



탄소 나노 튜브를 활용한 기계-전기화학 에너지 하베스팅 연구 동향

심현준¹, 최창순²

¹ 동국대학교 에너지신소재공학과

² 한양대학교 바이오메디컬공학과

Recent Advances in Mechano-Electrochemical Energy Harvesting Using Carbon Nanotube

Hyeon Jun Sim¹ and Changsoon Choi²

¹ Department of Energy and Materials Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Korea

² Department of Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received October 8, 2024; Revised October 17, 2024; Accepted October 21, 2024)

Abstract: Energy harvesting technology offers an innovative solution for providing self-sustaining power to wearable and implantable electronic devices. However, traditional energy harvesters face limitations in operating within electrolytic environments or at low motion speeds. To overcome these challenges, a mechano-electrochemical energy harvester using carbon nanotubes has been developed. This technology relies on electrochemical ion movement to induce changes in electrochemical double-layer capacitance, enabling operation within electrolytes and optimizing performance at low deformation speeds. This environmentally friendly and sustainable energy solution is expected to play a crucial role in the advancement of future smart systems and wearable technologies.

Keywords: CNT, Mechano-electrochemical energy harvesting, Carbon nanotube, Yarn, Wearable, Self-powered sensor

1. 서론

현재 환경과 안전에 대한 관심이 급증하면서 재생 에너지의 중요성이 그 어느 때보다 강조되고 있다 [1,2]. 이에 따라 태양광, 풍력, 열 에너지, 수력, 기계적 에너지와 같은 다양한 형태로 존재하고 있는 우리 주변의 에너지를 전기 에너지 형태로 수확하는 에너지 하베스팅 기술의 연구 및 개발이 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다 [2-5]. 특히, 최근 들어 이러한 에너지 하베스팅 기술은 더 작은 전

자기와 소형화된 시스템에 전력을 공급하는 데 필요한 핵심 요소로 그 중요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다 [6,7]. 그러나 기존의 전자기 유도 원리 기반의 발전기는 소형화 및 경량화가 어렵고, 이는 웨어러블 전자기기나 마이크로파워 시스템과 같은 새로운 응용 분야에서 응용되는데에 명백한 한계를 가지고 있다 [8,9]. 이러한 이유로, 주변 에너지로부터 더 효율적으로 에너지를 수확하고 이를 저장할 수 있는 경량화 및 소형화된 에너지 하베스팅 기술의 개발이 절실히 필요하다.

이를 위해, 피에조 및 트라이보일렉트릭 원리를 기반으로 한 에너지 하베스팅 기술이 개발되고 있다. 이러한 연구들은 고분자 등을 기반으로 하여 인장 및 회전과 같은 다양한 기계적 에너지로부터 높은 출력의 전기 에너지를 생성하는 장점을 가지고 있다 [10-13]. 그러나 이러한 기기들

✉ Changsoon Choi; pccs2004@hanyang.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 수 메가헤르츠(MHz) 이상의 높은 주파수에서 최적화되어 있으며, 인체의 움직임과 같은 5 Hz 미만의 저주파 움직임에서는 성능이 급격히 저하되는 한계가 있다.

이를 극복하기 위해서, 탄소 나노 튜브(carbon nanotube, CNT)를 기반으로 하는 전기화학적 에너지 하베스터가 보고되었다 [13-17]. 탄소 나노 튜브는 이미 잘 알려진 고유의 우수한 기계적, 전기적 특성뿐만 아니라 독특한 전기화학적 전하 수용 능력을 가지고 있어, 전해질에 적절히 담그기만 하면 외부의 추가적인 전기적 자극 없이 그 표면에 전하가 물리적으로 흡착되면서 발생하는 전기 이중층 커패시턴스(electrical double layer capacitance, EDLC)를 스스로 형성할 수 있는 것으로 알려져 있다 [1,18,19]. 특히, 탄소 나노 튜브가 기계적으로 변형될 때, 이 변형에 의해 발생하는 표면적의 변화가 곧 커패시턴스의 변화를 야기시킴으로써 전압의 변화가 생성될 수 있음이 보고되었다 [1,18-39]. 이러한, 전기 화학적 원리를 기반으로 하는 하베스터는 이온의 동적 움직임을 기반으로 하여 전기 에너지를 생산하기 때문에, 2 Hz 미만의 낮은 속도의 움직임에 최적화되어 있다. 본 글에서는 이와 같이 전기화학적 환경에서 특정 전극에 인가된 기계적 변형에 의해 전극 표면에 형성된 전기이중층의 변화가 유도되고, 이에 의해서 최종적으로 전압의 변화를 유도해 내는 효과를 기계-전기 화학 에너지 하베스팅 효과라고 정의하기로 한다. 이 효과

는 특히 코일 형태로 매우 압축된 탄소 나노 튜브로 이루어진 실 형태에서 더욱 두드러지게 나타나며, 이는 실의 내부에 존재하고 있는 탄소 나노 튜브 변들 간 다공성 구조가 실의 길이 방향으로 인가된 기계적 스트레칭에 의해 변화되기 때문이다. 이러한 코일형 탄소 나노 튜브의 구조적 특성은 트위스트론(twistron)으로 알려진 꼬임 기반 기계전기 화학 에너지 하베스팅에서 중요한 역할을 한다 [1].

본 글에서 제시하는 기계-전기화학 에너지 하베스팅은 다양한 형태의 탄소 나노 튜브 실을 활용하여 구현할 수 있는 것으로 보고되었다 [그림 1]. 특히 유의미한 성능을 이끌어 낼 수 있는 다양한 구조가 보고되었는데 특히, 코일(coil), 버클(buckle), 플라이(ply) 및 바이스크롤링(biscrolling) 등이 높은 출력 및 에너지 전환효율을 보여준 것으로 보고되었다 [18-39]. 또한, 이를 바탕으로, 웨어러블 모니터링 센서, 의료용 삽입형 기기, 바다 관측 시스템 등 다양한 스마트 시스템에 매우 매력적인 에너지 솔루션을 제공한다. 이러한 스마트 시스템은 특정 신호에 자율적으로 반응하며, 모니터링 및 반응 시스템을 원활하게 통합함으로써 더욱 효율적인 기능을 구현할 수 있다. 특히, 웨어러블 또는 이식 가능한 장치로 스마트 시스템을 소형화하고 통합할 수 있는 가능성은 미래 기술 발전에 있어서 중요한 전환점이 될 것으로 기대된다.

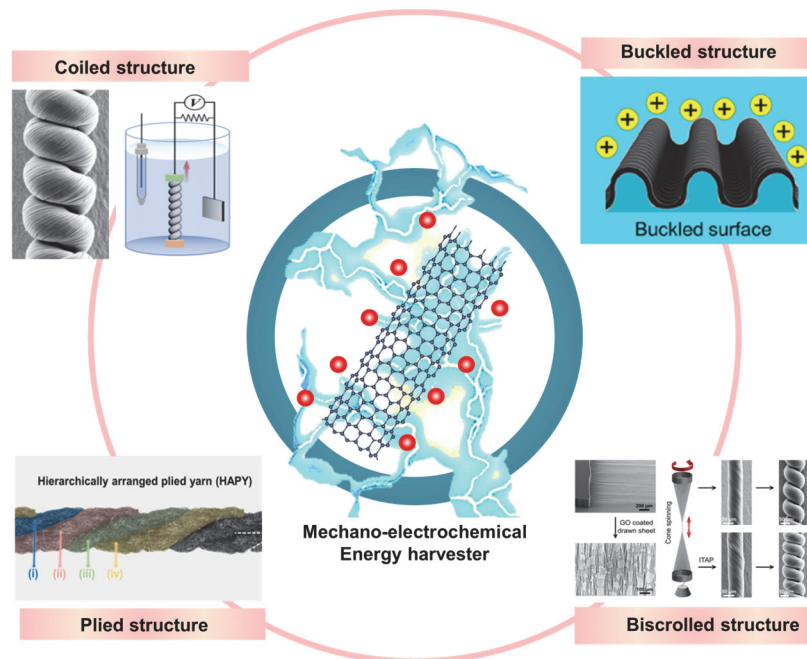


Fig. 1. Overview of different structure of mechano-electrochemical energy harvester that can be harvested by CNT-based energy devices [reproduced with permission from Wiley (2022) Ref. 18 and (2022) Ref. 24, ACS (2022) Ref. 28, and (2023) Ref. 32].

