



합성생물 관리방안 마련을 위한 국내외 연구동향

오일찬·구경아·박용하



■ 연구진

연구책임자 오일찬 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
참여연구원 구경아 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
 박용하 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)

■ 연구자문위원 (가나다 순)

김영철 (한국생명공학연구원 국가생명공학정책연구센터 팀장)
명수정 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
이승준 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)

© 2017 한국환경정책·평가연구원

발행인 조 명 래
발행처 한국환경정책·평가연구원
 (30147) 세종특별자치시 시청대로 370
 세종국책연구단지 과학·인프라동
 전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799
 <http://www.kei.re.kr>
인 쇠 2017년 12월 26일
발 행 2017년 12월 31일
등 록 제 2015-000009호(1998년 1월 30일)
ISBN 979-11-5980-176-1 93530

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
오일찬 외(2017), 「합성생물 관리방안 마련을 위한 국내외 연구동향」,
한국환경정책·평가연구원.

값 5,000원

서 언

합성생물학(Synthetic Biology)은 생명과학의 발전에 따라 새롭게 부각되는 분야로 질병 치료, 환경 문제, 식량 문제 등에 활용이 가능할 것으로 기대되고 있습니다. 합성생물학의 이러한 긍정적인 측면에 비해 잠재적인 위해성에 대한 내용은 상대적으로 덜 알려져 있으므로 이에 대한 대비 또한 필요한 상황입니다.

생물다양성협약(CBD)에서도 최근에 들어 다루어지기 시작한 합성생물학에 잠재적인 영향에 대한 전문가 논의 및 보고서를 발간하는 등 전 세계적으로 합성생물학 분야의 활발한 연구와 더불어 잠재적 위해성에 대한 연구도 지속적으로 수행되고 있습니다. 본 연구는 새로운 융합학문으로 바이오산업 분야 등에 활용이 기대되는 합성생물학과 관련된 논의에 대응하기 위해 합성생물학의 발전에 따른 긍정적 측면과 잠재적 위해성 관리를 위한 기초 자료가 될 것으로 기대됩니다.

끝으로 본 연구를 수행한 한국환경정책·평가연구원 오일찬 박사와 구경아 박사, 박용하 박사께 감사를 표합니다. 바쁘신 와중에도 자문을 통해 연구에 도움을 주신 한국생명공학연구원의 김영철 팀장께 깊은 감사를 드립니다. 또한 우리 원의 명수정 박사, 이승준 박사의 자문에도 감사를 표합니다.

2017년 12월

한국환경정책·평가연구원

원장 조 명 래

국문요약

본 연구는 생명공학의 발전에 따른 신규이슈로 부각되는 합성생물학과 관련된 국내외 연구 동향, 정책 등을 조사하여 합성생물학의 긍정적인 측면과 더불어 잠재적인 위해성에 대한 내용을 파악하는 기초자료의 제공을 위해 수행되었다.

첫째, 합성생물학의 정의 및 개념을 조사하고 고찰하기 위해 유럽연합집행위원회, 영국 왕립학회, 공학·생물학·연구 컨소시엄 및 미국 생명윤리 대통령 위원회의 합성생물학의 정의 및 개념을 살펴보았으며, 생물다양성협약에서 제시하는 합성생물학의 운용적 정의 및 논의 개요 또한 조사하였다.

둘째, 국내외 연구 및 정책 동향을 조사하였다. 국외 연구 동향을 위하여 미국의 공학·생물학·연구 컨소시엄과 우드로우 윌슨 국제학술센터 및 유럽연합의 합성생물학 연구 동향을 파악하였다. 국외 정책 동향을 위해서는 미국 생명윤리 대통령 위원회를 중심으로 생물안전, 생물안보, 윤리적 이슈와 관련된 정책 동향을 조사하였으며 ETC Group과 생물다양성 이슈 관련, OECD와 경제 이슈 관련 정책 동향 및 SynBioWatch의 내용을 파악하였다. 국내 합성생물학 관련 연구 및 정책 동향을 여러 연구자들의 자료를 바탕으로 최근의 동향을 살펴보았다.

셋째, 합성생물학의 긍정적 측면 및 위해관리의 필요성에 대해 고찰하였다. 합성생물학의 긍정적 측면은 유용화학물질, 바이오에너지, 바이오의약품, 환경문제, 식량 생산 등에 적용이 가능한 고부가가치의 유망한 기술이라는 점이며, 생물안전과 관련된 사항으로는 생태계 영향, 유전자 이동, 예측할 수 없는 형질의 출현을 들 수 있다. 생물안보와 관련된 내용의 파악과 이를 통제하기 위한 방안에 대해서도 조사하였다.

합성생물학 연구의 증가에 따라 생물안전과 생물안보와 같은 위해성 관리방안을 체계적으로 마련하여 새로운 기술 적용에 따른 문제점이 발생하지 않도록 하는 것이 필요하다.

주제어 : 합성생물학, 관리방안, 위해성, 잠재적 영향, 생물안전, 생물안보

| 차례 |

제1장 서론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 연구 내용 및 방법	2
제2장 합성생물학의 정의 및 개념	4
1. 주요 기관의 합성생물학의 정의 및 개념	4
2. 생물다양성협약의 합성생물학의 정의 및 논의 개요	6
제3장 국내외 연구 및 정책 동향	9
1. 국외 합성생물학 관련 연구 동향	9
2. 국외 합성생물학 관련 정책 동향	16
3. 국내 합성생물학 관련 연구 및 정책 동향	23
제4장 합성생물학의 긍정적 측면 및 위해관리의 필요성	26
1. 합성생물학의 긍정적 측면	26
2. 생물안전	28
3. 생물안보	29
제5장 결론 및 시사점	32
참고문헌	33
Abstract	39

| 표 차례 |

〈표 2-1〉 합성생물학의 개념과 도구	5
〈표 3-1〉 미국의 주요 합성생물학의 센터/이니셔티브	10
〈표 3-2〉 합성생물학의 윤리적 기본 원칙과 내용 요약	18
〈표 3-3〉 국내 합성생물학 연구 현황(괄호 안의 숫자는 프로젝트 수)	25
〈표 4-1〉 합성생물학의 안전과 환경적 위해성에 대한 규제 분석	29
〈표 4-2〉 합성생물학의 위험 통제 방안	30

| 그림차례 |

〈그림 1-1〉 간략화한 합성생물학의 원리방법, 활용분야	2
〈그림 3-1〉 미국과 유럽의 합성생물학 연구비 비교(2005-2010년)	12
〈그림 3-2〉 미국의 합성생물학 관련 연구비 지원 기관별 연구비 비교(2008-2014년)	13
〈그림 3-3〉 유럽연합집행위원회(EC)와 영국의 합성생물학 관련 연구비(2009-2014년)	15
〈그림 3-4〉 2014년 미국 기관별, 영국, 유럽연합집행위원회(EC)의 합성생물학 연구비	16
〈그림 4-1〉 합성생물학의 응용 분야	27
〈그림 4-2〉 DNA 합성 규제와 감독을 위한 제안된 체계	31

제1장

서론

1. 연구의 필요성 및 목적

합성생물학(Synthetic Biology)은 최근의 생명과학 기술의 발전에 따라 인류가 직면하고 있는 질병 치료, 식량 문제, 환경 문제를 해결할 수단으로 미국, 유럽을 중심으로 활발하게 연구되고 있는 분야이다. 합성생물학은 “1) 기존의 자연 세계에 존재하지 않는 새로운 생물 구성요소와 시스템을 설계 및 제작하거나, 2) 유용한 목적을 위한 특정 작업을 수행하기 위해 기존의 자연 세계에 존재하는 생물 시스템을 재설계 및 제작”하는 두 분야를 포함하는 것으로 일반적으로 정의되고 있다.¹⁾ 하지만 합성생물학은 비교적 최근에 새롭게 대두된 학문 분야이고 그 정의와 개념에 대해서도 논의가 계속되고 있다.

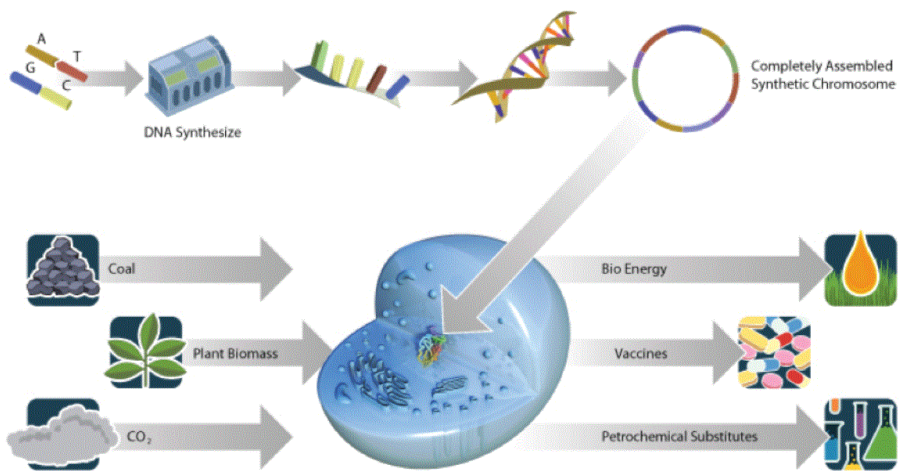
합성생물학은 생명과학에 전자공학 분야에서 쓰이는 논리회로와 같은 공학적 개념과 정보 기술(IT: Information Technology)과 나노기술(NT: Nano Technology)을 융합한 학문으로 인식하고 있다.²⁾ <그림 1-1>에서 보는 것처럼 의약품, 바이오에너지, 환경, 식량, 농업 등 여러 분야에 활용이 가능한 유망한 기술로 합성생물학은 긍정적인 측면이 있지만, 동시에 잠재적인 위해성에 대한 측면도 간과할 수 없다. 생물다양성협약(CBD: Convention on Biological Diversity) 제9차 당사국총회(2008년) 이후로 합성생물학 기술로부터 유래된 구성요소, 생물체, 산물이 생물다양성 보전 및 지속가능한 이용에 미치는 긍정적 또는 부정적인 잠재적 영향에 대한 전문가 심사 및 과학기술자문보조기구(SBSTTA: Subsidiary

1) Nature, “Synthetic Biology”, 검색일: 2017.10.31; ETC Group(2007); 위키백과, “합성생물학”, 검색일: 2017.10.31.

2) 김훈기(2009, 2010).

body on Scientific, Technical and Technological Advice)의 검토를 거쳤으며 새롭게 부각되는 이슈로 논의되고 있다. 미국의 생명윤리 대통령 위원회(PCSBI: Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues)에서는 2010년 합성생물학에 대한 연구개발 진행과 더불어 윤리적 이슈 및 잠재적 위험성을 지속적으로 감독해야 하는 필요성에 대한 보고서를 발간하였다.³⁾

본 연구의 목적은 합성생물학의 긍정적인 측면뿐만 아니라 생물안전성과 생물안보 등의 잠재적인 위험성에 대한 검토를 통해 관리방안 마련을 위한 기초 연구를 수행하고자 하는 것이다.



자료: SGI-DNA, “A Synthetic Genomics, Inc. Company”, 검색일: 2017.10.31.

〈그림 1-1〉 간략화한 합성생물학의 원리방법, 활용분야

2. 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 합성생물학 관련 국내외 선행 문헌 조사 및 고찰을 통해 최근의 합성생물학 관련 연구 동향, 정책 등을 조사하여 합성생물학의 긍정적인 측면과 더불어 잠재적인

3) PCSBI(2010); 한국과학기술기획평가원(KISTEP) 정책기획실(2010).

위해성에 대한 내용을 조사하였다. 또한 전문가 자문 및 의견수렴을 통해 합성생물학 발전에 따른 정책적 관리방안에 대한 방향을 논의하였다. 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

첫째, 합성생물학의 정의 및 개념을 조사하고 고찰하였다. 이를 위해 주요 기관의 합성생물학의 정의 및 개념을 살펴보았으며, 생물다양성협약에서 제시하는 합성생물학의 정의 및 논의 개요 또한 살펴보았다.

둘째, 국내외 연구 및 정책 동향을 조사하였다. 합성생물학의 연구가 비교적 활발하게 수행되고 있는 주요국의 연구 및 정책 동향에 대해 국내외 공신력 있는 기관 및 연구자들의 자료를 바탕으로 최근의 동향을 살펴보았다.

셋째, 합성생물학의 긍정적 측면 및 위해관리의 필요성에 대해 고찰하였다. 합성생물학 연구의 질병 치료, 식량 문제, 환경 문제 등에 적용 가능한 첨단 융합 기술로의 가능성과 긍정적 측면을 살펴보았으며, 이와 더불어 새로운 기술의 적용에 따른 생물안전과 생물안보 측면에서의 잠재적인 영향과 위해성에 대해 논의하였다.

