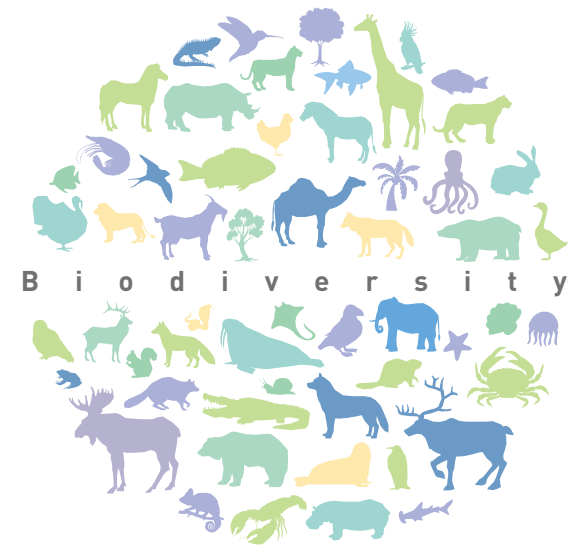


생물다양성과  
합성생물학

# 생물다양성과 합성생물학

김용휘 외 11인 지음



## NIBR, Challenge the Future



바야흐로 세계는 지금 인공지능, 빅데이터 등 디지털 기술로 촉발되는 초연결 기반의 4차 산업혁명 시대입니다. 4차 산업혁명 시대에 지능형 혁신 분야로 주목받는 산업은 바이오 헬스와 식량안보 관련 농수산물 분야입니다. 그리고 해당 분야의 원천 물질이 바로 '생물자원'입니다. 생물

자원은 인류의 행복과 번영을 위하여 필수적인 자원일 뿐만 아니라, 급격한 생태계 파괴 및 기후위기에 따라 인류가 마땅히 보전해야 할 보물이라 칭할 수 있습니다.

생물자원을 이용한 생명공학 기술은 4차 산업혁명과 더불어 더욱더 급진적이고 혁신적으로 진화하고 있습니다. 인류는 생명공학 기술의 수준을 자연계에 존재하는 유전자원을 활용하는 단계에서 진일보하여 과학, 기술, 공학을 접목해서 설계자의 의도대로 합성하는 수준까지 발전시켰

습니다. 4차 산업혁명 시대의 합성생물학(Synthetic Biology)이란, 자연계에 존재하지 않는 생물 구성요소와 시스템을 설계·제작하는 단계에서 더 나아가 자연계에 존재하는 생물시스템을 재설계·제작하는 현대 생물공학의 새로운 차원이자 발전을 의미합니다.

합성생물학의 등장에 따라 생물다양성을 보전하고 그 구성요소의 지속가능한 이용을 목적으로 하는 생물다양성협약(CBD) 역시 새로운 변곡점에서 있습니다. 2016년 개최된 제13차 생물다양성협약 당사국 총회는 합성생물학을 주요 안건으로 채택하였고, 제14차 당사국 총회에서는 유전자가위 기술로 특정 유전자형의 개체 비율을 높이는 유전자 드라이브(Engineered Gene Drives)로 유전자가 변형된 생물이 환경에 노출될 경우에 대한 사전예방적 접근의 중요성에 대하여 논의한 바 있습니다.

합성생물학과 같이 4차 산업혁명 시대에 새롭게 논의되는 신규 의제는 어떻게 대응해야 할까요? 불확실성, 변동성, 복잡성, 모호성이 다분한 4차

산업혁명 시대에 합성생물학과 같은 새로운 의제는 법학, 생명공학, 경영학 등 학제적 학문을 접목하여 다양한 이해관계자의 상호 간 소통이 필요합니다.

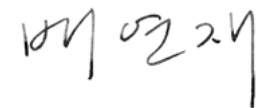
그리고 생물다양성 보전과 지속가능한 이용을 위하여 급변하는 새로운 현안에 대응할 수 있는 미래 세대 양성이 매우 중요합니다. 환경부 국립생물자원관은 소통, 자율 그리고 융합의 3대 운영 원칙으로 국가 생물다양성 정책에 이바지하기 위하여 노력하고 있습니다. 그리고 미래 세대 양성을 위하여 '생물다양성협약 대응 전문인력 양성사업'을 운영 중입니다. 본 사업은 법학, 생명공학기술<sup>BT</sup>, 정보기술<sup>IT</sup>, 경영학 등 다양한 전공으로 구성된 박사급 전문인력이 모여 '생물다양성과 합성생물학'이라는 주제로 협동연구를 진행하고 있으며, 이제 그 결과를 단행본으로 발간하여 생물다양성 연구자 및 이해관계자 분들과 공유하고자 합니다.

이 책은 생물다양성 관련 복합 이슈를 학제적으로 접목하는 융합연구

의 마중물이 될 것입니다. 국가 생물다양성 보전 정책 수립 및 미래 세대를 위한 교육 자료 그리고 생물다양성 인식 제고 강화를 위한 기초 정보로 널리 활용되기를 바랍니다.

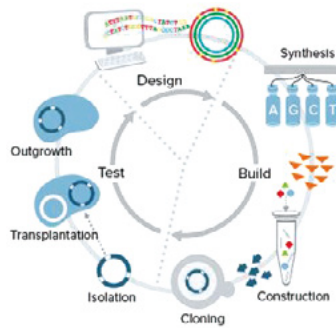
이번 발간을 위하여 적극적으로 연구에 임한 생물다양성협약 대응 전문인력 양성사업 연구자들과 도움 주신 전문가 분들께 깊은 감사의 말씀을 전합니다.

2019년 11월  
환경부 국립생물자원관장



## 이 책에 등장하는 용어들

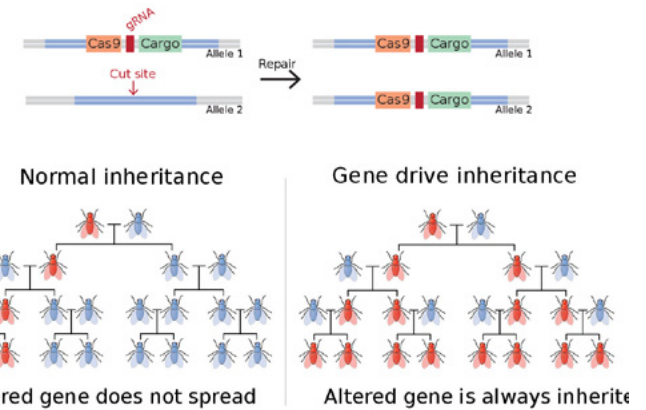
- **합성생물학** **Synthetic Biology** 합성생물학은 생물학을 기반으로 새로운 장치와 시스템을 설계하고 엔지니어링하여 기존 자연의 생물시스템을 재설계하는 것을 목표로 하는 유전공학 기술 발전의 연장선에 있는 기술 발전 단계 중 하나다. 합성생물학은 새로운 능력을 갖도록 공학적으로 유용한 목적을 위해 유기체를 재설



[그림 1] 합성생물학의 적용 과정  
(자료: J. Craig Venter Institute)

계하는 과학 분야이며(NHGRI, US), 생체 또는 비생물 물질을 변형하기 위해 생물체 내 유전물질의 설계, 제조 및 수정을 촉진하고 가속화하는 과학, 기술 및 공학의 응용으로 정의된다(European Commission, 2014; SCBD, 2015).

- **유전자 드라이브** **Gene Drive** 전체 종의 특성을 영구적으로 변화시킬 수 있는 유전공학 기술로, 비정상적으로 많은 수의 자손에게 부모의 유전자가 전달되도록 변형된 유전요소다. 유전자 드라이브는 자연적으로 발생하지만 공학적으로도 가능하다. 이 기술은 곤충이 말라리아 및 기타 끔찍한 감염을 전염시키는 것을 막고 식물을 공격하는 해충을 변형하여 작물 생산량을 향상시키며 산호가 환경 스트레스에 내성을 갖도록 하며 침습성 식물과 동물이 생태계를 파괴하지 못하게 할 수 있다. 그러나 생태계에서 종을 변경하거나 제거하는 것이 심각한 결과를 초래할 수 있다는 것을 깊이 인식하고, 이에 따라 실험실에서 연구된 유전자 드라이브를 향후 현장 테스트 및 더 넓은 용도로 이전하는 것을 규제하는 규범을 개발하고 있다.



[그림 2] Gene Drive 적용 예시

- **생물다양성협약** [Convention on Biodiversity](#) CBD 1987년 환경단체의 요청을 받아 1992년 UN에 의해 채택된 국제협약으로 생물다양성 보전을 위하여 생물다양성을 생태계·종·유전자의 3가지 수준에서 파악하고 생물다양성 구성요소의 지속가능한 이용을 목적으로 168개 국가와 기관이 조인하여, 현재 총 196개국 이 협약의 당사국으로 참여하고 있다.
- **나고야 의정서** [Nagoya Protocol](#) 생물다양성협약의 체계적이고 효율적인 이행을 위하여 2010년 일본 나고야 당사국 회의에서 채택된 의정서로서 생명공학에 기인한 유전자변형생물체의 국제간 이동·취급·이용 등과 관련한 문제와 유전자원 이용으로 발생하는 이익의 공유에 관한 내용을 담고 있다.
- **이익의 공정하고 공평한 공유** [Access to genetic resource and Benefit Sharing](#) ABS 나고야 당사국 회의에서 유전자원 등의 이용에서 발생하는 이익의 공정하고 공평한 공유를 규정하고 있는 원칙이다.
- **사전예방의 원칙** [Principle of Prevention](#) 국가가 자국 내에서 환경에 대한 피해가 발생하기 전에 미리 환경보호를 위한 조치를 취해야 한다는 원칙을 의미. 즉 국가가 환경에 대한 피해를 방지, 감소, 제한 또는 통제하기 위하여 필요한 조치를 취할 의무가 있다는 것을 의미한다.
- **사전주의의 원칙** [Precautionary Principle](#) 환경에 심각한 악영향을 미칠 수 있는 활동이 있다면 과학적 확실성이 결여되어 있는 경우라 할지라도 사전적으로 환경 훼손에 대해 방지 조치를 취해야 한다는 원칙이다.
- **생물무역** [BioTrade](#) 생물무역은 환경적, 사회적, 경제적 지속 가능성 기준에 따

라 고유 생물다양성에서 파생된 상품 및 서비스의 수집·생산·전환 및 국제거래 활동을 말한다. 1996년 UNCTAD가 출범한 이래 생물다양성협약의 목표를 지원하기 위해 지속가능한 생물무역을 홍보하고 세계 생물무역 프로그램 [Global BioTrade Programme](#)을 이행하여 무역 기회의 규모와 자본을 활용할 수 있는 능력을 키워서 생물다양성 및 지속가능한 개발을 촉진하고 있다.

- **생물경제** [Bio Economy](#) 유럽위원회 [European Commission](#)는 생물경제를 “재생 가능한 생물자원의 생산과 이러한 자원 및 폐기물 흐름을 식품, 사료, 생물기반 제품 및 바이오 에너지와 같은 부가가치 제품으로 변환하는 것”으로 정의한다.

## CONTENTS

발간사 · 국립생물자원관장	4
용어정리 · 이 책에 등장하는 용어들	8

### · 1부 ·

#### 생물다양성 보전을 위한 융합전문인력이 필요한 이유는?

Chapter 1 · 협동연구의 필요성	17
Chapter 2 · 협동연구 내용	22

### · 2부 ·

#### 생물다양성과 합성생물학

Chapter 3 · 생물다양성의 가치와 생물다양성협약	31
Chapter 4 · 진화하는 합성생물학의 미래	44
Chapter 5 · 생물다양성 보전과 합성생물학	57
- IT 기술 접목에 따른 생물다양성과 합성생물학	57
- 국제법으로 실행된 생물다양성과 합성생물학	87
- SWOT 분석을 통한 생물다양성과 합성생물학	108
Chapter 6 · 미래 생물다양성 보전을 위한 제언	130



### · 3부 ·

#### 국립생물자원관 토스트마스터즈 클럽

NIBR(National Institute of Biological Resources) Toastmasters Club

Chapter 7 · NIBR TM Club 소개	141
Chapter 8 · 전문가 Q&A	156

### · 4부 ·

#### 생물다양성 관련 국제기구와 교육 프로그램

Chapter 9 · 생물다양성 관련 국제기구	185
Chapter 10 · 생물다양성 교육 프로그램	193
Chapter 11 · 생물다양성과 합성생물학 관련 보고서와 논문	205

### · 5부 ·

#### 갈무리

■ 갈무리	215
■ 참고문헌	220

1부

생물다양성 보전을 위한  
융합전문인력이 필요한 이유는?





## 협동연구의 필요성

■ 우리 인간의 삶은 아름답고 풍요로운 지구를 떠나 존재할 수 없다. 하지만 우리의 삶은 인간만으로 이뤄질 수 있는 것이 아니라, 알려진 또는 알려지지 않은 다양한 생명체와 유기적으로 연결된 “삶의 공동체”로서 존재할 때 가능하다.

최근 인간 삶의 눈부신 발전으로 인한 산림의 황폐화, 많은 동식물의 멸종 등이 전 세계적으로 중요한 이슈로 인식되면서, 생물다양성 보전은 경제 발전과 밀접한 관계가 있다고 여겨지고 있다. 이미 산업이 발전된 선진국은 생물다양성의 보전과 경제 발전의 균형 유지를 위하여 환경 보호 분야와 개발 분야를 포함한 다양한 분야에 있는 사람들이 함께 노력하고 있으나, 경제발전이 국가의 중요한 문제인 개발도상국은 생물다양성 보전에 대한 노력이 상대적으로 중요한 이슈가 되지 않고 있다.

그러나 단기간의 이익을 추구한 자연환경 훼손에 따른 생물다양성의

파괴는 개발도상국의 경제적 몰락을 초래하는 경우가 일반적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1992년 UN을 중심으로 선진국과 개발도상국이 모여 생물다양성 보전을 위한 생물다양성협약이 체결되었으며, 이에 대한 구체적인 조치로 2010년 유전자원의 이용에 따른 이익의 공정하고 공평한 공유를 위하여 나고야 의정서가 체결되었다.

나고야 의정서는 생명산업의 발전과 함께 유전자원을 이용하여 얻어지는 이익을 공정하고 공평하게 공유한다는 새로운 체계를 구체화함으로써 경제 규모와 과학 기술 수준 등에 있어서 개발도상국과 선진국 간의 격차를 해소하고 전 세계 생물다양성 보전 및 지속가능한 생물자원의 이용을 위하여 체결되었다. 한국은 2017년 3월 국회 비준을 통하여 2017년 8월 발효되어 생물다양성 보전과 지속가능한 생물자원의 이용에 동참하고 있다.

최근 생명산업의 발전으로 나고야 의정서에서 기술하고 있는 유전자원 및 전통지식이 단순한 이용을 넘어, 생명산업에 공학적 개념을 적용하여 유전자원의 부품화, 표준화, 모듈화를 통한 재설계 제작된 자연계에 존재하지 않는 새로운 생물시스템을 창조하는 합성생물학(Synthetic Biology)으로 확장되었다. 새로운 분야의 합성생물학은 경제적으로 미래 지속가능한 생명산업 발전의 중요한 요소로 평가되고 있지만, 아직은 생물다양성 보전 노력에 대한 인센티브 제공과 관련된 논의가 미흡하여 합성생물학 분야에서 생물자원의 이용에는 충분한 인센티브를 제공하지 않을 수도 있다.

생물다양성의 보전과 지속가능한 개발은 기존의 개발과 보호의 개념과

크게 다르지 않다. 많은 이해 당사자들이 관계되어 있어, 합리적이고 현명한 미래 발전 방향에 대한 논의는 환경 분야 또는 개발 분야에서만 각자 논의할 문제가 아니다. 글로벌 시대에 국제 경쟁력을 갖추기 위하여 환경, 경제, 경영, 무역, 공학 분야에서 각자의 전문성을 바탕으로 생물다양성 보전과 지속가능한 개발을 위한 대한민국 발전 방향을 모색하고 이를 함께 논의하는 자리가 필요하다.

현대 생명공학의 발전에서 합성생물학은 가까운 미래 인류가 직면하게 될 난제에 대한 대안으로 제시되고 있다. 오늘날 기후변화로 생태계의 변화 또는 파괴로 생물다양성이 위협받고 있으며 인간의 생활환경 역시 변화하며 공중보건으로 인해 인류가 겪게 될 재앙 등과 같은 문제에 합성생물학이 해결 방안으로 제시되고 있는 것이다.

특히 합성생물학 기술의 급속한 발전으로 이전에 기대할 수 없었던 새로운 생명의 진화 또는 인공생명에 대한 기대가 가능해지며, 합성생물학에 기인한 새로운 생물체 또는 파생물이 생물다양성에 미칠 영향에 대한 우려가 커지고 있다. 이에 합성생물학이 생물다양성에 미칠 부정적 영향 또는 현시점에서 밝혀낼 수 없는 잠재적 영향에 대한 논의를 통해 합성생물학의 규제에 대한 당위성이 지속적으로 제시되고 있다.

합성생물학의 규제를 논의하는 데 있어 합성생물학의 생물다양성협약 및 나고야 의정서에의 적용 가능성에 대한 논의가 생겨나고 있으며, 생물다양성 보전을 위한 대응방안을 마련하려는 노력이 필요하게 되었다. 이에 생물다양성협약을 중심으로 합성생물학이 생물다양성에 미칠 영향에 대한 법률의 제정 또는 현재 법률의 개정 가능성에 관한 발전적 방향이

제시가 필요하다.

또한 기존의 생물다양성 보전과 관련된 기술의 발전과 법적 체계(CBD와 ABS 법제들)가 국내외 생명산업의 발전에 미치는 영향을 분석하고, 생물다양성 보전을 위해 합성생물학의 발전이 법적체계로 보완될 경우 국내 미래 생명산업의 한계점을 분석하고 합성생물학을 포함한 미래 생명산업의 발전을 위한 정책적 대안 도출이 필요하다.

또한 합성생물학의 미래 생명산업에 적용되지 않는다면, 합성생물학과 생물다양성을 분리하여 산업 정책을 제시할 필요가 있다. 합성생물학 연구가 진행 중인 주변국과 국내의 생물다양성 보전 정책과 합성생물학 정책을 비교하고 현재 우리나라의 생명산업 및 생물다양성 보전과 관련된 내부적인 강점(Strength)과 약점(Weakness), 외부환경의 기회(Opportunity)와 위협(Threat) 요인들을 찾기 위해 SWOT 분석을 하고, 기회를 극대화하기 위해 강점을 이용하는 전략(SO), 약점회피 기회 활용 전략(WO), 위협을 극복하거나 회피하기 위해 강점을 이용하는 전략(ST), 약점을 최소화 또는 회피하고 위협을 극복하거나 회피하는 전략(WT)들을 도출하여 미래 생명산업의 발전을 위한 정책적 대안 도출이 필요하다.

이러한 시대적 흐름에 따라 세종대학교 생명과학대학은 국립생물자원관의 도움으로, 미래 생명산업의 주체가 될 수 있는 합성생물학이 전 세계적 생물다양성 보전에 긍정적인 효과를 만들어 낼 수 있도록 생물학, 법학 및 경영/무역 등의 이슈를 이해하고 변화에 대응할 수 있는 융합전문인력의 필요성을 인지하여 생물학/ICT 분야(권태은, 이홍재, 이현민, 민경복), 법학/행정 분야(이현경, 박건우, 홍지운)와 경영/무역 분야(이경동, 임

충일, 심혜은)의 다학제간 융합전문인력 양성 사업을 수행하였다.

## 협동연구 내용

■ 지구는 다양한 생물이 생태계를 구성하면서 모든 생명체의 균형 있는 지구환경을 유지하고 있다. 지구환경을 구성하는 다양한 모든 생명체의 존재 이유는 명확하게 규명되지 않았으나 서로 상호 간의 직·간접적인 영향을 받고 있는 것으로 추측되고 있다. 한발 더 나아가 인간은 생태계의 한 구성요소이면서도, 생물다양성을 통해 인간의 풍요로운 삶을 유지 및 발전시키기 위하여 많은 생명 자원을 이용하고 있다.

그러나 이러한 인간의 풍요로운 삶을 유지 및 발전시키기 위한 인간의 행위는 서식지 훼손, 기후변화, 환경오염, 남획 등으로 생물다양성이 지속해서 감소하고 있으며, 생물다양성 보전 필요성 및 광범위한 시장가치로서의 인식이 매우 낮아 선진국 및 개발도상국의 경제적, 사회적, 문화적, 종교적 다양성에 의하여 실제로 그 가치를 체감하지 못하고 있다.

그러나 실질적으로 각 지역의 기후와 토양이 다른 곳에 적응한 다양한 생물자원은 각 지역에 맞게 실생활에 활용되고 있으며, 지역의 문화와 전통을 형성하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 지역별 다양한 생물자원은 생명공학기술 및 ICT 기술의 개발에 따라 단순히 특정 지역의 생물자원의 가치로서 존재할 뿐만 아니라, 전 세계가 공유할 수 있다.

한발 더 나아가 이러한 생물자원은 인류의 삶을 윤택하게 하기 위하여 인류가 공유해야 할 생물자원으로서 경제적 가치를 가지고 있을 뿐 아니라, 국제 정치적 수단으로서 그 가치가 확대되고 있다. 현재 다양한 생물자원은 지역적 한계를 넘어 의약품, 화장품, 정밀 화학물질, 농·식품 등 산업적으로 활용되어 새로운 생물자원에 대한 수요는 지속해서 증가할 것으로 전망되고 있다. 경제적 가치뿐만 아니라 국제 정치적 자원으로서 다양한 생물자원은, 생물자원에서 유래하는 유전자원에 대한 인식과 접근 및 이용과 관련된 생물자원 수요국과 보유국의 대립을 해소할 수 있는 새로운 생명산업생태계를 필요로 하고 있다.

생물자원에 대한 인식은 단순한 경제개발 또는 국제 정치적 이슈로서 제한되지 않고, 지속가능한 생명산업의 발전을 위하여 생물다양성 보전으로 인식이 확장되어야 한다.

이러한 국제적인 노력의 일환으로 1992년 6월 UN을 중심으로 생물다양성협약이 채택되었고, 전 세계적 생물다양성 보전을 위한 구체적 조치를 마련하기 위하여 2010년 10월 제10차 나고야 당사국총회에서 “유전자원의 이용과 관련하여 발생하는 이익의 공정한 공유”를 규정한 나고야 의정서를 체결하였다. 나고야 의정서는 유전자원 보유국, 특히 경제 발전이

국가의 최상 목표인 개발도상국에서 생물다양성 보전을 위한 노력을 추진할 수 있도록 생물자원 수요국이 제공하는 경제적 인센티브를 제공하도록 규정하고 있다. 그러나 빠른 생명공학기술의 발전과 ICT 기술의 접목에 따른 ‘유전자원의 이용과 관련된 이익의 공유’ 개념이 불명확한 상태로 기존의 나고야 의정서를 보완하거나 또는 새로운 ‘유전자원 이용과 관련된 이익의 공유’에 대한 ‘인식의 제고 [Change in Paradigm](#)’가 필요하게 되었다.

전 세계적으로 산재한 다양한 유전자원은 생명체의 유전자 특성을 규명하기 위한 단순한 과학적인 호기심을 넘어 산업적 이용 가치를 향상하기 위해 개별 생명체의 유전자 변형기술(LMO/GMO)이 적용되는 유전자 재조합을 기반으로 생명산업이 발전하기 시작하였다. 한발 더 나아가, 최근 급속도로 적용 범위가 확장되고 있는 ICT 기술 개발에 따라 유전자의 특성을 빠르게 비교 분석할 수 있도록 규명된 모든 유전자 정보가 DSI [Digital Sequence Information](#)화 되었으며, DSI를 기반으로 실험실에서 유전자 합성기술을 이용하여 필요한 유전자를 생성하거나, 유전자원의 특성을 극대화하기 위하여 유전자를 재구성 [Redesign](#) 하여 자연계에 존재하지 않는 유전자로 재조합할 수 있는 기술이 개발되었다.

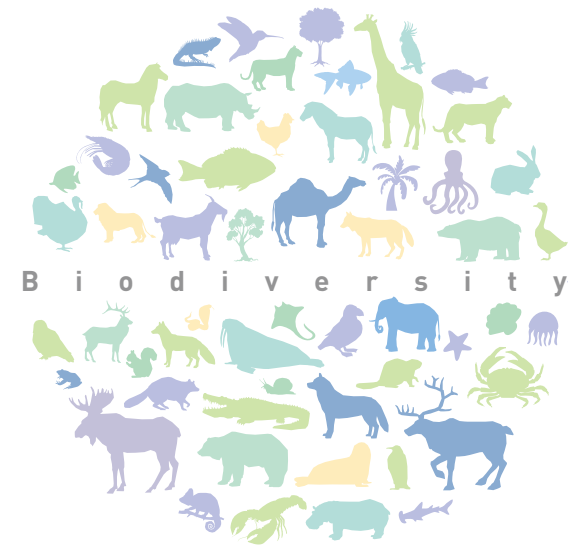
이러한 기술의 개발은 생물학적 기술 개발을 넘어서 부품화, 표준화, 모듈화의 공학적 개념이 접목됨으로써 DSI 기반의 DNA 합성·교정을 초고속으로 진행하여, 자연계에 존재하는 생물체를 넘어, 새로운 생명시스템으로서 ‘합성생물학’이 태동하게 되었다. 그러나 합성생물학을 포함하여 급속도로 진화하는 생명공학 기술의 개발이 전 세계적 생물다양성 보전에 미치는 영향은 명확하게 규명되지 않아, 생물다양성 보전을 위한 나

고야 의정서의 실효성에 대한 많은 의구심을 가지게 되었다.

본 연구는 빠르게 발전하는 합성생물학을 통한 생명산업의 지속적인 발전과 함께, 인류에게 삶의 풍요로움을 제공할 수 있는 ‘생물다양성 보전’을 위해 생물/ICT/법률/경영 분야를 융합한 전문인력을 양성하여 지속적인 생명산업의 발전과 더불어 생물다양성 보전을 위한 국내 법률 및 생명산업체의 경영 체계와 국제적 노력을 위한 제언을 도출하고자 하였다. 이를 위하여 지속가능한 생명산업을 위한 합성생물학 발전 방안, 생물다양성 보전을 위한 합성생물학 관련 법률적 기반 구축, 합성생물학 기반의 생명산업 촉진과 생물다양성 보전을 위한 대한민국 생명산업의 발전 방향이라는 3가지 주제로 협동연구를 수행하였다. 협동연구의 세부 내용은 다음과 같다.

1. 합성생물학 관련 국내외 연구 동향을 살펴보고 국내 합성생물학 기술 발전의 저해 요인을 분석함으로써 지속가능한 생명산업을 위한 합성생물학의 발전 방안 제안하고,
2. 생물다양성협약 및 나고야 의정서상 ABS 관련 합성생물학의 적용 여부, 합성생물학 관련 규제적 법률 소개, 카르타헤나 의정서에 규정한 사전예방 원칙을 포함한 합성생물학 적용 여부를 분석하고 생물다양성 보전을 위한 합성생물학 관련 국내 법률 제·개정 필요성을 평가하였으며,
3. 우리나라의 생명산업 및 생물다양성 보전과 관련된 정책이 합성생물학 기반의 생명산업에 미치는 영향을 비교하여 내부적인 강점 [Strength](#),

약점 Weakness, 외부적인 기회 Opportunity와 위협 Threat 요인을 분석하고 대한  
민국 미래 생명산업의 발전을 위한 합성생물학 및 생물다양성 보전을  
위한 국가 정책을 제시하였다.



2부

생물다양성과  
합성생물학



## 생물다양성의 가치와 생물다양성협약

■ 우리가 살고 있는 지구상에 존재하는 생물의 종류는 얼마나 다양할까? 지구상에 존재하는 것으로 추정되는 생물종의 수는 약 1,400만 종으로 추산되나, 아직 인간이 파악한 종의 수는 이에 한참 못 미치는 13% 정도로 알려져 있다. 수많은 생명체를 구성하는 기본 단위인 세포는 유전자와 DNA를 포함한 세포 소기관들로 이루어져 있으며, 이 세포는 단세포 생물이 되거나 나아가 여러 세포가 합쳐져 다세포 생물을 이루기도 한다. 생물다양성은 유전자부터 생물종 그리고 이 생물들이 이루고 있는 생태계 수준의 다양성을 모두 포괄하여 일컫는 말이다.

생물다양성 없이는 지구와 지구에 살고 있는 모든 생물종이 위협받게 된다. 질병의 매개체 역할을 하여 공중보건에 위협을 끼친다고 생각하는 모기, 파리와 같은 해충들도 생태계에서 나름의 고유 역할을 가지고 있







[그림 3-2] 유전적 다양성으로 나타나는 다양한 고추의 색깔과 모양  
(자료: Sheila Adimargono, 2015)

가 다채로워진다.

유전적 다양성이 정말 중요한 이유는 색과 모양이 다양하고 향과 풍미가 다채로운 것이 아니라, 같은 종의 생물이 조금씩 다른 유전자를 가져 다양한 환경 변화에 적응하고 살아남을 수 있다는 사실이다. 생물은 꾸준히 각자가 속한 환경에 잘 적응할 수 있는 형질과 그 형질을 표현하는 유전자를 갖출 수 있도록 진화하였다. 같은 고추라도 가뭄에 좀 더 강한 종자가 있고 어떤 종자는 해충에 더 저항성이 강한 것이 주변 환경의 특성에 맞추어 진화한 좋은 예이다. 이는 비단 식물에만 국한된 것이 아니다. 아주 작은 세균부터 효모와 곰팡이, 어류, 양서류, 조류, 파충류 그리고 포

유류에 이르기까지 많은 생물종이 환경 변화에 적응하며 얻은 유전자와 그 형질이 현대에는 다양한 유전자원과 부산물로 활용되고 있다. 인간이 다양한 자연자원, 특히 생물자원을 이용하고 누릴 수 있는 것도 유전적 다양성 덕분에 다양한 형질을 발현하는 생물들이 존재하기 때문이다. 생물다양성 중 '생태계의 다양성'도 반드시 고려해야 할 요소이다. 생태계의 다양성은 유전적 다양성이나 생물종의 다양성보다 더욱 복잡한 수준의 다양성이다. 생태계는 육상, 해양 및 수생 생태계로 하위 생태계를 아우르는 세 개의 주요 생태계로 나눌 수 있다. 육상 생태계는 툰드라, 초원, 타이가, 낙엽 수림, 열대우림, 사막 등 6개의 하위 생태계를 포함한다. 해양 생태계에는 개방 해양, 해저, 산호초, 강어귀, 바닷물 습지 강어귀 및 맹그로브 수림으로 이루어진 하위 생태계가 포함된다. 수생 생태계의 경우 담수로 이루어진 생태계를 의미하며 하구, 습지, 연못, 호수 및 강으로 구성된 이 생태계는 육상과 해양 생태계보다 상대적으로 작은 생태계이다.

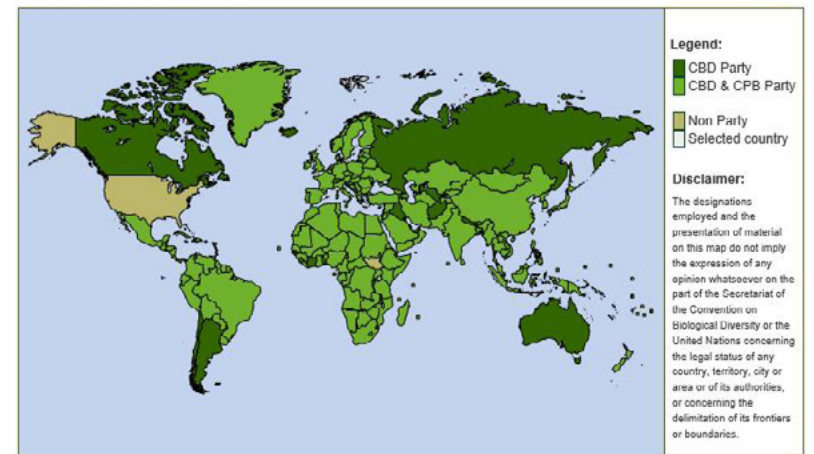
육상 생태계에서는 사막 생태계가 가장 다양성이 낮은 생태계로 일종의 수생 생태계를 이루는 오아시스와 모래, 바위, 덩불식물 등으로 구성되어 있다. 열대우림은 반대로 육상 생태계에서 가장 다양성이 풍부한 생태계이다. 하지만 지구의 열대우림 중 대다수가 생물다양성 분쟁지대 hotspot 이다. 생물다양성 분쟁지대는 해당 생태계가 그 지역에만 사는 고유의 생물종 1,500종 이상을 가져야 하지만 70%가 고유의 식생을 잃은 곳을 말한다. 다시 말해, 육상 생태계 중 가장 생물다양성이 풍부한 곳이 대부분 생물종과 다양성을 잃고 있다는 의미이며 일부는 95%까지 고유 식생을 잃은 지역도 존재한다고 하니, 생태계 파괴의 실태가 얼마나 심각한지 알

수 있다. 생태계와 생물다양성이 가지고 있는 자연 자산(natural capital)은 건강한 생태계를 유지하는 생물-환경학적 의미뿐만 아니라 경제적으로도 큰 의미가 있다. 전 세계 국가 중 상대적으로 저소득층에 속하는 국가들은 국가 자본의 36%가 자연 자산에서 비롯되며 자연 자산을 이용한 제품의 공급과 고용을 통해 충당하여 GDP의 절반 이상 되는 것으로 나타났다. 2011년 발표된 연구결과에 따르면 자연 자산의 총 가치는 연간 125조 달러에 달한다고 한다. 건강한 생태계와 풍부한 생물다양성을 기반으로 한 생태 관광은 전 세계 관광 산업에서 가장 빠르게 성장하는 분야로 그 규모는 연간 1천억 달러에 달하는 것으로 보고되었다. 이는 자연 자본 및 생물다양성을 이용한 새로운 시장이 출현했음을 나타내고 있으며, 미래에 국가의 주요 산업으로 자리 잡을 수 있다는 사실을 말하고 있다. 생물다양성은 기능적인 측면에서도 경제적 가치가 충분하다. 생물다양성은 산림, 이탄 지대와 해안 및 해양 지역이 인간이 배출하는 온실가스를 격리하고 저장하면서 급격한 기후 변화를 완충해주는 역할을 하는데, 이러한 탄소 격리 기능만 해도 경제적 가치는 연간 740~2,200억 달러의 가치가 있는 것으로 보고되었다.

이렇듯 여러모로 인간과 지구상의 생물들에게 중요한 생태계의 다양성에 영향을 미치는 요인은 기후의 변화, 환경오염, 인간의 활동, 천재지변 등 다양한 요소가 복합적으로 작용하게 된다. 생물다양성에 미치는 영향 중 사람으로 인한 영향이 상당 부분을 차지하는 만큼 생물다양성을 보전하려는 인류의 노력이 필요한 실정이다.

### 환경 분야 주요 국제조약 '생물다양성협약'

생물다양성협약은 1992년 개최된 환경개발회의(United Nations Conference on Environment and Development)에서 채택된 국제조약으로, 오늘날 감소하고 있는 생물다양성을 보전하고 그 구성요소를 지속가능하게 이용하며 유전자원의 이용으로부터 발생하는 이익을 공정하고 공평하게 공유하는 것을 목적으로 하여 1993년 발효되었다. 1988년부터 생물, 법학, 기술 등 특별 전문위원회를 설치하여 준비하였고, 1992년 나이로비에서 생물다양성협약을 채택하기 위한 회담이 진행되었다. 그리하여 1993년 리우 유엔 정상 회담에서 공식적으로 국제 협약으로 채택되어 이후 1년이라는 서명 개방 기간에 168개의 국가와 기관이 조인하였다. 생물다양성협약은 현재까지 196개국이 협약의 당사국으로 국제환경 분야에서 기후변화협약과 함께



[그림 3-3] 생물다양성협약 당사국 현황

(자료: 생물다양성협약 website, <https://www.cbd.int/countries/>)

참여하고 있다.

### 생물다양성협약의 채택 배경

생물다양성협약의 채택 배경에는 환경문제에 대한 국제사회의 위기의식이 있었다. 1945년 국제연합<sup>United Nations</sup>이 설립되기 이전까지 인류는 두 번의 전쟁을 경험하며 인류의 평화와 번영을 위한 국제적 거버넌스가 필요하게 되었다. 국제연합 헌장이 규정하고 있는 국제평화와 안전 유지 노력이 꾸준히 이루어진 결과, 오늘날 국제사회는 실질적인 무력충돌의 위협으로부터 어느 정도 자유로워질 수 있었다. 이후 국제연합은 인도적인 성격의 국제적 이슈를 다루게 되면서 안보의 문제, 기후변화, 지속가능한 발전을 위한 목표 설정 등의 문제를 포함한 다분야의 국제적 이슈를 함께 다루게 된다. 생물다양성의 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용과 관련한 문제는 국제연합과 전문기구들 그리고 국제적 회의 등을 통해 기후변화 방지 문제와 함께 국제환경 분야의 대표적인 환경안보 이슈로 다루어지기 시작한다. 특히, 기후변화 이슈는 최근 몇 년간의 자연재해와 기상이변 등 오늘날 우리의 실생활에서 실질적인 체감도가 높아 광범위하게 다루어지고 있다. 반면 생물다양성 이슈는 실생활에서의 체감도가 다소 떨어지는 경향이 있어, 기후변화 이슈보다 광범위하게 다루어지지 못하고 있다. 그러나 기후변화로 인해 생태계 환경이 변화하고 있다는 점에서 사실상 기후변화 방지와 생물다양성의 보전이 오늘날 환경안보

의 큰 축을 이루고 있다는 점은 분명한 사실이다. 그렇기 때문에 오늘날 생물다양성협약은 기후변화협약과 함께 국제환경 분야 대표적인 국제조약으로 전 세계 거의 모든 국가에 의해 현재까지도 꾸준히 이행되어 오고 있다.

국제연합을 비롯하여 전문성을 갖춘 국제기구들이 설립되기 시작하면서 분야별 과학적 증거의 수집·검토 및 국가별 실질적 통계의 집계가능해지고 각 국가가 공통으로 겪고 있는 문제를 국제적 이슈화할 수 있게 되었다. 특히 기후변화와 생물다양성의 감소 문제와 같이 환경안보의 큰 축을 이루는 이슈들의 경우, 몇몇 국가들이 겪고 있는 문제가 아닌 대부분 국가가 겪고 있는 공통의 이슈로 국제사회 공통의 이익 보호에 대한 인식이 확산되기 시작하였다. 다행히 국제사회는 구조적 변화를 통해 국제적 거버넌스를 구성하고 많은 국가가 겪고 있는 공통된 문제를 이슈화함으로써 이에 대한 합의를 도출할 수 있게 되었다. 환경안보 역시 이와 같은 과정을 통해 국제사회의 공통의 문제로 인식되기 시작하였다. 생물다양성의 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용 문제가 국제사회 공통 이익 보호에 대한 요구로 인식되는 데에는 생물다양성 감소의 문제가 가까운 미래 인류에게 닥칠 식량, 보건, 환경, 에너지 안보 및 그 밖의 분야별 안보 문제에 있어 국제사회의 부담으로 작용할 것이라는 우려 때문이다. 이에 따라 현시점에서 생물다양성의 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용을 위한 조치의 필요성이 제기된 것이다. 현대 사회는 경제발전과 더불어 국가 간 경계가 무의미할 정도로 인적·물적 이동이 활발해짐에 따라 인간의 활동 범위가 과거에 비해 넓어지면서 환경이 오염되고 훼손되는

일이 빈번하게 발생하기 시작하였다. 몇몇 국가들의 경우, 경제성장 중심의 국가전략을 수립하고 산업화에 집중하여 환경을 오염시키거나 훼손시켜 생태계 환경에 영향을 주기 시작함으로써 생물다양성에 실질적인 영향을 주고 있다. 그러나 더 큰 문제는 일부 국가에서 발생한 환경오염 또는 파괴·훼손으로 발생하는 문제가 발생한 국가에만 머무르지 않고 국경에 근접해 있는 국가를 포함한 많은 국가에 영향을 주기 시작하면서 특정 국가들의 환경 정책에만 의존하는 대응 방안은 큰 효과를 거두지 못하게 되었다. 특히, 생물다양성 보전 및 지속가능한 이용에 있어 풍부한 자연환경과 생물유전자원을 보유한 개발도상국들이 생물유전자원의 다양한 가치에 중점을 두기보다는 경제적 가치에 치중하기 시작하여, 생물다양성을 보전하기보다는 경제적 가치 창출 및 경제력의 축적에 치중하면서 유전자원을 경제 개발을 위한 도구로 삼는 경우도 심심치 않게 발생하며, 생물다양성의 보전 및 이의 지속가능한 이용에 대한 국제적 결의를 필요로 하게 되었다. 물론 생물다양성에 대한 개별 국가의 주권적 권리를 인정하고 생태계와 천연 서식지의 보전 및 적절한 개체군의 유지와 회복이 긴급적 원산국 내에서 이루어져야 할 것이다. 그러나 생물다양성이 장기적으로 현재 세대와 미래 세대의 필요와 요구를 충족하기 위해서는 잠재력을 유지하는 것이 분명 필요하기 때문에 생물다양성의 보전 및 이의 지속가능한 이용을 위해 국제사회 전체의 노력이 필요하다.

오늘날 국가들은 고립을 택하기보다 국제사회 일원으로 살아가기 위해 노력하며, 환경 안보 문제가 아니더라도 국제사회 공통의 이익 보호를 위한 문제에 동참해야 한다는 점을 당연하게 받아들이고 있다. 오늘날 많은

국가는 국가의 고립을 피하고 다양한 관계를 맺음으로써 얻게 될 국가적 이익을 위해 국제사회가 보호하고자 하는 공통의 이익에 국제적 협력 관계를 도모하고자 하는 노력을 기울인다. 많은 국가 간 이해관계가 국제사회에서 공통의 이익 보호 요구와 맞물리며 관련 국제법규범 채택에도 큰 이해충돌 없이 합의를 이루어낼 수 있게 되었다. 생물다양성의 보전 및 이의 지속가능한 이용에 관한 국제법규범의 채택에도 국제사회는 비교적 빠르게 합의에 이르며 생물다양성협약이 채택되었다.

### 생물다양성협약의 주요 목적

생물다양성협약(Convention on Biodiversity, CBD)은 1987년 환경 단체들의 요청을 받아 유엔 환경 계획이 준비를 시작하였다. 생물다양성의 보전을 위하여 생물다양성을 생태계, 종, 유전자 세 가지 수준에서 파악하고 생물다양성 구성요소의 지속가능한 이용을 목적으로 하여 다음의 세 가지 주요 목적을 가지고 있다.

