

국내외 물질순환 기술 R&D 현황 및 전략

연구기관 : 충남대학교

연구책임자 : 장용철

국회미래연구원

제 | 출 | 문

국회미래연구원 원장 귀하

본 보고서를 “국내외 물질순환 기술 R&D 현황 및 전략”의 최종보고서로 제출합니다.

2022년 9월 30일

연구기관명 : 충남대학교

연구책임자 : 장용철(충남대학교 교수)

연구원 : 최경훈(충남대학교 연구교수)

목 차

제1장 서론	1
1절 사업명	2
2절 사업의 범위	2
3절 연구 기간	3
4절 배경 및 필요성	3
5절 사업 목표	5
6절 추진 체계	7
제2장 물질순환 미래기술 연구개발 동향	8
1절 분야별 물질순환 기술	8
1. 플라스틱 자원화 기술	8
가. 세부기술 정의	8
나. 국내 플라스틱 자원화 기술 연구개발 현황	22
다. 해외 플라스틱 자원화 기술 연구개발 현황	33
라. 요약 및 시사점	41
2. 유가금속 재자원화 기술	42
가. 세부기술 정의	42
나. 국내 유가금속 재자원화 기술 연구개발 현황	51
다. 해외 유가금속 재자원화 기술 연구개발 현황	56
라. 요약 및 시사점	63
3. 재제조 물질순환 기술	65
가. 세부기술 정의	65
나. 국내 재제조 물질순환 기술 연구개발 현황	68
다. 해외 재제조 물질순환 기술 연구개발 현황	72

라. 요약 및 시사점	74
2절 순환경제를 위한 물질순환 미래기술 개발을 위한 재정 투자현황	76
1. 재정투자 현황	76
2. 요약 및 시사점	85

제3장 순환경제를 위한 중장기 물질순환 미래 핵심기술 개발 전략과 방향 86

1절 중장기 물질순환 미래 핵심 기술 개발의 전략 수립과 방향	87
2절 주요 분야별 물질순환 기술 개발과 전략	93
1. 플라스틱 자원화 기술 개발과 방향	93
가. 플라스틱의 기계적 재활용 기술 개발과 방향	95
나. 플라스틱의 화학적 재활용 기술 개발과 방향	95
다. 바이오플라스틱의 재활용 기술 개발과 방향	96
라. 플라스틱 자원화 핵심기술 개발	97
2. 유가금속 재자원화 전략	98
가. 전기차 폐배터리의 유가물질 회수 기술 개발과 방향	101
나. 폐전기전자제품의 유가물질 재자원화 기술 개발과 방향	101
다. 태양광 폐패널의 유가물질 재자원화 기술 개발과 방향	102
라. 유가금속의 재자원화 핵심 기술 개발	103
3. 재제조의 제품 순환 전략과 기술	104
가. 순환경제를 위한 재제조 미래 산업의 분야와 성장	

잠재력	107
나. 순환경제를 위한 재제조 미래 산업의 전망과 장애요인	108
다. 순환경제를 위한 재제조 산업의 성과 지표	112
3절 미래 물질순환 기술 로드맵 개발	114
1. 플라스틱 자원화 기술 전략과 로드맵	114
2. 유가금속 재자원화 기술 전략과 로드맵	117
3. 재제조를 통한 제품 순환 기술 전략과 로드맵	119
4절 물질순환 미래 핵심기술 개발의 이행 방안과 추진 체계	122
1. 국가 자원순환경제 정책과 연계 강화	122
2. 국가 연구개발 투자 방향과 연계 강화	122
2. 국가 연구개발 투자 방향과 연계 강화	122
3. 산업계의 투자 방향과 연계 강화	123

제4장 결론	124
--------------	-----

참고문헌	128
------------	-----

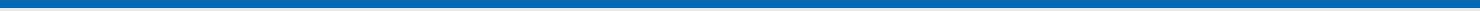
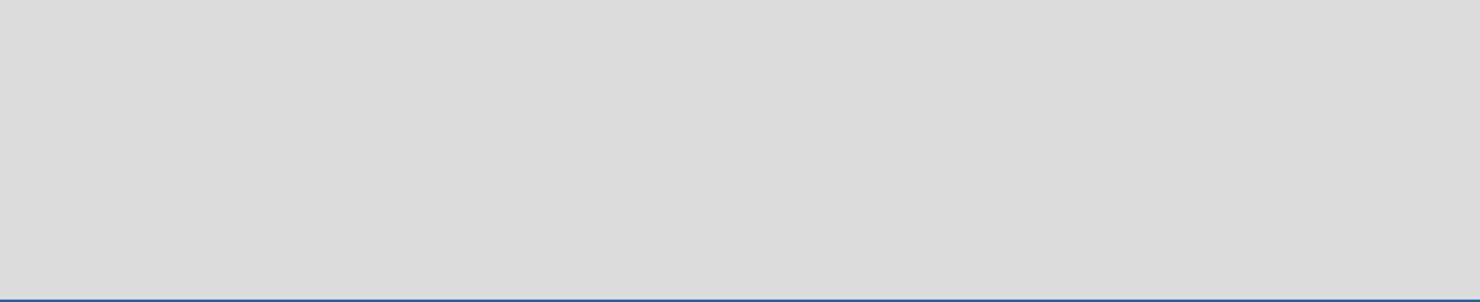


표 목 차

<표 2.1> 범부처 R&D 전략 정립을 위한 18개 플라스틱 자원순환 중점기술	10
<표 2.3> 폐플라스틱의 원료 재활용 단계별 기술개발	32
<표 2.4> 바이오매스 유래 원료 대체기술 단계별 기술개발	32
<표 2.5> 합성원유 제조기술 단계별 기술개발	33
<표 2.6> 국가별 플라스틱 대체재 및 재활용 개발 동향	36
<표 2.7> 바이오 플라스틱의 종류	37
<표 2.8> 국외 국가별 플라스틱 재활용사업 동향	39
<표 2.9> 비철금속 분야 단계별 기술개발	55
<표 2.10> 금속계 재생자원 금속회수 단계별 기술개발	55
<표 2.11> 연도별 재제조 시장 규모 현황	69
<표 2.12> 친환경 산업 전환에 따른 미래 폐자원 재제조 선제 기술 예비타당성 조사 진행 현황	70
<표 2.13> 산업특화 재제조 기술 단계별 기술개발	71
<표 2.14> 미래산업 순환경제 체제 구축 혁신기술 단계별 기술개발	71
<표 2.15> 주요 선진국의 재제조품 시장규모	73
<표 2.16> 환경부 최근 7년간 자원순환 분야 예산 현황 및 추이	77
<표 2.17> 산업부 순환경제 관련 사업 및 예산 지원 현황	77
<표 2.18> 산업부 탄소중립 R&D 예산 (정부안 기준)	84
<표 3.1> 플라스틱 물질순환을 위한 핵심 기술 개발과 전략	97
<표 3.2> 미래 산업 제품군과 유가금속과 원소의 공급망 리스크 요약	100
<표 3.3> 유가금속 함유 제품의 물질순환을 위한 핵심 기술 개발과 전략	104
<표 3.4> 재제조 미래 산업 분야의 제품군과 예상 연간 성장률(%)	107
<표 3.5> 재제조의 순환경제 기여도 지표(안)	112

그림목차

<그림 2.1> 증기와 압축의 물리적 가공 과정만으로 재활용한 바이블록 제품	14
<그림 2.2> 플라스틱 열분해 기술	15
<그림 2.3> 화학적 재활용 PET 생산	16
<그림 2.3> 열분해 기술, 가스화기술, 소각의 차이	17
<그림 2.4> 폴리머 구조 PLA의 lactic acid 모노머 구조로 변환	18
<그림 2.5> 해중합 기술 (Depolymerization)	19
<그림 2.5> 플라스틱의 비생물학적 및 생물학적 분해 모식도	20
<그림 2.6> PET병의 분해산물로부터 변환된 방향물질 (Vanillin)	21
<그림 2.7> 폐플라스틱 성상별 리사이클링 R&D 현황	22
<그림 2.8> 생물전환기술 이용 고부가 자원화	28
<그림 2.9> PET 사슬 끊는 촉매/미생물 이용한 통합 공정	29
<그림 2.10> 플라스틱의 비생물학적/생물학적 분해	36
<그림 2.11> 국외 정유/화학기업의 화학적 재활용 시장 진출을 위한 파트너십 체결	41
<그림 2.12> 냉장고의 재활용 기술 공정 예시 : 해체/파쇄/선별	46
<그림 2.13> 실리콘 태양광 폐패널의 재활용 공정	48
<그림 2.14> 국내 전기차 폐배터리의 재활용 공정	50
<그림 2.15> 태양광 폐패널의 재활용 공정	58
<그림 2.16> 전기차 폐배터리의 재활용 기술 공정	62
<그림 2.17> 재제조 정의	65
<그림 2.18> 재사용, 재제조, 물질재활용의 비교	66
<그림 2.19> 미국의 재제조 산업별 생산규모 [2011년, 백만 달러]	74
<그림 2.20> 전 세계 폐전기전자제품의 예상 발생량	79
<그림 2.21> 전세계 태양광 누적 발전량과 태양광 폐패널의 누적 예상 발생량	80
<그림 2.22> 전세계 전기차의 예상 누적 사용 대수	82
<그림 2.23> 국가별 전기차의 판매 예상(a) 및 전기차의 구매 비율(b)	83

<그림 3.1> 물질순환 미래 핵심 기술과 국내 산업의 연관성	90
<그림 3.2> 물질순환 미래 핵심 기술과 주요 키워드 분석	90
<그림 3.3> 물질순환 미래 핵심 기술의 비전과 목표	91
<그림 3.4> 플라스틱 순환경제 구축 전략과 물질순환 개념도	94
<그림 3.5> 순환경제에서의 재제조 역할과 공정 개념도	106
<그림 3.6> 석유계 플라스틱 순환경제를 위한 물질 순환 기술 개발 전략과 로드맵	115
<그림 3.7> 바이오 플라스틱 순환경제를 위한 물질 순환 기술 개발 전략과 로드맵	117
<그림 3.8> 유가금속의 물질 순환 기술 개발 전략과 로드맵	119
<그림 3.9> 재제조를 통한 제품 순환 기술 개발 전략	121

요 약

I 장. 연구개요

연구과제명	국내외 물질순환 기술 R&D 현황 및 전략			
연구기관	충남대학교	위탁책임자	소속	환경공학과
			성명	장 용 철
연구기간	2022. 04. 06. ~ 2022. 09. 30. (5개월 25일)			
연구개발비	22,000,000원			
참여연구원수	총 2명			

II 장. 연구목적 및 필요성

- 선형경제로 인해 자원고갈, 지구온난화, 환경오염 문제가 지속적으로 발생하고 있어 이에 대한 해결을 위해 원료의 투입을 최소화하고 소비 후 자원은 회수하여 다시 경제영역으로 되돌리는 순환경제 시스템의 구축이 반드시 필요함
- 유럽의 EU 순환경제이행계획 (2020년) 뿐 아니라 대한민국 2050 탄소중립 중 순환경제 추진 발표(2020년 10월), 한국형 K-순환경제 이행계획 발표 및 추진(2021년 12월 31일)에 따른 순환경제사회로의 전환은 매우 중요한 과제임

- 국가 미래 산업 경쟁력 향상을 위해 정책과 제도 지원과 함께 물질순환경제 기술 동향 분석과 미래 전략 방향 제시가 필요함

Ⅲ장. 연구개발의 내용 및 범위

1 국내외 물질순환 미래 기술 연구 동향 분석

- 물질순환 기술 연구 개발 동향 분석
 - 특히, 논문, 보고서 등 물질순환 기술별 연구동향 대상
 - 기술범위는 플라스틱 자원화, 유가금속 재자원화, 재제조 물질순환 등으로 구분
 - 과거 10년 기간 범위로 한정
- 주요 국가별 물질순환 주요 분야별 기술개발 특징 및 시사점 조사
 - 순환경제를 위한 물질순환 주요 분야별 세부 기술 정의
 - 각 기술개발 수준 분석 및 시사점 제시
- 순환경제를 위한 물질순환 미래 기술 대책 수립
 - 물질순환 핵심 기술 개발 분야 파악
 - 미래기술 개발을 위한 재정 투자 방향 및 전략 분석

2 순환경제를 위한 중장기 물질순환 미래 기술 전략과 방향 제시

- 물질순환 핵심 기술 연구개발 요약 및 중장기 기술 개발 전략 도출
 - 국내외 핵심기술 연구개발 동향 분석 및 기술개발 전략 초안 도출
 - 2030/2040/2050 물질순환 기술 개발 방향 및 전략 토의
- 중장기 물질순환 핵심 미래 기술 개발 방향 제시

- 순환경제 구축을 위한 국내 물질순환 주요 기술 개발 방향 수립
- 2030/2040/2050 물질순환 세부 분야별 기술 개발 방향 제시
- 국내 물질순환 세부 분야별 기술 개발 로드맵 제시
- 중장기 물질순환 핵심 미래 기술 전략 제시 및 기대효과 분석
 - 순환경제 구축을 위한 국외 물질순환 핵심 미래기술 개발 전략 제시
 - 국내 물질순환 핵심 미래 기술 전략에 따른 순환경제 구축 기대효과 및 탄소중립 기여도 평가
 - 순환경제 구축을 위한 물질순환 미래 기술 개발 및 정책 제도적 지원 연계방안 제시

IV장. 연구 결과

1 국내외 물질순환 미래 기술 연구 동향 분석

- 플라스틱 자원화
 - 국내외 플라스틱 물질순환은 주로 기계적 재활용을 중심으로 이루어져 왔으며, 최근 들어 유럽과 일본을 중심으로 화학적 재활용 기술 개발에 대한 투자와 산업계 참여가 활발히 이루어지고 있음
 - 국내에서도 최근 플라스틱의 기계적 재활용의 고도화와 열분해 기술 개발, 해중합 기술 개발, 생물학적 재활용 기술 등에 대한 산업계 상용화 기술 개발과 국가 연구 개발 투자가 이루어지고 있음
- 유가금속 재자원화
 - 폐전기전자제품, 전기차 배터리, 태양광 폐패널로부터 유가금속 회수에 대한 기술 개발은 전략원료물질(critical raw materials)의 안정

적인 공급망 구축 관점에서도 최근 들어 활발히 이루어지고 있음

- 폐전기전자제품은 도시광산(urban mining) 관점에서도 유가금속 회수 추출 정제 등의 기술 개발이 꾸준히 이루어져 왔으나, 전기차 배터리와 태양광 폐패널은 미래 폐자원으로 최근 기술 개발 투자가 국내외적으로 활발히 이루어지고 있음

○ 재제조 제품순환

- 국내외 재제조 산업 기술 개발은 주로 전기전자(토너 카트리지 등) 및 자동차 부품을 중심으로 이루어져 왔으며, 최근 들어 기계분야, 전락 기자재, 선박 기자재 등의 분야로 기술 개발 확산이 이루어지고 있음
- 유럽과 미국의 경우, 재제조 산업이 자동차 산업 이외에 항공, 기계설비, 의료기기 등 산업으로 기술 개발 확산이 이루어지고 있음

2 순환경제를 위한 증장기 물질순환 미래 기술 전략과 방향 제시

○ 플라스틱 물질순환 전략과 방향

- 플라스틱 물질순환을 위한 미래 기술 개발 방향은 석유계 플라스틱의 경우 기존 기계적 재활용의 고도화와 현대화를 통한 고품질 재생원료 생산 기술과 활용 기술 개발, 더 나아가 화학적 재활용 기술 개발 투자가 확대되어야 함
- 바이오플라스틱의 경우, 탄소중립 기여도 관점에서 적극적인 기술 개발이 필요하며, 이 과정에서 폐기되는 바이오플라스틱의 수거 및 처리 기술 개발 등이 필요함

○ 유가금속 물질순환 전략과 방향

- 유가금속 물질순환은 미래 신성장 산업 분야(전기차 배터리, 연료전지, 드론 및 로봇, 3D 프린터, 풍력발전기 등)와 연계하여 안정적인 원료 공급망 리스크와 순환경제 구축 관점에서 기술 개발과 투자가 필요함

○ 재제조 제품순환 전략과 방향

- 재제조 분야의 제품 순환은 기존 자동차와 전기전자제품과 함께 항공분야, 기계분야, 선박분야, 의료 장비 분야 등 국내 자원 확보 및 공급망 확보, 순환경제 관점에서 제품 순환 기술 개발과 투자가 필요함

제 1 장

서론

〈 개 요 〉

- 선형경제로 인해 자원고갈, 지구온난화, 환경오염 문제가 지속적으로 발생하고 있어 이에 대한 해결을 위해 원료의 투입을 최소화하고 소비 후 자원은 회수하여 다시 경제영역으로 되돌리는 순환경제 시스템의 구축이 반드시 필요함
- 국가 미래 산업 경쟁력 향상을 위해 정책과 제도 지원과 함께 물질 순환경제 기술 동향 분석과 미래 전략 방향 제시가 필요함

제 1 절 사업명

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

국내의 물질순환 기술 R&D 현황 및 전략

제 2 절 사업의 범위

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

- 국내외 물질순환 미래 기술 연구 동향 분석
- 순환경제를 위한 중장기 물질순환 미래 기술 전략과 방향 제시

제3절 연구 기간

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

□ 2022년 4월 6일 ~ 2022년 9월 30일 (5개월 25일)

제4절 배경 및 필요성

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

- 선형경제에서 순환경제로의 전환은 세계적 핵심 의제 대두
 - 전 세계적으로 기존 선형경제 (linear economy)는 자원고갈 위기, 기후변화, 환경오염 문제를 야기하고 있어 순환경제 (circular economy)로의 전환이 주요 핵심 의제로 대두되었음. 선형경제는 자원의 채취-제품생산-소비-폐기 등의 일방향(one-way) 경제 구조 시스템을 말함. 반면 순환경제는 기존 선형경제 구조의 대안으로서 원료의 투입을 최소화하고, 소비 후 자원을 회수하여 다시 경제영역으로 순환하는 시스템을 말함
 - 세계 각국에서는 기존 선형경제의 문제점과 한계를 극복하고 순환경제로의 전환을 위한 적극적인 정책 추진과 지원, 사회경제 구조 시스템 변화 유도, 산업계와 협력하여 물질 순환성 향상 기술 개발과 재정 투자를 확대하고 있음

○ EU-순환경제이행계획 발표

- 특히 유럽은 2020년 3월 EU 순환경제이행계획을 발표하여 지속가능한 제품 설계, 지속가능한 소비 확대, 생산단계 순환성 강화, 7대 핵심 분야 (전기전자 ICT, 배터리/자동차, 포장재, 플라스틱, 섬유, 건설자재, 식품)의 순환성 향상, 폐기물 발생 및 순환 정책 규제 강화, 자원순환 도시 구축, 기술 투자/혁신/디지털 전환, 국제 순환경제 구축 협력 등을 제시함 (European Commission, 2020)

○ 국가 ‘2050 탄소중립 추진전략’ 과 순환경제 활성화

- 우리나라는 2020년 ‘2050 탄소중립 추진전략’ 에서 10대 과제 중 순환경제 활성화가 포함되었으며, 미래 산업경쟁력 향상과 탄소중립 실현을 위해 순환경제 사회로의 전환은 매우 중요한 과제로 대두되었음 (관계부처합동, 2020)

○ 한국형 K-순환경제이행 계획 발표 (2021년 12월)

- 2021년 12월 탄소중립을 위한 K-순환경제 이행 계획을 수립하여 발표함. 생산 유통단계 자원순환성 강화, 친환경 소비 촉진, 폐자원의 재활용 확대, 안정적 폐기물 처리 체계 확립, 순환경제 사회로의 전환 등 분야별 구체적 이행 방안을 제시함. 특히 폐자원 회수 및 재활용 확대를 위해 고부가가치 폐기물 재활용 촉진, 금속 재자원화 및 도시유전 활성화, 미래 폐자원의 회수 및 재활용 체계 구축, 순환경제 신산업 육성 (재제조 산업 확대와 전략 품목별 기술 개발 포함) 등을 제시함 (산업통상자원부, 2021)

- EU와 유사하게 K-순환경제 이행계획에서 7대 품목 (포장재, 플라스틱, 섬유, 전기전자제품, 배터리/자동차, 음식물, 건설자재 등)의 순환성 향상을 위한 구체적인 전략을 제시함
- 국가 미래 경쟁력 확보를 위한 순환경제 기술 분석과 미래 전략 방향 제시 필요
 - 우리나라는 해외의 자원 의존도가 높고, 수출을 통한 글로벌 경제 체제를 구축하고 있어 안정적인 자원 수급 확보가 중요하고, 최대한 자원의 절약과 순환이 중요함. 특히 기후위기에 직면하면서 최근 탄소중립의 중요성이 부각되고 있으며, 이를 달성하기 위한 순환경제 구축도 핵심 과제로 대두되었음
 - 하지만, 국내 순환경제를 구축하기 위한 물질순환 미래 핵심 기술 개발 수준과 현황 분석은 미흡한 편이고, 주로 지역순환경제와 순환경제 지표 개발 등의 연구 (김은아 외, 2020; 조지혜 외, 2020; 배진수, 2021)가 이루어져, 국내외 물질순환 기술 개발 연구 동향과 비교 분석이 필요함. 이를 통해 중장기 관점에서 물질순환 미래 핵심 기술 개발의 방향 설정과 전략 마련이 필요함

제5절 본 연구사업의 목표

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

- 국내외 물질순환 기술 R&D 현황 분석
 - 본 연구에서는 국내외 물질순환 기술 개발 동향과 현황 분석을 통

해 국내 물질순환 기술 수준과 문제점 파악, 시사점 도출을 제시하는데 있음

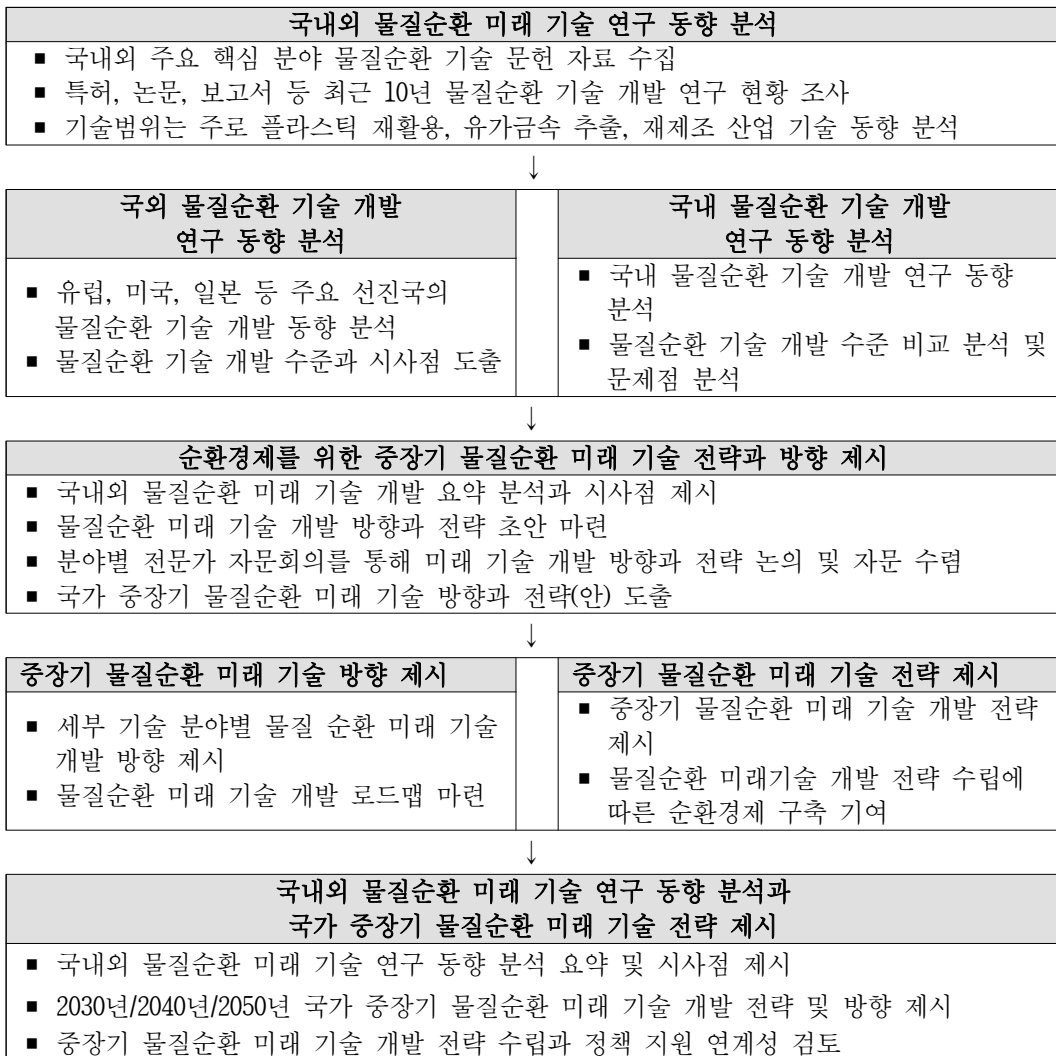
○ 물질순환 미래 기술 중장기 전략 방향 제시

- 국내 물질순환 기술 개발 동향 분석과 문제점 파악을 바탕으로 중장기적 관점에서 순환경제 구축을 위한 물질순환 미래 기술 전략과 방향을 제시하고자 함

제6절 추진 체계

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

○ 본 연구는 다음과 같이 연구수행 내용 및 추진 체계로 구성되었음



제 2 장

물질순환 미래기술 연구개발 동향

제1절 분야별 물질순환 기술 조사

제2절 순환경제를 위한 물질순환 미래기술 개발을 위한 재정
투자현황

1 플라스틱 자원화 기술

가. 세부기술 정의

- 2015년 EU의 순환경제 패키지 발표, 2020년 EU 순환경제이행계획 발표, 2018년 일본의 자원순환 전략, 2024년 플라스틱 국제협약 마련 등 국제적으로 플라스틱 관리는 자원순환 분야에서 핵심적인 영역으로 제시되고 있음
- 그간 플라스틱 자원순환 R&D는 자원 선순환을 위한 전주기 측면이 아닌 바이오 플라스틱 기술, 폐기물 재활용 기술에 편중되었고 부처별 및 연구기관과의 연계성 없이 추진되어 왔음. 최근 코로나 19의 영향으로 포장재 플라스틱 폐기물이 급격히 증가함에 따라 2050 탄소중립 달성을 위한 실효성 있는 대응 정책 및 R&D 전략 수립이 요구됨
- 2021년 10월 국가과학기술자문회의에서는 (1) 범부처 플라스틱 자원순환 R&D 체계의 정립과 (2) 자원순환 기반 체계 구축 및 협력 강화를 추진방향으로 삼았으며, 세부적인 범부처 R&D 전략 정립을 위한 18개 중점기술을 다음과 같이 제시했음 (국가과학기술자문회의, 2021)

〈표 2.1〉 범부처 R&D 전략 정립을 위한 18개 플라스틱 자원순환 중점기술

대분류	중분류	소분류
1. 생산	1.1. 석유계 플라스틱 개선기술(친환경설계)	1.1.1. 단일 소재화 기술 1.1.2. 내구성 강화 및 경량화 기술
	1.2. 바이오플라스틱 등 대체소재 개발 기술	1.2.1. 바이오매스 플라스틱(Bio-based) 1.2.2. 생분해성 플라스틱(Bio-degradable) 1.2.3. 플라스틱 대체 혁신소재 개발 기술
	1.3. 재생플라스틱 제품화기술	1.3.1. 재생플라스틱 제품화 및 생산기술 1.3.2. 재생플라스틱 품질개선 기술
2. 소비·회수	2.1. 제품의 환경성 정보제공 기술	2.1.1. 제품 순환성 및 환경성의 ICT 기반 표시 기술
	2.2. 스마트 수거 기술	2.2.1. ICT 등 디지털 기반 수거 및 추적 기술
	2.3. 재질별 선별 고도화 기술	2.3.1. 근적외선, 레이저 선별 및 AI 학습기반분리-선별 자동화 기술
	2.4. 다회용 포장재 기술	2.4.1. 다회용 용기 및 재사용 포장재 개발 기술 2.4.2. AI, IoT 기술을 활용한 탄소 저감 소비 및 재사용 플랫폼 기술
3. 자원화 기술	3.1. 기계적(물질) 재활용 기술	3.1.1. 물질 재활용 고도화 기술(원료·제품)
	3.2. 화학적 재활용 기술	3.2.1. 열분해 기술 3.2.2. 가스화 기술 3.2.3. 해중합 기술
	3.3. 생물학적 재활용 기술	3.3.1. 생물학적(효소/미생물) 분해 기술 3.3.2. 분해산물 업사이클링 기술
4. 전 범주	4.1. 전주기 정보화 관리 기술	4.1.1. 전주기 정보체계 개발 기술 4.1.2. 물질 재활용 통계 고도화 기술

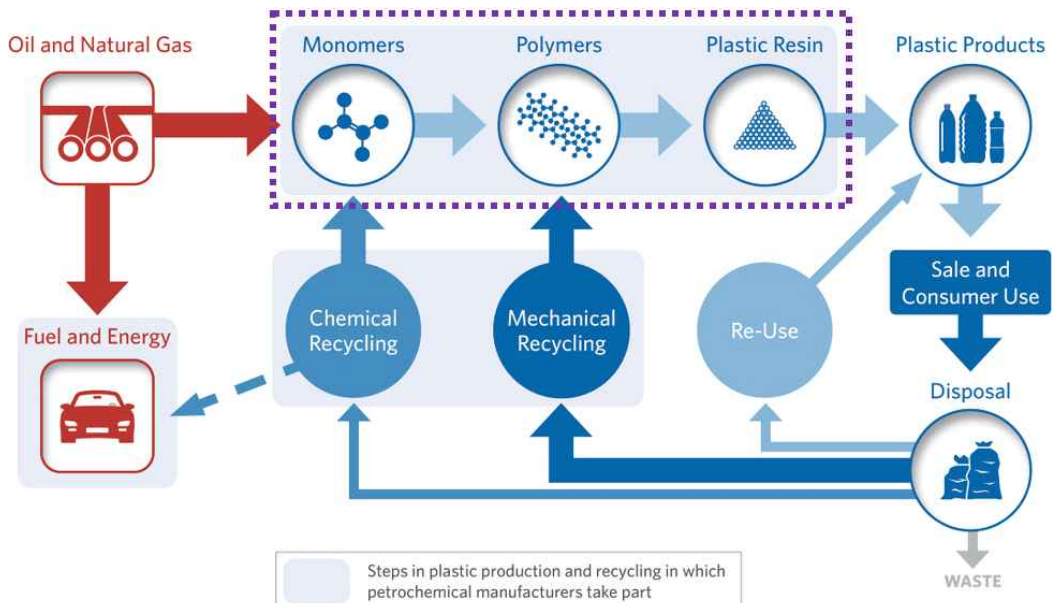
(출처 : 국가과학기술자문회의, 2021)

