Journal of the Korean Electrochemical Society
Vol. 28, No. 1, 2025, 1-13
https://doi.org/10.5229/JKES.2025.28.1.1

Review Paper
pISSN 1229-1935
eISSN 2288-9000

기계-전기화학 에너지 하베스터의 최근 응용과 진전

심현준[1] · 최창순[2]*

[1]동국대학교 에너지신소재공학과
[2]한양대학교 바이오메디컬공학과

(2024년 11월 21일 접수 : 2024년 12월 27일 채택)

Advancement and Application of Mechano-Electrochemical Energy Harvester

Hyeon Jun Sim[1] and Changsoon Choi[2]*

[1]*Department of Energy and Materials Engineering, Dongguk University-Seoul, 30 Pildong-ro, Jung-gu, Seoul 04620, Republic of Korea*
[2]*Department of Electronic Engineering and Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea*

(Received November 21, 2024 : Accepted December 27, 2024)

초 록

에너지 하베스팅 기술은 웨어러블 및 이식형 전자 장치에 자가 유지 전력을 제공하는 혁신적인 솔루션을 제공합니다. 하지만 기존 에너지 하베스터는 전해질 환경이나 낮은 구동 속도에서 작동할 때 한계로 작용함으로, 이러한 문제를 해결하기 위해 탄소 나노튜브를 이용한 기계-전기화학 에너지 하베스터가 개발되었습니다. 이 기술은 전기화학적 이온 이동을 통해 전기화학 이중층의 커패시턴스 변화를 유도하여 전해질 내에서도 작동이 가능하게 하며, 이를 통해 웨어러블 기기, 삽입형 의료 기기, 해양 모니터링 시스템 등 다양한 분야에 응용될 수 있습니다. 이 환경 친화적이고 지속 가능한 에너지 솔루션은 미래의 스마트 시스템과 웨어러블 기술 발전에 중요한 역할을 할 것으로 기대됩니다.

Abstract : Energy harvesting technology provides an innovative solution for delivering self-sustaining power to wearable and implantable electronic devices. However, conventional energy harvesters face limitations when operating in electrolytic environments or at low motion speeds. To address these issues, a mechano-electrochemical energy harvester using carbon nanotubes has been developed. This technology induces changes in electrochemical double-layer capacitance through electrochemical ion movement, enabling operation within electrolytes and allowing applications across a range of fields, including wearable devices, implantable medical devices, and ocean monitoring systems. This environmentally friendly and sustainable energy solution is expected to play a crucial role in advancing future smart systems and wearable technologies.

Keywords : Carbon nanotube, Mechano-electrochemical energy harvester, Yarn, Self-powered sensor, Human monitoring sensor

1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경 안전에 대한 관심이 크게 증가하면서, 재생 에너지의 중요성은 그 어느 때보다 강조되고 있다.[1,2] 이에 따라 태양광, 풍력, 열에너지, 수력, 기계적 에너지와 같은 다양한 주변 에너지를 효과적으로 수집하는 기술이 활발히 연구되고 있다.[2–5] 또한, 이러한 기술들은 소형 전자기기 및 시스템에 전

*E-mail: pccs2004@hanyang.ac.kr

력을 공급하기 위한 핵심 기술로 떠오르고 있다.[6,7] 그러나 기존의 전자기유도 발전을 이용하는 방법은 소형화가 어려워, 웨어러블 전자기기나 마이크로파워 시스템과 같은 새로운 응용 분야에 충분한 에너지를 제공하는 데 한계가 가진다.[8,9] 따라서 주변 환경으로부터 에너지를 더 효율적으로 수집하고 이를 저장할 수 있는 혁신적인 에너지 기술의 개발이 요구된다.

이 기술의 핵심에는 탄소나노튜브(carbon nanotube)가 있다.[10–14] 탄소나노튜브는 탁월한 전기화학적 전하 수용 능력을 지니고 있어, 적절한 전해질에 담그기만 해도 외부 전압 없이 전기화학적 이중층 커패시턴스(electrochemical double layer capacitance, EDLC)를 형성하고 충전할 수 있다.[1,15,16] 이러한 특성 덕분에 탄소나노튜브는 에너지 하베스팅 장치에서 매우 유망한 소재로 주목받고 있으며, 여러 연구에서 고무적인 성과를 보여주고 있다. 특히 탄소나노튜브에 기계적 변형을 가할 때, 그에 따른 커패시턴스 변화로 인해 전압이 발생한다.[1,15–36] 이 효과는 특히 실 형태의 탄소나노튜브에서 두드러지게 나타나며, 이는 실의 다공성 구조가 압축된 상태에서 기계적 스트레칭으로 변화되기 때문이다. 이렇게 구조에서 기인하는 특성은 트위스트론(Twistron)이라는 꼬임 기반 전기 생성 장치에서 중요한 역할을 한다.[1)]

우리는 트위스트론과 같이 기계적 에너지를 적용하여 전기화학적 원리로 전기를 생산하는 기술을 '기계-전기화학 에너지 하베스팅'이라 명명하였다(Fig. 1). 이 기술은 코일, 버클, 플라이, 바이스크롤링 등의 다양한 구조를 바탕으로 발전을 거듭하고 있으며, 높은 출력과 에너지 변환 효율을 보여준다.[15–36] 이러한 기술은 웨어러블 모니터링 센서, 의료용 이식형 기기, 해양 모니터링 시스템 등 다양한 스마트 시스템에서 매우 유망한 에너지 솔루션을 제공한다. 이 스마트 시스템들은 특정 신호에 자율적으로 반응할 수 있으며, 모니터링 및 반응 시스템의 통합을 통해 더 효율적인 기능을 구현할 수 있다. 특히 웨어러블 또는 이식형 장치로서 스마트 시스템을 소형화하고 통합할 수 있다는 가능성은 미래 기술 발전의 중요한 전환점이 될 것이다.

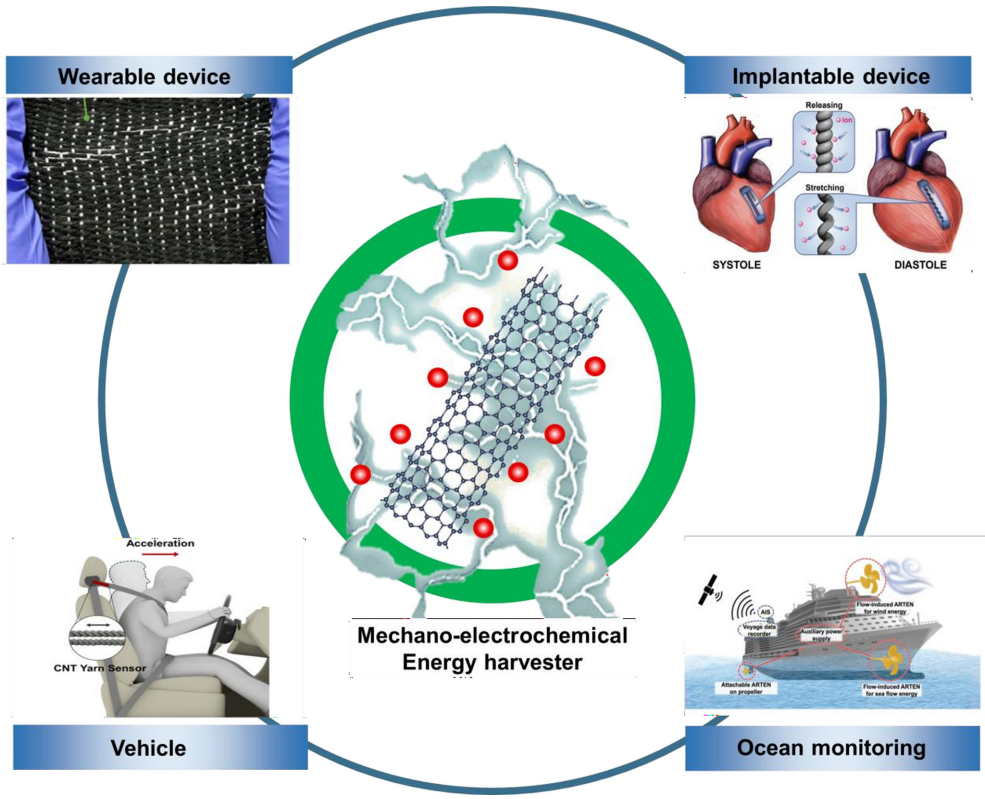

Fig. 1. Schematic diagram representing applied research of mechano-electrochemical energy harvester. [Reproduced with permission from ACS (2023) Ref. 29, Wiley (2024) Ref. 34, IEEE (2021) Ref. 21, and Wiley (2023) Ref. 31].