- 1) 생물다양성의 보전
- 2) 그 구성요소의 지속가능한 이용
- 3) 유전자원의 이용으로부터 발생하는 이익의 공정하고 공평한 공유

생물다양성협약은 전문과 42개 조항을 담은 본문 그리고 2개의 부속서

로 구성되어 있다. 생물다양성협약의 체계적이고 효율적인 이행을 위하여 2010년 나고야 당사국 회의에서 이행 전략인 2011-2020 아이치 타깃 **Aichi target**이 채택되었다. [그림 3-4]와 같이 아이치 타깃은 20개의 주요 목표로 구성되어 있으며, 각 목표는 카테고리에 따라 5개의 전략을 따르고 있다(Strategy A~E).

전략 A는 생물다양성 손실의 주요 원인과 국제사회에서 생물다양성협약의 주류화를 목표로 하고 있다. 전략 B는 생물다양성에 가해지는 압박 요인들을 완화하고 지속가능한 사용을 제창하고 있다. 전략 C는 생태계, 종, 유전적 다양성의 보호를 말하고 있으며, 전략 D는 생물다양성과 생태계 서비스의 편익 향상, 전략 E는 원활한 협약의 이행 준수를 다루고 있다. 위 전략과 20개의 목표를 가지고 생물다양성협약이 실제로 지구의 생

물다양성 보전에 기여할 수 있도록 조인국과 기관들이 협력하여 노력해 온 셈이다. 생물다양성협약은 생물자원, 유전자원의 사용에서 비롯되는 이익에 대한 갈등과 분쟁을 원활하게 해결하기 위해 공평한 이익의 분배 **Access and benefit sharing** 개념을 도입한 나고야 의정서와 LMO와 같은 유전변형생물체의 취급과 관리에 대한 지침인 카르타헤나 의정서도 채택하여 협약의 범위 안에 두고 있다.

### 생물다양성이 갖는 가치의 중요성

생물다양성의 내재적 가치와 생태학적·유전학적·회적·제적·학적·육적·문화적·휴양적 및 미학적인 가치에 대한 의식이 높아짐에 따라 국제사회는 생물다양성이 가진 중요성을 인식하게 되었다. 그러나 현대 국제사회의 전반적인 변화로 인한 인간의 특정 활동이 생물다양성을 감소시키고 있으며, 이에 따라 생물다양성을 현저하게 감소 또는 소실시키는 원인을 예측하여 방지하고 제거해야 하게 되었다. 생물다양성협약은 생물다양성의 보전과 그 구성요소의 지속가능한 이용에 대한 국제사회의 합의를 강화하고 보완하여 현재 세대와 미래 세대의 이익을 위하여 체결된 국제조약이다. 생물다양성은 인류와 지구상의 모든 생물이 건강하게 살아가는 데 있어 필수 불가분의 관계에 있기 때문에 2020년 이후에도 생물다양성협약이 건강하고 풍부한 생물다양성을 확보하는 데 기여하고 있는지 우리 모두의 관심이 필요하다.



[그림 3-4] 2011-2020 아이치 타깃 이행 전략의 20개 주요 목표  
(자료: 생물다양성협약 website, <https://www.cbd.int/sp/targets/>)

## 진화하는 합성생물학의 미래

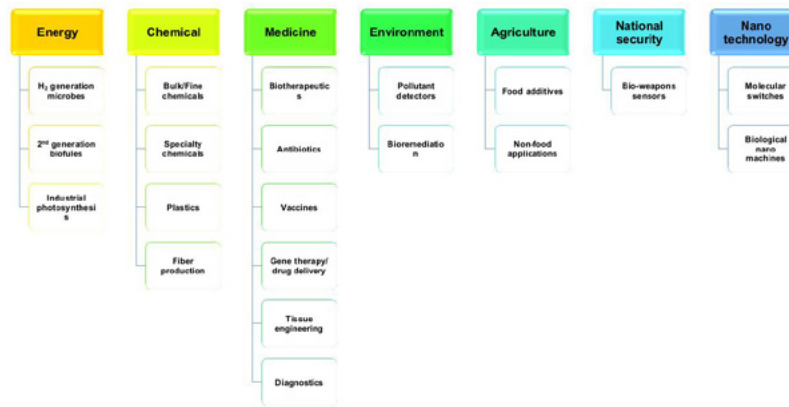
■ 합성생물학은 생물학을 기반으로 새로운 장치와 시스템을 설계하고 엔지니어링하여 기존의 자연의 논리시스템을 재설계하는 것을 목표로 하는 유전공학 기술 발전의 연장선에 있는 일련의 기술 발전과정 중 하나이다. 합성생물학에 내재된 주요 개념은 “합리적인 디자인”으로 생명공학 기술에 상업화의 패러다임을 반영한 것으로 볼 수 있다. 기존의 생명공학은 단지 생명현상의 복잡성을 설명하기 위해 분자 수준에서 이해하려고 노력하였기 때문에 공학에서 중심이 되는 직교성, 계층의 추상화, 제조와 설계 분리, 표준화 및 상호 운용성과 같은 개념이 크게 결여되어 있다. 그러나 합성생물학은 기존의 생명공학에 부족한 공학적인 개념을 보완하여 합성된 유전자로 생명현상을 합리적으로 디자인한다는 점에서 유전공학이나 유전자 재조합기술과는 차이가 있다.

### 합성생물학과 이전의 생명공학의 차이점(Panke, 2008)

- **이용 가능한 관련 지식의 종합성:** 기계, 전기 및 화학 등의 공학에서는 수학적 형식을 가지고 있으나 생물학은 다소 거리가 멀다.
- **직교성(즉, 독립성):** 개별 부분의 독립성은 공학에서 절대적으로 필요하다. 예를 들어, 자동차는 여러 개의 부품(미러, 창, 발전기, 조향 등) 독립적으로 움직일 수 있어야 한다. 생물학에서는 하나의 대사 경로가 종종 서로 연결되어 있기 때문에 다른 대사 경로에 영향을 주거나 하나의 변경이 종종 다른 대사의 간섭을 유발하므로 독립성이 결여되어 있다.
- **요약된 계층 구조:** 전체 시스템을 의미 있는 하위 시스템으로 나눌 수 있고 다시 의미 있는 하위 시스템으로 나눌 수 있는 경우, 설계 작업을 통해 여러 세부 수준으로 동시에 분산시킬 수 있다. 이때의 장점은 병렬형으로 개별 시간을 단축할 수 있고 전문가가 시스템의 특정 수준의 세부 시스템에서 발생한 문제를 쉽게 해결할 수 있다. 그러나 생물학적 시스템은 일반적으로 분자 수준으로 공식화, 추상 또는 기능화를 설명하는 데 중점을 둔다.
- **표준화:** 생명공학에 대한 표준의 부재로 결과가 나타나는 이유를 표준화하는 것은 매우 어렵다. 관련된 모든 다양한 변수를 발견하기 위해 많은 시간과 노력이 필요하다.
- **디자인과 제조의 분리:** 디자인과 시스템의 분리는 공학의 기본 개념이다. 자동차의 설계와 조립 라인에서의 조립은 별개이므로 관련된 직원 그룹마다 전문가 교육이 다르게 되며, 이를 통해 자동차를 설계하고 제조할 수 있다. 생명공학에서 시스템의 개발은 여전히 연구 프로젝트의 주요 부분이며, 대부분의 경우 개별 연구 프로젝트이다.

합성생물학은 에너지, 의약, 식품, 화학제품 등의 유용 물질을 낮은 가격으로 생산하기 위한 수단으로, 표준화된 생물 부품을 이용하여 사전에 설계되고 최적화를 거쳐 대량생산된다는 공학적 개념이 도입되어 보다 빠르게 상업화될 가능성이 있다. 이에 따라 2016년 OECD 과학기술혁신 미래전망보고서에 따르면 합성생물학은 전 세계적으로 큰 영향을 끼칠 10대 미래기술로 선정되었으며, 2016년 다보스 포럼에서 주요 5대 핵심 기술로 합성생물학이 선정되었다. 또한 바이오 기반 제품의 수요가 증가함에 따라 합성생물학에 대한 관심도 함께 증가하고 있다. 단기적으로는 천연물이나 석유화학 물질의 대체 소재의 생산에 대한 연구가 진행되고 있으며, 장기적으로는 유전자 편집기술을 이용한 개인 맞춤형 유전자 치료 등의 연구로 발전할 것으로 예상된다.

합성생물학은 일종의 플랫폼 기술로 다양한 산업 전반에 걸쳐 영향을



[그림 4-1] 합성생물학 적용 분야  
(자료: Collins, 2012)

줄 수 있기 때문에 그 관심이 증가하고 있다. 가장 초기 관심 분야는 에너지 응용 분야로, 이 분야에는 이미 미국에 여러 개의 스타트업이 설립되었다. 의약품 및 헬스케어 분야에는 훨씬 다양하게 응용 가능하지만, 제품을 시장에 출시하는 데 많은 시간이 걸린다. 화학 분야는 합성생물학을 이용한 바이오 기반 플라스틱을 생산하기 위해 많은 연구가 진행 중이다.

## 1. 바이오에너지

2005년부터 2010년까지 전 세계 연료 에탄올 생산은 두 배 이상 증가하였으며(FO Licht, 2010a), 바이오 디젤 생산은 네 배 이상 증가했다(FO Licht, 2010b). 이후 산업 생명공학은 급속히 발전하여 많은 바이오 기반 화학 물질과 바이오 플라스틱을 생산했다(OECD, 2011a). 바이오 기반의 생산은 석유 화학 물질의 생산을 부분적으로 대체할 수 있다. 또한 바이오 매스는 산업 생명공학의 주요 원료이기 때문에 석유를 원료로 한 생산에 비해 온실가스 배출을 대폭 절감할 수 있다(OECD, 2011b). 그러나 대부분의 응용 분야에서 산업적으로 사용 가능한 특정 전환 또는 합성을 위한 생체 촉매는 일반적인 생명체에서 거의 발생하지 않는다는 문제에 직면하게 된다. 생명체는 생산 수율을 극대화하고 때로는 인공적이거나 극단적인 발효 조건과 과정을 견뎌야 하므로 일반적인 생명체의 대사로는 불가능하다(Murakami et al., 2008). 따라서 합성생물학이 이러한 문제를 해결할 가능성에 큰 기대를 하고 있다. 현재 합성생물학은 바이오 연료를 중심으로 진행되고 있으며, 대사 공학을 기반으로 다양한 분야에서 합성생



물학 기술 및 플랫폼의 개발을 진행 중이다. 바이오 기반의 연료 및 화학 물질 생산 관련 연구는 앞으로도 지속해서 증가할 전망이다. 상업적으로 실행 가능한 경우, 석유의 고갈에 대한 문제를 해결하고 지속가능한 개발을 이룰 수 있을 것이다.

## 2. 바이오 소재

최근 친환경 소재에 대한 관심이 증가함에 따라 유용물질 생산 및 인공유전체 제작에 대한 관심도 함께 증가하고 있어 석유화학 소재를 대체할 수 있는 바이오 소재의 개발 분야에서 합성생물학에 대한 관심이 증가하고 있다. 합성생물학을 적용한 친환경적인 다양한 바이오 소재를 개발함으로써 바이오 소재 혁명이 시작될 것으로 분석되고 있다. 화학제품과 산업 프로세스에 대한 합성생물학의 적용은 재생 불가능한 자원의 사용을 줄이고 친환경적인 제조 공정을 통해 지속가능한 생산 및 소비로의 전환을 가져올 수 있다. 그러나 현재의 기술 수준에서는 바이오 플라스틱과 같이 화학제품과 산업 프로세스에 대한 합성생물학의 대체물이 아직은 친환경적이지 않을 수도 있다는 우려가 제기되고 있다.

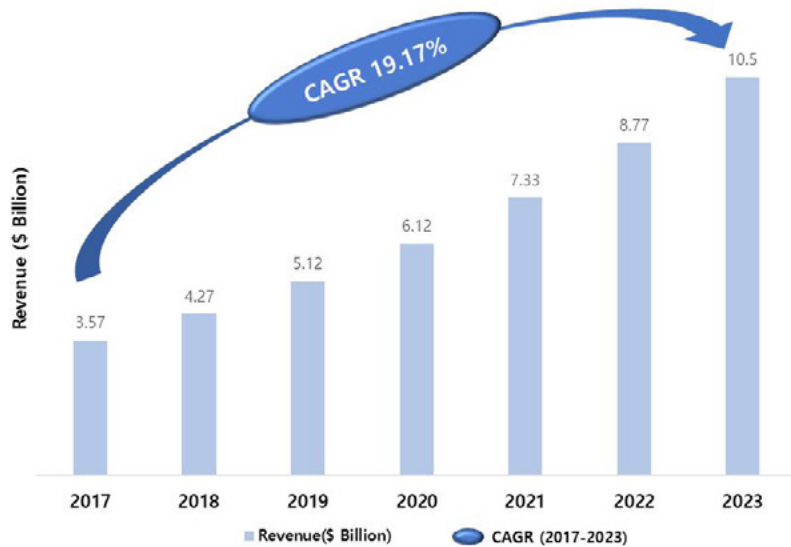
## 3. 의료

OECD 전 사무총장 도널드 존스톤(Donald Johnston)은 모든 사람을 위한 건강은 지속 가능성이 핵심이며, OECD 국가는 그것에 대한 책임을 상당

부분 맡게 된다고 하였다(OECD, 2003). 현재까지 가장 발전된 것은 약물 발견과 합성이었지만, 최근 합성생물학 접근법을 사용한 의학 분야의 연구가 다양하게 진행되고 있다. 합성생물학은 감염에 대한 치료에서부터 암 치료(Xiang et al., 2006), 당뇨병(Ye et al., 2011), 인공 수정(Kemmer et al., 2011)에 이르기까지 다양한 의학 분야에 적용되고 있다.

## 4. 농업

현재 세계 인구 9명 중 1명은 기아로 시달리고 있으며, 인구의 지속적인 증가 추세로 지구의 자원이 한계에 이를 것으로 예측된다. 인구증가에 따른 농경지의 감소 및 기후변화는 경작지와 농업 생산량의 감소로 이어져 식량 부족의 문제로 이어질 수 있다. 따라서 식량 자원의 생산성 향상이 필요하며, 이를 위하여 생산성이 향상된 농작물과 가축의 개량이 필요하다. 농업과 합성생물학에 대한 논의는 더 많은 사람에게 식량을 공급하고 농업에 대한 다른 요구를 수용하기 위해 효율성을 높이는 데 중점을 두고 있다. 질병에 대한 저항력 증가로 농작물의 손실을 줄임으로써 단위 면적당 더 높은 수확량으로 작물을 생산할 수 있다. 또한, 일차적인 식량의 공급뿐만 아니라 농업 응용 생물 경제 전략으로 세계 인구에게 공급할 수 있는 연료를 위한 바이오매스를 포함한 바이오 기반 산업의 원료를 제공하기 위해 농업의 확장이 필요하다. 또한 기존의 생물에서는 제한적으로 생산되던 고가의 의약품질을 합성생물학을 통해 단시간에 대량으로 생산한다면, 질병으로 인해 고통받는 많은 사람에게 도움이 될 수 있다.



[그림 4-2] 글로벌 합성생물학 시장 현황 및 전망  
(자료: 생명공학정책연구센터, 2018)

합성생물학은 그 역사가 매우 짧지만, 기존 생물학 연구에 공학적 개념을 도입하여 빠르게 산업화 할 수 있을 것으로 기대되어 신약개발 및 질병의 치료와 식량 및 환경 문제 해결 등의 다양한 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 선진국을 비롯해 많은 나라에서 합성생물학을 산업에 연계하려는 노력이 활발히 진행되고 있어, 100개 이상의 합성생물학 관련 스타트업 회사가 전 세계에 등록된 것으로 나타났으며 계속해서 시장이 확대될 전망이다. 4차 산업혁명의 선도 기술 중 하나로 선정된 합성 생물학은 그 시장이 연평균 20% 이상 성장하고 있으며, 2023년에는 147억 달러까지 증가할 것으로 예상된다. 컴퓨터, 나노기술과 함께 인류 미래에

결정적 영향을 미칠 원천기술로 주목되고 있다.

21세기는 규모의 경제를 벗어나 지식과 정보를 이용하는 지식기반의 디지털 정보통신 시대로, 우리의 생활과 산업구조 전반에 영향을 미치고 있으며 삶의 질을 높이고 있다. 현대의 유전학과 유전체학 기술도 대중에게 많은 양의 정보를 제공하고 있으며, 현대의 사회 문화적 흐름을 볼 때 정보의 양과 얻는 속도가 생명공학 기술 발전에 최우선이 되고 있다. 《제3의 물결》의 저자인 앨빈 토플러는 지식과 정보화 사회에서 한국은 이미 세계 수준의 정보인프라를 구축하고 있다고 하였으며, 한국도 다양한 유전체 사업이 계획 또는 추진되고 있기 때문에 생물학적 정보량은 지속해서 증가할 것으로 예상된다. 합성생물학은 생명과학과 컴퓨터과학의 발달과 깊은 관계가 있어 생물학적인 정보를 어떻게 효과적으로 분석하고 관리하는가 그리고 이를 빠르고 정확하게 검색하고 사용하는가에 따라 합성생물학 분야에서 우위를 가질 수 있을 것이다.

### 합성생물학과 생물다양성협약: 이슈의 등장

합성생물학은 21세기 들어 빠른 성장세를 보이기 시작한 분야로 합성 생물학의 발전이 생물다양성의 보전에 미칠 영향에 대한 논의가 공적인 영역에서 이루어지기 시작한 것이 그리 오래되지 않았다. 따라서 생물다양성 보전에 미칠 영향에 대해 충분한 검토가 이루어지지 않았으며, 생물다양성협약의 채택에도 합성생물학과 관련한 이슈는 직접적으로 다루어

지지 않았다. 일부 국가에서는 합성생물학의 산업화에 성공하면서 합성 생물학을 국가의 성장동력으로 지정하여 적극적으로 지원·육성하는데 치중하고 있어, 규제적 관점이나 기술력으로부터 발생하는 이익 공유 등과 관련한 논의에 있어 소극적인 태도를 보이기도 한다.

생물다양성협약은 생물다양성의 보전이라는 국제사회 공통의 이익을 보호하는 목적성을 가지고 채택된 국제조약이다. 그러나 생명공학, 합성 생물학과 같은 기술 발전의 속도가 국가 간 차이를 보인다는 점 역시 생물다양성협약상 합성생물학과 관련한 논의의 전개에 있어 발전적 방향을 제시하지 못하고 있는 요인이 되고 있다. 생명공학을 비롯하여 합성생물학의 기술 발전에는 자본력이 필요한 만큼, 선진국 위주의 기술 축적이 이루어지고 있다. 또한 합성생물학 발전의 역사가 오래된 국가일수록 이와 관련한 육성정책뿐만 아니라 규제를 해야 할 경우 국내적 조치를 충분히 마련하고 있거나 마련을 위해 노력하고 있다. 그러나 비교적 합성생물학 기술 발전이 더딘 국가들의 경우에는 합성생물학 관련 정책이 미비하여 합성생물학으로 제기될 수 있는 과학적, 윤리적, 사회적 검토가 광범위하게 이루어지지 못하였고, 합성생물학에 이용되는 유전자원의 이익공유 및 합성생물학이 생물다양성에 미치게 될 부정적 영향에 대한 규제를 위한 일관된 조치를 마련하지 못하는 경우가 많다. 이와 같은 국가마다 다른 합성생물학과 관련된 대응조치의 수준 차이가 생물안전성에 미칠 부정적 영향을 방지하기 위하여 생물다양성협약 당사국총회는 합성생물학과 관련한 논의를 지속해서 이어나가고 있다. 무엇보다 생물다양성협약이 생물다양성의 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용이라는 국제사회 공통의 이

익을 달성하기 위하여 모든 국가가 관련 기술에 대한 적절한 접근이 가능하도록 국가적 여건의 차이를 인정하고 있는 만큼 당사국총회를 통해 국제적 수준의 기준 제시가 필요하다.

### 합성생물학과 생물다양성협약: 논의의 흐름

생물다양성의 감소로 인해 국제사회가 부담하게 될 위기에 대한 우려가 생물다양성 보전을 위한 국제법규범의 채택으로 이어져 생물다양성협약이 채택되었다. 생물다양성이라는 국제사회 공통 이익 보호를 위해 채택된 생물다양성협약은 생물다양성 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용을 위한 조치를 취하는 데 있어 일반적이고 광범위한 기준을 제시한다. 생물다양성 감소의 문제는 현대 국제사회의 전반적 변화에 따라 생겨나고 있는 문제이기도 한 만큼 각 국가가 생물다양성에 미치는 영향과 생물다양성의 감소로 인해 나타나는 문제점 등에 관한 과학적, 기술적 증거의 축적, 사회적 현상 등의 종합적인 검토를 필요로 한다. 따라서 1992년 생물다양성협약을 채택된 이후 2년마다 당사국총회를 개최하여 당사국의 협약 이행상황과 이행에서 나타나는 문제점들을 주기적으로 점검 및 검토하여 대응방안을 마련하기 위한 노력을 하고 있다. 당사국총회를 통해 생물다양성 보전에 영향을 미치는 새로운 이슈가 제기될 경우, 이에 대한 과학적 증거와 실질적 통계 등을 검증·검토하여 대응방안을 마련하기 위한 논의를 하고 있다. 합성생물학의 발전이 생물다양성에 미칠 영

향과 관련한 이슈도 당사국총회를 통해 제기되어 대응방안 마련을 위해 지속적인 논의를 이어오고 있다. 생물다양성협약 당사국총회는 당사국들의 경제적, 사회적, 문화적, 과학적 발전이 생물다양성에 미칠 영향을 포괄적으로 검토하고, 개별 사안들에 대한 검토를 통해 국제적 수준의 대응방안 마련을 위해 노력한다.

1994년 제1차 당사국총회가 개최된 이래로 다양한 이슈가 당사국총회를 통해 논의된 바 있다. 특히 생물다양성협약에서는 생명공학의 발전이 생물다양성에 미칠 영향에 대한 가능성에 대한 우려로 생명공학의 발전으로 제기될 수 있는 다양한 이슈를 다루어 왔다. 생명공학에 기인한 유전자변형생물체가 생물다양성 및 인간의 인체에 미칠 영향에 대한 문제가 먼저 제기되며 카르타헤나 의정서가 채택된 바 있으며, 합성생물학과 관련한 논의 역시 생명공학의 발전적 상황에서 자연스럽게 제기되었다. 합성생물학과 관련한 논의는 2010년 당사국총회를 통해 제기되며, 2012년 개최된 제11차 당사국총회를 통해 합성생물학이 생물다양성 보전과 지속가능한 이용에 미칠 영향에 대한 논의를 필요로 한다는 점이 의제로 채택된다(Decision X/13, 2010 / Decision XI/11, 2012). 제13차 당사국총회를 통해서도 합성생물학이 지속적인 논의를 필요로 하는 의제로 결정되었으며, 제14차 당사국총회를 통해 합성생물학이 생물다양성에 미칠 부정적 영향을 최소화하기 위해 사전예방적 관리 방안의 필요성이 제기되었다(Decision XIII/17, 2016 / Decision XIII/17, 2018). 그러나 아직까지 당사국총회를 통해 합성생물학과 관련한 문제의 제기와 과학적 근거가 충분하지 못하거나 부정적 또는 잠재적 영향에 대한 증거가 축적되지 않아, 이

후 2020년 개최될 당사국총회에 거는 기대가 크다.

## 나고야 의정서와 합성생물학

합성생물학이 생물다양성 및 구성요소의 지속가능한 이용에 미칠 부정적 또는 현시점에서 나타나지 않은 잠재적 영향에 대한 대응방안을 필요로 한다는 점에는 큰 견해차가 없다. 그러나 나고야 의정서가 채택된 2010년을 기점으로 합성생물학에 이용되는 유전자원, 파생물, 전통지식 등이 이익공유의 대상인가에 대한 논의가 제기되고 있으며, 이에 대한 당사국간 의견충돌이 있다. 나고야 의정서는 유전자원의 이용으로부터 발생하는 이익 공유 절차를 국내법에 따르도록 하고 있기 때문에 나고야 의정서의 이행에 있어 각 국가가 규정하고 있는 유전자원, 파생물, 전통지식 등의 범위 그리고 유전자원의 이용에 대한 많은 입장차이가 있다. 특히 선진국과 개발도상국과의 입장은 큰 차이가 있으며, 합성생물학이 자본력에 의존하여 선진국이 주도하고 있어 선진국에는 경제적 부담이 될 수 있기 때문에 개발도상국이 유전자원 등의 범위를 광범위하게 규정하는 것에 부정적인 입장이다. 이익공유 문제가 국내법 또는 국내 절차를 따르도록 하고 있음에도 불구하고 당사국 총회를 통해 지속해서 논의되고 있는 이유는 개발도상국 입장에서는 유리한 입장을 고수하는 데 있어 국제적 기준이 제시될 경우 국내적 기준에 당위성이 마련될 수 있고, 선진국 입장에서는 경제적 손실을 조금이라도 줄일 수 있는 근거가 될 수 있기 때

문이다.

나고야 의정서의 궁극적인 목적은 유전자원의 이용으로 발생하는 이익을 공정하고 공평하게 공유함으로써 생물다양성을 보전하고 구성요소의 지속가능한 이용을 위한 국가적 노력을 위한 것이다. 특정 생명시스템 구축을 위해 이용된 전통지식과 유전자원의 출처, DSI를 포함한 유전자원 정보 및 비교분석 기술 그리고 합성기술 등의 정보를 객관적으로 평가하여 정보의 협약과 생물다양성협약 및 나고야 의정서상 적용 가능성에 관한 검토를 통해, 적정한 유전자원의 이용과 이에 따른 이익 공유가 이루어지고 생물다양성을 보전할 수 있는 방향으로 생명산업계의 의식이 변화되어야 한다.

## 생물다양성 보전과 합성생물학

### IT 기술 접목에 따른 생물다양성과 합성생물학

#### 1. 생물다양성의 딜레마

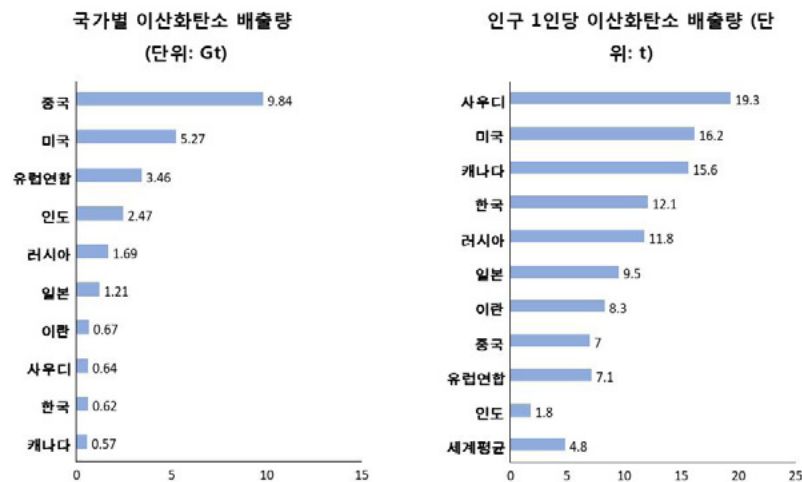
지구는 20여 번의 크고 작은 대멸종을 겪어 왔다. 그중 인간과 관련된 가장 최근의 멸종은 7만 5천 년 전 화산의 폭발로 생긴 빙하기로 인해 시작되었다. 전 지구 생물의 60%가 멸종하고 인류는 작게는 2천 명에서 많게는 4만 명밖에 살아남지 못했다. 그래도 인류와 지구 생물들은 다시 생존을 시작했고 인류는 문명을 발전시켜 왔다. 그러나 불과 200년에 걸친 인류 문명의 급격한 발전은 생태계를 위협하고 기후변화를 일으켜 지구의 멸종을 다시 예고하고 있다. 지난 20여 번의 멸종은 화산이나 지각변

동, 운석 등의 자연적인 요인에 의해 생겼지만, 이번 멸종은 인류에 의해 서 벌어지고 있다. 지금의 위기는 우리 인류가 만들고 있는 문제이기 때문에 우리는 이를 방지할 기술과 시행할 조직이 있다는 점이 이전의 멸종과는 차이가 있다. 이러한 조직과 기술을 사용하여 인류에게 다가온 위기를 극복해야 하지만, 인류의 이기심으로 인한 세계 각국의 다툼으로 위기 극복은 원활히 진행되고 있지 않다.

기후협약과 생물다양성협약의 정신은 인류가 현재 진행하고 있는 지구 환경의 파괴를 멈추고 인간으로 인해 멸종 위기에 있는 수많은 종을 보호하면서, 결과적으로는 지속가능한 소비 및 생산을 통해 인류 문명을 발전시키고자 하는 것이다. 이를 위해 탄소 배출을 줄이고 아마존과 같은 열대우림을 보호하고 친환경 에너지를 사용하는 등의 해결책들이 제시되

고 있으며, 세계 각국이 공평하게 환경보호 정책을 진행하자고 목소리를 높이고 있다. 초창기에 선진국들로부터 시작된 이 운동은 환경문제가 일부 선진국만이 나서서 해결할 수 있는 문제가 아니라 전 세계적으로 함께 해결해야 할 문제라는 공동의 인식으로 인하여 국제협약을 통해 의견을 공유하고 있다.

2018년을 기준으로 세계에서 이산화탄소 발생 1위는 중국이고 2위는 미국 그리고 3위는 인도이며 사우디가 8위, 한국이 9위, 캐나다가 10위다. 그러나 이를 인구 비례로 나누어 보면 사우디가 1위, 2위는 미국, 3위가 캐나다이고 중국과 인도는 10위권 밖으로 떨어지며 한국은 오히려 4위가 된다. 이것이 명시하는 바는 대체로 선진국들이 1인당 탄소 배출량이 더욱 많고, 이는 생활환경의 윤택함과 부유함에 따른 것이라는 것을 알 수 있다. 그러나 선진국들은 자신의 뼈를 깎는 노력이나 전 지구적인 환경보호 비용을 부담하는 대신 경제발전으로 인해 이산화탄소 배출과 공해 물질이 급격히 늘어나고 있는 중국이나 인도 또는 세계적인 열대우림을 가지고 있지만 개간 등으로 훼손하는 브라질, 인도네시아 등에 환경을 보존하라고 압력을 가하기도 한다. 그런데 여기에는 공정성의 문제가 발생하게 된다. 인류는 지구온난화를 막기 위하여 이산화탄소 배출을 감소시켜야 하는데, 지난 200년간 배출된 공해 물질과 이산화탄소는 거의 다 선진국에서 배출한 것이면서 개별 국가의 공평한 감축은 선진국이 아닌 사람들에게 경제발전으로 다가올 생활의 윤택함을 희생하라는 이야기와 다름이 없다. 2018년 미국은 2억 7천만 대의 차량이 등록되어 인구의 83%가 차를 가지고 있고, 중국은 1억 9천만 대 그리고 인도는 4천 600만 대의



[그림 5-1] 2017년 국가별 이산화탄소 배출량  
(자료: Global Carbon Project, 2018)

차를 가지고 있다. 중국과 인도의 경제력이 향상되어 미국과 같은 수준에 이르면 20억 대의 차량이 늘어나는데, 이는 현재 전 세계 차량 13억 대의 두 배에 달하는 양이다. 그리고 그들의 생활을 윤택하게 하기 위한 에어컨, 냉장고 등의 가전제품도 마찬가지이다. 이런 상황임에도 현재의 협약은 각 국가가 탄소 배출량을 무조건 줄여야 한다고 이야기한다. 이는 소득 수준이 이미 최상위권이어서 친환경 생활이 가능하고 인구증가율이 낮은 서구 유럽 국가들은 큰 노력을 하지 않아도 되고, 기존의 개발도상국들은 개인의 향후 미래 생활을 희생해야 한다는 이야기로도 이해될 수 있다. 지금 이대로 우리가 현 상황을 방치한다면 인류의 미래가 불투명하고, 그렇다고 우리가 탄소 배출을 강제로 줄여 버리면 현재의 삶과 복지가 파탄이 나는 딜레마의 상황이다.

### 기술발전이 지구와 생명다양성에 미치는 영향

2019년 6월 미국의 IT 전문잡지 <Wired>에 올라온 기사의 제목은 “아이폰이 어떻게 우리 지구를 구하고 있나 **HOW THE IPHONE HELPED SAVE THE PLANET**”이다. 이 기사는 12년 전 애플이 출시한 이후 20억 대 이상의 아이폰이 판매되었고 이를 위해 많은 금속, 플라스틱, 유리 그리고 다른 천연 자원을 필요로 하고 많은 전기를 필요로 하는데 추정에 따르면, 데이터에 목마른 사용자의 스마트폰은 냉장고가 소비하는 만큼의 전기를 1년에 소비하며, 아이폰과 스마트폰이 필수적인 부분이 된 “디지털 경제”는 지구

전체 전력의 약 10%를 사용하고 있음으로 지구상에 나쁜 영향을 끼쳤다고 볼 수 있다고 이야기한다. 실제로 현재 스마트폰 한 대를 제조하는 데 따른 이산화탄소의 양은 53kg으로 계산되며, 많은 학자들은 스마트폰이 지구환경에 나쁜 영향을 끼치고 있을 뿐만 아니라 우리 인간의 관계를 단절시킨다고 말한다. 그러나 이 기사는 몇몇 중요한 조사를 인용하여 ①미국의 총 전기 사용량은 10년 동안 크게 늘지 않았고, ②수십 년 동안 미국의 플라스틱 소비는 전체 경제보다 50% 이상 빠르게 성장했지만 2009년 이후 상황이 역전되어 플라스틱 사용은 경제 전체보다 15% 더 느리게 성장했으며, ③대부분의 천연자원의 소비 증가율이 단순히 둔화된 것이 아니라 실제로 줄어들었는데, 이러한 현상이 아이폰으로 지칭되는 스마트폰의 사용으로 기존에 우리가 사용하던 많은 전자제품들을 사라지게 했기 때문이라고 주장하고 있다. 스마트폰 자체는 많은 에너지와 탄소를 사용하지만, 우리가 과거에 일상적으로 사용하던 계산기, 캠코더, 시계, 라디오, 휴대전화, 녹음기, 나침반, 카메라, 기압계, 고도계, 가속도계, GPS 장치 등 수많은 전자제품을 우리의 생활에서 사라지게 하였다. 즉, 스마트폰의 제조가 끼치는 영향에 비해 그로 인해 없어진 기기들의 수가 훨씬 많기 때문에 에너지와 자원의 소비가 줄어들었다는 결론을 내렸다.

기술의 발전은 물질의 비 물질화를 가속시킨다. 90년대 디지털시대로의 전환과 2000년대 인터넷시대 그리고 현재의 스마트폰 문화는 기존의 책, 비디오테이프, 카세트, CD, DVD, 플로피디스크 등의 많은 물질을 스마트폰 속으로 집어넣어 비 물질화시켰다. 또한 스마트폰 등의 모바일 기기와 PC의 발전으로 인한 검색, 메일, 쇼핑 등의 일상이 산업화로 인한 이

동 거리의 폭발적인 증가를 다시 폭발적으로 감소시키고 있다. 이는 에너지와 자원 소비의 감소로 이어진다. 또한 기술의 발전이 혁명적으로 에너지 소비를 줄일 수 있다는 것을 보여준다.

4차 산업혁명으로 대변되는 기술의 발전은 생물다양성의 목표뿐만 아니라 전반적인 지구환경의 개선에 큰 도움을 줄 수 있다. 3D 프린팅으로 시작된 직접 생산은 소량 다품종 생산 및 공정 단순화로 에너지와 자원의 효율적인 사용에 기여하고 자재 및 판매의 이동 거리를 단축해 탄소 배출을 줄일 수 있다. 자동주행 및 공유경제 기술은 에너지와 자원의 효율적인 사용을 가능하게 한다. 5G 통신과 IoT로 대변되는 사물인터넷과 우리 생활의 초연결 기술은 회사와 집 그리고 출장의 경계를 무너트려 기존에는 실제로 세계 각국을 이동하기 위한 운송수단의 감소를 통해 에너지 소비와 탄소 배출을 줄일 수 있다.

지구온난화와 생물다양성과 같이 전 지구적인 문제는 국가 간의 이해가 복잡하게 얽혀 있기 때문에 통일된 지침을 가지고 진행하는 것은 늘 문제가 생길 수밖에 없다. 이를 보완하기 위해 전 지구적인 강력한 규제가 필요한 날이 올 수도 있겠지만, 4차 산업 혁명으로 대변되는 기술의 발전이 개발도상국과 선진국 간의 갈등을 완화하고 우리 지구의 파국을 늦추는데 기여할 수도 있다.

#### 4차 산업혁명, IT와 BT 기술의 융합

2017년 대선에서 회자하여 널리 알려진 제4차 산업혁명은 빅데이터 Big Data를 이용한 인공지능AI과 딥러닝Deep Learning의 발달 및 IoT를 통해 모든 사물이 연결되는 초연결 혁명으로, 3D 프린팅 등을 통해 누구나 쉽게 창작물을 생산할 수 있도록 생산의 자동화로의 연결성이 극대화되어 산업 환경의 급격한 변화를 예고하고 있다(문현준 등, 2017). 철도 · 증기기관의 발명 이후의 기계화 혁명으로 정의되는 제1차 산업혁명(1760~1840년), 전기 에너지와 컨베이어 생산체제로 인해 대량생산 혁명으로 정의되는 제2차 산업혁명(19세기 말~20세기 초), 반도체와 메인프레임(1960년대), PC(1980년대)와 인터넷(1990년대)을 통한 지식정보혁명으로 정의되는 3차 산업혁명은 모두 기술이 먼저 개발되고 산업에 적용된 이후에 학자들에 의해서 세대가 구분된 반면, 4차 산업 혁명은 먼저 기술에 대한 정의가 되고 난 다음 산업에 적용 방법을 예측하는 점도 흥미로운 상황이다. 우리가 4차 산업혁명을 주시해야 하는 이유는 19세기 2차 산업혁명에서는 한 대의 기계가 수백 명의 노동자를 대체했지만 이번에는 프로그램 하나, 컴퓨터 한 대가 수만 혹은 수십만 명의 전문인력을 대체할 수도 있으므로 기존 산업혁명과 비교하여 월등한 생산 효율의 증가가 예견되기 때문이다. 긍정적인 시각에서 본다면, 인간은 일상적인 업무에서 해방되어 더 많은 여가 생활이 주어지거나 창조적인 일에 종사할 수 있는 유토피아를 상상할 수도 있다. 그러나 부정적인 관점에서 본다면, 최대 80% 이상의 일자리가 기술 발전에 의해 사라질 것으로 예측되어 현재 경제 구조의 혁



신적인 개편이 없다면 노동 수요의 극단적인 감소에 따른 대공황이 올 것으로 보인다. AI의 발전은 이미 놀라울 정도이고, 일반인들을 경악시켰던 알파고를 비롯하여 IBM의 시맨틱 검색과 자연어 처리 기반 기법이 적용된 왓슨 등이 사물인터넷, 쇼핑, 교통, 금융, 법률 그리고 의료 판독 및 진단 등의 다양한 분야에서 활용되고 있으며 이미 우리의 직업들을 대체하고 있다.

또한 이러한 IT 기반의 AI 기술은 제조업과 전통 산업인 농업, 축산업과 결합하여 수많은 융합 기술들을 만들어 내고 있는데, 그중 가장 급격한 발전과 결과물들을 나타내는 분야가 바로 생물학 분야이다. BIT는 IT **Information Technology**와 BT **Bio Technology**를 융합한 학문이다. 또한 4차 산업혁명의 한 축인 NT **Nano Technology**와도 접목해 IT-BT-NT 융합 기술이라고도 한다.

## IT 기술이 접목된 합성생물학

생물학 분야에서 가장 활발하게 IT 기술이 사용되는 분야는 합성생물학 분야이다. 합성생물학은 필요한 세포의 기능이 구현되도록 DNA를 인코딩하는 과정이 필요한데, 세포의 기능 및 정보를 가진 유전자 염기를 구성하는 네 가지 알파벳 조합(G, A, T, C)으로 표현하는 과정에도 인코딩을 사용할 수 있다. 인코딩이란 어떠한 논리 및 데이터를 기계어로 바꾸는 과정을 의미하는 IT 분야의 전산 용어로, 합성생물학에서는 세포 안에

서 작동시킬 수 있는 가장 단순한 유전자 부품 목록을 구축하는 것으로부터 인코딩 과정이 시작된다. 이 목록에서 선택한 부품들을 논리소자처럼 조합하여 다양하고 고도화된 알고리즘을 구현하는 DNA 모듈을 제작할 수 있게 된다. 이러한 과정은 IT분야에서 반도체를 설계하는 방법과 매우 유사하며, 이는 합성생물학 분야에서 IT의 기술 개념을 DNA 영역에서 활용되도록 차용하여 사용하였기 때문이다. 최근에는 유전체 수준의 대형 DNA를 합성하는 데까지 DNA 모듈이 확장되고 있으며, 2010년 크레이그 벤터 연구소는 수십만 바이트 염기쌍에 이르는 최초의 미생물 유전체를 합성하여 확장성을 제시한 바 있다. 또한 효모에서 수천만 바이트 크기의 유전체 합성연구가 성공적으로 진행되었다.

합성생물학의 비약적인 발전은 유전체 정보와 분자생물학에 대한 이해가 높아지고 DNA 합성기술이 발전함에 따라 DNA를 합성하는 비용이 획기적으로 낮아진 데에 기인한다. 분자생물학의 한 분야로 파생된 합성생물학은 1953년 DNA의 분자구조 규명과 함께 시작되었다. 1970년대에는 대장균에 다른 생물의 DNA를 이식하여 단백질 치료제를 생산하는 유전자재조합 기술이 개발되면서 바이오산업으로 발전했다. 180만 염기쌍으로 구성된 미생물의 유전체가 1995년에 최초로 밝혀진 이래, 최근에는 한 해에도 수천 종의 미생물 유전체가 밝혀지고 있다. 유전체 정보가 축적되고 DNA 기능들을 표준화된 부품으로 확보하자는 아이디어를 기반으로 표준화된 생물 부품들을 조합하여 더 복잡한 모듈을 개발함으로써 세포 기능을 효과적으로 설계하려는 합성생물학 기술이 시작되었다. 2000년대를 거쳐 최근에는 빅데이터 분석을 통한 DNA의 설계, 자동화

된 DNA의 합성, 머신러닝 등을 통한 유전체 기능 분석 및 데이터 시각화를 통한 생체 시스템의 시뮬레이션과 같은 최신 기술에 접목하고 있으며, 이를 토대로 바이오 프로세스의 개발에 드는 시간과 비용을 획기적으로 단축하려는 연구도 활발하게 진행되고 있다.

한국은 2017년 9월에 국내 바이오산업 및 기술혁신의 가속화를 위하여 제3차 생명공학육성 기본계획 최종안을 발표하면서 바이오 혁신 기술의 핵심으로 합성생물학을 주목했다. 이는 합성생물학이 생명과학 전반의 효율성을 획기적으로 높일 수 있는 혁신기술로 바이오 경제 기반을 조성하는데 획기적인 역할을 할 것이라고 기대하고 있다는 것을 의미한다.

