



즉시 / 2022. 12. 21.(수)

연구책임자 정대홍 교수 (02-880-8012)/ 교신저자
 연구책임자 곽선영 교수 (02-880-4622)/ 교신저자
 연구진 손원기 연구원(02-880-9258) / 제1저자

식물 스트레스 실시간 감지하는 나노센서 개발

- 서울대학교 농업생명과학대학 바이오소재공학 전공 곽선영 교수와 사범대학 화학교육과 정대홍 교수 융합연구팀은 나노입자의 플라즈몬 특성을 활용하여 식물이 느끼는 다양한 스트레스 신호를 실시간으로 읽는 기술을 세계 최초로 개발하였다. 연구진이 개발한 기술은 12월 15일 국제저명 학술지 Nature Nanotechnology에 게재되어 온라인으로 확인할 수 있다.(<https://doi.org/10.1038/s41565-022-01274-2>)
- 세계 인구 증가로 대농장 식량 대량 생산 요구가 커지고 이상기후에 의한 질병 저항성이 약화되고 스마트팜 등 양질의 식량 생산을 위한 사회적 관심이 커지는 상황 속에서 식물의 질병과 관련된 스트레스 반응을 실시간으로 감지할 수 있는 기술은 식물 질병 조기진단, 방제 비용 절감 및 작물 생산량 증진 등에 획기적인 기여를 할 것이다.
- 플라즈몬 나노구조체에서 일어나는 표면증강라만산란(surface-enhanced Raman scattering, SERS)은 분자 하나를 감지할 수 있을 정도로 측정 감도가 매우 높고 “분자 지문(molecular fingerprint)”에 해당하는 스펙트럼 신호를 내기 때문에 꿈의 측정 기술로 생체 물질 검출을 위해 연구되어왔다. 이러한 가능성에도

불구하고, 다양한 물질이 혼재하고 식물 엽록소에 의한 강한 형광 신호가 나오는 식물 체내에서 실시간으로 표적 물질을 측정에는 성공하지 못했었다.

- 본 연구팀은 식물체 내 적용을 위해 자가 형광의 간섭을 피할 수 있는 근적외선 영역에서 광학적으로 활성화되는 플라즈몬 나노센서를 개발했으며, 식물나노생체공학 (plant nanobionics)이라는 최신 기술을 이용하여 나노센서를 비파괴적 방법으로 식물체 내 원하는 위치에 선택적으로 도입했다.
- 개발한 나노센서는 특정 표적 물질 하나만을 측정하는 것이 아니라 다수의 표적 물질을 표지기술 없이 다중검출이 가능하다. 또 검출 대상 물질과 가역적으로 상호작용할 수 있도록 설계했기 때문에, 식물 스트레스 신호 물질의 농도 변화나 이동 등의 동역학적 변화를 실시간으로 모니터링할 수 있다. 보고된 연구에서는 개발한 나노센서를 이용하여, 상처 또는 저온과 같은 비생물적 스트레스 및 곰팡이 감염과 같은 생물학적 스트레스 환경 하에서 식물이 생성하는 대표적인 스트레스 관련 내인성 분자를 실시간으로 감지함을 예시로 보여주었다.
- 이 기술은, 민감도가 높다고 알려진 식물병 진단법인 PCR보다 월등히 빠르게 진균병 감염여부 판단이 가능하며 PCR로는 확인할 수 없는 실시간 변화를 모니터링할 수 있다.
- 연구팀은 주요 작물인 밀, 보리, 물냉이를 대상으로 적용을 마쳤으며, 이 나노센서는 식물 종에 관계없이 적용이 가능하므로, 본 연구진은 현재 다양한 주요 경제작물로의 확장 적용을 시도하고 있다.

□ 농림식품기술기획평가원의 지원을 받아 해당 연구를 수행중인 연구책임자 정대홍 교수는 “식물은 말을 하지 못하기 때문에 잎이 병들거나 하는 형태가 나타나기 전에 질병을 확인하기 어려워 농장이나 식물 자원의 피해가 매우 크다. 이 기술은 식물이 질병에 노출되고 스트레스를 받기 시작할 때 바로 인지할 수 있는 그야말로 식물과 대화하는 기술이라고 말할 수 있다”고 해당 기술을 평가했다.

