

Biotechnology

2020
바이오 미래유망기술

2020. 2



생명공학정책연구센터
Biotech Policy Research Center



<목 차>

1. 연구 배경 및 목적	1
가. 연구 배경 및 필요성	1
나. 국내·외 현황 및 사례	9
다. 연구 목적	14
2. 연구 범위 및 방법	15
가. 정의 및 추진방안	15
나. 단계별 연구 방법	17
3. 연구 결과	28
가. 2020 10대 바이오 미래유망기술 선정	28
나. 향후계획 및 기대효과	31
4. 참고문헌	33
[첨부1] 2020 바이오 미래유망기술 설명자료.....	35
[첨부2] 그간 발굴된 바이오 미래유망기술 리스트.....	55
[첨부3] 2019 바이오 미래유망기술 연재소설.....	65

<표 목차>

[표 1] 2019년 주목할 바이오분야 7대 기술 및 발전전망	2
[표 2] 바이오 미래유망기술 발굴 연구방법론 특징 비교	8
[표 3] 세계경제포럼 선정 10대 미래유망기술	9
[표 4] MIT 선정 10대 미래유망기술	10
[표 5] 주요 해외 미래유망기술 발표 현황	11
[표 6] 주요 국내 미래유망기술 발표 현황	13
[표 7] 미래유망기술 파급효과 정의	15
[표 8] 미래유망기술 발굴을 위한 단계별 추진방안	16
[표 9] 혁신적 연구성과 모니터링을 위한 분야별 해당 저널 및 논문 수	17
[표 10] 키워드 네트워크 분석 절차	18
[표 11] 바이오 미래유망 후보기술 도출 양식(예시)	22
[표 12] 2020 바이오 미래유망 후보기술	23
[표 13] 바이오 미래유망기술 설문조사 및 전문가 평가 결과	26
[표 14] 2020 10대 바이오 미래유망기술 주요 내용	28

<그림 목차>

[그림 1] 「바이오산업 혁신 정책방향 및 핵심과제」 5대 전략 분야 및 10대 핵심과제	6
[그림 2] Platform, Red, Green, White Bio로 살펴본 10대 미래유망기술	7
[그림 3] 바이오 미래유망기술 발굴 추진방안 변화	8
[그림 4] 미래유망기술 발표 국내·외 주요 기관별 비교	14
[그림 5] Platform 바이오 키워드 네트워크 분석 결과	19
[그림 6] Red 바이오 키워드 네트워크 분석 결과	19
[그림 7] Green 바이오 키워드 네트워크 분석 결과	20
[그림 8] White 바이오 키워드 네트워크 분석 결과	20
[그림 9] Platform 바이오 키워드 트렌드 분석 결과	21
[그림 10] 바이오인 고객 대상 설문조사 내용 구성	25
[그림 11] 2019 바이오미래유망기술 바이오인 연재소설	27
[그림 12] Platform, Red, Green, White Bio로 살펴본 10대 미래유망기술 ..	30
[그림 13] 바이오 미래유망기술 발굴 연구결과의 활용방안	32

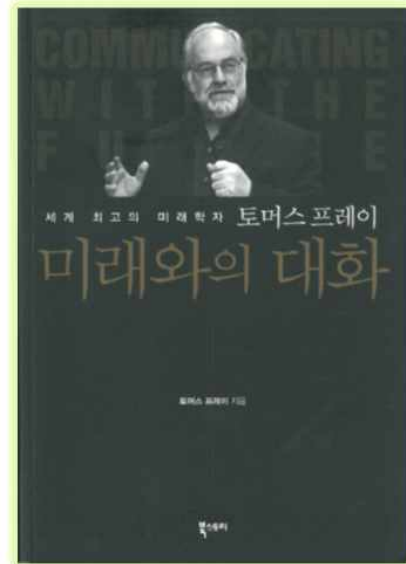
1. 연구 배경 및 목적

가. 연구 배경 및 필요성

[프롤로그(Prologue) - 시작에 앞서]

미래학자 토머스 프레이(Thomas Frey)는 그의 저서 「미래와의 대화(Communicating with the Future)」에서 “비전은 미래와 소통할 수 있는 강력한 도구가 될 수 있다.”라고 주장하고 있으며,

또한 그는 “몇 년 후나 몇 십 년 후에 실현될 새로운 기술에 대한 비전이 많은 반면 그 중에 결코 실현되지 않을 기술도 존재한다. 그러나 대부분의 비전은 처음에는 작은 씨앗과 같다.”라고 말하고 있다.



우리의 '바이오 미래유망기술'이 바이오 분야의 미래비전을 제시할 수 있는 작은 씨앗이 될 수 있기를 바란다.

- 2000년대 초반 인간게놈프로젝트(HGP-read) 종료 이후 10여년이 지난 현재, DNA 디자인과 합성 기반의 인간게놈합성프로젝트(HGP-write)¹⁾로의 패러다임 전환을 예고
 - 더불어 빠르게 진전되고 있는 유전체 분석기술과 유전자 편집기술이 인공지능, 빅데이터 기술과 만나면서,
 - 정밀의료, 정밀농업, 합성생물학 등 우리의 삶에 큰 파급효과를 나타낼 개념들이 현실화되는 추세
- ※ 최근 영국에서는 의료서비스기관(NHS Trust)들의 환자 데이터를 공유하는

1) 미국을 중심으로 한 생명과학자 25명은 향후 10년 내 인간 게놈(유전체)를 모두 합성하는 것을 목표로 전세계 '인간 게놈 프로젝트 합성(Human Genome Project-Write, HGP write)' 프로젝트 시작을 선언, Science, 2016.6

계약을 AI 전문기업인 딥마이드(DeepMind)와 체결(2019.9)하였는데, 딥마인드가 구글 헬스(Google Health)로 통합됨에 따라 새롭게 계약을 체결하였고, AI 기술을 헬스케어 분야에 적용하여 환자 모니터링 앱 스트림즈 등을 개발하고자 추진 중

- 딜로이트(Deloitte)에서 발표한 ‘글로벌 바이오 전망 보고서2)’에서 생명과학 분야의 디지털 전환이 가속화 될 것으로,
 - AI, 의료사물 인터넷(Internet of Medical Things, IoMT), 블록체인, 의료용 소프트웨어(Software-as-a-Medical- Device, SaMD), DIY 진단·가상케어(DIY diagnostics and virtual care), 로봇 자동화 등이 바이오 분야에서 디지털 전환을 촉진하는 선도적인 기술이 될 것으로 전망

□ 앞으로 어떤 바이오기술이 주목을 받을 것인가? 지난해 Nature³⁾에서는 7명의 바이오 전문가들에게 향후 주목해야 할 기술에 대해 인터뷰

- 단일세포 생물학의 확장, 유전자 편집기술의 향상, 초고해상도 현미경, 두뇌 연결지도, 유전체 합성기술의 진보, 분자 구조의 공개, 인공지능과 딥러닝 적용에 획기적인 발전이 있을 것으로 예상
 - 향후 이러한 기술들은 레드, 그린, 화이트바이오로의 다양한 파급효과가 기대되는 바이오 플랫폼기술(공통기반기술)로서, Post 반도체산업으로 주목하는 바이오산업의 혁신성장을 위해서는 이러한 바이오 플랫폼 기술에 대한 투자와 개발이 핵심이 될 것으로 전망

[표 1] 2019년 주목할 바이오분야 7대 기술 및 발전전망

기술분야	제안자 및 발전전망
<p style="text-align: center;">단일세포 생물학의 확장 (Expand single-cell biology)</p>	<p>▶ SARAH TEICHMANN <i>Head of cellular genetics, Wellcome Trust Sanger Institute, Hinxton, UK.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 지난 10년간 한 번에 프로파일링 할 수 있는 세포의 수가 크게 증가, 세포 포착(cell-capture) 기술의 향상, 바코드로 세포에 라벨을 붙이는 방법 및 현존하는 기술을 결합한 보다 스마트한 방법의 개발로 계속 발전할 것임

2) Deloitte, 2019 Global life sciences outlook ; Focus and transform | Accelerating change in life sciences, 2019.2

3) Nature, Technologies to watch in 2019, 2019.1

	<ul style="list-style-type: none"> ○ 이러한 증가는 다른 종류의 실험도 진행할 수 있게 하며 높은 해상도에서 더 복잡한 표본 연구를 가능케 함. 예를 들어 한 사람에게 초점을 맞추는 대신 한번에 20~100명의 샘플을 볼 수 있어, 인구 다양성을 보다 잘 파악할 수 있게 됨. 또한 발달 시점, 조직(tissues) 등 개인별 프로파일링 분석결과의 통계적 중요성을 높일 수 있음 ○ 단일세포에서 DNA-단백질의 복합체인 크로마틴(chromatin) 구조를 확인할 수 있어, 세포의 후성 상태를 이해하고 면역계와 신경계에서 후성 기억을 이해하는데 도움이 될 것임. 단일세포 유전체학을 표현형(phenotype)에 연결하는 방법에 발전이 있을 것으로 기대. 시퀀싱 기술과 이미징 기술의 수렴 진화로 다양한 유형의 발전이 있을 것임
<p style="text-align: center;">유전자 편집기술 향상 (Improve gene editors)</p>	<p>▶ JIN-SOO KIM <i>Director of the Center for Genome Engineering, Institute for Basic Science, and professor of chemistry, Seoul National University, Korea</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 3세대 유전자가위기술인 크리스퍼(CRISPR) 유전자편집 시스템은 특정 부위에서 DNA를 절단하는 효소인 Cas9을 사용. 기존 1, 2세대 기술에 비해 정확도와 효율성이 높아 획기적인 기술로 평가. 그러나 지난해 연구결과(2018, 웰컴 생어 연구소 앨런 브래들리 박사팀)는 크리스퍼 유전자가위가 예상치 못한 변이를 유발할 가능성이 높다고 발표 ○ 최근 Cas9 보다 정확도가 높으며, 오프타겟(off-target) 효과를 최소화하거나 피할 수 있는 xCas9 및 SpCas9-NG 효소로 대체하고 있음 ○ 또한 DNA 이중가닥을 자르지 않고 특정 위치의 염기 하나만을 바꿀 수 있는 염기편집(Base editing) 기술이 유전자편집 보다 깔끔하고 효율적임. 그러나 염기편집은 편집할 수 있는 순서가 제한되어 있어, 현재의 염기편집 기술을 재설계하고 개량하는 연구가 진행될 것임
<p style="text-align: center;">초고해상도 현미경 (Boost microscopy resolution)</p>	<p>▶ XIAOWEI ZHUANG <i>Professor of chemistry and chemical biology, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, US</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 유전체(Genome)의 3차 구조는 유전자 발현 조절에 중요한 역할을 함. 지난해 XIAOWEI ZHUANG 연구팀은 나노미터(nm) 수준의 정밀도로 염색질(chromatin)을 이미징하는데 성공. 이를 통해 수천 개 다른 유형의 세포에 대한 염기서열 정보와 염색질의 조절 메커니즘을 이해할 수 있게 됨 ○ 초고해상도의 이미징 분야에서 공간 분해능이 크게 향상될 것으로 기대. 해상도를 증가시키는 형광분자 및 이미징

	<p>접근 방식의 개선이 진행되고 있으며, 시간적 해결책도 향상되고 있음. 1nm 해상도에서 이미징이 일상화 될 것으로 기대</p>
<p>두뇌 연결지도 (Map brain connections)</p>	<p>▶ HONGKUI ZENG <i>Executive director of structured science, Allen Institute for Brain Science, Seattle, Washington, US</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 지난해 HONGKUI ZENG 박사 연구팀은 대뇌피질에서 유전자 발현여부를 바탕으로 133개의 서로 다른 세포 유형을 분류해 네이처에 발표. 이러한 성과는 이전보다 훨씬 많은 양의 전자현미경 데이터 세트 생성과 이미지 수집 및 샘플 처리 능력 향상, 컴퓨팅의 발전에 도움을 받음 ○ 앨런 뇌과학연구소는 기계학습 알고리즘의 도움으로 쥐의 뇌 신경 연결의 가상지도 만들기 위해 노력하고 있음. 연결체학(Connectomics : 두뇌 작동을 이해하기 위해 뇌 신경망의 구조를 포괄적으로 매핑하는 것을 목표)은 신경 활동과 행동을 이해할 수 있는 정보를 제공할 것으로 기대
<p>유전체 합성기술 진보 (Advance synthetic genomes)</p>	<p>▶ JEF BOEKE <i>Director of the Institute for Systems Genetics, New York University Langone Medical Center, New York City, US</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 생명체를 구성하는 전체 유전체를 합성할 수 있다는 것은 유전체 기능에 대한 새로운 시각을 얻을 수 있는 좋은 기회. 박테리아 및 효모의 유전체를 합성하는 과정에서 큰 진전이 있으나, 포유동물의 전체 유전체를 합성하는 데는 기술적인 문제가 남아있음 ○ DNA 합성비용을 줄이는 획기적인 기술발전이 필요하며, DNA 합성은 phosphoramidite를 이용한 화학적 합성이 주를 이루고 있으나 최근 많은 기업과 실험실에서 화학합성 보다 빠르고 정확하며 비용이 적게 드는 효소를 이용한 방법을 개발하고 있음. 효소를 이용해 합성된 분자를 상업적으로 제공한 사례가 없었으나, 지난해 10월 DNA Script사가 150bp를 합성했다고 발표 ○ 그간의 연구로 인간 염색체 DNA의 100kb 이상 합성 가능. 이 접근법을 사용하여 질병감수성 식별 및 표현형 특성분석 등이 가능할 것임
<p>분자 구조의 공개 (Reveal</p>	<p>▶ VENKI RAMAKRISHNAN <i>Structural biologist, MRC Laboratory of Molecular Biology, Cambridge, UK</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 2017년 노벨화학상은 저온 전자현미경(Cryo-electron microscopy,

<p>molecular structure)</p>	<p>cryo-EM)으로 생체구조를 규명하는 방법을 개발한 3명의 과학자가 수상. 저온 전자현미경은 이전보다 더 작고 덜 순수한 샘플을 사용하여 고해상도의 구조를 결정할 수 있게 함. 이로서 이전에는 관찰할 수 없었던 구조를 볼 수 있을 뿐 만 아니라 단백질 복합체의 역동성이나 생화학적 과정의 여러 상태 등을 연구할 수 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 샘플 준비과정의 개선 필요. 샘플 준비과정에서 움직이는 생체분자들을 순식간에 동결하게 되는데, 이때 공기와 물 경계 면의 분자는 변질되거나 붕괴될 수 있으며, 샘플에 충돌한 전자가 분자를 충전하여 이동을 흐리게 만들 수 있음
<p>인공지능과 딥러닝 적용 (Apply AI and deep learning)</p>	<p>▶ CASEY GREENE <i>Assistant professor of systems pharmacology and translational therapeutics, Perelman School of Medicine, University of Pennsylvania, Philadelphia, US</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 딥러닝 소프트웨어와 인공지능을 사용하여 유전자 조절요소가 결합하는 모티프를 찾는 등 예측모델 구축이 수월해짐. 이제 우리는 유전자 조절 자체의 세부사항과 특정 유전적 특징이 중요한 이유 등 보다 본질적인 모델을 원함 ○ CASEY GREENE 연구팀은 항중성구 세포질 항체 관련 혈관염이라는 희귀질환에 대한 RNA 시퀀싱 데이터 세트로 모델을 훈련, 이 모델을 사용하여 이 질병의 증상에 기여하는 면역 및 대사기능과 관련된 유전자 네트워크를 밝혀내 바 있음. 이와 같은 접근방법은 특정 시나리오에 대한 예측모델과 특정 문제에 대한 해답을 제공할 뿐만 아니라 생물학적으로 발생하는 일이 무엇인지는 밝혀내는데 도움을 줄 것으로 기대

출처 : Nature, Technologies to watch in 2019, 2019.1.23.

- 최근 기재부 중심의 관계부처 합동으로 「바이오산업 혁신 정책방향 및 핵심과제」 4)를 발표
 - 5대 추진전략 중 하나인 R&D 부문 핵심과제로 '바이오 부가가치의 원천인 미래유망기술 확보'가 포함
 - 특히, 공통기반기술(플랫폼), 레드, 그린, 화이트 바이오 분야별 미래유망기술을 강조

4) 관계부처 합동, 바이오산업 혁신 정책방향 및 핵심과제, 2020.1

Ⅲ. 바이오산업 혁신 정책방향

◇ 바이오산업을 차세대 주력산업으로 육성하고, 바이오경제 선도 국가로 도약하기 위해 5대 분야 10대 핵심과제 중점 추진

◇ 바이오산업 전문분야 혁신을 통한 선진 바이오경제 구현

5대 전략 분야 10대 핵심과제 추진

	5대 추진전략	10대 핵심과제
R & D	<전략1> 글로벌 경쟁력 강화를 위한 R&D 혁신 <ul style="list-style-type: none"> ■ 생명연구자원 고도화 ■ 공통 기반기술 및 분야별 미래 핵심기술 확보 	① 바이오 연구자원 빅데이터 인프라 구축 ② 바이오 부가가치의 원천인 미래 유망기술 확보
인재	<전략2> 바이오 분야 전문 인력 중점 육성 <ul style="list-style-type: none"> ■ 제약바이오 전문인력 양성 ■ 바이오산업 첨단 핵심인력 양성 	③ 바이오산업 우수 핵심인재 양성
규제·제도	<전략3> 시장성장 촉진을 위한 규제제도 선진화 <ul style="list-style-type: none"> ■ 바이오헬스 규제 개선 ■ 바이오 분야 금융제도 정비 	④ 바이오헬스 분야 합리적 규제환경 조성 ⑤ 바이오산업 금융분야 제도 정비
생태계	<전략4> 바이오 생태계 조성 및 해외진출 지원 <ul style="list-style-type: none"> ■ 상용화 지원 R&D 강화 ■ 오픈 이노베이션 활성화 ■ 바이오 창업·수출 지원 ■ 바이오 클러스터 효율화 	⑥ 바이오산업 기반조성 및 해외진출 지원 ⑦ 바이오 클러스터 재정비를 통한 지역거점 육성
사업화	<전략5> 바이오기반 기술융합 사업화 지원 <ul style="list-style-type: none"> ■ 바이오 기술 기반 신산업 육성 ■ 미래 유망 제품·비즈니스 모델 발굴 	⑧ K-뷰티 글로벌 경쟁력 강화 ⑨ 그린바이오 융합형 신산업 육성·활성화 ⑩ 화이트바이오 초기시장 창출

범정부 바이오산업 혁신 TF

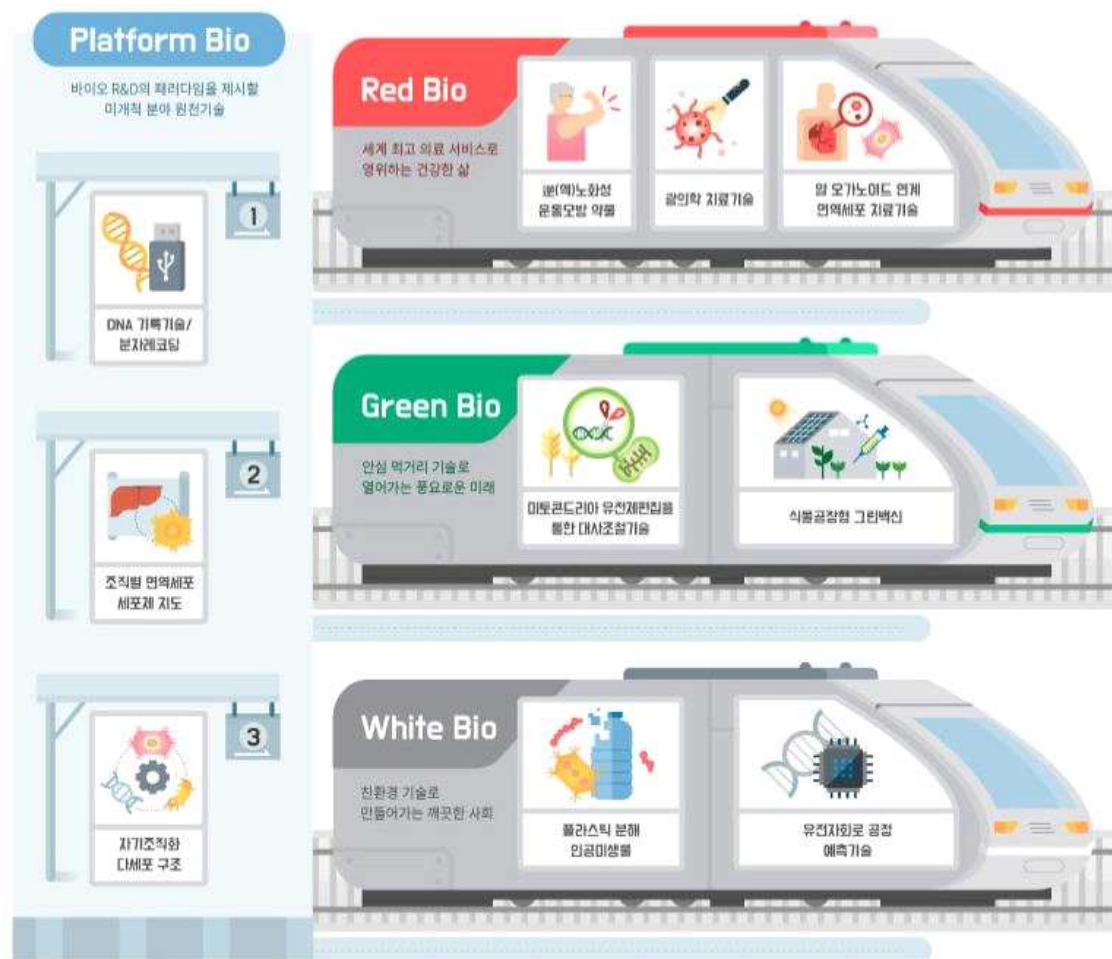
- 10개 관계 부처 및 10개 연구기관 등 참여
- 6개 작업반 구성(①총괄·규제개선반, ②개발지원반, ③금융지원반, ④바이오헬스반, ⑤자원·식품바이오반, ⑥산업기반조성반)
- 본회의 2회, 작업반 회의 및 전문가 간담회 30여회 개최

[그림 1] 「바이오산업 혁신 정책방향 및 핵심과제」 5대 전략 분야 및 10대 핵심과제

- 생명과학과 바이오기술의 상호혁신을 유도하는 플랫폼, 레드, 그린, 화이트 바이오 분야의 미래유망기술 발굴 연구 추진 필요
 - 지난해 생명공학정책연구센터는 바이오분야의 혁신적 연구성과 분석을 통해 기초·기반/플랫폼(Platform Bio), 보건의료(Red Bio), 농림수축산·식품(Green Bio), 산업공정/환경·해양(White Bio) 분야별로 선별된 10대 미래유망기술을 발표

2019년 10대 바이오 미래유망기술

Platform, Red, Green, White Bio로 살펴본 미래유망기술



[그림 2] Platform, Red, Green, White Bio로 살펴본 10대 미래유망기술

출처 : 생명공학정책연구센터, 2019 바이오 미래유망기술 발굴, 2019.1

- 생명공학정책연구센터는 지난 2015년부터 바이오 미래유망기술 발굴연구를 추진해오고 있으며, 다섯 번째 연구결과를 올해 발표
 - 바이오 분야에 최적화된 미래유망기술 발굴방법과 절차를 구축하기 위해서 다양한 연구방법을 수립
 - 지난 2015년 미래유망기술 발굴방법은 기술융합형으로 추진하였으며, 2017년은 이슈대응형으로, 2018년은 혁신발견형으로, 2019년과 2020년은 혁신공감형으로 변화하여 추진



[그림 3] 바이오 미래유망기술 발굴 추진방안 변화

[표 2] 바이오 미래유망기술 발굴 연구방법론 특징 비교

기술융합형	이슈대응형
<ul style="list-style-type: none"> ▪ BT-ICT 융합 관점의 기술 선정 ▪ 타 기관과의 협력으로 긍정적 홍보 효과 및 차별성 확보 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 바이오 뉴스 빅데이터 기반의 이슈 발굴 프로세스 확보 ▪ 대내외적인 이슈 기반으로 타당성 제시 가능
혁신발견형	혁신공감형
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 미래비전을 제시할 수 있는 혁신형 seed 발굴을 위한 분석 프로세스 확보 ▪ 현 시점의 이슈 중심이 아닌 향후 파급력을 나타내는 기술 발굴 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 혁신발견형의 보완된 형태로 진화 ▪ 선정된 기술을 보다 쉽게 대중에게 전달하여 공감대 형성 강화

- 바이오 관련 핵심저널에 발표되는 독창적이고 기발한 최신 연구결과 모니터링 및 전문가 심층토론에 따른 미래유망기술 발굴 프로세스 수립
 - 바이오 분야 최신 연구결과의 참고문헌 이중성 및 키워드 네트워크 분석결과를 토대로 분야별 전문가의 심층토론 등을 통해 후보기술 도출
 - 또한 후보기술에 대한 파급효과 평가를 위해 바이오정보 포털사이트인 바이오인(<http://www.bioin.or.kr>) 회원 등을 대상으로 설문조사 추진

나. 국내·외 현황 및 사례

- (국외) 세계경제포럼(WEF), MIT, 가트너(Gartner), 맥킨지(McKinsey), 테크캐스트(Techcast) 등에서 미래유망기술 또는 전략기술 발표
- WEF⁵⁾ 선정 10대 미래유망기술 중 바이오 분야는 점차 증가하는 추세
 - 바이오 관련 기술은 2015년 2개에서 2017년은 4개, 올해 5개의 기술 선정
 - ※ (바이오기술 포함 추이) 2015년 2개, 2016년 3개, 2017년 4개, 2018년 6개
 - 2019년 바이오 관련 미래유망기술 5개 : 순환경제를 위한 바이오플라스틱 (Bioplastics for a Circular Economy), 신약 타겟으로써의 구조결합 단백질 (Disordered Proteins as Drug Targets), 환경오염을 줄이는 더 스마트한 비료 (Smarter Fertilizers Can Reduce Environmental Contamination), 고급 식품 추적 및 포장(Advanced Food Tracking and Packaging), DNA 데이터 저장(DNA Data Storage)

[표 3] 세계경제포럼 선정 10대 미래유망기술

2017년	2018년	2019년
액체 생체검사	증강현실	순환경제를 위한 바이오플라스틱
물 획득 기술	정밀의료	소셜 로봇
시각 작업 딥 러닝	인공지능 기반 분자 디자인	소형 장치를 위한 작은 렌즈
태양광 이용 액체연료 제조기술	다능한 디지털 헬퍼	신약타겟으로써의 구조결합 단백질
인간세포 도감	전이가능 약물생산 세포	환경오염을 줄이는 더 스마트한 비료
정밀농업	유전자 드라이브	협업 텔레프레즌스
환경친화 이동수단 촉매	양자컴퓨터 알고리즘	고급 식품 추적 및 포장
게놈백신	플라즈모닉 재료	보다 안전한 원자로
공동생활권 디자인	실험실 생산 인공육류	DNA 데이터 저장
양자컴퓨팅	디지털 약물	유틸리티 규모의 재생에너지 저장

출처 : 세계경제포럼, Top 10 Emerging Technologies

5) 유수의 기업인, 경제학자, Journal리스트, 정치인 등이 모여 세계 경제에 대해 토론하고 연구하는 국제 민간회의로, 스위스의 제네바에 위치하고 있지만, 매년 1~2월 그라우빈덴 주에 위치하는 휴양 도시 다보스에서 열렸기 때문에 ‘다보스 포럼’으로 불림

- 미국 MIT에서는 테크놀로지 리뷰(Technology Review)를 통해 경제, 정치에 영향을 미치며 의학을 향상시켜 우리 문화에 큰 변화를 가져올 수 있는 '2019년 10대 혁신기술' 발표
 - 2001년부터 매년 10대 혁신기술(10 Breakthrough Technologies)⁶⁾을 선정하여 발표
 - ※ 새로운 기술 출현의 마이크로 트렌드에 초점을 맞추어 전 세계적으로 연구가 진행되는 기술(IT, BT, ET 등) 중 향후 5년 안에 사회·경제적 파급효과가 큰 10대 기술을 선정
 - 2019년 선정된 바이오 관련 기술로는 조산아 예측(Predicting preemies), 소형 캡슐형 장기 검사기(Gut probe in a pill), 맞춤형 암 예방 백신(Custom cancer vaccines), 인공육 햄버거(The cow-free burger), 손목형 심전도 측정기(An ECG on your wrist)로 총 5개 선정

[표 4] MIT 선정 10대 미래유망기술

2017년	2018년	2019년
마비역전기술	3D 금속 프린팅	로봇의 능력/재능
자율주행 트럭	인공배아	원자력의 새로운 시도
얼굴인식 지불방법	감각도시	조산아 예측
실용적인 양자 컴퓨팅	모두를 위한 인공지능	캡슐(알약)에 든 장 진단/활용 기기
360도 셀카	결투신경망	맞춤형 암 백신
고온 태양전지	바벨피쉬 이어버드	소고기 없는 버거
유전자 치료 2.0	탄소제로 천연가스	이산화탄소 포집기
세포 지도	완벽한 온라인 사생활	손목에 차는 심전도측정기
사물 봇넷	유전적 운세	하수도 없는 위생시설
강화 학습	재료의 양자 도약	자연스럽게 말하는 AI비서

출처 : MIT Technology Review, 10 Breakthrough Technologies

6) MIT Technology Review는 2001년부터 매년 상반기에 10대 Breakthrough Technologies를 발표, 매년 바이오 관련 기술이 2~4개 포함

[표 5] 주요 해외 미래유망기술 발표 현황

기관명	주요 내용	최초 발표	발표 주기
세계경제포럼 (WEF)	▪ [Top 10 Emerging Technologies] 인류에 긍정적이고 실제적 영향을 주는 그 해 주목받는 미래유망기술	2012년	1년
메사추세츠공대 (MIT)	▪ [10 Breakthrough Technologies] 경제적/사회적 파급효과를 가져올 향후 인류가 추구할만한 가치가 있는 10개 기술	2001년	1년
가트너 (Gartner)	▪ [Top 10 Strategic Technology Trends] 3-5년 내에 급부상 할 것으로 예상되는 IT 분야 10가지 기술	2004년	1년
아이디씨 (IDC)	▪ [Top 10 Tech Predictions] 3-5년 내에 급부상 할 것으로 예상되는 IT 분야 10가지 기술	2007년	1년
딜로이트 (Deloitte)	▪ [2018 Deloitte Global Technology, Media and Telecommunication Predictions] 본격적인 기계학습 도입에 대한 전망과 기술	2002년	1년
마셔블 (Mashable)	▪ [9 technologies to watch in 2017] 9대 기술 트렌드 예측	2012년	1년
테크스팟 (techspot)	▪ [7 Tech Predictions for 2018] 2018년 산업에서 중요한 발전을 가져올 것으로 기대되는 핵심 기술	2014년	1년
WT VOX	▪ [Top 6 New Technology Comebacks In 2016] 선택받지 못했지만 다시 우리생활 속으로 들어와 세상을 변화시키고 있는 기술	2015년	-
World Future Society	▪ [WORLD FUTURE 2018: HUMAN PURPOSE] 1966년 설립되어 매년 연례학회를 개최	1966년	1년
Forbes	▪ [Top 10 Most Transformative Technologies For Marketing In 2018] 인공지능과 기계학습을 바탕으로 '마케팅'의 미래를 결정할 수 있는 기술	2017년	-
McKinsey Global Institute	▪ [What the future of work will mean for jobs, skills, and wages] 자동화 및 인공 지능의 급속한 발전이 특징인 시대에 일자리에 대한 평가와 미래 전망	2017년	-
CBS	▪ [Tech trends to watch in 2017] 소비자 기술의 변화와 인공지능, 가상현실의 미래 예측	2017년	-
PwC	▪ [Top 10 AI technology trends for 2018] 여러 분야의 비즈니스에 대한 AI 최신 트렌드 기술	2013년	1년
Paste	▪ [the 10 best technology advances of 2016] 그동안 발표된 최고의 기술발전 소개	2013년	1년
The Washington Post	▪ [10 bold predictions for 2014] 최신 Mary Meeker Internet Trends 예측	2014년	-

기관명	주요 내용	최초 발표	발표 주기
SwiftKey	▪ [Top 10 tech predictions for the future] 기술혁신을 통한 우리에게 다가올 미래예측 설문조사	2014년	-
TIME	▪ [Top 20 Green Tech Ideas] 환경에 관한 창조적이고 스마트한 일을 하고 있는 회사와 기술 소개	2010년	-
Verizon	▪ [7 trends driving enterprise IT transformation in 2019] IT 기반 글로벌브랜드, 정부기관이 더 나은 고객서비스를 제공하기 위한 기술 및 차별화 전략	2017년	1년
Matador network & Intel	▪ [13 future car technologies for your road trip in 2020] 2020년까지 변화될 자동차 관련 기술	2012년	-
gov-UK	▪ [Eight great technologies] 영국의 연구성과물 중 미래성장동력이 될 수 있는 8대 기술	2013년	-
IBM	▪ [Next 5 in 5] IBM 연구소가 개발 중인 신기술을 토대로 향후 5년간 세상을 변화시킬 5가지의 기술혁신	2016년	1년

출처 : KISTEP, 2019년 KISTEP 10대 미래유망기술 선정에 관한 연구(2019.1) 등

□ (국내) 한국과학기술기획평가원(KISTEP), 한국과학기술정보연구원(KISTI) 등에서 기관에 따라 주제별 미래유망기술 발표

- 미래유망기술에 대해서 ‘미래’에 대한 관점은 발굴 목적에 따라 다양
 - 발굴 연구를 주도하는 주체에 따라 목적에 차별성을 지니고 있음
 - ※ (기업) 1~2년 내에 상용화할 수 있는 제품 모색, (국가연구개발사업) 향후 5~10년 안에 기술이 실현되기 위한 목적 설정 가능
- KISTEP에서는 매년 다양한 주제를 선정하고 우선순위 평가를 통해 미래유망기술을 발표
 - 2019년 연구는 주력산업 관련 기반기술인 소재 분야, 특히 혁신적인 소재 기술을 통해 주력산업의 디지털화를 지원한다는 목적을 고려하여 기술을 Environment of Things, Bio of Things, Energy of Things, Electronics of Things의 4개 분야로 구분
 - 이후 현황 분석, 빅데이터 분석, 전문가 의견 수렴 및 검토 과정을 거쳐 기술을 선정하였으며, 바이오 관련 기술로는 손실된 인체감각을 대체하는 기기용 소개와 3D 프린팅 인공장기가 포함

- KISTI에서는 국내·외 유망기술에 대한 정보를 수집, 빅데이터 분석을 통해 주제에 걸맞는 우선순위 도출 및 유망기술 선정
 - 2019년에는 빅데이터와 인공지능 기술을 이용, 최근 12년간 전세계에서 출판된 과학기술과 인문사회과학 분야를 포괄한 약 1600만건의 논문 정보 활용해 미래 10대 유망기술을 예측
 - 바이오 관련 기술로는 생물다양성 연구, 휴머노이드 로봇 기술이 선정

[표 6] 주요 국내 미래유망기술 발표 현황

기관명	주요 내용	최초 발표	발표 주기
한국과학기술 기획평가원 (KISTEP)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [10대 미래유망기술] 바람직한 미래국가상 관점에서 주요 사회적 이슈에 대한 대응 기술 	2009년	1년
한국과학기술 정보연구원 (KISTI)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [미래유망기술] 딥러닝을 이용한 기술클러스터의 미래 성장가능성 예측 	2006년	1년
한국연구재단 (NRF)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [12대 미래유망기술] 국가미래유망기술 상시 발굴 및 준비체제 	2017년	미정
한국전자통신연구원 (ETRI)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [주목해야 할 7대 미래기술] ICT 분야 중심의 유망기술 	2014년	1년
한국정보화진흥원 (NIA)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [전자정부 10대 기술트렌드] 차년도에 부각될 인터넷·정보보호 이슈를 도출 	2010년	1년
한국생명공학연구원 (KRIBB)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [바이오 미래유망기술] Platform, Red, Green, White 바이오로 살펴본 10대 미래유망기술 	2015년	1년
한국전력공사 (KEPCO)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [전력기술의 미래전망] 미래 유망전력 기술 후보 발표 	2014년	1년
중소벤처기업부 (구 중소기업청)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 중소·중견기업 기술로드맵 2018-2020 	2014년	1년
한국산업기술 평가관리원 (KEIT)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기술이슈 발간(PD이슈리포트, 2017) 	2009년	상시
국립전파연구원 (RRA)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2025년 미래전파 기술수요 예측조사 	2013년	-
특허청 (KIPO)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [5대 산업분야별 10대 미래유망기술] 핵심·원천특허 확보 가능 기술 	2012년	1년
정보통신기술 진흥원(IITP)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ [ICT 10대 이슈] ICT 분야에서 미래에 전개될 주요 이슈 	2008년	1년

출처 : KISTEP, 2019년 KISTEP 10대 미래유망기술 선정에 관한 연구(2019.1) 등

다. 연구 목적

- 차세대 성장동력 및 미래산업으로 인식되고 있는 바이오 관점의 미래유망기술 발굴 프로세스 구축 및 이를 활용한 미래유망기술 발굴
 - 국내외 주요 기관별 사례를 살펴보면 대상 기술은 과학기술 전문야 또는 ICT를 대상으로 하고 있으며 BT만을 대상으로 하는 사례는 전무
 - 주요국은 국가차원의 바이오경제 청사진을 마련하고, 유망 혁신기술의 선점과 시장 선도를 위한 경쟁이 이미 본격화

