



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](#)

碩士學位論文

자가발전활용을 위한 마찰전기 발전소자의 개발



濟州大學校 大學院

메카트로닉스工學科

愼 梳 倫

2015 年 2月

자가발전활용을 위한 마찰전기 발전소자의 개발

指導教授 金 相 宰

愼 梳 倫

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 12 月



洪仁哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

임종환



委 員

員

정지현



委 員

員

김상재



濟州大學校 大學院

2014 年 12 月

Development of triboelectric nanogenerator for the self-powered applications

So-Yoon Shin

(Supervised by Professor Sang-Jae Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Master of Engineering

2014. 12.

This thesis has been examined and approved.



Thesis director,	Department of Mechatronics Engineering,
Prof. Joung-Hwan Lim	Jeju National University
Thesis committee Member,	Department of Mechanical Engineering,
Prof. Ji-Hyun Jeong	Jeju National University
Thesis committee Member,	Department of Mechatronics Engineering,
Prof. Sang-Jae Kim	Jeju National University

December, 2014.

Department of Mechatronics Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

ABSTRACT

In recent years, searching and developing for sustainable, renewable and green energy has been one of the most important tasks for scientist and researchers to address the rapidly increasing global warming and energy crises in the world. nanogenerator(NG) has been developed for converting low frequency mechanical energy into electricity though piezoelectric and tribo-electrification processes and they have been demonstrated to power small electronic devices.

Generally, the triboelectric nanogenerator operate based on contact electrification and electrostatic induction. Due to its simple operation, low cost, availability of materials, higher performance, and high adaptability takes into a wide range applications such as wireless systems, portable/wearable electronics, and self-powered systems. Although a variety of materials are used in TENG have been reported, but still have their limitations. To achieve higher output performance, choosing the materials, surface morphology and inner distance are key parameters. Therefore, great efforts have been devoted to design and fabrication of triboelectric nanogenerator with high-performance to the sustainable driving of electronic systems.

In this thesis, we have fabricated the triboelectric nanogenerator with different condition and studied the effects on their nanogenerator performance when they were used in tribo-electrification process. Finally, the fabricated triboelectric nanogenerator can directly drive commercial LEDs connected in series, when the force is applied to the device. These results demonstrating that the potential application of triboelectric nanogenerator for self-powered systems, such as wireless sensor networks, implanted medical devices, nanorobotics, security applications and portable/wearable personal electronics.

CONTENTS

ABSTRACT	I
CONTENTS	II
LIST OF FIGURES	IV
I. 서론	1
1. 연구배경 및 목적	1
II. 연구내용	4
1. 마찰전기 효과	4
2. 마찰전기 나노발전소자	5
3. 구조에 따른 마찰전기 발전소자의 종류	6
3.1 수직 접촉-분리 모드	7
3.2 측면 슬라이딩 모드	8
3.3 단일전극 모드	9
4. 활용방안	10
III. PDMS기반의 마찰전기 나노발전소자의 제작	14
1. 서론	14
2. 제작 방법 및 분석	15
2.1 표면형상이 다른 PDMS 레이어의 제작과 분석	15
2.2 마찰전기 나노발전소자의 제작방법	15
3. 결과 및 고찰	16
4. 요약	21
IV. 다양한 직물을 이용한 STEG의 개발	23
1. 서론	23
2. 개발 내용 및 제작 방법	23
2.1 개발 내용	23
2.2 PDMS 레이어의 제작 및 분석	24

2.3 마찰전기 나노발전소자의 제작방법	24
3. 결과 및 고찰	25
4. 요약	31
V. 마찰전기발전소자의 웨어러블 디바이스 활용방안	32
1. 서론	32
2. 실험방법	32
3. 결과 및 고찰	33
4. 요약	36
VI. 결론	37
REFERENCE	38
감사의 글	42



LIST OF FIGURES

Figure 1. Schematic of energy sources in surrounding environment.	2
Figure 2. Perspectives of nanogenerators for harvesting mechanical energy and potential future applications.	3
Figure 3. Triboelectric series.	5
Figure 4. A summary on the progress made in the output power density of triboelectric nanogenerators within 12 months.	6
Figure 5. Vertical contact-separation mode of triboelectric nanogenerator.	8
Figure 6. Lateral sliding mode of triboelectric nanogenerator.	9
Figure 7. Single-electrode mode of triboelectric nanogenerator.	10
Figure 8. Harvesting energy from human body motion.	11
Figure 9. Smart Wearable Systems.	12
Figure 10. Self-powered nanorobot using triboelectric nanogenerator.	13
Figure 11. Schematic illustration of triboelectric nanogenerator (TENG) fabrication process. Inset shows the digital photograph of fabricated TENG.	16
Figure 12. FE-SEM images of the PDMS layer prepared using various sandpapers (a) 120, (b) 220 and (c) 320 C grade. FE-SEM images showed the various surface roughness morphologies. (d) TEM image of silver nanoparticles.	17
Figure 13. The electricity generation process of TENG. (a) Original position without external force. (b) External force makes ITO and PDMS layer to contact. (c) Reduced force brings separation. (d) Original state has triboelectric charges. (e) The force causes contact and electrons movement.	18
Figure 14. Electrical measurement of TENG. (a) Open-circuit voltage and (b) short-circuit current of TENG with different PDMS layers. (c) Average open-circuit voltage and (d) short-circuit current of different inner distance (1, 3, 5, 7, and 9 mm). (e) Dependence of the voltage and	

	current output on the external resistance. (f) The external load resistance dependence of electrical power.	20
Figure 15.	(a) Schematic of the energy harvesting circuit and LED display. (b) The photograph of the TENG-driven flashing LED display.	21
Figure 16.	(a) Schematic illustration of the STEG. (b) FE-SEM image of the PDMS layer. (c) Photographs of fabric with different component. ...	25
Figure 17.	The electricity harvesting mechanism of the STEG. (a) Original position without external force. (b) External force makes Fabric and PDMS layer to contact. (c) Reduced force brings separation. (d) Original state has triboelectric charges. (e) The force causes contact and electrons movement.	27
Figure 18.	The open-circuit and short-circuit of STEG with different frequencies. (a) Voltage and (b) Current using AW. (c) and (d) using PW. (e) and (f) using Co.	28
Figure 19.	Electrical measurement of fabric-STEG. (a) Open-circuit voltage and (b) short-circuit current of TENG with different fabric materials(AW, PW, Co). (c) Open-circuit rectified voltage and (d) short-circuit rectified current of AW-STEG.	29
Figure 20.	Electrical property of STEG. (a) Dependence of the voltage and current output on the external resistance. (b) The external load resistance dependence of electrical power. (c) Charging of 10 μ F capacitor with different STEG. (d) The photograph of the STEG-driven flashing 50 LED display.	30
Figure 21.	Schematic of bracelet-STEG (a) The structure design of the STEG. (b) Electric circuit diagram of total connect circuit.	33
Figure 22.	Output performance of fabric-STEG in jacket (a) Photograph of the device in hit condition: (b) Open-circuit voltage and (c) short-circuit current. (d) Photograph of the device in flutter condition: (e) Open-circuit voltage and (f) short-circuit current.	34
Figure 23.	Output performance of bracelet-STEG. (a) Photograph of the device	

in shake condition: (b) Open-circuit voltage and (c) short-circuit current. (d) Photograph of the device in shake condition (e) Open-circuit voltage and (f) short-circuit current. 35



I. 서론

1. 연구배경 및 목적

최근 인류의 기하급수적인 증가로 인해 화석연료의 사용량은 증가하고 필수 물자의 부족현상이 심해짐에 따라 무분별한 개발과 화석연료의 온실가스 배출로 인한 환경문제가 크게 대두되고 있다. 영국의 석유전문회사인 BP(British Petroleum)에서는 보고서를 통해 화석연료 종류별 고갈 시기를 예측한 통계 자료를 공개했으며 그 내용을 요약하면 주요 화석연료의 사용 가능 기간은 석유 53.3년, 천연가스 55.1년, 석탄 112년에 불과하다[1]. 석유 및 기타 화석연료의 고갈로 인해 지속적으로 에너지 가격이 상승될 것이며 물가 또한 오르게 됨에 따라 결과적으로는 전 세계 경제에도 영향을 미칠 것으로 보인다. 이에 따라 친환경적이면서도 지속가능한 에너지의 개발이 중요시 되고 있다.

또한 나노기술(NT)을 바탕으로 정보기술(IT), 에너지기술(ET) 등이 융합되는 유비쿼터스 기술들이 등장하고 있는 지금, 휴대용 전자소자의 끊임없는 소형화는 일반적인 배터리 기술에 의존하면서 계속적으로 문제를 유발하고 있다. 머지않아 미래 생활 속에 등장하게 될 마이크로 및 나노크기의 소자들이 환경감시, 건강관리, 국방 기술 등 다양한 분야에서 활용될 것으로 예상함에 따라 전원 공급에 관련된 이슈가 미래 산업 발전에 있어 중요한 문제로 대두되고 있다[2].

위와 같은 이슈들과 맞물려 지속가능한 친환경 에너지 개발과 더불어 소형화 기기들의 전원공급 문제들을 해결할 수 있는 에너지 수확기술(Energy harvesting)이 최근에 크게 각광 받고 있다. 에너지 수확기술은 빛, 열, 진동 등의 실생활에서 버려지는 에너지원에서 전기에너지를 수확하는 기술이다[3]. 에너지 하베스팅은 MIT가 선정한 10대 유망기술, 미국의 과학잡지 Popular Science가 선정한 세계를 뒤흔들 45가지 혁신 기술로 선정되기도 했으며 세계 각국에서는 이 기술을 선점하기 위한 연구가 진행되고 있다.



Figure 1. Schematic of energy sources in surrounding environment[4]

다양한 에너지 수확기술 중에서도 나노발전소자(Nanogenerator)는 2006년 미국 조지아대학 왕중린(Zhong Ling, Wang) 교수 연구팀에서 산화아연 나노와이어 (ZnO nanowire)를 이용하여 진동을 전기로 전환시키면서 최초로 소개되었으며 [5], 1차원적인 나노구조 소재의 압전성과 반전도성이 결합된 특성을 이용한 신기능의 미래 융합 나노 전자 에너지 소자를 구현하는 기술로 정의한 Nanopiezotronics 개념[6]과 함께 미래 유망 기술로 부각되고 있다[2]. 나노발전소자의 대표적인 종류로는 압력을 주었을 때 물질의 압전특성(Piezoelectric)을 이용하여 전기를 생산하는 압전나노발전소자와 온도의 변화에 따라 전기를 생산하는 초전성(Pyroelectric)을 이용한 발전소자, 마지막으로 마찰대전과 정전기유도 현상을 결합하여 전기를 생산하는 마찰전기(Triboelectric) 발전소자가 있다. 각각의 특성에 따라 적용하는 분야가 달라 질 수 있기 때문에 개발방법 및 활용분야에 대해서 활발하게 연구되어 지고 있다.

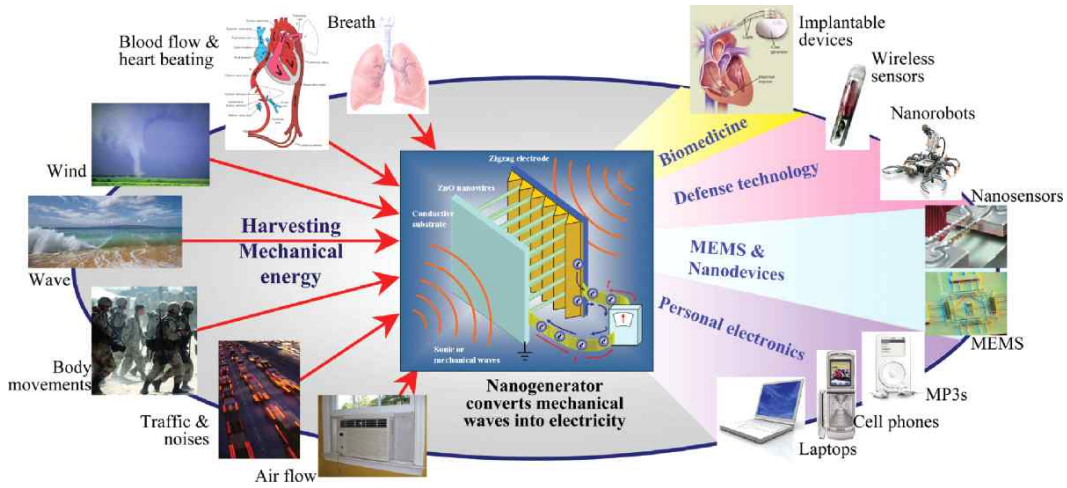


Figure 2. Perspectives of nanogenerators for harvesting mechanical energy and potential future applications[7]

본 논문에서는 기존의 압전이나 초전성 등을 이용한 나노발전기보다 제작과정이 간단하면서도 제작비용이 저렴한 마찰전기 발전소자에 대한 기본적인 실험을 통해 기초내용을 습득하고 전력 값을 증가시키면서 실생활에 쉽게 응용할 수 있게 소자를 개발하여 제작하였으며 다양한 환경과 조건에 노출시켜 전력발생에 영향을 주는 요인들을 분석하였다. 분석한 내용에 따라 최적 조건을 설정하여 결과 값을 측정하였으며 이를 토대로 개발한 소자를 활용하여 일상생활에서 버려지거나 소모되는 에너지원에서 전기에너지를 수확하는 것을 확인하였다.

II. 연구내용

1. 마찰전기 효과(Triboelectric effect)

마찰전기는 특정 물질이 다른 재료와 마찰하면서 발생한 마찰에너지에 의해 한 쪽 물체의 전자가 다른 물체로 이동하면서 대전되는 것으로 접촉 대전(Contact electrification)의 한 종류이다. 빗으로 머리를 빗거나 모피로 유리를 문지를 때, 마찰 대전이 유도 되는 것을 볼 수 있다. 대부분의 일상생활에서 경험하는 정전기는 마찰전기이며, 전하의 극성과 강도는 재료, 표면 조도, 온도, 변형, 및 다른 특성에 따라 다르게 발생한다. 마찰전기 효과는 BC600년경 탈레스가 호박을 울과 마찰시켰을 때 처음으로 발견되었으며 탈레스는 ‘전기(electricity)’라는 단어를 호박이란 뜻의 그리스어, *ēlectron*에서 파생시켜 만들었다. 마찰전기(Tribo-electric)는 그리스 고대 언어인 ‘마찰(rub)’을 의미하는 접두사 tribo-와 전기가 합쳐져 만들어졌다.