○ 플라스틱 순환경제를 이끄는 2가지 트렌드는 플라스틱 재활용과 바이오플라스틱 (삼성증권, 2021; European Commission, 2018)이 될 것으로 판단됨. 본 연구에서는 플라스틱 재활용 방법 중 기계적, 화학적, 생물학적 기술과 함께 바이오플라스틱 기술 역시 순환경제를 위한 중장기 물질순환 미래기술로써 검토하고자 함

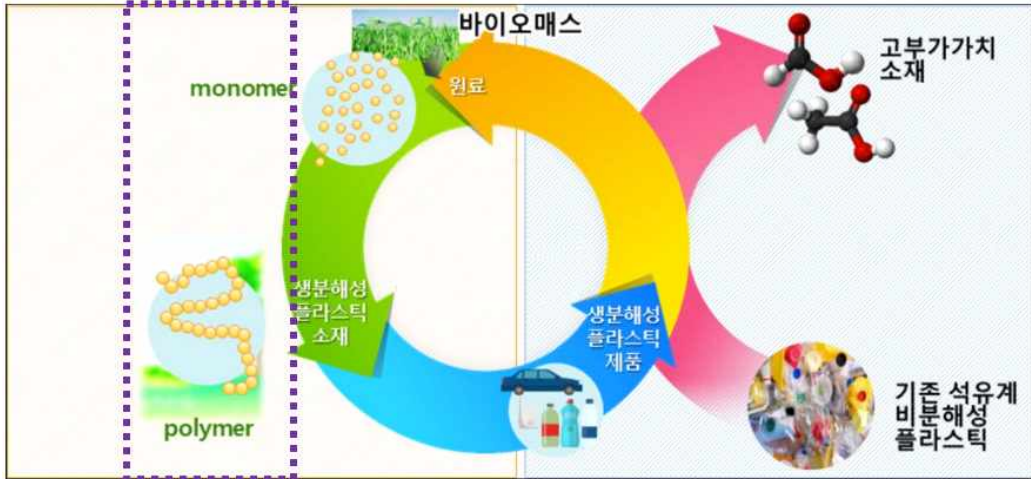
○ 탄소저감을 위한 폐플라스틱 자원화 방법

플라스틱 재활용		
기계적 재활용	화학적 재활용	생물학적 재활용

<플라스틱 재활용 방법>



(a) 플라스틱의 재활용 공급 체인



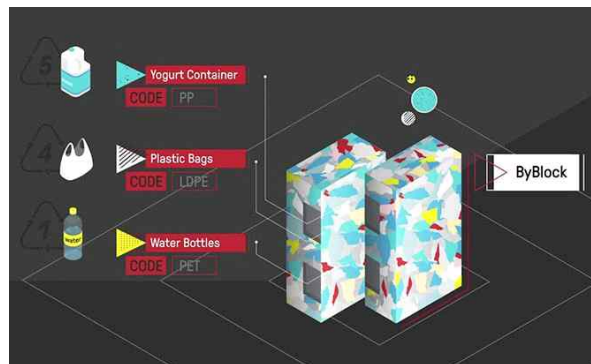
(b) 바이오플라스틱의 제조 순환주기

(출처 : (a) AFRM, 2019; (b) 김용환, 2020)

○ 기계적(물질) 재활용(material recycling) 기술

- 기술 개요 : 폐플라스틱의 분쇄·용융 등 물리적인 가공을 통해 다시 플라스틱 제품을 생산하는 방식을 말하며, 구체적으로는 폐플라스틱을 원료로 사용하여 기계적인 파쇄, 세척, 건조, 선별/분리 공정을 거쳐 수지의 종류별 성상별로 구분된 플레이크 (flake) 또는 펠렛 (pellet) 등으로 가공하는 기술을 의미함 (장용철, 2022). 가공품은 플라스틱 제품의 성형용 원료로 사용됨. 기계적 재활용 기술은 플라스틱 제품과 동급수준 또는 그 이상의 재활용 원료 및 제품으로 생산하기 위해 화학적, 생물학적 재활용 기술 및 업사이클링 기술들과 마찬가지로 그 완성도 및 효율 극대화를 위해 최적의 전처리 과정이 수반되어야 함 (국가과학기술자문회의, 2021)
- 장·단점 : 일반적으로 열화학적 재활용 방법에 비하여 첨가제나 열원과 같은 추가적인 공정이 덜 필요하거나 불필요하지만, 사용된 폐플라스틱의 오염 상태 및 전처리 수준에 따라 가공품

의 품질 저하를 피할 수 없음. 즉, 화석 연료를 이용해 최초로 생산된 플라스틱에 비해 품질이 낮아져 무한히 재활용하기는 어렵다는 측면이 있음. 또 하나는 플라스틱의 화학적 구조 변화 없이 물리적 형태만 바꾸는 것이기 때문에 여러 화학제품이 혼합된 플라스틱, 또는 오염된 폐플라스틱에는 적용하기 어려움 (TIN뉴스, 2022). 국내 현황은 재활용 PET (recycled-PET, r-PET) 제조를 위한 이물질 제거기술 부족 및 원료 품질의 균일화 제조기술 부재로 인해 저가 섬유제품 또는 밴드 형태의 제품만 생산 가능한 수준이므로 이물질 제거 기술 및 순도 향상 기술 개발이 필요함 (국가과학기술자문회의, 2021)





<그림 2.1> 증기와 압축의 물리적 가공 과정만으로 재활용한 바이블록 제품
(출처 : BIZION, 2022)

○ 화학적 재활용 (chemical recycling) 기술

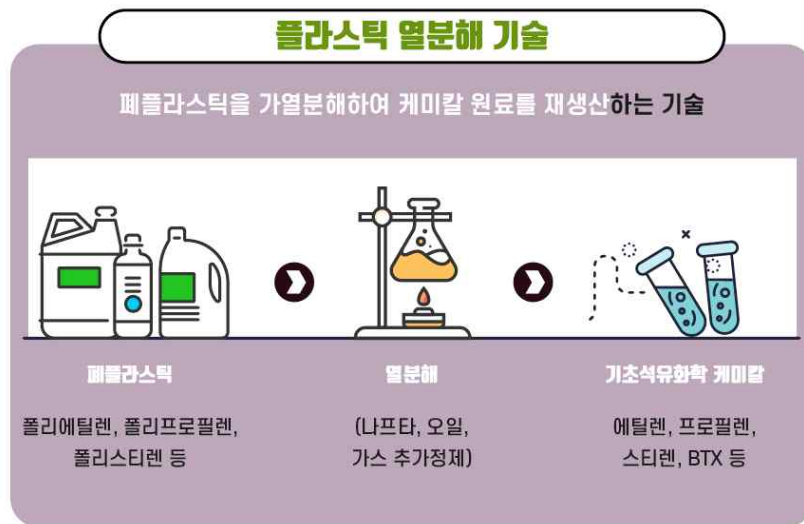
(1) 열분해 기술

- 기술 개요 : 무산소 및 약 400~550℃ 조건에서 폐플라스틱을 가스성분으로 열분해한 후 냉각하여 액상의 연료 또는 원료유로 변환시키는 기술을 말하며, 기술 수준은 일부 상용화된 상태이며 최근 수소 생산기술도 도입되고 있음. 열분해 기술의 경우 소각 및 가스화 기술과는 달리 열가소성 플라스틱에 제한적으로 적용함 (국가과학기술자문회의, 2021)

비점 차이에 따라 생성된 액상 열분해유는 경질유, 중질유, 반고상 왁스 등 각각의 특성에 따른 화학원료로 활용될 수 있음. 또한 폐플라스틱의 물질재활용 방법상 물성저하의 한계를 극복하여 실질적인 플라스틱 자원화의 Closed Loop 형태의 시스템 구축이 가능함. 상용화 기술개발을 위한 국가 차원의 지원은 2000년대 초기부터 시작되었으나, 경제성 및 운전성 문제로 인하여

회분식 시스템 수준의 기술개발 및 상용화 단계임 (국가과학기술자문회의, 2021).

- 장·단점 : 폐플라스틱이 다시 원료로 재탄생하기 때문에 품질 면에서 지속가능성을 확보할 수 있음. 해중합 기술로 처리할 수 없었던 PE, PP와 같은 제품의 재활용이 가능하다는 장점이 있고, 다양한 성분이 섞여 균일하지 않은 플라스틱에서 납사(나프타) 등 플라스틱의 원료 물질을 뽑아낼 수 있음 (TIN뉴스, 2022). 실제 완전 반응기 내부를 완전 무산소 조건으로 조성하기가 어려움. 이는 플라스틱을 반응기 안에 투입할 때 공기가 들어가지 않도록 차단하기가 쉽지 않기 때문임 (자원순환사회연구회, 2020)



<그림 2.2> 플라스틱 열분해 기술

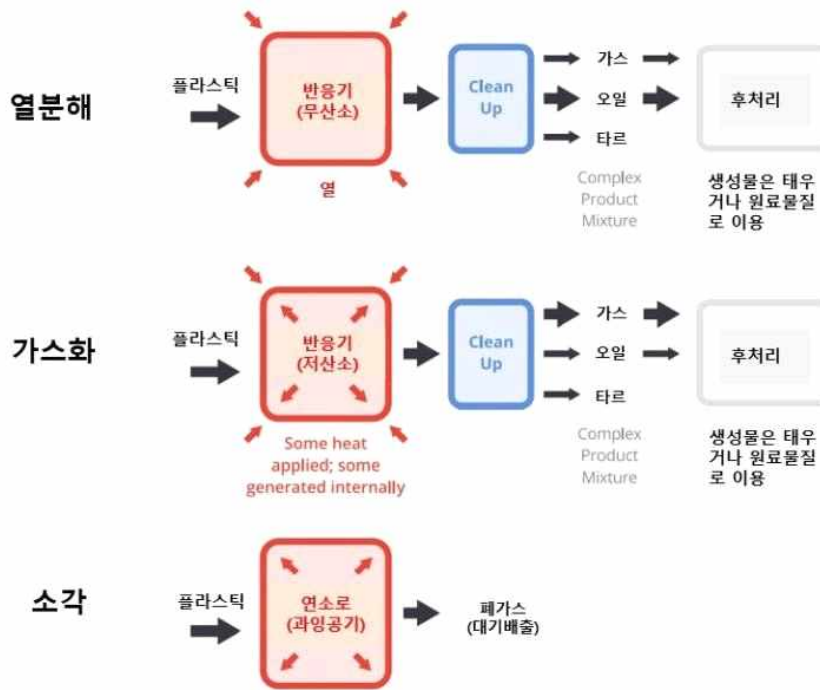
(출처 : 한화솔루션, 2020)



〈그림 2.3〉 화학적 재활용 PET 생산
(출처 : 한화솔루션, 2020)

(2) 가스화 기술

- 기술 개요 : 약 850℃ 이상의 부분 산화 조건에서 폐플라스틱을 가스화하여 일산화탄소와 수소를 주성분으로 하는 합성가스를 생산하는 기술임. 열분해 기술과는 달리 대상이 되는 플라스틱의 종류에 제한은 없으나, 합성가스를 이용하여 최종 생산하고자 하는 화학원료 물질의 종류에 따라 합성가스 이용기술이 다양함 (국가과학기술자문회의, 2021).



〈그림 2.3〉 열분해 기술, 가스화기술, 소각의 차이
(출처 : 자원순환사회연구소, 2020)

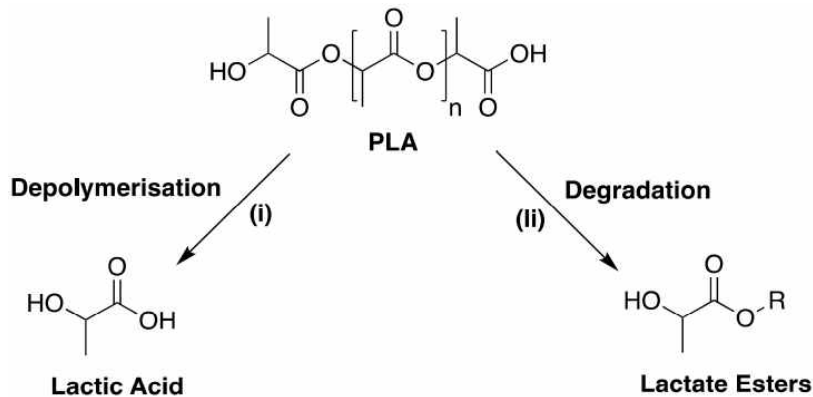
- 장·단점 : 열분해에 비해 투입되는 공기의 양이 더 많으며, 이 때문에 가스화 공정은 열분해 공정에 비해 가스 발생량이 많은 것이 특징임 (자원순환사회연구소, 2020).

(3) 해중합 기술

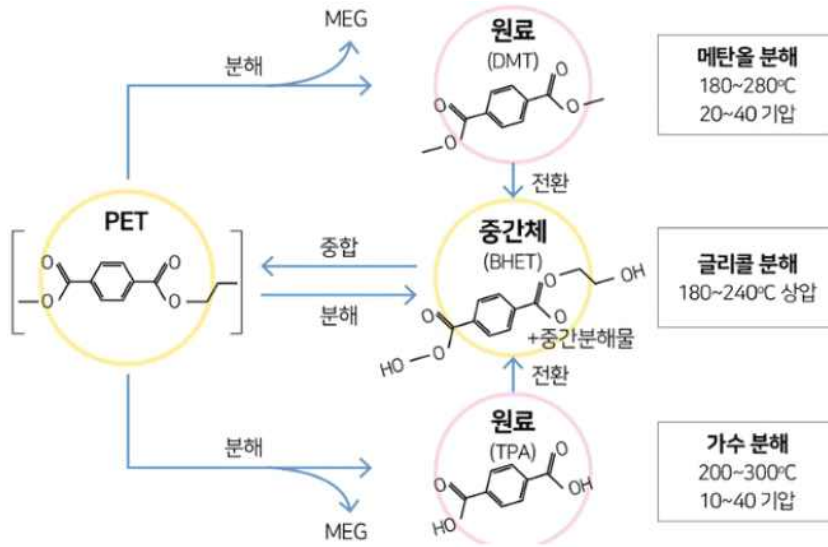
- 기술 개요 : 해중합 (depolymerization)은 플라스틱을 단량체 또는 유용 화합물 형태로 바꾸는 화학반응 기술임 (국가과학기술자문회의, 2021). 대표적인 해중합 반응으로는 알코올분해

(alcoholysis), 당분해 (glycolysis), 가수분해 (hydrolysis)가 있음 (국가환경정보센터, 2016).

- 장·단점 : 재활용을 거친 플라스틱의 물성이 처음 만들어진 플라스틱과 유사하다는 장점이 있음. 이 기술은 원료가 되는 폐플라스틱이 동일한 성분이어야 하기 때문에 해중합 방식으로 화학적 재활용을 할 수 있는 제품은 페트, 폴리우레탄 등으로 한정됨. 따라서 해중합은 주로 폐PET병의 재활용에 쓰일 전망이다. 또한 기존 폴리에스터계 고분자 해중합 반응을 통해 만들어진 단량체 정제공정은 에너지 소모량이 커 경제성 확보가 어려우며, 반응성이 높은 금속 촉매가 필요함 (TIN뉴스, 2022).



<그림 2.4> 폴리머 구조 PLA의 lactic acid 모노머 구조로 변환
(출처 : Payne, J 외, 2019)



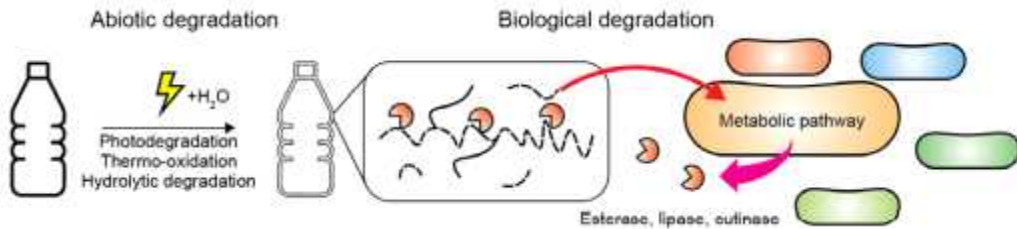
〈그림 2.5〉 해중합 기술 (Depolymerization)
(출처 : Payne, J 외, 2019)

○ 생물학적 재활용 기술

(1) 생물학적 (효소/미생물) 분해 기술

- 기술 개요 : 효소 및 미생물을 이용하여 플라스틱을 분해 (해중합)하는 기술로, 이산화탄소와 물 등으로 완전분해하거나 업사이클링을 위한 원료 소재로 분해하는 것을 목적으로 함 (국가과학기술자문회의, 2021).
- 장·단점 : 자연계의 미생물 및 효소를 이용한다는 측면에서 경제성 및 친환경적 성격이 강함. 단, 플라스틱은 자체적인 안정성으로 인해 비생물학적인 물리적 방식과 더불어 미생물의 효소에 의한 생화학적 방식의 복합적인 과정으로 분해됨 (임현규, 2021). 생물학적 분해속도가 타 방법에 비해 상대적으로 느리다는 특성이 있으며, 현재 기술수준으로는 올레핀계를 포함한 난

분해성 플라스틱을 분해하기 어려운 상황임 (국가과학기술자문회의, 2021).



<그림 2.5> 플라스틱의 비생물학적 및 생물학적 분해 모식도
(출처 : 임현규, 2021)

(2) 분해산물 업사이클링 기술

- 기술 개요 : 물리/화학/생물학적 전처리 및 분해기술을 통하여 원료화 (단량체화)된 플라스틱 소재에 생물학적 기술을 적용하여, 플라스틱의 단순 재활용이나 이산화탄소로의 생분해가 아닌 각종 산업에서 필요한 고부가 소재로 전환 또는 자원화하는 업사이클링(upcycling) 기술임 (국가과학기술자문회의, 2021). 예를 들어, PET로부터 화학적으로 전환된 bis(2-hydroxyethyl)TPA (BHET)를 *Pseudomonas*, *Comamonas*, *Rhodococcus*, *Idemonella* 균주 자체 효소 및 대사 경로를 활용하여 β -keto adipic acid로의 전환을 성공시킨 바가 있음. 이러한 연구는 미생물을 통한 플라스틱 재생산 기술의 잠재적 가능성을 보여줌 (임현규, 2021). 음료수병에 사용되는 PET를 기본 단위인 terephthalic acid (TA)로 분해하는 돌연변이 효소를 사용하여, TA를 바닐린 즉, 덩굴성 열대식물인 바닐라의 열매를 발효시켜 얻는 방향물질로 변환시켰음 (케미컬뉴스,

2021)

- 장·단점 : 플라스틱 폐기물로부터 산업용 소재를 생산함으로써 자원 재분배, 화석원료 수입 저감, 신규산업 창출 효과를 기대할 수 있음. 플라스틱 재자원화 기술이 화학적 재활용 방법 중심으로 진행되고 있는 추세이며, 생물학적 업사이클링 기술은 플라스틱 해중합 단량체 또는 올리고머의 활용 가능성을 확인하는 초기단계에 있음



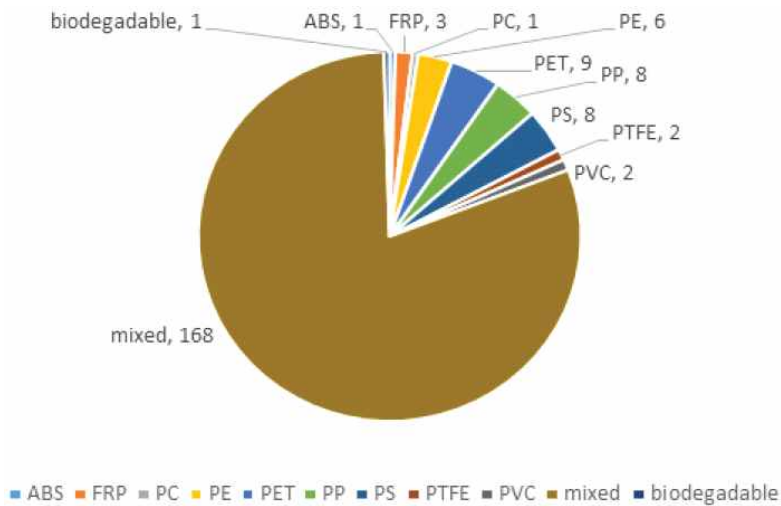
<그림 2.6> PET병의 분해산물로부터 변환된 방향물질 (Vanillin)

(출처 : 케미컬뉴스, 2021)

나. 국내 플라스틱 자원화 기술 연구개발 현황

- 폐플라스틱을 자원화하는 방법은 기계적 (물리적), 화학적, 생물학적인 3가지로 구분됨. 단, 본 연구에서는 열적 자원화 기술을 화학적 방법에 포함시켰음
- 국내 기술개발 방향 전반(정책방향 및 투자계획) : 폐플라스틱의 자원화 기술별 R&D 추진현황을 세부적으로 분류한 결과, 기계적 자원화가 162건 (77.5%)인 반면 화학적 자원화는 3건 (1.4%)에 불과함 (조영주 외, 2020)

2020년의 연구결과에 의하면 2000년부터 2019년 자료에 의하면 폐플라스틱 자원화와 관련된 R&D 추진 실적은 총 209건 255억 원으로 조사되었음



<그림 2.7> 폐플라스틱 성상별 리사이클링 R&D 현황

(출처 : 조영주 외, 2020)

- 현재의 자원순환 정책방향은 감량>재사용>재활용>에너지자원화>안전처리 순의 우선순위를 두고 있음 (관계부처합동, 2018). 따라서 생산·소비 단계에서 자원의 효율적 이용과 제품의 재사용을 추구하고 에너지 재활용 위주의 양적 팽창에서 벗어나, 고부가가치형 재활용 제품을 생산하는 물질 재활용 중심의 재활용 체계 개선을 정책방향으로 설정하였음
- 환경부에서는 PET 재활용병을 이용하여 고강도 차량용 안전벨트 필라멘트 개발 및 저급 폐플라스틱을 이용한 인공섬유 상용화 기술 개발을 지원하였으며, 이를 통해 2020년에는 차량용 시트 벨트 및 카페트, 인공섬유 제품을 영국 Phonex에 수출하는 성과를 달성하였음. 또한 저급 폐플라스틱 재활용을 위한 저에너지 소비형 전처리 공정기술과 재활용 소재품질 고도화 시스템 구축을 통해 곤포 사일리지 및 비료포대 재활용 고부가가치화 공정을 개발하였으며, 이를 통해 2020년 유니온 등 7개 업체가 재활용 원료칩을 판매하여 8.68억원의 매출을 달성하였음. 폐플라스틱의 에너지화의 경우 저염소 청정재생유 생산을 위한 촉매 및 품질개선 기술기반 플랜트 건설 및 10 톤/일의 실증운전을 마쳤으며, 이 기술로 생산한 열분해유는 미국 Marpan Recycling LCC에 수출하여 2억원의 매출을 올렸고, 태양환경산업은 6억원의 매출을 달성하였음 (환경부, 2022)

- 특허분석의 경우 “폐플라스틱 재활용” 을 키워드로 검색한 결과 다음과 같은 결과들이 도출되었음 (특허정보검색서비스 키프리스)

구분	출원번호	발명의 명칭	출원일자
1	1020210146396	폐플라스틱의 재활용 펠릿 제조용 정전 분리기	2021.10.29
2	1020210146397	폐플라스틱 재활용 펠릿 제조에 적용되는 도금 플라스틱 선별장치	2021.10.29
3	1020210033753	폐플라스틱 재활용을 위한 나선형 가스화로를 포함하는 이중 유동층 반응기	2021.03.16
4	1020210125505	재생원료의 탈색이 가능한 폐플라스틱 재활용 장치	2021.09.23
5	1020190107950	폐플라스틱 재활용 장치	2019.09.02
6	1020220108206	폐플라스틱의 재활용 펠릿 제조용 정전분리장치	2022.08.29
7	1020180152688	폐플라스틱 재활용을 위한 처리 장치(Apparatus for recycling plastic waste)	2018.11.30
8	1020210124666	폐플라스틱을 재활용한 보도블럭 및 건축자재	2021.09.17
9	1020200120400	폐플라스틱에 대한 재활용성을 향상시키기 위한 검질 여과시스템	2020.09.18
10	1020200078937	폐플라스틱 재활용 장치	2020.06.29
11	1020210058565	폐플라스틱을 재활용한 보도블럭	2021.05.06
12	1020200099991	폐플라스틱 가스화시스템 및 이를 이용한 재활용업체와의 연계 방법	2020.08.10
13	1020220005694	3D프린터용 폐플라스틱을 재활용한 원료의 연속 직공급장치	2022.01.14
14	1020130040080	천연섬유계 필러를 함유하는 폐플라스틱의 재활용 방법	2013.04.11
15	1020150136517	폐플라스틱의 폴리염화비닐을 재활용한 차음재 및 그 제조방법	2015.09.25
16	1020200009706	경도 및 강도가 우수한 폐플라스틱 재활용 성형물 제조방법	2020.01.28
17	1020130128845	장섬유계 필러를 함유하는 폐플라스틱의 재활용 방법	2013.10.28
18	1020200072589	폐플라스틱을 재활용하는 아트패널 제조방법	2020.06.15
19	1020210016455	폐플라스틱 슬러지의 재활용장치	2021.02.05
20	1020150096295	폐플라스틱 재활용 공정의 수선별장치	2015.07.07
21	1020200009037	폐플라스틱 재활용을 위한 이송 장치	2020.01.23

22	102019015 7315	결정화를 포함하는 폐플라스틱의 화학적 재활용 방법	2019.11.29
23	102020017 3380	폐 플라스틱 재활용을 위한 압출장치	2020.12.11
24	102013013 9906	폐 플라스틱병 재활용을 위한 이물질 제거 장치	2013.11.18
25	102020010 1720	폐 플라스틱의 단계적 분쇄를 이용한 재활용 플라스틱 파우더 제조 장치	2020.08.13

○ 폐플라스틱 재활용 기술의 특허 검색결과, 10년 기간 (2013~2022)을 기준으로 총 25건이 확인되었고, 이 중에서 기계적 재활용 76% (16개), 화학적 재활용 24% (6개)로 나타났음. 따라서, 상대적으로 기계적 재활용 기술이 더 많은 관심을 받고 있는 것으로 판단됨. 다만 기계적 재활용 기술의 한계가 명확하다는 측면 및 향후 화학적 재활용 기술의 필요도가 심화되고 있다는 점을 고려해야 함

○ 폐플라스틱 재활용 기술은 기계적(물질) 재활용, 화학적 재활용, 생물학적 재활용 기술로 구분할 수 있고, 각각의 개요 및 장단점은 다음과 같이 요약될 수 있음

○ 기계적(물질) 재활용 기술

- 최근에는 AI 기반 로봇스틱 기술, 근적외선 센서를 이용한 복합 재질 폐플라스틱의 선별기술 개발 노력이 활발히 진행되고 있으며, 폐비닐 및 폐유리병 등 생활폐기물 전반의 재활용 기술을 개발 중임. 또한 PET Chip 기술 관련으로 국내 리사이클 PET chip 제조 기술 (r-PET, recycled-폴리에틸렌 테레프탈레이트)은 이물에 대한 제거 기술이 부족과 원료의 품질을 균일하게 제조

할 기술이 없어 저가의 섬유제품 혹은 밴드 형태의 제품만 생산 가능한 수준으로, 이물 제거 기술 및 순도 향상 기술 개발이 필요함. 현재 PET 재활용의 사용처는 PET 신재 대비 저렴한 가격으로 단섬유 시장에서 주로 사용되고 있음

○ 화학적 재활용 기술

(1) 열분해 기술

- 상용화 공정으로 가동되고 있는 시설은 10개 내외이며, 현재 이로부터 생산되는 열분해유의 생산량은 2019년 기준으로 약 4,100톤 수준임. 현재 가동 중인 열분해 시설의 경우 대부분 회분식 공정이며, 연속식 공정을 적용하고 있는 시설은 1개의 시설에 불과함

2000년대 초기부터 상용화 기술을 위한 국가지원의 기술개발이 지원되었으나 경제성 및 운전성의 문제로 회분식에 한하여 기술 개발 및 상용화가 성공한 상황이며, 연속식의 경우 10-20톤/일 급의 demo 수준의 기술이 개발되었으나 상용화되지 못함 (국가과학 기술자문회의, 2021)

(2) 가스화 기술

- 단순 에너지 회수 (열회수 및 발전)를 위한 공기 분위기 가스화 기술의 경우 10여 기의 상용화 공정이 운전 중에 있으나, 화학 원료를 생산하기 위한 산소 분위기 가스화 기술의 경우 파일럿 플랜트 단계 (폐플라스틱 투입량 기준 : 3톤/일급)의 기술 수준에 머물러 있음

발전을 목적으로 하는 공기 분위기의 가스화 기술개발은 8톤/일

급 화학원료를 생산하기 위한 산소 분위기의 가스화 기술개발은 3톤/일급이 진행된 사례가 있으나, 생활폐기물 및 바이오매스를 이용한 합성가스/수소 생산 중심으로 개발되어 합성가스를 이용하여 메탄올을 생산하는 등의 화학원료 합성을 위한 연계기술개발은 Lab Scale 수준에 머물러 있음 (국가과학기술자문회의, 2021)

(3) 해중합 기술

- SK 종합화학 & 루프인더스트리 전략적 투자 결정 (PET 해중합) 수첨반응용 촉매 개발, 알칸 교차 복분해 반응 등을 통한 유용한 화합물 제조기술이 개발 중에 있으며, 유도결합 플라즈마 반응을 통한 PP 해중합 공정, 친환경 고효율 하이브리드 (마이크로 웨이브/플라즈마) 공정 적용을 통한 PET 해중합, 오염된 PET 폐플라스틱 해중합 및 첨가제 분리 정제 기술 등이 개발 중임

○ 생물학적 재활용 기술

(1) 생물학적 (효소/미생물) 분해 기술

- 국내 연구진에 의한 결과로, 플라스틱 분해효소와 플라스틱을 혼합하여 완전분해 가능한 폴리에스테르계 플라스틱 제작에 성공하였음 (Nature, 2021)
- 최근에는 신규 PET 분해효소 발굴 및 효소공학을 통한 기능 향상, PE, PS 등 난분해성 플라스틱 분해효소 및 미생물 탐색, 해양 미세플라스틱 제거용 플라스틱 분해효소 생산 미세조류 개발, 플라스틱 업사이클 활용을 위한 분해효소 분비 등의 연구를 진행하였음

