

2022 October | Vol. 8

10



융합연구리뷰

Convergence Research Review

미세먼지 저감기술 및 정책 동향

최종원(한국에너지기술연구원 책임연구원)

이강산(한국에너지기술연구원 박사후연구원)

국내외 탄소 포집·활용(CCU) 기술 연구 동향

오형석(한국과학기술연구원 책임연구원)

CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 미세먼지 저감기술 및 정책 동향
- 43 국내외 탄소 포집·활용(CCU) 기술 연구 동향
- 83 국가R&D 현황 분석



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2022 October vol.8 no.10

발행일 2022년 10월 11일

발행인 김현우

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

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

펴낸곳 한빛사회적협동조합



미세먼지 저감기술 및 정책 동향

죽음의 먼지, 침묵의 살인자, 잿빛재앙. 모두 미세먼지를 지칭하는 말이다. 눈에 보이지 않을 정도로 매우 작은 크기의 미세먼지는 눈과 호흡기를 통해 우리 몸에 스며들어 인체에 직·간접적으로 유해한 영향을 끼쳐 건강을 위협하고 삶의 질을 좌우한다. 세계보건기구(WHO, World Health Organization) 산하 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)는 미세먼지를 '1군(Group 1) 발암물질'로 분류하고 있고 2019년에는 국내 연구진에 의해 초미세먼지가 심방이 불규칙하고 빠르게 뛰는 질환인 심방세동 발생 위험을 증가시킬 수 있다는 사실이 밝혀졌다. 연구진에 의하면, 2007년부터 2015년까지 서울에 거주한 30세 이상 인구 12만 4천여 명의 국민건강보험공단 자료를 분석한 결과, 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하면 심방세동으로 인한 응급실 방문율이 4.5% 증가한다고 한다. 건강에 유해한 미세먼지는 전 세계의 범사회적 이슈로 미세먼지 저감 기술의 필요성이 증대되었다.

미세먼지는 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질로 머리카락 굵기의 1/5~1/7 수준의 미세먼지와 1/20~1/30 수준의 초미세먼지로 구분된다. 미세먼지는 자동차, 공장 및 굴뚝 등과 같은 배출원에서 직접적으로 나오는 1차 생성 미세먼지와 가스 또는 증기로 배출된 후 대기 중의 수증기, 오존 등과 결합하여 공기 중 입자로 변화되는 2차 생성 미세먼지로 구분된다. 1차 생성 미세먼지는 불완전 연소 시 발생하는 원소탄소(EC, Elemental Carbon), 중금속 등이며, 2차 미세먼지는 황산화물, 질소산화물 등이 다른 물질과 결합하여 만들어진 황산염, 질산염 등이다. 본 호 2부에서는 미세먼지 저감 정책과 산업 부문의 1차 생성 미세먼지 및 2차 생성 미세먼지의 다양한 저감기술에 대한 동향을 소개한다.

국내외 탄소 포집·활용(CCU) 기술 연구 동향

기후변화의 심각성에 대한 인식이 높아지면서 '탄소와의 전쟁'이 시작되었다. 2015년 파리협정, 2019년 유엔 기후정상회의 이후 121개 국가가 '2050 탄소중립 목표 기후 동맹'에 가입하였다. 또한, 세계 각국은 2050년까지 지구의 온도 상승폭을 1.5도 이내로 낮추기 위해 탄소중립을 선언했다. 2019년 6월 영국에 이어 2020년 유럽연합(3월), 중국(9월), 일본(10월), 한국(10월), 2021년 미국(10월)이 잇따라 탄소중립을 선언했다(2021년 12월 기준). 탄소중립은 인간 활동으로 배출되는 온실 가스는 최대한 줄이고, 배출되는 온실 가스는 산림 흡수 또는 이산화탄소 포집·활용(CCU)으로 제거하여 실질적인 이산화탄소 배출량을 '0' 수준으로 낮추는 것을 의미하며 이를 실현하기 위한 핵심 기술로 이산화탄소 포집·활용(CCU, Carbon Capture & Utilization) 기술이 부상하고 있다.

CCU 기술이란 에너지, 산업 공정 등에서 배출되는 이산화탄소를 포집 및 활용하여 유용한 자원으로 탈바꿈시키는 기술로 국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)는 해당 기술이 2050년까지 감축해야 하는 탄소의 41%를 해결해줄 것으로 전망한다. 세계 각국은 R&D 프로그램 등을 통해 기술 개발을 지원하고 CCU 산업 육성을 위한 제도적 지원방안을 마련하고 있다. 우리나라도 2020년에 발표한 '대한민국 2050 탄소중립 전략'에서 CCU 기술을 발전·산업 부문 핵심 기술 수단으로 제시했으며, 2021년 'CCU 기술혁신 로드맵'을 수립하였다. 본 호 2부에서는 세계 주요국 별 CCU 정책, R&D 프로젝트, 기술, 산업 동향에 대해 소개하며 국제사회의 노력에 맞춰 CCU 기술을 선제적으로 확보하여 탄소중립을 실현할 수 있기를 기대해 본다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 October vol.8 no.10



01

미세먼지 저감기술 및 정책 동향

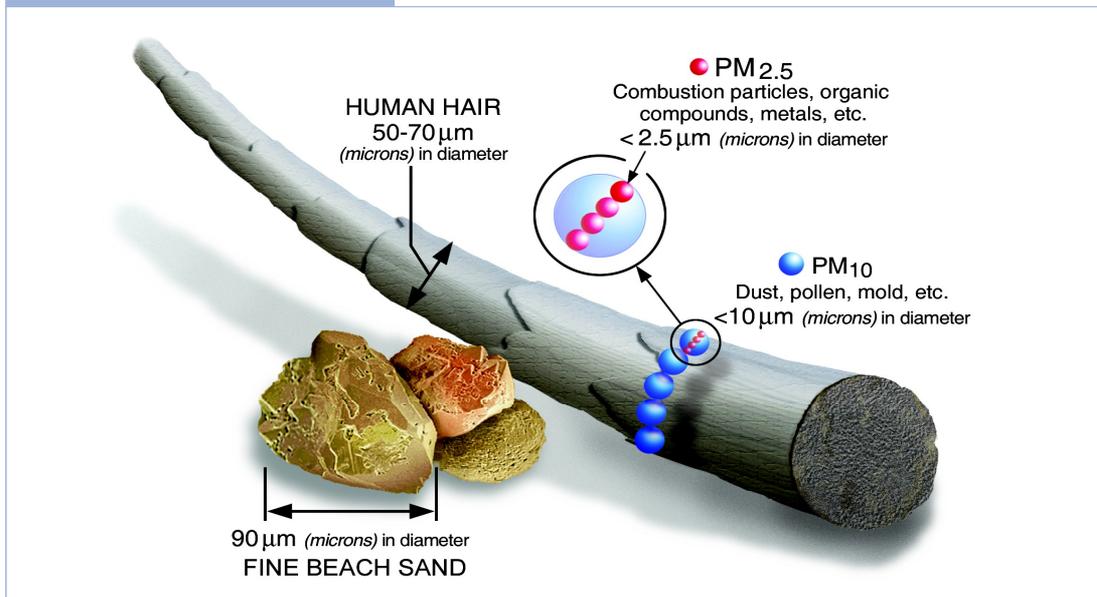
최종원(한국에너지기술연구원 책임연구원)
이강산(한국에너지기술연구원 박사후연구원)

I 개요

1. 미세먼지의 개념

환경부에서는 먼지를 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질로 정의하고 있으며, 먼지는 입자의 크기에 따라 50 μm 이하인 총 부유먼지(TSP, Total Suspended Particles)와 입자 지름이 10 μm 보다 작은 미세먼지(PM, Particulate Matter), 그리고 지름이 2.5 μm 보다 작은 초미세먼지(PM_{2.5})로 나뉜다. PM₁₀이 사람의 머리카락 지름(50~70 μm)보다 약 1/5~1/7 정도로 작은 크기라면, PM_{2.5}는 머리카락의 약 1/20~1/30에 불과할 정도로 매우 작다(환경부, 2016).

그림 1. 미세먼지 크기 비교



* 출처: 미국 환경보호청(EPA)

이처럼 미세먼지는 눈에 보이지 않을 정도로 매우 작아서 일반 먼지와 달리 코, 구강, 기관지에서 걸러지지 않고 신체에 축적된다. PM_{2.5}의 경우 호흡하면 폐 깊숙이 침투하여 일부는 혈관으로도 들어가 심혈관 질환을 일으킬 수도 있다. 세계보건기구(WHO, World Health Organization)는 매년 약 3백만 명의 사람들이 미세먼지와 관련된 암, 심장 질환 및 기타 질병으로 기대수명보다 일찍 사망하고 있으며, 이러한 질병의 65%가 아시아에서 발생한다고 발표했다. WHO는 미세먼지에 대한 대기질 가이드라인을 1987년부터 제시해왔으며, 동아시아와 남아시아에 있는 인구 중 99%는 PM_{2.5}에 대한 WHO 대기질 가이드라인을 초과하는 지역에 살고 있다(Brauer et al., 2012).

미세먼지는 건강상에 문제를 일으킬 뿐만 아니라 식물 잎 표면에 쌓여 신진대사를 방해하고 건축물이나 동상 등 설치물에 쌓여 부식을 유발하기도 한다. 또한 미세먼지는 빛을 산란시켜 대기를 혼탁하게 만들고, 지구복사 열평형을 바꿀 가능성도 있다. 기후 변화에 관한 정부 간 협의체인 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)에서 2007년에 발표한 보고서에 의하면, 산업 시대가 시작된 이후 미세먼지가 기후에 미치는 영향은 온실가스의 약 20%에 해당한다고 한다. 기후 변화로 인한 지구 온난화 현상이 나타나면 고도가 낮은 쪽에 무거운 공기가, 높은 쪽에 가벼운 공기가 위치해 무게 차에 의한 공기의 상하이동이 일어나지 않는 대기 정체 현상이 나타나면서 결과적으로 미세먼지는 지상에 머물며 계속 쌓여 농도가 증가하게 된다. 또한 지구 온난화로 인해 사막화가 확대되어 황사와 같은 먼지 발생이 증가하는 악순환이 반복된다. 전 세계적으로 미세먼지 농도를 줄이기 위한 노력을 하고 있지만 기후 위기가 지속되는 이상 앞으로도 미세먼지는 건강상에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 기후 변화에 지속적인 영향을 미칠 것으로 보인다.

2. 미세먼지의 발생원

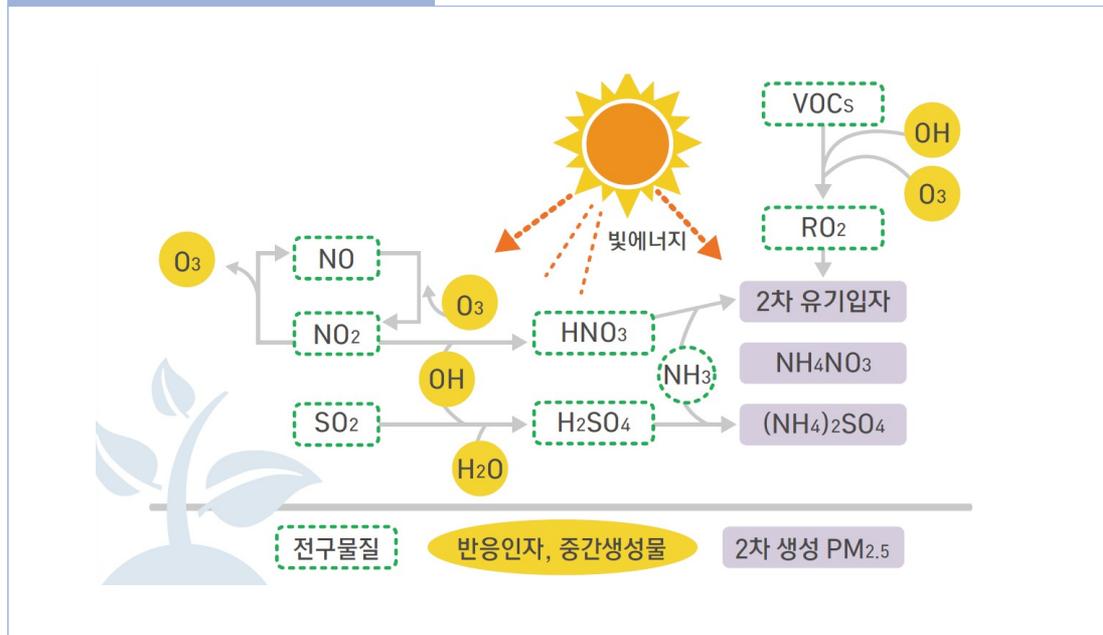
미세먼지 발생원은 크게 자연적 발생원과 인위적 발생원으로 구분된다. 자연적 발생원은 흙먼지, 해염(소금) 입자, 꽃가루, 화산재 등이 있으며, 인위적 발생원은 화석연료를 사용할 때 생기는 매연, 자동차 배기가스, 건설현장에서 발생하는 날림먼지, 공장 내 분말형태의 원자재·부자재, 취급공정에서의 가루성분, 소각장 연기 등이 있다.

인위적 발생원은 다시 배출원에서부터 나오는 1차 생성 미세먼지와 가스상 오염물질이 공기 중의 다른 물질과 화학반응을 일으켜 미세먼지가 되는 2차 생성 미세먼지로 나눌 수 있다. 1차 생성 미세먼지는 다시 여과성 미세먼지(FPM, Filterable Particulate Matter)와 응축성 미세먼지(CPM, Condensable Particulate

Matter)로 구분된다. 여과성 미세먼지는 배출원에서 직접 입자상으로 배출되는 물질을 말하며, 응축성 미세먼지는 배출원에서 기체상으로 배출되어 즉시 응축 또는 냉각되어 고체 상태로 변환되는 입자를 말한다. 이러한 응축성 미세먼지의 대표적인 전구물질은 이산화황(SO₂)과 질소산화물(NO_x)로 알려져 있다(공부주 외, 2016).

화석연료 연소에서 배출되는 황산화물(SO_x)이 대기 중의 수증기, 암모니아와 결합하거나, 자동차 배기가스에 서 배출되는 NO_x이 대기 중의 수증기, 오존, 암모니아 등과 결합하는 화학반응을 통해 미세먼지가 형성되기도 하는데 이것을 2차 생성 미세먼지라고 한다. 2016년 5월 국립환경과학원과 미국 항공우주국(NASA, National Aeronautics and Space Administration) 연구팀이 수행한 ‘국내 대기질 공동연구(KORUS-AQ)’ 연구결과에 의하면, 국내 초미세먼지의 75% 이상이 2차 생성 미세먼지인 것으로 밝혀졌다. 따라서 미세먼지 농도를 줄이기 위해서는 단순히 미세먼지만을 저감하는 것이 아니라 2차 생성 미세먼지 전구물질(NO_x, SO_x, VOCs 등)을 함께 저감시키는 것이 중요하다.

그림 2. 미세먼지 2차 생성과정



* 출처: 환경부(2016)

II 미세먼지 정책 동향

1. 미세먼지 관련 조직 현황

최근 고농도 미세먼지 발생으로 인하여 미세먼지에 대한 국민적 우려가 높아지면서 국회는 '미세먼지로 인한 피해를 사회재난으로 정하였고, 정부는 미세먼지 문제에 대응하기 위하여 미세먼지 관련 조직을 구성하였다.

「미세먼지 저감 및 관리에 대한 특별법」(2018.8.14. 제정, 2019.2.15. 시행)에 따른 미세먼지 관리 대책의 추진체계를 살펴보면, 미세먼지 대책의 컨트롤타워인 미세먼지특별대책위원회가 국무총리실 소속으로 설치되었으며(2019.2.15), 이 위원회는 미세먼지 관련 주요 정책·계획 및 이행 관련 사항을 심의하는 기능을 수행한다(국회에산정책처, 2019).

이와는 별도로 「미세먼지 문제 해결을 위한 국가기후 환경회의의 설치 및 운영에 관한 규정」(대통령령 제29713호, 2019.4.25. 제정 및 시행)에 따른 대통령 소속의 '국가기후환경회의'가 2019년 4월 29일에 출범하여 국민정책참여단 운영을 통해 정책과제를 발굴하고 정부에 대책을 제안하는 역할과 국민행동 변화 권고, 국제네트워크 구축 및 확대 등의 역할을 수행해왔으나 2021년 4월 28일부로 대통령 직속 '탄소중립위원회'(탄소중립위)로 통합되었다.

또한 과학·기술·정책의 융합적 미세먼지 솔루션을 제시하기 위해 과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부 공동으로 2017년 8월에 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단이 발족되었으며, 2017년 9월에 연구를 시작하여 2020년 9월까지 추진하였고, 현재 후속 R&D 연계 사업으로 '동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업(2020-2024)'을 수행 중이다.

환경부 소속 미세먼지 관련 기관에는 국가미세먼지정보센터, 온실가스종합정보센터, 그리고 국립환경과학원이 있다. 국가미세먼지정보센터는 「미세먼지 저감 및 관리에 대한 특별법」에 따라 2019년 12월에 설립되었으며, 신속하고 정확한 국가 배출량 산정체계 구축, 신뢰성·타당성 높은 원인진단 및 정책효과 분석, 그리고 대내·외 협력·소통 및 조직역량을 강화하는 역할을 하고 있다. 온실가스종합정보센터는

「저탄소 녹색성장 기본법」에 따라 2010년 6월에 설립되었으며, 국가온실가스 종합관리체계 구축, 과학적 분석을 통한 온실가스 감축목표 수립·달성 지원, 그리고 온실가스 감축을 위한 글로벌 협력체계를 구축하는 역할을 하고 있다. 그리고 국립환경과학원의 기후대기연구부는 대기오염물질 배출특성 연구, 국가 대기질 예보제 운영, 환경위성 및 국제협력 연구 등의 업무를 소관하고 있다.

표 1. 환경부 소속 미세먼지 관련 조직 현황

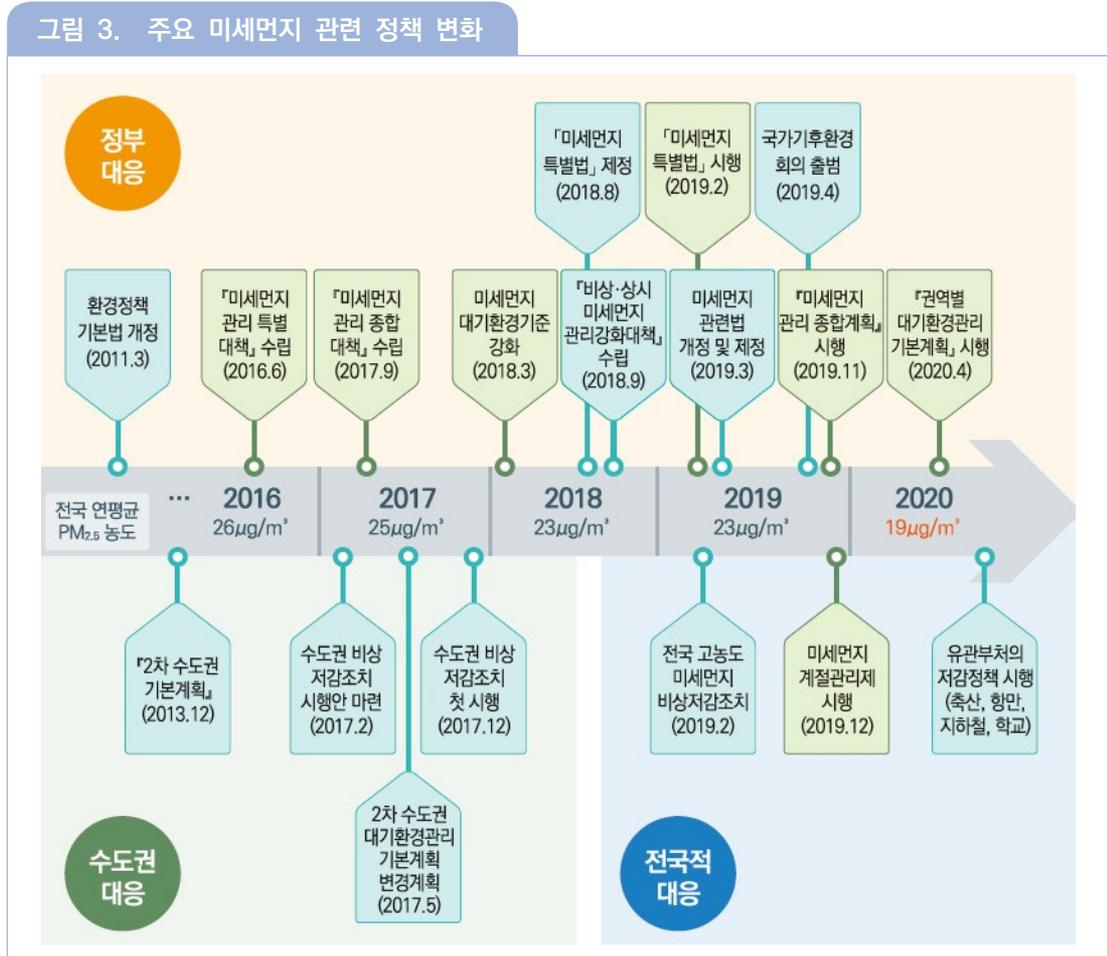
조직	역할	근거법률
국가미세먼지정보센터	<ul style="list-style-type: none"> 배출량 산정을 위한 자료 수집 및 분석 미세먼지 배출원 발굴 미세먼지 등 배출량 산정방법 개발 국내·외 미세먼지 배출원별 기여도 분석 통계관리 및 정책효과 분석 	미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 제17조
온실가스종합정보센터	<ul style="list-style-type: none"> 국가 및 부문별 온실가스 감축 목표 설정 지원 국제기준에 따른 국가 온실가스 종합정보관리체계 운영 온실가스·에너지 목표관리 관련 업무협조 지원 및 관계 중앙행정기관에 대한 정보 제공 국내·외 온실가스 감축 지원을 위한 조사·연구 국가 온실가스 배출계수 검증·관리, 배출량 산정방법 개선 등 온실가스 배출량 산정·보고에 관한 사항 	저탄소 녹색성장 기본법 제45조 및 동법 시행령 36조
국립환경과학원 (기후대기연구부)	<ul style="list-style-type: none"> 대기환경기준의 설정 및 대기오염물질의 예보제·경보제에 관한 조사·연구 대기 중 입자상, 가스상, 악취물질의 측정·분석에 관한 업무 대기오염 측정망 및 국가대기환경데이터센터 운영·관리 대기오염물질 배출원의 배출특성 및 방지기술, 배출계수에 관한 조사·연구 대기오염 총량관리 및 배출허용기준에 관한 조사·연구 온실가스 등 기후변화 유발물질에 대한 측정 및 조사·연구 온실가스 및 대기오염물질 통합시스템 운영, 배출계수 개발 및 배출량 산정 	환경부와 그 소속기관 직제

* 출처: 국회예산정책처(2019)

2. 미세먼지 관련 정부 정책 현황

「대기환경보전법」에 의한 최초의 대기분야 법정 종합계획으로 「대기환경개선 종합계획(2006~2015)」이 시행되었다. 이는 대기·기후분야 전국 단위 종합계획으로, 10년간의 정책방향을 제시하는 법정계획이며, 현재 2차 10년 장기계획(2016~2025년)이 시행 중이다.

「대기환경개선 종합계획」을 시행하면서 관리정책을 대도시 중심에서 환경기준이 초과되는 고농도 발생지역과 이에 영향을 주는 배출원(지역)을 중점적으로 관리하는 방향으로 전환해야 될 필요성이 제기됨에 따라 정부는 실질적인 미세먼지 정책을 계속해서 발표하고 개선해오고 있다.



* 출처: 심창섭 외(2021)

우리나라에서 가장 대기오염이 심각한 수도권의 대기질 개선을 위해 2003년 12월에 「수도권 대기환경 개선에 관한 특별법」이 제정되었으며, 이에 따라 환경부는 2005년 11월에 「수도권 대기환경관리 기본계획」을 수립하였다. 「수도권 대기환경관리 기본계획」은 자동차 배출가스 저감사업, 사업장 총량관리제 및 환경친화적 에너지, 도시 관리 등을 통해 수도권 대기오염물질 배출량을 2014년까지 2001년 대비 절반 수준으로 삭감하여 미세먼지 및 이산화질소 농도를 선진국 수준으로 개선하기 위한 제반 계획이다. 「1차 수도권 대기환경개선 특별대책(2005~2014)」 추진과 함께 한·중 협력사업이 착수되었고, 미세먼지 예·경보제 전국시행(2015.1) 등을 추진하였으나 국내 배출원의 과학적 관리(특히 경유차, 발전소), 한·중 협력 사업의 성과 가시화, 예·경보제의 실효성 등에서 국민 기대에 미흡했다는 평가를 받았다. 또한 2013년부터 서울의 미세먼지 농도가 악화되었고, 국민이 실생활에서 체감하는 미세먼지 오염도도 심각하게 악화됨에 따라 향후 10년간 특단의 미세먼지 대책을 수립·추진하여 2026년까지 미세먼지 농도를 유럽 주요도시의 수준으로 개선(서울, 2015년 $23\mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow 2026$ 년 $18\mu\text{g}/\text{m}^3$)하고자 관계부처 합동으로 2016년 6월에 「미세먼지 관리 특별대책」이 수립되었다.

「미세먼지 관리 특별대책」 실행 이후 미세먼지 저감 효과는 점진적으로 나타나고 있었으나, 기상악화에 따른 고농도 미세먼지 발생, 예보기준 변경, 정책여건(경유차 비중 증가) 등으로 인해 평상시 미세먼지 지속 저감을 위한 추가 감축방안 마련의 필요성이 제기되면서 정부는 2018년 6월에 관계부처 합동으로 「비상·상시 미세먼지 관리 강화대책」을 발표하였다. 여기에는 고농도 미세먼지 발생 시 비상저감조치를 강화하고 생활 주변 미세먼지 배출원에 대한 상시저감 대책을 대폭 강화하는 계획이 담겨있으며, 2022년까지 미세먼지 감축 목표를 종전 30.5%에서 35.8%까지 제고하였다.

하지만 비상저감조치의 효과는 국민이 기대했던 것과는 달리 미세먼지 농도를 줄이는 데 큰 역할을 하지 못했다. 특히 2019년 3월에는 수도권에서의 고농도 비상저감조치가 역사상 최장기간인 7일 연속 발령되었으며, 이 기간 서울의 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도는 WHO의 24시간 권고 기준보다 최대 5배 이상 높게 나타났다. 이에 따라 정부는 미세먼지에 관한 8법을 제·개정하였고, ‘미세먼지로 인한 피해’를 사회재난으로 지정하였다. 미세먼지 8법은 환경부가 4건, 교육부, 행정안전부, 산업통상자원부, 해양수산부가 각각 1건씩 소관하고 있다.

이러한 정부의 감축 노력으로 2018년 말까지 국내 배출량이 9.4%(직접+2차) 감축(2014년 배출량 기준)되었고, 초미세먼지 연평균 농도가 소폭 개선되었으나 여전히 WHO 권고기준($10\mu\text{g}/\text{m}^3$), 선진국(일본 11.9, 미국 $7.4\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 2배 이상이며 대기정체 등 기상예에 따라 고농도 발생가능성이 상존하고 있고, 국민의 체감도도 저조한 상태이다. 이로써 관련 기준·제도 강화와 이행을 통한 국내 배출량 감축의 가속화가 필요하게 됨에 따라 정부는 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」 제7조에 근거하여 관계부처 합동으로 「미세먼지 관리

종합계획(2020~2024)』을 수립하였다. 이 계획은 5년간의 미세먼지 저감 및 관리 정책방향과 추진과제를 제시하는 법정계획이며 미세먼지 대응에 관한 최신·최상위 종합계획으로 별도 행정계획이었던 기존 대책에 비해 보다 강력한 국가·행정 기관의 구속력이 발생한다.

표 2. 미세먼지 관리 종합 계획의 중점 추진과제

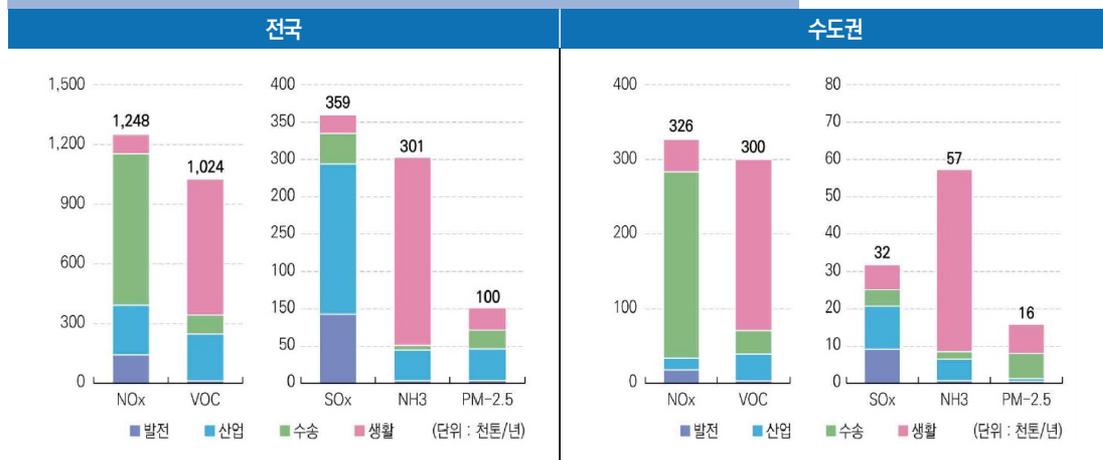
분야		15대 중점 추진과제
국내배출감축	산업부문	<ul style="list-style-type: none"> 배출총량제 전국 확대 사업장 점검 및 단속 강화
	수송부문	<ul style="list-style-type: none"> 노후경유차 감축 강화 및 저공해차 보급 확대 선박 및 항만 관리기준 강화 노후건설기계 관리 강화
	발전부문	<ul style="list-style-type: none"> 석탄발전 미세먼지 저감 친환경에너지 전환(중장기)
	농업·생활부문	<ul style="list-style-type: none"> 축산 환경 관리 강화 저녹스 보일러 보급 확대
국민건강	국민건강 보호	<ul style="list-style-type: none"> 미세먼지 고농도 계절관리제 도입 실내공기질 관리 강화
국제협력	동아시아 대기협력	<ul style="list-style-type: none"> 동아시아 미세먼지 저감 협약 추진(중장기) 실체적 협력사업 확대
기반·소통	과학적 접근·실천 국민참여·소통	<ul style="list-style-type: none"> 미세먼지 해결 다부처 기술개발 사업 참여와 숙의를 통한 사회적 합의 도출

* 출처: 관계부처 합동(2019)

III 미세먼지 저감기술 동향

우리나라 미세먼지 발생 현황을 보면, 초미세먼지(PM_{2.5})와 황산화물(SO_x)은 산업 부문(각 42.1%, 56.1%), 질소산화물(NO_x)은 수송 부문(61.1%)에서 주로 배출되는 것으로 조사되었다. 또한 수도권외의 경우 질소산화물(NO_x) 중 수송 부문이 전체의 76%를 차지하는 것으로 나타났다.

그림 4. 전국 및 수도권 대기오염물질 배출원별 배출량(2016년)



* 출처: 관계부처 합동(2019)

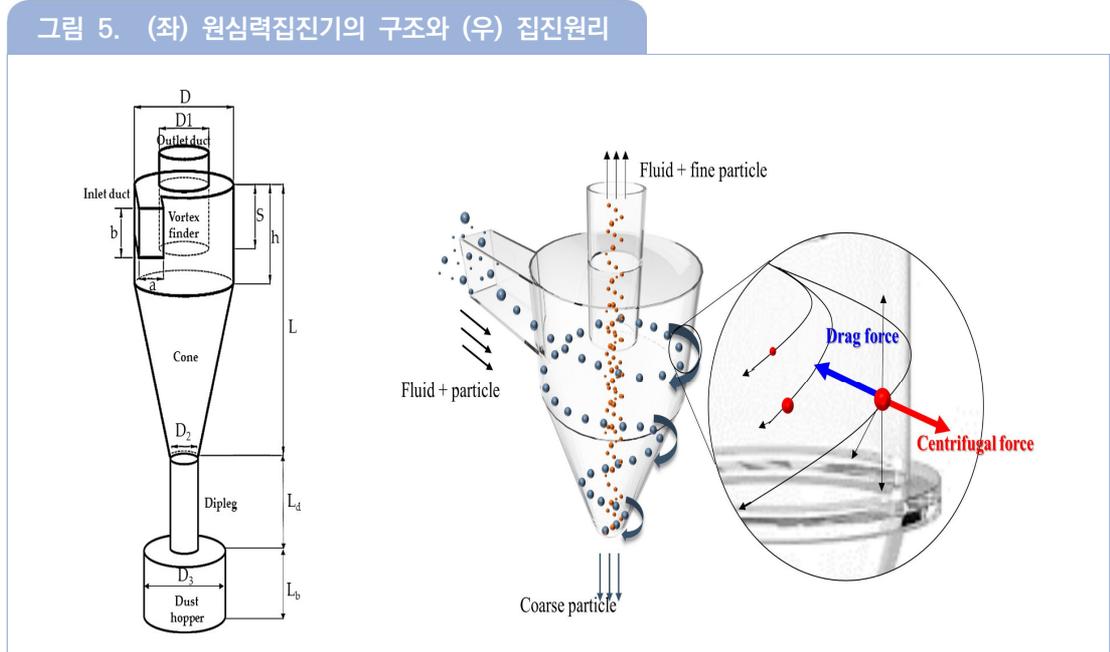
따라서 국내 미세먼지 배출량을 줄이기 위해서는 가장 많은 비율을 차지하는 산업 부문에서 발생하는 미세먼지를 저감하는 것이 중요하며, 융합연구리뷰에서는 이러한 산업 부문에서 주로 응용되고 있는 저감기술에 대해 소개를 하고자 한다.

1. 1차 생성 미세먼지 저감기술

미세먼지 저감기술은 크게 1차 생성 미세먼지를 제거하는 집진기술, 2차 생성 미세먼지 전구물질을 제거하는 탈질기술과 탈황기술로 구분할 수 있다. 1차 생성 미세먼지를 저감하는 기술에는 대표적으로 원심력집진기(cyclone), 여과집진기(bag filter), 전기집진기(electrostatic precipitator), 습식 세정장치(scrubber) 등이 있다.