마찰전기는 ‘마찰(rub)’에서 유래하지만 전자가 두 물질사이에서 교환하려면 접촉 및 분리하는 과정이 필요하다. 대전되는 원리를 설명하자면, 원자는 (+)전하를 띤 핵과 (-)전하를 띤 전자가 분포하고 두 전하량은 평형상태를 유지하려고 한다. 여기에 마찰에 의해 힘을 가하면 전자는 쉽게 다른 물체로 이동하게 되고, 전하의 불균형을 이루게 되어 전기를 띠는 물체가 된다. 이때 전자가 이탈된 물체는 (+)로 대전되었다고 하고, 전자를 얻은 쪽은 (-)로 대전되었다라고 한다. 여기서 물체의 극성은 대전열(帶電列)을 통해 알 수 있으며, 전자를 내보내거나 반대로 끌어당기는 특성에 따라 순서가 나열되어 있다. 대전열에 따라 극성이 많이 차이 나는 재료를 선택할수록 더 많은 전자의 이동을 얻을 수 있다.

그 후 대전된 물체는 시간이 지나면 다시 전자를 내보내거나 끌어당겨서 전기적으로 평형상태 또는 중성인 상태를 만든다. 따라서 두 물체가 계속 반복적으로 마찰되어 전자가 조금씩 쌓이게 되고 적정 한도 이상 축적되었을 때 다른 상이한 전자를 갖는 물체와 접촉하려고 하게 되면 방전으로 인한 스파크가 발생하게 된다. 이 현상은 실생활에서 많이 겪을 수 있으며 18세기 후반부터 샤를 쿨롱 등

에 의해 정량적 연구가 이루어져 전기의 응용과 전자기학 발전의 기반이 되었다 [8-9].



Figure 3. Triboelectric series

2. 마찰전기 나노발전소자(Triboelectric nanogenerator)

마찰전기 나노발전소자는 마찰전기와 정전기 유도를 결합하여 외부 기계적 에너지를 전기로 수확하는 에너지 변환 장치이다. 나노 발전기의 새 유형인 TENG은 2012년, 조지아 공과대학 Zhong Lin Wang 교수 연구팀에서 개발되었다[10]. 소자의 메커니즘에 대해 설명하면, 내부적으로는 반대 극성을 가진 두 개의 얇은 무기 또는 유기 물질 사이에 마찰 전기로 인해 전위차가 생성되는 것이고, 외부적으로는 전자가 균형을 이루기 위해 두 개의 전극 사이에서 흐르는 것으로 설명할 수 있다. TENG에 가장 유용하게 활용하는 재료가 유기 물질이기 때문에 유기나노발전소자(organic nanogenerator)라고도 하며, 기계적인 에너지를 수확하

는 소자로서 처음으로 유기 재료를 사용한 발전기이기도 하다.

2012년 1월 TENG이 최초로 보고된 이후 활발한 연구를 통하여 소자의 출력 밀도 값이 일 년 안에 수만 배 향상되었다. 면적당 출력 밀도는 $313\text{W}/\text{m}^2$, 체적 밀도는 $490\text{ kW}/\text{m}^3$ 로 변환 효율은 최대 60 % 정도까지 도달했다. 새로운 에너지 기술을 사용한 TENG은 뛰어난 성능 이외에도 제작비용이 저렴하고 간단한 제조공정, 우수한 안정성 및 신뢰성, 친환경적인 요소 등 많은 이점들을 가지며, 일상생활에서 낭비 될 수 있는 인간의 움직임, 걷기, 진동, 바람, 흐르는 물 등과 같은 모든 종류의 기계적 에너지를 수확할 수 있다[11].

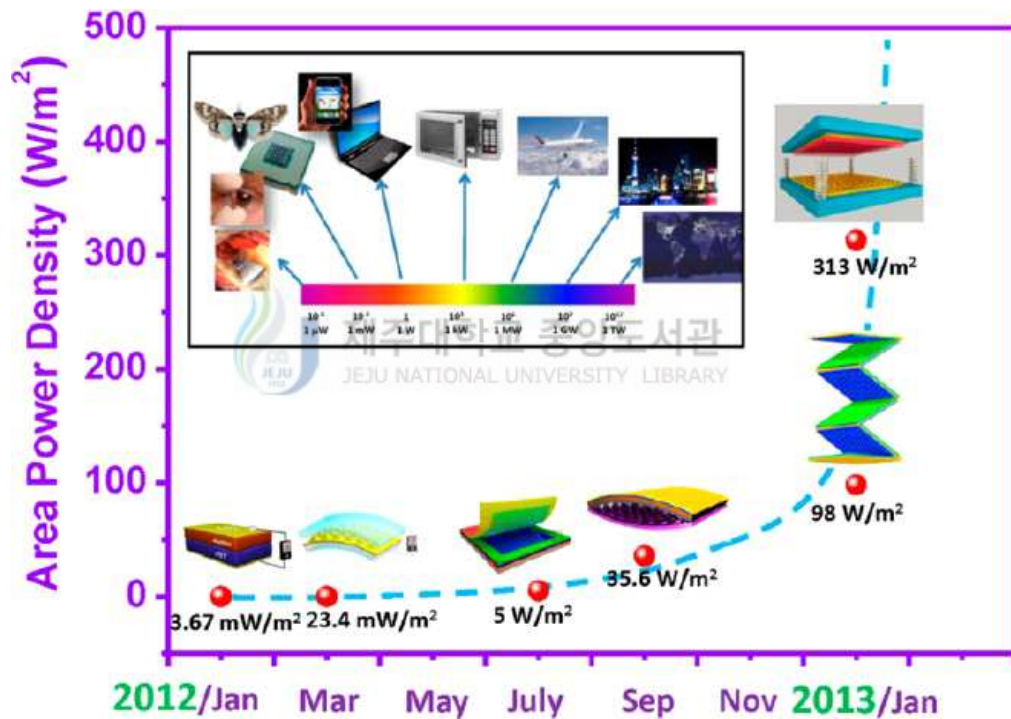


Figure 4. A summary on the progress made in the output power density of triboelectric nanogenerators within 12 months[11].

3. 구조에 따른 마찰전기 발전소자의 종류

마찰전기 나노발전소자는 세 가지의 기본 작동방법이 있다.

- ① 수직 접촉-분리 모드(Vertical contact-separation mode)

② 측면 슬라이딩 모드(Lateral sliding mode)

③ 단일 전극 모드(Single-electrode mode)

각각의 모드는 서로 다른 특성을 가지며 각 모드에 대한 메커니즘과 활용목적에 대해 세부적으로 설명하고자 한다.

3.1 수직 접촉-분리 모드(vertical contact-separation mode)

마찰전기 나노발전기의 메커니즘은 두 접촉면이 계속되는 접촉과 분리로 인해 표면에 생긴 마찰전기 전하가 전위의 차이를 만들고, 균형을 맞추고자 주기적으로 전자가 이동하는 것으로 설명할 수 있다. 소자에 기계적인 힘이 가해져 위쪽 기관이 구부리거나 눌러지면서 두 기관의 안쪽 표면이 가까워지면서 접촉하게 되면 대전열에 의해 한쪽은 (+)로 다른 한쪽은 (-)로 대전된다. 여기까지는 기존의 마찰전기 효과와 같다. 그 후, 상반된 극성을 가진 마찰전기 전하에 의해 두 기관 사이에서 전계가 생성되고 외부 힘이 줄어들어 접촉면이 분리되기 시작하면 위쪽과 아래쪽의 전위차가 발생하게 된다. 자연적으로 전기적 평형상태를 이루고자 외부 부하를 통해 전자가 한쪽 전극에서 반대편 전극으로 이동하게 된다. 여기서, 전기는 전위차가 균형을 이룰 때까지 전자가 이동하는 과정에 의해 만들어진다. 이어서 두 기관이 외부 힘에 의해 다시 접촉하려고 하면 아까와는 반대 방향으로 전위차를 없애고자 전자가 흐르게 된다. 이 과정이 계속 반복되면 결과적으로 교류(AC) 전기가 연속적으로 발생하게 된다[12-13].

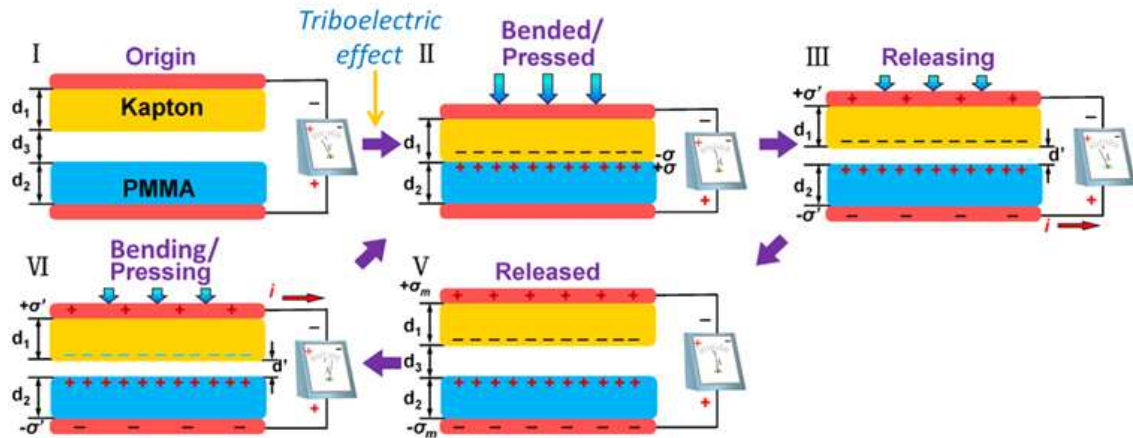


Figure 5. Vertical contact-separation mode of triboelectric nanogenerator

3.2 측면 슬라이딩 모드(Lateral sliding mode)

기본적으로 발전소자는 접촉하거나 슬라이딩하는 두 가지 마찰 방법이 있는데, 여기서는 같은 평면에 대해서 횡 방향으로 움직이는 구조로 제작된 TENG에 대해 설명하고자 한다[14]. Figure 6을 보면 동일한 양의 마찰전하를 가진 두 기판이 횡축으로 이동하는 모습을 과정별로 나타내었다. 처음상태는 위에서 설명한 것과 같이 두 가지의 중합체 물질이 완전히 포개진 모습으로 마찰대전이 된 상태이다. 중합체 물질은 절연체로서 한번 대전된 이후에는 상태를 계속 유지하는데 이 때문에 중합체의 접촉면에는 동일한 양의 마찰전하가 유지되고 그 뒷면에 부착된 전극에서만 전하량이 바뀌게 된다. 그 후 한쪽 면이 옆으로 이동하게 되면서 완전히 포개진 상태에서 일부만 겹쳐진 상태가 된다. 겹치지 않는 부분이 생기면서 전기적으로 불균형상태가 되는데 이를 균형상태로 바꾸고자 불균형 상태가 된 만큼의 전자가 위쪽 전극에서 아래 전극으로 이동하면서 전기가 발생하게 된다. 완전히 두 접촉면이 떨어지게 되면 각 기판은 동일한 양의 (+)전하와 (-)전하를 가지게 된다. 다시 위쪽 기판이 이동해서 일부만 겹치게 되면 겹쳐서 중화된 양만큼의 전자가 반대방향으로 이동하면서 전기적 균형을 맞추고자 한다. 모든 과정은 대칭적인 모습을 가지고 있으며 이 때문에 교류(AC)전기를 발생하게 된다.

측면 슬라이딩 모드는 한 방향에 대한 두 평면의 슬라이딩 마찰[15]과 더불어 회전운동에도 적용할 수 있다[16].

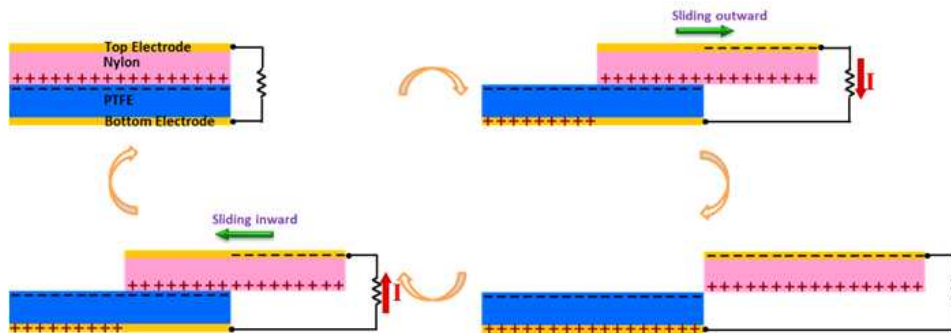


Figure 6. Lateral sliding mode of triboelectric nanogenerator

3.3 단일 전극 모드(Single-electrode mode)

단일 전극 기반의 마찰전기 나노발전기는 손가락으로 구동할 수 있게 디자인되면서 좀 더 실용적으로 실현 가능하게 개발되었다[17-18]. 접촉 대전 및 정전기 유도의 결합으로 설명되는 단일 전극 TENG의 작동 원리를 그림으로 나타내었다(Figure 7.). 가장 처음상태를 보면, 피부와 PDMS의 표면은 완전히 서로 접촉하여 반대의 극성이 대전된 상태이다. 대전열에 따르면 PDMS는 피부보다 더 전자를 끌어당기는 성질을 가지고 있어 전자는 피부로부터 PDMS로 이동한다. 완전히 균형을 이룬 상태에서 PDMS와 피부 사이의 간격이 발생하면, 마찰전기 전하가 접촉한 표면을 통해 이동이 불가능하게 되어 평형상태를 유지할 수 없다. 따라서 PDMS 표면의 마이너스 전하가 ITO 전극에 양의 전하를 유도하고 자유 전자를 ITO 전극으로부터 접지한 전선을 통해 흐르게 된다. 정전 유도 과정은 접촉된 피부와 PDMS 사이의 거리가 PDMS 막의 크기보다 상당히 크게 분리될 때 발생한다. ITO 전극 상에 유도된 양전하가 PDMS의 마이너스 마찰 전기 전하만큼 상영(screen)되는 경우 그림과 같이, 전하 이동이 없어지게 되어 어떠한 출력 신호도 관찰 할 수 없다. 피부가 PDMS에 다시 접근하면, ITO 전극에 접지된 전선을 따라 전자가 피부와 PDMS가 완전히 서로 접촉할 때 까지 이동하게 되고 ITO 전극의 양전하가 감소하면서 출력 전압, 전류 신호가 반대의 결과로

나온다. 두 번의 평형상태를 이룰 때 까지 반대방향으로 동일한 양의 전하가 이동하게 되면서 AC출력이 발생하며, 여기까지가 TENG의 접촉 분리모드 메커니즘의 전체 사이클이다.

