

식물 웨어러블 디바이스

Plant Wearable Device

김재현 · 김재준 | Jaehyun Kim · Jae Joon Kim

Flexible Electronics Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute,
218 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea
E-mail: skin@etri.re.kr

1. 서론

최근 급격한 기후변화로 인해 온난화, 가뭄, 폭우 등 기존에 없던 양상의 환경 피해가 증가하고 있으며, 이는 미세먼지와 미세플라스틱 같은 새로운 오염물질의 등장과 함께 인간의 삶은 물론 동식물 생태계에도 큰 영향을 끼치고 있다. 특히 이러한 변화는 이동이 불가능한 식물에겐 더욱 치명적으로 다가오며 농업 생산성의 질적, 양적 감소에 따른 식량 문제를 야기함으로써 사회와 경제에 심각한 영향을 미치고 있다. 이를 해결하기 위해 실내농장, 수직농장 등의 새로운 재배 방법, 드론 및 무선통신을 통한 농업 데이터 수집 및 정리, AI를 통한 고차원적 데이터 분석 방법 개발 등 다양한 연구적 접근이 이루어지고 있다.

그러나, 새로운 농업 환경에 대처하고 농업 데이터를 확보하는 데 필수적인 식물 웨어러블 센서 기술의 부족은 효과적인 식물건강 모니터링의 한계로 지적되고 있다. 기존의 식물 건강과 상태는 주로 외부 환경 감지에 의존하고 있어 정확도가 낮고 초기 단계 감지가 어렵다. 현재 생물학적 방법과 광학적 방법이 널리 사용되고 있지만 전문적 설비와 긴 분석 시간, 높은 비용과 에너지가 필요하기 때문에 대규모 농업시설에 적용하기에는 한계가 있다.

본 총설에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 식물 웨어러블 전자공학을 통한 식물의 전기적 건강을 모니터링하고 식물 근권부 환경을 센싱하는 디바이스들을 소개하고자 한다. 식물에 직접 부착되거나 표면의 일부로 일체화된 웨어러블 디바이스를 통해 비침습적으로 식물의 내부 건강 상태를 모니터링할 수 있으며, 식물에 밀접하게 부착된 센서를 통해 식물 주변환경 정보를 획득하여 보다 정확한 재배 조건을 파악할 수 있다. 특히, 전기적 방법은 실시간 데이터 획득이 용이하여 농업 데이터의 수집, 정리, AI 분석에 큰 장점을 제공한다.

이러한 식물 웨어러블 디바이스를 제작하기 위해서는 1) 식물 표면의 복잡한 미세구조와 초소수성을 극복하고 부착이 가능해야 하며, 2) 광합성을 위한 빛 유입과 기공을 통한 기체 이동에 제약이 없어야 하고, 3) 디바이스로 인한 성장 방해나 무게로 인한 처짐 현상이 없어야 한다. 본 총설에서는 이러한 필요조건들을 해결하기 위한 다양한 기관과 기능성 소재, 그리고 식물 표면 부착법에 대해 고찰하고자 한다.

2. 본론

식물 웨어러블 디바이스 연구는 기존의 사람 피부를 대상으로 하는 웨어러블 디바이스 기술을 식물에 적용하는

Author



김재현

2018
2024
2024-현재
POSTECH 신소재공학 (학사)
POSTECH 신소재공학 (박사)
한국전자통신연구원
(Post-Doc.)



김재준

2009
2011
2015
2015-2019
2019-2022
2022-현재
KAIST 물리학 (학사)
KAIST 원자력 및 양자공학 (석사)
KAIST 원자력 및 양자공학 (박사)
University of Massachusetts
Amherst 고분자공학 (Post-Doc.)
The University of Tokyo 전자공학
(Post-Doc.)
한국전자통신연구원 선임연구원

시도를 통해 많은 발전을 보여왔다. 최근에는 식물 고유의 특성과 식물성장환경을 반영한 다양한 소재와 구조가 활용되고 있다. 이러한 디바이스 특성과 식물 위 제작과정을 크게 1) 독립적으로 제작된 디바이스가 식물 표면에 부착되는 형태와 2) 식물 위에서 디바이스가 직접 제작 및 일체화 되는 형태로 나눠서 살펴보고자 한다.

