

# 1 마찰전기 에너지 하베스팅 소재 기술과 건축용 에너지소자에의 응용 방안

글\_정창규 교수 | 전북대학교 신소재공학부

## 1. 서론

제4차 산업혁명과 IoT의 출현과 함께, 사용자들과 쌍방향으로 커뮤니케이션이 가능한 다양한 센서에 대한 필요성이 급격히 증가했다 [1]. 이러한 시스템 사용되는 소들은 휴대하거나 착용하거나 또는 유연한 표면에 붙이는 것도 편리해야 한다. 그러나 기존의 배터리는 큰 부피를 가지고 있고, 구부릴 수 없으며 주기적인 교체해줘야 하는 등, 여러 문제들 때문에 차세대 IoT센서 장치의 전원 공급에 단독으로 사용하기에는 적절하지 않은 경우가 많다. 이 점에 있어서, 에너지 하베스팅 기술은 기존의 배터리를 대신하거나 보완할 수 있는 하나의 해결책으로 새롭게 대두되고 있다 [2]. 특히, 기계 에너지를 전기에너지로 바꾸는 기계적인 유연한 에너지 하베스터(flexible energy harvester)는 외부 환경과 무관하게 에너지를 지속적으로 제공할 수 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다.

압전소자 에너지 하베스터(piezoelectric energy harvester)는 기계적인 에너지를 수확하는 한 가지 방법으로서 많은 연구자들에 의해 널리 연구되어 왔다 [3,4]. 압전소자 장치가 외부 기계적인 응력에 의해 변형될 때, 압전쌍극자모멘트는 압전재료 내에서 변화하고, 이로 인해 전하가 생성된다. 비록 티탄산지르콘산연(PZT)과 같은 세라믹이나 폴리비닐리덴플루오라이드(PVDF)와 같은 고분자들이 에너지 하베스터 연구의 압전 물질들로 널리 사용되고 있지만, 단단한 성질이나 두꺼운 두께 또는 낮은 압전계수 등으로 인해 여러 제한이 있었다 [5,6]. 최근 몇 년 동안, 박막/후막을 이용해서 높은 성능의 유연한 에너지 하베스터 연구가 첨단 기술을 이용해서 성공적으로 연구되었다. 이를 이용하여 다양한 자가 발전 생체 모니터링 시스템 및 센서에 적용 할 수 있었다 [7,8]. 그럼에도 불구하고, 압전 에너지 하베스터는 여전히 상용화하기에 성능 및 재료 제한

과 같은 몇몇의 단점들을 가지고 있다.

압전소자 에너지 하베스터 이외에 에너지 하베스팅 기술을 확장하기 위해서, 마찰전기 나노발전기(triboelectric nanogenerator, TENG) 또는 에너지 하베스터로 불리는, 에너지 하베스팅 장치의 새로운 형태가 2012년에 처음으로 제안되었다 [9]. 접촉마찰대전과 정전기 유도의 결합 효과에 기반을 둔 TENG의 기본 구조는 적절한 전극 배치를 갖는 두 개의 접촉(마찰) 부분으로 구성되어 있다 [10,11]. 마찰전기 효과라는 것은 기계적인 접촉을 하는 동안에 다른 마찰전기 특성을 가지고 있는 두 개의 표면이 전기적으로 하전 되는, 이미 잘 알려진 현상이다 [12,13]. 두 표면 사이의 전위차는 서로 다른 수준의 전하에 대한 친화도를 가진 표면 사이 접촉으로 인한 마찰대전에 의해 발생된다. 이로 인해, 정전기적 평형을 유지하기 위해서 외부회로를 통해서 한 쪽 전극에서 다른 쪽 전극으로 전자의 흐름이 유도된다 [14,15]. 이러한 작동원리에 근거하여, TENG의 출력 성능은 기본적으로 마찰대전의 수준에 의해 결정된다. 따라서 표면의 마찰대전의 양을 증가시키기 위한 많은 연구가 이루어졌다. 크게 접촉 재료의 선택, 소자의 구조적 설계, 그리고 마찰표면의 변형과 같은 세 가지 범주의 연구로 나뉘어 생각해 볼 수 있다. 첫 번째, 재료를 선택하는 관점에서, 모든 재료들은 서로 다른 마찰전기 극성을 가지고 있으며, 이는 재료들이 접촉하는 동안에 상대적으로 표면전하를 얻거나 잃는 경향성을 가지고 있다는 것을 의미한다 [13,16]. 마찰전

