

웨어러블 식물 센서의 개발 연구 동향

Recent Advances in Wearable Plant Sensors

명수민 · 박형민 · 한재희 · 이기원 | Sumin Myoung · Hyeongmin Park · Jaehee Han · Giwon Lee

Department of Chemical Engineering, KwangWoon University,
20 Kwangwoon-ro, Seoul 01897, Korea
E-mail: giwonlee@kw.ac.kr

1. 서론

2050년까지 인구가 급격하게 증가하면서 세계적인 작물 수요가 2018년 대비 59-102% 증가할 것으로 예상된다. 이를 충족시키기 위해 식량 생산을 두 배로 늘려야 하는 문제에 직면하였으나, 현재 생물학적 및 환경적 스트레스로 인한 새로운 식물 질병들이 작물의 생산성을 위협하고 있다.¹⁻³ 병원체, 해충과 같은 생물학적 스트레스와 홍수, 가뭄, 고온, 서리 등의 환경적 스트레스는 상당한 작물 손실을 초래한다.^{4,5} 이를 해결하기 위하여, 최근 식물 성장에 유해한 스트레스를 감지할 수 있는 새로운 센서 기술들이 등장하였다. 예를 들어, 질소 관리를 위한 근접 광학 센서, 식물 질병 자동 감지를 위한 이미징 기술, 스마트폰 기반 기술 등 다양한 센서 기술이 개발되었다. 이러한 기술들은 주로 광학적 메커니즘에 기반하고 있어 연속적인 모니터링, 낮은 감지 민감도, 신호 변환의 복잡성 등의 한계가 존재한다. 이에 따라, 스트레스 상황에서 식물 성장을 적시에 최적화하고 조정할 수 있도록, 실시간으로 식물 건강 상태를 모니터링할 수 있는 새로운 접근 방식이 주목받고 있다.

웨어러블 식물 센서는 뿌리, 줄기, 잎 등 식물의 다양한 부분에 부착되어 실시간으로 생물학적 및 환경적 조건을 모니터링하고, 초기 단계에서 스트레스를 경고함으로써 작물 생산성을 높일 수 있다.^{6,7} 각 식물 기관은 식물건강을 유지하는 데 필요한 다양한 기능을 가지고 있으며 물과 영양분 흡수, 물과 미네랄 운반하며 가스 교환 등의 특정 기능을 수행한다.^{7,8} 식물의 가스 교환 과정은 다양한 휘발성 유기 화합물(volatile organic compounds, VOCs), 이산화탄소(CO_2), 산소(O_2), 수증기 등이 잎 표면의 기공을 통해 이루어지며, 이러한 생물학적 과정을 추적함으로써 식물 건강을 모니터링할 수 있다.^{9,10} 이러한 웨어러블 센싱은 식물 건강모니터링을 위한 이상적인 기술로, 생물학적 환경과 환경 조건을 감지하고 초기 단계에서 식물이 받는 스트레스를 인식하고, 사용자에게 이를 전달한다. 궁극적으로는 작물 생산성 손실을 완화하거나 예방할 수 있다. 이런 웨어러블 식물 센서는 물리적 성장, 생리학, 화학적 방출 등의 생물학적 신호를 전기 신호로 변환하여 실시간으로 식물 건강을 관찰할 수 있다.

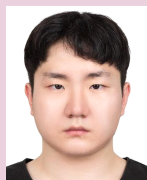
Author



명수민

2021-현재

광운대학교 화학공학과
(학사과정)



한재희

2019-현재

광운대학교 화학공학과
(학사과정)



박형민

2019-현재

광운대학교 화학공학과
(학사과정)



이기원

2013
2019
2022
2023-현재

한양대학교 화학공학과 (학사)
포항공과대학교 화학공학과 (박사)
North Carolina State University
화학공학과 (Post-Doc.)
광운대학교 화학공학과 조교수

현재까지 실시간으로 살아있는 식물과 상호 작용하기 위해 다양한 센싱 메커니즘을 갖춘 여러 유형의 웨어러블 식물 센서들이 개발되었다. 본 특집에서는 각 센서 모달리티에 대해 다른 감지 메커니즘, 설계, 구성 재료, 제조 방법을 자세히 논의하고 이러한 웨어러블 장치를 사용한 대표적인 응용 사례를 제시한다. 또한 이러한 혁신적인 웨어러블 식물 센서에 대해 소개하고, 실시간으로 식물 건강을 모니터링, 추적 및 예측하여 스트레스 상황에서 식물 성장을 최적화하고 농업 생산성을 향상시키는 데 중요한 역할을 하는 연구들의 중요성을 소개하고자 한다.