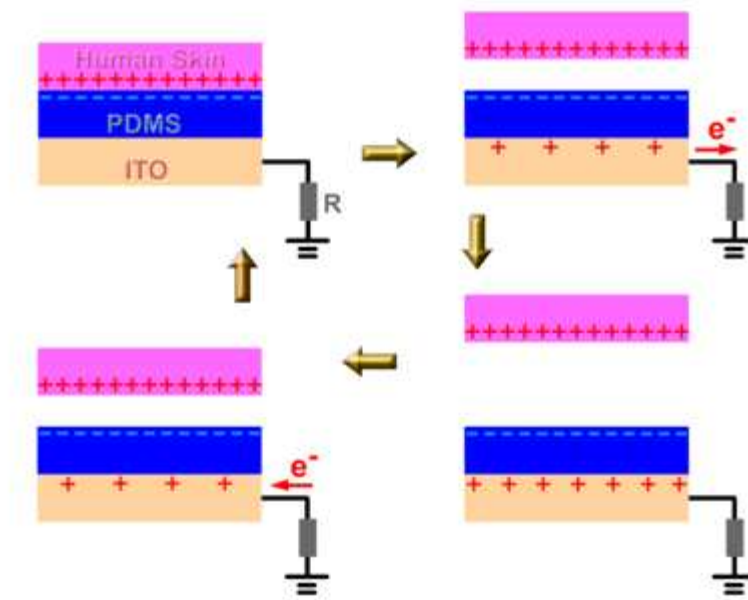


Figure 7. Single-electrode mode of triboelectric nanogenerator

4. 활용방안

마찰전기 효과과 정전기유도(Electrostatic induction) 현상을 기반으로 에너지를 수확하는 TENG은 크게 두 분류로 활용할 수 있다. 첫째는 다양한 기계에너지에서 전기에너지를 수확하는 것이며, 다른 활용은 별도의 외부 전원 없이 마이크로 또는 나노전자 부품이나 휴대용 전자기기, 가정용 전기제품의 자가발전 시스템에 적용하는 것이다. 아래에는 TENG의 대표적인 활용방안에 대해서 설명하였다.

진동 에너지 수확(Harvesting vibration energy)

진동은 일상생활에서 걷기, 목소리, 엔진 진동, 자동차, 기차, 항공기, 바람과 같이 많은 곳에서 가장 쉽게 접할 수 있는 현상 중 하나이다. 진동은 거의 모든 장소와 시간에 존재하기 때문에 진동 에너지 수확은 그 가치가 크다. TENG은 일

상생활에서 다양한 조건 중에서도 특히 낮은 주파수에서 주변의 진동 에너지를 수확하기 위해 설계되었다. 따라서 TENG은 환경/인프라 모니터링, 휴대용 전자 제품 충전 등에 응용이 가능하다[19].

인체운동에너지 수확(Harvesting energy from human body motion)

일상적인 행동을 통해 인간의 몸에서 생성된 풍부한 기계적 에너지가 많이 있기 때문에 휴대용 전자 기기 및 생물 의학 응용 프로그램을 충전하고자 마찰나노 발전기를 부착하여 사용할 수 있다. 이는 사람들의 생활의 편리성을 크게 개선하고 개인 전자 공학의 분야를 확장하는 데 도움이 될 것이며 또한 동물의 움직임도 수확하여 다양한 곳에 활용할 수 있을 것으로 보인다.



Figure 8. Harvesting energy from human body motion[20]

스마트 웨어러블 시스템(Smart Wearable Systems)

인체로부터 발생하는 운동 에너지는 발전소자를 통해 전기 에너지로 변환되고, 이는 다양한 스마트 웨어러블 시스템과 연결된 건강모니터링 시스템과 같은 휴대용 전자 기기를 구동하는 데 활용될 수 있다. 나노 발전기는 신발, 안경, 시계

등에 적용되어 운동에너지가 많이 발생하는 곳에 부착되어 활용될 수 있다[21].



Figure 9. Smart Wearable Systems[22]

자가발전 센서(Self-powered sensors)

마찰 나노 발전기는 기계적인 힘이 가해지면 자동적으로 출력 전압 및 전류를 생성한다. 이는 TENG의 기본 원리를 활용하여 자체 전원 압력 센서로서 사용될 수 있으며 심지어 물방울에 의해서도 압력을 받아 출력 신호가 발생할 수 있다. 이와 관련하여 연구 보고된 TENG은 모든 종류의 외력에 대한 높은 감도 및 빠른 응답을 가지고 있는 것을 확인하였다.[23]

마찰 나노 발전기에 관하여 양측에 전하 발생을 극대화하려면 전자를 끄는 능력에 차이가 가장 큰 재료를 선택하고, 표면 형상을 변화시킴으로써 높은 값을 달성 수 있다. 이러한 경우에, TENG의 출력은 마찰 재료의 표면에 흡착된 분자의 종류 및 농도에 따라 달라지기 때문에 이를 응용하여 화학 센서들을 제조할 수 있게 된다. 가까운 미래에는 다른 금속 이온과 생체 분자 DNA와 같은 단백질에 대해 반응하는 자가발전 TENG 센서가 개발될 것으로 판단된다.[24]



Figure 10. Self-powered nanorobot using triboelectric nanogenerator[25]

III. PDMS기반의 마찰전기 나노발전소자의 제작

1. 서론

나노발전소자(NG; nanogenerator)는 낮은 주파수의 기계적 에너지를 압전 및 마찰대전효과를 이용해 전기를 생산하도록 개발되었으며, 이를 이용해 작은 전자 기기의 동력원이 될 수 있음을 입증하였다[26-29]. 압전나노발전소자(PNG; piezoelectric nanogenerator)는 외부 힘이 가해진 압전물질에 전하가 흐르면서 생긴 압전 포텐셜에 좌우된다. PNG는 작은 기계에너지를 전기로 변환하고 다양한 분야의 동력원으로 활용하고자 개발되었다. 하지만, 현재의 압전나노발전소자는 압전특성 및 재료의 제약 등으로 인해 개발하는데 한계가 있었다. 이러한 문제들을 극복하기 위해 최근 연구진들은 경제적이고 견고한 마찰전기 나노발전소자 개발에 집중하고 있다.

일반적으로 마찰전기 나노발전소자는 대전과 정전기 유도 현상을 바탕으로 작동된다[10, 12, 23]. 구동이 쉽고 저렴하지만 높은 성능을 가진 소자의 이점 때문에 다양한 활용이 가능해서 앞에서 말한 무선 센서 네트워크, 포터블/웨어블 기기 및 자가발전시스템 등에 적용될 수 있다[13, 29-31]. 현재까지 여러 가지 재료들을 이용하여 개발된 TENG이 보고되었지만, 아직 활용될 수 있는 방법과 재료들이 많다. 고성능의 출력 값을 내기위해 재료선정 및 표면 형상이 중요한 요소로 알려지면서 마찰전기 나노발전소자의 구성과 제작방법에 많은 노력을 기울이고 있다.

본 연구에서는 마찰전기발전소자의 기본 구조 및 결과 값에 영향을 미치는 요인을 분석하고자 기존의 개발된 발전소자와 유사하게 제작되었으며 사포를 이용하여 PDMS 폴리머의 표면형상을 다양하게 하여 그 차이에 따라 소자 출력 값에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 제작한 TENG이 만들어낸 전압 값은 6.3V이고 단락전류는 0.635 μ A이며, 이를 이용해 10개의 녹색 LED를 밝혔다. 또한 표면 형상 및 사이간격에 변화를 주어 결과 값에 어떠한 영향을 주는 지도 함께 연구하였다.

2. 제작방법 및 분석

2.1 표면형상이 다른 PDMS 레이어의 제작과 분석

Sylgard 184 엘라스토머와 경화제를 10:1 비율로 섞어 PDMS 솔루션을 준비한다. 솔루션을 살짝 물게 하기 위해서 염화메틸 1ml를 넣어 섞고 공기방울을 제거하기 위해, 진공 상태로 30분 정도 둔다. 그 이후 준비된 솔루션을 각기 다른 사포(120C, 220C, 320C)에 코팅시킨 후 전기오븐에 넣고 60도에서 12시간 경화시킨다. 그 후 상온에서 식힌 PDMS 레이어를 사포에서 분리시킨 후 ITO기판에 붙인다. PDMS 레이어의 표면 분석은 FESEM(field emission scanning electron microscopy, JSM-6700F, JEOL Ltd, 2 kV)을 이용하였으며 추가적으로 Ag nanoparticles(NPs)은 폴리올 합성법(polyol synthesis method)으로 만들었으며 TEM(transmission electron microscopy, JEOL JEM2100 microscopes)을 이용하여 크기와 모양을 분석하였다.

2.2. 마찰전기 나노발전소자의 제작방법

마찰전기 나노발전소자는 두 개의 레이어로 구성되는데 하나는 PDMS 패턴을 ITO기판 위에 부착한 것이고 다른 하나는 Ag NPs를 ITO기판에 스펀코팅한 것이다. 여기서 Ag NPs는 PDMS와 접촉할 때 더 많은 거칠기를 만들면서 또한 전극의 역할을 한다. 두 레이어는 각기 다른 간격(1, 3, 5, 7과 9 mm)을 가진 스펀지를 사이에 넣고 부착시킨다. 마지막으로 소자는 분리되지 않게 테이프로 감아 마무리하고 전기적 특성을 측정하고자 Picoammeter(Keithley, 6485)와 Nanovoltmeter(Keithley, 2182A)를 사용하였다. 실험에서 사용한 LED는 순방향 전압(Vf)이 3~3.2V이고 순방향전류(If)는 20mA이다.

3. 결과 및 고찰

Figure 11은 마찰전기 나노발전소자의 제작과정을 그림으로 나타낸 것이다. 첫 번째 ITO기판 위에 Ag NPs를 스핀코팅 시키고 두 번째 기판에는 준비한 PDMS 레이어를 부착시킨다. 그 사이에는 각기 다른 높이를 가진 스펀지 (1,3,5,7,9mm)를 넣어 연결한다. 여기서 스펀지는 두 기판의 간격을 유지시켜주는 스페이서 역할 뿐만 아니라 사이간격을 쉽게 조절하면서도 그 특성에 따라 외부 힘이 가해진 후 원상태로 돌아오는 역할을 한다. (PDMS 레이어의 실측사진을 Figure 11에 삽입하였다.)

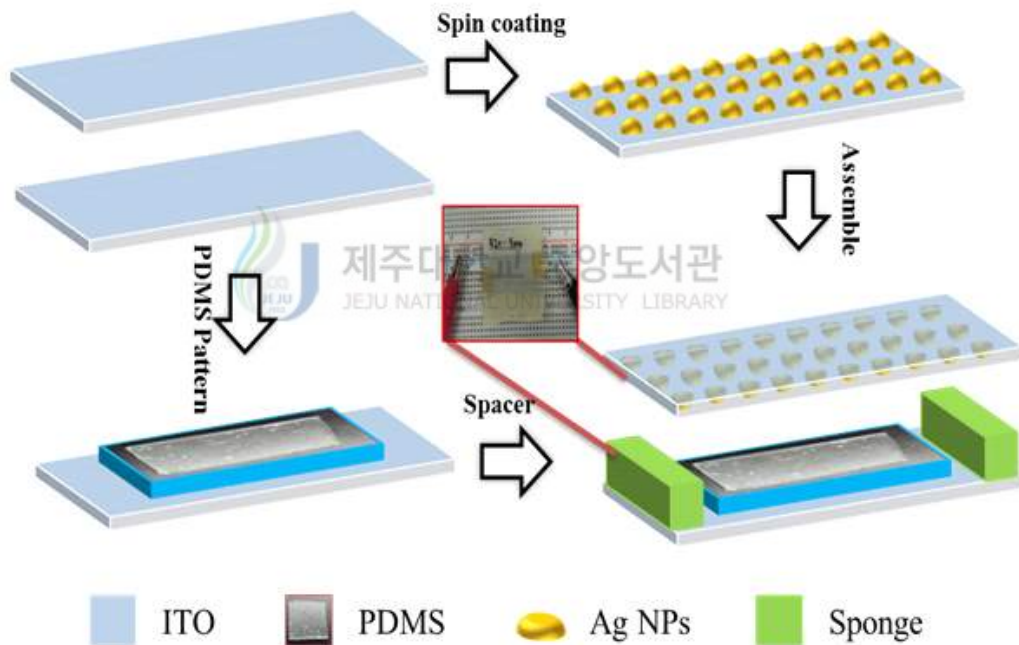


Figure 11. Schematic illustration of triboelectric nanogenerator (TENG) fabrication process. Inset shows the digital photograph of fabricated TENG.

Figure 12는 각기 다른 사포(120, 220, 320C)를 이용하여 제작한 PDMS를 측정 한 SEM 이미지이다. 120(Fig.12a)에서 220(Fig.12b), 320C(Fig.12c)으로 갈수록 표면이 사포의 표면형상에 따라 변화되는 것을 확인할 수 있다. 사포의 접촉면적은 320, 220, 120C 순으로 크며, 표면형상이 출력 값에 큰 영향을 주는 것을 이

후에 나오는 그래프를 통해 알 수 있다. Fig.12d는 Ag nanoparticle의 TEM 이미지로 구체의 형태로 균일하고 뭉침 없이 30nm 크기로 형성되었음을 볼 수 있다.