2. 기계-전기화학 에너지 하베스터

2.1 탄소나노튜브 시트 특성

탄소나노튜브는 현재 섬유 기반 스마트 시스템에서 가장 유망한 소재 중 하나로 평가받고 있다. 본래 탄소나노튜브는 고유의 높은 기계적 강도와 뛰어난 전기 전도성 덕분에 다양한 전자기기 응용 분야에서 주목받고 있다.[10] 이러한 우수한 특성 덕분에 나노 스케일에서는 강력한 성능을 발휘하지만, 이를 마이크로 또는 매크로 규모로 확장할 때 실용적인 활용에는 몇 가지 제약이 따른다. 대표적으로, 탄소나노튜브를 대량으로 활용하기 위한 스케일업 과정에서 기계적 강도와 전기 전도성이 급격히 감소하는 문제가 있다. 이러한 현상은 초기 연구에서 탄소나노튜브의 뛰어난 특성을 실질적인 응용에 적용하는 데 있어 큰 장애물로 작용했다. 따라서, 실생활에서 활용 가능하도록 하기 위해 스케일업과 관련된 연구와 개발이 필수적이었다. 최근 몇 년간의 연구들은 이러한 제약을 극복하는 중요한 진전을 이루었다. 연구자들은 탄소나노튜브 시트(sheet)와 실(yarn)을 개발하여, 나노 스케일에서의 특성을 매크로 스케일로 확장할 수 있는 방법을 찾아냈다.[11,12] 이러한 시트와 실은 수많은 탄소나노튜브를 집합체로 결합하여 강력하면서도 유연한 구조를 형성하였으며, 이를 통해 높은 기계적 강도와 전기 전도성을 매크로 스케일에서도 유지하는 데 성공했다. 이로써 탄소나노튜브는 다양한 실제 응용 분야에서 더욱 광범위하게 사용될 수 있는 가능성을 열었다.

2.2 기계-전기화학 에너지 하베스팅 원리

기계-전기화학 에너지 하베스터는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 혁신적인 기술로, 특히 탄소나노튜브와 같은 나노 소재의 독특한 전기화학적 특성을 활용한다(Fig. 2a). 이 기술은 전해질 내에서 탄소나노튜브의 전기화학적 준위 차이를 통해 전위를 생성하는 방식으로 작동한다. 탄소나노튜브를 전해질에 담그면, 전기화학적 준위 차이에 의해 탄소나노튜브 표면에 이온들이 흡착되면서 전기화학적 커패시턴스(electrochemical capacitance)가 형성된다. 이 과정에서 Q=CV의 관계에 따라 전극에 전하가 축적되고, 전위가 형성된다. 전위는 전극의 기계적 상태에 따라 변화하게 된다.[1,15,25] 즉, 기계적 압력이 전극에 가해지면 탄소나노튜브 표면에 접근할 수 있는 이온의 표면적이 감소하여, 전기화학적 저장 용량이 줄어들고, 그 결과 전위차가 증가한다(Fig. 2b). 반대로, 압력이 제거되어 표면적이 다시 늘어나면 전기화학적 저장 용량이 증가하고 전위는 원래 상태로 회복된다.

이와 같은 기계적 변형에 따른 전위 변화는 전극이 반복적으로 기계적 압력을 받을 때마다 지속적으로 발생하며, 이 과정에서 전기 에너지가 생성된다. 이 기술은 반복적인 기계적 움직임을 전기 에너지로 변환할 수 있어, 웨어러블 기기 및 자율형 센서와 같은 다양한 응용 분야에 매우 유망한 에너지 수확 방식으로 주목받고 있다.

3. 에너지 하베스터 제조 및 측정 방법

3.1 코일구조형 탄소나노튜브 실(yarn)

탄소 나노튜브(탄소나노튜브) 코일 실을 제작하는 방법은 다중벽 탄소 나노튜브(MWNT)를 사용하여 시작된다(Fig. 2c).[11,12] 탄소나노튜브는 화학 기상 증착법(CVD)을 통해 아세틸렌(C_2H_2) 가스를 탄소 원료로 사용하여 680 ºC에서 성장시킨다. 이때 생성된 탄소나노튜브는 외경이 약 10 nm이고 평균 7개의 벽으로 이루어져 있으며, 다양한 크기의 다발로 형성된다. 이 나노튜브들은 약 4 cm 폭, 30 cm 길이의 시트로 정렬되며, 45 겹의 시트를 겹쳐 하나의 시트를 만든다.

이 시트 스택을 약 1.3 cm 직경의 실린더로 말아 수직으로 고정한 뒤, 실린더의 상단에 모터를 연결하고 하단에는 약 11.2 g의 하중을 가하여 약 31 MPa의 스트레스를 제공한다.[1,5] 이 상태에서 실에 3,800 turns/meter의 비틀림을 가해 중앙에 고밀도의 실이 형성되도록 한다. 이 비틀림이 증가함에 따라 실은 두 개의 원뿔 모양으로 변형되며, 고밀도 실이 자연스럽게 코일 형태로 감긴다. 이를 자가 코일링(self-coiling)이라고 한다.

코일링된 실의 성질을 조정하기 위해, 비틀림을 약 500 turns/meter 정도 제거할 수 있다. 이를 통해 실의 변형 범위가 확장되며, 예를 들어 30%의 변형이 가능했던 실이 50%까지 변형될 수 있다. 실의 직경은 비틀림 전에는 약 50–70 μm이며, 코일링 후에는 약 90 μm 로 증가한다. 시트 스택의 면적 밀도와 비틀림을 고려한 실의 중량은 약 0.173 mg이다.

3.2 플라이구조형 탄소나노튜브 실

플라이(plied) 탄소나노튜브 실을 만드는 과정은 여러 개의 탄소나노튜브 실을 꼬아 더 강력한 실을 제작하는 방법이다.[30] 먼저, 기상 증착법(CVD)을 통해 형성된 탄소나노튜브 시트를 준비한다. 이 시트는 길이 방향으로 정렬되며, 면적당 밀도는 약 22 μg/cm^{2}로, 15–20 개의 층이 쌓인 실린더 형태로 형성된다. 이 실린더는 약 6.6 mm의 직경으로 만들어지며, 꼬임 밀도는 28 회전/cm이다. 이 과정에서 실의 직경은 약 90 μm이다. 꼬임을 넣어주기 전, 실린더는 약 42 MPa의 하중을 받으며 꼬아져 단일 꼬임 실이 만들어진다.

신축 사이클을 약 30회 반복하며, 실의 강도는 0.27에서 0.90 GPa로 증가하고, 이때 탄소나노튜브의 정렬도가 향상되어 실의 안정성이 높아진다. 이렇게 제작된 실은 플라이구조의 실로 변환된다. 세 개의 꼬임 실을 한 방향으로 꼬아 플라이 실을 만드는데, 각 실에 22 MPa의 하중을 가하며, 꼬임 밀도는 16 회전/cm이다. 이 과정을 통해 실은 자가 코일링 현상이 일어나기 전까지 꼬아져 플라이 실이 완성된다. 이때 꼬임의