### 합성생물학과 IT 기술의 융합 역사

그동안 생명과학 기술은 효율성을 핵심으로 하는 공학 분야와는 달리 발견과 규명이라는 관점에 치우쳐 있어 산업과의 연계에 어려운 점이 많았다. 그러나 합성생물학 기술은 전 과정에서 DNA의 모듈 설계와 제작을 수단으로 하고 있어, 발전된 기술이 다른 분야와 연계되거나 융합하는데 용이하고, 컴퓨팅 시뮬레이션을 통해 수많은 실험에 들어가는 시간을 획기적으로 단축할 수 있다. 합성생물학은 BT와 IT의 융합연구로 가장 활발하게 이루어지는 분야로, 처음에는 DNA 시퀀싱 분야의 데이터 축적을 위해 빅데이터 및 데이터 시각화 기법이 사용되었으며 최근에는 가상 세포 기반의 시뮬레이션 합성법의 도입에 인공지능과 딥러닝 기법이

사용되어 궁극의 발전을 진행 중이다.

유전자 설계와 자동화뿐만 아니라 인공지능이 연계되는 합성생물학 분야에 실리콘 벨리의 대형 정보기술<sup>IT</sup> 기업들은 연간 수억 달러를 투자하고 있다. 이는 DNA 인코딩을 통한 합성생물학 기술의 발전이 지금까지와 다른 공학적 활용성을 만들어 낼 수 있다는 기대에 따른 것으로, 미국의 경우 전통적인 제약 산업은 주로 동부 쪽에 위치하고 있었으나 합성생물학 분야의 벤처기업들은 절반 이상이 BT와 IT를 융합하여 개발이 용이한 캘리포니아의 실리콘 벨리에 본사를 두고 있다. 미국을 선두로 영국, 일본, 중국 등 주요 국가도 독자적인 합성생물학 파운드리를 구축하는 등 국가 차원의 플랫폼 구축을 통해 바이오 경제의 청사진을 마련하고 있다. 4차 산업혁명이란 말이 처음 사용된 다보스포럼에서는 2000년대 초 등장한 합성생물학이 생명공학 및 융합산업 전반에 파급되어 바이오 경제의 핵심 프레임이 될 것이라고 하였다. 실리콘벨리에서 연구되는 '디자인-합성-테스트-수정'을 고속화하는 시스템이 확산되면 수년이 걸리던 바이오기술 개발 주기가 불과 몇 주 또는 몇 개월로 단축될 것이다. 한국도 유전체 수준의 DNA 인코딩을 통해 합성생물학 기술 발전을 본격적으로 도모할 필요가 있다. 또한 세계적 연구 동향에 대처할 수 있도록 자동화, 고속화, 빅데이터 연산능력을 포괄하는 융합기술의 관점에서 장기적인 전략을 갖추어야 한다.

### 합성생물학 IT 기술의 융합 가상세포 기술

가상 세포 virtual cell 란 단백질과 DNA, RNA 같은 분자 수준에서 생명현상을 연구하는 방식과 달리, 세포 대사의 전반적인 과정을 컴퓨터로 구현해 생명 현상을 연구하고 이를 생물 공학에 응용하려는 방법이다. 이처럼 세포를 실제 실험으로 사용하는 대신에 그 구조를 컴퓨터에 데이터 베이스로 구축하여 소프트웨어를 세포의 대사 과정을 구현하는 중요한 연구 도구로 사용한다. 합성생물학에서 세포의 유전자 형질을 바꾸는 작업을 프로그래밍에 비유하면, 특정 대사 기능을 하는 DNA를 하나의 설계된 회로로 간주하고 이를 전자기기 논리회로처럼 프로그래밍 할 수 있다. 이는 기존의 실험실에서 유기적으로 진행했던 실험을 시뮬레이션으로 대체하고 최종결과를 도출하여 몇 번의 실험으로 생물을 만들어 낼 수 있게 만드는 혁신적인 방법이다. 이를 위해 만들어진 미국 MIT의 합성생물학자인 Christopher Voigt와 보스턴대학, 미국표준기술연구소 NIST 등의 연구진에 의해 개발된 “Cello”라는 프로그래밍 언어는 생명체 DNA 회로의 설계를 자동화하는 프로그램이다. 이는 반도체 전자회로 설계를 위한 프로그래밍 언어인 ‘Verilog’를 응용한 것으로, 세포의 유전자 회로를 설계한 다음 세포 내에 구현하여 그 기능을 볼 수 있게 한 것이다. 이 방법은 현재는 주로 세포 단위의 균류 합성에 사용되고 있지만, AI 기술과 BT 기술의 발전이 가속화된다면 쉽게 우리가 원하는 방식의 새로운 생물을 창조 할 수도 있다.

합성생물학의 가상세포 기법은 유전자가위 기법과 함께 융합기술을 필요로 하는 영역이다. 접근방법이나 데이터 해석 측면에서 BT에 기반을 둔 IT, NT 등 고도의 융합기술이 뒷받침되어야 제대로 된 연구를 할 수 있다. 4차 산업혁명 시대에서는 많은 양의 유전체 정보 데이터가 AI(인공지능), 빅데이터 분석, 로보틱스 등의 기술과 접목되어야만 엄청난 산업적 및 경제적 파급효과를 가진 ‘혁신융합기술’로 미래바이오 산업의 핵심이 될 수 있다.

유전자 회로를 구성하는 기본 원리는 유전자 발현을 조절하는 인자와 또 다른 유전자 회로를 활성화하거나 억제하는 활성인자-activator나 억제인자-repressor로 발현된 산물을 사용하게 하는 것이다. 또한 산소, 당, 빛, 온도, 산성 등과 같은 환경 조건과 여러 다른 환경 조건을 감지하는 감지인자를 직접 설계하여 유전자 회로에 입력할 수 있다. 이러한 방법으로 생물학 반응을 일으키는 여러 인자를 조합하여, 특정 대사 또는 기능을 할 수 있는 유전자 회로를 설계할 수 있다. 이와 같은 입력과 산출 과정은 마치 전자회로 게이트들의 스위치를 온/오프on/off 하는 것과 같이 여러 유전자를 활성화하거나 억제하면서 특정 반응의 회로를 구성하게 된다. 즉, 전자기기 논리회로 설계 방식과 마찬가지로 유전자 논리회로를 간편하게 구성할 수 있으며, 유전자 회로도 결국에는 활성화-activation와 억제-repression 등의 간단한 이진법적 스위치로 조절할 수 있음을 의미한다.

일반적인 프로그래밍 언어가 0, 1의 기계어로 번역되는 것처럼 유전자 회로의 프로그래밍 언어는 DNA 염기서열로 번역되고, 유전자 회로의 염기서열을 실제의 생물 세포에 삽입해 설계에서 의도한 형질이 실제

로 발현되는지 확인하는 과정을 거친다. Cello를 개발한 연구진은 대장균의 게놈 유전체인 *Escherichia coli*의 60개 회로 설계에 이 프로그램을 적용하여 DNA 서열을 변환하였고, DNA 염기서열은 추가 튜닝 없이 지정된 대로 구축되어 88만 쌍의 DNA 조립을 진행하였다. 이를 이용하여 60개의 유전자 회로를 설계했으며, 첫 시험에서 이 가운데 45개 회로가 작동함을 확인하였다.

유전자 회로의 프로그래밍 언어는 유용한 물질을 분비 또는 생산하는 미생물을 만들기 위한 생명공학 분야에서 주로 사용되고 있다. 기존의 유전자를 변형하여 대사 과정을 재설계함으로써 유용한 약물이나 회귀물질, 에너지 연료를 생산하는 미생물을 개발하는 과정은 수많은 실험을 거쳐 오류를 보완해가면서 진행되었다. 그러나 프로그래밍 언어를 사용하면 특정 대사 기능의 유전자 회로를 사전에 설계하고 실험 전 제대로 작동하는지 확인함으로써 실제 미생물 실험에 드는 시간과 비용을 대폭 줄일 수 있다. 보통 기존의 실험실에서 몇 년에 걸쳐서 이루어지는 작업이 며칠 만에 가능해지는 것이 가장 큰 장점이라고 할 수 있다.

IT 기술이 접목된 합성생물학은 이러한 기술적 진보에 힘입어 나날이 발전해 가고 있다. 합성생물학의 목표는, 우리가 원하는 분자를 효율적으로 빠른 시간에 생산하는 것이다. 첼로 Cello는 비싼 특정 효소나, 성장호르몬, 고가의 화합물, 항생제 등을 매우 효율적으로 생산하는 회로를 설계하는 데 쓰일 수 있다. 미래에는 실험실 내에서 실험으로 여러 종류의 분자를 만들어 선택하는 것이 아니라, 컴퓨터로 미리 설계도를 입력하여 특정한 생물을 제작하는 것이 최종 목표이다.

#### DSI(디지털 시퀀싱 인포메이션, Digital Sequencing Information)

DNA 시퀀싱 기법은 유전자를 이루는 염기 ATGC의 결합 순서를 알아내는 기술을 말하고 이 정보를 DSI(디지털 시퀀싱 인포메이션, Digital Sequencing Information)라고 한다. 1990년 후반에서 2000년대 초반 10년 동안 약 4조 원의 돈을 들여 최초로 인간 게놈을 분석한 HGP Human Genome Project에서 사용한 1세대 생어 시퀀싱 Sanger Sequencing으로 널리 알려진 기법이다.

DNA deoxyribonucleic acid는 4종류의 염기로 구성된 데옥시뉴클레오사이드 삼인산-deoxynucleoside triphosphate, dNTP을 재료로 합성되는데, 하나의 dNTP 내에 데옥시리보스의 3번 탄소에 있는 하이드록시기 hydroxyl group, -OH와 또 다른 dNTP 내에 데옥시리보스의 5번 탄소 위치에 있는 삼인산기 triphosphate group가 결합하여 2개의 인산기를 잃고 1개의 인산기 monophosphate가 되면서 DNA가 합성된다. 생어 방법은 DNA 분자가 합성되는 과정에서 사용되는 dNTP의 종류를 확인하여 염기서열을 분석하는 방법이다. 그러나 실제 DNA 합성은 매우 빠른 속도로 이루어지기 때문에 어떤 dNTP가 사용되는지 확인하기 어렵다. 따라서 3번 탄소에 하이드록시기 -OH가 없어 5번 탄소의 인산기와 더 이상 반응하는 것이 불가능하게 만들어진 다이데옥시뉴클레오사이드 삼인산 dideoxynucleoside triphosphate, ddNTP를 이용한다. 이 기법은 하나의 단일 나선 DNA 주형, 하나의 DNA 시발체 primer, DNA 중합효소, 보통의 데옥시뉴클레오사이드 3인산염 dNTP, 100배 적은 양(e.g. 0/005mM ddATP : 0.5mM dATP)의 수정된 다이데옥시뉴클레오사이드 3인산염 ddNTP을 사용하여 DNA 중합효소가 ddNTP를 만나게 되면 더 이상

의 합성이 불가능해져 연쇄반응이 정지하게 된다. DNA 분자가 dNTP와 결합하면 계속 길이가 길어지지만 ddNTP와 결합하는 경우 반응이 정지되어 똑같은 DNA를 주형으로 합성이 시작되더라도 합성된 DNA의 길이가 모두 다르게 된다. 이러한 현상을 이용하여 하나의 DNA 주형을 이용해 4종류의 ddNTP(ddATP, ddGTP, ddCTP, 또는 ddTTP)를 이용해 반응시킨 후, 이를 각각 젤 전기영동하여 만들어진 DNA 가닥을 크기별로 분석하는 방법으로 이루어진다. 생어 방법으로 염기서열을 분석하려면 네 종류의 ddNTP를 이용해 각각 반응을 진행해야 한다는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위한 기술 개량이 지속해서 이루어져, 현재 네 종류의 ddNTP에 각각 다른 방사능 표지를 부착하여 한 번에 DNA 합성을 진행하고, 이를 전기영동 하면서 감지기로 각 방사능 표지를 감지하여 한꺼번에 한 가닥의 DNA 염기서열을 분석할 수 있다. 생어분석법은 오랫동안 검증되어 기술적 신뢰도가 높고 분석기기의 발달로 이용이 편리하고 분석 결과를 얻는 데 걸리는 시간은 더 짧지만, 염기서열당 분석 비용이 매우 비싸기 때문에 유전체와 같은 거대 DNA 분자의 염기서열을 분석하기에는 바람직하지 않다.

1977년 개발된 생어 염기서열 분석법을 뒤로하고, 현재는 IT 기술이 접목된 NGS(Next Generation Sequencing) 기법이 일반적으로 사용된다. 차세대염기서열분석법 NGS은 유전자 배열 결정의 속도와 비용의 효율성이 고려되어 성능이 혁신적으로 진화함으로써 첫 인간의 게놈분석에는 수천 명의 연구 인력과 수조 원의 비용이 들었으나 이를 1000달러 정도의 예산으로 인간 전체 유전체 분석이 가능하게 만든 기술이다. 차세대 시퀀싱은 특별한

기술을 지칭하는 말이 아니라, 단지 예전의 HGP(Human Genome Project)에서 사용한 생어 시퀀싱의 데이터 출력량을 증가하는 여러 시퀀싱 기술들을 통칭하는 용어이다.

이 분석법의 발상은 컴퓨터 공학에서 한 작업을 동시에 수행하는 것을 뜻하는 병렬 컴퓨팅(Massively parallel processing) 방법에서 아이디어를 얻어 하나의 유전체를 수많은 조각으로 분해하고 각 조각의 정보를 동시에 읽어낸 다음, 생물정보학적 기법을 이용하여 각자의 데이터를 조합함으로써 방대한 유전체 정보를 빠르게 해독하는 방법이다. 2000년대 초반부터 나온 2세대에 해당하는 NGS 기술들은 수십만 내지 수십억 개의 서로 다른 대용량 염기서열 분석 반응을 동시에 진행되고 판독한다. Exome, Transcriptome, Illumina, Ion Torrent 등의 기술들은 현재까지 사용되고 있다.

2010년대에는 3세대 시퀀싱 기법이 나왔는데, 그 첫 시퀀서가 PacBio RS 모델이다. 이 모델은 de novo sequencing에 강점을 보이며 시장에 정착했으나 전체적인 게놈 분석에는 정확도가 80%에 머물러 99.9%의 정확도를 보여주는 2세대 기법들과 경쟁이 힘들다는 단점 때문에 전 분야로 확장되고 있지는 않다. 따라서 비용과 시간 그리고 휴대성에서는 2세대 방법보다 월등하지만, 게놈 해독의 정확성에서는 아직 2세대 기법을 따라가지 못해서 보완적으로 사용되고 있다.

기술의 발전에 따라 3세대 기법이 2세대 기법을 대체하고 전면 적용된다면 인간 게놈을 20달러 정도로 분석이 가능해져 누구나 자신의 게놈을 분석해 여러 질병에 대한 취약점이나 맞춤 약물 개발에 응용되는 혁신이

이루어질 것으로 기대된다.

### 3D 바이오 프린팅 기법 동향

3D 프린팅은 4차 산업혁명을 이끌 유망기술 중 하나이며 다품종 소량 생산 및 혁신의 아이콘으로 주목받고 있다. 인공조직 및 인공장기 제작을 위하여 바이오/의료 분야에서도 3D 바이오 프린팅에 기술이 개발되고 있다. 3D 바이오 프린팅은 살아있는 세포를 원하는 형상으로 쌓아 올려 조직 또는 장기를 제작하는 방법으로 3D 프린팅 기술과 생명공학이 융합된 개념이다.

3D 바이오 프린팅의 출력방식은 일반 3D 프린팅과 동일하지만, 기본 소재로 살아있는 세포를 출력하기 위해 생체적 합성을 하는 고분자나 생체 재료 등을 사용한다는 차이점이 있다. 3D 바이오 프린팅 기법으로는 생물학적과 비생물학적 3D 프린팅에서 가장 일반적으로 사용하는 작은 크기의 액체 방울로 재료를 분사하여 출력하는 잉크젯 [inkjet](#) 방식, 일정 점도 이상의 재료를 공기압력이나 피스톤으로 밀어내어 그것을 적층하여 물체를 출력하는 미세 압출 [Micro-extrusion](#) 방식, 그리고 잉크젯 방식이나 미세압출 방식보다 일반적으로 많이 사용되지는 않지만 두 방식과 달리 노즐이 없어 세포나 생체 물질이 출력 도중 막힐 우려가 없는 장점이 있는 광경화성 수지 표면에 광원을 조사하는 광 조형 [Laser-assisted](#) 방식이 있다. 잉크젯 방식은 준비 시간이 짧고 출력 속도가 빠르며 비용이 적게 든다는 장점이 있으나, 열에 의해 세포가 손상될 위험이 있다. 미세 압출 방식은 세포를 고밀도로 적층할 수 있어 복잡하고 다양한 구조를 형성할 수 있다

는 장점이 있어 가장 널리 사용되고 있지만, 정밀도와 속도를 보다 향상하는 것이 필요하다. 광 조형 방식은 노즐에서의 세포 막힘 현상이 없을 뿐만 아니라 정교한 프린팅이 가능하다는 장점이 있지만, 출력 준비 시간이 오래 걸리고 출력 비용이 높다는 단점이 있다(김동립 등, 2018).

3D 바이오 프린팅 기술은 현재 인공 혈관, 인공 조직, 인공 장기 제작 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 2016년 미국 Wake Forest 재생 의학 연구소 [WFIRM](#)는 세포가 포함된 수화 겔과 함께 기계적 강도를 높여주는 생분해성 고분자인 PCL, [polycaprolactone](#) 을 출력하는 방식으로 미세 압출 방식의 바이오 프린팅을 사용하여 인공 귀, 근육 및 뼈를 제작하였고, 동물 실험을 수행함으로써 인공 장기를 제작하는 연구를 수행하였다. 이전까지 바이오 프린팅 기술은 상대적으로 작은 크기의 조직 제작에만 제한적으로 사용되었으나, 이 연구를 통해 3D 바이오 프린팅 기술이 인공 장기 제작에 이용될 가능성을 보여주었다.

3D 바이오 프린팅에 대한 연구는 합성생물학 분야에서도 활용되어 미생물 세포나 효소를 프린팅 하여 살아있는 생체 재료, 즉 생체 시스템을 제작하는 다분야 통합 연구로 발전하고 있다. 2017년 미국 Massachusetts 대학 연구팀은 견고하고 신축성이 있으면서 박테리아에 물과 영양분을 공급할 수 있는 수화겔 [hydrogel](#) 부분과 박테리아를 캡슐화하여 외부로부터 보호하고 공기를 투과 할 수 있도록 제작된 탄성체 [elastomer](#) 복합체를 이용하여 유전적으로 변형된 다양한 종의 박테리아 세포를 수용하여 살아있는 생체 재료 및 생체 시스템을 제작하였다. 이러한 기술은 합성생물학 분야에서 바이오 CAD 기법을 이용하여 생물체를 설계하고 설계된 생물

의 설계도를 3D 바이오 프린팅 기법을 이용하여 완제품을 생산하는 방식으로 진화될 수 있다. 이를 이용하여 Wearable Sensor, 화학물질 합성의 대사 중간체 제작 등을 미니랩으로 제작 가능하다는 것을 증명한다.

### 바이오 빅데이터, 클라우드 서비스

생물학 및 의학 분야에서는 빅데이터 기반의 창출 방법을 활용해 거대한 바이오 정보를 효율적으로 정리 및 해석하고 생물학적 또는 의학적인 의미를 찾아내어 새로운 지식과 서비스를 개발함으로써 생명과학과 헬스케어의 융합을 시도하고 있다. 이에 따라 2000년에 완성된 인간게놈프로젝트 이후 현재까지 축적된 엄청난 양의 유전체 정보로부터 유의미한 결과를 도출할 필요성이 증가하고 있다. 빅데이터와 클라우드 서비스의 적용을 통해 의료서비스 확대와 바이오산업 육성 등 관련 분야의 발전을 기대하고 있다. 또한 맞춤형 의료서비스에 대한 관심이 증가하면서 진료 기록과 의료 영상뿐만 아니라 유전자 통계와 전염병 현황을 포함한 방대한 보건 의료 정보에서 의미 있는 정보를 얻어내려는 연구가 활성화되고 있다.

유전체학Genomics, 단백질체학Proteomics, 생물정보학Bioinformatics, 시스템생물학Systems Biology 등의 대규모 데이터 분석이 요구되는 바이오/보건의료와 같은 최첨단 R&D 분야에서 거대하고 복잡한 생물·화학적 데이터처리 기술의 고도화를 통해 성과를 창출할 것으로 전망하고 있다. 미국의 아마존과 구글이 기존 IT업체의 클라우드 서비스 분야를 BT 쪽으로 확장해 합성생물학 분야의 클라우드 플랫폼을 구축하고 서비스에 들어갔

는데, 이는 바이오 분야의 DSI 비용의 절감으로 DB의 사이즈도 기하급수적으로 늘어남에 따른 필수적인 요건으로 탄생한 분야이다.

### 합성생물학 동향 및 국내 기술 수준

#### 합성생물학의 전반적인 동향

합성생물학은 ICT 기술 발전으로 기존의 생명공학 기술에 알파고가 묘수를 찾아 바둑을 두는 것처럼 기계학습 등 인공지능과 자동화된 로봇시스템이나 고속 분석기기를 이용하여 빠른 시간 내에 유전정보를 분석하고 원하는 기능을 하는 DNA를 찾아 필요한 물질을 합성할 수 있도록 생물시스템을 개발하여 생물 또는 생물의 대사산물의 대량 생산을 통해 상업화할 수 있다. 또한 ICT 기술을 통해 인공지능과 빅데이터 분석기술이 '디자인-제작-테스트-학습' 사이클을 아주 짧은 시간에 반복하면서 보다 고도화된 분자생물학적 기능을 지닌 새로운 유전체를 발굴하여 합성생물학이 다양한 분야에 활용될 수 있도록 한다.

따라서 합성생물학은 생물다양성협약 내 유전자원의 사용에 대한 이익의 공유 문제에서 선진국과 개발도상국들의 이해가 상충하고 있는 분야이기도 하다. 상대적으로 기술 수준이 떨어지는 개발도상국들은 합성생물학으로 제조되는 생물에 대해서도 근본을 찾아서 이익을 공유하고자 하지만 기술개발이 어느 정도 진행된 선진국들은 바이오 보안을 이유로 이동에 대해서는 규제가 필요하다는 입장이지만 이익 공유에 관해서

는 생물다양성협약 내에 포함을 시키고 싶어 하지 않은 입장이다. 따라서 2018년 이집트 총회에서 많은 의견 차이를 보이게 되어 결국 DSI분야의 규제는 어느 정도 합의가 되었지만, 이익 공유는 다음에 논의하기로 하였으며 합성생물학 중 유전자기위 기술은 제외하기로 하며 임시 봉인한 상태로 회의가 종료되었다.

합성생물학의 핵심기술은 시스템 생물학, 유전자 분석, 합성, 편집 기술로 이루어지는데 2016년 경제협력개발기구(OECD) 과학기술혁신 미래 전망 보고서에서 향후 10~15년 동안 전 세계적으로 큰 영향을 끼칠 10대 미래 기술과 2016년 다보스 포럼에서 주요 5대 핵심 기술에 선정되었다(한병구 등, 2018). 합성생물학을 활용하는 기술은 새로운 생물체 혹은 생물장치를 만들기 위해 표준화된 생물부품과 최적화된 대사회로를 구축하는 바이오-캐드(Bio-CAD) 분야와 이제껏 불가능했던 유기물 합성을 가능하게 할 수 있는 바이오 파운드리(Bio foundry) 분야로 이루어진다. 100여 개 이상의 신제품이 개발되었지만, 이들은 기존 생명공학 기술로도 만들 수 있어 아직 큰 상업적 성과를 거두지는 못하고 있다. 그러나 합성생물학 기술은 향후 고령화, 감염병, 안전한 먹거리 등과 같은 다양한 사회문제 해결할 가능성을 제시함으로써 경제 전반에 새로운 변화를 촉발하는 기반 기술이라고 볼 수 있다.

합성생물학 역시 설계된 물질을 생산하는 공장이 필요한데 기존 산업과는 달리 대규모 공장설비가 아닌 다양한 사이즈의 설비 및 각 대상에 따라 다른 시설이 필요하다. 이는 현재 IT 반도체 산업의 파운드리와 비슷한 바이오파운드리는 산업이 탄생했다. 즉, 생물의 설계는 업체나 기관

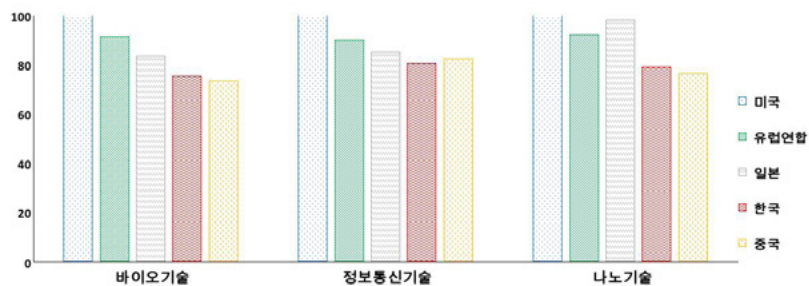
이 하고 이를 위탁해서 생산하는 업체들이 존재할 수 있는 협업의 비즈니스가 가능하다. 합성생물학은 유전자 설계 및 제작에 부품화와 모듈화를 기반으로 표준화를 접목하는 기술이며, 바이오 파운드리는 합성생물학 응용 및 연구 활성화를 위한 제조기술 및 시설로 인공유전체 및 유전자회로의 신속한 설계, 합성, 위탁제조, 및 성능시험을 위한 기술 및 시설로 인공유전체, 인공회로 기반의 생물체 개발 및 생물공정 프로세스의 상업화를 촉진 촉진할 수 있다. 2019년 전세계 합성생물학 기반의 협력 플랫폼인 글로벌 바이오 파운드리 연합(GBA, Global Biofoundries Alliance)이 결성됨에 따라 국가 간 바이오 파운드리 협력이 강화될 것으로 전망된다. 2019년 현재 미국, 영국, 덴마크, 중국, 일본, 싱가포르, 호주의 16개 기관과 업체가 이 협약을 체결하여 공동연구의 길을 열었다. 한국에서도 업체나 기관의 참여가 시급해 보인다.

#### 합성생물학의 시장과 국내 기술 수준

합성생물학의 현재 시장은 도구별로 본 시장은 새로운 합성제품 개발에 사용되는 핵심 도구(Tool)별 시장은 올리고뉴클레오타이드, Chassis Organisms, 효소, Cloning Technology Kits 등으로 구분되며 기술별 분류로 보면 차세대 염기서열분석(NGS)을 이용한 유전자 합성시장, Site-directed Mutagenesis 기법을 이용한 유전공학 및 편집 시장, Genome Engineering and Editing, 유전체 복제시장 및 Bioinformatics 시장으로 구분되어 이는 스마트 치료, 재생에너지, 농업 등 녹색산업 및 헬스케어 산업을 대상으로 응용되고 있다.



글로벌 합성생물학 관련 투자는 2013년 6억 달러에서 2018년 54억 달러로 급격하게 증가하고 있으며, 미국을 선두로 한 영국, 일본, 중국 등 주요국은 인류의 난제를 해결할 가능성을 제공할 수 있는 합성생물학의 중요성을 인식, 관련 프로그램을 신설하는 등 적극적인 투자를 추진하고 있다. 동기간 정부 투자보다 민간 투자가 빠르게 증가하여 2018년 전체 투자액의 44%를 차지하며 지역별로는 아메리카 지역(미국 주도)에서 가장 많은 투자를 하고 있다. 미국에는 500개 이상의 관련 기업이 존재하여 전체 투자액 중 민간의 투자 비중이 68%로 나타난다. 그러나 유럽과 아시아-태평양, 기타 지역의 총 투자액은 정부 자금의 비중이 절대적으로 높은 수준이다. 따라서 미국이 생물다양성협약에 가입하고 있지 않은 이유 중의 하나도 합성생물학 분야에서 가장 높은 수준을 이루고 있기 때문이라고 할 수도 있다.



[그림 5-2] 합성생물학 관련 기술의 국내외 기술 수준  
(자료: 한국과학기술기획평가원, 2019)

합성생물학은 BT(생명공학), IT(정보통신), NT(나노공학)가 융합된 기술로 현재 국내 분석 결과를 바탕으로 바이오 분야는 약 4년의 기술 격차

가 있으며, 한국의 바이오 기술은 미국 대비(미국을 100을 기준으로 한 기술 수준) 75.2% 수준으로 유럽연합<sup>EU</sup>이 91.0%, 일본이 83.3%, 중국이 73.2% 수준으로 나타났다(한국과학기술기획평가원, 2019). 그러나 사이언티픽 아메리칸-Scientific American이 2018년 바이오 분야의 국가별 혁신경쟁력을 평가하기 위해 54개국의 7개 부분(생산성, IP보호, 집중도, 기업지원, 교육/인력, 기반 인프라, 정책 및 안정성)에 대한 국가별 경쟁력 지수를 도출한 결과에 따르면, 바이오분야 글로벌 혁신 지표인 바이오 국가경쟁력 지수 중 미국(39.6점), 싱가포르(32.5점), 덴마크(31.1점), 스위스(29.9점), 스웨덴(28.4점)이 Top 5를 차지하였으며 우리나라(21.8점)는 26위로 2016년보다도 2단계 하락한 것으로 나타났다. 미국은 생산성과 기업지원 부분에서 큰 격차로 1위를 차지했다. IP 보호 부분은 핀란드가 1위, 미국이 2위이며 일본은 6위에 그쳤다. 바이오 집중도는 리투아니아가 생명공학 특허출원 비율이 높아 1위였고, 교육 및 인력은 싱가포르가 1위를 차지했다. 정책 및 안정성은 싱가포르가 1위, 뉴질랜드가 2위를 기록했다. 우리나라는 교육 및 인력 부분에서 비교적 큰 폭의 상승세를 보인다. 그리고 기반인프라 부분은 한국과 스위스가 최고 수준의 생명공학 기반 인프라를 제공하고 있다고 평가받았다. 미국 농무성 USDA GAIN 보고서에 의하면 한국은 바이오 기술에 의해 개발된 식품이 매우 제한적이며, 원인은 바이오 식품에 대해 소비자의 반응이 부정적이기 때문이라고 기술되었으며, 이는 국내 바이오 기술 발전의 저해 요인으로 분석된다. 또한 과학기술논문 발표가 높은 국가(9위)이지만 산업과의 연계성이 부족한 것이 바이오 기술 발전의 문제점으로 평가되고 있다.

1	2	3	4	5	6	7	SCORE	RANK	COUNTRY
10.0	9.1	6.1	9.5	5.7	7.5	7.5	39.6	1	UNITED STATES
	8.2	4.1	9.1	7.5	6.7	9.8	32.5	2	SINGAPORE
0.2	8.2	7.1	5.4	6.9	7.1	8.5	31.1	3	DENMARK
0.2	8.8	3.4	5.6	6.5	8.0	9.3	29.9	4	SWITZERLAND
0.4	8.6	2.9	6.3	5.4	7.3	8.9	28.4	5	SWEDEN
0.0	7.4	3.5	7.9	6.4	4.6	9.4	28.1	6	NEW ZEALAND
0.9	8.6	3.0	6.5	7.0	5.2	7.9	27.9	7	UNITED KINGDOM
0.0	9.4	0.5	6.3	6.3	7.1	8.9	27.5	8	FINLAND
0.0	6.8	1.5	8.7	4.0	6.8	8.9	26.3	9	HONG KONG
0.1	9.1	1.2	5.3	5.7	6.1	8.9	25.9	10	NETHERLANDS
0.1	8.6	0.6	4.6	6.4	7.7	8.0	25.7	11	JAPAN
0.6	7.3	2.7	5.3	5.4	6.2	8.5	25.7	12	AUSTRALIA
0.4	8.6	1.7	6.0	5.1	5.3	8.8	25.6	13	CANADA
0.2	7.1	3.0	7.0	5.9	6.5	5.8	25.5	14	ISRAEL
0.3	8.1	0.9	5.8	4.6	7.1	8.3	25.0	15	GERMANY
	4.7	10.0	5.4	4.6	3.6	6.6	24.9	16	LITHUANIA
0.1	7.6	1.3	5.7	5.5	5.4	9.0	24.7	17	NORWAY
0.7	8.8	1.7	4.8	5.5	6.0	6.5	24.2	18	FRANCE
0.1	8.8	2.0	4.6	5.6	5.6	7.1	24.1	19	BELGIUM
0.0	8.8	1.5	4.8	6.0	4.2	7.9	23.7	20	IRELAND
0.0	7.7	0.4	4.4	6.1	6.3	7.9	23.5	21	AUSTRIA
	7.0	2.9	7.0	4.4	4.2	7.3	23.3	22	ESTONIA
	6.3	4.1	4.4	5.9	4.0	6.7	22.4	23	PORTUGAL
	7.6	0.4	7.4	3.6	5.5	6.4	22.1	24	UAE
	5.7		6.2	5.5	5.5	7.8	21.9	25	ICELAND
0.1	5.6	0.8	5.1	4.8	8.0	6.2	21.8	26	SOUTH KOREA
0.1	5.5	0.3	6.8	1.2	7.0	7.2	20.1	27	TAIWAN, CHINA
	8.2	0.0	3.7	3.3	3.8	8.7	19.8	28	LUXEMBOURG
	5.9	2.5	4.6	4.3	3.9	6.2	19.6	29	SPAIN
	5.0	0.9	7.4	3.9	5.2	5.1	19.6	30	MALAYSIA

[그림 5-3] 2018년 바이오 국가 경쟁력 평가 순위

(자료: Scientific American Worldview: A Global Biotechnology Perspective, 2018)

4차 산업시대 관련 IT 기술 수준은 미국(100%) 대비 유럽연합EU 89.8%, 일본 84.9%, 중국 82.0%, 한국 80.2%이며, 기술 격차는 약 2년 정도 인 것으로 평가되었다(한국과학기술기획평가원, 2019). 인공지능AI 분야는 가장 앞서있는 미국(100%)을 기준으로 삼았을 때 유럽연합EU 93.9%, 일본 85.5% 한국은 65.1%에 불과했다. 사물인터넷IoT 분야는 가장 앞선 유럽(100%)의 57.4%로, 중국(54.6%)과 비슷한 것으로 드러났다. 빅데이터·클라우드 분야는 미국(100%)을 기준으로 유럽은 85.1%, 일본은 69.5%, 한국은 60.2%로 중국(54.8%)보다는 다소 앞선 수준이다. 특히 3D 프린팅 관련 경쟁력은 미국의 33.7% 수준으로 41.1% 수준인 중국보다 경쟁력이 약한 것으로 분석되었다(특허청, 2018).

나노 분야는 최고 기술보유국(미국 100%) 대비 일본 98%, 유럽연합EU 91.7%, 한국 78.3%, 중국 76.2%의 기술수준이며, 한국은 미국과 비교하여 3년의 기술 격차가 있는 것으로 분석되었다(한국과학기술기획평가원, 2019)

한국은 삼성바이오로직스와 셀트리온의 바이오시밀러 사업, 바이오니아, 마크로젠 등의 유전체 분석 사업, 한미약품, 휴온스 등의 합성생물학 기반의 의약품 사업을 필두로 유전자가위와 합성생물학 연구가 이뤄지고 있으나 가시적 성과는 합성생물학과는 어느 정도 거리가 있는 바이오시밀러 사업과 마크로젠의 아시아인들을 대상으로 하는 유전자 시퀀싱 분야 정도에 불과 하다. 또한 과학기술정보통신부와 산업통상자원부에서 대학기관과 기업들을 대상으로 공동 연구를 진행하고 있으며 미국이나 유럽의 영국이나 독일과 세부 기술력은 별 차이가 없으나 빅데이터 및 응용 기술력은 미국에 비해 4-5년 정도의 격차가 있는 것으로 평가된다. 특허 및 의약품 관련 임상시험 건수에서도 한국의 위치는 아직까지 미미한 상황이다.

### 합성생물학과 생물다양성 그리고 우리의 미래

기술의 발전이 공해와 에너지의 효율적 사용으로 지구 환경에 우리 인류가 생물다양성의 감소나 기후변화에 막대한 영향을 끼치기 시작한 것은 19세기 초 산업혁명으로부터 시작되었다고 보면 불과 200년 사이에 일어난 일이라고 할 수 있다. 그리고 세계 각국의 경제발전과 개도국과

선진국의 입장차이로 인하여 기후변화를 막기 위한 이산화탄소배출의 감소나 생물다양성을 위한 환경보호는 더욱더 힘들어지고 있다. ICT와 결합된 생물학으로 발전되는 합성생물학은 생물다양성협약 및 나고야 의정서 등의 기존 생물다양성 보전 전략을 통하여 지속적으로 전 지구상의 생물다양성을 보전하기에는 한계를 가지고 있어, 빠른 합성생물학의 진화에 따른 새로운 인식의 변화이 반영된 국내외 법적체계의 구축 및 지속가능한 생물산업의 발전 체계가 구축되어야 한다. 이와 더불어 합성생물학이 가지고 있는 기술적인 측면에서 합성생물학은 생물다양성 보전에 대한 궁극적인 한 가지 해결 방법이 될 수도 있어 생물다양성 보전에 적용할 수 있는 방법을 모색하여야 한다.

현재 인류에게 식량 및 자원 제공을 위하여 농업은 대량의 토지에 단일 품목을 재배하는 형태로 가축의 경우에는 공장식 사육이 진행되고 있다. 이는 생태계 및 환경 파괴로 이어지고 있다. 생활환경의 개선이 이루어진 인류는 그 어느 때보다 많은 육류와 곡류를 소비한다. 학자에 따라 계산이 다르지만, 현재 인류의 가축사육과 대량 곡물 재배에서 발생하는 이산화탄소는 전체 배출량의 30% 정도로 추정되며, 곡류의 대량재배로 인해 파괴되는 열대우림과 숲들은 많은 동식물의 멸종을 가져온다.

전혀 다른 분야인 것처럼 보이지만 IT 기술로 무장한 합성생물학은 이러한 농축산 방식에 혁명을 가져올 수 있다. 합성생물학을 적용한 대표적인 예가 인조고기를 생산하는 배양육 산업이다. 미국의 실리콘 벨리와 영국에서 배양육 산업은 아직 기존 방식의 축산방법과 비교하여 비용도 많이 들고 맛도 100% 같지는 않지만 수많은 투자자의 관심을 받고 있으며

지구 환경을 보호하는 획기적인 방안으로 보고 있다. 현재 많은 전문가는 2050년 배양육 산업이 현재 가축 수요량의 80%를 대체함으로써 전 지구적으로 10% 이상의 이산화탄소 감소라는 긍정적인 기대를 하고 있다. 또한, 여러 연구기관과 업체들이 합성생물학을 이용하여 종의 다양성을 위한 연구를 진행 중이며, 유전자 가위 기술을 통하여 일부 국가에서는 특정 병들을 방지하는 인간 배아 연구를 진행 중이다.

개별 국가는 자국 내에서 환경에 대한 피해가 발생하기 전에 미리 환경 보호를 위한 조치를 취하여야 하는 '사전예방의 원칙'에 따라 환경에 대한 피해를 방지, 감소, 제한 또는 통제하기 위하여 필요한 조치를 취할 의무가 있다. 합성생물학을 통해 얻어진 생물체 또는 파생물이 고의적 또는 비고의적으로 환경에 방출될 경우 바이오 안전성에 대한 우려를 불러일으킬 수 있고, 상황에 따라서는 생물다양성 보전에 미치는 영향 또는 합성 DNA의 전이를 통해 인간, 동물, 식물의 생명이나 건강에 위해를 가할 수 있다. 이러한 합성생물학 기술에 대한 직·간접적 위험과 관련하여 실제적으로 적용될 수 있는 규정은 '사전예방의 원칙'과 '위해성 평가와 관리'에 관한 규정이다. 위해성의 평가와 관리에는 과학적 증거가 필요하나, 짧은 역사를 가진 합성생물학은 과학적으로 검증되지 않은 잠재적 위해와 합성생물학 기술로 탄생한 생명체가 고의적 또는 비고의적으로 방출된 경우에 발생 가능한 위해(예, 생태계에 미치는 영향, 유전자 흐름에 미치는 영향, 그리고 예측 불가능한 형질의 출현 등)와 관련된 증거 자료가 부족하여 현재의 법률로 규제하기에는 한계가 있다.

합성생물학의 기술발전을 통한 지속가능한 생명산업 발전을 위하여 합

성생물학 기술 개발과 관련된 유전자원 정보의 축적 및 분석과 ICT 기술 개발에 적극적인 연구 투자가 필요하다. 또한 국내외 다양한 생물자원을 발굴하고 유전정보와 특성을 데이터베이스화하여 전 세계 연구 공동체가 공유할 수 있는 기반을 구축해야 한다. 마지막으로, 합성생물학에 이용되는 유전자원의 이용과 정보에 관한 출처에 대한 투명성 확보 방안을 마련하여야 한다. 이러한 투명성은 하나의 기업이나 연구자의 노력으로 완성되는 것이 아니라, 직접 또는 간접적으로 제공되는 지식 창출에 대한 기여도를 평가하고 인정하는 기업 문화를 확립함으로써 어느정도 가능할 것으로 생각된다. 이러한 노력에 따른 투명성의 확보는 바이오안전과 관련하여 인류가 가진 불안감을 해소할 수 있을 뿐만 아니라 지속가능한 생명산업으로 발전할 수 있을 것이다.

넓은 의미에서 합성생물학의 기술들은 기존 생물학의 일부분으로 1950년대부터 시작되었고 2000년대 들어 IT 기술과 유전자기공 기술의 양대 혁신을 통해 빠른 성장을 보이고 있다. 합성생물학의 발전을 통해 우려되는 우리가 바이오 보안과 같은 몇 가지 문제에 대한 적절한 규제와 함께 지속해서 발전시킨다면, 생물다양성의 보호 및 인류에게 이로운 기술을 가져다 줄 수 있을 것으로 예상된다. 불행히도 우리 인류가 지구 환경 변화를 막지 못하여 공해와 뜨거워진 지구에 살게 된다고 하더라도 합성생물학의 기술을 혁신적으로 발전시킨다면 공해에 강하고 뜨거운 지구에서도 살 수 있는 인간으로 개조할 수도 있을 것으로 기대하고 있다.

지난 200년간 기술의 발전은 우리에게 지구온난화 및 급격한 동식물의 멸종을 가져왔지만, 이를 극복하기 위해서는 기술의 발전이 필요하다는

아이러니가 있다. 그러나 우리 인류는 최악의 상황까지 가기 전에 스스로 긍정적인 해답을 찾을 것이라고 확신한다.