구분	KISTI	KISTEP	MIT	Gartner
대상기술	과학기술 전문야	과학기술 전문야	과학기술 전문야	ICT
선정방법	복합 (빅데이터 + 전문가평가)	복합 (빅데이터 + 전문가평가)	미공개 (전문가 델파이로 추정)	전문가 리뷰
실현시기	단기 (3년)	중장기 (5~10년)	중기 (5년)	단기 (3년)
특징	주요이슈관점 (중소·중견기업이 주목해야할 기술)	메가트렌드관점 (사회 주요이슈 해결 기술)	신기술 관점 (한번 등장한 기술은 다시 언급되지 않음)	시장 관점 (Hype curve 이용 제품의 수명주기 고려)

바이오 관점의 미래유망기술 도출 프로세스 구축을 통한 미래유망기술 발굴 필요

[그림 4] 미래유망기술 발표 국내·외 주요 기관별 비교

- 이에 본 연구에서는 바이오 분야의 연구개발을 선도할 수 있는 미래유망기술 도출 방법을 정립하고, 이를 통해 사회·경제적 혜택을 극대화할 수 있는 바이오 미래유망기술 발굴을 목적
 - 이를 통해 바이오 분야의 미래비전을 제시할 수 있고, 미래니즈에 사전대응 할 수 있는 바이오 미래유망기술을 도출
 - 1차적으로 학생을 포함한 대중들에게 바이오가 우리의 삶에 어떤 영향을 미칠지, 더 나아가 바이오 연구개발 필요성과 중요성에 대한 공감대 형성에 활용
 - 추가적으로는 산·학·연의 연구자들에게는 핵심기술 개발의 단초를 제공하고, 정책 입안자들에게는 정책 및 투자방향의 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 기대

2. 연구 범위 및 방법

가. 정의 및 추진방안

□ 2020 바이오 미래유망기술 정의

- 생명현상 연구(생명과학)를 기반으로 향후 5~10년 이내에 기술적 또는 산업적 실현이 가능하고, 향후 기술적, 산업적 파급효과가 높게 전망되는 기술
 - (바이오) 생명현상 연구(생명과학)를 기반으로 과학적 지식의 발견을 촉진, 문제해결 또는 유용제품 생산에 활용할 수 있고,
 - (미래) 향후 5~10년 이내에 기술적 또는 산업적 실현이 가능하고,
 - (유망기술) 기술적 혁신성 및 산업적 혁신성에 대한 파급효과가 높게 예측되는 기술

[표 7] 미래유망기술 파급효과 정의

구분	정의
기술적 혁신성	▪ 관련분야의 기술발전을 혁신하거나 기술적 문제해결에 영향력 발휘
산업적 혁신성	▪ 관련분야의 산업발전을 혁신하거나 광범위한 경제적 영향력 발휘

참고 : 미래기술은 “예측활동”, (미래)유망기술은 “발굴활동”

◆ 아래의 구분에 따라 본 연구는 미래유망기술을 발굴하는 활동으로 정의

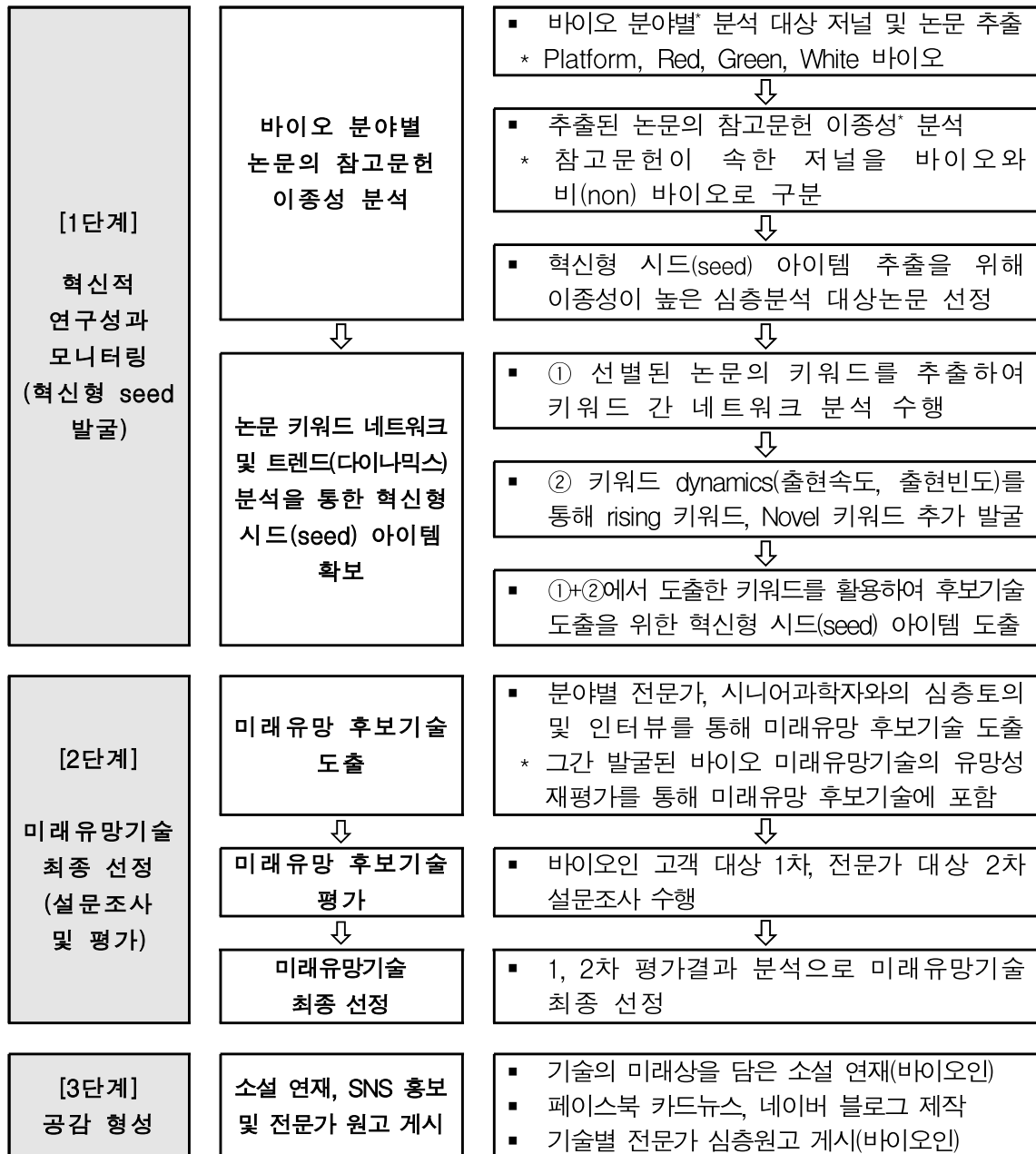
분야	미래기술	(미래)유망기술
정의	미래사회 패러다임 변화의 근간을 형성하는 기술(기술개발주체의 주관적 관점 없음)	기술개발주체에게 특정 미래시점에서 기회와 기대를 제공할 수 있는 기술
활동의 표현	“예측 활동”이라 불림	“발굴 활동”이라 불림
활동의 형태	이벤트성 활동이 많음	상시적인 정보 모니터링이 매우 중요
활동의 주체	주로 국가 단위	국가, 기업, 컨설팅업체 등 다양
미래 관점	최소 5년 후	내일부터

출처: KISTI, Technology Intelligence와 유망기술 센싱전략 발표자료(2014)

□ 2020 바이오 미래유망기술 발굴을 위한 추진방안 수립

- 혁신적 연구성과 분석을 통한 시드(seed) 아이템 도출 단계와 전문가 자문 등을 통한 미래유망 후보기술 도출 및 선정과 공감 형성 단계로 구성
- 의외(novel)의 지식조합으로 참고문헌의 이종성이 높은 논문이 과학적인 파급효과가 높다는 연구결과⁷⁾를 참고, 혁신적인 연구성과 분석 방법을 수립

[표 8] 미래유망기술 발굴을 위한 단계별 추진방안



7) Brian, U. et al., Atypical Combinations and Scientific Impact. Sci. 342,468-472, 2013

나. 단계별 연구 방법

1) 1단계 : 혁신적 연구성과 모니터링을 통한 혁신형 시드(seed) 발굴

□ 바이오 분야별 분석 대상 저널 및 논문 추출

- (데이터베이스) Journal Citation Reports(JCR), Web of Science(WoS)
- (대상년도 및 문서형태) 2018. 1월 ~ 2019. 7월, Article
- (수집절차) 바이오 관련 저널 카테고리를 선별한 후 바이오 분야별로 분류하여 파급효과 높은 저널 내 논문을 추출

- JCR의 전체 저널 카테고리에서 바이오 관련 카테고리 선별
- 바이오 카테고리를 Platform, Red, Green, White 바이오로 카테고리* 구분 및 각 카테고리별 해당저널 수집

* 생명공학 육성계획을 총괄한 최상위 법정계획(17~26)인 제3차 생명공학육성기본계획의 바이오 분야별 분과에 해당하는 생명과학, Red바이오, Green바이오, White바이오 구분 기준을 참고하여 기술 특징별로 Platform Bio(기초·생명과학, 공통기반), Red Bio, Green Bio, White Bio로 구분하여 후보기술 도출기준 수립

※ 융합바이오 개념은 전반에 걸쳐 혁신을 유도하기 때문에 이미 모든 분야에 융합적인 기술을 포함하고 있어 별도의 융합바이오를 구분하지 않음

- 바이오 분야별 카테고리 내에서 IF가 높아 비교적 R&D 파급 효과가 높은 저널에 발표된 논문을 중심으로 데이터 수집

[표 9] 혁신적 연구성과 모니터링을 위한 분야별 해당저널 및 논문 수

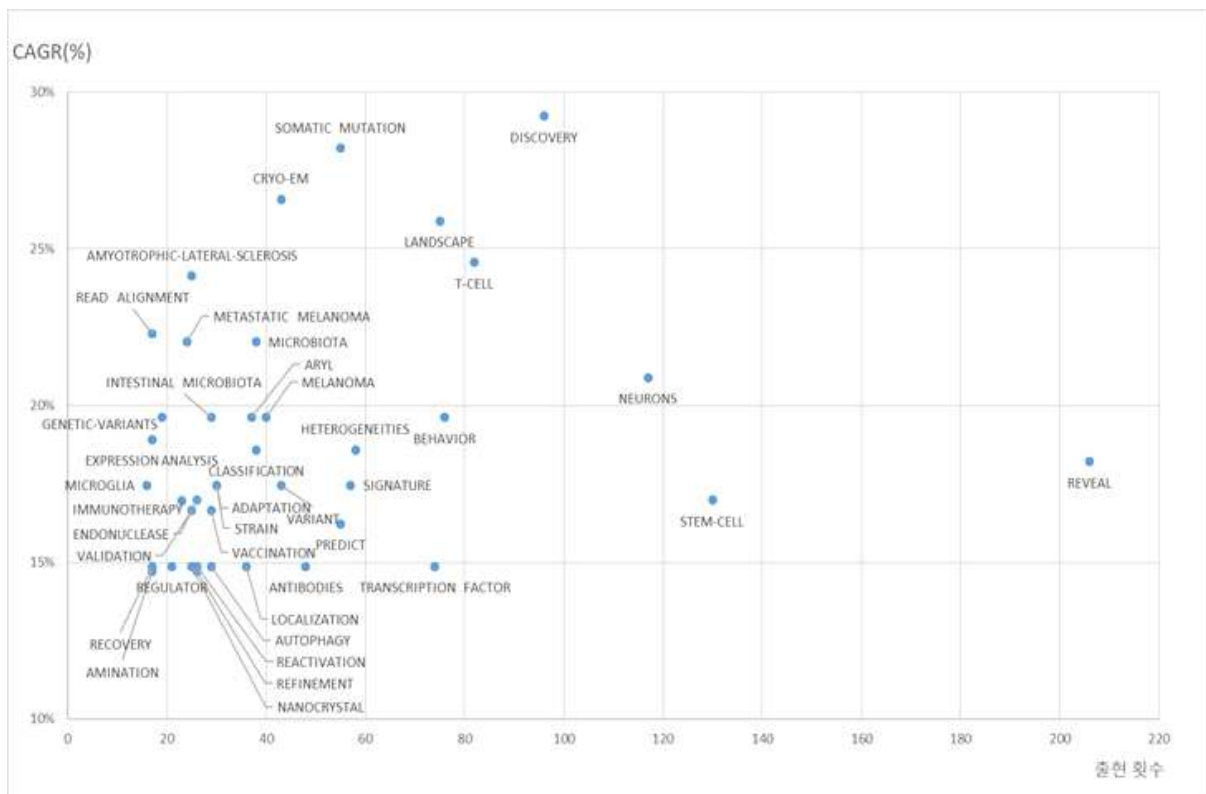
총 카테고리 234개 중 바이오 관련 카테고리 81개	구분	Platform 바이오	Red 바이오	Green 바이오	White 바이오
	분야별 카테고리	11	16	7	3
	분야별 카테고리 내 해당 저널 수	111	1,654	748	487
	IF 기준 추출 논문 수	15,081	3,925	8,439	5,685

- 논문의 참고문헌 이중성/융합성 분석 및 심층분석 대상 논문 선정
 - (참고문헌의 이중성/융합성 분석) 추출된 논문의 참고문헌 이중성/융합성 분석을 통해 타분야 연관성 비율 산출
 - WOS 데이터베이스에 있는 전체 저널들을 바이오 분야(5,105개) 및 비(non)-바이오 분야(4,402개)로 구분
 - 분야별로 선별한 논문의 참고문헌을 바이오 분야 및 비(non)-바이오 분야로 구분하여 비율 산출
 - ※ 이중성 산출식 : 비바이오 참고문헌수 / 전체 참고문헌수
 - (심층분석 대상논문 선정) 저널별로 참고문헌의 비(non)-바이오 분야 비율이 높아 이중성 및 타분야 연관성이 높을 것으로 예상되는 논문 선정
 - 참고문헌의 비(non)-바이오 비율 상위 논문의 내용을 검토하여 분야별로 논문* 선별
 - ※ 분야별 특성 상 분석대상 논문의 참고문헌 비(non)-바이오 비율이 상이
- 논문 키워드 네트워크 분석 및 키워드 트렌드 분석을 통한 혁신형 시드(seed) 아이템 확보
 - (키워드 네트워크 분석) 키워드 네트워크로 혁신형 기술 시드가 될 수 있는 창조적 조합 발굴
 - WoS의 Keyword Plus에서 추출된 각 논문의 키워드를 기반으로 사이람 사의 Netminer 프로그램을 활용하여 분야별 키워드 간 네트워크 분석
 - ※ (논문-키워드 간 네트워크 생성 시) 유사도지표 측정방법인 correlation inner product 활용, (키워드간 연결분석 시) cohesion의 component 분석 활용

[표 10] 키워드 네트워크 분석 절차

구분	주요 내용
1. 데이터(논문) 업로드	Platform: 152개, Red: 154개, Green: 152개, White: 152개
2. 논문-키워드 연결	Correlation inner product 활용(유사도 지표 중 하나)
3. 키워드 간 연결	Cohesion-component 분석 활용
4. 맵 생성	Modularity별(Community Betweenness) 클러스터맵 구성

- (키워드 트렌드 분석) 키워드 dynamics(출현속도, 출현빈도) 분석을 통해 rising 키워드 발굴
 - 각 분야별 고인용 논문(HCP, Highly Cited Paper) 내 키워드들의 10년간('09~'18)의 연평균 성장률을 분석
 - 10년간 총 출현횟수는 낮으나, 연평균 성장률(CAGR)이 높은 최근 급성장 키워드 발굴



[그림 9] Platform 바이오 키워드 트렌드 분석 결과

- (Novel 키워드 발굴) Nature, Science, Cell 등 주요 저널에 2019년 새롭게 등장한 키워드 총 276개 발굴
- (혁신형 seed 아이템 도출) 분야별 키워드 네트워크 맵 및 키워드 트렌드 등을 참고하여 키워드 간 독특한 조합을 탐색
 - 창조적 통합으로 연관이 없는 개념을 연결하면 혁신적 기술 시드 (seed) 아이템 도출 가능

2) 2단계 : 미래유망 후보기술 도출 및 미래유망기술 최종 선정

- (미래유망 후보기술 도출) 전문가 자문회의 및 심층 인터뷰를 통해 미래유망 후보기술 도출
 - 연구분야별 전문가, 시니어과학자로 구성된 총 2그룹의 전문가 위원회를 구성하여 자문회의 개최 및 인터뷰 진행
 - 키워드 네트워크 분석, 키워드 트렌드 분석, Novel 키워드 등을 활용하여 키워드들 간의 의외의 조합을 통한 후보기술 도출

[표 11] 바이오 미래유망 후보기술 도출 양식(예시)

구분	키워드	키워드	후보기술명
Platform 바이오	Cryo-EM	Model, Discovery, Dynamics	Bio modeling using Cryo-EM
Red 바이오	Somatic mutation	Read Alignment, expression	Real-time Liquid biopsy
Green 바이오	Genome engineering	Chloroplast	High efficient chloroplast genome engineering
White 바이오	invasive alien species	ecosystem, impact, parasite, pathogen	Impact model of invasive alien species on ecosystem

- 그간 발굴된 바이오미래유망후보기술(15~)들의 재검토를 통하여 2020년 바이오 미래유망기술 후보기술로 제시
- 전문가 심층 인터뷰를 통해 각 분야별 2배수의 미래유망 후보기술 도출
 - 플랫폼 바이오(Platform Bio), 레드 바이오(Red Bio), 그린 바이오(Green Bio), 화이트 바이오(White Bio)로 구분하여 후보기술을 각각 도출

(플랫폼바이오, Platform Bio) 기초·생명과학, 공통기반기술, (레드바이오, Red Bio) 의약품 등 보건의료, (그린바이오, Green Bio) 농림수축산·식품 및 바이오농업, (화이트바이오, White Bio) 산업공정/환경·해양 및 에너지, 소재 등 바이오화학

- 각 분야별로 플랫폼바이오 6개, 레드바이오 6개, 그린바이오 4개, 화이트바이오 4개 총 20개의 2배수 미래유망 후보기술을 도출

[표 12] 2020 바이오 미래유망 후보기술

플랫폼바이오(Platform Bio, 기초·기반, 플랫폼)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 프라임 에디팅(Prime editing) <ul style="list-style-type: none"> - 살아있는 세포 내에서 특정 유전자서열을 고효율로 첨가, 삭제, 치환하는 기술 ○ Cryo-EM 생체분자 구조분석기술(High-resolution cryo-EM bio-imaging) <ul style="list-style-type: none"> - 거대 단백질 복합체, 막단백질, 세포의 입체구조를 초저온-전자현미경을 통해 분석하는 기술 ○ 키메라 바이오인공장기(Artificial bio-organs by chimerism) <ul style="list-style-type: none"> - 환자 맞춤형 이식 및 치료를 목적으로 동물에서 사람의 세포, 조직, 장기 등을 키워내는 기술 ○ 단일 신경세포 트래킹(Tracking single neurons) <ul style="list-style-type: none"> - 뇌 특정 부위에 전극을 주입 후 각 신경세포의 전기신호를 측정하고 분류하여 신경회로 구성 및 뇌기능 제어기전을 규명하는 기술 ○ 장기관류시스템(Organ perfusion system) <ul style="list-style-type: none"> - 체내 환경(혈류, 산소, 온도 등)을 모사하여 체외에서 장기의 세포 괴사나 손상 없이 기능을 유지하는 기술 ○ 공간 오믹스 기반 단일세포 분석기술(Single cell spatial reconstruction) <ul style="list-style-type: none"> - 생체 기관이나 조직 내 개별세포의 위치정보를 유지한 상태에서 오믹스 데이터를 확보하여 3차원적인 공간정보를 파악하는 기술

레드바이오(Red Bio, 의약품 등 보건의료)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 조직 내 노화세포 제거기술(Senolytics) <ul style="list-style-type: none"> - 조직의 노화 및 기능 이상을 유발하는 노화세포를 선택적으로 제거하여 조직 항상성을 유지하고 질병을 치료하는 기술 ○ 소포체 기반 약물전달기술(Drug delivery with extracellular vesicles) <ul style="list-style-type: none"> - 세포 소기관인 소포체에 약물을 탑재하여 목적 세포까지 정확하게 전달하는 기술 ○ 면역세포치료제 활성화 백신(Boosting vaccine for CAR-T/NK cells) <ul style="list-style-type: none"> - CAR-T, NK 등 면역세포의 활성화를 유도하는 물질(백신)을 투입하여 고형암을 치료하는 기술 ○ 실시간 액체생검(Real-time liquid biopsies) <ul style="list-style-type: none"> - 혈액, 소변 등에 존재하는 핵산 조각들을 분석하여 실시간 질병의 진행을 추적하는 기술 ○ 알츠하이머 치매를 위한 세포치료(Cell therapy for Alzheimer's disease) <ul style="list-style-type: none"> - 대표적인 퇴행성 뇌질환인 알츠하이머성 치매를 치료하기 위한 세포 혹은 줄기세포를 이용한 치료법

- **디지털 치료제(Digital therapeutics)**
 - 기존의 먹는 알약이나 주사제가 아닌 디지털기술(소프트웨어)을 기반으로 질병 예방, 관리 및 치료하는 신개념 의약품

그린바이오(Green Bio, 농림수축산·식품)

- **엽록체 바이오공장**
(Chloroplast biofactory for high-level production of biomolecules)
 - 식물 세포 소기관인 엽록체를 이용하여 유용한 외래 단백질 등을 대량 생산하는 기술
- **식물 종간 장벽제거기술**
(Removing interspecific incompatibility for cross-species hybridization)
 - 식물 생식기관에서 종간 장벽 역할을 하는 단백질의 재설계와 도입을 통해 교배가 어려운 두 종간의 교배 효율을 향상시키는 기술
- **친환경 에너지 발전과 농업의 결합**
(Agrivoltaics for efficient food and energy production)
 - 식물 재배시설에 친환경 에너지 발전 시설을 결합하여 농업 효율과 에너지 생산 효율을 동반 상승시키는 기술
- **애완동물 유전체의약(Pet genomic medicine)**
 - 애완동물의 유전체 염기서열 분석을 통해 확보된 유전정보를 바탕으로 각 애완동물의 특성에 맞게 치료하는 기술

화이트바이오(White Bio, 산업공정/환경·해양 및 에너지, 소재)

- **빅데이터 기반 생태건강성 평가(Ecosystem health assessment using bio-big data)**
 - 바이오 빅데이터(특히, 미생물 군집구조)를 포함한 환경, 생태 데이터를 통합하여 생태계의 건강성을 평가하는 기술
- **바이오 파운드리(Biofoundry)**
 - 로봇과 AI 기술을 융합한 바이오 첨단기술로서 DNA 조립에서부터 세포 개량까지의 복잡한 과정을 빠른 순환 공정으로 구현하는 기술
- **인공생태계 (Manipulation of artificial ecosystem)**
 - 최소한의 요소로 실제 생태계를 최대한 모사하는 기술로 다양한 생태계 교란의 영향을 현장처럼 시뮬레이션하는 기술
- **무세포 합성생물학(Cell-free synthetic biology)**
 - 생명활동에 필요한 최소요소(DNA, 단백질 등)로 구성된 무세포 환경에서 유용한 기능을 수행하는 생명 시스템을 제작하는 기술

□ (미래유망 후보기술 평가) 각 기술별 기술적 혁신성, 산업적 혁신성에 대한 평가를 위해 20개 후보기술에 대한 설문조사 실시

※ 총 592명 설문조사 참여

○ 바이오인 고객 대상으로 20대 후보기술에 대한 1차 설문조사 수행

2020 바이오 미래유망기술 발굴을 위한 설문조사

안녕하십니까?
생명공학정책연구센터에서는 4차 산업혁명을 촉발한 핵심기술로서 관심이 고조되고 있는 바이오분야에 대한 '미래유망기술 발굴' 연구를 진행하고 있습니다.

이에 최근 혁신적 바이오 연구성과를 상시 모니터링하고 분석하여 4가지 바이오 분야(Platform, Red, Green, White) 미래유망 후보기술을 도출하였습니다. 본 설문조사는 바이오 미래유망기술을 최종 선정하기 위한 과정입니다.

귀하의 소중한 의견과 정보는 「통계법」 제33조(비밀의 보호)에 따라 본 연구 이외의 다른 목적으로는 절대 이용되지 않을 것임을 약속드리며, 설문 및 연구결과에 대한 문의사항은 아래의 연락처로 문의 주시기를 바랍니다.

감사합니다.

설문에 참여하신 분들을 100명을 초청하여 스타벅스 아메리카노 R 커피 기프트콘을 드립니다.

설문조사 참여하기

주관기관 한국생명공학연구원 국가생명공학정책연구센터
조사기간 2019년 12월 9일(월) ~ 12월 16일(월), 8일간
문의전화 042-879-8365, yjnam@kribb.re.kr, 남연정 연구원
042-879-8375, moongkim@kribb.re.kr, 김무용 책임연구원

2020 바이오 미래유망기술 발굴을 위한 설문조사

바이오미래유망기술 정의
(미래) 향후 5~10년 이내에 기술적 실현이 가능하고,
(유망) 생명현상 연구(생명과학)를 기반으로 문제해결 또는 유용제품 생산에 활용되는,
(바이오기술) 기술적 혁신성 및 산업적 혁신성에 대한 파급효과가 높은 기술

- 기술적 혁신성: 관련분야의 기술발전을 혁신하거나 기술적 문제해결에 영향력 발휘
- 산업적 혁신성: 관련분야의 산업발전을 혁신하거나 광범위한 경제의 영향력 발휘

문의전화 042-879-8365, yjnam@kribb.re.kr, 남연정 연구원
042-879-8375, moongkim@kribb.re.kr, 김무용 책임연구원

AQ1-3. Green 바이오 분야(식품, 중저 등 바이오농업)

번호	후보기술 및 기술설명	평가 (점수)	
		낮음 <<	>> 높음
1	(후보기술) 고효율 바이오공장(Chloroplast biofactory for high-level production of biomolecules)	기술적 혁신성	① ② ③ ④ ⑤
	(기술설명) 식물 세포 소기관인 엽록체를 이용하여 유용 의약품 단백질 등을 대량 생산하는 기술	산업적 혁신성	① ② ③ ④ ⑤
2	(후보기술) 식물 종간 장벽 제거기술(Removing interspecific incompatibility for cross-species hybridization)	기술적 혁신성	① ② ③ ④ ⑤
	(기술설명) 이종 교배의 장벽 역할을 하는 단백질 엔지니어링을 통해 이종 교배를 가능하게 하는 기술	산업적 혁신성	① ② ③ ④ ⑤
3	(후보기술) 친환경 에너지 발전과 농업의 결합(Agrivoltaics for efficient food and energy production)	기술적 혁신성	① ② ③ ④ ⑤
	(기술설명) 식물 재배시설에 친환경 에너지 발전 시설을 결합하여 농업 효율과 에너지 생산 효율을 동반 상승시키는 기술	산업적 혁신성	① ② ③ ④ ⑤
4	(후보기술) 애완동물 유전체 의학(Pet genomics medicine)	기술적 혁신성	① ② ③ ④ ⑤
	(기술설명) 애완동물의 유전체 염기서열 분석을 통해 확보된 유전정보를 바탕으로 각 애완동물들의 특성에 맞게 치료하는 기술	산업적 혁신성	① ② ③ ④ ⑤

[그림 10] 바이오인 고객 대상 설문조사 내용 구성

○ 1차 설문조사 후, 미래유망 후보기술 도출에 참여한 전문가 위원회 및 총괄위원회를 대상으로 2차 설문조사를 수행

□ (미래유망기술 최종선정) 1, 2차 설문조사를 통해 미래유망기술 최종 선정

○ 바이오인 고객 대상 1차 설문조사 결과와 전문가 대상 2차 설문조사 결과를 합산하여 최종 10대 바이오 미래유망기술 선정

[표 13] 바이오 미래유망기술 설문조사 및 전문가 평가 결과

분야	후보기술명	기술적 혁신성	산업적 혁신성	평균
플랫폼 바이오 Platform Bio	프라임 에디팅(Prime editing)	3.99	4.14	8.12
	Cryo-EM 생체분자 구조분석기술 (High-resolution cryo-EM bio-imaging)	4.10	3.90	7.99
	키메라 바이오인공장기 (Artificial bio-organs by chimerism)	3.64	3.73	7.37
	단일 신경세포 트래킹(Tracking single neurons)	3.74	3.39	7.14
	장기관류시스템(Organ perfusion system)	3.50	3.60	7.10
	공간 오믹스 기반 단일세포 분석기술 (Single cell spatial reconstruction)	4.17	3.52	7.68
레드 바이오 Red Bio	소포체 기반 약물전달기술 (Drug delivery with extracellular vesicles)	3.41	3.94	7.35
	면역세포치료제 활성화 백신 (Boosting vaccine for CAR-T/NK cells)	3.48	4.01	7.49
	실시간 액체생검 (Real-time liquid biopsies)	3.74	4.18	7.92
	알츠하이머 치매를 위한 세포치료 (Cell therapy for Alzheimer's disease)	3.61	3.58	7.19
	디지털 치료제(Digital therapeutics)	3.71	3.79	7.50
	조직 내 노화세포 제거기술(Senolytics)	4.07	3.89	7.96
그린 바이오 Green Bio	엽록체 바이오공장 (Chloroplast biofactory for high-level production of biomolecules)	3.47	3.64	7.11
	식물 종간 장벽제거기술(Removing interspecific incompatibility for cross-species hybridization)	3.71	3.73	7.44
	친환경 에너지 발전과 농업의 결합 (Agrivoltaics for efficient food and energy production)	3.09	3.77	6.86
	애완동물 유전체의약(Pet genomics medicine)	2.66	3.16	5.83
화이트 바이오 White Bio	빅데이터 기반 생태건강성 평가 (Ecosystem health assessment using bio-big data)	3.59	3.53	7.12
	바이오파운드리(Biofoundry)	3.59	3.95	7.54
	인공생태계(Manipulation of artificial ecosystem)	3.46	3.14	6.60
	무세포 합성생물학(Cell-free synthetic biology)	3.92	3.72	7.65

3) 3단계 : 기 발굴된 바이오 미래유망기술의 공감대 형성을 위한 홍보

□ 2019 바이오 미래유망기술 삽화 소설, SNS 홍보 등을 통한 대중의 공감대 형성 유도

- 바이오정책포털사이트 BioIN을 통하여 각 10대 기술을 삽화 소설로 연재하였으며 각 기술별 전문가 심층 원고 게시
- 선정된 기술 관련 페이스북 카드 뉴스 게재 및 네이버 블로그 제작을 통한 홍보



2019 바이오미래유망기술의 이야기 - 제1화 "DNA기록기·분자레코딩 기술" 편

출처	생명공학정책연구센터	조회수	3804
발간일	2019-05-03	등록일	2019-05-03

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - "DNA기록기·분자레코딩 기술" 편]
제1화 "그들만의 1000일 기념일"

4월 22일은 김현과 관희선의 이른바 '1000일 기념일'이었다. 새끼어른 지 벌써 3년이 지난다니. 서로를 아끼는 마음 이 커져가는 것과 비례해서 둘의 태도는 시간이 지날수록 시큰둥했다. 뭘 이야기해도 상대의 대답을 미리 알고 있었고, 어떤 행동을 해도 상대의 반응을 예측할 수 있었다. 오래된 연인이란 게 보통 그런 식이다.

하선은 뭔가 숫자를 세는 것을 좋아했다. 기념일도 제법 중성하게 생각도. 몇 달 전부터 1000일 기념일은 정겨이 한다고 복선을 깔아왔던 것도 그니다. 현은 하선이 거창하게 뭔가 특별한 행사를 바란 건 아니라고 생각했다. 서로 바빴으니까. 하지만 길은 직장에 다니고 있으니까 나란히 퇴근해 저녁식사라도 함께 하면 될 거라고 생각했다.

"미안해요. 오늘은 도저히 움직일 수가 없어요. 어제처럼 끝내 보고 싶었는데."

"오늘은 식사라도 함께 하고 싶었는데."

"저한테 인생이 끝났음을 정도로 중요한 일이라서. 자기가 보자면 별 의미 없을 수 있지만 난 어쨌든 오늘 안에 꼭 끝내고 싶어요."

"굳이 오늘 꼭? 재를 마찰이 있는 서투른 발목이 있는 것도 아니잖아?"

"미안해요. 음?"

말했다고 할까? 혼자 사유를 나사면서 현은 기분이 조금 불편했다. 연구실 문을 빠져 나오며 하선이 들으라는 듯 안정 말 에 붙은 작은 타자음을 누르며 조금 소리로 말했다. "집으로 간다. 자를 준비해 줘."

BioIN 바이오인
2월 2일 오후 4:43 · 🌐

#바이오인 생생정보통
 바이오 유망기술, 어떤 미래를 만들까요?
 바이오인 공식블로그에서 알아보세요!👁️
 ✓ 원문 바로가기... 더 보기

BLOG.NAVER.COM
바이오 유망기술, 어떤 미래 만들까?
 스타 연구원으로 살아 온 지도 올해로 30주년. 오랜 경력만큼 몸도 연식을 다했는지 요즘엔 책상에서 몸을 ...

2019년 BioINpro64호
2019 바이오 미래유망기술(상)

BioINpro는 최근 바이오분야 주요 이슈에 대해 전문가의 시각에서 심밀한 보고서를 제공합니다. 이번호는 2019 바이오 미래유망기술에 관한 주제로 제공하였으니 많은 분들의 관심 부탁드립니다. 유용한 자료로 활용하시기를 기대합니다.