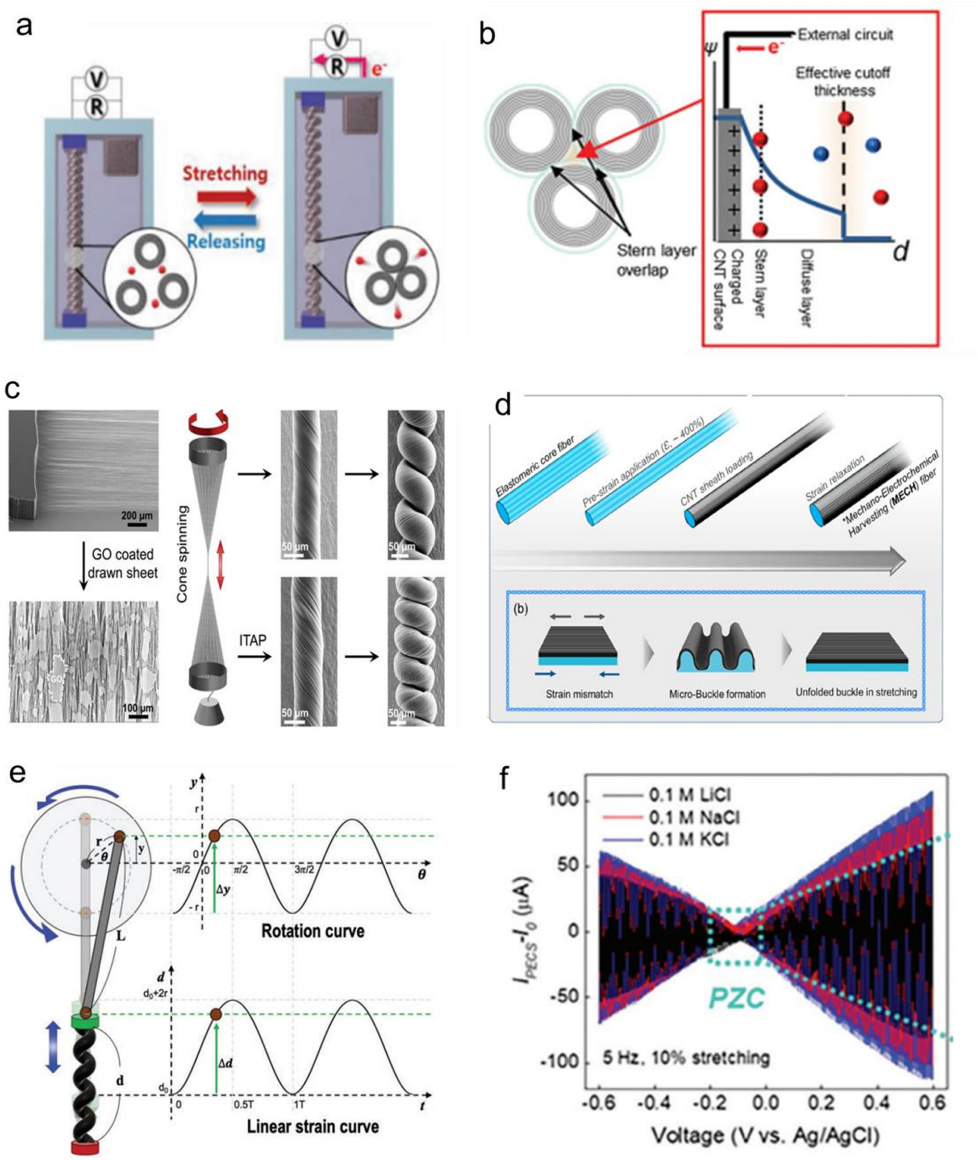

Fig. 2. (a) Schematic diagram showing the measurement method of the mechano-electrochemical energy harvester. (b) Schematic illustrating the principle of electricity generation. (c) Schematic of the fabrication process for the coil structure of the mechano-electrochemical energy harvester. (d) Schematic of the fabrication process for the buckle structure of the mechano-electrochemical energy harvester. (e) Experimental setup for measuring the mechano-electrochemical energy harvester. (f) Schematic diagram showing the method for measuring PZC (Point of Zero Charge) using PECS (Potential Electrochemical Capacitance Spectroscopy). [Reproduced with permission from Wiley (2023) Ref. 18, Wiley (2022) Ref. 15, Wiley (2022) Ref.24, ACS (2022) Ref. 25, Wiley (2023) Ref.31 and Wiley (2024) Ref. 16]

정도와 하중에 따라 실의 물리적 특성이 조정된다.

플라이 실의 기계적 성질과 전기적 성질을 개선하기 위해 추가적인 신장 또는 측면 압축을 가할 수 있다. 이를 통해 실의 밀도가 증가하고, 전기화학적 특성, 즉 전기용량과 전위차가 변하며 에너지 수확 성능이 향상된다. 최적화된 플라이 실은 기존 코일 실에 비해 최대 17.4%의 기계적 에너지 수확 효율을 가지며, 비틀림 변형을 통한 수확 효율은 최대 22.4%이다. 이렇게 제작된 플라이 탄소나노튜브 실은 높은 에너지 수확 성능을 가져 웨어러블 전자기기나 해양 에너지 수확 등 다양한 응용 분야에서 활용될 수 있다.

3.3 버클구조형 탄소나노튜브 실

버클(buckled) 섬유 제작 과정은 엘라스토머 섬유에 탄소나노튜브 시트를 감싸 미세 주름 구조를 형성하는 방식으로 이루어진다(Fig. 2d).[25,36] 먼저, 신축성 있는 엘라스토머 섬유(예: 스판덱스 섬유)를 준비하고, 이를 인장 방향으로 100에서 400%까지 늘린다. 이 과정을 통해 섬유가 미리 늘어난 상태가 되며, 이후 섬유가 수축할 때 미세 주름 구조를 형성할 수 있는 구조체가 된다.

인장된 섬유에 다중벽 탄소 나노튜브시트를 감싸는데, 이 시트는 섬유의 길이 방향으로 정렬된다. 탄소나노튜브 시트는 섬유 표면에 밀착되며, 감싸는 과정에서 약 4 회전/cm의 꼬임이 추가된다. 이후 인장력을 해제하면 엘라스토머 섬유가 수축하면서 표면에 자연스럽게 미세 주름이 형성된다. 이 주름 구조는 섬유와 탄소나노튜브 시트 간의 변형 불일치로 인해 생성되며, 표면에 추가적인 면적이 형성된다. 주름의 평균 크기는 약 16 μm 로, 사전 인장 정도에 따라 크기가 달라질 수 있다. 이렇게 형성된 버클 섬유는 높은 탄성과 복원력을 가진다. 최대 100%까지 늘어날 수 있으며, 변형 후에도 원래 상태로 복원된다.

3.4 기계-전기화학 에너지 하베스터 측정 방법

하베스터의 전기 출력의 측정은 3 전극 시스템을 이용하며, 작업 전극으로는 꼬인 탄소나노튜브 실을, 대전극으로는 백금 메시(Pt mesh)와 고표면적 카본을 사용하였고, 기준 전극으로는 Ag/AgCl 전극을 사용한다(Fig. 2e).[1,15] 전해질로는 0.1 M 염산(HCl) 용액이 사용되었으며, 이는 탄소나노튜브 실의 전기적 성능을 최적화하는 데 효과적인 농도이다.

전기적 측정은 Gamry 전위계를 통해 개방 회로 전압(OCV), 단락 전류(SCC), 그리고 전극의 전기 용량을 측정하는 방식으로 진행되었다. 특히 전기 용량 측정은 순환전류전압법(Cycle voltammetry)를 통해 0.3–0.6 V 범위에서 50 mV/s의 스캔 속도로 측정되었다. 기계적 변형 실험은 1 Hz에서 30% 스트레인을 주기적으로 가하며 탄소나노튜브 실의 전기적 변화를 관찰했다. 실은 꼬임이 풀리지 않도록 고정한 상태에서 변형되었으며, 직경 50–70 um 사이의 탄소나노튜브 실의 전기적 신호를 기계적 변형에 따라 실시간으로 측정되었다.

실험의 재현성 및 정확성을 높이기 위해 30,000회 이상의 반복 측정이 수행되었으며, 평균 전력, 최대 전력, 주기당 에너지 측정에서 매우 적은 오차 범위를 나타내어 실험 결과의 신뢰성이 확보되었다. 다양한 농도의 염산(HCl)을 사용하여 성능 변화를 측정한 결과, 성능이 최적화되는 농도 범위는 0.1에서 1 M 사이였으며, 이 농도를 벗어나는 범위에서는 성능이 감소하는 경향을 보였다.

3.5 PECS 측정 및 분석 방법

PECS (Piezoelectrochemical spectroscopy)는 탄소나노튜브 실의 기계적 변형과 전기적 성능 간의 상관관계를 분석하는 기법이다(Fig. 2f).[20] PECS는 기계적 변형을 가하는 동시에 전기화학적 전위를 측정하여 전극의 전기적 특성 변화를 실시간으로 분석하는 기술이다. 실험에서는 탄소나노튜브 실을 작업 전극으로, 백금 메시(Pt mesh) 또는 고표면적 카본을 대전극으로, Ag/AgCl 전극을 기준 전극으로 사용하였으며, 전극은 모두 0.1 M 염산 용액에 담긴 상태에서 실험이 진행되었다.

PECS 실험에서는 주기적인 전압 스캔을 수행하는 순환전류전압법 기법을 활용하여 실에 5 Hz에 해당하는 주파수를 주기적으로 가하면서 10%의 변형을 가하였다. 실의 전기적 특성은 변형 전후로 비교 분석하였다. 이 실험의 주요 목표 중 하나는 전극과 전해질 사이에서 전하가 0이 되는 전위(potential of zero charge, PZC)를 측정하는 것이다. 기계적 변형이 가해질 때 전극의 전위가 변하며, 전류가 최소가 되는 지점과 전류 위상이 180 도 반전되는 지점을 통해 PZC를 확인할 수 있다. 실험 결과, PZC는 온도 변화(3 ºC에서 60 ºC)에 대해 ±7 mV의 작은 변동을 보였으며, 이는 전해질로부터 전극으로 주입되는 전하가 기계적 변형에 크게 영향을 받지 않음을 나타낸다. 또한 PECS 실험에서는 전극의 개방 회로 전압(OCV)이 전해질의 pH에 따라 선형적으로 변하는 것을 관찰하였다. 예를 들어, 0.1 M의 염산 용액을 사용할 때 pH가 낮으면 전극에 홀(hole)이 주입되고, pH 가 높으면 전자가 주입되며, 이는 Nernst 방정식에 따라 pH 단위당 약 –47 mV의 전위 변화를 나타낸다. 이러한 결과는 탄소나노튜브 실의 기계적 변형과 전기적 특성을 정밀하게 이해하는 데 중요한 데이터를 제공하며, 전극 성능을 최적화하는 데 기여할 수 있다.