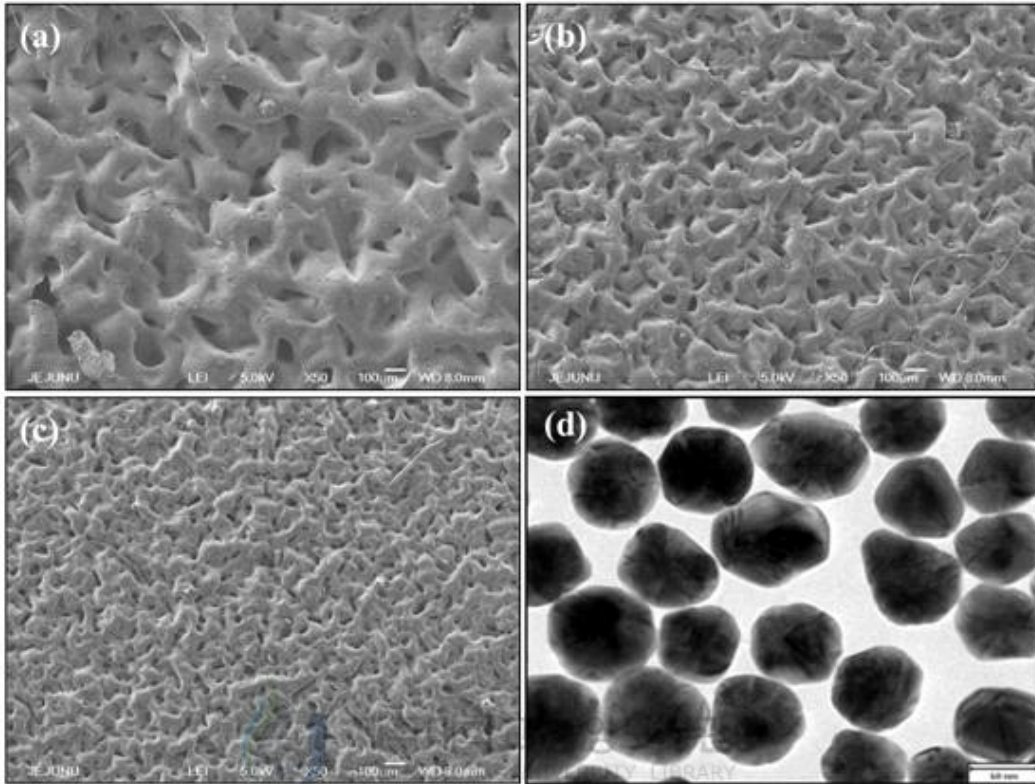


Figure 12. FE-SEM images of the PDMS layer prepared using various sandpapers (a) 120, (b) 220 and (c) 320 C grade. FE-SEM images showed the various surface roughness morphologies. (d) TEM image of silver nanoparticles.

제작한 TENG의 메커니즘을 Figure 13에 도식적으로 나타내었다. 기본적으로 TENG은 마찰전기와 정전기유도현상을 바탕으로 구동된다[24, 32]. 두 기관이 접촉하기 전, 기본 상태에서는 전하의 변화가 없으며(Fig.13a) 두 기관 사이의 간격(d)은 스페이서를 통해 유지된다. 외부 압력이 상판에 가해져 두 표면이 접촉하게 되면 대전열에 따라 PDMS 표면이 (-)전기를 띠게 된다(Fig.13b). PDMS 표면에 음전하가 분포됨에 따라 반대편 ITO 표면에는 전하적 중립을 위해 양전하가 대전된다. 가해진 힘이 줄어들면 마찰된 두 표면 사이에 간격이 변화하면서 포텐셜 또한 변하게 된다(Fig.13c). 위쪽과 아래쪽 전극에 포텐셜 차이가 생기면서 아래쪽 전극에서 위쪽 전극으로 전자가 이동하게 되는데 이는 자연적으로 평

형상상태를 이루고자 하는 현상으로 설명할 수 있다(Fig.13d). 여기까지가 전체 메커니즘의 절반과정이다. 다시 힘이 가해져서 두 표면이 마찰하게 되면 중립/평형상태가 깨지게 되는데 이를 다시 평형상태로 이를 때까지 아까와는 반대로 위쪽에서 아래쪽 전극으로 전자가 이동하게 된다(Fig.13e). Fig.13b는 다시 평형상태를 이룬 모습을 나타낸 것이며 이후에는 b에서 e순서가 반복된다.

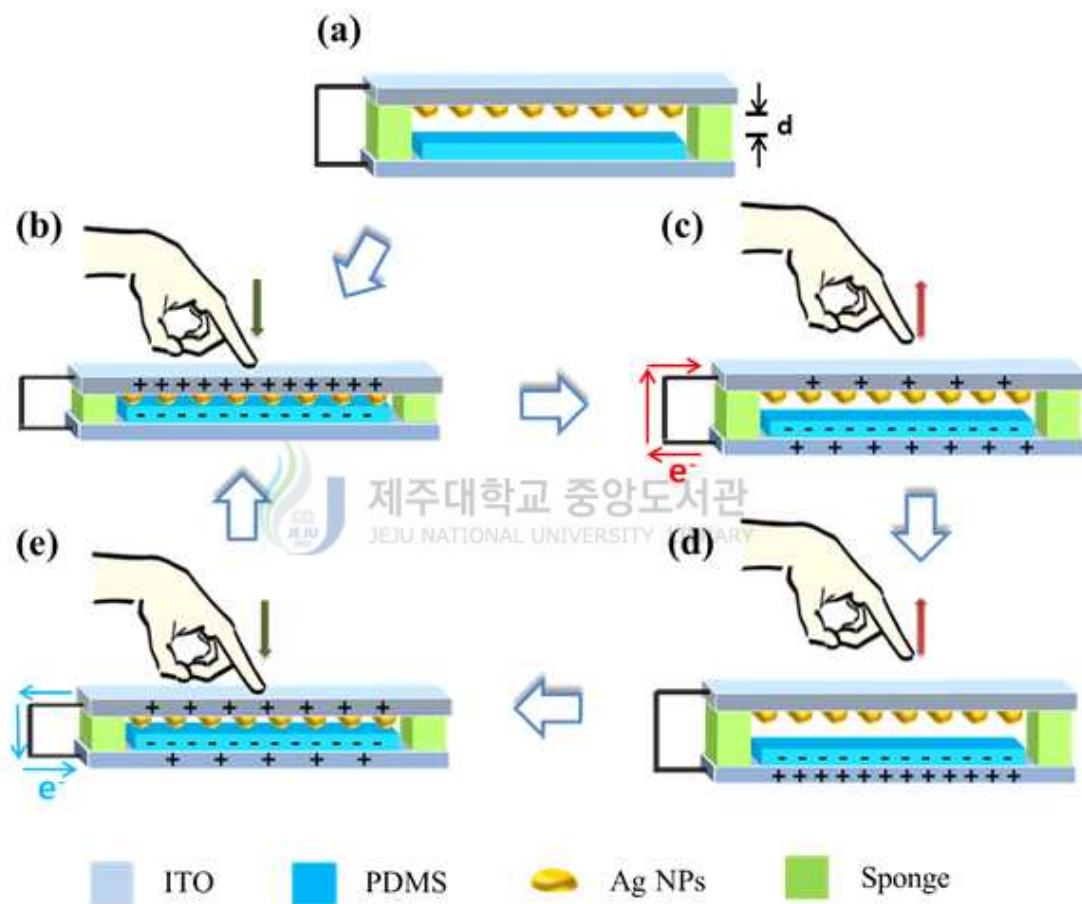


Figure 13. The electricity generation process of TENG. (a) Original position without external force. (b) External force makes ITO and PDMS layer to contact. (c) Reduced force brings separation. (d) Original state has triboelectric charges. (e) The force causes contact and electrons movement.

주파수와 진폭을 조절하여 제작한 TENG을 주기적으로 마찰하는 조건을 만든 후 각 소자에 대한 결과 값을 확인하는 실험을 하였다. Fig.14a와 b는 표면형상

에 따라 측정된 결과 값(개방전압 및 단락전류)이며 3가지 PDMS 표면형상 중에서 320C를 사용한 소자에서 가장 좋은 출력 값을 나타냈다. 320C-1mm 간격일 때 최대전압 값은 6.3V이고 최대전류는 0.635 μ A이며 320C-TENG이 가장 높은 출력 값을 보인 이유는 표면 거칠기가 낮기 때문으로 보인다. 표면 거칠기가 낮으면 접촉 면적이 증가하게 되고 그만큼 표면에 대전이 많이 일어나게 된다. 이 때문에 높은 결과 값을 발생하는 것이다.

이와 더불어 두 기관사이의 간격에 따른 결과 값에 대한 영향을 살펴보았다. 각각의 간격에 따른 평균 전압 값과 전류 값을 나타낸 것이 Fig.14c와 d이다. 그래프를 보면 사이거리가 증가할수록 평균 전압 및 전류 값이 감소되는 것을 알 수 있는데 이는 거리가 증가함에 따라 접촉 면적에 영향이 줄어드는 것으로 볼 수 있다.

제작한 320C-TENG에 외부저항을 연결하여 저항 값에 따라 출력 값이 어떻게 변화하는지 실험하였다. Fig.14e는 같은 조건(주파수:10Hz, 간격:1mm)에서 외부 저항에 따라 변화하는 값을 나타낸 그래프이다. 1k Ω 에서 800 M Ω 으로 증가함에 따라 전류 값은 같이 증가하였으며 이와는 반대로 전압 값은 감소하는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 전류 및 전압의 최댓값은 저항손실로 인해 낮아진 것으로 보인다. 이에 따라 동일 저항에 대한 전력 값은 Fig.14f와 같이 10 M Ω 에서 178 nW 를 가지며 제작한 TENG이 효율적으로 사용되기 위해서는 수~수십 M Ω 의 외부저항이 필요하다는 것을 알 수 있다.

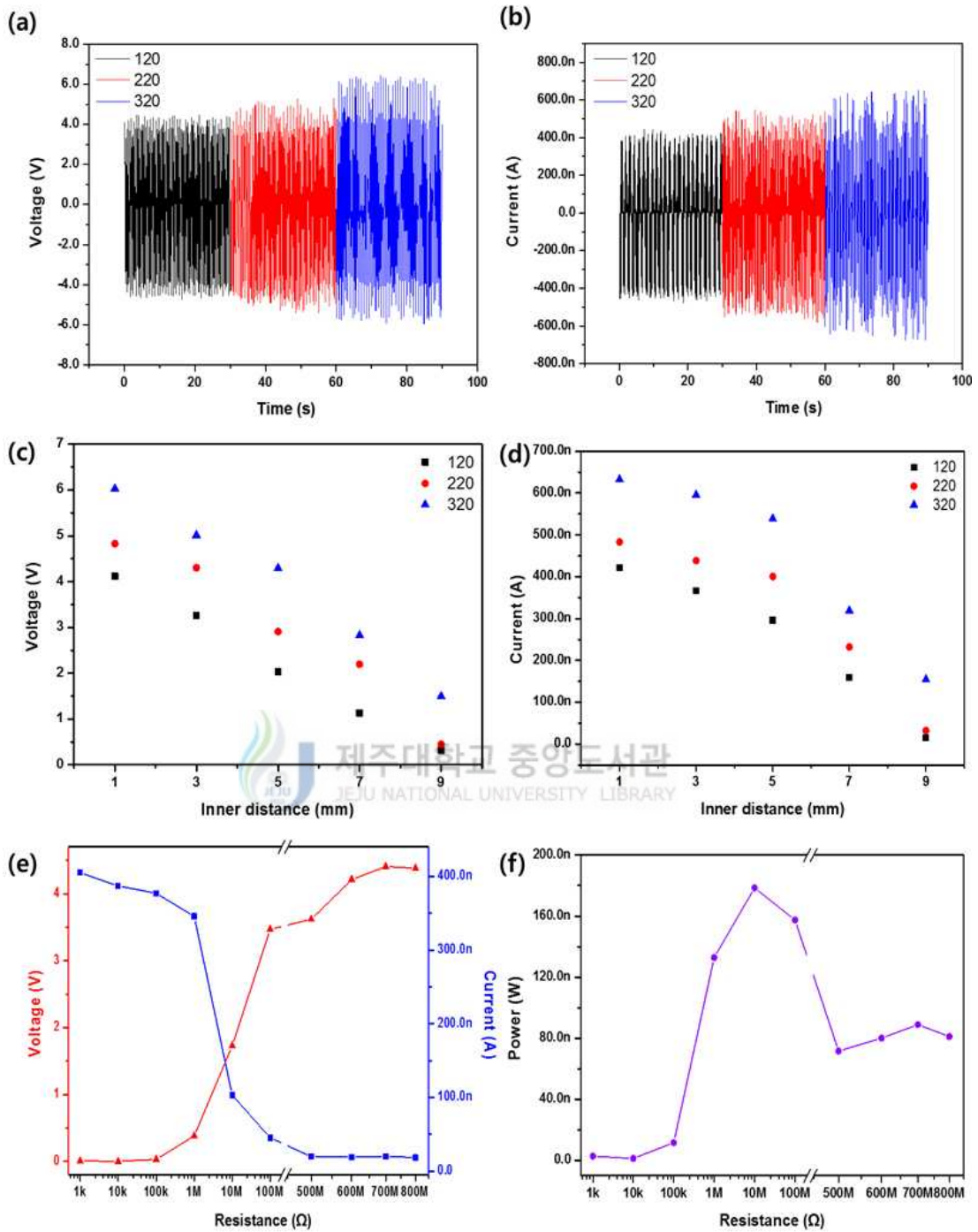


Figure 14. Electrical measurement of TENG. (a) Open-circuit voltage and (b) short-circuit current of TENG with different PDMS layers. (c) Average open-circuit voltage and (d) short-circuit current of different inner distance (1, 3, 5, 7, and 9 mm). (e) Dependence of the voltage and current output on the external resistance. (f) The external load resistance dependence of electrical power.

마지막으로 PDMS기판의 마찰전기 나노발전소자가 기계적 에너지를 전기로 변환하여 휴대용 전자기기에 활용될 수 있는지를 실험하였다. Fig.15a는 LED를 밝히는 실험사진이며 그 안에 구성된 회로를 나타낸 그림을 삽입하였다. 제작한 소자와 직렬로 연결된 10개의 LED를 연결한 회로에서 TENG은 동력원으로서 힘이 가해질 때마다 곧바로 10개의 LED를 작동시켰다. 이는 Fig.15b에서 확인할 수 있으며 손가락으로 힘을 주었을 때 마다 LED가 무리 없이 켜지는 것으로 보아 이 결과를 통해 PDMS-TENG이 자가발전시스템에 동력원으로서 활용될 수 있음을 나타낸다.

