



Korea Synthetic Biology Association

합성생물학 월간동향

2026

1

SynBioxAI 혁신 : 미래 잠재력과 정책 과제

김민정 前 국가생명공학정책연구센터 연구원

SynBioxAI 혁신 : 미래 잠재력과 정책 과제

본 자료는 OECD에서 발간된 'SYNTHETIC BIOLOGY, AI AND AUTOMATION : A FORWARD-LOOKING TECHNOLOGY ASSESSMENT(2025.11)' 보고서의 내용을 주요 골자로 하며, 목차 구성 및 최신 사례를 추가·각색하여 재구성하였습니다.

1. [INTRO] SynBioxAI : 왜 지금 이 기술에 주목하는가?

- 최근 합성생물학(Synthetic Biology)과 인공지능(AI), 로봇 자동화(Automation)의 결합은 단순한 기술적 보조를 넘어, 생명공학 연구와 산업의 근간을 바꾸는 'SynBioxAI*'라는 새로운 혁신 체계를 형성

* 합성생물학, AI, 자동화 및 로봇공학의 융합을 지칭하는 OECD의 전략적 용어

- AI는 혁신의 도구일 뿐만 아니라 위험을 관리하고 사회적 신뢰를 확보하기 위한 필수적인 안전망으로, 합성생물학의 연구 속도와 범위를 전례 없는 수준으로 확장시키는 데 기여

※ 향후 양자 기술과의 융합도 기대되며 이는 합성생물학 가능성의 경계가 확장될 전망

- 또한 기술적 융합은 단순히 '빠른 도구'의 획득이 아닌 기존 생명체를 다루는 규칙을 바꾸고 전통적인 바이오산업 체계를 재편할 수 있는 영향력 발휘

- OECD에서는 SynBioxAI의 기술적 영향력과 정책적 우려 사항을 판단하기 위해 예비 진단을 실시했으며 이를 통해 기술·사회적 특성을 살펴볼 수 있음

- '신기술의 선제적 거버넌스를 위한 OECD 프레임워크(2024)'에 따라 SynBioxAI가 단순한 기술적 진보를 넘어 사회 전반에 근본적인 변화를 초래하는 신기술임을 전제로 하며, 6가지 핵심 진단 기준*을 기반으로 이 기술이 지닌 고유한 복합적 특징을 도출

* ①Uncertainty ②Risk and scale of impact ③Level of public concern or value conflict ④Pace of technology emergence ⑤Strategic importance ⑥Governance gaps

※ OECD에서는 2010년대부터 합성생물학 정책연구를 수행해왔으며 2023~2024년에 합성생물학과 AI·자동화가 빠르게 융합됨을 확인하고 선제적으로 기회와 위험 분석을 시작

※ 예비 진단의 본래 목적은 기술의 위험성과 전략적 정보 수집의 필요성을 판단하고 정책적 우선순위를 살펴보기 위함이나, 그 과정에서 도출된 데이터는 신기술의 본질적 특성을 이해하는 지표로도 활용될 수 있음

▶ SynBioxAI는,

- AI 알고리즘의 비투명성과 생물학적 가변성이 결합되어, 기술 확산에 따른 장기적 영향 및 환경적 상호작용에 대한 예측 불확실성이 높은 분야

※ 다수 국가에서 핵심기술로 분류하고 선도적 위치 확보를 위해 경쟁하는 등의 외부 요인도 기술 발전 속도와 방향에 대한 불확실성에 영향을 줄 수 있음

- 무수한 가능성을 제공하고 연구자의 지식 접근성을 높이는 동시에, 악의적 행위자의 생물보안(Biosecurity) 및 바이오 테러 위험이 높은 분야
 - AI 기술은 국가별 규제와 안전 프레임워크가 구축되고 미디어와 대중의 관심이 매우 높은 반면, 합성생물학 기술은 일반 시민이 이해하기 어렵고 GMO에 대한 불신이 존재하는 등 대중 인식 차이 극복을 위한 투명한 정보 제공과 시민 참여가 필요한 분야
 - 생성형 AI가 실험실 연구 방식을 빠르게 변화시키고 있으며 로봇·자동화 기술로 바이오 파운드리 등 완전한 자동화 연구시스템이 구현되며 기술 발전 속도가 빠르게 진행됨에 따라 규제 수립 속도를 앞지를 수 있는 분야
 - 기후 위기 대응, 보건 및 식량안보 개선 등 글로벌 난제 해결을 위한 핵심 기술로 간주되며, 국가 간 경쟁 심화 속에서 공급망 회복력 확보와 경제적 경쟁력을 결정짓는 전략기술로 지정되고 있는 분야
 - 합성생물학은 초기부터 엄격하게 규제된 반면, AI는 비교적 자유롭게 발전해 온 상이한 거버넌스 문화를 지니고 있어 융합 과정에서 기존 거버넌스 간 충돌이 발생하지 않도록 조율이 필요한 분야
- 이처럼 SynBioxAI 기술은 혁신적 잠재력과 국가 전략적 가치가 매우 높으며, 기회와 위험 요소를 동시에 안고 있어 선제적 현황 파악과 영향 평가가 필요
- 앞으로 기술 발전과 동시에 유발될 수 있는 디지털 의존도 심화, 오픈 소스 데이터 가용성 확대, 연구 자동화, 기술 악용 가능성 등 새로운 도전 과제들이 수반될 것으로 예상
 - 기술 접근성이 낮아짐에 따라 악의적 행위자에 의한 생물학적 위협 가능성이 증대될 수 있고, AI 학습 데이터의 편향성으로 인한 기술 격차 및 윤리적 문제가 발생할 가능성 존재
 - SynBioxAI 기술 발전 가속도에 대응하여 미래의 불확실성을 통제 가능한 범위 내로 수렴시키기 위한 전략적 정책 옵션을 지속적으로 고민해야 함

2. [TECH] SynBioxAI 혁신 현황 및 잠재력

- **(R&D 패러다임 전환)** AI를 활용한 예측 모델링 및 가상 시뮬레이션(In silico) 도입과 자동화 시스템을 통해 시행착오를 최소화하고 R&D·생산을 가속화
- AI 기반 바이오 디자인 도구(AI-Augmented Biodesign Tools)는 AI 모델을 통해 분자 구조 및 상호작용을 빠르게 예측하고 특정 목적에 맞는 정밀한 바이오 분자 설계를 가능하도록 전환

- AI는 세포 내 상호작용을 프로그래밍하여 원하는 분자를 생성하게 하는 유전 회로 설계를 자동화
- 연구의 전 과정을 지원하는 인공 보조 과학자 AI 에이전트(AI Agents)도 개발되어 과학 문헌 탐색 및 가설 생성, 실험 프로토콜 설계, 결과 분석을 지원하며 연구 주기 단축에 기여