2. 본론

광합성, 증산작용 및 호흡은 식물의 건강을 유지하고 식물의 성장을 위해 진행되는 민감하고 복잡한 과정이다. 식물이 자라는 동안 식물은 생리학적 상태와 식물 주위의 미세기후를 조절해야만 하며, 다양한 스트레스 조건에서 많은 종류의 가스를 공기 중으로 방출하여 주변 환경과 소통해야 한다. 식물이 건강한 상태를 유지하기 위해서는 식물에 영향을 미치는 요인들과 식물의 성장 결과를 실시간으로 모니터링하는 것이 필수적이다. 웨어러블 식물 건강 모니터링 센서는 원격 또는 이미지 센싱 기법을 사용하는 기존의 식물 건강 모니터링 센서를 대체할 수 있는 잠재력을 가지고 있기 때문에 웨어러블 식물 센서의 제작을 위해 많은 연구들이 진행되고 있다(그림 1).

2.1 식물 성장 센서

식물은 세포 성장과 세포 분열이 반복되며 성장한다.¹² 세포 성장은 세포 크기와 기능의 확장이며, 세포 분열은 세포의 수를 증가시키는 과정이다. 식물의 다양한 부위의 크기와 형태는 생애 동안 크게 변한다. 식물의 성장은 식물의 크기 변화와 같은 기계적 변형으로 특정 지을 수 있으며, 이를 측정하기 위해 여러 변환 메커니즘(예: 압저항, 정전용량,

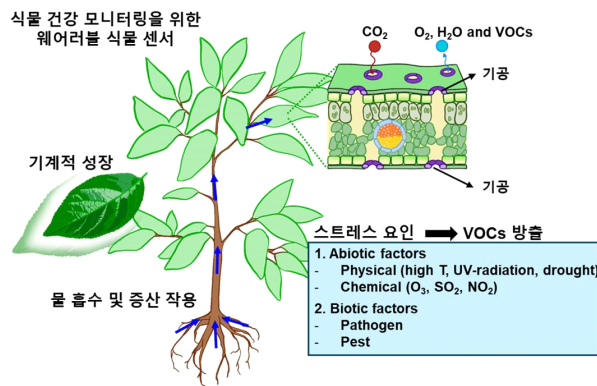


그림 1. 웨어러블 식물 센서의 원리 및 측정 요소.¹¹

압전기)을 기반으로 많은 센서가 개발되었다. 여기서 게이지 팩터(gauge factor, GF)는 민감도를 나타내며, 식물 성장 센서의 응용에 영향을 미치는 중요한 매개 변수이다.

첫 번째로 보고된 식물 성장 모니터링 센서는 과일의 성장을 측정하는 센서이다. 키토산 기반의 graphite ink로 제작되었으며, 전도성 graphite ink를 오이 표면과 같은 대상 식물의 표면에 직접 인쇄하여 센서를 개발한다. 이 센서는 과일의 성장으로 표면이 늘어났을 때 인장변형을 감지하여 식물의 성장을 측정하는 메커니즘이다. 과일이 성장하여 표면이 늘어나게 되면 표면에 부착된 전도성 graphite ink에 인장 변형이 가해지게 되고, graphite flakes 사이의 percolation 네트워크가 변화하여 저항이 달라지게 된다. 이 센서는 64의 민감도(GF)를 가지며 높은 신축성(60%)을 가진다. 이와 유사한 측정 메커니즘을 가지며 polydimethylsiloxane(PDMS)와 티타늄/금 필름을 활용한 새로운 센서도 개발되었다.¹³ 이 센서를 활용해 식물의 성장을 측정한 결과 3.9의 민감도를 가지며, 22% 인장 변형까지 안정성과 선형성을 유지했다.