1.1. 원심력집진기(cyclone)

원심력집진기는 흡진가스를 집진기의 접선 방향으로 유입시켜 선회운동을 형성함으로써 원심력에 의해 관성력이 큰 입자가 선회류를 벗어나 집진기 내벽과 충돌하여 집진되는 원리이다.



* 출처: Park & Go(2020)

원심력집진기는 구조가 간단하고 운전·유지비용이 저렴하여 각종 산업공정에서 다양하게 적용되고 있지만 미세먼지의 경우 집진효율이 낮아 대부분이 여과집진기 또는 전기집진기의 전처리용으로 사용하고 있다.

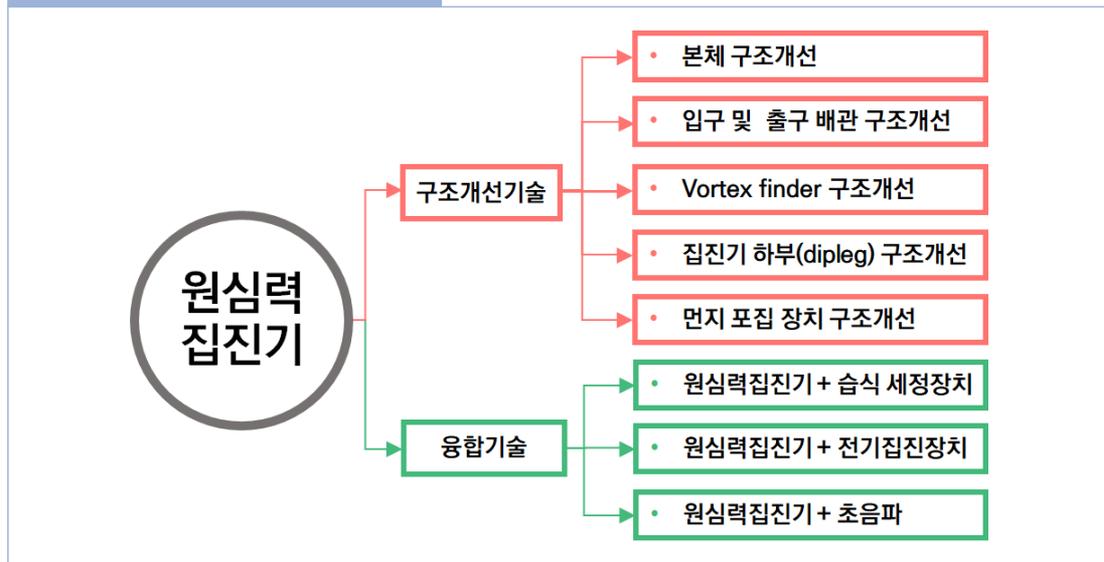
표 3. 원심력집진기의 장·단점

장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> • 구조가 간단함 • 설치면적이 적게 소요됨 • 온도 영향이 적음 • 유지·보수 비용이 적음 • 습도가 높은 환경에서 사용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 미세먼지의 경우 집진효율이 낮음 • 유량변화에 민감함 (최적의 집진효율을 위해서는 7~15m/s 범위의 유속이 필요함)

* 출처: 저자작성

최근에는 원심력집진기의 구조를 개선하거나 다른 기술과 융합하여 미세먼지 집진효율을 향상시키는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 일반적으로 원심력집진기의 성능(압력손실, 집진효율)은 본체, 입구 및 출구 배관, 보텍스 파인더(vortex finder), 집진기 하부(dimple) 및 먼지 포집 장치(dust hopper) 등의 구조에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

그림 6. 원심력집진기 기술 동향



* 출처: 저자작성

원심력집진기 본체의 경우 길이와 직경의 비율(L/D, Length/Diameter)에 의해 집진효율이 달라지며, 최적의 비율은 5.65로 길이의 비율이 이보다 커지면 집진효율은 급격하게 감소한다(Hoffmann et al., 2001).

입구 배관의 경우 원형 구조보다는 직사각형 구조의 배관이 동일한 면적대비 집진효율이 높아 직사각형

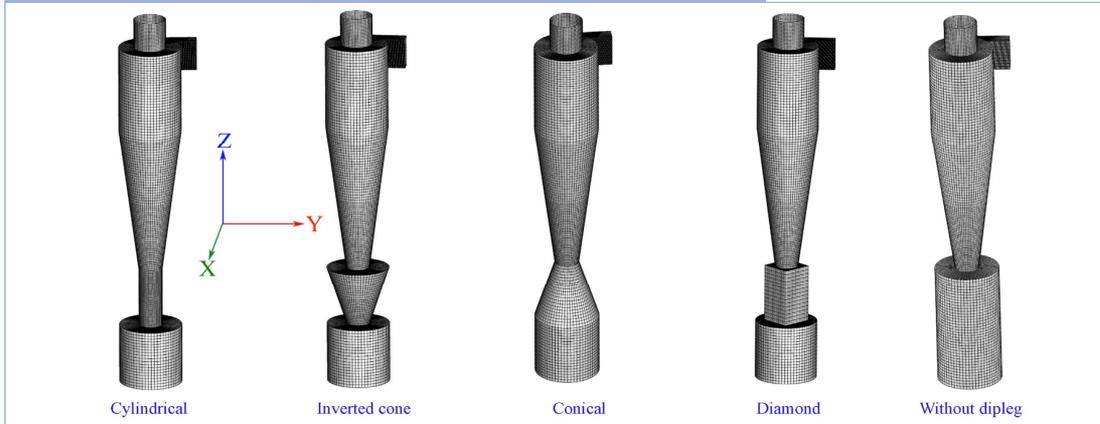
구조의 배관을 본체에 접선방향으로 유입시킨 형태를 가장 일반적으로 사용하고 있다. 입구 배관의 폭과 높이가 증가할수록 집진효율과 압력손실은 모두 감소하며, 집진효율은 높이보다는 폭에 의해 더 큰 영향을 받는다(Elsayed & Lacor, 2011). 원심력집진기는 유입되는 유체의 속도가 빠를수록 집진효율이 증가하기 때문에 수축된 형태의 입구 배관을 사용하기도 하는데, 이 경우 배관 길이가 길어질수록 압력손실과 집진효율이 모두 감소하며, 길이가 본체 직경대비 1.5배 이상 커지면 그 영향은 미비해진다(Yao et al., 2021).

출구 배관의 경우에는 길이가 증가할수록 집진효율은 증가하고, 압력손실은 감소하지만 일정 길이 이상 증가하게 되면 분리입경(cut off diameter)이 커지면서 집진효율은 감소하고 압력손실은 증가하게 된다. 또한 출구 배관이 곡관 형태인 경우 굽힘 반경(bend radius)이 작을수록, 곡관 시작 지점(bend beginning)이 집진기 상부에서 멀어질수록 분리입경은 증가하게 된다(Souza et al., 2015).

출구 배관과 이어지는 vortex finder 역시 원심력집진기의 성능에 영향을 미치는 중요한 인자이며, vortex finder의 직경이 증가할수록 압력손실과 집진효율 모두 감소하는 경향이 있다(El-Batsh, 2013). vortex finder 내부의 유동은 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데, 하나는 축 방향 속도가 균일한 외곽 부분에서의 유동이며, 다른 하나는 축 방향 속도가 무시될 수 있는 내부 코어에서의 유동이다(Stein & Hoffman, 2010). 최근에는 기존의 vortex finder에 십자 형태의 블레이드를 설치하여 내부 코어에서의 유동장을 변화시켜 집진효율의 감소 없이(0.64%로 미비하게 증가) 압력손실을 16.41%로 크게 감소시킨 연구도 진행되었다(Pei et al., 2017).

일반적으로 원심력집진기는 기체로부터 분리된 먼지를 포집하기 위해 하부에 먼지 포집 장치가 있으며, 유체가 집진기 하부에 도달하면 일부는 먼지와 함께 콘(cone) 방향으로 다시 되돌아가는데 이것을 재비산(re-entrainment) 현상이라고 한다. 따라서 먼지 포집 장치로 이어지는 집진기 하부(dimple)와 먼지 포집 장치의 구조는 먼지의 재비산 현상과 장치의 압력손실에 중요한 영향을 미치게 된다. 아래 <그림 7>에 제시한 여러 형태의 집진기 하부 및 먼지 포집 장치의 구조 중에 두 번째의 inverted cone 구조가 가장 높은 집진효율을 보이며, 네 번째에 있는 다이몬드(diamond) 형태의 하부구조는 가장 낮은 집진효율을 보이는 것으로 나타났다(Parvas et al., 2020). 또한 장치의 압력손실을 최소화하기 위한 집진기 하부의 길이 및 먼지 포집 장치의 길이와 직경은 본체 직경에 각각 1.38, 1.925, 1.88배인 것으로 연구되었다(Elsayed et al., 2020).

그림 7. 원심력집진기 하부 및 먼지 포집 장치의 다양한 구조



* 출처: Parvaz et al.(2020)

원심력집진기의 융합기술 동향으로는 크게 습식 세정장치와 융합한 기술, 전기집진장치와 융합한 기술, 그리고 초음파 기술과 융합한 기술로 나눌 수 있다.

습식 세정장치와 융합한 원심력집진기는 집진기 내부에 물을 분사함으로써 관성력에 의해 포집되기 어려운 미세먼지가 물 액적과 충돌하여 포집되는 원리이다. 압력손실의 큰 증가 없이 미세먼지 집진효율을 높일 수 있으며, 수용성 가스도 일부 제거 가능한 특징이 있다. 일반적으로 액기비(L/G ratio)가 증가할수록 물 액적의 수가 증가하여 물 액적과 미세먼지 간의 충돌 확률이 증가함으로써 집진효율이 증가하게 된다. 하지만 액기비가 증가한 만큼 집진효율이 비례해서 증가하지 않기 때문에 에너지 소비와 폐수발생량을 줄이기 위해서 적절한 액기비를 선정하는 것이 중요하다. 습식 세정장치에서 높은 효율을 나타내는 벤투리 스크러버(venturi scrubber, 공기에 포함된 먼지를 모아 제거하는 장치)의 경우 0.5~5.0 L/m³의 액기비를 사용하며 2942~8826 Pa의 압력손실을 나타내는데, 습식 세정장치를 융합한 원심력집진기는 이보다 상대적으로 낮은 액기비(0.5 L/m³이하)와 압력손실(196~628 Pa)에서도 높은 집진효율을 나타낸다(Achiles & Guerra, 2020).

전기집진장치와 융합한 원심력집진기는 원심력에 정전기적 인력을 추가하여 미세먼지 집진효율을 향상시키는 기술이다. 집진기 내부에 방전극을 설치한 형태로써 방전극에 고전압을 인가하여 코로나 방전(corona discharge, 도체(전선) 주위의 유체(공기)가 이온화되며 발생하는 전기적 방전) 영역을 지나가는 미세먼지를 하전시킴으로써 정전기적 인력에 의해 하전된 먼지가 집진기 벽면으로 이동하여 충돌하는 원리이다. 원심력집진기의 경우 유속이 빨라지면 원심력이 증가하여 집진효율이 향상되지만 전기집진장치와 융합한 원심력집진기는 유속이 빨라지면 체류시간이 짧아지고 입자의 하전 영향이 줄어들어 집진효율이 감소하는 특징이 있다.

초음파 기술을 융합한 원심력집진기는 초음파 발생장치를 이용하여 미세먼지를 응집시켜 집진효율을 향상시키는 원리이다(Vekteris et al., 2014). 그러나 이 기술은 큰 규모의 집진기에 적용하기에는 한계가 있다.

1.2. 여과집진기(bag filter)

여과집진기는 필터백(filter bag)을 이용하여 미세먼지를 포집하는 장치로써 집진 메커니즘으로는 브라운확산, 직접차단, 관성충돌, 중력침강이 있다. 여과집진기는 이러한 네 가지 메커니즘이 동시에 작용하기 때문에 현재까지 알려진 미세먼저 집진기술 중에 가장 효율이 높지만 필터를 사용하는 만큼 압력손실이 높은 단점이 있다.

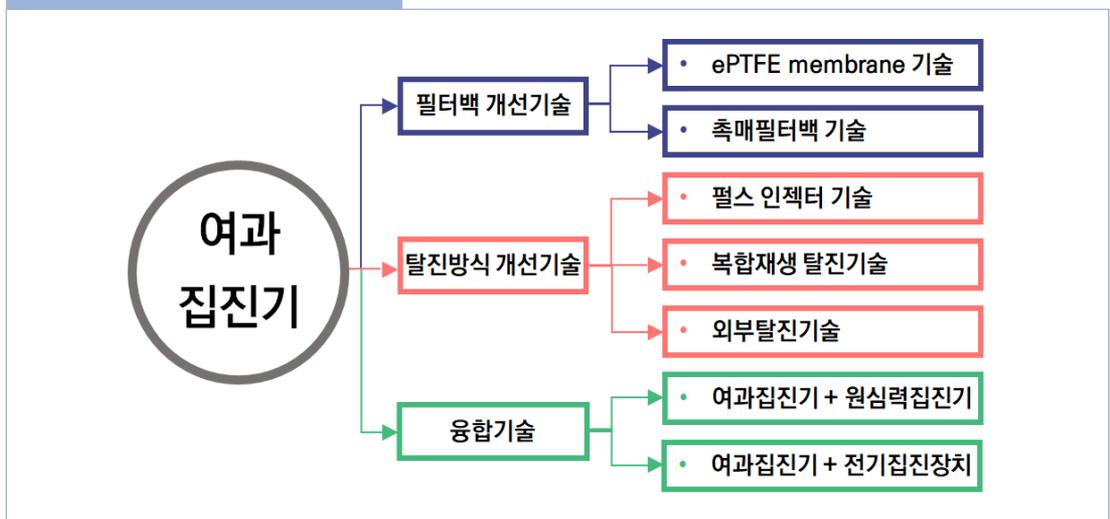
표 4. 여과포집진기의 장·단점

장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> • 집진효율이 높음 • 먼지 특성(입자 크기, 성분, 형상)에 영향이 적음 • 높은 먼지농도 환경에서 사용가능 • 유량 변화에 영향이 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 압력손실이 높음 • 필터 교체에 따른 유지·보수 비용 발생 • 고온(250℃ 이상)에서 사용 불가 • 화재 발생의 위험이 있음 • 점착성 또는 고습분 미세먼저는 처리가 어려움

* 출처: 저자작성

여과집진기의 기술동향은 크게 필터백 개선기술, 탈진방식 개선기술, 그리고 융합기술로 나눌 수 있으며, 필터백 개선기술은 다시 ePTFE(Expanded Polytetrafluoroethylene) membrane 기술과 촉매필터백 기술로 나눌 수 있다.

그림 8. 여과집진기 기술동향



* 출처: 저자작성

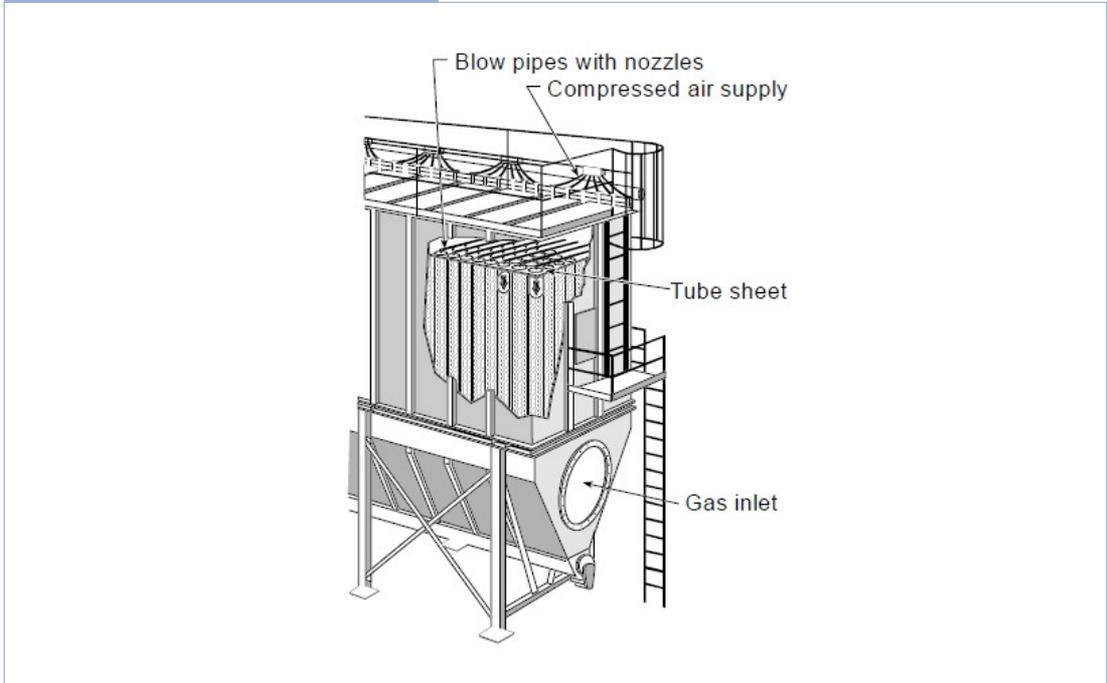
ePTFE membrane 기술은 필터백 표면에 매우 얇은 ePTFE membrane을 적층시킨 기술로 ePTFE membrane은 수십 μm 크기의 미세 기공으로 이루어져있어 미세먼지 집진효율이 우수하다. 또한 필터백을 오래 사용하다보면 탈진조작을 여러 번 반복하더라도 필터백 여재 기공에는 미세먼지가 조금씩 막히게 된다. 이러한 필터백 눈막힘 현상은 시스템 압력손실과 필터백 교체주기에 큰 영향을 미치게 되는데, ePTFE membrane 필터백은 탈진조작 시 필터백 표면의 먼지층 탈리 효율이 우수하여 필터백 사용에 따른 압력손실이 낮게 유지되는 특징이 있다.

촉매필터백은 필터 여재 내에 촉매를 패키징하여 미세먼지 뿐만 아니라 NO_x 를 동시에 저감하는 기술이다. 기존 탈질 설비(SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적 촉매 환원 기술), SNCR(Selective Non Catalytic Reduction, 선택적 비촉매 환원 기술) 등)에서 제대로 처리되지 못한 NO_x 를 여과집진기에서 추가로 저감할 수 있다는 점에서 공간적, 비용적 이점이 발생하게 된다.

필터 여재 내에 촉매를 패키징하는 방법 외에 필터백 카트리리지 내에 입상 촉매를 충전하여 미세먼지와 NO_x 를 동시에 저감하는 기술도 개발되었다. 하지만 일반적으로 탈질 촉매의 최적 반응온도는 350°C 정도이며, 여과집진기 내의 배가스 온도는 $80\sim 230^\circ\text{C}$ 범위이므로 일반적인 탈질촉매를 사용한다면 배가스를 다시 승온해야되는 단점이 있다. 따라서 촉매필터백 기술을 적용하기 위해서는 $200\sim 230^\circ\text{C}$ 범위에서 탈질 효과가 있는 저온 탈질 촉매를 적용하여야 하며, 이 온도범위에서 사용할 수 있는 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene, 폴리테트라플루오르에틸렌, 유기 중합체 계열에 속하는 비가연성 불소수지)나 ARAMID(고분자 화합물로 알려진 폴리아라미드 (polyaramide)를 이용해 제작된 고강도 섬유) 같은 재질의 필터백이 요구된다.

필터백은 시간이 지남에 따라 필터백 표면에 먼지층이 형성되면 먼지층이 새로운 필터의 역할을 하므로 집진효율이 좋아지게 된다. 그러다 일정한 압력손실(또는 시간)에 도달하면 필터백에 포집된 먼지를 탈리시켜 집진기 하부로 배출하는데 충격기류식(pulse jet) 탈진방법을 가장 널리 사용하고 있다. 충격기류식 탈진방법은 압축공기를 필터 내부로 짧은 시간(0.03~0.1초) 동안 분사시켜 필터 표면의 먼지층을 탈리시키는 기술이다. 그러나 필터백이 압축공기에 의해 순간적으로 팽창되었다가 수축되는 순간 필터 표면에 있던 먼지층이 없어지면서 미세먼지가 필터 내부로 침투하여 밖으로 배출되는 재비산현상이 발생하게 된다. 따라서 탈진조작 시 미세먼지가 재비산되는 문제와 필터 눈막힘 현상으로 인해 압력손실이 증가하는 문제를 해결하기 위해서 다양한 탈진기술들이 개발되었다.

그림 9. 충격기류식 여과집진기



* 출처: Vatauk et al.(1999)

펄스 인젝터 기술은 코안다 효과(coanda effect, 유체가 곡면과 접촉한 상태로 흐를 때 직선으로 흐르는 대신 곡면의 곡률을 따라서 흐르는 현상)를 이용한 기술로써 블로 파이프(blow pipe) 노즐에서 발생한 압축공기가 이중 슬릿(dual-slit) 형태의 인젝터(injector)를 통해 필터백 내부로 들어가면서 주변의 공기를 끌어당겨 2차 기류가 형성되어 일반 노즐을 사용하여 탈진했을 때보다 더 많은 유량의 공기가 필터백 내부로 들어가면서 먼지층 탈리 효과가 증가하게 되고, 2차 기류가 먼지 재비산 현상을 막아 탈진 조작 시 순간적으로 배출되는 미세먼지 농도가 감소하는 특징이 있다(Sim et al., 2017).

복합재생 탈진기술은 외부의 청정 공기를 여과할 때의 공기흐름과 반대 방향으로 필터에 유입시킨 상태에서 압축공기를 순간적으로 분사하는 충격기류 방식을 복합화한 기술이다. 기존 기술에 비해 필터에 쌓인 먼지를 보다 쉽게 털어낼 수 있기 때문에 필터의 수명을 큰 폭으로 향상시켜 집진장치의 안정적인 운전이 가능하다. 특히 복합재생 탈진기술은 길이 15m의 긴 필터백을 사용해도 탈진 효율이 좋아 안정적인 운전이 가능하며 기존의 3m 길이의 필터백에 비해 집진기 설치면적을 70% 줄일 수 있으며 시설비용은 35% 절감이 가능한 특징이 있다.

외부탈진기술은 압축공기를 필터백 내부로 분사시켰던 기존의 탈진방식과는 정반대로 공기를 필터백 표면에 분사하여 먼지층을 탈리시키는 기술이다. 기존의 충격기류식 탈진기술과 비교했을 때 탈진효율이 우수하여 필터의 눈막힘 현상이 완화되고 압력손실이 낮게 유지될 뿐만 아니라 기존 기술보다 탈진간격을 길게 운전할 수 있어 필터백의 물리적 충격에 의한 손상도 줄일 수 있다. 또한 탈진조작 시 발생하는 미세먼지 재비산 문제도 감소하여 미세먼지 배출농도를 크게 줄일 수 있는 특징이 있다(Cho et al., 2020).

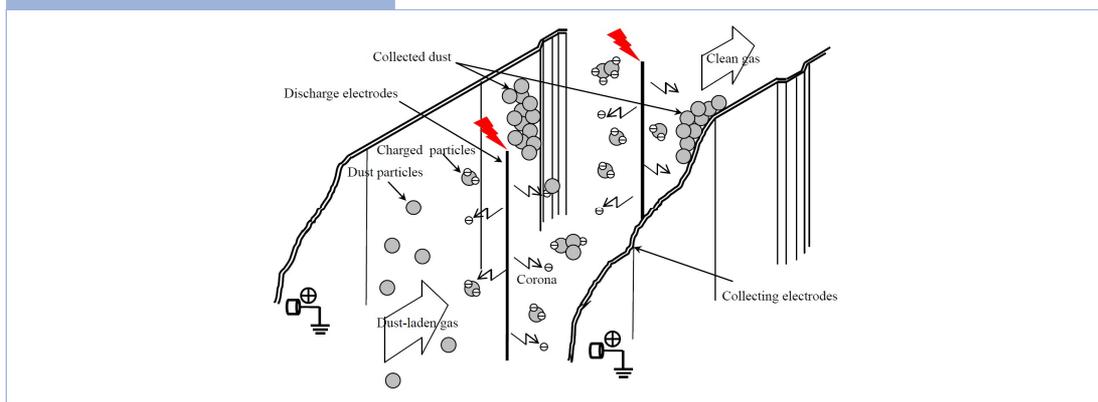
여과집진기의 융합기술로는 크게 원심력집진기와 융합한 기술, 그리고 전기집진기와 융합한 기술이 있다. 원심력집진기와 융합한 기술은 원심력집진기를 여과집진기의 하부에 적용하여 상대적으로 큰 먼지는 원심력 집진기에서 관성력에 의해 포집되며 미세먼지는 상부로 올라가 필터에 포집되는 기술이다. 원심력집진기에 의해 1차적으로 먼지가 포집되기 때문에 같은 양의 먼지가 유입되어도 필터백에 포집되는 먼지의 양이 줄어들므로써 탈진간격이 증가하고 필터백의 수명이 증가하는 특징이 있다.

전기집진기와 융합한 여과집진기는 집진기로 유입된 먼지가 전기집진기에서 1차 포집되고, 전기집진기에서 포집되지 않은 초미세먼지는 여과집진기에서 포집되는 원리이다. 일반적으로 전기집진기는 집진판에 붙은 먼지층을 털어내기 위한 추타과정 시 미세먼지가 재비산되는 문제점이 있는데 전기집진기에서 재비산되는 미세먼지가 여과집진기의 필터백에 포집되고, 필터백 탈진 시 재비산되는 미세먼지는 집진판에 포집됨으로써 집진효율이 증가하게 된다. 또한 전기집진기에서 1차적으로 먼지가 포집되므로 필터백에 유입되는 먼지의 양이 줄어들게 되고, 전기집진기에서 하전된 먼지가 필터백 표면에 응집되어 포집됨으로써 같은 양의 먼지가 포집되어도 먼지층의 통기도가 좋아져서 압력손실이 낮게 유지되는 특징이 있다. 전기집진기와 융합된 여과집진기는 전기집진기와 여과집진기가 분리된 2단 구조가 있고, 하나의 챔버(chamber)에 융합된 단일구조가 있다.

1.3. 전기집진기(electrostatic precipitator)

전기집진기는 크게 방전극, 집진판, 그리고 추타장치로 구성되어있으며, 방전극에 고전압을 인가하여 코로나 방전을 발생시키고 주변을 지나가는 미세먼지를 하전시키면, 하전된 미세먼지가 집진판으로 정전기적 인력에 의해 끌려가 충돌하여 포집되는 원리이다.

그림 10. 전기집진기의 원리



* 출처: Huang et al.(2015)

전기집진기는 필터를 사용하지 않아 압력손실이 낮고 99% 이상의 높은 집진효율을 나타낸다. 하지만 0.1~1 μm 범위의 입자의 경우 상대적으로 집진효율이 낮게 나타나는 특징이 있다. 집진판에 포집된 미세먼지는 추타과정을 통해 주기적으로 분리시켜 하부로 배출하는데 이때 일부 미세먼지가 출구 배관으로 빠져나가는 재비산 현상이 일어나기도 한다. 하지만 전기집진기는 운전·유지비용이 적고 많은 유량의 배가스를 처리할 수 있어서 다양한 사업장에 많이 쓰이고 있다.

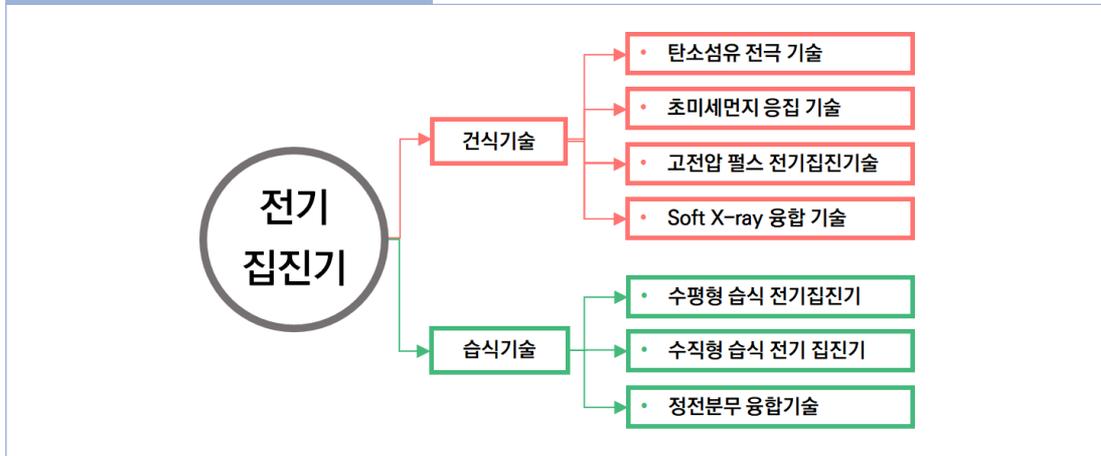
표 5. 전기집진기의 장·단점

장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> • 압력손실이 낮으며 집진효율이 높음 • 많은 유량의 배가스 처리 가능 • 운전·유지비용이 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • 설치비용이 높음 • 운전조건 변화에 민감함 • 넓은 설치면적 필요 • 전기비저항이 큰 미세먼지는 처리가 어려움

* 출처: 저자작성

전기집진기의 기술동향은 크게 건식기술과 습식기술로 구분되며, 건식기술의 주요 기술동향으로는 탄소섬유 전극 기술, 초미세먼지 응집 기술, 고전압 펄스 전기집진기술, 연질엑스선(Soft X-ray) 융합 기술이 있다.

그림 11. 전기집진기 기술 동향



* 출처: 저자작성

탄소섬유 전극 기술은 탄소섬유 다발에 고전압을 인가하여 낮은 전압에서도 이온들을 방출하여 입자를 하전시키는 기술로써 오존 발생량이 적어 실내 공기청정기에 적용이 가능하다. 이 기술은 압력손실이 낮으며, 높은 미세먼지 집진효율과 청정화 능력(CADR, Clean Air Delivery Rate)을 갖는 특징이 있다(Kim et al., 2019).

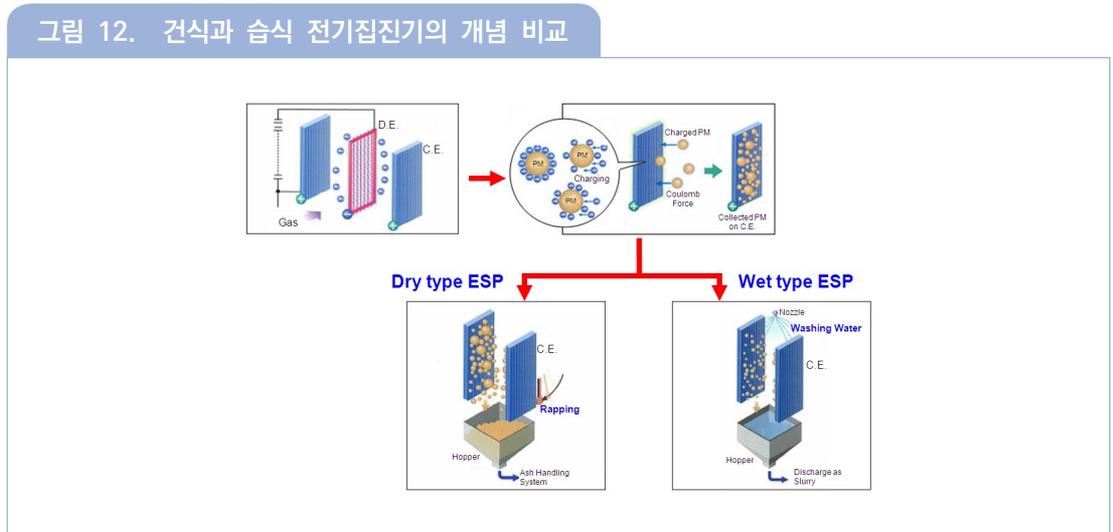
초미세먼지 응집기술은 전기집진기의 초미세먼지 집진효율을 향상시키기 위해 개발되었다. 이 기술은 주로 2단 구조의 전기집진기를 사용하며 전단 챔버에서 방전극에 직류 고전압을 인가하여 단극 또는 양극 하전을 한 후 후단 챔버에서는 교류 전압을 인가하여 초미세먼지를 응집시킨다. 단극으로 하전된 초미세먼지는 교류 전기장 내에서 유체 흐름방향과 직각 방향으로 진동 운동을 하며 서로 충돌하며 응집이 되고, 양극으로 하전된 초미세먼지는 교류 전기장 내에서 쿨롱인력(coulomb attraction)에 의해 서로 충돌하며 응집된다(Sobczyk et al., 2017).

고전압 펄스 전기집진기술은 순간적으로 전기장의 강도를 증가시켜 백 코로나(back corona) 현상을 억제하고, 입자하전을 증가시켜 미세먼지의 집진효율을 향상시키는 기술이다. 직류 고전압 전기집진기술과 비교했을 때 입경이 10 μm 이상 먼지의 집진효율에는 큰 차이가 없으며, 입자가 작을수록 집진효율에 큰 영향을 미치게 된다(Guo et al., 2018).

Soft X-ray 융합기술은 전기집진기에 연질엑스선(soft X-ray, 파장 $10^{-1} \sim 10 \text{ nm}$ 정도 범위의 비교적 쉽게 물질에 흡수되고 투과능이 작은 엑스선)을 조사하여 초미세먼지의 집진효율을 향상시키는 기술로써 입자 표면의 원자 또는 분자가 광이온화 되거나 공기가 이온화되어 확산 하전에 의해 초미세먼지가 하전됨으로써 집진효율이 향상되는 원리이다. Soft X-ray를 융합한 전기집진기는 초미세먼지 뿐만 아니라 입자 크기가

매우 작아 하전이 어려운 나노입자까지도 하전시켜 집진이 가능하다(Kulkarni et al., 2002). 그러나 Soft X-ray를 사용하기 위해서는 방사선 발생장치 사용 허가가 필요하며, 파일럿 규모(pilot-scale) 이상에서는 적용이 어렵다는 점에서 기술이 제한적이다.