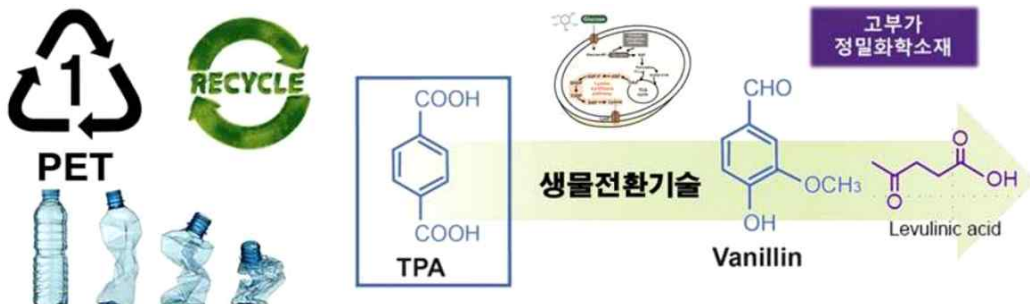
(2) 분해산물 업사이클링 기술

- 최근 PET 등 해중합이 가능한 특정 플라스틱 소재에 대한 생물학적 업사이클링 기술 개발, PET의 단량체인 테레프탈산을 이용한 새로운 생분해 플라스틱 소재, 화장품 소재, 의약소재 등 고부가 소재 생산 가능성 제시

한국화학연구원, 고려대학교, 이화여자대학교, 한국생명공학연구원 연구팀은 PET의 친환경적 분해 기술과 해중합 단량체를 고부가 소재로 전환하는 연구 진행 중임

대사공학을 접목하여 플라스틱 해중합 단량체에서 고부가 소재를 생산하는 인공미생물 세포공장 개발 경쟁 치열

(3) 국내 개발 고부가 자원화 기술



<그림 2.8> 생물전환기술 이용 고부가 자원화

(출처 : 한국기계연구원, 2019)

- 생물전환 물질 생산

친환경촉매 (베타인)를 이용한 화학적 분해 후 미생물 효소를 이용하여 에틸렌글리콜과 테레프탈레이트로 분해함. 이를 다른 미생물을 이용하여 생물전환시켜 고부가가치 물질로 생산 (ex. 글리콜산, 프로토키테규익산)



<그림 2.9> PET 사슬 끊는 촉매/미생물 이용한 통합 공정

(출처 : Kim 외, 2021)

○ 국내 플라스틱 재활용사업 동향

<표 2.2> 국내 주요 기업들의 폐플라스틱 재활용 사업 현황 및 계획

국가	기업명	주요 내용
한국	LG화학	<ul style="list-style-type: none"> - 기계적 재활용 + 화학적 재활용 • 쿠광과 플라스틱 재활용, 자원 선순환 생태계 구축을 위한 MOU를 체결하고, 쿠광이 폐기하는 3,000톤 가량의 포장용 비닐을 재활용해 쿠광에 재공급할 계획 (2021.09) • 2024년 1월까지 국내 최초 초임계 열분해유 공장 건설, 연간 2만톤 규모로 시작하여 점차 확대할 예정 (영국 무라 테크놀로지 지분 투자) • 다양한 PCR (Post-Consumer Recycled) 플라스틱 재료 중 ABS만 분류하는 과정을 통해 PCR-ABS 제조 (기계적 재활용 - 백색도 증진 기술)
한국	롯데케미칼	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적 재활용 • 2024년까지 1,000억 원을 투자해 향후 2030년까지 울산 PET 공장 전체를 재생 PET 공장으로 전환할 계획 발표 (2021.04) - 기계적 재활용 • 재활용 플라스틱, 원료 플라스틱, 첨가제, 착색제의 최적 조합 기술 및 프로젝트 루프 사업을 통해 PP와 ABS 등 제조 (컴파운딩 기술/LCA 인증)
한국	한화솔루션	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적 재활용 • 산자부 ‘폐플라스틱 열분해유 기반 나프타 생성기술’ 사업 주관 기업 선정 (2021.04) • 폐플라스틱을 고온에서 분해한 열분해유에서 불순물을 제거하고 분자 구조를 변화시켜 납사를 생성하는 기술

		(PTC, Plastic to Chemicals) 개발을 목표로 함 <ul style="list-style-type: none"> 열분해 기반 화학적 재활용 기술을 2024년까지 개발해 내재화할 방침 (2021.04)
한국	SK지오센트릭 (구 SK종합화학)	<ul style="list-style-type: none"> 화학적 재활용 해중합 기술을 보유한 캐나다 루프 인더스트리에 지분 (10%) 투자 (2021.01) 루프 인더스트리사와 함께 2025년까지 연간 8.4만톤 규모의 PET 해중합 설비 구축 계획 (2021.07) 미국 브라이트 마크사와 협력해 2024년까지 연간 10만톤 규모의 열분해 생산설비 구축 예정 (2021.07) 폐플라스틱 재활용 규모를 2025년까지 90만 톤에서 2027년 250만톤까지 확대할 계획
한국	SKC	<ul style="list-style-type: none"> 화학적 재활용 열분해 기술을 보유한 일본 벤처기업 칸쿄에너지 (Kankyo Energy)와 상업화 추진 (2021.06)
한국	SK케미칼	<ul style="list-style-type: none"> 화학적 재활용 해중합 기술과 생산 설비를 보유한 중국 수예 (Shuye)에 지분 (10%, 230억) 투자하여 화학적 재활용된 원료를 구매할 수 있는 권한 확보
한국	효성	<ul style="list-style-type: none"> 화학적 재활용 PET 해중합, 후공정을 통해 재생 폴리에스터 수지 상업적 생산 성공 (2008년) 2022년 초까지 울산 지역 내 해중합 설비를 갖추고 부산·전남 지역 폐어망을 수거해 연간 1,800톤 상당의 재활용 나일론 섬유 생산 계획 (2021.08)
한국	휴비스	<ul style="list-style-type: none"> 기계적 재활용 + 화학적 재활용 2021년 4월부터 연간 2천톤 규모의 물리적 재활용 방식을 사용한 원사 ‘에코에버’ 가동 시작 (2021.03) 물리적 재활용 원사 브랜드 ‘에코에버’ 에 화학적 재활용 원사 브랜드 ‘에코에버 CR’ 까지 추가 (2021.06)
한국	삼양패키징	<ul style="list-style-type: none"> 기계적 재활용 PET 플레이크를 생산하는 재활용 사업장 시화공장에 약 430억원을 투자하는 폐플라스틱 재활용 신규 설비 도입 계획 발표 (2022.01) 고순도 PET 플레이크와 고부가가치 제품의 원료가 되는 리사이클 PET 칩 생산 설비 2종 도입 예정이며 2023년 말부터 본격 설비 가동 시작 예정

한국	ACI엔텍	<ul style="list-style-type: none"> - 기계적 재활용 • 인공지능 (AI) 및 사물인터넷 (IoT) 기술을 활용한 폐기물 수거 및 처리 전문기업 • 고품질 PET 플레이크를 생산하는 페트병 재활용라인, HDPE 용기 및 LDPE 필름을 생산하는 폴리올레핀 재활용라인, rPET 시트 압출생산라인 보유 • 사모펀드 운용사 VL인베스트먼트로부터 70억원 투자 유치 (2021.10)
한국	에코크레이션	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적 재활용 • 열분해유 제조 및 열분해 설비 생산기술 보유 중소기업 • 인천 청라에 신규 열병합 열분해 플랜트 제조공장 구축 중 • SK지오센트릭으로부터 68억원 투자 유치 (2021.08)
한국	슈퍼빈	<ul style="list-style-type: none"> - 기계적 재활용 • AI 기술을 활용해 재활용 폐기물을 회수하는 로봇 ‘네프론’을 2016년에 개발하여 상용화에 성공한 스타트업 • 회수된 재활용 폐기물을 고부가가치 재생소재로 가공해 제품 생산업체에 판매하는 순환경제 사이클 구축 계획 • 200억원 규모의 시리즈B 투자를 유치해 누적 투자금 270억 원, 기업가치 1,000억원 달성 (2020.08)

(출처 : 삼일PwC경영연구원, 2022)

○ 추가적인 플라스틱 재활용 기술 R&D 보도자료

- 산업 분야 저탄소 공정기술 확보 및 탄소 다배출설비 전환과 관련하여, 2021년 산업통상자원부는 석유화학 탄소 주배출원인 나프타 열분해공정의 저탄소화와 관련하여 2030년까지 폐플라스틱 해중합 플랜트 시운전을 계획하고 있음 (산업통상자원부, 2021A)

<표 2.3> 폐플라스틱의 원료 재활용 단계별 기술개발

⑧ (석유화학) 탄소 지배출원인 나프타 열분해공정의 저탄소화

○ 폐플라스틱의 원료 재활용(現 0% → '30년 18%)을 위한 전처리기술 개발

<폐플라스틱의 원료 재활용 단계별 기술개발>

기간	~'25	~'27	~'30
기술	· 폐플라스틱(폴리스타이렌 폴리우레탄 PET) 해중합 기반기술 개발	· 폐플라스틱 해중합 공정 스케일업 및 최적화 (300톤/년 이상 규모)	· 폐플라스틱 해중합 플랜트 시운전

(출처 : 산업통상자원부, 2021B)

- 또한 친환경 원료로 전환하기 위한 바이오 납사 및 소재 제조기술과 관련하여, 나프타 열분해 기반 에너지 다소비 공정을 고에너지 효율 촉매 반응공정으로 대체하기 위한 선행기술 개발을 목표로 現 에너지소비 절감 0%에서 2030년에는 5%까지 증진시키고자 함 (산업통상자원부, 2021)

<표 2.4> 바이오매스 유래 원료 대체기술 단계별 기술개발

기간	~'25	~'28	~'30
기술	· 플라스틱 원료대체 바이오화학 기초원료소재 공정기술 개발	· 바이오 납사(1톤/일) 및 바이오 올레핀(100kg/일) 생산기술 개발	· 바이오 납사 및 바이오 올레핀 상용급 실증 공정 기초 설계

(출처 : 산업통상자원부, 2021B)

- 페비닐, 폐플라스틱 등 유기성 폐자원 열분해를 통한 합성원유 제조기술 개발과 관련하여, 現 불순물제거율 90%를 2030년까지 95% 수준으로 향상시키고자 함 (산업통상자원부, 2021)

〈표 2.5〉 합성원유 제조기술 단계별 기술개발

기간	~'24	~'25	~'30
기술	· 폐플라스틱 열분해 및 업그레이딩 (생산공정 수율 60%규모 25만 톤/년)	· 불순물 제거율 95% 달성	· 스케일업(대용량 처리)

(출처 : 산업통상자원부, 2021B)

다. 국외 플라스틱 자원화 기술 연구개발 현황

○ 기계적(물질) 재활용 기술

- 특허동향 분석 결과 EU, 미국이 최고 기술수준이며 일본은 EU, 미국대비 85% 수준인 것으로 나타남 (국가과학기술자문회의, 2021)

폐플라스틱의 재질별 분류방법 (근적외선 센서 등) 개발 및 상용화 중이며, AI 기반 로봇스틱과 같은 첨단 선별기술의 자동화로 전환 중임. 산업용 폐기물 속 PP, PS, PVC 등의 선별기술은 상용화 중이나, 생활계 폐기물 속의 A-PET, PET-G, ABS, Acrylic 등은 아직 불완전하고 폐PET bottle의 이물제거 washing 기술 고도화를 통해 PET Flake 제조기술 및 리사이클 Chip 제조기술은 상용화 중임 (국가과학기술자문회의, 2021)

○ 화학적 재활용 기술

(1) 열분해 기술

- 스페인, Plastic Energy사 등은 폐플라스틱을 활용하여 열분해를 통한 화학원료가 될 수 있는 기초유분을 제조하는 사업을 추진하고 있으며, 최근 SABIC, INEOS, TOTAL 등에 공급하여 플라스

틱을 재활용하는 사업에 협업을 발표하였음

1990년대부터 기술개발이 진행되었으며 독일/일본을 중심으로 회분/연속식 열분해 공정에 대한 기술개발 사례가 발표된 바 있음

최근 BASF의 경우 chem-cycling 원료 생산 기술 개발 진행하고 있음

(2) 가스화 기술

- 에너지 회수를 위한 다수의 상용화 공정이 운전 중에 있으며, 특히 화학원료를 생산으로 하는 경우 또한 100~300톤/일급의 가스화 공정을 통하여 메탄올 생산의 상업운전 가동 중에 있음

(3) 해중합 기술

- PMMA의 경우 열분해 공정을 통해 해중합 되어 MMA 단량체를 형성하고 폴리아마이드류 (Nylon 6, Nylon 66, Polyamide 11, Polyamide 12 등)은 고리단합 해중합반응을 통해 비교적 낮은 온도에서 카프로락탐 단량체를 형성함

○ 생물학적 재활용 기술

(1) 생물학적 (효소/미생물) 분해 기술

- PET, nylon은 자연계에 존재하는 생물에 의해 분해될 수 있음이 밝혀졌고, PE, PP, PS 등 난분해 플라스틱의 생물학적 분해 연구 진행 중 (국가과학기술자문회의, 2021)

프랑스 카르비오사(社)는 퇴비 더미에서 찾은 미생물의 효소로 10시간 안에 페트병의 90%를 분해할 수 있음을 밝혔음 (Nature, 2020)

- 프랑스 기업(Carbios) 및 글로벌 효소 기업(Novozymes)의 공동 연구, 다국적 기업의 컨소시엄(로레알, 네슬레 등)을 통하여 고효율 플라스틱 분해 효소 개발, 2024년까지 프랑스에 플라스틱 분해공장을 세워 재활용 플라스틱 원료를 연간 4만 톤 생산 예정

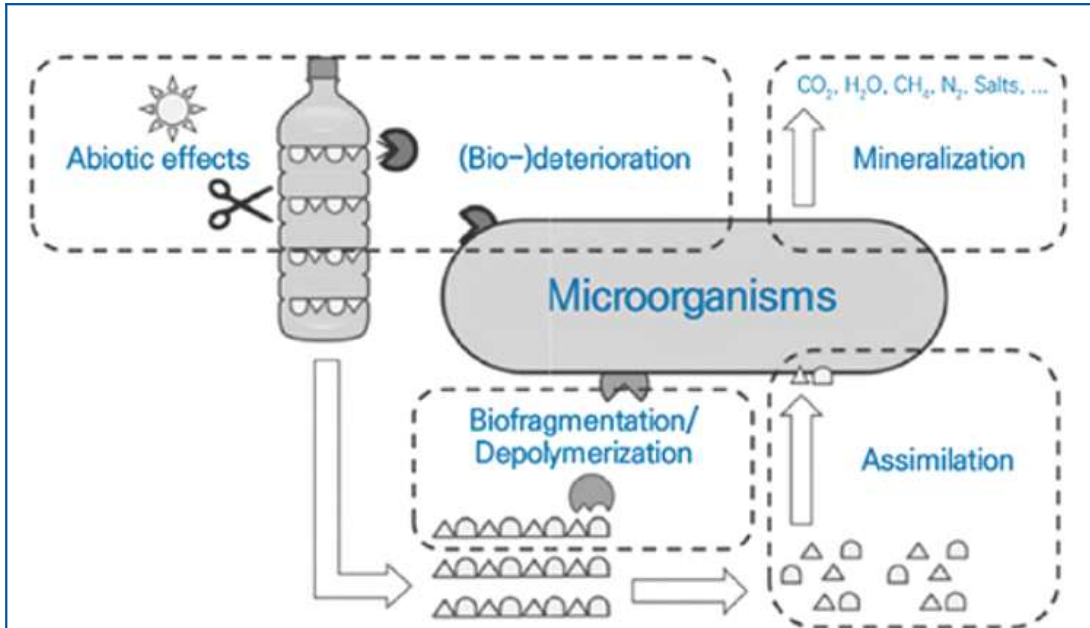
(2) 분해산물 업사이클링 기술

- 난분해성 플라스틱의 재자원화 연구는 화학적 재활용 기술 중심으로 진행, 생물학적 업사이클링 기술은 플라스틱 해중합 단량체 또는 올리고머의 활용 가능성을 제시하는 초기 연구 수준.

유럽과 중국은 연합으로 MIX-UP, BIOCLEAN 등의 프로젝트 수행

PET, PU, PE, PS 해중합 단량체를 활용하여 생분해성 플라스틱 같은 고부가 소재를 생산할 수 있는 효소 및 인공미생물을 합성 생물학 기술로 개발하고 있음

미국은 기존 물리적 재활용을 통한 PET의 저부가 자원화 한계를 극복하기 위해 PET를 효율적으로 분해하는 효소를 개발하고 해중합 산물을 엔지니어링 플라스틱, 섬유강화플라스틱 등 고부가 소재로 전환하는 기술을 개발 중임



<그림 2.10> 플라스틱의 비생물학적/생물학적 분해
(출처 : Wei et al., 2017)

○ 바이오플라스틱 기술

<표 2.6> 국가별 플라스틱 대체재 및 재활용 개발 동향

국가	단체	주요 내용
미국	하버드대학 Wyss 연구소	<ul style="list-style-type: none"> - 새우껍질의 키틴 유래 바이오플라스틱 (생분해성) 개발 성공 - 완전 분해되는 바이오플라스틱을 사용하여 계란용기, 컵, 체스 말 등의 제품을 소개하였으며, 보통 기존 플라스틱과 동일한 강도를 나타내지면 습기에 노출되면 빠른 속도로 분해되는 성질을 가지고 있음 - 습기에 의한 분해를 지연시키기 위해 왁스코팅 방법 고려 중
	New Light Technologies	<ul style="list-style-type: none"> - 폐수처리설비, 매립지, 발전소 등에서 발생한 이산화탄소를 이용하여 플라스틱을 만드는 방법 개발 - AirCarbon 제품은 플라스틱의 원료로 석유를 사용하지 않고 (원유사용 저감), 온실가스 배출량을 감소시키며 이산화탄소를 재활용할 수 있다는 장점

		- AirCarbon 제품은 폴리프로필렌 (PP), 폴리에틸렌 (PE), 폴리스티렌 (PS)을 포함한 다양한 범위의 플라스틱과 동일한 성능을 보여줌과 동시에 생분해 및 재활용 가능
EU	유럽연합의회	- 바이오 플라스틱 지원정책 강화 - 유럽연합의회는 플라스틱 봉투와 기타 재생이 불가능한 플라스틱 쓰레기의 확산을 막기 위해 ‘19년까지 플라스틱 봉투 사용량의 최소 80%를 감소하라고 발표했으며, ‘17년까지 50%, ’ 18년까지 80% 감축을 목표로 설정하고 있다고 발표
벨기에	Aquiris (Veolia의 자회사)	- 폐수 중 성분으로부터 바이오플라스틱을 제조하는 파일럿 프로젝트 진행 (슬러지로부터 휘발성 지방산을 분리하고, 지방산을 바이오고분자로 변환하도록 선정된 박테리아와 폐수를 혼합) - 상용화/현실화 가능한 사업파트너 모색 중

(출처 : 한국건설기술연구원, 2019, p24)

<표 2.7> 바이오 플라스틱의 종류

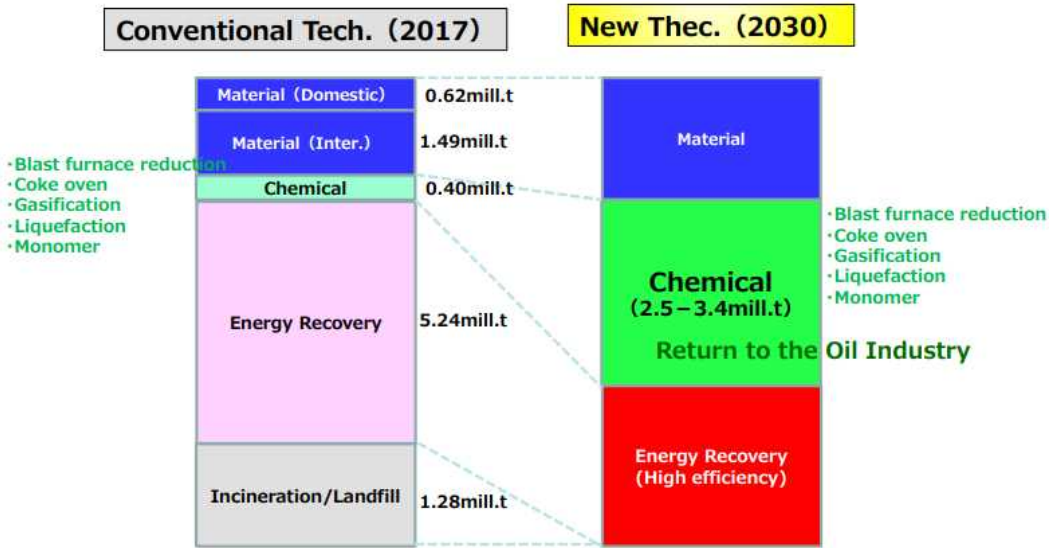
종류	설명	예시
바이오기반 플라스틱	옥수수, 사탕수수 같은 식물 기반의 플라스틱 생산	Poly-lactic acid (PLA)
석유기반 플라스틱	바이오기반보다 빠른 분해가 특징인 석유기반의 썩는 플라스틱 생산	Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)

(출처 : Kim 외, 2021)

- 우리나라의 바이오 플라스틱 기술 연구 수준은 선진국 대비 현저히 떨어지는 것으로 평가되고 있으며 원천 기술개발에 대한 필요성이 크다고 할 수 있음 (강길선, 2021). 바이오 플라스틱은 1900년대부터 전분계열 천연고분자 물질을 기반으로 한 제품이 사용된 것이 시작이라 할 수 있으나, 최근에는 Bio-PET, Bio-PE 및 PLA 물질로 대체되고 있음. 이 중 약 70%가 포장재로 사용

되고 있음. 2016년 기준 국내에서는 미세조류와 박테리아를 이용한 바이오 플라스틱 원료물질의 생산 연구를 진행하였음 (한국환경정책평가연구원, 2016)

○ 일본의 플라스틱 자원화 기술 연구개발 현황



- 일본은 2017년 40만 톤의 플라스틱이 화학적 재활용에 사용되었으나, 2030년에는 이를 250만~340만 톤으로 6~8배 늘려서 화학적 재활용의 비중을 확대하여 석유산업에 환원시키고자 함 (Yoshioka, 일본폐기물자원순환학회, 2019)

○ 국외 플라스틱 재활용사업 동향

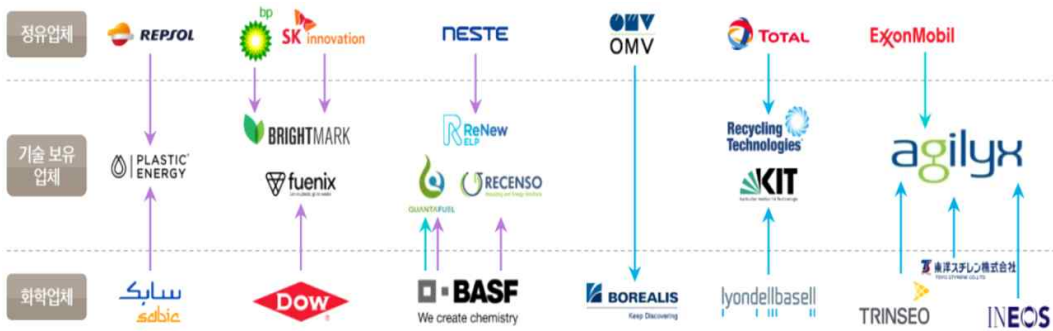
<표 2.8> 국외 국가별 플라스틱 재활용사업 동향

국가	기업명	주요 내용
독일	BASF	- 화학적 재활용 • 전세계 30여개의 기업들과 함께 해양 폐플라스틱 감소 및 제거를 위한 솔루션을 증진하는 글로벌 플라스틱 쓰레기 제거 연합 결성. 5년간 15억 달러 (한화 약 1조6천억원) 투자 목표 (2019.01) • 플라스틱 화학적 재활용을 통해 첫 파일럿 제품 생산 (2019.01)
미국	Eastman	- 화학적 재활용 • 폴리에스터 재생 기술 및 가스화를 통한 재활용 기술인 탄소 재생 기술 사용 • 프랑스 대통령과 Eastman의 CEO가 프랑스의 재료분자 재생시설에 최대 10억달러 투자할 것을 공동 발표 (2022.01) • 2025년 가동 예정인 재료분자 재생시설은 폴리에스터 재생 기술을 통해 폐플라스틱을 연간 최대 160,000메트릭톤 까지 재생할 예정
사우디	Sabir	- 화학적 재활용 • 영국의 플라스틱 재활용 회사 Plastic Energy와 MOU 체결 및 네덜란드에 상업폐기물 재활용공장 설립계획 발표 (2018.12) • 재활용 폴리머 대규모 생산을 위한 최초 상업공장 건설 개시 (2021.01) 및 2022년 하반기 가동 예정 • 말레이시아 플라스틱 재활용회사 HHI와 협업하여 세계 최초 재활용 폴리머 생산 (2021.11)
독일	Covestro	- 화학적 재활용 • 폐기된 매트리스의 연질 폴리우레탄 폼의 화학적 재활용 기술개발(2021.03) • 매트리스폼의 2가지 원료 (polyol, toluene diamine)를 모두 재활용하기 위한 연질폼 재활용 파일럿공장 가동 (2021.04) • 폐기된 연질 폴리우레탄폼의 화학적 재활용의 산업화 및 회수된 2가지 원료의 재생산을 목표로 함

프랑스	Loreal	<ul style="list-style-type: none"> - 생물학적 재활용 • 프랑스 스타트업 Carbios의 효소기술을 이용해 재활용 플라스틱으로 만든 최초의 화장품 용기 구현 (2021.06) • 2025년 효소 재활용기술을 이용하는 용기 생산을 목표로 하고 있으며, 향후 로레알 브랜드 중 비오템에 최초로 해당 용기 사용 제품 출시 계획
미국	Agilyx	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적 재활용 (열분해) • 전세계에서 현재 유일하게 자사 열분해 시스템을 이용해 PS 재활용설비 보유 • ExxonMobil, Toyo Styrene, Braskem, Trinseo, INEOS 등 글로벌 화학업체들과 기술을 개발하거나 생산설비 신설 중
일본	JGC	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적 재활용 (가스화) • 일본의 Ebara Environmental Plant, Ube Industries, Showa Denko와 공동으로 플라스틱 가스화 기술인 EUP (Ebara Ube Process)를 이용한 플라스틱 폐기물 재활용 협업 계약 체결(2020.10)
미국	DOW	<ul style="list-style-type: none"> - 물리적 재활용 + 화학적 재활용 • Recycling 목표 : 2030년까지 1백만톤의 플라스틱을 재사용, 재활용할 계획이며, 2035년까지 전제품들이 재사용 또는 재활용 가능한 패키징으로 판매될 예정 • 첨단 재활용 프로세스 접목 : Mura Technology와 파트너십 체결 및 Hydrothermal 플라스틱 재활용 솔루션 활용
프랑스	Dupont	<ul style="list-style-type: none"> - 물리적 재활용 + 화학적 재활용 • 2030년 로드맵에 폐기물 감축을 위한 4R (Reduce, Reuse, Repurpose, Recycle) 프로그램 도입 • Tyvek 재활용 프로그램 : 미국 내 PPE 의류 수집, 운송, 보관 및 재활용 활동 • Entira EP copolymer기술을 활용하여 혼합 플라스틱 폐기물 재활용 개발 중

(출처 : 삼일PwC경영연구원, 2022)

- 국외 화학기업의 화학적 재활용 시장 진출을 위한 노력



<그림 2.11> 국외 정유/화학기업의 화학적 재활용 시장 진출을 위한 파트너십 체결

(출처 : 삼성증권, 2021)

라. 요약 및 시사점

○ 플라스틱 재활용 기술

- 우리나라 재활용 기술 수준은 최고수준인 EU 대비 80% 수준이고 기술격차는 3년으로 평가되고 있으며 화학적 재활용 기술 등 원천기술의 개발 저변의 확대가 필수적이라 판단됨 (대한상공회의소, 2021)

기계적 재활용 기술의 경우 중소기업을 중심으로 선별 공정에 AI나 IoT를 이용하는 등의 개발/상용화가 활발히 이루어지고 있으며, 화학적 재활용의 경우 대기업을 중심으로 해중합, 가스화 등의 기술을 개발/도입하는 과정에 있으며, 일부 중소기업에서 차별화된 기술을 개발하고 있는 것으로 파악됨

바이오 플라스틱 기술 연구는 아직 선진국 대비 현저히 떨어지는 것으로 보이므로 이에 대한 원천 기술개발에 대한 필요성이

크다고 할 수 있음

- 미국, 독일, 프랑스, 일본 등에서는 일찍이 1990년대부터 기술개발이 진행되었으며, 평균 200톤/일 규모의 플라스틱 가스화 공정 등 기계적/화학적/열적 재활용 기술을 적용하는 상용화 운전 사례가 있음

바이오 플라스틱 기술의 경우 역시 다국적 기업의 컨소시엄 구성 등을 통해 활발한 연구가 진행되고 있으나, 플라스틱 분해 효소 개발 등의 국외 기술수준 역시 상용화하기 위해서는 향후 5~10년 정도가 필요할 것으로 판단됨

2 유가금속 재자원화 기술

가. 세부기술 정의

- 정보통신 디지털과 재생에너지 제품의 생산/소비 급격한 증가 전 세계적으로 디지털 산업의 급격한 기술 발전과 재생에너지 확대 보급에 따른 고부가가치 제품 생산 및 소비가 급격히 증가하고 있음
- 전기전자제품의 경우 현대 사회에서 없어서는 안 될 필수 생활 제품이고, 매년 신제품과 모델이 시장에 출시되면서 그 소비는 계속 증가하고 있음. 전 세계적으로는 전기전자제품 소비는 매년 약 270만톤씩 증가하는 것으로 보고됨 (Forti et al., 2020)
- 태양광 패널의 경우 중국은 태양광 발전에 대한 관심과 산업 규모가 확대되면서 태양광 발전시스템 설치가 확대되고 있음. 미

국의 태양광 설치 규모는 2016년 기준 약 14.8 GW로 나타났으며 (IEA, PVPS, 2016), 2015년 기준 영국은 3.5GW, 독일은 1.5GW, 프랑스는 약 0.9GW 규모로 나타남 (한국에너지공단, 2017. 2016년 신·재생에너지 보급통계). 국내 태양광 설치 규모는 2011년 78.8 MW에서 2017 기준 약 5.7 GW로 나타남. 국내에서는 2030년까지 재생에너지 발전량 비중을 20%로 확대하는 목표 설정하였고, 이중 약 57%를 태양광에너지가 차지하는 것으로 제시하였음. 따라서 태양광 발전의 확대에 따른 태양광 패널의 생산과 소비가 급격하게 늘어날 전망이다 (산업통상자원부, 2017)

- 전기자동차의 보급은 국제적으로 즉, 중국, 미국, 유럽, 일본, 한국 등을 중심으로 급격히 증가할 전망이다. 2025년 중국은 약 330만대의 친환경차 시장을 형성하고, 유럽은 약 250만대, 미국 140만대 등으로 수요가 급격히 증가할 것으로 예상됨 (BloombergNEF, 2020). 2020년 7월 기준 국내 전기차 누적 보급 대수는 총 114,318대로서 2019년 12월말 대비 약 25,000대 증가하였음. 2018년 정부관계부처 합동 마련 ‘자동차 부품산업 활력 제고 방안’의 보급계획 및 보급 추이에 따르면 2030년 국내 전기자동차는 약 300만대 운행 전망 (산업통상자원부, 2018)

○ 미래 폐자원의 발생과 자원순환의 필요성

전 세계적으로 디지털 산업의 급격한 기술 발전과 재생에너지 확대 보급에 따른 사용 후 고부가가치 폐자원이 급격히 증가 발생 예상.

