

REVIEW

식물 웨어러블 전자소자의 개발과 응용

김재현, 김재준*

한국전자통신연구원 플렉시블전자소자연구실

Development and Applications of Plant Wearable Electronic Devices

Jaehyun Kim, Jae Joon Kim*

Flexible Electronics Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), Seoul, Korea



ABSTRACT

Climate change and emerging pollutants, such as fine dust and microplastics, are severely impacting ecosystems and agriculture. Plants are particularly vulnerable, leading to reduced productivity and food security concerns. While solutions like vertical farming, drone monitoring, and analysis driven by artificial intelligence (AI) are being explored, precise plant health monitoring remains challenging due to the limitations of current sensor technologies. This review highlights plant wearable electronics for real-time, non-invasive monitoring of plant health and rhizosphere conditions. These devices, attached to or integrated with plant surfaces, enable accurate data collection on internal plant states and environmental parameters, enhancing cultivation strategies. Electrical sensing methods, with real-time data acquisition, offer significant advantages for AI-based agricultural analysis. Key considerations include overcoming plant surface complexity, ensuring photosynthesis and gas exchange, and minimizing growth interference. This paper examines innovative materials, substrates, and attachment techniques to advance plant wearable technologies for sustainable agriculture.

Key Words: Plant health monitoring, Plant wearable sensors, Smart farm, Environmental sensing, Agricultural technology

*Correspondence: skin@etri.re.kr



1. 서론

최근 기후 변화의 가속화로 인해 지구 환경은 급격한 변화를 겪고 있으며, 그로 인해 가뭄, 폭우, 온난화 등 다양한 기상이변이 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 변화는 미세 먼지와 미세 플라스틱과 같은 새로운 오염물질의 확산과 더불어 생태계 전반, 특히 고정된 위치에서 생존하는 식물에 심각한 영향을 미치고 있다. 식물의 건강 악화는 농업 생산성의 감소를 초래하며, 이는 글로벌 식량 안보 문제로 직결되어 사회와 경제에 상당한 파급 효과를 미치고 있다. 이에 대응하기 위해 농업 분야에서는 데이터 기반 기술과 새로운 재배 시스템의 도입이 이루어지고 있다[1,2].

농업 데이터 수집 및 분석을 통한 정밀 농업의 발전에도 불구하고, 식물의 건강 상태를 실시간으로 모니터링하고 환경 데이터를 정밀하게 수집할 수 있는 기술은 아직 초기 단계에 머물러 있다. 현재 식물 상태 진단은 주로 외부 환경의 영향을 분석하는 방식으로 이루어지며, 이는 정확도가 낮고, 병충해나 스트레스를 조기에 감지하는 데 한계가 있다. 생물학적 및 광학적 분석 방법이 널리 사용되고 있지만, 이러한 방법은 높은 비용, 전문 장비의 의존성, 그리고 긴 처리 시간이 요구되어 대규모 농업 시스템에서는 적용이 어려운 실정이다[3,4].

이러한 한계를 극복하기 위한 유망한 기술로 식물 웨어러블 전자소자가 주목받고 있다[5-7]. 웨어러블 디바이스는 식물 표면에 부착되거나 일체화되어 비침습적으로 식물 내부와 주변 환경의 데이터를 실시간으로 모니터링할 수 있다. 특히 전기적 센싱 기술은 데이터의 실시간 수집과 분석이 용이하여 농업 데이터 관리와 인공지능 기반 분석에서 강점을 제공한다. 이를 통해 재배 조건을 최적화하고, 농업 생산성을 향상시킬 수 있는 가능성을 열어준다.

식물 웨어러블 디바이스의 효과적인 개발을 위해서는 몇 가지 주요 기술적 과제가 해결되어야 한다. 식물

표면의 복잡한 미세구조와 초소수성은 디바이스 부착의 안정성을 저해할 수 있으며, 이를 극복할 방법이 요구된다. 또한, 디바이스가 광합성에 필요한 빛 투과와 기공을 통한 기체 교환에 지장을 주지 않도록 설계되어야 한다. 마지막으로, 디바이스가 식물 성장에 미치는 물리적 영향을 최소화해야 하며, 경량화 및 유연성 있는 소재의 사용이 필요하다.

