

## 화학 결합 종류에 따른 생활 용품 기반 마찰 발전기 거동 연구

황희재 · 최동휘 · 최덕현<sup>†</sup>

## Investigation on Behaviors of Triboelectric Nanogenerators Based on Life Supplies according to Kinds of Chemical Bonding

Hee Jae Hwang, Dongwhi Choi, Dukhyun Choi<sup>†</sup>

**ABSTRACT:** Triboelectric nanogenerators (TENGs), which are combined effects of triboelectricity and electric induction, is a large-area and low-cost technology that can be applied easily in our life. In this work, we applied life supplies to TENGs and analyzed a type of chemical bonding with the ratio of C-C/C-H/C-O/C=O bonding. As the ratio of C-C bonding increases, the materials can be positively charge. On the other hands, as the ratio of C-H bonding increases, the materials can be negatively charged materials. Based on these behaviors, we got a voltage of 210V, a current of 14.6  $\mu$ A and a maximum power of 9.8mW. Finally, we could turn on 97 light emitting diodes (LEDs) by using a wrap as a negative material and a magnetic note as a positive material.

**초 록:** Triboelectric nanogenerators (TENGs)는 정전기 기반의 마찰 전기 발전기로써 간단한 구조로 저비용, 대면적으로 손쉽게 활용할 수 있는 기술이다. 본 연구에선 생활 용품을 활용하여 화학적 결합 및 SEM image로써 분석을 하고 C-C/C-H/C-O/C=O bonding에 따라 bonding 조성비에 따라 C-C bonding의 비율이 클수록 음전하, C-H bonding 비율이 클수록 양전하 대전체가 되는 것을 확인하였다. 그러한 특성을 가지고 최적 생활용품을 활용하여 정전 출력 실험을 했을 때 최대 210 V, 14.6  $\mu$ A, 9.83 mW의 출력을 얻었다. 최종적으로, 랩과 마그네틱 노트를 이용해 97개의 Light Emitting Diodes (LEDs)를 점등할 수 있었다.

**Key Words:** 마찰 전기 발전기(Triboelectric nanogenerators), 생활용품(Life supplies), 화학적 결합(Chemical bonding), 저비용(Low costs), 대면적(Large area)

### 1. 서 론

최근 해양 쓰레기 통합 정보 시스템에 따르면 2018년 기준으로 국내에서 약 4,000 kg의 해양 쓰레기가 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 해양 쓰레기는 동식물 개체 수를 감소 시키거나 선박 사고 유발, 자연 경관 파괴 등 자연 또는 인체에 부정적인 요인으로 사회적 문제가 대두되고 있다. 이러한 해양 쓰레기 중 약 63%가 플라스틱 형태의 쓰레기로 발견되는 것을 알 수 있고, 이러한 해양 쓰레기를 줄이기 위

해 정부 및 민간 차원에서 많은 노력을 실시하고 있다[1].

Triboelectric nanogenerators (TENGs)는 2012년 Zhong Lin Wang 교수에 의해 최초로 개발된 정전기 기반의 마찰 전기 발전기로써 높은 발전 효율과 간단한 구조, 다양하고 저렴한 재료로 제작할 수 있다는 장점이 있다[2-4]. 특히, TENGs는 진동, 사람의 움직임, 풍력, 조력 등의 다양한 형태로 존재하는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변화시키는 형태로 접촉-분리, 마찰 등과 같이 다양한 형태를 가지고 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시킬 수 있다[5,6].

Received 27 November 2019, received in revised form 27 December 2019, accepted 31 December 2019

\*Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

\*<sup>†</sup>Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea, Corresponding author (E-mail: dchoi@khu.ac.kr)

이러한 TENGs 연구는 보다 효율적인 전기 에너지 발전을 위해서 높은 유전율을 물질을 고분자와 혼합을 함으로써 정전 출력을 높이는 연구를 진행해 왔다. 또한 표면의 나노구조물을 형성하거나 다공성 구조를 제작함으로써 surface charge density를 증가시키는 등 물질 개선에 많은 연구가 진행되어 왔고 또한 표면에 부분 방전 처리를 함으로써 출력을 증가시키는 연구도 진행하고 있다[7-9]. 하지만 이러한 방법들은 출력면에서는 증가하는 효과가 있을 수 있으나 간단한 구조의 장점을 가진 TENGs의 측면에서 오히려 복잡한 제작 방법은 단순한 구조의 장점을 줄일 수 있다.