최근에는 건식 전기집진기의 문제점을 해결하기 위해 집진판을 추타하지 않고 물로 세정하는 습식 전기집진기가 많이 개발되고 있다. 습식 전기집진기는 미세먼지 재비산 현상이 줄어들어 집진효율이 높고, 전기 비저항 같은 미세먼지 특성에 영향을 적게 받으며, 수용성의 가스상 오염물질도 제거가 가능한 특징이 있다. 이러한 습식 전기집진기의 기술동향으로는 크게 수평형 습식 전기집진기, 수직형 습식 전기집진기, 그리고 정전분무 기술과 융합한 습식 전기집진기가 있다.



* 출처: Nagata et al.(2013)

수평형 습식 전기집진기는 가장 일반적인 형태의 습식 전기집진기로서 건식 전기집진기와 마찬가지로 배가스가 수평방향으로 들어와서 처리된 가스는 다시 수평방향으로 나가며 물은 상부에서 집진판에 분사시켜준다. 배가스에는 미세먼지 뿐만 아니라 산성 가스도 포함되어 있어 분사시킨 물을 재사용하다 보면 물의 pH가 감소하게 되므로 장치의 부식을 막기 위해서 집진기 하부에 있는 물 저장조에서 pH를 모니터링하여 알칼리성 용액을 펌프를 통해 투입함으로써 pH를 일정하게 맞춰서 운전한다. 이러한 습식 전기집진기를 탈황장치(FGD, Flue Gas Desulfurizer) 후단에 적용하면 황산 미스트 배출을 줄여 굴뚝에서 배출되는 백연도 줄어들게 된다.

수직형 습식 전기집진기는 배가스가 집진기 하부에서 유입되어 상부로 나가며 물은 배가스 흐름 방향과

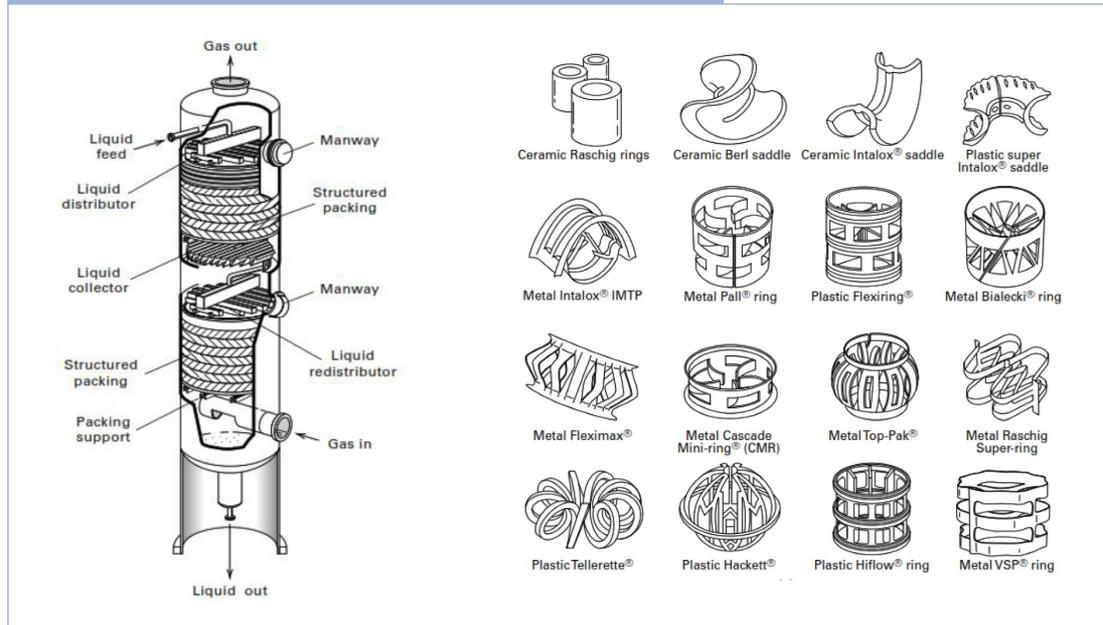
반대 방향으로 분사시키는 구조로써 일정한 물 막(water film)을 형성하기가 어렵고 용량에 제한이 있다. 게다가 일정하지 못한 물 막에 의해 스파크 방전(spark discharge)이 발생하여 성능이 감소하기도 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 교류 고전압을 이용한 수직형 습식 전기집진기 기술이 개발되기도 했다. 코로나 방전이 음극판과 양극판에 모두 발생하면서 미세먼지 집진효율을 향상시킨 기술이다.

정전분무 기술을 융합한 습식 전기집진기는 물을 기계적으로 분사시키는 기존의 습식 전기집진기와는 달리 물에 고전압을 인가하여 하전된 미세액적들을 집진기 내부로 분사시키는 기술이다. 정전분무의 경우 기계적인 물 분사보다 액적 크기가 작고 정전기적 인력에 의해 집진판에 고루 분사되어 균일한 먼지 세척이 가능하고, 적은 양의 물로도 높은 미세먼지 집진효율을 나타내는 특징이 있어 물 소비량을 줄일 수 있는 장점이 있다(조연주 외., 2018).

1.4. 습식 세정장치(scrubber)

습식 세정장치는 집진기로 유입된 배가스를 액체와 접촉시켜 확산, 직접 차단, 관성 충돌 메커니즘에 의해 오염물질을 저감하는 장치이다. 여러 형태의 습식 세정장치가 있는데 일반적으로 분무탑(spray tower) 형태의 습식 세정장치를 많이 사용한다.

그림 13. (좌) 습식 세정장치의 구조 및 (우) 충전물 종류



* 출처: Shishkin et al.(2021)

분무탑의 경우 미세먼저 집진효율이 40~60% 정도 범위로 낮으며, venturi scrubber의 경우 90% 이상의 집진효율을 보이지만 압력손실이 높은 단점이 있다. 습식 세정장치는 건식 집진장치로 처리하기가 어려운 점착성 또는 고습분의 먼지를 처리할 수 있고, 먼지뿐만 아니라 가스상 오염물질도 동시에 처리 가능한 특징이 있어서 다양한 사업장에 적용되어 많이 사용되고 있다.

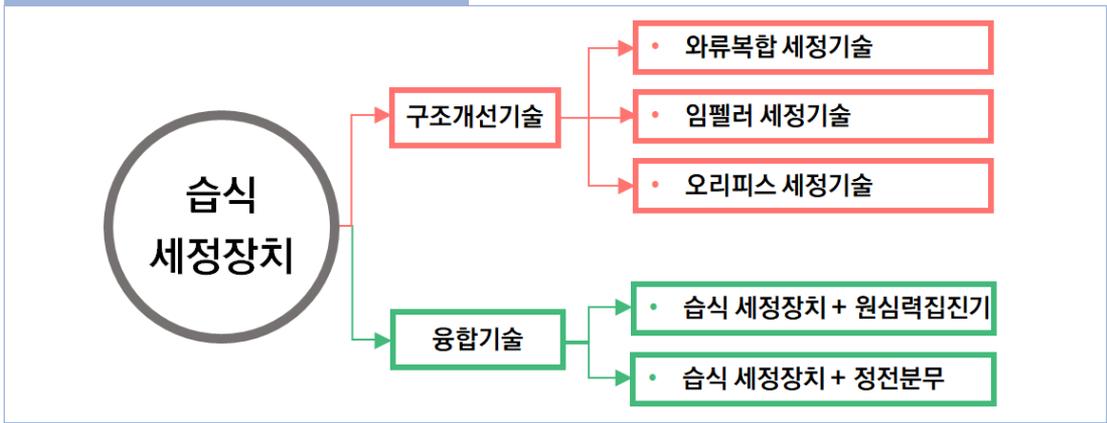
표 6. 습식 세정장치의 장·단점

장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> • 미세먼지와 가스상 오염물질 동시 저감 가능 • 화재 위험이 적음 • 폭발성, 점착성 또는 고습분의 먼지 처리 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 압력손실이 높음 • 미세먼저 집진효율이 낮음 • 건식 집진기에 비해 부식성이 큼 • 폐수 처리 비용 발생

* 출처: 저자작성

습식 세정장치의 기술동향은 크게 구조개선 기술과 융합기술로 구분할 수 있다. 구조개선 기술에는 와류복합 세정기술, 임펠러(impeller) 세정기술, 오리피스(orifice) 세정기술, 체판(sieve plate) 세정기술이 있다.

그림 14. 습식 세정장치 기술 동향



* 출처: 저자작성

와류복합 세정기술을 이용한 습식 세정장치는 긴 슬롯형태의 노즐과 가이드 베인(guide vane, 유체의 유동 면적을 조절하여 유량을 조정하는 데에 쓰이는 가동 날개), 그리고 충돌판으로 구성되어 있다. 세정액을 노즐 부근까지 채운 다음 배가스를 유입시키면 배가스가 세정액과 충돌하여 1차로 큰 먼지들이 포집된다. 이후 배가스가 노즐을 통과하면서 강한 와류가 형성되어 미세 액적이 발생하게 되고, 미세먼지가 미세 액적에

의해 충돌하여 포집된다. 와류복합 세정기술은 노즐을 통과하는 공기의 유속에 따라 미세액적의 크기와 발생량이 달라져 집진효율에 영향을 미치므로 일정 범위의 유속을 유지하는 것이 중요하다(Kim et al., 2019).

임펠러(impeller, 원심펌프 내부에서 회전하는 날개)를 이용한 습식 세정장치는 하부에 위치한 임펠러를 이용하여 배가스를 선회 유도하여 미세먼지의 체류시간을 조절하고 균일 세정이 가능하게 하는 기술이다. 또한 노즐에서 분사된 물 액적이 회전하는 임펠러에 의해 미세액적으로 미립화되면서 미세먼지 집진효율이 향상된다(Hu et al., 2021).

오리피스(orifice, 일반적으로 파이프 또는 배관 내부에 설치되는 구멍이 뚫린 얇은 판)를 이용한 습식 세정장치는 오리피스 판을 일정한 간격을 두고 수평으로 설치하여 배가스가 오리피스 판을 통과하면서 비교적 고르게 분배되게 하는 기술이며, 미세먼지와 배가스의 혼합이 잘 이루어져 집진효율이 향상되는 특징이 있다(Li et al., 2019).

습식 세정장치의 융합기술에는 원심력집진기와 융합한 기술, 그리고 정전분무와 융합한 기술이 있다. 원심력집진기와 융합한 습식 세정장치는 원심력집진기에서 언급하였으므로 여기에서는 정전분무 습식 세정장치만 살펴보도록 하겠다.

정전분무 기술을 융합한 습식 세정장치는 정전분무 습식 전기집진기와 마찬가지로 물을 정전분무하여 하전된 미세 액적을 발생시킴으로써 기존 습식 세정장치의 미세먼지 집진 메커니즘인 확산, 직접차단, 관성충돌에 정전기적 인력이 추가되어 집진효율이 향상되는 기술이다. 정전분무는 물이 흐르는 노즐에 직접 고전압을 인가하는 직접 하전 방식과 링 전극 중앙에 노즐이 위치하여 링 전극에 고전압을 인가하고 노즐에는 접지를 연결함으로써 노즐에서 분사되는 물 액적이 링 전극을 통과하면서 하전되어 미세액적으로 분사되는 간접 하전 방식이 있다. 간접 하전 방식은 지속적으로 물을 공급하면서 정전분무를 하는 것이 수월하다는 장점이 있지만 링 전극의 정중앙에 노즐을 위치하기가 어렵고, 수평 방향으로 분사 시 중력에 의해 아래로 내려간 물이 고전압이 인가된 링 전극에 접촉하여 스파크가 발생하면서 안정적인 분사가 불가능한 단점이 있다. 직접 하전 방식은 하전 효율이 높으며, 수평 분사가 가능한 장점이 있지만 물 이송 배관과 펌프 등에 고전압이 인가되므로 지속적으로 물을 공급하면서 정전분무를 하는 것이 어려운 단점이 있다. 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위해 고전압 용액의 초절연 이송 기술이 국내에서 개발되어 직접 하전 방식의 정전분무를 습식 세정장치에서 구현할 수 있게 되었다. 이러한 기술을 토대로 국내에서 부하변동에 대응이 가능한 2,000 CMH급 정전분무 습식 세정장치가 개발되었으며 현재 실증연구 단계에 있다.

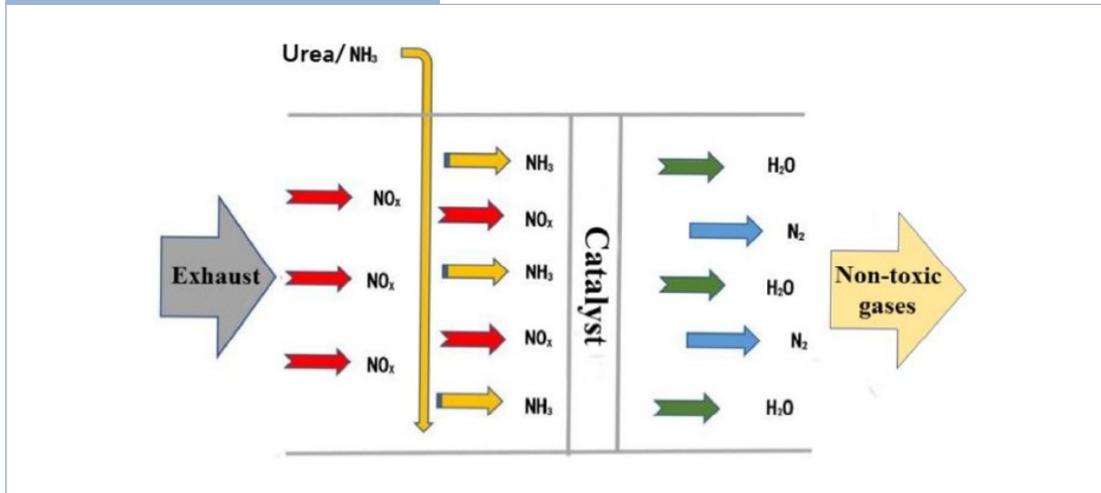
2. 2차 생성 미세먼지 전구물질 저감기술

2.1. 질소산화물(NOx) 저감기술

질소산화물(NOx)을 저감하기 위해 현재 사용되고 있는 대표적인 탈질기술에는 선택적 촉매 환원 기술(SCR, Selective Catalytic Reduction)과 선택적 비촉매 환원 기술(SNCR, Selective Non-Catalytic Reduction)이 있다. SNCR 기술은 암모니아 또는 요소수를 고온의 배출가스에 직접 주입하여 반응온도 850~1,100℃ 범위에서 NOx를 질소와 물로 환원시키는 방법으로 설치비용이 저렴하여 폐기물 소각장, 산업용 보일러 등에 적용되어 많이 쓰이고 있다. 하지만 저감효율이 40~60%로 낮아 질소산화물 배출규제를 만족시킬 수가 없어서 주로 SCR 설비와 혼합되어서 사용되고 있다.

SCR 기술은 촉매에 환원제(NH₃, 요소수)를 분사하여 NOx를 질소와 물로 환원시키는 방법으로 저감효율이 80~90%로 높은 장점이 있다. 그러나 연소기 열교환기 후단에 주로 위치하여 사용하는, 반응온도가 300~400℃인 SCR 촉매는 미반응된 NH₃가 황산화물과 반응하여 황산암모늄을 형성함으로써 촉매의 기공을 막아 촉매의 수명과 NOx 전환 효율을 감소시키며, 후단 설비의 부식을 일으키기도 한다. 또한 집진기 전단에 위치하여 많은 양의 먼지가 촉매의 셀을 막아 성능을 저하시키고 시스템의 압력손실을 증가시키게 된다. 이를 해결하기 위해 SCR 설비를 방지설비(여과집진기, 전기집진기, 탈황설비 등) 후단에 위치할 경우 촉매의 반응온도를 맞추기 위해 배가스 온도를 다시 승온시켜야 하는 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 탈질촉매의 황산화물에 대한 내구성과 활성을 증가시키고 250℃ 이하 온도 영역에서도 반응 효율을 높이기 위하여 금속산화물과 촉매 담체(carrier)를 활용한 탈질촉매 기술들이 개발되고 있다.

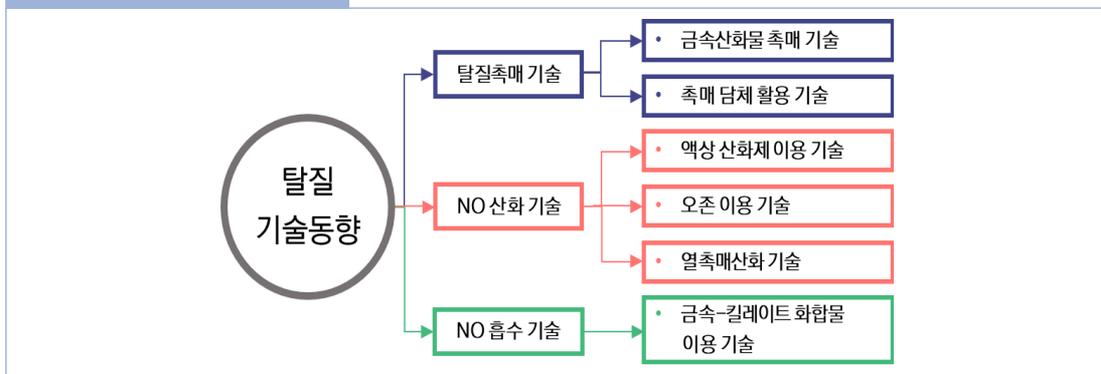
그림 15. SCR 기술의 탈질원리



* 출처: Zhang et al.(2021)

탈질촉매를 이용한 기술 외에도 최근에는 용해도가 낮은 일산화질소(NO)를 용해도가 높은 이산화질소(NO₂)로 산화시켜서 습식 세정장치로 저감할 수 있는 기술들이 개발되고 있으며, NO를 직접 흡수할 수 있는 기술도 개발되고 있다.

그림 16. 탈질 기술동향



* 출처: 저자작성

금속산화물 촉매는 금속산화물을 촉매에 도핑하여 촉매의 활성을 증가시키고 반응 온도 범위를 확장시키는 기술이다. SCR 탈질촉매에 도핑되는 금속산화물의 종류에는 산화 망간(MnO₂), 산화구리(CuO), 산화제2철

(FeOx), 산화 세륨(CeO2), 이산화 지르코늄(ZrO2), 산화 코발트(CoOx) 등이 있으며, 이러한 금속산화물들이 도핑된 촉매들은 NOx 저감성능 뿐만 아니라 원소 수은을 산화시키는 능력까지 개선되어 NOx와 수은(Hg⁰)을 동시에 저감하는데 사용할 수 있다. 이러한 금속산화물 촉매의 종류와 반응온도 범위 및 촉매의 성능을 아래 <표 7>에 정리하였다.

표 7. 금속산화물 촉매의 NO와 Hg⁰ 동시저감 특성

촉매 종류	운전 조건		최적 효율 (%)	
	반응 온도 (°C)	공간속도 (h ⁻¹)	NO	Hg ⁰
V ₂ O ₅ /ZrO ₂ -CeO ₂	100-400	100,000	89.6 (250°C)	88.9 (250°C)
V ₂ O ₅ -CeO ₂ /TiO ₂	250-300	65,000	86.03	77.64
MnOx-V ₂ O ₅ -WO ₃ / MnOx-TiO ₂ -SiO ₂	200-350	12,000	91.4	83.8 (NO 200 ppm)
CuO-MnOx-TiO ₂	150-250	40,000	96.4 (175°C)	100 (175°C)
Ce-Cu-V ₂ O ₅ /TiO ₂	150-350	45,000	>97	>75
Fe-Co-Mn-Ce/TiO ₂	100-300	30,000	>80 (150°C)	>85 (150°C)
CuO-CeO ₂ /TiO ₂ -ZrO ₂	100-350	50,000	83.8	72.7
MnCe@MOF	100-350	225,000	>80 (300°C)	>80 (300°C)

* 출처: Wang et al.(2019)

촉매의 활성 성분(active components) 외에도 담체(carrier) 역시 촉매의 성능에 중요한 역할을 한다. 촉매 담체는 주로 다공성의 흡착제로써 이산화 규소(SiO₂) 기반 담체, 탄소 기반 담체, 제올라이트 기반 담체, 금속-유기 골격체(MOF, Metal-Organic Framework) 기반 담체로 구분될 수 있다.

메조다공성(mesoporous) 실리카는 큰 표면적과 기공 부피, 그리고 높은 내재적 표면 반응성을 갖고 있어 흡착제와 촉매 담체로 모두 사용될 수 있다. 망간(Mn)과 구리(Cu) 산화물이 첨가된 SiO₂ 합성물은 NO/SiO₂/Hg⁰의 우수한 동시저감 성능을 보이며, MnOx(20%)-CeOx(10%)/SiO₂ 촉매의 경우 가스온도 100~300°C 범위에서 거의 100%에 근접한 NO 제거효율을 보이는 것으로 연구되었다(Liu et al., 2017).

탄소 기반 담체는 가장 일반적이고 저렴한 다공성 흡착제로 탄소 기반 담체를 활용한 촉매 역시 NO 외에 다른 가스상 오염물질의 동시 저감이 가능하다. 게다가 활성탄 기반의 촉매는 CO가 환원제로 작용하면 아래 식에 의해 NO를 질소(N₂)와 CO₂로 변환시키는데, 암모니아(NH₃)를 환원제로 사용했을 때 보다 NO 저감에 더 효과적인 것으로 밝혀졌다(Tseng et al., 2003).



제올라이트 기반 담체는 높은 비표면적과 내열성을 갖고 있으며, 기계적 강도가 강하고 우수한 재생 특성을 보인다. 많은 금속 물질들을 제올라이트 기반 담체에 침지한 촉매 기술들이 개발되고 있으며, 제올라이트를 이용한 촉매의 경우 NH_3 와 CO 같은 환원제가 없어도 NO 를 NO_2 로 일부 산화시키기 때문에 습식 세정장치를 통해 이를 용해시켜 저감이 가능하다.

금속유기복합체(MOFs, Metal-Organic Frameworks)는 금속 클러스터 노드와 유기 리간드(ligand)로 구성된 다공성 물질로써 높은 기공성과 비표면적을 갖고 있다. MOFs 중에서도 UiO-67과 UiO-66이 높은 3차원 기공성을 보이고, 내열성, 내화학적 및 기계적 강도가 우수하여 촉매 담체로 각광받고 있다(Zhang et al., 2017).

배가스 내 NO_x 는 약 95%가 NO 형태로 존재하며, 5%가 NO_2 로 존재한다. 용해도가 낮은 NO 를 용해도가 높은 NO_2 로 산화시키면 저온에서도 습식 세정장치를 이용하여 쉽게 저감이 가능하고, 수용성이 높은 다른 가스상 오염물질(SO_x , Hg^0 등)을 동시에 저감할 수가 있다. 대표적인 NO 산화 기술에는 액상 산화제 이용 기술, 오존 이용 기술, 열촉매산화 기술이 있으며, 액상 산화제 이용 기술에서 사용되는 산화제의 종류에는 과망가니즈산 칼륨(KMnO_4), 과산화수소(H_2O_2), 포타슘 페레이트(K_2FeO_4), 차아염소산나트륨(NaClO), 아염소산나트륨(NaClO_2), 이산화염소(ClO_2) 등이 있다(박현우 & 엄성현, 2017).

액상 산화제에 자외선(UV, ultraviolet)을 조사하여 NO 의 산화효율을 증가시키는 고도 산화 기술(AOP, Advanced Oxidation Process)도 개발되었다. UV/ NaClO 기술은 NaClO 수용액에 존재하는 하이포아염소산(HClO)과 하이포아염소산 이온(OCl^-)에 UV를 조사할 때 방출되는 산화수소(HO^\cdot)와 염소(Cl^\cdot) 라디칼에 의해 NO 산화효율이 증대되는 기술이다. UV가 조사된 NaClO_2 수용액의 경우 ClO^\cdot , $\text{O}^{\cdot-}$ 를 생성하고, $\text{O}^{\cdot-}$ 은 다시 물과 만나 히드록실라디칼(Hydroxyl radical, HO^\cdot 라디칼)을 생성한다. ClO^\cdot 는 HO^\cdot 와 Cl^\cdot 에 비해 NO 를 저감하는 데 더 효과적인 것으로 연구되었으며, 최근에는 UV/ NaClO_2 에 암모니아수(NH_4OH)를 첨가하여 ClO^\cdot 라디칼을 생성하는 이온인 ClO_2^- 이 ClO_2 로 변환되는 것을 억제하고 NO_2 를 흡수하여 NO_x 저감효율을 향상시키는 기술도 개발되었다(Hao et al., 2019).

오존을 이용한 NO 산화 기술은 촉매 없이 오존에 의해 NO 를 빠르게 산화시키는 기술로써 NO 산화효율이 높은 특징이 있다. 오존을 발생시켜 NO 를 산화시킨 후 습식 세정장치에서 알칼리 수용액을 이용하여 이를 저감시키면 NO_x 와 SO_x 의 동시 저감이 가능하다(Kang et al., 2020).

열촉매산화 기술은 액상 산화제 기술과 가스상 산화제 기술의 장점을 융합한 기술로써 액상 복합 산화제가 열촉매 과정을 통해 많은 라디칼을 생성하면 생성된 라디칼에 의해 NO가 산화되는 기술이다. 이 기술의 핵심은 액상 복합 산화제를 기화시키는 것이며, 이것이 NO의 산화효율을 결정짓는다. 현재 개발된 액상 복합 산화제의 종류에는 NaClO₂/NaBr(아염소산나트륨/나트륨 브롬화물), H₂O₂/Na₂S₂O₈(과산화수소/과황산나트륨), H₂O₂/NaClO₂(과산화수소/아염소산나트륨), Fenton/PAA/NaClO(펜톤/폴리아크릴산/차아염소산나트륨), Na₂S₂O₈/NaClO₂(과황산나트륨/아염소산나트륨), UV-H₂O₂(g) 등이 있으며, 이 중 NaClO₂/NaBr의 NO_x/SO_x/Hg⁰ 동시저감 성능이 제일 우수하다. 또한 액상 복합 산화제의 비용은 NaClO₂/NaBr > Fenton/PAA/NaClO > H₂O₂/NaClO₂ > H₂O₂/Na₂S₂O₈ > UV-H₂O₂(g) 순으로 높게 나타난다(Wang et al., 2019).

NO 흡수 기술은 금속이온과 유기물이 결합된 금속-킬레이트 화합물을 이용하여 NO를 직접 흡수하는 기술로써 단일 시스템으로 가스상 오염물질의 동시 처리가 가능하다. 이러한 금속-킬레이트 화합물로 Fe(II)EDTA(철-에틸렌디아민사아세트산)가 많이 연구되고 있으며, Fe(II)EDTA는 NO를 흡수하여 Fe(II)EDTA-NO로 전환되는 반응의 평형 상수가 크기 때문에 NO를 빠르게 흡수할 수 있다는 장점이 있다.

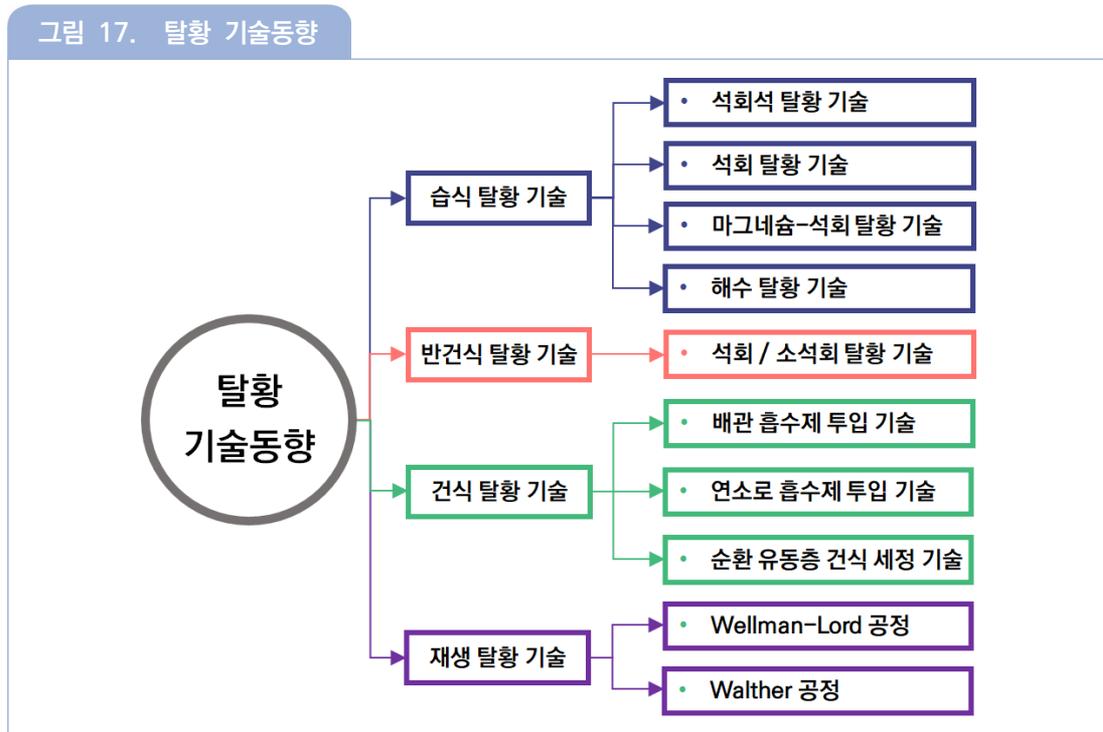
하지만 Fe(II)EDTA는 산소에 의해 쉽게 산화되어 Fe(III)EDTA로 변환되는데, 이는 NO를 흡수하는 능력이 거의 없어서 시간이 지날수록 산화된 Fe(III)EDTA가 증가하여 NO_x 저감 효율이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 이를 해결하기 위해서 Fe(III)EDTA와 Fe(II)EDTA-NO를 Fe(II)EDTA로 환원시켜, NO_x 저감 효율과 시스템 경제성을 향상시키기 위한 재생기술들이 많이 개발되고 있다. 다양한 환원물질 중에서 금속에 의한 재생기술이 가장 효율이 높은 것으로 알려져 있다(Zhu et al., 2019).

Fe(II)EDTA-NO 및 Fe(III)EDTA 재생에 사용된 금속들은 지속적 사용을 위해서 회수가 필요하다. 또한 회수 및 후처리 없이 사용한 금속을 물에 흘려 보내면 금속이온으로 인한 심각한 2차적 환경오염을 일으킬 수 있다. 따라서 공정의 경제성 확보 및 유출된 금속이온으로 인한 2차적 환경문제를 해결하기 위해 Fe(II)EDTA-NO를 Fe(II)EDTA로 재생시키기 위해 사용된 금속은 반드시 회수되어야 하며, 수용액상 존재하는 금속이온을 선택적으로 환원하여 회수하는 방법 중 대표적인 방법에는 전기 석출 방법(electro-deposition)이 있다. 전기 석출은 환원전극(cathode)에서 일어나며 전류의 밀도는 중요한 매개 변수로 물질에 대해 전기 석출의 전류가 부족하면 불순물이 많이 형성되고 과도한 전류가 흘러도 전기 석출이 잘 일어나지 않기 때문에 물질마다 적절한 전류를 선택하는 것이 중요하다(김윤희 & 주지봉, 2021). 현재 국내에서는 이러한 기술들을

이용하여 세계 최초로 ‘금속-킬레이트 화합물을 이용한 NOx 흡수 저감 -> NOx 흡수용액의 재생 -> 전기 석출에 의한 금속 환원물질의 회수’ 시스템을 구성하여 폐수 배출 없이 PM/NOx/SOx를 동시에 저감하는 기술을 실증 연구하고 있다.

2.2. 황산화물(SOx) 저감기술

황산화물(SOx)은 질소산화물(NOx)과 마찬가지로 2차 생성 미세먼지를 발생시키는 대표적인 전구물질이며, SOx를 저감시키는 탈황기술은 크게 습식 기술, 반건식 기술, 건식 기술, 그리고 재생 탈황 기술로 분류할 수 있다.



* 출처: 저자작성

습식 탈황 기술은 가장 널리 사용되고 있는 기술로써 칼슘 또는 나트륨 기반의 흡수제를 슬러리(다양한 불용해물과 액의 혼합현탁액) 형태로 습식 세정장치의 위에서 아래 방향으로 노즐을 통해 분사시키면 하부에서 유입된 배가스와 황산, 직접차단, 관성충돌 메커니즘에 의해 충돌하여 이황산가스(SO₂)를 높은 효율로 저감한다.

습식 탈황 기술 중 석회석(CaCO_3) 탈황 기술은 가장 대표적인 기술로써 아래 반응식에 의해 SO_2 를 저감하며, 부산물로 석고를 발생시킨다. 일반적으로 석회석 탈황 기술은 CaCO_3 와 SO_2 의 몰 비를 1~1.1로 하며, pH는 5.0~6.0 범위에서 사용한다.



습식 탈황 장치의 경우 자연 산화를 통해 습식 세정장치, 데미스터(demister, 유체 중에 함유되어 있는 액적 또는 분진을 분리하고 제거하는 필터 장치), 그리고 배관 도처에 석고 스케일링 문제가 발생하는데, 이를 방지하기 위해서 흡수제 슬러리에 공기를 불어 넣어 황산칼슘(CaSO_4)의 결정 성장을 빠르게 해준다. 이러한 방식의 탈황 기술을 석회석 강제 산화(LSFO, Limestone Forced Oxidation)라고 하고, 습식 세정장치 내의 스케일링을 최소화하며, 슬러리의 탈수가 더 쉽게 되는 장점이 있다. 따라서 탈수 장치가 작아지고 상업용 품질의 석고를 형성하게 되어 전 세계적으로 선호하는 기술이 되었다.

석회 탈황 기술은 습식 세정장치 내에 산화칼슘(CaO) 슬러리를 투입하여 SO_2 를 저감하는 기술로써 석회석 슬러리보다 반응율이 높지만 가격이 더 비싼 특징이 있다. 이러한 석회 탈황 기술은 석회석 탈황 기술보다 알칼리성과 용해도가 증가되기 때문에 pH 6~7 범위에서 운전된다.