본 리뷰에서는 식물 웨어러블 전자소자의 개발 동향과 기술적 진보를 정리하고, 다양한 재료와 제작 기술, 식물 표면 부착 방법에 대해 논의한다. 또한, 현재의 기술적 한계를 해결하기 위한 접근법과 이를 기반으로 한 응용 가능성을 제시하며, 향후 식물 웨어러블 기술이 농업과 환경 분야에서 기여할 수 있는 잠재적 방향성을 탐구한다.

2. 주제

2.1. 식물 부착형 웨어러블 디바이스

가장 기본적인 식물 웨어러블 디바이스는 기판 위에 제작된 장치를 식물 표면에 부착하는 방식으로 구성된다(Fig. 1). 이는 일반적으로 사람용 웨어러블 디바이스에서 사용되던 유연하거나 신축성 있는 기판, 해당 기판 위에 증착되거나 프린팅된 전극이나 센서, 그리고 접착제로 이루어진다. 이러한 식물 부착형 장치들은 기존에 주변 환경을 모니터링하던 센서와 달리, 식물에 밀착하여 근권부나 내부 환경을 직접적으로 측정함으로써 더 세밀하고 구체적인 생장 정보를 제공할 수 있게 한다.

초기 식물 부착형 장치들은 높은 유연성을 가진 Polyimide(PI)와 Polyethylene terephthalate(PET), 신축성이 있는 Polydimethylsiloxane(PDMS) 등의 엘라스토머를 기판으로 활용하여 센서를 제작하고 이를 잎이나 줄기에 간단히 부착하는 형태로 개발되었다. 이를 통해 식물 근권부의 온도와 습도, 그리고 식물의 생장

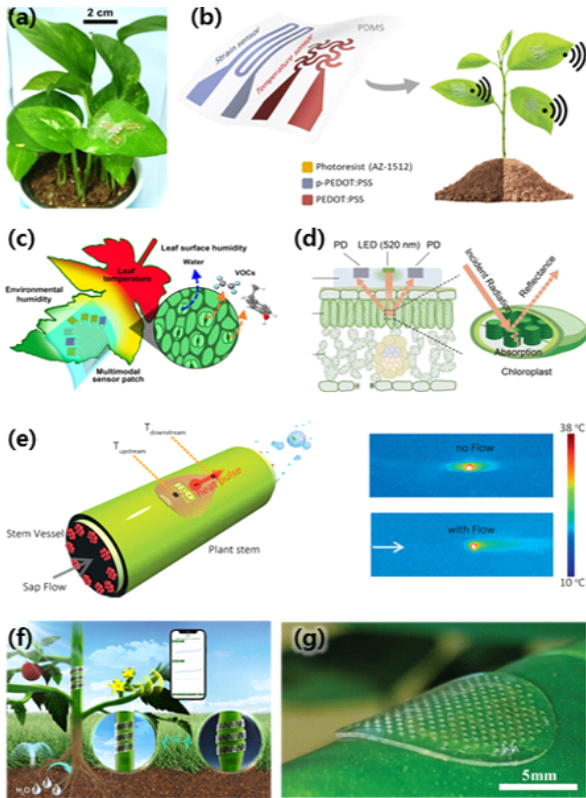


Fig. 1. Plant-attached wearable electronic devices. (a) Gold electrodes coated on PDMS substrate. (b) Conductive polymer electrodes coated on PDMS substrate. (c) Multimodal chemical sensors coated on PDMS substrate. (d) Photostimulation and analysis sensor fabricated on PI substrate. (e) Copper electrode-based plant flow sensor fabricated on PDMS substrate. (f) PDMS/laser-induced graphite/Ecoflex-based plant detection sensor. (g) Plant microneedles.