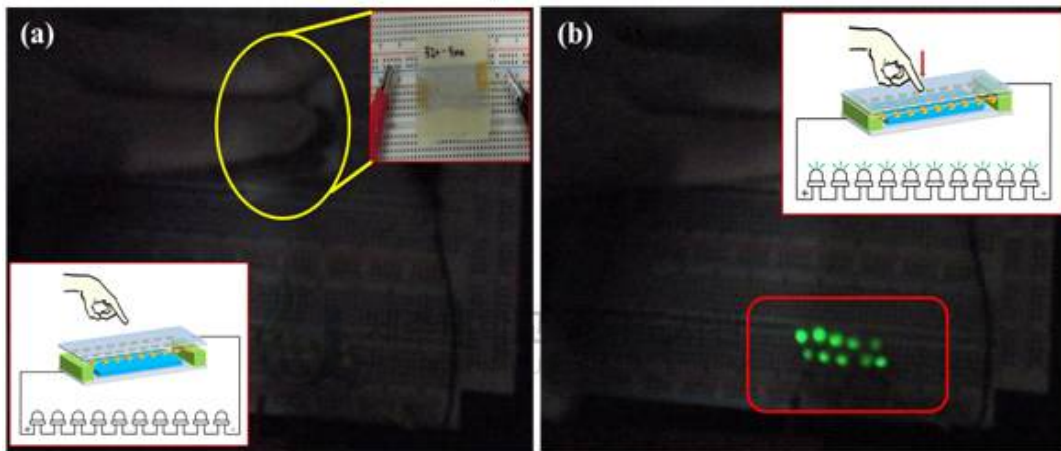


Figure 15. (a) Schematic of the energy harvesting circuit and LED display. (b) The photograph of the TENG-driven flashing LED display.

4. 요약

본 연구에서는 사포입자크기를 활용하여 손쉽게 다양한 PDMS 표면을 만들어 냈으며 이를 이용하여 PDMS 기판의 마찰전기 나노발전소자를 제작하였다. 제작한 소자는 기계적 에너지를 지속적이고 안정적으로 에너지를 수확하였으며 표면구조와 사이간격의 변화에 따라 TENG의 출력 값이 어떻게 변화하는지를 실험하여 전력 생산의 중요한 요소임을 알아냈다. 320C로 제작한 PDMS 레이어를 사용한 소자가 압력을 주었을 때 가장 많은 접촉면적을 가져 178 nW의 전력을 생산하였으며 이는 10개의 직렬로 연결된 초록색 LED를 밝혔다. 이 연구를 통해

제작한 TENG이 사람의 움직임, 기계의 진동과 같은 다양한 에너지원에서 전기를 생산할 수 있음을 확인하였다[33].



IV. 다양한 직물을 이용한 STEG의 개발

1. 서론

앞서 제작한 TENG을 통해 마찰전기 나노발전소자의 가장 기본적인 구조와 특징에 대해 분석하였다. 그러나 제작한 TENG의 결과 값이 기존의 발표된 소자들에 비하여 값이 높지 않았다. 현재 발표된 마찰전기 나노발전소자의 전압은 수십에서 수백 V를 생산하고 있으며, 전류는 수십~수백 μA 를 수확하고 있다. 결과값만을 놓고 보면 마찰전기 발전소자의 단점이자 개발과정에서 문제되고 있는 부분은 전류 값인데, 여러 연구진에서 전압 값은 크게 발생되었으나 전압 값을 크게 발생시키는 것에 번번이 어려움을 겪었다. 이러한 단점을 보완하고 출력 값을 향상시키고자 마찰전기 발전소자와 전자기 유도현상을 이용한 발전 소자를 결합한 소자를 발표하기도 하였다.[34]

이번 연구에서는 마찰전기 효과만을 이용하여 저렴하면서도 쉽게 제작이 가능하고 TENG의 단점을 보완하는 STEG(Single-electrode Triboelectric generator)을 개발하면서 동시에 결과 값을 높이는 구조와 재료를 설계하여 제작하고자 하였다.

2. 개발 내용 및 제작 방법

2.1 개발 내용

앞장에서 제작한 TENG은 전압 및 전류 값이 크게 나타나지 않아 실제로 활용하는데 큰 어려움이 있었다. 출력 값을 높이면서도 쉽게 활용할 수 있는 방법에 대해 고민하던 중, 일상생활에서 쉽게 발생하는 정전기에 대해 생각하게 되었다. 보통의 정전기는 따끔거릴 정도로 출력 값이 크게 나타나는데 어떠한 조건에서 발생하는지를 파악하여 발전소자에 적용하면 결과 값을 향상시키는데 도움이 될 것이라고 판단하였다. 따라서 기존의 발전소자와는 다르게 마찰하는 물질에 직물을 이용하여 발전 소자를 구성해 보았으며 간단한 실험을 통해 결과 값

이 향상된 것을 확인하였다. 또한 직물을 이용한 소자를 효과적으로 활용하기 위해서는 웨어러블 디바이스에 적용할 수 있도록 개발하는 것이 좋다고 생각하였다. 이에 따라 다양한 직물을 활용할 수 있으면서도 웨어러블 디바이스에 쉽게 적용할 수 있도록 단일전극모드를 적용한 소자를 개발하게 되었다.

다양한 직물을 이용하여 출력 값이 향상된 결과를 이어지는 내용에서 확인할 수 있으며, 최종적으로는 스마트 위치와 같은 웨어러블 디바이스처럼 소자를 구성하여 상용화할 때의 문제점 및 보완사항들에 대해 연구하였다.

2.2 PDMS 레이어의 제작 및 분석

Sylgard 184 엘라스토머와 경화제를 10:1 비율로 섞어 PDMS 솔루션을 준비한다. 솔루션을 살짝 묽게 하기 위해서 염화메틸 1ml를 넣어 섞고 공기방울을 제거하기 위해, 진공 상태로 30분 정도 둔다. 그 이후 준비된 솔루션을 사포(220C)에 코팅시킨 후 전기오븐에 넣고 60도에서 12시간 경화시킨다. 그 후 상온에서 식힌 PDMS 레이어를 사포에서 분리시켰다. PDMS 레이어의 표면 분석은 FE-SEM을 이용하여 표면 구조를 분석하였다.

2.3 마찰전기 나노발전소자의 제작방법

제작한 소자는 사각형 구조(6cm × 5cm)로 되어 있으며 사용한 물질은 PDMS, Al, PET와 직물이다. 사용한 직물은 세 가지이며 아크릴과 울이 6:4 비율로 혼합된 혼용직물(약어: AW)과 같은 비율로 폴리에스터와 울이 혼합된 직물(약어: PW) 마지막으로 100%의 면(약어: Co)을 사용하였다. STEG은 원래 한 개의 전극을 사용하지만 여기서는 전하를 제공하고 회수하는 역할을 전극을 추가로 두어 두 개의 전극으로 구성하였다. 한쪽은 PDMS 패턴을 Al 코팅한 PET 기판 위에 부착하였으며 다른 하나는 기존 전극의 역할만 하는 Al/PET기판으로 구성되었다. 여기서 Al/PET 기판은 다른 기판이 마찰되면서 필요한 전하를 제공하고 회수하는 베이스 전극 역할을 한다. 발전소자의 전기적 특성을 측정하고자 Picoammeter와 Nanovoltmeter를 사용하였으며 측정할 때 진동센서를 이용하여

주파수를 조절하며 소자의 충격을 주었다. 실험에서 사용한 LED는 순방향전압 (Vf)이 3~3.2V이고 순방향전류(I_f)는 20mA이다.

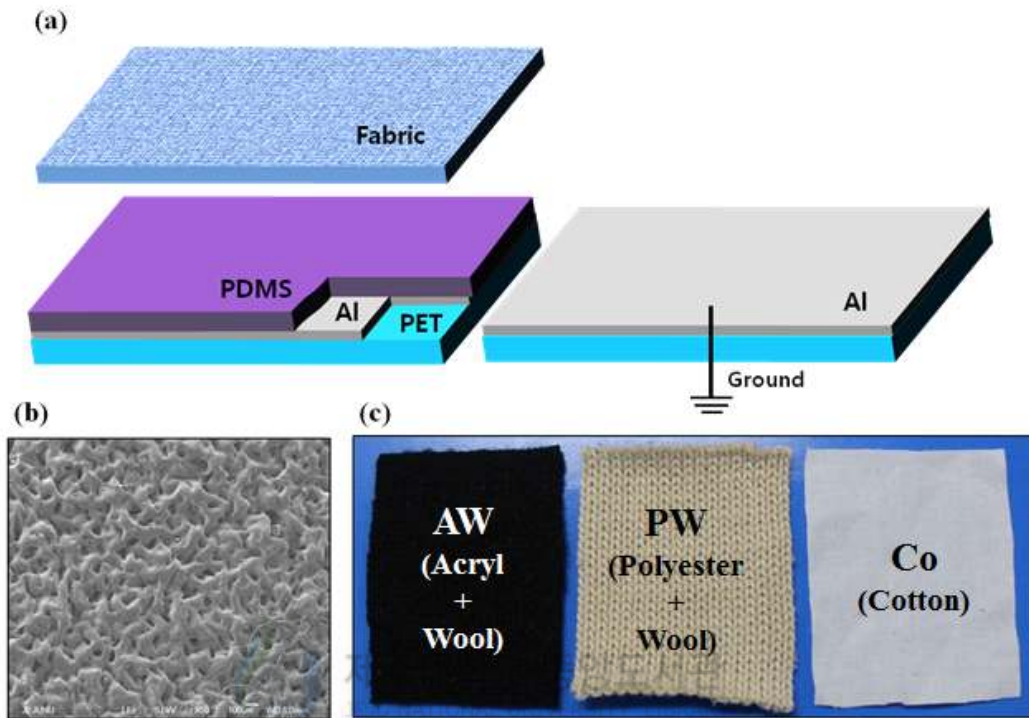


Figure 16. (a) Schematic illustration of the STEG. (b) FE-SEM image of the PDMS layer. (c) Photographs of fabric with different component.

3. 결과 및 고찰

접촉 대전 및 정전기 유도의 결합으로 설명되는 STEG의 메커니즘을 그림으로 나타내었다(Figure 17.). 기본구조에 대한 모습은 Fig.17a를 보면 알 수 있으며 아무런 변화가 없는 상태를 나타낸다. 외부 힘에 의하여 직물과 PDMS의 표면이 완전히 서로 접촉하여 반대의 극성이 대전된 상태를 Fig.17b를 보면 알 수 있다. 대전열에 따르면 PDMS는 직물보다 더 전자를 끌어당기는 성질을 가지고 있어 전자는 직물로부터 PDMS로 이동한다. 그 후, 완전히 균형을 이룬 상태에서 두 기판사이의 간격이 발생하면 전기적 포텐셜에 차이가 발생한다. PDMS 표면의 마이너스 전하로 인해 Al₁ 전극에 양전하를 유도하게 되고 자유 전자는 접지한

Al₂ 전극 방향으로 흐르게 된다(Fig.17c). 여기서 정전 유도 과정은 접촉된 직물과 PDMS 사이의 거리가 PDMS의 두께보다 상당히 크게 분리될 때 출력 전압, 전류 신호를 줄 수 있다. PDMS와 직물사이의 거리가 증가됨에 따라 Al₁ 전극 상에 유도된 양전하와 마찰 전기 (-)전하가 완전히 상영(screen)되는 경우 Fig. 17d와 같이, 어떠한 출력 신호도 관찰 할 수 없다. 직물이 PDMS에 다시 반대로 접근하면, Al₁ 과 Al₂ 전극에 접지한 전선을 따라 전자가 피부와 PDMS가 완전히 서로 접촉할 때 까지 흐를 때 ITO 전극의 양전하가 감소하면서 출력 전압, 전류 신호가 반대의 결과로 나온다(Fig.17e). Fig.17b는 다시 완전히 접촉해서 평형상태를 이룬 모습을 나타낸 것이며 이후에는 b에서 e순서가 반복된다.

주파수를 조절하여 제작한 STEG을 주기적으로 마찰하는 조건을 만든 후 각 소자에 대한 결과 값을 확인하는 실험을 하였다. Fig.18a~f는 3가지 STEG의 측정된 결과 값(개방전압 및 단락전류)이며 주파수는 6, 11, 16와 18Hz로 설정하여 각각의 결과 값의 변화를 실험하였다. AW를 사용한 STEG이 가장 큰 값을 나타내었는데 전압은 10.06V, 전류는 3.01mA를 발생시켰다(Fig.18a-b). 그 다음으로는 PW를 사용한 소자에서 9.88V, 1.13 μ A를 생산했으며(Fig.18c-d), Co을 이용한 소자에서는 각각 5.23V와 579.13nA를 나타냈다(Fig.18e-f). 전체적으로 주파수가 6Hz에서 18Hz로 증가할 때 전압, 전류 모두 증가하는 모습을 보였으며 이는 주파수가 증가할수록 같은 시간동안 더 많은 마찰을 발생시킴에 따라 표면에 생기는 전하량에 영향을 주기 때문으로 분석된다. 3가지 직물 중 AW에서 가장 큰 값을 보이는 이유는 대전열에 따라 PDMS와 가장 반대되는 특성을 가지고 있기 때문이다[8-9].

