



BT분야 전문가가 바라본 분야별 동향을 소개합니다.

BioINpro

BioIN + Professional

미래유망기술(하)



AI 기반 합성식물체 기술의
현황과 미래 발전 전략



생명공학정책연구센터
Biotech Policy Research Center

AI 기반 합성식물체 기술의 현황과 미래 발전 전략



신아영 / 한국생명공학연구원 선임연구원

1. 기술 개발 배경: 식물 합성생물학의 전환점

바이오경제는 기후위기, 식량·보건안보, 공급망 불안, 친환경 제조 요구가 동시에 확대되는 환경에서 빠르게 재편되고 있다. 세계 인구 증가와 기후변화는 농업 생산성과 천연물 원료 확보를 동시에 압박하고 있으며[1,2], 의약품 전구체, 기능성 식품소재, 화장품 원료, 향료·색소 등 고부가 식물 유래 성분의 안정적 공급은 산업 경쟁력의 핵심 요소로 부상하고 있다.

기존 생산 방식은 이러한 수요에 대응하는 데 뚜렷한 한계를 가진다. 천연 추출은 원료 친숙도가 높지만 함량이 낮고 산지·계절·기후 변동성이 크며, 화학합성은 공정 표준화가 가능하나 구조가 복잡한 천연물에서는 비용과 환경 부담이 증가한다. 미생물 발효는 대량생산에 유리하지만 식물 특이 효소, 세포 소기관 기반 반응, 복잡한 당화·수송·저장 과정을 완전히 재현하기 어렵다[3].

식물은 광합성, 세포소기관, 조직 분화, 저장·분비 능력을 갖춘 지속가능 생산체로서 복잡한 고부가 대사산물 생산에 유리한 생물학적 기반을 제공한다. 그러나 미생물에 비해 생장 주기가 길고, 형질전환·재분화 효율이 유전형에 크게 의존하며, 대사산물 생산이 조직, 발달단계, 환경 조건에 따라 달라진다는 난점도 있다. 따라서 식물 합성생물학은 단순 유전자 도입을 넘어 데이터 기반 설계, 자동화 검증, 세포·조직·소기관 수준의 정밀 제어가 결합된 공학적 접근으로 전환되어야 한다.

최근 AI 기반 식물 세포 대사공학, 작물 합성생물학, 자동화 식물 DBTL, 세포형 특이 유전자 조절, 디지털 트윈 기반 멀티오믹스 모델링이 빠르게 발

전하면서, 식물 합성생물학은 개별 유전자 조작 중심에서 예측·설계·검증이 순환하는 플랫폼 기술로 이동하고 있다. 이러한 흐름 속에서 AI 기반 합성식물체는 식물 시스템의 복잡성을 제약 요인이 아니라 예측·모델링·최적화의 대상으로 전환하는 새로운 기술 개념으로 부상하고 있다.

생산 방식	주요 장점	핵심 한계	AI 기반 합성식물체의 보완 방향
천연추출	자연 원료 기반, 소비자 친숙도 높음	낮은 함량, 산지·계절 변동, 희귀자원 훼손 위험	통제된 식물체·세포배양에서 목표 물질 고함량·표준화 생산
화학합성	공정 표준화와 대량 생산 가능	복잡한 천연물 합성비용과 환경부담 증가	식물 효소와 소기관을 이용한 생물학적 합성으로 대체
미생물 발효	자동화와 스케일업이 용이	식물 특이적 효소·수식·중간체 독성 처리 한계	식물 새시에서 복잡한 식물 유래 대사산물·단백질 생산
전통 식물 대사공학	특정 유전자 조작으로 수율 향상 가능	네트워크 전체 예측이 어렵고 시행착오가 큼	AI-DBTL로 병목, 대사플럭스, 조직 특이성 반복 최적화

[표 1] 기존 유효성분 생산 방식과 AI 기반 합성식물체의 보완 방향

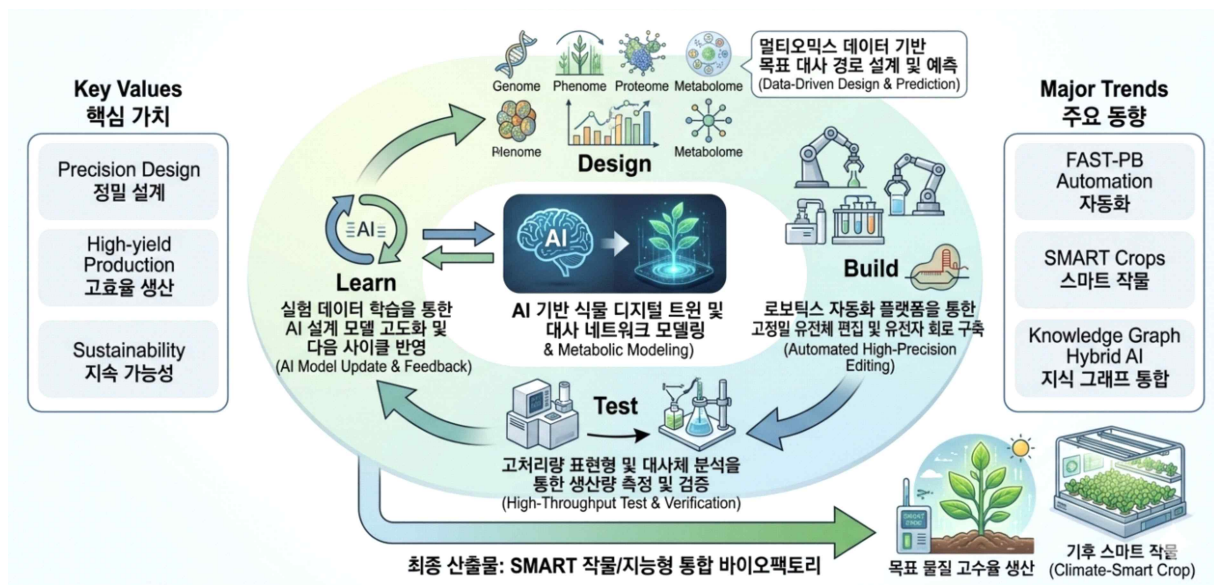
2. 기술 개념과 플랫폼적 특성

AI 기반 합성식물체(AI-based synthetic plant)는 인공지능과 합성생물학을 융합하여 식물 유전체, 유전자 발현 조절망, 대사경로, 세포·조직별 생산 환경을 통합적으로 재설계하고, 목표 유효성분의 생산성을 극대화하는 기술이다. 이는 단일 유전자 도입 또는 특정 효소 과발현 기술과 달리, 생합성 경로, 전구체·보조인자 공급, 경쟁 경로 차단, 효소 발현량, 세포소기관 표적화, 수송체, 저장·분비, 배양·재배 환경을 하나의 시스템으로 최적화하는 접근이다.