정도를 측정하는 연구 결과가 보고되었으며[8], 온도 변화에 따른 식물의 낮과 밤 성장 패턴을 분석한 사례도 발표되었다[9].

나아가, 근권부 환경 및 성장 정보뿐만 아니라 식물 내부의 건강 상태를 분석하기 위한 센서 개발도 활발히 이루어졌다. 예를 들어, 화학 센서를 추가로 구성하여 잎의 기공에서 방출되는 기체를 분석해 식물의 호흡 상태를 연구한 사례[10], 엽록체를 광센서를 통해

관찰하여 식물의 건강 상태를 평가한 연구[11], 그리고 온도 센서를 두 지점에 설치해 온도 차이를 활용하여 식물 내부의 수분 흐름을 분석한 연구 등이 보고되었다[12,13]. 또한 부착에 마이크로니들을 적용하여 향상된 부착상태에서 온도를 측정하는 사례도 보고되었다[14]. 이와 같은 부착형 디바이스들은 제작과정이 간단하며 다양한 소재와 구조의 도입이 가능하고 접착성 물질을 한쪽 면에 도포한 후 압력을 주어 쉽게 식물에 부착시킬 수 있다는 편의성에서 널리 쓰이고 있다. 하지만, 2차원 구조의 기판을 복잡한 3차원 구조의 식물 표면에 부착하는 것은 부착 안정성과 효과적인 소자-식물 계면을 형성하기 쉽지 않고, 원활한 광합성과 물질대사, 그리고 성장을 제약할 수 있다. 따라서 기존에 사람 대상으로 많이 사용되던 유연하고 투명한 전극 및 기판 소재나 메쉬형 혹은 초박막형과 같은 구조적 접근법도 활용되리라 기대된다.

2.2. 식물 위 직접 제작 웨어러블 디바이스

최근 위와 같은 식물 부착형 웨어러블 디바이스의 기판의 사용으로 인한 각종 한계점들을 극복하기 위해 기판 없이 식물 표면에 직접 디바이스를 제작하여 일체화하려는 연구들이 보고되고 있다. 이러한 연구들은 주로 액체(열가변성 하이드로젤이나 액체금속)나 기체(전도성고분자의 모노머) 상태에서 식물 표면에 코팅한 뒤 건조 과정에서 전도성을 지니는 다양한 물질들을 활용하여 이루어진다. 먼저, 전도성 하이드로젤을 활용한 식물 일체형 웨어러블 디바이스들이 보고되었다(그림 2). 하이드로젤의 응고 과정을 통해 식물 표면의 털이나 돌기와 같은 미세구조를 극복하여 디바이스를 구성할 수 있었으며, 높은 접착력을 통해 식물 표면에 안정적으로 전극을 형성할 수 있었다[15]. 또한, 하이드로젤 전극을 통해 식물의 액션 포텐셜을 측정하고 이를 인가하여 파리지옥의 움직임을 전기적으로 조절하고 로봇 그리퍼로 활용한 연구도 보고되었다[16]. 더

