

탄소나노튜브 기반 전기화학적 섬유형 인공근육 연구 및 개발 동향



김시형

- 2009. 한양대학교 전기제어생체공학부 학사
- 2011. 한양대학교 의용생체공학 석사
- 2017. 한양대학교 생체의공학 박사
- 2017. University of Texas at Dallas 박사후연구원
- 2018. U.S. Army Research Lab. 박사후연구원
- 2019-현재. 한국생산기술연구원 수석
- 2021-현재. 한양대학교 학연교수
- 2024-현재. 중앙대학교 학연교수



박채린

- 2021. 한양대학교 기계공학과 학사
- 2023. 한양대학교 HYU-KITECH 공동학과 석사
- 2026. 한양대학교 HYU-KITECH 공동학과 박사 졸업 예정

1. 서론

인공근육은 외부 자극에 반응하여 생물학적 근육과 유사한 방식으로 수축 및 팽창 운동을 구현할 수 있는 기능성 소재 또는 장치로, 차세대 구동 기술의 핵심 요소로 주목받고 있다. 이러한 인공근육은 기존의 기계식 액추에이터와는 달리 유연하고, 가벼우며, 정밀한 제어가 가능하다는 점에서 다양한 응용 분야에서 활용 가능성이 매우 크다. 특히, 로봇공학, 웨어러블 디바이스, 생체모사 시스템, 의료용 보조기기 등 인간의 움직임을 모사하거나 보조하는 기술 영역에서 활발한 연구가 진행되고 있다.

기존 액추에이터 시스템은 모터 기반의 기계 장치로 구성되어 있으며, 이는 고정된 구동 방식, 큰 부피, 무거운 중량, 작동 시 발생하는 소음 등 여러 가지 기술적 한계를 가지고 있다. 이러한 점을 극복하기 위한 대안으로 인공근육 기술이 제시되고 있으며, 그 중에서도 섬유형 회전 구동 인공근육(fiber-type torsional artificial muscle)은 기존 선형 작동 방식과 달리 회전 운동을 유도할 수 있다는 점에서 매우 큰 주목을 받고 있다. 이들은 단위 길이 당 저장 가능한 기계적 에너지 밀도가 매우 높아서, 복잡하고 미세한 동작 구현에 최적화된 플랫폼이 가능하다.

특히, 전기 에너지를 직접 기계적 에너지로 변환하는 전기화학적 구동 방식의 인공근육은 높은 에너지 효율, 빠른 응답 속도, 낮은 구동 전압, 낮은 열 발생 등의 장점이 있다. 또한, 전해질 환경에서 인가전압에 의한 이온의 삽입 및 탈리 현상에 기반한 체적 변화를 통해 구동되며, 구동 효율과 응답 특성은 전극 재료의 특성에 크게 영향을 받는다.

이러한 전기화학적 구동 인공근육의 핵심 구성 요소 중 하나로, 최근에는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT) 기반 소재가 각광받고 있다. CNT는 우수한 전기전도도, 기계적 강도, 화학적 안정성, 높은 비표면적 등의 장점을 지니고 있어, 전극 소재로 활용 시 높은 구동력과 내구성, 반복적인 작동에 대한 안정성을 제공할 수 있다. 또한, CNT 섬유는 연속적인 길이를 가지며 유연성과 인장 특성이 뛰어나 섬유형 인공근육 제작에 매우 적합한 구조적 특성을 갖추고 있다.

본 논문에서는 CNT를 기반으로 한 전기화학적 섬유형 인공 근육의 개발 동향을 종합적으로 정리하고, 현재까지의 기술 진보와 연구 방향 및 향후 과제를 분석하고자 한다. 이를 통해 차세대 유연 구동 시스템 구현을 위한 CNT 기반 인공근육 기술의 응용 가능성과 그 잠재력을 고찰한다.

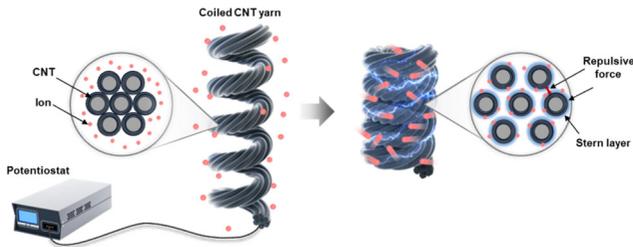


Figure 1. 탄소나노튜브 기반 전기화학적 섬유형 인공근육의 구동[1].

