



2022.12.31.

국회미래연구원 | 연구보고서 | 22-09호

순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향

김은아 박성준 여영준 박주영 안진주



국회미래연구원
NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향

연구진

내부 연구진

김은아 연구위원(연구책임)

박성준 부연구위원

여영준 부연구위원

외부 연구진

박주영 부교수(서울대학교)

안진주 선임연구원(한국화학연구원)

- ◆ 출처를 밝히지 않고 이 보고서를 무단 전재 또는 복제하는 것을 금합니다.
- ◆ 본 보고서의 내용은 국회미래연구원의 공식적인 의견이 아님을 밝힙니다.

발 | 간 | 사

인간의 산업활동으로 야기되는 기후변화·환경파괴, 자원수급 불안정 등의 문제는 시간이 갈수록 심각성을 드러내고 있습니다. 이에 각 국가는 이들 환경문제를 더 이상 환경에 국한되지 않은 경제·사회 전반에 영향을 미치는 위기요소로 관리하고 있습니다. 또한 전 세계는 코로나19로 촉발된 대전환의 시기에 기존의 선형경제 패러다임을 대체할 대안적 개념으로서 순환경제 필요성이 대두되고 있습니다. 순환경제는 기존의 생산, 소비, 폐기 방식이 지속가능하지 못하다는 현실을 직시하고 어떻게 하면 천연자원 채굴을 최소화하고 환경으로 배출되는 오염물질 양을 최소화 할 수 있을 것인가에 대한 해결책으로서, 산업전환, 재화와 서비스 사용 방식의 전환을 포함하는 경제·사회시스템 전반의 대전환을 의미합니다.

국회미래연구원은 순환경제로의 전환에 따라 물질을 사용하는 전 과정에서 발생하는 환경적 편익 및 경제적 영향에 대한 미래 시나리오를 도출하여 향후 순환경제로의 전환 방향성 도출에 근거를 설정하고자 하였습니다. 특히 산업계에서 순환경제 전환에 따른 파급효과가 높은 부문을 발굴하여 해당 산업을 순환경제로 전환하기 위한 전략을 우선적으로 도출하고자 하였으며, 국내외에서 가장 시급하게 해결해야 하는 플라스틱 부문을 집중적으로 분석하였습니다.

이 연구를 기획하고 연구책임으로 전체 과정을 진행한 국회미래연구원 김은아 연구위원과 국내 산업계 영향을 분석해주신 여영준 부연구위원, 그리고 플라스틱 전과정 국제 물질흐름을 분석해주신 박성준 부연구위원께 감사를 표합니다. 그리고 순환경제 국내 수준 진단 및 플라스틱 전과정 국내 물질흐름 분석 부분에 참여해주신 서울대학교 박주영 부교수, 플라스틱 재활용 전과정평가 방법론에 대하여 장기자문을 해주신 한국화학연구원 안진주 선임연구원께도 감사의 마음을 전합니다.

본 연구의 결과물이 우리나라가 제한된 자원을 현명하게 활용하고 온실가스 배출을 줄이면서 새로운 성장동력을 가져올 수 있는 사회·경제 시스템으로의 대전환 전략 수립에 근거자료로 활용될 수 있기를 바랍니다.

2022년 12월
국회미래연구원장 김 현 곤

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구의 배경 및 필요성	3
1. 중장기적 패러다임 전환의 필요성	3
2. 연구의 필요성 및 목적	4
제2절 연구 범위 및 전체 분석 틀	7
1. 보고서 구성	7
2. 미래 시나리오 구성	9
제3절 용어와 정의	11

1부 산업계의 순환경제 영향

제2장 국내 순환경제 수준 및 전환 동력 진단	17
제1절 국내 순환경제 수준 진단	19
1. 순환경제 진단 주요 지표	19
2. 국내 순환경제 수준 진단	26
제2절 순환경제 전환 주요 산업 정의	36
1. 순환경제 전환 동력	36
2. 순환경제 전환 주요 대상 산업 도출	40
제3절 순환경제 성과지표 기반 2050 시나리오	43
1. BAU 분석	43
2. 성과지표 기반 2050 시나리오	44

제3장 산업계 순환경제 전환 전략 49

제1절 산업계 순환경제 전략 요소	51
1. 산업계 순환경제 전환 전략	51
2. 산업계 순환경제 전환 전략 우선순위	54
제2절 산업계 2050 전략 시나리오	58

제4장 순환경제 산업 미래영향 시나리오 61

제1절 문제의식과 연구목적	63
제2절 분석모형 설계와 활용	68
1. 순환경제 특화 산업연관표 구축	68
2. 순환경제 특화 산업연관표 활용과 시나리오 설계	72
제3절 결과 분석과 해석	82

제5장 소결

제1절 산업계 순환경제 2050 시나리오 개괄	95
1. 순환경제 성과 모니터링 지표 기반 시나리오	95
2. 순환경제 산업 전략 시나리오	96
3. 순환경제 산업 영향 시나리오	97
제2절 특정 산업의 순환경제 전환에 따른 전체 산업계 영향	98

제3절 취약영역 및 기회영역	102
1. 취약영역	102
2. 기회영역	103
3. 분석의 한계점 및 향후 개선 방안	104

II부 플라스틱 순환경제 시나리오

제6장 플라스틱 순환경제 현황 107

제1절 플라스틱 순환경제 정책 및 산업 현황	109
--------------------------------	-----

제2절 플라스틱 재활용 기술개발 현황	116
----------------------------	-----

1. 세부기술 정의 및 국내 기술개발 동향	116
2. 세부기술별 해외 연구개발 현황	120
3. 국내 연구개발 현황	123
4. 국내·외 특허출원 현황	125

제3절 국내 플라스틱 전과정 물질흐름	128
----------------------------	-----

1. 정적 물질흐름 분석	128
2. 동적 물질흐름 분석	135
3. 플라스틱 수지별 생산-수요-재활용 물질흐름	137
4. 성과지표 기반 2050 시나리오	139

제4절 국제 플라스틱 전과정 물질흐름	142
----------------------------	-----

1. 분석개요	142
2. 요약 통계량	143

3. 플라스틱 물질 국제 순환 현황	148
4. 탄소중립과 플라스틱 물질 국제 순환	157
5. 플라스틱 물질 국제 순환의 정책적 함의	163

제7장 플라스틱 순환경제 환경영향 165

제1절 순환경제 환경영향 평가 방법	167
1. 선행 연구 분석	167
2. 전과정평가 개념 및 용어 정의	168
3. 분석목적 및 분석범위정의	174
제2절 플라스틱 재활용 전과정 평가	178
1. 시스템경계 설정	178
2. 데이터 수집 결과	183
3. 전과정평가 수행 내용	189
제3절 비교 전과정평가 결과 해석	197

제8장 소결 211

제1절 플라스틱 순환경제 2050 시나리오 개괄	213
제2절 플라스틱 순환경제의 미래영향	216
제3절 취약영역 및 기회영역	219
1. 취약영역	219
2. 기회영역	220

참고문헌 221

- 1. 문헌자료 223
- 2. 웹사이트 230

Abstract 231

부록 235

- [부록 1] 산업계 순환경제 전략 우선순위 설문조사지 237
- [부록 2] 산업연관표 내 산업분류 세부 정보 248
- [부록 3] 플라스틱 물질 전과정 국제 순환 상세 데이터 255

[표 1-1] 본 보고서에 사용한 전문용어의 정의	11
[표 2-1] 순환경제 모니터링 단기 지표(안)을 활용한 추이 분석 및 진단(조지혜 외, 2020) ..	22
[표 2-2] 주요 국가 및 지역의 자원 소비와 자원생산성 지표 비교(2019년 기준)	33
[표 2-3] 순환경제 전환 동력 프로파일링에 사용한 지표	38
[표 2-4] 순환경제 전환 동력(PM _{2.5} , 온실가스 배출량, 해외의존도, 기존 정책영역) 기여도가 높은 업종	41
[표 2-5] 『K-순환경제 이행계획』의 순환이용률 목표(안) (환경부 보도자료, 2021.12.31.) ..	46
[표 2-6] 6대 주요 산업의 100% 순환경제 달성에 따른 국가 순환경제 지표의 변화	48
[표 3-1] 해외 학술문헌에서 다뤄진 산업계 순환경제 주요 전략	53
[표 3-2] 설문조사 응답 전문가 인적정보	54
[표 3-3] 산업계 순환경제 전환 전략 우선순위 판단기준 조사 결과	54
[표 3-4] 순환경제 전환 전략 전체에 대한 우선순위 조사 결과	55
[표 3-5] 전략 우선순위 전문가 설문 응답의 주성분 분석 결과에 기반한 산업계 순환경제 전략 그룹	56
[표 3-6] 순환경제 전환 주요산업 대상 전략 우선순위 조사 결과	58
[표 3-7] 순환경제 산업계 2050 전략 시나리오 프레임워크	59
[표 4-1] 산업연구원(2020) 제안 녹색산업 분류체계 내 자원순환산업 위상	69
[표 4-2] 본 연구 내 산업분류	70
[표 4-3] 본 연구 내 구축 산업연관표 기본 구조	71
[표 4-4] 산업연관표 기본 구조와 구성요소	73
[표 4-5] 본 연구 내 정책 시나리오 설계	76
[표 4-6] 2050년 기준 우리나라 주요 품목별 자원 순환성 목표치	79
[표 4-7] 2050년 기준 BAU 대비 정책 시나리오별 영향 전망	83
[표 4-8] 2050년 기준 BAU 대비 설계 시나리오별 산업별 생산유발효과 변화	84
[표 4-9] 2050년 기준 BAU 대비 설계 시나리오별 산업별 부가가치유발효과 변화	88
[표 4-10] 순환경제 산업의 경제적 파급효과: 부가가치유발계수(SCN3 시나리오 예)	90

[표 4-11] 2050년 기준 BAU 대비 설계 시나리오별 산업별 취업유발효과 변화(명)	91
[표 5-1] 6대 주요 산업의 100% 순환경제 달성에 따른 국가 순환경제 지표의 변화	95
[표 5-2] 순환경제 산업계 2050 전략 시나리오 프레임워크	96
[표 6-1] 주요국의 플라스틱 부문 순환경제 정책 범위	109
[표 6-2] 해외 국가별 플라스틱 재활용 사업 동향	112
[표 6-3] 국내 주요 기업들의 폐플라스틱 재활용 사업 현황 및 계획	113
[표 6-4] 범부처 R&D 전략 정립을 위한 18개 플라스틱 자원순환 중점기술	116
[표 6-5] 국가별 플라스틱 대체재 및 재활용 개발 동향	122
[표 6-6] 부처별 플라스틱 자원화 기술 투자 금액	124
[표 6-7] 특허분석 대상 플라스틱 자원화 기술(2012~2021년 공개된 특허 대상)	126
[표 6-8] 플라스틱 자원화 기술 특허 주요 출원국 구성 비율	127
[표 6-9] 플라스틱 정적 물질흐름분석 모형	129
[표 6-10] 플라스틱 정적 물질흐름분석의 단계별 흐름과 데이터	129
[표 6-11] 한국의 2017-2019년 플라스틱 물질흐름(단위: 천톤)	132
[표 6-12] 국내 플라스틱 수지 생산량, 수요량, 재활용(가능)량	138
[표 6-13] 플라스틱 순환경제 전략 시나리오	140
[표 6-14] 국내 플라스틱 수지 생산량, 수요량, 재활용(가능)량	140
[표 6-15] 시나리오별 국내 발생 폐플라스틱 순환이용률 및 재생자원 전환률	141
[표 6-16] 플라스틱 관련 무역 요약 통계량	145
[표 6-17] 탄소국경조정제도 적용 대상 품목 무역량	159
[표 6-18] 탄소국경조정 적용 지역과 미적용 지역 간 물질 이동	160
[표 6-19] 한국의 탄소국경조정제도 적용 대상 품목 수출량	162
[표 6-20] 한국의 탄소국경조정제도 적용 지역 및 미적용 지역 수출량	162
[표 7-1] 전과정평가에서 사용하는 주요 용어 및 그 정의	168
[표 7-2] 시스템 범위 정의	179
[표 7-3] 국내 플라스틱 수지 생산량과 수요량	179
[표 7-4] 분석 대상기술, 재활용원료 및 제품	180

[표 7-5] 영향평가 범주 및 지표	181
[표 7-6] 주 공정 데이터 수집 결과	186
[표 7-7] 상위 및 하위흐름의 전과정 인벤토리 수집 내역 (Ecoinvent ver 3.8, Method: allocation, cut-off by classification)	187
[표 7-8] 비교 시스템(baseline project)의 데이터 수집 내역 (Ecoinvent ver 3.8, Method: allocation, cut-off by classification)	189
[표 7-9] 플라스틱 1 kg 투입시 발생하는 결과물 또는 부산물 양	190
[표 7-10] 플라스틱 1kg 재활용에 필요한 에너지·자원 및 발생 폐기물	191
[표 7-11] 제품 시스템과 비교 시스템 대상 전과정평가 결과-1(비교 LCA 결과)	193
[표 7-12] 제품 시스템과 비교 시스템 대상 전과정평가 결과-2(비교 LCA 결과)	195
[표 8-1] 국내 플라스틱 수지 생산량, 수요량, 재활용(가능)량	213
[표 8-2] 시나리오별 국내 발생 폐플라스틱 순환이용률 및 재생자원 전환률	214
[표 8-3] 플라스틱 순환경제 전략 시나리오	215

그림 목 차

[그림 1-1] 순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향 연구 분석 틀	8
[그림 1-2] 순환경제 전환 시나리오 개념도	9
[그림 2-1] 국가 단위 물질흐름도	20
[그림 2-2] 유럽연합(European Union)의 2020년 물질흐름(Gt/yr)	27
[그림 2-3] 경제 기반 물질흐름분석 프레임워크 및 지표	27
[그림 2-4] 한국의 1970-2019년 물질별 국내 자원 소비: 바이오매스(녹색), 비금속광물 (주황색), 화석연료(회색), 금속광물(파란색), 기타 제품(노란색), 폐기물(갈색)	31
[그림 2-5] 한국의 1970-2019년 물질별 국내 채굴: 바이오매스(녹색), 비금속광물(주황색), 화석연료(회색), 금속광물(파란색)	32
[그림 2-6] 한국의 1970-2019년 물질별 물질발자국: 바이오매스(녹색), 비금속광물(주황색), 화석연료(회색), 금속광물(파란색)	32
[그림 2-7] 주요 국가 및 지역별 2019년 자원생산성(GDP/RMC, 2015 USD/kg)과 GDP(2015 USD)	34
[그림 2-8] 주요 국가(164개국)의 1992-2019년 사이 GDP 변화율과 자원생산성 (GDP/RMC) 변화율 관계: 절대적 탈동조화(녹색), 상대적 탈동조화(노란색), 탈동조화 경향을 보이지 않음(빨간색)	34
[그림 2-9] 지역순환경제 전환 프레임워크	37
[그림 2-10] 순환경제 전환 동력 관점에서 대한민국 여건 프로파일링: G7 국가 대비 대한민국 수준(값이 클수록 취약성이 큼)	39
[그림 2-11] 성과지표 기반 순환경제 2050 시나리오: BAU(그래프에 사용된 물질순환성 값은 지승민 외(2021)의 논문 Fig. 8에 적시된 수치를 활용하고, 자원생산성 값은 OECD stat에서 제공하는 통계 데이터를 사용함)	44
[그림 2-12] 물질순환성 산정 방법	45
[그림 3-1] 제품의 생산, 소비, 폐기 전 과정에 걸친 순환경제 전략 구성요소	51
[그림 3-2] 산업계 순환경제 전환전략 개념도(sector 1~5는 개별 업체를 의미함)	52
[그림 3-3] 산업계 순환경제 전략 우선순위 전문가 설문 응답의 주성분 분석 결과	56

[그림 4-1] 탄소배출 비중 및 2050년 제품부문 탄소배출량 감소 방안	65
[그림 4-2] 본 연구 내 정책 시나리오 반영 위한 방법론적 접근	81
[그림 4-3] 2050년 기준 BAU 대비 시나리오별 총 생산유발액 내 개별 산업 비중(%) ..	86
[그림 6-1] 일본의 플라스틱 자원화 현황	111
[그림 6-2] 열분해 기술, 가스화기술, 소각의 차이	117
[그림 6-3] 연도별(2012~2021) 플라스틱 자원화 기술 연구개발 투자 규모 추이	125
[그림 6-4] 플라스틱 자원화 기술 관련 주요 출원국의 특허 보유 비중(%)	126
[그림 6-5] Geyer et al.(2017)에서 사용한 8개 부문 플라스틱 제품 수명주기 분포함수 ..	136
[그림 6-6] 플라스틱 물질 무역량	145
[그림 6-7] 플라스틱 물질 교역 구성비(2020년)	146
[그림 6-8] 플라스틱 물질 무역액	147
[그림 6-9] 플라스틱 물질(원료) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)	150
[그림 6-10] 플라스틱 물질(첨가물) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)	151
[그림 6-11] 플라스틱 물질(플라스틱 수지) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년) ·	152
[그림 6-12] 플라스틱 물질(중간물질) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)	153
[그림 6-13] 플라스틱 물질(중간재) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)	154
[그림 6-14] 플라스틱 물질(최종재) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)	155
[그림 6-15] 플라스틱 물질(폐기물) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)	156
[그림 7-1] 전과정평가 개념도	170
[그림 7-2] 전과정 목록분석 절차	171
[그림 7-3] 열린고리 재활용 할당 개념도	173
[그림 7-4] 물리적 관계 및 그 밖의 원칙에 의한 할당 개념도 제품 A와 B에 공정으로 투입 및 산출되는 흐름의 양을 분배하여 다중기능(A+B)을 단일기능(A)화 ...	173
[그림 7-5] 시스템경계 용어와 그 범위	175
[그림 7-6] 시스템 정의 개념도	177
[그림 7-7] 플라스틱 재활용에 관한 대상 제품 시스템 vs. 비교 제품 시스템 경계	183
[그림 7-8] 플라스틱 재활용 공통 프로세스 모식도	184

[그림 7-9] 화학적 재활용 공정 프로세스 모식도	184
[그림 7-10] 비교 제품 공정 프로세스 모식도	188
[그림 7-11] 비교 시스템 대비 제품 시스템의 온실가스 배출량 비교	200
[그림 7-12] 폐플라스틱 원료 영향을 제외한 경우 비교 시스템 대비 제품 시스템의 온실가스 배출량 비교	201
[그림 7-13] 2050 최적시나리오 조건에서 비교 시스템 대비 제품 시스템의 온실가스 배출량 비교	202
[그림 7-14] 플라스틱 재활용 공정이 폐플라스틱 소각 처리를 대체하는 경우 온실가스 배출 저감 수준	203
[그림 7-15] 비교 시스템 대비 제품 시스템의 천연자원 고갈 영향 비교	204
[그림 7-16] 폐플라스틱 원료 영향을 제외한 경우 비교 시스템 대비 제품 시스템의 천연자원 고갈 영향 비교	205
[그림 7-17] 2050 최적시나리오 조건에서 비교 시스템 대비 제품 시스템의 천연자원 고갈 영향 비교	206
[그림 7-18] 비교 시스템 대비 제품 시스템의 미세먼지 발생 영향 비교	208
[그림 7-19] 폐플라스틱 원료 영향을 제외한 경우 비교 시스템 대비 제품 시스템의 미세먼지 발생 영향 비교	209
[그림 7-20] 2050 최적시나리오 조건에서 비교 시스템 대비 제품 시스템의 미세먼지 발생 영향 비교	210

1 서론

□ 연구의 배경 및 필요성

● 중장기적 패러다임 전환의 필요성

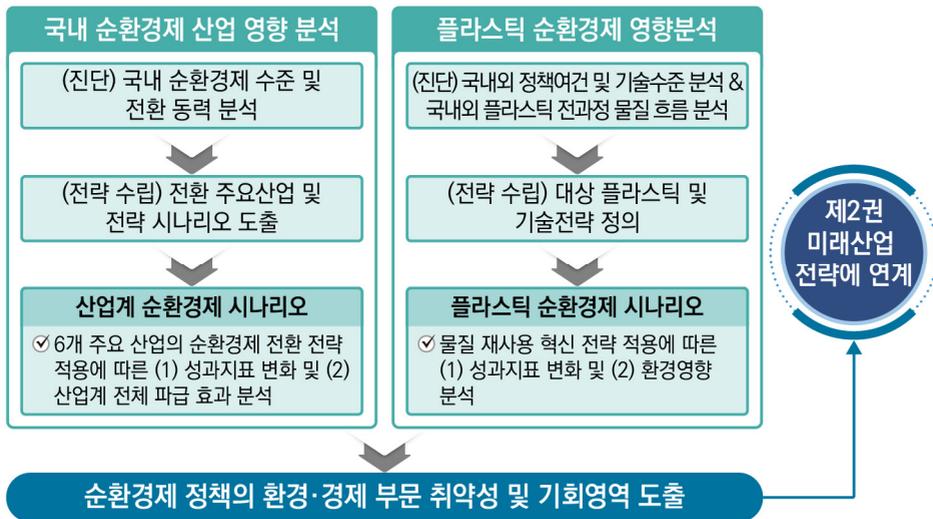
- 인류세가 만들어낸 기후변화·환경 파괴 및 자원고갈 문제를 해결하기 위하여 전 세계적으로 ‘녹색전환’의 필요성이 커지고 현재의 경제활동 방식이 기반하는 선형경제 패러다임을 대체할 대안적 개념으로서 순환경제가 대두함
- 선형경제는 자원고갈, 지구온난화, 환경오염 문제를 지속적으로 발생시키므로 이를 해결하려면 원료의 투입을 최소화하고 소비 후 자원은 회수하여 다시 경제영역으로 되돌리는 순환경제 시스템의 구축이 필요함

● 연구의 필요성 및 목적

- 국내 순환경제 정책은 주로 유럽 등의 해외제도에서 내용을 도출되하였으며, 재활용의 순기능에 집중하고 촉진하는 전략이 우세함.
- 순환경제로의 전환에 따라 물질을 사용하는 전 과정에서 발생하는 환경적 편익 및 경제적 영향에 대한 환경·경제·사회 전체 맥락에서의 해석이 존재하지 않아 향후 순환경제로의 전환 방향성 도출에 근거 설정 작업이 필요함.
- 중장기적 순환경제 전환 정책의 방향을 도출할 때 국내 여건을 고려해야 하며 이에 기반한 중장기적인 비전과 목표를 설정하는 것이 바람직함.
- 특히 산업계에서 순환경제 전환에 따른 파급효과가 높은 영역을 발굴하여 해당 산업을 순환경제로 전환하기 위한 전략을 우선적으로 도출할 필요가 있음.

□ 연구 범위 및 전체 분석 틀

- Part 1: 특정 산업의 순환경제 전환이 중장기적으로 산업계 전반에 어떠한 영향을 미치는지 분석함.
- Part 2: 순환경제 전환 부문에서 국내외 공통으로 가장 시급하게 해결해야 하는 플라스틱 순환경제 현황과 미래영향을 다양한 각도로 분석함.



Part 1. 산업계의 순환경제 영향

2 국내 순환경제 진단

□ 순환경제 전환 주요 산업

• 국내 순환경제 전환 주요 산업 도출 근거

- 순환경제로의 전환으로 개선이 될 수 있는 기후·환경, 폐기물, 경제, 사회 부문 관련 항목 중 G7 국가 대비 우리나라의 수준이 낮은(즉 취약성이 높은) 영역에 기여도가 높은 산업: 대기오염물질 배출량 및 해외 의존도가 높은 산업

- 대내외 정책 여건상 순환경제 전환 동력이 강화되는 산업: 최근 전세계적으로 추진 동력이 큰 탄소중립 정책과 관련된 온실가스 다배출 산업
- 제도가 이미 정비되어 순환경제로의 전환 동력이 존재하는 산업: 산업 부산물 및 폐기물 순환에 관한 법령이 존재하는 산업

● 국내 순환경제 전환 6대 주요 산업

- 위 기준에 부합하는 상위 3위 업종에 2회 이상 등장한 업종: ① 1차금속 제조업, ② 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업, ③ 전기장비 제조업, ④ 운송장비 제조업, ⑤ 화학물질 및 화학제품 제조업(플라스틱 물질 제조 포함), ⑥ 코크스 및 석유정제품 제조업

□ 국내 순환경제 수준 진단

● 낮은 자원생산성, 높은 자원 해외의존도, 낮은 실질 재활용율

- 국가별 자원생산성 비교 결과 우리나라는 OECD 평균에 근접하나 유럽, 미국에 비해서는 낮은 수준임
- 화석연료와 금속광물은 거의 전량 수입에 의존하고 있으며 자원안보 차원에서 금속광물 순환성을 높이고, 탄소중립을 위해서도 화석연·원료 소비를 줄이는 방향의 순환경제 전략이 중요함
- 국내 발생 폐기물중 상당량이 재활용 시설로 반입(통계상 재활용율)되나 실질적으로 재활용되는 비율은 낮으며, 산업으로 투입되는 재생자원 양에 대한 통계가 부재하여 산업계의 순환경제 전환 수준 진단이 어려움

□ 순환경제 성과지표 기반 2050 시나리오

● 성과지표 설정 및 시나리오 구성

- 국내·외 순환경제 모니터링 지표 현황 분석 결과에 따르면 순환경제 현황을 보여주는 핵심 지표로 물질순환성이 공통적으로 존재하며, 자원 사용의 부가가치를 높이는 성과를 보여주는 자원생산성 또한 주요한 성과지표로 활용되고 있음.
- 네덜란드는 2050년까지 100% 순환경제로 전환하는 목표를 발표한 바

있으며, 최적 시나리오는 6대 주요 산업이 모든 가능 전략을 사용하여 이 수준을 달성하는 것으로 설정함.

- 산업별 생산에 필요한 자원량 전체를 조사하여 6대 주요 산업이 100% 순환경제로 전환하여 새로 투입되는 자원량이 0이 되는 경우(이외의 산업은 BAU 수준 유지) 물질순환성과 자원생산성이 각각 약 2배 증가함.

- 성과지표 기준 BAU 대비 최적 시나리오

6대 전략산업의 100% 순환경제 달성에 따른 국가 순환경제 지표의 변화

	물질순환성 (%)	자원생산성 (US\$ million/1,000 ton)
BAU	14.8	3.0
최적 시나리오	33.1	6.5

3 산업계 미래영향 시나리오

□ 산업계 순환경제 전략 요소

- 산업계 순환경제 전환 전략

- 산업계 순환경제 전략 전체에 관한 문헌조사 결과 도출된 10개의 전략을 대상으로 우선순위를 조사한 결과 그룹1(직접 순환 전략)과 그룹2(혁신 전략)의 우선순위가 높게 나타남

전략 그룹 (그룹명)	전략명
그룹 1 (직접 순환 전략)	상품 재제조
	재생원료 사용
	수거, 분해, 조립, 수리, 원료 재사용 공급망 안정화 (순환 공급망 안정화)
그룹 2 (혁신 전략)	순환경제 기술혁신
	순환경제 부문 녹색투자 촉진
그룹3 (간접 순환 전략)	상품의 서비스화
	상품 전과정의 디지털화
	에코디자인 적용
그룹 4 (사회기반 전략)	순환경제 정책 강화
	소비자 인식 향상

● 6대 주요 산업의 우선순위 상위 전략

순환경제 전환 주요 산업	1순위	2순위	3순위
코르크스 및 석유정제품 제조업	순환경제 기술혁신	재생원료 사용	순환 공급망 안정화
화학물질 및 화학제품 제조업	재생원료 사용	순환경제 기술혁신	순환 공급망 안정화
1차금속 제조업	순환 공급망 안정화	순환경제 기술혁신	재생원료 사용
컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업	순환 공급망 안정화	상품 재제조	에코디자인 적용
전기장비 제조업	순환 공급망 안정화	상품 재제조	순환경제 기술혁신
운송장비 제조업	순환 공급망 안정화	에코디자인 적용	상품 재제조

□ 순환경제 전환 산업계 2050 전략 시나리오

● 전략 시나리오 프레임워크

- 우선순위 상위 전략을 중심으로 산업계 전략 시나리오를 도출함.

순환경제 산업계 2050 전략 시나리오 프레임워크

시나리오 이름	전략 그룹1 (직접 순환 전략)			전략 그룹 2 (혁신 전략)		주요 대상 산업 (본연구 내 산업분류)	관련 순환산업
	순환 공급망	재생 원료 사용	상품 재제조	기술 혁신	녹색 투자		
BAU						-	-
물질 재사용	●	●				코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE), 1차금속제조업(NFM)	순환공급 (CRM) 원료재생 (CEN)
물질 재사용 혁신	●	●		●	●		
부품 재사용	●		●			컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT)	순환공급 (CRM) 재제조 (CMA)
부품 재사용 혁신	●		●	●	●		
지속가능한 순환시스템	●	●	●	●	●	위의 6개 전략 산업 전부	위의 순환산업 전부

□ 산업계 미래영향 시나리오 분석 결과

● 2050 목표 달성 시 생산 유발, 부가가치 유발, 일자리 창출 증가

- 국내 순환산업(폐기물 및 폐자원 관리, 폐기물 재생, 제품 재제조)의 성장으로 본 연구가 설정한 6개 전략산업과 그외 연관된 산업들의 직간접적인 생산 유발효과가 확대되고 경제체제 내 성장잠재력이 높아짐.
- 'K-순환경제 이행계획'상 2050년 목표를 달성한다면, 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 취업 유발효과가 BAU 대비 각각 최대 31%, 56%, 50% 증가할 것으로 전망됨.
- 순환산업 중에서도 폐기물 및 폐자원 관리 산업(순환공급 산업, CRM)의 생산 유발계수가 타 산업에 비해 높은 수준으로, 순환경제 전환에 따른 파급효과에서 중추적인 역할을 할 수 있음을 시사함.

- **혁신전략이 동반된 물질순환성 향상 전략의 비교 우위**

- 기술개발 및 투자 전략이 동반된 경우 그렇지 않은 순환경제 시나리오 대비 경제효과가 높게 나타남.
- 그러나 순환경제 전환이 진행됨에 따라 R&D 산업 부가가치 유발효과가 다소 약해질 수 있어 기술혁신 활동 촉진 정책과 함께 R&D 생산성 향상을 위한 전략 및 출구전략이 필요함.

- **국내 산업계 순환경제 전환 취약영역 및 기회영역**

- **취약영역**

- 기존의 생산방식에서 재생원료 사용률과 재사용 부품 이용률을 높이는 등의 방식으로의 전환 과정에서 기술 및 시설 투자 등으로 인한 생산원가 상승이 불가피함에 따라 단기적으로 해당 산업의 불안정성을 높일 수 있으며, 순환경제 전환 6개 주요 산업은 국가 경제에 중요한 부분을 차지하므로 국가 산업경쟁력 전반에 부정적인 영향을 줄 수 있음.
- 6대 주요산업에 재제조 전략을 적용하는 경우 컴퓨터, 전자 및 광학기기 산업의 생산유발액이 BAU 대비 다소 감소하는 것으로 전망됨.
- 순환경제로의 전환이 보다 진전됨에 따라, R&D 산업의 자본집약화와 생산성 향상이 진전됨에 따라 해당 산업의 부가가치 유발효과가 다소 약화될 수 있음.

- **기회영역**

- 6개 주요 산업은 물질순환성과 자원생산성에 미치는 영향 또한 크기 때문에 6개 주요 산업의 순환성이 극대화 되는 경우 순환경제 성과지표가 BAU 대비 최대 120% 증가할 수 있음.
- 6대 주요산업에 지속가능한 순환 경제시스템으로의 전환 시나리오를 적용하는 경우 우리나라는 2050년까지 생산유발효과 측면에서는 약 482조 원, 부가가치유발 효과 측면에서는 약 292조원, 그리고 취업유발 효과 측면에서는 약 411만 개 일자리 창출효과를 견인할 수 있을 것으로 전망됨.

- 순환경제 이행을 위한 전략 산업별 기술혁신을 위한 R&D가 확대될 때 생산유발, 부가가치유발효과가 더욱 증대되며, 이는 경제체제 내 취업유발 효과를 더욱 향상시킬 것으로 전망됨.

Part 2. 플라스틱 순환경제 시나리오

4 플라스틱 순환경제 현황

□ 플라스틱 산업 및 기술개발 현황

- 국제적으로 플라스틱 관리는 자원순환 분야에서 핵심영역으로 제시되고 있으며, 최근 유럽과 일본을 중심으로 화학적 재활용 기술개발 및 산업계 참여가 활발히 이루어지고 있음. 국내에서도 기계적 재활용 고도화, 열분해, 해중합, 생물학적 재활용 기술 등에 대한 산업계 상용화 기술개발이 진행되고 있음.

□ 국내 플라스틱 전과정 물질흐름

● 많은 플라스틱 소비, 폐기, 폐플라스틱 수입

- 우리나라 1인당 플라스틱 소비량은 전 세계적으로 최상위 수준이며, 포장재로 사용되는 비중이 약 50%에 달함
- 2019년 발생한 플라스틱 폐기물 발생량이 2017년 대비 약 30% 증가하였으며, 재활용률 증가에도 해외로부터 수입되는 폐플라스틱 량이 2배 이상 증가함

□ 국제 플라스틱 전과정 물질흐름

● 플라스틱 전과정 무역 규모

- 원료, 첨가물, 플라스틱 수지, 중간물질, 중간재, 최종재, 폐기물 단위 분석 결과, 금액 기준 무역량은 연간 총 5백만달러~442백만달러 수준으로, 첨가물, 최종재, 플라스틱 수지가 차지하는 비중이 높으며, 무게 기준 무역량은 연간 총 11백만톤~224백만톤 수준으로 첨가물, 플라스틱 수지, 원료와 같이 전주기 전반에 투입되는 물질의 비중이 높음.

- 2002~2020년 무역량 분석 결과 전과정에서 점차 무역량이 증가하는 경향을 보였으며, 원료나 첨가물 같은 플라스틱 생산 이전의 물질을 제외하면 플라스틱 수지가 50% 이상을 차지함.

● 국가간 무역 변화 양상

- 지역(대륙)별 무역의 비중이 높게 나타나던 플라스틱 물질 순환 패턴이 2018년부터 중국 집중도가 급증하였는데, 원료, 플라스틱 수지는 중국으로 유입되고 중간물질, 중간재는 중국에서 주로 공급하는 양상임.
- 2018년 중국이 폐기물 수입을 전면금지함에 따라 중국으로 집중되던 폐기물이 2018년 이후에는 동남아 및 터키와 독일 등 일부 유럽국가로 이동함.
- 향후 탄소중립과 순환경제 관련 정책 변화에 따라 국가간 플라스틱 전과정 물질흐름은 중장기적으로 일정 수준 이상의 탄소 가격이 형성되어 있는 지역 간의 흐름으로 재편성 될 것으로 전망함.

5 플라스틱 순환경제 성과지표·전략 시나리오

□ 성과 모니터링 지표 기반 시나리오

시나리오별 국내 발생 폐플라스틱 순환이용률 및 재생자원 전환률

시나리오 구분	순환이용률 (폐플라스틱 발생량 중 재생원료 생산에 투입된 양)	재생자원 전환률* (폐플라스틱 발생량 중 재생원료로 전환된 양)
K-순환경제 이행계획 2021 수준 (BAU)	56%	48%
현재 기술 기준 최대 수준 (전환 시나리오)	76%	59%
K-순환경제 이행계획 2050 목표 (최적 시나리오)	95%	81%

※ 모든 시나리오에서 재생원료 생산에 투입된 폐플라스틱에 현재 기준 전처리 수율 85.5%를 적용하였으며, 전처리 이후 공정의 전환률의 경우 BAU와 전환시나리오는 현재 기술 최대 수준(90%)의 전환률을 적용하고 최적시나리오는 100% 전환률을 적용함.

※ 전환 시나리오의 순환이용률은 [표 6-12]에서 '현재 기술 기준 최대 재생자원량'이 존재하는 수지의 국내수요량이 전체 국내수요량에서 차지하는 비율로 산정함.

- 플라스틱 전주기 상의 물질흐름 분석 결과에 기반하여 플라스틱 순환경제 전환 수준을 예측하는 성과 모니터링 지표 중심의 시나리오를 도출함.
- BAU, 전환 시나리오, 최적 시나리오에서 각각 최대 48%, 59%, 81%의 폐플라스틱이 원료로 재투입되거나 재사용 가능한 것으로 나타남.

□ 플라스틱 순환경제 전략 시나리오

- 플라스틱 재활용 공정을 통하여 재생원료를 생산하여 다시 코크스 및 석유정제품과 화학물질 및 화학제품 제조업의 생산활동에 투입되는 물질 재사용 또는 물질 재사용 혁신 전략 시나리오를 BAU와 비교하는 프레임 워크 도출

플라스틱 순환경제 전략 시나리오

시나리오 이름	전략 그룹1 (직접 순환 전략)			전략그룹 2 (혁신 전략)		주요 전환 대상 산업	관련 순환산업
	순환 공급망	재생 원료 사용	상품 재제조	기술 혁신	녹색 투자		
BAU						-	-
물질 재사용	●	●				코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE)	순환공급 (CRM)
물질 재사용 혁신	●	●		●	●		원료재생 (CEN)

- BAU-1: 폐플라스틱 처리 방법에 따라 시나리오를 구분하는 경우로, 기존의 처리 방식인 매립, 소각, 재활용(기계적 재활용을 통하여 저품질 플라스틱 생산) 방법으로 처리하는 시나리오
- BAU-2: 플라스틱 재활용 결과물에 따라 시나리오를 구분하는 경우로, 플라스틱 재활용을 통해 생산된 재생원료(화학물질)를 기존 상용 공정을 통하여 생산하는 시나리오

6 플라스틱 순환경제 환경영향

□ 환경영향 시나리오 분석결과

● 플라스틱 폐기 방식(매립, 소각, 물질 재활용) 간의 환경영향 비교 결과 (BAU-1 vs. 물질 재사용 혁신 시나리오)

- 플라스틱 폐기물을 매립하는 경우, 모든 물질 재활용 방법(기계적 재활용 & 화학적 재활용)을 적용하는 경우보다 인간독성과 담수 환경독성이 높았으며, 소각하는 경우 온실가스 배출량이 가장 많음.
- 즉, 현재 물질 재활용 기술 수준에서는 모든 환경영향 항목에서 이득이 되는 처리 방법이 존재하지 않으며, 저감하려는 환경영향의 종류에 따라 바람직한 처리방식이 달라짐.
- 그러나 물질 재활용 기술혁신(수율 향상, 수집·분류 효율 향상 등)을 통하여 현재의 환경영향보다 낮은 수준에 도달할 수 있을 것으로 기대함.

● 재활용 결과물(합성가스, 디젤 등) 생산 방식 간의 환경영향 비교 결과 (BAU-2 vs. 물질 재사용 혁신 시나리오)

- 온실가스 배출영향: 가스화, 열분해(PS 단량체 생산), 용해, 가용매분해 공정을 사용하는 경우 폐플라스틱 재활용 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출량은 상용공정을 적용하는 경우에 비해 적으며 플라스틱 재활용을 통하여 소각처리를 회피하는 효과를 반영하는 경우 모든 재활용 공정에서 온실가스 배출 감축 효과를 기대할 수 있었음.
- 천연자원 고갈영향: 플라스틱 재활용 전 과정은 분리·선별 및 화학적 생산공정으로 여러 단계를 거치면서 폐플라스틱을 포함한 원료와 에너지 투입이 신규물질 생성 공정에 비하여 전반적으로 천연자원 고갈 영향을 높임.
- 대기오염 영향: 가스화, 열분해(PS 단량체 생산), 용해 공정을 사용하는 경우 상용공정을 적용하는 경우에 비해 미세먼지 발생량 감축 효과를 기대할 수 있음.

- 화학적 재활용 공정에 비해 기존의 분리·선별, 과립화 공정(화학적 재활용의 전처리 공정에 해당)의 환경영향 값이 높아 전체 물질 재활용 공정에서 전처리 공정의 환경영향이 차지하는 비중이 절대적으로 높음.
- 폐플라스틱 전처리(선별·분리, 과립화 등)에서 오는 환경영향을 제외한 경우 수율이 매우 낮은 공정(PE 또는 PP 단량체 생산) 외의 모든 플라스틱 재활용 시나리오에서 온실가스 배출량, 천연자원 고갈, 대기오염물질 배출 저감 효과를 볼 수 있었음.
- 화학적 재활용 공정 수율에 따라 플라스틱 재활용 환경영향에 큰 격차가 생긴.
- 따라서 플라스틱 물질 재활용을 통한 환경편익을 증가시키기 위해서는 화학적 재활용의 전처리공정 효율성을 높이고 화학적 재활용 공정 수율을 높이기 위한 기술 혁신이 요구됨.

□ 국내 플라스틱 순환경제 취약영역 및 기회영역

● 취약영역

- 현재 기술수준으로 달성 가능한 최대 재생자원양과 2050 목표 수준 간의 차이가 22%로, 순환이용에 방해가 되는 플라스틱 수지를 순환이용에 용이한 물질로 대체하는 기술 개발과 화학적 재활용 수율 향상이 요구됨.
- 폐플라스틱이 재생원료로 전환하는 과정에서 발생하는 환경영향에 전처리 공정이 미치는 영향이 절대적으로 크기 때문에, 화학적·생물학적 재활용 공정의 성공은 전처리 공정의 효율이 담보되어야 함.
- BAU를 매립 또는 소각 처리로 설정하는 경우, 플라스틱 물질재활용 과정에서 발생하는 환경영향은 매립 또는 소각 방법으로 처리하는 경우에 발생하는 환경영향보다 클 수 있음. 그러나 이는 재생원료 생산으로 회피되는 환경영향이 고려되지 않은 해석으로, 종합적인 환경영향 평가를 위해서는 폐기물 처리 시스템을 확장하여 신규물질 생산 시스템을 포함하여 해석할 필요가 있음.
- 우리나라는 플라스틱 전 주기에서 원료와 플라스틱 수지의 수출 비중이 매우 높으며, 원료, 첨가물, 플라스틱 수지는 탄소국경조정제도 적용 대상 품목이 88%~95%에 달해 제도가 적용되는 국가로의 수출 여건이 악화될 수 있음.

- 기회영역

- BAU를 상용 공정을 통한 화학물질(재생원료와 동일 물질) 생산으로 설정하는 경우, 기존 상용공정을 회피함으로써 얻는 편익과 폐플라스틱 매립 또는 소각 처리를 회피함으로써 얻는 편익을 고려하여 전과정평가 결과를 해석하면 대다수의 재생원료 생산 공정은 온실가스 배출, 천연자원 고갈, 대기오염물질 배출에서 긍정적인 환경영향을 주는 것으로 나타났으며, 공정효율이 향상되는 경우 환경 편익이 더욱 증가할 수 있을 것으로 기대됨.
- 탄소국경조정제도 도입에 따른 잠재적인 무역장벽 형성은 일정 수준 이상의 탄소 가격이 형성되어 있는 우리나라가 그렇지 않은 국가 대비 플라스틱 전과정 품목의 수출 경쟁력을 가질 수 있으며, 폐플라스틱을 이용한 재생원료 생산으로 온실가스 감축효과를 더하는 경우 수출 경쟁력이 더욱 향상될 수 있음.

제1장

서론

제1절 연구의 배경 및 필요성

제2절 연구 범위 및 전체 분석 틀

제 1절

연구의 배경 및 필요성

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 중장기적 패러다임 전환의 필요성

인류 문명이 시작하기 전까지 지구의 지질시대는 기후의 변화 및 종의 변화 등 자연 환경과 생태계의 큰 변화에 따라 나뉘었다. 그러나 인류 문명의 시작으로 구분 되는 홀로세는 산업화가 진행된 이래 전례 없는 방식으로 인류가 자연환경 변화를 일으키고 있다. 현재, 인류는 자연의 변화로 구분되던 지질시대를 마감하고 온실가스 배출에 의한 기후변화, 무분별한 개발과 폐기물 발생으로 인한 생태계 파괴 등과 같이 인간이 자연의 질서를 교란하는 ‘인류세’(Crutzen, 2002)에 접어들었다. 이렇듯 인류세가 만들어 낸 기후변화·환경파괴 및 자원고갈 문제를 해결하기 위하여 전 세계적으로 ‘녹색전환’¹⁾의 필요성이 커지고 있으며, 현재의 경제활동 방식이 기반하는 선형경제 패러다임을 대체할 대안적 개념으로서 순환경제가 대두하였다.

기존 선형경제(linear economy)는 전 세계적으로 자원고갈 위기, 기후변화, 환경오염 문제를 야기하고 있어 순환경제(circular economy)로의 전환이 주요 핵심 의제로 대두되었다. 선형경제는 자원의 채취-제품생산-소비-폐기 등의 한방향(one-way) 경제 구조 시스템인 반면, 순환경제는 기존 선형경제 구조의 대안으로서 원료의 투입을 최소화하고, 소비 후 자원을 회수하여 다시 경제영역으로 순환하는 시스템을 말한다. 선형경제 구조하에서 자원고갈, 지구온난화, 환경오염 문제가 지속적으로 발생하고 있어 이를 해결하기 위해 원료의 투입을 최소화하고 소비 후 자원은 회수하여 다시 경제영역으로 되돌리는 순환경제 시스템 구축이 필요하다.

자원의 채굴, 가공, 사용, 폐기에서 발생하는 온실가스가 유럽연합(European Union, EU) 전체배출량의 50%가량을 차지하므로 재생원료 사용을 통하여 새로운 원료 투입을 최소화하는 전략은 온실가스 배출감축 목표 달성에 크게 기여할 것으로 기대된다.

1) 전세계적으로 ‘녹색전환’은 다양한 맥락에서 사용되나 역사적으로 경제성장 중심의 패러다임에서 환경적 가치를 중요하게 여기는 패러다임의 전환으로 해석할 수 있다는 공통점을 가지고 있다

또한, 플라스틱 등 폐기물 배출 및 부적절한 관리로 인한 환경문제를 해결하기 위하여 전 세계적으로 폐기물 감소 및 재활용 정책을 시행하고 있으며 이는 순환경제 전략의 중요한 부분을 차지한다. 한편, 경제성장이 진행될수록 자원사용량은 지속적인 증가추세를 보이며, 가용자원량은 반대로 감소추세를 나타낸다. 해외자원 의존성이 높은 우리나라가 자원수급 안정성을 높이기 위해서는 순환경제로의 전환을 통한 재생원료 사용 전략을 적극적으로 도입할 필요가 있다.

2 연구의 필요성 및 목적

세계 각국에서는 기존 선형경제의 문제점과 한계를 극복하고 순환경제로 전환하기 위한 적극적인 정책 추진과 지원, 사회경제 구조 시스템 변화 유도, 산업계와 협력하여 물질순환성 향상 기술 개발과 재정 투자를 확대하고 있다. 특히 유럽은 2020년 3월 EU 순환경제 이행계획을 발표하여 지속가능한 제품 설계, 지속가능한 소비 확대, 생산 단계 순환성 강화, 7대 핵심 분야(전기·전자 ICT, 자동차 및 배터리, 포장재, 플라스틱, 섬유, 건설자재, 식품)의 순환성 향상, 폐기물 발생 및 순환 정책 규제 강화, 자원순환 도시 구축, 기술의 투자와 혁신 및 디지털 전환, 국제 순환경제 구축 협력 등을 제시하였다(European Commission, 2020).

위와 같은 기존의 전 세계적인 흐름 속에서 글로벌 물질순환 미래 핵심 기술 패권 대응, 탄소국경세 대응, 포스트-COVID 19 이후 공급망 불확실성과 자원 수급의 불안정성 대두되었고, 자원 빈국으로서 K-순환경제 구축의 중요성 더욱 증가하고 있다. 우리나라는 해외의 자원 의존도가 높고, 수출을 통한 글로벌 경제 체제를 구축하고 있어 안정적인 자원 수급 확보가 중요하고, 최대한 자원의 절약과 순환이 중요하다. 특히 기후위기에 직면하면서 최근 탄소중립의 중요성이 부각되고 있으며, 이를 달성하기 위한 순환경제 구축도 핵심 과제로 대두되었다.

우리나라는 2020년 '2050 탄소중립 추진전략'에서 10대 과제 중에 순환경제 활성화를 포함하였으며, 미래 산업경쟁력 향상과 탄소중립 실현을 위해 순환경제 사회로의 전환을 매우 중요한 과제로 상정하였다(관계부처합동, 2020). 한편, 2021년 12월 탄소중립을 위한 'K-순환경제 이행계획'을 수립하여 발표하였고, 생산 유통단계 자원순환성 강화,

친환경 소비 촉진, 폐자원의 재활용 확대, 안정적 폐기물 처리 체계 확립, 순환경제 사회로의 전환 등 분야별 구체적 이행 방안을 제시하였으며, 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 제시하였다(산업통상자원부, 2021).

그러나 'K-순환경제 이행계획'에서 2050년까지의 순환이용률 목표를 제시한 7개 부문을 선택한 근거 및 부문별 순환이용률평가 방법에 대한 설명이 부족하다는 한계가 있다. 또한 순환경제로의 전환에 따라 물질 사용 전 과정에서 발생하는 환경적 편익 및 경제적 영향에 대한 환경·경제·사회 전체 맥락에서의 해석이 존재하지 않아 향후 순환경제로의 전환 방향성 도출에 근거 설정 작업이 요구된다.

국내에서는 순환경제의 환경적인 측면에 초점을 맞춘 '자원순환'을 주제로 폐기물 재활용 및 자원화 전략에 관한 연구를 진행한 바가 있으며, 순환경제의 지속가능성을 평가하는 방법론 정립이 필요하다. 국내에서는 주로 국립환경과학원과 한국환경연구원 등에서 폐기물의 처리(재활용 포함), 관리, 자원화에 대한 다수의 연구를 수행하였다. 최근에는 순환경제 전략 연구 대상으로 플라스틱, 배터리, 포장재, 음식물 등에 집중하였으며, 자원순환 성과평가 방법에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 2020년 폐기물처리시스템의 지속가능성을 평가하는 연구(이소라 외, 2020)가 진행되었으나 원료투입-생산-사용-폐기 전반을 아우르는 전과정평가(life cycle assessment) 방법론이 정립되지 않았다. 유럽연합은 2000년대부터 통합제품정책(Integrated Product Policy) 안에서 제품의 전주기를 분석하여 환경적인 영향을 고려하도록 하였다(EC, 2020). 유럽연합의 nCEAP에서는 건축 부문에서 전과정평가를 공공 조달과 지속가능 금융 프레임워크에 활용하도록 하였다(EC, 2020).

순환경제로의 이행에 따른 거시경제적 영향을 고찰하는 연구들은 해외 문헌에서 최근 증가하고 있으며 이를 위해 산업연관분석 모형을 활발히 활용 중이다. 산업연관분석 모형(Kronen et al., 2010)은 산업 간 연관 효과를 수량적으로 분석하는 방법으로, 최근 연구(Wijkman and Skanberg, 2015; Donati et al., 2020)에서 순환경제로의 이행에 따른 온실가스 저감효과, 고용 및 무역수지 영향을 분석하거나, 신산업 등장 효과 및 취업 유발효과를 살펴보았다. 다른 연구(Beylot and Villeneuve, 2017)에서는 폐기물

산업연관표를 이용하여 최종수요 변화 등에 따른 오염물질 배출량 변화 효과를 분석하였다. 최근 국내 연구(신상철 외, 2015)에서는 폐기물 산업을 별도로 고려한 산업연관 분석을 수행하였으나, 순환경제 전반을 아우르지 못하는 한계와 신산업 창출 효과 등을 포착하지 못하는 내재적 한계점을 보이기도 하였다.

우리나라는 순환경제 및 탄소 중립 사회로의 이행을 정책적으로 매우 강조하지만, 이에 따른 신산업 창출 및 일자리 창출효과에 대한 정량분석 연구는 미진한 상황이다. 이와 같은 방법론적 접근의 부재는 순환경제 이행전략의 지속적이고 안정된 추진을 제약할 수 있으며, 정책 신뢰도 향상 및 정책 추진에 따른 잠재적 도전과제 식별을 위해서는 관련 분석 연구가 필요하다.

이렇게 국내 순환경제 또는 자원순환 정책은 재활용의 순기능에 집중하여 그것을 촉진하는 전략이 우세하나, 재활용 및 재사용 과정에서 발생하는 환경적 영향, 신산업 성장(이에 따른 일자리 증감), 국내외 투자 증감, 무역장벽 등 폭넓은 영역에서 순환경제의 순기능과 역기능을 함께 분석할 필요가 있다. 다시 말해 국내 순환경제 전환에서 기회의 영역을 촉진하는 전략 수립과 함께 취약점에 대한 대비책 마련이 시급함에도 취약점 분석에 관한 연구가 미흡한 상황이다. 따라서 기회 영역과 취약점 발굴을 위한 정량적 분석 방법론을 개발하고 이에 근거한 전략을 도출하여야 한다.

본 연구는 국내 순환경제 추진요인(취약영역 및 정책환경) 분석 결과에 기반하여 순환경제 전환 전략 산업군을 도출하고 이들을 중심으로 2050 순환경제 전환 시나리오를 구성하여 순환성 향상에 따른 환경·경제·사회 영역의 변화를 예측하고자 한다. 여기서 예측에 필요한 평가 방법론이 부재한 경우 본 과제에서 방법론을 개발할 필요가 있으며, 환경영향 평가를 위한 전과정평가 방법이 그 예이다. 물질순환성 향상에 따른 신산업 창출 및 일자리 증감 효과 분석을 위해, 산업연관분석을 활용하였으며, 순환경제와 관련한 정책개입에 따른 영향은 새로운 산업의 상대적 영향 증대 및 기존 산업의 비중과 상대적 영향 감소 등 직접적 효과를 수반할 것으로 예상된다. 이러한 정책개입에 따른 직접적 영향을 산업연관분석에 정책적 충격으로 반영하여, 그에 따른 거시경제적 효과(Donati et al., 2020)를 정량적으로 추산하고자 하였다. 마지막으로, 글로벌 공급망 변화 등과 연계하여 순환경제가 중장기적으로 국제무역에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며, 특히 탄소국경조정 도입 시 비관세 무역장벽으로서의 잠재적 영향을 분석하였다.

제2절 연구 범위 및 전체 분석 틀

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 보고서 구성

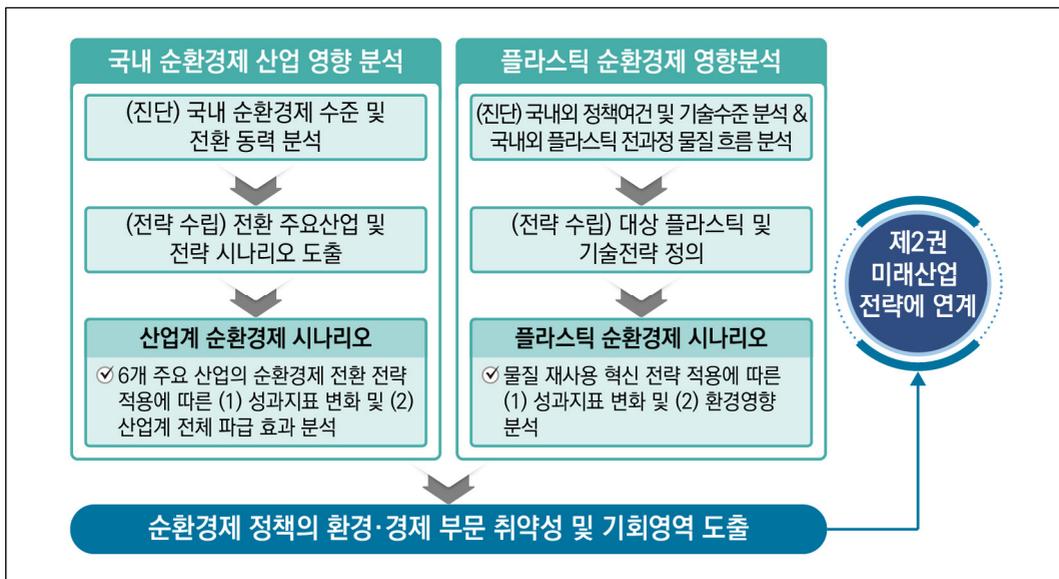
본 연구는 국내 산업계의 순환경제 전환에 따른 영향을 분석하는 것을 목적으로 하였으며, 크게 두 파트로 나누어 분석하였다. 첫 번째 파트에서는 특정 산업의 순환경제 전환이 중장기적으로 산업계 전반에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 분석하였고, 두 번째 파트에서는 순환경제 전환 부문에서 국내외 공통으로 가장 시급하게 해결해야 하는 플라스틱 순환경제 현황과 미래영향을 다양한 각도로 분석하였다. 본 보고서의 구조는 [그림 1-1]에서 확인할 수 있으며 장별 구성은 아래와 같다.

제2장(Part 1)은 국내 순환경제 전환에 따르는 사회·경제·환경적인 파급효과가 특히 클 것으로 예상되는 6개 주요 산업을 도출하고, 이 산업에 중장기적으로 적용할 2050 전략 시나리오를 구성하였다. 제3장(Part 1)은 제2장에서 도출한 2050 전략 시나리오를 6개 주요 산업에 적용했을 때 우리나라 전체 산업에 미치는 영향(생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 취업 유발효과)을 분석하였다. 제4장(Part 1)에서는 제2~3장의 분석 과정에서 발견한 국내 순환경제 전환 과정의 걸림돌이 될 수 있는 요소와 기회 요소를 정리하였으며, 정책적인 시사점을 간략하게 제시하였다. 여기서 제시된 시사점은 제2권 미래산업 전략 보고서로 연결되며, 국내 제도 및 기술개발에 관한 개선방안을 도출하는데 활용하였다.

제5장(Part 2)은 플라스틱 순환경제 전환에 관한 국내외 정책 여건 변화와 기술개발 현황을 분석하고, 국내 플라스틱 전과정(물질 및 제품 생산, 소비, 폐기)의 물질 흐름 분석 결과에 기반하여 국내 플라스틱 순환경제의 현주소를 진단하였다. 이와 더불어 국제 플라스틱 전과정 무역 현황분석 결과에 기반하여 탄소국경 조정 등의 대외적 정책 여건 변화에 따라 잠재적으로 무역에 미칠 수 있는 영향을 분석하였다. 제6장(Part 2)은 아직 상용화 초기 단계이거나 개발 단계인 플라스틱 물질순환 기술을 적용하여再生资源로

를 생산하는 과정에서 발생하는 환경영향을 기존의 폐플라스틱 처리방법 등의 BAU(Business As Usual)와 비교하여 분석하였다. 제7장(Part 2)에서는 제4장과 유사한 방식으로 제5~6장의 분석 과정에서 발견한 플라스틱 순환경제 전환에 관한 취약점과 기회 요소를 정리하고, 정책적인 시사점을 간략하게 제시하였다. 여기서 제시된 시사점 또한 제2권 미래산업 전략 보고서로 연결되며, 국내 제도 및 기술개발에 관한 개선방안을 도출하는 데에 활용하였다.

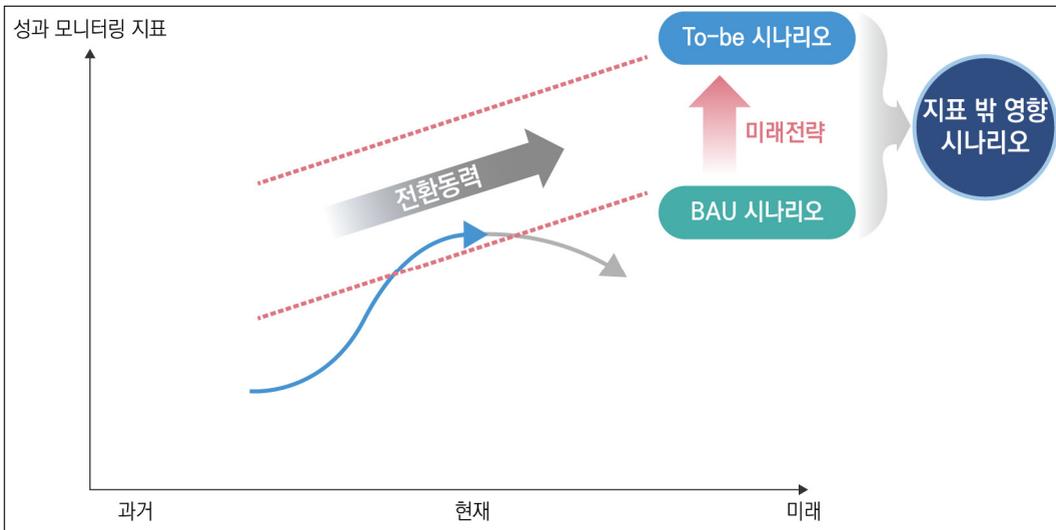
Part 1과 2는 특정 산업 및 특정 부문의 순환경제 전환에 따르는 영향을 분석하였으므로 본 연구의 결과가 국내 순환경제 전환의 영향 전부를 제시할 수는 없으나, 순환경제 전환에 따른 파급효과가 클 것으로 예상하는 산업 및 부문에 대한 중장기적인 영향 분석을 최초로 시도한 데에 의의가 있다. 또한 본 연구는 기존에 정립되지 않았던 순환경제의 경제·환경·무역부문 영향분석 방법론을 제시하였으며, 향후 연구에서는 이에 기반하여 영향분석 영역을 확장할 수 있을 것으로 기대한다.



[그림 1-1] 순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향 연구 분석 틀

2 미래 시나리오 구성

순환경제 미래 시나리오는 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 순환경제 성과 모니터링 지표에 기반한 순환경제 전환 ‘수준’을 BAU(Business As Usual)와 이상적인 시나리오(아래 그림에서 to-be 시나리오)로 구분할 수 있다. 둘째, 이상적인 시나리오를 가능하게 하는 미래전략으로 구성된 ‘미래전략 시나리오’가 실제 산업과 연결되어있으며, 셋째, 미래전략 시나리오를 적용한 결과 모니터링 지표가 나타내지 못하는 다양한 환경·경제·사회 부문에서 변화를 보여주는 ‘영향 시나리오’가 도출되었다.



[그림 1-2] 순환경제 전환 시나리오 개념도

Part 1에서는 국내 순환경제 추진요인(취약영역 및 정책환경) 분석 결과에 기반하여 순환경제 전환 주요 산업군 6개를 도출하였고 이들을 중심으로 2050 순환경제 전환에 따른 (1) 지표 기반 시나리오, (2) 미래전략 시나리오, (3) 지표 밖 영향 시나리오를 분석하였다. 첫 번째, 순환경제 전환 수준을 예측하는 성과 모니터링 지표 중심의 시나리오는 6개 주요 산업이 순환경제 전략을 도입했을 때에 현재 수준 대비 어느 정도 수준의 물질순환성과 자원생산성의 변화를 기대할 수 있는지의 최대치를 알려주었다. 두 번째, 미래전략 시나리오는 다양한 산업계 순환경제 전략 중에서 주요 산업군 6개에 어떠한

전략을 적용할 수 있는지의 선택지를 제공하였다. 세 번째, 지표 밖 미래영향 시나리오는 6개 주요 산업에 미래전략을 적용하여 해당 산업의 순환경제 전환이 성공적으로 이루어졌을 때에 우리나라 경제에 미치는 영향을 예측한 내용을 담았다.

Part 2에서는 상기 산업군 중에 플라스틱 산업에 집중하여 플라스틱 순환경제 전환에 따른 미래 환경영향을 분석하였다. 환경영향 분석은 (1) 지표 기반 시나리오는 『K-순환경제 이행계획』의 플라스틱 물질순환성 목표치를 참고하였으며 플라스틱 전과정 물질흐름분석 결과에 기반하여 도출하였다. (2) 미래전략 시나리오 중 플라스틱 물질순환은 재생원료 사용 및 관련 혁신에 해당하는 부문으로, BAU는 플라스틱 매립, 소각, 재활용(기계적 재활용), 기존의 화학물질 생산공정 시나리오이며, to-be 시나리오는 플라스틱 폐기물로부터 재생원료를 생산하는 시나리오로 설정하였다. 이때 재생원료 생산에 적용 가능한 미래기술 중 현재 공정 정보 및 물질 인벤토리 정보를 문헌에서 확보 가능한 화학적 재활용 기술을 적용하여 분석하였다. (3) 지표 밖 영향 시나리오는 플라스틱 폐기물로 재생원료를 생산할 때에 다양한 환경요소에 미치는 영향을 예측한 내용을 담았다.

영향 분석 방법에 따라 분석 대상이 산업 단위, 제품 단위, 기술 단위, 공정 단위 등으로 상이하여 동일한 분석범위 안에서 경제·환경·무역부문을 통합한 영향 시나리오를 도출하지 못한 점은 향후 연구에서 보완하여야 할 부분이다.

제3절 용어와 정의

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

본 연구에서 사용하는 주요 용어와 그 정의를 [표 1-1]에 정리하였다. 별도의 용어 정의가 포함되어있는 제7장의 내용과 수식에 사용된 변수 및 지표는 여기서 제외하였다.

[표 1-1] 본 보고서에 사용한 전문용어의 정의

용어	정의
가스화 (gasification)	유기물을 수증기와 함께 고온으로 가열, 분해하여 가스를 생성하는 반응
가용매분해 (solvolysis)	용매와 (플라스틱) 물질 간의 화학반응을 통해 화학결합을 끊어 물질을 분해하는 반응
기계적재활용 (mechanical recycling)	폐플라스틱을 파쇄, 세척, 선별, 혼합 등의 물리적인 처리 과정을 통하여 재생 플라스틱을 생산하는 방법
녹색투자 (green investing)	환경적 편익이 발생하는 산업에의 투자
물질 발자국 (material footprint)	한 국가의 소비에 필요한 물질(바이오매스, 화석연료, 금속광물, 비금속광물) 추출 양
물질흐름분석 (material flow analysis)	정의된 시스템에서 물질의 투입/배출/저장 양을 분석하는 방법
바이오매스 (biomass)	에너지 또는 화학연료 생산에 활용될 수 있는 생물자원
바이오플라스틱 (bioplastic)	바이오매스를 원료로 만들어지는 플라스틱
부가가치유발효과	재화, 서비스 최종 수요 발생이 전 산업에 직간접적으로 부가가치를 생성하는 효과
산업연관분석 (Input-output analysis)	산업연관표를 활용하여 국가 단위에서 재화, 서비스가 산업 간에 또는 최종 수요 간에 분배되는 내역을 분석하는 방법
산업연관표 (input-output table)	1년간 국가 내에서 발생하는 재화 및 서비스의 생산·처분에 관한 모든 거래를 나타낸 표
생산유발효과	재화, 서비스 최종 수요 발생이 전 산업의 생산량에 미치는 영향

용어	정의
수지 (plastic in primary forms)	플라스틱 고분자 일차제품
순환 공급망 (circular supply chain)	제품이 재활용 또는 재사용되는 데에 적합하도록 원료-생산-사용-폐기 과정이 유기적으로 연결된 공급망
에코디자인 (eco-design)	제품 생산-사용-폐기 전 과정에서 발생 가능한 환경 피해를 줄이고 내구성을 높이는 등 환경 친화 디자인
열분해 (pyrolysis)	산소가 없는 환경에서 고온으로 가열하여 화학결합을 끊어 물질을 분해하는 반응
용해 (dissolution)	용매에 (플라스틱) 물질을 녹이는 것
재생자원 (recycled material)	폐기물 재활용을 통해 생산과정에 재투입 되는 물질
재제조 (remanufacturing)	기존 제품 또는 부품을 분해→세척→검사→수리→조립하여 신제품과 유사한 성능을 내는 제품 생산방법
전과정평가 (life cycle assessment)	제품, 프로세스, 서비스의 전 주기에서 발생하는 환경영향 평가 방법
중간물질 (Intermediate forms of plastics)	시트, 필름, 판, 섬유 등의 형태로 1차 가공된 수지
중간재 (Intermediate manufactured plastic goods)	플라스틱 부품, 직물 등 최종 소비재를 생산하기 위하여 투입되는 플라스틱 소재 제품
첨가물 (additives used in plastics)	플라스틱 수지에 내열성, 가소성 등 물성 변경을 위해 추가되는 물질
최종재 (Final manufactured plastics goods)	플라스틱 고분자를 이용하여 최종 소비재 형태로 생산된 상품
취업유발효과	재화, 서비스 최종 수요 발생이 전 산업의 취업자 수에 미치는 영향
탄소국경조정제도 (carbon border adjustment mechanism)	국가간 탄소가격의 차이에 해당하는 부분에 대해서 비용을 부과하는 제도
화학적재활용 (chemical recycling)	폐플라스틱을 화학적으로 분해하거나 녹여서 재생 원료를 생산하는 방법
ABS (acrylonitrile butadiene styrene)	스타이렌, 아크릴로타이트릴, 부타다이엔으로 이루어진 수지
BAU 시나리오 (Business As Usual scenario)	기준안 시나리오: 조정 없이 지금 현재 조건을 유지하는 경우 예상되는 시나리오

용어	정의
EVA (ethylene vinyl acetate)	에틸렌초산비닐
G7 (group of seven)	선진 7개국 (캐나다, 프랑스, 독일, 이탈리아, 일본, 영국, 미국)
HS 코드 (Harmonized System code)	국제통일상품분류체계: 무역 거래에서 상품의 종류를 숫자 코드로 분류한 코드
PC (polycarbonate)	폴리카보네이트
PE/LDPE/LLDPE/HDPE (Polyethylene/low-density PE/linear-low-density PE/high-density PE)	폴리에틸렌
PET (Polyethylene terephthalate)	폴리에틸렌테레프탈레이트
PM _{2.5}	초미세먼지: 입자 크기가 2.5 μm 이하인 먼지
PP (polypropylene)	폴리프로필렌
PS/EPS (polystyrene/expended PS)	폴리스티렌(스티렌 수지)
PVC (polyvinyl chloride)	폴리염화비닐(염화비닐 수지)
USEEIO (United States Environmentally-Extended Input-Oupt)	미국 환경산업연관표: 각 산업의 에너지 및 자원 이용량 및 환경데이터를 산업연관표 형태로 정리한 테이블

제 1 부

산업계의 순환경제 영향

제2장 국내 순환경제 수준 및 전환 동력 진단

제3장 산업계 순환경제 전환 전략

제4장 순환경제 산업 미래영향 시나리오

제5장 소결

제2장

국내 순환경제 수준 및 전환 동력 진단

제1절 국내 순환경제 수준 진단

제2절 순환경제 전환 주요 산업 정의

제3절 순환경제 성과지표 기반 2050 시나리오

제 1절 국내 순환경제 수준 진단

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

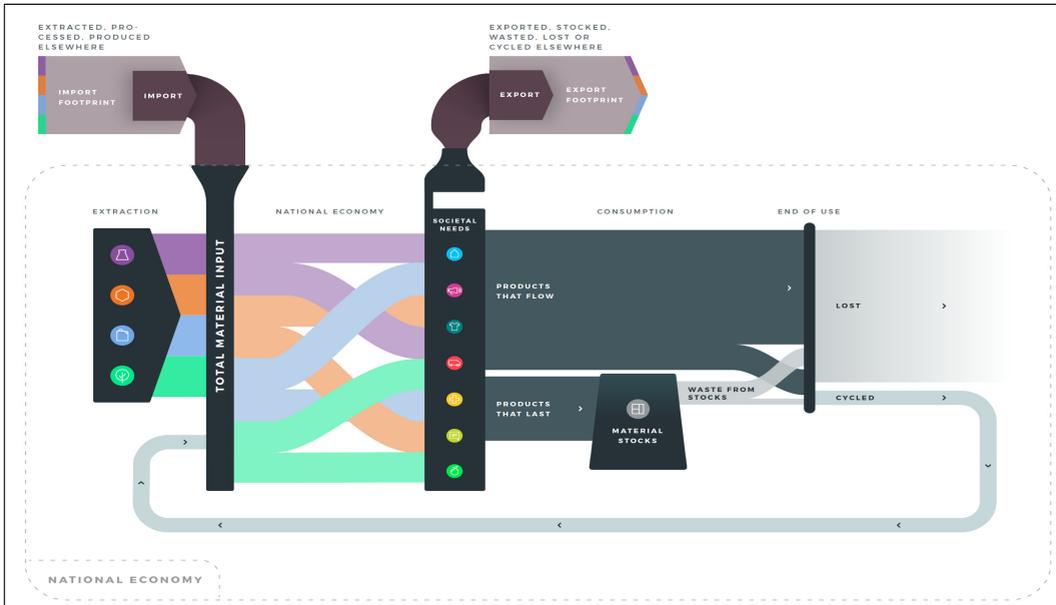
본 절에서는 순환경제 추진을 위해 한국의 전반적인 자원 소비 현황을 진단하고자 한다. 먼저, 한국의 자원 소비 경향 진단에 사용하는 주요 지표를 살펴보고, 사회경제대사의 개념과 경제 기반 물질흐름분석 프레임워크에 대해 알아보았다. 이에 기반하여 지난 50년간(1970-2019년) 한국의 자원 소비 경향과 2019년 자원 소비 현황을 분석한 결과를 정리하였다.

1 순환경제 진단 주요 지표

순환경제는 생산, 소비, 폐기물 관리 등 경제 전반에서 자원 효율을 높이하고자 하는 노력으로, 물질발자국, 자원생산성과 같은 국가 수준의 자원 효율성 지표 외에도 부문별 다양한 지표를 모니터링에 활용할 수 있다. 유럽연합의 순환경제 모니터링 프레임워크(European Commission, 2018)는 순환경제의 다양한 측면을 평가하되 자료의 가용성을 고려하여 1) 생산 및 소비, 2) 폐기물 관리, 3) 재생자원, 4) 경쟁력 및 혁신의 4가지 부문에 대해 10가지 지표를 제시하여 활용하였다. 스위스에서는 최근 순환경제의 환경적인 가치를 평가하기 위하여 전과정 평가에 기반한 REV(retained environmental value) 지표를 제안한 바 있으며, 이 지표는 물질과 제품을 생산하는 전 과정에서 발생하는 환경영향을 보여준다(Bocken et al., 2021). De Wilt et al.(2020)의 보고서에서는 2020년 네덜란드의 순환성(circularity metric)²⁾을 24.5%로 발표하였는데, 여기서 순환성이란 순환경제를 진단하는 단일지표로서 “매년 국가에 투입되는 총 물질량 중 재사용된 양”³⁾을 의미하며, [그림 2-1]에서 총 물질 투입(total material input)에 기여하는 광물, 광석, 화석연료, 바이오매스 채굴량(extraction)을 2050년까지 0으로 만드는 것을 목표로 하고 있다.

2) 네덜란드는 2050년까지 순환성 100% 달성을 목표로 설정한 바 있으며 De Wilt et al.(2020)에서는 70%까지 달성 가능할 것으로 전망하였음.