기술의 핵심은 DBTL (Design-Build-Test-Learn) 순환의 자동화와 지능화에 있다. Design 단계에서는 멀티오믹스, 문헌 지식, 대사 네트워크, 단백질 구조, 유전자 조절 정보를 통합해 후보 설계를 도출한다. Build 단계에서는 CRISPR, 합성 프로모터, 유전자 회로, 대사 모듈, 형질전환·재분화 기술을 활용해 설계를 구현한다. Test 단계에서는 고속 표현형 분석과 대사체 분석으로 결과를 정량화하고, Learn 단계에서는 실험 결과를 AI 학습데이터로 환류해 다음 설계를 고도화한다.

따라서 AI 기반 합성식물체는 ‘고부가 유효성분 생산 식물’이라는 개별 산물보다, 식물 대사 설계와 생산공정 최적화를 반복·고도화하는 플랫폼 기술로 정의될 필요가 있다. 목표 물질이 변경되더라도 데이터, 설계 규칙, 유전자 부품 라이브러리, 자동화 검증 워크플로우가 축적·재활용되기 때문이다. 이러한 관점에서 AI 기반 합성식물체의 경쟁력은 개별 유전자 편집의 성공 여부보다 설계-구축-검증-학습 과정을 얼마나 신속하고 표준화된 방식으로 반복할 수 있는지에 의해 결정된다.

초기에는 니코티아나 벤타미아나, 애기장대, 토마토, 상추, 식물세포배양, 모상근 등 연구 접근성과 생산성이 높은 재료를 활용해 단일 목표 물질 생산을 실증하는 것이 현실적이다. 중기에는 조직 특이 발현, 소기관 표적화, 수송체 엔지니어링, 독성 중간체 완화 기술을 결합해 복합 대사경로의 안정성을 확보해야 한다. 장기적으로는 다중 유효성분을 동시에 생산하거나 환경 신호에 따라 생산 모드가 전환되는 동적 합성식물체로 확장될 수 있다.



[그림 1] AI 기반 합성식물체 기술의 개념도

3. 핵심 요소기술과 구현 전략

가. AI 기반 식물 DBTL 자동화

DBTL 자동화는 AI 기반 합성식물체 구현의 핵심 기반이다. 식물은 미생물에 비해 성장과 형질전환, 재분화에 시간이 오래 걸리고, 개체 간 변이가 크기 때문에 반복 실험의 속도와 표준화가 기술 경쟁력을 좌우한다. Design 단계에서는 문헌과 데이터베이스에서 후보 유전자, 효소, 전사인자, 프로모터, 수송체를 추출하고, 대사 네트워크 모델을 통해 수율 병목과 부작용을 예측한다. Build 단계에서는 DNA 조립, 벡터 구축, gRNA 설계, 형질전환, 식물체 또는 세포주 선발을 자동화한다. Test 단계에서는 이미지·형광·대사체·단일세포 분석을 통해 대량 후보를 빠르게 정량하고, Learn 단계에서는 결과 데이터를 다음 실험 설계에 반영해 폐루프 최적화를 수행한다. FAST-PB 연구는 옥수수과 니코티아나 벤타미아나를 대상으로 자동화 바이오파운드리, 원형질체·캘러스 엔지니어링, 단일세포 대사체 분석을 통합함으로써 식물 시스템에서도 고속 DBTL 구현이 가능함을 보여주었다[4,5].

나. 디지털 트윈과 멀티오믹스 모델링

식물 디지털 트윈은 유전체·전사체·단백체·대사체·표현형·환경 데이터를 시간축으로 연결해 실제 식물체, 조직, 세포 또는 생산공정을 가상 공간에 재현하는 예측 모델이다. 이를 통해 유전자 발현 조절, 프로모터 선택, 소기관 표적화, 빛·온도·영양 조건 변화가 목표 물질 수율과 생장에 미치는 영향을 사전에 시뮬레이션할 수 있다. 최근 AI 기반 식물 연구는 기술 현상을 설명하는 단계에서 벗어나, 식물 시스템을 예측하고 설계하는 공학적 패러다임으로 전환되고 있다. 다중스케일 가상 식물세포 모델링은 분자 상호작용부터 조직 기능까지 연결해 식물 반응을 시뮬레이션할 수 있는 가능성을 보여주고 있으며[6], 약용식물 분야에서도 멀티오믹스와 AI의 통합을 통해 핵심 생합성 요소 발굴과 생산공정 최적화가 가속되고 있다[7]. 이는 AI 기반 합성식물체가 단순 유전공학을 넘어 데이터 표준화, 모델 검증, 공정 제어를 포함하는 시스템 기술임을 시사한다.

다. 고정밀 식물 합성생물학 구현 기술

AI가 도출한 설계를 식물 시스템에서 구현하기 위해서는 식물 특화 유전자 부품 라이브러리와 정밀 편집 기술이 필수적이다. 프로모터, 인핸서, UTR, 터미네이터, 신호펩타이드, 소기관 표적화 서열, 유도성 스위치, 조직 특이 조절부품을 표준화하고, 염기교정, 프라임에디팅, CRISPR activation/interference, 에피게놈 편집, 다중 gRNA 기반 멀티플렉스 제어 기술을 통합해야 한다[8].