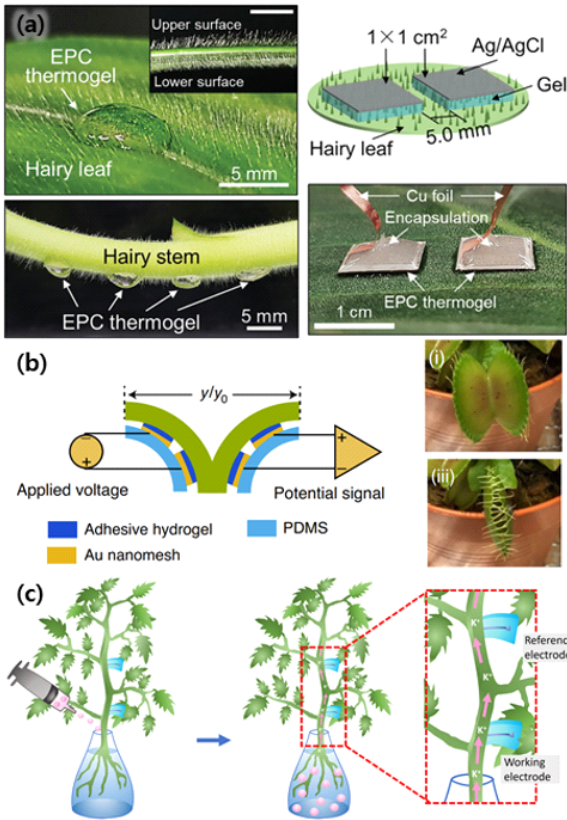


Fig. 2. Hydrogel-based plant-integrated electronics. (a) Thermo-hydrogel with liquid-solid phase change. (b) Plant actuation through plant hydrogel. (c) Ion detection through hydrogel electrode.

나아가, 하이드로젤의 생체 안정성을 활용하여 식물 표면뿐만 아니라 내부에 디바이스를 삽입해 줄기 내부의 이온 이동을 분석한 연구도 보고되었다[17]. 이러한 하이드로젤은 형태를 바꾸기 용이하여 복잡한 식물표면에 도포가 쉽고 물성 조절에 따라 높은 접착강도와 이온전도성을 갖는다는 장점, 그리고 사람 대상일 때와 마찬가지로 식물과 높은 생체친화도를 기대 가능하다는 점에서 널리 쓰이고 있다. 하지만, 장기간 사용시 탈수화로 인해 특성이 변하고 다른 전극 소재들에 비해 무거우며 패터닝이 힘들다는 점들은 향후 장기간 다기능 소자 제작을 위해 극복해야 할 단점들로 지적되고 있다.

한편, 다양한 형태로 프린팅이 가능한 액체금속의 장점을 활용한 식물 일체형 웨어러블 디바이스 연구도 진행되었다(그림 3). 액체금속의 소수성을 활용한 hydroprinting 기법을 통해 꽃, 줄기, 떡잎 등 다양한 부위에 액체금속 전극을 구성하여 식물의 성장 정보를 분석한 연구가 보고되었으며[18], 액체금속 입자 기반 스트레인 센서를 잎 표면에 직접 프린팅해 잎의 성장을 모니터링한 연구도 발표되었다[19].

전도성 고분자를 직접 식물 표면에 증착하여 식물의 건강 상태를 분석하는 연구도 이루어졌다(그림 4). 전도성 고분자인 Poly(3,4-propylenedioxythiophene) (PProDOT)이나 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT)을 산화제인 FeCl₃를 이용해 산화화학기상증착(oxidative chemical vapor deposition, oCVD) 방식으로 식물 표면에 구성하고, 이를 통해 식물 내부의 임피던스를 측정하여 건강 상태를 모니터링한 연구가 보고되었다[20]. 더 나아가, 식물에 작용하는 외부 스트레스에 따른 임피던스 변화를 분석해 건조나 오존에 따른 식물 건강 상태를 평가한 연구도 보고되었다[21].

이러한 식물 위 직접 제작 디바이스들은 식물 표면

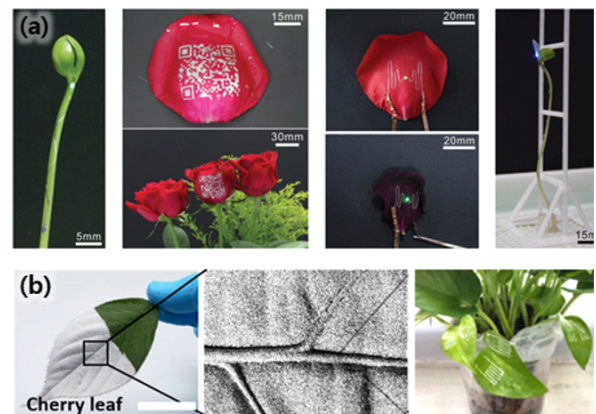


Fig. 3. Plant surface electronics using liquid metal electrodes. (a) Plant growth monitoring by coating plant surfaces with liquid metal. (b) Plant surface coating using liquid metal particles.