4. 기계-전기화학 에너지 하베스터의 응용

기계-전기화학 에너지 하베스터의 응용은 여러 분야에서 큰 잠재력을 가지고 있다. 특히 탄소나노튜브 실을 이용한 기계적 에너지의 전기 에너지 변환 기술은 다양한 혁신적인 응용 가능성을 제공한다. 이러한 기술은 인간 건강 모니터링 시스템, 의료용 삽입형 센서, 해양 파도 관측 시스템, 그리고 여러 무선 센서 등의 분야에서 유용하게 사용될 수 있다.

4.1 웨어러블 센서

탄소나노튜브 실은 직물에 통합되어 인간 모니터링 시스템에서 혁신적인 응용 가능성을 제공한다. 이러한 직물은 호흡, 심박수, 근육 움직임 등 다양한 생리학적 신호를 감지할 수 있으며, 이를 통해 실시간으로 건강 상태를 모니터링할 수 있다. 예를 들어, 탄소나노튜브 실을 사용한 직물을 셔츠나 패치 형태로 제작하여 착용하면, 호흡 시 흉곽의 확장과 수축을 감지할 수 있다. 이는 매우 정밀한 센서 역할을 하여 사용자의 호흡 패턴을 실시간으로 모니터링할 수 있게 한다.[1] 특히 주목할 만한 점은 이 기술이 외부 전력 공급 없이도 작동할 수 있다는 것이다. 탄소나노튜브 실 자체가 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있는 능력을 지니고 있기 때문에, 별도의 배터리나 전력 공급 장치가 필요로 하지 않는다. 사용자의 움직임이나 생리적 변화로부터 직접 에너지를 수확하여 필요한 전력을 생성함으로써, 지속적으로 작동하는 자가 충전형 모니터링 시스템을 구현할 수 있다. 이는 웨어러블 디바이스나 의료용 센서에서 매우 중요한 기술로, 사용자에게 편리함을 제공하고 장치의 유지보수 비용을 줄이는 데 기여할 것이다. 웨어러블 휴먼 모니터링을 위한 연구에서는 탄소나노튜브 시트와 고무 섬유를 활용하여 고성능 웨어러블 센서를 제작하는 몇 가지 방법이 제시되었다(Fig. 3a).[18] 이 연구는 인간의 생리학적 신호를 감지하고 모니터링하는 시스템을 개발하는 데 초점을 맞추고 있다. 이를 위한, 첫 번째 단계는 탄소나노튜브 시트를 꼬인 실로 변환하는 것이다. 이 꼬인 실을 활용하여 기계-전기화학 에너지 하베스터와 에너지 저장 슈퍼커패시터를 제작한다. 하베스터는 고도로 꼬인 탄소나노튜브 실을 사용하여 기계적 변형 시 전기 에너지를 생성하며, 실리콘 고무 섬유 주위에 감겨 있다. 이 하베스터는 외부의 기계적 자극, 예를 들어 착용자가 움직일 때 발생하는 신체의 변형을 전기 에너지로 변환하는 역할을 한다. 반면 슈퍼커패시터는 꼬이지 않은 탄소나노튜브 실 기반의 전극을 적용한다. 이 실들은 실리콘 고무 섬유와 고체 전해질이 포함된 실리콘 고무 튜브에 감겨 있으며, 에너지를 저장하는 역할을 한다. 하베스터와 슈퍼커패시터가 직물 형태로 엮이면, 이 직물은 전기 에너지를 생성하고 저장할 수 있는 기능을 동시에 수행한다. 직물은 직렬 또는 병렬로 연결하여 전압이나 전류를 증가시킬 수 있으며, 다양한 전력 요구 사항에 맞게 조정할 수 있다. 이 시스템의 구조적 특징 중 하나는 호모카이랄(homochiral) 및 헤테로카이랄(heterochiral) 꼬임 구조이다. 이러한 구조는 전극의 전압 변화를 반대 방향으로 유도하여 에너지를 더욱 효율적으로 생성할 수 있게 한다. 또한 실리콘 고무와 탄소나노튜브의 조합은 높은 유연성과 신축성을 제공하여 착용자가 편안하게 사용할 수 있다. 고체 전해질을 포함한 실리콘 고무 튜브로 보호된 다층 구조는 전기적 성능과 내구성을 증가시키며, 반복적인 굽힘 및 신축 변형에도 안정적인 성능을 유지한다.

이러한 연구들은 인체의 움직임을 더욱 정밀하게 측정하기 위해 발전해왔으며, 특히 두 축의 코일 구조를 가진 탄소나노튜브 실을 활용한 멀티디렉셔널 변형 센서(muliti-directional diagonal sensor)가 주목받고 있다(Fig. 2b).[19] 이 센서는 전통적인 변형 센서와 달리 변형의 크기뿐만 아니라 방향도 정확하게 감지할 수 있는 구조적 장점을 가지고 있다. 즉, 센서는 변형이 발생할 때 크기와 방향을 동시에 측정할 수 있어, 인체의 움직임을 정밀하게 추적하는 데 매우 유용하다. 이 멀티디렉셔널 변형 센서는 자체 전원 공급이 가능하다는 중요한 이점을 가진다. 탄소나노튜브 실이 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있어, 외부 전원 없이도 작동할 수 있다. 이로 인해 웨어러블 기기의 소형화가 가능해졌으며, 외부 배터리 없이도 지속적으로 작동할 수 있어 사용자에게 더 큰 편리함을 제공한다. 또한, 이 센서는 높은 감도와 빠른 응답 시간을 자랑한다. 이러한 특성 덕분에 인간의 움직임을 인식하는 데 매우 유용하며, 예를 들어 손목의 움직임 방향과 크기를 정확하게 감지할 수 있다. 이는 웨어러블 기기뿐만 아니라 다양한 헬스케어 및 피트니스 애플리케이션에서 중요한 역할을 할 수 있으며, 사용자의 실시간 건강 모니터링이나 운동 분석에 큰 도움을 줄 수 있다(Fig. 3c,d).[27]

최근 연구는 단순한 기계적 에너지 수확 시스템을 넘어, 다양한 형태의 인체 정보를 동시에 측정하고 융합하여 새로운 형태의 웨어러블 센서로 발전하고 있다.[23] 이러한 발전의 일환으로, 표면 근전도(sEMG) 전극과 코일형 탄소나노튜브 실을 통합하여 동적 및 등척성(근육 길이 변화 없이 힘을 발휘하는 운동) 근육 움직임을 모니터링할 수 있는 장치가 개발되었다(Fig. 3e,f). 근전도 전극은 비침습적으로 피부 표면에서 신경근 활동에 의해 생성된 전류를 수집하는 역할을 한