□ 서울대학교 ‘창의선도 신진연구자’로 발탁되었던 농업생명과학대학 바이오소재공학 전공 곽선영 교수는 “해당 연구는 식물 스트레스의 실시간 모니터링이 가능한 플라즈몬 나노센서 플랫폼을 사용하여 적시에 질병 관리를 할 수 있는 가능성을 보여주었으며, 이는 작물 생산성 향상과 더불어 방제제 남용을 줄임으로써 지속가능한 농업에 기여할 수 있을 것”이라고 전망했다.

□ 주도적으로 연구를 수행한 박사과정 손원기 연구원은 “최근 기후문제나 전쟁으로 식량 문제가 대두되고 있는데, 이렇게 제 연구결과로 미래 식량기술에 이바지할 수 있어서 기뻐다.”라고 소회를 밝혔다.

[붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명

연구 결과

Won Ki Son, Yun Sik Choi, Young Woo Han, Dong Wook Shin, Kyunghun Min,
Jiyoung Shin, Min Jeong Lee, Hokyoung Son, Dae Hong Jeong*, Seon-Yeong
Kwak*

(Nature Nanotechnology, *in press*)

기후변화로 인한 이상기온, 병해충 피해 증가는 작물 생산량 감소와 품질 저하를 야기시킨다. 식물의 경우, 생장에 불리한 상황으로부터 물리적인 회피가 불가능 대신, 외부 환경 스트레스에 대응하기 위한 신호 물질을 생성하는 기작을 갖추고 있다. 이러한, 식물 스트레스 반응을 실시간으로 감지할 수 있는 기술이 있다면, 생육에 최적 조건을 제공함은 물론 질병 감염 조기진단이 가능함으로써, 방제 비용 절감 및 작물 생산량 증진에 큰 도움이 될 것이다.

본 연구는 살아있는 식물에서 여러 스트레스 관련 내인성 분자를 실시간으로 검출할 수 있는 비파괴적 플라즈몬 나노센서 개발 및 적용에 관한 것이다. 플라즈몬 나노구조를 기반으로 하는 표면증강라만산란 (surface-enhanced Raman scattering, SERS)은 물 신호의 간섭이 거의 없고, 각 분자의 화학적 구조 정보를 ‘지문 (fingerprinting)’ 처럼 생성할 수 있기 때문에, 생체 내 시스템에서 미량의 생체 분자를 검출하기 위한 분석 도구로 사용되어 왔다. 이러한 장점에도 불구하고, SERS 기반 나노센서를 이용하여, 살아있는 식물체 내에서 식물 신호 분자를 검출해 내는 연구는 보고된 바가 없는데, 이는 식물체 내 나노센서 도입기술의 부재와 엽록소로 인한 강한 자가 형광의 간섭을 피하여 높은 감도로 라만 신호를 얻기 힘들었다는 점이 크게 작용했다.

본 연구진은 식물나노생체공학 (plant nanobionics)이라는 최신 기술을 이용하여 나노센서를 비파괴적 방법으로 식물체 내 원하는 위치에 선택적으로 도입할 수 있었으며, 플라즈몬 나노센서의 식물체 내 적용을 위해 자가 형광의 간섭을 피할 수 있는 근적외선 영역에서 광학적으로 활성화되도록 제작했다. 또한, 다양한 신호 분자들을 동시에 검출할 수 있도록 나노센서

표면을 기능화함에 따라, 두 종류 분자들의 신호 강도에 따른 정량적 정보를 해석할 수 있는 결합 모델을 구축했다. 두 개 이상의 다른 분자를 동시에 검출함으로써, 한 종류의 분자 검출로부터 얻는 정보의 한계에서 벗어나 서로 다른 신호 분자들 간의 상호작용을 가시화할 수 있었으며, 이를 통해 식물이 겪는 스트레스를 보다 더 정확하게 분석할 수 있게 되었다. 식물 내 신호 분자들을 모니터링하기 위해, 나노센서는 세포 간 공간 (intercellular space)에 위치하도록 설계했으며, 나노센서의 표면을 검출 대상 물질과 가역적으로 상호작용할 수 있도록 설계했기 때문에, 식물 스트레스 신호 물질의 농도 변화나 이동 등의 동역학적 변화를 실시간으로 모니터링 할 수 있었다.