2.1 식물 부착형 웨어러블 디바이스

가장 단순한 식물 웨어러블 디바이스는 기판위에 구성된 디바이스를 식물의 표면위에 부착하는 것이다(그림 1). 이는 크게 기존 사람 웨어러블 디바이스에서 활용되던 유연/신축 기판, 그 위에 증착이나 프린팅으로 제작된 전극 혹은 센서, 그리고 접착 물질로 구성되어 있다. 이러한 식물 부착형 디바이스들은 식물 주변에 설치되어 광범위한 식물 성장 환경을 모니터링하던 센서들에 반해, 식물에 밀착한 형태로 식물 근권부나 내부의 환경을 모니터링 함으로서 보다 세밀한 식물 성장 정보를 얻을 수 있게 하였다.

초기의 식물 부착형 디바이스들은 높은 유연성을 갖는 polyimide(PI)나 polyethylene terephthalate(PET), 신축성을 갖는 polydimethylsiloxane(PDMS) 등 각종 고분자 기판 위에 센서를 제작하고 잎이나 줄기에 단순 부착하는 형태로 개발되었다. 식물 부착형 센서를 통한 식물 근권부의 온도 및 습도,

식물의 생장 정도의 측정이 보고 되었으며,¹ 식물에 작용하는 온도에 따른 성장을 측정하여 낮과 밤의 식물의 성장 패턴의 분석이 보고되었다.²

더 나아가, 식물의 근권부 환경 및 성장 정보뿐만 아니라 다양한 식물의 내부건강 상태를 분석하기 위한 센서들이 연구되었다. 잎의 기공에서 나오는 기체를 센싱하는 화학센서를 추가로 구성하면서 식물의 호흡을 분석한 연구가 보고되었으며,³ 잎의 엽록체를 광센서를 통해 분석하여 식물의 건강상태를 분석한 연구가 보고되었다.⁴ 또한, 온도센서를 두 지점에 구성하여 두 센서간의 온도 차를 활용하여 식물 내부의 물의 흐름을 분석한 사례도 보고되었다.⁵

식물 부착형 웨어러블 디바이스들이 연구됨에 따라 기존의 사람용 웨어러블 디바이스와 다른 식물에 적합한 형태를 가진 디바이스의 개발이 요구되었다. 이에 얇은 줄기에 감는 형태로 부착이 되어 줄기에 물이 이동할 때 발생하는 팽창과 수축을 센싱하는 디바이스가 보고되었다.⁶ 또한, 기판의 마이크로 구조를 통해 불규칙적인 곡률을 가지는 식물 표면에 컨포멀하게 부착한 센서도 보고되었다.⁷

이러한 식물 부착형 웨어러블 디바이스들은 제조과정이 간단하고 다양한 타입의 센서 제작에 용이하지만, 기판의 무게, 유연성, 신축성 등에 의해 식물의 생장과 기능을 방해한다는 단점이 있다. 또한, 제작과 부착 과정을 위해 일정 이상의 두께를 요하는 기판이 미세 구조의 식물 표면위 컨포멀한 부착과 이를 통한 신호획득을 방해한다는 단점을 보여준다.

2.2 식물 일체형 웨어러블 디바이스

최근, 위와 같은 식물 부착형 웨어러블 디바이스의 한계점들을 극복하고자, 기판 없이 식물표면에 직접 디바이스를 제작하여 일체화하고자 하는 연구들이 보고되고 있다. 이러한 연구들은 주로 액체나 기체로 식물 위에 코팅되어 건조 이후에는 전도성을 지니는 다양한 물질들을 통해 시도되었다.

먼저, 전도성 하이드로젤을 활용한 식물 일체형 웨어러블 디바이스들이 보고되었는데(그림 2), 하이드로젤의 응고 과정을 통해 식물 표면의 털, 돌기와 같은 미세구조를 극복하여 식물 표면에 디바이스가 구성될 수 있었으며, 하이드로젤의 높은 접착력을 통해 식물 표면에 안정적으로 전극을 형성될 수 있었다.⁸ 또한, 하이드로젤의 전극을 통해 식물의 액션 포텐셜의 측정 및 인가를 가능하게 하여, 파리지옥의 움직임을 전기적으로 조절하고 이를 로봇 그리퍼로 활용한 연구도 보고되었다.⁹ 더 나아가, 하이드로젤의 생체안정성을 활용하여 식물의 표면뿐 아니라, 식물의 내부에 디바이스를 삽입하여, 줄기 내부의 이온의 이동을 분석한 연구도 보고되었다.¹⁰

