

포스트 플라스틱 시대를 위한 정책 제언

Policy Recommendations for the Post-Plastics Age



포스트 플라스틱 시대를 위한 정책 제안

Policy Recommendations for the Post-Plastics Age

연구위원장

임승순 한국과학기술한림원 종신회원,
한양대학교 명예교수

연구위원

김상용 과학기술연합대학원 교수

김영하 한국과학기술한림원 종신회원,
한국과학기술연구원 명예연구원

이호경 LG화학 상무

진인주 한국바이오플라스틱협회 회장,
인하대학교 명예교수

황성연 경희대학교 교수

황윤일 CJ제일제당 BIO사업부문 대표

간사

주정찬 가톨릭대학교 교수

요약문

플라스틱은 가볍고 강하며 부식성이 없고 내구성이 우수함. 또한 어떠한 모양으로든지 가공하기 쉬운 장점이 있음. 플라스틱은 금속·세라믹보다 생산·가공하는 데 소요되는 에너지와 비용이 적은 환경친화성 소재임. 또한 비교적 저렴한 비용으로 대량생산이 가능하여 섬유, 각종 일상 생활용품, 포장재는 물론이고 자동차, 전기·전자 용도의 기능성 및 첨단 제품에까지 사용되어 오늘날 인류는 플라스틱 문명시대에 살고 있음.

그러나, 대량생산에 따른 대량소비로 이어져 플라스틱 시대가 시작된 1950년부터 2015년까지 65년간 용도폐기되어 배출된 플라스틱의 양이 무려 약 63억 톤으로 추산되고 있음. 이렇게 적절하게 처리되지 못하고 폐기된 플라스틱은 자연환경에서 분해되지 않아, 버려진 63억 톤 중 재활용(recycle)된 것은 불과 9%밖에 없으며, 12%는 소각 처리, 나머지 79%는 매립 내지 해양을 포함한 자연환경에 버려졌음.

우리나라는 세계 4위의 석유화학공업국으로 플라스틱 소비량은 2021년 약 620만 톤, 플라스틱 폐기물은 230만~390만 톤 정도로 추산되나 보다 정확한 통계가 필요함.

폐플라스틱 중에서도 가장 문제되는 것은 폐플라스틱의 약 반을 차지하는 일회용품, 식품·음료 용기 및 포장재로서 대부분이 일회용 또는 단기간 사용 후 버려지기 때문에 폐플라스틱 양이 증가하여 환경오염을 초래하며 생태계에 큰 영향을 미치고 있음. 모든 일반 플라스틱은 최종적으로 잘게 부서져 미세플라스틱이 되고, 미세플라스틱은 해양오염을 일으켜, 자연생태계뿐 아니라 인간생태계에도 심각한 문제를 야기함.

세계 각국은 이러한 문제를 해결하고자, 2022년 3월 UN환경총회에서 175개국 대표들이 모여 2024년 말까지 법적 구속력이 있는 국제협약을 체결하자는 결의안을 채택하였음.

또한 세계 각국은 온실가스 배출을 감축하고 에너지소비를 최소화함으로써 2050년 탄소중립 제로를 추구하고 있음. 당연히 우리나라도 탄소중립 실현을 목표로 저탄소산업 생태계 조성을 위해 원료와 제품, 그리고 폐기물의 재사용·재활용을 확대하고 에너지소비의 최소화를 목적으로 하는 순환경제를 활성화하는 계획을 수립하여 시행하고 있음. 따라서

플라스틱도 이제까지의 선형경제에서 벗어나 생산·가공·폐기 단계에서 에너지소비와 탄소발생을 최소화하여, 폐플라스틱도 원료로 재활용될 수 있는 순환경제체제로 가야 함.

국제적으로 플라스틱 폐기물의 처리 방법은 3R[감축(Reduce), 재사용(Reuse), 재활용(Recycle)]이 실행되고 있음. 그러나 이와 같은 방법은 플라스틱을 대체할 적합한 소재 등의 대안을 찾기 어렵다는 점과 재사용, 재활용이 가능한 폐플라스틱의 범위가 제한적이라는 한계를 내포하고 있음. 우선 플라스틱 사용을 줄이면 폐플라스틱 양도 줄어들지만, 현실적으로 쉽지 않음. 즉, 플라스틱은 나무·알루미늄·종이 등 천연자원 대비 생산이 경제적이고 가공 및 활용이 편리하여 다양한 용도에 적용되어 왔기 때문에 대체할 소재를 찾기 어려움. 정부가 세운 “플라스틱 폐기물 발생량을 2030년까지 현재의 50%로 감축하겠다”는 목표는 현실적으로 달성하기 어렵다고 생각됨.