2. 탄소 나노 튜브 시트 및 실의 특성

탄소 나노 튜브는 본래 고유한 높은 기계적 강도와 뛰어난 전기 전도성 덕분에 전자기기와 같은 다양한 응용 분야에서 큰 관심을 받아왔다 [13]. 하지만 이러한 특성들은 아주 작은 스케일에서 확인된 것이며, 우리가 일상적으로 접하게 되는 스케일에는 그 특성이 급격히 저하되는 등 실제 생활에서의 활용에 제약이 있었다. 다행히도, 최근 몇 년간 이루어진 연구들은 탄소 나노 튜브의 응용 가능성을 크게 확장하였는데 특히, 단순한 가루(powder) 형태가 아닌 시트(sheet) 및 실(yarn) 형태를 갖춘 탄소 나노 튜브 소재를 개발하여 앞서 언급한 제약을 극복하고 매크로 스케일에서도 탄소 나노 튜브의 우수한 특성을 어느 정도 유지될 수 있음이 보고되었다 [14,15].

2.1 탄소 나노 튜브의 구조와 특성

탄소 나노 튜브는 고유한 원자 구조로 인해 여러 가지 뛰어난 물리적, 화학적 특성을 제공한다. 이 특성들은 탄소 나노 튜브를 다양한 산업 분야에서 혁신적인 응용 가능성을 지닌 소재로 만들고 있다. 탄소 나노 튜브의 구조는 주로 탄소 원자들이 sp^2 혼성화된 결합을 통해 육각형 네트워크를 형성한다. 이러한 구조는 탄소 나노 튜브에 매우 높은 기계적 강도를 부여하며, 이는 강철과 케블라보다도 뛰어나다. 탄소 나노 튜브의 강도는 다이아몬드에서 발견되는 sp^3 결합보다 강한 sp^2 결합 덕분이며, 이러한 결합은 탄소 나노 튜브를 현재 알려진 가장 강한 재료 중 하나로 만든다. 특히, 탄소 나노 튜브는 결합이 없는 육각형 네트워크 구조를 가지고 있어 그 유연성과 강도 면에서 탁월한 성능을 보인다 [40].

단일벽 탄소 나노 튜브(single walled carbon nanotube, SWNT)의 경우, 영률은 1 TPa에서 1.8 TPa에 이르며, 다중벽 탄소 나노 튜브(multi-walled carbon nanotube, MWNT)는 벽의 수에 따라 이 값이 달라질 수 있다 [41]. 이러한 영률은 탄소 나노 튜브가 극도로 강력한 기계적 특성을 가지며, 다양한 응용 분야에서 고성능 소재로 활용될 수 있음을 보여준다. 또한, 탄소 나노 튜브는 독특한 전기적 특성을 보여준다. 탄소 나노 튜브의 전자 밴드 구조는 탄소 나노 튜브의 대칭성, 직경, 그리고 나선성에 의해 결정된다. 이러한 특성들에 따라 탄소 나노 튜브는 금속성 또는 반도체성일 수 있으며, 밴드갭 특성은 (n, m) 지수에 따라 달라진다. 특히, 금속 성질을 띠는 탄소 나노 튜브는 4×10^9 A/cm²의 높은 전류 밀도를 자랑하며, 이는 구리와 같은

전통적인 금속보다 훨씬 높은 전기 전도성을 제공한다 [42]. 열 전도성 또한 탄소 나노 튜브의 중요한 특성 중 하나이다. 탄소 나노 튜브는 구리보다 훨씬 뛰어난 열 전도성을 가지며, $6,000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 에 이르는 열 전달 능력을 가진다 [43]. 탄소 나노 튜브가 전도 현상을 갖기 때문에, 이는 전자들이 산란 없이 긴 거리까지 이동할 수 있기 때문에 높은 열 전도성을 가진다. 이러한 뛰어난 열 전도성은 고효율 열 관리 시스템이나 고성능 전자 장치의 냉각에 탄소 나노 튜브를 활용할 수 있다. 탄소 나노 튜브는 또한 광학적 특성에 있어서도 중요한 역할 수행이 가능하다. 탄소 나노 튜브는 직경에 따라 광학 활성도가 달라지며, 일반적으로 직경이 커질수록 광학 활성은 감소한다 [44]. 이러한 특성은 탄소 나노 튜브가 1,550 nm의 파장 영역에서 광흡수를 나타내는 데 유용하며, 이 파장은 광섬유 통신과 같은 광학 기술에서 중요한 의미를 갖는다. 화학적으로, 탄소 나노 튜브는 독특한 반응성을 가지고 있다. 이는 주로 탄소 나노 튜브의 그래핀 구조와 그로 인해 발생하는 파이(π) 오비탈의 곡률에 의해, 상대적으로 직경이 작은 탄소 나노 튜브는 직경이 큰 탄소 나노 튜브보다 더 높은 반응성을 가지며, 화학적 결합은 주로 탄소 나노 튜브의 최외곽면과 끝단에서 발생한다 [45]. 표면 특성을 조절하여 다양한 용매 내 용해도와 반응성을 높일 수 있고, 이는 탄소 나노 튜브를 다양한 화학적 및 생물학적 응용에서 더 널리 사용할 수 있게 한다. 결론적으로, 탄소 나노 튜브는 기계적, 전기적, 열적, 광학적 및 화학적 특성에서 모두 뛰어난 성능을 제공하며, 이를 통해 다양한 산업 분야에서 응용 가능성을 지닌 혁신적인 소재로 자리잡고 있다. 이러한 특성들은 탄소 나노 튜브가 미래 기술 발전에 중요한 역할을 할 수 있음을 시사하며, 다양한 분야에서 활발히 연구개발이 이루어지고 있다.

2.2 코일 및 버클 구조의 탄소 나노 튜브 기반 전극

탄소 나노 튜브 실은 탄소 나노 튜브 사이에서 발생하는 반데르발스(Van der Waals) 힘에 의해 높은 결합력을 가지며, 이러한 특성 때문에 낮은 인장(strain) 값을 갖는 경향을 보인다 [그림 2(a)] [46,47]. 그러나 응용 분야에 따라 높은 신축성을 필요로 하는 경우가 있기 때문에, 이를 개선하려는 다양한 연구들이 진행되고 있다. 탄소 나노 튜브 실의 신축성을 증대시키는 방법 중 하나는 탄소 나노 튜브 실에 지속적으로 꼬임을 가함으로써, 구조적 변형을 유도하여 코일(coil) 구조를 형성하는 것이다 [그림 2(b)] [48-50]. 이 코일 구조는 탄소 나노 튜브의 본래 전도성을 유지하면서도 고도로 신축성을 가지는 구조를 제공한다. 이로 인해 탄소 나노 튜브 실은 30% 이상의 고변형에서도 전기전도

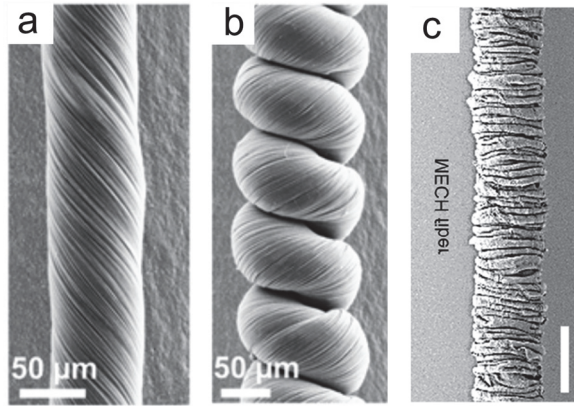


Fig. 2. SEM images: (a) single carbon nanotubes, (b) homochiral coiled yarn, and (c) buckled fiber with 400% pre-strain (scale bar: 200 μm) [Reproduced with permission from Wiley (2022) Ref. 18, and ACS (2022) Ref. 28].

성을 유지한다.

전기전도성을 유지하면서 더 높은 신축성을 달성하기 위한 또 다른 방법으로 버클(buckle) 구조를 가진 신축성 전극이 제안되었다 [그림 2(c)] [51,52]. 이 방법은 고무 코어 섬유를 최대 인장 상태로 늘린 후, 탄소 나노 튜브 시트를 코어의 섬유 방향과 평행하게 감싸는 과정을 진행한다. 이후 고무 섬유가 본래 길이로 수축할 때, 표면에 존재하는 탄소 나노 튜브 시트는 줄어든 길이를 보완하기 위해 자연스럽게 버클 구조를 형성한다. 이러한 버클 구조의 전극은 1,000% 이상의 신축성을 가지며, 신축 과정에서도 저항 변화율이 4.5% 이하로 매우 낮아 전도성을 안정적으로 유지할 수 있다 [25].