마그네슘-석회 탈황 기술은 5~8%의 산화 마그네슘(MgO)으로 구성된 흡수제(magnesium-enhanced lime) 또는 20%의 MgO 로 구성된 백운석 석회(dolomitic lime)를 사용한다. 마그네슘 염의 용해도는 칼슘계열의 흡착제보다 훨씬 높기 때문에 슬러리는 더 강한 알칼리성을 띄게 된다. 그러므로 마그네슘-석회 탈황 기술은 석회석을 사용한 습식 세정장치보다 훨씬 작은 크기로 더 높은 SO_2 제거효율을 보이며, LSFO 공정에 비해 훨씬 낮은 액기비를 사용한다. 마그네슘-석회 탈황 기술에서 생성된 상업용 등급의 석고는 LSFO 공정에서 생성된 석고보다 가벼운데, 석고가 가벼울수록 잠재적으로 더 높은 상업적 가치가 있다.

해수 탈황 기술은 해안가 발전소에서 배출되는 SO_2 를 제거하는데 편리하고 경제적인 탈황 기술이다. 해수가 탈황에 적합한 이유는 첫째로 해수는 탄산수소염(HCO_3^-)과 탄산염(CO_3^{2-})을 포함하기 때문에 자연적으로 알칼리성을 띄며, 둘째로 흡수된 SO_2 는 황산이온(SO_4^{2-})으로 변환되는데 이는 해수의 자연 구성성분이다. 일반적으로 배출된 해수에는 SO_4^{2-} 이 약간만 증가하게 되고, 이러한 증가는 해수에서 자연적으로 발생하는 변화 범위 내에 있다. 다만 높은 염화물 농도로 인해 해수를 사용하는 시스템에서는 내식성이 강한 재료를 사용해야 된다. 해수 탈황 기술의 화학 반응식은 아래와 같으며, 85~98%의 SO_2 저감 효율을 보인다(Córdoba, 2015).



반건식 탈황 기술은 전 세계에서 두 번째로 가장 많이 사용하고 있는 기술로써 황을 최대 3.5% 함유하고 있는 연료의 연소 공정에 사용된다. 주로 수산화 칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 또는 CaO 슬러리를 사용하며, 회전식 분무기 (rotary atomizer) 또는 이류체 노즐을 사용하여 탈황 장치 내부로 미세하게 분사시켜 SO_2 를 저감한다. 일반적으로, 황 함유량이 낮은 석탄의 경우 0.9, 높은 석탄의 경우 1.3~1.5의 석회 몰 비를 사용하며, 반건식 탈황 장치에서 일어나는 주요한 반응들은 아래와 같으며, 85~95%의 탈황 효율을 보인다(Poullikkas, 2015).



반건식 탈황 장치 내에서 물은 완전히 증발하기 때문에 폐수가 발생하지 않는다. 일부 건조된 생성 고형물은 탈황 장치 바닥에서 포집되며, 배가스 내 남아있는 고체 입자들은 집진기로 이동하여 포집된다. 집진기가 여과집진기로 구성된 공정의 경우, 필터백 표면의 먼지층에서 추가적인 SO_2 제거가 발생할 수 있으며, 전체 탈황 효율에서 20%까지 기여한다.

건식 탈황 기술은 크게 흡수제 투입 기술과 건식 세정 기술로 나눌 수 있으며, 흡수제 투입 기술은 위치에 따라 배관 흡수제 투입 기술(dust sorbent injection)과 연소로 흡수제 투입 기술(furnace sorbent injection)로 나누어진다. 배관 흡수제 투입 기술은 공기 예열기와 집진기 사이의 배관에서 SO_2 농도를 직접 제어하기 위해 흡수제를 투입하는 기술이며, 별도의 탈황장치가 필요하지 않기 때문에 SO_2 를 제어하기 위한 시스템이 최소화된다. 배관 흡수제 투입 기술에서 흡수제는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 또는 NaHCO_3 를 사용하며, SO_2 와 흡수제와의 반응을 향상시키기 위해 물을 주입하기도 한다. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 이용한 기술의 SO_2 저감 효율은 50~60% 범위이고, NaHCO_3 를 이용한 기술은 최대 80%의 저감 효율이 나타난다(Córdoba, 2015).

연소로 흡수제 투입 기술은 흡수제를 연소로 내에 최적 온도 지점에 투입하여 SO_2 를 저감하는 기술로써 높은 온도(거의 $1,000^\circ\text{C}$) 때문에 흡수제(주로 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 종종 CaCO_3 사용) 입자들은 아래 반응식과 같이 분해되고 높은 표면적을 갖는 다공성 입자로 변하여 배가스 내 SO_2 와 반응하게 된다.



CaSO₄와 미반응 흡수제는 연소로부터 배출되어 집진기에 포집된다. 석회석을 사용한 경우 몰 비 4~5 범위에서 약 50%의 SO₂ 저감 효율을 보이며, 이를 재순환하면 70~80%까지 효율을 증가시킬 수 있다(Córdoba, 2015).

순환 유동층 건식 세정 기술은 흡수제(주로 Ca(OH)₂)가 순환 유동층 내에서 배가스와 직접 접촉하여 SO₂를 저감하는 기술이다. 유동층은 흡수제 고체 층을 통해 위로 흐르는 배가스로 인해 형성되며, 순환 유동층 보일려는 흡수제가 배드(bed)를 여러 번 통과하기 때문에 흡수제와 배가스 사이에 긴 접촉 시간을 제공한다. 반응 생성물은 집진기로 이동되어 포집되며, 집진기에 포집된 흡수제의 활용도를 높이기 위해 bed로 일부 재순환되고 나머지 부분은 폐기처리 된다.

재생 탈황 기술은 흡수제가 화학적으로 또는 열적으로 재생되거나 재사용되는 기술이다. 일반적으로 폐기물 처리가 없고, 적은 폐수를 발생시키며, 염화물을 제어하기 위해 전처리장치(pre-scrubber)가 필수적으로 요구된다. 이 기술은 높은 SO₂ 제거효율 (> 95%)을 나타내는 반면에 높은 자본 비용과 에너지 소비를 나타낸다. 하지만 재생 탈황 기술에서 발생한 부산물의 수익으로 높은 자본 경비를 일부 보상받을 수 있다. 재생 탈황 기술은 크게 Wellman-Lord 공정과 Walther 공정으로 구분된다.

Wellman-Lord 공정은 Na₂SO₃ 흡수제를 사용하며, SO₃ 분리 → 배가스의 pre-scrubbing → SO₂ 흡수 → 흡수제 재생 → 폐수 처리의 과정을 거친다. 이러한 Wellman-Lord 공정은 연료의 황 함유량이 최대 3.5%인 연료의 연소 공정에서 사용되며, SO₂ 저감 효율은 95% 정도이다(Poullikkas., 2015).

Walther 공정은 두 대의 습식 세정장치가 연속으로 운전되며 첫 번째 장치에서 70℃ 온도 범위에서 먼지가 포집되고, 재순환된 흡수제가 pH 6에서 SO₂와 반응하여 (NH₄)₂SO₃를 형성한다. 흡수제는 25% 농도의 암모니아수를 사용하며, 첫 번째 습식 세정장치에서 생성된 암모늄염은 장치 하부에서 포집되며 공기와 혼합하여 (NH₄)₂SO₃를 (NH₄)₂SO₃로 산화시킨다. 이렇게 생성된 최종 생산물은 질소가 20~25% 함유된 상업용 품질의 비료가 된다. 첫 번째 습식 세정장치에서 정제된 배가스는 두 번째 장치로 유입되면서 온도가 50℃ 정도로 떨어지는데 배가스를 90℃로 승온시켜 굴뚝으로 배출시킨다. Walther 공정은 연료의 황 함유량이 최대 1.2%인 연료의 연소공정에서 사용되며, SO₂ 저감 효율은 90% 정도이다(Poullikkas, 2015).

IV 향후 전망

우리나라에서 초미세먼지에 대한 환경기준이 아직 마련되지 않았던 2013년도에 서울시는 ‘초미세먼지 주의보’를 처음으로 발령했다. 이후 우리는 재난 수준의 미세먼지를 겪으면서 매일 일기예보에서 미세먼지 농도를 확인하고 마스크를 쓰는 것이 이제는 일상이 되었다.

정부는 미세먼지 문제를 개선하기 위해 2018년에 미세먼지특별법을 제정하였고, 2019년에는 미세먼지로 인한 피해를 ‘사회재난’으로 공식화함으로써 국가적 대응 기반을 마련하였다. 그리고 관계부처 합동으로 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)을 수립하여 강도 높게 시행해 오고 있다.

융합연구리뷰에서는 미세먼지 저감에 관해 정책과 기술현황으로 나누어 설명을 하였으며, 글을 마치며 정책적인 면과 기술적인 면에 다음과 같은 제언을 하고자 한다.

우선 정책적으로는 우리나라에서 가장 많이 배출되고 있는 사업장을 대상으로 탄소배출권과 유사한 개념의 ‘미세먼지 배출권’ 제도를 시행해볼 필요성이 있다. 이를 위해서는 각종 사업장에서 현재 운영 중인 방지설비 중 개선(retrofit)이 가능한 사업장과 설비의 전면 교체가 필요한 사업장을 구분해볼 필요가 있다. 개선이 가능하다면 추가적인 개선을 통해 미세먼지 배출량을 직접적으로 저감시킬 수 있지만, 개선이 불가능한 사업장은 굴뚝 이외에 재생에너지를 이용한 미세먼지 저감 설비를 도입함으로써 순수하게 저감시킨 미세먼지 양만큼 굴뚝에서의 미세먼지 배출권을 부여하는 방식으로, 재생에너지 확산과 더불어 미세먼지 저감을 함께 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

다음으로 기술적으로는 1차 생성 미세먼지와 2차 생성 미세먼지를 독립적으로 저감시키기 위한 기술을 진보시켜 두 가지 종류의 미세먼지를 경제적이면서 동시에 저감시키는 기술의 국산화가 필요하다. 또한, 미세먼지 배출량을 줄이기 위해서 방지설비의 저감 효율 자체를 높이는 것도 중요하지만 방지설비 운영에 필요한 전기 소모량도 함께 고려하는 것이 필요하다. 따라서 정부의 탄소중립 정책과 맞물려 미세먼지도 각 저감 기술별로 환경 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 통해 실질적으로 전주기적 관점으로 미세먼지 배출이 저감되는지, 오히려 증가되는지에 관해 분석해볼 필요가 있다. 이를 통해 정부는 미세먼지 배출이 실질적으로 저감이 되는 기술에 지원을 하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

끝으로 산업분야 외에 실내공기 오염물질 저감 기술의 경우에는 1차 미세먼지와 더불어 휘발성유기화합물 (VOCs, Volatile Organic Compounds), 부유세균 등을 동시에 저감시킬 수 있는 기술과 더불어 사람이 오염물질에 노출되는 시간을 줄이기 위해서 저감 기술의 효율보다는 오염물질의 농도를 허용기준까지 신속하게 저감시킬 수 있는 방향으로 기술 개발이 필요하다.

저자_ **최종원**(Jong Won Choi)

• 학력

서울대학교 기계공학 박사
 서울대학교 기계공학 석사
 고려대학교 기계공학 학사

• 경력

現) 한국에너지기술연구원 EMS 연구실
 책임연구원

저자_ **이강산**(Kang San Lee)

• 학력

연세대학교 기계공학 박사
 고려대학교 환경보건학 석사
 충남대학교 임산공학 학사

• 경력

現) 한국에너지기술연구원 EMS 연구실
 박사후연구원

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 공부주, 김종현, 김혜리, 이상보, 김형천, 조정화, ... & 홍지형. (2016). 배출가스 중 응축성미세먼지 특성 연구. 한국대기환경학회지 (국문), 32(5), 501-512.
- 2) 국회예산정책처. (2019). 미세먼지 대응 사업 분석.
- 3) 관계부처 합동. (2019). 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024).
- 4) 김윤희, & 주지봉. (2021). 미세먼지 원인 전구물질인 일산화질소 제거 기술의 동향. 에너지기후변화학회지, 16(2), 128-148.
- 5) 조연주, 임현정, 김소연, 최상미, & 김민성. (2018). 배가스내 PM1.0 미세먼지 제거를 위한 사이클론 정전분무 습식 집진기 개발 연구. 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 217-220.
- 6) 박현우, & 엄성현. (2017). 배출가스의 질소산화물과 이산화황 동시 저감 기술. Applied Chemistry for Engineering, 28(6), 607-618.
- 7) 심창섭, 최기철, 이정석, 공지영. (2021) 국내 미세먼지(PM_{2.5}) 관리 개선을 위한 과제. 한국환경정책·평가연구원.
- 8) 환경부. (2016). 미세먼지 도대체 뭘까?.
- 9) Kim, K. D., Hasolli, N., Lee, K. S., Lee, J. R., & Park, Y. O. (2019). Control of fugitive fine coal particulate emissions from coal handling system at coal-fired power plants using a two-stage vortex scrubber. 한국대기환경학회지, 35(2), 282-293.

〈국외문헌〉

- 10) Achilles, A. E., & Guerra, V. G. (2020). Performance of a cyclone scrubber on removal of fine particulate matter. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 26(1), 31-40.
- 11) Brauer, M., Amann, M., Burnett, R.T. et al. (2012) Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution. Environmental Science and Technology, 45, 652-660.
- 12) Colbeck, I., & Lazaridis, M. (2014). Aerosol Science. Wiley Online Library.
- 13) Córdoba, P. (2015). Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs. Fuel, 144, 274-286.
- 14) Cho, H., Youn, J. S., Oh, I., Jung, Y. W., & Jeon, K. J. (2020). A new air-washing method to clean fabric filters clogged with submicron fume particles: A pilot-scale study. Journal of hazardous materials, 383, 121186.
- 15) de Souza, F. J., de Vasconcelos Salvo, R., & de Moro Martins, D. (2015). Effects of the gas outlet duct length and shape on the performance of cyclone separators. Separation and Purification Technology, 142, 90-100.

- 16) El-Batsh, H. M. (2013). Improving cyclone performance by proper selection of the exit pipe. *Applied mathematical modelling*, 37(7), 5286–5303.
- 17) Elsayed, K., Parvaz, F., Hosseini, S. H., & Ahmadi, G. (2020). Influence of the dipleg and dustbin dimensions on performance of gas cyclones: An optimization study. *Separation and Purification Technology*, 239, 116553.
- 18) Elsayed, K., & Lacor, C. (2011). The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. *Applied mathematical modelling*, 35(4), 1952–1968.
- 19) Guo, Y., Zheng, C., Zhang, J., Xu, Z., Yang, Z., Weng, W., ... & Gao, X. (2018). Enhancing PM removal by pulse energized electrostatic precipitators—a comparative study. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47(1), 365–375.
- 20) Hao, R., Mao, X., Wang, Z., Zhao, Y., Wang, T., Sun, Z., ... & Li, Y. (2019). A novel method of ultraviolet/NaClO₂-NH₄OH for NO removal: mechanism and kinetics. *Journal of hazardous materials*, 368, 234–242.
- 21) Hoffmann, A. C., De Groot, M., Peng, W., Dries, H. W. A., & Kater, J. (2001). Advantages and risks in increasing cyclone separator length. *AIChE journal*, 47(11), 2452–2460.
- 22) Hu, S., Gao, Y., Hu, F., Feng, G., Liu, C., & Li, J. (2021). A novel method for cleaning coal-dust-laden air and its application. *Process Safety and Environmental Protection*, 153, 311–319.
- 23) Huang, Y., Li, S., Zheng, Q., Shen, X., Wang, S., Han, P., ... & Yan, K. (2015). Recent progress of dry electrostatic precipitation for PM_{2.5} emission control from coal-fired boilers. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 9(2), 69–85.
- 24) Kang, M. S., Shin, J., Tae, U. Y., & Hwang, J. (2020). Simultaneous removal of gaseous NO_x and SO₂ by gas-phase oxidation with ozone and wet scrubbing with sodium hydroxide. *Chemical Engineering Journal*, 381, 122601.
- 25) Kim, M., Lim, G. T., Kim, Y. J., Han, B., Woo, C. G., & Kim, H. J. (2018). A novel electrostatic precipitator-type small air purifier with a carbon fiber ionizer and an activated carbon fiber filter. *Journal of Aerosol Science*, 117, 63–73.
- 26) Kulkarni, P., Namiki, N., Otani, Y., & Biswas, P. (2002). Charging of particles in unipolar coronas irradiated by in-situ soft X-rays: enhancement of capture efficiency of ultrafine particles. *Journal of aerosol science*, 33(9), 1279–1296.
- 27) Li, X., Xu, X., Zhang, M., & Jiao, Y. (2019). Column Dust Scrubber Based on an Orifice Plate to Intensify Gas-Liquid Mixing. *Chemical Engineering & Technology*, 42(11), 2302–2309.
- 28) Liu, K. H., Chen, M. Y., Tsai, Y. C., Lin, H. P., & Hsi, H. C. (2017). Control of Hg₀ and NO from coal-combustion flue gases using MnO_x-CeO_x/mesoporous SiO₂ from waste rice husk. *Catalysis Today*, 297, 104–112.

- 29) Park, D., & Go, J. S. (2020). Design of cyclone separator critical diameter model based on machine learning and cfd. *Processes*, 8(11), 1521.
- 30) Parvaz, F., Hosseini, S. H., Elsayed, K., & Ahmadi, G. (2020). Influence of the dipleg shape on the performance of gas cyclones. *Separation and Purification Technology*, 233, 116000.
- 31) Pei, B., Yang, L., Dong, K., Jiang, Y., Du, X., & Wang, B. (2017). The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator. *Powder Technology*, 313, 135–144.
- 32) Poullikkas, A. (2015). Review of Design, Operating, and financial considerations in flue gas desulfurization systems. *Energy Technology & Policy*, 2(1), 92–103.
- 33) Shishkin, A., Goel, G., Baronins, J., Ozolins, J., Hoskins, C., & Goel, S. (2021). Using circular economy principles to recycle materials in guiding the design of a wet scrubber-reactor for indoor air disinfection from coronavirus and other pathogens. *Environmental technology & innovation*, 22, 101429.
- 34) Shim, J., Joe, Y. H., & Park, H. S. (2017). Influence of air injection nozzles on filter cleaning performance of pulse-jet bag filter. *Powder Technology*, 322, 250–257.
- 35) Sobczyk, A. T., Marchewicz, A., Krupa, A., Jaworek, A., Czech, T., Kluk, D., & Charchalis, A. (2017). Enhancement of collection efficiency for fly ash particles (PM_{2.5}) by unipolar agglomerator in two-stage electrostatic precipitator. *Separation and Purification Technology*, 187, 91–101.
- 36) Tseng, H. H., Wey, M. Y., Liang, Y. S., & Chen, K. H. (2003). Catalytic removal of SO₂, NO and HCl from incineration flue gas over activated carbon-supported metal oxides. *Carbon*, 41(5), 1079–1085.
- 37) Stein, L., & Hoffmann, A. (2010). *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design, and Operation*. Berlin, Heidelberg, New York.
- 38) Vekteris, V., Strishka, V., Ozarovskis, D., & Mokshin, V. (2014). Experimental investigation of processes in acoustic cyclone separator. *Advanced Powder Technology*, 25(3), 1118–1123.
- 39) Vatauk, W. M., Klotz, W. L., & Stallings, R. L. (1999). *EPA Air Pollution Control Cost Manual*. EPA 452/B-02-001.
- 40) Wang, H., Yuan, B., Hao, R., Zhao, Y., & Wang, X. (2019). A critical review on the method of simultaneous removal of multi-air-pollutant in flue gas. *Chemical Engineering Journal*, 378, 122155.
- 41) Yao, Y., Huang, W., Wu, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Yang, H., & Lyu, J. (2021). Effects of the inlet duct length on the flow field and performance of a cyclone separator with a contracted inlet duct. *Powder Technology*, 393, 12–22.
- 42) Zhang, X., Shen, B., Shen, F., Zhang, X., Si, M., & Yuan, P. (2017). The behavior of the manganese-cerium loaded metal-organic framework in elemental mercury and NO removal from flue gas. *Chemical Engineering Journal*, 326, 551–560.

- 43) Zhu, X., He, F., Xia, M., Liu, H., & Ding, J. (2019). Evaluation of Fe (iii) EDTA reduction with ascorbic acid in a wet denitrification system. RSC advances, 9(42), 24386–24393.

〈기타문헌〉

- 44) 미국 환경보호청(EPA) 홈페이지. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- 45) 환경부 홈페이지. <https://www.me.go.kr/mamo/web/index.do?menuId=16201>



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 October vol.8 no.10



02

국내외 탄소 포집·활용(CCU) 기술 연구 동향

오형석(한국과학기술연구원 책임연구원)

I 서론

2015년 파리에서 개최된 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회(UNFCCC COP21, the 21st session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change)에서 진행된 신(新) 기후변화체제 협상은 탄소 포집·활용(CCU, Carbon Capture & Utilization) 관련 연구 동향 및 정책에 많은 영향을 주었다. 또한, 최근 이상기후 현상과 이로 인한 해수면 상승, 홍수, 산불 등으로 온실가스 저감의 필요성이 더욱 강조되고 있다. 가깝게는 2022년 여름, 서울과 수도권을 강타한 집중호우가 기후위기의 심각성을 단적으로 보여주는데, 올해 이산화탄소 농도는 414.7 ppm로 관측 이래 가장 높은 것으로 나타났다. 이와 유사한 기후변화로 인한 피해는 향후 가속화 될 것으로 예상된다. 경제적 측면에서 수출 주도형 경제구조를 가진 우리나라의 경우 탄소세 및 탄소국경세가 부과되면 수출의 어려움이 있을 것으로 예상된다. 융합연구리뷰에서는 국내외 이산화탄소를 저감하기 위한 방법으로 수행된 이산화탄소 전환관련 CCU 연구 동향과 진행 중인 프로젝트에 관하여 논의하고자 한다.

II 국가별 COP21 파리협정 대응 CCU 정책 및 R&D 프로젝트

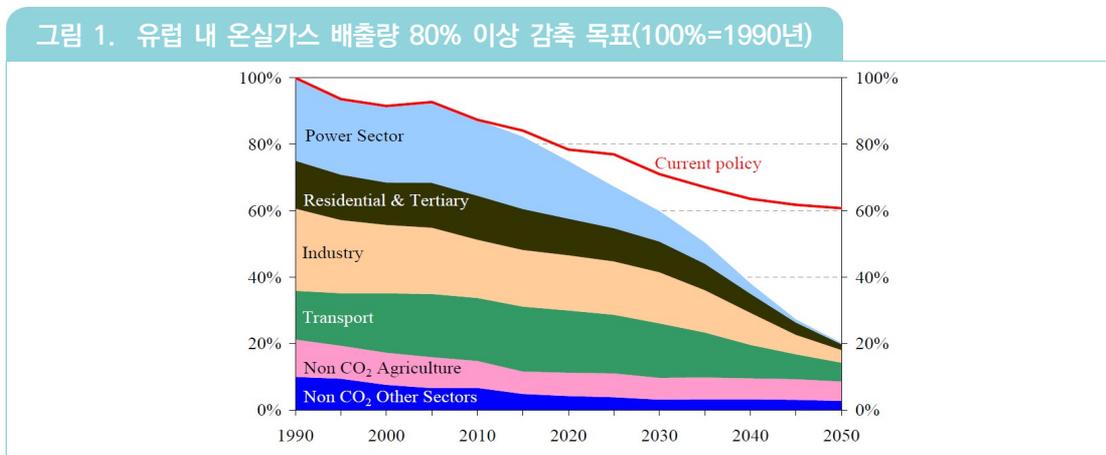
1. 유럽연합(EU)의 COP21 파리협정 대응 CCU 정책 및 R&D 프로젝트

유럽은 COP21의 신 기후변화체제 계획수립에 주도적 역할을 했기 때문에 COP21 파리협정(Paris Agreement)에 대응하기 위한 실질적인 목표를 책임 있게 달성해야 하는 입장에 있다. 이러한 이유로 유럽은 가장 조직적이고 능동적인 연구 및 혁신(R&I, Research and Innovation) 계획을 수립하고 이에 대한 대응을 하고 있다.

1.1. EU의 정책 동향

1.1.1. 유럽집행위원회(EC)의 COP 파리협정 대응 정책 동향

유럽연합은 2011년에 2050년까지의 온실가스 감축 로드맵을 확정하였고, 이러한 계획이 COP21 파리협정에 반영되었다. 1990년 수준의 온실가스 배출량 대비 2020년까지 25%, 2030년까지 40%, 2050년까지 80% 이상 감축하도록 추진 전략이 마련되었다.



* 출처: Akif(2015)

COP21 파리협정 계획에 실질적으로 대응하기 위해서 유럽집행위원회(EC, European Commission)는 다양한 분야에서의 재원마련을 통해 2016년부터 ‘호라이즌 2020(Horizon 2020)’ 프로그램 예산 8백억 유로의 35%를 기후변화대응기술에 투자해 왔고, 실제로 7개의 혁신 실증기술(AMPERE, LIMITS, CARBON-AP 등)이 COP21 파리협정 계획을 도출하는데 중요한 실증적 자료로 활용되었다. 이 비용은 이처럼 관련분야의 혁신적 기술개발뿐만 아니라 혁신 및 경쟁을 통해 실질적인 목표를 달성할 수 있도록 하는 정책 수립에 투입되었다. ‘Horizon 2020’이 종료됨에 따라 후속 프로그램인 ‘호라이즌 유럽(Horizon Europe)’이 2019년 유럽의회에서 확정되어 추진 중이다.

또한, EC는 ‘전략적 에너지 기술 계획(SET Plan, European Strategic Energy Technology Plan)’을 수립하고, 저탄소 기술을 개발하여 추진하도록 하는 정책을 수립하였다. 2017년 ‘SET Plan’은 10개의 목표로 구성되어 있으며, 그에 따른 10개의 액션(Action) 분야가 있는데, 탄소 포집, 활용, 저장(CCUS, Carbon Capture, Utilization, Storage) 기술은 9번째 액션(SET Plan Action 9)에 포함되어 있다.

그림 2. 전략적 에너지 기술 계획(SET Plan)의 10가지 핵심 액션(Key Actions)

Energy Union <i>Research, Innovation and Competitiveness Priorities</i>		SET Plan 10 Key Actions
No1 in Renewables 		1 Performant renewable technologies integrated in the system 2 Reduce costs of technologies
Consumers in the Energy System 		3 New technologies & services for consumers 4 Resilience & security of energy system
Efficient Energy Systems 		5 New materials & technologies for buildings 6 Energy efficiency for industry
Sustainable Transport 		7 Competitive in global battery sector and e-mobility 8 Renewable fuels and bioenergy
Carbon Capture Utilisation and Storage 		9 Carbon Capture Storage / Use
Nuclear Safety 		10 Nuclear safety

* 출처: European Commission 사이트

SET Plan Action 9에는 10개의 목표(Target)가 있고 그 중 Target 8과 Target 9가 CCUS 기술과 관련되어 있다. 특히, Target 8은 CO₂를 전환해 연료(fuel)를 생산하기 위한 CCU 프로젝트이며, 사용규모의 탄소 포집 및 저장 CCS cluster에 연계하여 TRL(Technology Readiness Level, 기술성숙도) 6~7 단계의 실증 연구가 진행 중이다. 한 가지 예로, Norwegian CCS cluster와 연계하여 'MefCO₂'와 'FReSMe' 프로젝트는 독일과 스웨덴에서 운영되고 있으며, 신재생에너지를 활용하여 메탄올을 연간 5~10톤 생산하고 있다. 구체적 예는 아래 <표 1>과 같다.

표 1. 유럽 Target 8의 CCS cluster 연계 실증 CCU 프로젝트

프로젝트 명	생산물	CO ₂ 공급원	생산량	위치
MefCO ₂ , FReSMe (EU)	메탄올	배기가스 (Flue gas)	1톤/일	독일, 스웨덴
Goerg Olah Plnat (IS)	메탄올	지열	4천톤/년	아이슬란드
Kopernikus P2X (DE)	연료	공기중 직접 흡착	10 리터/일	독일
Soletair (FI)	화학제품	공기중 직접 흡착	6 kg/일	핀란드
STORE&GO (EU)	메탄	에탄올 공장	1400 m ³ /일	독일
Jupiter1000 (FR)	메탄	배기가스	25 m ³ /시간	프랑스
ALIGN-CCUS (EU)	DME	배기가스	50 kg/일	독일
Audi (DE)	메탄	바이오가스	1천톤/년	독일
Twence	소듐 바이카보네이트	배기가스	8천톤/년	네덜란드

* 출처 : CCUS SET-PLAN(2021)

SET Plan Action 9의 이용기술로는 '산업폐기물의 탄산화(carbonation of industrial wastes)', '전기분해를 통한 전력-메탄올(power-to-methanol via electrolysis)', '잉여에너지(power)를 다른 에너지(X)로 변환하여 저장하는 기술(PtX, Power-to-X)', '중합체(polymers)', '태양연료(solar fuels)'가 있으며 2017년 개발이 추진되었다.

탄소 배출 제로 플랫폼(ZEP, Zero-Emission Platform)은 'SET Plan'에 대한 기술적인 지원을 하는 플랫폼으로 'Horizon 2020' 으로부터 지원을 받았다. 유럽은 탄소제로 사회를 구현하기 위한 에너지, 기후변화,

환경(Energy, Climate change, Environment)의 체계하의 ‘유럽 그린딜(European Green Deal)’을 통해 실질적인 실행계획(action plan)을 담은 로드맵을 2019년 확정하였다. 그리고 2030년 기후변화 대응 목표를 책임지고(responsible way) 온실가스를 50% 이상 감축하도록 목표를 상향하는 내용을 유럽 기후법(European Climate Law)에 담도록 제안하였다. 2020년부터 추진하는 CCU분야의 주요 실행계획(action plan)은 ‘청정 및 순환경제를 위한 산업 전략(Industrial Strategy for a Clean and Circular Economy)’에 담았고 그 내용은 다음과 같다.

- 저탄소 사회구현을 위한 EU 산업전략 구축
- 섬유, 건설, 전기 및 플라스틱과 같은 주요산업에 저 탄소구현을 위한 ‘순환경제 실행계획(Circular Economic Action Plan)’
- 에너지 다소비형 산업에 저탄소 산업을 선점하도록 하는 주도권 확보
- 2030년까지 탄소제로 제철공정을 지원하는 계획을 2020년까지 수립
- 제로 오염물질 배출을 위한 화학제품 전략을 2020년 여름까지 수립
- 글로벌 리더로서의 유럽의 역할강화

1.1.2. 유럽의 탄소세 제도

기후변화 대응을 위한 하나의 실질적인 추진 동력으로 유럽은 세계 최초로 배출거래시스템인 유럽연합 배출권 거래제(EU ETS, EU Emissions Trading System)를 2005년부터 운영하였다. EU ETS를 통해 유럽에서 배출되는 총 배출가스양(Cap) 범위 내에서 탄소배출권(emission allowances)을 받거나 구매하게 되며, 두 가지 형태(CDM 및 JI)의 국외 탄소배출권 거래가 가능하다. EU ETS는 2020년 단계 3(2013-2020)이 종료되었으며, 단계 4(2021-2030)가 발효되고 부분적으로 파리협정에 기여할 수 있도록 개정되었다. 단계 3에서는 3억 유로의 총당금(allowances)이 CCU 기술 실증을 위해 NER300 프로그램을 통해 지원되도록 배정되었다. NER300 프로그램은 3억 톤의 탄소 배출거래권을 의미하며, 유사한 프로그램으로 EU ETS Phase NER400이 있다. 이러한 탄소배출권 프로그램은 저탄소 산업을 지원 육성하는 정책으로 활용되고 있다. 유럽은 ‘2030 기후 및 에너지정책 프레임워크(2030 Climate and Energy Framework)’ 계획상 탄소 배출거래를 통해서 온실가스 감축 목표인 40% 이상을 달성하도록 탄소배출권 할당량을 강화하고, 이를 저탄소를 위한 혁신적 기술개발에 재투자하도록 추진하고 있다.

1.2. EU의 CCU R&D 프로젝트

1.2.1. Horizon 2020 Projects(2014~2020)

유럽집행위원회는 'Horizon 2020'(2014~2020) 출범 계획을 2015년에 수립하고, COP21 파리협정에 대응하는 CCU 기술을 2016년부터 개발하였다. 대표적인 'Horizon 2020' 프로젝트의 목록은 <표 2>에 기술되었다.

표 2. 대표적인 'Horizon 2020'의 CCU 프로젝트

프로젝트 번호	프로젝트 명	기간	예산 (단위: 백만 유로)
SC5-06-2016-2017	Policy: Pathways towards the decarbonization and resilience of the European economy in the timeframe 2030-2050 and beyond (정책: 2030년~2050년 및 그 이후 기간 동안 유럽 경제의 탈탄소화 및 회복력을 향한 경로)	2015-2016	20
SC5-07-2017	Policy: Coordinating and supporting research and innovation actions on the decarbonization of the EU economy (정책: EU 경제의 탈탄소화에 대한 연구·혁신 활동 조정 및 지원)	2016-2017	6
CE-SC3-NZE-2-2018	Conversion of captured CO ₂ (포집된 CO ₂ 의 전환)	2018-2022	12
LC-SC3-NZE-3-2018	Strategic Planning for CCUS Development (CCU 개발을 위한 전략계획)	2018-2022	3
LC-SC3-NZE-4-2019	Integrated solution of power plant through PtX or energy storage (PtX 또는 에너지 저장을 통한 발전소 통합 솔루션)	2018-2022	20
LC-SC3-NZE-5-2019	Low carbon industrial production using CCUS (CCUS를 이용한 저탄소 산업 생산)	2019-2022	33
H2020-LCE-2017-RES-RIA-TwoStage	eForFuel: Fuels from electricity: de novo metabolic conversion of electrochemically produced formate into hydrocarbons (eForFuel: 전기 연료: 전기화학적으로 생성된 포름산염을 탄화수소로 신진대사 전환)	2018-2022	4.3
MSCA-IF-2018/ individual fellowship	CO ₂ COFs: New Heterogeneous Catalyst Materials for Hydrogenation of CO ₂ to Formic Acid: Metallophthalocyanine-Based 2D- and 3D Covalent Organic Frameworks (CO ₂ COFs: CO ₂ 를 포름산으로 수소화하기 위한 새로운 이종 촉매 재료: 메탈로프탈로시아닌 기반 2D 및 3D 공유 유기 프레임워크)	2018-2022	0.24
H2020-SPIRE-2017	Carbon4PUR: Turning industrial waste gases(mixed CO/CO ₂ streams) into intermediates for polyurethane plastics for rigid foams/building insulation and coatings (Carbon4PUR: 산업 폐가스(혼합 CO/CO ₂ 흐름)를 경질 폼/건물 단열재 및 코팅용 폴리우레탄 플라스틱의 중간체로 전환)	2018-2022	7.8
LC-SC3-CC-2-2018	Modelling in support to the transition to a Low-Carbon Energy system in Europe (유럽의 저탄소 에너지 시스템으로의 전환을 지원하는 모델링)	2018-2022	5.0

* 출처: European Commission(2017)

1.2.2. Horizon Europe(2021~2027)

‘Horizon Europe’은 5개의 미션(mission)을 수행하도록 계획되고 있으며, CCU 기술은 ‘기후중립 및 스마트 도시(Climate-neutral and smart cities)’ 미션에 포함되어 있다. 해당 미션은 COP21 파리협정에 따른 신 기후변화체제의 목표를 만족할 수 있는 기술개발을 지원하는 데 있다. ‘Horizon Europe’에서의 CCU 기술은 실질적 탄소중립을 위한 혁신적 기술을 개발하는 것이 목표이며, 해당 기술은 유럽연합 배출권 거래제(EU ETS)에서 2020년부터 추진 중인 CCU 실증화 프로젝트인 ‘혁신 기금(Innovation Fund)’과 연계되어 수행되도록 계획되고 있다.

