



# Micro biome Issue Brief

## CONTENTS

### 파이토티론(Phytotron) 연구 및 기술개발 동향

- 1 파이토티론의 개념 및 발전과정
- 2 국내 파이토티론 구축 및 연구동향
- 3 파이토티론 관련 기술 및 연구개발 동향

## 1 파이토포톤(phytotron)의 개념 및 발전과정

### □ 파이토포톤(phytotron)의 개념 및 특징

○ **(파이토포톤의 개념)** Phytotron은 식물 생리학 및 관련 분야의 연구에 사용되는 통제된 환경 시설. 이를 통해 과학자들은 빛, 온도, 습도, 이산화탄소 수준 및 식물 성장에 영향을 미치는 기타 요인과 같은 환경 조건을 시뮬레이션하고 조작할 수 있음. 파이토포톤의 목표는 이러한 변수에 대한 정확하고 재현 가능한 제어를 제공하여 식물의 생리, 성장, 발달 및 다른 유기체와의 상호 작용에 어떤 영향을 미치는지 연구하는 것임.

- 에코트론이라는 용어로도 사용되고 있는데, 에코트론은 자연 또는 인공의 생태계 환경을 동시에 조절하고 이러한 생태계에 존재하는 생명체가 생성하는 물질과 에너지 흐름의 과정을 측정하는 실험 및 생태학적인 계측 장치를 지칭. 파이토포톤은 단일 기후 제어 실험실 또는 이로 이뤄진 인프라 시설을 지칭하며 대부분 식물의 성장을 관찰하는 용도로 활용되고 있음

### ○ 파이토포톤의 주요 특징

- **(통제된 환경)** 바이오트론은 연구자들에게 환경 매개변수를 조정할 수 있는 능력을 제공. 이를 통해 동일하거나 다양한 조건에서 실험을 수행할 수 있으므로 연구를 위해 특정 변수를 분리할 수 있는 능력이 보장됨.

- **(기후 시뮬레이션)** 연구자들은 열대에서 북극까지 다양한 자연 기후를 시뮬레이션할 수 있으므로 기후 변화, 가뭄이나 열과 같은 스트레스 요인, 기타 극한 조건에 대한 식물 적응을 연구할 수 있음.

- **(다단계 실험)** 파이토포톤을 사용하면 빛, 온도 및 CO<sub>2</sub>의 결합 효과와 같은 여러 변수를 포함하는 연구를 수행할 수 있음. 이를 통해 연구자들은 다양한 환경 요인 간의 상호 작용과 식물 발달에 미치는 영향을 관찰할 수 있음.

- **(재현성)** 파이토포톤 연구의 가장 중요한 측면 중 하나는 실험을 위해 동일한 환경 조건을 유지하여 결과를 재현하는 능력이므로 일관성이 중요한 과학 연구에 유용

### ○ 파이토포톤의 용도 및 응용분야

- **(식물 생리학 및 성장 연구)** 파이토포톤은 광합성, 호흡, 증산, 영양분 흡수와 같은 기본적인 식물 기능을 연구하는 데 사용됩니다.

- **(농업 연구)** 가뭄, 더위, 추위와 같은 환경적 스트레스 요인에 더 잘 견디는 작물

품종을 육종하고 개발하는 데 중요한 역할을 함.

- (기후 변화 연구) 식물이 변화하는 환경 조건, 특히 지구 온난화, CO2 수준 및 기타 기후 관련 요인의 맥락에서 식물이 어떻게 반응하는지 이해하는 데 도움이 됨.
- (해충 또는 미생물과의 상호 작용) 파이토틨론은 또한 통제된 조건에서 식물과 해충, 질병 또는 공생 미생물과의 상호 작용과 관련된 실험을 허용
- (생태학 및 진화 연구) 연구자들은 과거 또는 미래의 기후 조건을 시뮬레이션하여 시간 경과에 따른 식물 진화와 생태적 적응을 연구할 수 있음.