▶(분자구조·상호작용 예측) AlphaFold>AlphaFold3, RoseTTAFold>RoseTTAFold All-Atom

- AlphaFold는 고정밀 단백질 구조 예측을 가능하게 함으로써 합성생물학을 포함한 바이오 연구 전반의 속도와 접근성을 획기적으로 향상
- 기존 AlphaFold가 단백질 구조를 예측했다면 최근 AlphaFold3은 단백질뿐 아니라 DNA, RNA, Ligands, 이온 간 복합체 구조 등 분자 간 상호작용까지 예측 가능
 - * 특히 리간드(약물 후보물질)와의 결합 예측 정확도가 크게 향상되어, 인실리코(In-silico) 기반 신약 설계(Drug Design) 가능성을 높였다는 평가(실제 약물 결합 예측에서는 여전히 검증이 필요한 단계)
- Isomorphic Labs*가 AlphaFold3를 실제 drug discovery pipeline에 적용 중이며, IsoDDE(Isomorphic Labs Drug Design Engine)와 같은 약물 설계용 AI 플랫폼도 활용해 바이오데이터와 대규모 언어·단백질 구조 모델 결합으로 신규 치료 후보를 신속 발굴
 - * AlphaFold 기술의 실제 신약개발 적용을 위해 Alphabet이 DeepMind에서 분사해 설립한 AI 기반 바이오기업
- RoseTTAFold All-Atom(RFAA)은 생성 AI인 RFdiffusion과 결합하여 자연에 없는 새로운 단백질을 설계하는 데 최적화된 설계 도구로, 오픈 소스 생태계를 기반으로 연구자가 직접 알고리즘 개량 가능

▶(표적화 및 신규기능 설계) Benchling, CAMEOS

- 클라우드 기반 R&D 협업 통합 플랫폼인 'Benchling'은 기존 생물학 연구가 종이 노트나 파편화된 파일에 의존하던 관행을 깨고, 클라우드 환경에서 연구데이터를 통합하기 위해 2012년에 처음 개발되었으며 초기에는 디지털 실험노트 수준에서 시작
- 현재는 Benchling AI로 업그레이드되어 AI가 연구 과정에 직접 개입하여 데이터 자동 정리, 실험데이터 구조화, 연구자 의사결정 보조 등의 기능을 수행
 - * PipeBio 인수 후 생물정보학과 실험 데이터를 연결하는 통합 솔루션을 발표, 바이오의약품·항체 개발 플랫폼으로 확장
- CAMEOS(Constrained Adaptive Mutational Evolution for Overlapping Sequences)는 합성생물학에서 핵심유전자와 목표유전자를 동일한 DNA 영역 내에서 겹쳐 인코딩(오버랩)함으로써, 목표 유전자의 돌연변이 발생을 억제하고 유전적 안정성을 높이는 계산 설계 및 실험 플랫폼

* 2019년 개발 시 수학적 알고리즘을 주로 사용했으나, AI 도입 후 수조 개의 DNA 서열과 단백질 발현량 데이터를 학습하며 더욱 정밀한 예측이 가능

» (유전회로 설계 자동화) Cello, CELLM

- Cello는 원하는 기능을 입력하면 세포 내 작동하는 유전자 회로를 자동으로 설계해주는 소프트웨어로, 2016년 개발된 최초의 유전자 회로 자동 설계 플랫폼 중 하나
- * DNA 부품 라이브러리를 논리 게이트로 활용하여 인공 유전자 회로를 구축
- 기존 연구자가 직접 설계했던 것을 컴퓨터가 자동 설계, 자동 DNA를 생성함으로써 실험 효율이 증가했으며 합성생물학 설계 플랫폼 발전에 큰 영향을 미침
- 초기 Cello가 E.coli 중심의 단순 유전자 회로 설계였다면 업그레이드된 Cello 2.0은 다양한 생물에 적용이 가능하고 DB와 연동되어 더 복잡한 유전자 회로 설계가 가능
- Cello에 AI를 결합한 CELLM은 자연어로 유전자 설계를 할 수 있도록 만든 차세대 시스템으로, 전문가의 설계 입력 없이 아이디어를 설명하면 AI가 이해하여 Cello가 유전자를 자동 설계하는 것이 가능(2025년 발표)
- * CELLM은 일반 연구자도 자연어로 유전자 회로 설계가 가능하여 향후 누구나 생물학적 설계를 할 수 있는 AI 기반 합성생물학 플랫폼의 방향성 제시

» (가설생성 및 실험설계) FutureHouse

- 2023년 설립된 AI 과학자(AI Scientist) 개발 연구기관으로, 인간 과학자의 보조를 넘어 스스로 가설을 세우고 실험을 설계하는 자율형 AI 과학자 개발을 추구
- * 솔루션은 과학 문헌을 탐색하여 아이디어 간의 연결 고리를 추출하고, 새로운 가설 생성, 실험 프로토콜 설계, 결과 분석을 도와 연구 주기를 자동화하고 가속화
- 2025년 6월, 'ehterO'이라는 화학 분야 과학적 추론 모델을 발표했으며, 2025년 11월, FutureHouse의 상업용 스피노프인 Edison에서 한 번의 실행으로 1,500편의 논문과 42,000줄의 분석 코드를 처리할 수 있는 차세대 AI 과학자 'Kosmos' 출시

- 바이오파운드리: 로봇 기반 자동화 공정과 AI 설계 도구를 결합하여 합성생물학의 DBTL 사이클을 고속화하는 첨단 인프라로, 자동화를 통한 비용 절감, 학제 간 협업 생태계 조성이 가능해 국가별 인프라 조성에 적극적

※ 막대한 자본 투자가 어려운 스타트업이나 개별 연구자들이 첨단 인프라를 활용할 수 있게 하여 바이오 기술의 민주화에도 기여

※ 바이오파운드리 운영 모델로는 정부 또는 기관의 보조금으로 운영되는 공공 바이오파운드리(K-BioFoundry, London Biofoundry 등)와 위탁연구기관(CRO) 역할을 수행하며 민간/학계에 유료 연구 서비스를 제공하는 민간 바이오파운드리가 있음

※ '글로벌 바이오파운드리 연합(Global Biofoundries Alliance)' 등을 통해 표준, 지표를 개발하고 국제 파트너십을 강화

➤ (사례①) 국가 주도 공공 인프라 - 선전 바이오파운드리(Shenzhen Biofoundry)

- 중국과학원(CAS) 산하 선전 선진기술연구원(SIAT)이 주도하고 선전 시정부가 자금을 지원하여 개발한 대규모 프로젝트
- 대학이나 연구기관이 독립적으로 운영하는 일반적인 바이오파운드리(예: 미국 iBioFAB, 영국 EGF)와 달리, 정부의 강력한 지원과 전략적 투자를 바탕으로 구축
- 중국의 여타 연구기관과 마찬가지로 '군민 융합(Civil-Military Fusion)' 개념이 통합되어 있을 수 있으며, 이는 개발된 기술이 민간과 군사 분야 모두에 적용 가능한 '이중 용도(Dual-use)' 성격을 가질 수 있음을 시사
- 글로벌 바이오파운드리 연합(GBA)의 회원사로서 전 세계 유사 시설들과 협력하며 합성생물학 기술의 글로벌 확산을 도모
- 강력한 정부 지원, 국제 협력, 데이터 분석 기술의 통합을 통해 바이오파운드리가 가질 수 있는 잠재력을 보여주는 선도적인 사례로 평가

➤ (사례②) 차세대 바이오파운드리 - Ginkgo Bioworks 'Autonomous Lab'

- 전통적인 바이오파운드리에 생성형 AI와 멀티 에이전트 시스템을 통합하여, 인간의 개입을 최소화한 자율형 연구소 'Autonomous Lab' 모델을 구축
- 단순한 자동화 설비를 넘어, AI 에이전트가 실험 가설 수립부터 로봇제어, 결과 분석까지 수행하는 지능형 R&D 인프라로 업그레이드
 - * OpenAI와의 전략적 협업을 통해 개발된 바이오 전용 LLM을 바이오파운드리 운영 체제에 이식함으로써 연구자가 자연어로 실험 목적을 입력하면 AI 에이전트가 최적의 워크플로우를 설계하고 실행
 - * OpenAI의 GPT-5 추론 모델과 Ginkgo의 클라우드 실험실 인프라를 결합해 약 36,000건의 실험 데이터를 자율적으로 분석하여 무세포(Cell-free) 단백질 합성 반응 비용을 약 40% 절감
- 외부 연구자들이 회사의 자동화된 실험실 인프라에 원격으로 접속하여 이용할 수 있는 'Ginkgo Cloud Lab' 서비스도 제공함으로써 대규모 자본 투자 없이도 첨단 바이오파운드리 활용이 가능

