

2022 September | Vol. 8

09



융합연구리뷰

Convergence Research Review

ICT 기술을 활용한 전주기 재난안전관리 기술

이용태(한국전자통신연구원 국방·안전ICT연구단장)

정우석(한국전자통신연구원 재난안전지능화융합센터장)

탄소중립 구현을 위한 바이오피아너리 기술의 방향

이수연(한국에너지기술연구원 책임연구원)

문명훈(한국에너지기술연구원 선임연구원)

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 ICT 기술을 활용한
전주기 재난안전관리 기술
- 49 탄소중립 구현을 위한
바이오리파이너리 기술의 방향
- 89 국가R&D 현황 분석



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2022 September vol.8 no.9

발행일 2022년 9월 13일

발행인 김현우

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4977 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 한빛사회적협동조합



ICT 기술을 활용한 전주기 재난안전관리 기술

기후변화와 급속한 사회 환경 변화로 대규모의 예측 불가능한 재난사고 발생이 빈번해짐에 따라 반복적으로 발생하는 기존의 재난뿐만 아니라 신종재난 등에 대해 효율적으로 대처할 수 있는 방법 마련이 시급하다.

여름철 집중호우로 인한 상습침수 지역인 서울 서초구는 2023년 '디지털 트윈 기반 시설안전 예·경보 시스템'을 도입할 예정이다. 이는 폭우 등 재난위험을 사전에 감지하여 대응하기 위한 것으로 이 시스템의 주된 특징은 노후 및 위험시설에 부착한 IoT(사물인터넷) 계측 센서를 통해 수집된 균열, 기울기, 진동, 습도, 침수 관련 데이터들을 3차원 모델로 구현하여 시뮬레이션하면 위험을 예측할 수 있다는 점이다. 또한, 위험 요소가 감지될 경우, 구에서 운영하는 '스마트시티 통합 플랫폼'과 연계하여 소방서, 경찰서 등 유관기관들과 해당 시설 안전관리 담당자 및 주민 등에게 즉시 예·경보한다는 점이다. 이처럼 재난안전 플랫폼은 재난예측·감지·대응 등 다양한 재난관리 단계에서 활용되고 있으며 관련 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다.

본 호 1부에서는 시나리오 기반 대형복합재난 확산예측 플랫폼, 스마트 아이 플랫폼, 멀티미디어 재난정보전달 플랫폼, 디지털 트윈 기반 재난관리 플랫폼 등을 소개한다. 첨단 ICT 기술을 기반으로 하는 재난안전 플랫폼 기술 개발을 통해 다양한 재난에 신속하고 체계적으로 대응할 수 있는 재난대응 기반을 마련할 수 있기를 기대해 본다.

탄소중립 구현을 위한 바이오피나이네리 기술의 방향

지구 온난화에 따른 기상이변이 빈번해지면서 세계 각국은 온실가스 감축을 통해 지구의 평균온도 상승을 제한하려는 노력을 기울이고 있다. 지난 6월 환경부 보도자료에 따르면, 우리나라 2021년 온실가스 잠정배출량은 6억 7,960만 톤으로 나타났다. 지난 2019년 10월 정부는 지속가능한 저탄소 녹색사회 구현을 목표로 2030년까지 온실가스 배출량을 5억 3,600만 톤으로 감축한다는 내용의 '제2차 기후변화대응 기본계획'을 발표했다. 이 기본계획에는 7대 부문(전환·건물·수송·폐기물·공공·농축산·산림)과 함께 산업 부문의 온실가스를 감축한다는 내용이 포함되어 있다. 저탄소·탈탄소 산업구조로의 전환과 연료와 화학제품의 저탄소 공정 기술개발이 필요한 때이다. 이에 따라, 바이오피나이네리(Biorefinery) 기술이 주목받고 있다.

바이오피나이네리란 오일리파이네리(Oil refinery, 석유정제) 대신 식물 자원인 바이오매스를 원료로 하여 화학 제품 또는 바이오 연료 등을 생산하는 기술이다. 식용 작물의 바이오매스, 목질계 바이오매스, 미세조류 바이오매스 등을 활용한 바이오피나이네리 기술들뿐만 아니라 최근에는 지형적 특성으로 바이오매스 확보에 불리한 우리나라의 실정에 맞는 새로운 개념의 바이오피나이네리 기술개발이 이루어지고 있다. 본 호 2부에서는 e-바이오피나이네리와 가스리파이네리를 소개한다.



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 September vol.8 no.9



01

ICT 기술을 활용한 전주기 재난안전관리 기술

이용태(한국전자통신연구원 국방·안전ICT연구단장)
정우석(한국전자통신연구원 재난안전지능화융합센터장)

I 서론

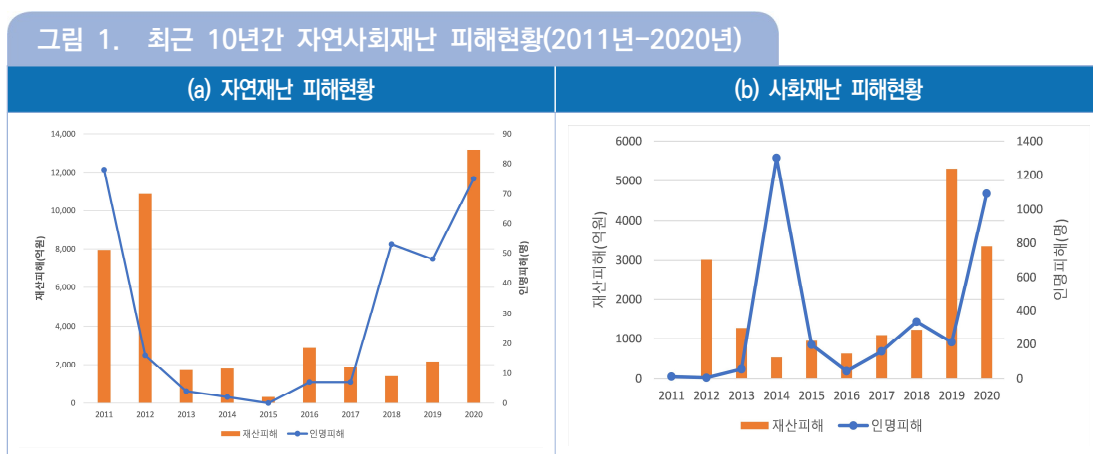
최근 수십 년 동안 산업화가 진행됨에 따라 경제, 사회, 환경 등 복합적 요인에 의해 기후환경 변화 및 도심화 현상이 가속화되고 있다. 이러한 현상으로 오늘날의 재난은 산업화 이전의 재난에 의한 피해와는 비교할 수 없을 정도로 심각한 인명 피해와 경제적 피해를 유발한다. 국내외에서는 재난 피해를 저감하기 위하여 빅데이터, 인공지능(AI, Artificial Intelligence), 사물인터넷(IoT, Internet of Things) 등 다양한 ICT 기술을 활용하여 재난 발생 이전 단계에서부터 재난관리를 위한 기술 개발에 박차를 가하고 있다. 융합연구리뷰에서는 국내외에서 진행되고 있는 ICT 기반의 재난안전관리 기술 동향을 살펴보고 대표적인 재난안전관리 연구에 대해 소개한다.

1. 재난 정의 및 피해 현황

재난이란 국민의 생명·신체·재산과 국가에 피해를 주거나 줄 수 있는 것으로 자연재난과 사회재난으로 분류하고 있다. 자연재난이란 태풍, 홍수, 호우, 강풍, 풍랑, 해일, 대설, 낙뢰, 가뭄, 지진, 황사, 조류 대발생, 조수, 화산활동, 그 밖에 이에 준하는 자연현상으로 인하여 발생하는 재해를 의미한다. 사회재난이란 화재·붕괴·폭발·교통사고(항공사고 및 해상사고 포함)·화생방 사고·환경 오염 사고 등으로 인하여 발생하는 대통령령으로 정하는 규모 이상의 피해와 에너지·통신·교통·금융·의료·수도 등 국가기반체계의 마비, 「감염병의 예방 및 관리에 관한 법률」에 따른 감염병 또는 「가축전염병예방법」에 따른 가축전염병의 확산 등으로 인한 피해를 의미한다. 재난관리는 재난의 예방대비대응 및 복구를 위하여 하는 모든 활동을 의미한다. 이를 위해 국가와 지방자치단체는 재난이나 그 밖의 각종 사고로부터 국민의 생명·신체 및 재산을 보호할 책무를 지고, 재난이나 그 밖의 각종 사고를 예방하고 피해를 줄이기 위하여 노력하여야 하며, 발생한 피해를 신속히 대응 및 복구하기 위한 계획을 수립·시행하여야 한다(재난 및 안전관리법, 2022.04).

국내에서 발생하는 자연재난의 피해는 70% 이상이 태풍, 홍수와 같이 수해에 의한 것으로 태풍이 국내를 직접 거쳐 가는 해에는 피해가 급증하는 추세이다. 역대 최악의 태풍인 루사(2002년)는 이재민 8만 8천명,

사망실종 246명, 재산피해 약 5조 1,479억 원을 초래하였다. 사회재난 피해는 산불, 다중 이용 시설 등을 포함한 화재 등에 의해 주로 발생한다. 자연재난은 인명피해와 재산피해가 유사한 추세로 발생하는 특성이 있으며, 사회재난은 특정한 사건으로 인해 인명피해 또는 재산피해가 집중되는 현상이 두드러진다. 대표적인 사회재난의 사례로는 강원 동해안 산불(2019년)로 사망 2명, 부상 1명인데 반해 재산피해는 약 1,291억이 발생하였다.



* 출처: (좌) 2020 재해연보, (우) 2020 재해연감

1.1. 국내외 재난안전관리 연구 동향

세계 최고의 재난안전기술을 보유하고 있는 미국은 우수한 ICT 인프라를 바탕으로 산·학·연·관이 상호 협력하여 실용적인 기술 개발을 통해 세계 재난안전 기술을 선도하고 있다. 국토안보부(DHS, Department of Homeland Security)와 연방재난관리청(FEMA, Federal Emergency Management Agency)은 911테러(2001년) 및 빈번한 허리케인과 같은 재난상황을 통합적이고 효율적으로 관리하기 위한 표준체계인 국가사고관리 시스템(NIMS, National Incident Management System)을 도입하였다. 연방정부와 각 부처, 주정부는 NIMS 가이드라인을 준수하는 재난관리시스템을 구축하였으며, 정보 관리 및 전달, 시스템의 상호 운용성을 위해 미국국가표준협회(ANSI, American National Standards Institute), 전기전자기술자협회(IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers), e비즈니스 국제표준 관련 비영리 컨소시엄(OASIS, Organization for the Advancement of Structured Information Standards)에 정의된 사고·자원관리 및 표현 표준을 도입하였다. 미국 연방정부는 주정부, 지방자치단체 간의 상호운용성을 확보하고 재난관리와

공공안전을 위해 재난안전통신망을 구축하였다. 학계 및 연구계에서는 재난재해 상황을 사전에 예측하기 위한 신뢰성 있는 모델 및 재난재해 시뮬레이터를 개발하였다. 해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 대양환경연구소(PMEL, Pacific Marine Environmental Laboratory)는 보다 빠르고 신뢰성 있는 지진해일 경보를 위한 모델(MOST, Method of Splitting Tsunami)을 개발하였으며, 지진해일 방재대책은 개념정립 단계를 거쳐 기술의 안정화 단계에 도달한 것으로 판단된다.

표 1. 미국 기관별 ICT 융합형 재난재해 관련 개발 기술

구분	개발 기술
연방재난관리청(FEMA, Federal Emergency Management Agency), 연방통신위원회(FCC, Federal Communications Commission)	- 긴급 상황 발생 시 휴대폰의 위치정보를 이용하여 해당 지역의 사람들에게만 경고 메시지를 전송하는 대국민 경보 시스템인 PLAN(Personal Localized Alerting Network) 개발
지질조사국(USGS, United States Geological Survey)	- 트위터 메시지에서 '지진' 낱말과 메시지의 위치정보를 활용하여 지진 발생을 실시간으로 알려주는 트위터지진감지기(TED, Twitter Earthquake Detection) 시스템 개발
해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)	- 쓰나미 관측을 위한 GPS, 입력센서, 통신모듈 등이 탑재된 DART 센서 모듈을 태평양과 대서양에 설치하여 쓰나미 관측에 활용
태평양재난재해센터(PDC, Pacific Disaster Center)	- 전 세계의 지진, 쓰나미, 태풍, 홍수, 화산 등과 같은 자연재해의 정보를 온라인에서 실시간으로 제공

* 출처: FCC Plan, USGS TED

일본은 지리적 특성상 잦은 지진을 극복하기 위한 재난재해 연구개발이 발달하였으며, 동일본 원전사고 이후 극한 상황에서의 대응을 위한 기술개발 및 세계 최고 수준의 지진 예·관측 및 대응 시스템인 지진방재정보시스템을 구축하였다. 일본 정부에서는 4차 산업혁명과 연계하여 인공지능 기술 및 빅데이터 분석을 통하여 홍수해석·수리·수문·생태 등의 복합현상 해석을 위한 CommonMP를 개발하여 재난 데이터 통합 플랫폼으로 활용하고 있다. NTT도코모 선진기술연구소는 빅데이터를 활용한 모바일 기반의 지진 및 재난대비 시뮬레이션 기술을 개발하였다. 도호쿠대학은 건물과 구조물 잔해의 좁은 틈에서 인명 탐색을 위한 내시경 형태의 ActiveScope 카메라와 울통불통한 잔해 위에서 이동이 가능한 Kenaf 로봇을 개발하였다. 또한 교토대학은 장애인 극복이 용이한 뱀 형태의 로봇 KOHGA와 반자동 플리퍼가 적용된 무한궤도 형태의 KOHGA 2와 3 로봇을 개발하였다. 미쓰비시중공업은 재해지의 오염물을 제거하고 제염 작업 및 통로 확보를 위한 장애물 절단 작업이 가능한 마이스터(MHI-MEISTeR) 로봇을 개발하여 활용하고 있다.

유럽연합은 공동연구프로그램(FP, Framework Program) 등을 통한 다국적 협력을 적극 이용하여 다양한

재난안전기술을 연구하고 있다. Horizon 2020을 바탕으로 자연·사회재난대응 기술연구(DARWIN, RASOR 프로젝트), 재난구조·구난로봇 기술연구(Centauro, TRADR, NiIFTi 프로젝트), 실종자 수색·구조연구기술(ICARUS, Sherpa 프로젝트) 등을 추진하고 있거나 완료하였다.

국내에서는 국가 중대재난에 대응할 수 있는 전략 및 계획을 수립하고 ICT 기술을 활용한 과학적 상황관리와 재난 대응역량 제고를 위한 시스템을 구축하였다. 국민이 공감하는 맞춤형 안전서비스 제공을 위한 기술개발, 빅데이터·로봇·무인기 등을 활용한 스마트 재난안전시스템 개발 등을 진행하였다. 또한 국내 재난이 복합화되고 대형화됨에 따라 기존의 재난안전관리 주무부처 중심에서 관계 부처 협력을 통한 재난안전관리분야 사업이 진행되고 있다. 국내에서 추진된 연구개발 사례에 대해서는 2장 이후에 설명한다.

1.2. 국외 재난안전관리 정책 동향

국외에서는 재난안전 정보수집 및 전달서비스 강화를 통해 신속한 재난 대응을 위한 계획을 수립하였다. 미국 연방재난관리청(FEMA)은 ‘연방재난관리청 전략계획(FEMA Strategic Plan)’을 수립하였으며, 일본은 ‘2016년 방재백서’를 통하여 미래 방재대책으로 재난 발생 시 인공위성, 무인항공기 등을 활용한 정보 수집 및 전달계획을 수립하였다. 중장기 재난안전 과학기술개발을 위해 미국에서는 백악관 산하 국가과학기술위원회에서 초대형 재난대응, 재난상황 행동분석 및 현장장비 운영 등을 포함하는 ‘국가재난과학기술 10개년 전략계획(2008-2017)’을 수립하였다. 일본에서는 초 스마트 사회 실현을 위하여 IoT, 빅데이터, 인공지능 등 첨단 과학기술을 활용한 재난예측 및 대응 기술개발 계획을 수립하였다.

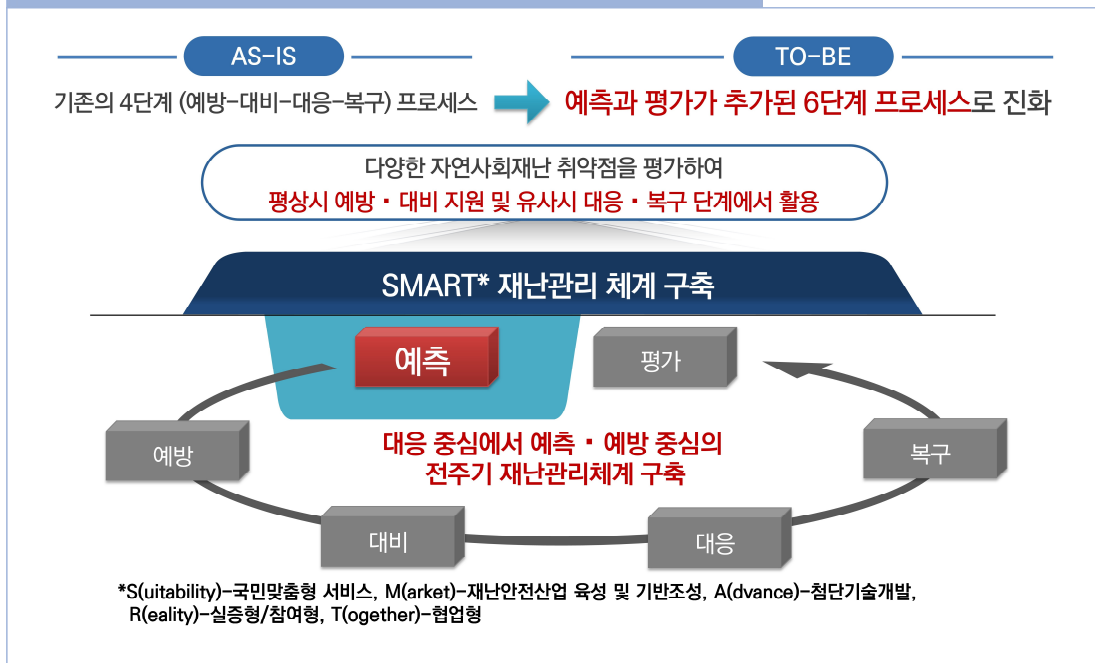
또한 부처 간 협업형 연구개발 추진 및 파트너십 강화를 위하여 미국에서는 여러 연방부처와 독립기관에 의해 분권화되어 다원화된 과학기술정책을 추진하고 있으며 기후변화, 제조업 혁신 등 사회문제 해결을 위한 과제는 협업과제의 형태로 구성·추진하고 있다. 일본은 ‘전략적 혁신 진흥 프로그램’을 통하여 부처 간 융합 과제를 선정하여 기초-실용화 및 사업화 연계 연구개발을 추진하고 있다. 이러한 부처 협력 연구개발 사업은 최근 국내에서 활발하게 진행되고 있다.

국내에서는 과학기술심의위원회를 통하여 ‘제3차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획’을 수립하였다. 본 계획에는 사회문제 현안을 해결하기 위하여 빅데이터, 인공지능, IoT, 지능형 로봇, 무인기 등 4차 산업혁명 기술을 기반으로 재난으로부터 국민들을 보호하기 위한 계획을 담고 있다. 특히 재난안전 사고환경에 선제적으로 대응하기 위해 기존 대응 중심의 재난 관리 체계에서 예측과 예방 중심의 전주기 재난관리 체계를 도입하고 관련 시스템 개발 관련 계획을 수립하였다. 전주기 재난관리 체계는 다양한 자연·사회재난 취약점을 평가,

가상의 재난발생 상황을 설정하여 다양한 모의를 통해 예측하고 재난 취약점을 찾아 사전 예방함으로써 재난 피해를 저감하기 위한 것이다. 또한 평가 단계를 추가함으로써 재난관리 업무수행 중에 발생한 문제점을 찾아 향후 유사재난이 발생하였을 경우 동일한 오류를 최소화하기 위한 것이다.

현재 국내에서는 대응 중심의 연구 개발뿐 아니라, 빅데이터, 인공지능, 디지털 트윈(Digital Twin), 무인기 등 다양한 첨단 ICT 기술을 활용하여 예측·예방 중심의 재난관련 기술개발도 활발하게 진행되고 있다.

그림 2. 대응 중심에서 예측·예방 중심의 재난관리 체계 구축



* 출처: 저자 작성

융합연구리뷰에서는 한국전자통신연구원에서 진행된 전주기 재난관리기술에 대해 간략하게 설명한다. 2장에서는 예측 중심의 재난관리를 위한 ‘시나리오 기반 대형복합재난 확산예측 기술’에 대해 설명하며, 3장에서는 무인기 및 영상센서를 활용한 재난현장 정보 수집을 위한 ‘무인기 기반 지능형 재난관리 기술’에 대해 설명한다. 4장에서는 신속한 재난정보전달을 통해 국민 스스로 재난에 대응할 수 있도록 하기 위한 ‘다양한 매체를 활용한 재난정보전달 기술’에 대해 설명하고 5장에서는 최근 ICT 기술 분야에서 핵심 화두로 대두되고 있는 디지털 트윈 기술을 활용한 전주기 재난관리를 위한 ‘디지털 트윈 기반 재난관리 플랫폼 기술’에 대해 설명한다. 마지막으로 6장에서는 ICT 기술을 활용한 향후 재난안전 분야의 연구 방향에 대해 설명한다.

II 시나리오 기반 대형복합재난 확산예측 기술

기후변화, 도심지의 시설물의 복잡화 및 종속성 증가, 인구 과밀화 등 다양한 자연·사회적 환경변화에 따라 재난의 복합화와 대형화가 가속되는 추세이다. 도심화가 진행되기 전, 초기에는 지역적 재난 및 피해가 제한적인 단순재난 형태였다. 이후 급격한 도심화로 시설물들이 상호 복잡하게 연계되어 종속성이 강화됨에 따라 개별 재난이 상호 연계되고 통합되어 대형화되고 복합화되는 형태로 변화하였다. 재난의 대형화·복합화 현상은 지속적으로 가속화되고 있으며 이러한 현상으로 인한 재난이 발생하면 막대한 피해를 유발하기 때문에 재난발생 이전에 예측예방을 통한 피해저감 기술개발이 요구된다.

그림 3. 재난 복합화 및 대형화 가속

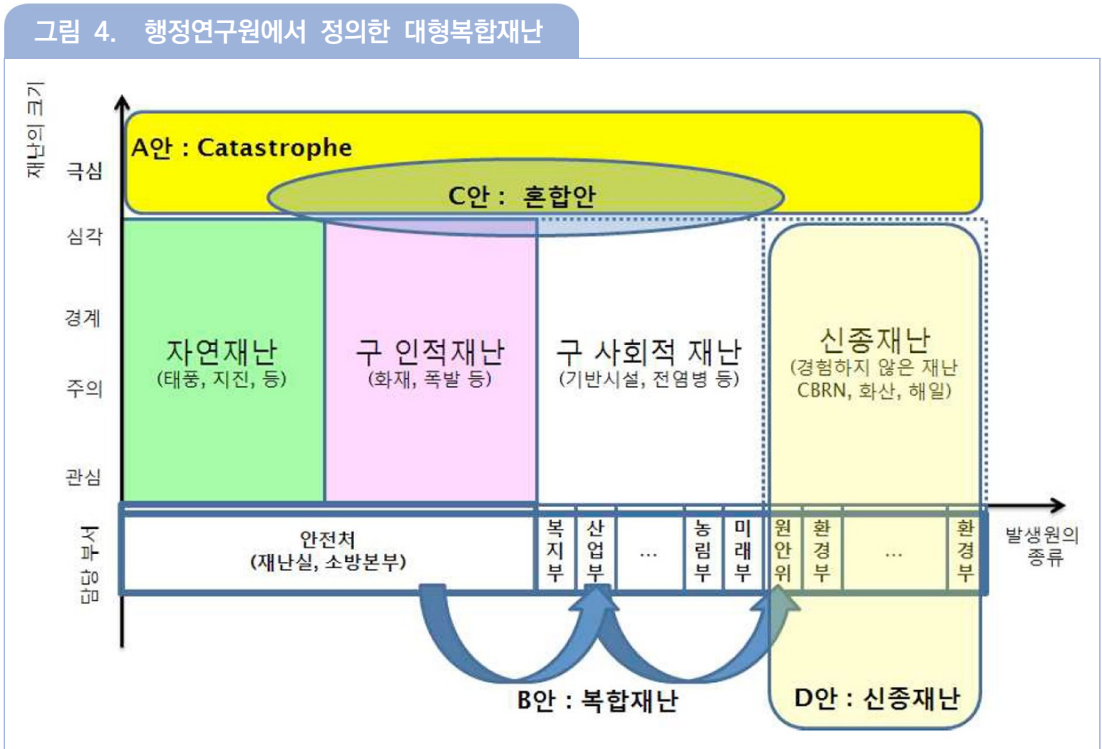


* 출처: 저자 작성

1. 대형복합재난 정의 및 동향

일본 최악의 재난으로 불리우는 동일본 지진은 2011년 3월 11일 일본 산리쿠 연안 태평양 앞바다에서 발생한 강력한 해저 지진(M_w 9.0)으로, 이후 쓰나미, 여진 등의 발생으로 사회 기반 시설인 원자력 발전소가 폭발하면서 관련 지역이 오염되어 아직도 복구되지 못한 심각한 피해를 유발하였다. 동일본 지진으로 인해 일본의 12개 지역에서 15,897명 사망, 2,534명 실종(2018년 12월 기준)되는 인적 피해가 발생하였으며, 건물 127,290채 붕괴, 272,788채가 반파되는 물질 피해가 발생하였다. 동일본 지진은 전 세계적으로 복합재난관리의 중요성이 강조된 대표적인 사례이다. 국내에서 발생한 대형복합재난으로는 태풍 매미, 우면산 산사태, 청주 집중 호우 등의 사례가 있다.

오늘날 국내외에서 발생하는 대부분의 재난은 복합재난의 범주에 속할 수 있다. 이중 복수의 정부부처가 협력하여 대응하는 재난을 대형복합재난으로 분류할 수 있다. 일본에서는 방재기본계획에서 “동시 또는 순차적으로 두 개 이상의 재해가 발생하고 그 영향이 복합화함으로써 피해가 심각해지면서 재해 응급 대응이 어려운 사건”으로 정의하고 있다. 또한 미국에서는 국가재난대응체계(NRF, National Response Framework)의 재앙부속서에서는 “일상적인 범위를 벗어나 대규모 사상자, 손실, 또는 기반시설·환경·경제·국가적 위기, 정부 기능에 영향을 끼치는 붕괴를 야기하는 재난”으로 정의하고 있다. 국내에서는 “동시 또는 순차적으로 두 개 이상의 자연/사회재난이 발생하고 그 영향이 복합화되어 인명, 재산, 기반시설 마비 등 피해가 극심해서 국가적 위협이 되어 범부처의 통합적 대응이 필요한 재난”을 대형복합재난으로 정의하고 있다. 대형복합재난 법적기반 구축 연구(행정연구원, 2015)에서는 “재난의 종류, 발생장소, 피해자들의 주무부처가 다르기 때문에 기관 간 긴밀한 협력이 필요한 경우”로 정의하고 있으며, 아래와 같이 4가지 세부정의를 하였다.



* 출처: 행정연구원(2015)

표 2. 재난 피해크기, 복합성, 신규성 및 특수성 중심의 복합재난 세부정의

구분	특징
[A안] 피해크기 중심	인명, 재산, 기반시설 마비 등 피해가 극심하여 국가적 위협이 되는 재난
[B안] 원인+피해 복합성 중심	복수의 현상이 거의 동시 또는 시간을 두고 발생하여 일어나는 재난
[C안] 크기+복합성 혼합안	인명 재산 등 피해가 극심하여 국가적 위협이 되며, 다부처의 중앙사고 수습본부가 운영되어 범부처의 통합적 대응이 필요한 재난
[D안] 신규성 및 특수성	새로운 유형의 재난으로 기존에 경험하지 못했거나, 현 재난대응체계로는 대응이 어려운 재난

* 출처: 행정연구원(2015)

대형 복합재난관리 분야는 미국과 유럽연합에서 적극적으로 진행하고 있다. 미국 연방재난관리청(FEMA)에서는 지진, 허리케인, 홍수 등에 대한 재해위험 평가 소프트웨어를 개발하여 재난 발생 이전에 재난 영향평가, 응급 대응, 복구계획 수립 및 피해손실 규모 추정, 피해경감 대책수립 등의 자료를 공급하는 지리 정보 시스템(GIS, Geographical Information System) 기반의 자연재난 통합관리 시스템인 HAZUS-MH를 구축하여 운영하고

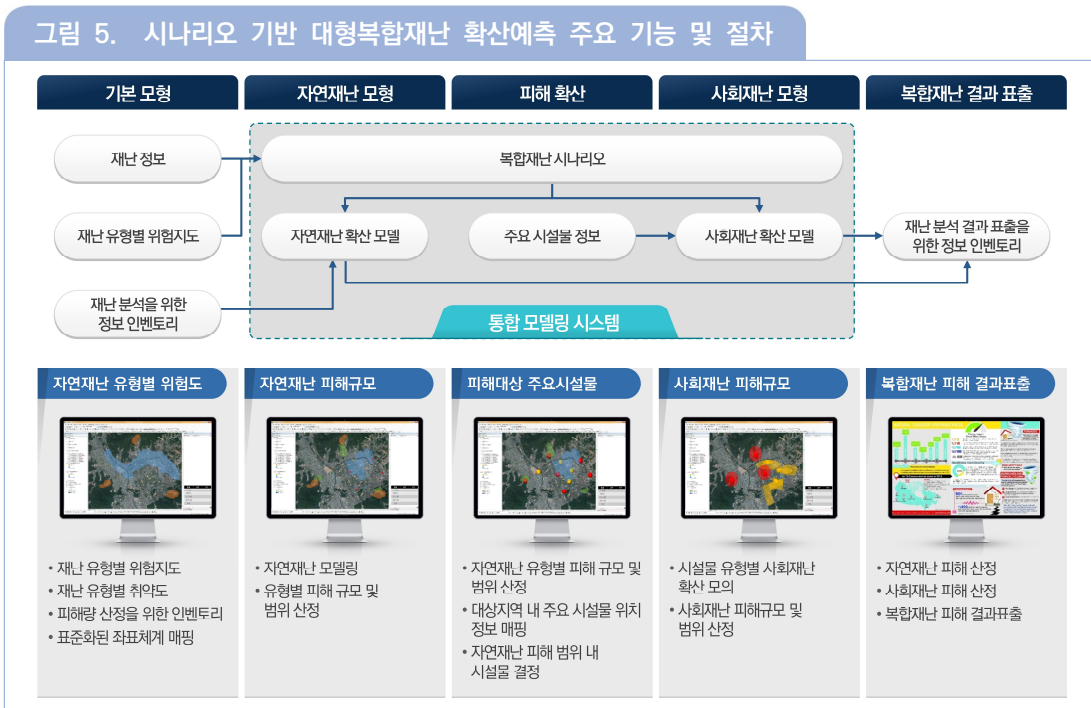
있다. 미국 지질조사국(USGS)은 지진, 쓰나미, 산불, 산사태, 홍수 및 해안침식을 고려하여 선사시대 지질변화 및 현대 홍수기록, 기후변화 등의 자료를 활용하여 시나리오를 생성하고 극한재난 발생 시 발생 가능한 자연적, 사회적 피해를 예측하고 복구계획 수립 및 피해비용 산정을 위한 ARkStorm 프로젝트를 수행하였다. 유럽연합에서는 MATRIX(New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Methods for Europe) 프로젝트를 통해 유럽 상황에 적합한 복합재난 위험평가 및 저감도구를 개발하였으며, RASOR(Rapid Analysis and Spatialisation Of Risk) 프로젝트를 통하여 재난관리 전주기를 지원하는 복합재난 위험분석 수행 플랫폼을 개발하였다. 이후 HEIMDALL(Multi-Hazard Cooperative Management Tool for Data Exchange, Response Planning and Scenario Building) 프로젝트를 통하여 효과적인 재난 대응 계획 수립 및 산불, 홍수, 집중 호우, 산사태 중심의 다원적인 실제 시나리오 설계 가능한 통합 도구를 제공하고 위기 상황 극복을 위한 대응태세 개선 시스템을 개발하였다.

국내에서는 다수의 자연재난과 사회재난의 연계성을 사례 기반으로 분석하여 시나리오를 생성하고 수치, 통계, 물리 모델링을 활용하여 대형복합재난 확산예측을 위한 시스템을 개발하는 연구를 수행하였다.

2. 시나리오 기반 대형복합재난 확산예측 기술

국내에서는 대형복합재난에 의한 피해저감을 위하여 시나리오 기반 대형복합재난 확산예측 플랫폼(이후 복합재난 플랫폼이라고 함)을 개발하였다. 복합재난 플랫폼은 아래와 같은 5가지 대표적인 기능으로 구성된다.

- 1) 시나리오 자동생성: 국내외에서 발생한 자연재난에 의한 사회재난 사례를 발굴하여 재난발생에 대한 상호연계성을 분석, 한 개 재난으로부터 발생 가능한 시나리오 자동 생성
- 2) 자연재난 확산예측: 재난 및 안전관리 기본법에 정의된 12개 자연재난에 대해 수치, 물리, 통계 자연재난 모델을 활용하여 확산예측 결과 도출
- 3) 사회재난 확산예측: 재난 및 안전관리 기본법에 정의된 8개 사회재난에 대해 시스템 다이내믹 방법론에 의해 확산예측 결과 도출
- 4) 통합 모델링 및 결과 표출: 시나리오가 자동생성된 자연·사회재난 확산예측 결과를 분석하여 복합재난 확산예측 범위에 대한 결과를 도출하고 관련 정보를 지리 정보 시스템(GIS, Geographic Information System) 지도상에 2D/3D로 표출



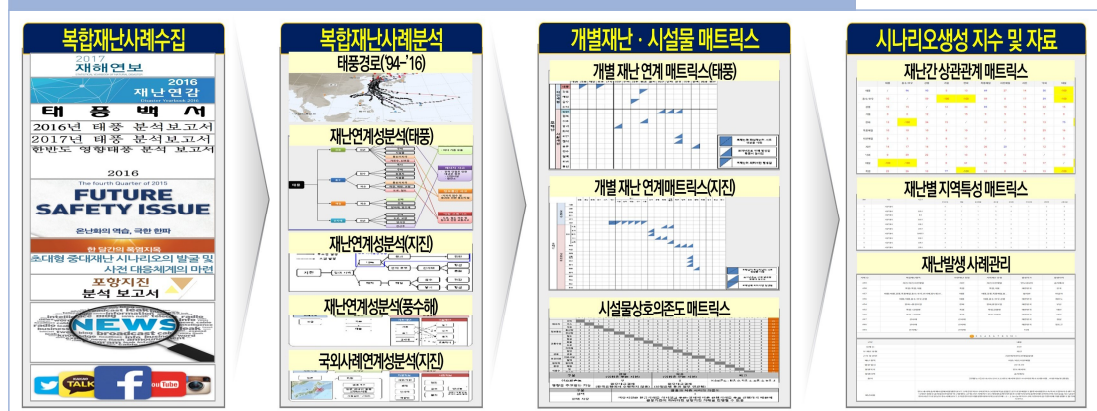
* 출처: 저자 작성

2.1. 시나리오 자동생성

시나리오는 재난 확산예측을 위해 과거 이력, 지역 특성 등을 반영하여 자연·사회재난의 상호연관성을 정립한 재난 확산 연계의 흐름을 표현하는 기법으로 정의한다. 재난 시나리오를 자동생성하기 위한 거시적 환경분석 기법인 STEEP(Social, Technology, Economy, Ecology, Politics) 분석은 사회, 기술, 경제, 환경, 자원 및 정치적 관점에서 전문가 질의를 통해 초대형 중대재난에 대한 의견을 수렴하는 방법이다. 재난관리를 위해서는 자연·사회현상이 복잡하게 연계되어 수치해석만으로 관련 문제를 해결하기에 어려움이 있다. 이를 위해 델파이 기법을 활용하여 전문가 자문을 통해 초대형 중대재난 개념에 대한 전문가 의견을 수렴하고 초대형 중대재난으로 판단할 수 있는 구체적 기준 단위 및 수치에 대해 분석하였다. 과거 재난 사례분석 기법을 통해 실제 발생한 과거의 대형복합재난 사례들을 분석하고 개별 재난간의 연계 강도를 분석하고 정형화하였다. 이를 위해 재해연보, 재난연감, 태풍백서 등 재난관련 보고서뿐 아니라 SNS, 뉴스, 영상 등 재난 빅데이터를 분석하고 수치화하여 국내 환경에 적합한 재난 연계성 매트릭스(matrix)를 생성하였다.

재난 발생 시나리오를 위해서는 공간적인 특성도 함께 고려해야 한다. 예를 들면 집중 호우로 인한 하천 범람을 위해서는 재난이 발생하는 공간에 하천이라는 공간적 객체가 존재해야 한다. 즉, 시나리오 자동생성을 위해서는 재난 간 연계지수 뿐 아니라 지역 특성을 함께 고려해야 한다. 이에 따라, 지역 특성을 해당 거주지역의 인구 수, 연령분포, 하천, 저수지, 산악지역 등 자연 재난 유발요소와 농축산 시설, 교통시설, 발전소 등 사회 재난 유발요소 등 약 76종의 인벤토리(inventory, 목록)로 구축하고 분석하여 공간적 위험요소를 수치화하였다. 공간적인 위험요소는 행정동 코드 기준으로 시군구 단위로 분류하고 1-5등급으로 분류하였다. 이러한 재난 간 연계성 지수와 지역특성 지수를 고려하여 2단계에 걸쳐 시나리오를 자동생성하게 된다. 1단계에서는 최초의 재난으로부터 연계지수 기반으로 임계치를 초과하는 파생 재난들이 선정된다. 2단계에서는 공간적 위험요소를 고려하여 관련 없는 파생재난을 제거하는 과정을 거쳐 최종 재난 시나리오를 생성하게 된다.