#### □ 파이토틨론(phytotron)의 발전과정

- (1949년: 최초의 파이토틨론 설치) 최초의 진정한 파이토틨론은 1949에 네덜란드 태생의 식물 생리학자인 Frits Went 박사의 지도 하에 캘리포니아 공과대학 (Caltech)에서 설립
  - Earhart 식물 연구소로 알려져 있으며, Went는 "phyto"(식물)와 "tron"(기구 또는 장치를 암시하는 접미사)을 결합하여 "phytotron"이라고 불렀음. 이 시설은 온도, 습도, 빛과 같은 환경 조건을 전혀 없는 정밀도로 제어하도록 설계되었음
  - Went의 원래 의도는 과학자들이 환경 요인이 식물 성장 및 발달에 어떻게 체계적인 방식으로 영향을 미치는지 연구할 수 있는 환경을 만드는 것이었음.
  - ※ 에어하트 식물 연구소(Earhart Plant Research Laboratory)는 환경적으로 통제되는 온실이라고 불렸지만, 한 박사 후 연구원에 의해 파이토틨론(phytotron)으로 명명. 파이토스는 그리스어로 식물을 뜻하는 단어에서 유래한 것이고, 트론은 사이클로트론(cyclotron)에서 유래한 것으로, 크고 복잡한 기계
- (1950년대~1960년대: 파이토틨론 시설 확장) Caltech Phytotron의 성공에 따라 다른 여러 기관에서도 유사한 시설을 건설
  - Duke University Phytotron은 1968에 설립되었으며 과학자들이 다양한 환경 조건을 시뮬레이션할 수 있는 특수 챔버를 갖춘 식물 생물학 분야의 저명한 연구 센터가 되었음.
  - 호주 국립 대학교(ANU) Phytotron은 1960년대 호주 캔버라에서 설립. 호주의 독특한 기후 조건과 생태계에 초점을 맞춰 식물 생리학 및 생태학 연구의 선도적인 중심지가 되었음
  - 캐나다, 영국, 프랑스, 일본 등의 국가에서는 농업, 생태, 기후변화 연구를 위한 이러한 통제된 환경의 가치를 과학계가 인식하면서 기타 식물트론 시설이 설립되었음.

- (1970년대~1980년대: 기후 및 농업 연구에 중점) 이후 수십 년 동안 파이토틨론 연구는 농업 문제를 해결하는 데 중요한 역할을 함.
  - 과학자들은 식물 생산에 CO<sub>2</sub> 농도, 가뭄, 온도 스트레스 및 영양 결핍이 미치는 영향을 연구하기 위해 파이토틨론을 사용
  - 파이토틨론을 통해 연구자들은 시뮬레이션된 환경 스트레스 조건에서 작물 품종을 테스트할 수 있었으며, 특히 식량 안보에 대한 우려가 커지면서 더욱 탄력 있는 식물 종의 개발로 이어졌음.
  - 기후 변화와 CO<sub>2</sub> 수준 상승에 대한 식물 반응에 대한 연구가 주목을 받았고, 식물전자는 미래 환경 시나리오를 시뮬레이션하는 데 핵심적인 역할을 함.
  
- (1990년대~2000년대: 혁신과 일부 식물트론의 쇠퇴) 20세기 후반에는 자동화 시스템을 갖춘 성장실 및 온실과 같은 통제된 환경 농업의 발전으로 인해 일부 지역에서 대규모의 중앙 집중식 식물트론에 대한 필요성이 대체되기 시작
  - 그러나 Duke University 및 ANU와 같은 일부 식물전자는 계속 사용되었으며 컴퓨터화된 기후 제어 및 자동화와 같은 새로운 기술을 통합하여 현대화
  
- (현재: 식물 및 환경 연구에 지속적으로 사용) 오늘날 많은 기관이 소규모 성장실이나 보다 진보된 기후 시뮬레이션 기술을 사용하는 방향으로 전환했지만, 식물전자는 계속해서 과학 연구에서 중요한 역할을 하고 있음.
  - 최근의 식물트론 연구는 종종 지구 기후 변화에 초점을 맞춰 기온 상승, 강수량 패턴 변화, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 상승과 같은 변화된 조건에 식물이 어떻게 반응하는지 조사
  - 파이토틨론은 유전공학에도 사용되며, 과학자들이 변형된 형질을 가진 식물이 특정 환경 조건에서 어떻게 작동하는지 이해하는 데 도움이 됨.