1.2.3. A.SPIRE 협회

A.SPIRE 협회(association)는 유럽 내 기업의 20%가 가입되어 있는 조직으로 혁신적인 산업공정기술을 개발 및 이를 실용화하고, 상호 협조하기 위해 조직되었다. 시멘트(CMEBUREAU), 세라믹(Ceramic-Unie), 화학공업(CEFIC), 비철(Eurometaux), 광물(IMA Europe), 금속(EUROFER) 등의 산업부문협회들로 구성되어 있다. A.SPIRE 협회는 개별적인 국가과제는 물론 ‘Horizon 2020’ 체제 하에서 목적을 달성하기 위한 공동기금(co-funding)에 의해 연구개발을 수행하고 있다. A.SPIRE 협회에서 수행하는 주요 CCU 프로젝트는 아래의 <표 3>과 같다.

표 3. A.SPIRE 협회에서 수행하는 CCU 프로젝트 목록

프로젝트	내용
C2Fuel (2019.01~2023.05)	Carbon Captured Fuel and Energy Carriers for an Intensified Steel Off-Gases based Electricity Generation in a Smarter Industrial Ecosystem (스마트한 산업 생태계에서의 강화철 오프가스 기반 발전을 위한 탄소 포획 연료 및 에너지 운반체)
Carbon4PUR (2017.01~2020.09)	Turning industrial waste gases(mixed CO/CO ₂ streams) into intermediates for polyurethane plastics for rigid foams/building insulation and coatings (산업 폐기물 가스(혼합 CO/CO ₂ 스트림)를 강성 발포체용 폴리우레탄 플라스틱의 중간체로 전환/건물 단열재 및 코팅)/Horizon 2020과 연계(Utilization of CO ₂ : SPIRE08-2017)
CarbonNext (2016.09~2018.08)	The Next Generation of Carbon for the Process Industry (공정산업의 차세대 탄소)/Horizon 2020과 연계(SPIRE05-2016)
CO ₂ EXIDE (2018.01~2020.03)	CO ₂ -based Electrosynthesis of ethylene OXIDE/the substitution of fossil-based production of ethylene (CO ₂ 기반 에틸렌 옥사이드 전기합성/에틸렌 화석 기반 생산 대체)/(SPIRE10-2017)
COZMOS (2019.05~2023.04)	Efficient CO ₂ conversion over multisite Zeolite-Metal nanocatalysts to fuels and OlefinS/CO ₂ hydrogenation into chemicals and fuels (다중 사이트 Zeolite-Metal 나노촉매에서 연료로의 효율적인 CO ₂ 전환 및 OlefinS/CO ₂ 수소화에서 화학 및 연료로의 효율적인 CO ₂ 전환)
eCOCO ₂ (2019.05~2022.05)	Direct electrocatalytic conversion of CO ₂ into chemical energy carriers in a co-ionic membrane reactor (공이온막 반응기에서 CO ₂ 의 화학 에너지 운반체로 직접 전기 촉매 변환)
FReSMe (2016.11~2020.10)	From Residual Steel gases(Blast Furnace) to Methanol (잔류 강철 가스에서 메탄올로)/(U of captured CO ₂ , LCE-25-2016)
ICO ₂ CHEM (2017.10~2021.09)	From industrial CO ₂ streams to added value Fischer-Tropsch chemicals (산업용 CO ₂ 흐름에서 부가가치 Fischer-Tropsch 화학물질로)/(U of CO ₂ , SPIRE08-2017)
MefCO ₂ (2014.12~2018.11)	MefCO ₂ (Methanol fuel from CO ₂) - Synthesis of methanol from captured carbon dioxide using surplus electricity (MefCO ₂ (CO ₂ 에서의 메탄올 연료) - 잉여 전기를 이용한 포획된 이산화탄소의 메탄올 합성)/ (U of renewable, SPIRE02-2014)
OCEAN (2017.10~2021.09)	Oxalic acid from CO ₂ using Electrochemistry at demonstratiON scale (시연 척도에서의 전기화학 사용 CO ₂ 의 옥살산)/(Electrochemical solution, SPIRE10-2017)

* 출처: 저자정리

2. 유럽 개별 국가별 CCU 정책 및 기술개발 현황

2.1. 독일

독일은 CCU 분야에 대한 연구가 가장 활발히 수행된 국가 중 하나이다. 독일정부가 발간한 '2050 기후행동계획 (Climate Action Plan 2050)'에서 독일은 2030년까지 약 56~55%의 CO₂를 저감한다고 명시하고 있으며, 2050년에는 EU에서 결정한 감축계획을 이행하는 것으로 계획을 수립하였다. 독일 CCU 분야의 연구는 주로 독일 연방교육연구부에서 2009년부터 연구 과제를 기획하고 실행하여 왔고 2016년부터 대형 CCU 프로젝트를 수행해 왔다. 그리고 2010년부터 2014년까지 150백만 유로(교육부 100백만 유로, 민간 50백만 유로)의 대형 프로젝트를 산학연 체계로 12개의 전환연구를 수행하였으며 그 목록은 <표 4>와 같다.

표 4. 전환연구 목록

연구명	내용/업체명
Dream Production	이산화탄소와 polyol촉매반응에 의한 상용규모 폴리우레탄 합성공정/ Bayer
CO ₂ 기반 고분자합성	이산화탄소 기반 PE-PU 고분자합성 촉매 개발/ BASF
Neue Organokatalysatoren fuer die stoffliche Nutzung von CO ₂	폴리카보네이트 합성 촉매 개발/ Bayer
CO ₂ Reaction using Regenerative Energies and Catalytic Technology	전기화학적으로 CO 및 포름산을 제조하고 이로부터 폴리카보네이트를 제조하는 기술/ Bayer, Simens
Development of active & selective hetero-photocatalysis for CO ₂ reduction	이산화탄소 수소화반응에 의한 메탄 또는 메탄올 합성/ Bochum University
Energieeffiziente Synthese von aliphatischen Aldehyden aus CO ₂	올레핀기반 지방족 알데히드 제조시 일산화탄소 원료를 이산화탄소로 대체/ Degussa
H ₂ O Elektrolyse und Synthese von Gaskomponenten:	신재생에너지전력 사용 수소생산 및 메탄화 공정개발/ KIT
CO ₂ 기반 나트릴아크릴산제조 촉매개발(BASF)	에틸렌의 카복실레이션에 의한 나트릴아크릴산 제조 촉매개발/ BASF
iC4	이산화탄소 수소화 메탄가스 제조기술/ WACKER, LINDE
CO ₂ basierte Acetonfermentation	생물학적 발효에 의한 아세톤제조 기술개발/ Evonik Industries
Solar-thermochemische Erzeugung Chemischer Produkte aus H ₂ O und CO ₂	태양로(solar furnace)에서 태양열로 금속산화물의 산화환원반응에 의한 일산화탄소 제조기술개발/ BASF
Integrierte Dimethylethersynthese aus Methan und CO ₂	이산화탄소의 메탄개질에 의한 디메틸에테르(DME, Dimethyl Ether) 제조기술 개발

* 출처: 저자정리

프로젝트 성과 중 한 사례로, 'Dream Production' 프로젝트를 통해 개발된 기술을 사용하여 2016년에 Covestro社가 세계 최초로 CO₂ 기반 폼 매트리스를 생산하였다. 원료는 CO₂ 기반의 폴리올(polyol)로부터 제조한 폴리우레탄(cardyon)으로 기존 공법에 의한 폴리우레탄 대비 약 20%의 이산화탄소 절감효과가 있는 것으로 평가되고 있다.

한편, 'CO2Plus'(2016~2019, 1천 5백만 유로) 과제가 수행되었다. 해당 과제는 화학제품 제조에 대한 프로젝트 4개, 전기화학적 이산화탄소 전환 관련 프로젝트 5개, 분리기술에 대한 프로젝트 3개로 구분되어 있으며 주요 프로젝트는 아래와 같다.

표 5. CO2Plus 과제의 주요 프로젝트

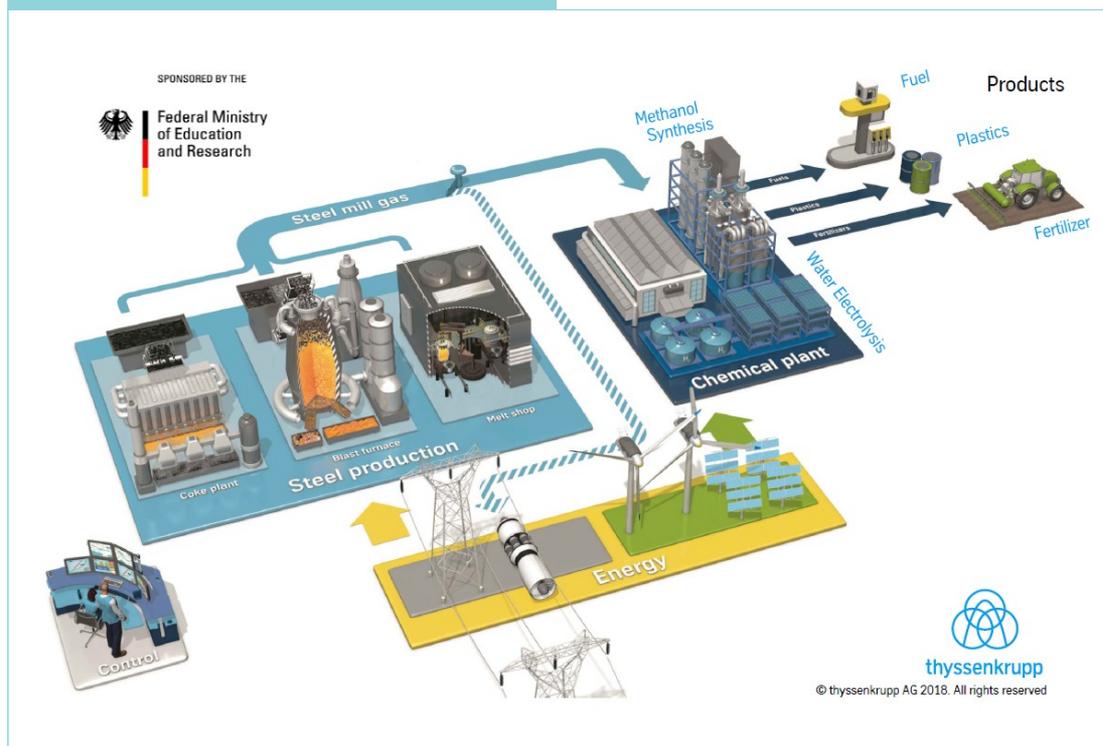
프로젝트 명	내용
CO2Form	메탄올, 포름알데히드 제조, 폴리우레탄 및 리피드 제조를 목적으로 4개의 과제가 수행되고 있으며, 아세탈폼을 경유한 포름알데히드가 이산화탄소의 저감 측면에서 시장성이 큰 제품으로 중요한 기술로 평가됨
DreamResources	'Dream Production' 프로젝트에서 개발한 폴리올 생산기술을 기반으로 다양한 응용소재 제품을 개발하는 프로젝트
PROPHOCY	직접 광전환에 의해 고부가 제품을 제조하는 인공광합성기술
CO2Lubricants	미세조류로부터 윤활기유를 제조하는 기술로 LCA는 nova-institute가 수행 중
BioElectroPlas	배가스 CO ₂ 로부터 DET 가능 미생물을 활용한 바이오 플라스틱 제조기술
MIKE	잉여전력을 이용하여 이산화탄소를 수소화하여 메탄을 제조하는 기술
CarbonCat	동시 광전환 및 이산화탄소전환에 의해 화학제품을 제조하는 인공광합성기술
eEthylene	이산화탄소의 수소화 반응에 의해 에틸렌을 제조하는 기술개발 과제이며 LCA는 참여기업이 수행 중
CO2Selekt	산업시설에서 배출되는 배가스에 함유된 이산화탄소를 분리하는 기술

* 출처: 저자정리

이 외에도 'r+Impuls' 프로젝트(2016~2019, 1천 9백만 유로)에는 기업주도로 수행되는 이산화탄소 전환기술이 포함되며 전 과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment), 기술 경제성 평가(TEA, Techno-Economic Assessment)도 포함된다. 또한, 'CO₂ in fuels-sunfire' 프로젝트는 2014년부터 sunfire社에 의해 수행된 프로젝트로 다양한 합성유, 메탄올 등을 제조 가능한 고온 공전해 기술 기반의 합성가스 제조기술을 개발한다. 그리고 'E-Gas' 프로젝트는 2016년 Audi社가 전기화학적 CO₂ 전환기술을 활용하여 가솔린 및 디젤을 제조하는 기술개발에 착수한 것으로 2018년 이 기술에 의해 제조된 가솔린을 e-benzene으로 명명하였다. 해당 기술은

직접 CO₂를 전기화학적으로 전환하기보다는 전기화학적 수소생산 기술을 기반으로 역수성 가스시스템에 의해 기존의 C1전환기술을 활용하여 가솔린을 제조하는 시스템을 구축하였다. 이는 수소 자동차도 동시에 염두에 두고 미래의 시장을 지향하는 기반을 구축한 것으로 판단된다. ‘Carbon2Chem’ 프로젝트(2016~2020, 6천만 유로)는 제철소에서 발생하는 부생가스 및 전기화학기술에 의한 전환기술로 연료를 제조하는 프로젝트이다.

그림 3. Carbon2Chem 프로젝트의 개략도



* 출처: BusinessEurope 사이트

독일은 다양한 CCU 사업들 중 이산화탄소 무배출(CO₂-free) 재생에너지를 확충하고 있으며, 이를 활용한 전기화학적 화학제품 및 수송연료에 대한 정부는 물론 기업의 관심이 크다. 아래의 지도(그림 4) 참고)는 독일지역 내의 전기화학적 CO₂ 전환기술을 수행하는 프로젝트의 맵이다.

그림 4. 독일지역 내의 전기화학적 CO₂ 전환기술 프로젝트 맵



* 출처: BusinessEurope 사이트

대표적인 전기화학 기반 CCU 과제로 ‘코페르니쿠스 프로젝트(Kopernikus Project)’(2016~2025, 4억 유로)가 있으며, 해당 프로젝트는 CO₂ free 신재생에너지 기반 전기화학적 CO₂ 전환기술로 실증화 핵심기술개발과제로 구성되어 있다. 구체적 내용은 다음의 <표 6>과 같다.

표 6. Kopernikus Project의 내용

과제명	내용
ENSURE	새로운 최적 에너지믹스 전기공급망 구축
P2X	전기화학적 이산화탄소 전환기술개발
SynErgie	신재생에너지의 안정적인 공급망 구축
ENavi	LCA/TEA 및 사회적 수용성 등 정책에 대한 전망 등을 수행

* 출처: 저자정리

‘레티쿠스 프로젝트(Rheticus Project)’는 ‘Kopernikus Project’로부터 파생(spun-off)되어 수행되는 프로젝트로 헥사놀(hexanol) 및 부탄올(butanol)을 제조하는 기술개발 과제이다. 그리고 ‘PICK Project’는 ‘Kopernikus Project’의 연계 프로젝트로 플라즈마에너지에 의해 이산화탄소를 일산화탄소와 산소로 전환하는 기술개발 과제이다.

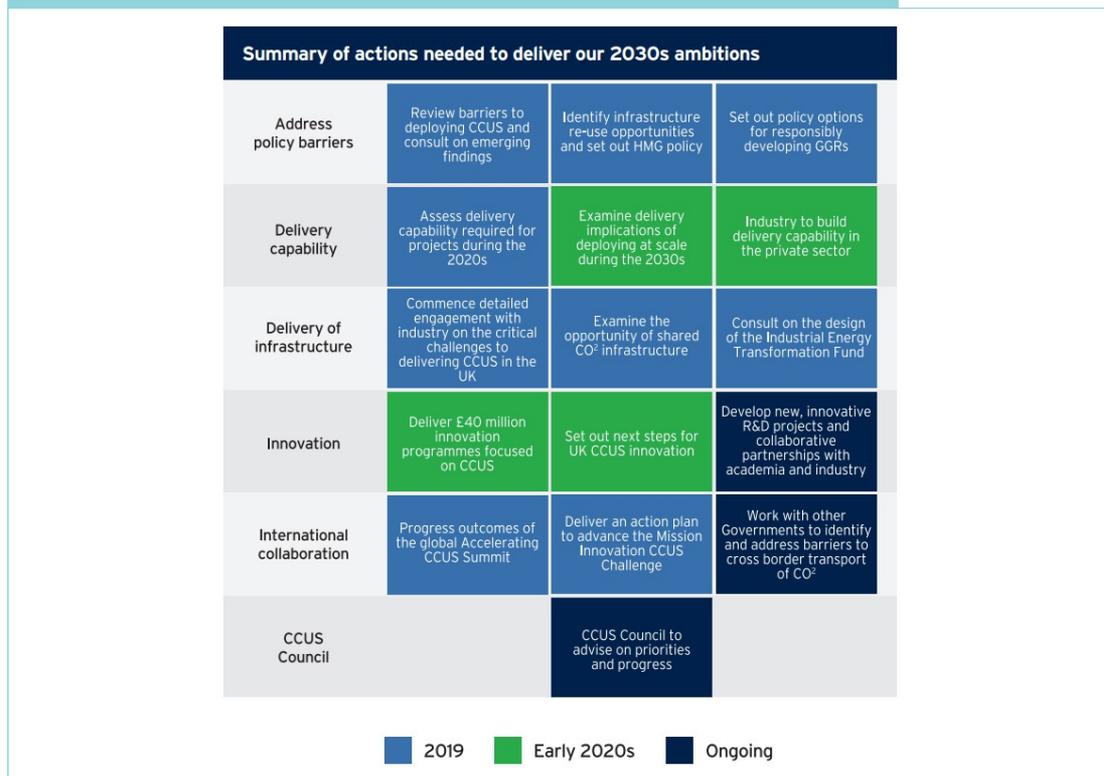
2.2. 기타 유럽국가

영국의 COP21 파리협정 대응계획은 ‘청정성장 전략(Clean Growth Strategy)’(2017년)에 보고되었다. 영국은 CCUS 기술과 관련하여 산업부문에 중점을 두고 있으며 경제성을 보다 우선시하는 특징을 보인다. 또한, 영국은 CCU 기술을 이산화탄소 저감은 물론 미래시장 창출을 위한 산업화 기술로 보고 있으며, ‘산업적 전략(Industrial Strategy)’ 하에 ‘영국 CCUS 실행계획(UK CCUS action plan)’에서 다음과 같은 비전과 계획을 제시하였다. 구체적 내용은 아래와 같다.

표 7. UK CCUS 실행계획의 비전 및 계획

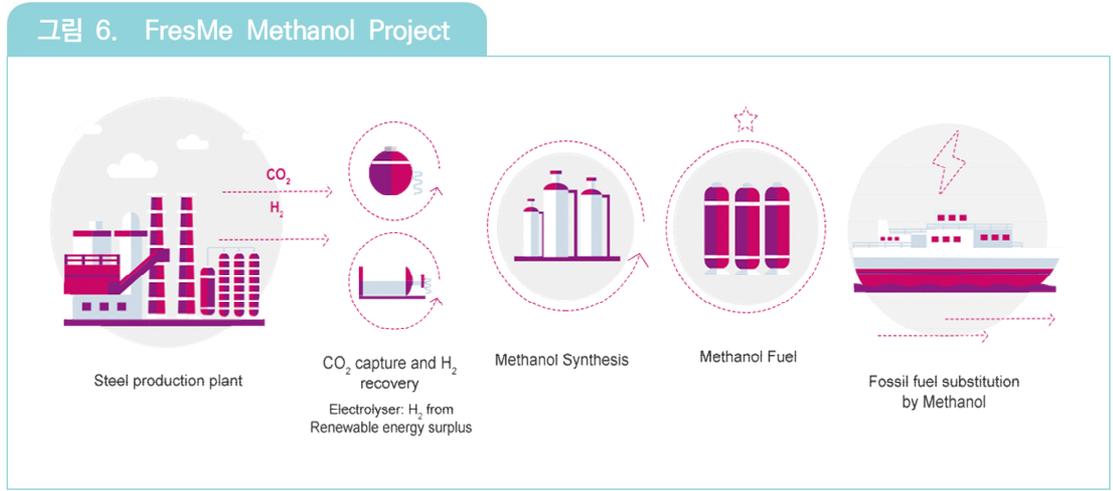
구분	내용
비전	CCUS의 글로벌 리더(a global leader in CCUS)
계획	2020년도 중반에 영국에 첫 CCUS 설비(4천만 파운드)를 구축하도록 설계하고 2030년에 비용이 효과적으로 저감되는 상업화된 CCUS 기술을 개발하는 ‘야심찬 계획’을 만족시키도록 함

그림 5. 영국 2030년대 상용화 CCUS 설비구축계획(4천만 파운드 규모)



* 출처: BusinessEurope 사이트

한편, 'FesMe project'(2016~2020)는 제철소 부생가스에서 배출되는 이산화탄소 및 수소를 분리해서 메탄올을 합성하는 기술을 개발하는, 'Horizon 2020'에서 지원을 받는 프로젝트로 네덜란드가 주도하여 개발 중에 있다.



* 출처: FreSMe 사이트

'VoltaChem' 프로그램은 네덜란드에서 수행하는 'Power to X' 프로그램으로 'Kopernikus project'와 동일하게 네 개의 세부 프로그램(Integrate, Heat, Hydrogen, Chemicals)으로 진행된다. 연료, 비료 및 플라스틱 제조기술 개발을 위한 프로젝트로 TRL 3~5에서 시작하여 TRL 5~7을 목표로 한다.

3. 미국의 COP21 파리협정 대응 CCU 정책 및 R&D 프로젝트

3.1. 미국의 정책 동향

미국은 트럼프 대통령이 취임한 후 COP21 파리협정을 탈퇴하여 신 기후변화체제에 대응하기 위한 프로그램을 명시적으로 제시하고 있지 않으나 미국 에너지부(DOE, Department of Energy) 및 각 주정부는 이산화탄소 포집, 활용, 저장(CCUS) 기술에 대한 투자계획을 큰 변화 없이 유지하고 있다. 트럼프 이후 들어선 바이든 정부에서는 재생에너지의 확대 및 CCUS에 대한 관심과 투자가 확대되고 있다. 미국은 주로 이산화탄소 포집 및 저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 기술개발에 주력하였으나 2011년부터 '이산화탄소 활용 및 재활용(Carbon Use and Reuse)'의 개념으로 기업주도로 CCU 기술의 실증화 위주의 개발을 수행해 오고 있다. DOE는 2016년 CCUS 백서를 발간하고 연구, 개발, 실증, 확산(RDD&D, Research, Development, Demonstration, Deployment)의 지속적인 추진이 필요하다고 강조하였다. 미국의 25개주는 기후변화에 대응하기 위한 '미국기후동맹(United States Climate Alliance)'을 결성하였다. 각 주는 파리협정의 목표에 부응하도록 온실가스를 적어도 2025년까지 2005년 수준의 26~28% 이하로 줄일 수 있도록 정책을 추진하고 있다. 또한 파리협정에 부응하여 이러한 감축노력을 추적하고 보고하도록 하며 온실가스 감축을 위한 노력을 가속화 하였다. 예를 들어 하와이 주는 2017년 미국 최초로 파리협정이행을 위한 법안을 제정하였다.

그리고 미국은 2008년 CCS 프로젝트를 통한 포집 설비건설 및 운영을 장려하기 위해 세액 공제(tax credit)를 제정하고 세액 공제 대상으로 CO₂ 이외에도 일산화탄소(CO)를 추가하였으며, 특히 2018년 CCU 프로젝트에 대한 세액 공제를 확대하였다. 미 북동부 9개 주정부는 의무적인 시장기반 배출권 거래제인 '지역 온실가스 감축 이니셔티브(RGGI, The Regional Greenhouse Gas Initiative)'에 참여하였다. 2014년 RGGI 허용배출 총량(Cap)은 9천백 만 톤이었으나 매년 2.5%씩 줄어들고 있다. 캘리포니아 주는 발전사와 제조분야, 정유 등 탄소배출 산업계를 대상으로 독자적인 배출권 거래제를 시행하고 있다.

미국은 이산화탄소 저감을 목표로 하는 것 보다는 미래시장 창출을 위해 실용화가 가능한 CCU 기술개발 중심으로 기업의 수요에 부응하여 프로젝트가 수행되었다. 혁신적인 CCU 기술은 미국 국립과학재단(NSF, National Science Foundation) 또는 에너지 첨단연구 프로젝트 기관(ARPA-E, Advanced Research Projects Agency-Energy) 프로그램을 통해서 기술개발을 추진해 오고 있다. 2020년 4월 미국은 1억 3천 백만 달러 규모의 CCUS R&D 프로그램에 투자하기로 하였다.

3.2. 미국의 CCU R&D 프로젝트

3.2.1. DOE 주요 CCU 프로젝트

2010년 DOE에서는 3년간 다음의 6개의 기술을 이산화탄소 전환 기술로 선정하여 산업계에서 배출되는 이산화탄소로부터 연료, 플라스틱, 시멘트 및 비료를 제조하는 실증단계의 기술개발을 추진하였다. 구체적인 내용은 아래와 같다.

연번	기술	기관명
1	• 효소(carbonic anhydrase)를 사용해서 이산화탄소로부터 중탄산이나 탄산을 제조하고, 알루미늄공장의 부산물인 Clay와 반응하여 고체무기탄산 또는 비료를 제조하는 기술(DOE Share: 11,999,359 달러)	Alcoa, Inc. (Alcoa Center, Pa.)
2	• 프로필렌 옥사이드와 이산화탄소와 반응하여 열가소성 폴리카보네이트 고분자를 합성하는 기술로 이산화탄소의 함유량이 50% 수준(DOE Share: 18,417,989 달러) • 2016년 Novomer社は 폴리카보네이트 합성 및 연관기술을 사우디 아람코(Aramco)社에 1억 달러에 기술이전 - 1억 달러	Novomer Inc. (Ithaca, N.Y.)
3	• 조류의 최적배양조건수립하고, 배양된 미세조류로부터 추출된 리피드로부터 연료를 생산하고 남은 바이오매스로부터 메탄을 제조하는 기술(DOE Share: 6,239,542 달러)	Touchstone Research Laboratory Ltd. (Triadelphia, W. Va.)
4	• 미세조류로부터 액상연료(crude liquid fuel)를 제조하고 이를 사용하는 연료에 맞는 물리적 특성을 갖도록 섞어 제트유나 바이오디젤로 사용하는 기술(DOE Share: 24,243,509 달러)	Phycal, LLC (Highland Heights, Ohio)
5	• Chloroalkali 전해기술과 연료전지기술을 병합하여 저 에너지로 소다를 제조하는 기술(DOE Share: 25,000,000 달러), 현재, 벤처기업으로 운영 중	Skyonic Corporation (Austin, Texas)
6	• 저에너지의 전해조 기반으로 시멘트 원료인 탄산칼슘을 제조하는 공정(DOE Share: 19,895,553 달러)	Calera Corporation (Los Gatos, Calif.)

* 출처: 저자정리

2014년 이후 DOE에서는 개별 프로그램으로 후속 CCU 기술개발을 수행하였으며, 현재까지 2년 단위로 28개의 CCU 프로젝트를 수행해오고 있다(35백만 7천 달러). 28개의 CCU 프로젝트들은 광물화 과제 6개, 화학적 전환과제 8개, 생물학적 전환과제 5개, 고분자 합성과제 1개 및 전기화학적 전환과제 9개로 구성되어 있다.

표 9. DOE의 28가지 CCU 프로젝트

과제명	수행기관	예산(달러)	시작일	상태
Tailoring Cementitious Materials Towards Value-Added Use of Large CO ₂ Volumes (대량 CO ₂ 의 부가가치 사용을 위한 시멘트 재료 조정)	Metna Company (Mineralization)	2,138,827	2014/06/09	종료
Conversion of CO ₂ to Alkyl Carbonates Using Ethylene Oxide as Feedstock (에틸렌 옥사이드를 공급원료로 사용하여 CO ₂ 를 알킬 카보네이트로 전환)	E3TEC Service, LLC (polymer)	2,140,781	2015/02/17	종료
Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Useful Chemical Intermediates(biofuel) (유용한 화학 중간체로 이산화탄소의 전기화학적 환원)	Mainstream Engineering Corporation	1,154,381	2017/02/21	진행 중
Novel Algae Technology for CO ₂ Utilization (CO ₂ 활용을 위한 새로운 조류 기술)	Helios-NRG, LLC	1,164,536	2017/02/21	진행 중
Electrochemical Conversion of Carbon Dioxide to Alcohols (이산화탄소의 알코올로의 전기화학적 전환)	University of Delaware	1,000,000	2017/04/01	진행 중
Upcycled CO ₂ -Negative Concrete for Construction Functions (건설 기능을 위한 업사이클링된 CO ₂ -음성 콘크리트)	University of California - Los Angeles	1,349,999	2017/04/01	진행 중
High Energy Systems for Transforming CO ₂ to Valuable Products(DryRef) (CO ₂ 를 가치 있는 제품으로 전환하기 위한 고에너지 시스템)	Gas Technology Institute(GTI)	1,005,998	2017/05/01	진행 중
Beneficial Re-Use of Carbon Emissions from Coal-Fired Power Plants using Microalgae (미세조류를 이용한 석탄화력발전소 탄소배출량의 유익한 재사용)	University of Kentucky Research Foundation	1,258,462	2017/06/01	진행 중
Nano Engineered Catalyst Supported on Ceramic Hollow Fibers for the Utilization of CO ₂ in Dry Reforming to Produce Syngas (합성 가스를 생산하기 위한 건식 개질에서 CO ₂ 의 활용을 위해 세라믹 중공 섬유에 지지된 나노 공학 촉매)	Gas Technology Institute (GTI)	999,797	2017/07/01	진행 중
A Combined Biological and Chemical Flue Gas Utilization System towards Carbon Dioxide Capture(Biopolyol) (이산화탄소 포집을 위한 결합된 생물학적 및 화학적 연도 가스 활용 시스템)	Michigan State University	1,268,990	2017/10/01	진행 중
CO ₂ Mineralization Using Porous Carbon and Industrial Wastes to Make Multifunctional Concrete (다공질 탄소 및 산업폐기물을 이용한 CO ₂ 광물화를 통한 다기능 콘크리트 제조)	C-Crete Technologies, LLC	1,250,000	2017/10/01	진행 중

과제명	수행기관	예산(달러)	시작일	상태
Improving the Economic Viability of Biological Utilization of Coal Power Plant CO ₂ by Improved Algae Productivity and Integration with Wastewater (조류 생산성 향상 및 폐수 통합을 통한 석탄 발전소 CO ₂ 생물학적 이용의 경제성 향상)	University of Illinois	1,249,874	2017/10/01	진행 중
Novel Catalysts Process Technology for Utilization of CO ₂ for Acrylonitrile Production (아크릴로니트릴 생산을 위한 CO ₂ 활용을 위한 새로운 촉매 공정 기술)	Research Triangle Institute(RTI)	1,000,000	2017/10/01	진행 중
Storing CO ₂ in Built Infrastructure: CO ₂ Carbonation of Precast Concrete Products (건설 기반 시설에 CO ₂ 저장: 프리캐스트 콘크리트 제품의 CO ₂ 탄산화)	University of Michigan	1,249,999	2017/10/01	진행 중
A Scalable Process for Upcycling Carbon Dioxide(CO ₂) and Coal Combustion Residues Into Construction Products (이산화탄소(CO ₂) 및 석탄 연소 잔류물을 건설 제품으로 재활용하기 위한 확장 가능한 프로세스)	University of California - Los Angeles	2,260,265	2019/01/01	진행 중
An Intensified Electro-Catalytic Process for Production of Formic Acid from Power Plant CO ₂ Emissions (발전소 CO ₂ 배출로 인한 개미산 생산을 위한 강화된 전기 촉매 공정)	University of Kentucky	1,001,964	2019/01/01	진행 중
Beneficial use of CO ₂ from Coal-Fired Power Plants for Production of Animal Feeds (동물 사료 생산을 위한 석탄 화력 발전소의 CO ₂ 활용)	MicroBio Engineering	1,811,009	2019/01/01	진행 중
Design of Transition-Metal/Zeolite Catalysts tor Direct Conversion of Coal-Derived Carbon Dioxide to Aromatics (석탄에서 파생된 이산화탄소를 방향족으로 직접 전환하기 위한 전이금속/제올라이트 촉매 설계)	Georgia Tech Research Corporation	1,035,118	2019/01/01	진행 중
Novel Modular Electrocatalytic Processing for Simultaneous Conversion of Carbon Dioxide and Wet Shale Gas into Valuable Products (이산화탄소와 습한 셰일 가스를 가치 있는 제품으로 동시에 전환하기 위한 새로운 모듈식 전기 촉매 처리)	Ohio University	1,000,000	2019/01/01	진행 중
Unique Nanotechnology Converts Carbon Dioxide to Valuable Products (독특한 나노기술로 이산화탄소를 가치 있는 제품으로 전환)	West Virginia University Research Corporation	1,018,205	2019/01/01	진행 중
CO ₂ to Fuels Through Novel Electrochemical Catalysis (새로운 전기화학적 촉매를 통한 연료로의 CO ₂)	Colorado School of Mines	812,948	2019/01/03	진행 중

과제명	수행기관	예산(달러)	시작일	상태
Novel Process for CO ₂ Conversion to Fuel (Methane Stream Reforming) (CO ₂ 를 연료로 전환하는 새로운 프로세스)	TDA Research, Inc.	1,000,000	2019/01/10	진행 중
Electrochemical Conversion of CO ₂ from Coal into Fuels and Chemicals Using a Modified PEM Electrolyzer (수정된 PEM 전해조를 사용하여 석탄에서 연료 및 화학 물질로 CO ₂ 의 전기화학적 변환)	Opus 12, Inc.	1,000,000	2019/01/25	진행 중
Selective and Efficient Electrochemical Production of Neat Formic Acid from Carbon Dioxide Using Novel Platinum Group Metals-Free Catalysts (새로운 백금족 금속이 없는 촉매를 사용하여 이산화탄소로부터 순수 포름산의 선택적이고 효율적인 전기화학 생산)	University Of Iowa	931,662	2019/01/29	진행 중
Field Scale Testing of the Thermocatalytic Ethylene Production Process Using Ethane and Actual Coal Fired Flue Gas CO ₂ (에탄 및 실제 석탄 연소 배가스 CO ₂ 를 사용한 열촉매 에틸렌 생산 공정의 현장 규모 테스트)	Southern Research Institute	1,874,900	2019/02/01	진행 중
Carbon Dioxide and Renewable Electricity into Chemicals: Chemical Production from Coal Flue Gas (이산화탄소와 재생 가능한 전기를 화학 물질로 전환: 석탄 연도 가스에서 화학 물질 생산)	Dioxide Materials, Inc.	1,002,653	2019/02/15	진행 중
Synthetic Calcium Carbonate Production by Carbon Dioxide (CO ₂) Mineralization of Industrial Waste Brines (이산화탄소(CO ₂) 산업 폐기물 염수의 광물화에 의한 합성 탄산칼슘 생산)	University of Wisconsin	999,993	2019/02/15	진행 중
Novel Algae Technology to Utilize Carbon Dioxide for Value-Added Products (부가가치 제품에 이산화탄소를 활용하는 새로운 조류 기술)	Helios-NRG, LLC	1,734,588	2019/05/01	진행 중

* 출처: 저자정리

4. 캐나다의 COP21 파리협정 대응 CCU 정책 및 R&D 프로젝트

캐나다는 COP21 파리협정 이후 CCUS 기술이 온실가스 저감을 위한 중요한 기술로 인식되면서 2015년 앨버타의 기후변화 및 배출관리공단(CCEMC, Climate Change and Emissions Management Cooperation)은 캐나다에서 처음으로 기후변화 추진을 위한 기후변화 및 배출 관리법(CCEM Act, Climate Change and Emissions Management Act)을 제정하였다. CCEM Act에 앨버타 지역의 온실가스 저감 목표를 명시하였으며 구체적 내용은 다음과 같다.