▶ **이세철라스트 이슈 대응 바이오기술 현황**
 이승구 책임연구원 & 임수진 선임연구원
 1. 유전자서열 분석
 2. 유전자서열 분석 플랫폼
 3. 유전자서열 분석 플랫폼
 4. 유전자서열 분석 플랫폼
 5. 유전자서열 분석 플랫폼

▶ **합성생물학 기반의 유전자치료 연구동향**
 김종민 POSTECH 생명과학과 교수
 1. 유전자 치료
 2. 유전자 치료
 3. 유전자 치료
 4. 유전자 치료
 5. 유전자 치료

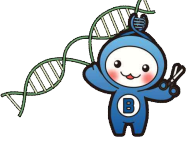




[그림 11] 2019 바이오미래유망기술 바이오인 연재소설, SNS 홍보 및 전문가 원고






3. 연구 결과

가. 2020년 10대 바이오 미래유망기술 선정

- 바이오 전 분야를 선도한다는 관점에서 Platform, Red, Green, White Bio 분야별 미래유망기술 도출

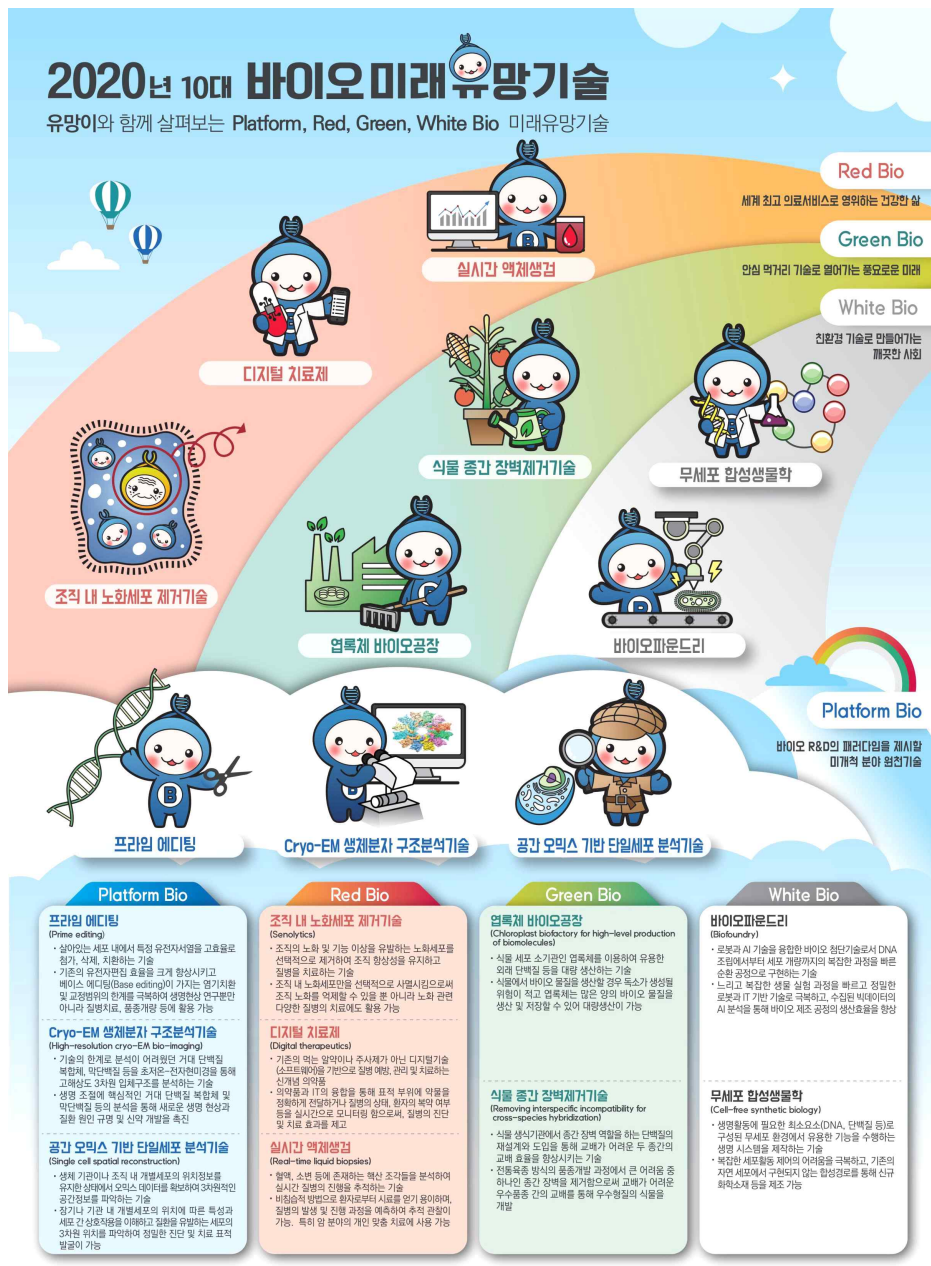
[표 14] 2020년 10대 바이오 미래유망기술 주요 내용

분야	미래유망기술 주요 내용
플랫폼 바이오 Platform Bio	<p>프라임 에디팅(Prime editing)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▶ 살아있는 세포 내에서 특정 유전자서열을 고효율로 첨가, 삭제, 치환하는 기술 ▶ 기존의 유전자편집 효율을 크게 향상시키고 베이스 에디팅(Base editing)이 가지는 염기치환 및 교정범위의 한계를 극복하여 생명현상 연구뿐만 아니라 질병치료, 품종개량 등에 활용 가능
	<p>Cryo-EM 생체분자 구조분석기술(High-resolution cryo-EM bio-imaging)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▶ 기술의 한계로 분석이 어려웠던 거대 단백질 복합체, 막단백질 등을 초저온-전자현미경을 통해 고해상도 3차원 입체구조를 분석하는 기술 ▶ 생명 조절에 핵심적인 거대 단백질 복합체 및 막단백질 등의 분석을 통해 새로운 생명 현상과 질환 원인 규명 및 신약 개발을 촉진
	<p>공간 오믹스 기반 단일세포 분석기술(Single cell spatial reconstruction)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▶ 생체 기관이나 조직 내 개별세포의 위치정보를 유지한 상태에서 오믹스 데이터를 확보하여 3차원적인 공간정보를 파악하는 기술 ▶ 장기나 기관 내 개별세포의 위치에 따른 특성과 세포 간 상호작용을 이해하고 질환을 유발하는 세포의 3차원 위치를 파악하여 정밀한 진단 및 치료 표적 발굴이 가능
	<p>조직 내 노화세포 제거 기술(Senolytics)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▶ 조직의 노화 및 기능 이상을 유발하는 노화세포를 선택적으로 제거하여 조직 항상성을 유지하고 질병을 치료하는 기술 ▶ 조직 내 노화세포만을 선택적으로 사멸시킴으로써 조직 노화를 억제할 수 있을 뿐 아니라 노화 관련 다양한 질병의 치료에도 활용 가능
레드 바이오 Red Bio	<p>디지털 치료제(Digital therapeutics)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▶ 기존의 먹는 알약이나 주사제가 아닌 디지털기술(소프트웨어)을 기반으로 질병 예방, 관리 및 치료하는 신개념 의약품 ▶ 의약품과 IT의 융합을 통해 표적 부위에 약물을 정확하게 전달하거나 질병의 상태, 환자의 복약 여부 등을 실시간으로 모니터링 함으로써, 질병의 진단 및 치료 효과를 제고

	<div data-bbox="363 277 1286 338" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> 실시간 액체생검 (Real-time liquid biopsies) </div> <div data-bbox="363 349 564 573">  </div> <div data-bbox="580 371 1342 573"> <ul style="list-style-type: none"> ▷ 혈액, 소변 등에 존재하는 핵산 조각들을 분석하여 실시간 질병의 진행을 추적하는 기술 ▷ 비침습적 방법으로 환자로부터 시료를 얻기 용이하며, 질병의 발생 및 진행 과정을 예측하여 추적 관찰이 가능. 특히 암 분야의 개인 맞춤 치료에 사용 가능 </div>
그린 바이오 Green Bio	<div data-bbox="363 607 1286 689" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> 엽록체 바이오공장 (Chloroplast biofactory for high-level production of biomolecules) </div> <div data-bbox="363 701 564 925">  </div> <div data-bbox="580 723 1342 925"> <ul style="list-style-type: none"> ▷ 식물 세포 소기관인 엽록체를 이용하여 유용한 외래 단백질 등을 대량 생산하는 기술 ▷ 식물에서 바이오 물질을 생산할 경우 독소가 생성될 위험이 적고 엽록체는 많은 양의 바이오 물질을 생산 및 저장할 수 있어 대량생산이 가능 </div> <div data-bbox="363 958 1286 1041" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> 식물 종간 장벽제거기술 (Removing interspecific incompatibility for cross-species hybridization) </div> <div data-bbox="363 1052 564 1276">  </div> <div data-bbox="580 1064 1342 1265"> <ul style="list-style-type: none"> ▷ 식물 생식기관에서 종간 장벽 역할을 하는 단백질의 재설계와 도입을 통해 교배가 어려운 두 종간의 교배 효율을 향상시키는 기술 ▷ 전통육종 방식의 품종개발 과정에서 큰 어려움 중 하나인 종간 장벽을 제거함으로써 교배가 어려운 우수품종 간의 교배를 통해 우수형질의 식물을 개발 </div>
화이트 바이오 White Bio	<div data-bbox="363 1301 1286 1361" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> 바이오파운드리(Biofoundry) </div> <div data-bbox="363 1373 564 1597">  </div> <div data-bbox="580 1395 1342 1641"> <ul style="list-style-type: none"> ▷ 로봇과 AI 기술을 융합한 바이오 첨단기술로서 DNA 조립에서부터 세포 개량까지의 복잡한 과정을 빠른 순환 공정으로 구현하는 기술 ▷ 느리고 복잡한 생물 실험 과정을 빠르고 정밀한 로봇과 IT 기반 기술로 극복하고, 수집된 빅데이터의 AI 분석을 통해 바이오 제조 공정의 생산효율을 향상 </div> <div data-bbox="363 1675 1286 1736" style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> 무세포 합성생물학(Cell-free synthetic biology) </div> <div data-bbox="363 1747 564 1971">  </div> <div data-bbox="580 1769 1342 1971"> <ul style="list-style-type: none"> ▷ 생명활동에 필요한 최소요소(DNA, 단백질 등)로 구성된 무세포 환경에서 유용한 기능을 수행하는 생명 시스템을 제작하는 기술 ▷ 복잡한 세포활동 제어의 어려움을 극복하고, 기존의 자연 세포에서 구현되지 않는 합성경로를 통해 신규 화학소재 등을 제조 가능 </div>

□ Platform, Red, Green, White Bio로 살펴본 2020 바이오 미래유망기술을 무지개 및 구름으로 형상화하여 인포그래픽으로 작성

- 기초·생명과학/공통기반기술에 해당하는 Platform 바이오는 Red, Green, White 바이오 미래유망기술의 근간이 된다는 의미에서 구름으로 표현
- 다양한 산업적 활용범위를 보이는 Red, Green, White 바이오는 구름에서 뻗어 나오는 각각의 색깔을 지닌 무지개로 표현



[그림 12] Platform, Red, Green, White Bio로 살펴본 10대 미래유망기술

나. 향후계획 및 기대효과

[에필로그(Epilogue) - 보고서를 마치며]

최근 Science紙에서는 과학과 기술을 파워커플(Power couple)이라 지칭하며, 특히 바이오 분야에서 과학과 기술의 상호혁신 시너지를 강조하였다.

혁신기술이 발명되면 이로 인해 새로운 과학적 발견이 가속화되어 폭발적으로 지식이 확장되어 학문의 변화를 유도하는데, 바이오 연구에서 현미경은 미생물학의 도약을, PCR (Polymerase chain reaction)은 분자생물학 연구의 혁명을 촉발하였다.

최근 개발된 단일세포 이미징 및 시퀀싱 기술은 발달 생물학, 면역학, 종양학에 매우 진보된 접근방식을 제공할 것으로 기대된다.

이에 우리는 바이오 맞춤형 미래유망기술 연구방법을 구축하고, 바이오 분야의 과학과 기술의 상호혁신을 유도할 수 있는 미래유망 기술 발굴을 위해 지속 노력할 계획이다.

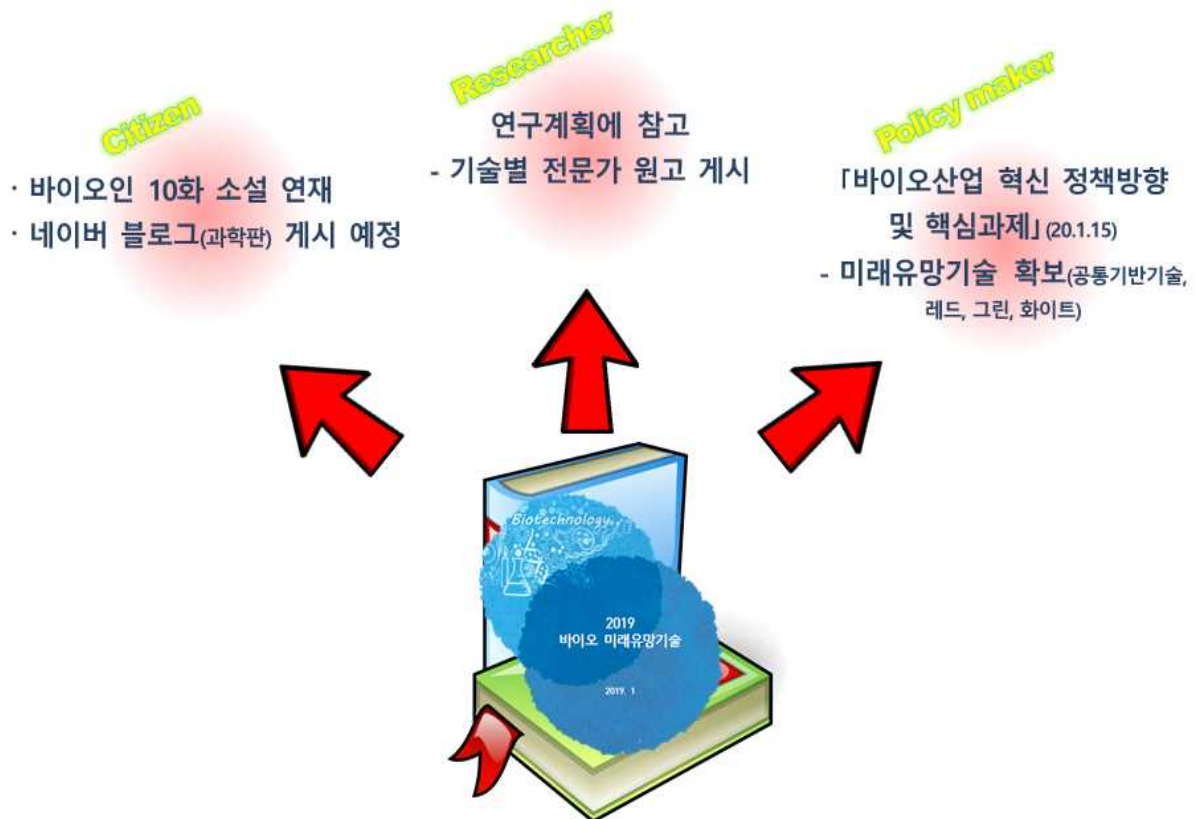


* Science 스페셜이슈(V361, I6405, 2018.8.31) 커버 이미지는 바이오 발전에 있어 과학과 기술의 상호혁신에 관한 무한주기(뢰비우스의 띠)를 상징

- 글로벌 바이오경제시대 진입을 앞두고 미래수요를 분석하는 데 필요한 바이오 미래유망기술 연구방법론 구축과 그 연구결과로서 바이오 미래유망기술을 제시하고자 노력
- 이를 위해 생명공학정책연구센터는 바이오 분야의 미래유망기술 발굴에 있어 다양한 접근방법을 통해 연구를 추진
 - 이번 연구에서는 ‘혁신공감형’이라는 프로세스를 통해 플랫폼, 레드,

그린, 화이트 바이오 분야의 미래유망기술을 발굴

- 본 보고서를 기반으로 바이오 미래유망기술 발굴 연구결과가 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대
 - 일반인, 연구자, 정책입안자 관점에서 다양하게 활용될 수 있도록 지속적인 업무를 추진할 계획
 - 일반인 관점에서 기술의 미래상을 바이오인에 10화의 소설(삽화 포함)로 연재할 계획이며, 네이버블로그, 페이스북 카드뉴스 등 친화적인 형태로 연구결과를 전달할 예정
 - 연구자 관점에서 연구계획서 작성 및 동향 파악에 도움이 될 수 있는 기술별 전문가의 심도 있는 원고 작성이 추진될 계획
 - 정책입안자 관점에서는 바이오 R&D 방향 설정 및 신규사업 기획에 참고할 수 있는 형태로 보완해나갈 예정



[그림 13] 바이오 미래유망기술 발굴 연구결과의 활용방안

4. 참고문헌

- 1) Thomas Frey, *Communicating with the Future*, 2011
- 2) 과학기술정보통신부, 제3차 생명공학육성기본계획, 2017
- 3) 생명공학정책연구센터, 2015 바이오 미래유망기술 발굴, 2015
- 4) 생명공학정책연구센터, 2017 바이오 미래유망기술 발굴, 2017
- 5) 생명공학정책연구센터, 2018 바이오 미래유망기술 발굴, 2018
- 6) 생명공학정책연구센터, 2019 바이오 미래유망기술 발굴, 2019
- 7) MIT Technology Review, *10 Breakthrough Technologies*, 2019
- 8) KISTEP, 2019년 KISTEP 10대 미래유망기술 선정에 관한 연구, 2019
- 9) KISTI, *Technology Intelligence와 유망기술 센싱전략 발표자료*, 2014
- 10) Science, *Power Couple: Science and technology*, 2018
- 11) World Economic Forum, *Top 10 Emerging Technologies*, 2019
- 12) Nature, *Technologies to watch in 2019*, 2019.1.23
- 13) Deloitte, *2019 Global life sciences outlook ; Focus and transform | Accelerating change in life sciences*, 2019. 2
- 14) 관계부처 합동, *바이오산업 혁신 정책방향 및 핵심과제*, 2020.1.15.
- 15) KISTI, *2019 미래유망기술세미나 발표자료*, 2019

첨부 1 **2020 바이오 미래유망기술 설명자료**

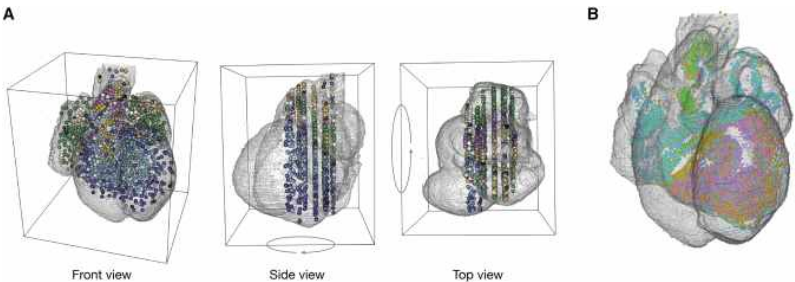
기술명	프라임 에디팅(Prime editing)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 살아있는 세포 내에서 특정 유전자서열을 고효율로 첨가, 삭제, 치환하는 기술 ▪ (장점) 기존의 유전자편집 효율을 크게 향상시키고 베이스 에디팅(Base editing)이 가지는 염기치환 및 교정범위의 한계를 극복하여 생명현상 연구뿐만 아니라 질병치료, 품종개량 등에 활용 가능 					
실현 시기	<table border="1"> <tr> <th>향후 5년</th> <th>향후 10년</th> </tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 프라임 에디팅 기술의 고도화, 특이성 개선 및 다양한 Cas 기반의 프라임 에디팅 기술 개발 </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 해당 기술의 고도화 및 체내 전달 기술을 적용한 유전자 교정치료의 임상 시도 </td> </tr> </table>	향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 프라임 에디팅 기술의 고도화, 특이성 개선 및 다양한 Cas 기반의 프라임 에디팅 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 해당 기술의 고도화 및 체내 전달 기술을 적용한 유전자 교정치료의 임상 시도 	
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 프라임 에디팅 기술의 고도화, 특이성 개선 및 다양한 Cas 기반의 프라임 에디팅 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 해당 기술의 고도화 및 체내 전달 기술을 적용한 유전자 교정치료의 임상 시도 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 크리스퍼 기반 유전자 타게팅 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 특정 DNA 염기서열 및 PAM 서열을 인식하는 크리스퍼 시스템(가이드RNA-Cas9구성)을 사용하여 교정하고자 하는 특정 유전자의 염기서열을 타게팅하는 기술 - 가이드RNA와 목적으로 하는 DNA 사이에 20 bp 정도 길이의 서열이 상동성을 보일 경우 타겟으로 인식 ▪ 단백질 엔지니어링 기술(nickase, fusion) <ul style="list-style-type: none"> - 기존에 사용되던 Cas9의 특정 아미노산 서열에 변화(H840A)를 준 닉케이즈(nickase) 형태로 사용하여 DNA 이중가닥절단이 아닌 단일가닥 절단을 유도 - 닉케이즈 Cas9의 C말단에 역전사효소를 결합(PE1) 시킨 융합 단백질을 이용하여 가이드RNA를 주형으로 하는 역전사반응을 통해 단일가닥 절단이 일어나 부위를 정밀하게 교정. 또한 역전사효소의 아미노산 서열의 변형(D200N/L603W/T330P/T306K/W313F)을 통하여 교정 효율을 높임(PE2) ▪ RNA 엔지니어링 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 교정하고자 하는 염기서열을 포함하면서 역전사효소의 주형으로 사용되는 RT(RTtemplate) 서열과 표적 유전자 염기서열에 결합하는 PBS(Prime-binding site)서열을 가이드RNA의 3'말단에 삽입한 pegRNA(Prime editing gRNA) 개발이 핵심요소 기술 - PBS 및 RT 서열의 길이 조합에 따라 교정 효율의 변화가 발생하며 RT서열의 구성을 통해 특정부위의 염기서열 치환, 또는 특정부위의 특정 염기서열 삽입 및 제거 가능 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 유전자 치료제로의 접근 시 교정 가능한 범위의 확대, 교정 효율 및 안정성 확보, 효과적인 전달 시스템의 확립 등 복합적인 측면의 고도화 ▪ (경제적 니즈) 다양한 유전질환 및 난치질환의 치료제 개발을 통해 유전자치료 산업 경쟁력 확보 및 사회 기회비용의 절감 ▪ (사회적 니즈) 유전체 편집기술의 빠른 발전과 더불어 바이오 분야 과학과 기술의 상호혁신을 통해 품종개량, 유전질환 및 난치질환 등 다양한 글로벌 난제 해결 					

기술 개발 동향	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 미국 하버드대 데이비드 리우 교수 연구팀이 해당 기술(프라임 에디팅) 기술을 개발하여 기존의 사용되던 유전자 교정 기술과 비교하여 상회하는 효율과 자유로운 유전자 치환 가능성을 보여줌(Anzalone et al., Nature, 21 Oct 2019) - Cas9 nickase에 의한 DNA 단일가닥 절단과 역전사효소에 의한 DNA 염기서열 합성을 통해 교정하는 방법으로 기존에 사용되던 이중가닥 절단-복구기작으로 발생 할 수 있는 의도치 않은 염기서열의 제거 또는 삽입을 줄일 수 있음 - 기존의 유전자이중절단-상동재조합수리의 원리를 이용한 유전자 기술 및 베이스에디팅으로는 시도할 수 없던 교정범위의 확대 ▪ 동 연구팀은 이전에 크리스퍼 기반의 유전자 타게팅 기술에 시티딘 탈아미노효소 및 아데노신 탈아미노효소를 결합하여 DNA 이중가닥 절단 없이 염기서열 교정이 가능한 염기교정유전자가위(Base editor) 개발 - 키스 정(J. Keith Joung) 연구팀이 탈아미노효소에 의한 DNA 염기서열 교정 시 비특이적 RNA 염기서열 교정을 확인하였으며 이후 탈아미노효소의 개량을 통해 RNA 비특이적 교정 최소화
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Base editing 고도화 기술 개발 - Cytosine base editing 시스템 및 Adenine base editing 기술 고도화 - Di-genome seq 기술을 활용한 오프타겟 측정 기술 ▪ 유전자가위 기술을 활용한 치료제 및 동식물 개발을 위한 스타트업 기업 창업 - (틀젠) CRISPR 국내 원천기술 기반으로 CAR-T 항암면역치료제 개발 및 종자기발 - (지플러스) 식물을 생산시스템으로 하는 항체신약생산 시스템 개발 - (진코어) 고효율 CRISPR-Cpf1 기술 및 UGET 기술을 활용한 희귀성 유전자치료제 개발 ▪ 현재 프라임 에디팅 관련 개발 실적은 없으나 향후 다양한 연구그룹에서 관련 기술의 연구결과를 발표할 것으로 예측
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기존의 CRISPR 기술로 해결하려 하였으나 어렵거나 불가능하였던 유전적 교정이 요구되는 난치성 질병치료, 작물과 가축의 품종개량 등에 활용할 수 있는 기반 기술로 범용적 가치 보유 ▪ 유전자편집 전체 시장은 2018년 36.2억 달러에서 연평균 14.5% 성장으로 2023년 71.2억달러 규모로 확대될 전망 - CRISPR 기술을 활용한 글로벌 유전자편집 시장은 2023년까지 14.7%로 성장 및 38.7억 달러를 형성할 것으로 전망되며 전체 유전자편집 시장 중 54.2%로 높은 시장 점유율을 유지 할 것으로 예상
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DNA 염기서열을 자유자재로 편집 가능하여 적용범위가 넓어 현존하는 7만 5000종에 달하는 유전질환 중 89%를 치료할 수 있는 기술로 암, 난치질환 등 글로벌 난제의 해결 기대
필요 사항	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 국내 경쟁력 확보 및 고도화 기술개발 필요 ▪ 국제특허 출원 등 국제경쟁력의 확보를 위해 신속한 대응 필요 ▪ 해당 기술의 in vivo 치료 적용 시 크기에서 오는 체내 전달의 어려움을 극복 가능한 전달 시스템 개발 필요 ▪ 다른 유전자편집 기술과 동일하게 다양한 안전성 이슈에 관한 연구 및 사회적 인식, 제도적 문제해결 필요 	

기술명	Cryo-EM 생체분자 구조분석기술(High-resolution cryo-EM bio-imaging)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 기술의 한계로 분석이 어려웠던 거대 단백질 복합체, 막단백질 등을 초저온-전자현미경을 통해 고해상도 3차원 입체구조를 분석하는 기술 ▪ (장점) 생명 조절에 핵심적인 거대 단백질 복합체 및 막단백질 등의 분석을 통해 새로운 생명 현상과 질환 원인 규명 및 신약 개발을 촉진 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">향후 5년</th> <th style="text-align: center;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 생명 조절에 관여하는 고난이도 단백질 복합체 및 막단백질의 입체구조 분석을 통한 신규 생명 현상 및 질환 발생 원인 규명 ▪ 신약 타겟 막단백질들과 후보물질 결합 구조 분석을 통한 신약 개발 촉진 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cryo-EM 결과 기반 기존의 생명 조절 시스템 패러다임 변화로 생화학/생명의과학 분야 텍스트북 내용 대체 예상 ▪ 50%의 신약 타겟인 막단백질 구조 기반 질환 치료 리드 물질 발굴 및 신약 창출 </td> </tr> </tbody> </table>	향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 생명 조절에 관여하는 고난이도 단백질 복합체 및 막단백질의 입체구조 분석을 통한 신규 생명 현상 및 질환 발생 원인 규명 ▪ 신약 타겟 막단백질들과 후보물질 결합 구조 분석을 통한 신약 개발 촉진 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cryo-EM 결과 기반 기존의 생명 조절 시스템 패러다임 변화로 생화학/생명의과학 분야 텍스트북 내용 대체 예상 ▪ 50%의 신약 타겟인 막단백질 구조 기반 질환 치료 리드 물질 발굴 및 신약 창출 	
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 생명 조절에 관여하는 고난이도 단백질 복합체 및 막단백질의 입체구조 분석을 통한 신규 생명 현상 및 질환 발생 원인 규명 ▪ 신약 타겟 막단백질들과 후보물질 결합 구조 분석을 통한 신약 개발 촉진 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cryo-EM 결과 기반 기존의 생명 조절 시스템 패러다임 변화로 생화학/생명의과학 분야 텍스트북 내용 대체 예상 ▪ 50%의 신약 타겟인 막단백질 구조 기반 질환 치료 리드 물질 발굴 및 신약 창출 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cryo-EM용 생체 거대 단백질 복합체 및 막단백질 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 생체 거대 단백질 복합체 고순도 정제 및 구조적 안정화 기술 - 막단백질 발현/기능 유지 정제 기술 및 리간드와 복합체 정제 기술 ▪ 고분해능 cryo-EM 구조 분석을 위한 시편 제작 <ul style="list-style-type: none"> - 정제 단백질의 비정질 유리화 시편 제작 기술 - 세포내의 단백질 구조 분석용 비정질 유리화 시편 제작 기술 - 시편 제작 자동화 기술 ▪ 고분해능 cryo-EM 입체 구조 및 기능 규명 <ul style="list-style-type: none"> - 대량 이미지 데이터 고속 처리 기술 - Heterogeneous한 구조 분석을 위한 알고리즘 개발 기술 - 구조 기반 기능 검증 디자인 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 초저온-electron microscopy(cryo-EM) 단입자 분석기술의 혁신적인 발전으로 소위 “Resolution Revolution”이라는 고해상도 입체구조 규명이 가능해지면서 기존의 X-선 결정학 또는 NMR과 같은 기술로 분석하기 어려웠던 막단백질과 거대 단백질 복합체 구조 규명이 가능. 이와 더불어 초저온-electron tomography(cryo-ET) 기술은 세포 소기관과 세포 소기관 내 단백질, 세포 밖으로 분비되는 단백질 및 세포 자체의 입체 구조 분석이 가능 <ul style="list-style-type: none"> - 매우 정교한 생명 조절에 수반되는 거대 단백질 복합체들의 구조분석과 세포 내에서 일어나는 현상들에 대한 세포 수준의 구조분석이 가능해져 그동안 기술적 한계로 인해 대부분 정확하게 밝혀지지 않은 생명 현상에 대한 큰 연구 발전과 변화를 가져올 것으로 예상 ▪ (경제적 니즈) 신약개발 타겟의 중심인 막단백질은 단백질 확보/결정화 등의 핵심 문제가 대두되었고 이를 해결하기 위한 혁신적인 기술로 전망 ▪ (사회적 니즈) 기술적 한계에 따른 풀지 못한 생명 현상들의 이해 부재로 인한 질환 원인 규명과 이에 따른 치료제 개발을 극복하기 위한 기술로 전망 					

기술 개발 동향	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 지카 바이러스 구조분석을 통해 빠른 시간 내에 백신을 디자인 하고, 임상시험 실시(Sirochi et al., Science, 2016) - 2016년 4월: 바이러스 cryo-EM 구조 분석 3.8Å, 2016년 11월: 첫번째 백신 디자인, 2017년 3월 : 임상 2상 ▪ 말라리아 리보솜에 특이적인 항 말라리아 약 디자인에 활용(Wong et al., eLife, 2014) ▪ 결정화 과정이 필요 없고 소량의 정제 단백질 용액으로 구조 분석이 가능한 cryo-EM 기술로 인해 막단백질의 구조분석이 가속화되면서 빅파마들이 컨소시엄을 구성하여 cryo-EM 기술을 초기 단계부터 도입하여 신약 개발 시도 - Cambridge Pharmaceutical cryo-EM Consortium in UK 등
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 최신 구조생물학 연구가 결정학과 NMR 기술로부터 cryo-EM 기술로 급속히 전환되고 있는 해외 환경과는 다르게 국내는 열악한 장비보유 상황으로 인해 경쟁적으로 분석되고 있는 막단백질과 거대 단백질 복합체 연구가 느리게 진행 ▪ 막단백질이 주요 타겟인 신약 개발에 있어 핵심이 되는 입체구조 기반 소재 발굴, 디자인, 신약 후보 최적화에 필요한 주요 기술로 부상하고 있는 초저온 전자현미경 기술 도입 대형 사업 구상이 필요한 시기
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 현재 개발 중인 신약의 40% 이상은 인체 대부분의 생리적 활동에 관여하며 다양한 질환과 관련된 막단백질인 GPCR에 집중되어 있고 관련 시장 규모는 2018년 26억 달러이며, 2026년까지 6.7% 성장 전망 * 출처 : Market Research Report, 2019 ▪ 단백질신약 글로벌 시장 규모는 2016년 1,725억 달러에서 2021년까지 2,284억 달러로 성장 전망 * 출처 : Global Markets for Bioengineered Protein Drugs, Market Research Reports, 2017
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기초과학에서 신약 개발까지 전반에 필요한 생물학 및 의과학 연구 분야에 큰 영향을 끼칠 것으로 전망
필요 사항		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 체계적인 산학연 수요 분석을 기반으로 스크리닝용과 데이터 수집용 cryo-EM 활용 시설 구축 필요 ▪ Cryo-ET 기술 도입을 위한 적정 장비 구축 수요조사 필요 ▪ Cryo-EM, cryo-ET 기술 전문가 양성 프로그램 도입 필요

기술명	공간 오믹스 기반 단일세포 분석기술(Single cell spatial reconstruction)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 생체 기관이나 조직 내 개별 세포의 위치 정보를 유지한 상태에서 오믹스 데이터를 확보하여 3차원적인 공간 정보를 파악하는 기술 ▪ (장점) 장거나 기관 내의 서로 다른 개별 세포의 위치를 파악하여 특정 위치에서 유도되는 세포 종류 및 상태의 특성과 세포 간의 상호작용을 이해할 수 있고 질환을 유발하는 세포의 3차원 위치 파악을 통해 정밀한 진단 및 치료 표적 발굴이 가능 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">향후 5년</th> <th style="text-align: center;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="359 660 837 806"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 인체 및 다양한 모델시스템의 조직 내 개별 세포의 위치 정보 데이터베이스 확보 </td> <td data-bbox="845 660 1332 806"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 조직 내 3차원 세포위치 재구성으로 찾아낸 다양한 질환 특이 세포를 기반으로 정밀 진단 및 치료 기술 개발 </td> </tr> </tbody> </table>	향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 인체 및 다양한 모델시스템의 조직 내 개별 세포의 위치 정보 데이터베이스 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 조직 내 3차원 세포위치 재구성으로 찾아낸 다양한 질환 특이 세포를 기반으로 정밀 진단 및 치료 기술 개발 	
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 인체 및 다양한 모델시스템의 조직 내 개별 세포의 위치 정보 데이터베이스 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 조직 내 3차원 세포위치 재구성으로 찾아낸 다양한 질환 특이 세포를 기반으로 정밀 진단 및 치료 기술 개발 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 단분자 형광 이미징 추적 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 광학 현미경의 회절 한계를 뛰어 넘어 분자수준의 해상도로 살아있는 세포 내 다양한 분자들의 실시간 추적이 가능한 초해상도 현미경 기반 기술 ▪ 어레이 기반 단일세포 바코딩 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 조직을 oligonucleotide array가 심어진 유리 슬라이드에 배치하여 각 위치를 특정할 수 있는 공간바코드를 부착한 후 형광 표지된 염기나 금속 결합된 항체를 통해 세포 내 유전자와 단백질을 분석하는 기술 ▪ 이미징 정보와 시퀀싱 정보를 결합한 3차원 세포 위치 정보 재구성 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 단일세포 오믹스 정보와 위치 정보를 컴퓨터 상에서 결합하여 3차원으로 시각화하는 빅데이터 기술 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 향상된 3차원 단일세포 이미징 기술 개발 및 단일세포 내 단백질, 전사체, 후성유전체 등의 생분자 동시 검출이 가능한 신기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 이미징 데이터와 다중 생분자 검출을 기반으로 세포 위치 분석 및 재구성이 가능한 소프트웨어의 동반 개발 필요 ▪ (경제적 니즈) 공간 정보가 있는 세포 분석을 통해 보다 정밀한 진단 및 신약 개발에 필요한 생명정보 데이터베이스 확보 ▪ (사회적 니즈) 초해상도의 생명정보 데이터의 생산과 이를 수요자의 요구에 맞추어 분석할 수 있는 데이터 분석 연구자의 상호협력과 이를 통한 융합연구 확장 					
기술 개발 동향	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 조직 내 위치 정보를 유지한 채 세포 정보를 확보하기 위해 세포 이미징과 단백질, 전사체 분석을 결합하는 기술 개발 확산 ▪ 고에너지, 고해상도 자외선 레이저를 이용하여 금속 동위원소 결합된 항체로 염색한 조직 영역 일부를 체계적으로 절제하여 얻어진 조직 입자를 태워 플라즈마 비행-시간형 질량분석기(plasma time-of-flight mass spectrometer, CyTOF)가 개발되어 500-1000nM 해상도에서 52개 항체에 대한 측정 가능 				

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 조직 내 세포 분석을 위해 항체를 이용한 단백질 분석 방법에 질량 분석이 가능한 금속 결합 DNA를 표지로 RNA를 분석하여 단백질과 mRNA를 동시에 분석하는 기술 개발 ▪ 공간정보가 표지된 단일세포 전사체 분석은 정량적 분석 및 염기 서열 분석까지 가능해져 단백질 분석보다 훨씬 많은 수의 세포를 구별해 낼 수 있게 개발 ▪ 최근 조직 및 장기 내의 세포 종류와 위치 정보를 동시에 분석한 후 이를 in-silico로 3차원 재구성하는 기술이 개발되어 마우스 뇌, 인간태아 심장 등의 3차원 세포지도 제작 <div style="text-align: center;">  <p><3차원 태아심장 세포지도(2019, Cell)></p> </div>
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 출연(연), 대학 등에서 뇌지도 작성과 같은 연관분야의 연구를 수행하면서 관심이 증대하고 있으나, 공간 오믹스를 기반으로 단일세포 위치 정보를 분석하는 연구에 대한 수준은 세계적인 수준에 비해 낮음
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 공간 오믹스 기반 단일세포 위치 추적 기술 관련 세계시장은 연평균 8.5% 성장률로 2026년 약 2.62억 달러의 규모에 이를 것으로 전망 ▪ 질병 진단 및 치료 기술 개발을 위한 주요 기술로 활용 가능 ▪ 암 진단과 아울러 다양한 질환 진단 분야 활용 가능성으로 인해 글로벌 유전체 바이오텍뿐 아니라 신생 스타트업 등에서 신규 기술을 기반으로 한 파이프라인을 확장하고 있는 추세 <ul style="list-style-type: none"> - 예; 분자진단 전문의 NanoString Tech사에서는 2019년 GeoMx Digital Spatial Profiler를 신규로 발족하여 시장 점유를 위한 투자 확대
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 생명체에 대한 이해를 장기나 조직에서 세포 수준까지 확장하여 지금까지 규명이 불가능했던 근본적인 생명현상의 신비를 이해하는 데에 기여 ▪ 이를 기반으로 바이오 분야 과학과 기술의 상호혁신을 통해 다양한 글로벌 난제를 해결할 수 있을 것으로 기대
필요 사항		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 첨단 공간 오믹스 기술의 효과적인 현장 적용을 위해 시의적절한 최신 장비 구축과 개별 연구 수요에 맞추어 데이터 생산과 분석에 긴밀히 협력할 수 있는 전문인력 필요 ▪ 공간 정보와 단일세포 종류 정보의 결합을 통해 3차원 조직 및 장기 내 세포 재구성을 재현할 수 있는 소프트웨어 개발 및 분석 서비스 필요

기술명	조직내 노화세포 제거 기술(Senolytics)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 조직의 노화 및 기능 이상을 유발하는 노화세포를 선택적으로 제거하여 조직 항상성을 유지하고 질병을 치료하는 기술 ▪ (장점) 조직 내 노화세포만을 선택적으로 사멸시킴으로써 조직 노화를 억제할 수 있을 뿐 아니라 노화 관련 다양한 질병의 치료에도 활용 가능 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 5년</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 기 개발된 senolytics 약물의 노화관련 질병 대상 임상적용 ▪ Senolytics 약물의 항노화 효과를 위한 임상 연구 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 새로운 Senolytics 약물을 활용한 효율적인 항-노화 및 노화관련 질병 치료제 개발 </td> </tr> </tbody> </table>		향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기 개발된 senolytics 약물의 노화관련 질병 대상 임상적용 ▪ Senolytics 약물의 항노화 효과를 위한 임상 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 새로운 Senolytics 약물을 활용한 효율적인 항-노화 및 노화관련 질병 치료제 개발
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기 개발된 senolytics 약물의 노화관련 질병 대상 임상적용 ▪ Senolytics 약물의 항노화 효과를 위한 임상 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 새로운 Senolytics 약물을 활용한 효율적인 항-노화 및 노화관련 질병 치료제 개발 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 조직노화 및 생체 내 노화세포를 선별할 수 있는 바이오마커 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 조직별 조직 노화의 정도를 측정하고, 노화세포를 검증할 수 있는 실험방법 및 바이오마커 발굴 - 조직 노화세포의 특성 분석을 통한 노화세포 표적인자 발굴 ▪ 노화세포 선택적 제거 약물(Senolytics) 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 정상세포의 이상 없이 노화된 세포만 선택적으로 제거 가능한 약물의 개발 ▪ 노화세포 선택적 제거 약물의 질병 치료 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 노화세포 선택적 제거 약물의 노화 관련 질병치료기술 개발 - 약물의 흡수, 대사, 독성 평가 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 인간의 노화가 불가역적인 생물학적 현상에서 치료 가능한 질병이라는 패러다임으로 변화하고 있으며, 이에 따라 노화를 제어함으로써 인간의 건강수명을 증진시킬 수 있는 기술개발에 대한 필요성 증대 <ul style="list-style-type: none"> - 최근 5년 동안 조직 내 노화세포 제거술의 항노화 및 노화관련 질병 치료효과가 증명되고 있어서, 효과적인 약물적 노화세포 제거법 개발에 대한 가능성과 필요성 인식 - 하지만, 현재까지 노화세포 선택적 세포사멸유도 약물 개발이 미비한 실정 ▪ (경제적 니즈) 노화는 가장 많은 질병의 대표적 위험인자이기 때문에, 노화세포 선택적 사멸기술의 경우 다양한 질병에 적용 가능하며 항노화 약물로서 개발 가능하여 경제적/산업적 가치가 매우 큼 ▪ (사회적 니즈) 빠른 고령사회 진입으로 인한 사회적 비용이 증가하고 있기 때문에 국민의 건강수명을 증진시키고 의료비 감소를 위해서 노화제어 기술 개발 시급 					
기술 개발 동향	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 생체 내 살아남은 노화세포와 조직노화 연관성이 증명됨으로써, 노화세포제거기술 개발에 대한 연구 확대 <ul style="list-style-type: none"> - 소수의 노화세포를 젊은 쥐에 이식했을 때, 조직노화가 유발된다는 				