## 2 국내 파이토포톤(phytotron) 구축 및 연구 동향

### □ 국내의 파이토포톤 구축 현황

#### ○ (한국원자력연구원) 감마파이토포톤 고조도 식물성장상 설비 보유

- 감마파이토포톤 내부에서 식물체를 장기간 키우면서 방사선을 조사하기 위한 인위적인 식물성장 조절 설비
- 조사선원으로부터 일정 거리 별로 조명장치를 설치하고 상하조절이 가능케 설계를 하여 식물체의 위치에 따라 자유롭게 조절이 가능
- 각 조명장치의 on/off 조절이 중앙에서 통제가 가능하며 장치로부터 다량의 열이 발생하기 때문에 식물체의 토양 수분조절에 유의
- 조도는 조명장치 직하 30,000lux이며 제어방식은 종합환경제어방식(온도, 습도, 바람)으로 온도범위 15~35도 변온조건 1일 4회 설정기능 습도범위 50~80% 풍속제어 자연순환형 외기도입/배양실 흡기급기 시스템으로 구성

#### ○ (식품의약품안전처) 옥천, 제주 등에 국가생약자원관리센터를 개설하여 관련 자료 수집 및 보존

- (표준생약) 공정서(KP/KHP) 생약시험법의 적부판정에 사용되는 표준품으로서, 갈근 등 137종의 표준생약 보유(품질검사기관에 유상분양)
- (국가생약자원관리센터, 옥천) 1992년 온대성 생약자원관리를 위해 개설, 2010년 국가생약자원보존관 신축
  - \* 2013년 전시 교육관 및 생약자원의 증장기 보존시설 확장을 위해 3층(1262m<sup>2</sup>)으로 증축, 한약재 표본과 위변조 한약재, 동물 한약재, 광물한약재, CITES 한약재, 혼돈하기 쉬운 한약재 등을 보존관에 전시
  - \* 한약재 관련 공무원, 검사기관, 제약업계 실무자를 대상으로 생약 감별교육 병행
- (국가생약자원관리센터, 제주) 국내 아열대성 생약자원 연구·보존·표준화와 품질 안전관리 체계 강화 목표, 열대성 생약 130종, 해양성 생약 15종, 수생 생약 9종의 확보와 보존, 연구 등 품질 관리체계를 마련하는 구심점 역할, 생약자원을 원료로 하는 관련 업계의 경쟁력 제고를 위한 제품화 지원

#### ○ (한국생명공학연구원) 국가 바이오 인프라 본부를 오창분원에 설치하여 생물 자원 연구를 총괄하고 있으며 전북분원에서 생물자원의 증식·관리·보존기술 등을 개발 및 지원하는 구조

- (천연물 중앙은행) '00년~'20년 한국식물추출물은행을 통한 국내식물, '06년 해외생물소재센터를 통한 해외식물, '21년부터 천연물클러스터 육성사업을 통한 국내외 자생식물 및 유통 생약 추출물·원시료 유상분양
  - (해외생물소재센터) 중국, 코스타리카, 인도네시아, 베트남에 양국 간 생물다양성 연구센터 설립 MoU를 체결하고 거점센터를 설치하여 주변 권역의 해외 생물소재 수집 중
- (국립원예특작과학원) 원예특작산업의 지속적 발전과 경쟁력 향상을 위한 채소·과수·화훼·인삼·약초·버섯류 등 원예특용작물 기술 개발 및 지원
- (한국약용자원표본관) 2010년 Index Herbariorum 등재, 등재 당시 약용식물자원 880종의 석엽표본.
  - (인삼특작부 추출물은행) 국내외 천연자원을 활용하여 조제된 추출물의 보존·관리 및 분양에 관한 업무를 효과적으로 수행하기 위해 추출물은행 운영
  - (원예특작 품질 고급화 및 부가가치 향상 기술 개발) 원예산업 미래가치 창출 및 국제경쟁력 제고, 융복합기술 개발 및 안정생산 기반 구축, 인삼특작 산업의 부가가치 극대화, 기관 운영시스템 고도화
- (한국한의약진흥원) 한방바이오소재은행, 천연물 물질 은행 등을 보유하여 관련 산업 활성화 지원
- (한방바이오소재은행) 한약재 및 생약재의 기능성 향상을 위한 생물 전환 대사체 제공, 한약재 및 생약재로부터 새로운 물질을 확보하여 소재의 고부가 가치화 및 글로벌 신약, 식품 및 화장품 등의 신소재 개발 지원을 통해 관련 산업 활성화
  - (천연물물질은행) 한약재 중 활성성분을 순수 분리 정제하여 대량으로 확보하여 수요자에게 공급, 한방 및 천연물 제품의 품질관리 및 신제품 개발에 지원
- (한국한의학연구원) 한약표준표본관과 한약 및 천연물질뱅크 등을 통해 약재표본 무상 분양, 추출물 보존 등뱅크역할 수행
- (한약표준표본관) 2013년 Index Herbariorum 등재, 한약재·약용식물 감정(형태감별, 유전자감별), 약재표본 무상 분양 서비스 중
  - (한약 및 천연물질 뱅크) 한약제제 및 천연물 신약 개발의 기반이 될 수 있는 한약 및 천연물질 뱅크, 한약의 주요 처방에 사용되는 한약재의 지표 유효 천연물질 350종, 국내외 한약재 표준 추출물 700여 종 보유