3. 탄소 나노 튜브기반 기계-전기화학 에너지 하베스터

3.1 기계-전기화학 에너지 하베스팅 메커니즘 및 피에조-일렉트로케미컬 스펙트로스코피 (piezoelectrochemical spectroscopy, PECS)

기계-전기화학 에너지 하베스터(mechano-electrochemical energy harvester)는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 혁신적인 기술로, 특히 탄소 나노 튜브와 같은 나노 소재의 전기화학적 특성을 활용한다. 이 과정은 전해질 내에서 탄소 나노 튜브를 사용하여 전기화학적 준위 차이를 형성하고, 이에 따라 전위를 생성하는 방식으로 작동하는 메커니즘을 따른다.

탄소 나노 튜브를 전해질에 담그면, 전기화학적 준위 차이에 의해 탄소 나노 튜브 표면에 이온이 달라붙어 전기화학적 커패시턴스(electrochemical capacitance)를 형성한다. 이때, $Q=CV$ 의 관계에 따라, 전극에 전하가 축적되며 전위 차를 형성한다. 이때 전위는 전극의 기계적 상태에 따라 변한다 [1,18,28]. 전극에 기계적 압력이 가해지면, 탄소 나노 튜브 재료 표면에 접근 가능한 이온의 표면적이 감소하게 된다 [그림 3(a)]. 이는 전기화학적 저장 용량의 감소를 초래하며, 결과적으로 전극과 전해질 사이의 전위차가 증가시킨다. 반대로, 기계적 압력이 제거되어 전기화학적 표면적이 증가하면, 전기화학적 저장 용량과 전위는 다시 원래 상태로 회복된다 [그림 3(b)]. 이러한 기계적 변형에 따른 전위의 변화는 전극이 기계적 압력을 받을 때마다 반복적으로 일어나며, 이 과정에서 전기 에너지가 생성된다.

특히 중요한 점은 이러한 전위 변화가 외부 인가 전압 없이도 이루어진다는 것이다. 이 과정에서 발생하는 전위 변화와 전하 상태를 측정하기 위해 피에조-일렉트로케미컬 스펙트로스코피(piezoelectrochemical spectroscopy, PECS)라는 기술이 사용된다 [그림 3(c)] [1,25]. PECS는 전극의 전하 상태와 기계적 변형 간의 관계를 설명하는 중요한 기술로, 전기화학적 에너지 수확 장치의 성능을 최적화함에 있어 핵심적인 역할을 한다.

PECS 측정 시스템은 전기화학 셀로 구성되며, 탄소 나노 튜브 작동 전극(working electrode), 상대 전극(counter electrode), 그리고 기준 전극(reference electrode)이 포함된다. 이 실험에서 탄소 나노 튜브 전극은 주기적으로 인장되며, 동시에 개방 회로 전압(open circuit voltage, OCV)과 단락 전류(short circuit current, SCC)를 생성한다. PECS를 통해 전극의 potential of zero charge (PZC)와 같은 중요한 전기화학적 특성을 분석할 수 있으며, 이러한 분석은 전기화학적 에너지 수확기의 효율성을 평가하고 최적화하는 데 매우 유용하다.

PECS 데이터는 전극의 전위와 기계적 변형 간의 관계를 규명하여, 전기화학적 에너지 수확 장치의 성능을 향상시키기 위한 설계 방향을 제시한다 [그림 3(d)] [18,35]. 또한, 전극으로 활용되는 소재의 특성을 개선하고, 시스템의 동작을 이해하는 데 중요한 역할을 한다. 이러한 기술은 다양한 응용 분야에서 전극의 전기화학적 특성을 실시간으로 관찰하고 분석하는 데 활용될 수 있으며, 전기화학적 에너지 수확기의 성능을 극대화하는 데 기여한다.

3.2 코일 구조의 기계-전기화학 에너지 하베스터

탄소 나노 튜브 시트는 본래 높은 전기 전도성 및 기계

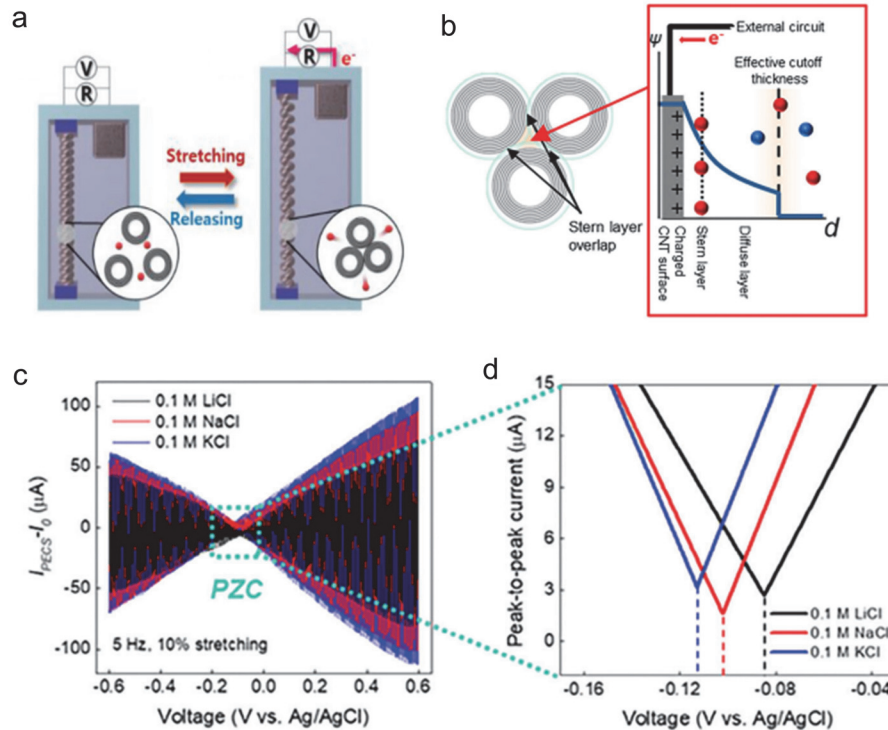


Fig. 3. (a) Illustration of a torsionally tethered coiled harvester electrode along with counter and reference electrodes in an electrochemical bath, depicting the coiled yarn before and after stretching, (b) conceptual illustration showing the changes in the electrochemical double layer, where the red and blue spheres represent negative and positive charges, respectively, (c) cyclic voltammograms (scan rate: 50 mV/s) of a coiled twistron electrode in 0.1 M HCl during a 5 Hz sinusoidal stretch to 10% strain (red) and without deformation (black), and (d) magnitude and phase of current fluctuations relative to the applied mechanical stretch, where the potential at both the minimum current amplitude and the 180° phase shift corresponds to the potential of zero charge (PZC) [reproduced with permission from Wiley (2022) Ref. 18, (2024) Ref. 35 and (2024) Ref. 37].

적 강도를 가지며, 구조적 특성으로 인해 매우 큰 표면적을 가진다. 이러한 탄소 나노 튜브 시트에 극도로 많은 꼬임을 인가함으로써 형성되는 코일 구조의 실은 50~70 μm 의 지름을 가지며, 동시에 높은 다공성과 함께 300 S/cm의 전기 전도성과 우수한 기계적 특성을 유지한다 [1]. 이렇게 제작된 코일 구조의 탄소 나노 튜브 실은 0.1 M HCl 전해질에서 기계적 인장을 통해 전기를 생산한다. 전해질 내의 이온이 탄소 나노 튜브 표면에 달라붙어 전기화학적 커패시턴스를 형성하고, 이후, 탄소 나노 튜브 실에 30%의 인장 또는 비틀림 변형을 가하면, 실 내부 구조가 압착되면서 탄소 나노 튜브 사이의 거리가 가까워진다. 이로 인해 다공성이 감소하고, 이온이 접근 가능한 표면적도 줄어들게 된다. 따라서 실을 30% 인장할 때 커패시턴스는 30.7% 감소하고, 전위차는 140 mV 증가한다.

반대로, 외부의 기계적 힘이 제거되면, 코일 구조의 탄소 나노 튜브 실은 원래 형태로 복원된다. 이 과정에서 다시 커패시턴스가 증가하며, 기계적 변형에 따른 전기적 특

성의 변화가 발생한다. 탄소 나노 튜브 실은 30 Hz의 주파수에서 최대 250 W/kg의 피크 전력을 생성할 수 있으며, 실의 무게로 정규화(normalized)했을 때, 기계적 주기당 킬로그램당 41.2 J의 전기 에너지를 생성한다 [41]. 이를 통해 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 효율은 약 1.05%에 달했다.