마침내, 본 연구진은 개발한 나노센서를 이용하여, 상처 또는 저온과 같은 비생물적 스트레스 및 곰팡이 감염과 같은 생물학적 스트레스 환경 하에서 식물이 생성하는 대표적인 스트레스 관련 내인성 분자를 실시간으로 감지하는 데 성공했다. 특히, 민감도가 높다고 알려진 식물병 진단법인 PCR보다 더 빠르고 정확하게 진균병 감염여부 판단이 가능함을 확인했다. 주요 작물인 밀, 보리, 물냉이를 대상으로 수행한 결과, 나노센서로 검출한 식물 스트레스 신호물질로는 살리실산 (salicylic acid), 세포외 아데노신 (extracellular adenosine triphosphate), 파이토알렉신 (phytoalexin) 및 글루타티온 (glutathione) 이었다. 나노센서는 식물 종에 관계없이 적용이 가능하므로, 본 연구진은 현재 다양한 주요 경제작물로의 확장 적용을 시도하고 있다.

해당 연구는 식물 스트레스의 실시간 모니터링이 가능한 플라즈몬 나노센서 플랫폼을 사용하여 적시에 질병 관리를 할 수 있는 가능성을 보여주었으며, 이는 작물 생산성 향상과 더불어 방제제 남용을 줄임으로써 지속 가능한 농업에 기여할 수 있을 것이다.

용 어 설 명

1. 나노 (nano)

○ 10^{-9} 에 해당하는 SI 접두어. 기호는 nm (나노미터: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

2. 나노센서 (Nano Sensor)

○ 특정 물질을 감지하여 이의 종류와 양을 나타내는 신호를 내는 나노 크기의 물질이다.

3. 표면증강라만산란 (Surface-Enhanced Raman Scattering)

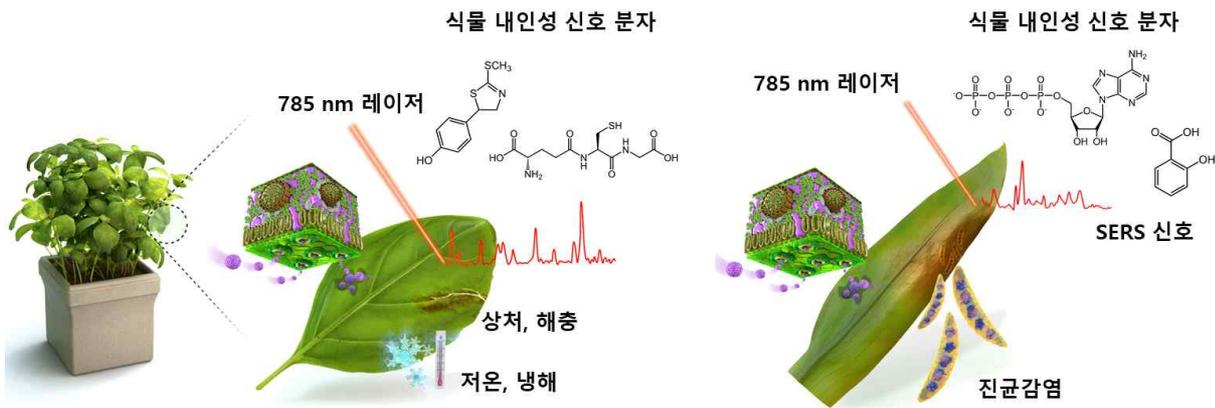
○ 은, 금 등 귀금속으로 이루어진 나노입자 표면에 분자가 존재할 때 분자의 진동 상태를 나타내는 스펙트럼의 세기가 매우 증강되어 분자 한 개까지도 측정이 가능하게 되는 광학현상이다. 신호 증강을 극대화하기 위해서 매우 다양한 구조체가 과학자들에 의해서 연구되고 있으며, 신호의 증강 비율(EF, enhancement factor)이 $10^6 \sim 10^{11}$ 배에 이르는 것으로 보고되고 있다.

4. 식물나노생체공학

○ 나노입자 또는 나노구조를 식물에 삽입하여, 전통적인 식물 엔지니어링 기술로는 달성할 수 없었던 기능을 식물에 제공하는 과학 기술 분야. 2014년에 MIT 화학공학부 마이클 스트라노 교수 연구실에서 이 용어를 처음 사용한 논문을 출판했다.

그림 설명

식물 스트레스 실시간 모니터링이 가능한 나노센서



식물은 상처 및 저온과 같은 비생물학적 스트레스와 진균감염을 비롯한 생물학적 스트레스 환경 하에서 다양한 신호 분자를 생성한다. 식물 앞에 비파괴적 방법으로 도입된 나노센서는 식물 내인성 신호 분자들의 생성과 이동을 실시간으로 다중 검출할 수 있다.