특히 유효성분 생산을 목표로 하는 합성식물체에서는 전신 과발현이 생장 저하, 독성 축적, 대사 불균형을 유발할 수 있으므로, 세포·조직·발달단계 특이적 발현 제어가 중요하다. 최근 연구에서는 안정적 식물체에서 세포형 특이 CRISPR activation을 구현하고, 다수의 대사효소 유전자를 동시에 활성화함으로써 뿌리의 특정 세포층에서 플라보놀 생산을 유도하였다[9]. 이는 합성식물체 설계가 단순히 ‘어떤 유전자를 조절할 것인가’를 넘어, ‘어떤 세포에서, 언제, 어느 수준으로 조절할 것인가’까지 포함해야 함을 보여준다.

라. 대사 플렉스 최적화와 공간적 대사 제어

목표 물질 생산성을 높이기 위해서는 전구체 공급 확대, 경쟁 경로 억제, 보조인자 균형, 독성 중간체 완화가 통합적으로 이루어져야 한다. 식물은 조직·세포소기관·발달단계별 대사 특성이 달라 동일한 유전체 설계라도 생산 결과가 크게 달라질 수 있으므로, 수송체 엔지니어링, 소기관 표적화, 액포 저장, 분비 유도, 조직 특이 발현을 결합한 공간적 대사 제어가 중요하다.

AI는 이러한 복합 요인을 다목적 최적화 문제로 다룰 수 있다. 목표 물질 수율뿐 아니라 생장 저해, 독성, 부산물 축적, 생산 변동성, 공정 비용을 함께 예측·조정함으로써 설계의 안정성과 산업 적용성을 높일 수 있다. 이에 따라 합성식물체의 설계 단위는 개별 유전자 수준을 넘어 세포, 조직, 개체, 생산 공정으로 확장되어야 한다.

마. 생산 공정·스케일업과 스마트 제조 기술

합성식물체가 산업 플랫폼으로 활용되기 위해서는 실험실 수준의 고생산

라인 선발을 넘어, 생산 시스템별 공정 최적화가 필요하다. 적용 가능한 플랫폼은 온실·수직농장 기반 식물체 생산, 폐쇄형 식물공장, 일시적 발현 시스템, 식물세포 현탁배양, 모상근 배양, 조직배양체 생산 등으로 구분된다. 각 플랫폼은 생장속도, 생산물 회수 방식, 품질관리 요건, 규제 경로, 시설 비용, 오염 위험이 다르므로 목표 물질의 특성과 용도에 따라 선택되어야 한다.

AI 기반 공정제어는 빛, 광질, 광주기, 온도, 습도, CO₂, 영양액, 생물·비생물 스트레스, elicitor 처리 조건을 실시간으로 조절해 생산성을 높이고 변동성을 낮출 수 있다. 특히 재배 조건에 따라 성분 함량이 달라지는 기능성 식품·화장품 원료에서는 스마트팜 데이터와 대사체 데이터를 연계한 예측 모델이 로트 간 균일성 확보에 기여할 수 있다. 의약품·백신·항체 등 고품질 규제가 요구되는 제품의 경우에는 폐쇄형 생산체계와 추적 가능한 원료·공정 데이터, 배치별 품질시험 체계를 함께 구축해야 한다.

핵심 요소기술	현재 병목	AI 기반 합성식물체의 개발 방향
AI-DBTL 자동화	식물 형질전환·재분화 속도 및 표준화 부족	로보틱스, 자동 DNA 조립, 고속 리포터·대사체 분석, 페루프 최적화
디지털 트윈·멀티오믹스	데이터 파편화, 표준 메타데이터 부족, 종간 전이 한계	유전체·전사체·대사체·환경 데이터 통합, 예측 모델 검증, 불확실성 정량화
정밀 합성생물학 구현	식물 특화 부품 라이브러리와 멀티플렉스 구현 한계	프로모터·UTR·터미네이터 등 조절부품, CRISPRa/i, 프라임에디팅, 합성회로 표준화
대사 플렉스·공간 제어	독성 중간체, 경쟁 경로, 조직별 생산성 차이	전구체 공급, 경쟁 경로 차단, 소기관 표적화, 수송체 엔지니어링, 저장·분비 제어, 다목적 최적화
스마트 제조·스케일업	실험실 성과의 공정 전환과 품질 균질성 확보 어려움	수직농장·온실·세포배양별 AI 공정제어, 품질관리, 생산성 예측

[표 2] AI 기반 합성식물체의 핵심 요소기술 및 개발 방향

4. 국내외 기술개발 동향

가. 해외 동향: AI-DBTL 기반 식물 합성생물학의 플랫폼화

① 식물 DBTL과 AI 설계의 실증 단계 진입

해외 연구는 AI 기반 식물 대사 설계, 작물 합성생물학, 자동화 식물 바이오파운드리 실증으로 빠르게 전환되고 있다. 식물 대사공학에서는 세포 이질

성을 고려한 분석이 중요해지고 있으며, 의료영상·단일세포 분석 분야에서 발전한 AI 기법을 식물 세포 특성 규명과 대사공학 전략 수립에 적용할 수 있다고 제안했다[10]. 이는 식물 대사산물이 특정 세포군에서 선택적으로 합성·저장되는 경우가 많다는 점에서 중요한 접근이다.

작물 합성생물학은 DBTL 원리에 따라 유전자 회로, 유전체 편집, 합성 핵산·단백질, 멀티오믹스, 유전체 선발, 단백질 공학, AI를 통합하는 방향으로 발전하고 있다. 이러한 기술 융합은 광합성 효율, 식물체 구조, 대사경로, 환경적응성, 영양흡수, 작물공장 구축 등으로 적용 범위를 넓히고 있고[11], 오믹스, 유전체 편집, 단백질 설계, 고처리량 표현형 분석과 AI 도구의 통합을 차세대 작물개량의 패러다임으로 제시했다[12].