[참고] 글로벌 바이오파운드리 리스트

Name	City	Country	Public or Private
A*STAR SPARROW	Singapore	Singapore	Public
ACIED BIO	Ljubljana	Slovenia	Private
Agile Biofoundry	Emeryville	USA	Public
Ajagene Biofoundry	Herzliya	Israel	Private
Australian Genome Foundry	Sydney	Australia	Public
Australian Institute for Bioengineering and Nanotechnology	Brisbane	Australia	Public
Biofactual	Vancouver	Canada	Private
Biofoundry India	New Delhi	India	Public
BRIGHT Biofoundry, Technical University of Denmark	Kongens Lyngby	Denmark	Public
Center for Synthetic Biology	Evanston	USA	Private
Colorado Cyberbiofoundry	Colorado	USA	Public
CompuGene, TU Darmstadt	Darmstadt	Germany	Public
Concordia Genome Foundry	Montreal	Canada	Public
CSIRO Biofoundry	Brisbane	Australia	Public
DAMP lab, Boston University	Boston	USA	Public
DTU Biosustain Biofoundry	Lyngby	Denmark	Public
Dyadic	Jupiter	USA	Private
Earlham DNA Foundry	Norwich	UK	Public
Edinburgh Genome Foundry	Edinburgh	UK	Public
Engineering Biology Research Centre, Kobe University	Kobe	Japan	Public
Estonian Biofoundry	Tartu	Estonia	Public
GeneMill	Liverpool	UK	Public
Ginkgo Bioworks	Boston	USA	Private
iBioFAB – Illinois Biological Foundry for Advanced Biomanufacturing	Illinois	USA	Public
iBVT	Stuttgart	Germany	Public
IDEA Bio	Queensland	Australia	Public
Julich Biofoundry, Forschungszentrum Julich	Julich	Germany	Private
K-BioFoundry (KAIST and KRIBB)	Daejeon	South Korea	Public
Kobe Biofoundry	Kobe	Japan	Public
Lara, Laboratory Automation Robotic Assistant Biochemistry Greifswald	Greifswald	Germany	Public
Living Measurement Systems Foundry, NIST	Maryland	USA	Public
London Biofoundry, Imperial College London	London	UK	Public
MaxGENESYS, Max Planck Society, MPI for Terrestrial Microbiology	Marburg	Germany	Public
NIST Living Measurement Systems Foundry	Gaithersburg	USA	Public
NSF ExFAB BioFoundry	Santa Barbara	USA	Public
Nucleo de Innovación de Sistemas Biológicos, NISB	Monterrey	Mexico	Public
Paris Biofoundry	Paris	France	Public
RISE High-throughput Centre		Sweden	Public
SIAT Biofoundry	Shenzhen	China	Public
SJTU Synbio Biofoundry	Shanghai	China	Public
SKy Biofoundry, Sungkyunkwan University	Seoul	South Korea	Public
SYNBIOCHEM	Manchester	UK	Public
SynBiofoundry@TUM	Munich	Germany	Public
SynCTI, Singapore Biofoundry	Singapore	Singapore	Public
SynDNA Lab	Heidelberg	Germany	Public
The Biofoundry at UBC	Vancouver	Canada	Public
Tianjin Biofoundry – Tianjin Institute of Industrial Biotechnology	Tianjin	China	Public
Tianjin University Biofoundry	Tianjin	China	Public
UCSD Biofoundry	San Diego	USA	Public
UKM Biofoundry	Bangi	Malaysia	Public
VTT Technical Research Centre of Finland	Espoo	Finland	Public
Zhejiang University	Zhejiang	China	

* 출처 : OECD(2025)

* 이 목록은 OECD에서 기존 보고서, 학술 논문, 정책 문서 등을 검토하여 2025년 7월 기준으로 작성됨

- **(산업 가치사슬 혁신)** AI와 합성생물학의 융합은 여러 산업을 근본적으로 변화시키며 더 스마트하고 빠른, 지속 가능한 생산 시스템을 가능하도록 전환
- **(보건의료)** AI는 방대한 유전체 데이터셋과 화합물 라이브러리를 분석하여 타겟을 예측하고 리드 화합물을 최적화함으로써, 비용과 시간이 많이 드는 고처리량 스크리닝에 대한 의존도를 감소
- 또한 ADMET(흡수, 분포, 대사, 배설 및 독성) 특성을 예측하여 약물 안전성 평가를 강화하고 후기 단계의 실패를 최소화하는데 기여

» (사례) 인실리코 메디슨(Insilico Medicine) - AI 기반 신약개발 패러다임 전환

- AI가 표적을 찾고 설계까지 마친 신약 후보물질(INS018_055, 특발성 폐섬유증 치료제)로 세계 최초 임상 시험에 진입한 상징적 사례(2021.11~ 임상 진행 중)
- 표적 발굴부터 후보물질 도구까지 전 과정 AI 주도 : 질병의 원인이 되는 단백질(표적)을 찾는 'PandaOmics'와 새로운 분자 구조를 설계하는 'Chemistry42'를 결합하여 연구 효율성 극대화
- 통상 4~5년 소요되는 전임상 단계를 18개월 미만으로 단축하고, 비용을 수분의 일로 절감
- 2025년 임상 2상 결과에 대한 긍정적인 중간 발표 후 현재 임상 3상 준비 중으로 치료 효능 실증 단계에 안착

구분	전통적 신약개발	인실리코 메디슨
타겟 발굴-전임상 후보도출	약 4.5~5년	18개월(약 1/3 수준)
소요 비용	수억 달러(수천억 원)	약 260만 달러(액 35억 원)
합성 및 테스트 화합물 수	수천개 이상	단 78개
성공률 및 효율	높은 불확실성, 낮은 타겟 정확도	AI가 노화와 질병 경로를 동시 분석하여 정확도 극대화

- **(식량·농업)** AI는 엔지니어링된 미생물과 작물 같은 합성생물학 응용을 간소화하고 가속화, 유전자 공학은 영양이 강화된 식품원을 만드는 데 사용되어 왔으며, AI의 통합은 미생물과 작물의 타겟 변이 부위를 식별하거나 유전적 변화의 결과를 예측하는 데 도움

» (사례①) 탄소 포집 효율을 극대화한 '기후 대응형 벼(Climate-resilient Rice)' 설계

- 광합성 효율을 결정하는 핵심 효소인 루비스코(Rubisco)의 유전적 변이 부위를 AI로 분석하여, 이산화탄소(CO₂) 결합 능력이 뛰어난 최적의 유전자 조합을 인실리코(Insilico) 상에서 설계

- * 전통적 교배 육종으로 10~12년 소요되던 과정을 AI 예측과 유전자 교정(CRISPR) 기술의 결합으로 3년 이내로 단축
- IRRI(국제미작연구소)가 2025년 공개한 AI 기반 하이브리드 육종 플랫폼(GAI-HRP)의 성과를 바탕으로, 2026년 베트남 등 동남아시아 주요 쌀 생산지에서 대규모 저탄소 벼 실증 사업 진행 중
- * IRRI는 세계에서 권위있는 벼 연구 기관으로, AI와 유전자 교정을 활용해 가뭄에 강하고 탄소 흡수 효율이 높은 벼 품종을 개발하는 'C4 Rice Project'를 주도
- 영국 스타트업 Biographica가 2026년 1월, 세계적 화학기업 BASF와 파트너십을 체결하고 AI 플랫폼을 통해 가뭄과 질병에 강한 유전자 타겟을 기존 대비 12배 빠른 속도로 식별 성공