기 극성의 차이가 클수록 이동된 전하들의 양은 높아진다. 그런 이유로, TENG의 두 접촉 재료들은 일반적으로 마찰대전 시리즈에서 서로 멀리 떨어져 있는 것으로 선택하는 것이 마찰전기 에너지 하베스팅에 유리하다. 여기서 마찰대전 시리즈란 마찰전기 극성 순서가 상대적으로 열거된 표라고 생각할 수 있다 [17,18]. 더불어 전형적인 마찰대전 시리즈 안에 열거되지 않은 재료들 역시 표면분석장비를 이용하여 평가하고 소자용 재료로 고려할 수 있다 [16,19,20]. 성능을 증가시키기 위한 또 다른 방법은 슬라이딩 모드, 회전 모드, 비접촉 모드, 등과 같은 소자 구조를 변형시키고 최적화하는 방법이다 [21-26]. 마지막 접근법은 접촉 표면의 물리적, 화학적 변형이다. 물리적 변형은 미세/나노 구조의 도입을 통해 접촉 표면 면적의 증가를 유도할 수 있다 [16,27-31]. 이것은 전체 이동 전하의 증가에 기여하게 된다. 또한 화학적 개질을 통한 표면 전위의 제어는 접촉 표면 사이 마찰전기 극성을 더욱 극대화할 수 있다 [31]. 따라서 접촉 물질의 표면 전위를 조절하기 위한 연구도 다양하게 진행되고 있다.

## 2. 마찰전기 에너지 하베스팅의 원리

그림 1(a)는 접촉-분리 모드(contact-separation mode)에서 금속-절연체가 마찰전기 소재의 쌍으로 이용되는 에너지 하베스터의 대표적

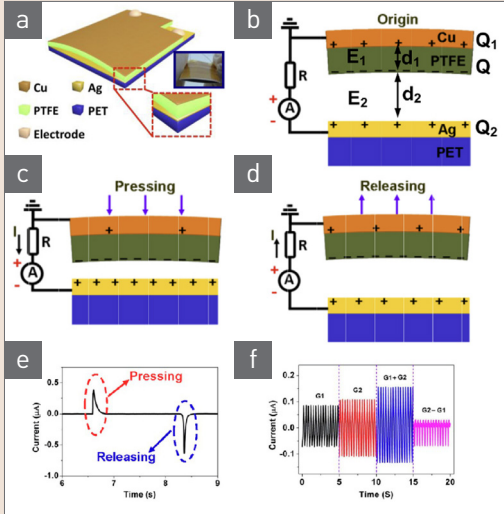


그림 1 ▶ (a) Schematic illustration and photograph of a simple-structured triboelectric energy harvester of the metal-to-insulator type in contact-separation mode. Equivalent circuits of the triboelectric energy harvesting system with an external load when the device is in (b) original, (c) pressed, and (d) released states, and (e) corresponding generated current signals during the single cycle. (f) Linear superposition tests of two triboelectric generators (G1 and G2) connected each other in parallel with same and opposite polarity [33].

인 소자 구조 예시이다 [33]. 마찰대전 시리즈에 기반을 두어, 전자들(음이온)은 은 전극(Ag)에서 폴리테트라플루오로에틸렌 (PTFE)표면으로 마찰전기에 의해서 주입된다. 이 전하를  $Q$ 라고 표기하겠다. 간단한 설명을 위해서, 외부 부하( $R$ )를 가진 마찰전기 장치의 등가회로를 그림 2(b)~(d)에 묘사했다. 이 장치는 거리 변화가 가능한 공기 간극을 가지고 있는 평행판 축전기로 간주할 수 있다. PTFE 표면의 전하밀도는  $\sigma$ 이다. 구리 전극의 전하밀도는  $\sigma_1$ , 그리고 은 전극 윗면의 전하밀도는  $\sigma_2$ 이다(그림 1(b)). 균일하게 분산된 전하와 평형상태를

가정하면 우리는 식 (1), (2)를 도출할 수 있다.

$$\sigma_1 = -\sigma - \sigma_2 \quad (1)$$

$$\sigma_1 = -\frac{\sigma}{1 + \frac{d_1}{d_2 \epsilon_{rp}}} \quad (2)$$

여기서  $d_1$ 과  $\epsilon_{rp}$ 는 각각 PTFE의 두께와 유전율이다. 전하  $Q$ 는 긴 지속시간동안 비교적 안정하다고 가정하자. 따라서  $\sigma_1$ 은 공기 간극( $d_2$ )의 거리에 의해 영향을 받는다. 구리와 은 전극 사이의 전하는  $d_2$ 의 변화에 의해 재분배되어야 하고, 그 결과로 외부 회로  $R$ 을 통해 전압 전위 변화가 발생하고 전류가 흐르게 된다. 마찰전기 발전기가 외부에서 기계적인 압력을 받을 때 (그림 1(c)), 간극 거리는 줄어들고, 그 결과로 식 (2)에 따라  $\sigma_1$ 의 감소가 야기된다. 따라서 순간적으로 양의 전류가 발생된다. 다시 소자에 기계적 압력이 사라지면(그림 1(d)), 공기 간극은 기존 거리로 되돌아온다. 이런 이유로 순간적인 음의 전류 신호를 생성하는 공기 간극 거리  $d_2$ 의 복원에 따라, 표면 전하  $\sigma_1$ 은 증가한다. 최종적으로 한 번의 사이클에서 전류 신호는 그림 1(e)처럼 나타나고, 전류 신호는 그들의 극성에 따라 여러 소자가 병렬로 연결될 때 합쳐질 수 있다(그림 1(f)). 모든 마찰전기 소자들의 기본적인 작동 방법은 비록 다른 재료 종류들(즉, 절연체-절연체 형태) 및 다양한 소자 구조들(예를 들면, 슬라이딩, 회전 그리고 단일 전극 모드)로 되어 있다 하더라도 위에서 설명한 원리와 거의 유사하다.