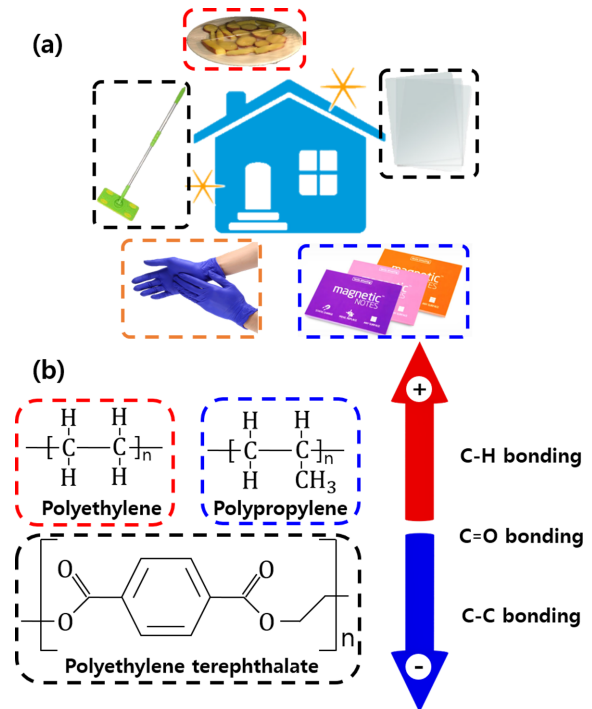
현재 생활에서 다양한 플라스틱 형태의 생활 용품이 사용되고 있으며, 이러한 생활 용품은 사용 후 폐기물이 되어 해양 쓰레기 문제와 같은 사회적 문제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 생활 용품을 활용하여 단순한 구조에서도 효율적인 전기 에너지 생산을 할 수 있음을 보여주려 한다. 또한 각각의 생활용품에 따른 정전 발전 출력을 화학적 결합을 통해 정전 발전 출력의 원인을 분석하고 그를 통해 생활용품 간의 최대 출력을 지닌 물질을 사용함으로써 생활에 응용할 수 있는 사례를 제시하고자 한다. 이러한 연구 결과는 생활용품이 단순히 사용 후 쓰레기가 되는 것이 아니라 생활용품을 활용한 TENGs라는 개념으로 생활 쓰레기를 감소시키며, 또한 이를 통해서 전기적 에너지를 생산할 수 있음을 제시함으로써 사회적, 경제적으로 다양한 이점을 소개하는 연구가 될 것으로 기대한다.

## 2. 실험

### 2.1 TENG 소자 제작

본 연구에서 사용된 생활용품은 Fig. 1(a)와 같이 랩(wrap), OHP film, 투명 파일, magnetic note, 라텍스 장갑, 정전기 청소소포와 같이 생활에 많이 사용되는 생활 용품을 활용하였다. 여기서 랩은 Polyethylene ( $C_2H_4$ )<sub>n</sub>, OHP film과 청소소포는 Polyethylene terephthalate ( $C_{10}H_8O_4$ )<sub>n</sub>, 투명 파일과 magnetic note는 Polypropylene ( $C_3H_6$ )<sub>n</sub>으로 구성되어 있다(Fig. 1(b)). TENG에 있어 분자식은 양전하 대전체 또는 음전하 대전체를 구분하는데 중요한 지표이다. 대표적으로 C-F bonding은 음전하 대전체를 나타내며 N-H bonding은 양전하 대전체를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 생활 용품은 주로 분자결합이 C-H bonding, C=O bonding, C-C bonding으로 구성되어 있다. 이러한 bonding은 사전 연구에 따르면 C-H bonding은 주로 양전하 대전체 성질을 띄며, C-C bonding은 음전하 대전체 성질을 띤다[10,11]. 라텍스 장갑의 경우 Nitrile rubber, polyvinyl chloride, neoprene로 구성되어 있는 복합물질이다[12].

TENG 소자의 경우 전극으로써 70  $\mu$ m 두께의 Aluminum (Al)을 사용하였고 본 연구에서 사용된 생활용품의 경우 Al 상단에 부착하였다. 제작된 소자는 2 cm  $\times$  2 cm의 크기로



**Fig. 1.** The schematic of life product (a) the image of life product, wrap, transparent file, magnetic note, latex glove and cleaner (b) the molecular formula of polyethylene, polypropylene and polyethylene terephthalate and tribo series by chemical bonding

제작하였으며 정전 출력을 높이기 위해 Al 하단부에는 foam tape를 활용하여 출력을 증가시켰다. 음전하로써 평가를 하기 위해서 양전하 대전 물질로 Al을 사용하였고 이와 반대로 양전하 대전 물질로써 평가하기 위해 Polytetrafluoroethylene (PTFE)를 Al 전극에 부착하여 활용하였다.