자동화 식물 바이오파운드리도 실증 단계에 진입하고 있다. FAST-PB는 자동화된 설계·구축·검증 흐름을 식물 원형질체, 캘러스, 재분화 식물체, 단일세포 대사체 분석과 연결해 식물 합성생물학의 처리량을 크게 높일 수 있음을 보여주었다[4,5]. 이는 식물 대사공학이 소수 후보 유전자의 순차 검증을 넘어, 수십~수백 개 설계를 병렬 검증하는 플랫폼 경쟁 단계로 진입했음을 의미한다.

② AI 기반 생합성 유전자 예측과 멀티오믹스 통합

AI 기반 생합성 유전자 예측도 식물 특화 대사산물 연구의 핵심 병목을 줄이는 방향으로 빠르게 발전하고 있다. 멀티오믹스 데이터와 자동화 기계학습을 결합하면 테르페노이드, 알칼로이드, 페놀류 등 식물 특화 대사산물의 생합성 관련 효소 유전자를 보다 효율적으로 예측할 수 있다[13]. 이러한 접근은 국내 천연물 소재 연구에서 기능 미확인 후보 유전자와 대사산물이 많은 약용식물 연구에 특히 유용하다.

향후 AI 모델은 후보 유전자 분류를 넘어 경로 조합 설계, 효소 기질특이성 예측, 대사 플렉스 예측, 대사산물 구조 예측, 독성 중간체 회피, 수송체 예측으로 확장될 전망이다. AlphaFold 3와 같은 복합체 구조 예측 기술은 단백질, 핵산, 소분자, 이온, 변형잔기를 포함한 상호작용 예측 범위를 넓히고 있으며[14], 기계학습 기반 단백질 설계 프레임워크는 효소 개량, 결합 단백질, 리포터, 센서 개발을 가속할 수 있다[15].

③ CRISPR, LLM, 자동화 실험 설계의 결합

정밀 유전체 편집은 AI 기반 합성식물체 구현의 핵심 도구이다. 염기교정, 프라임에디팅, 신규 CRISPR 시스템, 식물 내 전달 기술, 표적 유전체 조작 기반 작물육종 전략이 현재 빠르게 발전하고 있다[16]. 합성식물체에서는 단일 유전자 knockout보다 조절영역 편집, 발현량 조절, CRISPRa/i, 에피게놈 조절, 다중 편집을 통해 대사 네트워크 균형을 재조정하는 전략이 중요하다.

LLM 기반 실험 설계도 새로운 흐름으로 부상하고 있다. CRISPR-GPT는 CRISPR 시스템 선택, gRNA 설계, 전달 방식 결정, 프로토콜 작성, 검증 실험 설계, 데이터 분석을 지원하는 LLM 에이전트 시스템으로 제시되었다[17]. 아직 식물 특화 플랫폼은 아니며 인간·마우스 중심의 기능적 한계가 있지만, 향후 식물 유전체, 프로모터, 형질전환법, 재분화 조건, 오프타겟 예측, 작물별 gRNA 설계 데이터가 연계될 경우 식물 DBTL의 Design과 Build 단계를 크게 가속할 수 있다. 다만 AI 에이전트 활용에는 환각, 데이터 편향, 안전성·윤리성 문제가 수반될 수 있으므로 전문가 검토, 자동화 실험 검증, 생물안전성 평가가 병행되어야 한다.

나. 국내 동향: 공공 바이오파운드리와 식물 특화 공백

국내에서는 합성생물학과 바이오파운드리 인프라 구축이 본격화되고 있다. 과학기술정보통신부와 산업통상자원부는 2025~2029년 5년간 총 1,263억 원 규모의 바이오파운드리 인프라 및 활용기반 구축 사업을 추진하고 있으며, 공공 바이오파운드리 시설과 실험 자동화·고속 분석 지원을 통해 합성생물학 연구개발과 사업화 기간을 단축하는 것을 목표로 하고 있다[18,19].

다만 현재 국내 바이오파운드리 논의는 범용 또는 미생물 중심 자동화에 상대적으로 집중되어 있다. 식물 새시는 세포벽, 조직배양, 재분화, 개체 생장, 광환경, 대사체 분석 등 고유한 병목과 전용 워크플로우를 필요로 한다. 따라서 국가 바이오파운드리 내에 식물 형질전환·재분화, 식물세포·모상근 배양, 자동화 리포터 분석, LC/GC-MS 및 단일세포·공간 대사체 분석, 수직농장 공정제어를 포함하는 식물 전용 트랙을 구축할 필요가 있다. 한국이 보유한 스마트팜, 식물세포배양, 천연물 데이터, IT·AI 인프라를 식물 합성생물학

과 조기에 연계할 경우, 고부가 천연물·기능성 소재·식물 기반 바이오제조 분야에서 글로벌 틈새 시장 선점이 가능하다.

5. 주요 이슈와 기술 병목

가. 데이터 부족과 표준화 미흡

AI 기반 합성식물체 구현의 핵심 병목은 고품질 표준 데이터의 부족이다. 식물 멀티오믹스 데이터는 종, 품종, 조직, 발달단계, 환경조건, 분석 장비, 전처리 방식에 따라 크게 달라지며, 천연물 연구에서는 대사체 피크가 검출되더라도 구조 동정이나 유전자-대사산물 간 인과관계 검증이 불충분한 경우가 많다. 따라서 AI 예측력을 높이기 위해서는 데이터 축적을 넘어 실험 조건, 생육 단계, 조직 위치, 분석법, 내부표준, 배치 정보, 품질지표를 포함하는 표준 메타데이터 체계가 필요하다.

국내에서도 식물 합성생물학에 특화된 데이터 표준을 마련하고, 유전체·전사체·대사체·표현형·재배환경 데이터를 동일 샘플 또는 계통 단위로 연계해야 한다. 원자료, 전처리 자료, 분석 코드, 실험 프로토콜뿐 아니라 실패 데이터까지 축적하는 구조가 필요하며, 이는 DBTL 과정에서 작동하지 않는 설계 조합을 학습하는 데 중요한 자산이 된다.