2. 탄소나노튜브 기반 섬유형 인공근육

2.1. 탄소나노튜브 기반 섬유형 인공근육의 개발

CNT를 기반으로 한 섬유형 인공근육의 개발은 2011년 Science에 보고된 연구를 기점으로 본격화되었다. 이 연구에서는 방직 가능한 구조로 정렬된 탄소나노튜브 숲(spinnable carbon nanotube forest)으로부터 고도로 정렬된 탄소나노튜브 시트(carbon nanotube sheet)를 추출하고, 이를 일정한 방향으로 비틀어 섬유 형태로 전환함으로써, 전도성과 기계적 유연성을 동시에 갖춘 탄소나노튜브 yarn(섬)을 제조하는 공정이 소개되었다(Figure 2a-c)[2,3].

제조된 CNT yarn은 밀도 측면에서 에어로겔(aerogel) 수준에 근접하는 초경량 구조를 갖는다. 부피 밀도는 약 0.0015 g/cm^3 로 보고되었으며, 이러한 낮은 밀도에도 불구하고 CNT yarn은 자체 중량의 약 50,000배에 달하는 하중을 견딜 수 있는 고강도 특성을 나타낸다. 이는 약 $465 \text{ MPa/(g/cm}^3)$ 의 특성 강도(specific strength)에 해당하며, 기존 금속성 재료를 상회하는 우수한 기계적 성능이다. 이와 같은 기계적 특성은 CNT 간의 강한 반데르발스 상호작용과 정렬 구조에서 기인하는 하중 분산 효과에 기초한다.

2012년에는 이 yarn 구조에 추가적인 꼬임을 인가함으로써, Figure 2d와 같이 코일(coiled) 형태의 인공근육이 개발되었다[4]. 이러한 나선형 구조는 선형형(linear-type) 섬유 대비 현저히 우수한 수축 및 인장 성능을 제공하며, 구동 시 발생하는 기계적 에너지를 집중적으로 방출할 수 있는 구조적 이점을 가진다. 또한, 코일 구조는 구조 내부의 응력 집중을 효과적으로 분산시켜 반복적인 구동에도 안정적인 성능을 유지할 수 있도록 한다.

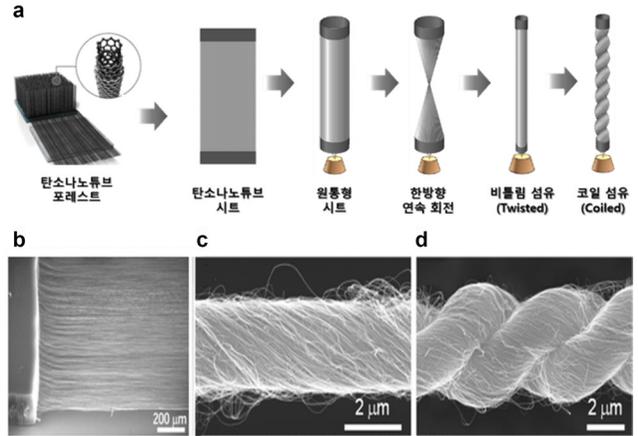


Figure 2. (a) 꼬임 기반 탄소나노튜브 섬유 제작 과정 도식, (b) 탄소나노튜브 숲에서 뽑혀진 탄소나노튜브 시트[3], (c) 꼬임이 인가된 탄소나노튜브 섬유, (d) 코일 구조의 탄소나노튜브 섬유[5].

하지만 단일 CNT yarn만으로는 실제 사람의 근육 다발과 같은 출력과 내구성을 달성하기에는 한계가 있다(Figure 3a)[6]. 이에, 2019년에는 단일 CNT yarn의 기계적 출력과 내구성을 더욱 향상시키기 위한 연구로서, 복수의 yarn을 다중 가닥(multiply)으로 꼬아 제작하는 공정이 개발되었다[7]. Figure 3b는 이와 같은 복합 구조의 개요를 제시하며, multiply 구조는 구동력의 증가뿐만 아니라 인공근육의 작동 안정성과 내구성 확보에 기여한다. 이는 마치 로프 구조에서 다중 가닥이 서로 응력 부담을 분산시키는 것과 유사한 원리이다.