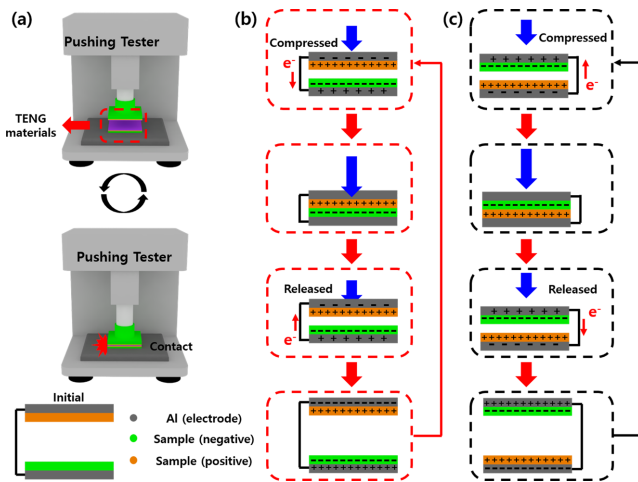
### 2.2 측정 및 분석

생활용품의 TENG 출력 측정을 위하여 오실로스코프 (MDO3052, Tektronix)와 40 M $\Omega$ 의 저항을 가지는 프로브 (P5100A, Tektronix)를 활용하였다. 전류 측정을 위하여 전류 증폭기(SR570, Stanford Research Systems)를 활용하였다. 또한 일정한 힘과 접촉 주기를 가하기 위하여 Pushing Tester (준일tech.)를 활용하였다.

표면 형상 및 두께 측정을 위해 Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM (LEO SUPRA 55, GENESIS 2000, Carl Zeiss)를 활용하였고, 각 물질의 조성을 위해 X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS (K-Alpha, Thermo Electron)을 활용하였다.

## 3. 결과 및 토의

실험 구성은 Fig. 2(a)와 같이 pushing tester에 부착된 팁에



**Fig. 2.** The schematic and mechanism of experiment (a) the schematic of pushing tester and the fundamental mechanism of vertical contact-separation when bottom layer is (b) negative charged material and (c) positively charged material

3d printer로 제작된 2 cm × 2 cm 정사각형 형태를 부착시킨 후 평가 시 기준이 되는 소자(Al 또는 PTFE)를 부착하였다. Pushing tester의 stage에는 평가하려는 소자를 부착하였으며 이 때 각 소자 간의 간격은 4 mm, 힘은 10 N, 접촉 주기는 5 Hz로 고정하여 접촉 및 분리를 지속적으로 진행하였다.

이 때, 전기적 에너지가 발생하는 원리는 하단부가 각각 음전하 대전체(Fig. 2(b))와 양전하 대전체(Fig. 2(c))로 나뉘어진다. 하단부가 음전하 대전체인 경우 접촉 및 분리가 이루어지기 전에는 아무런 대전이 이루어지지 않은 상태로 있다. (Initial) 서로 다른 대전체가 접촉 및 분리를 통해 대전이 발생하게 되는데 이 때, 발생하는 대전은 Triboelectric effects로 인해 대전이 된다. 그 결과, 각 물질의 성질에 따라 상대적으로 한 쪽은 양전하 대전체로, 다른 한 쪽은 음전하 대전체로 대전이 된다. Fig. 2(b)와 같이 하단부가 음전하 대전체로, 상단부가 양전하 대전체로 대전된 경우 두 물질이 접촉이 이루어 지려고 할 때 서로 다른 전극이 전선으로 연결이 되어진 경우 대전충과의 전기적 평형을 이루기 위하여 전자가 양전하 대전 물질의 전극에서 음전하 대전 물질의 전극으로 이동하게 된다. 이 후, 완전히 접촉을 하게 되면 각 대전층 간의 전기적 평형이 이루어져 외부 전선으로 전자가 이동하지 않게 된다. 다시 두 물질이 분리가 되려 할 때, 또한 전기적 평형을 이루기 위해 음전하 대전 물질의 전극에서 양전하 대전 물질의 전극으로 전자가 이동하게 되며 앞서 접촉할 때와는 반대 방향으로 전자가 이동하게 된다. 이러한 원리는 electrostatic induction 효과로 정전 발전은 Triboelectric effects와 electrostatic induction의 복합적인 영향으로 정전 출력이 발생하게 된다. 이러한 과정이 반복이 되고 그 결과 교류 형태의 정전 출력이 나타나게 된다.

Fig. 2(c)는 앞선 과정과 반대로 하단부에 양전하 대전 물질이 존재하고 상단부에 음전하 대전 물질이 존재한다. 앞선 원리와 동일한 원리로 전자가 이동하게 되며 전자의 이동 방향은 Fig. 2(b)와는 반대 방향으로 전자가 이동하게 된다. 이는 실험 진행하려는 생활 용품이 각각 양전하 또는 음전하 인지 파악을 하기 위해서 생활 용품의 음전하 대전 성질 평가를 위해 기준 물질을 Al로 활용하였고 양전하 대전 성질 평가를 위해 기준 물질을 PTFE로 선정하여 진행하였으며 접촉 및 분리가 발생될 때 발생하는 전기적 출력의 peak 방향으로써 각 물질의 양전하 또는 음전하 대전 물질을 선정하였다.