➤ (사례②) AI 기반 '고단백 맞춤형 대두' 육종

- Benson Hill은 자체 AI 플랫폼 'CropOS®'를 활용해 단백질 함량이 일반 대두보다 현저히 높은(약 45~50% 수준) 초고단백(UHP) 대두 설계
- * 글로벌 곡물 기업 ADM과의 파트너십을 통해 북미 시장에서 상업화 및 생산 규모 확대 계획

➤ (사례③) GEAIR 시스템 : AI 로봇과 작물의 공진화

- GEAIR(Genome Editing with AI-based Robots), 단순히 작물을 개량하는 것을 넘어, AI 로봇이 수분(Pollination)하기 가장 좋은 형태로 작물의 유전자를 교정하는 '작물-로봇 공동 설계' 개념이 Cell지에 발표
- * 논문명 : Engineering crop flower morphology facilitates robotization of cross-pollination and speed breeding(2025.10)

- **(소재·화학)** 생촉매(Biocatalysis)는 합성생물학을 통해 발전해 왔으며, 현재는 AI 기반 설계를 통해 더욱 효율적이고 지속 가능한 생산을 실현
- ※ 머신러닝 기반 효소 공학은 그린 화학의 기본 반응인 아미드 결합을 형성할 수 있는 생촉매 제작을 용이
- ※ 석유 대신 생물학적 원료나 폐기물을 사용하여 플랫폼 화학물질이나 플라스틱을 합성하도록 미생물을 최적화함으로써 화석 연료 의존도를 낮추고 순환 경제에 기여

➤ (사례) AI로 설계한 '신속 플라스틱 분해 효소 FAST-PETase'

- 미국 텍사스대 연구팀은 머신러닝 모델을 활용하여 페플라스틱(PET)을 상온에서 단 몇 시간~몇 일 만에 분해하는 초강력 효소 'FAST-PETase'를 설계(2022.5)

* 논문명 : Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization(Nature, 2022)

- 최근 2026.3월 FAST-PETase를 안정성이 높도록 추가 개량한 'FAST-PETaseDC' 개발연구의 논문 발표(1.9배 분해 효율 증가, 50°C에서 3일 내 PET 필름 거의 완전 분해)

* 이는 아직 상용화 준비 단계에 있으나, 추후 FAST-PETase와 같은 AI 설계 효소(Extremozymes)들이 전통적인 화학 제품 재활용을 대체하기 시작하는 것으로 분석(Verified Market Research 시장분석보고서)

- **(도전 과제)** AI 모델 학습 시 발생하는 막대한 CO₂ 배출량(대형 모델 1개당 약 500톤)이 바이오 경제의 환경적 이득을 상쇄할 우려 존재

※ 2030년까지 AI 관련 전력 소비가 4배 증가할 것으로 예상됨에 따라 지속 가능성 확보가 필수 과제로 부상

※ **(대응 방안)** 재생 에너지 활용 데이터 센터 구축 및 알고리즘 연산 효율화 필요

» (사례) 소르본 대학, '녹색 바이오파운드리(Green Biofoundry)' 모델

- CO₂를 유일한 탄소원으로 사용하는 광합성 생물체를 엔지니어링하여 탄소 배출을 억제하는 친환경 공정(Carbon-negative) 인프라

* 기존 바이오파운드리가 주로 다루던 대장균이나 효모 대신 미세조류와 같은 광합성 유기체 고속 설계·배양

- DBTL 사이클을 로봇공학·AI로 자동화하여 미세조류의 복잡한 유전적 회로를 신속 테스트

- 탄소 중립(Net-Zero) 달성과 태양광을 이용한 지속가능한 바이오 경제를 목표

● (교육 및 기술) AI 도구는 교육과 연구방식의 모습을 재편하며 첨단 합성생물학 지식과 기술에 대한 접근성을 향상시키는데 기여

- 많은 학술 기관이 학습 보조 및 신기술 접근을 위해 AI를 수용하고 있으나, 교사들의 훈련 부족이나 명확한 통합 프레임워크의 부재는 여전히 과제

※ LLM을 통한 복잡한 과학 콘텐츠의 단순화 및 개인 맞춤형 학습 지원을 통한 지식 접근성은 확대되는 반면 디지털 도구 접근성 차이에 따른 불평등 심화, AI 환각(오정보)에 대한 비판적 검증 능력 부족 및 AI 과의존에 따른 문제 해결 능력 약화와 같은 리스크 우려

- 실험실에서도 과거에는 연구 후반부 결과 분석에만 생물정보학(Bioinformatics)을 사용했다면, 이제는 초기 설계나 프로토콜 문제 해결 단계에서부터 AI와 자동화 시스템을 통합하는 추세

※ 이러한 발전은 생명과학자와 소프트웨어 엔지니어 간의 공동 작업 문화 정착 등 기존 대비 더 높은 수준의 다학제적 역량을 요구

- AI 도구가 합성생물학의 진입 장벽을 낮추고 있으나 전문적인 AI 바이오 디자인 도구 운영과 결과의 실제 구현에 있어서 고도의 전문 교육이 필요

- 또한 합성생물학에 대한 단순 지식습득을 넘어 사회 전반의 이해와 합리적 판단을 위한 '바이오 리터러시(Bioliteracy)'의 지속적인 논의가 필요

● **(안전관리)** 연구실 외부로 방출되는 유기체에 대한 위험 평가의 디지털 전환 및 AI 기반 생물학적 봉쇄(Biocontainment), 실시간 생물 감시(Biosurveillance) 고도화

- 유전자 변형 생물체(GMO) 규제는 방출 전 실증 연구에 기반한 위험 평가를 요구하나, AI의 대규모 환경 데이터 분석을 활용하면 GMO의 자연계 상호작용 및 시계열적 진화 양상을 사전에 예측 가능

※ 이러한 모델이 개발된다면 규제 당국의 신속하고 정보에 입각한 의사결정 지원 및 지역사회와의 효과적인 소통이 가능하나, 데이터 가용성 제한, 알고리즘 편향성, AI 생성 결과에 대한 신뢰 구축 등의 과제는 해결이 필요한 과제

- 생물학적 봉쇄를 위해 과학자들은 유전적 킬 스위치(Genetic Kill Switches)*, 합성 영양 요구성(Synthetic Auxotrophs)**, 바코딩(Barcoding)*** 등 다양한 '페일세이프(Failsafe)' 전략을 테스트해왔으며 AI를 통해 진화적 탈출 경로를 식별하거나 신경망을 통한 생물학적 회로 설계를 최적화하는 연구 진행 중

* 특정 조건(온도변화, 특정 화학물질 부재 등)에 반응해 스스로 사멸하도록 유전자 설계

** 자연계에 존재하지 않는 특수한 영양소가 있어야만 생존(외부 영양소 없이는 생존 불가)

*** 유기체의 유전자에 식별을 위한 인공 염기서열을 삽입하여 기록

※ 시간이 지나 생물이 돌연변이를 일으킬 수 있으므로 AI를 통해 탈출 경로를 미리 시뮬레이션하고, AI 기반의 철저한 이중·삼중 잠금장치를 설계할 수 있으며 신경망 기술을 이용해 환경 변화에도 오작동하지 않는 가장 최적화된 생물학적 회로 설계 목표