- 국제적으로 폐전기전자제품의 발생량은 2019년 기준 약 53.6백만톤으로 알려져 있고, 이중 아시아 국가에서 약 24.9백만톤, 유럽 지역에서 약 12백만톤, 북미와 남미 지역에서 13.1백만톤이 발생하는 것으로 예측됨 (Forti et al., 2020). 2030년에는 전 세계 폐전기전자제품의 발생량은 약 40% 증가한 약 74.7백만톤으로 예상됨. 한편 국내에서 발생하는 폐전기전자제품의 발생량은 약 82만톤으로 나타났으며, 2019년 기준 이중 약 35만톤 정도가 재활용되었음
- 태양광 발전의 핵심 부품인 태양광 패널은 제조사마다 수명이 다르지만, 대략 20년 사용 후 교체되고 폐기됨. 전 세계 태양광 폐패널의 발생량은 2016년 기준 44천톤~250만톤에서 2030년 약 17만톤~80만톤으로 예상하고 있음 (PV CYCLE, 2018). 일본의 경우, 태양광 폐패널의 발생량을 2020년 기준 약 2,800톤에서 2030년에는 약 28,800톤으로 예상하였음 (일본 환경성, 2016). 국내의 경우 재생에너지 3020 이행계획에 따라 신규 재생에너지 발전설비의 95% 이상을 태양광 중심의 청정에너지로 보급하는 정책 추진에 따라 2023년 이후 약 12,690톤에서 2030년에는 약 87,124톤의 태양광 폐패널이 발생할 것으로 예측됨 (KEI, 2018)
- 전기차 폐배터리는 이차전지 리튬이온 배터리로서 전기차 사용 후 수명이 다한 배터리를 의미함. 전기차 보급 확대에 따라 향후 전기차 폐배터리의 발생량이 지속적으로 증가하고, 사용 후 이차전지의 재사용과 재활용을 통해 재생원료 확보 기술이 주요 관심 사항으로 대두되고 있음. 전기차 배터리는 양극활물질, 음극활물질, 분리막, 전해질 및 용기 등을 구성되어 있음. 유가금

속으로는 코발트, 리튬, 망간, 니켈 등 다양한 물질이 함유되어 있으며, 희유금속인 코발트와 리튬이 리튬이온전지의 양극활 물질의 주요 성분으로 함유되어 있음. 이들 물질은 이차전지 소재 원가의 약 40%를 차지하는 핵심소재로 알려져 있음. 국내의 경우 이차전지 업계에서는 리튬을 전량 수입에 의존하고 있음. 이 물질은 전체 이차전지 무게 중 약 15%에 해당함. 전기차 보급 대수 증가와 함께 전기차 사용 후 폐배터리 예상 발생량은 2023년 약 10,000개 발생할 것으로 예상됨 (한국환경공단, 2020). 정부 전기차 보급목표에 따라 2035년 국내 예상 전기자동차 폐배터리의 누적대수는 최소 105만대에서 최대 187만대로 예상됨 (환경부, 전기차 폐배터리 회수 관리 체계 구축 연구, 2020). 전기자동차 배터리는 전기차 원가의 약 59%를 차지할 정도로 상당한 부가가치가 집중되어 있음 (한국투자증권, 2020)

○ 미래 폐자원의 기술 정의 및 범위

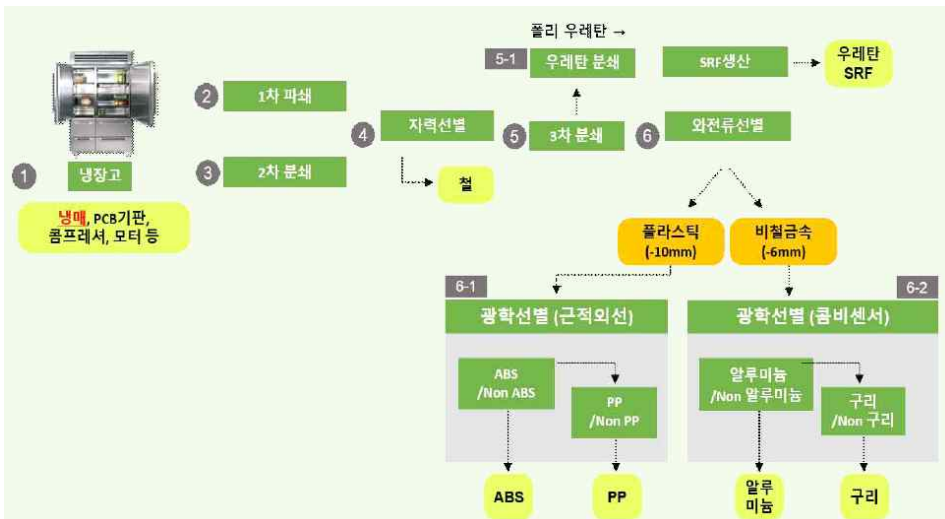
- 미래 폐자원 기술은 전기전자제품, 자동차, 재생에너지 태양광 산업 발전에 따른 제품 사용 후 폐기되는 폐자원 등을 자원으로 회수하는 것을 의미하며, 폐전기전자제품, 태양광패널, 전기차 폐배터리로 크게 분류할 수 있으며, 대체적으로 전처리 기술, 물질 재활용 기술 등으로 구분할 수 있음

○ 폐전기전자제품 재활용

- 기술 개요 : 전기전자제품 사용 후 폐기되는 제품을 폐전기전자제품 또는 전자폐기물이라 부르고, 그 제품의 종류와 수는 100

여종에 달하고 있음. 이들 폐전기전자제품에는 알루미늄, 구리, 철, 금, 은, 팔라듐 등 각종 유가금속 자원과 유해물질 (카드뮴, 수은, 비소, 브롬화난연제 등)도 함유되어 있음. 자원의 회수와 환경 보전 측면에서 전처리 (해체/파쇄/선별 기술), 물질재활용 (농축/정련/정제 기술 등) 기술 등이 포함됨

폐전기전자제품의 재활용기술은 일반적으로 전처리/해체, 파쇄/분쇄/선별, 농축/추출/정제 등으로 이루어짐. 특히 전처리 해체 공정을 통해 재사용이 가능한 일부 부품들을 따로 분리해서 재사용 또는 재활용되고, 나머지 부품들은 파쇄 및 분쇄 과정을 거치면서 일정한 크기로 작게 분쇄됨. 분쇄된 물질들은 여러 선별 단계를 거치면서 밀도, 색상, 풍력, 자력 등을 활용하여 비금속과 금속, 플라스틱류 등으로 회수됨. 회수된 물질은 다시 농축/추출/분리 정제 과정을 통해 고순도 유가물로 회수됨

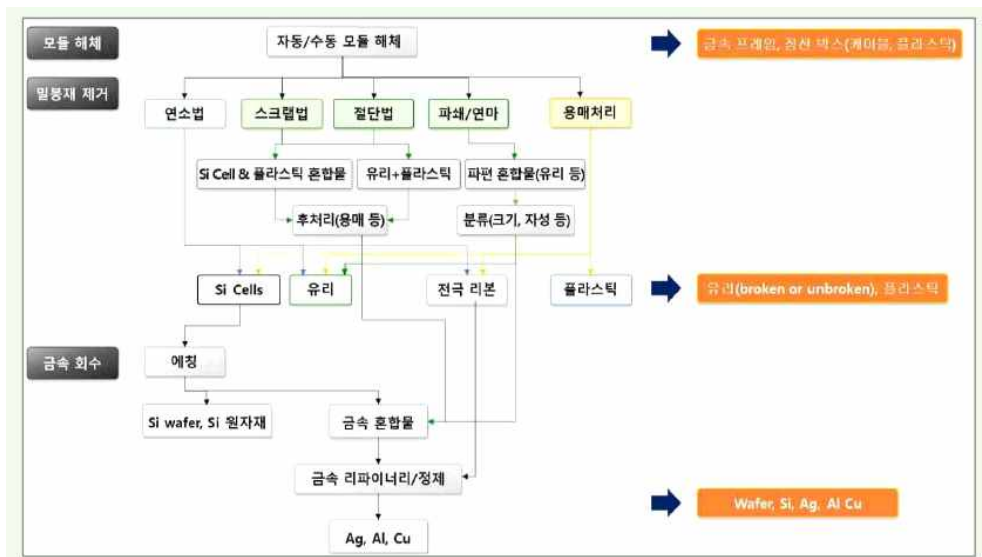


<그림 2.12> 냉장고의 재활용 기술 공정 예시 : 해체/파쇄/선별
(출처 : 박지환, 2019)

- 장·단점 : 폐전기전자제품 내에는 다양한 금속이 포함되어 있으며, 구리, 알루미늄 및 금 등은 회수되어 재이용될 경우 자원을 절약하고 경제성을 확보할 수 있지만, 납과 수은과 같은 유해물질은 자연계에 방치되거나 매립될 경우 용출되어 자연환경과 생태계에 악영향을 미칠 수 있음 (한국환경연구원, 2019). 대형가전제품의 자동화 전처리 기술에 비해 유가물의 재질에 따른 세부적인 해체 및 선별공정이 부족함. 따라서 생산된 유가금속의 품위가 상대적으로 낮은 상태이며, 대부분 수선별 작업에 의존하고 자력선별 이외에 플라스틱 색상 선별과 유가금속 선별 등의 재활용 기술 응용이 부족한 상황

○ 태양광 폐패널 재활용

- 기술 개요 : 신재생에너지 보급 확대 이후 일정기간 사용 후 폐기되는 태양광 폐패널 (또는 폐모듈)의 발생량이 점차 증가할 것으로 예상됨. 이들 태양광 폐패널의 재활용 기술로는 부품별 해체/선별 기술, 물질 재활용 기술 (유리 재활용 및 금속 추출 기술) 등으로 구분할 수 있음



〈그림 2.13〉 실리콘 태양광 폐패널의 재활용 공정

(출처 : 한국에너지기술연구원, 2019)

- 장·단점 : 태양광패널은 70%의 유리, 알루미늄, 플라스틱, 은 등으로 구성되어 있으며, 그 중 약 96%가 재활용이 가능함. 그러나 현재 태양광 폐패널의 재활용 공정은 폐패널을 파쇄해 원료를 분리하기 때문에 원재료 분류과정이 복잡하고 순도를 높이기 위해 화학물질을 사용하거나 고온의 열처리 과정을 거쳐야 하므로 에너지 소비량이 높고 친환경적이지 못함. 따라서 폐패널을 저비용으로 해체하기 위한 재활용기술 지원이 필요함. 태양광 패널 제조업체에서는 화학물질 사용 저감 등을 추진하고 있지만, 25년 이상 장기적으로 사용되는 태양광 패널의 특성상 최근에는 해체가 용이하지 않은 패널이 생산되고 있음. 또한 패널 내 은 함유량이 감소하는 경향이 있기 때문에 앞으로 저비용 분해처리 기술, 저비용 철거·분리·회수 기술을 개발할 필요

가 있으며, 제품의 설계에서부터 재사용이나 환경성을 고려하는 설계가 요구됨 (인더스트리뉴스, 2022)

한편 현재의 태양광 폐패널은 관리체계 미흡으로 인해 그대로 방치되거나 단순 매립되는 등 부적절하게 처리되는 사례가 많음 (한국환경연구원, 2018). 따라서 앞으로 다량 배출될 태양광 폐패널에 대한 처리 문제를 사전에 인식하여 대응방안을 모색할 필요가 있음

○ 전기차 폐배터리 재활용

- 기술 개요 : 전기차 폐배터리는 주로 리튬이차전지로서 셀 (cell), 팩 (pack) 크기와 모양의 다양성, 복잡한 배터리 팩의 전자장치, 열 제어 시스템 등 기술 발전 변화에 따라 구성 성분과 제품 모델이 매우 다양하고, 리튬, 니켈, 코발트 등 유가금속 자원 회수와 환경 보전 측면에서 매우 중요함, 이를 재활용하는 기술은 크게 전처리 기술과 물질재활용을 통한 금속회수 기술 등으로 구분함. 전처리 기술에는 주로 해체/선별, 파쇄/분쇄, 선별 기술 등이 있으며, 금속회수 기술에는 건식제련, 습식제련, 건/습식 조합 공정기술 등으로 구분할 수 있음. 유가금속의 농축/정련/정제 공정을 거쳐 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 구리 등을 회수함



〈그림 2.14〉 국내 전기차 폐배터리의 재활용 공정
(출처 : 손정수, 2018)

- 장·단점 : 전기차 배터리 재활용 기술은 배터리를 분해하여 Cobalt, Lithium 등의 핵심물질을 추출하여 재활용하는 방식임 (구지선, 2019). 배터리를 재활용할 경우, 천연 광물 상태에서의 채굴보다 정제비용을 절감할 수 있으며, 배터리 종류별로 다양한 수익성 창출이 가능함 (한국무역협회, 2022). 전기차의 폐배터리 재활용은 환경편익 증진 외에도 안정적인 재료 확보 측면에서 긍정적임. 폐배터리 내의 중금속, 독성 화학물질 등의 유해물질 회수를 통해 환경편익 증진이 가능함. 폐배터리 매립처리시 배터리 내의 유해물질이 토양 및 지하수를 오염시키며, 소각할 경우 독성가스 배출 등 환경 문제 발생 (구지선, 2019)

나. 국내 유가금속 재자원화 기술 연구개발 현황

○ 우리나라는 광물자원의 95% 이상을 수입에 의존하고 있으나, 폐 금속자원 재활용기술수준의 경우 선진국의 50~70% 수준, 폐가전제품 등에서의 유가금속 재활용률은 15~35%로 매우 저조함 (이종수 외, 2019)

○ 폐전기전자제품 재활용 기술

- 해체/파쇄/선별 등 전처리 기술 : 국내 전기전자제품의 재활용은 주로 대형 가전제품 (냉장고, 세탁기, 에어컨, TV 등)을 중심으로 해체/파쇄/선별 공정을 거쳐 유가물 회수가 이루어지고 있음. 예를 들어, 냉장고의 경우는 해체 공정에서 냉매, Compressor, 모터, PCB 기판 등이 인력에 의해 회수되고, 파분쇄 공정과 선별 공정을 거치면서 철, 구리, 알루미늄, 플라스틱, 우레탄 등이 회수됨 (박지환, 2019)

국내 중소형 가전제품 (전기비데, 공기청정기, 오디오, 전기밥솥, 연수기, 가습기, 전기다리미, 선풍기, 믹서, 청소기 등)의 재활용 기술은 대형가전제품의 자동화 전처리 기술에 비해 유가물의 재질에 따른 세부적인 해체 및 선별공정을 보유하고 있지 않음. 따라서 소형가전제품 재활용 시설로부터 생산된 유가물의 품위가 상대적으로 낮고, 대부분 수작업에 의존하고 자력선별 이외에 플라스틱 색상 선별과 유가금속 선별 등의 재활용 기술 응용이 부족한 상황임

- 농축/추출/정제 기술 : 국내 대형가전으로부터 금속을 회수하기

위해 대형가전제품 내 주로 PCBs 기관 등을 비철금속제련업체로 보내어 유가금속을 생산하고 있으나, 선별공정의 효율이 높지 않은 편임. 또한 금속 추출이 주로 건식공정에 의존하고 있어 회토류 등 회소금속의 회수율이 대체로 낮은 편임. 폐중소형가전제품의 경우, 주로 수선별을 통한 구리, 알루미늄, 플라스틱 등을 회수한 후 나머지 물질은 혼합 스크랩 상태로 매각, 수출, 또는 매립/소각 등으로 처리하고 있는 실정임. 따라서 폐중소형가전제품 내 각종 부품에 포함된 다양한 종류의 유가금속(귀금속, 희유금속, 특수금속 등)은 농축/추출/정제를 통한 유가금속 회수가 어려운 실정임. 따라서 비용 효율적인 재활용 기술 개발이 필요한 상황이며, 폐중소형가전제품의 잠재적 가치와 선별비용과 물류비용, 유가물의 시장 가격변동 등 다양한 요소를 고려한 경제성 분석도 함께 이루어져야 함

○ 태양광 폐패널 재활용 기술

- 국내 재활용 기술 : 국내 태양광 폐패널은 생산자책임재활용제도를 도입하여 현재 소각이나 매립되는 폐패널의 회수 재활용 체계를 구축하여 알루미늄, 실리콘, 유리 등 유가 자원을 회수할 예정임

태양광 폐패널 관련 재활용 기술로서는 실리콘계 태양전지 폐모듈로부터 희유금속 회수와 고순화 기술 개발, 태양전지 모듈의 재자원화 기술 개발, 결정질 실리콘 태양광 폐모듈의 저비용/고효율 재활용 공정시스템 및 소재화 공정기술 개발 등이 있으며, 국책연구기관과 산업체와 공동 연구를 통해 이루어졌음. 아직까

지 국내에서 태양광 폐모듈로부터 유가금속 회수를 위한 재활용 공정 상업화 기술은 이루지지 않고 있음. 또한 국내 태양광 폐패널의 재활용 기술 개발은 주로 실리콘계 모듈에 초점이 이루어져 있어, 향후 태양광 패널의 시장점유율 변화 전망에 대응한 non-silicate 태양광 모듈의 재활용 원천 기술 개발도 필요한 상황임

환경부에서는 태양광 폐패널 회수 실리콘을 활용한 재활용 및 제품화 기술을 통해 회수된 Si를 재활용 사업장에 적용하고 자동차 부품으로 활용하도록 했음 (환경부, 2022)

○ 전기차 폐배터리 재활용 기술

- 국내 재활용 기술 동향 : 환경부 글로벌탑 환경기술 개발 사업으로 전기차 배터리팩 공정 최적화 및 해체 자동화, 습식공정 개선, ESS 해체 파쇄 등에 관한 실증연구 (2016~2019년)를 수행하였음. 자원순환성 제고 기술 개발 사업을 통해 2022년까지 전기차 폐배터리 해체, 유용자원의 회수, 이차전지 소재 개발 등에 약 50억원 이상을 연구개발에 투자하고 있음. 2020년 리사이클링 및 업사이클링 미래 신산업 전략 및 사업화 방향 세미나에서 전기차 배터리팩 해체 및 전지 형태별 모듈 절단 자동화, 분리 정제공정 자동화 등 전기차 폐배터리 재활용 기술 연구 분야가 설정됨 (한국자동차부품재제조협회, 2020)
- 전처리 기술 : 전기차 폐배터리 재사용과 재활용을 위한 센터구축사업이 제주도에서 추진되고 있으며, 일부 재활용 관련 R&D 기술 개발 중임. 전처리공정은 방전시킨 배터리를 물리적으로

- 해체하는 단계임. 부품회수, 기계적 분쇄, 블랙파우더 제조과정이 이에 해당함 (한국무역협회, 2022). 해체공정을 통해 케이스, 제어 box, pack, 모듈 분리, 케이블과 PCB 기판, 셀 등을 분리함
- 물질 재활용 기술 : 국내에서는 성일하이텍 등을 중심으로 우선 해체공정을 통해 케이스, 제어 box, pack, 모듈 분리, 케이블과 PCB 기판, 셀 등을 분리함. 중요한 점은 이러한 물리적 해체 및 선별 공정 이전에 전기적 방전 (electrical discharge) 등을 통해 폭발성 위험을 제거한 후 파분쇄 및 선별 과정을 거쳐야 함. 화학적 처리 공정은 침출, 여과, 용매추출, 전기적 분해 및 침전 등 금속 회수의 목적과 순도를 고려하여 다양한 기술 적용이 필요함. 이러한 공정을 거쳐 약 95% 이상 농축된 망간, 니켈, 코발트, 리튬 등을 회수하고 있음. 향후 해체 및 물리적 선별, 화학적 자동화 공정 등을 통해 재활용 기술의 최적화와 경제성 확보가 주요한 해결 과제로 남아 있음

○ 추가적인 유가금속 물질순환 R&D 보도자료

- 비철금속 물질순환을 위한 기술과 관련하여, 화석연료 기반 열원 및 환원제를 대체하는 친환경 신용융 기술, 전해공정 금속전극의 전력저감형 신전해기술 개발하고자 함 (산업통상자원부, 2021B)

<표 2.9> 비철금속 분야 단계별 기술개발

기간	~'26	~'30
기술	· 비철제련 신용용 기반기술 개발 · 전력저감형 신전해 기반기술 개발	· 수소 열원 기반(20%이상) 안전한 일괄 제련공정 기술 실증 · 아연제련소 대상 전력저감(12%) 전해기술 실증

(출처 : 산업통상자원부, 2021B)

- 친환경 · 저탄소 실현 분야 친환경 제조-청정생산-순환자원 이용 기술
(고품위 고상 순환자원) 에너지 저감형 고용점 금속 용해, 고용점 금속 회수율 향상 전처리, 희소금속 분말 균질화 기술
(저품위 고상 순환자원) 저품위 고상자원용 차세대 분쇄 장치
(한국산업기술평가관리원, 2020)

<표 2.10> 금속계再生资源 금속회수 단계별 기술개발

기간	~'25	~'29	~'30
기술	· 범용금속再生资源의 원료 소재화 기술개발 및 실증	· 희소금속再生资源의 원료 소재화 기술개발 및 실증	· 금속再生资源으로부터 92% 이상 금속회수 공정 기술 확보

(출처 : 산업통상자원부, 2021B)

- 탄소중립 공통 분야로 자원순환 기술 고도화 및 CCUS 기술 본격 개발을 준비하고 있음
(자원순환)再生资源의 산업원료 · 소재화 및 재제조기술 고도화를 위해 금속계(범용/희소금속), 무기계(철강부산물, 폐유리 등), 석유화학계(페타이어 등)再生资源의 산업원료 · 소재화 기술 고도화 (재자원화율을 現 83%에서 2030년까지 92%까지 향상시키 고자 함 (산업통상자원부, 2021B)

다. 국외 유가금속 재자원화 기술 연구개발 현황

○ 폐전기전자제품 재활용 기술

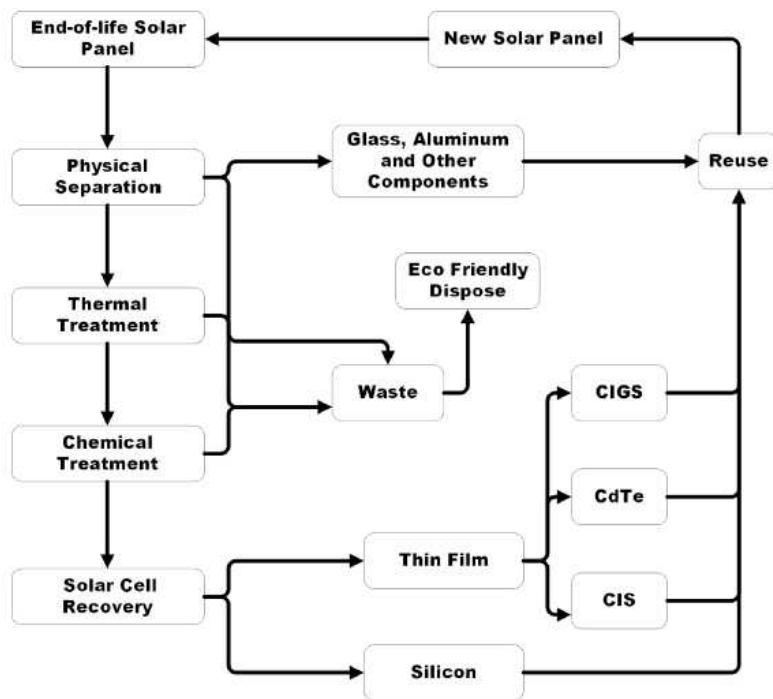
- 국외 재활용 기술 : 폐전기전자제품의 재활용 기술은 주로 유럽과 일본을 중심으로 유가자원 회수와 유해물질 처리를 통해 순환경제 구축을 위해 활발히 이루어지고 있음
- 유럽 : 독일 REMONDIS와 벨기에 UMICORE, 오스트리아 Muller Gtttenbrunn 등을 중심으로 금속과 귀금속, 희소금속 등을 회수할 수 있는 종합 용융 및 정련로를 개발하여 가동하고 있음. 대형가전제품의 재활용 공정은 전처리(해체/파쇄) 공정, 선별공정, 추출 및 정제 공정으로 이루어져 있음. 중소형가전제품의 경우, 통합파쇄 및 선별 후 건식제련과 습식제련 등의 공정을 통해 유가금속을 회수하고, 플라스틱류는 재생원료 및 고형연료로 재활용하고 있음. 농축과 추출공정은 복합 포집금속 (구리, 납, 아연 등)을 유용하게 회수할 수 있도록 복합 비철제련 공정 운영을 통해 포집금속별 특성, 금속의 종류, 최적 회수 조건 등 재활용 기술을 구축하고 있음
- 일본 : 전기전자제품 재활용 기술은 한국에 비해 상대적으로 앞서 있으며, 전처리(해체/파쇄/선별 등), 농축, 정련 및 정제 기술 등이 개발되어 유가자원과 각종 희유 금속 회수 등이 이루어지고 있음. 특히 일본은 도시광산 (urban mining) 개념을 일찍 도입하여 폐전기전자제품으로부터 금속 자원들을 회수하고자 기술 개발과 실증화 연구가 활발히 이루어지고 있음. 대형가전 (냉장고, 세탁기, TV, 에어컨 등)의 경우, 수작업 해체 공정을 통해 콘덴서에 함유되어 있는 오일과 냉매를 회수하고, compressor

등을 분리한 후 선별 공정을 거쳐 철, 비철금속, 플라스틱, 우레탄 등을 회수하고 있음. 중소형가전의 경우, 제품의 종류가 많고, 포함된 각종 유가금속의 성분과 함량이 다양해서 파분쇄, 선별, 건식 제련 또는 습식제련과 추출 과정을 거쳐서 유가자원과 금속을 회수하고 있음. 희소금속 (rare metal, 니켈, 망간, 탄탈, 크롬 등 포함) 재활용을 위해 건식 제련공정 (배소 처리, melting and molten salt 처리 등)과 습식제련공정 (hydrothermal treatment, 이온교환 용매추출, 여과, 정전기분리 및 미생물 추출 등)이 적용되고 있음 (Itoh, 2014)

○ 태양광 폐패널 재활용 기술

- 국외 재활용 기술 : 세계 주요 국가는 2010년대 초반부터 주로 결정질 실리콘 태양전지를 중심으로 유리와 유가 금속 회수를 위한 재활용 공정 기술 개발이 이루어져 왔음. 특히 미국, 유럽, 일본 등을 중심으로 태양광 폐패널의 재활용 기술 연구와 상용화가 이루어지고 있음. 태양광 폐패널의 재활용 기술은 물리적 분리 해체, 열적처리, 화학적 처리 등으로 구성되어 있으며, 주로 유리 회수, 실리콘과 유가 금속 및 회수 및 추출 목적으로 자원회수가 이루어지고 있음. 재활용 기술 단계에서 우선 알루미늄 frame과 Junction box 등을 제거하는 자동 또는 수거 모듈 해체 및 분해 전처리 단계를 거친 후 밀봉재 (encapsulant) 제거 단계, 폐소자로부터 금속 추출단계, 회수된 원자재 및 부품의 재제조와 재활용 단계 등으로 크게 구분할 수 있음. 특히 태양광 모듈의 구성요소인 유리는 태양광 모듈 무게의 약 75% 이상

을 차지하고 있음. 적층구조인 결정질 실리콘계의 폐모듈은 밀봉재를 제거하기 위해서는 가열 절단 과정을 거친 기계적 분리, 유기용매를 이용한 화학적 분리, 고온가열을 통한 연소법 등의 기술 적용이 이루어지고 있음. 일반적으로 파쇄 선별과정을 거친 후 용매 추출을 통해 반도체 소재만을 선택적으로 용해시킨 후 고체와 액체 분리 및 석출공정을 통해 반도체 소재를 회수하는 방법이 보편적으로 이용되고 있음. 이러한 재활용 기술 공정을 거친 후 Al, Cu, Si, Ag, Cd, Te, Se, In, Ga, 유리, 플라스틱, 알루미늄 frame, cable 등이 회수됨



〈그림 2.15〉 태양광 폐패널의 재활용 공정
(출처 : Chowdhury et al., 2020)