## 국제법으로 살펴본 생물다양성과 합성생물학

### 1. 국제 생물다양성협약에 따른 생물다양성 보전 관련 규정

생물다양성협약 상 합성생물학에 관한 직접적인 규정은 찾아볼 수 없으나 오늘날 급속도로 발전하고 있는 합성생물학 기술로 인해 생물다양성에 미칠 부정적 또는 잠재적 영향에 대한 문제는 지속적으로 제기되고 있으며 이에 따른 국내외 법적규제의 필요성이 제기된다. 합성생물학과 관련하여 규제의 필요성 제기와 더불어 합성생물학은 오늘날 많은 국가들이 경제성장 동력으로 삼으며 이를 육성하기 위한 정책 역시 시행하고 있다. 기존의 생물산업과 비교하여 ICT와 결합된 합성생물학의 발전에 따른 새로운 생명산업은 나고야 의정서에서 규정하고 있는 유전자원에 의 접근으로 발생하는 이익 공유의 적용범위와 관련된 문제가 발생하여 합성생물학에 이용되는 유전자원의 이용 및 전통지식에 따른 경제적 이익 공유와 관련하여서는 국가간 입장차를 보이고 있다.

생물다양성협약 상 합성생물학에 관한 직접적인 규정은 찾아볼 수 없으나 오늘날 급속도로 발전하고 있는 합성생물학 기술로 인해 생물다양성에 미칠 부정적 또는 잠재적 영향에 대한 문제는 지속적으로 제기되고

있으며 이에 따른 국내외 법적규제의 필요성이 제기된다. 합성생물학과 관련하여 규제의 필요성 제기와 더불어 합성생물학은 오늘날 많은 국가들이 경제성장 동력으로 삼으며 이를 육성하기 위한 정책 역시 시행하고 있다. 기존의 생물산업과 비교하여 ICT와 결합된 합성생물학의 발전에 따른 새로운 생명산업은 나고야 의정서 에서 규정하고 있는 유전자원에 의 접근으로 발생하는 이익 공유의 적용범위와 관련된 문제가 발생하여 합성생물학에 이용되는 유전자원의 이용 및 전통지식에 따른 경제적 이익 공유와 관련하여서는 국가간 입장차를 보이고 있다.

#### 생물다양성협약에 따른 국제 환경 문제의 특성

생물다양성협약은 1992년 유엔환경개발회의를 통해 기후변화협약 [Framework Convention on Climate Change](#)과 함께 채택되었다. 국제적으로 발생하고 있는 환경오염, 환경 훼손, 파괴, 생태계 파괴 등 영구적인 환경파괴를 방지하고자 국제적 환경의 사전적 보호를 위한 구체적 대책 마련이 시급해 지면서 국제환경분야에서 국제법규범이 채택된 것이다.

생물다양성협약은 국제적 규범으로서 일반적인 내용만을 규정하고 있는 이유는 국제 환경문제와 분야별 특성에 따른 공통점이 있다. 생물다양성이 감소, 기후변화와 같은 문제들의 경우 생물다양성의 감소, 그리고 기후변화로 인해 국제사회가 부담하게 될 문제에 대한 과학적 근거와 증거의 검토를 필요로 한다. 뿐만 아니라 환경 문제의 경우 현 시점에서 나타나지 않았거나 현대의 기술로는 증명될 수 없는 증거와 근거들이 과학적 · 경제적 · 사회적 발전에 따라 새로운 근거가 제시되거나 새롭게 증

명될 경우 이를 국제법규범에 반영할 수 있어야 한다. 이와 같은 이유에서 국제환경 분야에서 채택되는 국제조약의 경우, 다양한 분야의 지식 및 기술 발전에 따른 열린 가능성을 두어 채택되고 있다(Nele Matz-Lük, 2009). 생물다양성협약은 다분야에 걸친 변화를 반영하여 당사국들의 국내적 이행을 돕거나 생물다양성에 영향을 미치는 새로운 이슈에 대한 규제의 당위성을 제시하여 새로운 국제법규범을 채택할 수 있는 구조적 체계를 갖추고 있다. 생물다양성이 지속적으로 감소하고 있는 현상은 한정된 기간 내에 일어난 일시적인 현상이 아닌 국제사회의 전반적인 변화에 따라 지속적으로 일어나고 있는 현상이다. 이에 생물다양성협약은 이와 같은 생물다양성의 보전이라는 궁극적인 목적에 합의하고 생물다양성의 보전 및 그 구성요소의 지속가능한 이용을 위한 대응방안을 마련하는 데 있어 지속적인 후속조치를 마련하여 오고 있다.

#### 생물다양성협약이 갖는 특성

생물다양성협약상 분명한 목적을 규정하고 있음에도 불구하고 이와 관련한 구체적이고 분명한 절차, 형식, 방법 등에 대해서는 규정하고 있지 않아 일반적인 국제조약에 비해 법적 명확성과 구체성이 다소 떨어진다는 평가를 받기도 한다. 국제환경 분야에서 채택된 생물다양성협약의 이와 같은 특성은 몇 가지 이유가 있다.

생물다양성협약이 설정하고 있는 세 가지 공통의 목적이 몇몇 국가들만의 노력만으로는 달성될 수 없는 만큼 최대한 많은 국가들의 참여를 필요로 한다. 오늘날 생물다양성의 보전이 인류의 공통적인 관심사임을 확

인한 바 있으며, 이를 위한 국제조약의 채택에 있어서도 많은 국가들의 관심을 필요로 한다. 그러나 국제법규범의 채택에 있어 엄격한 기준이 포함될 경우 많은 국가들의 참여를 이끌어 내기 힘들다. 각 국가들의 여건, 상황, 능력 등이 상이하고 입법 및 경제적·사회적 구조와 체계가 다른 만큼 국제조약의 국내적 이행에 있어 각 국가들의 이와 같은 다양한 조건이 반영될 수 없는 국제조약은 외면받을 수밖에 없다(김석현, 1997).

특히 생물다양성협약의 경우 국제환경 분야에 포함된 국제조약으로 환경문제의 특성상 환경오염, 훼손, 파괴 등과 같은 문제가 발생 지역 또는 특정 국가에만 머무르지 않고 국경을 접하고 있는 국가와 지역들로 확산되는 경향이 나타난다. 지속적인 생물다양성의 감소 역시 가까운 미래 결국 국제사회가 부담해야 할 중대한 문제라는 점에서 몇몇 국가들의 자본, 기술, 정보력에만 의존하여 대응방안을 마련하는 데에는 한계가 있을 수밖에 없다. 따라서 생물다양성을 보전하기 위한 국제법규범의 채택하는데 있어 각 국가들의 국내적 이행에 국내적 상황과 여건, 구조적 체계 등을 반영할 수 있도록 일반적인 의무와 내용만을 협약상 규정하고 있다.

이와 같은 생물다양성협약의 조약상 특성은 생물다양성의 감소로 인해 국제사회가 겪게 될 생물안보에 대한 위기의식에 대한 대응 노력이 보편적인 인식으로 자리잡게 된 오늘날 생물다양성협약이 유래없이 많은 국가들의 참여로 현재까지도 지속적으로 이행되고 있는 국제조약이 될 수 있는 데 큰 기여를 했다.

### 생물다양성협약에 관한 의정서

생물다양성협약은 생명공학에 기인한 변형된 생물체의 안전성을 확보하여 생물다양성의 보전과 지속가능한 이용에 부정적인 영향을 최소화하며 유전자원에의 접근에 있어 각 당사국의 국내입법에 따라 유전자원의 이용으로 발생하는 이익을 공정하고 공평하게 공유하도록 규정하고 있다.

생물다양성협약 제19조는 생물다양성의 보전과 지속가능한 이용에 부정적이고 잠재적인 효과를 미칠 수 있는 생명공학에 기인한 변형된 생물체의 안전한 이전·취급 및 사용에 있어 안전성을 확보하도록 규정하고 있다. 또한 생물다양성협약 제15조는 유전자원의 국가의 생물 주권을 인정하며 유전자원의 접근에 있어 국내법에 따르도록 규정하며 유전자원의 상업적 및 그 밖의 이용으로 발생하는 이익을 공정하고 공평하게 공유하도록 규정하고 있다. 생물다양성협약에 근거하여 채택된 나고야 의정서의 경우 협약의 특정 내용 또는 규정을 구체화하고 있어 협약의 이행에 구체적인 법적 근거가 된다. 2000년 바이오안전성에 관한 카르타헤나 의정서가 채택되었으며, 2010년에는 유전자원에 대한 접근 및 그 이용으로부터 발생하는 이익의 공정하고 공평한 공유에 관한 의정서가 채택된 바 있다.

### 나고야 의정서상 이익 공유 - ABS

2010년 채택된 유전자원의 이용으로부터 발생하는 이익의 공정하고

공평한 공유에 관한 나고야 의정서는 유전자원의 접근으로부터 발생되는 이익을 공정하고 공평하게 공유하도록 절차적 내용을 규정하고 있다. 유전자원의 이용에 관한 이익공유 문제는 생물다양성협약이 규정하고 있는 주요 목표이기도 한 바, 나고야 의정서의 채택은 유전자원의 경제적 가치에 주목하고 유전자원의 이용으로 창출되는 경제적 가치가 생물다양성의 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용을 위해 사용될 수 있도록 절차를 규정하고 있다는 데 의의가 있다.

나고야 의정서가 규정하고 유전자원의 이용에서 발생하는 이익의 공정하고 공평한 공유는 Access to genetic resource and Benefit Sharing, ABS로 부른다. 먼저 이용하고자 하는 유전자원이 ABS의 적용 대상인가를 확인하고 국내법 또는 절차적 요건 등에 따라 사전통보승인을 취득하고 이익공유와 관련한 상호합의 조건을 체결한다. 한국은 유전자원의 접근·이용 및 이익 공유에 관한 법률을 제정하여 나고야 의정서가 규정하고 있는 ABS 관련 절차를 국내적 여건에 부합하도록 규정하고 있다.

#### 카르타헤나 의정서상 생물안전성

2000년 채택된 카르타헤나 의정서는 특히 현대 생명공학의 발전으로 유전자변형생물체가 생물다양성에 미칠 부정적 영향뿐만 아닌 잠재적 영향에까지 주목하고 있다. 이에 카르타헤나 의정서는 사전주의적 접근 방식 Precautionary Approach에 따라 현대 생명공학 기술로부터 나온 유전자변형 생물체의 안전한 이동, 취급 및 이용에 있어 적절한 보호수준을 보장하도록 하고 있으며 사전주의적 접근방식을 생물안전성을 확보하는 데

있어 중요한 원칙으로 적용하고 있다.

## 2. 생물다양성협약 및 의정서상 합성생물학의 적용 여부

### 생물다양성협약 관련 용어의 법적 정의

생물다양성협약과 카르타헤나 의정서, 나고야 의정서는 조문상 목적에 부합하도록 용어를 정의하고 있다. 그중에서 합성생물학과 관련하여 살펴보아야 할 협약 및 의정서상 용어는 “생물자원”, “유전자원”, “유전물질”, “생명공학”, “생물체”, “유전자변형생물체”, “현대 생명공학기술”, “생명공학기술”, “파생물”, “유전자원의 이용” 등이 있다. 이들 용어는 조문상 규정된 법적 정의로 합성생물학의 적용 가능성 검토에 있어 특히 생물다양성협약이 규정하고 있는 “유전물질”, “유전자원”, “생명공학” 등의 용어의 정의를 살펴볼 필요가 있다.

생물다양성협약상 “유전물질”이라 함은 “유전의 기능적 단위를 포함하는 식물, 동물, 미생물 또는 그 밖의 기원 물질”을 말하며, “유전자원”이라 함은 “실질적 또는 잠재적 가치를 가진 유전물질”을 말한다. “생명공학”이라 함은 “특정 용도를 위하여 제품이나 제조공정을 개발하거나 변형시키기 위하여 생물계/생물체 또는 그 파생물을 이용하는 기술적 응용”을 말하는 것으로 협약상 생명공학의 정의는 나고야 의정서가 “생명공학기술”의 범위 안에 포함된다.

나고야 의정서상 “파생물”이라 함은 유전의 기능적 단위를 포함하지 아니하더라도 생물자원 또는 유전자원의 유전자 발현 또는 대사작용으로

부터 자연적으로 생성된 생화학적 합성물을 말하며, “유전자원의 이용”이라 함은 생명공학기술의 적용 등의 방법으로, 유전자원의 유전적 그리고/또는 생화학적 구성에 관한 연구·개발을 수행하는 것이다. 카르타헤나 의정서상 “유전자변형생물체”라 함은 현대 생명공학기술을 이용하여 얻어진 새롭게 조합된 유전물질을 포함하는 모든 생물체를 말하며, “생물체”라 함은 유전물질을 전달하거나 복제할 수 있는 모든 생물학적 존재를 말한다.

#### 생물다양성협약에 관한 의정서의 적용범위

합성생물학은 생명체의 유전정보를 기반으로 DNA를 해독하고 설계, 재설계하여 새로운 생물학적 시스템을 생산해내는 학문이다. 당사국총회가 채택한 합성생물학의 정의에 따르면 “합성생물학은 유전물질, 생물체, 생물체계에 대한 이해, 설계, 재설계, 제조 그리고/또는 변형을 촉진하고 가속화하는 과학, 기술, 공학을 결합시킨 현대 생물공학의 새로운 기술이자 발전”으로 정의하고 있다(Decision XIII/17).

합성생물학에는 기본적으로 생명체를 구성하는 유전적 기능을 포함한 유전물질을 사용하며 의도에 따라 효율성을 더한 생물학적 시스템 고안이 가능하다. 따라서 생물다양성협약상 “유전의 기능적 단위를 포함하는 식물·동물·미생물 또는 그 밖의 기원의 물질”인 유전물질과 유전자원, 생물자원 등이 합성생물학에 이용될 경우 합성생물학은 생물다양성협약의 적용범위 내 포함되는 것으로 볼 수 있다(환경부, 2016). 다만, 최근 합성생물학 관련 기술의 급속적인 발전에 따라 개별 사안에 따른 적용범위 검

토가 필요하다.

나고야 의정서의 경우 합성생물학의 적용에 있어 국가간 의견차가 크다. 특히, “파생물”, “유전자원의 이용”에 있어 합성생물학의 적용에 대한 국가간 팽팽한 대립 양상을 보이고 있다. 의정서의 국내적 이행에 있어 각 국가들의 국내법률에 따라 적용범위에 대한 입장차가 반영되어 있어 당사국 총회를 통해 합성생물학의 나고야 의정서상 적용범위에 대한 국제적 기준 제시가 필요해 보인다. 카르타헤나 의정서는 현대 생명공학기술을 유전자재조합 기술, 핵산을 세포 등에 직접 주입하는 기술 등으로 정의하며 현대 생명공학기술에 의해 생물학적 존재인 유전자변형생물체를 의정서의 적용범위 내 포함시키고 있다.

합성생물학은 현대 생명공학기술의 범위 내 포함되며 합성생물학에 기인하여 새롭게 조합된 유전물질을 포함한 모든 생물체 등은 카르타헤나 의정서에 포함된다고 볼 수 있다. 다만, 카르타헤나 의정서가 LMO **Living Modified Organism** 을 정의하고 있어 GMO는 포함되지 않는다.

### 3. 생물다양성협약 및 의정서상 합성생물학 관련 쟁점

생물다양성협약과 카르타헤나 의정서 내 합성생물학 적용과 관련하여서는 대체적으로 큰 이견차는 없어 보인다. 생물다양성협약과 카르타헤나 의정서가 생물안전성 및 생물안정성에 미칠 부정적 또는 잠재적 영향에 대한 대응방안을 필요로 한다는 점, 특히 카르타헤나 의정서의 경우



유전자변형생물체가 인체 건강에 미칠 위해까지 고려하도록 하고 있다는 점에서 합성생물학의 규제적 관점에 대한 당위성을 확보하는 데에도 큰 무리는 없어 보인다. 생물다양성의 보전이라는 관점에서 합성생물학으로 제기될 수 있는 문제는 국제사회 공통의 이익을 보호하기 위해 다루어져야 한다는 인식이 자리잡고 있는 것으로 보아야 할 것이다. 이와 달리 나고야 의정서 내 규정하고 있는 “생물자원 및 유전자원과 전통지식 이용과 관련된 공평한 이익의 공유”와 관련된 규정은, 빠르게 진화하고 있는 합성생물학 분야를 구체적으로 포함하기에는 한계를 가지고 있다.

#### 나고야 의정서의 ABS 관련 쟁점

나고야 의정서의 경우 유전자원의 접근, 이용 등으로 경제적 가치 창출이 가능하여 적용범위를 결정하는 데 있어 국가들간 입장차가 나타난다. 더욱이 나고야 의정서가 “파생물”, “전통지식” 등에의 접근에 대한 이익 공유도 규정하고 있어 이에 대한 국가들간, 특히 선진국과 개발도상국간 입장차가 크다. 특히 합성생물학의 발전을 선진국이 주도하고 있고 자본력 의존도가 크다 보니 산업계와의 이해관계 역시 고려되어야 한다는 점에서 합성생물학의 나고야 의정서상 적용범위에 대한 입장차를 좁히기 쉽지 않아 보인다.

한국은 “유전자원의 접근·이용 및 이익 공유에 관한 법률”(유전자원법)을 제정한 바 있으며 법률상 “유전자원”의 범위와 함께 유전자원에 포함되지 않는 대상을 함께 규정하고 있다. 유전자원법이 규정하고 있는 이익 공유 대상에서 제외되는 유전자원으로는 인간의 유전자원 등, 남극지역

등 국가관할권이 미치지 아니하는 지역에 존재하는 유전자원 등이다. 유전자원법이 인간의 유전자원을 제외하고 있어 인간의 DNA를 기반으로 한 기술에 바탕을 두고 있는 합성생물학에 이용되는 유전자원의 적용범위를 다소 축소하고 있는 것으로 볼 수 있다. 유전자원법상 “이용”은 “유전자원 등을 활용하여 유전자원의 유전적·생화학적 구성성분에 관하여 생명공학기술 적용 등의 방법으로 연구·개발을 수행하는 것”으로 정의하고 있어 나고야 의정서가 정의하고 있는 이용의 범위를 그대로 따르고 있다.

일본 역시 나고야 의정서 적용범위에 포함되지 않는 대상에 핵산의 염기배열 등 유전자원에 관한 정보, 인공합성DNA, 유전의 기능적 단위를 갖지 않는 생화학적 화합물, 인간의 유전자원 등을 포함하고 있어 대체적으로 나고야 의정서상 이익공유 대상인 “파생물”을 범위를 포함시키지 않고 있다. 유럽은 일본과 마찬가지로 나고야 의정서상 적용대상인 “파생물”을 이익공유 대상에서 명확하고 제외하고 있는 반면, 중국의 경우 유전의 기능적 단위를 포함하는 식물·동물·미생물 또는 기타 출처로부터 얻은 실질적 또는 잠재적 가치를 지닌 모든 재료·파생물 및 그로부터 생산된 정보자료와 함께 모든 전통지식을 포함하고 있다.

유럽, 일본이 비약적인 합성생물학 기술의 발전에 따른 나고야 의정서상 이익공유 범위를 축소하고자 하는 반면 중국의 경우 나고야 의정서의 적용범위를 광범위하게 포함하고자 하는 경향이 나타나고 있다. 나고야 의정서의 적용범위를 축소하고자 하는 국가들의 경우 합성생물학에 이용되는 유전자원에의 접근 시 경제적 비용을 덜 지불할 수 있겠지만 개발

도상국, 특히 풍부한 유전자원을 가진 국가들의 경우 나고야 의정서의 적용범위를 광범위하게 규정하여 막대한 경제적 창출에 기여하고자 한다. 반면 합성생물학이 자본력에 의존하여 선진국에 의해 주도되고 있다는 점은 선진국에게는 경제적 부담이 될 수 있기 때문에 개발도상국이 유전자원 등의 범위를 광범위하게 규정하는 것에 부정적인 입장을 보인다.

### 카르타헤나 의정서상 사전주의적 접근방식 규정

#### 사전주의적 접근방식

사전주의 원칙 **Precautionary principle**은 국제환경법상 예방의 원칙과 구분되는 개념으로 환경에 심각한 악영향을 미칠 가능성이 제기된다면 과학적 불확실성에도 불구하고 대응조치를 취하도록 규정하고 있다(정인섭, 2019). 다만 생물다양성협약과 카르타헤나 의정서가 사전주의 원칙을 직접적으로 언급하고 있지는 않으며, 이는 사전주의 원칙의 국제법 원칙상 지위에 대한 견해가 대립하고 있기 때문으로 보여진다(노명준, 2002).

생물다양성협약은 전문을 통해 생물다양성 보전을 위한 조치를 취하는 데 있어 과학적 확실성의 결여가 조치 지연의 구실이 되지 않도록 명시하고 있으며, 카르타헤나 의정서 제1조는 리우선언 제15원칙에 따라 생물안전성 확보에 사전주의적 접근방식에 따르도록 규정하고 있다. 따라서 생물다양성을 보전하고 구성요소의 지속가능한 이용에 대한 대응 조치를 취하는 데 있어서 근본적으로 합성생물학 기반의 생물산업은 사전주의적 접근방식이 적용되어야 할 것이다.

### 합성생물학이 생물다양성에 미치는 영향과 사전주의적 접근방식

합성생물학의 발전은 인류가 현재 겪고 있거나 앞으로 겪게 될 에너지, 환경, 식량, 보건 등의 문제에 일정한 대안을 제시하고 있다. 많은 국가들이 합성생물학을 지원하거나 육성하기 위한 법률 또는 정책을 시행하며 합성생물학은 산업화에도 어느 정도 성공을 거두었다. 우리나라 역시 생명공학육성기본계획 안에 합성생물학을 포함시켜 국가적 지원을 위한 근거를 마련하고 있다. 그러나 합성생물학이 생물다양성에 미칠 영향에 대한 국제적 논의의 흐름은 합성생물학에 대한 규제방안 역시 필요로 한다는 것이다.

이와 같은 논의는 생물다양성협약 당사국 총회를 통해서도 지속적으로 제기되고 있는 문제로 합성생물학으로 제기될 수 있는 생물안전성 문제에 있어 사전주의적 접근방식을 요구한다(Decision XIII/17, 2018). 합성생물학과 관련한 엄격한 규제가 요구되는 데에는 합성생물학에 기인한 생물체가 생물다양성에 미칠 영향, 예측할 수 없는 형질의 출현이 생물다양성에 미칠 영향 등 합성생물학의 부정적 또는 잠재적 영향에 대한 국제사회의 생물안전성에 대한 위기의식이 있다. 합성생물학 관련 규제적 관점에 대해서는 개별적 사안에 따라 당사국들의 큰 이견차를 보이지 않고 있다.

#### 4. 생물다양성협약상 주요 목적 달성을 위한 노력의 필요성

##### 국제적 수준의 대응방안 노력

합성생물학과 관련한 논의가 규제적 관점을 중심으로 이루어지며 합성생물학에 대한 엄격한 규제방안을 필요로 한다는 점만이 강조되고 있는 것은 아니다. 오늘날 기후변화는 인간의 삶에 영향을 주고 있으며 생태계 환경에도 영향을 주어 생물다양성 감소의 요인이 되고 있다. 기후변화와 생물다양성의 감소는 가까운 미래 인류의 삶에 변화를 줄 것으로 예상되며, 그중에서 식량안보, 보건안보, 에너지안보 등으로 제기될 수 있는 문제에 있어 합성생물학이 일정한 대안으로 제시되기도 한다. 많은 국가들이 합성생물학의 육성을 위한 지원을 아끼지 않으며 합성생물학으로 인한 경제적, 사회적 가치에 집중하고 있는 것이 현실이다.

그러나 국제환경 문제에 있어 선진국들의 경제성장에 대한 책임이 요구되고 있는 것과 마찬가지로 생물다양성의 보전이라는 문제에 있어서도 일부 국가들의 경제적 가치창출 위주의 성장만을 추구하는 것이 과연 바람직한 것인지에 대한 성찰을 필요로 한다. 이와 같은 맥락에서 합성생물학의 발전의 정도에 비추어 합성생물학이 생물다양성 및 구성요소의 지속가능한 이용에 미칠 영향에 관한 논의는 국제사회 공통의 이익보호라는 생물다양성협약의 궁극적인 목적을 달성하는 데 있어 중요한 문제이다.

생물다양성협약과 카르타헤나 의정서, 나고야 의정서는 생물안전성을 확보하여 생물다양성을 보전하는 문제를 포함하여 생물안전성에 미

칠 영향에 있어 당사국들의 일반적인 조치에 관해 규정하고 있으며, 유전자원으로 발생하는 이익을 공정하고 공평하게 공유하여 생물다양성 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용을 위한 조치를 취할 수 있도록 한다. 생물다양성협약 및 의정서의 궁극적인 목적을 달성하는 데 있어 합성생물학을 제기될 수 있는 문제는 발전에 비추어 지속적인 논의를 필요로 한다. 생물다양성협약이 생명공학의 발전에 따른 열린 가능성을 두어 채택된 만큼 합성생물학이 생물안전성에 미칠 영향에 대한 대응방안을 마련하는 데 있어 생물다양성협약은 대표적인 국제법규범이 될 수 있다.

현재 생물다양성협약 당사국 총회는 합성생물학이 생물다양성에 미칠 부정적 영향과 관련한 논의와 더불어 합성생물학이 개별 국가의 사회·경제적 상황에 미칠 영향과 그로 인해 생물다양성이 보전되고 지속가능한 이용에 대한 구상 역시 함께 논의하고 있다. 합성생물학이 오늘날 산업화에 성공하며 합성생물학에 이용되는 유전자원의 이용에 대한 비용 부담을 줄이고자 하는 국가와 기업들의 이해관계가 국제사회 공통 이익을 달성하기 위한 국제조약의 이행에 영향을 주고 있다.

합성생물학이 사적인 영역에서도 자유롭게 이용할 수 있게 되면서 기술의 발전에 따라 부정적 의도·목적에 의한 합성생물학 기술의 이용이 생물다양성의 보전이라는 공통의 이익에 미칠 영향에 대한 우려 역시 제기되고 있다. 생물다양성은 인류의 공동 자산이라는 인식 하에 생물다양성협약이 채택되었으며 생물다양성 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용, 그리고 유전자원으로부터 발생하는 이익의 공유라는 문제는 많은 국가들의 경제, 사회, 환경, 문화 등 복합적인 요소에 영향을 주고 있다. 합성

생물학의 발전 역시 이와 같은 맥락에서 다양한 문제들이 복합적으로 고려되어 이에 대한 대응방안이 마련되어야 할 것이다.

그렇기 때문에 합성생물학과 관련된 논의를 지속적으로 모니터링하여 이에 따른 국내적 조치가 이루어져야 하겠지만 상대적으로 합성생물학 기술력의 발전이 저조한 국가들의 경우 국제법규범이 제시가 국내적 여건 및 상황에 부합하도록 체계화하는 데 가이드라인이 될 수 있다. 더욱이 생물다양성의 감소와 합성생물학이 생물다양성에 미칠 부정적 또는 잠재적 영향의 문제가 국제사회 공공의 분야에서 일어나고 있는 만큼 몇몇 국가들의 대응 노력만으로는 성과를 보기 힘들다는 점을 상기시키며 최대한 많은 국가들의 노력이 필요하다는 점을 강조할 필요가 있다.

합성생물학은 발전의 시기가 그리 길지 않아 생물다양성에 미칠 영향에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않았으며 생물다양성협약의 채택에 있어서도 합성생물학과 관련한 이슈가 직접적인 다루어지지 않았다. 합성생물학은 21세기 들어 급격한 성장세를 보이기 시작한 분야로 합성생물학의 발전이 생물다양성의 보전에 미칠 영향에 대한 논의가 공적인 영역에서 이루어지기 시작한 것이 그리 오래되지 않은 것이다. 또한 일부 국가들의 경우 합성생물학의 산업화에 성공하며 합성생물학을 국가의 성장동력으로 삼고 있으며 합성생물학을 적극적으로 지원하며 육성에 치중하고 있어 규제적 관점이나 기술력으로부터 발생하는 이익 공유 등과 관련한 논의에 있어 소극적인 태도를 보이는 경우가 생겨나고 있다.

생물다양성협약이 생물다양성의 보전이라는 국제사회 공통의 이익을 보호하는 목적성을 가지고 채택된 국제조약이기는 하나 생명공학, 합성

생물학과 같은 기술의 발전은 국가들 간 차이를 보이고 있다는 점 역시 생물다양성협약상 합성생물학과 관련한 논의 전개에 있어 발전적 방향을 제시하지 못하고 있는 요인이 되고 있다. 생명공학을 비롯하여 합성생물학의 경우 기술력의 발전에 자본력을 필요로 하는 만큼 선진국 위주의 기술력 축적이 이루어지고 있으며, 합성생물학의 발전의 역사가 오래된 국가일수록 이와 관련한 육성 정책뿐만 아니라 규제를 필요로 할 경우 국내적 조치를 충분히 마련하고 있거나 마련을 위해 노력하고 있다.

그러나 비교적 합성생물학 기술력 발전이 더딘 국가들의 경우 합성생물학과 관련한 정책이 미비하여 합성생물학으로 제기될 수 있는 과학적, 윤리적, 사회적 검토가 광범위하게 이루어지지 못하였고, 합성생물학에 이용되는 유전자원의 이익공유, 합성생물학이 생물다양성에 미칠 영향에 대한 규제방안 마련을 위한 일관된 조치를 마련하지 못하는 경우가 많다. 이와 같은 합성생물학과 관련한 국가들의 대응조치의 수준 차이가 생물안전성에 미칠 영향을 방지하고자 생물다양성협약 당사국총회는 합성생물학과 관련한 논의를 지속적으로 이어나가고 있다. 무엇보다 생물다양성협약이 생물다양성의 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용, 유전자원으로부터 발생하는 이익의 공정하고 공평한 공유라는 국제사회 공통의 이익을 달성하고자 하며 관련 모든 국가들의 관련 기술력에의 적절한 접근이 가능하도록 국가적 여건의 차이를 인정하고 있는 만큼 당사국총회를 통해 국제적 수준의 기준 제시가 필요하다.

### 국가적 대응 전략의 필요성

생물다양성의 보전 및 구성요소의 지속가능한 이용을 위한 국제사회의 국제적 기준 제시, 국제법규범 채택 노력이 이어진다면 당사국들의 국내적 이행을 위한 노력 역시 함께 이루어져야 할 것이다. 합성생물학과 관련한 법률을 제정한 국가는 많지 않으며, 한국 역시 생명공학에 기인한 유전자변형생물체를 규제하는 법률상 합성생물학을 적용하거나 일부 생명공학관련 법률을 합성생물학의 적용이 가능하도록 개정하고 있다. 그러나 합성생물학관련 법률 제·개정 논의의 흐름상 합성생물학으로 제기될 수 있는 생물안전성 문제가 국내적 상황에 부합하는 체계화 노력이 생겨나고 있다는 점은 분명해 보인다.

한국의 경우 생물다양성협약을 비롯하여 카르타헤나 의정서와 나고야 의정서의 당사국으로써 국제조약의 이행을 위한 국내법을 제정한 바 있다. 생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률, 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률, 유전자원의 접근·이용 및 이익 공유에 관한 법률이 바로 그것이다.

### 국내 합성생물학 관련 법률

한국은 생물다양성협약 및 의정서의 국내적 이행에 있어 대체적으로 발빠르게 법률을 제정하여 당사국으로서 생물다양성과 합성생물학관련 국제적 논의의 흐름에 부응할 수 있는 발판을 마련하였다. 국제조약의 국내적 이행을 위해 제정된 법률인 만큼 생물다양성협약 및 의정서가 달성하고자 하는 궁극적인 목적을 그대로 반영하고 있어 국내외 생물다양성

의 보전 및 지속가능한 이용에 미칠 영향에 대한 대응방안을 마련하는 데 있어서는 법률적 근거가 될 수 있다. 다만, 생물다양성협약 및 의정서가 규정하고 있는 내용, 절차 등이 다소 구체성이 떨어진다는 점이 지적되고 있는 바, 국내법을 제정하는 데 있어서는 국내적 상황 및 여건 등을 반영하여 협약 및 의정서에 비해 보다 명확한 법적 기준이 제시되어야 한다.

다만 기존의 생물다양성 관련 국내 법률에 합성생물학을 직접적으로 적용하기보다는 법률상 적용범위외의 새로운 합성생물학 적용 가능성에 대한 구체적 검토가 필요하다. 더불어 제3차 생명공학육성기본계획에 합성생물학을 포함하고 있으나 합성생물학과 관련한 지원 또는 육성과 관련한 법률을 생명공학관련 법률의 범위 내 검토를 통해 적용해야 한다는 문제가 남아 있다. 합성생물학이 생물다양성에 미칠 영향에 대한 국제적 논의가 지속적으로 이어지고 있는 가운데 위에 언급된 법률상 적용범위에 대한 검토가 가능하다 하더라도 합성생물학을 직접적으로 규정하는 국내법은 부재한 상태이다.

그러나 1983년 “유전공학육성법”의 제정을 시작으로 1995년 “생명공학육성법”으로 개정되며 “생명공학”의 범위를 생물학적 시스템, 생체 또는 그들로부터 유래되는 물질을 연구·활용하는 학문을 포함하게 되었다. 합성생물의 발전적 상황에 비추어 합성생물학과 관련한 직접적인 법률이 부재하지만 생명공학의 발전에 따른 합성생물학 역시 새로운 분야로 자리잡게 된 만큼 생명공학육성법이 규정하고 있는 생명공학의 범위 내 합성생물학의 적용이 가능할 것이다. 생명공학관련 법률의 범위 내 합성생물학의 적용의 검토가 가능한 가운데 생명공학 지원, 육성을 위한 법

를 외에도 생명공학 규제관련 법률 내 합성생물학의 적용의 검토 역시 필요하다.

이와 더불어 한국의 경우 생명공학관련 대표적인 규제관련 법률로 “생명윤리 및 안전에 관한 법률”(생명윤리법)로 인간의 존엄과 가치를 침해하거나 인체에 유해를 끼치지 않도록 생명윤리와 안전을 확보를 규정하고 있다. 오늘날 합성생물학의 발전의 정도에 비추어 볼 때 합성생물학으로 제기될 수 있는 윤리적, 도덕적 문제를 광범위하게 생명윤리법의 범위에 적용할 수 있을 것이다. 그러나 합성생물학으로 제기될 수 있는 문제를 포괄적으로 다루는 데 있어 국내법이 부재하여 현재의 법률의 개정만으로 합성생물학의 발전적 상황에 부합하는 규제가 이루어질 수 없어 새로운 법률의 제정이 필요하다.

#### 합성생물학이 생물다양성에 미칠 영향의 최소화 노력

오늘날 합성생물학이 생물다양성에 미칠 부정적 또는 잠재적 영향에 대한 우려는 전세계 모든 국가들에게 주어진 과제이다. 전세계 거의 모든 국가들이 생물다양성협약의 당사국이고 생물다양성협약 당사국총회를 통해 합성생물학과 관련한 논의가 이루어지고 있다는 점이 이와 같은 우려를 뒷받침하고 있다.

합성생물학은 21세기 들어 급속히 발전하며 산업화에도 어느 정도의 성공을 거두었고 지속적인 성장세를 보이고 있을 뿐만 아니라 누구나 쉽게 접할 수 있는 학문으로 발전하여 우리의 실생활에 직간접적으로 관여되어 가고 있다. 그러나 합성생물학으로 제기될 수 있는 부정적 또는 잠

재적 영향력을 모두 파악하기에는 합성생물학의 발전 시기가 그리 길지 않고 대체적으로 자본력에 의한 기술적 발전이 일부 선진 국가들에 집중되어 있어 합성생물학과 관련한 논의가 이제까지 국제적 이슈화되지 못하였다.

그러나 합성생물학의 지속적인 발전으로 유전자를 변형하거나 합성한 생명체를 만들어내고, 심지어 간단한 유전자 조합만으로 새로운 생명체의 창조가 가능한 단계에까지 이르게 되면서 이들이 생태계를 교란하고 생물다양성에 부정적 영향을 미칠 수 있다는 생물안전성 문제가 제기되고 있다. 생물다양성협약 당사국총회 역시 이와 관련한 논의를 시작하기는 하였으나 아직 논의의 시기가 길지 않아 합성생물학과 관련한 논의는 본격적으로 이루어지지 않고 있다. 그럼에도 불구하고 합성생물학이 생물다양성에 미칠 부정적 또는 잠재적 영향에 대한 우려와 대응방안 마련을 위한 지속적인 논의가 필요하다. 더욱이 합성생물학이 공적인 분야에서 국가의 경제적, 과학적, 기술적, 사회적 발전에 기여할 것이라는 기대에도 불구하고 합성생물학이 공적인 영역뿐만 아닌 사적인 영역에서조차 쉽게 접근 가능한 길이 열리면서 개별 사안에 대한 규제의 필요성 역시 제기되고 있다. 특히 합성생물학 기술의 이용에 있어 의도·목적 등에 따라 생물안전성, 더 나아가 생물안보에 미칠 영향에 대한 우려가 지속적으로 제기되고 있는 상황에서 합성생물학이 생물다양성에 미칠 부정적 또는 잠재적 영향에 대한 규제적 논의는 지속되어야 한다.

합성생물학이 인류의 보다 나은 삶을 제공해 줄 수 있는 대안이 될 수 있음과 동시에 생물다양성이라는 인류 자산에 부정적 영향을 최소화하

는 국내외적 노력이 필요하다. 합성생물학의 발전적 추이를 지속적으로 모니터링하고 이에 대한 논의를 지속할 때, 합성생물학을 기반으로 한 생명산업이 인류의 삶을 향상시킬 수 있다.

## SWOT 분석을 통한 생물다양성과 합성생물학

세계지식재산권기구(World Intellectual Property Organization, WIPO)는 생명공학에 대해 21세기에 광범위한 분야에서 빠르게 발전할 것으로 기대되는 기술 분야이며, 생명공학이 제시한 약속이 너무나 커서, 현재의 '정보화 시대'는 차세대 '생물공학 시대'로 대체될 수도 있다고 하였다. 바로 정보화 시대의 생명공학이 첨단 컴퓨터 기술과 만나면서 합성생물학이 탄생되고 있다. 이렇게 탄생된 합성생물학의 적용 분야는 화학, 제약, 식품 산업뿐만 아니라 농업, 임업, 어업, 전자, 기계와 관련된 산업들을 포함한 많은 산업을 포함하고 있다. 또한 천연자원과 에너지의 활용, 유독성 폐기물 및 유출 정화, 의료, 법률 및 의료 정보학 등과 관련한 산업에도 적용될 수 있다. 따라서 합성생물학은 인류의 복지를 위해 그 중요성이 21세기에 걸쳐 확대될 것이라 전망되고 있다. 특히 생명공학 기술과 컴퓨터 기술이 융합되면서 급속도로 합성생물학의 영역이 확대됨과 동시에 생물다양성 보전을 위한 생물다양성협약(Convention of Biological Diversity, CBD)과 생물자원에 대한 접근과 이익공유(Access and Benefit-sharing)를 위한 나고야 의정서(Nagoya Protocol)의 편입과 관련하여 새로운 문제들이 제기되고 있다.

유엔환경프로그램(UN Environment)은 모든 분야에서 지속가능성을 유지하기 위하여 다양한 환경에 관한 활동을 추진하고 있다. 이 중에 다자간 환경협약으로 생물다양성협약(Convention of Biological Diversity, CBD)을 구축하였고 이 협약의 목표를 달성하기 위한 세부목표(아이치 타깃)를 정하여 추진하고 있는 상황이다. 이에 대한 글로벌(20개) 및 지역협약(26개) 이익 공유를 위한 나고야 의정서, 생물안전과 거래를 규정하는 카르타헤나 의정서, 멸종 위기종의 국제거래를 규제하는 CITES, UPOV, SPS, TBT 등을 맺고 목표를 달성하기 위한 이니셔티브로 생물무역(BioTrade)을 활성화하겠다는 전략이다.

유엔무역개발회의(UN Convention on Trade and Development, UNCTAD)는 1996년 출범한 이래 BioTrade Initiative로 생물다양성협약의 목표를 지원하기 위해 지속가능한 BioTrade를 홍보하고 있다. BioTrade는 환경적, 사회적, 경제적 지속가능성 기준에 따라 고유 생물다양성에서 파생된 상품 및 서비스의 수집, 생산, 변형과 상업화 활동을 하고 있다. 현재 유엔무역개발회의(UNCTAD)는 Global BioTrade Programme을 이행 중이며, 주요 이해 당사자들에게 생물다양성과 지속가능한 개발을 연결하여 무역 기회를 규모화하고 활용할 수 있는 능력개발을 위한 기회를 제공함으로써 유엔의 지속가능한 목표(Sustainable Development Goals, SDGs)의 구현과 생물다양성협약(Convention of Biological Diversity, CBD)의 아이치 타깃(Aichi Targets)을 달성하는 것을 목표로 하고 있다. BioTrade의 이해 관계자들은 생물자원과 전통지식을 자사 Bio 상품을 생산하는 자원으로 취급함과 동시에 기업의 기술력과 융합하여 경제적인 관점에서 수익 창출의 도구로 보고 있다. 그리고 여기에 소요되는

솔루션을 생명공학과 합성생물학 기술로 해결하려 하고 있다.

또한 합성생물학이 생물다양성협약, 접근 및 이익공유<sup>ABS</sup>, 지속가능한 목표에 영향을 미치고 있음을 밝히고 있다. 이러한 노력들이 우리나라 경제와 기업에게 어떻게 영향을 미치고 있는지를 파악하기 위하여 세계 CBD 가입국 중 OECD(2014)가 합성생물학 연구를 위해서 인프라 구축을 주도적으로 구축하고 있다고 지목한 미국, 영국, 중국을 우리의 경쟁 대상국으로 보고, 이들은 과연 어떤 정책을 준비하고 실행하고 있는지를 협동연구(생물/IT 분과, 법학/행정 분과) 결과를 반영하여 향후 우리 정부 정책에 대한 대안을 모색하기 위해 첫째, 내부와 외부 경쟁 대상국을 선정하여 국가별 정책 및 연구 환경을 도출하였다. 둘째, 앞의 조사결과를 토대로 마이클 포터 교수가 개발한 SWOT 분석을 하였다. 마지막으로 TOWS 전략 도출 틀을 이용하여 정책제안 결과를 도출하였다.

## 1. 합성생물학과 생물다양성 보전의 관계

Lionel Clarke <sup>Chairman, UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group</sup>은 2012년에 생물자원보전에 대한 합성생물학의 잠재적 역할에 대하여 연구하였는데, 이것에 따르면 생물다양성 보전을 위한 합성생물학은 ①멸종된 종 부활 및 복원, ②지속적이고 반복적인 자연재해 협박에 대처, ③파괴된(특히 오염이 심한) 생태계를 복구할 수 있는 역량 강화, ④인간의 생산 및 소비의 유해한 패턴에서 발생하는 문제해결(예: 온실가스 축적 및 인공 기후변화), ⑤외래종의 침입 조절을 담당함으로써 합성생물학은 우리 지구가 직

면하고 생물다양성보전의 주요 과제들을 해결할 수 있는 새로운 솔루션을 제공하고 기존의 산업 프로세스를 개선할 수 있는 잠재력을 가지고 있다고 하였다. 그리고 이를 통한 경제 성장과 일자리 창출도 이루어질 수 있다고 밝혔다.