3.3 합사 구조의 기계-전기화학 에너지 하베스터

이온이 접근 가능한 표면적의 변화를 극대화하기 위해 다양한 구조의 에너지 하베스터가 개발되고 있다. 특히, 합사(plied) 구조는 기존의 단일 코일 구조의 탄소 나노 튜브 실과 달리 여러 가닥의 탄소 나노 튜브 실을 동일한 방향으로 꼬아서 제작된 구조이다 [32,33]. 이 독특한 구조는 실을 인장할 때 중심축 쪽으로 힘이 가해지면서 실의 밀도를 증가시키고, 이는 에너지 변환 효율을 높이는 데 중요한 역할을 한다.

합사된 실에 기계적 변형이 가해지면, 전기화학적 이중층의 변화로 인해 전압이 발생하며, 이를 통해 전기 에너지가 생성된다. 특히, 실을 인장할 때 푸아송 비율이 크게 증가하여 실의 밀도가 더 높아지고, 이에 따라 에너지 변환 효율이 향상된다. 한 연구에 따르면, 합사된 실의 에너지 변환 효율은 17.4%, 비틀림 에너지 변환 효율은 22.4%로, 이는 기존 단일 코일 구조의 탄소 나노 튜브 실보다 크게 향상된 수치이다 [30].

또한, 합사 구조의 실은 2 Hz에서 120 Hz 사이의 주파수 범위에서 높은 중량 대비 피크 전력과 평균 전력을 제공한다. 예를 들어, 40%의 신장에서 50 Hz로 인장 및 수축할 때, 해당 장치는 최대 1,475 W/kg의 피크 전력과 438 W/kg의 평균 전력을 생성할 수 있다. 이러한 성능은 합사 구조의 실이 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 효율성이 기존의 단일 코일 구조보다 우수함을 보여준다.

탄소 나노 튜브 시트의 물질적 한계를 극복하고 연구의 확장성을 높이기 위해, 그래핀(graphene)/상업용 목화 실

(commercial cotton yarn) 기반의 계층적 합사 구조 실(hierarchical aligned plied yarn, HAPY) 형태의 에너지 하베스터가 개발되었다 [그림 4(a)] [32]. 이 연구에서는 계층적 합사 구조를 갖는 그래핀이 코팅된 상업용 면사(graphene coated cotton yarn)로 10 m 길이의 실 형태인 기계-전기화학 에너지 하베스터를 개발했다 [그림 4(b)]. HAPY 구조는 실의 기계적 강도와 유연성, 투과성을 향상시키는 동시에, 그래핀 코팅을 통해 전도성을 높이고 높은 다공성을 유지할 수 있다 [그림 4(c)]. HAPY는 최대 18 mV의 OCV와 21.0 $\mu\text{A}/\text{cm}$ 의 SCC를 생성할 수 있으며, 이는 그렇지 않은 실보다 각각 3.6배 및 4배 높은 값이다 [그림 4(d)]. 외부의 기계적 자극에 대한 출력은 선형적으로 증가하며, 2~10%의 인장 범위에서 높은 민감도를 나타낸다. 이러한 특성은 다양한 기계적 변형에 민감하게 반응할 수 있음을 의미하며, 이를 통해 에너지 수확기의 성능을 극대화할 수 있다.

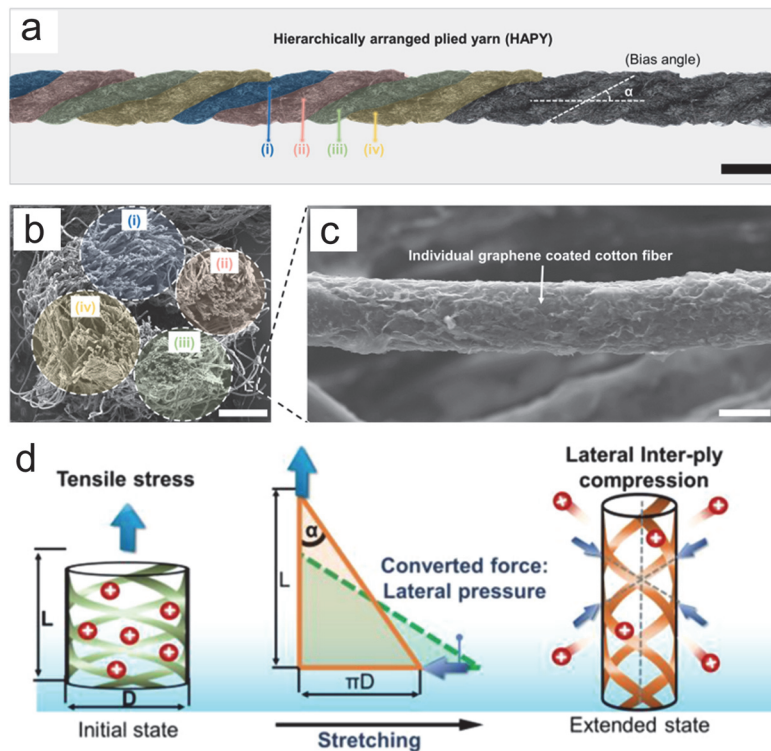


Fig. 4. (a) Optical image of the fabricated plied yarn (scale bar: 3 mm), showing the four-ply structure and maintained bias angle after the graphene coating process, (b) cross-sectional SEM image of the plied yarn (scale bar: 1 mm), (c) magnified SEM image of an individual graphene-coated cotton fiber (scale bar: 20 μm), and (d) schematic illustrating stress conversion in the ply structure, where tension is converted into lateral interply compression as the bias angle changes, leading to ion efflux due to increased yarn density [reproduced with permission from ACS (2023) Ref. 32].

3.4 바이스크롤 구조의 기계-전기화학 에너지 하베스터

기계-전기화학 에너지 하베스터의 성능을 증가시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그중 한 가지로, 탄소 나노 튜브 실 내부에 바이스크롤링(biscrolling) 방법을 적용한 코일 구조의 그래핀/탄소 나노 튜브 실이 개발되었다 [27]. 바이스크롤링 방법은 탄소 나노 튜브 시트와 기능성 물질을 결합하여 고성능 실을 제조하는 혁신적인 기술이다. 준비된 탄소 나노 튜브 시트 위에 기능성 물질을 추가하여 이층 구조를 형성하고, 이 구조에 동시에 꼬임을 가해 줌으로써, 실 형태의 1차원 구조를 형성한다. 바이스크롤링 방법을 통해 최대 95%의 기능성 물질을 함유할 수 있어, 나노 입자나 나노 섬유 등의 기능을 유지하면서도 섬유 형태로 활용 가능하다. 바이스크롤링 그래핀/탄소 나노 튜브 실을 개발하기 위해, 탄소 나노 튜브 시트 표면에 그래핀 나노 플레이크 용액을 코팅하고 꼬임을 가해, 코일 구조의 실을 제작한다 [그림 5(a)]. 이 과정에서 그래핀을 최대 95%

까지 함유할 수 있으며, 이를 통해 탄소 나노 튜브 실의 전기화학적 커패시턴스가 크게 증가한다.

바이스크롤링 방법을 통해 제작된 코일 구조의 그래핀/탄소 나노 튜브 실은 1 Hz에서 최대 0.73 kW/kg, 30 Hz에서 3.19 kW/kg의 출력 전력을 보여주며, 이는 이전에 개발된 단일 코일 구조의 탄소 나노 튜브 실 대비 7.2배 향상된 에너지 변환 효율을 나타낸다 [그림 5(b), (c)] [24]. 이러한 성능 향상은 탄소 나노 튜브 실과 그래핀의 조합이 기계-전기화학 에너지 하베스터의 전기화학적 성능을 크게 증대시킴으로써 가능했다. 생체 친화적인 응용을 위한 연구로, 생체 물질인 페리틴(ferritin)을 바이스크롤링 방법이 적용된 생체 적합성 탄소 나노 튜브 실이 개발되었다 [19]. 이 연구에서는 기존의 화학물질 대신 생체 물질을 사용하여, 인체나 생체 환경에서 활용할 수 있는 에너지 하베스팅 장치를 만들고자 했다. 코일 구조의 페리틴/탄소 나노 튜브 실은 0.01 M의 PBS 완충액에서 최대 30%의 인장 주기 동안 37 mV의 최대 OCV와 135 A/kg의 SCC를 생