제2장

합성생물학의 정의 및 개념

1. 주요 기관의 합성생물학의 정의 및 개념

가장 일반적으로 인용되는 합성생물학의 정의 중 하나는 “1) 기존의 자연 세계에 존재하지 않는 새로운 생물 구성요소와 시스템을 설계 및 제작하거나, 2) 유용한 목적을 위한 특정 작업을 수행하기 위해 기존의 자연 세계에 존재하는 생물 시스템을 재설계 및 제작하는 것”이다.⁴⁾

유럽연합집행위원회(EC: European Commission)는 “합성생물학은 생체 또는 비생물 물질을 변형하기 위해 생물체 내 유전물질의 설계, 제조 및/또는 수정을 촉진하고 가속화하는 과학, 기술 및 공학의 응용”이라고 정의하고 있다(European Commission, 2014; SCBD, 2015).⁵⁾ 합성생물학에는 유전자로 이루어진 복잡한 생물 시스템을 단순화하기 위해서 공학적인 개념인 표준화(Standardization), 모듈화(Modularization), 추상화(Abstraction) 등의 개념이 사용되는데 <표 2-1>은 유럽연합집행위원회에서 제시하는 합성생물학의 개념과 사용되는 도구들을 보여준다(European Commission, 2014).

영국 왕립학회(UK Royal Society)에서는 “합성생물학은 새로운 인공생물학적 경로, 유기체 또는 장치의 설계와 제작, 또는 기존에 존재하는 자연계를 재설계하는 것으로 넓게

4) Nature, “Synthetic Biology”, 검색일: 2017.10.31; ETC Group(2007); 위키백과, “합성생물학”, 검색일: 2017.10.31.

5) 기존의 30개 이상의 합성생물학의 정의에 대한 사전 조사를 거쳐 21개 기관과 개인으로부터 64개의 의견을 수렴한 결과임. 원문은 “SynBio is the application of science, technology and engineering to facilitate and accelerate the design, manufacture and/or modification of genetic materials in living organisms to alter living or non-living materials”.

묘사되어질 수 있는 신생 연구 분야이다”라고 정의하고 있다(The Royal Society, UK, 2007).⁶⁾

〈표 2-1〉 합성생물학의 개념과 도구

개념	도구
표준화(Standardization)	BioCAD 소프트웨어(BioCAD software)
모듈화(Modularization)	로봇식의 클로닝(Robotic cloning)
계층적 추상화(Hierarchical abstraction)	대사 모델링(Metabolic modelling)
디자인과 제조의 분리 (Decoupling of design and fabrication)	단백질 공학(Protein engineering)
직교성(Orthogonality)	DNA 데이터베이스와 레지스트리 (DNA databases and registries)
리팩토링(Refactoring)	부품과 장치 라이브러리(Part and device libraries)
	조절 회로(Regulatory circuits)
	DNA 합성(DNA synthesis)
	유전자와 게놈 조립(Gene and genome assembly)
	게놈 편집(Genome editing)
	MAGE, CRISPR, TALENs, zinc fingers와 같은 게놈 편집 도구
	현미경 관찰기술(Microscopy)
	분자 프로파일링(Molecular profiling)

자료: European Commission(2014), p.26.

공학·생물학·연구 컨소시엄(EBRC: Engineering Biology Research Consortium)은 “합성생물학은 효소, 유전 회로 및 세포와 같은 새로운 생물학적 실체의 설계 및 제작 또는 기존의 생물학적 시스템의 재설계이다”라고 정의하고 있다.⁷⁾ 합성생물학은 분자생물학, 세포 생물학, 시스템생물학의 진보를 토대로 하며 집적 회로 디자인과 같은 공학적 개념이 생물학에 더해진 것으로 다른 여러 공학 분야와 달리 생물학적 특성에 따라 예측이 어려우며 생물학적

6) “Synthetic biology is an emerging area of research that can broadly be described as the design and construction of novel artificial biological pathways, organisms or devices, or the redesign of existing natural biological systems”.

7) “Synthetic biology is the design and construction of new biological entities such as enzymes, genetic circuits, and cells or the redesign of existing biological systems”.

부품과 상호작용 방법에 대한 지식이 부족한 것으로 보인다. EBRC는 유전자 서열, 단백질 특성과 생물학적 시스템과 같은 생물학적 세부사항들이 일련의 설계 규칙을 따라 체계화되고 재작성 되면 많은 구성요소가 통합된 생물시스템의 공학이 가능하다고 설명하고 있다.⁸⁾

미국 생명윤리 대통령 위원회(PCSBI)에서는 “합성생물학은 생물학, 공학, 유전학, 화학 및 컴퓨터 과학의 요소를 결합한 새로운 연구 분야에 주어진 이름이다. 합성생물학이라는 엄브렐라 아래에 있는 표준화되고 자동화 가능한 과정과 함께 화학적으로 합성된 DNA에 의하여 새롭게 향상된 특성을 지닌 새로운 생화학 시스템 또는 유기체를 만드는 다양하지만 관련 있는 노력”이라고 정의하고 있다(PCSBI, 2010).⁹⁾

2. 생물다양성협약의 합성생물학의 정의 및 논의 개요

2016년 12월 멕시코 칸쿤에서 개최되었던 제13차 생물다양성협약(CBD) 당사국총회(COP 13: Conference of the Parties)에서는 기술전문가특별그룹(AHTEG: Ad Hoc Technical Expert Group)의 논의를 통해 합성생물학의 운용적 정의(operational definition)를 제시하였다. 결정문(CBD/COP/DEC/XIII/17)에 의하면 “합성생물학은 유전물질, 생물, 생물 시스템의 이해, 설계, 재설계, 제조 그리고/또는 변형을 촉진, 가속화하기 위해 과학, 기술, 공학을 결합시킨 현대 생명공학의 더 나아간 발전 및 새로운 차원이다”라고 정의하고 있다.¹⁰⁾ 이러한 합성생물학의 운용적 정의를 통해 그동안 생물다양성협약에서 제기되었던 합성생물학에 대한 보다 구체적인 논의가 시작된 것으로 평가하고 있다.¹¹⁾

8) EBRC, “What is synthetic biology?”, 검색일: 2017.10.31.

9) “Synthetic biology is the name given to an emerging field of research that combines elements of biology, engineering, genetics, chemistry, and computer science. The diverse but related endeavors that fall under its umbrella rely on chemically synthesized DNA, along with standardized and automatable processes, to create new biochemical systems or organisms with novel or enhanced characteristics”.

10) “Synthetic biology is a further development and new dimension of modern biotechnology that combines science, technology and engineering to facilitate and accelerate the understanding, design, redesign, manufacture and/or modification of genetic materials, living organisms and biological systems”.

11) CBD(2016.12.16), “Decision Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity”, XIII/17, *Synthetic Biology*, CBD/COP/DEC/XIII/17, 검색일: 2017.10.31.

생물다양성협약(CBD)에서 합성생물학과 관련된 내용이 공식적으로 제기된 것은 2008년 COP 9에 바이오연료(Biofuel)가 의제로 다루어지기 시작하면서부터이다.

2010년 COP 10에서는 새롭게 부각되는 이슈들(New & Emerging Issues)에 대한 결정문에서 각 당사국과 정부 및 관계 기관들이 합성생물학에 대한 정보를 제출하도록 권고하였다.¹²⁾ 이러한 계기가 된 것은 2010년 크레이그 벤터 연구소(J. Craig Venter Institute)가 실험실에서 합성한 인공생명체가 「사이언스」지에 소개되어 전 세계적으로 주목받게 된 것을 한 원인으로 볼 수 있다.¹³⁾ 2010년 오바마 대통령의 요청으로 미국 생명윤리 대통령 위원회(PCSBI)에서 합성생물학에 대한 윤리적 측면과 잠재적 위험성을 지속적으로 감독해야 하는 필요성에 대한 보고서를 발간하게 된 것도 크레이그 벤터 연구소의 연구 결과가 주목받게 된 것과 관련이 있다.

2012년 COP 11에서는 새롭게 부각되는 이슈들에 관한 결정문을 통해 합성생물학에 대한 긍정적이며 부정적인 잠재적 영향과 생물다양성협약과 다른 협약과의 겹과 중복에 대한 문서 초안을 마련하여 당사국들의 검토를 통한 의견 제출 및 제18차 과학기술자문보조 기구(SBSTTA: Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice)의 논의와 검토를 거치기로 하였다.¹⁴⁾

평창에서 개최되었던 2014년 COP 12에서는 합성생물학에 대한 결정문에서 사전주의적 접근(precautionary approach)과 잠재적 위해성에 대한 평가와 관리, 사회경제적 고려 및 규제 강화를 위한 체제(framework)를 구축하도록 권고하였다.¹⁵⁾

2015년에는 위에서 언급한 2010년 COP 10 이후로 논의되고 검토되어 온 합성생물학에 대한 내용을 바탕으로 CBD 기술보고서(CBD Technical Series No.82, Synthetic

12) CBD(2010.10.29), "Decision Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity at its Tenth Meeting", X/13, *New and Emerging Issues*, UNEP/CBD/COP/DEC/X/13, 검색일: 2017.10.31.

13) Gibson et al.(2010).

14) CBD(2012.12.5), "Decision Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity at its Eleventh Meeting", XI/11, *New and Emerging Issues relating to the Conservation and Sustainable Use of Biodiversity*, UNEP/CBD/COP/DEC/XI/11, 검색일: 2017.10.31; CBD, "New & Emerging Issues", <https://www.cbd.int/emerging/>, 검색일: 2017.10.31.

15) CBD(2014.10.17), "Decision Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity", XII/24, *New and Emerging Issues: Synthetic Biology*, UNEP/CBD/COP/DEC/XII/24, 검색일: 2017.10.31.

Biology)가 출판되었다. 이 보고서는 기술전문가특별그룹(AHTEG)의 작업을 지원하기 위한 목적으로 1) 생물다양성에 대한 합성생물학의 잠재적인 영향에 대한 기술적 정보와 2) 생물다양성협약과 합성생물학과 관련 있는 다른 협약과의 겹과 중복 가능성에 대한 정보를 포함하고 있다.¹⁶⁾

2016년 COP 13에서는 합성생물학 의제가 주요 관심의 대상이 되었으며 운용적 정의가 제시되었고 합성생물학과 더불어 유전자 드라이브(Gene drive)¹⁷⁾에 대한 사전주의적 접근이 논의되었다.¹⁸⁾

16) SCBD(2015).

17) 특정 유전자가 우선적으로 유전되어 개체군 내에서 우세하게 살아남는 유전학적 현상으로 생명공학과 합성생물학에 적용 가능하나 자연 환경에 방출되는 경우 생태계 영향에 대한 이슈 등 논의가 활발한 분야임.

18) CBD(2016.12.16), “Decision Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity”, XIII/17, *Synthetic Biology*, CBD/COP/DEC/XIII/17, 검색일: 2017.10.31.

제3장

국내외 연구 및 정책 동향

1. 국외 합성생물학 관련 연구 동향

가. EBRC¹⁹⁾

공학·생물학·연구 컨소시엄(EBRC: Engineering Biology Research Consortium)은 비영리 컨소시엄으로 미국 국립과학재단(NSF: National Science Foundation)의 후원으로 운영된다. EBRC는 원래 NSF의 연구비 지원으로 2006년 설립된 미국의 여러 대학 등이 연합한 합성생물학 연구센터인 SynBERC(Synthetic Biology Engineering Research Center)가 10년 동안 활동한 이후에 설립된 연구 컨소시엄이다. <표 3-1>에서 주요 내용을 볼 수 있듯이 SynBERC는 버클리 대학의 Jay Keasling이 센터의 책임을 맡았으며 NSF로부터 10년 동안 3,900만 달러의 연구비를 지원받아 운영되었다.

EBRC는 합성생물학 연구와 교육을 위한 촉매와 목소리를 내는 역할을 하고, 정부 기관과 협력하여 합성생물학 분야의 비전과 목표가 연구 및 교육 프로그램으로 전환될 수 있도록 하는 등의 목표를 가지고 활동을 하고 있다. 이를 위해 합성생물학 연구 커뮤니티의 로드맵을 개발하고, 합성생물학 분야에서 최대로 잠재력이 있는 연구 분야를 발굴하는 일을 하고 있다.

25개 대학으로부터 45명의 학술 멤버로 구성된 연구팀이 이러한 목표를 이루기 위해 협력하며 미래의 생물공학 인력을 양성하기 위해 교육을 하고 있다. 생물공학으로 인해 더 많은 제품이 삶의 일부가 될 수 있기 때문에 정책입안자와 광범위한 사람들이 이 분야를

19) EBRC, 검색일: 2017.10.31; SynBERC, 검색일: 2017.10.31.

발전시키기 위한 도전과 기회에 참여하도록 하고 있다.