## 2. 합성생물학이 생물다양성 보전에 미치는 영향 요인

### 생물학 관점에서 미치는 영향 요인

우리 인간 생활에 합성생물학을 적용할 수 있는 범위는 식품 생산, 신소재 및 제조, 폐기물 처리 및 정수, 생태 복원 및 보건 등 아주 넓다[영국 의회, 2013]. 그리고 합성생물학과 생물다양성 보전의 관계에 대한 문제는 2013년 4월 야생생물보존학회(Wildlife Conservation Society, 2013년)가 주최한 회의에서도 합성생물학은 시장과 인간의 소비 및 생물권 변화를 촉진하고, 거의 모든 인간 생활과 산업부문에 영향을 미칠 수 있으므로 당연히 생물다양성보존에도 영향을 미치게 될 것이라고 밝히고 있다. 합성생물학의 태생은 생물다양성에서 발견되는 유전자원과 전통지식에서 영태되는 것이 아니라 엔지니어링과 디자인이 만나서 새로운 컴퓨터생물 생태계에서 생물과 물질을 만들고 이는 다시 생물다양성 보전에 부족한 부분과 위기 대처 이용이라는 임무를 수행하는 선순환의 구조를 연출하게 됨으로써 합성생물학과 생물다양성 보전의 관계는 밀접하지만 생태계가 다르다.



### 합성생물학 기반기술에 대한 영향 요인

합성생물학은 생명과학에 공학적 설계 및 제작원리를 적용하는 것으로 생명과학의 흐름이 관측과 발견에서 새로운 창조로 이동하는 것을 의미한다. 합성생물학은 IT(정보), BT(생명공학), NT(나노) 등을 아우르는 과학과 공학의 융합기술이 합성생물학의 기반기술 간주된다[한국환경정책평가연구원 2014]. 합성생물학의 핵심기술로 다루고 있는 나노 바이오 기술 수준은 최상위국인 미국을 100으로 했을 때 우리나라는 평균 75.8%의 상대 기술력을 갖는 것으로 평가된다. 이는 일본(81.7%), 독일(75.8%)에 이어 3위에 해당하며, 영국(69.2%), 중국(67.5%), 프랑스(67.5%)보다 앞선 것이다[교육과학기술부 자료 www.nanonet.info].

생물/IT 분야의 연구결과를 바탕으로 합성생물학 기반기술에 대한 SWOT 분석 요인을 찾기 위해 첫째, 유전자 분석기술 둘째, 시스템 생물학 기술 셋째, 유전자 합성기술 넷째, 유전자 편집기술로 보고 국가별 기술 수준을 조사하였다.

### 법제적 관점에서 미치는 영향 요인

합성생물학은 제품을 생산 유통해 수익 창출이 목적인 상업적 성격을 가지고 있다. 따라서 미래에는 대부분의 생물무역 상품이 합성생물학으로 생산된 상품들이 될 것으로 본다. 이러한 시장 상황에서 CBD 및 ABS 법제는 또 다른 무역 규제의 요인으로 작용할 가능성이 크다. 현재의 생물무역 상황을 보면 CITES, UPOV, SPS 등이 자국민의 건강권 보존의 장점도 있지만 무역 원활화에 규제 요인으로 작용하는 경우도 있기 때문

에 이런 부분에서 합성생물학에 영향을 미칠 것으로 보인다. 나고야 의정서는 유전적 자원의 사용으로 발생하는 편익의 공정한 공유를 위한 틀을 제공하고 있지만, 그것이 모든 합성생물학에 적용될지는 명확하지 않다(Bagley & Rai, 2013).

예를 들어 나고야 의정서는 합성생물학의 기초로서 사용될 수 있는 디지털로 저장된 유전 정보를 다루지 않고 있기 때문이다. 이는 앞으로 참여 국가들이 더욱더 논의가 진행되어야 할 문제이기도 하다. 따라서 법학/행정 분야의 연구결과를 바탕으로 합성생물학의 법적 제도에 대한 SWOT 분석 요인을 찾기 위해 첫째, 합성생물학 육성 기본계획 둘째, 규제 감시에 대한 법규 셋째, 합성생물학에 관한 규칙과 메커니즘 넷째, 유전자원에 대한 빅데이터 구축 국가제도 등을 법적 제도로 보고 국가별로 조사하였다.

### 합성생물학이 생물무역에 미치는 영향 요인

합성생물학 비즈니스 스킬과 소프트 스킬 보고서 2016의 조사결과에 의하면 기업에서 합성생물학에 대한 상업적 인식이 얼마나 중요한지를 묻는 질문응답자 85%는 상업적 중요성이 증가하고 있다고 답했으며 그 다음으로는 "실질부터 고객에 이르기까지 가치사슬에 대한 올바른 이해"가 중요하다고 답하였다.

이미 많은 기업에서는 ABS를 넘어 합성생물학에 대한 이해와 가치사슬을 발굴하고 있을 정도로 한걸음 앞서가고 있음을 보여주는 중요한 조사결과로서 우리에게 시사하는 바가 크다. 우리가 준비되지 않았다고 해

서 상대국들이 기다려 주지 않는다는 사실을 인식해야 할 때임을 알려주고 있는 깊은 단서이기도 하며, 우리에게 직면하고 있는 현실이 되고 있다. 세계는 지금 생물무역 확대를 다양하게 준비하고 있다. 2-1에서 언급하였듯이 합성생물학은 생물다양성 보전을 위해 5가지 측면에서 잠재력을 가지고 있고 합성생물학으로 개발된 제품들이 생물무역을 통해서 창출되는 이익을 공유(ABS 제도)하는 체제로 진행될 것이라는 전제하에서 현재 국제적으로 진행되고 있는 생물무역을 위한 트렌드를 분석해 볼 필요가 있을 것이다.

1996년 유엔무역개발회의(UN Convention on Trade and Development, UNCTAD)는 생물다양성에서 파생된 상품과 서비스의 교역을 통해 각국이 생물다양성 보존과 경제발전을 조화시킬 수 있는 도구로서 생물무역(BioTrade)과 생물무역 이니셔티브(BioTrade Initiative)라는 용어를 만들었다. 그리고 지난 20년 동안 여러 나라의 기관과 기업들은 다양한 분야에 걸쳐 생물무역을 시행하는 데 관여해 왔다.

유엔무역개발회의(UN Convention on Trade and Development, UNCTAD)는 생물무역 이니셔티브를 통해 생물자원과 생태계에 대한 무역과 투자를 촉진하여 생물다양성협약의 세 가지 목표인 생물다양성의 보전, 구성 요소의 지속가능한 이용, 유전적 자원에서부터 발생하는 편익의 공정하고 공평한 공유를 통하여 생물자원 개발과 빈곤 완화를 더욱 촉진하고 있다. 또한, 생물무역은 다른 다자간환경협약(MEA)의 보전 및 지속가능한 개발목표 달성에 직접적으로 기여한다. 대표적인 협정 중 하나가 멸종위기에 처한 야생 동·식물 종들의 국제거래에 관한 협약인데, 유엔무역개발회의(UN Convention

on Trade and Development, UNCTAD)는 이 협약을 통해 멸종위기에 처한 종들의 합법적이고 지속가능하며 추적 가능한 무역을 촉진하기 위해 지원해오고 있다.

2015년 모든 유엔 회원국이 채택한 아젠다 2030과 지속가능한 목표(Sustainable Development Goals, SDGs)를 채택함에 따라 생물무역 이니셔티브는 첫째 육상 생태계의 지속가능한 이용, 보호와 복원을 촉진하고 산림을 지속가능하게 관리하여 토지의 사막화, 황폐화를 방지시켜서 생물다양성 손실을 방지하고, 둘째 지속가능한 개발을 위한 실행 수단 강화와 글로벌 파트너십 활성화하며, 셋째 지속가능한 소비와 생산 패턴 확보 등을 유지시킴으로써 거의 모든 유엔의 지속가능한 목표(Sustainable Development Goals, SDGs)의 구현에 기여할 것으로 예측하고 있다.

이러한 내용과 각국의 준비 상황들은 지난 20년 동안의 생물무역의 역사를 통해서 관련 파트너들과 어떤 측면에서 확장되어 왔는지 역사를 통해서 알 수가 있다. 따라서 경영/무역 분과의 연구결과를 바탕으로 합성 생물 무역 확대에 대한 SWOT 분석 요인을 찾기 위해 첫째, 산업의 거시적 상황 둘째, 합성생물학의 경쟁상황 셋째, 생물무역의 수출 마케팅 상황 넷째, 합성생물학 연구에 투자되는 재원 등을 경쟁력으로 보고 국가별로 조사하였다.

### 3. SWOT 분석을 위한 합성생물학에 대한 국가정책 및 연구환경 분석

#### SWOT 분석을 위한 내부환경 분석

2018년 Synthetic Biology 시장 보고서는 세계 합성생물학 시장규모는 약 120억 8천만 달러 - 133억 8천만 달러로 밝혔다. 그리고 2019-2025년 기간 동안의 연평균 성장률은 약 36%에서 38%로 증가할 것으로 예상하고 있다[Industry ARC].

우리나라도 생명공학백서(2017)에 따르면 바이오기술이 질병극복 등 인류의 복지와 일자리 창출, 새로운 성장동력 육성 등 경제성장을 동시에 달성하는 새로운 경제 패러다임인 바이오경제시대로 진입할 것으로 전망하고 있다. 바이오는 건강<sup>Red</sup>, 식량<sup>Green</sup>, 환경·에너지<sup>White</sup> 문제를 해결할 수 있는 대안으로 떠오르고 있다. 글로벌 바이오 시장은 2030년 4.4조 달러로 반도체, 자동차, 화학제품 등 3대 산업 합계 3.6조 달러 규모를 뛰어넘어 급성장할 것으로 예상하고 있다. 그러나 우리나라 기록 생물종은 45,295종으로 미국, 영국, 중국에 비하면 비교할 수 없을 정도로 생물다양성이 미약한 국가로서 합성생물학의 출현은 우리 바이오경제 발전을 추진하는 필수요소가 될 것으로 전망되며 우리나라의 내부환경을 조사한 결과가 아래와 같다.

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 한국의 정치적 법 제도적 상황</li> <li>- 생명윤리법에 따른 유전자 검사의 한계</li> <li>- 생명공학 육성 기본계획 시행중</li> <li>- 정부주도에서 지방으로 분산</li> <li>- 유전자원 빅데이터 구축을 위한 국가 제도 부재</li> <li>- 규제 감시에 관한 법규 부재</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 합성생물학 연구에 투자되는 자원</li> <li>- 국가예산 투여 부족</li> <li>- 연구프로젝트 2018년 기준 60건/년 정도 85건/년 확대</li> <li>- 연구개발 성과를 체계화하는 '국가 연구데이터 플랫폼' 구축</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 합성생물 산업의 거시적 상황</li> <li>- 정부 주도 사업으로 지난 2014년 시작한 '포스트 게놈 다부처 유전체 사업'은 농업, 해양, 보건, 과학연구 등으로 분산</li> <li>- 생물다양성 인지도 78%(2018)</li> <li>- 한국생물학 부품소재은행 설립</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 합성생물학 연구의 인적자원</li> <li>- 고학력 인적자원 보유('07-16) 석박사급 116,239명</li> <li>- 게놈 해독과 분석 인력</li> <li>- 전문 인식 교육 인력 부족</li> <li>- 전문 기술인력 부족</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 합성생물학 경쟁상황</li> <li>- OECD는 2030년 바이오경제 시대가 올 것으로 예측</li> <li>- 유리한 시장 연결 역량</li> <li>- 게놈 빅데이터 경쟁력 1만명 시작</li> <li>- 다부처 유전체 사업(농식품, 에너지, 자원) 추진</li> <li>- 바이오 산업생태계 기반 조성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 합성생물학 상품 생산기술</li> <li>- 게놈 생산기술 격차</li> <li>- 특화된 정보 인프라 확보 능력</li> <li>- DNA 시퀀싱 기술(게놈 정보 축적) 수준 확보</li> <li>- IT/AI 기술(생물 정보해석, 생물 기능디자인) 확보</li> <li>- 게놈 편집 기술(새로운 생물 기능 실현) 확보</li> <li>- 2017년 '울산 1만명 게놈 프로젝트' 시작</li> <li>- 10만 단위에서 최대 500만까지 해독과 분석 중인 주요 선진국과 격차가 큼</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 생물무역의 수출 마케팅</li> <li>- 세계 상위권의 무역국 국내 바이오의약품업의 수출산업화</li> <li>- 신뢰할 수 있는 국가 이미지</li> <li>- 자유무역을 통한 글로벌 서플라이 체인 운영 생물무역 기반 조성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 천연 생물자원 보유 상황</li> <li>- 기록 생물종 50,827종(2018)</li> <li>- 2023년까지 60,000종 목표</li> <li>- 해외 유전자원 또는 그 파생물을 이용</li> </ul>

## SWOT 분석을 위한 외부환경 분석

전 세계 CBD 가입국 중 OECD(2014)가 합성생물학 연구를 위해서 인프라 구축을 주도적으로 구축하고 있다고 지목한 미국, 영국, 중국을 우리의 경쟁 대상국으로 보고 이들은 어떤 정책을 준비하고 실행하고 있는지를 협동연구(생물/IT 분과, 법학/행정 분과) 결과를 반영하여 다음과 같이 내용을 정리하였다.

### 1) 미국의 합성생물학 국가정책 및 연구 환경

미국은 합성생물학 연구 및 상업화의 선도 국가다. 전략적 정부 투자를 통해 미국은 합성생물학 분야에 수많은 연구센터와 프로그램을 설립하여 생물 에너지, 생물 제조, 생물 의학에 이르기까지 기초적인 도구 개발 및 실제 응용 분야에서 상당한 발전을 이룰 수 있었다. 미국의 합성생물학 연구분야에 영향력을 가지고 있는 중요한 정부 부처들로는 NSF, DOE, 보건복지부(NIH 포함), 국방성(DARPA 포함), 농무부 **USDA**, 미 해군, 공군 및 미국 항공 우주국 **NASA**, 백악관 과학 기술 정책국 **OSTP** 등 점점 더 많은 기관에서 합성생물학에 대한 연구를 지원하고 있다(Nancy J. K., David J. W., Ellyn K., Aidan A., Robyn B., & Rachael S.,(2014)).

또한 미국은 생물다양성협약에 가입은 했지만 아직 비준을 하고 있지 않으면서 합성생물학의 상업화 연구를 추진하고 있는 미국에 관한 정책 연구가 필요한 시점이다. 합성생물학이 발전함에 따라 가능한 위험을 최소화하고 이익을 극대화할 수 있도록 돕는 것을 목적으로, 합성생물학의 진보에 관한 대중의 지식과 정책담론 증진을 목표로 2008년부터 2014년

사이 미국의 합성생물학 연구투자는 약 8억 2,000만 달러로 대대적인 투자를 하고 있다. 미국의 합성생물학 정책에 대한 조사 내용을 보면 아래와 같다.

<p>■ 미국의 정치적 법 제도적 상황</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 개인이 원하면 자신의 질병, 신체 특징 관련 유전정보를 쉽게 파악할 수 있음. 개인이 자신의 게놈을 완전 해독해 각종 다른 의료정보와 합쳐 건강 상태를 다양한 방식으로 관리하는 것이 가능하도록 법적 허용.</li> </ul>	<p>■ 합성생물학 연구에 투자되는 재원</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 약 2/3의 미국인은 합성 생물학 연구가 그 의미와 위험이 완전히 이해되지 않더라도 금지되지 않고 계속되어야 한다고 생각</li> </ul>
<p>■ 합성생물 산업의 거시적 상황</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미국 국가과학기술위원회 <b>NSTC</b> 산하 마이크로바이옴 <b>Microbiome</b>은 2018년 5월 범부처 실무그룹, 연방기관 각 연구 조정지원 전략계획('18~'22) 발표</li> <li>- 2019년 2분기 실업률은 전기 3.9% 대비 개선된 3.6%로 완전고용에 근접한 수준을 나타냈으며 취업자 수가 꾸준히 증가하고 임금이 상승하는 등 개선 추세가 지속되고 있다.</li> <li>- IMF에 따르면, 2019년 미국 경제는 여전히 높은 수준인 2.6%의 경제성장률을 이어갈 전망</li> </ul>	<p>■ 합성생물학 연구의 인적자원</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국가예산 2008-2014 8억 2천만 달러 지원</li> <li>- 연구프로젝트</li> <li>- 2014년 회계연도에는 연간 예산의 10%에 해당하는 1.1억 달러(약 1,251억원)를 합성생물학 연구에 투자. 미생물 개량 및 식물기반 센서, 유전자드라이브 <b>Gene Drive</b> 등에 투자</li> </ul>
<p>■ 합성생물학 경쟁상황</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 세계 1위</li> <li>- 유리한 시장 연결 역량 확보</li> <li>- 게놈 빅데이터 경쟁력 100만명 시작 (2015)</li> </ul>	<p>■ 합성생물학 상품 생산기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2015년 오바마 정부 때 '100만 인간게놈' 사업에 착수, 분석 데이터를 이용해 미국 생명공학기업을 기술적 경제적으로 지원</li> <li>- 인간 체세포 유전자편집 기술 연구(2018)</li> <li>- 인간바이옴 분자 지도 프로그램 연구(2018)</li> </ul>

## 2) 영국의 합성생물학 국가정책 및 연구 환경

영국은 합성생물학 연구가 가장 활발한 나라로 알려져 있다. 합성생물학 연구에서 미국 다음으로 두 번째이며, 유럽을 선도하는 합성바이오 회사들과 전용기관들이 있다. 영국은 2012년에 합성생물학 정책에 대한 로드맵을 완성했으며 합성생물학이 국가의 경제 성장을 불러올 8대 기술 중 하나라고 공식적으로 선언하고 영국 정부 사업에 중점 영역이 되었다. 또한 2016년에 합성생물학 전 계획을 발표하여 상업화에 중점을 두었고, 2005년 이후부터 2014년까지 합성생물학 연구에 약 1억 7,500만 달러 연구비를 지원하고 영국의 합성생물학 로드맵을 제시하고 적극적인 연구를 하고 있으며 영국의 합성생물학 정책에 대한 조사 내용을 보면 아래와 같다.

<p>■ <b>영국의 정치적 법 제도적 상황</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 인간 세포 내 특정 유전자의 돌연변이를 유전자가위 기술로 조작, 편집하는 연구까지 허용</li> <li>- 게놈 해독과 분석을 위한 유전자 제공과 활용 범위에 제한이 적고, 국가가 앞장서 체계적으로 공기업을 세워 게놈분석을 이끌고 있음.</li> </ul>	<p>■ <b>합성생물학 연구에 투자되는 자원</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국가예산 2005-2014 1억 7천 5백만 달러 지원</li> <li>- 영국생물학연구협회(BBSRC) 10대 연구투자 분야 중 첫 번째로 합성생물학을 선정하고, 2005년부터 2012년까지 1000억 원 이상 과제를 지원. 2013년 영국 8대 미래기술 중 하나로 선정되어 대규모 투자가 이뤄지고 있음</li> <li>- 해외 투자 유치도 활발</li> </ul>
<p>■ <b>합성생물 산업의 거시적 상황</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전문가 패널을 구성하여 영국의 합성생물학 로드맵 제시</li> <li>- 2012년 합성생물학 발전 로드맵 제시하고 관련 인프라 및 R&amp;D 투자에 박차</li> <li>- 무역수지 - 184,194.97 백만(2018) 무역</li> </ul>	<p>■ <b>합성생물학 연구의 인적자원</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전문가 패널을 구성</li> <li>- 개인이나 단체도 가장 유망한 사업기회를 완전히 알지 못할 것 같다. 그러므로 과학의 최첨단에 있는 사람들을 사업상의 혁신자들과 함께 끌어 모아 상업적 기회와</li> </ul>

<p>수지 적자</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최근 소비자신뢰지수 하락과 저축심리 상승 및 브렉시트 불확실성에 따른 기업투자 감소는 경기하락 압력으로 작용</li> </ul>	<p>과학적 잠재력 사이에서 가장 잘 맞는 것을 찾고, 그들이 그들의 아이디어를 개발하기 위해 함께 일할 수 있도록 돕는 기회</p>
<p>■ <b>합성생물학 경쟁상황</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미국 다음으로 성장</li> <li>- 게놈 빅데이터 경쟁력 최근 500만 명으로 확장</li> <li>- 상업적 및 기술적 위험 감소를 위해 서로 다른 조직과 다른 능력을 가진 사람들이 협력 프로젝트에 함께 일하도록 함</li> </ul>	<p>■ <b>합성생물학 상품 생산기술</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국가보건서비스(NHS)에서 주도로 2014년 10만 게놈 프로젝트를 시작으로 최근 500만으로 게놈분석 목표</li> <li>- 2018년 10월 The 100K Genome Project의 100만명 확대 및 5년 내 500만 명의 유전체 정보 확보 계획 발표</li> <li>- 영국은 과학과 공학 기반에 뛰어난 전문 지식을 가지고 있다.</li> <li>- 핵심 합성생물학 기술뿐만 아니라 급속 시퀀싱, 마이크로유체학, 바이오CAD 등의 지원 기술에서도</li> </ul>
<p>■ <b>합성생물학 경쟁상황</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- EU와의 미래 교역관계 불확실성</li> <li>- 새로운 혁신상품 기회로 보고 있음</li> <li>- 창조적 산업으로 인식</li> <li>- 시장 진출 가속화 추진 '데몬스트레이터', 스케일업, 필요한 시설을 지원</li> </ul>	

## 3) 중국의 합성생물학 국가정책 및 연구 환경

중국은 2011년에 합성생물학 연구를 지원하기 시작했다. 중국의 13억 인구는 전 세계 인구의 5분의 1을 차지한다. 이 국민들의 건강, 영양 및 자원 관리는 국가적 사명이 되고 있고 시급한 문제이기 때문에 중국 정부는 신 바이오 연구를 실제 응용 프로그램으로 발전시키기 위한 동기가 되었다. 중국은 향후 5, 10, 20년 동안 합성생물학에 대한 종합 부품 데이터베이스의 목표와 공학 부품의 상업적 적용 및 장치, 시스템의 임상 적용에 대한 목표를 제시하는 전략적 로드맵을 발표했다. 중국과학아카데미(CAS)는 중국에서의 합성생물학 연구가 “전반적으로 5~10년 사이에 세계 최고

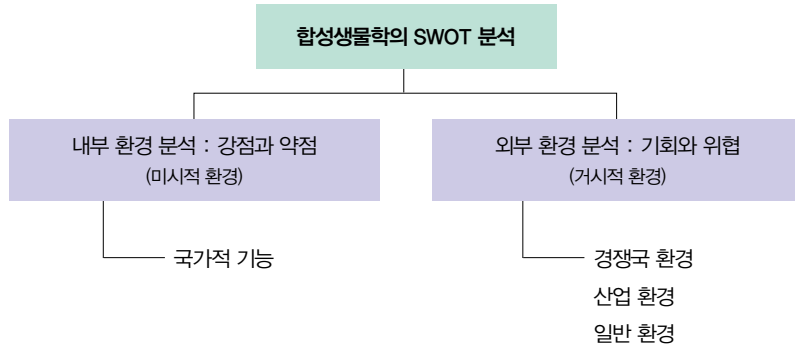
수준"이 될 것이라고 전망했다. 합성생물학 분야에서 정부 예산 및 관련 프로그램이 증가함에 따라 2023년까지 가장 높은 성장률로 성장될 것으로 전망하고 있으며 중국의 합성생물학 정책에 대한 조사내용을 보면 아래와 같다.

<p>■ 중국의 정치적 법 제도적 상황</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정부주도로 추진</li> <li>- 인간 세포 내 특정 유전자의 돌연변이를 유전자가위 기술로 조작, 편집하는 연구까지 허용</li> <li>- 보존 및 유전자원 관련 전통지식에 대한 접근 및 이익공유에 관한 규칙과 메커니즘 수립</li> </ul>	<p>■ 생물무역의 수출 마케팅 상황</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2019년 상반기 수출은 미중 무역전쟁 여파로 0.9% 감소</li> </ul>
<p>■ 합성생물 산업의 거시적 상황</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유전자원의 수입과 수출에 관한 조사 및 검사 시스템 구축</li> <li>- 무역수지 438,024.42백만\$ 매년 흑자를 유지하고 있음.</li> <li>- 미-중 무역전쟁 장기화 속에 중국의 2019년 2분기 경제성장률이 6.3%로 27년 만에 최저치를 기록</li> <li>- 중국의 급증하는 13억 인구는 전 세계 인구의 5분의 1을 차지한다. 중국 정부는 건강, 영양, 자원 관리의 긴급성을 감안할 때 합성생물학 연구가 실제 응용 분야로 발전하도록 동기를 부여하고 있다.</li> </ul>	<p>■ 합성생물학 연구에 투자되는 자원</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국가는 2020년에 GDP의 1.5%에서 2.5%로 R&amp;D 지출을 늘릴 계획 연구비는 3,250만 달러</li> <li>- 연구프로젝트 2017년 기준 45건 정도</li> <li>- 국가생물다양성 전략계획(2011-2030) 수립 8개 전략과제, 30개 실천계획 구성</li> </ul> <p>■ 합성생물학 연구의 인적자원</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 대중 참여 메커니즘 구축</li> </ul>

<p>■ 합성생물학 경쟁상황</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중국은 합성생물학 분야에서 정부 예산 및 관련 프로그램이 증가함에 따라 2023년까지 가장 높은 성장률로 성장 기대</li> <li>- 중국은 2017년 말까지 총면적 1억717만 ha에 달하는 2,750여개의 자연보호구역을 설립해 전국 국토면적의 14.86%를 차지하며 세계 평균을 넘어섰다.</li> <li>- 중국은 2018년까지 국제 중요 습지 57곳을 지정해 898개 국립 습지공원(조종사)을 조성해 습지보전율이 49.03%에 이르렀다.</li> <li>- 비즈니스를 직접 목표로 하는 인식 제고 및 역량 구축;</li> <li>- 생물다양성을 지속 가능성 및 CSR 지침에 통합하거나 생물다양성 보전에 초점을 둔 산업별 지침을 개발하기 위해 산업 협회의 노력 지원;</li> <li>- 생물다양성에 영향을 미치는 사업 운영을 모니터링 및 평가하고 인증 서비스를 제공하기 위한 체계적인 원칙, 기준 및 지표의 개발</li> <li>- 생물다양성을 지역 경제 개발 전략 및 인센티브 메커니즘에 통합하는 문제를 해결하는 데 도움을 주기 위해 지방 정부에 지속 가능성에 대한 상담을 제공합니다.</li> </ul>	<p>■ 합성생물학 상품 생산기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유전자원 관련 정보시스템 구축 촉진 및 조정</li> <li>- 생물과 유전자원 보존을 위한 시스템 확립 및 개선</li> <li>- 유전자변형생물체의 생물 안전성 평가, 검사와 모니터링을 위한 기술 시스템 및 플랫폼의 구축 및 완성</li> <li>- 국가는 향후 5, 10, 20년 동안의 기회를 요약한 전략적 로드맵을 초안을 마련하고, 공학적 부품과 기기 및 시스템의 임상적 적용을 위한 타임 스케줄과 종합적 데이터베이스 구축을 목표로 하고 있다.</li> <li>- 인공지능을 이용한 종별 식별 기술</li> <li>- 분류학을 위한 DNA 바코드 기술</li> <li>- DNA 바코드 데이터베이스</li> <li>- 유전적 자원 및 관련 전통 지식의 조사 기법</li> <li>- 현대 정보기술, 생명공학 및 원격 감지 기술에 의한 생물다양성 조사 및 모니터링</li> <li>- 생물다양성 모니터링 네트워크 설계 기법 및 도구</li> <li>- 생물다양성 감시망 및 조기경보센터 구축</li> <li>- 다중 소스 및 다중 규모 생물다양성 데이터의 통합</li> <li>- 생물다양성 데이터베이스 및 정보 시스템</li> <li>- 생물다양성 빅데이터 심층 채굴 기술</li> </ul>
--	--

#### 4. 한국의 합성생물학 국가정책 및 연구에 대한 SWOT 분석

##### 1) SWOT 분석 모델



[그림 5-1] SWOT 분석의 주요 요소(자료: SWOT analysis main components)

##### 2) 우리나라 합성생물학에 대한 SWOT 분석

본 과제의 생물/IT 분과, 법학/행정 분과, 경영/무역 분과의 협동연구 결과와 이를 기반으로 한 글로벌 합성생물학에 대한 외부 환경 분석 그리고 국내 내부 환경 분석을 통해 도출된 한국의 합성생물학에 대한 강점 Strength, 약점 Weakness, 기회 Opportunity, 위협 Threats의 요인들을 도출하였으며, 아래 표와 같이 정리하였다.

내부적 장점(S)	내부적 약점(W)	외부적 기회(O)	외부적 위협(T)
1. IT 기술의 우위 2. 자유무역국가 3. IT 인력풀 보유 4. 세계 시 기술 보유	1. 지자체 주도 추진 2. 법과 제도의 미흡 3. 게놈 데이터 부족 4. 투자지원 자원 부족	1. 충분한 무역 경험 2. 활발한 자유무역협정 3. IT/AI 기술 4. 특화된 정보 인프라	1. CBD, ABS의 발효 2. 집중 자원 투자 3. 선제적 연구 4. 공격적 게놈정보 구축

[표 5-1] 우리나라 합성생물학에 대한 SWOT 분석

#### 5. 우리나라 합성생물학 정책 제언

##### 1) TOWS 전략적 대안 내용 도출 방법

4-2에서 도출된 SWOT 분석 내용을 기존 강점의 활용과 약점 축소를 통해 기회를 이용하거나 위협으로부터 방어하기 위해 배치될 수 있는 잠재적 전술 전략도출을 위해 TOWS 매트릭스를 이용하여 전략 대안을 도출하였다. 이를 기반으로 합성생물학을 통한 생명산업의 지속 발전과 함께, 인류에게 삶의 풍요로움을 제공할 수 있는 '생물다양성보전'을 위한 정책 제언을 위해 TOWS 매트릭스를 이용하였다.

Opportunities / Threats	외부적 기회(O) 1. 합성생물학의 ABS 제한적 적용 가능성 2. 우리의 경쟁국은 미,영,중 3. 합성생물산업의 초기단계 4. 시장 진입 기회확보가 용이	외부적 위협(T) 1. CBD, ABS로 비용증가 가능성 2. 무역규제 요인으로 발전 가능성 3. COP13 채택 가능성 4. 토착민과 지역공동체의 사전 승인 가능성
Strengths / Weaknesses	기회를 극대화하기 위해 강점을 이용하는 전략(SO)	위협을 극복하거나 회피하기 위해 강점을 이용하는 전략(ST)
내부적 장점(S)	1. 세계적 IT 기술 보유 2. 세계 3위권 자유무역국가 3. 글로벌 마케팅 능력 보유 4. 합성생물학 기술 경쟁력 우위	
내부적 약점(W)	약점회피 기회 활용 전략(WO)	약점을 최소화 또는 회피하고 위협을 극복하거나 회피하는 전략(WT)
내부적 약점(W)	1. 연구투자 자원 부족 2. 게놈 데이터 부족 3. 투명성 확보 준비 부족 4. ABS 적용범위의 불분명 5. 국내 법률적 기반 취약	

## 2) 우리나라 합성생물학 정책 전략 제언

### SO 믹스 활용 정책 전략

가. 생물다양성협약<sup>COP</sup>에서 합성생물학에 대한 ABS의 제한적 적용 가능성에 대해 논의가 되고 있으므로 우리도 적극적으로 지지하여 합성생물학 산업발전의 기회로 만들기 위해서 시스템생물학, 생물정보학, 나노기술 경쟁력, 글로벌 마케팅 능력 등의 장점을 충분히 활용하는 국가 전략이 필요하다. 그리고 우리나라의 강점은 산업 경쟁력이므로 합성생물학과 바이오기업과 연계하여 상용화에 대한 국가 전략 또는 산업 전략이 필요할 것으로 생각한다.

나. 세계의 합성생물학 시장에서 현재까지 미국, 영국, 중국 등이 주류를 이루고 있으나 충분히 경쟁해 볼 수 있는 기회로 우리의 기술적 장점을 살려낸다면 충분한 경쟁력이 확보될 수 있다고 예상된다.

다. 합성생물산업은 어느 나라들이나 초기 단계로 진입 기회확보가 용이하므로 국가적인 내부의 장점인 IT 기술, 자유무역을 활용한 글로벌 마케팅 능력, 시스템생물학, 생물정보학, 나노기술의 경쟁력을 중점적으로 공략이 필요할 것이다.

### ST 믹스 활용 정책 전략

가. 생물다양성협약<sup>CBD</sup>과 접근 및 이익공유<sup>ABS</sup>의 발효로 비용증가가 능성이 우리에게 위협요인으로 작용할 수 있으나 나고야 의정서 체결 이후 대두되고 있는 합성생물학에 대해서는 논란이 계속되고 있

다. 우리의 기술적 장점과 가치사슬의 최적화를 통해 극복이 가능할 것으로 예상되므로 장점을 최대화하는 전략이 필요하다고 판단된다.

나. 합성생물 제품에 대한 CBD나 ABS 규정이 무역규제 요인으로 발전 가능성이 무역국인 우리에게 위협요인이 될 수 있으나 자유무역 규정의 MRA<sup>Mutual Recognition Arrangement</sup> 등을 통해서 극복하도록 자유 무역 규정을 적극 활용하는 전략이 필요할 것이다.

다. 합성생물학 산출물의 환경방출 고려 시 토착민과 지역공동체의 사전승인 가능성이 우리와 같이 자연자원 부족국에는 큰 위협요소로 작용할 수 있으나 합성생물학 기술력으로 충분히 극복이 가능한 전략이 필요하다고 보인다.

### WO 믹스 활용 정책 전략

가. 우리 정부의 합성생물학에 대한 투자는 선발 국가에 비해서 아직은 부족한 상태인 약점을 가지고 있다. 그러나 산업의 초기 단계이므로 CBD 당사국총회<sup>Conference of the Party</sup> 등을 주시하면서 시장 진입 기회를 찾는 전략이 필요하다고 판단된다.

나. 게놈 데이터 부족과 국내 법률적 기반 취약 등 우리는 후발 주자로 많은 약점을 가지고 있다. 하지만 벤치마킹을 할 수 있는 3개국이 있으므로 이를 기회로 활용하는 전략이 필요할 것이다.

다. 현재 우리 국가 위치에서 ABS 적용 범위 등을 아직까지 결정하지 못한 약점이 있으나 CBD 당사국총회에서 논의 중인 합성생물학에



대한 접근 및 이익공유ABS의 제한적 적용 가능성 협의의 기회가 있으므로 우리 정부도 적극 참여하여 통과시키는 전략이 필요하다고 보인다.

#### WT 믹스 활용 전략

가. 합성생물학에 대한 우리 정부의 약점은 선발 국가들에 비해서 연구 투자 재원 부족, 게놈 데이터 부족, 투명성 확보 준비 부족, 불분명한 ABS 적용범위, 국내 법률적 기반 취약 등에 대한 현재로서의 약점을 가지고 있다. 그러나 기회 요인과 우리만의 장점으로 극복이 가능할 것으로 예상된다.

나. CBD, ABS의 발효로 비용증가 가능성. 무역규제 요인으로 발전 가능성, 합성생물학의 협상용 정의 채택COP13 가능성, 합성생물학 산출물의 환경방출 고려 시 토착민과 지역공동체의 사전승인 가능성 등이 자연자원이 부족한 우리에게서 위협적인 요소이지만 기회 요인과 우리가 가지고 있는 기술적 장점을 활용하여 합성생물 산업을 발전 전략이 필요할 것이다.

합성생물학에 대한 우리나라 정책대안을 도출하기 위한 SWOT 분석 내용을 보면 위협요인으로 CBD, ABS가 발효가 되었을 시에 비용증가 가능성, 이로 인한 무역규제, 합성생물학의 협상용 정의 채택COP13 가능성, 합성생물학 산출물의 환경방출 고려 시 토착민과 지역공동체의 사전 승인 가능성 등이 국토면적이 좁고 생물자원이 부족한 우리나라로서는

가장 큰 위협요인으로 대두될 수가 있다. 그러므로 전략적 대응과 회피 방법을 모색해야 한다. 융합 연구에서 보면 생물 합성기술과 IT 기술의 발전으로 인하여 생물생태계의 변화에 대한 중요한 사실을 발견할 수가 있었다. 즉 생물이 서식하는 자연 생태계와 합성생물 생태계로 대별되고 있음을 확인할 수가 있었다.

## 미래 생물다양성 보전을 위한 제언

- 본 연구는 빠르게 발전하는 합성생물학을 통한 생명산업의 지속적인 발전과 함께, 인류에게 삶의 풍요로움을 제공할 수 있는 ‘생물다양성 보전’을 위해 생물/ICT/법학/경영 분야의 융합 전문인력을 양성하고 ‘생물다양성 보전’을 위해 다음과 같은 제언을 도출하였다.

### 지속가능한 생명산업 – 합성생물학

생물자원을 이용한 생명산업의 경제적 가치가 급속도로 증가하고 있어, 한국을 포함한 모든 국가의 중요한 미래 먹거리 산업으로 발전하고 있다. 따라서 합성생물학 기술개발과 관련된 적극적인 연구 투자가 필요

하다. 합성생물학의 발전은 유전자원과 관련된 정보의 축적 및 과학적 분석 그리고 ICT 기술개발(DSI 등)이 필요하며, 관련 정보의 자유로운 공유를 통한 새로운 생명시스템의 개발이 필요하다.

- **국내외 유전자원의 발굴 및 정보화:** 공학적 개념을 도입한 “합성생물학”은 유전자의 설계 및 재조합 등을 이용한 새로운 생명시스템을 구축하고 다양한 유용물질의 생산을 통해 인간 삶의 질을 향상하기 위한 전략과 희망은 상대적으로 크지만, 현재까지 밝혀진 유전자원의 정보가 상대적으로 부족하여 새로운 생명시스템을 공학적으로 구성하는 데 한계를 가지고 있다. 이를 극복하기 위하여 국내외의 합성생물학 관련 연구를 진행하고 있는 연구자를 중심으로 국내외의 다양한 생명체를 발굴하고 관련 유전 정보 및 특성을 정보화함으로써 전 세계 연구 공동체가 공유할 수 있는 기반을 구축하여야 한다.
- **생명산업의 투명성 확보:** 합성생물학을 포함한 생명산업이 미래 먹거리 산업으로 발전하기 위해서는 새로운 생명시스템의 구축에 필요한 유전자원의 이용 및 정보와 관련된 출처를 명확히 할 때 투명성이 확보될 수 있다. 미래 생명산업은 한 기업의 노력으로서 완성되는 것이 아니라, 생명체와 관련된 다양한 유전정보와 지식이 필요하므로 연관된 직간접 지식창출자에 대한 기여도를 평가할 수 있는 기업 구조 및 문화를 확립하여야 한다. 이러한 투명성은 합성생물학을 통한 “Bio Security”이슈에 대해 인류가 가지고 있는 불안감을 해소할 수 있을 뿐

아니라 미래 지속가능한 산업으로 발전할 수 있을 것이다.

- **합성생물학과 생물다양성협약 – 나고야 의정서 적용 범위:** 합성생물학을 중심으로 발전할 미래 생명산업의 지속성은 다양한 전통지식과 함께 유전자원의 정보 및 특성 규명에 달려있어, 생태계에 존재하는 생물다양성 보전이 중요하다. 이러한 노력을 위해 합성생물학의 적용 범위는 특정 생명시스템 구축을 위해 이용된 전통지식과 유전자원의 출처, DSI를 포함한 유전자원 정보 및 비교분석 기술 그리고 합성기술 등의 정보를 객관적으로 평가하여 정보 협약과 생물다양성협약 및 나고야 의정서상 적용 가능성에 관한 검토를 통해, 적정한 유전자원의 이용과 이에 따른 이익 공유가 이루어져 생물다양성을 보전할 수 있는 방향으로 생명산업계의 의식이 변화되어야 한다.

### 지속적인 생명산업 발전을 위한 법률적 기반 구축

생물다양성협약이 규정하고 있는 유전자원의 이용으로부터 발생하는 이익을 공정하고 공평하게 공유하고자 2010년 나고야 의정서가 채택되었다. 나고야 의정서는 유전자원과 관련 전통지식의 이용과 관련하여, ① 유전자원 접근과 관련한 사전통보승인 PIC, ② 유전자원이용에 따른 이익의 공유에 대한 상호합의조건 MAT 과 ③ 의무준수를 규정하고 있다. 한국은 2017년 발효되어 나고야 의정서의 국내적 이행을 위해 2017년 「유전자원

의 접근·이용 및 이익 공유에 관한 법률」이 제정된 바 있다. 현재의 법률은 전형적인 유전자원 및 전통지식과 관련된 내용을 규정하고 있으나, 최근 발전하고 있는 '합성생물학'과 관련된 유전자원 및 전통지식을 포함한 DSI와 관련된 규정을 포함하고 있지 않아, 본 법령의 개정 혹은 새로운 관련 법률의 제정 또는 개정이 필요하다.

- **나고야 의정서 유전자원 및 전통지식 적용 범위의 명확성의 확립:** 나고야 의정서는 “창의적 모호함 속의 걸작품 a masterpiece in creative ambiguity”로 평가될 만큼 적용범위, 효력발생 시기, 이익 공유 대상 국가, 유전자원 관련 전통지식 이용의 정의, 다자 이익 공유 체제의 설립체계 등에 관련하여 명확성을 확보하지 못하고 있을 뿐만 아니라 실효성에 의심을 가지고 있다. 「유전자원의 접근·이용 및 이익 공유에 관한 법률」에 포함되어 있는 내용을 구체화하기 위한 관련 생물학자 및 법률가의 융합적 의견 도출이 필수적이다. 더욱이 기존의 나고야 의정서에서 거론되지 않은 합성생물학을 포함한 미래 생명산업을 위한 선제적 법률 개정 또는 새로운 법률의 제정이 절대적으로 필요하다.