3) 보고서 내용을 직접 인용하면 “measuring the share of cycled materials as part of the total material inputs into a national economy every year”



[그림 2-1] 국가 단위 물질흐름도

(출처: De Wilt et al., (2020), p. 14)

우리나라는 2022년도에 개정하여 시행 중인「자원순환기본법 시행규칙」에서 자원순환 목표를 나타내는 대표 지표로 최종처분율, 순환이용률, 에너지회수율을 정의하였고, 각각을 산정하는 식과 산정기준은 아래와 같다⁴⁾. 「자원순환기본법」에서는 『제1차 자원순환 기본계획(2018~2027년)』의 수립 근거를 규정하였으며, 본 기본계획 안에서도 순환경제 추진을 위한 기반을 마련하였으나, 모니터링을 위한 주요 지표는 폐기물 원단위 발생량, 최종처분율, 순환이용률, 에너지회수율 등 폐기 단계에 국한되어 있는 상황이다.

$$(식 2-1) \text{ 최종처분률}(\%) = \frac{\text{최종처분량(톤)}}{\text{폐기물 발생량(톤)} + \text{순환자원인정량(톤)}} \times 100$$

$$(식 2-2) \text{ 순환이용률}(\%) = \frac{\text{실질재활용량(톤)} + \text{순환자원인정량(톤)}}{\text{폐기물 발생량(톤)} + \text{순환자원인정량(톤)}} \times 100$$

$$(식 2-3) \text{ 에너지회수율}(\%) = \frac{\text{에너지화된 폐기물량(톤)}}{\text{에너지화가용 폐기물 발생량(톤)}} \times 100$$

4) 「자원순환기본법 시행규칙」의 별표1(자원순환 목표의 산정방법)을 발췌, 정리함.

- 최종처분량: 중간처리과정 또는 재활용 과정 없이 바로 최종처분되는 폐기물과 중간처리과정에서 발생하는 잔재물의 최종처분량을 합한 양
- 폐기물 발생량: 발생한 폐기물 총량 중 중간처리 과정에서 발생한 잔재물 양을 제외한 양(단, 중간 처리과정에서 추가 투입된 물질이 폐기물이 된 경우 추가 발생량으로 더해짐)
- 순환자원 인정량: 유상거래가 가능하고 방치될 우려가 없는 순환자원 중 재활용 과정을 거치지 않은 양
- 실질재활용량: 재활용 양에서 전처리 또는 재활용 과정에서 발생하는 잔재물 양을 제외한 양
- 에너지화된 폐기물량: 에너지를 직접 회수할 목적으로 직접 투입하거나, 에너지를 회수할 수 있는 상태로 만든 폐기물의 양(단, 에너지를 회수할 수 있는 상태로 만드는 과정에서 발생한 잔재물 양 제외)
- 에너지화 가용폐기물 발생량: 가연성 폐기물 발생량
- 최종 처분량: 중간처리 과정 또는 재활용과정 없이 바로 최종 처분한 폐기물과 중간처리 과정에서 발생한 잔재물의 최종 처분량을 합한 양
- 폐기물발생량: 발생한 폐기물 총량 중 중간처리 과정에서 발생한 잔재물 양을 제외한 양(단, 중간처리 과정에서 추가 투입한 물질이 폐기물이 된 경우 추가 발생량으로 더해짐)
- 순환자원 인정량: 유상거래가 가능하고 방치될 우려가 없는 순환자원 중 재활용 과정을 거치지 않은 양
- 실질재활용량: 재활용 양에서 전처리 또는 재활용과정에서 발생한 잔재물 양을 제외한 양
- 에너지화된 폐기물량: 에너지를 직접 회수할 목적으로 직접 투입하거나, 에너지를 회수할 수 있는 상태로 만든 폐기물의 양(단, 에너지를 회수할 수 있는 상태로 만드는 과정에서 발생한 잔재물 양 제외)
- 에너지화 가용폐기물 발생량: 가연성 폐기물 발생량

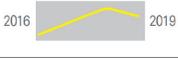
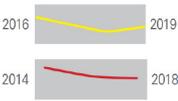
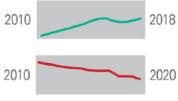
여기에서 “실질재활용량”을 어떻게 정의하느냐에 따라 순환이용률에 편차가 발생한다. ‘실질적으로 물질 루프에 재투입하는’ 양이 아닌 폐기물 통계수치에서 재활용으로 분리수거된 양으로 정의하는 경우는 과다 산정될 가능성이 있다. 「자원순환기본법 시행규칙」에서 정의하는 실질재활용량 또한 ‘활용’ 여부에 따라 구분하기보다는, 전체 재활용 수거량에서 잔재물을 제외한 양으로 ‘폐기물 처리’ 단계에서 산정하도록 되어 있다. 그 결과, 『제1차 자원순환 기본계획(2018~2027년)』에 따르면 2018년 순환이용률이 70.3%로 나타나, 실질적인 물질순환성을 보여주기에 무리가 있다. 일본의 자원순환 물질흐름 지표에서는 순환이용률을 자원이 투입되는 지점(입구)과 폐기물이 발생하는 지점(출구)에서 별도로 정의하며, 입구에서는 순환이용량/(순환이용량 + 천연자원 등 투입량), 출구에서는 순환이용량/(폐기물 등 발생량)으로 산정한다(김은아·민보경, 2020). 유럽연합의 순환경제 모니터링 지표에는 2차 원재료 사용률(재활용한 물질이 원료로 사용되는 비율)을 포함하였는데 이는 일본의 입구 지점 순환이용률과 유사한 개념이다.

조지혜 외(2020)에서는 기존 유관 지표와 데이터 가용성을 고려하여, 폐기물 처리의 사후 관점에서 나아가 생산 및 소비 단계를 포함한 전과정 측면에서 순환경제를 모니터링할 수 있는 지표를 제안하고, 일부 지표의 추이를 분석하고 평가하였다[표 2-1]. 이 중 재생자원 이용률을 유럽연합에서 사용하는 방법론으로 추정한 결과, 2018년 기준 8.8%⁵⁾로 나타났다. 이는 유럽 28개국의 2018년 순환율(circular material use rate)인 12.2%보다 낮은 수준이다(Eurostat, 2022b). 더 정확한 추정을 하려면 제조 단계에서 실제로 이용된 재생자원 양에 대한 데이터가 필요하다.

[표 2-1] 순환경제 모니터링 단기 지표(안)을 활용한 추이 분석 및 진단(조지혜 외, 2020)

단계	지표명	진단	추이
생산 및 소비	자원생산성	국내 경제성장과 자원사용의 탈동조화 정도를 평가하기 위함. 2012-2017년 동안 거의 변화가 없었으나, 이후 2018년 자원생산성 증가	
	재생자원 이용률	생산단계에 재투입되는 재생자원의 기여율을 평가하기 위함. EU에서 사용 중인 대체 방법론을 활용하여 산정. 향후 실질적인 통계자료 구축 필요	

5) 2018년 ‘재생자원 이용률’ 8.8%는 조지혜 외(2020)의 연구보고서 내용에서 가져온 수치이며, 이와 비슷한 개념으로 본 연구에서 성과지표 기반 시나리오 도출에 활용한 ‘자원순환성’은 시계열 데이터가 존재하는 지승민 외(2021)의 결과를 활용함.

단계	지표명	진단	추이
	폐기물 발생	DMC 대비 폐기물 발생량은 감소하다가 2018년 다시 증가 1인당 총 폐기물, 생활폐기물, 음식물폐기물, 의료폐기물 발생량 증가추세 매출액당 사업장 폐기물 발생량은 감소 추세	총 폐기물 발생량/DMC 
			생활폐기물 발생량/총인구 
			사업장폐기물 발생량/매출액 
	자원순환제품의 국가표준 건수	우수재활용(GR)+재제조제품 대상 국가표준은 해당 제품의 재활용 및 재제조 시장을 형성하는 기반이 됨 GR 국가표준 건수는 다양한 품목을 대상으로 지속적인 증가 추세에 있으나, 재제조제품의 경우 대부분 자동차부품 및 토너 카트리지로 유지되고 있어 확대 필요	우수재활용제품 (GRC) 국가표준 건수 
			재제조제품 국가표준 건수 
자원순환제품의 조달청 등록건수 및 매출액	자원순환제품 조달청 등록건수는 계속 증가하고 있으며, 매출액 역시 증가 추세	자원순환제품 조달청 등록건수 	
		자원순환제품 조달청 매출액 	
지속가능소비 실천행동지수	자원 재활용의 경우, 정책적 유인과 지원이 지속적으로 이루어지는 대표적인 영역인데 반해, 2015년부터 소비자의 실천행동점수가 하락하고 있어 소비자 행동을 유도하기 위한 정책 설계 필요		
관리 및 재생	순환이용률	실질재활용량은 증가하였으나, 폐기물 발생량 증가로 인해 순환이용률은 2019년 감소	
	최종처분량	폐기물 최종처분량이 2019년 다시 증가하고 있으며, 시도별 최종처분율 역시 높음 최종처분시설(민간)의 잔여 가용용량은 2018년 기준 27.4%로 지속적으로 감소	
전 영역	순환경제 부문 R&D 예산 지출액	전체 국가 R&D 대비 순환경제 부문 연구지출 비중이 2014년 이후 감소하고 있으며, 특히 출연 수는 증가하다가 2018년에는 소폭 감소	
	순환경제 부문 부가가치(매출액)	재생용 재료 수집·판매업 및 수리업 중심으로 매출액은 2013년 이후 지속적으로 증가	
	순환경제 부문 고용자 수	종사자 수는 증가 추세에 있다가 2016년 이후 소폭 감소 전체 산업 대비 순환경제 부문 피고용자 비율은 지속적으로 감소	
	폐기물 부문 온실가스 배출량	폐기물 부문 온실가스 배출량은 증가 추세임	

상기 국내외 순환경제 모니터링 지표 현황분석 결과에 따르면 순환경제 현황을 보여주는 핵심지표로 물질 투입 단계에서 물질순환성이 공통적으로 존재하며 이는 네덜란드의 '순환성(circularity metric)' 개념과 일치하며 조지혜 외(2020)의 '재생자원 이용률', 유럽연합의 '2차 원재료 사용률', 일본의 '자원이 투입되는 지점에서 순환이용률'과 일맥상통한다. 따라서 본 연구는 '물질순환성'(식 2-4)을 순환경제를 진단하는 핵심 지표로 선정하여 미래 시나리오를 구성하는 데에 활용하였다.

또한 물질 투입 단계에서의 재생원료 사용량만큼 중요하게 고려할 점은 고품질의 재생원료가 공급 가능한지의 여부이며, 따라서 자원순환성뿐만 아니라 부가가치를 높이는 방향성 또한 반영할 수 있어야 한다. 이는 순환경제로의 전환을 이끄는 중요한 요인인 경제성장 동력으로서의 성과를 나타내는 지표이다. 재생원료의 고부가가치화 정도를 보여주기 위해서는 재생원료량 대비 창출된 부가가치를 산정해야 하나, 이를 산정할 국가 단위의 통계자료가 존재하지 않기 때문에 기존의 성과지표 중 이와 가장 가까운 지표를 선정하는 것이 효과적일 수 있다. 자원생산성(식 2-5)은 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」에 기반한 『제1차 자원순환 기본계획(2011~2015년)』에 순환경제 전환 정도를 나타내는 보조지표로 포함이 되었으나 현행 자원순환 기본계획에서는 누락되었다. 일본에서는 국내총생산(GDP)/(천연자원 등 투입량)을 자원순환 주요 지표에 포함하였으며 이는 『제1차 자원순환 기본계획(2011~2015년)』에 보조지표로 정의한 자원생산성(국내총생산(GDP)/국내자원소비량(DMC))과 유사한 개념이다. 자원생산성은 투입된 물질 자원이 경제적인 가치 창출, 혹은 GDP 상승에 얼마나 효율적으로 사용되었는지를 반영한다. 고부가가치의 재생원료 투입이 늘어날수록 자원생산성이 증가한다는 측면에서 순환경제의 경제적인 성과를 반영하는 지표로 활용할 수 있다. 자원생산성은 재생원료의 경제적 가치 이외에도 생산 공정상의 효율성 향상 등과 같이 다양한 여건이 이에 영향을 줄 수 있어서 경제성장 성과를 직접적으로 보여주지 못하는 한계가 있으나, 제조 단계에서 부가가치 향상 정도를 간접적으로나마 반영할 수 있다. 따라서 자원생산성은 현재 존재하는 순환경제 관련 통계자료에서 얻을 수 있는 최적의 지표로 볼 수 있다. 조지혜 외(2020)의 연구에서도 순환경제를 진단하는 지표로서 자원생산성[표 2-1]을 주요 모니터링 지표에 포함하였으며, 본 연구에서도 미래 시나리오를 도출하는 데에 활용하였다.

$$(식 2-4) \text{ 물질순환성}(\%) = \text{RMI/TMI}$$

$$(식 2-5) \text{ 자원생산성}(\$/\text{kg}) = \text{GDP/DMC}$$

- RMI: 순환자원량(recycled material input)
- TMI: 총물질투입량(total material input) = DMC + RMI
- DMC: 국내자원소비량(domestic material consumption) = 국내사용 채취량 + (수입-수출)자원량
- GDP: 국내총생산(2010 ppp)

위와 같은 내용을 고려하여 순환경제 전환 미래 시나리오를 구성할 지표로 아래와 같이 (1) 물질순환성과 (2) 자원생산성을 정의하였다. 현행 「자원순환기본법」에서 정의한 주요 지표가 폐기물 통계에 기반한 것과 달리, 아래 지표들은 생산 단계에서 투입 부분, 즉 선형경제 모델의 시작 부분에 해당하는 단계에서 물질순환성을 정의하였다.

물질순환성과 자원생산성 이외에도 순환경제와 연계된 중요한 성과지표들이 존재하며 온실가스 감축 효과, 자원공급 안정 효과 등을 고려할 필요가 있으나 본 연구는 핵심 지표를 활용하여 명료한 미래비전을 제시하는 데에 중점을 두었다. 그러나 본 연구가 선정한 핵심 지표는 기타 주요 성과지표와 상호관련성이 존재하므로 해당 보조지표가 나타내는 성과를 일부 반영할 수 있다. 일례로 미국 환경청(US environment protection agency)에서 사용하는 Waste Reduction Model(WARM)에 따르면 폐기물을 재사용 또는 재활용할 때 온실가스 감축이 가능한 것으로 설정되었으며, 임진홍과 장용철(2021)은 이 모델을 사용하여 플라스틱 생산에 투입된 재사용 원료 비율에 따라 결정되는 온실가스 감축 시나리오를 도출하였다. 이처럼 자원순환성 향상은 온실가스 감축 효과를 추정하는 프락시(proxy)로 활용할 수 있다. 한편, 자원공급 안정성은 다양한 대내외 여건과 연결되기 때문에 순환경제와 1:1 연계가 될 만한 지표를 찾기는 어려우나, 생산 단계에서 국내 생산된 재생원료 사용 비중이 높으면 대외적인 여건에 따른 공급 불안정성을 완화하므로 자원순환성이나 재생자원 이용률이 자원공급 안정성 수준을 일부 반영할 수 있다.

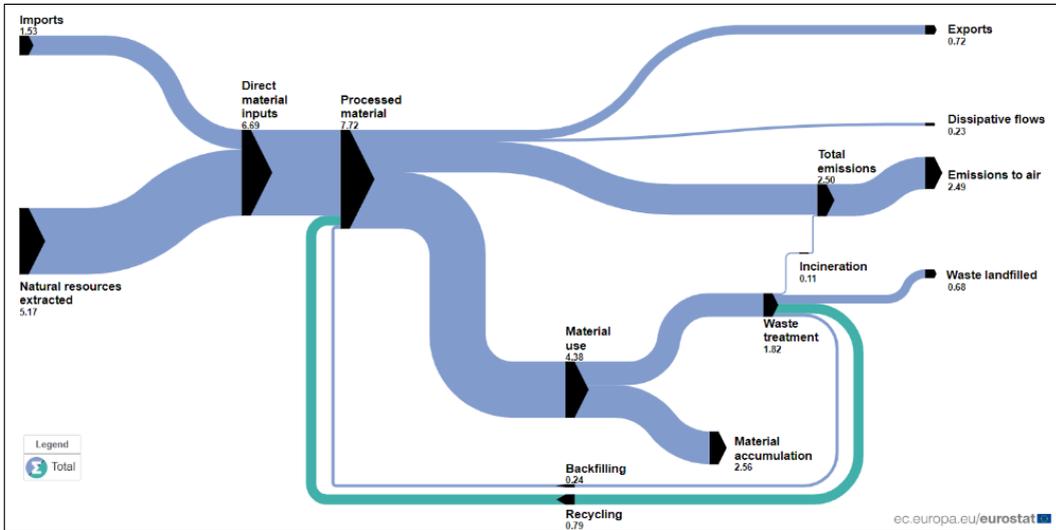
2 국내 순환경제 수준 진단

가. 한국의 자원 소비현황 진단

1) 사회경제대사와 유럽 경제 기반 물질흐름분석 프레임워크

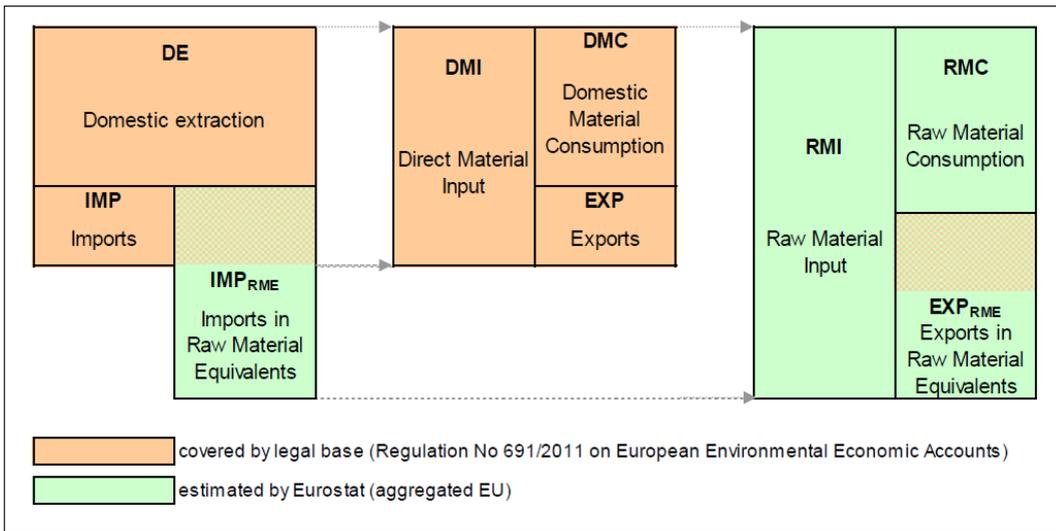
사회경제대사(socio-economic metabolism)는 사회·경제 시스템이 바이오매스, 화석연료, 금속광물 등의 자원을 자연으로부터 추출하여 제품과 서비스를 생산·소비하고, 이 과정에서 폐기물과 오염물을 배출하는 일련의 대사(metabolism) 과정을 분석하는 방법이다. 사회경제대사는 물질흐름분석(material flow analysis)의 한 형태로, 특히 도시, 국가, 글로벌 경제와 같은 거시적인 시스템의 자원 소비 규모와 패턴을 파악하기 위한 목적으로 활용한다. 예를 들어 [그림 2-2]는 유럽연합의 2020년 사회경제대사를 생키 다이어그램(Sankey diagram) 형태로 제시한 것으로, 이를 통해 유럽 경제로 유입되고 유출되는 자원의 흐름과 경제계에 누적되는 재고, 자원 소비, 오염물 및 폐기물 배출, 재활용의 수준을 효과적으로 파악할 수 있다. 표준화된 사회경제대사 분석틀을 활용한다면, 자원생산성, 탈동조화 수준과 같은 지표를 정량화하고, 이 지표를 통해 자원 소비 경향을 시간적, 공간적으로 비교할 수 있다.

유럽에서는 녹색성장, 순환경제, 자원효율 관련 정책 의사결정을 지원하는 방법으로 경제기반 물질흐름분석(economy-wide material flow analysis, EW-MFA)이라고 부르는 국가 수준의 사회경제대사 분석을 활용하고 있다. EW-MFA는 환경·경제 통합 계정의 한 부분으로 Regulation No. 691/2011를 통해 일부 데이터 수집이 이루어진다. EW-MFA 프레임워크는 기본적으로 국내 채굴(domestic extraction, DE) 및 수입(Import, IMP)을 통해 경제계로 유입되는 흐름과 수출(export, EXP) 및 국내 배출(domestic processed output, DPO)을 통해 경제계에서 유출되는 흐름을 포함하며, 이 기본 흐름으로부터 도출한 지표와 밸런싱 요소로 구성된다(Eurostat, 2018)[그림 2-3].



[그림 2-2] 유럽연합(European Union)의 2020년 물질흐름(Gt/yr)

(출처: Eurostat, 2022a).



[그림 2-3] 경제 기반 물질흐름분석 프레임워크 및 지표

(출처: Eurostat, 2018).

국내 채굴(domestic extraction, DE)은 국가 시스템경계 내 자연환경에서 채취, 수확, 채굴하여 생산활동에 투입된 물질자원의 흐름을 말하며, 국내 배출(domestic processed outputs, DPO)은 국가 시스템경계 내에서 자연환경으로 배출하는 물질흐름을 의미한다. 이때 유입 흐름에서 다루는 물질자원은 크게 바이오매스, 금속광물, 비금속광물, 화석연료의 네 가지 대분류 항목으로 나뉘며, 수출입 제품은 주요 물질 구성에 따라 앞서 논의한 물질자원 항목으로 분류한다. 폐기물 및 배출물 흐름은 대기배출물(emissions to air), 수계배출물(emissions to water), 제품 사용 중 배출물(dissipative use of products), 누출(dissipative losses), 그리고 처리 폐기물(waste disposal)로 구분한다.

이 기본 흐름으로부터 추가적인 지표들을 계산할 수 있다. 직접 자원 투입(direct material input, DMI)은 국내에서 채취, 수확, 채굴하거나 해외에서 수입하여 경제적인 가치를 가지고 국내 생산 시스템으로 투입되는 모든 물질 자원으로, 국내 채굴(DE)과 수입(IMP)의 합으로 계산한다. 국내 자원 소비(domestic material consumption, DMC)는 국내 소비자가 사용한 물질 자원으로 국내 경제에 투입된 자원(DMI)에서 수출(EXP) 흐름을 제외한 것이다. 경제계로 유입되었으나 아직 유출되지 않은 물질은 건물, 인프라, 내구재, 가정용 제품 등 다양한 재고 형태로 경제계에 남아 매년 누적된다. 이 재고 증가분(net addition to stock, NAS)은 경제계의 물질적인 성장을 나타낸다. 이론적으로 NAS는 경제계 총유입과 유출의 차이로 계산할 수 있으나, 가용한 통계 자료로 실제로 측정한 경우는 드물다. 또한, 대상 경제계의 수출입 의존도를 파악하기 위해 물질 단위의 무역수지(physical trade balance, PTB) 지표를 활용하기도 하는데, 이는 보통 수입분에서 수출분을 뺀 순수입분으로 계산한다.

상기 수출입 흐름은 대상 국가 경계를 지나는 제품의 무게만 고려하고, 수출입 제품을 생산하기 위해 모든 공급망에서 일어나는 자원 소비와 이를 위한 채굴을 고려하지 않는다. 이렇게 되면 부존 자원이 많지 않아 수입에 의존해야 하는 국가가 수입을 통해 간접적으로 유발하는 자원 소비분은 고려하지 못하게 된다. 수출입 제품을 생산하기 위해 공급망을 따라 국내외에서 소비된 모든 물질 자원을 자원 채굴량으로 환산함으로써 소비 측면에서 유발된 총 자원 소비를 분석하는 방식을 “직간접 자원 채굴량을 고려한 물질흐름계정(material flow accounts in raw material equivalents, MFA-RME)”

이라고 한다. 예를 들어, 직간접 자원 채굴량을 고려한 수입(imports in RME) 혹은 수출(exports in RME)은 수입 혹은 수출 제품을 생산하기 위해 국외 공급망 전반에서 채굴하고 소비한 자원량을 의미한다. 마찬가지로 직간접 자원 채굴량을 고려한 투입(raw material inputs, RMI)은 경제계로 투입되는 제품을 생산하기 위해 국내외 공급망 전반에서 소비한 모든 물질 자원을 의미하며, DE와 IMP-RME의 합으로 계산한다. 직간접 자원 채굴량을 고려한 소비(raw material consumption, RMC)는 국내에서 소비된 최종제품을 생산하기 위해 국내외 공급망 전반에서 소비한 모든 물질 자원을 의미하며, RMI에서 EXP-RME를 제외한 것과 같다. 특히 각 제품군에 대한 RMC는 “물질 발자국(material footprint)”이라고도 불리며, 소비된 최종제품에 얼마나 많은 물질 소비와 채굴이 필요한지를 나타낸다. MFA-RME 지표는 Regulation 691/2011에 따른 법적 의무 보고사항에는 포함되어 있지 않지만, 유럽연합의 자원효율 이니셔티브와 유엔 지속가능발전목표(8.4와 12.2)에 포함되어 있다.

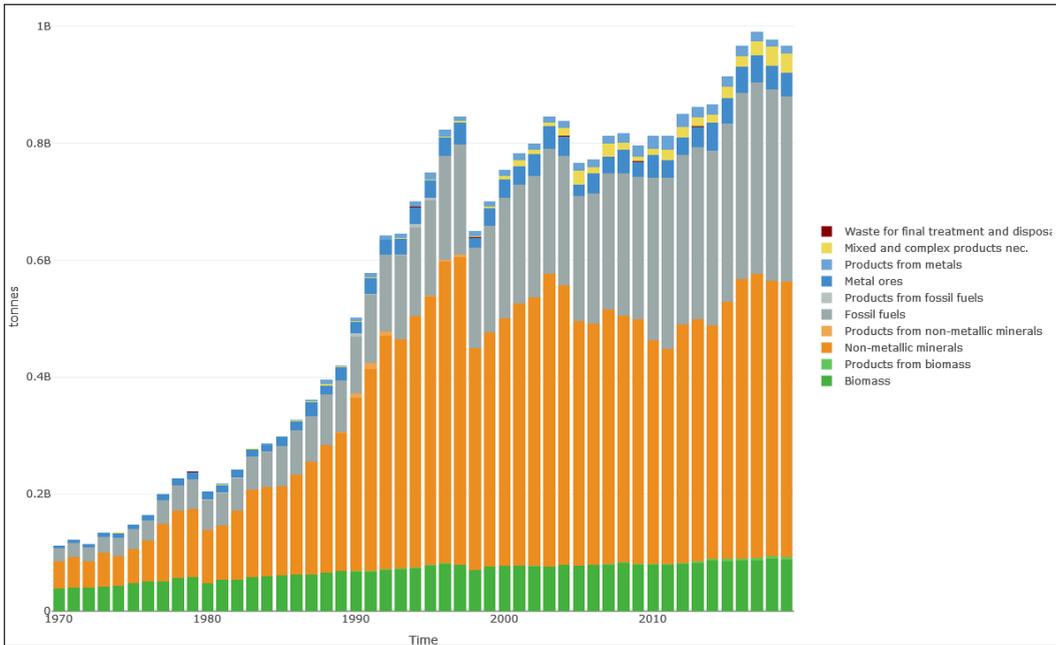
유럽 EW-MFA 프레임워크에서 정의하고 있지는 않지만 사회경제대사 분석으로부터 도출할 수 있고, 지속가능발전 정책 목표 및 모니터링에 활용되고 있는 지표로 자원생산성(resource productivity)이 있다. 지속가능발전을 위해서는 삶의 질과 웰빙은 높이고 이를 위한 경제성장은 추구하되, 이 과정에서 필요로 하는 물질적인 자원 소비는 가능한 최소화하고 자원 소비가 야기하는 부정적인 환경영향은 줄여나가야 한다(UNEP IRP, 2019). 자원 소비의 증가가 불가피하더라도, 자원 소비 증가율에 비해 경제성장이나 삶의 질 제고 속도가 더 높다면, 이는 자원 소비가 경제성장으로 부터 상대적 탈동조화(relative decoupling) 되는 것을 의미한다. 더 나아가 경제성장은 추구화되 부정적인 환경영향을 절대적으로 줄여나갈 수 있다면, 이는 절대적 탈동조화(absolute decoupling)를 의미한다. 자원 소비와 경제성장 간 관계를 정의하는 지표 중 하나가 자원생산성이다. 자원생산성은 주로 단위 자원 투입 당 GDP로 측정된다. 일본은 2003년 자원순환사회 기본계획(fundamental plan for establishing a sound material cycle society)을 수립하며 자원생산성, 순환율, 최종처분량 지표를 도입하였는데, 이때 자원생산성 측정에 DMI 지표를 사용하였다(UNEP IRP, 2018). 반면 유럽에서는 자원생산성 계산에 DMC 지표를 사용한다. 한편, RMC 지표를 사용하게 되면 수입 제품을 생산하기 위해 해외에서 소비된 자원을 포함하여 경제에 직간접으로 투입한 모든 자원 소비를 고려하여 자원생산성을 나타낼 수 있다.

2) 한국의 사회경제대사 분석

유엔환경계획(UNEP)의 국제자원패널(International Resource Panel)의 『글로벌 물질흐름 데이터베이스(Global Material Flow Database)』는 전 세계 200여 개국의 50년간(1970~2019년) 사회경제대사 추정 결과를 제공한다(UNEP IRP, 2022). 각국의 개방된 데이터만을 활용하여 물질흐름을 정확히 추정하는 데에는 한계가 있으나, 다 지역 산업연관모형(Multi-regional input-output model)에 기반하여 RME 수출입 흐름과 물질발자국을 분석한 점은 강점으로 보인다. 글로벌 공급망 전반에서 실제 생산국의 자원 소비를 반영하였기 때문에 국가 간 물질흐름을 일관되게 비교할 수 있다. 또한, WU Vienna(2022)의 『물질흐름분석 포털(The Material Flow Analysis Portal)』에서는 데이터를 다양한 방식으로 시각화하여 각국의 물질흐름 결과를 보여준다. 따라서 본 절에서는 『The Material Flow Analysis Portal』에서 제공하는 데이터를 활용하여 한국의 사회경제대사가 지난 50년간 어떻게 변해왔는지 분석하고, 2019년 한국의 자원 생산성 등 EW-MFA 지표가 다른 주요국과 비교하여 어떤 수준인지 분석하고자 한다.

한국의 국내 자원 소비(DMC)는 1970년 112백만톤에서 2019년 920백만톤으로 지난 50년간 8배 이상 증가하였는데, 특히 비금속광물과 화석연료 사용의 증가가 두드러진다(그림 2-4). 국내 자원 소비(DMC)는 1997년 경제위기 직후 감소하였다가 6년 사이 이전 수준을 회복하였으며, 2005년 이후 꾸준한 증가세를 보이다가 2017년-2019년 3년간은 감소하였다. 국내 채굴(DE)은 1970년 98백만톤에서 2019년 526백만톤으로 증가하였는데, 2019년 채굴량 기준으로 거의 대부분(90.7%)은 건설용 골재와 석회석이고, 식량작물과 목초지 바이오매스와 같은 바이오매스가 8.3%, 금속광물과 화석연료가 나머지 1%를 차지한다(그림 2-5). 국내 채굴(DE)과 국내 자원 소비(DMC)를 비교해 보면, DE/DMC 비율이 같은 기간 88%에서 57%로 감소하며 자원 소비의 해외 의존도가 증가하였다. 이는 같은 기간 동안 순수입(PTB)이 13백만톤에서 394백만톤으로 28배 이상 증가한 것을 보아서도 알 수 있으며, 화석연료와 금속광물의 경우 거의 전량 수입에 의존하고 있다. 한편, 한국 소비에 의한 총 물질 요구량(RMC), 혹은 물질발자국(MF)은 1970년 226백만톤에서 2019년 1,128백만톤으로 약 5배 증가하였는데, RMC의 변화 양상은 DMC의 변화 양상과 다르게 나타난다(그림 2-6). RMC의 경우 1997-1998년, 2007-2009년을 제외하고 대상 기간 동안 전반적으로 증가세를 보였으

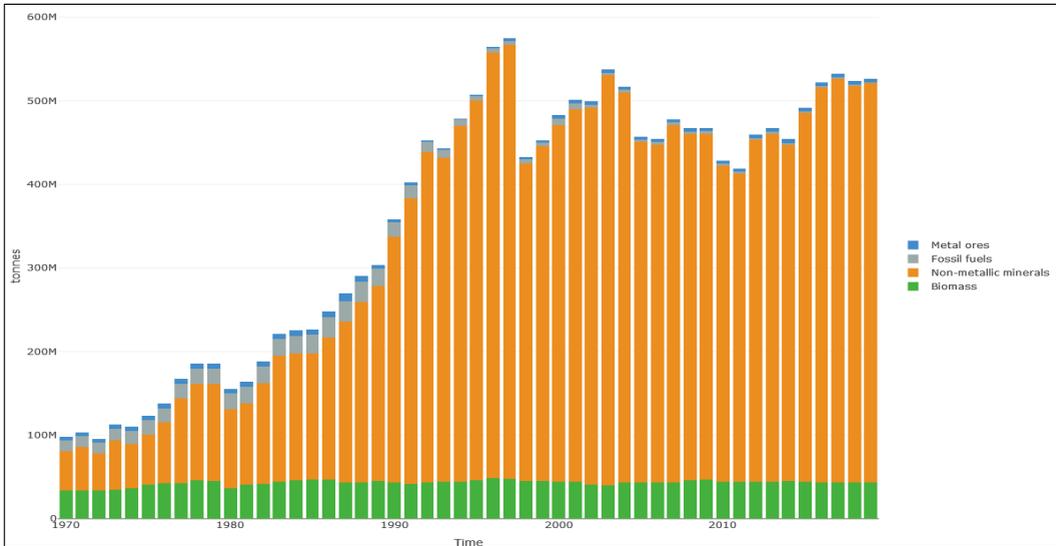
나, 최근 10년간은 2007년 최고치를 넘지 못하고 등락을 보이고 있다. 또한, 물질발자국(MF)이 국내 자원 소비(DMC)보다 크게 나타나 한국 국내 소비가 글로벌 공급망을 통해 유발하는 자원 소비가 국내 직접 소비량보다 크다는 것을 알 수 있다.



[그림 2-4] 한국의 1970-2019년 물질별 국내 자원 소비: 바이오매스(녹색), 비금속광물(주황색), 화석연료(회색), 금속광물(파란색), 기타 제품(노란색), 폐기물(갈색)

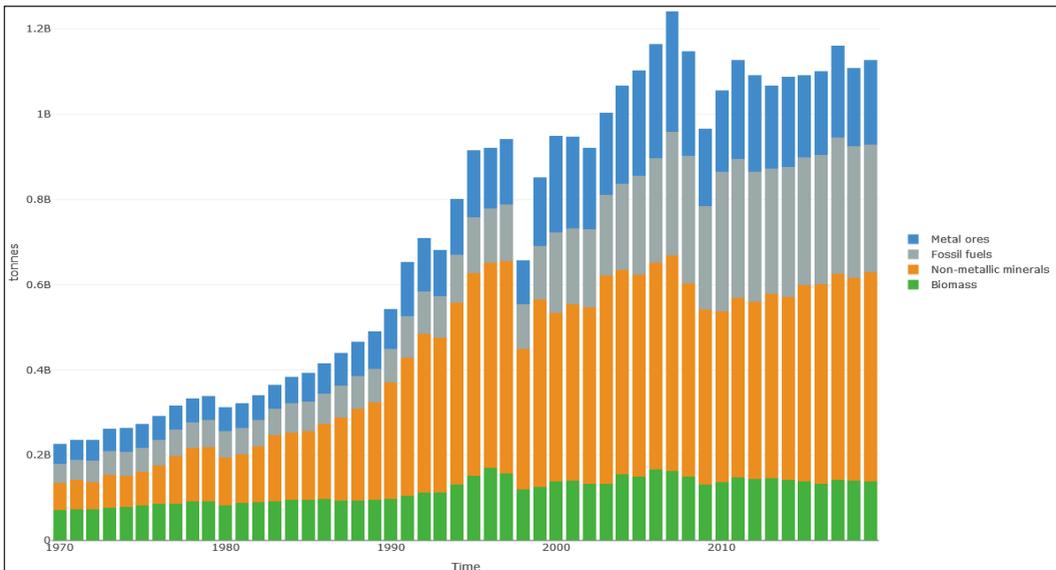
(출처: WU Vienna, 2022).

순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향 ...



[그림 2-5] 한국의 1970-2019년 물질별 국내 채굴: 바이오매스(녹색), 비금속광물(주황색), 화석연료(회색), 금속광물(파란색)

(출처: WU Vienna, 2022).



[그림 2-6] 한국의 1970-2019년 물질별 물질발자국: 바이오매스(녹색), 비금속광물(주황색), 화석연료(회색), 금속광물(파란색)

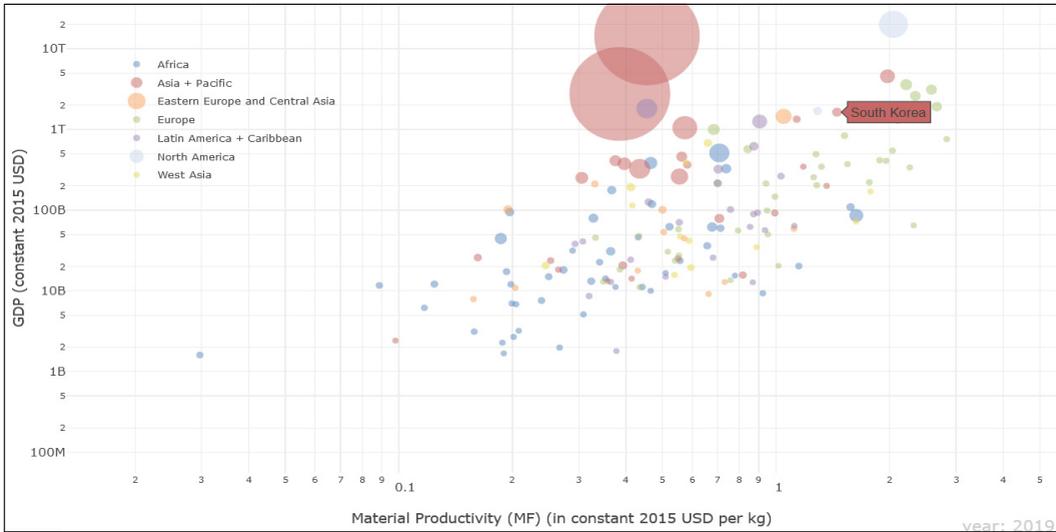
(출처: WU Vienna, 2022).

[표 2-2]는 주요 지역 및 국가의 자원 소비 지표와 자원 생산성 지표를 비교한 것이다. 본 절의 분석에서 한국의 2019년 1인당 DMC는 17.97톤으로 나타났는데, K-SDG의 2016년 국내 1인당 자원소비량 12.8톤이나 2040년 목표인 13.4톤에 비해 높은 수준이다. 한국의 1인당 RMC는 2019년 기준 22.01톤으로 OECD 평균을 상회하며, 조사된 164개국 중 126번째 수준이다. 전 세계 평균과의 차이는 1인당 DMC에 비해 1인당 RMC가 더 크게 나타나, 한국이 다른 국가에 비해 해외의 자원소비에 대한 의존도가 높은 것을 알 수 있다. RMC 기준 자원생산성은 1.45달러(2015년)/kg으로 유럽이나 OECD 평균보다는 낮지만, 전 세계 대부분 국가와 비교하여 높은 자원생산성을 나타낸다(164개국 중 138번째)[그림 2-7]. 지난 50년간(1970~2019년) 한국의 자원 소비도 증가하였으나, GDP의 괄목할만한 성장으로 RMC 기준 자원생산성이 5배 이상 증가하였다. 다른 국가와 비교하여 보더라도 한국의 경제성장은 자원 소비 증가에 비해 크게 나타나는 상대적 탈동조화(relative decoupling) 경향을 보인다[그림 2-7]. 지난 1992~2019년 사이 경제성장에도 불구하고 물질발자국이 감소하는 절대적 탈동조화(absolute decoupling) 경향을 보인 국가로는 일본, 이탈리아, 몽골, 러시아, 몰도바, 에스토니아, 벨라루스, 짐바브웨 등이 있다.

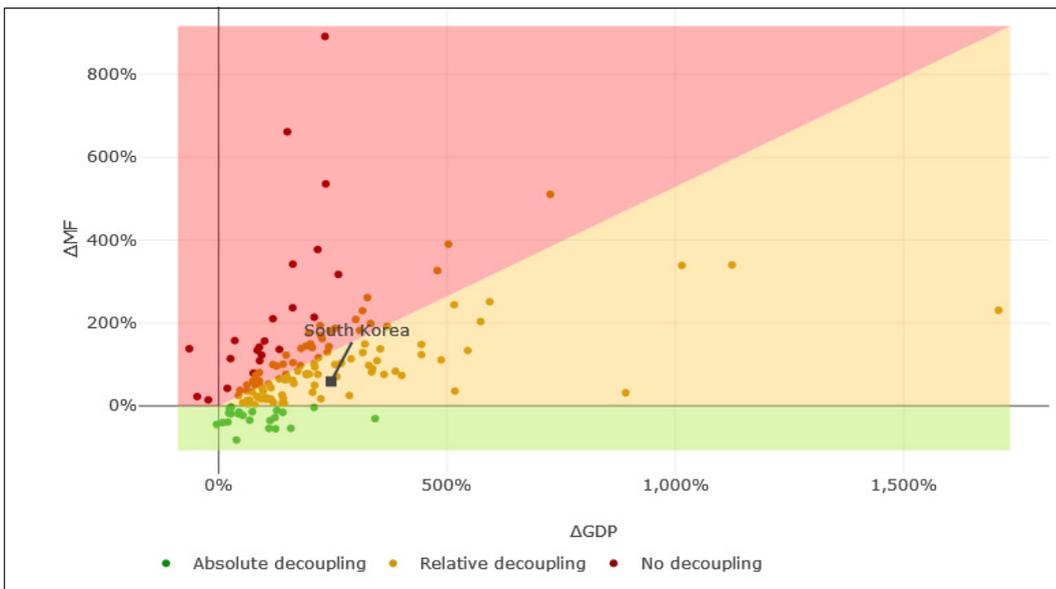
[표 2-2] 주요 국가 및 지역의 자원 소비와 자원생산성 지표 비교(2019년 기준)

	DMC/capita (톤/인)	RMC/capita (톤/인)	GDP/DMC (2015 USD/kg)	GDP/RMC (2015 USD/kg)
한국	17.97	22.01	1.78	1.45
전 세계	12.39	12.56	0.87	0.86
유럽	14.89	19.03	2.16	1.69
아시아태평양	12.32	12.39	0.55	0.55
OECD	18.32	21.50	2.06	1.75
미국	23.29	29.65	2.61	2.05
호주	42.24	46.82	1.33	1.13
중국	22.78	21.96	0.44	0.45
일본	10.80	18.18	3.32	1.97

순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향 ...



[그림 2-7] 주요 국가 및 지역별 2019년 자원생산성(GDP/RMC, 2015 USD/kg)과 GDP(2015 USD)
(출처: WU Vienna, 2022).



[그림 2-8] 주요 국가(164개국)의 1992-2019년 사이 GDP 변화율과 자원생산성(GDP/RMC) 변화율 관계: 절대적 탈동조화(녹색), 상대적 탈동조화(노란색), 탈동조화 경향을 보이지 않음(빨간색)
(출처: WU Vienna, 2022).

3) 한국의 물질순환 현황

EU에서 사용하고 있는 방법론을 활용하여 국내 재생자원이용률을 추정한 결과 2018년 기준 8.8%로 나타났다(조지혜 외, 2020). 이는 유럽 28개국의 2018년 순환율(circular material use rate)인 12.2%보다 낮은 수준이다(Eurostat, 2022b). 그러나, 순환경제 전환 성과지표로 설정된 물질순환에 관한 국내 현황을 진단하기에는 제조 단계에 실질적으로 투입된 재생자원 양 정보가 필요하나, 국내에는 직접 산정에 이용할 데이터가 존재하지 않는다. 생산 및 소비로부터 발생한 폐기물 중 상당량이 재활용 시설로 반입되나, 실질적으로 최종 재활용되는 폐기물 비율은 낮은 것으로 보이며, 산업으로 투입되는 재생자원의 양을 정확히 파악하기 위해서는 통계의 보완이 필요하다. 여기서 제시한 한국의 사회경제대사는 물질흐름의 구분이나 자원의 종류가 단순하여 구체적인 순환경제 전략을 도출하기에는 한계가 있다. 각 경제 부문에서 구체적인 고해상도 데이터를 활용하여 물질흐름 및 순환성을 진단할 필요가 있다. 정확한 성과 모니터링을 위해서는 제조 단계에서의 물질(재생자원)투입 정보와 함께 폐자원 에너지 회수 및 사용률, 천연자원환산소비량, 식품손실률, 원재료 대체 및 에너지 회수·사용에 따른 온실가스 배출량 지표에 대해서 데이터 보완과 개선이 필요한 상황이다(조지혜 외, 2020).

4) 한국의 자원 소비 현황

상기 분석 결과를 종합해보면, 한국의 국가 자원생산성은 지난 50년간 빠르게 증가하여 2019년 전 세계적으로도 상당히 높은 자원생산성을 달성하였다. 이는 OECD 평균에 근접하나 유럽, 미국에 비해서는 낮은 수준이다. 한국의 자원 소비는 수입에 의존하는 경향이 크며, 특히 화석연료와 금속광물은 거의 전량 수입하는 실정이다. 국내에서 자체적으로 채굴되어 소비되는 자원은 대부분 건설용 골재와 석회석을 포함한 비금속광물, 목초지 바이오매스를 포함한 바이오매스이다. 자원안보 측면에서 특히 금속광물에 대한 순환경제가 필요하며, 순환성을 높이기 어려운 화석연료 소비를 줄이기 위해서는 이를 연료로 사용하는 에너지 부문의 전환과 원료로서의 화석연료 소비를 줄이기 위한 대체 기술 개발, 산업의 탈탄소전환이 필요하다.

제2절

순환경제 전환 주요 산업 정의

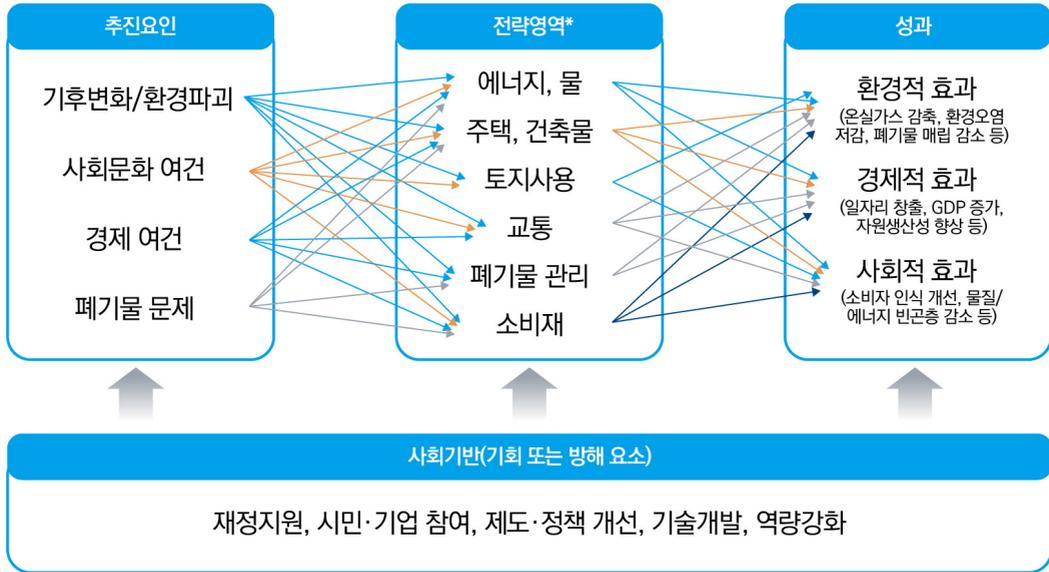
NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

EU에서는 핵심 가치품목(key product value chains) 7가지를 순환경제 전환에 있어서 중요한 산업군으로 선정하여 중점 관리하고 있다. 이들 품목은 전자제품, 배터리·자동차, 포장재, 플라스틱, 섬유, 건설자재, 음식물이다. 이와 유사하게 네덜란드에서는 건설(construction), 플라스틱, 소비재(consumer goods), 유기재료(biomass and food), 제조업(manufacturing) 총 5개 군을 중점 섹터로 선정하여 이들 각각의 물질 흐름(material flow) 현황을 물질·자원 채굴(material extraction), 부가가치(financial value creation), 온실가스(greenhouse gas emission) 관점에서 분석하여 전략영역을 도출하였다(De Wilt et al., 2020). 2021년 12월 우리나라에서 발표한 『탄소중립을 위한 한국형 K-순환경제 이행계획』에서도 유럽연합에서 정의한 핵심 가치품목과 동일한 내용으로 품목별 순환이용률을 순환경제 이행지표에 포함하였다. 그러나 유럽과 우리나라의 산업구조와 폐기물 발생 현황에 차이점이 있으며, 국내에 이미 존재하는 정책영역을 고려하여 미래 순환경제 전환전략에 중요한 품목 또는 산업을 정의할 필요가 있다. 본 절에서는 국내 순환경제 전환 동력에 기반하여 순환경제 전환 주요 산업군을 도출하고자 한다.

1 순환경제 전환 동력

앞 절에서 기술한 바와 같이 순환경제 전 과정에 관한 다양한 지표가 존재하며 이에 기반하여 순환경제의 과거와 현재 상황을 설명할 수 있다. 이와 연계하여 순환경제 미래 시나리오는 현재 수준에 변화를 줄 수 있는 미래전략이 작용한 결과로 해석할 수 있으며, 효과적인 전환 전략을 도출하기 위해서는 변화의 동력을 파악하는 것이 중요하다. OECD(2019)는 우리나라는 ICT와 전자제품 생산에 필요한 에너지와 자원의 해외의존도가 높고 인구밀도가 높아 매립에 필요한 토지를 확보하는 데에 어려움이 큼에 따라 폐기물 감축 및 자원순환 정책 도입 필요성이 높다고 분석하였다. 다시 말해 우리나라

의 순환경제 전환 동력으로 자원의 높은 해외의존도와 인구밀도가 도출되었다. 김은아·민보경(2020)은 지역 순환경제로 전환을 이끄는 동력을 크게 기후·환경, 폐기물, 경제, 사회 부문으로 나누어 여건을 분석하였는데, 본 연구에서는 이러한 지역 프로파일링 정보 구성을 큰 틀에서 활용하였다.



[그림 2-9] 지역순환경제 전환 프레임워크

(출처: 김은아·민보경, 2020, p. 15)

[표 2-3]은 본 연구에서 순환경제 전환 동력을 분석하기 위하여 순환경제 추진요인 ([그림 2-9] 참조)에 해당하는 기후·환경, 폐기물, 경제, 사회 관련 정량지표를 보여준다. [그림 2-10]는 [표 2-3]의 값을 이용하여 G7 국가 대비 대한민국의 수준이 어떠한지를 직관적으로 이해하기 쉽도록 그림으로 나타내었다. 그림이 보여주는 값은 모든 지표 값이 존재하는 최근 자료인 2017년 통계수치에 기반하며, 폐기물에 해당하는 지표는 2017년 자료를 구할 수 없어서 가장 최근에 가까운 2016년 자료로 대체하였다. 본 과제에서는 물질순환성에 집중하기 때문에 폐기물 재활용률은 비물질 순환에 해당하는 에너지 회수 부분을 제외한 값을 사용하였다.

G7 국가⁶⁾와 대한민국의 수준을 비교하기 위하여 G7 평균 대비 G7 평균과 대한민국의 차이 값을 아래 식을 이용하여 구하였다. 여기서 취약성 계수는 지표의 성격에 따라 부정인 경우 -1, 긍정인 경우 1로 설정하였으며, 이는 순환경제 측면에서 부정적인 결과를 보여주는 지표가 그래프 바깥쪽에 위치하도록 시각화 하여 취약성이 높은 지표 값이 상대적으로 잘 드러나도록 하기 위한 목적으로 사용되었다.

$$(식 2-6) \text{ 지표별 국내 취약성} = \frac{\text{한국}-G7\text{평균}}{G7\text{평균}} * \text{취약성 계수}$$

[표 2-3] 순환경제 전환 동력 프로파일링에 사용한 지표

구분	해당 지표 (단위)	지표 성격	한국	캐나다	프랑스	독일	이탈 리아	일본	영국
기후· 환경	1인당 온실가스 배출량 (LULUCF 포함, 1,000kg/capita)	부정	13.1	19.5	6.8	10.5	6.8	9.7	7.2
	PM _{2.5} 평균 노출 농도 (µg/m ³)	부정	26.9	7.3	11.4	12.0	15.9	13.8	10.3
폐기물	1인당 폐기물 발생량 (kg/capita)	부정	3,538	NA	4,990	4,867	2,701	NA	4,182
	폐기물 재활용률 (에너지회수 부분 제외, %)	긍정	60	28	43	67	50	21	44
경제	자원생산성 (GDP/DMC, million \$/1,000 ton)	긍정	3.6	1.6	3.6	3.1	4.8	4.6	5.1
	자원해외의존도 (수입자원량/총자원투입량, %)	부정	78	14	34	37	50	60	38
사회	인구밀도 (people/km ²)	-	517	4	105	234	204	339	271
	취업률 (취업자수/인구, %)	긍정	52	51%	42%	54%	42%	53%	49%

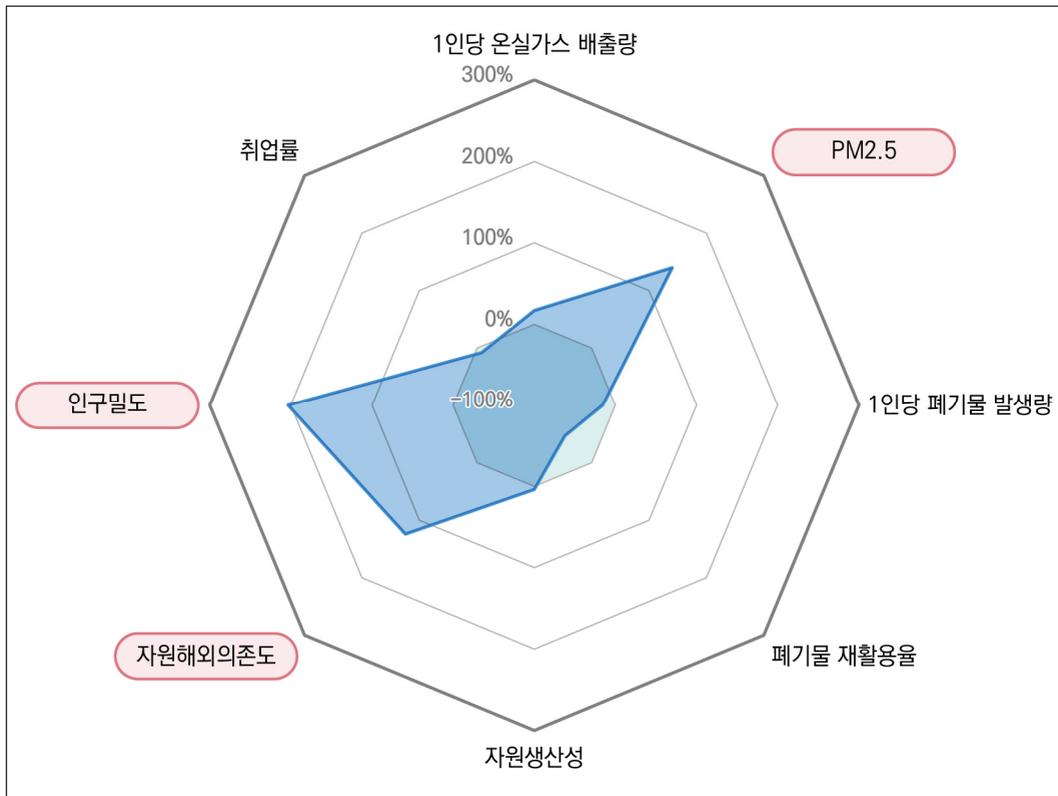
데이터 출처: OECD statistics (<https://stats.oecd.org/>, 검색일: 2022.1.20.)

* DMC: domestic material consumption (전체 물질 사용량 - 재활용 물질 투입량)

* 직접자원투입량(direct material input) = 수입자원량 + 국내채굴량(domestic extraction)

6) G7 국가에 포함된 국가: 캐나다, 프랑스, 독일, 이탈리아, 일본, 영국, 미국

그림에서 우리나라는 기후·환경(PM_{2.5}), 경제(자원 해외의존도), 사회(인구밀도) 부문에서 특히 취약함을 알 수 있다. 한국의 폐기물 부문 지표를 보면 G7 국가 대비 취약성이 상대적으로 낮으나, OECD(2019)가 분석한 바와 같이 인구밀도가 높은 사회환경에 기인하여 매립에 필요한 토지를 확보하는 데에 어려움이 크므로 폐기물 부문 또한 순환경제 전환 동력에 기여하는 바가 작지 않다. 본 분석 결과는 우리나라는 기후·환경, 폐기물, 경제, 사회 부문 전체에 걸쳐 순환경제 전환을 이끄는 동력이 존재함을 시사하며, 이어지는 소절에서는 이처럼 특히 취약한 지표를 중심으로 순환경제 전환이 필요한 전략 산업을 도출하였다.



[그림 2-10] 순환경제 전환 동력 관점에서 대한민국 여건 프로파일링: G7 국가 대비 대한민국 수준 (값이 클수록 취약성이 큼)

2 순환경제 전환 주요 대상 산업 도출

상기에서 분석한 결과 우리나라는 PM_{2.5}, 자원 해외의존도, 인구밀도 지표가 G7 국가에 비하여 취약성이 높아 해당 지표를 G7 국가 수준으로 올리는 방향의 노력이 순환경제 전환의 동력이 될 수 있으며 이들 지표에 기여하는 바가 큰 산업을 순환경제 정책에서 높은 우선순위에 놓을 필요가 있다. 여기서 인구밀도는 순환경제 정책 전반에 영향을 줄 수 있는 사회환경 요소이나, 반대로 순환경제로의 전환이 인구밀도에 영향을 주기 어렵다는 특성이 있으므로 순환경제 전환 주요 산업 도출에 해당 취약성 정보를 활용하지 않았다.

한편, 김은아·민보경(2020)의 연구에서는 사회기반에서 기회가 되거나 방해가 되는 요소 또한 순환경제 전환 전략을 도출하는 데에 중요한 정보를 제공한다는 점을 설명한 바가 있으며, 이러한 맥락에서 국내외 정책 여건도 순환경제 전환 동력으로서 추가적으로 고려할 필요가 있다. Circle Economy가 발행한 네덜란드의 Circularity Gap Report에서도 물질순환성 향상을 위한 전략 섹터를 결정하려면 기존 순환경제 정책의 제와 연계성을 고려해야 한다고 설명하였다(De Wilt et al., 2020). 따라서 본 연구는 최근 전 세계적으로 탄소중립이 국가정책의 중요한 축을 이루는 정책적 여건을 고려하여 온실가스 배출량을 순환경제 전환 동력에 포함하였다. 더불어, 기존의 국내 순환경제 정책이 근거로 하는 주요 법률인 「자원순환기본법」, 「폐기물 관리법」, 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」, 「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률」에서 중요하게 관리하고 있는 산업 또한 추가적으로 고려하였다. 기존 국내 정책영역에 포함된 전기·전자제품 및 자동차는 산업 대전환에 따라 신재생에너지 제품(태양광·태양열 패널, 풍력발전기, 바이오매스 등)과 전기차 및 배터리 생산량이 늘어날 것이므로 폐기물 발생량의 급증 문제를 해결하기 위한 순환경제로의 전환 필요성이 미래에 더욱 커질 것으로 전망한다.

[표 2-4]는 위와 같이 분석한 순환경제 전환을 이끄는 여건에 기여도가 높은 산업 및 제품을 항목별로 구분하여 보여준다. 미세먼지 생성 주요 원인 물질을 대량으로 배출하는 업종을 PM_{2.5} 지표에 대응하는 업종으로 정리하였고, 업종별 온실가스 배출량 데이터는 2017년 통계청 자료⁷⁾를 활용하였다. 대기오염물질의 절대량은 2020년 기준 질소산화물, 황산화물, 먼지가 98%⁸⁾를 차지하였고, 여기서는 해당 오염물질 다배출 업

종을 중심으로 정리하였다. 자원 해외의존도에 해당하는 업종은 한국은행에서 제공하는 『2019 산업연관표』의 품목별 해외의존도 데이터를 이용하여 분석하였다. 2015~2019년 평균 광산품의 해외의존도는 96.5%이고 총수입의 18.5%를 차지하는 등, 광산품이 우리나라 전체 해외의존도에서 차지하는 바가 크나, 국내 부존자원량의 한계로 개선의 여지가 상대적으로 낮다. 반면 공산품 생산에 필요한 원자재는 순환경제로의 전환을 통하여 개선의 여지가 상대적으로 높다고 판단하여 본 연구에서는 공산품에 국한하여 해외의존도 상위 업종을 분석하였다.

[표 2-4] 순환경제 전환 동력(PM_{2.5}, 온실가스 배출량, 해외의존도, 기존 정책영역) 기여도가 높은 업종

순환경제 전환 동력	기여도 상위 업종 또는 물품	기여도* 또는 근거자료
대기오염물질 배출량	발전업	38%
	시멘트제조업	25%
	제철제강업	22%
온실가스 배출량	1차철강제조업	35%
	석유정제품제조업	12%
	기초화학물질제조업	11%
해외의존도	컴퓨터, 전자 및 광학기기	14.3%
	화학제품	10.4%
	기계 및 장비	6.4%
	1차금속제품	6.0%
기존 국내 정책영역	건설폐기물	건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률
	전기·전자제품 및 자동차	전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률

* 기여도는 국내 전체 배출량에서 차지하는 비율 또는 총 수입금액에서 차지하는 비율을 의미함

7) 통계청(KOSIS)에서 제공하는 2017년 제조업 부문 업종별 온실가스 배출량 데이터 활용(접속일: 2022.1.20.)
 8) 환경부 보도자료((2021.10.8.), 「전국 648개 대형사업장, 전년 대비 대기오염물질 26% 감소」 참고. 여기서 대기오염물질은 PM_{2.5} 생성에 주요 원인 물질인 먼지, 황산화물, 질소산화물 등 7종 물질을 포함함
 9) 한국은행에서 제공하는 2019 산업연관표 통계표(10. 부문별 수입률 및 구성) 활용.

이상의 조사 내용에서 국내 산업은 대기오염물질 배출량, 온실가스 배출량, 수입의존도가 높은 산업 간에 중첩되는 영역이 상당수 존재하며, 소수 업종의 순환경제로의 전환만으로도 우리나라 환경·경제·사회적 취약성을 크게 개선할 것으로 기대할 수 있다. 한편, 김도완 외(2020)는 「한국표준산업분류표」 중분류 17개 업종 중 사업장 배출시설계를 대상으로 자원소비량 대비 최종폐기물 발생량이 높은 5개 업종을 대상으로 자원생산성과 자원순환성을 분석한 결과, 1차금속 제조업과 비금속광물제품 제조업의 자원생산성이 상대적으로 낮으며, 1차금속 제조업과 화학물질 및 화학제품 제조업의 자원순환성이 상대적으로 낮은 것으로 분석하였다. 여기서 화학물질 및 화학제품 제조업에는 폐기물 처리와 관련하여 전 세계적으로 쟁점이 되는 플라스틱물질 제조를 포함한다. 본 연구가 순환경제 전환을 모니터링하는 핵심 지표로 선정한 자원순환성 또는 자원생산성이 낮은 업종인 1차금속 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업은 순환경제 전환 동력에 기여하는 바 또한 높기 때문에 자원순환성과 자원생산성을 모니터링함으로써 순환경제 전환에 따른 환경·경제·사회적 취약성 개선 효과 또한 간접적으로 유추할 수 있을 것이다.

[표 2-4]에서 순환경제 전환 동력 상위 업종에 2회 이상 등장한 업종을 본 연구에서 국내 순환경제 전환 주요 산업으로 정의하였으며, 아래와 같이 2015년 기준 산업분류표 대분류 업종(총 6개 업종)에 대응시켰다. 여기서 기존 국내 정책영역에 포함되면서 해외의존도가 높은 업종인 전기·전자제품 및 자동차와 컴퓨터, 전자 및 광학기기는 2015년 기준 산업분류표 대분류상에서 복수의 업종과 매칭된다.

- 환경·경제·사회적 취약성 기여도가 가장 높은 업종: ① 1차금속 제조업
- (물질)공급 안정성이 낮으면서 폐기물 배출량 증가가 예상되는 업종: ② 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업, ③ 전기장비 제조업, ④ 운송장비 제조업
- 온실가스배출량이 많으면서 (물질)공급 안정성 취약성이 높은 업종: ⑤ 화학물질 및 화학제품 제조업(플라스틱 물질 제조 포함), ⑥ 코크스 및 석유정제품 제조업

제3절

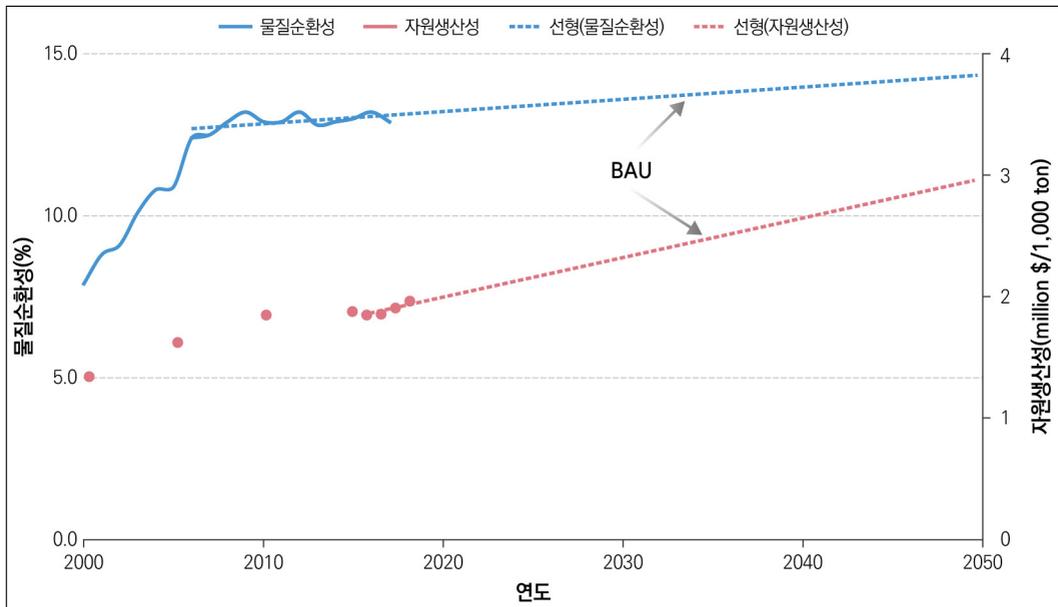
순환경제 성과지표 기반 2050 시나리오

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 BAU 분석

그림 [2-11]은 제1절에서 도출한 순환경제 전환 시나리오를 구성할 주요 지표인 물질순환성과 자원생산성의 과거 추세를 기반으로 2050년도까지의 변화를 예측한 결과이다. 그래프에 사용된 물질순환성 값은 지승민 외(2021)의 논문 Fig. 8에 적시된 수치를 활용하였으며, 2050년까지의 BAU를 추정하기 위한 추세선을 도출하기 위해서 물질순환성 수치가 안정화되기 시작한 2006년도부터 2018년까지의 값에 기반하여 선형회귀방향을 사용하였다. 물질순환성을 계산하기 위해서는 OECD통계 중 GDP 추계¹⁰⁾ 데이터와 국내자원소비(domestic material consumption) 데이터를 사용하였다. 이와 같은 분석 결과 2050년 BAU에 해당하는 물질순환성은 14.8%, 자원생산성은 300만달러/1,000톤으로 나타났다. 여기서 자원생산성은 어떤 GDP 수치를 사용함에 따라 값의 변동이 크므로 이 점을 고려하여 값을 비교할 필요가 있다.

10) OECD (2022), Real GDP long-term forecast (indicator). doi: 10.1787/d927bc18-en (검색일: 2022.10.17.)



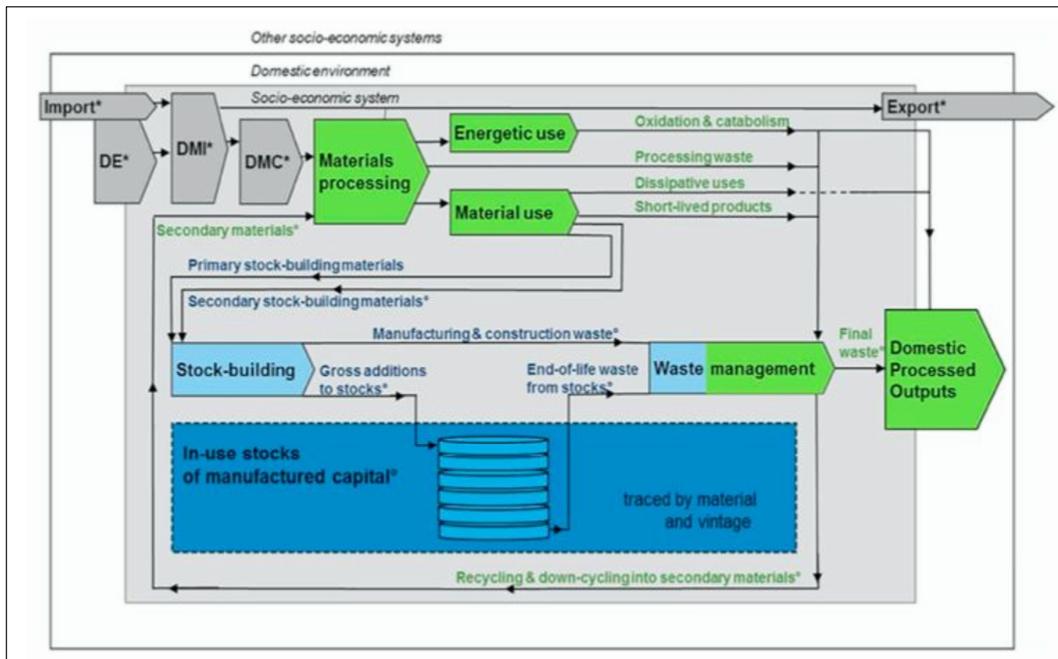
[그림 2-11] 성과지표 기반 순환경제 2050 시나리오: BAU(그래프에 사용된 물질순환성 값은 지승민 외(2021)의 논문 Fig. 8에 적시된 수치를 활용하고, 자원생산성 값은 OECD stat에서 제공하는 통계 데이터를 사용함)

2 성과지표 기반 2050 시나리오

최근 유럽을 중심으로 2050년 순환경제 성과 목표를 설정한 국가들이 등장하여 간극 보고서(gap report) 발간 등을 통하여 성과를 모니터링하고 있다. 물질순환성은 국가의 주요산업 및 소비행태 등에 따라 발생하는 폐기물의 종류가 달라 국가별 최대치가 상이하므로 외국의 목표치를 단순 도입하는 것은 바람직하지 않으나, 순환경제 선도 국가의 목표치와 그것을 선정한 근거는 참고할 필요가 있다. 스위스는 2018년 기준 물질순환성(자원 투입부 기준)은 13% 수준이며, 발생하는 모든 폐기물을 모두 재생원료로 활용하면 물질순환성이 20%까지 상승 가능하다고 발표하였다. 즉 스위스의 최대 물질순환성은 20% 정도로 추정한다(PWC and WWF, 2021).

네덜란드는 자원순환성이 높으면서(2019년 기준 세계 2위) 최근 10년간 급격하게 상승한(2009년 대비 47% 증가, 스위스의 경우 2009년 대비 24% 증가) 국가로 유럽연합

국가 중에서도 순환경제의 선도국가로 인정받고 있다. 네덜란드는 국가적으로 2050년 까지 완전히(fully) 순환경제로 전환하는 것을 목표로 삼는다고 발표하였는데, Circle Economy가 발행한 네덜란드의 『Circularity Gap Report』에서 2020년 네덜란드의 물질순환성(circularity metric)은 24.5%¹¹⁾이며 건설(construction), 농업(biomass and food) 섹터의 순환성 향상, 재생에너지로의 전환, 소비재 재활용 시나리오에 따라 70%까지 증가할 것으로 내다보았다(De Wilt et al., 2020). 이것은 물질발자국(material footprint)으로 환산하면 현재 물질소비량 대비 57% 감소한 양이며, 물질순환성은 순환불가한 물질을 제외한 시스템[그림 2-12]¹²⁾으로 한정하였다(Circle Economy, 2020).



[그림 2-12] 물질순환성 산정 방법

(출처: Wiedenhofer et al., 2019)

11) 동 리포트에서 전 세계 평균 circularity를 8.6%로 분석함.

12) 연소나 음식물 섭취 등의 활동은 필연적으로 자원회수가 어렵기 때문에 circularity 계산에 fossil fuels, renewable energy, food는 포함하지 않음.

우리나라는 2021년 12월, 『K-순환경제 이행계획』을 발표하였고 아래와 같은 순환이용률 목표치와 목표 달성을 위한 구체적 추진 방향을 제시하였다. 여기서 대상이 되는 품목은 국내 주요 산업 구성 및 순환경제 전환의 동력으로 작용할 요소 등에 관한 고려 없이 유럽연합 순환경제 이행계획상의 7대 핵심 분야(전기전자 ICT, 자동차/배터리, 포장재, 플라스틱, 섬유, 건설자재, 식품)를 그대로 가져왔다. 이 품목군은 본 연구에서 도출한 주요 산업군과 1:1 매칭이 되지 않으나, 포장재, 플라스틱, 전기·전자제품, 자동차 항목을 포함하고 있어 해당 부문의 2050년도 순환이용률을 참고하였다. [표 2-5]에 따르면 2050년 포장재, 플라스틱, 자동차 순환이용률 목표는 90~95%이며, 네덜란드가 설정한 100% 순환성에 가까운 도전적인 목표치로 볼 수 있다. 본 연구에서는 100% 순환성 달성이 『K-순환경제 이행계획』의 목표치에서 크게 벗어나지 않은 수준으로 보고 성과지표 기반 2050 시나리오에서 6대 주요 산업군의 최적 시나리오 수준을 물질순환성 100%로 단순화하여 설정하였다.

[표 2-5] 『K-순환경제 이행계획』의 순환이용률 목표(안) (환경부 보도자료, 2021.12.31.)

구분	현재('21년)	'30년	'50년
포장재(EPR대상)	81%	85%	90%
플라스틱	56%	60%	95%
섬유	30%	50%	70%
전기·전자제품	33%	50%	70%
자동차(대당)	89%	93%	95%
음식물 (바이오가스화)	13%	52%	70%
건설자재 (천연자원 대체율)	73% (6.2%)	80% (20%)	90% (30%)

※ 자동차 부품인 전기차 배터리 순환이용률은 순환체계 구축 이후 추가 검토

본 연구의 성과지표 기반 2050 순환경제 시나리오는 이상의 국내외에서 설정한 중장기 성과지표(물질순환성, 자원생산성)를 참고하여 2050년 목표치를 설정하였으며, 아래의 과정을 거쳐 시나리오를 도출하였다.