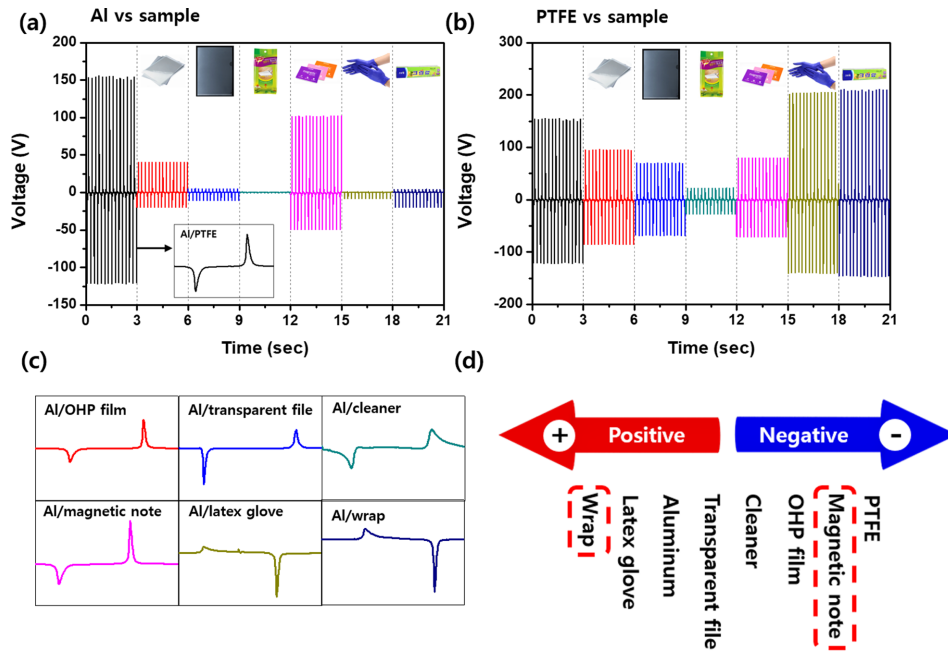
각각의 생활 용품에 대한 양전하 또는 음전하 대전 물질 유무에 대해서는 Fig. 3과 같이 정리를 하였다. 우선 Al이라는 양전하 대전 물질을 가지고 음전하 대전 물질로 일반적으로 사용되는 PTFE를 기준으로 각각의 생활 용품에 대한 출력을 Fig. 3(a)과 같이 나타나 진다. Al-PTFE의 경우 최대 155 V이며 생활 용품 중에서는 Al-magnetic note 일 때 최대 102 V인 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3(a)의 작게 삽입된 그래프는 접촉할 때는 전기적 출력이 음의 방향으로, 반대로 분리될 때는 전기적 출력이 양의 방향으로 나타나지는 것을 알 수 있었다. 상대적으로 일반적으로 흔히 사용되는 Al-PTFE가 Al과 각각의 생활 용품이 접촉 및 분리가 일어나는 경우보다 더 큰 출력을 가지는 것을 확인하였다.

추가적으로 Fig. 3(b)와 같이 PTFE를 고정하고 각각의 생활 용품에 대한 정전 출력을 확인하였을 때, Al-PTFE의 경우 최대 155 V이나 생활 용품의 경우 PTFE-라텍스 장갑, PTFE-랩은 기존 Al-PTFE보다 높은 205 V, 211 V의 출력을 가지는 것을 각각 확인하였다. 이러한 정전 출력의 값은 여러 복잡한 공정을 가지는 사전의 보고된 소자와 유사하게 뛰어난 출력인 것을 알 수 있으며, 이는 저비용, 대면적으로 활용하기에 충분히 활용 가치가 있는 것으로 판단할 수 있다.

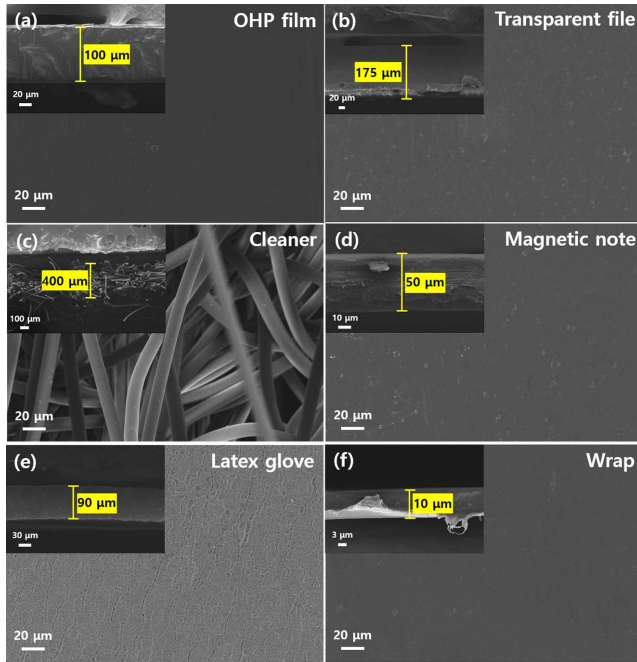
각각의 대전 특징을 확인하기 위해 Fig. 3(c)와 같이 Al과 생활 용품이 접촉 및 분리가 발생할 때 생기는 하나의 peak을 확대하여 peak 방향 및 출력 크기를 통해 생활 용품에 대한 tribo series를 나타낼 수 있었다. 우선 Al-PTFE와 peak의 방향이 동일한 OHP film, 투명 파일, 청소포, magnetic note는 상대적으로 Al보다는 음전하 대전 물질인 것을 알 수 있으며 Al-PTFE와 peak의 방향이 반대인 라텍스 장갑, 랩은 Al 보다 양전하 대전 물질인 것을 알 수 있었다.