- **합성생물학 기반 생명산업 진흥 관련 법령의 개정 혹은 제정:** 최근 공학적 개념을 접목한 합성생물학을 통한 생물시스템의 구축 가능성은 미래 생명산업의 새로운 모델로서 주목을 받고 있다. 그러나 합성생물학 기반의 생물시스템 구축은 유전자 정보 및 분석기술에 ICT기술의 결합과 초고속 유전자의 재합성/변형이 가능한 유전자 합성기술로 인

하여, 기존의 나고야 의정서와 「유전자원의 접근·이용 및 이익 공유에 관한 법률」에 적용되기에는 한계를 가지고 있다. 합성생물학은 기존의 전통지식, 생물 유전자원, 유전자 합성 및 재조합 기술 등이 혼재되어 나고야 의정서에 규정된 유전자원의 이용 및 이익의 공유 적용범위에 명확하게 적용되지 않으며, 새로운 생명시스템 구축과 관련된 유전정보 및 전통지식에 관련된 이해당사자(개인 및 국가를 포함) 간 의견 충돌이 있어 일률적인 적용이 어렵다. 이를 극복하기 위해서는 지속적인 생명산업의 발전을 위하여 기존의 나고야 의정서상 정의된 “이익의 공유” 개념을 확대하여 기존 법령에 합성생물학 기반의 생명시스템을 분리 적용하는 개정 혹은 합성생물학 기반 생명산업 진흥 관련 법률을 제정하여, 합성생물학의 기반 생명산업의 발전을 촉진하고, “유전자원 공급 및 수요자의 이익 공유”의 개념을 적정 비율의 “생물자원 사용과 관련된 특별세”로 전환하여 생물다양성 보전을 위한 기금을 형성하여 국제적 노력을 지원하기 위하여 UN을 중심으로 ‘생물다양성 보전 기금’의 운영을 제안하는 방향으로 ABD 당사국 회의에서 제안할 필요가 있다.

### 합성생물학 기반의 생명산업 촉진과 생물다양성 보전을 위한

#### 생명산업의 발전 방향

2018년 생물다양성협약 및 나고야 의정서를 반영한 「생명연구자원의

확보 관리 및 활용에 관한 법률」 발효에 따라 유전자원 제공국과 수요국의 유전자원 이용에 따른 이익의 공유 원칙의 적용이 의무화됨으로써 생명산업과 관련된 비용이 증가되어, 미래 생명산업의 발전에 장애요인으로 작용할 가능성이 커졌다. 이와 더불어 합성생물학을 기반으로 한 새로운 생명시스템을 이용한 생명산업은 기존의 전통지식, 유전자원, ICT 기술을 이용한 유전정보 및 분석 기술과 유전자 합성기술을 이용하고 있어, 이익 분배의 대상이 될 수 있는 다양한 당사자가 존재하고 있어 이익의 공유를 위한 적정 이익의 공유의 불확실성이 상대적으로 커져, 생명산업의 발전과 이에 따른 생산물 및 파생물의 무역교류에 장애를 초래할 수 있다.

이를 위하여 명확하게 나고야 의정서에 적용될 수 있는 기존의 생물공학 개념의 생명산업(GMO/LMO 기반 생명공학)과 나고야 의정서 적용이 불투명한 합성생물학 기반의 생명산업을 구별하여 관련 당사자 간의 적정 이익의 분배 원칙을 반영한 “생물자원 이용한 관련된 특별세” 규정을 통하여 국내외 생물다양성 보전에 기여할 필요가 있다.

- 생명산업의 이익 공유 모델의 개발 - 나고야 의정서에 규정된 전통지식과 유전자원의 이용 및 이익의 공유 원칙에 적용되는 생명산업의 명확성: 생물다양성 보전을 위한 구체적 조치로 활용되고 있는 나고야 의정서의 적용범위는 명확하게 전통지식 및 유전자원의 출처가 규명될 수 있는 경우로 제한하여, 적정 이익 공유 원칙을 적용할 필요가 있다. 생명산업에 적용 가능한 이익 공유 모델을 적용하여, 개발비를 포함한 생명

산업 개발 당사자의 이익을 보장할 수 있는 이익 공유 모델을 개발하여 적용할 수 있도록 법적 규제가 개선될 필요가 있다.

- **생물다양성 보전을 위한 합성생물학 기반 생명산업의 유전자원 및 전통지식의 “공공재” 개념 도입:** 합성생물학은 명확한 유전자원 혹은 전통지식을 이용하여 개발된 GMO/LMO 기반의 생명산업과 달리 다양한 출처의 유전정보 및 전통지식의 이용, ICT 기술을 통한 유전 정보의 관리 및 비교 분석 기술과 고성능 유전자 합성/조합 기술을 이용하여 유전자원 및 전통지식의 출처가 불명확한 경우와 다양한 관련 당사자가 포함되는 경우가 일반적인 경우로, 나고야 의정서의 적용범위로 규제하기에는 한계를 가지고 있다. 이러한 합성생물학의 발전은 생물다양성의 보전과 생물 안전에 부정적인 요소로 작용할 수 있어, 새로운 생명산업의 모델이 개발되어야 한다. 생명산업을 포함한 다양한 산업은 지속적인 산업 발전을 위하여 자연 환경을 포함한 공공재 활용(물과 도로 등) 및 공공재 관련 환경 파괴와 관련하여 특별세(예, 환경 부담금 등) 규정하여 소유가 명확하지 않거나 공공 소유의 자원 사용에 대한 특별 규정을 가지고 있다. 이러한 개념을 적용하여 국내외 생물자원 및 전통지식은 공공의 소유로 인식하여, 이러한 자원을 이용할 경우 공공재 이용에 따른 특별세 규정을 두어 국내외 생물다양성 보전을 위한 기금으로 사용할 수 있는 규정을 제정할 수 있다. 합성생물학 기반의 생명산업은 생명자원 이용과 관련된 특별세를 지불할 수 있으며 기업의 이윤을 보장할 수 있는 비즈니스 모델을 개발할 필요가 있다. 이

렇게 조성된 기금은 국내외 생물다양성 보전을 지원하기 위하여 UN 중심의 국제기구를 통하여 집행할 수 있다.

본 연구는 제한된 정보를 이용하여 분석한 결과로, 아직은 생물다양성 보전이 미래 인간의 풍요로운 삶을 위해 필요하다는 당위성을 설명하기에는 모호한 상태이기 때문에 생물다양성의 주류화에 한계를 가지고 있다는 것을 보여주었다. 또한, 빠르게 발전하고 있는 합성생물학을 기반으로 한 생명산업의 지속성과 생물다양성의 보전을 위해 향후 생물/ICT/법률/경영 분야의 융합연구 및 교육을 통한 융합적 전문인력을 지속해서 양성할 것을 제안한다.

3부

국립생물자원관  
토스트마스터즈 클럽  
NIBR Toastmasters Club



## NIBR TM Club 소개

### Toastmasters란 무엇인가요?

Toastmasters International은 1924년부터 다른 사람과의 커뮤니케이션에서 더 자신감을 갖도록 수백만 명을 지원해왔다. 유능한 리더는 팀의 구성원이 각자의 개인 목표를 달성할 수 있게 돕고, 그룹의 공동 목표를 성공적으로 달성하는 데 기여한다. 리더는 다른 사람의 본보기가 되는 롤 모델이다. 할당된 프로젝트 과정 전반에서 지침과 피드백을 제시하고 다른 사람이 역량을 향상할 수 있도록 돕는다. 훌륭한 리더는 다른 사람에게 영감을 주어 자신을 따르게 한다. Toastmasters의 클럽 네트워크와 실습기반의 학습 프로그램은 여러분이 연설자와 리더로서 성장할 수 있도록 도와준다. 선천적으로 자신감과 카리스마가 넘치는 리더인 사람도 있

지만, 대부분은 노력을 통해서 리더십 역량을 키워야 한다. Toastmasters 에서는 여러분이 바라는 리더이자 연설자가 되기 위해 훈련할 수 있다. 또한 관리기술을 향상시키고 협상을 더 능숙하게 하며 팀의 신뢰를 얻고 그들을 감화시킬 수 있다.



[그림 7-1] 토스트마스터즈 클럽에서 할 수 있는 경험들 (자료: 토스트마스터즈 코리아)

나의 잠재력을 최대한으로 끌어내는 방법을 안내해주는 프로그램:

### Pathways

Pathways는 Toastmasters가 제공하는 생동감 있고 유연한 참여형 교육 프로그램이다. 이 프로그램은 대중 연설, 대인 커뮤니케이션, 전략적 리더십, 관리, 자신감과 같은 5가지 핵심 역량에 초점을 맞추고 있다.



[그림 7-2] 토스트마스터즈 Pathways의 핵심 역량(자료: 토스트마스터즈 코리아)

11개의 선택 가능한 패스가 있으며 Pathways에 등록해 온라인 평가를 진행하면 자신의 목표에 맞는 학습 패스를 추천받을 수 있다. 각 패스는 다섯 단계로 이루어져 있으며, 각 패스에는 최소 14개의 프로젝트가 있다.



[그림 7-3] 토스트마스터즈의 11개 학습 Pathways (자료: 토스트마스터즈 코리아)

### NIBR Club 소개

NIBR Toastmasters Club은 생물다양성 및 합성생물학을 기반으로 한 산업의 발전을 위한 다학제 융합 전문인력을 양성하는 클럽이다. NIBR Club은 나고야 의정서의 핵심 쟁점인 유전자원 및 전통 지식과 지속가능한 발전을 위한 생물자원이 사용에 대한 이익의 공평하고 공정한 공유에 대한 이해를 통해 새로운 미래 바이오산업의 핵심 기술인 합성생물학 분야에서 생물다양성 보전을 위해 취해야 할 조치들에 대해 발표하고 토론함으로써 다학제 융합 전문인력을 양성하는데 목표를 두고 있다.



## 스피치 능력 향상의 도구 “NIBR Toastmasters Club”

세종대학교 컴퓨터공학과 민경복

공학, 법학, 경영학 분야에서 생물다양성과 합성생물학이라는 주제로 각 분야의 의견을 나누고 토론 및 전문가 자문을 통해 각 분야에서 제시된 의견들을 하나로 취합하는 과정에서 원활한 커뮤니케이션 능력을 함양하기 위하여 공식적인 클럽을 개설하였다. NIBR Club은 리더십 및 커뮤니케이션 훈련을 전문으로 하는 교육기관인 Toastmasters Korea의 운영 방법을 적용하여 주 1회 이상, 총 20회 이상의 학습모임을 진행하였다.

학습모임의 주요 내용은 합성 생물학이 생물다양성에 미치는 영향, 생물학, 경제학, 법학 분야 융합 연구이다. 매주 개최되는 정기 모임 시간에는 전문가 특강 및 토론과 연구원들의 학습모임 시간을 통해 당일의 주제를 중심으로 연구결과를 공유하였다. 클럽 학습모임은 생물다양성협약과 관련된 10회의 학습모임(생물다양성협약, 지속가능한 발전, 아이치타깃, 당사국총회 등)과 생물학, 경제학, 법학 각 분야의 용어에 대한 이해도를 높여 협동연구 결과 도출을 위한 용어의 정의와 이를 통해 생물다양성과 합성생물학과의 관계를 분석하여 생명공학, 경제학, 법학 분야에서 합성생물학이 생물다양성 보전에 미치는 영향을 분석하는 연구를 진행하였다.

토스트마스터즈는 주기적인 모임을 통해 무대공포증 극복, 프레젠테이션에 대한 자신감, 능숙한 진행, 효과적인 피드백 주기 등 각자 원하는 커뮤니케이션과 리더십 능력을 개발하는 데 목적이 있다. 미국의 비영리 기관에서 담당하고 있는 토스트마스터즈 프로그램의 모토는 실제 사회에서 필요로 하는 스피치와 리더십을 능력을 개발할 수 있도록 다양한 교육 프로그램들이 Pathway의 형태로 제공되어 개인이 커뮤니케이션과 리더십으로 크게 구분 되어 있는 패스 중 자기가 원하는 과정으로 실력을 향상시킬 수 있는 프로그램이다. 2019년 진행된 생물다양성협약 대응 전문인력 양성사업의 협동연구 중 학습모임은 NIBR TM으로 이루어졌는데 연구원들은 이를 통해 연설 시 시간 배분 및 준수 그리고 연설 방법 및 청중들과의 소통 스킬을 향상시키는 등 많은 능력을 향상시킬 수 있었다. 또한, 매주 한글 또는 영문 리플렛이 미리 배포되어 그날 미팅의 주제에 대해 한눈에 알아볼 수 있는 점도 TM의 장점이라고 할 수 있었다. TM의 취지는 스피치능력 향상의 도구이며 확실히 효과가 있으나, 전문인력들이 모여 과제를 선정하고 발표한 후 토론으로 이루어지는 심화 과정에 기존 방식과 동일하게 한 번의 미팅에 너무 많은 연설들이 진행되면 한 주

제를 깊이 토론하기에는 시간이 다소 부족할 때가 있다. 따라서 NIBR 협동연구에서 TM은 이를 보완하기 위한 장치들이 필요하다고 본다.

#### NIBR 토스트마스터즈 활동 참여소감 ②

### 양방향bilateral 소통을 통한 연설 능력의 향상

연세대학교 행정학과 박건우

토스트마스터즈를 통해 연구프로젝트를 수행하는 것은 여러모로 의미가 있는 활동이라고 평가한다. 먼저, 대중 또는 참석자들에게 준비된 연설speech을 전달할 때, 효과적으로 수행할 수 있는 판단 기준과 근거가 성립되기 때문이다. 이를테면, 내가 어느 정도의 시간에 어떤 표현을 활용하고, 그리고 이들과 어떻게 소통해야 되는지에 대해서 가이드라인을 제시해주기 때문이다. 둘째, 토스트마스터즈는 나의 발표 내용을 전달하고 이를 통해 참여자들과의 효율적인 피드백이 이루어지는데 상당히 효과적이다. 즉 일방향one direction적인 피칭pitching이 아니라, 양방향bilateral적인 소통이 이루어짐으로써, 발표자 및 참여자가 서로의 의견을 공유하고 개진하는데 기여하는 것이다. 마지막으로, 토스트마스터즈는 발표자로 하여금 일련의 무대 공포증을 극복하는데 상당히 효과적인 도구로 판단된다. 많은 경우, 우리는 대중 또는 다수의 사람들 앞에서 발표의 기회가 빈

번하지 않다. 하지만, 토스트마스터즈는 이러한 공포증을 극복하는 데 도움을 준다. 그 이유는 토스트마스터의 원래 목표가 발표자의 연설 능력 향상 및 효과적인 연설법을 공유하는 데 기초하고 있기 때문이다. 결국, 토스트마스터즈를 약 반년 동안 연구프로젝트와 병행하여 경험한 바에 따르면 연설 능력은 확실히 향상된 것으로 느껴진다. 또한, 다수의 청중 앞에서 긴장하지 않고, 이들과 소통하며, 어떻게 발표를 이끌어 나아가야 하는지에 대해 배울 수 있는 중요한 계기였다.

#### NIBR 토스트마스터즈 활동 참여소감 ③

### 좋은 발표에 대해 끊임없이 생각하게 만든 토스트마스터즈 활동

한양대학교 법학과 홍지윤

20여 차례의 TM을 경험하면서 얻은 가장 큰 소득은 생물다양성협약 대응 사업 참여자 모두의 발표 실력이 크게 성장했다는 점이라고 생각한다. 먼저, 발표에 자신감이 붙었다. TM 초기에는 쭈뼛쭈뼛 발표를 하면서 시간 채우기에 급급한 발표였다면, 중반 이후부터는 거의 모든 연설자가 초기에 비해 당차고 자신감 넘치는 태도로 준비한 내용을 전달하고 보다 편안하게 청중과 시선을 맞추는 모습을 볼 수 있었다. TM 후반부에 들어

서서는 TM 특유의 일방적인 발표 방식에서 탈피하여, 발표 후 충분한 질의응답 시간을 갖는 쌍방향적인 방식으로 발표 형태를 변형했다. 처음에 비해 발표시간이 2~3배 늘어났음에도 불구하고, 초반에 TM을 통해 쌓아온 자신감을 통해 질문에 틀리더라도 당당하게 말하고 질의응답을 통해 함께 문제를 해결해가는 모습을 볼 수 있어서 좋았다. 그다음으로, 발표가 깔끔해졌다. TM을 접하기 이전에 해왔던 발표들은 콘텐츠에만 초점을 맞추었다면, TM의 준비된 연설 및 즉흥 연설은 단순히 내용적 측면만이 아닌, 시간, 어법, 추임새와 같은 형식적인 측면도 중요시한다. 내용적 완성도와 더불어 형식적 완결성을 갖추려는 노력을 함으로써 자연스럽게 군더더기 없고 깔끔한 발표를 추구하게 되었다. 또한, 연설 평가를 통해서 발표에 더욱 집중하는 연습을 할 수 있었고, 어떤 발표가 좋은 발표인지에 대해 끊임없이 생각하는 습관을 들일 수 있었다. 이상이 내가 경험하면서 느낀 TM의 장점이다.

#### NIBR 토스트마스터즈 활동 참여소감 ④

### 소중한 발표 스킬과 경험을 준 NIBR 토스트마스터즈 클럽

동덕여자대학교 화학과 정은채

처음 토스트마스터즈 클럽에 들어왔을 땐, 그 이름부터 생소했다. 토스

트? Toast를 말하는 것인가 하는 생각이었다. 그래서 첫 미팅 후 토스트마스터즈에 대해 먼저 알아보기로 했다. 토스트마스터즈는 회원들의 스피치와 리더십을 연습하고 개발할 수 있도록 운영되고 있는 국제 비영리 교육단체이다. 회원들은 주기적인 모임을 통해 무대공포증 극복, 프레젠테이션에 대한 자신감, 능숙한 진행, 효과적인 피드백 주기 등 각자 원하는 커뮤니케이션 리더십 능력을 개발하고 있다. 실제로 여러 국가에서도 시행되고 있으며 프랑스어, 일본어, 독일어, 스페인어 중국어가 지원되고 있으며 한국어도 곧 지원될 예정이라고 한다. 실제로 토스트 마스터즈 클럽에 가입하고 첫 번째로 했던 것이 교육 프로그램을 이수하는 일이었다. 열 가지 path를 기준으로 여러 프로젝트를 수행할 수 있었고 내가 했던 것은 CBD였다. 주제는 합성생물학과 생물다양성이었고 의장의 개최를 시작으로 전문가 특강과 준비된 연설을 토론하고 각 연설자마다 그 연설을 평가해주는 연설평가자가 있었다. 누군가의 연설을 평가하는 것은 그 사람의 발표를 더욱 집중해서 들을 수 있게 해주었다. 어지기와 어법지기, 시간지기도 매회 있었는데, 이런 역할을 맡고 미팅에 임할 때 더 책임감을 느끼게 되었다. 연설을 맡은 연설자가 되었을 때는 대본을 보지 않고 발표하며 청중들과 소통해야 한다는 부담이 있었지만 회를 거듭할수록 좋아졌다. 여기서 시간지기와 어지기, 어법지기의 역할의 중요성을 알게 되었다. 내가 발표할 내용이 많다고 해서 시간을 넘기면 안 된다는 것을 알게 되었고 발표 시 불필요한 ‘어’나 ‘음’ 등의 습관어가 있는지도 알게 되었다. 또한, 중복되는 단어나 문장이 있다는 것도 알게 되었다. 실제로 이렇게 발표를 할 수 있는 기회는 많지 않고 우리는 그 자리를 부담

스러워 피하려 하지만 토스트마스터즈를 통해 많은 발표 스킬과 경험을 얻게 되었다.

#### NIBR 토스트마스터즈 활동 참여소감 ⑤

### 생물다양성협약과 보전에 대한 대화의 장

인하대학교 생명과학과 채규석

생물다양성협약의 채택은 분류학 분야에서 아주 중요한 사건이라고 볼 수 있다. 생물다양성협약으로 인하여 생물을 보호하여야 한다는 인식의 변화와 생물을 지킴으로써 얻을 수 있는 이익을 이전보다는 실질적으로 느낄 수 있게 되었기 때문이다. 이런 시기에 맞추어 이번 미개척분류군 전문인력 양성사업에서는 생물다양성협약에 대한 모임에 참여할 수 있게 도와주어 분류학자로서 생물다양성의 중요성과 의미를 이해할 수 있게 해주었다. 학습모임의 참여로 인하여 내가 생각하는 생물다양성협약과 보전에 대한 생각 또한 변할 수 있게 되었다. 하지만 반대로 아직 생물다양성협약이 가야 할 길이 멀다는 것 또한 느낄 수 있었다. 생물다양성협약은 생물자원이 많지 않고 생물자원을 개발할 기술이 없는 국가의 경우 생물다양성 보호에 소극적일 수밖에 없어질 것이고 이러한 국가 간의 차이는 생물다양성협약이 이루려는 생물다양성 보호의 목적을 이루

기 힘들어지게 할 것이다. 그리고 생물다양성협약의 현재 진행 상황은 상당히 더딘 실정인데 협약의 모호한 문구와 법안은 협약을 위한 국가 간의 모임에서 진정한 생물다양성 보호를 위한 노력이 아닌 자기 자신들에게 유리하게 해석하기 위한 말싸움으로 협약의 실효성이 의심되고 있는 상황이다. 많은 문제가 존재하고 진행되어 가고 있지만, 이 생물다양성협약이 시작되었다는 사실만은 상당히 중요한 한 걸음이라고 할 수 있다. 이 협약이 진행되기 전에는 생물다양성이라는 주제는 우리에게 먼 얘기였고 없는 것이나 다름없었다. 그렇기에 이 협약의 존재만으로도 생물다양성 보전에 상당한 영향을 미친다고 볼 수 있을 것이다. 시작이 반이라는 말이 있듯이 생물다양성협약의 시작만으로도 거의 반은 지나온 것이라고 생각하며 앞으로 지속적인 협약의 발전을 위해서는 더욱더 많은 의견과 대화가 필요할 것이다.

# National Institute of Biological Resource (NIBR) Club

2019년 9월 16일 오후 3시 - 6시



주제: Conference of the Parties (COP) 9-12 의제분석

주제 질문: 생물다양성 손실의 근본 원인과 생물다양성의 지속가능한 이용

회장: 이흥재 / 이한결

교육부 회장: 박건우 / 구상모

회원부 회장: 임종일 / 박보화

홍보부 회장: 민경복 / 최혜지

서기: 홍지은 / 조성은

재무: 조성은 / 오형명

총무: 이현민 / 서명일

시간  
매주 월요일  
오후 3시 ~ 6시 /  
오후 2시 30분 ~ 5시 30분

장소: 세종대학교 / 국립생물자원관

Website  
[www.nibrfm.org](http://www.nibrfm.org)

Toastmasters International  
[www.toastmasters.org](http://www.toastmasters.org)

디스트릭트 93 (한국)  
[www.District93.org](http://www.District93.org)

### Club Mission

1. 우리는 서로를 응원하고 긍정적인 배움의 경험을 제공함으로써 회원들의 커뮤니케이션과 리더십 능력을 향상시키도록 돕고 나아가 자신감을 키우고 개인적인 성장을 이루도록 합니다.  
2. 생물 다양성 협약 (Convention on Biological Diversity, CBD)은 생물 다양성의 보전과 생물 다양성 구성 요소의 지속 가능한 이용, 유전자원의 이용으로부터 발생하는 이익의 공평하고 공평한 배분을 목적으로 합니다.

3:00	<b>의장 개회</b> 인사말 및 첫 방문자 소개 모임 설명 클럽 미션 낭독	의장 (이흥재) 의장 (이흥재) 의장 (이흥재) 전체
3:10	<b>전문가 특강 및 질의 응답</b>	
3:50	<b>휴식</b>	
4:00	<b>오늘의 토스트마스터</b> 모임 주제 및 주제 질문 소개	토스트마스터 (권태은)
4:10	<b>역할자 소개</b> 어지기 어법지기 시간지기 총평기자	어지기 (서명일) 어법지기 (박건우) 시간지기 (구상모) 김용휘 교수님
4:15	<b>Ice Breaking - "내가 생각하는 생물 다양성이란?"</b> 첫 번째 연설자 (5분) 최우수 Ice Breaker 투표	연설자 1 (정은서)
4:30	<b>준비된 연설 1 - "COP 9-12 의제 심층 분석"</b> 첫 번째 연설자 (5-7 분) '제 9차 생물다양성협약 당사국총회' 두 번째 연설자 (5-7 분) '제 10차 생물다양성협약 당사국총회' 세 번째 연설자 (5-7 분) '제 11차 생물다양성협약 당사국총회' 네 번째 연설자 (5-7 분) '제 12차 생물다양성협약 당사국총회' 최우수 연설자 투표	연설자 2 (홍지은) 연설자 3 (이현민) 연설자 4 (이현민) 연설자 5 (이흥재)
5:00	<b>평가 세션</b> 평가자 소개 및 방법 소개 연설평가 1 (2-3 분) 연설평가 2 (2-3 분) 연설평가 3 (2-3 분) 연설평가 4 (2-3 분) 연설평가 5 (2-3 분) 최우수 연설평가자 투표	토스트마스터 (권태은) 평가자 1 (박보화) 평가자 2 (민경복) 평가자 3 (권태은) 평가자 4 (영종일) 평가자 5 (서혜은)
5:20	<b>즉흥연설</b> 즉흥 연설의 목적 및 방법 소개 즉흥 연설 1 (1-2 분) 즉흥 연설 2 (1-2 분) 최우수 즉흥 연설자 투표	즉흥연설진행자 (이현민) 연설자 6 (민경복) 연설자 7 (박보화)

# National Institute of Biological Resource (NIBR) Club

2019년 9월 16일 오후 3시 - 6시



주제: Conference of the Parties (COP) 9-12 의제분석

주제 질문: 생물다양성 손실의 근본 원인과 생물다양성의 지속가능한 이용

회장: 이흥재 / 이한결

교육부 회장: 박건우 / 구상모

회원부 회장: 임종일 / 박보화

홍보부 회장: 민경복 / 최혜지

서기: 홍지은 / 조성은

재무: 조성은 / 오형명

총무: 이현민 / 서명일

시간  
매주 월요일  
오후 3시 ~ 6시 /  
오후 2시 30분 ~ 5시 30분

장소: 세종대학교 / 국립생물자원관

Website  
[www.nibrfm.org](http://www.nibrfm.org)

Toastmasters International  
[www.toastmasters.org](http://www.toastmasters.org)

디스트릭트 93 (한국)  
[www.District93.org](http://www.District93.org)

### Club Mission

1. 우리는 서로를 응원하고 긍정적인 배움의 경험을 제공함으로써 회원들의 커뮤니케이션과 리더십 능력을 향상시키도록 돕고 나아가 자신감을 키우고 개인적인 성장을 이루도록 합니다.  
2. 생물 다양성 협약 (Convention on Biological Diversity, CBD)은 생물 다양성의 보전과 생물 다양성 구성 요소의 지속 가능한 이용, 유전자원의 이용으로부터 발생하는 이익의 공평하고 공평한 배분을 목적으로 합니다.

5:40	<b>역할자 보고</b> 어지기 보고 시간지기 어법지기 보고 총 평가자의 평가	어지기 (서명일) 시간지기 (구상모) 어법지기 (박건우) 김용휘 교수님
5:50	<b>토스트마스터의 시상</b> 최우수 Ice Breaker 최우수 연설자 최우수 연설평가자 최우수 즉흥 연설자	김용휘 교수님
5:55	<b>클럽 비즈니스 세션</b>	김용휘 교수님
6:00	<b>폐회</b>	의장 (이흥재)

최우수 즉흥연설자: 박보화  
 최우수 준비된연설자: 이흥재  
 최우수 연설평가자: 임종일  
 최우수 Ice Breaker: 정은채

**National Institute of Biological Resource (NIBR) Club**  
 July 29, 2019 2:30 pm - 5:30 pm  
 Theme : Future Ecosystem – Can be Supportive for Human Life?



**President:**  
Alex Lee / Han Kyul Rhee

**VP Education:**  
Geonwoo Park / Sang Mo Goo

**VP Membership:**  
Choong Il Im / Bo Wha Park

**VP Public Relations:**  
Gyung Bok Min / Hyeji Choi

**Secretary:**  
Ji-un Hong / Sungeun Jo

**Treasurer:**  
Sungeun Jo / Cheongmyeong Oh

**Sergeant At Arms:**  
Hyun Min Lee / Myeong Won Seo

Time: 2:30 pm - 5:30 pm  
 Location: NIBR

Website  
[www.nibrtm.org](http://www.nibrtm.org)

Toastmasters International  
[www.toastmasters.org](http://www.toastmasters.org)

District 93 (Korea)  
[www.district93.org](http://www.district93.org)

**Club Mission**

1. We provide a supportive and positive learning experience in which members are empowered to develop communication and leadership skills, resulting in greater self-confidence and personal growth.
2. The Convention on Biological Diversity (CBD) aims to preserve biodiversity, to make sustainable use of biodiversity components, and to distribute fair and fair profits from the use of genetic resources.

**Best Speaker:** Geonwoo Park  
**Best Table Topic Speaker:** Choong Il Im  
**Best Ice Breaker:** Kristy Jeong

- 2:30 **Specialist Lecture** Seunghwan Oh
- 3:00 **TM Special Lecture**  
 "Evaluate to Motivate" Jennifer Kwon
- 4:00 **Intermission**
- 4:10 **Chair Calls Meeting to Order**  
 Chair's Welcome  
 Invocation and Pledge (optional)  
 Welcome Guests Han Kyul Rhee
- 4:15 **Chair Introduces the Toastmaster of the Day**  
 Toastmaster Calls on Meeting Roles Alex Lee  
 Ah-Counter Myeong Won Seo  
 Grammarian Byung Jun An  
 Timer Hyeji Choi
- 4:20 **Table Topics Session**  
 Toastmaster Introduces Table Topics Master  
 Explain format & purpose of Table Topics Session  
 Table Topics Speakers (1-2 min)  
 Call for Timer & Vote for the Best Table Topics Speaker Gyung Bok Min
- 4:35 **Prepared Speech Session** Alex Lee  
 Describe Speech Objectives, Introduce & hand stage over to speakers
- | No | Name           | Project                    | Title                         | Allotted Time |
|----|----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1  | Hyun Kyung Lee | Ice Breaker                | Who am I?                     | 4-6 min       |
| 2  | Ji-un Hong     |                            |                               |               |
| 3  | Bora Shim      |                            |                               |               |
| 4  | Kristy Jeong   |                            |                               |               |
| 5  | Geonwoo Park   | Researching and Presenting | Human Impact on the Ecosystem | 2-3 min       |
| 6  | Hye Eun Shim   | Researching and Presenting | How We Can Maintain Our Earth |               |
- Call for Timer & Vote for the Best Speaker, Best Ice Breaker
- 5:05 **Evaluation Session**  
 Toastmaster Introduces General Evaluator Alex Lee  
 Call for evaluators
- | No | Evaluator    | Speaker        | Speaker's Project          | Allotted Time |
|----|--------------|----------------|----------------------------|---------------|
| 1  | Choong Il Im | Hyun Kyung Lee | Ice Breaker                | 2-3 min       |
| 2  |              | Ji-un Hong     |                            |               |
| 3  |              | Kristy Jeong   |                            |               |
| 4  | Byung Jun An | Bora Shim      | Researching and Presenting | 2-3 min       |
| 5  | Hyun Min Lee | Geonwoo Park   |                            |               |
| 6  | Taeun Kwon   | Hye Eun Shim   |                            |               |
- Call for Timer  
 Ah-Counter's Report (1-2 min)  
 Grammarian's Report (2-3 min)  
 General Evaluator's Report (4-6 min) Byung Jun An  
 Augustine YH Kim
- 5:25 **Toastmaster Presents Awards**  
 Best Table Topics Speaker, Best Speaker, Best Ice Breaker
- 5:28 **Closing Comments** Han Kyul Rhee



## 전문가 Q&A

- **전문가** | 전성우 교수님(고려대학교 환경생태공학부)
- **주 제** | 생물다양성과 생태계서비스

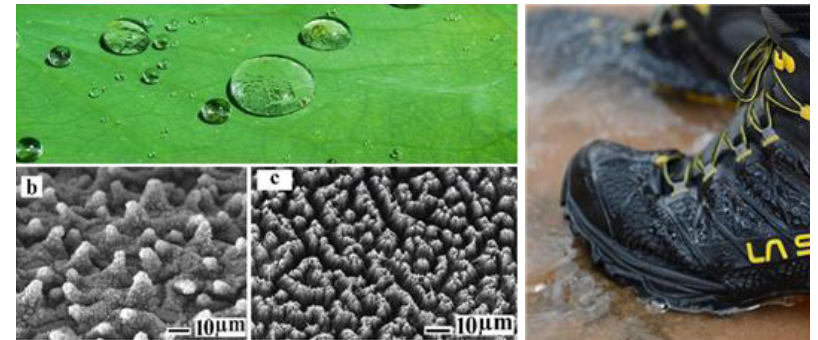
### Q. 생태계서비스란 무엇인가요?

A. 생태계서비스라는 개념은 우리 주변의 생태계가 인류에 미치는 편익과 혜택을 경제성의 개념을 도입하여 숫자적으로 실감할 수 있는 가치 평가를 위하여 도입한 것입니다. 산업화가 이루어지면서 개발하려는 녹지에 대한 금전적 보상을 한다든지 또는 도심 내의 녹지나 공원이 도시와 도시에 거주하는 사람들에게 제공하는 편익과 가치를 환산하는 연구를 통해 생태계서비스 가치를 측정하게 됩니다. 즉, 생태계서비스에는 식생 자체가 살아있을 때 제공하는 서비스의 양뿐만 아니라

식생으로부터 생산되는 딸감이나 목재의 가치 그리고 서비스를 제공할 수 있는 수준의 식생을 조성하는 데 들어가는 시간과 비용이 모두 포함됩니다. 생태계서비스는 생물 자체가 서비스를 제공하기도 하지만 생물에서 유래한 아이디어가 서비스의 대상이자 산업의 모델이 되기도 합니다. 예를 들어, 연꽃의 경우 담수를 정화하는 자정작용 자체가 생물의 가치이자 서비스이지만 연꽃의 표면 구조가 갖는 방수 또는 발수의 특성은 산업에 적용할 수 있는 아이디어로 차용되어 우리에게 익숙한 기능성 방수 의류 및 신발, 식기 등에 적용되기도 합니다.

### Q. 생태계서비스를 가치로 제시하는 이유는 무엇인가요?

A. 생태계서비스의 관점에서 자연 자산의 가치를 통합적으로 제시하는 것은 자연 자산의 지속적인 관리 측면에서도 긍정적인 의미를 가집니다. 생태계에 산술적, 경제적 가치 개념을 도입함으로써 환경 정책 편익분석과 타당성을 평가할 수 있고 자연 자산의 가치 정보를 일정 수



[그림 8-1] 연잎 위의 물방울과 전자현미경(SEM)으로 관찰한 연잎의 미세 구조(좌). 연잎의 방수 기능을 적용한 방수 신발(우)

준 통일하여 경제가치 산출시스템을 구성할 수도 있습니다. 이 시스템을 통하여 축적된 자료는 정책 의사결정의 근거 자료로도 충분히 가치를 가질 수 있습니다. 또한 자연 자산의 가치평가는 생태계와 생물다양성 보존의 근거로도 충분히 활용될 수 있습니다. 정부 기관과 NGO에서 아무리 생태계와 생물다양성의 보존 필요성을 부르짖고 UN이 지속가능한 개발의 중요성을 역설하여도 대중이 피부로 실감할 수 없다면 실천되기는 어렵습니다. 자연 자산과 생태계 그리고 생물다양성이 왜 중요한지는 이미 알고 있습니다. 그런데 이제 이들이 얼마나 중요한지를 알려줄 수 있는 가치 판단의 근거가 필요합니다. 이를 산술적 또는 경제적 가치로 환산하여 알려줄 수 있다면 그 중요성이 상대적으로 쉽게 체감될 것입니다.

**Q. 우리나라는 생태계 가치평가가 어느 정도 진행이 되었나요?**

**A.** 이미 생태계 기능의 계량화를 통한 가치평가는 스페인, 체코, 아일랜드, 네덜란드, 영국 등 여러 국가에서 완료했거나 진행 중이라고 합니다. 이에 반해 우리나라의 경우 자연 자산의 가치평가를 위하여 유형화하고 평가하기보다는 환경 문제로 이슈가 될 때마다 단일 유형, 장소에 대한 유형화가 대부분입니다. 따라서 국내에도 지리적, 기능적 특성을 포함하여 생태계가 공급할 수 있는 서비스의 유형을 나누고 자연 자산에 대한 가치 가를 실시하여야 할 것입니다. 예를 들면, 산림이 가지는 공급 기능(수원 함양의 기능), 조절 기능(산소와 이산화탄소 균형 조절 및 기후의 조절 기능, 토사 붕괴 방지 기능, 수질 정화 기능, 침식조절 기능),

지원 기능(야생동물의 서식지 제공, 인간에게 휴식처 제공 등의 기능) 등과 같이 여러 기능이 직접 또는 간접적으로 미치는 이익과 영향을 평가하고 계량하여야 합니다. 이렇게 마련된 산술적, 경제적 자료는 생태계를 이루고 있는 자연 자산이 인간에게 얼마나 큰 기여를 하고 있는지 수치화하여 보다 쉽게 체감할 수 있으며, 향후 국내 또는 국가 간 자연 자산 혹은 생물자원의 거래와 보상이 논의에 오를 때 근거 자료로서 훌륭히 활용될 수 있을 것입니다.

- **전문가** | 최인걸 교수님(고려대학교 생명공학부)
- **주 제** | 합성생물학, 만들기의 생물학

**Q. 합성생물학이란 무엇인가요?**

**A.** 인류에 필요한 생물과 형질을 얻고자 개량하고 연구한 역사는 일찍이 옛날부터 시도된 결과, 생물학과 육종학, 유전공학, 생명공학 등 바이오 분야의 학문이 활발히 성장하게 되었습니다. 과학발전에 밝은 면이 있다면 어두운 면도 있는 법, 대중 가운데 유전공학과 생명공학의 산물을 프랑켄슈타인과 같은 괴물의 형상으로 상상하는 등 공포심을 가지고 있습니다. 이는 기술의 발전에 따른 혜택만큼이나 아직 마주하지 못한 미래의 기술에 대한 불안감이 크기 때문일 것입니다. 최근 들어 생물학계에서 크게 조명을 받는 합성생물학도 이와 같습니다. 합성생물학을 긍정적으로 바라보는 시각에서는 필요한 물질들을 다양한

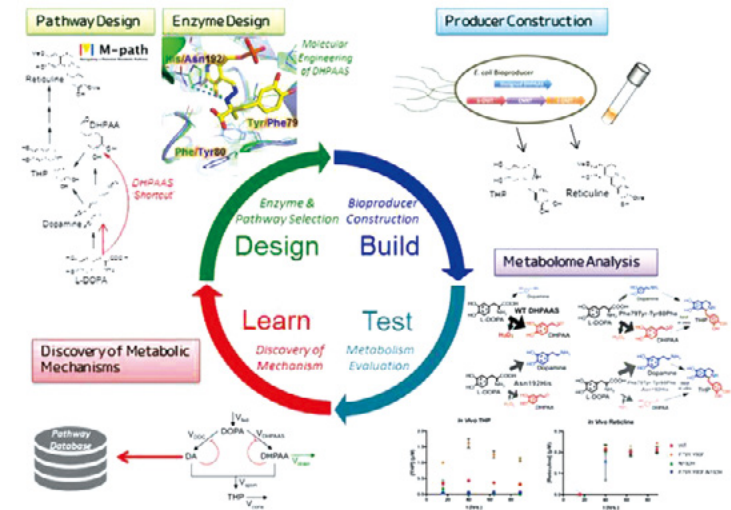


경로로 정확하게 합성해내는 방법을 얻었다고 찬사를 보내는 반면, 부정적으로 바라보는 시각에서는 바이오 테러에 대한 심각한 우려와 함께 생명윤리의 존엄성을 침범할 수 있는 문제를 들어 비판적으로 접근하고 있습니다. 사실 합성생물학의 가장 큰 목표는 생명체가 증식하고 복제하는 중심원리(Central dogma)를 이해하고 다양한 대사 경로를 설계하면 삼아, 원하는 산물 또는 대사물 그리고 대사 효과를 도출해 낼 수 있는 유전 회로를 만들어내는 것입니다. 이른바 생물학 지식을 바탕으로 한 공학적 개념이 내포되어 있는 것이지요. 대사 경로에 관여하는 유전자와 유전체의 유전정보 등은 기계의 부품이 표준화되어 있는 것처럼 표준화시켜 필요한 곳에 적합하게 조립하고 삽입할 수 있는 형태로 만들고자 하는 것이 합성생물학의 골자라고 생각합니다.

**Q. 합성생물학의 발전 과정이 궁금합니다**

A. [그림 8-2]에서 알 수 있듯이 합성생물학을 이용하여 생산하고자 하는 물질을 만들기 위해서는 생체 내에서 대상 물질이 합성되는 기전과 경로를 이해하고 Learn, 이 물질을 합성하는 대사에 관여하는 유전자와 효소의 경로를 설계하여 Design, 이 경로를 성공적으로 대사 및 수행할 수 있는 생체 모델을 만들고 Build, 실제 대사 활동 결과 적절한 산물이 생성되는지 분석하고 평가하는 단계 Test 를 거쳐 세포 단위의 생산체계인 'Cell factory'를 구성할 수 있습니다. 다양한 생명체 중 하나에 불과한 인간이 직접 생명체를 합성하고 표적 물질을 생산할 수 있는 경지에 도달할 수 있던 근간은 무엇일까요? 생물학과 생명공학 지식과

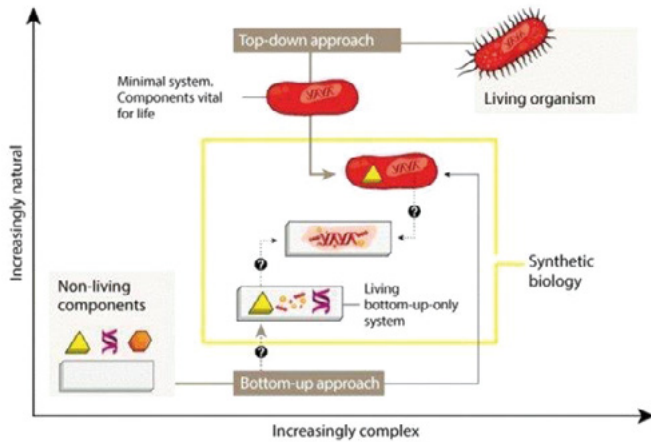
연구자료가 많이 축적된 것도 있지만 생명체의 기본 정보가 되는 유전체의 해석을 빠르게 진행할 수 있는 분석기술의 발전이 가장 큰 이유일 것입니다. 자연이 설계한 생명체의 설계도라 할 수 있는 유전체, 그 중에서도 DNA를 분석하고 Reading 합성하는 Writing 기술이 빠르게 발전하고 개선되면서 소요되는 비용 또한 빠른 속도로 감소하였습니다. 그 결과 사람의 유전체를 읽어내는 데 드는 비용이 약 1백만 원밖에 들지 않는 시대가 되었고 이보다 작은 유전체를 갖는 세균이나 바이러스의 경우 더 적은 비용으로 처리가 가능합니다. 이를 통해 대상 물질을 합성하는 데 필요한 유전자와 효소가 어떤 것들이 필요한지 빠르게 파악할 수 있게 되었고, 대상 물질에 따라 알맞은 DNA 설계도를 직접 짜고 수정하는 것이 가능해졌습니다.