〈표 3-1〉 미국의 주요 합성생물학의 센터/이니셔티브

연구비 지원 기관	프로그램 명칭	주요 연구기관	프로그램 기간	연구비 (백만달러)
NSF(National Science Foundation)	Synthetic Biology Engineering Research Center(SynBERC)	UC Berkeley	2006-2016	39
DOE(Department of Energy)	DOE Bioenergy Science Center	Oak Ridge National Lab	2007-2018	250
DOE	DOE Great Lakes Bioenergy Research Center	U Wisconsin/ Michigan State University	2007-2018	250
DOE	DOE Joint BioEnergy Institute	Lawrence Berkeley National Lab	2007-2018	250
NIH(National Institutes of Health)	Center for Systems and Synthetic Biology	UC San Francisco	2011-2016	15
NIH	MIT Center for Integrative Synthetic Biology	MIT	2013-2017	12
NIH	Genomes-to-Natural Products program	Rockefeller University/ Stanford	2014-2019	20
DOD(Department of Defense)-DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)	Living Foundries: ATCG	MIT/U Texas/Caltech/J Craig Venter Institute	2011-2014	35
DOD-DARPA	Living Foundries: 1000 Molecules	UC Berkeley/ MIT/Harvard/UIUC /U Colorado/ Zymergen/Amyris	2013-now (2016)	110

자료: Si and Zhao(2016), p.260.

나. Synthetic Biology Project(Woodrow Wilson International Center for Scholars)²⁰⁾

우드로우 윌슨 국제학술센터(WWICS: Woodrow Wilson International Center for Scholars)는 Alfred P. Sloan Foundation으로부터 연구비를 지원받아 2008년부터 합성생물학 프로젝트(Synthetic Biology Project)를 수행하고 있다. 이 프로젝트는 합성생물학의 진보에 관한 대중의 지식과 정책 담론을 증진시키는 것을 목표로 한다.

Synthetic Biology Project의 목적은 합성생물학이 발전함에 따라 가능한 위험을 최소화하고 이익을 극대화 할 수 있도록 돕는 것이다. 이를 위해 합성생물학의 연구, 상용화 및 사용에 영향을 미치는 중요한 결정을 알릴 수 있는 독립적이고 철저한 분석을 제공한다. 연구자, 정부, 산업체, 비정부기구, 정책 입안자 및 다른 사람들과 협력하여 합성생물학의 잠재적 위험에 대한 지식의 갭을 확인하고, 현장에 대한 대중의 인식을 탐구하며, 공공 안전을 보장하고 혁신을 촉진하는 일들을 하고 있다.

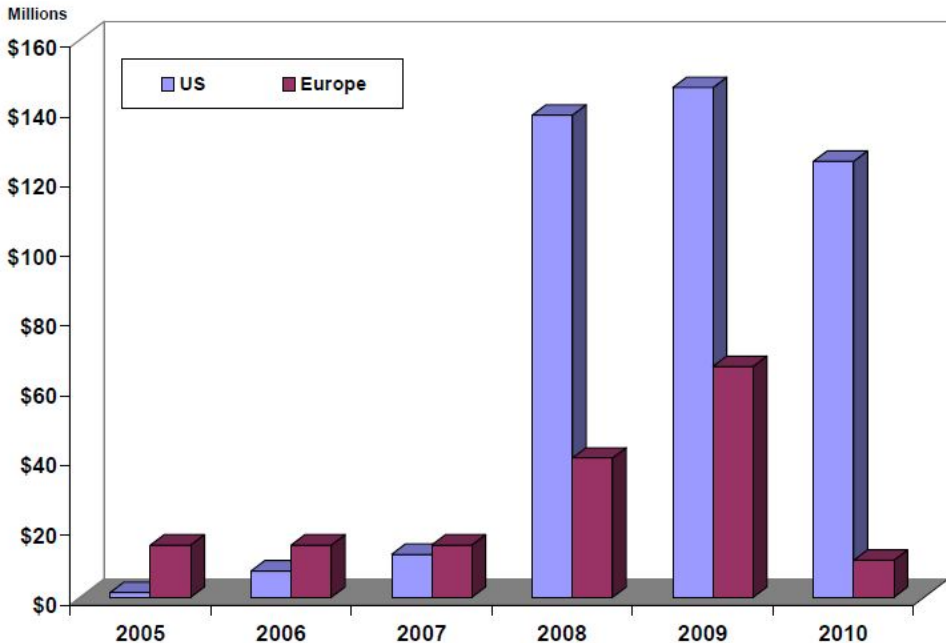
Synthetic Biology Project는 그동안 출판된 보고서와 웹사이트에 있는 정보를 통해 합성생물학에서 새롭게 나타나는 위험성에 대해 예측하고 인식하였으며, 현재 존재하는 규제 시스템이 불충분하다는 것을 밝혀냈다. 이와 함께 합성생물학에 대한 대중의 인식에 대한 조사 등을 수행하였다.

우드로우 윌슨 국제학술센터가 뉴욕의 Hastings Center와 함께 출판한 Parens et al.(2009)의 합성생물학의 윤리적 이슈에 관한 보고서는 신생분야인 합성생물학의 사회적, 윤리적 문제를 다루면서 물리적인 위해성(예를 들어 생물안전, 생물안보)과 비물리적인 위해성(예를 들어 합성생물학을 수행하는데 필요한 도구를 공정하게 배포하고 합성생물학을 통해 발생하는 혜택의 공정한 분배)의 범주로 나누어 윤리적 이슈에 접근하고 있다. 비물리적인 위해성에 대해서는 물리적인 위해성에 비해 상대적으로 논의가 적었기에 다수의 의견을 들을 수 있는 대화와 논의가 필요하다고 지적했다.

우드로우 윌슨 국제학술센터는 2005년과 2010년 미국과 유럽의 합성생물학 연구비 지원 규모에 대한 조사를 통해 미국은 2005년 이후로 약 4억 3,000만 달러의 연구비가 합성

20) Synthetic Biology Project, 검색일: 2017.10.31.

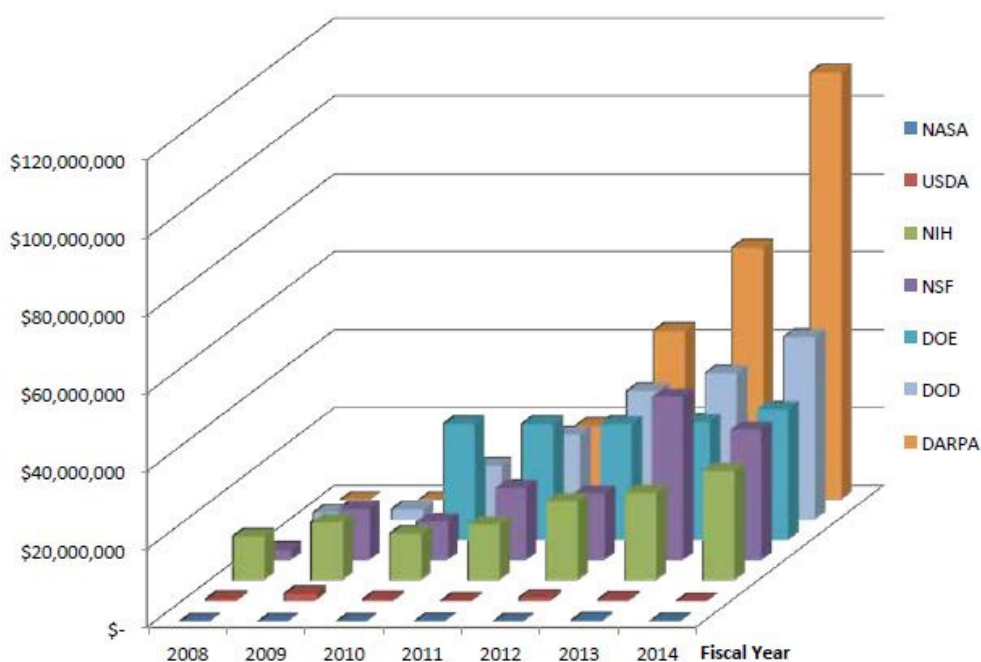
생물학 관련 연구에 지원되었으며 그 중 에너지부(DOE: Department of Energy)가 많은 부분을 지원하는 것으로 보고하였다. <그림 3-1>에서 보는 것처럼 영국, 독일, 네덜란드를 포함한 유럽연합의 2005년 이후 합성생물학 분야 연구비는 약 1억 6,000만 달러 규모인 것으로 파악되었다(WWICS, 2010).



자료: WWICS(2010), p.2.

<그림 3-1> 미국과 유럽의 합성생물학 연구비 비교(2005-2010년)

2008년과 2014년 사이 미국의 합성생물학 연구 투자는 약 8억 2,000만 달러 규모인 것으로 파악되었다. <그림 3-2>에서 보듯이 미국 국방부 첨단연구 프로젝트국(DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency)과 국방부(DOD: Department of Defense)의 예산이 상당 부분을 차지하는 것을 볼 수 있다. 국방과 관련된 예산이 많은 비중을 차지하는 반면에 위해성에 대한 연구에는 전체 예산의 1% 미만이 쓰이고 약 1%가 윤리, 법, 사회적 이슈와 관련된 연구에 쓰이는 것으로 보고 있다(WWICS, 2015).



자료: WWICS(2015), p.3.

〈그림 3-2〉 미국의 합성생물학 관련 연구비 지원 기관별 연구비 비교(2008-2014년)

다. 유럽연합²¹⁾

유럽은 2005년부터 2010년까지 합성생물학 연구에 약 1억 6,000만 달러를 할당하였는데 여기에는 영국, 네덜란드 및 독일의 개별 국가 예산과 함께 유럽연합집행위원회(EC)가 제공하는 연구비가 포함된다.

EC는 2005년과 2007년 사이 약 4,500만 달러를 제6차 연구기술 개발 프레임워크 프로그램(Sixth Framework Program for Research and Technological Development)의 일환으로 지출하였다. 2007년부터 2013년까지 실행되는 제7차 프레임워크 프로그램에는 약 800만 달러가 할당되었다.

21) WWICS(2010); WWICS(2015).

영국의 합성생물학에 대한 연구비는 2005년 이후에서 2010년까지 약 3,000만 달러에서 5,300만 달러 사이로 예상된다. 연구비는 생명공학 및 생물과학 연구위원회, 공학 및 물리학 연구위원회 및 Wellcome Trust의 세 가지 프로그램으로 나누어진다.

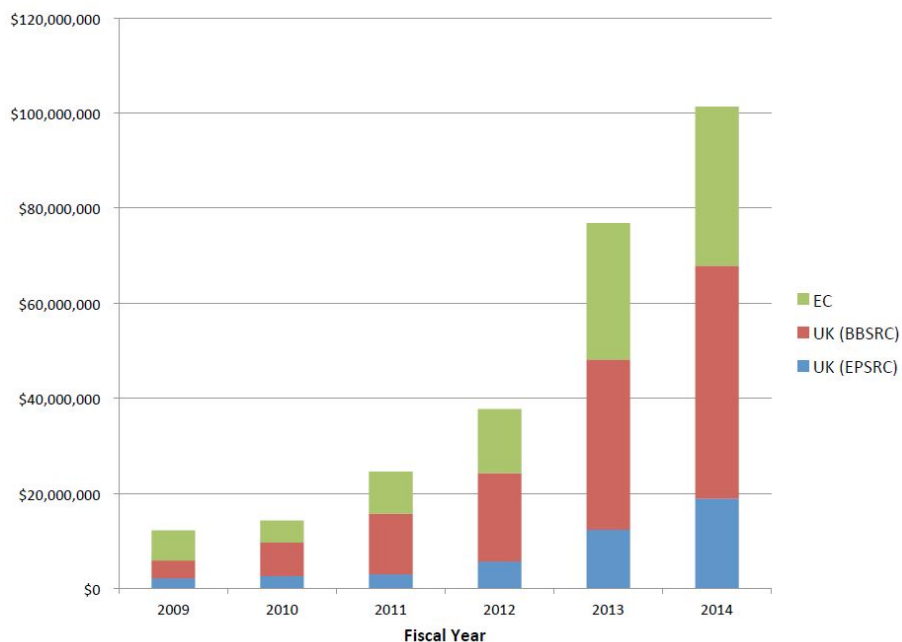
2008년 3개의 네덜란드 대학은 향후 5년에서 10년 동안 합성생물학 연구 센터에 총 9,000만 달러를 투자할 것이라고 발표했다. 3개의 대학은 델프트 공대(바이오나노과학학과), 그로닝겐 대학(합성생물학 센터) 및 아인트호벤 공대(복합 분자 시스템 연구소)이다.

독일은 합성생물학의 기회와 위험에 관한 2009년 공동 연구보고서에 근거하여 Deutsche Forschungsgemeinschaft(DFG, 독일 연구재단), acatech(독일 과학 공학 한림원) 및 국립 과학 아카데미(National Academy of Sciences) 등이 합성생물학을 연구비 지원 우선 순위 분야로 삼고 있다. DFG는 합성생물학에 약 350만 달러를 투자 할 계획이다(WWICS, 2010).

