태의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다.

앞서 언급했듯이 예를 든 방법들에도 각각의 장단점을 가지고 있어 그 환경에 맞는 새로운 에너지 하베스팅 방법이 필요하기도 하며 현재 그 필요성에 따라 새로운 형태의 에너지원을 이용하는 다양한 에너지 하베스팅 방법들이 새로이 연구 및 개발이 진행되고 있다 [3].

표 1.1 에너지 하베스팅 특성 비교

에너지 원	전력 밀도 [mW/cm^3]	효율 [%]
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

1.2 에너지 하베스팅의 연구 동향

에너지 하베스팅은 현재 큰 규모의 발전장치부터 소형 나노기계까지 다양한 분야에서 응용 연구가 활발히 진행되고 있다.

에너지 하베스팅 기술은 자연의 빛에너지, 인간신체 또는 연소형 엔진으로부터의 저온 폐열에너지, 휴대용 기기 탑재/부착장치의 미세 진동에너지, 인간의 신체활동(걸거나 뛰는)으로 인한 소산에너지 등을 흡수하여 그림 1.2 에서와 같이 Thermoelectric Element, Electrochemical Reaction, DC/AC Generator, Piezoelectric Transducer, Capacitor Transducer나 Photovoltaic Cell 등과 같은 소자기술을 이용하여 전기에너지로 변환, 전자기기의 전력으로 사용하는 환경에너지 재생형 에너지원이라 할 수 있으며 연구가 진행됨에 따라 에너지원의 종류 뿐만 아니라 그 활용분야도 점차 확대되고 있다 [4].

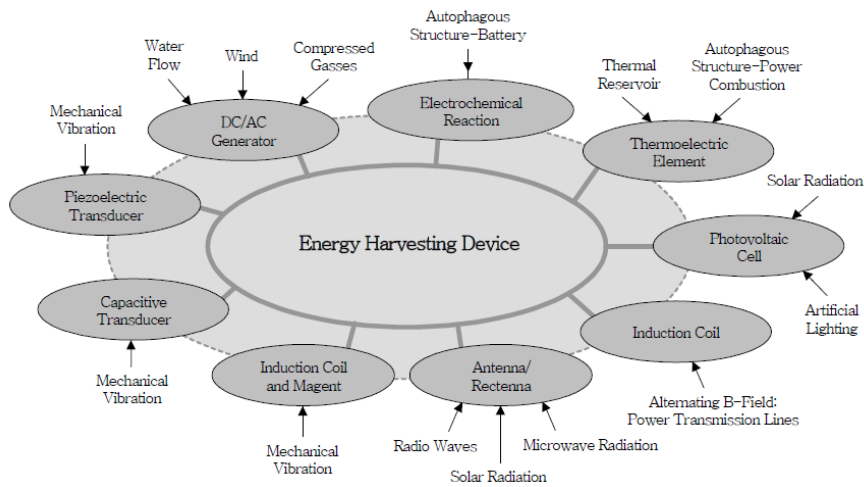


그림 1.2 에너지 하베스팅 소자 종류

그 중 가장 활발한 연구가 진행중인 압전에너지 하베스팅은 군수용 발전장치, 의료용 장치의 보조 전원, 자동차의 2차 발전장치, 착용 가능한(wearable) 전자제품 등에 적용하기 위한 연구가 진행 중에 있으며 유비쿼터스 센서 네트워크(USN)의 에너지원으로 검토되고 있다. 이외에도 인공심장, 심장 박동기 등 인체에 적용하는 응용이나 건축 구조물 진단용 센서 전원 등의 소규모 전원, 로봇 등의 차세대 전자장치의 전원으로 응용 가능성에 대한 연구가 진행 중이다.

미국 NASA의 Xu 박사 등은 압전발전기의 효율을 증가시키기 위하여 PAT 벌크 세라믹을 적층한 후 그림 1.3 와 같은 구조로 제작하였다. 일반적인 세라믹의 경우 기계-전기에너지 변환효율이 7% 인데 새롭게 제작한 구조는 26 %를 보인다고 보고되었다 [5].

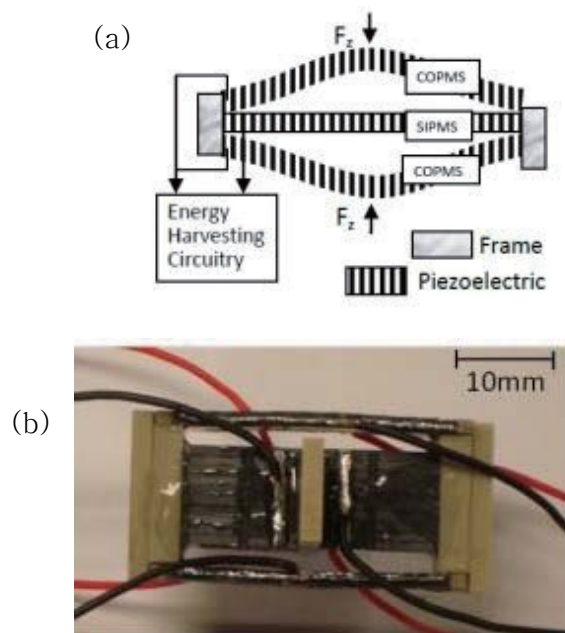


그림 1.3 NASA에서 효율 증대를 위해 제안한 다층 스택 압전에너지 수확기 : (a) 다층 스택 및 압전에너지수확기 구성도 (b) 제1압전에너지수확기 시작품

The University of Texas Arlington에서는 2006년 그림 1.4
 에서와 같이 풍차에 압전체를 사용하여 바람의 흐름으로 하베스팅을
 하는 하베스터를 제안하였다. $3 \times 4 \times 5 \text{ in.}^3$ 의 크기를 가지고 있으며
 기어의 비율을 조절함으로써 주파수를 조정할 수 있으며 다중 날개를
 사용하여 풍력을 효율적으로 이용할 수 있도록 하였다 [6].

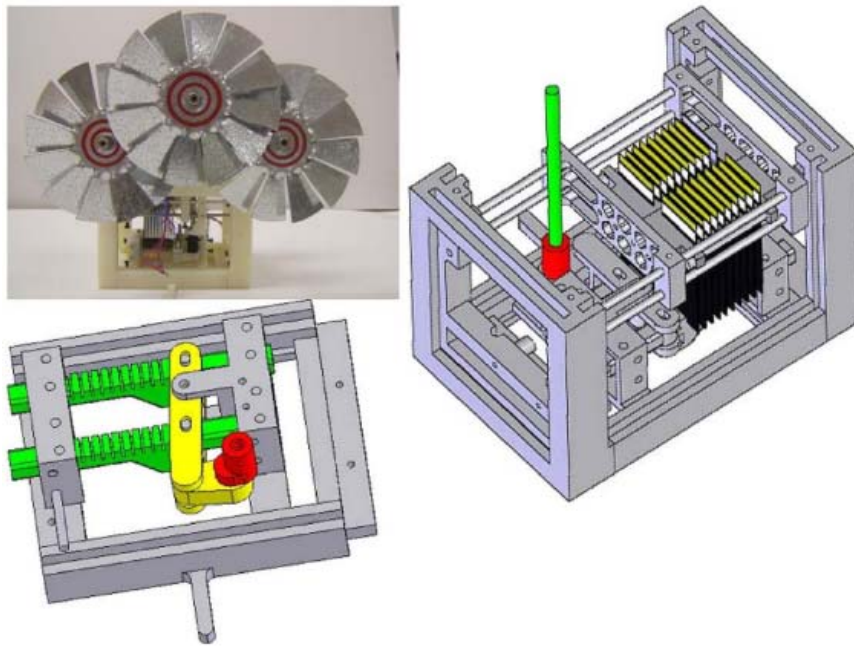


그림 1.4 The University of Texas Arlington에서 제작한 풍차 형태
 의 에너지 하베스터

유럽에서는 VIBES (Vibration Energy Scavenging)이라는
 컨소시엄을 구성하여 영국, 독일, 프랑스, 이탈리아 등에서 활발하게
 연구하고 있다. 독일의 EnOcean사는 Siemens사에서 분리된 회사로
 압전에너지 하베스터와 센서를 일체화한 센서노드를 판매하고 있다.
 이탈리아 Tyndall National Institute에서는 PVDF를 신발에 적용한

연구를 수행하였다. 프랑스 리옹 INSA에서는 에너지 하베스팅 회로연구를 활발히 진행하였다. 벨기에 Interuniversity Microelectronics Center 에서는 MEMS기술과 압전 소자를 이용해 기계적 진동으로부터 40 μW 의 전력을 얻을 수 있는 부품을 개발하였다. 일본에서는 기업을 중심으로 아이디어 상품을 많이 제조하여 판매하고 있으며 대학을 중심으로 다양한 종류의 연구를 수행하고 있다 [7].

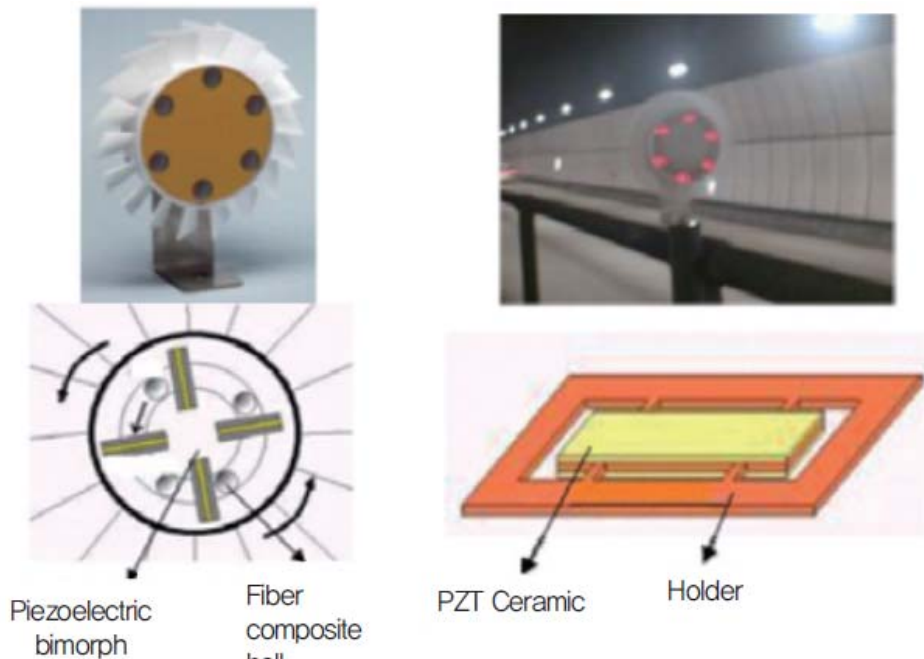


그림 1.5 일본 NEC-Tokin에서 제작한 에너지 하베스터 응용 예

에너지 하베스팅의 잠재적 이용 에너지원 중 하나는 빗방울의 기계 에너지를 전기로 변환하는 것으로 센서 및 포터블 전기장치와 같은 저전력 응용에 사용할 수 있다. 프랑스 연구자들은 PVDF를 이용하여 빗물의 낙하에너지를 전기에너지로 변환시키는 연구를 수행하였으며, 1~5 mm 크기의 빗물은 전기에너지를 생산할 수 있을 것이라고 발표하였다. 계산결과에 따르면 폭우가 쏟아지는 환경에서 12 mW

정도의 에너지를 생산할 수 있다고 한다. 넓은 면적의 PDVF를 이용하여 해저나 강물아래에 설치하여 향후 이를 이용하여 배터리 교환이나 전력공급이 힘든 해저나 대양의 바다 위의 센서나 부표의 무한 동력전원으로 사용이 가능할 것으로 예상된다 [8, 9].

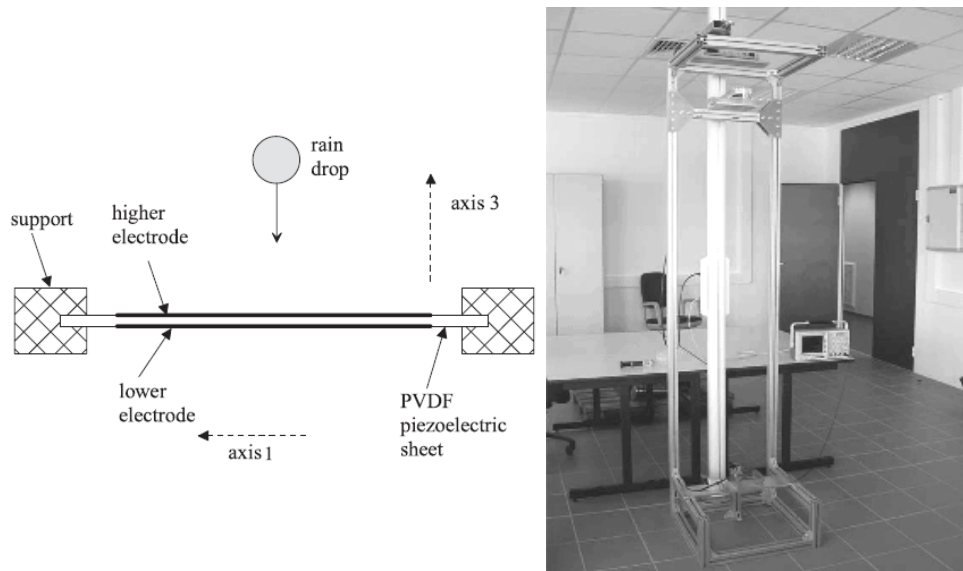


그림 1.6 프랑스연구자들에 의해 제작된 빗방울 에너지 수확 장치

볼튼 대학교와 미국에 기반을 둔 클린-기술 회사인 POWERleap사는 사람들이 밟고 다닐 수 있는 바닥판을 만들어 발전하는 것을 시연하였다. 이 기술의 핵심은 재료가 기계적인 스트레스를 받을 때 전압이 생성되는 자연적인 현상인 압전기(piezoelectricity)기술이다. LED조명이나 무선 전자기기 같은 장치에 전원을 공급하기 위해 걷고 춤추는 것과 같은 운동 움직임에 내포된 에너지를 처리하기 위해 압전기 기술을 사용한다 [10].

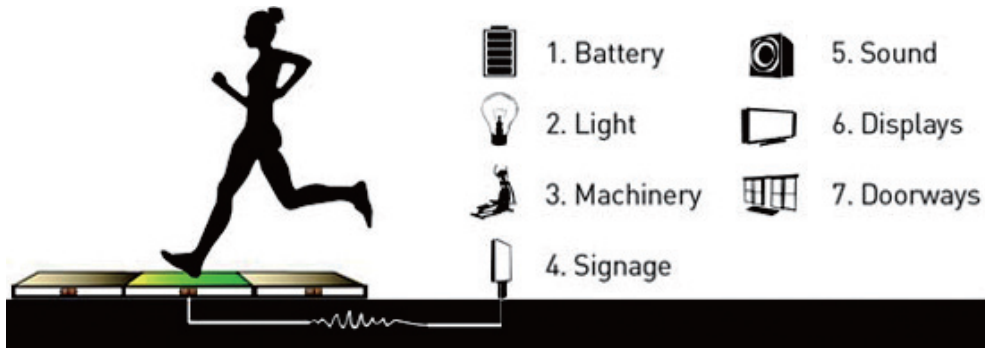


그림 1.7 POWERleap에서 개발한 발전기 개념도 및 발전기를 이용한 발전

2009년 Northwestern Polytechnical University에서는 나무의 잎처럼 압전발전기를 부착하여 발전하는 개념을 제시하였다. 바람의 흐름에서도 움직일 수 있도록 유연한 PVDF를 이용하여 발전기를 제작하였으며 공기역학을 고려하여 다양한 모양의 압전발전기를 제작하였다. 실험 결과 약 2 cm의 실린더에서 4.5 m/s의 바람이 불 때 100 pW의 파워가 측정되었다 [11, 12].