3. 결론 및 전망

식물의 상태를 정확히 파악하기 위해 식물 내부 건강 상태와 근권부의 환경 상태를 측정할 수 있는 다양한 형태의 식물 웨어러블 디바이스들이 개발되고 있으며, 이 과정에서 식물과 디바이스 간 인터페이스 문제를 해결하기 위한 다양한 연구적 접근들이 이루어지고 있다. 지금까지는 사람을 대상으로 한 디바이스를 단순히 식물에 적용하는 방식이 주를 이루었다면, 앞으로는 식물의 생장에 필요한 광합성, 호흡, 성장, 생체 안정성 등을 고려한 식물 안정성과 함께, 장기간 고온 다습한 환경에 노출되어도 식물 성장에 영향을 주지 않는 디바이스 안정성을 갖춘, 농업 환경에 적합한 형태의 디바이스가 개발될 것으로 예상된다.

또한, 사람이나 동물에 비해 상대적으로 규제가 적은 식물을 대상으로 한 연구는 농업, 식물 연구, 식품 등의 분야에서 단기간 내 대규모로 실제 적용될 가능성이 높다고 기대된다. 이에 따라 가격이 저렴하고 환경친화적인 디바이스의 개발이 필요하다. 나아가 농업 현장에서 디바이스를 식물에 부착하고 자동으로 데이터를 획득할 수 있는 시스템 구축, 센서 데이터를 기반으로 인공지능 등을 활용해 식물 건강 상태를 해석하는 기술이 앞으로의 주요 과제로서 활발히 연구될 것으로 예상된다.

기호설명

- AI: Artificial intelligence
- PET: Polyethylene terephthalate
- PI: Polyimide
- PDMS: Polydimethylsiloxane
- PProDOT: Poly(3,4-propylenedioxythiophene)
- PEDOT: Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)
- oCVD: Oxidative chemical vapor deposition

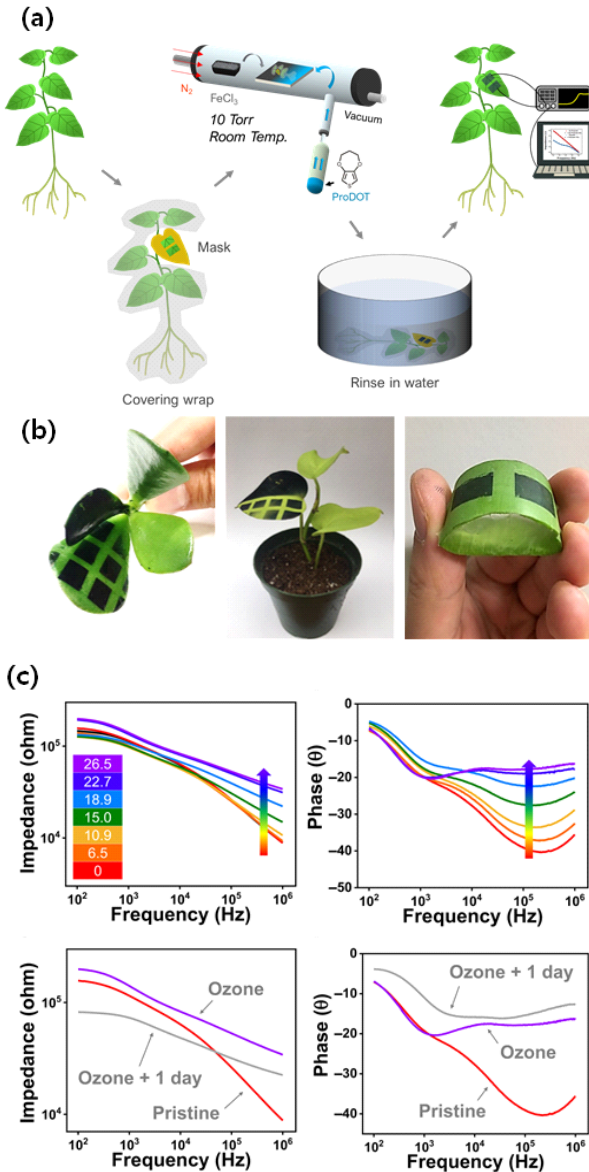


Fig. 4. Conductive polymer-based plant-integrated electronics. (a) Coating process on living plants. (b) Image of coated electrodes. (c) Bioimpedance-based plant health monitoring via electrodes.