- ① 순환경제 전환 시나리오를 구성할 주요 지표(물질순환성, 자원생산성)를 도출
- ② 상기 도출된 지표가 과거에 어떠한 추세로 변화하였는지를 분석하고, 변화 추세가 동일하게 유지되는 가정하에 BAU(business as usual) 시나리오를 도출
- ③ 우리나라에서 순환경제로의 전환이 특히 필요한 산업 영역을 정의
- ④ 상기 정의한 산업 영역에서 물질순환성이 최대치(100%)에 도달하는 경우를 최적 시나리오로 설정하여 순환경제 성과지표 값을 산정

본 보고서에서는 우리나라의 6대 전략 산업의 물질순환성과 자원생산성이 극대화되었을 때에 국가 전체 물질순환성과 자원생산성에 어느 정도로 기여할 수 있을지를 국내 산업연관표(2015년 기초가격 통합대분류 기준 투입산출표)와 미국 환경청에서 사용하는 USEEIO v1.1¹³⁾를 이용하여 산정하였다. USEEIO는 1달러의 제품을 생산하는 데에 소요되는 자원의 양과 그때 발생하는 환경영향을 제품 소분류별로 산정하여 제공하며, 국내 투입산출표에서 업종별 총투입에 해당하는 금액을 달러로 환산하여 국내에서 해당 업종의 제품을 생산하는 데에 필요한 자원 양을 추정하였다. USEEIO의 제품 상세 제품분류는 국내 산업연관표와 1:1 대응하지 않으므로 USEEIO의 제품이 국내 산업연관표의 통합대분류에서 무엇에 가장 가까운지를 찾아 국내 업종 구분에 맞춰 USEEIO의 품목을 재분류하였고, 이들 품목을 생산하는 데에 필요한 자원의 평균을 대분류 단위로 구하여 국내의 어떤 산업이 생산 과정에서 자원 소비가 상대적으로 많은지를 파악하였다.

분석 결과, 6대 순환경제 전환 전략 산업이 100% 전환에 성공한 최적 시나리오에서 물질순환성이 BAU 수준의 2.2배, 자원생산성이 BAU 수준의 2.1배로 증가하는 것으로 나타났다[표 2-6].

13) Environmentally extended input-output matrices 중 1달러 가치 제품을 생산하는데 필요한 자원의 양을 보여주는 matrix U를 활용함

[표 2-6] 6대 주요 산업의 100% 순환경제 달성에 따른 국가 순환경제 지표의 변화

	물질순환성 (%)	자원생산성 (US\$ million/1,000 ton)
BAU	14.8	3.0
최적 시나리오 (6개 전략 산업의 100% 순환경제 전환)	33.1	6.5

이상의 분석 결과, 본 연구에서 온실가스 배출량, 자원 해외의존도, 대기오염물질 배출량, 기존 정책영역을 기준으로 도출한 6개 주요 산업은 물질순환성과 자원생산성에 미치는 영향 또한 큰 것으로 분석되었다.

제3장

산업계 순환경제 전환 전략

제1절 산업계 순환경제 전략 요소

제2절 산업계 2050 전략 시나리오

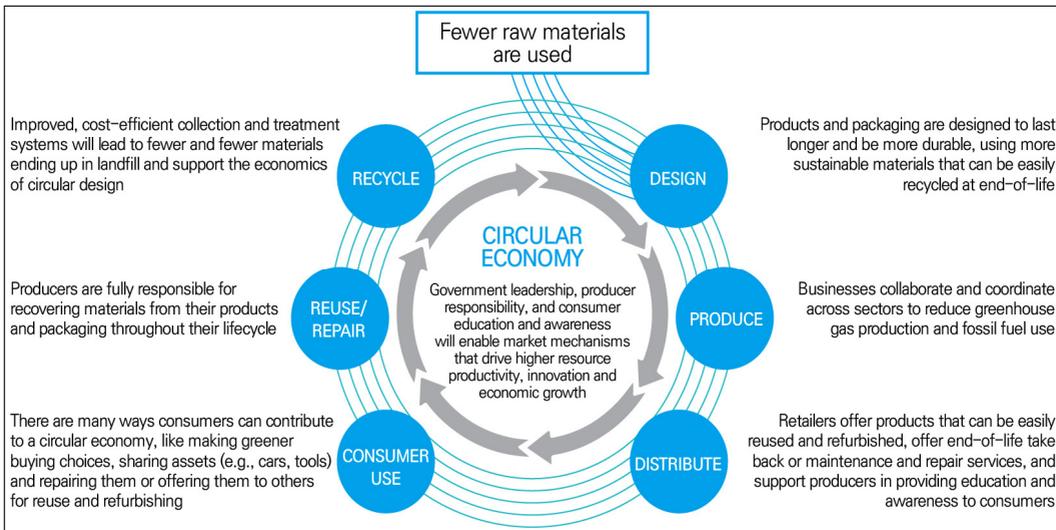
제 1절

산업계 순환경제 전략 요소

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 산업계 순환경제 전환 전략

순환경제 전환 전략은 생산-소비-폐기 전과정에서 새로운 원료 투입을 최소화하고, 제품 수명을 최대화하고, 폐기물 발생을 최소화함으로써 자원이 사용되는 양과 폐기되는 양을 줄이는 것을 원칙으로 한다(그림 3-1). 여기서 산업계 순환경제 전략은 (1) 재활용(recycle), 재사용(reuse), 또는 수리(repair)한 물질과 부품을 활용하여 원자재 투입을 최소화하고, (2) 재활용에 용이하고 내구성이 높은 제품 디자인을 하며, (3) 생산과정에서 온실가스 배출을 최소화하는 전략을 포함한다. 이러한 큰 틀 안에서 국가별 산업구조 및 여건에 따라 순환경제 전환을 중점적으로 요구하는 산업군과 전략을 다양하게 도출할 수 있다.



[그림 3-1] 제품의 생산, 소비, 폐기 전 과정에 걸친 순환경제 전략 구성요소

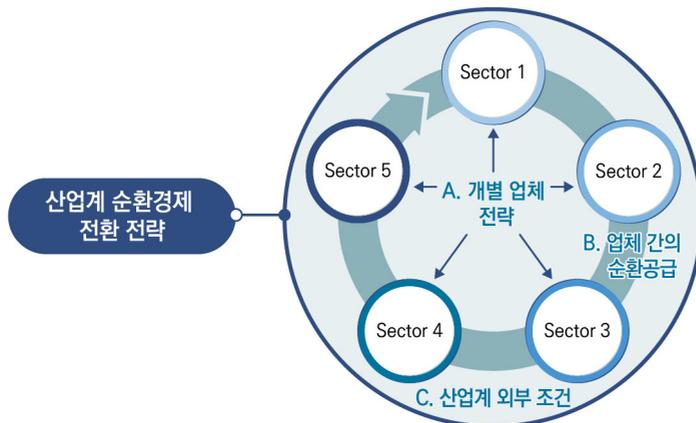
출처: <https://www.ontario.ca/page/strategy-waste-free-ontario-building-circular-economy>

네덜란드의 경우 순환경제 목표 달성, 특히 자원사용 방식의 효과적인 대전환을 위하여 아래와 같이 세 가지 주요 전략을 도출하였다.

- (1) 기존의 공급망에서 원료(raw materials)는 높은 품질로 활용한다. 즉 자원생산성을 향상하는 방향으로 원료를 사용한다.
- (2) 신규 원료 투입이 필요할 때에는 화석연료나 지속가능성이 낮은 방식으로 생산한 원료를 지속가능성이 높은 방식으로 생산과 재생이 가능하며 쉽게 찾을 수 있는 (generally available, eg. biomass, iron, silicon, carbon, etc) 자원으로 대체한다.
- (3) 생산(생산 프로세스, 디자인, 공간 활용 등)과 소비 방식을 새롭게 하는 공급망의 전환을 통하여 순환경제를 촉진한다.

본 연구에서는 우리나라 산업계 순환경제 전환 전략 시나리오를 구성하기 위하여 산업계에서 적용할 수 있는 전체 전략 풀에서 국내 주요 산업에 특히 중요하게 적용하여야 하는 전략에 대한 전문가 설문조사를 실시하였다.

우선, 해외 학술문헌에서 다룬 산업계 순환경제 전략의 영향 전략 전체를 추출하여 아래 [표 3-1]와 같이 정리하였다. 전체 문헌의 내용에서 중요하게 다룬 전략을 ‘순환경제 시나리오 구성전략 후보’로 추출, 구분하여 정리하고, 그들을 다시 전략을 이행하는 주체에 따라 A. 개별 업체 전략, B. 업체 간의 순환공급, C. 산업계 외부조건으로 구분하여 재구성하였다. 세부 전략 간의 관계는 아래 [그림 3-2]에 도식화하였다.



[그림 3-2] 산업계 순환경제 전환전략 개념도(sector 1~5는 개별 업체를 의미함)

[표 3-1] 해외 학술문헌에서 다뤄진 산업계 순환경제 주요 전략

구분	순환경제 시나리오 구성 전략 후보	참고문헌
A. 개별 업체 전략	상품의 서비스화	Agrawal, V., et al. (2020); Gyde, C. and L. S. McNeill (2021); Sun, S. H. (2021)
	상품 전주기 과정의 디지털화	Dev, N. K., et al. (2020); Gavril, S. G. and A. D. Ancillo (2021)
	상품 재제조	Alizadeh-Basban, N. and Taleizadeh, A. A. (2020); Dev, N. K., et al. (2020); Feng, Y. T., et al. (2016); Wang, P., et al. (2017); Zhu, X. D., et al. (2019)
	재생원료 사용	Fassio, F. and B. Minotti (2019)
	에코디자인 적용	Bakirlioglu, Y. and M. McMahon (2021); Bundgaard, A. M., et al. (2017); Li, G., et al. (2021); Ranta, V., et al. (2020); Yi, S. L. and C. F. Wu (2021)
B. 업체 간의 순환공급 (circular flow)	수거, 분해, 조립, 수리, 원료 재사용 공급망 안정화	Fassio, F. and B. Minotti (2019); Li, G., et al. (2021); Rahman, S. M. M., et al. (2019); Reinhardt, R., et al. (2020); Reinhardt, R., et al. (2019); Salim, H. K., et al. (2021); Yu, D. J. and Y. T. Chen (2021)
C. 산업계 외부 조건	순환경제 정책 강화	Alizadeh-Basban, N. and A. A. Taleizadeh (2020); Bosman, R., et al. (2018); Di Foggia, G. and M. Beccarello (2021); Notteboom, T., et al. (2020); Rahman, S. M. M., et al. (2019); Salim, H. K., et al. (2021); Shooshtarian, S., et al. (2021)
	순환경제 기술혁신	Alizadeh-Basban, N. and A. A. Taleizadeh (2020); Ranta, V., et al. (2020); Shogren, R., et al. (2019)
	순환경제 부문 녹색투자 촉진	Agyemang, M., et al. (2019); Alizadeh-Basban, N. and A. A. Taleizadeh (2020).
	소비자 인식 향상	Agyemang, M., et al. (2019); Bosman, R., et al. (2018); Camacho-Otero, J., et al. (2018); Shekarian, E., et al. (2021); Zhu, X. D., et al. (2019)

2 산업계 순환경제 전환 전략 우선순위

위와 같이 도출한 전략 후보를 대상으로 전문가 8인에게 설문조사¹⁴⁾를 시행하여 전략 우선순위를 도출하였다. 설문에 응한 전문가 정보는 아래 [표 3-2]에 정리하였다.

[표 3-2] 설문조사 응답 전문가 인적정보

	응답 내용
재직기관 구분	대학 3명, 연구소 5명
순환경제 관련 경력기간	1년이하: 2명, 1~5년: 1명, 5~10년: 3명, 10~20년: 2명
전문분야(중복 선택 가능)	환경정책: 8명, 경제: 4명, 기술 정책 및 R&D: 1명
전문분야 경력기간	1~5년: 2명, 5~10년: 2명, 10~20년: 4명
성별	남: 3명, 여: 5명

[표 3-3] 산업계 순환경제 전환 전략 우선순위 판단기준 조사 결과

전략 우선순위 판단기준	순위
물질 순환성 향상	3
자원 해외의존도 저감	7
온실가스 배출 저감	1
환경오염도 저감	2
경제성장	5
일자리 창출	4
수출 경쟁력 강화	9
국가 전략기술 확보	8
실행·구현 가능성	6

순환경제 전략 우선순위를 판단할 때 기준으로 삼을 항목들에 대한 인식을 조사한 결과 온실가스 배출 저감, 환경오염도 저감, 물질순환성 향상과 같이 환경부문 목표 달성 관련 기준이 상위에 위치하였으며, 경제적인 파급효과에 관한 내용이 그 뒤를 이었다. 설문에는 포함되지 않았지만, 소비자의 수용성 확보와 지속가능발전 기여도 등이 판단 기준으로 추가할 필요가 있는 항목으로 조사되었다.

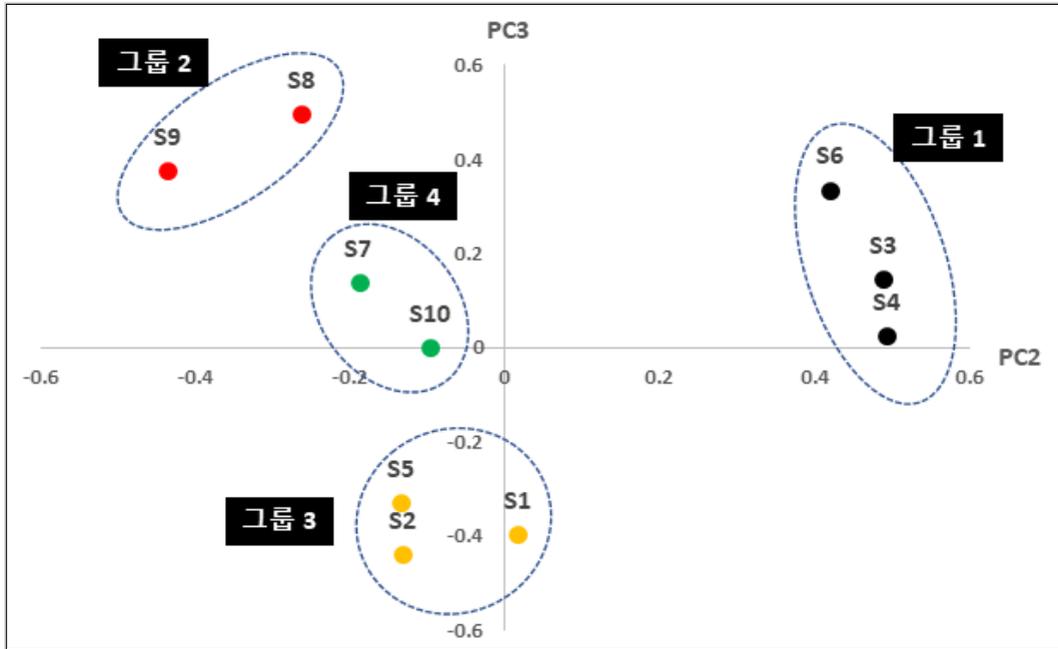
14) 설문조사 문항지는 <부록1>에 수록함

위에 조사한 판단기준 결과에 기반한 가중치를 적용하여 순환경제 전략 전체에 대한 우선순위를 계산한 결과, 순환경제 기술혁신, 공급망 안정화, 재생원료 사용, 녹색투자 촉진과 같이 혁신 전략과 함께 물질순환 공급망 전략의 우선순위가 높은 것으로 나타났다(표 3-4).

[표 3-4] 순환경제 전환 전략 전체에 대한 우선순위 조사 결과

구분	순환경제 시나리오 구성 전략 후보	전략 코드	순위 (우선순위 판단기준 가중치 적용)
A. 개별 업체 전략	상품의 서비스화	S1	9
	상품 전주기 과정의 디지털화	S2	10
	상품 재제조	S3	6
	재생원료 사용	S4	3
	에코디자인 적용	S5	7
B. 업체 간의 순환공급	수거, 분해, 조립, 수리, 원료 재사용 공급망 안정화 (순환 공급망 안정화)	S6	2
C. 산업계 외부 조건	순환경제 정책 강화	S7	5
	순환경제 기술혁신	S8	1
	순환경제 부문 녹색투자 촉진	S9	4
	소비자 인식 향상	S10	8

전문가 설문조사 응답 전체에서 일정한 패턴이 존재하는 것으로 나타남에 따라 추가적으로 통계분석(주성분 분석, principal component analysis)을 수행하였다. 통계분석 결과에서 서로 상관관계가 보이는 전략들이 존재하였으며, 10개 전략이 독립적으로 존재하기보다는 아래 [그림 3-3]과 같이 범주화하여 인식한 것으로 나타났다. 다시 말해, 개별 전략 간에 공통적인 특성을 공유하는 그룹 단위가 존재하며, 이러한 그룹 단위로 분석할 때 전문가 응답에서 드러난 우선순위가 더욱 명확하게 나타남을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 순환경제 전환 전략 시나리오를 이들 전략 그룹을 기본 단위로 하여 구성하였다.



[그림 3-3] 산업계 순환경제 전략 우선순위 전문가 설문 응답의 주성분 분석 결과

[표 3-5] 전략 우선순위 전문가 설문 응답의 주성분 분석 결과에 기반한 산업계 순환경제 전략 그룹

전략 그룹 (그룹명)	전략명	전략 코드
그룹 1 (직접 순환 전략)	상품 재제조	S3
	재생원료 사용	S4
	수거, 분해, 조립, 수리, 원료 재사용 공급망 안정화 (순환 공급망 안정화)	S6
그룹 2 (혁신 전략)	순환경제 기술혁신	S8
	순환경제 부문 녹색투자 촉진	S9
그룹3 (간접 순환 전략)	상품의 서비스화	S1
	상품 전주기 과정의 디지털화	S2
	에코디자인 적용	S5
그룹 4 (사회기반 전략)	순환경제 정책 강화	S7
	소비자 인식 향상	S10

위의 통계분석 결과에 따라 전략을 [표 3-5]와 같이 4개의 그룹으로 재분류할 수 있었다. [표 3-4]와 [표 3-5]에서 전체 산업 및 6개 주요 산업에 적용할 전략 우선순위가 높았던 그룹 1과 그룹 2의 전략을 중심으로 순환경제 전환 산업계 2050 전략 시나리오를 구성하였다. 여기서 그룹 3과 그룹 4는 설문조사에서 우선순위가 상대적으로 낮게 나왔으나 전략의 중요도가 낮다기보다는 그룹 1의 전략은 물질순환성 향상에 직접적으로 연계하는 반면, 그룹 3과 4의 전략은 그룹 1 전략을 구현하는 세부 전략으로 작용하는 등 물질순환성 향상에 간접적으로 연결됨에 따라 순환성 향상을 위한 전략으로써 인식되는 정도가 상대적으로 낮을 수 있다.

제2절

산업계 2050 전략 시나리오

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

제1절에서는 국내 순환경제 전환 주요 산업군 6개 전체에 적용할 전략 우선순위 설문조사 결과를 정리하였다. 본 절에서는 개별 산업에 적용할 전략 우선순위 설문조사 결과를 정리하여 보여준다.

[표 3-6]은 본 연구가 주요 산업으로 정의한 6개 산업에 적용하는 전략으로 대상을 좁혀서 우선순위를 조사한 결과를 보여주며 순환경제 전환 주요 산업별 우선순위가 높은 전략으로 순환 공급망 안정화(수거, 분해, 조립, 수리, 원료 재사용 공급망 안정화)를 공통으로 1~3순위에 자리매김하였으며, 산업별 생산활동의 특성에 따라서 재생원료 사용 전략이 중요한 산업과 상품 재제조 전략이 중요한 산업으로 구분하였다. 순환경제 기술혁신 또한 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업을 제외한 산업군에서 우선순위가 높은 전략으로 조사되었다. 이러한 결과는 제1절의 전체 산업군을 대상으로 조사한 전략 우선순위 결과와 유사하며, 직접 순환 전략에 해당하는 그룹 1(순환 공급망 안정화, 재생원료 사용, 상품 재제조) 전략과 혁신 전략에 해당하는 그룹 2(순환경제 기술혁신, 순환경제 부문 녹색투자 촉진) 전략을 공통으로 중요한 요소로 도출하였다.

[표 3-6] 순환경제 전환 주요산업 대상 전략 우선순위 조사 결과

순환경제 전환 주요 산업	1순위	2순위	3순위
코크스 및 석유정제품 제조업	순환경제 기술혁신	재생원료 사용	순환 공급망 안정화
화학물질 및 화학제품 제조업	재생원료 사용	순환경제 기술혁신	순환 공급망 안정화
1차금속 제조업	순환 공급망 안정화	순환경제 기술혁신	재생원료 사용
컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업	순환 공급망 안정화	상품 재제조	에코디자인 적용
전기장비 제조업	순환 공급망 안정화	상품 재제조	순환경제 기술혁신
운송장비 제조업	순환 공급망 안정화	에코디자인 적용	상품 재제조

상기의 분석 결과에 기반하여 순환경제 전환 주요 산업에 적용할 2050 전략 시나리오를 [표 3-7]과 같이 도출하였다. 시나리오 이름은 시나리오를 구분하는 전략 요소를 반영하였으며, 전략 요소에 따라 관련 순환산업¹⁵⁾을 구분하여 매칭하였다. 각각의 시나리오가 개별 산업군에 어떻게 작용하는지에 대한 설명은 본 보고서 제4장 순환경제 산업 미래영향 시나리오에서 확인할 수 있다.

[표 3-7] 순환경제 산업계 2050 전략 시나리오 프레임워크

시나리오 이름	전략 그룹1 (직접 순환 전략)			전략그룹 2 (혁신 전략)		주요 대상 산업 ¹⁶⁾ (본연구 내 산업분류)	관련 순환산업 ¹⁷⁾
	순환 공급망	재생원료 사용	상품 재제조	기술혁신	녹색투자		
BAU						-	-
물질 재사용	●	●				코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE), 1차금속제조업(NFM)	순환공급 (CRM) 원료재생 (CEN)
물질재사용 혁신	●	●		●	●		
부품 재사용	●		●			컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT)	순환공급 (CRM) 재제조 (CMA)
부품재사용 혁신	●		●	●	●		
지속가능한 순환시스템	●	●	●	●	●	위의 6개 전략 산업 전부	위의 순환산업 전부

15) 관련 순환산업에 대한 세부 내용은 제4장에 기술되어있음.

16) 2015년도 기준 산업연관표 대분류상의 업종 구분에 따른 산업을 의미하며, 이후 본 연구에서 새롭게 정의한 순환경제 관련 산업군 분류 기준[표 4-2]을 적용한 산업분류(코드)를 괄호 안에 표시함.

17) 시나리오별 전략과 관련된 순환산업을 의미하며 [표 4-2]의 산업분류(코드)를 괄호 안에 표시함.

제4장

순환경제 산업 미래영향 시나리오

제1절 문제의식과 연구목적

제2절 분석모형 설계와 활용

제3절 결과 분석과 해석

제2장에서는 국내 순환경제 전환에 따르는 사회·경제·환경적인 파급효과가 특히 클 것으로 예상하는 6개 주요 산업을 도출하였고, 제3장에서는 산업계 순환경제 미래전략 시나리오를 도출하여 다양한 산업계 순환경제 전략 중에 주요 산업군 6개에 어떠한 전략을 적용할 수 있는지의 선택지를 제공하였다. 본 제4장에서는 6개 주요 산업에 미래 전략을 적용하여 해당 산업의 순환경제 전환이 성공적으로 이루어질 때에 우리나라 경제 전반에 미치는 영향(생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 취업 유발효과)을 예측한 내용을 담았다.

제 1 절 문제의식과 연구목적

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

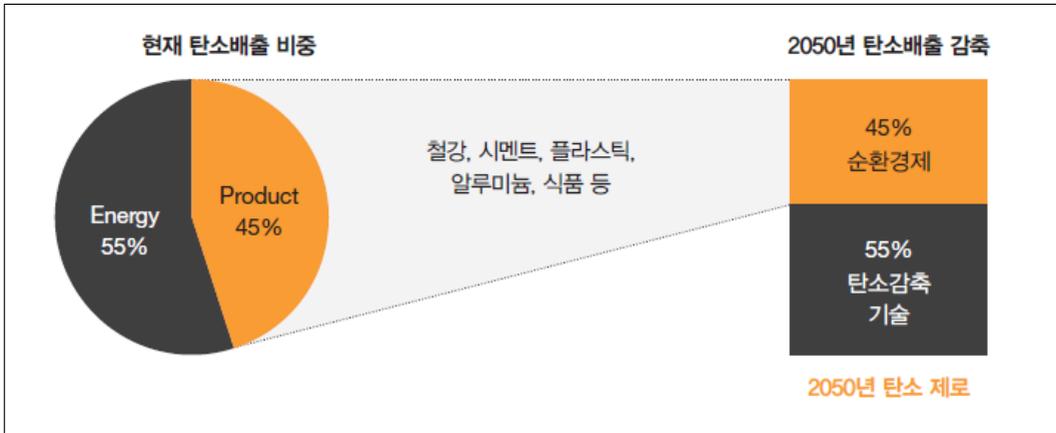
전통적 경제사회 시스템이 기반한 선형적 경제구조는 자원 고갈, 폐기물 발생, 기후 변화 및 환경오염 확대 등의 문제를 낳았고, 이는 순환경제로 이행해야 할 필요성에 대한 강조로 이어졌다. 순환경제는 궁극적으로 산업 부문의 생산과 소비 부문에 투입되는 다양한 자원과 폐기물의 규모를 최소화하고, 생산망에서 순환되는 물질의 양을 극대화하는 데에 목적이 있다. 따라서 자원의 유한성 안에서 자원을 효율적인 사용하려는 노력을 기울이고, 지속가능한 형태로 자원을 이용하려는 “순환경제”로의 전환을 추진하는 것은 세계공통의 과제라고 각국 정부에서는 인식하고 있다. 또한 포스트 코로나 시대에 기업은 자사의 비즈니스 전략이자 새로운 경쟁력의 원천으로서 소비자의 참여를 유도하여 자원순환에 임하는 움직임을 가속하는 것이 중요하다. 더불어, 순환경제와 관련한 세계적인 흐름이 가속화되는 상황에서 자국의 선진 기술과 솔루션을 해외에 확대하여, 세계적인 순환경제 기반 성장 패러다임 진전에 기여함과 동시에 자국 기업의 장기적인 경쟁력 강화를 도모하는 것이 중요한 상황이다. 그 예로, 유럽연합은 탄소중립 실현을 위한, ‘그린 딜(Green Deal)’ 이니셔티브 내 탄소중립 중심 경제체제로의 전환을 주요 목표로 설정하고, 이를 실현하기 위한 정책 분야로서 순환경제 및 산업 분야를 설정하였다(European Commission, 2020). 특히, 유럽연합은 주요 산업(플라스틱, 섬유, 전

자 및 건축)에서 재료 및 자원 사용과 폐기물 배출을 줄이고, 제품 수명을 연장함과 동시에 재료·자원 및 폐기물의 재사용을 강화함으로써 순환경제로 이행을 촉진하고자 중장기 전략을 마련 중이다(PwC, 2022). 그에 따라, 2020년부터 폐기물 관련 입법을 제정하고, 순환경제 행동계획 등을 마련함으로써 제도적 기반을 닦고 있다.

이와 함께 일본의 경우를 살펴보면, 2021년 3월에 일본 환경성은 세계경제포럼(WEF)과 함께 한 '순환경제 라운드테이블 회의'에서, 궁극적으로 일본 경제의 경쟁력 원천으로서 순환경제 실현을 바라보고 있으며, 한정된 자원의 효율적인 이용을 통해 약 500조 엔의 경제효과 획득을 목표로 함을 밝히기도 했다(일본 환경성, 2021). 이에, 순환경제 전환을 위한 법제도 정비의 필요성을 강조함과 동시에, 일본의 선진적인 기술이나 순환경제 솔루션을 국제적으로 확산하기 위한 기업의 중장기적인 경쟁력 강화를 강조하기도 했다. 최근 이러한 순환경제 전환을 위한 노력은 일본 환경성과 더불어 일본 경제산업성이 주도하고 있다. 2020년 5월에 경제산업성이 공표한 「순환경제비전 2020」은 일본의 새로운 순환경제의 목표로 자리매김했다. 해당 「순환경제비전 2020」에서는, 기존 정책이 강조했던 3R(Reduce, Reuse, Recycle), 또는 폐기물 감소 등을 목표로 하는 환경 활동뿐만 아니라, 경제적 선순환 구조를 만들어내기 위한 모델을 목표로 하는 순환경제 관점을 강조하였다(일본 경제산업성, 2020).

우리나라 역시 2050년 탄소중립을 선언하며 해당 목표 달성을 위한 주요 수단으로서 순환경제로의 전환이 필수적임을 강조하였다. 특히, 2050년 목표로 하는 국가 탄소배출 감축량에서 45%에 해당하는 규모를 순환경제 실현을 바탕으로 이뤄내겠다는 세부 목표를 정립한 상황이다(그림 4-1). 이러한 배경하에 우리나라 정부는 최근 '탄소중립을 위한 『한국형(K)-순환경제 이행계획』'을 수립하여 발표하였다. 해당 계획에서는 1) 생산 및 유통단계의 자원순환성 강화, 2) 친환경 소비 촉진, 3) 폐자원 재활용 확대 등을 포함한 세부 전략을 포함하여, 경제사회 시스템 내 생산, 유통 및 소비 전 단계에서 자원의 효율적인 이용과 순환경제를 활성화하기 위한 제도적 개선을 지속적으로 추진하겠다는 비전을 공표하였다¹⁸⁾. 이를 바탕으로 우리나라 역시 순환경제 실현을 바탕으로 경제체제 내 신성장동력을 마련함과 동시에, 탄소중립 및 기후변화 및 환경오염에 대응한 적응력 증대를 꾀하고 있음을 이해할 수 있다.

18) 환경부 보도자료 (2021.12.31.) '탄소중립을 위한 한국형(K)-순환경제 이행계획 수립'의 일부를 발췌·정리함.



[그림 4-1] 탄소배출 비중 및 2050년 제품부문 탄소배출량 감소 방안

(출처: PwC, 2022, p. 18).

이처럼 우리나라를 포함한 세계 각국은 자원의 유한성 아래에서 자원의 효율적인 사용과 지속가능한 형태로 자원 이용을 촉진함과 동시에 중장기적 가치를 창출하는 기반으로서 순환경제 전환을 바라보고 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 순환경제로의 전환은 생산 단계, 소비 단계, 폐기 단계로 이어지는 선형적 시스템이 아닌 생산, 유통, 소비, 수거, 재활용 및 재제조 등으로 이어지는 순환적 시스템으로 근본적 생산망의 상 전환을 필요로 한다. 이는 경제체제 내에 다양한 직간접 영향을 바탕으로 파급경로를 형성할 것이다. 예컨대 순환경제로의 전환으로 새로운 산업(폐기물 처리, 재활용 및 재제조 부문 등)의 상대적 영향이 증대하면 기존 중간재(부품 및 자원 공급) 산업 등에 영향을 끼쳐 산업 구조상의 변화를 일으킬 수 있다. 산업 구조 측면의 변화를 동반하면 경제체제 내 생산 유발효과에서 변동이 발생하여 부가가치 유발 및 취업자 수 증감에도 변화가 일어나게 된다. 이처럼 중장기적으로 순환경제로의 이행을 촉진하는 주요 정책적 대안별 거시경제적 영향을 분석함으로써, 순환경제로 효과적인 이행을 보장하기 위한 구체적 정책과제 마련과 정책 추진력 확보를 뒷받침할 노력이 필요한 상황이다. 이에 본 장에서는 순환경제로의 이행을 뒷받침하는 주요 정책 시나리오별 우리나라의 경제 및 산업 부문 영향을 정량적으로 분석하고자 한다.

최근 해외 문헌에서 순환경제로의 이행에 따른 거시경제적 영향을 고찰하는 연구가 증가하였다. 이러한 연구의 분석 도구로서 산업연관분석을 활발하게 활용하고 있다. 순

환경제로의 전환에서 중요한 기반산업으로 역할하는 폐기물·폐자원 관리, 폐기물 에너지화, 재생용 가공원가공원료 및 재활용품 제조 부문 등의 영향력 증대는 관련 산업의 성장과 함께 전체 산업구조를 변화시킬 수 있다. 이에 따른 경제적 파급효과 발생은 산업구조의 변화를 넘어, 산업 간 연관관계와 산업 생산구조를 바탕으로 지역 및 국가 내 생산 유발 및 부가가치 유발효과 등을 촉발한다. 산업연관분석은 산업 간 연관관계에 따른 영향을 정량적으로 분석하는 방법론이며, 최종수요 변화에 의한 생산, 고용, 소득 등 국가 경제체제에 미치는 각종 파급효과를 산업별로 구분하여 분석할 수 있어 산업별 전망이나 경제의 내·외부 충격에 대한 영향 파악 등에 널리 활용되고 있다(Kronen et al., 2010). 이러한 측면에서, Beylot(2014)의 연구는 프랑스 경제를 분석대상으로 설정하여, 폐기물의 흐름이 명시적으로 반영된 산업연관표를 구축하고 소비, 수출 등을 포함한 최종수요 부문 변화에 따른 폐기물 및 오염물질 배출량 변화가 산업별로 어떻게 나타나는지 분석한 바 있다. 그리고, Wijkman and Skanberg(2015)는 5개 유럽연합 국가를 대상으로 하여, 산업연관분석을 통해 순환경제로의 이행에 따른 온실가스 저감, 고용 및 무역수지 영향 등을 살펴보기도 했다. 최근, Donati et al.(2020)와 Wiebe et al.(2019) 등 연구들은 순환경제 이행에 따른 신산업 등장 효과 및 취업 유발효과 등을 정량적으로 산출할 방법론적 기법을 제안하고 활용도를 증명하기도 했다. 특히, 해당 연구에서는 다지역 산업연관표를 바탕으로 순환경제 이행을 촉진하는 다양한 시나리오를 산업연관분석 내에 반영할 수 있는 체계와 접근을 제안하기도 했다. 최근 국내 연구인 신상철 외(2015) 연구에서 폐기물 산업을 별도로 고려한 산업연관분석을 수행하였으나, 순환경제 전반을 아우르지 못하는 한계를 보이고 있으며, 순환경제를 촉진하는 주요 정책 수단에 대한 심도 있는 고려에 바탕을 두는 영향 분석을 이뤄내지 못하는 한계점을 보이기도 했다. 이처럼, 우리나라 경제사회 시스템 내 산업 간 연관관계와 산업별 공급 및 수요 구조 등을 포함한 주요 특성을 반영한 순환경제 특화 산업연관표를 활용한 시나리오 분석은 찾아보기 힘든 실정이다. 우리나라의 경우는 정책적으로 순환경제 및 탄소중립 사회로의 이행을 매우 강조하나, 이에 따른 산업별 중장기 영향과 일자리 창출효과 등에 대한 시나리오 기반 정량분석 연구는 매우 미진한 상황이다. 이와 같은 방법론적 접근의 부재는 순환경제로의 이행전략의 지속적이고 안정된 정책추진을 제약할 수 있기에, 순환경제와 관련한 정책 추진에 따른 잠재적 도전과제 관련 영향분석 연구를 수행하여야 한다. 이에, 본 연구에서는 우리나라 실정에 맞게 산업 간 연관관

계와 산업별 공급 및 수요 구조 등을 포함한 주요 특성을 반영한 순환경제 특화 산업연관표를 구축하고자 한다. 그리고, 해당 자료체계를 활용하여 순환경제를 촉진하는 다양한 정책 대안별 중장기 영향을 분석함으로써, 순환경제 정책 및 전략을 수립하는 데에 과학적 근거를 제시하고자 한다. 분석 대상 시나리오로서는 제3장에서 도출한 1) 재생원료 활용, 2) 재생원료 활용 혁신, 3) 재제조 활용, 그리고 4) 재제조 활용 혁신 전략을 고려하고자 한다. 더불어, 순환경제 이행을 위한 전략적 산업으로서 코크스 및 석유정제품 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업, 1차금속 제조업, 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업, 전기장비 제조업, 운송장비 제조업 산업 분야를 설정하여 해당 산업에 대한 정책적 충격을 가함으로써 그에 따른 영향을 분석하고자 한다. 이처럼, 우리나라의 실정에 맞추어 개발된 순환경제 산업연관표를 이용한 시나리오 분석은, 본 연구에서 제안하는 순환경제 이행 전략의 실효성을 검증하고, 중장기 순환경제 정책을 수립하는 데 있어 구체성과 현실 적합성을 증대시키기 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

제2절 분석모형 설계와 활용

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 순환경제 특화 산업연관표 구축

본 연구에서는 2050년 순환경제 실현을 위한 주요 전략 이행에 따른 거시경제적 영향 분석을 위해 산업연관분석을 수행하고자 한다. 산업연관분석(input-output analysis) 모형은 경제체제 내 개별 산업의 생산구조와 산업 간 연관관계, 산업별 생산 재화·서비스에 대한 수요 구조 등과 관련한 주요 속성을 고려하여, 특정 전략(정책) 도입이나 외생변수의 변화에 따른 영향을 분석할 수 있는 장점을 지닌다. 본 연구에서는 순환경제 관련 주요 산업을 명시적으로 고려한 산업연관표를 구축하고 활용함으로써 제3장에서 도출한 주요 전략별 중장기 영향을 분석하고자 한다. 산업연관표는 과거 경제구조를 대상으로 작성하는 것이 일반적이다. 그렇기 때문에 현재 활용 가능한 산업연관표에서는 순환경제와 관련한 산업들을 명시적으로 드러내기 힘든 한계를 지닌다. 또한, 순환경제로의 이행을 알려주는 주요 산업별 생산구조에서의 변동을 포착하는 데에도 한계가 있다. 따라서 산업연관표에 순환경제 관련 산업을 명시하고 순환경제로의 이행을 설명하는 생산기술구조의 변화 등을 반영할 필요가 있다. 본 연구에서는 정책(전략) 시나리오별 산업연관표 내 산업별 투입구조 변경과 행렬 밸런싱 기법(matrix balancing technique) 등을 활용한 수정 산업연관표 구축 등을 수행하고자 한다.

본 연구에서는 첫 번째로 순환경제 관련 산업을 명시적으로 고려한 산업연관표를 구축하고자 환경부(2011)와 산업연구원(2020) 등의 선행연구에서 제안한 순환경제 산업 분류 체계를 참고하였다. 산업연구원(2020)은 녹색 관련 정책수립과 목표 달성 점검을 위해서는 녹색산업에 대한 개념적 정의와 산업분류체계를 조속히 마련해야 한다는 문제의식에서 녹색산업 분류체계를 제안한 바 있다. 해당 연구에서는 녹색산업 분류체계 내 자원순환 관리 산업을 명시적으로 고려하고, 해당 산업을 “폐기물 관리, 폐자원 에너지화, 재생용 가공원료 및 재활용 제품, 자원순환 관련 분석·자료수집·평가”를 수행하는 산업으로서 정의하여 제안하였다(산업연구원, 2020). 이 연구는 총 34개 세부 분류

로 구성된 녹색산업 분류체계 내 폐기물·폐자원 관리 산업, 폐기물 에너지화 산업, 재생용 가공원료 및 재활용제품 제조 산업을 포함한 자원순환 산업을 명시적으로 [표 4-1]과 같이 고려하였다.

[표 4-1] 산업연구원(2020) 제안 녹색산업 분류체계 내 자원순환산업 위상

번호	산업 분류	번호	산업 분류
A. 환경 산업	A01. 대기환경 산업	A0101.	대기오염 관리
		A0102.	실내 공기질 관리 및 모니터링
	A02. 수질 및 토양환경 산업	A0201.	수질오염 관리
		A0202.	토양 및 지하수 정화
	A03. 인공방사능 처리 산업 (원전 관련 제외)	A301.	인공방사능 오염처리
	A04. 자원순환 산업	A401.	폐기물 및 폐자원 관리
		A402.	폐기물 에너지화
		A403.	재생용 가공원료 및 재활용 제품 제조
	A05. 생태계 보존 산업	A501.	생물 및 산림자원 관리 보전
		A502.	생물다양성 및 경관 보호

출처: 산업연구원(2020, p.69)

이에, 해당 연구에서는 자원순환 산업에 포함되는 세부 분류 산업으로서 폐기물 및 폐자원 관리 산업 범주에, “유해 폐기물 보관 및 처리 기기 제조”, “일반 폐기물 수집, 처리, 취급장비, 분리기기”, “제조/소각로 제조/폐기물 관리시설 건설”, “폐기물 관리 서비스” 등을 주요 산업으로 간주한다. 그리고 폐기물 에너지화 산업에는 “폐자원 에너지화 시설, 저장기기, 기타 기기 제조”, “폐자원 에너지화 시설 건설”, “폐자원 에너지화 서비스” 등을 포함한다. 더불어, 재생용 가공원료 및 재활용 제품 제조 부문에는 “재생 유지 및 사료 제조”, “재생 직물, 의복 제품, 펄프 제조”, “재생 화합물 및 화학제품 제조, 재생고무, 플라스틱, 유리 제품, 아스콘 제조”, “금속 슬래그 및 부산물 제조”, “재생용 가공원료 생산”, “재활용 제품 유통” 산업 등을 포함한다(산업연구원, 2020). 더 나아가, 이같은 분류체계 제안을 바탕으로 해당 연구는 분류체계 내 산업 구분과 한국 표준산업분류 및 산업연관표 내 산업분류와의 연계표도 함께 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 산업연구원(2020) 연구에서 제안하는 산업분류체계와 산업연관표 분류 간

연계표를 참고하고, 환경부(2011)의 주요 분류체계 등을 참고하여, 순환경제 관련 산업을 산업연관표에 명시적으로 포함하였다. 아래 [표 4-2]와 같은 산업분류 체계를 바탕으로 산업연관표를 작성하였다. [표 4-2]에서 확인할 수 있듯이, 산업분류체계 내 순환경제 관련 산업군으로서 ‘CRM: 폐기물 및 폐자원 관리’, ‘CEN: 폐기물 재생’, ‘CMA: 제품 재제조’ 산업을 명시적으로 제시하였다. 더불어, 해당 산업분류 체계 내에 포함되는 산업연관표 내 기본 부문 산업에 대한 정보는 <부록2>를 통해 확인할 수 있다.

그리고, 산업연관표를 작성하는 과정에 있어, CRM, CEN, CMA 산업에 중복으로 포함되는 기본 분류 산업 부문들이 존재하는데(예: 기본 부문 1801 합성수지, 1802 합성고무, 1900 화학섬유, 2310 플라스틱 1차제품, 2391 건축용 플라스틱제품, 2392 포장용 플라스틱제품, 2393 운송장비 및 조립용 플라스틱제품, 2399 기타 플라스틱제품 등), 우선 이들을 모두 포함하여 CRM, CEN, CMA 산업의 생산구조 및 수요 배분 구조를 설정하고자 했다. 이렇게 CRM, CEN, CMA 산업에 중복 존재하는 기본 분류 산업들을 모두 포함하여 설정한 CRM, CEN, CMA 산업 총 공급액(투입액) 비중만큼, 중복된 기본 분류 산업의 생산비용과 수요 배분액을 다시 CRM, CEN, CMA 산업에 배분 및 차감함으로써 산업연관표를 최종 작성하였다. 이러한 산업분류 체계를 바탕으로 작성한 산업연관표의 구조는 [표 4-3]과 같이 정리할 수 있다.

[표 4-2] 본 연구 내 산업분류

코드	산업명	코드	산업명
AFF	농림수산	ELM	전기장비
MIN	광업	AUT	자동차 및 운송장비
FOO	음식료품	OMA	기타 제조업
CLO	섬유/가죽	ELE	가스 및 수도
PPP	목재/종이/인쇄	CRM	폐기물 및 폐자원 관리
OIL	석유정제	CEN	폐기물 재생
CHE	화학물질 및 화학제품	CMA	제품 재제조
NMP	비금속광물	RND	연구개발
NFM	철강 및 1차금속	CON	건설
MAC	금속제품/기계/장비	TRN	운수
ECT	컴퓨터, 전자 및 광학기기	SER	서비스

[표 4-3] 본 연구 내 구축 산업연관표 기본 구조

		중간 수요					최종 수요	수입 (공제)	총 산출액
		부문1	부문2	...	부문22	중간 수요계			
중간 투입	부문1	내생 부문					외생 부문		
	부문2								
	...	열 : 투입 구조							
부가 가치	부문22						외생 부문		
	중간 투입계								
	비용자 보수								
	영업 잉여								
	고정 자본 소모								
생산세									
부가 가치계									
총투입액									

이처럼 산업연관표는 경제학자 레온티에프(Leontief)에 의해 제안된 것으로, 일정한 기간(보통 1년) 동안 특정 범위의 지역(보통 국가) 경제를 구성하는 여러 산업 부문 및 경제주체 간에 이루어진 투입, 산출 등의 거래관계를 금액으로 기록한 표이다(이홍권 외, 2017). 산업연관표는 해당 지역의 특정 기간 경제활동을 조망하는 지표가 되며, 산업연관분석(input-output analysis)을 위한 기초자료로 활용한다. 산업연관표가 어떻게 구성되는지 [표 4-3]을 통해 확인해보면, 산업연관표의 가로축(행)은 산출을, 세로축(열)은 투입을 나타내며, 총투입과 총산출의 값은 서로 일치하도록 작성되어 있다. 산업연관표를 가로축으로 읽느냐, 세로축으로 읽느냐에 따라 끌어낼 수 있는 의미가 달라진다. 산업연관표의 열 방향은 개별 산업 부문의 생산기술 구조 및 투입 비용 구성을 나타내는 정보들을 기록한다. 따라서 산업별 최종재화를 생산하기 위해 투입되는 중간재,

자본, 노동 등의 투입구조를 확인할 수 있다. 산업연관표의 행 방향은 개별 산업에서 생산한 재화/서비스의 판매 구조(수요 배분 구조)를 나타낸다. 따라서 산업별 재화/서비스가 타 산업의 중간재 수요, 민간 소비, 정부 소비, 투자, 수출 등을 포함한 최종수요 충족을 위해 얼마나 배분되는지를 확인할 수 있다. 이처럼 산업연관표 내 특정 영역에 대한 변동이 경제체제에 어떠한 파급효과를 미치는가를 살펴보려는 것이 산업연관표 작성의 목적이다.

2 순환경제 특화 산업연관표 활용과 시나리오 설계¹⁹⁾

산업연관표 내 투입계수(input coefficient)는 개별 산업이 최종재화 생산을 위해 다른 산업 부문으로부터 구매하거나 활용한 자원, 원재료 등을 포함한 중간재 투입액 규모를 총 투입액으로 나눈 행렬을 뜻한다. 이러한 투입계수는 개별 산업 고유의 생산구조와 중간재 투입을 위한 타 산업에 대한 의존도를 보여주기 때문에, 개별 산업 부문의 생산 기술구조 및 생산함수를 나타낸다. 투입계수를 매개로 하여, 최종수요 등 외생적 변화에 따르는 생산부문 변동 수준을 계측함으로써, 생산 유발효과를 정량적으로 파악할 수 있다. 또한 생산 유발효과에 의한 개별 산업의 부가가치 유발효과 역시 측정할 수 있다. [표 4-4]는 본 연구에서 구축하여 활용한 22개 산업($n = 22$)으로 구성된 산업연관표의 구조를 나타낸다.

[표 4-4]에서 a_{ij} 는 산업 j 부문에서 최종재 생산을 위해 사용 및 투입하는 산업 i 부문 재화(서비스) 투입액(중간재 투입) x_{ij} 을 산업 j 부문 총 투입액 X_j 로 나눈 값으로서, 투입계수 행렬 요소로 이해할 수 있다. 그리고, 부가가치 계수를 의미하는 v_j 요소는 산업 j 부문의 최종재 생산을 위해 투입하는 자본 및 노동 등을 포함한 생산요소 투입에 의한 부가가치액 V_j 를 산업 j 부문의 총 투입액 X_j 으로 나눈 값이다. 산업 j 부문 투입계수 a_{ij} 와 부가가치 계수 V_j 를 세로 방향으로 모두 합하면 1이 된다. 이에, 산업연관표 내 내생 부문에 해당하는 산업 간 거래 내역과 최종수요 부문 간 선형적 관계를 바탕으로 한, 산업별 총산출액 결정식은 (식 4-1)과 같이 정리할 수 있다. (식 4-1)에 $x_{ij} = a_{ij} \cdot X_j$ 관계식을 대입하면 (식 4-2)와 같이 도출된다. (식 4-2)를 행렬 형태로 정리하고, X 에

19) 본 세부 절의 주요 방법론적 설계와 관련한 내용은 여영준 외(2022)의 연구를 바탕으로 작성되었음.

대해서 전개하면 (식 4-3)과 (식 4-4)를 도출할 수 있다.

[표 4-4] 산업연관표 기본 구조와 구성요소

		중 간 수 요						최종 수요	총 산출액
		1	2	...	j	...	n		
중 간 투 입	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1n}	Y_1	X_1
	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2n}	Y_2	X_2
	⋮	⋮	⋮				⋮	⋮	⋮
	i	x_{i1}	x_{i2}		x_{ij}		x_{in}	Y_i	X_i
	⋮	⋮	⋮				⋮	⋮	⋮
	n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nj}	...	x_{nn}	Y_n	X_n
부가가치		V_1	V_2	...	V_j	...	V_n		
총투입액		X_1	X_2	...	X_j	...	X_n		

출처: 여영준 외(2022, p.429)

$$\begin{bmatrix} x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n} + Y_1 \\ \vdots \\ x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{in} + Y_i \\ \vdots \\ x_{n1} + x_{n2} + \dots + x_{nn} + Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad \dots \text{(식 4-1)}$$

where $n = 22$

정리된 (식 4-4)에서 $(I - A)^{-1}$ 는 레온티에프 역행렬(Leontief inverse matrix)로서, $(I - A)^{-1}$ 행렬을 구성하는 요소 α_{ij} 는 산업 j 부문에 대한 최종수요 한 단위 증가로 직, 간접적으로 유발되는 i 부문의 산출량 변화량을 의미한다. 그에 따라, $(I - A)^{-1}$ 행렬을 식별하면, 최종수요 부문 변동 ΔY 에 따른 각 산업에서 직·간접적으로 유발되는 총 산출 변동분 ΔX 을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \cdots + a_{1n}X_n + Y_1 \\ \vdots \\ a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \cdots + a_{in}X_n + Y_i \\ \vdots \\ a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + \cdots + a_{nn}X_n + Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad \dots \text{(식 4-2)}$$

$$AX + Y = X \quad \dots \text{(식 4-3)}$$

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad \dots \text{(식 4-4)}$$

또한, 산업연관분석은 자료체계 내 소비, 투자, 수출 등을 포함한 최종수요 요소의 변화가 레온티에프 역행렬을 매개로 경제체제 내 산업 부문의 생산활동에 변동을 유발하는 것뿐만 아니라 이러한 산업 생산활동 변화가 부가가치 형성액도 변화시키는 것으로 간주한다. 여기에서는 부가가치 유발계수를 활용하는데, 부가가치 유발계수는 앞서 언급한 부가가치계수 행렬 요소 v_j 로 구성된 \widehat{A}_V 과 레온티에프 역행렬 $(I - A)^{-1}$ 를 곱하여 부가가치유발계수를 도출할 수 있다. 이는 (식 4-5)를 통해 확인할 수 있다. 더 나아가 산업연관분석은 최종수요 부문에서의 변화가 부가가치 유발과 함께 이것이 노동 수요에서도 변화를 일으킬 것을 가정하여 취업유발계수를 예측할 수 있다. 그에 따라, 취업유발계수는 아래 (식 4-6)처럼 결정되는데, 해당 식에서 \widehat{l} 은 취업계수 행렬을 뜻하며, 행렬 요소는 $l_{w,j} = L_{w,j}/X_j$ 로 구성된다. 여기에서 $L_{w,j}$ 는 기준연도 산업 j 부문에 종사하는 취업자 수를 뜻한다. 이에 따라, (식 4-6)을 바탕으로 최종수요 변화 등에 따라 경제체제 내에서 직간접적으로 유발되는 취업자 수의 증감 수준을 예측할 수 있는 것이다. 이같은 방법론적 설계를 바탕으로, 본 연구에서는 생산유발계수, 부가가치유발계수, 취업유발계수를 활용함으로써 설계하는 시나리오별 파급효과를 정량화하여 전망하고자 한다. 이러한 분석을 위해서는 2015년 기준연도 산업연관표 실측표를 활용하였다.

$$V = \widehat{A}_V \cdot (I - A)^{-1} Y \quad \dots \text{(식 4-5)}$$

$$L = \widehat{l} \cdot (I - A)^{-1} Y \quad \dots \text{(식 4-6)}$$

본 연구에서는 2050년 기준 전략적 산업별 순환경제 이행전략 추진에 따른 파급효과를 산출하는 데에 목적이 있다. 2050년 기준 최종수요 부문 수치 반영을 위해, OECD(2021)의 장기 경제전망(GDP 전망치)을 바탕으로, 2015년 대비 2050년 GDP 수준을 계산하여 활용했다. 즉 2015년 대비 2050년 민간 소비, 정부 소비, 투자 및 수출 규모가 2015년 대비 2050년 GDP 증가(전망치) 수준만큼 동조화되어 증가함을 가정해 반영함으로써 2050년 기준 산업별 순환경제 이행에 따른 영향을 정량화하는 기반 체계를 마련하고자 했다. 기준안 시나리오(Business As Usual, BAU)는 외생적인 정책 충격을 가하지 않은 경우로 설정하기 위해, 상기 구축한 산업연관표를 그대로 적용하고, 해당 자료체계에 2015년 기준연도 대비 2050년 최종수요 증가분을 반영함으로써 생산유발액, 부가가치 유발액, 그리고 취업유발 규모를 산정하고자 했다. 즉, 2015년 기준연도의 산업별 생산기술 구조가 그대로 유지된 상태로 2050년까지 지속할 것으로 가정하였다. 이는 경제규모(최종수요 규모)가 2015년 대비 2050년 GDP 전망치 증가 수준만큼씩 단순 증가하는 경우로서, 순환경제 이행을 위한 주요 산업별 전략 이행과 이에 따른 생산기술 구조상 변동이 반영되지 않은 경우라고 이해할 수 있다.

또한 본 연구에서는 기준안 시나리오 BAU와 별도로, 순환경제 이행 시나리오를 고려하여 총 5가지 정책 시나리오를 구성해 분석을 수행하고자 한다. 이에 첫 번째 정책 시나리오 SCN1-1은 제2장에서 도출한 순환성 향상을 위한 전략적 산업으로 선정된 코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE), 1차금속 제조업(NFM) 산업에서 중요한 전략으로 상정하는 순환 공급망 안정화(수거/분해/조립/수리/원료 재사용)와 순환 재생원료 활용 확대를 산업연관표 내 투입계수에 반영하는 정책적 충격을 가하는 경우로 설정했다. 그리고 두 번째 SCN1-2 시나리오의 경우에는 SCN1-1에 추가로, 전략적 산업 코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE), 1차금속 제조업(NFM)에서 순환경제 실현을 위한 R&D를 확대하는 경우를 반영한 경우로 가정했다.

세 번째 시나리오 SCN2-1은 제3장에서 도출한 순환성 향상을 위한 전략적 산업으로 선정된 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT) 산업에서 중요한 전략으로 간주하는 순환 공급망 안정화(수거/분해/조립/수리/원료 재사용)와 부품 재사용 및 상품 재제조 확대를 산업연관표 내 투입계수에 반영하

는 정책적 충격을 가하는 경우로 설정했다. 더불어, 네 번째 시나리오 SCN2-2는 SCN2-1에 추가로 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT)에서 순환경제 실현을 위해 R&D를 확대하는 경우를 반영한 시나리오이다. 마지막으로, 다섯 번째 시나리오 SCN3은 SCN1-1과 SCN2-1을 모두 반영한 시나리오로 설정함으로써, 실질적으로 지속가능한 순환시스템 실현을 위한 핵심 산업의 전략 이행에 따른 중장기 영향을 전망하고자 하였다.

이처럼 본 연구에서는 분석대상 시나리오로서는 제3장에서 도출한 1) 물질 재사용, 2) 물질 재사용 혁신, 3) 부품 재사용, 그리고 4) 부품 재사용 혁신전략을 고려하고자 한다. 더불어 순환경제 이행을 위한 전략적 산업으로서 코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE), 1차금속 제조업(NFM), 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT)으로서 설정하여 해당 산업에 대한 정책적 충격을 가했을 때 그에 따른 영향을 분석하고자 했다. 앞선 산업연관표 내 산업분류에서도 확인하였듯이 해당 전략적 산업들을 명시적으로 자료체계 내에 표현함으로써, 해당 산업의 생산기술 구조상 변화를 투입계수 변동으로 이뤄내 고자 시도했음을 밝힌다. 따라서 BAU 시나리오 대비 정책 시나리오별 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 취업 유발효과 간 차이를 계산함으로써 전략 이행에 따른 중장기 영향을 계측하고자 한다. 본 연구에서 설계한 정책 시나리오에 대한 고려는 아래 [표 4-5]를 통해 확인할 수 있다.

[표 4-5] 본 연구 내 정책 시나리오 설계

시나리오 명		시나리오 개요	시나리오 세부 가정
BAU 시나리오		순환경제 정책 이행 X (정책충격 X)	<ul style="list-style-type: none"> • 우리나라 산업별 최종수요 변화('15-'50) 적용 • 기준연도 '15년 대비 '50년 GDP 전망치 증가 수준만큼 최종수요 변동
순환 경제 정책시 나리오	SCN1-1 시나리오 (물질재사용 시나리오)	물질(원료) 재사용 확대	<ul style="list-style-type: none"> • '50년 OIL, CHE, NFM 산업 자원(물질)순환성 목표 달성 가정 • OIL, CHE, NFM 산업 생산기술 구조 내 CRM과 CEN 산업에 대한 중간수요 증대 • 투입계수 변동을 통한 행렬 재조정 및 수정 산업연관표 적용

시나리오 명	시나리오 개요	시나리오 세부 가정
SCN1-2 시나리오 (물질재사용 혁신 시나리오)	물질(원료) 재사용 확대 및 R&D 확대	<ul style="list-style-type: none"> • '50년 OIL, CHE, NFM 산업 자원(물질)순환성 목표 달성 가정 • OIL, CHE, NFM 산업 생산기술 구조 내 CRM과 CEN 산업에 대한 중간수요 증대 • OIL, CHE, NFM 산업 생산기술 구조 내 R&D 산업에 대한 중간수요 증대 • 투입계수 변동을 통한 행렬 재조정 및 수정 산업연관표 적용
SCN2-1 시나리오 (부품재사용 시나리오)	부품 재사용/ 재제조 확대	<ul style="list-style-type: none"> • '50년 ECT, ELM, AUT 산업 자원(물질)순환성 목표 달성 가정 • ECT, ELM, AUT 산업 생산기술 구조 내 CRM과 CMA 산업에 대한 중간수요 증대 • 투입계수 변동을 통한 행렬 재조정 및 수정 산업연관표 적용
SCN2-2 시나리오 (부품재사용 혁신 시나리오)	부품 재사용/ 재제조 확대 및 R&D 확대	<ul style="list-style-type: none"> • '50년 ECT, ELM, AUT 산업 자원(물질)순환성 목표 달성 가정 • ECT, ELM, AUT 산업 생산기술 구조 내 CRM과 CMA 산업에 대한 중간수요 증대 • ECT, ELM, AUT 산업 생산기술 구조 내 R&D 산업에 대한 중간수요 증대 • 투입계수 변동을 통한 행렬 재조정 및 수정 산업연관표 적용
SCN3 시나리오 (지속가능한 순환시스템 시나리오)	지속가능한 순환 시스템 실현 위한 통합적 전략 이행	<ul style="list-style-type: none"> • '50년 OIL, CHE, NFM , ECT, ELM, AUT 산업 자원(물질)순환성 목표 달성 가정 • OIL, CHE, NFM , ECT, ELM, AUT 산업 생산기술 구조 내 CRM과 CEN 산업에 대한 중간수요 증대 • OIL, CHE, NFM , ECT, ELM, AUT 산업 생산기술 구조 내 R&D 산업에 대한 중간수요 증대 • 투입계수 변동을 통한 행렬 재조정 및 수정 산업연관표 적용

[표 4-5]에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서는 순환경제 정책 시나리오를 산업연관표 내에 반영하기 위해 몇 가지 방법론적 가정을 포함하였다. 우선 순환경제 이행을 위한 전략적 산업으로서 고려한 코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE), 1차금속 제조업(NFM), 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT)의 자원(물질)순환성이 목표연도 2050년에 달성됨을 외생적으로 가정하기 위해, 개별 산업의 총 투입액에서 (자원순환 산업으로 고려되는) CRM, CEN, CMA 산업 중간재 투입액 비중으로 자원(물질)순환성 달성 수준을 대리변수로 고려하여 계산, 활용하고자 했다. 이에 따라 우리나라 정부가 최근 발

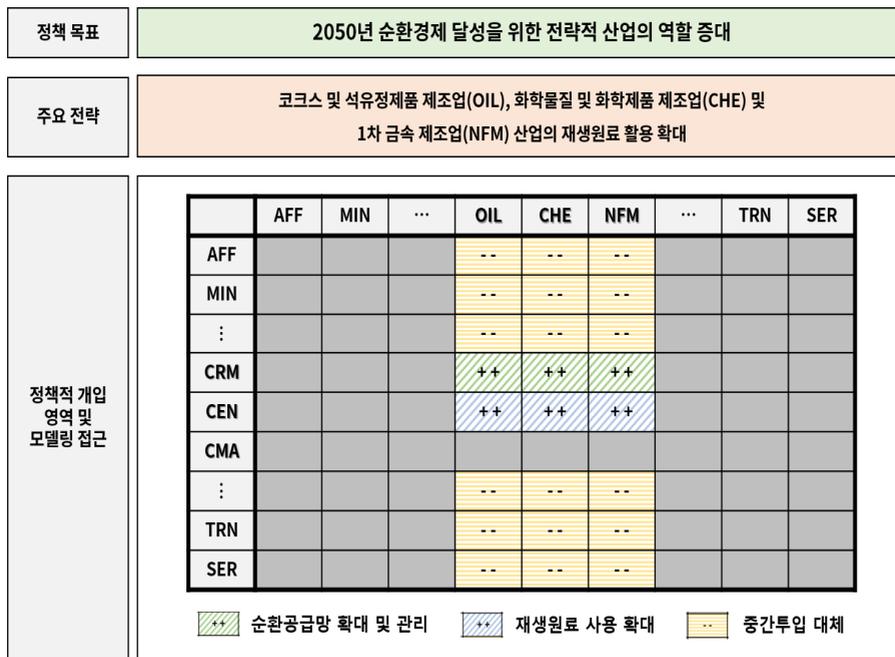
표한 『탄소중립을 위한 한국형(K)-순환경제 이행계획』 내에 명시화된 주요 품목별 자원 순환성 달성 수준[표 4-6] 이 2020년 대비 2050년에 증가하는 만큼, 산업연관표 내 6개 산업(OIL, CHE, NFM, ECT, ELM, AUT)의 투입 구조에서 CRM, CEN, CMA 산업 중간재 투입액 비중이 증가하도록 투입계수 행렬의 변화를 반영하였다. 그리고 세부적으로, 자원순환성 달성 증가분을 기준으로 CRM, CEN, CMA 산업 중간재 투입액 비중 증가분은 기준연도 개별 산업의 투입계수 수치만큼 비례 배분하여 반영하였음을 밝힌다.

그리고, 산업연관표 내 6개 전략 산업(OIL, CHE, NFM, ECT, ELM, AUT)의 총투입액을 일정하게 유지하고, 해당 산업의 투입계수를 위에서 설명한 바와 같이 변화시킴으로써 수정 산업연관표를 개별 시나리오에 적용해 2050년 기준 최종수요에 따른 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 취업 유발효과를 계산하고자 하였다. 여기에서 투입계수에 변동을 일으키면 전략적 산업으로 선정한 6개 산업의 총투입액과 총산출액이 서로 다르기 때문에 RAS 기법을 적용하여 행렬 재구축(matrix balancing) 작업을 수행하였다. 더불어, SCN1-2 시나리오, SCN2-1 시나리오와 같이 전략적 산업에서 R&D를 확대하는 경우를 산업연관표에 반영하기 위해, 6개 전략 산업(OIL, CHE, NFM, ECT, ELM, AUT)의 총 투입액을 일정하게 유지하고, 해당 산업들의 R&D 산업에 대한 중간재 투입이 증대함을 가정하고자 했다. 여기에서, 자원 순환성 달성 증가분을 기준으로, CRM, CEN, CMA, R&D 산업 중간재 투입액 비중 증가분은 기준연도 개별 산업의 투입계수 수치만큼 비례 배분하여 반영하였음을 밝힌다. 더불어, 해당 시나리오에서 전략 산업들의 R&D 산업에 대한 투입계수 변동에 따른 중간재 투입액 절대 증가분만큼 CRM, CEN, CMA 산업에서 R&D 투입계수 변동에도 영향을 끼치도록 설정함으로써, 실질적으로 6개 전략산업에서 R&D 확대가 CRM, CEN, CMA 산업과 관련한 R&D 확대임을 명시적으로 반영하고자 했다. 이에, 해당 요소들에 대한 투입계수를 변동시키는 행렬 재구축(matrix balancing) 작업을 수행하고, 2050년 기준 최종수요에 따른 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 취업 유발효과를 계산하고자 하였다. 또한 시나리오별 CRM, CEN, CMA, R&D 산업에 대한 투입계수 증가분만큼 타 산업의 투입계수는 감소 시킴으로써 중간재 간 대체효과 역시 모형에 반영하고자 했다. 이에 따라 본 연구에서 산업연관분석을 위해 기반한 정책 시나리오별 주요 방법론적 접근은 아래 [그림 4-2]를 통해 확인할 수 있다.

[표 4-6] 2050년 기준 우리나라 주요 품목별 자원 순환성 목표치

구분	현재('21년)	'30년	'50년	'21년 대비 '50년 증가분
포장재	81%	85%	90%	+9%p
플라스틱	56%	60%	95%	+39%p
섬유	30%	50%	70%	+37%p
전기·전자제품	33%	50%	70%	+6%p
자동차	89%	93%	95%	+40%p
음식물	13%	52%	70%	+57%p
건설자재	73%	80%	90%	+17%p

출처: 산업통상자원부(2021, p.27) 재구성.



(a) SCN1-1 시나리오

순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향 ...

정책 목표	2050년 순환경제 달성을 위한 전략적 산업의 역할 증대																																																																																																																																															
주요 전략	코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE) 및 1차 금속 제조업(NFM) 산업의 재생원료 활용 확대와 관련 기술혁신 확대																																																																																																																																															
정책적 개입 영역 및 모델링 접근	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>AFF</th> <th>MIN</th> <th>...</th> <th>OIL</th> <th>CHE</th> <th>NFM</th> <th>...</th> <th>CRM</th> <th>CEN</th> <th>...</th> <th>TRN</th> <th>SER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>AFF</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>MIN</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>⋮</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>CRM</th> <td></td><td></td><td></td><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>CEN</th> <td></td><td></td><td></td><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>CMA</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>RND</th> <td></td><td></td><td></td><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td></td><td>++</td><td>++</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>⋮</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>TRN</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>SER</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </tbody> </table> <p> 순환공급망 확대 및 관리 재생원료 사용 확대 중간투입 대체 순환경제 R&D 확대 </p>		AFF	MIN	...	OIL	CHE	NFM	...	CRM	CEN	...	TRN	SER	AFF				--	--	--							MIN				--	--	--							⋮				--	--	--							CRM				++	++	++							CEN				++	++	++							CMA													RND				++	++	++		++	++				⋮				--	--	--							TRN				--	--	--							SER				--	--	--						
		AFF	MIN	...	OIL	CHE	NFM	...	CRM	CEN	...	TRN	SER																																																																																																																																			
	AFF				--	--	--																																																																																																																																									
	MIN				--	--	--																																																																																																																																									
	⋮				--	--	--																																																																																																																																									
	CRM				++	++	++																																																																																																																																									
	CEN				++	++	++																																																																																																																																									
	CMA																																																																																																																																															
	RND				++	++	++		++	++																																																																																																																																						
	⋮				--	--	--																																																																																																																																									
TRN				--	--	--																																																																																																																																										
SER				--	--	--																																																																																																																																										

(b) SCN1-2 시나리오

정책 목표	2050년 순환경제 달성을 위한 전략적 산업의 역할 증대																																																																																																				
주요 전략	컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT) 산업의 상품 재제조 확대																																																																																																				
정책적 개입 영역 및 모델링 접근	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>AFF</th> <th>MIN</th> <th>...</th> <th>ECT</th> <th>ELM</th> <th>AUT</th> <th>...</th> <th>TRN</th> <th>SER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>AFF</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>MIN</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>⋮</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>CRM</th> <td></td><td></td><td></td><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>CEN</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>CMA</th> <td></td><td></td><td></td><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>⋮</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>TRN</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>SER</th> <td></td><td></td><td></td><td>--</td><td>--</td><td>--</td><td></td><td></td><td></td> </tr> </tbody> </table> <p> 순환공급망 확대 및 관리 상품 재제조 확대 중간투입 대체 </p>		AFF	MIN	...	ECT	ELM	AUT	...	TRN	SER	AFF				--	--	--				MIN				--	--	--				⋮				--	--	--				CRM				++	++	++				CEN										CMA				++	++	++				⋮				--	--	--				TRN				--	--	--				SER				--	--	--			
		AFF	MIN	...	ECT	ELM	AUT	...	TRN	SER																																																																																											
	AFF				--	--	--																																																																																														
	MIN				--	--	--																																																																																														
	⋮				--	--	--																																																																																														
	CRM				++	++	++																																																																																														
	CEN																																																																																																				
	CMA				++	++	++																																																																																														
	⋮				--	--	--																																																																																														
	TRN				--	--	--																																																																																														
SER				--	--	--																																																																																															

(c) SCN2-1 시나리오

정책 목표	2050년 순환경제 달성을 위한 전략적 산업의 역할 증대																																																																																																																																																			
주요 전략	컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT) 산업의 상품 재제조 확대 및 관련 기술혁신 확대																																																																																																																																																			
정책적 개입 영역 및 모델링 접근	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>AFF</th> <th>MIN</th> <th>...</th> <th>ECT</th> <th>ELM</th> <th>AUT</th> <th>...</th> <th>CRM</th> <th>CMA</th> <th>...</th> <th>TRN</th> <th>SER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AFF</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>--</td> <td>--</td> <td>--</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MIN</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>--</td> <td>--</td> <td>--</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>⋮</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>--</td> <td>--</td> <td>--</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CRM</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>++</td> <td>++</td> <td>++</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CEN</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CMA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>++</td> <td>++</td> <td>++</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>RND</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>++</td> <td>++</td> <td>++</td> <td></td> <td>++</td> <td>++</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>⋮</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>--</td> <td>--</td> <td>--</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TRN</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>--</td> <td>--</td> <td>--</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SER</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>--</td> <td>--</td> <td>--</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <div style="margin-top: 10px;"> <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;"> 순환공급망 확대 및 관리</td> <td style="width: 50%;"> 상품 재제조 확대</td> </tr> <tr> <td> 중간투입 대체</td> <td> 순환경제 R&D 확대</td> </tr> </table> </div>		AFF	MIN	...	ECT	ELM	AUT	...	CRM	CMA	...	TRN	SER	AFF				--	--	--							MIN				--	--	--							⋮				--	--	--							CRM				++	++	++							CEN													CMA				++	++	++							RND				++	++	++		++	++				⋮				--	--	--							TRN				--	--	--							SER				--	--	--							순환공급망 확대 및 관리	상품 재제조 확대	중간투입 대체	순환경제 R&D 확대
		AFF	MIN	...	ECT	ELM	AUT	...	CRM	CMA	...	TRN	SER																																																																																																																																							
	AFF				--	--	--																																																																																																																																													
	MIN				--	--	--																																																																																																																																													
	⋮				--	--	--																																																																																																																																													
	CRM				++	++	++																																																																																																																																													
	CEN																																																																																																																																																			
	CMA				++	++	++																																																																																																																																													
	RND				++	++	++		++	++																																																																																																																																										
	⋮				--	--	--																																																																																																																																													
TRN				--	--	--																																																																																																																																														
SER				--	--	--																																																																																																																																														
순환공급망 확대 및 관리	상품 재제조 확대																																																																																																																																																			
중간투입 대체	순환경제 R&D 확대																																																																																																																																																			

(d) SCN2-2 시나리오

[그림 4-2] 본 연구 내 정책 시나리오 반영 위한 방법론적 접근

제3절 결과 분석과 해석

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

본 세부 절에서는 앞서 설명한 주요 방법론적 접근과 시나리오 설계를 바탕으로 도출한 주요 분석 결과를 제시하고자 한다. 아래 제시된 [표 4-7]은 BAU 시나리오 대비 정책 시나리오별 생산 유발효과, 부가가치 유발효과, 취업 유발효과를 비교하여 정리한 것이다. 해당 [표 4-7] 결과표에서 나타나듯이 SCN3 시나리오에서 BAU 대비 가장 높은 수준의 생산 유발효과, 부가가치 유발효과 및 취업 유발효과가 직간접적으로 발생함을 분석할 수 있었다. SCN3 시나리오의 경우 BAU 시나리오 대비 약 482조 원, 약 292조 원의 생산 유발효과 및 부가가치 유발효과가 발생하였으며 취업 유발효과는 BAU 대비 약 411만 개가 더 창출되는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로, 6개 전략적 산업(OIL, CHE, NFM, ECT, ELM, AUT)에서 물질(원료) 재사용 확대, 부품 재사용/재제조 확대, 그리고 관련 R&D 확대를 통한 전략 이행을 중장기적으로 시행하여 2050년에 자원순환성 목표를 달성하면 경제체제 내 산업의 직간접적인 생산 유발효과를 통해 경제체제 내 성장잠재력을 보다 확대할 수 있다. 더불어, 해당 결과치를 바탕으로, 2050년 지속가능한 순환경제 시스템으로 전환을 효과적으로 도모하기 위해서는 통합적인 관점으로 산업별 전략을 이행할 필요가 있음을 알 수 있다. 이를 통해, 순환경제로의 이행이 단순히 환경오염 및 자원고갈 문제에 대한 대응을 넘어, 경제의 성장잠재력을 확대하고 일자리 창출 효과를 확대 견인하는 성장동력으로서 잠재성을 지니고 있음을 이해할 수 있다.

더불어 SCN1-1부터 SCN2-2 시나리오의 BAU 대비 주요 결과치를 살펴보면, OIL, CHE, NFM 산업에 대한 순환경제 전략 이행 효과보다 ECT, ELM, AUT 산업에서 순환경제 전략을 부품 재사용/재제조 확대를 바탕으로 이행하는 경우의 생산유발 및 경제적 효과가 상대적으로 높게 형성됨을 확인할 수 있다(SCN1-1 시나리오 생산 유발효과: BASE 대비 약 27.5% 증가; SCN2-1 시나리오 생산 유발효과: BASE 대비 약 28.3% 증가). 이는 기준연도 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT)의 자원(물질) 순환성이 코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학

물질 및 화학제품 제조업(CHE), 1차금속 제조업(NFM) 산업 대비 상대적으로 낮은 수준으로서, 자원순환성 목표 달성에 따른 생산 유발효과 확대 잠재력이 더욱 증가하기 때문으로 볼 수 있다. 또한 ECT, ELM, AUT 산업이 OIL, CHE, NFM 산업에 대비하여 상대적으로 우리나라 경제체제 내 총 산출액에서 차지하는 비중이 높다 보니, 이들의 자원(물질)순환성 달성에 따른 직간접적 영향이 더욱 크게 형성되기 때문으로 해석할 수 있다.