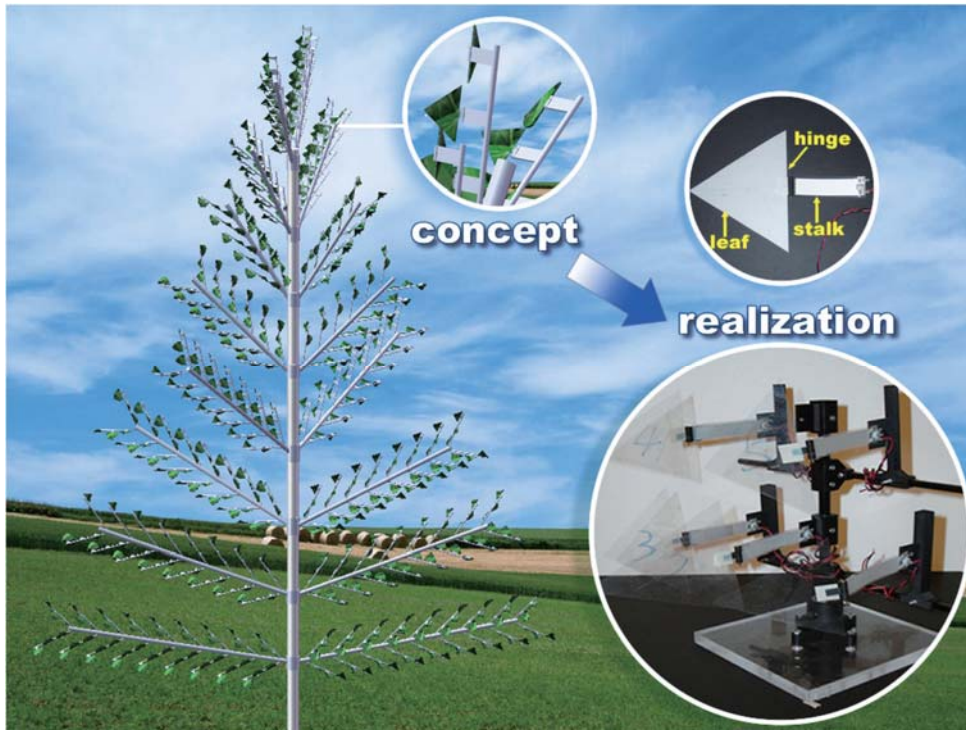


그림 1.8 Dickson이 제안한 압전 트리 발전기의 스케치와 구현화

현재 대부분의 하베스터들은 큰 크기로 제작하고 있으나 미래의 유비쿼터스용 센서 네트워크에 이용하기 위해서는 소형화가 이루어져야 한다. 이를 위해서 MEMS공정을 이용한 연구가 미국, 중국 등에서 진행되고 있다. 또한 미래의 웨어러블 컴퓨터를 실현하기 위한 고효율 유연한 압전에너지 하베스터 개발 연구가 활발하게 진행되고 있다 [13].

미국 미시간대학에서는 USN 센서 노드 구동을 위한 소형 발전기를 MEMS기술을 이용하여 제작하였다. 하베스터의 크기는 약 27 mm^3 정도이며 155 Hz의 동작주파수와 14 Hz의 대역폭을 가지고 있으며 1.5 g 진동에서 $20 \mu\text{W}$ 정도의 에너지를 생산하여 1.85 V의 슈퍼커패시터에 충전한다. 이는 현재까지 개발된 것보다 5~10배 더 효율적이며 크기는 미화 1센트 동전보다 작다 [14].

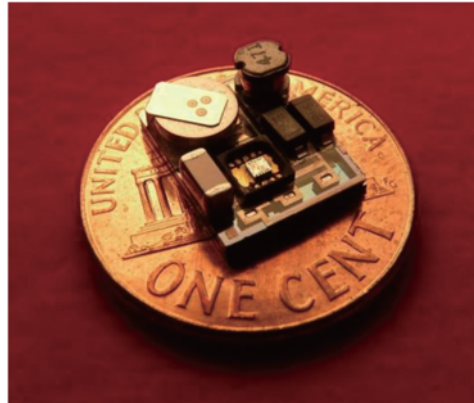
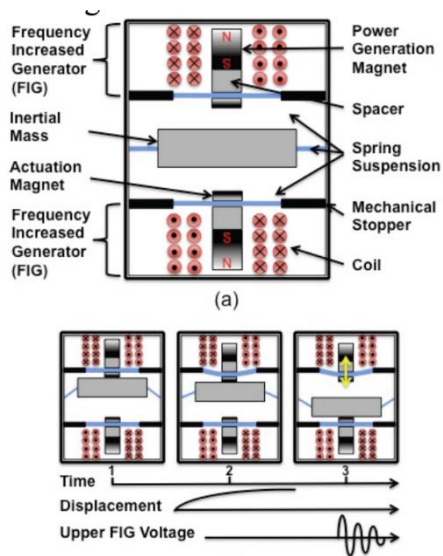


그림 1.9 University of Michigan에서 제작한 센서 노드 구동을 위한 소형 발전기

미국 조지아공대의 Wang교수는 ZnO나노와이어를 이용하여 압전발전기를 제작한 후 달리는 타이어에 적용하였다. 연구팀이 구축한 실험 조건 하에서 나노발전기를 타이어에 장착하고 운전하여 1.5 V 전압과 25 nA의 전류로 LCD 스크린을 직접 밝힐 수 있다. 제작한 압전발전기 크기는 약 1.5 cm × 0.5 cm 크기이며 최대 파워밀도는 70 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 이다 [15].

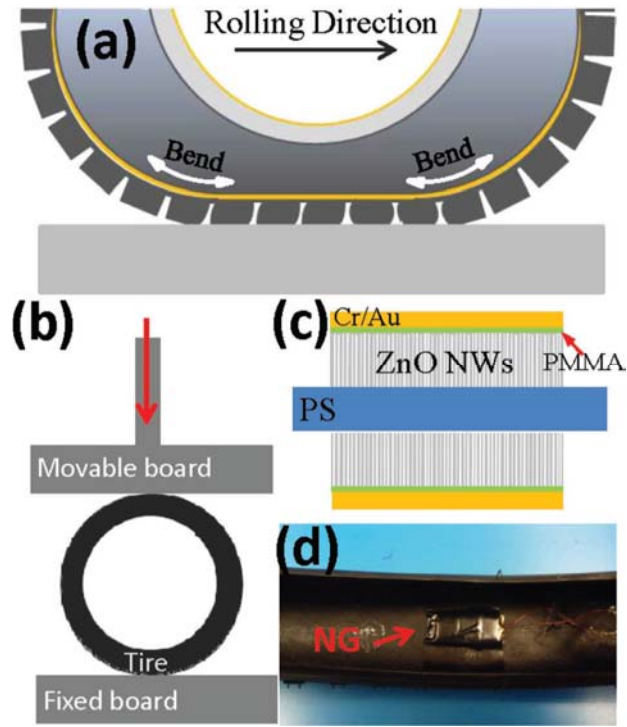


그림 1.10 Georgia Institute of Technology에서 제작한 달리는 타이어의 운동을 이용한 발전기: (a) 차량 이동중 타이어, (b) 형상변화, (c) 실험설정 스케치지도, (d) 타이어 내면에 고정된 나노발전기

성균관대학교 김상우 교수팀은 ZnO나노와이를 GaN위에 성장하고 음파를 이용한 발전을 보고하였다. 약 100 dB의 소리를 가했을 때 약 50 mV의 교류가 발생하고, ZnO를 PdAu 금속과 접합함으로써 쇼트키 접촉을 한다고 보고하였다 [16].

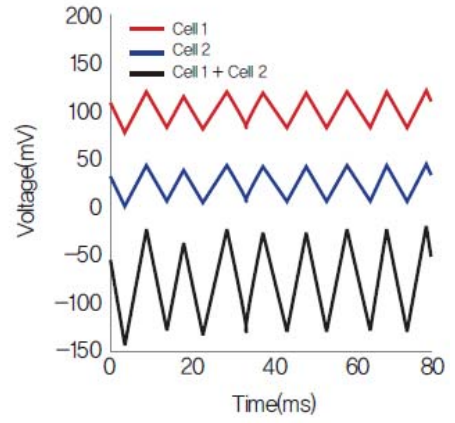
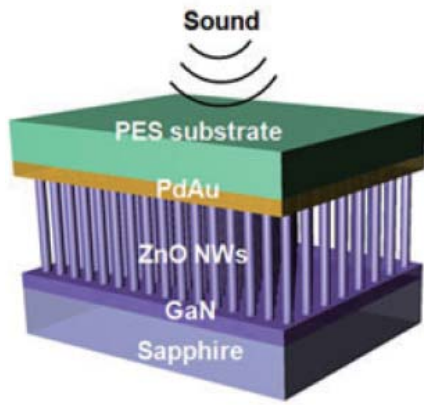


그림 1.11 산화 아연 나노 와이어와 발전 성능에 따라 소리 주도 압전 나노 발전기의 개략도

1.3 Kelvin water dropper

Kelvin water dropper는 1867년 William Thomson(Lord Kelvin)에 의해 고안된 물의 극성과 정전기 유도에 의해 정전기를 발생시키는 정전발전기의 한 유형이다. Kelvin water dropper는 그림 1.14 와 같이 구성되어 있으며 Kelvin hydroelectric generator, the Kelvin electrostatic generator, Lord Kelvin' s Thunderstorm 등 다양한 이름으로 불린다.

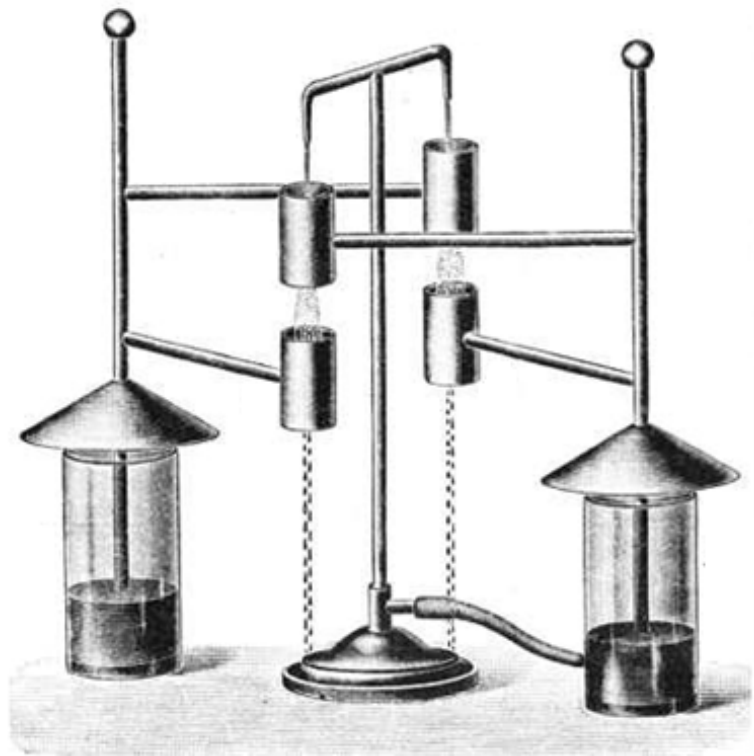


그림 1.12 Kelvin water dropper

Kelvin water dropper는 적은 양의 물로도 발전이 가능하며 수만 볼트의 고전압 정전기 에너지를 발생시키는 특징을 가지고 있다.

1.4 연구의 동기 및 목적

에너지 수확은 자연 곳곳에서 버려지는 에너지를 전기에너지로 변환 및 이용하는 기술로서 각각의 방법은 장단점을 가지고 있으므로 그 환경에 맞는 방법이 선택되어 적용되어야 한다. 현재까지 에너지 하베스팅 기술의 연구는 태양광과 풍력, 그리고 인체에서 발생하는 진동에너지 등을 중심으로 연구 개발되어 왔으나 자연환경에 큰 비중을 차지하는 물을 이용한 에너지 수확에 대한 연구 결과는 다른 에너지원에 비해 상대적으로 적은 편이었다. 물은 순환과정에서 잠재적으로 큰 에너지를 가지고 있으나 아직까지 이 에너지를 이용하는 데는 기술적 한계가 존재한다.

한편 사람의 손이 닿기 힘든 환경에서의 소형 전자기기를 활용하기 위해서는 그 주변의 환경에너지를 전기에너지로 변환하여 전자기기에 전원을 공급하는 에너지 하베스팅 기술이 필요하며 이 때 이용가능한 에너지원으로 빛, 열, 바람을 들 수 있으나 비가 오거나 흐린 날에는 이 또한 이용에 제한이 발생한다.

이에 따라 비가 오는 환경에서도 에너지 수확이 가능토록 하기 위해서는 빗물을 이용하는 에너지 하베스팅 기술의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 빗물을 에너지원으로 이용하기 위한 방법으로 Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스터의 개발을 목표로 한다. Kelvin water dropper는 적은 양의 물과 약간의 물이 떨어지는 낙차가 존재하면 어느 곳이든 정전기 에너지 생산이 가능한 장치로 이를 이용한

에너지 하베스터의 개발로 빛과 바람이 잘 들지 않는 산속과 같은 환경에서도 에너지 수확이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 Kelvin water dropper에서 발생하는 정전기 에너지를 저장하기 위한 방법을 제안하고 물의 양에 따라 커패시터에 저장되는 에너지를 측정 및 분석한다. 또한 Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스터의 효율을 높이기 위해 시도된 두 가지 방법을 소개하고 각각의 방법을 통해 효율의 향상 정도를 알아본다. 마지막으로 에너지 하베스팅을 통해 생산된 에너지가 특정 응용에 이용될 수 있도록 안정적인 출력을 낼 수 있는 전원공급 회로의 도입을 통해 시스템의 유효성을 확인하는 것을 목표로 한다.

1.5 논문의 구성

본 논문의 2 장에서는 먼저 Kelvin water dropper를 수학적으로 모델링하기 위해 Kelvin water dropper를 등가회로로 나타내고 이를 통해 전압상승에 대한 식을 도출한 뒤 식을 바탕으로 이론적인 분석을 수행하여 지양되어야 할 점과 지향해야 할 점을 알아본다. 다음으로 제작된 Kelvin water dropper 가 원활히 동작하기 위해 최적화된 배치를 시뮬레이션과 실험 그리고 이론을 통해 분석한다.

3 장에서는 Paschen의 법칙과 수정된 Paschen 의 법칙을 이론적으로 분석하고 이를 통해 본 연구에서 제안하는 에너지 저장 방법을 두 가지 보인다. 첫 번째 방법으로는 RF MEMS 스위치를 이용한 방법으로 이러한 방법이 수정된 Paschen 의 법칙에 의해 적합하지 않은 방법임을 이론 및 실험을 통해 확인한다. 두 번째 방법은 불꽃 방전 간극을 이용한 에너지 저장 방법으로 제안된 방법의 타당성과 회로의 구성요소를 보인다. 또한 불꽃 방전 간극을 이용한 에너지 저장 방법을 이용하여 물의 양에 따라 저장되는 에너지의 변화량을 측정 및 분석한다. 다음으로 제안된 방법과 2 장에서의 Kelvin water dropper의 이론적 분석을 토대로 전체 시스템의 에너지 저장 효율을 향상시킬 수 있는 방법을 보이고 수식을 통해 결과를 예측하고 실험을 통해 효율 향상 정도를 측정 및 분석한다.

4 장에서는 에너지 저장 회로에 저장된 에너지를 특정 응용에

적합한 일정한 전압을 낼 수 있는 전원 공급 회로를 보이고 출력되는 전압의 파형을 측정 및 분석한다.

마지막으로 5장에서는 본 연구의 결과를 요약하며 논문을 마무리 짓는다.

제 2 장 Kelvin water dropper의 이론적 분석과 구성

2.1 Kelvin water dropper의 원리

Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스팅 시스템을 구성하기 위해서는 먼저 Kelvin water dropper의 이론적 분석이 선행되어야 한다.

그림 2.1 는 제작된 Kelvin water dropper를 보여주며 그림 2.2 는 제작된 Kelvin water dropper를 단순화시킨 모식도이다. 장치는 두 개의 금속 용기와 두 개의 금속 링, 그리고 물방울이 떨어지는 두 개의 노즐을 가진 물 저장소로 구성되어 있다. 여기서 두 개의 금속 용기와 링은 금속 와이어에 의해 교차되어 연결되어 있으며 물의 흐름은 밸브를 통해 조절되어 초당 떨어지는 물방울의 수를 조절할 수 있다.