의 복잡한 구조나 초소수성을 극복하여 이상적인 디바이스-식물 표면 인터페이스를 구축할 수 있지만, 아직 활용 가능한 물질이 한정적이며 대규모 생산에 적합하지 않다는 한계를 갖고 있다.



ACKNOWLEDGEMENTS.

Author Contributions

KJJ and KJH were involved in experiments, analysis, and discussion. KJJ and KJH drafted the manuscript.

Funding

This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant of the Ministry of Science and ICT (MSIT), Republic of Korea (2022-0-00020; Imperceptible On-Skin Sensor Devices for Musculoskeletal Monitoring and Rehabilitation).

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

AUTHORS



김재현
2018년: POSTECH 신소재공학 학사
2024년: POSTECH 신소재공학 박사
2024년~현재: ETRI Post-Doc.
[관심분야] 유연전자소자, 식물전자소자



김재준
2009년: KAIST 물리학 학사
2011년: KAIST 원자력 및 양자공학 석사
2015년: KAIST 원자력 및 양자공학 박사
2015년~2019년: University of Massachusetts

Amherst 고분자공학 Post-Doc.
2019년~2022년: The University of Tokyo 전자공학 Post-Doc.

2022년~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
[관심분야] 유연전자소자, 식물전자소자

REFERENCES

- [1] Cravero, A.; Pardo, S.; Sepúlveda, S.; Muñoz, L. Challenges to Use Machine Learning in Agricultural Big Data: A Systematic Literature Review. *Agronomy* 2022, 12 (3), 748.
- [2] Da Silveira, F.; Lermen, F. H.; Amaral, F. G. An Overview of Agriculture 4.0 Development: Systematic Review of Descriptions, Technologies, Barriers, Advantages, and Disadvantages. *Comput. Electron. Agric.* 2021, 189, 106405.
- [3] Buja, I.; Sabella, E.; Monteduro, A. G.; Chiriaco, M. S.; De Bellis, L.; Luvisi, A. et al. Advances in Plant Disease Detection and Monitoring: From Traditional Assays to In-Field Diagnostics. *Sensors* 2021, 21 (6), 2129.
- [4] Martinelli, F.; Scalenghe, R.; Davino, S.; Panno, S.; Scuderi, G.; Ruisi, P. et al. Advanced Methods of Plant Disease Detection: A Review. *Agron. Sustain. Dev.* 2015, 35, 1-25.
- [5] Dufil, G.; Bernacka-Wojcik, I.; Armada-Moreira, A.; Stavrinidou, E. Plant Bioelectronics and Biohybrids: The Growing Contribution of Organic Electronic and Carbon-Based Materials. *Chemical Reviews*, 2021, 122(4), 4847-4883.
- [5] Dufil, G.; Bernacka-Wojcik, I.; Armada-Moreira, A.; Stavrinidou, E. Plant Bioelectronics and Biohybrids: The Growing Contribution of Organic Electronic and Carbon-Based Materials. *Chem. Rev.* 2021, 122 (4), 4847-4883.
- [6] Qu, C. C.; Sun, X. Y.; Sun, W. X.; Cao, L. X.; Wang, X. Q.; He, Z. Z. Flexible Wearables for