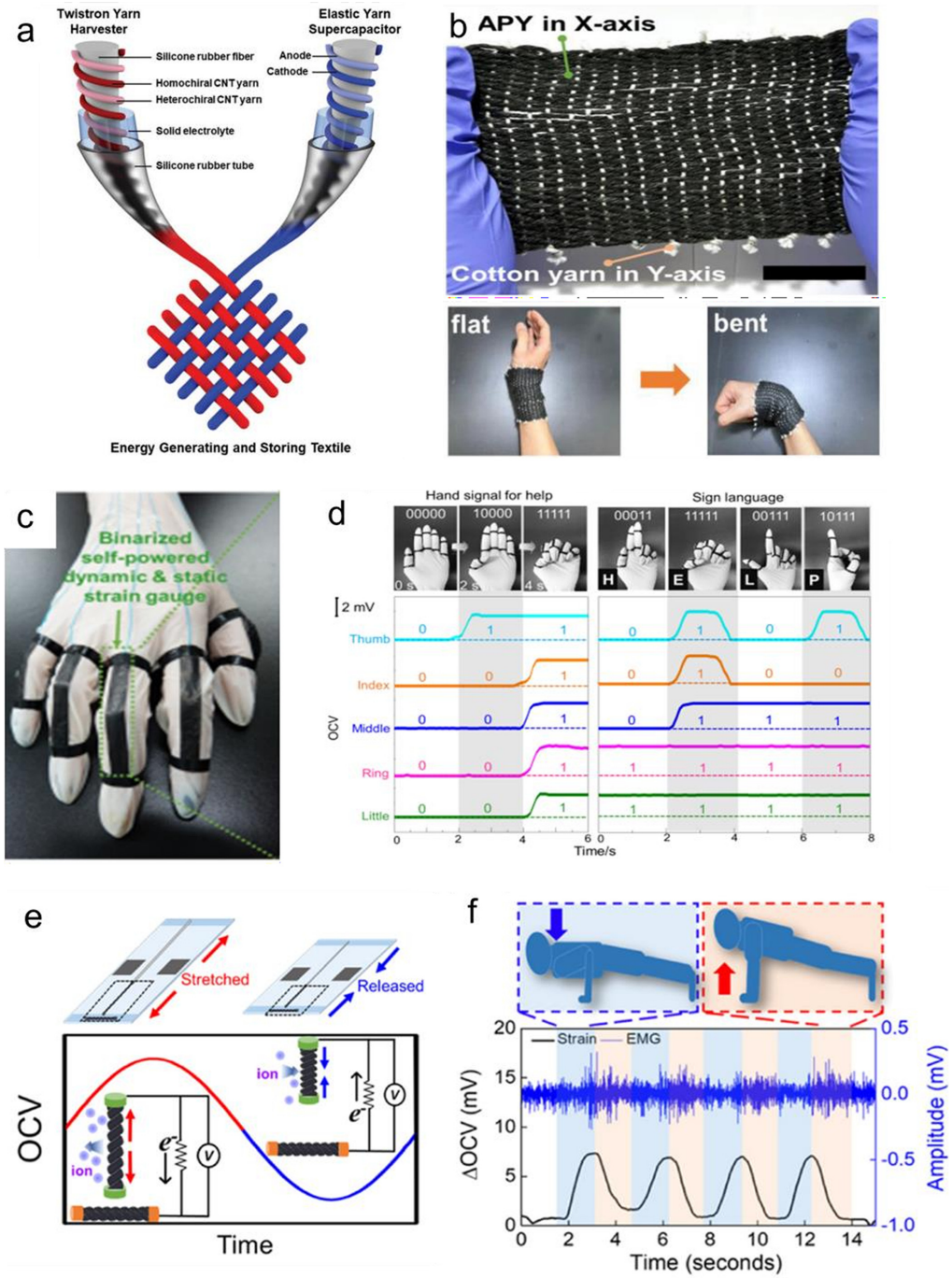

Fig. 3. (a) Schematic diagram of a wearable energy textile woven with a mechano- electrochemical energy harvester and supercapacitor. (b) Optical image of a fabric-type mechano-electrochemical energy harvester and an energy harvester generating electricity through wrist movement. (c) Optical image of a tattoo-type mechano-electrochemical energy harvester and (d) human motion sensor measuring movements through hand gestures. (e) Body-attached sensor combining an electromyography electrode and mechano-electrochemical energy harvester. (f) Wearable human monitoring sensors capable of measuring various human movements [Reproduced with permission from Wiley (2020) Ref. 18, ACS (2023) Ref. 19, MDPI (2022) Ref. 27 and ACS (2022) Ref. 23].

다. 이를 통해 근육 활동을 모니터링하고, 근육 수축의 강도와 시간을 측정할 수 있다. 근전도 전극은 근육의 전기적 신호를 감지하여, 운동 중 근육의 활성화 정도를 실시간으로 분석할 수 있는 중요한 도구이다. 한편, 코일형 탄소나노튜브 실 전극은 기계적 변형을 감지하는 역할을 한다. 이 실은 신축성이 있고 유연하여 착용하기에 적합하며, 인장 될 때 개방 회로 전압(OCV) 신호를 생성한다. 코일 구조 덕분에, 이 실은 근육의 움직임에 따라 변형되며, 변형의 각도와 방향에 대한 정보를 제공한다. 이를 통해 사용자의 동적 움직임뿐만 아니라 등척성 운동이 진행되는 동안의 근육 상태를 모니터링할 수 있다. 이러한 센서는 근전도 신호와 탄소나노튜브 실의 변형 감지 신호를 통합하여, 근육의 전기적 활동과 기계적 움직임 정보를 동시에 제공할 수 있다. 이는 단순히 근육의 활성화 여부뿐만 아니라, 근육 움직임의 각도와 방향까지 정확하게 파악할 수 있게 해준다. 이 기술은 웨어러블 헬스케어 기기에서의 응용 가능성을 크게 확장할 수 있으며, 운동 분석, 재활 치료, 인간–기계 인터페이스 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 할 것이다.

4.2 삽입형 센서

최근에는, 외부에서 인체의 움직임을 측정하는 것뿐만 아니라, 생체 내부 장기들의 에너지원 및 움직임을 측정하는 센서로도 활용될 수 있다.[25] 이를 위해, 인공 위 모형 실험을 통해 트위스트론 센서의 적용 가능성을 평가하는 연구가 수행되었다. 실험에서는 인공 위를 구성하기 위해 풍선을 연동 펌프에 연결한 후, 풍선의 부피와 팽창 속도를 조절하였다(Fig. 4a,b). 이 풍선은 실제 위의 팽창과 수축을 모사하였으며, 코일 구조의 탄소나노튜브 실 센서는 풍선의 표면에 감겨 고정되었다. 이 센서는 풍선의 팽창과 수축에 따른 기계적 변형을 감지하고, 이를 전기 신호로 변환하여 내부 장기의 움직임을 모니터링하는 데 활용된다.

특히, 인공 위 모형 실험에서는 반 식염수, 인산완충식염수, 헹크스 균형염 용액, 말 혈청 등 네 가지 종류의 액체 전해질을 사용하여 실제 위에서 일어나는 느린 속도의 움직임을 구현했다. 전기화학적 성능 측정 결과, 30%의 신장률에서 0.04, 0.06, 0.08 Hz의 주파수로 신장시킬 때 OCV가 약 37.4–37.5 mV의 피크를 기록했다. 이는 주기적으로 신장을 반복할수록 OCV가 선형적으로 증가함을 보여준다. 인공 위 모형 실험에서 풍선의 부피 변화를 모니터링한 결과, 주입된 액체 부피에 비례하여 OCV가 증가하는 것을 확인했다. 0.05 Hz의 주기로 액체를 주입하고 추출하는 동안, OCV의 변화는 주입된 액체 부피와 정확하게 일치했으며, 이는 트위스트론 센서가 높은 정확도로 위의 부피 변화를 감지할 수 있음을 입증했다.

또한, 생체 적합성을 테스트하기 위해 C2C12 근세포를 콜라겐으로 코팅된 탄소나노튜브 시트에 배양하였다.[33] 배양 후 1일 및 7일 동안 세포 성장을 관찰하였고, 생/사 염색을 통해 세포 생존력을 비교했다. 그 결과, 탄소나노튜브 시트에서 배양된 C2C12 세포는 정상적으로 증식하였으며, 배양 7일 후에도 높은 생존율을 유지했다. 이는 탄소나노튜브가 생체 적합성을 가지고 있어, 인체 내부에서의 응용 가능함을 나타낸다.

생성된 전기 에너지는 인체의 세포를 자극하여 단순한 측정을 넘어 다양한 생의학적 자극 신호로 활용될 수 있다(Fig. 4c). 전기 자극은 세포의 증식과 분화에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 이는 신경조절, 신경 보철, 상처 치유, 심장 박동 조절, 부정맥 관리, 근육 자극 및 재활, 조직 공학 등 다양한 생의학적 응용 분야에서 필수적인 역할을 한다. 특히, 전기 자극을 통해 세포의 증식과 분화를 효과적으로 촉진함으로써 재생 의학, 질병 모델링 및 약물 발견 등의 분야에서 중요한 전략이 될 수 있다. 기존의 전기 자극 방법은 전원 공급 장치의 한계, 예를 들어 수명이 짧고 부피가 크며 복잡한 구조 때문에 실용성에 어려움이 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기계적 에너지 수확기를 사용한 전기 자극 시스템이 주목받고 있다. 이 연구에서는 폴리도파민(polydopamine, PDA)을 포함한 탄소나노튜브 실을 꼬아 트위스트론 전극을 제작하였다. PDA는 탄소나노튜브 실의 전기적 및 기계적 특성을 향상시키고, 전극의 수분 흡수를 도와 세포 배양 환경에서 효율적으로 작동할 수 있게 한다. 또한, 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜)(PEDOT)으로 코팅된 탄소나노튜브 시트를 전도성 스캐폴드(scaffold)로 사용하였으며, 이 스캐폴드는 세포 접착에 적합한 표면을 제공하고, 전기 자극을 효율적으로 전달할 수 있는 낮은 저항을 가진다.