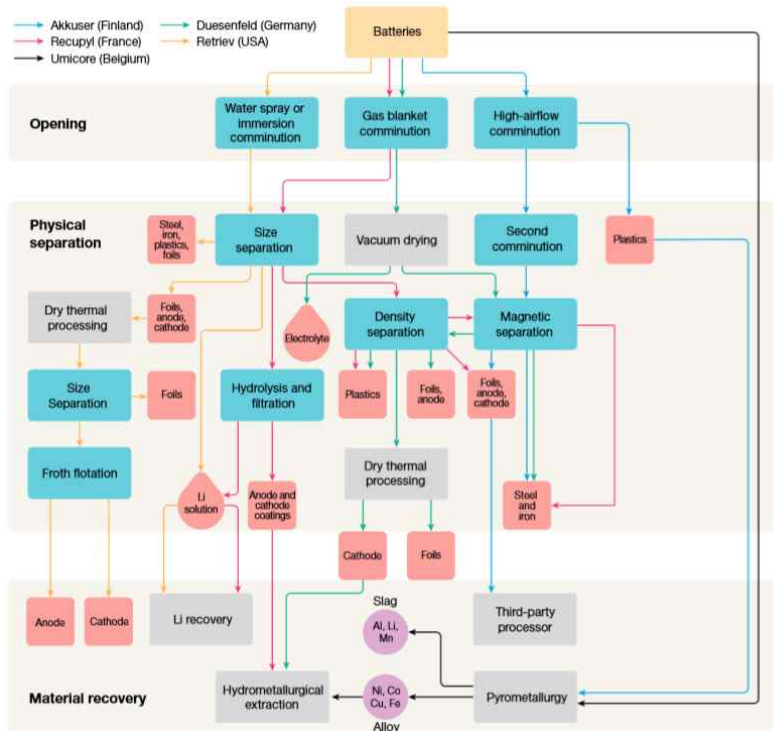
- 유럽 : First Solar, Eco Recycling, SASIL, SSV, Maltha, Reiling Marienfeld, La Mia Energia Scarl, TNO 등 미국, 이탈리아, 네덜란드, 벨기에 등을 중심으로 태양광 폐패널의 재활용을 위한 기술개발을 통한 유가자원 (유리, 금속류) 및 희토류 금속 등의 회수가 이루어지고 있음. 태양광 폐패널로부터 고품질의 유리 추출을 통해 창문이나 식기류 등에 재활용하고 있음. 플라스틱과 EVA 샌드위치틀 연소시킨 후 실리콘을 추출하여 합금으로 재활용하고 있으며, 알루미늄, 은을 회수할 수 있음. 하지만, 유럽에서 태양광 폐패널의 폭넓은 상용화 확대 기술 적용을 위해서는 공정 과정에서 저소비형 에너지, 유해물질 제거, 경제성 확보 등이 아직도 주요 해결과제로 남아있음
- 일본 : NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 재정적 투자를 바탕으로 태양광 폐패널의 재활용 기술 개발과 연구가 이루어졌음. 이 연구를 통해 다양한 종류의 태양광 모듈의 분리 해체 및 유가자원 (알루미늄 frame, 실리콘 셀, 유리 등) 재활용 기술, 밀봉재 열분해와 CIS 층 박리 (CIS 모듈 전용) 등의 공정을 개발하였음. 최근에는 미쯔비시 materials, Hamada Company, Solar Frontier 등 여러 산업체를 중심으로 결정질 실리콘 태양전지 모듈의 재활용 기술 개발, 습식 방법에 의한 결정질 태양전지 모듈의 고효율 재활용 기술, 모듈 분해를 위한 hot knife 이용 재활용 기술 개발, G2G 형 태양광 모듈의 비용 절감 분리 기술 개발, 다양한 태양전지 모듈의 비용 효율적 재활용 기술 개발 등이 이루어지고 있음

○ 전기차 폐배터리 재활용 기술

- 국외 재활용 기술 : 전기차 폐배터리인 페리튬이온전지는 재사용하거나 재활용이 가능함. 재사용을 위해 가공 범위에 따라 배터리 팩을 해체하여 모듈과 셀 단위로 선별 및 재조립하거나 팩 단위 그대로 재사용하는 방법으로 주로 에너지저장장치 (ESS) 용도로 활용함. 반면 전기차 폐배터리의 재활용은 폐배터리 내 포함되어 있는 유가자원, 특히 유가금속을 회수하여 재생원료로 활용하는 목적으로 적용됨. 리튬이온전지의 재활용 시 리튬은 물과 격렬하게 반응하여 화재 및 폭발 가능성이 존재함. 각 전기자동차의 폐배터리 재활용을 위한 시스템 해체와 전처리 기술이 상이함. 다양한 전기차 폐배터리의 종류별 최적화된 재활용 기술 개발이 필요함. 폐배터리의 회수 시 드는 비용과 유가금속의 회수 시 경제적 가치가 변동하는 경우 경제적 효과가 없어 재활용 시장의 활성화가 어려움. 따라서 향후 저비용, 환경오염 최소화, 에너지 절감 기반 고부가가치 재생원료 회수를 위한 재활용 기술 개발이 요구되고 있음
- 유럽 : 벨기에 UMICORE, 핀란드 Akkuser, 독일 Duesenfeld, 프랑스 Recupyl 등 중심으로 전기차 폐배터리의 재활용 기술의 선도적 역할을 하고 있음. 특히 벨기에 UMICORE는 페리튬이온전지를 해체 분리 및 선별 공정을 거친 후 직접 제련공정에 투입 후 건식제련과 습식제련 등의 기술을 결합하여 초고온 공정 (UHT 기술 공정)으로 습식제련을 통해 코발트-니켈-구리 등 합금을 생산하여 Ni-MH, 리튬이온전지 등의 재생원료로 공급하고

있음. 정련 및 추출 공정을 통해서 구리, 아연, 망간, 니켈, 코발트, 리튬 등 유가금속을 회수하고 있음. 슬래그의 경우 건설재료로 활용하거나 또는 회토류 회수를 위해 추가 재활용 공정을 거쳐 물질 회수가 이루어짐

- 일본 : Nissan 자동차의 경우 2014년부터 구형 배터리 반납 조건으로 배터리 교체 서비스를 시행하여 에너지 저장장치(XStorage)를 제작하여 태양광 발전과 연계한 전기 저장과 무전력 저장장치(UPS)를 개발하고 있음 (시사저널e, 2016). Nissan 자동차와 Sumitomo Co과 합작투자를 통해 2018년 전기차 폐배터리 재사용과 재활용을 위한 플랜트를 건설하여 연간 약 2,250개의 배터리 처리할 예정임 (에너지경제연구원, 2018). 혼다 자동차의 경우, 전기차 및 하이브리드 차량으로부터 폐리튬이온전지를 회수 후 전지 상태를 확인 후 일정 조건 충족 시 재생에너지 저장장치 (ESS)로 활용하거나 재사용이 어려운 경우 해체/선별 과정을 거쳐 희소금속 등을 추출할 예정임 (에너지데일리, 2020)



<그림 2.16> 전기차 폐배터리의 재활용 기술 공정
(출처 : Harper et al., 2019)

라. 요약 및 시사점

○ 미래 폐자원의 자원순환 필요성 : 국내 전자정보통신 산업과 재생에너지 확대에 따른 일정 기간 지난 후 제품의 폐기에 따른 미래 폐자원의 발생량이 급격히 증가할 것으로 예상하고 있으며, 이를 자원화하기 위한 기술 개발을 추진해야 함.

- 미래 폐자원으로서 폐전기전자제품, 태양광 폐패널, 전기차 폐배터리 등 재활용 국내외 기술 현황을 분석하고, 미래 폐자원의 자원순환을 위한 정책, 재활용 산업과 투자 동향 등을 파악하였음.

- 고부가가치 자원순환 정책방향 추진 및 산업계의 움직임이 활발히 진행 중이며, 국내에서는 폐자원 유통구조의 비효율화 문제 심화

신재생 에너지, 전기차 보급 확대 정책에 따라 폐태양광 패널, 폐이차전지, 각종 폐플라스틱 등 향후 배출량 급증이 예상되는 폐기물에 대해 리사이클링 측면의 회수·이송·처리·재활용 등 효율적 자원순환을 위한 소 단계 관리 등 폐기물 해결을 위해 세계 각국에서는 정부 차원의 규제 강화와 더불어 자원순환시장 활성화 진행 중으로 이에 대한 전략적 접근 필요

특히, 폐태양광 패널, 폐이차전지 등에 대한 처리·재활용시 부가적으로 발생하는 오염 물질 처리 기술 및 분해·재활용이 용이한 제품 개발과 폐기물 발생량 최소화를 위한 제품 과대포장 금지 등 각종 규제 및 지원 방안 마련 필요 (환경 인적자원개발위원회, 2020)

- 기술 : 미래 폐자원 기술은 전기전자제품, 자동차, 재생에너지 태양광 산업 발전에 따른 제품 사용 후 폐기되는 폐자원 등을 자원으로 회수하는 것에 초점을 두어, 폐전기전자제품, 태양광패널, 전기차 폐배터리를 대상으로 하였으며, 대체적으로 전처리 기술, 물질 재활용 기술 등으로 구분할 수 있음
 - (폐전기전자제품) 대형가전제품의 재활용을 위한 해체/파쇄/선별 등의 공정으로 이루어져 있고, 중소형 가전제품의 비용 효율적 재활용 기술 개발 연구와 함께 유가금속 회수 기술 개발이 필요함
 - (태양광 폐패널) 국내에서 태양광 폐모듈로부터 유가금속 회수를 위한 재활용 공정 상업화 기술은 아직까지 이루지지 않고 있음. 국내 태양광 폐패널의 재활용 기술 개발은 주로 실리콘계 모듈에 초점이 이루어져 있으며, 향후 태양광 패널의 시장점유율 변화 전망에 대응한 non-silicate 태양광 모듈의 재활용 원천 기술 개발이 필요함
 - (전기차 폐배터리) 환경부를 중심으로 전기차 폐배터리 회수 후 재사용 또는 재활용하기 위한 실증/상용화 연구를 추진했으며, 자원순환성 제고를 위한 기술개발 사업을 진행하고 있음. 산업계에서는 해체, 분리, 파분쇄/선별 등의 물리적 재활용 공정과 침출, 여과, 용매추출, 전기분해 등의 화학적 재활용 공정을 적용하고 있음. 향후 자동화 공정을 통한 재활용 기술의 최적화 및 경제성 확보가 주요 해결과제임

3 재제조 물질순환 기술

가. 세부기술 정의

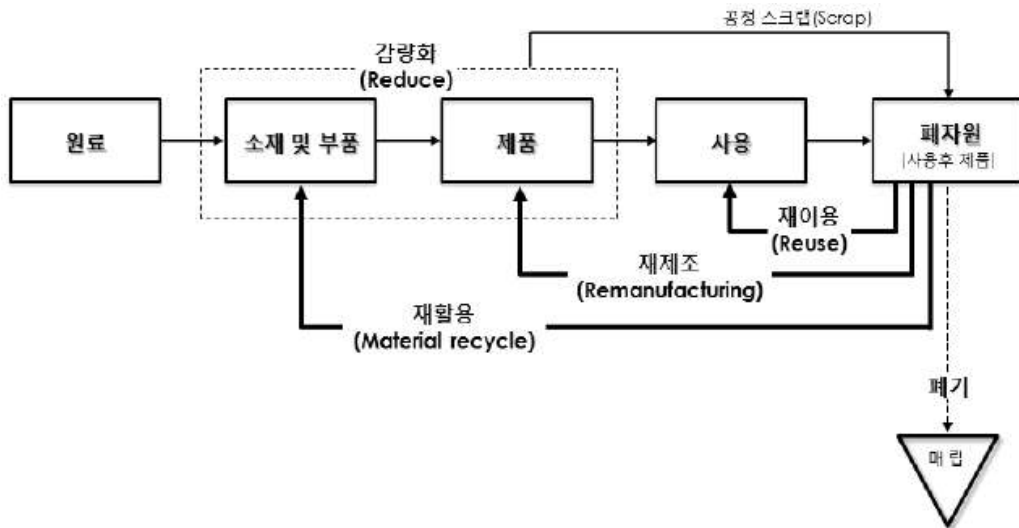
- 제조는 일반적으로 ‘수명 또는 사용 주기가 다 된 사용 후 제품을 신제품과 동일하거나 더 나은 품질의 제품으로 복원하는 산업 공정’으로 정의할 수 있음. “환경친화적 산업구조로의 전환 촉진에 관한 법률” 개정을 통해 정의된 바로는, 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 제2조제1호에 따른 재활용가능자원을 폐기물관리법 제2조제7호에 따른 재사용·재생이용할 수 있는 상태로 만드는 활동 중에서 분해·세척·검사·보수·조정·제조립 등 일련의 과정을 거쳐 원래의 성능을 유지할 수 있는 상태로 만드는 것을 말함



<그림 2.17> 재제조의 정의

(출처 : 한국생산기술연구원, 2007)

사용 후 제품의 재자원화는 방법은 reuse, repair, refurbishing, remanufacturing, cannibalization, material recycling 등 다양하지만 크게는 재사용, 재제조, 물질재활용으로 구분할 수 있음



<그림 2.18> 재사용, 재제조, 물질재활용의 비교
(출처 : 강홍운 외, 2017)

물질재활용은 원료만을 회수할 수 있고 사용 후 제품에 잔존하는 부가가치는 회수할 수 없으므로 자원순환 관점에서 가장 낮은 우선순위에 해당함. 재제조는 자원이용 효율성 및 부가가치 창출 측면에서 매우 효과적인 자원순환 방법임. 사용 후 제품 또는 그 제품을 구성하는 부품을 좀 더 오래 사용하도록 함으로써, 에너지 사용량과 대기, 수질, 토양으로의 오염물질 배출량을 상당 부분 줄일 수 있음. 반면, 재이용은 사용 후의 제품이나 부품을 특별한 생산공정 없이 단순한 세척이나 수리를 통해

다시 사용하는 것을 말함

재제조 공정은 사용 후 제품이 입고되면 세부 부품으로 분해하여 적재해 놓은 후, 기능적으로 큰 하자가 없는 부품을 대상으로 세척 단계를 거치게 되며, 세척 후 다시 한번 단품 검사를 통해 불합격된 것은 폐기시키고 합격된 부품에 대해서 보수/조정을 거쳐 재조립한 후 최종 제품에 대해 QC를 시행하여 최종 제품으로 출고되는 과정을 밟게 됨

○ 재제조 공정의 주요 5단계는 다음과 같이 제시됨

① 해체 (Disassembly) 공정

부품을 단일 부품 수준으로 완전히 해체하는 단계로, 부품을 훼손 또는 파손하지 않고 접합부를 풀 수 있는 수준까지 해체하고, 자동차엔진의 경우 500여 가지의 단일 작업을 거쳐 해체됨

② 세척 (Cleaning) 공정

해체 단계에서 나온 모든 부품을 재사용 가능한 상태로 세척하는 단계로, 세척 공정의 변수로는 화학물질의 영향, 세척 과정에서의 온도의 영향, 그리고 물분사와 같은 기계적 활동 및 공정 지속시간 등이 있음

③ 검사 및 분류 (Inspection and Sorting) 공정

해체와 세척을 거친 후에는 부품의 재사용 여부와 수리 조정이 가능한지 상태를 판단함. 부품의 분류는 수리 조정 없이 재사용 가능한 부품과 불가능한 부품 그리고 수리 조정이 가능한 부품으로 분류함

④ 수리 조정 교체 (Reconditioning) 공정

다시 새것 수준으로 만드는 단계로, 선반, 밀링, 드릴링 머신, 그라인더 또는 머시닝 센터와 같은 제조장비를 사용하거나 새로운 부품을 만들어 교체하기도 함

⑤ 재조립 (Reassembly) 공정

신제품 조립라인과 동일한 방식 & 기능검사/시험운전을 통해 품질을 검사함

나. 국내 재제조 물질순환 기술 연구개발 현황

○ 국내 재제조산업 현황

- 2005년 친환경산업법 개정을 통해 국내 재제조 개념이 도입된 후 자동차 부품 및 토너 카트리지 중심의 재제조 시장을 유지하고 있으나, 최근 기계 등 분야 확장 중
시장규모는 7,500억원 (2010년)에서 1조원 (2017년)으로 7년간 약 30% 성장했으나 품목은 제한적임
자동차 및 토너 카트리지 비중이 100%에서 90%로 축소되었으나 여전히 재제조 시장의 중심 축에 해당함
재제조 기업의 90% 이상이 근로자 수 10인 미만으로 구성되어 있으며, 매출액은 10억원 이하임 (안상준, 2022)

<표 2.11> 연도별 재제조 시장 규모 현황

[단위 ; 억원, %]

분야	2010년		2015년		2017년	
	매출액	비중	매출액	비중	매출액	비중
자동차부품	6,100	81.3	6,741	80.0	7,874	78.6
전기전자 부품 (토너 카트리지)	1,400	18.7	1,450	17.2	1,200	12.0
건설기계·부품	-	-	-	-	770	7.7
공작기계	-	-	-	-	31	0.3
화학축매	-	-	40	0.5	6	0.06
전기·전자제품	-	-	194	2.3	139	1.4
합계	7,500	100	8,425	100	10,020	100

* [참고] 재제조산업에 대한 별도 산업분류가 없어 통계 작성의 한계 존재,
현재 유관단체 등을 통해 전수조사를 실시
(출처 : 안상준, 2022)

○ 국내 재제조산업 기술개발 현황

- 현 시점의 기존 산업 기준으로는 전기전자 및 자동차 부품 외 기술개발을 통한 재제조 분야가 확산되고 있음

기계 분야의 경우 산업단지 내 범용 노후 산업기계를 대상으로 스펙-업 재제조 기술 개발이 이루어지고 있으며, 공작기계 및 건설기계 리트로핏 기술개발을 위한 예비타당성 조사가 진행 중임 (안상준, 2022)

전력 기자재의 경우 저 열화성 노후 GIS의 ICT/AI 기반 재제조 기술 개발, 노후 수배전반 ICT 융합 스펙-업 기술 개발, 전력 송배전용 노후전선의 물질순환 기술개발을 기획 중임 (한국산업 기술평가관리원, 2020, 2021년 산업기술 R&D 투자전략. p24; 안상준, 2022)

선박 기자재의 경우 조선해양 핵심기자재 (7종) 재제조 기술개발 및 노후 소형선박 스펙-업 재제조 기술개발을 위한 예비타당성 조사가 진행 중임 (안상준, 2022)

- 미래 산업을 위한 기술개발 준비 현황으로는 친환경 산업 전환에 따른 미래 폐자원에 대한 재제조 선제 기술 개발을 목표로 하고 있음

<표 2.12> 친환경 산업 전환에 따른 미래 폐자원 재제조 선제 기술 예비타당성 조사 진행 현황

분야	주요 내용
전기 E모빌리티	- 전기차 폐배터리 B2U, 고전압 부품류 등 미래 모빌리티의 생애 전주기 순환경제 체계 구축 기술 개발
수소 E모빌리티	- 연료전지의 사용 후 스택 진단, 해체, 선별 등의 재제조 기술 개발
에너지 전환	- 노후 내연기관 자동차의 탄소 다배출 연료를 LPG, CNG, 바이오에탄올 등의 E-fuel 엔진 연료전환 시스템 기술개발
태양광 발전	- 현재도 활용의 어려움으로 보관 중이며, 향후 폭발적인 배출이 예상되는 태양광 폐패널의 리파워링 재제조 기술개발

(출처 : 안상준, 2022)

○ 추가적인 재제조 물질순환 기술 R&D 보도자료

- 탄소중립 공통 분야로 재제조 관련 자원순환 기술 고도화 및 CCUS 기술 본격 개발을 준비하고 있음

(자원순환) 재생자원의 산업원료·소재화 및 재제조기술 고도화와 관련하여, 수송기기, 산업기계 재제조기술 개발 및 성능평가·품질인증시스템 구축을 목표로 2030년까지 기술고도화를 계획하고 있음 (산업통상자원부, 2021B)

〈표 2.13〉 산업특화 재제조 기술 단계별 기술개발

기간	~'28	~'30
기술	· 산업기계 리트로핏 기술개발 · 수송기기/공정설비 재제조 기술개발	· 산업 특화된 첨단기술 융합 탄소저감 재제조 기술 고도화

(출처 : 산업통상자원부, 2021B)

- 2050 탄소중립 실현 핵심기술 개발을 목표로 탄소중립 공통 분야에서는 탄소자원 재자원화 및 CCUS 활용기술 확대를 계획하고 있음

(자원순환) 저탄소 순환경제를 위한 자원순환 혁신기술 고도화를 목표로 미래산업 제품 (전기차, 재생에너지, 로봇, 드론 등) 재자원화를 2030년까지 92%, 2050년에는 94% 수준까지 향상시키고자 함. 재제조 목표는 2030년 10%에서 2050년까지 30% 수준까지 향상시킴으로써 기술 고도화로 저탄소 순환경제를 구축하고자 함

〈표 2.14〉 미래산업 순환경제 체제 구축 혁신기술 단계별 기술개발

기간	~'30	~'50
기술	· 전기차 사용후 고전압 부품 및 폐배터리, 재생에너지 소재부품, 로봇, 드론 등 재제조율>10%, 재자원화율>92%	· 전기차 사용후 고전압 부품 및 폐배터리, 재생에너지 소재부품, 로봇, 드론 등 재제조율>30%, 재자원화율>94%

(출처 : 산업통상자원부, 2021B)

다. 국외 재제조 물질순환 기술 현황

○ 미국, 유럽, 일본

- 유럽에서는 생산자에게 제품의 회수에 관한 책임을 부여하는 입법안이 추진되고 있으며 전기·전자제품 폐기물처리지침(WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment)은 전기, 전자 장비의 재사용 및 재활용 촉진을 통한 폐기물 최소화를 내용을 담고 있음. 또한 유럽은 European Recycling Law for Electronic Waste 법안을 통해 프린터 제조자가 사용자로 하여금 기존 프린터와 다른 상품의 카트리지 사용이나 재제조를 방해하는 Clever Chip의 장착을 금지하는 법률안을 통과시켜 2006년도부터 시행 중임. 이러한 정부의 시책으로 인해 유럽은 미국과 함께 전 세계적으로 재제조 산업이 가장 발달하였음

제품은 가치를 잃었으나 그 제품에 사용된 소재는 가치가 남아 있는 경우 그 소재를 재사용하기 위해 제조공정으로 다시 보내는 것임. IDEO에서는 르노 (Renault)사를 예로 들었는데, 르노에서는 기존에 완성품의 일부분으로 사용되었던 콤프레셔나 기어 박스를 인텐시브한 공정과정을 거쳐 동일한 보증기간을 가지고 신제품과 함께 판매한다고 소개하고 있음. 완전한 변형이 아닌 만큼 recycle에 비해서는 에너지가 덜 들어가게 되지만, 그래도 투입되는 에너지가 공정과정에 상당히 들어가게 됨 (김병수, 2020)

- 미국, 유럽을 중심으로 자동차 뿐 아니라 항공기, 중장비, 의료 기기, 군수장비, 로봇 등 첨단·고부가가치 산업분야로 재제조

산업 영역이 확대되고 있음

시장규모는 미국 51.7조원, 유럽 46.8조원으로 국내 대비 50배 이상, GDP 대비 4배 이상인 것으로 나타남 (안상준, 2022)

<표 2.15> 주요 선진국의 재제조품 시장규모

구분	미국('11)	EU('15)	일본('15)	한국('17)
재제조품 시장 규모 (GDP 대비)	51.7조 원 (0.23%)	46.8조 원 (0.22%)	1.7조 원 (0.03%)	1.0조 원 (0.05%)
업체 수	8,000여 개	7,200여 개	1,500여 개	1,450여 개
고용인원	18만 명	19만 명	1.8만 명	0.7만 명

(출처 : 안상준, 2022)

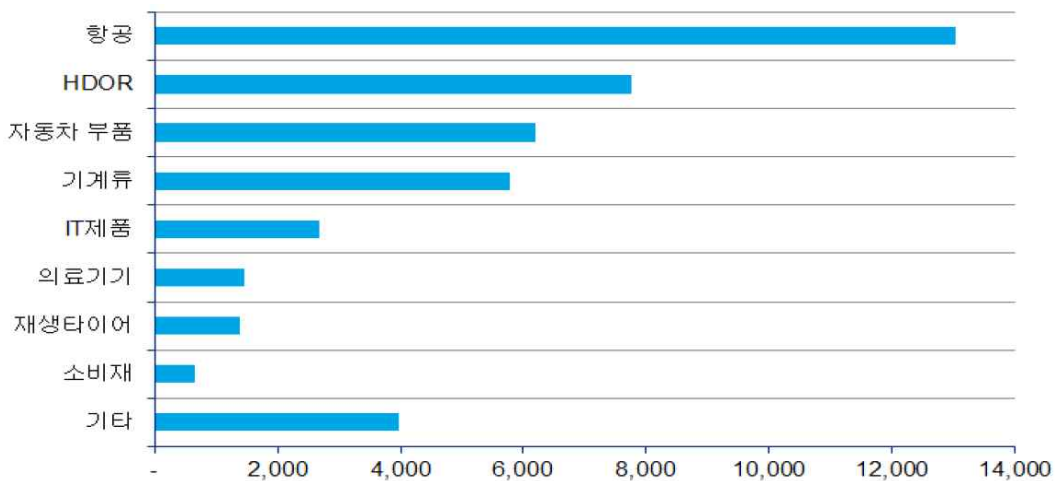
- 독일의 경우, 원제조업체인 벤츠에서 약 37,000여종의 재제조부품을 브랜드화하고 있으며 가격은 30% 저렴한 수준이나 보증수준은 동일하게 책정하고 있음
- 일본의 경우, DMG-Mori에서 생산된 제품을 대상으로 100% 성능복원 뿐 아니라 맞춤형 성능향상을 목표로 한 lifecycle service를 제공하고 있으며, 이처럼 원래성능 대비 향상된 성능을 제공함으로써 재제조 범위를 확장하고 있음
- 미국의 경우, GE에서 첨단 의료기기 등의 고부가제품을 대상으로 재정비 서비스를 제공하는 GoldSeal 프로그램을 운영하고 있음 (안상준, 2022)

○ 글로벌 재제조 산업 방향 - 고부가 가치화

- 전통적으로 재제조 시장을 주도하고 있는 자동차 부품 분야는 성숙 안정화 단계이며, 항공, 중장비, 기계류, 의료기기 등 첨단

기술이 필요한 분야로 시장이 확대 중임

미국 국제무역위원회에서 조사한 재제조 시장 규모는 항공 130억 달러, HDOR (Heavy duty and Off-road vehicles) 78억 달러, 기계류 68억 달러, 자동차 부품 62억 달러로 조사되었으며 (2011년 기준), 유럽도 비슷한 양상임



<그림 2.19> 미국의 재제조 산업별 생산규모 [2011년, 백만 달러]

(출처 : 안상준, 2022)

라. 요약 및 시사점

○ 재제조 기술 필요성

국내의 경우 2010년부터 7년간 30% 증가한 시장규모 대비 자동차 및 토너 카트리지 등으로 여전히 대상 품목이 제한되어 있으며, 이에 대한 확장이 필요함

유럽, 미국, 일본 등에서는 자동차 뿐 아니라 항공기, 중장비, 의료기기, 군수장비, 로봇 등의 첨단·고부가가치 산업 분야로 재제조 산업 영역을 확대하고 있음. (1) 원제조업체의 참여, (2) 재제조범위의 확장, (3) 첨단·고부가제품으로의 확대와 같은 전략적 방향을 설정해야 함

○ 기술 현황

- 국내의 경우 기존 전기전자 및 자동차 부품 외 산업기계, 전력기자재, 선박 기자재 등에 대한 기술개발을 위해 예비타당성 조사가 진행 중임

친환경 산업으로의 전환을 위한 미래 기술로는 (1) 전기 및 수소 E모빌리티 분야의 폐배터리 또는 고전압 부품류에 대한 해체/선별 등의 기술, (2) 노후 내연기관 자동차의 탄소 다배출 연료를 대체하기 위해 LPG, CNG, 바이오에탄올을 연료로 하는 E-Fuel 엔진 연료전환 시스템 기술, (3) 향후 폭발적인 배출이 예상되는 태양광 폐패널의 리파워링 재제조 기술이 있으며 이들 기술개발을 위한 예비타당성 조사가 진행 중임

제2절

순환경제를 위한 물질순환 미래기술 개발을 위한 재정 투자현황

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 재정투자 현황

가. 정부 예산

○ 환경부 자원순환 예산

- 환경부의 자원순환 예산은 2019년 기준 2,262억원에서 2020년 2,669억원으로 약 18.0% 증가했으며 2021년에는 2,939억원으로 전년 대비 약 10.1% 증가하였음

순환경제는 정부가 2020년 하반기에 발표한 한국판 뉴딜 계획과 2050 탄소중립 추진전략과 밀접한 관련성이 있으므로 재정투자의 규모는 한동안 계속해서 증가할 것으로 예상됨

세부적인 내용으로는 2019년도에는 생활자원회수센터 확충 (67억원 → 124억원), 미래자원 거점수거센터 구축 (신규 3억원) 등 일반적인 폐기물의 수거·회수·재활용에 초점을 두었으나, 2020년에는 유해폐기물 처리 및 대집행 예산을 크게 확충 (109억원 → 361억원)하고 재활용품 비축사업 예산을 편성 (신규 94억원)하는 등 쓰레기 산 이슈와 재활용 시장 기능 약화에 대응하였음. 2021년도에는 재활용품 비축사업을 대폭 확대 (94억원 → 259억원)하고 다회용 포장재 재사용 사업 예산을 편성 (신규 54억원)하여 비대면 소비 증가에 따른 포장재 사용량 증가에 대응하였음

〈표 2.16〉 환경부 최근 7년간 자원순환 분야 예산 현황 및 추이

(단위: 억원)

구분	2015년	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년
자원순환 ¹⁾	3,105	3,477	3,492	3,147	3,545	2,669	2,939
재활용산업 육성용자	1,036	1,036	1,329	1,283	1,283	-	-
재활용산업 육성용자 제외 예산 ²⁾	2,069	2,441	2,163	1,864	2,262	2,669	2,939

주: 1) 2015~2017년은 폐기물 분야 예산

2) 재활용산업 및 육성용자 사업은 2020년 미래환경산업 육성용자 사업으로 통합(자원순환-환경경제)
(출처 : 배진수, 2021)

〈표 2.17〉 산업부 순환경제 관련 사업 및 예산 지원 현황

(단위: 억원)

구분	사업명	사업기간	연도별 예산					
			2017	2018	2019	2020	2021	2022
비R&D	산업계 순환경제 기반구축사업	2021~	-	-	-	-	24	66
R&D	에너지·자원순환기술개발사업	2007~2020	121	88	18	5	-	-
	첨단제품 전후방산업의 순환자원이용 기술개발	2018~2022	-	17	37	49	39	34
	제조업 활력제고를 위한 산업기계 에너지저감형 재제조 기술개발	2020~2024	-	-	-	59	90	95
	특수차량 노후엔진 및 배기장치 전자기술 연동 재제조 기술개발	2020~2022	-	-	-	58	56	54
	자원순환이용 희소금속 회수 공통활용기술개발	2021~2025	-	-	-	-	50	74
	저열화성 노후 전력기자재 재제조 기술개발	2021~2024	-	-	-	-	30	62
	이차전지 재활용 표준인증 플랫폼 구축사업	2021~2024	-	-	-	-	20	30
	EV·ESS 응용제품 기술개발 및 실증	2021~2024	-	-	-	-	30	40
R&D (신규)	재생자원의 저탄소 산업원료화 기술개발	2022~2026	-	-	-	-	-	62
	에너지저감 공정축매 재자원화 기술개발	2022~2025	-	-	-	-	-	91
	저탄소 고부가 전극재생 혁신기술개발	2022~2026	-	-	-	-	-	36
	전자산업 재생소재 순환성 검증 기반구축	2022~2026	-	-	-	-	-	20
	탄소중립 E-FUEL 연료시스템 및 차량 적용/검증 기술개발	2022~2025	-	-	-	-	-	47
	석유화학산업 온실가스 감축을 위한 탄소중립형 석유계 원료대체 화학공정기술개발사업	2022~2024	-	-	-	-	-	74
합계			121	105	55	171	309	785