나. 식물 형질전환·재분화의 유전형 의존성

식물은 종과 품종에 따라 형질전환 효율, 조직배양 반응, 재분화 능력이 크게 다르다. 니코티아나 벤탐타미아나 등 일부 모델식물에서는 빠른 검증이 가능하지만, 산업적으로 중요한 약용식물, 식품작물, 목본식물은 난형질전환 특성을 보이는 경우가 많다. AI 설계가 우수하더라도 Build 단계에서 구현되지 않으면 DBTL 체계는 작동하기 어렵기 때문에, 새시별 형질전환·재분화 조건 데이터베이스와 조직배양 배지, 생장조절제 조합, 유전자형별 반응 예측 모델이 필요하다.

단기적으로는 빠른 검증용 새시와 실제 생산용 새시를 구분하는 전략이 현실적이다. 니코티아나 벤탐타미아나, 애기장대, 토마토, 상추, 식물세포·모상근 배양은 설계 검증과 기전 분석에 활용하고, 목표 물질과 제품 형태에 따라 생산용 식물 또는 세포 플랫폼으로 이전하는 단계적 접근이 필요하다. 장기적으로

로는 유전형 의존성이 낮은 전달 기술, 조직배양 비의존적 편집, 일시적 발현과 안정형질전환을 결합한 구현 전략이 중요해질 것이다.

다. 예측모델의 설명가능성과 실험 검증

AI 모델이 제안한 유전자 조합이나 공정 조건은 반드시 실험적으로 검증되어야 한다. 식물 대사 네트워크는 비선형적이고 환경 의존성이 높아, 특정 유전자 조절이 예상과 달리 전구체 고갈, 생장 저해, 면역 반응, 대체 경로 활성화로 이어질 수 있다. 따라서 AI 모델은 단일 최적값만 제시하기보다 예측 신뢰구간, 대체 후보, 실패 가능성, 생장·수율 간 trade-off를 함께 제공해야 한다.

설명가능 AI는 연구자가 AI 설계를 생물학적으로 해석하고 수정할 수 있게 하는 핵심 요소이다. 후보 유전자 예측에 기여한 오믹스 특징, 플렉스 병목으로 작용하는 효소, 특정 환경 조건이 목표 대사산물 생산에 유리한 이유를 설명할 수 있어야 한다. 이는 실험 설계의 신뢰성을 높일 뿐 아니라 규제 대응과 사회적 수용성 확보에도 중요하다.

라. 생물안전성, 규제, 사회적 수용성

AI 기반 합성식물체는 유전자편집, 합성회로, 외래 유전자 도입, 대사산물 고축적 등 다양한 기술 형태를 포함하므로 유형별 규제 경로가 달라질 수 있다. 외래 유전자가 남아 있는 안정형질전환 식물, 외래 DNA가 없는 유전자 교정 식물, 일시적 발현 시스템, 폐쇄형 식물세포배양, 의약품 생산 식물은 각각 위해성 평가와 품질관리 요건이 다르다. 국내에서도 외래 유전자를 포함하지 않는 유전자편집 산물을 LMO와 구분하려는 논의가 있으나, 제도 정비는 여전히 중요한 과제로 남아 있다[20].

사회적 수용성은 기술의 목적, 생산 시스템, 환경 방출 가능성, 식품·의약품 사용 여부, 소비자 표시, 이익 공유, 생태계 영향 평가를 투명하게 제시할 때 확보될 수 있다. 초기 산업화에는 환경 방출 위험이 낮고 품질관리가 용이한 폐쇄형 식물공장이나 식물세포배양 기반 생산이 적합하다. 반면 야외 재배 식물체는 꽃가루 이동, 야생 근연종과의 교잡, 비표적 생물 영향, 토양 미생물 영향 등에 대한 별도 평가가 필요하다.

6. 중장기 발전 로드맵

가. 2026~2030: 플랫폼 기반 확립과 단일 고부가 성분 실증

향후 5년은 AI 기반 합성식물체의 플랫폼 기반을 확립하고, 특정 목표 물질의 실험실·파일럿 스케일 생산성을 입증하는 단계이다. 초기 타깃은 향산화 플라보노이드, 천연 색소, 고기능성 테르펜, 희귀 사포닌 전구체, 의약품 전구체, 단백질 소재 등 단일 또는 소수의 고부가 유효성분이 적합하다. 기술적으로는 멀티오믹스 기반 후보 유전자 예측, 빠른 새시에서의 경로 검증, CRISPRa/i 및 프로모터 라이브러리를 활용한 발현량 조절, LC-MS 기반 생산성 평가, 식물세포·모상근 또는 폐쇄형 식물공장 파일럿 생산을 연계해야 한다.

이 단계의 성과는 최고 수율뿐 아니라 설계 처리량, 후보 구축 속도, 형질 전환 성공률, 대사체 분석 처리량, 모델 예측 정확도, 로트 간 변동성, 단위 생산비, 데이터 재사용률 등으로 종합 평가해야 한다. 또한 공공 바이오파운드리 내 식물 DBTL 전용 워크플로우를 구축하고, 국내 천연물·약용식물 타깃을 중심으로 실증 사례를 축적할 필요가 있다.

나. 2031~2035: 다중 성분 생산과 환경응답형 합성식물체

향후 10년에는 AI-자동화 DBTL 플랫폼과 식물 합성생물학의 고도화를 통해 합성식물체의 기능이 복합화될 전망이다. 하나의 식물 또는 식물세포 플랫폼에서 여러 유효성분을 동시에 생산하거나, 특정 환경 조건·유도 신호에 따라 생산 경로가 전환되는 시스템이 가능해질 수 있다. 예를 들어 평상시에는 생장을 우선하고, 특정 발달단계나 유도 조건에서만 목표 물질 생산을 강화하는 동적 합성회로가 활용될 수 있다.