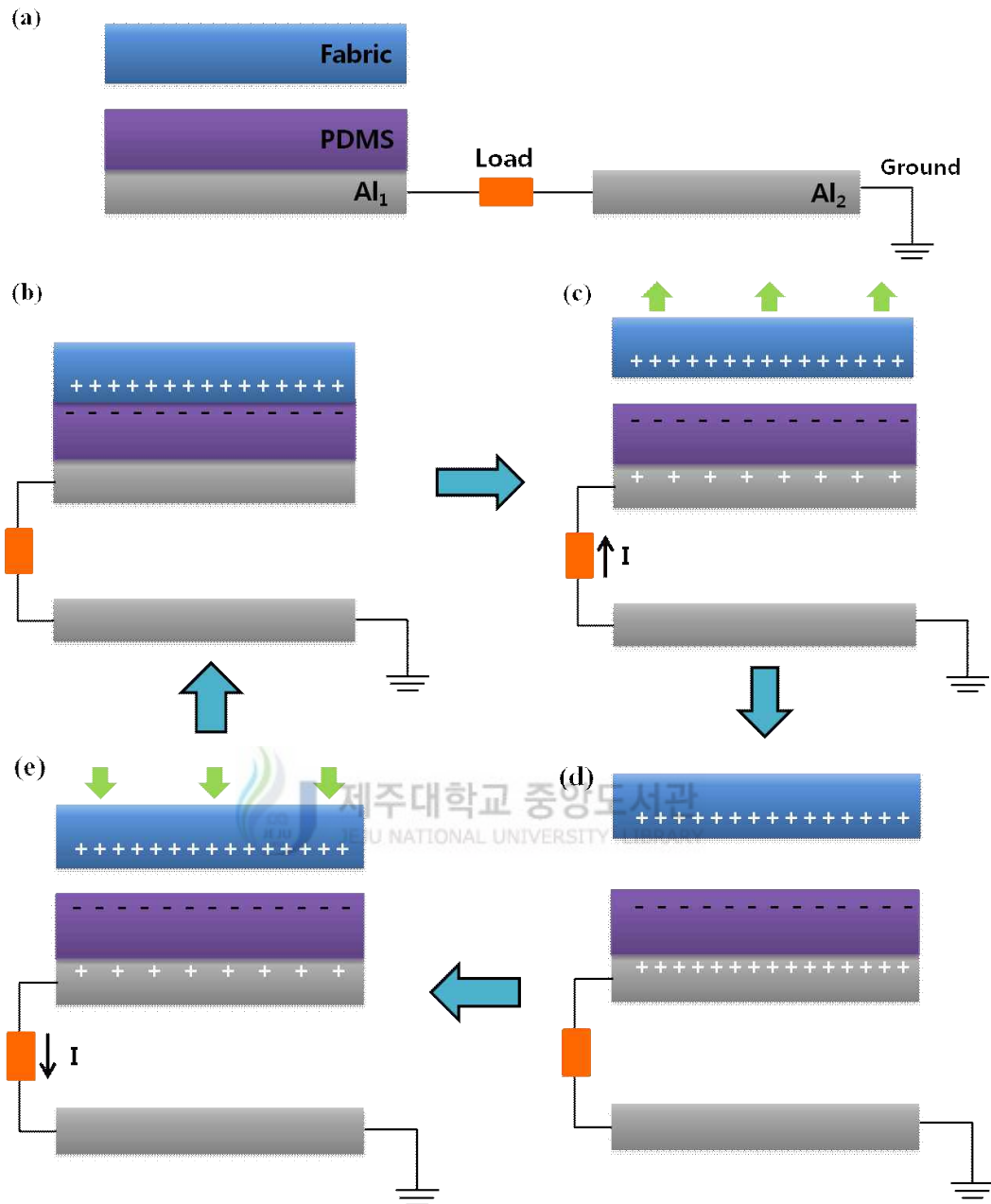


Figure 17. The electricity harvesting mechanism of the STEG. (a) Original position without external force. (b) External force makes Fabric and PDMS layer to contact. (c) Reduced force brings separation. (d) Original state has triboelectric charges. (e) The force causes contact and electrons movement.

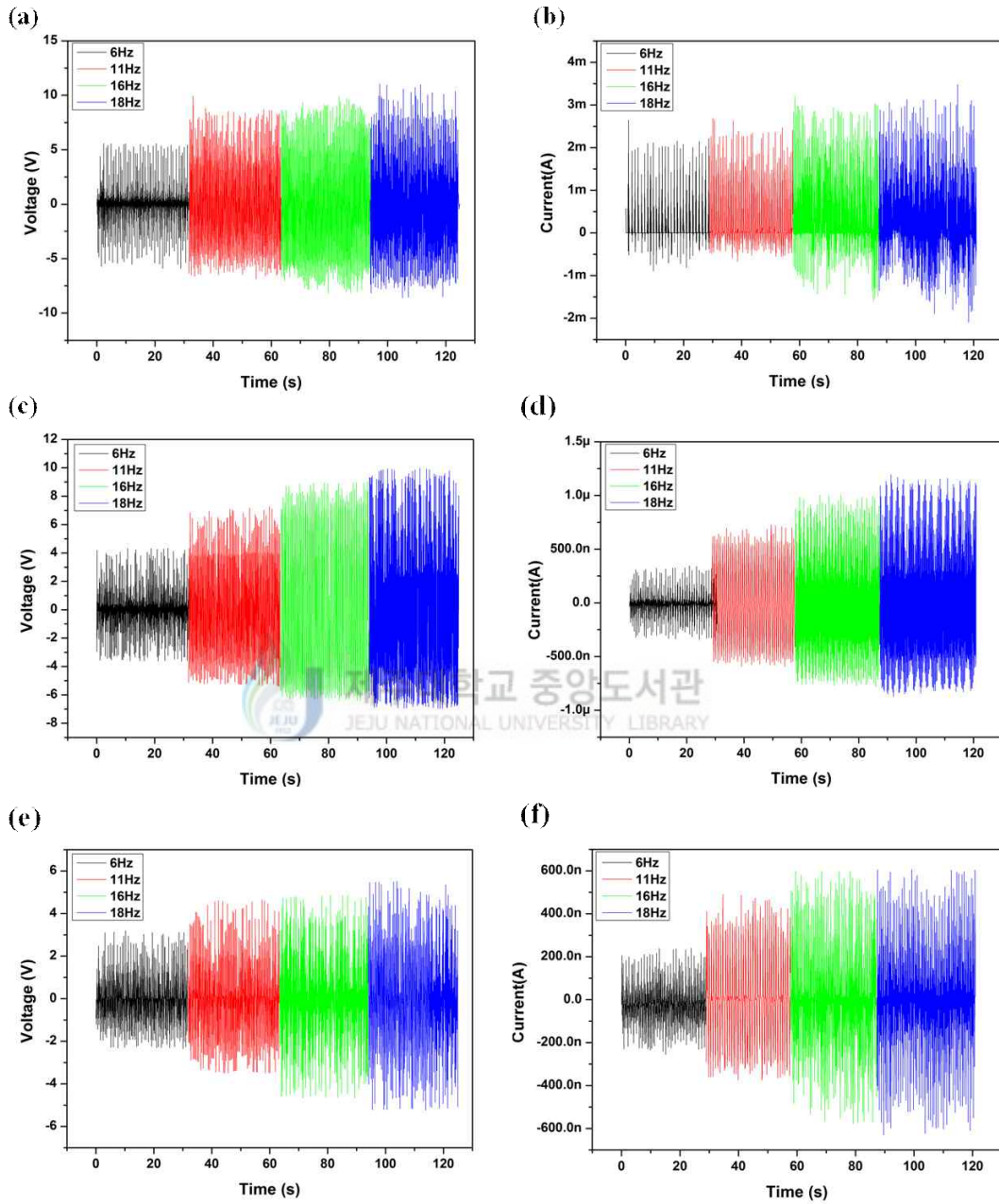


Figure 18. The open-circuit and short-circuit of STEG with different frequencies. (a) Voltage and (b) Current using AW. (c) and (d) using PW. (e) and (f) using Co.

Fig.19a와b는 3가지 소자들의 주파수별 결과 값을 종합적으로 정리한 것이며 앞서 설명한 내용과 같이 주파수가 증가할수록 전압과 전류 모두 증가하는 것을

볼 수 있다. Fig.19c와 d는 가장 큰 결과 값을 보인 AW-STEГ을 이용하여 정류 정류전압과 전류를 측정된 그래프이며 이를 통해 소자에서 발생한 AC 값을 그대로 변환하여 DC 값으로 나오는 것을 확인할 수 있었다.

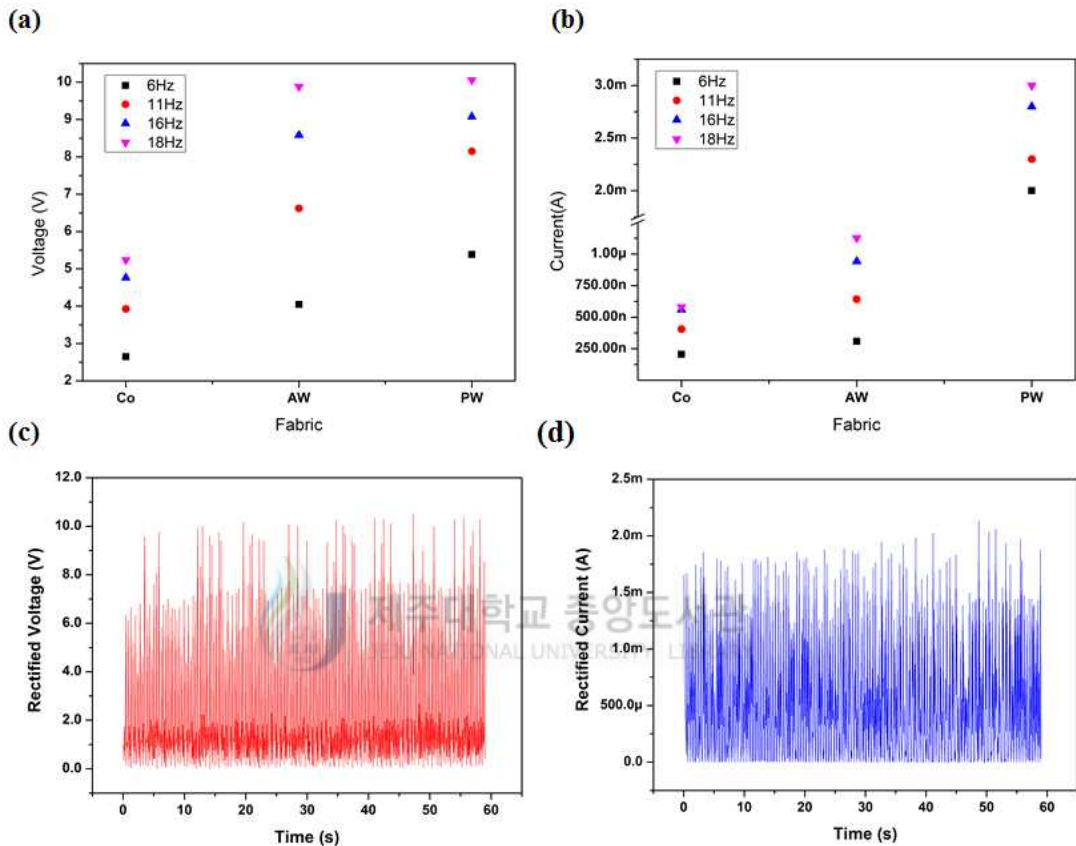


Figure 19. Electrical measurement of fabric-STEГ. (a) Open-circuit voltage and (b) short-circuit current of TENG with different fabric materials(AW, PW, Co). (c) Open-circuit rectified voltage and (d) short-circuit rectified current of AW-STEГ.

현재까지 측정된 마찰전기발전소자의 결과 값은 저항을 연결하지 않은 값인데 이를 실제로 활용할 때에는 저항에 연결되어 영향을 받기 때문에 외부저항에 따른 출력 값을 확인하고자 100Ω부터 1GΩ까지 저항을 연결하여 전압과 전류 값을 측정하였다. 저항의 크기가 증가함에 따라 전압 값은 0V에서 8V로 증가하는 것을 확인할 수 있었고 반대로 전류 값은 2.7mA에서 750μA로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 각 저항에 따른 출력 값을 계산하여 Fig.20b에 보이는 것과 같이

그래프로 나타내었다. 100MΩ일 때 7mW로 가장 높은 출력 값을 보였으며 이는 소자가 100MΩ의 저항과 연결되었을 때 가장 큰 값을 발전시킬 수 있다는 것을 의미한다.

다른 직물을 사용한 소자들에 10μF 커패시터를 연결하여 충전량을 확인하였다. 동일시간(300초)동안 18Hz로 마찰하였을 때 Fig.20c와 같이 Co는 0.113V, PW는 1.8V 그리고 AW는 2.9V 전압 값을 충전하는 것을 확인할 수 있었다. 가장 큰 값을 나타내는 AW-STEAG을 이용하여 LED를 동작시키는 실험을 하였는데 별도의 전원 없이 소자만으로 50개의 LED를 밝히는 것을 확인하였다.

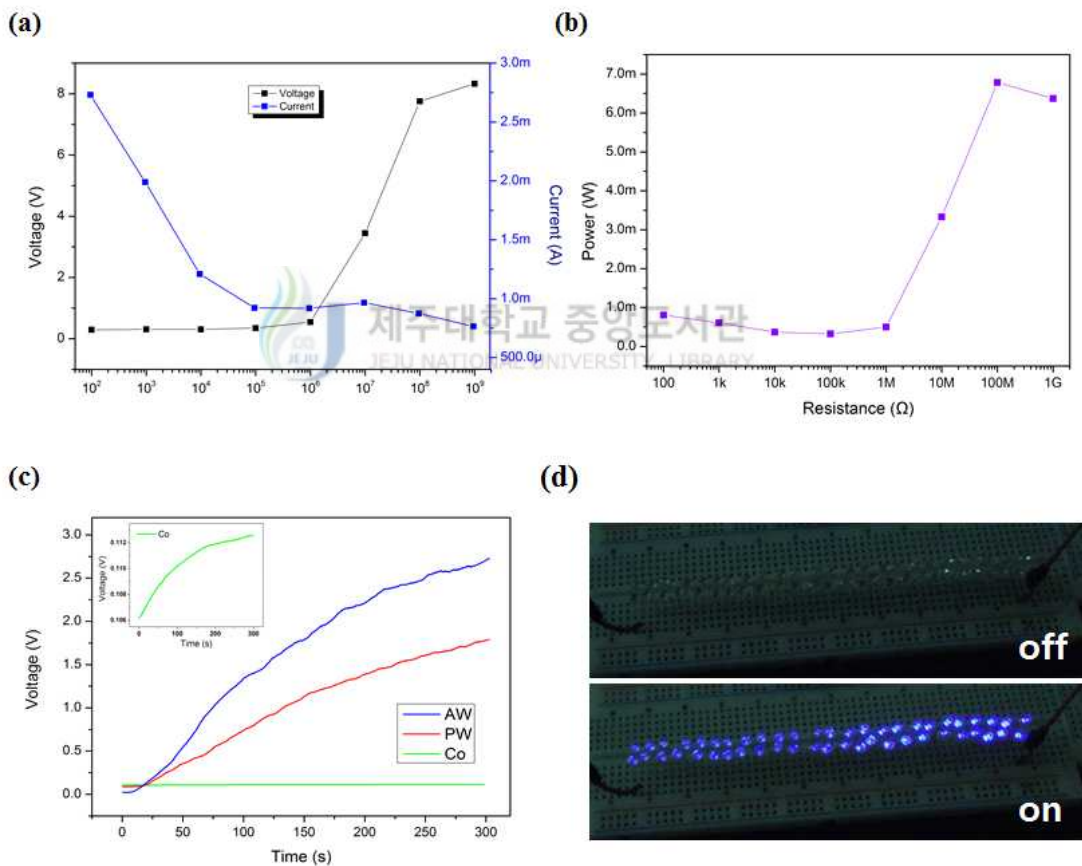


Figure 20. Electrical property of STEG. (a) Dependence of the voltage and current output on the external resistance. (b) The external load resistance dependence of electrical power. (c) Charging of 10μF capacitor with different STEG. (d) The photograph of the STEG-driven flashing 50 LED display.