[그림 8-2] 합성생물학을 적용한 미생물 기반 표적 물질 생산 알고리즘의 예 (자료: Kobe University)

**Q. 합성생물 또는 합성생물의 산물들은 어떠한 과정으로 만들어지나요?**

**A.** 분석한 유전정보를 바탕으로 합성생물학은 두 가지 방법으로 원하는 특성을 만드는 생명시스템을 설계하게 됩니다. 하나는 생물 단계에서 삽입과 삭제를 통해 필요한 시스템을 설계하는 하향식<sup>Top-down</sup>이고 다른 하나는 비생물 수준의 유전정보들을 하나씩 모아 합성해 거꾸로 생명시스템을 설계하는 상향식<sup>Bottom-up</sup>입니다. 두 방법은 모두 목표하는 생명시스템을 합성해낸다는 공통점이 있습니다. 하지만 하향식의 경우는 자연계에 존재하는 생명시스템을 조금씩 수정하기 때문에 한번에 복잡한 변화를 주기에는 어렵다는 단점이 있고, 상향식의 경우 자연계에 존재하는 형태가 아니라 임의로 원하는 시스템 경로를 설계하는 것이기 때문에 비생물 수준에서 합성은 쉬우나 합성 후 실제로 발현시키는 것이 어렵다는 단점이 있습니다.



[그림 8-3] 합성생물학의 상향식 방법과 하향식 방법 관계도  
(자료: Wikmark, 2016)

**Q. 합성생물학의 미래는 어떠한가요?**

**A.** 합성생물학은 이전 다른 학문들의 방법론이 그대로였듯이 각 방법의 단점은 보완하고 장점을 최대화하여 적용 가능한 쪽으로 발전해갈 것입니다. 이를 통해 자연에서 어렵게 얻는 물질들을 생산하는데 기여하고 생태계 파괴와 생물다양성 감소를 막을 수 있는 새로운 돌파구를 열어 주기를 기대해봅니다.

- **전문가** | 최승환 교수님(경희대학교 법학전문대학원)
- **주 제** | 바이오안전성과 합성생물학

**Q. 바이오안전성이란 무엇입니까?**

**A.** 바이오안전성이란 생명공학기술이 환경 또는 인체에 미치는 잠재적 위해성을 최소화하기 위한 법률, 정책, 절차 등의 모든 제도 및 수단을 포괄하는 개념을 말합니다. 이 개념은 바이오안전성 의정서 제1조에서 정의되고 있으며, 군사적 생화학무기로부터의 방어를 뜻하는 biosecurity와는 구분되어야 합니다. 생명공학기술 **biotechnology**은 생물다양성협약 제3조 (h)호에서 정의되고 있는데, 이에 따르면 현대 생명공학기술은 전통적인 교배 및 선발에서 사용되는 기술이 아닌, 자연상태의 생리적 증식이나 재조합의 장벽을 넘어서는 유전자재조합 기술, 핵산을 세포 또는 세포내 소기관으로 직접 주입하는 기술을 포함한 시험관 내 핵산기술 또는 분류학에 의한 과의 범위를 넘는 세포융합기술

중 하나가 적용된 기술을 일컫습니다.

생물다양성협약상 바이오안전성 관련 규정은 제8조 (g)호, 제19조 제3호, 제19조 제4호에 규정되어 있습니다. 제8조 (g)호는 각 당사국들이 인체건강에 미치는 위해성을 고려하면서 생물다양성의 보전과 지속가능한 이용에 부정적 영향을 미칠 수 있는 생명공학기술에 의한 LMO의 이용과 방출 등에 따른 위해성을 규제 관리 통제할 수 있는 수단을 수립하거나 유지하도록 명시하고 있습니다. 제19조 제3항은 당사국들이 생물다양성의 보전과 지속가능한 이용에 부정적 영향을 미칠 수 있는 생명공학기술에 의한 LMO의 안전한·safe·이전·취급·이용에 대해서 사전통보협의 [Advanced Informed Agreement, AIA](#) 등을 포함한 적절한 절차 [appropriate procedures](#)를 명시한 의정서 [protocol](#)의 필요성과 그 세부원칙 [modalities](#)을 고려하도록 규정하고 있습니다. 제19조 제4항은 각 당사국들이 제19조 제3항의 이행을 위해, 직접 또는 제3항에 언급된 LMO를 제공하는 자국 관할권 하에 있는 자연인 또는 법인에 요구하여, LMO를 취급함에 있어 협약 당사국이 요구하는 이용 및 안전규정에 관한 모든 가능한 정보뿐만 아니라 특정 LMO의 잠재적이고 부정적인 영향에 관한 모든 이용 가능한 정보를 LMO가 도입되는 당사국에게 제공할 의무가 있다고 규정합니다. 정리하자면, 생물다양성협약은 바이오안전성에 직접적으로 관련된 조항을 3개 포함하고 있으며, 협약 제19조 제3항은 의정서의 채택을 위한 국제협상의 초석이 되었으며 제8조 (g)호와 제19조 제4항은 의정서의 당사국 여부와는 관계없이 생물다양성협약의 모든 당사국들에게 적용될 수 있는 의무를 규정

하고 있는 것으로 파악됩니다.

#### Q. 생물다양성협약과 바이오안전성 의정서는 어떤 관계가 있나요?

A. 생물다양성협약과 바이오안전성 의정서와의 관련성을 알기 위해서는 국제환경협약의 구조부터 알 필요가 있습니다. 국제환경조약의 경우, 먼저 골격협약 [framework agreement](#)을 맺습니다. 골격협약의 내용은 대부분 비구체적이고, 규범목표를 위한 일반적 합의에 관한 것입니다. 골격협약이 맺어진 후 세부사항에 대한 규율을 의정서를 통해서 합니다. 생물다양성협약의 경우, 생물다양성협약 [Convention on Biodiversity](#)이 골격협약에 해당하며 그 세부적인 내용은 후속 의정서인 바이오안전성 의정서와 나고야 의정서에 의해 규율됩니다. 생물다양성협약과 바이오안전성 의정서는 생물다양성 보전이라는 목적을 공유하며 생물다양성 보전과 지속가능한 이용에 대한 부정적인 영향을 규제한다는 점에서 공통점을 보입니다.

바이오안전성 의정서가 채택된 배경은 다음과 같습니다. 1994년 미국에서 최초의 유전자변형식품인 토마토가 시장에 출시된 이래, 유전자 변형제품의 수와 범위가 꾸준히 증가되었습니다. 그러나 LMO에 대한 심각한 우려 또한 제기되어 왔고, LMO의 잠재적 위해성 및 혜택 또는 이익을 중심으로 대립적인 논쟁이 제기되어 왔습니다. 이러한 배경 하에서 LMO에 대한 구체적인 우려가 생물다양성 보전과 관련하여 부각되었습니다. 일반적인 수준에서 생태계에 방출된 LMO는 외래 침입종에 의해 제기된 위해성과 유사한 유형의 위해성을 지닐 수 있

다는 주장이 제기되었기 때문입니다. 의도적 방출과 관련하여(예컨대, LMO 작물의 야외실험, 상업적 재배, 수산양식 또는 해양양식 프로젝트에서의 LMO 물고기 방출), 생물다양성에 대한 LMO의 부정적 영향에 대한 우려에는 자연환경에서의 LMO의 잠재적 분산, 다른 생물체에 삽입된 유전물질(및 관련 특성)의 잠재적 이전, 비대상<sup>non-target</sup> 종들에 대한 잠재적 영향 등이 있습니다. 논쟁이 전개되면서 바이오안전성의 '제공자'<sup>provider</sup>로서, 즉 LMO의 안전한 취급, 운송 및 사용을 확보하기 위한 장치의 제공자로서, 국가와 법의 역할이 점점 크게 부각되었습니다. 특히 LMO의 국가간 이동이라는 맥락에서 바이오안전성의 도전은 국제체제의 수립이 효율적인 규제체계를 유지하기 위한 필수요건으로 만들었습니다. 즉 바이오안전성은 국가들 간의 조정된 접근이 없이는 달성될 수 없다는 것이 바이오안전성 의정서의 채택을 위한 국제협상이 개시된 이유인 것입니다. 다년간의 협상 결과 2000년 1월 29일 '바이오안전성 의정서'가 채택되었고, 이로써 LMO의 위해로부터 안전성을 확보할 수 있는 국제적 규제 장치가 마련되었습니다.

바이오안전성 의정서는 인간이나 동식물의 생명 또는 건강에 대한 높은 수준의 보호, 생물다양성의 지속가능성 보장, 안전하고 건강에 좋은 식품 및 사료의 자유무역 보장, CBD와 바이오안전성 의정서의 의무 준수 이행, 생명공학기술과 바이오산업의 건전한 발전을 통한 국가경쟁력 강화, 생물유전자원의 이용 확대에 따른 피해에 대한 정당한 보상, 소비자의 권리 보장의 역할을 통해 지속가능한 생물다양성 보전에 기여하고 있습니다.

- 전문가 | 김형건 연구위원(한국법제연구원 글로벌법제연구실)
- 주 제 | 합성생물학 기술의 잠재적인 위해성과 그에 대한 규제

### Q. 합성생물학이 무엇인가요?

A. 합성생물학에 대한 통일된 정의는 존재하지 않습니다. 나라별, 주제별로 합성생물학의 정의는 상이하지만 뜻은 거의 같습니다. 합성생물학의 여러 정의들이 공통적으로 언급하는 내용을 통해 합성생물학에 대한 대략적인 의미를 알 수 있습니다. 합성생물학은 기술발전에 따라 그 내용이 시시각각 변합니다. 합성생물학의 초기 방향성은 사회적 논란이 적은 방향으로 설정되었고 그 덕분에 합성생물학 분야가 빠르게 성장할 수 있었습니다. 그 후 특허, 저작권 획득, 선점과 관련 되면서 보다 사회적 이슈의 중심부로 이동하게 되었습니다. 합성생물학이 적용될 수 있는 산업 분야로는 대체 에너지(바이오 연료) 산업, 새로운 의약품 개발 산업 등이 있다. 대체 에너지 산업에서는 합성 유전자 및 합성 게놈을 이용하여 만들어지거나 형질이 변환된 세포를 통해 셀룰로오스 공급 원료를 효율적으로 바이오 연료로 변환하는 데 활용하고 있습니다. 의약품 개발 산업에서는 바이러스 게놈의 합성을 통한 백신의 개발, 유전자 클러스터의 디자인 및 합성을 통한 신약 분자 생산 기술 개발, 유전자 디자인 알고리즘과 유전자 합성 기술을 이용한 최적화된 항체 합성 등에 활용되고 있습니다. 그밖에 화학제품, 식품, 화장품, 의류 산업 등 규제가 심하지 않고 신속하게 시장에 제품을 출시할 수 있는 영역에서 활용되고 있습니다.

생물학적 부품의 효율적인 생산, 유통 및 재사용을 가능케 하는 유전적으로 암호화된 기능들에 대한 기술 표준을 개발하기 위한 활발한 활동이 이루어지고 있습니다. 또한 물질적 구성, 기능적 구성, 측정단위, 데이터 교환 분야에서 합성생물학의 적용과 관계된 기술 표준 개발이 시도되고 있습니다. 현재 여러 기구에서 합성생물학 관련 기술표준을 개발하는 활동들이 수행 중입니다. 합성생물학 기술의 유해한 사용 위험을 줄일 수 있느냐가 합성생물학 공동체 사이에서의 논의와 계획의 초기 화두가 되었으며, DNA 염기서열의 배열을 알아내기 위한 고유한 표준들이 개발되었습니다. 생물보안-Biosecurity과 관련 있는 DNA 합성배열의 검사를 위한 표준은 광범위하게 채택되고 있습니다.

**Q. 생물다양성 보전 및 지속가능한 이용에 합성생물학은 어떤 영향을 가져올까요?**

**A.** 생물다양성 보전과 지속가능한 이용에 있어 합성생물학은 긍정적인 측면과 부정적인 측면 모두를 갖습니다. 바이오 에너지, 환경, 농업, 야생동식물의 개체 수 변화, 자연물질의 대체, 화학적 생산이라는 여섯 개 영역을 중심으로 합성생물학 기술이 적용될 경우 나타날 수 있는 긍정적인 영향과 부정적인 영향에 대한 논의가 진행되고 있습니다. 합성생물학 기술에 의해 탄생한 유기체 등이 고의적으로 또는 비고의적으로 방출될 경우, 바이오안전성이 우려됩니다. 바이오안전성 관련 논의는 생태계에 미치는 영향, 유전자 흐름에 미치는 영향, 그리고 예측할 수 없는 형질의 출현을 중심으로 이루어지고 있습니다. 합성생물학 기술로 탄생한 유기체는 적합성에서 우위를 점하고 있기 때문에 기존

의 종을 몰아낼 수 있으며, 합성생물학 기술로 탄생한 유기체가 장기간 지속하는 경우 새로운 종류의 오염원이 될 수 있거나 생태계나 서식지가 파괴될 수 있습니다. 대부분의 합성생물학 연구는 미생물을 숙주로 사용하는데, 그 과정에서 미생물의 급격한 진화, 미생물의 돌연변이로 인한 생태계 파괴가 우려됩니다. 또한 합성생물학은 유전자 흐름에도 영향을 미칩니다. 합성생물학 기술로 탄생한 유기체는 그와 관련 없는 종으로 변형된 DNA가 이동하는 것을 가능케하는 수평적 유전자 흐름 및 전이를 가능하게 합니다. 이러한 수평적 이동은 유전자 수준에서 생물다양성에 변화를 야기할 수 있고, 바람직하지 않은 형질을 전파시킬 수 있기 때문에 “유전적 오염”의 위험이 있습니다. 또한 합성생물학은 “예측할 수 없는 새로운 형질”을 가진 전혀 다른 생명체를 출현시킬 가능성이 있습니다.

**Q. 합성생물학 기술의 잠재적인 위해성을 규제하기 위해서 현재 CBD 체제상의 어떤 규정이 적용 가능하다고 보시나요?**

**A.** 합성생물학 기술의 잠재적인 위해성 규제를 위한 국제규범으로 가장 먼저 생물다양성에 관한 협약을 들 수 있습니다. 생물다양성협약 상의 “생명공학에 의한 변형생물체(living organisms resulting from biotechnology)”, “환경에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있는 likely to have adverse environmental impacts”, “잠재적인 부정적 영향(potential adverse impacts)” 그리고 “이용 및 방출(use and release)”이라는 용어의 해석에 따라 바이오안전성에 관한 동 협약의 규정들이 합성생물학에도 적용될 여지가 있습니다. 보다 구체적

으로, 영향평가(제3조) 및 부정적 영향의 최소화 의무(제14조 제1항 제 a호 및 제b호), 변형생물체의 바이오안전성과 관련한 의무(제8조 제g호, 제19조 제4항) 등에 관한 규정이 합성생물학에 적용될 수 있습니다. 바이오안전성에 관한 카르타헤나 의정서 [Cartagena Protocol on Biosafety](#)도 합성 생물학 기술의 잠재적 위해성 규제를 위한 국제규범이 될 수 있습니다. 의정서상의 “생물체 [living organism](#)”를 ‘무균 생물체, 바이러스, 바이오 드를 포함하여 유전물질을 전달하거나 복제할 수 있는 모든 생물학적 존재’로 정의하고 있어 현재 합성생물학에 의해 얻어진 생물체가 대부분 미생물인 점을 감안하면, 동 의정서가 합성생물학에도 적용될 여지가 있습니다. 특히, ‘사전 예방의 원칙’(제1조), 생물다양성의 보전 및 지속가능한 이용에 미칠 수 있는 악영향과 인체 건강에 미칠 위해의 고려(제4조), 그리고 위해성 평가 및 관리와 관련한 당사국의 권리와 의무(제15조 및 제16조) 등에 관한 규정이 합성생물학에 적용될 수 있습니다. 그 외에도 세균무기(생물무기) 및 독소무기의 개발·생산 및 비축의 금지와 그 폐기에 관한 협약 [Convention on the Prohibition of the Development, Production and Stocking of Bacteriological\(biological\) and Toxin Weapons and on Their Destruction](#), 위생 및 식물위생 조치의 적용에 관한 협정 [Agreement on the Application of Sanitary and Phytosanitary Measures](#)도 합성생물학 위해성 규제를 위해 적용될 수 있습니다. 실제로 합성생물학 기술에 적용될 수 있는 규정들은 이른바 ‘사전 예방의 원칙’을 천명하는 규정과 ‘위해성의 평가와 관리’에 관한 규정입니다. 그러나 위해성의 평가 및 관리와 관련하여 ‘과학적 증거 또는 원리’에 근거할 것을 요구하고 있어 과학적으로 검증되지 않은 잠

재적인 위해 또는 일정한 가정(합성생물학 기술로 탄생한 유기체가 고의적으로 또는 비고의적으로 방출될 경우 등) 하에서만 상정할 수 있는 위해를 규제하기 위한 법적 근거로서는 한계가 있습니다.

- **전문가** | 이명선 책임연구원(한국보건산업진흥원)
- **주 제** | 생물다양성협약과 합성생물학

**Q. 생명공학기술의 관리 및 그 이익의 배분(제19조)은 무엇인가요?**

**A.** 생물다양성 보전과 지속가능한 이용을 위한 국가전략 수립, 유전자원 제공국이 생명공학기술의 연구활동에 참여할 수 있는 조치의 강구입니다. 유전자원 제공국이 그 유전자원에 근거한 생명공학기술로부터 얻어지는 결과 및 이익에 우선적으로 접근(상호합의된 조건하에)할 수 있도록 조치해야 하고 유전자원변형생물체 **LMOs**의 안전한 이동, 취급 및 사용과 관련해서 사전통보합의 **AIA : Advanced Informed Agreement**를 포함한 적절한 절차를 규정하는 의정서 작성을 검토하고 유전자원변형생물체 **LMOs**의 안전한 취급에 관한 정보 및 잠재적 악영향에 관한 정보교환입니다.

**Q. 생물다양성협약 가입 및 이행 대응방안으로는 어떤 것이 있을까요?**

**A.** 국내 보유 생물 및 유전자원을 철저히 조사하여 그 목록을 작성하고, 이들 주요 생물자원에 대한 불법적인 해외 유출을 엄격하게 관리해야

하며 국내 생물다양성 보전대책을 수립, 시행하고, 생물다양성의 보전과 연구를 위한 전담기구 및 협의회를 설치해야 합니다. 뿐만 아니라, 생물자원의 현지 내 보존(보호지역 지정 등) 및 인공적인 보전인 현지의 보전(중자은행, 식물원 설치 등)을 강화 또는 확대 실시하고, 이를 관리하기 위한 데이터베이스 구축 및 관련 기술의 개발을 촉진해야 하며 해외 생물종 및 유전자원을 지속적으로 확보 및 보전하여 생물자원 보유국으로서의 입지를 강화해야 합니다. 그리고 국내 생물자원을 이용한 우리 고유기술 제품(토산품)을 발굴하고 조사하여 이와 관련된 생물자원의 관리, 보전, 재배기술을 확대 발전시켜 토산품 산업을 보호 및 육성해야 합니다.

또한 비공해기술 및 산업의 육성, 즉 생물산업기술의 발전과 연구개발 활성화를 통한 국제경쟁력 강화를 통해 기술시장 개방 압력에 대응하며, 유전자원을 이용하는 기술, 즉 생명공학기술의 국제적 환경안전성 평가에 대한 조사와 평가기술 개발 등 사전대비 방안을 강구해 나갈으로써 이들 제품의 국제 수출기반을 공고해야 하며 우리는 자원이 많지 않은 나라로 자원과 첨단기술의 집약적인 확보 및 연구로서만 지속적인 경제발전을 기대할 수 있을 것이므로, 넓은 면적이 필요치 않은 나라로서 자원과 첨단기술의 집약적인 확보 및 연구로서만 지속적인 경제발전을 기대할 수 있을 것입니다. 그러므로 넓은 면적이 필요치 않은 종자, 화훼, 미생물 산업 등의 획기적인 발전을 위하여 국내의 자원확보와 신기술 도입 및 기초 연구에 보다 많은 재원을 투자해야 할 것입니다.

**Q. 합성생물학이 미치는 사회적 영향은 어떤 것이 있을까요?**

**A.** 생물안전(Bio safety), 생물안보(Bio security) 그리고 생명윤리(Bio ethics)에 있어서는 분자생물학과 시스템 생물학 등을 통해 축적된 생물정보를 이용해 설계와 제작은 생명현상을 여전히 완벽하게 이해하지 못한다는 점에서 합성생물학은 내재적으로 불확실성하며, 자연계에 한 번도 존재하지 않았던 생명시스템을 만들고 재설계는 합성된 생물시스템 등이 환경에 방출될 때에 나타날 위험이 있다고 할 수 있다. 따라서 영향력 평가는 현재의 기술 수준으로는 불가능하며 이에 따라 막대한 산업화 비용 및 일부 소수 기업의 독과점에 따른 시장 왜곡 등의 문제와 기술적, 시장적 문제 이외 에도 야기되고 있는 공공 안전과 윤리 이슈도 지속적으로 제시해야하는 개발 기술의 산업화에 따른 우려의 목소리가 크다고 할 수 있다.

**Q. 정책 수립 시 고려해야 할 사항(제언)은 무엇일까요?**

**A.** GMO와 LMO는 전체적인 사후관리가 생물안전성에 있어서는 위험 물질이 비의도적 또는 환경방출용으로 외부 노출 시 인간과 생태계에 미치는 영향과 생물안보에 있어서는 의도적인 생태계 방출 등으로 생화학 무기로 악용 가능하다. 정책 수립과 기준 설정 시 정부와 민간, 다양한 분야의 이해관계 주체가 참여하는 미래지향적이며 광범위한 논의되어야 한다. 합리적인 아젠다의 필요성과 범글로벌 신뢰기반, 윤리적인 검토, 혁신센터 등의 R&D 원칙 도출 및 정책 수립과 기준 설정 시 정부와 민간, 다양한 분야의 이해관계 주체가 참여하는 미래지향적

이며 광범위한 논의 그리고 지속가능성 제고를 위한 사회적 합의 노력이 필요하다고 할 수 있습니다.

- 전문가 | 최재용 교수님(충남대학교)
- 주 제 | CBD 이익공유 계약 사례

**Q. ABS에 대한 체계적인 제도가 확립되어 있지 않아 자원 제공국에 대한 이익 공유가 불안정해짐을 잘 보여주고 있는 사례가 있다면 어떤 것이 있을까요?**

**A.** 우선, 코루펜시스를 둘러싼 ABS 제도 형성 과정을 살펴보겠습니다. NCI는 1990년 코루펜시스에서 항 HIV 물질을 발견하고, 이에 따라 추가 채집이 필요해지자 카메룬의 야운데Yaounde 대학과 LOC를 체결, 채집 작업을 추진했습니다. 또한 코루펜시스의 자생지역이 좁고 채집에 장기간이 소요됨이 밝혀지자, 1993년 푸두Pudue 대학에 경작 가능성과 보급에 대한 연구를 의뢰했습니다. 위에서 이미 본 바와 같이 투자 협약서 Letter of Commitment 상 NCI는 상업화 이후에는 이익공유에 대한 책임이 없고, 다만 상업화를 의뢰받은 민간기업이 이익공유 계약을 맺을 것을 의무화하고 있습니다. 1990년대 초까지만 해도 ABS에 대한 체계적인 접근이 부재했으며 국제논의도 활발하지 않았으나, 1991년 최초의 ABS 사적 계약인 INBIO-Merck 계약이 공개되고 1993년 CBD가 체결되자 이에 영향받은 카메룬 정부가 코루펜시스 관련 프로젝트에 적극적으로 개입하기 시작해 1993년 대학이 국가를 대표할 수 없다

는 이유로 NIC-야운데 대학의 투자의향서 Letter of Intent를 1993년에 철회했습니다. 그러나 정부가 이를 대체할 만한 계약을 NCI와 체결에 실패하자, 누가 코루펜시스 관련 프로젝트를 실질적으로 운영하는 계약당사자가 되어야 할지에 대해 많은 혼란이 가중됐습니다. 정부의 계약 실패에는 크게 두 가지 원인이 있는 것으로 보이는데 첫째, 카메룬 정부가 1993년 관계부처 간 위원회를 형성하였음에도 불구하고 관련된 각 부처의 책임소재가 불분명하여 효과적인 협상을 개재하지 못했습니다. 둘째, NCI의 투자협약서는 상업화 단계에서의 이익공유(로열티 지급 등 금전적 보상)를 위한 계약은 향후 기술을 실시할 민간기업과 직접 하도록 하고 있으나, 미셀라민 B에 대한 상업화는 현재 중단된 상태에 있으므로 상업화로 얻어지는 부분에 대한 이익공유에 관한 구체적인 협상이 진행될 수 없습니다.

**Q. 그렇다면, 투자협약서상 NCI가 탐사 기간 중 직접 제공할 수 있는 것은 무엇 일까요?**

**A.** 실험결과 공유, 연구자 교환을 통한 기술훈련, 실험기자재의 제공, 관련 기술의 이전 및 인프라 구축에 대한 기여, 추가 채집 시 원 채집 장소로부터의 우선 조달 등입니다. 이러한 경험을 바탕으로 카메룬 정부는 ABS 관련 규정을 포함하는 Forestry Law(94/01)를 1994년 도입했습니다. 동 법은 모든 유전자원이 국가 소유임을 선포, 사전승인이 없이는 어떤 용도로도 사용될 수 없음을 규정하고, 유전자원으로부터 얻어지는 경제적 또는 금전적 이익이 로열티를 통해 국가에 귀속될 것을



규정하고 있습니다.

**Q. 1996년에는 도입된 환경관리를 위한 'Framework Law'와 관련된 사례는 어떤 것이 있나요?**

**A.** 동 법은 유전자원에 대한 과학적 연구가 투명하여야 하며 카메룬 연구기관과 협력할 것을 규정하는 한편, 이를 위한 계약이 체결될 수 있는 법적 근거를 마련하고 있습니다. 나아가서 전통적 지식을 지재권으로 인정, 비록 이에 대한 보상을 할 것을 명시적으로 규정하지는 않았지만 CBD 규정을 준수할 것을 규정함으로써, 간접적으로 전통지식에 대한 ABS도 포함하고 있습니다. 그러나 이러한 입법 조치에도 불구하고 카메룬 정부는 ABS 관련 주무 당국을 설정하지 못하여 아직 위의 법을 제대로 집행하지 못하고 있습니다. NCI와도 아직 그 어떠한 계약도 체결하지 않은 상태입니다. 이 사례는 자연 탐사를 통해 발견되는 물질이 항시 상업화 가능성이 있기 때문에 자연 탐사 과정에서부터 상업적 이득에 대한 ABS 계약 관계와 기본적인 조건이 명확히 설정되어야 함을 보여주고 있습니다. 이를 위해서는 무엇보다도 국내법에 이를 반영하여야 하며 이를 집행할 주무당국이 명확히 설정되어야 합니다. 또한, 이 사례는 상업화에 장기간이 소요되고, 중간에 중단될 우려도 있으므로 가능한 한 많은 이익 공유가 자연 탐사와 상업화의 중간 단계인 연구개발 기간에 지속적으로 이루어져야 함을 동시에 시사하고 있다고 할 수 있습니다.

• **전문가** | 문현준 교수님 (세종대학교 컴퓨터공과)  
• **주 제** | 생물다양성 보전과 합성생물학 발전을 위한 전략

**Q. 합성생물학 기술 개발과 관련한 ICT 분야의 문제점은 무엇인가요?**

**A.** 빅데이터, 딥러닝, 인공지능이 불과 3년 반 전, 알파고가 이세돌 9단을 누르면서 인공지능시대의 도래를 알렸지만 아직까지 국내의 법규나 제도적인 시스템들이 갖추어지지 않아 기업들이 데이터를 활용하는 데는 큰 제약이 있습니다. 데이터 활용에 대한 국내 규제들 때문에 인재의 외부 유출과 연구를 중단하는 문제점이 있는 것으로 보입니다. 합성생물학 분야도 마찬가지로 빅데이터를 구축하더라도 이를 활용하는 데에는 법적·제도적 장치가 없기 때문에 실제 연구를 진행함에 있어서 현재로서는 많은 한계가 있을 것으로 생각합니다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위하여 개인정보보호법, 정보통신망법, 신용정보법과 관련된 데이터 3법의 개정에 대한 논의가 국회에서 있었습니다. 공청회나 토론회를 통해 사회적 합의를 하고 해결 방안을 마련하여 제도화 및 법제화해야 합니다. 현재는 가명 조치한 개인정보를 사전에 구체적 동의를 얻은 범위 내에서 데이터를 활용해야 하고, 특정 목적 달성 이후 5일 이내에 지체 없이 폐기해야 합니다. 개정이 되면, 가명 정보 개념을 도입하여 연구 등의 특정 목적에서는 정보 주체의 동의 없이 사용이 가능해지고 나아가서 산업의 복합 분야에서 활용이 가능해 집니다. 가명 정보의 사용과 관련하여 동의 없이 사용 가능한 목적 범위의 구체화, 가명 정보 이용 시 안전장치 및 통제 수단 마련, 개인정보

를 관리·감독하는 개인정보보호위원회를 통해서 일원화된 연구를 진행해야 합니다. 이러한 문제가 해결되어야만, 빅데이터 구축을 통한 합성생물학 기술개발이 가능할 것으로 생각합니다.

- **전문가** | 반연희 교수님 (이화여자대학교 나노·바이오기술연구소)
- **주 제** | 생물다양성 보전과 합성생물학 발전을 위한 전략

**Q. 합성생물학 기술 개발과 발전을 위해 선행되어야 할 부분은 무엇인가요?**

**A.** 합성생물학 기술개발을 위해서는 인간뿐만 아니라 미생물을 비롯한 동식물의 다양한 종에서 유전정보가 확보되어야 하기 때문에 빅데이터의 경쟁력이 합성생물학의 경쟁력을 좌우할 것이라고 생각합니다. 또한, 합성생물학 관련 문제와 관련된 현실 가능성이 있는 통제 방안의 마련도 필요합니다.

- **전문가** | 이병량 교수님(경기대학교 경영학과)
- **주 제** | 생물유전자원을 포함한 법규

**Q. 합성생물학과 관련한 규제방안을 마련하는 데 있어 실질적인 근거 제시가 가능한가요?**

**A.** 한국의 경우, GMO에 대해서 약한 수준에서 규제를 하고 있습니다. 규

제를 통해서 손해를 보는 산업계 또는 기업(농산물 관련-유전자변형 식물)의 이해관계가 많이 반영되었다고 볼 수 있습니다. 합성생물학과 관련한 논의를 고려해보면, 첫째, 규제라는 것이 어떤 행위가 있거나 결과가 있어야 규제를 하는데, 한국의 경우에는 구체화되어 있지 않은 상황에서 규제를 먼저 논의한다는 것은 매우 어렵다고 생각합니다. 물론, 이에 대한 근거들과 관련하여 이를테면, 나고야 의정서, 카르타헤나 등이 있지만 법적으로는 아직 약한 근거라고 생각합니다. 따라서 관련한 구체적인 위험 등의 사례가 있어야만 규제가 이루어질 수 있다고 판단됩니다. 둘째, 이 규제의 목표가 무엇인지에 대해서 살펴볼 필요가 있습니다. 합성생물학의 발전 및 활용이 생물다양성에 위협을 주는 것인지 또는 나쁜 결과를 초래하는 것인지에 대한 우려를 사전에 방지하는 것이 목표가 되는 것인가에 대해 살펴볼 필요가 있습니다. 발전은 하되, 어떠한 수준으로 발전 시켜야하는 것인지에 대해 구체적인 규제의 목표를 살펴보아야 합니다. 요약하면, 구체적인 위협(근거)에 대한 측정이 어렵다고 판단됩니다.

한편으로 더 논의할 내용은 규제와 관련해, 포괄적인 네거티브형 규제 그리고 규제샌드박스 등은 자칫하면 규제가 없는 상황으로 갈 수 있는 가능성이 존재합니다. 규제샌드박스는 신기술에 일반적으로 적용되는 것으로 볼 수 있으며, 네거티브형 규제는 원칙적으로 허용하지 않는 것만 금지하는 것입니다. 따라서 구체적인 규제에 대한 내용이 없는 상태에서 포괄적 네거티브 규제는 신중히 접근할 필요가 있습니다. 즉 국내에서의 규제 원칙을 수립하는 것이 어렵다고 볼 수 있습니다.

이에 대한 대안으로 선진국의 사례 중 유사한 것을 근거로 삼아 출발할 필요가 있을 것입니다.

• **전문가** | 이성호 교수님 (서울시립대학교 경영학부)

• **주 제** | SWOT 분석을 통한 생물다양성과 합성생물학

**Q.** 합성생물학분야에서 우리나라의 국가전략을 세울 때 중요하게 생각해야 하는 점은 무엇일까요?

**A.** 이번 웨비나를 통해서 합성생물학과 생물다양성에 대한 이야기를 잘 들었습니다. 합성생물학에 대해서 이전에 들은 적이 있는데, 오늘 웨비나에서 언급된 것처럼 국가전략 차원에서 진행되고 있는 상황은 몰랐습니다. 초기 단계의 사업화를 넘어가는 상황이라고 이해가 되며, 미국, 영국, 중국과 같이 우리나라도 합성생물학에서 잠재 가능성이 있다는 것 등이 인상적입니다. 아무래도 경영학자다 보니, 오늘 웨비나 내용 중 SWOT 기반 TOWS 전략 부분에 좀 더 집중을 해서 듣게 되었는데, 전반적으로 광범위한 자료를 기반으로 종합적인 정리를 잘 하고, 분석 결과도 적절하게 보입니다. 첨언을 하자면, SO/ST/WO/WT 전략과 관련해서 정책의 명료성을 위해서 키워드 중심으로 정리를 해보면 독자들이 이해하는 데 좀 더 쉬울 것으로 보입니다.

합성생물학 기술의 적용 가능한 산업과 관련해서 의약품, 화장품, 정밀화학, 농식품 등이 나왔는데, 상용화와 시장 중심의 경영학자들의 시각

에서는 우리나라가 국가전략으로 키워 사업화하기 위해서는 선택과 집중이 필요하다고 생각합니다. 즉, 의약품과 농식품 분야는 기본 산업 기술이 경쟁력이 있다고 하더라도 제약, 규제, 프로세스 등 측면에서 장애물이 있는 반면, 오히려 화장품과 정밀화학은 우리나라가 산업 경쟁력을 가지고 있어서 합성생물학과 연계가 먼저 되어야 할 것으로 생각합니다. 이와 같은 상용화에 대한 내용이 있으면, 국가 전략 또는 산업 전략이 좀 더 분명해질 것으로 생각합니다.

4부

## 생물다양성 관련 국제기구와 교육 프로그램



## 생물다양성 관련 국제기구

### 1. 관련 국제기구 소개

#### ① 생물다양성 기구 설립의 근거

먼저, 생물다양성협약에서는 기구의 설치 및 운영에 대한 내용을 협약 전문에 포함하고 있다. 구체적으로, 협약전문의 내용 중 기구 또는 국제기구와 관련한 내용을 포함하는 것은 제15조 이하로 볼 수 있다. 이와 더불어, 사무국 설치 및 과학기술자문보조기구(SBSTTA)에 대한 내용도 포함되어 제시하고 있다.

보다 구체적으로 생물다양성협약 전문에 근거하여, 제24조와 제25조에서는 사무국 및 과학기술자문 보조기구에 대해서 그 내용을 제시하고 있다. 제24조의 사무국에 관한 내용은 당사국총회의 지원 및 의정서상의

기능(function)을 수행하는 것을 목적으로 한다. 그리고 제25조 과학기술자문 보조기구에 관한 내용에서는 과학기술 전문분야의 대표로 구성되어, 생물다양성의 현황에 있어 과학적 그리고 기술적 평가 제공, 기술개발에 대한 자문, 이의 이용 및 연구개발 분야 및 국제협력에 대한 자문 제공 등을 포함하고 있다.

구분	구성내용
제1조-제5조	• 협약의 목적과 필요성
제6조-제14조	• 생물다양성 보전과 지속적 이용 및 환경안전관리
제15조-제21조	• 생물다양성보전 기술에의 접근, 기술이전, 생명공학기술의 취급과 이익의 배분, 재정지원 및 기구 등
제22조-제42조	• 국제규약의 일반적 관례, 사무국의 설치, 과학기술자문보조기구(SBSTTA)의 설치, 의정서 등

[표 9-1] 생물다양성협약의 내용 및 국제기구에 관한 조항  
(자료: 국가생물다양성 정보공유체계(kbr.go.kr))

생물다양성과 관련하여, 기구별 역할을 살펴보면 당사국 총회, 과학·기술자문을 위한 보조기구(Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice, SBSTTA), 사무국 그리고 기타 기구 또는 회의 등으로 구분할 수 있다. 먼저 당사국 총회는 생물다양성에 대해서 최고 의사결정기구로 생물다양성협약의 이행사항 검토 및 채택 그리고 전반적인 내용을 다루고 있다. SBSTTA의 경우, 주로 당사국 총회에서 제시되는 과학 및 기술 분야에 대해서 자문을 담당하고 있다. 이는 생물다양성과 관련한 과학 및 기술 측면에서 포괄적으로 당사국 총회에 자문 및 권고를 수행하는 기구로 볼 수 있다. 그리고 행정을 담당하는 사무국과 협약 이행검토에 관한 임시 작업

반(WGRI: Ad Hoc Open-ended Working Group on the Review of Implementation of the Convention, ABS 작업반 등이 생물다양성과 관련한 기구로 구성되어 있는 것으로 나타나고 있다. 특히 협약 이행검토에 대한 임시작업반을 대신하여 이행보조기구(SBI: Subsidiary Body on Implementation)를 설립하였는데, SBI의 주요 업무는 생물다양성 이행에 대한 검토 및 증진에 대한 전략 그리고 이행 수단의 강화 및 협약 운영에 대한 역할을 담당하고 있다.



[그림 9-1] 생물다양성협약 운영조직  
(자료: 국립생태원(http://ipbes.nie.re.kr/))

## ② 생물다양성 및 생태계서비스 과학-정책기반 국제기구 IPBES

생물다양성 및 생태계서비스 과학-정책기반 국제기구 IPBES: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services는 2010년 생물다양성의 해를 맞이하여 설립된 대표적인 생물다양성 국제기구로 볼 수 있다. 이는 기후변화협약에 대한 IPCC와 유사한 성격을 지니는 국

제 전문기구로 설립되었다. IPBES는 UN산하의 독립적인 정부간 기구 independent inter-governmental organization이며, 생물다양성과 관련한 다양한 연구 결과들을 중심으로 평가 및 정부 정책의 형성을 지원하고 보고하는 것을 골자로 하고 있다. 이는 생물다양성의 전 지구적 기여도 향상을 위한 기반을 마련하는 데 의의가 있다.

IPBES는 사무국을 중심으로 역량 강화 전담반, 지식 및 데이터 전담반, 토착민 지역공동체 전담반 등의 하위 조직으로 구성되어 있으며, 이들 조직은 일련의 태스크 포스(task force)의 형태로 나타나고 있다.



[그림 9-2] 생물다양성과과학기구 조직의 구성

(출처: <http://www.ecotiger.co.kr/news/articleView.html?idxno=26695>)

그리고 2010년 개최된 제3차 IPBES 정부 간 회의에서는 IPBES의 활동 및 기타 참여자(국제과학기구, 비정부기구, 민간부문)의 요구사항에 대한 수용 여부를 논의하였으며, 해당 조직의 기능(지식 창출, 평가, 정책지원, 능력개발), 설립근거 및 구조 그리고 재원 등에서 합의하였다.<sup>•</sup>

### ③ 생물다양성정보기구

생물다양성정보기구(GBIF: Global Biodiversity Information Facility)는 글로벌 생물다양성 및 생물자원을 발굴 및 수집하여 이를 정보화하기 위한 것을 목적으로 구성되었으며, 2001년 설립된 정부 간 국제기구이다. 해당 기구의 주요 역할은 인터넷 등을 활용하여, 지구상의 생물 및 생물종의 정보를 공개적으로 이용 및 활용을 가능케 하는 것이다. 따라서 생물다양성 자료를 공유하는데 주안점을 두고 있다. 주로 국가 단위로 가입이 이루어지며, 한국의 경우는 2001년 정회원국으로 가입한 바 있다. 생물다양성 정보기구는 집행이사회(예산위원회, 집행위원회, 법무위원회, 노드위원회, 과학위원회)와 사무국으로 구분되어 운영되며, 생물다양성의 디지털 환경 및 기반의 구축을 활성화하기 위해 노력하고 있다.

### ④ 멸종위기에 처한 야생 동·식물의 국제거래에 관한 협약

국제자연보호연맹 협의를 통해 1973년 채택되었으며, 주로 야생동식물종에 대해서 국제적인 거래를 통해 이들 동식물이 생존의 위협이 발생하지 않을 것에 포커스를 두고 있다. 즉 야생동식물의 불법거래를 방지하고 무분별한 거래를 억제하는 것이 주요 목적이다.

• 환경부 보도자료 "유엔 산하 생물다양성 국제기구 설립 합의" 2010년 6월 12일

## ⑤ 합성생물학 관련 주요 기구

### 1) ICTA International Center for Technology Assessment

ICTA는 사회에 대한 기술적 영향을 평가 및 분석하여, 일반에 제공하는 것을 목적으로 하는 비영리기구로, 합성생물학, 기후 온난화, 나노기술, 바이오기술, 의 기술의 적용으로부터 발생하는 다양한 측면(경제, 윤리, 사회, 환경 그리고 정치) 등에 대해서 연구하는 단체다.

### 2) UC Berkeley 합성생물학 연구소 UC Berkeley SBI

본 연구소는 2010년에 합성생물학 기술 및 시스템의 분석을 통한 사회 공헌을 목적으로 설립, 화학, 에너지, 제약, 재료 등 다양한 부문에 대한 혁신적인 기술 및 표준을 개발하고 있으며, 미국 소재의 많은 기업 및 대학과 공동 연구의 인프라를 구축하고 교육 또한 담당하고 있다.

### 3) Luc Hoffmann Institute

본 연구소는 일생을 자연보존을 위해 공헌한 Luc Hoffmann 박사를 중심으로 2013년에 설립, 유럽 및 전 세계를 대상으로 자연보존의 영향에 대한 과학, 정책 등을 분석하고 개선하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히, 합성생물학 프로젝트 수행을 통해 합성생물학이 잠재적으로 환경 및 보존 문제에 크게 기여할 수 있다고 보고 있으며, 학술활동을 통해 일반 대중에게 생물다양성 및 합성생물학에 대해서 전문지식을 향상시키는 데 기여하고 있다.

## ⑥ 기타 생물다양성 관련 국제기구

1) 유엔환경계획 UNEP: UN Environment Programme은 1972년 설립된 국제적인 환경기구로, 환경문제를 해결하기 위한 초국가적 행위자로 인간과 환경과 관련된 다양한 문제를 개선하기 위해 노력하고 있다.

2) 지구환경금융 GEF: Global Environment Facility은 지구의 환경관련 투자 기술 지원 등의 사업에 대해서 무상지원 및 양허성 자금 지원을 수행하는 기관으로, 생물다양성뿐만 아니라 기후변화협약에 대한 재정체계의 역할을 수행하고 있다.