□ 국내의 파이토틨론을 이용한 약용작물 관련 연구동향

- (농촌진흥청, 기후위기 약용작물에 기술 적용) 인삼특작부에서 2020년 노지에서 주로 생산되는 일천궁, 참당귀 등 10여 작목에 대해 재배지 고온에 따른 생산량 감소 문제를 해결할 수 있는 ‘스마트 멀칭 필름’을 이용하여 두둑 온도는 20℃, 토양 온도는 9℃를 유지할 수 있는 ‘노지 스마트팜’ 기술개발에 착수
- (충북농업기술원, 성분 극대화 방안 연구) 충북농업기술원은 밀폐형 수직농장 시설에서 온도 및 공급 양액의 전기전도도 등을 조절하는 환경 조절 기술을 이용한 ‘병풀’의 수경재배를 위한 최적 환경 조성 기술 개발했으며, 이를 통해 상처 치료 성분인 ‘아시아티코사이드’의 함량을 증가시키는 방법을 연구 중
- (한국과학기술연구원, 천연물 원료 표준화 및 산업화 연구) 스마트팜 생산 천연물 원료 표준화 및 산업화 연구 中 케일을 외부환경과 차단된 공간인 인공광형 식물공장을 이용해 환경조절을 통해 생육환경을 최적화하여 항암 성분을 증진시켰고 안정적으로 대량 생산할 수 있는 기반 마련

□ 파이토틨론 한의약 분야 적용방안

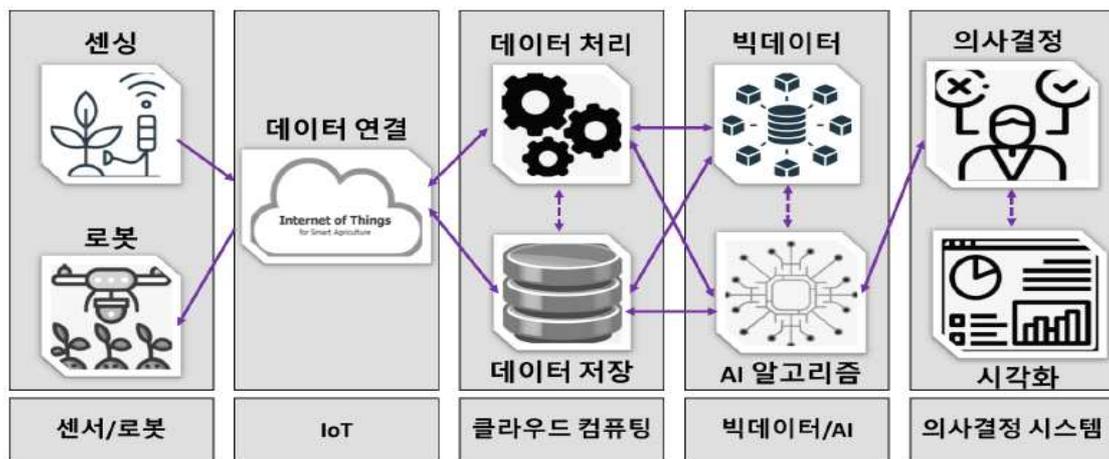
- 온·습도, 광원, 공기 조성 등을 정밀하게 제어해 식물이 적절히 자라도록 하는 파이토틨론 기술을 이용하면, 열대·한대·고산·사막이 원산지인 한약 자원도 국내에서 생산할 수 있음.
  - 아울러 기후 위기로 인해 국내 재배가 어려워지고 있는 작목도 보존할 수 있으며, 적은 양으로도 높은 효과를 내는 고기능성 한약재 생산으로 가격 경쟁력도 확보할 수 있을 것임. 물론 대부분의 약용 작물은 아직 노지에서 재배되고 있으므로, 지속적인 연구가 이뤄져야 함.
- ※ (예시) 한약자원 첨단육종을 위한 최적환경제어 한약 파이토틨론 기술개발 등