- Plants. *Small* 2021, 17 (50), 2104482.
- [7] Yin, H.; Cao, Y.; Marelli, B.; Zeng, X.; Mason, A. J.; Cao, C. Soil Sensors and Plant Wearables for Smart and Precision Agriculture. *Adv. Mater.* 2021, 33 (20), 2007764.
- [8] Nassar, J. M.; Khan, S. M.; Villalva, D. R.; Nour, M. M.; Almuslem, A. S.; Hussain, M. M. Compliant Plant Wearables for Localized Microclimate and Plant Growth Monitoring. *NPJ Flex. Electron.* 2018, 2, 24.
- [9] Yang, Y.; Ravindran, P.; Wen, F.; Krishnamurthy, P.; Wang, L.; Zhang, Z.; et al. All-Organic Transparent Plant E-Skin for Noninvasive Phenotyping. *Sci. Adv.* 2024, 10, eadk7488.
- [10] Lee, G.; Husain, O.; Jamalzadegan, S.; Wang, H.; Saville, A.; Shymanovich, T. et al. All-Organic Transparent Plant E-Skin for Noninvasive Phenotyping. *Sci. Adv.* 2023, 9, eade2232.
- [11] Zhang, K.; Li, W.; Li, H.; Luo, Y.; Li, Z.; Wang, X. et al. A Leaf-Patchable Reflectance Meter for In Situ Continuous Monitoring of Chlorophyll Content. *Adv. Sci.* 2023, 10, 2305552.
- [12] Chai, Y.; Chen, C.; Luo, X.; Zhan, S.; Kim, J.; Luo, J. et al. Cohabiting Plant-Wearable Sensor *In Situ* Monitors Water Transport in Plant. *Adv. Sci.* 2021, 8, 2003642.
- [13] Zhang, C.; Zhang, C.; Wu, X.; Ping, J.; Ying, Y. An Integrated and Robust Plant Pulse Monitoring System Based on Biomimetic Wearable Sensor. *NPJ Flex. Electron.* 2022, 6, 43.
- [14] Dong, K.; Wang, Y.; Zhang, R.; Wang, Z.; Zhao, X.; Chang, Z. et al. Flexible and Shape-Morphing Plant Sensors Designed for Microenvironment Temperature Monitoring of Irregular Surfaces. *Adv. Mater. Technol.* 2023, 8 (4), 2201204.
- [15] Luo, Y.; Li, W.; Lin, Q.; Zhang, F.; He, K.; Yang, D. et al. Flexible and Shape-Morphing Plant Sensors Designed for Microenvironment Temperature Monitoring of Irregular Surfaces. *Adv. Mater.* 2021, 33, 2007848.
- [16] Li, W.; Matsuhisa, N.; Liu, Z.; Wang, M.; Luo, Y.; Cai, P. et al. An On-Demand Plant-Based Actuator Created Using Conformable Electrodes. *Nat. Electron.* 2021, 4, 134-142.
- [17] Bihar, E.; Strand, E. J.; Crichton, C. A.; Renny, M. N.; Bonter, I.; Tran, T. et al. Self-Healable Stretchable Printed Electronic Cryogels for *In-Vivo* Plant Monitoring. *NPJ Flex. Electron.* 2023, 7, 48.
- [18] Jiang, J.; Zhang, S.; Wang, B.; Ding, H.; Wu, Z. G. Hydroprinted Liquid-Alloy-Based Morphing Electronics for Fast-Growing/Tender Plants: From Physiology Monitoring to Habit Manipulation. *Small* 2020, 16, 2003833.
- [19] Li, F.; Lei, W.; Wang, Y.; Lu, X.; Li, S.; Xu, F. et al. Ultra-Conformable Liquid Metal Particle Monolayer on Air/Water Interface for Substrate-Free E-Tattoo. *npj Flex. Electron.* 2023, 7, 31.
- [20] Kim, J. J.; Allison, L. K.; Andrew, T. L. Vapor-Printed Polymer Electrodes for Long-Term, On-Demand Health Monitoring. *Sci. Adv.* 2019, 5, eaaw0463.
- [21] Kim, J. J.; Fan, R.; Allison, L. K.; Andrew, T. L. On-Site Identification of Ozone Damage in Fruiting Plants Using Vapor-Deposited Conducting Polymer Tattoos. *Sci. Adv.* 2020, 6, eabc3296.