그림 6. 복합재난 시나리오 자동생성을 위한 재난 연계지수 산정 절차



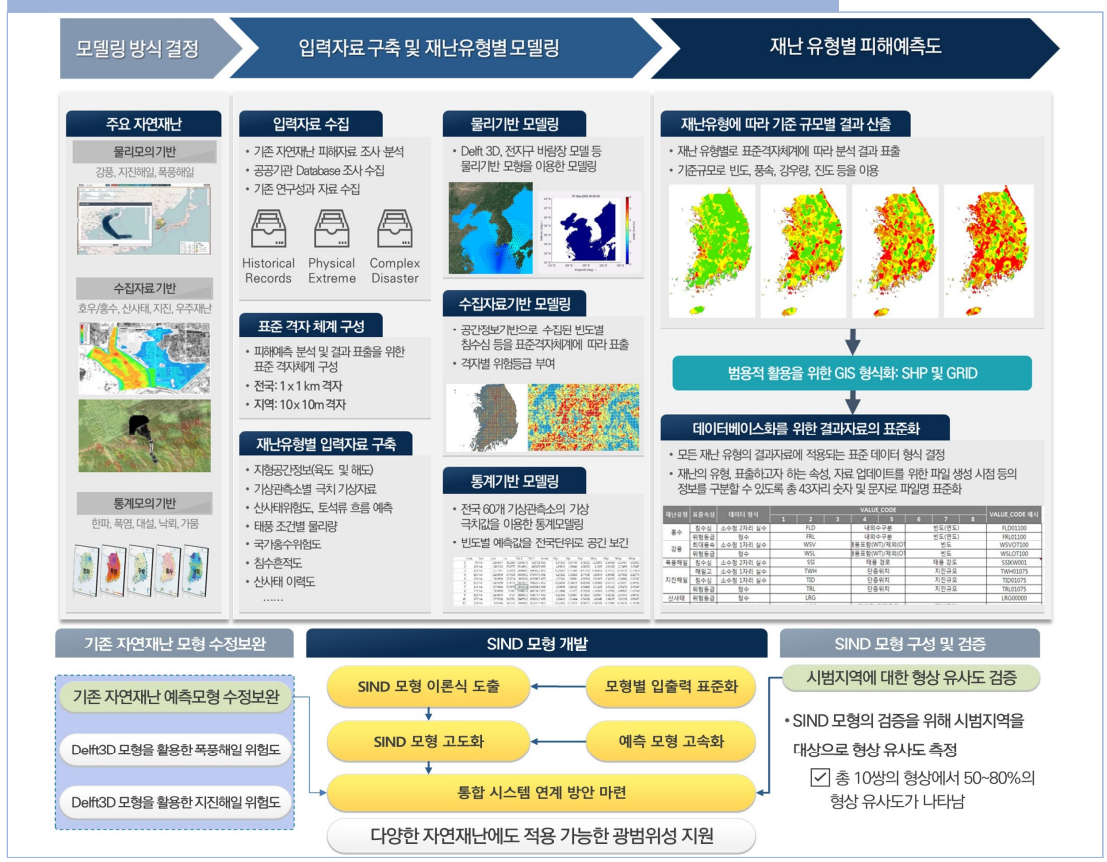
* 출처: 저자 작성

2.2. 자연재난 확산예측 기술

복합재난 플랫폼에서는 격자 기반으로 자연재난 확산예측 모델링을 위한 표준격자 체계를 수립한다. 표준 격자는 자연재난 피해예측 분석 및 결과를 표출하기 위해 활용되며, 전국 단위는 1km × 1km 격자를 사용하고, 지역은 10m × 10m 단위의 격자체계를 수립하고 활용한다. 자연재난 확산예측을 위해서는 지형공간정보, 기상 관측소별 기상자료, 산사태 위험도, 침수 흔적도 등 자연재난과 직접 연관이 있는 자료를 입력자료로 구축한다. 이후 구축된 자료를 활용하여 개별 재난 단위로 확산예측 과정을 수행하게 된다. 자연재난 확산예측 모델링은 개별재난 단위로 물리 기반 모델링, 수집자료 기반 모델링, 통계 기반 모델링 가운데 최적화된 방법을

활용한다. 개별 자연재난 모델링은 짧게는 수 시간에서 길게는 일주일 이상의 기간이 소요되어 긴급한 재난 대응을 위해서는 결과를 활용하기에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 복잡재난 플랫폼은 재난 발생 가능성에 따라 다양한 조건을 사전에 연산한 다음, 데이터베이스(DB, Database)화 하여 재난이 발생할 경우 즉각적으로 활용할 수 있도록 구축하였다. 또한 DB에 없는 조건에 대해서는 단순 보간법을 활용하여 계산하는 것이 일반적이나 정확성이 떨어지는 문제점이 있다. 복잡재난 플랫폼은 이러한 한계점을 극복하기 위해 과학적 보간법인 SIND(Scientific Interpolation for Natural Disaster) 모델을 개발하여 탑재하였다. SIND 방법은 자연재난 확산예측에 사용되는 수치의 각 항 값에 대한 가중치를 조정하여 기존 확산·예측된 결과와 유사성을 가지는 결과를 도출하기 위한 방법이다. SIND 알고리즘과 지능화 기술과 결합하여 연구가 진행될 경우 고정밀 결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

그림 7. 자연재난 모델링 절차 및 과학적 보간법(SIND) 모델링 절차

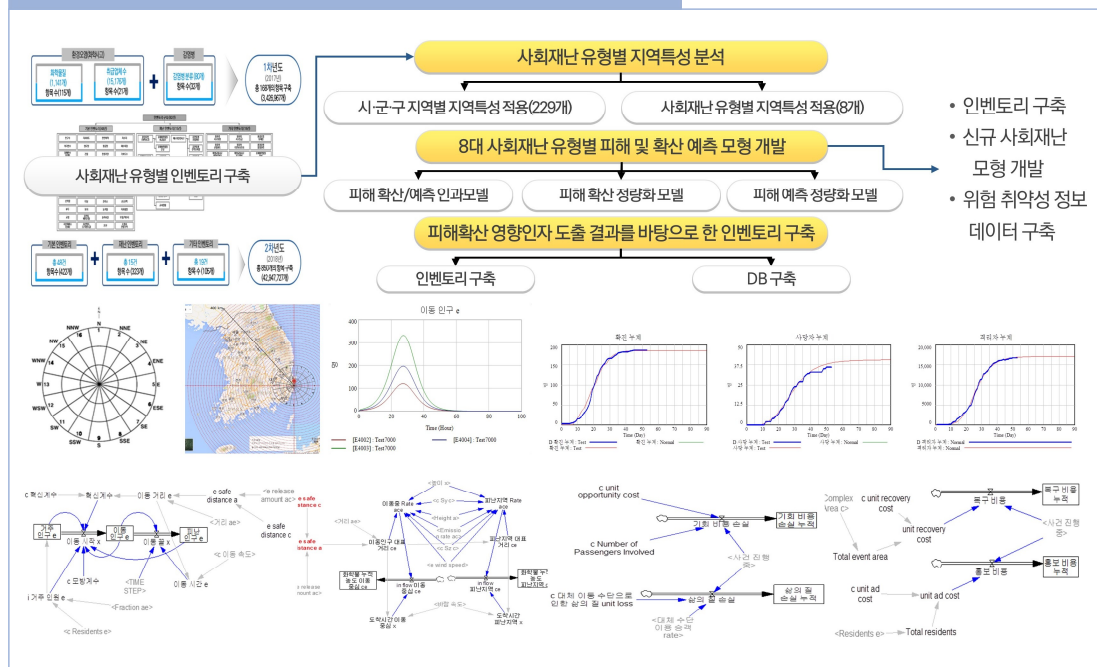


* 출처: 저자 작성

2.3. 사회재난 확산예측 기술

복합재난 플랫폼은 환경오염(화학사고), 감염병, 원자력 안전사고, 가축 질병 등 총 8개 사회재난에 대한 확산예측을 수행한다. 사회재난 확산예측을 위해 피해확산 영향인자를 정의하고 이를 바탕으로 기본 인벤토리와 재난 인벤토리를 구축한다. 기본 인벤토리는 인구, 건물, 농작물, 하천, 도로, 가축, 대피소 등 사회를 구성하는 기본적인 정보를 포함하고 있으며 재난 인벤토리는 개별 사회재난에 영향을 주는 원인정보로 구축된다. 사회재난 확산예측 모델은 VENSIM이라는 시스템 다이내믹스 도구를 활용하여 개발되었다. VENSIM을 활용한 사회재난 확산예측 모델은 시나리오를 기반으로 다양한 변수를 고려하였으며, 유연성 및 연결성이 강한 특징을 가지고 있다. VENSIM이 적용된 대표적인 사례로는 방사능 누출사고에 따른 인구 대피이동 및 경제적 피해평가를 위한 AtomCARE 시스템이 있다. 사회재난 확산예측 모델은 확산예측 뿐 아니라 간접적인 피해에 대해서도 산출하게 된다. 즉, 원자력 안전사고의 경우 방사능 확산 피해범위 뿐 아니라 경제·환경 관점에서 발생하는 피해를 예측한다.

그림 8. VENSIM을 활용한 사회재난 확산예측 모델링



* 출처: 저자 작성

2.4. 통합모델링 및 가시화

복합재난 플랫폼은 자동생성된 복합재난 시나리오에 의해 자연재난 및 사회재난 모델링 결과에 의해 복합재난 확산예측을 위한 통합모델링 과정을 수행한다. 복합재난 확산예측 유형은 아래와 같이 3가지로 구분한다.

- 1) 유지형: 1차 재난 강도가 일정하게 유지되나, 2차 재난으로 확대되지 않은 재난 유형
- 2) 연속유지형: 1차 재난이 연속형으로 재난의 강도가 지속적으로 상승하지만 2차 재난은 재난 강도가 일정하게 유지되는 재난 유형
- 3) 연속확산형: 1차 재난이 2차 재난을 유발하며, 1차 및 2차 재난 강도가 지속적으로 상승하는 재난 유형

복합재난 플랫폼은 공간을 격자단위로 나누고 해당 격자 단위로 위험도를 연산하게 된다. 단일 재난이 발생한 지역은 유지형으로 구분하며, 재난이 복수개로 중첩되는 지역은 연속 유지형으로 분류하였다. 복합재난 위험도는 1-4단계로 구분하였으며, 유지형의 경우는 위험도 1단계로 분류하고 연속 유지형의 복합재난이 발생한 지역에 대해서는 위험도를 차등하여 계산하여 위험도 2-4단계로 구분한다. 연속 확산형의 경우 시간개념을 고려하여 연산이 이루어져야 하나, 전국 또는 시도 단위를 고려할 경우 계산량이 기하급수적으로 증가하여 복합재난 플랫폼에서는 고려하지 않았다. 이에 대해서는 추후 추가 기술 개발이 요구된다. 복합재난 플랫폼은 통합 모델링을 통해 계산된 격자단위의 위험도를 GIS상에 2차원 또는 3차원으로 표출한다.

III 무인기 기반 지능형 재난관리 기술

국내에서 발생하는 자연재난은 감시범위가 넓고 재난관리자가 현장에 접근하기 어려운 산악, 하천 등 지역에서 초기 자연재난이 발생하는 경우가 많다. 이러한 공간적인 제약을 극복하기 위해서 고정형 IoT 센서를 활용하여 현장정보를 수집하고 분석하는 방법에서 드론 등 무인 이동체를 활용하고 엣지 컴퓨팅 기술을 활용하여 현장정보를 수집·분석하는 방식으로 발전하고 있다. 특히 최근에는 무인기에 영상센서를 부착하여 광범위한 지역을 동시에 감시하고, 수집된 정보를 분석하는 연구가 활발하게 진행될 뿐만 아니라 상용화가 진행되고 있다. 서울시 소방재난본부에 따르면 2016년부터 2021년까지 소방드론은 총 1,680회 활용되었으며, 이중 사고현장 출동에 775회, 훈련 등 기타 활동에 699회, 산악 순찰에 206회 활용되었다.

1. 국내외 무인기를 활용한 재난관리 기술현황

국외에서는 산불, 홍수, 산사태 등 다양한 자연재난 분야에 무인기를 활용한 재난관리 기술개발을 진행하고 있다. 산불과 관련하여 미국 Vanguard社에서는 열 감지 카메라를 장착한 헬리콥터형 무인기를 활용하여 산불 발생 시 소방서에서 무인기를 이동시켜 산불이 발생한 규모를 확인하고 현장상황을 인지하여 산불에 대응한다. 유럽에서는 COMETS 프로젝트를 통해 Vanguard社와 유사하게 무인기에 열화상(IR, InfraRed) 카메라를 장착하여 실시간 산불을 감시하는 연구를 진행하였다. 홍수의 경우, 일본 야마하社에서 RMAX 회전의 무인기에 Nikon D70 카메라를 탑재하여 홍수피해 지역의 범위를 관측하고 피해정도를 분석하였다. 미국에서는 홍수 재난대응을 위해 고정익 Falcon UAV를 이용하여 콜로라도주 홍수지역의 피해범위를 관측하고 각 지원 기관에 정보를 제공하여 효율적인 재난 관리 업무에 사용되었다. Falcon UAV는 기체 크기 2.4m, 무게 5Kg, 30만 화소로 주야간 촬영이 가능한 카메라를 장착하였다. 산사태와 관련해서는 Falcon 고정익 무인기와 Falcon Hover 회전의 무인기에 고해상도 카메라를 장착하여 미국 콜로라도주에서 발생한 산사태 지역의 범위를 촬영한 후 총 750장의 영상을 모자이크하여 피해지역 상세지도를 하루 만에 작성함으로써 피해범위 인지 및 신속한 대응이 가능하였다. 또한 유럽에서는 지름 60cm 회전의 멀티콥터 무인기에 컴팩트 카메라를 장착하여 알프스산 남부 지역의 산사태 발생 지역의 영상을 촬영 후 영상을 분석하고 산사태 발생원인 및 지형의 변동 규모를 확인하는 프로젝트가 진행되었다.

표 3. 재난 유형별 무인기 규격

재난 유형	산불	홍수	산사태		
분류	Shadowhawk	Yamaha RMAX	Quad-router UAV	Falcon Hover	Falcon
기체타입	헬리콥터	헬리콥터	멀티콥터	회전익	고정익
기체크기	0.75m	3.1m (메인로터 길이)	0.6m (지름)	정보 없음	2.4m (날개길이)
엔진종류	-	가솔린 엔진	전기 모터	전기모터	전기모터
기체무게	16kg	93kg	2.1kg	정보 없음	정보 없음
비행시간	45분	3시간 이상	12분	20분	60분
탑재체	Sony FCB EX-980 CCDTV, 20X Zoom FLIR Photon 320, Tau UTAM-32 Thermal Camera	니콘 D70 (무게 600g, 해상도 610만 화소)	광학카메라 (무게 110g, 해상도 800만 화소)	Combined DAY/IR Video Payloads (640x480), High Resolution Mapping Payloads	

* 출처: 저자 작성

국내에서는 2009년부터 무인기를 활용하여 골프장, 토사 붕괴 지역, 토목건설현장 등의 고해상도 촬영을 실시하였다. 현재 재해발생의 우려가 있는 접근이 곤란한 위험지역의 정기적인 모니터링에 이용되고 있다. 집중호우로 인한 산사태가 발생하였을 경우, 피해지역 및 농경지 피해지역 정보를 수집하고 홍수 모니터링 기술과 연계하여 침수발생 지역 및 홍수 피해 규모를 산정하기 위해 무인기를 활용하고 있다. 재난관리를 위해 무인기에 탑재되는 센서를 임무장비라고 하며, 탑재체의 요구조건은 대상 재난 및 무인기의 크기에 따라 상이하다.

표 4. 재난탐지를 위한 임무장비 탑재체 요구조건

재난 유형	요구조건	
	임무장비(센서)	무인기
산불	L-band SAR, 적외선, 전자광학, 초분광	- 적외선, 전자광학, 초분광 : 소형부터 대형까지 초소형을 제외한 무인기에 장착 가능 - SAR : 대형 무인기
화산		
가뭄	L-band SAR, 적외선	
홍수	L-band SAR, 전자광학	- 광학영상 : 소형 및 중형 무인기 장착 가능 - SAR : 대형 무인기
기름유출		
산사태	L-band SAR, 전자광학, 라이더(LiDAR)	- 전자광학 : 소형 및 중형 무인기 장착 가능 - SAR : 대형 무인기
지진		

* 출처: 저자 작성

2. 무인기 기반 지능형 재난관리를 위한 스마트 아이 플랫폼 기술

한국전자통신연구원에서는 2015년부터 약 3년간 무인기를 활용하여 재난관리 및 재난정보전달 서비스를 제공하기 위한 스마트 아이 플랫폼을 개발하였다. 무인기를 활용한 영상기반의 재난관리 기술에 대해 설명한다.

2.1. 스마트 아이 플랫폼 개념

스마트 아이 플랫폼은 무인기에 탑재된 다중 복합센서 데이터의 실시간 처리·분석을 통해 산불, 국지홍수, 산사태 등 국지적 재난의 감지·예측 및 상황대응을 지원하고, 통합경보 시스템과 연동하여 대국민 재난정보전달 서비스를 제공하기 위해 활용된다. 스마트 아이 플랫폼은 선제적 재난 감시·예측 및 재난상황 대응을 위해 아래와 같은 기술을 포함한다.

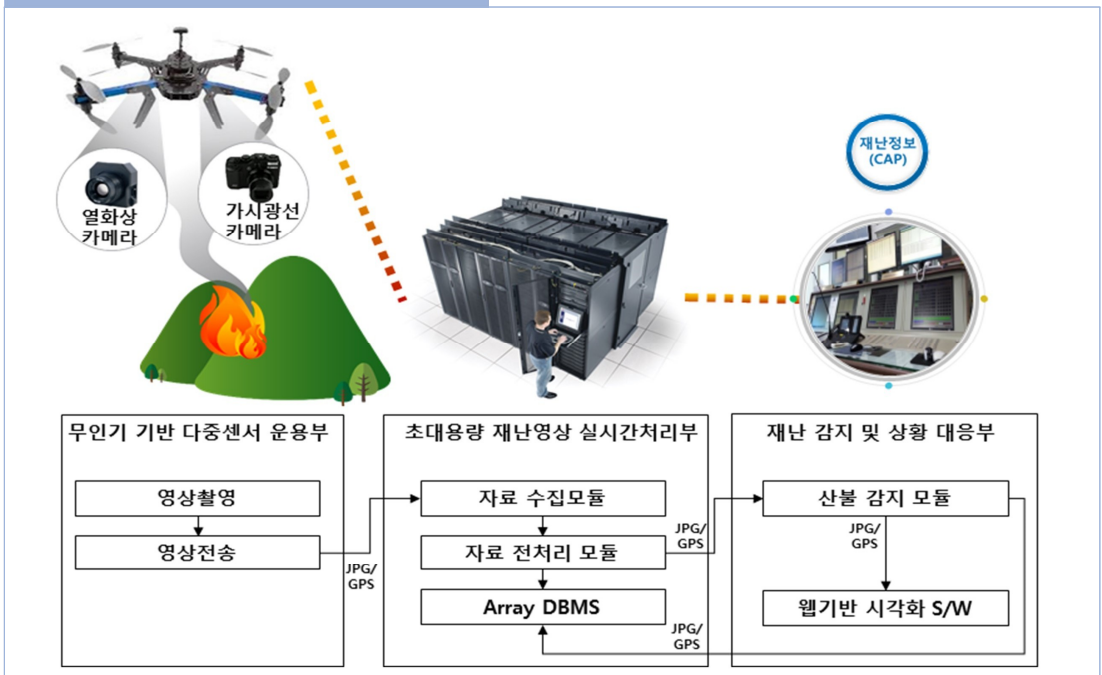
- 무인기 다중 센서 운용 : 무인기에 다중 복합 센서(가시광선 카메라, 열화상 카메라, 라이다, 초분광센서, 풍향/풍속센서 등) 탑재 운영 기술을 적용하여, 인력 접근 불가지역에 대한 실시간 재난 감시 및 대응 지원
- 초대용량 재난 영상 실시간 처리 : 무인기 획득 센서 영상의 보정 및 분석, 재난 발생 감지를 위한 특징점 검출, 기계 학습 기반 영상 분석 및 초대용량 데이터의 고속 실시간 처리를 위한 클라우드 기반 분산 처리 기술
- 재난 예측 및 상황대응 : 재난상황 학습형 예측 알고리즘 적용, 이종 재난 연계 분석을 통한 재난 대응 시나리오 제공 및 공통경보 프로토콜(CAP, Common Alerting Protocol) 기반 통합경보시스템 연동(융합연구 리뷰에서는 기술하지 않음)

그림 9. 재난 감지·예측 및 재난정보전달을 위한 스마트 아이 플랫폼 개념도



* 출처: 저자 작성

그림 10. 스마트 아이 플랫폼 구성도

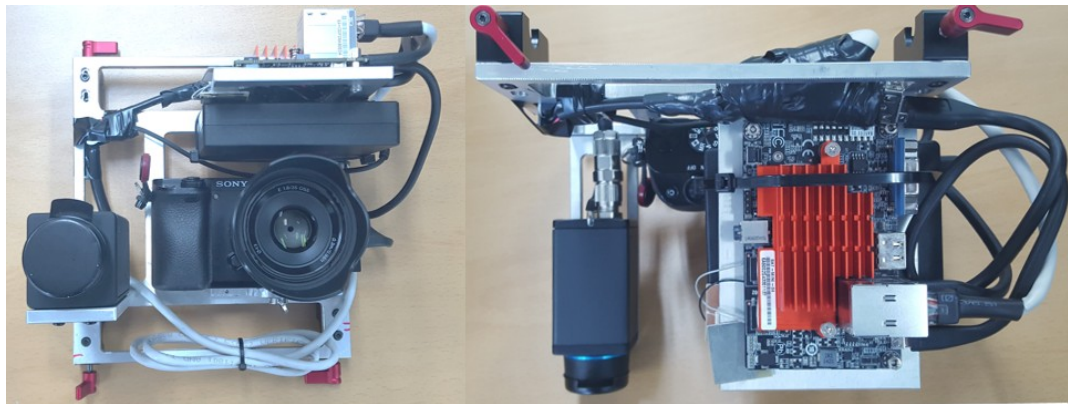


* 출처: 저자 작성

2.2. 무인기 다중 센서 운용 기술

무인기 다중 센서 운용기술은 <그림 11>의 왼쪽과 같이 무인기에 가시광센서와 열화상센서를 탑재하여 산불 영상을 획득하고 전송할 수 있다. <그림 11>에 도시된 것처럼 탑재된 다중 센서들은 동기화된 영상 촬영과 송수신을 위해 미니컴퓨터에 플러그인/아웃이 가능한 시스템으로 개발되었다. 센서별 촬영과 데이터 전송을 하나의 보드에서 수행하여 공간과 전력소모를 최소화함으로써 비행시간을 최대화할 수 있다. 해당 탑재체에서는 일정 시간마다 영상을 동시에 촬영하여 JPEG 형식으로 압축한 뒤 LTE/WIFI 등의 무선통신을 통해 지상의 영상처리센터로 전송을 한다. 여기에 추가로 대응 및 경보를 위해 GPS/풍향/풍속/시간/온습도 등의 메타데이터를 텍스트 파일로 함께 전송한다.

그림 11. 무인기 탑재체 센서 및 하드웨어

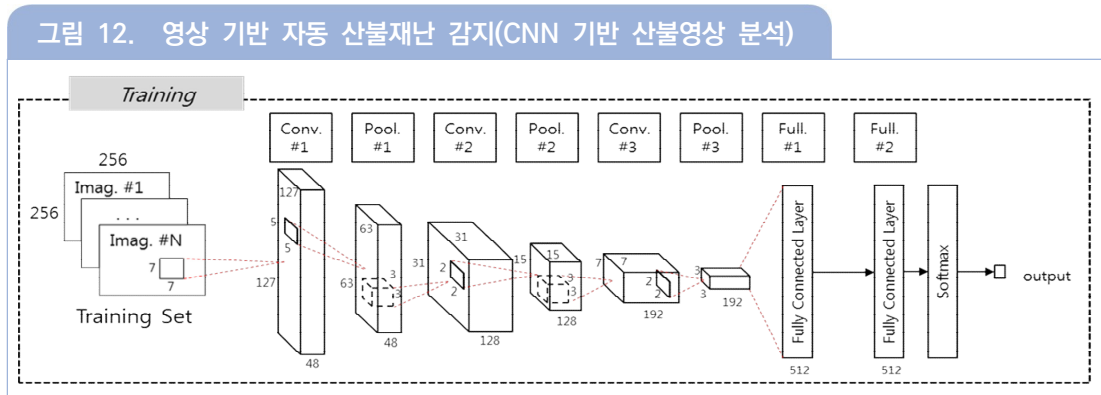


* 출처: 저자 작성

2.3. 초대용량 재난 영상 실시간 처리 기술

무인기에서 획득한 영상은 실시간으로 전처리 모듈과 배열형 데이터베이스 관리 시스템(Array DBMS, Array Database Management System) 모듈로 전달된다. 항공 영상은 지상에서 획득한 영상에 비해 대기 및 기상 환경의 영향을 받아 열화될 가능성이 높다. 전처리 모듈에서는 수집된 영상에 대해 약천후 영상 개선과 저조도 영상개선 과정을 수행한다. 약천후 영상개선은 이미지 리샘플링(resampling, 이미지의 픽셀 치수나 해상도를 변경할 때 이미지 데이터 양을 변경하는 것)을 통해 전역적인 대기의 빛과 빛의 전달량을 추정하여 보정한다. 보정된 영상은 array DBMS를 이용해 저장하여 재난 정보를 효율적으로 관리하고 호출된다.

영상 기반의 자동 산불 재난 감지를 위해서는 재난 영상의 특징점을 검출해야 하는데 산불 재난의 경우 특징점은 화염과 연기로 구분할 수 있다. 특징점을 추출하기 위해 인공지능 기술이 활용되었다. 영상 기반의 자동 산불 재난 감지 알고리즘은 2개 합성곱 계층(convolutional layer), 3개 풀링 계층(pooling layer)와 두 개의 완전연결 층(fully connected layer)으로 구성된다.



* 출처: 저자 작성

딥러닝 기반 영상 분석의 필수 요소인 학습을 위해서는 과거 발생한 산불 재난에 대한 학습영상을 학습 자료로 구축하고 학습영상에 대한 분류 과정과 각 분류에 대한 라벨링(labeling)을 진행한다. <그림 13>은 화재-비화재에 대한 분류 방식과 해당 분류에 대한 라벨을 예시한 것이다. 학습 영상들은 화재 학습을 위해 불-(주간, 야간), 연기의 이미지들로 구성되고, 오버 피팅(over fitting, 과적합) 문제를 피하기 위해 비화재 학습 영상은 봄-가을과 여름, 겨울로 구성된다. 이를 클래스로 구분하면 라벨-2는 화재, 비화재 2개로 구분되고, 라벨-6는 불-(주간, 야간), 연기, 봄-가을, 여름, 겨울의 총 6개의 클래스로 구분하여 학습을 진행하였다. 산불 재난 감지 딥러닝 알고리즘의 학습을 위해 54,928장의 영상 데이터를 사용하였다. 또한 이를 검증하기 위한 영상 데이터는 총 13,732장을 사용하였으며, CPU i7-5903K, RAM 64GB, GPU GeForce GTX Titan X으로 구성된 분석 서버를 구축하였다.

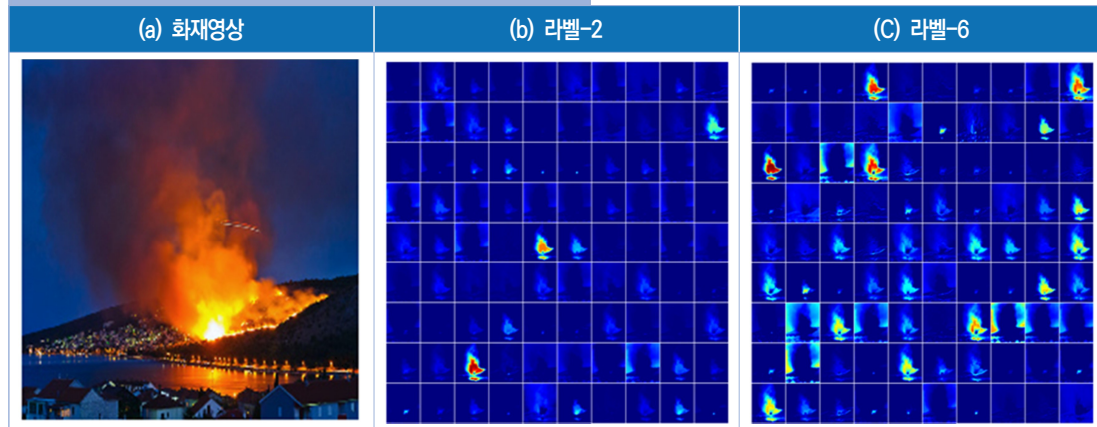
그림 13. 영상 기반 자동 산불재난 감지(학습영상 및 라벨 정의)

Label-2	화재			비화재		
Label-6	불-야간	불-주간	연기	봄-가을	여름	겨울
학습 영상						

* 출처: 저자 작성

〈그림 14〉는 산불 영상의 CL1(Convolutional Layer 1)에 해당하는 라벨-2 및 라벨-6의 필터 출력을 도시한 것이다. 〈그림 14〉의 (b)는 라벨-2에 대한 필터 출력을 나타내며, (c)는 라벨-6에 대한 필터 출력을 나타낸다. 화염에 대해서는 라벨-2의 필터 출력보다 라벨-6에 대한 필터 결과가 우수함을 알 수 있다.

그림 14. 화재 영상에 대한 CL1의 필터 출력



* 출처: 저자 작성

〈표 5〉는 라벨-2와 라벨-6의 학습시간 및 정확도 비교를 나타내며 정확도는 (정확하게 검출된 횟수) / (전체 테스트 영상 수)로 표현할 수 있다. 학습한 결과에 따르면, 라벨-2는 약 5시간 15분이 소요되어 6시간 20분이 소요된 라벨-6에 비해 빠른 학습속도를 가지지만 라벨-2가 81.6%의 정확도를 가진데 반해 라벨-6가 88.54%를 정확도를 보여 더 우수함을 알 수 있다. 라벨-6 학습시간이 더 긴 이유는 라벨-6의 상세한 분류기법이 화재와 비화재에 대하여 더 구체적인 특징을 추출하기 때문이고, 이를 기반으로 더 높은 정확도를 얻을 수 있다.

라벨-2와 라벨-6에 대하여 더 상세한 정확도를 제공하기 위해, Confusion Matrix(혼동행렬)를 계산하였다 (<표 5> 참고). Confusion Matrix는 True Positive, True Negative, False Positive 그리고 False Negative를 포함한다. True Positive는 제안 플랫폼이 화재 영상에 대하여 알람 출력을 갖는다는 것을 의미한다. True Negative는 제안 플랫폼이 비화재 영상에 대하여 비알람 출력을 갖는다는 것을 의미한다. 즉, True Positive와 True Negative는 제안 플랫폼이 입력 영상에 대하여 올바른 출력을 갖는 것을 의미한다. 이와 반대로 False Positive와 False Negative는 제안 플랫폼이 입력 영상에 대하여 잘못된 출력을 갖는 것을 의미한다. <표 5>에 도시된 바와 같이, 라벨-6이 라벨-2보다 True Positive는 12.00%, True Negative는 3.40% 더 높은 것을 알 수 있다. 해당 결과를 통해, 라벨-6의 True Positive가 라벨-2에 비해 산불 감지에 높은 성능개선 효과를 얻을 수 있다. 즉, 라벨-6의 구체적인 특징과 더 많은 수의 클래스를 기반으로 한 필터 출력으로 인해, 라벨-6이 라벨-2보다 더 신뢰도 높은 화재 검출 결과를 얻을 수 있다.

표 5. 레벨-2 및 레벨-6에 대한 Confusion Matrix

라벨	경보	화재	비화재
라벨-2	알람	True Positive: 77.71%	False Positive: 15.74%
	비알람	False Negative: 22.29%	True Negative: 84.26%
라벨-6	알람	True Positive: 89.71%	False Positive: 12.34%
	비알람	False Negative: 10.29%	True Negative: 87.66%

* 출처: 저자 작성

IV 다양한 매체를 활용한 재난정보전달 기술

재난이 발생하면 국민들에게 신속하고 정확하게 재난정보를 전달하여 스스로 재난으로부터 보호하고 사회적 혼란을 최소화하기 위한 기술이 필요하다. 또한 재난 관리자 및 현장대응요원들이 정보를 공유하여 현장에 최적화된 대응을 통해 재난피해를 저감하기 위한 기술이 필요하다. 국민들에게 재난정보를 전달하는 기술을 예·경보 기술이라고 하며, 재난관리자와 현장요원들이 정보를 공유하기 위한 기술을 상황전파 기술이라고 한다. 그리고 예·경보 기술과 상황전파 기술을 통칭하여 재난정보전달 기술이라고 한다.

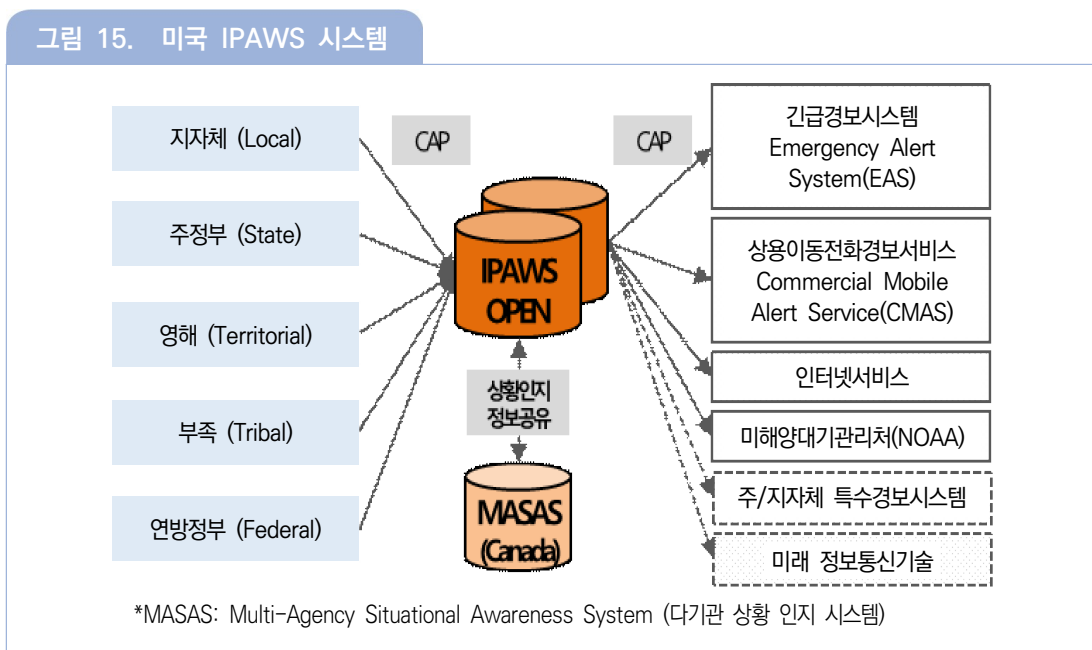
1. 국외 재난정보전달 기술 현황

기존 국내 예·경보 기술은 재난 발생 시 매체별로 규정된 재난정보를 입력하고 전달한다. 이는 예·경보 기술의 신속성을 저해하는 것으로 일본 동경대학교 연구에 따르면 지진이 발생할 경우 지진 유여시간(지진 조기경보로부터 진동이 발생하기까지 소요되는 시간) 10초 전에 예·경보 정보를 전달할 경우 건물 밖 탈출이 가능하여 약 90%의 인명을 절감할 수 있다고 한다. 상황전파 기술의 경우 전화, FAX로 정보를 전달함으로써 상황실에서 재난현장 상황을 인지하지 못해 효과적인 대응이 어렵다. 재난정보전달 분야에 있어 이러한 문제 이외에도 예·경보 기술과 상황전파가 연계되지 못해 재난현장 정보를 국민에게 신속하게 전달하지 못하는 어려움이 있다.

미국과 일본에서는 다양한 매체에 동시에 재난정보를 전달하는 예·경보 시스템을, EU에서는 예·경보 기술과 상황전파 기술이 연계된 시스템을 구축·운영하고 있다.

1.1. 미국 IPAWS 프로그램

미국의 FEMA는 2006년 대통령 행정 명령(Presidential Executive Order) 13407에 따라 IPAWS(Integrated Public Alert & Warning System) 프로그램을 구축하여, 1,600개 이상의 연방, 주, 지방, 부족 및 경보 관련 당국 관할 구역에서 중요한 공공 경보 및 경고(warning)를 보내는 데 활용하고 있다. 국가차원에서 재난상황 및 재난정보를 IPAWS를 통해 라디오, 텔레비전, 케이블, 위성 및 유선통신에 전달하며 NOAA의 날씨 라디오로 인증된 비상 및 인명 구조 정보를 대중에게 동시에 신속 및 효율적으로 전달할 수 있는 구조를 제공한다. 또한 IPAWS는 국제표준 ITU-T X.1303으로 정의된 공통 경보 프로토콜(CAP, Common Alerting Protocol)을 적용했으며, 현재 표준 프로토콜인 CAP은 미국뿐만 아니라 EU, 인도, 네팔, 대만 등 여러 국가에서 재난 관련 시스템에 도입하고 있다.

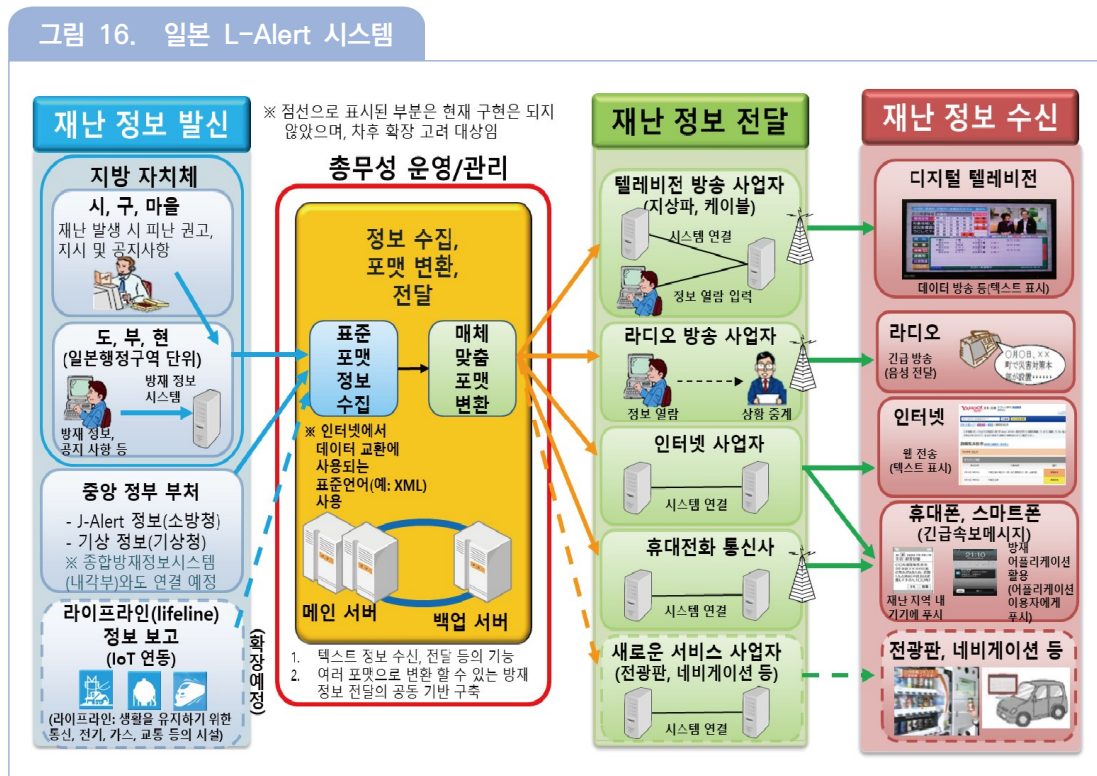


* 출처: 오승희 외(2022.06)

1.2. 일본 L-Alert 시스템

일본 총무성은 2008년 안심·안전 정보 기반에 관한 연구회 개최를 통해 재해정보공유시스템의 필요성을 확인하고, 실증시험 과정을 거쳐 2011년 6월부터 L-Alert 시스템을 운영하고 있다. L-Alert 시스템은 중앙정부부처, 지방자치단체 및 IoT 장치들로부터 발신된 재난정보를 수신하여 지상파, 케이블, 라디오, 인터넷, 휴대폰 등 여러 매체로 동시에 전달할 수 있는 구조이다. 이를 통해 재난상황과 재난정보를 신속하게 국민들에게 전달하고 있으며, 현재 L-Alert 시스템은 방송 서비스 외에는 문자 중심의 예·경보 정보만을 전달하고 있으나 전광판 및 내비게이션 등과 같은 서비스 사업자와 연계하는 새로운 서비스 확장 계획을 수립하고 있다.