이를 토대로 tribo series를 작성하면 Fig. 3(d)와 같이 (양전하 대전 물질) 랩 > 라텍스 장갑 > Al > 투명 파일 > 청소포 > OHP film > Magnetic note > PTFE (음전하 대전 물질) 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 3과 같이 나온 정전 출력의 경향은 SEM 사진과 XPS 분석에 따른 분자 결합을 통해 설명할 수 있다. Fig. 4에는 생활 용품 각각에 대한 표면 및 두께에 대한 SEM 사진이 나타나 있다. 정전 출력에 있어 전압 및 전류에 대한 기본 식



**Fig. 3.** The output voltage of (a) Al-PTFE, Al-life products, the insets are the photo image of life products and single peak between Al-PTFE, (b) PTFE-Al, PTFE-life products and (c) single peak of Al-PTFE/life products on TENG. (d) The tribo series



**Fig. 4.** The SEM image of top view and the inset is the cross SEM image of (a) OHP film (b) Transparent file (c) Cleaner (d) Magnetic note (e) Latex glove and (f) Wrap

은 식 (1)과 (2)와 같다[13].

$$V_{OC} = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$I_{SC} = \frac{S \sigma d_0 x(t)}{(d_0 + x(t))^2} \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ 는 surface charge density,  $x(t)$ 는 양전하 대전 물질과 음전하 대전 물질간의 거리,  $\epsilon_0$ 는 진공에서의 유전율,  $S$ 는 면적,  $d_0$ 는 소자의 두께를 나타낸다.

또한 정전 발전에 있어 중요한 요인인 surface charge density와 관련된 중요한 지표 중 하나는 소자의 정전 용량인데 정전 용량은 식 (3)과 같이 나타나진다.

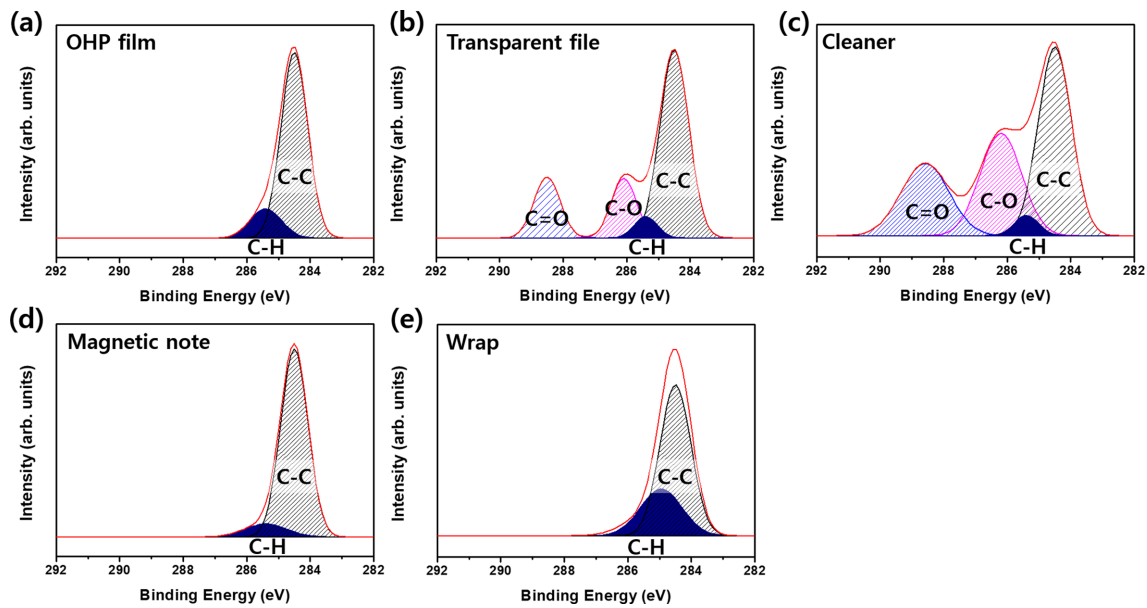
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d_0} \quad (3)$$

여기서  $\epsilon_r$ 은 상대 유전율이다.