### 3 파이토포톤(phytotron) 관련 기술 및 연구개발 동향

□ 파이토포톤(생육시설) 관련 기술 동향

- 4차 산업혁명 도래에 따라 IoT, 클라우드 컴퓨팅, 로봇, AI와 같은 4차 산업 혁명 기반 기술들의 등장으로 생육시설 관련 기술 및 산업도 급속도로 변화하고 있음
  - 전통적으로 밭에 나가 자원의 상태를 확인하고 결정을 내리는 방식에서 모바일 인터넷, IoT, 컴퓨터 비전 및 지능적 의사 결정을 통해 간접하고 지능적인 온라인 관리 접근 방식으로 변화
  - 5G, 클라우드 및 AI를 전문 생육 솔루션에 통합하면 효율성, 자원 사용, 토지 수확량 및 생산을 개선할 수 있음
  - 또한, 센서 기반 기술을 통한 스마트 자원 관리를 통해 효율적이고 효과적으로 자원 활용\* 가능
- \* (스마트 물 관리) 원격 모니터링 및 IoT 센서를 통해 실시간 환경 및 조건에 따라 빠른 물 제공이 가능하여 효율적인 물 관리 및 공급 가능

<그림 II-11> 관련 기술 핵심 구성 요소



출처 : BRIC(2023), 스마트농업 기술 동향

- 센서는 자원을 모니터링하고 자원에서 객관적인 정보를 얻는 범용 장치로서 광전기, 전자기학, 전도성 및 초음파와 같은 기술을 사용하여 토양 질감 및 구조, 영양 수준, 초목, 습도, 수증기, 공기, 온도 등을 추정하는 데 사용됨
  - 원격 감지 데이터는 자원 유형을 구별하고 해충을 분류할 수 있으며 잡초, 토양 및 식물 조건에서 스트레스를 찾고 모니터링 하는데 사용됨

- 자원의 건강은 토양 수분, 영양분 가용성, 빛에 대한 노출, 습도, 강수량, 잎 색깔 등과 같은 많은 요인에 의해 영향을 받으며, 최적의 온도와 빛의 강도를 유지하고 마이크로 관개를 통하여 물과 에너지를 보존하면서 모니터링 가능
- 일반적으로 감지 기술에 사용되는 지표로는 온도, 습도, 토양 패턴, 기류 센서, 위치, CO<sub>2</sub>, 압력, 빛 및 습도가 있으며, 현재 사용 가능한 무선 센서는 자원 상태에 대한 데이터를 수집하고 기타 정보를 제공하는 데 중요한 역할을 수행함

<표 II-4> 자원 모니터링 관련 센서

센서 유형	응용 분야	작동 과정
음향 센서	품종을 분류하는 해충 모니터링 및 탐지, 수확	다른 물질, 즉 토양 입자와 섞일 때 소음 수준의 변화를 측정
기류 센서	정적 위치 또는 이동 모드에서 토양 공기 투과성, 수분 및 구조 측정	다양한 토양 속성을 기반으로 식별
Eddy 공분산 기반 센서	CO <sub>2</sub> , 수증기, 메탄 또는 기타 가스의 교환 정량화, 다양한 생태계에서 표면 대기 및 미량 가스 플럭스 측정	넓은 영역에서 연속 플럭스 측정
전기화학 센서	토양 영양분 수준과 pH 분석	토양, 염분 및 pH의 영양소는 센서를 사용하여 측정
전자기 센서	전기 전도도, 전자기 반응, 잔류 질산염 및 토양의 유기물 기록	전하를 전도하거나 축적하는 토양 입자의 특성 측정
FAAA(Field Programmable Gate Array) 기반 센서	실시간 식물 증산, 관개 및 습도 측정	프로그래밍 가능한 실리콘 칩과 논리 블록은 디지털 회로의 프로그래밍 가능한 상호 연결된 리소스로 함께 둘러싸여 있음
LIDAR (Light Detection and Ranging)	토지 매핑, 토양 유형 결정, 농장 3D 모델링, 침식 모니터링 및 토양 손실, 수확량 예측	광원에서 방출된 빛이 물체와 충돌 후 반사되어 센서로 돌아올 때 걸리는 시간을 이용하여 측정
질량 흐름 센서	콤바인 수확기를 통과하는 곡물 흐름의 양을 기준으로 수확량 모니터링	수분 센서, 데이터 저장 장치 및 내부 소프트웨어와 같은 모듈로 질량 흐름 감지
기계적 센서	토양 경도 또는 기계적 저항	센서는 스트레인 게이지 또는 로드셀에 의해 평가된 힘을 기록
광학 센서	토양 유기물, 토양 수분, 색상, 미네랄, 구성, 점토 함량 등. 형광 기반 광학 센서는 과일 숙성도를 검사하는 데 사용	빛 반사 현상을 사용하여 파동 반사의 변화 측정
광전자 센서	자원에서 잡초를 감지하기 위해 식물 유형 구분	반사 스펙트럼을 기반으로 구별
SWLB(Soft water level-based) 센서	수문학적 거동(수위 및 흐름, 시간 단계 획득)을 특성화하기 위한 유역에서 사용	강수량, 하천 흐름 및 기타 물 존재 옵션 측정
텔레매틱스 센서	위치, 이동 경로, 기계 및 농장 운영 활동 평가	장소 간 통신 (특히 접근할 수 없는 지점)