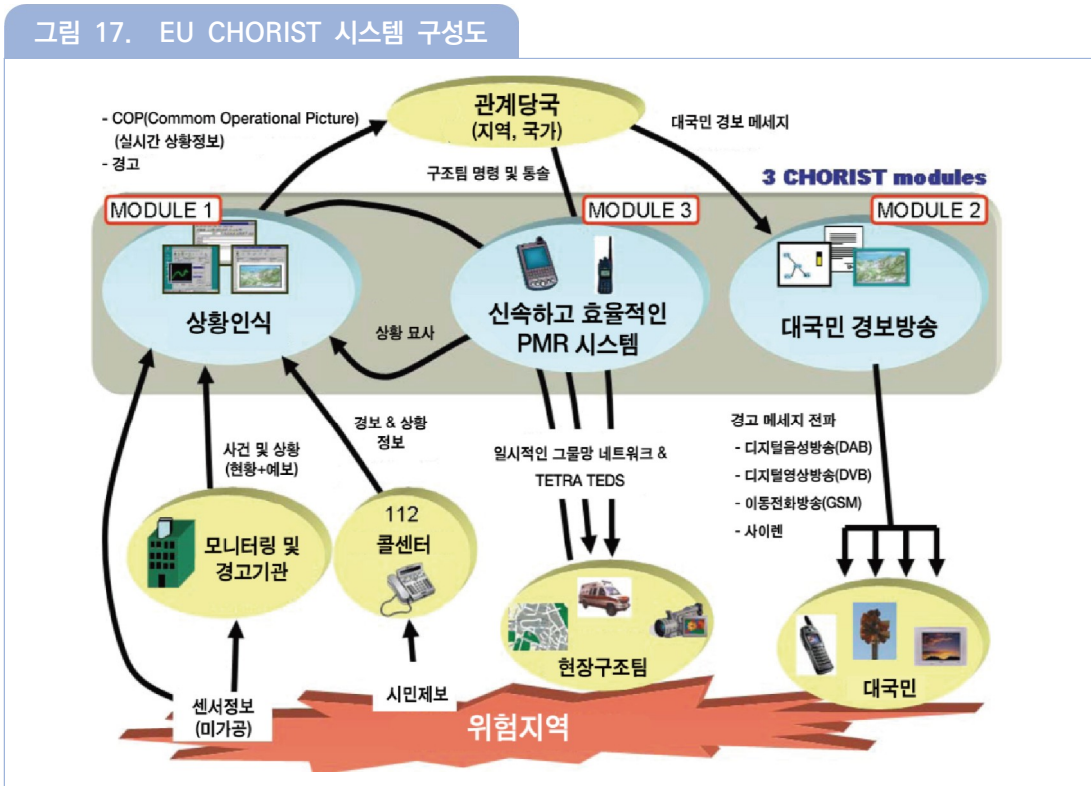
그림 16. 일본 L-Alert 시스템



* 출처: 정상구 외(2016)

1.3. 유럽연합의 CHORIST 시스템

2006년부터 약 3년간의 연구를 통해서 이루어진 EU의 CHORIST(Integrating Communications for enHanced enviroNmental RiSk management and citizen safeTy) 시스템은 유럽 8개국(영국, 프랑스, 네덜란드, 핀란드, 이탈리아, 벨기에, 스페인, 체코)의 16개 단체 및 EU 연합회가 공동기금을 조성하여 자연재해 및 산업재해에 대해 신속하고 효율적으로 대응하기 위해 개발되었다. CHORIST 시스템은 예방과 예측 단계뿐만 아니라 명령 및 제어를 통해서 위기 관리 시스템으로도 동시 활용될 수 있도록 설계되었다. 미국의 IPAWS와 같이 라디오, 텔레비전, 사이렌, 휴대폰을 포함한 이종 통신 수단으로 동시 전송될 수 있는 구조이며, 현장 구조를 위해 재난대응기관 간의 소통 및 현장 대응용 애드혹 네트워크(Ad-hoc network, 유선을 기반으로, 망 없이 이동 단말기로만 구성된 무선 지역의 통신망)도 포함되어 있다. CHORIST 시스템은 모니터링과 시뮬레이션을 통한 상황인식과 현장 구조팀과 신속하고 효율적인 구조 관리 시스템, 대국민 상황전파를 위한 대국민 경보방송 등으로 구성되어 있다.

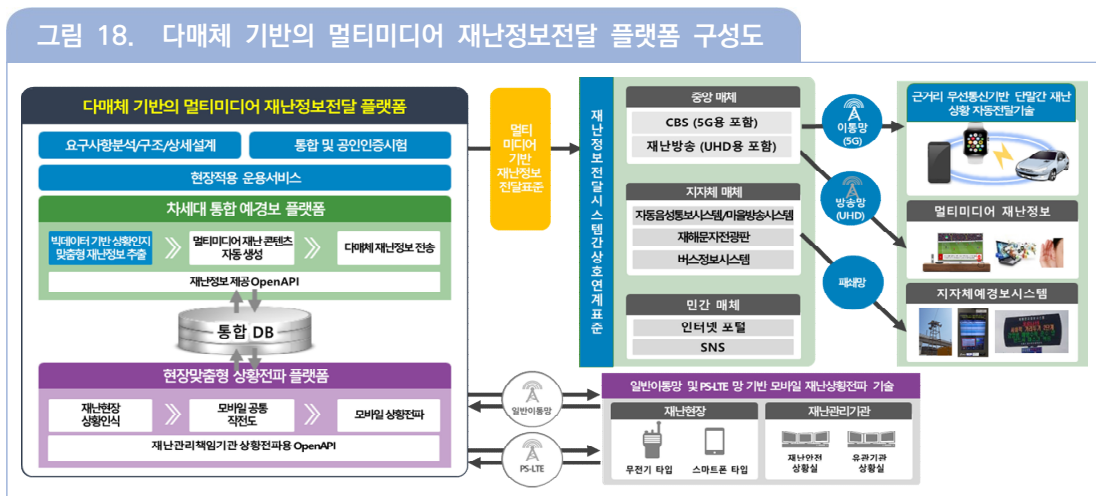


* 출처: 조경섭 외(2014)

2. 멀티미디어 재난정보전달 플랫폼

국내에서도 중앙정부와 지방자치단체에서 개별 독립 시스템으로 구축되어 운영 중인 다양한 재난정보전달 시스템을 통합할 수 있는 플랫폼에 대한 요구사항이 존재했다. 국내에서 운영 중인 재난정보를 전달하기 위한 매체는 방송망, 이동통신망, 지방자치단체 마을방송 서비스, 민간매체인 인터넷 포털 등으로 다양하지만 별도 시스템으로 구성되어 재난발생 시 재난 담당자들이 개별적으로 입력하여 발송해야하기 때문에 운영에 어려움이 존재했다.

이처럼 다양한 매체를 재난 발생 시 효율적으로 통합 운영하기 위한 다매체 기반의 멀티미디어 재난정보전달 플랫폼이 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국전자통신연구원 주관으로 2018년부터 2021년까지 개발되었다. 재난정보전달 플랫폼은 <그림 18>과 같이 다양한 매체와 연계가 가능하고 ITU-T 국제 표준 CAP을 준용하며 국내 재난 발령기관 및 재난 상황에 적합하도록 매체별 CAP 프로파일 국내 표준(TTAK.KO-06.0055/R3, TTAK.KO-06.0498/R1, TTAK.KO-06.0514, TTAK.KO-06.0524, TTAK.KO-06.0547, TTAK.KO-06.0550)을 기반으로 개발되었다. 다매체 기반의 재난정보전달 플랫폼은 2021년까지 1년 이상 충북 청주, 충남 아산, 강원 태백, 제주, 경기 고양에서 매체별 현장 실증시험을 수행하여 기능 및 성능의 완성도를 높였으며 수요부처인 행정안전부의 요구사항을 수용하고 지방자치단체의 재난 예·경보 사업화를 지원할 수 있도록 시스템을 구성 및 관련 소스코드를 공유하였다. 다매체 기반의 멀티미디어 재난정보전달 플랫폼은 <그림 18>과 같이 국민에게 다양한 매체로 재난정보를 전달하는 차세대 통합 예·경보 플랫폼과 재난관리를 위해 재난 현장에서 재난상황 및 구조 상황을 공유하기 위한 현장맞춤형 상황전파 플랫폼으로 구성되어 있다.

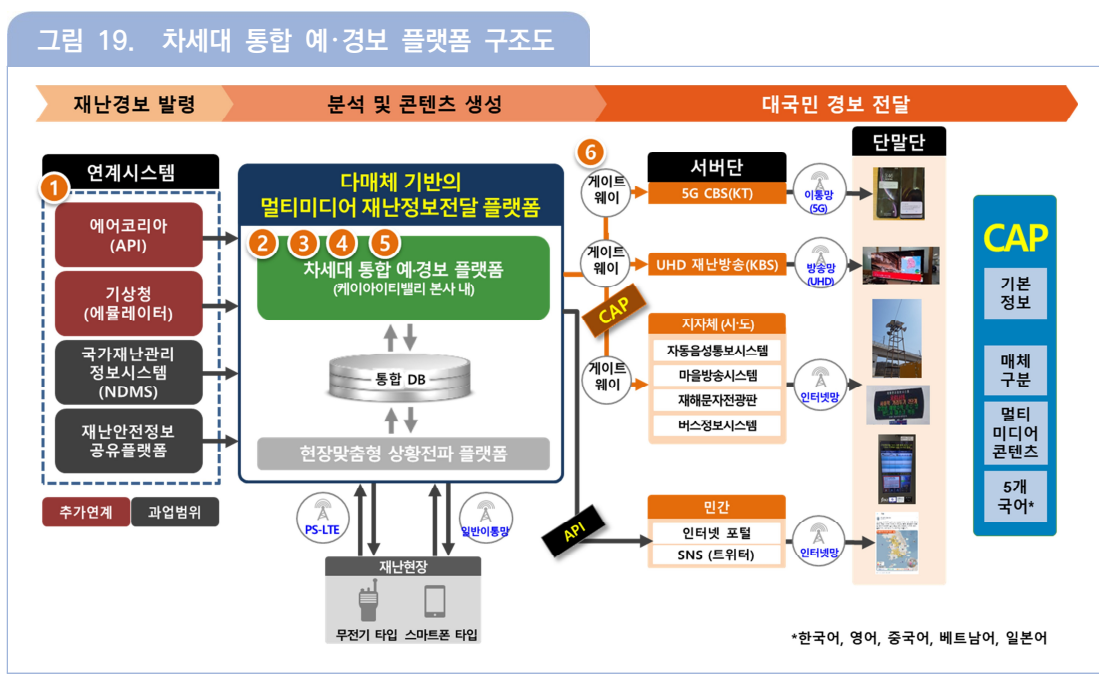


* 출처: 저자 작성

2.1. 차세대 통합 예·경보 플랫폼

차세대 통합 예·경보 플랫폼은 크게 이동통신망, 방송망, 기존 지방자치단체 예·경보 시스템(자동음성통보시스템, 마을방송시스템, 재해문자전광판, 버스정보시스템) 그리고 민간매체인 인터넷 포털 및 SNS(트위터)와 연동되는 플랫폼으로 사용자 권한 및 재난상황 전파 범위에 따라 다매체를 동시에 전송할 수 있다.

〈그림 19〉는 차세대 통합 예·경보 플랫폼의 구조도를 도시한 것이다. 차세대 예·경보 플랫폼은 재난발령기관으로부터 수신한 통보문을 분석하여 재난 종류, 지역, 시간 등 다양한 정보를 추출한다. 추출된 정보는 매체별로 예·경보 콘텐츠를 생성하고 해당 정보를 CAP 메시지로 변환한다. 생성된 CAP 메시지는 재난관리자의 승인을 거쳐 한 번의 클릭으로 이동통신, 재난방송, 지방자치단체 예·경보 매체 및 SNS와 같은 민간매체로 동시에 전달한다.

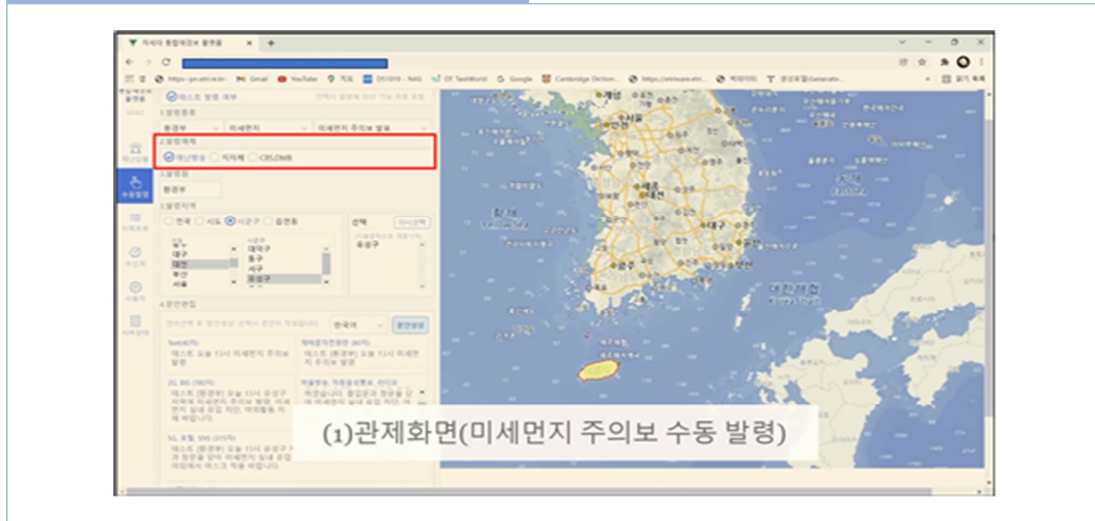


* 출처: 저자 작성

〈그림20〉의 재난발령화면은 대전시 유성구로 미세먼지주의보를 수동 발령하는 화면을 보여주는 것으로, 붉은색 네모의 발령매체를 선택하여 동시에 재난방송, 지방자치단체 예·경보 시스템, 긴급재난문자(CBS, Cell Broadcasting Service) 및 디지털 멀티미디어 방송(DMB, Digital Multimedia Broadcasting)의 다매체로

재난정보를 자동생성하고 발령하는 화면을 도시한 것이다. 차세대 통합 예·경보 플랫폼은 재난상황 시 동시에 다매체 전송으로 신속하게 재난정보가 가능할 뿐만 아니라 재난발령 결과 또한 동시에 관리할 수 있어 효율적이다.

그림 20. 차세대 통합 예·경보 발령화면

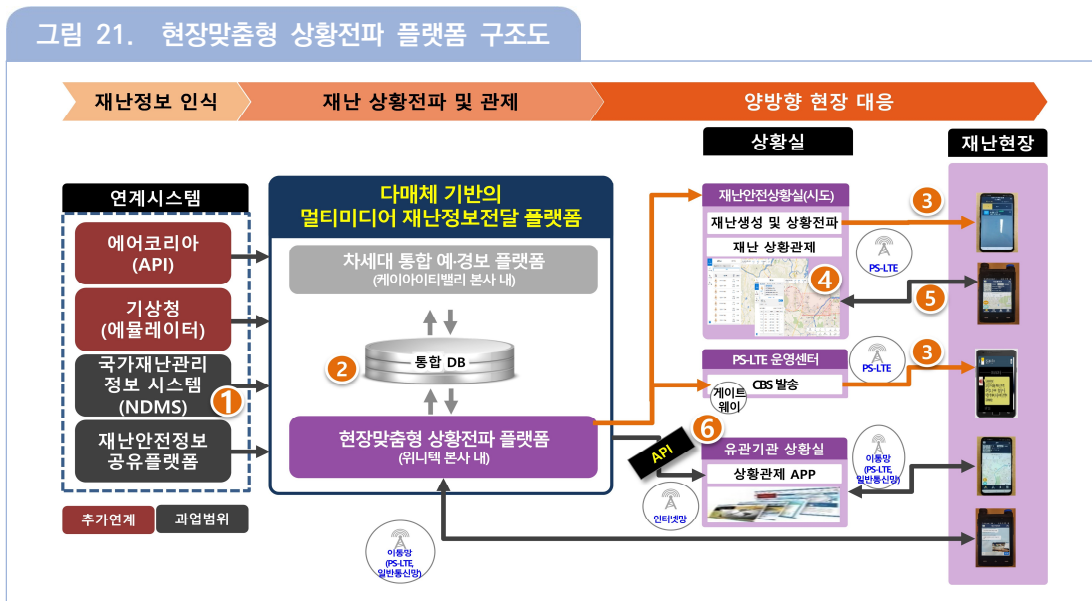


* 출처: 저자 작성

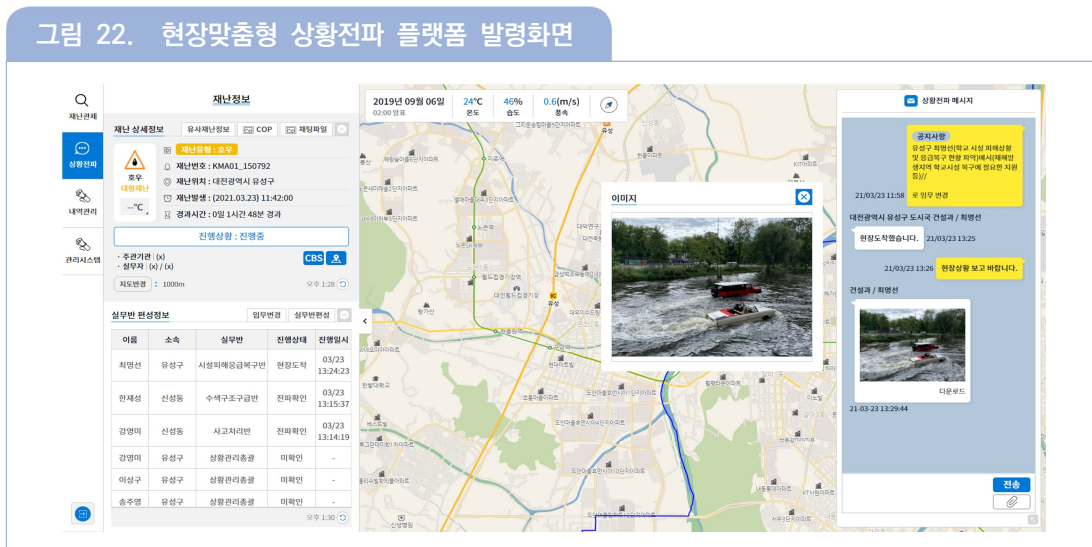
2.2. 현장맞춤형 상황전파 플랫폼

현장맞춤형 상황전파 플랫폼은 재난관리자를 위한 시스템으로 기상청 지진조기경보시스템 및 국가재난관리정보시스템(NDMS, National Disaster Management System)으로부터 재난정보를 수신한다. 수신된 재난정보와 현장수집 정보는 통합DB에 저장함으로써 차세대 통합 예·경보 플랫폼을 통하여 국민들에게 신속하게 예·경보 정보를 전달할 수 있다. 현장맞춤형 상황전파 플랫폼은 PS-LTE(재난안전통신망, LTE 통신기술을 기반으로 공공 안전에 관련 된 사람들이 재난의 예방, 대비, 대응 및 복구를 수행할 때 필요한 통신을 하기 위한 기술)를 통하여 재난담당자에게 문자 메시지로 전달하며, 재난담당자가 해당 정보를 확인하면 자동으로 실무반에 합류하게 된다. 재난대응반에 합류된 재난대응요원은 상황실로부터 현장대응 작업을 지시받고 현장정보를 수집하고 상황실과 공유하게 된다. 상황실은 현장정보를 인지하고 재난대응을 지시함으로써 양방향으로 현장과 소통할 수 있다. 상황실과 재난현장 대응요원 간에는 문자, 음성, 사진, 동영상 등 다양한 형태의 정보 유형으로 소통할 수 있다. 또한 상황실과 재난현장 간에 소통되는 정보는 Open API(인터넷 이용자가 직접 응용 프로그램과 서비스를 개발할 수 있도록 공개된 인터페이스)를 통하여 재난관리 유관기관과 공유될 수 있다. 이러한 과정을

통하여 상황실은 재난현장을 이해하고 대응할 수 있는 신속·정확한 정보를 전달할 수 있으며, 현장대응요원은 정확한 재난대응정보를 바탕으로 신속·정확하게 현장활동을 함으로써 재난피해를 저감할 수 있다. <그림 21>과 <그림 22>는 현장맞춤형 상황전파 플랫폼 구조와 발령화면을 도시한 것이다.



* 출처: 저자 작성



* 출처: 저자 작성

3. 긴급재난문자 서비스 고도화

국민들에게 이동통신망을 통해 개인이 보유하고 있는 휴대폰으로 재난문자를 전송하는 것을 긴급재난문자 서비스라고 한다. 휴대폰이 광범위하게 보급됨에 따라 재난정보 수신 매체에 대한 선호도가 기존 방송에서 휴대폰으로 변경되고 있는 추세이다. 최근 3년간 코로나-19 팬데믹 사태를 경험하면서 지방자치단체에서 긴급재난문자의 다양한 활용이 빈번하여 긴급재난문자 발령 수치가 급증하였다(2019년 대비 2020년에 약 63배 증가).

긴급재난문자 발령은 「재난 및 안전관리 기본법 제38조의 2(재난 예보·경보체계 구축·운영 등)」에 의거하여 법으로 규정되어 있으며 행정안전부의 대국민상황전파 시스템을 통해서 수동 발령하고 있다. 다만 예외적으로 지진, 지진해일, 화산의 경우, 2016년 11월 21일 행정안전부와 기상청의 ‘지진관련 긴급재난문자방송 협력에 관한 업무 협정’을 체결하여 해당 재난에 대한 재난문자 발송 업무만 기상청으로 이관하여 자동발령하고 있다.

재난관리 주무부처인 행정안전부는 국내 이동통신 3사와 긴밀하게 협업하면서 재난정보 수신에 있어서 국민 선호도가 높은 긴급재난문자 서비스를 고도화하기 위한 방안을 수립하고 있다. 긴급재난문자 발령 권한은 2017년 8월 시도 권한 부여, 2019년 9월 시군구 권한 부여를 통해 현재 시군구 단위로 발령이 가능하다. 2021년 10월 행정안전부에서 일반 국민 845명을 대상으로 시행한 설문결과에 의하면, 재난문자 서비스에 대해 만족도가 80%이며, 송출권역 세분화가 필요하다는 의견이 59.8%였다. 타 지역의 긴급재난문자 수신에 대한 불만이 TV, 뉴스 기사를 통해 지속적으로 제기되었기에 행정안전부에서는 2022년 읍면동 송출권역 세분화에 대한 이동통신 3사와의 논의 및 관련 실증시험을 추진하고 있다.

그 외에도 5G 기반 긴급재난문자 고도화 기술개발 과제를 통해서 90자로만 전달 가능한 긴급재난문자를 5G SA(Stand-Alone) 환경에서는 157자까지 확장함으로써 기존 텍스트 중심의 재난정보전달 방식에서 국내 체류 외국인, 노약자, 장애인들을 고려하여 재난 심볼 및 링크를 함께 전달하는 서비스, 다중밀집시설에서의 화재 등과 같은 특수상황에서 긴급재난문자를 수신한 재난지역의 요구조자들이 현장 및 구조에 대한 정보를 답신하는 서비스, 단말 수신기 기반의 정밀화를 통해 Geo-fencing(지오펜싱, 실제 지리적 영역에 대한 가상 경계)을 제공하는 서비스에 대해 관련 기술 개발, 연동 방안 설계, 국제 및 국내 표준화, 리빙랩(Living Lab) 시험을 수행하고 있다.

V 디지털 트윈 기반 재난관리 플랫폼 기술

디지털 트윈은 2017년에 미국 시장조사 기업인 가트너(Gartner)에서 발표한 10대 전략기술 중 하나로 선정된 이후 제조 분야뿐만 아니라 물류, 에너지, 의료, 도시 등 다양한 분야에서 문제해결을 위한 솔루션으로 활용되고 있다. 본 장에서는 디지털 트윈 개요 및 국내 여러 지방자치단체에서 진행하고 있는 도시 재난관리 플랫폼 기술개발 동향과 편리하고 안전한 도시 생활에 필요한 기반 인프라를 제공하는 공동구를 재난으로부터 안전하게 관리하기 위한 디지털 트윈 기반 재난관리 플랫폼에 대해 살펴보려고 한다.

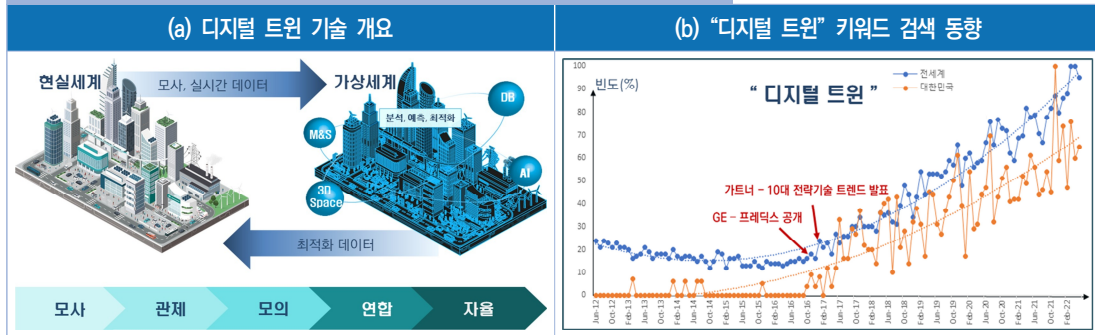
1. 디지털 트윈 기술 개요

디지털 트윈에 대한 개념은 2002년 미국 미시간 대학교(University of Michigan)의 마이클 그리브스(Michael Grieves) 박사가 최초로 제안하였다. 그러나 당시에는 디지털 트윈을 구성하는 요소 기술의 미성숙으로 인해 응용 분야에 바로 적용할 수 없었다(Michael Grieves, 2016). 이후 2010년에 미국 항공우주국(NASA)에서 로켓의 다양한 조건을 시뮬레이션하는 수단으로 디지털 트윈 개념이 처음 활용되었다. 그리고 몇 년 전부터는 디지털 트윈을 구성하는 핵심 기술의 발전과 더불어 여러 분야에서 다양한 문제해결을 위한 수단으로 활용되기 시작하였다. 특히 2017년에 가트너에서 10대 전략기술 중 하나로 디지털 트윈을 선정하면서 다양한 문제를 해결할 수 있는 기술로 많은 주목을 받기 시작하였다.

디지털 트윈은 적용 분야에 따라 약간씩 다르게 정의하고 있지만, 기본 개념은 현실 세계(사물, 공간, 시스템, 프로세스, 등)가 복제된 가상 세계에서 다양한 분석, 예측, 모의를 통해 최적화 데이터를 구하고, 이를 현실 세계에 적용함으로써 안전하고 효율적인 현실 세계 구축에 필요한 기술이라고 볼 수 있다.

디지털 트윈의 성숙도는 디지털 트윈의 실현 수준이 어느 정도인지 이해하기 위한 평가 도구를 제공하고, 더 높은 수준을 향한 지속적인 개선 계획을 수립할 수 있도록 기준을 제시하기 위한 모델로 모사, 관제, 모의, 연합과 자율 5단계로 구분할 수 있다(한국전자통신연구원, 2020). 제조 분야의 디지털 트윈 성숙도는 3단계로 볼 수 있지만, 그 외의 분야에서는 여전히 2-2.5단계 수준으로 볼 수 있다(Michael Grieves, 2016).

그림 23. 디지털 트윈 기술 개요와 디지털 트윈 검색 동향



* 출처: (좌) 한국전자통신연구원(2021), (우) Google Trends 사이트

2. 디지털 트윈 기반 도시 재난 대응 기술개발 동향

〈표 6〉은 다양한 재난에 신속하게 대응하기 위해 국내 지방자치단체에서 진행하고 있는 사업을 나타내고 있다. 이러한 사업을 통해 지방자치단체는 자연재난과 사회재난으로부터 시민들의 안전을 보장하기 위한 기술을 개발하고자 한다. 예를 들어, 우리나라에서 가장 더운 도시인 대구에서는 폭염에 대응하기 위한 디지털 트윈 구축을 시작으로 2026년까지 재난 전반을 관리하기 위한 디지털 트윈 구축을 위한 사업 추진을 위해 4개 기관이 협약식을 체결하기도 하였다.

표 6. 국내 디지털 트윈 기반 도시 재난 대응 플랫폼 개발 사업 동향

도시	주요 사업 내용
전주	스마트시티 도시계획(2021~2025) - 2021.11.
	- 천만그루 나무심기 입지 분석, 폭염 취약지 분석 대응, 음식 폐기물 수거 체계, 3D 코로나 방역 등 (* 출처: 전주시 보고서)
대전	디지털 트윈 기반 지능형 재난예측 플랫폼 구축 사업 - 2021.12.
	- 기후재난 분야, 도로재난 분야, 대기재난 예측 플랫폼 개발 등 (* 출처: 대전광역시 보도자료(2021.12.20))
여수	5G 기반 디지털 트윈 기술 적용 '안전·재난대응 관리'사업 - 2021.05.
	- 에너지 효율 최적화, 안전사고 위험징후 사전예측 및 최적의 대피 경로 제공 등 (* 출처: 여수시청)
인천	디지털 트윈 기반 화재대응 통합 플랫폼 구축 - 2021.08.
	- 출동 차량 실시간 위치 확인, 사건 대상물과 관련 정보 제공, 위험물 및 유해화학물에 관한 정보 제공, 재난현장 주변 CCTV 영상 제공, 소방용수시설 정보제공, 길안내 서비스 등 (* 출처: 인천광역시 보도자료(2021.08.12.))
대구	재난 디지털 트윈 구축 사업 추진을 위한 공동 협력 협약 체결 - 2022.04.
	- 2022년 폭염 디지털 트윈 구축을 시작으로 2026년까지 재난 전반을 관리할 시스템 구축 예정 (* 출처: 매일신문 (2022.04.25.))

* 출처: 저자 작성

3. 공동구 현황 및 재난 사례

공동구는 국민의 일상생활에 필수적인 지하 매설물(전기·가스·수도 등의 공급설비, 통신시설, 하수도시설 등)을 공동 수용함으로써 도시 미관의 개선, 도로 구조의 보전 및 교통의 원활한 소통을 기하기 위하여 지하에 설치하는 중요 기반시설물이다. 전 세계적으로 공동구의 길이는 약 5,000km에 달하며, 국내의 경우에는 11개 지방자치단체의 25개 지역에 공동구가 설치되어 있으며 전체 길이는 약 229km에 달한다(국가통계포털).

국내 공동구는 1978년에 건설된 여의도 공동구가 시초이며, 이후 신도시 개발과 동시에 꾸준히 설치되어 왔다. 그러나 많은 공동구가 1980년-1990년에 집중 건설됨에 따라 30년 이상 노후화된 공동구의 비율이 약 30%, 20년 이상 노후화된 공동구의 비율은 43%로 각종 재난의 잠재적인 위험에 노출되어 있다. 한국지능정보사회진흥원(NIA)에서는 스마트 사회간접자본시설과 지하공동구 스마트 관리 시스템 구축사업을 통해 지능형 CCTV, 디지털 트윈, IoT 복합센서 기술을 활용하여 공동구에서 발생할 수 있는 재난을 모니터링하고 대응할 수 있는 플랫폼 기술을 개발하고 있다.

공동구가 손상되면 그 지역의 인프라가 마비되기 때문에 정전, 통신두절, 단수 등의 불편함을 광범위하게 겪게 된다. 공동구는 국가중요시설로 지정되어 있으며 내화재를 사용하는 등 방화 대책이 수립되어 있다. 만일 화재가 발생한다면, 공동구 내부가 좁고 폐쇄적이며 별도의 방화벽을 설치하지 않은 곳이 많기 때문에 매연이 순식간에 가득하고 유독가스가 발생하기 때문에 진압이 쉽지 않다.

가장 최근에 발생한 화재는 2018년 11월에 서울 아현동 KT 통신구에서 발생하였다. 이 화재로 인해 서울시 및 경기도 일부 지역에 대규모 통신 마비로 각종 온라인 서비스가 중단되어 약 750억 원의 경제적 손실 및 인명 피해가 발생하였다. <표 7>은 2000년 이후 국내에서 발생한 공동구 사고 사례를 나타내고 있다.

표 7. 2000년 이후 국내 공동구 사고 사례

연도	공동구/단독구	사고 내용
2000	여의도 공동구	- 2월: 전력케이블 과부하 혹은 TV 증폭기 과열에 의한 화재 - 11월: 상수도관 파열에 의한 침수
2001	목동 공동구	- 우수 유입에 의한 침수
2003	여수 공동구	- 우수 유입에 의한 침수
2006	구리 전력구	- 화재(원인 미상)
2018	KT 아현지사 통신구	- 화재(원인 미상)

* 출처: 화재보험협회(2019)

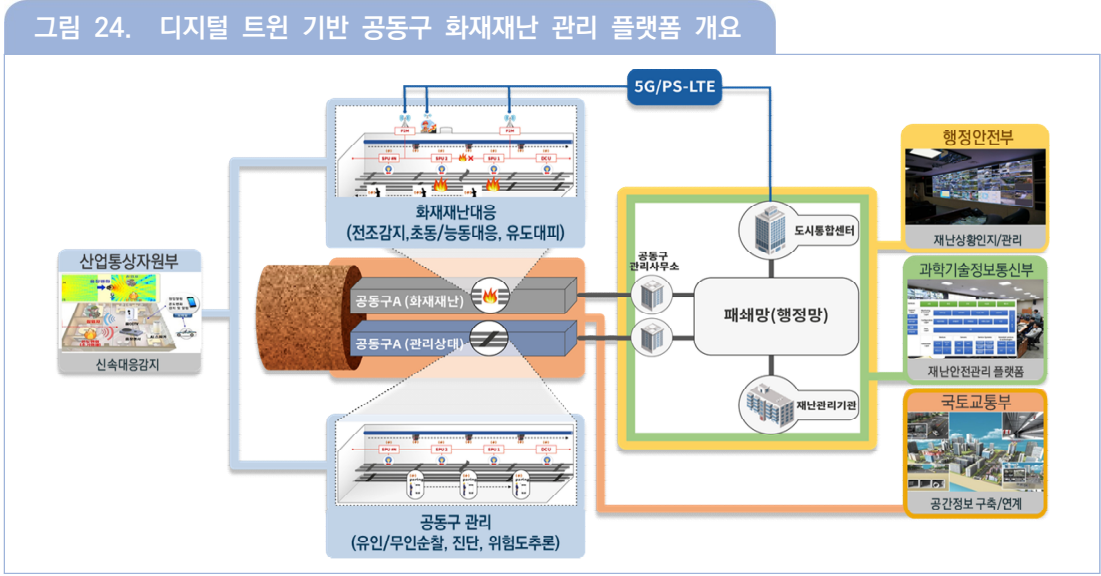
4. 디지털 트윈 기반 공동구 재난관리 플랫폼 기술 개발

공동구는 국가기반시설로 분류된 중요 시설물이지만 인력 중심의 관리가 이루어지고 있어서 잠재적인 재난 발생 위험성을 내포하고 있다. 공동구는 복도형태로 구축된 시설이기 때문에 관리 사각대가 발생하여 인력 중심의 관리 체계로는 효율적인 관리가 어렵다. 공동구에서 발생하는 재난은 통신, 상수도관과 같은 점유시설 외에도 환풍기, 배수펌프와 같은 노후화된 관리시설에 의해서도 발생할 수 있다. 공동구에서 화재와 같은 재난이 발생하면, 공동구의 공간적 특성 때문에 급속한 화재 확산과 온도상승, 고농도 연무 및 유독가스 발생으로 인해 화재 발생 위치 파악, 진·출입으로 확보 등이 어려워 전 구간에 걸친 피해가 불가피하다. 따라서 공동구를 안전하게 유지관리하기 위해서는 재난이 발생하기 전에 이상 징후를 감지하여 신속한 대응을 할 수 있도록 하는 플랫폼 기술개발이 필요하다.

본 절에서는 재난으로부터 공동구를 안전하게 관리하기 위한 기술개발을 위해 4개 부처에서 공동으로 진행하고 있는 ‘디지털 트윈 기반의 지하공동구 화재재난지원 통합플랫폼 기술개발’ 사업을 간략히 소개한다. 해당 사업은 과학기술정보통신부를 주관부처로 행정안전부, 국토교통부, 그리고 산업통상자원부가 협력하는 다부처 사업으로, 디지털 트윈 관련된 국내 최초 연구개발 사업이다. 본 사업은 현장정보 센싱, 데이터 통합분석, 모델링 및 시뮬레이션, 초정밀 가시화 등 디지털 트윈을 구성하는 핵심 기술을 개발하여 화재, 침수, 지진과 같은 재난으로부터 공동구를 안전하게 관리하기 위한 서비스 기술을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다(이미숙 외, 2021).

이 사업을 통해 개발되는 공동구 재난관리 플랫폼에서 제공하는 주요 서비스는 <그림 24>와 같이 평상시 공동구를 관리하는 서비스와 화재, 침수, 지진과 같은 재난 발생에 따른 대응 서비스로 구분할 수 있다.

- 1) 공동구 관리 서비스: 평상시 공동구 관리를 위해 다양한 온습도를 포함한 8종의 센서와 저조도 CCTV, 열화상 카메라 및 레일형 로봇을 통해 수집한 다양한 데이터를 관제실 화면에 표출하고, 수집된 데이터를 종합 분석하여 이상 징후를 감지하며 위험도 추론 및 재난확산 예측 시뮬레이션 결과를 활용하여 공동구에서 발생할 수 있는 다양한 이상상황을 감지하여 공동구를 안전하게 관리하기 위한 서비스
- 2) 공동구 화재·재난대응 서비스: 재난발생 단계를 전조 → 초동 → 능동대응 단계로 구분하고 재난 대응을 위한 표준작전절차(SOP, Standard Operation Process)와 현장상황 정보를 통합 분석하여 재난의 유형과 위험도 수준에 따라 효과적으로 재난에 대응하여 피해를 저감하기 위한 서비스



* 출처: 저자 작성

디지털 트윈 기반의 공동구 화재·재난 지원 플랫폼에서는 최종적으로 <그림 25>와 같이 화재재난 예측부터 대응, 조사 분석까지의 원스톱 서비스 제공을 목표로 하며 이를 위해 수집 → 예측 → 예방 → 대응 → 조사 분석 단계로 서비스 제공을 목표로 하고 있다. 평상시에는 지하공동구 관리를 위한 유무인 순찰서비스를 제공하며, 수집된 정보는 BAS(Bigdata, AI, Simulation) 기술을 활용하여 위험도를 추론하고 재난 발생 확률을 감소시키기 위한 예방 절차를 진행하게 된다. 이후 재난이 발생할 경우 초기 대응을 통해 재난이 확산되는 것을 지연시키며, 재난이 확산될 경우 수집 가능한 현장정보를 분석하여 재난상황을 인지하고 최적화된 재난 대응을 통해 피해를 저감하게 된다. 이러한 공동구 관리 과정에서 수집되는 정보는 상시 저장되어 향후 유사 사례가 발생할 경우 동일한 오류를 범하지 않기 위한 기초자료로 재사용된다.