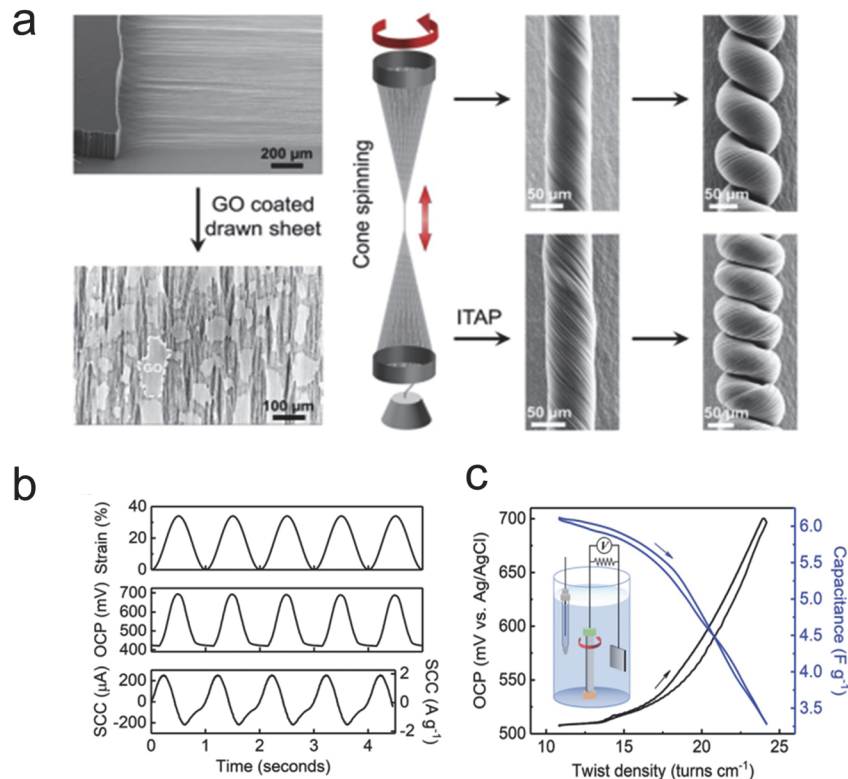


Fig. 5. (a) SEM images and an illustration of cone spinning for fabricating twisted and coiled neat CNT yarns from forest-drawn CNT sheets (top), and its modification process for making rGO@CNT yarns (bottom), (b) the time dependencies of applied tensile strain and the resulting changes in open-circuit potential (OCP vs Ag/AgCl reference) and short-circuit current (SCC) for a coiled harvester, and (c) for a noncoiled CNT yarn, 30 mm long and 100 μm in diameter, being twisted and untwisted at 3.33 turns cm⁻¹ s⁻¹, the dependencies of the capacitance and OCP on isometric twist and untwist are shown [(inset) experimental apparatus] [reproduced with permission from Wiley (2022) Ref. 27].

성하는 우수한 성능을 발휘한다. 이 실의 최대 피크 전력은 6.1 W/kg으로, 순수 탄소 나노 튜브 실에 비해 4.2 W/kg 보다 높다. 이는 페리틴이 탄소 나노 튜브 실의 전기화학적 성능을 개선하고, 생체 친화적 환경에서도 우수한 성능을 발휘할 수 있도록 기여했음을 의미한다.

또한, 페리틴/탄소 나노 튜브 실은 다양한 생체 내부와 유사한 전해질 환경(HBSS, PBS 완충액, 혈청)에서도 높은 성능을 유지한다. HBSS에서 8.2 W/kg, PBS 완충액에서 6.1 W/kg, 혈청에서 3.1 W/kg의 피크 전력을 기록하며, 이는 생체 내 응용에 있어 매우 유망한 특성을 보여준다. 전기화학적 특성에서도 코일 구조의 페리틴/탄소 나노 튜브 실은 뛰어난 성능을 나타낸다. 페리틴이 40 wt% 함유된 탄소 나노 튜브 실의 전기화학적 저장 용량은 0%의 인장 상태 기준 1.5 mF/g에서 2.8 mF/g로 증가했으며, 이는 페리틴의 양전하로 인해 PZC가 180 mV에서 430 mV로 이동한 결과이다. 이로 인해 코일 구조의 페리틴/탄소 나노 튜브 실의 전기화학적 성능이 크게 향상되었다.

3.5 버클 구조의 기계-전기화학 에너지 하베스터

기존의 에너지 하베스터는 탄소 나노 튜브의 높은 탄성 계수(Young's modulus)와 낮은 신축성(stretchability) 때문에 응용에 제약이 있었다. 이를 극복하기 위해, 연구자들은 버클 구조를 활용한 새로운 형태의 에너지 하베스터를 개발했다 [28]. 기계-전기화학 에너지 하베스터 (mechano-electrochemical energy harvester, MECH) 라고 명명된 이 섬유는 낮은 탄성계수와 높은 신축성, 그리고 우수한 전기화학적 특성을 동시에 제공하여 기존의 한계를 극복했다.

버클 구조의 MECH 섬유는 몇 가지 중요한 단계를 통해 제조된다 [그림 6(a), (b)]. 먼저, 탄성 섬유를 준비한 후, 이를 400%까지 늘려 인장한다. 이어서, 인장된 탄성 섬유 위에 탄소 나노 튜브 시트를 섬유의 길이 방향으로 정렬시켜 감아준다. 이 과정에서 탄소 나노 튜브 시트는 섬유 표면에 밀착되며, 이후 섬유의 수축할 때 중요한 역할을 한다. 마지막으로, 탄소 나노 튜브 시트로 감은 섬유를 원래 길이로

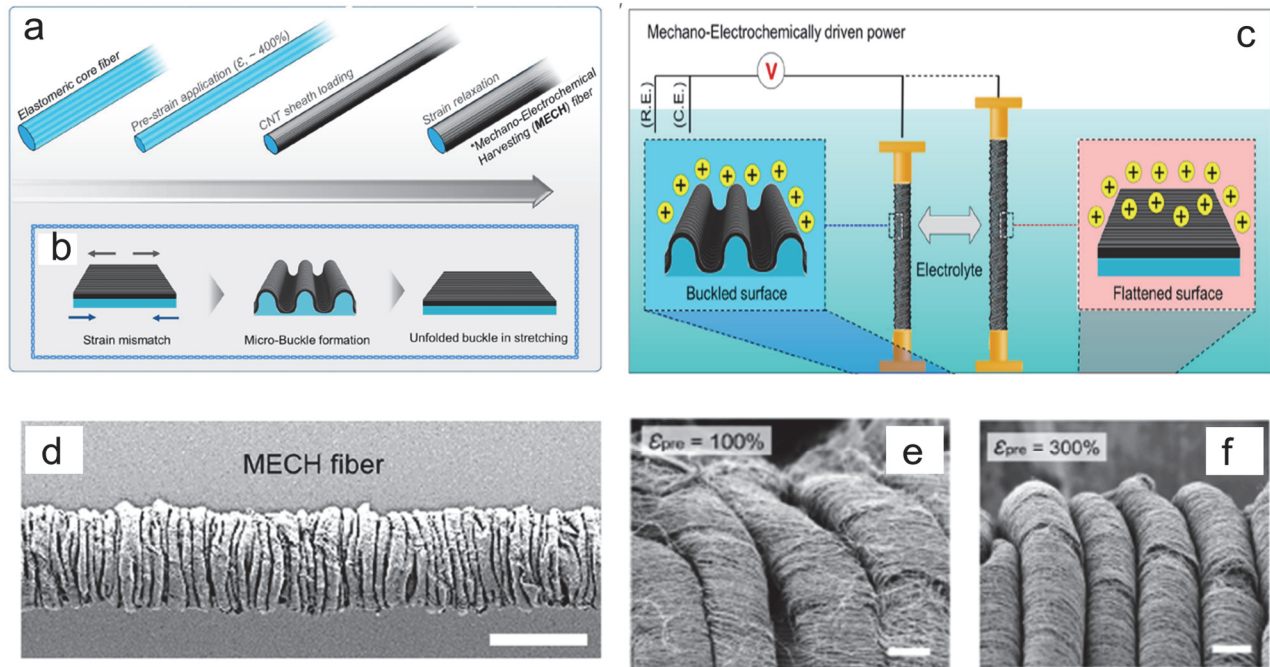


Fig. 6. (a) Schematic illustration of the fabrication process of MECH fiber. The elastomeric spandex fiber (average diameter of 240 μm) was stretched from 5 to 25 cm. Three layers of MWNT sheets (1 cm wide and 25 cm long) were placed on the elastomeric fiber, and twists at 4 turns/cm were applied. (b) The principle of buckle formation during the stretching and releasing of the elastomeric fiber. (c) Schematic illustration of the harvesting mechanism and electrochemical experiment, consisting of the MECH fiber as the working electrode, Pt as the counter electrode, and Ag/AgCl as the reference electrode. (d) SEM image of the buckled fiber type mechano-electrochemical energy harvester. The active surface area of the MWNT changed by folding and unfolding the buckles during stretching/releasing cycles. SEM images of the buckled fiber when pre-stretched at (e) 100% strain, and (f) 300% strain [Reproduced with permission from ACS (2022) Ref. 28]