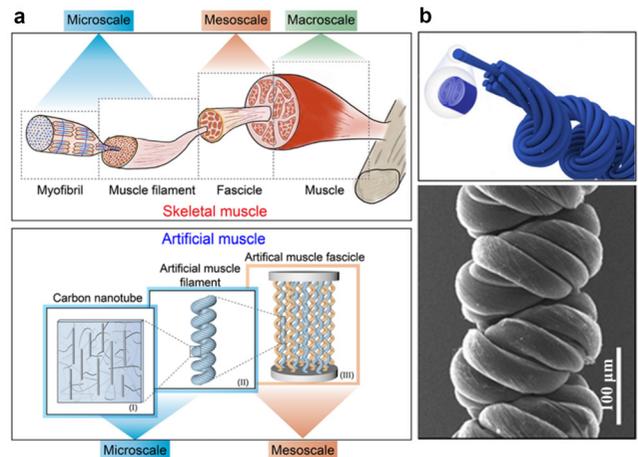


Figure 3. (a) 생체 근육과 인공근육 다발 구조 도식[6], (b) 9-ply 탄소나노튜브 섬유 다발[7].

2.2. 탄소나노튜브 기반 전기화학적 섬유형 인공근육

전기화학적으로 구동되는 CNT 기반 회전형 인공근육은 전

해질 내 이온의 이동과 나노 구조체의 기하학적 특성이 상호작용하여, 외부에서 인가된 전기 에너지를 빠르고 강력한 회전 운동으로 효율적으로 전환한다. 보다 구체적으로, 전해질에 담긴 CNT yarn에 전압을 인가하면, 용액 내의 반대 극성의 이온이 CNT 표면에 흡착하면서 전기이중층(electrochemical double layer)이 형성된다. 이중층 내부에서 발생하는 정전기적 척력은 섬유의 직경 방향으로의 부피 팽창을 유도하며, 결과적으로 섬유의 풀림 및 길이 수축을 발생시킨다(Figure 4a)[2]. Figure 4b에서는 전압 인가에 따른 전류 및 수축 구동을 설명하고 있다. 전압 인가가 중단되면 CNT 실 내부에 존재하던 이온들이 탈착되며 전기이중층이 소멸하고, 이에 따라 섬유는 원래의 형태로 되돌아간다. 이와 같이 CNT 기반 인공근육은 가역적인 회전 및 수축 운동이 가능하며, 저전력 조건에서도 안정적으로 작동할 수 있어 다양한 시스템에 적용 가능성이 높다.

CNT 인공근육의 구동 성능은 크게 두 가지 주요 요인에 의해 결정된다. 첫번째는 인공근육 자체의 재료 특성과 구조적 설계 요소이다. CNT의 전기전도도, 비표면적, 이온 저장 용량과 같은 전기화학적 특성이 핵심이며, 이와 함께 섬유의 꼬임 각도(twist angle), 스프링 인덱스(spring index), 직경-길이 비율(aspect ratio) 등의 기하학적 변수 역시 정밀하게 제어되어야 한다. 이러한 요소들의 최적화는 회전력 증대, 응답 속도 개선, 에너지 효율 향상 등에 직접적으로 기여한다.

두번째는 전기화학적 작동 환경의 변수이다. 전해질에 포함된 이온의 종류와 크기, 농도, 전압 인가의 크기 및 속도, 주파

수, 하중 등 다양한 외부 변수들이 구동 특성에 영향을 미친다. 특히, Figure 4c에서 나타난 바와 같이 이온의 크기 차이를 활용한 구동 성능 제어 전략은 주목할 만하다. 서로 다른 부피를 갖는 양이온(293 \AA^3)과 음이온(69 \AA^3)을 포함한 전해질을 사용할 경우, 전압 극성에 따라 흡착되는 이온의 종류가 달라지고, 이에 따라 팽창률과 회전 성능이 조절된다. 일반적으로 부피가 큰 이온이 CNT 실에 흡착될 때 더 큰 부피 팽창이 유도되어, 강한 회전 및 수축 응답이 가능해진다. 또한, 인가 전압의 크기가 증가할수록 CNT 표면에 흡착되는 이온의 수가 증가하여 구동 성능이 향상되는 경향을 보인다. 반면, 전압의 주파수가 높아질수록 이온이 전극 표면에 도달하고 흡착할 수 있는 시간이 제한되므로, 전체적인 이온 흡착량이 감소하고 이에 따라 구동 성능이 저하되는 현상이 나타난다(Figure 4d)[8].