완전 통합 전기 자극 어셈블리(fully integrated electrical signal assembly, FESA)는 PDA/탄소나노튜브 전극, PEDOT/탄소나노튜브 스캐폴드, 탄성 접시, 세포 성장 배지를 포함한다. 이 시스템은 전극을 늘리고 수축시키면서 전기 자극을 생성하여 세포에 전달합니다. 반월상 연골 원시 세포를 PEDOT/탄소나노튜브 스캐폴드에 배양하고, FESA를 사용하여 일정한 주기(1 Hz)로 전기 자극(13.1 μA/cm²)을 가했다. 이 실험에서 세포는 10%의 신장을 주기적으로 경험했다. 실험 결과, 전기 자극을 받은 세포는 대조군(전기 자극을 받지 않은 세포)에 비해 현저히 높은 증식률을 보였다. 7일 동안의 배양 후, 전기 자극을 받은 세포의 수는 대조군에 비해 7.3배 증가했다. 또한, 전기 자

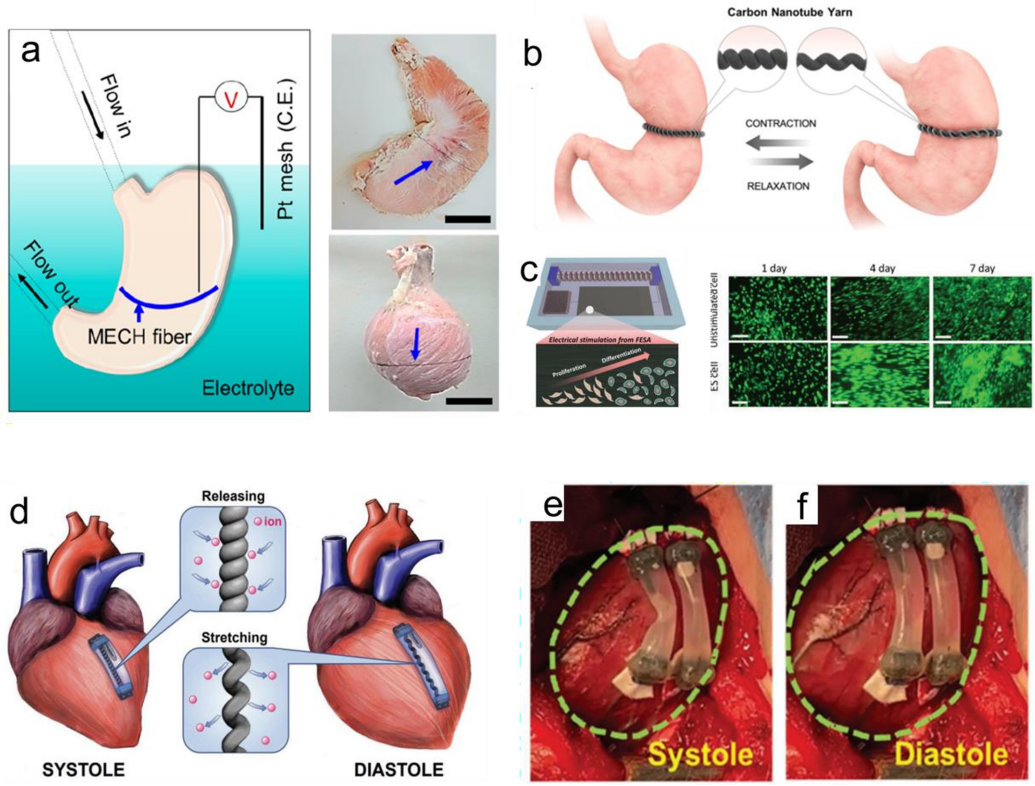

Fig. 4. (a,b) Mechano-electrochemical energy harvester capable of measuring the above-mentioned movements. (c) Schematic diagram of a system that stimulates cell growth by using the generated electrical energy, along with an optical image showing cell growth resulting from this stimulation. (d) Mechano-electrochemical energy harvester attached to the heart, measuring heart movement and using this signal to stimulate an artificial heart. Mechano-electrochemical energy harvester deformed during (e) systole and (f) diastole of a pig's heart. [Reproduced with permission from ACS (2022) Ref. 25, ACS (2019) Ref.17, Wiley (2024) Ref. 33 and Wiley (2024) Ref. 34].

극은 세포 외 기질(ECM)의 주요 성분인 I형 및 II형 콜라겐과 글리코사미노글리칸(GAG)의 합성을 촉진했다. 4일 및 7일 후, 전기 자극을 받은 세포는 대조군에 비해 I형 콜라겐과 II형 콜라겐의 발현이 크게 증가했으며, GAG의 양도 유의미하게 증가했다.

세포 단위를 넘어, 심장과 같은 장기에 직접적인 전기자극을 가해줌으로써, 이상장기운동의 조절이 가능하다(Fig. 4d–f).[34] 이를 위한 에너지원은 수명에 있어 제약이 존재하였으나, 에너지 하베스터를 통해 반영구적 작동이 가능한 시스템 개발이 가능해졌다. 전자 장치의 전력 공급 문제를 해결하기 위한 혁신적인 접근 방식을 제시하며, 특히 생체 내에서 자율적으로 전력을 공급할 수 있는 기술의 필요성을 강조한다. 이를 위해 연구팀은 심박동의 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 트위스트론 에너지 셀 하베스터(twistron energy cell harvester, TECH) 라는 장치를 개발했다. 이 장치는 의료 기기의 전력 문제를 해결하고 장치의 수명을 연장하며, 환자의 수술 위험을 줄이는 것을 목표로 하고 있다. TECH 장치는 탄소나노튜브를 꼬아 coiled 탄소나노튜브 실을 제작한 후, 이를 실리콘 튜브에 넣어 완성되었다. TECH는 0.15 M NaCl 수용액으로 채워져 전해질을 공유하도록 설계되었으며, 심박동의 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기능을 수행한다. 연구 방법은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 인공 심장 박동 시스템을 이용한 in vitro 실험으로, 심장 표면의 변형 패턴을 모방하여 TECH의 전기적 성능을 다양한 조건에서 분석했다. 이 실험에서 TECH는 다양한 심장 박동 빈도와 변형 범위에서 안정적인 전압과 전류를 생성했으며, 최대 전력 밀도는 1.42 W/kg, 평균 전력 밀도는 0.39 W/kg에 도달했다. 이로써 TECH는 심박동에 따라 안정적인 전기 출력을 제공할 수 있음을 보여주었다. 두 번째는

돼지 모델을 이용한 in vivo 실험으로, TECH를 돼지의 좌심실 표면에 이식하여 심박동으로 생성된 전기를 측정하고, 이 전기를 이용해 심장을 직접 자극하는 능력을 검증했다. 이 실험에서도 TECH는 심장 표면에 이식된 상태에서 심박동으로부터 지속적으로 전기를 생성하였고, 생성된 전기를 통해 심장을 직접 자극할 수 있음을 입증했다. 특히, TECH는 50,000회 이상의 반복적인 신장-수축 사이클에서도 성능 저하 없이 안정적인 전압을 생성하여 뛰어난 내구성을 보여주었다. 이러한 연구 결과는 TECH가 심박동에 따라 안정적으로 전기를 생성하고, 이렇게 생성된 전기를 이용해 의료 기기를 자율적으로 구동할 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 시사한다. 이는 기존의 전력 공급 방식에서 벗어나, 생체 내에서 지속 가능한 에너지원을 제공함으로써, 이식형 전자 장치의 수명을 연장하고, 환자의 추가 수술을 줄이는 데 기여할 수 있다. TECH는 특히 심장 박동과 같은 지속적인 기계적 움직임이 발생하는 생체 환경에서 에너지 하베스터로서 매우 유망한 솔루션으로 평가받을 수 있다.

4.3. 해양 모니터링 센서

해양 파도는 자연 상태에서 다양한 정보를 함유하고 있으며, 이를 활용하여 전기에너지를 생성하거나 변화 예측에 활용할 수 있다(Fig. 5a).[31] 이를 위한 연구에서, 코일 구조의 탄소나노튜브 실을 풍선과 해저의 추 사이에 부착하여 해양 파도와 함께 움직이도록 설계하였다. 이 시스템은 파도의 움직임을 전기 에너지로 변환하는 데 중점을 두고 있으며, 실험 중에는 해양 조건을 13 °C의 온도, 0.31 M의 NaCl 농도, 0.9에서 1.2 Hz의 파도 주파수로 설정하여 실험을 진행했다. 측정 결과, 탄소나노튜브 yarn은 해양 파력 수확 과정에서 46 mV의 OCV와 1.79 mW의 평균 출력 전력을 생성했다. 전극의 무게로 정규화한 결과, 25 Ω의 저항을 통해 전달된 평균 출력 전력은 1.66 W/kg에 달했다. 변형 주파수가 0.25에서 12 Hz로 변하는 동안, 6 Hz 이상의 주파수에서는 피크 전력이 약 94 W/kg에 도달하며 평탄화 현상이 관찰되었다.

이를 발전시켜, 조류의 움직임을 통해 에너지를 생산할 수 있는 시스템을 개발하는 데 중점을 두었으며, 나일론 코어를 갖춘 코일 나일론/탄소나노튜브 실과 프로펠러 기반의 회전형 에너지 수확기(ARTEN)를 제작하여 다양한 환경에서의 에너지 수확 성능을 평가했다(Fig. 5b). ARTEN 시스템은 바람, 강물, 해수의 흐름을 활용하여 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 장치로, 아크릴 바디와 플라스틱 터빈을 포함한 기계적 구조물을 기반으로 설계되었다. 에너지 수확 실험은 세 가지 주요 환경에서 진행되었다. 첫 번째로 바람을 이용한 에너지 수확 실험에서는 풍속 4.5 m/s의 조건에서 ARTEN이 최대 OCV를 142.7 mV를 생성했다. 두 번째로, 강물의 흐름을 이용한 실험에서는 300–420 rpm의 회전 속도에서 최대 OCV를 86.2 mV가 생성되었다. 마지막으로, 해수의 흐름을 활용한 실험에서는 최대 OCV를 42 mV와 최대 순간 전력 1.74 μW가 생성했다.