우드루우 윌슨 국제학술센터(WWICS, 2015)에 의하면 영국은 2005년 이후부터 2014년까지 합성생물학 연구에 약 1억 7,500만 달러의 연구비를 지원했으며, 대부분이 2010년 이후 지원된 것으로 약 1억 6,500만 달러 이상으로 보고 있다. <그림 3-3>에서 보는 것처럼 연구비는 생명공학 및 생물과학 연구위원회(BBSRC: Biotechnology and Biological Science Research Council)와 공학 및 물리학 연구위원회(EPSC: Engineering and Physical Sciences Research Council)의 2가지 프로그램으로 나누어져 있다. <그림 3-4>는 2014년 미국과 유럽(EC)의 합성생물학 분야 연구비를 미국은 기관별로 나누고 영국과 유럽은 각각의 연구비 규모를 표시하여 나타낸 것이다. 미국이 전체 연구비의 약 70% 이상을 차지하고 있으며 영국은 19.15%, 유럽은 9.44%를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

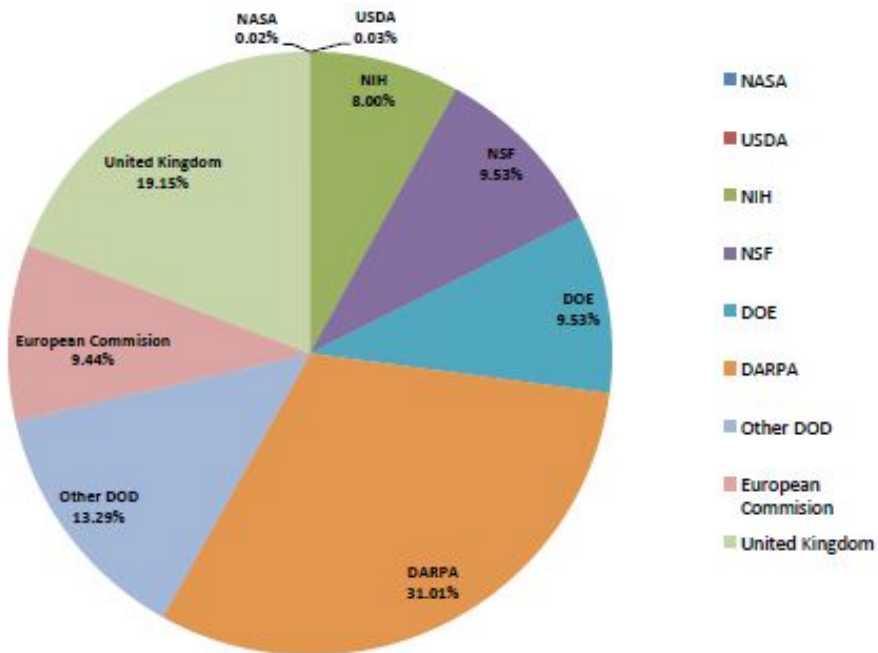
영국의 합성생물학 로드맵 협력 그룹(UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group, 2012)은 기업혁신기술부(BIS: Department for Business Innovation and Skills)의 요청으로 전문가 패널을 구성하여 영국의 합성생물학 로드맵을 제시하였다. 이 로드맵에서는 다섯 개의 주요 테마로 1. 기초 과학과 공학, 2. 책임 있는 연구와 혁신의 지속, 3. 상업적 이용을 위한 기술 개발, 4. 응용과 시장, 5. 국제협력을 제시하였다. 권고사항으로는 1. 합성생물학 자원을 확립하기 위해 다학제적인 센터 네트워크에 투자하는 것이 필요하고, 2. 숙련되고 열의가 있으며 연구지원이 잘되는 합성생물학 커뮤니티 형성, 3.

시장에 대응하기 위한 기술을 가속화하기 위한 투자, 4. 선도적인 국제적 역할을 맡는 것, 5. 리더십 협의회 설립을 제안하였다(UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group, 2012).



자료: WWICS(2015), p.9.

〈그림 3-3〉 유럽연합집행위원회(EC)와 영국의 합성생물학 관련 연구비(2009-2014년)



자료: WWICS(2015), p.10.

〈그림 3-4〉 2014년 미국 기관별, 영국, 유럽연합집행위원회(EC)의 합성생물학 연구비

2. 국외 합성생물학 관련 정책 동향

가. 생물안전, 생물안보, 윤리적 이슈 관련 정책 동향²²⁾

미국의 생명윤리 대통령 위원회(PCSBI, 2010)는 '새로운 방향: 합성생물학과 신생 기술의 윤리(New Directions: The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies)' 보고서에서 급속하게 발전하는 연구 분야인 합성생물학 연구와 안전과 안보 문제 사이에 균형을 유지할 수 있도록 윤리적 원칙을 마련하였다. 이러한 윤리적 기본 원칙(principle)에는 〈표 3-2〉와 같이 (1) 공익성(Public Beneficence), (2) 책무성(Responsible Stewardship), (3) 지적 자유와 책임성(Intellectual Freedom and Responsibility), (4)

22) PCSBI(2010); 한국과학기술기획평가원(KISTEP) 정책기획실(2010); Gronvall(2016); DIYbio.org, 검색일: 2017.10.31.

민주적인 숙의과정(Democratic Deliberation) 및 (5) 정의와 공평(Justice and Fairness)을 제시하였다. 이와 더불어 18개의 정책적 권고(Recommendation)를 통해 각각의 기본 원칙이 고려해야 할 사항들을 제시하였다. 예를 들어 (1) 공익성 측면에서 고려해야 할 사항으로는 1. 예산지출의 적절성 논의와 그 결과의 공개, 2. 유망 연구에 대한 지속적인 지원, 3. 공유를 통한 혁신을 검토해야 할 것으로 제안하였다. PCSBI(2010)의 이러한 합성생물학에 대한 기본원칙과 정책적 권고는 합성생물학 연구의 자유를 침해하지 않으면서 안전과 안보 문제 사이에 규제 강화와 같은 행정적 체제 개편을 하기 위한 신중하면서도 중립적인 의견 제시로 보기도 한다(오철우, 2010).

Gronvall(2016)은 합성생물학이 과학적 혁명을 가져올 만한 중요한 분야이지만 동시에 기술 및 사회적 위험성을 가지고 있음을 지적했다. 합성생물학은 생물안전, 생물안보, 윤리 및 국가 경쟁력 차원에서 중점을 두고 추진을 하여야 합성생물학의 이점을 극대화하면서도 위험을 최소화할 수 있다는 점을 강조하였다. 합성생물학의 기술은 더 이상 전문가가 아닌 일반인도 쉽게 온라인에서 유전자 정보와 합성생물학 기술에 접근하여 유전자 합성이 가능한 것을 말하는 용어인 DIY(Do-It-Yourself) Bio의 측면을 들어 설명하기도 한다. 점차 증가하는 DIY Bio와 연관된 이슈는 합성생물학 기술을 일반인이 악용하는 경우 생물학적 무기나 바이오테러와 같은 심각한 위험에 직면할 가능성이 있기에 생물안보 측면에서 이러한 위험을 최소화하기 위한 정책적 제언으로 합성생물학 커뮤니티에서의 위험성 인식 증대, 위험성 있는 염기서열의 유전자 합성 주문 시 스크리닝 등을 제시하고 있으나 이러한 정책이 실제에서 적용되는데 한계가 있음을 언급하였다. 아울러 합성생물학 기술 발전에 따라 생물학적 무기에 대한 빠른 탐지와 새로운 질병에 대한 처치 등 선제적 대응책에 대한 가능성에 대해서도 제시하였다.

위에서 언급한 대로 전문가가 아니라도 일반인도 인터넷에 있는 정보를 이용하여 스스로 생명체를 조립할 수 있다는 의미로 DIY Bio라는 용어를 사용하기 시작하였으며, 2008년에는 DIYbio라는 그룹을 만들어 합성생명의 제조를 독려하고 이점을 대중들에게 이해시키면서 안전성에 대해서도 논의하는 네트워크를 형성하고 있다.²³⁾ 2011년 DIYbio 그룹은 총회를 통해 바이오해킹에 대한 윤리강령(Code of Ethics) 초안을 마련하기도 하였다. 북미

23) 김훈기(2010); DIYbio.org, 검색일: 2017.10.31.

총회에서 마련된 윤리강령 초안에는 시민과학을 장려하고 생명공학에 대한 중앙 집중화를 막는 내용인 개방 접근(Open Access)을 비롯하여 아이디어, 지식과 데이터를 공유하는 것을 강조하는 투명성(Transparency), 교육(Education), 안전(Safety), 환경(Environment), 평화로운 목적(Peaceful Purposes), 수선하기(Tinkering)에 대한 내용이 포함되어 있다.²⁴⁾ 이와 더불어 유럽 총회에서는 투명성(Transparency), 안전(Safety), 개방 접근(Open Access), 교육(Education), 겸허함(Modesty), 커뮤니티(Community), 평화로운 목적(Peaceful Purposes), 존중(Respect), 책임(Responsibility), 의무(Accountability)에 대한 내용을 포함하여 이러한 윤리강령에 따라 합성생명을 다루도록 하고 있다.²⁵⁾

〈표 3-2〉 합성생물학의 윤리적 기본 원칙과 내용 요약

원칙	내용 요약	권고
1. 공익성 (Public Beneficence)	공공의 이익을 극대화하고 기술로 인한 피해는 최소화해야 함	1. 예산지출의 적절성 논의와 그 결과의 공개 2. 유망 연구에 대한 지속적인 지원 3. 공유를 통한 혁신
2. 책무성 (Responsible Stewardship)	어린이, 다음 세대 등 합성생물학의 결과가 영향을 미칠 수 있는 이해관계자의 입장과 미래 자연환경에의 영향도 고려해야 함	4. 합성생물학과 관련한 협력·조정활동 5. 위험성 평가 및 합성생명체의 환경방출에 대한 평가 6. 감시·방지·통제 7. 사전 위험평가 8. 국제적 협력 및 논의 9. 윤리교육 10. 반대이견에 대한 지속적인 평가
3. 지적 자유와 책임성 (Intellectual Freedom and Responsibility)	과학적 창조성의 발휘에도 자유와 책임의 두 측면을 지님	11. 책임성과 의무성의 육성 12. 안전과 안보측면의 위험성에 대한 주기적 평가 13. 관리감독

24) DIYbio.org, "Draft DIYbio Code of Ethics from North American Congress", 검색일: 2017.10.31.

25) DIYbio.org, "Draft DIYbio Code of Ethics from European Congress", 검색일: 2017.10.31.

〈표 3-2〉의 계속

원칙	내용 요약	권고
4. 민주적인 숙의과정 (Democratic Deliberation)	다양한 의견을 가진 시민의 적극적인 참여와 토론 등 협력적인 과정을 통해 의사결정을 이끌어 내는 것이 중요	14. 과학계, 종교계, 민간의 참여 (다양한 측면의 참여와 교류)
		15. 정보의 정확성
		16. 공공 교육
5. 정의와 공평 (Justice and Fairness)	합성생물학과 같은 신기술의 파급효과는 사회적 규모로 발생할 수 있으므로 이로 인한 이익, 피해에 관한 분배, 부담에 관한 정의를 실현하기 위한 시스템 필요	17. 연구 활동에 있어서의 위험성
		18. 합성생물학 관련 상품의 생산과 유통에 있어서의 위험성과 혜택

자료: PCSBI(2010), pp.24-31; 한국과학기술기획평가원(KISTEP) 정책기획실(2010), pp.2-3의 내용을 기초로 요약 및 재정리함.

나. ETC Group과 생물다양성 이슈 관련 정책 동향²⁶⁾

ETC Group은 캐나다에 근거를 둔 국제기구로 문화와 생태적 다양성의 보전과 지속가능한 진보 및 인권에 헌신하는 NGO 단체이다. 주요 활동 분야는 생물다양성, 기후와 지구공학, 기업 독점, 지속가능 발전, 합성생물학, 기술평가(Technology assessment)에 초점을 두고 생물다양성협약(CBD), 과학기술자문보조기구(SBSTTA) 등에서 활동하며 각종 보고서와 자료들을 출판하고 있다. 정식 영문 명칭은 Action Group on Erosion, Technology and Concentration으로 영어 약자인 E(Erosion)에는 문화 및 인권 손상을 포함하는 생태적 손상(부식), T(Technology)는 유전체학과 같은 새로운 기술 발전에 따른 문제, C(Concentration)는 기술에 있어 소유 집중화와 관련된 문제들을 다루고 있음을 나타낸다.

ETC Group은 합성생물학이라는 용어에 대해 “Extreme Genetic Engineering”이라는 표현을 사용하여 합성생물학이 새로운 학문이 아닌 과거의 유전공학을 극단적으로 발전시킨 한 분야인 것으로 표현하고 있다(ETC Group, 2007). 이는 Boldt(2016)도 지적한 내용으로 합성생물학이 유전공학 기술이 발전함에 따라 유전공학에 합성생물학이라는 이름의 새로운 라벨을 붙인 것과 다름없다고 보는 합성생물학에 다소 회의적인 견해도 있다.