식 (1)-(3)에서 나타난 바와 같이 소자의 두께는 정전 출력에 있어 중요한 요인이며 두께는 얇으면 얇을수록 출력이 높아지는 것을 사전 연구를 통해 알 수 있었다. 실제로 Fig. 4에서 보듯이 두께가 100 μm 미만의 랩(10 μm), magnetic note (50 μm), 라텍스 장갑(90 μm)의 경우 Fig. 3(a, b)에서 나타난 것과 같이 다른 물질 보다 정전 출력이 더 큰 것을 알 수 있었다.

보다 정확한 분석을 위하여 XPS를 통해 각 물질간의 분자식 및 조성을 Fig. 5와 같이 확인하였다. 여기서 주로 확인한 화학 결합은 C-H, C-C, C-O, C=O bonding을 주로 확인하였으며 이 때의 조성 차이가 정전 발전 출력에 있어 어떠한 영향을 주는지에 대해 분석을 하였다. 라텍스 장갑의 경우 워낙 많은 분자식으로 구성되어 있으며 Nitrile과 같





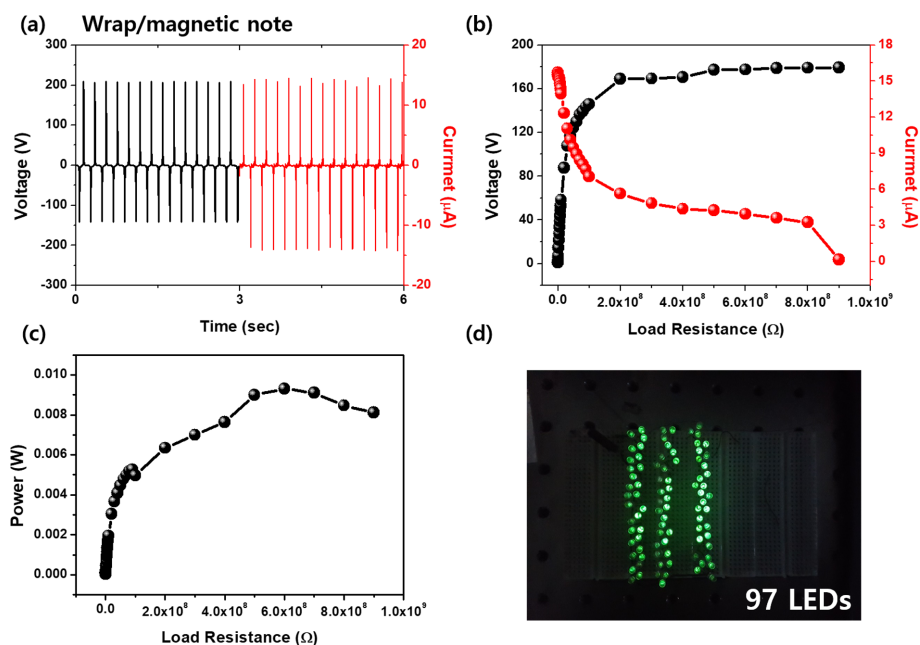
**Fig. 5.** The XPS analysis of (a) OHP film (b) Transparent file (c) Cleaner (d) Magnetic note and (e) Wrap from 282 eV to 292 eV

**Table 1.** The ratio of bonding in life products

	C-C (%)	C-H(%)	C-O(%)	C=O(%)
OHP film	84.4	15.6	-	-
Transparent file	60.3	5.4	16.6	17.7
Cleaner	38.2	15.3	14.9	31.6
Magnetic note	90.2	9.8	-	-
Wrap	70.6	29.4	-	-

은 양전하 특성을 가지는 분자 결합을 가지고 있으므로 기타 다른 생활 용품과 함께 비교하는데 한계가 있어 XPS 분석에 있어서는 배제하였다.

투명 파일과 청소포의 경우 Fig. 1(b)에서 언급된 바와 같이 Polyethylene terephthalate ((C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>)<sub>n</sub>)으로 구성되어 있어 C-C (284.5 eV)/C-H (285.2 eV)/C-O (286.3 eV)/C=O (288.6 eV) bonding으로 구성되어 있다[14,15]. 이는 Table 1에서 나타난 바와 같이 C-C bonding 측면에서 많은 양이 나



**Fig. 6.** The performance of life product TENGs (a) the output voltage and current, impedance matching of (b) voltage and current (c) power (d) the snapshot of 37 commercial green LEDs being lit up in the dark

타나있는 것을 알 수 있는데 이러한 C-C bonding으로 인해 음전하 특성이 더 많이 나타남을 알 수 있다. 그 결과 Fig. 3(a)에서 투명 파일과 청소포를 비교했을 때 투명 파일의 출력이 높은 것을 설명할 수 있다.