- 실시간 생물감시는 수동적인 샘플 채취 방식에서 벗어나 AI와 바이오센서, IoT 기술을 결합하여 위험 요소를 즉각 탐지하고 그 기원(자연적·인위적)까지 식별하는 '지능형 조기 경보 체계'로 진화 중

➤ **(사례)** 미국 FELIX(Finding Engineering Linked Indicators) 프로그램

- 미국 국가정보원 산하 IARPA(Intelligence Advanced Research Projects Activity)에서 개발한 유전자 조작 탐지 AI 프로그램
- AI 기반 유전체 비교 분석을 통해 환경 내 유전자 조작 생물체의 존재를 약 70%의 정확도로 식별
- 2017년부터 CRISPR 등의 유전자 편집 기술이 급격히 대중화되면서 안보 위협에 대응하기 위해 시작되었으며 약 5년 이상의 기간 동안 여러 대학과 민간 연구소가 팀을 이룬 R&D를 거쳐 현재의 수준까지 도달
- 지금은 단순히 조작된 사실을 넘어 어떤 도구(어떤 종류의 유전자 가위 등)를 사용했는지까지 더 정밀하게 파악하는 고도화 단계의 연구 중

- **(장기적 혁신 및 기반 연구)** AI와 자동화 기술은 합성생물학의 기초연구를 가속화하여 생물학적 시스템에 대한 이해를 높이고 인공세포, 디지털 트윈, 거울상 생명체 등의 새로운 응용을 가능하게 함
 - 기존 생물 수정에서 벗어나 생체 부품을 조립(Bottom-up)하거나 게놈 전체를 합성 교체(Top-down)하여 '무(無)'에서 생명 창조'가 시도되고 있으며, 불필요한 대사 과정을 제거하고 특정 산업·의료 목적에만 최적화된 고효율 세포 설계 가능
 - ※ 액체 방울 내에서 CO₂ 고정 특성을 모방하거나, 종양 내부에서 항암 단백질을 생산하는 소포(Vesicles)를 만드는 연구가 이미 진행
 - ※ 박테리아의 게놈을 화학적으로 합성된 다른 종의 게놈으로 교체하거나, 생존에 필수적인 유전자만 남기는 '최소 세포(Minimal cells)' 연구도 진행 중
 - AI와 멀티오믹스 데이터를 결합하여 세포의 기능을 3D 가상 공간에 복제하는 세포 가상 모델 'Digital Twins'는 치료제 투여 시의 반응 예측과 세포 내 작동 기전을 시각화하여 규명하는 것을 목표로 연구 중
 - ※ 예쁜꼬마선충(C.elegans) 모델 전체를 디지털로 시뮬레이션하는 단계에 진입했으나 생명의 복잡성으로 인해 '완전한 구현'까지는 아직 기술적 간극과 지식 공백 존재
 - 과학자들은 생명체의 고유한 분자 방향성과 반대되는 '거울상 생명체(Mirrored Life)'를 합성해 기초연구와 치료제 개발에 활용하고자 시도 중
 - ※ 이러한 유기체가 연구실 밖으로 유출될 경우 기존 생태계가 인지하지 못하는 공격성이나 먹이사슬 교란 등의 위험성이 초래될 우려가 제기되고 있으며 기술개발 전 선제적 위험분석 및 글로벌 연구 가이드라인 또는 금지 조치에 대한 사회적 합의 촉구
 - AI·자동화로 가속화된 기술 진보는 새로운 인한 생명체 대규모 설계의 윤리적 한계 직면하고 사회가 자기 충분히 탐구하지 못한 새로운 불확실성을 도입
 - ※ 기술의 목적과 수단, 윤리적 경계에 대해 시민사회 및 전문가 그룹과의 지속적인 재참여(Re-engagement) 및 소통 강화를 통한 투명성 확보가 필수적으로 요구

3. [FUTURE] 거버넌스 과제와 정책 옵션

OECD에서는 SynBioxAI 기술혁신의 가속화와 동시에 오용을 방지하기 위한 정책 입안자와 국제사회에서 향후 취해야 할 잠재적 조치에 대한 정책 옵션을 7가지로 제시

- ECD에서는 SynBioxAI 기술혁신의 가속화와 동시에 오용을 방지하기 위한 정책 입안자와 국제사회에서 향후 취해야 할 잠재적 조치에 대한 정책 옵션을 7가지로 제시

(1) 혁신 친화적 규제(Pro-innovation Regulation)

- SynBioxAI 기술에 대한 거버넌스는 완전히 새로운 출발점에서 시작되는 것이 아니며 기

술 발전에 따른 기존 규제 개정 여부에 대한 국가별 검토 필요

- 기존 합성생물학 제품 관련 규제나 GMO, 화학물질, 생물학적 제품에 대한 규제와 함께 최근 새롭게 규정되고 있는 AI 규제에 이미 포함

- 이러한 기존 규제, 표준, 법 등을 종합하면 대부분의 SynBioxAI 응용은 이미 어느 정도 규제 범위 내 포함될 가능성이 높음

※ 실제 EU의 'AI Act'는 신약개발 분야의 AI 활용을 포함하며, 미국의 'America's AI Action Plan'은 핵산 합성 스크리닝과 같은 생물안보 조항을 포함

- 따라서 SynBioxAI 발전에 따른 기존 규제에서 개정이 필요한 범위에 대해서 국가별로 규제 중복, 사각지대, 공백 식별을 위한 법적 검토 필요

※ 이러한 규제 검토 시, 특히 이중용도 위험, 생물학적 데이터 규제, 관련 AI 도구 감독 등을 명시적으로 고려할 것을 권고

● 혁신 촉진을 위해 얼마나 유연한 규제가 필요한지 지속적으로 논의되는 분야로, 향후 여러 기술의 융합에 따른 문화적 차이 극복, 사회적 필요성 판단 요구

- 빠른 상용화와 제한된 감독 하에 발전해 온 AI 기술과 오랜 기간 자율규제와 엄격한 감독을 받아온 합성생물학 기술 간 문화 차이가 존재하므로 두 분야의 서로 다른 규제 관습과 규범을 통합하는 것이 필요

※ AI의 빠른 속도에 익숙한 투자자들이 합성생물학의 비선형적 R&D와 긴 규제 승인 기간에 적응해야 하며, 정부는 환경 안전·보건기술평가·AI 규제당국 간 칸막이 없는 협력 필요

- 기술 개발 과정에서 위험을 식별하고 관리하는 동시에, SynBioxAI가 가지는 긍정적 잠재력과 이를 활용하지 않을 경우의 기회비용도 고려

※ R&D 단계부터 사회적 목표(기후 변화 대응, 팬데믹 방지 등) 달성을 위해 기술 발전을 유도하는 '설계에 의한 안전(Safe-by-Design)' 및 '책임 있는 연구 혁신(RRI)' 개념 도입

※ (신속 승인 사례) 기후 위기나 팬데믹 같은 거대 과제 해결에 기여할 경우, 안전성을 유지하면서도 승인 절차를 간소화하는 방안 고려 (예: 코로나19 백신 개발을 앞당긴 미국의 '초고속 작전(Operation Warp Speed)')

● 리스크를 사후에 관리하는 방식에서, 혁신 초기 단계부터 이해관계자가 참여하여 문제를 예측하고 완화하는 방식으로 '민첩하고 선제적인 거버넌스' 중요