[표 4-7] 2050년 기준 BAU 대비 정책 시나리오별 영향 전망

시나리오 명	시나리오 개요	생산유발효과 (백만원)	부가가치유발효과 (백만원)	취업유발효과 (명)
SCN1-1 시나리오	물질(원료) 재사용 확대	427,596,490 (27.5%)*	263,560,830 (50.4%)	3,673,641 (44.8%)
SCN1-2 시나리오	물질(원료) 재사용 확대 및 R&D 확대	435,164,897 (28.0%)	266,202,892 (50.9%)	3,718,970 (45.4%)
SCN2-1 시나리오	부품 재사용/ 재제조 확대	440,058,542 (28.3%)	276,694,830 (52.9%)	3,878,773 (47.3%)
SCN2-2 시나리오	부품 재사용/ 재제조 확대 및 R&D 확대	467,924,282 (30.1%)	288,618,431 (55.2%)	4,062,559 (49.6%)
SCN3 시나리오	지속가능한 순환 시스템 실현 위한 통합적 전략 이행	481,768,263 (31.0%)	292,092,746 (55.9%)	4,108,147 (50.1%)

* 주) BAU 시나리오 대비 증가 수준

SCN1-1과 SCN1-2 시나리오의 주요 결과치를 비교하고, SCN2-1과 SCN2-2 시나리오의 주요 결과를 비교하였을 때, 순환경제 이행을 위한 전략 산업별 기술혁신을 위한 R&D가 확대되면 생산 유발효과와 부가가치 유발효과가 더욱 증대됨을 확인할 수 있다. 이같은 규모효과 증대는 경제체제 내 취업 유발효과를 더욱 증대시키는 것으로 확인되었다(SCN2-1 시나리오 생산 유발효과: BASE 대비 약 28.3% 증가; SCN2-2 시나리오 생산 유발효과: BASE 대비 약 30.1% 증가). 이에 따라 경제체제 내 폐기물 에너지화, 재생용 가공원료 및 재활용제품 제조, 폐기물·폐자원 관리를 전제로 하는 제품 개발과 회수·선별·재활용 기술의 고도화 등을 포함한 저비용·고수준 자원순환을 뒷받침하는

R&D 투자 확대를 중장기적으로 이행할 필요가 있다. 해당 분석 결과를 통해, 특정 국가에 대한 물자나 자원의 의존율을 낮추고, 보다 탄력적인(resilient) 순환경제 시스템을 구축해야 한다. 이와 동시에 우리나라의 순환경제 관련 기술·제도·시스템의 경쟁력 강화를 위해 중장기적으로 산업 전반의 순환경제 관련 기술혁신을 촉진하는 다양한 정책 대안을 준비할 필요가 있다. 글로벌 시장에서 우리나라 순환경제 시스템의 경쟁력을 향상하고 중장기적으로 지속가능한 발전(성장) 목표를 실현하는 기반을 마련해야 한다.

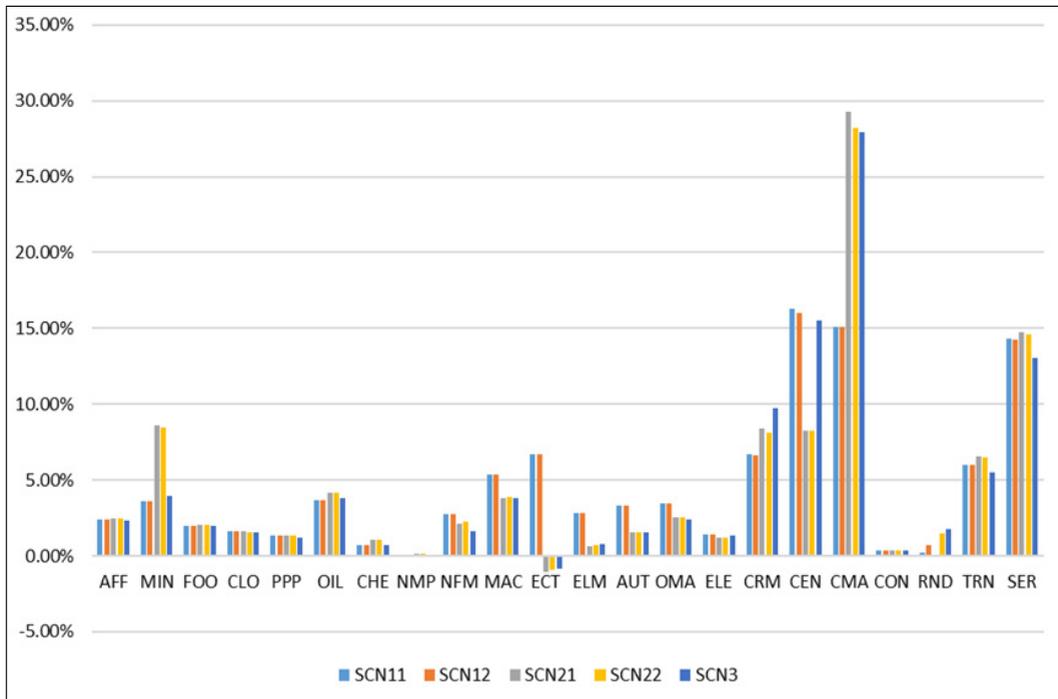
[표 4-7]에서 제시한 주요 결과 요약표에 대한 이해를 바탕으로, 시나리오별 생산 유발효과가 산업별로 어떻게 나타나는지 정리하면 아래 [표 4-8]와 같다. 해당 결과표를 통해 확인할 수 있듯이 SCN1-1부터 SCN3 시나리오에 이르기까지의 전략 이행에 따라 가장 높은 생산 유발효과가 도래하는 산업은 폐기물 및 폐자원 관리(CRM), 폐기물 재생(CEN), 제품 재제조(CMA) 산업이다. 이는 순환경제 전략 이행에 따라 해당 산업들의 규모 증대 효과가 더욱 확대되는 직접적이고 1차적인 영향이 원인인 것으로 해석할 수 있다. 이들 CRM, CEN, CMA 산업이 시나리오별 총생산 유발액에서 차지하는 비중이 높았다. 아래 [그림 4-3]은 시나리오별 총생산 유발액에서 개별 산업의 생산 유발효과가 차지하는 상대적 비중을 나타낸 것이다. SCN1-1와 SCN1-2, SCN2-1, SCN2-2, SCN3 시나리오의 총생산 유발액에서 순환경제 산업이 차지하는 비중은 각각 38.1%와 37.7%, 46.0%, 44.6%, 53.2%인 것으로 집계된다. 이는 SCN3 시나리오로 갈수록, CRM, CEN, CMA 산업의 생산 유발효과 확대가 순환경제 산업구조로의 전환을 더욱 촉진함을 시사한다.

[표 4-8] 2050년 기준 BAU 대비 설계 시나리오별 산업별 생산유발효과 변화

(단위: 백만원)

코드	업종명	시나리오 명				
		SCN1-1	SCN1-2	SCN2-1	SCN2-2	SCN3
AFF	농림수산	10,136,166	10,305,321	10,891,763	11,465,206	11,208,896
MIN	광업	15,276,063	15,537,719	37,982,880	39,710,503	19,153,290
FOO	음식료품	8,411,511	8,556,444	9,080,297	9,597,972	9,397,795
CLO	섬유/가죽	7,065,209	7,181,417	7,019,243	7,402,797	7,382,154
PPP	목재/종이/인쇄	5,585,215	5,680,280	5,997,276	6,365,986	5,733,746
OIL	석유정제	15,748,097	16,011,767	18,405,122	19,395,525	18,343,848

코드	업종명	시나리오 명				
		SCN1-1	SCN1-2	SCN2-1	SCN2-2	SCN3
CHE	화학물질 및 화학제품	2,874,605	2,914,861	4,682,441	4,969,231	3,236,053
NMP	비금속광물	187,174	189,870	551,032	589,322	104,214
NFM	철강 및 1차금속	11,747,761	11,957,202	9,446,571	10,402,894	7,748,983
MAC	금속제품/기계/장비	22,894,298	23,205,327	16,911,047	18,181,049	18,427,403
ECT	컴퓨터, 전자 및 광학기기	28,518,874	29,080,407	- 4,672,969	- 4,382,471	- 4,060,745
ELM	전기장비	11,999,831	12,197,123	2,676,235	3,172,622	3,771,925
AUT	자동차 및 운송장비	14,098,000	14,289,071	6,671,309	7,418,604	7,538,551
OMA	기타 제조업	14,844,014	15,110,285	11,137,558	11,967,708	11,383,447
ELE	가스 및 수도	6,135,510	6,186,802	5,245,891	5,632,712	6,576,106
CRM	폐기물 및 폐자원 관리	28,730,035	28,852,941	36,939,187	37,924,889	46,957,785
CEN	폐기물 재생	69,730,068	69,702,849	36,443,473	38,727,026	74,821,365
CMA	제품 재제조	64,595,666	65,606,234	128,929,802	132,072,767	134,617,810
CON	건설	1,487,803	1,502,018	1,556,478	1,627,280	1,557,592
RND	연구개발	812,722	3,162,228	318,157	6,938,873	8,403,754
TRN	운수	25,638,361	26,007,584	28,858,899	30,329,590	26,643,596
SER	서비스	61,079,507	61,927,143	64,986,850	68,414,198	62,820,694
TOT	전체 산업	427,596,490	435,164,897	440,058,542	467,924,282	481,768,263



[그림 4-3] 2050년 기준 BAU 대비 시나리오별 총 생산유발액 내 개별 산업 비중(%)

CRM, CEN, CMA 산업을 포함한 주요 순환경제 산업의 일차적 생산 유발효과는 타 산업으로 확산되어 산업 부문 전반의 생산 유발효과를 견인하는 것으로 파악된다. 이 같은 영향은 SCN3 > SCN2 > SCN1 순으로 큰 것으로 확인된다. 더불어, SCN3 시나리오에 국한하여 도출한 순환경제 산업(CRM, CEN, CMA 산업)의 생산유발계수를 비교해 보면, 순환공급망 관리와 관련된 폐기물 및 폐자원 관리 산업(CRM)의 생산유발계수가 CEN, CMA 대비 상대적으로 높은 수준으로 나타났다. 이는, 해당 CRM 산업이

순환경제로의 전환에 따른 파급효과 형성에 중추적인 역할을 할 수 있음을 시사한다. 더불어, CRM, CEN, CMA 산업의 생산 유발계수가 산업별로 어떻게 분포되어 형성되는지 살펴보면, CRM, CEN, CMA 산업 간 연관관계가 매우 높은 수준임을 확인할 수 있다. 이는 CRM, CEN, CMA 개별 산업의 생산 유발계수 총규모에서 순환경제 산업이 기여하는 상대적 비중이 매우 높음을 통해 알 수 있다. 이를 통해 CRM, CEN, CMA 산업 간 관계성이 매우 높으며, 이들 산업간 연관관계가 복합적으로 이뤄짐으로써 순환경제 이

행에 따른 중장기 경제적 가치 창출에 긍정적인 기여를 할 것으로 전망할 수 있다.

더불어, CRM, CEN, CMA 산업을 포함한 순환경제 산업의 생산 유발효과 확대와 함께 금속제품/기계/장비(MAC), 운송장비(AUT) 철강 및 1차금속(NFM), 기타 제조업(OMA), 석유정제(OIL), 광업(MIN) 산업을 포함한 제조업 부문과 운수(TRN), 서비스(SER) 산업을 포함한 서비스 부문의 생산 유발효과가 두드러지게 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이는 CRM, CEN, CMA 산업의 폐기물 및 폐자원 관리, 폐기물 에너지화 및 재활용 재제조 등 과정에서 관련 제조업(MAC, AUT, NFM, OMA, MIN)이 생산한 중간재 및 자원의 재배치와 재사용이 촉진되기 때문으로 해석한다. 특히, 여기에서는 석유정제나 광업, 운송장비 제조업, 금속제품/기계/장비, 기타 제조업, 철강 및 1차금속 등을 포함한 산업에서 생산 유발효과가 직간접적으로 높은 수준으로 유발될 수 있음을 가늠할 수 있다. 이를 통해, 해당 산업군에서 폐자원 발생부터 처리, 자원화 및 재활용 등 전체적인 관리체계 혁신을 더욱 도모해야 한다. 즉, 해당 분석 결과는 자원과 주요 원료를 공급하는 산업에서 폐기물 및 폐자원 관리가 향후 순환경제로의 이행에 주요한 과제이며, 순환경제 관련 산업과 자원 공급 산업의 순환성 강화를 병행하여 추진해야 함을 시사한다. 재자원화와 원료 재사용 등 순환 공급망의 안정화를 목표로, 원료 및 자원, 부품 산업의 비즈니스 모델 혁신을 촉진하고, 해당 자원 공급자의 수익 구조를 재설계하는 방안을 지원해야 하며 더불어, 전 산업에서 석유정제 및 광업 부문에 대한 투입계수가 점진적으로 감소하도록 고품질·저 환경부담의 소재 및 자원(원료)의 생산체계를 마련하는 등 기술혁신을 추진해야 한다.

생산 유발액 변화를 살펴보면 SCN2-1, SCN2-2, SCN3 시나리오에서 ECT(컴퓨터, 전자 및 광학기기) 산업의 생산 유발액이 BAU 대비 다소 감소하는 것으로 나타나는데 [표 4-8], 이는 해당 산업에서 부품 재제조 및 순환 공급망 관리 등의 형태로 순환경제로 이행을 촉진할수록 ECT 산업이 자체적으로 조달하는 중간재 투입량이 대폭 감소하면서 해당 ECT 산업 중간재에 대한 수요가 크게 줄기 때문으로 해석할 수 있다. 이는 순환경제로 이행하는 과정에서 기존 부품과 원료가 대체되는 과정에서 발생하는 잠재적 손실 효과를 완화할 다양한 지원체계를 마련할 필요가 있음을 시사한다.

시나리오별 부가가치 유발효과가 산업별로 어떻게 나타나는지 정리하면 아래 [표 4-9]와 같이 정리하여 제시할 수 있다. 해당 결과표를 통해 확인할 수 있듯이, SCN1-1

부터 SCN3 시나리오에 이르기까지의 전략 이행에 따라, 총 부가가치 유발액에서 폐기물 및 폐자원 관리(CRM), 폐기물 재생(CEN), 제품 재제조(CMA) 산업이 기여하는 부분이 증가하였다. 기술혁신을 동반하는 SCN2-2 시나리오와 SCN3 시나리오의 부가가치 유발효과를 살펴보면, R&D 산업에서 BAU 시나리오 대비 부가가치 유발효과가 감소하는 것이 나타난다([표 4-9]). 이는 순환경제로의 전환이 보다 진전됨에 따라, R&D 산업의 지분집약화와 생산성 향상이 진전됨에 따라 부가가치 유발효과가 다소 약화되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 이에, 중장기적으로 순환경제로의 전환과정에 있어서 관련 기술혁신 활동을 촉진함과 동시에, 관련 R&D 산업의 생산성 증대 및 부가가치 창출 잠재력 확대를 위한 정책적 대안 마련을 고민할 필요가 있음을 이해할 수 있다.

[표 4-9] 2050년 기준 BAU 대비 설계 시나리오별 산업별 부가가치유발효과 변화(백만원)

코드	업종명	시나리오 명				
		SCN1-1	SCN1-2	SCN2-1	SCN2-2	SCN3
AFF	농림수산	7,827,770	7,974,439	8,055,910	8,520,815	8,456,704
MIN	광업	34,644,947	34,890,375	42,529,209	43,787,466	37,592,727
FOO	음식료품	3,514,686	3,569,988	3,684,221	3,863,226	3,842,460
CLO	섬유/가죽	2,732,103	2,778,001	2,744,431	2,885,585	2,931,327
PPP	목재/종이/인쇄	2,195,252	2,258,802	2,288,475	2,501,668	2,426,351
OIL	석유정제	4,780,465	4,841,840	5,216,364	5,385,775	5,426,132
CHE	화학물질 및 화학제품	3,128,505	3,185,672	3,310,945	3,507,812	3,223,958
NMP	비금속광물	368,473	372,729	424,715	446,832	374,340
NFM	철강 및 1차금속	5,082,240	5,194,003	4,855,254	5,241,094	5,407,762
MAC	금속제품/기계/장비	12,981,278	13,201,534	11,950,896	12,828,584	13,756,474
ECT	컴퓨터, 전자 및 광학기기	19,847,616	20,449,168	21,763,837	23,483,139	24,081,111
ELM	전기장비	5,553,920	5,678,042	4,541,242	4,956,431	5,322,329

코드	업종명	시나리오 명				
		SCN1-1	SCN1-2	SCN2-1	SCN2-2	SCN3
AUT	자동차 및 운송장비	3,728,136	3,817,010	4,109,525	4,500,013	4,724,147
OMA	기타 제조업	8,978,787	9,161,327	8,357,359	8,958,889	9,038,504
ELE	가스 및 수도	1,542,776	1,554,580	1,376,350	1,465,502	1,898,142
CRM	폐기물 및 폐자원 관리	11,739,609	11,833,405	9,638,452	10,388,753	10,989,548
CEN	폐기물 재생	22,149,415	22,295,168	16,566,716	17,975,414	24,543,812
CMA	제품 재제조	35,689,594	36,433,121	41,319,349	43,475,333	44,713,613
CON	건설	2,342,932	2,461,481	2,116,831	2,496,844	2,797,013
RND	연구개발	3,450,102	1,236,277	4,122,093	-1,866,275	-2,196,987
TRN	운수	13,867,527	14,111,251	16,263,306	17,156,052	16,557,846
SER	서비스	57,414,696	58,904,680	61,459,350	66,659,480	66,185,433
TOT	전체 산업	263,560,830	266,202,892	276,694,830	288,618,431	292,092,746

순환경제 중심 산업(CRM, CEN, CMA)들의 부가가치 유발계수 형성 구조를 살펴보면(SCN3 시나리오), 앞선 생산 유발계수의 결과와 유사하게 CRM, CEN, CMA 산업 간 연관관계가 매우 높은 수준임을 확인할 수 있다. 이는, CRM, CEN, CMA 개별 산업의 부가가치 유발계수 총규모에서 순환경제 산업이 기여하는 상대적 비중이 매우 높은 점으로 알 수 있다. 따라서 CRM, CEN, CMA 산업 간 관계성이 매우 높으며, 이들 산업 간 연관관계에 따른 부가가치 창출 잠재력이 중장기적으로 높게 작용할 수 있음을 전망해볼 수 있다. 또한, 금속제품/기계/장비(MAC), 운송장비(AUT) 철강 및 1차금속(NFM), 기타 제조업(OMA), 수도 및 가스(ELE), 광업(MIN), 운수(TRN), 서비스(SER) 산업 부문에서 CRM, CEN, CMA 산업에 의한 부가가치 유발효과가 두드러지게 확대되는 것을 확인할 수 있다(표 4-10). 이를 통해, 순환경제로 전환하기 위한 CRM, CEN, CMA 산업 중심의 구조적 전환은, 중장기적으로 타 산업의 규모효과나 부가가치 창출 잠재력을 훼손하지 않고 순기능을 가져올 수 있음을 이해할 수 있다.

[표 4-10] 순환경제 산업의 경제적 파급효과: 부가가치유발계수(SCN3 시나리오 예)

코드	산업명	CRM 폐기물 및 폐자원 관리		CEN 폐기물 재생		CMA 제품 재제조	
		크기	순위	크기	순위	크기	순위
AFF	농림수산	0.00783	13	0.00523	14	0.01262	10
MIN	광업	0.04497	5	0.10843	3	0.05480	3
FOO	음식료품	0.00238	20	0.00222	20	0.00419	15
CLO	섬유/가죽	0.00262	19	0.00200	21	0.00368	20
PPP	목재/종이/인쇄	0.00454	16	0.00382	16	0.00636	13
OIL	석유정제	0.00713	14	0.00905	13	0.01351	9
CHE	화학물질 및 화학제품	0.00313	18	0.00326	18	0.00402	16
NMP	비금속광물	0.00060	22	0.00081	22	0.00059	22
NFM	철강 및 1차금속	0.01532	12	0.02355	7	0.00944	11
MAC	금속제품/기계/장비	0.04200	6	0.04577	5	0.01636	6
ECT	컴퓨터, 전자 및 광학기기	0.02562	9	0.01267	12	0.00861	12
ELM	전기장비	0.02406	10	0.01631	11	0.00560	14
AUT	자동차 및 운송장비	0.03319	8	0.00439	15	0.00394	18
OMA	기타 제조업	0.01802	11	0.01845	9	0.01391	8
ELE	가스 및 수도	0.00426	17	0.02099	8	0.00392	19
CRM	폐기물 및 폐자원 관리	0.28371	1	0.01785	10	0.01517	7
CEN	폐기물 재생	0.06407	4	0.42236	1	0.05432	4
CMA	제품 재제조	0.10494	3	0.06903	4	0.41852	1
CON	건설	0.00141	21	0.00228	19	0.00164	21
RND	연구개발	0.00570	15	0.00350	17	0.00399	17
TRN	운수	0.03697	7	0.03246	6	0.04161	5
SER	서비스	0.11044	2	0.10881	2	0.15614	2
합계		0.842896		0.933234		0.852937	

시나리오별 취업 유발효과가 산업별로 어떻게 나타나는지 아래 [표 4-11]와 같이 정리하여 제시하였다. 해당 결과표를 통해 부가가치 유발효과 변화와 유사하게 취업 유발효과가 형성됨을 확인할 수 있다. 특히 여기에서도 SCN3 시나리오의 취업 유발효과가 BAU 대비 가장 높은 수준임을 알 수 있다. 이를 바탕으로, 6개 전략적 산업(OIL,

CHE, NFM, ECT, ELM, AUT)에서 물질(원료) 재사용 확대와 부품 재사용/재제조 확대, 관련 R&D 확대를 통한 전략 이행을 중장기적으로 이행하여 2050년에 자원 순환성 목표가 달성되면 경제체제 내 산업들의 직간접적인 생산 유발효과 및 부가가치 유발효과가 증가함으로써 고용 유발효과가 높아짐을 예상할 수 있다. 따라서 순환경제로의 전환 정책은 경기부양책이자 성장동력 정책이 될 수 있다는 잠재성을 확인할 수 있다.

[표 4-11] 2050년 기준 BAU 대비 설계 시나리오별 산업별 취업유발효과 변화(명)

코드	업종명	시나리오 명				
		SCN1-1	SCN1-2	SCN2-1	SCN2-2	SCN3
AFF	농림수산	294,312	299,826	302,889	320,369	317,958
MIN	광업	188,399	189,734	231,274	238,117	204,430
FOO	음식료품	60,299	61,248	63,208	66,279	65,923
CLO	섬유/가죽	71,032	72,225	71,352	75,022	76,211
PPP	목재/종이/ 인쇄	33,061	34,018	34,465	37,676	36,541
OIL	석유정제	3,940	3,991	4,300	4,439	4,473
CHE	화학물질 및 화학제품	21,508	21,901	22,763	24,116	22,164
NMP	비금속광물	7,211	7,294	8,312	8,744	7,326
NFM	철강 및 1차금속	30,360	31,028	29,004	31,309	32,305
MAC	금속제품/기 계/장비	133,217	135,477	122,643	131,650	141,172
ECT	컴퓨터, 전자 및 광학기기	91,087	93,848	99,881	107,771	110,516
ELM	전기장비	47,053	48,105	38,474	41,991	45,091
AUT	자동차 및 운송장비	50,146	51,342	55,276	60,529	63,543
OMA	기타 제조업	207,754	211,978	193,375	207,294	209,136
ELE	가스 및 수도	6,968	7,022	6,217	6,619	8,573
CRM	폐기물 및 폐자원 관리	176,034	177,441	144,528	155,778	164,787
CEN	폐기물 재생	164,177	165,257	122,796	133,238	181,924
CMA	제품 재제조	711,133	725,949	823,309	866,268	890,942

순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향 ...

코드	업종명	시나리오 명				
		SCN1-1	SCN1-2	SCN2-1	SCN2-2	SCN3
CON	건설	49,588	52,097	44,803	52,846	59,199
RND	연구개발	43,057	15,429	51,443	- 23,291	- 27,418
TRN	운수	339,686	345,656	398,371	420,239	405,586
SER	서비스	943,616	968,104	1,010,091	1,095,555	1,087,764
TOT	전체 산업	3,673,641	3,718,970	3,878,773	4,062,559	4,108,147

제5장

소결

제1절 산업계 순환경제 2050 시나리오 개괄

제2절 특정 산업의 순환경제 전환에 따른 전체 산업계 영향

제3절 취약영역 및 기회영역

제 1절

산업계 순환경제 2050 시나리오 개괄

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

Part 1에서는 국내 순환경제 추진요인(취약영역 및 정책환경) 분석 결과에 기반하여 순환경제 전환 주요 산업군 6개를 도출하였고, 이들 산업이 성공적으로 순환경제로 전환하는 데에 필요한 미래전략을 적용했을 때 전체 산업에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 영향을 분석하는 과정에서 아래와 같이 세 가지 2050 순환경제 전환 시나리오를 도출하였다.

1 순환경제 성과 모니터링 지표 기반 시나리오

순환경제 전환 수준을 예측하는 성과 모니터링 지표 중심의 시나리오는 6개 순환경제 전환 주요 산업군이 순환경제 전환 전략을 성공적으로 도입했을 때에 국내 순환경제 성과지표(물질순환성, 자원생산성)가 도달할 수 있는 최대치를 알려주었다. 여기서 순환경제 성과지표 최대치는 6개 주요 산업을 100% 순환경제로 전환하는 경우, 다시 말해 해당 산업에 새로 투입되는 천연자원이 없는 경우에 해당한다. 6개 주요 산업 이외의 산업은 BAU 시나리오상 2050년 물질순환성(14.8%)을 적용하여 국내 산업 생산에 소요하는 총천연자원량과 재생원료량을 산정한 결과 최적 시나리오에서 국내 산업이 소비하는 재생자원 비율이 BAU의 2.2배로 증가하는 것으로 나타났다.

[표 5-1] 6대 주요 산업의 100% 순환경제 달성에 따른 국가 순환경제 지표의 변화

	물질순환성 (%)	자원생산성 (US\$ million/1,000 ton)
BAU	14.8	3.0
최적 시나리오 (6개 주요 산업의 100% 순환경제 전환)	33.1	6.5

여기에서 2050년 국내총생산(GDP) 추정치를 적용하여 2050년 자원생산성을 산정하였으며 저성장이 지속된다는 가정하에 물질순환성 증가와 유사한 비율로 자원생산성 또한 증가함을 확인하였다. 이러한 저성장 가정은 보수적인 조건으로, 이후 실시한 산업영향 시나리오 분석결과 확인된 생산유발효과(BAU 대비 최대 31% 증가)를 반영하는 경우 자원생산성은 BAU 대비 2.8배 가량까지 증가 가능하다.

2 순환경제 산업 전략 시나리오

순환경제 산업 전략 시나리오는 상기 성과 모니터링 지표 기반 시나리오에서 최적 시나리오를 가능하게 하는 미래전략으로 구성하였다. 여기서 미래전략은 학술 문헌에 존재하는 다양한 산업계 순환경제 전략 중에 전문가 설문조사를 통하여 6개 주요 산업군 전체와 개별 산업을 대상으로 적용할 전략으로 우선순위가 높은 것을 도출하였다. 이들 전략이 어떻게 조합되는지에 따라 [표 5-2]와 같이 6가지 전략 시나리오를 구성하였다.

[표 5-2] 순환경제 산업계 2050 전략 시나리오 프레임워크

시나리오 이름	전략 그룹1 (직접 순환 전략)			전략그룹 2 (혁신 전략)		주요 대상 산업 ²⁰⁾ (본연구 내 산업분류)	관련 순환산업 ²¹⁾
	순환 공급망	재생 원료 사용	상품 재제조	기술 혁신	녹색 투자		
BAU						-	-
물질 재사용	●	●				코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE), 1차금속제조업(NFM)	순환공급 (CRM) 원료재생 (CEN)
물질재사용 혁신	●	●		●	●		
부품 재사용	●		●			컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업(ECT), 전기장비 제조업(ELM), 운송장비 제조업(AUT)	순환공급 (CRM) 재제조 (CMA)
부품재사용 혁신	●		●	●	●		
지속가능한 순환시스템	●	●	●	●	●	위의 6개 전략 산업 전부	위의 순환산업 전부

3 순환경제 산업 영향 시나리오

위에서 구성한 순환경제 산업 전략 시나리오 미래전략 시나리오를 6개 순환경제 전환 주요 산업군에 적용하였을 때 우리나라의 전체 산업에 어떠한 변화가 기대되는지를 ① 생산 유발효과, ② 부가가치 유발효과, ③ 일자리 창출효과 중심으로 분석하였다. 여기서 6개 주요 산업군에 투입되는 순환산업이 『K-순환경제 이행계획』상 연도별 목표에 비례하여 성장한다는 가정하여 2050년도 산업연관표를 재조정하였기 때문에 6개 주요 산업군에 미치는 영향이 가장 두드러질 수밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 주요 산업의 변화가 연관산업에 미치는 영향을 중요하게 다루었다. 영향 시나리오 분석 결과는 제2절에 요약하였다.

Part 1에서 도출한 순환경제 산업 2050 시나리오에 기반하여 국내 산업의 순환경제 전환 과정을 방해할 수 있는 잠재적 취약점 및 기대되는 기회요소를 발굴하였으며, 본 내용을 제2권에서 중장기 국가전략을 도출하는 데에 근거 자료로 활용하고자 하였다.

20) 2015년도 기준 산업연관표 대분류상의 업종 구분에 따른 산업을 의미하며, 이후 본 연구에서 새롭게 정의한 순환경제 관련 산업군 분류 기준[표 4-2]을 적용한 산업분류(코드)를 괄호 안에 표시함.
 21) 시나리오별 전략과 관련된 순환산업을 의미하며 [표 4-2]의 산업분류(코드)를 괄호 안에 표시함.

제2절

특정 산업의 순환경제 전환에 따른 전체 산업계 영향

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

본 연구에서는 산업 간 연관관계와 산업별 공급 및 수요 구조 등을 포함한 주요 특성을 반영한 순환경제 특화 산업연관표를 우리나라 실정에 맞게 구축하고자 시도하였으며, 해당 자료체계를 활용하여 순환경제를 촉진하는 다양한 정책 대안별 중장기 영향을 분석함으로써, 순환경제 정책 및 전략을 수립하는 데 과학적 근거를 제시하고자 하였다. 분석 대상 시나리오로서는 제3장에서 도출한 1) 물질 재사용, 2) 물질 재사용 혁신, 3) 부품 재사용, 그리고 4) 부품 재사용 혁신, 5) 지속가능한 순환시스템을 고려하였다. 더불어, 순환경제 이행을 위한 전략적 산업으로서 코크스 및 석유정제품 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업, 1차금속 제조업, 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업, 전기장비 제조업, 운송장비 제조업 산업을 설정하여 해당 산업에 정책적 충격을 가함으로써 그에 따른 영향을 분석하고자 했다.

분석을 통해, 6개 전략적 산업(OIL, CHE, NFM, ECT, ELM, AUT)에서 물질(원료) 재사용 확대, 부품 재사용/재제조 확대, 관련 R&D 확대를 통한 전략을 중장기적으로 이행함으로써 2050년에 자원 순환성 목표를 달성하면 경제체제 내 산업의 직간접적인 생산 유발효과를 확대하여 경제체제 내 성장잠재력을 보다 증대할 수 있음을 이해할 수 있었다. 특히 순환경제로의 전환은 혁신과 경제성장, 일자리 창출의 기회가 될 수 있으며, 순환경제를 통한 우리나라 경제체제에 미치는 효과는 2050년까지 생산 유발효과 측면에서는 약 482조원, 부가가치유발 효과 측면에서는 약 292조원, 그리고 취업유발 효과 측면에서는 약 411만 개 일자리 창출효과를 견인할 것이라는 전망을 도출할 수 있었다. 이를 바탕으로, 2050년 지속가능한 순환경제 시스템으로 전환을 효과적으로 도모하기 위해서는 통합적인 관점으로 산업별 전략을 이행할 필요가 있다. 이를 통해 순환경제로의 이행이 단순히 환경오염 및 자원고갈 문제에 대한 대응을 넘어, 경제의 성장잠재력을 확대하고 일자리 창출효과를 확대·견인하는 성장동력으로서 역할 할 수 있는 잠재성을 확인할 수 있었다.

분석 결과를 바탕으로 하여, 2050년 순환경제로의 효과적 전환을 도모하기 위한 정책과제들을 아래와 같이 도출할 수 있었다. 우선, 순환공급망 안정화를 위한 전략적 접근을 다양한 형태로 시도하여야 한다. 앞선 분석 결과에서도 확인할 수 있듯이, 순환경제 산업(CRM, CEN, CMA 산업)의 생산 유발계수를 비교해보면 순환공급망 관리와 관련한 폐기물 및 폐자원 관리 산업(CRM)의 생산 유발계수가 CEN, CMA 대비 상대적으로 높은 수준으로 나타남을 확인할 수 있다. 이는, 해당 CRM 산업이 순환경제로의 전환에 따른 파급효과 형성에 있어서 중추적인 역할을 할 수 있음을 시사한다. 더불어 CRM, CEN, CMA 산업의 생산 유발계수가 산업별로 어떻게 분포되어 형성되는지 살펴보면, CRM, CEN, CMA 산업 간 연관관계가 매우 높은 수준임을 확인할 수 있다. 따라서 순환경제 관련 산업 간 연계성을 보다 강화하고, 순환 공급망 안정화를 도모하기 위한 다양한 노력을 전개할 필요가 있다.

특히 코로나19와 러시아-우크라이나 전쟁 등, 국제 정세 변화로 자원, 물질, 중간재 등 공급이 어려워진 상황에서 특정 국가에 대한 물자나 자원의존율을 낮추고, 순환 공급망을 안정화하기 위한 노력을 전개해야 한다. 폐기물 및 폐자원 관리 산업에서 다양한 공급자들이 시장에 진입하도록 정부가 민관 협력관계를 바탕으로, 전략적 비즈니스 모델을 개발 및 제시함으로써 잠재적 공급자의 시장유입과 시장 활성화를 도모할 필요가 있다. 이처럼 순환경제를 활성화하기 위해서는 폐기물 및 재활용 자원의 공급 안정이 선제적으로 이루어져야 한다는 인식을 바탕으로, 이를 위해 해당 자원 공급자의 수익 구조 재설계를 도모해야 한다. 특히 재생 원자재의 가격과 공급량 등이 불안정하면 수요측도 조달계획을 세우지 못하여 결과적으로 적절한 재생 원자재 시장이 구축되지 않는 악순환이 발생할 수 있다. 따라서 재생 원자재의 가격 보조, 세제 우대, 또는 조달 기준을 수립하고 순환경제를 진행하는 데 필요한 비용을 사회 전체가 부담하는 논리를 정리하고 수익 구조 및 비즈니스 모델의 재설계를 지원할 필요가 있다. 이를 바탕으로 정부가 관련 이해관계자들 간 협의 채널을 확보하여 효율적 자원/폐기물 회수 계획 구축, 협력 파트너 확보, 재활용 기술(유해물질, 복합재료, 혼합물) 개발, 재생 원자재 품질 향상, 설계 및 회수·선별과 조합한 재활용 고도화 등을 이뤄내야 한다.

앞선 장에서 분석을 통해 CRM, CEN, CMA 산업의 폐기물 및 폐자원 관리, 폐기물 에너지화 및 재활용 재제조 등의 과정에서 관련 제조업(MAC, AUT, NFM, OMA,

MIN)에서 생산한 중간재 및 자원의 재배치와 재사용이 촉진될 수 있음을 확인하였다. 해당 산업군에서 폐자원 발생부터 처리와 자원화 및 재활용 등 전체적인 관리체계 혁신을 도모해야 하며, 특히 해당 산업군을 중심으로 환경친화적 설계와 재활용 기술 및 재생 원자재 활용 확대 등이 이루어져야 한다. 이와 더불어, 전 산업 측면에서 석유정제 및 광업 부문에 대한 투입계수가 점진적으로 감소하도록 고품질·저환경부담의 소재 및 자원(원료)의 생산체계를 마련하는 등, 기술혁신을 추진할 필요가 있다. 이러한 차원에서 화석연료 기반의 원료 및 중간재가 아닌, 바이오 연료 등 차세대 자원(원료)의 사용을 장려하는 정책과 같은 재생원료의 확대를 위한 지원이 순환경제 구축에 필수적인 요소임을 인지해야 한다. 산업 전반의 친환경적 제품 설계, 재생원료의 시장 구축, 재생원료의 사용 기준 정립, 재생원료 기반 제품의 재자원화 등을 촉진해 나가야 할 것이다.

또한 앞선 장에서 실시한 분석을 통해 순환경제에 따른 경제적 가치 창출 확대를 위해서는 경제체제 내에 폐기물 에너지화, 재생용 가공원료 및 재활용제품 제조, 폐기물 폐자원 관리를 전제로 하는 제품 개발과 회수·선별·재활용 기술의 고도화 등을 포함한 저비용·고수준 자원순환을 뒷받침하는 R&D 투자 확대가 중장기적으로 이행될 필요가 있음을 알 수 있었다. 해당 분석 결과에 따르면 특정 국가에 대한 물자나 자원의 의존율을 낮추고 보다 강한(resilient) 순환경제 시스템을 구축함과 동시에, 우리나라의 순환경제 관련 기술·제도·시스템의 경쟁력을 강화하고, 중장기적으로 산업 전반의 순환경제 관련 기술혁신을 촉진하기 위한 다양한 정책대안들이 마련해야 한다. 글로벌 시장에서 우리나라 순환경제 시스템의 경쟁력을 향상하고, 중장기적으로 지속가능한 발전(성장) 목표를 실현할 기반을 다져야 하는 것이다.

다만 순환경제로의 전환을 진행할수록 R&D 산업에서 지본집약화와 생산성이 향상하지만 부가가치 유발효과는 다소 약화할 수 있음을 분석을 통해 확인하였다. 따라서 중장기적으로 순환경제로의 전환 과정에서 관련 기술혁신 활동을 촉진하고 관련 R&D 산업의 생산성을 증대하는 동시에 부가가치 창출 잠재력 확대를 위한 기술 사업화 및 상용화 전략을 고민할 필요가 있다. 순환경제 관련 R&D 효과성 제고를 위해, 를 위한 정책대안을 수립해야 한다. 관련 신기술이 보급되더라도 재생원료의 폭넓은 사용을 도모하려면, 재생원료의 사용으로 인한 비용의 증가를 누가 부담할 것인지가 중요한 과제로 남아있다. 일본은 재생원료 사용 제품의 공공 조달을 통해 국가적 수요를 마련하고, 기

업 간 연계를 활성화하여 재생원료 제품의 생산 과정에서 규모의 경제를 구축하는 등 비즈니스 관점으로 접근하고 있다. 특히 혁신기술을 효과적으로 사업화하려면 안정적인 수요가 필수적이기에, 재생원료 제품의 공공 조달을 통해 도전적인 순환경제 관련 기술을 장려하는 방안이 효과적일 것이다. 특히 공공 조달로 국내 재활용 산업을 육성하는 방안은 산업 경쟁력을 강화할 뿐만 아니라 국가 간 자원이동 과정에서의 환경 부하도 줄일 수 있어 환경 측면에서도 더욱 바람직한 정책이 될 수 있다.

또한 소비자 관점의 순환경제 정책을 폭넓게 입안해야 한다. 일본 경제산업성은 일본 기업이 순환경제를 실현하는 과정에서 마주할 과제를 도출하는 과정에서 소비자 관점을 매우 강조한 바 있다(Forbes Japan, 2022). 기업이 직접 나서서 재활용이나 친환경 소재 등에 대한 소비자 인식을 고취하는 데에는 한계가 있으며, 순환경제의 성과를 나타내기 위한 가시적인 지표 등을 작성하기 위해서는 여러 업계를 아우르며 정보의 비대칭성을 해결해야 하기에 정부의 주도적인 역할이 더욱 중요하다. 순환경제의 여러 이해관계자 중에서도 소비자의 인식과 소비 패턴은 기업의 순환경제 참여에 직접적인 인센티브를 제공하기에 탄소발자국을 산정하여 가시화하고 환경친화적으로 설계된 제품에 대한 인증마크 등, 소비자의 인식을 제고하기 위한 정부의 노력이 필요하다. 한국 역시 2022년 9월 30일에 열린 비상경제장관회의에서 국내 기업의 탄소중립 대응을 위한 탄소배출 측정 및 보고를 위한 기초 인프라를 구축하고, 탄소발자국 산정을 위한 기초정보 DB 및 제품별 산정 표준의 확충을 공표하였다. 이에서 더욱 나아가 이 결과를 소비자들이 손쉽게 접할 수 있게 제공하는 방안도 고려되어야 할 것이다.

제3절

취약영역 및 기회영역

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 취약영역

- **국가 산업구조 전환 과정이 산업경쟁력에 미치는 영향:** 본 연구에서 온실가스 배출량, 자원 해외의존도, 대기오염물질 배출량 측면에서 우리나라의 취약성을 높이는 산업을 순환경제 전환 6개 주요 산업²²⁾에 포함하였는데, 이들 산업의 2015년 시장점유율 합은 31.1%로 국가 경제에 중요한 부분을 차지한다. 순환경제로의 전환은 기존의 생산방식에서 재생원료 사용률과 재사용 부품 이용률을 높이는 등의 방식으로의 전환을 의미한다. 이 과정에서 기술 및 시설투자 등으로 인한 생산원가 상승이 불가피하다. 이는 단기적으로 해당 산업의 불안정성을 높이고 산업경쟁력에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 이러한 잠재적 취약성을 극복하기 위하여 주요 산업을 대상으로 순환경제 전환을 촉진하기 위한 재정적 지원 및 투자 활성화 방안을 마련할 필요가 있다.
- **6대 주요산업의 순환경제 전환에 따른 마이너스 성장 산업:** 재제조 전략을 적용하는 경우 ECT(컴퓨터, 전자 및 광학기기) 산업의 생산 유발액이 BAU 대비 다소 감소하는 것으로 나타난다. 이는 해당 산업에서 부품 재제조 및 순환공급망관리 등의 형태로 순환경제로의 이행을 촉진하면 ECT 산업 자체적으로 조달하는 중간재 투입량이 대폭 감소하면서 해당 ECT 산업 중간재에 대한 수요가 크게 감소하기 때문으로 해석할 수 있다. 이처럼 순환경제로의 이행과정에서 기존 부품과 원료들이 대체되며 발생하는 잠재적 손실 효과를 완화하기 위한 다양한 지원체계를 마련해야 함을 시사한다.

22) 코크스 및 석유정제품 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업, 1차금속 제조업, 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업, 전기장비 제조업, 운송장비 제조업.

- **6대 주요산업의 순환경제 전환에 따른 부가가치 및 일자리 감소 산업:** 순환경제로의 전환이 진전될수록 R&D 산업의 지분집약화와 생산성은 향상되지만 부가가치 유발효과가 다소 약화할 수 있음을 분석을 통해 확인하였다. 따라서 순환경제로의 전환과정에서 중장기적으로 관련 기술혁신 활동을 촉진함과 동시에, 관련 R&D 산업의 생산성 증대 및 부가가치 창출 잠재력 확대를 위한 정책적 대안 마련을 고민할 필요가 있다.

2 기회영역

- **6개 주요 산업의 순환경제 전환의 물질순환성 향상 효과:** 본 연구에서 온실가스 배출량, 자원 해외의존도, 대기오염물질 배출량, 기존 정책영역을 기준으로 도출한 6개 주요 산업은 물질순환성과 자원생산성에 미치는 영향 또한 큰 것으로 분석되었다. 국가 순환경제 지표 기반 시나리오에서 주요 산업의 순환성이 극대화되는 경우 성과지표가 BAU 대비 최대 2.2배로 증가할 수 있었다.
- **6대 주요 산업의 순환경제 전환에 따른 국가경제 성장 효과:** 지속가능한 순환경제 시스템으로의 전환 시나리오를 적용하는 경우 우리나라는 2050년까지 생산 유발효과 측면에서는 약 482조원, 부가가치 유발효과 측면에서는 약 292조원, 그리고 취업 유발효과 측면에서는 약 411만 개 일자리 창출 효과를 견인할 수 있을 것으로 전망하였다. 특히 금속제품/기계/장비(MAC), 운송장비(AUT) 철강 및 1차금속(NFM), 기타 제조업(OMA), 석유정제(OIL), 광업(MIN) 산업을 포함한 제조업 부문과 운수(TRN), 서비스(SER) 산업을 포함한 서비스 부문의 생산 유발효과가 두드러지게 확대됨을 확인하였다.
- **순환경제 R&D 강화를 통한 경제효과 극대화:** 순환경제 이행을 위한 전략 산업별 기술혁신을 위한 R&D가 확대될 때 생산과 부가가치 유발효과가 더욱 증대됨을 확인할 수 있다. 그리고, 이같은 규모효과 증대는 경제체제 내 취업 유발효과를 더욱 증대시키는 것으로 확인되었다.

3 분석의 한계점 및 향후 개선 방안

본 연구의 한계점은 다음과 같이 제시할 수 있다. 우선, 본 연구에서 분석을 위한 순환경제 관련 시나리오를 산업연관분석 방법론에 적용하는 과정에서 주요 전략 산업별 투입계수의 변화를 적용하였다. 하지만 여기에서 투입계수 변화와 관련한 주요 가정들이 다소 추상적이며 순환경제 관련 산업과 여타 산업 간 대체에 따른 경제적 손실효과 및 제품 가격변화에 따른 영향 등을 구체적으로 제시하지 못한다는 한계점을 지닌다. 그에 따라 후속 연구에서는 순환경제 이행과 관련한 시나리오 설계 및 분석 방법론 내 적용과정에 있어서 구체성을 확보하기 위해 다양한 보완적 데이터를 활용 및 적용하고자 한다. 이를 바탕으로 순환경제 이행에 따른 경제적 편익 분석을 넘어 경제적 손실까지 복합적으로 고려할 수 있는 방법론적 체계를 제안하고자 한다. 더 나아가 후속 연구에서는 본 연구에서 전략 산업으로 고려하는 산업 이외에 여타 산업 전반에서 순환경제로의 이행에 따른 파급효과가 어떻게 나타나는지 분석범위를 확장함으로써, 우리나라 경제사회가 순환경제로의 전환과정에서 마주할 잠재적 도전과제와 기회요인 식별과 관련하여 심화된 논의를 이어나가고자 한다.

제 II 부

플라스틱 순환경제 시나리오

제6장 플라스틱 순환경제 현황

제7장 플라스틱 순환경제 환경영향

제8장 소결

제6장

플라스틱 순환경제 현황

제1절 플라스틱 순환경제 정책 및 산업 현황

제2절 플라스틱 재활용 기술개발 현황

제3절 국내 플라스틱 전과정 물질흐름

제4절 국제 플라스틱 전과정 물질흐름

제 1 절

플라스틱 순환경제 정책 및 산업 현황²³⁾

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

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 있다. 특히 우리나라는 1인당 연간 135 kg의 플라스틱을 소비하는 것으로 발표된 바 있는데, 이는 전 세계적으로도 최상위 수준이다(장용철 외, 2022). 또한, 최근 코로나 19의 영향으로 포장재 플라스틱 폐기물이 급격히 증가함에 따라 2050 탄소중립 달성을 위한 실효성 있는 처리 및 자원화 방안이 요구되고 있다.

플라스틱 관련 정책은 순환경제 세부 과제 중에서도 전 세계적으로 참여도가 높은 부문으로 법적인 기반과 구체적인 이행 전략을 마련한 국가들이 다수 존재하며, 해당 내용을 [표 6-1]에 정리하였다.

[표 6-1] 주요국의 플라스틱 부문 순환경제 정책 범위

국가	내용
유럽연합	<ul style="list-style-type: none"> - 2015년 순환경제 패키지 : 폐기물의 매립축소 및 재활용·재이용을 장려하여 장기적 목표를 제시하여 생산부터 소비, 수리 및 제조, 폐기물 관리와 2차 원료를 아우르는 가치사슬(Value Chain)에 순환경제 원리를 적용하는 액션플랜. - 에코디자인 실행계획(2016~2019). - 2017년, “The 2017 Commission Work Programme(순환경제 액션플랜의 이행을 위한 실행 프로그램)” 발표. - 2018년 순환경제 패키지는 플라스틱 및 플라스틱 제품의 설계, 생산, 사용 및 재활용 방식을 변화시키는 부속서 중심으로 구성. - 일회용 플라스틱 제품 사용규제를 위한 지침 제정안 2021년부터 발효.
독일	<ul style="list-style-type: none"> - 생분해성 봉투에서 Bio Contents 비율 50% 고시 예정. - 포장재의 유통, 회수, 고품질 재활용에 관한 ‘신포장재법(VerpackG)’ 개정(2019.1). - 독일 내 듀얼 시스템에 가입해야 수출이 가능하도록 재활용 제도 의무화. - 2020년까지 독일 에너지 공급량에서 바이오에너지 점유율 2배 증가 목표, 재생에너지 발생 비중을 2009년 6.6%에서 2020년 14%로 확대 계획.

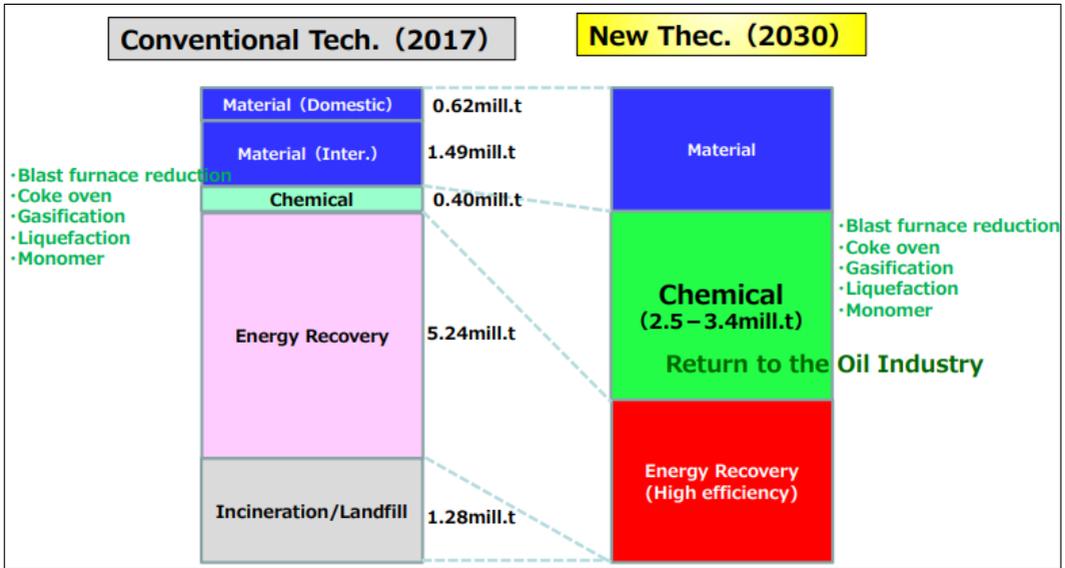
23) 플라스틱 산업현황은 2022년 충남대학교 환경공학과 교수 장용철교수와 최경훈 연구교수가 수행한 ‘순환경제 기술현황 및 전략’ 용역과제 최종보고서의 일부 내용을 정리하여 작성함

국가	내용
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> - 비분해성 일회용 쇼핑 봉투 사용 규제(2016.7). - 바이오매스 함량 30% 봉투만 사용(2017.1). - 2017년, 미세플라스틱 함유 화장품 전면 금지. - 순환경제 로드맵 개발(2018): 생산 개선, 소비 개선, 폐기물 관리 개선, 모든 이해관계자의 참여 등 4가지 영역으로 분류하여 50가지 조치사항으로 구성(FREC 50가지 조치). - 2020년부터 플라스틱 컵과 접시 사용금지.
중국	<ul style="list-style-type: none"> - 폐기물 수입규제 제도(2017). - 2020년까지 자원순환 촉진을 위한 산업구조 재검토(불법 수입사업자 영업정지 포함). - 2021년 1월 고체 폐기물 수입 전면 금지, 일회용 플라스틱 제한·금지. - 2021년 2월 탄소배출권 거래 관리 방법으로 운영 관리체계 구축.
일본	<ul style="list-style-type: none"> - 2000년대 초반 환경기본법 및 순환형 사회 형성 추진 기본법 구축. - “순환형사회형성추진기본계획(2003)”, 5년마다 재검토 실시하여 보완. - 과학기술 예측조사 기반마련.

출처: 최지연·이혜선(2022, p. 201)

우리나라는 『K-순환경제 이행계획』에서 2023년부터 플라스틱 제조업체를 대상으로 재생원료 사용 의무를 부과할 계획을 밝힌 바 있다. 특히 PET는 2030년 재생원료 사용목표를 30%로 설정하였다. 또한 폐플라스틱 열분해처리 비중을 2030년 10%²⁴⁾까지 확대할 계획이며, 열분해유 품질 향상을 통하여 현재 연료로만 사용하던 것을 점차 석유·화학공정 원료로 활용토록 추진할 계획이다. 화학적 재활용을 통한 순환성 향상뿐만 아니라 바이오 플라스틱으로의 단계적 전환을 통하여 석유계 플라스틱 사용 비율을 줄이고 2050년까지 생활플라스틱은 100%, 사업장 플라스틱은 45%까지 순수바이오 플라스틱으로 대체하는 것을 목표로 하고 있다.

24) 2020년 열분해 처리 비중은 0.1%에 불과함



[그림 6-1] 일본의 플라스틱 자원화 현황(출처: Yoshioka, 2019)

상기 국내외 플라스틱 순환경제 정책 여건의 급격한 변화와 더불어 산업계의 석유계 플라스틱 재활용 상용공정 개발 및 바이오 플라스틱 개발도 활발하다. 국내외 플라스틱 물질순환은 주로 기계적 재활용을 중심으로 이루어져 왔으나 최근 들어 유럽과 일본을 중심으로 화학적 재활용 기술 개발에 대한 투자와 산업계 참여가 활발히 이루어지고 있다. 영국의 플라스틱 에너지사(Plastic Energy) 등은 폐플라스틱을 활용하여 열분해를 통한 화학 원료가 될 수 있는 기초유분을 제조하는 사업을 추진하고 있는데, 최근 사빅(SABIC), 이네오스(INEOS), 토탈(TOTAL) 등에 이를 공급하여 플라스틱을 재활용하는 사업에 협업을 발표하였다. 일본은 2017년 40만톤의 플라스틱을 화학적 재활용에 사용하였으나, 2030년에는 이를 250~340만톤으로 6~8배 늘려 화학적 재활용의 비중을 확대하여 석유산업에 환원시키는 계획을 준비하였다(Yoshioka, 2019).

한편, 플라스틱을 생물학적으로 분해하는 기술을 활용하여 원료화하는 기술이 개발되고 있으며, 프랑스 기업 카르비오(Carbios)는 효소 글로벌기업 노보자임스(Novozymes)의 공동 연구 및 다국적 기업의 컨소시엄(로레알, 네슬레) 등을 통하여 고효율 플라스틱 분해효소를 개발하여 2024년까지 프랑스에 플라스틱 분해 공장을 세워 재활용 플라스틱 원료를 연간 4만톤 규모로 생산 예정이다.

[표 6-2] 해외 국가별 플라스틱 재활용 사업 동향

국가	기업명	주요 내용
독일	BASF	화학적 재활용 • '해양 폐플라스틱 감소 및 제거를 위한 솔루션을 증진하는 글로벌 플라스틱 쓰레기 제거 연합(Alliance to End Plastic Waste)' 결성. 전 세계 30여 개 기업과 5년간 15억 달러(한화 약 1조 6천억 원) 투자 목표 (2019.01). • 플라스틱 화학적 재활용을 통한 첫 시험 생산(2019.01)
미국	Eastman	화학적 재활용 • 폴리에스터 재생기술 및 가스화를 통한 재활용 기술인 탄소 재생기술 사용 • 프랑스 대통령과 Eastman의 CEO가 프랑스의 재료분자 재생시설에 최대 10억 달러를 투자할 것을 공동 발표(2022.01) • 2025년 가동 예정인 재료분자 재생시설은 폴리에스터 재생 기술을 통해 폐플라스틱을 연간 최대 16만 메트릭톤까지 재생할 예정
사우디아라비아	Sabic	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 준공 (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 폴리우레탄폼의 화학적 재활용 기술개발(2021.03) • 매트리스폼의 2가지 원료(polyol, toluene diamine)를 모두 재활용하기 위한 연질폼 재활용 시험 생산 개시(2021.04) • 폐기된 연질 폴리우레탄폼의 화학적 재활용의 산업화 및 회수된 2가지 원료의 재생산을 목표로 함
프랑스	Loreal	생물학적 재활용 • 프랑스 스타트업 Carbios의 효소 기술을 이용해 재활용 플라스틱으로 만든 최초의 화장품 용기 구현(2021.06) • 2025년 효소 재활용 기술을 이용하는 용기 생산을 목표로 하고 있으며, 향후 로레알 브랜드 중 비오템에 최초로 해당 용기 사용 제품 출시 계획
미국, 노르웨이	Agilyx	화학적 재활용 (열분해) • 전 세계에서 현재 유일하게 자사 열분해 시스템을 이용한 PS 재활용설비 보유 • ExxonMobil, Toyo Styrene, Braskem, Trinseo, INEOS 등 글로벌 화학업체들과 기술을 개발하거나 생산설비 신설 중
일본	JGC	화학적 재활용(가스화)

국가	기업명	주요 내용
		<ul style="list-style-type: none"> 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	물리적 재활용 + 화학적 재활용 <ul style="list-style-type: none"> Recycling 목표 : 2030년까지 100만톤의 플라스틱을 재사용·재활용할 계획이며, 2035년까지 전 제품을 재사용 또는 재활용 가능한 패키징으로 판매할 예정 첨단 재활용 프로세스 접목 : Mura Technology와 파트너십 체결 및 Hydrothermal 플라스틱 재활용 솔루션 활용
미국	Dupont	물리적 재활용 + 화학적 재활용 <ul style="list-style-type: none"> 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 copolymer 기술을 활용하여 혼합 플라스틱 폐기물 재활용 개발 중

출처: 삼일 PwC 경영연구원(2022)에서 기사를 종합하여 작성한 내용을 재인용함.

국내에서도 최근 플라스틱의 기계적 재활용의 고도화와 열분해 기술 개발, 해중합 기술 개발, 생물학적 재활용 기술 등에 대한 산업계 상용화기술 개발과 국가 연구 개발 투자가 이루어지고 있다.

[표 6-3] 국내 주요 기업들의 폐플라스틱 재활용 사업 현황 및 계획

국가	기업명	주요 내용
한국	LG화학	기계적 재활용 + 화학적 재활용 <ul style="list-style-type: none"> 쿠팡과 플라스틱 재활용, 자원 선순환 생태계 구축을 위한 MOU를 체결, 쿠팡이 폐기하는 3,000톤 가량의 포장용 비닐을 재활용해 쿠팡에 재공급할 계획(2021.09) 2024년 1월까지 국내 최초 초임계 열분해유 공장 건설, 연간 2만톤 규모로 시작하여 점차 확대할 예정(영국 무라테크놀로지 지분 투자) 다양한 PCR(Post-Consumer Recycled) 플라스틱 재료 중 ABS만 분류하는 과정을 통해 PCR-ABS 제조(기계적 재활용: 백색도 증진 기술)
한국	롯데케미칼	화학적 재활용 <ul style="list-style-type: none"> 2024년까지 1천억 원을 투자해 향후 2030년까지 울산 PET 공장 전체를 재생 PET 공장으로 전환할 계획 발표(2021.04) 기계적 재활용 <ul style="list-style-type: none"> 재활용 플라스틱, 원료 플라스틱, 첨가제, 착색제의 최적 조합기술 및 프로젝트 루프 사업을 통해 PP와 ABS 등 제조(컴파운딩 기술/ LCA 인증)

국가	기업명	주요 내용
한국	한화솔루션	화학적 재활용 • 산자부 ‘폐플라스틱 열분해유 기반 나프타 생성기술’ 사업 주관기업 선정(2021.04) • 폐플라스틱을 고온에서 분해한 열분해유에서 불순물을 제거하고 분자 구조를 변화시켜 납사를 생성하는 기술(PTC, Plastic to Chemicals) 개발을 목표로 함 • 열분해 기반 화학적 재활용 기술을 2024년까지 개발해 내재화할 방침(2021.04)
한국	SK지오센트릭 (구 SK종합화학)	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 브라이트마크사와 협력해 2024년까지 연간 10만톤 규모의 열분해 생산설비 구축 예정(2021.07) • 폐플라스틱 재활용 규모를 2025년까지 90만톤에서 2027년 250만톤까지 확대할 계획
한국	SKC	화학적 재활용 • 열분해 기술을 보유한 일본 벤처기업 칸쿄에너지(Kankyo Energy)와 상업화 추진(2021.06)
한국	SK케미칼	화학적 재활용 • 해중합 기술과 생산설비를 보유한 중국 슈예(Shuye)에 지분(10%, 230억) 투자하여 화학적 재활용한 원료를 구매할 수 있는 권한 확보
한국	효성	화학적 재활용 • PET 해중합, 후공정을 통해 재생 폴리에스터수지 상업 생산 성공(2008년) • 2022년 초까지 울산 지역 내 해중합 설비를 갖추고 부산·전남 지역 페어망을 수거해 연간 1,800톤 상당의 재활용 나일론 섬유 생산 계획(2021.08)
한국	휴비스	기계적 재활용 + 화학적 재활용 • 2021년 4월부터 물리적 재활용 방식을 사용한 원사 ‘에코에버’ 연간 2천톤 규모의 생산 가동 시작(2021.03) • 물리적 재활용 원사 브랜드 ‘에코에버’에 화학적 재활용 원사 브랜드 ‘에코에버 CR’까지 추가(2021.06)
한국	삼양패키징	기계적 재활용 • PET 플레이크를 생산하는 재활용 사업장 시화 공장에 약 430억원을 투자하는 폐플라스틱 재활용 신규설비 도입계획 발표(2022.01) • 고순도 PET 플레이크와 고부가가치 제품의 원료가 되는 리사이클 PET 칩 생산설비 2종 도입 예정이며 2023년 말부터 본격 설비 가동 시작 예정

국가	기업명	주요 내용
한국	ACI엔텍	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 압출 생산라인 보유 • 사모펀드 운용사 VL인베스트먼트로부터 70억원 투자 유치(2021.10)
한국	에코크레이션	화학적 재활용 • 열분해유 제조 및 열분해 설비 생산 기술 보유 중소기업 • 인천 청라에 신규 열병합 열분해 플랜트 제조공장 구축 중 • SK지오센트릭으로부터 68억원 투자 유치(2021.08)
한국	슈퍼빈	기계적 재활용 • AI 기술을 활용해 재활용 폐기물을 회수하는 로봇 ‘네프론’을 2016년에 개발하여 상용화에 성공한 스타트업 • 회수된 재활용 폐기물을 고부가가치 재생 소재로 가공해 제품 생산업체에 판매하는 순환경제 사이클 구축 계획 • 200억원 규모의 시리즈B 투자를 유치해 누적 투자금 270억 원, 기업가치 1,000억원 달성(2020.08)

출처: 삼일 PwC 경영연구원(2022)에서 기사를 종합하여 작성한 내용을 재인용함

제2절

플라스틱 재활용 기술개발 현황²⁵⁾

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 세부기술 정의 및 국내 기술개발 동향

그간 플라스틱 자원순환 R&D는 자원 선순환을 위한 전과정 측면이 아닌 바이오 플라스틱 기술, 폐기물 재활용 기술에 편중하여 정부 부처별 및 연구기관과의 연계성 없이 추진해 왔다. 최근 코로나19의 영향으로 포장재 플라스틱 폐기물이 급격히 증가함에 따라 2050 탄소중립 달성을 위한 실효성 있는 대응정책 및 R&D 전략 수립이 필요한 바, 2021년 10월 국가과학기술자문회의에서는 (1) 범부처 플라스틱 자원순환 R&D 체계의 정립과 (2) 자원순환 기반체계 구축 및 협력강화를 추진 방향으로 삼았으며, 세부적인 범부처 R&D 전략 정립을 위한 18개 중점기술을 다음과 같이 제시했다(국가과학기술자문회의, 2021).

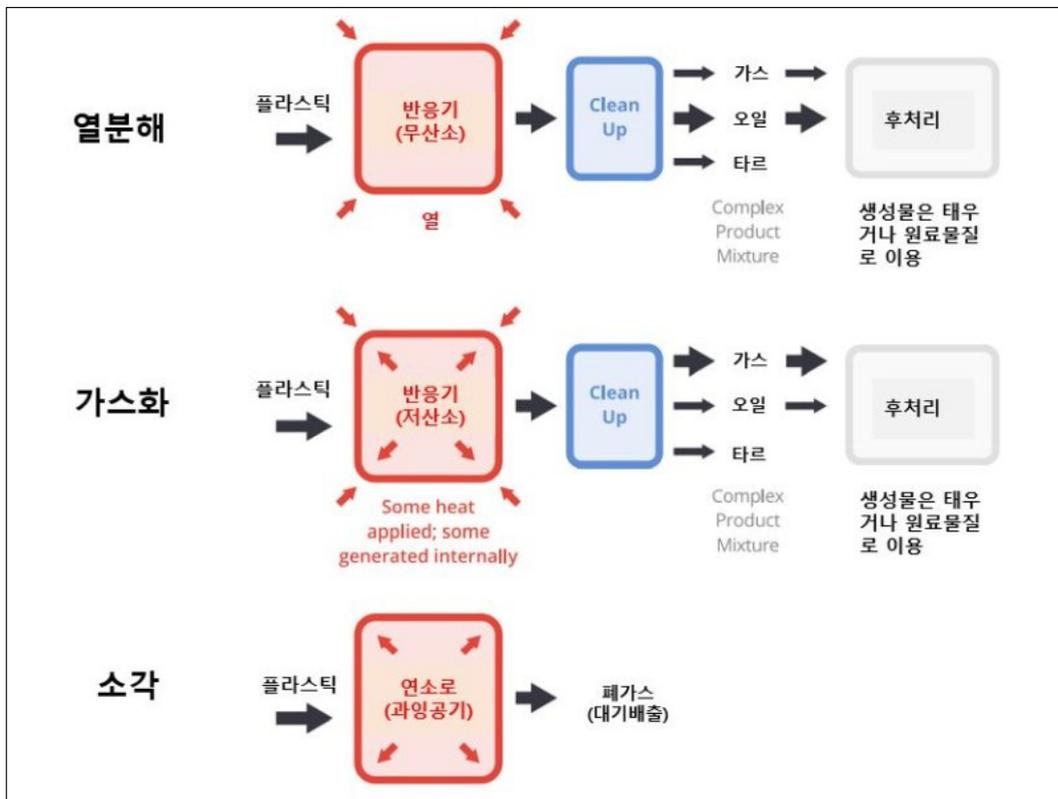
[표 6-4] 범부처 R&D 전략 정립을 위한 18개 플라스틱 자원순환 중점기술

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 표식 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

25) 세부기술 정의, 국내 기술개발 동향, 세부기술별 해외 연구개발 현황은 2022년 충남대학교 환경공학과 교수 장용철교수와 최경훈 연구교수가 수행한 '순환경제 기술현황 및 전략' 용역과제 최종보고서의 일부 내용을 정리하여 작성함

대분류	중분류	소분류
	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)



[그림 6-2] 열분해 기술, 가스화기술, 소각의 차이(출처 : 자원순환사회연구소, 2020)

플라스틱 순환경제를 이끄는 2가지 트렌드는 플라스틱 재활용과 바이오플라스틱(삼성증권, 2021; European Commission, 2018)이 될 것으로 판단되며, 본 연구에서는 플라스틱 재활용 방법 중 기계적, 화학적²⁶⁾, 생물학적 기술과 함께 바이오플라스틱 기술 역시 순환경제를 위한 중장기 물질순환 미래기술로써 검토하였다.

가. 기계적 재활용 기술

기계적 재활용 기술은 중소기업을 중심으로 선별 공정에 AI나 IoT를 이용하는 등의 개발/상용화가 활발히 이루어지고 있으며, 화학적 재활용은 대기업을 중심으로 해중합, 가스화 등의 기술을 개발/도입하는 과정에 있으며, 일부 중소기업에서 차별화된 기술을 개발하고 있는 것으로 파악된다.

최근에는 AI 기반 로봇 기술, 근적외선 센서를 이용한 복합재질 페플라스틱의 선별기술 개발 노력이 활발히 진행되고 있으며, 페비닐 및 폐유리병 등 생활폐기물 전반의 재활용 기술을 개발 중이다. 또한 국내 리사이클 페트칩 제조 기술(r-PET, 재활용된 폴리에틸렌 테레프탈레이트)은 이물제거 기술이 부족하고, 균일한 품질의 원료 제조 기술이 없어 저가의 섬유제품 혹은 밴드 형태의 저가 제품만 생산 가능한 수준이다. 현재 재활용한 PET는 주로 단섬유 시장에서 사용한다. 재생 PET 품질향상을 위해 이물제거 기술 및 순도향상 기술 개발이 필요하다.

나. 화학적 재활용 기술

1) 열분해 기술

상용화 공정으로 가동되는 시설에서 생산하는 열분해유의 생산량은 2019년 기준으로 약 4,100톤 수준이다. 현재 가동 중인 열분해 시설은 대부분 회분식 공정이며, 연속식 공정을 적용하는 시설은 1개 시설에 불과하다.

2000년대 초기부터 열분해 기술 상용화를 위한 기술 개발을 국가가 지원하였으나 경제성 및 운전성의 문제로 회분식 시설에 한하여 기술 개발 및 상용화가 성공한 실정이다. 연속식은 1일 생산량 10~20톤급의 시운전 수준의 기술을 개발하였으나 상용화하지는

26) 본 연구에서는 열적 자원화 기술을 화학적 방법에 포함시킴

못하였다(국가과학기술자문회의, 2021).

2) 가스화 기술

단순 에너지 회수(열회수 및 발전)를 위한 공기 분위기 가스화 기술은 10여 기의 상용화 공정을 운용 중이지만, 화학원료를 생산하기 위한 산소 분위기 가스화 기술은 파일럿 플랜트 단계(폐플라스틱 투입량 기준: 3톤/일급)의 수준에 머물러 있다.

이처럼 발전을 목적으로 하는 공기 분위기의 가스화 기술과 화학원료를 생산하기 위한 산소 분위기의 가스화 기술은 생활폐기물 및 바이오매스를 이용한 합성가스/수소 생산 중심으로 진행 중이다. 특히 합성가스를 이용하여 메탄올을 생산하는 등의 화학원료 합성을 위한 연계기술 개발은 실험실 규모 수준에 머물러 있다(국가과학기술자문회의, 2021).

3) 해중합 기술

수침반응용 촉매 개발, 알칸 교차 복분해 반응 등을 통한 유용한 화합물 제조기술이 개발 중이다. 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 등을 개발 중에 있다.

다. 생물학적 재활용 기술

1) 생물학적 (효소/미생물) 분해 기술

국내 연구진은 플라스틱 분해효소와 플라스틱을 혼합하여 완전분해 가능한 폴리에스테르계 플라스틱 제작에 성공한 바 있다(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 진행하였다.

2) 분해산물 업사이클링 기술

최근 PET 등 해중합이 가능한 특정 플라스틱 소재에 대한 생물학적 업사이클링 기술 개발이 진행되면서 PET의 단량체인 테레프탈산을 이용한 새로운 생분해 플라스틱 소재, 화장품 소재, 의약 소재 등 고부가 소재 생산 가능성을 제시하였다. 한국화학연구원, 고려대학교, 이화여자대학교, 한국생명공학연구원 연구팀은 PET의 친환경적 분해 기술과 해중합 단량체를 고부가 소재로 전환하는 연구를 진행 중이다. 특히 대사공학을 접목하여 플라스틱 해중합 단량체에서 고부가 소재를 생산하는 인공미생물 세포공장 개발 경쟁이 치열하다.

라. 바이오플라스틱 생산 기술

바이오 플라스틱 기술은 다국적 기업의 컨소시엄 구성 등을 통해 활발한 연구가 진행되고 있으나 플라스틱 분해효소 개발 등의 국외 기술 수준 역시 상용화하기 위해서는 향후 5~10년 정도가 필요할 것으로 전망한다.

우리나라 바이오 플라스틱 기술 연구 수준은 선진국 대비 현저히 떨어지는 것으로 평가되고 있으며, 원천기술 개발에 대한 필요성이 크다(강길선, 2021). 바이오 플라스틱은 1900년대부터 전분계열 천연고분자 물질을 기반으로 한 제품을 사용해왔다(지민규 외, 2016). 최근에는 Bio-PET, Bio-PE 및 PLA 물질로 대체되고 있으며, 이 중 약 70%가 포장재로 사용되고 있다(지민규 외, 2016).

2 세부기술별 해외 연구개발 현황

가. 기계적 재활용 기술

폐플라스틱의 재질별 분류 방법(근적외선 센서 등)이 개발 및 상용화 중이며, AI 기반 로봇과 같은 첨단 선별기술을 활용한 자동화로 전환 중이다. 산업용 폐기물 속 PP, PS, PVC 등의 선별기술은 상용화 중이나, 생활계 폐기물 속의 비결정성-PET, 글리콜 변성-PET, ABS, Acrylic 선별 등은 아직 불완전하다. 페페트병의 이물 제거·세척기술 고도화를 통한 PET 플레이크 제조기술 및 리사이클칩 제조기술은 상용화 중이다(국가과학기술자문회의, 2021).

나. 화학적 재활용 기술

미국, 독일, 프랑스, 일본 등에서는 일찍이 1990년대부터 화학적 재활용 기술 개발을 진행하였으며, 평균 200톤/일급 규모의 플라스틱 가스화 공정을 포함하여 기계적/화학적/열적 재활용 기술을 적용하는 상용화 운전 사례가 있다. 영국 플라스틱에너지사(Plastic Energy) 등은 폐플라스틱을 활용하여 열분해를 통한 화학원료가 될 수 있는 기초유분을 제조하는 사업을 추진하고 있으며, 1990년대부터 기술 개발을 진행한 독일과 일본을 중심으로 회분/연속식 열분해 공정에 대한 기술 개발 사례가 발표된 바 있다. 최근 독일 바스프(BASF)는 화학적 재활용 프로젝트(chem-cycling)를 진행하여 합성가스 등의 화학제품을 생산하고 있다. 일본의 닛키홀딩스그룹(JGC)은 2020년 10월 에바라환경플랜트주식회사(Ebara Environmental Plant)와 유비이주식회사(Ube Industries)으로부터 플라스틱 가스화 기술인 EUP(Ebara Ube Process) 기술을 받고 쇼와전공주식회사(Showa Denko)과 협력하는 내용의 계약에 대하여 발표한 바 있다²⁷⁾.

다. 생물학적 재활용 기술

PET, 나일론은 자연계에 존재하는 생물에 의해 분해될 수 있음이 밝혀진 바 있으며, PE, PP, PS 등 난분해 플라스틱의 생물학적 분해 연구가 진행 중이다(국가과학기술자문회의, 2021). 프랑스 카르비오사(社)는 퇴비 더미에서 찾은 미생물의 효소로 10시간 안에 페트병의 90%를 분해할 수 있음을 발표했다(Nature, 2020). 프랑스 기업(Carbios) 및 글로벌 효소 기업(Novozymes)의 공동 연구, 다국적 기업의 컨소시엄(로레알, 네슬레 등)을 통하여 고효율 플라스틱 분해효소를 개발 중이며, 2024년까지 프랑스에 플라스틱 분해공장을 세워 재활용 플라스틱 원료를 연간 4만톤씩 생산 예정이다.