26) ETC Group, 검색일: 2017.10.31.

ETC Group은 합성생물학이 거대 자본을 배경으로 이미 시장에 여러 가지 제품의 형태로 급속도로 퍼져나가고 있다고 경고하고 있으며, 합성생물학이 기존의 재조합 DNA(Recombinant DNA) 기술과 다르며, 합성생물학은 생물다양성협약에서 이야기하는 보전과 지속가능한 이용 및 유전자원으로부터 발생하는 이익의 공평한 분배를 위협하고 있다고 지적하고 있다(ETC Group, 2012).

ETC Group(2016)은 합성생물학 제품이 적은 규모의 농사를 하는 농부들의 삶을 위협하고 있으며 자연에서 생산되는 제품과 생물다양성의 지속가능한 이용에 나쁜 영향을 주고 있다고 지적했다. 그 사례로 식품이나 향료에 쓰이는 물질인 합성 바닐라, 말라리아 치료제에 사용되는 아르테미시닌(Artemisinin), 감미료로 쓰이는 스테비아(Stevia), 향수의 원료로 쓰이는 침향나무 오일(Agarwood Oil), 식품 원료인 코코아 버터(Cocoa butter) 등이 자연에서 생산되는 제품을 대체할 목적으로 합성생물학 기술을 이용하여 현재 많은 기업과 연구소를 통해 연구와 제품 개발이 진행되고 있음을 지적하고, 일부 제품은 이미 상업화되어 생물다양성과 관련된 문제뿐만 아니라 인류의 건강 및 환경 문제에도 장기적으로 볼 때 영향을 줄 수 있으나 관련 자료가 부족하거나 없음을 지적했다(ETC Group, 2016).

다. OECD와 경제 이슈 관련 정책 동향²⁷⁾

경제협력개발기구(OECD: Organization for Economic Cooperation and Development)는 생명공학기술 정책의 한 부분으로 합성생물학과 관련된 이슈를 다루고 있다. OECD는 합성생물학이 여러 경제 분야에 영향을 미치는 것과 장기적인 경제 성장에 대한 기여 및 사회와 환경적 관심에도 기여할 것으로 예상하고 있다. 그러나 합성생물학이 제공하는 경제적 보상을 얻기 위해서는 과학과 기술적 문제를 극복하는 것뿐만 아니라 사회적, 경제적, 윤리적, 법적 문제를 해결해야 한다고 지적하고 있다.²⁸⁾

OECD and Royal Society, United Kingdom(2010)은 합성생물학의 안전하고 효율적

27) OECD, "Synthetic Biology", 검색일: 2017.10.31; OECD and Royal Society, UK(2010), "Symposium on Opportunities and Challenges in the Emerging Field of Synthetic Biology: Synthesis Report", 검색일: 2017.10.31; OECD(2014).

28) OECD, "Synthetic Biology", 검색일: 2017.10.31.

인 개발을 보장하기 위해서는 관련 기술 과학, 교육 및 정책을 뒷받침하고 투자하는 것이 중요하다고 강조하고 있다. 이를 위해 합성생물학의 적용과 도구 및 기술 간의 갭이 연결되어야 하며 도구와 기술을 개발하기 위한 투자가 필요함을 언급하고 있다. 또한 생물학적 부품의 표준화, 지식 재산 모델, 합성생물학의 규제 및 거버넌스와 같은 여러 단계에 정책적 개입이 필요함을 지적하였다. 합성생물학의 기술적 측면뿐만 아니라 윤리적, 사회적 측면에 대해서는 많은 이해관계자와 대중이 참여하는 대화와 토론의 기회가 필요함을 지적하였다(OECD and Royal Society, UK, 2010).

OECD(2014)는 합성생물학 신생 정책 이슈에 대한 보고서에서 합성생물학의 잠재력을 다루면서 합성생물학은 광범위한 산업 분야에 응용이 가능하며 상당한 경제적 이익을 가져오며 생산효율을 높일 수 있는 기술로 바이오경제의 목표인 온실가스 배출 감소, 식량 및 에너지 안보에 기여할 수 있을 것으로 보았다. DNA 염기서열 분석 비용은 2003년과 비교했을 때 약 백만 배 이하로 떨어졌기에 DNA 합성 비용 또한 저렴해지고 있다.

OECD(2014)는 합성생물학은 첨단 기술이 제대로 형성되기 전까지는 재정적인 어려움의 위험성이 있기에 정부의 연구비, 대출 보장, 세액 공제 등의 지원을 통해 경제적인 어려움을 극복하는 것이 필요하다고 지적했다. 연구를 위한 인프라를 구축하는 것도 중요한데 미국, 영국, 중국 등이 주도적으로 인프라를 적극적으로 개발하고 영국의 경우는 로드맵을 만들어 전략을 수립하고 있음을 언급했다. 또 합성생물학은 다학제적인 분야이기에 교육에 있어서도 다른 분야보다 더 어려우며 변화 관리와 같은 비즈니스와 기업적인 기술이 요구되므로 이러한 교육과 기술교육이 필요함을 지적하였다. 또한 지식재산권과 관련된 것도 생명과학 발명 특허와 관련된 경험에서 배울 수 있으며 더불어 합성생물학에서 새롭게 제기되는 문제에 대해 인식하고 관리할 수 있어야 한다고 언급했고, 합성생물학은 전자공학의 개념이 융합된 것이기에 반도체 업계로부터도 배울 수 있음을 지적했으며, 실제로 합성생물학 특허는 전형적인 생명과학 특허보다도 반도체 특허를 닮을 수 있다는 점도 지적했다.

대부분의 합성생물학 분야에서 일하는 사람들은 DNA 합성을 제외하고는 유전자변형생물체(GMO)에 적용 가능한 규제가 합성생물학에도 충분하다고 믿는다. DNA 합성의 경우는 초기의 연구 공동체와 산업에서 독특한 생물안보 문제가 생길 가능성이 있다고 언급했으며 합성된 DNA는 안보 위험성을 나타내지 않지만 제품으로 전환될 때 안보 위험이 나타날 수

있음을 지적했다. 이를 처리하기 위해 위험에 기반을 둔 평가(Risk-based assessment)가 사용될 수 있음을 언급했다. 규제가 너무 강할 경우 상업적 배치 등을 다른 곳에 하게 되면 합성생물학 연구 개발을 수행하는 국가나 지역은 손해를 볼 수 있음을 지적했다(OECD, 2014).

바이오경제를 발전시키기 위해 합성생물학을 이용하면 우리 시대의 큰 과제를 해결하는데 도움이 될 수 있지만 이를 위해서는 유전자변형생물체 기술에 대한 반감이 있는 대중들과의 소통을 통해 합성생물학에 대한 오해를 바로잡는 것이 필요함을 언급하였다. 정부는 예를 들어 학생들이 참여하여 바이오브릭(BioBricks)이라고 불리는 표준화된 생물부품을 사용하여 생물시스템을 구축하는 합성생물학 대회인 MIT의 iGEM(International Genetically Engineered Machine)과 같이 젊은 사람들의 관심을 사로잡을 수 있는 대회를 지원할 수도 있다. 지식 교환 네트워크와 소셜 미디어는 과학 커뮤니티뿐만 아니라 대중에게도 개방되어 아이디어 교환을 촉진할 수 있음을 지적하였다(OECD, 2014).

라. SynBioWatch²⁹⁾

SynBioWatch는 ETC Group, Friends of Earth 등을 포함하는 15개의 기구들의 연합체로 차세대 유전공학인 합성생물학의 환경적 영향, 경제적 영향, 건강과 안전, 인간 유전학, 생명공학을 이용한 기업의 권모술수(Corporate Wheeling & Dealing), 규제와 감독에 대한 온라인 자료 정보 제공을 하고 있다.

SynBioWatch는 합성생물학 기술을 사용하여 만들어진 식품이나 화장품의 원료가 쓰이는 것을 소비자가 판단할 수 있도록 돕는 가이드 자료를 만들었다. 어떤 기업에서는 합성생물학 기술을 사용하여 우리에게 익숙한 맛이 나거나 향이 나는 인공 화합물을 생산하는데 이렇게 생산된 것들을 기존의 GMO에서 변화된 새로운 버전이라는 표현으로 GMO 2.0이라고 하거나 극단적인 유전공학(extreme genetic engineering)이라고 부르기도 한다. 문제는 GMO 2.0이라는 합성생물학 기술을 이용하여 만들어진 제품들이 자연에서 얻어진 것처럼 라벨을 붙이고 있으나 실제로는 자연에서 얻어진 물질이 아니라는 것이다. 이러한 제품의 예로는 유전자 편집된 카놀라유, 합성생물학으로 얻어진 감미료인 스테비아, 유전자

29) SynBioWatch, 검색일: 2017.10.31; SynBioWatch(2016), "A Shopper's Guide to Synthetic Biology", 검색일: 2017.10.31.

발현을 중단시켜 갈색으로 변하지 않도록 만든 사과 등이 있다. 이러한 제품의 문제점에 대해 4가지로 지적하고 있다(SynBioWatch, 2016).

1. Unpredictable(예측할 수 없는): 유전자 변화로 인한 생물종과 생태계에 미치는 영향을 예측할 수 없음
2. Untested(검증되지 않은): 정부에서 실질적으로 GMO의 안전성을 보장하기 위해 테스트를 거의 하지 않는 것처럼 GMO 2.0도 마찬가지로 보고 있음
3. Unfair and Unjust(불공평하고 부당한): 특허가 있는 종자나 화학물질과 관련 있는 GMO 작물들이 전 세계 농민들을 대신하여 불공평하게 유통되고 있음. 자연에서 유래한 것으로 둔갑하는 합성생물학 제품이 부당하게 시장에서 유통됨
4. Unsustainable(지속불가능한): 일부 회사들은 GMO 2.0이 지속가능성을 위한 해결책이라고 주장하지만 현재의 많은 합성생물학 제품은 화학적으로 강화된 단일배양으로 얻어진 당에 의존함. 합성생물학으로 만들어진 조류(algae)와 같은 GMO 2.0 제품은 환경으로 빠져나와 “살아있는 오염”이 될 수 있음

3. 국내 합성생물학 관련 연구 및 정책 동향

우리나라는 합성생물학 관련 연구가 2004년부터 조금씩 시작되었고 2010년 이후 다양한 연구가 시도되었다. <표 3-3>과 같이 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)에서 과제상세 검색을 통해 합성생물학을 키워드로 2002년부터 2017년 사이의 과제를 검색하여 추출한 자료를 살펴보면 2004년 1건의 과제를 시작으로 합성생물학과 연관된 연구과제들이 시작되었고 2017년에는 45건의 관련 과제들이 진행되고 있다.

김영창 외(2008)는 ‘합성생물학’을 통해 생명과학/공학의 새로운 도전과 변화로의 합성생물학의 역사와 개념을 서술하고 유전자 합성, 바이러스 합성, 세포 합성, 생물학의 공학적 접근, 시스템 설계 및 제작 기술, 유전체 조작과 재설계 등을 다루었다.

김훈기(2010)는 합성생물학 연구의 세계적인 흐름과 인공생명의 개념 등을 소개하고 합성생물학 연구의 유용성과 위해성에 대하여 다루었다. 합성생물학 연구의 발전에 따른 가능성과 혜택과 더불어 합성생물학으로 인해 야기될 수 있는 생물안전, 생물안보, 생명윤리와

같은 위해성에 대한 대비가 필요한 것을 언급하였다.

국내 합성생물학 연구 중 컨소시엄 형태의 연구단 규모로 진행되고 있는 것은 과학기술정보통신부 주관의 글로벌프론티어연구개발사업으로 2011년 9월부터 진행되어 온 ‘지능형바이오시스템 설계 및 합성 연구단’이다. 2020년 8월까지 10년간 진행되며 정부지원과 민간 지원을 합하여 총예산 1,491억 원의 규모이다. KAIST의 김선창 교수가 연구단장으로 한국생명공학연구원, 서울대학교, 전남대학교, 연세대학교를 포함하여 11개 대학과 연구기관에서 연인원 약 200여명의 인력이 참여하고 있다. 3단계로 진행되고 있으며 1단계(2011-2012)에서는 지능형 바이오시스템 설계 및 기반기술을 연구하고, 2단계(2013-2015)와 3단계(2016-2019)에서 바이오시스템 구축 및 고도화를 통해 지능형 바이오시스템을 구축하고 활용할 수 있도록 하는 연구를 진행하고 있다.³⁰⁾

국내에서도 규모와 활동이 크지 않지만 MIT의 합성생물학 관련 표준화된 생물부품을 구축하고 확보하는 ‘Registry of Standard Biological Parts’³¹⁾와 같은 기능을 수행하는 ‘한국생물학부품소재은행’을 2010년부터 홈페이지를 구축하여 생물학 부품을 등록하고 이용할 수 있도록 하고 있다.³²⁾

김응빈 외(2017)는 합성생물학과 유전자가위의 과학적 측면뿐만 아니라 윤리, 정책 및 철학적인 측면을 다룬 내용에서 사회가 과학기술의 성과를 이용하는 것과 그 결과물에 대해 관리 및 통제가 가능한 체계를 마련하는 것이 필요한 점을 언급하였다.