3. 탄소나노튜브 기반 전기화학적 섬유형 인공근육의 응용

CNT를 기반으로 개발된 섬유형 인공근육은 구조적 설계의 다양성과 우수한 기능적 특성으로 인해, 적용 분야에 따라 폭넓은 기술적 확장성을 지닌다. 특히, 일반적인 회전형 또는 선형 모터는 구조적 복잡성, 부피, 질량, 소음, 그리고 동작의 기계적 한계 등으로 인해 미세 구동 시스템에 적합하지 않지만, CNT 기반 인공근육은 고출력·고속 응답성을 유지하면서도 소형화 및 집적화가 용이하다는 점에서 기존의 전기모터 기반 구동 장치와 차별화된다. 특히, 마이크로 사이즈의 구동 부품이 필수적인 정밀기기 분야에서 탁월한 경쟁력을 갖는다. 실제로 CNT 실에 간단한 기계 요소인 패들(paddle)을 부착함으로써 마이크로 액체 혼합장치를 제작한 실험이 보고되었으며, 이는 CNT 인공근육이 마이크로 유체 시스템에 응용될 수 있음을 보여준다[2](Figure 5a). 또한, CNT 섬유에 구조물 또는 기능성 소재를 접합함으로써 회전형 마이크로 믹서, 정밀 유체 펌프, 자가조절형 밸브 구동기 등으로 응용될 수 있다. 회전각의 정밀한 제어가 가능하고, 저전력으로도 고속 구동이 이루어지는 특성은 마이크로 광학 시스템, 정밀 위치 제어 장치, 미세 작동기 기반 로봇 시스템, 그리고 인체 삽입형 약물 전달 플랫폼과 같은 분야로의 확장을 가능하게 한다(Figure 5b).

최근에는 반려로봇, 노인 케어 로봇, 정서교류 기반 헬스케어 로봇 등 인간과의 상호작용을 중시하는 개인 서비스용 휴머노이드 로봇의 개발이 활발히 진행되고 있다(Figure 6a). 특히 반려로봇, 노인 케어 로봇, 정서 교류 기반 헬스케어 로봇 등은 단순한 기능 수행을 넘어, 사용자의 감정 상태에 반응하고 정서적 교감을 형성할 수 있는 상호작용 능력이 핵심 기술로 부각되고

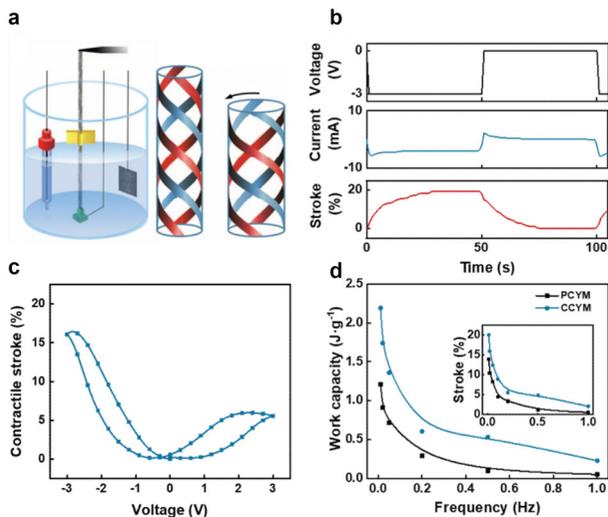


Figure 4. (a) 전해질에서 전기화학적으로 구동하는 회전형 탄소나노튜브 인공근육의 성능 측정을 위한 3전극 모식도[2], (b) 전압 인가에 따른 인공근육의 수축 성능[8], (c) 인가 전압의 극성에 따른 수축 성능 차이, (d) 인가 전압의 주파수에 따른 수축 성능 차이.