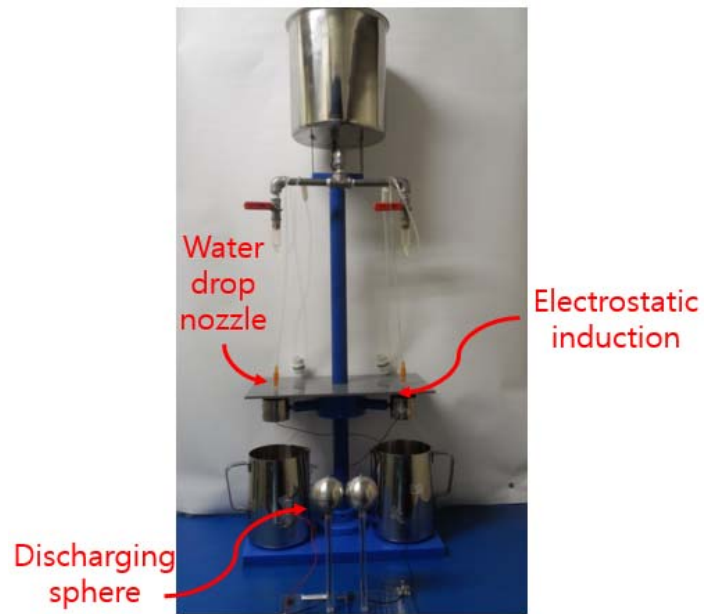


그림 2.1 제작된 Kelvin water dropper

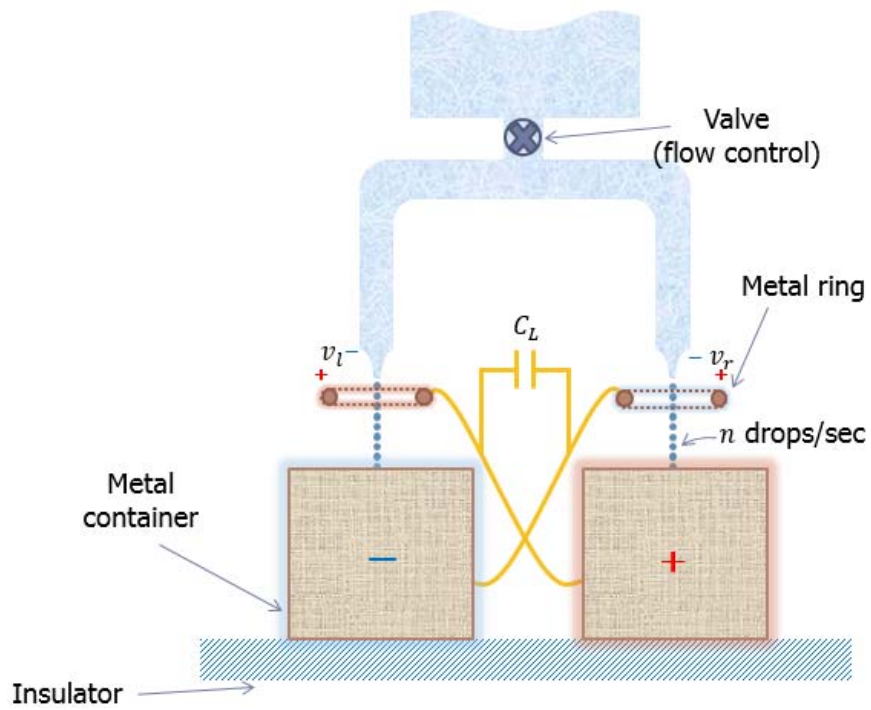


그림 2.2 Kelvin water dropper의 모식도

이 장치는 대지와 절연된 물체가 약간의 전하를 띠는 현상으로부터 시작된다. 가령 오른쪽 금속 용기가 왼쪽 금속 용기에 비해 상대적으로 약간의 +전위를 띤 상태에서 물방울이 떨어지기 시작하면 오른쪽은 금속 용기와 전기적으로 연결된 금속 링에 의해 왼쪽 노즐의 물방울에는 -전하가 유도되고, 그 물방울들은 왼쪽 용기에 떨어져 -전하가 축적되게 된다. 또한 오른쪽 링은 왼쪽 금속 용기와 전기적으로 연결되어 있기 때문에 오른쪽 노즐에서 떨어지는 물방울에는 +전하가 유도되고 오른쪽 금속 용기에 떨어져 더 큰 전위를 갖게 된다. 결과적으로 두 금속 용기 사이의 전위차는 점차 증가하게 된다.

하지만 이러한 설명이 설립되기 위해서는 두 개의 완화시간이 중요한 문제로 존재한다. 바로 물과 공기의 완화시간이다. 먼저 물의 완화시간이 물줄기에서 물방울로 형성되는 시간보다 훨씬 짧아야 한다. 그렇지 않다면 물방울의 전하는 보존되지 않는다. 반면 공기의 완화시간은 물방울이 금속 용기에 도달할 때까지의 시간보다 훨씬 길어야 한다.

설명한 완화시간이 장치의 작동 요건을 충족시킬 경우, Kelvin water dropper는 일반적으로 어떤 외부의 전원 없이 두 금속용기 사이에서 방전구의 거리에 따라 최대 10 ~ 20 kV의 전위차를 얻을 수 있고 특정 전압 차에서 금속 방전구를 통해 쌓인 전하가 불꽃 방전과 함께 방전된다(그림 2.2).



그림 2.3 방전구를 통해 발생된 불꽃 방전

이러한 현상은 Kelvin water dropper를 그림 2.3 와 같은 등가회로로 나타낸 후 이를 수학적 모델로 해석함으로써 수식적으로도 확인 할 수 있다.

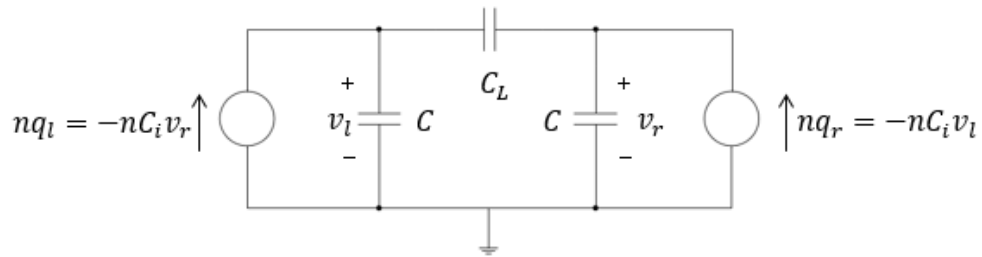


그림 2.4 Kelvin water dropper의 등가회로

실험을 정량적으로 모델링하기 위해 각 물방울에서의 전하는 금속 링의 전압에 비례하여 유도된다고 가정한다. 그에 따른 방정식은 다음과 같다 [17].

$$q_l = -C_i v_r \quad (\text{식 2-1})$$

$$q_r = -C_i v_l \quad (\text{식 2-2})$$

위 식에서 C_i 는 정전 용량 크기의 비례상수이다. 시스템은 그림 2.3의 등가회로에 의해 아래 식과 같이 모델링될 수 있다.

$$-nC_i v_r = C \frac{dv_l}{dt} + C_L \frac{d(v_l - v_r)}{dt} \quad (\text{식 2-3})$$

$$-nC_i v_l = C \frac{dv_r}{dt} + C_L \frac{d(v_r - v_l)}{dt} \quad (\text{식 2-4})$$

각 식은 등가회로의 노드 방정식이며 C 는 접지와 각 금속 용기 사이의 정전 용량을, C_L 은 금속 용기 사이에 존재하는 정전 용량을 의미하며, n 은 노즐을 통해 초당 떨어지는 물방울의 수를 나타낸다. 이 식들은 하나의 2차 미분방정식으로 줄일 수 있으며 두 개의 해가 존재하게 된다. 일반해인 각 금속 용기의 전압은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$v_l = A \exp\left(\frac{nC_i}{C + 2C_L} t\right) + B \exp\left(-\frac{nC_i}{C} t\right) \quad (\text{식 2-5})$$

$$v_r = -A \exp\left(\frac{nC_i}{C + 2C_L} t\right) + B \exp\left(-\frac{nC_i}{C} t\right) \quad (\text{식 2-6})$$

상수 A와 B는 초기 조건에 의해 결정된다. 식을 통해 알 수 있듯이 초기 전압에서의 약간의 불균형은 식의 첫 번째 항을 무한대로 두 번째 항을 0으로 만든다. 실제 실험에서 전압은 두 용기 사이에서 불꽃 방전이 일어나거나 물방울 사이의 반발력에 의해 물방울이 휘어져 금속 링에 닿을 때까지 상승하게 된다.

2.2 Kelvin water dropper의 구성

Kelvin water dropper는 일반적으로 장치 자체의 구조에 의한 내적 요인과 습도와 같은 외적 요인에 의해 어느 정도의 효율변화가 존재한다. 주변 환경에 따라 결정되는 제어하기 힘든 외적 요인과 달리 내적 요인은 Kelvin water dropper 자체 구조물의 설계단계에서 어느 정도 제어가 가능하고 이를 통해 장치의 효율을 향상시키는 것이 가능하다.

앞서 언급하였듯이 전압상승 식은

$$v = A \exp\left(\frac{nC_i}{C + 2C_L} t\right) + B \exp\left(-\frac{nC_i}{C} t\right) \quad (\text{식 2-7})$$

와 같이 나타나는데, 이중 두 개의 금속 용기 사이의 정전 용량 C_L 은 작을수록 같은 시간 동안 전압상승이 빠르게 일어나 장치의 효율 향상을 기대할 수 있다. 이 C_L 을 감소 시키기 위해 실험과 시뮬레이션을 통해 그에 적합한 구조물의 배치를 알아보았다.

실험을 위한 구조물의 배치구조 개략도는 그림 2.4 와 같다. 구조물의 크기는 그림과 같이 고정되어있으며, 금속 링과 금속 용기 사이의 거리 h 만을 변수로 두어 거리에 따른 정전 용량의 변화를 측정하였다. 또한 정전 용량 C_L 을 측정하기 위해 그림 2.5 와 같이 회로를 구성하였다.

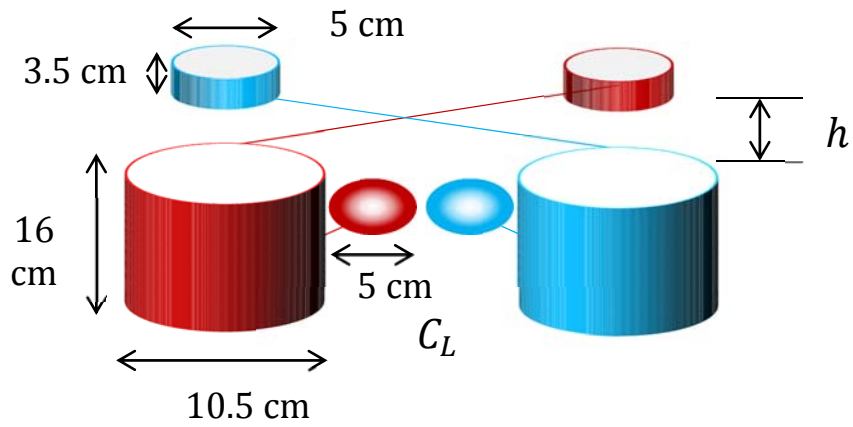


그림 2.5 C_L 측정을 위한 Kelvin water dropper 배치구조

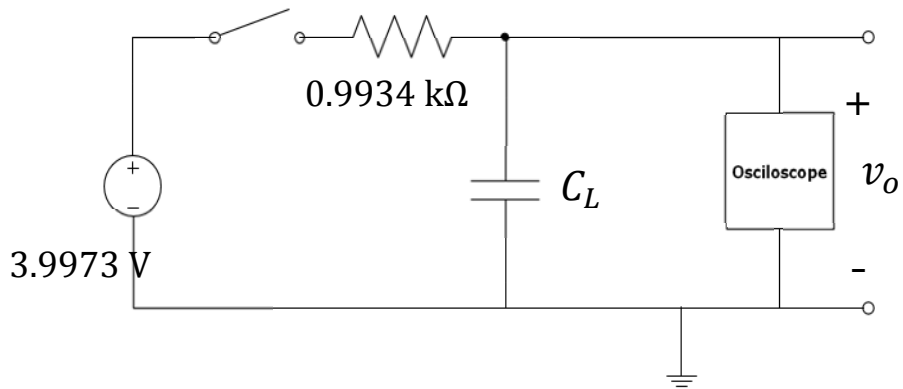


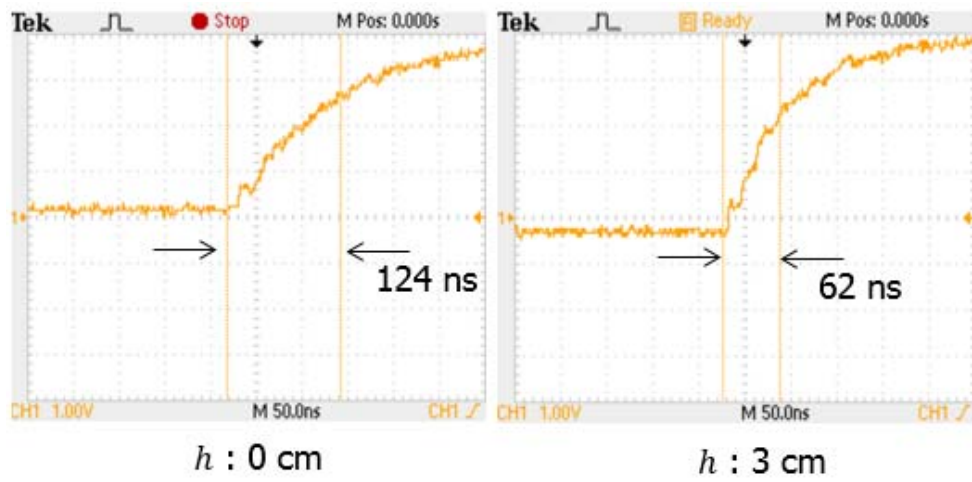
그림 2.6 C_L 측정을 위한 RC 회로

실험을 위해 h 를 0 ~ 9 cm 범위 내에서 3 cm 씩 늘려가며 실험을 진행하였다. 정전 용량을 측정하는 방법은 RC 회로를 구성하여 스위치를 닫았을 경우 오실로스코프에 입력 전압의 63.2 %에 도달하기까지의 시간인 시정수 τ 를 측정한 후 아래 식을 통해 C_L 을 구할 수 있다.

$$\tau = R(C_L + C_{osc}) \quad (\text{식 2-8})$$

$$C_L = \frac{\tau}{R} - C_{osc} \quad (\text{식 2-9})$$

식에서 R 은 0.9934 k Ω 이며 오실로스코프의 내부 정전 용량 C_{osc} 은 20 pF 이다. 오실로스코프를 통해 측정된 시정수 τ 를 그림 2.6 을 통해 확인할 수 있다. 또한 시정수 측정을 통해 얻은 C_L 결과 값을 표 2.1과 같이 정리하였다.