### 3. 마찰전기 에너지 하베스팅 소재의 표면에 대한 중요성

그림 2는 표면 접촉 층에서 마이크로/나노 구조의 도입을 이용하여 마찰전기 에너지 하베스팅의 출력 성능 증가를 위한 방법의 예시들을 보여준다. 그림 2(a)에서는 초고속레이저로 제작된 층상적 미세구조로 인해 마찰층들 사이 접촉 면적 증가에 대한 것을 보여준다. 이로 인해, 마찰전기 에너지 하베스터의 출력 성능의 증가시킬 수 있다 [34]. 일반적인 평평한 구조의 폴리디메틸실록산(PDMS)에 기반을 둔 마찰전기 에너지 하베스터와 비교하여, 마이크로 구조로 된 PDMS 기반의 마찰전기 에너지 하베스터는 최소한 두 배 이상 높은 출력 전력밀도를 보였다.

그림 2(b)에서 보여주듯이 서울대학교 연구팀은 마찰층 아래에 금속 나노와이어 층을 만들어서 마찰대전이 일어나는 표면자체를 쉽게 변형 하는 방법을 제시했다 [16]. 그 결과, 표면의 거칠기는 세 배 이상 증가되었고, 증가된 표면적은 마찰전기 소자의 출력 향상에 상당히 기여했다. 그림 2(c)는 나노입자에 의해 표면적 거칠기와 면적을 증가시킨 형태의 마찰전기 에너지 하베스터 소자를 보여준다 [27]. 표면에 화학적으로 코팅된 금(Au) 나노 입자에 의해 거칠어진 형태의 금 표면은, 편평한 금 박막에 비해 더 넓은 접촉면적을 제공할 수 있다.

또한 마찰전기 에너지 하베스팅 소자의 표면 패터닝을 위해 첨단 나노기술들을 적용한 사

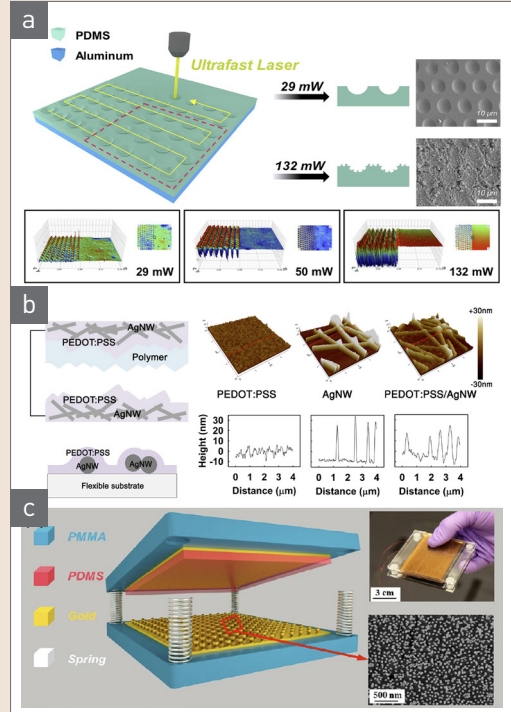
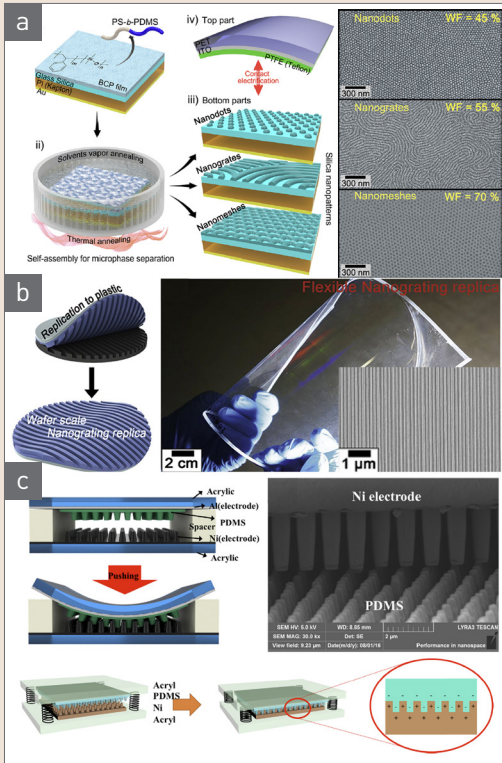