난분해성 플라스틱의 재자원화 연구는 화학적 재활용 기술 중심으로 진행 중이다. 생물학적 업사이클링 기술은 플라스틱 해중합 단량체 또는 올리고머의 활용 가능성을 제시하는 초기연구 단계이다. 유럽과 중국은 연합으로 믹스업(MIX-UP), 바이오클린(BIOCLEAN)등의 프로젝트를 수행 중으로 PET, PU, PE, PS 해중합 단량체를 활용하여 생분해성 플라스틱 같은 고부가 소재를 생산하는 효소 및 인공미생물을 합성생물학

27) <https://www.jgc.com/en/news/2020/20201006.html> (접근일: 2022.12.05.)

기술로 개발하고 있다. 미국은 PET를 효율적으로 분해하는 효소의 개발 기술과 해중합 산물을 엔지니어링 플라스틱, 섬유강화플라스틱 등 고부가 소재로 전환하는 기술을 개발 중이다.

라. 바이오플라스틱 생산 기술

바이오플라스틱은 1900년대부터 전분계열 천연고분자 물질을 기반으로 한 제품을 상업적으로 사용하기 시작하여 최근에는 Bio-PET, Bio-PE 및 PLA 물질로 확대되고 있다. 생산된 바이오 플라스틱 중 약 70%가 포장재로 사용된다. [표 6-5]는 해외 선진 기관에서 개발 중인 바이오 플라스틱 기술 내용을 요약한 내용이다.

[표 6-5] 국가별 플라스틱 대체재 및 재활용 개발 동향

국가	단체	주요 내용
미국	하버드대학 Wyss 연구소	<ul style="list-style-type: none"> 새우 껍질의 키틴에서 유래한 바이오 플라스틱 (생분해성) 개발 성공 완전분해되는 바이오 플라스틱을 사용한 달걀 포장재, 컵, 체스말 등의 제품을 소개하였으며, 평소에는 기존 플라스틱과 동일한 강도를 나타내지만 습기에 노출되면 빠르게 분해되는 성질을 지님 습기에 의한 분해를 지연시키기 위해 왁스코팅 방안 고려 중
	New Light Technologies	<ul style="list-style-type: none"> 폐수 처리설비, 매립지, 발전소 등에서 발생한 이산화탄소를 이용하여 플라스틱을 만드는 방법 개발 AirCarbon 제품은 플라스틱의 원료로 석유를 사용하지 않고 (원유 사용 저감), 온실가스 배출량을 감소시키며 이산화탄소를 재활용할 수 있는 장점이 있음 AirCarbon 제품은 폴리프로필렌(PP), 폴리에틸렌(PE), 폴리스티렌(PS)을 포함한 다양한 범위의 플라스틱과 동일한 성능을 보여줌과 동시에 생분해 및 재활용 가능
EU	유럽연합 의회	<ul style="list-style-type: none"> 바이오 플라스틱 지원정책 강화 유럽연합 의회는 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)	<ul style="list-style-type: none"> 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, p. 24

3 국내 연구개발 현황

국가과학기술지식정보서비스(NTIS)는 국내에서 수행한 연구개발 과제를 대상으로 정보를 제공하며 다양한 과학기술 분류체계에 기반하여 분석할 수 있는 근거자료를 제공한다. 여기서 순환경제 기술은 「과학기술표준분류」에서 ‘폐기물 관리 및 자원순환’ 또는 「녹색기술분류체계」에서 ‘폐기물 자원화 및 에너지화’(기타 기술 포함)와 가장 일치도가 높으나 두 분류체계를 적용하여 추출한 과제정보가 일치하지 않는 것이 상당 부분 존재한다. 포괄적인 분석을 위하여 여기서는 두 분류체계 중 하나 이상에 포함된 과제를 모두 포함하여 분석하였다. 2012~2021년 10년간 수행된 과제 중 이러한 기준으로 선택된 과제 중 과제명을 대상으로 키워드(플라스틱)가 포함된 과제를 추출하여 분석대상으로 정의하였다.

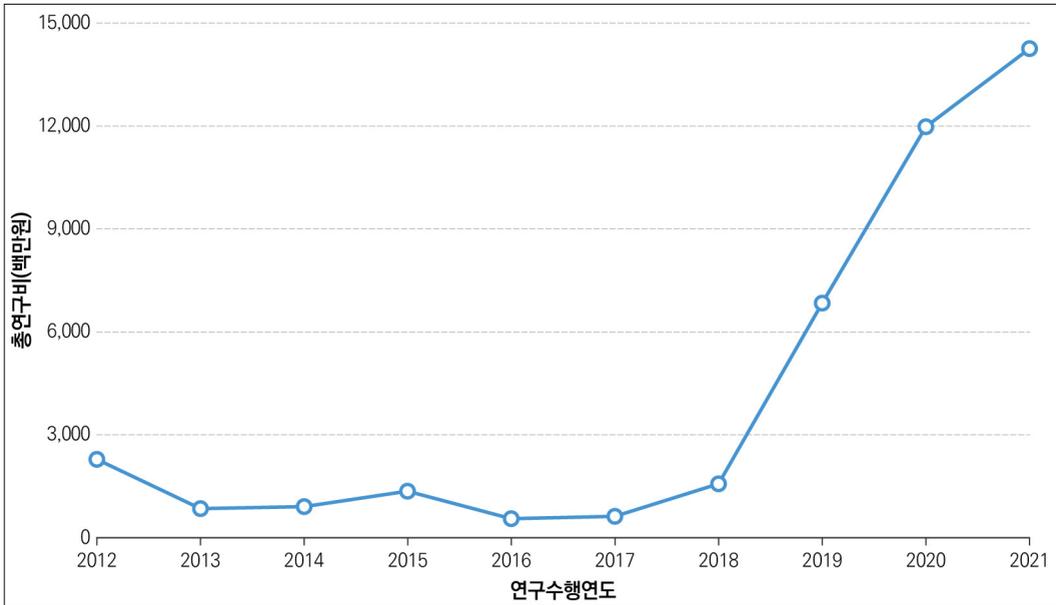
[표 6-6]은 플라스틱 자원화 기술에 대한 부처별 투자현황을 정리한 결과이다. 플라스틱 자원화는 환경부 투자가 주를 이룬다. 산업계 기술투자와 밀접하게 관련된 산업통상자원부와 중소벤처기업부의 투자는 각각 환경부의 9%, 12% 수준에 불과한 것으로 나타났다. 이는 플라스틱 자원화가 아직은 여전히 환경보전의 관점에서 기술개발이 추진되며 열분해, 가스화 등의 화학적 재활용 방법을 통한 신산업 육성 차원에서의 정부 투자는 부족한 것으로 진단할 수 있다.

[표 6-6] 부처별 플라스틱 자원화 기술 투자 금액

부처명	총연구비(백만원)
환경부	28,746
산업통상자원부	2,490
중소벤처기업부	3,364
과학기술정보통신부	2,851
교육부	1,305
농촌진흥청	1,230
해양수산부	882
국토교통부	360
총합계	41,228

- * 산업통상자원부의 총 연구비는 지식경제부를 포함한 결과임
- * 중소벤처기업부의 총 연구비는 중소기업청을 포함한 결과임
- * 과학기술정보통신부의 총 연구비는 미래창조과학부와 교육과학기술부를 포함한 결과임

[그림 6-3]은 연도별 플라스틱 자원화 기술 연구개발 투자 규모의 추이를 보여주며, 2018년부터 급증하는 추세이다. 2019~2021년 사이 3년간 플라스틱 자원화 기술에 투자된 금액은 전체 투자 금액의 80%이며, 2019년도부터 환경부에서 시작한 200억 이상 규모의 「생활폐기물 재활용 기술개발사업」이 폐플라스틱 재활용 기술에 집중함에 따라 발생한 현상이다. 이러한 변화는「자원순환기본법」을 2018년 1월 1일부터 시행한 이후, 『제1차 자원순환 기본계획(2018~2027년)』의 다양한 전략 사업을 시행한 것과 밀접한 관련이 있던 것으로 볼 수 있다. 『K-순환경제 이행계획』에서 플라스틱 재자원화 목표를 중요하게 다루었으며, 미세플라스틱 통합관리 기술개발사업 등 플라스틱 자원화 관련 예비타당성조사가 이루어진 바가 있어 향후에도 이러한 투자 증가추세는 지속될 것으로 전망한다.



[그림 6-3] 연도별(2012~2021) 플라스틱 자원화 기술 연구개발 투자 규모 추이

4 국내·외 특허출원 현황

국내외 기술개발 현황 및 경쟁력 진단목적으로 특허분석을 일반적으로 널리 사용한다. 여기에서는 2012~2021년에 공개된 출원 또는 등록된 특허 중 주요국에 해당하는 중국(CN), 유럽(EP), 일본(JP), 대한민국(KR), 미국(US)을 대상 국가로 하는 특허를 분석한 결과를 보여준다. 특허 검색은 위스²⁸⁾ 데이터베이스를 사용했으며 특허 상태가 취하, 거절, 심사 중, 소멸, 각하, 포기, 무효에 해당하는 건은 포함하지 않았다. 전체 분석 대상²⁹⁾ 2,548건의 특허 중 2,415건이 등록된 상태이며 133건이 출원된 상태이다. 여기서 우리나라를 대상국으로 출원한 특허 수는 0건으로 우리나라의 플라스틱 자원화 기술 관련 방어가 필요한 내용 및 수준이 아직 존재하지 않음을 시사한다.

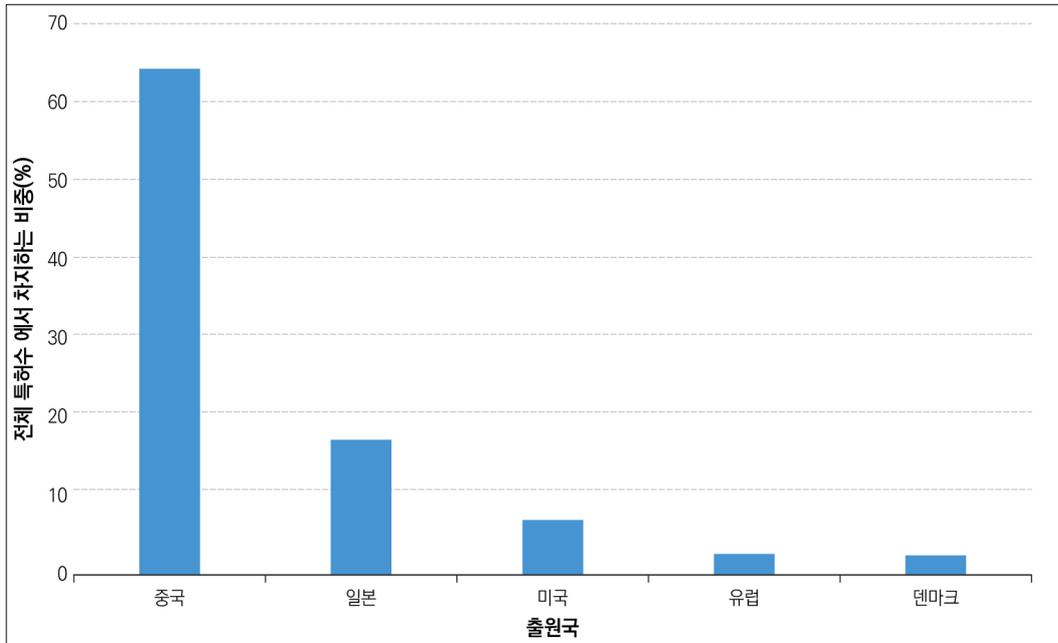
28) <https://www.wintelips.com/service/sci/integratedSearch.wips> (검색일:2022.12.7.)

29) 효과적인 분석을 위하여 위스 패밀리 로직으로 동일 발명 단위를 그룹핑한 결과임.

30) 주요국인 중국(CN), 유럽(EP), 일본(JP), 대한민국(KR), 미국(US)에서 출원한 특허

[표 6-7] 특허분석 대상 플라스틱 자원화 기술(2012~2021년 공개된 특허 대상)

기술 설명	특허 건수 (주요국 출원) ³⁰⁾	특허 건수 (전체)
플라스틱 재활용, 고무 재활용	2,338	2,548



[그림 6-4] 플라스틱 자원화 기술 관련 주요 출원국의 특허 보유 비중(%)

중국, 유럽, 일본, 대한민국, 미국을 대상국으로 순환경제 기술 특허를 출원한 전체 국가의 특허 2,548건 중 2,338건이 주요국이 출원한 건수에 해당한다. 이는 자국 대상 특허출원이 압도적인 중국과 일본 특허가 전체에서 차지하는 비중이 81%에 달하는 데에서 온 특징이라고 볼 수 있다. [표 6-8]은 전체 분석 대상 특허에서 특허 수 기준 상위 5위 출원국이 차지하는 비중을 분석한 결과를 보여준다. 중국이 압도적으로 높은 비중을 차지하며, 일본과 미국이 그 뒤를 잇고 있다.

[표 6-8] 플라스틱 자원화 기술 특허 주요 출원국 구성 비율

대상국가	중국	유럽	일본	대한민국	미국
특허건수	1,638	68	437	17	178
구성비율	64%	2.7%	17%	0.7%	7.0%

[표 6-8]에서 보여주는 바와 같이 우리나라 출원인이 보유한 특허는 17건으로 우리나라는 플라스틱 자원화 관련 지적재산권 경쟁력이 매우 낮은 수준에 머무른다. 다른 주요국들이 자국을 대상으로 주로 출원한 것과 달리 우리나라는 총 17건 중 중국 7건, 일본 6건, 미국 4건을 출원한 점이 특징적이다.

제3절

국내 플라스틱 전과정 물질흐름

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

본 절에서는 국내 플라스틱의 생산-소비-폐기 전과정 물질흐름을 분석하여 순환경제 대상이 되는 플라스틱 양과 종류를 살펴보고, 이에 기반하여 『K-순환경제 이행계획』에서 2050 목표달성에 필요한 재활용량을 추정하였다. 여기서 플라스틱 소비현황은 2017~2019년 3개년에 대한 정적 물질흐름분석을 통해 살펴보고, 정적 물질흐름분석의 한계를 보완할 동적 물질흐름분석의 방법론을 제시하고자 한다.

한국은 주요 플라스틱 생산 및 소비국으로, 특히 2018년부터는 폐플라스틱 수거 거부 사태, 불법 폐기물 수출, 의성 쓰레기산 등 플라스틱과 관련한 문제를 여러 차례 겪어왔으나 플라스틱 물질흐름분석 연구는 부족한 실정이다. 여기에서는 플라스틱 전과정 모든 단계에서 물질흐름을 정량적으로 추정함으로써 한국의 플라스틱 소비현황을 종합적으로 진단하고자 한다.

1 정적 물질흐름 분석³¹⁾

가. 분석 모형

한국 경제 전반에서 플라스틱 자원 소비현황을 파악하기 위해 수지 생산, 플라스틱 1차 제품과 제조, 플라스틱 제품 사용, 폐플라스틱 배출과 처리에 이르는 모든 과정에서 가용한 통계 및 문헌자료를 활용하여 2017~2019년 3개년 각각에 대한 플라스틱 물질흐름을 분석하였다. 이를 위해 먼저 분석모형을 수지 생산, 제품 제조, 제품 사용, 폐기물 관리의 4가지 단계로 구성하고, 각 단계에서는 가용한 데이터에 따라 9개 수지, 10개 제품, 4가지 폐플라스틱 처리 과정을 고려하였다[표 6-9]. 제조 단계의 재생 플라스틱은 수출입량만 고려한 것으로, 국내 산업에 투입되는 재생 플라스틱은 자료의 부족으

31) 본 소절의 내용은 장용철 외 (2022)의 내용을 기반으로 작성함

로 포함하지 않았다. 폐기물 처리 단계에서 열분해와 같은 화학적 재활용은 분석 기간 사이에는 상용화되지 않았으므로 분석에서 제외하였다.

[표 6-9] 플라스틱 정적 물질흐름분석 모형

생산단계	제품 제조 단계	소비 단계	폐기물 처리 단계
LDPE/LLDPE	일차 제품	전기전자제품	매립
HDPE	포장재	자동차	소각
PP	섬유	건물 및 건설	물질 재활용
PVC	의류	농업용 제품	열적 재활용
PS/EPS	건물 및 건설	가정용 제품	
PET	전기전자제품	포장재	
PC	가정용 제품	섬유 및 의류	
ABS	기타		
EVA	첨가물		
	재생 플라스틱		

분석모형에 따라 플라스틱 흐름을 정량화하기 위해 각종 통계와 문헌에서 데이터를 수집하였다[표 6-10]. 다양한 출처에서 수집한 데이터는 대상 물질, 연도, 지역이 다를 수 있기에 분석의 모든 단계에서 일관된 분석범위를 유지하기 어렵다. 생산 단계의 물질은 9개의 수지를 고려하였으나, 폐기물관리 단계의 물질흐름은 합성수지별로 세분화된 정보가 부족하여 모든 플라스틱의 총량을 반영하였다.

[표 6-10] 플라스틱 정적 물질흐름분석의 단계별 흐름과 데이터

단계	흐름	수집/추정 방법	데이터 연도	주요 데이터 출처
수지 생산	수지	원 출처 수집, 밸런스	2017-2019	석유화학편람
	첨가제	원 출처 수집	2017-2019	광공업생산연보
	일차 제품 생산 폐기물	원 출처 수집	2017-2019	전국 폐기물 발생 및 처리현황, 광공업생산연보, 폐기물 다량발생 사업장 폐기물 감량현황
	섬유	원 출처 수집, 밸런스	2017-2019	화섬편람
수출입	제품의 플라스틱 함유량	원 출처 수집	-	Swedish Chemical Agency(2007), Kawecki et al.(2018)
	제품 수출입 중량	원 출처 수집	2017-2019	무역협회 수출입 통계

단계	흐름	수집/추정 방법	데이터 연도	주요 데이터 출처
소비	소비 부문별 할당비율	원 출처 수집, 밸런스	2011-2013	한국석유화학협회 내부 조사 자료
폐기물 수집 및 처리	생활, 사업장생활, 사업장배출시설계, 건설폐기물 발생 및 처리	원 출처 수집	2017-2019	전국 폐기물발생 및 처리현황
	폐기물 조성	원 출처 수집	2016/2017	5차 전국폐기물 통계조사
	고형연료	원 출처 수집	2017-2019	고형연료제품 제조/사용시설 및 실적
	지정 폐기물	원 출처 수집, 밸런스	2017-2019	지정 폐기물 발생 및 처리현황
	영농 폐기물	원 출처 수집	2017-2019	영농 폐기물 통계
	폐전기전자제품	원 출처 수집	2017-2019	한국전자제품자원순환공제조합
	폐차	원 출처 수집	2017-2019	폐차 통계
	자발적 협약	원 출처 수집	2017	환경공단 내부 자료
	생산자재활용책임 제도	원 출처 수집	2017-2019	EPR 대상 포장재 폐기물 발생량 및 재활용량
	물질 재활용	원 출처 수집, 밸런스	2017-2019	폐기물 재활용 실적 및 업체 현황
	열적 재활용	원 출처 수집	2017-2019	고형연료제품 제조, 사용, 수입 실적 현황

나. 생산 단계 물질흐름 추정 방법

PET를 제외한 합성수지의 생산량과 수출입량은 『석유화학편람』 자료를 활용하였다. PET의 생산량과 수출입량은 별도로 보고되지 않기 때문에 PET 제품(단섬유, 장섬유, 필름, 병)의 생산을 위한 DMT(Dimethyl terephthalate)와 TPA(Terephthalic acid)의 소비통계, 화학반응 질량비, 용도별 출하 비중을 사용하여 PET의 생산량을 추정하였다. 제품 제조 과정에서 필요한 첨가제 생산량은 『광공업생산연보』의 항산화제 및 안정제 자료를 활용하여 추산하였다. 제조 단계에서의 10개 제품 수출입에 따른 플라스틱 수출입 흐름은 HS 코드별 제품의 수출입 증량과 플라스틱 함유량을 사용하여 추정하였다. 이때 HS 코드별 제품의 플라스틱 함유량은 국내 자료가 존재하지 않아 Swedish Chemical Agency(2007)와 Kawecki et al.(2018)의 수치를 활용하였다. 폴리에스테르 장섬유와 단섬유의 생산량은 『화섬편람』에서 수집하였다. 플라스틱 제품 제조 과정

중 발생하는 폐플라스틱량은 『전국폐기물 발생 및 처리현황』의 업종별 사업장배출시설 계폐기물에 집계된 고무 및 플라스틱 제품 제조업(C22) 폐기물량과 『광공업생산연보』의 부산물·폐품 판매액에서 도출한 할당계수를 통해 추정하였다. 고무 및 플라스틱 제품 제조업에서 발생한 폐플라스틱의 처리 방법별 처리량(다시 자가 재활용되는 비율 및 최종처리 비율)은 『폐기물 다량발생 사업장 폐기물 감량 현황』에서 집계된 내·외부 재활용 및 최종처리 비율을 활용하였다. 최종제품 단계로 투입되는 플라스틱량은 수지의 국내수요가 전부 1차 제품으로 변환된다고 가정하고, 추가로 투입되는 첨가제와 수출입량, 발생하는 폐기물을 고려하여 매스 밸런스를 통해 산출하였다.

다. 소비 단계 물질흐름 추정 방법

소비 단계는 플라스틱 제품을 최종 용도에 따라 7가지 부문으로 구성하였는데, 이는 한국석유화학협회가 2014년에 실시한 내부조사, 「합성수지 재질별, 용도별 생산판매 현황조사」에서 사용한 분류를 따른 것이다. 이는 2011~2013년 3개년 동안 플라스틱 최종사용 부문에서 판매된 합성수지의 양을 조사한 유일한 자료이다. 이 자료에서 소비 부문별 플라스틱 제품의 판매 비율을 도출하고, 이 할당 계수를 각 소비 부문에서 사용되는 플라스틱 흐름을 추정하는 데 사용하였다. 섬유 및 의류 항목은 폴리에스테르 장 섬유 및 단섬유의 소비량은 『화섬편람』의 자료를 사용하였고, 포장 및 용기의 PET 소비량은 전체 PET 제품 무게에서 섬유의 소비 값을 제외하여 추정하였다. 이후 플라스틱 순 소비량은 국내 공급 중 수출입을 조정하여 추정하였다.

라. 폐기물 수집 및 처리 단계 물질흐름 추정 방법

폐플라스틱 흐름은 『전국 폐기물 발생 및 처리현황』의 폐기물 종류별(생활, 사업장, 건설폐기물) 발생량에 『제5차 전국 폐기물 통계조사』 및 문헌의 플라스틱과 합성수지 함유량을 고려하여 추정하였다. 포장재 폐기물은 『전국 폐기물 발생 및 처리현황』의 생활계 폐기물량에, 『전국 폐기물 통계조사』에서 제공하는 생활폐기물 내 생산자재활용책임제도(EPR) 대상 플라스틱 제품의 비율을 적용하였다. 사업장배출시설계 플라스틱 폐기물은 전체 사업장에서 발생한 플라스틱 폐기물량에서 전과정 다른 단계에서 이미 감안한 고무 및 플라스틱 제품 제조업(C22) 부문의 폐기물량과 폐기물재활용 단계에서

발생하는 잔재물을 제외하고 산정하였다. 이 외에도 폐전기전자제품, 폐차, 농업에서 발생하는 폐플라스틱 흐름은 여러 문헌 수치를 활용하여 추정하였다.

재활용 중 물질 재활용은 환경공단 『폐기물 재활용 실적 및 업체 현황』의 재활용 판매량에서 고�형연료제품 제조시설로 보내진 폐기물량을 제외한 것을 물질 재활용 흐름으로 고려하였다. 재활용 판매량 중 실제 얼마나 산업에 재생원료로 투입되었는지는 현재 통계로는 알 수 없으며, 따라서 본 분석에서 추정한 물질 재활용량은 과대 추정되었을 가능성이 있다. 고�형연료 제품의 생산과 투입(시멘트 가마, 발전기, 산업용 보일러)에 대한 자료는 고�형연료제품 제조/사용시설 및 실적에서 수집하였다. 물질재활용 및 에너지회수 과정 중 발생하는 잔재물은 매스 밸런스에 따라 투입과 산출의 차이로 추정하였다. 최종처리에 대한 자료가 없는 폐기물에 대해서는 문헌 또는 인터뷰를 통해 재활용, 소각 및 매립 비율을 추정하였다. 예를 들어, 폐전기전자제품에서 발생한 폐플라스틱의 매립률은 1%, 재활용되지 않는 농업용 및 폐차의 폐플라스틱은 소각되는 것으로 가정하였다.

마. 정적 물질흐름분석 결과

한국의 2017~2019년 3개년에 대한 플라스틱 물질흐름 추정 결과는 [표 6-11]과 같다. 2017년 결과를 보면, 한국은 PP(25%), PE(24%), PET(17%), ABS(11%) 등 1,750만 1천톤의 합성수지를 생산하였다. 이 중 절반 이상을 수출한 후 플라스틱 제품을 생산 및 수출입하여 695만 2천톤의 플라스틱 제품을 순수하게 국내에서 소비하였다. 이는 1인당 135kg의 플라스틱 소비에 해당하는 것으로, 전 세계적으로도 최상위 수준이다. 전체 플라스틱 소비량 695만 2천톤 중 46%를 포장재로 사용하였고, 건물 및 건설에 17%, 생활용품에 15%를 소비하였다.

[표 6-11] 한국의 2017-2019년 플라스틱 물질흐름

(단위: 천톤)

단계	공정	흐름	2017	2018	2019
생산	수지 밸런스	수지 생산	17,501	17,366	17,143
		수지 수입	760	814	954
		수지 수출	9,387	9,626	9,642
	제품 제조	수지 국내공급	8,874	8,443	8,416
		첨가제 생산	233	230	234
		첨가제 수입	2	1	3

단계	공정	흐름	2017	2018	2019
		첨가제 수출	2	4	5
		제품 수입	330	336	371
		제품 수출	1,508	1,072	1,121
		제품 제조 폐기물	203	177	163
		제품 제조 폐기물 재활용	19	17	15
소비	제품 밸런스	제품 국내 공급	8,175	7,867	7,775
		제품 수입	1,264	1,361	1,449
		제품 수출	2,488	2,615	2,538
	전기전자제품	전기전자제품	497	511	585
	자동차	자동차제품	306	294	307
	건물 및 건설	건물 및 건설 제품	1,163	1,037	971
	농업	농업용 제품	316	294	308
	가정	가정용 제품	1,019	991	997
	포장재	포장재 및 컨테이너 제품	3,232	3,315	3,154
	섬유 및 의류	섬유 및 의류	420	350	365
폐기물 관리	폐기물 수집	산업			
		소계	7,112	7,636	9,152
		폐전기전자제품 플라스틱	55	79	65
		폐차 플라스틱	115	116	127
		건물 유래 폐플라스틱	811	829	756
		농업 폐플라스틱	318	322	314
		가정용 폐플라스틱	741	796	1,131
		포장재 폐플라스틱	2,239	2,234	2,889
		폐섬유 및 폐의류	55	239	232
	산업 및 지정폐기물	1,706	2,247	3,022	
	고형연료제조 잔재물	870	398	454	
	매립	매립	389	402	475
	소각	소각	2,934	2,711	2,978
	선별 및 재활용	재활용	3,789	4,524	5,529
		폐플라스틱 수입	63	151	169
	물질 재활용	폐플라스틱 판매	2,218	3,409	4,384
	수출	폐플라스틱 수출	200	67	33
에너지 회수	폐플라스틱 투입	1,634	1,266	1,314	
열적 재활용	고형 연료	765	869	860	
기타	기타	0	0	171	

같은 해 발생한 총 플라스틱 폐기물량은 711만 2천톤으로, 산업에서 39%, 포장재 31%, 건물 및 건설 11%, 생활 부문에서 10%가 발생하였다. 산업에서 어떠한 용도로 플라스틱을 사용하는지는 가용한 자료로 파악할 수 없었으나, 『전국 폐기물 발생 및 처리현황 통계』에 기반한 산업 부문별 플라스틱 폐기물 발생 특징은 다음과 같다. 일반 산업용 플라스틱 폐기물의 50% 이상은 제조업(C10-C34)에서 발생하였으며, 수도·하수 및 폐기물 처리·원료 재생업(상·하수도 포함, E) 부문이 39%를 차지했다. 제조업 부문의 플라스틱 폐기물의 세부 하위부문별 구성을 보면 펄프·종이 및 종이제품 제조업(C17, 18%), 고무 및 플라스틱 제품 제조업(C22, 11%), 전기장비 제조업(C28, 10%), 기타제품 제조업(C33, 10%), 식료품 제조업(C10, 9%) 순으로, 이 5개 제조업 부문이 전체 플라스틱 폐기물 발생의 58%를 차지하였다. 지정 폐기물은 총 플라스틱 폐기물 발생의 8%가 화학물질 및 화학제품 제조업에서 발생하였다.

2017년 발생한 플라스틱 폐기물 711만 2천톤 중 6%는 매립, 41%는 소각, 53%는 재활용시설로 보내졌고, 이 중 물질 재활용을 위해 판매된 폐플라스틱은 221만 8천톤으로, 전체 수집된 플라스틱의 31%로 나타났다. 나머지 재활용량(수입량 포함)인 163만 4천톤은 에너지 회수를 위해 판매되었고, 판매량의 47%가 고품연료로 사용되었으며, 고품연료 생산을 통한 열적 재활용률은 전체 수집된 플라스틱의 11%로 나타났다.

산업 폐기물은 약 66%, 284만톤이 재활용시설로 보내졌으며, 거의 모든 폐기물이 물질 재활용이나 열적 재활용을 위해 판매된 것으로 나타났다. 반면, 가정과 사업장에서 배출하는 생활계폐기물의 폐플라스틱 중 58%는 재활용시설로 보내졌으나, 최종적으로 0.57%만 재활용 제품으로 판매된 것으로 나타났다. 특히 생활계폐기물의 수거 경로(혼합배출, 분리배출)에 따라 최종 처리에 큰 차이가 나타났다. 분리배출된 폐플라스틱은 모두 재활용시설로 보내졌으나, 혼합 배출된 폐플라스틱은 25%만 재활용시설로 보내졌고, 56%는 소각, 나머지는 매립되었다. 그러나 이렇게 분리배출되는 플라스틱 폐기물(130만 1천톤)보다 종량제봉투에 버려지는 폐기물(167만 9천톤)이 더 많은 것으로 나타났다. 구체적으로 어떠한 요소가 수거경로에 따른 재활용률에 영향을 미쳤는지 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

분석 기간 3개년 동안 플라스틱 물질흐름의 변화를 살펴보면, 소비 단계까지 투입된 플라스틱량은 조금씩 줄어든 반면, 2019년에 발생한 플라스틱 폐기물량은 2017년 대

비 약 29% 증가하였다. 특히 생활계폐기물(+53%), 산업폐기물(+77%), 포장재폐기물(+29%)의 증가가 두드러졌다. 2018년과 비교하여도 2019년 플라스틱 폐기물 발생이 증가하였는데, 생활계폐기물은 42%, 산업용 및 지정폐기물 34%, 포장재 19% 증가한 것으로 나타났다. 동시에 재활용시설로 보내지는 폐기물량 또한 증가하여, 전체 재활용률은 2017년 42%에서 2019년 57%로 증가하였다. 폐플라스틱 수출은 2018년 1월 중국의 폐기물 수입금지 조치의 영향으로 2017년 20만톤에서 2019년 3만 3천톤으로 감소한 반면, 수입은 6만 3천톤에서 16만 9천톤으로 증가하였으며, 수입된 폐플라스틱은 재활용시설로 반입된 총 폐기물의 1~3% 수준이다.

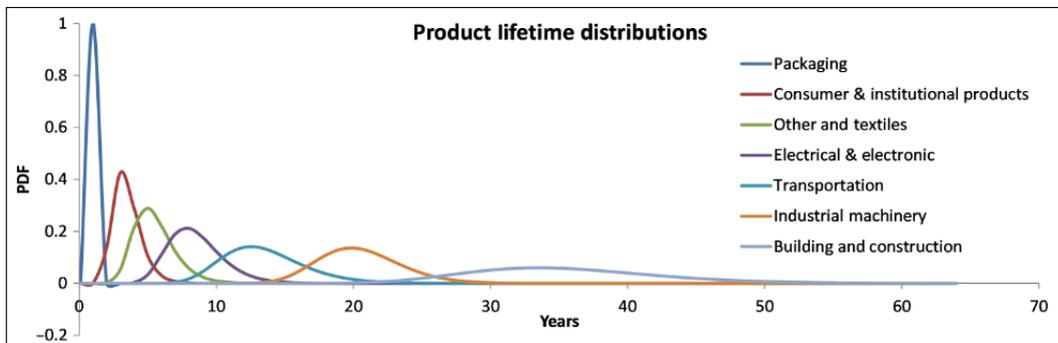
2 동적 물질흐름 분석

플라스틱 정적 물질흐름분석은 대상 시스템(예: 한국)의 특정 시점(예: 2017년)에서 가용한 통계와 문헌 자료를 통해 물질흐름을 정량화하는 방법론이다. 한국의 플라스틱 정적 물질흐름분석 결과, 가용 통계자료의 한계로 폐플라스틱에 포함된 수지나 제품 조성을 파악할 수 없었다. 특히 수지별 폐기물 발생 패턴은 재활용 전략을 수립하는 데 유용한 기초 자료가 될 수 있는데, 이를 추정하기 위해서는 동적 물질흐름분석을 활용할 수 있다. 동적 물질흐름분석에서는 플라스틱 제품의 수명주기분포를 통해 폐기물 발생을 하향식(top-down)으로 추정한다. 예를 들어 특정 플라스틱 제품의 수명주기분포가 평균 2년의 정규분포를 따른다면, 특정 시점에 투입된 플라스틱 제품은 평균 2년 후 폐기물로 발생되며, 폐기물 발생 또한 제품 수명주기분포를 따른다. 제품의 수명이 다해 폐기물로 바뀌기 이전에는 대상 시스템 내에서 제품이 사용 중이며, 이렇게 시스템에 누적되는 재고(stock)변화 또한 동적 물질흐름분석을 통해 추정할 수 있다.

한국의 플라스틱 동적 물질흐름분석을 수행한다면, 정적 물질흐름분석에서 도출된 주요 변수와 그에 대한 동일한 데이터를 기본적으로 활용하되, 제품의 수명주기분포함수를 추가적으로 추정하여야 한다. 예를 들어, 각 연도별(t) 플라스틱 수지 투입은 석유화학편람의 국내수요 통계를 활용하고, 석유화학편람에서 보고되고 있지 않은 PET의 경우 원료물질인 DMT 및 TPA의 국내수요와 용도별 출하비중, 원단위를 활용하여 추정할 수 있다. 각 연도별 제품 생산은 당해연도(t) 수지 신재 투입(국내 수요)과 전년도(t-1)

재생수지 투입에서 제조업의 폐합성수지 폐기물 발생과 수출입으로 인한 플라스틱 유출입을 조정하여 물질수지(mass balance)를 통해 산출할 수 있다. 각 연도별 최종 소비 또한 정적 물질흐름분석에서 사용한 방법과 동일하게, 제품 투입분에 소비부문별 할당 계수(한국석유화학협회 2014년 내부 자료의 소비 부문별 플라스틱 제품의 판매 비율)를 적용하고, 플라스틱 최종제품 수출입분을 조정하여 산출할 수 있다.

폐플라스틱 흐름은 제품별 수명주기분포를 고려하여 제품이 폐기물로 배출되는 확률로 산출할 수 있는데, 제품별 수명주기분포는 한국전자제품자원순환공제조합에서 수집하는 것과 같은 자료가 없다면 Geyer et al. (2017)와 같은 문헌 자료를 활용할 수 있다 [그림 6-5]. 분석 시스템으로 투입되는 흐름 중 사용 후 폐기물로 발생하는 부분을 제외하면, 시스템에 누적되는 사용 중 재고(in-use stock)를 추정할 수 있다. 재활용 흐름의 경우, 소비 단계에서 발생한 사용 후 제품 폐기물과 제조 단계에서 발생하는 폐기물에 대해 재활용 업체 반입율, 선별 비율을 적용하고, 폐플라스틱 수출입분을 조정한 후 재생수지로의 변환 비율을 적용하여 추정할 수 있으나, 추정치의 신뢰성을 확보하기 위해서는 재생수지 투입에 대한 추가적인 실증 조사가 필요하다. 폐플라스틱 최종 처분(매립, 소각, 기타 처리) 흐름은 폐기물 통계에 기반하여 연도별, 제품군별 처리 비율을 활용하여 산출할 수 있다.



[그림 6-5] Geyer et al.(2017)에서 사용한 8개 부문 플라스틱 제품 수명주기 분포함수
(출처: Geyer et al., 2017)

3 플라스틱 수지별 생산-수요-재활용 물질흐름

최근 플라스틱 부문 순환경제 전략으로 화학적 재활용 기술을 적용한 재생원료 사용이 주목을 받고 있다. 화학적 재활용 기술은 기술별로 그리고 수지 종류별로 결과물과 공정효율이 다양하기 때문에 향후 플라스틱 재활용 결과에서 순환성을 산정하려면 플라스틱 수지별, 재활용 기술별 물질흐름 정보가 필요하다. 상기 분석 결과와 화학적 재활용 관련 문헌 정보³²⁾를 이용하여 현재까지 가용한 데이터를 기반으로 아래와 같이 국내 플라스틱 수지 생산량, 수요량, 재활용량을 정리하였다. 현재까지 실험실 테스트 결과를 포함한 화학적 재활용 공정수율 정보를 종합한 결과 27%~90%까지 다양하며, 수율이 50% 미만인 재활용 공정은 재활용효율이 낮은 수준으로 판단하여³³⁾ 50% 이상인 공정만 포함하였다.

화학적 재활용 공정에 들어가기 전 플라스틱은 기계적 전처리를 통하여 일정 수준 이상의 품질기준을 만족하여야 하며, 이를 위하여 선별, 과립화(Ecoinvent DB 상의 폴리에틸렌의 sorting과 granule 생산에 해당함) 단계를 일괄적으로 적용한다고 가정하면 수거된 폐플라스틱이 화학적 재활용 원료가 되기까지의 수율은 85.5%가 된다. 이후 적용되는 화학적 재활용 수율을 현재 기준 최대치인 90%를 일괄 적용하는 경우, 국내 수요량이 100% 폐기된다는 가정하에 최대 재활용량을 산정하면 총 841만 6천톤의 국내 플라스틱 수요량 중 494만 5천톤이 화학적으로 재활용되어 최대 59%가 원료로 투입되거나 재사용 가능한 것으로 나타났다. 여기서 PVC, ABS, PC는 구성 성분 및 제품 수명주기 분포를 고려했을 때에 재생원료 생산 대상 폐기물로 고려하지 않았으나, 2019년 기준 물질 재활용률인 49%보다 높은 수준으로, 화학적 재활용 확대를 통한 플라스틱 순환성 향상을 기대할 수 있을 것으로 전망한다.

32) 자세한 정보는 제7장 제2절 플라스틱 재활용 전과정 평가에 정리됨.

33) 「폐기물관리법 시행령 개정안」에서 열분해유 회수기준으로 설정한 수율 50%를 참고함.

[표 6-12] 국내 플라스틱 수지 생산량, 수요량, 재활용(가능)량

수지 종류	플라스틱 생산량 (단위: 천톤)	국내수요량 (단위: 천톤)	Recycling rate (%)	현재 기술 기준 최대 재생자원량 (천톤, %)	2050 목표 재생자원량 (천톤, %)
PET	2,677	1,949	90% (dissolution, solvolysis) 80% (mechanical); 74% (gasification)	1,500 (77%)	K-순환경제 이행계획의 2050년 순환이용률 목표 기준 95% & 전처리 수율 85.5% 적용
PP	4,433	1,517	90% (dissolution); 80% (mechanical) 74% (gasification)	1,167 (77%)	
LDPE	2,861	1,420	90% (dissolution); 86% (pyrolysis-diesel)	1,885 (77%)	
HDPE	2,174	1,029	80% (mechanical); 74% (gasification);		
PVC	1,413	1,025	85.5% (sorting and granulation)	-	
ABS	1,938	589	85.5% (sorting and granulation)	-	
PS	979	511	90% (dissolution); 86% (pyrolysis-diesel) 80% (mechanical); 74% (gasification) 73% (pyrolysis-monomer)	393 (77%)	
PC	668	376	85.5% (sorting and granulation)	-	
계	17,143	8,416	-	4,945 (59%)	

* 『2022 석유화학편람』의 2019년 통계자료 참조.

* PET: 『석유화학편람』에서 제공하지 않는 통계 값으로 장용철 외(2022)의 논문에서 2019년 국내 수지 생산량 또는 국내 수지 공급량에서 나머지 플라스틱량의 차이로 각각 계산.

* LDPE: 『석유화학편람』 통계에서 LDPE, LLDPE, EVA를 합한 값에 해당함.

* PS: 『석유화학편람』 통계에서 PS와 EPS를 합한 값에 해당함.

* Recycling rate 중 화학적 재활용 공정은 재활용 공정 수율이 50% 이상인 공정 정보만 포함하였으며, 본 연구에서 화학적 재활용 대상에 포함하지 않은 수지의 경우 전처리 공정(sorting & granulation) 수율에 해당하는 85.5%를 일괄적용함.

* 최대 재생자원량은 국내수요량에 기반하여 산정함.

* 최대 재생자원량은 전처리를 거친 화학적 재활용량만 해당함.

『K-순환경제 이행계획』의 2050년 플라스틱 순환이용률 목표치는 95%이며, 이는 선별 및 재활용 단계에 해당한다고 가정³⁴⁾하였을 때에, 전처리 공정 수율인 85.5%을 적용하여 실질적으로 재활용되는 양으로 환산하면 81% 수준이다. 현재 기술수준으로 달성 가능한 최대 재생자원양에 해당하는 59%를 넘어 2050 목표 수준(81%)을 달성하기 위해서는 화학적 재활용 수율뿐만 아니라 PVC와 같이 순환이용에 방해가 되는 물질을 순환이용에 용이한 물질로 대체하는 기술이 개발될 필요가 있다. 여기에는 생분해 플라스틱 또는 바이오 플라스틱 등의 대체재 개발과 플라스틱 성분에 따른 선별기술 개발의 고도화가 요구된다.

4 성과지표 기반 2050 시나리오

이상의 플라스틱 전주기 상의 물질흐름 분석 결과에 기반하여 플라스틱 순환경제 전환 수준을 예측하는 성과 모니터링 지표 중심의 시나리오는 도출하였다.

본 연구에서 선정한 6개 순환경제 전환 산업 중 플라스틱 생산 및 폐플라스틱 재활용에 관한 산업은 코크스 및 석유정제품과 화학물질 및 화학제품 제조업이며, 이들 산업에 적용되는 시나리오는 BAU, ‘물질 재사용 시나리오’와 ‘물질재사용 혁신 시나리오’이다. 물질 재사용 또는 물질 재사용 혁신 시나리오는 플라스틱 재활용 공정을 통하여 재생원료를 생산하여 다시 생산활동에 투입되는 시나리오이며, BAU는 분석 목적에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 폐플라스틱 처리 방법에 따라 시나리오를 구분하는 경우 BAU는 기존의 처리방식 중 매립, 소각, 재활용(기계적 재활용을 통하여 저품질 플라스틱 생산)에 해당하며, 둘째, 플라스틱 재활용 결과물에 따라 시나리오를 구분하는 경우 BAU는 플라스틱 재활용을 통해 생산된 재생원료(화학물질)를 기존 상용 공정을 통하여 생산하는 시나리오에 해당한다. 본 연구는 두 번째 구분 방식을 적용하여 현재 기술 수준을 반영한 물질 재사용 시나리오를 중심으로 환경영향을 분석하였으며, 첫 번째 구분 방식에 따른 시나리오 간의 비교 또한 일부 수행하였다.

34) 『K-순환경제 이행계획』에 순환이용률 정의 및 기준 미제시.

[표 6-13] 플라스틱 순환경제 전략 시나리오

시나리오 이름	전략 그룹1 (직접 순환 전략)			전략그룹 2 (혁신 전략)		주요 전환 대상 산업	관련 순환산업
	순환 공급망	재생원료 사용	상품 재제조	기술혁신	녹색투자		
BAU						-	-
물질 재사용 (전환시나리오)	●	●				코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE)	순환공급 (CRM) 원료재생 (CEN)
물질 재사용 혁신 (최적 시나리오)	●	●		●	●		

BAU 수준은 K-순환경제 이행계획 상의 현재 순환이용률인 56%를 적용했으며, 재생 자원 전환률은 현재 기술 기준 최대치(화학적 재활용 기술의 최고 전환 효율에 해당하는 용해와 가용매분해 반응의 수율, 90%)를 적용하여 계산하였다. 물질 재사용 시나리오(전환 시나리오)는 본 연구에서 재생자원 생산 공정이 적용되는 대상으로 정의되었던 PET, PP, PE, PS 국내 수요량 100%가 재생원료 생산에 투입된다고 가정하였으며 현재 기술 기준의 최대치를 적용하였다. 물질 재사용 혁신 시나리오(최적 시나리오)의 경우 K-순환경제 이행계획 상의 2050년 순환이용률 목표인 95%를 적용했으며, 재생자원 전환률은 기술혁신을 통하여 현재 최대 수율인 90%보다 향상된 100%를 적용하여 계산하였다. 단, 모든 시나리오에서 재생원료 생산에 투입된 폐플라스틱 전처리 수율은 현재 수준인 85.5%로 일괄 적용하였다.

[표 6-14] 국내 플라스틱 수지 생산량, 수요량, 재활용(가능)량

플라스틱 생산량 (단위: 천톤)	국내수요량 (단위: 천톤)	재생자원 생산 최대 수율 (%)	현재 기술 기준 최대 재생자원양 (천톤, %)	2050 목표 재생자원양 (천톤, %)
17,143	8,416	77% (기계적 전처리 후 용해, PET, PP, PE, PS)	4,945 (59%)	6,836 (81%)

* 『2022 석유화학편람』의 2019년 통계자료 참조

* 최대 재생자원 양은 국내 수요량에 기반하여 산정하였으며, 전처리를 거친 화학적재활용 양만 해당함

* 2050 목표 재생자원양은 『K-순환경제 이행계획』상의 2050년 순환이용률 목표 기준 95%, 전처리 수율 85.5%, 전처리 이후 처리공정 수율 100% 적용

K-순환경제 이행계획 상의 플라스틱 부문 현재(2021년 기준) 순환이용률과 2050년 순환이용률 목표를 각각 BAU 및 최적시나리오 수준으로 설정하고, 본 연구에서 현재 적용 가능한 재생자원 생산 기술의 최대 수준을 중간 단계인 전환시나리오로 설정하는 경우 달성 가능한 순환이용률과 재생자원 전환률을 [표 6-15]에 정리하였다. 계산 결과 BAU, 전환 시나리오, 최적 시나리오에서 각각 최대 48%, 59%, 81%의 폐플라스틱이 원료로 재투입되거나 재사용 가능한 것으로 나타났다. 제2장에서는 최적 시나리오를 6대 순환경제 전환 전략 산업의 물질순환성([표 6-15]에서 재생자원 전환률에 해당함)이 100%에 도달하는 경우로 단순화하여 적용하였던 것과 달리 플라스틱 순환경제 시나리오 분석에는 순환성 향상에 적용 가능한 기술정보 등 산업활동을 구성하는 구체적인 정보를 활용하여 최적 시나리오 수준을 수정할 수 있었다.

[표 6-15] 시나리오별 국내 발생 폐플라스틱 순환이용률 및 재생자원 전환률

시나리오 구분	순환이용률 (폐플라스틱 발생량 중 재생원료 생산에 투입된 양)	재생자원 전환률※ (폐플라스틱 발생량 중 재생원료로 전환된 양)
K-순환경제 이행계획 2021 수준 (BAU)	56%	48%
현재 기술 기준 최대 수준 (전환 시나리오)	76%	59%
K-순환경제 이행계획 2050 목표 (최적 시나리오)	95%	81%

※ 모든 시나리오에서 재생원료 생산에 투입된 폐플라스틱에 현재 기준 전처리 수율 85.5%를 적용하였으며, 전처리 이후 공정의 전환률의 경우 BAU와 전환시나리오는 현재 기술 최대 수준(90%)의 전환률을 적용하고 최적시나리오는 100% 전환률을 적용함.

※ 전환 시나리오의 순환이용률은 [표 6-12]에서 '현재 기술 기준 최대 재생자원량'이 존재하는 수지의 국내수요량이 전체 국내수요량에서 차지하는 비율로 산정함.

제4절

국제 플라스틱 전과정 물질흐름

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 분석개요

본 장에서는 플라스틱 관련 물질의 국제적 순환 양상을 무역 데이터를 토대로 전과정(life cycle)의 측면에서 분석하고 탄소중립 정책이 이러한 물질 순환 양상에 미칠 영향을 예측한다. 국제 무역은 HS코드(Harmonized System code)를 기준으로 기록하며, 국제적으로 통용되는 HS코드는 6자리(6단위)로 구성된다.³⁵⁾ HS코드의 분류체계는 2단위(chapter, 류), 4단위(heading, 호), 6단위(sub-heading, 소호)로 구성되는데, 4단위는 2단위를 세분류한 것이고, 6단위는 4단위를 세분류한 것이다.³⁶⁾ 「HS2017 개정안」을 기준으로 살펴보면 2단위는 97개, 4단위는 1,222개, 6단위는 5,387개의 품목이 있다.³⁷⁾

HS코드(2017년 개정안)를 기준으로 플라스틱 제품은 제39류(플라스틱과 그 제품)로 분류되며, 이는 다시 26개의 4단위와 126개의 6단위 코드로 분류된다. 하지만, 이러한 분류는 플라스틱 또는 플라스틱 제조에 사용되는 모든 물질을 포함하지 못하기 때문에 플라스틱 관련 물질의 국제적 순환을 살펴보는 데에는 적합하지 못하다. 이는 HS코드의 분류기준이 물질을 기준으로 하지 않기 때문이다. 반면, 무역자료는 비용과 접근성의 측면에서 물질순환 관련 데이터베이스보다 우위에 있다. Barrowclough, Birkbeck & Christen(2020)은 이러한 점에 착안하여 전과정을 고려한 플라스틱 무역 데이터베이스를 제안하였다. 본 절에서는 동 연구에서 제안한 플라스틱 무역 데이터베이스를 기반으로 플라스틱 관련 물질이 국제적으로 어떻게 순환하는지 살펴본다.

35) 각 국가에서는 관세부과, 통계 작성 등의 목적으로 거래 상품을 더 세부적으로 분류하기도 한다. 예를 들어, 한국은 대내적으로 6자리 HS코드에 4자리를 추가한 총 10자리 코드(HSK)를 사용한다. 다만, 6자리를 초과하는 코드는 국제적인 기준이 없으므로 다국가 간 이루어지는 무역과 관련한 분석은 6자리 HS코드를 사용하는 것이 통상적이다. 예를 들어, 미국 역시 대내적으로 10자리 코드를 사용하지만, 한국의 10자리 코드와 미국의 10자리 코드는 일치하지 않는다.

36) 10단위(10자리)는 품목번호로 지칭하며, 6단위를 세분류한 것이다.

37) 10단위 품목의 수는 1만 2,232개이다.

Barrowclough, Birkbeck & Christen(2020)의 데이터베이스는 HS코드 6단위(HS2017 개정안)를 기준으로 총 10개의 항목으로 구성되어 있다.³⁸⁾ 이 가운데 원료(feedstocks and precursors used in plastics)와 첨가물(additives used in plastics) 항목은 플라스틱 제품 이전 단계라고 볼 수 있다. 한편, 플라스틱 제품은 전 과정을 바탕으로 플라스틱 수지(plastics in primary forms), 중간물질(intermediate forms of plastics), 중간재(intermediate manufactured plastic goods), 최종재(final manufactured plastics goods), 폐기물(plastic waste) 항목으로 구분된다. 이외에 별도로 합성섬유(synthetic textiles), 그물(fishing nets), 포장재(plastic packaging) 항목이 있다. 본 절에서는 플라스틱 물질의 전과정 관점에서의 순환을 살펴보고자 하므로 합성섬유, 그물, 포장재를 제외한 7개의 항목을 기준으로 플라스틱 물질이 국제적으로 어떻게 이동하는지를 살펴본다. 다만, 동 데이터베이스는 국제무역을 기준으로 하였으므로, 자국에서 생산하여 자국에서 소비한 제품은 포함하지 않는다는 점에 유의할 필요가 있다.

본 연구에서는 플라스틱 물질의 국가 간의 흐름에서 무역을 통하여 이동하는 양에만 초점을 맞춰 분석하였으나 물질 순환 측면에서는 바다에 부적절하게 폐기되는 양 등을 고려할 필요가 있다는 점을 해석 시에 참고할 필요가 있다.

2 요약 통계량

Barrowclough, Birkbeck & Christen(2020)은 2018년 무역자료를 기준으로 플라스틱 물질의 국제 순환을 분석하였다. 본 절에서는 시간에 따른 플라스틱 물질의 순환을 파악하고자 2002년부터 2020년까지의 국가 간 무역자료를 기준으로 분석하였다. 무역자료는 프랑스의 연구기관인 CEPII(Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales)가 제공하는 BACI(Base pour l'Analyse du Commerce International)³⁹⁾를 사용하였다.⁴⁰⁾⁴¹⁾⁴²⁾

38) 각 항목별 HS코드는 Barrowclough, Birkbeck & Christen(2020)의 부록에 수록되어 있다.

39) Database for International Trade Analysis를 의미한다.

40) Gaulier, G. and Zignago, S. (2010) BACI: International Trade Database at the Product-Level. The 1994-2007 Version. CEPII Working Paper, N°2010-23.

한편, 플라스틱 물질 데이터베이스는 「HS2017 개정안」을 기준으로 작성되었다. 따라서, 2017년 이전 시기의 플라스틱 물질 관련 무역자료를 분석하기 위해서는 이전 개정안을 기준으로 분석해야 한다. 본 절에서는 이를 위해 UN Comtrade 홈페이지에서 제공하는 HS코드 변환표를 이용하여 「HS2002 개정안」을 기준으로 데이터베이스 항목을 재작성한 후 이를 이용하여 무역자료를 분류하고 집계하였다. 다만, HS코드의 변환으로 인해 오차가 발생하는데, 시간의 흐름에 따른 플라스틱 물질 순환 양상의 변화를 관찰하기 위해서는 불가피한 과정이다.⁴³⁾

한편, 무역자료에는 무역액과 무역량이 모두 기록되어 있으나, 일부 무역량은 자료에서 누락되어 있다. 전체 표본 기간에 누락된 무역량의 비율은 금액 기준으로 각각 1.10%(원료), 1.01%(첨가물), 0.08%(플라스틱 수지), 0.46%(중간물질), 0.51%(중간재), 0.43%(최종재), 0.02%(폐기물)이다.⁴⁴⁾ 항목에 따라 편차가 있고 연도에 따라서도 편차가 있으나 전반적인 분석에 영향을 줄 수 있는 크기는 아니므로 아래에서는 별도의 조정 없이 분석을 진행하였다. 자세한 사항은 아래의 [표 6-16]에 표시하였다.

41) BACI는 UN Comtrade 데이터베이스를 기반으로 작성한 자료이다. UN Comtrade 데이터베이스는 회원국들이 제출한 자료를 집계하여 제공하는데, 국가별로 무역자료의 집계 기준이 다르기 때문에 이에 따른 불일치 문제 등이 발생한다. 이러한 문제를 완벽히 해결할 수는 없으나, 여러 기관에서 문제가 되는 부분을 교정하기 위한 노력을 하고 있으며, BACI는 그러한 데이터베이스 중 하나이다.

42) Barrowclough, Birkbeck & Christen(2020)은 UN Comtrade 자료를 사용하였다. 따라서, 분석 기간 및 대상을 고려하더라도 결과에 약간의 차이가 있다.

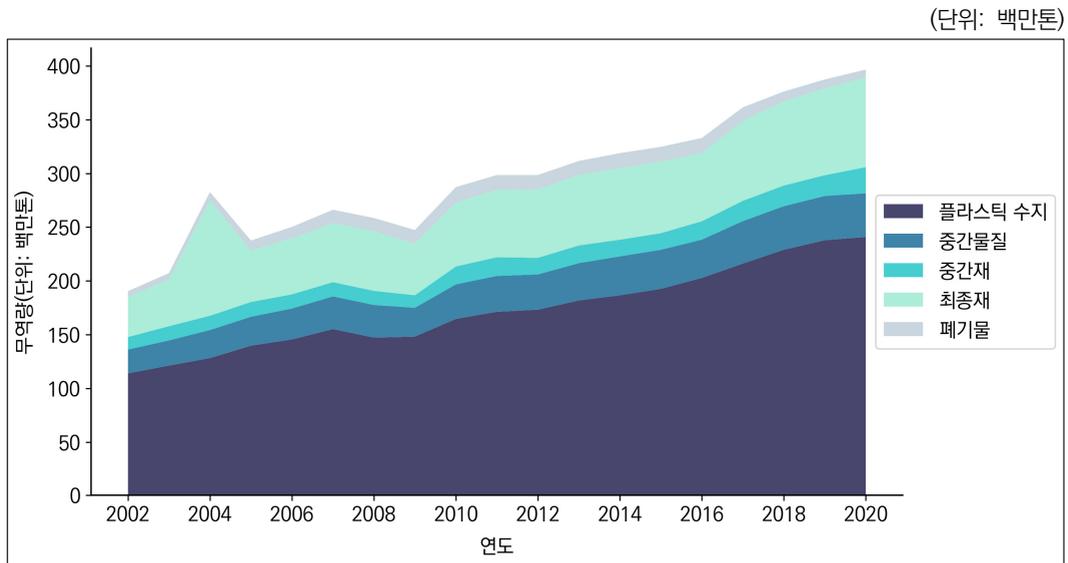
43) 아래에서 탄소중립 정책의 영향을 분석할 때는 Barrowclough, Birkbeck & Christen(2020)의 연구에서 정의한 HS2017 개정안 기준 코드를 그대로 사용한다.

44) 금액은 각 연도의 무역 금액을 2015년 기준 실질가치로 환산하여 집계하였다. 무역액은 미 달러화로 표시되어 있으므로, 미국의 GDP 디플레이터를 이용하여 실질가치로 환산하였다.

[표 6-16] 플라스틱 관련 무역 요약 통계량

	무역액(백만달러)	무역량(백만톤)	무역량 누락 비중(%)	
	평균	평균	평균	표준편차
원료	80.14	83.06	0.10	0.10
첨가물	441.72	223.81	1.01	1.20
플라스틱 수지	311.35	173.49	0.08	0.08
중간물질	140.19	32.51	0.46	0.64
중간재	72.16	15.72	0.51	0.57
최종재	336.01	63.85	0.43	0.57
폐기물	5.43	10.97	0.02	0.06

자료: BACI, 저자 계산



자료: BACI, 저자 계산

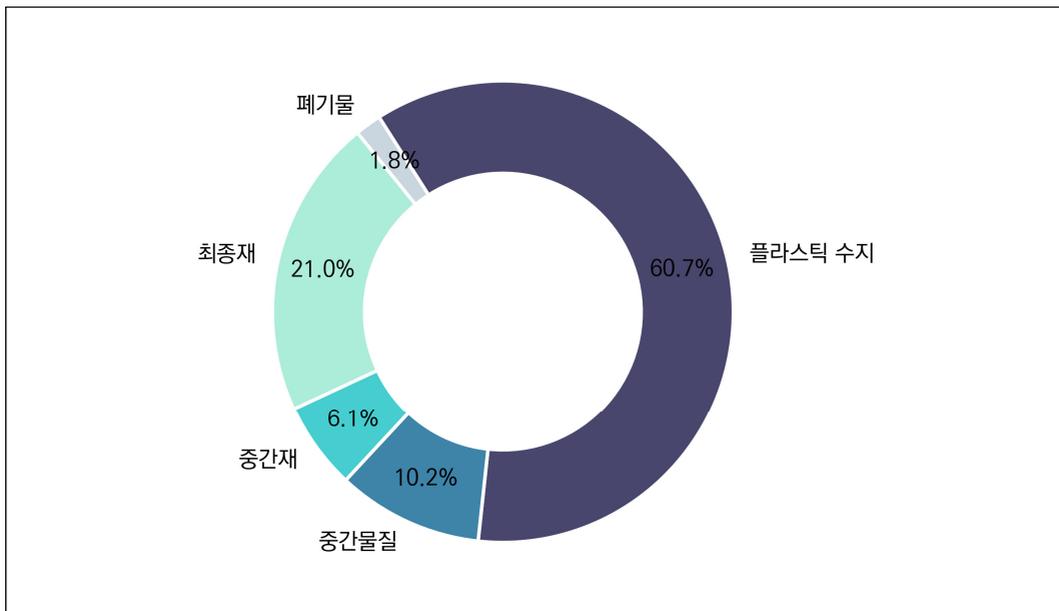
[그림 6-6] 플라스틱 물질 무역량

[그림 6-6]은 플라스틱 물질 무역량을 나타낸다.⁴⁵⁾ 분석에서 사용하는 플라스틱 데이터 베이스 항목 가운데 플라스틱 수지, 중간물질, 중간재, 최종재, 폐기물을 표시하였다.⁴⁶⁾

45) 구체적인 수치는 부록 3의 [표 A3-1]을 참조.

46) 원료와 첨가물 항목은 반드시 플라스틱 제품의 제조에 사용되지는 않으므로 제외하였다.

그림을 살펴보면 전반적으로는 플라스틱 물질의 무역량이 시간에 따라 증가하는 양상을 보인다. 또한 다섯 가지 항목 가운데 플라스틱 수지의 비중이 가장 높게 나타나며, 구성비는 일정하게 유지된다. 가장 최근인 2020년을 기준으로 각 항목의 구성비는 아래의 [그림 6-7]에 표시하였다. 전체 교역에서 플라스틱 수지가 60.7%, 중간물질이 10.2%, 중간재가 6.1%, 최종재가 21.0%, 폐기물이 1.8%를 차지함을 알 수 있다.



자료: BACI, 저자 계산

[그림 6-7] 플라스틱 물질 교역 구성비(2020년)

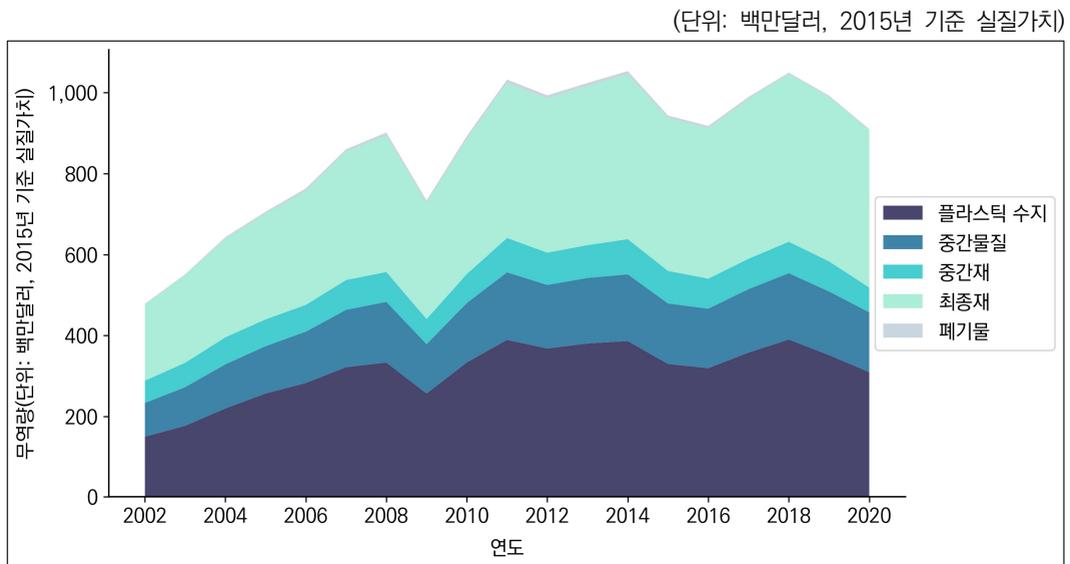
무역액을 기준으로 플라스틱 제품 무역을 살펴보면 무역량과는 다른 양상이 나타난다. [그림 6-8]은 2002년부터 2020년까지 플라스틱 물질의 무역액을 표시하였는데,⁴⁷⁾⁴⁸⁾ [그림 6-6]에 표시한 무역량과 두 가지 측면에서 차이가 있다. 첫째, 무역량은 시간에 따라 꾸준히 증가하는 반면, 무역액은 2011년까지는 증가하는 추세를 보이거나 이후로는 정체되어 있다.⁴⁹⁾ 둘째, 무역량을 기준으로 보면 플라스틱 수지가 약 60%를 차지하여

47) 앞서와 마찬가지로 2015년 미 달러화 기준으로 표시하였다.

48) 구체적인 수치는 부록 3의 [표 A3-2]를 참조.

49) 무역량과 무역액 모두 2009년에 감소하는데 이는 글로벌 금융위기의 여파로 보인다.

다른 4가지 항목을 크게 앞서지만, 무역액을 기준으로 보면 최종재의 비중과 플라스틱 수지의 비중이 비슷하게 나타난다. 중간물질과 중간재의 비중 또한 무역액의 경우가 무역량의 경우보다 다소 크게 나타난다. 이는 순환주기에 따라 제품의 금액(가치)이 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 한편, 각 순환주기별 항목의 비중은 시간에 따라 크게 달라지지 않는다는 점에서 무역량과 공통점이 있다. 다만, 본 보고서에서는 물질의 순환에 중점을 두고 있으므로, 아래에서는 무역량을 중심으로 분석을 진행한다.



자료: BACI, 저자 계산

[그림 6-8] 플라스틱 물질 무역액

3 플라스틱 물질 국제 순환 현황

본 절에서는 플라스틱 전과정 항목별 국가 간의 무역량을 분석하여 시각화하였다. [그림 6-9]부터 [그림 6-15]의 지도에는 양국 간 수출·수입 관계를 화살표로 표시하여 플라스틱 물질의 전 세계적 흐름을 보여주고, 막대그래프에는 플라스틱 물질의 주요 수출국과 수입국을 대상으로 총수출과 총수입을 표시하였다. 표본기간 중 첫 3년인 2002~2004년의 평균과 마지막 3년인 2018~2020년의 평균을 표시하였는데, 첫 3년에 해당하는 자료는 주황색으로 표시하고 마지막 3년에 해당하는 자료는 파란색으로 표시하였다. 지도에는 양국 간 무역량 상위 50%에 해당하는 자료를 표시하였으며, 화살표가 크고 선명할수록 무역량이 많다. 막대그래프는 수출량과 수입량이 많은 순서로 상위 10개국을 표시하였다.

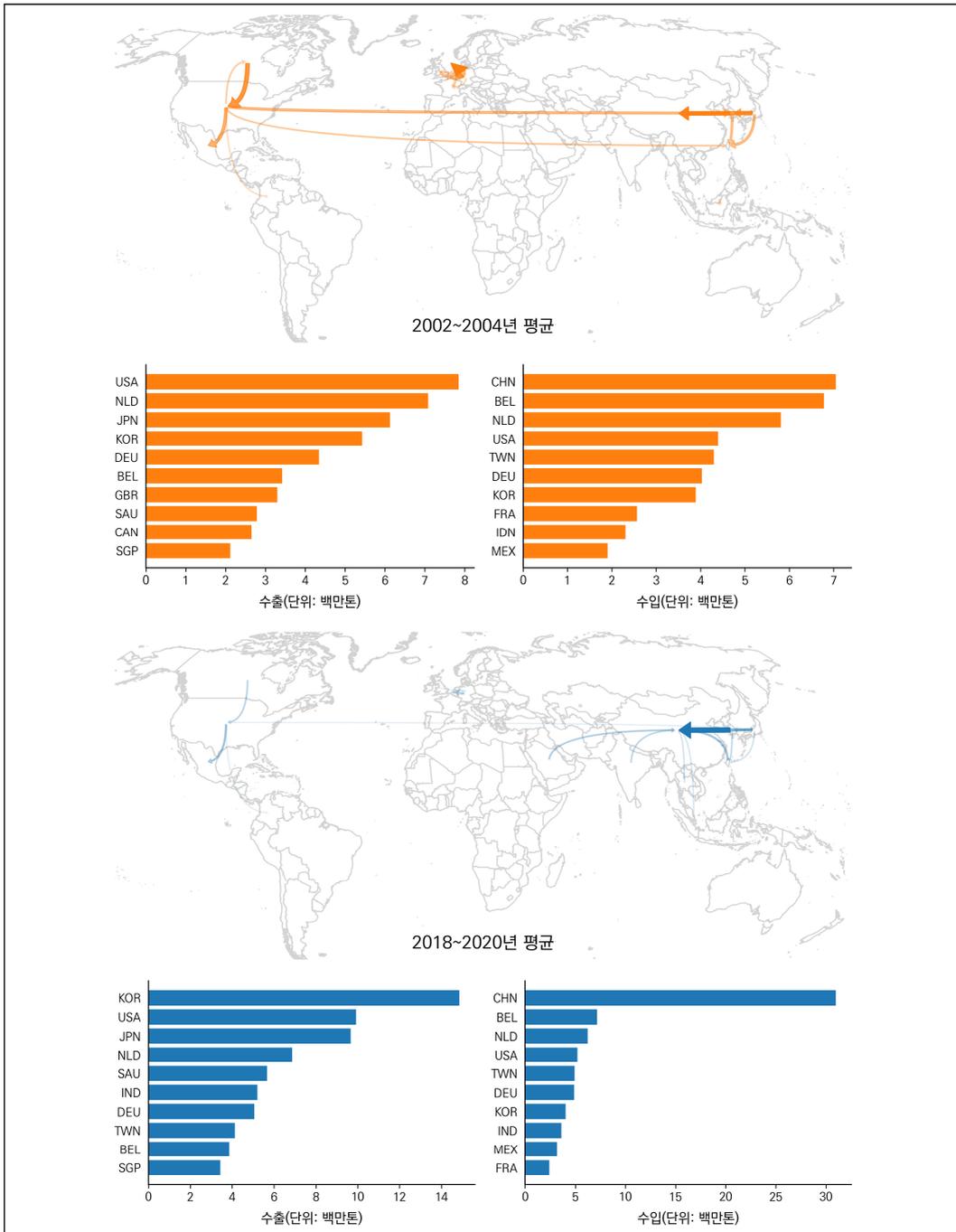
전반적으로 2002~2004년과 2018~2020년 자료에서는 다음과 같은 특징이 발견된다. 첫째, 상대적으로 2002~2004년에는 지역(대륙)별 무역의 비중이 높게 나타나고, 2018~2020년에는 중국이 전체 플라스틱 물질 순환에서 차지하는 비중이 높게 나타난다. 두 기간 모두에서 북미(미국, 캐나다, 멕시코) 국가 간 교역이 활발하게 나타나지만, 2018~2020년에는 미국이 상대적으로 많은 물질을 중국으로부터 수입하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향성은 최종재에서 특히 두드러지게 나타나는데, 2002~2004년에는 멕시코에서 미국으로 유입되는 최종재의 양이 양자 간 무역에서 압도적인 분량을 차지하는 반면, 2018~2020년에는 중국에서 미국으로 유입되는 최종재의 양이 양자 간 무역에서 압도적인 분량을 차지한다. 이러한 양상은 국가별 수출량과 수입량을 통해서도 확인할 수 있다. 한편, 유럽 지역을 살펴보면, 독일, 프랑스, 영국, 네덜란드, 벨기에 등의 국가 간 플라스틱 무역이 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 다만, 북미와 마찬가지로 다수의 분야에서 무역량의 비중이 2018~2020년에 상대적으로 하락하였으며, 원료 등 일부 분야에서는 이러한 경향성이 강하게 나타난다.

둘째, 양 기간 사이에 중국의 역할 변화가 두드러지게 나타난다. 원료, 플라스틱 수지 수입 항목에서 중국 집중도가 크게 높아졌다. 반면, 중간물질, 중간재 분야에서 중국은 수입이 대폭 줄어들고 수출은 대폭 늘어나 전 세계적으로 플라스틱 물질의 주요 공급원이 되었다. 전과정에서 나타나는 이와 같은 변화 양상은 중국의 산업이 고도화되면서 점차 글로벌 가치사슬에서의 위상이 변화(후방 또는 다운스트림 산업으로 이동)하였다

는 일반적인 분석과도 상응한다. 다만, 중국은 최종재 등의 수출에서도 비중이 상당히 증가하였으므로 플라스틱 물질 무역 전반에 걸쳐 위상이 상승하였다고 볼 수 있다.

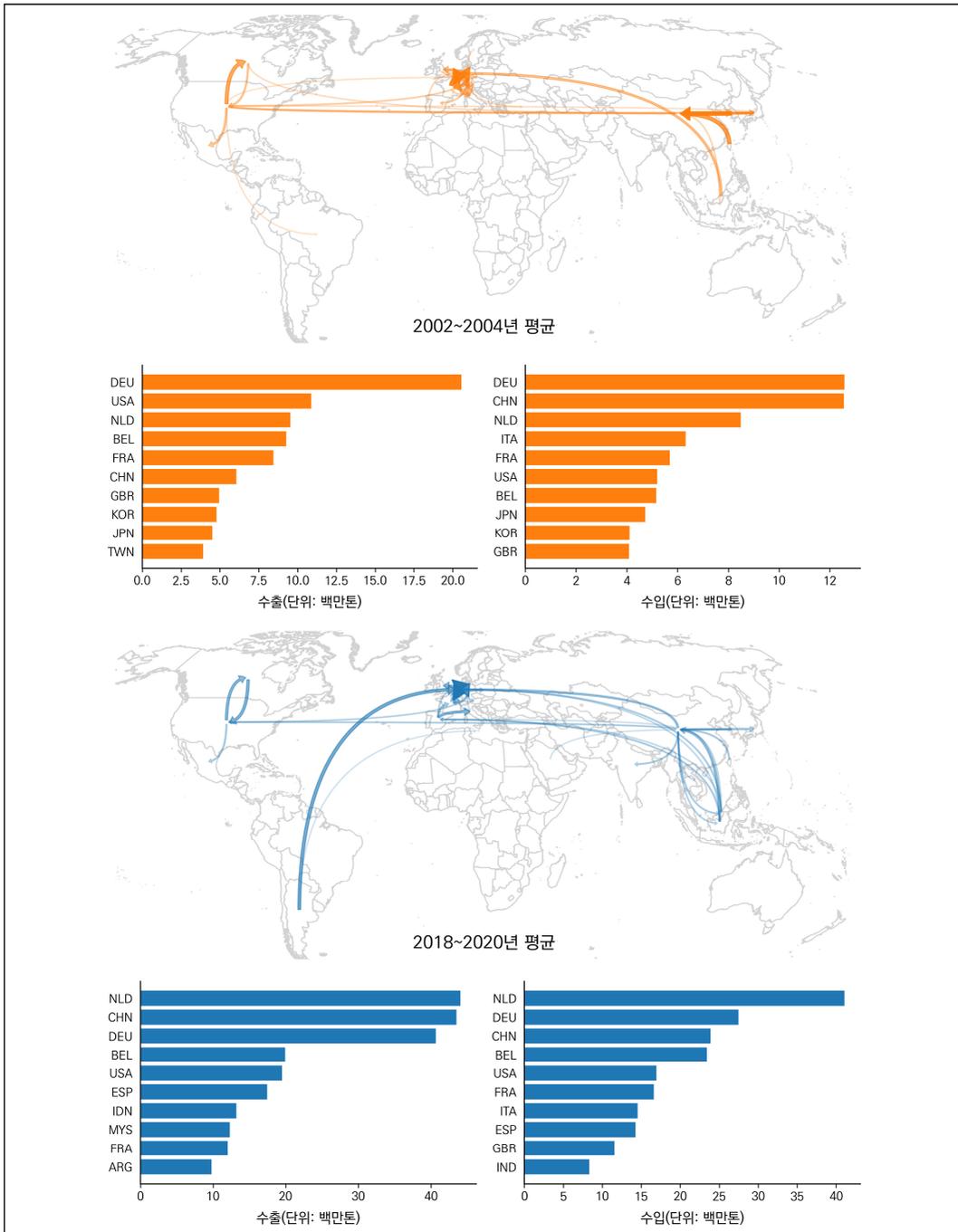
셋째, 플라스틱 폐기물의 이동을 살펴보면, 과거에는 폐기물이 중국으로 집중적으로 유입되었지만, 최근에는 중국으로의 유입량이 크게 줄었음을 알 수 있다. 이는 중국이 2018년에 플라스틱 폐기물의 수입을 전면적으로 금지함에 따른 것으로, [그림 6-15]에서 2018년 자료를 제외하면 이러한 변화가 더욱 잘 나타났을 것이다. 최근에는 폐기물이 주로 동남아 국가들과 터키, 독일 등 일부 유럽 국가로 이동하고 있음을 알 수 있다.