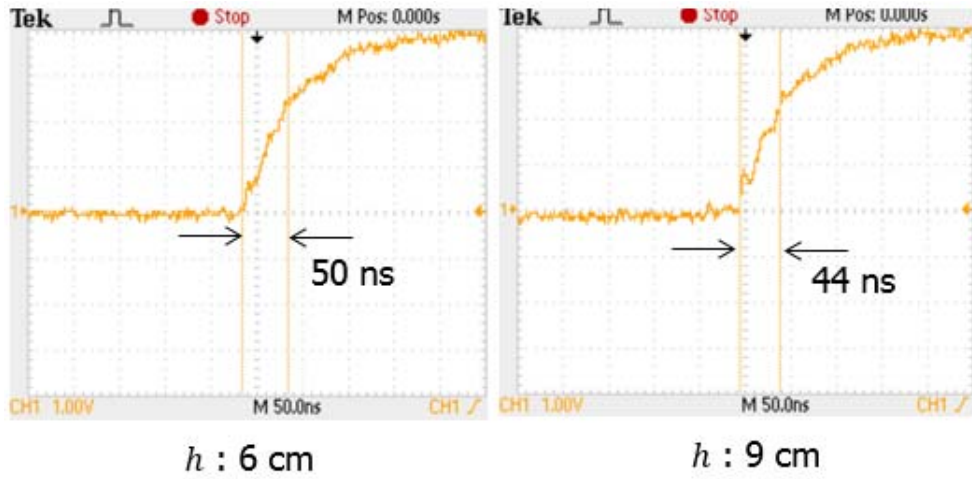


그림 2.7 시정수 측정 결과

표 2.1 실험을 통해 측정된 h 의 변화에 따른 C_L 의 변화

h	τ	C_L
0 cm	$122 \pm 20 \text{ ns}$	$102 \pm 20 \text{ pF}$
3 cm	$65 \pm 3 \text{ ns}$	$45 \pm 3 \text{ pF}$
6 cm	$52 \pm 6 \text{ ns}$	$32 \pm 6 \text{ pF}$
9 cm	$43 \pm 1 \text{ ns}$	$23 \pm 1 \text{ pF}$

다음으로 Altsoft 社의 시뮬레이션 툴인 COMSOL를 통하여 실험과 마찬가지로 금속 링과 금속 용기 사이의 거리 h 에 따른 정전용량 C_L 의 변화를 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 그림 2.7 와 표 2.2는 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

표 2.2 시뮬레이션을 통해 측정된 h 의 변화에 따른 C_L 의 변화

h	C_L
0 cm	89.9806 pF
3 cm	19.5400 pF
6 cm	15.1846 pF
9 cm	12.4247 pF

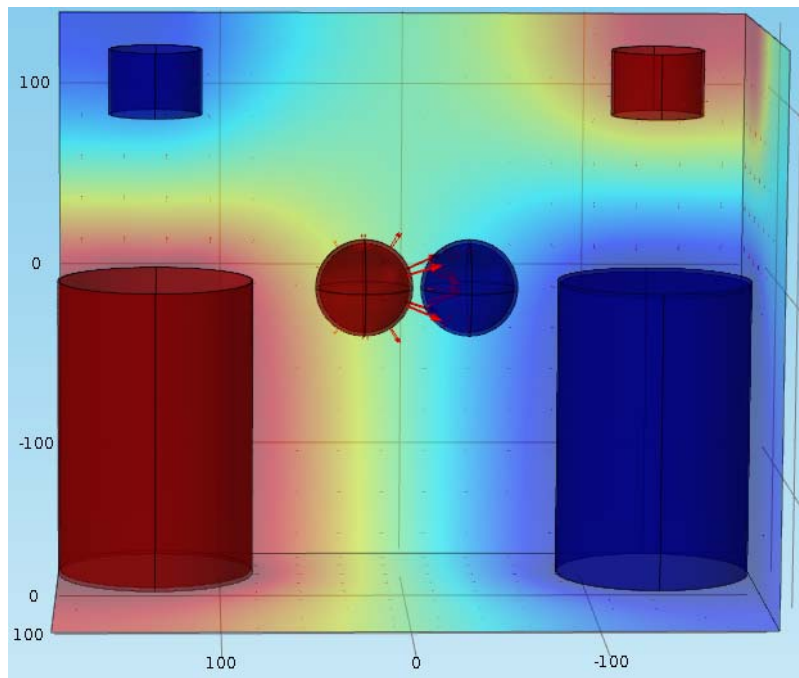


그림 2.8 C_L 변화에 대한 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과와 실험 결과를 그래프로 그림 2.8 를 통해 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 정전용량은 3 cm 이상의 거리에서 급격히 떨어지고 이후 9 cm 까지는 떨어지는 폭이 완만하다. 정전용량은 작을수록 효율적인 측면에서 장점을 가지나 정전용량을

줄이기 위해 h 를 너무 크게 하게 될 경우 장치의 크기도 커질 뿐 아니라 큰 전압에서는 물방울 사이의 반발력에 의해 물방울이 용기를 벗어날 수 있으므로 용기와 노즐 사이의 거리가 너무 먼 것도 효율을 떨어트릴 수 있으므로 실험결과와 시뮬레이션 결과를 토대로 장치의 h 를 3 cm로 설정하였다.

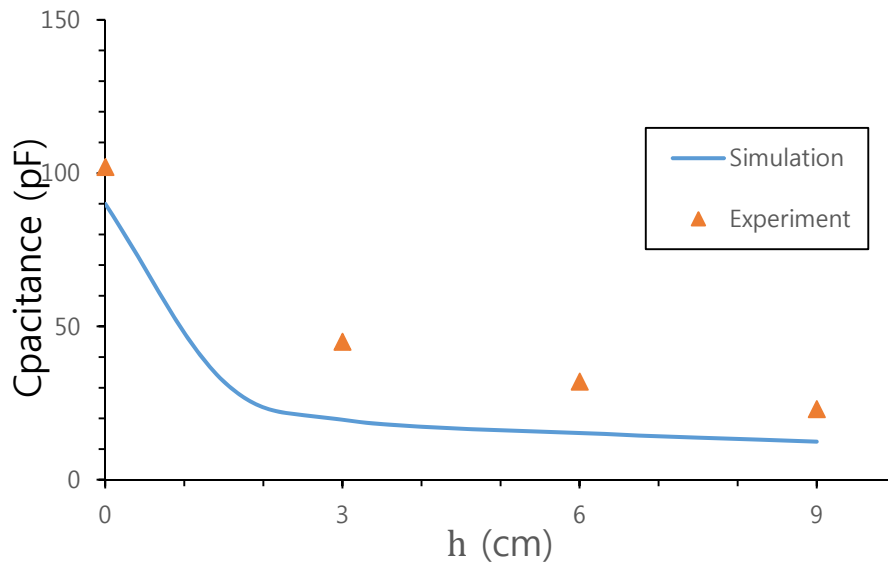


그림 2.9 실험과 시뮬레이션을 통해 측정된 h 에 따른 C_L

제 3 장 정전기 에너지를 저장하기 위한 에너지

저장회로의 설계와 제작

3.1 Paschen곡선에 의한 공기의 절연파괴 전압

3.1.1 Paschen의 법칙

높은 전압에 의해 불꽃방전을 일으키는 Kelvin water dropper를 에너지 하베스팅에 이용하기 위해서는 공기의 절연파괴 전압을 결정하는 Paschen의 법칙에 대한 이해가 필요하다.

기체에 전압이 인가되면 전자들은 전기장에 가속되어 에너지를 얻게 되고 중성 기체와 충돌하여 에너지를 잃게 된다. 처음에는 전자의 에너지가 원자나 분자를 이온화시키거나 들뜬 상태로 만들기에 충분치 않아 전자들은 탄성 충돌만 하게 된다. 원자나 분자와의 탄성 충돌로 전자가 잃게 되는 에너지의 비율은 $2m_e/M$ 정도이며, M 은 원자나 분자의 질량이다. 전자의 질량이 원자나 분자에 비해 매우 작으므로 이러한 탄성 충돌로는 전체 에너지의 극히 일부분만 잃는다. 하지만 전기장을 통해 전자의 에너지가 이온화 에너지 정도나 여기 에너지 정도로 충분하게 되면 기체 분자와 비탄성 충돌을 할 수 있게 된다. 비탄성 충돌을 하게 되면 대부분의 전자 에너지는 기체를 이온화시키거나 쪼개거나, 들뜬 상태로 만드는 데 사용된다. 이렇게

이온화로 만들어진 전자들은 다시 전기장에 의해 가속되고, 기체 분자와 충돌하여 기체 분자들을 또 이온화시킨다. 이렇게 해서 전자의 수가 기하급수적으로 증가하게 되는 것이다.

전기장을 통해 전자의 에너지가 이온화 에너지 정도나 여기에너지 정도로 충분하게 되면 기체 분자와 비탄성 충돌을 할 수 있게 되며, 비탄성 충돌을 하게 되면 대부분의 전자 에너지는 기체를 이온화시키거나 쪼개거나, 들뜬 상태로 만드는데 사용된다. 이렇게 이온화로 만들어진 전자들은 다시 전기장에 의해 가속되고, 기체 분자와 충돌하여 기체 분자들을 또 이온화시킨다. 이렇게 해서 전자의 수가 기하급수적으로 증가하게 된다. 타운센드(Townsend)는 이러한 과정을 α 과정이라고 했고, 이온이 음극을 때릴 때 이차 전자가 나오는 것을 γ 과정이라고 명명했다. 그림 3.1 과 그림 3.2 에 이와 같은 과정을 표현하였다 [18, 19].

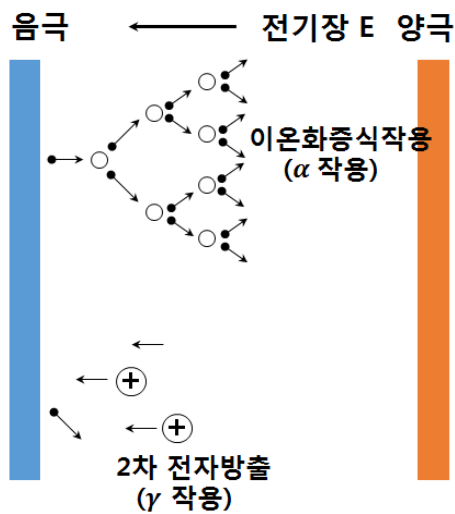


그림 3.1 전자 증식작용

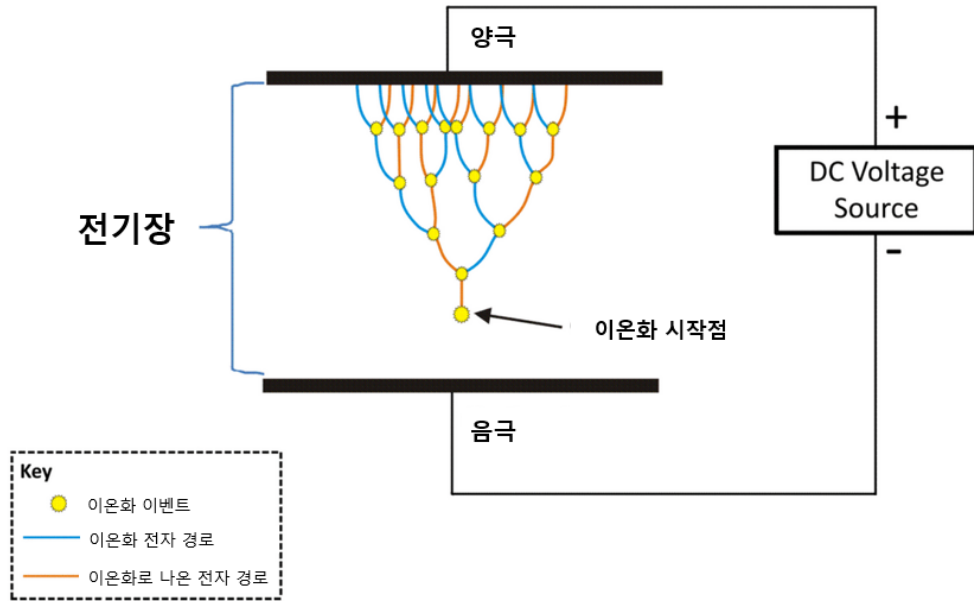


그림 3.2 전자사태

단위 길이당 전자의 이온화 횟수를 α 계수라고 하면 실험을 통해 다음과 같이 주어진다고 알려져 있다.

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-C \frac{p}{E}\right) \quad \text{for } 100 < E < 600 \text{ V/cm} \quad (\text{식 3-1})$$

여기서 p 는 기체의 압력, E 는 전기장, A 와 C 는 기체 고유 상수를 나타낸다.

한편 이차 전자 방출계수 γ 는 다음과 같이 정의되고, 이 계수는 음극 물질에 따라 달라진다.

$$\gamma = \frac{\text{방출된 전자 개수}}{\text{입사한 이온의 개수}} \quad (\text{식 3-2})$$

Paschen의 법칙은 이 α , γ 두 가지 과정을 적용하여 유도할 수 있다. 먼저 전자는 전기장에 의해 음극(cathode)에서부터 가속되고 중성기체들은 이온화시킨다. 이때 전기장 반대 방향을 따라 양극에 도달하는 전자의 선속은 다음과 같다.

$$\Gamma_{ea} = (\Gamma_{e0} + \Gamma_{es}) \exp(\alpha d) \quad (\text{식 3-3})$$

Γ_{e0} 는 배경(background) 이온화로 생긴 음극에서의 전자 선속이고, Γ_{es} 는 이차 전자에 의한 전자 선속이다. 음극과 양극 사이에서 전자와 이온이 동일하게 만들어지기 때문에, 음극에 도달하는 이온 선속 Γ_{ic} 는 다음과 같다.

$$\Gamma_{ic} = \Gamma_{ea} - (\Gamma_{e0} + \Gamma_{es}) \quad (\text{식 3-4})$$

이차 전자 선속은 $\Gamma_{ea} = \gamma \Gamma_{ic}$ 이므로 위 식을 Γ_{ea} 에 대해 풀면 식 (3-5)과 같이 되며 이것을 다시 (3-3) 식에 대입하면 식(3-6)과 같이 나타난다.

$$\Gamma_{ea} = \frac{\gamma}{1 + \gamma} (\Gamma_{ea} - \Gamma_{e0}) \quad (\text{식 3-5})$$

$$\Gamma_{ea} = \Gamma_{e0} \frac{\exp(\alpha d)}{1 - \gamma \{\exp(\alpha d) - 1\}} \quad (\text{식 3-6})$$

선속에 전하량을 곱하면 전류 밀도가 되는데, 분모가 영이 되는

경우는 전류가 무한대가 되는 조건, 즉 방전 개시점이라고 한다. 분모가 영이 되는 조건은 (3-7)식과 같으며, 이 식에 로그를 두 번 취하면 식 (3-8)과 같이 된다.

$$\exp(\alpha d) = 1 + \frac{1}{\gamma} \quad (\text{식 3-7})$$

$$\ln \alpha + \ln d = \ln \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (\text{식 3-8})$$

또한 (3-1)식에서 $E = \frac{V}{d}$ 로 놓고 α 에 대한 식에서 양변에 로그를 취하면 아래 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\ln \alpha - \ln p = \ln A - Cp \frac{d}{V} \quad (\text{식 3-9})$$

식 (3-8)와 (3-9)를 통해 $\ln \alpha$ 를 소거하고, 이때의 전압을 방전 전압 V_B 로 놓고 이에 대해서 정리하면 최종적으로 다음과 같은 식으로 정리될 수 있다.

$$V_B = \frac{Cpd}{K_0 + \ln(pd)} \quad (\text{식 3-10})$$

여기서 $K_0 = \ln A - \ln \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$ 이며, 위 식으로부터 방전 전압이 극판 간격과 압력의 곱, 즉 pd 만의 함수임을 알 수 있다. 이 식이 익히 알려진 Paschen의 법칙으로 방전 개시 전압이 균일한 전계 하에서는

압력과 전극 간극의 곱의 함수가 됨을 나타낸다.

pd 의 변화에 따른 방전 전압 V_B 의 그래프를 그림 3.3를 통해 확인 할 수 있고 이 그래프를 Paschen 곡선이라고 한다. 일반적인 대기압에서 최소 방전 전압은 327 V이며 최소 방전 전압을 기준으로 큰 pd 에서는 방전 전압이 pd 에 거의 비례하고, 작은 pd 에서는 $\ln pd \approx \ln[\ln 1 + \frac{1}{\gamma_{se}}] - \ln A$ 되어 분모가 거의 영에 가까워져서 방전 전압이 매우 높아진다 [20, 21].