그림 2 ▶ (a) Schematics of the fabrication of laser-irradiated (LI) PDMS using ultrafast laser, and corresponding scanning electron microscopy (SEM) images of the LI-PDMS at laser power of 29 mW and 132 mW [34]. (b) Schematics of the enlarged cross-sectional view of PEDOT:PSS/AgNW layer on a substrate (left). 3D topographic images of PEDOT:PSS, AgNW, and PEDOT:PSS/AgNW films (right) [16]. (c) Schematic illustration, photograph, and SEM image of the Au nanoparticles-coated surface based triboelectric nanogenerator (TENG) [27].

레들도 있다. KAIST 연구팀은 블록 공중합체 (BCP)의 자기조립(self-assembly)공정을 이용하여 매우 정교하게 제어가 가능한 나노구조들을 이용하여 마찰전기 발전기를 개발하였다 [28]. 그림 3(a)에서 보여주듯이, 비교적 대면적 소자에 나노닷, 나노그레이트, 나노메쉬 등의 다양한 실리카 나노패턴들은 폴리스티렌-



**그림 3 ▶** (a) Illustrated fabrication scheme of the nanopatterned surface of the block copolymer (BCP) TENG. The right panels show SEM images of BCP nanopatterned surface established by various self-assembly conditions [28]. (b) Schematics of nanograting replication process onto a flexible plastic substrate using ultraviolet (UV)-curable resin. The right panel is the photograph of the wafer-scale and uniform nanograting replica onto the flexible plastic substrate. The inset is the SEM image of the ultra-long and defect-free nanograting pattern of the replica on the flexible substrate [30]. (c) Schematics and SEM image of the interlocked TENG (i-TENG) [35].

블록-폴리디메틸실록산 (PS-b-PDMS) 블록공중합체의 자기조립 조건에 따라 제어 할 수 있다. 또한 해당 연구팀은 실험적/이론적으로 접촉면적 증대 효과와 물리적 마찰 계수 변화 효과에서 나노 패터닝의 영향력을 발견했다. 그

리므로 마찰전기 에너지 하베스터들의 해당 장치 성능은 나노규모의 표면 공학에 의해서 또한 잘 조절될 수 있다. 이것은 bottom-up 나노 기술들을 이용한 마찰전기 장치들의 표면 나노 패터닝을 위한 대표 연구들 중 하나이다.

이와 같은 bottom-up 형식의 나노 패터닝 기술들이 뛰어난 나노규모의 제어성을 가지고 있는 하지만, 대부분의 상업적인 공정들은 top-down 형식 공정에 기반을 두고 있기 때문에 실용적인 소자 제작 호환성을 고려해보면 top-down 형식을 이용할 필요가 있다. 그림 3(b)에 제시된 것과 같이, 단단하거나 유연한 기판들의 웨이퍼 스케일 및 무결함 나노 패터닝을 얻기 위해 상용화된 반도체공정을 채택한 연구가 있다 [30]. 스페이서와 다결정 실리콘의 반복적인 증착을 이용하여 8인치 실리콘 웨이퍼 위에서 전통적인 반도체 리소그래피 공정에 의해 다결정 실리콘 나노격자패턴들이 제작됐다. 스페이서 측벽은 다결정 실리콘 나노격자패턴이 드러날 때 까지, 스페이서 증착과 건식 에칭 공정의 반복에 의해 형성된다. 이 변형된 스페이서 리소그래피 방법은 다중 스페이서 패턴 다운스케일링(MS-PaD)방법이라고 이름 붙여졌다. 균일한 나노격자패턴은 스페이서와 실리콘 패턴 아래에서 계속해서 이용되면서 훨씬 좋아질 수 있고, 이는 MS-PaD방법의 중요한 특징이다. 뒤이어, 이렇게 형성된 실리콘 웨이퍼 위의 대면적 50 nm 이하 격자나노패턴은 유연한 플라스틱 기판으로 복제 될 수 있다. 전자현미경 이미지와 사진의 무지갯빛 회절은 균일하고, 잘 배열된 나노패턴표면을 의

미한다 (그림 3(b)의 오른쪽 그림). 게다가 해당 연구팀은 나노패턴 위에 증착되는 금속 박막의 두께가 마찰전기 에너지 하베스팅 성능에 어떠한 영향을 줄 수 있는지를 연구하였다. 전극의 전도도와 나노패턴 평탄화 효과 사이의 관계에 따른 trade-off 현상을 나타냈다.