		<p>사실이 보고되면서 노화세포와 조직노화의 직접적 연관성 증명 (Nature Medicine, 2018)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 노화세포 특이적 마커인 p16 발현세포 사멸을 유발함으로써, 조직 내 노화세포 제거술의 항-노화 및 노화관련 질병에서의 치료효과가 다수의 논문에서 증명 ▪ 노화세포 특이적 제거약물 개발 및 치료제로서의 효과 검증 - 노화세포-선택적인 세포사멸 약물 (Senolytics ; Dasatinib과 Quercetin의 병행투여)이 2015년 최초로 개발(2015) - 당뇨, 폐섬유화 등 다양한 노화관련 병증에서 Senolytics의 치료효과 및 조직노화 회복효과 증명 ▪ 최근 Senolytics의 임상연구가 몇몇 질환을 대상으로 시작 - 유전성 폐섬유증환자에서 Senolytics의 임상적 효능이 보고되었으며, 최근 당뇨성 신장질환자 대상 임상연구에서 인간조직에서의 노화세포 제거효과 검증
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ UNIST 김채규 교수가 국제 연구진과의 공동연구를 통해 새로운 노화세포 제거약물을 개발하고, 이들 약물을 통한 노화세포 제거가 퇴행성 관절염에 걸린 생쥐모델의 생체 재생능력향상에 기여한다는 사실을 2017 Nature medicine에 발표하고, 실리콘밸리 생명과학 스타트업 기업인 Unity Biotechnology에 기술이전 ▪ 출연(연), 대학 등에서 역노화를 위한 연구들은 수행하고 있으나, 노화세포제거술에 대한 집중적 연구는 미비한 실정
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 노화와 관련된 난치성 질병치료, 노화의 예방 및 노화 조직의 기능 회복 등에 활용할 수 있는 기술로 범용적 가치 보유 ▪ Transparency Market Research에서는 2013년부터 2019년까지 전 세계 항노화 산업은 매년 평균 7.8%씩 성장해 2019년 1,917억 달러 규모가 될 것으로 전망 - 국내의 경우에도 2016년 약 20조원이던 시장규모가 2020년 약 38조 규모로 확대될 전망 * 출처 : Hebronstar Strategy Consultants, 항노화 산업동향 2018
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 노화관련 질병의 예방 및 치료가 가능하여, 고령화 사회의 건강수명 증진에 기여할 것
필요 사항		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 효과적인 노화세포 제거기술 및 약물 발굴을 통한 원천기술 개발을 통해 고령화 사회에서의 항노화 산업 및 기술 선도 가능 ▪ 이와 관련된 국내 집중적 연구 지원 필요

기술명	디지털 치료제(Digital therapeutics)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 기존의 먹는 알약이나 주사제가 아닌 디지털기술(소프트웨어)를 기반으로 질병 예방, 관리 및 치료하는 새로운 개념의 의약품 ▪ (장점) 의약품과 IT의 융합을 통해 표적부위에 약물을 정확하게 전달하거나 질병의 상태, 환자의 복용 여부 등을 실시간으로 모니터링 함으로써, 질병의 진단 및 치료 효과를 제고 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">향후 5년</th> <th style="width: 50%;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="363 640 863 864"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 선진국과 개발도상국 스마트폰 보급 확대 및 5G 초고속 인터넷 발달로 디지털 치료제 개발 기반 확대 ▪ AI, VR 등 기술을 활용한 기기의 다양화 및 원격의료, 디지털 처방 모바일 앱 개발 </td> <td data-bbox="879 640 1326 864"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 중증질환 분야에서 디지털 치료의 효용성 극대화 및 상용화 </td> </tr> </tbody> </table>	향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 선진국과 개발도상국 스마트폰 보급 확대 및 5G 초고속 인터넷 발달로 디지털 치료제 개발 기반 확대 ▪ AI, VR 등 기술을 활용한 기기의 다양화 및 원격의료, 디지털 처방 모바일 앱 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 중증질환 분야에서 디지털 치료의 효용성 극대화 및 상용화 	
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 선진국과 개발도상국 스마트폰 보급 확대 및 5G 초고속 인터넷 발달로 디지털 치료제 개발 기반 확대 ▪ AI, VR 등 기술을 활용한 기기의 다양화 및 원격의료, 디지털 처방 모바일 앱 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 중증질환 분야에서 디지털 치료의 효용성 극대화 및 상용화 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 개인 건강정보를 레코드로 구축, 공유/활용하기 위한 표준화 및 교류 기술 ▪ 건강 빅데이터 분석기술: 축적된 개인 건강정보의 빅데이터 분석을 통해 개인 건강 추이 예측기술 포함 ▪ 모바일 건강관리 서비스 플랫폼 기술 ▪ 원격 건강 모니터링 기술: 원격 시스템에 의한 환자의 실시간 모니터링 및 실시간 진단을 위한 정밀한 센서기술 ▪ 맞춤형 원격진료 및 치료기술: 환자 원격진단-상담, 원격 병리 진단기술, 원격 시스템에 의한 환자의 실시간 관리-원격 간호, 원격 처방, 원격 재활 포함. 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 증가하는 데이터를 통합 할 수 있는 플랫폼 확보 및 이를 위해 IT 기업들은 병원, 데이터 기업과 제휴 확대 ▪ (경제적 니즈) IT 기업들의 글로벌 시장 공략을 위한 디지털 치료제 분야 적극 투자 ▪ (사회적 니즈) 기술의 특성에 맞는 ‘맞춤’ 규제체제를 마련하여 업계의 불확실성을 해소하고 새로운 제품 개발을 촉진. 의료 공급자, 보험자, 제약 회사 등 기존 이해관계자 간 인센티브 조정 등의 노력과 디지털치료제에 대한 건강보험 수가 적용 검토 필요 					
기술 개발 동향	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2017년 디지털 치료제 산업의 이해를 대변할 목적으로 비영일 산업협회인 Digital Therapeutics Alliance (DTx Alliance) 결성 ▪ Pear Therapeutics의 중독치료 목적의 어플리케이션 리셋(reSET)이 디지털 치료제 최초로 2017년 미국 FDA 허가 받음. 2018년 산도스(Sandoz) 공동 개발한 ‘reSET-O’ FDA 승인 획득 ▪ Akili Interactive Labs는 주의력결핍과잉행동장애(ADHD) 치료용 비디오게임, 모바일 앱 개발 임상시험 진행 중 ▪ Click Therapeutics, MySugar(Roche Diabetes Care), WellDoc, Proteus Digital Health, Omada Health, Chrono Therapeutics 등 디지털 치료제 개발 추진 중 				

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 미국방위고등연구계획국(DARPA)의 ‘일렉트릭스(ElectrRX)’ 프로젝트 진행: 전자약을 개발 연구 ▪ 미국 IT 기업, 제약 기업과의 협력 통한 스마트 의약 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - GSK는 2016년 구글의 자회사 베릴리와 합작하여 생체전자공학 의약품 개발을 목표로 ‘갈바니(Galvani Bioelectronics)’ 설립 - 다국적 제약사 노바티스는 미국 벤처기업 피어테라퓨틱스와 조현병 치료용 디지털 신약 개발 위한 임상시험 돌입 - 일본 오츠카제약과 미국 벤처기업 프로테우스디지털 헬스가 공동 개발한 ‘아빌리파이’는 2017년 미국에서 정식 승인받아 판매 돌입 ▪ 미국이 전체 글로벌 시장의 대부분 차지, 현재 스마트 필 시장의 주요 업체로는 미국 캡소비전, 이스라엘 기븐이미징, 멕시코 메디메트릭스, 일본 올림푸스, 영국 바이오-이미지 리서치 등이 있으며, 다양한 기술 기반 스타트업들도 시장에 참여하는 추세
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 국내기업 중 디지털 치료제 승인 받은 곳은 없으며, 관련 법규도 미비한 실정. 일부 업체가 임상 승인 받아 연구를 진행 ▪ 뇌질환 디지털 치료제 개발 스타트업 뉴냅스는 ‘뉴냅 비전(Nunap Vision)’ 확증 임상시험 계획을 식품의약품안전처가 승인 ▪ 라이프시맨틱스가 암경험자를 대상으로 자가 건강관리서비스 앱 ‘에필케어’ 출시
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 새로운 시장을 형성하여 경제성장과 일자리 창출에 일조. ▪ 글로벌 디지털 치료제 시장 규모는 2016년 17억 달러에서 2017~2025년 21.0%의 연평균성장률로 증가, 2025년 94억 달러에 이를 것으로 전망 * 출처 : Grand View Research 2017 시장전망보고서 ▪ 미국 내 시장 규모는 2017년 8.9억 달러에서 연평균 30.7%의 높은 성장률로 성장해 2023년에 44.2억 달러를 형성할 것으로 전망. * 출처 : 생명공학정책센터 2019 디지털 치료제 개발 동향
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 모바일 기반 디지털 치료제를 통해 시공간 제약 없이 실시간 데이터 기반 맞춤형 치료를 제공해 환자 편의성 및 의료서비스 확대와 치료비용 절감 및 의약품 오용으로 인한 사회적 비용 절감 기대 ▪ 기존 신약보다 연구개발 기간을 획기적으로 줄여 빠르게 임상 적용이 가능하여 신약개발에 드는 비용과 시간 절감
필요 사항		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 국내기업 및 학계에서 차세대 고부가가치 의약품 창출을 위한 융복합 센서의 원천기술을 확보하기 위해서는 국가 차원의 R&D 지원이 필요 ▪ 제약 및 의료기기 IT 산업에서도 경쟁이 아닌 협력적 경쟁 능력이 요구 ▪ 디지털 치료제가 상용화되려면 원격의료 도입이나 의약품 인허가 확대 등 제도적 기반 마련 필요

기술명	실시간 액체생검(Real-time liquid biopsies)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 혈액, 소변 등에 존재하는 핵산 조각들을 분석하여 실시간 암 등의 질병 진행을 추적하는 기술 ▪ (장점) 비침습적 방법으로 환자로부터 시료를 얻기 용이하며, 질병의 발생 및 진행과정을 예측하여 추적 관찰이 가능함. 특히 암 분야에서 개인맞춤 치료에 사용 가능 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 5년</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 유전적 이질성에 대한 광범위한 분석을 통한 환자 맞춤형 치료 ▪ 항암제 저항성과 관련된 돌연변이 발견 및 암치료 가이드라인의 재정립 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 순환종양세포(CTC)에 대한 단일세포 분석법의 기술 발전을 통한 원발암, 전이암, 재발암의 치료 </td> </tr> </tbody> </table>		향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유전적 이질성에 대한 광범위한 분석을 통한 환자 맞춤형 치료 ▪ 항암제 저항성과 관련된 돌연변이 발견 및 암치료 가이드라인의 재정립 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 순환종양세포(CTC)에 대한 단일세포 분석법의 기술 발전을 통한 원발암, 전이암, 재발암의 치료
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유전적 이질성에 대한 광범위한 분석을 통한 환자 맞춤형 치료 ▪ 항암제 저항성과 관련된 돌연변이 발견 및 암치료 가이드라인의 재정립 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 순환종양세포(CTC)에 대한 단일세포 분석법의 기술 발전을 통한 원발암, 전이암, 재발암의 치료 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 순환종양세포(Circulating tumor cell, CTC) 분석기술 <ul style="list-style-type: none"> - 혈액 내 CTC의 극대화된 효율적 분리 및 검출기술 - 암환자별 발견되는 CTC 개수 차이에 따른 분석 방법의 정량화기술 - 단일세포 분석기술과의 접목을 통한 CTC 분석기술 ▪ 암세포 유래 핵산(Circulating tumor DNA, ctDNA) 분석기술 <ul style="list-style-type: none"> - 디지털 PCR, tagged-amplicon deep sequencing(TAm-seq) 등의 방법을 활용한 ctDNA의 정확한 정량화기술 - 종양 절제술 후 최소잔존질병 검출기술 및 종양의 전이, 재발 추적기술 - 암 유발 돌연변이인 BRAF, EGFR, ERBB2, KRAS 등에 대한 분석기술 ▪ 세포외소포체 (Extracellular vesicle, EV) 분석기술 <ul style="list-style-type: none"> - 혈액 내 소포체 분리 및 정량화기술 - 소포체 구성 물질인 4500여 종의 단백질, 지방질, 유전정보(mRNA, miRNA, DNA) 등의 분석을 통한 암의 진행, 전이, 약제 반응 예측기술 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 액체생검 내 존재하는 세포, 소포체, 핵산들을 고효율로 분리할 수 있는 기술 및 정량화 할 수 있는 기반 기술이 필요 ▪ (경제적 니즈) 전 세계적으로 암 환자 수 증가 및 그에 따른 경제적 비용이 지속적으로 증가하고 있기 때문에 정확한 암의 조기진단 및 진행상황을 판단할 수 있는 액체생검 기반의 바이오마커 기술에 대한 필요성 급증 ▪ (사회적 니즈) 매년 암의 발생률 증가에 따른 쉽고 정확한 암의 진단방법 및 개인 맞춤형 치료 방법 필요성 대두 					
기술 개발	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 미국의 액체생검기업 그레일(Grail)이 높은 정확도로 비세포성폐암 돌연변이를 검출할 수 있는 새로운 액체생검 기술 개발 				

동향		<ul style="list-style-type: none"> - ctDNA의 돌연변이 분석을 통해 75%의 폐암 진단 정확도를 보였고, 위양성(false-positive)이 판독되지 않음 ▪ 미국의 지노믹헬스 회사는 액체생검 기술 기반 암 진단기기를 상품화 ▪ 단일세포 분석(Single-cell analysis) 기술의 발전으로 순환종양세포에 대한 유전정보를 읽고, 암 바이오마커의 임상적 유용성 제시(Proc. Natl. Acad. Sci, 2019).
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 파나진은 폐암 환자용 맞춤형 항암제 선택을 위한 파나뮤타이퍼 출시 <ul style="list-style-type: none"> - 검출 표적 민감도와 특이도를 높이고 46종의 EGFR 돌연변이를 검출해 환자별 폐암 치료제 효과를 파악할 수 있는 기술 ▪ 이원다이애그노믹스(EDGC)는 혈액 내 적은 양의 ctDNA 분석의 힘든 점을 개선하여 암 발생여부를 판단할 수 있는 액체생검 기술에 대해 임상연구 중. 그 외 고형암 3-4기 진단 가능 기술 보유 ▪ 테라젠지놈케어는 혈액암 치료 후 잔존종양 파악 가능한 기술 개발 ▪ 지노믹트리는 대장암 조기진단용 얼리텍 출시 및 방광암, 폐암으로 진단기술 확대 ▪ 싸이토젠은 순환종양세포 액체생검 플랫폼 구축 ▪ 특허청 조사에 따르면 혈액, 소변과 같은 액체생검을 활용한 암 진단기술 출원이 2016년 308건으로 급격히 증가하고 있는 추세
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 환자 맞춤형 치료를 통한 의료비 절감 및 현재 의료체계 효율성 제고 <ul style="list-style-type: none"> - 환자마다 항암제 반응성이 다르기 때문에 가장 적합한 치료법을 적용하여 부작용 및 불필요한 치료를 최소화하여 의료비용 절감을 기대 ▪ 액체생검 시장 규모는 2016년 2349만 달러에서 2030년 24억 달러로 100배 이상 급성장 할 전망 <ul style="list-style-type: none"> * 출처 : Grand View Research
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 암의 조기 진단을 통해 치료율을 높이고, 전이암 및 재발암에 대한 실시간 분석을 통해 조기에 암을 치료할 수 있도록 도모 ▪ 환자별 맞춤형 치료제 사용으로 치료율을 높여 암 환자 삶의 질을 개선
필요 사항		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 암 바이오마커의 불확실성으로 인해 아직 진단의 정확도가 높지 않기 때문에 추가적인 표준화된 검사기준 및 대규모 임상시험을 통한 검증이 필요

기술명	엽록체 바이오공장(Chloroplast biofactory for high-level production of biomolecules)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 식물 세포 소기관인 엽록체를 이용하여 백신, 의료용 단백질, 항체 등 유용한 바이오물질을 대량생산하는 기술 ▪ (장점) 식물에서 바이오물질을 생산할 경우 독소가 생성될 위험이 적고 엽록체는 많은 양의 바이오물질을 생산 및 저장할 수 있어 대량생산이 가능 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 5년</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 엽록체의 외래 RNA 안정성 향상을 통한 바이오물질 생산 증가 ▪ 엽록체 내부 단백질공학을 통해 외래 유전자 발현율 증가 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 백신 등 유용물질 생산 식물을 제작하여 사료의 형태로 동물에게 섭취시켜 전염병 예방 ▪ 엽록체 및 엽록체 유사기관에 요소기술을 적용하여 바이오물질 생산 최적화 </td> </tr> </tbody> </table>		향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 엽록체의 외래 RNA 안정성 향상을 통한 바이오물질 생산 증가 ▪ 엽록체 내부 단백질공학을 통해 외래 유전자 발현율 증가 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 백신 등 유용물질 생산 식물을 제작하여 사료의 형태로 동물에게 섭취시켜 전염병 예방 ▪ 엽록체 및 엽록체 유사기관에 요소기술을 적용하여 바이오물질 생산 최적화
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 엽록체의 외래 RNA 안정성 향상을 통한 바이오물질 생산 증가 ▪ 엽록체 내부 단백질공학을 통해 외래 유전자 발현율 증가 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 백신 등 유용물질 생산 식물을 제작하여 사료의 형태로 동물에게 섭취시켜 전염병 예방 ▪ 엽록체 및 엽록체 유사기관에 요소기술을 적용하여 바이오물질 생산 최적화 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 엽록체 타겟형 유전자 발현기술 <ul style="list-style-type: none"> - 식물 세포 내부에 외래 유전자를 도입할 경우 세포 소기관으로 이동하지 않는 경우가 대부분이기 때문에 엽록체 내부로 유전자를 전달할 수 있는 기술 개발 ▪ 엽록체 타겟형 유전자 발현 안정화기술 <ul style="list-style-type: none"> - 엽록체는 외래 단백질을 생산하여 고농도로 축적시킬 수 있지만, 외래 유전자를 인식하고 분해하는 특성이 있어 이를 억제하는 기술 개발 - 식물 세포 내부에 안정화 단백질을 발현시켜 엽록체 내부 RNA의 안정성을 향상시키는 기술 ▪ 엽록체 단백질 추출기술 <ul style="list-style-type: none"> - 엽록체에서 발현시킨 단백질 등의 바이오물질을 고순도로 추출할 수 있는 기술 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 식물 유전자 공학이 발전하고 있지만 대부분의 연구가 세포핵에 집중되어 있음. 하지만 식물 세포 소기관의 경우 외래 단백질을 축적하는 등 독특한 기능이 있어 이를 활용할 수 있다면 다양한 분야에서 응용이 가능 ▪ (경제적 니즈) 지금도 식물에서 바이오물질을 발현시킬 수 있지만 발현율이 낮아 경제성이 떨어짐 <ul style="list-style-type: none"> - 엽록체 등 소기관을 이용하여 바이오물질을 고농도로 발현시킨다면 식물을 이용하여 여러 유용물질을 생산하고 이를 실생활에 이용 가능 ▪ (사회적 니즈) 동물세포 및 박테리아에서 백신 등 바이오물질을 만들 경우 독성물질이 함유되어 있을 가능성이 높음 <ul style="list-style-type: none"> - 하지만 식물은 비교적 독성물질 함유 가능성이 낮아 식물에서 바이오물질을 합성 및 추출하여 사용할 필요성이 제기 					

기술 개발 동향	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PRR10 단백질을 이용하여 엽록체 내부에 발현시킨 외래 RNA의 안정성을 크게 증가시키는 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 담배를 이용한 실험의 경우 기존의 방식보다 약 40배 향상된 생산성을 보임 ▪ 감자 괴경에 있는 amyloplast를 이용하여 외래 단백질을 발현시켜 단백질 저장성을 높이는데 성공 <ul style="list-style-type: none"> - 감자의 괴경에서 기존 보다 약 60배 저장성이 높은 단백질을 발현시키는데 성공
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 대학 및 기업에서 백신을 식물에서 생산하려는 연구가 추진 중 <ul style="list-style-type: none"> - 지플러스생명과학, 포항공대 황인환 교수팀 등 국내 연구진들이 연구 개발하여 백신, 항암제 등 개발 중 ▪ 하지만 식물의 세포 소기관을 이용한 국내연구는 초기 단계
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2020년 식물기반 바이오소재의 시장규모는 약 2,500억 달러로 예상 ▪ 의약품 단백질 시장은 최근 빠르게 증가하고 있어 2001년 이후 5년마다 각각 3배, 4.5배 증가 ▪ 형질전환 식물을 이용한 경구용 백신 생산은 전세계적으로 연구되고 있으며, <ul style="list-style-type: none"> - Plant Biotechnology, Dow AgroScience, Thomas Jefferson 등의 회사에서 담배, 시금치, 감자 등을 이용하여 항원을 생산하였고 임상시험 중에 있어 향후 해당 분야 발전이 예상 <p>* 출처 : Biosafety, vol.10, 2009</p>
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 식물에 백신과 같은 의약품 단백질을 고농도로 생산할 경우, 식품을 섭취하듯이 백신의 경구투여를 통해 면역반응을 유도할 수 있어 의학, 수의학 분야에 파급효과가 클 것으로 예상 ▪ 식물 세포 소기관을 이용한 기반 기술의 발전은 의약품 단백질 생산뿐 아니라 세포 소기관에 대한 이해도를 높여 향후 식물 개량 및 신제품 개발 연구에 직, 간접적인 도움을 줄 것으로 기대
필요 사항		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 엽록체 내부에 외래 단백질을 고농도로 발현시킬 경우 식물의 성장 및 발달이 저해되는 등의 부작용이 종종 발생하기 때문에 이러한 문제해결 필요 ▪ 식물 종마다 서로 다른 특성을 가지고 있으므로, 엽록체 바이오공장이 효율적으로 만들어지는 품종 선정 필요

기술명	식물 종간 장벽제거기술(Removing interspecific incompatibility for cross-species hybridization)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 식물 생식기관에서 종간 장벽 역할을 하는 단백질의 재설계와 도입을 통해 교배가 어려운 두 종간의 교배 효율을 향상시키는 기술 ▪ (장점) 전통육종 방식의 품종개발 과정에서 큰 어려움 중 하나인 종간 장벽을 제거함으로써 교배가 어려운 우수품종 간의 교배를 통해 우수형질의 식물을 개발 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 5년</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 식물 생식기관에서 종간 장벽 역할을 하는 단백질과 수용체를 규명하고 분석 ▪ 식물 생식기관에 재설계된 종 인식 단백질을 발현시키는 기술 개발 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 교배가 어려운 가까운 품종 간 교배를 가능하게 하여 신품종 개발 ▪ 다양한 우수 형질의 품종을 개발하여 식량 생산량과 품질을 향상 </td> </tr> </tbody> </table>		향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 식물 생식기관에서 종간 장벽 역할을 하는 단백질과 수용체를 규명하고 분석 ▪ 식물 생식기관에 재설계된 종 인식 단백질을 발현시키는 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 교배가 어려운 가까운 품종 간 교배를 가능하게 하여 신품종 개발 ▪ 다양한 우수 형질의 품종을 개발하여 식량 생산량과 품질을 향상
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 식물 생식기관에서 종간 장벽 역할을 하는 단백질과 수용체를 규명하고 분석 ▪ 식물 생식기관에 재설계된 종 인식 단백질을 발현시키는 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 교배가 어려운 가까운 품종 간 교배를 가능하게 하여 신품종 개발 ▪ 다양한 우수 형질의 품종을 개발하여 식량 생산량과 품질을 향상 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 식물 종 인식 단백질 분석기술 <ul style="list-style-type: none"> - 식물 생식기관인 화분과 암술머리에는 종을 인식할 수 있는 단백질 신호를 보유 - 식물 종마다 가지고 있는 종 인식 단백질의 특성을 분석하고 단백질을 인식하는 수용체(리셉터)의 기능을 분석하여 향후 응용 가능한 데이터 축적 ▪ 외래 단백질 발현기술 <ul style="list-style-type: none"> - 식물 종 인식 단백질을 재설계하여 생식기관에 발현시켜야만 교배의 종간 장벽을 제거 가능 - 화분이나 암술머리에 재설계된 단백질을 발현시켜 다른 종의 화분을 인식할 수 있는 기술 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 기존 전통육종 방식에 한계를 느끼고 있으며, 식물 교배의 원리 및 단백질 공학기술이 발전함에 따라 새로운 방식의 육종을 통한 신품종 개발이 요구 <ul style="list-style-type: none"> - 식물 형질전환, 원형질체 재분화기술 등으로 재설계된 단백질을 발현하는 식물을 제작할 수 있으며, 이를 종간 장벽 제거 원리에 적용한다면 이종간의 교배가 가능할 것으로 전망 ▪ (경제적 니즈) 식물의 작동원리와 개량기술이 발전함에 따라 기존의 전통육종 방식을 넘어 새로운 방식으로 품종을 개량함으로써 기존 방식으로는 해결할 수 없는 농업문제를 해결하고 생산량, 품질 등의 비약적 향상이 요구 ▪ (사회적 니즈) 기후변화, 니즈변화 등으로 농업은 새로운 시대를 맞이하고 있으며, 이에 맞춰 작물의 개량이 요구. 이를 위해 그동안 시도하지 않았던 종간의 교배를 통해 새로운 품종의 개발 필요 					
기술 개발 동향	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 암술머리에서 발현되는 단백질인 SPRI1의 조절을 통해 교배가 어려운 품종 간의 교배를 성공시키는 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - SPRI1은 암술머리에서 발현하여 같은 종의 화분은 받아들이고 다른 				

		<p>종의 화분은 발달을 저해하는 기능을 함으로써 중간 장벽을 형성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 교배가 어려웠던 종의 암술머리에서 발현되는 SPRI1을 다른 종에 발현시켜 교배 성공률을 비약적으로 향상시키는 기술 개발 ▪ 화분관이 씨방을 찾아갈 수 있도록 유도하는 신호 단백질과 그를 인식하는 리셉터를 조절하여 교배가 어려운 종간의 교배를 성공시키는 기술 개발 - 씨방은 자신의 화분관 성장을 올바른 방향으로 유도하기 위해 LURE 펩타이드 호르몬을 분비하며, 이를 화분관 끝에서 발현되는 리셉터가 인식 - 교배가 어려운 종에서 생성되는 LURE와 리셉터를 다른 종에 발현시켜 교배율을 비약적으로 향상시킨 기술 개발
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 원하는 종의 단백질을 다른 종에 발현시키는 형질전환 기술개발 진행 - 식물 재분화 및 형질전환 기술을 꾸준히 연구하여 주요 작물에 원하는 단백질을 발현시킬 수 있는 시스템을 일부 갖췄으나, 아직 효율이 낮고 특정 품종에서만 가능한 한계를 가지고 있음. ▪ 식물 생식기관 및 생식원리에 대한 연구는 해외 사례와 비교하였을 때 연구규모가 작고 연구시스템의 발전이 필요한 상태
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 식량수요 증가 등으로 세계 종자시장은 지속적으로 상승하고 있는 추세이며, 향후에도 성장가능성이 높을 것으로 예측 - 세계 식량종자시장 규모는 2010년 291억 달러에서 2025년 585억 달러로 연평균 4.7% 성장할 것으로 전망(KISTEP 기술동향브리프, 2018-4) ▪ 형질전환을 통해 단백질을 도입하여 신품종을 만들어내는 유전자 재조합식품의 시장규모는 2022년까지 3억 6800만 달러 수준으로 증가할 것으로 보이며, 최근 8년간 10배의 성장이 전망되는 유전자가위의 도입을 활용하여 생식기관의 단백질 엔지니어링이 가능(KISTEP 기술동향브리프, 2017.5)
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 식물 생식의 기본원리를 보다 자세히 이해할 수 있어 향후 교배 기술의 발전에 긍정적인 영향을 끼칠 것으로 전망 ▪ 기존의 전통육종 방식으로는 교배가 어려웠던 이종 간의 교배가 가능해질 경우 정체되어있는 식물 신품종 개발 시장을 크게 활성화시켜 1차산업인 농업분야의 재부흥 기대
필요 사항		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 단백질 공학은 가능하나, 이를 안정적으로 생식기관에 발현시키기 위해서는 기존의 형질전환 방식 이외에 새로운 기술 필요 ▪ GMO 규제에서 자유롭기 위해서는 아그로박테리움과 같은 박테리아를 사용하지 않고 물리적인 방법으로 외부에서 단백질을 전달하여 일시적으로 교배 장벽을 제거하는 신기술 필요

기술명	바이오 파운드리(Biofoundry)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 로봇과 AI 기술을 융합한 바이오 첨단기술로서 DNA 조립에서부터 세포 개량까지의 복잡한 과정을 빠른 순환 공정으로 구현하는 기술 ▪ (장점) 느리고 복잡한 생물 실험 과정을 빠르고 정밀한 로봇과 IT 기반 기술로 극복하고, 수집된 빅데이터의 AI 분석을 통해 바이오 제조 공정의 생산효율을 향상 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">향후 5년</th> <th style="text-align: center;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 인공미생물 기반 소재 생산의 경제성 확보, 석유 화학물질 대체 ▪ 바이오 에너지(수소, 전기) 생산 ▪ 인공효모 프로젝트 완성(SG2.0) 및 효모 기반 물질 생산 적용 ▪ 합성 인간 유전체 기반(GP-write) cell-line 개발 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 환경오염(플라스틱, 폐기물) 정화에 인공미생물 활용 ▪ 고효율 바이오 연료전지 상용화 ▪ 우주 테라포밍 인공미생물 개발 ▪ 인공 인간유전체 cell-line 활용 치료 상용화 </td> </tr> </tbody> </table>	향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 인공미생물 기반 소재 생산의 경제성 확보, 석유 화학물질 대체 ▪ 바이오 에너지(수소, 전기) 생산 ▪ 인공효모 프로젝트 완성(SG2.0) 및 효모 기반 물질 생산 적용 ▪ 합성 인간 유전체 기반(GP-write) cell-line 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 환경오염(플라스틱, 폐기물) 정화에 인공미생물 활용 ▪ 고효율 바이오 연료전지 상용화 ▪ 우주 테라포밍 인공미생물 개발 ▪ 인공 인간유전체 cell-line 활용 치료 상용화 	
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 인공미생물 기반 소재 생산의 경제성 확보, 석유 화학물질 대체 ▪ 바이오 에너지(수소, 전기) 생산 ▪ 인공효모 프로젝트 완성(SG2.0) 및 효모 기반 물질 생산 적용 ▪ 합성 인간 유전체 기반(GP-write) cell-line 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 환경오염(플라스틱, 폐기물) 정화에 인공미생물 활용 ▪ 고효율 바이오 연료전지 상용화 ▪ 우주 테라포밍 인공미생물 개발 ▪ 인공 인간유전체 cell-line 활용 치료 상용화 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 합성생물학 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 표준화된 부품을 이용한 유전자회로를 설계하고 이를 최적화된 인공세포에 도입하여 유용한 기능을 수행하는 생명시스템을 구현하는 기술 ▪ Part registry 기술 <ul style="list-style-type: none"> - DNA 부품/회로 정보 관리용 database, DNA 서열을 원하는 조합으로 배치 하거나 유전체 설계용 소프트웨어 등 ▪ 차세대 시퀀싱기술 기반 게놈/DNA 서열 고속 분석기술 ▪ 바이오촉매 적응진화 및 초고속 탐색기술 ▪ DBTL 공정용 자동화 하드웨어 및 소프트웨어 <ul style="list-style-type: none"> - DNA 서열 조합 등의 실험 자동화를 위한 로봇 및 측정 장비(Liquid handler, Colony picker, GC/LC 등)와 개별 장비들의 프로세스를 연계하는 장비 - SBML, SBOL, SiLA2, ANIML, LIMS, FAIR 등의 표준화 데이터 관리기술이 적용된 바이오파운드리 통합 운영 소프트웨어 ▪ 빅데이터 처리기술, AI, Cloud <ul style="list-style-type: none"> - 자동화 수행 과정에서 고속으로 생산되는 데이터를 대용량으로 처리하기 위한 데이터베이스 기술과 빅데이터를 분석하기 위한 AI 모형 및 통합 제어를 위한 Cloud 기술 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 바이오산업의 오랜 난제가 되어온 불확실성과 낮은 생산성을 극복하고, 효율적 DNA 합성과 바이오제조를 위한 자동화 기술 필요. 자동화시스템, 로봇, AI와 융합 가능한 바이오 기술은 합성생물학의 표준화 기반 부품/회로 설계기술이 유일 ▪ (경제적 니즈) 미국을 중심으로 바이오파운드리 기반 합성생물학 전문기업들의 바이오소재 생산 가치 창출 본격화, 합성생물학 글로벌 투자금 규모 '17년 14억 달러에서 '18년 38억 달러로 증가. 바이오파운드리의 중소기업 기술 공유 및 공동연구를 위한 공공영역으로 확대 ▪ (사회적 니즈) 바이오 기술은 환경, 에너지, 질병 등 다양한 사회문제에 대한 지속 가능한 해결책을 제공할 수 있으며, 바이오파운드리의 도입을 통해 그 실현 시기를 빠르게 견인 가능 					

기술 개발 동향	해외 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 바이오파운드리 구축을 통한 바이오제조 기간 단축 <ul style="list-style-type: none"> - DARPA Living Foundry 10개 복잡물질을 90일 만에 제조(<i>JACS</i> 2018), Amyris사 말라리아 치료제 상업화에 10년 1,500만 달러가 들었으나 바이오파운드리 구축 이후 7년간 15개 물질 상용화 완료. 유럽 Horizon2020 SHIKIFACTORY100 프로젝트 4년 100개 물질 생산 목표 ▪ 19개 바이오파운드리 기관 연합 글로벌 바이오파운드리 얼라이언스 구축(<i>Nature Comms</i>, 2019) ▪ 바이오파운드리 기반 인공 유전체 연구 <ul style="list-style-type: none"> - 인공 미생물 JCVI-syn3.0(<i>Science</i> 2017), 호모 지놈 합성 SC2.0(<i>Science</i> 2017), 인공 대장균(<i>Nature</i> 2019) 등 ▪ 미국 중심 기업들의 가치 창출 본격화 <ul style="list-style-type: none"> - Amyris NASDAQ 15개 물질 상용화, Twist bioscience 2018년 NASDAQ 상장 1년 만에 가치 2배, Ginkgo Bioworks 기업가치 42억 달러 (2019), Zymergen 소프트뱅크 4억 달러 투자(2018년 실리콘밸리 단일규모 최대) ▪ 영국 특화된 합성생물학 기반 바이오파운드리 설립 운영 <ul style="list-style-type: none"> - London DNA foundry (허브, 임페리얼), Edinburgh Genome Foundry (포유류, 에딘버러), SYNBIOCHEM (화합물, 맨체스터) 등 ▪ 중국 Shenzhen 지역 정부 대규모 투자, 대규모 건물 별도 건설, 2021 prototype, 2022-2023 완공
	국내 동향	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 국내 최초 합성생물학 전문센터 설치(2013), 유전자회로 설계, 지능형 세포대사 제어, 신기능 효소 등 개발(한국생명공학연구원) ▪ 시스템생물공학 기반 대사공학, 미생물 이용 가솔린 생산, 초고속 미생물유전체 표현형 분석 등 추진(한국과학기술원) ▪ DNA 컴퓨팅, 바이오센서기술 등 개발(포항공과대학교) ▪ 바이오벤처를 중심으로 올리고머 DNA 합성 분야 시장의 양적인 성장 지속되나, 기술개발의 수준은 정체
기대 효과	경제·산업적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 합성생물학은 보편적 플랫폼기술로써 바이오파운드리의 도입을 통한 고속화 대량화는 제약, 화학, 에너지, 농업 등 전 산업에 막대한 파급효과 예상 ▪ 바이오소재 개발기간 5년에서 2.5년으로 50% 이상 단축 가능, 신규 산업용 고성능 세포공장 확보(산업계협업) 시일 단축 ▪ 수입의존 일변도의 석유화학 소재 시장에 대한 대안 마련
	사회적 효과	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 지난 100년 간의 화석연료 기반 산업화로 인한 미세먼지, 플라스틱, 온실가스, 유해화학물질 등 글로벌 현안 문제에 대한 친환경적 해결책 제시 ▪ 대규모 고속 탐색 및 AI 기반 학습을 가능하게 함으로써 질병, 바이러스 등 인류 건강 위협 요소에 대한 치료 대안 제시
필요 사항		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유전체 합성 또는 바이오 생산 등 바이오파운드리 핵심 콘텐츠에 대한 파이프라인 구축이 우선이며 하드웨어/소프트웨어, 그리고 AI 등 기반 요소기술의 확보 필요 ▪ 첨예한 합성생물학 기술선점 경쟁에서 차별성 및 경쟁력 확보를 위한 자동화·인공지능·빅데이터 기술을 적극 도입 필요 ▪ 고가의 하드웨어와 고비용 실험 문제를 해결하기 위한 장비 및 소프트웨어 국산화 전략 수립 필요