다양한 외부 저항을 사용하여 ARTEN의 전력을 측정하고 계산한 결과, 코일 나일론/탄소나노튜브 실이 코일형 탄소나노튜브 실보다 에너지 변환 효율이 더 높음을 확인할 수 있었다. ARTEN 시스템은 바람, 강물, 해수 등 다양한 자연 환경에서 안정적으로 에너지를 수확할 수 있는 잠재력을 보여준다. 특히 조류와 같은 지속적인 자연 흐름을 활용하여 전기를 생성할 수 있는 이 시스템은 해양 부표, 원격 센서 네트워크, 또는 에너지 자급자족이 필요한 해양 장비에 매우 유용할 수 있다. 이를 통해, 자연의 움직임을 활용한 에너지 하베스팅 기술이 미래의 지속 가능한 에너지 솔루션으로 중요한 역할을 할 수 있음을 입증했다.

4.4 다양한 응용

기계-전기화학 에너지 하베스터는 다양한 형태의 센서로 응용될 수 있으며, 특히 외부 전력 없이 자체 전력을 공급받는 관성 센서로서 높은 잠재력을 가지고 있다. 이 연구에서는 코일 탄소나노튜브 실을 기반으로 한 관성 센서를 개발하여, 높은 정확도로 다양한 움직임을 감지할 수 있는 시스템을 구축했다(Fig. 5c).[21] 센서 제작을 위해 두 개의 탄소나노튜브 실을 꼬아 30 mm 길이의 플라이구조의 실을 형성하였고, 나머지 부분에는 네 가닥의 탄소나노튜브 실을 꼬아 만들어진 비신축성 전극을 사용했다.

실험적으로 변형은 스텝 모터와 전자 동적 진동 엑추에이터를 사용하여 가하였으며, 센서 장치는 진동 엑추에이터의 끝에 고정하여 가속도를 측정했다. 다양한 주파수와 진폭의 진동을 통해 센서의 OCV 변화를 측정한 결과, 주파수가 증가할수록 OCV가 선형적으로 증가하였다. 이는 센서가 다양한 주파수에서 발생하는 진동을 정확하게 감지할 수 있음을 의미한다. 또한, 센서를 특정 각도로 회전시키는 실험을 통해 기울기를 측정했으며, 각도에 따라 발생하는 OCV 변화를 분석했다. 이 결과는 인간의 운동, 예를 들어 스쿼트 동작을 모니터링하는 데 유용하게 활용될 수 있다. 다양한 무게와 충격 에너지를 적용하여 센서의 충격 감지 능력을 테스트한 결과, 외부 충격이 증가할수록 센서의 OCV가 선형적으로 증가하는 것을 확인했다. 마지막으로, 걷기, 달리기, 점프 등 다양한 운동을 통해 생성된 OCV를 분석하였다. 주파수와 진폭을 기반으

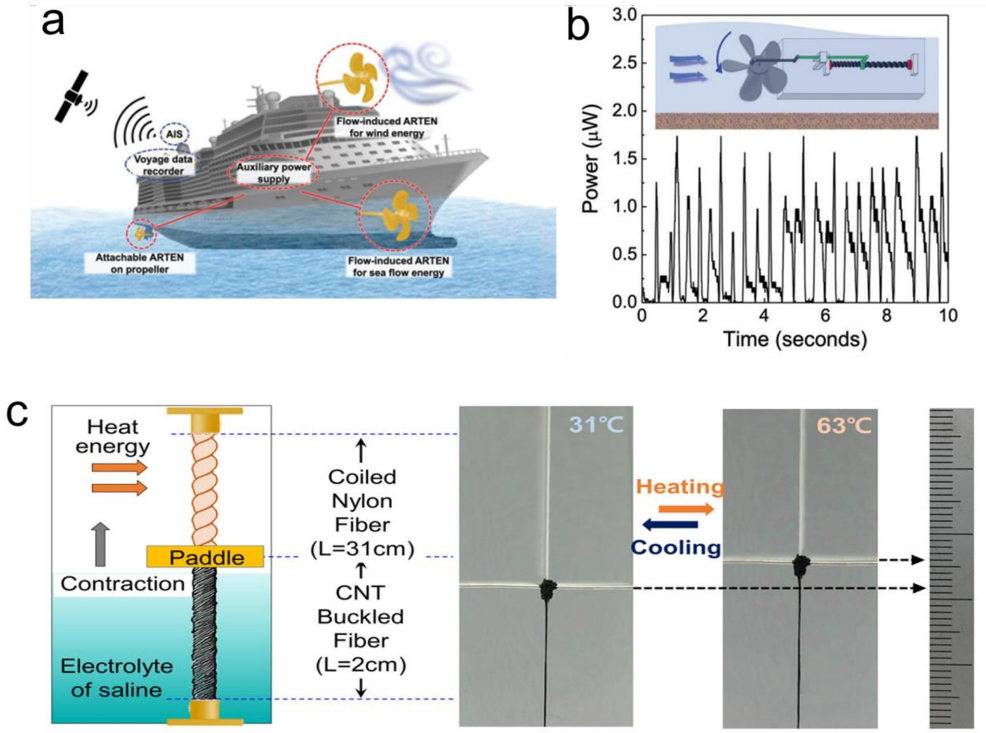

Fig. 5. (a) Mechano-electrochemical energy harvester attached to a ship to measure ocean movements. (b) System for measuring water flow velocity using a propeller. (c) Integrated harvester designed to simultaneously measure external temperature and mechanical movement in conjunction with thermally responsive artificial muscles. [Reproduced with permission from Wiley (2023) Ref. 31 and MDPI (2023) Ref. 26].

로 각 운동을 구분할 수 있었으며, 이는 탄소나노튜브 기반 관성 센서가 다양한 신체 활동을 모니터링하는 데 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

코일형 탄소나노튜브 실을 활용한 센서는 자동차의 가속 센서로서도 뛰어난 성능을 발휘할 수 있다. 연구에서는 코일구조의 탄소나노튜브 실을 사용하여 2-전극 실험을 진행하고, 디지털 오실로스코프를 통해 OCV을 측정했다. 실험에서는 전자동역학적 진동 시험기를 사용하여 주기적인 가속도 센싱 특성을 평가했으며, 함수 발생기를 통해 사인파 인장 진동을 생성하고 이를 코일형 탄소나노튜브 실과 상용 센서에 직접 연결하여 비교 실험을 수행했다. 시간에 따른 OCV 변화 실험 결과, 가속도가 28.96 m/s^{2}에서 25% 스트레인을 가해줄 때 약 23.02 mV의 OCV 변화가 발생함을 확인했다(Fig. 5d). 또한, 주기적인 사인파 인장 가속도에 대해 코일형 탄소나노튜브 실이 우수한 동적 응답을 보였으며, 높은 가속도에서 OCV 변화가 선형적인 관계를 나타냈다. 이로 인해 탄소나노튜브 실은 다양한 가속도 조건에서도 일관된 성능을 제공할 수 있다는 점이 입증되었다. 상용 센서와의 비교 실험에서도 코일형 탄소나노튜브 실은 10 Hz 및 20 Hz 주파수에서 상용 센서보다 우수한 동적 응답을 보였다. 이는 탄소나노튜브 실이 저주파수 범위에서 특히 뛰어난 성능을 발휘함을 의미하며, 자동차와 같은 환경에서의 활용 가능성을 높여준다. 질량 스프링 모델을 사용한 질량 구성 장치 시스템에서는 10 Hz에서 사인파 진동에 노출되었을 때 OCV 변화가 적용된 가속도에 비례하여 증가함을 확인했다. 이러한 결과는 탄소나노튜브 실 센서가 질량 스프링 시스템과 같은 구조에서도 정확한 가속도 측정이 가능함을 보여준다. 특히, 안전벨트 응용 실험에서는 인체를 진동 질량으로 사용하여 매우 빠른 응답 및 회복 시간을 확인했으며, 상용 가속도계의 출력 전압과 선형 관계를 나타냈다. 이는 탄소나노튜브 실 센서가 자동차 안전 시스템과 같은 실질적인 응용에 적합함을 시사한다. 또한, 고체 전해질(10 wt% PVA/0.6 M NaCl)을 사용한 실험에서도 유사한 가속도 센싱 성능이 확인되었다. 이는 인공근육과 연계하여, 측정 영역을 넓힐 수 있다(Fig. 4e).[26] 열에 반응하는 나일론 인공근육과 기계-전기화학에너지 하베스터를 융합함으로써, 온도 및 길이

변화를 동시에 측정가능한 센서를 개발하였다. 기존 연구에서는 두가지 신호를 동시에 측정하기 위해서는 이에 상응하여, 추가적인 센서가 필요하였으나, 두가지 신호를 하나의 기기로 측정 가능함으로써, 웨어러블 기기 및 인체 삽입형 기기를 위한 연구에 발판을 마련하였다.