그림 25. 디지털 트윈 기반 공동구 화재재난 관리 서비스 개요



* 출처: 저자 작성

VI 결론

우리가 사물들이 복잡하게 상호 연결되는 초연결 사회에 진입함에 따라 재난이 발생하는 양상도 단일재난에서 복합재난 형태로 변화하였을 뿐 아니라 이전에 발생하지 않았거나 발생빈도가 적었던 대형재난들이 빈번하게 발생하고 있어 피해가 급증하는 추세이다. 융합연구리뷰에서는 복합화되고 대형화되는 재난으로부터 국민들을 안전하게 보호하기 위한 ICT 기술을 활용한 전주기 재난안전관리 기술개발 현황에 대해 설명하였다.

정부에서는 '제3차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획(2018-2022)'을 예측과 예방 중심의 재난관리 체계로 전환하였다. 예측과 예방 중심의 재난관리 체계로 전환하기 위해서는 기존에 발생한 다양한 재난에서 발생한 정보를 체계적으로 수집하고 분석하여 재난 취약점을 도출하고 예방함으로써 재난 발생을 억제하고 피해를 최소화할 수 있는 기술개발이 우선되어야 한다. 앞에서 살펴본 바와 같이 재난안전관리 기술은 특정한 기술에 의해 문제를 해결할 수 있는 것이 아니라 전반적인 ICT 기술 뿐 아니라 인문·사회·공학이 융복합되어야 가능한 연구 분야이다.

재난을 예측하고 예방하기 위해서는 빅데이터, 인공지능, 디지털 트윈과 같은 지능화 기술이 필요하며, 재난관리 현장의 정보를 수집 및 전달하기 위해서는 IoT, 무인기, 5G와 같은 초고속 네트워크와 같은 기술이 요구된다. 또한 ICT 비전문가인 재난관리자에게 이해하기 쉬운 형태로 분석된 결과를 전달하기 위해서는 전통적인 그래픽 사용자 인터페이스(GUI, Graphical User Interface) 기술 뿐 아니라 메타버스, AR/VR/XR(증강현실, 가상현실, 확장현실)과 같은 가상화 기술이 요구된다. 재난이 발생하면 사람이 재난현장에 직접 투입되어 대응하는 것이 한계가 있기에 지능형 로봇과 같은 기술도 함께 요구된다.

ICT 기술은 각 개별 재난의 특성을 이해하기 위해 토목, 건축, 전기, 심리, 의료 등 다양한 분야와 융복합되어야 한다. 태풍, 강풍, 호우, 산사태 등을 포함하는 자연재난의 경우 토목, 건축, 도시공학, 지질학 등 주로 ICT 이외의 공학 분야의 이해가 필요하다. 감염병과 기축질병은 의학 및 수의학에 대한 융복합이 필요하다. 특히 사회재난의 경우 인간의 행동반경, 습성, 환경 분석, 심리적 요인들에 대한 분석이 필요하여 인문사회적인 접근이 필요하다. 즉, ICT 기반의 재난안전관리 연구 분야는 인간이 보유하고 있는 대부분이 연구 내용이 상호 융복합되어야 하는 대표적인 분야 중 하나이다.

현재 국내의 재난안전 분야 기술은 파편적으로 시장이 형성되고 영세하여 대외적인 경쟁력이 타 분야에 비해 낮은 수준이다. 재난안전 분야의 기술 경쟁력을 확보하기 위해서는 국내의 우수한 ICT 기술을 재난안전 분야와 융복합하고 타 분야와 원활한 의사소통 및 기술적 결합을 위한 협의체 구성 등이 필요할 것으로 생각된다. 이러한 산·학·연·관이 협업하여 개발된 신기술은 국외 경쟁기관과의 기술 격차를 해소하여 기술 추격자에서 기술 선도자로 역할변화를 위한 게임 체인저(game changer) 핵심 역할을 할 수 있다. 이러한 ICT 기반의 재난안전관리 기술은 국민들의 일상에 밀접한 생활안전, 산업안전 등 다양한 사회현안 문제를 해결하여 국민들이 안심하고 일상생활을 영위할 수 있는 사회 건설에 이바지할 것으로 예상된다.

저자_ 이용태(Yong Tae Lee)

• 학력

연세대학교 전기전자공학 박사
한국항공대학교 항공전자공학 석사
한국항공대학교 항공전자공학 학사

• 경력

現) 한국전자통신연구원
지능융합연구소 국방·안전ICT연구단 단장
現) 국가과학기술심의회 전문위원
한국연구재단 이사
과학기술연합대학원대학교 교수

저자_ 정우석(Woo Sug Jung)

• 학력

충남대학교 컴퓨터공학 박사
명지대학교 전자공학 석사
명지대학교 전자공학 학사

• 경력

現) 한국전자통신연구원
지능융합연구소 재난안전지능융합센터 센터장

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 강주연, 장효정, 오효정. (2017). 대형 자연재난 피해상황 분석을 위한 어휘 자질 추출. 한국정보기술학회, Vol. 15, No. 9, 11-21.
- 2) 과학기술정보통신부. (2020.08.) 더 안전한 대한민국을 위한 지진 조기경보. R&D KIOSK 제75호. file:///C:/Users/ADmin/Downloads/Kiosk_Issue75_2020_8.pdf
- 3) 과학기술정보통신부, 한국인터넷진흥원. (2018). 2018 인터넷 이용실태조사.
- 4) 국가과학기술심의회. (2018). 제3차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획(안).
- 5) 국립방재연구원. (2012). 거버넌스형 안전도시 포털시스템 설계 연구.
- 6) 국토교통부. (2020). 제2차 전주시 스마트도시 기본계획(2021~2025).
- 7) 국회예산정책처. (2019). 국가연구개발사업 분석(총괄).
- 8) 김근영. (2014). 대한민국 정부수립 후 주요재난 및 재난정책 변천사, 방재저널, Vol. 16, No.2, 24-29.
- 9) 김용운, 유상근, 이현정, 한순흥. (2020). 디지털 트윈의 꿈. 한국전자통신연구원.
- 10) 박정희. (2017). 최근 자연재해 발생 및 보상 현황. 보험연구원 KIRI 리포트, 제412호.
- 11) 박종현, 이용태, 김재철, 정우석, 이미숙, 홍상기, 조성균, 윤현진, 박대근, 임명은, 강현철, 문대성, 유상근, 연승준. (2021). 디지털 트윈 기술 보고서. 한국전자통신연구원.
- 12) 방송통신위원회. (2020). 2020 방송매체 이용행태 조사.
- 13) 소방방재청. (2012. 09.) 재난관리기준 이행 활성화 촉진 연구.
- 14) 신원재, 이용태. (2017). 무인기 탑재 다중 센서 기반 국지 산불 감시 및 상황 대응 플랫폼 설계 및 구현. 한국정보전자통신기술학회 논문지, Vol.10 No.6, 626-632.
- 15) 심재현, 이치현. (2014). 재난안전대책의 현재와 미래. 한국지방행정연구원, 지방자치 FOCUS 제79호.
- 16) 아론 패럿(Aaron Parrott) & 레인 워쇼(Lane Warshaw). (2017). 인더스트리 4.0과 디지털트윈, Deloitte Anjin Review, No. 9, 64-72.
- 17) 오승희, 강현주, 주상임, 정우석. (2022). 재난약자를 위한 차세대 재난정보 전달 기술에 대한 연구. 한국통신학회지, Vol. 39, No. 6, 3-10.
- 18) 오승희, 정우석, 이용태. (2021). 코로나19 관련 국내 긴급재난문자 서비스 동향 분석. 주간기술동향, Vol. 2008, 15-27.
- 19) 오승희, 정우석, 조경섭, 이용태. (2018). 복합재난 연계를 위한 시나리오 생성 메커니즘에 대한 연구. 2018년도 한국통신학회 추계종합학술발표회.
- 20) 이기영, 이명구, 임명재. (2013). 블루투스 및 NFC 기반 사회약자 사고방지 시스템 설계 및 구현. 한국인터넷방송통신학회, 13(6), 131-136.
- 21) 이미숙, 정우석, 김은솔. (2021). 디지털 트윈 기반 지하공동구 재난안전관리 방법에 관한 연구. 정보과학지, Vol. 39, No. 2, 16-24.

- 22) 이병진, 이병훈, 오승희, 이용태, 김경석. (2017). 주요 시설물 피해를 고려한 복합재난 피해 예측 시스템 방안 연구. 한국위성정보통신학회, Vol. 12, Issue 4, 18-25.
- 23) 이병훈, 김명진, 정우석, 김경석. (2020). 스마트워치를 활용한 재난정보전달 방안. 한국인터넷방송통신학회, Vol. 20 Issue. 2, 55-60.
- 24) 이병훈, 이병진, 오승희, 이용태, 김경석. (2017). 복합재난 예측 모형 설계를 위한 공통 입출력 파라미터 도출 연구. 한국위성정보통신학회, Vol.12, Issue 4, 34-41.
- 25) 이순화, 윤재선, 김정복, 임승각. (2011). 국내 공공안전재난구조 무선통신을 위한 주파수 소요량 산출. 한국인터넷 방송통신학회 논문지, 11(4), 209-216.
- 26) 장석용, 정현영, 박다솔, 고상선. (2012). 운전 중 스마트폰 이용이 교통안전에 미치는 영향 연구. 19(2). 75-91.
- 27) 장은미, 김은경. (2015). 지역특성을 고려한 안전환경 조사 프레임워크 개발. 한국지역지리학회지, Vol. 21, No. 2, 364-378.
- 28) 장철순. (2015). 국토 라이프라인: 국민 안전을 위한 생명선, 월간국토, Vol. 401, 6-11.
- 29) 정상구, 박현호, 조경섭, 이용태. (2016). 일본의 재난관리 및 방송 시스템 현황. 전자통신동향분석, Vol. 31, No. 3, 112-121.
- 30) 정우석, 명승일, 이미숙, 오승희, 정득영. (2020). 디지털트윈 기술을 활용한 지하공동구 재난관리 방법에 관한 연구, 한국재난정보학회 정기학술대회, No. 1, 75-76.
- 31) 정우석, 오승희, 손진, 김성현, 이용태. (2017). 대형 복합재난 모의를 위한 시나리오 자동 생성 방법에 관한 연구. 대한전자공학회 추계학술대회 논문집.
- 32) 정우석, 오승희, 이용태. (2018). 대형복합재난 피해확산예측 시스템 구현에 관한 연구. 한국통신학회 추계종합 학술발표회 논문집, Vol. 1.
- 33) 정창삼. (2017). 시나리오 기반 대형 복합재난 확산 예측 기술개발, 국토연구원, KRIHS Monthly Magazine, No. 430, 37-42.
- 34) 조경섭, 김건, 이용태, 류원. (2014). 지능 맞춤형 통합경보시스템 기술동향. 한국전자통신연구원, 전자통신동향분석, Vol. 29, No. 3, 56-65.
- 35) 주용완, 채승완, 배항은, 김현준. (2016). 2016 인터넷 이용 실태조사. 미래창조과학부, 한국인터넷진흥원.
- 36) 주혜정, 홍솔기. (2018). 더 안전한 대한민국을 위한 재난재해 R&D의 전환 방향 모색, 한국과학기술기획평가원, 정책브리프 Issue Weekly, 2018.
- 37) 최우철, 김태훈. (2020). 실감형 재난대응 서비스 구현방안 연구: 공공과 민간 분야 전문가 인식 차이를 중심으로. 한국산학기술학회 논문지, 21(6), 625-633.
- 38) 한국전자통신연구원. (2010). 디지털트윈 기반의 지하공동구 화재재난지원 통합플랫폼 기술개발 연구과제 계획서.
- 39) 한국전자통신연구원. (2015). 무인기 탑재 복합형 센서 기반의 국지적 재난 감시 및 상황대응을 위한 스마트 아이 기술개발 연구과제 계획서.
- 40) 한국전자통신연구원. (2019). 시나리오 기반 대형복합재난 확산예측 기술개발 연구과제 보고서.

- 41) 한국전자통신연구원. (2020). 다매체 기반의 멀티미디어 재난정보전달 플랫폼 기술개발 연구과제 보고서.
- 42) 한국행정연구원. (2015.12.) 대형복합재난 법적기반 구축 연구.
- 43) 화재보험협회, (2019). KFS 1252 지하구·공동구의 방화기준.
- 44) 행정안전부. (2020). 2020 재해연보(자연재난).
- 45) 행정안전부. (2020). 2020 재난연감(사회재난).

〈국외문헌〉

- 46) 3GPP TS 23.041. (2021. 06). Technical realization of Cell broadcast Service.
- 47) El Saddik, A. (2018). Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies. IEEE Multimedia, 25(2), 87–92, 2018.
- 48) Federal ministry for Economic Affairs and Energy. (2016). Digital Strategy 2025. https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/EN/Publikation/digital-strategy-2025.pdf?__blob=publicationFile&v=9
- 49) Gartner, Inc. (2016). Use the IoT Platform Reference Model to Plan Your IoT Business Solutions.
- 50) Gill, J. C. & Malamud, B. D. (2014). Reviewing and Visualizing the interactions of natural hazards. Reviews of Geophysics, Vol. 4, No. 52.
- 51) Grieves, M. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication. file:///C:/Users/ADmin/Downloads/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf.
- 52) Grieves, M., (2016) Origins of the Digital Twin Concept.
- 53) Kannan, K., & Arunachalam, N. (2019). A Digital Twin for Grinding Wheel: An Information Sharing Platform for Sustainable Grinding Process. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 141(2).
- 54) Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison, IEEE Access, 6, 3585–3593.
- 55) Showalter, P. S. & Myers, M, F. (1994). Natural Disaster in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980–1989: Analysis and Recommendations, Vol. 14, Issue 2, Risk Analysis, 169–182.
- 56) Stark, R., Kind, S., Neumeyer, S. (2017). Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design, CIRP Annals, Vol. 66, Issue 1, 169–172.

〈기타문헌〉

- 57) 김지수. (2022.04.25). 대구시, 3D 지도+실시간 정보 '디지털 트윈'으로 재난 대응. 매일신문. <http://news.imaeil.com/page/view/2022042510544916738>.

- 58) 대전광역시 보도자료. (2021.12.20.). 대전시, 행안부 주민주도형 지역균형 뉴딜 우수사업 공모 선정 - '디지털 트윈 기반 지능형 재난 예측 플랫폼 구축'사업, 특별교부세 5억 원 확보. https://www.daejeon.go.kr/drh/board/boardNormalView.do?boardId=normal_0189&menuSeq=1632&ntatcSeq=1389235587.
- 59) 미국 에너지부(Integrated Public Alert and Warning System (IPAWS)). <https://www.osti.gov/servlets/purl/1721501>
- 60) 박시현. (2021.02.04.). 마이크로소프트 “애저 디지털 트윈은 가장 앞선 기술의 디지털 트윈 솔루션”. 디지털 경제뉴스. <https://www.denews.co.kr/news/articleView.html?idxno=17717>
- 61) 여주시청. (2021.05.25.). 여주시, “5G 기반 디지털트윈 공모”선정 “안전에 한 발 더”. <http://news.yeosu.go.kr/news/articleView.html?idxno=27887>.
- 62) 이지현. (2020.05.25.). 포스트 코로나 시대, 4차 산업혁명은 어디로? @디지털 트윈. KOTRA 해외시장뉴스, <https://news.kotra.or.kr/user/globalAllBbs/kotranews/album/781/globalBbsDataAllView.do?dataIdx=182119>
- 63) 인천광역시 보도자료. (2021.08.12.). 인천시, 쌍둥이 가상도시가 화재로부터 시민의 생명과 재산을 지킨다 - 디지털 트윈국토 지자체 시범사업 공모 선정, 총 14억 투입. https://www.incheon.go.kr/IC010205/view?repSeq=DOM_000000003083448.
- 64) 정보통신단체표준(TTAS). TTA.KO-06.0263/R4, 재난 문자 서비스 제공을 위한 요구사항 및 메시지 형식 (Requirements and message format for Korean Public Alert System over mobile network), 제개정일 : 2019.
- 65) 조재학. (2019.06.19.). 정부, 2023년까지 노후 인프라 안전 강화 32조원 투자. 한국건설기술협회, <http://gisulin.kr/news/view.html?section=1&no=19492>
- 66) 지혁민. (2022.01.20.). 재난현장 “스마트 아이” 소방드론, 5년새 현장출동 10배 넘게 증가. 스마트시티투데이. <https://www.smartcitytoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=22340>
- 67) 캠브리지 대학 홈페이지. <https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-do/national-digitaltwin-programme>
- 68) 한국판 뉴딜 New Deal 홈페이지. <http://www.knewdeal.go.kr/>
- 69) 행정안전부. (2019). 재난문자방송 기준 및 운영규정. <https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000179035>
- 70) 행정안전위원회. (2019). 제376회 국회 행정안전위원회 업무보고 자료..
- 71) European Commission. Integrating communications for enhanced environmental risk management and citizens safety. <https://cordis.europa.eu/project/id/033685>.
- 72) European Commission. New Multi-HAZard and Multi-RIsK Assessment MethodS for Europe. https://cordis.europa.eu/project/rcn/96701_en.html.
- 73) European Commission. Rapid Analysis and Spatialisation Of Risk (RASOR). https://cordis.europa.eu/project/rcn/188821_en.html.

- 74) FEMA 홈페이지(Hazus). <https://www.fema.gov/hazus>
- 75) FEMA 홈페이지(Integrated Public Alert & Warning System). <https://www.fema.gov/emergency-managers/practitioners/integrated-public-alert-warning-system>
- 76) FCC Plan, <http://transition.fcc.gov/pshs/services/plan.html>
- 77) Gartner사 홈페이지. <https://www.gartner.com/en/informationtechnology/glossary/digital-twin>
- 78) Google Trends 사이트, www.trends.google.com
- 79) Heimdall 홈페이지. <http://heimdall-h2020.eu/>
- 80) IBM Internet of Things. (2018). Hannover Messe: Evolution of a cognitive Digital Twin. <https://www.slideshare.net/IBMIoT/hannover-messe-evolution-of-a-cognitive-digital-twin>
- 81) IPAWS Architecture. https://emilms.fema.gov/is_0247b/groups/24.html
- 82) Open Geospatial Consortium 홈페이지. <http://www.opengeospatial.org/>
- 83) Parris. C. What is a Digital Twin?, <https://www.ge.com/digital/blog/what-digital-twin>
- 84) SmartAmerica Challenge 프로젝트 홈페이지. <https://smartamerica.org/>
- 85) USGS TED, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/ted/>



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 September vol.8 no.9



02

탄소중립 구현을 위한 바이오리파이너리 기술의 방향

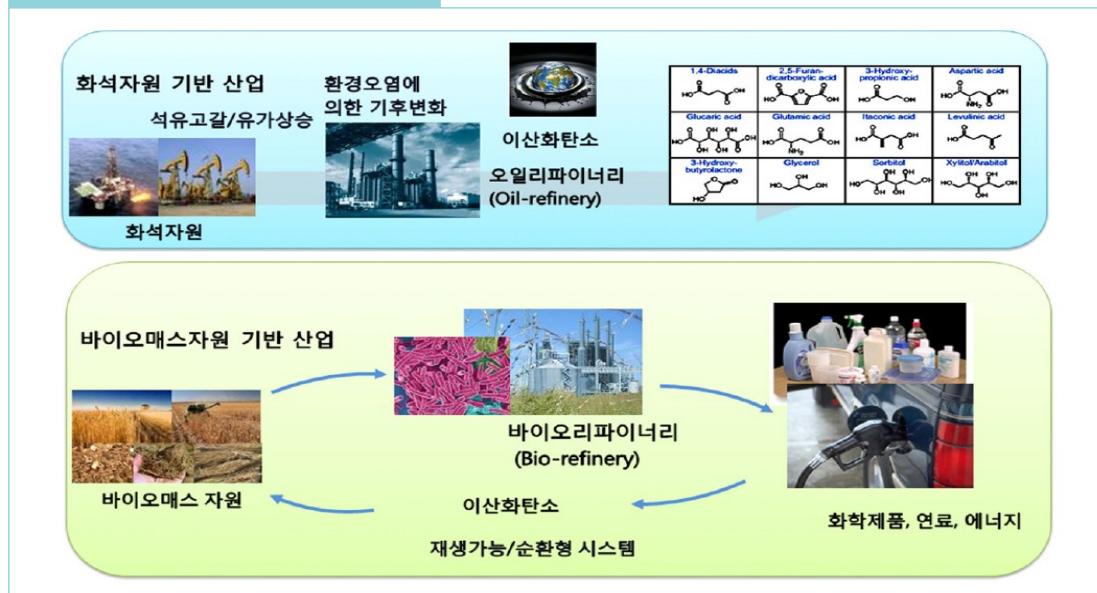
이수연(한국에너지기술연구원 책임연구원)
문명훈(한국에너지기술연구원 선임연구원)

I 바이오파이너지란?

1. 바이오파이너지 개념

전 세계적으로 산업이 발달하면서 석유와 같은 화석연료에 대한 의존도가 상승하였으며, 이는 기후변화의 원인으로 작용하고 있다. 이와 같은 범지구적인 기후변화로 인해 평균 기온이 상승하면서 온실가스 저감을 위한 탄소중립형(carbon neutral) 에너지 개발의 필요성에 대한 공감대가 형성되고 있다. 바이오파이너지(biorefinery)란 재생 가능한 생물자원인 바이오매스(biomass)를 원료로 사용하여 산업적 목적의 최종 및 중간제품을 생산 및 응용하는 바이오화학산업의 주요 공정이다(〈그림 1〉 참고).

그림 1. 바이오파이너지 개념도



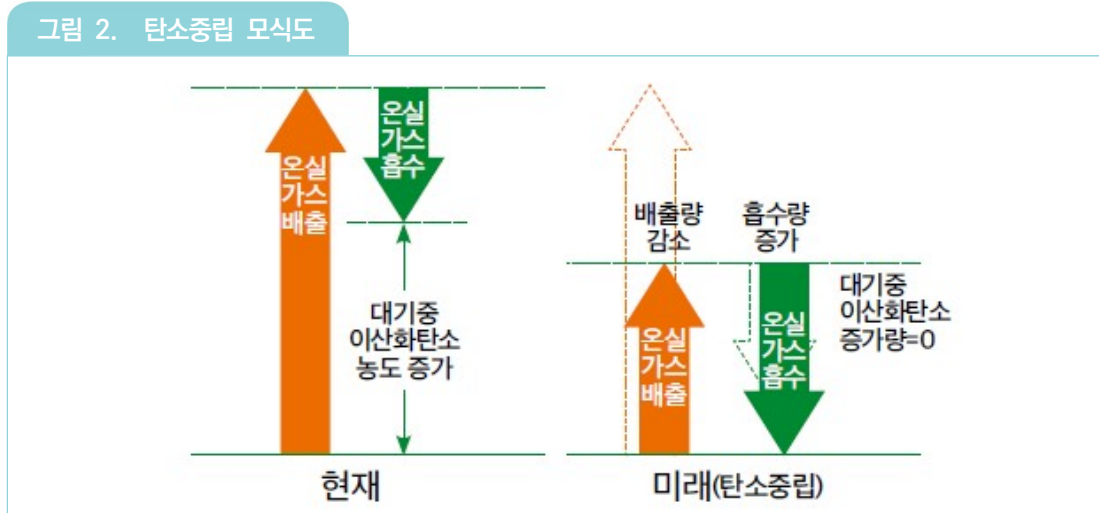
* 출처: 이상엽 & 유승민(2017)

최근에는 여기에서 더 나아가 온실가스(CO₂ 등)와 태양광을 이용해, 또는 온실가스와 외부환원력(수소, 전기)을 이용하여 원하는 바이오에너지와 바이오화학물질들을 생산하는 연구도 활발히 진행 중이다.

2. 바이오리파이너리 기술 개발의 필요성

2.1. 환경적 측면

탄소중립은 대기 중의 이산화탄소 농도가 인간 활동에 의해 더 이상 증가되지 않도록 순 배출량이 0이 되도록 하는 것으로, '넷제로(Net-Zero)'라고도 부른다(그림 2) 참고). 특정 기간 동안 인간 활동에 의한 이산화탄소 배출량이 전 지구적 이산화탄소 흡수량과 균형을 이룰 때 탄소중립이 달성된다. 탄소중립을 달성하기 위해서는 차량 및 공장의 화석 연료 연소 등과 같은 인위적 배출을 가능한 한 0에 가깝게 최대한 줄여야 하며, 나머지 탄소는 숲 복원 등 흡수원을 확대해 흡수량을 증가시키거나 네거티브 배출 기술(NET, Negative Emission Technique)과 같은 탄소 제거기술을 활용해 제거할 수 있다.



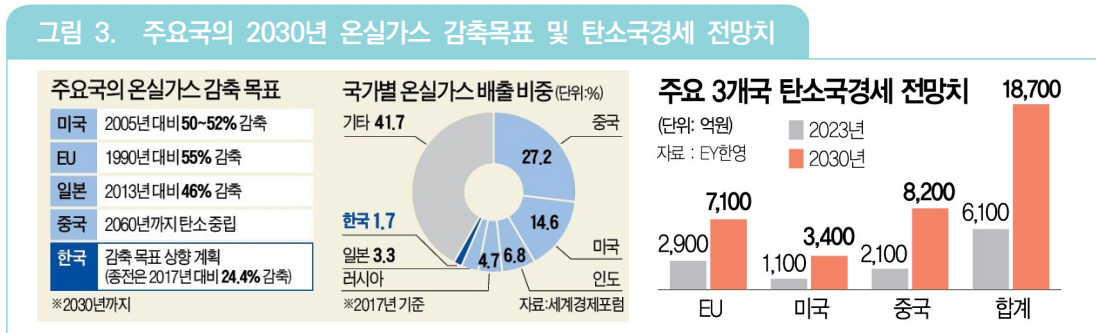
* 출처: 2050 탄소중립위원회(2021)

탄소중립 달성을 위해서는 기존 석유화학 중심의 화학산업 패러다임에 변화가 필요하며 이는 바이오리파이너리를 통해서 달성 가능하다. 관련 산업계에서도 기존 고(高)탄소 석유화학 원료를 저(低)탄소 기반 바이오화학 원료로 대체하여 온실가스 발생저감 및 친환경 산업으로의 전환을 도모하고 있다. 세계 각국의 탄소중립 선언이 이어지는 가운데 바이오리파이너리는 현재 당면한 환경오염과 기후변화, 자원고갈 문제에 대응하면서 우리 경제의 지속 가능한 발전을 동시에 가능케 하는 분야로써 그 중요성은 어느 때보다 높다.

2.2. 산업적 측면

바이오화학산업으로 대표되는 바이오리파이너리 관련 세계 시장규모는 매년 10% 이상의 고성장이 전망되는 분야이다. 시장규모는 좁게는 95억 달러에서 넓게는 6,417억 달러로 추정되고 있으며, 연평균 성장률은 8.9%에서 15.1%로 추정된다. 국내의 경우, 생산규모는 2017년 1조 5,944억 원에서 연평균 7.9% 증가하여 2019년에는 1조 8,551억 원을 기록하였다.

2016년에 체결된 '파리기후변화협정' 이후, 대한민국을 비롯한 주요국이 탄소중립이라는 도전적이고 정량적인 목표를 설정하고 이를 위해 기존 온실가스 감축전략과 함께 탄소중립 순환경제를 정착하고 에너지 및 자원 효율 향상을 도모하고 있다. 특히, 탄소국경세 등 탄소 다배출 규제가 강화됨에 따라 글로벌 기업을 중심으로 ESG 경영(장기적인 관점에서 친환경 및 사회적 책임경영과 투명경영을 통해 지속가능한 발전을 추구하는 것), RE100(재생에너지 전기(Renewable Electricity) 100%의 약자로, 기업 활동에 필요한 전력의 100%를 재생에너지를 이용해 생산된 전기로 사용하겠다는 자발적인 글로벌 신재생에너지 캠페인) 등을 도입 중이다(그림 3) 참고). 향후에도 강화되는 탄소규제에 대응하고자 바이오산업에 대한 시장요구가 화학제품에서 에너지 부문으로 확대될 전망이다.



* 출처: 한경글로벌마켓(2021.07.19)

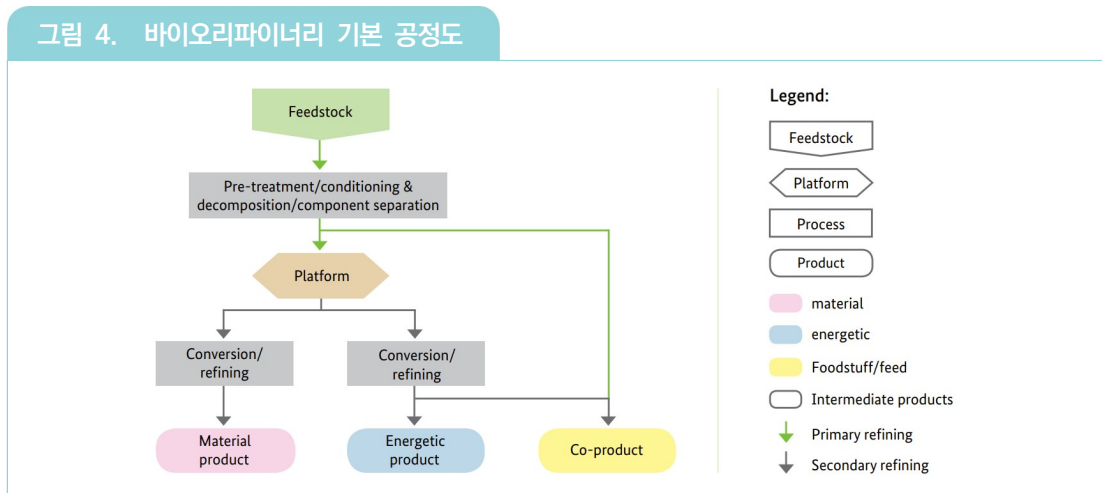
최근 포스트 코로나 시대의 특징인 비대면 상거래의 증가는 모바일을 비롯한 온라인 상거래의 급증과 배달음식 주문의 증가로 포장재에 대한 수요, 특히 일회용 플라스틱의 소비증가를 가져왔다. 또한 위생·방역에 대한 관심이 증대됨에 따라 페이스 실드(face shield, 얼굴 가림막), 투명 방역창(protection wall) 등 개인 보호 장구에 대한 수요가 많아지면서 아크릴수지 또는 글리콜 변성 PET수지(PETG, glycolmodified polyethylene terephthalate) 등의 합성수지 수요가 증가하였으며, KF94 마스크 소비의 급격한 증가로 정전기 필터의 원료로 사용되는 폴리프로필렌(PP, polypropylene)에 대한 수요가 급증하였다. 이러한 시대적 상황을 고려할

때, 바이오리파이너리 관련 산업은 석유화학을 대체하는 패러다임 전환(paradigm shift)형 산업으로 필요가 아닌 필수적인 분야가 될 것이다.

3. 바이오리파이너리 기술 개발 현황(공급원료 측면)

3.1. 기술 분류 및 개발 현황

바이오리파이너리 기술은 여러 단위 공정들이 모인 통합시스템 형태이다. 국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)에서는 바이오리파이너리를 공급원료(feedstock), 전환공정(conversion process), 플랫폼(platform), 제품(product) 등과 같은 4대 주요 구성 요소로 특징지었으며 다음의 <그림 4>와 같이 도식적으로 표현할 수 있다.



* 출처: German Federal Government(2012)

또한 유럽 위원회(European Commission)에서 발간한 보고서 '2030년까지 유럽연합 바이오리파이너리 전망(EU Biorefinery Outlook to 2030)'에 따르면 바이오리파이너리 기술의 4대 구성 요소 중 하위 카테고리를 다음의 <표 1>과 같이 확인할 수 있다. 우선, 공급원료(feedstock)부터 살펴보면 바이오매스를 1차, 2차로 구분하였는데 1차 바이오매스(primary biomass)는 인공적 또는 자연적 광합성에 의해 생성된 바이오매스를 의미하고 산림, 농경지, 수계 또는 생물 반응기에서 얻을 수 있다. 2차 바이오매스(secondary biomass)는 1차 바이오매스를 전환 또는 분해하는 과정에서 생성되는 바이오매스 즉, 잔사물을 의미한다.

전환공정(conversion process)의 경우 생물화학적(biochemical), 화학적(chemical), 기계 및 열기계학적(mechanical and thermomechanical), 열화학적(thermochemical) 4가지 방법으로 구분할 수 있으며 바이오매스의 전처리 방법에도 사용될 수 있다.

또한 최종산물과 공급 원료를 이어주는 중간산물을 의미하는 플랫폼(platform)은 C5/C6 당 플랫폼, 바이오 오일 플랫폼, 합성가스 플랫폼과 같이 여러 종류의 바이오리파이너리를 표현하는 방법이 되기도 하면서 사용되는 플랫폼의 수는 바이오리파이너리 시스템의 복잡도를 나타낸다.

마지막으로 제품(product)은 바이오리파이너리 기술을 통해 생산할 수 있는 최종산물을 의미하는데 최근에는 바이오 연료뿐만 아니라 바이오화학 분야까지 스펙트럼을 넓혀서 분류가 세분화되고 있는 추세이다.

표 1. 바이오리파이너리 기술 분류 시스템

1. Feedstock	2. Conversion Process	3. Platform	4. Product
<p>1.1. Primary biomass:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aquatic biomass • Lignocellulosic from croplands and grasslands • Lignocellulosic wood/forestry • Oil crops • Starch crops • Sugar crops • *Other primary biomass <p>1.1. Secondary Biomass:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Microbial biomass • Residues from agriculture • Residues from aquatic biomass • Residues from forestry and forest-based industry • Residues from nature and landscape management • Residues from recycled bio-based products • *Other organic residues 	<p>2.1. Biochemical:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aerobic conversion • Anaerobic digestion • Enzymatic process • Fermentation • Insect-based bioconversion • Other biochemical conversion <p>2.2. Chemical:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Catalytic • Esterification • Hydrogenation • Hydrolysis • Methanation • Chemical Pulping • Steam reforming • Water electrolysis • Water gas shift • *Other chemical conversion <p>2.3. Mechanical and thermomechanical:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Blending • Extraction • Mechanical & thermomechanical disruption & fractionation • Mechanical pulping • Separation processes • Other mechanical and thermomechanical conversion <p>2.4. Thermochemical:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Combustion • Gasification • Hydrothermal liquefaction • Pyrolysis • Supercritical conversion • Torrefaction & Carbonization • *Other thermochemical conversion 	<ul style="list-style-type: none"> • Biochar • Bio-Coal • Bio-Crude • Biogas • Bio-oils • Bio-hydrogen • Bio-Naphtha • C5/C6 sugars • Carbon dioxide • Lignin • Oils • Organic Fibres • Organic Juice • Protein • Pyrolytic Liquid • Starch • Syngas • *Other platform 	<p>4.1. Chemicals:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Additives • Agrochemicals • Building blocks⁶⁸ • Catalysts & Enzymes • Colorants • Cosmeceuticals • Flavours & Fragrances • Lubricants • Nutraceuticals • Paints & Coatings • Pharmaceuticals • Solvents • Surfactants • *Other chemical product <p>4.2. Materials:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Composites • **Fibres • Organic Fertilizers • Polymers • Resins • *Other material product <p>4.3. Food</p> <p>4.4. Animal Feed</p> <p>4.5. Energy:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cooling agents • Fuels • Heat • Power • *Other energy product

* 출처: European Commission(2021)

지금까지 소개된 구성요소를 바탕으로 바이오리파이너리를 통해 생산되는 바이오 연료 기술 개발 현황을 살펴보면, 사용되는 공급원료의 종류에 따라 1세대를 거쳐 4세대까지 진화하고 있다(〈표 2〉 참고).

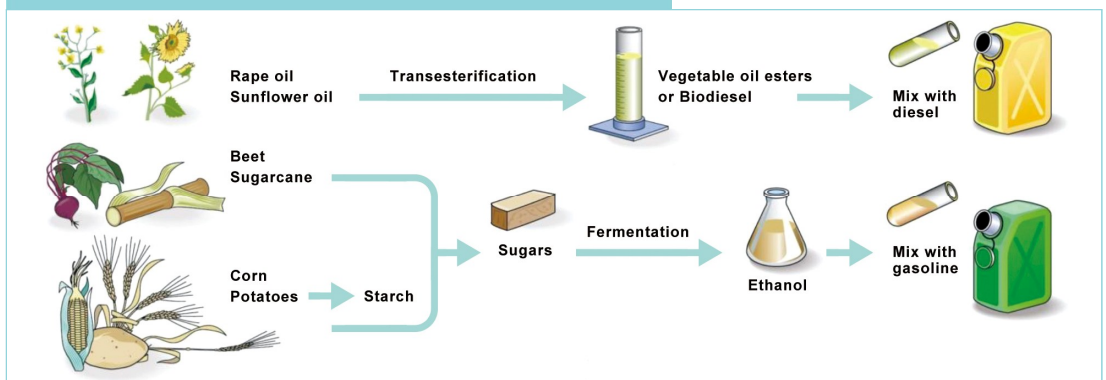
표 2. 바이오리파이너리(바이오 연료 생산) 진화 단계

구분	원료
1세대	곡물에서 생산된 에탄올, 식물성 기름에서 생산된 바이오 디젤 등 식량작물로부터 생성된 바이오 연료
2세대	목재, 폐기물 등 폐자원을 활용한 비식량계 바이오매스로 생산된 바이오 연료
3세대	GMO, 조류로부터 생산된 바이오 연료
4세대	바이오 연료 생산과 이산화탄소 포집·저감이 연계된 첨단 생물변환 기술로 개발된 작물로부터 생산된 바이오 연료

* 출처: 융합연구정책센터(2018)

우선, 1세대 바이오 연료(〈그림 5〉 참고)는 식량자원으로도 활용될 수 있는 옥수수, 사탕수수, 대두, 유채 등의 곡물 기반으로 전분계, 당질계로 쉽게 전환되며 미생물 발효를 통해 바이오에탄올을 생산한다. 또한 식물성 기름은 전이 에스테르화(transesterification) 반응을 통해 바이오디젤로 전환할 수 있다. 특히, 우리나라의 경우 RFS(Renewable Fuel Standard, 신재생에너지 연료 혼합 의무화) 제도에 의해 바이오디젤을 3.5%(2022년) 수송용 경유에 혼합 사용하고 있으며 점차 확대 예정이다.

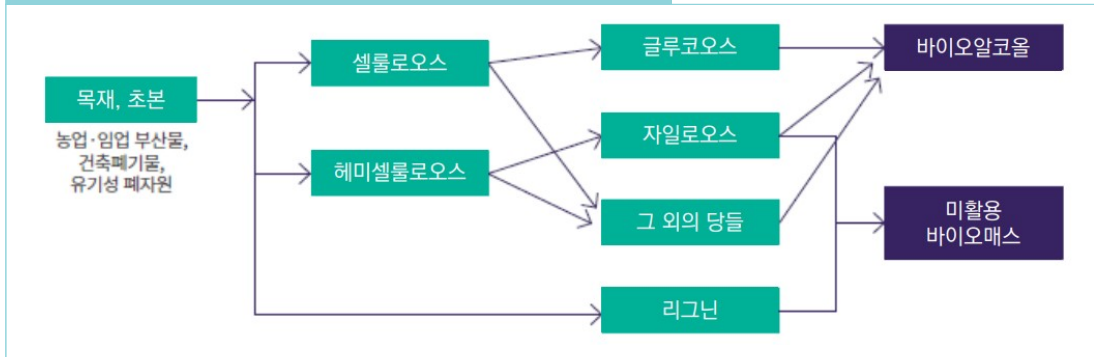
그림 5. 1세대 바이오매스 유래 바이오 연료 생산 공정



* 출처: Planet Decarb 사이트

2세대 바이오 연료(〈그림 6〉 참고)는 1세대 바이오 연료가 식량자원 기반이라는 한계점을 가지고 있기 때문에 제안된 방법으로 주성분이 리그닌(lignin), 셀룰로오스(cellulose), 헤미셀룰로오스(hemicellulose)로 구성된 목질계 바이오매스를 이용한다. 비식용 바이오매스 원료를 윤리적 문제없이 안정적으로 확보할 수 있다는 장점이 있지만 리그닌의 전처리 및 셀룰로오스 분해 비용이 추가로 발생된다.