기술명	무세포 합성생물학(Cell-free synthetic biology)					
기술 정의	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (정의) 생명활동에 필요한 최소요소(DNA, 단백질 등)로 구성된 무세포 환경에서 유용한 기능을 수행하는 생명 시스템을 제작하는 기술 ▪ (장점) 복잡한 세포활동 제어의 어려움을 극복하고, 기존의 자연 세포에서 구현되지 않는 합성경로를 통해 신규 화학소재 등을 제조 가능 					
실현 시기	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 5년</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">향후 10년</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ato mole 수준 진단용 키트 ▪ 고효율 무세포 자동화 파운드리 ▪ 단백질/의약품 이동형 현장 생산 ▪ 비천연 아미노산 포함 합성 단백질 생산 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 완전 제어 가능 인공세포 ▪ 고효율 연료전지 ▪ 유전자회로 예측 수학 모형 ▪ 효소 기반 게놈 수준 무세포 DNA 합성 </td> </tr> </tbody> </table>		향후 5년	향후 10년	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ato mole 수준 진단용 키트 ▪ 고효율 무세포 자동화 파운드리 ▪ 단백질/의약품 이동형 현장 생산 ▪ 비천연 아미노산 포함 합성 단백질 생산 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 완전 제어 가능 인공세포 ▪ 고효율 연료전지 ▪ 유전자회로 예측 수학 모형 ▪ 효소 기반 게놈 수준 무세포 DNA 합성
향후 5년	향후 10년					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ato mole 수준 진단용 키트 ▪ 고효율 무세포 자동화 파운드리 ▪ 단백질/의약품 이동형 현장 생산 ▪ 비천연 아미노산 포함 합성 단백질 생산 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 완전 제어 가능 인공세포 ▪ 고효율 연료전지 ▪ 유전자회로 예측 수학 모형 ▪ 효소 기반 게놈 수준 무세포 DNA 합성 					
요소 기술	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 무세포 기술 <ul style="list-style-type: none"> - RNAP, ribosome, NTP, AA 등 전사/번역/단백질 활성화에 필요한 최소한의 요소들만을 이용하여 세포모사 환경을 만들고 DNA로부터 단백질을 생산하고 활용하는 기술 ▪ 합성생물학 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 표준화된 부품을 이용한 유전자회로를 설계하고 이를 최적화된 인공세포에 도입하여 유용한 기능을 수행하는 생명 시스템을 구현하는 기술 ▪ 자동화 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 유전체 수준의 DNA 합성/어셈블리와 세포배양 및 고속탐색을 수행하는 로봇, IT, 그리고 시가 융합된 기술로 기존 생물 실험의 속도와 스케일을 향상시킨 혁신 기술 ▪ 정량적 수학 모델링 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 유전자 발현과 단백질 활성, 대사 화학반응, 세포성장 등의 생명현상을 정량적으로 설명하고 예측하는 수학 모델링 기술 					
주요 이슈	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (기술적 니즈) 최소의 필수 요인만으로 생명현상을 설명하고 확장하는 방식으로 여전히 밝혀지지 않은 복잡한 세포 내 생화학적 반응과 원리를 bottom-up 방식으로 이해 시도. 안전하고 완전 제어 가능한 인공세포 구현 기술 요구 <ul style="list-style-type: none"> - 기존의 살아있는 세포를 사용한 방법에서 제한요소로 작용하는 세포대사의 복잡성, 노동력 및 시간 등을 최소화한 초고속 유전자 및 유전자 회로 개발 및 기능 평가 플랫폼 필요 ▪ (경제적 니즈) 합성생물학을 적용한 다양한 소재물질의 바이오제조를 무세포 기반으로 전환하여 GMO 이슈를 회피하고 빠르고 경제적인 소재물질 생산을 통한 산업화 가능 <ul style="list-style-type: none"> - 자연 세포에서 구현되지 않는 합성 대사경로 개발을 통한 신규 화학소재 개발의 가속화 					

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (사회적 니즈) 고가 장비와 고급인력에 의존하지 않고 빠르고 정확한 질병 또는 유해물 진단하는 키트로 사회문제 해결 가능
기술 개발 동향	<p>해외 동향</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 합성생물학 글로벌 투자금 규모는 2017년 14억 달러에서 2018년 38억 달러로 급등 ▪ 무세포 동결건조 기반 지카바이러스 진단 키트 개발(<i>Cell</i>, 2014, 2016) ▪ 글루코스 1unit당 24개 전자 생산 가능한 고효율 연료전지 개발 (<i>Nature comm.</i>, 2014) ▪ 일본 무세포 시스템 기반 1M DNA 합성기술 연구(Oricoro, 2018) ▪ <i>Vibrio natriegens</i> 기반 대량 세포파쇄액 확보기술로 고속 무세포 플랫폼 기반 마련(Harvard, 2018) ▪ 자동화 기반 고속 프로토타이핑 무세포기술 개발(Imperial college, 2020 / Northwestern Univ., 2019) ▪ 무세포 생물학 솔루션 PURExpress 상용화(NEB), Cell free 기반 생물학 교육용 키트 상용화(Amplyus)
	<p>국내 동향</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 무세포 생물학 솔루션 AccuAapid 상용화(바이오니아, 충남대) ▪ 무세포 기반 고감도 센서 연구(충남대, 포항공대) ▪ 무세포 기반 유전자회로 정량적 모형 연구(한국생명공학연구원)
기대 효과	<p>경제·산업적 효과</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 무세포 합성생물학 기술은 DNA 서열 해독과 합성기술이 발전함에 따라 그 활용성과 경제성이 더욱 높아질 것으로 전망 - 무세포 DNA 기반 시장은 2017년 8,530만 달러에서 2026년 4.4억 달러 규모로 증가할 것으로 예측 ▪ 천연/비천연 단백질/아미노산 대량 합성, 소재/에너지 생산, 치료제 및 진단키트 등 실제 활용되고 있는 분야로 산업화 효과 높음
	<p>사회적 효과</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 안전하고 제어 가능한 바이오 시스템을 구현함으로써 환경오염에 대한 사회적 우려 경감 ▪ 저가의 고감도 감지 키트 등 적정기술을 이용한 전염병, 바이러스, 국방 등의 사회문제 해결책 제시 ▪ 교육용 키트를 활용한 체험형 생물학 교육으로 전문가 양성
필요 사항	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 무세포 합성생물학 기술의 활용성 증가를 위해서는 다양한 sigma factor 기반 RNAP 작동을 연구하고 Ribosome의 대량 확보기술 개발을 통한 비용 절감 및 대량화 필요 ▪ 무세포 시스템의 빠르고 비교적 단순한 메커니즘과 표준화 기반의 합성생물학 특성상 IT기반 자동화 및 AI 기술과 빠르게 융합 가능, 바이오분야 4차산업혁명의 핵심 역할을 위해 해당 분야 집중 연구 필요 ▪ 정량적 수학 모델링 기술을 활용해 생물학의 기초 핵심 지식을 축적하여 복잡한 생물 시스템의 예측기술 확보 필요 ▪ 전략적 투자를 통한 미국, 일본, 유럽을 중심의 무세포 기술 확보 경쟁에서 우위 선점 필요

첨부2 **그간 발굴된 바이오 미래유망기술 리스트(후보기술 포함)**

2015 바이오 미래유망 후보기술(밑줄: 선정기술)

의약
<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>지능형 환자 맞춤형</u> <ul style="list-style-type: none"> - 신기술(환자 맞춤형 줄기세포, 지능형 약물 방출 등)과 바이오 빅데이터를 지능형 컴퓨팅으로 처리하여 최적의 약물 개발 ○ <u>Expressome 분석 기반의 iPSC 활용 약물평가</u> <ul style="list-style-type: none"> - 유전적 차이에 따른 약물 반응이 아니라 약물에 반응하여 발현되는 expressome을 분석하여 좀 더 정밀한 약물 반응성을 분석하는 기술 ○ <u>유전자 교정세포 3D 프린팅</u> <ul style="list-style-type: none"> - 체외에서 유전자 교정 후 3차원 세포 프린팅으로 원하는 조직이나 장기를 제작하여 재생하는 기술 ○ <u>바이오 빅데이터 인공지능 알고리즘</u> <ul style="list-style-type: none"> - 바이오 빅데이터를 활용하여 생명현상의 시를 생성케 하고, 이 논리로 생명현상을 해석하는 기술 ○ <u>개인 맞춤형 마이크로바이옴</u> <ul style="list-style-type: none"> - 개인 특이적 다양성을 가진 인체 공생 마이크로바이옴 특성 규명을 통한 마이크로바이옴 치료제 개발 ○ <u>줄기세포 기반의 Regeneration-on-a-chip</u> <ul style="list-style-type: none"> - 줄기세포치료제가 수행할 것으로 예상되는 regeneration 현상을 마이크로칩 상에서 구현하여 치료의 적합성과 가능성을 판단할 수 있는 기술

의료기기
<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>차세대유전체분석 칩(NGS-on-a-chip)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 칩 상에서 극소량의 시료로부터 유전체 서열 정보를 초고속/저비용/대용량으로 분석하는 기술 ○ <u>스마트 진단용 Quadcoder</u> <ul style="list-style-type: none"> - 스캐닝만으로 환자의 상태를 측정하고, 질병을 진단하는 분석기능, 데이터를 저장하고 이를 기반으로 치료 및 모니터링을 위한 데이터 셰어링 기능을 갖는 기기 ○ <u>줄기세포치료제/재생의약 이식용 로봇수술 기술 및 장비</u> <ul style="list-style-type: none"> - 줄기세포의 재생의학적 치료효과를 높이기 위한 이식기술의 개발을 위해 robotic surgery의 정밀한 기술과 융합하는 기술

- **Sociogenomics 기반의 생체인식 웨어러블 디바이스**
 - 인간의 반복적인 병적·사회적 행동양식(치매, 행동장애, 인격장애 등)을 예측할 수 있는 생체인식(유전체, 지문, 홍채 등) 웨어러블 기기 /프로그램
- **체내 이식형 스마트 바이오센서**
 - 신체에 직접 이식하거나 복용할 수 있는 형태의 바이오센서로, ICT 기술을 활용하여 의사와 환자를 실시간으로 연결하는 기술
- **운동효과 바이오닉스**
 - 실제 운동을 하지 않아도 운동을 통해 형성되는 근육을 생성하고 유지하여 노화에 따른 근육감소 예방 및 근기능 유지를 위한 기술

의료서비스

- **사이버 메이트 헬스케어**
 - 개인 바이오헬스 데이터(유전체 정보 등)를 재구성하여 사이버 상의 헬스케어 관리 시스템을 구현하는 기술
- **퍼스널 노화속도계**
 - 신체 기능별 노화속도를 정확하게 측정할 수 있는 마커 발굴로 개인별 노화속도를 예측하고, 진단하는 기술
- **자가 건강관리를 위한 무자각/무구속 Gamification 시스템**
 - 사물인터넷을 이용해 일상생활에서 사용자의 활동량을 기록(무자각/무구속)하고 게임에서 사용되는 요소들로 연결하여 온라인 자가 건강관리 서비스
- **아바타 유전체를 이용한 건강 게임틀**
 - 개인 유전체 정보를 재구성하여 사이버 상의 아바타를 제작하고, 이의 건강유지(비만 예방 등)를 게임 프로그램과 접목
- **Human 빅데이터 분석을 위한 가상인간 모델링**
 - 휴먼 데이터 분석을 통한 해부용 3D 카데바(cadaver) 등 가상인간 모델링을 구현하는 기술
- **사회유전체 분석용 인공지능 시스템**
 - 인간의 사회적 행동양식(행동장애, 인격장애 등)에 대한 광범위한 유전체적 데이터 생산과 분석을 수행하는 AI
- **인지/감각기능 증강용 가상현실**
 - 신체 기능별 노화속도를 정확하게 측정할 수 있는 마커 발굴로 개인별 노화속도를 예측하고, 진단하는 기술
- **4D 세포 추적기술**
 - 분화, 증식에 따른 세포들의 3차원적인 변화 정보를 기반으로 고해상도의 3D, 4D 생명체 지도를 확보하여 세포의 상호작용을 분석하는 기술

2017 바이오 미래유망 후보기술 리스트(밑줄: 선정기술)

분야 1	보건의료 빅데이터 플랫폼 구축
<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>대규모 임상 유전체 정보관리기술(Clinico-genomic big data management)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 환자의 다중 임상 데이터 표준화 및 이를 유전정보와 연계, 관리하는 기술 ○ <u>치료예측 빅데이터 분석기술(Data mining for predictive therapy)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 질병과 관련된 유전자 변이, 약물반응 등의 발굴을 위한 데이터 마이닝 기법 ○ <u>모든인터넷 기반 바이오헬스(Biohealth service based on Internet of Everything)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 사물인터넷 기반의 개인 건강정보와 임상정보가 종합되는 IoT 건강관리 기술 및 서비스 	

분야 2	개인 유전체 기반 맞춤형 치료제 개발
<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>단일세포 유전체 분석기술(Single cell genomics)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 단일세포 수준에서 유전자 돌연변이, 전사체의 변화 등을 분석하는 기술 ○ <u>합성 면역공학(Synthetic immunity)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 유전자 편집 등을 통해 개인 맞춤형 면역체계를 구축하여 암 등에 걸리지 않도록 하는 기술 ○ <u>유전체 분석 기반 항암치료기술(Cancer Precision Medicine)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 현재 사용 중인 표적 항암제를 환자의 유전자 돌연변이에 맞게 처방하여 치료하는 기술 	

분야 3	신종 바이러스와 슈퍼 박테리아의 전세계 확산
<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>원헬스 모니터링기술(One-health monitoring)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 인간, 동식물, 환경이 인간 건강과 연결되어 있다는 개념에서 바이러스의 국가/대륙 간 이동 등을 감지하는 기술 ○ <u>현장 적용 바이러스 진단기술(Field viral diagnostics)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 공항, 항만, 병원 등에서 바이러스를 신속-현장 진단하고 그 데이터를 전송할 수 있는 기술 ○ <u>역학정보분석기술(Infoepidemiology)</u> <ul style="list-style-type: none"> - 인공지능 및 빅데이터 분석 기술을 활용한 감염병 발생과 바이러스 확산을 예측하는 기술 	

분야 4	모바일 기기로 질병 예측·예방·진단 및 관리
<ul style="list-style-type: none">○ 스마트폰 진단센서(Smartphone diagnostic sensor)<ul style="list-style-type: none">- 스마트폰에 내장된 센서(온도, 가속도, 압력, 적외선, 카메라, 마이크 등)를 이용하여 질병을 진단하는 기술○ 모바일 인공지능 진단기술(Mobile AI diagnostics)<ul style="list-style-type: none">- 모바일기기에 내장된 센서에 의한 데이터와 문자, 음성, 이미지 등의 빅데이터 수집 및 분석을 통해 질병 예방, 진단, 치료에 응용하는 기술○ e-헬스 조정기술(E-health intervention)<ul style="list-style-type: none">- 스마트폰이나 인터넷을 이용하여 질병의 진단 및 치료에 의료진이 개입하여 치료성과를 높이는 기술	

분야 5	애플·구글 등 스마트 헬스케어 전쟁
<ul style="list-style-type: none">○ 웨어러블 건강관리기술(Wearable health device)<ul style="list-style-type: none">- 생체신호(맥박, 체온, 혈압, 심전도 등)의 실시간 수집을 위한 웨어러블기기의 제조 및 데이터 분석을 통한 건강 관리기술○ 전자·인공 피부(Electric/Artificial skin)<ul style="list-style-type: none">- 생체신호의 즉각적인 입·출력 및 약물주입 등이 가능한 유연한 소재 기반의 전기장치로 모바일기기와의 연동이 가능하게 하는 기술○ IoT 헬스케어 플랫폼(IoT healthcare platform)<ul style="list-style-type: none">- 다양한 전자기기들 간의 통합을 통해 만성질환자, 고령자의 질병 예방과 건강관리에 기여하는 기술	

분야 6	표적유전자를 편집하는 유전자 가위기술의 혁신
<ul style="list-style-type: none">○ 유전자 편집을 통한 질병치료기술(Genome editing-base gene/cell therapy)<ul style="list-style-type: none">- 질병 관련 유전자의 편집을 통해 희귀유전질환 등 질병을 치료하는 기술○ 유전자변형 동식물 제작기술(One-step generation of gene-modified animals/plants)<ul style="list-style-type: none">- 동식물의 특정 유전자 변형을 유도하여 개량된 형질을 갖는 동식물을 제작하는 기술○ 유전자가위의 비특이성 제어기술(Control of off-target effects by genetic scissors)<ul style="list-style-type: none">- 원하지 않는 유전자가 변형되어 발생할 수 있는 오프-타겟(off-target) 정보를 측정하고 관련 위험성을 줄이는 기술	

<p>분야 7</p>	<p>혁신적 진단기술, 액체생체검사 대두</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 순환 종양세포 DNA 탐지기술(Circulating tumor DNA detection) <ul style="list-style-type: none"> - 혈액 내 종양세포의 분자적 특성 분석을 통해 암의 전이 및 내성 기전을 이해하여 암 치료에 기여하는 기술 ○ 질병세포 트랩 기술(Disease cell trap) <ul style="list-style-type: none"> - 혈액 등 인체 내에서 돌아다니는 질병 관련 비정상 세포를 특이적으로 포집하는 기술 ○ 면역자석기술(Immuno-magnetic) <ul style="list-style-type: none"> - 체액 내 미량으로 존재하는 바이오마커를 대량으로 존재하는 매트릭스 물질로부터 분리해내는 기술 	
<p>분야 8</p>	<p>원격의료 시범사업 확산</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 연속식 혈당측정기술(Continuous glucose monitoring) <ul style="list-style-type: none"> - 혈액 채취 없이 비침습적인 방법으로 혈당을 연속적으로 측정하는 센서의 고도화 기술 ○ 종이 바이오칩(Lap-on-paper biochip) <ul style="list-style-type: none"> - 건강, 질병의 관리를 위해서 간단하지만 신뢰성이 보장된 센서 플랫폼 기술 ○ 가상 진료기술(Virtual medical room) <ul style="list-style-type: none"> - 가상현실기술을 활용하여 의사의 진료 등이 원격으로 가능하게 하는 기술 	
<p>분야 9</p>	<p>재생의료 융합화 및 기술개발 확대</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 생체 내 직접교차분화기술(<i>in vivo</i> direct reprogramming) <ul style="list-style-type: none"> - 세포의 체외조작 없이 생체 내에서 직접교차분화를 유도하여 세포의 운명을 바꾸는 기술 ○ 리프로그래밍 인자 전달기술(Targeted delivery of reprogramming factors) <ul style="list-style-type: none"> - 생체 내 재생을 유도하기 위해 특정한 목적 세포에 원하는 인자를 정확하게 전달하는 기술 ○ 재생유도 신약(Regenerative small molecule drug) <ul style="list-style-type: none"> - 생체에 내재 된 재생기능을 유도하는 의약품 개발 및 신약개발 기술 	
<p>분야 10</p>	<p>유전체 발현 지휘 단백질 발견</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 후성유전학적 발생·분화 조절기술(Epigenetic regulation of development) <ul style="list-style-type: none"> - 후성유전학적 방법으로 발생 및 분화과정에서 광범위한 유전자들의 발현을 조절하는 기술 ○ 세포운명 결정인자 제어기술(Regulation of cell fate-determining factors) <ul style="list-style-type: none"> - 세포의 운명을 결정지을 수 있는 중요 인자들을 발굴하고 이들에 의해 영향 받는 유전자들의 발현을 조절하는 기술 ○ 발생과정의 유전체·단백체 분석기술(Genomic and proteomic analysis on early development) <ul style="list-style-type: none"> - 발생 초기과정의 조절기전을 파악하기 위해 발생 단계별 유전체, 단백체를 분석하는 기술 	

2018 바이오 미래유망 후보기술(밑줄: 선정기술)

코어바이오(Core Bio, 기초·기반, 플랫폼)
<ul style="list-style-type: none">○ 고속/대량 당쇄합성 (High throughput glycomimics)<ul style="list-style-type: none">- 인체 유래 당단백질의 구조와 동일한 형태의 당쇄를 고속/대량으로 합성하여 제작하는 기술○ 단일 뉴런 분석기술 (Single neuron analysis)<ul style="list-style-type: none">- 단일뉴런의 유전자 발현, 단백질 결합, 연결성, 신경활성 변화 등을 종합하여 신경 조직 간 네트워킹을 파악하는 기술○ 대사체 재설계 분석 (Metabolomic reprogramming)<ul style="list-style-type: none">- 체세포 리프로그래밍 등을 통해 인공적으로 생식세포(난자, 정자) 및 배아를 제작하는 기술○ 막단백질 구조 지도 (Membrane proteome structure map)<ul style="list-style-type: none">- 항체의 주요 타겟이지만 정제가 어려워 많은 연구가 필요한 막단백질 구조의 전체상을 파악하는 기술○ 유전자 복원기술 (Genetic remediation)<ul style="list-style-type: none">- 생태계 및 시스템 내에서 원치 않는 유전자 변이를 제거하여 유전적 기준선(genetic baseline states) 상태로 복원하는 기술○ 합성 배아 (Synthetic embryo)<ul style="list-style-type: none">- 줄기세포를 이용하여 인공적으로 배아 및 배아성장에 필요한 태반과 유사 구조체를 제작하는 기술

화이트바이오 (White Bio, 산업공정/환경·해양 및 에너지, 소재)
<ul style="list-style-type: none">○ 유전자 드라이브기술 (Gene drive)<ul style="list-style-type: none">- 기후변화에 따른 질병매개 해충의 특정 유전자를 종 전체로 확산시켜 개체번식을 제어하는 기술○ 인공효소 체인 (Artificial enzyme chain)<ul style="list-style-type: none">- 세포 내 연쇄반응인 생합성 대사경로를 이용, 인공적으로 합성한 체인형식의 효소 연쇄반응 공정을 통해 바이오연료 및 다양한 소재 생산효율을 극대화하는 기술○ 탄소자원화 광합성 세포공장 (Carbon utilizing photosynthetic cell factory)<ul style="list-style-type: none">- 이산화탄소 저감 및 탄소자원화 능력을 갖는 광합성 세포공장 시스템을 구축, 이를 활용한 고부가가치 소재를 생산하는 기술○ 환경오염물질 분해 마이크로바이옴 (Xenobiotics microbial ecosystem)<ul style="list-style-type: none">- 박테리아, 나방 등의 분해효소를 활용하여 플라스틱, 비닐 등 환경 오염물질을 해결하는 기술

레드바이오 (Red Bio, 의약품 등 보건의료)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 생체 내 유전체 편집기술 (<i>in vivo</i> Genome editing) <ul style="list-style-type: none"> - 유전자 가위기술을 이용하여 개체 내 세포를 대상으로, 그 내부의 특정 유전자를 편집하여 질병을 치료하는 기술 ○ 신경/정신질환 맞춤형 뉴로이미징 (Neuroimaging for psychiatry) <ul style="list-style-type: none"> - 신경/정신질환 관련 뇌영상 정보의 데이터뱅크화 및 이를 분석하여 신경/정신질환 진단과 치료에 활용하는 기술 ○ 약물전달 3D 프린팅 기술 (3D-printed drug delivery system) <ul style="list-style-type: none"> - 투약결과에 대한 모니터링이 필요하고, 복잡한 제형의 의약품을 환자 맞춤형 용량과 성분, 체내 추적이 가능한 물질을 함께 3D 프린팅하는 기술 ○ 오가노이드 기반 생체모사기술 (Organoids-based biomimetics) <ul style="list-style-type: none"> - 줄기세포, 3D 프린팅기술 융합 등을 통해 제작된 오가노이드를 이용하여 복잡한 생체시스템(순환계, 신경계, 소화계, 개체 전체 등)을 모사하는 기술 ○ 오픈소스 신약발굴기술 (Open source drug discovery) <ul style="list-style-type: none"> - 공개된 신약개발 관련 빅데이터를 인공지능 등의 분석기술을 통해 의약품질의 신규작용점을 발굴하여 신약개발에 활용하는 기술 ○ 차세대 항암백신 (Next generation cancer vaccine) <ul style="list-style-type: none"> - 활성이 없는 다양한 암 유발 바이러스 인자들의 동정과 분석에 관한 빅데이터를 통해 고효율의 암 발생 예방 및 치료적 접근이 가능한 백신물질을 개발하는 기술

그린바이오 (Green Bio, 농림수축산·식품)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 식물공장형 그린백신 (Plant-based vaccine production in plant factory) <ul style="list-style-type: none"> - 식물공장 생산방식을 적용하여 부작용이 적고 효율적인 식물백신을 대량으로 생산하는 기술 ○ 식품 유해성분 동시검출 센서 (Simultaneous hazards-detecting sensors) <ul style="list-style-type: none"> - 안전한 먹거리 검증을 위해 식품 내 미량 포함된 인공색소, 중금속 등을 동시에 검출하는 기술 ○ 유전체 편집 기반 양적형질 조절기술(QT engineering by genome editing) <ul style="list-style-type: none"> - 양적형질(quantitative traits)에 관련된 여러 개의 타겟 유전자를 동시에 편집하여 동·식물의 형질을 강화/개량하는 기술 ○ 인공육류 생산기술 (Artificial meat production) <ul style="list-style-type: none"> - 줄기세포의 3D printing을 이용하여 동물세포 배양기술을 통해 친환경·고기능성 육류를 생산하는 기술

[표] 2019 바이오 미래유망 후보기술(밑줄: 선정기술)

플랫폼바이오(Platform Bio, 기초·기반, 플랫폼)
<ul style="list-style-type: none">○ <u>DNA 기록기/분자레코더(DNA writer/Molecular recorder)</u><ul style="list-style-type: none">- 생물학적·인공적 정보를 살아있는 세포 내에서 처리하고 저장할 수 있도록 DNA를 역동적인 기록 매개체로 활용하는 기술○ <u>염색체 엔지니어링(Chromosome engineering)</u><ul style="list-style-type: none">- 세포 내 염색체를 복제, 재조합, 분리하여 염색체 수를 최소화하는 등 염색체 공정을 통해 생물학적 기능을 해석하는 기술○ <u>단일세포 다중오믹스 시각화기술(Single cell multiomics visualization)</u><ul style="list-style-type: none">- 단일세포의 유전체, 단백질체, 대사체 등의 데이터를 AI 기반으로 시각화하여 시공간적 지도로 표현하는 기술○ <u>조직별 면역세포 세포체 지도(Cellomics map of tissue-resident immune cells)</u><ul style="list-style-type: none">- 조직 특이적 면역세포의 종류, 기능 및 상호 관계를 이해하기 위해 세포체의 전체상을 파악하고 시각화하는 기술○ <u>자기조직화 다세포 구조(Self-organizing multicellular structures)</u><ul style="list-style-type: none">- 합성유전회로(synthetic genetic circuits)를 설계하여 생물의 능력을 모방할 수 있는 맞춤형의 3D 구조(조직)를 제작하는 기술○ <u>크리스퍼 바코드 맵(CRISPR barcode map)</u><ul style="list-style-type: none">- CRISPR 유전자편집기술을 이용하여 유전체 내 표시해 둔 바코드를 통해 생명의 발생과 분화를 추적하는 기술

그린바이오 (Green Bio, 농림수축산·식품)
<ul style="list-style-type: none">○ <u>미토콘드리아 유전체 편집을 통한 대사조절기술(Metabolic modification by mitochondrial genome editing)</u><ul style="list-style-type: none">- 에너지 생산기관인 미토콘드리아 유전체편집을 통해 식물의 물질대사를 조절하고 생산성을 증대시키는 기술○ <u>이미지 기반의 작물생장 모델링기술(Image-based modeling for crop production)</u><ul style="list-style-type: none">- 작물 이미지 빅데이터를 이용하여 작물의 생장을 예측 및 관리하는 기술○ <u>인공육류 생산기술(Artificial meat production)</u><ul style="list-style-type: none">- 줄기세포의 3D printing을 이용하여 동물세포 배양기술을 통해 친환경·고기능성 육류를 생산하는 기술○ <u>식물공장형 그린백신(Plant-based vaccine production in plant factory)</u><ul style="list-style-type: none">- 식물공장 생산방식을 적용하여 부작용이 적고 효율적인 식물백신을 대량으로 생산하는 기술

레드바이오 (Red Bio, 의약품 등 보건의료)
<ul style="list-style-type: none"> ○ ↻노화성 운동모방 약물(Exercise-mimicking medicine for anti-aging) <ul style="list-style-type: none"> - 실제 운동을 하지 않아도 운동효과를 나타내어 근육노쇠 등 노인성질환을 예방할 수 있는 약물 ○ 광의학 치료기술(Photodynamic/Photothermal therapy) <ul style="list-style-type: none"> - 특정 파장대의 빛과 광민감제(photosensitizer)를 암세포의 내부로 도입시켜 그 빛을 이용하여 암세포를 제거하는 기술 ○ 암 오가노이드 연계 면역세포 치료기술(Canceroid-mediated immune cell therapy) <ul style="list-style-type: none"> - 암환자 세포 유래 암 오가노이드를 이용하여 환자 맞춤형 면역세포치료를 생산하고, 이를 항암치료에 활용하는 기술 ○ 비 오피오이드 통증조절제(Non-opioid painkiller) <ul style="list-style-type: none"> - 만성통증 기전 및 바이오마커 규명을 통해 안전하고, 효과적이며, 중독성 없이 통증을 조절하는 약물 ○ 오픈소스 신약발굴기술(Open source drug discovery) <ul style="list-style-type: none"> - 공개된 신약개발 관련 빅데이터를 인공지능 등의 분석기술을 통해 의약품질의 신규작용점을 발굴하여 신약개발에 활용하는 기술 ○ 신경/정신질환 맞춤형 뉴로이미징(Neuroimaging for psychiatry) <ul style="list-style-type: none"> - 신경/정신질환 관련 뇌영상 정보의 데이터 뱅크화 및 이를 분석하여 신경/정신질환 진단과 치료에 활용하는 기술

화이트바이오 (White Bio, 산업공정/환경·해양 및 에너지, 소재)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 유전자 드라이브기술(Gene drive) <ul style="list-style-type: none"> - 기후변화에 따른 질병 매개 해충의 특정 유전자를 종 전체로 확산시켜 개체번식을 제어하는 기술 ○ 플라스틱 분해 인공미생물(Plastic degrading artificial microorganism) <ul style="list-style-type: none"> - 합성생물학을 통해 플라스틱 분해능을 보유한 미생물을 상향식(bottom-up) 방식으로 개발하는 기술 ○ 유전자회로 공정 예측기술(Predictable genetic circuit engineering) <ul style="list-style-type: none"> - 빅데이터로 기계학습 된 시뮬레이션으로 합성유전자회로의 최종출력(소재·물질 생산능 등)을 예측하는 기술 ○ 미세플라스틱 유해성 장기 평가기술(Long-term hazard assessment for nanoplastics) <ul style="list-style-type: none"> - 해양환경 보존을 위해 장기적 관점에서 미세 플라스틱의 독성 및 유해성을 평가하는 기술

첨부3 **2019 바이오 미래유망기술 연재소설**
 글: 전승민(과학저술가), 삽화: 조진호(과학저술가)

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - “DNA기록기·분자레코딩 기술” 편]
 제1화 “그들만의 1000일 기념일” 

4월 22일은 강현과 권하선의 이른바 ‘1000일 기념일’이었다. 사귀어온지 벌써 3년이 지났다니. 서로를 아끼는 마음이 커져가는 것과 비례해서 둘의 태도는 시간이 지날수록 시큰둥했다. 뭘 이야기해도 상대의 대답을 미리 알고 있었고, 어떤 행동을 해도 상대의 반응을 예측할 수 있었다. 오래된 연인이랑게 보통 그런 식이다.

하선은 뭔가 숫자를 세는 것을 좋아했다. 기념일도 제법 충실하게 챙겼다. 몇 달 전부터 1000일 기념일은 챙겨야 한다고 복선을 깔아왔던 것도 그녀다. 현은 하선이 거창하게 뭔가 특별한 행사를 바란 건 아니라고 생각했다. 서로 바빴으니까. 하지만 같은 직장에 다니고 있으니 나란히 퇴근해 저녁식사라도 함께하면 될 거라고 생각했다.

“미안해요. 오늘은 도저히 움직일 수가 없어. 어제까진 끝내보려고 했는데.”
 “오늘은 식사라도 함께하고 싶었는데.”
 “저한테 인생이 걸려있을 정도로 중요한 일이라서. 자기가 보기엔 별 의미 없어 보일 수 있지만 난 이걸 오늘 안에 꼭 끝내고 싶어요.”
 “굳이 오늘 꼭? 제출 마감에 있는 서류나 발표가 있는 것도 아니잖아.”
 “미안해요. 응?”
 알았다고 말하며 혼자 사무실을 나서면서도 현은 기분이 조금 불편했다. 연구실 문을 빠져 나오며 하선이 들으라는 듯 안경 옆에 붙은 작은 터치센서를 누르며 조금 큰 소리로 말했다. “집으로 간다. 차를 준비해 줘.”



3분 정도를 걸어 연구소 정문 앞으로 천천히 걸어 나서자 인공지능(AI)이 호출한 자율주행차 한 대가 유리창 위로 '103683'이라는 숫자를 켜고 기다리고 있었다. 현의 주민등록 식별 번호의 일부다. 차 문을 열고 탑승하자 차는 스르르 움직이기 시작했다. 퇴근시간이지만 조금도 길이 막히지는 않았다. 도로에 신호등이 없기 때문이다. 대신 차량마다 신호등이 따로 달려있다. 모든 차량마다 원격으로 데이터를 주고받으며 교차로를 통과할 순서를 자동으로 결정한다. 거리에서 사거리를 보고 있으면 모든 차량이 무질서하게 교차로를 그대로 통과하고 있는 것 같다.

하지만 교통사고는 옛날 말. 차량 내 신호등에 빨간불이 켜져 다른 차량이 지나가기를 기다려야 하는 날은 한 달에 많아도 서너 번에 불과했다. 경찰차나 앰블런스 등 사람이 직접 운전해야만 하는 특수임무 차량이 지나가는 경우다. 약 1년 전부터 전국 서비스를 시작한 이 시스템 덕분에 스포츠 목적이 아닌 한 차량을 직접 구매하는 사람은 없어졌다. 대부분은 자율주행차를 공유서비스로 이용한다. 한국의 성공사례를 보며 미국, 일본, 유럽 등 각국에서도 이 시스템을 도입하려고 준비 중이다.

한국에 이런 교통체증 없는 세상을 만든 건 현이었다. 그는 창밖을 보면서 문득 3~4년 전, 이 교통 시스템의 실용화 작업에 자신과 하선이 나란히 참가했었다는 사실을 떠올렸다. 사람이 운전하지 않아도 되는 자율주행차는 10년 전부터 이미 완전히 실용화 됐지만 걸림돌은 교통신호 시스템이었다.

자동차에 통신 기능을 얹어 주는 건 그리 어렵지 않은 일이었지만 각각의 자동차에 정확한 교통신호를 0.1초도 틀리지 않게 제어하려면 도시 중앙에 설치한 교통통제용 컴퓨터에 걸리는 부하가 상상을 초월했다. 고성능 슈퍼컴퓨터를 동원하더라도 모든 교통 상황을 예측하고 완전히 통제하긴 불가능해 보였다.

시스템 기획 과정에서 핵과 하선이 머리를 맞대 새롭게 들고 들어간 아이디어는 'DNA기록기술'을 도입하자는 거였다. 생명체의 유전자 기록 코드인 DNA에 인공적인 정보를 저장하는 기술. 처음 이 기술을 실험실에서 구현해 낸 건 2000년대 초반. 자동화 기술이 처음 개발된 것이 2019년이다. 이 기술은 지속적으로 발전해 지금은 대용량 컴퓨터 저장장치를 제작할 때 여러 분야에서 속속 쓰이고 있다. 1g의 유전자 물질에 10억 GB(기가바이트)의 데이터를 저장할 수 있어 최근 수년 사이에 급격히 각광 받고 있었다.

현과 하선은 이 기술을 끌고 와 교통통제 시스템의 데이터 저장시스템에 연결해 낸 일등 공신이었다. 현은 도로교통시스템에 꼭 맞게 데이터를 저장할 수 있는 전용 DNA 구조를 고안해냈고, 하선은 이 DNA기록시스템을 컴퓨터 시스템에 연결하는 인터페이스를 개발했다. 둘이 없었다면 세상은 아직도 교통체증에 시달리며 살아가고 있었을지도 몰랐다.

두 사람의 감정이 직장 동료 이상으로 발전한 것도 그 무렵이었다. 둘은 같은 실험실에서 밤을 새고, 함께 같은 소파에 쓰러져 쪽잠을 잤다. 시간 안에 프로젝트를 마치려다 보니, 그리고 지금까지 누구도 해 본 적이 없는 시스템을 개발하는 일이다 보니 하루가 48시간이라도 모자랄 지경이었다. 힘겹게 지내던 시절 누구보다 위안이 됐던 두 사람 사이에 특별한 감정이 싹트는 것도 그리 이상한 일은 아니었다.

“그리고 보니 하선이기도 그때 이 연구 하면서 정말 고생 많았었는데.” 현은 하선이 생각나자 조금 전 내심 섭섭했던 감정이 다시 떠올리며 투덜거렸다.

“도대체 오늘 같은 날 뭐가 바쁘다는 거야.”

집에 들어온 현은 식사를 하고 싶은 마음이 없었다. 간단한 음식을 챙겨 먹고 잠시 TV보다가 결국 다시 일거리를 찾았다. 노트북 컴퓨터엔 그가 과거에 설계했던 기록저장용 DNA구조의 설계도가 들어있었다. 최근 현은 짬이 나는 대로 이 DNA 구조를 다시 새롭게 다듬을 수 있을지 고민해 왔다. 예상대로만 완성된다면 지금 실용화 돼 있는 DNA기록 시스템의 효율을 한층 더 끌어올릴 수 있을지 몰랐다.