5. 요 약

기계-전기화학 에너지 하베스터는 다양한 응용 가능성을 가진 혁신적인 기술로, 웨어러블 센서, 삽입형 센서, 해양 모니터링 센서 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이 기술은 탄소나노튜브 실 기반의 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 원리를 이용하여, 외부 전력 공급 없이도 자가 충전형 에너지 시스템을 구현할 수 있다. 웨어러블 센서는 호흡, 심박수, 근육 움직임 등의 생리학적 신호를 실시간으로 감지하며, 의료용 삽입형 센서는 인공 장기를 모사하거나 심박동에서 에너지를 수확해 전기 자극을 제공한다. 또한, 해양 모니터링에서는 파도와 조류의 움직임을 활용하여 지속 가능한 에너지를 수확하고, 관성 센서로는 자동차 가속도 및 다양한 진동을 정밀하게 감지할 수 있다. 특히, 열 반응형 나일론 인공근육과 결합해 온도와 길이 변화를 동시에 측정할 수 있는 센서로 발전하며, 웨어러블 및 이식형 기기 개발에 새로운 가능성을 열고 있다.

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, Harvesting electrical energy from carbon nanotube yarn twist, *Science*, **357(6563)**, 773–778 (2017).
2. H. J. Sim, D. Y. Lee, H. Kim, Y.-B. Choi, H.-H. Kim, R. H. Baughman, and S. J. Kim, Stretchable fiber biofuel cell by rewrapping multiwalled carbon nanotube sheets, *Nano Lett.*, **18(8)**, 5272–5278 (2018).
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, Biomolecule based fiber supercapacitor for implantable device, *Nano Energy*, **47**, 385–392 (2018).
4. H. J. Sim, H. Gwac, S. J. Kim, J.-M. Oh, and C. Choi, Soft and elastic hygroelectric fiber for wearable human monitoring textiles, *J. Chem. Eng.*, **495**, 153486 (2024).
5. J. A. Lee, A. E. Aliev, J. S. Bykova, M. J. 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, Woven-yarn thermoelectric textiles, *Adv. Mater.*, **28(25)**, 5038–5044 (2016).
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, Harvesting temperature fluctuations as electrical energy using torsional and tensile polymer muscles, *Energy. Environ. Sci.*, **8**, 3336–3344 (2015).
7. C. Choi, J. H. Kim, H. J. Sim, J. Di, R. H. Baughman, and S. J. Kim, Microscopically buckled and macroscopically coiled fibers for ultra-stretchable supercapacitors, *Adv. Energy Mater.*, **7(6)**, 1602021 (2017).
8. C. Choi, H. J. Sim, G. M. Spinks, X. Lepró, R. H. Baughman, and S. J. Kim, Elastomeric and dynamic MnO_2/CNT core–shell structure coiled yarn supercapacitor, *Adv. Energy Mater.*, **6(5)**, 1502119 (2016).
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, Stretchable triboelectric fiber for self-powered kinematic sensing textile, *Sci. Rep.*, **6**, 35153 (2016).
10. R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, and W. A. Heer, Carbon nanotubes--the route toward applications, *Science*, **297**, 5582, 787–792 (2002).
11. M. Zhang, K. R. Atkinson, and R. H. Baughman, Multifunctional carbon nanotube yarns by downsizing an ancient technology, *Science*, **306(5700)**, 1358 (2004).
12. M. Zhang, S. Fang, A. A. Zakhidov, S. B. Lee, A. E. Aliev, C. D. Williams, K. R. Atkinson, and R. H. Baughman, Strong, transparent, multifunctional, carbon nanotube sheets, *Science*, **309(5738)**, 1215 (2005).
13. 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, Giant-stroke, superelastic carbon nanotube aerogel muscles, *Science*, **323(5921)**, 1575 (2009).
14. M. D. Lim, S. Fang, X. Lepró, C. Lewis, R. Ovalle-Robles, J. Carretero-Gonzáliz, 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, Biscrolling nanotube sheets and functional guests into yarns, *Science*, **331(6013)**, 51 (2011).
15. 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, Chemo-mechanical energy harvesters with enhanced intrinsic electrochemical capacitance in carbon nanotube yarns, *Adv. Sci.*, **9(32)**,

2203767 (2022).
16. 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, Understanding piezoionic effects in chemo–mechanical energy harvesting by carbon nanotube yarn twists, *Adv. Energy Mater.*, **14(10)**, 2303343 (2024).
17. 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, Self-powered coiled carbon-nanotube yarn sensor for gastric electronics, *ACS Sens.* **4(11)**, 2893 (2019).
18. T. J. Mun, S. H. Kim, J. W. Park, J. H. Moon, Y. Jang, C. Huynh, R. H. Baughman, and S. J. Kim, Wearable energy generating and storing textile based on carbon nanotube yarns, *Adv. Funct. Mater.*, **30(23)**, 2000411 (2020).
19. H. Kim, J. W. Park, J. S. Hyeon, H. J. Sim, Y. Jang, Y. Shim, C. Huynh, R. H. Baughman, S. J. Kim, Electrical energy harvesting from ferritin biscrolled carbon nanotube yarn, *Biosens. Bioelectron.*, **164**, 112318 (2020).
20. B. Goh, K. J. Kim, E. S. Kim, S. H. Kim, and J. Choi, Outer diameter curvature effects in multi-walled carbon nanotubes on the twistron energy harvester, *Appl. Surf. Sci.*, **561**, 150075 (2021).
21. B.-J. Kim, Y. Jang, J. H. Moon, R. H. Baughman, and S. J. Kim, Self-powered carbon nanotube yarn for acceleration sensor application, *Trans. Ind. Electron.*, **68(3)**, 2676 (2021).
22. J. H. Moon, B.-J. Kim, Y. Jang, T. J. Mun, H. Kim, and S. J. Kim, Self-powered inertial sensor based on carbon nanotube yarn, *Trans. Ind. Electron.*, **68(9)**, 8904 (2021).
23. 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, A coiled carbon nanotube yarn-integrated surface electromyography system to monitor isotonic and isometric movements, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14(40)**, 45149 (2022).
24. 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, More powerful twistron carbon nanotube yarn mechanical energy harvesters, *Adv. Mater.*, **34(27)**, 2201826 (2022).
25. H. J. Sim, and C. Choi, Microbuckled mechano-electrochemical harvesting fiber for self-powered organ motion sensors, *Nano Lett.*, **22(21)**, 8695 (2022).
26. H. J. Sim, J. H. Noh, J. H. Choi, and C. Choi, Integrated mechano-electrochemical harvesting fiber and thermally responsive artificial muscle for self-powered temperature–strain dual-parameter sensor, *Sensors*, **23(1)**, 269 (2023).
27. H. J. Sim, J. Kim, J. H. Choi, M. Oh, and C. Choi, Stretchy electrochemical harvesters for binarized self-powered strain gauge-based static motion sensors, *Sensors*, **22(12)**, 4542 (2022).
28. S. Yu, W. Son, G. Jeon, J. Kim, J. You, S. Ko, and C. Choi, Electromechanical stability, electrochemical energy storage, and mechano-electrochemical energy harvesting of carbon nanotube buckles, *Compos. B Eng.*, **256**, 110664 (2023).
29. J. Kim, J. H. Noh, S. Chun, S. J. Kim, H. J. Sim, and C. Choi, Hierarchically plied mechano- electrochemical energy harvesting using a scalable kinematic sensing textile woven from a graphene-coated commercial cotton yarn, *Nano Lett.* **23(16)**, 7623–7632 (2023).
30. 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, Mechanical energy harvesters with tensile efficiency of 17.4% and torsional efficiency of 22.4% based on homochirally plied carbon nanotube yarns, *Nat. Energy*, **8**, 203–213 (2023).
31. T. J. Mun, J. H. Moon, J. W. Park, R. H. Baughman, and S. J. Kim, Environment-adaptable rotational energy harvesters based on nylon-core coiled carbon nanotube yarns, *Small Methods*, **7(10)**, 2300526 (2023).
32. J. M. Lee, W. Son, J. Kim, J. H. No, M. Oh, J. H. Choi, C. Choi, Fiber based supercapacitors for wearable application, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36(4)**, 303–325 (2023).
33. 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, Integrated electrostimulation cell culture systems driven by chemically modified twistron mechanical energy harvesting electrodes, *Adv. Funct. Mater.*, **34(33)**, 2315279 (2024).
34. A. Ruhparwar, A. Osswald, H. Kim, R. Wakili, J. Müller, N. Pizanis, F. Al-Rashid, U. Hendgen-Cotta, T. Rassaf, and S. J. Kim, Implanted carbon nanotubes harvest electrical energy from heartbeat for medical implants, *Adv. Mater.*, **36(32)**, 2313688 (2024).
35. 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, Self-powered multidirectional strain sensor for electronic skin based on coiled carbon nanotube yarns, *IEEE Sens. J.*, **24(3)**, 2577–2587 (2024).
36. 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, Synergistic effect of microscopic buckle and macroscopic coil for self-powered organ motion sensor, *Nano Energy*, **128**, 109889 (2024).