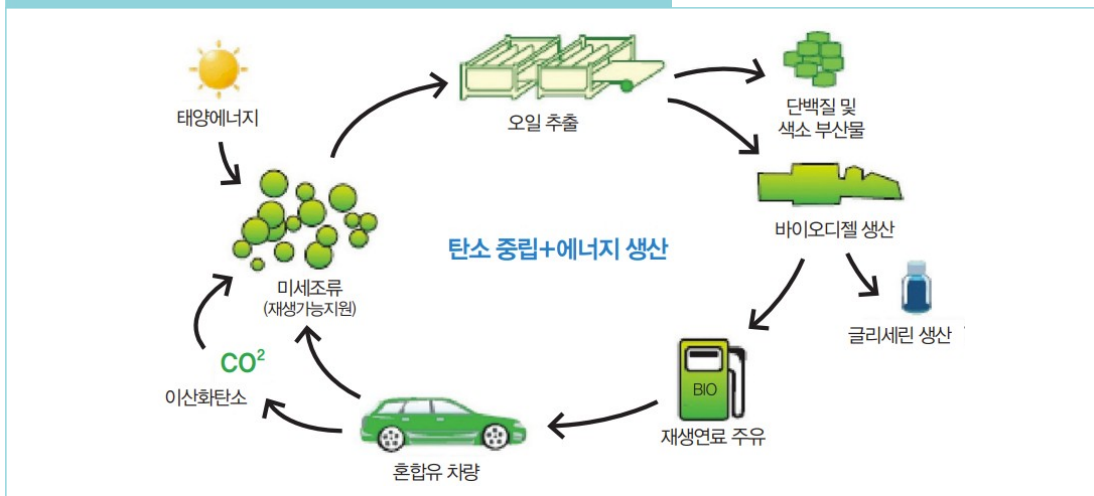
그림 6. 2세대 바이오매스 유래 바이오 연료 생산 공정



* 출처: 융합연구정책센터(2018)

3세대 바이오 연료(그림 7) 참고)는 1세대와 2세대의 단점이었던 식용 작물이면서 전처리 비용이 높은 부분을 해결하기 위해 제안된 방법으로 미세조류 바이오매스를 사용한다. 미세조류 바이오매스는 비식용 자원이면서 2세대 바이오매스와 다르게 리그닌이 없어 추가적인 전처리 비용이 필요가 없다. 미세조류 바이오매스 유래 바이오 연료 생산 하위 기술로는 배양, 수확, 추출, 전환 공정이 있으며 현재까지도 많은 연구들이 진행되고 있지만 여전히 공급 원료의 경제적이며 안정적인 확보를 위한 대량배양 기술 개발이 필요하다.

그림 7. 3세대 바이오매스 유래 바이오 연료 생산 공정



* 출처: 경제정보센터(2015)

4. 지속 가능성 관점에서 본 기술 개발 이슈

앞서 설명된 바이오매스 세대별 바이오리파이너리 기술들을 지속 가능성 관점에서 살펴보면(〈표 3〉 참고) 1세대 바이오매스는 곡물 자원으로 당으로의 전환이 쉬워 바이오 연료 생산 공정이 비교적 간단하다는 장점이 있고 주로 바이오매스를 충분히 확보할 수 있는 경작지가 넓은 미국과 브라질 같은 나라에서 생산되고 있다. 하지만, 곡물을 원료로 사용하기 때문에 식량 문제와 상충하는 윤리적 문제에서 벗어날 수 없다. 또한 지구 온난화 같은 이상 기후에 따른 수확량 감소와 더불어 개발도상국의 곡물 수요 급증 및 바이오 연료의 수요 증가로 곡물 가격이 상승하는 부작용이 존재한다. 따라서 세계적으로도 지속가능한 공급 원료를 확보하기 위해 비식용 작물인 2세대, 3세대 바이오매스 활용 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 우리나라의 좁은 면적으로는 충분한 목질계 바이오매스를 확보하기에 어려움이 있고 전처리 및 수송에도 비용 부담이 있으며, 원료가 균일하지 않다는 단점도 있다. 또한 3세대 바이오매스인 미세조류도 활발히 연구가 진행되었지만, 우리나라의 높은 토지가격과 더불어 월별 평균기온이 미세조류 성장의 적온보다 낮은 날이 많아 야외에서 대량 생산하기에는 불리하고 충분한 광량을 확보하기도 어려워 외부 광원을 사용해야 하는 경제적 이슈가 발생한다. 따라서 지금까지 개발되었던 1세대 바이오매스부터 2, 3세대 바이오매스 기반 바이오리파이너리 기술들을 살펴보았을 때 독특한 우리나라 실정에 맞는 바이오 연료 및 바이오화학 소재를 지속 가능하게 생산할 수 있으며 탄소중립 구현에도 이바지할 수 있는 새로운 개념의 바이오리파이너리 기술 개발 접근 방법이 필요하다.

표 3. 지속 가능성 관점에서 본 각 세대별 바이오매스의 한계점

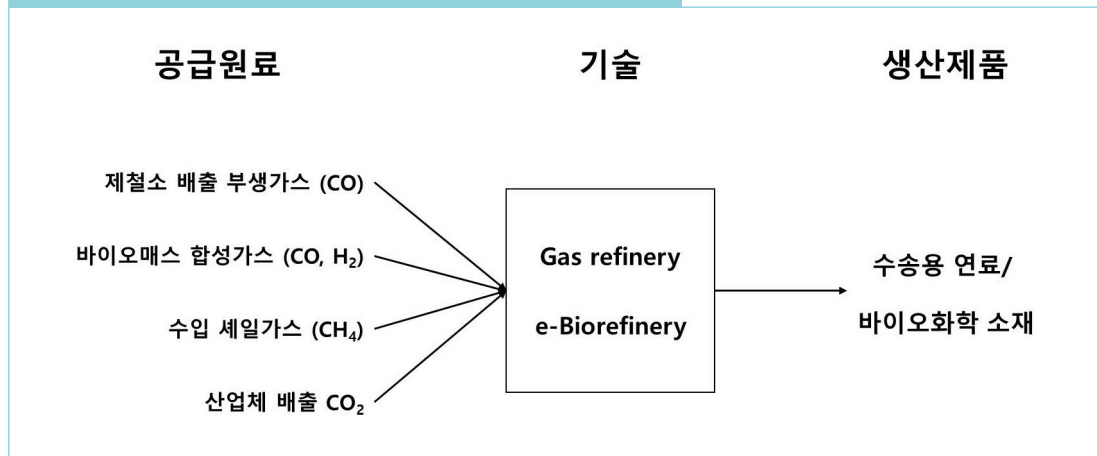
	주요 작물	세대 구분	특징
식용 자원	옥수수, 사탕수수, 콩 등	1세대	곡물가격 상승 등의 부작용 존재, 식량자원에 관한 윤리문제 존재
비식용 자원	식물 줄기, 목재 등	2세대	셀룰로오스 분해를 위한 추가 공정 및 비용이 소요, 자원 수집 및 수송에 비용 부담이 있으며, 원료가 균일하지 않음
	미세조류, 해조류 등	3세대	에너지 전환율이 높으나, 경제적 대량생산을 위한 기술개발 보완 필요

* 출처: KISTEP(2022)

5. 탄소중립 구현을 위한 바이오리파이너지 제안

융합연구리뷰에서는 앞서 이야기한 지속 가능한 관점에서 탄소중립 구현이 가능한 새로운 전략으로 가스리파이너지와 e-바이오리파이너지 개념을 소개하고자 한다. 기존 바이오리파이너지 기술의 한계점이었던 공급원료 수급과 관련하여 좁은 면적을 가진 우리나라의 상황에 맞게 산업체 배출 가스(CO, CH₄, CO₂를 포함하는 산업체 발생 부생가스)를 생물학적으로 전환하는 바이오리파이너지 기술이다. 가스리파이너지는 대기 중으로 배출되어 온실가스로 작용하였던 가스들을 미생물의 공급 원료로 사용하여 산업체 배출 폐가스 내 탄소의 고정화 및 유용 물질 전환으로 가치를 높이고 e-바이오리파이너지 기술은 추가로 미생물에 직접 전자(환원력)를 제공해주어 이산화탄소를 고정화할 수 있도록 하는 미생물전기합성 바이오 융합기술을 사용한다. 이처럼 산업 배출 가스 내 온실가스를 적극적으로 고정화하고 저감하는 CCU(Carbon Capture and Utilization, 이산화탄소 포집 및 저장) 기술과도 연계될 뿐 아니라 기존 바이오매스 기반 바이오리파이너지의 한계점도 극복하며 연료 및 바이오 기반 화학소재를 지속 가능하게 생산하는 신개념 기술이다(그림 8) 참고).

그림 8. 신개념 CCU 연계 바이오리파이너지 기술 개요

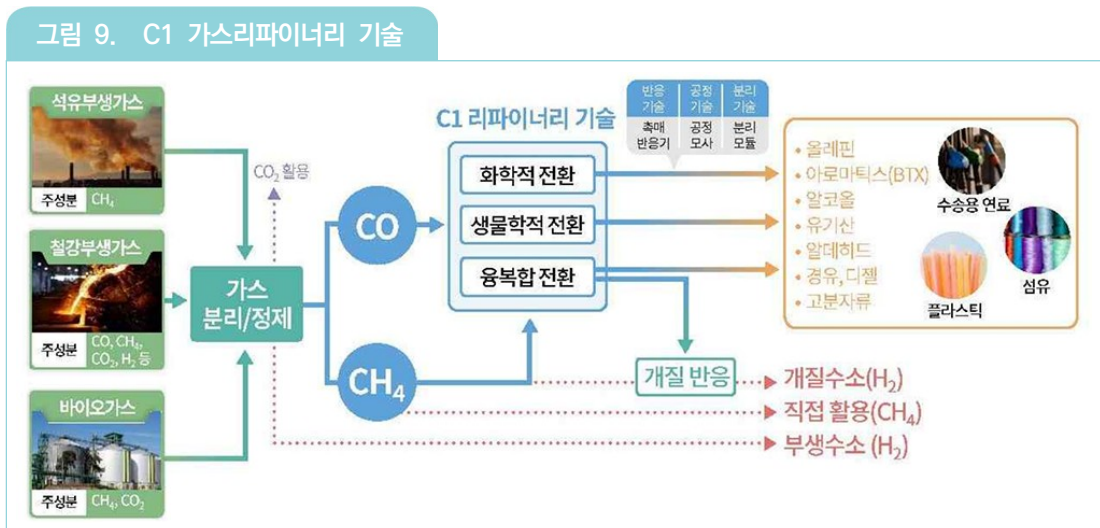


* 출처: 저자 작성

II CCU 연계 바이오리파이너리 기술(I): C1 가스리파이너리

1. 기술의 개념 및 특징

C1 가스란 산업 유래의 부생가스 및 합성가스, 바이오가스 및 셰일가스(shale gas)를 포함한 천연가스 내 탄소(C, carbon) 수가 1개인 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄)가스를 지칭하는 용어이다. 대기 중에 방출되거나 기존처럼 단순 열에너지로만 사용된다면 지구 온난화와 더불어 기후변화에 직간접적으로 영향을 주는 온실가스이지만 다른 한편으로 C1 가스 전환 기술인 가스리파이너리를 통하여 수송용 연료 및 기초 화학소재 생산의 원료물질로 활용 가능한 탄소 자원이기 때문에, 최근 전 세계적으로 온실가스 활용 및 감축과 함께 석유 의존도를 낮추는 대안으로 C1 가스리파이너리 기술개발 연구가 활발히 진행되고 있다. C1 가스리파이너리 기술은 아래의 <그림 9>와 같이 C1 가스의 화학적, 생물학적 융복합 전환을 통해 수송용 연료 및 화학 원료 생산기술을 포괄하나 융합연구리뷰에서는 C1 가스의 생물학적 전환 기술에 집중하여 서술하고자 한다.



* 출처: 관계부처 합동(2021)

2. 기술개발 동향

2.1. 가스리파이너리 전환 기술개발 개요

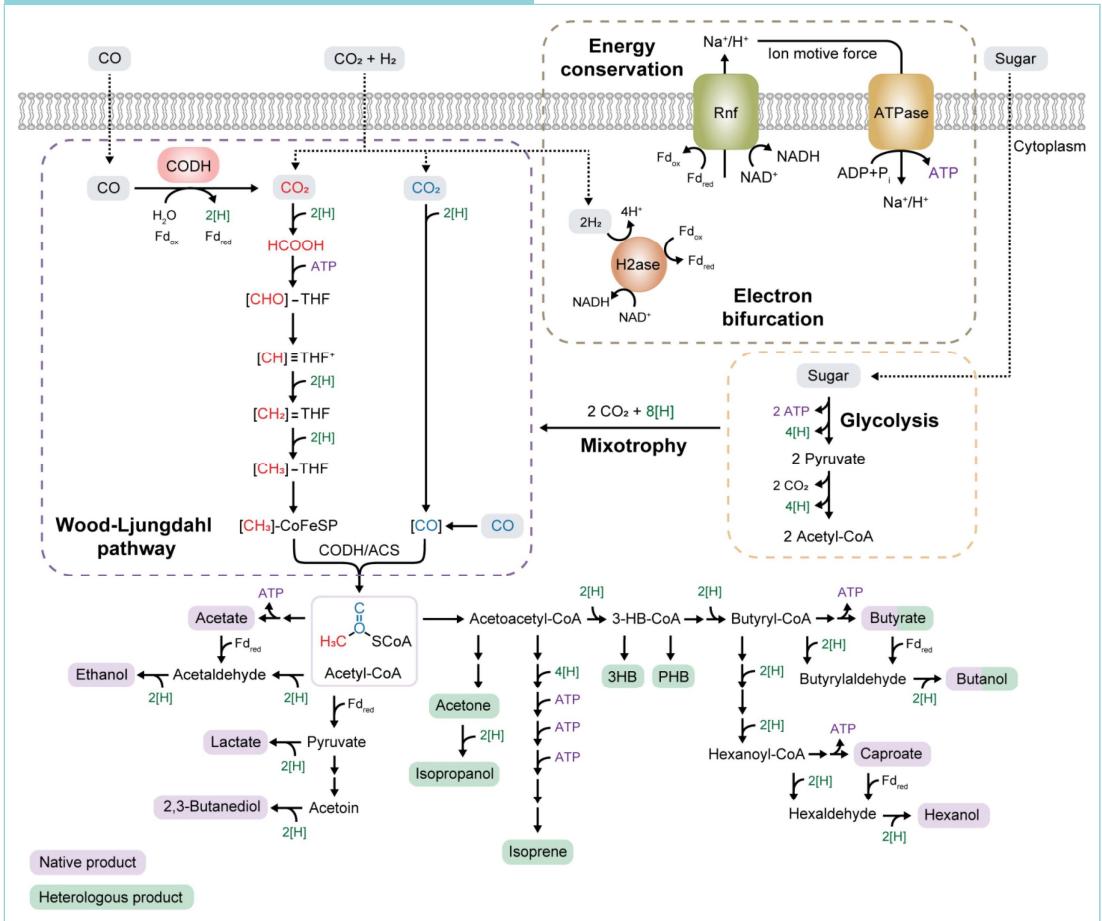
1) CO의 생물학적 전환 기술

일산화탄소(CO)는 불완전 연소로 발생하는 무색무취의 가스로 산업 현장에서는 수소(H₂)와 함께 합성가스(syngas)의 주요 성분으로 잘 알려져 있다. 합성가스는 가스화(gasification)를 통해 생산할 수 있으며 사용 가능한 원료의 종류로는 석탄(coal), 바이오매스(biomass), 도시형 생활폐기물(MSW, Municipal Solid Waste), 농업부산물, 폐기물(고형/유기물)로 스펙트럼이 넓다. 전통적으로 합성가스는 피셔-트로프쉬 합성(Fischer-Tropsch synthesis)을 통해 탄화수소(hydrocarbon) 형태의 액체형 연료를 생산하는 데 주로 사용되고 있으나 생물 전환 기술 대비 높은 반응 온도(200~300℃) 및 압력(10~40 bar)이 필요하고 합성가스 내 황, 염소 및 타르와 같은 불순물에 의한 촉매 피독(촉매에 극소량의 다른 물질이 들어가 촉매에 강하게 흡착하거나 또는 결합하여 촉매의 활성을 감소시키는 현상)으로 인한 추가적인 세정 공정이 필요하다. 그러나 생물 전환 기술은 사이안화 수소(HCN, Hydrogen Cyanide) 물질을 제외하고는 화학 전환 기술 대비 피독 물질에 강하다고 알려져 있다.

가스화 이외에 철강 산업에서 발생하는 부생가스 내에도 다양한 조성의 C1 가스를 확인할 수 있다. 대표적인 철강 산업 부생가스로는 COG(Coke Oven Gas, 코크스 오븐 가스), BFG(Blast Furnace Gas, 고로 가스), LDG(Linz-Donawitz Converter Gas, 전로가스), FOG (Finex Off Gas, 파이넥스 부생가스)가 있으며 총 발생량은 78.9 백만 톤/년 정도로 대부분이 발전용으로 사용되고 있으나 생물학적 전환기술의 경제성이 개선되면 미생물의 공급 원료로도 충분히 활용 가능하다.

독성가스로 알려진 CO는 소량으로도 대부분의 생명체에게 치명적인 피해를 준다고 알려져 있으나 CO를 대사할 수 있는 일부 미생물들을 이용하면 생물학적 전환을 통해 다양한 유용물질 생산이 가능하다. 토양, 퇴적물, 동물의 장내에 서식하며 CO를 이용하는 대표적인 미생물인 아세트젠(acetogen)이라 불리는 혐기성 미생물들(anaerobic microorganisms)은 에너지 효율이 높은 우드-융달 대사경로(Wood-Ljungdahl pathways)를 통해 C1 가스를 고정화하여 생체 내 다양한 빌딩 블록을 합성하고 생장에 필요한 에너지를 얻을 수 있다. 다음의 <그림 10> 및 <그림 11>은 C1 가스 대사 경로 및 대표적인 미생물들의 종류와 성장 조건을 나타낸다.

그림 10. 아세트젠 내 C1 가스 대사 경로



* 출처: Bae et al.(2022)

그림 11. 대표 아세트젠 미생물의 성장 조건 및 대사산물

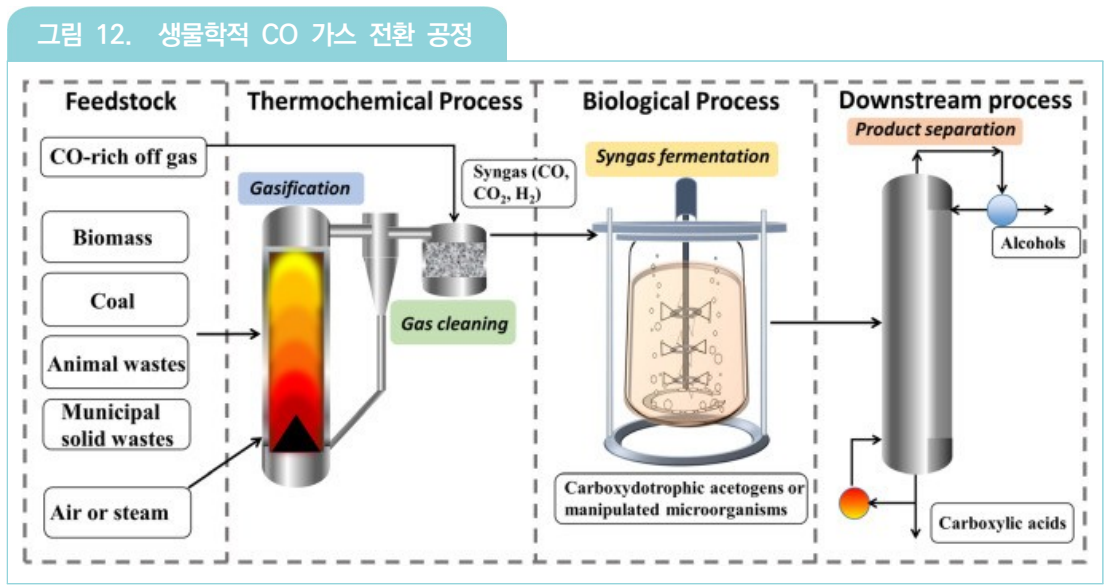
Species	Gaseous substrate	T _{opt} ^a (°C)	pH _{opt} ^b	Natural products	Ref.
<i>Acetobacterium woodii</i>	H ₂ /CO ₂ , CO/H ₂ / CO ₂	30	7.2	Acetate	[29,30]
<i>Butyribacterium methylotrophicum</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	37	7.5	Acetate, ethanol, butyrate, butanol	[31-33]
<i>Clostridium aceticum</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	30	8.3	Acetate	[34]
<i>Clostridium autoethanogenum</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	37	5.8-6.0	Acetate, ethanol, 2,3- butanediol	[35,36]
<i>Clostridium carboxidivorans</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	38	5.0-7.0	Acetate, ethanol, butyrate, butanol, caproate, hexanol	[37,38]
<i>Clostridium ljungdahlii</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	37	6	Acetate, ethanol, 2,3- butanediol	[35,39]
<i>Clostridium ragsdalei</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	37	6.3	Acetate, ethanol, 2,3- butanediol	[35]
<i>Eubacterium limosum</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	37-39	7.0-7.2	Acetate, butyrate	[29,40,41]
<i>Moorella thermoacetica</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	55	6.5-6.8	Acetate	[42,43]
<i>Thermoanaerobacter kivui</i>	H ₂ /CO ₂ , CO	66	6.4	Acetate	
<i>Sporomusa ovata</i>	H ₂ /CO ₂	30-34	6.3	Acetate	[44]

^a T_{opt}: optimal temperature.

^b pH_{opt}: optimal pH.

* 출처: Bae et al.(2022)

CO를 기질로 활용하여 유용한 물질을 생산하는 생물전환 공정의 구성은 다음의 <그림 12>와 같이 부생가스 또는 가스화 기반 합성가스 내 CO 확보, 아세트젠을 이용한 가스 발효, 대사산물 분리와 같은 여러 단위 공정들을 통합하여 이루어진다.

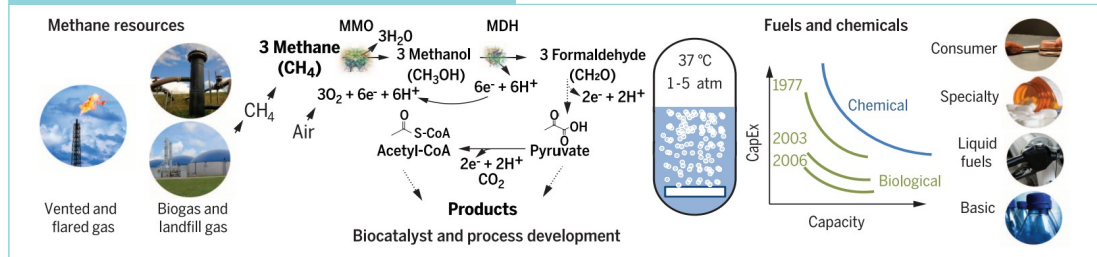


* 출처: Sun et al.(2019)

2) CH₄의 생물학적 전환 기술

메탄가스(CH₄)는 천연가스의 대부분을 차지하고 있으며 주로 오일 채굴과정에서 유출되거나 축사, 쓰레기 매립지, 해양 등에서 발생하며 이산화탄소에 비해 방출량은 적지만 약 20배 높은 온실 효과를 유발한다고 알려진 온실가스이다. 메탄은 높은 결합에너지를 갖는 C-H bond(Carbon-Hydrogen bond, 탄소-수소 결합)로 되어있어 활성화하기 위해서는 높은 에너지가 필요하다. 기존의 화학적 전환 방법으로는 고온 및 고압의 금속 촉매 공정을 이용하여 syngas로 전환 후 다른 화학제품을 만드는 간접전환 방법을 주로 사용하고 있지만 반응 효율이 낮고 투자 비율이 높다. 그에 반해 생물학적 메탄 전환 방법은 메탄자화균(methanotroph) 유래 메탄산화효소(MMO, methane monooxygenase)를 기반으로 상온·상압에서 메탄을 메탄올로 전환할 수 있으며, 메탄자화균은 메탄뿐만 아니라 이산화탄소도 동시에 고정화할 수 있는 특징이 있어 바이오가스 활용에도 가능하다.

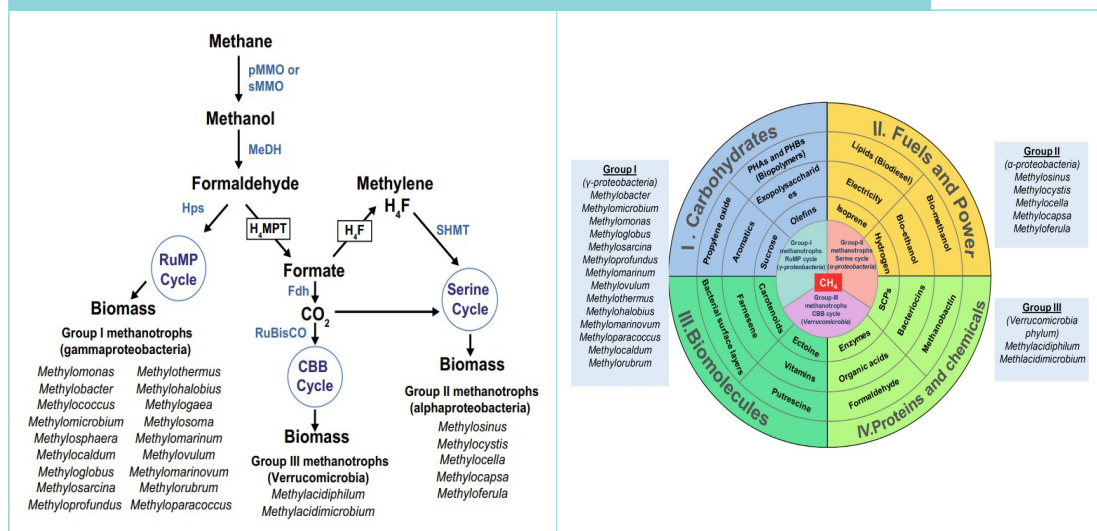
그림 13. 생물학적 CH₄ 가스 전환 공정



* 출처: Clomburg et al.(2017)

메탄자화균 내 MMO는 가용성 메탄산화효소(sMMO, soluble methane monooxygenase)와 미립자 메탄산화효소(pMMO, particulate methane monooxygenase)로 나눌 수 있다. 특히 sMMO는 일부 메탄자화균에만 존재한다. 메탄자화균을 구별하는 여러 특성 중 메탄 대사 경로에 따라 분류할 수 있다. Group I 메탄자화균은 메탄으로부터 전환된 포름알데히드를 동화하는 RuMP(ribulose monophosphate) pathway를 주요 대사 경로로 사용하며, Group II 메탄자화균은 주로 serine pathway를 사용하여 대사한다(그림 14) 참고). 또한 메탄자화균은 다양한 메탄 대사 경로로 지방산 메틸에스테르(FAME, Fatty Acid Methyl Ester), 아스타잔틴(astaxanthin), 락테이트(lactate) 등 여러 유용물질들을 생산할 수 있다.

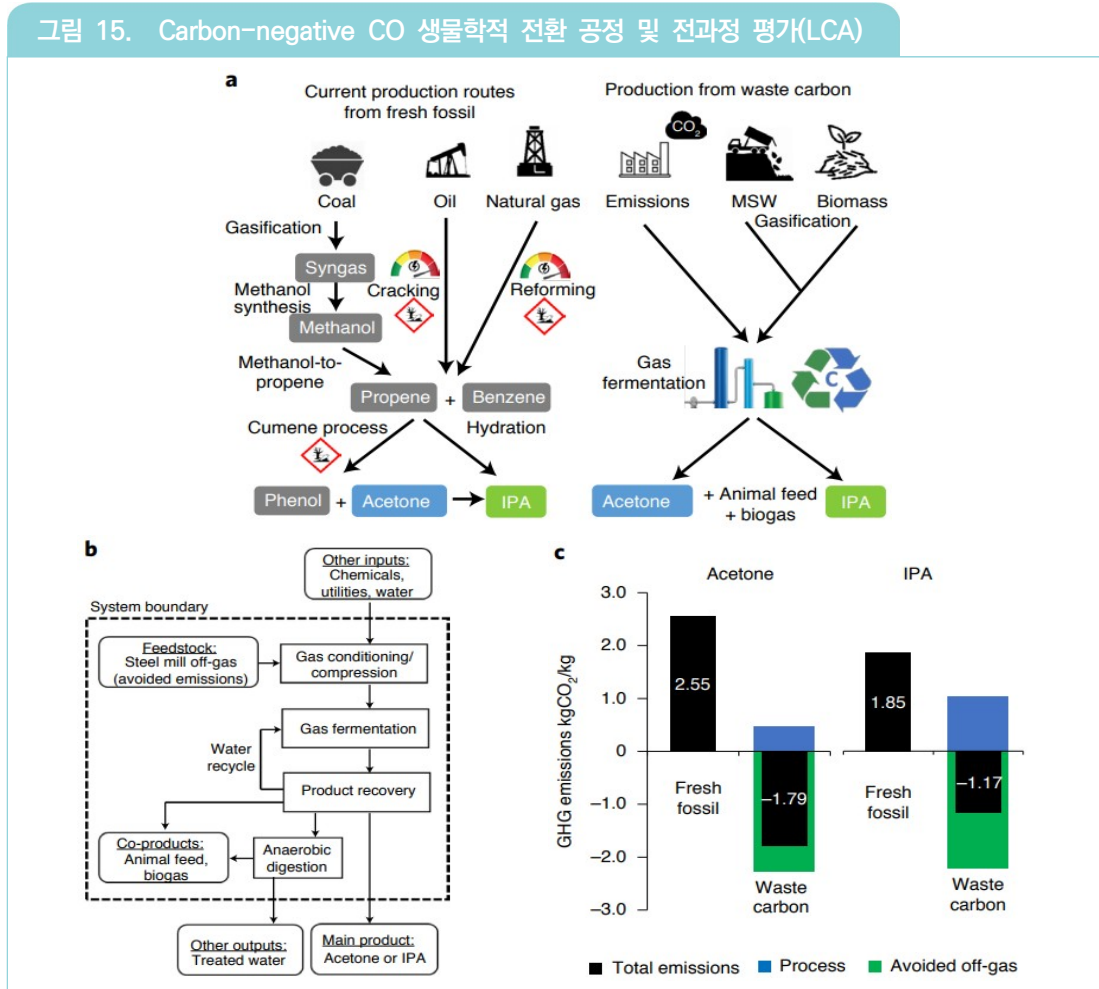
그림 14. CH₄ 가스 대사경로에 따른 메탄자화균의 분류 및 전환가능 유용물질



* 출처: Kalyuzhnaya et al.(2015), Jawaharraj et al.(2020)

2.2. 해외 기술개발 동향

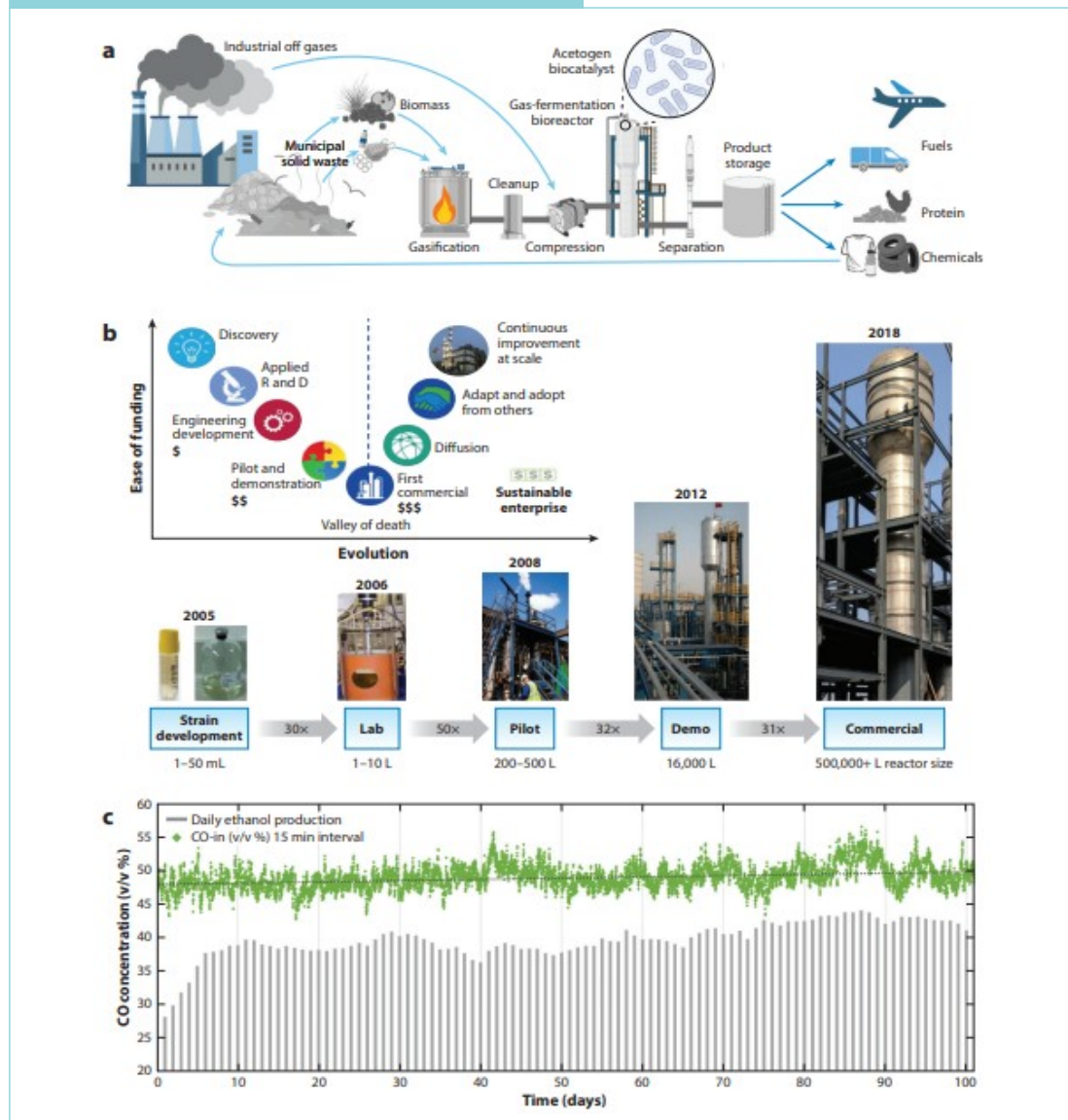
CO 가스 생물학적 전환 관련 기술개발 동향으로 미국 노스웨스턴 대학 연구팀에서 Nature Biotechnology 저널에 발표한 결과에 따르면, 대표 아세토젠인 클로스트리디움 오토에타노게눔(*Clostridium autoethanogenum*)을 유전자 조작하여 아세톤과 이소프로필알코올(IPA, isopropyl alcohol)을 합성하였으며, 파일럿 공정의 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment) 결과, 가스발효로 아세톤을 생산 시 $-1.78 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$, IPA는 $-1.17 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ 만큼의 온실가스를 흡수하는 것으로 분석되었으며 이는 가스리파이너리 기술을 통해 온실가스 저감이 가능하다는 것을 방증한다(그림 15) 참고).



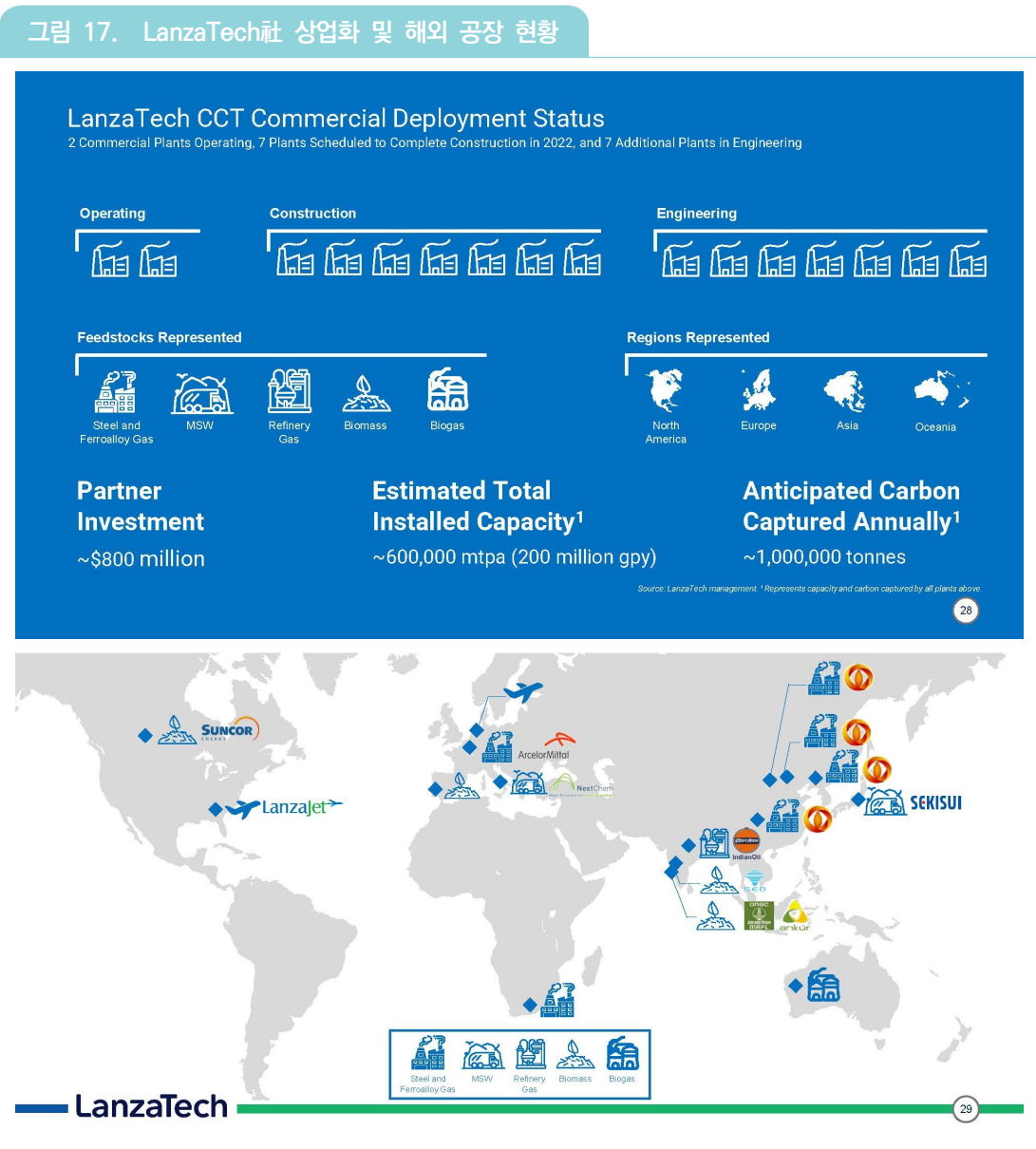
* 출처: Liew et al. (2022)

또한 LanzaTech社는 CO 가스를 이용한 에탄올 생산 공정을 랩 스케일부터 500톤 규모의 사업화 시설까지 개발에 성공하였으며 중국 서우광(Shougang) 및 일본 Sekisui社 등과 협력하여 제철소 부생가스, MSW 기반 플랜트를 건설하며 가스리파이너리를 확대하고 있다(그림 16) 및 (그림 17) 참고).