다른 유형의 성장 센서로는 신축성이 있는 라텍스 기반에 graphite와 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)를 순차적으로 증착하여 개발된 센서가 보고되었다. 이 센서는 150% 변형 시 최대 352의 GF를 가진다. 이 센서를 이용해 가지와 애호박의 성장을 측정한 결과 식물이 빠르게 성장한 후 몇 초 동안 쉬는 리듬 패턴을 확인할 수 있었으며, 식물 성장의 역동적인 과정을 특성화하는데 유망한 가능성을 제시했다. 빠르게 성장하는 식물을 모니터링하기 위해 개발된 압저항 방식의 갈륨 기반 액체 합금 변형 센서(liquid-alloy morphing electronics, LAME)의 개발도 보고되었다.¹⁴ LAME이 가지는 액체 합금 회로의 우수한 변형성과 순응성을 바탕으로 식물의 생리학적 신호를 감지하고, 잎의 수분 함량과 길이를 모니터링하였다.

이전에 연구 개발된 식물 성장 모니터링 센서는 대부분 기계적 확장 및 변형에 중점을 두었다. 더 가치 있는 응용을 위해서는 가뭄, 고온/저온, 병원체 감염 등의 다양한 성장 조건에서 이 기계적 변형을 식물 건강 상태와 연관시키는 연구가 필요하다.

2.2 식물 생리학 및 미세기후 센서

식물 생리학은 광합성, 증산작용, 호흡 등 식물의 기능과 주변 환경 간의 상호작용을 연구하는 학문이다.¹⁵ 웨어러블 식물 센서는 식물의 기능 변화 포착에 유용할 수 있다. 식물에게 습도, 온도, 빛과 같은 미세기후는 식물 건강 유지에 중요한 역할을 하며, 특정 식물은 미세기후 요소의 불균형 상태에 민감하게 반응한다.¹⁶ 지역 환경 조건을 모니터링하고 조절하려는 노력은 식물 생산성 증대에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 최근 여러 연구 그룹에서 광학, 정전용량, 압저항 메커니즘을 포함한 다양한 작동 메커니즘을 가진 식물 미세기후 센서를

개발하였다.¹⁷⁻¹⁹

Ursu 교수 연구팀은 광학적 특성을 감지하는 빛 확산 섬유(light-diffusing fiber, LDF)와 청색 형광 섬유(blue fluorescent fiber, BFF)를 통합하여 엽록소 모니터링을 위한 웨어러블 광학 식물 센서를 개발하였다.¹⁷ 엽록소 형광의 스펙트럼은 빛 확산 섬유(LDF) 근처에 장착된 섬유의 코어에 결합되며, LDF에 의해 측면으로 방출된 복사는 BFF의 출력 스펙트럼의 강도 보정을 위해 사용되었다. 결과로 얻어진 스펙트럼은 엽록소 방출에 대한 두 개의 특정 피크를 가지고 있었으며, 이 정보는 광합성 과정에서 비롯된 식물의 생리학적 상태의 변화를 나타낸다. Luthe 교수 연구팀은 식물의 수분 상태를 추적하기 위해 잎의 두께와 정전 용량을 측정하는 센서를 보고하였다.¹⁸ 두 전극 간의 정전용량은 잎 속의 수분 함량에 따라 달랐으며, 물 부족이 식물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 잎의 두께와 잎 내부의 정전용량의 변화를 모니터링하였다. Kim 교수 연구팀은 담배 식물의 수분 함량을 측정하기 위하여 교차된 티타늄/금 전극이 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 필름에 패턴화한 정전용량 센서를 개발했다.¹⁹ 식물은 주위의 가뭄 스트레스에 따라 기공을 조절하여 항상성을 유지하는데, 이 반응을 센서를 이용해 정전용량 변화로 측정할 수 있다. 이 습도 센서는 상대 습도 90%까지 높은 가역성과 좋은 기계적 안정성을 보여주었다.

Ping 교수 연구팀은 최근 graphene oxide(GO)를 이용해 식물 잎의 습도를 감지할 수 있음을 보였다. Laser direct writing 방식을 사용해 GO 전극과 polyimide(PI)와 PET 기판을 기반으로 하는 센서를 제작했으며, 이 센서는 높은 민감도(3215.25 pF/% RH)와 안정성, 낮은 히스테리시스를 보였다.²⁰ 이와 더불어 이 센서는 식물에 기계적 및 생물학적 손상을 주지 않으며 기공에서 증산작용을 실시간으로 장기간 모니터링 할 수 있음을 보였다.