- 혁신 기술의 비례적·적응적 거버넌스(Proportionate and Adaptive Governance of Innovative Technologies, PAGIT)나 OECD 선제적 거버넌스 프레임워크가 적절한 대안이 될 수 있음

- SynBioxAI 기술이 성숙함에 따라 누가 의사결정을 하고 책임을 질 것인지에 대한 논의가 필요하며, OECD와 같은 국제기구가 국가 간 규제 상호운용성을 높이는 역할을 해야 함

(2) 생물안보 및 생물안전(Biosecurity and biosafety)

- AI 도구는 합성생물학 활용 진입장벽을 낮출 것으로 기대되나 동시에 병원체, 독소 개발 등의 생물학적 악용 가능성도 존재하므로 추가적 안전장치 필요
 - 디지털 설계가 실제 물리적 샘플(분자, 유기체 등)로 전환되는 '실험실 단계'에서 생산시설, 장비, 자금 등의 자원이 사용되는 과정에 강력한 안전장치 마련
 - 과거 서열 중심의 분석에서(무엇을 만드는가), 앞으로는 '사용자 의도'를 평가하기 위한 서열 기반 스크리닝과 사용자/주문 맥락 분석을 결합(누가, 왜 만드는가)
 - ※ 생성형 AI 모델과의 상호작용(프롬프트 등)을 분석하고, 맥락적 메타데이터, 행동 지표, 고객 스크리닝 시스템을 활용해 사용자 의도를 파악하는 정교한 프레임워크
- 합성생물학용 AI 모델 개방성에 대해 폐쇄형 모델은 안보 측면에서 유리하나 혁신 속도를 저하하므로 체계적 오픈소스 모델 활용 및 책임있는 문화 조성 필요
 - 오픈소스 모델은 투명성과 신뢰를 높이고 동료 검토(Peer-review)를 통해 도구의 효능과 위험 식별 능력 개선 가능(예: AlphaFold)
 - ※ 신뢰할 수 있는 사용자에게만 권한을 부여하는 '계층적 접근(Tiered Access)'이나 '내장형 가드레일(built-in guardrails)' 방식 고안
 - 정부 규제만으로는 한계가 있으므로 연구자들이 스스로 위험을 식별하고 설계 단계부터 안보를 고려하는 '책임 있는 문화'를 조성
 - ※ 특정 보안 지침을 준수하는 업체로부터만 물품을 구매하도록 하는 산업 구매 가이드라인 등 민간 협력 병행도 필요
- 생물안보 정책의 핵심 타겟이 될 수 있는 '핵산 합성 스크리닝'에 대한 새로운 식별 프로세스 및 국가별 전략적 정책 방안 마련 제안
 - 현재의 접근 방식은 주로 요청된 서열이 알려진 위험 서열과 얼마나 유사한지(상동성, Homology)를 확인하여 의심스러운 주문을 식별하는데 의존
 - AI 기반 바이오 디자인 도구는 기존의 스크리닝 시스템을 우회할 수 있어 스크리닝에 새로운 위험을 초래
 - ※ AI를 활용해 위험성이 알려진 서열과는 상동성이 낮으면서도, 실제로는 위험한 단백질과 구조 및 기능이 유사한 단백질을 생성하는 유전자 서열 설계 가능
 - 앞으로는 단순히 염기서열 문자를 읽는 것을 넘어, 이 유전자가 세포 내에서 어떤 '위험한 기능'을 수행할지 예측하여 차단하는 "우려 기능(Functions of concern)" 식별 방식에 집중 필요
 - ※ 주문자의 소속과 의도를 검증하는 '고객 스크리닝', 연구실 내 소형 합성기(Desktop Synthesizer) 제조사들과 협력하여 기기 자체에 차단 소프트웨어 탑재하는 방법도 고려
 - 각 국가별 상황에 맞게 AI 모델이 설계한 서열의 위험성을 평가할 수 있는 구체적인 기술 가이드라인 마련과 수출입 통제 기준 명확화로 연구자 혼란을 줄이고 혁신을 보호

※ 모든 국가가 자국 내에 핵산 합성 공급업체를 보유한 것은 아니며, 합성 업체가 없는 국가는 수입 단계에서의 통제가 중요

(3) 데이터 공급망(Data supply chain)

- 합성생물학을 위한 AI 알고리즘 학습에는 대량의 고품질 데이터가 필요하나, 다양한 소유권(정부/민간/기업별)에 따른 파편화 현상으로 병목 현상 존재

- 이를 해결하기 위해 연구자 간 데이터 공유·재사용이 가능한 데이터 공유 인프라와 상호 운용성 확보가 필수적

※ AlphaFold는 1960년대부터 정부 자금으로 구축된 PDB(Protein Data Bank)의 고품질 구조데이터를 기반으로 성공할 수 있었으며, PDB는 글로벌 오픈 액세스 원칙과 학술지의 데이터 공개 의무화 정책을 통해 막대한 투자 수익을 창출(연방 기금의 1,500배 이상)

- 데이터 부족의 대안으로 '합성 데이터(synthetic data)' 활용 방안이 논의되고 있으나 AI 모델의 편향을 고착화할 위험이 존재하며, AI 설계 속도를 따라가지 못하는 유전자 합성 길이 및 실험 하드웨어의 한계 발생

- 데이터 및 알고리즘의 공개 여부는 바이오 데이터 독점의 위험성을 방지하기 위한 개방형·폐쇄형 간 적절한 이원화 전략 필요

- 특정 거대 기업이나 국가가 필수 바이오 데이터를 독점할 경우, 전 세계 연구 방향이 특정 집단의 이익에 맞춰 왜곡되거나 다른 연구자 진입을 차단

※ 현재 합성생물학 분야(ELIXIR, EMBL-EBI 등)는 누구나 데이터를 찾고 사용할 수 있는 FAIR 원칙(Findable, Accessible, Interoperable, Reusable)을 따르나, AI 유입에 따른 데이터 권력화 방지를 위해 거버넌스의 역할 중요

※ 민간의 데이터 독점에 대응하기 위해 공공 주도의 표준화된 고품질 바이오데이터뱅크를 국가 자산으로 육성 필요

- 데이터 개방형 모델의 경우, 소스코드 공개로 전 세계 연구자들의 검증을 통한 모델 정확도 상승이 가능하며 특정 인종·곤경에 대한 데이터 편향성 방지 가능

- 폐쇄형 모델의 경우, 악의적인 생물체 설계용 AI 모델 사용의 원천 차단이 가능하며 대규모 투자 기업의 지재권 보호와 수익 창출 시 지속적 혁신이 가능

※ 안보 위험이 큰 영역은 폐쇄적으로 관리하되, 범용적인 기초연구 데이터는 FAIR 원칙을 고수하는 이원화 전략이 필요

- 규제 당국이 고려할 수 있는 실질적 정책 도구로 AI 학습에 사용되는 데이터의 윤리성과 품질을 담보할 수 있는 '데이터 라벨링(Data Labels)' 제도 검토 제안

※ 해당 데이터셋이나 알고리즘이 특정 기준(고품질, 포용성, 이익의 공정한 환원 등)을 충족했다는 것을 인증하는 일종의 '품질 보증 마크'로, 민간 기업의 자발적 마크 획득으로 신뢰도를 향상하거나, 공공 프로젝트에서는 이 마크가 있는 데이터만 사용하도록 의무화함으로써 건강한 데이터 생태계를 유도 가능

(4) 지역적 격차 해소(Regional Disparities)