그림 16. LanzaTech社 상업화 공정 개발 단계



* 출처: Fackler et al.(2021)

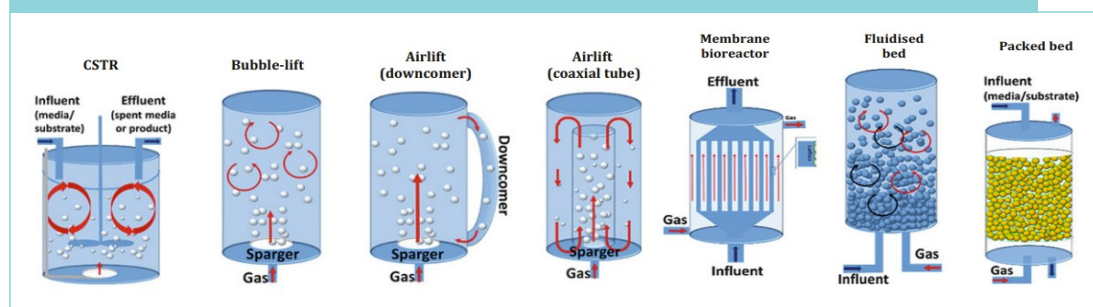


* 출처: Fackler et al.(2021)

CH₄의 생물학적 전환의 기술개발 동향은 메탄산화균 배양의 기술적, 생물학적 한계점을 극복하기 위한 방향으로 이루어지고 있다. 우선 기술적 한계점으로 메탄 생물전환 배양 뿐 아니라 가스배양의 일반적인 문제점인 낮은 기-액 물질 전달의 한계를 극복하는 것이다. 기본적으로 랩스케일(lab scale) 반응기 배양은

연속 교반 탱크 반응기(CSTR, Continuous Stirred Tank Reactor)를 많이 사용하지만 여러 연구자들이 기포탑, 공기 부양식, 압력 반응기, 다상반응기 형태와 같이 반응기의 다양한 디자인을 통해 낮은 기-액 전달의 한계를 극복하고자 노력하고 있다(그림 18) 참고).

그림 18. 낮은 기-액 전달 한계를 극복하기 위해 사용되는 다양한 가스 배양 생물반응기



* 출처: Mühlemeier et al.(2022)

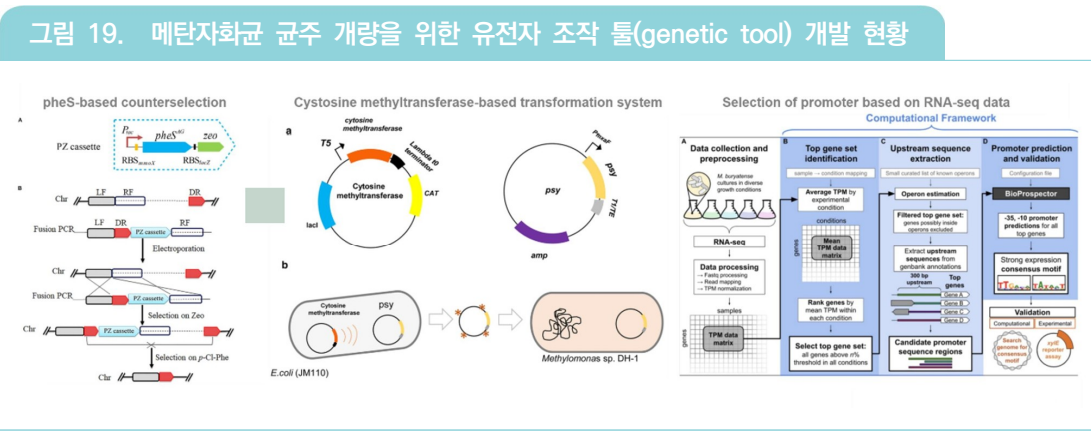
생물학적 도전과제로는 2차 대사산물에 대한 낮은 탄소 플럭스(flux)가 있는데 메탄산화균으로 생산할 수 있는 생분해성 고분자인 폴리하이드록시 부티레이트(PHB, polyhydroxybutyrate) 또한 대량으로 축적하기 위해서는 배지 내 특정 영양분(칼륨, 황, 철, 암모늄, 인, 마그네슘, 질소 등)의 제한 조건을 이용하여 PHB 고분자량 및 함량을 높이는 연구도 진행 중이다(표 4) 참고).

표 4. 고분자량 PHB 생산을 위한 전략

Microorganisms	Mw(MDa)	Reactor Type	Techology	PHB(%)	$Y_{PHB/CH_4}(g\ g^{-1})$
<i>Methylocystis</i> sp. GB 25 DSM 7674	3.10	Pressure bioreactor	Potassium deficiency	33.60	0.45
<i>Methylocystis</i> sp. GB 25 DSM 7674	2.46	Pressure bioreactor	Sulfur deficiency	32.60	0.40
<i>Methylocystis</i> sp. GB 25 DSM 7674	1.81	Pressure bioreactor	Iron deficiency	10.40	0.22
<i>Methylosinus trichosporium</i> IMV3011	1.50	Shake flasks	Citric acid+Methanol	40.00	-
<i>Methylocystis</i> sp. GB 25 DSMZ 7674	2.50	Pressure bioreactor	Ammonium deficiency	51.30	0.52
<i>Methylocystis</i> sp. GB 25 DSMZ 7674	2.50	Pressure bioreactor	Phosphorus deficiency	46.80	0.55
<i>Methylocystis</i> sp. GB 25 DSMZ 7674	2.50	Pressure bioreactor	Magnesium deficiency	28.30	0.37
<i>Methylocystis</i> sp. GB 25 DSM 7674	2.30	Pressure bioreactor	Nitrogen deficiency	51.00	0.54

* 출처: Liu et al.(2020)

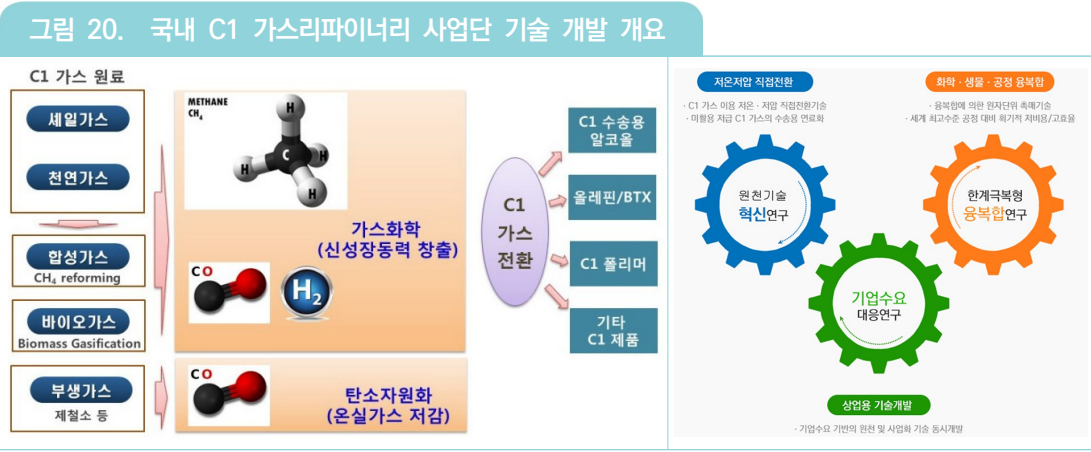
뿐만 아니라 여러 유용 물질 생산이 가능한 메탄산화균 기반 산업 플랫폼 균주 개량을 위해 유전자 조작물 개발도 활발히 진행 중이다(그림 19) 참고).



* 출처: Pham et al.(2022)

2.3. 국내 기술개발 동향

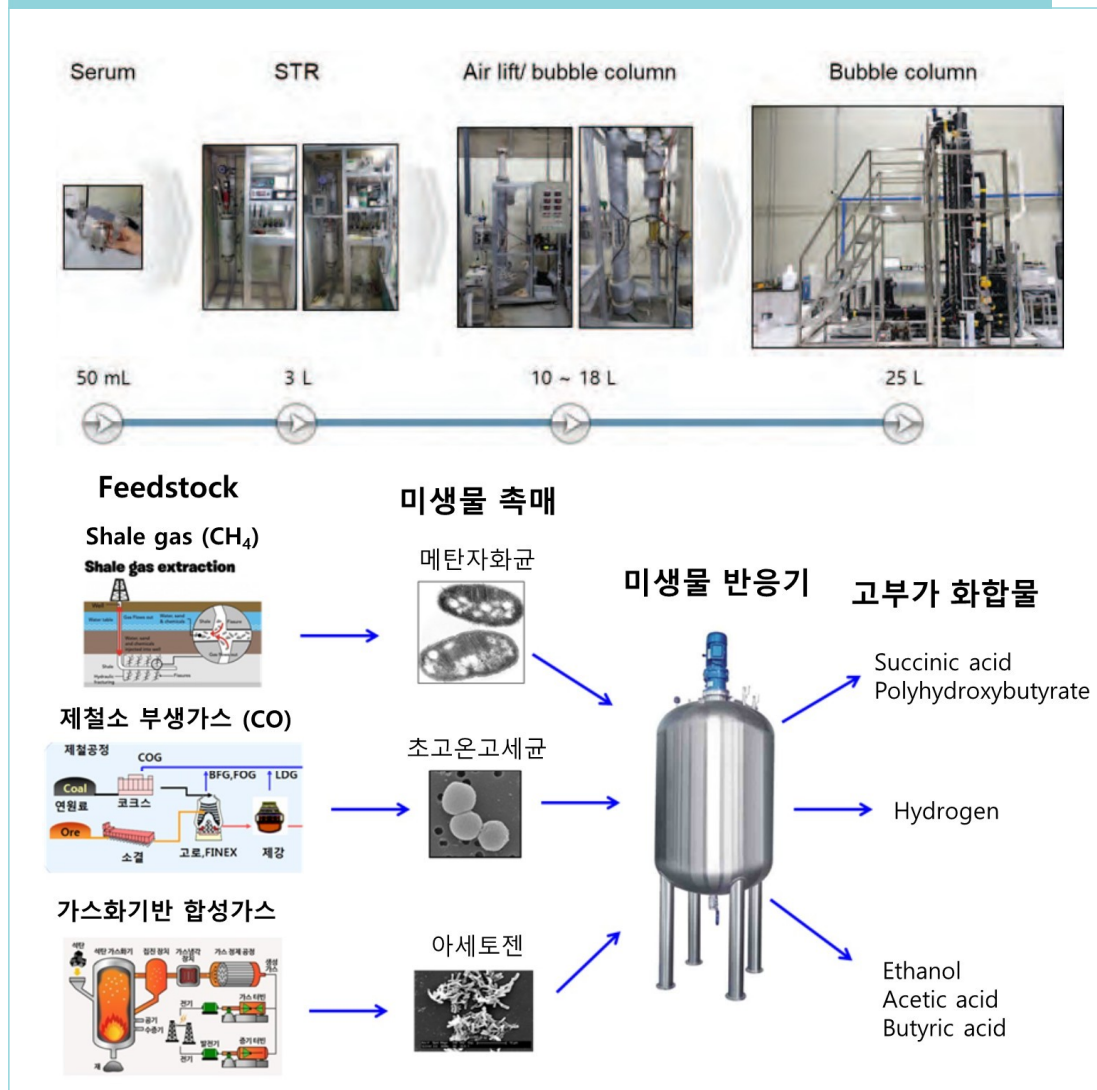
국내에서는 2015년 C1 가스리파이너리 사업단(CGRC, C1 Gas Refinery R&D Center)이 출범하여 C1 가스 전환 기술 전반을 연구 중에 있다. 저온저압 직접전환 기술 개발로 혁신적인 원천기술을 개발하고 화학생물공정 융복합에 의한 한계 돌파로 2024년까지 기술성숙도(TRL, Technology Readiness Level) 6 수준의 기술 경제성이 있는 C1 가스리파이너리 핵심 기술 개발을 목표로 대학, 정부출연연구소의 여러 연구진이 참여하고 있다(그림 20) 참고).



* 출처: NICE(2017), C1 가스리파이너리 사업단 홈페이지

특히, 한국에너지기술연구원에서는 CO 가스 기반 써모코커스 온누리누스(*Thermococcus onnurineus* NA1) 유래 수소생산을 위한 압력 반응 공정 개발, 아세트젠을 이용한 에탄올, 아세트산 생산, CH₄를 이용한 숙신산 및 바이오플라스틱(PHA, polyhydroxyalkanoate) 생산연구를 수행하였거나 진행 중이다(그림 21) 참고.

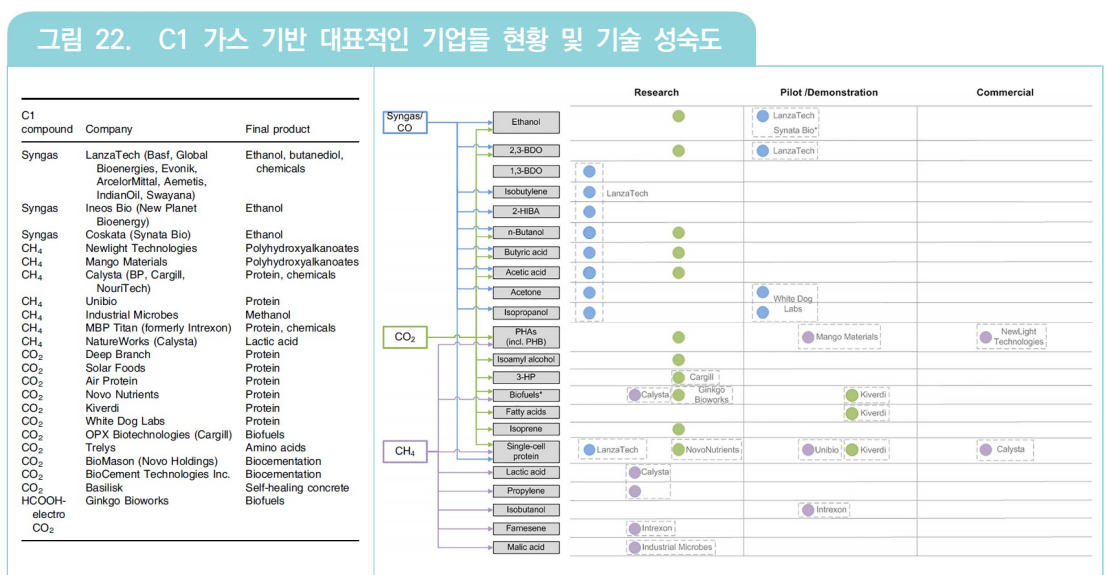
그림 21. 한국에너지기술연구원 광주친환경에너지연구센터 가스발효 기술 설비 및 연구 개발



* 출처: NICE(2019), 신재생에너지학회지(2021)

3. 시장동향과 전망

C1 가스를 이용하여 유용 물질을 생산하고자 많은 기업이 기술개발에 힘쓰고 있다. 하지만 경제적 또는 기술적 어려움으로 중단한 기업들(IneosBio, Coskata 등)도 있고 꾸준한 기술개발로 상업화에 성큼 다가간 LanzaTech社와 Newlight Technologies社 같은 기업들도 있다. 아래의 <그림 22>는 C1 가스를 이용하여 유용 물질을 생산하는 기업들의 대표 제품과 기술 성숙도를 나타낸다.

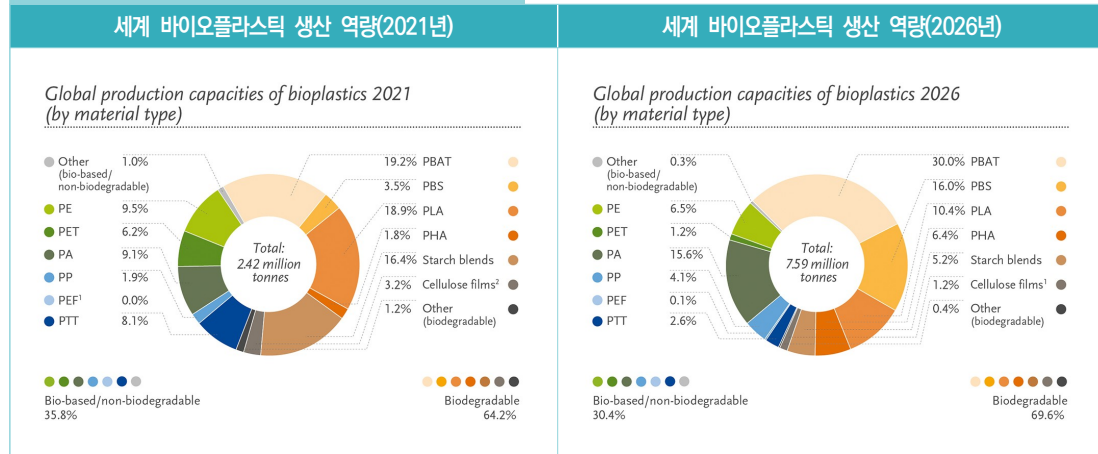


* 출처: Garcia & Galán(2021), Teixeira et al.(2018)

특히 LanzaTech 기업의 경우 에탄올뿐만 아니라 더 나아가 지속 가능 항공연료(SAF, Sustainable Aviation Fuel) 생산 기술 개발에도 힘쓰고 있으며 2040년 예상되는 세계 항공유 요구량은 1,600억 갤런으로(약 6,000억 리터) 2020년 대비 약 2배가량 증가할 것으로 예상된다.

또한 현재 환경적 이슈로 관심이 증대되는 바이오화학 시장 동향 및 전망을 살펴보면, 2021년 2.42 백만 톤이었던 생산량은 2026년에는 7.59 백만 톤으로 약 3배 성장할 것으로 예상되고 있고, 특히 앞서 소개되었던 메탄지화균을 통해 생산할 수 있는 생분해성플라스틱인 PHA의 점유율은 2021년 1.8%에서 6.4%까지 확대될 전망이다(<그림 23> 참고).

그림 23. 세계 바이오플라스틱 시장 동향



* 출처: European Bioplastics 홈페이지

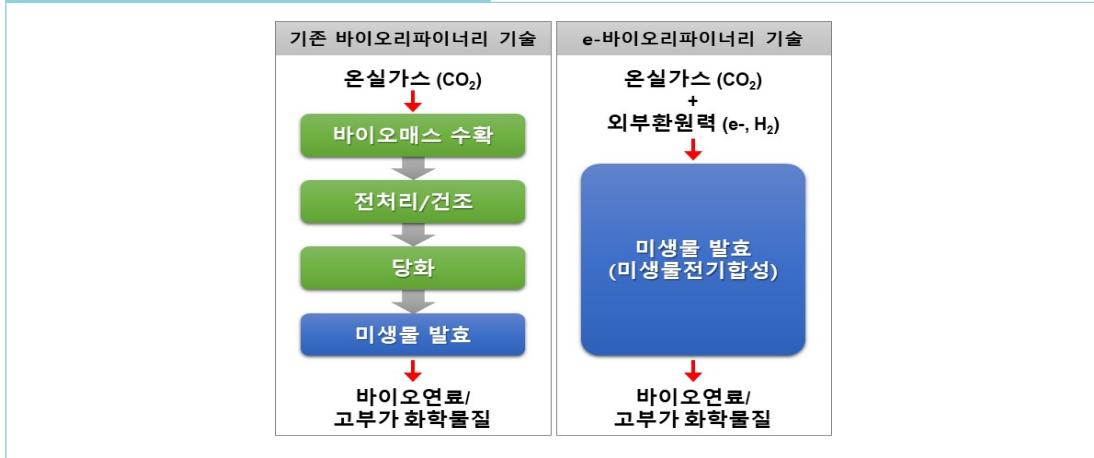
III CCU 연계 바이오리파이너리 기술(II): e-바이오리파이너리

1. 기술의 개념 및 특징

미국이나 중국처럼 넓은 영토를 가지고 있는 국가에서는 바이오매스가 대량으로 생산될 수 있지만, 산이 많고 영토가 좁은 우리나라는 바이오매스 확보에 불리하다. 또한, 기존의 생물학적 이산화탄소 전환은 광합성을 통하여 생산된 유기물 또는 바이오매스의 당화과정을 거친 후 미생물 발효를 통해 바이오 연료 또는 화학물질을 생산하는 방식이다. 따라서 국내 바이오매스 수급 문제 보완 및 여러 단계의 공정을 거쳐야 하는 기존 바이오리파이너리 방식에서 벗어나 이산화탄소를 직접 전환할 수 있는 효과적인 미생물 발효 공정이 필요하다.

이에 새로운 방법으로 이산화탄소를 직접 탄소원으로 활용해 성장할 수 있는 미생물(예, 화학독립영양세균(Chemoautotroph))에 환원력(이산화탄소를 유기물로 전환하기 위해 필요한 에너지)으로 전자(e^-)를 제공해주는 미생물전기합성(microbial electrosynthesis) 바이오 융합 기술이 제시되고 있다(그림 24) 참고). e-바이오리파이너리(Electro(e)-Biorefinery)란 바이오리파이너리에서 기존 미생물 배양공정에서 활용되던 유기산, 당 등의 전자공급자(electron donor)의 역할을 전극(양극, cathode)으로 대체할 수 있는 것으로, 대사공학(metabolic engineering)을 적용할 경우 이산화탄소를 환원시켜 유용한 바이오화학소재를 생산할 수 있어 많은 발전이 있을 것으로 예상된다. 그러나 현재까지 e-바이오리파이너리의 핵심 공정인 미생물전기합성 기술은 전자를 미생물 내부로 받아들이는 효율(전자흡수, electron uptake) 및 이산화탄소 전환 속도가 낮아 이러한 문제점을 극복하는 대안이 필요하다.

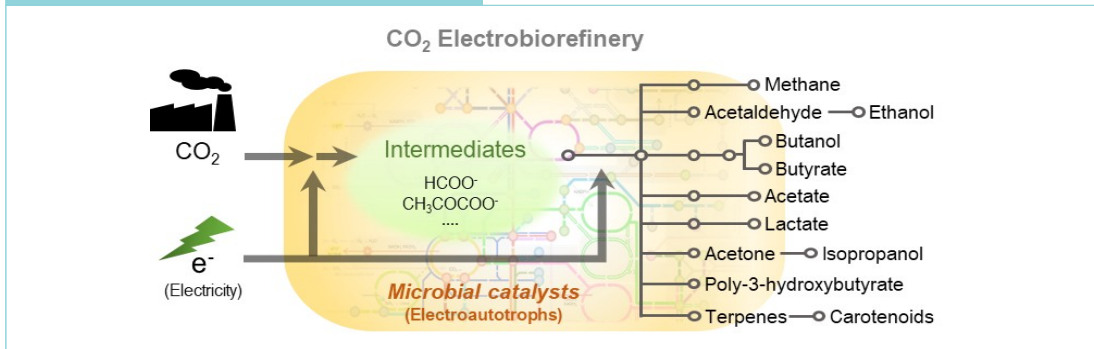
그림 24. 바이오리파이너리 기술 비교



* 출처: 한국에너지기술연구원(2021)

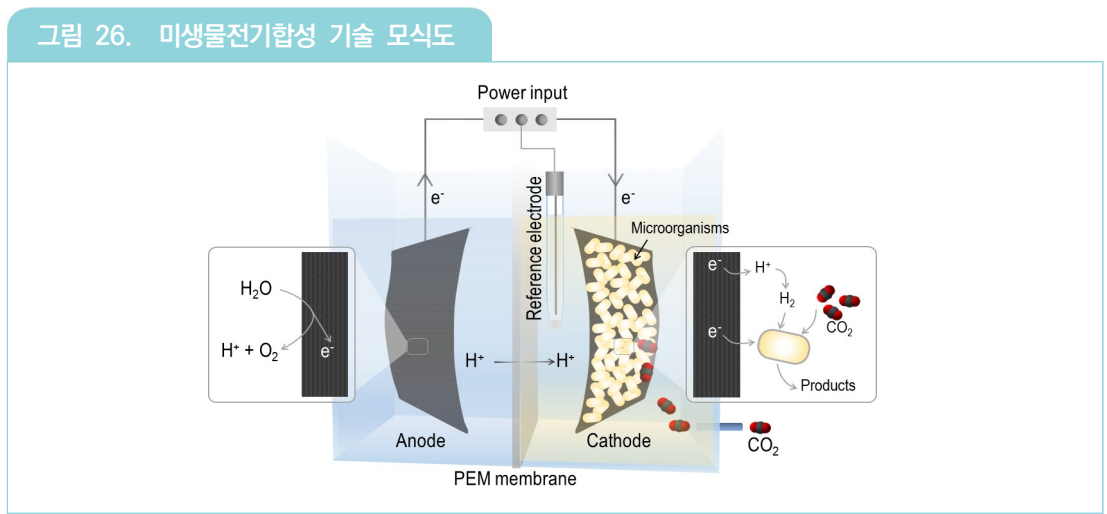
e-바이오리파이너리는 미생물전기합성 반응을 이용하여 비교적 온화한 조건에서 재생전력을 저장 가능한 형태의 화학물질로 전환할 수 있는 생물전기화학 기반의 새로운 생물공정 기술이다. 전기활성미생물 (electroactive microorganisms), 아세트산생성미생물(acetogens), 메탄생성미생물(methanogens) 등은 미생물전기합성 반응에서 전기적 환원력을 이용해 이산화탄소를 아세트산, 에탄올, 메탄 등으로 전환하는 것이 보고되고 있다. 더욱이, 미생물의 대사경로 최적화를 통해 이산화탄소 전환 물질의 범위를 고부가 연료 및 화학물질까지 확장시킬 수 있다. 본 대사경로에서 이산화탄소 전환은 중요 대사 중간체인 포름산이온(HCOO⁻) 또는 피루베이트(CH₃COCOO⁻)에 의해 개시된다(그림 25) 참고).

그림 25. e-바이오리파이너리 개념도



* 출처: Lee et al.(2021)

미생물전기합성 반응은 산화전극(anode)에서 물분해(water-splitting) 반응으로 획득한 전자를 이용하므로 광합성과 유사한 시스템이다(〈그림 26〉 참고). 물분해 반응은 환원전극(cathode)에서 전자독립영양세균(electroautotrophs)의 이산화탄소 전환에 필요한 전자(e^-)와 양성자(H^+)를 제공하며, 이들은 각각 도선(conductive wire) 및 이온교환막(ion exchange membrane)을 통해 환원전극부로 이동한다. 반응에 사용되는 기질 중 이산화탄소는 공기 중 또는 발전소, 석유화학, 시멘트 공장 등으로부터 발생하는 산업체 부생가스(~15%, v/v) 등을 활용할 수 있다. 물은 광범위하게 분포하는 지속 가능한 자원으로 e-바이오리파이너리의 공정에서 이산화탄소 전환에 필요한 전자를 제공하며, 폐수 등을 활용할 수 있다.



* 출처: Lee et al.(2021)

현재까지, 전자독립영양세균은 다음과 같은 세 가지 경로를 통해 환원전극으로부터 세포 내부로 전자를 획득하여 이산화탄소 전환에 활용한다고 알려져 있다.

- ① 환원전극으로부터 생성된 수소(H_2)를 전자운반체로 활용한 전자 획득
- ② 외부 전자서플(전자전달매개체 등)을 이용한 전자 획득
- ③ 미생물 세포 표면의 전자전달시스템과 전극의 접촉에 의한 직접적인 전자 획득

다음으로, 이산화탄소 전환을 위한 미생물전기합성 반응은 독립영양세균(autotrophs)에 내재된 다양한 종류의 탄소고정화 경로(예, 환원 오타당 인산염 순환경로, 환원성 TCA 경로, 환원성 Acetyl-CoA 경로 등)를 통해 이루어진다. 이러한 에너지를 소모하는 대사경로들은 에너지를 생산하는 세포 내의 반응들과 결합하여 세포 내에서 에너지 운반체 ATP(adenosine triphosphate)를 소비하게 된다. 미생물전기합성 반응은 환원전극

에서 방출된 전자(e^-) 또는 환원전극으로부터 생성된 수소(H_2)를 이용해 미생물에서 이산화탄소가 고정되는 반응을 촉진시킬 수 있다.

2. 기술개발 동향

2.1. e-바이오리파이너리 기술개발 개요

전기활성미생물에 대한 첫 발견은 1911년 영국 더럼(Durham) 대학의 M. C. Potter 그룹으로 보고 있다. 그 이후 55년 동안 큰 실질적인 진전이 없다가, 1990년대 초기에 연료전지에 대한 관심이 계기가 되어 유기물로부터 전기에너지를 생산하기 위한 미생물연료전지(MFC, Microbial fuel cells) 기술이 성장하게 되었다. 전기활성 미생물을 활용한 다른 형태의 기술인 미생물전기합성 기술은 2010년 미국 매사추세츠(Massachusetts) 대학의 D. R. Lovely 그룹에 의해 소개되었다. 아세트산생성미생물(acetogens)인 *Sporomusa ovata*가 흑연(graphite) 환원전극 표면에서 바이오필름 형태로 성장하면서 이산화탄소로부터 아세트산과 2-옥소 부티르산을 생산하는 것을 발견했다. 이후 2016년 벨기에 플랑드르 기술연구소(VITO, Vision on Technology)의 D. Pant 그룹은 이산화탄소 전환기술로써 미생물전기합성 반응으로 이산화탄소를 C2 이하의 유기물(예, 개미산, 아세트산, 옥살산, 메탄올 및 에탄올 등)로 전환하는 공정의 경제성을 검토하였다. 이를 통해 이산화탄소 전환을 위한 e-바이오리파이너리의 개념을 언급하였다.

e-바이오리파이너리는 기존 바이오리파이너리 공정 중 생물학적 전환을 미생물전기합성 반응으로 대체하는 것으로 전 공정의 경제성 확보를 위해서는 미생물전기합성 반응의 성능향상이 우선시 되어야 한다. 융합연구리뷰에서는 e-바이오리파이너리의 핵심공정인 미생물전기합성의 기술개발동향을 분석하였다.

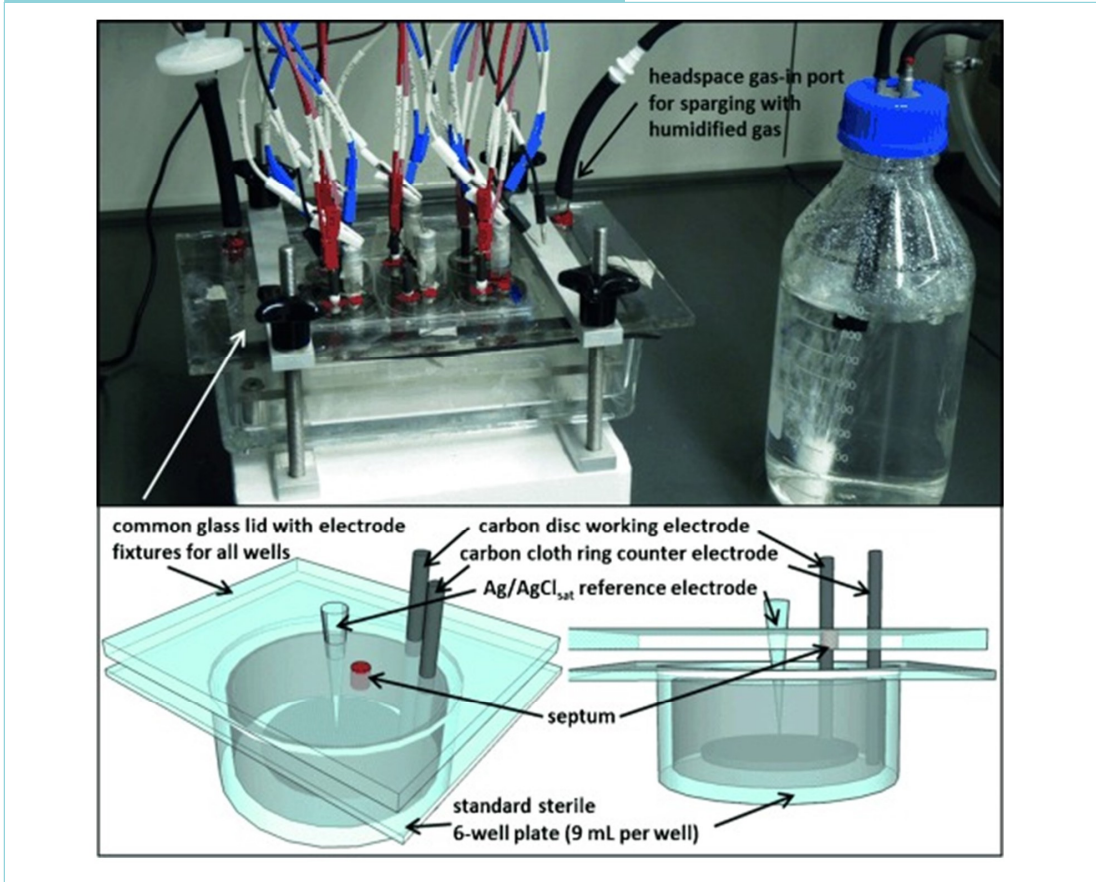
2.2. 해외 기술개발 동향

미국, EU 국가를 중심으로 미생물전기합성 반응의 성능개선을 위한 연구가 수행 중이며, e-바이오리파이너리의 경제성 향상을 위한 이산화탄소 전환물질(제품군)의 고부가화가 필요하다.

① 전자독립영양세균(electroautotrophs) 발굴

독일 라인 베스트팔렌 아헨(RWTH Aachen) 대학의 M. A. Rosenbaum 그룹은 자연시료로부터 다양한 종류의 전자독립영양세균을 선별하고 전기활성을 테스트하기 위해 6-well 플레이트를 활용한 미생물-전기화학 분석 장치를 고안했다(그림 27) 참고). 본 분석 장치를 이용해 6 종류의 서로 다른 미생물이 환원전극으로부터 발생하는 전류를 소모하는 패턴 등을 분석하여 미생물전기합성 반응에 적합한 전자독립영양세균을 선별하였다.

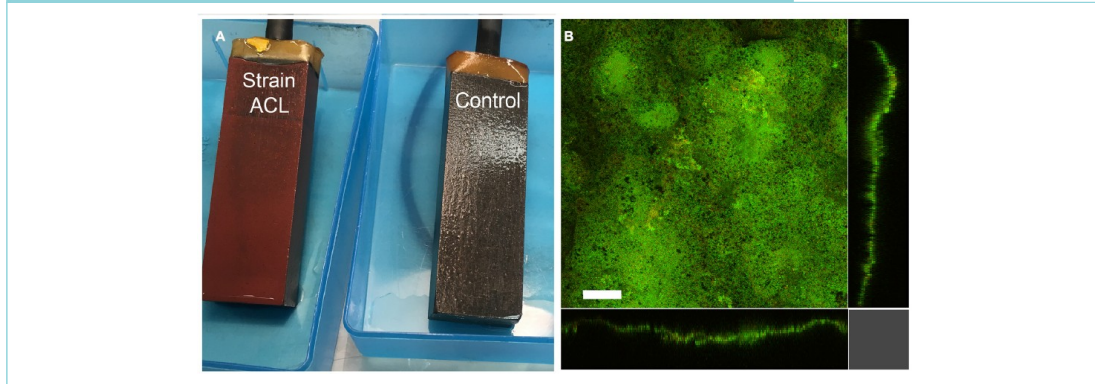
그림 27. 전자독립영양세균 선별을 위한 분석 장치



* 출처: Rodrigues & Rosenbaum (2014)

미국 매사추세츠(Massachusetts) 대학의 D. R. Lovely 그룹은 미생물연료전지에서 사용하는 대표적인 전자방출세균(exoelectrogen)인 *Geobacter sulfurreducens* 균주에 미생물 대사공학을 적용하여 환원전극으로부터 발생한 전자를 활용 가능하도록 고안하였다(그림 28) 참고). 미생물의 대사경로 중, ATP 시트르산 분해효소(ACL, ATP Citrate Lyase)는 TCA 경로에서 생성되는 시트르산을 아세틸-CoA와 옥살아세트산으로 분해하고, 이 과정에서 ATP가 가수분해(ATP → ADP + P_i)되면서 환원력을 얻는다. TCA 경로에서 ACL 효소가 추가된 *G. sulfurreducens* 균주는 환원전극 표면에 바이오필름을 형성하여 직접 전자 전달을 받을 수 있는 것으로 확인되었다.

그림 28. 전자요구성 Geobacter의 환원전극에 생성된 바이오필름

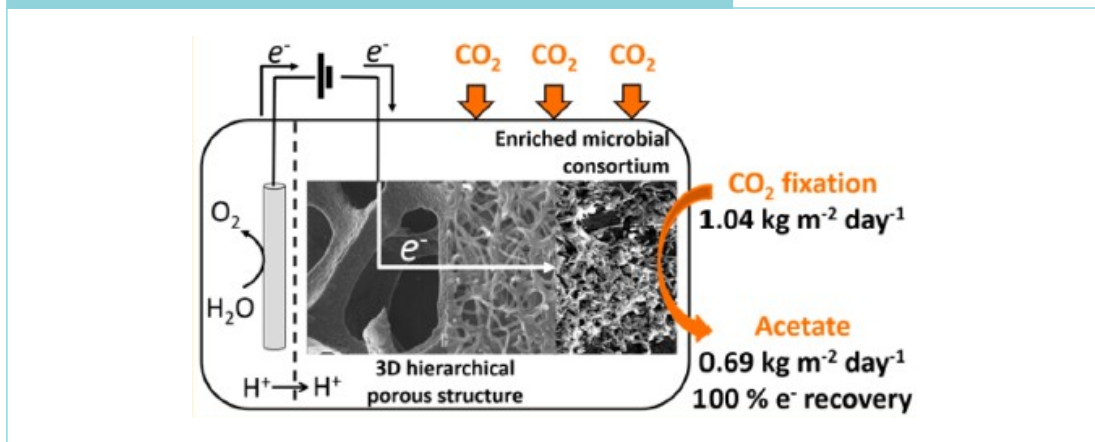


* 출처: Ukei et al.(2018)

② 환원전극의 전자전달 성능 개선

호주 퀸즐랜드(Queensland) 대학 L. Jourdin 그룹은 미생물전기합성 반응에서 환원전극의 전류밀도를 향상시키기 위해, 다공성 탄소(RVC, Reticulated Vitreous Carbon) 전극 표면에 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT, multiwalled carbon nanotube)를 성장시켜 전도성이 높은 계층적 다공성 구조의 3차원 탄소전극(NanoWeb-RVC)을 고안하였다(그림 29) 참고). 제작한 3차원 탄소전극을 환원전극으로 활용하여 미생물전기합성 반응을 진행한 결과, 이산화탄소로부터 최대 11g/L의 아세트산 생산 역가를 달성하였다.