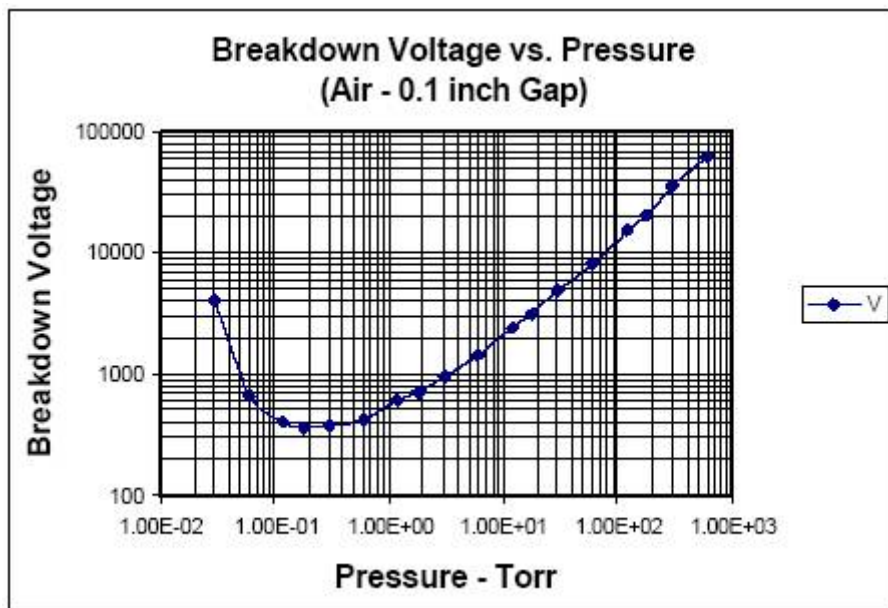


그림 3.3 압력과 전극 간격의 곱의 값에 따른 절연파괴 전압

3.1.2 수정된 Paschen의 법칙

일반적인 Paschen의 법칙에서는 전극 사이의 간격이 짧거나 압력이 낮으면 음극으로부터 방출된 이차 전자의 대부분이 이온화 충돌을 하기가 어렵다. 그 결과 이차 전자를 충분히 만들 수 있는 이온이 생성되지 않아 방전 전압이 매우 크다. 한편 압력이 높으면 너무 잦은 충돌로 전자가 이온화 에너지 이상의 에너지를 얻을 수 없게 된다. 따라서 더 큰 전압 또는 전기장이 필요하게 된다.

하지만 대기압에서 10 μm 이하의 마이크로 크기의 전극 간격에서는 상황이 달라진다. 아주 작은 전극 간격에서는 α , γ 과정이 아닌 음극으로부터의 전자 전계 방출에 의한 제 3의 전자 생산 과정이 발생한다. 이로 인해 그림 3.4 와 같이 전극 간격이 감소함에 따라 거의 선형적으로 방전 개시 전압 또한 감소하는 현상이 발생한다 [22].

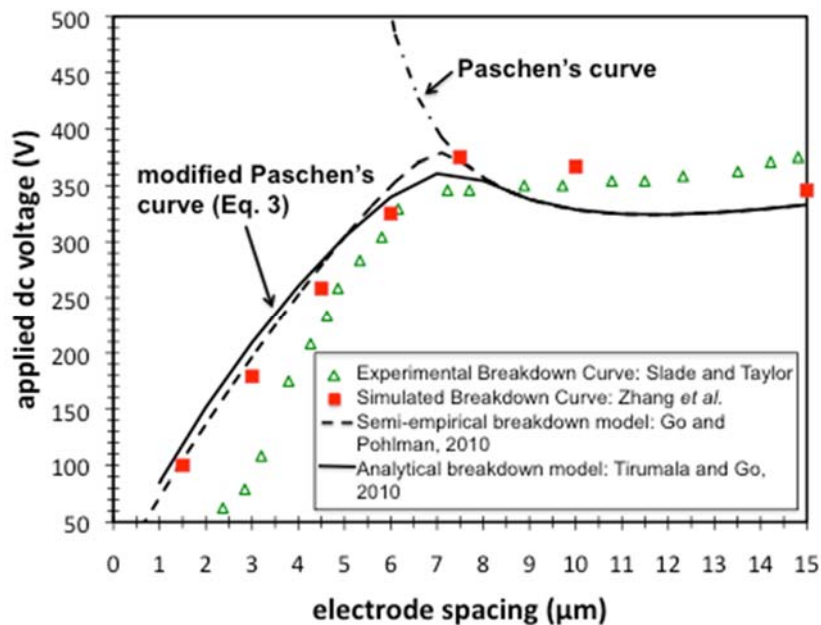


그림 3.4 수정된 Paschen의 절연파괴 곡선

Schaffert는 수정된 Paschen 곡선에서는 세가지 영역이 존재함을 제시하였다. 간격이 $2\ \mu\text{m}$ 이하에서는 전계 방출에 의한 선형 영역이 존재하며 $2\ \mu\text{m}$ 에서 $5\ \mu\text{m}$ 사이에서는 과도 영역으로 방전 전압이 거의 일정하며 마지막으로 $5\ \mu\text{m}$ 이상에서는 이상적인 Paschen의 곡선을 따르는 영역임을 주장하였다 [23].

3.2 에너지 저장회로의 설계

3.2.1 MEMS switch를 이용한 에너지 저장회로

일반적으로 정전 구동형 RF MEMS 스위치는 설계된 Pull-in 전압에 도달하면 스위치는 정전 인력에 의해 구동되어 두 지점이 연결되게 된다. 이러한 MEMS 스위치의 특성을 이용하여 Kelvin water dropper의 전압이 Pull-in 전압 이상 상승하면 MEMS 스위치가 구동되어 Kelvin water dropper에서 발생된 에너지를 에너지 저장 커패시터에 전달하는 회로를 그림 3.5 와 같이 설계하였다.

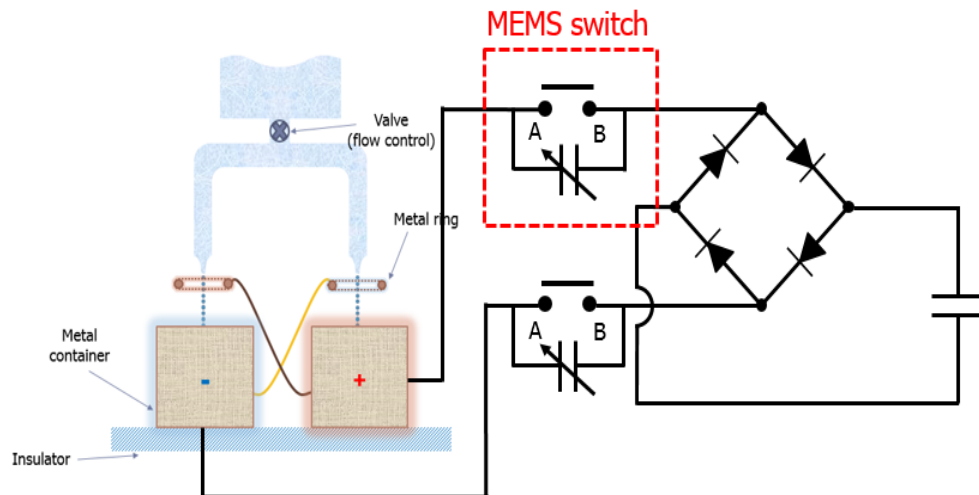


그림 3.5 MEMS 스위치를 이용한 에너지 저장회로

초기 상태에서 MEMS 스위치의 A, B 단자는 분리되어 있어 에너지를 저장하는 저장 커패시터와 Kelvin water dropper는 물리적으로 분리되어있다. Kelvin water dropper의 전압이 상승하기 시작하여 MEMS 스위치의 Pull-in 전압에 도달하면 스위치는 구동되어

A, B 단자가 연결되어 Kelvin water dropper에서 발생한 전하들이 저장 커패시터로 이동하여 축적되게 된다. 전하의 이동으로 Kelvin water dropper는 전압의 감소가 발생하고 Release 전압 아래로 떨어지면 다시 A, B 단자는 분리되어 Kelvin water dropper의 전압 상승이 시작된다. 이러한 일련의 과정이 물이 다 소모될 때까지 반복되어 진행된다.

그러나 일반적인 상용 RF MEMS 스위치는 수십 V의 구동전압을 가지고 있고 Kelvin water dropper는 장치가 작동하지 않는 초기상태에서도 쉽게 수십 V의 초기 전압이 존재하는 경우가 많기 때문에 시스템의 원활한 동작이 이루어 지지 않는다. 뿐만 아니라 MEMS 스위치는 고전압의 정전기에 약하여 스위치에 손상을 입기 쉽고 점착 문제도 빈번히 발생하여 고전압을 발생시키는 Kelvin water dropper에 적합하지 않다.

무엇보다 가장 큰 문제는 효율상의 문제이다. 위와 같은 문제들을 해결하기 위해 큰 구동 전압을 가지는 MEMS 스위치를 제작할 경우 Pull-in 전압은 200 V를 넘을 수 없다. 200 V 이상의 구동전압을 가질 경우 그림 3.6의 수정된 Paschen의 법칙에 의해 상하부 전극 사이에 불꽃 방전이 발생하여 소자가 망가지는 원인이 되기 때문이다.

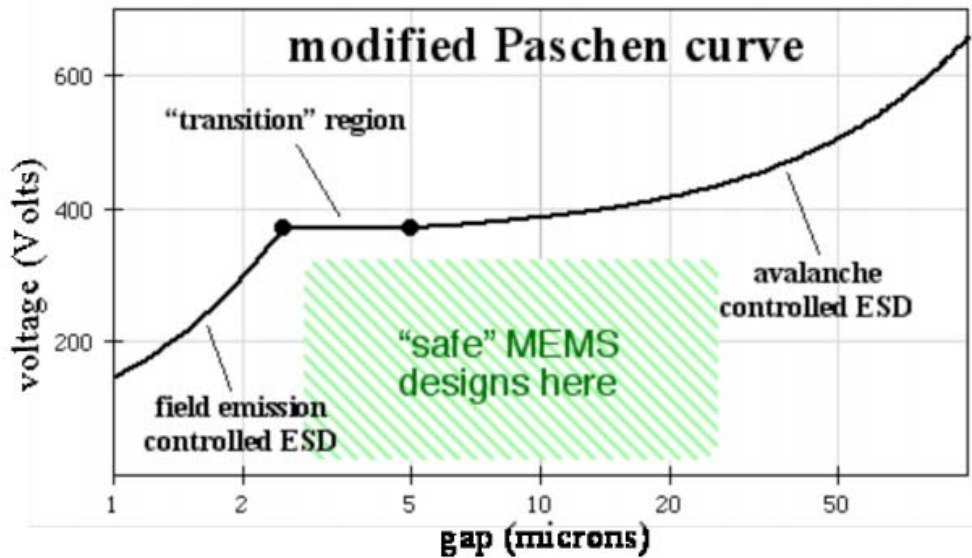


그림 3.6 수정된 Paschen 곡선에 의한 안전한 MEMS 설계 영역

따라서 필연적으로 Kelvin water dropper 장치는 0~200 V 사이에서 전압의 상승과 하강을 반복하게 된다. 전형적인 Kelvin water dropp의 전압 상승 그래프인 그림 3.7 을 통해 알 수 있듯이 전압은 지수함수적으로 상승하기 때문에 낮은 전압에서는 물방울 하나에 유도되는 전하가 작아 효율이 떨어지고, 높은 전압에서는 물방울 하나당 유도되는 전하가 커서 효율이 높아진다. 그러므로 MEMS 스위치를 이용하여 Kelvin water dropper에서 발생하는 에너지를 100 % 에너지 저장 장치에 전달하여도 저장되는 에너지는 미비하기 때문에 좀 더 높은 효율을 가지는 에너지 저장방법이 필요하다.

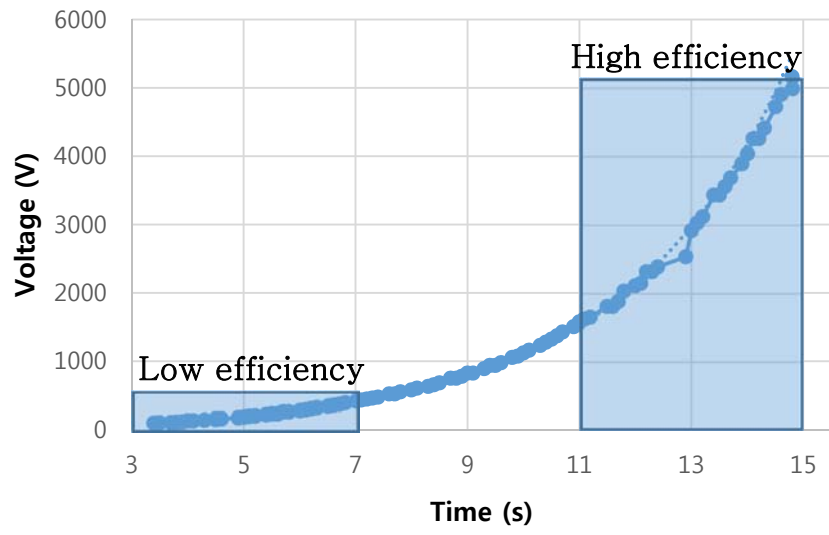


그림 3.7 Kelvin water dropper의 전압 상승 곡선

3.2.2 불꽃 방전 간극을 이용한 에너지 저장회로

앞서 설명한 바와 같이 Kelvin water dropper에서 발생하는 정전기는 전압은 높지만 전하량이 적기 때문에 정전기를 포획하여 에너지를 저장하기란 쉽지 않다.

만약 발생하는 정전기를 커패시터에 저장하기 위해 두 금속 용기 사이에 μF 크기 커패시터를 연결한다고 가정할 경우 C_L 의 크기가 매우 커져 전압상승식인 식(4-2)의 지수함수의 분모가 0에 수렴하여 장치가 작동하지 않는 문제가 발생한다. 따라서 이러한 문제를 해결하고자 커패시터가 존재하는 에너지 저장회로와 Kelvin water dropper를 약간의 간격을 두고 물리적으로 분리시켜 정상적으로 작동하도록 구성하였다. 이렇게 회로와 장치 사이에 간격을 둘 경우 전압이 어느 정도 상승한 후 거리에 따른 공기의 절연과외 전압에 도달하면 불꽃 방전과 함께 순간적으로 단락상태가 되고 용기에 있던 전하들이 커패시터로 이동하여 에너지가 저장되게 된다.

설명한 개념을 바탕으로 그림 3.8 과 같이 에너지 저장회로를 구성한다.

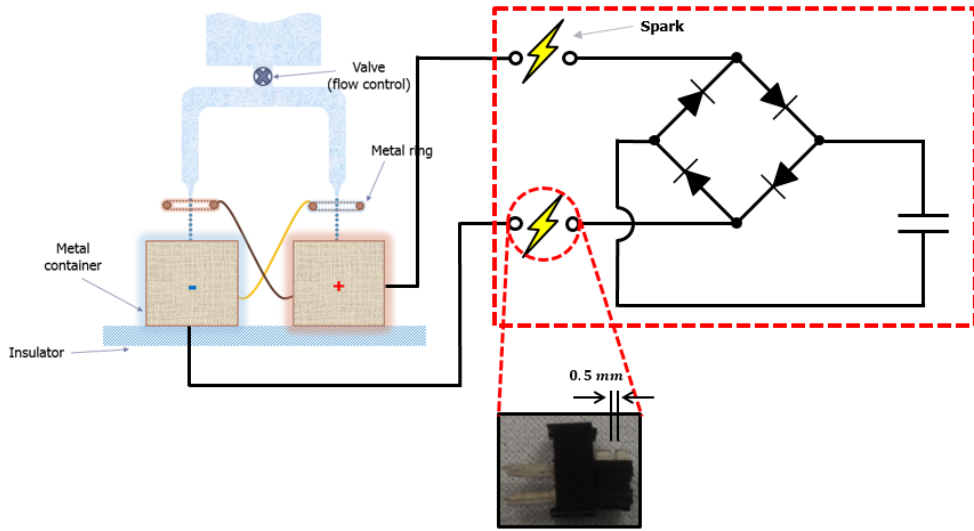


그림 3.8 불꽃 방전 간극을 이용한 에너지 저장회로

에너지가 저장되는 커패시터 앞단에는 금속 용기의 초기 전하에 따라 +, - 극성이 되는 Kelvin water dropper의 특성을 고려하여 브리지 정류회로를 구성하였다. 또한 전하량이 적기 때문에 누설되는 전하를 최소화하기 위해 매우 낮은 누설량을 가지는 FJH1100 다이오드를 사용하였다. 제작된 실제 저장 회로는 그림 3.9 를 통해 확인할 수 있다.