과학기술정보통신부의 『제3차 생명공학육성기본계획(바이오경제 혁신전략 2025, '17~'26년)』에 의하면 합성생물학, 유전자교정 등 미래유망 분야 기술개발을 통해 바이오 R&D 혁신을 위한 전략을 추진할 계획을 가지고 있다. 또한 이와 관련된 기술개발을 촉진하고 관련 규제를 개선하는 법적 근거를 마련할 계획을 가지고 있다.³³⁾

위에서 살펴본 것처럼 국내의 경우도 국외와 마찬가지로 대부분이 합성생물학과 관련된 연구와 개발이 대다수를 차지하고 있고 아직까지는 합성생물학의 위해성과 윤리적인 측면에 대한 연구는 많지 않은 것으로 파악된다.

30) 지능형바이오시스템 설계 및 합성 연구단, 검색일: 2017.11.3.

31) Registry of Standard Biological Parts, 검색일: 2017.11.3.

32) 한국생물학부품소재은행, 검색일: 2017.11.3.

33) 교육부 외 보도자료(2017.9.28).

〈표 3-3〉 국내 합성생물학 연구 현황(괄호 안의 숫자는 프로젝트 수)

기준 연도	연구 책임자	과제수행기관	과제관리기관	예산사업명
2017	이승구(22)	한국생명공학연구원(47)	한국연구재단(201)	차세대바이오그린21(91)
(45)	이성국(19)	한국과학기술원(41)	농촌진흥청(91)	일반연구자지원(36)
2016	박희성(12)	경상대학교(24)	한국과학재단(4)	글로벌프론티어사업(33)
(44)	조병관(11)	서울대학교(20)	중소기업기술정보	글로벌프론티어지원(16)
2015	권성훈(10)	국립대법인	진흥원(3)	이공학개인기초연구지원(12)
(33)	안중훈(10)	울산과학기술대학교	(재)한국산업기술	개인기초연구(미래부)(12)
2014	이상열(7)	산학협력단(15)	재단(2)	기후변화대응기술개발(11)
(44)	김선창(7)	포항공과대학교(10)	한국생명공학연구원	글로벌프론티어(11)
2013	백승필(6)	울산과학기술대학교(9)	(2)	개인연구지원(9)
(38)	정규열(6)	연세대학교(8)	한국과학기술원(1)	중견연구자지원(7)
2012	이상엽(6)	재단법인 지능형 바이오 시스템	한국산업기술평가	BK21플러스사업(0.5)(5)
(42)	김선원(6)	설계 및 합성 연구단(7)	관리원(1)	첨단융합기술개발(5)
2011	김태성(5)	전문대학교 산학협력단(7)		국가간협력기반조성(비ODA)(4)
(31)	윤철호(5)	성균관대학교(자연과학캠퍼스)(7)		국가간협력기반조성(4)
2010	이상준(5)	건국대학교(서울)(7)		개인기초연구(교육부)(4)
(14)	신종식(5)	전남대학교(6)		일반연구자지원(교육부)(3)
2009	송재경(5)	국립농업과학원(6)		신진연구자지원(3)
(8)	박성훈(5)	농촌진흥청 본청(6)		C1가스리파이너리(3)
2008	박용일(5)	부경대학교(6)		해외우수기관유치(3)
(3)	홍순호(5)	연세대학교 산학협력단(5)		지역혁신인력양성(2)
2007	이균민(4)	중앙대학교(5)		한국생명공학연구원연구운영비
(1)	김재연(4)	가톨릭대학교 성심교정(5)		지원(2)
2005	김응수(4)	건국대학교(5)		인문학진흥방안(2)
(1)	김수연(4)	부산대학교(4)		이공학기술연구기반구축(2)
2004	임선형(4)	고려대학교 산학협력단(4)		이공학교육활성화사업(2)
(1)	권오석(4)	인하대학교(4)		BK21플러스사업(2)
	이동엽(3)	울산대학교(3)		STEAM연구(2)
	이강석(3)	이화여자대학교(3)		기후변화대응기초원천기술개발
	우동균(3)	울산과학기술원(3)		사업(2)
	오현명(3)	National University of		바이오기술개발사업(2)
		Singapore(3)		연구장비공동활용지원(1)
		포항공과대학교 산학협력단(3)		바이오·의료기술개발(1)
		전문대학교(3)		
		경성대학교(3)		

자료: 국가과학기술지식정보서비스(NTIS), 검색일: 2017.11.3.

제4장

합성생물학의 긍정적 측면 및 위해관리의 필요성

1. 합성생물학의 긍정적 측면

합성생물학은 유용화학물질, 바이오에너지, 바이오의약품, 환경문제, 식량 생산 등에 적용이 가능한 것으로 보이며 여러 분야에서 고부가가치를 창출할 것으로 예상된다.

예를 들어 말라리아 치료제의 물질인 아르테미시닌(Artemisinin)의 핵심 전구체인 Artemisinic acid를 대사공학 기술과 미생물을 통해 대량 생산할 수 있는 가능성을 제시한 연구는 합성생물학의 좋은 사례로 소개되고 있다(Ro et al., 2006).

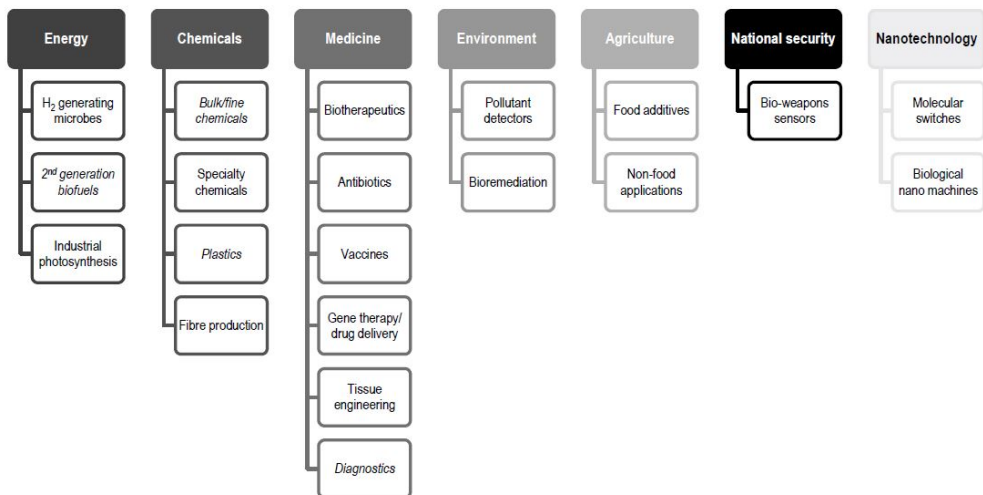
〈그림 4-1〉에서 보는 것처럼 합성생물학을 이용한 바이오연료와 같은 에너지 분야, 생물 기반의 플라스틱 생산과 같은 화학 분야, 항생제, 백신 및 약물 전달 등의 의약 분야, 생물학적 정화(Bioremediation), 오염물질 탐지기와 같은 환경 분야, 식품 첨가물과 같은 농업 분야, 생물학무기 감지 센서와 같은 안보 분야, 나노공학 분야에도 적용이 가능하다(OECD, 2014).

기존의 화석연료를 대체할 수 있는 연료로 인공 미생물을 이용하여 바이오 에탄올, 디젤, 항공유 등의 바이오연료를 생산하는 연구가 미국의 에너지부 산하의 국가바이오에너지연구소(JBEL: Joint BioEnergy Institute) 및 LS9, AMYRIS와 같은 기업에서 진행되고 있으며 생산성을 높이기 위해 노력하고 있는 것으로 보인다(이성국, 이재명, 오기광, 2010). 합성생물학을 이용한 차세대 바이오연료는 기존에 식용작물로부터 생산한 1세대 바이오연료의 문제점을 극복할 수 있을 것으로 기대된다(SCBD, 2015).

합성생물학 기술을 이용한 미생물이 오염된 지역을 감지할 수 있는 바이오센서로 쓰일 수도 있으며, 유전자 드라이브를 통해 말라리아 같은 질병의 원인인 모기를 통제하여 질병 확산을 막는다거나 침입 외래종을 통제하는 것도 가능할 것으로 보인다(SCBD, 2015).

농업에서도 합성생물학 기술로 만들어진 생물체 생산은 농업용지의 부족으로 인한 토지 전용을 줄일 수 있으며 화학비료와 살충제의 사용을 줄여 생태계에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 기대된다(SCBD, 2015).

기존에 식물에서 얻어지는 물질인 향을 내기 위한 바닐라를 대체하는 물질인 바닐린(vanillin)이나 향신료로 쓰이는 사프란(saffron), 화장품 등의 원료로 쓰이는 로즈오일(Rose oil) 등이 합성생물학 기술을 이용하여 생산되며 자연에서 얻어지는 천연물질을 대체할 수 있기에 지속가능하지 않은 천연물질의 수급문제를 해결하는 동시에 생물 보전에도 기여할 수 있을 것으로 보인다(SCBD, 2015; ETC Group, 2016).



자료: Collins(2012); OECD(2014), p.32에서 재인용, 이탤릭체로 표시된 부분은 초기산업 적용단계를 의미.

〈그림 4-1〉 합성생물학의 응용 분야

2. 생물안전³⁴⁾

합성생물학의 잠재적인 위험으로 지적되어 온 사항 중에 생물안전(Biosafety)과 관련이 있는 것은 1. 합성 계놈으로 만들어진 생물체가 외부에 우발적으로 방출되어 인간 및 생태계에 해를 주거나 영향을 끼칠 가능성에 대한 것, 2. 유전자 이동(Gene flow), 3. 예측할 수 없는 형질의 출현을 들고 있다(김훈기, 2010; SCBD, 2015; 김형진, 2016).

SCBD(2015)와 김형진(2016)은 합성생물학 기술을 사용한 생물체가 생태계에 미치는 영향에 대해서 기존에 존재하는 생물종들보다 적합성면에서 우위를 차지할 수 있으므로 기존의 종들을 살던 곳에서 몰아내거나 침입외래종처럼 될 수도 있다는 점을 지적하고 있다. 또한 생태계에서 새로운 오염물질이 될 수도 있는데 예를 들어 바이오연료 생산을 위해 사용한 조류(algae)가 실험실과 같은 제한된 환경을 벗어나 생태계에 지속적으로 잔존하여 기름을 계속 생산한다거나, 에탄올을 얻을 목적으로 사탕수수를 분해하기 위해 합성한 생명체가 생태계에서 당을 분해하는 것을 예로 들 수 있다(SCBD, 2015; 김형진, 2016). SCBD(2015)는 이러한 생태계에 미치는 위해성에 대한 평가에 대해서는 사례별로 접근하는 방식을 취해야 하며, 제한된 실험실 상에서 사용하는 합성생물학 기술을 이용한 생명체가 의도적이거나 비의도적으로 외부에 방출되는 것이 해가 있을 수 있다는 점에 대해서는 과학계와 정책계간에 이견이 있다는 점을 지적하였다. 합성생물학이 사용하는 숙주로 미생물을 사용하는 것이 미생물의 특성상 급격한 진화를 한다거나 돌연변이를 거쳐 지속적으로 생존할 수 있는 점 등을 들어 생태계에 미치는 위해성을 지적하고 있다(SCBD, 2015).

수평적 유전자 이동(Horizontal gene transfer)과 같이 합성생물학을 통해 변형된 생물의 DNA가 다른 종간에 이동하는 것 또한 위해성 평가의 주요 대상이 되며, 이러한 유전자 이동은 유전자 수준에서의 생물다양성 변화와 원하지 않는 생물의 형질을 퍼뜨릴 수 있기에 유전적 오염(genetic pollution)으로 여겨지기도 한다(SCBD 2015; 김형진 2016). <표 4-1>은 유전자 이동, 돌연변이, 생태계에 미치는 영향, 생물다양성에 미치는 영향 등에 대한 국제적인 규제 체계와 미국과 유럽의 규제 체계를 비교한 것이다(OECD, 2014).

34) 김훈기(2010); SCBD(2015); 김형진(2016).