그림 3(c)는 나노기둥 배열 기반 TENG의 구조를 제시한다 [35]. 잘 정돈된 서로 맞물린 계면을 통해서, 접촉 표면 면적이 효과적으로 증가되고, 각각 전압과 전류가 각각 100 V, 23  $\mu$ A 까지 증가하는 결과를 보였다. 어떠한 방법을 이용하던지 마이크로/나노패터닝과 구조화에 의한 마찰대전 소재들의 표면 변화는 TENG 소자 제작 및 개발에서 기초적으로 고려될 수 있다는 것을 항상 상기해야 한다.

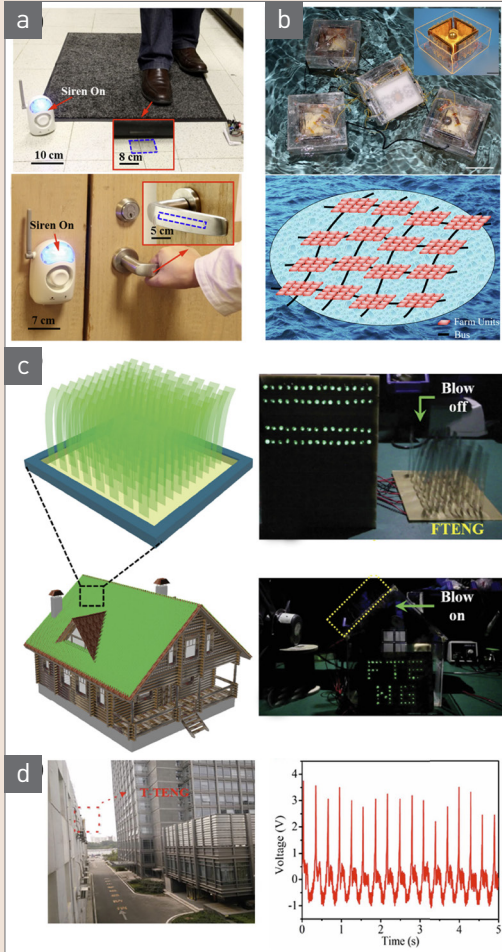
#### 4. 건축용 에너지소자로서의 연구 동향

앞서 소개한 예시들과 같이, 마찰전기 에너지 하베스팅의 소재 개발 및 소자 형태에 대한 연구와 더불어, 이들이 사용될 수 있는 응용분야에 대한 연구도 끊임없이 계속되고 있다. 이는 에너지소자의 당연한 연구 동향이라 할 수 있겠다. 압전 에너지 하베스팅 분야가 그렇듯이, 마찰전기 에너지 하베스팅 소자 역시 기본적으로 다양한 소형 전자부품소자를 구동시키는 것을 목표로 하는 연구가 주로 되어오고 있다. 하지만 압전 에너지 하베스팅 분야가 오래

전부터 도로 등의 사회기반시설에 사용되기 위한 에너지 시스템으로도 연구된 것처럼, 마찰전기 에너지 하베스팅 분야 역시 일부 건축/건설용 소자 시스템으로 적용될 수 있는 가능성을 나타내고 있다.

그림 4(a)는 마찰전기 에너지 하베스팅 소자를 이용해서 에너지 발전 자체에 의의를 둔 것이 아닌, 실생활 건축물에서 센서로써 사용될 수 있다는 것을 보여주는 연구이다 [36]. 압전 소재 및 소자와 같이, 마찰전기 에너지 하베스팅 소자는 그 자체로써 기계적 물리 자극을 감지할 수 있는 자가발전 센서로서 사용할 수 있다. 자가발전 센서는 외부의 전원 공급이 없거나 줄인 상태에서도 충분히 센서가 작동할 수 있다는 장점으로 연구개발 되어 오고 있다. 해당 연구에서는 바닥이나 문의 손잡이 등의 건축 내장재에 간단한 형태의 마찰전기 소자를 부착시킨후, 누군가가 그 소자를 건드렸을 때 무선으로 사이렌이 울릴 수 있는 시스템을 구축하였다. 오직 사이렌 자체에 들어가는 전지를 제외하곤, 단순한 구조의 마찰전기 소자만과 그와 호환되는 무선회로만을 이용해서 외부 전원 없이 작동하는 외부인 침입센서를 개발한 것이다.

그림 4(b)는 마찰전기 에너지 하베스팅 소자를 이용해서 구축한 블루에너지 시스템을 보여준다 [37]. 약한 바람이나 물결은 일반적인 풍력 또는 파력 발전으로는 전기 생산에 사용할 수 없는 기계적 에너지이다. 그림 4(b)의 상부에서 볼 수 있다시피, 미국 조지아공대에서는 금속 구체과 특수한 형태의 프레임을 이용



**그림 4** ▶ (a) Top: triggering a wireless alarm system by foot stepping on a triboelectric sensor (inset: enlarged view of the triboelectric sensor). Bottom: Triggering a wireless alarm system by grabbing the triboelectric sensor. (b) Top: photograph of a small scale triboelectric generators network with four units in a simulational ocean pool (inset: an unit of triboelectric generator). Bottom: schematic of the configuration of the proposed triboelectric generators network for a practical blue energy farm. (c) Left: lawn structured TENG and the schematic and that the TENG can be easily equipped to the rooftops for natural wind energy harvesting. Right: The self-powered house based TENG harvest wind energy all the time and power a LED display board. (d) Demonstration of the potential application of the TENG device for harvesting energy from raindrop.