또한, 다양한 형태로 프린팅이 가능한 액체금속의 장점을 활용하여 식물 일체형 웨어러블 디바이스를 구성하는 연구도

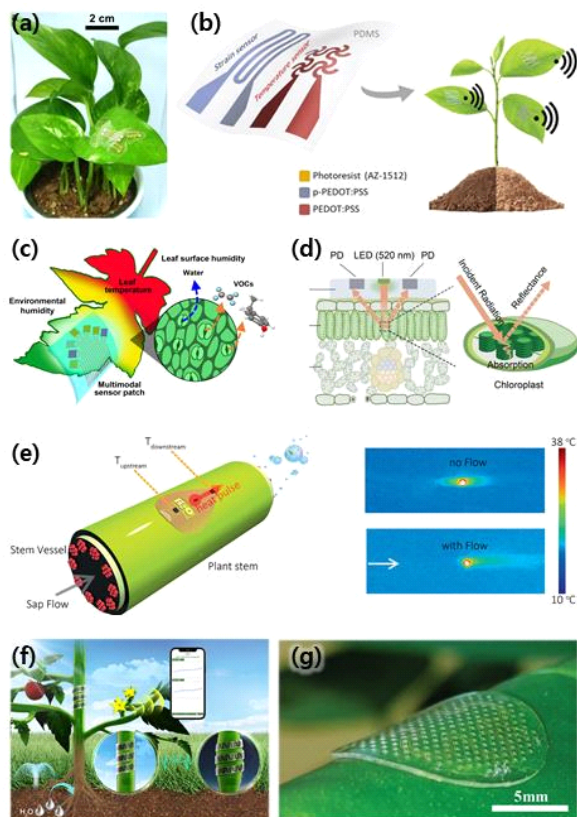


그림 1. 식물 부착형 웨어러블 디바이스.

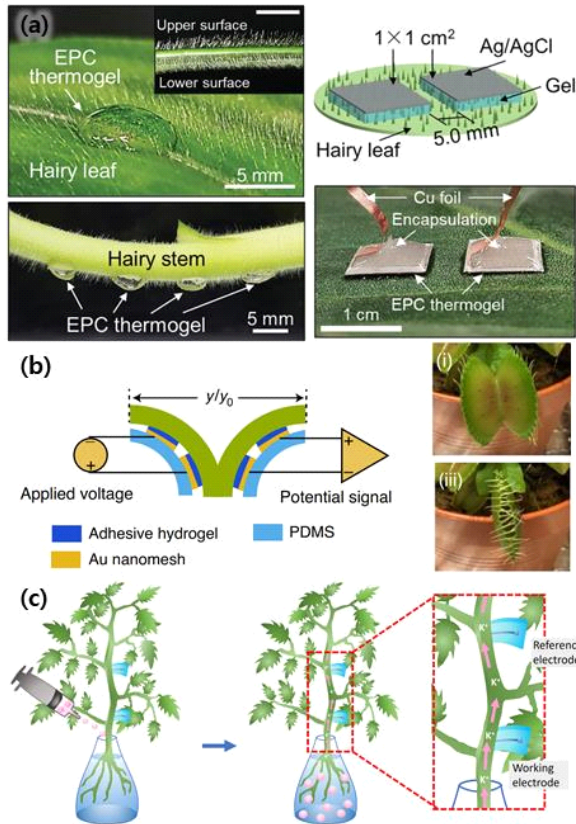


그림 2. 하이드로젤 기반 식물 일체형 웨어러블 디바이스.

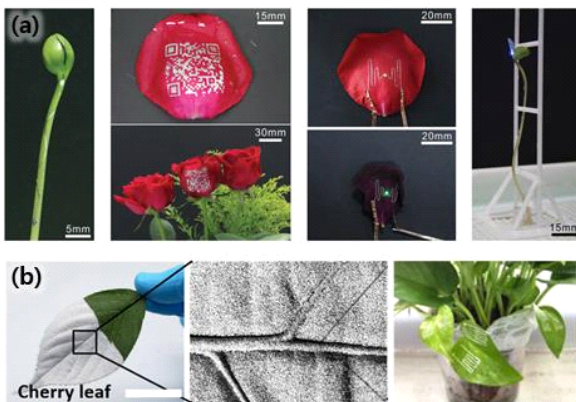


그림 3. 액체금속 기반 식물 일체형 웨어러블 디바이스.