(출처 : 조세재정연구원, 2021, 2021~2025 국가재정운용계획 지원단보고서(자원순환경제 구축))

○ 산업부 순환경제 예산

- 산업부의 순환경제 예산은 2017년부터 2019년도까지는 에너지·자원순환기술개발사업과 첨단제품 전후방산업의 순환자원이용기술개발의 2개 사업만 순환경제 관련 예산으로 편성되었음
- 그러나 2020년 이후로 다양한 사업에 대한 재정지출 계획이 수립되었으며, 재제조 및 재자원화 기술 연구개발이 많은 비중을 차지하는 추세를 보이고 있음

나. 유가금속 물질순환 산업 동향

- 국내외 폐전기전자제품의 재활용 산업 규모 : 전 세계적으로 전기전자 산업의 급격한 기술 발달로 인해 매년 소비되는 전기전자제품의 소비는 매년 약 2.5백만톤이 증가할 것으로 예상되며, 전 세계적으로 2019년 기준 약 53.6백만톤의 폐전기전자제품이 발생하는 것으로 보고됨 (Forti et al., 2020)

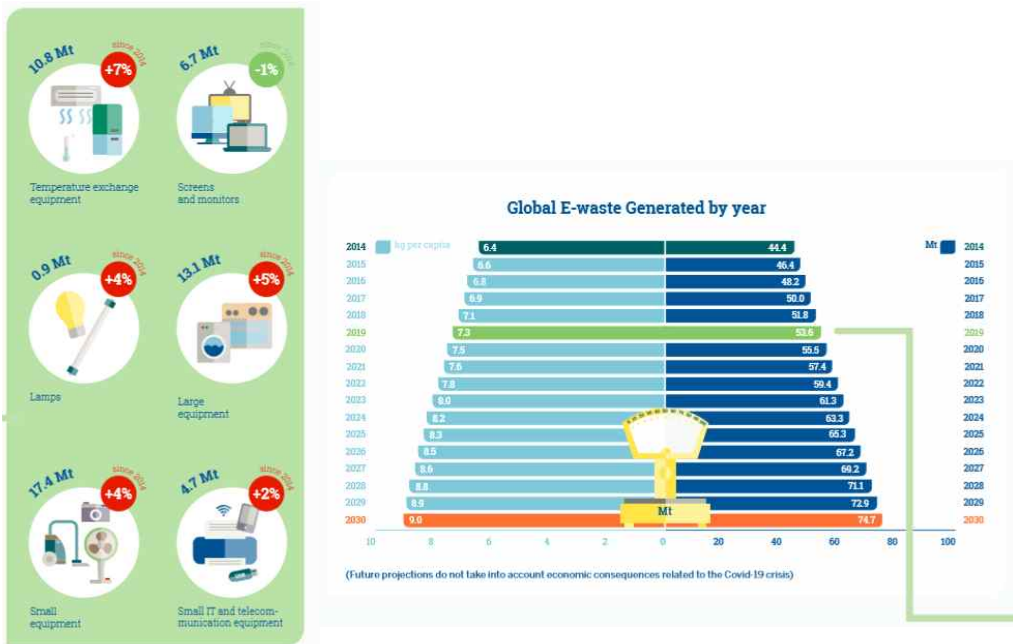
(1) 국내 전기전자제품 재활용 산업

- 국내 전기전자산업의 발달로 제품 소비가 늘어나면서 폐전기전자제품의 종류와 폐기량도 역시 증가하고 있는 추세임. 연간 폐기되는 폐전기전자제품의 발생량은 2017년 기준 약 82만톤으로 예상되며, 지속적으로 증가할 것으로 예상됨. 이중에서 약 40% 정도가 회수 후 재활용되고 있으며, 나머지는 재사용되거나 적정 관리되지 않는 경우가 있음

(2) 국외 전기전자제품 재활용 산업

- 매년 전기전자제품 사용 후 폐기되는 폐전기전자제품의 발생량은 증가하고 있으며, 2014년 기준 전 세계적으로 약 44.4백만톤이 발생하였고, 2030년에는 약 74.7백톤 발생이 예상되었음. 이러

한 막대한 폐전기전자제품이 회수 및 재활용되는 비율은 유럽 약 42.5%, 아시아 약 11.7%, 아메리카 지역 약 9.4%, 오세아니아 약 8.8%, 아프리카 지역 약 0.9%에 불과함 (Forti et al., 2020). 따라서 폐전기전자제품의 재활용을 통한 자원순환 산업 규모는 지속적으로 증가할 것으로 예상됨



<그림 2.20> 전 세계 폐전기전자제품의 예상 발생량
(출처 : Forti et al., 2020)

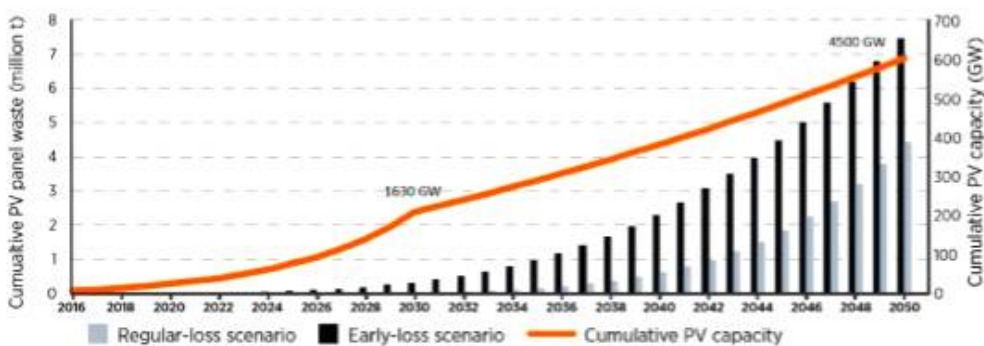
- 국내외 태양광 폐패널 재활용 산업 규모 : 전세계적으로 신재생 에너지 추진에 따른 태양광 발전 보급 확대에 따른 사용 후 태양광 폐패널의 발생량이 지속적으로 증가할 것으로 예상
- (1) 국내 태양광 폐패널 재활용 산업
 - 국내 태양광은 2000년대 초반부터 전국적으로 설치가 확대되었

고, 태양광 폐패널의 발생량은 2017년 약 17톤에 불과하지만, 2023년에는 약 9,665톤의 발생이 예상되었고, 향후에도 지속적으로 증가할 것으로 예상됨 (한국환경연구원, 2018)

환경부에서는 태양광 폐패널 재활용 회수체계 시범사업을 2021년부터 2년간 진행하고, 2023년에는 생산자책임재활용제도를 시행할 예정임 (환경부, 2022)

(2) 국외 태양광 폐패널 재활용 산업

- 전세계적으로 2016년 기준 태양광 폐패널의 발생량은 약 43,000톤에서 약 250,000톤으로 예상되었음. 향후 2030년에는 전체 태양광 발전 비율이 증가하면서 2040년에는 폐기되는 태양광 폐패널이 약 2백만톤 이상 될 것으로 예상됨. 따라서 이러한 태양광 폐패널의 처리와 재활용 산업이 지속적으로 성장할 것으로 예상됨 (Chowdhury et al., 2020)



<그림 2.21> 전세계 태양광 누적 발전량과 태양광 폐패널의 누적 예상 발생량
(출처 : Chowdhury et al., 2020)

○ 국내외 전기차 폐배터리 재활용 산업 규모 : 전기차 사용 후 폐배터리의 재사용과 재활용은 다양한 산업에 응용되고 있으며, 각종 전력 계통 연계형 에너지 저장장치, 산업용 무정전 전원장치 분야, 납축전지 차량용 대체 에너지 저장장치 등에 활용이 가능

(1) 국내 전기차 폐배터리 재활용 산업

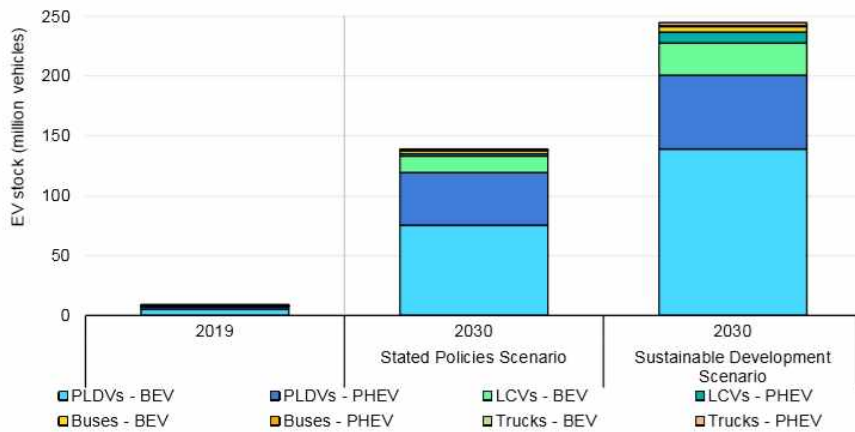
- 국내 전기차 폐배터리 재사용센터는 제주테크노파크가 주관하고 제주특별자치도, 한국산업기술진흥원, 한국전지연구조합, 제주대학교, 자동차부품연구원 등이 참여하여 총 예산 약 189억을 투입해 2019년 12월 제주첨단과학기술단지 내 디지털융합센터 4,200㎡ 부지에 2층 3,700㎡ 규모로 구축됨. 이러한 재사용 센터를 중심으로 전기차 차종별, 연식별로 상이한 배터리 유형에 대한 DB화 및 전기차 정비화, 중고 거래를 위한 배터리 진단사 양성, 그리고 이를 위한 배터리 및 ESS 시험평가기준과 인증체계 마련 등을 수행할 예정임. 국내 전기차 구매 비율은 2030년 약 30%, 2040년에는 약 60%에 달할 것으로 예상되었음 (BloombergNEF, 2020). 이러한 전기차 구매 확대에 따른 폐배터리 발생량은 지속적으로 증가할 것으로 예상됨

환경부에서는 2022년부터 2024년까지 폐배터리 분리·보관·운송 및 방전·해체공정을 개발하도록 70억을 지원하고 있으며, 발생량 증가에 따른 신속한 대응을 위해 인라인 자동 평가센터를 구축하고자 함 (환경부, 2022)

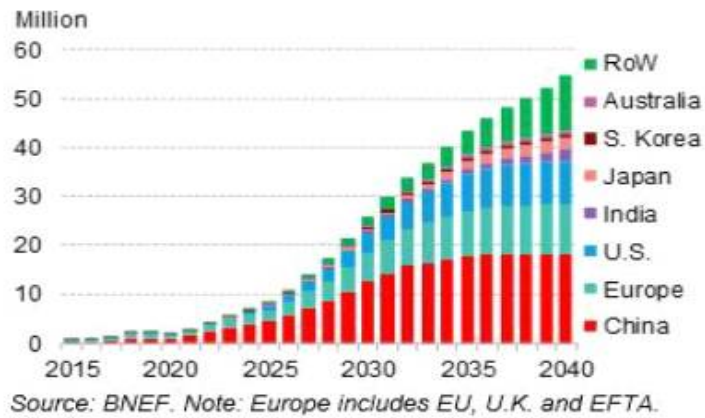
(2) 국외 전기차 폐배터리 재활용 산업

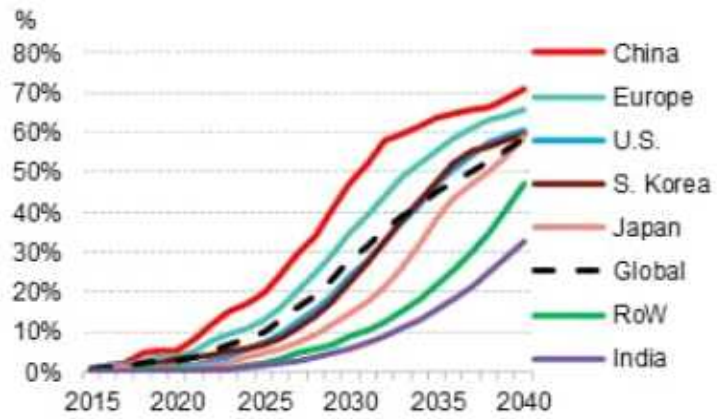
- 세계 전기차 판매량 및 비율이 증가함에 따라 일정기간 사용 후 폐기되는 폐배터리의 발생량도 급격하게 증가할 것으로 예상됨. 각 국가별 전기자동차의 판매량은 차이가 있지만, 2030년 약 140백만~245백만개의 차량이 운행될 것으로 예상함 (IEA, 2019). 또한 2040년에는 전체 판매량의 50% 이상을 전기차가 차지할

것으로 예상하고 있음 (BloombergNEF, 2020). 따라서 전기자동차의 폐배터리의 재활용 산업은 지속적으로 성장할 것으로 예상된다



<그림 2.22> 전세계 전기차의 예상 누적 사용 대수
(출처 : IEA, 2019)





<그림 2.23> 국가별 전기차의 판매 예상(a) 및 전기차의 구매 비율(b)
 (출처 : BloombergNEF, 2020)

다. 재제조 물질순환 기술 산업 동향

○ 산업통상자원부 탄소중립 예산

- 2030년까지는 기술개발 1단계로 정부의 선제적인 마중물 투자 확대를 계획하고 있음

2022년 탄소중립 R&D 예산을 전년 0.8조원에서 1.2조원으로 대폭 확대하였으며 특히, 그간 투자가 소홀했던 저탄소 산업공정 혁신 투자를 본격화하였음. 2022년 신규로 철강, 석유화학, 시멘트 등 산업공정 탄소 저감에 651억원을 투자하기로 함 (산업통상자원부, 2021B)

<표 2.18> 산업부 탄소중립 R&D 예산 (정부안 기준)

구분	'21년 예산(A)	'22년 정부안(B)
산업	2,130억원	4,197억원
에너지	6,118억원	7,814억원
합계	8,248억원	1조 2,011억원

(출처 : 산업통상자원부, 2021B)

- 또한 2030년까지 예산 구조조정 등을 통해 산업부 R&D의 30% 이상을 탄소중립에 전략적으로 투자함과 동시에 탄소중립 R&D는 기존 사업 확대 및 비예타 신규사업으로 우선 반영하고자 함
대규모 기술개발이 필요한 분야는 대형 예비타당성 조사를 추진하고자 하고 있으며, 산업부 주관 및 다부처 공동 대형 예타를 통해 R&D예산을 확충하고자 함 (산업통상자원부, 2021B)

2 요약 및 시사점

- 환경부 및 산자부의 자원순환·순환경제 예산 편성
 - 환경부와 산업부 재정투자 현황에서 볼 수 있듯이 순환경제 분야 재정투자는 2020년을 기점으로 크게 증가하고 있는 것으로 보임. 그뿐만 아니라 재정투자의 방향 또한 기존의 폐기물 관리 및 재활용 중심의 접근에서 벗어나 포장재 폐기물 원천 저감을 위한 다회용 포장재 재사용, 재활용 시장 안정화를 위한 재활용품 비축사업 등 최근 순환경제 정책환경 변화에 대응하고 있음
 - 산업부의 재제조 및 재자원화 기술개발에 대한 재정 투입은 기존의 폐기물 관리 위주의 정책에서 벗어나 자원의 가치를 최대한 경제 내에 유지하도록 하는 순환경제의 포괄적인 목표를 달성하고자 하는 노력으로 볼 수 있음

- 정부의 지원 및 산업체의 선제적 투자 필요
 - 유럽연합 회원국은 2021년 1월부터 재활용되지 않는 플라스틱 폐기물 발생량에 비례하여 0.8 유로/kg의 기부금을 부담하고 있으며 미국에서도 바이든 행정부 출범 이후 그간 미진했던 플라스틱에 대한 규제 (플라스틱 생산자에게 대단위 생산자 책임 부과 등)가 강화되고 있는 추세임
 - 이와 같은 규제 동향은 기업들의 향후 이익의 하락을 유발할 것으로 판단되지만, 환경적 차원에서의 플라스틱 재활용은 피할 수 없는 거대 담론이 되어 가고 있으므로 상용화 이전 단계인 기술들을 중심으로 글로벌 시장 선점을 위한 정부 지원과 관련 기업들의 선제적 투자가 요구됨

제3장

순환경제를 위한 중장기 물질순환 미래 핵심 기술 개발 전략과 방향

제1절 중장기 물질순환 미래 핵심 기술 개발의 전략 수립과
방향

제2절 주요 분야별 물질순환 기술 개발과 전략

제3절 미래 물질순환 기술 로드맵 개발

제4절 물질순환 미래 핵심기술 개발의 이행 방안과 추진 체계

제1절

중장기 물질순환 미래 핵심 기술 개발의 전략 수립과 방향

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 필요성

- 급격한 사회변화에 대응하고 국가 미래 산업의 성장동력 지속적인 확충을 위해 자원의 확보를 통한 과학기술 혁신의 중요성이 강조되는 상황
- 국가 차원의 미래 지향적 물질순환 핵심 기술을 파악하여 국가·사회의 미래 발전을 견인할 수 있도록 중장기적 관점에서 물질순환 기술 개발 전략과 투자, 비전, 목표 설정이 필요
- 중장기 물질순환 미래 핵심 기술 개발과 투자전략을 수립하여 산업계 자원확보와 순환경제 구축 관점에서 지원하여 안정적인 유가자원 확보와 자원효율성 제고에 기여

2 수립 방향

- 글로벌 물질순환 미래 핵심 기술 패권 대응, 포스트-COVID 19 이후 공급망 불확실성과 자원 수급의 불안정성 대두, 탄소국경세 강화, 자원 빈국으로서 K-순환경제 구축의 중요성 증가 등을 감안하여 중장기적 전망 (2030년/2040년/2050년) 관점에서 국가 미래 산업의 경쟁력 강화를 위한 기술 개발 방향과 투자 전략 제시

- 국내외 물질순환 기술 개발 관련 주요 정책 추진 동향을 파악하여 반영하고 최근 K-순환경제 R&D 기술 개발을 고려하여 정책의 일관성을 유지하여 중장기 물질순환 미래 핵심 기술을 방향을 설정
- 유럽과 미국을 중심으로 탄소국경세 (이산화탄소 배출 규제가 느슨한 국가가 강한 국가에 상품 서비스를 수출할 때 적용받는 무역 관세를 말함)을 도입할 예정으로 수출 주도형 산업국가인 한국의 경우, 저탄소 제품과 제품 순환성을 강화하는 산업계 대응이 중요

3 대상 기간

- 중기 2023~2030년, 장기 2030~2040년, 2040~2050년

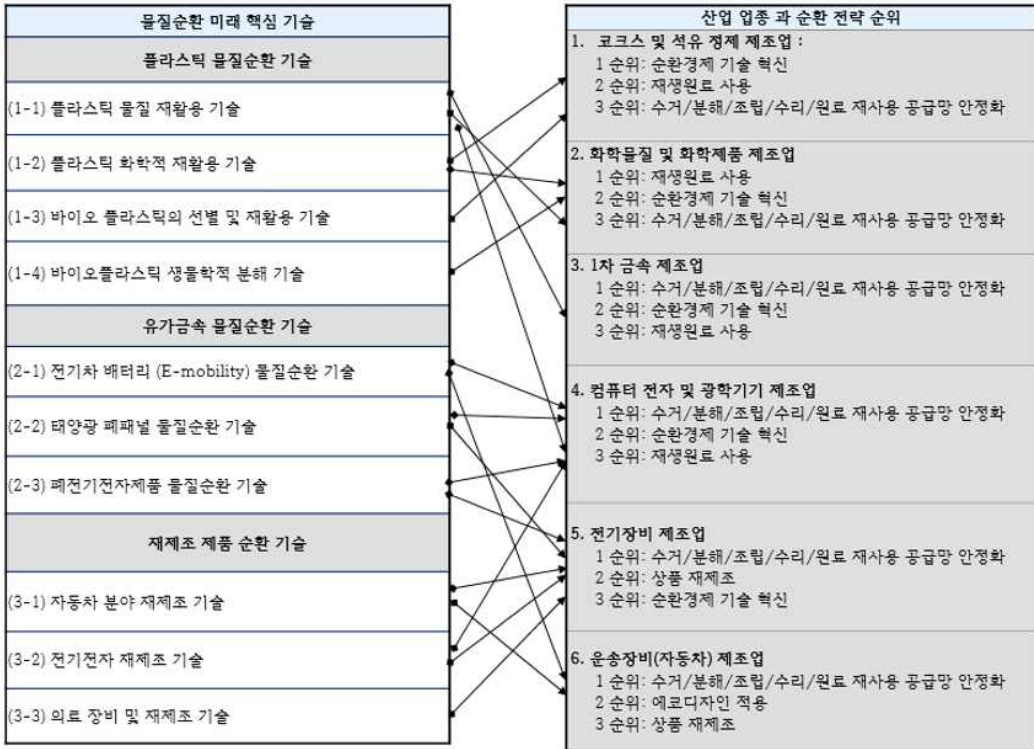
4 수립 범위 및 고려 사항

- 물질순환 미래 핵심 기술은 매우 광범위하고 포괄적인 영역임. 따라서 미래 산업 순환경제 전환 2050 시나리오를 고려하여 석유정제제조 산업, 반도체 전기전자제품제조 산업, 1차 금속제조 산업, 운송장비 (자동차 등) 제조업 등 물질순환 (재사용, 재제조 포함) 산업의 중요도와 우선순위를 고려하여 순환공급망, 재생원료 생산, 재제조의 관점에서 미래 핵심 기술의 범위를 설정

- 국가 차원의 미래 지향적 물질순환 핵심 기술 전략 수립 시 기후 환경, 경제, 사회, 폐기물 등 산업계의 순환공급망 구축과 전환, 미래 기술과 그와 관련된 산업 성장 시 안정적 자원 확보와 자원 안보를 고려

- 중장기 관점에서 산업계 순환경제 전환 2050 시나리오에서 제시한 여러 산업과 업종 중 플라스틱 물질순환, 유가금속 물질순환, 재제조 물질순환 등 3개 영역으로 구분하여 미래 핵심 기술의 수립 범위 제시함 <그림 3.1>

- 물질순환 미래 핵심 기술과 주요 키워드 분석을 통해 순환경제, 폐플라스틱, 자원효율성, 4차 산업혁명, 태양광패널, 전기차 폐배터리 등이 주요 용어로 검색됨 <그림 3.2>



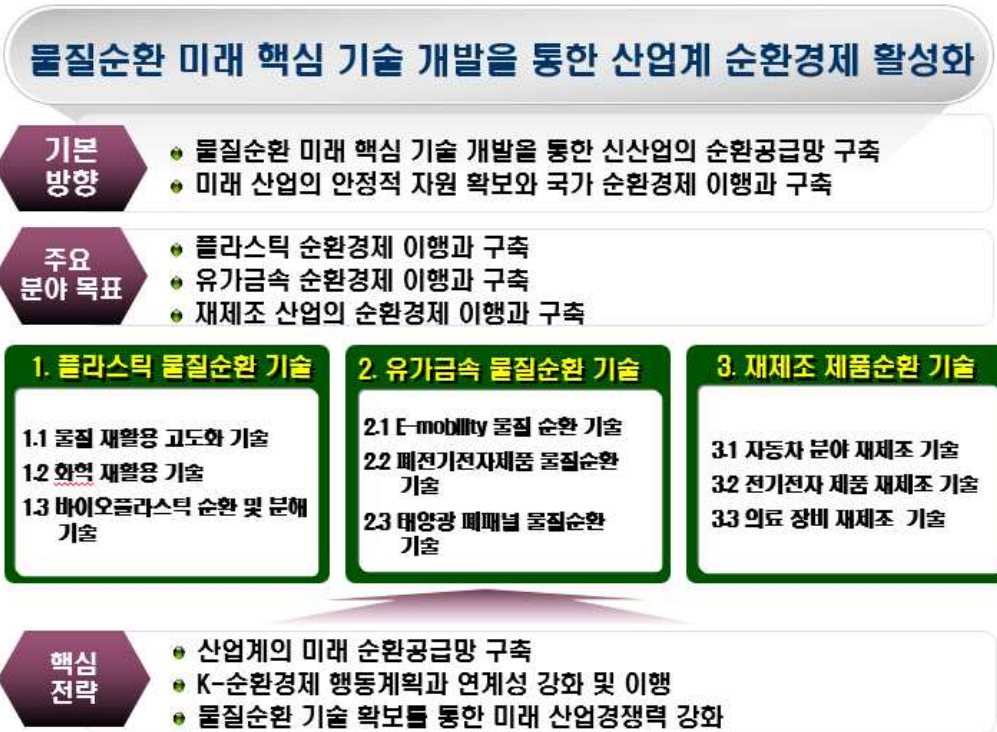
<그림 3.1> 물질순환 미래 핵심 기술과 국내 산업의 연관성



<그림 3.2> 물질순환 미래 핵심 기술과 주요 키워드 분석

5 비전과 목표

- **비전** : 물질순환 미래 핵심 기술 개발을 산업계 순환경제 활성화와 안정적 순환공급망 구축
- **목표** : 플라스틱 자원화, 유가금속 재자원화, 재제조 물질순환 산업의 K-순환경제 이행과 구축



〈그림 3.3〉 물질순환 미래 핵심 기술의 비전과 목표

6 전략

- 산업계 순환경제 전환 2050 시나리오 기반 물질순환 미래 핵심 기술 개발을 통한 미래 산업 경쟁력 강화와 순환공급망 구축을 위한 투자 확대
 - 3개 물질순환 미래 핵심 기술 영역*(등)을 중심으로 9개 물질 및 제품 순환 기술**을 설정하여 투자 우선순위 및 방향 제시
- * 플라스틱 물질순환, 유가금속 물질순환, 재제조
- ** 플라스틱 물질재활용, 화학적 재활용, 바이오플라스틱 순환기술, e-mobility 물질순환, 전기전자제품 물질순환, 태양광패널 물질순환, 재제조 제품 순환 기술 (자동차, e-mobility, 의료 장비 등)

- 물질순환 미래 핵심 기술 개발을 통한 K-순환경제 행동계획 (2021. 12. 31일자) 이행에 기여하고, 심화되는 국가 간 미래 자원 확보 경제에 대응하여 산업 경쟁력 강화와 신산업 창출을 위한 기술 전략을 수립

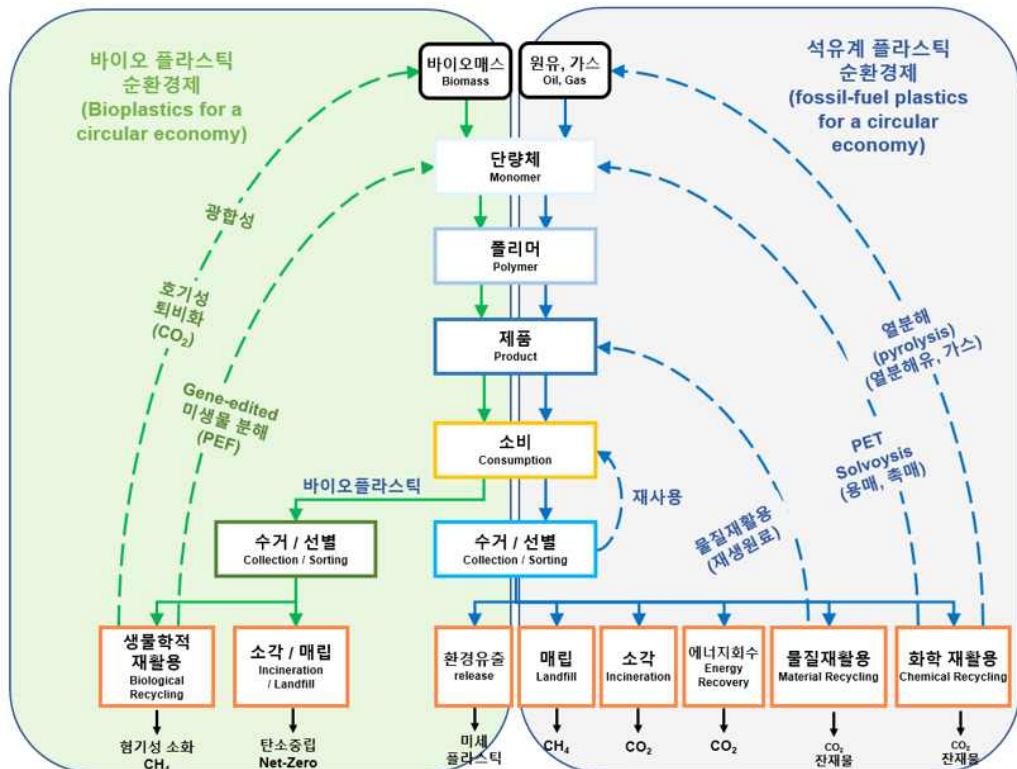
- 포스터 코로나 시대, 전 세계 자원공급망의 불안정성, 순환경제 및 디지털 경제 전환에 대응하여 국가 차원의 물질순환 미래 핵심 기술 개발 수립과 글로벌 미래 물질순환 기술 협력 강화

본 소절은 저자의 insight에 기반한 내용이 포함되어 있음을 알려드립니다.