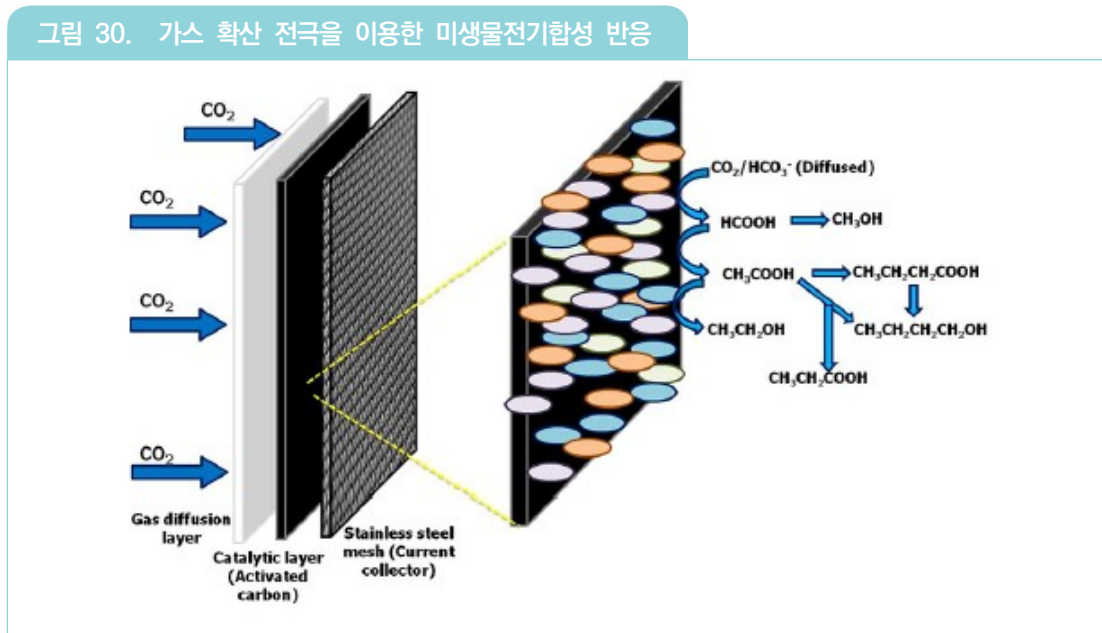
그림 29. 3차원 탄소환원전극을 활용한 미생물전기합성 반응



* 출처: Jourdin et al.(2015)

③ 미생물전기합성 반응의 이산화탄소 전환 성능 개선

벨기에 플랑드르 기술연구소(VITO)의 D. Pant 그룹은 환원전극 반응에서 기질로 사용되는 이산화탄소 가스의 물질전달을 향상시켜 미생물전기합성 성능을 향상시켰다(그림 30) 참고). 가스 확산 전극(GDE, Gas Diffusion Electrode)을 미생물전기합성 반응의 환원전극으로 사용하였을 때 이산화탄소 공급율이 90mg/L/min 이상으로 확인되었으며, 공급된 이산화탄소의 95% 이상이 아세트산 등으로 전환되었다.



* 출처: Srikanth et al.(2018)

④ 이산화탄소 전환물질의 고부가화

독일 데헤마(DECHEMA) 연구소 D. Holtmann 그룹은 미생물전기합성을 통해 이산화탄소로부터 고부가 바이오화합물을 생산하기 위한 연구를 보고하였다. 대사공학이 적용된 *Cupriavidus necator* 균주에서 미생물전기합성을 통해 고부가 바이오화합물인 테르펜 계열 물질인 α -Humulene($C_{15}H_{24}$)을 생산하였다(17 mg/g-세포 건조중량). α -Humulene의 시장 가격은 약 USD 50/kg 수준으로 향염증제 등으로 사용되고 있으며, α -Humulene을 포함하는 테르펜 계열은 대부분 식물로부터 추출하거나 당을 원료물질로 이용한 미생물 발효를 통해 생산되고 있다. 본 연구는 미생물전기합성을 통한 이산화탄소 전환 물질의 고부가화를 위한 새로운 접근법으로 해석되고 있다.

또한, 프랑스, 독일, 벨기에 등의 EU 국가에서는 신재생전기를 이용해 이산화탄소를 전환하기 위한 다수의 대형 프로젝트가 진행 중이다. 이중 네덜란드 응용과학연구기구(TNO)가 수행 중인 E2C프로젝트(TRL 6-7)을 제외하면 대부분 실험실 규모의 연구를 수행하고 있다(표 5) 참고).

표 5. EU 국가에서 수행 중인 이산화탄소 전환 프로젝트

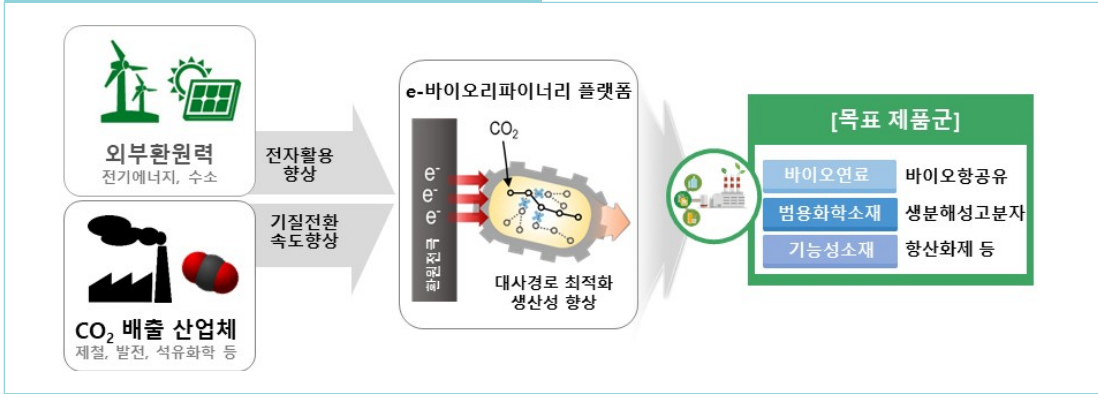
프로젝트명	연구기관(국가)	생산물질	주요내용
CHOCHCO	프랑스국립연구센터 (프랑스)	CH ₄	수전해 반응과 연계하여 합성가스(CO, H ₂)와 CO ₂ 를 전환하여 메탄 생산
enCO2re	Covestro (독일)	CO	수전해 반응과 연계하여 CO ₂ 를 CO로 전환
BioRECO2VER	VITO (벨기에)	젖산(lactate), 이소부틸렌(isobutene)	수전해 반응과 연계하여 CO ₂ 를 C3-C4화합물로 전환
Kopernikus Power-to-X	울리히연구소 (독일)	액상연료, H ₂ , 폴리머	수전해 반응과 연계하여 합성가스(CO, H ₂)와 CO ₂ 를 전환
eForFuel	막스플랑크연구소 (독일)	프로페인(propane), 이소부틸렌(isobutene)	전기화학적으로 CO ₂ 를 C3-C4환원, 미생물 반응을 연계한 탄화수소 생산
E2C	TNO (네덜란드)	연료, 플랫폼케미컬	실증 규모에서 수전해 반응과 연계한 CO ₂ 전환

* 출처: Sánchez et al.(2019)

2.3. 국내 기술개발 동향

한국에너지기술연구원에서는 e-바이오리파이너리를 통해 이산화탄소로부터 바이오항공유, 생분해성 고분자(바이오플라스틱) 및 바이오활성소재 생산 연구를 수행 중이다(그림 31) 참고. 이산화탄소를 직접 탄소원으로 활용해 성장할 수 있는 화학독립영양체균인 *Rhodobacter sphaeroides*를 미생물전기합성 반응의 미생물축매로 적용하고 있으며, 대사공학(metabolic engineering) 기법을 활용해 이산화탄소 전환물질의 고부가가치를 유도하고 있다.

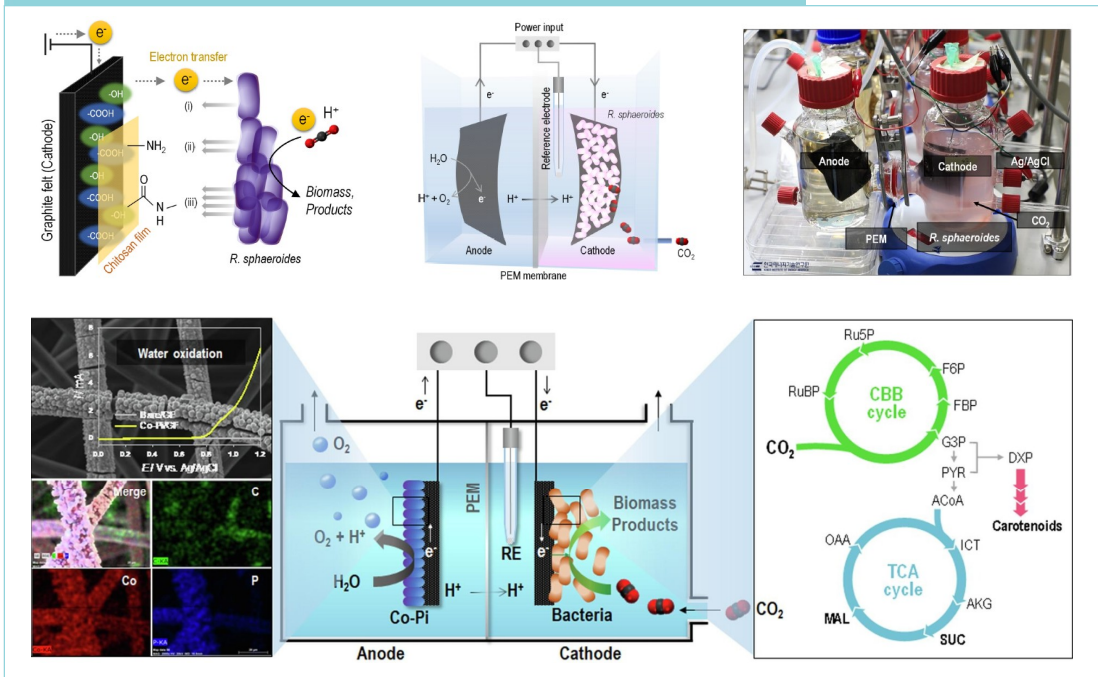
그림 31. e-바이오파이너리 기술 개념도



* 출처: 저자 작성

더욱이, 산화전극에 물분해 촉매 도금 및 환원전극 표면 개질 등을 통해 미생물전기합성 반응의 성능을 개선하였다(그림 32) 참고).

그림 32. 미생물전기합성 반응 성능향상을 위한 산화/환원 전극개선



* 출처: Fitriana et al.(2021), Lee et al.(2022)

최근 과학기술정보통신부에서는 미래 유망 바이오기술 분야의 원천기술 개발을 위한 바이오·의료기술개발사업의 일환으로 e-바이오리파이너리 사업을 추진하여(목질계 바이오매스의 통합 e-Biorefinery 기술개발, 2022-2026년, 총 95억 원 규모) 관련 기술의 고도화를 도모하고 있다.

3. 시장동향과 전망

e-바이오리파이너리를 포함하는 탄소중립 기술은 경제성이 뒷받침되지 않는다면 상용화가 어려워진다. 현재까지 1톤의 이산화탄소를 처리하는데 USD 600~1,000 수준이지만(스위스, Climeworks 社), 처리 비용은 더 낮아질 전망이다. 현재까지 e-바이오리파이너리 공정으로 이산화탄소를 원료물질로 사용해 생산할 수 있는 주된 품목은 개미산, 옥살산, 아세트산 수준이다(〈표 6〉 참고).

표 6. e-바이오리파이너리 생산물질의 시장규모 및 용도

생산물질	연간 생산규모(kton/y)	용도
Formic acid	720	방부제, 염료흡착제, 고무응고제 등
Oxalic acid	278	금속제련, 제약 등
Acetic acid	12,900	섬유, 비닐, 유기용매 등

* 출처: ElMekawy et al.(2016)

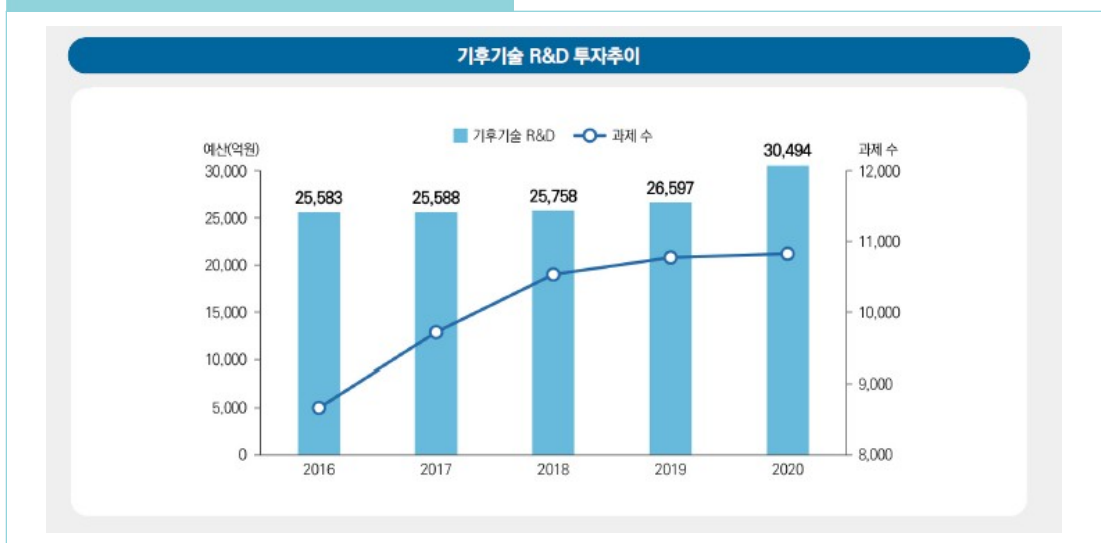
가장 활발하게 CO₂를 활용하는 산업군은 국내 주력산업에 속하는 에너지, 철강, 석유화학과 정유 회사들로 이들은 탄소배출 저감을 위해 탄소자원화 기술을 활용하고 있다. e-바이오리파이너리 역시 탄소자원화 기술 분야에 속하므로 향후 탄소가격제(carbon pricing)와의 연동을 통해 시장규모를 확대해 나갈 수 있다.

IV CCU 연계 바이오피너리 발전 방향

1. 관련 정책과의 부합성

온실가스 감축은 더 이상 국제적인 약속을 지키는 차원의 문제가 아니라, 전 세계로 확산되고 있는 저탄소 경제와 에너지 전환의 흐름에서 뒤처지지 않고 장기적으로 국가이익을 확보하기 위해 반드시 가야 할 길이다. 세계 각국은 탄소중립 목표 선언과 함께 탄소 규제를 더욱 강화하고 있으며, 주요 선진국들의 경우 온실가스 배출권 거래제 확대, 탄소세 부과, 탄소국경세 등을 통해 저탄소·친환경 경제주도로의 전환을 유도하고 있다. 이에 발맞추어 국가 R&D 사업 중 기후기술 관련 투자규모는 2020년 기준으로 3조 494억 원 수준이었다. 이는 국가 전체 R&D 23조 8,803억 원 대비 12.8%의 비중을 차지하고 있다. 최근 5년간(2016-2020년) 기후기술 R&D 투자액은 연평균 4.5% 증가하였으며, 2020년도는 전년대비 14.7% 증가하였다(그림 33) 참고).

그림 33. 국내 기후기술 R&D 투자추이



* 출처: 한수현 외 (2021)

반면, 온실가스 감축을 위한 노력은 계속되고 있으나, CCU 기술을 확보하기 위한 R&D 투자는 상대적으로 미비하며 대다수 전환기술은 여전히 기초·원천연구단계에 머물러 있다. 이는 주요 선진국 대비 기술격차가 여전히 높은 편으로 확보된 핵심기술의 상용화 단계로의 연계가 필요하다. 이러한 관점에서 볼 때, CCU 연계 기술로써의 C1 가스리파이너리 및 e-바이오리파이너리 기술은 적용산업 및 제품 시장수요가 점차 확대될 전망이다. 장기적인 발전전략을 수립하여 단계별 기술 성숙도를 제고하는 것이 필요하다.

2. 기존 CCUS 기술과의 연계 방안

국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)는 글로벌 탄소중립 시나리오에서 2050년 CCUS(CO₂ Capture, Utilization & Storage) 기술의 기여도를 총 감축량의 18% 수준으로 제시하였다. 탄소중립을 실현하기 위해서는 배출된 CO₂를 흡수하여 처리해야 하며, 이를 위한 수단으로 CCUS 기술 도입의 필요성이 대두되고 있다. CCUS는 석유화학 공장이나 석탄발전소 등에서 발생하는 CO₂를 공기 중으로 방출되는 것을 막고(carbon capture), 필요한 곳에 사용하거나(utilization), 해저 깊은 곳에 저장해(storage) 대기 중으로 흘러가지 않도록 처리하는 기술이다. IEA에서는 CCUS를 탄소제로 배출을 가능하게 할 유일한 기술이라고 부르기도 한다. 전 세계에서든 CCUS 개발을 위한 다양한 노력이 이어지고 있으며(예, 탄소 세금 크레딧 지급(미국), 탄소저감 프로젝트 기금조성(EU)), 특히 스위스는 대기 중 CO₂를 직접 포획하는 직접공기포집(DAC, Direct Air Capture)를 최초로 구축하기도 했다. 국내에서는 K-CCUS 추진단을 출범하여 정부 기관과 철강, 시멘트, 석유화학 등 CO₂ 포함 온실가스 배출 주요 기업과 에너지 공기업 등 60여 기관이 함께 힘을 모아 CCUS 기술을 적극적으로 추진하고자 노력 중이다. 융합연구리뷰에서 소개한 CCU 연계 바이오리파이너리를 현재 개발 중인 CCUS 기술에 적용하여 온실가스 전환 기술의 경제성 향상 및 기술의 고도화를 실현할 수 있기를 기대한다.

3. 재생에너지와의 연계 방안

재생에너지는 햇빛, 물, 지열, 강수, 생물 유기체 등에 포함된 에너지를 변환해 만드는 에너지로 지속적으로 재생이 가능하다. IEA의 '2017년 신재생에너지 전망 보고서'에 따르면 2022년까지 풍력은 321GW, 태양광은 438GW 등으로 재생에너지의 총 발전용량은 920GW까지 도달할 것으로 전망된다. 재생에너지를 이용한 전력 생산량이 8000TWh까지 증가하면서 전 세계 전력 수요의 30%를 재생에너지로 충당할 수 있을 것이다.

최근 수립된 국가 CCU 기술혁신 로드맵(관계부처합동, 2021)에서는 CCU 기술의 정의를 주로 기술적 경로가 CCU 기술과 유사하거나 밀접하게 연계된 CO₂ 외 탄소원(CO, CH₄ 등) 자원화 기술도 포함하고 있다. 따라서 CCU 연계 바이오리파이닝 기술인 C1 가스바이오리파이닝과 e-바이오리파이닝은 신재생에너지의 활용 및 친환경 자원순환 측면 등에서 잠재력이 높은 탄소중립 수단으로 주목받을 것이다.

4. 맺음말

바이오리파이닝이 기존 석유화학 대비 경쟁력을 가지기 위해서는 원료물질의 비용절감과 동시에 생산제품의 고부가가가 필요하다. 기후 변화, 식량문제, 에너지고갈이라는 현 사회가 직면하고 있는 과제를 해결하기 위한 수단 중 하나로 CCU 연계 바이오리파이닝을 적극적으로 고려할 필요가 있다. 또한, 석유화학산업을 바이오화학 산업으로 전환시키고 국제시장 선점을 위한 경쟁력을 확보하기 위해서 본 기술의 발전이 요구된다. 이를 위해 각 공정에 필요한 요소 기술 간의 융합이 중요하며 학계-산업계-정부 간의 긴밀한 네트워크 구성을 통해 환경 친화적이고 경제적인 CCU 연계 바이오리파이닝 공정 개발이 이루어져야 할 것이다.

저자 _ 이수연(Soo Youn Lee)

- 학력
 - 전북대학교 화학공학 박사
 - 충북대학교 미생물생명공학 석사
 - 충북대학교 미생물학 학사

- 경력
 - 現) 한국에너지기술연구원
광주친환경에너지연구센터 책임연구원

저자 _ 문명훈(Myounghoon Moon)

- 학력
 - 한국과학기술원 생명화학공학 박사
 - 한국과학기술원 생명화학공학 석사
 - 인하대학교 화학공학 학사

- 경력
 - 現) 한국에너지기술연구원
광주친환경에너지연구센터 선임연구원

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 김민식. (2019). 한국에너지기술연구원 광주바이오/에너지연구개발센터 바이오프로세스 연구팀, 한국화학공학회, NICE 제37권 제5호, 628-630.
- 2) 김성호, 김길훈. (2013). 바이오-에너지/케미컬 동시-생산 시스템 바이오리파이너리의 동향. 에너지공학, 제22권 제3호, 25-261.
- 3) 나정걸, 이진원. (2016). 생물학적 합성가스 전환에 의한 수송용 연료 및 화학원료 생산, 공업화학전망, KIC News, 19(2), 61-73.
- 4) 나정걸. (2017). C1 가스리파이너리 구현을 위한 공정 연구 동향, NICE 제35권 제3호, 296-301.
- 5) 문명훈. (2021). 한국에너지기술연구원 광주바이오에너지연구개발센터 가스발효연구팀, 소식지 1권 1호, 신재생 에너지학회지.
- 6) 박지현, 강유진. (2022). 바이오 연료, 한국과학기술기획평가원, KISTEP 브리프 9호.
- 7) 이상엽, 유승민. (2017). 미래의 석유화학 산업을 대체할 시스템 대사공학 기술. 융합연구정책센터, 융합연구리뷰, Vol. 3, No. 2.
- 8) 이상진. (2015). 해양 미세조류를 이용한 바이오디젤 2019년 상용화, KDI 경제정보센터.
- 9) 이진원. (2017). C1 가스리파이너리 기술 개발, NICE 제35권 제3호, 286-290.
- 10) 이현숙. (2018). 바이오리파이너리 기술 현황. 융합연구정책센터, 융합 Weekly Tip, Vol. 112.
- 11) 한수현, 안세진, 우아미, 주경원(2021). 2020 기후기술 국가연구개발사업 조사·분석 보고서. 녹색기술센터, 과학기술정보통신부.
- 12) 한국에너지기술연구원. (2016). 한국에너지기술연구원 사업화유망기술. 한국에너지기술연구원 기술사업화실.
- 13) 황인엽, 이은열. (2017). 메탄자화균(methanotroph)을 이용한 메탄가스 바이오전환 기술, NICE 제35권 제3호, 287-290.
- 14) 2050 탄소중립위원회. (2021). 탄소중립 학습 자료집.

〈국외문헌〉

- 15) Bae, J., Song, Y., Lee, H., et al. (2022). Valorization of C1 gases to value-added chemicals using acetogenic biocatalysts. Chemical Engineering Journal, 428 : 131325.
- 16) Clomburg, J. M., Crumbley, A. M., Gonzalez, R. (2017). Industrial Biomanufacturing: the Future of Chemical Production. Science, Vol. 355, Issue. 6320.
- 17) Dürre, P. & Eikmanns, B. J. (2015). C1-Carbon Sources for Chemical and Fuel Production by Microbial Gas Fermentation. Current opinion in biotechnology, 35, 63-72.

- 18) Fackler, N., Heijstra, B. D., Rasor, B. J., et al. (2021). Stepping on the Gas to a Circular Economy: Accelerating Development of Carbon-Negative Chemical Production from Gas Fermentation. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 12(1), 439–470.
- 19) ElMekawy, A., Hegab, H. M., Mohanakrishna, G., et al. (2016). Technological Advances in CO₂ Conversion Electro-Biorefinery: A Step Toward Commercialization. *Bioresource Technology*, 215, 357–370.
- 20) Fitriana, H. N., Lee, J., Lee, S., et al. (2021). Surface Modification of a Graphite Felt Cathode with Amide-Coupling Enhances the Electron Uptake of Rhodobacter Sphaeroides. *Applied Sciences*, 11(16), 7585.
- 21) García, J. L., & Galán, B. Integrating Greenhouse Gas Capture and C1 Biotechnology: A Key Challenge for Circular Economy. *Microbial Biotechnology*, 15(1), 228–239.
- 22) Aleksandra, G., Oleskiewicz-Popiel, P., Łęzyk, M. (2021). Recent Trends in Methane to Bioproduct Conversion by Methanotrophs. *Biotechnology Advances*, 53, 107861.
- 23) Jourdin, L., Grieger, T., Monetti, J., et al. (2015). High Acetic Acid Production Rate Obtained by Microbial Electrosynthesis from Carbon Dioxide. *Environmental Science & Technology*, 49, 13566–13574.
- 24) Jawaharraj, K., Shrestha, N., Chilkoor, G., et al. (2020). Valorization of Methane from Environmental Engineering Applications: A Critical Review. *Water Research*, 187.
- 25) Kalyuzhnaya, M. G., Puri, A. W., Lidstrom, M. E. (2015). Metabolic Engineering in Methanotrophic Bacteria. *Metabolic Engineering*, 29, 142–152.
- 26) Lee, S. Y., Oh, Y. K., Lee, S., et al. (2021). Recent Developments and Key Barriers to Microbial CO₂ Electrobio-refinery. *Bioresource Technology*, 320, 124350.
- 27) NurFitriana, H., Lee, S., Kim, H. S., et al. (2022). Enhanced CO₂ Electroconversion of Rhodobacter Sphaeroides by Cobalt-Phosphate Complex Assisted Water Oxidation. *Bioelectrochemistry*, 145, 108102.
- 28) Liew, F. E., Nogle, R., Abdalla, T., et al. (2022). Carbon-Negative Production of Acetone and Isopropanol by Gas Fermentation at Industrial Pilot Scale. *Nature Biotechnology*, 40, 335–344.
- 29) Liu, L., Xie, G., Xing, D., et al. (2020). Biological Conversion of Methane to Polyhydroxyalkanoates: Current Advances, Challenges, and Perspectives. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2, 100029.
- 30) Mühlemeier, I., Speight, R., Strong, J. (2018). *Biogas, Bioreactors and Bacterial Methane Oxidation. Methane Biocatalysis: Paving the way to sustainability.* Springer, Cham, 2018, 213–235.
- 31) Pham, D. N., Nguyen, A. D., Lee, E. Y. (2022). Outlook on Engineering Methylo-trophs for One-Carbon-based Industrial Biotechnology. *Chemical Engineering Journal*, 449, 137769.

- 32) Rodrigues, T. & Rosenbaum, M. A. (2014). Microbial Electroreduction: Screening for New Cathodic Biocatalysts. *ChemElectroChem*, 1, 1916–1922.
- 33) Sánchez, O. G., Birdja, Y. Y., Bulut, M., et al. (2019). Recent Advances in Industrial CO₂ Electroreduction. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 16, 47–56.
- 34) Srikanth, S., Singh, D., Vanbroekhoven, K., et al. (2018). Electro-Biocatalytic Conversion of Carbon Dioxide to Alcohols using Gas Diffusion Electrode. *Bioresource Technology*, 265, 45–51.
- 35) Sun, X., Atiyeh, H. K., Huhnke, R. L., et al. (2019). Syngas Fermentation Process Development for Production of Biofuels and Chemicals: A review. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100279.
- 36) Teixeira, L. V., Moutinho, L. F., Romão-Dumaresq, A. S. (2018). Gas Fermentation of C1 Feedstocks: Commercialization Status and Future Prospects. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 12, 1103–1117.
- 37) Ukei, T., Nevin, K. P., Woodard, T. L., et al. (2018). Construction of Geobacter Strain with Exceptional Growth on Cathodes. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1512.
- 38) Yoon, J. & Oh, M. (2022). Strategies for Biosynthesis of C1 Gas-derived Polyhydroxyalkanoates: A review. *Bioresource Technology*, 344, 126307.

〈기타문헌〉

- 39) 관계부처 합동. (2021). 이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵(안).
- 40) 주용석. (2021.07.19). EU 이어 美도 탄소국경세 물리나. *한경글로벌마켓*, <https://www.hankyung.com/international/article/202107190748i>.
- 41) 한국동서발전 블로그. (2018.09.18). 3세대 바이오매스 '미세조류에너지'. <https://blog.naver.com/iamewp/221361538673>
- 42) C1 가스 리파이너리 사업단 웹진. <https://cgrc.sogang.ac.kr/webzine/202111/sub0201.html>
- 43) C1 가스리파이너리 사업단 홈페이지, https://cgrc.sogang.ac.kr/index.php?mid=c1_02_02.
- 44) Bundesregierun. Biorefineries roadmap. German Federal Government (Bundesregierung); 2012. Available from: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/FS/30759_Biorefineries_Roadmap_en.html.
- 45) European Bioplastics 홈페이지, <https://www.european-bioplastics.org/news/publications/>
- 46) European Commission. (2021). EU Biorefinery Outlook to 2030 : Studies on Support to Research and Innovation Policy in the Area of Bio-Based Products and Services. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/103465>
- 47) Lanzatech. (2022). Transforming Carbon. Making Products. https://lanzatech.com/wp-content/uploads/2022/03/LanzaTech-Investor-Presentation_March-2022_vF.pdf
- 48) Planet Decarb 사이트, <https://planetdecarb.com/bases-connaissances/liquid-biofuels/>



03

국가R&D 현황 분석

융합연구리뷰 9월호에서 다룬 2개의 주제(재난안전 플랫폼 및 바이오리파이너리 기술)에 대한 각각의 국가R&D 현황을 살펴보기 위해 국가연구개발 과제 분석을 수행하였다. 연구비를 기준으로 연구비 규모별 과제수, 연구수행주체, 연구수준, 연구분야(국가과학기술표준분류, 미래유망신기술분류) 등 여러 측면에서의 분석 결과를 제시한다.

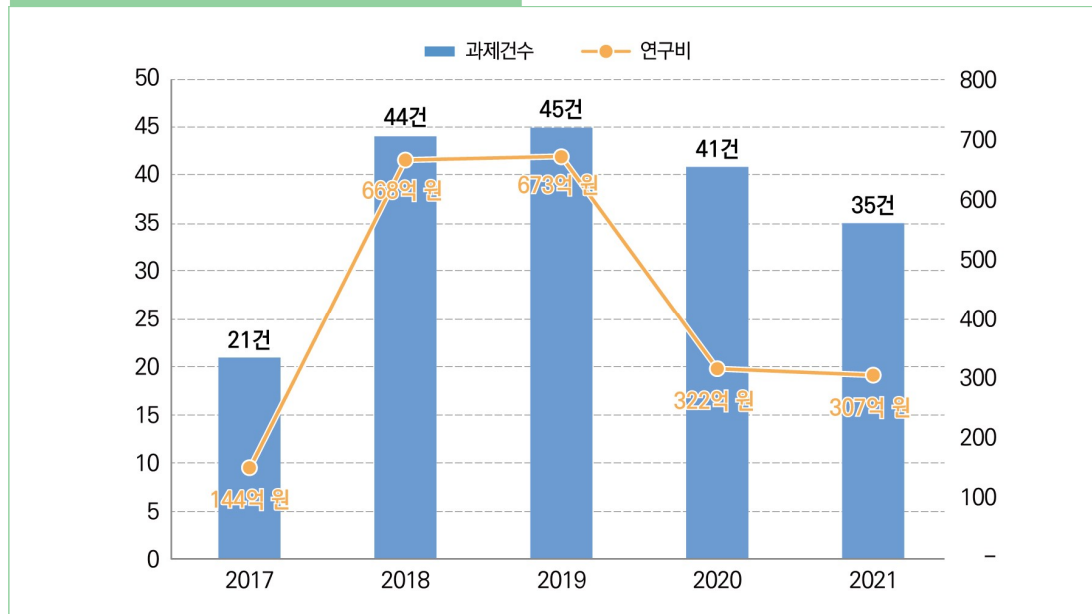
I 재난안전 플랫폼

□ (총괄) 최근 5년간('17~'21) 총 186건의 과제에 대해 2,113억 원의 연구비가 투자됨

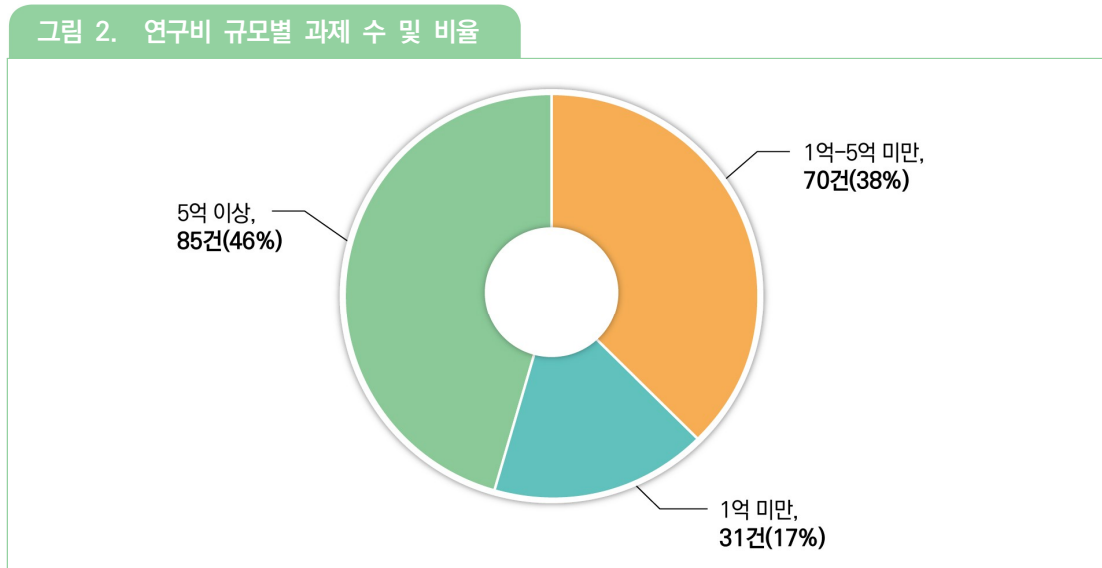
※ 국가과학기술지식정보서비스(NTIS) 플랫폼을 기반으로 관련 국가 연구개발 과제 분석 수행 : 원고의 핵심 키워드를 고려하여 검색 실시

* (재난 or 재해) and (안전) and (플랫폼) and (모델링 or 예측 or 관리 or 전달 or 경보 or 전파)

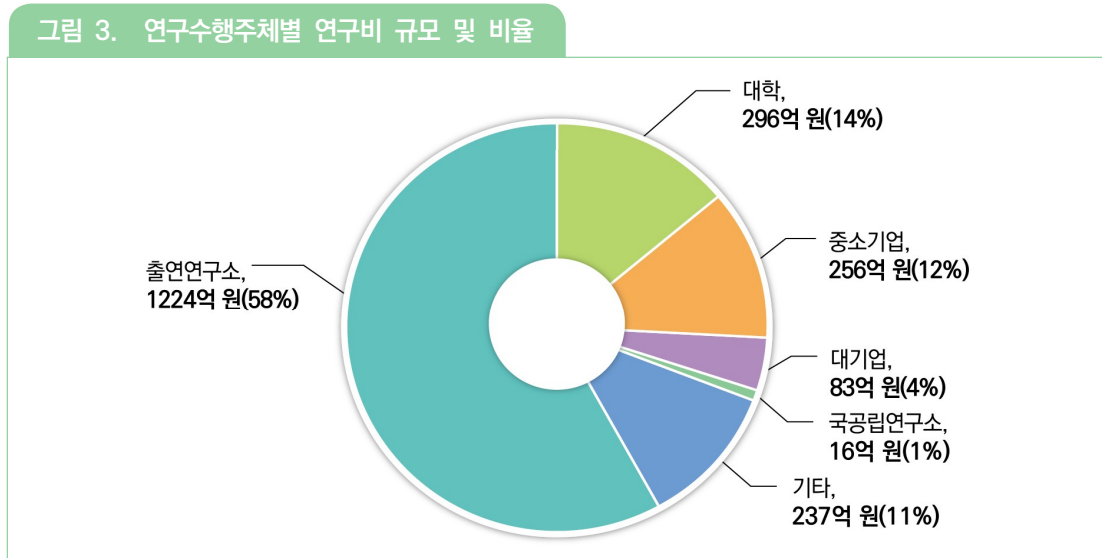
그림 1. 연도별 연구과제 건수 및 연구비



□ (연구비 규모별 과제 수) 연구비가 5억 원 이상인 과제는 46%(85건)를 차지하며 연구비가 1억 원 이상 5억 원 미만인 과제의 비중은 38%(70건), 1억 원 미만인 과제의 비중은 17%(31건)로 나타남



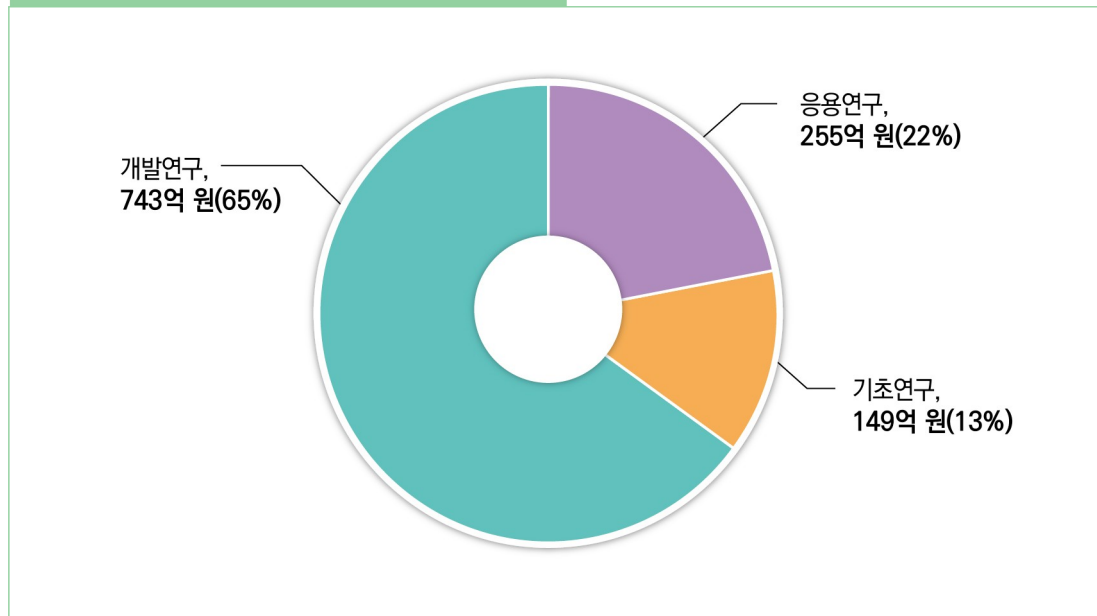
□ (연구수행주체) 출연연구소가 지원받는 연구비 비중(58%, 1,224억 원)이 가장 크고, 그 다음으로 대학(14%, 296억 원), 중소기업(12%, 256억 원), 대기업(4%, 83억 원) 순으로 큰 비중을 차지함