센서 유형	응용 분야	작동 과정
초음파 센서	탱크 모니터링, 스프레이 거리 측정, 균일한 스프레이 범위, 물체 감지, 자원 캐노피 모니터링 및 잡초 감지	트랜스듀서를 사용하여 물체의 근접성에 대한 정보를 전달하는 초음파 펄스 송수신
원격 감지	자원 평가, 수확량 모델링, 수확일 예측, 토지피복 및 황폐화 매핑, 예측, 식물 및 해충 식별 등	위성 기반 센서 시스템은 고정 및 모바일 플랫폼에서 환경 데이터를 수집, 처리 및 배포

출처 : BRIC(2023), 스마트농업 기술 동향

○ (데이터 종류 및 분류) 데이터는 식물 성장을 위한 최적 조건, 수확량 예측, 해충 및 질병 탐지와 같은 정보를 제공하며 최신 데이터 수집 장치의 가용성으로 인해 과도한 양의 데이터를 처리하기 위해 적절한 데이터 분류가 필요

- 데이터는 외부 환경, 내부 기후, 배지(growth media), 병해충, 자원/동물 측정, 기타 데이터를 포함하여 6가지 범주로 분류할 수 있음

<표 II-5> 센서 데이터의 종류에 따른 분류

센서 유형	응용 분야	작동 과정
외부 환경	거시 기후	기온, 상대습도, 일사량, 운량, 풍속, 풍향, 강우량
	기타	위성 이미지, 수확 후 관련 데이터, 시장 관련 데이터
미시 기후	-	실내 온도, 습도, CO2 농도, 조도
배지 (growth media)	토양	토양 단면, 수분, 염분, water log
	수경	pH, 영양분
병해충	잡초	잡초 종류
	해충	해충 종류, 생활 단계(life stage)
	병	구체적 형태, 확산 정도
자원/동물 측정	형태학	키, 무게, 군락 분포
	계절학	생활 주기
	생리학	휴면, 반추, 먹이, 걸음걸이
기타	농장 관리	비용, 급수
	원격 감지	GPS 데이터
	음료	발효, 맛
	유전자	유전체 모델, 염기서열
	이미지	빛깔, 감촉

출처 : BRIC(2023), 스마트농업 기술 동향

○ (IoT) 센서 및 기타 장치를 사용하여 관련된 모든 요소와 작업을 데이터로 전환하는 것을 의미

- IoT는 2050년까지 생산성을 70%까지 높일 수 있는 잠재력이 있는 것으로 추정되며, 수확량이 1.75% 증가하고 에너지 비용이 헥타르(ha) 당 17~32달러 감소하는 반면 물 사용은 8% 감소하는 것으로 보고(Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F, 2020)