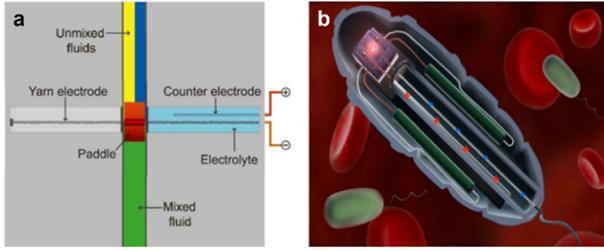


Figure 5. (a) 마이크로 믹서 응용 모식도[2], (b) 미래형 나노 로봇 응용 모식도.

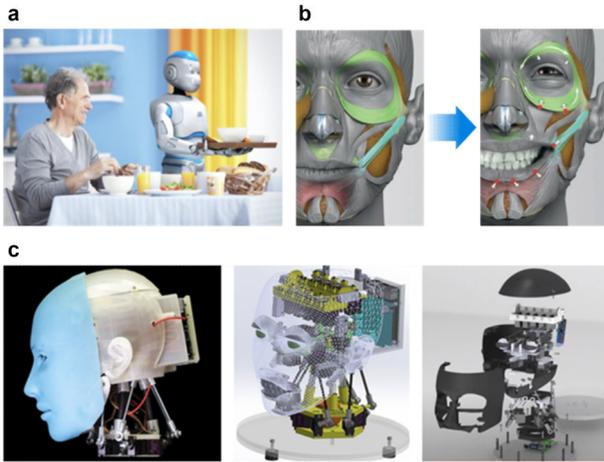


Figure 6. (a) 노인케어 로봇 '로미오', (b) 전기화학적 섬유형 인공근육을 활용한 휴머노이드의 표정 구현 모식도, (c) 모터 기반 표정 구현 로봇 '에바'.

있으나, 사람의 얼굴과 유사한 수준의 표정 표현, 특히, 복잡한 감정 상태를 반영하는 정밀한 안면 근육의 움직임 구현은 여전히 기술적으로 해결되지 않은 난제로 남아 있다. 이는 정서적 상호작용의 질이 사용자의 수용성과 직결되는 노인 돌봄 로봇이나 반려 로봇 개발에 있어 극복해야 할 중요한 도전 과제 중 하나이다(Figure 6b). 이러한 기술적 한계를 극복하기 위한 방안으로, 실제 생체 근육처럼 고도로 섬세한 운동 구현이 가능한 유연 구동 메커니즘을 갖춘 표정 구현형 휴머노이드에 대한 연구가 주목받고 있다. 현재까지 개발된 대표적인 표정 구현 휴머노이드는 서보 모터 기반 액추에이터를 사용하여 최대 6가지의 표정을 구현하였으나, 약 42개의 모터를 사용함으로써 전체 얼굴 구조의 중량이 3 kg에 달하고, 그에 따른 부피와 기계적 복잡성으로 인해 실제 적용에 제약이 따른다 (Figure 6c). 이와 대조적으로, CNT 기반 인공근육은 머리카락과 유사한 직경을 가지면서도 높은 인장 강도, 우수한 내구성, 반복 가능한 정밀 수축 특성을 갖추고 있어, 실제 인간 안면 근육의 미세한 움직임을 정교하게 재현할 수 있는 유력한 대체 기술로 평가된다. 이러한

특성은 향후 경량화된 고자유도 휴머노이드 구현뿐만 아니라, 정서 기반 인간-로봇 인터페이스 기술의 발전에도 실질적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 섬유형 구조라는 물리적 특성을 바탕으로 직조가 가능하다는 점은 CNT 인공근육의 활용 범위를 크게 확장시킨다. 이러한 직조 구조의 인공근육 개발은 웨어러블 디바이스, 스마트 텍스타일, 근력 증강용 외골격 시스템(exoskeleton) 등 유연하면서도 능동적인 동작 보조 장치로의 응용을 가능하게 한다. 실제로, 탄성 직물 구조 내에 CNT 인공근육을 삽입한 형태의 섬유형 액추에이터가 보고되고 있으며, 이는 인간의 움직임을 능동적으로 보조하는 신체 확장 장치로도 유망한 적용 가능성을 가진다(Figure 7)[9].

결과적으로, CNT 기반 인공근육은 나노 및 마이크로 규모에서의 고정밀 구동, 경량화된 설계, 생체 친화성, 직조 가능성 등의 복합적인 장점을 바탕으로, 로보틱스, 바이오메디컬, 웨어러블 전자기기 등 다양한 첨단 기술 분야에서 실용화 가능성을 제시하고 있다.