“아무래도 정보를 어떻게 넣고 꺼내야 하는지, 이 부분은 내 머리로 한계가 있단 말이야. ICT 분야는 영...” 현은 모니터를 바라보며 중얼거렸다.

두 서너 시간이 훌쩍 지났을까. 시계가 밤 11시를 가르키자 슬슬 잠이 쏟아지기 시작했다. 지금부터 해야 할 지각 있는 행동은 잠을 잘 준비를 하는 것 이외에 없다는 사실은 현도 잘 알고 있었다. 하지만 화를 풀 곳을 찾고 있는 듯 계속 설계를 노려보고 또 노려보고 있었다.

11시 30분이 넘어갈 무렵. 현의 휴대 단말기로 화상통화 요청이 들어왔다. ‘와우. 다 했어요. 퇴근합니다~’라는 제목을 달고 있었다. 하선이었다. 현은 화상통화를 켜고 하선의 얼굴을 보며 말을 걸었다.



“아니. 지금 퇴근하는 거야?”

“막상 그러는 자기도 지금 일하는 것처럼 보이는데요?” 하선은 낭랑하게 말했다.

“으... 응. 그러네.”

“e메일 하나 보냈는데 혹시 지금 볼 수 있어요?”

현은 대답 없이 노트북 메일함을 뒤졌다. 제목란에 ‘경축. 1000일 기념.’이라고 적혀있었다.

“이게 뭔데 그래?”

“오늘 안에 꼭 끝내서 자기한테 선물로 주고 싶었어요. 이 일 때문에 우리가 지금까지 같이 있을 수 있었던 건데. DNA기록 시스템에 쓸 수 있는 신형 정보 인터페이스예요. 원래는 오늘 저녁식사 자리에서 주려고 했는데 예상찮은 버그(소프트웨어의 오류)가 보여서 고치느라고.”

“.....”

“왜 아무 말이 없어요. 고맙다 정도는 해야지. 여기 맞추면 기록저장용 DNA구조를 새로 짜기가 100배는 더 쉬워질 것 같지 않아요. 내가 생각해도 잘 만들었다구요. 기존 시스템으로는 엄두도 내기 어려웠던 뇌세포 전체 시뮬레이션까지 가능해질지도 몰라요. 생명과학분야에도 혁명이....”

하선은 자랑하듯 속사포처럼 말했다.

“하선아. 지금 어디야?” 현은 그녀의 말을 자르며 급하게 물었다.

“집에 가는 중. 왜요?”

“지금 갈게. 집 앞에서 보자.”

“예? 조금 있으면 출근인데 뭐하러?”

“좀 안아주고 싶어서. 도착하면 잠시만 기다려.” 현은 자율주행차를 부를 수 있는 스마트 안경을 찾아 쓰고 현관문을 급하게 열고 뛰어나갔다.

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - "조직별 면역세포의 세포체 지도"편]



제2화 "암보다 독감이 더 무서운 세상"

‘국가생명정보기술원’ 연구원들의 동료의식은 남다르기로 유명하다. 업무량이 상상을 초월하다 보니 함께 고생하던 동료들 사이에선 친가족 이상으로 서로 돕고 아끼는 문화가 있었다. 인공지능이 발전하면서 과거엔 몇 년을 차근차근 연구해야 했던 일을 불과 몇 달 사이에 해치울 수 있게 되면서 도리어 업무량은 점점 더 많아져 갔다.

연구소 내에서 ‘기술지원단’을 총괄하고 있는 나형욱 단장도 일벌레로 유명했다. 그는 요 며칠 사이 입이 석 자는 튀어나왔다. 최근 건강검진에서 췌장암이 발견됐기 때문이다. 당분간 수시로 병원을 찾아야 할 걸 생각하니 나 단장은 계속 짜증이 났다.

“도대체 하루가 아쉬운 판국에 왜 이런 일까지...” 나 단장은 주위에 미안했는지 들으라는 듯 투덜거렸다.

“거, 암 걸린 분이 너무 일만 생각하시는 것 아닙니까.” 강현은 나 단장을 놀리듯 낭랑한 말투로 말했다.

“당장 국내 기업체 기술지원 목록 검토할 것만 몇 십개인 줄 알아? 아 진짜. 인공지능은 왜 자아를 못 가지는 걸까. 말도 안 되는 업체목록 걸러내는 것만 알아서 해 줘도 원이 없겠어. 아. 내친김에 우리도 연구소 내 뇌 신경 연구센터랑 협력해서 한번 만들어볼까. 뇌 과학도 옛날 같지 않잖아.”

“어어. 그러다 울트론(영화 ‘어벤져스’에 등장하는 악한 인공지능)이라도 태어나면 어떻게 하시려고요.”

“알 만한 사람이 무슨 수십 년 전 농담을 하고 그래? 자네만 해도 나보다 훨씬 머리 좋은데도 내가 시키는 대로 일 하잖아.”

“어이쿠. 저는 단장님에 비하면 아직 멀었습니다.” 현은 입을 삐죽 내밀면서 너스레를 떨고는 말을 이어갔다.

“그러지 마시고요. 며칠이라도 입원하시는 건 어때요. 아니면 휴가라도 다녀오십시오. 10년 전에 췌장암이면 사형선고였어요.”

“요즘엔 면역항암제 한 달만 처방받으면 되는데 뭐 하려고. 사실 나는 암보다 인플루엔자(독감)가 더 무서워. 대부분 금방 낫긴 하지만 변종이 끝이 없다 보니 가끔 치명적인 종류가 생겨나는 건 피할 수 없잖아.”

“그래도 암 생기실 정도면 너무 무리하고 계신 겁니다.”

“이봐. 일이란 건 미뤄두지 말고 할 수 있을 때 최대한 해야 하는 거야. 나중에 어떻게 되고 나면 후회해도 늦는다고. 내가 젊은 시절에 일을 대강대강 했다면 지금 어떻게 되었겠나. 꼼짝없이 ‘죽었다’고 생각하면서 땅을 치며 후회하고 있지 않겠어?” 그의 말에 현은 어쩔 수 없이 입을 다물었다.

나 단장은 인류가 암을 정복하는데 큰 획을 그은 일등 공신으로 꼽혔다. 불과 10여년 전 만 해도 노년 이후 자연사를 제외하면 사망률 부동의 1위는 암이었다. 그러나 인체의 면역기능을 이용해 부작용 없이 암을 공격하는 ‘면역항암제’가 보편화 되면서 암은 차츰 인간의 통제 속으로 들어오기 시작했다.

나 단장은 그 단초를 제공한 인물이었다. 사람의 몸속엔 각종 장기, 피부, 혈관 등 수없이 많은 조직이 얽히고설키 있다. 그는 전 세계 의학, 생명과학 연구진이 달려들어도 성공하지 못했던, 각 인체 조직에 따라 최적의 항암 효과를 낼 수 있는 세포체구조를 찾아낼 수 있는 ‘세포체지도’를 완성하는데 가장 크게 기여한 인물이었다.



자기 말대로 나 단장은 머리가 그리 좋은 편이 아니었다. 그러나 우직함 만큼은 남달랐다. 그는 몇 년이고 포기하지 않고 매달리면서 조금씩 실험 데이터를 계속해서 쌓아 올렸다. 그가 만든 ‘인체조직별 세포체지도’는 누구든지 맞춤형 항암제를 개발할 때 반드시 참고해야 하는 ‘바이블’이 됐다. 각종 특효 항암제가 봇물 터지듯 시장에 쏟아져 나오기 시작한 것도 그 무렵부터다.

“휴. 예. 알겠습니다.” 현은 한숨을 몰아쉬면서 일단 강 단장의 방에서 물러 나왔다. 어떻게 해서든 저 고집불통 두목님을 며칠이라도 쉬도록 하고 싶었는데, 도저히 말이 통하지 않으니 속이 시커멓게 타들어갔다. 그는 방문 앞을 나서기가 무섭게 스마트 안경을 누르며 동료이자 연인인 권하선 연구원에게 전화를 걸었다.

“어떻게 됐어요? 성공?”

“아니. 내 말은 이빨도 안 들어가.”

“아. 진짜 어쩌자고 저러신대요? 저러다 과로사라도 하실까 걱정이예요.”

“잠깐만 있어 봐. 나한테 아직 한 가지 방법이 있기는 해.”

현은 2시간 정도 후, 단장실을 다시 찾아가 문을 두드렸다.

“단장님. 시간 되세요?”

“왜 또 왔어? 나 입원 안 한다고 했다.”

“그게 아니라. 이것 좀 봐주시죠.” 현은 전자종이(e페이퍼)로 된 서류 한 묶음을 불쑥 내밀었다.

“저보다 더 잘 아시겠지만, 일부 면역세포는 인체 내 특정 조직에서만 유달리 더 높은 기능을 나타낸다는 사실은 꽤 오래전부터 알려져 있었잖아요. 이 ‘조직상주면역세포’ 기능을 잘 이용하면...”

“그렇지. 지금 많이들 쓰고 있는 항암제도 비슷한 원리가 많지.” 나 단장은 바쁘다는 듯 서류를 훑어 빠르게 넘겨보며 대답했다.

“제 특기가 유전자 설계 아니겠습니까. 제가 그래서, 그 면역세포의 성질을 인위적으로 조정할 수 있도록 DNA 설계도를 한 번 그려보고 있었는데요.”

“뭐야? 정말인가? 그게 된다고?”

“완성되면 암 뿐 아니라 자꾸 변이를 일으키는 바이러스 세포도 100% 예방과 치료가 가능할지 모릅니다. 앞으로는 인플루엔자도 무서워하지 않으셔도 돼요.”

“이거 놀랍군..... 그런데, 갑자기 이걸 내놓는 이유가 뭐야? 이 정도면 현 씨도 유명 저널에 논문도 발표할 수 있을 텐데 말이야.”

“이런 일을 제대로 추진하려면 단장님만한 전문가도 없잖습니까.”

“나한테 뭔가 해 달라는 건가?”

“별 것 아니에요. 다음 주에 일본 홋카이도(북해도)에서 유전자 설계분야 학회가 열립니다. 거기 저랑 같이 가 주십시오. 단장님이 계셔 주시면 큰 힘이 될 겁니다. 제가 이쪽 학회는 처음이어서요.”

“아. 좋긴 하지만 나는 다른 일이…….”

“에이. 싫으시면 할 수 없고요. 그럼 저 혼자 가서 발표할게요.”

“아… 알았어. 잠깐만 기다려. 일정을 좀 조정해 볼게.”

“비행기 표는 제가 예약해 놓겠습니다.” 현은 입술을 꼭 다물고 조용히 단장실을 빠져나왔다.

단장이 공항으로 출발한 날, 하선은 어이가 없다는 듯이 현에게 말했다.



“와. 어떻게 이런 생각을 했어요? 있지도 않은 학회에 가야 한다고 해 놓고 상사를 휴가 보내다니. 나중에 뒷감당을 어떻게 하려고 그래요?”

“괜찮아. 단장님은 인격이 훌륭하신 분이라고. 항공권에 온천 패키지까지 내 카드로 전부 예약해서 보내드렸는데, 화는 좀 내시겠지만 설마 날 어떻게 하시겠어?”

“그런데. 휴가결제 안 받고 가신 것 아니에요?”

“어. 내가 대신 받아드렸어. 원장님께 몰래 부탁해서. 도착하면 사모님이랑 아이들이 치토세 공항에서 기다리고 있을 거야. 세상에 3년 동안 휴가를 한 번도 안 쓰셨더라고.”

“와. 그럼 자기 돈 진짜 많이 썼겠네요?”

“그동안 신세 진 것 생각하면 그 정도야 뭘. 아무튼 저 DNA 설계도는 진짜거든. 다음 주엔 진짜로 유럽 학회에 모시고 가야 해. 그 전엔 날 위해서라도 좀 쉬셔야 한다고.”

현은 음흉해 보이는 표정으로 빙긋 웃었다.



[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - “자기조직화 다세포 구조” 편]
제3화 “그들이 불안한 이유”

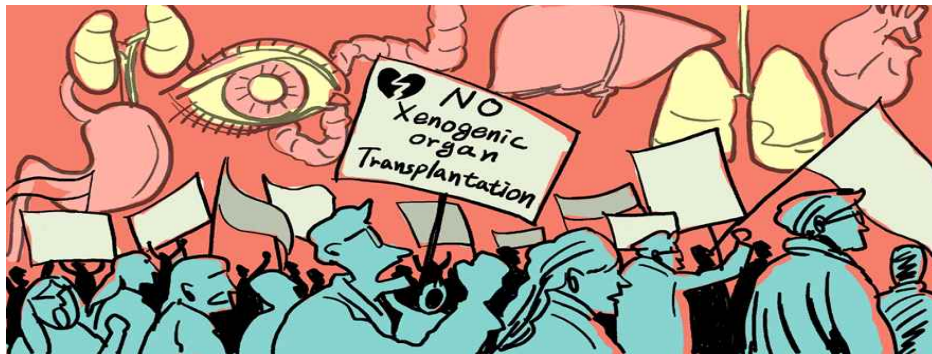


TV 뉴스에선 사람들이 도시 곳곳에 모여 시위를 하는 모습을 하루도 빠지지 않고 보여주고 있었다. 인류 역사에 민주주의가 등장한 이후 어디서나 볼 수 있는 흔하고 오래된 풍경. 하지만 이제는 시위의 목적과 형태는 과거와 달라지고 있었다. 정보격차가 해소되고 생활 수준이 향상되면서, 과거처럼 이념이나 정치적 목적으로 시위를 하는 사람을 찾긴 점점 어려워졌다.

새로운 시대가 되면서 사람들의 관심은 더 개인적인 문제로 모였다. 한 사람 한 사람의 존엄성, 인간으로서 마땅히 지켜야 할 근본적 가치. 이런 철학적이고 종교적이기도 한 관념들이 새로운 과학기술과 충돌할 때 그들은 거리로 나섰다. 급속도로 변화하기 시작한 과학기술의 행보를 놓고 사회적인 ‘합의’를 구하기 위해 대중이 갖는 일말의 노력인지도 몰랐다.

최근엔 ‘인체 이식용 장기 제조’에 반대 목소리를 내는 사람들이 부쩍 늘어나고 있었다. 국가과학기술국에서 앞으로 수년 이내에 실제 적용이 기대되는 여러 관련 기술의 실용화 연구를 지원하겠다는 발표가 나왔기 때문이다.

WFDA(국제식품의약품국)에서 몇 종류의 인공장기 이식기술은 이미 과학적으로 안전성에 큰 문제가 없다고 공식 발표를 한 것이 이미 몇 해 전 이야기다. 일부 국가에선 실험 목적이지만 인공장기를 치료에 도입한 사례도 등장하기 시작했다. 국내에서도 이 기술을 본격적으로 실용화하려는 시도가 여러 번 있었다. 하지만 번번이 사회문제가 커지고, 때마침 몇 건의 의료사고가 불거지면서 한국 내 여론은 극도로 안 좋아져 갔다. 결국 인공장기 제조를 허가하는 의료법 개정은 몇 년째 국회에서 계류 중이다.



과학자들의 연구 활동을 막는 사람은 없었지만 실제 의료에 적용하려면 임상시험을 거쳐야만 한다. 이때는 불완전한 기술이 실험실 밖으로 나오는 것이라 사회가 정한 법과 규정을 따라야만 했다.

강현 연구원도 이 문제로 골머리를 썩이곤 했다. 국가과학기술국에서 관련 기술 실용화 연구를 적극적으로 추진한다면 현의 연구팀은 지원자 중 0순위로 꼽힐 터였다. 현 자신도 관련법만 허용된다면 지금 당장 병원으로 달려가 임상 연구를 시작하고 싶은 아이디어가 수 없이 많았다.

하지만 법은 언제나 보수적이었다. 사회 시스템을 유지하려는 입장에선 검토할 것이 많겠지만 연구자로서 맥이 빠지는 것은 어쩔 수 없는 일이었다.

그날도 그랬다. 현은 연구실 한쪽 벽에 걸어둔 입체영상 TV를 통해 “생명 존엄성 무시하는 정부기관은 각성하라”는 피켓을 든 시민이 연성을 높이는 것을 보자 들고 있던 마이크로 피펫(Micro Pipette; 실험용 초정밀 스포이드)을 ‘탁’ 소리가 나게 내던지고 말했다.

“이런 이야기 해도 되나 모르겠는데, 사람들은 왜 알지도 못하면서 이렇게 시끄럽게 구는 걸까. 모르면 그냥 전문가들 의견대로 대로 따라오면 될 것 아니야.”

“에이. 말이 좀 과한 거 아니에요? 연구기관은 시민이 동의하고 지원해 주니까 존재하는 건데.” 같은 연구실에 근무하는 여자친구 권하선연구원이 달래듯 말했다.

“미안. 그냥 답답해서 그래. 이 연구로 목숨을 구할 수 있는 사람도 많을 텐데 꼭 저렇게 해야만 하는 걸까. 왜 기술의 원리를 이해하려는 노력은 하지 않고 무조건 반대만 하는 건지 모르겠어.” 현은 씩씩하게 말했다.

치료시기를 놓쳐 말기까지 진행돼 버린 악성 암 환자에겐 장기 이식은 마지막 삶을 제시하는 기술이 될 수 있었다. 장기의 선천적인 기형, 면역성 질환, 사고로 인한 큰 부상까지 고려하면 안전한 이식용 장기를 확보하기 위한 기술은 반드시 필요했다.

인공적으로 장기를 만드는 방법이야 여러 가지가 있었지만 크게 두 부류로 나뉜다. 돼지 등 다른 동물의 형질을 전환해 사람의 몸에 이식할 수 있는 장기를 갖고 태어나게 만드는 ‘바이오이종장기’ 기술, 세포를 처음부터 배양해 나가며 사람의 몸에 필요한 장기 형태로 시험관 속에서 키우는 ‘오가노이드(장기유사체)’ 등의 기술이 대표적이다. 큰 장기를 만들 때는 이종장기가, 미세조직을 만들 때는 오가노이드기술이 장점이 많아 두 가지 기술을 상황에 맞게 두루 사용한다.

이 두 가지 기술은 수십 년 전부터 나름대로 발전해 왔기에 일부에선 이미 임상에 도입되고 있는 등의 성과가 나오고 있었다. 그러나 기술의 부작용을 완전하게 제어하려면 유전자의 기능을 인위적으로 설계해 필요한 세포, 조직 등으로 만드는 ‘자기조직화 다세포구조’ 기술의 혁신이 뒤따라야 한다는 보고가 많았다. DNA 설계는 현의 특기라고 불려도 좋은 분야라 그는 틈만 나면 “앞으로 십수년 이내에 관련기술을 실용화해 낼 수 있다”고 호언하곤 했다.

“난 DNA 구조까지 손대지는 않으니까 잘 모르겠는데요, 이 기술을 더 연구하면 대부분의 장기를 만들 수 있고, 다른 동물의 장기를 이식받을 때 생기는 면역 거부반응을 막을 때도 도움이 되는 거 맞죠?”

“이론적으로 가능성이 크지. 하지만 응용과정에도 연구가 필요하니까.”

“어떤 연구요? 나 좀 가르쳐 줘 봐요.” 하선은 현의 눈을 바라보고 생글생글 웃으면서 물었다.

“정말 몰라서 묻는 건 아니지? 예를 들어 몇 달 전에 폐가 안 좋은 사람이 인공장기를 이식받아서 화제가 된 적이 있잖아. 그런데 폐 한 가지만 가지고도 과학자들은 아주 많은 연구를 거쳐 이식에 필요한 수많은 조건을 일일이 찾아내야 했거든. 가끔 ‘돼지머리에 사람의 뇌를 만들어 넣으면 사람처럼 생각하고 말할 수 있는 돼지가 태어나는 것 아니냐’는 식으로 극단적인 우려를 사람도 있던데 갑자기 그런 일을 해내기는 쉽지 않다고. 그러니까 관련법을 잘 만들어서…….”

“하지만 자기는 할 수 있죠?” 하선은 계속 생글거리며 재차 물었다.

“뭐? 그건…….”

현은 말을 멈췄다. 자신이 그런 ‘괴물’을 정말 만들어 낼 수 있을까 생각해 보니, 시간과 연구비만 주어진다면 불가능하다고 단정하기도 어렵다는 생각이 들었다.

“저 사람들은 그런 점이 꺼림칙한 거예요. 어떻게 될지 모르겠으니까. 자기처럼 실력 좋은 사람 중 한 명이 갑자기 나쁜 맘 먹으면 어쩌나 싶고. 이 기술이 잘못돼서 안 좋은데 쓰이면 어떻게 하나 싶고.”

“하지만 매사 그런 식이면 지식의 발전이 있을 수 없어.”

“맞아요. 그러니까 이런 문제는 사람들의 불안감을 이해하는 데서 시작해야 할 것 같아요. 우리가 하려는 일을 좀 더 알기 쉽게, 더 투명하게 알려줄 필요도 있을 것 같아요. 시간도 필요할 거고.”

“.....”

“왜요? 혹시 화났어요?”

“아니야. 그래. 자기 말 듣고 보니 그러네.”

“어. 왜요? 아유. 하지 마요. 아프다니까.”



현은 조용히 두 손을 뺀어 하선의 양쪽 볼을 지그시 잡아당겼다. 그만의 애정표현 방법이지만 하선은 매번 질색하곤 했다. 하지만 막상 부리치는 일은 거의 없었다.

그러다 잠시 후. 현은 두 손을 내려놓고 잔걸음으로 책상 위 컴퓨터 앞으로 걸어갔다. 그리고는 재빠르게 파일을 몇 개를 골라 전자잉크 서류에 옮겨 담기 시작했다.

“갑자기 뭐해요?”

“아. 홍보실에 다녀와야겠어. 지난번에 나한테 대중강연 다녀와 달라고 했었는데, 안 가겠다고 하면서 버티고 있었거든.” 현은 서류뭉치를 챙겨 들고 빠르게 문밖으로 나섰다. 뺨이 조금 발그스름해진 하선은 그의 뒷모습을 보며 여전히 생글생글 웃고 있었다.

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - “역(逆)노화성 운동모방 약물”편]
제4화 “홈오토메이션이 가져온 굶주림”



“휴. 이거 곤란하게 됐는데.”

휴일 아침. 식사 전 체중계에 올라가 본 강현은 나지막하게 탄식을 내뿜고 말았다. 몸무게가 어느덧 85kg을 훌쩍 넘어섰기 때문이다.

사실 현은 자신의 체중에 그리 신경 쓰는 성격은 아니었다. 그가 걱정하는 건 다른 문제였다. 연인인 권하선이 잔소리를 늘어놓을 것이 뻔했기 때문이다. 85kg은 그녀가 일방적으로 정해 놓은 현의 한계 체중이다. 현은 저울에서 내려와 아침 식사로 먹을 빵 몇 개를 구우면서, 커피 한 잔을 내리고 있었다. 하선으로부터 영상통화가 걸려왔다. 뭔가 눈치를 챘는지 초반부터 공격적이었다.

“아침 먹고 있는 거죠? 그 빵 절반은 나중에 먹어요. 너무 많아요.”

“응? 내가 빵을 몇 개나 굶고 있는지 어떻게 알고?”

“아침마다 원래 빵 많이 먹잖아요. 크루아상 한 조각에 몇 칼로리인지 몰라요?”

“뭐? 아니 빵 종류는 또 어떻게 알았어?”

현은 뭔가 이상하다고 느꼈다. 평소 눈치가 빠른 편이긴 하지만 이렇게 모든 일을 손바닥 보듯 꿰뚫어 보고 있기는 어려운 일이었다. 현이 이틀 전 하선과 나란히 퇴근하면서 제과점에 들렀다가 크루아상을 산 건 사실이었다. 하지만 그때 바구니 속에는 평소 자주 사던 베이글도, 통밀 식빵도 들어있었다. 영상통화 장치로 토스터 속에 들어 있는 빵의 종류까지 확인하는 건 불가능했다.

“한계 체중까진 아직 여유가 있어. 아침은 좀 챙겨 먹을게.”

오늘따라 하선이 다그치는 기색이 강하자 현은 어쩔 수 없이 거짓말을 했다.

“안 넘은 것 맞아요? 체중 몇 kg이었는지 정확하게 말해봐요.”



하선은 식탁 앞 홀로그램(입체영상) 디스플레이 너머로 도끼눈을 한 채 현을 보고 있었다. 현은 ‘오늘 아침에 잤던 체중은 또 어떻게 알고 있느냐’고 물어보려다가 그만두었다.

현은 키가 큰 편인 데다 타고 난 골격도 굵고 튼튼했다. 겉보기엔 건장해 보이는 것도 사실이었다. 그러나 입버릇처럼 ‘과체중은 뼈가 굵어서 그런 것’이라며 너스레를 떨면서 운동과 식생활 조절을 소홀히 하곤 했다.

하지만 그의 생활 습관을 알고 있는 하선은 걱정이 적지 않았다. 현은 늘 “대학 시절에 비해 그렇게 체중이 많이 나가지도 않는다”고 항변했지만, 하선은 도리어 그 이야기가 위험신호로 들렸다. 이른바 마른 비만. 근육이 빠져나간 만큼 내장지방이 차올라오고 있다는 의미로 여겨져 늘 마음이 답답했다.

“정 걱정되면 오후에 병원에 가볼 테니까. 토요일이지만 예약을 오전에 잘 잡으면...”

“어유. 그 방법은 이야기 안 하면 안 돼요?” 하선은 결국 짜증을 냈다.

“나도 매일 시간 내서 운동하고 싶어. 하지만 실험 데이터 체크 할 것이 밀리기 시작하면 뒷감당이 안 된단 말이야. 내가 맡은 프로젝트가 몇 개인지 알고 있잖아.”

“작은 것부터 하면 되잖아요. 우선 그 크루아상부터 두 개 줄여요.” 하선은 다시 달래듯이 말했다.

적정 체중을 유지하고, 운동을 꾸준히 계속하는 것은 건강을 지키는 기본이다. 1970년대부터 알려진 상식을 모르는 사람은 거의 없었다. 여기서 더 나아가 생명과학자들은 그 뒤에 숨어있는 인체의 비밀까지 풀어내려고 했다. 운동할 때 몸속에서 어떤 일이 일어나는지, 혈액과 세포 속 성분이 어떻게 바뀌는지, 그 성분이 몸에 어떤 영향을 미치는지를 차근차근, 몇 십 년에 걸쳐 차근차근 밝혀내온 것이다. 이런 노력은 노화나 사고, 질병 등으로 운동을 할 능력을 잃어버려 점점 더 건강이 나빠질 수밖에 없는 사람들에게겐 큰 도움이 됐다.

관련 연구는 5년 전인 2030년으로 거슬러 올라간다. 인체가 운동을 하면 생겨나는 성분, 이른바 ‘운동 인자’를 정량적으로 계측할 수 있게 됐다. 이른바 ‘혈액검사 시약’이 등장한 것이다. 처음엔 개인에게 꼭 맞는 운동 치료방법과 강도를 결정하는 데 쓰였지만, 점차 사람들은 그 응용방법에도 눈을 떴다. 관련 분야 연구개발은 물론 관련 기술을 이용한 의약품 개발도 급속도로 성장하기 시작했다. 결국 이 기술은 알약 형 ‘운동캡슐’의 개발로 이어졌다

주변에선 ‘운동선수 누가 운동캡슐을 먹고 있다더라. 부쩍 날씬해진 연애인 누군가가 이 캡슐로 효과를 봤다더라’는 식의 이야기가 자주 들렸다. 실제로 이 캡슐을 먹으면 운동한 효과를 얻을 수 있다. ‘2HR’이라고 적힌 알약 한 알을 먹으면 두 시간 동안 운동한 효과를 얻는 식이다. 인체 활력이 늘어나고 혈관이 튼튼해지며, 근육 손실마저 막아주니 노인들에게겐 적지 않은 도움이 됐다. 대사량이 늘어나니 체중감소 효과도 기대할 수 있었다. 하지만 전문의의 처방이 있어야만 먹을 수 있었다.

하선은 현이 이런 약에 눈독을 들이는 게 영 못마땅했다. 약으로 건강을 유지하려는 태도가 못내 언짢았다. 10여 년 전 완전히 실용화된 ‘먹는 인슐린’만 있으면 당뇨병 환자도 큰 불편 없이 생활할 수 있다. 하지만 당뇨병에 걸리지 않은 사람과, 이미 걸린 사람이 약을 먹으며 건강을 유지하는 것을 같은 선상에 놓을 수 없는 것과 별반 다르지 않다고 하선은 생각했다. 반대로 실용주의자인 현의 생각은 하선과 달랐다. 알약 하나로 운동하는 데 드는 시간과 노력을 줄일 수 있다는데, 체중을 줄이라고 매일 잔소리를 하면서도 병원은 왜 가지 말라고 하는지 하선의 마음이 이해가 가지 않았다.

그날 오후. 아침부터 하선과 실랑이를 벌이느라 조금 토라진 현은 욕하는 마음이 동해 결국 혼자 병원을 찾았다. 그는 몇 가지 굵직한 연구에 성공하면서 대중에 이름이 알려진 스타 과학자 중 한 사람이다. 비만과 관련이 있는 약물 때문에 병원을 찾았다는 사실이 알려져서 좋을 일은 없었다. 어느 병원을 갈까 잠시 고민하다 의사로 일하고 있는 친구 김형진을 찾았다. 간단한 검사를 받고 진료실에 들어서자 형진은 흰 가운을 입고 그를 기다리며 서 있었다.

“오랜만이네. 운동 캡슐 처방 받겠다고 뇌신경외과로 오는 건 너 뿐일거야. 잠깐 앉아봐.”
형진은 그의 의료 정보를 띄워 둔 투명 태블릿 PC의 화면을 훑히 넘기면서 말했다.

“바쁘데 미안해. 맘 편하게 찾을 사람이 너밖에 없어서. 저번에 몸살로 집 앞 병원에 갔을 때는 현수막이 내 걸렸다고. ‘생명과학자 강현도 믿고 찾는 OO병원’이라고 써 있었어.”

“하하. 진짜야? 걸작인데. 우리도 해 볼까?”

“농담하지 말고. 전화로 잠깐 이야기했던 건 말인데, 그 약 나 먹어도 돼?”

“잠깐만. 음, 신체 활력 수치가... 안 되겠는데. 넌 아직 이런 약 먹을 단계는 아니야.”

“왜? 운동선수나 연예인들도 그 약 먹는단데?”



“그건 불법이잖아. 몰래 구해서 먹다가 발견되니까 자꾸 뉴스에 나오는 거지.”

“그럼 건강한 사람은 그런 약을 못 먹게 법으로 막아 놓았다는 거야?”

“응. 아마 약이 워낙 좋아서 그런 건 아닐까?”

“약이 좋은데 왜 못 먹게 해?” 현은 의아해서 물었다.

“의료서비스의 형평성 문제겠지 뭐. 내가 봐도 의학적으로 크게 위험하진 않아. 사람 몸속에서도 자연스럽게 생겨나는 성분이니깐. 하지만 이런 약이 제한 없이 쓰이면 건강한 사람들의 평균적인 체력도 경충 올라간다는 뜻이 되거든. 그럼 정작 몸이 안 좋아서 치료를 받고 겨우 정상인 수준에 다가가려는 사람들의 사회적인 차별은 해소되지 않을 수 있잖아.”

“아...”

“그래서, 안됐지만 이 약은 못 드립니다. 환자님. 대신 관련 기술을 응용해서 조금 도움을 드릴 수는 있는데 어떻게 하시겠습니까?” 형진은 너스레를 떨며 말했다.

“어떤 도움?”

“약을 먹지만 않으면 되니까. 그 전 단계에 시행하는 성분 진단을 이용하는 건 가능해. 몸 상태를 정확하게 확인하면 식단조절이나 하루 운동량을 계획할 때 도움이 될 거야.”

“어휴. 결국은 굶고 운동하라는 이야기구나.”

“당연하지. 그것보다 확실하고 좋은 방법은 없어.”

현은 아쉽게 병원에서 나와 자율주행차를 타고 집으로 돌아가고 있었다. 뒷자리에 앉아 시트에 몸을 기대고 있을 때 하선의 화상통화가 들어왔다.

“병원에서 뭐라던가요? 그 약 먹으래요?”

“아니. 나는 아직 먹으면 안 된다고... 잠깐만. 내가 오늘 병원에 간 건 또 어떻게 안 거야?” 현은 깜짝 놀라 자동차 시트에서 몸을 일으키며 물었다.

“지난 주말에 자기가 홈오토메이션 시스템 업그레이드하면서 나한테 다 맡겼었잖아요. 비밀번호 알려준 것도 자기였고, 기억 안 나요?”

“아. 가사관리용 인공지능 시스템이 자기한테...”

“아까 토라져서 나갔길래 걱정했는데 마침 병원 갔던 의무기록도 올라와서 봤어요. 아침엔 토스터 설정이랑 스마트 체중계 기록을 봤을 뿐이고.”

“계속 그렇게 감시할 생각이야?”

“설마. 그저 당분간 주방이랑 아파트 단지의 운동센터연동 기록만 보고 싶을 뿐이에요. 83kg, 아니 82kg 밑으로 내려가기 전에 비밀번호 바꾸면 안 돼요. 알았죠?”

“휴. 알았어요. 알았다고. 살 빼면 될 것 아니야.” 현은 아침 식사를 조금밖에 하지 못해 허기진 배에 한 손을 올려둔 채 조금 서글픈 목소리로 말했다.

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - "광의학 치료기술" 편]

제5화 "그 두 남자의 신경전"



“박사님도 잘 아시겠지만, 면역항암제도 만능은 아닙니다. 사람에 따라서 그 효과에 차이가...”

“아. 알았어요. 알아서 잘 해주시겠지요. 뭐.”

“.....”

“그래서 저는 언제까지 병원에 와야 하는 건가요?”

“지금으로서는 확답드리기가. 우선 이번 주만 드시는 약을 좀 늘려보시겠어요?”

“치료 기간이 늘어나면 곤란한데...”

나형욱 국가생명정보기술원 단장이 취장암으로 병원을 드나든 지 벌써 3주 째. 표적항암제 치료를 받으며 어느 정도는 차도가 있어도 좋으려만 그의 병세는 그리 좋아지고 있지 않았다. 다행히 암이 더 이상 진행되는 것은 막을 수 있었지만 이 상태로 치료를 계속할 수는 없어 치료 방침을 변경해야 할 기로에 서 있었다.

의료기술이 발전하면서 ‘오진’이라는 말이 나오는 일은 크게 줄어들었다. 인공지능 검진프로그램을 이용하면 거의 대부분의 상황에서 필요한 조치를 찾아낼 수 있기 때문이다. 간단한 병이라면 그대로 따르는 편이 안전하고 확실했다.

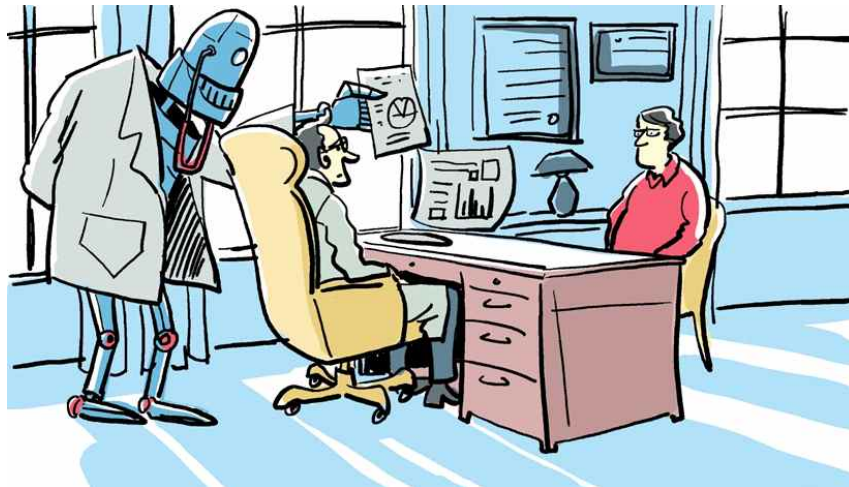
인공지능 진료시스템이 도입되기 시작한 초창기엔 세간에서 ‘현장에서 내과 의사가 사라질 것’이라는 이야기가 많았다. 그러나 현실은 그와 다르게 변했다.

검증된 ‘스탠다드(가장 효과가 높다고 검증된 치료법)’를 따른다고 해도 의료에 100%는 있을 수 없는 법이라 변수는 언제든지 생길 수 있었다. 그러니 환자의 상태를 살펴보고 적절히 치료계획을 세우고 수정해 나가는 고급 의료관리 서비스가 중시되기 시작했다. 이런 서비스를 유지하기 위해선 실력 있는 내과 의사의 존재는 여전히 필수로 여겨졌다.

나 단장을 담당하고 있는 주치 의사는 그의 차트(의료기록카드)를 볼 때마다 입술이 바짝바짝 타들어가는 기분이 들었다. 생명과학 전문가 중에는 시쳇말로 ‘진상 환자’ 비율이 높은 편이었다. 아는 게 많으니 궁금한 점도 많았고, 아는 게 많으니 오해도 더 자주 생겼다. 일부 의사들은 “생명과학 하는 환자가 제일 싫다.”고 공공연하게 이야기하고 다니기까지 했다.

더구나 나 단장이 누구라고 신경이 쓰이지 않았을까. 직접적으로 의학기술 발전에 큰 공헌을 한 과학자를 치료하기란 의사입장에서 여간 부담이 되는 일이 아니었다. 암은 더 이상 불치병으로 불리지 않는 시대지만 중병(重兵)이라는 사실도 변함이 없었다. 더구나 나 단장의 태도는 다른 전문가들과도 달랐다. 그런 점이 주치의의 더욱 곤혹스럽게 했다. 병원을 올 때마다 검사를 받고, 의사에게 경과에 관해 설명을 들을 때마다 “그럼 언제 낫는 거냐? 언제부터 병원을 안 와도 되느냐”는 천진한 질문만 반복하곤 했다.