위의 논의를 종합하면, 최근 20여년 동안 플라스틱 관련 물질의 순환이 중국을 중심으로 재편되었다고 볼 수 있다. 다만, 앞서 기술한 바와 같이 이는 국제적으로 이동한 물질에만 해당하며, 각국 내에서 생산되고 소비된 물질에 대한 정보는 담지 않았다는 점에 유의할 필요가 있다. 또한, 전 세계적인 탄소중립(탈탄소) 움직임과 순환경제의 도입으로 향후 플라스틱 관련 물질의 국제 이동에도 일정 부분 변화가 일어날 것으로 예상된다. 이와 관련해서는 다음에서 별도로 논의한다.



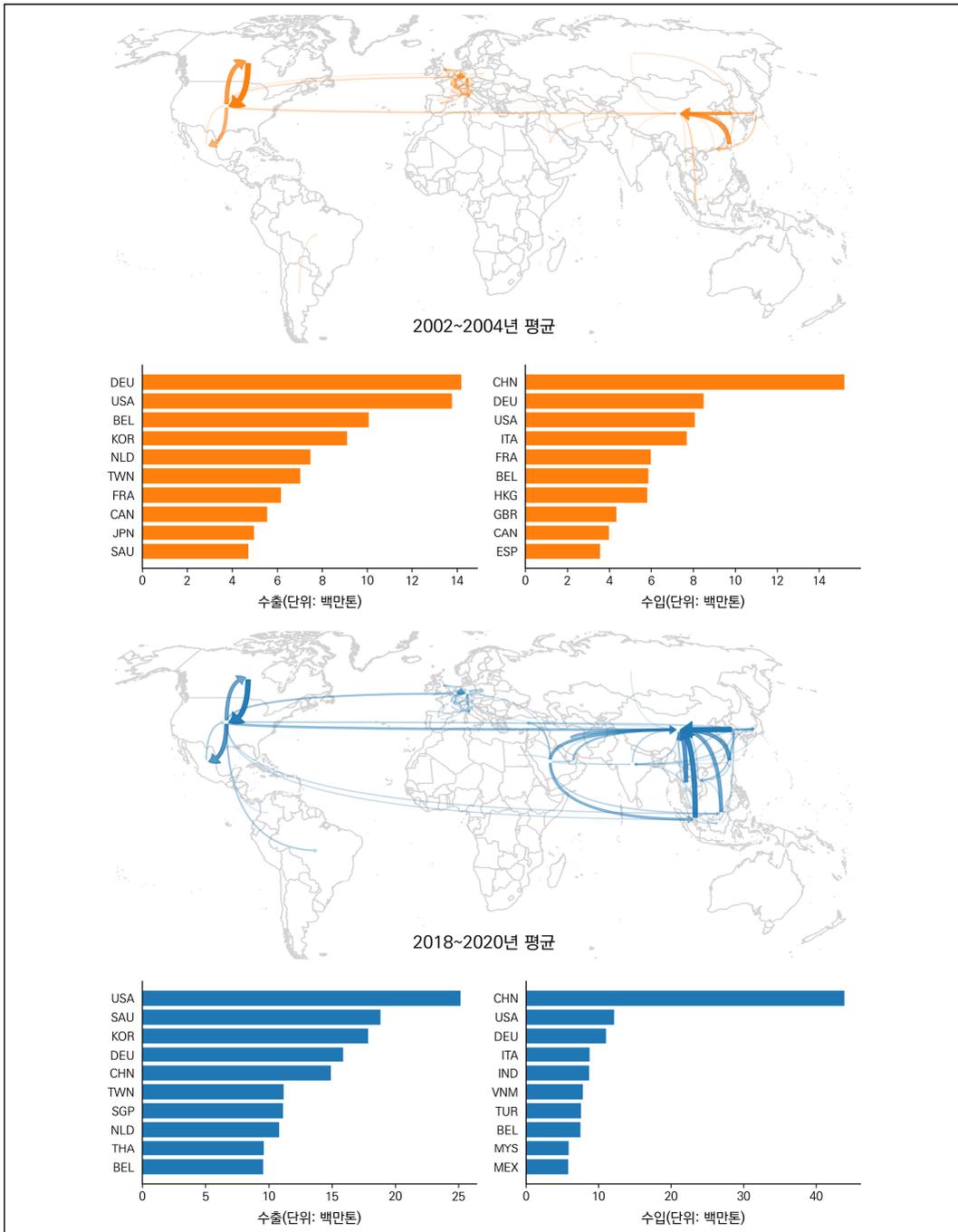
자료: BACI, 저자 계산. 주황색은 2002~2004년 평균, 파란색은 2018~2020년 평균을 나타냄.

[그림 6-9] 플라스틱 물질(원료) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)



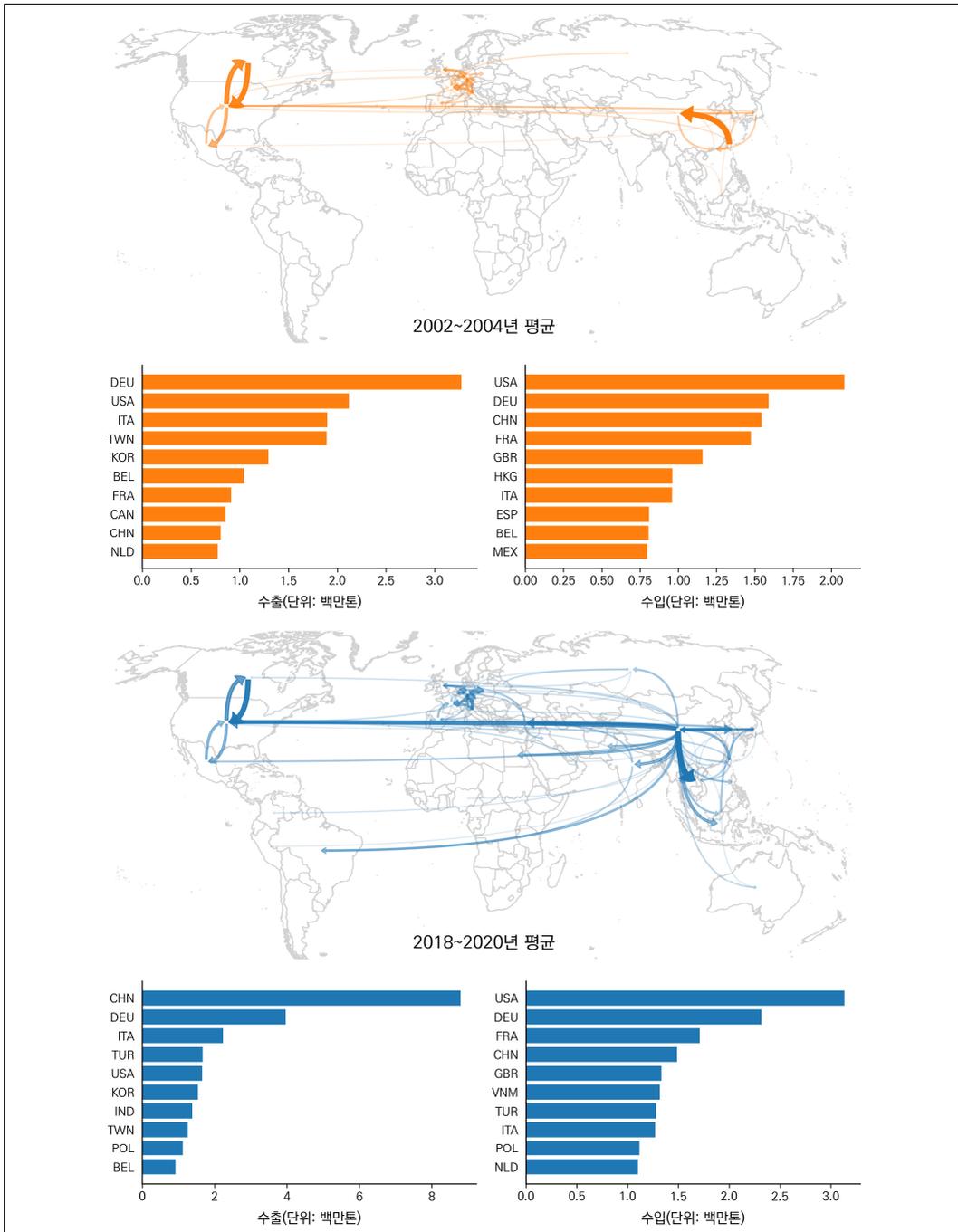
자료: BACI, 저자 계산. 주황색은 2002~2004년 평균, 파란색은 2018~2020년 평균을 나타냄.

[그림 6-10] 플라스틱 물질(첨가물) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)



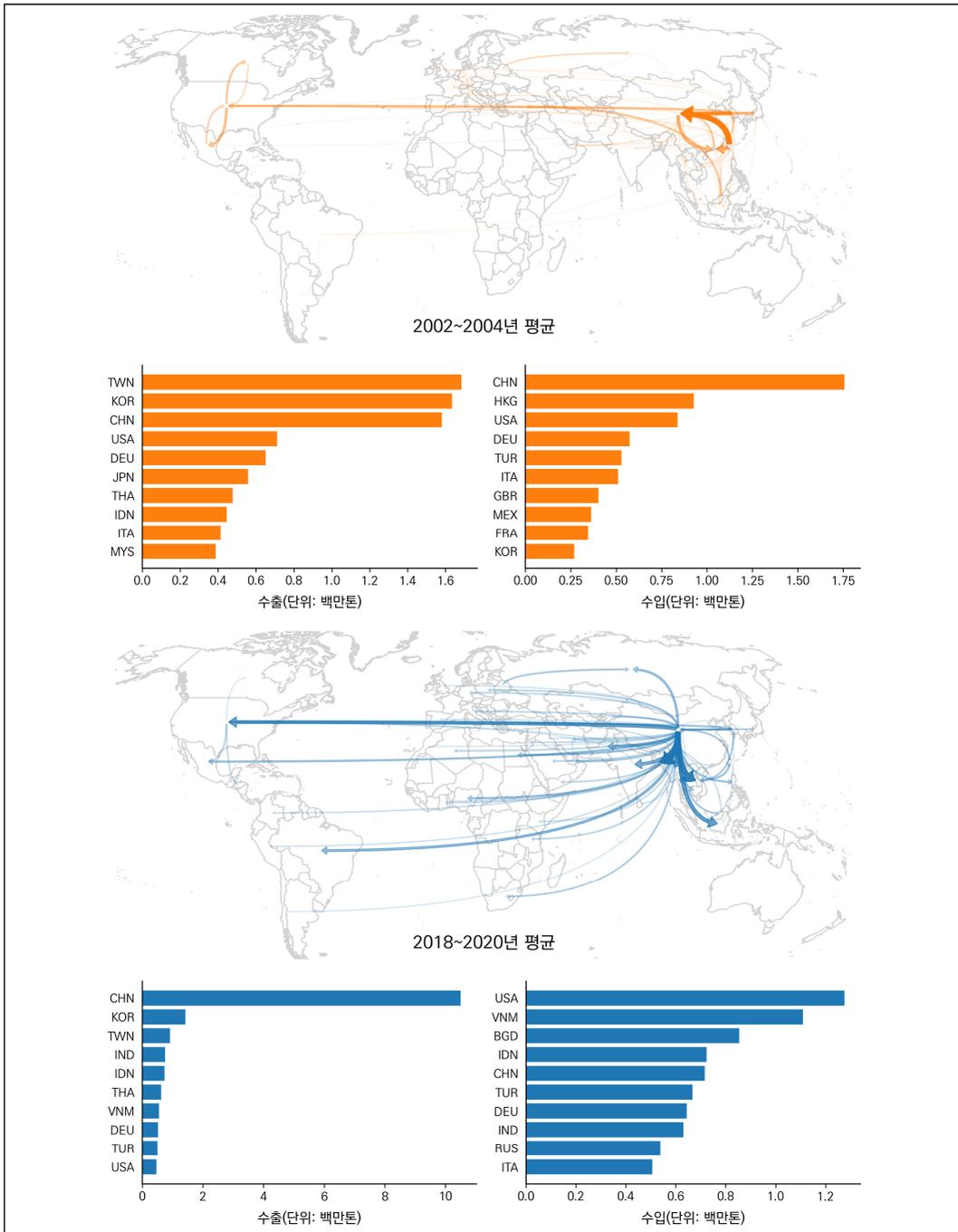
자료: BACI, 저자 계산. 주황색은 2002~2004년 평균, 파란색은 2018~2020년 평균을 나타냄.

[그림 6-11] 플라스틱 물질(플라스틱 수지) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)



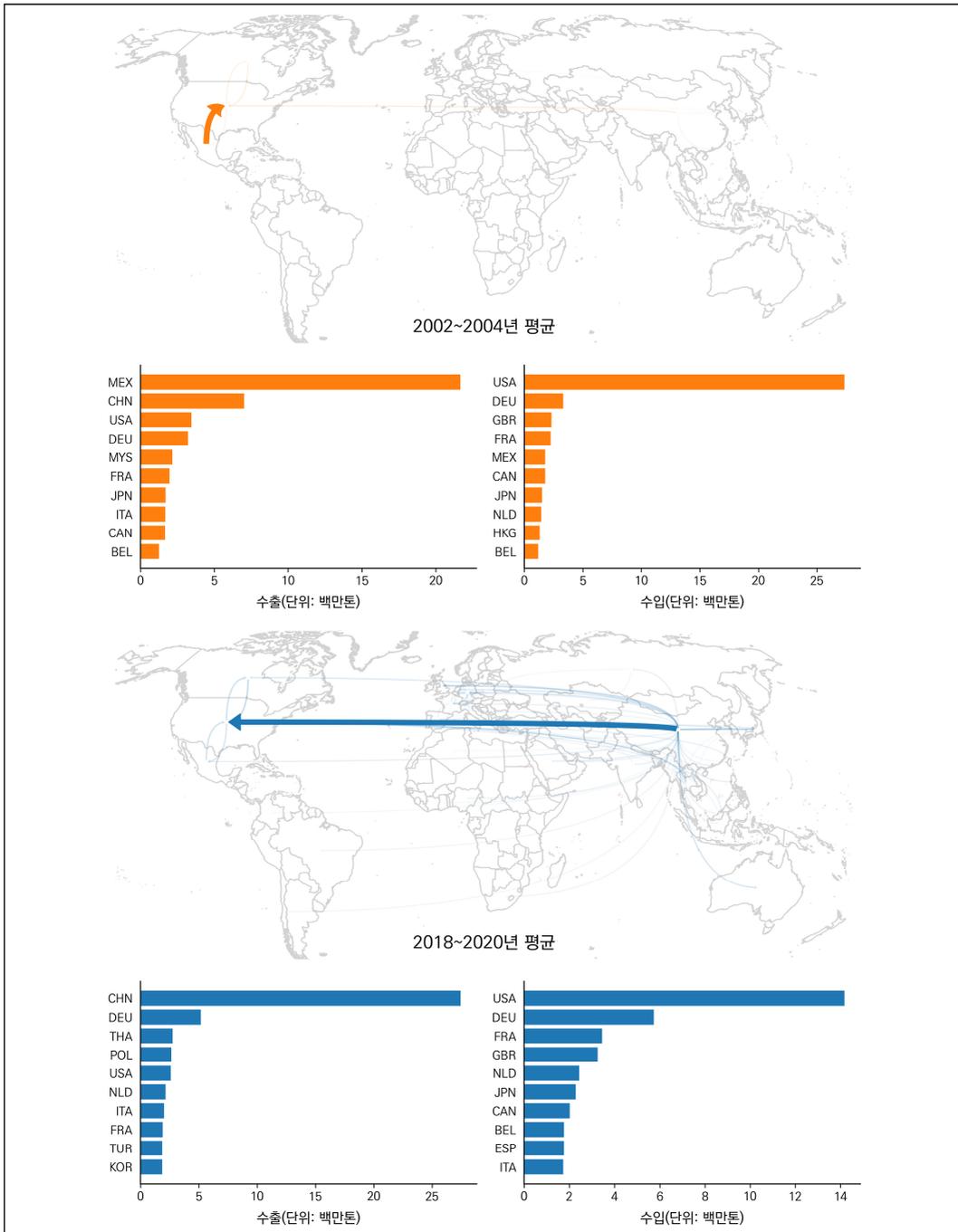
자료: BACI, 저자 계산. 주황색은 2002~2004년 평균, 파란색은 2018~2020년 평균을 나타냄.

[그림 6-12] 플라스틱 물질(중간물질) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)



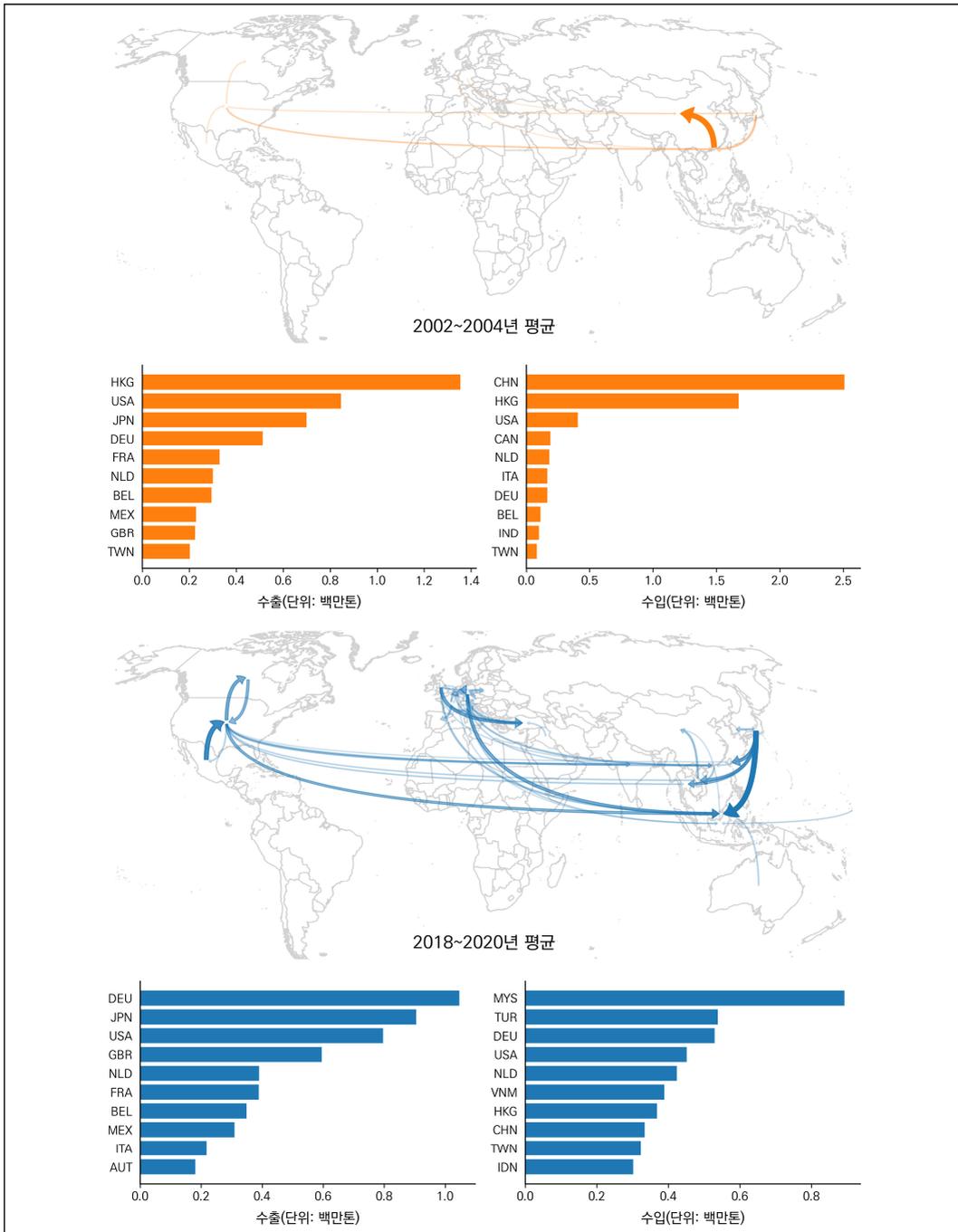
자료: BACI, 저자 계산. 주황색은 2002~2004년 평균, 파란색은 2018~2020년 평균을 나타냄.

[그림 6-13] 플라스틱 물질(중간재) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)



자료: BACI, 저자 계산. 주황색은 2002~2004년 평균, 파란색은 2018~2020년 평균을 나타냄.

[그림 6-14] 플라스틱 물질(최종재) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)



자료: BACI, 저자 계산. 주황색은 2002~2004년 평균, 파란색은 2018~2020년 평균을 나타냄.

[그림 6-15] 플라스틱 물질(폐기물) 무역현황(2002~2004년, 2018~2020년)

4 탄소중립과 플라스틱 물질 국제 순환

유럽연합을 중심으로 탄소국경조정제도(carbon border adjustment mechanism)가 본격적으로 논의됨에 따라 플라스틱 물질의 국제 순환(무역)에도 영향이 있을 것으로 보인다. 탄소국경조정제도는 유럽연합 이외의 국가에서 생산된 제품을 유럽연합으로 수출할 때 생산 공정에서 배출된 탄소의 규모에 따라 별도의 비용을 부담하도록 하는 제도이다. 다만, 제품을 생산하는 국가에서 탄소 가격이 형성되어 탄소 배출량에 대해 비용을 지불한다면 해당 비용에 대해서는 비용 부담을 면제한다. 이는 유럽연합 내에서는 탄소를 배출하는 생산자에 탄소세나 배출권거래제를 통해 비용을 부과하는 반면 다른 국가에서는 탄소의 배출에 대해 비용을 부과하지 않아 발생하는 탄소누출(carbon leakage) 현상을 방지하기 위한 것이다.⁵⁰⁾ 또한, 상대적으로 엄격한 환경 기준이 적용되는 유럽연합 내 기업을 보호하고 다른 국가 역시 이에 준하는 환경 기준을 따르도록 영향력을 행사하려는 시도이기도 하다.

탄소국경조정은 아직 입법안이 최종 통과되지 않은 사안이다. 다만, 보고서 작성 시점에 유럽연합 집행위원회(European Commission), 유럽의회(European Parliament), 유럽연합 이사회(Council of the European Union)가 합의에 도달하여 입법이 빠르게 진행될 것으로 보인다.⁵¹⁾ 아래에서는 2022년 6월 유럽의회 개정안(amenment)⁵²⁾에 제시된 품목을 기준으로 탄소중립 노력이 플라스틱 물질의 국제 순환에 미치는 영향을 개략적으로 살펴보고자 한다. 의회가 탄소국경조정 항목에 포함할 것을 제안한 화학제품과 폴리머 분야는 이번 최종 합의에서는 제외되었으나, 탄소국경조정제도의 과도기간이 종료되는 시점에서 집행위원회가 이들 분야를 적용 목록에 포함할지를 검토할 예정이다.⁵³⁾ 중장기적으로 탄소국경조정 목록이 확대될 것임을 고려한다면, 탄소 배출량이 높은 이들 항목이 포함될 가능성이 상당하다. 다만, 탄소국경조정제도와 관련한 본격적

50) 유럽연합 외에도 한국 등 여러 국가에서 탄소 배출에 대해 탄소세나 배출권거래제를 통해 비용을 부과하고 있다. 다만, 그 수가 적고 대부분 유럽연합과 비교했을 때 비용이 낮다.

51) 2022년 12월 13일.

52) European Parliament. (2022). Amendments adopted by the European Parliament on 22 June 2022 on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon border adjustment mechanism (COM(2021)0564 - C9-0328/2021 - 2021/0214(COD)). https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-06-22_EN.html#sdocta3

53) <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20221212IPR64509/deal-reached-on-new-carbon-leakage-instrument-to-raise-global-climate-ambition>

인 분석은 본 보고서의 범위를 벗어나므로 앞서 제시한 플라스틱 물질의 순환 단계별로 얼마나 많은 물질이 탄소국경조정제도의 영향을 받는지를 중심으로 분석을 전개한다.

탄소국경조정제도가 적용되는 제품군은 시멘트, 전기, 비료, 철강, 알루미늄, 화학제품, 폴리머 등이 있다. 이 가운데 화학제품과 폴리머는 집행위원회의 초안에는 포함되지 않았지만, 의회의 개정안에 새롭게 포함되었다. 화학제품은 HS코드 29류(유기화학품)의 모든 제품과 수소(HS 280410), 무수(無水)암모니아(HS 281410), 암모니아수(HS 281420)을 포괄하며, 폴리머는 HS코드 39류(플라스틱과 그 제품)을 포괄한다. 따라서, 유럽의회의 개정안에 새롭게 포함된 두 제품군은 플라스틱 물질의 국제 순환과 밀접한 관련이 있다고 볼 수 있다.⁵⁴⁾⁵⁵⁾

플라스틱 순환의 단계별로 탄소국경조정제도의 적용 대상인 물질의 규모는 [표 6-17]에 나타난 바와 같다.⁵⁶⁾⁵⁷⁾ 중간재를 제외한 모든 단계에서 탄소국경조정제도에 포함되는 품목의 비중이 상당히 높게 나타난다. 탄소국경조정제도가 탄소 배출량이 높은 산업을 중심으로 설계되는 점을 고려한다면 플라스틱 물질의 생산이 기후변화에 미치는 영향이 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 특히 각 단계 중 가장 규모가 큰 플라스틱 수지는 93.28%에 해당하는 제품이 탄소국경조정제도 적용 품목에 해당하며, 다음으로 규모가 큰 원료 역시 국제적으로 거래되는 제품의 86.83%가 탄소국경조정제도 적용 품목에 해당한다.

54) 유럽연합은 교역상품의 분류에 있어 HS 6자리에 2자리를 덧붙여 세분화한 CN 코드(Combined Nomenclature)를 사용한다. 탄소국경조정제도가 적용되는 품목 역시 CN 코드를 기준으로 제시되었다. 다만, 초안과 개정안에 CN 코드를 기준으로 제시한 모든 품목은 6자리 HS 코드로 정확하게 변환할 수 있다. 따라서 본문에서는 불필요한 용어상의 혼란을 방지하고자 제품 분류를 HS 코드로 나타내었다.

55) 탄소국경조정제도 적용 품목은 지속적으로 확대될 것으로 전망된다. 또한, 화학제품과 폴리머는 의회의 개정안에만 명시되어 있지만, 이 가운데 상당수가 탄소누출의 위험성이 높은 업종을 분류한 유럽연합 배출권거래제도(EU ETS)의 탄소누출 목록(carbon leakage list)에 포함되는 만큼 제도의 최초 실행 단계에서는 제외되더라도 머지않아 적용대상 품목에 포함될 것으로 예측할 수 있다.

56) 본 보고서는 물질 순환에 중점을 두고 있으므로 교역액이 아닌 교역량을 기준으로 분석하였다.

57) 아래의 분석은 과거 시계열과 무관하므로 Barrowclough, Birkbeck & Christen(2020)의 연구에서 제시한 바와 같이 HS 2017 개정안을 기준으로 분석을 진행하였다. 따라서 구체적인 수치는 앞의 분석과 약간의 차이가 있다.

[표 6-17] 탄소국경조정제도 적용 대상 품목 무역량

(단위: 백만톤)

	적용 품목	미적용 품목	합계
원료	83.05 (86.83%)	12.60 (13.17%)	95.65 (100.00%)
첨가물	36.33 (67.17%)	17.76 (32.83%)	54.09 (100.00%)
플라스틱 수지	185.92 (93.28%)	13.39 (6.72%)	199.31 (100.00%)
중간물질	31.86 (81.96%)	7.01 (18.04%)	38.87 (100.00%)
중간재	-	19.45 (100.00%)	19.45 (100.00%)
최종재	36.87 (47.50%)	40.76 (52.50%)	77.63 (100.00%)
폐기물	7.89 (100.00%)	7.89 (100.00%)	8.59 (100.00%)

자료: BACI, 저자 계산

탄소국경조정제도가 현재 가장 구체적으로 논의되는 지역은 유럽연합이지만, 미국 역시 바이든 행정부가 기후변화 대응에 적극적으로 나서는 만큼 향후 이와 유사한 제도를 도입할 가능성이 있다. 김선진·안희정·이윤정(2021) 등 탄소국경조정제도가 우리나라에 미치는 영향을 살펴본 연구에서도 유럽연합과 미국이 모두 탄소국경조정을 도입하는 상황을 전제로 분석을 진행한 바 있다. 따라서 아래에서는 탄소국경조정제도가 두 지역 모두에서 적용된다고 가정하고 연구를 진행하였다. 본 연구가 중장기 시계의 연구인 만큼, 이러한 가정은 충분히 타당성을 가진다. 다만, 미국에서는 아직 구체적인 적용방안이 제시되지 않았기 때문에 유럽연합과 동일한 제도를 도입한다고 가정하였다.⁵⁸⁾

[표 6-18]에서는 탄소국경조정이 적용되는 지역과 그렇지 않은 지역 간 물질 이동 규모를 나타내었다. 제도가 적용되는 품목만을 대상으로 하였으므로, 합계에 나타난 단계별 무역량의 규모는 [표 6-17]에 나타난 것보다 작다. 탄소국경조정이 적용되는 지역 간에는 별도의 비용이 부과되지 않는다고 가정한다면⁵⁹⁾⁶⁰⁾ 실제로 탄소국경조정에 따라 비용이 부과되는 경우는 미적용 지역에서 적용 지역으로 물질이 이동하는 사례에 국한된다. 전반적으로는 미적용 지역으로의 물질 흐름이 적용 지역으로의 물질 흐름보다 크게 나타나지만, 적용 지역으로의 물질 흐름 규모도 단계별로 전체의 대략 30~60%로 나타나

58) 김선진·안희정·이윤정(2021)도 동일한 가정을 적용하였다.

59) 탄소국경조정제도의 주요 목적이 탄소누출의 방지임을 고려한다면 이러한 가정은 현실적으로 타당하다. 유럽연합의 개정안에서도 탄소 가격이 유럽연합보다 높거나 같은 국가의 수출품에 대해서는 비용을 부과하지 않는다.

60) 스위스, 아이슬란드, 리히텐슈타인, 노르웨이는 유럽연합에 포함되지 않지만, 제도적인 이유로 탄소국경조정이 적용되지 않는다. [표 6-17]에서는 단순화를 위해 이러한 요소를 반영하지 않았다.

유의미한 규모라고 보기에 충분하다.

다만, 이 가운데에서도 전체 교역 규모가 큰 원료와 플라스틱 수지 물질이 탄소국경 조정제도의 적용을 받는 비중이 다소 낮게 나타나는데, 이는 [그림 6-9]와 [그림 6-11]에 나타난 바와 같이 이러한 물질의 주요 수입국이 중국이며, 수입규모 면에서 다른 국가와 상당한 격차가 있기 때문이다. 반면, 중간물질과 최종재는 탄소국경조정제도의 적용을 받는 비중이 높게 나타나는데, 이는 [그림 6-12]와 [그림 6-14]에 나타난 바와 같이 중국이 이들 물질의 주요 수출국이고, 미국과 유럽연합이 이들 물질의 주요 수입국이기 때문이다. 또한, [그림 6-12]에서 알 수 있듯이 중간물질의 주요 수출국에는 독일, 이탈리아, 폴란드, 벨기에 등 유럽연합의 주요 국가들도 포함되고 유럽연합 내에서의 교역이 활발하게 이루어지므로 중간물질은 탄소국경조정제도의 적용 지역 간 이동 비중이 35.24%로 상당히 높게 나타난다.

[표 6-18] 탄소국경조정 적용 지역과 미적용 지역 간 물질 이동

(단위: 백만톤)

	적용 → 적용	적용 → 미적용	미적용 → 적용	미적용 → 미적용	합계
원료	17.71 (21.33%)	10.85 (13.06%)	7.55 (9.09%)	46.94 (56.52%)	83.05 (100.00%)
첨가물	6.57 (18.10%)	3.38 (9.29%)	3.57 (9.84%)	22.81 (62.77%)	36.33 (100.00%)
플라스틱 수지	47.59 (25.60%)	30.28 (16.28%)	16.05 (8.63%)	92.01 (49.49%)	185.92 (100.00%)
중간물질	11.23 (35.24%)	4.25 (13.35%)	4.64 (14.57%)	11.74 (36.84%)	31.86 (100.00%)
중간재	-	-	-	-	-
최종재	11.11 (30.13%)	3.24 (8.78%)	10.60 (28.74%)	11.93 (32.35%)	36.87 (100.00%)
폐기물	2.77 (35.13%)	2.32 (29.35%)	0.71 (9.05%)	2.09 (26.47%)	7.89 (100.00%)

자료: BACI, 저자 계산

전체 물질 순환 가운데 비용이 부과되는 물질의 비중은 단계별로 대략 9~30%로 나타나는데(중간재 제외), 이 역시 플라스틱 물질의 국제 순환에 유의미한 영향을 미치기에는 충분한 규모로 보인다. 동 제도가 관세의 성격을 가진다는 점을 고려한다면, 미적용 지역에서 적용 지역으로의 물질 이동은 줄어드는 대신 적용 지역 간의 물질 이동은 증가할 것으로 예상할 수 있다. 특히 [그림 6-12]과 [그림 6-14]에 나타난 바와 같이 중간물질과 최종재는 중국에서 유럽이나 미국으로 수출하는 규모가 상당히 큰데, 이에 따라 탄소국경조정제도가 본격적으로 도입되면 중국이 큰 영향을 받을 수 있으며, 국가 간 플라스틱 물질 이동 양상에도 변화가 발생할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 장기적으로는 플라스틱 관련 물질의 생산과정에서 탄소 배출을 줄이기 위한 기술개발(R&D)이 활발해질 것으로 예측할 수 있는데, 물질의 재사용 및 순환을 강조하는 순환경제 개념에 기반한 기술 및 공정 개발도 이와 관련하여 한 축을 담당할 수 있을 것으로 보인다. 만일 장기적으로 더 많은 국가가 유사한 제도를 도입한다면, 이러한 흐름을 더욱 가속화될 것이다.

아래에서는 우리나라의 수출 품목으로 범위를 좁혀 위의 분석을 다시 시행하였다. 우리나라가 수출하는 플라스틱 물질 가운데 탄소국경조정제도의 대상인 품목과 그렇지 않은 품목의 규모는 [표 6-19]에 표시된 바와 같다. 한국의 플라스틱 단계별 수출 품목의 규모는 전 세계 무역량과 다른 양상을 보이는데, 원료와 플라스틱 수지의 비중이 매우 높고, 첨가물, 중간물질, 중간재, 최종재, 폐기물의 비중은 상대적으로 낮다. 따라서 본 연구에서 살펴보고 있는 플라스틱 전과정에서는 전방(upstream)에 위치한 산업에서 상당한 강세를 보인다고 할 수 있다. [그림 6-9]와 [그림 6-11]에서 확인할 수 있듯이 우리나라는 원료와 플라스틱 수지를 가장 많이 수출하는 국가에 속한다.⁶¹⁾ 또한, [표 6-17]과 비교해보면 첨가물, 중간물질, 중간재, 최종재의 비중도 상대적으로 낮은 것이고 전 세계 무역에서 차지하는 비중은 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 이는 [그림 6-10], [그림 6-12], [그림 6-13], [그림 6-14]를 통해서도 확인할 수 있다. 중간물질, 중간재, 최종재 단계의 수출에서도 우리나라는 상위권에 있다.

61) 다만, 앞서 언급한 바와 같이 이는 무역량(질량) 기준이며, 무역액 기준은 아니라는 점에 유의할 필요가 있다. 무역액 기준으로 집계하면 결과는 달라질 수 있다.

[표 6-19] 한국의 탄소국경조정제도 적용 대상 품목 수출량

(단위: 백만톤)

	적용	미적용	합계
원료	14.21 (94.96%)	0.76 (5.04%)	14.97 (100.00%)
첨가물	3.44 (95.25%)	0.17 (4.75%)	3.61 (100.00%)
플라스틱 수지	14.02 (88.15%)	1.88 (11.85%)	15.90 (100.00%)
중간물질	1.09 (75.99%)	0.35 (24.01%)	1.44 (100.00%)
중간재	-	1.38 (100.00%)	1.38 (100.00%)
최종재	0.79 (43.21%)	1.03 (56.79%)	1.82 (100.00%)
폐기물	0.05 (100.00%)	0.05 (100.00%)	0.05 (100.00%)

자료: BACI, 저자 계산

[표 6-20]은 우리나라의 플라스틱 물질 수출 가운데 탄소국경조정제도의 적용을 받는 비중과 그렇지 않은 비중을 나타내는데, 제도가 적용되는 품목만을 대상으로 분석하였다. [표 6-20]을 살펴보면 원료 단계 물질은 미적용 지역의 비중이 특히 높은데, 이는 [그림 6-9]에 나타난 바와 같이 중국으로의 수출이 매우 높은 비중을 차지하기 때문이다. 반면, 최종재 단계 물질은 유럽이나 미국으로의 수출 비중이 높아 대략 43% 정도의 수출량이 탄소국경조정제도의 적용을 받는다.

[표 6-20] 한국의 탄소국경조정제도 적용 지역 및 미적용 지역 수출량

(단위: 백만톤)

	유럽	미국	미적용	합계
원료	0.02 (0.17%)	1.00 (7.05%)	13.19 (92.78%)	14.21 (100.00%)
첨가물	0.52 (15.17%)	0.09 (2.63%)	2.83 (82.21%)	3.44 (100.00%)
플라스틱 수지	1.67 (11.92%)	0.63 (4.49%)	11.72 (83.59%)	14.02 (100.00%)
중간물질	0.10 (9.60%)	0.14 (12.52%)	0.85 (77.88%)	1.09 (100.00%)
중간재	-	-	-	-
최종재	0.10 (13.29%)	0.24 (29.89%)	0.45 (56.82%)	0.79 (100.00%)
폐기물	0.00 (1.24%)	0.00 (4.80%)	0.05 (93.96%)	0.05 (100.00%)

자료: BACI, 저자 계산

위의 분석은 암묵적으로 탄소국경조정제도가 scope 1(직접 배출)이나 scope 2(직접 배출+전력)의 범주로 적용되는 경우를 가정하였다. 만일 탄소국경조정이 scope 3의 범주

에서 적용되어 직접 배출만이 아니라 생산에 사용한 중간재에 내포된(embedded) 탄소 배출까지 포함한다면 분석은 더욱 복잡해진다. 탄소국경조정 관련 현재 논의는 scope 1과 scope 2를 중심으로 이루어지고 있고, scope 3 범주에서의 분석은 본 보고서의 범위를 넘어서기 때문에 scope 3 범주에서의 분석은 생략하였다.⁶²⁾ 다만, 구체적인 분석 결과에는 다소의 차이가 있어도 전반적인 양상 및 시사점에는 변화가 없을 것으로 보인다.

5 플라스틱 물질 국제 순환의 정책적 함의

본 절에서는 플라스틱 관련 물질의 국제 순환을 분석하고, 탄소국경조정제도로 대표 되는 탄소중립 정책이 이에 미치는 영향을 살펴보았다. Barrowclough, Birkbeck & Christen(2020)의 분류를 기준으로 플라스틱의 전과정(life cycle) 단계별로 무역 데이터를 재분류하였고, 이를 바탕으로 시간의 흐름에 따른 플라스틱 관련 물질의 순환 양상 변화를 확인하고 탄소중립 정책과의 관련성 및 정책의 영향을 분석하였다.

플라스틱 관련 물질의 무역량은 꾸준히 증가하는 추세이다. 2002~2004년과 2018~2020년을 비교하면 중국을 중심으로 플라스틱 물질 공급망이 재편되는 양상이 나타나지만 각 지역(대륙) 내 무역 역시 일정 수준 유지되고 있다. 다만, 향후 탄소국경조정 제도가 도입된다면 이러한 양상에도 변화가 나타날 것으로 예상되는데, 본 절에서 분석한 플라스틱 물질의 상당수가 탄소국경조정제도의 적용을 받기 때문이다.⁶³⁾ 이에 따라 플라스틱 관련 물질의 국제적인 순환 양상에 변화가 나타날 것으로 예상되는데, 특히 탄소국경조정제도가 일종의 무역장벽으로 기능하여 일정 수준 이상의 탄소 가격이 형성되어 있는 지역 간 무역이 활발해질 수 있다.

이러한 변화에 따라 제조 공정에서 탄소 배출을 줄이기 위한 기술개발(R&D)이 활발해질 것으로 보이는데, 물질의 순환과 재사용을 강조하는 순환경제 개념에 기반한 기술 개발 역시 한 축을 담당할 수 있을 것으로 예상된다. 특히 유럽연합은 탄소중립과 순환 경제 활성화를 위해 플라스틱에 주목하고 있으며, 플라스틱과 관련된 다양한 정책을 시

62) Scope 3 범주에서의 분석은 박성준·김은아·안세진·조해인(2022)을 참고할 수 있다.

63) 앞서 기술한 바와 같이 2022년 6월에 유럽의회를 통과한 개정안 기준이다. 유럽연합 내 탄소국경조정제도 입법은 보고서 작성 시점에서 완결되지 않았다.

행하고 있다. 한 예로, 유럽연합에서는 플라스틱 포장재의 일정 비율 이상을 재생원료를 사용하여 생산하도록 규제하고, 이를 준수하지 않으면 세금을 부과하는 정책을 추진하고 있다. 향후 이처럼 탄소중립과 순환경제 활성화를 동시에 추구하는 규제가 수입품에도 적용될 가능성이 크다는 점에서 순환경제 개념에 기반한 기술개발은 효용성이 높을 것으로 예상할 수 있다.

제7장

플라스틱 순환경제 환경영향

제1절 순환경제 환경영향 평가 방법

제2절 플라스틱 재활용 전과정 평가

제3절 비교 전과정평가 결과 해석

제 1절

순환경제 환경영향 평가 방법

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 선행 연구 분석

순환 경제(circular economy)는 자원취득-소비-폐기의 선형 모델을 사회 전반의 이익을 창출하고 경제적, 환경적, 사회적 자원을 구축하는 재생 모델로 전환하여 경제성장에서 유한한 자원 소비를 분리하는 것을 목표로 한다. 따라서 순환경제로 전환한 결과 기대가 되는 효과는 환경·경제·사회 영역 전반에서 확인할 수 있으며 다양한 성과지표를 통하여 평가할 수 있다(김은아·민보경, 2020; 조지혜 외, 2020). 반대로, 이러한 성과지표는 특정 순환경제 전략을 도입하였을 때 효과를 예측하는 정량적 전략 평가 툴로서 활용할 수 있다.

그러나 다양한 문헌에서 현재 우리나라의 물질통계는 순환경제 성과를 평가하기에 미흡함을 지적하고 있으며, 2021년 12월에 발표된 『K-순환경제 이행계획』에 포함된 순환경제 이행지표(안) 또한 “적용방법, 대상 등은 향후 관련 업계, 관계부처 의견수렴 등을 거쳐 마련 예정”으로 아직 확정되지 못하였다.

해외에서도 제품의 순환성(circularity)을 정량화하는 방법론이 연구되고 있는데, 크게 (1) 물질흐름분석(Material Flow Analysis) (Eurostat, 2018), (2) 전과정 평가(LCA) (Van Stijin et al., 2021)의 두 가지로 분류할 수 있다.

물질흐름분석(MFA) 방법은 정의된 시스템 내에서 물질흐름의 변화와 상태를 확인하기 위해 물질수지를 시간에 따라 계산하며, 물질순환성에 초점을 맞춰 순환경제 전환 ‘성과’를 지표화하여 전반의 효과를 보여주는 장점이 있다. Ellen MacArthur Foundation은 2015년에 순환성을 0에서 1 사이의 값으로 나타내는 Material Circularity Indicator(MCI)⁶⁴)를 개발하였으며, Gabi의 Circularity Toolkit⁶⁵),

64) <https://ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator> 내용 참조 (접속일: 2022.10.11.)

65) <https://gabi.sphera.com/international/software/gabi-software/gabi-circularity-toolkit/> 내용 참조 (접속일: 2022.10.11.)

Simapro⁶⁶⁾ 등 대표적인 LCA 소프트웨어에서도 물질순환성 분석 모델 및 가이드라인을 제공한다.

전과정 평가(LCA) 방법 또한 정의된 시스템에서의 생산활동에 필요한 자원·에너지와 결과적으로 배출되는 환경부하 등을 계산하는데, LCA의 경우에는 물질순환성뿐만 아니라 특정 공정 과정의 도입 결과로 일어나는 다양한 환경영향을 보여준다는 장점이 있다. 순환경제 모델에서는 제품이나 서비스의 전과정(life cycle)을 고려하는 전과정 사고(Life cycle thinking, LCT)가 필요하며, LCA는 이러한 전과정 사고를 정량화하는 방법으로 사용할 수 있다. 또한, LCA 방법론은 전과정 중 일부의 환경영향이 다른 일부로 단순히 이동하는 ‘환경영향의 전가(burden-shifting)’를 회피하고 전과정의 잠재적 환경영향을 감소시키는 절충안을 찾는 데 기여할 수 있다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 순환경제 전환에 따른 환경영향을 평가하는 방법으로 LCA를 택하였다.

그러나 LCA 방법론의 성격상 대상으로 하는 공정에 대한 정보의 유무 및 출처(이론값, 실험실 수준의 결과, 유사 공정 등)에 따라 결과가 크게 차이날 수 있어 상용 공정 인벤토리 정보가 존재하는 기술의 환경영향 평가에 적합하며 미래기술의 평가에는 추가적인 해석이 필요하다는 한계점이 있다. 본 연구에서는 이러한 한계점을 보완하기 위하여 정량분석 결과가 현 기술 수준에 기반했음을 감안하여 해석하였다.

2 전과정평가 개념 및 용어 정의

가. 주요 용어 정의

본 연구에서 사용하는 주요 용어 및 그 정의는 아래 [표 7-1]과 같다.

[표 7-1] 전과정평가에서 사용하는 주요 용어 및 그 정의

용어 (영어)	정의
전과정 (life cycle)	천연자원으로부터 원자재 획득 또는 생성부터 최종 처분까지 제품 시스템의 연속적이고 상호연결된 단계들의 집합

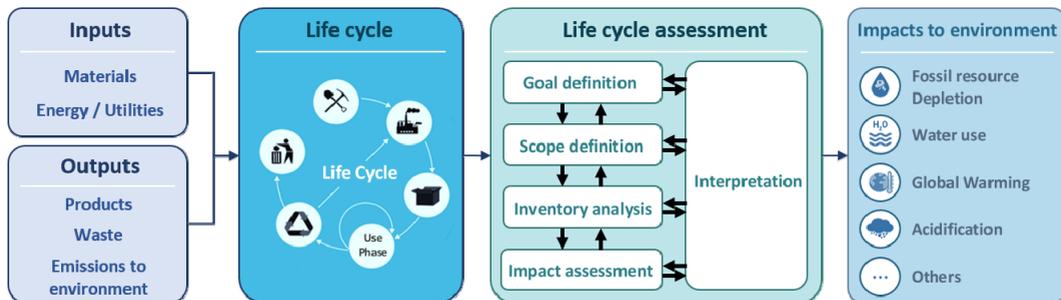
66) <https://simapro.com/> 내용 참조 (접속일: 2022.10.11.)

용어 (영어)	정의
전과정 평가 (life cycle assessment)	전과정 동안 제품 시스템의 투입물, 산출물 및 잠재적 환경영향의 수집 및 평가
전과정 목록분석 (life cycle inventory analysis)	전과정에 걸쳐 제품에 대한 투입 및 산출물의 수집 및 정량화를 포함하는 전과정 평가의 단계
전과정 영향평가 (life cycle impact assessment)	제품 전과정 동안 제품 시스템이 갖는 잠재적 환경영향의 규모와 중요성의 이해 및 평가를 목적으로 하는 전과정 평가의 단계
전과정 해석 (life cycle interpretation)	결론 및 권고사항에 도달하기 위하여 정의한 목적 및 범위와 관련된 목록분석 혹은 영향평가에서의 결과를 해석하는 전과정 평가의 단계
제품 (product)	가공된 물질, 서비스(수송 등), 소프트웨어, 하드웨어 등
연산품 (co-product)	동일한 단위공정 혹은 제품 시스템으로부터 산출된 두 개 이상의 제품
공정 (process)	투입물을 산출물로 전환하는 상호연관된 혹은 상호작용하는 활동들의 집합
기본흐름 (elementary flow)	인간에 의한 어떠한 변환도 거치지 않고 환경으로부터 연구되는 시스템에 투입되거나 환경으로 산출되는 물질 혹은 에너지 흐름
제품흐름 (product flow)	다른 제품 시스템으로부터 투입되거나 다른 제품 시스템으로 산출되는 제품
원료 (raw material)	제품 생산을 위해 사용되는 1차 혹은 2차 물질
보조물질 (ancillary input)	제품 생산을 위해 사용되지만, 제품 일부를 구성하지 않는 투입재료
할당 (allocation)	연구 중인 제품 시스템과 또 다른 제품 시스템 간에 공정 혹은 제품 시스템의 투입물과 산출물을 분할하는 방법
제외규칙 (cut-off criteria)	연구에서 제외될 단위공정 혹은 제품 시스템의 물질 혹은 에너지 흐름의 양 또는 환경적 중요 수준의 지정
기능단위 (functional unit)	참조 단위로 사용하기 위한 제품 시스템의 정량화된 성능
제품 시스템 (product system)	하나 혹은 여러 정의된 기능을 수행하며, 제품의 전과정을 만드는 기본흐름 및 제품흐름을 포함하는 단위공정들의 집합
시스템경계 (system boundary)	어떤 단위공정들이 제품 시스템의 일부인지를 특정하는 기준

용어 (영어)	정의
단위공정 (unit process)	투입물과 산출물 정보를 정량화하는 전과정 목록분석 단계에서 고려하는 가장 작은 단위요소
영향범주 지표 (impact category indicator)	영향범주의 정량화 가능한 표현 (e.g. 기후변화 - global warming potential 100a (GWP100))
특성화 인자 (characterization factor)	전과정 목록분석 결과를 영향범주의 공통 단위로 변환하는 데 적용하는 특성화 모델에서 파생된 인자 (e.g. 기후변화 - GWP100 - kg CO ₂ equivalent /kg gas)
영향범주 (Impact category)	전과정목록분석 결과가 지정되는 관심있는 환경문제의 종류 (e.g. 기후변화, 자원고갈 등)

나. 전과정평가 소개 및 정의

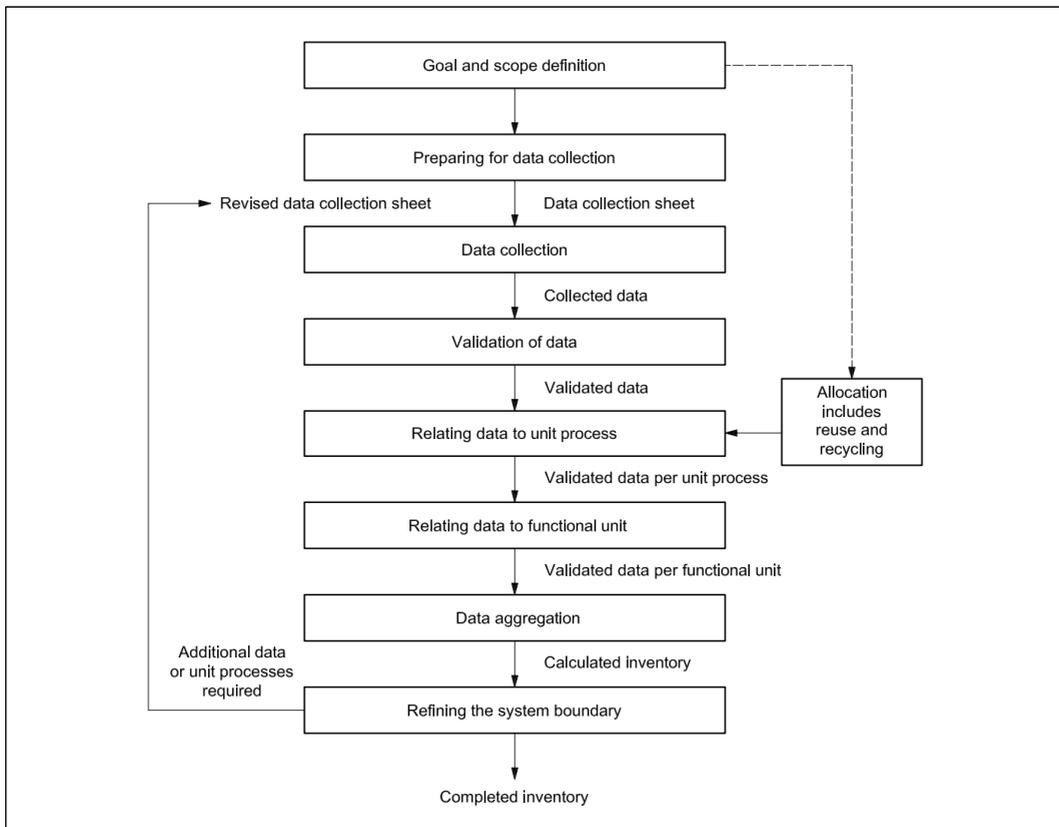
전과정평가(life cycle assessment, LCA)는 [그림 7-1]과 같이 제품 시스템 혹은 서비스를 기준으로 전과정(생애주기)에 걸친 에너지, 자원의 사용과 이로 인해 잠재적으로 발생하는 환경부하를 정량화하고, 환경에 미치는 악영향을 규명 및 개선하고자 개발된 기법이다. 대표적인 활용분야는 제품 환경발자국(product environmental footprint, PEF), 친환경설계(eco-design), 녹색공공조달(green public procurement, GPP) 등이 있다.



[그림 7-1] 전과정평가 개념도

1997년 International Organization for Standardization(ISO)에서 LCA 관련 표준 (ISO 14040⁶⁷⁾, 14044⁶⁸⁾ 등을 제정함에 따라 수행 절차 및 방법이 구체화 되었으며, 현재는 이 표준을 적용하여 다양한 분야에 걸쳐 LCA 기법이 적용되고 있다.

이 표준은 전과정 평가를 수행하기 위한 원칙 및 체계를 제시하며, 총 4단계(① 목적 및 범위 정의(goal and scope definition), ② 전과정 목록분석(life cycle inventory analysis), ③ 전과정 영향평가(life cycle impact assessment), ④ 전과정 해석(life cycle interpretation))으로 구성되어있다(EC, 2010). 각 단계에서는 아래와 같은 사항을 모호하지 않게 제시하고 수행하여야 한다(EC, 2010).



[그림 7-2] 전과정 목록분석 절차

(출처: European Commission, 2010)

67) ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework

68) ISO 14044:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines

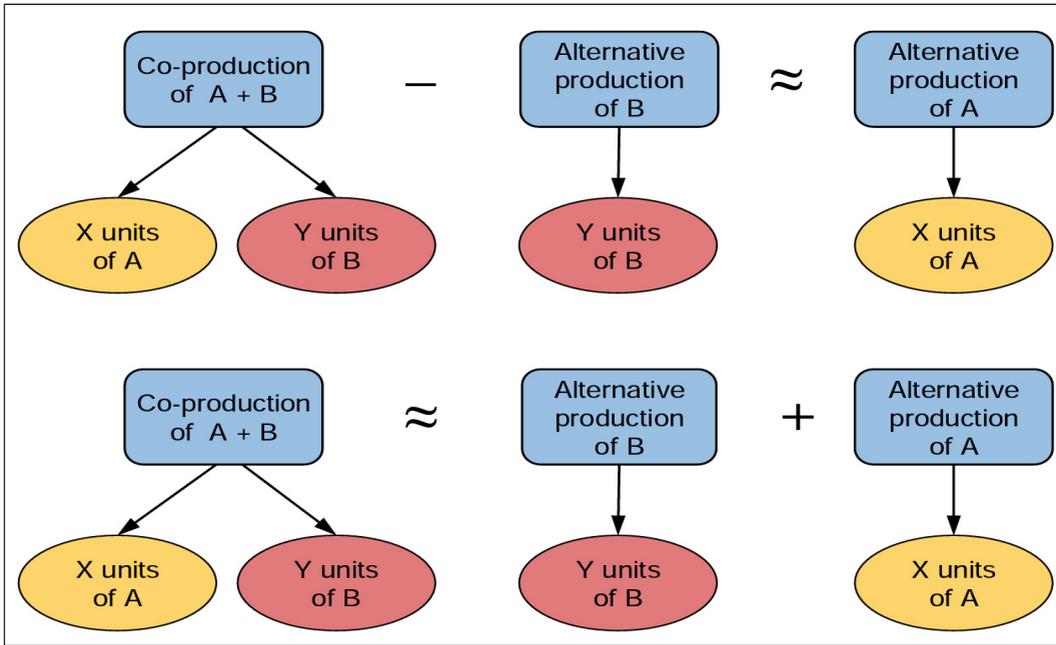
1) 목적 및 범위 정의

목적 및 범위 정의는 연구의 계획을 구성하는 단계로 LCA의 반복수행적(iterative) 특성으로 인해 연구 중 목적 달성을 위하여 범위를 수정 및 보완할 수 있다.

- 목적: 활용처, 연구 수행 이유, 대상자, 대중에 공개할 목적으로 결과의 비교주장에 사용되는지 여부
- 범위: 대상 제품시스템, 기능, 기능단위, 시스템경계, 할당 방법론 및 제외 규칙, 영향평가 방법론 및 영향범주, 사용할 해석, 요구되는 자료, 가정 및 제한사항, 가치 판단 및 선택사항, 정밀 검토 종류(적용 시), 보고 종류 및 양식

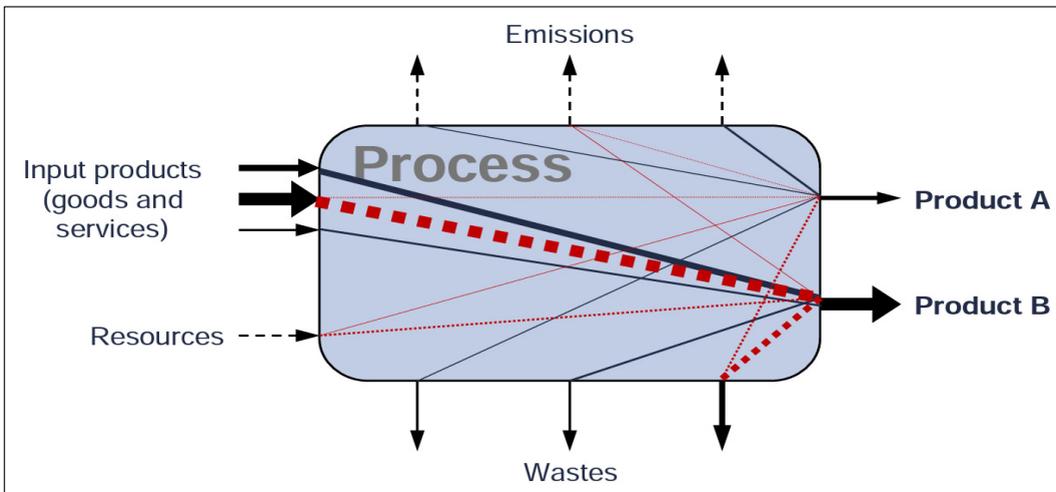
2) 전과정 목록분석 방법

- 가) 자료 수집: 시스템경계 내 단위공정별 투입물과 산출물 자료를 수집
- 나) 자료 계산: 데이터 유효성 검사(열물질 수지 확인 등)를 통해 의도한 목적 및 범위에 충족되는지 확인하고, 기능단위를 고려해 단위공정을 조합하여 제품 시스템을 구성
- 다) 할당: 제품 시스템에서 다양한 제품이 생산될 경우 아래와 같은 우선순위를 적용하여 제품 시스템을 할당(EC, 2010)
 - ① 공정 세분화 혹은 연산품 관련 기능을 포함한 시스템의 확장[그림 7-3]
 - ② 물리적 관계에 의한 할당[그림 7-4]
 - ③ 그 밖의 원칙에 의한 할당(질량, 에너지, 경제적 가치 등)[그림 7-4]
- 라) 재사용 및 재활용 시스템에서 할당: 열린고리 재활용(open-loop recycling), 닫힌고리 재활용(closed-loop recycling)이 대표적
 - 닫힌고리 재활용(closed-loop recycling): 닫힌 시스템경계 내 재활용에 적용하며, 2차재료(recycled material)의 사용이 1차재료(virgin material)의 사용을 대체하기 때문에 할당이 회피됨. 열린고리재활용 중에서도 재활용 재료의 고유 특성 변화가 없는 경우에도 적용이 가능함.
 - 열린고리 재활용(open-loop recycling): 재활용되는 물질이 다른 제품 시스템에서 사용되며 고유 특성에 변화가 있는 경우 적용.



[그림 7-3] 열린고리 재활용 할당 개념도

(출처: European Commission, 2010)



[그림 7-4] 물리적 관계 및 그 밖의 원칙에 의한 할당 개념도 제품 A와 B에 공정으로 투입 및 산출되는 흐름의 양을 분배하여 다중기능(A+B)을 단일기능(A)화

(출처: European Commission, 2010)

3) 전과정 영향평가 및 전과정 해석

가) 영향평가

선정한 영향범주, 지표, 특성화 인자에 따라 전과정 목록을 분류(classification)하고 흐름별 특성화 인자를 적용하여 계산(characterization). 연구 목적에 따라 필요시 정규화(normalization), 그룹화(grouping), 가중화(weighting) 등을 수행할 수 있음

나) 해석

기여도 분석(contribution analysis/key issue identification), 민감도 분석(sensitivity analysis), 불확도 분석(uncertainty analysis), 결과의 제한사항 및 권고 사항 등

3 분석목적 및 분석범위정의

가. 분석목적

본 연구는 순환경제 이행 결과, 기존 대비 환경에 미치는 영향에 대한 평가방법이자 순환경제 전략을 평가하는 틀로서 전과정 평가(LCA) 방법론을 택하여 직접 적용해보고자 하였다. 현재 국내·외에서 순환경제 적용이 필요한 대표적인 대상영역인 플라스틱 자원 순환을 적용대상으로 하였다. 플라스틱 재활용은 본 연구가 대상으로 하는 순환경제 전환 전략산업에서 다루는 일부 항목에 불과하나 (1) 재제조 전략은 다양한 재제조 대상 품목을 공정 단위로 일반화한 전략을 도출하기 어렵기 때문에 개별 품목별 분석이 필요한 반면, (2) 플라스틱 재활용을 통한 재생원료 사용 전략은 유사한 개념을 적용하여 재생원료 사용에 관한 환경영향평가 방법으로 확장 적용이 가능하다는 점에서 환경영향평가 방법을 테스트하는 대상으로서 적절한 시작점이라고 판단하였다.

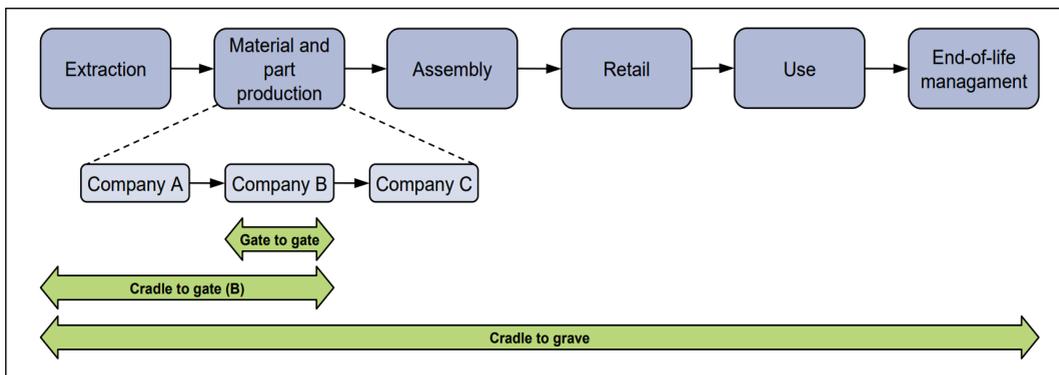
플라스틱 물질 재활용의 환경영향은 두 가지 관점으로 비교 전과정평가(LCA)를 수행할 수 있는데 하나는 동일한 양의 플라스틱 폐기물의 처리방식(매립 vs 소각 vs 물질 재활용) 간의 환경영향을 비교하는 경우이며 다른 하나는 동일한 양의 물질 재활용 결과물을 생산하는 공정(기존 산업공정 vs 물질 재활용공정) 간의 환경영향을 비교하는

경우로 나뉜다. 본 연구에서는 두 번째 방식에 초점을 맞춰 분석을 하였으며, 물질 재활용 결과 생산되는 결과물의 사용 과정에서 발생하는 환경영향을 제외하고 첫 번째 방식의 비교를 일부 수행하였다.

본 연구에서는 (1) 다양한 기술을 활용한 폐플라스틱의 자원순환 시스템의 환경영향을 정량화하고 (2) 대상 기술별 생산되는 제품과 기존 기술의 환경영향 비교를 통해 폐플라스틱 자원순환의 환경적 타당성을 타진하며 (3) 플라스틱 재활용 기술전략별 환경영향을 비교함으로써 환경적 측면에서 효용성이 큰 기술전략을 식별하고자 하였다.

[그림 7-5]는 전과정 평가 단위를 구분하는 시스템경계(Van Stijin et al., 2021)의 개념을 도식으로 표현하였으며 아래의 내용으로 구성되어 있다.

- Gate to gate: 기능을 수행하는 주 공정의 범위
- Cradle to gate: 원료, 에너지 추출·생산부터 제품 생산까지의 범위
- Cradle to grave: 원료, 에너지 추출·생산부터 제품 생산, 수송, 사용 및 폐기 단계까지 전 과정의 범위



[그림 7-5] 시스템경계 용어와 그 범위

(출처: Van Stijin et al., 2021)

본 연구의 대상 제품 시스템경계는 위와 같이 정의된 분석 대상 플라스틱 수지에 다양한 폐플라스틱 자원화 기술을 적용하여 유용한 자원을 생산하는 단계까지를 포함하며, [그림 7-5]에서 cradle to gate에 해당한다.

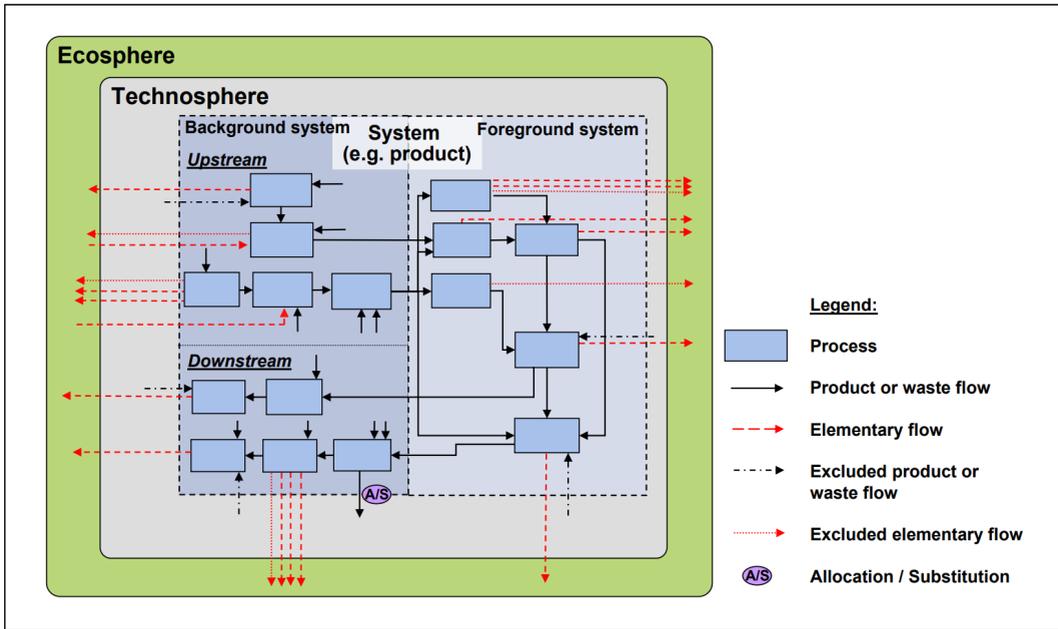
나. 대상 제품 시스템 선정

[그림 7-6]은 시스템경계 안에 포함되는 다양한 시스템(Van Stijin et al., 2021) 간의 관계를 도식으로 표현하였으며 아래의 내용으로 구성된다.

- System (제품 시스템): 분석 대상이 되는 시스템의 경계, 주 공정 (foreground system)과 주변 공정(background system)의 합([그림 7-6]의 점선 상자 구역).
- Foreground system (주 공정): 분석 대상 기능을 수행하는 주공정.
- Background system(주변 공정): 주 공정(foreground system)에 투입되는 원료, 에너지, 산출되는 폐기물 등을 생산/처리하는 상위흐름 (upstream) 및 하위흐름(downstream)의 시스템.

본 연구에서는 다양한 폐플라스틱 재활용기술 중 화학적 재활용기술을 중심으로 분석하였다. 물리적 재활용기술은 다양한 역할을 담당하는 내용으로 제품 시스템에 포함되었다; ① 화학적 재활용공정 이전에 전처리공정, ② 고품질 플라스틱 재생원료 생산 공정(Schwartz et al., 2021), ③ 기존의 플라스틱 재생원료 생산공정(②의 비교 시스템)에 포함되었다⁶⁹⁾. 생물학적 업사이클링 기술 또한 단량체 생산 등 기존의 상용 공정을 통하여 생산되는 물질을 만들어 낼 수 있는 기술로 현재 학술연구가 활발하게 진행 중이지만 전과정 평가에 적용할 수 있는 공정정보를 확보하는 데에 어려움이 있어 본 연구의 범위에는 포함하지 않았다.

69) ①과 ③에 해당하는 물리적 재활용공정의 환경영향은 Ecoinvent ver 3.8에서 제공하는 플라스틱(PE) 과립화 공정 데이터를 활용하여 계산함.



(출처: Van Stijin et al., 2021)

[그림 7-6] 시스템 정의 개념도

제2절

플라스틱 재활용 전과정 평가

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 시스템경계 설정

가. 제품 시스템(system)

대상 제품은 국내 플라스틱 수지별 폐기물 발생량 정보를 기반으로 다량 발생하는 플라스틱 수지를 우선적으로 분석하는 것이 합리적이거나 국내 폐기물 통계자료에서 해당 정보를 얻을 수 없는 제약조건에 따라 플라스틱 수지 생산량·수요량 등의 정보를 활용하여 간접적으로 주요 플라스틱 폐기물 조성을 유추하였다. 국내 플라스틱 생산량과 수요량은 『석유화학편람』의 2019년 자료⁷⁰⁾를 활용하였다. 이소라 외(2019)의 연구 결과에서 플라스틱 수지별 주요 소비재 생산량 정보를 수집하였고 Geyer et al. (2017)의 플라스틱 제품 수명주기 분포 정보를 바탕으로 연간 발생하는 폐플라스틱 발생량 순위를 분석하였다. [표 7-3]에서 국내에서 다량 생산 또는 소비되는 플라스틱 수지는 PET, PE, PP, PVC, ABS이다. 그러나 PVC는 건축에 주로 사용하고 ABS는 전자·전기·기계 제조에 사용하여 순환 주기가 포장재, 소비재, 섬유 등에 비해 수 배에서 수십 배 길어 소비되는 양에 비해 폐기되는 양이 적다는 특성이 있다. 또한 PVC는 재활용 고정에서 염소계 부산물이 발생하여 미리 선별 제거되어야 하는 대상이므로 재활용 대상으로 적합하지 않다고 판단하였다. 따라서 국내에서 폐기되는 플라스틱 제품은 PET, PE, PP 조성이 높을 것으로 유추하였고, 이들을 우선 분석 대상으로 선정하였다. 이후 문헌조사 과정에서 PS가 화학적 재활용 대상 플라스틱에 함께 포함되어있는 사례를 다수 발견함에 따라 PET, PE, PP, PS 재활용공정을 전과정 평가 대상으로 정의하였다. 이는 생산량 기준으로 76.6%, 수요량 기준으로 85.1%에 해당하는 양이다.

70) 『2022 석유화학편람』 참조.

[표 7-2] 시스템 범위 정의

구분	내용
기능	폐플라스틱의 자원화를 통한 다양한 제품의 생산(제품 시스템별 상이)
기능단위	플라스틱 1kg 재활용으로 발생하는 주제품 및 연산품 00kg(제품 시스템별 상이)
기준흐름	플라스틱 1kg 재활용
시스템경계	cradle to gate(재활용 물질의 전처리부터 최종제품의 생산까지)
할당 방법론	<ul style="list-style-type: none"> • 열린고리 재활용(재활용 물질 발생 이후의 환경영향은 재활용 제품 시스템에 할당) • 생산되는 제품의 기능(주 제품 및 연산품)을 모두 포함하도록 시스템을 확장하여 할당을 회피(할당-①)
영향평가방법론 및 영향범주	ILCD 2011 Midpoint + ver 1.119, 16개 영향 범주
데이터 수집	<ul style="list-style-type: none"> • 주 공정(foreground system): 문헌 자료 수집 • 보조 공정(background system): 일반 전과정 인벤토리 데이터 수집 (Ecoinvent v3.810) • 비교 시스템: 기존 기술을 통해 생산된 제품과의 비교를 위하여 일반 전과정 인벤토리 데이터를 수집(Ecoinvent v3.8)
가정사항	<ul style="list-style-type: none"> • 플랜트 건설, 수송 제외 • Background system의 인벤토리는 다음과 같은 기준으로 선정 • 지리적 대표성: 한국(KR) > 유럽을 제외한 나머지 국가(RoW) > 전체 평균(GLO) • 기술적 대표성: 국내 대표적인 기술을 우선 적용, 상세 기술정보가 없으면 기술 평균 적용 • 시간적 대표성: 사용 가능한 가장 최신의 데이터를 적용

[표 7-3] 국내 플라스틱 수지 생산량과 수요량

(단위: 천톤)

수지종류	플라스틱 생산량	국내수요량
PET	2,677	1,949
PP	4,433	1,517
LDPE	2,861	1,420
HDPE	2,174	1,029
PVC	1,413	1,025
ABS	1,938	589
PS	979	511
PC	668	376

* 『2022 석유화학편람』의 2019년 통계자료 참조.