- 국가마다 합성생물학 및 AI의 연구, 개발, 거버넌스 성숙도가 다른 바이오 디바이드(Bio-divide) 현상이 심화되고 있어 각기 다른 발전 경로가 필요
 - AI와 로봇 자동화 기술이 고가인 이유로 선진국 중심의 기술 독점 현상이 가속화될 수 있으며 개발도상국이 과학 연구에서 소외되고, AI 모델이 특정 인종·지역 데이터에만 편향될 가능성 존재
 - 국가별 바이오파운드리 인프라 격차는 (자본)투자 수준, (문화)기업가 정신, (인재)전문가 밀집도, (정책)규제 환경, (안정성)지정학적·사회경제적 요인 등에 따른 복합적인 요소가 결합되어 영향을 미치는 것으로 분석
- ※ 따라서 단순히 장비만 들여놓는 것이 아니라, 이 5가지 요소가 결합된 '혁신 생태계'를 구축하는 것이 본질적인 해결책으로 제시

투자 수준	미국, 영국, 중국과 같이 공공 및 민간 투자가 활발한 국가가 선도
기업가 정신	벤처 캐피털 인프라와 위험 감수 문화의 유무가 상용화 속도를 결정
전문가 밀집도	숙련된 전문가와 연구 기관이 집중된 '혁신 핫스팟'(런던, 보스턴, 선전 등) 형성 여부
정책·규제 환경	세제 혜택 및 간소화된 규제 등 정부의 지원 정책이 성패를 좌우
지정학적·사회경제적 요인	지속적인 투자·협력을 가능케 하는 경제적 안정성과 국제적 파트너십

- 빠른 회수·높은 확장성을 보유한 AI와 생물학적 불확실성·긴 호흡의 자본이 필요한 합성생물학 간 투자 문화의 충돌 발생 가능성 존재
- ※ 이를 극복하기 위해서 지역별 특화된 니치 시장을 발굴하거나 지역 파트너십을 활용하는 등의 맞춤형 투자 유치 전략 필요
- 기술의 혜택을 얻고 편향성에서 벗어나기 위해 개발도상국이나 원주민 공동체의 데이터도 알고리즘 학습에 포함되어야 하며 동시에 데이터 제공자에 대한 공정한 보상이 보장되는 '이익 공유' 체계 마련 필요
- ※ CBD(생물다양성협약) 및 나고야의정서의 이익 공유 정신을 AI 모델 개발 단계에도 적용할 것을 권고

(5) 인간의 감독(Human Oversight)

- 합성생물학과 디지털 도구의 결합은 DBTL 사이클 전 과정을 기계가 주도하며 인간의 감독이 거의 없는 완전한 자동화 실험실을 가능케 함
 - LLM/AI가 논문을 분석해 가설을 수립, 바이오 디자인 도구가 실험을 설계, 데이터 분석을 수행하고 로봇이 실험을 수행함으로써 연구 속도 가속화와 인간의 실수(Human error) 배제 가능

- 그러나 이면에 심각한 리스크와 한계도 존재하므로 인간이 적절히 개입하는 시스템을 갖추어 최적의 균형을 찾아야 함
 - **(책임)** AI 시스템의 문제 발생 시 이를 개발·운영한 자가 법적·도덕적 책임을 지게 되므로 알고리즘의 결정을 이해하고 승인·거부할 권한은 인간이 보유
 - **(안전)** 자연재해나 시스템 폭주 등으로 인한 오작동, 외부 해킹 시 물리적으로 시스템을 정지(중단)할 수 있는 '최종 안전장치(Failsafe)' 역할 수행
 - **(투명성)** AI의 결과가 '왜' 나왔는지 설명할 수 있도록 인간은 그 이유를 탐색·해석하여 정당성을 제공
 - **(윤리)** AI가 편향된 데이터로 인해 인간을 도구화하거나 존엄성을 훼손하지 않도록 감시하고 위험하거나 바람직하지 않은 연구 경로를 멈추는 역할 수행
 - **(목표)** 연구의 실제 목적은 인간이 설정해야 하며, 연구자는 단순 반복 업무에서 벗어나, 기술의 필요성과 사회적 목표를 연계하여 고민하는 '거시적 사고'에 집중
 - **(신뢰)** 기계가 만든 결과물에 대한 인간의 검증과 사회적 합의를 통해 더 큰 신뢰를 얻고 응용 기술에 대한 승인을 주도
- 시스템이 연구자의 '대체재'가 아닌 능력을 확장하는 '보조도구'로 활용하고 직종·경력별 재교육과 인간 존엄성에 대한 사회적 고민의 병행 필요
 - AI·자동화로 인해서 단순 기술직의 일자리는 감소될 수 있으나 관리·설계 중심의 인력 구조 개편이 가능하며, 디지털 환경에 익숙한 신진 연구자와 기존 연구자 간 적응의 격차가 생길 수 있음
 - 자율 주행 자동차와 같은 다른 분야의 논의처럼, 책임 있는 재교육, 시스템이 연구자를 대체하는 것이 아니라 보완하게 만드는 방법, 그리고 인간의 존엄성과 성취감을 위한 공간을 남겨두는 방법에 대한 사회적 논의 필요

(6) 기술 주권(Technology Sovereignty)

- 합성생물학을 포함한 바이오와 AI는 다수 해외 주요국의 국가 전략에서 핵심 전략기술로 명시되어 있으며, 이는 경제 경쟁력과 안보의 핵심 요소로 간주
 - 코로나19 팬데믹으로 인한 글로벌 공급망 붕괴가 국가적 위기로 직결됨을 경험하면서 경제와 국가 안보를 위한 타국 의존도가 낮아지는 추세
 - 특히 급진적으로 발전하는 SynBioxAI 기술은 미국, 영국, 중국, 일본, 한국 등 주요국에서 전략 수립을 통해 정부 주도로 국가적 역량 강화를 집중 지원 중
- 글로벌 지역별 자원 접근성에 대한 한계와 표준·규제 선점을 위한 경쟁 등 국가별 기술 주

권 확보를 위한 차별화된 전략 수립이 더욱 활발

- 합성생물학은 지역의 바이오 자원(바이오매스 등)을 활용해 필요한 제품을 직접 생산하는 '분산형 제조'를 가능케 하나 국가별로 자원 보유 상황이 상이

※ 한국과 일본은 매우 진보된 바이오 기술을 보유하고 있지만, 미국이나 브라질과 같은 원료 생산 능력(바이오매스 확보량)은 부족해 원료 수급의 외부 의존도를 낮추는 대체 자원 및 공정 개발 필요

- 합성생물학 초기 단계에서와 달리 미국, 영국, 일본 등은 AI 연구소와 같은 전담 기구를 설립하고 고위험 원칙 및 기술 표준을 선점하여 기술의 발전 방향을 주도하려는 노력 추진

- 기술 주권 확보를 위한 전략적 자율성을 필수적이나, 모든 것을 자국화하는 것이 아닌 공통 과제 해결을 위한 국제협력의 균형이 요구

- 기후변화나 팬데믹, 생물학적 무기 확산 방지 등의 글로벌 과제는 국제적 협력 없이 해결이 불가능

※ 각 국가들은 독자적 기술력을 쌓는 동시에 공통 과제 해결을 위한 협력 사이에 균형을 찾아야 하며, 자국 중심의 규제가 국제적 협력과 혁신의 확산을 방해하지 않도록 주의

- OECD, 생물무기금지협약(BWC), 생물다양성협약(CBD) 등 국제기구, 기술 주권 경쟁 시대에도 국가 간 협력을 이끌어내고 규범을 공유하는 중요한 역할을 수행

※ 국제 표준 결정 과정에 적극 참여해 글로벌 표준에서 소외되지 않도록 하는 노력 필요

(7) 연구 보안(Research Security)