해서 약한 물결에도 높은 전기 에너지를 생산할 수 있는 마찰전기 에너지 하베스팅 소자구조를 개발하였다. 이들을 연결함으로써 더욱 높은 수준의 전력을 생산할 수 있었고, 이와 같은 마찰전기 에너지 하베스팅 시스템을 블루에너지 시스템이라고 명명하였다. 나아가 이러한 마찰전기 하베스팅 소자를 이용하여 거대한 네트워크를 만든다면 (그림 4(b) 하부), 거시적인 발전소 및 건축물의 전기 공급원으로써도 사용할 수 있을 것으로 기대하면서 블루에너지 농장(Blue Energy Farms)를 제시하였다.

그림 4(c)는 약한 바람에도 흔들리면서 높은 에너지를 생산할 수 있는 소자 시스템을 구축한 연구를 보여주고 있다 [38]. 잔디처럼 얇고 긴 형태의 마찰전기 에너지 하베스팅 소자들을 다수 만든 후 이들을 적당한 간격으로 배열하면, 약한 바람에도 이들이 흔들리면서 서로 부딪히고, 이로 인해 마찰전기가 생성되면 전력을 생산하는 시스템이다. 그림 4(c)의 좌측 모식도에서 볼 수 있다시피, 이러한 시스템을 촘촘하게 만들어서 주택의 지붕 또는 건물의 옥상 및 외부에 구축하고 항상 바람에 의한 에너지를 수집할 수 있을 것이다. 그림 4(d) 우측에서 보여주고 있다시피, 실제로 이와 같은 마찰전기 에너지 발전 주택 시스템을 소형으로 제작하여, 약한 바람으로도 전자소자를 구동할 수 있다는 것을 증명하였다.

고체 뿐만 아니라, 액체 역시 마찰전기를 만들어낼 수 있는 매개체가 될 수 있다 [39]. 이것에 착안하여 비 또는 눈이 내리는 날씨에서, 빗방울이나 눈송이의 낙하 에너지를 이용하

여 에너지를 생산하는 시스템도 연구되었다 [40,41]. 일례로 그림 4(d)는 빌딩의 외부 창문 및 외벽에 마찰전기 소자를 붙여놓고, 우천시 발생되는 에너지 신호를 보여주고 있다 [40].

## 5. 맺음말

지금까지 마찰전기 에너지 하베스팅 기술에 대한 소개와, 소재로써 중요하게 다루어야 할 부분 및 건축용 에너지소자로써 이용할 수 있는 가능성을 보여준 연구 결과들을 제시하였다. 친환경 및 신재생 에너지원과 소자에는 다양한 종류가 있으며, 이들은 상호보완적이며 호혜적으로 작용하여야 한다. 예를 들어, 신재생 에너지의 메인 에너지 소재 및 소자는 태양전지 및 수소연료전지가 될 것으로 예측된다. 하지만 이동전자소자, 고립된 곳에서 사용되는 전자소자, 군사용 소자, 산재되어 있는 센서 네트워크 등등 다소 특이한 조건에서 에너지를 공급해주어야 하는 경우가 많다. 그러므로 압전소자, 열전소자, 전자기무선전송, 바이오에너지 등의 여타 신재생에너지 역시 미래 에너지원의 일부로써 많은 역할을 할 것으로 생각된다. 마찰전기 에너지 하베스팅 기술도 이와 맥을 같이한다. 우리 주변에는 무심코 지나치는, 잊기 쉬운 수많은 기계적 에너지가 존재한다. 이러한 기계적 에너지를 전기 에너지 변환 이용하여 소자 구동 또는 센서 신호용으로 사용할 수 있다면, 미래 IoT 기반 소자 시스템에