주치의는 그 말이 더없이 부담스럽게 들렸다. 약이 자신의 몸속에서 어떻게 작용하는지, 그 모든 과정을 누구보다 더 잘 알고 있을 것 같은 사람이 자꾸 초등학생이나 할 법한 뻘한 질문만 해대니 그 시커먼 속마음이 궁금했다. 그에겐 나 단장의 “언제 낫느냐”는 질문이 ‘왜 이 정도밖에 효과가 없느냐. 암세포 크기가 20~30%는 줄어 있어야 하는 것 아니냐. 당신이 빠뜨린 부분은 없느냐’는 질책으로 느껴졌다.



담당 의사는 지난주부터 말하려고 했던 치료법 변경에 관한 이야기를 이번에도 꺼내지 못하고 있었다. 그의 입에서 무슨 이야기가 나올지 무서웠기 때문이다. 나 단장은 병원을 갈 때마다 조급한 마음이 들었다. 밀린 업무가 많아 병원을 찾는 시간도 아깝다고 여기는 그의 관심사는 그저 하루라도 빨리 병이 완전히 낫는 것이었다.

하지만 매번 의사는 치료 방향과 종료 시점을 명확히 알려주질 않고 자꾸 말을 빙빙 돌리고 있었다. 그러니 매번 그가 할 수 있는 질문도 ‘언제 다 낫느냐’는 그 한 가지 뿐이었다.

의사가 면역항암제를 쓰고 있는 것은 알겠고, 그 성분도 잘 알고 있는 것들이었다. 하지만 거기까지였다. 혼자 병과 싸우라고 하면 아무것도 하지 못한다고 생각했다. 몸 상태를 정확히 검사하고 거기에 맞춰 어떻게 치료방침을 잡아 나갈지는 아무것도 알 수 없었다. 면역항암제 이외의 함께 먹는 각각의 약들은 어떤 것들인지, 주사로 맞아야 할 약, 피부에 붙이는 약, 먹는 약 등 종류가 어떻게 다른지, 투약 시간과 양은 어떻게 조절해야 할지, 이런 세세한 치료과정을 확인하는 것도 철저히 의사의 영역이었다.

물론 일부 과학자 중에는 이해가 갈 때까지 의사와 실랑이를 벌이는 타입도 있었다. 하지만 나 단장은 도리어 주치의가 자꾸 뭘 설명하고 양해를 구하려는 태도가 영 못마땅했다. 그는 왜 자신 있게 치료를 하지 않을까. 왜 치료방침을 결정하면서 의학에 대해 잘 모르는 환자에게 묻고 결정하려는 것일까. 그의 미온적인 그 태도가 잘 이해되지 않았다.

“단장님. 무슨 일 있으십니까?”

어느 평일 아침. 보고서를 제출하러 나 단장 직무실을 찾은 강현 연구원은 그가 턱에 손을 괴고 앉아 골똘히 생각에 잠겨 있는 것을 보고 깜짝 놀라 물었다. 나 단장은 이도 저도 아닐 경우 일단 하나를 정해 밀어붙이는 타입이다. 직원들 사이에서 그가 심사숙고하는 것을 본 사람은 오늘 현이 처음이다.

“아. 미안. 들어오는 걸 못 봤어. 병원 문제 때문에 그러네. 주치의가 치료방침이 명확하지 않은 것 같아. 이 이상 차도가 없다면 진짜로 위험해질 것 같다는 생각도 들고 그렇군.” 나 단장은 현이 내미는 전자서유몽치를 받아 챙기면서 말했다.

“자꾸 왜 나한테 뭘 물어보는지 알 수가 없어. 자기가 의사잖아. 자기가 치료방침을 정하는 게 아니고 자꾸 나한테 결정하라고 미루는 느낌이 든단 말이야.”

“보통은 의사들이 환자와 잘 공감해 주지 않는다고 화를 내곤 하던데 단장님은 정 반대시네요.” 현은 무슨 일인지 알았다는 듯이 담담하게 웃으며 답했다.

“다른 병원을 갈까?”

“그 전에 주치의랑 이야기를 조금 더 해 보시면 어때요. 실력 있는 친구라 소개해 드린 건데. 혹시 단장님을 좀 어려워하는 것 아닐까요?”

“뭐? 날 왜 어려워해. 그렇다고 해도 그렇지. 치료를 제대로 안 하면 어떻게 해.”

“내일 병원 가시는 날이죠? 다른 치료법을 검토해 달라고 먼저 한 번 이야기 해 보십시오. 단장님 덕분에 세상에 나온 면역항암제를 단장님 눈앞에서 부정할 수는 없는 일 아닙니까.”

“.....”

이튿날 나 단장은 다시 병원을 찾았다. 병원을 다시 찾은 지 일주일 만이었다. 주치의는 검사를 다시 진행했다. 혈액검사를 진행하고, 저선량CT(컴퓨터단층촬영)와 3D(입체) 초음파로 췌장 부위를 다시 촬영했다.

나 단장은 검사가 끝날 무렵, 이동식 침대에 누운 채로 주치의의 소매를 잡고 나지막이 말했다.

“선생님. 환자는 선생님을 믿고 여기 있는 겁니다. 선생님이 주도적으로 치료해 주시지 않으면 저는 아무것도 할 수 없어요.”

주치의는 뒤통수를 한 대 맞은 것 같은 기분이 들었다. 세계적인 생명과학계석학의 입에서 저런 나약한 말이 나올 줄이야. 주치의는 곧 나 단장의 손을 잡고 가슴 속에 쌓아뒀던 이야기를 속사포처럼 털어 내기 시작했다.

“지금 박사님은 약이 잘 듣지 않습니다. 몇 % 확률로 면역항암제가 효과가 크지 않은 사람이 있는데 공교롭게 박사님이 그렇습니다. 지금 암이 축소해 가는 속도가 점점 줄어들고 있어요. 이대로 1~2주만 더 계속하면 이 이상 약효를 기대하기는 어려울 것 같습니다. 그래서...”

“예. 어떻게 할지 가르쳐 주세요. 그대로 하겠습니다.”

“수년 전부터 새로 도입된 광치료 기법을 병행할 것을 권유드립니다.”



“그건 뭔가요? 나도 처음 듣는데.” 나 단장은 이제 알아서 해 달라며 말을 중간에 끊지 않고 의사의 설명을 듣기로 했다.

“먼저 빛에 반응하는 조영제를 따로 챙겨서 드셔야 합니다. 이 약은 암세포에만 모여들게 됩니다. 그 다음엔 외부에서 특수한 파장의 강한 빛을 쬐어주면 암세포만 선택적으로 죽일 수 있습니다.”

“아. 어렸을 때 비슷한 치료를 본 기억이 있는데. ‘감마나이프’라고 불렀었나.”

“사실 조금 다릅니다. 그건 감마 방사선을 환부에만 집중시키는 장치라서... 빛을 이용해 치료하려면 조영제가 중요한데, 최근에는 좋은 약들이 많이 나왔습니다. 사실 이것도 박사님 덕분입니다.”

“나 때문에? 왜요?”

“조영제가 암세포에만 모여들게 하려면 면역학적 분석이 필요하니까요.”

“아. 그거 고마운 이야기네요. 그럼 잘 부탁드립니다.”

“오늘 바로 1차 치료받고 가시도록 하겠습니다.”

“그렇게 바로요? 내 몸에 맞게 약도 새로 마련하고 해야 하고 하지 않나요?”

“이미 준비해 두었습니다.” 주치의는 가슴 속 답답함이 풀리는 것을 느끼면서 짧게 대답했다.

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - "암 오가노이드 연계 면역세포 치료기술"편]

제6화 "힘난한 여름휴가 일정"



여름 휴가철을 맞아 강현과 권하선, 두 사람은 고민 끝에 나란히 휴가원을 내기로 작심했다. 업무가 과중하다 보니 같은 연구실에서 일하는 두 사람이 동시에 휴가를 내는 건 동료 연구자들의 질책을 한몸에 받을 만한 일이었다. 하지만 얼마 전 '1000일 기념일'마져(2019 바이오미래유망기술의 이야기 1화 참조) 야근으로 보내야 했던 두 사람은 일만 계속하다간 몸보다 정신이 먼저 망가질 것 같다는 불안감이 들었다. 며칠이라도 좋으니 일 걱정 없이 두 사람이 함께 쉬고 싶은 마음이 굴뚝같았다. 이런 욕심은 연구자로서의 책임 의식을 아득히 멀리 날려 보낼 충분한 힘이 있었다.

현은 이번 한 번만 둘이 함께 휴가를 다녀오게 해 달라고 상사인 나형욱 단장을 일주일 전부터 졸라댔다. 나 단장은 "휴가를 둘이 꼭 함께 가야겠느냐"고 몇 번이나 만류해 봤지만 현의 의지는 강력했다. 결재를 보류하면 다음 날 다시 찾아갔다. 더구나 지난번 현에게 속아 가족휴가까지 다녀왔던 나 단장은 야멸차게 거절할 명분을 찾기도 힘들었다.

"설마 이러려고 저번에 나 휴가 보냈던 건 아니지?"

"일생의 소원입니다. 단... 아니 형님."

"공사 구분 잘 하는 사람이 왜 이래. 무섭게."

"둘이 같이 가기로 한 시점에서 이미 그런 거 없다고 생각했습니다."

어렵게 결재를 받은 현은 단장실을 빠져나왔다. 복도에서 쾌재를 부르지는 못하고 그저 한쪽 손을 조용히 짚어본 현은 성큼성큼 잔걸음으로 자신의 연구실 책상 앞으로 돌아왔다. 마침 공용 실험장비를 사용하기 위해 맞은편 자리에 잠시 앉아있던 하선이 책상 가림 막 너머로 고개를 살짝 내밀고 물었다.

"결재 잘 됐어요?"

"응. 그런데 나 혼 많이 났어. 다녀와서 둘이 제대로 만회해야 할 것 같아."

"알았어요." 하선은 살짝 웃으면서 대답했다.



현은 손을 바쁘게 움직이기 시작했다. 결재가 났으니 휴가를 떠날 대책을 세워야 했다. 먼저 밀린 일을 어느정도 정리할 필요가 있었다. 개인용 정보 단말기를 책상 앞 홀로그램 디스플레이에 꽂고선 자신에게 쏟아져 들어와 있던 각종 이메일이나 보고용 파일, 논문서식 등의 서류를 맹렬한 속도로 보기 시작했다.

휴가 날까지 그에게 주어진 시간은 겨우 일주일. 하지만 쌓여있는 파일을 보면서 그는 짧게 한숨을 내 쉬었다. 굵직한 연구야 차근차근 진행하는 거니 어떻게든 조정이 가능했다. 하지만 새로운 연구를 기획하는 일, 기존의 연구성과를 정리하고 보고하는 일도 중요한 업무 중 하나다. 이런 일은 대부분 일정에 맞춰 어떻게든 서류를 꾸며 넘겨야 한다. 얼핏 보니 평소에 가지고 다니던 50페이지짜리 전자서류 바인더 두 개에 옮겨 넣고 처리하기는 불가능할 것 같아 보였다. 급한대로 현은 눈앞에 있는 하선이 가지고 있던 100페이지짜리 전자서류 바인더까지 빼앗듯이 빌려왔다. 그리고는 홀로그램 디스플레이 속에 보이는 수많은 파일들 중에서 당장 급한 것부터 찾아내 전자서류로 하나씩 던져 넣기 시작했다.

2030년대가 되면서 사람들의 컴퓨터 사용환경은 크게 달라졌다. 겉보기엔 먼 옛날처럼 서류 뭉치를 들고 다니면서 일을 하는 것처럼 보였다. 겉보기에 거의 완벽히 A4용지 꾸러미 같았고 돌돌 말거나 접을 수도 있었다. 그러나 실상은 언제든지 원하는 대로 내용을 바꿀 수 있는 전자잉크 서류라는 점이 달랐다. 보통은 50페이지, 혹은 100페이지 정도씩 전용 바인더로 묶어 한두 개씩 가지고 다니는 게 전부였다. 당장 일할 분량을 옮겨 넣을 수 있었고, 그 종이 위에 전용 팬이나 가상키보드로 글씨를 쓰거나 메모를 하면 원본 파일까지 한 번에 바뀌어 저장됐다. 영상을 보거나 수식을 계산하는 등의 복잡한 일도 할 수 있었다.

그러니 영상제작이나 설계 등의 전문적 작업을 하는 사람들, 옛날 방식이 좋아서 여전히 키보드와 마우스를 쓰는 일부 사람들을 제외하면 책상 위에 모니터를 놓고 쓰는 사람은 드물었다. 현처럼 꼭 필요할 때만 홀로그램 장치를 이용해 파일을 관리했다.

“이건 다녀와서 해도 되고. 이걸 내일 보내야 하고, 그리고 이걸...”

“너무 서두르지 말아요. 나도 도와줄게요.”

책상 위 홀로그램 영상을 보며 마치 복싱이라도 하듯 두 팔을 휘젓고 있는 현을 바라보고 있던 하선은 안스럽다는 듯이 말했다.

“자긴 자기 일 있잖아. 이렇게 구분만 해 놓으면 내일부터 연구 중에 짬짬이 챙기면 될 거야.”

“다음번에 갈 걸 그랬나 봐요. 미안해지네.”

“아이고. 안 바쁠 때가 있어야 다음에 가지.” 현은 손을 바쁘게 움직이면서 투덜대고 있었지만 내심 하선과 단둘이 휴가를 간다는 생각에 입꼬리는 살짝 웃고 있었다.

“앗.”

그렇게 한참을 파일을 넘겨대던 현의 눈에 맘에 걸리는 이메일 하나가 눈에 들어오자 현은 외마디 비명을 지르고 말았다. 신경외과 의사로 일하고 있는 친구 김형진이 보낸 파일이었다.

제목란엔 ‘두개 내 원발 간엽성 연골육종 사례 찾았음’이라고 적혀있었다. 간에서 생겨난 ‘육종’이라는 악성 암이 뇌로 전이된 환자를 발견했다는 것이다.

치켜 올라가 있던 현의 입꼬리는 순식간에 굳어졌다. 그는 즉시 스마트 안경을 찾아 쓰고 형진에게 전화를 걸었다.

“미안하다. 답이 늦었지. 이메일을 지금 봤어. 이거 상황 좀 알려줘.”

“네가 부탁한 거 찾았다고. 야 이거 고생했다. 네 말 생각나서 내가 제주 분원까지 달려갔다 왔어.” 형진은 너스레를 떨며 말했다.

사코마(Sarcoma, 육종)는 암 중에서도 항암제가 안 듣기로 유명하다. 일반 암을 카시노마(Carcinoma, 상피종)라고 부르며, 대부분의 항암제는 이 암을 치료할 목적으로 개발된다. 그러나 시대가 발전하면서 항암제 기술이 발전해 육종의 항암치료도 가능해졌다.

오가노이드(장기유사세포, 줄기세포로 만든다)를 면역세포 항암치료개발에 응용할 수 있는 ‘암 오가노이드 연계 면역세포 치료기술’이 5년 전부터 완전히 실용화되면서 가능했다. 환자의 몸에서 뽑아낸 물질로 오가노이드를 만들고, 이 세포를 이용해 가장 효과가 높은 면역세포 치료제를 생산하는 기술이다.

하지만 뇌는 2035년인 지금까지도 어느정도 걸림돌이 있었다. 혈뇌장벽(오염물질이 뇌로 전달되는 것을 막는 얇은 막. 약물의 전달까지 막아버려 항암치료의 걸림돌이 된다)을 해결하는 것도 문제였고, 뇌 조직에 꼭 맞는 면역세포를 만드는 방법도 골치거리였다. 만약 육종이 전이되어 뇌 속에 발견될 경우 일반 육종과 두뇌 육종, 두 가지 특수성을 모두 고려해 치료제를 만들어야 한다. 현은 나 단장과 공동으로 이 분야 연구 역시 진행하고 있었기 때문에 뇌 부위에서 육종이 발생한 환자에게 신선한(?) 암 세포를 얻어 오는데 혈안이 돼 있었다.

“환자를 찾았는데, 수술을 해야할 것 같아. 다행히 환자는 연구에 도움이 된다면 수술 중에 떼어낸 조직을 기증한다고 했거든.” 형진은 계속 말을 이어나갔다.

“.....”

“수술 날은 다음주 금요일이고, 그날 병원에 오면 깨끗한 조직표본을 넘겨줄 수 있어. 환자의 암은 물론 간, 뇌세포도 일부 얻을 수 있을 거야.”

“금요일? 야.저... 내가 그날 안 가면 안 되겠지?”

“무슨 소리 하는 거야. 네가 여기서 줄기세포 뽑아내서 오가노이드(장기유사체)로 만들어보고 싶다고 했잖아. 뇌종양 자체가 다른 암에 비해 드물고, 다른 곳에서 생긴 암이 다시 뇌로 넘어와서 두개골 내에 이렇게 딱 맞게 생긴 사례는 그중에서도 0.2%도 안 된다고. 이런 샘플 네 평생에 다시 찾기 힘들 텐데.”

“휴. 야. 냉동 보관해 주면 안... 되겠지?” 현은 다시 한번 우물쭈물 물었다.

“좋을 리가 있냐. 웬만하면 네가 와서 바로 가져가.”

“알았어. 잠시만. 내가 다시 전화해 줄게.”

“오케이. 무슨 일인지 모르지만 나는 환자 치료만 하면 돼. 그다음엔 해달라는 대로 해 줄 테니까 결정하고 알려줘.”

전화를 끊고 현은 흑시 하선이 통화 내용을 엿들었을까 싶어 고개를 돌려 주위를 살폈다. 다행히 하선은 자기 자리로 돌아갔는지 공용 책상엔 아무도 앉아있지 않았다. 현은 머릿속이 복잡했다. 다시 얻기 힘든 실험자료를 포기하긴 어려웠다. 하지만 이번 휴가가 둘 사이에 더없이 소중한 것도 사실이었다.

현은 홀로그램 디스플레이를 꺼버렸다. 그리고 오가노이드 실험계획서가 올라가 있는 전자서류를 번히 들여다보기 시작했다. 새삼 다시 볼 필요 없는 파일이지만 그는 시무룩해진 표정으로 그 서류를 들여다보는 것 이외에 다른 행동을 할 생각이 나질 않았다.

몇 분이 더 흘렀을까. 등 뒤에서 인기척이 느껴졌다. 하선이었다.
“깜짝이야. 어디 갔다 왔어? 자기 자리 돌아간 줄 알았더니.”

하선은 말없이 현에게 전자서류 두 장을 내밀었다. 제목란엔 ‘휴가철회원’이라고 적혀있었고, 맨 밑엔 각각 현과 하선의 이름이 적혀있었다. 나 단장의 사인은 이미 올라가 있었다.



“이게 뭐야. 왜 이런 걸 가지고 왔어.”

“아까 통화하는 걸 들었어요. 휴가 못 가는 거죠?”

“아니. 꼭 그런 건 아니야... 잘 찾아보면 방법이...”

“자. 자. 이걸로 여기다 사인하면 서버에 바로 올라가니까 철회결제 즉시 끝나요. 내가 단장님 다시 불러서 이거 받아오느라고 애 먹었다구요.”

“하지만...”

“빨리요. 우리 팔자가 그렇지 뭐.” 하선은 별일 아니라는 듯 생글생글 웃으며 말했다.

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - “미토콘드리아 유전체편집을 통한 대사조절기술” 편]

제7화 “단장님의 첫 사랑”



생산시설 자동화 분야에선 국내 정상급으로 기업으로 꼽히는 ‘날리지뱅크시스템(knowledge bank system, KBS)’은 최근 사세 확장을 위해 새로운 사업에 눈독을 들이고 있었다. 바로 농업 및 식품유통 사업이었다. 서기 2035년이 된 지금, 농업은 이미 첨단 과학기술 사업의 범주에 들어갔다. 농업시장에서 생존하려면 유전물질 편집기술이나 첨단 공학기술 등이 각종 과학기술 분야를 두루 섭렵해야 했다.

KBS가 생소한 사업에 뛰어들 수 있던 건 나름대로 비밀 언덕이 있었기 때문이었다. 과거 바이오 전문기업인 한스(HANS)의 공장시설 자동화 설계해 줬던 것이 인연이 돼 두 회사 공동으로 합자회사를 설립했다. HANS가 생명과학기술을 이용해 새로운 식자재 개발을 맡으면, 생산공장의 설계와 유통은 KBS가 맡는 식이었다. 양사 모두 규모가 상당하다 보니 이 사실은 신문, 방송 등에 여러 차례 소개됐다. ‘국내 농식품 산업 다크호스 될까… KBS, HANS와 협력, 조인트 법인 ‘HKBS’ 출범’ 등의 제목을 단 기사가 연일 쏟아져 나왔다. 그때만 해도 이 신생 기업의 밝은 청사진을 의심하는 사람은 그렇게 많지 않았다.

그러나 막상 HKBS는 운영이 순탄하지만은 않았다. HKBS가 가장 먼저 주목한 분야는 생산성이 높으면서도 밥맛이 뛰어난 신품종의 쌀을 개발하는 일이었다. 유전자 교정을 통해 기능(형질)이 개선된 쌀 품종의 개발이 3년이 넘도록 상용화가 가능한 수준에 도달하지 못하고 있었다. 생명과학 전문가 김혜영 사장이 HKBS 신임 사장으로 취임해 온 것은 그 때문이다.

‘국가생명정보기술원 산하 기술지원단’ 소속 강현 연구원은 상사인 나형욱 단장의 강압에 가까운 지시를 받고 바쁜 일정을 미뤄 둔 채 부산행 열차에 몸을 실은 것도 마찬가지 이유였다. 김 사장이 “일을 내부에서 계속 끌어안기보다는 기업지원을 목적으로 설립된 국가 연구기관에 도움을 요청해 보자”는 아이디어를 냈기 때문이다.

현이 올라탄 4세대 KTX는 고속형 자기부상열차 방식으로 서울에서 부산까지 1시간밖에 걸리지 않았다. 열차에서 내린 다음부터는 자율주행차를 이용해 일체의 교통체증 없이 시내를 이동할 수 있으니 전국 어디든 목적지까지 왕복 두세 시간이면 충분했다. 아침 일찍 출발했다면 점심시간 전후에 연구실에 돌아올 수 있었겠지만 현은 일부러 일정을 조절해 오후에 출발하기로 했다.

연인인 권하선과 함께 가야 하니, 함께 노을이 진 저녁 바다를 보며 식사라도 하려는 생각이었다. 식물의 생육과정에 필요한 정보시스템 전체를 점검해야 할지 몰랐는데, 관련 기술에 관해선 하선만 한 책임자도 드물었다.

“먼 길 오느라고 수고하셨습니다. 유명하신 분을 뵙게 되어 영광입니다.”

현과 하선이 오후 3시 조금 넘어 도착하자 사장인 HKBS 김 사장이 현과 하선을 반갑게 맞이하며 말했다.

“제가 도움이 될 수 있을지 모르겠습니다. 전공분야와도 조금 거리가 있고.”

“나형욱 단장님께서 ‘강현 연구원이 못 하면 아무도 못 한다’고 하던걸요.” 김 사장은 웃으면서 말했다.

현은 나 단장 이야기를 하는 김 사장의 목소리가 유독 생기 있게 들려 묘한 느낌을 받았다. 그리고는 나지막하게 입속말을 재빠르게 중얼거렸다. ‘별걸 다 나한테 다 떠넘기시는군, 싫었더니... 이런 미인 사장님 부탁을 들어주고 싶어서 일정도 빠듯한 나를 출장 보냈다 이거지.’

“실례지만 단장님과는 어떻게 아시는 사이신지요?” 현이 물었다.

“학부 때 동기예요. 같이 수업도 많이 듣고 했었지요.” 김 사장은 입을 가리며 말했다.



“이 업계에선 사장님 성함을 모르는 사람이 많지 않습니다. 내부에서 해결하실 수 없는 일은 거의 없었을 텐데 어떻게 된 일이실까요?” 현은 약간 통명스럽게 물었다.

“일단 신제품개발은 성공했어요. 나름 신경 썼기 때문에 유전자의 기능이 꽤 안정적으로 나타난다고 생각해요. 그런데 뭐가 잘못됐는지 처음 기대했던 만큼의 수확이 나오질 않는 거예요. 저도 이 회사로 오고 나서 전체 과정을 전부 점검했는데 원인을 알기 어려웠어요.”

“일단 지금까지 진척상황을 좀 볼 수 있을까요?”

3시간 정도 지났을까. 현과 하선은 HKBS 내부 기술진들에게 개발과정에 대해 두 시간 정도 브리핑 듣고선 연구소 내에 마련된 시험재배 시설을 둘러보고 있었다. 현은 한 손에 작은 홀로그램 디스플레이 장치를 들고 신제품 벼의 교정된 유전자가 식물 발달 과정에 따라 주요 유전자 및 단백질에 어떤 영향을 끼치는지 점검하고 있었다. 하선은 농장용 환경 제어 프로그램에 이상한 곳은 없는지 살피고 다녔다.

“식물 성장 온도를 수정해 봐야 할 것 같아요. 유전자 설계 과정에서 온도에 따른 단백질 변성은 고려하지 않은 것 같거든요. 그러니 생육 과정에서 가급적 온도가 높아지지 않도록 주의할 필요가 있어요. 추가로 냉각기를 설치하는 방법도 괜찮을 것 같습니다.”

둘은 일을 빠르게 진행했다. 하선은 본래 일 처리가 빨랐다. 현과 잠시 이야기를 주고받는가 싶더니 곧 옆에서 설명을 듣고 있는 기업 연구자들에게 특유의 설명조 말투를 속사포처럼 쏟아내며 여러 가지를 알려주고 있었다.

“몇 시간 밖에 안 됐는데도 저희는 생각도 못 한 걸 콧속 잘 짚어 내시네요. 역시 도움을 요청하길 잘 했어요...”

자문을 마친 현과 하선이 퇴근을 준비하고 있는 모습을 지켜보며 김 사장이 감복한 듯 말했다. 하지만 그녀는 이 두 사람이 오늘로 업무를 종료하고 다시 찾아와 주지 않으면 어쩌나 싶은 불안감이 들어 연이어 물었다.

“하지만 오늘 말씀해 주신 것만으로는 문제가 완전히 해결되지는 않을 듯합니다. 어떻게 생각하세요?”

“여기까지만 해도 생산량은 상당량 늘어날 겁니다. 발아율이나 생장률 모두 꽤 높아질 것 같은데요.” 현은 여전히 약간 통명스럽게 말했다.

“이야기해 주신 내용을 어림잡아 봤는데, 아슬아슬하게 생산 가능한 수준까지 높일 수 있을 것 같기도 해요. 하지만 그 정도로는..., 뭔가 근본적인 해결책이 아닌 것 같아서요.”

“무슨 말씀이신지 알겠습니다. 그 부분은 DNA 설계과정을 천천히 살펴봐야 알 수 있을 것 같습니다. 추후 진행 여부는 다시 알려드리겠습니다.”

“예. 잘 부탁드립니다.”

김 사장의 배웅을 받고 회사를 빠져나온 현과 하선은 해운대 앞 바닷가 한 식당을 찾아 저녁 햇살이 내리쬐는 창가 식탁에 마주 앉았다. 음식이 나오기 전 하선이 말을 꺼냈다.

“왜 그랬어요?” 하선이 물었다.

“뭘?”

“에이, 말해보요. 아까 왜 전부 다 알려주지 않은 거예요?”

“아니야. 그 회사에서 개발한 벼는 DNA설계가 처음부터 꽤 탄탄했어. 내가 손댈 부분은 거의 보이지 않았는데.”

“하지만 자기는 해결방법을 알고 있지 않나요? 겨우 효율 몇 % 올리려고 시험재배 시설을 점검할 문제는 아니었던 것 같아서요.”

“세포 내 핵 유전자 교정을 통해 해결하려고 했지만 맛 관련 유전자 기능이 식물 성장에는 부작용을 일으키는 것 같아. 차라리 다른 곳에서 기능을 보완하면 좋을 텐데. 세포내 소기관인 미토콘드리아의 유전자를 이용하면 어떨까 했어. 인공지는 써서 작업하면 오래 걸리진 않을 것 같았어.”

“아. 그러네요. 그런데 왜 알려주지 않은 건가요?”

“그 전에 한 가지 꼭 확인하고 싶은 게 있어서 말이야.”

“뭘요? 그게 뭔데요?”



현은 고개를 가웃거리고 있는 하선의 질문에 대답하는 대신 쓰고 있던 스마트 안경을 터치하며 말했다. “전화를 걸어줘. 나형욱 단장님.”

“예. 단장님 접니다. 예. 그런데 지시 주신 건은 저도 잘……. 예. 그래서 하선 씨랑 논의해서 최대한 생산효율을 높이는 방안만 알려주고 나왔습니다.”

“그런가. 아쉽게 됐네. 수고 많이 했어요.” 나 단장이 전화 너머로 말했다.

“뭐 잘하면 다른 좋은 방법이 생각이 날 법도 한데, 그 전에 한 가지만 알려 주시면 시도해 보겠습니다.”

“응? 뭘 말인가?”

“김 사장님이랑, 학교 때 어떤 사이셨습니까?”

“그……, 그게 자네랑 무슨 상관인가?” 현의 갑작스런 질문에 나 단장은 당황해서 말했다.

현은 묵묵히 통화 중인 나 단장의 모습을 홀로그램으로 바꾸어 하선에게 보여주기 시작했다. 나 단장은 얼굴이 빨갛게 되기 시작했다.

“이야기 안 해주시면 오늘로 출장 종료하겠습니다. 한 번만 더 오면 뭔가 획기적인 방법이 떠오를 것 같기도 한데, 아, 이걸 어쩐다…….”

“와. 자기 못됐네요……. 흠.” 현이 전화를 끊자 하선은 웃음이 터져 나오려는 걸 가까스로 참으며 말했다.

“이 정도는 좀 봐 달라고. 단장님이 갑자기 소년 시절 감성을 떠올리신 것 때문에 여기까지 출장 나온 건데 좀 억울하잖아. 내가 이번 주에 얼마나 바빴는지 알아.” 현은 망치로 랩스터의 집게발을 부수면서 중얼거렸다.

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - “식물공장형 그린백신”편]
제8화 “중동전쟁”



“자네, 사우디아라비아 좀 다녀오지 않겠나?”

국가생명정보기술원 산하 기술지원단 소속 강현 연구원은 단장인 나형욱 박사의 난데없는 지시에 어안이 빙빙해졌다. 강 단장은 현의 직속 상사였다. 연구소 내에서 누구보다 바쁜 일정을 소화하고 있다는 것을 잘 알고 있었다. 그런 그를 중동까지 출장을 보내려 하다니. 물론 현도 나 단장의 뜻은 어렵פות이 짐작이 갔다. 하지만 이렇게 갑작스럽게 지시가 내려올 줄은 몰라 적잖게 당황스러웠다.

“예. 아니 그 먼 곳을 지금 갑자기 왜요? 설마 저보고 ‘메르스(중동급성호흡기증후군)’를 해결하고 오라는 말씀은 아니죠?”

“맞아. 자네 말고는 해결할 만한 사람이 없어서 그래.”

최근 중동에선 메르스로 골머리를 앓고 있었다. 2000년대 초반부터 기승을 떨쳤던 메르스는 2025년 백신 개발에 성공하면서 문명국에선 급속도로 사그라들고 있었다. 하지만 치사율이 더 높은 변종이 등장한 데다 의료 서비스를 받기 어려운 개도국에선 백신의 효과를 기대하기도 어려웠다. 한 번 유행하기 시작하면 사망자 숫자를 헤아리기 힘든 경우도 많았다.

“아니, 저는 바이러스 전문도 아니지 않습니까. 하고 많은 연구원 중에 하필 왜 제가?”

“동물이건 식물이건 유전자 설계는 자네가 특기잖아. 현지에서 국제공동연구진을 꾸리는 모양이던데 아예 자네를 지목해서 파견 요청이 들어왔어.”

“아… 그 때문이군요”

현은 뭔가 짐작이 간다는 듯이 강경하게 항변하던 말투를 누그러뜨렸다. 나 단장의 말을 듣고 보니 현도 자신이 가는 것이 가장 일 처리가 빠를 거라는 생각이 들었다.

백신이 개발돼 있다고는 하지만 의료시스템이 낙후된 후진국에선 이런 약품을 주사로 맞는 건 상당히 어려운 일이었다. 백신의 생산에 시간이 걸리는 것도 문제였고, 개발된 백신의 유통기한도 그리 긴 편이 아니었다. 억지로 약품을 끌어모아 공급해도 개도국에선 주사를 놓을 줄 아는 의료인력도 찾기 어려운 경우가 많았다. 물론 먹는 약을 개발하면 모든 문제를 해결할 수 있었지만, 바이러스 백신을 먹는 약으로 만드는 건 그리 쉽지 않았다. 방법은 꼭 한 가지가 있었다. 백신 성분을 가진 농작물을 개발하는 것이다.

“예방주사 맞고 며칠 내로 출발해. 현지에선 지금도 사람이 죽어 나가고 있다는데 우리만 바쁘다고 참여 안 할 수도 없잖은가. 다른 일정은 내가 어떻게든 조정할 테니까.”

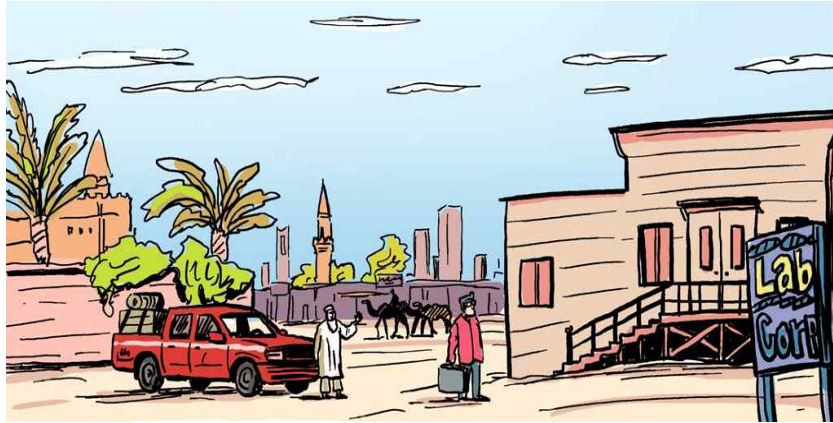
“휴. 알겠습니다.”

“다른 것 필요한 건 없어? 권한 씨 같이 보내줄까?”

“예. 컴퓨터 시스템으로 데이터 처리하려면 하선 씨가 꼭…… 아. 아닙니다. 다른 도움은 현지에서 받지요. 뭐.”

현은 뭔가 생각났다는 듯 굳이 굳이 혼자서 가길 자청했다.

사흘 후, 현은 작은 가방 하나만을 들고 사우디아라비아 수도 리야드 인근에 꾸려진 간이 실험실에 도착했다. 사막 기후가 숨통을 조여오는 살풍경한 곳. 연구실 건물도 곧 무너질 것 같이 보일 정도로 만큼 허름했다. 그러나 연구 기자재만큼은 세계 각국에서 실어온 첨단 장비로 갖춰져 있었다.



현의 임무는 메르스 백신 성분을 가진 ‘형질전환 식물’을 개발하는 일이다. 이론적으로는 이런 식물을 길러 음식처럼 먹기만 해도 예방효과를 얻을 수 있다. 그러나 이런 식물을 식품으로 공급하면 약물 성분의 복용량과 시간을 지키기 어렵고 부작용도 통제가 불가능해진다. 그러니 이런 식물에서 다시 필요한 성분만을 추출해 알약으로 만들어 유통하는 방법이 주로 쓰였다. 이미 B형간염, LTV(설사병의 일종) 등을 예방하는 ‘먹는 백신’은 2020년대에 개발이 끝나 유통되고 있었다.

“你好。您是中国团队的成员吗?(안녕하세요. 중국 연구팀 분이시죠?)”
“아 안녕하세요. 유명하신 분을 다 뵙게 되네요. 제가 출장 오길 잘 했군요.”

국제 공동연구팀에 합류하게 된 현은 중국 연구팀 소속 과학자에게 말을 걸었다. 옛돼 보이는 외모에 선도 가날파서 누가 보아도 눈이 휘둥그레질 정도로 예쁜 여성이었다. 어설픈 중국어로 인사를 해 보았다가 갑작스레 유창한 한국말로 대답을 듣고 깜짝 놀라 대답했다.

“아. 한국 분인 줄 몰랐습니다. 한(韓) 씨는 중국에서도 쓰기에 그만...”
“별말씀을요. 중국팀으로 왔으니 당연하지요. 저는 중국에서 학교를 졸업하고 현지 기업에 바로 취직했어요. 휘경이라고 불러주세요. 중국어로는 ‘후이징’이라고 씁니다만.”
“다른 게 아니라, 실험결과를 데이터로 바꿔서 시뮬레이션 처리해줄 분을 찾고 있는데 다들 닥터 한을 찾으라고 해서요.”
“안 그래도 강 박사님이랑 함께 일을 하게 될 거라고 들었습니다. 저는 본래 화장품 회사에서 일을 했어요. 바르는 화장품을 먹는 약으로 개발하는 일을 주로 하고 있었습니다. 그 과정에서 분자량 변화에 따른 효과 차이를 시뮬레이션 해 보는 일을 자주 했었어요. 저라도 도움이 되시면.”
“우리가 최종적으로 해야 하는 일이 먹는 약을 만드는 거니까요. 중국 연구진이 박사님을 이곳까지 모시고 온 이유를 알겠군요.”

공동의 목표를 가진 두 사람은 쉽게 의기투합했다. 현이 새로운 유전자 구조를 설계해 넘겨주면, 한 박사는 그 설계를 바탕으로 시뮬레이션 프로그램에 넣고 가상실험을 했다. 두 사람은 이렇게 며칠 사이에 가장 효과가 높을 것 같은 식물의 DNA 구조를 몇 가지 뽑아내는 데 성공했다. 그야말로 순식간에 이뤄진 일이었다.