2.3 웨어러블 VOC 및 화학 센서

식물은 대기 오염 물질과 같은 화학적 스트레스에 취약하며, 노출될 시 VOC와 과산화수소(H_2O_2)를 방출한다.⁹ 이를 위해 VOC 배출량 또는 유독 화학물질을 비침습적으로 모니터링하는

웨어러블 센서가 개발되었다.^{21,22}

Ren 교수 연구팀은 은나노입자(AgNPs)와 CNT, 환원그래핀 옥사이드(reduced graphene oxide, rGO)를 사용한 웨어러블 이산화질소(NO_2) 센서를 보고했다.²¹ 여러 타겟 물질에 스프레이 코팅된 이 센서는 silver nanoparticles(AgNPs)로 장식된 rGO가 NO_2 의 변화를 확인하는 감지층으로 작용한다. NO_2 기체가 센서 표면에 접근하면 탄소의 도핑 상태를 바꾸며 센서의 저항이 증가한다. 이 센서는 높은 민감도(0.17 ppm), 빠른 응답/복원 속도, 기계적 내구성(3,000 cycle)을 가져 센서 성능에서의 우수함을 보였다.

스트레스 요인에 대한 식물의 반응은 화학저항 이외에도 미역학, 광학 등을 통해 측정할 수 있다. Rinaldi 교수 연구팀은 이중물질 마이크로 캔틸레버와 수동 스위치 기반 판독 메커니즘을 통합한 마이크로 기계식 스위치 기반 화학 검출기를 보고했다.²² 목표 VOC에 노출될 시 활성 폴리머 층의 화학적 흡수로 인해 poly(methyl methacrylate)/gold bimaterial cantilever가 아래쪽 금 전극으로 구부러진다. 이 때 상단 전극과 하단 전극의 접촉으로 전기 전도도가 변화한다. 이 연구에서는 toluene, hexanol 및 ethanol의 검출을 입증할 수 있었다. 세번째 메커니즘을 활용한 상처 유발에 의한 H_2O_2 의 실시간 감지를 측정하기 위해서는 광학 단일벽 탄소나노튜브(SWNT) 기반 나노 센서가 보고되었다.²⁴ Ss(GT) oligonucleotides (G-SWNTs)로 싸여있는 SWNT의 형광 강도는 표면에 존재하는 H_2O_2 의 목표 물질과의 흡착으로 낮아지고, 이가 광학 센서에 감지된다.

3. 결론

지금까지 우리는 물리적 성장, 생리/미세기후, 화학적 반응 등 다양한 웨어러블 식물 센서의 기능적 메커니즘을 기반으로 이 센서들의 발전을 소개하였다. 웨어러블 센서를 사용한다면 식물의 성장 요인을 최적화할 수 있으며, 질병이나 이상 상태를 초기에 감지할 수 있다(그림 2). 또한 식물에서 수집된 재배 정보는 인터넷을 통해 실시간 전송 및 공유되어 지속적인 모니터링을 가능케 했으며, 이는 지역 사회에 차세대 식물