이 단계에서는 AI 디지털 트윈과 생산공정의 통합이 핵심이다. 유전체 설계와 재배환경 제어를 분리하지 않고, 유전자 회로와 스마트팜 조건을 동시에 최적화하는 방식으로 발전해야 한다. 나아가 식물체, 식물세포배양, 모상근, 수직농장, 온실 등 생산 시스템이 제품군별로 분화되고, 의약·소재·식품 원료의 품질관리 및 규제 요건에 부합하는 표준 생산 플랫폼으로 정착할 것이다.

시기	기술 목표	주요 구현 형태	정책·인프라 과제
기반 안정화 (현재~5년)	식물 AI-DBTL 파일럿 안정화, 단일 고부가 성분 고효율 생산	빠른 새시 기반 경로 검증, 식물세포·모상근·니코티아나 벤타미아나 생산 라인, 표준 데이터셋 구축	식물 전용 바이오파운드리 모듈, 대사체 고속 분석, 데이터 표준
플랫폼 고도화 (5년~10년)	다중 성분 생산, 조직·세포 특이 합성회로, 환경응답형 플랫폼 구현	동적 대사회로, 디지털 트윈 기반 공정제어, 제품군별 생산 플랫폼	규제 차등화, 폐쇄형 생산 인증, AI 모델 검증 기준
범용 확산 (10년 이후)	범용 그린 바이오제조 플랫폼 확산	의약·소재·식품 전반의 맞춤형 합성식물체 서비스	국제 표준, 공급망 연계, 생태·윤리 거버넌스

[표 3] AI 기반 합성식물체 기술의 중장기 발전 로드맵

7. 기대효과

가. 경제·산업적 효과

AI 기반 합성식물체는 고부가 유효성분의 안정적·고효율 생산을 통해 의약·식품·소재 산업의 원가 절감과 공급망 안정화에 기여할 수 있다. 단기적으로는 단일 고부가 성분을 대상으로 식물 AI-DBTL 파일럿, 빠른 새시 기반 경로 검증, 식물세포·모상근·니코티아나 벤타미아나 생산 라인을 구축함으로써 천연물 원료, 기능성 화장품 성분, 건강기능식품 소재, 친환경 색소·향료 등의 초기 산업화 기반을 마련할 수 있다.

중장기적으로는 다중 성분 생산, 조직·세포 특이 합성회로, 디지털 트윈 기반 공정제어가 결합되면서 제품군별 표준 생산 플랫폼으로 확장될 전망이다. 이를 통해 목표 물질이 변경되더라도 데이터, 설계 규칙, 유전자 부품 라이브러리, 자동화 워크플로우를 재사용할 수 있어 개발 기간과 비용을 줄일 수 있다. 장기적으로는 의약·소재·식품 전반에서 식물 기반 바이오소재 CDMO 또는 맞춤형 합성식물체 설계-생산 서비스와 같은 신규 산업 모델 창출도 가능하다.

나. 사회·환경적 효과

AI 기반 합성식물체는 저탄소·친환경 바이오제조 전환을 촉진하고, 기후·산

지·지정학 리스크에 취약한 천연물 공급망을 보완할 수 있다. 폐쇄형 식물공장, 식물세포배양, 모상근 배양 등 통제형 생산 시스템을 활용해 생산 로트 간 균일성을 확보하고, 희귀 식물의 무분별한 채취와 원료 수급 불안정 완화, 팬데믹, 무역 분쟁 등에 따른 공급망 불안을 완화하는 효과도 기대된다.

환경응답형 플랫폼과 디지털 트윈 기반 공정제어를 통해 생산성과 자원 이용 효율을 동시에 높일 수 있다. 폐쇄형 생산 인증, AI 모델 검증 기준, 규제 차등화가 정비되면 의약·소재·식품 원료의 안전성과 추적 가능성을 강화할 수 있으며, 이후에는 국제 표준, 공급망 연계, 생태·윤리 거버넌스를 기반으로 지속가능한 그린 바이오제조 플랫폼으로 확산될 수 있다. 다만 합성생물학 기술에 대한 사회적 우려를 고려해 제품 유형별 위해성 평가, 투명한 표시, 생산 시설 관리, 데이터 공개, 시민 소통이 병행되어야 한다.

8. 정책·제도적 제언 및 결론

가. 국가 식물 바이오데이터 표준화와 공유체계 구축

AI 기반 합성식물체 기술의 성패는 고품질 데이터의 확보와 표준화에 좌우될 수 있으므로, 국가 차원에서 식물 유전체, 전사체, 대사체, 표현형, 재배환경 데이터를 통합 관리할 수 있는 표준 체계를 마련해야 한다. 특히 시료 정보, 생육 조건, 조직·세포 위치, 발달단계, 분석 장비, 전처리 방법, 내부표준, 품질지표, 실패 실험 정보까지 포함하는 메타데이터 표준이 필요하다.

공공 연구개발 과제에서 생산되는 데이터는 FAIR 원칙에 따라 공유되되, 산업적으로 민감한 데이터는 보안형 분석 환경에서 활용할 수 있도록 해야 한다. 이를 통해 개별 연구 단위의 데이터가 일회성 성과에 그치지 않고, AI 모델 학습과 DBTL 반복 최적화에 재사용되는 국가 식물 바이오데이터 자산으로 축적될 수 있다.

나. 식물 특화 바이오파운드리 트랙 구축

국가 바이오파운드리에는 국내 합성생물학 경쟁력 강화를 위한 핵심 인프라이지만, 식물 새시는 미생물과 다른 자동화 워크플로우를 필요로 한다. 따라

서 기존 범용 바이오파운드리 체계 안에 식물 전용 트랙을 구축하고, 식물 형질전환·재분화·대사체 분석·재배환경 제어를 통합한 DBTL 플랫폼으로 확장할 필요가 있다. 식물 전용 트랙에는 자동 DNA 조립과 벡터 구축뿐 아니라 원형질체 자동화, Agrobacterium 기반 형질전환, 캘러스·모상근·세포배양, 재분화, 고속 리포터 이미징, LC/GC-MS, MALDI-MS, 공간 오믹스, 수직농장 환경제어 모듈이 포함되어야 한다. 국내 강점인 스마트팜 기술과 대사체 분석 인프라를 결합하면 해외 식물 바이오파운드리와 차별화된 한국형 식물 바이오파운드리 모델을 구축할 수 있다.