1 플라스틱 자원화 기술 개발과 방향

- <그림 3.4>는 플라스틱의 순환경제 구축 전략과 물질순환 개념도를 나타낸 것임. 플라스틱의 물질순환은 석유계 플라스틱 순환과 바이오 플라스틱 순환으로 크게 구분할 수 있음. 현재는 석유계 플라스틱의 물질 재활용 중심으로 일부 순환이 이루어지고 있으나, 향후 화학적 재활용 기술 개발과 함께 바이오 플라스틱 순환기술 개발도 이루어져야 함
- 석유계 플라스틱 순환경제 구축을 위해서는 물질 재활용 기술과 함께 화학적 재활용 기술 개발과 투자를 통해 플라스틱 순환성을 확대할 필요가 있음. 화학적 재활용 기술은 재질별 물질 재활용 한계를 넘어서 오염된 플라스틱의 열적 및 화학적 방법을 활용하여 순환고리를 완성하는데 기여함
- 최근 들어 바이오 플라스틱 제품 개발을 통해 기존 화석연료 기반 플라스틱 제품이 대체되고 있음. 이러한 바이오 플라스틱 제

품 역시 소비 후 폐기되는 과정에서 폐기물 관리가 필요하며, 순환경제 구축이 이루어져야 함. 바이오 플라스틱의 수거 및 선별 이후 생물학적 재활용 (호기성 퇴비화 또는 미생물 분해 방법)을 통해 완전 분해하거나 퇴비화 공정을 거쳐 바이오매스로 전환이 가능함. 바이오 플라스틱 순환경제는 석유계 플라스틱 순환경제와 달리 탄소 중립에 기여하고 온실가스를 유발하지 않는 장점이 있음



〈그림 3.4〉 플라스틱 순환경제 구축 전략과 물질순환 개념도

가. 플라스틱의 기계적 재활용 기술 개발과 방향

- **플라스틱 선별 고도화 기술 개발** : 국내 폐플라스틱의 선별은 주로 인력 선별과 단순 기계적 선별 위주로 되어 있어 고품질 재생원료 생산의 한계가 존재함. 선별 단계에서 근적외선 선별, 레이저 선별, AI 학습기반 로봇 분리 선별과 자동화 기술 개발과 투자가 필요함
- **고품질 플라스틱 재생원료 생산 기술 개발** : 고품질 플라스틱 재생원료 생산을 위한 Super clean 공정 도입을 통한 rPET, rPP, rPE 생산 공정 고도화 및 자동화 기술 개발이 필요함. 이를 위해 로봇 기반 플라스틱 선택적 플라스틱 재질별 선별과 이물질 제거, 용융, 펠릿 및 성형 가공 제조기술 개발과 투자가 필요함

나. 플라스틱의 화학적 재활용 기술 개발과 방향

- **PET 해중합 기술 개발** : 해중합 기술은 고분자 PET 플라스틱을 단량체(monomer) 또는 유용 화합물로 전환하는 화학반응 기술로서 다시 중합과정을 거쳐 고분자 플라스틱으로 재생산이 가능함. 국내외적으로 아직 PET 해중합 기술은 거의 상용화 단계에 이르고 있으며, 기계적 재활용의 단점인 오염된 플라스틱 처리와 물리화학적 물성의 악화를 극복할 수 있는 연구 기술 개발 투자가 필요함

- **플라스틱 열분해 기술 개발** : 폐플라스틱을 약 400~550℃ 무산소 분위기에서 가스 형태로 열분해한 후 냉각하여 액체 상태의 연료 또는 열분해유를 회수하는 기술로서 연속식 열분해 공정 기술 개발과 투자가 필요함. 최근 유럽, 일본과 미국을 중심으로 플라스틱의 열분해 기술 공정과 가스화 용융 공정이 상용화되어 열분해유를 생산하고 있어 국내에서도 상용화 기술 개발과 투자가 필요함

다. 바이오 플라스틱의 재활용 기술 개발과 방향

- **바이오 플라스틱 선별 기술 개발** : 기존 석유계 플라스틱이 바이오 플라스틱으로 대체되면서 바이오플라스틱의 선별과 재활용, 처리 기술 개발이 필요함. 특히 석유계 플라스틱과 바이오 플라스틱이 혼합된 폐플라스틱으로부터 호기성 퇴비화 기술 적용 바이오 플라스틱과 미생물 및 효소 분해 적용 바이오 플라스틱의 선별 기술 개발과 투자가 필요함
- **바이오 플라스틱 생물학적 재활용 기술 개발** : 바이오 플라스틱은 크게 호기성 퇴비화를 통한 재활용 기술과 미생물 분해 효소를 이용한 생물학적 분해 기술로 크게 구분할 수 있으며, 아직까지 고효율 바이오 플라스틱의 분해 기술은 상용화되지 않고 있으며, 일반적으로 퇴비화를 통해 처리되고 있음. 향후 바이오 플라스틱의 종류와 특성, 용도가 다양해지고, 사용 후 폐

기되는 바이오 플라스틱의 발생량이 급증할 것으로 예상되어 대규모 상용화된 생물학적 분해 연구 기술 개발과 투자가 필요함

라. 플라스틱 자원화 핵심 기술 개발

- <표 3.1>은 플라스틱 물질순환의 핵심 기술 개발 전략과 방향을 장단기로 구분하여 제시하였음. 물질재활용 기술은 선별 자동화 기술과 AI 기반 로봇 선별 기술 도입을 통한 선별 고도화와 고품질 재생원료 생산을 통한 순환 제품 생산 구축이 마련되어야 함. 화학적 재활용 기술로서는 PET 해중합 기술 개발, 열분해 및 가스화 기술 개발을 통한 수소 생산 기술 등이 핵심 기술 개발과 투자가 필요함. 장기적으로는 바이오 플라스틱의 대체 기술 개발과 함께 소비 후 선별, 재활용 및 분해 기술 개발 등이 필요함

<표 3.1> 플라스틱 물질순환을 위한 핵심 기술 개발과 전략

분야	기간	주요 내용
물질 재활용 : 선별 기술	~2030년(단기)	복합 플라스틱 재질을 근적외선, 레이저, AI 학습기반 로봇 분리 선별과 자동화 기술 개발
물질 재활용 : 재활용 기술	~2030년 (단기)	품질 플라스틱 재생원료 생산을 위한 Super clean 공정 도입을 통한 rPET, rPP, rPE 재생원료 생산 공정 개발과 재생원료 사용 플라스틱 제품 공정 개선과 생산 기술 개발
화학 재활용 :	~2030년(단기)	수거된 PET의 해중합 기술 적용을 통한

해중합 기술		PET 단량체 생산 기술 개발
화학 재활용 : 열분해 기술	~2030년(단기)	연속식 열분해 상용화 공정 개발과 열분해유의 납사 대체와 화학원료 대체 기술 개발
바이오플라스틱 : 선별 및 재활용	2031~2050년(중장기)	바이오플라스틱과 석유계 플라스틱의 선별 분리 기술과 재활용 공정 개발
바이오플라스틱 : 미생물 분해	2031~2050년(중장기)	바이오플라스틱의 미생물 효소 활용 분해 상용화 기술 개발과 바이오 순환경제

2 유가금속의 재자원화 전략

- 유가금속 회수를 통한 물질순환 전략은 미래 신성장 산업 분야와 제품군과 연관하여 제시되어야 함. 본 연구에서는 미래 산업 순환경제 2050 시나리오를 고려하여 제품 생산에 필요한 유가 자원 (예를 들어, 희토류, 희유금속, 희소금속 등)의 회수와 재활용을 통한 물질순환 구축이 이루어져야 함
- 미래 산업 순환경제 구축이 필요한 예상 제품군으로는 전기차 배터리, 연료전지, 태양광패널, 드론, 로봇, 반도체 기반 전기전자제품, 3D 프린터, 풍력발전기 등 재생에너지 분야와 E-mobility 분야로 크게 구분할 수 있음
- 이러한 미래 산업 제품군은 기술 발전 속도와 변화에 따라 필수 유가금속의 종류와 양은 매우 다르고, 일부 물질은 특정 지역과

국가에 편중되어 있어 안정적인 공급망 구축을 위해서는 국내 유가금속의 순환경제 구축이 자원 안보 관점에서 매우 중요함

- 미래 산업 제품군과 유가금속과 희토류의 공급망 리스크 (supply risk)를 평가하여 우선순위에 근거하는 물질순환 체계 구축이 필요함. <표 3.2>는 미래 산업 제품군과 유가금속과 희토류의 공급망 리스크 (supply risk) 관점에서 나타낸 것임 (EC, 2021)

〈표 3.2〉 미래 산업 제품군과 유가금속과 원소의 공급망 리스크 요약

공급망 risk	물질	미래 산업 제품군
매우 높음	희토류(light)	연료전지, 풍력발전기, 태양광 패널, 로봇, 드론, 반도체 전기전자
매우 높음	희토류(heavy)	연료전지, 풍력발전기, 로봇, 드론, 반도체 전기전자
다소 높음	Magnesium	연료전지, 로봇, 드론, 3D 프린팅, 반도체 전기전자
다소 높음	Niobium	배터리, 풍력발전기, 드론, 3D 프린팅
다소 높음	Germanium	태양광 패널, 드론, 반도체 전기전자
다소 높음	Borates	연료전지, 풍력발전기, 태양광 패널, 로봇, 드론, 3D 프린팅, 반도체 전기전자
다소 높음	Scandium	드론, 3D 프린팅
높음	Strontium	연료전지, 로봇, 드론
높음	Cobalt	배터리, 연료전지, 풍력발전기, 로봇, 드론, 3D 프린팅, 반도체 전기전자
높음	PGMs	연료전지, 로봇, 드론, 반도체 전기전자
높음	Natural graphite	배터리, 연료전지, 로봇, 드론, 반도체 전기전자
높음	Bismuth	로봇, 드론, 반도체 전기전자
높음	Antimony	로봇, 드론
보통	Indium	태양광 패널, 로봇, 드론
보통	Vanadium	연료전지, 로봇, 드론, 3D 프린팅, 반도체 전기전자
보통	Lithium	배터리, 연료전지, 로봇, 드론
보통	Tungsten	로봇, 드론, 3D 프린팅
보통	Tantalum	로봇, 드론
보통	Fluorspar	배터리, 로봇, 드론
보통	Titanium	배터리, 연료전지, 로봇, 드론, 3D 프린팅, 반도체 전기전자
보통	Gallium	태양광 패널, 로봇, 드론, 3D 프린팅, 반도체 전기전자
보통	Arsenic	연료전지, 로봇, 드론, 반도체 전기전자
보통	Silicon metal	배터리, 연료전지, 태양광 패널, 로봇, 드론, 3D 프린팅, 반도체 전기전자
보통	Hafnium	드론, 3D 프린팅

(출처 : European Commission, 2021)

가. 전기차 폐배터리의 유가물질 회수 기술 개발과 방향

- **전기차 배터리의 재사용 기술 개발** : 전기차 사용 후 배터리는 대용량 배터리로서 재사용과 재활용을 위해서는 폐배터리의 안전 보관, 방전, 화재 및 폭발 방지 기술이 필요함. 특히 전기차용 배터리는 잔류 에너지를 방전시키기 위한 완전 방전 시스템 기술 개발과 과방전방지회로 제거 시스템 기술 개발이 도입되어야 함. 사용 후 배터리 팩 기본정보를 제조사로부터 제공받고, 배터리 모듈별 성능 평가와 정보 DB 구축과 함께 에너지저장장치 (ESS)로서 재사용을 위한 기술 실증 연구 개발과 투자가 필요함
- **전기차 배터리의 물질순환 기술 개발** : 전기차 배터리의 해체시 반자동화 및 자동화 공정 기술 개발이 필요하고, 분리-파쇄-분쇄-화학처리 등의 단위 공정별 빅데이터 분석을 통해 배터리 팩의 부품별 선별을 고도화 및 최적화 기술 개발이 필요함. 배터리 이외 구성 부품별 이미지 센싱 및 AI 기반 선별 기술과 유가물질 회수 기술 (추출 공정, 습식침출기술, 건식용융기술 등) 연구 개발이 필요함

나. 폐전기전자제품의 유가물질 재자원화 기술 개발과 방향

- **폐전기전자제품의 물질순환 기술 개발** : 디지털 기술 발전과 함께 전기전자제품의 종류와 용도도 다양해지고 있으며, 그 범위도 확대되고 있음. 기존 대형가전 위주의 재활용 기술 적용을

통한 유가물 회수와 물질순환을 확대 적용하여 중소형 가전제품으로부터 유가자원의 회수 및 선별 고도화, 재활용 공정기술 개발이 필요함

- 드론, 3D 프린터, 반도체 장비 등 물질 순환 기술 개발 : 미래 산업 순환경제 구축이 필요한 제품군 중 드론, 로봇, 3D 프린터, 각종 반도체 기계 장비 등으로부터 유가물질 회수 공정 기술 개발과 투자가 필요함. 이러한 반도체 기반 각종 전기전자장비에는 회토류, 희유금속, 희소금속, 유가금속 등이 함유되어 있어 기존 폐전기전자제품의 재활용 기술 공정 적용과 함께 목적 금속의 회수 기술 개발이 필요함

다. 태양광 폐패널의 유가물질 재자원화 기술 개발과 방향

- 태양광 폐패널의 물질순환 기술 개발: 실리콘계 태양전지 폐모듈로부터 희유금속 회수와 고순도 추출 기술 개발, 태양전지 모듈의 재자원화 기술 개발, 결정질 실리콘 태양광 폐모듈의 저비용/고효율 재활용 공정시스템 및 소재화 공정실증 기술 개발과 상용화 기술 연구가 필요함. 최근까지 태양광 폐패널의 재활용 기술 개발은 주로 실리콘계 모듈에 초점이 이루어져 왔으나, 미래에는 태양광 패널의 시장점유율 변화 전망에 대응한 비실리콘계 (non-silicate) 태양광 모듈의 재활용 원천 기술 개발이 필요함

라. 유가금속의 재자원화 핵심 기술 개발

- <표 3.3>은 유가금속 함유 제품으로부터 물질순환의 핵심 기술 개발 전략과 방향을 장단기로 구분하여 제시하였음. 전기자 배터리의 재사용 및 재활용 기술 개발을 위한 에너지 저장장치 재사용 기술 실증과 상용화 기술 개발과 해체 후 분리-파쇄-분쇄-화학처리 등 단위 공정별 빅데이터 분석과 선별 재활용 자동화 기술 개발 등이 필요함. 전기전자제품과 반도체 기반 제품의 경우, 고순도 유가금속 회수를 위한 선별 공정 고도와 재활용 공정 기술 개발이 필요함. 태양광 폐패널의 경우 실리콘계와 비실리콘계 재질로부터 희유금속 회수와 소재 상용화 기술 개발이 필요함

<표 3.3> 유가금속 함유 제품의 물질순환을 위한 핵심 기술 개발과 전략

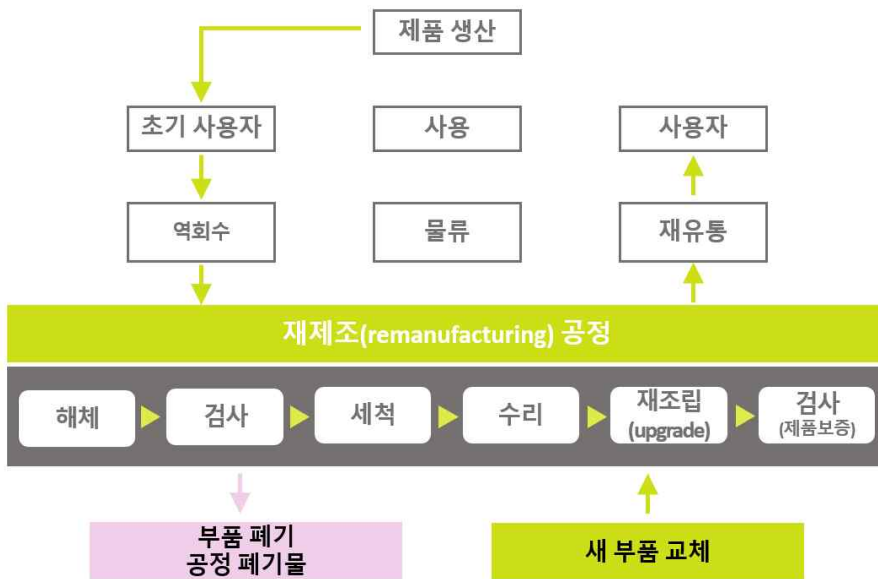
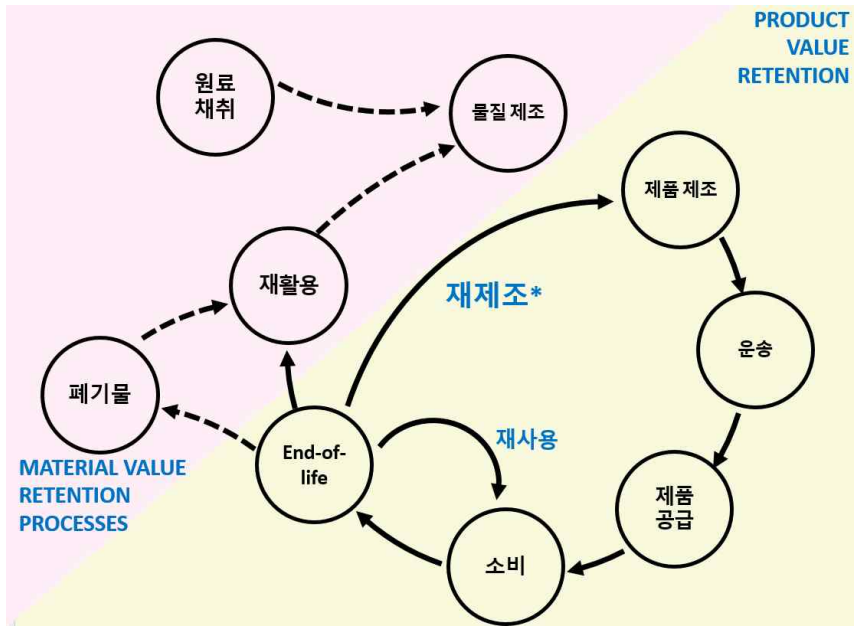
분야	기간	주요 내용
전기차 배터리 : 재사용 기술	~2030년(단기)	전기차 배터리 모듈별 성능 평가, 부품 정보 DB 구축과 함께 에너지저장장치 (ESS)로서 재사용을 위한 기술 실증 및 상용화 기술 개발
전기차 배터리 : 재활용 기술	~2040년 (단기 및 중기)	전기차 배터리의 안전 해체 후 분리-파쇄-분쇄-화학처리 등의 단위 공정별 빅데이터 분석과 배터리 팩의 부품별 선별 고도화, 자동화 및 최적화 기술 개발
전기전자제품 : 물질순환기술	~2030년(단기)	중소형 전기전자제품으로 유가금속의 분리, 선별, 재활용 공정을 통한 고순도 추출 기술 개발
반도체 제품 : 물질순환기술	2031~2050년(중장기)	드론, 로봇, 3-D 프린터 등 반도체 기반 제품으로부터 유가금속과 자원 회수 공정 기술 개발
태양광 폐패널 : 물질순환 기술	2031~2050년(중장기)	실리콘계 및 비실리콘계 태양광 폐패널로부터 희유금속 회수와 소재 상용화 공정 기술 개발

3 재제조의 제품 순환 전략과 기술

- <그림 3.5>는 순환경제 달성을 위한 재제조 (remanufacturing)의 역할과 기능을 나타낸 것으로, 재활용을 통한 유가물질의 순환과 더불어 제품으로서 순환하는 측면에서 매우 중요함. 재제조 공정 (해체-검사-세척-수리-재조립-검사 및 출고, 제품 품질 보증 등)을 거치면서 오래되고 낡은 부품은 새 부품으로 교체되어 신제품과 동일한 수준으로 제품이 완성되어 판매됨

○ 미래 산업 순환경제 구축 시 고려할 수 있는 산업 분야별 제품군으로는 자동차 분야 (엔진, 기어박스, 브레이크, 전기차 배터리, 연료전지 등), 항공 분야 (헬리콥터, 랜딩기어, 엔진과 연료계통 등), 전기전자 분야(컴퓨터, 노트북, 네트워크 스위치, 라우터, 모뎀, 변압기, 스위치 기어, 반도체 보드 등), 중장비 기계 분야 (건설 굴착 장비, 광물 채굴 장비, 농업 및 수송 장비 등), 기계 분야 (풍력, 가스, 스팀 터빈, 밸브, compressor, 열교환기, 음식가공장비, 산업용 로봇 등), 의료장비 (의료 진단 및 수술 장비 등), 해양수산 분야 (대형 디젤 엔진의 부품, cabin 부품 등), 철도 분야 (기관차 엔진, 모터, 컨버터 등) 등이 있음 (Vlaanderen, 2018).

○ 이러한 재제조 산업 제품군은 국내 미래 기술 발전과 변화에 따라 다를 수 있으며, 특히 자동차 분야와 전기전자 분야는 철강, 반도체 기반 산업으로 향후 재제조 산업 육성과 미래 기술 개발이 필요한 분야이고, 타 분야 역시 국내 자원 확보와 안보 관점에서 순환경제 구축이 필요



<그림 3.5> 순환경제에서의 재제조 역할과 공정 개념도
(출처 : ETC/WMGE, 2021)

가. 순환경제를 위한 재제조 미래 산업의 분야와 성장 잠재력

- 순환경제 구축을 위한 재제조 산업에 대한 관심이 최근 높아지면서 미래 산업으로서 잠재적 성장이 예상되는 산업 분야와 제품군을 유럽, 미국을 중심으로 시장 조사와 성장률을 다음 <표 3.4>와 같이 분석하여 제시함. 한국의 경우, 미래 산업의 구조와 성장 가능성, 기반 산업을 고려하여 재제조 산업의 미래 핵심 산업과 기술을 향후 구축해야 함. 국내 재제조 미래 산업 유망 분야로서는 디지털 기술 혁신과 반도체 산업 발전에 따른 자동차, 전기전자, 의료 장비 등이 포함될 수 있음

<표 3.4> 재제조 미래 산업 분야의 제품군과 예상 연간 성장률(%)

산업 분야	미래 산업 제품군	유럽 ¹⁾	세계 ²⁾	한국
자동차	엔진, 기어박스, 브레이크, 전기차 배터리, 연료전지 등	3%	NA	긍정
전기전자	컴퓨터, 노트북, 네트워크 스위치, 라우터, 모뎀, 변압기, 스위치 기어, 반도체 보드 등	5%	5%	긍정
항공	헬리콥터, 랜딩기어, 엔진과 연료 계통 등	3%	NA	
중장비	건설 굴착 장비, 광물 채굴 장비, 농업 및 수송 장비 등	0.5%	NA	
기계	풍력, 가스, 스팀 터빈, 밸브, compressor, 열교환기, 음식가공장비, 산업용 로봇 등	0.5%	5%	
해양	대형 디젤 엔진의 부품, cabin 부품 등	0.5%	11%	
의료장비	진단 및 수술 장비 등	5%	4%	긍정
철도	기관차 엔진, 모터, 컨버터 등	3%	7%	
가구	의자, 책상, 선반 등	5%	NA	

(출처 : ¹⁾ Parker et al., 2015, ²⁾ Rematec, 2020)

나. 순환경제를 위한 재제조 미래 산업의 전망과 장애요인

○ 순환경제 구축을 위한 재제조 산업의 성장을 위한 전망과 영향 인자, 장애요소 등을 요약하면 다음과 같음. 재제조는 제품의 가치와 질이 높고, 급속한 기술 발전과 혁신이 상대적으로 적으며, 제품의 내구성과 해체가 용이한 산업 분야에서 많이 적용되고 있음

○ 재제조 산업의 미래 추이와 전망

- 1) **디지털 기술 발전과 초연결 산업사회** : 디지털 기술 발전으로 데이터 공유와 투명성이 강화되면서 가치 사슬 간의 연계성이 확대되어 스마트 기술 기반 재제조 산업이 형성될 것으로 예상된다. 실시간 데이터 자료 공유와 모니터링을 통해 부품 교환, 제품 회수와 재공급 가능
- 2) **3-D 프린팅 기술과 부품 제조 확대** : 장비 내구성은 부품 조달의 용이성에 달려있으며, 3-D 프린팅 기술을 활용한 부품의 공급은 재제조 산업 활성화에 기여할 것으로 예상
- 3) **역회수와 새로운 사업 모델** : 순환경제의 새로운 사업 모델로서 제품 서비스 시스템 (product service system)은 제조자가 제품 소유권을 갖고 소비자는 제품을 공급받아 서비스 형태로 사용함. 소비자는 사용 후 제품을 역회수 물류 시스템을 통해 반환하게 되며, 제조자는 다시 오래된 제품을 다시 재제조하여 새로운 제품 형태로 공급하게 되어 재제조 산업 활성화에 기여하게 됨

- 4) **자동화 기술혁신** : 제품 조립 시 자동화 기술 발전은 재제조 산업에도 크게 영향을 미쳐 경제적으로 비용 절감 효과와 제품 경쟁력 강화에 기여할 것으로 예상됨
- 5) **E-mobility 확대** : 현재 내연기관 중심의 자동차 재제조 산업은 점차 쇠퇴할 것으로 예상되고, 전기차 기반 자동차 중심으로 재제조 산업은 형성되어 특정 부품과 제품 (전기차 배터리, 전자제어장비, 전자부품 등) 위주의 재제조가 이루어질 것으로 예상됨

○ 재제조 산업의 영향 인자

- 1) **에너지와 물질 소비 증가** : 신제품 제조 시 에너지와 물질 소비 증가는 재제조 산업과 자원의 효율적 이용 측면에서 기회로 작용하고 있음. 재제조 제품의 제품 생산 비용은 신제품 대비 약 40~65% 정도에 불과한 것으로 보고됨 (Nasr, 2020). 재제조 산업의 제조 공정을 순환하는 시스템 구축을 하게 되어 자원순환성을 높이는 효과를 가져옴
- 2) **안정적 원료와 자원 확보** : 재제조 산업 활성화를 통해 원료의 의존도를 낮추고, 안정적인 자원 확보가 가능하여 제품 공급망 위기에 대처할 수 있음
- 3) **순환경제 사업 모델** : 재제조는 순환경제의 새로운 사업 모델로서 제품 서비스 시스템 (product service system) 구축에 기여하게 됨
- 4) **순환경제 관련 규제 강화**: 순환경제 규제 강화에 따라 생산

단계에서 친환경제품설계는 보다 내구성이 강한 제품 생산을 유도하게 되고 제품 순환성을 높여 재제조 산업의 활성화에 영향을 미칠 것으로 예상함

- 5) **소비자의 인식 제고** : 친환경소비와 인식 제고는 미래 재제조 산업의 활성화에 기여할 것으로 예상됨. 재제조 산업의 활성화는 탄소 배출량 저감, 에너지 및 자원 소비 절감, 폐기물 발생 억제와 오염 예방 등 다양한 환경적 편익을 가져올 수 있어 지속가능한 사회에도 기여하게 되며, 최근 기후위기 대응과 저탄소사회로의 전환 측면에서 큰 역할을 할 것으로 예상

○ 재제조 산업의 10대 장애 요소

아래 내용은 현재 재제조 산업의 활성화를 위한 장애 요소 10가지를 요약 제시한 것임 (Fischer et al., 2017)

- 1) **재제조를 위한 설계** : 신제품 제조 시 재제조를 고려하지 않고, 제품 설계가 되어 재제조 공정의 표준화가 어렵고, 다양한 원료 활용 제품 제조
- 2) **규제 장애** : 재제조와 중고품의 국가 간 이동 규제, 재제조와 폐기물의 법적 정의와 범위, 구분의 한계점 존재
- 3) **재제조 제품과 신제품간의 경쟁** : 재제조의 제품 공급에 따른 신제품 시장과의 경쟁 관계와 시장 잠식에 대한 우려가 존재
- 4) **재제조 제품 소비자 가격 지불 의사 이슈** : 재제조 제품을 신제품과 동일한 가격을 지불하는 것에 대한 소비자의 거부

감과 인식 개선이 필요함. 이러한 이유로 재제조 산업은 주로 B2C 경로가 아닌 B2B 형태로 형성되어 있음

- 5) **재제조 제품의 인증 미흡** : 재제조, 재사용, 재활용 제품 간의 차별성이 부족하고, 재제조 제품의 인증 체계가 미흡
- 6) **제품 반환 시스템 구축 미흡** : 사용된 제품의 상태, 반환 방법, 반환 시기, 비용 부담, 경제적 유인책 등이 불확실하여 재제조 산업 활성화에 장애요인으로 작용함
- 7) **재제조 기술 인력 기반 미흡** : 재제조 산업의 기술 인력 확보 부족, 정보와 지식 미흡, 인식 미흡, 교육 훈련 프로그램의 구축 미흡함
- 8) **정보와 기술 접근성 미흡** : 재제조 산업 활성화를 위한 제조업자와의 협력 모델이 부족하고, 제품과 부품 정보 공유의 어려움이 존재함. 특히 새로운 기술이 적용된 e-mobility 제품군의 경우, 신기술 적용을 통한 재제조 산업 활성화가 어려움
- 9) **제품의 부품 구성과 복잡성** : 제품의 복잡한 부품 구성, 모델 등으로 재제조의 해체, 조립 공정 등 어려움
- 10) **생산과 공급망의 복잡성** : 제품 역회수 체계 구축 시 반드시 필요하고, 이 과정에서 비용이 발생함. 재제조는 기존 신제품과 같이 자동화가 어렵고, 추가 노동에 따른 비용 발생

다. 순환경제를 위한 재제조 산업의 성과 지표

- 재제조는 제품의 순환성을 증대시켜 순환경제 구축에 기여하게 되며, 이러한 기여도를 정성 및 정량적으로 평가하기 위한 지표 개발 연구가 수행되고 있음. EU 차원의 순환경제 모니터링 체계에는 아직까지 재제조 관련 지표가 공식적으로 설정되어 있지 않음. 다만, 최근 연구를 통해 아래와 같이 재제조의 순환경제 기여에 대한 지표를 제안하였음
- <표 3.5>는 재제조의 순환경제 지표를 예시로 나타낸 것임. 지표는 주로 물질흐름, 경제지표, 관련 정책과 사회 지표 등을 거시적과 미시적 관점에서 통계데이터, 산업체 데이터, 모델링 데이터 등을 활용하는 것을 제안함

<표 3.5> 재제조의 순환경제 기여도 지표(안)

재제조 지표안	지표의 종류	수준	데이터 생성원
1차원료의 이용	물질흐름도 (material flow)	미시(micro)	사업체 데이터
물질흐름도 (material flow)	물질흐름도 (material flow)	미시 (micro)	사업체 데이터
순이익	economic	미시 (micro)	사업체 데이터
재제조 공정의 지속가능성	환경발자국(environmental footprint)	미시 (micro)	모델링 데이터