〈표 4-1〉 합성생물학의 안전과 환경적 위해성에 대한 규제 분석

Risk	International	United States	European Union
Transfer of genes	Cartagena Protocol on Biosafety	EPA and APHIS	Directive 2001/18/EC
Mutations, evolution and proliferation		EPA	Directive 2001/18/EC
Effects on ecosystem and other species	Cartagena Protocol on Biosafety	EPA and APHIS	Directive 2001/18/EC
Effect on biodiversity	Convention on Biological Diversity, Cartagena Protocol on Biosafety		Directive 2001/18/EC
Consumption risks		EPA (only for plant-incorporated pesticides)	Regulation 1829/2003
Risks to laboratory workers		NIH Guidelines	Directive 2009/41/EC Directive 2000/54/EC
Accidental release of laboratory strains		NIH Guidelines	Directive 2009/41/EC

자료: Bar-Yam et al.(2012): OECD(2014), p.120에서 재인용.

3. 생물안보³⁵⁾

합성생물학은 새로운 생명과학 연구의 주류가 되었으며 여러 분야에 걸쳐 과학적 진보를 가져올 수 있는 기술로 주목받고 있지만 잠재적인 생물안보의 위협 또한 될 수 있다. 이제는 DNA를 기존보다 훨씬 신속하고 저렴하게 합성할 수 있기 때문에 누군가 악의적인 목적을 가지고 독성 유전자나 바이러스 게놈을 합성하는 것도 가능하다. 이러한 기술은 잠재적으로 생물 테러리스트가 기존처럼 바이러스 자체의 물리적 샘플을 얻을 필요 없이 DNA 또는 다른 핵산의 염기서열에 대한 지식으로부터 바이러스를 만드는 것을 가능하게 한다(Carter and Friedman, 2015).

Carter and Friedman(2015)은 이와 관련하여 미국 보건사회복지부(HHS: U.S. Department of Health and Human Services)에서 제시하는 합성 2중가닥 DNA 제공자를 위한 검사체계 가이드를 소개하면서 1. 고객 검사(Customer Screening), 2. 염기서열

35) Carter and Friedman(2015).

검사(Sequence Screening), 3. 사후 검사(Follow-up Screening)를 통해 고객이 잠재적으로 테러 위협이 있는 사람인지 구분하고 적절한 절차에 따라 DNA를 주문하는지를 검사하고, 염려되거나 위험성이 있는 염기서열인지 검사하고, 고객과 주 이용자가 최종 목적에 맞게 적법하게 DNA를 사용하는지 검사하는 것이 필요하다고 하였다.

김훈기(2009)는 생물안보와 관련한 합성생물학의 위험을 통제하기 위한 정책적 방안에 대해 Garfinkel et al.(2007)의 보고서에서 제시한 내용을 재구성하여 3가지 대상인물(1. 합성 DNA 판매기업, 2. 유전자 합성장치 소유자, 3. 합성생물학 연구자)이 통제하여야 할 내용들을 <표 4-2>와 같이 제시하였다.

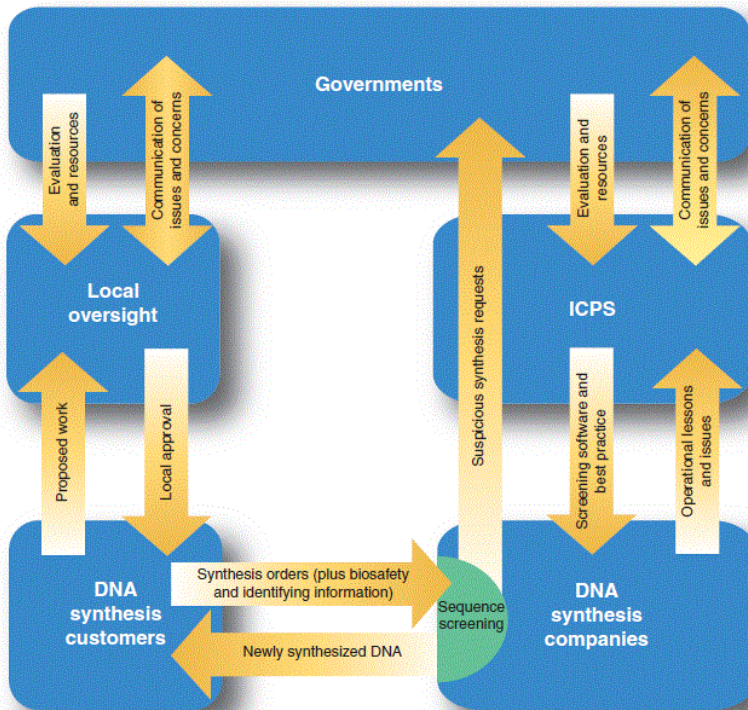
<표 4-2> 합성생물학의 위험 통제 방안

대상인물	도구
합성DNA 판매 기업	- 주문 내용이 위험한지 조사할 수 있는 인증된 소프트웨어 사용이 요구된다 - 주문자는 소속기관의 생물안전성기구나 책임기구로부터 합법적으로 증명되어야 한다 - 인증된 소프트웨어와 함께 생물안전성기구로부터 증명된 사람이 확인되어야 한다 - 고객과 주문에 관한 정보를 저장해야 한다
유전자 합성장치 소유자	- 기계를 등록해야 한다 - 자격증이 있어야 한다 - 자격증은 합성장치 소유자와 관련 시약 및 서비스 구매자 모두에게 갖춰져야 한다
합성생물학 연구자	- 대학 과정처럼 위험과 최고의 실습에 대한 교육이 필요하다 - ‘합성생물학 실험실 내 생물안전성’을 위한 매뉴얼을 만든다 - 최고의 실습을 위한 정보센터를 설립한다 - 위험한 실험에 대해 책임을 검토하는 IBC(Institutional Biosafety Committee) 기능을 확장한다 - IBC는 검토책임과 함께 위험 실험에 대한 국가 차원의 권고사항을 반영한다 - IBC는 검토책임과 함께 생물안전성 가이드라인을 준수해 실행케 한다

자료: Garfinkel et al.(2007): 김훈기(2009), p.187에서 재인용.

Bügl(2007)은 <그림 4-2>에서와 같이 계층화된 DNA 합성 주문 검사(Screening) 프로세스가 생물안보와 관련된 문제에 즉각적이고 체계적으로 이행될 수 있도록 제안하였다. DNA 합성에 대한 명령을 내린 개인은 자신, 자신의 조직 및 모든 관련 바이오 안전성 정보를 확인해야 한다. 그 다음 단계로 개별 회사는 검증된 소프트웨어 도구를 사용하여 염기서

열에 대한 합성 주문이 위험한 것이 아니고 규정을 따른 것인지 확인하고 추가 검토를 위해 합성 주문에 플래그를 지정한다. 마지막으로 DNA 합성 및 합성생물학 회사는 폴리 뉴클레오타이드 합성을 위한 국제 컨소시엄(ICPS: International Consortium for Polynucleotide Synthesis)를 통해 협력하고 적절한 정부 기관(전 세계)과 협력하여 주문을 검사(Screening)하고 잠재적으로 위험한 서열을 식별하는 데 사용되는 기본 기술을 신속하고 지속적으로 개선하고 합의된 지침을 벗어나는 행동을 보고하는 절차를 거친다(Bügl, 2007).



자료: Bügl(2007), p.627.

〈그림 4-2〉 DNA 합성 규제와 감독을 위한 제안된 체계

제5장

결론 및 시사점

본 연구에서는 융합학문으로 새롭게 부각되고 있는 합성생물학의 정의 및 개념, 국내외 연구 및 정책 동향 조사와 합성생물학의 긍정적 측면 및 잠재적인 위해관리의 필요성에 대한 고찰을 하였다. 이를 통해 합성생물학 연구 증가에 따른 혜택과 더불어 생물안전과 생물안보와 같은 위해성 관리를 위한 체계적인 방안 마련이 필요함을 논의하였다.

국내외에서 합성생물학을 미래유망 기술로 보고 상당한 규모의 예산을 투자하여 연구와 개발을 하고 있으나 상대적으로 합성생물학의 잠재적 위해성과 같은 이슈에는 적은 규모의 예산 투자와 연구가 수행되었으며, 특히 국내의 경우는 소수의 관련 연구가 진행되었다.

합성생물학 연구는 생명현상을 다루고 기존에 자연에 존재하지 않는 생명체를 디자인하고 제작한다는 점에서 불확실성이 존재한다. 합성생물학 기술을 이용하여 이러한 불확실성을 극복하고 있지만 현재의 기술과 정책 및 제도가 모든 잠재적 위해성을 예측하고 평가하며 관리하기에는 한계가 있다. 따라서 합성생물학 연구 개발을 저해하지 않는 범위에서 생물안전과 생물안보와 같은 잠재적 위해성을 체계적으로 관리하기 위한 방안을 마련하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 합성생물학 전문가, 정책 입안자, 정부, 시민사회, 학계, 산업계 등을 포함하는 이해관계자들의 충분한 논의와 검토를 거쳐 관리방안을 마련할 수 있도록 준비하는 것이 선행되어야 할 것이다.

| 참고문헌 |

[국내문헌]

교육부, 과학기술정보통신부, 농림축산식품부, 산업통상자원부, 보건복지부, 환경부, 해양수산부, 식품의약품안전처 보도자료(2017.9.28), “바이오경제 혁신으로 혁신성장·미래 일자리·국민 건강 이끈다: 제3차 생명공학육성기본계획(바이오경제 혁신전략 2025) 확정·발표”.

김영창 외(2008), 「합성생물학」, 개신.

김응빈 외(2017), 「생명과학, 신에게 도전하다: 5개의 시선으로 읽는 유전자가위와 합성생물학」, 동아시아.

김형진(2016), 「미래산업 분야 법제이슈에 관한 연구(1): 합성생물학 표준 개발 현황과 보호 법제 연구」, 한국법제연구원.

김훈기(2009), “합성생물학의 위해성에 대한 국내 규제법률 검토, LMO법과 생물무기금지법을 중심으로”, 「환경사회학연구 ECO」, 13(2), pp.175-208.

김훈기(2010), 「합성생명: 창조주가 된 인간과 불확실한 미래」, 서울: 이음.

오철우(2010), “미국 합성생물학 기대와 우려 '중간의 길' 선택”, 「한겨레 사이언스온」, 2010년 12월 27일.

이성국, 이재명, 오기광(2010), “합성생물학을 통한 균주 개발과 바이오안전성 문제”, 「BIOSAFETY」, 10(3), pp.32-41.

한국과학기술기획평가원(KISTEP) 정책기획실(2010), 「합성생물학의 윤리적 측면에 관한 정책 제언」, 해외정책이슈분석.

[국외문헌]

Bar-Yam, S. et al.(2012), *The Regulation of Synthetic Biology: A Guide to United States and European Union Regulations, Rules and Guidelines*, SynBERC and iGEM Version 9.1, 10 January 2012.

- Boldt, J. ed.(2016), *Synthetic Biology: Metaphors, Worldviews, Ethics, and Law*, Springer VS.
- Bügl, H.(2007), “DNA Synthesis and Biological Security”, *Nature Biotechnology*, 25(6), pp.627-629.
- Carter, S. R. and R. M. Friedman(2015), *DNA Synthesis and Biosecurity, Lessons Learned and Options for the Future*, J. Craig Venter Institute, La Jolla, California.
- ETC Group(2007), *Extreme Genetic Engineering - An Introduction to Synthetic Biology*, Montreal: ETC Group.
- ETC Group(2012), *Synthetic Biology: 10 Key Points for Delegates*, Montreal: ETC Group.
- ETC Group(2016), *Synthetic Biology: Biodiversity and Farmers*, Montreal: ETC Group.
- Garfinkel, M. S. et al.(2007), *Synthetic Genomics: Options for Governance*, J. Craig Venter Institute, CSIS, MIT.
- Gibson, D. G. et al.(2010), “Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome”, *Science*, 329(5987), pp.52-56.
- Gronvall, G. K.(2016), *Synthetic Biology, Safety, Security, and Promise*, Health Security Press, Baltimore, Maryland.
- OECD(2014), *Emerging Policy Issues in Synthetic Biology*, OECD Publishing.
- Parens, E. et al.(2009), *Ethical Issues in Synthetic Biology*, Woodrow Wilson International Center for Scholars, Washington, DC., The Hastings Center, Garrison, New York.
- PCSB: Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues(2010), *New Directions: the Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies*, Washington, DC.
- Ro, D. K. et al.(2006), “Production of the Antimalarial Drug Precursor Artemisinic Acid in Engineered Yeast”, *Nature*, 440, pp.940-943.
- SCBD: Secretariat of the Convention on Biological Diversity(2015), *Synthetic Biology*, Montreal, Technical Series No. 82, p.118.

- Si, Tong and Huimin Zhao(2016), “A Brief Overview of Synthetic Biology Research Programs and Roadmap Studies in the United States”, *Synthetic and Systems Biotechnology*, 1(4), pp.258-264.
- UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group(2012), *A Synthetic Biology Roadmap for the UK*, Technology Strategy Board on Behalf of UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group, Swindon.
- WWICS: Woodrow Wilson International Center for Scholars(2010), *Trends in Synthetic Biology Research Funding in the United States and Europe*, Washington, DC.
- WWICS: Woodrow Wilson International Center for Scholars(2015), *U.S. Trends in Synthetic Biology Research Funding*, Washington, DC.