* PET: 『석유화학편람』에서 제공하지 않는 통계 값으로 장용철 외(2022) 논문에서 2019년 국내 수지 생산량 또는 국내 수지 공급량에서 나머지 플라스틱량의 차이로 각각 계산.

* LDPE: 『석유화학편람』 통계에서 LDPE, LLDPE, EVA를 합한 값에 해당함.

* PS: 『석유화학편람』 통계에서 PS와 EPS를 합한 값에 해당함.

나. 주 공정(foreground system)

자원화 기술은 폐기물처리(end-of-life) 관점과 제품생산 관점에서 바라볼 수 있으며, 어떤 관점에서 시스템을 정의하는지에 따라 목적 및 범위 정의가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 재활용원료의 자원화(제품생산) 관점을 중심으로 제품생산을 주기능으로 설정하였다. 재활용 원료는 열린고리 재활용 방법론을 공통으로 적용하여 폐플라스틱 발생을 기준으로 이전 활동은 이전 제품 시스템에 모두 할당(burden-free)하고 폐플라스틱 발생 이후 원료의 수집, 분리 및 전처리(세척, 분쇄 등) 단계부터의 환경영향을 제품 시스템에 포함하였다.

본 연구에서는 [표 7-4]와 같은 기술 및 원료를 적용하여 폐플라스틱의 자원순환 시스템을 구성하였다. 사용하는 기술은 화학적 재활용 방법으로 가스화(gasification), 열분해(pyrolysis), 용해(dissolution), 가용매분해(solvolysis) 방식을 포함한다. 화학적 재활용은 탄화수소 등 성분 수준으로 분해하여 재활용하는 방식으로 원료인 폐플라스틱으로 직접 재활용하기보단 연료, 플라스틱 단량체 등 다양한 제품으로 자원화하는 방식이다.

[표 7-4] 분석 대상기술, 재활용원료 및 제품

Case #	기술 구분	원료	주제품	연산품
1	Gasification	PET	Synthetic gas (Carbon monoxide, hydrogen)	
2		PE		
3		PP		
4		PS		
5	Pyrolysis	PE	Diesel fuel	lubricating oil
6		PP		
7		PE		
8		PP		
9		PS		
10		PE		
11	Dissolution	PP	Propene	
12		PS	Styrene	
13		PET, PE, PP, PS	Polymer	
14	Solvolysis	PET	bis(3-hydroxyethyl) terephthalate	

다. 주변 공정(background system)

주변 공정은 주 공정에 투입되는 원료, 에너지, 산출되는 폐기물 등을 생산/처리하는 상위흐름 및 하위흐름에 해당하며 인벤토리 정보를 활용하여 아래 [표 7-5]와 같은 영향평가를 수행할 수 있다.

[표 7-5] 영향평가 범주 및 지표

	Impact category	Model	Indicator
1	climate change	IPCC 2007	GWP 100a, CO2 equivalents
2	ozone depletion	WMO 1999	Ozone depletion potential (ODP), CFC-11 equivalents
3	human toxicity, cancer effects	USEtoxTM	Comparative Toxic Unit for Human Health (CTUh)
4	human toxicity, non-cancer effects		
5	particulate matter	(RiskPoll model and Greco et al., 2007)	PM _{2.5} equivalents
6	ionizing radiation - Human health	(Frischknecht et al., 2000)	Ionizing Radiation Potentials, Bq Uranium 235 equivalents
7	ionizing radiation - Ecosystem	(Garnier- Laplace et al., 2009)	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)
8	photochemical ozone formation	(Van Zelm et al., 2008 as applied in ReCiPe 2008)	Photochemical ozone creation potentials (POCP), Non-methane volatile organic compounds (NMVOC)
9	acidification	(Seppala et al., 2006; Posch et al., 2008)	Accumulated Exceedance (AE), H+ equivalents
10	terrestrial eutrophication	(Seppala et al., 2006; Posch et al., 2008)	Accumulated Exceedance (AE), N equivalents
11	freshwater eutrophication	ReCiPe 2008 (EUTREND model - Struijs et al. 2009b)	P equivalents and N equivalents
12	marine eutrophication		
13	freshwater ecotoxicity	USEtoxTM	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)
14	land use	Mila I (Canals et al. 2007a)	Soil Organic Matter (SOM), Carbon deficit

	Impact category	Model	Indicator
15	water resource depletion	Ecoscarcity (Frischknecht et al. 2008)	Water consumption equivalent
16	mineral, fossil & renewable resource depletion	CML 2002 (Guinée et al. 2002)	Scarcity, Antimony (Sb) equivalents

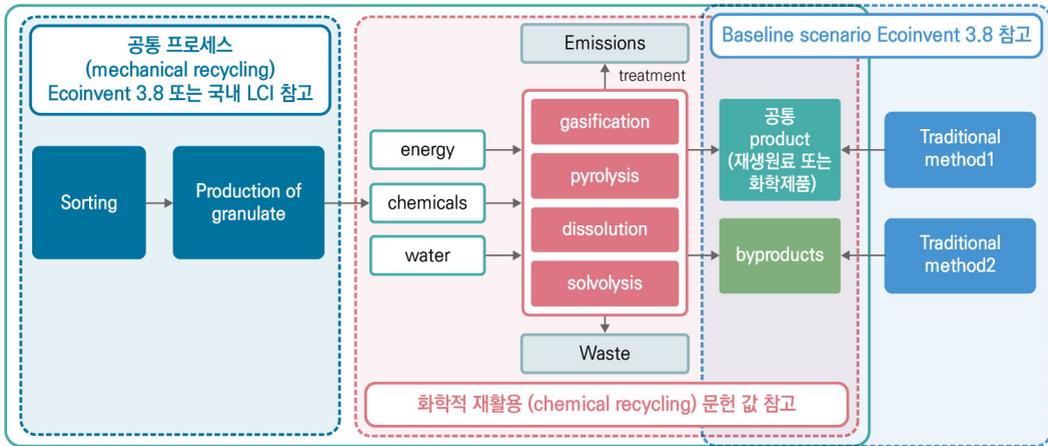
출처: EC, 2010

다. 비교 제품 시스템의 설정

비교 제품 시스템(baseline system)은 위에서 설명한 폐플라스틱과 자원화 기술([표 7-4]의 기술 구분 내용 참조)에 비교되는 기존 생산기술(conventional)을 대상으로 선정하여 [그림 7-7]과 같이 공통 적용하였다. 폐플라스틱 자원화 시스템은 대상 제품 시스템에서 연산품을 생산할 경우, 비교 제품 시스템에 연산품 생산에 대한 기능을 포함하기 위해 시스템 확장(할당-①) 방식을 적용하여 두 시스템을 비교할 수 있도록 하였다.

2018년 환경부 폐기물 통계⁷¹⁾에 따르면 국내 폐플라스틱(생활계 폐기물, 사업장 생활계 폐기물)은 매립 12.7%, 소각 42.4%, 재활용 44.9%로 처리된다. 이 중 소각은 에너지 회수를 하지 않는 단순 소각 처리를 의미한다. 재활용은 화학적, 물리적, 열적 재활용으로 나뉘는데 이 중 열적 재활용이 에너지 회수형 연소를 포함한다. 물리적 재활용은 선별, 세척 등 전처리를 거친 후 압출을 통해 플라스틱 조각(펠릿)을 만들어 플라스틱 원료를 생산하는 것으로 원료로 투입한 폐플라스틱과 같은 제품으로 재활용할 수 있다. 열적 재활용은 폐플라스틱을 연료화하여 발열량을 활용하는 재활용 방식이다.

71) 환경부(2019), 발간등록번호 11-1480000-001552-10 『2018년도 전국 폐기물 발생 및 처리현황』



[그림 7-7] 플라스틱 재활용에 관한 대상 제품 시스템 vs. 비교 제품 시스템 경계

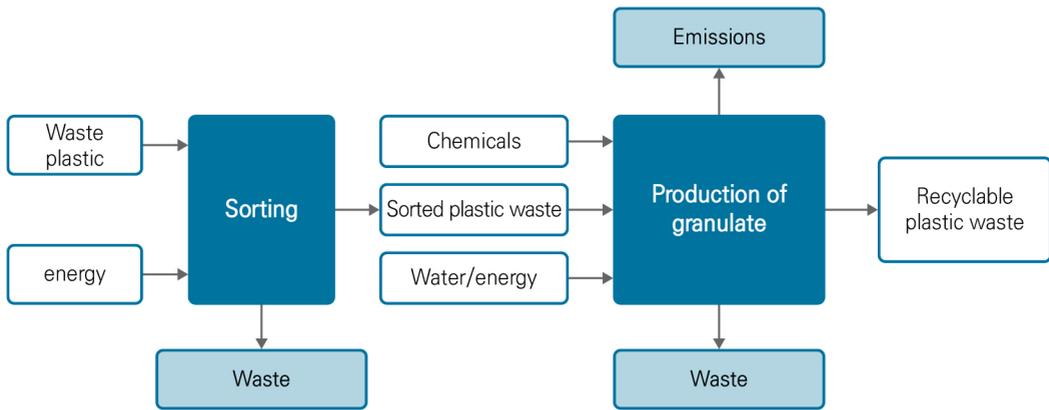
[그림 7-7]은 본 연구에서 분석 대상으로 하는 대상 제품 시스템과 비교 제품 시스템 전체를 보여준다. 플라스틱 재활용 공통프로세스(분리, 파쇄 등 전처리)는 전통적인 플라스틱 재활용 방법과 본 연구에서 대상 제품 시스템이 공통적으로 포함하는 프로세스에 해당한다. 공통 프로세스 이후에 화학적 재활용 과정을 거쳐 상품 가치를 가지는 재생원료+부산물+열과 환경부하로 작용하는 폐기물+오염물질이 발생하는 과정을 거치게 된다. 비교 제품 시스템은 대상 제품 시스템(공통프로세스 & 화학적 재활용 프로세스) 결과 생산되는 재생원료와 부산물(byproducts)을 이미 존재하는 공정으로 생산하는 시스템에 해당한다.

2 데이터 수집 결과

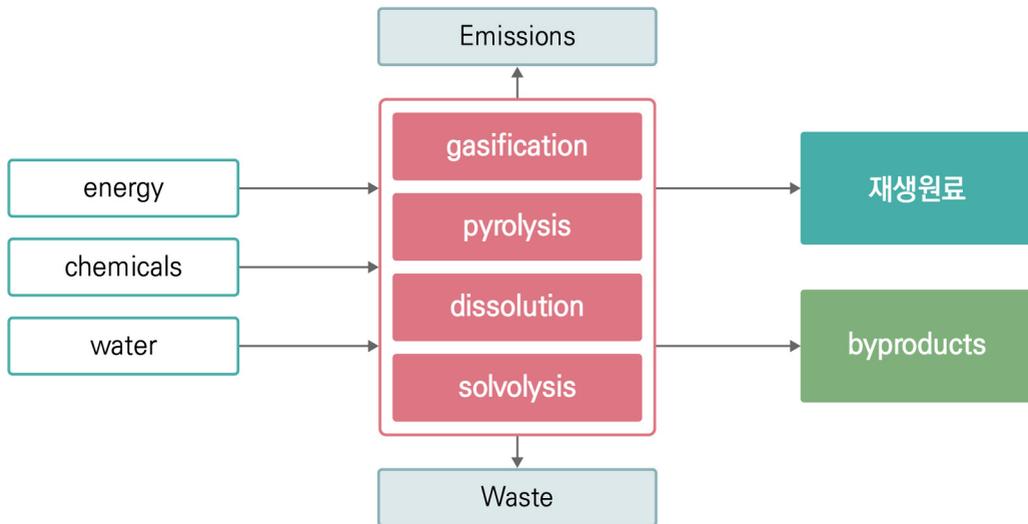
1) 대상 시스템의 데이터 수집: 주 공정

대상 시스템의 주 공정은 [그림 7-8]과 [그림 7-9]에서 보여주는 물리적 재활용 공정과 화학적 재활용 공정을 포함한다. 물리적 재활용 공정은 수거된 플라스틱 폐기물을 1차적으로 분리한 후 파쇄, 분리 등을 거쳐 일정 품질 기준을 만족하는 결과물을 펠릿화하는 과정에 해당한다. 이에 대한 공정정보 및 인벤토리는 해외 상용 데이터베이스

(Ecoinvent ver 3.8)에서 “sorting”과 “pelletizing” 프로세스 정보를 수집하였다. 화학적 재활용 공정은 여전히 실험실 수준에서 개발되고 있으며 공개된 공장 생산 수준의 실증 데이터는 존재하지 않으므로 관련 정보는 학술 문헌 또는 이론적 반응식을 활용하였다. [표 7-6]에 정리한 바와 같이 각각의 대상 기술(가스화, 열분해, 용해, 가용매분해)에 적용 가능한 원료 플라스틱에 관하여 주 공정 화학반응식, 반응온도, 수율 등을 아래와 같이 수집하였다.



[그림 7-8] 플라스틱 재활용 공통 프로세스 모식도



[그림 7-9] 화학적 재활용 공정 프로세스 모식도

공정에 사용되는 원료, 결과물의 종류, 반응온도 등 반응 전반에 관한 정보는 Schwartz et al.(2021)에서 제시한 정보를 활용하였으며, 탄소 수지(carbon balance)를 맞추는 방법으로 부족한 수율 정보를 도출하였다. 결과물, 부산물, 또는 잔재물의 종류와 발생량은 적용되는 공정기술에 따라 다르며 [표 7-6]에 정리하였다. 수율과 반응 열원으로 사용한 숯(char)의 양은 제공된 정보가 충분하지 않기 때문에 아래와 같이 몇 가지 가정을 사용하여 계산하였다.

가) 반응 열원으로 사용된 숯의 양 계산

- 가정: 반응에 필요한 열은 모두 반응 부산물로 발생하는 숯(char)의 연소열에서 오며(Schwartz et al., 2021) 외부 열원이 필요하지 않음.
- Ecoinvent ver 3.8에서 숯(charcoal) 1kg의 열량이 28.4MJ이므로 (즉, 1MJ 열 발생에 0.0352kg 숯이 필요함) Schwartz et al.(2021)에서 제시한 공정별 필요한 열에너지 계산.

나) 결과물, 부산물, 잔재물 수율 계산

- 가정: 투입된 플라스틱은 결과물, 부산물, 또는 잔재물로 100% 전환되며, 플라스틱 이외의 탄소원이 없음.
- 투입 플라스틱, 결과물, 부산물의 화학조성(탄소 함량)은 문헌으로부터 정리함.
- 문헌으로부터 탄소 함량을 구할 수 없었던 윤활유(lubricating oil)은 C10~C20 탄화수소(hydrocarbon) 그룹으로 일반화하여 해당 그룹의 탄소 함량을 사용함.
- 잔재물 수율(kg C/kg plastic)은 = 투입 플라스틱의 탄소함량 - (결과물 탄소함량 + 부산물 탄소함량 + 열원으로 이용된 숯의 양)으로 계산함.

[표 7-6] 주 공정 데이터 수집 결과

기술 구분	포함 공정	원료	결과물 종류	결과물 (수율)	부산물 (수율)	잔재물 (수율)	반응온도
Mechanical	sorting→shredding→washing→melting→filtration	PET, PE, PP, PS	plastic pellet	plastic pallet 80%	-	residual 20%	-
Gasification	shredding→heating→steam/O2 addition→separation (distillation)→waste gas treatment (release of 1% waste gas)	PET, PE, PP, PS	syngas	H2 12.5~18.5%	char 17.6%	-	1,000℃
				CO 86.6~128.8%			
Pyrolysis	shredding→heating→separation (purification & distillation)→waste gas treatment (release of 1% waste gas)	PE, PP	diesel	diesel 83.3~83.6%	char 13.7%		700℃
		PE, PP, PS	wax	paraffins 47.4%	lubricating oil 9.5% char 5.3%	waste gas & char 37.9%	450℃
		PE	monomer	ethene 27.4%	char 8.8%	Hydrocarbons and etc 63.8%	700℃
		PP	monomer	propene 27.4%			700℃
		PS	monomer	styrene 73.0%	char 8.8%	Hydrocarbons and etc 18.2%	700℃
Dissolution	shredding→dissolution in superheated solvent (purification & distillation)→addition of cosolvent→pelletizing	PET, PE, PP, PS	plastic pallet	pure polymer 90%	-	residual 10%	80~150℃, 120℃ on average
Solvolysis	shredding→washing→solvated in 190℃ ethylene glycol→cleaning (washing off excess glycol)	PET	monomer	BHET 90%	-	residual 10%	190℃

- 수율은 투입원료 질량 대비 결과물, 부산물, 잔재물의 질량비를 의미함. 총결과물+부산물+잔재물 수율은 공기, 물 등의 투입물이 존재하는 경우 투입원료 대비 100% 초과 가능하며, 투입원료의 일부가 배기가스로 나가는 경우 원료 대비 100% 미만도 가능함.
- BHET: bis(3-hydroxyethyl)terephthalate
- Ancillary material에 포함된 char는 반응 결과 생성되는 물질이며 가스화, 열분해 공정에 필요한 에너지/유틸리티에 사용됨.
- Dissolution에서 사용되는 용매(solvent + co-solvent)는 99% 재사용됨.

2) 대상 시스템의 데이터 수집: 주변 공정

분석 대상 시스템별 원료, 에너지, 폐기물 처리 등 상위흐름 및 하위흐름 인벤토리 데이터를 전과정 목록 데이터베이스 (Life cycle inventory database, LCI DB)를 사용하여 [표 7-7]과 같은 항목들을 수집하였다.⁷²⁾

[표 7-7] 상위 및 하위흐름의 전과정 인벤토리 수집 내역
(Ecoinvent ver 3.8, Method: allocation, cut-off by classification)

구분	Activity name	Reference product		Geo- graphy
		Name	Unit	
에너지 /유틸리티	Electricity, high voltage	electricity	kWh	KR
	Heat, from steam, in chemical industry	steam	MJ	RoW§
	Decarbonised water	cooling water, makeup	kg	RoW
	Tap water, conventional treatment	Process water	kg	RoW
원료	Treatment of waste polyethylene terephthalate, for recycling, unsorted, sorting	Waste polyethylene terephthalate	kg	RoW
	Treatment of waste polyethylene, for recycling, unsorted, sorting	waste polyethylene	kg	RoW
	Wastewater treatment, capacity of 1E9L/y	Wastewater treatment	m³	RoW
	Waste treatment, hazardous waste, incineration	Hazardous waste incineration	kg	RoW
폐기물 처리	Inert waste treatment, sanitary landfill	Inert waste landfill	kg	RoW
	Inert waste for final disposal treatment	Inert waste, for final disposal	kg	RoW
	Municipal solid waste, treatment of, sanitary landfill	Municipal solid waste landfill	kg	RoW
	Municipal solid waste, treatment of, incineration	Municipal solid waste incineration	kg	RoW
	Treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration	Waste plastic incineration	kg	RoW
	Treatment of waste polyethylene, municipal incineration	Waste plastic incineration	kg	RoW
	Treatment of waste polyethylene	waste polyethylene	kg	RoW

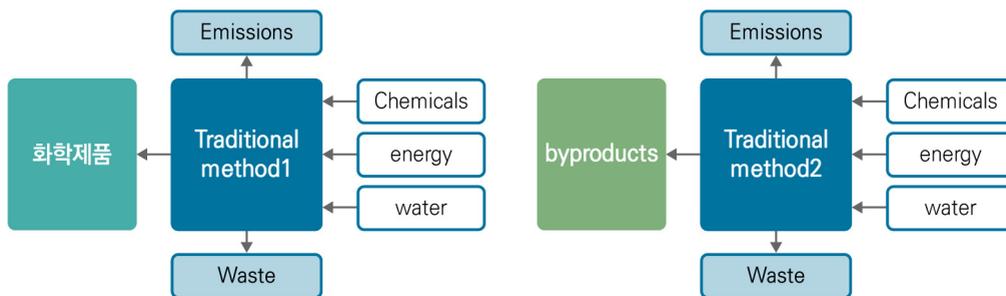
72) Ecoinvent database ver 3.8, <https://ecoinvent.org/>

구분	Activity name	Reference product		Geo- graphy
		Name	Unit	
	terephthalate, municipal incineration	terephthalate incineration		
	treatment of waste polystyrene, municipal incineration	waste polystyrene incineration	kg	RoW
	Soap production	Soap	kg	RoW
보조물질	Ethylene glycol production	Ethylene glycol	kg	RoW
	Iron(III) chloride, without water, in 14% iron solution state production	Iron(III) chloride, without water	kg	RoW

§ RoW(Rest-of-World): 유럽을 제외한 나머지 국가

3) 비교 시스템(baseline system)의 데이터 수집

대상 시스템에서 생산되는 결과물 또는 부산물은 비교 시스템에서 기존의 상용 공정을 통하여 생산되는 제품과 매칭되며, 이들 결과물과 부산물이 생산된 이후의 전과정(life cycle)은 이전의 생산과정과 무관하므로 본 연구는 cradle to gate 시스템경계를 적용하여 두 시스템(대상 시스템 vs 비교시스템)의 환경영향을 비교하고자 하였다. 비교 시스템은 [그림 7-10]과 같이 주요 결과물(traditional method 1을 통하여 생산)과 부산물(traditional method 2을 통하여 생산)의 합으로 정의하였다. 여기서 기존의 상용공정(traditional methods)이 복수로 존재하는 경우 기술적 대표성을 기준으로 선정하였으며, 선정된 공정에 대한 전과정 인벤토리 데이터를 아래와 같이 수집하였다.



[그림 7-10] 비교 제품 공정 프로세스 모식도

[표 7-8] 비교 시스템(baseline project)의 데이터 수집 내역
(Ecoinvent ver 3.8, Method: allocation, cut-off by classification)

Activity name	Product name	Unit	Geo-gephy
Carbon monoxide production	Carbon monoxide	kg	RoW
Hydrogen production, gaseous, petroleum refinery operation	Hydrogen gas	kg	RoW
Diesel production, petroleum refinery operation	Diesel	kg	RoW
Paraffin production	Paraffin	kg	RoW
Lubricating oil production	lubricating oil	kg	RoW
Ethylene production, average	Ethylene	kg	RoW
Propylene production	propylene	kg	RoW
Styrene production	styrene	kg	RoW
Polyethylene production, high density, granulate, recycled	Polyethylene, high density, granulate, recycled	kg	RoW
Purified terephthalic acid production	purified terephthalic acid	kg	RoW

3 전과정평가 수행 내용

가. 데이터 계산 및 검토

화학적 재활용 공정은 아직 상용 데이터베이스에 인벤토리 정보가 존재하지 않기 때문에 학술 문헌의 데이터 또는 이론적 수치를 이용하였다. 주로 Schwartz et al. (2021) 논문의 보조자료에 기재된 정보를 활용하였다. 본 반응 및 배출가스 처리에 투입하는 화학물질, 에너지 정보 등이 제한적으로 존재하기 때문에 기존의 상용 LCI (Ecoinvent)에 기반한 비교 시스템 전과정 평가와 단순비교하기는 어려울 것이나, 환경영향에 대하여 함의를 도출하는 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 보았다. 여기에서 투입되는 화학물질, 자원, 에너지/유틸리티로는 Schwartz et al. (2021)의 전과정 평가와 동일하게 전기, 열, 물, 용매, 보조 용매(co-solvent), 비누(soap), 에틸렌 글라이콜, 촉매, 황산, 탄산칼슘, 부산석고(waste gypsum), 암모니아, 생석회(quicklime)을 고려하였다. 해당 정보가 문헌에 없는 경우에는 공정에서 사용되지 않는 것으로 가정하였다.

두 시스템(제품 시스템 vs 비교 시스템)의 환경영향을 비교하려면 동일한 양의 결과물(product)과 부산물(byproduct)을 생산하는 데에 필요한 플라스틱량 정보가 필요하며, 이는 수율 계산을 통하여 도출할 수 있다. 계산상 편의를 위하여 1kg의 플라스틱을 투입하였을 때 발생하는 결과물과 부산물 양[표 7-9]을 계산하여 비교 시스템에서 이에 해당하는 양을 생산하는 것으로 환산하여 비교하였다. 제품 시스템은 [그림 7-7]에서 나타난 바와 같이 기계적 재활용 공정을 거친 후 화학적 재활용 공정을 거치며, 제품 시스템의 화학적 재활용 공정에 의한 환경영향은 [표 7-10]에 정리된 정보(Schwartz et al., 2021)를 활용하여 계산하였다. 현재 상용화가 활발하지는 않지만 미래에 일반화될 것으로 전망하는 기술 후보로서 화학적 재활용 공정의 환경편익에 초점을 맞추기 위하여 제품 시스템에 포함된 기계적 재활용 공정은 비교 시스템의 기계적 재활용 공정과 동일하다고 가정하고 해당 환경영향을 화학적 재활용 공정으로부터 발생하는 환경영향에 더하여 [표 7-11]과 [표 7-12]에 정리하였다.

[표 7-9] 플라스틱 1 kg 투입시 발생하는 결과물 또는 부산물 양

기술 구분	원료	결과물 또는 부산물 -1		결과물 또는 부산물 -2	
		이름	발생량 (kg)	이름	발생량 (kg)
Mechanical	PET, PE, PP, PS	plastic pallet	0.8		
Gasification	PET	수소	0.125	일산화탄소	0.866
	PE	수소	0.171	일산화탄소	1.19
	PP	수소	0.172	일산화탄소	1.19
	PS	수소	0.185	일산화탄소	1.29
Pyrolysis	PE	디젤	0.833		
	PP	디젤	0.836		
	PE	파라핀	0.474	윤활유	0.095
	PP	파라핀	0.474	윤활유	0.095
	PS	파라핀	0.474	윤활유	0.095
	PE	에틸렌	0.274		
	PP	프로필렌	0.274		
	PS	스타이렌	0.73		
Dissolution	PET, PE, PP, PS	PET, PE, PP, PS	0.9		
Solvolysis	PET	BHET	0.9		

- 가스화는 플라스틱과 주입된 공기와 스팀이 반응하여 결과물을 생성하므로 원료의 탄소 함량에 따라 1kg 이상이 생산될 수 있음
- BHET: bis(3-hydroxyethyl)terephthalate

[표 7-10] 플라스틱 1kg 재활용에 필요한 에너지·자원 및 발생 폐기물

기술 구분	원료	에너지/유틸리티	보조물질	폐기물 처리
Mechanical	PET, PE, PP, PS	전기 0.464 Kwh 물 2.91 L	비누 0.02kg	매립 0.2kg 폐수 0.00291m ³
	PET			매립 0.074kg
Gasification	PE	전기 0.024 Kwh	-	매립 0.167kg
	PP	물(스팀) 0.05 L		매립 0.168kg
	PS			매립 0.195kg
Pyrolysis	PE, PP			-
	PE, PP, PS	전기 0.024 Kwh	-	매립 0.379kg
	PE, PP			매립 0.638kg
	PS			매립 0.182kg
Dissolution	PET, PE, PP, PS	-	-	매립 0.1kg
Solvolyis	PET	물 3.9 L	비누 0.01kg 에틸렌 글라이콜 0.3kg 촉매 0.025kg	매립 0.1kg 폐수 0.0042m ³

- 보조물질에 포함된 char는 반응 결과 생성되는 물질이며 가스화, 열분해 공정에 필요한 에너지/유틸리티에 사용됨.
- 가스화 반응 결과 발생하는 폐기물 종류가 숯이라고 가정하고 발생량을 산정함.
- 투입된 물을 포함한 액체 물질의 100%가 폐수로 배출된다고 가정.
- 투입된 촉매는 재사용 된다고 가정, 폐기물 발생량 산정 시 무시함.
- 플라스틱 재활용 공정 결과 발생하는 폐기물은 비교 시스템과 마찬가지로 municipal solid waste로 구분되고 매립방식으로 처리된다고 가정함.
- Dissolution에서 사용되는 용매(solvent + co-solvent)는 99% 재사용되므로 투입되는 보조물질에서 제외함.
(출처: Schwartz et al., 2021; Wu and Williams, 2009)

위와 같이 수집한 주 공정과 주변 공정의 정보를 종합하여 수행한 전과정 평가 결과를 아래 테이블에 정리하였다. 비교 시스템의 환경영향은 Ecoinvent ver 3.8에서 allocation, cut-off by classification 방법을 사용하여 계산한 결과를 가져왔다. 전과정 영향평가는 사용 소프트웨어인 Simapro v9.3.0.2를 사용하였으며 ILCD Midpoint ver 1.11 방법론을 사용하여 기후변화를 포함한 총 16개 영향범주에 대하여 분석하였다.

여기서 기계적 재활용방법에 관한 비교 시스템은 분류(sorting) 공정 이후 과립(granulation) 공정을 포함하며 Ecoinvent ver 3.8 데이터베이스 상에서 1kg의 과립화된 PE를 생산하기 위해서는 1.06kg의 분류된 PE가 필요하며, 1.06kg의 분류된 PE를 생산하기 위해서는 1.17kg의 PE 폐기물이 필요하다는 정보를 전과정 평가에 적용하였다.

이상의 비교 전과정 평가 준비 과정에서는 재활용 결과물을 중심으로 비교 시스템을 설정하였으나 기존의 플라스틱 폐기에 의한 환경평가와의 비교도 중요한 시사점을 줄 수 있으므로 해당 프로세스에 관한 전과정 평가 결과도 아래 표에 포함하였다.

[표 7-11] 제품 시스템과 비교 시스템 대상 전과정평가 결과-1(비교 LCA 결과)

Case 구분	환경영향 구분	Climate change		Ozone depletion		Human toxicity, non-cancer effects		Human toxicity, cancer effects		Particulate matter		Ionizing radiation HH		Ionizing radiation E (interim)		Photochemic al ozone formation	
		kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	CTUh	CTUh	CTUh	CTUh	kg PM _{2.5} eq	kBq U235 eq	CTUe	CTUe	kg NMVOC eq					
Mechanical recycling	제품시스템	0.5609596	2.742E-08	2.87806E-07	6.829E-08	0.0005621	0.1179813	4.339E-07	0.0017841								
	비교시스템	0.6734716	3.159E-08	2.92299E-07	6.128E-08	0.0008393	0.0234575	1.008E-07	0.0019233								
Gasification (PET)	제품시스템	0.7628621	3.255E-08	5.50775E-07	6.871E-08	0.0008613	0.0290385	1.207E-07	0.0020521								
	비교시스템	1.8039635	5.88E-07	2.88703E-07	6.847E-08	0.0016779	0.3376935	1.876E-06	0.0061911								
Gasification (PE)	제품시스템	0.8277637	3.264E-08	6.90857E-07	7.078E-08	0.0008628	0.0291632	1.212E-07	0.0020811								
	비교시스템	2.4778065	8.066E-07	3.96642E-07	9.409E-08	0.0023048	0.4635758	2.575E-06	0.0085011								
Gasification (PP)	제품시스템	0.8284616	3.264E-08	6.92364E-07	7.08E-08	0.0008628	0.0291645	1.212E-07	0.0020814								
	비교시스템	2.4792164	8.085E-07	3.96739E-07	9.409E-08	0.0023059	0.4641762	2.579E-06	0.0085092								
Gasification (PS)	제품시스템	0.847304	3.267E-08	7.33033E-07	7.14E-08	0.0008632	0.0292007	1.214E-07	0.0020899								
	비교시스템	2.6855042	8.737E-07	4.29937E-07	1.02E-07	0.0024981	0.5023097	2.79E-06	0.0092124								
Pyrolysis (PE→diesel)	제품시스템	0.6896524	3.197E-08	2.96162E-07	6.24E-08	0.0008448	0.0280345	1.17E-07	0.0019646								
	비교시스템	0.3217062	5.433E-07	2.95866E-08	1.235E-09	0.0002469	0.1783843	1.256E-06	0.0022878								
Pyrolysis (PP→diesel)	제품시스템	0.6896524	3.197E-08	2.96162E-07	6.24E-08	0.0008448	0.0280345	1.17E-07	0.0019646								
	비교시스템	0.3228648	5.452E-07	2.96931E-08	1.239E-09	0.0002478	0.1790267	1.261E-06	0.0022961								
Pyrolysis (PE, PP,PS→paraffin)	제품시스템	0.9541438	3.234E-08	8.67034E-07	7.083E-08	0.0008507	0.0285427	1.19E-07	0.002083								
	비교시스템	0.4394107	6.147E-08	4.81835E-08	7.373E-09	0.0004349	0.0249901	1.527E-07	0.004165								
Pyrolysis (PE→monomer)	제품시스템	1.1348912	3.258E-08	1.25716E-06	7.658E-08	0.0008547	0.02889	1.204E-07	0.002164								
	비교시스템	0.3835676	1.56E-10	3.82739E-09	6.436E-09	0.0001426	4.616E-05	2.411E-10	0.0012896								
Pyrolysis (PP→monomer)	제품시스템	1.1348912	3.258E-08	1.25716E-06	7.658E-08	0.0008547	0.02889	1.204E-07	0.002164								
	비교시스템	0.3942325	1.599E-10	4.03226E-09	6.933E-09	0.0001487	4.756E-05	2.485E-10	0.0012579								

Case 구분	환경영향 구분		Climate change	Ozone depletion	Human toxicity, non-cancer effects	Human toxicity, cancer effects	Particulate matter	Ionizing radiation HH	Ionizing radiation E (interim)	Photochemical ozone formation
	단위	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	CTUh	CTUh	kg PM _{2.5} eq	kBq U235 eq	CTUe	kg NMVOC eq	
Pyrolysis (PS→monomer)	제품시스템	0.8166641	3.215E-08	5.70301E-07	6.645E-08	0.0008476	0.0282785	1.179E-07	0.0020215	
	비교시스템	2.2384291	7.946E-08	1.96796E-07	6.242E-08	0.0015292	0.0283924	1.459E-07	0.0077998	
Dissolution (PET, PE, PP, PS)	제품시스템	0.7432582	3.169E-08	4.42925E-07	6.35E-08	0.0008408	0.0235916	1.013E-07	0.0019545	
	비교시스템	1.4550703	7.553E-08	6.83683E-07	1.574E-07	0.0019797	0.0509013	2.312E-07	0.0043046	
Solvolysis (PET)	제품시스템	1.3161731	4.329E-08	5.21602E-07	8.401E-08	0.0012073	0.0515594	2.03E-07	0.0037367	
	비교시스템	1.6298432	1.036E-05	1.37511E-07	7.781E-08	0.0007662	0.0459447	2.098E-07	0.0047915	
플라스틱 폐기	매립	0.697866	9.56E-10	1.50626E-06	2.22E-08	1.54E-05	0.001341	5.34E-09	0.000313	
	소각	2.374138	4.2E-09	3.58665E-07	5.21E-08	2.14E-05	0.00103	4.61E-09	0.000611	

* 화학적 재활용(gasification, pyrolysis, dissolution, solvolysis) 제품 시스템에 해당하는 환경영향은 비교시스템 기계적 재활용(mechanical recycling) 공정으로 1kg 플라스틱 원료를 생산함에 따라 발생하는 환경영향을 포함함.

* 화학적 재활용 공정을 대상으로 하는 시스템의 전과정 평가는 플라스틱 원료 1kg 투입을 기준으로 하며, 이에 상응하는 준비 공정으로서 기계적 재활용 전과정 평가는 1kg 플라스틱 재생 원료 생산에 해당하는 데이터임(따라서 기계적 재활용 제품 시스템은 80% 수율을 고려하여 원료로 1.25kg의 선별된(sorted) 플라스틱 폐기물을 사용함).

* 비교 시스템 기계적 재활용의 환경영향은 PE를 과립화하는 공정에 해당하는 Ecoinvent ver 3.8 데이터를 이용하여 계산함(선별된 플라스틱 폐기물이 원료로 투입됨).

* Dissolution의 비교 시스템 환경영향은 화학적 재활용에 공통적으로 적용된 전처리 공정 이후에 과립화 공정을 거쳐 0.9 kg(1 kg 플라스틱 dissolution 공정 결과물의 양) PE를 생산하는 과정을 포함함.

* 플라스틱 폐기에 해당하는 전과정 평가는 Ecoinvent ver 3.8 DB를 이용하였으며, 매립은 municipal solid waste, treatment of, sanitary landfill (RoW), 소각은 treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)에 해당함.

[표 7-12] 제품 시스템과 비교 시스템 대상 전과정평가 결과-2(비교 LCA 결과)

Case 구분	환경영향 구분	Acidification		Terrestrial eutrophication		Freshwater eutrophication		Marine eutrophication		Freshwater ecotoxicity		Land use		Water resource depletion		Mineral, fossil & ren resource depletion			
		molc H+	eq	molc N	eq	kg P	eq	kg N	eq	kg N	eq	CTUe	kg C	deficit	m3	water	eq	kg	Sb
Mechanical recycling	제품시스템	0.0022213		0.0075321		0.0003116		0.0011868		10.71441		0.3458518		0.0017579		3.875E-06			
	비교시스템	0.00301		0.0071231		0.0001699		0.0009379		15.311224		0.1240005		-0.002861		2.85E-06			
Gasification (PET)	제품시스템	0.0032946		0.0079598		0.0002335		0.0020984		24.02906		0.1320863		-0.010178		2.921E-06			
	비교시스템	0.0119037		0.0196499		0.0006312		0.0019094		6.5697258		0.326977		-0.008155		1.737E-06			
Gasification (PE)	제품시스템	0.0033071		0.0079941		0.0002349		0.0022636		34.447553		0.1342396		-0.010181		2.922E-06			
	비교시스템	0.0163431		0.0269872		0.0008674		0.0026225		9.0261894		0.4492744		-0.011206		2.385E-06			
Gasification (PP)	제품시스템	0.0033072		0.0079945		0.0002349		0.0022654		34.55958		0.1342628		-0.010181		2.922E-06			
	비교시스템	0.0163616		0.027006		0.0008674		0.0026242		9.0281377		0.449321		-0.011207		2.387E-06			
Gasification (PS)	제품시스템	0.0033108		0.0080044		0.0002353		0.0023133		37.584304		0.1348879		-0.010181		2.922E-06			
	비교시스템	0.0177096		0.0292481		0.0009403		0.0028423		9.7839723		0.4870113		-0.012148		2.585E-06			
Pyrolysis (PE→diesel)	제품시스템	0.0030626		0.0072878		0.0001816		0.000955		15.411321		0.1279686		-0.002848		2.892E-06			
	비교시스템	0.0044829		0.0051828		6.457E-06		0.0004714		0.6445409		0.0250869		-4.43E-05		7.144E-07			
Pyrolysis (PP→diesel)	제품시스템	0.0030626		0.0072878		0.0001816		0.000955		15.411321		0.1279686		-0.002848		2.892E-06			
	비교시스템	0.0044991		0.0052014		6.481E-06		0.0004731		0.6468622		0.0251773		-4.45E-05		7.17E-07			
Pyrolysis (PE, PP,PS→paraffin)	제품시스템	0.0031135		0.0074274		0.0001872		0.0016282		57.869482		0.136744		-0.002858		2.896E-06			
	비교시스템	0.0033865		0.0061374		5.781E-05		0.0005724		1.0275056		0.0926973		-0.00089		1.082E-06			
Pyrolysis (PE→monomer)	제품시스템	0.0031484		0.0075229		0.0001911		0.0020883		86.884426		0.142741		-0.002865		2.899E-06			
	비교시스템	0.0012691		0.0026595		2.859E-06		0.000244		0.3971169		0.0001822		0.0005129		2.983E-07			

Case 구분	환경영향 구분		Terrestrial eutrophication molc N eq	Freshwater eutrophication kg P eq	Marine eutrophication kg N eq	Freshwater ecotoxicity CTUe	Land use kg C deficit	Water resource depletion m3 water eq	Mineral, fossil & ren resource depletion kg Sb eq
	단위	Acidification molc H+ eq							
Pyrolysis (PP→monomer)	제품시스템	0.0031484	0.0075229	0.0001911	0.0020883	86.884426	0.142741	-0.002865	2.899E-06
	비교시스템	0.0012962	0.0025402	3.054E-06	0.0002331	0.4196642	0.0001922	0.0005025	3.1E-07
Pyrolysis (PS→monomer)	제품시스템	0.003087	0.0073549	0.0001843	0.0012783	35.8002	0.1321827	-0.002853	2.894E-06
	비교시스템	0.0100136	0.0161905	0.0003878	0.0015462	5.0300287	0.3529235	0.0023951	2.437E-06
Dissolution (PET,PE,PP,PS)	제품시스템	0.0030234	0.0071599	0.0001713	0.0011155	26.513905	0.1263159	-0.002864	2.851E-06
	비교시스템	0.006352	0.0159114	0.0003395	0.002163	36.276491	0.2515132	-0.005328	6.369E-06
Solvolysis (PET)	제품시스템	0.0054709	0.0122581	0.0003166	0.0017756	28.39247	0.3033734	-0.00264	5.175E-06
	비교시스템	0.0060043	0.0115192	0.0001697	0.0011801	4.0726166	0.0946896	0.0019937	1.292E-05
플라스틱 폐기	매립	0.000134	0.000368	1.48E-05	0.001776	112.0268	0.023154	-2.7E-05	1.21E-08
	소각	0.000521	0.002567	5.28E-06	0.000303	44.06707	0.007186	0.001453	8.79E-07

- * 화학적 재활용(gasification, pyrolysis, dissolution, solvolysis) 제품 시스템에 해당하는 환경영향은 비교시스템 기계적 재활용(mechanical recycling) 공정으로 1kg 플라스틱 원료를 생산함에 따라 발생하는 환경영향을 포함함.
- * 화학적 재활용 공정을 대상으로 하는 시스템의 전과정 평가는 플라스틱 원료 1kg 투입을 기준으로 하며, 이에 상응하는 준비 공정보다 기계적 재활용 전과정 평가는 1kg 플라스틱 재활용 '생산'에 해당하는 데이터임(따라서 기계적 재활용 제품 시스템은 80% 수율을 고려하여 원료로 1.25kg의 선별된(sorted) 플라스틱 폐기물을 사용함).
- * 비교 시스템 기계적 재활용의 환경영향은 PE를 과립화하는 공정에 해당하는 Ecoinvent ver 3.8 데이터를 이용하여 계산한(선별된 플라스틱 폐기물이 원료로 투입됨).
- * Dissolution의 비교 시스템 환경영향은 화학적 재활용에 공통적으로 적용된 전처리 공정 이후에 과립화 공정을 거쳐 0.9 kg(1 kg 플라스틱 dissolution 공정 결과물의양) PE를 생산하는 과정을 포함함.
- * 플라스틱 폐기에 해당하는 전과정 평가는 Ecoinvent ver 3.8 DB를 이용하였으며, 매립은 municipal solid waste, treatment of, sanitary landfill (RoW), 소각은 treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)에 해당함.

제3절

비교 전과정평가 결과 해석

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

가. 총론

[표 7-11]과 [표 7-12]에 정리된 내용을 종합해보면, 플라스틱의 화학적 재활용 기술 적용에 따른 16가지 환경영향⁷³⁾은 사용하는 원료, 전력량 등에 따라 기술별로 편차가 크며, 이때 생산되는 제품과 동일한 종류와 양으로 기존의 상용 공정을 사용할 때 발생하는 환경영향과 비교하면 환경편익이 발생하는 경우도 있으나 그 반대의 경우도 존재함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 물질 재활용 공정 간의 환경영향 수준은 기존 산업공정 대비 상대적 비율로 표현하였다. 그러므로 본 연구에서 나타난 수치는 절대적인 배출량의 크기를 보여주기보다는 기존 공정을 대체하는 경우 기대할 수 있는 편익을 보여주되, 기존 산업공정에서 발생하는 환경영향을 기본 단위로 한다. 다시 말해, 기존 공정의 환경영향이 상대적으로 큰 합성가스(syngas)와 같은 물질생산을 위하여 플라스틱 재활용 공정을 적용하면 환경편익이 상대적으로 크게 발생하며, 이는 동일 폐플라스틱 가공품을 어떤 목적으로 활용할지를 결정할 때에 경제적인 이익 이외에 고려해볼 만한 기준이 될 수 있다.

본 연구에서 사용한 시스템경계 및 기술 수준에서는 용해(dissolution) 방법을 사용하는 경우에만 16개 영역 환경영향 모두에서 비교 시스템 대비 환경편익이 발생하는 것으로 나타났다. 가스화와 열분해 공정은 세부 공정별 환경편익이 일부는 비교 시스템에 비해 높았으나 일부는 전통적인 방식으로 생산하는 공정의 환경편익이 높게 나타났다. 가스화의 경우, 온실가스 배출량, 오존층 파괴영향, 미세먼지 발생량 측면에서 환경편익이 높았으나 천연자원 고갈 영향에서는 부정적인 결과를 보여주었다. 한편, 천연자원 고갈 영향 측면에서는 화학적 재활용 공정 중 가용매분해 공정과 용해 공정만 비교 시스템 대비 편익이 있는 것으로 나타났다.

73) ILCD Midpoint ver 1.11 방법론을 사용하여 기후변화를 포함한 총 16개 영향범주에 대하여 분석.

한편 열분해의 경우 PS가 스타이렌 생산에 이용되는 공정에서만 온실가스 배출량과 미세먼지발생 영향이 저감되는 효과를 확인하였다. 단량체(monomer)를 생산하는 열분해 공정은 결과물 수율에 따라 환경적 편익이 발행하는 정도에 큰 차이가 있었다. PS가 열분해를 통해 스타이렌을 생산하는 공정의 수율이 PE와 PP의 수율보다 2배 이상 크다는 특성에 따라 이에 대응하는 양의 단량체를 생산하는 공정의 환경영향이 크고, 결과적으로 비교 시스템 대비 환경편익이 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 이는 화학적 재활용공정의 수율을 높이는 기술개발이 기존 생산공정 대비 환경편익을 극대화할 수 있는 전략이 될 수 있음을 의미한다.

파라핀과 디젤을 생산하는 열분해 공정에서 오존층 파괴 영향은 비교 시스템 대비 환경편익이 발생하나, 온실가스 배출량, 미세먼지 발생 영향, 천연자원 고갈 영향 측면에서는 비교 시스템의 환경편익이 큰 것으로 드러났다.

한편, 플라스틱이 재활용되지 않는 경우 발생한 플라스틱 폐기물은 주로 매립 또는 소각 방식으로 처리하는데 플라스틱 폐기물의 처리방식(매립 vs 소각 vs 물질 재활용) 간의 환경영향을 비교한 결과, 환경영향의 종류에 따라 제품 시스템 적용에 의한 편익이 발생하기도 하였다.

플라스틱 폐기물을 매립하는 경우, 모든 제품 시스템 공정보다 인간독성(human toxicity, non-cancer effects)과 담수 환경독성이 높았다. 소각하는 경우는 모든 제품 시스템 공정보다 온실가스 배출량이 많았다. 이 결과는 플라스틱 재활용 전과정에서 환경영향의 합이 현재의 기술 수준에서 일반적인 폐기물 처리 방식으로 적용되는 매립과 소각 방식에 비해 높은 항목이 다수 존재함을 시사한다. 따라서 저감하려는 환경영향의 종류에 따라서 바람직한 플라스틱 처리 방법이 다를 수 있으며, 플라스틱 재활용 공정효율 개선 등의 기술혁신을 통하여 환경영향이 저감될 가능성이 있다는 점도 고려할 필요가 있다.

아래 나~라는 제2장 제2절에서 도출한 순환경제 전환 동력 관련 지표 중 취약영역에 해당하는 PM_{2.5}, 온실가스 배출량, 자원 해외의존도와 밀접하게 연결된 환경영향에 대하여 정리하였다.

나. 온실가스 배출 영향

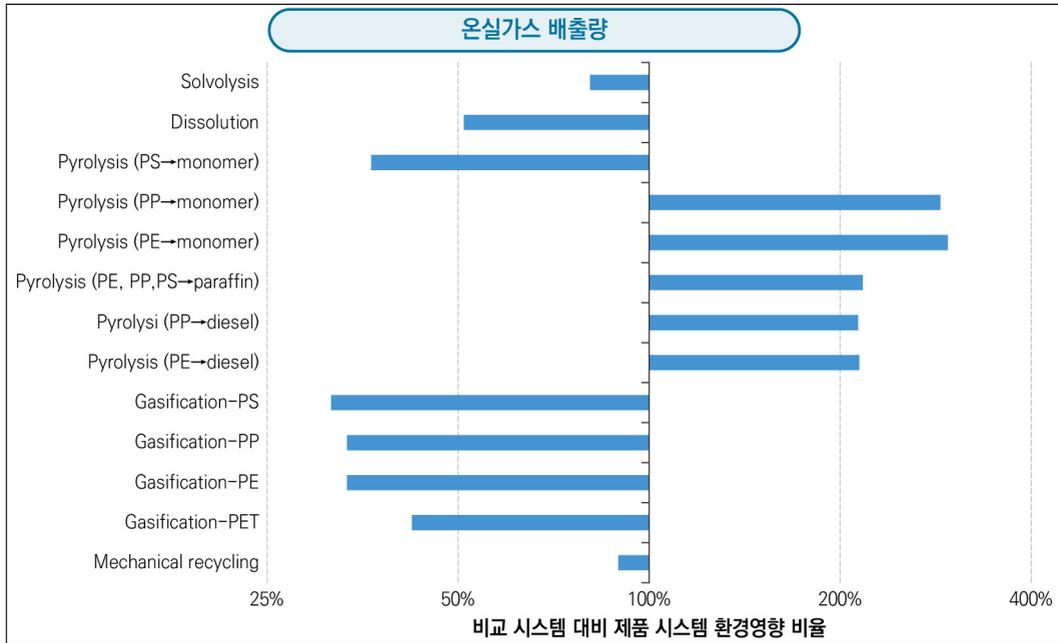
탄소중립은 최근 전 세계적으로 그린뉴딜 또는 그린딜이라는 국가전략의 핵심 목표에 해당하며, 각국은 이 목표를 달성하기 위하여 다양한 정책 수단을 강화하고 있다. 유럽연합에서도 순환경제는 탄소중립의 중요한 전략으로 다뤄지고 있으며, 우리나라에서도 탄소중립 녹색성장 4대 전략⁷⁴⁾ 중 ‘구체적·효율적 방식으로 온실가스를 감축하는 책임감 있는 탄소중립’ 하에 순환경제로의 전환 과제가 포함되어있다. 따라서 전과정 평가 결과 도출된 환경영향 중 온실가스 배출 영향을 플라스틱 순환경제 전환 동력의 과학적인 진단 차원에서 중요하게 분석할 필요가 있다.

단, 여기서 수행한 환경영향(cradle to gate) 평가의 기후변화 영향은 현재 국가에서 관리하는 온실가스 배출량 인벤토리 값 산정방법⁷⁵⁾과 다르며, 제품 생산에 포함된 모든 공정 배출의 합이라는 점을 감안하여 결과를 해석해야 한다.

아래 [그림 7-11]은 화학적 재활용 공정 전에 기계적 재활용 공정을 전처리 과정으로 일괄 적용한 경우, 폐플라스틱 분리·선별에서부터 상용 화학제품 생산공정 시스템 전체에서 발생하는 온실가스 배출량을 동일 상용 화학제품을 같은 양 생산하는 전 과정(비교 시스템)에서 발생하는 온실가스 배출량과 비교한 결과를 보여준다. 가스화, 열분해(PS 단량체 생산), 용해, 가용매분해 공정을 사용하였을 때에 비교 시스템 대비 온실가스 감축 효과를 기대할 수 있었고, 감축 수준은 화학적 재활용 공정과 그에 따라 발생하는 결과물의 종류와 양에 따라 상이하였다.

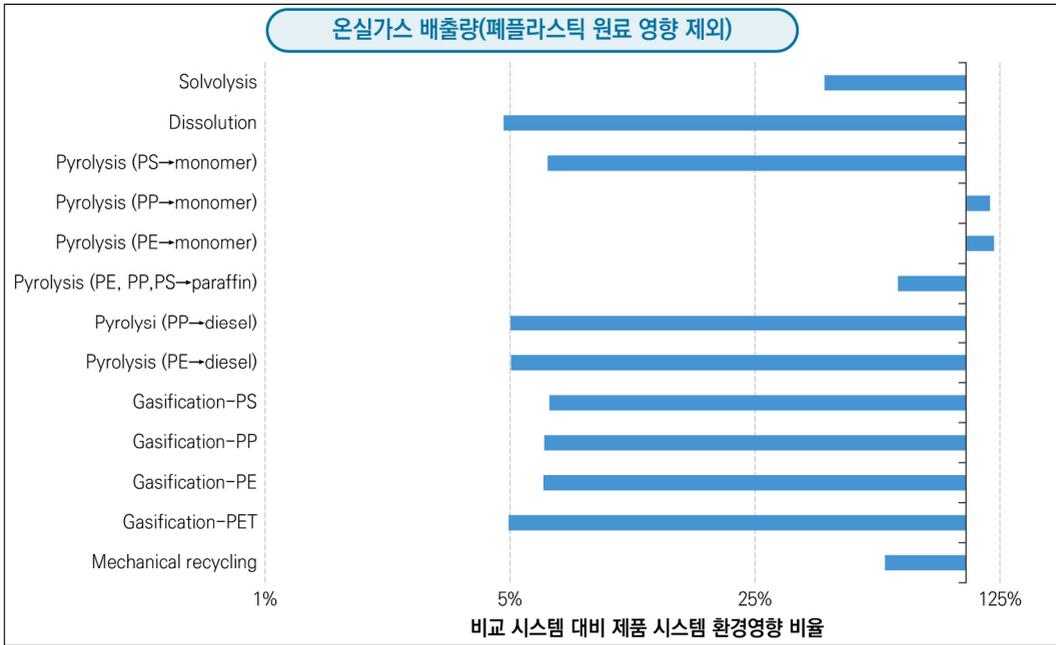
74) 2050 탄소중립녹색성장위원회 보도자료(2022.10.26.) 참고.

75) 최상위흐름 활동량(예: 플라스틱 생산에 들어간 납사 양만 고려) 및 해당 배출계수로 산정.



[그림 7-11] 비교 시스템 대비 제품 시스템의 온실가스 배출량 비교

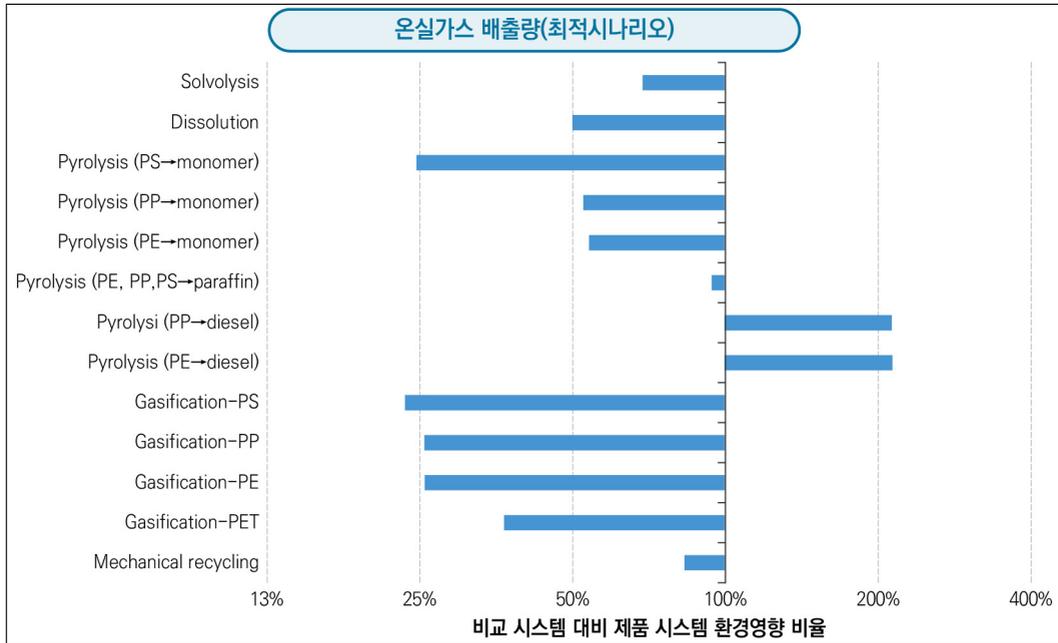
제품 시스템의 환경영향이 전처리 과정에 기인하는 비중이 높기 때문에 화학적 재활용 공정만의 기후변화 영향을 확인하기 위하여 폐플라스틱 전처리(선별·분리, 과립화 등)에서 오는 환경영향을 제외하고 분석을 수행하였다. 그 결과, [그림 7-12]와 같이 공정 수율(27.4%)이 매우 낮은 열분해(PE 또는 PP 단량체 생산)를 제외한 제품 시스템에서 온실가스 배출량 저감 효과를 볼 수 있었다.



[그림 7-12] 폐플라스틱 원료 영향을 제외한 경우 비교 시스템 대비 제품 시스템의 온실가스 배출량 비교

한편, [표 6-15]에서 2050년 최적시나리오 조건인 전처리 수율 85.5%와 전처리 이후 공정 전환율 100%을 적용하는 경우⁷⁶⁾ 전체 플라스틱 재활용 공정에서 발생하는 온실가스 배출량을 동일 상용 화학제품을 같은 양 생산하는 전 과정(비교 시스템)에서 발생하는 온실가스 배출량과 비교하였으며 결과를 [그림 7-13]에서 확인할 수 있다. 기존 상용공정에서 온실가스 배출량이 상대적으로 적은 열분해를 통한 디젤생산 공정을 제외한 모든 재활용공정이 기존의 상용공정을 통한 제품생산과 비교하여 온실가스 배출량 저감 효과를 볼 수 있었다.

76) 비현실적인 수치이나 가상의 시나리오로서 전처리 이후 공정전환율 영향을 배제한 조건에서 환경영향을 비교할 목적으로 수행함

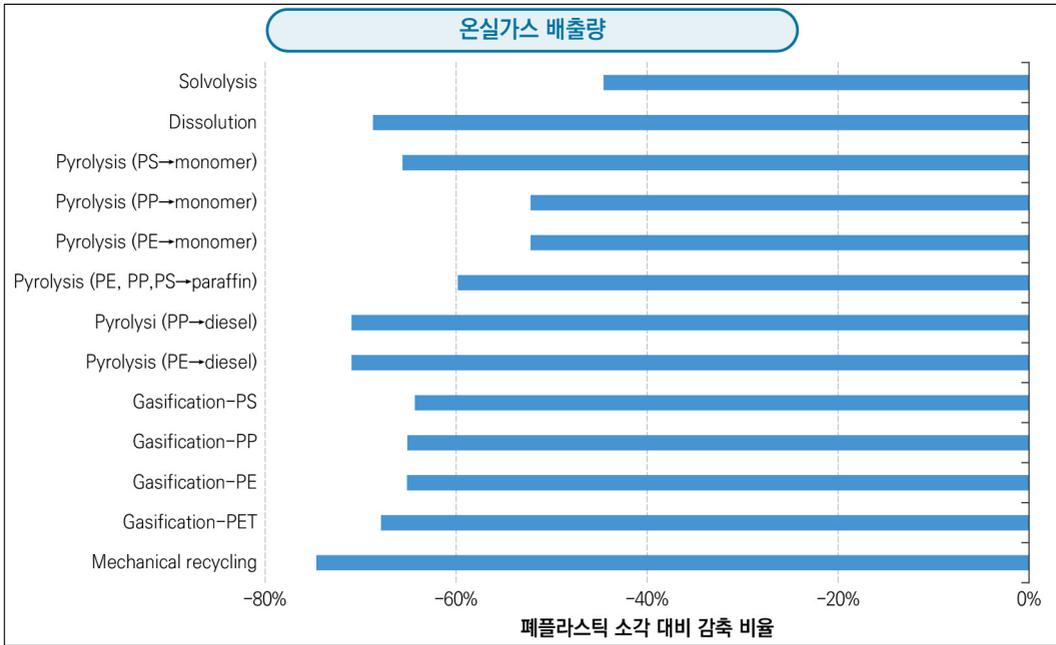


[그림 7-13] 2050 최적시나리오 조건에서 비교 시스템 대비 제품 시스템의 온실가스 배출량 비교

[그림 7-11], [그림 7-12], [그림 7-13]이 나타내는 수치는 비교 시스템 대비 상대적인 비율을 나타내므로 절대적인 배출량의 크기를 보여주기보다 기존 공정을 대체하는 경우 기후변화 차원에서 기대할 수 있는 편익의 크기를 보여준다.

마지막으로, 폐플라스틱 유래 원료를 사용하는 경우 폐플라스틱 소각량 감소에 따른 온실가스 감축량으로 인정받을 수 있는 점 또한 해석 시에 고려할 부분이다. 폐플라스틱 열분해는 기존에 소각처리되던 플라스틱 폐기물을 재활용한다는 차원에서, 플라스틱 소각에서 발생하던 온실가스의 저감효과를 반영한 온실가스 배출 감축효과는 아래 [그림 7-14]에서 확인할 수 있다. 여기서 보여주는 온실가스 배출량은 폐플라스틱 전처리와 화학적 재활용에서 발생하는 온실가스량([그림 7-11]의 제품 시스템)에서 폐플라스틱 소각으로 발생하는 온실가스량을 뺀 값(즉, 소각 대비 감축량)을 소각으로 발생하는 온실가스량으로 나눈 값⁷⁷⁾에 해당한다. 계산 결과 모든 재활용 공정에서 온실가스 배출 감축 효과(소각처리 대비 45~75%)를 기대할 수 있었다.

77) 가독성을 위하여 -를 없애고 표기함.



[그림 7-14] 플라스틱 재활용 공정이 폐플라스틱 소각 처리를 대체하는 경우 온실가스 배출 저감 수준

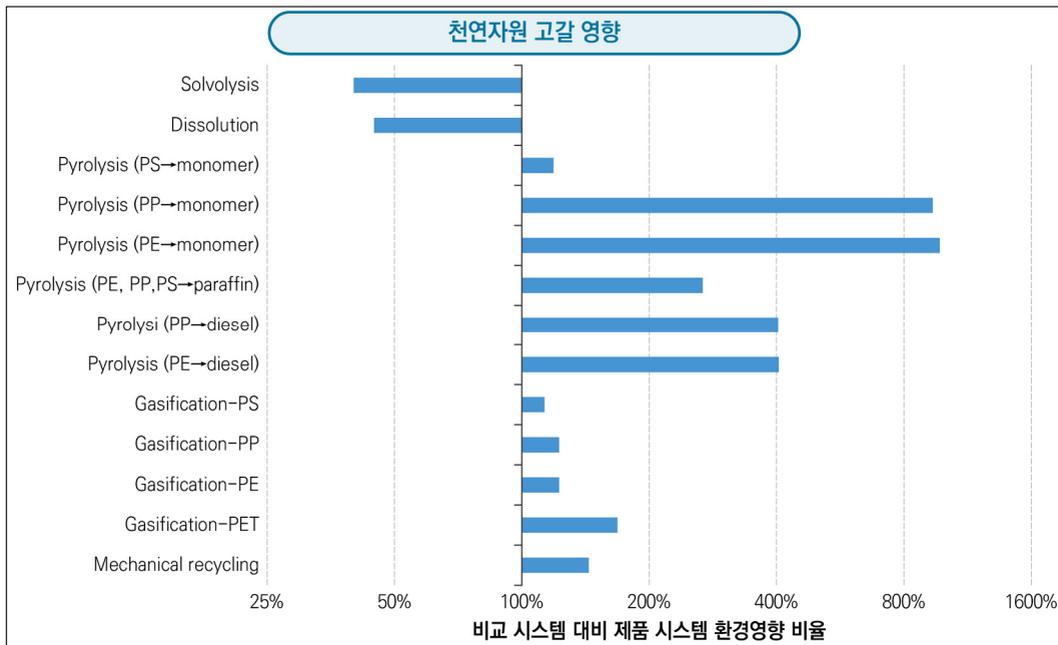
다. 천연자원 고갈 영향

앞선 순환경제 전환 동력 분석 결과에서 자원 해외의존도는 우리나라 현재 산업 구조 상 취약성이 높은 부문에 해당하며, 해당 취약성을 낮추기 위하여 자원 사용량을 줄이는 방향의 순환경제 전략이 중요하다.

전과정 평가 16개 환경영향 부문 중 mineral, fossil & renewable resource depletion은 천연자원 고갈 영향을 나타내며, 희소자원(Sb eq.)의 고갈 수준으로 표현된다. 해당 환경영향은 화학물질·제품(비누, 윤활유, 에틸렌 글라이콜, 스타이렌, 플라스틱 등)을 생산할 때에 가장 고갈 영향이 크고, 전력사용량이 많을수록 높게 산정한다. 따라서 생산과정에서 원료 및 부원료를 많이 사용하고 전기 등의 에너지 자원 투입이 많을수록 자원고갈의 영향이 커진다.

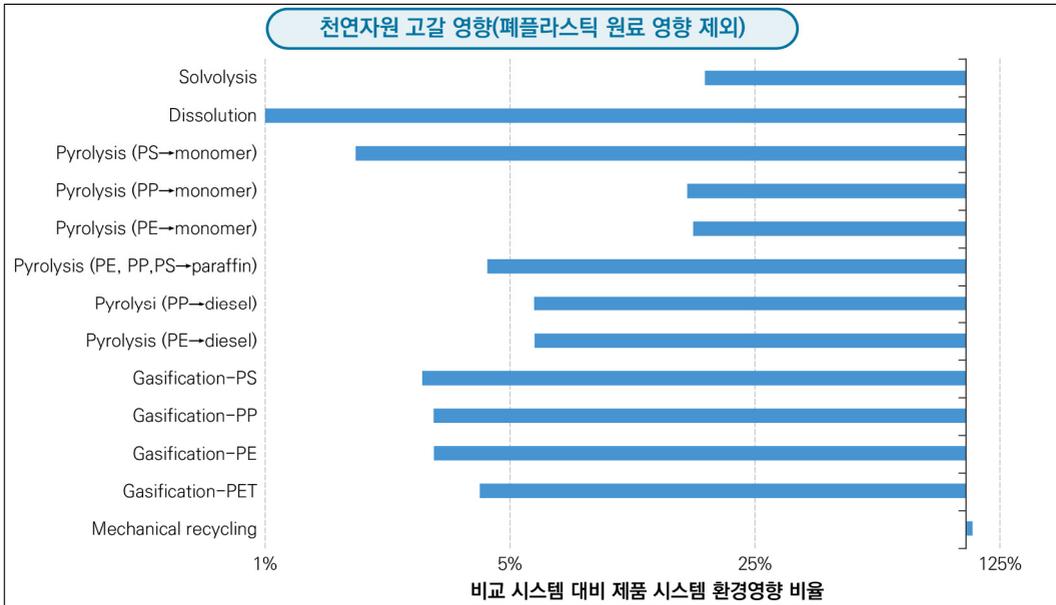
[그림 7-15]는 화학적 재활용 공정 전에 기계적 재활용 공정을 전처리 과정으로 일괄 적용한 경우, 폐플라스틱 분리·선별에서부터 상용 화학제품 생산공정 시스템 전체에서 고갈되는 천연자원량을 동일 상용 화학제품을 같은 양 생산하는 전과정(비교 시스템)에

서 고갈되는 천연자원량과 비교한 결과를 보여준다. 플라스틱 재활용 공정 전과정에서 고갈되는 천연자원량은 $2.89 \times 10^{-6} \sim 5.18 \times 10^{-6}$ kg Sb eq.으로 편차가 크지 않으나, 비교시스템에 해당하는 플라스틱 생산, 단량체 생산, 파라핀 및 디젤 생산 등의 공정에서 고갈되는 천연자원량이 $2.98 \times 10^{-7} \sim 1.29 \times 10^{-5}$ kg Sb eq.로 편차가 크며, 이에 따라 상대적인 환경영향의 크기가 [그림 7-15]와 같이 다양한 수준으로 나타났다.



[그림 7-15] 비교 시스템 대비 제품 시스템의 천연자원 고갈 영향 비교

플라스틱 재활용 전과정은 분리·선별 및 화학적 생산공정으로 여러 단계를 거치면서 폐플라스틱을 포함한 원료와 에너지 투입이 신규물질 생성공정에 비하여 전반적으로 천연자원 고갈 영향을 높이는 것으로 나타났다. 가용매분해(solvolysis) 공정의 비교 시스템에 해당하는 테레프탈산 생산과 용해(dissolution) 공정의 비교시스템에 해당하는 과립화된 재생 폴리에틸렌(PE) 생산과정에서 천연자원 고갈 영향이 상대적으로 높기 때문에 해당 플라스틱 재활용 공정 전과정의 천연자원 고갈 영향이 낮은 것으로 분석되었다.

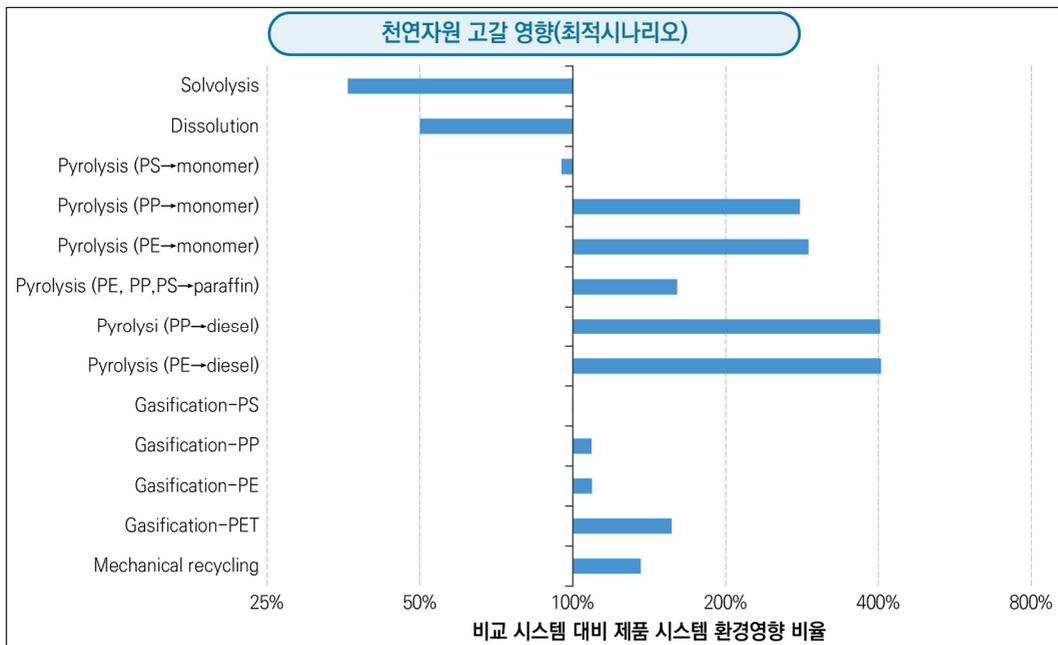


[그림 7-16] 폐플라스틱 원료 영향을 제외한 경우 비교 시스템 대비 제품 시스템의 천연자원 고갈 영향 비교

천연자원 고갈 영향도 온실가스 배출 영향과 마찬가지로 제품 시스템의 환경영향에서 전처리 과정에 기인하는 비중이 높기 때문에 화학적 재활용 공정만의 환경영향을 확인하기 위하여 폐플라스틱 전처리(선별·분리, 과립화 등)에서 오는 환경영향을 제외하고 분석을 수행하였다. [그림 7-16]에서 분석결과를 시각화하였으며, 기계적 재활용 방법을 제외한 모든 화학적 재활용 공정으로 인한 천연자원 고갈 영향은 비교 시스템 환경영향의 0.02~18%에 불과한 수준인 것으로 나타났다. 이는 본 연구가 수행한 전과정 평가에서 제한된 자료를 사용함으로써 투입되는 화학물질 정보 및 생산된 화학물질 후 처리(분리·정제 등) 공정 정보가 누락됨에 따라 발생한 오차에 일부 기인할 수 있으나, 열분해 및 가스화 공정이 화학물질과의 반응이 아닌 고열 분해반응이라는 특성을 고려할 필요가 있다. 본 연구가 대상으로 하는 화학적 재활용 공정에서 천연자원 고갈 영향은 주로 열 발생에 필요한 전기생산과 공정에서 발생하는 폐수·폐기물 처리과정에서 투입되는 자원에 기인하며, 이들 항목은 본 분석에서 반영되었다.

천연자원 고갈 영향 또한 온실가스 배출 영향에서도 나타난 바와 같이 공정수율이 낮은 열분해를 통한 PE, PP 단량체 생산공정에서 상대적으로 환경편익이 낮았다. 플라스

텍 재활용을 통한 환경편의 극대화를 위해서는 수율 및 공정효율 개선에 필요한 기술이 개발되어야 한다.



[그림 7-17] 2050 최적시나리오 조건에서 비교 시스템 대비 제품 시스템의 천연자원 고갈 영향 비교

한편, [표 6-15]에서 2050년 최적시나리오 조건인 전처리 수율 85.5%와 전처리 이후 공정 전환율 100%를 적용하는 경우⁷⁸⁾ 전체 플라스틱 재활용 공정으로 인한 천연자원 고갈 영향을 동일 상용 화학제품을 같은 양 생산하는 전 과정(비교 시스템)에서 발생하는 영향 크기와 비교하였으며, [그림 7-17]에서 결과를 확인할 수 있다. 전반적으로 [그림 7-15]에서 확인한 경향성과 유사한 결과를 보이거나 낮은 공정 수율에 의해 부정적인 환경편의가 특히 컸던 열분해(PE, PP 단량체 생산) 공정의 천연자원 고갈 영향이 큰 폭으로 감소하였다. 그러나 전처리 이후의 공정 효율 개선은 전처리 과정의 효율 개선 없이는 여전히 그 효과가 제한적임을 확인하였다.