□ **파이토포톤 관련 연구 및 기술개발 동향**

- **(기후변화와 환경스트레스 연구)** 파이토포톤은 기후 변화 시나리오를 시뮬레이션하고 CO2 상승, 온도 상승, 강수량 패턴 변경, 기상 이변 등 환경 스트레스에 대한 식물의 반응을 연구하는 데 광범위하게 사용
  - CO2 상승 연구: Phytotron 연구는 특히 광합성, 기공 조절 및 전반적인 성장과 관련하여 식물이 CO2 수준 상승에 어떻게 반응하는지 조사. 이는 미래 기후에서 작물 생산성을 예측하는 데 필수적
  - 열 스트레스 및 가뭄 내성: 연구원들은 식물이 스트레스를 관리하는 방법을 연구하고 점점 더 가혹해지는 기후에서 번성할 수 있는 작물 품종을 개발하기 위해 식물전자의 폭염과 가뭄 조건을 시뮬레이션
  - 홍수 및 염분: 파이토포톤은 기후 변화가 생태계와 농업에 영향을 미치면서 점점 더 일반화되고 있는 과도한 물과 높은 염분에 대한 식물의 반응을 이해하는 데에도 사용
- **(작물 개선을 위한 Phenotyping)** 식물 Phenotyping은 파이토포톤 연구의 중심. 표현형 분석은 특정 환경 조건에서 식물 특성(예: 높이, 잎 면적, 뿌리 발달 등)을 측정하는 것을 의미. 고급 이미징 및 센서 기술을 통해 최근 다음과 같은 높은 처리량 표현형 분석을 수행
  - 실시간 성장 모니터링: 자동화된 카메라와 센서를 통해 연구자는 최소한의 수동 개입으로 시간 경과에 따른 식물 성장과 발달을 추적 가능
  - 스크린 작물 품종: 식물트론은 가뭄 저항성, 영양분 사용 효율성 및 질병 저항성과 관련된 특성을 식별하는 데 사용되어 개선된 작물 품종 개발을 지원
  - 유전자형-환경 상호 작용: 과학자들은 다양한 식물 유전자형이 다양한 환경 조건에서 어떻게 수행되는지 더 잘 이해할 수 있으므로 특정 기후에 맞게 작물을 정밀하게 육종 가능
- **(인공지능과 자동화의 통합)** 최근 파이토포톤은 점점 더 AI 및 기계 학습 도구를 통합하여 데이터를 분석하고, 프로세스를 자동화하고, 식물 성장 조건을 최적화
  - 자동 온도 조절: Phytotron은 이제 AI 기반 시스템을 사용하여 실시간 식물 반응을

- 기반으로 환경 조건(온도, 빛, 습도)을 자동으로 조정하여 실험 효율성과 정확성을 극대화
- 데이터 기반 통찰력: 실험에서 생성된 대규모 데이터 세트는 기계 학습 알고리즘을 사용하여 분석되어 식물 성장 및 스트레스 반응의 패턴을 식별하여 더 깊은 통찰력과 예측으로 이어짐
  - 식물 관리를 위한 로봇공학: 물주기, 영양분 전달, 식물 관리(예: 가지치기)를 위한 자동화 시스템이 식물 관리 작업에 통합되어 노동력과 인적 오류를 줄이고 있음.
- (식물-미생물 및 식물-곤충 상호작용) 통제된 조건에서 식물-미생물 및 식물-곤충 상호작용을 연구하는 데 파이토틨론이 점점 더 많이 사용되고 있으며, 이는 생태계 역학을 이해하고 농업 관행을 개선하는 데 중요
- 공생 관계: 유익한 미생물(예: 균근균, 질소 고정 박테리아)이 식물과 상호 작용하여 영양 흡수와 스트레스 회복력을 향상시키는 방법을 조사
  - 병원체 저항성: 연구원들은 식물이 어떻게 저항성을 발달시키고 이러한 병원체가 어떻게 진화하는지 연구하기 위해 병원체 발생(곰팡이, 박테리아 또는 바이러스)을 시뮬레이션
  - 곤충 초식동물: 파이토틨론은 해충에 대한 식물 방어와 이것이 식물 생산성 및 생태계 건강에 미치는 영향을 탐구하는 데 도움
- (영양소 사용 효율성 및 지속 가능한 농업) 지속 가능한 농업 관행에 대한 필요성이 증가함에 따라 NUE(영양소 사용 효율성) 개선에 초점을 맞춘 파이토틨론 연구가 이루어지고 있음. 여기에는 식물이 질소, 인, 칼륨과 같은 주요 영양소를 사용하는 방법과 이러한 영양소를 다음과 같이 최적화할 수 있는 방법을 이해하는 것이 포함
- 비료 사용 감소: 영양소를 보다 효율적으로 흡수하고 활용하는 능력을 향상시켜 비료가 덜 필요한 작물 품종을 개발
  - 환경 영향 최소화: Phytotron 실험은 작물 수확량을 유지하면서 영양분 유출과 환경 오염을 줄이는 농업 관행을 개발하는 데 도움
  - 토양 건강 및 재생 농업: 지속 가능한 재생 농업 관행 구축에 중점을 두고 다양한 식물 종과 작물 시스템이 토양 건강에 어떤 영향을 미치는지에 대한 통제된 연구가 진행되고 있음
- (수직농업과 도시농업) 수직 농업과 도시 농업이 증가하면서 실내 농업 시스템에 특히 적합한 작물 품종과 재배 방법을 개발하는 데 파이토틨론이 사용되고 있음.
- 성장 조건 최적화: 수직 농장에서 재배되는 작물에 대한 최적의 광 스펙트럼, 온도 범위 및 영양분 전달 시스템을 식별하기 위한 연구 진행