4. 요약

이번 장에서는 다양한 직물을 활용하여 손쉽게 단일전극 마찰전기 나노발전소자를 개발하였으며 각각에 따른 결과 값을 확인하였다. 제작한 소자는 동일한 조건에서 아크릴과 울을 혼합한 직물을 이용하였을 때 가장 큰 값을 나타내었으며 아크릴의 마찰전기 극성이 PDMS와 가장 큰 차이를 보이기 때문에 더 많은 전하량을 발생시킨 것으로 분석된다. 주파수의 변화에 따라 STEG의 출력 값이 어떻게 변화하는지를 실험하여 동일시간일 때 더 많은 마찰을 시킬수록 출력 값은 커진다는 것을 알아냈다. 기존의 제작한 TENG과 비교하여 높은 값의 전압(10.06V)과 전류값(3.01mA)을 생산하였으며 저항과 연결하였을 때 최대 7mW의 전력을 생산하는 것을 확인하였다. 이는 50개의 LED를 외부전원 없이 구동시켰으며 10 μ F의 커패시터를 300초동안 2.9V를 충전시켰다. 이 연구를 통해 제작한 발전소자가 주변에서 버려지는 에너지를 수확하여 무선네트워크 시스템 및 웨어러블 디바이스 등에 전기를 공급하는 동력원으로 활용될 수 있음을 확인하였다.



V. 마찰전기발전소자의 웨어러블 디바이스 활용방안

1. 서론

웨어러블 디바이스(Wearable device)란 안경, 시계 등과 같이 신체나 의류에 착용해서 자유롭게 사용할 수 있도록 작고 가볍게 개발된 PC를 뜻한다. 웨어러블 디바이스는 1960년대에 단순히 계산기나 카메라를 부착하는 형태로 시작했지만 1980년대 입출력 장치와 컴퓨터 기능이 도입된 프로토타입이 등장하였으며 2000년대에는 발열문제, 단말기 소형화 등이 진전되어 발전을 거듭하고 있다[35] 스마트폰 시장이 성장함에 따라 웨어러블 디바이스에 대한 관심이 높아지면서 삼성, 애플, 구글 등과 같은 글로벌 IT 기업들이 앞 다투어 스마트 워치 등을 내보이고 있으며 새로운 수익원으로 급부상하고 있다. 하지만 지속적인 발전을 위해서는 배터리 수명 문제와 독립된 스마트 기기로서의 역할을 할 수 있는 기술적인 문제가 해결되어야 하는 것으로 예측된다[36].

따라서 이번 연구에서는 앞서 개발한 마찰전기 발전소자를 이용하여 기존 소자를 그대로 외투에 부착하거나 스마트 워치와 같은 팔찌 형태로 제작하여 인체의 움직임에 따라 어떠한 출력 값을 생산하는지를 실험하였으며 실생활에서 활용될 마찰전기 발전소자의 가능성과 다양한 활용방안에 대해서 말하고자 한다.

2. 실험방법

실험에는 두 가지의 소자를 활용하였는데 하나는 4장에서 설명한 소자와 같은 것을 추가로 제작하여 사용하였으며 다른 하나는 손목시계와 동일한 크기로 제작하여 실제로 착용할 수 있게 만들었다. 아래에는 팔찌형태로 제작한 소자의 구성을 보여주고 있으며 총 크기는 5.5cm × 1.5cm, 실제 접촉면적은 3cm × 1.5cm로 제작하였다. Fig.21.b는 발전소자에 정류회로를 연결하여 교류 값을 직류로 변환한 후 LED나 커패시터를 연결하여 실험할 때의 구성을 나타내는 그림이다.

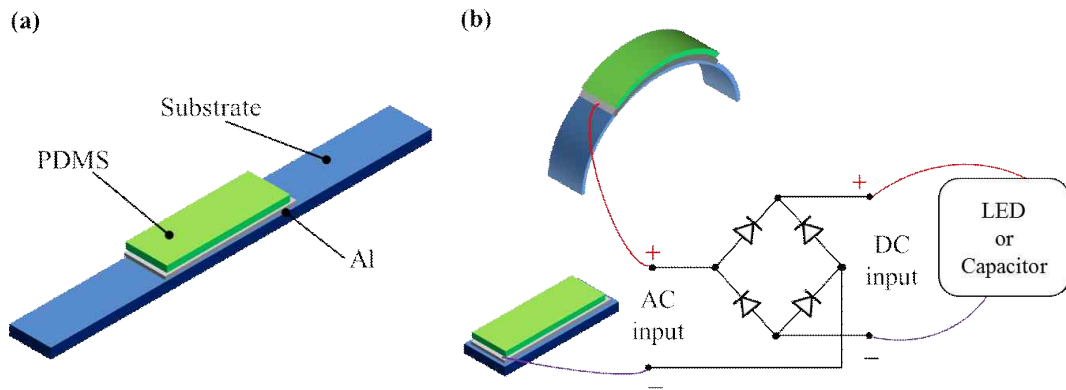


Figure 21. Schematic of bracelet-STEG (a) The structure design of the STEG. (b) Electric circuit diagram of total connect circuit.

3. 결과 및 고찰

첫 번째 실험은 기존의 소자를 외투에 부착시킨 후 손으로 소자가 있는 부분에 힘을 가했을 때의 전압과 전류를 측정하였다(Fig.22a-c). 전압은 1~4V 정도의 값이 나왔으며, 전류는 300nA~1.5 μ A 범위에서 결과 값을 나타냈다. 실제 환경에 적용하여 실험하는 조건에 따라 결과 값은 가해진 힘에 비례하여 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 두 번째 실험은 같은 조건에서 외투를 펴려질 때의 결과 값을 측정한 것이며(Fig.22d-f). 첫 번째 실험보다 적은 힘이 가해짐에 따라 전체적으로 전압과 전류 값이 감소한 것을 알 수 있다. 전압은 0.2에서 0.7V 범위에서 변화하며 발생하고 전류는 50에서 200nA 범위에서 발생하는 것을 확인하였다.

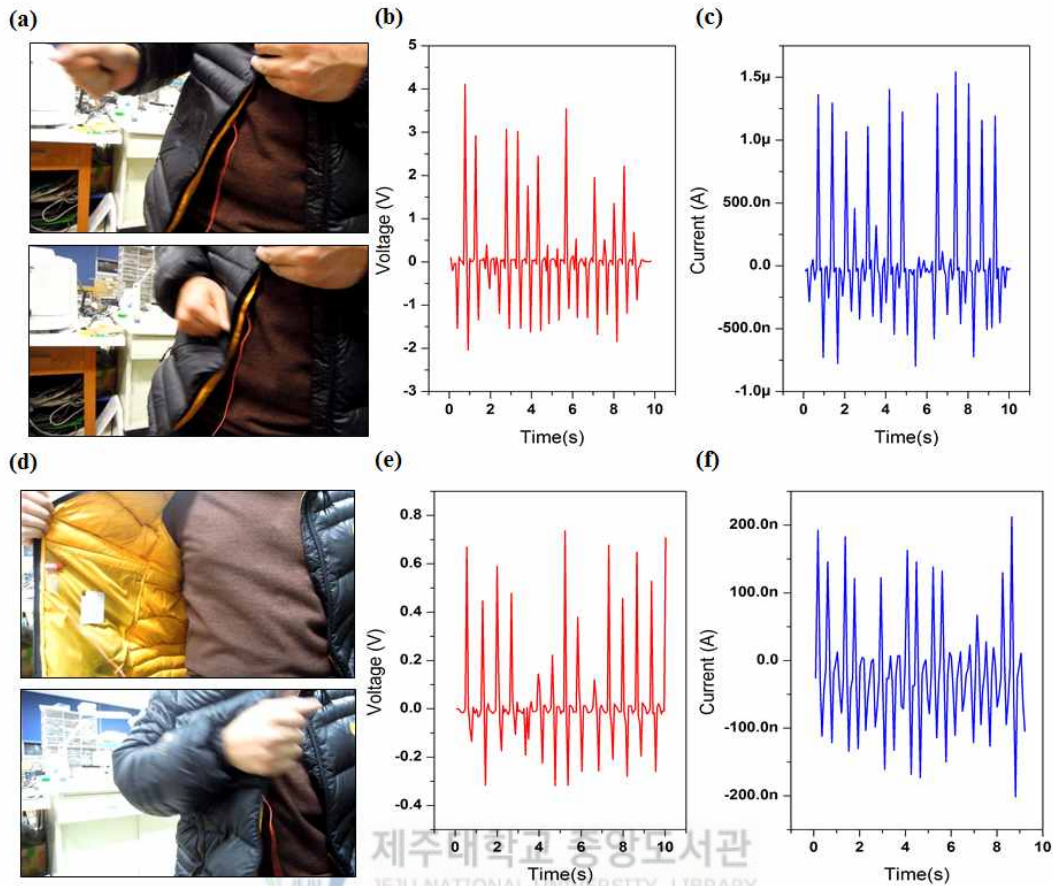


Figure 22. Output performance of fabric-STEG in jacket (a) Photograph of the device in hit condition: (b) Open-circuit voltage and (c) short-circuit current. (d) Photograph of the device in flutter condition: (e) Open-circuit voltage and (f) short-circuit current.

이어서, 팔찌 형태로 제작한 마찰전기 발전소자를 이용하여 손목부분에 충격을 가할 때와 소매 안에서 마찰되는 조건을 설정하여 실험하였다. 세 번째 실험은 제작한 STEG을 착용한 후 손목부분에 충격을 가해서 책상이나 다른 물체에 부딪히는 경우에 발생하는 결과 값을 측정하였다. 소자의 크기가 줄어들어 접촉 면적이 작아짐에 따라 전체적으로 앞의 소자보다 적은 양의 전압과 전류 값을 발생하는 것을 알 수 있으며 전압은 0.7에서 1.5V, 전류는 200에서 900nA 범위에서 전기를 생산하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 소자와 LED를 연결하여 실험을 진행하였으며 4개의 LED를 구동하는 것을 삽입된 부분을 통해 확인할 수 있다. 마지막으로 소자가 소매 안에서 움직임에 따라 마찰되는 경우에 대해 실험하였

다. 실제로 팔찌나 시계가 착용된 상태에서 팔을 움직일 때마다 소자와 직물간의 작은 마찰이 계속 있기 때문에 동일한 환경을 설정하여 실험하게 되었다. 소자를 소매 안으로 넣고 손목만 흔들었을 경우 슬라이딩 모드와 같이 PDMS와 직물이 옆으로 이동하면서 마찰전기가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 마지막 실험에서는 전압은 0.03~0.15V 범위에서 측정되었고 전류는 180~760nA 범위에서 측정되었다.

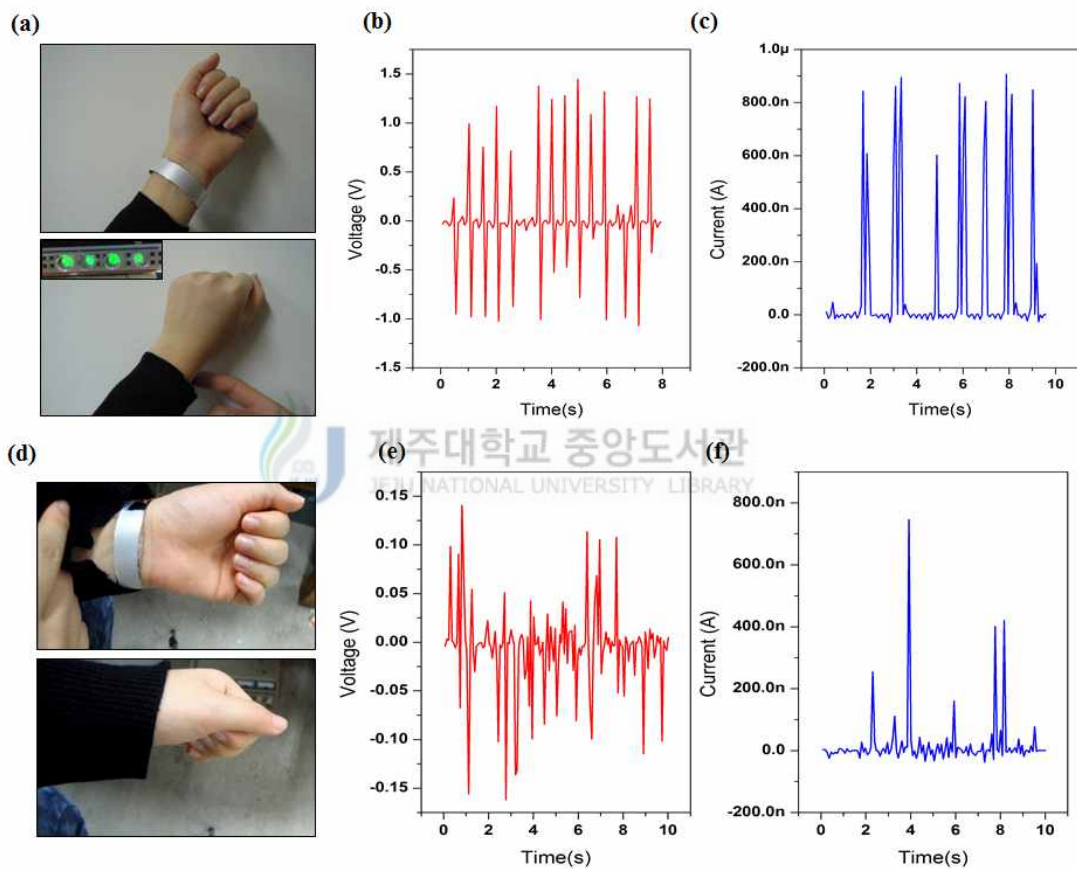


Figure 23. Output performance of bracelet-STEG. (a) Photograph of the device in shake condition: (b) Open-circuit voltage and (c) short-circuit current. (d) Photograph of the device in shake condition (e) Open-circuit voltage and (f) short-circuit current.