OHP film과 magnetic note의 경우 Polypropylene ((C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>)<sub>n</sub>)으로 구성되어 있어 주로 C-C/C-H bonding으로만 이루어져 있다. 이 또한 C-C bonding 조성비에 있어 magnetic note-90.2%, OHP film-84.4%로 더 많은 C-C bonding으로 인해 magnetic note가 좀 더 음전하 대전체 성질을 띠는 것을 알 수 있었다. 하지만 랩의 경우 polypropylene과 유사한 분자식의 polyethylene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>로 이루어져 있는데, 분석 결과 C-H bonding이 분석한 생활 용품 중에 제일 많은 비율을 차지하는 것을 알 수 있다. 그 결과 상대적으로 다른 물질에 비해 양전하 대전 물질의 성질을 가지는 것을 알 수 있었다.

하지만 정전 발전에 있어 단순히 bonding에 의해서만 정전 출력이 Fig. 3와 같이 나온다고 할 수 없을 것이다. Fig. 4에서 보여진 바와 같이 소자의 표면 구조물에 대한 유무, 소자의 두께 등과 같은 크기에 따른 요인과 Fig. 5와 같이 화학적 결합에 따른 요인 등 여러 요인을 종합했을 때 두께가 얇으며 탄소 결합 중 C-H bonding이 많은 것이 양전하 대전 물질로서의 특성을 잘 나타내며 C-C bonding 비율이 많은 소자가 음전하 대전체로서의 특징을 잘 나타나 질 수 있다는 것을 본 연구 결과를 통해 알 수 있었다.

Fig. 3(d)에서 나타낸 tribo series를 바탕으로 하여 생활 용품 중에서 정전 출력이 제일 잘 나온 물질을 가지고 추가적인 실험을 진행하였다. 이 때, 양전하 대전 물질로서는 랩을 사용하였고 음전하 대전 물질로서는 magnetic note를 사용하여 정전 출력을 측정하였다.

이 때, Fig. 6(a)와 같이 최대 전압 210 V, 최대 전류 14.6μA가 측정이 되는 것을 알 수 있었다. 또한 impedance matching을 위하여 100 kΩ부터 900 MΩ까지 전압 전류를 측정하였고 이 때 최대 전압은 900 MΩ에서 180V, 최대 전류는 100kΩ에서 15.7 μA로 측정 되었다(Fig. 6(b)). 또한 식 (4)를 통해 측정된 최대 전력은 600 MΩ에서 9.31 mW로 측정되었다(Fig. 6(c)).

$$P = IV = I^2 R \dots \dots V = IR \quad (4)$$

이 때, P는 전력, I는 전류, V는 전압, R은 저항이다.

이를 바탕으로 정류 회로를 연결시킨 뒤 Light Emitting Diodes (LEDs) 점등 실험을 진행하였고 그 결과 97개의 LEDs를 점등하였다(Fig. 6(d)). 따라서 이러한 결과는 간단한 구조에서 저비용, 대면적으로 활용할 수 있는 정전 발전 뿐만 아니라 쓰레기를 감소시키는 긍정적인 효과가 있을 것이라 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 생활에 사용되는 플라스틱 물질을 활용하여 정전 발전 출력 특성을 확인하였고 그러한 특성을 SEM 이미지 및 XPS를 통해 분석을 진행하였다. 이 때, XPS 분석을 통해 물질을 이루고 있는 화학적 결합에 따른 양전하 또는 음전하 특성에 대해 기존 보고된 사례와 적용하여 양전하 또는 음전하 특성에 대한 적합성을 판단할 수 있었다. 본 연구에서 사용된 생활 용품 중 정전 출력 특성이 제일 크게 나온 물질은 랩과 magnetic note이며 최대 전압, 전류 및 전력은 210 V, 14.6 μA, 9.31 mW의 출력을 얻을 수 있었으며 이를 통해 97개의 LEDs를 점등하였다. 본 연구 결과는 값싸고 대면적이 쉬운 생활 용품을 활용하여 간단한 구조에서의 에너지 하베스팅을 제시했을 뿐만 아니라 사용 후 버려질 수 있는 플라스틱 계열의 생활 용품을 활용하여 환경 오염이 아닌 에너지 재생산의 측면을 보아 사회적, 경제적으로 긍정적인 효과를 미칠 것이라 예상된다.