- 에너지 효율성: 연구원들은 LED 조명 및 효율적인 HVAC(난방, 환기 및 공조) 시스템의 사용을 포함하여 환경 제어 농업 시스템의 에너지 소비를 줄이는 방법을 모색
  - 지속 가능한 도시 식품 시스템: Phytotron은 전통적인 농업 공간이 제한되어 있고 인구 밀도가 높은 도시 환경에 더 적합한 작물 및 재배 기술을 개발하는 데 도움
- (우주 농업 및 우주생물학) 파이토티론 연구에서 점점 더 발전하고 있는 분야는 우주 탐사를 위한 농업 시스템의 개발. 달, 화성 또는 기타 천체에 대한 장기 임무를 수행할 때 식물트론은 다음과 같은 용도로 사용
- 우주 환경 시뮬레이션: 파이토티론은 외계 환경(예: 저중력, 높은 방사선 및 극한 온도)을 시뮬레이션하여 이러한 조건에서 식물이 어떻게 자랄 수 있는지 연구
  - 우주에서의 식량 생산: 연구는 자원 효율성(예: 물 및 영양분 재활용)과 환경 영향 최소화에 중점을 두고 폐쇄 루프 시스템에서 번성할 수 있는 작물을 식별하는 데 중점
  - 우주 스트레스 요인에 대한 식물의 탄력성: 과학자들은 방사선 및 저기압 조건과 같이 우주에서 직면하는 독특한 스트레스 요인에 저항하도록 식물을 유전적으로 조작할 수 있는 방법을 조사
- (정밀 농업 및 디지털 트윈 모델링) 디지털 트윈은 다양한 환경 시나리오에서 식물의 성장과 발달을 시뮬레이션할 수 있는 물리적 시스템의 가상 모델
- 복잡한 시스템 모델링: 연구원은 전체 생태계 또는 농업 시스템을 디지털 형식으로 모델링하고 실험을 실행하여 다양한 환경 스트레스 하에서 식물이 어떻게 행동할지 예측 가능
  - 정밀 농업: Phytotron 실험은 효율성과 지속 가능성을 개선하기 위해 입력(물, 비료)을 세분화된 수준에서 최적화하는 정밀 농업 기술을 알리는 데 사용할 수 있는 데이터를 생성함
- (생태학 및 진화 연구) Phytotron은 자연 환경을 시뮬레이션하고 식물 개체군의 장기적인 변화를 연구하는 데 도움이 되는 생태학 및 진화론 연구에 점점 더 많이 사용되고 있음
- 변화하는 환경에 대한 적응: 식물트론 연구는 과거, 현재, 미래의 환경 조건을 시뮬레이션함으로써 과학자들이 기후 변화와 같은 점진적인 변화에 대응하여 식물이 적응하거나 진화하는 방식을 이해하는 데 도움
  - 생물 다양성 및 보존: 파이토티론은 다양한 종이 생태계 내에서 어떻게 상호 작용하는지 연구하고 멸종 위기에 처한 식물이 새로운 서식지에 적응해야 할 수 있는 시나리오를 시뮬레이션하는 데 사용

## 참고자료

---

- 1) 위키피디아 <https://en.wikipedia.org/wiki/Phytotron>
- 2) 녹색기술연구소(2023), 국외 에코트론 기술개발 동향, NIGT Brief Vol.1 No.24
- 3) 경향신문(2023.12.24.), 약방의 감초 외국산 쓰는 까닭  
<https://www.khan.co.kr/science/science-general/article/202312242127025>
- 4) 데일리스포츠한국(2020. 2. 11), 산림과학원, 파이토틘론 구축  
<https://www.dailysportshankook.co.kr/news/articleView.html?idxno=219831>
- 5) BRIC(2023), 스마트농업 기술동향
- 6) 한국원자력연구원(2018), 방사선육종 연구시설 운영