- 개방적인 협력 환경을 악용한 지식 유출 등 국제협력 시 발생 가능한 리스크 관리를 위해 다수 국가들이 엄격한 정책을 도입 중

- 일본은 2023년 연구 무결성 체크리스트를 업데이트, 기관이 연구자의 해외 소속 기관을 독립적으로 검증하도록 의무화

- 캐나다는 2024년 '민감 기술 연구 및 우려 기관에 관한 정책'으로 고위험 기관과 연계된 연구자에 대한 자금 지원 금지

- 교육 및 생물학 시설이 점차 디지털화되고 자동화됨에 따라 사이버보안 위험에 더욱 취약해지는 추세로, 국제기구, 국가 정부 및 연구기관들은 새로운 정책과 지침을 개발함으로써 증가하는 사이버 생물보안 위협에 대응

- AI는 악의적인 의도를 가진 행위자들의 지식 장벽을 낮춤으로써 악성 사이버 활동을 용이하게 하는 것으로 인식

- 생물안전 봉쇄 등급(Biosafety Containment Level) 보호 체계를 무력화하여 독성 또

는 감염성 물질을 의도적으로 방출하거나 완전히 자동화된 바이오 제조 허브가 불법적으로 활용되어 위험한 물질 생산에 악용되는 경우 등이 우려

- OECD, WHO 등 국제기구에서는 사이버 생물보안 문제에 대한 글로벌 원칙 등 국제적 대응 지침을 선도

※ OECD는 회원국 전반에 적용가능한 디지털 보안 및 리스크 관리 원칙 개발하고 있으며, WHO는 2024년 '실험실 생물 보안 지침' 개정판에 사이버 생물보안 이슈와 통제 방안 포함

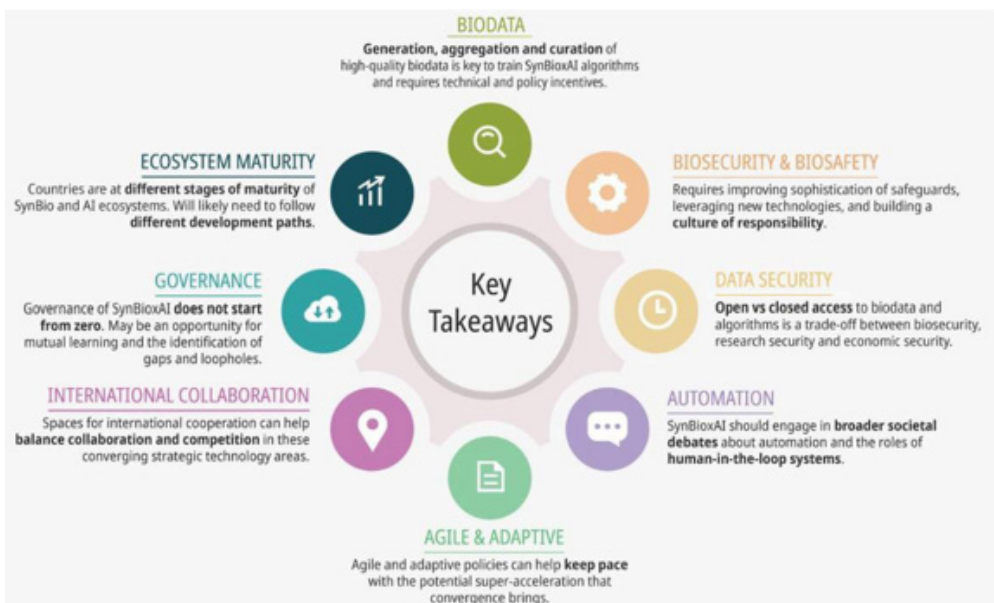
※ 미국 국립표준기술연구소(NIST) '사이버보안 프레임워크'나 EU의 '사이버 회복력 법안' 등을 통해 전 산업분야의 위협 대응 지원

4. [NEXT] 전략적 정책 결정을 위해 필요한 추가적 정보 요소

● OECD 보고서는 SynBioxAI 거버넌스의 효과적인 설계를 위해 정책적으로 중요하고 불확실성이 높은 8개 전략적 정책 인텔리전스 영역(Key takeaways and strategic intelligence needs)을 제시

- 바이오데이터, 생태계 성숙도, 거버넌스, 국제협력, 유연·적응형 정책, 자동화, 데이터 보안, 바이오안전·바이오보안 등 8개 영역을 강조

※ 이들 영역은 SynBioxAI 발전의 핵심 기반이면서 동시에 정책 불확실성이 높은 분야로, 국가별 정책 경로 설계, 데이터 인프라 구축, 국제 협력 구조, 자동화에 따른 인간 역할, 데이터 접근 통제, 안전관리 체계 등에서 추가적인 연구와 전략 정보 축적이 필요



* 출처 : OECD(2025)

〈참고자료〉

- ACS Synthetic Biology, CELLM: Bridging Natural Language Processing and Synthetic Genetic Circuit Design with AI(2025.9)
- Benchling website, Benchling AI Overview
- BIOCONVS website, The Bioconvergence Paris Biofoundry
- blog.google, AlphaFold 3 predicts the structure and interactions of all of life's molecules(2024.5)
- CELL, Engineering crop flower morphology facilitates robotization of cross-pollination and speed breeding(2025.10)
- Edison, Kosmos: An AI Scientist for Autonomous Discovery(2025.11)
- FOOD DIVE, ADM, Benson Hill partner to scale high-protein soy(2022.8)
- GINKGO BIOWORKS website, Autonomous-lab
- IARPA website, FELIX(Finding Engineering-Linked Indicators)
- International Rice Research Institute(IRRI), IRRI launches AI-powered global digital platform for hybrid rice breeding and parental selection(2025.3)
- International Rice Research Institute(IRRI), Scaling Low-Emission Rice through Pilot Models that Showcase the Future of Vietnam's Mekong Delta(2026.3)
- IntuitionLabs, FutureHouse AI Agents: A Guide to Its Research Platform(2026.3)
- Investing.com, Benson Hill ends exclusive ADM agreement, signs new deal(2024.9)
- Investing.com, 킵코 바이오웍스, 클라우드 기반 자율 실험실 플랫폼 출시(2026.3)
- Journal of Hazardous Materials, Rational redesign of FAST-PETase via a "locking" strategy for efficient PET depolymerization(2026.3)
- MILLING, Benson Hill's AI-driven soybean advancements poised to transform agriculture(2024.1)
- OECD, SYNTHETIC BIOLOGY, AI AND AUTOMATION: A FORWARD-LOOKING TECHNOLOGY ASSESSMENT(2025.11)
- PR Newswire, Ginkgo Bioworks' Autonomous Laboratory Driven by OpenAI's GPT-5 Achieves 40% Improvement Over State-of-the-Art Scientific Benchmark(2026.2)

- Responsible us, Biographica Raises \$9.4M to Build Climate-Resilient Crops with AI(2026.1)
- 데일리포스트, 플라스틱 이틀만에 분해하는 혁신적 '변이효소' 등장(2022.5)
- 이코노미트리뷴, AI가 설계한 신약, 임상 3상 문턱에 서다(2026.1) 외

발행일 | 2026년 5월

발행인 | 한국합성생물학발전협의회 운영위원회

발행처 | 한국합성생물학발전협의회

대전광역시 유성구 과학로 125, KOBIC동 1323호

T. 042-860-4371~81 E. wogml919@kribb.re.kr / kmyang@kribb.re.kr