수축시키면, 탄성 섬유와 탄소 나노 튜브 시트 간의 스트레인 미스 매치로 인해 미세한 버클 구조가 자연스럽게 형성된다 [그림 6(d)]. 이 버클 구조 덕분에 섬유는 신축성을 유지하면서도 전기적 특성을 잃지 않게 된다. 이 MECH 섬유는 기계적 변형에 따라 전기화학적 특성이 크게 향상된다. 예를 들어, 섬유를 0%에서 100%까지 인장했을 때, 전기화학적 저장 용량은 0.96 mF에서 1.16 mF로 약 21% 증가했고, 이에 따라 전위도 증가한다 [그림 6(c)]. 1 Hz의 사인파 형태의 인장을 통해 전압을 측정된 결과, 섬유에 가해지는 사전 변형 값이 클수록 전압 출력이 증가하는 경향을 보였다. 외부 부하 저항을 걸어 전기 에너지를 측정된 결과, 부하 저항이 증가할수록 피크 전압이 높아졌으며, 200 Ω의 부하 저항에서 최대 출력이 1.5 W/kg에 달했다. MECH는 탄성계수가 2 MPa 이하로 매우 낮는데, 이는 인체 조직 및 장기와 유사한 정도이며, 최대 100%까지 신축이 가능하고 신축 후에도 원래 형태로 복원된다 [그림 6(e), (f)]. 이러한 특성 덕분에 버클 구조의 MECH 섬유는 생체 친화적인 웨어러블 디바이스나 신축성을 요구하는 다양한 응용 분야에서 매우 유망한 소재로 평가받고 있다.

버클 구조의 섬유는 인체와 유사한 탄성계수와 높은 신축성 덕분에 다양한 응용 가능성을 가지고 있지만, 낮은 출력 성능 값으로 제약을 받아왔다. 이러한 문제를 극복하기 위해, 연구자들은 미세한 버클 구조와 거시적인 코일 구조를 결합한 섬유형 에너지 하베스터(synergistic macro-coil and micro-buckle fiber, SCBF)를 개발했다 [39]. 이 새로운 구조는 기계적 자극에 따라 이온이 접근 가능한 표면적을 변화시켜 전기 출력을 크게 향상시키는 효과를 가져온다. SCBF의 제조 과정은 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 고분자 섬유 코어를 사용하여 탄성 섬유를 늘린 후, 여러 층의 탄소 나노 튜브 시트를 감아 미세적 버클이 자발적으로 형성되도록 한다. 이 과정에서 형성된 미세적 버클은 섬유의 길이 방향을 따라 버클 형태의 구조를 가지며, 인장하면 이 버클이 퍼지면서 시트와 이온 간 접근성을 증가시킨다. 두 번째 단계에서는 이렇게 형성된 버클 섬유에 꼬임을 가해 거시적 코일 구조를 만든다. 이 단계에서는 0.7 MPa의 응력을 인가한 상태로 5,000회/m의 꼬임을 가하면 나선형의 코일 구조가 형성된다. 이 거시적 코일은 섬유가 늘어났다가 다시 원래 상태로 돌아오는 성질을 가지므로, 기계적 자극에 대응하는 동안 전기적 출력을 유지할 수 있도록 한다. 이처럼 SCBF는 미세적 버클과 거시적 코일 구조가 결합된 형태로, 기존의 버클 섬유보다 월등한 성능을 자랑한다. 미세한 버클 구조는 섬유가 인장되면서 퍼지고, 이 과정에서 전기화학적으로 이온이 접근 가능한 표면적이 증가하여 전기 출력을 극대화한다. 거

시적 코일 구조는 섬유의 신축성에 따른 기계적 복원력을 제공하여, 지속적인 에너지 수확이 가능하게 한다. 결과적으로 이 구조는 SCBF가 최대 전류 밀도 121 A/kg, 최대 전력 밀도 16 W/kg을 달성하게 한다. 에너지 변환 효율은 0.33%로, 이는 기존의 버클 섬유보다 33배나 향상된 수치이다. 또한, SCBF는 1.050%까지 견딜 수 있는 높은 신축성을 보이며, 탄성계수는 0.2 MPa로 기존 기계-전기화학 에너지 하베스터, 피에조 일렉트릭 및 트라이보 일렉트릭 섬유보다 훨씬 부드럽다. 이러한 특성 덕분에 SCBF는 생체 친화적 응용 분야, 특히 웨어러블 디바이스나 신축성 센서와 같은 응용 분야에서 매우 유망한 소재로 주목받고 있다.

4. 기계-전기화학 에너지 하베스터의 응용

기계-전기화학 에너지 하베스터는 탄소 나노 튜브 시트와 실을 이용해 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기술로, 다양한 응용 분야에서 주목받고 있다. 해당 기술은 웨어러블 모션 모니터링 센서, 이식형 에너지 하베스터, 해양 모니터링 시스템 등에서 혁신적인 역할을 할 수 있다 [37-39]. 먼저, 웨어러블 모션 모니터링 센서는 사용자의 호흡, 심박수, 근육 움직임을 실시간으로 모니터링할 수 있는 혁신적인 디바이스로 사용된다 [그림 7(a), (b)]. 이 센서는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하여 외부 전력 공급 없이 자가 충전형 모니터링 시스템을 구현할 수 있다. 특히, 인체의 움직임을 정밀하게 추적하는 다방향성 변형 센서는 운동 분석과 재활 치료 등에 유용하게 사용될 수 있다 [30,31]. 이식형 에너지 하베스터는 탄소 나노 튜브 기반 에너지 하베스터가 심장 박동과 같은 생체 내부의 움직임을 감지하여 전기 에너지를 생성할 수 있다 [그림 7(c), (d)] [36-39]. 이 기술을 사용해 인체 내에서 지속적으로 에너지를 공급함으로써, 이식형 의료 기기의 수명을 연장하고 추가적인 수술을 줄일 수 있다는 잠재력을 가진다. 또한, 생체 적합성과 전기 자극을 통한 세포 증식 촉진 효과도 입증되어 재생의학과 신경조절 등 다양한 생의학적 응용 분야에서 활용될 수 있다. 또한 더 큰 스케일에서의 응용 가능성도 존재하는데 특히 해양 모니터링 시스템에서는 해양 파도와 조류의 움직임을 전기 에너지로 변환하는 기술에 활용될 수도 있다 [그림 7(e)] [34,39]. 트위터론을 활용한 이 시스템은 해양 부표, 원격 센서 네트워크 등에서 에너지를 자급자족할 수 있는 시스템을 제공하며, 다양한 자연 환경에서 안정적으로 작동할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로, 기계-전기화학 에너지 하베스터는 자체 전