다. 식물 부품·새시·생산공정 라이브러리 구축

합성식물체 설계의 재현성과 확장성을 높이기 위해서는 표준화된 유전자 부품, 새시, 생산공정 라이브러리가 필요하다. 프로모터, 인핸서, UTR, 터미네이터, 소기관 표적화 서열, 조직 특이 발현 부품, 유도성 스위치, 리포터, 수송체, 대사효소, CRISPRa/i 부품을 식물종과 조직별로 검증하고 표준화해야 한다. 또한 니코티아나 벤타미아나, 상추, 토마토, 애기장대, 약용식물 세포주, 모상근 등 주요 새시의 장단점, 형질전환 효율, 재분화 조건, 생산 적합성, 표준 프로토콜을 체계화해야 한다. 이를 통해 목표 물질의 특성과 제품 용도에 따라 최적의 식물 플랫폼을 선택하고, 축적된 설계 규칙과 공정 조건을 반복적으로 활용할 수 있다.

라. 규제 차등화와 안전성 평가 프레임워크 마련

규제는 기술 확산을 제한하는 장벽이 아니라 안전한 산업화를 가능하게 하는 설계 기준으로 작동해야 한다. 외래 유전자 삽입 안정형질전환체, 외래 DNA가 남지 않는 유전자교정체, 폐쇄형 세포배양 생산, 식용·비식용 제품, 의약품 생산 식물체를 구분하고, 위험도와 사용 목적에 따른 차등화된 평가 기준을 마련할 필요가 있다. AI가 설계한 유전자 조합과 합성회로에 대해서는 예측 근거, 오프타겟 가능성, 대사 부산물, 환경 방출 가능성, 데이터 검증 수준을 함께 평가해야 한다. 아울러 폐쇄형 생산시설, 생산 이력 추적, 배치별 품질관리, 환경 위해성 평가, 소비자 정보 제공을 연계한 규제·윤리 프레임워크가 요구된다.

마. 결론

AI 기반 합성식물체 기술은 식물을 단순한 농업 생산체에서 데이터, 인공지능, 자동화, 합성생물학으로 설계 가능한 지속가능 바이오제조 플랫폼으로 전환하는 미래기술이다. 이 기술은 천연추출의 낮은 수율과 품질 변동성, 화학합성의 환경 부담, 미생물 발효의 식물 특이적 대사 재현 한계를 보완하면서, 식물의 광합성, 세포소기관, 조직 분화, 저장·분비 능력을 활용해 복잡한 고부가 유효성분 생산에 특화된 장점을 제공한다.

식물 DBTL 자동화, 세포형 특이 유전자 조절, AI 기반 멀티오믹스 대사 네트워크 모델링, 식물 디지털 트윈 연구는 AI 기반 합성식물체가 개념 단계를 넘어 플랫폼 기술로 구체화되고 있음을 보여준다. 향후 5년은 식물 특화 DBTL 자동화와 단일 고부가 성분 생산 실증이 핵심이며, 향후 10년은 다중 성분 생산, 환경응답형 합성회로, 스마트 제조와 결합한 범용 생산 플랫폼으로의 확장이 중요해질 것이다.

한국은 AI·IT 인프라, 스마트팜, 식물세포배양, 천연물 연구 기반, 국가 바이오파운드리 투자라는 강점을 보유하고 있다. 그러나 식물 새시 특화 자동화, 고속 대사체 분석, 데이터 표준화, 규제 차등화가 지연될 경우 글로벌 플랫폼 경쟁에서 뒤처질 수 있다. 따라서 국가 식물 바이오데이터 표준화, 식물 전용 바이오파운드리 트랙, 부품·새시·공정 라이브러리, 폐쇄형 생산 실증, 과학 기반 규제 프레임워크를 선제적으로 구축해야 한다. 이를 통해 AI 기반 합성식물체는 국내 바이오소재 자립화와 글로벌 그린 바이오경제 선도에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Kraklow VA, et al. Impact of drought on global food security by 2050. *Nature Communications*. 2026;17:1099.
- [2] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2024*. 2024.
- [3] Fang C, et al. Exploring the Diversity of Plant Metabolism. *Trends in Plant Science*. 2019;24(1):83.
- [4] Dong J, Croslow SW, et al. Enhancing lipid production in plant cells through automated high-throughput genome engineering and phenotyping. *Plant Cell*. 2025;37(2):koaf026.
- [5] Department of Energy Office of Science. *Robotic Lab Revolutionizes Plant Bioengineering*. 2025.
- [6] Liu Z and Sun X. AI-driven multiscale virtual plant cell modeling: from molecular mechanisms to tissue functions. *Planta*. 2026;263:88.
- [7] Chen J, Cai J, et al. AI-driven integration and optimization of medicinal plant multi-omics metabolic networks. *Frontiers in Plant Science*. 2026;17:1756809.
- [8] Kong C, et al. Predictive genetic circuit design for phenotype reprogramming in plants. *Nature Communications*. 2025;16:715.
- [9] Houbaert A, et al. Efficient, cell-type-specific production of flavonols by multiplexed CRISPR activation of a suite of metabolic enzymes. *Nature Communications*. 2025;16:6559.
- [10] Sears RG, et al. AI to enable plant cell metabolic engineering. *Trends in Plant Science*. 2024;29(2):126.