- 온실가스 저감 목표 달성을 위한 프레임워크(framework)를 구성한다.
- CCEM Act에 따라서 이 지역의 기업은 공정효율화, 또는 앨버타 탄소배출권 구매 또는 기후변화에 기여하는 방법을 통해 온실가스 저감 목표를 달성해야한다.

또한, 브리티시콜롬비아(British Columbia) 주는 2008년 톤당 10 CAD의 탄소세를 도입하였고 2019년에는 톤당 CAD 30으로 연방정부보다 높은 탄소세를 부과하였다. 이후 연방정부에서는 2018년 온실가스 오염 부담금법(GHGPPA, Greenhouse Gas Pollution Pricing Act)을 제정하고, 2019년부터 중일적 탄소세를 시행하였다.

캐나다는 주로 CCS 기술에 대한 투자를 지속적으로 수행해 왔고 7개의 CCS 설비를 구축하였는데 포집설비는 석유회수증진(EOR, Enhanced Oil Recovery)에 주입하도록 설계가 되었다. 캐나다의 이용기술은 광물화 관련 연구가 주를 이루고 있고, CCU 기술개발은 주로 국제공동연구 형태로 수행되고 있다. ‘Grand Challenge 과제’를 통해 국제경쟁모집으로 2017년 각 기술에 대해서 3백만 달러를 지원하였으며, 2019년 앨버타 지역에서 상용화하도록 천만 달러를 추가로 지원하였다. 현재 경쟁 중인 프로젝트 4개가 아래의 <표 10>에 구체적으로 언급되어 있다.

표 10. Grand Challenge 과제의 프로젝트

프로젝트 명	수행기관
Mineralization(광물화)	Solidia Technologies
Carbon dioxide Utilization in concrete(콘크리트에서의 이산화탄소 이용에 관한 연구)	CarbonCure technologies
A technology for conversion of CO2 and saline waste water to oil and gas field chemicals and reuseable water (CO2 및 염수 폐수를 유전 및 가스전 화학물질 및 재사용 가능한 물로 변환하는 기술)	Mangrove Water Technologies
Field-depolyment of a carbon dioxide transformation system powered by sunlight (태양광발전 이산화탄소 변환시스템의 현장배치)	McGill University

* 출처: 저자정리

또한, 캐나다의 오일샌드 혁신 연합(COSIA, Canada's Oil Sands Innovation Alliance) 역시 ‘Carbon XPRIZE’라는 국제 경쟁을 통해 전환과제를 발굴하고 있으며, 현재 ‘Carbon XPRIZE’를 통해 4개의 과제가 경쟁 중이다.

5. 일본의 COP21 파리협정 대응 CCU 정책 및 기술 동향

5.1. 정책 동향

일본 하원은 2010년 ‘발전차액지원제도(FTT, Feed in Tariffs)와 탄소세, 탄소배출거래제도(ETS, Emission Reading System) 관련 내용이 포함된 ‘지구온난화대책기본법(Basic Act on Global Warming Countermeasures)’을 통과시켰다. 그러나, 2011년 일본 대지진이 발생하면서, 12월 11일 ETS는 폐지되었다. 이후 2012년 화석연료의 모든 소비자를 대상으로 하는 지구온난화대책세(환경세)를 도입하였으며, 이는 CO₂ 톤당 289엔으로써, 3년 6개월에 걸쳐 점차 인상되었다. 당면한 지구온난화 대책에 관한 방침(지구온난화대책추진본부, 2013년) 결정 후, 에너지-환경 이노베이션 전략(중합과학기술혁신회의, 2016년), 지구온난화대책계획(각의 결정, 2016년) 등을 수립하였다.

2017년 4월 일본의 지구온난화 대책의 진행 방향을 모색한 장기 지구 온난화 대책 플랫폼 보고서를 발표하였다. 지속 가능한 발전을 대목표로 설정하고, 이를 실현하기 위하여 국제 공헌-글로벌 벨류체인-이노베이션을 위한 이산화탄소 중립이라는 3개의 전략을 제시하였다. 최근 일본 경제 단체연합회는 2015년에 작성한 2030년을 향한 일본 경제 단체연합회의 저탄소 사회 실행계획을 개정하고, 혁신적 기술 개발을 계획의 주축 중 하나로 추진하여 혁신기술 개발 및 실용화를 도모하였다.

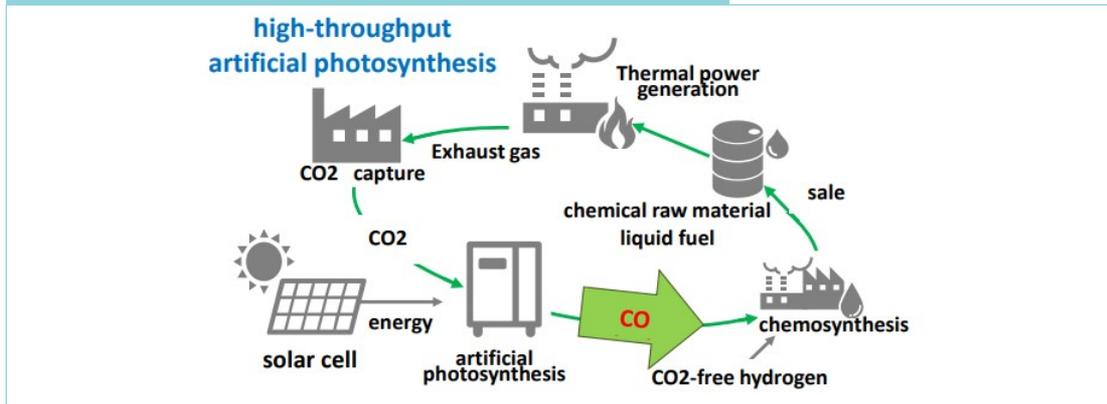
5.2. 기술 동향

2050년을 목표로 온실가스 감축기술 개발의 방향성을 규정한 ‘에너지-환경 이노베이션 전략(2016년 2월)에서 CCU 등 8대 분야를 선정하고 향후 중점 투자계획을 수립하였다. Mitsui Chemical社가 대표적인 CCU 기술개발 기업으로 석유화학산업에서 배출된 100톤/년의 CO₂를 포집, 불균일 촉매 이용 수소화 반응을 통해 메탄올을 생산하는 플랜트를 보유하고 있다. 또한, 세계적으로 경쟁력 확보가 가능한 태양전지를 이용한 물 분해 기술과 광촉매를 활용한 인공광합성 기술개발이 진행 중이다. 산업기술종합연구소(AIST, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)의 바이오매스연구센터에서는 바이오 슈거 대량생산 기술 확보를 위한 국가 차원의 플랜트 실증 및 분산형 발전체계를 위한 바이오 연료 기술을 개발 중이다.

또한, 일본 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO, New Energy and Industrial Technology Development Organization), 일본 환경부(MOEJ, Ministry of the Environment, Japan) 등의 지원으로

친환경 화학물질 개발 및 혁신적 차세대 연료 상용화 연구를 추진하였다. Asahi社は 2018년부터 2022년까지 CO₂, 산화 에틸렌(ethylene oxide), 비스페놀(bisphenol-A)로부터 폴리카보네이트(polycarbonate) 및 에틸렌 글라이콜(monoethylene glycol)을 생산하기 위한 연구를 진행 중이다. Mitsui Chemical社の 주도로 태양광 이용 수소 제조공정 개발 및 CO₂를 플라스틱 원료 등 핵심 화학물질로 전환하는 자원화 공정 기술개발을 추진 중이며, Toshiba社도 2022년까지 화력발전소에서 배출되는 CO₂를 기반으로 한 인공광합성 기술을 이용한 CO 전환연구를 진행 중이다.

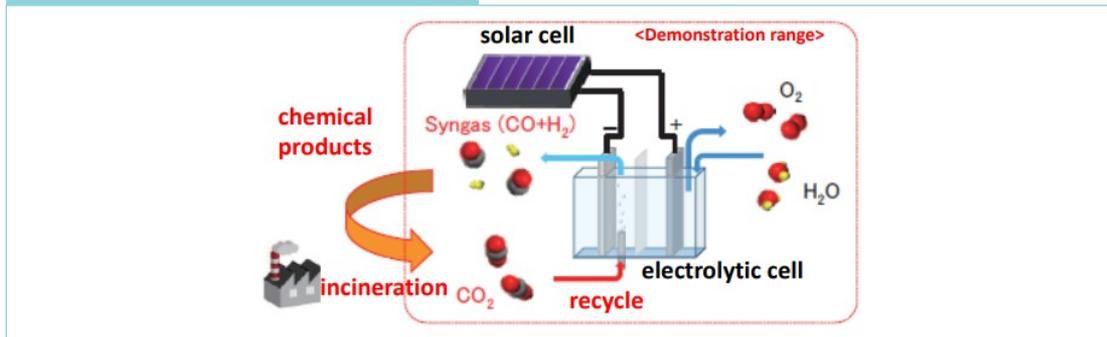
그림 7. Toshiba社の CO₂ 전환 CO 생산 플랜트 모식도



* 출처: Aizawa(2019)

또한, Toyota社は 2022년까지 천연가스 유래 합성가스 대체를 목표로 상온-상압에서 CO₂와 물을 원료로 합성가스를 생산하는 탄소 순환 모델 실증을 추진하고 있다.

그림 8. Toyota社の 탄소 순환 모델



* 출처: Aizawa(2019)

2017년 신규 R&D 사업인 '미래사회창조사업'의 주요 영역으로 '저탄소 사회 실현' 과제가 선정되었다. 동 사업은 초스마트 사회 실현, 지속 가능한 사회 실현, 세계 제일의 안전-안심 사회 실현, 전 세계의 문제인 저탄소 사회 실현 등 총 4개 영역으로 구성되었다. 동 사업의 기술 분야 중 CO₂ 고정화 유효 이용 분야에 미세조류, 바이오매스 생산성 향상 등 CO₂ 이용 생물학적 전환 과제가 포함된다.

6. 중국의 COP21 파리협정 대응 CCU 정책 및 기술 동향

6.1. 정책 동향

중국은 유럽연합과 연대하여 미국에 대응할 구체적 명분 확보에 주력하는 한편, 약점 기술 역량을 확보하기 위한 실리 추구 전략을 병행하였다. '중공중앙 국민경제사회발전 제13차 5개년 계획(13.5 계획)'으로 녹색발전을 천명한 이후, 후속 계획을 통해 신재생에너지 개발 등 온실가스 감축을 위하여 적극적으로 노력 중이다. '중국 기후 변화 남남 협력 기금'(2015년) 조성 및 '십백천(十百千) 프로젝트'(2016년) 추진을 선언하는 등 개도국에 대한 국제협력을 강화하였으며 개발도상국에서 저탄소 시범구 10곳, 기후변화 적응 및 감축 프로젝트 100개, 기후변화대응 인력 1,000명을 양성하기 위한 협력 프로젝트를 추진하였다. 또한, 중국 정부는 2011년부터 상하이, 선전 등 몇 개 도시에서 시범적으로 배출권 거래제를 시행하고, 이후 2013년부터 7개 지역에서 ETS 시행을 시작하였다. 2017년 말부터 전국적으로 발전소, 시멘트, 알루미늄 등 3개 산업에 적용되는 ETS 시행을 발표하였고 2020년까지 철강, 항공 등 8개 탄소 과다배출산업들로 점차 확대하였다. ETS의 단점을 보완하고 에너지 소비 구조 개선을 위한 탄소세 제도 병행을 고려 중이다.

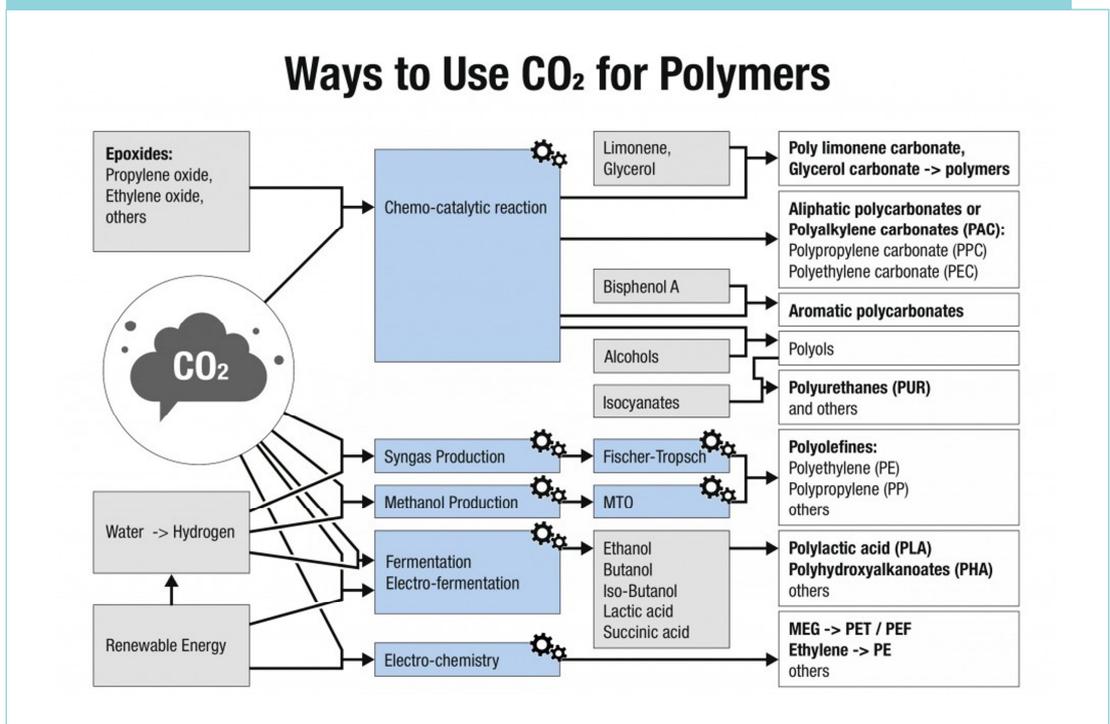
6.2. 기술 동향

중국은 2013년 과학기술부 주도로 CCUS 기술개발을 위한 특별 계획을 마련한 바 있으며 2015년 발표한 '제 13차 국가 온실가스 저감 5개년(2016~2020) 계획'에서 중기 감축 목표 달성을 위한 방안으로 CCUS를 강조하였다.

2008년부터 2010년까지 추진된 중국의 국가 첨단기술 R&D 프로그램('863' Program)에 300만 위안(500억 원)의 예산을 투입하여 CCU 기술, 미세조류 관련 연구를 집중 추진하였다. ENN 그룹은 미세조류 바이오 연료 전환 파일럿 플랜트를 건설하고 실증하였으며 중국 상하이의 SARI(Shanghai Advanced Research Institute)에서는 CO₂ 기반의 플라스틱 및 연료 생산 관련 CCU 기술 개발을 추진하였다. 이 뿐만 아니라, 화학 촉매 이용 CO₂의 에틸렌(ethylene) 전환 및 아크릴산염(acrylate) 생산연구와 전기화학 촉매를

이용한 포름산 전환 연구가 추진되었다. 또한, 중국은 감축 잠재량이 큰 CO₂ 기반 고분자 생산 기술 연구에 집중하고 있다. 중국의 Jiangsu Zhongke Jinlong Chemical社는 CO₂ 기반 고분자 수요 생산기업 중 하나로 연간 2만 톤 규모로 폴리프로필렌 카보네이트(PPC, Propylene Carbonate) 생산 및 판매 중이며 PPC 물성 보안을 위해 기타 생분해성 고분자와의 공중합체 기술을 개발 중이다.

그림 9. Jiangsu Zhongke Jinlong Chemical社의 CO₂ 활용 polymer 생산 모식도



* 출처: Jiangsu Zhongke Jinlong Chemical社 홈페이지

III CCU 전환기술 생성물의 산업계 동향

1. CCU 전환기술 생성물 산업계 동향

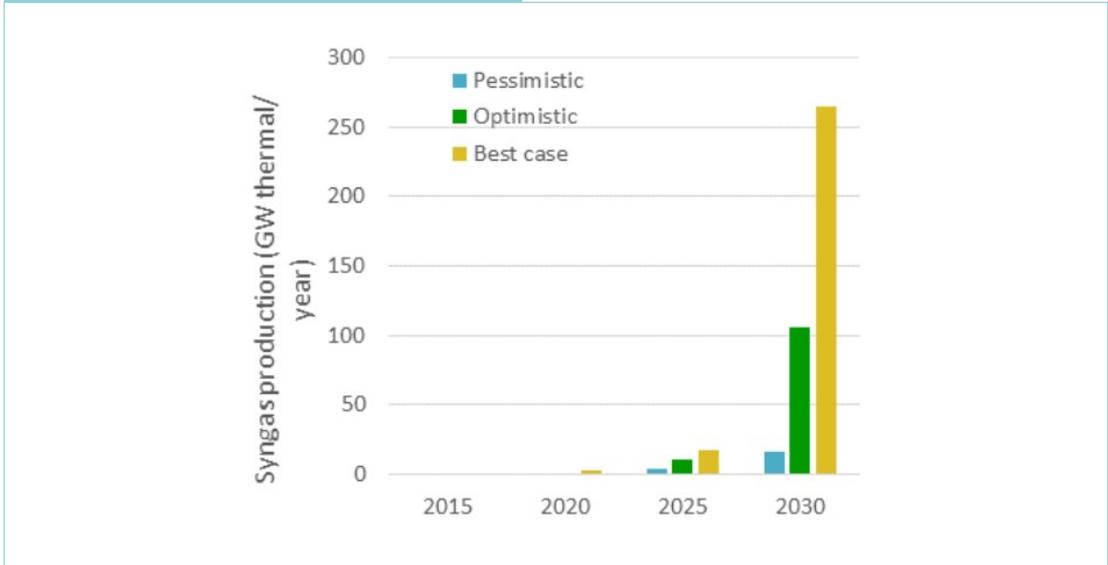
1.1. 일산화탄소 생산 기술

1.1.1. 일산화탄소와 합성가스

일산화탄소와 수소를 함유한 합성가스는 그 활용범위가 매우 크고, 특히 석유자원의 고갈로 인한 수송연료 부족과 석유화학 산업에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 대안 중 하나로 평가되고 있다. 더불어 북미지역에서는 셰일가스의 생산량 증가로 합성가스의 직·간접 활용에 큰 관심을 가지고 있다. 최근 국내에서도 일산화탄소의 고부가화를 미래기술로 평가하고 있고, 이에 대해 원천기술 형태로 기술이 개발되고 있다. 이와 함께 공정 개발도 이루어져 고유의 기술 확보가 필요하다.

합성가스는 다양한 화학 중간체로 이를 통해 메탄, 메탄올, 액체연료(Fischer-Tropsch 반응), 가솔린 또는 올레핀 및 발전 연료와 같은 기존 석유계 원료에서 얻을 수 있는 연료와 화학제품을 거의 모두 얻을 수 있다. 합성가스는 다른 화학물질의 원료로 이용되거나 발전용 연료로 이용되기 때문에 시장규모 전체에 대한 정량화가 어렵다. 2015년 합성가스 발전량 기준 총 시장규모는 연간 130~150 GW로 추정되고 있으며, 합성가스 시장은 2030년까지 연평균 8~10%씩 성장하여 총 500 GW의 수요가 예상된다. 2030년까지 CO₂ 기반 합성가스 전체 시장은 연간 최대 265 GW(8,800억 달러)까지 증가할 것으로 전망된다. CO₂ 기반 합성가스는 많은 화학물질의 중간체로 이용될 수 있는 잠재력이 있으며, 기존 생산 방식과 경쟁을 위한 노력이 필요하다.

그림 10. CO₂ 활용 합성가스 시장 전망



* 출처: ICEF(2016)

1.1.2. 일산화탄소 생산 기술의 국내외 상업화 현황

합성가스로부터 에탄올을 생산하는 Coskata社에서 2009년에 데모(demo) 수준의 설비에서 운전결과를 축적하였으며, 이 결과를 토대로 상업화 설비 건설을 준비하였다(2016년 기준). 합성가스로부터 합성석유를 생산하는 천연가스 액화기술(GTL, Gas-to-Liquids) 공정에 있어서 Shell社에서는 카타르 도하 근처의 Ras Laffan시의 가스전에서 140,000배럴/일급의 'Pearl GTL' 프로젝트를 진행하였다. 2010년 준공을 완료하였으며, 2012년 말에 최대용량 생산을 달성하여 현재까지 안정적으로 운영 중에 있다. 중국에서는 천연가스 수요량의 급속한 증가와 함께 석탄이용 합성천연가스(SNG, Synthetic Natural Gas) 생산 프로젝트가 활성화되어 있으며, 4개의 SNG 프로젝트가 진행되었고, 이는 합성천연가스 생산기준 16~40억Nm³/년 규모였다(2016년 기준). 해외에서는 일산화탄소를 기반으로 하는 탄화수소 전환공정에 대하여 GTL, 메탄올합성 공정 등은 상업화 수준의 기술을 보유하고 있으며, SNG 공정 등의 기술도 상용급 규모의 설비를 운용하고 있는 수준에 있다.

우리나라의 해양과학기술연구원에서는 일산화탄소를 이용한 수소 생산을 위해 초고온 고세균(NA1)을 이용한 수성가스전환 연구를 수행하였고, 제철부생가스와 연계하여 운전 계획한 바 있다(2016년 기준). 또한, 한국가스공사에서는 2011년부터 2012년까지 연구과제를 통해 1배럴/일급 GTL 파일럿 플랜트를 건설하고 이에 대한 운용능력과 100배럴/일급 GTL 실증플랜트 기본설계 기술을 확보하였다. 실제로 2019년 11월 태안에 50톤 규모의 실증 플랜트가 준공되었다. 해당 시스템은 산업현장에서 발생하는 일산화탄소(CO)를 생산원료로 사용하기 때문에 환경문제도 해결할 수 있고 원료 공급도 안정적이다. 또한, 수소를 생산하는 미생물을 활용한 친환경 공정과정을 거치며, 전환율이 높아 상용화 가능성이 높은 것으로 평가된다.

그림 11. 한국서부발전 태안발전본부에 구축된 해양바이오수소 생산기술 실증플랜트에서 수소를 생산하는 과정



* 출처: 전력문화사(2020)

합성가스는 아래 <표 11>에서 볼 수 있는 바와 같이 에너지원 또는 기초화학 원료로 사용되며, 국내 기업의 경우 롯데BP, 현대오일뱅크에서 합성가스 시장을 선도하고 있다. 롯데BP는 폐기물·폐바이오매스를 활용한 중소형 합성가스 플랜트사업을 추진할 계획이다. 생산된 합성가스를 초산, 암모니아 등의 화학연료 또는 발전연료로 활용하기 위한 것이다. 해외 타깃시장은 동남아, 유럽, 북미, 중국, 러시아 등이다. 롯데BP는 폐기물·바이오매스를 활용한 합성가스 플랜트 환산(잠재) 시장을 2025년까지 국내는 연간 2조 8,000억 원, 해외는 약 30조 원으로 추산한다.

현대오일뱅크는 석탄·펄코크를 활용한 중소형 합성가스 플랜트사업을 추진할 계획이다. 생산된 합성가스를 LNG·보일러연료를 대체하는 청정연료가스 생산과 분산전원(해외수출)으로 활용하기 위한 것이다. 해외 타깃시장은 동남아, 몽골, 인도, 터키 등이다. 현대오일뱅크는 국내 청정연료가스의 합성가스 플랜트 환산(잠재) 시장을 연간 11조 2,500억 원, 해외는 연간 250조 원(분산전원 240조 원, 청정연료가스 10조 원)으로 추산한다.

표 11. 합성가스 플랜트 타깃시장

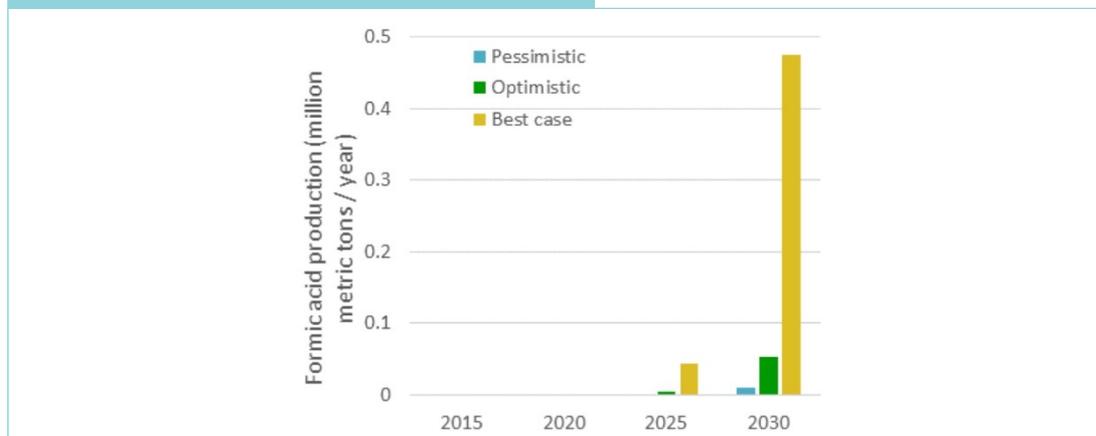
타깃시장	대상국 보유 저급자원	합성가스시장				
		현재 사용 원료	대체가능	생산합성가스 활용	적용처	단일 플랜트 규모
국내	폐기물	오일, LNG	펄코크	청정연료가스	소성로, 유리용해로, HGG설비/보일러 연료전환	15~50톤/일급
		납사, 중유	폐기물	고순도 CO, 수소	초산	100~300톤/일급×3기
		납사, 중유	석탄슬러리	청정합성가스	석유화학, 열병합	100~1,000톤/일급
인도네시아, 몽골, 인도, 파키스탄, 이란, 남아공, 터키	저급석탄	디젤유	자국 석탄	가스엔진 발전	전기 부족지역 분산전원	1~10MW
	폐기물	-	폐기물	열병합, 가스엔진 발전	분산형 에너지	5~20MW
EU (동유럽)	저급석탄	-	자국 석탄	가스엔진 발전	분산전원	1~20MW
	폐기물	납사, 중유	폐기물	고순도 CO, 수소	초산	100~300톤/일급×3기
중국	폐기물	납사, 중유	폐기물	고순도 CO, 수소	초산	100~300톤/일급×3기
남미	폐기물	디젤유	폐기물	청정연료가스	분산전원	1~10MW
호주	저급석탄	천연가스	자국 석탄	SNG, DME	청정연료	500톤/일급 이상

* 출처: 투데이에너지 기사(2016.11.07.)

1.2. 포름산 제조 기술

1.2.1. 포름산

포름산은 다양한 화학공정에서 가장 유용한 pH 조절제로써 높은 흡수력을 이용하여 가죽생산 등 다양한 응용이 가능하며, 소비자 라이프스타일 변화에 힘입어 염색 및 섬유 산업에서의 수요가 증가하고 있다. 포름알데히드 방부제, 동물사료, 염색 및 섬유, 고무 및 가죽 생산에 활용되며, 에탄올 및 옥살산의 카르보닐화를 통해 생산되고 있다. 기술 개발이 활발한 CO₂ 활용 기술을 통한 원료 다양화, 세제 및 세정제 등 다양한 응용 분야 확대로 시장 전망이 양호하다.

그림 12. 2030년 CO₂ 활용 포름산 시장 전망

* 출처: ICEF(2016)

CO₂를 활용한 화학 중간체 분야는 경제적 타당성에 대한 우려로 인해 지난 5년간 제한적인 성장을 보였으며, 메탄올(methanol), 포름산(formic acid), 합성가스(syngas) 등의 제품들이 상용화 초기단계에 있는 것으로 파악된다. Mitsui Chemical社와 Carbon Recycling International社는 화학 중간체 분야에서 2011년부터 지속적으로 높은 기술력과 시장성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

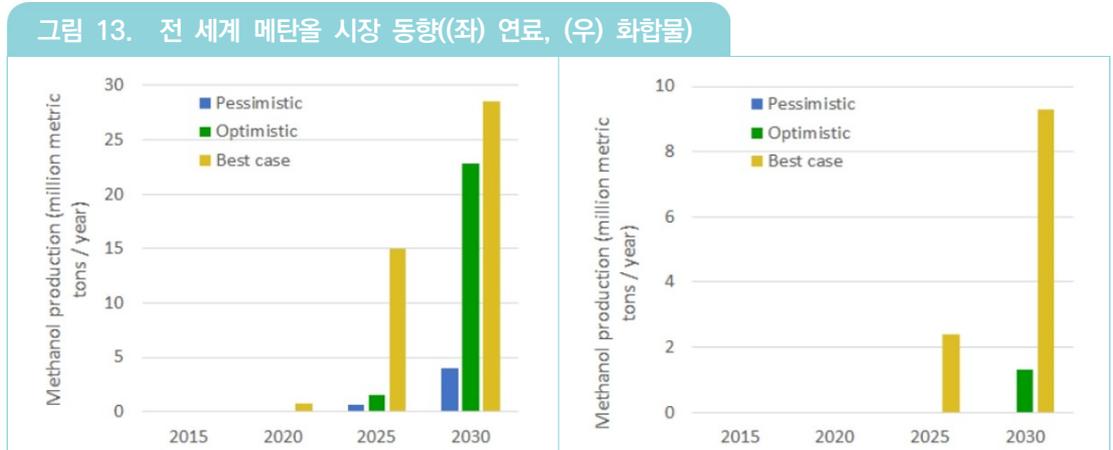
우리나라의 경우 기존 메틸포메이트의 수화를 통한 포름산 생산 공정이 2017년 중단됨에 따라 국내에서 소비되는 포름산은 전량 수입에 의존하고 있다. 2014년 기준, 85% 포메이트의 가격은 kg당 0.6달러~0.7달러 수준이며 순수 포름산 가격은 약 1,200 달러/톤이나 소비 현장에서는 2,000달러/톤의 가격에 활용할 수 있어 향후 국산화를 통한 실 소비 가격 하락을 유도하는 것이 필요하다. 포름산이 연료전지용 수소의 액체저장물질로 개발이 성공한다면, 기존의 고압 수소경제를 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 스테이션을 위한 인프라 비용이 획기적으로 저감되고 수소차에 대한 안전성 문제가 해결될 것으로 판단된다. 국내의 국가 로드맵 상으로 2020년까지 수소차를 약 4만 대, 2030년까지 80만 대를 보급할 예정으로 이에 따른 수소경제 규모는 2040년까지 약 43조의 부가가치와 42만 개의 일자리가 창출될 것으로 기대된다.