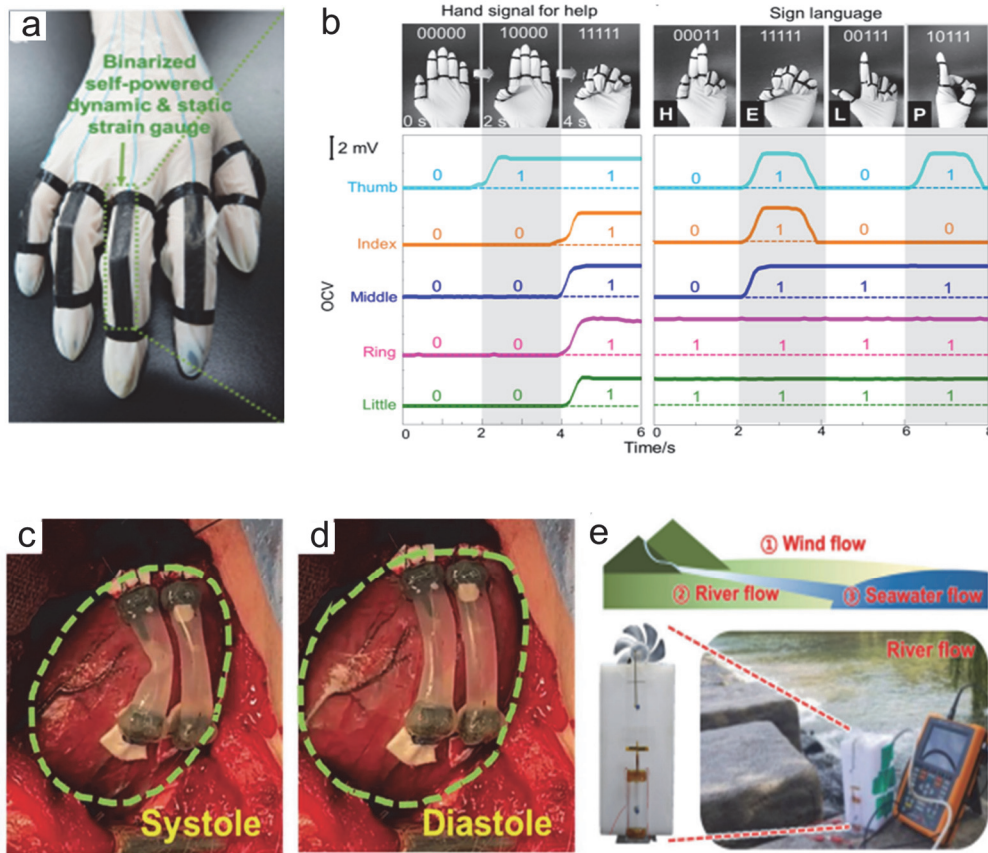


Fig. 7. (a) The optical image of a wearable self-powered strain gauge using a mechano-electrochemical energy harvester. (b) The open-circuit voltage versus time corresponding to changes in hand configuration for a help signal and sign language [(inset) The photograph of hand configuration representing a binary number]. (c) TECHs placed between the apex of the heart and the valve level generate electricity by repeated stretching during the systole and (d) diastole phases of the heart. (e) The harvesting source and location where the actual harvesting test was conducted [reproduced with permission from Wiley (2024) Ref. 37, (2023) Ref. 34 and MDPI (2022) Ref. 30].

력 공급이 가능한 관성 센서로도 활용될 수 있다. 트위스트론을 기반으로 하여 높은 정확도로 다양한 진동과 충격을 감지할 수 있으며, 자동차 가속도 센서와 안전벨트 센서로 적용 시에도 뛰어난 성능을 발휘한다 [24,25]. 이처럼 기계-전기화학 에너지 하베스터는 웨어러블 디바이스, 이식형 의료 기기, 해양 모니터링 시스템 등 다양한 분야에서 혁신적인 가능성을 가지고 있으며, 지속 가능한 에너지원으로의 역할이 기대된다.

5. 결론

본 논문에서는 탄소 나노 튜브 시트와 실을 기반으로 하는 기계-전기화학 에너지 하베스터의 최근 국내외 연구 동향을 종합적으로 검토하였다. 이러한 하베스터는 기계적 에

너지를 전기 에너지로 변환하는 혁신적인 기술로, 특히 웨어러블 디바이스, 이식형 의료 기기, 해양 모니터링 시스템 등 다양한 응용 분야에서 유망한 잠재력을 가지고 있다.

인간의 움직임을 기반으로 전기 에너지를 반영구적으로 생산함으로써, 배터리 교체가 큰 이슈가 되고 있는 삽입형 기기의 에너지원으로 활용될 수 있으며, 또한 휴대폰 등 웨어러블 디바이스를 자체적으로 충전하는 에너지원으로 사용할 수 있다. 전해질 이온과의 접촉을 통해 전기 에너지를 생산하는 새로운 원리의 하베스터는 해양의 해류 및 조류를 측정할 수 있으며, 무작위 위치에 존재해야 하는 센서의 특성상 자체적으로 전기를 생산하고 측정할 수 있어 이러한 점에서 최적화되어 있다.

코일, 합사, 바이스크롤링, 버클 구조를 기반으로 한 다양한 기계-전기화학 에너지 하베스터는 각각의 특성에 따라 효율적이고 지속 가능한 에너지 전환을 가능하게 한다.

특히, 생체 친화적인 응용을 포함하여 인체에 무해한 방식으로 에너지를 수확할 수 있는 잠재력을 지니고 있어, 미래의 스마트 시스템 및 웨어러블 기기의 발전에 중요한 역할을 할 것이다.

향후 연구에서는 이러한 에너지 하베스터의 성능 향상을 바탕으로 실제 응용을 위한 최적화와 상용화를 위한 대규모 제조 기술 개발이 필요하다. 현재의 기술로는 탄소 나노튜브 포레스트를 기반으로 한 탄소 나노튜브 시트의 대량 생산이 어려우며, 이를 해결하기 위해서는 그래핀과 같은 다양한 탄소 나노물질을 기반으로 한 전기화학적 에너지 하베스터에 대한 연구와 발전이 필요하다. 또한, 구조적 및 물질적 변화와 발전을 통해 전기화학적 하베스터의 출력 성능을 향상시키기 위한 지속적인 노력이 필요하다. 이를 통해 하베스터의 효율성을 높이고, 다양한 응용 분야에서 더욱 실용적으로 활용할 수 있는 가능성을 열어 갈 수 있다.

ORCID

Changsoon Choi

<https://orcid.org/0000-0003-4456-4548>

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00449455 and RS-2023-00240008).

REFERENCES

- [1] S. H. Kim, C. S. Haines, N. Li, K. J. Kim, T. J. Mun, C. Choi, J. Di, Y. J. Oh, J. P. Oviedo, J. Bykova, S. Fang, N. Jiang, Z. Liu, R. Wang, P. Kumar, R. Qiao, S. Priya, K. Cho, M. Kim, M. S. Lucas, L. F. Drummy, B. Maruyama, D. Y. Lee, X. Lepró, E. Gao, D. Albarq, R. Ovalle-Rbles, S. J. Kim, and R. H. Baughman, *Science*, **357**, 773 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.aam8771>
- [2] H. J. Sim, D. Y. Lee, H. Kim, Y. B. Choi, H. H. Kim, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *Nano Lett.*, **18**, 5272 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b02256>
- [3] H. J. Sim, C. Choi, D. Y. Lee, H. Kim, J. H. Yun, J. M. Kim, T. M. Kang, R. Ovalle, R. H. Baughman, C. W. Kee, and S. J. Kim, *Nano Energy*, **47**, 385 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.011>
- [4] H. J. Sim, H. Gwac, S. J. Kim, J. M. Oh, and C. Choi, *Chem. Eng. J.*, **495**, 153486 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153486>
- [5] J. A. Lee, A. E. Aliev, J. S. Bykova, M. J. de Andrade, D. Kim, H. J. Sim, X. Lepró, A. A. Zakhidov, J. B. Lee, G. M. Spinks, S. Roth, S. J. Kim, and R. H. Baughman, *Adv. Mater.*, **28**, 5038 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201600709>
- [6] S. H. Kim, M. D. Lima, M. E. Kozlov, C. S. Haines, G. M. Spinks, S. Aziz, C. Choi, H. J. Sim, X. Wang, H. Lu, D. Qian, J.D.W. Madden, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 3336 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1039/c5ee02219c>
- [7] C. Choi, J. H. Kim, H. J. Sim, J. Di, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *Adv. Energy Mater.*, **7**, 1602021 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201602021>
- [8] C. Choi, H. J. Sim, G. M. Spinks, X. Lepró, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1502119 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201502119>
- [9] H. J. Sim, C. Choi, S. H. Kim, K. M. Kim, C. J. Lee, Y. T. Kim, X. Lepró, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *Sci. Rep.*, **6**, 35153 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep35153>
- [10] H. Kim, H. Kim, and C. K. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 292 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.13>
- [11] D. Park, H. Park, and J. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 93 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.1.15>
- [12] J. Lee, S. Na, and D. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 106 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.1.15>
- [13] R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, and W. A. de Heer, *Science*, **297**, 787 (2002).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1060928>
- [14] M. Zhang, K. R. Atkinson, and R. H. Baughman, *Science*, **306**, 1358 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1104276>
- [15] M. Zhang, S. Fang, A. A. Zakhidov, S. B. Lee, A. E. Aliev, C. D. Williams, K. R. Atkinson, and R. H. Baughman, *Science*, **309**, 1215 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1115311>
- [16] A. E. Aliev, J. Oh, M. E. Kozlov, A. A. Kuznetsov, S. Fang, A. F. Fonseca, R. Ovalle, M. D. Lima, M. H. Haque, Y. N. Gartstein, M. Zhang, A. A. Zakhidov, and R. H. Baughman, *Science*, **323**, 1575 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1168312>
- [17] M. D. Lima, S. Fang, X. Lepró, C. Lewis, R. Ovalle-Robles, J. Carretero-Gozáliz, E. Castillo-Martínez, M. E. Kozlov, J. Oh, N. Rawat, C. S. Haines, M. H. Haque, V. Aare, S. Stoughton, A. A. Zakhidov, and R. H. Baughman, *Science*, **331**, 51 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1195912>