[온라인 자료]

- 국가과학기술지식정보서비스(NTIS), <http://www.ntis.go.kr>, 검색일: 2017.11.3.
- 위키백과(2017.9.22), “합성생물학”, <https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%95%A9%EC%84%B1%EC%83%9D%EB%AC%BC%ED%95%99>, 검색일: 2017.10.31.
- 지능형바이오시스템 설계 및 합성 연구단, <http://www.syntheticbiology.or.kr/>, 검색일: 2017.11.3.
- 한국생물학부품소재은행, <http://rsbp.unist.ac.kr/>, 검색일: 2017.11.3.
- CBD, “New & Emerging Issues”, <https://www.cbd.int/emerging/>, 검색일: 2017.10.31.
- CBD(2010.10.29), “Decision Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity at its Tenth Meeting”, X/13, *New and Emerging Issues*, UNEP/CBD/COP/DEC/X/13, <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-10/cop-10-dec-13-en.pdf>, 검색일: 2017.10.31.
- CBD(2014.10.17), “Decision Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity”, XII/24. *New and Emerging Issues: Synthetic Biology*,

- UNEP/CBD/COP/DEC/XII/24, <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-12/cop-12-dec-24-en.pdf>, 검색일: 2017.10.31.
- CBD(2016.12.16), “Decision Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity”, XIII/17, *Synthetic Biology*, CBD/COP/DEC/XIII/17, <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-13/cop-13-dec-17-en.pdf>, 검색일: 2017.10.31.
- Collins, A.(2012), “Win-win Investments: Synthetic Biology for Growth and Innovation”, Paper Presented at the Science and Technology Options Assessment (STOA) Workshop “Synthetic Biology - Enabling Sustainable Solutions for Food, Feed, Bio-fuel and Health: New Potentials for the European Bio-economy”, European Parliament, Brussels, 6 June 2012, www.europarl.europa.eu/stoa/cms/home/events/workshops/synthetic_biology, 검색일: 2017.10.31.
- DIYbio.org, <https://diybio.org/>, 검색일: 2017.10.31.
- DIYbio.org, “Draft DIYbio Code of Ethics from European Congress”, <https://diybio.org/codes/draft-diybio-code-of-ethics-from-european-congress/>, 검색일: 2017.10.31.
- DIYbio.org, “Draft DIYbio Code of Ethics from North American Congress”, <https://diybio.org/codes/code-of-ethics-north-america-congress-2011/>, 검색일: 2017.10.31.
- EBRC, <https://www.ebrc.org/>, 검색일: 2017.10.31.
- EBRC, “What is synthetic biology?”, <https://www.ebrc.org/what-is-synbio>, 검색일: 2017.10.31.
- ETC Group, <http://www.etcgroup.org/>, 검색일: 2017.10.31.
- European Commission(2014), “Preliminary Opinion on Synthetic Biology I: Definition”, https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_044.pdf, 검색일: 2017.10.31.

Nature, “Synthetic Biology”, <https://www.nature.com/subjects/synthetic-biology>,
검색일: 2017.10.31.

New & Emerging Issues, “CBD”, <https://www.cbd.int/emerging/>, 검색일: 2017.10.31.

OECD, “Synthetic Biology”, <http://www.oecd.org/sti/biotech/syntheticbiology.htm>,
검색일: 2017.10.31.

OECD and Royal Society, United Kingdom(2010), “Symposium on Opportunities
and Challenges in the Emerging Field of Synthetic Biology: Synthesis Report”,
<http://www.oecd.org/sti/biotech/45144066.pdf>, 검색일: 2017.10.31.

Registry of Standard Biological Parts, http://parts.igem.org/Main_Page, 검색일:
2017.11.3.

SGI-DNA, “A Synthetic Genomics, Inc. Company”, [https://sgidna.com/our_technology](https://sgidna.com/our_technology.html).
html, 검색일: 2017.10.31.

SynBERC, <https://www.synberc.org/>, 검색일: 2017.10.31.

SynBioWatch, <http://www.synbiowatch.org/>, 검색일: 2017.10.31.

SynBioWatch(2016), “A Shopper’s Guide to Synthetic Biology”, <http://www.synbiowatch.org/shoppers-guide/>, 검색일: 2017.10.31.

Synthetic Biology Project, <http://www.synbioproject.org/>, 검색일: 2017.10.31.

The Royal Society, UK(2007), “Call for views: Synthetic Biology”, [https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/projects/synthetic-biology/Call
ForViews.pdf](https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/projects/synthetic-biology/CallForViews.pdf), 검색일: 2017.10.31.

Abstract

Research Trends in Synthetic Biology for Preparation of Management Plan

Il-Chan Oh, Kyung-Ah Koo, Yong-Ha Park

This study investigates the domestic and international research trends and policies related to the synthetic biology, new and emerging issue in the field of biotechnology. The study also provides data to understand the benefits and potential risks of synthetic biology.

First, the study reviews the definition and concept of synthetic biology of the European Commission, UK Royal Society, Engineering Biology Research Consortium, and Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues. It also examines the operational definition and discussion of synthetic biology issues in the Convention on Biological Diversity.

Second, the study reviews the domestic and international research trends and policies. The Engineering Biology Research Consortium in the United States, the Woodrow Wilson International Center for Scholars and the EU's synthetic biology research trends are reviewed. The Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues investigates policy trends related to biosafety, biosecurity, and ethical issues. ETC Group and biodiversity related issues, policy trends related to OECD and economic issues, and SynBioWatch are also reviewed. In addition, the study conducts reviewing on the researches and policy trends related to the synthetic biology in Korea.

Third, the benefits of synthetic biology and the need for risk management

are discussed. Synthetic biology is promising, high-value technologies which can be applied to biochemical, bioenergy, biomedicine, bioremediation, food production, and so on. The study also reviews biosafety issues include ecosystem-level impacts, gene transfer, and emergence of unpredictable properties. Biosecurity issues in the synthetic biology are also discussed.

It is necessary to prepare the risk management system such as biosafety, biosecurity issues on the synthetic biology to prevent potential risks caused by applying new technologies.

Keywords: Synthetic Biology, Management plan, Risks, Potential impacts, Biosafety, Biosecurity

| KEI Working Paper 목록 | 2015~2017

- 2017년
- 2017-01 불확실성과 학습효과를 반영한 기후경제 모형 방법론 연구(황인창)
 - 2017-02 환경경제 분석에서 행위자 기반 모형의 활용 방안 연구(채여라, 정예민)
 - 2017-03 인도 물관리 정책의 비교분석과 환경협력 확대 방향(김익재)
 - 2017-04 산림경영사업지의 개발용지 전환 사례조사 및 개선사항의 도출(방상원)
 - 2017-05 환경분야 빅데이터 수집방법 연구(한국진)
 - 2017-06 에머지 방법론을 활용한 유역의 지속가능성 평가: 금강유역을 중심으로(이승준)
 - 2017-07 도시재생 활성화지역 노후 건물의 재정비 시나리오별 환경적 지속가능성 평가를 위한 기초연구(송지윤)
 - 2017-08 Smart waste 및 환경정보 제공을 위한 주민참여형 애플리케이션 활용 연구(이소라, 임혜숙)
 - 2017-09 2차생성 미세먼지 저감을 위한 암모니아 관리정책마련 기초연구(신동원)
 - 2017-10 주요국가 환경정책 트렌드 분석연구(명수정, 문현주, 신용승, 전호철)
 - 2017-11 한국의 녹색경제지수 산정(김종호)
 - 2017-12 합성생물 관리방안 마련을 위한 국내외 연구동향(오일찬)
- 2016년
- 2016-01 시스템과 네트워크 이론을 활용한 미래 환경정책 방향 연구(이승준)
 - 2016-02 공공자료 분석을 통한 친환경적 풍력에너지 개발 기초 연구(김태윤)
 - 2016-03 환경영향평가에서 활용 가능한 주민참여 방법 기초 연구(이상윤)
 - 2016-04 자율주행 자동차의 친환경성 제고를 위한 기초 연구(이승민)
 - 2016-05 미래 고온환경 변화와 직종 간 임금격차 추정(김동현)
 - 2016-06 드론을 이용한 환경재난 사후대응 기술 및 연구동향 분석 연구(손승우)
 - 2016-07 건물부문의 환경 부하 평가 모형 개발을 위한 기초연구(송지윤)
 - 2016-08 근지표환경 임계영역(critical zones)의 환경적 중요성과 환경관리의 미래 이슈(현윤정)
 - 2016-09 시민과학의 자연환경조사 적용방안 연구(김윤정)
 - 2016-10 환경평가 자료의 공공서비스 지원을 위한 기초연구(김태형)
 - 2016-11 토지환경분야의 지속가능발전목표(SDGs) 이행을 위한 정책방향 설정(명수정)
 - 2016-12 건강영향평가 분야에서의 위해소통을 위한 리스크 테이블 제작 연구(하중식)
 - 2016-13 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 환경전략/대기환경/물환경/국토자연/자원순환 부문(조일현, 공성용, 한대호, 홍현정, 한상운)
 - 2016-14 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 환경평가 부문(박하늘)
 - 2016-15 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 온실가스 감축 부문(김이진, 간순영)
 - 2016-16 지하수 개발사업의 환경영향평가 개선을 위한 기초연구(김경호)
 - 2016-17 토양자원 관리를 위한 전략환경영향평가 개선을 위한 기초연구: 도시개발사업을 중심으로(양경)

2016-18 미세조류 바이오매스의 자원화 활용에 대한 연구: 바이오 (기능성)소재를 중심으로
(지민규)

2016-19 2016 국민환경의식조사 연구(곽소윤)

2015년 2015-01 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선방안 연구(김윤승)

2015-02 이슈스캐닝(Horizon Scanning) 기법 활용을 통한 물환경관리 부문 이머징 이슈 발굴
연구(한혜진)

2015-03 기후경제통합-지역평가모형(Regional Integrated Assessment Model of Climate
and the Economy) 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구(황인창)

2015-04 기후변화로 인한 고온환경 근로자의 작업역량 저하 추정과 공간적 군집 파악(김동현)

2015-05 환경영향평가 설명회·공청회 운영현황 분석(조공장)

2015-06 도로 및 철도 사업의 토양분야 환경영향평가 사례 연구(신경희)

2015-07 빅데이터를 활용한 환경보건서비스에 관한 기초연구(간순영, 윤성지)

2015-08 자원순환분야 지속가능발전목표(SDGs) 이행 기반 마련을 위한 기초연구(임혜숙)

2015-09 내륙습지에 대한 환경영향평가 개선방안 연구 I: 환경부 전국내륙습지 조사 지침(2011)
의 적용을 중심으로(방상원)

2015-10 자원순환성 평가제도 대상 확대를 위한 기초연구(이소라)

2015-11 환경소음 빅데이터의 정책 활용성 제고 방안(박영민)

2015-12 인과지도(Causal Loop)를 활용, 미래 물수급관리 정책 지원을 위한 기초연구
(류재나)

2015-13 생물안전 법제 기초연구(홍현정)

2015-14 지방자치단체 환경영향평가 조례 운영현황 및 효율화 방안(신효성)

2015-15 개발사업의 비점오염 영향평가방법 개발을 위한 기초연구(이진희)

2015-16 환경영향평가제도에서의 생태계보전협력금 활용 개선방안(이상범)

2015-17 환경가치 증장기 연구수요 조사(곽소윤)

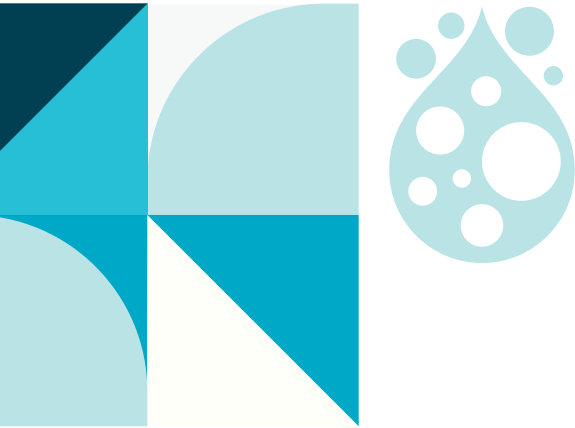
2015-18 세종특별자치시의 대기질 관리 기획 연구(심창섭)

2015-19 2015 국민환경의식조사 연구(곽소윤)

※ KEI 설립 이후 현재까지의 보고서 원문은 KEI 홈페이지(www.kei.re.kr)에서 보실 수 있습니다.



합성생물 관리방안 마련을 위한 국내외 연구동향



KEI  한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

30147 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 B동(과학·인프라동) 8~11층
<http://www.kei.re.kr>

본 책자는 친환경용으로 인쇄되었습니다



ISBN 979-11-5980-176-1