1.2.2. 포름산의 국내외 시장 동향

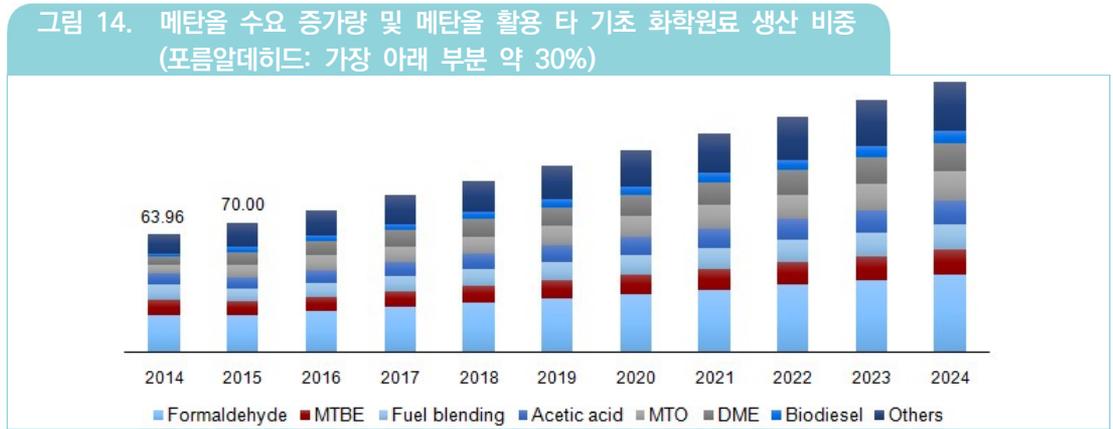
포름산 시장은 2016년 기준 517백만 달러이며, 2027년까지 879백만 달러로 연평균 4.94% 성장할 것으로 예상된다. 아시아태평양 지역에서 빠른 산업화 및 원자재 공급의 용이성으로 인해 전체 물량의 35% 이상을 차지하며, 중국시장이 연평균 5.5% 성장을 통해 2027년까지 144백만 달러의 규모를 차지할 것으로 예상된다.

포름산의 주요 생산국은 중국, 독일, 미국 등이며, 대표적인 생산업체는 독일의 BASF社로써 급속히 성장한 중국, 인도 시장 점유를 통해 아시아태평양 시장을 장악하고 있으며, 그 외 Perstorp AB, Feicheng Acid Chemicals, Luxi Chemical Group, Eastman, Basf-YPC, Tianyuan Group 등 다양한 기업이 포름산 시장을 확대하고 있다.

국내 포름산 시장 규모는 약 7만 톤/년으로 2030년 10만 톤/년으로 상향이 예상된다. 저가 포름산 생산 시, 연료전지, 포름산을 활용한 메탄올, 옥살산, 포름알데하이드 등의 기초화학물 생산으로 확장되어 시장규모가 폭발적으로 증가하는 포름산 경제를 이룩하고 세계 70만 톤(4,200억 원/년) 시장을 주도할 수 있을 것으로 기대된다.



* 출처: ICEF(2016)



* 출처: ICEF(2016)

1.3. 친환경 고분자 제조 기술

1.3.1. 폴리카보네이트(PC, Polycarbonate) 플라스틱

폴리카보네이트 플라스틱은 일반적인 고분자 단량체인 에틸렌 또는 프로필렌을 이산화탄소와 결합한 형태인 폴리에틸렌 카보네이트 또는 폴리프로필렌 카보네이트로 전환하여 생성한다. 폴리카보네이트 플라스틱은 합성가스 공정과 달리 CO₂를 CO 등의 활성분으로 전환시키지 않고 직접 활용이 가능하므로 공정에너지 측면에서 유리하다. 코팅제, 비닐백 및 라미네이트 등으로 활용할 수 있고 생성된 플라스틱의 형태에 따라 CO₂의 반영구적 고정이 가능하다.

1.3.2. 폴리카보네이트 플라스틱의 국내외 시장 동향

폴리카보네이트 플라스틱은 초기시장 단계로 현재 약 10만 톤/년 규모이다. 우리나라는 시장 형성이 미흡하지만, LG화학에서 약 2만 톤/년의 상업 생산 시설을 건설 계획 중이다. 폴리카보네이트 플라스틱 시장은 전형적으로 시장에 소개된 시기와 시장의 수요가 S자 형태를 보인다. 즉, 시장에 초기 진입할 때 시장의 수요가 미미하나 점차 수요가 폭발적으로 증가하고 추후 최대치에 접근하는 패턴을 보인다. 폴리프로필렌 카보네이트(PPC, Propylene Carbonate), 폴리에틸렌 카보네이트(PEC, Polyethylene Carbonate)는 초기시장 진입 단계로 아직까지 시장의 수요가 미미하나 점진적으로 확대될 것으로 기대된다. 특히, 최근 친환경 플라스틱에 대한 사회적 요구가 증가함에 따라 시장이 커질 가능성이 크다.

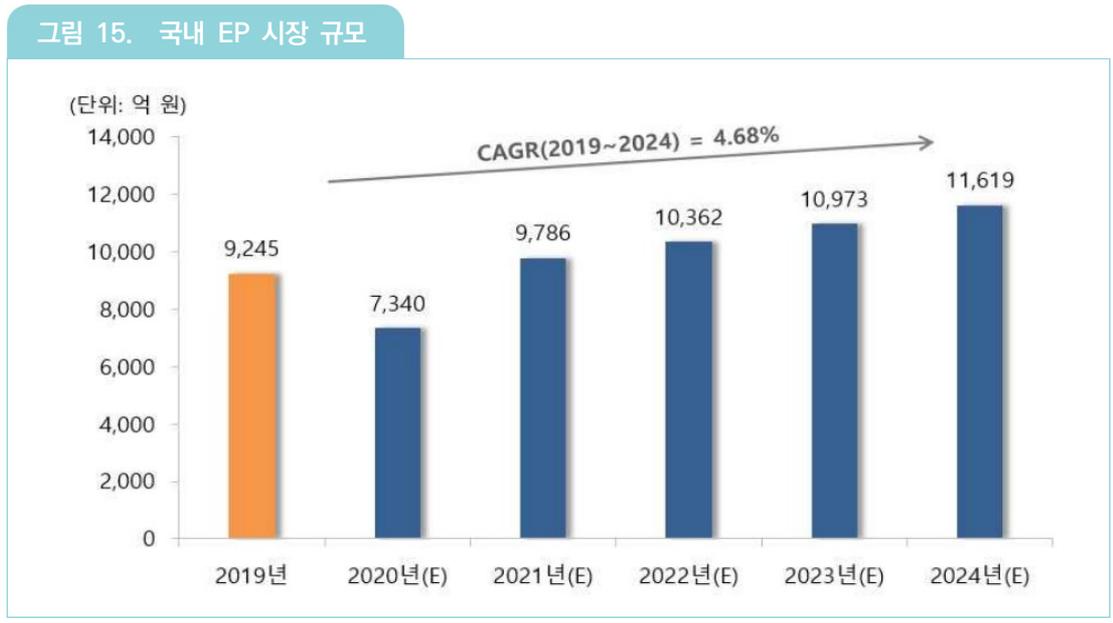
무연연소, 차단성 등의 특성을 가지는 플라스틱 시장이 확대될 것으로 보고되고 있다(IBK 경제연구소, 2018). 실제로 무연연소 특성을 가지는 플라스틱의 경우 750만 톤 규모의 내장재 시장 중 230만 톤 이상을 대체하였다. 또한 차단성 특성을 가지는 플라스틱은 130만 톤 규모의 포장용 필름시장 중 55만 톤을 대체하였다. 630만 톤 규모의 접착제 코팅 시장의 상당 부분을 대체할 수 있으며, 총 잠재 시장은 1,600만 톤/년 규모(40조 원 시장)로 추정되고 있다.

표 12. CO₂/에폭사이드의 잠재 시장

수요처	잠재 수요량 (백만톤)	대체 가능 수요량 (백만톤)
건축·수송용 내장재	7.96	3.36
식품포장재	1.36	0.80
단열재/완충재	0.90	0.64
접착제/코팅	6.60	0.72

* 출처 : IBK경제연구소(2018)

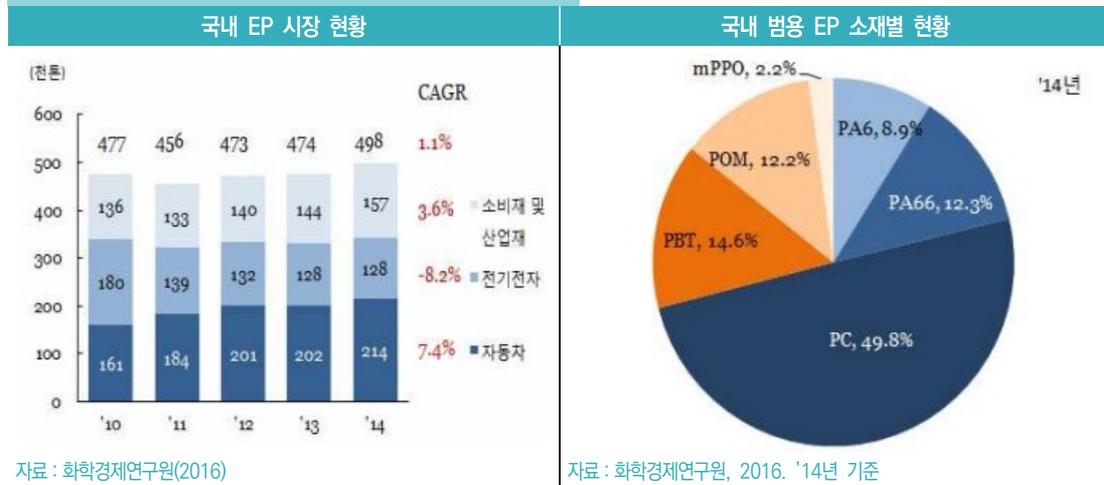
폴리카보네이트(PC)는 엔지니어링 플라스틱(EP, Engineering Plastic)의 대표 격인 나이론(nylon)에 이어서 가장 많이 사용되는 EP로 Global Information 보고서(2021년)에서도 EP 잠재 시장을 1,250만 톤/년으로 예측하고 있다. PC를 포함한 국내 EP 시장 규모는 연평균 4.68%씩 증대되어 2024년에는 1조 1,619억 원에 이를 것으로 전망된다.



* 출처: BBC Research(2022)

EP 제품군은 PC가 약 50%로 가장 많으며, 그 다음으로 PA6(Nylon6), PA66(Nylon66)가 21.2%, PBT(Polybutylene terephthalate, 폴리부틸렌 테레프탈레이트) 14.6%, POM(Polyoxymethylene, 폴리옥시메틸렌) 12.2%, mPPO(Modified PolyPhenylene Oxide, 변성 폴리페닐렌 옥사이드) 2.2% 등의 순이다. PC 소비는 Base Resin이 12만 톤, Compound가 13만 톤으로 약 절반씩 소비되었다(2014년 기준).

그림 16. 국내 EP 시장 현황 및 소재별 현황



자료 : 화학경제연구원(2016)

자료 : 화학경제연구원, 2016. '14년 기준

* 출처: IBK 경제연구소(2018)

1.4. 광생물 전환 기반 플라스틱 생산 기술

1.4.1. 플라스틱 필러(filler)와 생분해성 플라스틱

플라스틱 복합재료에서의 플라스틱 필러의 역할은 플라스틱 단독으로는 얻을 수 없는 역학특성(기계특성)과 플라스틱에 없는 다양한 기능을 부여하고 기타 치수정밀도, 선팽창계수, 표면광택, 2차 가공성 등을 향상시킨다. 필러를 이용한 플라스틱 복합재료는 자동차 분야, 전기, 전자, 정보, 기계 분야를 비롯하여 많은 공업 분야에서 중요한 소재로 폭넓게 이용 가능하다.

폴리염화 비닐(PVC, PolyVinyl Chloride) 수지는 포장용, 건축용 등 다양한 용도로 오래 전부터 사용되고 있는데 수지 특성 상 가공이 어려워 프탈레이트계의 가소제를 사용하지만 내분비장애물질(환경호르몬)로 의심되고 있다. 소각 시 다이옥신이 다량 배출되어 식품용 랩은 폴리에틸렌(PE, Polyethylenem)으로, 유아용 장난감 역시 PE로, 건축용 창호재는 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 수지로 대체되는 추세이다.

이와 같이 플라스틱에 사용되는 각종 필러와 관련해서는 환경에 대응하는 기술 개발이 앞으로 국제경쟁력을 높이는 기회가 될 수 있다.

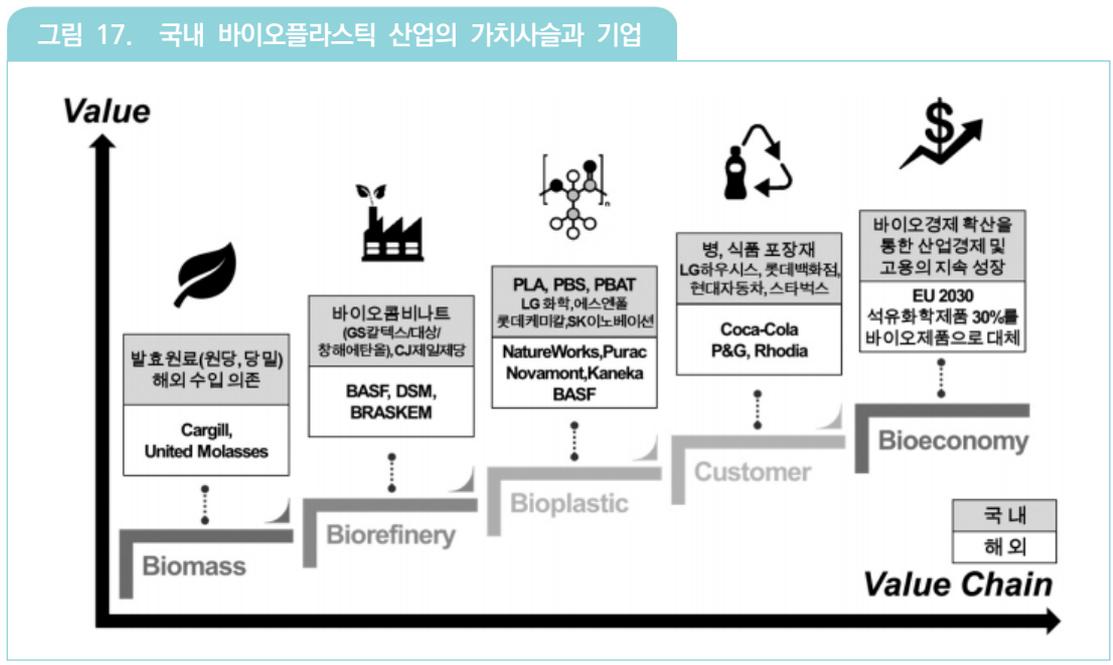
국내의 플라스틱 필러는 정밀화학 산업이 주도하고 있는데 시장 현황은 다국적 기업 중심의 수입품이 우위를 점하고 있는 실정으로 국산화가 이루어진 제품과 고가의 수입품으로 이원화되어 있다.

생분해성 바이오플라스틱은 1980년대 후반부터 대두된 기존 플라스틱의 대체품으로써 1990년대 중반 이후 환경 규제가 강화되면서 새롭게 부각되고 있는 신형 산업 분야이다. 국내 기업들은 식품 포장재, 산업용

포장재, 면도기, 칫솔, 포크, 수저 등의 다양한 일회용 플라스틱 제품에 대한 대체 원료를 출시하여 급속히 기존 시장을 대체하고 있어 추후 바이오 플라스틱의 국내 시장 규모는 최소 5조 원 이상이 될 것으로 예상하고 있다. 2015년 이후 CARG 21.67%의 가파른 성장세가 예상되고 있다(유영선 외, 2015).

1.4.2. 생분해성 플라스틱의 국내외 시장 동향

국내 바이오플라스틱 시장은 약 4만 톤 규모로 국내 플라스틱 시장의 0.5% 차지하며, 세계 바이오플라스틱 시장의 1~2% 내외를 점유하고 있다. 국내 바이오플라스틱 시장은 2016년 229억 원, 세계 시장(2017년 35억 달러)의 1% 수준이다. 국내 생분해성 바이오플라스틱 산업은 원료 및 플랫폼(platform) 중심의 업스트림(upstream)보다는 가공제품 중심의 다운스트림(downstream) 부문이 더욱 활발하다. PLA(Polylactic acid), PBS(Polybutylene succinate), PBAT(Polybuthylene Adipate-co-Terephthalate) 등 생분해성 원료를 수입·가공하여 플라스틱 제품으로 생산하는 중소·중견기업을 중심으로 바이오플라스틱 전·후방 산업생태계가 구축되어 있다. 생분해성 원료 소재는 대기업을 중심으로 아직 연구 단계에 머물러 있고, 석유화학기업 중심으로 바이오플라스틱 생산 중(원료 중합)이나, 리파이너리(원료 추출·가공)는 기술개발 단계로 해외원료 수입에 의존하고 있다.



* 출처: 한국산업기술평가관리원(2019)

그림 18. 국내 바이오플라스틱 전·후방 산업과 관련 기업



* 출처: 한국산업기술평가관리원(2019)

바이오플라스틱 산업은 발효원료(원당, 당밀) 확보, 바이오리파이너리를 통한 플랫폼 화합물의 생산, 바이오 플라스틱의 제조, 최종 소비재로 가공 등의 가치 사슬이 존재한다. 국내 바이오플라스틱 산업은 가공 중심의 바이오플라스틱 산업이 우선적으로 성장하여 최종제품(필름, 섬유, 합성수지 등)을 생산하는 최종 소비재 가공 기술이 확보된 상황이며 바이오매스 및 바이오리파이너리 기술은 연구 개발 단계이다.

글로벌 화학기업들과는 달리 국내 화학기업들은 국내의 규제 및 무역 장벽 등에 대비하여, 기술 개발 중이나 제도 불확실성 등으로 사업화 투자가 부진한 상황이다. LG화학(식품포장재 → 가격문제로 담보), 롯데정밀화학(바이오원료 → 사업성 악화로 철수), 롯데케미칼(Bio-PET → 가격문제로 판매부진), SKC(산업용필름 → 원료 수급·가격문제로 철수) 정도가 해당 분야에 조금 관심을 가지고 있다. 따라서 정부의 적극적인 시장확대제도 도입 및 기업의 투자확대가 필요한 상황이다.

IV CCU 정책 및 R&D 프로젝트의 방향성

최근 전 세계적으로 문제되고 있는 지구 온난화와 이상기후 현상을 해결하기 위해서는 탄소중립을 이뤄야 한다. 현재 우리나라의 에너지원 대부분은 석유와 석탄을 활용한 화력발전이며, 이를 재생에너지로 전환하려는 노력이 이루어지고 있다. 이와 더불어 산업 영역에서 발생하는 이산화탄소를 전환하여 유용한 물질로 전환·활용(CCU)하는 접근 또한 시도되고 있다. 하지만 CCU는 기술 성숙도 측면에서 R&D가 더 필요하다. 실제 해외에서는 ①이산화탄소의 열화학적 수소화, ②전기화학적 이산화탄소 전환, ③이산화탄소 활용 친환경 고분자 생산, ④광생물 전환을 통한 고분자 원료 생산 분야로 선택과 집중을 하여 기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 또한, 실험실 규모의 R&D 연구가 아닌 실증 연구를 통해 빠르게 산업에 적용할 수 있는 접근 전략을 세워 진행 중이다. 우리나라 또한 기술적 성공 가능성이 높은 상기 4개 분야에 선택과 집중을 하여 R&D 연구가 진행 중이다. 이러한 연구 흐름이 규모화 되고 빠르게 산업에 적용되기 위해서는 실제 수요기업이 참여하는 협력 구조가 필요하며, 경제성이 확보된 기술 개발과 함께 탄소 배출권(carbon credit) 시장의 형성 가속화, 이산화탄소 저감에 따른 인센티브 등의 노력이 동반되어 진행되어야 한다.

저자_ 오형석(Hyung Suk Oh)

• 학력

연세대학교 화학공학 박사
연세대학교 화학공학 석사
연세대학교 화학공학 학사

• 경력

現) 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터
책임연구원

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 강석환, 류재홍, 유영돈, 윤용승. (2016). 합성가스와 연계된 C1 가스 리파이너리 기술과 동향. 공업화학 전망, Vol. 19, No. 2, 16-27.
- 2) 유영선, 오유성, 홍승희, 최성욱. (2015). 국내외 바이오플라스틱의 연구개발, 제품화 및 시장 동향. 청정기술, 21(3), 41-152.
- 3) 이상호, 박경문, 주정찬. (2019). 생분해성 바이오플라스틱 생산기술과 산업동향. KEIT PD 이슈리포트, 2019년 10월호. 한국산업기술평가관리원.
- 4) 임팩트. (2019). 바이오화학(바이오플라스틱/바이오매스/바이오연료) 시장/기술 동향과 사업현황. 서울: 임팩트.
- 5) IBK 경제연구소. (2018). 국내 「엔지니어링 플라스틱」 산업 분석.

〈국외문헌〉

- 6) Aizawa, H., (2019). Innovation to Generate Growth – CCUS Projects to Accelerate Innovation and Deployment. Japan CCS Forum 2019, Ministry of the Environment.
- 7) Akif, M. (2015). Analysis of Gas Power Systems, Today & Tomorrow, Technical Report.
- 8) BCC Research. (2022). Engineering Resins, Polymer Alloys and Blends: Global Markets.
- 9) CCUS SET-PLAN. (2021). SET-PLAN IWG9 CCS and CCU Implementation Plan – Report: Follow-up on targets.
- 10) European Commission. (2017). Horizon 2020 Energy and Transport – Compendium of Projects implemented by INEA.
- 11) Global Information. (2021). Carbon Dioxide(CO₂) as Chemical Feedstock for Polymers – Technologies, Polymers, Developers and Producers.
- 12) ICEF(Innovation for Cool Earth Forum) 2016 자료

〈기타문헌〉

- 13) 배상훈. (2020.03.13). 서부발전, 수소생산기술로 수소경제 선도. 일렉트릭파워, <http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=24462>
- 14) 이종수. (2016.11.07). 저급자원 활용 합성가스 플랜트시장 개척한다. 투데이에너지. <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=118953>
- 15) 해양수산부 공식 블로그, 수소경제의 미래는 바다에 있다!
- 16) A.SPIRE 사이트, <https://www.spire2030.eu/intro>
- 17) Business Europe 사이트, <https://www.businesseurope.eu/>

- 18) European Commission 사이트, <https://energy.ec.europa.eu/>
- 19) European Commission(기후변화) 사이트, https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en
- 20) FreSMe 사이트, <http://fresme.eu/>
- 21) Jiangsu Zhongke Jinlong Chemical社 홈페이지, <http://www.zhongkejulong.com.cn/>



융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 October vol.8 no.10



03

국가R&D 현황 분석

융합연구리뷰 10월호에서 다룬 2개의 주제(미세먼지 저감기술 및 CCU 기술)에 대한 국가R&D 현황을 살펴보기 위해 국가연구개발 과제 분석을 수행하였다. 연구비를 기준으로 연구비 규모별 과제 수, 연구수행주체, 연구수준, 연구분야(국가과학기술표준분류, 미래유망신기술분류) 등 여러 측면에서의 분석 결과를 제시한다.

I 미세먼지 저감기술

□ (총괄) 최근 5년간('17~'21) 총 184건의 과제에 대해 1,007억 원의 연구비가 투자됨

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

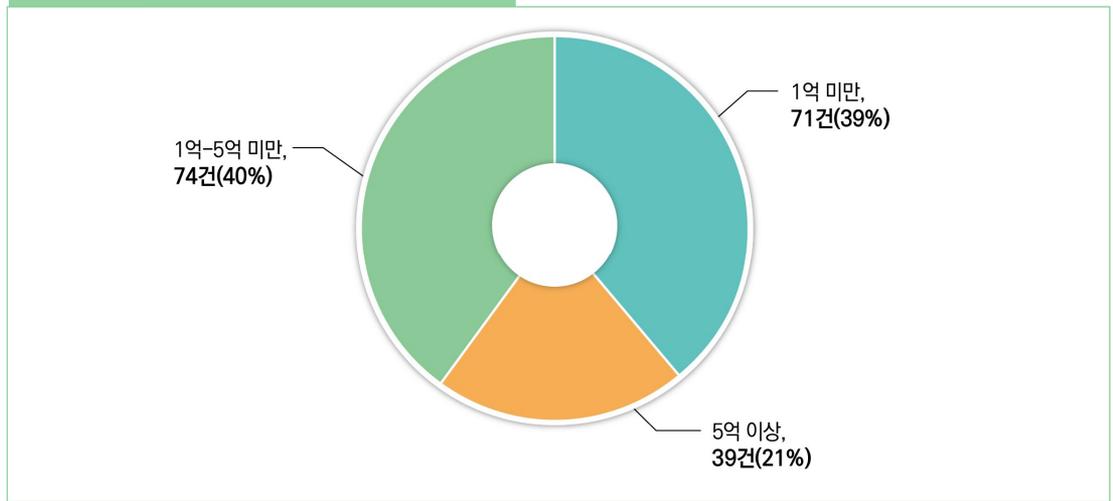
* (미세먼지) and (PM or 부유먼지 or TSP or 황산화물 or 질소산화물 or NOx or SOx) and 저감

그림 1. 연도별 연구과제 건수 및 연구비



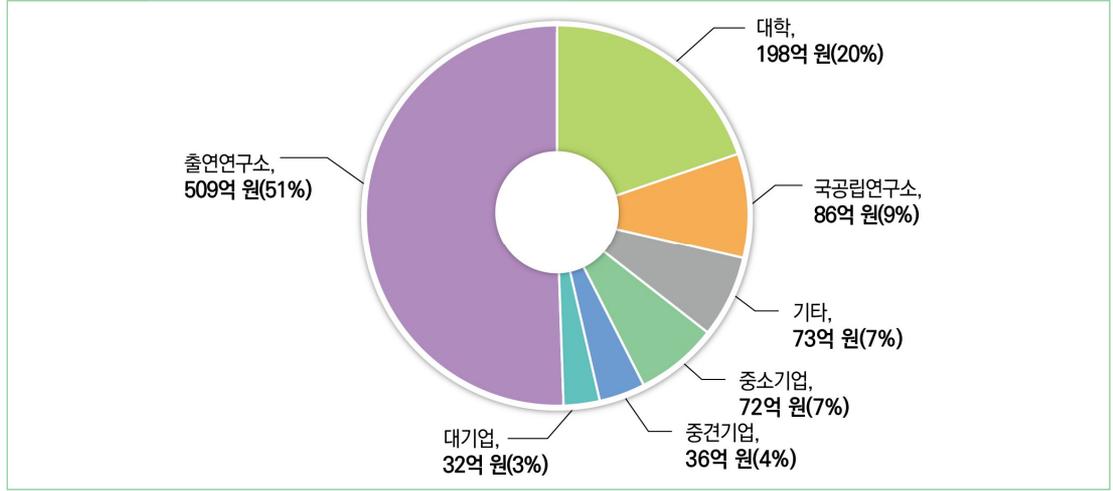
□ (연구비 규모별 과제 수) 연구비가 1억 원 이상 5억 원 미만인 과제의 연구비(40%, 74건)와 연구비가 1억 원 미만인 과제의 연구비(39%, 71건)는 유사한 비중을 차지하고, 5억 원 이상인 과제의 연구비는 21%(39건)의 비중을 차지하는 것으로 나타남

그림 2. 연구비 규모별 과제 수 및 비율



□ (연구수행주체) 출연연구소가 지원받는 연구비가 절반 이상(51%, 509억 원)의 비중을 차지하고, 대학(20%, 198억 원), 국공립연구소(9%, 86억 원), 중소기업(7%, 72억 원) 순으로 큰 것으로 드러남

그림 3. 연구수행주체별 연구비 규모 및 비율



□ (연구수준) 미세면지 저감기술은 도입기이며 응용연구 단계인 것으로 확인됨

- (연구개발단계 분석 결과) 응용연구에 투자되는 연구비 비중이 51%(509억 원)로 개발연구(35%, 353억 원), 기초연구(14%, 137억 원)에 비해 월등히 큰 것으로 나타남
- (연구개발성격 분석 결과) 제품 또는 공정개발 관련 연구에 투자되는 연구비의 비중이 81%(198억 원)인 반면, 시작품개발과 아이디어 개발의 연구비 비중은 각각 10%(25억 원)과 9%(22억 원)에 불과한 것으로 확인됨
- (기술수명주기 분석 결과) 도입기에 투자되는 연구비 비중(68%, 351억 원)과 성장기에 투자되는 연구비 비중(31%, 159억 원)이 주를 이루는 것으로 확인됨

그림 4. 연구개발단계별 연구비 규모 및 비율

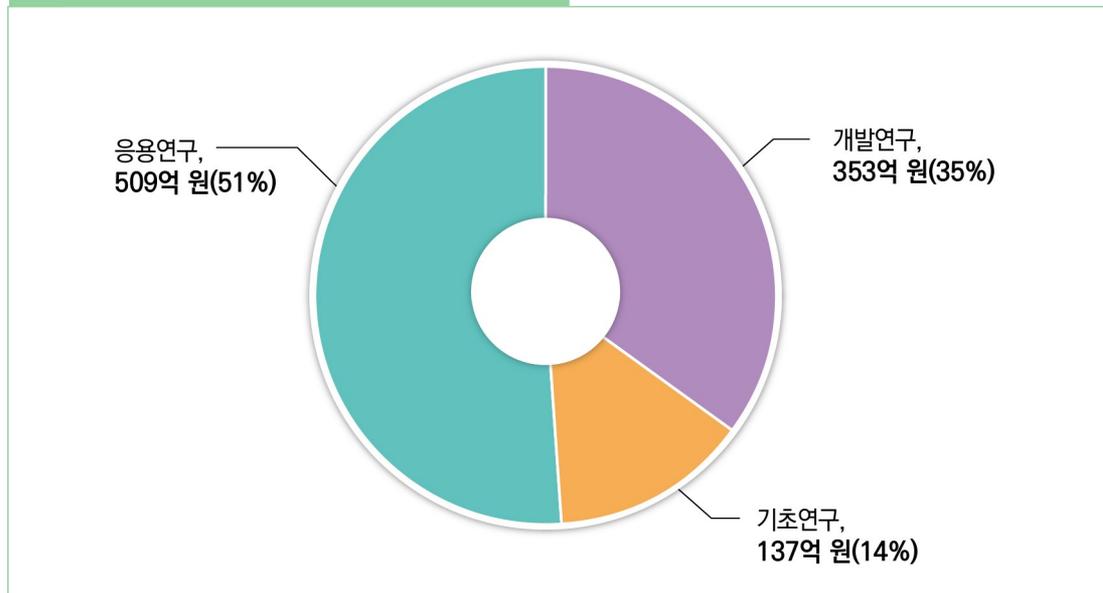


그림 5. 연구개발성격별 연구비 규모 및 비율

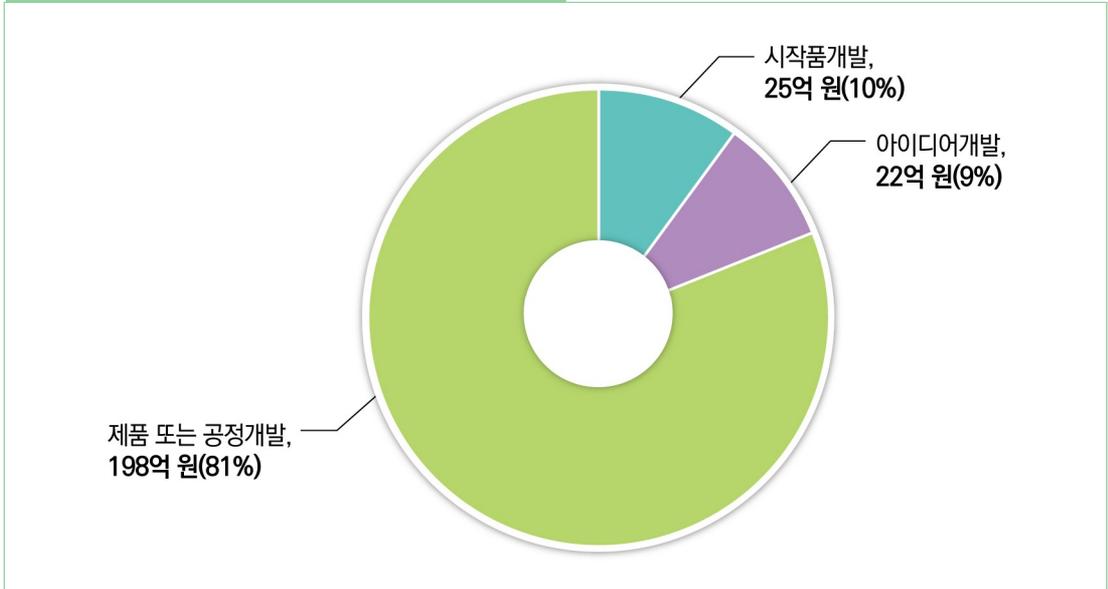
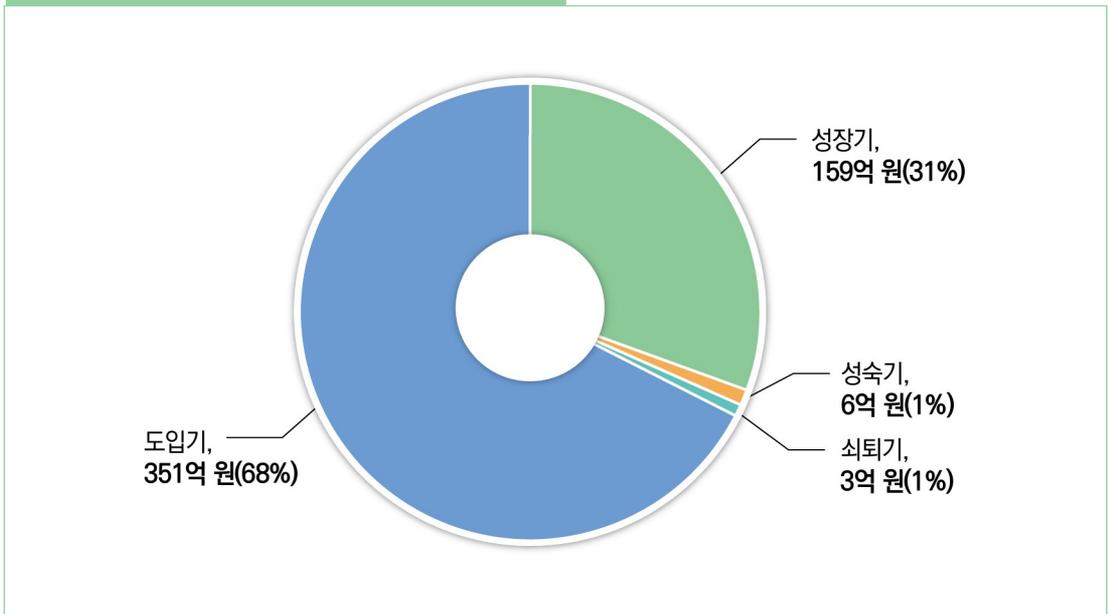