□ (연구수준) 재난안전 플랫폼 연구는 도입기이며 개발연구 단계인 것으로 확인됨

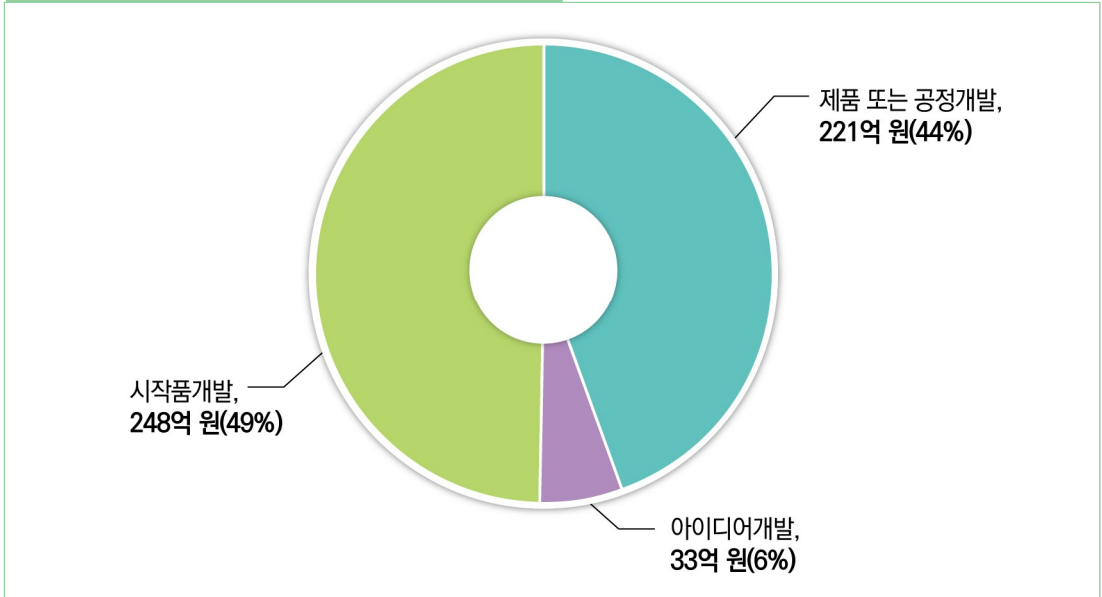
- (연구개발단계 분석 결과) 개발연구에 투자되는 연구비 비중이 65%(743억 원)로 응용연구(22%, 255억 원)와 기초연구(13%, 149억 원)에 투자되는 연구비 비중에 비해 월등히 높은 것으로 나타남
- (연구개발성격 분석 결과) 시작품 개발 관련 연구에 투자되는 연구비의 비중(49%, 248억 원)이 가장 크고, 제품 또는 공정개발(44%, 221억 원), 아이디어 개발(6%, 33억 원) 순으로 큰 것으로 드러남
- (기술수명주기 분석 결과) 도입기에 투자되는 연구비의 비중이 재난안전 플랫폼 관련 전체 연구비의 절반 이상(65%, 492억 원)을 차지하고, 성장기에 투자되는 연구비 비중(33%, 250억 원)이 그 다음으로 큰 것으로 확인됨

그림 4. 연구개발단계별 연구비 규모 및 비율



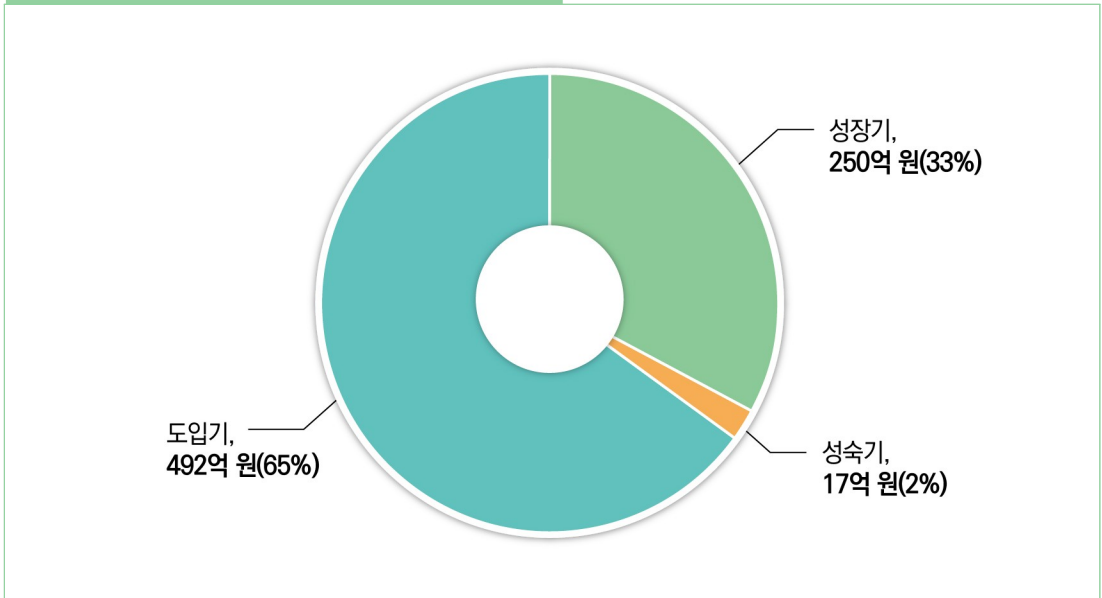
* '기타' 연구비(966억 원) 제외

그림 5. 연구개발성격별 연구비 규모 및 비율



* '미분류' 연구비(1,206억 원)와 '기타개발' 연구비(405억 원) 제외

그림 6. 기술수명주기별 연구비 규모 및 비율



* '기타' 연구비(266억 원)와 '미분류' 연구비(1,088억 원) 제외

- (연구분야) 국가과학기술표준분류와 미래유망신기술분류(6T) 분석 결과, 지구과학(지구/대기/해양/천문) 및 정보통신기술(IT) 분야를 중심으로 재난안전 플랫폼 연구가 이루어지는 것으로 확인됨
- (국가과학기술표준분류 분석 결과) 지구과학(지구/대기/해양/천문) 분야에 대한 연구비(37%, 773억 원), 정보/통신 분야의 연구비(31%, 659억 원) 순으로 큰 비중을 차지하는 것으로 나타남
 - ※ 연구책임자가 최대 3개까지 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류에 대한 각 가중치를 고려한 결과임
 - 융합과제에 지원된 연구비 비중은 재난안전 플랫폼 연구에 투자된 전체 연구비의 19%를 차지하며 약 410억 원이 지원된 것으로 드러남
 - ※ 융합과제란 연구책임자가 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류가 두 개 이상의 분류에 해당하는 과제를 의미함
 - (미래유망신기술분류(6T) 결과) 정보통신기술(IT) 관련 연구와 환경 기술(ET) 관련 연구에 투자된 연구비 비중이 각각 37%(774억 원)와 36%(770억 원)로 거의 유사한 것으로 확인됨

그림 7. 국가과학기술표준분류별 연구비 규모 및 비율

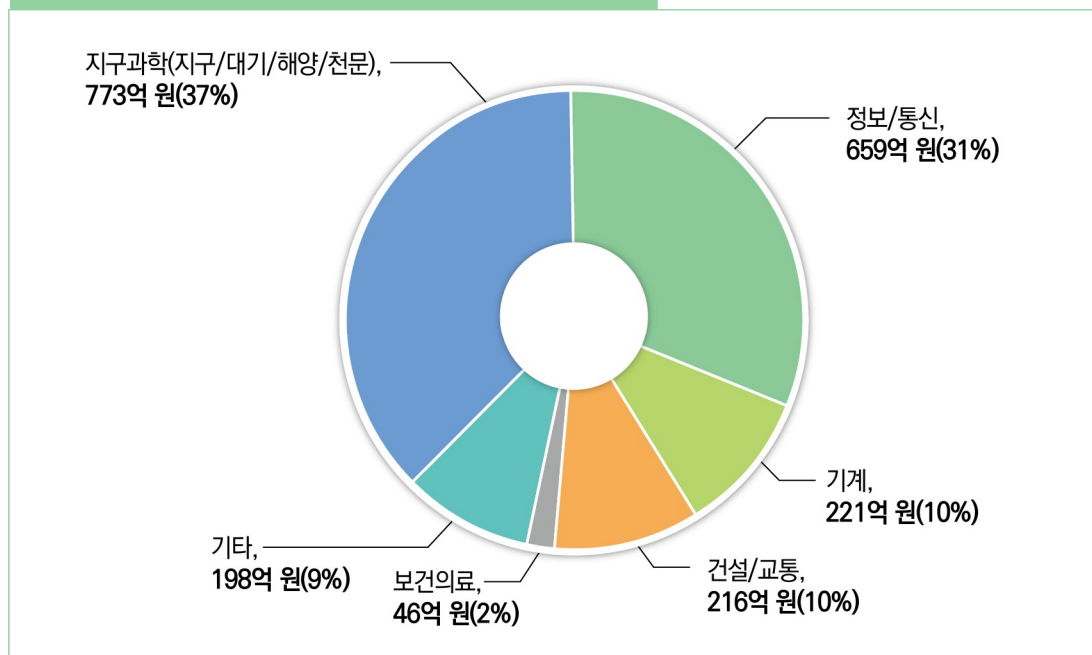


그림 8. 융합 R&D 과제 연구비 규모 및 비율

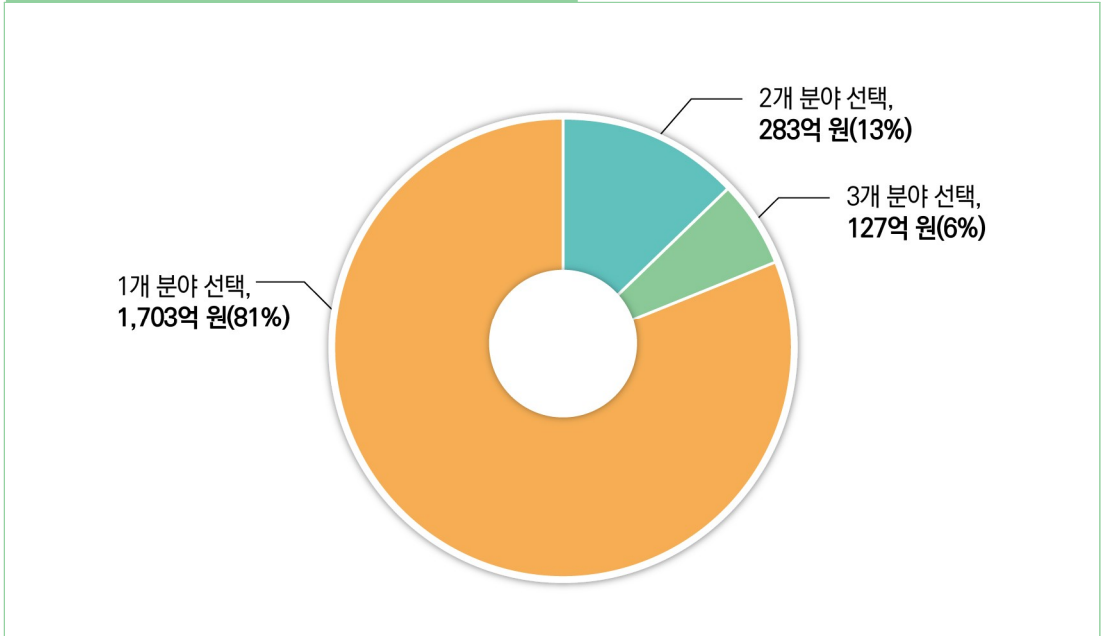
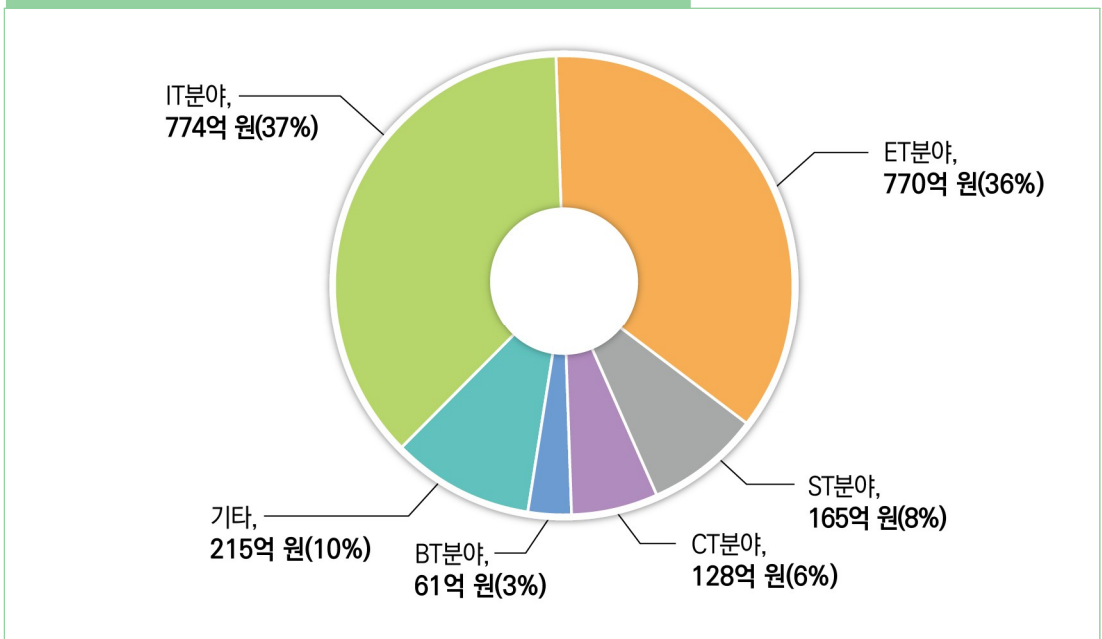


그림 9. 미래유망 신기술분류(6T)별 연구비 규모 및 비율



□ (주요 과제) 원고의 주요 내용 및 키워드 등을 기준으로 선정함

과제명 (사업명, 부처명)	수행기관, 총 연구기간, 연구비 규모	과제 주요 내용
실시간 재난정보 지도를 이용한 철도운영 지원시스템 개발 (국토교통기술사업화지원, 국토교통부)	(주)이에스피, 2018-2021년, 8억 원('21)	철도 운행에서 발생할 수 있는 다양한 자연재해를 구분하고 그에 따른 센서 통합 플랫폼을 구성하여 계측의 유형 별 플러그인이 가능한 철도환경에 특화된 센서 네트워크 구성 등
SOC 시설물의 스마트 통합 유지 관리를 위한 드론 기반 3D 엔진 및 무선 제어 계측 플랫폼 기반 기술 개발 (국토교통기술촉진연구, 국토교통부)	대림대학교 산학협력단, 2017-2018년, 2억 원('18)	지진, 수재해 등 재난 재해에 대비한 유지 관리용 감시 시스템 (영상 정보, 계측장비 등)에 IoT 기술을 접목하여 스마트폰과 연동이 가능한 인터페이스 및 3D 시설물 관리를 위한 스마트 유지관리 통합 플랫폼 기반 기술
국지적 재난 환경에서 멀티캐스트 기반 긴급 이종 재난안전망 구축 및 자원관리 방안 (개인기초연구, 과학기술정보통신부)	인하대학교, 2016-2019년, 0.9억 원('18)	이동형 기지국을 활용한 긴급 HetNet 재난안전망의 구축 방안과 효율적인 멀티캐스트 기술, D2MD(Device-to-Multiple Devices) 기술을 활용한 멀티캐스트 기반 재난안전망 서비스 제공 방안 연구

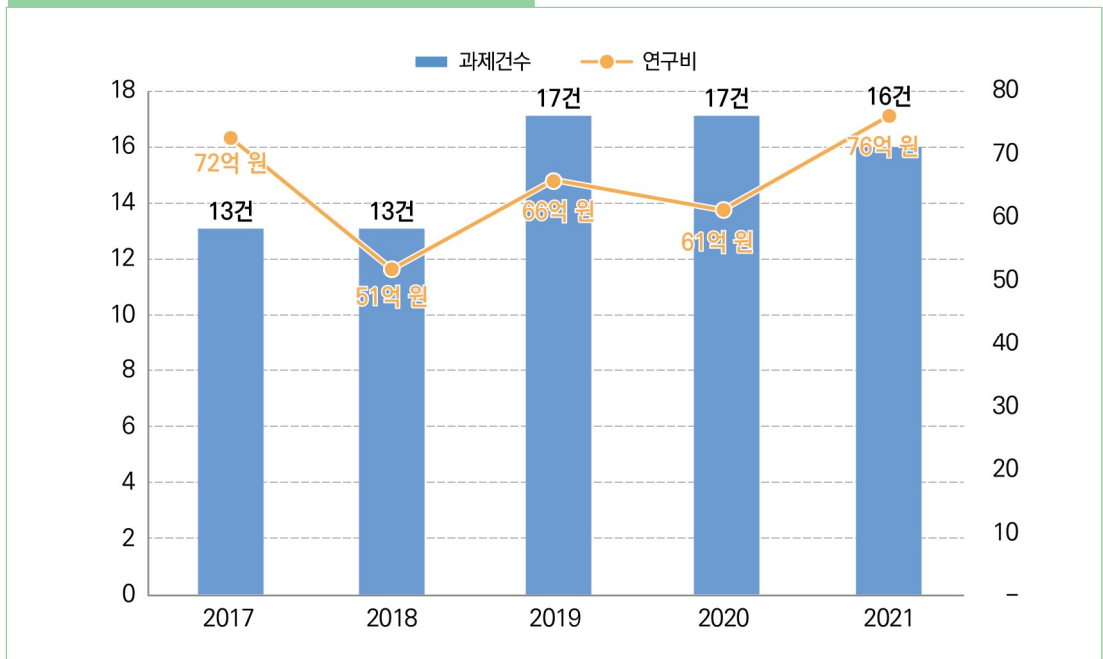
II 바이오리파이너리 기술

□ (총괄) 최근 5년간('17~'21) 총 76건의 과제에 대해 327억 원의 연구비가 투자됨

※ 국가과학기술지식정보서비스(NTIS) 플랫폼을 기반으로 관련 국가 연구개발 과제 분석 수행 : 원고의 핵심 키워드를 고려하여 검색 실시

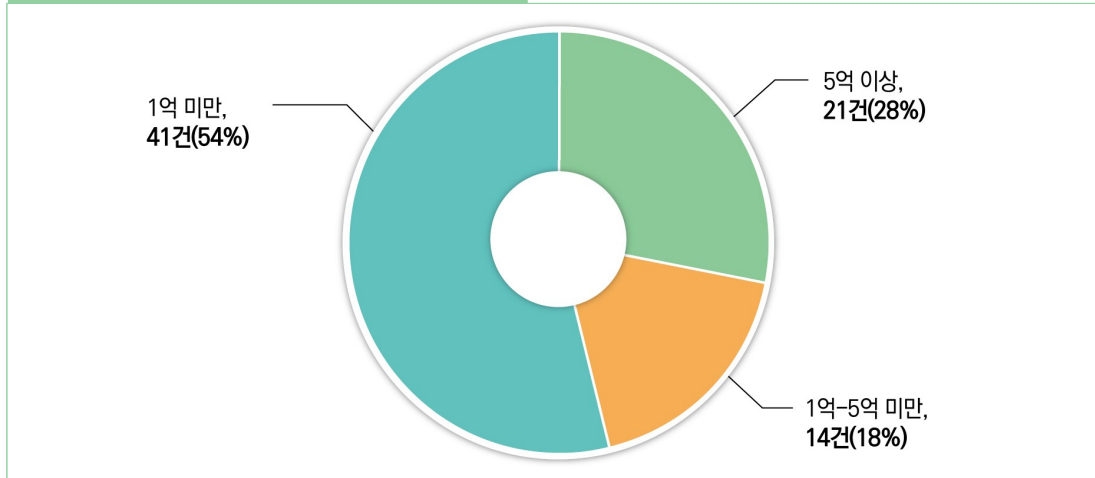
* (e-바이오리파이너리) or (가스 리파이너리) or (바이오리파이너리) or (바이오 리파이너리) or (biorefinery)

그림 10. 연도별 연구과제 건수 및 연구비



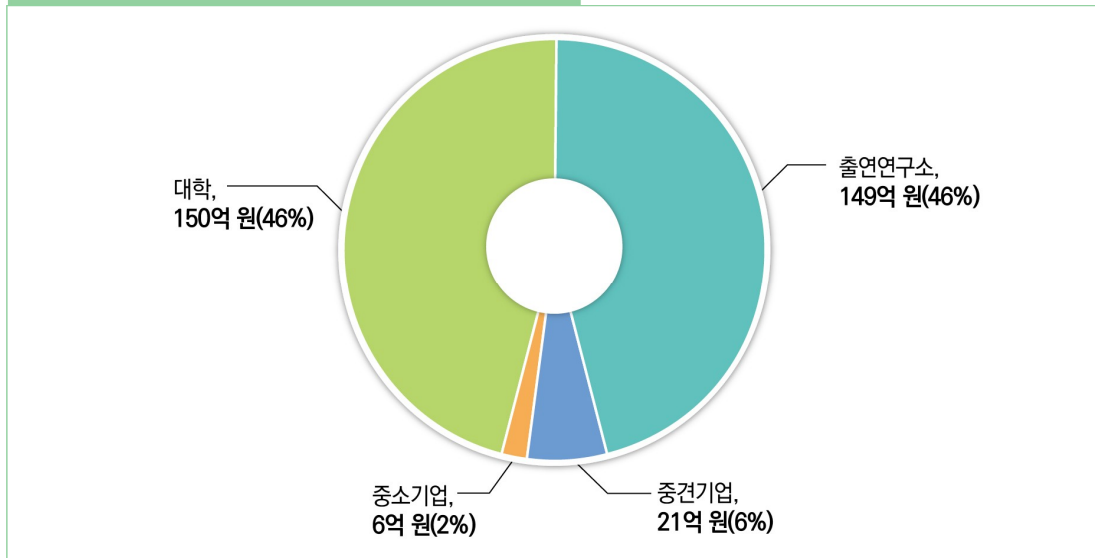
□ (연구비 규모별 과제 수) 1억 원 미만인 과제가 절반 이상(54%, 41건)을 차지하고, 5억 원 이상인 과제와 1억 원 이상 5억 원 미만인 과제가 각각 28%(21건), 18%(14건)의 비중을 차지하는 것으로 확인됨

그림 11. 연구비 규모별 과제 수 및 비율



□ (연구수행주체) 대학(46%, 150억 원)과 출연연구소(46%, 149억 원)가 지원받는 연구비의 비중이 바이오 리파이너리 기술 관련 전체 연구비의 대부분(92%, 299억 원)을 차지하는 것으로 드러남

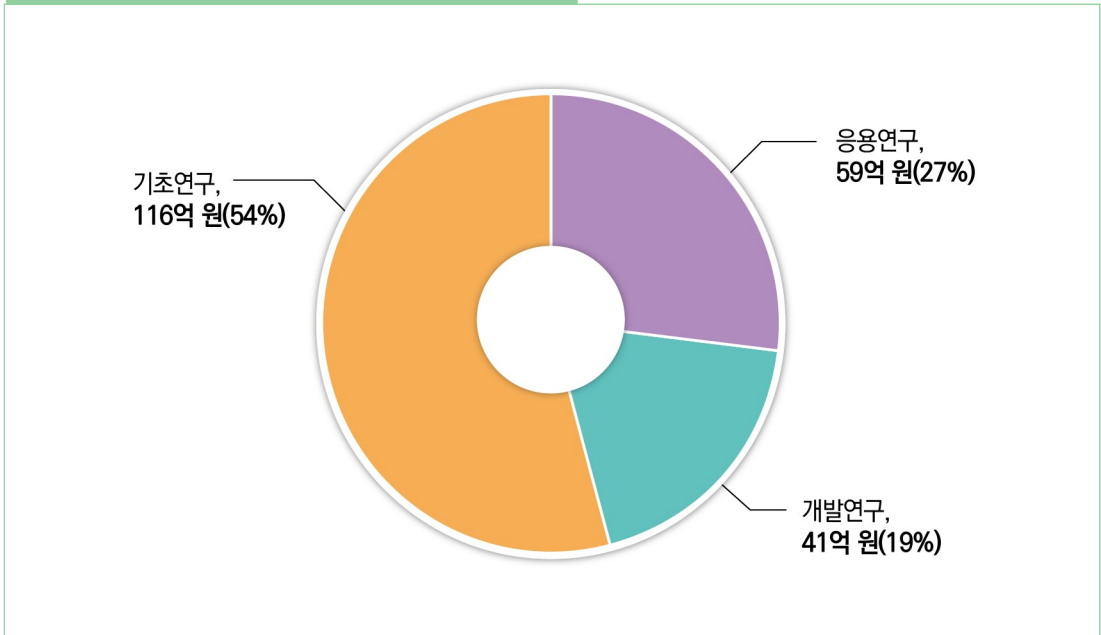
그림 12. 연구수행주체별 연구비 규모 및 비율



□ (연구수준) 연구수준을 분석한 결과, 바이오리파이너리 기술 관련 연구는 도입기이며 기초연구 단계인 것으로 드러남

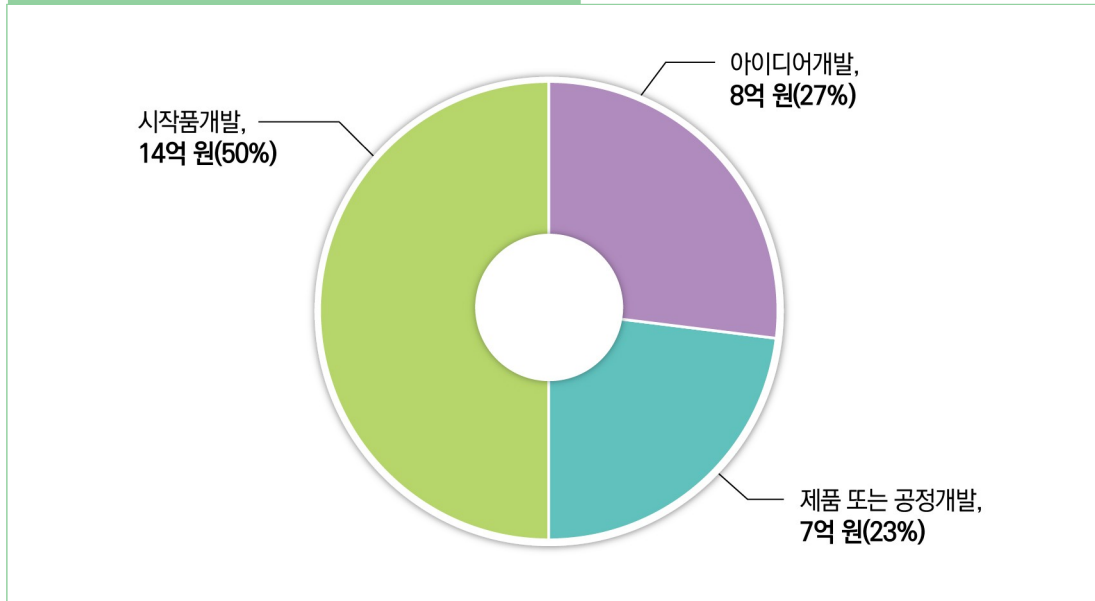
- (연구개발단계 분석 결과) 기초연구에 바이오리파이너리 기술 관련 전체 연구비의 54%에 해당하는 116억 원이 투자되고 있으며 응용연구와 개발연구의 연구비 비중은 각각 27%(59억 원), 19%(41억 원)인 것으로 확인됨
- (연구개발성격 분석 결과) 시작품 개발 관련 연구의 연구비가 바이오리파이너리 기술 전체 연구비의 절반(50%, 14억 원)을 차지하는 것으로 나타남
- (기술수명주기 분석 결과) 도입기에 대한 연구비의 비중이 94%(127억 원)인 반면, 성장기에 대한 연구비의 비중은 6%(8억 원)에 불과한 것으로 나타남

그림 13. 연구개발단계별 연구비 규모 및 비율



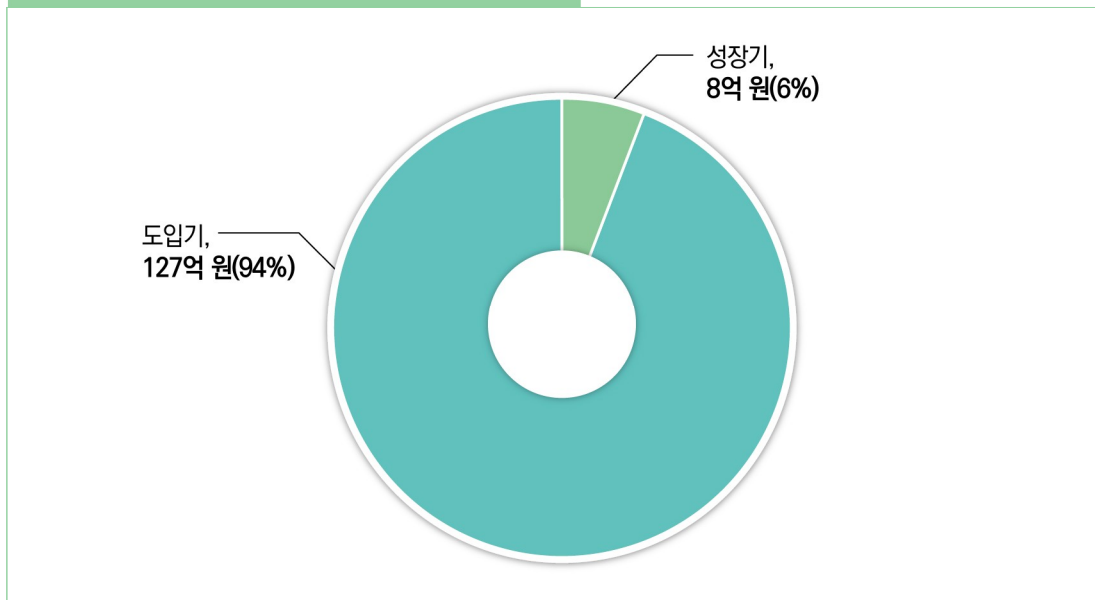
* '기타' 연구비(110억 원) 제외

그림 14. 연구개발성격별 연구비 규모 및 비율



* '기타' 연구비(214억 원)와 '미분류' 연구비(85억 원) 제외

그림 15. 기술수명주기별 연구비 규모 및 비율



* '기타' 연구비(108억 원)와 '미분류' 연구비(85억 원) 제외

- (연구분야) 국가과학기술표준분류와 미래유망신기술분류(6T) 분석 결과, 바이오리파이너리 기술에 대한 연구비 투자는 바이오 기술(BT) 및 생명과학 분야를 중심으로 연구비 투자가 이루어짐
- (국가과학기술표준분류 분석 결과) 생명과학 분야에 대한 연구비 비중(38%, 124억 원)이 가장 큰 것으로 나타났으며 에너지/자원(31%, 102억 원) 분야가 그 다음으로 큰 것으로 확인됨
 - ※ 연구책임자가 최대 3개까지 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류에 대한 각 가중치를 고려한 결과임
 - 바이오리파이너리 기술 관련 융합과제에 투자된 연구비 비중은 26%(86억 원)인 것으로 드러남
 - ※ 융합과제란 연구책임자가 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류가 두 개 이상의 분류에 해당하는 과제를 의미함
 - (미래유망신기술분류(6T) 결과) 바이오 기술(BT) 관련 연구에 대한 투자 비중이 58%(191억 원)로 바이오리파이너리 기술 관련 전체 연구비 중 가장 크고 환경 기술(ET)이 그 다음으로 큰 것(35%, 115억 원)으로 확인됨

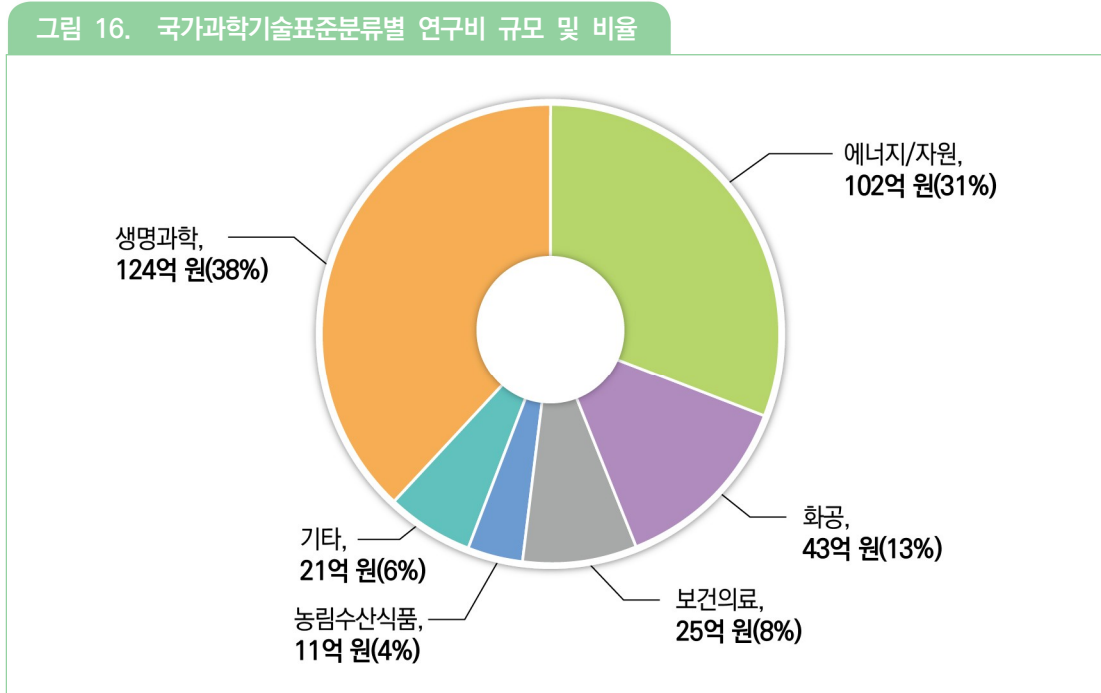


그림 17. 융합 R&D 과제 연구비 규모 및 비율

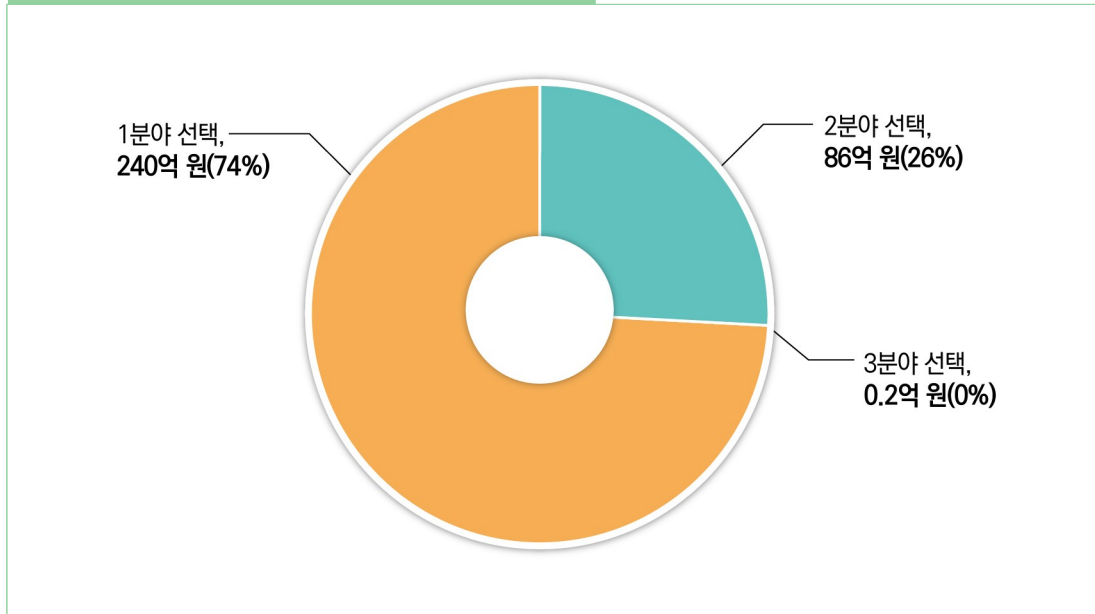
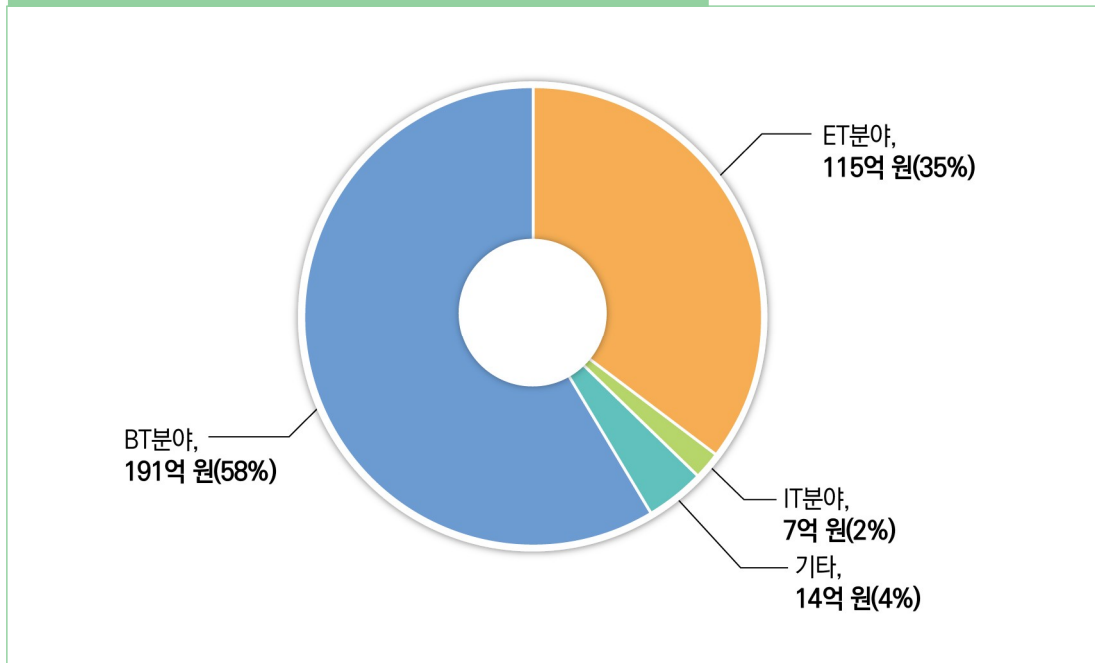


그림 18. 미래유망 신기술분류(6T)별 연구비 규모 및 비율



□ (주요 과제) 원고의 주요 내용 및 키워드 등을 기준으로 선정함

과제명 (사업명, 부처명)	수행기관, 총 연구기간, 연구비 규모	과제 주요 내용
바이오리파이너리를 위한 미생물 시스템대사공학 원천기술 개발 (기후변화대응기술개발, 과학기술정보통신부)	한국과학기술원, 2012-2021년, 20억 원('20)	바이오리파이너리 산업 구축의 핵심 전략 기술인 미생물 시스템 대사공학 플랫폼 기술 개발
생물전기화학시스템 및 라만분광법 기반 신개념 고성능 CO 전환 균주 스크리닝 및 C1가스바이오리파이너리 기술개발 (기후변화대응기술개발, 과학기술정보통신부)	부산대학교, 2016-2020년, 2억 원('17)	CO 전환활성을 전기화학적 분석 및 표면증강라만분광법으로 실시간으로 검출 가능한 생물전기화학반응 플랫폼을 개발, 이를 이용해 CO 전환 고성능 균주를 선별하여 실제 C1 바이오리파이너리 공정에 적용 가능한 바이오촉매 개발
케나프 유래 레불린산 생산 바이오리파이너리 공정모사 및 경제·환경성 평가 모델 개발 (이공학기술연구기반구축, 교육부)	전북대학교, 2019-2022년, 0.5억 원('20)	플랫폼 케미칼 기반 레불린산 생산 바이오리파이너리 공정모사 모델을 개발하고, 개발된 공정의 실용화 가능성을 검증하기 위해 경제·환경성 평가 모델 개발

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 September vol.8 no.9

이 보고서는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 사업임

(No. NRF-2012M3C1A1050726)