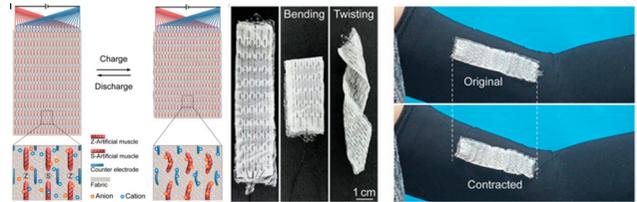


Figure 7. 직물형 인공근육의 구동 모식도 및 구동 사진[9].

4. 결 론

현대 산업사회에서 인공근육의 활용 가능성은 로봇공학, 의료기술, 웨어러블 전자기기 등 다양한 분야에서 점차 확대되고 있으며, 이에 따른 기술적 수요 또한 지속적으로 증가하고 있다. 특히, 실질적인 산업 적용을 위해서는 단순한 구동 기능을 넘어, 고강도 기계적 물성, 우수한 수축/이완 특성, 빠른 응답 속도, 장기적인 내구성, 그리고 비틀림 및 회전 동작을 포함한 고자유도 구동 능력을 종합적으로 갖춘 차세대 인공근육 시스템의 개발이 필수적이다.

이러한 고성능 인공근육을 구현하기 위해서는 재료과학, 전기화학, 기계공학, 나노기술, 생체공학 등 다양한 학문 분야의 통합적 접근이 요구된다. 따라서 향후 인공근육 기술의 진보를 위해서는 학제 간 융합연구를 통한 심도 있는 기술 통합과 공동 개발이 반드시 병행되어야 하며, 이는 차세대 유연 구동 시스템의 실용화와 인간-기계 인터페이스 기술의 발전에 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. C.-L. Park, B. Goh, E. S. Kim, J. Choi, and S. H. Kim, "Carbon nanotube yarn with small outer diameter to maximize the electrochemical performance of artificial muscles", *Carbon*, 2024, **220**, 118775.
2. 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, "Torsional carbon nanotube artificial muscles", *Science* 2011, **334**, 494-497.
3. 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*, 2005, **309**, 5738.
4. M. D. Lima, N. Li, M. J. Andrade, S. Fang, J. Oh, G. M. Spinks, M. E. Kozlov, C. S. Haines, D. Suh, J. Foroughi, S. J. Kim, Y. Chen, T. Ware, M. K. Shin, L. D. Machado, A. F. Fonseca, J. D. W. Madden, W. E. Voit, D. S. Galvão, and R. H. Baughman, "Electrically, chemically, and photonically powered torsional and tensile actuation of hybrid carbon nanotube yarn muscles", *Science*, 2012, **338**, 928.
5. M. Zhang, K. R. Atkinson, and R. H. Baughman, "Multifunctional carbon nanotube yarns by downsizing an ancient technology", *Science*, 2004, **306**, 1358.
6. Y. Wang, Y. Zhao, M. Ren, Y. Zhou, L. Dong, X. Wei, J. He, B. Cui, X. Wang, P. Xu, J. Di, and Q. Li, "Artificial muscle fascicles integrated with high-performance actuation properties and energy-storage function", *Nano Energy*, 2022, **102**, 107609.
7. K. J. Kim, J. S. Hyeon, H. Kim, T. J. Mun, C. S. Haines, N. Li, R. H. Baughman, and S. J. Kim, "Enhancing the work capacity of electrochemical artificial muscles by coiling plies of twist-released carbon nanotube yarns", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, **11**, 13533-13537.
8. C.-L. Park, B. Goh, K. J. Kim, S. Oh, D. Suh, Y.-C. Song, H. Kim, E. S. Kim, H. Lee, D. W. Lee, J. Choi, and S. H. Kim, "Synergistic actuation performance of artificial fern muscle with a double nanocarbon structure", *Mater. Today Adv.*, 2024, **21**, 100459.
9. X. Wang, Y. Wang, M. Ren, L. Dong, T. Zhou, G. Yang, H. Yang, Y. Zhao, B. Cui, Y. Li, W. Li, X. Yuan, G. Qiao, Y. Wu, X. Wang, P. Xu, and J. Di, "Knittable electrochemical yarn muscle for morphing textiles", *ACS Nano*, 2024, **18**, 9500.