시도되었다(그림 3). 액체금속의 소수성을 활용한 hydroprinting 기법을 통해 꽃, 줄기, 떡잎과 같은 다양한 부위에 액체금속 전극을 구성하여 식물의 성장 정보를 분석한 연구가 보고 되었으며,¹¹ 액체금속 입자 기반의 스트레인 센서를 잎 표면에 직접 프린팅하여 잎의 성장을 모니터링한 연구도 보고되었다.¹²

그리고, 전도성 고분자를 직접 식물 표면에 증착하여 식물의 건강 상태를 분석하는 연구도 진행되었다(그림 4). 전도성 고분자인 poly(3,4-propylenedioxythiophene) (PProDOT)이나 poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT)을 산화제인 FeCl₃를

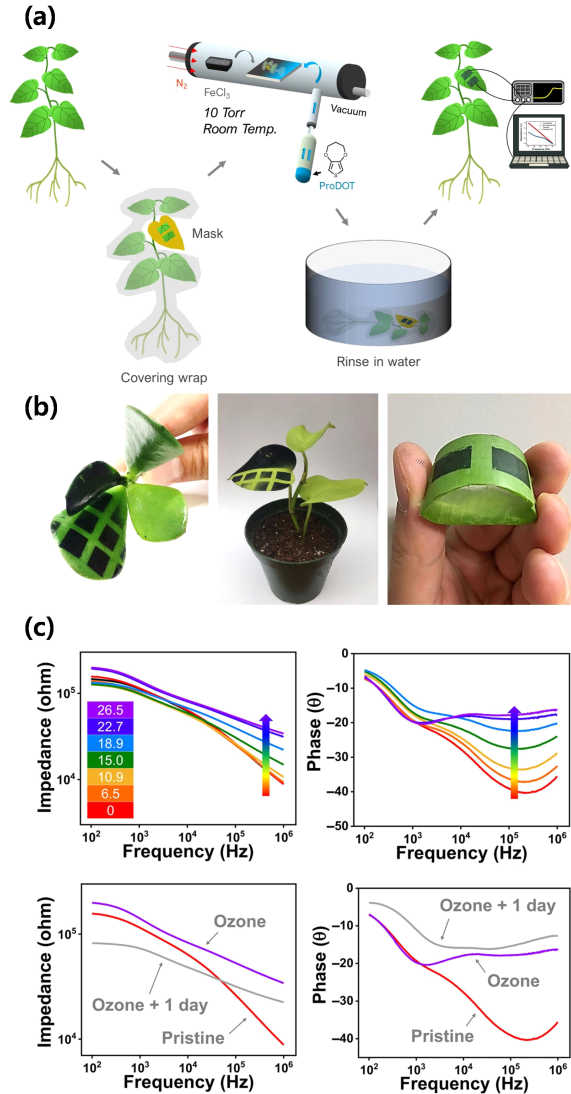


그림 4. 전도성 고분자 기반 식물 일체형 웨어러블 디바이스.

이용해서 산화화학기상증착(oxidative chemical vapor deposition, oCVD)시켜 식물의 표면에 구성하고 이를 통해 식물 내부의 임피던스를 측정하여 식물의 건강 상태를 모니터링하는 연구가 보고되었고,¹³ 더 나아가 식물에 작용하는 외부 스트레스에 따른 임피던스의 변화를 분석하여, 식물의 건조와 오존에 따른 식물 건강 상태를 분석하였다.¹⁴

이러한 식물 위 직접 제작 디바이스들은 식물의 표면의 복잡한 구조나 초소수성을 극복하여 이상적인 디바이스-식물표면 인터페이스를 구축할 수 있지만, 아직 가능한 물질이 한정적이고 대규모 생산에 용이하지 않다는 단점을 갖고 있다.