- [18] S. Oh, K. J. Kim, B. Goh, C. L. Park, G. D. Lee, S. Shin, S. Lim, E. S. Kim, K. R. Yoon, C. Choi, H. Kim, D. Suh, J. Choi, and S. H. Kim, *Adv. Sci.*, **9**, 2203767 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202203767>
- [19] K. J. Kim, S. Oh, Y. Kim, C. L. Park, Y. C. Song, H. Lee, E. S. Kim, D. Suh, S. C. Lim, H. Kim, J. Choi, and S. H. Kim, *Adv. Energy Mater.*, **14**, 2303343 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202303343>
- [20] Y. Jang, S. M. Kim, K. J. Kim, H. J. Sim, B. J. Kim, J. W. Park, R. H. Baughman, A. Ruhparwar, and S. J. Kim, *ACS Sens.*, **4**, 2893 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b01180>
- [21] T. J. Mun, S. H. Kim, J. W. Park, J. H. Moon, Y. Jang, C. Huynh, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 2000411 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202000411>
- [22] H. Kim, J. W. Park, J. S. Hyeon, H. J. Sim, Y. Jang, Y. Shim, C. Huynh, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *Biosens. Bioelectron.*, **164**, 112318 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112318>
- [23] B. Goh, K. J. Kim, E. S. Kim, S. H. Kim, and J. Choi, *Appl. Surf. Sci.*, **561**, 150075 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150075>
- [24] B. J. Kim, Y. Jang, J. H. Moon, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **68**, 2676 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2977541>
- [25] J. H. Moon, B. J. Kim, Y. Jang, T. J. Mun, H. Kim, and S. J. Kim, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **68**, 8904 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3014578>
- [26] Y. Jang, J. H. Moon, C. Lee, S. M. Lee, H. Kim, G. H. Song, G. M. Spinks, G. G. Wallace, and S. J. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 45149 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1021/acami.2c11811>
- [27] Z. Wang, T. J. Mun, F. M. Machado, J. H. Moon, S. Fang, A. E. Aliev, M. Zhang, W. Cai, J. Mu, J. S. Hyeon, J. W. Park, P. Conlin, K. Cho, E. Gao, G. Wan, C. Huynh, A. A. Zakhidov, S. J. Kim, and R. H. Baughman, *Adv. Mater.*, **34**, 2201826 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202201826>
- [28] H. J. Sim and C. Choi, *Nano Lett.*, **22**, 8695 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c03296>
- [29] H. J. Sim, J. H. Noh, J. H. Choi, and C. Choi, *Sensors*, **23**, 269 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/s23010269>
- [30] H. J. Sim, J. Kim, J. H. Choi, M. Oh, and C. Choi, *Sensors*, **22**, 4542 (2022).
doi: <https://doi.org/10.3390/s22124542>
- [31] S. Yu, W. Son, G. Jeon, J. Kim, J. You, S. Ko, and C. Choi, *Composites Part B*, **256**, 110664 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110664>
- [32] J. Kim, J. H. Noh, S. Chun, S. J. Kim, H. J. Sim, and C. Choi, *Nano Lett.*, **23**, 7623 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c02221>
- [33] M. Zhang, W. Cai, Z. Wang, S. Fang, R. Zhang, H. Lu, A. E. Aliev, A. A. Zakhidov, C. Huynh, E. Gao, J. Oh, J. H. Moon, J. W. Park, S. J. Kim, and R. H. Baughman, *Nat. Energy*, **8**, 203 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01191-7>
- [34] T. J. Mun, J. H. Moon, J. W. Park, R. H. Baughman, and S. J. Kim, *Small Methods*, **7**, 2300526 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/smt.202300526>
- [35] K. J. Kim, S. Oh, Y. Kim, C. L. Park, Y. C. Song, H. Lee, E. S. Kim, D. Suh, S. C. Lim, H. Kim, J. Choi, and S. H. Kim, *Adv. Energy Mater.*, **14**, 2303343 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202303343>
- [36] S. Oh, K. J. Kim, C. H. Kim, J. H. Lee, H. Kim, B. Kim, C. L. Park, J. Oh, E. S. Kim, H. Kim, S. Y. Yeo, D. Kim, X. Hu, J. Choi, D. Suh, S. C. Lim, R. H. Baughman, C. H. Park, T. H. Kim, and S. H. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2315279 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202315279>
- [37] A. Ruhparwar, A. Osswald, H. Kim, R. Wakili, J. Müller, N. Pizanis, F. Al-Rashid, U. Hendgen-Cotta, T. Rassaf, and S. J. Kim, *Adv. Mater.*, **36**, 2313688 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202313688>
- [38] T. Li, Y. Jang, J. H. Moon, J. G. Choi, H. Gwac, D. Y. Lee, J. S. Hyeon, T. J. Mun, J. H. Ahn, Y. Jeong, and S. J. Kim, *IEEE Sens. J.*, **24**, 2577 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3342792>
- [39] H. J. Sim, J. Kim, W. Son, J. M. Lee, D. Y. Lee, Y. J. Kim, Y. K. Kim, S. J. Kim, J. M. Oh, and C. Choi, *Nano Energy*, **128**, 109889 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109889>
- [40] S. Rathinavel, K. Priyadarshini, and D. Panda, *Mater. Sci. Eng. B*, **268**, 115095 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115095>
- [41] M. Meo and M. Rossi, *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 1597 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.11.015>
- [42] H. Dai, A. Javey, E. Pop, D. Mann, W. Kim, and Y. Lu, *Nano*, **1**, 1 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1142/S1793292006000070>
- [43] E. Pop, D. Mann, Q. Wang, K. Goodson, and H. Dai, *Nano Lett.*, **6**, 96 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl052145f>
- [44] S. Yamashita, Y. Inoue, S. Maruyama, Y. Murakami, H. Yaguchi, M. Jablonski, and S. Y. Set, *Opt. Lett.*, **29**, 1581 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1364/OL.29.001581>
- [45] V. Lordi and N. Yao, *J. Mater. Res.*, **15**, 2770 (2000).
doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.2000.0396>
- [46] L. J. Hall, V. R. Coluci, D. S. Galvão, M. E. Kozlov, M. Zhang, S. O. Dantas, and R. H. Baughman, *Science*, **320**, 504 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1149815>
- [47] A. E. Aliev, J. Oh, M. E. Kozlov, A. A. Kuznetsov, S. Fang, A. F. Fonseca, R. Ovalle, M. D. Lima, M. H. Hauque, Y. N.

- Gartstein, M. Zhang, A. A. Zakhidov, and R. H. Baughman, *Science*, **323**, 1575 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1168312>
- [48] J. Foroughi, G. M. Spinks, G. G. Wallace, J. Oh, M. E. Kozlov, S. Fang, T. Mirfakhrai, J.D.W. Madden, M. K. Shin, S. J. Kim, and R. H. Baughman, *Science*, **334**, 494 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1211220>
- [49] M. D. Lima, N. Li, M. J. de Andrade, S. Fang, J. Oh, G. M. Spinks, M. E. Kozlov, C. S. Haines, D. Suh, F. Foroughi, S. J. Kim, Y. Chen, Y. Ware, M. K. Shin, L. D. Machado, A. F. Fonseca, J.D.W. Madden, W. E. Voit, D. S. Galvão, and R. H. Baughman, *Science*, **338**, 928 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1226762>
- [50] M.F.L. de Volder, S. H. Tawfick, R. H. Baughman, and A. J. Hart, *Science*, **339**, 535 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1222453>
- [51] Z. F. Liu, S. Fang, F. A. Moura, J. N. Ding, N. Jiang, J. Di, M. Zhang, X. Lepró, D. S. Galvão, C. S. Haines, N. Y. Yuan, S. G. Yin, D. W. Lee, R. Wang, H. Y. Wang, W. Lv, C. Dong, R. C. Zhang, M. J. Chen, Q. Yin, Y. T. Chong, R. Zhang, X. Wang, M. D. Lima, R. Ovalle-Robles, D. Qian, H. Lu, and R. H. Baughman, *Science*, **349**, 400 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.aaa7952>
- [52] J. M. Lee, W. Son, J. Kim, J. H. Noh, M. Oh, J. H. Choi, and C. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 303 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.4.1>