그림 6. 기술수명주기별 연구비 규모 및 비율



- **(연구분야)** 국가과학기술표준분류와 미래유망신기술분류(6T) 분석 결과, 환경 및 환경기술(ET) 분야를 중심으로 미세먼지 저감기술 연구가 이루어짐
- **(국가과학기술표준분류 분석 결과)** 환경 분야에 대한 연구비 비중이 미세먼지 저감기술 관련 전체 연구비의 절반 이상(53%, 534억 원)을 차지하는 것으로 드러났으며, 그 다음으로 에너지/자원 분야(15%, 150억 원)의 연구비 비중이 높은 것으로 확인됨
 - ※ 연구책임자가 최대 3개까지 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류에 대한 각 가중치를 고려한 결과임
 - 융합과제에 지원된 연구비 비중은 미세먼지 저감기술 연구에 투자된 전체 연구비의 22%(약 223억 원)를 차지하는 것으로 드러남
 - ※ 융합과제란 연구책임자가 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류가 두 개 이상의 분류에 해당하는 과제를 의미함
 - **(미래유망신기술분류(6T) 결과)** 환경기술(ET) 관련 연구에 대한 연구비 비중이 77%(771억 원)로 가장 큰 것으로 나타남

그림 7. 국가과학기술표준분류별 연구비 규모 및 비율

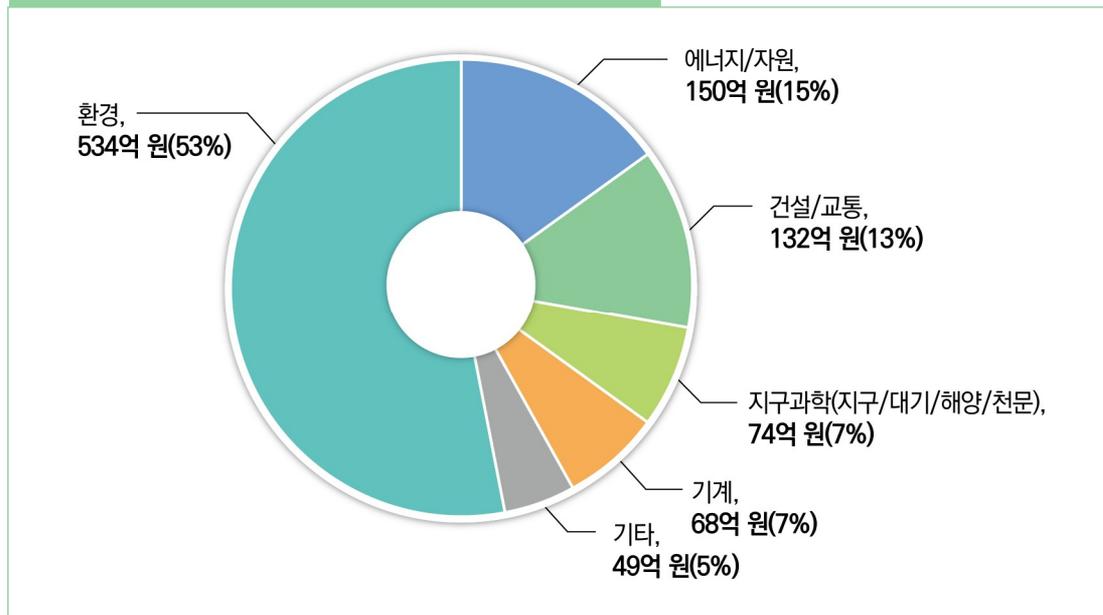


그림 8. 융합 R&D 과제 연구비 규모 및 비율

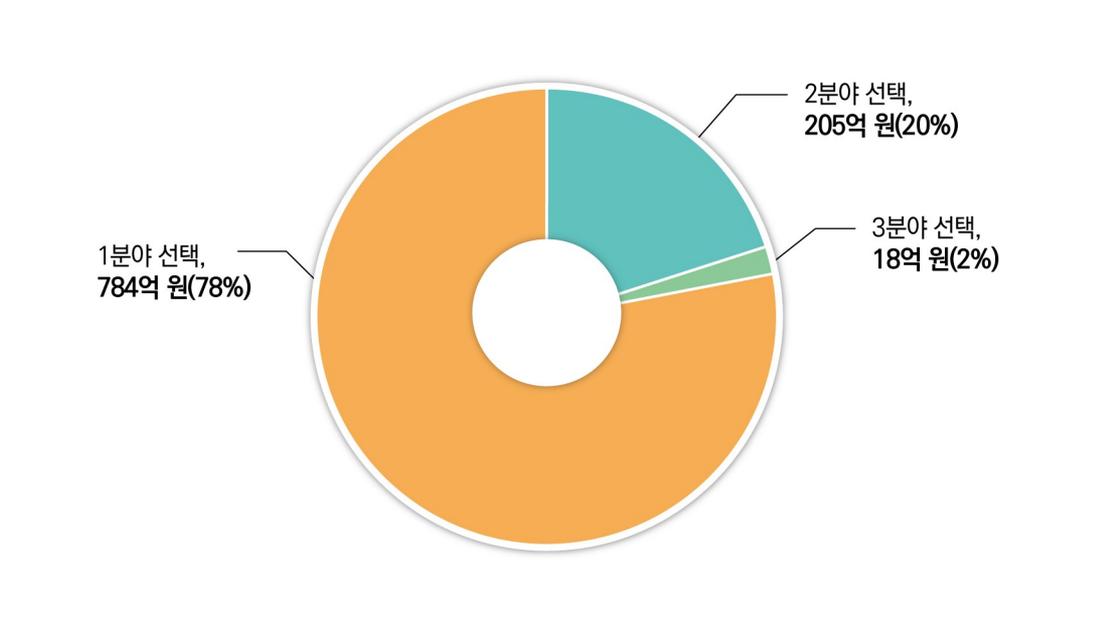
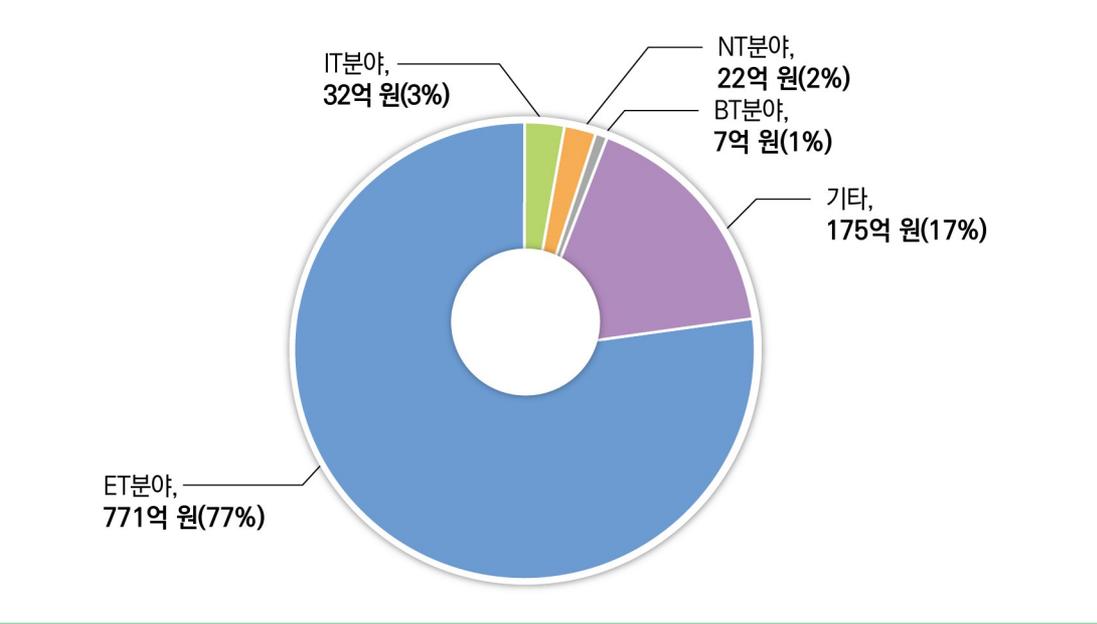


그림 9. 미래유망 신기술분류(6T)별 연구비 규모 및 비율



□ (주요 과제) 원고의 주요 내용 및 키워드 등을 기준으로 선정함

과제명 (사업명, 부처명)	수행기관, 총 연구기간, 연구비 규모	과제 주요 내용
전자선 이용 미세먼지 저감기술 개발 (방사선기술개발사업, 과학기술정보통신부)	한국원자력연구원, 2018~2022년, 10억 원('21)	미세먼지와 그 전구물질인 가스상 오염물질(황산화물/질소산화물)을 동시에 처리하는 전자선 기반의 미세먼지 청정 처리기술 개발
초미세먼지 및 생성 원인물질 제거용 Sustainable 공기필터 개발 (한국과학기술원연구운영비지원, 과학기술정보통신부)	한국과학기술원, 2019~2021년, 1.5억 원('20)	신개념 공기필터 소재 합성을 위한 원천 공정기술과 초미세먼지 마스크용 공기필터, 창문형 방진망, 산업용 초미세먼지 제거 및 가스포집을 위한 고내열성 고분자/세라믹 나노섬유 필터 개발
미세먼지 및 배기가스 저감을 위한 환경 촉매 재료 및 시스템 개발 (개인기초연구, 과학기술정보통신부)	연세대학교(미래캠퍼스), 2020~2023년, 0.5억 원('21)	미세먼지 및 배기가스 문제의 해결을 위해 새로운 구조를 갖는 귀금속 페로프스카이트(Perovskite) 물질을 디자인 및 합성하여 고효성/ 내구성을 갖는 혁신적인 촉매 시스템 제안

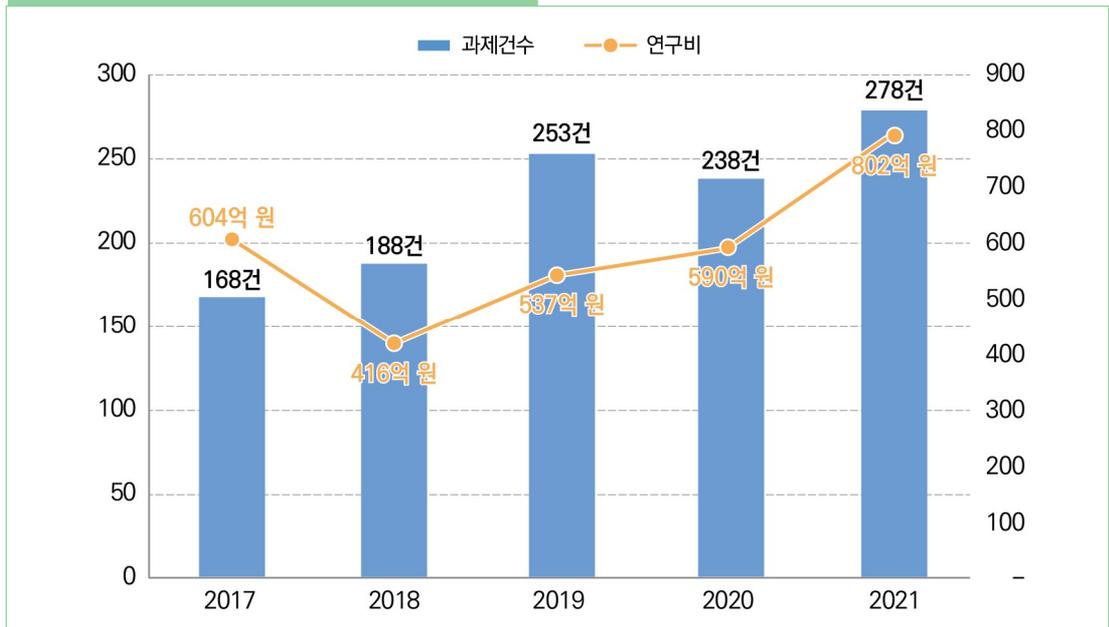
II CCU 기술

□ (총괄) 최근 5년간('17~'21) 총 1,125건의 과제에 대해 2,949억 원의 연구비가 투자됨

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

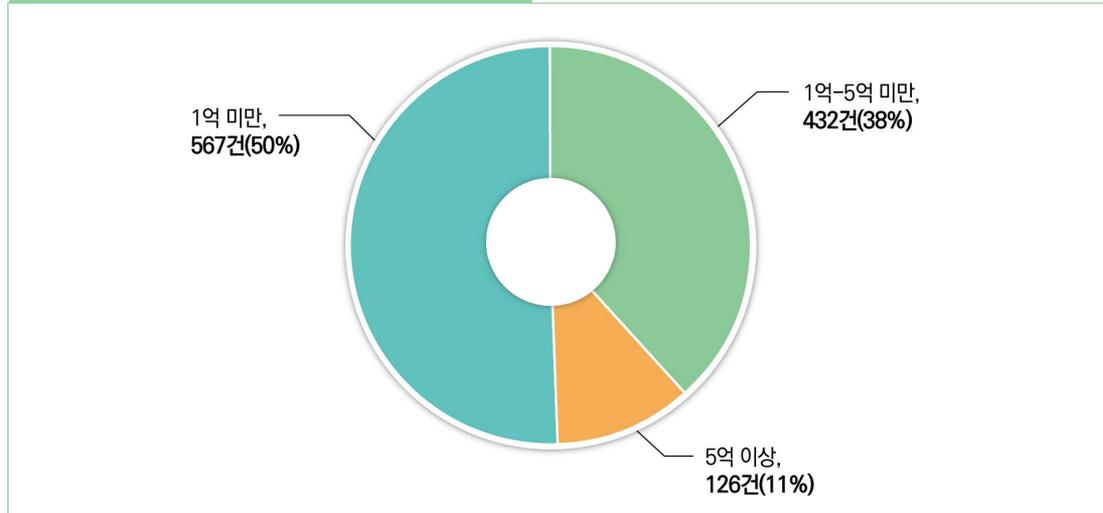
* 이산화탄소 and (활용 or 포집 or 저장 or 전환)

그림 10. 연도별 연구과제 건수 및 연구비



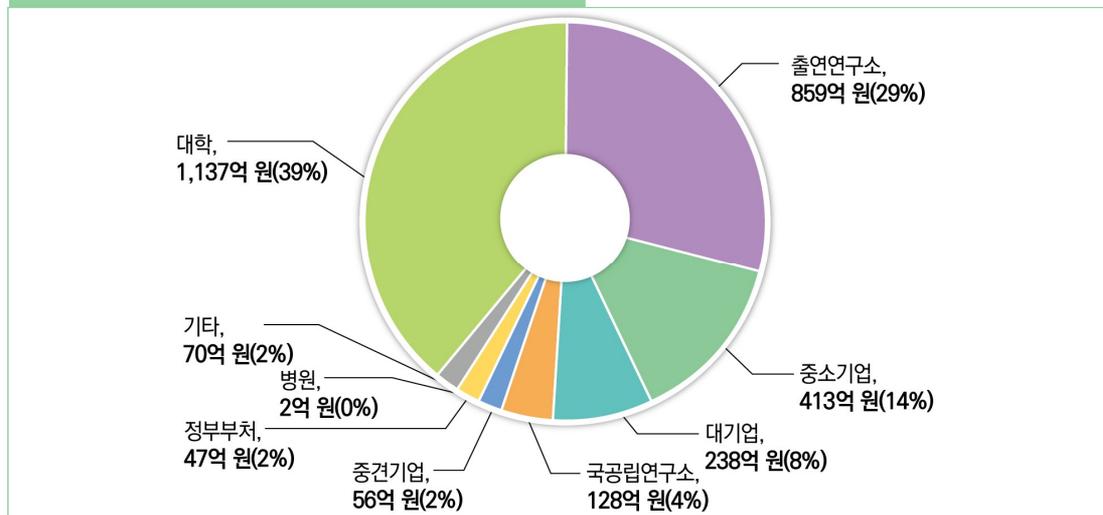
□ (연구비 규모별 과제 수) 연구비가 1억 원 미만인 과제의 비중이 50%(567건)로 가장 큰 것으로 드러났고, 1억 원 이상 5억 원 미만인 과제와 5억 원 이상인 과제는 각각 38%(432건), 11%(126건)를 차지하는 것으로 확인됨

그림 11. 연구비 규모별 과제 수 및 비율



□ (연구수행주체) 연구수행주체별로 살펴보면, 대학(39%, 1,137억 원), 출연연구소(29%, 859억 원), 중소기업 (14%, 413억 원) 순으로 연구비 비중이 큰 것으로 드러남

그림 12. 연구수행주체별 연구비 규모 및 비율



- (연구수준) 연구수준을 분석한 결과, CCU 기술 관련 연구는 도입기이며 기초연구 단계인 것으로 나타남
- (연구개발단계 분석 결과) 기초연구 연구비가 CCU 기술 관련 전체 연구비의 절반 이상인 54%(1,555억 원)를 차지하며, 개발연구의 연구비는 29%(848억 원), 응용연구의 연구비는 16%(475억 원)의 비중을 차지하는 것으로 확인됨
 - (연구개발성격 분석 결과) 아이디어개발 관련 연구의 연구비(45%, 233억 원)와 제품 또는 공정개발 관련 연구의 연구비(42%, 219억 원)가 CCU 기술 관련 전체 연구비의 대부분을 차지하며 시작품개발 관련 연구의 연구비 비중은 12%(63억 원)인 것으로 드러남
 - (기술수명주기 분석 결과) 도입기에 대한 연구비의 비중이 63%(1,094억 원), 성장기에 대한 연구비의 비중이 36%(633억 원)를 차지하는 것으로 나타남

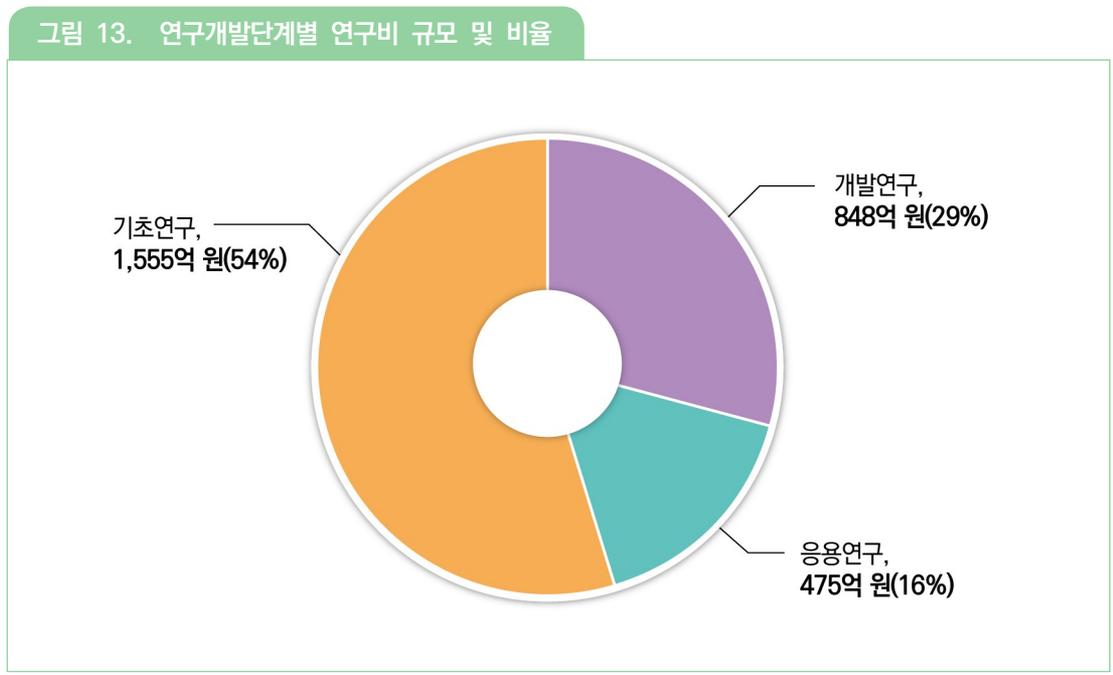


그림 14. 연구개발성격별 연구비 규모 및 비율

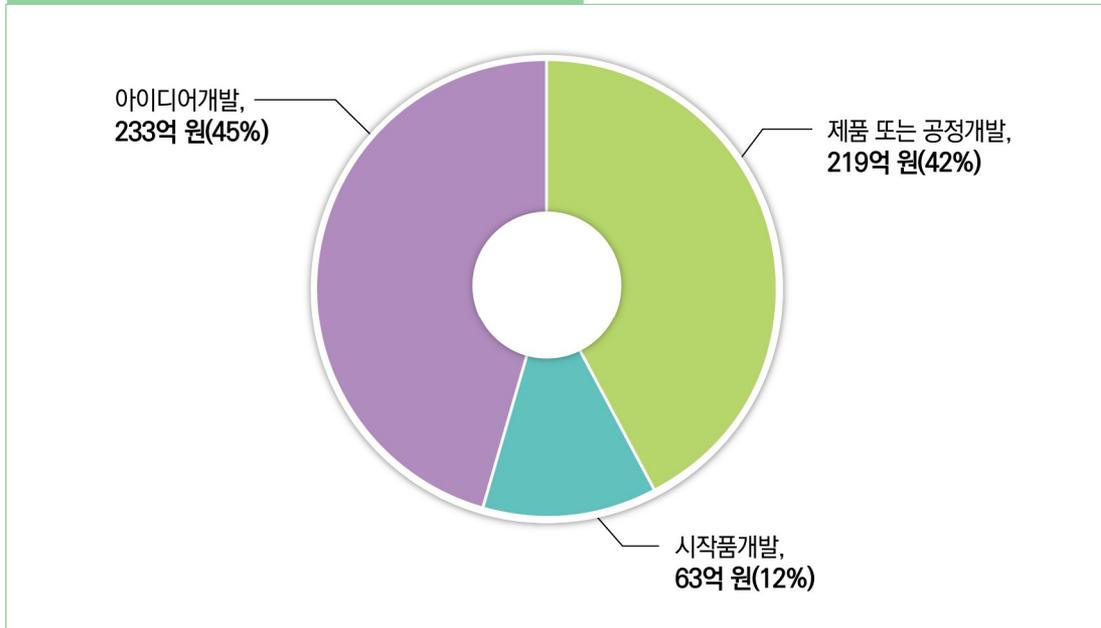
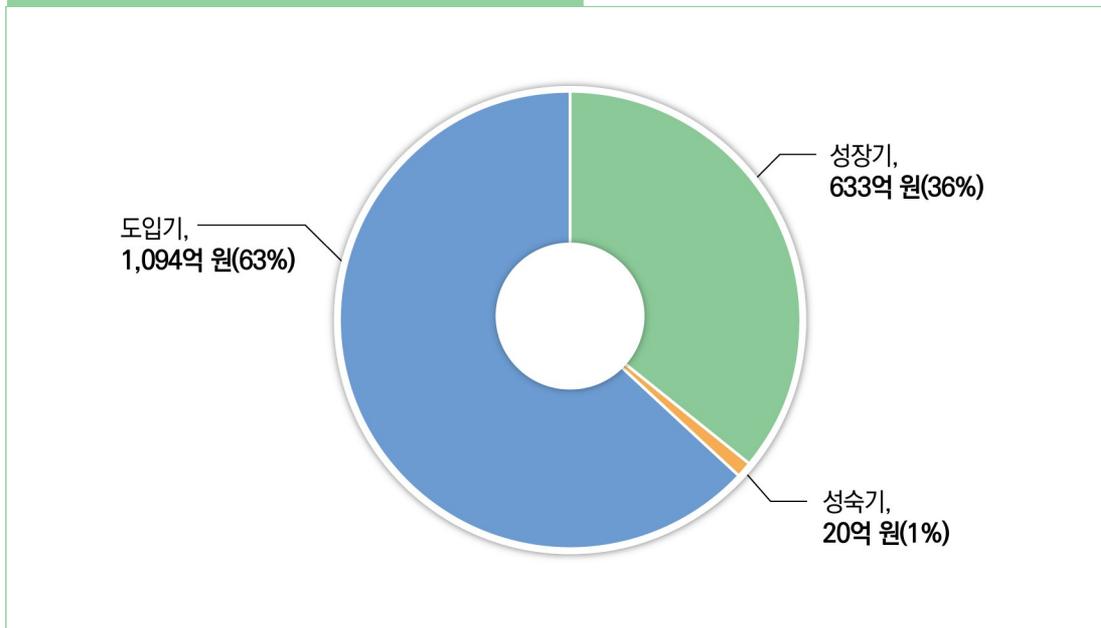


그림 15. 기술수명주기별 연구비 규모 및 비율



□ **(연구분야)** 국가과학기술표준분류와 미래유망신기술분류(6T) 분석 결과, CCU 기술에 대한 연구비 투자는 환경 기술(ET) 및 에너지/자원 분야를 바탕으로 연구비 투자가 이루어짐

- **(국가과학기술표준분류 분석 결과)** 국가과학기술표준분류 중 에너지/자원 분야에 대한 연구비 비중(31%, 925억 원)이 가장 큰 것으로 나타났으며 화공(20%, 601억 원) 분야가 그다음으로 큰 것으로 확인됨
 - ※ 연구책임자가 최대 3개까지 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류에 대한 각 가중치를 고려한 결과임
- CCU 기술 관련 전체 연구 중 융합과제의 연구비 비중은 39%(1,142억 원)인 것으로 드러남
 - ※ 융합과제란 연구책임자가 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류가 두 개 이상의 분류에 해당하는 과제를 의미함
- **(미래유망신기술분류(6T) 결과)** 환경 기술(ET) 관련 연구에 대한 연구비가 CCU 기술 전체 연구비의 61%(1,785억 원)를 차지하고, 나노 기술(NT) 연구의 연구비 비중은 15%(450억 원), 바이오 기술(BT) 연구의 연구비 비중은 9%(275억 원)인 것으로 나타남

그림 16. 국가과학기술표준분류별 연구비 규모 및 비율

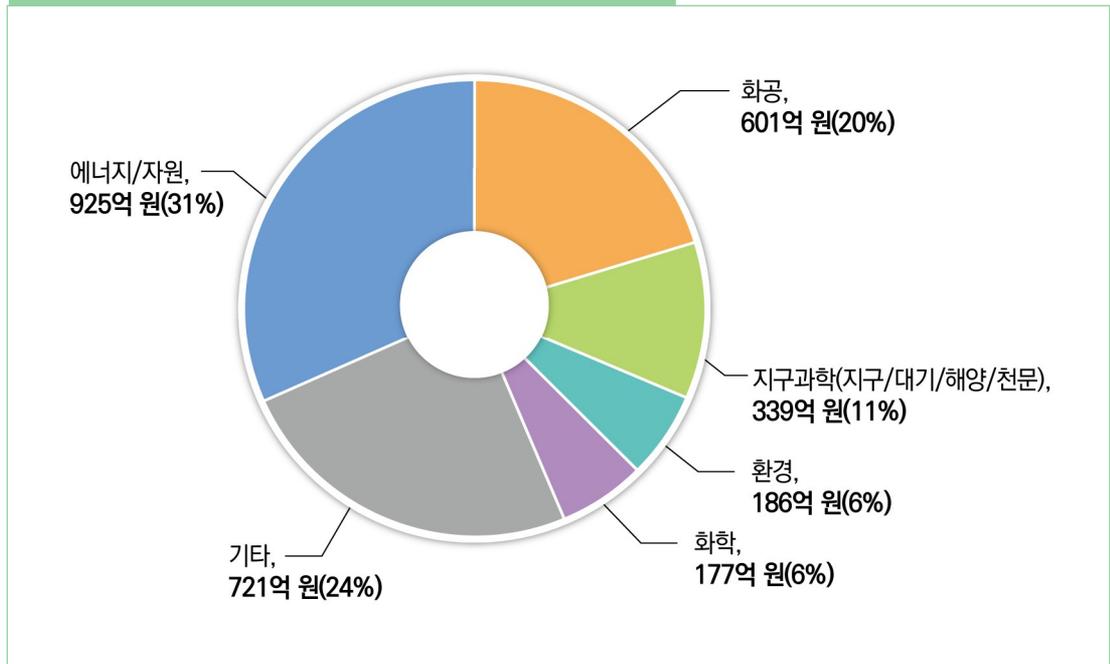


그림 17. 융합 R&D 과제 연구비 규모 및 비율

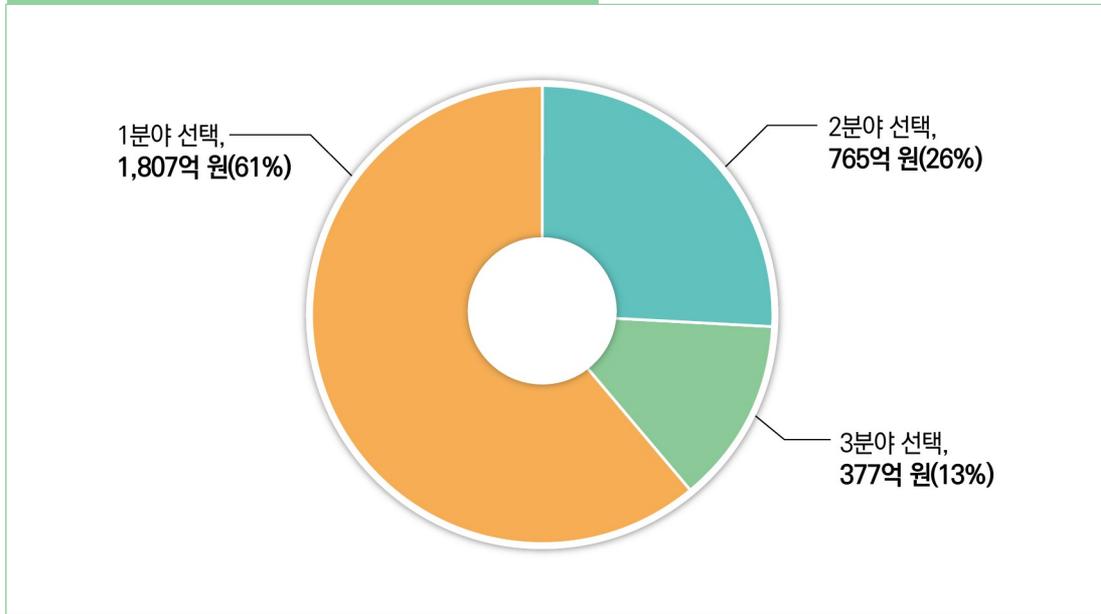
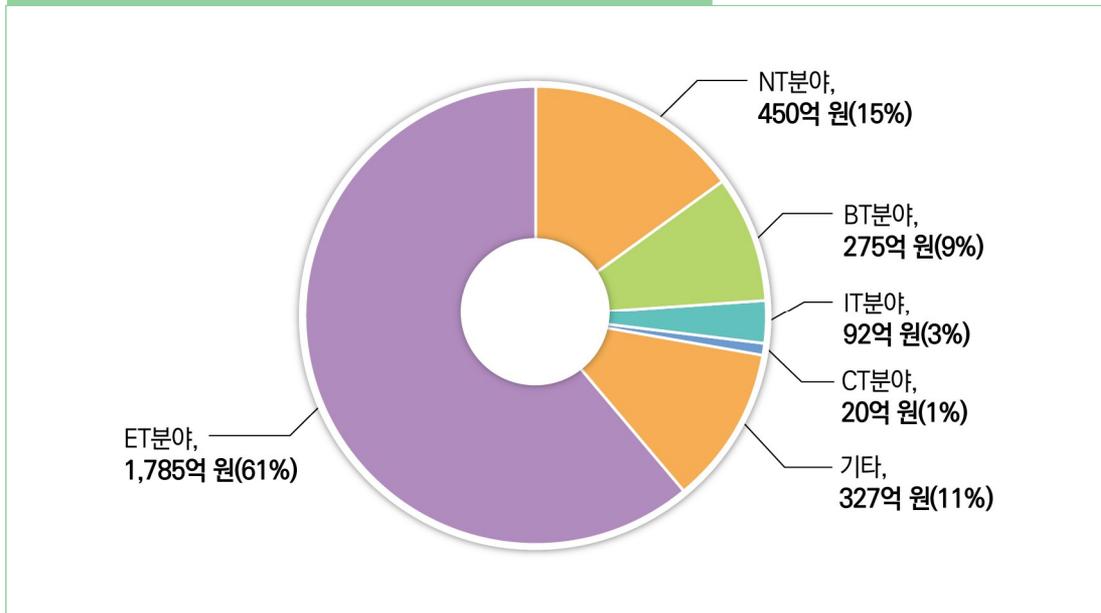


그림 18. 미래유망 신기술분류(6T)별 연구비 규모 및 비율



□ (주요 과제) 원고의 주요 내용 및 키워드 등을 기준으로 선정함

과제명 (사업명, 부처명)	수행기관, 총 연구기간, 연구비 규모	과제 주요 내용
글리세롤 활용 이산화탄소 동시 전환 불균일 촉매기술 개발 (기후변화대응기술개발, 과학기술정보통신부)	한국화학연구원, 2020-2021년, 5억 원('21)	나노스케일 금속노드 단위 조작을 통한 이산화탄소(탄산염)와 바이오알콜 동시전환 나노촉매 설계 및 합성기술 및 포름산유도체 화합물, 젯산유도체 제조기술 개발
이산화탄소 포집 및 전환용 전도성고분자 기반 하이브리드나노입자 연구 (개인기초연구, 과학기술정보통신부)	중앙대학교, 2019-2022년, 1억 원('21)	광흡수특성과 광에너지전환 효율이 우수한 전도성고분자를 이용하여 이산화탄소의 포집과 전환이 동시에 가능한 하이브리드 나노입자 개발
열화학공정을 통한 이산화탄소 연료화 (4단계두뇌한국21사업, 교육부)	세종대학교, 2019-2022년, 0.1억 원('21)	열화학공정(열분해)을 기반으로 하는 폐기물 처리/에너지화 공정 내에서 탄소/에너지원으로서 이산화탄소를 활용하여 고부가가치 산물 및 합성가스 생성

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 October vol.8 no.10

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

(No. NRF-2012M3C1A1050726)