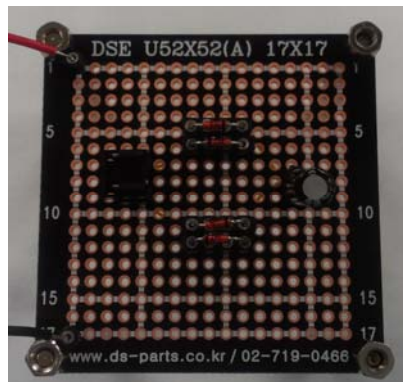


그림 3.9 제작된 에너지 저장회로

Kelvin water dropper와 에너지 저장회로 사이의 물리적 간격은 0.5 mm로 두었으며 물의 양에 따라 커패시터에 저장되는 에너지의 양의 정량적으로 분석하기 위해서 각 노즐에서는 5.1 ml/s 의 속도로 물방울을 떨어트렸으며 사용된 커패시터는 1 μF 의 전해 커패시터이다.

그림 3.10 은 제작한 에너지 저장회로를 이용하여 Kelvin water dropper에 사용된 물의 양에 따라 커패시터에 저장된 에너지를 나타내는 그래프이다. 또한 표 3.1 에 물의 양에 따라 저장되는 에너지의 평균과 분산을 나타내었다.

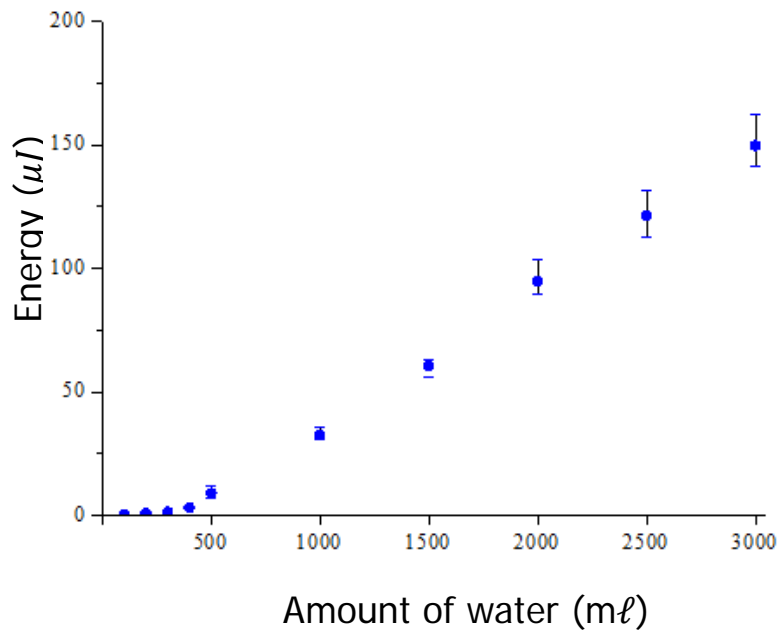


그림 3.10 물의 양에 따른 에너지 충전 양

표 3.1 저장된 에너지의 평균 및 분산

Water (mℓ)	Mean of stored energy (μJ)	Standard deviation
500	8.89	2.35
1000	32.56	1.96
1500	60.52	2.39
2000	94.84	5.93
2500	121.26	7.46
3000	149.75	8.71

실험결과를 통해 리터당 39.4 μJ 의 에너지가 커패시터에 저장되는 것을 확인할 수 있었으며 전력밀도는 16.75 pW/cm³로 나타났다. 다만 물의 양이 적을 경우에는 리터당 충전되는 에너지가 훨씬 적는데 이는 초기 전압상승 시간으로 인한 안정화 시간이 큰 부분을 차지하기 때문인 것으로 판단된다. 실제 리터당 저장되는 물의 양이 500 ml 에서는 17.78 μJ/l , 1000 ml 에서는 32.56 μJ/l , 1500 ml 에서는 40.35 μJ/l , 2000 ml 에서는 47.42 μJ/l , 2500 ml 에서는 48.50 μJ/l 그리고 3000 ml 에서는 49.92 μJ/l 로 나타났다. 이는 그림 3.11 를 통해 다시 나타내었다.

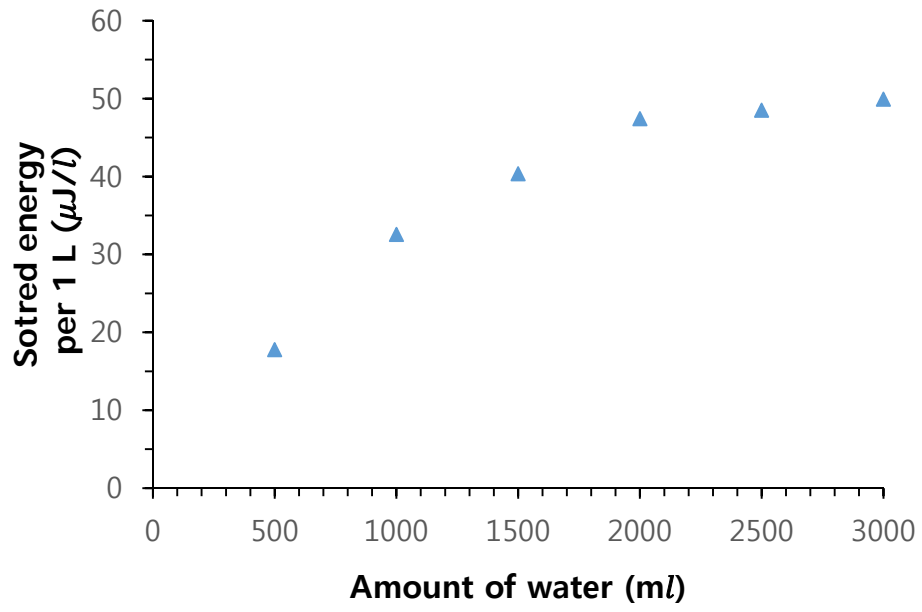


그림 3.11 물의 양에 따른 리터당 저장된 에너지

제 4 장 시스템의 효율 향상 방법과

전원공급 회로의 제작

4.1 시스템 효율 향상 방법

4.1.1 불꽃 방전 간극

앞서 식 (2-7)을 통해 확인하였듯이 시간이 지남에 따라 전압은 지수함수적으로 증가하기 때문에 방전이 일어나기 전까지는 Kelvin water dropper의 정전기 발생 효율이 급격히 증가한다. 따라서 에너지 저장을 위해 Kelvin water dropper와 에너지 저장 회로 사이에 둔 물리적 간격을 조절하여 불꽃 방전 전압을 늘림으로써 시스템 전체의 하베스팅 효율을 증가시킬 수 있을 것임을 예상하는 것이 가능하다. 이러한 예상은 수식적인 해석을 통해 확인할 수 있다.

앞서 제작한 에너지 저장 회로를 통해 하베스팅을 할 경우 Kelvin water dropper의 시간에 따른 전압은 그림 4.1 과 같은 형태를 보인다.

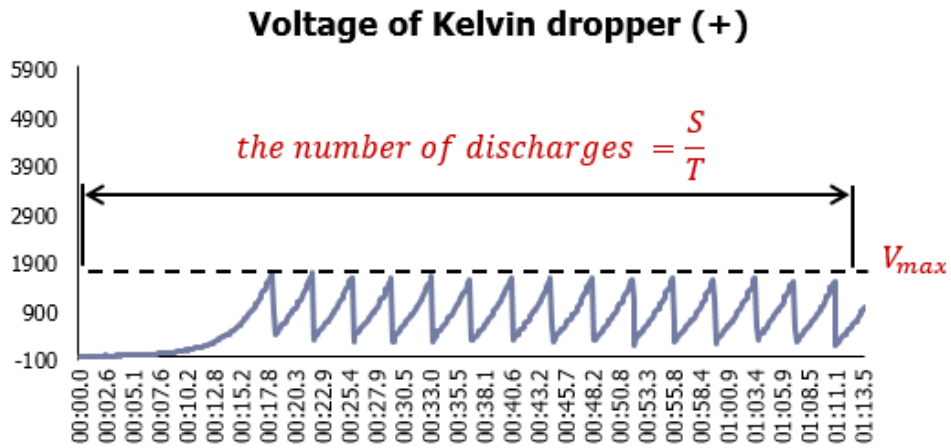


그림 4.1 Kelvin water dropper의 시간에 따른 전압 변화

모든 물이 떨어지는 시간을 S , 불꽃 방전의 주기가 T 라면 총 방전 횟수는 $\frac{S}{T}$ 가 된다. 불꽃 방전 개시 전압이 $V_{max} = V_B$ 이고, 불꽃 방전이 발생하는 간격 사이의 정전용량이 C_X 라면 결과적으로 전체 시간 동안 발생하는 에너지는 다음과 같게 된다.

$$W_T = \frac{S}{T} C_X V_{max}^2 \quad (\text{식 4-1})$$

불꽃 방전 개시 전압 V_{max} 는 불꽃 방전의 주기와 식 (4-2)와 같은 관계를 가지며, 주기 T 에 대해 정리하면 식 (4-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{max} \propto A \exp\left(\frac{nC_i}{C+2C_L} T\right) \quad (\text{식 4-2})$$

$$T \propto \frac{C + 2C_L}{nC_i} \ln \frac{V_{max}}{A} \quad (\text{식 4-3})$$

따라서 식 (4-3)를 식 (4-1)에 대입하면 발생된 에너지와 불꽃 방전 전압 사이에 다음과 같은 비례식을 확인할 수 있다.

$$W_T \propto \frac{SnC_i}{(C + 2C_L) \ln \frac{V_{max}}{A}} C_X V_{max}^2 \quad (\text{식 4-4})$$

앞서 Paschen의 법칙에 관한 설명에서 확인하였듯이 최소 방전 개시 전압 327 V 이상의 큰 pd 에서는 방전 전압이 pd 에 거의 비례하고, 기체의 압력 p 는 고정되어 있으므로 최종적으로 W_T 는 불꽃 방전이 일어나는 극판 사이의 거리 d 와 식 (4-5)와 같은 관계를 가지게 됨을 알 수 있다.

$$W_T \propto \frac{d^2}{\ln d} \quad (\text{식 4-5})$$

이러한 이론적 분석을 바탕으로 거리 d 를 증가시키면서 그에 따른 에너지 발생 효율의 정도를 실험을 통해 알아보았다. 실험은 표 4.1 의 조건에서 수행되었다.

표 4.1 d 의 영향을 알아보기 위한 실험조건

물의 양	각 노즐의 초당 물 흐름	저장 커패시터의 정전용량	C_X	습도
1 ℓ	5,1 ml/s	1 μ F	3.36 pF	50 \pm 0.3 %

먼저 $d = 0.5 \text{ mm}$ 일 때의 시간에 따른 전압 변화는 그림 4.2 과 같다.

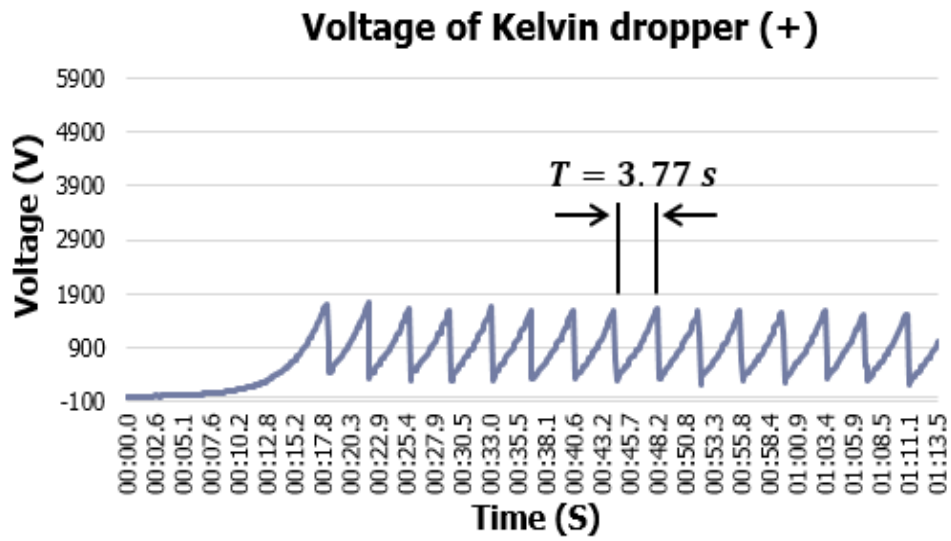


그림 4.2 $d = 0.5 \text{ mm}$ 일 때의 전압 변화

불꽃 방전의 주기는 3.77 초로 측정되었으며, 평균 방전 개시 전압은 1608 V 그리고 1 L 의 물을 떨어트린 경우 커패시터에 충전된 에너지는 $32.56 \mu\text{J}$, 전력밀도는 13.84 pW/cm^3 임이 확인되었다. 충전된 에너지를 측정하기 위해 저장 커패시터가 방전되는 파형을 측정하여 최대 전압으로부터 저장된 에너지를 도출하였다. (그림 4.3)

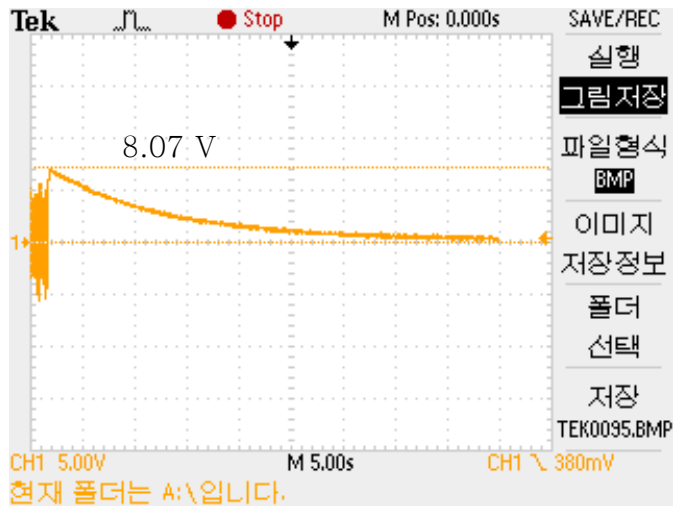


그림 4.3 $d = 0.5 \text{ mm}$ 일 때 저장된 에너지의 방전 그래프

$d = 1.75 \text{ mm}$ 로 3.5배 만큼 불꽃 방전이 발생하는 거리를 증가시킨 후 다른 조건은 동일하게 유지한 채 실험을 진행하였다. 결과는 그림 4.4 을 통해 확인할 수 있다.

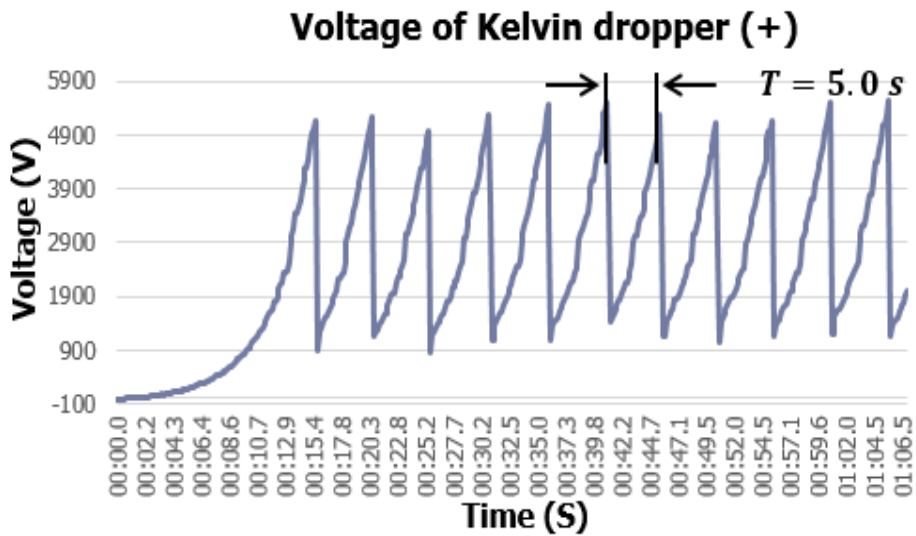


그림 4.4 $d = 1.75 \text{ mm}$ 일 때의 전압 변화

d 를 증가시킨 결과 방전 주기는 5.0 초로 증가되었으나 평균 방전 개시 전압은 5286 V로 증가하였고, 결과적으로 커패시터에 저장된 에너지는 $41.41 \mu\text{J}$, 전력밀도는 $17.61 \text{ pW}/\text{cm}^3$ 로 증가하였다. 저장된 에너지는 그림 4.5 에 나타난 커패시터의 방전 파형을 통해 도출하였다.