중요하게 사용할 수 있는 기틀이 될 것이다. 특히 건축물의 특성 상, 한 건물 내에서도 다양한 곳에 산재되어 있는 에너지 소자 및 센서 네트워크가 존재할 수 있다. 이를 지원하기 위해서 마찰전기 에너지 하베스팅 기술이 중요하게 사용될 수 있을 것이다. 물론 아직 마찰전기 에너지 하베스팅은 연구가 본격적으로 시작된지 채 10년이 되지 않았으므로, 압전 소자 에너지 하베스팅 기술보다도 해결해야 할 부분이 많다. 압전 에너지 하베스팅에 비해서 전기 에너지 생산 수준이 높다는 것을 제외하곤, 외부 환경 요인 제한, 마찰에 의한 마모 문제, 일부 메커니즘에 대한 불확실성, 전기 회로와의 호환성 등 여전히 해결해야하는 부분이 더 많다. 또한 건축물에 사용되기 위해서는 건축/건설 시스템과의 시공 호환성도 보장되어야 할 것이다. 그럼에도 불구하고, 마찰전기 에너지 하베스팅 기술은 현재 그 어떤 분야보다도 급격하게 연구 개발되어 높은 수준의 에너지 성능을 이룩하고 있으므로, 자체적인 연구 개발은 물론 다른 분야와의 많은 협력을 통해 미래 시대의 스마트하우징에 일조할 수 있을 것이라 기대해본다. ☺



- [1] C. Dagdeviren, Y. Shi, P. Joe, R. Ghaffari, G. Balooch, K. Usgaonkar, O. Gur, P. L. Tran, J. R. Crosby, M. Meyer, Y. Su, R. Chad Webb, A. S. Tedesco, M. J. Slepian, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Nat. Mater.* 14, 728 (2015).
- [2] A. D. Kuo, *Science* 309, 1686 (2005).
- [3] C. Dagdeviren, B. D. Yang, Y. Su, P. L. Tran, P. Joe, E. Anderson, J. Xia, V. Doraiswamy, B. Dehdashti, X. Feng, B. Lu, R. Poston, Z. Khalpey, R. Ghaffari, Y. Huang, M. J. Slepian, and J. A. Rogers, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 1927 (2014).
- [4] Z. Zhang, C. Yao, Y. Yu, Z. Hong, M. Zhi, and X. Wang, *Adv. Funct. Mater.* 26, 6760 (2016).
- [5] K. I. Park, J. H. Son, G. T. Hwang, C. K. Jeong, J. Ryu, M. Koo, I. Choi, S. H. Lee, M. Byun, Z. L. Wang, and K. J. Lee, *Adv. Mater.* 26, 2514 (2014).
- [6] C. K. Jeong, S. B. Cho, J. H. Han, D. Y. Park, S. Yang, K. I. Park, J. Ryu, H. Sohn, Y. C. Chung, and K. J. Lee, *Nano Res.* 10, 437 (2017).
- [7] G. T. Hwang, H. Park, J. H. Lee, S. Oh, K. I. Park, M. Byun, H. Park, G. Ahn, C. K. Jeong, K. No, H. Kwon, S. G. Lee, B. Joung, and K. J. Lee, *Adv. Mater.* 26, 4880 (2014).
- [8] G. T. Hwang, Y. Kim, J. H. Lee, S. Oh, C. K. Jeong, D. Y. Park, J. Ryu, H. Kwon, S. G. Lee, B. Joung, D. Kim, and K. J. Lee, *Energy Environ. Sci.* 8, 2677 (2015).
- [9] F. R. Fan, Z. Q. Tian, and Z. Lin Wang, *Nano Energy* 1, 328 (2012).
- [10] S. Wang, L. Lin, and Z. L. Wang, *Nano Lett.* 12, 6339 (2012).
- [11] G. Zhu, C. Pan, W. Guo, C. Y. Chen, Y. Zhou, R. Yu, and Z. L. Wang, *Nano Lett.* 12, 4960 (2012).
- [12] H. A. Mizes, E. M. Conwell, and D. P. Salamida, *Appl. Phys. Lett.* 56, 1597 (1990).
- [13] C. Liu and A. J. Bard, *Chem. Phys. Lett.* 480, 145 (2009).
- [14] C. Xu, Y. Zi, A. C. Wang, H. Zou, Y. Dai, X. He, P. Wang, Y. C. Wang, P. Feng, D. Li, and Z. L. Wang, *Adv. Mater.* 30, 1706790 (2018).
- [15] S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, and Z. L. Wang, *Adv. Funct. Mater.* 24, 3332 (2014).
- [16] B. Y. Lee, S. U. Kim, S. Kang, and S. D. Lee, *Nano Energy* 53, 152 (2018).
- [17] Y. J. Kim, J. Lee, S. Park, C. Park, C. Park, and H. J. Choi, *RSC Adv.* 7, 49368 (2017).
- [18] M. Żenkiewicz, T. Żuk, and E. Markiewicz, *Polym. Test.* 42, 192 (2015).
- [19] Y. S. Zhou, Y. Liu, G. Zhu, Z. H. Lin, C. Pan, Q. Jing, and Z. L. Wang, *Nano Lett.* 13, 2771 (2013).
- [20] K. E. Byun, Y. Cho, M. Seol, S. Kim, S. W. Kim, H. J. Shin, S. Park, and S. Hwang, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8, 18519 (2016).
- [21] P. Bai, G. Zhu, Y. Liu, J. Chen, Q. Jing, W. Yang, J. Ma, G. Zhang, and Z. L. Wang, *ACS Nano* 7, 6361 (2013).
- [22] G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, and Z. L. Wang, *Nat. Commun.* 5, 3426 (2014).
- [23] L. Lin, S. Wang, Y. Xie, Q. Jing, S. Niu, Y. Hu, and Z. L. Wang, *Nano Lett.* 13, 2916 (2013).
- [24] Y. Yang, H. Zhang, J. Chen, Q. Jing, Y. S. Zhou, X. Wen, and Z. L. Wang, *ACS Nano* 7, 7342 (2013).
- [25] S. Wang, L. Lin, Y. Xie, Q. Jing, S. Niu, and Z. L. Wang, *Nano Lett.* 13, 2226 (2013).