재제조 산업의 지속가능성	환경발자국(environmental footprint)	중간 및 거시 (meso/macro)	통계 데이터
제품 기능성 보유	물질흐름도 (material flow)	미시 (micro)	사업체 데이터
제품의 국가간 운송	물질흐름도 (material flow)	미시 (micro)	통계 교역 데이터
사업체 재제조 활동의 비율	economic	미시 (micro)	사업체 데이터
재제조 순환율	economic	미시 (micro)	사업체 데이터
사업체 순환 핵심 코아의 수	물질흐름도 (material flow)	초미시 (nano)	사업체 데이터
제조업에서 재제조 비율	policy, process, behavior	거시 (macro)	통계 데이터
재제조 제품의 소비자 구매 및 이용 비율	policy, process, behavior	거시 (macro)	통계 데이터
재제조 투자액	economic	거시 (macro)	재정 데이터
재제조 일자리 수	social	거시 (macro)	통계 데이터
재제조 숙련된 인력수	social	거시 (macro)	통계 데이터

(출처 : ETC/WMGE, 2021)

1 플라스틱 자원화 기술 전략과 로드맵

- <그림 3.6>과 <그림 3.7>은 플라스틱의 순환경제 구축 전략과 물질순환 기술 개발로드맵을 나타낸 것임. 플라스틱의 물질순환 기술 개발은 석유계 플라스틱 순환과 바이오 플라스틱 순환으로 크게 구분할 수 있음. 현재는 석유계 플라스틱의 물질 재활용 중심으로 일부 순환이 이루어지고 있으나, 그 비율은 상대적으로 작음. 향후 화학적 재활용 기술 개발과 함께 바이오 플라스틱 순환기술 개발이 필요하고도 이루어져야 함

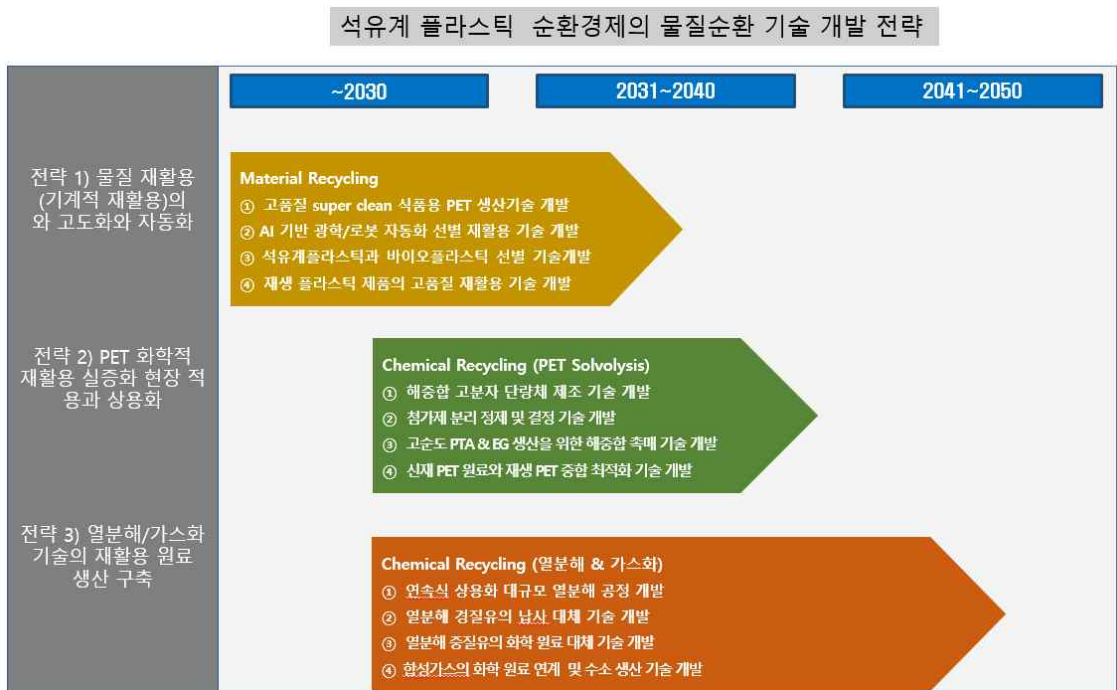
○ 석유계 플라스틱의 물질순환 기술 전략:

-전략 1 물질재활용의 고도화와 자동화 (~2035년): 고품질 super clean 공정을 통한 PET 재생원료 생산, AI 기반 로봇 자동화 선별 장치 개발, 재생플라스틱을 활용한 고품질 재활용 제품 기술 개발 등이 필요함

-전략 2 PET 화학적 재활용 실증화 및 상용화 (~2040년): PET 해중합 기술을 기반으로 한 단량체 제조 기술과 첨가제의 분리 정제 및 결정화 기술 개발, 고순도 PTA/EG 생산을 위한 촉매

적용 기술 개발, virgin PET와 재생 PET 혼합을 통한 최적 제품 생산 등 화학적 재활용 기술이 필요함

-전략 3 열분해/가스화 기술 활용한 재활용 원료 생산 구축 (~2045년): 열분해 기술을 활용한 연속식 상용화 공정 개발, 경질유의 납사 대체 기술, 중질류의 화학원료 대체 기술, 합성가스의 화학원료 연계 및 수소 생산 기술 등이 포함됨



〈그림 3.6〉 석유계 플라스틱 순환경제를 위한 물질 순환 기술 개발 전략과 로드맵

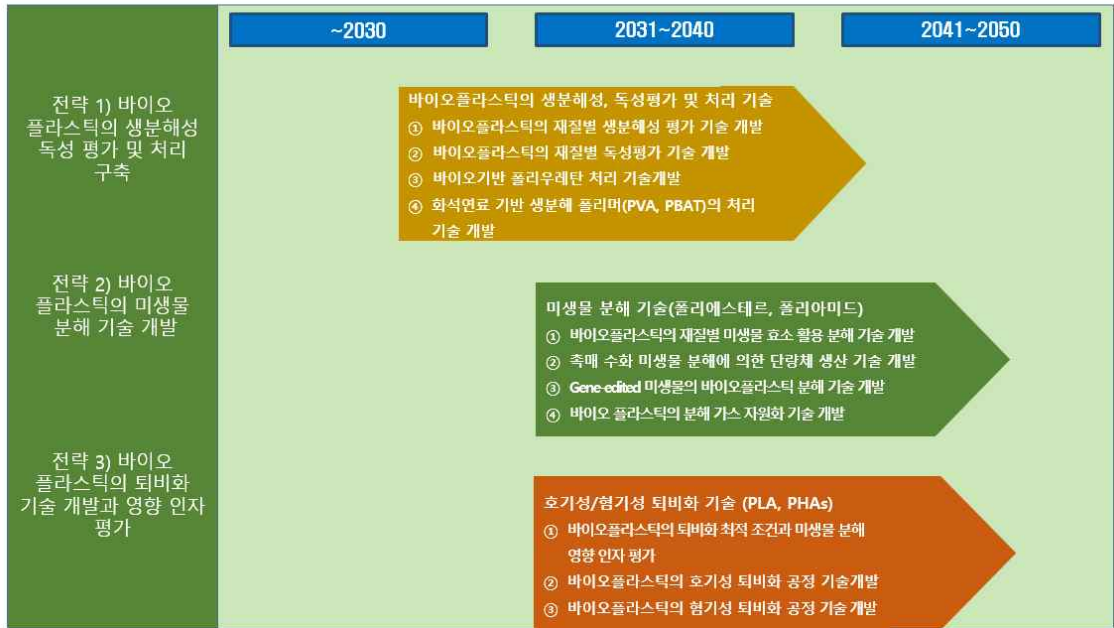
○ 바이오 플라스틱의 물질순환 기술 전략:

-전략 1 바이오 플라스틱의 생분해성, 독성 평가 및 처리 구축 (~2040년): 바이오플라스틱의 재질별 생분해성 평가, 독성 평가 기술 개발을 바탕으로 처리 구축이 필요함. 바이오 기반 폴리우레탄 처리 기술 개발, 생분해 폴리머의 처리 기술 개발 등이 필요

-전략 2 바이오 플라스틱의 미생물 분해 기술 개발 (~2045년): 바이오 플라스틱의 재질별 미생물 효소 활용 분해 기술, 촉매 수화 반응을 통한 미생물 분해 과정에서 단량체 생산 기술, Gene-edited 미생물에 의한 바이오 플라스틱 분해 기술, 분해 과정에서 발생한 분해 가수의 활용과 자원화 기술 등이 필요

-전략 3 바이오 플라스틱의 퇴비화 기술과 영향 인자 평가(~2045년): 호기성 및 혐기성 퇴비화 시 최적 조건과 미생물 분해 영향 인자의 평가, 호기성과 혐기성 퇴비화의 최적 공정 기술 개발이 필요

바이오 플라스틱 순환경제의 물질순환 기술 개발 전략



<그림 3.7> 바이오 플라스틱 순환경제를 위한 물질 순환 기술 개발 전략과 로드맵

2 유가금속 재자원화 기술 전략과 로드맵

- <그림 3.8>은 유가금속 물질순환 전략과 기술 개발 로드맵을 나타낸 것임. 유가금속의 주요 분야로 전기차 폐배터리, 폐전기전자제품(신규 미래 발생 폐기물 드론, 로봇, 3D 프린터 포함), 태양광 폐패널 등이 포함됨. 현재는 폐전기전자제품(2022년 기준 약 50개 재활용 의무 대상 품목)으로부터 유가금속 회수가 이루어지고 있으나, 향후 신재생에너지 보급 확대와 4차 산업혁명

기술 발달에 따른 신규 미래 폐자원 발생이 크게 증가할 것으로 예상됨. 따라서 미래 산업 육성과 공급망 위기 관리 관점에서 국내 폐자원으로부터 유가금속 회수를 극대화하는 전략과 로드맵 수립이 필요함

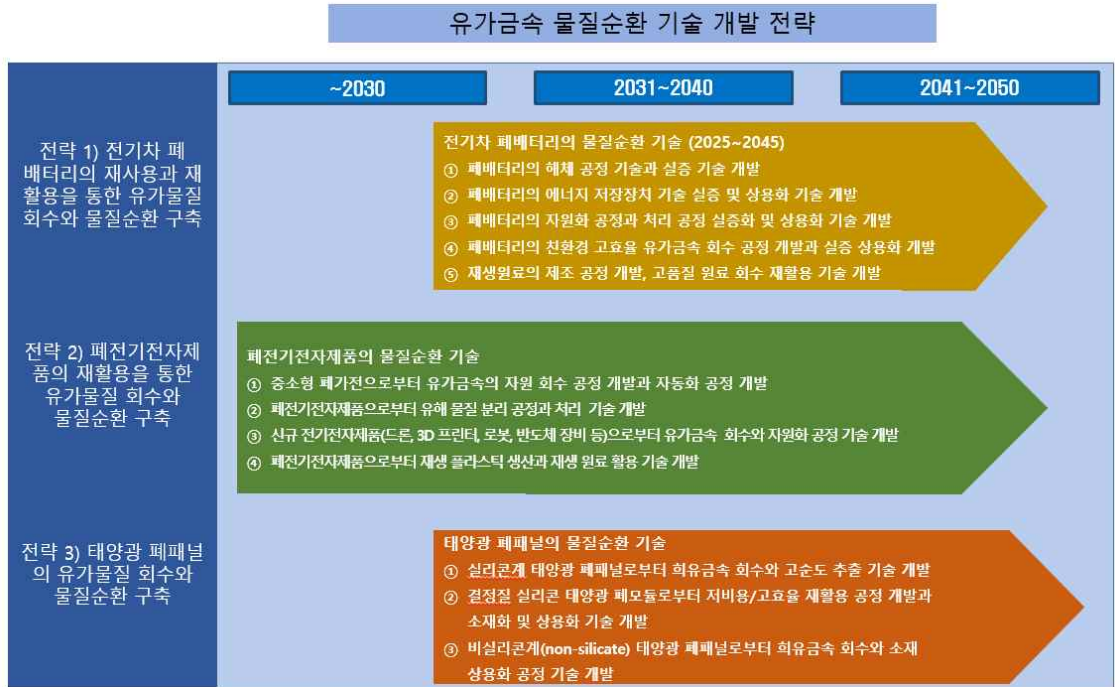
○ 유가금속 물질순환 기술 전략:

-전략 1 전기차 폐배터리의 재사용과 재활용을 통한 유가물질 회수와 물질 순환 (~2050년): 폐배터리의 안전 해체 공정과 실증화 기술 개발, 폐배터리의 에너지 저장장치 재사용 실증 및 상용화 기술, 폐배터리로부터 유가물질 회수 공정 및 안전 처리 공정 기술 개발, 회수된 유가물질의 고품질 원료 생산 기술 등이 필요

-전략 2 폐전기전자제품의 재활용을 통한 유가물질 회수와 물질 순환 구축 (~2040년): 중소형 가전제품으로부터 유가금속 자원 회수 자동화 공정 기술, 유해물질 분리 및 정제 공정 기술, 신규 폐전기전자제품 및 반도체 제품으로부터 유가물질 회수 공정 기술, 재생 플라스틱 함유 전기전자제품의 순환 공정 기술 등이 필요

-전략 3 태양광 폐패널로부터 유가물질 회수와 물질순환 구축 (2050년): 실리콘계 태양광 폐패널로부터 희유금속 회수와 고순도 추출 기술, 태양광 폐모듈로부터 유가물질의 소재화와 상용

화 기술, 비실리콘계 태양광 페패널로부터 희유금속 회수와 소재화 기술 등 포함



〈그림 3.8〉 유가금속의 물질 순환 기술 개발 전략과 로드맵

3 재제조를 통한 제품 순환 기술 전략과 로드맵

- 〈그림 3.9〉는 재제조를 통한 물질순환 전략과 기술 개발 로드맵을 나타낸 것임. 재제조의 주요 미래 산업 육성 분야로 전기전자제품 산업, 의료장비 산업, 기계장비 산업 등이 포함됨. 이들

산업은 유럽과 미국에서도 재제조 산업 성장률이 지속적으로 성장할 것으로 전망하고 있으며, 국내에서도 반도체 산업, 의료 진단 치료 장비, 기계 장비 등이 지속적으로 발달하면서 재제조를 통한 제품 순환 기술이 중요할 것으로 판단함

○ 재제조를 통한 제품순환 기술 전략:

-전략 1 전기전자제품의 재제조 산업 활성화 구축 (~2040년): 컴퓨터, 노트북, 휴대폰 등 전자제품의 재제조 기술, 반도체 보드, 스위치 기어, 변압기 등 전기전자 장비 재제조 기술, 대용량 서버와 네트워크 워크 스테이션 등 재제조 기술, 연료전지, 수소 전지, 리튬이차 전지 등 재제조 기술 개발 등을 통한 재제조 산업 활성화 필요

-전략 2 의료 장비 제품의 재제조 산업 활성화 구축 (~2045년): 첨단 의료 진단 장비(CT, MRI 등)의 재제조 기술, 로봇 수술 장비, 초음파 치료 의료 장비, 레이저 방사선 치료 등 각종 치료 장비의 재제조 기술 개발 등을 통한 산업 활성화가 필요

-전략 3 기계 장비 산업의 재제조 산업 활성화 구축 (~2050년): 풍력, 가스, 스팀 및 전기 발전 터빈 등 에너지 관련 장비의 재제조 기술, 산업용 로봇, 열교환기, Compressor 등 기계 장비의 재제조 기술, 식품 가공 장비의 재제조 기술, 수송용 로봇 장비의 재제조 기술 등이 재제조 산업 활성화를 위해 필요

재제조 제품의 제품 순환 기술 개발 전략



<그림 3.9> 재제조를 통한 제품 순환 기술 개발 전략

1 국가 자원순환경제 정책과 연계 강화

○ 국가 자원순환경제 정책과 미래 핵심 기술과 연계성 강화

- (국가 순환경제 정책과 연계성 강화) 2050 탄소중립이 글로벌 패러다임으로 대두되면서 탄소중립 실현을 위한 중요한 수단 중 하나로 순환경제 사회 전환이 필수적임. 순환경제 사회로의 전환을 위한 정책 방향이 미래 핵심 물질순환 기술 개발 투자를 촉진하고, 지원하도록 순환경제 정책과 물질순환 기술의 연계성 강화가 필요함. 기존 자원순환기본법을 순환경제사회 전환 촉진법으로 전환하여 2050 탄소중립 실현을 위한 순환경제 전략을 추진 중에 있음. 국가 순환경제 사회 전환을 위한 자원 순환 정책적 이슈와 물질 순환 기술의 해결 방안 연계성 강화가 필요함

2 국가 연구개발 투자 방향과 연계 강화

○ 국가 연구개발 투자 방향과 물질순환 미래 핵심 기술과 연계성 강화

- (국가 연구개발 투자 방향과 연계성 강화) 제1차 국가연구개발 중장기 투자전략(2023~2027년), 환경부 R&D 기술 개발, 환경부 자원순환 탄소중립 순환경제 기술 개발(2024~2028년) 등과 연계하여

미래 핵심 물질순환 기술과 연계성 강화가 필요함. 자원순환 기술 분야 중 감량 및 대체 물질 개발, 물질 재활용, 열적 재활용 및 화학적 재활용, 생물학적 재활용, 재제조 대상 제품의 수명 연장과 품질 성능평가 및 인증 등 국가 및 환경부 연구 개발 투자 방향에 반영하여 미래 물질순환 기술에 대한 투자 확대와 전략 수립이 필요함

3 산업계의 투자 방향과 연계 강화

○ 산업계의 기술개발 투자와 물질순환 미래 핵심 기술과 연계성 강화

- (산업계의 기술 개발 투자와 연계성 강화) 산업계를 중심으로 지속가능한 성장을 위한 기업의 노력으로 ESG(Environment Social Governance) 측면에 강조되고 있으며, 향후 안정적 원료 공급망 구축 관점에서 순환경제 구축이 중요한 의제로 대두되고 있음. 이러한 점을 고려하여 산업계의 순환경제 구축을 위한 대규모 기술 개발 투자 시 물질순환 미래 핵심 기술을 고려하여 기술 개발의 촉진이 이루어지도록 연계성 강화가 필요함

제 4 장

결론

전 세계적으로 현행 선형경제에서 순환경제로의 전환을 위해 물질순환 향상 기술 개발과 투자가 최근 들어 활발히 이루어지고 있음. 본 연구에서는 국내외 물질순환 기술 R&D 개발 동향과 미래 물질순환 기술 전략과 방향을 플라스틱 물질순환, 유가금속(주로 폐전기전자제품, 전기차 배터리, 폐태양광을 중심으로) 회수, 및 재제조의 제품 순환 중심으로 제시하였고, 그 결과를 요약하여 제시하면 아래와 같음

제1절 국내외 물질순환 기술 R&D 현황

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

- (플라스틱 물질순환) 국내외 플라스틱 물질순환은 주로 기계적 재활용을 중심으로 이루어져 왔으며, 최근 들어 유럽과 일본을 중심으로 화학적 재활용 기술 개발에 대한 투자와 산업계 참여가 활발히 이루어지고 있음. 국내에서도 최근 플라스틱의 기계적 재활용의 고도화와 열분해 기술 개발, 해중합 기술 개발, 생물학적 재활용 기술 등에 대한 산업계 상용화 기술 개발과 국가 연구 개발 투자가 이루어지고 있음
- (유가금속 물질순환) 폐전기전자제품, 전기차 배터리, 태양광 폐패널로부터 유가금속 회수에 대한 기술 개발은 전략원료물질(critical raw materials)의 안정적인 공급망 구축 관점에서도 최근 들어 활발히 이루어지고 있음. 폐전기전자제품은 도시광산(urban mining) 관점에서도 유가금속 회수 추출 정제 등의 기술 개발이 꾸준히 이루

어져 왔으나, 전기차 배터리와 태양광 폐패널은 미래 폐자원으로 최근 기술 개발 투자가 국내외적으로 활발히 이루어지고 있음

- (재제조 제품순환) 국내외 재제조 산업 기술 개발은 주로 전기전자 (토너 카트리지 등) 및 자동차 부품을 중심으로 이루어져 왔음. 최근 들어, 기계분야, 전략 기자재, 선박 기자재 등의 분야로 기술 개발 확산이 이루어지고 있음. 유럽과 미국의 경우, 재제조 산업이 자동차 산업 이외에 항공, 기계설비, 의료기기 등 산업으로 기술 개발 확산이 이루어지고 있음

제 2 절

물질순환 미래 기술 중장기 전략 방향

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

- (플라스틱 물질순환 전략과 방향) 플라스틱 물질순환을 위한 미래 기술 개발 방향은 석유계 플라스틱의 경우 기존 기계적 재활용의 고도화와 현대화를 통한 고품질 재생원료 생산 기술과 활용 기술 개발, 더 나아가 화학적 재활용 기술 개발 투자가 확대되어야 함. 바이오플라스틱의 경우, 탄소중립 기여도 관점에서 적극적인 기술 개발이 필요하며, 이 과정에서 폐기되는 바이오플라스틱의 수거 및 처리 기술 개발 등이 필요함

- (유가금속 물질순환 전략과 방향) 유가금속 물질순환은 미래 신성장 산업 분야(예를 들어, 전기차 배터리, 연료전자, 드론 및 로봇, 3D 프린터, 풍력발전기 등)와 연계하여 안정적인 원료 공급망 리스크와 순환경제 구축 관점에서 기술 개발과 투자가 필요함
- (재제조 제품순환 전략과 방향) 재제조 분야의 제품 순환은 기존 자동차와 전기전자제품과 함께 항공분야, 기계분야, 선박분야, 의료장비 분야 등 국내 자원확보 및 공급망 확보, 순환경제 관점에서 제품 순환 기술 개발과 투자가 필요함

참고 문헌

1. 문헌 자료
2. 웹 사이트

1 문헌 자료

국문

- 강홍윤, 김영춘 (2017), 「우리나라 재제조산업의 재진단을 통한 지속가능 성장전략 -자동차 분야를 중심으로-」. 공업화학 전망, 20(5), 1-12.
- 관계부처합동 (2018), 「제1차 자원순환기본계획(2018~2027)」.
- 관계부처합동 (2020), 「2050 탄소중립 추진전략」.
- 구지선 (2019), 「전기차 폐 배터리 활용 현황과 시사점」. Weekly KDB Report.
- 국가과학기술자문회의, 2021. 「2050 탄소중립을 위한 플라스틱 자원순환 혁신 전략」.
- 국가환경정보센터 (2016), 「폐플라스틱의 처리와 재활용을 위한 기술 동향」.
- 김용환 (2020), 「미세플라스틱 대응 화공/바이오 융합 공정 기술 개발」 NICE (News & Information for Chemical Engineers), 38(5), 한국화학공학회, 497-515.
- 김은아, 민보경 (2020), 「지역순환경제 전략체계 및 사례연구」, 국회미래연구원.
- 대한상공회의소 (2021), 「플라스틱 폐기물에 대한 인식조사 및 정책과제 건의」.
- 박지환 (2019), 「국내 폐전기전자제품 재활용 현황 및 기술동향, 국내환경동향보고」.
- 배진수 (2021), 「국내 순환경제의 현황 및 정책적 시사점-경제적 유인을 중심으로」.
- 산업통상자원부 (2017), 「재생에너지 3020 이행계획(안) 발표 -‘제2회 재생에너지 정책협의회’개최를 통해 의견수렴 -」.
- 산업통상자원부 (2018), 「자동차 부품산업 활력 제고 방안」.
- 산업통상자원부 (2021A), 「탄소중립을 위한 한국형 K-순환경제 이행계획 수립」.
- 산업통상자원부 (2021B), 「탄소중립 산업·에너지 R&D 전략」.

삼성증권 (2021), 「ESG 시대, 순환경제」.

삼일PwC경영연구원 (2022), 「순환경제로의 전환과 대응전략 - 플라스틱과 배터리(이차전지)를 중심으로」.

손정수 (2018), 「전기차 폐배터리의 물리화학적 처리」.

안상준 (2022), 「국내 재제조 산업 현황과 발전 방향」.

이종수, 김도완, 배재근 (2019), 「폐 전기, 전자제품 유래 금속 자원 관리를 위한 통계기반 구축 제언 연구」. 환경정책, 27(4), 241-269.

임현규 (2021), 「미생물을 활용한 플라스틱 생물학적 분해 동향」.

장용철 (2022), 「대한민국 플라스틱 순환경제 전략과 기술」, 한국-네덜란드 공동 순환경제국제포럼, 2022년 6월 9일, 국회미래연구원.

조세재정연구원 (2021), 「2021~2025 국가재정운용계획 지원단보고서(자원순환경제 구축)」.

조영주, 조봉규 (2020), 「폐플라스틱 리사이클링의 현주소 및 향후 방향」. 자원리사이클링, 29(4), 31-44.

조지혜, 주문술, 신동원, 고인철 (2020), 「순환경제 이행 진단을 위한 통합 평가 지표 개발 및 활용 방안 구축」. 한국환경연구원.

한국건설기술연구원 (2019), 「미세플라스틱 대체재 및 자원화 기술개발 기획연구」.

한국무역협회 (2022), 「전기차 배터리 재활용 산업 동향 및 시사점 : 중국 사례 중심으로」.

한국산업기술평가관리원 (2020), 「2021년 산업기술 R&D 투자전략」.

한국생산기술연구원 (2007), 「재제조산업 동향 및 발전전략」.

한국에너지기술연구원 (2019), 「자원순환: 태양광 폐패널의 재활용 기술 동향」.

한국자동차부품재제조협회 (2020), 「전기차 배터리 재활용 리사이클링 및 업사이클링 미래 신산업 전략 및 사업화 방향 세미나」

한국투자증권 (2020), 「친환경차 보급현황 및 정책방향 세미나」.

한국환경연구원 (2018), 「태양광 폐패널의 관리 실태조사 및 개선 방안 연구」.

한국환경정책평가연구원 (2016), 「미세조류 바이오매스의 자원화 활용에 대한 연구」.

환경 인적자원개발위원회 (2020), 「한국판 뉴딜에 대응하는 환경산업 육성 방안」.

환경부 (2022), 「2022-제2차 환경R&D 전문가 포럼-자원순환분과」.

영문

AFRM (2019), "Petrochemical manufacturers use chemistry to make plastic more sustainable and recyclable".

<https://www.politico.com/sponsor-content/2019/03/petrochemical-manufacturers>
(accessed on 15 June 2022).

BloombergNEF (2020), "Electric Vehicle Outlook 2020".

Chowdhury et al. (2020), "An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling". *Energy Strategy Reviews*, 27, 1000431.

DelRe, C.; Jiang, Y.; Kang, P.; Kwon, J.; Hall, A.; Jayapurna, I.; Ruan, Z.; Ma, L.; Zolkin, K.; Li, T.; Scown, C.D.; Ritchie, R.O.; Russell, T.P.; Xu, T. (2021), "Near-complete depolymerization of polyesters with nano-dispersed enzymes". *Nature*, 592, 558-563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03408-3>.

ETC/WMGE (2021), "Contribution of remanufacturing to circular economy".

European Commission (2018), "The European economic and social committee and the committee of the regions - A European strategy for plastics in a circular economy".

European Commission (2020), "Circular Economy Action Plan".

European Commission (2021), "CRMs for strategic technologies and sectors in the EU".

Fischer et al. (2017), "Bridging the raw materials knowledge gap for reuse and remanufacturing professionals: report in ten knowledge gaps".

Forti et al. (2020), "The Global E-waste Monitor 2020".

Harper et al. (2019), "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles". *Science*, 575, 75-86.

- IEA (2019), "Global EV outlook".
- Itoh (2014), "The recent trend of e-waste recycling and rare metal recovery in Japan".
- Kim, D.H.; Han, D.O.; Shim, K.I.; Kim, J.K.; Pelton, J.G.; Ryu, M.H., Joo, J.C.; Han, J.W.; Kim, H.T.; Kim, K.H. (2021), "One-pot chemo-bioprocess of PET depolymerization and recycling, enabled by a biocompatible catalyst, betaine". ACS Catalysis, 11(7), 3996-4008. <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c04014>.
- Parker et al. (2015), "Remanufacturing market study".
- Payne, J.; McKeown, P.; Jones, M. (2019), "A Circular Economy Approach to Plastic Waste". Polymer Degradation and Stability, 165, 170-181. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.014>
- PV CYCLE (2018), "Annual report 2018".
- Rematec (2020), "Global remanufacturing benchmark, 2020".
- Tournier, V.; Topham, C.M.; Gilles, A.; David, B.; Folgoas, C.; Moya-Leclair, E.; Kamionka, E.; Desrousseaux, M.-L.; Texier, H.; Gavalda, S.; Cot, M.; Guémard, E.; Dalibey, M.; Nomme, J.; Cioci, G.; Barbe, S.; Chateau, M.; André, I.; Duquesne, S.; Marty, A. (2020), "An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles". Nature, 580, 216-219. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>.
- Vlaanderen (2018), "Accelerating growth of the US Remanufacturing industry: a stakeholder guide".
- Wei, R.; Zimmermann, W. (2017), "Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: How far are we?". Microbial Biotechnology, 10(6), 1308-1322. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12710>.
- 일본 환경성 (2016), "태양광 발전설비의 재활용 추진을 위한 가이드라인".

2 웹 사이트

국문

- BIZION (2022), "페플라스틱을 재활용해 만든 '건축용 블록'".
http://www.bizion.com/bbs/board.php?bo_table=social&wr_id=508 (accessed on 15 June 2022).
- TIN뉴스 (2022), "저온 해중합 기술로 페플라스틱 재활용 - 플라스틱을 다시 원료로 만드는 해중합과 열분해 기술". <https://www.tinnews.co.kr/21870> (accessed on 30 June 2022).
- 김병수 (2020), "순환 경제 Circular Economy Diagram".
<https://brunch.co.kr/@byeongsookim/4> (accessed on 15 June 2022).
- 시사저널e (2016), "전기차 중고 배터리, ESS 시장서 각광".
<https://www.sisajournal-e.com/news/articleView.html?idxno=159910>. (accessed on 25 June 2022).
- 에너지데일리 (2020), "일본 기업, 전기차 폐배터리 재활용 사업 '돈 된다'".
<https://www.energydaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=111415> (accessed on 25 June 2022).
- 인더스트리뉴스 (2022), "태양광 폐패널 재활용, 사업성 커진다.. 주요 기업 투자 증가".
<https://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=46252> (accessed on 16 June 2022).
- 자원순환사회연구소 (2020), "플라스틱 재활용 방법 : 물질재활용, 화학적 재활용".
<https://m.blog.naver.com/waterheat/222113036295> (accessed on 22 June 2022).
- 케미컬뉴스 (2021), "페플라스틱병을 유용한 바닐라 향료로 만드는 기술 개발".
<http://www.chemicalnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=4061> (accessed on 30 June 2022).
- 한화솔루션 (2020), "플라스틱의 생명연장, '화학적 재활용'이란?".
<https://post.naver.com/viewer/postView.nhn?volumeNo=27571195&memberNo=5673438> (accessed on 15 June 2022).