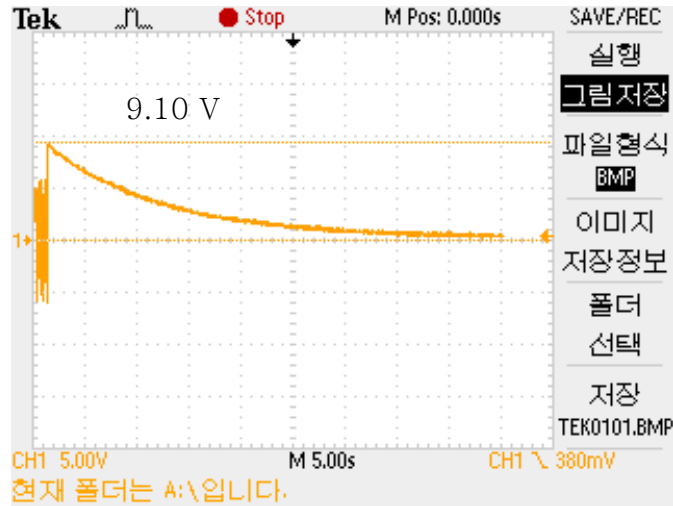


그림 4.5 $d = 1.75 \text{ mm}$ 일 때 저장된 에너지의 방전 그래프

이러한 결과들을 표 4.2에 정리하였다.

표 4.2 $d=0.5, d = 1.75$ 에서의 에너지 저장 효율

d (mm)	T (s)	$V_{max}(V)$	S/T	$W_T(\mu\text{J})$	$W(\mu\text{J})$	Efficiency(%)
0.5	3.77	1608	22	191.2	32.56	17.03
1.75	5.0	5286	19	1828.1	41.41	2.33

표 4.2 에서 W_T 는 Kelvin water dropper에서 발생하는 에너지의 양으로 d 를 0.5 mm에서 1.75 mm로 증가시켰을 경우 발생하는

에너지는 약 9.56배 증가하였다. 그러나 실제 커패시터에 저장된 에너지 W 는 $32.57 \mu\text{J}$ 에서 $41.41 \mu\text{J}$ 로 약 1.27배 증가하는 데 그쳤는데 이는 불꽃 방전의 세기가 증가함에 따라 빛과 소리에 의한 에너지 손실 역시 커져 에너지 저장효율이 감소한 것이 원인으로 해석된다. 0.5 mm 의 방전 간극에서는 17.03 %의 효율을 보인 반면 1.75 mm 의 방전 간극에서는 2.33 % 로 감소하였다. 그러나 방전 간극 d 가 증가함에 따라 시스템의 효율이 다소간 증가함을 확인할 수 있다.

실험 결과의 세분화를 위해 방전 간극 조절장치를 그림 4.6 과 같이 제작하여 d 를 0.5 mm 에서 3 mm 까지 0.25 mm 간격으로 조절하여 그에 따라 저장되는 에너지의 변화를 살펴보았다.



그림 4.6 방전 간극 조절장치

실험은 각 방전 간극 별로 3회씩 진행하였다. 방전 간극 d 가 증가함에 따라 저장되는 에너지 또한 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향을 그림 4.7 과 같이 나타내었는데, 방전 간극 사이의 거리가 3 mm 를 넘어서는 순간 저장되는 에너지는 오히려 감소하는 현상이 발견되었다. 이는 Kelvin water dropper의 방전 전압이 너무 높아져 물방울 사이의 반발력이 강해지고 이로 인해 많은 물방울들이 금속 용기를 벗어나 손실되기 때문이다. 이러한 실험결과를 바탕으로 효율 향상을 위한 방전 간극은 3 mm 를 초과하지 않는 범위 내에서 증가시키는 것이 바람직하다.

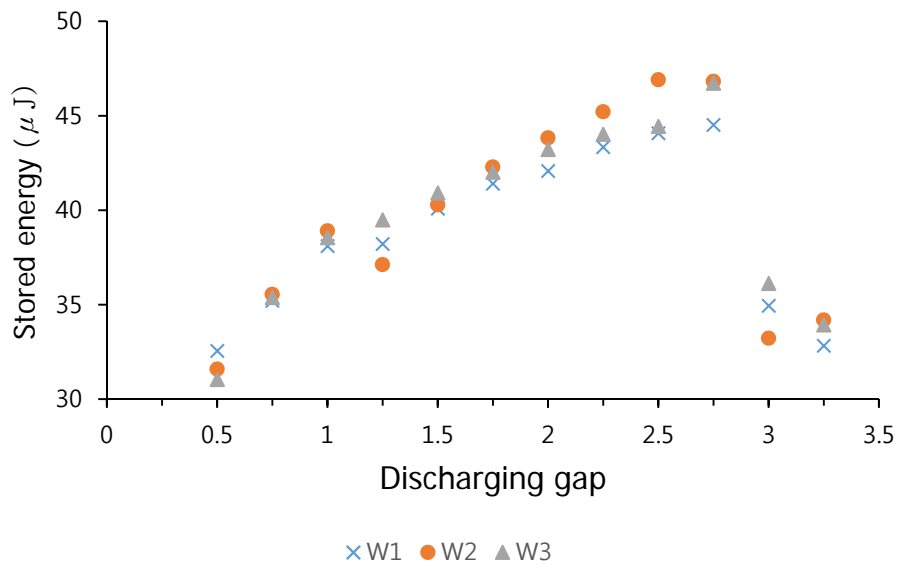


그림 4.7 방전 간극의 변화에 따른 저장된 에너지의 변화

4.1.2 다중 노즐

전압상승 식 (2-7) 을 다시 써보면 다음과 같다.

$$v = A \exp\left(\frac{nC_i}{C + 2C_L}t\right) + B \exp\left(-\frac{nC_i}{C}t\right) \quad (\text{식 } 2-7)$$

식에서 알 수 있듯이 초당 물방울 수 n 를 증가시키면 그에 따라 전압상승이 더욱 빠르게 일어나고 결과적으로 시스템의 효율 향상을 기대할 수 있다.

노즐에서 떨어지는 초당 물방울의 수를 증가시키기 위해 물의 흐름의 세기를 증가시킬 경우 물방울이 형성되지 않거나 형성되더라도 노즐의 아래 부분에서 형성되고 금속 링과 물방울이 형성되는 지점을 맞추기가 쉽지 않다. 따라서 n 을 증가시킬 수 있는 가장 손쉬운 방법은 노즐의 개수를 증가시키는 것이다.

n 의 증가에 따른 결과를 수식적으로 확인할 수 있다. 시간 t 를 불꽃 방전 주기 T_n 로 대체한 후 주기에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$T_n \propto \frac{C + 2C_L}{nC_i} \ln \frac{V_{max}}{A} \quad (\text{식 } 4-6)$$

따라서 불꽃 방전 주기는 노즐을 통해 떨어지는 초당 물방울 수에

반비례한다.

$$T_n \propto \frac{1}{n} \quad (\text{식 } 4-7)$$

이러한 결과는 Kelvin water dropper의 전압이 빠르게 상승하여 같은 시간 동안 더 많은 방전을 통해 에너지가 에너지 저장회로로 전달되어 시스템의 효율이 향상됨을 나타낸다.

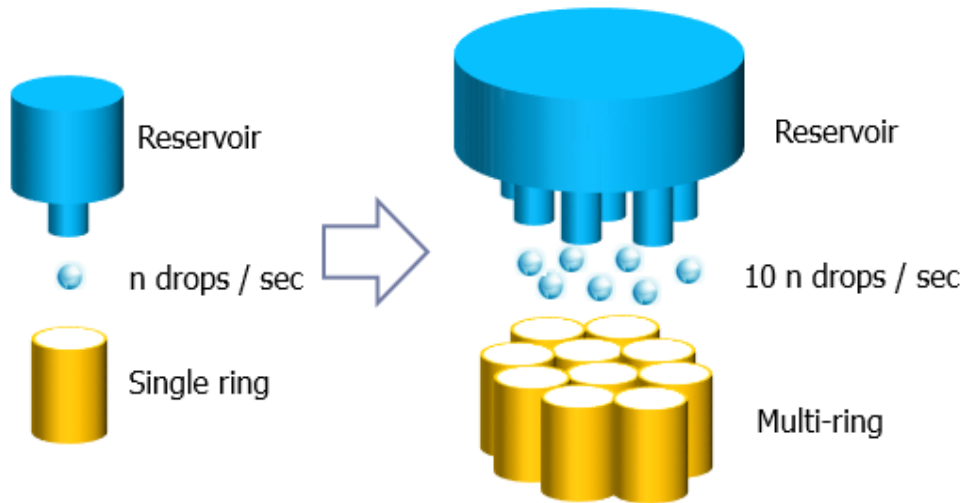


그림 4.8 다중 노즐 모식도

그림 4.8 은 앞선 이론적 분석을 바탕으로 시스템의 효율 향상을 위해 Kelvin water dropper에 적용한 다중 노즐의 모식도이다. 그림에서와 같이 노즐의 개수만큼 초당 물방울의 수 역시 증가하게 된다.

본 연구에서는 노즐의 개수를 1, 2, 3 개로 증가시켜 실험을 진행하였다. 실험의 조건으로 각각의 노즐에서는 시간당 5.1 ml/s 의 속도로 물방울을 떨어트렸다. 시간의 증가에 따른 전압의 변화를 그림 4.9 를 통해 확인할 수 있다. 또한 노즐의 변화에 따른 방전 주기가 표 4.3 과 같이 측정되었다.

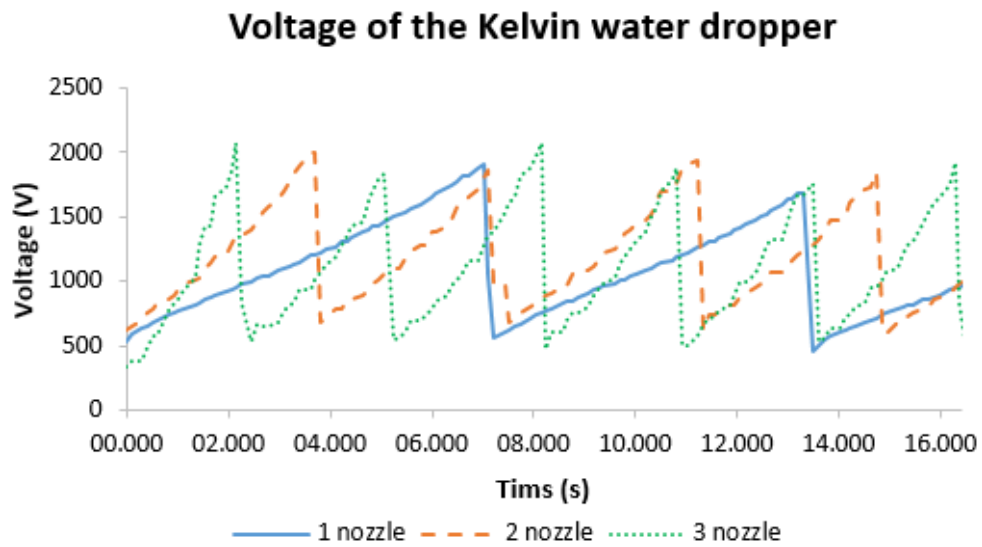


그림 4.9 다중 노즐을 적용한 Kelvin water dropper의 전압 변화

표 4.3 노즐의 변화에 따른 방전 주기

노즐의 개수 n	1	2	3
불꽃 방전 주기 $T_n(s)$	7.041	3.521	2.854

다중 노즐을 적용하지 않은 상태에서 불꽃 방전은 7.041 초를 주기로 방전되었고, 멀티 노즐을 적용하여 노즐을 하나 더 증가시켜 오른쪽과 왼쪽 각각 두 개의 노즐을 통해 물방울을 떨어뜨렸을 때 3.621 초를 주기로 방전이 발생하여 결과적으로 50.01% 만큼 방전 시간이 단축되었다. 또한 각각 3개의 노즐을 적용하였을 경우, 방전 주기는 2.347초로 더욱 단축되어 결과적으로 1개의 노즐에 비해 방전 주기가 40.53% 로 단축되었다. 실험 결과는 이론적 결과값과 매우 비슷한 경향을 보임을 그림 4.10 을 통해 확인할 수 있다.

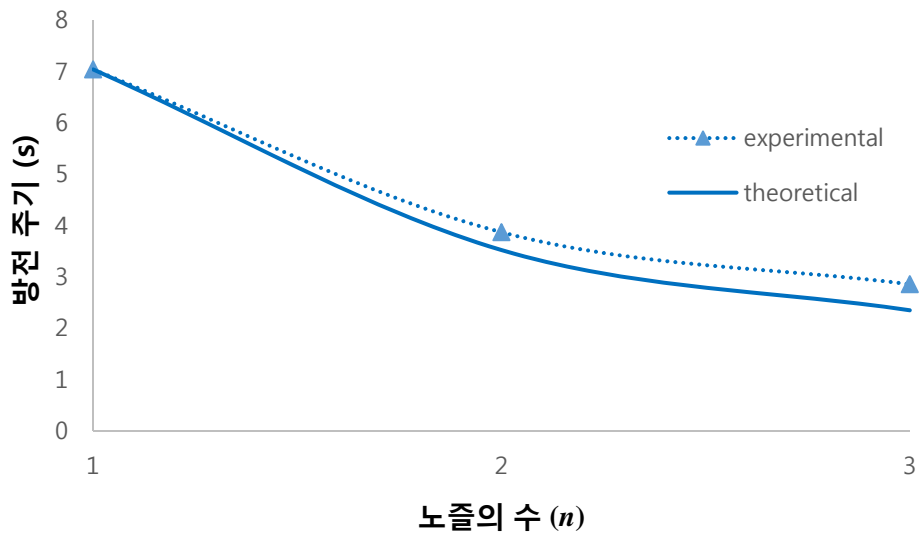


그림 4.10 노즐의 수에 따른 방전 주기의 변화

이러한 측정 값들은 결과적으로 다중 노즐이 적용된 Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스팅에서는 단일 노즐만을 사용한 경우보다 노즐의 개수만큼 에너지 충전시간을 $\frac{1}{n}$ 만큼 줄일 수 있음을 의미한다.

4.2 전원공급 회로의 제작

Kelvin water dropper를 구동하기 위해서는 물이 필요하며 이 물을 인위적으로 공급하는 것도 가능하지만 강우와 같은 자연적이고 가변적인 상황에서도 이용이 가능해야 한다. 또한 무선 센서와 같은 전기기기의 전원 공급 장치로 Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스팅 장치가 실제 적용되기 위해서는 저장된 에너지가 적절한 전압으로 출력되어야 한다.