현이 중동 사막에서 활약하고 있을 무렵, 하선은 갑자기 ‘나 출장 좀 다녀올게’라는 짧은 통화만 남기고 나가버린 현에게 화가 잔뜩 나 있었다. 무슨 일인지는 나 단장에게 전해 들었지만 굳지 자기랑 같이 갈 기회까지 마다하고 혼자 떠나 버린 현이 이해가 가지 않았다.

“뭐야. 이 남자.” 하선은 출국하겠다고며 걸려온 현의 전화를 끊고 몇 번이나 그렇게 중얼거렸다.

그 시간 중동. 밤 11시가 가까워질 무렵인데도 현과 휘경 두 사람은 밤늦도록 연구실에 앉아 있었다. 연구 기간이 하루라도 줄어들면 그사이 몇 사람이 더 목숨을 구할 수 있을지 모르는 일이라 두 사람은 매일같이 분주하게 연구에 매진했다.

“자. 이제 남은 문제는 이 DNA 구조를 가진 식물을 만드는 일인데요. 이곳 중동 땅에서도 대량 생산할 수 있는 식물 중에 가능한 것이 있을지 봐야 해요. 몇 가지 살펴봤는데 과일류가 적당해 보이긴 해요. 바나나나 포도, 아 올리브도 가능하려나...”

“아. 올리브 먼저 해 보면 어때요? 유효성분을 기름으로도 쉽게 뽑아낼 수 있을지 몰라요. 성공하면 금방 알약으로도 만들 수 있을 텐데.”

휘경이 기뻐하며 말했다.



“아 잘됐네요. 그럼 제가 지금 한국 연구팀에 바로 연락을 넣어 보겠습니다. 저쪽은 퇴근시간이 거의 다 되어가니. 이걸 식물 전체의 유전자를 다 확인해야 하니 저쪽 슈퍼컴퓨터로 시뮬레이션 작업을 해 달라고 해서 넘겨받으면 일이 빠를 거예요. 아. 하선이 잘 있으려나.”

현은 문득 연인이자 직장동료인 권하선 연구원이 생각나 중얼거렸다.

그리고 현은 쓰고 있던 스마트 안경의 스위치를 누르고 하선에게 전화를 걸었다. 화상통화로 본 하선은 도끼눈을 뜨고 현을 노려보고 있었다.

“뭐예요? 무슨 일인데요?”

“아니. 여기서 실험을 하다가 시뮬레이션할 것이 있어서 그러는데, 국제 연구진도 여기까지 슈퍼컴퓨터를 가지고 오진 않았거든. DNA 설계도를 보내줄 테니까 올리브에 적용할 수 있는지 확인을 좀...”

“이봐요. 지금 그 전에 나한테 할 말 있지 않아요?”

“으... 응?”

현은 아차 싶었다. 조금한 마음에 이곳까지 혼자 날아오고 하선에게 제대로 된 설명도 하지 않았다는 사실, 그리고 그녀에게 연락하지 않은 것이 1주일이 훌쩍 더 지났다는 사실이 생각났다.

“저기... 여긴 메르스 위험지역이잖아. 위험한데 굳이 자기까지 올 필요는 없겠다 싶어서...”

“나한테만 위험하고 자기는 안 위험해요? 왜 그래요 도대체!”

하선은 결국 소리를 질렀다.

현은 찢찢매며 통화를 마치고는 뒤통수를 긁적거리며 하선에게 보낼 e메일을 또각또각 입력하기 시작했다. 그런 두 사람의 통화를 옆에서 지켜보던 휘경은 짐짓 말을 걸었다.

“권하선 박사님이세요?”

“아 하선 씨를 아십니까.”

“강 박사님이 발표한 논문에는 반드시 그분 이름이 있었어요. 누구인지 궁금했습니다.”

“제 가장 소중한 동료입니다. 제가 그동안 냈던 성과는 모두 하선 씨 덕분이에요. 이번에 한 박사님이 맡아 주셨던 일을 한국에서는 대부분 하선 씨가 해 주곤 했어요.”

하선에게 잔뜩 혼이 났는데도 여전히 싱글거리며 e메일을 쓰고 있는 현을 바라보며 휘경은 자기도 모르게 입술을 곱씹고 있었다. 그런 휘경에게 현은 다시 말을 걸었다.

“이번 일이 끝나면 한국에 들려주십시오. 꼭 하선 씨랑 같이 뵙고 싶습니다. 두 분이 비슷한 일을 하시니 알고 지내셨으면 좋겠... 응? 표정이 왜 그러세요?”

“아니에요. 권 박사님이 무척 고생이 많으시겠다 싶어서요.”

휘경은 한숨을 내 쉬며 말했다.

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - “플라스틱 분해 인공미생물” 편]
제9화 “지구를 지키는 방법”



“강현 박사, ‘메르스’를 잡았다”.

며칠 사이 신문 헤드라인에는 연일 이런 제목의 기사가 쏟아져 나왔다. 얼마 전 사우디아라비아에서 ‘메르스 예방약’을 개발하고 돌아온 국가생명정보기술원 소속 강현 연구원에게 쏟아지는 관심은 사람을 피곤하게 할 충분한 힘이 있었다. ‘강 박사와 만나 인터뷰를 하겠다’며 연구실 문 앞을 지키는 취재진 때문에 출퇴근이 곤란할 지경이었다.

현은 어쩔 수 없이 집에 틀어박혔다. 직속 상사인 나형욱 단장과 논의한 후 당분간 재택근무를 하기로 했다.

“홍보팀이 하도 졸라대서 보도자료를 낸 것이 실수였어. 그렇다고 자네 이름을 빼 버릴 수도 없잖은가.” 나 단장은 현에게 영상통화로 업무 이야기를 하다가 짐짓 미안한 듯 이야기를 꺼냈다.

“일반 기자들이야 그런데요, 과학전문 기자들은 해외 논문도 계속 체크하잖아요. 자료를 안 냈더라도 이틀만 지나면 결국 똑같았을 거예요.”

“이렇게 된 이상 제대로 언론 응대를 하라는 소장님 지시가 있었는데, 내가 억지로 막았네. 자네가 외부 일정 소화하고 다니기 시작하면 올해 연구 계획은 전부 엉망이 될 거야.”

“함께 연구했던 중국 연구팀 후이징 박사도 지금 현지에서 난리가 났다더군요. 그분은 아예 취재진을 피해서 한국으로 도망을 나오겠다고 그래요.”

“아 그래? 그럼 둘이 연구소로 와서 나란히 기자회견이라도 하겠나?”



나 단장은 갑자기 장난기가 동했는지 놀리듯이 말했다.

“아이고. 왜 그러십니까. 기자들 피해 도망 온 분한테 그게 무슨...” 현이 한숨을 쉬면서 말했다.

“그래. 어찌 됐건 며칠 집에서 기본적인 일정만 확인하고 좀 쉬게나. 굶직한 실험은 다 미뤄줬으니 너무 염려 말고.”

“휴. 알겠습니다.”

현은 강 단장과 통화를 하면서도 책상용 홀로그램 디스플레이로 손을 뻗어 e메일 함에 쌓여있는 취재요청서를 끊임없이 휴지통에 던져 넣고 있었다. 통화를 마치고 홀로그램 화면에 집중하기 시작한 현의 표정은 일순간 일그러졌다. 신경 쓰이는 e메일 한 통이 눈에 들어왔기 때문이다. “인간의 편리함 만 생각하면 안 돼요. 지구 환경에 관심을 가져주기 바랍니다.”라는 제목이 적혀 있었다.

평소 같으면 바로 휴지통에 던져 넣었을 내용이었을 터였다. 하지만 현은 그 e메일을 전자 서류로 옮겨 놓고 차근차근 들여다보기 시작했다. 보낸 사람 란에 ‘사이언스피스 조아영 책임연구원’이라고 적혀 있었기 때문이었다.

과학자로서는 보기 드물게 유명한 편이다 보니 현은 어이없는 제안도 수없이 자주 받는다. 무슨 뜻인지 알아보기조차 힘든 사이비 연구성과를 현의 이름을 넣어 공동으로 발표하고 싶다는 사람, 연구제안서를 쓰는데 공동연구자로 이름 한 번만 넣어달라는 사람, 제자가 되고 싶다는 사람 등 별의별 요청이 끊임없이 쏟아져 들어왔다.

욕설이나 비난 등의 내용도 자주 받았다. 일부 종교 관계자들이 보기에 현은 ‘지구를 파괴하는 악마’ 같은 존재였다. 신이 정해 놓은 유전자를 그대로 두지 않고 마음대로 편집하는 현을 끔찍하게 보기 힘든 탓이다. 환경운동가들에게도 현은 그리 곱지 않은 존재로 비춰지곤 했다. 특히 과학을 전혀 고려하지 않고 인간이 자연으로 돌아가야 한다고 주장하는 ‘조건 없는 환경 보호론자’ 들은 현을 절대 곱게 보지 않았다.

하지만 최근 십 수년 사이에 새로운 흐름도 생겨났다. 인간의 발전적인 활동을 유지하면서도 환경에 미치는 영향은 최소화하는 방법을 찾는, 과학으로 문제해결을 하려고 노력하는 환경운동 단체가 생겨나가 시작했다. 사이언스피스는 그런 NGO(비정부 기구) 중에서도 가장 활발하게 활동하고 있는 곳이었다. 이곳의 실적은 적지 않았다. 바다 오염의 근원인 ‘적조’의 생성과정을 원리부터 밝혀내고, 그 원인을 최소화할 수 있는 친환경 하수 정화처리 시스템 등을 독자적으로 연구해 발표하기도 했다. 그리 큰 비용이 들지 않는 방식이라 현재 세계 각국에서 앞다퉈 하수 정화 시설을 개선해 나가고 있다. 현은 평소 그런 사이언스피스의 사상에 대해 나름 공감할 부분이 있다고 생각하곤 했다.

조 연구원이 보내온 e메일은 예의와 격식을 갖추고 있었지만, 주 내용은 그간 이뤄진 현의 연구 활동을 비판하는 것들이었다. 국가와 사회의 주목을 받는 연구자로 성장했으면서도 환경문제에 책임 있는 태도를 보이지 않고 있다는 점을 조목조목 지적하고 있었다.

무시하면 그 뿐이었지만 현은 그 e메일을 몇 번이고 곱씹어 읽었다. 현은 자신의 연구결과가 모두에게 좋은 결과가 돌아오길 기대하고, 그만한 소기의 성과도 있었다고 자신하고 있었다. 하지만 그 이면에 소홀히 한 부분도 있었다는 지적은 그간의 활동을 돌이켜 볼 좋은 기회로 여겨졌다.

현은 기지개를 켜고 앉아 조용히 답신을 쓰기 시작했다. 제목란에 “언제 말씀 좀 나눌까요?”라고 적고, 내용란에도 단 한 줄만 넣었다. “연락을 주십시오. 직통 103683-56”.

스마트 안경으로 바로 연결되는 직통 번호. 가족과 하선, 나 단장 이외에는 아는 사람이 거의 없다. 보통은 화상통화를 하려면 직통 번호가 아닌 ‘대기 번호’로 사전에 연락을 넣고, 수신 측이 승낙을 하면 서로 시간을 정해 통화한다. 하지만 직통 번호를 알고 있는 사람은 20여 년 전의 일반 휴대 전화와 같은 방식으로 전화를 걸 수 있다. 자고 있을 때도 벨이 울려 전화를 받도록 요구할 수 있다. 화상통화가 일반화되면서 사생활을 지키기 위해 굳어진 문화다.

통화 요청은 현이 e메일 회신을 보낸 지 불과 몇 십분 만에 들어왔다. 화상에는 단아한 차림의, 그러나 다소 공격적인 표정의 여성 연구원이 보였다.

“예. 강현입니다.” 현이 말했다.

“조아영입니다.” 아영이 다부진 말투로 말했다.

“하시고 싶은 말씀이 많으신 듯해서 연락처를 드렸습니다. 이메일로 주신 내용 이외에 하고 싶은 말씀이 있으실까요?”

“거두절미하고 말씀드릴게요. 저희는 미세플라스틱 문제해결을 위해 연구 중입니다.”

“그 문제는 어느정도 해결이 되지 않았나요. 이미 몇 년 전부터 플라스틱도 분해할 수 있는 효소와 미생물을 쓰레기 처리장에서…”

“것 보세요. 역시 이런 문제에는 관심이 전혀 없으시네요. 그건 대규모 쓰레기 이야기예요. 바닷속에 떠도는 미세 플라스틱의 농도는 지금도 계속해서 증가추세에…” 아영은 갑자기 목소리의 톤을 올렸다.

“아. 그런가요. 몰라서 죄송합니다. 계속 말씀하시죠.” 현은 실쭉해져서 말했다.

“그래서 우리는 아예 해양에 풀어 놓을 수 있는 미생물을 개발하는 중입니다.”

“듣고 보니 몇 가지 의문이 드는군요. 생태계에 미치는 효과는요? 그리고 그런 미생물이 바다 속에서 살게 되면 플라스틱으로 된 적지 않은 시설물이 부식될 수도 있겠는데요.”

“이 미생물은 미세플라스틱만을 먹이로 삼으니 생태계에 큰 문제는 없을 겁니다. 바닷물과 비슷한 농도의 염분이 없으면 살아갈 수 없으니 지상에 만든 인간의 시설물도 큰 영향은 없을 거라고 생각해요. 오히려 선박에서 떨어져 나오는 미세플라스틱도 먹어 치워 줄 거라서…”

“좋은 생각이군요. 환경영향평가는 추후에 받기로 하고 일단 개발해 보시는 건 나쁘지 않을 것 같은데요.”

“그래서 저희 말씀은…”

“저보고 그 미생물의 유전체 설계와 합성을 봐 달라는 건가요.”

“예…….” 아영은 말꼬리를 흐렸다.

“아시겠지만 저는 국책연구기관 소속으로 근무하고 있습니다. 지금 결정 드릴 수는 없지만 여러 조건을 보아 긍정적으로…”

“지구 환경을 조금이라도 생각하신다면 어떻게 그런 말을…” 아영은 다시 화를 내는 듯한 목소리로 말했다.

“이것 보세요. 이게 지금 도움을 요청하시는 태도입니까? 여러분들이 그렇게 투쟁적인 자세를 일관하니 바른 일을 하면서도 지지를 못 받는 겁니다.” 현도 결국 따지듯이 말했다.

“휴. 강 박사님 말고도 유전자 설계를 할 수 있는 사람은 있어요. 저희도 여러 사람과 접촉해 봤구요. 하지만 다들 돈 이야기만 하고…, 강 박사님이 연구소에 보고하셔서 공식적으로 처리하더라도 그 비용이 적지 않을 것입니다. 저희 재단 입장에선…”

“말씀을 이해하기 어렵군요. 제가 언제 돈을 달라고 했습니까?”

“예?” 아영은 놀란 어조로 되물었다.

한 달이 지난 어느 날, 현은 연구소로 정상출근하고 있었다. 집에 틀어박혀 있었던 일주일 사이 있었던 일은 어느덧 까맣게 잊고 지내고 있었다.

어느 날 이른 아침, 사무실로 출근한 현은 커다란 전자 종이에 오늘 새벽 발행된 신문을 내려받아 한 장씩 넘기며 읽기 시작했다. 그러던 현은 잠시 후 부리나케 스마트 안경을 고쳐 쓰고 아영에게 전화를 걸었다.



“이거 봐요. 이게 어떻게 된 겁니까? 저는 호의로 도와드린 거예요. 그걸 이렇게.”

“무슨 말씀이세요. 저희가 몇 년을 고심하던 연구입니다. 박사님 덕분에 큰 속제가 풀렸는데, 그걸 저희 이름으로만 발표할 수는 없습니다. 그거야말로 염치없는 일 아닐까요.”

“.....”

“논문 절차가 지난주에 끝나다 보니 오늘 기사가 나갔나 봅니다. 혹시 절차상 문제가 있으신 건가요. 소속 연구소에 보고해 두신다고 해서 염려하지 않았습니다.”

“그런 문제는 없을 겁니다. 다만..., 기사가 이런 식으로 나면, 이거 창피해서.....”

“미디어엔 익숙하신 줄 알았는데 의외네요.” 아영이 담담한 말투로 말했지만, 얼굴 표정은 묘하게 생글거리고 있었다.

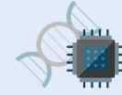
“알겠습니다. 휴. 덕분에 내일부터 다시 집에 틀어박혀야 할지도 모르겠어요.”

통화를 종료하고 현은 짜증이 난다는 듯 신문 머리기사 제목을 다시 한번 읽었다. 거기엔 커다란 활자체로 다음과 같이 쓰여 있었다.

“이번엔 미세플라스틱 문제해결, 강현 박사가 또 해냈다... 환경재단 사이언스피스와 협업”

[바이오로 열어가는 2035 미래사회 - "유전자회로 공정 예측기술"편]

제10화 "그가 천재로 불렸던 이유"



“이것 보세요. 자꾸 이러실 겁니까. 지난번엔 거기 때문에 기자들 피하느라 출근도 제대로 못 하고 제가 얼마나 난감했는지 압니까. 자꾸 이러시면 더는 거기랑 일하기 어려워요.”

국가생명정보기술원 소속 강현 수석연구원은 환경분야 국제연구진 ‘사이언스피스’의 조아영 책임연구원의 영상통화를 받다가 화가 난 듯이 소리쳤다.

“그때 일은 여러 번 사과드렸잖아요. 제발 부탁인데 이번 일도 신경을 좀 써 주세요.”

사이언스피스는 적은 연구비로 환경문제를 해결하려다 보니 안면이 있는 연구자들에게 도움을 부탁하는 일이 적지 않았다. 현과는 얼마 전 ‘미세플라스틱을 먹이로 삼는 미생물’을 개발하면서 인연이 닿았다. 그 이후 사이언스피스와 국가생명정보기술원은 현을 창구로 삼아 수시로 의견을 주고받게 됐다. 현은 사이언스피스 측의 입장을 이해하면서도 간혹 너무 과도한 부탁에 피곤을 느끼는 일이 많았다.

“너무 그러지 마십시오. 저도 제 연구 일정이 있지 않습니까. 그리고 이 분야를 연구하시는 건 좋은데, 접근 방법은 말씀하신 것과 전혀 달라야 합니다. 다른 분야 전문가가 필요해요. 저희 연구소의 권... 아, 차라리 국제협업을 해 보시지 그래요. 사이언스피스는 중국 사무소도 있으시다 들었는데.”

“누구 생각나는 사람이라도 있으신가요?”

“중국 생명공학연구소 한 후이징 박사랑 같이 일한 적이 있는데, 거의 모든 면에서 책임자라고 생각해요.”

“어쩐지 떠넘기시는 듯한 기분이 드는데요.” 조 연구원이 웃으면서 말했다.

“그런 건 아닙니다. 이런 연구가 꼭 필요하다는 건 인정하고 도울 생각도 있어요. 하지만 저보다 한 박사가 더 잘 어울립니다.” 현은 담담하게 말했다.

현은 천재로 불렸다. 그저 대중의 인기만 있는 것이 아니었다. 동료 과학자들 모두 그를 천재라고 부르기에 서슴지 않았다. 남들은 몇 년씩 난관에 부딪혀 있는 연구도 그가 손을 대면 빠르게 문제가 해결되곤 했다. 생명체의 유전자를 원하는 대로 설계하고 기능을 개선할 수 있으니 사실상 생명과학분야 연구에선 ‘만능 치트키’를 손에 쥐고 있는 것과 다름없었다.

물론 그와 비슷한 일을 할 수 있는 연구자들이 없는 건 아니었다. 이는 축적된 인류의 생명과학지식과 급진전한 인공지능(AI) 기술 덕분에 가능해진 일이다. 과거라면 수없이 많은 생물의 유전자 정보를 분석하고, 이를 기반으로 그 유전자 정보를 교정하거나 이를 기반으로 새로운 유전자정보를 만들고, 다시 세포를 배양하고, 그 기능을 확인하는 일을 지겹도록 반복해야 했다.

하지만 지금은 이야기가 달랐다. 시는 가장 효율이 좋은 유전자 구조를 척척 제안해 주고, 이를 다른 시를 이용해 가상실험을 해 보는 방식으로 시행착오도 최대한 줄일 수 있었다.

이 결과 생명과학분야 연구속도가 과거와는 비교도 할 수 없이 빨라졌다. 물론 이런 일을 하려면 생명과학은 물론 인공지능 시스템까지 능수능란하게 쓸 수 있어야 했다. 당연히 그런 전문가가 그리 많을 리 없었다. 현은 그 몇 안되는 사람 중에서도 독보적이었다.

하지만 현은 자기 스스로 '운이 좋았다'고 생각하고 있었다. 자신이 가진 지식이나 연구역량이 타인보다 크게 나올 것도 없다고 생각하곤 했다. 물론 그에게는 인공지능 시스템을 이용해 누구보다 빠르게 문제 해결의 원인을 찾아낼 줄 아는 자기만의 노하우가 있었다. 하지만 절대적인 영향을 미친다고 생각하기는 어려웠다. 그보다 중요한 건 조력자의 역량이었다.

현의 곁에는 같은 연구소 동료이자 지금은 연인으로 발전한 권하선 연구원이 있었다. 생명과학 연구에 인공지능을 동원하려면, 그 분야에 특화된 정보통신기술(ICT) 전문가의 도움이 필요했고, 그런 두 사람의 호흡은 꽤나 중요한 것이었다. 그러니 현은 다른 전문가들의 연구효율이 자기보다 떨어지는 건, 그저 그들의 옆에 하선이 없었기 때문이라고 생각했다.

현은 하선을 대신할 수 있을 만한 역량을 갖춘 사람을 최근 꼭 한 사람 만난 적이 있었다. 몇 개월 전 메르스 연구를 함께하며 호흡을 맞춘 적이 있는 중국 연구팀 한 후이징(훤경) 박사였다. 그녀는 하선처럼 현의 마음에 쏙 드는 데이터를 뽑아내 주고, 필요한 입출력 프로그램을 원하는 때에 쏙쏙 개발해 줄 줄 알았다.

사이언스피스는 최근 '유전자회로 공정 예측기술'에 관심을 쏟고 있었다. 동식물의 유전자를 전자회로처럼 인식하고, 그 기능을 예측해 설계에 반영하는 기술이다. 관련 기술은 과거 십수년 사이 크게 성장했다. 사실 현과 같은 전문가가 등장한 것도 이 분야 지식이 급진했기 때문에 가능한 일이다. 과학자들은 이미 10년 전 박테리아 등 세포의 대사경로를 조작해 각종 화학물질, 에너지, 의약품 등을 생산하는 단계에 도달했다. 몇 년 전에는 미국항공우주국(NASA) 소속 연구자가 '화성에서 키울 수 있는 식물'을 만들어 내 화제가 되기도 했다.

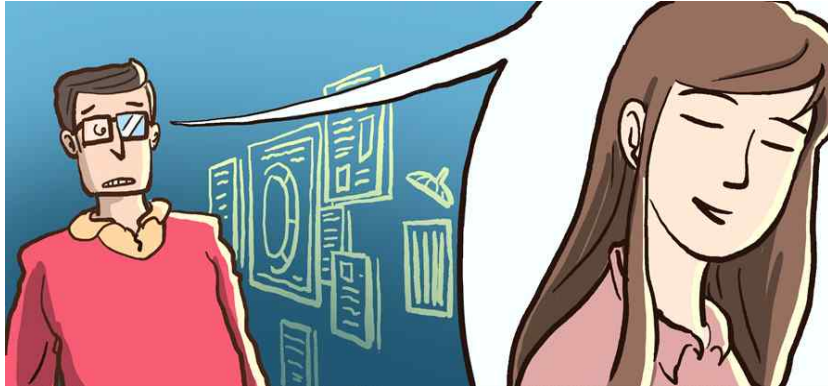
사이언스피스의 목표는 범용 유전자회로 공정예측 소프트웨어를 만드는 일이었다. 이 소프트웨어가 완성된다면 관련분야 전문가 누구나 연구효율을 크게 높일 수 있다. 세계 각지의 연구자들이 이 소프트웨어를 사용해 얼마나 많은 환경문제를 해결할 수 있을지를 생각해 본다면, 이는 사이언스피스 입장에선 총력을 걸만한 일이었다. 그 연구를 시작하려는 사이언스피스가 가장 전문가라고 불리는 현에게 도움을 요청한 것이다. 이런 아영의 요청은 억지스러운 것이었다. 짐짓 현의 입장에서 "당신의 연구 노하우를 담은 AI 소프트웨어를 개발해 무상으로 내 놓으라"는 소리로 들릴 수 있었다. 그러나 아영을 비롯한 사이언스피스 연구자들은 '올바른 일을 한다'는 믿음이 있었고, 실제로도 그랬다. 현도 크게 나무라지 않았다. 도리어 많은 사람들의 연구 효율이 높아진다면 세상이 조금은 더 깨끗해지고, 더 편리해질 것 같다고 생각했다.

하지만 현이 도움을 주려는 방법은 차이가 있었다. 아영의 요구는 현만의 독자적인 노하우와 확보하고 있는 DNA 데이터에 관한 부분이었지만, 현은 하선의 서포트 능력이 더 중요하다고 여겼다. 즉 하선의 역할을 대신할 수 있는 AI를 제공하면 문제는 해결될 거라고 여겼다. 다만 요즘 정신없이 바쁜 하선의 일정을 고려해, 그와 가장 비슷한 역량을 가졌다고 생각하는 휘경과 상의해 보라고 추천한 것이다.

다음 날, 현은 연구실 허공에 펼쳐져 있는 홀로그램을 바라보며 두 팔을 열심히 휘젓고 있었다. 복잡해진 연구 일정을 정리하느라 수없이 많은 이메일과 파일로 정리하고 있자니 정신이 아득해질 지경이었다.

때마침 화상전화가 들어왔다. 현은 한 손으로 홀로그램 속 이메일 함에 들어와 있는 스팸메일 하나를 집어내 휴지통에 던져 넣으면서, 또 다른 한 손으로 스마트 안경을 집어 얼굴에 쓰면서 답했다.

“응. 왜? 지금 바쁜데 내가 조금 있다가... 아... 한 박사님이시군요.” 개인 번호로 전화를 할 사람이 많지 않으니 현은 하선이 건 전화라고 생각했다. 그러나 전화를 건 사람은 중국에 있던 휘경이었다.



“권 박사님이 아니라서 실망하셨나 봐요?” 휘경은 뽀로통해져서 말했다.

“아. 미안합니다. 어떤 일이세요?”

“사이언스피스 측에서 연락을 받았어요. 강 박사님 추천이라고 꼭 도와 달라고 하더군요. 그런데 저 사람들이 왜 저를 찾았는지, 강 박사님은 왜 저한테 이런 일을 하라고 하신 건지, 저로서는 도저히 이해가 안 가세요.” 휘경이 다시 따지듯 말했다.

“아. 그 이야기인가요. 전에도 말씀드렸지만 제 연구성과는 대부분 하선 씨 덕분이라고 생각합니다. 한 박사님 이외에는 비교할 수 있는 사람조차 없었어요. 그래서 저는 하선이나 한 박사님에게 뛰어난 연구 노하우가 있으실 거라고 판단을...”

“휴. 이 양반이 겨우 정리하고 있는 사람 속을 다시 뒤집으시네.” 휘경은 한숨을 쉬 다음 현의 말을 자르며 연이어 말했다.

“강 박사님. 지금 사람에 대한 애정을 Si에게 학습시키라는 건가요?”

“예? 그게 무슨?” 현은 여전히 알아듣지 못하고 고개를 갸우뚱거리고 있었다.

“권하선 박사님이 그만큼이나 일을 잘 도와드릴 수 있었던 건, 아마 강 박사님의 세세한 습관까지 모두 배려하고 하나하나 애정을 가지고 일하셨기 때문일 겁니다. 무슨 기술적인 노하우 같은 게 아닐 거예요.”

“.....”

“그리고, 뭐....., 저도 그랬었어요. 그래서 그렇게 몇 날 며칠 밤을 함께 세면서도 즐겁게 일을 할 수 있었던 겁니다. 지금 제가 다른 사람과 일을 하거나, 혹은 다른 사람을 위해 Si를 학습시킨다고 해도 그것과 비슷한 결과를 기대하는 건 있을 수 없는 일입니다.”

“그게... 그러니까..... 예.” 현은 겨우 알았다는 듯 고개를 떨어뜨렸다. 뭔가 말을 해야 할 것 같아서 입을 떼려다가 다시 다물고 말았다.

“더 하실 말씀 있으세요? 전화를 빨리 끊고 싶어졌어요.” 휘경은 조금 글썽이는 목소리로 말했다.

“아닙니다. 그..., 정말로 미안합니다.”

“이봐요. 박사님. 끝까지 왜 그래요? 그럴 땐 그냥 고맙다고 하시면 된다고요. 권 박사님은 평생 정말 큰 일이네요.” 휘경은 다시 한숨을 쉬고는 뽁- 소리와 함께 화면에서 사라졌다.

“나 참. 이런 배 나온 아저씨 어디에 볼 데가 있다고.” 휘경에게 공연히 혼이 나고 어안이 병병해졌던 현은 반나절이 지난 다음에야 억울하다는 듯이 겨우 중얼거렸다.

“뭐해요. 야근 할거예요? 오늘은 좀 같이 들어가면 안 돼요?” 퇴근 시간이 다 되자 옆 실험실에서 근무하던 하선이 찾아와서 말했다.

“하나 물어보고 싶은 게 있어.” 궁금증이 채 풀리지 않은 현은 하선에게 묻기 시작했다.

“왜요? 뭘요?”

“지금까지 열심히 도와줬던 것 정말 고맙게 생각해. 하선이 없었으면 지금의 나도 없었을거야.”

“뭬예요. 사람 불안하게 왜 그래요?”

“혹시, 내가 하선이 없을 때도 하선처럼 일하는 것처럼 계속 도움을 받을 수 있는, 뭐 그런 소프트웨어를 만드는 게 가능할까?”

“응? 자기 어디 가요? 그런 걸 왜 물어봐요?”

“그냥 궁금해져서 그래. 나 어디 안 가.”

“그런 소프트웨어라면 저번에 기념일 날 선물로 만들어 줬잖아요. 그런데 그거 자기밖에 못 쓸걸요. 잘 고치면 다른 사람들도 도움이 될지도 모르지만, 그게 사람마다 업무습관이 달라서 세팅 다시 다 해야할텐데...” [2019 바이오미래유망기술의 이야기 - 제1화 “그들만의 1000일 기념일” 참고]

“뭬? 설마 그때 그 소프트웨어가.”

“뭬예요. 아직 한 번 써 보지도 않은거예요?”

“아니. 그때는 그냥 신형 정보입출력 프로그램이라고 해서, 다음에 자기한테 물어보고 쓰려고 놔뒀는데 바쁘다 보니 그만...”

“아유. 진짜 내가 못 살아. 그거 만드느라고 내가 얼마나 고생을 했는데 지금 1년이 다 돼가도록.....” 하선은 결국 현의 가슴팍을 때리기 시작했다.



현은 그렇게 화를 내고있는 하선을 끌어당겨 말없이 꼭 끌어안았다.

“아 이거 뉘요. 오늘 진짜 이상하네. 엉뚱한 걸 물어보질 않나. 낮간지러운 소리를 하지를 않나.”

“아니야. 고마워서 그래. 정말이야. 그리고 이럴 땐 그냥 고맙다고 하는 거라며.”

“그런 건 누가 가르쳐 줬는데요?” 하선이 현의 가슴팍을 때리던 손을 내리고 눈을 흘기며 물었다.

현은 아무 대답없이 하선을 다시 꼭 끌어안았다.

- ◇ 본 자료의 내용은 생명공학정책연구센터의 공식 견해가 아니며, 자료의 내용을 인용할 시에는 출처를 반드시 밝혀 주시기 바랍니다.
- ◇ 본 자료는 생명공학정책연구센터 사이트(<http://www.bioin.or.kr>)에서 다운로드가 가능하며, 자료의 내용을 인용할 경우에 출처를 명시하여 주시기 바랍니다.

● 생명공학정책연구센터 총서 목록(최근 3년) ●

총서 번호	보고서명	담당자	발간일	공개 여부
245	2016년 하반기 BioINwatch Collection	김무웅	2017-01-06	공개
246	2016 정부 BT 연구성과 보도자료 모음집	박성훈	2017-01-10	공개
247	2016 정부 바이오 정책 보도자료 모음집	박성훈	2017-01-20	공개
248	2017년도 생명연구자원관리 시행계획	김영철 우창우	2017-03-31	공개
249	바이오헬스 미래 신산업 육성전략-바이오 미래전략 I (바이오의약품)	문성훈 김무웅 김민정 민현준	2017-05-01	공개
250	바이오헬스 미래 신산업 육성전략-바이오 미래전략 II (의료기기)	문성훈 민현준	2017-05-01	공개
251	바이오 창조경제10대 활성화 프로젝트	문성훈 조선자	2017-05-01	공개
252	2017년 상반기 BioINwatch Collection	김무웅 홍윤정 홍지영 조선자	2017-07-21	공개
253	2016년 국내 바이오 중소·벤처기업 현황 통계	김무웅 홍윤정	2017-11-22	공개
254	2017 생명공학백서	문성훈 이지현	2017-12-31	공개
255	2017 바이오 통계 브리프	김무웅 홍윤정	2017-12-29	공개
256	2017 BioINpro 모음집	박미정	2017-12-31	공개
257	2017년 BioINdustry 산업동향 보고서	김무웅 홍윤정 조선자 홍지영	2017-12-31	공개
258	2016 정부 BT 연구성과 보도자료 모음집	홍지영 조선자 박성훈	2018-01-31	공개
259	2017년 하반기 BioINwatch Collection	김은중 홍지영 조선자 홍윤정 김무웅	2018-01-21	공개
260	2016 정부 바이오 정책 보도자료 모음집	홍지영 조선자 박성훈	2018-02-02	공개
261	2018 바이오 미래유망기술 발굴	홍지영 김무웅	2018-02-02	공개
262	2016년 바이오분야 국가연구개발사업의 포트폴리오 및 포지셔닝 분석	김무웅 홍윤정	2018-02-28	비공개
263	2017년 국내 생물자원센터 실태조사 보고서	김영철	2018-05-00	비공개
264	2018년도 생명연구자원관리 시행계획	김모모	2018-07-09	공개
265	2018년 상반기 BioINwatch Collection	김은중 김무웅	2018-07-24	공개

총서 번호	보고서명	담당자	발간일	공개 여부
266	OECD BIO POLICY REVIEW	박주연 김민정	2018-07-20	공개
267	미국 국립보건원(NIH) 연구지원 정책과 철학	김은중 김무웅	2018-11-14	공개
268	2017년 국내 바이오 중소·벤처기업 현황 통계	김무웅 홍윤정	2018-12-28	공개
269	2018년 BioIndustry 산업동향 보고서	김무웅 홍윤정 김은중 남연정 조선자 홍지영	2018-12-28	공개
270	2018년 BioNpro 모음집	박미정 김영철	2018-12-31	공개
271	2019 바이오 미래유망기술	남연정 김무웅	2019-01-31	공개
272	2018년 하반기 BioNwatch Collection	김은중 김무웅	2019-01-31	공개
273	2017년 바이오분야 국가연구개발사업의 포트폴리오 및 포지셔닝 분석	홍윤정 김무웅	2019-02-11	비공개
274	2018 정부 바이오 정책 보도자료 모음집	박성훈	2019-02-14	공개
275	2018 정부 BT 연구성과 보도자료 모음집	박성훈	2019-02-18	공개
276	2018 바이오인글로벌 모음집	박성훈	2019-02-20	공개
277	OECD Bio Policy Review No.2	박주연	2019-03-20	공개
278	정부연구비가 신약개발 성과에 미치는 영향분석 및 시사점	조윤정	2019-04-15	공개
279	2019년 상반기 BioNwatch Collection	김은중 남연정 김무웅	2019-08-16	공개
280	2019 내 손 안의 바이오 통계	홍윤정 김무웅	2019-10-04	공개
281	2019년 BioIndustry 산업동향 보고서	김무웅 홍윤정 김은중 남연정 하선권 김영철	2019-12-31	공개
282	2018년 국내 바이오 중소·벤처기업 현황 통계	홍윤정 김무웅	2020-1-31	공개

※ 총서 발간자료는 BioIN정보포털사이트(<http://www.bioin.or.kr>)에서 다운받으실 수 있습니다.

저자 소개

- ◆ 남 연 정 - 생명공학정책연구센터 연구원
 - 전화 : 042-879-8365
 - e-mail : yjnam@kribb.re.kr

 - ◆ 김 무 응 - 생명공학정책연구센터 책임연구원
 - 전화 : 042-879-8375
 - e-mail : moongkim@kribb.re.kr

 - ◆ 김 흥 열 - 생명공학정책연구센터 센터장
 - 전화 : 042-879-8370
 - e-mail : yeolhee@kribb.re.kr
-

2020 바이오 미래유망기술 발굴

- Platform, Red, Green, White Bio로 살펴본 10대 미래유망기술 -

2020年 2月 11日 印刷

2020年 2月 11日 發行

著 者 남 연 정, 김 무 응, 김 흥 열
發 行 人 김 장 성/한국생명공학연구원장
發 行 處 생명공학정책연구센터
 대전광역시 유성구 과학로 125
 한국생명공학연구원 14동 3층
 대표전화 : (042) 879-8377

ISBN 978-89-6709-141-5

© 생명공학정책연구센터 2020

非賣品

BioINsay
(BioIN+Essay)

No. 45



305-806 대전광역시 유성구 과학로 125
Tel 042 879 8377 Fax 042 879 8369
www.bioin.or.kr

비매품/무료



ISBN 978-89-6709-141-5
ISBN 978-89-93675-47-4 (세트)