- [26] H. Zhang, Y. Yang, Y. Su, J. Chen, K. Adams, S. Lee, C. Hu, and Z. L. Wang, *Adv. Funct. Mater.* 24, 1401 (2014).
- [27] G. Zhu, Z. H. Lin, Q. Jing, P. Bai, C. Pan, Y. Yang, Y. Zhou, and Z. L. Wang, *Nano Lett.* 13, 847 (2013).
- [28] C. K. Jeong, K. M. Baek, S. Niu, T. W. Nam, Y. H. Hur, D. Y. Park, G. T. Hwang, M. Byun, Z. L. Wang, Y. S. Jung, and K. J. Lee, *Nano Lett.* 14, 7031 (2014).
- [29] D. Kim, S. B. Jeon, J. Y. Kim, M. L. Seol, S. O. Kim, and Y. K. Choi, *Nano Energy* 12, 331 (2015).
- [30] H. S. Wang, C. K. Jeong, M. H. Seo, D. J. Joe, J. H. Han, J. B. Yoon, and K. J. Lee, *Nano Energy* 35, 415 (2017).
- [31] Y. Feng, Y. Zheng, S. Ma, D. Wang, F. Zhou, and W. Liu, *Nano Energy* 19, 48 (2016).
- [32] F. R. Fan, L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, and Z. L. Wang, *Nano Lett.* 12, 3109 (2012).
- [33] J. Zhong, Q. Zhong, F. Fan, Y. Zhang, S. Wang, B. Hu, Z. L. Wang, and J. Zhou, *Nano Energy* 2, 491 (2013).
- [34] D. Kim, I. W. Tcho, I. K. Jin, S. J. Park, S. B. Jeon, W. G. Kim, H. S. Cho, H. S. Lee, S. C. Jeoung, and Y. K. Choi, *Nano Energy* 35, 379 (2017).
- [35] H. J. Choi, J. H. Lee, J. Jun, T. Y. Kim, S. W. Kim, and H. Lee, *Nano Energy* 27, 595 (2016).
- [36] G. Zhu, W. Q. Yang, T. Zhang, Q. Jing, J. Chen, Y. S. Zhou, P. Bai, and Z. L. Wang, *Nano Lett.* 14, 3208 (2014).
- [37] J. Chen, J. Yang, Z. Li, X. Fan, Y. Zi, Q. Jing, H. Guo, Z. Wen, K. C. Pradel, S. Niu, and Z. L. Wang, *ACS Nano* 9, 3324 (2015).
- [38] L. Zhang, B. Zhang, J. Chen, L. Jin, W. Deng, J. Tang, H. Zhang, H. Pan, M. Zhu, W. Yang, and Z. L. Wang, *Adv. Mater.* 28, 1650 (2016).
- [39] Z. H. Lin, G. Cheng, L. Lin, S. Lee and Z. L. Wang, *Angew. Chem. Int. Ed.* 52, 1 (2013).
- [40] Q. Liang, X. Yan, Y. Gu, K. Zhang, M. Liang, S. Lu, X. Zheng, and Y. Zhang, *Sci. Rep.* 5, 9080 (2015).
- [41] A. Ahmed, I. Hassan, I. M. Mosa, E. Elsanadidy, G. S. Phadke, M. F. El-Kady, J. F. Rusling, P. R. Selvaganapathy, and R. B. Kaner, *Nano Energy* 60, 17 (2019).

## 저/자/약/력



<b>성명</b>	정창규	
<b>학력</b>	2011년 2013년 2016년	한양대학교 신소재공학부 공학사 KAIST 신소재공학과 공학석사 KAIST 신소재공학과 공학박사
<b>경력</b>	2016년 ~ 2017년 2017년 ~ 2018년 2018년 ~ 현재 2018년 ~ 현재 2018년 ~ 현재 2019년 ~ 현재	KI나노융합연구소 박사후연구원 Pennsylvania State University 박사후연구원 Sensors 초빙 편집위원 전북대학교 연료전지연구센터 교수 전북대학교 신소재공학부 전자재료공학전공 조교수 Nano Convergence 편집위원