3) 식량농업기구-식량농업식물유전자원 FAO-PGRFA: FAO-Plant Genetic Resources for Food and Agriculture은 식량 및 농업을 위한 실질적 혹은 잠재적인 가치가 있는 식물로부터 비롯된 모든 유전자원에 대해서, 환경적 그리고 생태적 측면에 대한 식량안보를 위해서 보존과 지속가능한 이용에 대해서 발생하는 이익의 공정한 공유에 목적을 두고 있다.

4) 식물신품종보호협약 UPOV: Union for the Protection of New Varieties of Plants은 식물 품종에 대한 보호의 효과적인 시스템을 제공하는데 목적이 있으며, 식물품종을 개선하고 개발을 촉진하여 이익을 창출하는 데 중점을 두고, 생물다양성협약의 내용을 지지하고 있다.

5) 세계자연보전연맹 IUCN: International Union for Conservation of Nature은 1948년에



창설된 생물다양성에 대해서 자연보전 대책 활성화와 자연보전을 위한 국가 간 정보 교류를 목적으로 구성된 기구이다.

6) 동북아생물보전지역 네트워크는 1995년 한국에 설립된 동북아시아 지역의 국가들이 가입한 국제기구로, 국가 간 생물보전지역에 대한 정보 교환 및 관리경험 공유 그리고 정보 교환 및 협력을 추진하고 있다.

## 생물다양성 교육 프로그램

- 생물다양성 및 생물다양성협약, 기후 변화, 지속가능 개발, 합성 생물학과 관련한 대표적 온라인 교육 프로그램은 아래와 같으며, 이어서 세부내용에 대해서 다룬다.

번호	분야	프로그램명(홈페이지)	기관
1	생물다양성	Introductory Course to the Convention on Biological Diversity • <a href="https://elearning.informea.org/course/view.php?id=12">https://elearning.informea.org/course/view.php?id=12</a>	InforMEA
2	생물다양성	Biodiversity Course • <a href="https://www.calacademy.org/biodiversity-course">https://www.calacademy.org/biodiversity-course</a>	California Academy of Sciences
3	생물다양성 협약	Biodiversity E-Learning Platform • <a href="https://scbd.unssc.org/">https://scbd.unssc.org/</a>	CBD

번호	분야	프로그램명(홈페이지)	기관
4	생물다양성 협약	The Free Massive Online Open Course (MOOC) on Biodiversity Finance • <a href="https://learningfornature.org/courses/biodiversity-finance/">https://learningfornature.org/courses/biodiversity-finance/</a>	Learning for Nature
5	기후 변화	UN CC:Learn Introductory e-Course on Climate Change • <a href="https://unccelearn.org/course/index.php">https://unccelearn.org/course/index.php</a>	UN CC:Learn
6	지속 가능 개발	Free educational resources from the world's leading experts on sustainable development • <a href="https://sdgacademy.org/courses/">https://sdgacademy.org/courses/</a>	SDG academy
7	합성생물학	Learn Synthetic Biology • <a href="http://diy-bio.com/learn-science-behind-diybio/learn-synthetic-biology/">http://diy-bio.com/learn-science-behind-diybio/learn-synthetic-biology/</a>	Diy-bio

## 1. Introductory Course to the Convention on Biological Diversity(CBD)

InforMEA the United Nations Information Portal on Multilateral Environmental Agreements



제공. InforMEA는 다자간 환경 협약MEA에 관한 정보를 제공하는 UN 온라인 포털로 2011년에 출범했다. 생물다양성협약Convention on Biological Diversity의 COP Conference on the Parties 결정과 MEA Multilateral Environmental Agreements의 뉴스 및 이벤트, MEA 멤버십 및 국가 차원의 중점 사안으로 구성된 MEA 정보를 윈스톱one-stop shop으로 제공하고 있으며, MEA 당사국과 환경 공동체를 위해 상호 운용 가능한 정보 시스템을 개발하고자

2011년 InforMEA 플랫폼이 출시된 이후, 환경법 및 협약 관련 정보 제공에서부터 의사결정, 결의안, 뉴스, 행사 일정, 용어집, 당사국 목록, 국가 연락 기관, 국가 보고서 및 전략 등의 MEA 관련 정보를 제공하도록 확대되었다. 본 포털은 UNEP United Nations Environment Programme 지원을 받는 MEA 정보와 지식 관리 정책에 따라 개발된 최초의 프로젝트로, UN 기구 및 IUCN International Union for Conservation of Nature 이 주도한 13개 MEA 사무국에서 제공한 24개의 국제 정책 도구가 포함된다. InforMEA는 MEA와 관련된 28개의 무료 온라인 학습 과정을 제공하며, 시드니의 Macquarie University, University of Eastern Finland 및 UN system staff college와 같은 대학의 커리큘럼에도 사용되고 있다.

Browse information by Environmental Topic:



위와 같이 환경 관련 6개 토픽으로 구분하여 서비스를 제공하고 있으며, 이 중 생물다양성Biological Diversity과 관련하여 11개 Global Treaties and Protocols과 54개 Regional Treaties and Protocols에 대한 온라인 교육 프로그램을 제공하고 있고, 특히 생물다양성협약CBD와 관련하여 “Introductory Course to the Convention on Biological DiversityCBD” 교육 프로그램을 운영 중이다.

- 홈페이지(기관) : <https://www.informea.org/>
- 이러닝 홈페이지 : <https://elearning.informea.org/>
- 이러닝 홈페이지(Introductory Course to the Convention on Biological Diversity (CBD)) : <https://elearning.informea.org/course/view.php?id=12>

## 2. Biodiversity E-Learning Platform

Convention on Biological Diversity  
제공. 생물다양성협약 사무국 The  
Secretariat of the Convention on Biological Diversity

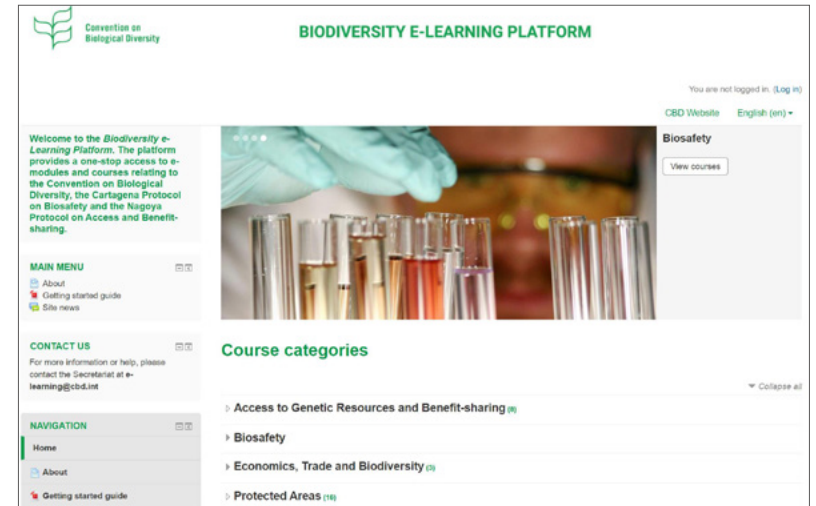


은 2017년 새로운 기술을 사용하여 생물다양성에 대한 역량 개발을 제공하는 동시에 전 세계의 학습자와 강사를 연결을 목적으로 생물다양성 전자 학습 플랫폼 서비스를 시작했다. 이 플랫폼은 출시된 이후 4개 언어로 15개 이상의 코스를 개발했으며, UNDP, UNEP, IDLO 및 The Nature Conservancy와 파트너십을 맺은 과정을 개발했다. 이 플랫폼은 생물학적 다양성에 관한 협약, 생물 안전에 관한 카르타헤나 의정서 및 접근 및 혜택 공유에 관한 나고야 의정서와 관련된 전자 모듈 및 과정에 대한 원스톱 액세스를 제공한다. 참가자는 CBD 계정에 가입하고 선택한 모듈에 등록함으로써 이러한 E-Learning 기회를 활용할 수 있다.

전자 학습 모듈 및 과정 범주는 다음과 같이 4가지로 구성되어 있다.

- ① 액세스 및 혜택 공유 **Access and Benefit-sharing**: 액세스 및 혜택 공유에 대한 나고야 프로토콜을 구현하기 위한 법적 프레임워크 구축 모듈
- ② 생물 안전성 **Biosafety**: 주류 생물 안전성의 모듈 · 대중 인식, 교육 및 참여 · 살아있는 변형 된 생물체의 취급, 운송, 포장 및 식별 · 책임 및 구제에 관한 나고야 쿠알라룸푸르 보충 프로토콜
- ③ 경제, 무역 및 생물다양성 **Economics, Trade, and Biodiversity**: 생물다양성 평가 모듈; 지속가능한 소비 및 생산
- ④ 보호구역 **Protected areas**: 네트워크 설계 모듈 · 완성 · 관리 계획 · 참여 · 지속가능한 금융 · 이행 · 모니터링 및 적응 관리

- 홈페이지(기관) : <https://www.cbd.int/cb/E-learning/>
- 홈페이지(이러닝 플랫폼) : <https://scbd.unssc.org/>



[그림 10-1] Biodiversity E-Learning Platform 홈페이지

### 3. The Free Massive Online Open Course (MOOC) on Biodiversity

#### Finance

Learning for Nature : A gateway to the expertise of a worldwide network of biodiversity practitioners and

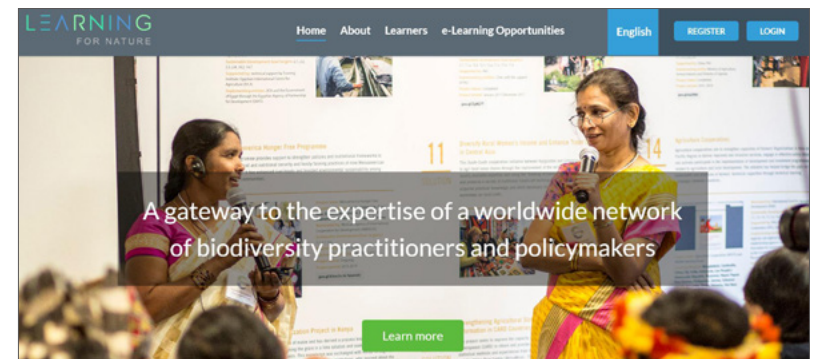


policymakers 제공. Learning for Nature는 유엔 개발 프로그램(UNDP)이 제공하는 e-러닝 프로그램으로, 생물다양성 정책 입안자, 변화 입안자 및 현장 주제 전문가를 연결하여 ① 생물다양성의 아이치 생물다양성 목표 협약의 이행 및 ② 유엔의 지속가능한 개발 목표달성을 촉진하고 있다.

Learning for Nature는 MOOC(Massive Open Online Courses), 웨비나, 자율학습 e-러닝 모듈 및 개인 교육 과정을 통해 자연기반 지속가능한 개발을 위한 노력을 확장할 수 있는 역량을 키우는 기회를 모색하고 있으며, 지상에서의 학습을 바탕으로 시너지 추구, 연계 구축, 사람, 자연 및 회복력 있는 커뮤니티를 위한 지속가능한 개발 솔루션을 목표로 한다. 특히, Biodiversity Finance 과정은 생물다양성 금융에 대한 정책, 제도 및 경제 상황을 평가할 수 있는 도구, 국가의 생물다양성 목표를 달성하기 위해 재정적 필요 평가 도구, 가장 적합한 금융 솔루션을 식별하는 생물다양성 금융 계획을 개발 도구를 제공한다. 이 과정은 재정적으로 건전하고 정치적으로 실행 가능한 생물다양성 재무 계획을 개발하는 방법을 알려 주며, 보존 계획 및 생물다양성 금융 개입의 및 정책 입안자를 대상으로 하지만 모든 사람에게 열려 있다.

- 홈페이지(기관) : <https://learningfornature.org/>
- 홈페이지(Biodiversity Finance 과정 소개 및 등록) : <https://learningfornature.org/courses/biodiversity-finance/>

Biodiversity Finance 이외에도 Access and benefit-sharing, Biodiversity valuation, Biosafety, Conservation and spatial planning, Education and awareness of nature's value, Environmental governance, International environmental policies, National biodiversity planning, Poverty eradication, Protected areas, Resilience, Sustainable consumption and production, Women's empowerment and natural resources와 관련된 총 66개의 다양한 교육 콘텐츠를 제공하고 있다.



[그림 10-2] Learning for Nature 홈페이지

#### 4. Biodiversity Course

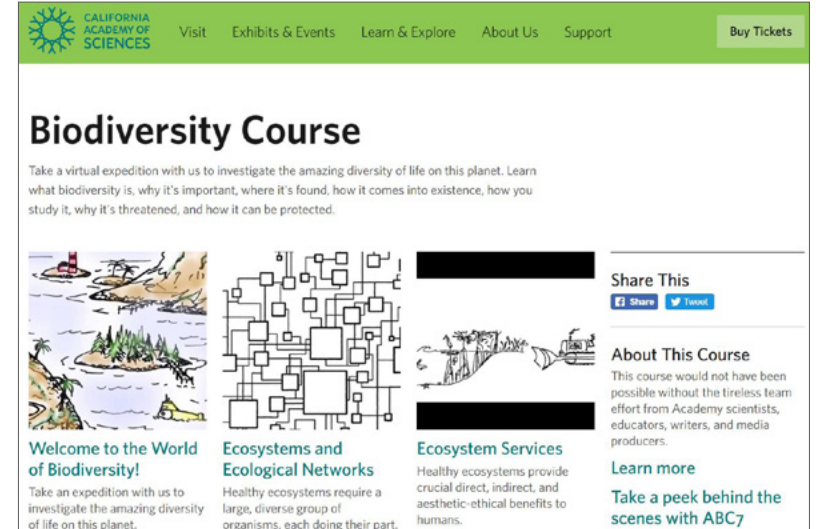
California Academy of Sciences 제공. 캘리포니아 과학 아카데미(California Academy of Sciences)는 지구의 생명을 탐험하고 설명하고 유지하는데 전념하는 세계적으로 유명한 과학 및 교육기관으로, 미국 샌프란시스코의 골든 게이트 파크(Golden Gate Park)에 위치한 세계적 수준의 수족관, 천문관 및 자연사 박물관으로 구성되어 있다. 이를 통한 대중적 과학 교육을 제공하는 역할 이외에도 분류학, 계통 발달학 및 생물다양성 연구를 위해 Institute for Biodiversity Science and Sustainability(IBSS)를 운영하고 있다.



CALIFORNIA  
ACADEMY OF  
SCIENCES

캘리포니아 과학 아카데미(California Academy of Sciences)에서 제공하는 생물다양성 코스(온라인)를 통해 생물다양성이 무엇인지, 중요한 이유, 발견 장소, 존재 방식, 연구 방법, 위협 이유 및 보호 방법에 대해 알아볼 수 있으며, 총 33개 동영상 콘텐츠를 제공하고 있다.

- 홈페이지(기관) : <https://www.calacademy.org/>
- 온라인 생물다양성 코스 : <https://www.calacademy.org/biodiversity-course>



[그림 10-3] Biodiversity Course 홈페이지

#### 5. UN CC:Learn Introductory e-Course on Climate Change(UN CC:e-learn)

UN CC:Learn UN Climate Change Learning Partnership 제공. 유엔 기후 변화 학습 파트너십 UN CC :



Learn, UN Climate Change Learning Partnership은 체계적이고 결과 지향적인 기후 변화 학습을 설계하고 실행하도록 지원하는 30개 이상의 다자 기구가 공동으로 추진하여 2009 코펜하겐 기후 변화 정상 회담에서 시작된 이니셔티브다. 처음 3년간의 시험 단계(2011-2013) 동안 UN CC : Learn는 5개 국가가 참여하였으며, 2014~2017년에는 서로 다른 국가와 협력하여 새로

운 학습 방법을 개발하고 학습 플랫폼을 향상시켰다. 2017~2020년은 기후 변화 교육의 중요성을 홍보하고 국가의 요구를 해결하는 데 초점을 맞추고 있다.

UN CC:Learn 목표는 전 세계적 차원에서 지식 공유를 지원하고 일반적인 기후 변화 학습 자료를 개발하며, 기후 변화 학습 전략을 개발하고 실행하는 국가를 지원하는 것이며, 관심 영역으로는 기후 변화 과학, 기후 금융, 국제 기후협상, 적응계획, 기후 변화와 건강, 기후 변화와 숲, 어린이를 위한 기후 변화 교육 등이 있고, 활동 영역으로는 지식 공유 및 관리, UN 기후 변화 교육, 참여국의 인적 자원, 학습 및 기술개발 지원 등이 있다.



[그림 10-4] Biodiversity Course 홈페이지

## 6. Free educational resources from the world's leading experts on sustainable development

SDG academy는 유엔의 (SDG academy 제공) Global initiative인 Sustainable Development Solutions Network SDSN의 온라인 교육 플랫폼으로, 지속가능한 개발 Sustainable Development에 대한 무료 자료를 제작, 관리하며 이를 글로벌 공공재로 제공하고 있다.

온라인 교육 플랫폼은 2015년 유엔 회원국이 채택한 17개의 지속가능한 목표 Sustainable Development Goals와 관련한 헤드라인 이슈와 다학제간 주제 등 총 26개의 코스를 제공하고 있다.

- 홈페이지(기관) : <https://sdgacademy.org/>
- 홈페이지(e-Learn) : <https://sdgacademy.org/courses/>

## 7. Learn Synthetic Biology

Diy-bio는 DIYbio의 채택을 가 (SDG academy 제공) 속화하고 의료 발견을 돕고 20세기 의학과 전통적인 기업 비즈니스 모델을 방해하려는 노력으로 바이오해커 커뮤니티를 육성하고자 개인들

이 모여 만들고 운영하는 DIY BIO 관련 사이트이다. 이 사이트에서는 합성생물학을 배우는데 도움이 되는 Online Courses, Quarterly Journal, Academic Papers, Learn Synthetic Biology by Doing Synthetic Biology, Meet-up with Some Biohackers, Try a Synthetic Biology Virtual Lab에 대한 정보를 제공하고 있다.

### 세부 정보 내용

- Online Course : MIT's Online MOOC
  - Online Courses : Synthetic Biology One
  - Quarterly Journal: Synthetic Biology- A Primer
  - Academic Papers: The PLOS Synthetic Biology Collection
  - Learn Synthetic Biology by Doing Synthetic Biology
  - Meet-up with Some Biohackers
  - Try a Synthetic Biology Virtual Lab
- **홈페이지(기관)** : <http://diy-bio.com/>
  - **홈페이지(e-Learn)** : <http://diy-bio.com/learn-science-behind-diybio/learn-synthetic-biology/>

## 생물다양성과 합성생물학 관련 보고서와 논문

### 생물다양성과 합성생물학 관련 문헌 소개(보고서, 논문)

#### 1. 관련 보고서

보고서 제목	Quick Guides for the Aichi Biodiversity Targets
저자	The Secretariat of the Convention on Biological Diversity (생물다양성협약 사무국)
출판연도	2013

이 문서는 각 Aichi Biodiversity Targets에 대한 빠른 안내서로, 각 목표에서 다루어진 주요 문제에 대한 개요를 제공하며, 주요 용어를 소개하고, 국가 목표 설정에 대한 영향을 강조하며, 국가 목표 설정 연습의 일부로 고려할 질문을 제공하고, 아이디어를 제공함으로써 당사자 및 기타 이해 관계자에게 각 Aichi Biodiversity Target에 대한 소개를 제공하는 것을 목표로 한다.

<b>보고서 제목</b>	Global Biodiversity Outlook 4(제4차 지구생물다양성전망)
<b>저자</b>	The Secretariat of the Convention on Biological Diversity (생물다양성협약 사무국)
<b>출판연도</b>	2014

국제사회는 2010년 일본 나고야에서 미래 세대에 대한 약속으로서 생물다양성전략계획 2011-2020 및 아이치 생물다양성 목표 20개 항목을 채택하였다. 그로부터 4년 후, 유엔 생물다양성 10년(2011-2020)의 중간 지점을 향해 가고 있는 시점에 출간된 「제4차 지구생물다양성전망」은 국제 사회가 어떻게 해오고 있는지를 보여주는 중요한 척도를 제공하며, 당사국들이 진전을 보이면서 아이치 생물다양성 목표를 이행하기 위한 구체적인 약속을 재평가하는 기회를 제공한다.

<b>보고서 제목</b>	CBD Technical Series No.82, Synthetic Biology
<b>저자</b>	The Secretariat of the Convention on Biological Diversity (생물다양성협약 사무국)
<b>출판연도</b>	2015

이 보고서는 합성생물학이 수반할 수 있는 생물다양성에 대한 잠재적 긍정적 및 부정적 영향에 대한 기술 정보를 제공하고, 기존 규정이 구성요소, 유기체를 어떻게 적절하게 다루는지에 대한 기술 정보를 제공함으로써 국제 토론과 과학 정책 인터페이스 사이의 격차를 메우는 것을 목표로 한다.

<b>보고서 제목</b>	The Economics of Ecosystems and Biodiversity(TEEB) in Business and Enterprise
<b>저자</b>	Edited by Joshua Bishop, Earthscan
<b>출판연도/출판사</b>	2012

이 보고서는 생물다양성 손실에 대한 기업의 관심이 커지고 있다는 중요한 증거를 제공하며, 선도적인 회사가 어떻게 생물다양성을 보존하고 생태계를 복원하기 위해 조치를 취하는지를 보여주고 있고, 생물다양성 손실과 생태계 쇠퇴의 징후와 동인을 살펴보면서, 어떻게 모든 비즈니스에 위험과 기회를 제공하는지 보여준다.

<b>보고서 제목</b>	알기 쉬운 지속가능발전목표 (SDGs : : Sustainable Development Goals)
<b>저자</b>	문도운, 민경일, 이소연, 이하늬, 이현아, 전지은
<b>출판연도</b>	2016

이 문서는 2015년 9월 유엔 회원 국가들이 모여 합의한 '지속가능발전목표(SDGs: Sustainable Development Goals)'에 대해 2016년 국내 민간단체 전문가들이 모여 작성한 것으로, 지속가능발전 목표에 대해 쉽고 자세하게 안내하고 있는 자료집이다.

<b>보고서 제목</b>	나고야 의정서 국제 이슈 분석 연구: 1차년도
<b>저자</b>	김영창, 최원목, 오선영, 곽희선
<b>출판연도</b>	2016

이 보고서는 합성생물학과 나고야 의정서에 대한 다양한 이슈를 분석하였으며, 나고야 의정서의 효과적인 이행을 위해 합성생물학의 정의 및 적용 분야에 대한 자료 확보 그리고 ABS 체계의 구축에 대해서, 결정문 분석, 국제동향에 대한 소개, 합성생물학 관련 사례 분석 그리고 합성생물학과 나고야 의정서와의 관계 등을 분석한다.

<b>보고서 제목</b>	합성생물학의 발전과 바이오 안보 정책 방향
<b>저자</b>	한성구, 조병관
<b>출판연도</b>	2018

이 보고서는 합성생물학의 개요 및 사례를 소개하고, 바이오기술 그리고 합성생물학과 바이오 안보에 대해서 소개한다.

<b>보고서 제목</b>	유전자원 이익공유 시대, 바이오산업계는 어떻게 대응할 것인가?
<b>저자</b>	오기환, 염지원, 기지현, 안지영
<b>출판연도</b>	2019

이 보고서는 나고야 의정서<sup>ABS</sup>가 국내 바이오산업에 미칠 수 있는 영향을 정리하고 이에 대한 준비 및 대응 관련한 국내외 현황을 소개한다.



<b>보고서 제목</b>	Genetic frontiers for conservation : an assessment of synthetic biology and biodiversity conservation : synthesis and key messages
<b>저자</b>	Edited by: Kent H. Redford, Thomas M. Brooks, Nicholas B.W. Macfarlane, Jonathan S. Adams
<b>출판연도</b>	2019

이 보고서는 국제자연보전연맹(International Union for Conservation of Nature, IUCN)에서 발간한 것으로, 생물다양성 보전에 대한 합성 생물학의 잠재적 긍정적 및 부정적 영향에 관한 권고 및 지침을 제공하고 있으며, 이와 관련한 전체 평가와 종합 보고서로 구성되어 있다.

## 2. 관련 논문

<b>논문 제목</b>	합성생물학과 윤리적 쟁점들
<b>저자</b>	이상헌
<b>출판연도</b>	2010, 생명연구 17 : 173-196

본 연구논문은 합성생물학과 윤리적 쟁점들에 대해서 다양한 이슈를 고찰하는 것으로, 합성생물학이라는 기술의 발전에 따라 초래될 수 있는 잠재적인 문제점에 대해서 논의하고 있다. 또한 생물학 및 생명과학에서 주요한 이슈로 부각되고 있는 합성생물학은 생명의 재창조 혹은 인공생명의 창조와도 연관성이 있기 때문에, 이에 대한 접근은 신중해야 한다고 설명하고 있다. 합성생물학의 윤리적 쟁점은 크게 네 가지 정도로 구분될 수 있는데, 이는 생물보안, 생물안전성, 공정성과 이득 배분 그리고 기타 다양한 문제점이다. 결론적으로 합성생물학의 발전은 윤리적 문제에서 벗어날 수 없기 때문에, 잠재적인 결과가 부정적이든 혹은 긍정적이든 이에 대해서 대중과의 소통을 중요하다고 밝히고 있다.

<b>논문 제목</b>	생명자원으로서의 합성생물학에 대한 고찰과 전망
<b>저자</b>	김준희, 한의진, 김예영
<b>출판연도</b>	2017, 생명자원연구, 25(1): 1-12

본 연구는 합성생물학이 생명자원의 관점에서 그 가치가 상당히 높고, 4차 산업혁명 시대에서의 기술을 주도한다는 측면에서 다시 조명될 필요가 있다고 주장하고 있다. 주요 내용으로 합성생물학의 개념, 방법론, 역사, 논의 및 평가 등을 통해 이가 생명자원으로서 어떠한 의미를 지니고 있는지를 소개하고 있다. 결론적으로, 합성생물학은 기존의 유전공학에 대한 다양한 정보를 누구나 활용/응용할 수 있도록 유전자를 표준화 및 부품화시켜 지식기반의 **knowledge-based** 고부가가치 창출을 위해서 생명자원을 제공한다는 측면에서 그 가치가 상당히 높다고 볼 수 있다.

<b>논문 제목</b>	합성생물학 시대에 신학담론의 위치
<b>저자</b>	방연상, 송기원, 이삼열
<b>출판연도</b>	2016, 신학사상, 174(): 1-36

본 연구는 합성생물학을 신학의 담론을 통해 논의하는 것으로, 합성생물학의 배경과 역사 그리고 정책의 관점에서 소개하고 있다. 그리고 신학은 합성생물학을 활용함으로써, 인류가 마주할 다양한 부작용을 방지할 수 있는 하나의 대안으로 기능할 수 있다고 주장하고 있다. 합성생물학은 세 가지 관점에서 그 목적과 접근방식이 설명될 수 있는데, 첫째는 합성생물학을 통한 생명체의 탄생을 조명하는 것이고, 둘째는 세포를 복잡한 기계 장치로 인식하는 것이며, 셋째는 합성생물학을 기존의 DNA 재조합 기술의 단순 연장 기술로 이해하는 태도라는 것이다. 이러한 관점에서, 합성생물학은 신학적 성찰이 요구되는데, 과학과 종교는 오랜 기간 동안 주제를 공유하게 함께 다루어진 이슈인 만큼, 잠재적인 갈등을 최소화할 수 있는데 상호 보완할 수 있다.

<b>논문 제목</b>	Synthetic biology: Recent progress, biosafety and biosecurity concerns, and possible solutions
<b>저자</b>	Wang, Fangzhong, and Weiwen Zhang.
<b>출판연도</b>	2019, Journal of Biosafety and Biosecurity

본 연구에서는 합성생물학의 생물학적 개념과 특성에 대해서 설명하며, 지난 10년간 합성생물학의 발전 양상에 대해서 살펴보고 있다. 이에 대해서 합성생물학이 인류 발전에 다양한 기여가 있었다. 이를테면, 인류의 건강, 과학의 발전, 환경보호 그리고 경제성장을 들 수 있다. 하지만, 이와 더불어, 잠재적인 위험도 존재하는데, 생물안전, 보안 그리고 윤리적 위험 등이다. 이에 대해 본 연구는 국가, 국제 그리고 개인적 관점에서의 다양한 노력에 대해서 내용을 제시하고 있다.

<b>논문 제목</b>	Synthetic biology regulation and governance: Lessons from TAPIC for the United States, European Union, and Singapore
<b>저자</b>	Trump, Benjamin D.
<b>출판연도</b>	2017, Health Policy

본 연구에서는 TAPIC 프레임워크에 대해서 그 내용을 소개하고 이로부터 합성생물학의 규제와 거버넌스에 대해서 논의하는 것을 주요한 목적으로 다루고 있다. 연구에 따르면, 합성생물학은 불확실한 기술이며, 이는 거버넌스를 구축하는데 다소 어려움을 제공할 수 있지만, 이를 잘 극복할 경우, 거버넌스를 개혁하는데 기여할 수 있다고 주장하고 있다. 즉 합성생물학은 다양한 분야에 잠재적인 이익을 제공함과 동시에 잠재적 위험을 포함하고 있는 기술이라는 측면에 동의하는 것이다. 연구에서는 이와 같은 기술의 거버넌스를 개선하기 위해 정부차원에서의 노력이 필요하다고 설명하고 있다.

<b>논문 제목</b>	A Brief Overview of Synthetic Biology Research Programs and Road-map Studies in the United States.
<b>저자</b>	Si, Tong, and Huimin Zhao.
<b>출판연도</b>	2016, Synthetic and systems biotechnology

본 연구에서는 미국의 생물학적 시스템 및 공학 분야에 대해 설명하면서, 미국이 합성생물학에서 가장 선도적인 국가라고 설명하고 있다. 이는 정부 부처의 투자뿐만 아니라 수많은 연구센터 및 교육기관을 통해 합성생물학에 대한 다양한 응용 분야에 대해서 발전이 있었다고 밝히고 있다. 본 연구에서는 주로 미국의 주요 생물학 그리고 합성생물학에 대한 다양한 연구를 소개하고, 이에 대한 정보를 제공하는데 주요한 목적이 있다.

<b>논문 제목</b>	Is it time for synthetic biodiversity conservation?
<b>저자</b>	Piaggio, Antoinette J., et al.
<b>출판연도</b>	2017, Trends in Ecology & Evolution

본 연구에서는 합성생물학이 유전변화를 가능하게 하며, 생물다양성 보존을 위한 다양한 문제해결에 도움이 된다고 밝히고 있다. 이에 대해서, 생물의 보존에 대해서 연구하는 학자들은 합성생물학을 연구하는 학자들과 생물다양성의 보호 및 부정적인 결과를 최소화하기 위해 적극적으로 협력해야 한다고 주장하고 있다. 요약하면, 논문에서는 학자들 간의 참여적 협력이 여전히 미비하다고 밝히고 있으며, 이에 대한 신속한 협력이 필요하다고 주장하고 있다.

5부

## 갈무리



---

## 갈무리

---

■ 유전자변형생물과 합성생물학을 특별히 구분하는 이유는 무엇일까? 과거의 유전자 변형은 단지 몇 개의 유전자를 조작하기 위하여 필요한 유전자를 인위적 합성이 아닌 특정 형질을 가진 생물에서 해당 형질을 가진 유전자를 찾아 조각으로 잘라낸 다음, 유전자 운반체인 벡터를 사용하여 그 형질을 도입하고자 하는 생물에게 전달하는 재조합 방식으로 이루어졌기 때문에 한계가 있었다.

그러나 지금의 합성생물학 기술은 기존의 유전자 변형 기술과 비교하여 더 빠르고 다양하게 생물체의 유전자를 합성하고 편집하여 생물이 원래 가진 유전자를 변형하거나 혹은 완전히 새로운 생명시스템을 개발할 수 있다.

지금까지 대부분의 유전자변형생물의 규제와 관련해서는 최종 산물에

있어서 외래 유전자의 도입 여부가 핵심이다. 그러나 외래의 유전자 도입이든 기존 유전자의 일부 편집이든 생명체의 유전자에 변이가 발생하였다는 것은 명백한 사실이다. 따라서 합성생물학과 관련된 정책에는 완전히 새로운 접근법보다는 기존의 제도와 법규를 수정·보완하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

현재 합성생물학의 기본 도구와 플랫폼은 바이오 기반 연료, 화학 물질 및 재료 생산과 같은 산업 생명공학 분야 전반에서 적용되고 있다. 기존의 화석 유래 화학 물질을 대체하기 위하여 화학 구조가 동일하거나 유사한 물질로 생산물에 대한 현재의 규제 시스템의 적용이 적절해 보인다. 신약은 de novo 접근법보다는 기존 규제의 수정을 통한 확장이 필요한 것으로 생각된다. 일부 특정한 경우에 합성생물학은 지적 재산권<sup>IP</sup>의 세부 사항을 고려해야 할 수도 있다.

하지만 가장 크게 염려가 되는 것은 인간의 소비로 인하여 유전되는 형질의 환경 방출을 포함하는 농업 응용 분야이다. 합성생물학 분야의 개발을 저해하는 규제보다는 수십 년 동안 유전자 변형GM 생물에 대한 경험을 토대로 일부 규제와 법규를 수정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 합성생물학은 아직 초기 단계에 있으며, 단순히 규제를 통해 문제를 해결해야 할 것이 아니라, 공공 자금 및 기술 이전을 통한 연구 및 혁신 지원과 지식재산권 문제에 대한 명확성을 개선할 필요가 있다.

따라서 합성생물학 분야의 기술개발 및 사용에 대한 기술적, 사회적, 윤리적 규범에 대한 국가 로드맵의 마련이 필요하다. 기술 로드맵은 기술 개발과 관련된 도전과 기회에 중점을 두고 기술 및 환경에서 지속가능한

미래 개발을 고려하여 연구, 개발, 재무, 법률을 계획하고 조정하기 위한 프레임워크를 구성해야 한다. 다양한 분야의 이해 관계자가 참여와 광범위한 논의를 통해 단기, 중기 및 장기적 국가 목표의 수립이 필요하다.

일반적으로 과학과 기술의 발전은 생명현상의 본질적인 이해와 이를 통한 인류 공익의 추구를 위하여 수행된다. 그러나 아무리 좋은 의도를 갖고 연구를 수행한다 하더라도 예상하지 못한 결과는 언제나 발생할 수 있다. 지금 시작되고 있는 합성생물학 세계는 진보인가, 퇴보인가? 아니면 긍정인가, 부정인가? 장단점은 늘 동전의 양면처럼 떼려야 뗄 수 없이 복잡하게 얽혀있다. 어느 쪽이 되던 개인의 삶뿐만 아니라 종족 전체의 생존 그리고 이와 관련된 사회와 생태계 전체에 어떤 식으로든 영향을 미치게 된다.

따라서 기술의 발전과 이에 따른 규제의 필요는 분리하여 생각할 수 없는 일이다. 잠재적 위험성과 혜택 그리고 금전적인 이익과 관련된 수요와 공급의 경제와 인간의 욕망이나 욕심에 의해 오용될 수 있는 우려에 대해서도 신중하게 생각해 보아야 할 것이다. 또한 개인 유전정보의 사용과 관련된 사생활 침해 문제 역시 합성생물학 및 인간 유전체학 분야에서 고민해 보아야 할 문제로 생각된다.

지금 우리가 살고 있는 세상의 변화는 과학기술만이 결정하지는 않는다. 윤리와 정치는 법과 정책을 통하여 과학기술에 많은 영향을 주고 있으며, 기술 혁신에는 항상 부정적인 이면도 존재한다. 생명체가 상품화되면 생명체 자체로서 존재의 의미를 상실할 수도 있고, 복원된 생물체가 생태계에서 역할이 무엇일지 그리고 인간의 판단으로 멸종시킨 생물체

로 인한 생태계의 변화는 무엇일지에 대해서는 아직 구체적으로 상상할 수 없다.

또한 기술이 개발되고 그 기술이 다른 기술과 결합하거나 다양한 방식으로 활용되는 과정에서 의도와는 다르게 부정적 결과를 초래하거나 윤리적인 딜레마가 발생 할 수도 있다. 따라서 대중과 다양한 이해 관계자가 과학기술의 발전과 이에 따른 여러 문제점을 해결하기 위한 논의가 필수적이다.

합성생물학은 공학적 개념을 가지고 있어 사전 설계, 최적화, 대량 생산 등 현재까지의 산업화 방법과 유사하여 그 파급효과는 더욱 클 것으로 전망된다. 따라서 인류 그리고 인류와 함께하는 생태계에 보다 긍정적인 영향을 주려면 전 인류가 합성생물학을 통한 경제적인 측면과 윤리적인 측면 그리고 과학기술 발전에 대한 균형 잡힌 시각이 필요하며, 합성생물학에 대해 보다 많은 이해를 통한 토론을 끌어내야 할 것이다. 여론이 합성생물학 발전에 중요한 요소가 될 수 있기 때문에 합성생물학 기술의 적용을 대중과 폭넓게 논의할 경우 투명성이 증가하고, 이러한 여론을 바탕으로 마련된 국가 로드맵은 일반 대중에게 생명공학과 관련하여 발생한 부정적인 인식을 줄이고 합성생물학의 발전에 매우 중요한 기능을 수행할 것이다.

단순한 이익과 위험이라는 기준으로 평가되고 있는 과학기술을 평가할 것이 아니라 생명 경시나 환경의 위해가 될 가능성에 대해서도 고려해야 한다. 따라서 인간의 통제 속에 생명을 창조할 수 있는 합성생물학 시대에서는 생명체 하나하나에 대한 가치와 의미를 포함한 논의가 필요하며, 이

를 통하여 인류 공통의 지속가능성을 높일 수 있는 생물다양성 보전에 책임감 있는 발전 방향으로 나아가야 할 것이다.

---

## 참고문헌

---

- Anna Filyushkina, Reversing the loss of biological diversity: Money talks, environbites. March 6 2018.
- Convention on Biology Diversity, Synthetic biology, CBD/COP/DEC/XIII/17, 16 December 2016.
- Convention on Biology Diversity, Synthetic biology, CBD/COP/DEC/14/19, 30 November 2018.
- Convention on Biology Diversity, New and emerging issues, UNEP/CBD/COP/DEC/X/13, 29 October 2010.
- Convention on Biology Diversity, New and emerging issues relating to the conservation and sustainable use of biodiversity, UNEP/CBD/COP/DEC/XI/11, 5 December 2012.
- Convention on Biology Diversity, New and emerging issues: synthetic biology,

UNEP/CBD/COP/DEC/XII/24, 17 October 2014.

- Collins, 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](http://www.europarl.europa.eu/stoa/cms/home/events/workshops/synthetic_biology)
- Global Carbon Project, Global Carbon Budget 2018, 5 December 2018.
- FO Licht, Slow 2011 World Ethanol Production Growth to Help Balance the Market, World Ethanol & Biofuels Report, 22 October. 2010a.
- FO Licht, A First Assessment of the 2011 World Biodiesel Balance, World Ethanol & Biofuels Report, 11 October, 2010b.
- Kemmer, C., D. A. Fluri, U. Witschi, A. Passeraub, A. Gutzwiller and M. Fussenegger, A designer network coordinating bovine artificial insemination by ovulation-triggered release of implanted sperms, Jour. nal of Controlled Release, 2011, Vol. 150, pp. 23-29.
- Murakami, S., K. Nagasaki, H. Nishimoto, R. Shigematu, J. Umesaki, S. Takenaka et al., Purification and characterization of five alkaline, thermotolerant, and maltotetraose-producing  $\alpha$ -amylases from *Bacillus halodurans* MS-2-5, and production of recombinant enzymes in *Escherichia coli*, Enzyme and Microbial Technology, 2008, Vol. 43, p 321-328.
- Nele Matz-Lük, Framework Convention as a Regulatory Tool, Goettingen Journal of International Law 1, 2009.

- OECD, Biotechnology and substantiality, The fight against infectious disease, OECD Publishing, Paris, 2003, [www.oecd.org/dataoecd/23/23/2508407.pdf](http://www.oecd.org/dataoecd/23/23/2508407.pdf)
- OECD, Future Prospects for Industrial Biotechnology, OECD Publishing, 2011a, doi: 10.1787/9789264126633-en
- OECD, Industrial biotechnology and climate change: opportunities and challenges, 2011b, [www.oecd.org/sti/biotech/49024032.pdf](http://www.oecd.org/sti/biotech/49024032.pdf)
- Panke, S., Synthetic Biology Engineering in Biotechnology, A report of the Committee on Applied Bioscience, Swiss Academy of Engineering Sciences, 2008.
- Scientific American Worldview: A Global Biotechnology Perspective, 2018.
- Tilford, D.S., Saving the Blueprints: The International Legal Regime for Plant Resources, Case Western Reserve Journal of International Law, 1998, vol. 30: 431-432.
- Xiang, S., J. Fruehauf and C.J. Li, Short hairpin RNA-expressing bacteria elicit RNA interference in mammals, Nature Biotechnology, 2006, Vol. 24, pp. 697-702.
- Ye, H., M. Daoud-El Baba, R.W. Peng and M. Fussenegger, A synthetic optogenetic transcription device enhances blood-glucose homeostasis in mice, Science, 2011, Vol. 332, pp. 1565-1568.
- 김동립, 전예일. 3D 바이오 프린팅 연구동향. 생명공학정책연구센터, 2018.
- 김석현. 국제법에 있어서 Soft Law. 국제법평론, 통권 제8호, 1997.
- 국립생물자원관, 나고야 의정서 국제 이슈 분석 연구 [1차년도], 환경부, 2016.
- 과학기술자문위원회. 2018년도 기술수준평가 결과. 과학기술정보통신부 한국 과학기술기획평가원, 2019.
- 노명준, 국제환경법의 원칙, 환경법연구, 제24권 제1호, 2002.
- 문현준, 민경복. 4차 산업혁명과 딥러닝. 한국공간구조학회지, 2017, Vol. 17, no.4, pp. 4-9.
- 생물공학정책연구센터, 글로벌 합성생물학 시장 현황 및 전망, 2018.
- 정인섭, 신국제법강의 제9판, 박영사, 2019.
- 한국바이오안전성정보센터, 나고야 의정서 대응 국내외 생물자원 확보·분석 및 산업화 전략 개발. 산업통산자원부, 2018.
- 한병구, 조병관. 합성생물학의 발전과 바이오안보 정책방향. 한국과학기술기획평가원, 2018, 2018-39 (vol. 257).



## 생물다양성과 합성생물학

발행처: 환경부 국립생물자원관

발행일: 2019년 11월 25일

기 획: 안세창, 김진한, 이은영, 강지혜, 오정민

작 성: 김용휘, 권태은, 이경동, 이현경, 이현민,  
민경복, 이홍재, 임충일, 심혜은, 박건우,  
홍지운, 조성은

디자인: 기민주

제 작: 도서출판 덤보