## 후 기

본 연구는 한국 연구 재단에서 지원하는 중견과제(NRF-2019R1A2C2083934)와 글로벌박사양성사업(NRF-2019H1A2A1077099)로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Jang, S.W., Park, J.M., Chung, Y.H., Kim, D.H., and Yoon, H.J., "A Study on the Inflow and Seasonal Characteristics of Foreign Marine Debris in the Coastal Area of the West Sea," *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 15, No. 2, 2012, pp. 89-100.
2. Fan, F.R., Lin, L., Zhu, G., Wu, W., Zhang, R., and Wang, Z.L., "Transparent Triboelectric Nanogenerators and Self-powered Pressure Sensors Based on Micropatterned Plastic Films," *Nano Letters*, Vol. 12, No. 6, 2012, pp. 3109-3114.
3. Kim, W., Bhatia, D., Hwang, H.J., Choi, K., and Choi, D., "Double Impact Triboelectric Nanogenerators for Harvesting Broad-band Vibrations from Vehicles," *Functional Composites and Structures*, Vol. 1, No. 035003, 2019, pp. 1-8.
4. Hwang, H.J., Kim, J.S., Kim, W., Park, H., Bhatia, D., Jee, E., Chung, Y.S., Kim, D.H., and Choi, D., "An Ultra-Mechanosensitive Visco-Poroelastic Polymer Ion Pump for Continuous Self-Powering Kinematic Triboelectric Nanogenerators," *Advanced Energy Materials*, Vol. 9, No. 17, 2019, pp. 1970059.
5. Bae, J.-H., and Chang, S.-H., "Basic Study on P(VDF-TrFE) Smart Sensor for Monitoring Composite Structure Behaviors," *Composites Research*, Vol. 28, No. 3, 2015, pp. 75-80.
6. Saha, S., Jana, M., Samanta, P., Murmu, N.C., Lee, J.H., and Kuila, T., "Self Charging Sulganilic Acid Azocromotrop/

- Reduced Graphene Oxide Decorated Nickel Oxide/Iron Oxide Solar Supercapacitor for Energy Storage Application,” *Composites Research*, Vol. 29, No. 4, 2016, pp. 179-185.
7. Choi, J.H., Cha, K.J., Ra, Y., La, M., Park, S.J., and Choi, D., “Development of a Triboelectric Nanogenerator with Enhanced Electrical Output Performance by Embedding Electrically Charged Microparticles,” *Functional Composites and Structures*, Vol. 1, No. 045005, 2019, pp. 1-9.
  8. Huyng, N.D., Park, H.W., Chung, K.-B., and Choi, D., “Effect on TENG Performance by Phase Control of TiO<sub>x</sub> Nanoparticles,” *Composites Research*, Vol. 31, No. 6, 2018, pp. 365-370.
  9. Hwang, H.J., Lee, Y., Lee, C., Nam, Y., Park, J., Choi, D., and Kim, D., “Mesoporous Highly-Deformable Composite Polymer for a Gapless Triboelectric Nanogenerator via a One-Step Metal Oxidation Process,” *Micromachines*, Vol. 9, No. 656, 2018, pp. 1-11.
  10. Kim, S., Gupta, M.K., Lee, K.Y., Sohn, A., Kim, T.Y., Shin, K.-S., Kim, D., Kim, S.K., Lee, K.H., Shin, H.-J., Kim, D.-W., and Kim, S.-W., “Transparent Flexible Graphene Triboelectric Nanogenerators,” *Advanced Materials*, Vol. 26, No. 23, 2014, pp. 3918-3925.
  11. Guo, H., Li, T., Cao, X., Xiong, J., Jie, Y., Willander, M., Cao, X., Wang, N., and Wang, Z.L., “Self-Sterilized Flexible Single-Electrode Triboelectric Nanogenerator for Energy Harvesting and Dynamic Force Sensing,” *ACS Nano*, Vol. 11, 2017, pp. 856-864.
  12. Plasencia, A., Plasecki, J.D., and Strohmaier, B.R., “XPS Surface Characterization of Disposable Laboratory Gloves and the Transfer of Glove Components to Other Surfaces,” *Spectroscopy*, Vol. 27, No. 7, 2012.
  13. Niu, S., Wang, S., Lin, L., Liu, Y., Zhou, Y.S., Hu, Y., and Wang, Z.L., “Theoretical Study of Contact-mode Triboelectric Nanogenerators as an Effective Power Source,” *Energy & Environmental Science*, Vol. 6, 2013, pp. 3576-3583.
  14. Al-Ajlony, A.M.B., Kanjilal, A., Harilal, S.S., and Hassanein, A., “Carbon Contamination and Oxidation of Au Surfaces under Extreme Ultraviolet Radiation: An X-ray Photoelectron Spectroscopy Study,” *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 30, No. 4, 2012, pp. 041603.
  15. Zai, J., Liu, Y., Li, X., Ma, Z.-F., Qi, R., and Qian, X., “3D Hierarchical Co-Al Layered Double Hydroxides with Long-Term Stabilities and High Rate Performances in Supercapacitors,” *Nano-Micro Letters*, Vol. 9, No. 21, 2017, pp. 1-9.