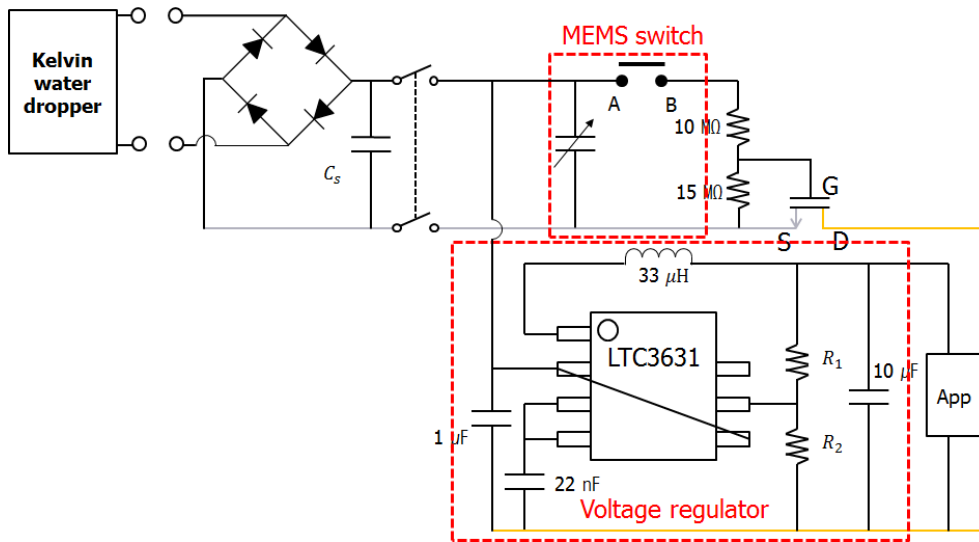


그림 4.11 전원공급 회로

그림 4.11 은 어플리케이션 구동을 목적으로 일정한 전압을 출력하기 위해 구성한 회로이다 [24]. 회로 구성을 위해 상용의 RF MEMS 스위치(Omron, 2SMES-01)와 N-channel MOSFET(ZVNL110GTA) 그리고 전압 조정기 (Linear Technology,

LTC3631EMS8E#PBF)를 사용하였다. 소자의 상세한 사양은 표 4.4를 통해 나타내었다.

표 4.4 전원공급 회로에 사용된 소자의 사양

<p>RF MEMS 스위치 (Omron 2SEMS-01)</p>	<p>Rated voltage (VDC) : $34 \pm 5\%$ V Operated voltage (V) : Rated voltage 최대의 90% Release voltage (V) : Rated voltage 최소의 10%</p>
<p>N-channel MOSFET (ZVNL110GTA)</p>	<p>V_{gs} 항복 전압 : 20 V I_d 연속 드레인 전류 : 600 mA</p>
<p>전압 조정기 (LTC3631EMS8E)</p>	<p>전압-입력 : 4.5 V ~ 45 V 전압-출력 : 0.8 V ~ 45 V 전류-출력 : 100 mA</p>

구성한 회로는 초기 상태에서는 C_s 가 충전되어 있지 않기 때문에 MEMS 스위치의 A와 B 단자가 분리되어 있으므로 MOSFET의 Gate 전압은 0 V 가 되어 OFF 상태에 놓여있기 때문에 C_s 는 전압 조정기 및 어플리케이션 단과는 완전히 분리되어 있다. Kelvin water dropper가 구동되어 C_s 가 MEMS 스위치의 Pull-in 전압인 22.1 V 만큼 충전되면 스위치가 구동되어 MEMS 스위치의 A, B 단자는 연결되고 MOSFET의 Gate에 전압이 인가되어 전압 조정기에 저장된 에너지가 전달되게 된다.

전압 조정기는 R_1, R_2 저항에 의해 $V_{out} = 0.8(1 + R_1/R_2)$ 의 출력을 어플리케이션에 전달하여 전자기기가 구동되게 된다. 전자기기가 구동되면 C_s 는 방전되어 전압이 감소하게 되고 MEMS 스위치의 Release 전압 아래로 떨어지면 A, B 단자는 분리되어 에너지 저장 커패시터와 전압 조정기와 분리되어 다시 에너지를 충전하게 된다.

실제 구성된 회로의 사진은 그림 4.12 와 같으며 3 V의 출력을 낼 수 있도록 R_1, R_2 저항을 조정한 후 오실로스코프를 통해 출력 전압을 측정한 그래프가 그림 4.13 이다.

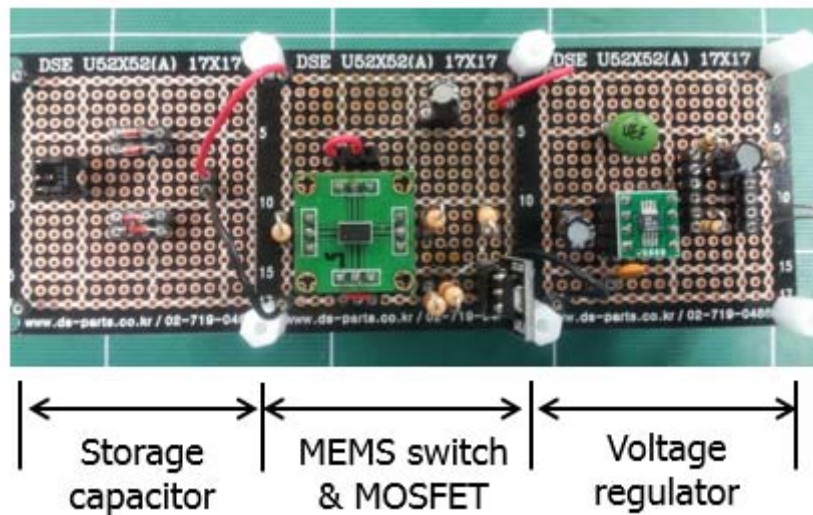


그림 4.12 제작된 에너지 저장회로 및 전원공급 회로

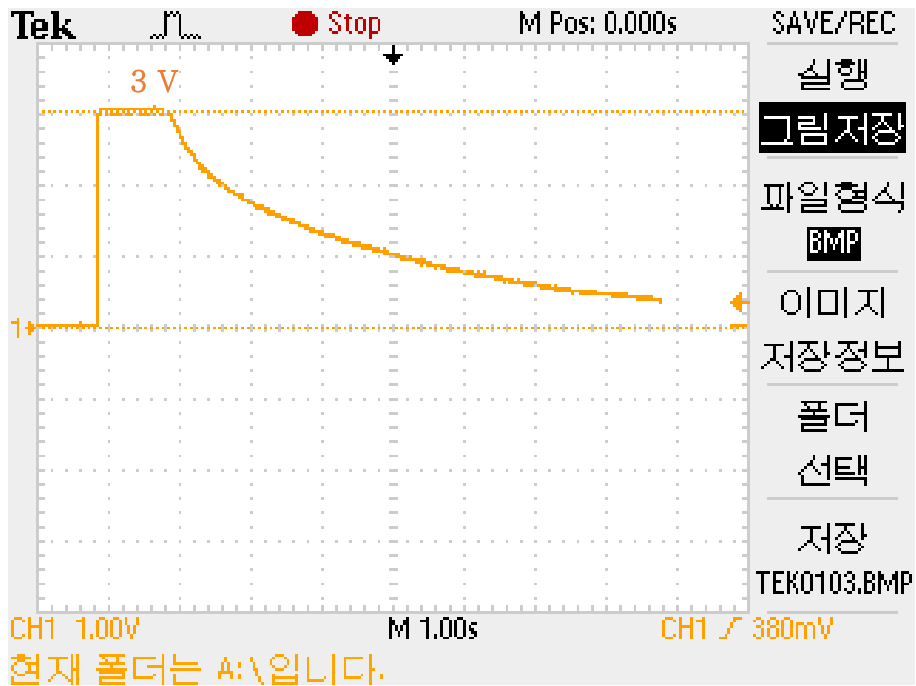


그림 4.13 전원공급 회로의 출력 파형

출력 값의 측정을 위해 $1\ \mu\text{F}$ 의 저장 커패시터 C_s 와 $1\ \text{M}\Omega$ 부하를 출력단에 연결하여 사용하였고 커패시터에 $22.1\ \text{V}$ 를 충전하기 위해 Kelvin water dropper에서는 총 $5.27\ \text{L}$ 의 물을 사용하였다.

제 5 장 결론

본 논문에서는 Kelvin water dropper를 이용하여 물을 통해 에너지를 수확할 수 있는 에너지 하베스팅 시스템을 제안하고 구현하였다. 본 연구에서는 물을 통해 정전기 에너지를 발생시키는 Kelvin water dropper 장치 자체의 효율 향상을 꾀하고자 Kelvin water dropper의 이론적인 분석을 수행하였고, 이를 위해 시뮬레이션과 수식 그리고 실험을 통해 적합한 배치 구조를 찾았다.

다음으로 본 연구에서는 고전압 저전하로 인해 에너지 수확이 어려운 정전기 에너지를 모으고자 두 가지 에너지 저장 방법을 제안하였다. 첫 번째로 RF MEMS 스위치를 이용한 에너지 저장방법은 효율상의 문제와 정전기에 적합하지 않은 MEMS 스위치로 인해 구현이 어려움 확인하였고, 두 번째로 불꽃 방전 간극을 이용한 에너지 저장 방법은 비록 저장 효율상의 문제는 존재하다 충분히 유효한 방법임을 검증하였다. 또한 이러한 방법을 통해 물의 양에 따른 에너지 저장량을 측정하였고, 리터당 $39.4 \mu\text{J}$ 의 에너지가 저장됨을 확인하였으며, 전력밀도는 16.75 pW/cm^3 로 나타났다.

그리고, Kelvin water dropper와 에너지 저장 회로 사이에 Paschen의 법칙에 근거하여 시스템 효율의 향상 가능성을 이론적으로 분석하였고, 실험을 통해 저장되는 에너지가 증가함을 확인하여 방법의 유효성을 검증하였다. 또한 Kelvin water dropper의 전압 상승식에

근거하여 다중 노즐을 장치에 도입하였고 이러한 방법이 에너지 충전시간을 노즐의 개수에 반비례하여 줄여줌을 실험 결과를 측정함으로써 확인하였다.

마지막 장에서는 본 논문에서 제안한 Kelvin water dropper를 이용한 에너지 하베스팅 시스템이 특정 응용에 이용가능 하도록 가변적인 환경에서 안정적이고 응용에 맞는 출력을 낼 수 있는 전원 공급 회로를 도입하였다. 또한 5.27 L 의 물을 사용하여 구성된 회로를 통해 1 μF 의 저장 커패시터를 22.1 V 만큼 충전한 뒤 3 V의 일정한 출력전압이 출력됨을 확인하여 구성된 시스템이 원활히 잘 작동함을 확인하였다.

본 논문을 통해 제시된 Kelvin water dropper 를 이용한 에너지 하베스터는 적은 양의 물로도 발전이 가능하여 햇빛과 바람이 들기 어려운 장소에서의 이용이 용이하다. 또한 산과 같은 사람의 접근이 어려운 장소에서의 센서 모듈과 같은 소형 전자기기의 구동에 본 장치를 이용한다면 유지보수의 번거로움을 피할 수 있다. 끝으로 본 연구가 좀 더 다양한 환경에서의 에너지 수확에 기여함으로써 에너지 하베스팅 기술 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] <http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=102&oid=025&aid=0002467426>.
- [2] 김상우, “에너지하베스터의 기술 및 연구동향”, 대한전기학회, 전기의 세계 62(11) 10-18 1598-4613, 2013.
- [3] 이수진 외 2명, “압전에너지 하베스팅 기술동향 및 전망”, 한국과학기술정보연구원 정보분석연구소, pp. 1-8, 2013.
- [4] 유병곤, “MEMS 기술을 이용한 에너지 하베스팅 기술”, 전자통신동향분석 제23권 제6호 통권 114호, pp.48-58 1225-6455, 2008년 12월.
- [5] <http://phys.org/news/2011-12-award-winning-energy-harvester-applications-closer.html>.
- [6] Robert Myers, Mike Vickers, Hyeoungwoo Kim and Shashank Priya, “Small scale windmill,” Appl. Phys. Lett. 90, 054106 2007.
- [7] Hyeoungwoo KIM, “임피던스 ADAPTATION METHODS OF THE PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING,” *Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State Univ.* 2006.
- [8] Guigon, Romain, *et al.* "Harvesting raindrop energy:"

- experimental study," *Smart Materials and Structures* 17.1, 2008: 015039.
- [9] Guigon, Romain, *et al.* "Harvesting raindrop energy: theory." *Smart Materials and Structures* 17.1, 2008: 015038.
- [10] <http://www.mascontext.com/tag/powerleap/>.
- [11] Li, Shuguang, and Hod Lipson. "Vertical–stalk flapping–leaf generator for wind energy harvesting." *ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, pp. 611–619 American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [12] Li, Shuguang, Jianping Yuan, and Hod Lipson. "Ambient wind energy harvesting using cross–flow fluttering." *Journal of Applied Physics* ,2011: 026104.
- [13] Beeby, S. P., Tudor, M. J., & White, N. M. ,” Energy harvesting vibration sources for microsystems applications” , *Measurement science and technology*, 17(12), R175, 2006.
- [14] Najafi, K., *et al.* "Microsystems for energy harvesting." *Solid–State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS)*, 2011 16th International. IEEE, pp. 1845–1850, 2011.
- [15] Hu, Youfan, *et al.* "A Nanogenerator for Energy Harvesting from a Rotating Tire and its Application as a Self-Powered Pressure/Speed Sensor." *Advanced Materials* 23.35 , pp. 4068–

4071, 2011.

- [16] Lee, Ju-Hyuck, *et al*, "Synthesis of Ga-doped ZnO nanorods using an aqueous solution method for a piezoelectric nanogenerator", *Journal of nanoscience and nanotechnology* 12.4 , pp. 3430–3433, 2012.
- [17] Herbert H. Woodson and James R. Melcher, "Electromechanical dynamics Part II: Fields, Forces, and Motion" , *Robert E. Krieger Publishing Company Malabar*, 1968.
- [18] 정진욱, "플라즈마 전자공학" , 청문각, pp. 79–82, 2013
- [19] Lieberman, M. A., & Lichtenberg, A. J., "Principles of plasma discharges and materials processing" , *MRS Bulletin* 30, pp. 899–901, 1994.
- [20] D. B. Go, T. S. Fisher, S. V. Garimella and V. Bahadur, "Planar microscale ionization devices in atmospheric air with diamond-based electrodes" , *Plasma Sources Science and Technology*, vol.18, no.3, pp. 1–10, 2009
- [21] Ching-Heng Chen, J Andrew Yeh and Pei-Jen Wang, "Electrical breakdown phenomena for devices with micron separations" , *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.16, no.7, pp. 1366–1373, 2006.
- [22] Go, David B., and Daniel A. Pohlman, "A mathematical model of the modified Paschen' s curve for breakdown in microscale gaps.", *Journal of Applied physics*, 107.10, 2010: 103303.

- [23] R. M. Schaffert, “Electrophotography” , *Wiley and Sons: New York*, pp. 516–517, 1975.
- [24] Dongkil Choi, Hoseong Kim, *et al* “Application of MEMS Switch to Stray Electric Field Energy Harvesting” , *2014 KMEMS*, FP-1-50, 2014.

Abstract

A Study on Energy Harvesting using Kelvin Water Dropper

Sung-Hwan Kim

Department of Electrical Engineering and Computer Science

The Graduate School

Seoul National University

In this paper, in order to use Kelvin water dropper that create static electricity of high voltage for energy harvesting, we proposed energy storage circuit that can store static electricity energy in capacitor. We proposed and realized the two method to improve the efficiency of energy harvesting system using Kelvin water dropper. Also the power supply circuit was introduced for this system to achieve constant output voltage in a variable environment.

We mathematically modeled the Kelvin water dropper in order that it is reliable and efficiently work, and simulation and experiment were conducted about suitable arrangement. As a result, the distance h between the metal container and the metal ring was set to 3 cm.

Then energy storage circuit using discharging gap was designed for saving the static electricity energy which is generated from Kelvin water dropper. In case of performing harvesting in Kelvin

water dropper using fabricated energy storage circuit, energy of 32.56 μJ per liter was harvested.

We have devised two kinds of ways to raise efficiency of energy harvesting system using the Kelvin water dropper. The first method is to increase discharging spark gap from 0.5 mm to 3.25 mm. The second method is to employ the multi-nozzle to the Kelvin water dropper. The experimental results of the first method showed that energy saved in capacitor is increased up to 3 mm discharging gap. By utilizing the multi-nozzle energy, storage time was reduced as many as the number of nozzle. In the last study, energy supply circuit is added. It is possible to confirm the effectiveness of the system, by obtaining the results of 1 s maintaining time and 3 V output voltage.

It is expected to extend the field of energy harvesting in a variety of environments, through the proposed energy harvesting system using the Kelvin water dropper.

Keywords : Kelvin water dropper, energy harvesting, MEMS switch, Paschen's law

Student Number : 2013-20765