78) 비현실적인 수치이나 가상의 시나리오로서 전처리 이후 공정전환율 영향을 배제한 조건에서 환경영향을 비교할 목적으로 수행함

라. 대기오염(PM_{2.5}) 영향

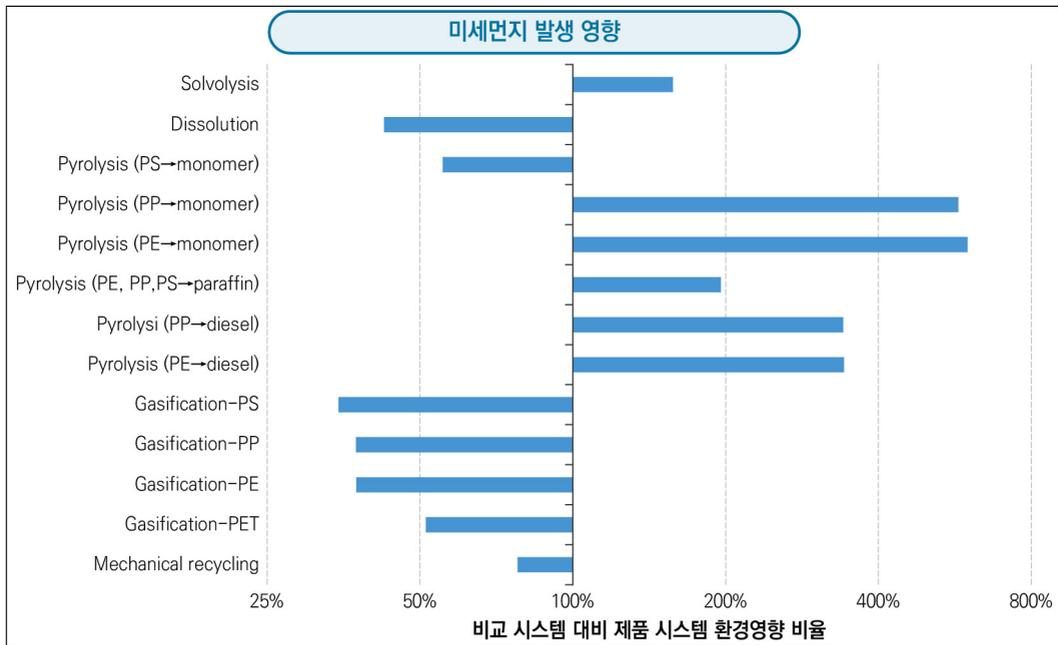
우리나라는 OECD 국가 중 최악의 미세먼지 노출농도⁷⁹⁾ 수준을 보이며 빠르게 개선되지 않아 이에 관한 취약성이 순환경제 전환 동력으로 강하게 작용할 수 있다. 따라서 전과정 평가 결과 도출된 환경영향 중 PM_{2.5} 배출 영향은 플라스틱 순환경제 전환 동력의 과학적인 진단 차원에서 중요하게 분석될 필요가 있다.

전과정평가 16개 환경영향 부문 중 입자상물질(particulate matter, PM)는 미세먼지 등의 대기오염물질 발생 영향을 나타내며, kg PM_{2.5} eq.으로 표현한다. 해당 환경영향은 폐기물 소각을 포함한 폐기물 처리과정에서 다량 발생하며, 공정에 사용되는 물 생산 및 파라핀 생산과정에서도 다량 발생한다. 따라서 생산과정에서 폐기물 발생이 많을수록, 즉 공정 수율이 낮을수록, 그리고 투입되는 원료 및 부원료의 생산과정에서 대기 오염물질 발생이 많을수록 대기오염 영향이 커진다.

[그림 7-18]은 화학적 재활용 공정 전에 기계적 재활용 공정을 전처리 과정으로 일괄 적용하였을 때, 폐플라스틱 분리·선별에서부터 상용 화학제품 생산공정 시스템 전체에서 발생하는 미세먼지량을 동일 상용 화학제품을 같은 양 생산하는 전 과정(비교 시스템)에서 발생하는 미세먼지량과 비교한 결과를 보여준다.

플라스틱 재활용 공정 전과정에서 발생하는 미세먼지량이 보여주는 패턴은 온실가스 배출량에서 보여주었던 것과 유사하다. 가스화, 열분해(PS 단량체 생산), 용해 공정을 사용할 때에 비교 시스템 대비 미세먼지 발생량 감축효과를 기대할 수 있었으나, 공정 수율이 낮은 열분해(PE, PP 단량체 생산)는 기존의 상용공정을 사용하는 것이 환경영향이 적은 방법인 것으로 나타났다. 한편, 기존 상용공정에서 미세먼지량이 상대적으로 적게 발생하는 디젤 및 파라핀 생산공정은 동일 물질 생산을 위하여 플라스틱 재활용 공정을 사용하면 부정적인 환경편익이 발생함을 확인하였다.

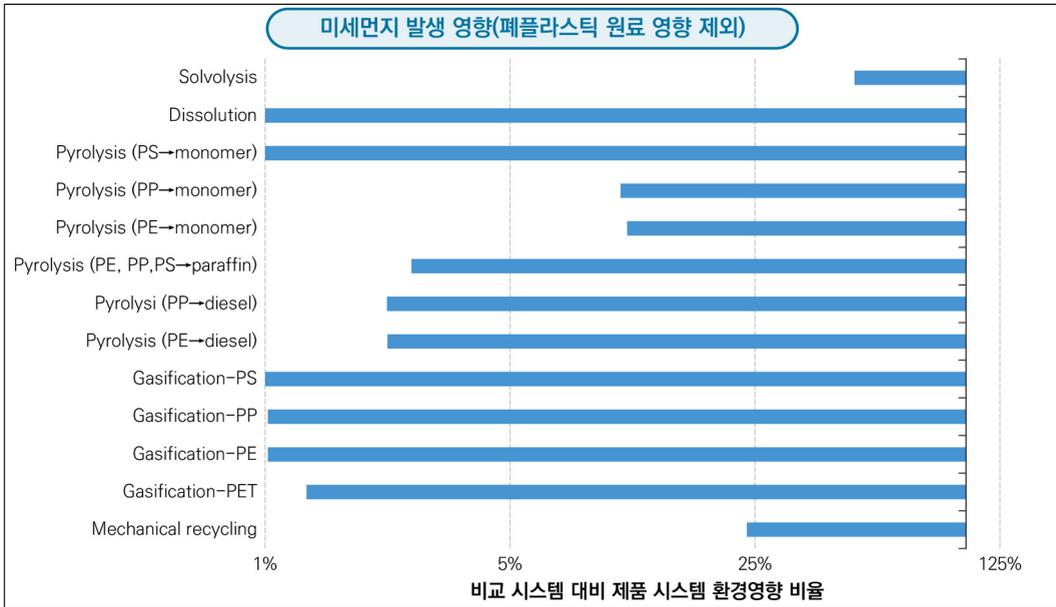
79) 2019년 OECD 통계치 기준.



[그림 7-18] 비교 시스템 대비 제품 시스템의 미세먼지 발생 영향 비교

그러나 온실가스 배출 영향 및 천연자원 고갈 영향과 마찬가지로 미세먼지 발생 영향 또한 제품 시스템의 환경영향에서 전처리 과정에 기인하는 비중이 높기 때문에 화학적 재활용 공정만의 환경영향을 확인하기 위하여 폐플라스틱 전처리(선별·분리, 과립화 등)에서 오는 환경영향을 제외하고 분석을 수행하였다.

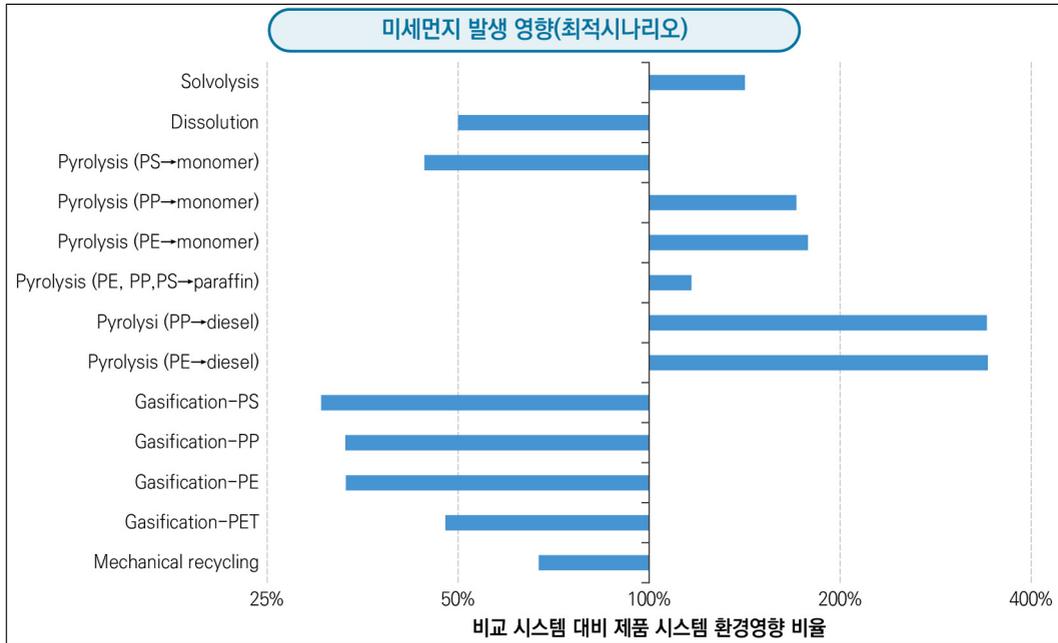
[그림 7-19]는 분석 결과를 시각화한 결과이며, 본 연구가 분석 대상으로 삼은 플라스틱 재활용 공정으로 인한 천연자원 고갈 영향은 비교 시스템 환경영향의 0.08~48%에 불과한 수준인 것으로 나타났다. 여기서 공정 수율이 낮은 플라스틱 재활용 기술의 경우, 제품으로 전환되지 못한 부분을 폐기물 발생량으로 처리하여 환경영향을 계산하였기 때문에 천연자원 고갈 영향과 온실가스 배출 영향에서도 공통적으로 발생하였던 공정 수율 영향이 더욱 크게 나타날 수 있다. 따라서 플라스틱 재활용을 통한 미세먼지 발생 영향을 최소화하기 위해서도 수율 및 공정효율 개선을 위한 기술개발이 필요하다.



[그림 7-19] 폐플라스틱 원료 영향을 제외한 경우 비교 시스템 대비 제품 시스템의 미세먼지 발생 영향 비교

한편, [표 6-15]에서 2050년 최적시나리오 조건인 전처리 수율 85.5%와 전처리 이후 공정 전환율 100%를 적용하는 경우⁸⁰⁾ 전체 플라스틱 재활용 공정에서 발생하는 미세먼지 발생 영향을 동일 상용 화학제품을 같은 양 생산하는 전 과정(비교 시스템)에서 발생하는 영향 크기와 비교하였으며, [그림 7-20]에서 결과를 확인할 수 있다. 전반적으로 [그림 7-18]에서 확인한 경향성과 유사한 결과를 보이거나 낮은 공정 수율에 의해 부정적인 환경편익이 특히 컸던 열분해(PE, PP 단량체 생산) 공정의 미세먼지 발생 영향이 큰 폭으로 감소하였다. 그러나 천연자원 고갈 영향에서 확인한 바와 같이 전처리 이후의 공정 효율 개선은 전처리 과정의 효율 개선 없이는 여전히 그 효과가 제한적이므로 전처리 공정의 수율 향상과 함께 공정에 투입되는 물질 및 에너지 사용 효율 개선 노력이 시급히 요구된다.

80) 비현실적인 수치이나 가상의 시나리오로서 전처리 이후 공정전환율 영향을 배제한 조건에서 환경영향을 비교할 목적으로 수행함



[그림 7-20] 2050 최적시나리오 조건에서 비교 시스템 대비 제품 시스템의 미세먼지 발생 영향 비교

마. 전과정 평가를 통한 환경영향 분석 결과의 함의

이상의 분석 결과를 통하여 동일한 양의 물질 재활용 결과물을 생산하는 공정(기존 산업 공정 vs 물질 재활용 공정) 간의 환경영향을 비교한 결과, 플라스틱 재활용에 의한 환경편익을 결정하는 매우 중요한 요소가 존재함을 알 수 있었다. (1) 가스화, 열분해, 용해, 가용매분해 공정(제품 시스템) 환경영향에는 기계적 재활용 공정(비교 시스템)의 환경영향 값이 절대적으로 높은 비중(예: PET 가스화에 따른 온실가스 배출량 전체의 88%가 화학적 재활용 공정 이전의 기계적 재활용 공정에서 발생함)을 차지하며, (2) 화학적 재활용 공정 수율에 따라 플라스틱 재활용의 환경영향은 기존의 전통적인 생산 방식이 미치는 환경영향보다 오히려 클 수 있다. 따라서 플라스틱 재활용을 통하여 환경적인 편익을 증가시키기 위해서는 우선적으로 화학적 재활용의 원료 생산에 필요한 ‘분류 → 과립화 과정’의 효율성을 높이고 재활용 공정 수율을 높이는 기술혁신이 필요하다.

제8장

소결

제1절 플라스틱 순환경제 2050 시나리오 개괄

제2절 플라스틱 순환경제의 미래영향

제3절 취약영역 및 기회영역

제 1 절

플라스틱 순환경제 2050 시나리오 개괄

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

Part 2에서는 국내 플라스틱 순환경제 현황을 분석하고 현재 개발중인 플라스틱 재활용 기술이 널리 상용화되는 경우 환경에 미칠 수 있는 영향을 분석하였다. 또한 플라스틱 전과정 무역현황을 분석하고 생산 및 무역 관련 국제적인 정책여건 변화에 따른 잠재적 무역 영향을 도출하였다. 이러한 미래영향 분석 결과에 기반하여 플라스틱 순환경제 전환 과정을 방해할 수 있는 잠재적 취약점 및 기대되는 기회요소를 발굴하였으며, 본 내용은 제2권에서 중장기 국가전략을 도출하는 데에 근거 자료로 활용하고자 하였다.

1) 순환경제 성과 모니터링 지표 기반 시나리오

플라스틱 순환경제 전환 수준을 예측하는 성과 모니터링 지표 중심의 시나리오는 Part 1에서 거시경제 지표를 활용하였던 방식과는 달리 플라스틱 전과정 상의 물질흐름분석 결과에 기반하여 도출하였다.

[표 8-1] 국내 플라스틱 수지 생산량, 수요량, 재활용(가능)량

플라스틱 생산량 (단위: 천톤)	국내수요량 (단위: 천톤)	재생자원 생산 최대 수율 (%)	현재 기술 기준 최대 재생자원량 (천톤, %)	2050 목표 재생자원량 (천톤, %)
17,143	8,416	77% (기계적 전처리 후 용해, PET, PP, PE, PS)	4,945 (59%)	6,836 (81%)

* 『2022 석유화학편람』의 2019년 통계자료 참조.

* 최대 재생자원량은 국내 수요량에 기반하여 산정하였으며, 전처리를 거친 화학적 재활용량만 해당함.

* 2050 목표 재생자원량은 『K-순환경제 이행계획』의 2050년 순환이용율 목표 기준 95%, 전처리 수율 85.5%, 전처리 이후 처리공정 수율 100% 적용

K-순환경제 이행계획 상의 플라스틱 부문 현재(2021년 기준) 순환이용률과 2050년 순환이용률 목표를 각각 BAU 및 최적시나리오 수준으로 설정하고, 본 연구에서 현재

적용 가능한 재생자원 생산 기술의 최대 수준을 중간 단계인 전환시나리오로 설정하는 경우 달성 가능한 순환이용률과 재생자원 전환률을 [표 8-2]에 정리하였다. 계산 결과 BAU, 전환 시나리오, 최적 시나리오에서 각각 최대 48%, 59%, 81%의 폐플라스틱이 원료로 재투입되거나 재사용 가능한 것으로 나타났다. 제2장에서는 최적 시나리오를 6대 순환경제 전환 전략 산업의 물질순환성([표 8-2]에서 재생자원 전환률에 해당함)이 100%에 도달하는 경우로 단순화하여 적용하였던 것과 달리 플라스틱 순환경제 시나리오 분석에는 순환성 향상에 적용 가능한 기술정보 등 산업활동을 구성하는 구체적인 정보를 활용하여 최적 시나리오 수준을 수정할 수 있었다.

[표 8-2] 시나리오별 국내 발생 폐플라스틱 순환이용률 및 재생자원 전환률

시나리오 구분	순환이용률 (폐플라스틱 발생량 중 재생원료 생산에 투입된 양)	재생자원 전환률 ¹⁾ (폐플라스틱 발생량 중 재생원료로 전환된 양)
K-순환경제 이행계획 2021 수준 (BAU)	56%	48%
현재 기술 기준 최대 수준 (전환 시나리오)	76% ²⁾	59%
K-순환경제 이행계획 2050 목표 (최적 시나리오)	95%	81%

¹⁾ 모든 시나리오에서 재생원료 생산에 투입된 폐플라스틱에 현재 기준 전처리 수율 85.5%를 적용하였으며, 전처리 이후 공정의 전환률의 경우 BAU와 전환시나리오는 현재 기술 최대 수준(90%)의 전환률을 적용하고 최적시나리오는 100% 전환률을 적용함.

²⁾ 전환 시나리오의 순환이용률은 [표 6-12]에서 '현재 기술 기준 최대 재생자원량'이 존재하는 수지의 국내수요량이 전체 국내 수요량에서 차지하는 비율로 산정함.

2) 플라스틱 순환경제 전략 시나리오

본 연구에서 선정한 6개 순환경제 전환 산업 중 플라스틱 생산 및 폐플라스틱 재활용에 관한 산업은 코크스 및 석유정제품과 화학물질 및 화학제품 제조업이며, 이들 산업에 적용되는 시나리오는 BAU, '물질 재사용 시나리오'와 '물질재사용 혁신 시나리오'이다. 물질 재사용 또는 물질 재사용 혁신 시나리오는 플라스틱 재활용 공정을 통하여 재생원료를 생산하여 다시 생산활동에 투입되는 시나리오이며, BAU는 분석 목적에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 폐플라스틱 처리 방법에 따라 시나리오를 구분하는 경우 BAU는 기존의 처리방식 중 매립, 소각, 재활용(기계적 재활용을 통하여

저품질 플라스틱 생산)에 해당하며, 둘째, 플라스틱 재활용 결과물에 따라 시나리오를 구분하는 경우 BAU는 플라스틱 재활용을 통해 생산된 재생원료(화학물질)를 기존 상용 공정을 통하여 생산하는 시나리오에 해당한다. 본 연구는 두 번째 구분 방식을 적용하여 현재 기술 수준을 반영한 물질 재사용 시나리오를 중심으로 환경영향을 분석하였으며, 첫 번째 구분 방식에 따른 시나리오 간의 비교 또한 일부 수행하였다.

【표 8-3】 플라스틱 순환경제 전략 시나리오

시나리오 이름	전략 그룹1 (직접 순환 전략)			전략그룹 2 (혁신 전략)		주요 전환 대상 산업	관련 순환산업
	순환 공급망	재생원료 사용	상품 재제조	기술혁신	녹색투자		
BAU						-	-
물질 재사용 (전환시나리오)	●	●				코크스 및 석유정제품 제조업(OIL), 화학물질 및 화학제품 제조업(CHE)	순환공급 (CRM) 원료재생 (CEN)
물질 재사용 혁신 (최적 시나리오)	●	●		●	●		

3) 플라스틱 순환경제 미래영향 시나리오

폐플라스틱을 재생원료 생산에 활용하는 전략을 성공적으로 적용하는 경우 발생할 수 있는 환경영향을 분석하였다. 환경영향 분석은 재생원료 생산에 적용 가능한 미래기술 중 현재 공정 정보 및 물질 인벤토리 정보를 문헌에서 확보 가능한 화학적 재활용 기술을 중심으로 분석하였다. 플라스틱 순환경제 환경영향 분석 결과는 제2절에 요약하였다.

제2절

플라스틱 순환경제의 미래영향

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

플라스틱의 화학적 재활용 기술 적용에 따른 16가지 환경영향⁸¹⁾은 사용하는 원료, 전력량 등에 따라 기술별로 편차가 크며, 플라스틱 재활용을 통하여 생산되는 제품과 동일한 종류와 양을 기존의 상용 공정을 사용하여 생산하는 경우 발생하는 환경영향과 비교한 결과 플라스틱 재활용에 의한 환경편익을 결정하는 매우 중요한 요소가 존재함을 알 수 있었다. (1) 가스화, 열분해, 용해, 가용매분해 공정(제품 시스템) 환경영향에는 기계적 재활용 공정(비교 시스템)의 환경영향 값이 절대적으로 높은 비중(예: PET 가스화에 따른 온실가스 배출량 전체의 88%가 화학적 재활용 공정 이전의 기계적 재활용 공정에서 발생함)을 차지하며, (2) 화학적 재활용 공정수율에 따라 플라스틱 재활용의 환경영향은 기존의 전통적인 생산방식에서 비롯하는 환경영향보다 오히려 클 수 있다. 따라서 플라스틱 재활용을 통하여 환경적인 편익이 증가하려면 우선적으로 화학적 재활용의 원료 생산에 필요한 '분류 → 과립화 과정'의 효율성을 높이고 재활용 공정 수율을 높이는 기술 혁신이 필요하다.

한편, 플라스틱이 재활용되지 않는 경우 발생된 플라스틱 폐기물은 주로 매립 또는 소각 방식으로 처리되게 되며, 플라스틱 폐기물의 처리방식(매립 vs 소각 vs 물질 재활용) 간의 환경영향을 비교한 결과 환경영향의 종류에 따라 제품 시스템 적용에 의한 편익이 발생하기도 하였다.

본 분석 결과는 현재 재활용 기술을 이용하는 경우 (1) 화학적 재활용 결과물이 비교 시스템에 포함된 상용화된 물질의 품질보다 낮고, (2) 재활용 결과물의 경제적인 가치가 고려되지 않았으며, (3) 화학적 재활용 공정에 들어가는 원료 및 보조물질 정보가 제한적이고 후처리 공정(결과물의 분리·정제 등)이 반영되지 않았다는 점, (4) 모든 화학적 재활용 공정 이전에 동일한 전통적인 방식의 물리적 재활용 공정(분류 후 과립화)을 일괄 적용하였다는 점을 결과 해석 시에 유의해야 한다.

81) ILCD Midpoint ver 1.11 방법론을 사용하여 기후변화를 포함한 총 16개 영향범주에 대하여 분석

이와 같이 전과정평가 방법은 제한된 가용 데이터를 이용하였다는 한계가 있었음에도 순환경제 환경영향을 평가하는 틀로서 활용될 수 있음을 확인하였다.

제2장 제2절에서 도출한 순환경제 전환동력 관련 지표 중 취약영역에 해당하는 PM_{2.5}, 온실가스배출량, 자원해외의존도와 밀접하게 연결되어있는 환경영향을 분석한 결과를 아래에 요약하였다.

가. 온실가스 배출영향

폐플라스틱 분리·선별에서부터 상용 화학제품 생산공정 시스템 전체에서 발생하는 온실가스 배출량을 동일 상용 화학제품을 같은 양 생산하는 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출량과 비교한 결과 가스화, 열분해(PS 단량체 생산), 용해, 가용매분해 공정을 사용하는 경우 상용공정을 적용하는 경우에 비해 온실가스 감축 효과를 기대할 수 있었다. 한편, 화학적 재활용 공정만의 기후변화 영향을 확인하기 위하여 폐플라스틱 전처리(선별·분리, 과립화 등)에서 오는 환경영향을 제외하는 경우 공정수율(27.4%)이 매우 낮은 열분해(PE 또는 PP 단량체 생산)를 제외한 모든 플라스틱 재활용 공정에서 온실가스 배출량 저감 효과를 볼 수 있었다. 더 나아가 플라스틱 재활용을 통하여 소각처리를 회피하는 효과를 반영하는 경우 모든 재활용 공정에서 온실가스 배출 감축 효과(소각처리 대비 45%~75%)를 기대할 수 있었다.

나. 천연자원 고갈영향

플라스틱 재활용 전 과정은 분리·선별 및 화학적 생산공정으로 여러 단계를 거치면서 폐플라스틱을 포함한 원료와 에너지 투입이 신규물질 생성 공정에 비하여 전반적으로 천연자원 고갈 영향을 높이는 것으로 나타났다. 그러나 폐플라스틱 전처리(선별·분리, 과립화 등)에서 오는 환경영향을 제외한 경우 기계적 재활용 방법을 제외한 모든 화학적 재활용 공정으로 인한 천연자원 고갈 영향은 기존 상용 공정 적용시 발생하는 환경영향의 0.02%~18%에 불과한 수준인 것으로 나타났다. 천연자원 고갈 영향 또한 온실가스 배출 영향에서도 나타난 바와 같이 공정수율이 낮은 열분해를 통한 PE, PP 단량체 생산 공정에서 상대적으로 환경 편익이 낮아 플라스틱 재활용을 통한 환경 편익 극대화를 위해서 수율 및 공정효율 개선에 필요한 기술 개발이 요구된다.

다. 대기오염 영향

플라스틱 재활용 공정 전과정에서 발생하는 미세먼지 양이 보여주는 패턴은 온실가스 배출량에서 보여주었던 것과 유사하게 나타났다. 가스화, 열분해(PS 단량체 생산), 용해 공정을 사용하는 경우 상용공정을 적용하는 경우에 비해 미세먼지 발생량 감축 효과를 기대할 수 있었다. 한편, 폐플라스틱 전처리(선별·분리, 과립화 등)에서 오는 환경영향을 제외하는 경우 플라스틱 재활용 공정으로 인한 미세먼지 발생 영향은 기존 상용 공정 적용시 발생하는 환경영향의 0.08%~48%에 불과한 수준인 것으로 나타났다. 플온실가스 배출영향과 천연자원 고갈영향과 마찬가지로 공정수율이 낮은 플라스틱 재활용 공정의 미세먼지 발생 영향을 최소화하기 위해서는 수율 및 공정효율 개선을 위한 기술 개발이 요구된다.

제3절

취약영역 및 기회영역

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 취약영역

- **재생원료 생산 수율:** 『K-순환경제 이행계획』의 2050년 플라스틱 순환 이용률 목표치는 95%이며, 이는 선별 및 재활용 단계에 해당한다고 가정⁸²⁾ 하였을 때에, 전처리 공정 수율인 85.5%을 적용하여 실질적으로 재활용되는 양으로 환산하면 81% 수준이다. 현재 기술 수준으로 달성가능한 최대 재생자원량에 해당하는 59%와 2050 목표 수준(81%) 간의 차이(22%)를 메꾸기 위해 순환이용에 방해가 되는 플라스틱 수지를 순환이용에 용이한 물질로 대체하는 기술개발과 화학적 재활용 수율 향상이 필요하다.
- **페플라스틱 전처리(분류 과립화) 효율 및 공정의 친환경성:** 페플라스틱을 화학적 재활용 공정을 통하여 재생원료를 생산하는 경우 발생하는 환경영향에 전처리 공정이 미치는 영향이 절대적이므로 해당 공정의 효율 개선과 함께 친환경적인 전처리 공정을 도입할 필요가 있다. 분류, 파쇄 등의 과정의 효율성 향상을 위하여 제품 디자인 단계부터 환경성을 고려하는 에코디자인 도입이 중요하며, 물질 선별 단계의 효율성 향상을 위한 기술 혁신이 필요하다.
- **페플라스틱 매립 또는 소각 처리 대비 재생원료 생산 과정에서 증가하는 환경영향:** 페플라스틱을 재생원료 생산에 이용하는 것을 일종의 폐기물 처리 방법으로 구분하는 경우, 즉 BAU를 매립 또는 소각 처리로 설정하는 경우, 플라스틱 물질재활용 과정에서 발생하는 환경영향은 매립 또는 소각 방법으로 처리하는 경우에 발생하는 환경영향보다 클 수 있다. 매립 처리 방법과 비교하였을 때 인간 독성과 담수환경 독성 이외의 항목에서 상대적으로 부정적인 영향이 컸으며, 소각 처리 방법과 비교하는 경우 온실가스 배출량 이외의 항목에서 상대적으로 부정적인 영향이 컸

82) 『K-순환경제 이행계획』에 순환이용률 정의 및 기준 미제시

다. 그러나 이는 재생원료 생산으로 회피되는 환경영향을 고려하지 않은 해석으로, 종합적인 환경영향 평가를 위해서는 폐기물처리 시스템을 확장하여 신규물질 생산 시스템을 포함하여 해석할 필요가 있다.

- 탄소국경 조정제도 도입에 따른 플라스틱 원료, 플라스틱 수지 무역 여건 악화: 우리나라는 플라스틱 전과정에서 원료와 플라스틱 수지의 수출 비중이 매우 높고, 첨가물, 중간물질, 중간재, 최종재, 폐기물의 비중은 상대적으로 낮다. 원료, 첨가물, 플라스틱 수지는 탄소국경 조정제도 적용 대상 품목이 88~95%에 달해 해당 제도를 적용하는 국가로의 수출 여건이 악화될 수 있다.

2 기회영역

- 재생원료 생산으로 회피 가능한 환경영향: 폐플라스틱을 재생원료 생산 공정으로 구분하는 경우, 즉 BAU를 상용공정을 통한 화학물질(재생원료와 동일 물질) 생산으로 설정하는 경우, 재생원료 생산 과정에서 환경영향이 발생하는 반면 기존 상용공정에서 발생하는 환경영향을 회피하는 효과도 존재한다. 또한, 폐플라스틱을 재활용함으로써 매립 또는 소각 처리 시에 발생하는 환경영향 또한 회피 가능하다. 이렇게 회피 가능한 환경영향을 고려하여 전과정 평가 결과를 해석하면 대다수의 재생원료 생산 공정은 온실가스 배출, 천연자원 고갈, 대기오염물질 배출 등에서 긍정적인 영향을 주는 것으로 나타났으며, 공정효율이 향상되면 환경편익이 더욱 증가할 수 있을 것으로 기대된다.
- 탄소국경조정제도 도입에 따른 재생 플라스틱 원료 생산 촉진: 탄소국경조정제도 도입에 따른 잠재적인 무역장벽 형성은 반대로 국내에서 순환경제를 통한 재생원료 생산을 촉진하는 방향으로 작용할 수 있다. 유럽연합이 탄소중립과 순환경제 활성화를 위해 플라스틱에 주목하고 있으며, 플라스틱 포장재의 일정 비율 이상을 재생원료를 사용하여 생산하도록 규제하는 등의 정책 동향을 참고할 필요가 있다. 탄소중립과 순환경제 활성화를 동시에 추구하는 규제가 수입품에도 적용될 가능성이 크다는 점에서 순환경제 개념에 기반한 기술개발은 효용성이 더욱 높아질 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 문헌자료
2. 웹사이트

참 고 문 헌

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

1 문헌자료

- 관계부처합동(2011), 『제1차 자원순환 기본계획(2011-2015)』.
- 관계부처합동(2018), 『제1차 자원순환 기본계획(2018-2027)』.
- 고등기술연구원(2015), 『희소금속을 이용한 산업현황 및 재활용 기술 동향』.
- 김도완·이종수·배재근(2020), 「업종별 자원효율성 분석 및 개선방안」, 『환경정책』, 28(1), pp. 23~49.
- 김연재(2021), 「도시광산: 4차 산업혁명 핵심 자원의 공급 안정화」, 『혁신성장품목분석 보고서』, 2021-11, 한국IR협의회.
- 김은아·민보경(2020), 「지역순환경제 전략체계 및 사례연구」, 『국회미래연구원 연구보고서』, 20(06).
- 김희영(2022), 「전기차 배터리 재활용 산업 동향 및 시사점 : 중국 사례 중심으로」, 『Trade Focus』, 2022-11, 한국무역협회 국제무역통상연구원.
- 나덕주(2012), 「사용 후 소형 가전제품에서 희소금속의 회수」, 『첨단기술정보분석』, 고경력과학기술인(ReSEAT).
- 녹색기술센터(2020), 『2020 기후기술 수준조사』, 녹색기술센터.
- 박성호(2021), 「철강산업 부산물의 재활용 확대를 위한 기술개발의 필요성」, 『한국건설 순환자원학회지』, 16(2), pp. 46~49.
- 산업연구원(2020), 「녹색산업 현황 조사 및 활성화 방안 연구」, 『산업연구원 최종보고서』.
- 삼일PwC경영연구원(2022), 「순환경제로의 전환과 대응전략」, 『Insight Research』.
- 성봉근·이순자(2020), 「유럽의 CCS 및 CCU 법정정책적 변화와 탄소배출거래제의 관련성에 대한 연구」, 『유럽헌법연구』, 34, pp. 37~71.

- 신상철·박효준·한인성(2015), 「자원순환경제로의 이행을 위한 정책평가 방법론 개선-폐기물산업연관표 구축 및 활용을 중심으로」, 『사업보고서』, 2015, 한국환경·정책평가연구원, pp. 3042~3117.
- 여영준·조해인·정훈(2022), 「환경산업연관분석을 활용한 탄소국경조정 메커니즘 도입에 따른 국내 산업계 영향 분석과 대응전략」, 『자원·환경경제연구』, 31(3), pp. 419~449.
- 여준석·김태영(2022), 「CCU(이산화탄소 활용)」, 『KISTEP 기술동향 브리프』, 26, 한국과학기술기획평가원.
- 유재국·류경주(2021), 「탄소중립 이행을 위한 금속자원 확보 과제」, 『이슈와 논점』, 1912, 국회입법조사처.
- 이소라 외(2019), 「순환경제로의 전환을 위한 플라스틱 관리전략 연구」, 『한국환경연구원 연구보고서』, 한국환경정책평가연구원, p. 42.
- 이소라 외(2020), 『지속가능성 확보를 위한 자원순환 성능 및 처리기반 적정성 평가 연구』, 한국환경정책평가연구원.
- 이종수·김도완·배재근(2019), 「폐 전기, 전자제품 유래 금속 자원 관리를 위한 통계기반 구축 제언 연구」, 『환경정책』, 27(4), pp. 241~269.
- 이종영(2019), 「재제조제품 품질인증제도의 자원순환사회적 문제」, 『환경법연구』, 41(2), pp. 173~310.
- 이흥권 외(2017) 「2016년도 Creative KISTEP Fellowship Program 운영 및 정책 이슈발굴 연구」, 『KISTEP 연구보고』, 한국과학기술기획평가원, p. 181.
- 임진홍·장용철(2021), 「순환경제를 위한 PET병 물질흐름분석과 재활용에 따른 온실가스 감축량 산정 연구」, 『한국폐기물자원순환학회지』, 38(4), pp. 294~302.
- 장용철·손민희·박주영(2022), 「한국의 2017-2019 년 플라스틱 물질흐름분석」, 『한국폐기물자원순환학회지』, 39(3), pp. 194~206.
- 조영주·조봉규(2020), 「폐플라스틱 리사이클링의 현주소 및 향후 방향」, 『자원리사이클링』, 29(4), pp. 31~44.
- 조지혜 외(2020), 『순환경제 이행 진단을 위한 통합 평가 지표 개발 및 활용 방안 구축』, 한국환경연구원.

- 조지혜 외(2021), 『탄소 중립 이행을 위한 순환경제 정책 로드맵 연구』, 한국환경연구원.
- 조지혜·김영희·신동원(2022), 「폐플라스틱 열분해 활성화를 위한 정책과제」, 『KEI 포커스』, 10(6), 한국환경연구원.
- 지민규 외(2016), 『미세조류 바이오메스의 자원화 활용에 대한 연구』, 『한국환경연구원 Working Paper』, 한국환경정책평가연구원, p. 26.
- 지승민 외(2021), 「물질흐름분석 기반 자원생산성과 자원순환성 평가 연구」, 『한국폐기물자원순환학회지』, 38(2), pp. 153~164.
- 한국과학기술기획평가원(2019), 『제2차 과학기술기반 국민생활(사회)문제해결 종합계획의 추진과제 이행 및 사회문제해결 기반 고도화 연구』.
- 한국에너지공단(2021), 『2021 산업부문 에너지 사용 및 온실가스 배출량 조사』.
- 한국에너지기술연구원·한국에너지기술평가원(2020), 『에너지산업 생태계 조사 및 기술수준 조사 분석 (CO2 분야)』.
- 한국에너지기술연구원(2021), 『CCUS 심층 투자 보고서: 탄소중립 구현을 위한 CCUS 기술 개발 여정』.
- 환경부(2011), 『자원순환 산업 분류체계 구축 및 산업통계조사 방안 마련 연구』, 환경부.
- Agrawal, V. et al.(2021), “Leasing, Modularity, and the Circular Economy”, *Management Science*, 67(11), pp. 6782-6802.
- Agyemang, M. et al.(2019), “Drivers and barriers to circular economy implementation An explorative study in Pakistan's automobile industry”, *Management Decision*, 57(4), pp. 971-994.
- Alizadeh-Basban, N. and Taleizadeh, A. A.(2020), “A hybrid circular economy - Game theoretical approach in a dual-channel green supply chain considering sale's effort, delivery time, and hybrid remanufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, p. 250.
- Arrigo, E.(2021), “Collaborative consumption in the fashion industry: A systematic literature review and conceptual framework.”, *Journal of Cleaner Production*, p. 325.

- Bakirlioglu, Y. and M. McMahon(2021), “Co-learning for sustainable design: The case of a circular design collaborative project in Ireland.”, *Journal of Cleaner Production*, p. 279.
- Beylot, A., & Villeneuve, J.(2017), “Accounting for the environmental impacts of sulfidic tailings storage in the Life Cycle Assessment of copper production: A case study”, *Journal of Cleaner Production*, 153, pp. 139-145.
- Bocken, Nancy. et al.(2021), *Circularity as the new normal: Future fitting Swiss business strategies*, WWF.
- Bosman, R. et al.(2018), “Carbon Lock-Out: Leading the Fossil Port of Rotterdam into Transition.”, *Sustainability*, 10(7).
- Bundgaard, A. M. et al.(2017), “From energy efficiency towards resource efficiency within the Ecodesign Directive”, *Journal of Cleaner Production*, 144, pp. 358-374.
- Camacho-Otero, J. et al.(2018), “Consumption in the Circular Economy: A Literature Review”, *Sustainability*, 10(8).
- Circle Economy(2020), *Measuring Circularity - Technical Methodology Document*, (January 2020).
- Crutzen, Paul.(2002), “Geology of Mankind”, *Nature*, 415, p. 23.
- De Wilt et al.(2020), *The Circularity Gap Report NL 2020*, Circle Economy.
- Dev, N. K. et al.(2020), “Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance”, *Resources Conservation and Recycling*, 153.
- Di Foggia, G. and M. Beccarello(2021), “Market Structure of Urban Waste Treatment and Disposal: Empirical Evidence from the Italian Industry”, *Sustainability*, 13(13).
- Donati, F. et al.(2020), “Modeling the circular economy in environmentally extended input-output tables: Methods, software and case study”, *Conservation and Recycling*, 152, 104508.

- European Commission(2003), *Communication from the commission to the council and the European parliament-integrated product policy- building on life-cycle thinking*.
- European Commission Joint Research Centre(2010), *Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*, First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.
- European Commission(2020), *Circular Economy Action Plan*.
- Eurostat(2018), *Economy-wide material flow accounts handbook*, Luxembourg, Publication Office of the European Union.
- Fassio, F. and B. Minotti(2019), “Circular Economy for Food Policy: The Case of the RePoPP Project in The City of Turin (Italy)”, *Sustainability*, 11(21).
- Feng, Y. T. et al.(2016), “A combined input-output/decision making trial and evaluation laboratory method for evaluating effect of the remanufacturing sector development”, *Journal of Cleaner Production*, 114, pp. 103-113.
- Gavrila, S. G. and A. D. Ancillo(2021), “Spanish SMEs' digitalization enablers: E-Receipt applications to the offline retail market”, *Technological Forecasting and Social Change*, 162.
- Geyer, R. et al.(2017), “Production, use, and fate of all plastics ever made”, *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Gosselin, A. et al.(2021), “Main Features of the Timber Structure Building Industry Business Models”, *Buildings*, 11(4).
- Gyde, C. and L. S. McNeill(2021), “Fashion Rental: Smart Business or Ethical Folly?”, *Sustainability*, 13(16).
- Kronen, M. et al.(2010), “Socio-economic drivers and indicators for artisanal coastal fisheries in Pacific island countries and territories and their use for fisheries management strategies”, *Marine Policy*, 34(6), pp. 1135-1143.
- Li, G. et al.(2021), “Contracting green product supply chains considering

- marketing efforts in the circular economy era.”, *International Journal of Production Economics*, 234.
- Material Economics(2018), *The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation*.
- Notteboom, T. et al.(2020), “The Role of Seaports in Green Supply Chain Management: Initiatives, Attitudes, and Perspectives in Rotterdam, Antwerp, North Sea Port, and Zeebrugge”, *Sustainability*, 12(4).
- OECD(2019), “Waste Management and the Circular Economy in Selected OECD Countries: evidence from environmental performance reviews”, *OECD Environmental Performance Reviews*, OECD Publishing, Paris.
- PWC, WWF(2021) *Circularity as the new normal, future fitting Swiss businesses*, https://www.wwf.ch/sites/default/files/doc-2021-01/Circularity-as-the-new-normal_whitepaper-EN.pdf
- Rahman, S. M. M. et al.(2019), “Value Retention Options in Circular Economy: Issues and Challenges of LED Lamp Preprocessing”, *Sustainability*, 11(17).
- Ranta, V. et al.(2020), “How B2B suppliers articulate customer value propositions in the circular economy: Four innovation-driven value creation logics”, *Industrial Marketing Management*, 87, pp. 291-305.
- Reinhardt, R. et al.(2019), “Towards sustainable business models for electric vehicle battery second use: A critical review”, *Journal of Environmental Management*, 245, pp. 432-446.
- Reinhardt, R. et al.(2020), “Sustainable business model archetypes for the electric vehicle battery second use industry: Towards a conceptual framework”, *Journal of Cleaner Production*, 254.
- Salim, H. K. et al.(2021), “Dynamic modelling of Australian rooftop solar photovoltaic product stewardship transition”, *Waste Management*, 127, pp. 18-29.
- Schwarz, A. E. et al.(2021), “Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach”, *Waste Management*, 121, pp. 331-342.

- Shekarian, E. et al.(2021), “Dual-channel remanufacturing closed-loop supply chains under carbon footprint and collection competition”, *Sustainable Production and Consumption*, 28, pp. 1050-1075.
- Shogren, R. et al.(2019), “Plant-based materials and transitioning to a circular economy”, *Sustainable Production and Consumption*, 19: pp. 194-215.
- Shooshtarian, S. et al.(2021), “An investigation into challenges and opportunities in the Australian construction and demolition waste management system”, *Engineering Construction and Architectural Management*.
- Sun, S. H. (2021), “How Does the Collaborative Economy Advance Better Product Lifetimes? A Case Study of Free-Floating Bike Sharing”, *Sustainability*, 13(3).
- Van Stijn, A. et al.(2021), “A circular economy life cycle assessment (CE-LCA) model for building components”, *Resources, Conservation and Recycling*, 174, (2021): 105683.
- Wang, P. et al.(2017), “Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China”, *Resources Conservation and Recycling*, 117, pp. 45-57.
- Wiebe, K. S. et al.(2019), “Global circular economy scenario in a multiregional input-output framework”, *Environmental science & technology*, 53(11), pp. 6362-6373.
- Wijkman, A., and Skånberg, K.(2015), *The circular economy and benefits for society*, Club of Rome.
- Yi, S. L. and C. F. Wu(2021), “Green-Extension Design-A New Strategy to Reduce the Environmental Pressure from the Existing Consumer Electronics”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18).
- Yu, D. J. and Y. T. Chen(2021), “Dynamic structure and knowledge diffusion trajectory research in green supply chain”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(3),pp. 4979-4991.
- Zhu, X. D. et al.(2019), “Warranty Period Decision and Coordination in Closed-Loop Supply Chains Considering Remanufacturing and Consumer Behavior”, *Sustainability*, 11(15).

2 웹사이트

- 산업종합저널(2021. 9. 27.), 「폐기물을 활용한 대체물질...자원순환 실현과 수입의존도 낮춰」, (접속일:2022.10.1.) , (<http://industryjournal.co.kr/news/224258>)
- 산업통상자원부(2021. 6. 4.), 「탄소중립 실현을 위한 '재제조' 사업화 지원 본격 추진」, (접속일: 2022.10.2.), (http://www.motie.go.kr/motie/gov3.0/gov_openinfo/sajun/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=164180&bbs_cd_n=81)
- 일본환경성(2021.1.20.), 「순환 경제 파트너십」의 시작에 관한 합의에 대해서 (「循環經濟パートナーシップ」の立ち上げに関する合意について) , (<https://www.keidanren.or.jp/policy/2021/008.html>)
- 한경(2021. 9. 27.), 「삼성전자 반도체 폐수, 현대제철 철강 만들때 쓰는 광물로 '재탄생」, (접속일: 2022.10.1.), (<https://www.hankyung.com/economy/article/202109277541g>)
- Eurostat(2022), “Circular material use rate”, Accessed at https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm030/default/table?lang=en
- IEA.(2022a), “Oil Market Report - June 2022”, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/oil-market-report-june-2022>.
- IEA.(2022b), “Coal Market Update - July 2022”, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/coal-market-update-july-2022>.
- ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO 140404:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- UN, “The Global E-waste Monitor 2020”, (접속일: 2022.10.1.), https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf

Abstract

Long-term Scenario and Future Impact of Circular Economy Industry

NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE

This study analyzed the impact of the circular economy on Korean industry, and the analysis was largely divided into two parts. The first segment entailed identifying six key industries that are projected to experience significant social, economic, and environmental ramifications as a result of transitioning to a circular economy. A scenario framework was then developed, comprising a set of high-priority strategies, in order to construct a 2050 circular economy strategy scenario. Based on this scenario framework, the impacts of transitioning the aforementioned six key industries to a circular economy on the overall Korean industrial sector were analyzed. In the second part, an examination of domestic and foreign policy as well as technology pertaining to the plastic circular economy, which has been widely acknowledged as a pressing area of intervention, was conducted. The status of Korea's plastic circular economy was diagnosed based on the comparative policy and technology analysis, as well as a material flow analysis throughout the entire life cycle of plastics. Additionally, a comparative life cycle assessment was performed to analyze the environmental impacts of plastic recycling utilizing the currently available technologies with respect to two business-as-usual scenarios. Overall, the transition to a circular economy in key industries is expected to bring about economic and environmental benefits in the mid-to-long-term, however, technological innovation is still required to fully capitalize on these benefits.

부록

[부록 1] 산업계 순환경제 전략 우선순위 설문조사지

[부록 2] 산업연관표 내 산업분류 세부 정보

[부록 3] 플라스틱 물질 전과정 국제 순환 상세 데이터

부록 1 산업계 순환경제 전략 우선순위 설문조사지

[설문조사 개요]

- 우리나라 기업※이 생산을 순환경제 방식으로 전환함에 있어서 아래의 판단기준을 적용할 때에 미래(현재부터 2050년까지)에 중요한 전략 우선순위를 도출

※ 본 연구에서는 자원순환성, 자원 해외의존도, 온실가스 배출량 등을 고려하여 6개 산업⁸³⁾(코크스 및 석유정제품 제조업, 화학물질 및 화학제품 제조업, 1차금속 제조업, 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업, 전기장비 제조업, 운송장비 제조업)을 순환경제 전환 필요성이 큰 산업으로 선정하였고, 이들의 총 시장점유율은 2015년 31.1%를 차지함

▷ 전략 우선순위 판단기준: 물질순환성 향상, 자원 해외의존도 저감, 온실가스 배출 저감, 환경오염도 저감, 경제성장, 일자리 창출, 수출 경쟁력 강화, 국가 전략기술 확보, 실행/구현 가능성

- 여기서 산업계 순환경제 전략은 관련 학술 문헌 30건으로부터 아래와 같이 정리함

산업계 순환경제 전략	설명
상품의 서비스화	제품 판매 대신 렌탈 및 유지·보수 서비스 제공 & 사용료 부과, 소비자 맞춤형 설계 및 제품 컨설팅 서비스 제공 등
상품 전주기 과정의 디지털화	제품 생산공정 최적화, 디지털 제품 여권(부품, 원산지, 재활용 방법, 수명 등 정보 포함) 발급, 재활용 자원 데이터 수집·제공 등
상품 재제조	사용 중이거나 폐기된 제품의 분해→가공→재조립을 통하여 새 제품 생산
재생원료 사용	자연 자원 채취가 아닌 폐기물의 재활용을 통하여 생산된 원료를 제품 생산에 투입
에코디자인 적용	제품 전 주기에서 발생할 수 있는 환경 피해를 줄이는 환경친화 디자인 (예: 제품·부품의 분해·수리 용이성 강화, 내구성 강화, 소재 단순화 등)
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	재생원료 및 부품 등을 필요로 하는 생산자에게 안정적으로 물질 공급(수요-공급처 간의 교류 등)
순환경제 정책 강화	생산자책임재활용제도(EPR), 재생원료 사용 목표 부과, 자원효율 등급제 도입, 일회용품 사용 금지, 순환경제 활동의 온실가스 감축효과 인정 등
순환경제 기술혁신	재생원료 생산 효율 및 품질 향상, 대량생산, 물질 수거·분리·유통 등에 도움이 되는 기술 개발 등
순환경제 부문 녹색투자 촉진	ESG 확산, 환경정보 공개 확대, 녹색분류체계 및 녹색금융 가이드라인에 순환경제 개념 반영 등
소비자 인식 향상	녹색구매 유인, 소비자 정보 제공 확대, 에코 라벨링, 재사용 및 재활용 제품 사용 관련 주민의식 증진 교육·캠페인 등

83) 해당 산업에 포함된 세부산업은 [참고-1] 표 참조

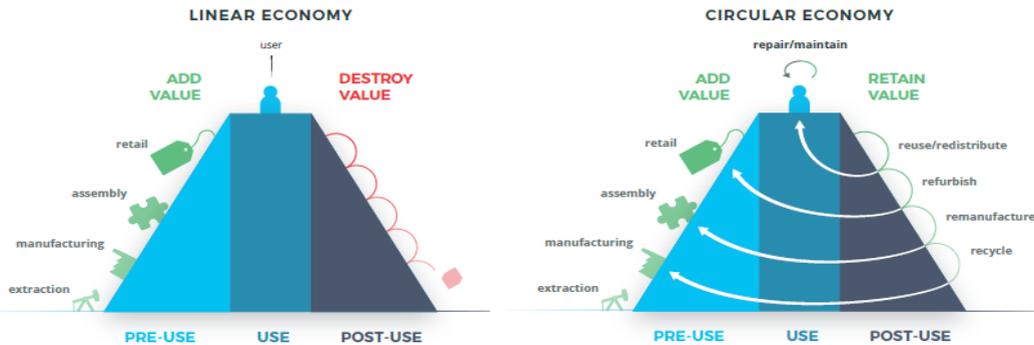
[참고-1] 2015 기준년 산업분류

대분류	대분류 구성 세부 산업(기본부문)	
코크스 및 석유정제품 제조업	코크스 및 연탄 제조업 원유 정제 처리업	윤활유 및 기타 석유정제품 제조업
화학물질 및 화학제품 제조업	석유화학계 기초화학물질 제조업	세제 및 광택제 제조업
	기타 기초유기화학물질 제조업	접착제 및 젤라틴 제조업
	산업용 가스 제조업	기타 화학제품 제조업
	무기안료, 염료, 유연제 및 기타 착색제 제조업	의료용 물질 및 의약품 제조업
	기타 기초 무기화학물질 제조업	고무 타이어 및 튜브 제조업
	비료 및 질소화합물 제조업	산업용 고무제품 제조업
	합성고무 제조업	기타 고무제품 제조업
	합성수지 및 기타 플라스틱 물질 제조업	플라스틱 1차제품 제조업
	화학섬유 제조업	포장용 프라스틱제품 제조업
	농약 및 살균·살충제 제조업	조립용 프라스틱제품 제조업
1차금속 제조업	잉크, 페인트, 코팅제 및 유사제품 제조업	건축용 프라스틱제품 제조업
	화장품 제조업	기타 프라스틱제품 제조업
	제철 및 제강업	알루미늄 제련, 정련 및 합금 제조업
	합금철 및 기타 제철 및 제강업	연 및 아연 제련, 정련 및 합금 제조업
	열간 압연 및 압출제품 제조업	기타 비철금속 제련, 정련 및 합금 제조업
	냉간 압연 및 압출제품 제조업	동 압연, 압출 및 연신제품 제조업
	철강선 제조업	알루미늄 압연, 압출 및 연신제품 제조업
	철강관 제조업	기타 비철금속 압연, 압출 및 연신제품 제조업
	표면처리강재 제조업	기타 비철금속 1차제품 제조업
	기타 철강 1차제품 제조업	금속 주조업
컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업	동 제련, 정련 및 합금 제조업	
	전자집적회로 제조업	유선 통신장비 제조업
	다이오드, 트랜지스터 및 유사반도체소자 제조업	이동전화기 제조업
	액정 표시장치 제조업	방송장비 및 기타 무선 통신장비 제조업
	기타 전자표시장치 제조업	텔레비전 제조업
	인쇄회로기판 및 전자부품 실장기판 제조업	비디오 및 기타 영상기기 제조업
	축전기, 저항기, 전자코일 및 변성기 제조업	오디오, 스피커 및 기타 음향기기 제조업
	기타 전자부품 제조업	의료용 기기 제조업
전기장비 제조업	컴퓨터 제조업	측정, 시험, 항해, 제어기기 제조업
	기억장치 제조업	사진장비 및 광학기기 제조업
	기타 컴퓨터 주변기기 제조업	기타 정밀기기 제조업
	전동기 및 발전기 제조업	절연선 및 케이블 제조업
	전기 변환장치 제조업	가정용 기기 제조업
운송장비 제조업	전기 공급 및 제어장치 제조업	전구 및 조명장치 제조업
	일차전지 및 축전지 제조업	기타 전기장비 제조업
	승용차 및 기타 여객용 자동차 제조업	강선 건조업
	화물자동차 및 특수 목적용 자동차 제조업	기타 선박 건조업
	자동차용 엔진 제조업	선박 구성 부품품 제조업
	차체 및 특장차 제조업	철도장비 제조업
	트레일러 및 세미트레일러 제조업	항공기, 우주선 및 부품 제조업
자동차 부품 제조업	기타 운송장비 제조업	

출처: 한국은행 2015년 산업연관표

[참고-2] 순환경제란?

기존의 자원채굴→생산·조립→유통·소비→폐기로 이어지는 선형적 경제모델과 대비되는 개념으로, **원료 투입량과 폐기물, 배출 오염물, 에너지 손실을 최소화**할 수 있도록 물질과 에너지가 순환하는 시스템⁸⁴⁾



〈그림1. 선형경제와 순환경제의 비교⁸⁵⁾〉

- EU의 지속가능한 제품 정책과 순환경제 정책은 유기적으로 얽혀있으며, 상품 내구성 향상, 상품의 서비스화, 상품정보의 디지털화 등을 포함한 폭넓은 활동을 순환경제 전략으로 보고 있습니다.
- 2021년 12월에 발표된 한국형 순환경제 이행계획은 생산·유통·소비·재활용 전 과정에서 순환성 강화를 위한 전략을 포함하고 있으며, 제품 전 과정의 순환성 향상 활동은 아래와 같이 정리할 수 있습니다.



84) Geissdoerfer, Martin, et al. (2017) "The Circular Economy? A new sustainability paradigm?." Journal of clean production 143 : 757-768.

85) Circular jobs in Belgium, CIRCLE ECONOMY, King Baudouin Foundation

86) 출처: 탄소중립을 위한 한국형 K-순환경제 이행계획

응답자 기초정보 (가장 가까운 항목을 체크하시거나 직접 작성해주시길 부탁드립니다.)

재직기관 구분	① 대학 ② 연구소 ③ 정부부처 ④ 산업체 ⑤ 기타
순환경제 관련 경력 기간	① 1년 이하 ② 1~5년 ③ 5년~10년 ④ 10년~20년 ⑤ 20년 이상
전문분야(중복 선택 가능)	① 환경정책 ② 경제 ③ 기술 R&D(정책 포함)
전문분야 경력기간	① 1년 이하 ② 1~5년 ③ 5년~10년 ④ 10년~20년 ⑤ 20년 이상
성별	① 남 ② 여

1부 순환경제 전반에 관한 질문

Q1. 순환경제는 여러 요소를 포함할 수 있습니다. 아래 요소는 ‘순환경제 활동’에 얼마나 부합하나요?

순환경제 요소	①전혀 부합하지 않음 ←---→ 매우 부합함⑩
폐기물 재활용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
제품 재사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
제품 수리	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
업사이클링	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
일회용품 사용 저감	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
제품 공유	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 내구성 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 구매 대신 대여 서비스 이용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
생분해 소재 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생에너지 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에너지 효율 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩

추가되어야 할 순환경제 요소:

Q2. 산업계 순환경제 전략 우선순위를 결정할 때 어떤 기준이 중요한가요?

전략 우선순위 판단 기준	①전혀 중요하지 않음 ←-----→ 매우 중요함⑩
물질순환성 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
자원 해외 의존도 저감	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
온실가스 배출 저감	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
환경오염도 저감	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
경제성장	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
일자리 창출	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수출 경쟁력 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
국가 전략기술 확보	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
실행/구현 가능성	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 기준:	

Q3. 우리나라 산업계가 순환경제 방식으로 생산활동을 전환하는 경우 어떤 환경·경제·사회적 효과를 기대할 수 있을지 중요한 것을 중심으로 간략하게 작성해주시요.

II부 산업계 순환경제 전략 효과에 관한 질문

Q1. 본 연구에서 순환경제 전환 필요성이 크다고 본 6개 산업의 순환성 향상에 가장 도움이 될 수 있는 산업계 전략 3개를 아래 ① ~ ⑩ 중에서 선택해주세요

산업계 순환경제 전략

- ① 상품의 서비스화 ② 상품 전주기 과정의 디지털화 ③ 상품 재제조 ④ 재생원료 사용
 ⑤ 에코디자인 적용 ⑥ 수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화 ⑦ 순환경제 정책 강화
 ⑧ 순환경제 기술혁신 ⑨ 순환경제 부문 녹색투자 촉진 ⑩ 소비자 인식 향상

산업 구분	순환성 향상에 가장 도움이 될 산업계 전략		
코크스 및 석유정제품 제조업	1순위:	2순위:	3순위:
화학물질 및 화학제품 제조업	1순위:	2순위:	3순위:
1차금속 제조업	1순위:	2순위:	3순위:
컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업	1순위:	2순위:	3순위:
전기장비 제조업	1순위:	2순위:	3순위:
운송장비 제조업	1순위:	2순위:	3순위:

Q2 ~ Q10은 위의 '6개 산업 총합'을 대상으로 판단을 해주시기 바랍니다.

Q2. 물질 순환성 향상에 아래 전략이 얼마나 효과적일까요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩

추가되어야 할 전략 작성

Q3. 자원 해외의존도 저감에 아래 전략이 얼마나 효과적인가요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 전략 작성	

Q4. 온실가스 배출 저감에 아래 전략이 얼마나 효과적인가요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 전략 작성	

Q5. 환경오염도 저감에 아래 전략이 얼마나 효과적인가요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 전략 작성	

Q6. 경제성장에 아래 전략이 얼마나 효과적인가요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 전략 작성	

Q7. 일자리 창출에 아래 전략이 얼마나 효과적인가요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 전략 작성	

Q8. 수출 경쟁력 강화에 아래 전략이 얼마나 효과적인가요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 전략 작성	

Q9. 국가 전략기술 확보에 아래 전략이 얼마나 효과적인가요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 전략 작성	

Q10. 아래 전략의 실행/구현 가능성은 얼마나 클까요?

산업계 순환경제 전략	①전혀 효과적이지 않음 ←-----→ 매우 효과적임⑩
상품의 서비스화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 전주기 과정의 디지털화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
상품 재제조	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
재생원료 사용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
에코디자인 적용	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
수거/분해/조립/수리/원료 재사용 공급망 안정화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 정책 강화	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 기술혁신	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
순환경제 부문 녹색투자 촉진	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
소비자 인식 향상	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩
추가되어야 할 전략 작성	

Q11. 기타의견을 자유롭게 작성해주세요



부록 2 산업연관표 내 산업분류 세부 정보

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
1	AFF	농림수산	0111 벼
			0112 맥류 및 잡곡
			0113 콩류
			0114 감자류
			0121 채소
			0122 과실
			0191 화훼작물
			0192 약용작물
			0193 잎담배
			0194 천연고무
			0195 종자
			0196 기타식용작물
			0199 기타 비식용작물
			0211 낙농
			0212 축우
			0291 양돈
			0292 가금
			0299 기타축산
			0301 영림
			0302 원목
			0303 식용 임산물
			0309 기타 임산물
			0401 수산어획
			0402 수산양식
0500 농림어업 서비스			
2	MIN	광업	0611 무연탄
			0612 유연탄
			0621 원유
			0622 천연가스(LNG)
			0711 철광석
			0719 기타 비철금속광석
			0721 골재 및 석재
			0722 석회석
			0729 기타 비금속광물
			3
0812 가공육			
0813 육가공품			

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
			0814 낙농품 0821 수산물 가공품 0822 수산동물 저장품 0831 정곡 0832 제분 0841 원당 0842 정제당 0843 전분 및 당류 0851 떡 빵 및 과자류 0852 면류 0871 과실 및 채소 가공품 0872 커피 및 차류 0873 인삼 및 건강보조 식품 0879 기타 식료품 0911 주정 0912 소주 0913 맥주 0919 기타 주류 0920 비알콜음료 및 얼음 1000 담배
4	CLO	섬유/가죽	1111 천연 및 화학섬유사 1119 기타섬유사 1130 섬유표백 및 염색 임가공 1141 직물제품 1142 부직포 및 펠트 1149 기타 섬유제품 1151 봉제 의류 1152 편조의류 1153 가죽의류 1154 모피의류 및 모피제품 1155 의복 관련 장신품 1201 가죽 1202 모피 1203 가방 및 핸드백 1204 신발 1209 기타 가죽제품
5	PPP	목재/종이/ 인쇄	1321 건축용 목제품 1322 목재 용기 및 적재판 1329 기타 목제품

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
			1421 인쇄용지 1429 기타 원지 및 판지 1431 골판지 및 골판지가공품 1432 종이용기 1433 종이문구 및 사무용지 1434 위생용 종이제품 1439 기타 종이제품 1500 인쇄 및 기록매체 복제
6	OIL	코크스 및 석유정제	1611 석탄코크스 및 석탄 관련제품 1612 연탄 1621 나프타 1622 휘발유 1623 제트유 1624 등유 1625 경유 1626 중유 1627 액화석유가스 1628 정제혼합용 원료유
7	CHE	화학물질 및 화학제품	2000 의약품 2101 비료 및 질소화합물 2102 살충제 및 농약 2221 비누 세제 및 치약 2222 화장품
8	NMP	비금속광물	2611 가정용 도자기 2612 산업용 도자기 2613 내화요업제품 2614 건설용 비내화요업제품
9	NFM	철강 및 1차 금속	2721 철근 및 봉강 2722 형강 2723 선재 및 궤조 2724 중후판(두께 3mm 이상) 2725 열연강판 2726 강선 2727 철강관 2730 냉간압연강재 2821 동 1차제품 2822 알루미늄 1차제품 2829 기타 비철금속 1차제품 2900 금속 주물

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
10	MAC	금속제품/ 기계/장비	3021 금속 단조 및 야금제품
			3022 금속압형제품
			3031 금속처리
			3032 금속처리 가공품
			3091 가정용 금속제품
			3092 부착용 금속제품
			3093 공구류
			3094 나사 및 철선 제품
			3095 금속포장용기
			3099 기타 금속제품
			3820 펌프 및 압축기
			3831 밸브
			3832 베어링 기어 및 동력전달장치
			3840 산업용 운반기계
			3911 농업용 기계
			3912 건설 및 광물처리기계
			3920 금속가공용기계
			3930 금형 및 주형
			3941 반도체 제조용 기계
			3942 디스플레이 제조용 기계
11	ECT	컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업	3101 개별소자
			3102 집적회로
			3201 LCD 평판 디스플레이
			3209 기타 전자표시장치
			3310 인쇄회로기판 및 실장기판
			3391 축전기 저항기 전자코일 및 변성기
			3399 기타 전자부품
			3401 컴퓨터
			3402 컴퓨터 기억장치
			3409 컴퓨터 주변기기
			3511 유선통신기기
			3512 이동전화기
			3519 기타 무선통신장비 및 방송장비
			3521 TV
			3522 영상기기
			3523 오디오 및 음향기기
			3611 의료용 기기
3612 측정 및 분석기기			
3613 자동조정 및 제어기기			

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
			3691 사진기 및 영사기 3692 기타광학기기 3693 시계
12	ELM	전기장비	3710 발전기 및 전동기 3721 변압기 3722 전기변환장치 3723 전기회로 개폐 및 접속장치 3724 배전반 및 전기자동 제어반 3730 전지 3740 전선 및 케이블 3791 전구 및 램프 3792 조명장치 3799 기타 전기장비
13	AUT	자동차 및 운송장비 제조업	4012 버스 4013 트럭 4021 특장차 4022 트레일러 및 컨테이너 4031 자동차용 엔진 4032 자동차 부품품 4101 강철제 선박 4102 기타 선박 4103 선박 수리 및 부품품 4210 철도차량 4220 항공기 4291 모터사이클 4299 기타 운수장비
14	OMA	기타 제조업	4311 목재 가구 4312 금속 가구 4319 기타 가구 4391 장난감 및 오락용품 4392 운동 및 경기용품 4393 약기 4394 문구용품 4395 귀금속 및 보석 4396 모형 및 장식용품 4399 기타 제조업 제품 4401 제조임가공서비스
15	ELE	가스 및 수도	4610 도시가스

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
			4700 수도
16	CRM	폐기물 폐자원 관리	1311 제재목 1312 합판 1313 강화 및 재생목재 2620 시멘트 2631 레미콘 2632 콘크리트 제품 3851 공기조절 장치 및 냉장 냉동 장비 3852 공기 및 액체 여과기 3751 가정용 냉장고 및 냉동고 3752 주방용 및 난방용 전기기기 3759 기타가정용전기기기 4011 승용차 4801 하수 폐수 및 분뇨 처리(국공립) 4802 하수 폐수 및 분뇨 처리(산업) 7300 장비 용품 및 지식재산권 임대 8211 자동차 수리서비스 8212 전자통신기기 및 가정용품 수리서비스 1801 합성수지 1802 합성고무 1900 화학섬유 2310 플라스틱 1차제품 2391 건축용 플라스틱제품 2392 포장용 플라스틱제품 2393 운송장비 및 조립용 플라스틱제품 2399 기타 플라스틱제품 2410 타이어 및 튜브 2811 동 제련 정련 및 합금제품 2812 알루미늄 제련 정련 및 합금제품 2813 연 및 아연 제련 정련 및 합금제품 2814 금은괴 2819 기타 비철금속 제련 정련 및 합금제품 4920 자원재활용서비스 3891 사무용기기 3899 기타 일반목적용 기계 3991 음식료품 가공기계 3992 섬유 및 의복가공 기계 3993 산업용 로봇 3994 제지 및 인쇄기계 3995 고무 및 플라스틱 성형기계

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
			3999 기타 특수목적용 기계 4911 폐기물 수집 운반 및 처리(국공립) 4912 폐기물 수집 운반 및 처리(산업) 5131 환경정화시설 5132 통신시설 5133 전력시설 5134 산업플랜트 5190 기타 건설 7410 사업시설 유지관리 및 조경서비스 7291 공학 관련 서비스 7292 과학기술서비스 7299 기타 전문 서비스
17	CEN	폐기물 에너지화	3011 건축용 금속제품 3012 구조물용 금속제품 3013 금속제 탱크 및 압력용기 3014 산업용 보일러 및 증기 발생기 3810 내연기관 및 터빈 4501 수력 4502 화력 4503 원자력 4504 자가발전 4505 신재생에너지 4620 증기 및 온수 공급 3891 사무용기기 3899 기타 일반목적용 기계 3991 음식료품 가공기계 3992 섬유 및 의복가공 기계 3993 산업용 로봇 3994 제지 및 인쇄기계 3995 고무 및 플라스틱 성형기계 3999 기타 특수목적용 기계 4911 폐기물 수집 운반 및 처리(국공립) 4912 폐기물 수집 운반 및 처리(산업) 5131 환경정화시설 5132 통신시설 5133 전력시설 5134 산업플랜트 5190 기타 건설 7410 사업시설 유지관리 및 조경서비스 7291 공학 관련 서비스

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)	
			7292	과학기술서비스
			7299	기타 전문 서비스
18	CMA	재생용 가공원 및 재활용제품 제조	0861	조미료 및 첨가용식품
			0862	유지
			0880	사료
			1121	천연 및 화학 섬유직물
			1122	기타 섬유직물
			1123	편조원단
			1410	펄프
			1631	윤활유 및 그리스
			1639	기타 석유정제제품
			1711	지방족 기초유분
			1712	방향족 기초유분
			1713	석유화학중간제품
			1719	기타 기초유기화합물
			1721	산업용 가스
			1722	기초무기화합물
			1723	염료 안료 및 유연제
			2211	도료
			2212	잉크
			2291	접착제 및 젤라틴
			2292	사진용 화학제품 및 감광재료
			2299	기타 화학제품
			2491	산업용 고무제품
			2499	기타 고무제품
			2501	판유리 및 1차 유리제품
			2502	전자기기용 유리제품
			2503	산업용 유리제품(전자기기용 제외)
			2509	기타 유리제품
			2691	석회 및 석고제품
			2692	석제품
			2693	연마재
			2694	아스콘 및 아스팔트 제품
			2699	기타 비금속광물 제품
			2711	선철
			2712	합금철
			2713	조강
			2791	표면처리강재
			2799	기타 철강1차제품
			4402	산업용 기계 및 장비 수리

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
			5200 도소매 및 상품중개서비스 1801 합성수지 1802 합성고무 1900 화학섬유 2310 플라스틱 1차제품 2391 건축용 플라스틱제품 2392 포장용 플라스틱제품 2393 운송장비 및 조립용 플라스틱제품 2399 기타 플라스틱제품 2410 타이어 및 튜브 2811 동 제련 정련 및 합금제품 2812 알루미늄 제련 정련 및 합금제품 2813 연 및 아연 제련 정련 및 합금제품 2814 금은괴 2819 기타 비철금속 제련 정련 및 합금제품 4920 자원재활용서비스 7291 공학 관련 서비스 7292 과학기술서비스 7299 기타 전문 서비스
19	RND	연구개발	7001 연구개발(국공립) 7002 연구개발(비영리) 7003 연구개발(산업) 7004 기업내 연구개발
20	CON	건설	5010 주거용 건물 5020 비주거용 건물 5030 건축보수 5111 도로시설 5112 철도시설 5113 항만시설 5121 하천사방 5122 상하수도시설 5123 농림수산토목 5124 도시토목
21	TRN	운수	5310 철도운송서비스 5321 도로여객운송서비스 5322 도로화물운송서비스 5401 연안 및 내륙수상운송서비스 5402 외항운송서비스

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
			5500 항공운송서비스 5611 육상운송보조서비스 5612 수상운송보조서비스 5613 항공운송보조서비스 5620 하역서비스 5630 보관 및 창고서비스 5690 기타 운송 관련 서비스
22	SER	서비스	5710 공영우편서비스 5720 소화물전문운송서비스 5811 일반음식점 5812 기타음식점 5813 주점 5814 비알콜음료점 5820 숙박 5911 유선통신서비스 5912 무선 및 위성 통신서비스 5991 통신 재판매 및 중개 서비스 5999 기타 전기통신서비스 6001 지상파 방송서비스 6002 유선 위성 및 기타방송서비스 6100 정보제공서비스 6211 게임소프트웨어 출판 6212 소프트웨어 개발 공급 6290 기타 IT서비스 6300 신문 및 출판 6401 영상 오디오물 제작 배급 6402 영화상영 6510 중앙은행 및 예금취급기관 6591 금융투자기관 6599 기타 금융중개기관 6601 생명보험 6602 연금기금 6603 비생명보험 6700 금융 및 보험 보조 서비스 6800 주거서비스 6911 비주거용 건물 임대 6912 부동산 개발 및 공급 6920 부동산 관련 서비스 7111 법무 및 회계서비스 7112 시장조사 및 경영지원서비스

번호	코드	산업 설명	산업연관표 내 기본분류(381개 기준)
			7120 광고
			7210 건축 토목 관련 서비스
			7420 인력공급 및 알선
			7490 기타 사업지원서비스
			7511 중앙정부
			7512 지방정부
			7520 사회보험(국공립)
			7601 교육서비스(국공립)
			7602 교육서비스(비영리)
			7603 교육서비스(산업)
			7701 의료 및 보건(국공립)
			7702 의료 및 보건(비영리)
			7703 의료 및 보건(산업)
			7801 사회복지서비스(국공립)
			7802 사회복지서비스(비영리)
			7901 문화서비스(국공립)
			7902 연극 음악 및 기타예술
			7903 기타 문화서비스
			7904 여행사 및 여행보조 서비스
			8001 스포츠 서비스
			8002 오락 서비스
			8101 산업 및 전문가 단체
			8109 기타 사회 단체
			8221 미용관련 서비스
			8222 세탁
			8223 가사서비스
			8229 기타 개인 서비스
			8300 기타

부록 3 플라스틱 물질 전과정 국제 순환 상세 데이터

[표 A3-1] 연도별 플라스틱 물질 무역량

(단위: 백만톤)

	플라스틱 수지	중간물질	중간재	최종재	폐기물
2002	113.96	22.19	11.64	37.29	5.35
2003	121.26	23.37	13.25	43.46	5.94
2004	128.19	26.11	13.25	107.63	7.52
2005	139.76	26.9	13.74	47.88	9.3
2006	145.57	28.72	13.16	52.29	10.49
2007	155.21	30.38	13.24	55.06	12.29
2008	147.25	30.35	13.13	55.55	12.25
2009	148.2	26.8	11.65	48.11	12.55
2010	164.66	32.12	16.64	59.71	14.13
2011	171.29	33.36	17.35	62.85	13.62
2012	173.23	32.79	15.44	63.58	13.48
2013	181.84	34.7	16.44	65.61	13
2014	186.62	36.19	15.52	66.67	13.84
2015	192.63	36.35	15.41	66.6	13.77
2016	202.78	35.6	17.13	63.65	13.8
2017	216.12	39.53	18.86	74.5	12.43
2018	229.02	40.48	19.23	78.37	9.16
2019	237.86	41.18	19.29	80.8	8.25
2020	240.92	40.58	24.35	83.46	7.32

자료: BACI, 저자 계산

[표 A3-2] 연도별 플라스틱 물질 무역액(단위: 백만달러, 2015년 기준 실질가치)

	플라스틱 수지	중간물질	중간재	최종재	폐기물
2002	150.11	83.23	55.07	188.21	1.93
2003	177.02	95.32	60.35	215.85	2.57
2004	219.92	108.89	66.81	244.06	3.45
2005	256.83	116.95	66.15	261.17	4.72
2006	282.82	126.78	66.25	282.1	5.6
2007	321.91	141.62	73.67	316.68	6.47
2008	333.44	149.81	73.77	337.52	7.05
2009	256.78	121.87	62.1	286.99	5.98
2010	333.61	146.86	71.46	333.35	7.53
2011	389.44	166.77	84.88	382.94	8.37
2012	367.99	157.03	79.74	380.77	7.85
2013	380.54	161.85	81.04	393.21	7.39
2014	386.49	164.68	86.89	407.33	7.95
2015	329.81	149.37	80.43	377.66	6.37
2016	319.52	146.92	74.15	371.24	5.9
2017	357.97	156.75	74.97	394.57	5.22
2018	390.17	163.86	77.69	414.46	3.37
2019	351.66	157.27	74.33	406.77	3
2020	309.53	147.82	61.21	389.23	2.39

자료: BACI, 저자 계산

순환경제 산업 중장기 시나리오와 미래영향

인 쇄	2022년 12월 26일
발 행	2022년 12월 31일
발 행 인	김현곤
발 행 처	국회미래연구원
주 소	서울시 영등포구 의사당대로 1 국회의원회관 222호
전 화	02)786-2190
팩 스	02)786-3977
홈페이지	www.nafi.re.kr
인 쇄 처	(주)케이에스센세이션 (02-761-0031)

©2022 국회미래연구원

ISBN 979-11-90858-97-7 (93530)

새로운 **희망**을 만드는 국회



국회미래연구원
NATIONAL ASSEMBLY FUTURES INSTITUTE