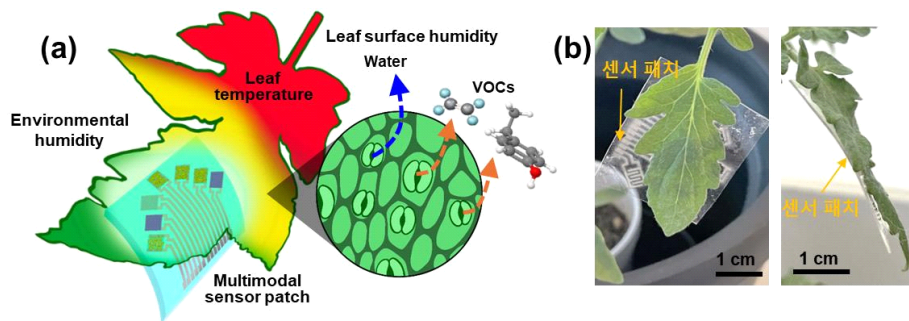


그림 2. 다기능 웨어러블 식물 센서의 (a) 구조 및 (b) 실제 응용.²³

제배를 위한 중요한 데이터를 제공할 수 있다. 이에 농업, 식물과학, 공학 등의 학제간 접근을 기반으로 연구가 진행되어 기술의 발전을 이룩한다면 전세계적으로 증가하는 식량 수요를 충족할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. K. Pawlak and M. Kołodziejczak, *Sustainability*, **12**, 5488 (2020).
2. M. C. Hunter, R. G. Smith, M. E. Schipanski, L. W. Atwood, and D. A. Mortensen, *BioScience*, **67**, 386 (2017).
3. D. Tilman, C. Balzer, J. Hill, and B. L. Befort, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **108**, 20260 (2011).
4. E. C. Oerke, *J. Agric. Sci.*, **144**, 31 (2006).
5. N. Suzuki, R. M. Rivero, V. Shulaev, E. Blumwald, and R. Mittler, *New Phytol.*, **203**, 32 (2014).
6. T. T. S. Lew, V. B. Koman, P. Gordiichuk, M. Park, and M. S. Strano, *Adv. Mater. Technol.*, **5**, 1900657 (2019).
7. H. Yin, Y. Cao, B. Marelli, X. Zeng, A. J. Marson, and C. Cao, *Adv. Mater.*, **33**, 2007764 (2021).
8. P. Wang, E. Lombi, F. J. Zhao, and P. M. Kopittke, *Trends Plant Sci.*, **21**, 699 (2016).
9. F. Brilli, F. Loreto, and I. Baccelli, *Front. Plant Sci.*, **10**, 264 (2019).
10. M. Haworth, C. Elliott-Kingston, and J. C. McElwain, *J. Exp. Bot.*, **62**, 2419 (2011).
11. G. Lee, Q. Wei, and Y. Zhu, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2106475 (2021).
12. H. Wang, Y. Zhou, S. Gilmer, S. Whitwill, and L. C. Fowke, *Plant J.*, **24**, 613 (2000).
13. 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).
14. J. Jiang, S. Zhang, B. Wang, H. Ding, and Z. Wu, *Small*, **16**, 2003833 (2020).
15. R. W. Brooker, A. E. Bennett, W. F. Cong, T. J. Daniell, T. S. George, P. D. Hallett, C. Hawes, P. P. M. Iannetta, H. G. Jones, A. J. Karley, L. Li, B. M. McKenzie, R. J. Pakeman, E. Peterson, C. Schob, J. Shen, G. Squire, C. A. Watson, C. Zhang, F. Zhang, J. Zhang, and P. J. White, *New Phytol.*, **206**, 107 (2015).
16. S. Chakraborty, and A. C. Newton, *Plant Pathol.*, **60**, 2 (2011).
17. R. M. Galatus, R. Papara, L. Buzura, A. Roman, and T. Ursu, *Proc. SPIE*, **11361**, 113610Z (2020).
18. A. Afzal, S. W. Duiker, J. E. Watson, and D. Luthe, *Trans. ASABE*, **60**, 1063 (2017).
19. H. Im, S. Lee, M. Naqi, C. Lee, and S. Kim, *Electronics*, **7**, 114 (2018).
20. L. Lan, X. Le, H. Dong, J. Xie, Y. Ying, and J. Ping, *Biosens. Bioelectron.*, **165**, 112360 (2020).
21. W. Li, C. Teng, Y. Sun, L. Cai, J. L. Xu, M. Sun, X. Li, X. Yang, L. Xiang, D. Xie, and T. Ren, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 34485 (2018).
22. S. D. Calisgan, V. Rajaram, S. Kang, A. Risso, Z. Qian, and M. Rinaldi, *J. Microelectromech. Syst.*, **29**, 755 (2020).
23. G. Lee, O. Hossain, S. Jamalzadegan, Y. Liu, H. Wang, A. C. Saville, T. Shymanovich, R. Paul, D. Rotenberg, A. E. Whitfield, J. B. Ristaino, Y. Zhu, and Q. Wei, *Sci. Adv.*, **9**, 2232 (2023).
24. T. T. S. Lew, V. B. Koman, K. S. Silmore, J. S. Seo, P. Gordiichuk, S. Y. Kwak, M. Park, M. C. Y. Ang, D. T. Khong, M. A. Lee, M. B. C. Park, N. H. Chua, and M. S. Strano, *Nat. Plants*, **6**, 404 (2020).