4. 요약

앞에서 연구한 마찰전기 발전소자를 이용하여 웨어러블 디바이스 형태로 제작하여 다양한 신체움직임에 적용하여 실험하였다. 팔이나 손이 움직일 때마다 생기는 작은 마찰에서부터 책상이나 벽에 부딪히는 충격까지 여러 조건에서 소자가 전기를 생산하는 것을 확인할 수 있었다. 높게는 4V에서 적게는 0.15V까지 실제 환경에서 전압이 발생하는 것을 측정 그래프를 통해 나타내었으며 전류 또한 최대 1.5 μ A까지 생산하는 것을 볼 수 있었다. 여기에 LED를 연결하여 구동하는 실험을 하였으며 소자에서 발생한 전기가 곧바로 LED를 밝히는 것을 확인할 수 있었다. 이 실험을 통해 마찰전기 발전소자가 버려지는 에너지를 수확한 전기를 생산하는 것을 알 수 있었으며 이를 웨어러블 디바이스에 적용하여 다양한 인체움직임에서 전압과 전류를 발생하는 것을 확인하였다. 이것은 본 논문에서 말하고자하는 마찰전기 발전소자의 목적과 중요성에 대해 직접적으로 보여주는 결과이기도 하다. 그러나 실제 소자를 상용화하기 위해서는 정전기가 전자제품에 영향을 미치지 않도록 보호하는 방법 및 마찰되는 직물이 없을 경우를 생각한 다른 구조들에 대한 추가적인 실험과 연구가 필요하다.

앞으로 추가적인 실험을 통하여 상용화할 수 있는 발전소자를 제작하고 알맞은 저장장치를 연결하여 최종적으로는 자가발전 웨어러블 디바이스를 개발하고 이를 실제 환경에 적용하여 구동하고자 한다.

VI. 결론

본 논문은 다양한 재료와 구조를 이용하여 마찰전기 나노발전소자를 개발 및 제작하였으며 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 마이크로 또는 나노패턴을 물리적으로 만들어낸 표면구조에 의해 마찰면적이 증가함에 따라 마찰대전도 같이 증가하여 결과적으로 출력 값을 향상시키는 요인임을 알 수 있었다. 마찰전기 발전소자는 마찰전기와 정전기 유도 현상이 결합한 메커니즘을 사용하는데 여기서 두 기관사이의 거리는 전기포텐셜의 차이를 불러일으키는 중요한 요인임을 이론과 더불어 실험결과에서도 확인할 수 있었다.

- 출력 값을 향상시키고자 직물을 이용한 단일전극 마찰전기 발전소자를 개발하였으며 전압 값이 크게 향상된 것을 확인하였다. 또한 각 직물에 따라 결과 값이 달라지는 것을 확인하였는데, 이는 마찰대전이 물질에 따라 극성을 가지기 쉬운 특성인지에 따라 나타낼 수 있는데 두 물질이 더 많은 반대의 극성을 가지고자 할 때 많은 양의 표면전하가 발생하게 된다. 따라서 마찰되는 두 물질을 더 많은 차이가 있도록 선택하는 것이 중요한 요인임을 알 수 있었다.

- 저항, 주파수, 마찰방식 등에 따라 마찰전기 발전소자의 출력 값이 달라짐을 확인할 수 있었으며 실제로 활용하기 위해서 적절한 곳에 활용할 수 있도록 각각의 환경을 면밀하게 분석하는 것이 필요해 보이며 상용화를 위해서는 여러 가지 문제점들을 파악하고 보완하여 소자를 제작하는 것이 필요해 보인다.

위의 내용들을 적용하여 제작한 소자는 기계적 에너지, 진동 에너지, 화학적 에너지, 인체에너지 등의 다양한 동력원들을 효율적으로 전기적인 에너지로 변화시켜줄 수 있다. 이를 이용한 나노발전소자들이 무선, 원격, 독립적으로 작동하기 위한 나노시스템에게 지속적으로 에너지를 공급해주어 스마트 센서, 웨어러블 디바이스, 환경 모니터링과 같은 시스템을 실제로 실현시킬 수 있고 향후 확장된 응용분야에 중요한 기술로 사용되어질 것으로 보인다.

REFERENCE

- [1] Petroleum, B. (2013). BP Statistical Review of World Energy. June 2013. London: British Petroleum.
- [2] 이수재, 유인규, 추혜용.(2012). **Nanopiezotronics** 기술. 전자통신동향분석 27(1), 1-18.
- [3] 윤승욱.(2013). **휴대용 제품에서의 나노발전기 개발 현황**. 한국과학기술정보연구원
- [4] [http://wonderfulengineering.com/german-engineer-makes-a-free-energy-harvesting -device](http://wonderfulengineering.com/german-engineer-makes-a-free-energy-harvesting-device)
- [5] Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312(5771), 242-246.
- [6] Wang, Z. L. (2007). Nanopiezotronics. *Advanced Materials*, 19(6), 889-892.
- [7] Wang, Z. L. (2008). Towards Self Powered Nanosystems: From Nanogenerators to Nanopiezotronics. *Advanced Functional Materials*, 18(22), 3553-3567.
- [8] <http://owlsmag.wordpress.com/2010/01/20/a-natural-history-devin-corbin/>
2.Jump up
- [9] Disputatio physica experimentalis, de electricitatibus contrariis... Typis Ioannis Iacobi Adleri, 1757.
- [10] Fan, F. R., Tian, Z. Q., & Lin Wang, Z. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328-334.
- [11] Wang, Z. L. (2013). Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS nano*, 7(11), 9533-9557.
- [12] Zhu, G., Pan, C., Guo, W., Chen, C. Y., Zhou, Y., Yu, R., & Wang, Z. L. (2012). Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning. *Nano letters*, 12(9), 4960-4965.

- [13] Wang, S., Lin, L., & Wang, Z. L. (2012). Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics. *Nano letters*, *12*(12), 6339–6346.
- [14] Wang, S., Lin, L., Xie, Y., Jing, Q., Niu, S., & Wang, Z. L. (2013). Sliding-triboelectric nanogenerators based on in-plane charge-separation mechanism. *Nano letters*, *13*(5), 2226–2233.
- [15] Zhu, G., Chen, J., Liu, Y., Bai, P., Zhou, Y. S., Jing, Q., ... & Wang, Z. L. (2013). Linear-grating triboelectric generator based on sliding electrification. *Nano letters*, *13*(5), 2282–2289.
- [16] Lin, L., Wang, S., Xie, Y., Jing, Q., Niu, S., Hu, Y., & Wang, Z. L. (2013). Segmentally structured disk triboelectric nanogenerator for harvesting rotational mechanical energy. *Nano letters*, *13*(6), 2916–2923.
- [17] Yang, Y., Zhou, Y. S., Zhang, H., Liu, Y., Lee, S., & Wang, Z. L. (2013). A Single Electrode Based Triboelectric Nanogenerator as Self Powered Tracking System. *Advanced Materials*, *25*(45), 6594–6601.
- [18] Yang, Y., Zhang, H., Chen, J., Jing, Q., Zhou, Y. S., Wen, X., & Wang, Z. L. (2013). Single-Electrode-Based Sliding Triboelectric Nanogenerator for Self-Powered Displacement Vector Sensor System. *ACS nano*, *7*(8), 7342–7351.
- [19] Chen, J., Zhu, G., Yang, W., Jing, Q., Bai, P., Yang, Y., ... & Wang, Z. L. (2013). Harmonic Resonator Based Triboelectric Nanogenerator as a Sustainable Power Source and a Self Powered Active Vibration Sensor. *Advanced Materials*, *25*(42), 6094–6099.
- [20] <https://altamashjiwani.files.wordpress.com/2010/08/greensuit2.jpg>
- [21] Zhou, T., Zhang, C., Han, C. B., Fan, F. R., Tang, W., & Wang, Z. L. (2014). Woven Structured Triboelectric Nanogenerator for Wearable Devices. *ACS applied materials & interfaces*, *6*(16), 14695–14701.
- [22] <http://www.mistralsolutions.com/product-engineering-services/solutions/wearable-electronics/>

- [23] Fan, F. R., Lin, L., Zhu, G., Wu, W., Zhang, R., & Wang, Z. L. (2012). Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films. *Nano letters*, *12*(6), 3109–3114.
- [24] Lin, Z. H., Zhu, G., Zhou, Y. S., Yang, Y., Bai, P., Chen, J., & Wang, Z. L. (2013). A Self Powered Triboelectric Nanosensor for Mercury Ion Detection. *Angewandte Chemie International Edition*, *52*(19), 5065–5069.
- [25] <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/14319544/Nanorobot-cromalocitos.html>
- [26] Chen, C. Y., Liu, T. H., Zhou, Y., Zhang, Y., Chueh, Y. L., Chu, Y. H., ... & Wang, Z. L. (2012). Electricity generation based on vertically aligned PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃ nanowire arrays. *Nano Energy*, *1*(3), 424–428.
- [27] Xu, S., Poirier, G., & Yao, N. (2012). Fabrication and piezoelectric property of PMN-PT nanofibers. *Nano Energy*, *1*(4), 602–607.
- [28] Chen, X., Xu, S., Yao, N., & Shi, Y. (2010). 1.6 V nanogenerator for mechanical energy harvesting using PZT nanofibers. *Nano letters*, *10*(6), 2133–2137.
- [29] Zhong, J., Zhong, Q., Fan, F., Zhang, Y., Wang, S., Hu, B., ... & Zhou, J. (2013). Finger typing driven triboelectric nanogenerator and its use for instantaneously lighting up LEDs. *Nano Energy*, *2*(4), 491–497.
- [30] Zhang, X. S., Han, M. D., Wang, R. X., Zhu, F. Y., Li, Z. H., Wang, W., & Zhang, H. X. (2013). Frequency-multiplication high-output triboelectric nanogenerator for sustainably powering biomedical microsystems. *Nano letters*, *13*(3), 1168–1172.
- [31] Lin, Z. H., Cheng, G., Lin, L., Lee, S., & Wang, Z. L. (2013). Water - Solid Surface Contact Electrification and its Use for Harvesting Liquid Wave Energy. *Angewandte Chemie International Edition*, *52*(48), 12545–12549.
- [32] Zhu, G., Lin, Z. H., Jing, Q., Bai, P., Pan, C., Yang, Y., ... & Wang, Z. L.

- (2013). Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator. *Nano letters*, 13(2), 847-853.
- [33] SoYoon S., Saravanakumar, B., Ramadoss, A., Taehyun, K., Sang-Jae K. Fabrication of PDMS-based triboelectric nanogenerator for self-sustained power source application. *International Journal of Energy Research*, (Submitted to Journal).
- [34] Hu, Y., Yang, J., Niu, S., Wu, W., & Wang, Z. L. (2014). Hybridizing Triboelectrification and Electromagnetic Induction Effects for High-Efficient Mechanical Energy Harvesting. *ACS nano*, 8(7), 7442-7450.
- [35] www.embeddedworld.co.kr
- [36] 전황수.(2014). 차세대 PC 웨어러블 디바이스 시장 및 개발 동향. 정보통신산업진흥원



감사의 글

가장 먼저 논문을 지도해 주신 김상재 교수님께 감사드립니다. 학부생 때부터 지금까지 6년이 넘는 시간동안 많은 관심과 지도를 통해 좋은 결과를 보일 수 있도록 해주셨고 연구실 생활을 하는 동안 여러 가지 좋은 경험을 할 수 있도록 기회를 주신 것에 감사드립니다. 또한 바쁘신 가운데에도 제 학위논문의 심사위원을 맡아주시고 조언을 해 주신 임종환, 정지현 교수님께 감사드립니다. 논문심사와 일을 동시에 진행하느라 부족한 논문내용과 발표임에도 불구하고 크나큰 관심과 유익한 말씀을 해주셔서 자신감을 갖고 논문을 잘 마무리 하게 되었습니다.

연구실에서 6년이라는 시간을 보내면서 만나온 선·후배들과 연구실 멤버들에게도 감사의 마음을 전합니다. 특히, 졸업할 때까지 많은 조언과 도움을 준 대영오빠, 연구실의 모든 일을 도맡아 힘써준 태현이, 논문발표를 도와준 민희, 민건이, 이번에 같이 졸업하게 된 Kumar, Anan, Thiyagu, 의용오빠에게 축하인사와 함께 고생했다는 말을 전하고 싶습니다. 학문적으로도 인생의 멘토로도 좋은 사람들을 만나 너무 행복했고 연구실에서 함께 보낸 시간들이 오래도록 기억에 남을 것 같습니다.

마지막으로 항상 저를 믿어주시고 묵묵히 응원해주시는 사랑하는 부모님께 감사드립니다. 가까이 있지만 자주 연락도 못 드리는 못난 자식이지만 항상 이해해 주시고 믿어주셔서 제가 여기까지 할 수 있었고, 흔들리지 않고 제대로 마무리 할 수 있었습니다. 앞으로도 열심히 노력해서 부모님께서 해주신 은혜에 보답할 수 있는 자랑스러운 딸이 되도록 하겠습니다.

이외에도 여기에 미처 적지 못한 많은 분들께 감사드립니다. 많은 사람들의 관심과 도움이 저에게 힘이 되었기에 저도 여러분께 도움이 될 수 있는 존재가 될 수 있도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2014년 12월 25일

신소윤 올림