- [11] Zhang D, Xu F, et al. Synthetic biology and artificial intelligence in crop improvement. *Plant Communications*. 2025;6(2):101220.
- [12] Li G, An L, Yang W, et al. Integrated biotechnological and AI innovations for crop improvement. *Nature*. 2025;643:925.
- [13] Bai W, et al. Machine learning assists prediction of genes responsible for plant specialized metabolite biosynthesis by integrating multi-omics data. *BMC Genomics*. 2024;25:418.
- [14] Abramson J, Adler J, Dunger J, et al. Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3. *Nature*. 2024;630:493-500.
- [15] Landweh GM, Bogart JW, et al. Accelerated enzyme engineering by machine-learning guided cell-free expression. *Nature Communications*. 2025;16(1):865.
- [16] Li B, Sun C, et al. Targeted genome-modification tools and their advanced applications in crop breeding. *Nature Reviews Genetics*. 2024;25:603.
- [17] Qu Y, Huang K, et al. CRISPR-GPT for agentic automation of gene-editing experiments. *Nature Biomedical Engineering*. 2026;10(2):245.
- [18] The Ministry of Science and ICT and the Ministry of Trade, Industry and Energy. Biofoundry Infrastructure Establishment Project. Press releases. 2024.
- [19] Korea National Biofoundry. History: Korea National Biofoundry Project Started. 2025.
- [20] USDA Foreign Agricultural Service. South Korea: Agricultural Biotechnology Annual. GAIN Report KS2024-0023. 2024.

정책제안서(안)

제안명	○ AI 기반 합성식물체 기술 육성을 위한 식물 특화 바이오파운드리 구축
배경 및 필요성	○ 기후변화, 공급망 불안, 친환경 바이오제조 수요 증가로 고부가 식물 유래 의약·식품·소재 성분의 안정적 생산기술 확보가 중요해지고 있음. ○ 식물은 광합성, 세포소기관, 조직 분화, 저장·분비 능력을 갖춘 지속가능 생산 플랫폼이나, 형질전환·재분화의 유전형 의존성, 긴 생장 주기, 대사 변동성으로 인해 기존 수작업 중심 연구 방식에는 한계가 있음. ○ AI 기반 설계, 자동화 실험, 고속 대사체 분석, 디지털 트윈을 결합한 식물 특화 DBTL 플랫폼을 구축해야 식물 합성생물학을 개별 기술에서 산업화 가능한 플랫폼 기술로 전환할 수 있음.
목적	○ 식물 형질전환, 조직·세포배양, 고속 표현형·대사체 분석, 재배환경 데이터, AI 학습을 통합한 식물 특화 페루프형 DBTL 플랫폼을 구축하여 AI 기반 합성식물체 개발 인프라를 확보함.
주요내용	○ 국가 식물 바이오데이터 표준화 및 공유체계 구축: 유전체, 전사체, 대사체, 표현형, 재배환경 데이터를 표준화하고, 시료 정보, 분석 조건, 품질지표, 실패 데이터까지 포함하는 AI 학습용 데이터 체계를 마련함. ○ 식물 특화 바이오파운드리 트랙 구축: 자동 DNA 조립, 식물 형질전환, 재분화, 식물세포·모상근 배양, 고속 리포터 분석, LC/GC-MS, 공간 오믹스, 수직농장 제어를 연계한 전용 워크플로우를 구축함. ○ 부품·새시·생산공정 라이브러리 확보: 프로모터, UTR, 터미네이터, 소기관 표적화 서열, 조직 특이 조절부품, CRISPRa/i 부품과 주요 식물 새시별 표준 프로토콜을 구축함.
국내외 유사 사례	○ 국내에서는 국가 바이오파운드리 인프라 구축이 추진되고 있으나, 현재까지는 범용 합성생물학 또는 미생물 중심 자동화에 비중이 있어 식물 형질전환·재분화·대사체 분석을 포괄하는 식물 특화 트랙은 부족함. ○ 해외에서는 AI, 로봇틱스, 고처리량 분석, CRISPR 조절, 단일세포 대사체 분석을 결합한 바이오파운드리 기반 연구가 확산되고 있으며, 식물 분야에서도 자동화 DBTL 실증 사례가 제시되고 있음. ○ AI를 활용해 생합성 유전자, 효소 기능, 대사 플렉스, 단백질 구조, 수송체 후보를 예측하고, 작물 합성생물학과 디지털 트윈으로 확장하는 연구가 활발히 진행 중임.

기대효과 및 활용방안	○ 식물 멀티오믹스, 대사체, 표현형, 재배환경 데이터를 통합한 AI-DBTL 플랫폼을 구축하여 대사경로 설계의 예측성과 재현성을 높이고, 연구개발 기간과 시행착오를 감소시킬 수 있음. ○ 전구체 공급 확대, 경쟁 경로 억제, 보조인자 균형 조절, 독성 중간체 완화, 조직·소기관 특이 발현 기술을 통합하여 목표 물질의 생산성과 안정성을 향상할 수 있음. ○ 단일 성분 생산 실증 이후 다중 성분 생산, 환경응답형 합성회로, 디지털 트윈 기반 공정제어로 확장함으로써 식물 기반 바이오소재 CDMO, 맞춤형 합성식물체 설계·생산 서비스, 고부가 천연물 원료 국산화 플랫폼으로 활용 가능함.
기타	○ 식물 합성생물학, AI, 로봇틱스, 대사체 분석, 스마트팜, 규제과학 전문가가 참여하는 산·학·연·관 협력형 국가 전략과제로 추진할 필요가 있음. ○ 외래 유전자 삽입체, 유전자교정체, 폐쇄형 세포배양, 식용·비식용 제품, 의약품 생산 식물체를 구분한 위험도 기반 규제 차등화와 안전성 평가체계가 필요함. ○ 중장기적으로 국제 표준, 폐쇄형 생산 인증, AI 모델 검증 기준, 생태·윤리 거버넌스를 연계하여 글로벌 식물 기반 바이오제조 플랫폼으로 확장할 수 있음.

2026년
BioINpro

- 발 행 호 : Vol.198
- 발 행 처 : 한국생명공학연구원 국가생명공학정책연구센터
- 온라인 서비스 : <http://www.bioin.or.kr>

- ◇ BioINpro는 생명공학 주요 기술별 관련 전문가의 시각에서 작성된 보고서이며,
생명공학정책연구센터의 공식 견해는 아닙니다.
- ◇ 본 자료는 생명공학정책연구센터 홈페이지(<http://www.bioin.or.kr>)에서 다운로드가
가능하며, 자료의 내용을 인용할 경우 출처를 명시하여 주시기 바랍니다.