3. 결론

식물의 상태를 정확히 파악하기 위해 식물 내부 건강상태와 근권부의 환경상태 측정에 적합한 다양한 형태의 식물 웨어러블

디바이스들이 개발되고 있으며, 이때 식물과 디바이스의 인터페이스를 극복하기 위한 다양한 연구적 접근들이 이루어지고 있다. 지금까지 사람 대상으로 한 디바이스의 단순한 식물 대상 적용이었으면 앞으로는 식물의 생장에 필요한 광합성, 호흡, 성장, 생체안정성 등에 대한 식물 안정성과 장기간 고온다습 환경노출 및 식물 성장에 대한 디바이스 안정성을 갖춘 보다 농업환경에 적합한 형태의 디바이스가 개발되리라 예상된다.

또한 사람이나 동물에 비해 상대적으로 규제가 적은 식물 대상 연구는 농업이나 식물 연구, 식품 등의 분야에 단기간 내에 대규모 실제 적용이 가능하리라 기대되는 만큼 가격이 저렴하고 환경친화적 디바이스의 개발이 필요하다. 또한 농업 현장 내 디바이스를 부착하고 자동으로 데이터를 획득하는 시스템 구축, 그리고 센서 데이터를 기반으로 인공지능 등을 활용한 식물 건강의 해석이 앞으로 남은 과제로서 활발히 연구되리라 예상된다.

참고문헌

1. J. M. Nassar, S. M. Khan, D. R. Villalva, M. M. Nour, A. S. Almuslem, and M. M. Hussain, *npj Flex. Electron.*, **2**, 24 (2018).
2. Y. Yang, P. Ravindran, F. Wen, P. Krishnamurthy, L. Wang, Z. Zhang, P. Kumar, E. Chae, and C. Lee, *Sci. Adv.*, **10**, eadk7488 (2024).
3. G. Lee, O. Husain, S. Jamalzadegan, H. Wang, A. Saville, T. Shymanovich, R. Paul, D. Rotenberg, A. E. Whitfled, J. B. Ristaino, Y. Zhu, and Q. Wei, *Sci. Adv.*, **9**, eade2232 (2023).
4. K. Zhang, W. Li, H. Li, Y. Luo, Z. Li, X. Wang, and X. Chen, *Adv. Sci.*, **10**, 2305552 (2023).
5. Y. Chai, C. Chen, X. Luo, S. Zhan, J. Kim, J. Luo, X. Wang, Z. Hu, Y. Ying, and X. Liu, *Adv. Sci.*, **8**, 2003642 (2021).
6. C. Zhang, C. Zhang, X. Wu, J. Ping, and Y. Ying, *npj Flex. Electron.*, **6**, 43 (2022).
7. K. Dong, Y. Wang, R. Zhang, Z. Wang, X. Zhao, Z. Chang, B. Lu, and Q. Zhao, *Adv. Mater. Technol.*, **8**, 2201204 (2023).
8. Y. Luo, W. Li, Q. Lin, F. Zhang, K. He, D. Yang, X. J. Loh, and X. Chen, *Adv. Mater.*, **33**, 2007848 (2021).
9. W. Li, N. Matsuhisa, Z. Liu, M. Wang, Y. Luo, P. Cai, G. Chen, F. Zhang, C. Li, Z. Liu, Z. Lv, W. Zhang, and X. Chen, *Nat. Electron.*, **4**, 134 (2021).
10. E. Bihar, E. J. Strand, C. A. Crichton, M. N. Renny, I. Bonter, T. Tran, M. Atreya, A. Gestos, J. Haseloff, R. R. McLeod, and G. L. Whiting, *npj Flex. Electron.*, **7**, 48 (2023).
11. J. Jiang, S. Zhang, B. Wang, H. Ding, and Z. G. Wu, *Small*, **16**, 2003833 (2020).
12. F. Li, W. Lei, Y. Wang, X. Lu, S. Li, F. Xu, Z. He, J. Liu, H. Yang, Y. Wu, J. Shang, Y. Liu, and R.-W. Li, *npj Flex. Electron.*, **7**, 31 (2023).
13. J. J. Kim, L. K. Allison, and T. L. Andrew, *Sci. Adv.*, **5**, eaaw0463 (2019).
14. J. J. Kim, R. Fan, L. K. Allison, and T. L. Andrew, *Sci. Adv.*, **6**, eabc3296 (2020).