플라스틱은 재질의 특성 및 용도에 따라 크게 내구성 제품과 비내구성 제품으로, 사용 후 회수 측면에서 회수 가능한 것과 회수 불가능한 것으로 나눌 수 있음.

내구성 플라스틱은 상대적으로 회수가 쉬우므로 재사용, 재활용을 강화하여 자원순환에 기여하여야 함. 플라스틱 제품의 재사용, 재활용이 가능하려면 경제적 방법으로 회수되어야 하는데, 플라스틱의 다양한 용도와 사용 장소를 고려할 때 회수 가능 영역이 제한적이고 분리배출·수집회수 체제가 명확하지 않아 재사용, 재활용이 어려운 상황임. 우선 국내 플라스틱 폐기물에 대한 정확한 통계와 함께 처리 방법에 따른 폐기물량의 통계치가 있어야 함. 또 재사용, 재활용을 강화하여 실질적인 효과를 위해서는 플라스틱 제품의 생산자에게 재활용 처리 책임을 강화하고, 분리배출·수집회수 체제를 더 확실하게 시행하고, 폐플라스틱을 재질별로 쉽게 선별할 수 있는 방법 및 장치를 현대화하고, 재활용산업을 지원하여 물질재활용 제품의 상품화를 촉진하고 재활용 제품 구매에 인센티브를 부여하여야 함. 또한 물질재활용과 더불어 제품 소재에 따라서 화학적 재활용 및 열적 재활용도 강화하여야 함.

요약문

한편 회수가 가능하다고 하여도 분실이나 파손되는 경우와, 회수가 불가능한 플라스틱 제품, 특히 쇼핑백, 음식물로 오염되어 세척이 어려운 식품포장용 소형용기 등은 물성의 특성상 재사용, 재활용이 거의 불가능함. 회수되지 못하고 토양, 하천, 해양 등으로 유실된 플라스틱은 자연에 지속적으로 남아 미세플라스틱 문제를 야기함. 농업용 필름, 어망, 어구뿐만 아니라 일회용품 용기, 테이블보 등 일회용품의 비내구성 플라스틱(소비재)의 많은 부분이 자발적·비자발적 이유로 회수되지 못함. 따라서 세계 각국은 일회용품 외에도 매립 및 유실 가능성이 큰 용도는 생분해성 플라스틱으로만 생산하도록 하는 법령을 시행하고 있음. 우리나라도 이러한 법령의 도입이 불가피한 시점이 도래하였다고 생각함. 또한 세계적으로 다양한 분해 환경을 반영하는 생분해성 인증제도에 대한 R&D가 진행되고 있어, 국내도 이러한 인증제도 확립에 동참이 절대적으로 필요함.

환경부는 플라스틱 폐기물 문제의 대응으로 종이 봉투·용기를 친환경 소재로 간주하여 일회용 포장재의 규제 대상에서 제외하고 있음. 그러나 종이는 이산화탄소를 흡수하는 소중한 나무를 벌목해야 하고 제조 과정에서 과량의 폐수를 배출하며 표백제, 형광증백제 등의 약품처리로 인해 오히려 더 많은 에너지와 온실가스 배출을 유발한다는 언론 지적에 더해 플라스틱 봉투의 이산화탄소 배출량은 7.52kg/개인데 종이백은 훨씬 더 많은 44.74kg/개가 방출되었다는 논문 결과도 있어 플라스틱보다 환경친화적이지만은 않음.

생분해성 플라스틱은 그 자체로 분리하여 물질재활용이 가능하고, 또한 다른 일반 플라스틱과 섞여도 재활용하는 데 문제가 없음. 또한 생분해성 플라스틱은 물과 이산화탄소로 분해되어 자연계로 순환되어 물질순환이 가능한 소재임. 특히, 탄소저감 특성이 뛰어난 바이오매스 원료를 활용하는 바이오기반 생분해성 플라스틱을 포함하여 기존 3R(Reduce, Reuse, Recycle)에 Bio-Renewable을 추가한 4R시스템으로 정책이 시행되어야 함. 음식물쓰레기, 식품산업용 쓰레기 등 유기물 쓰레기들은 소각이나 매립 대신에 퇴비화하여 온실가스 발생량을 줄이고 비료 및 부생가스 등으로 자원화하여야 하므로, 우리나라의 취약한 퇴비화 및 바이오가스 생산시설을 대대적으로 설치하여야 함. 생분해성 플라스틱도 유기물 쓰레기들과 함께 퇴비화가 가능함.

이산화탄소 저감 및 에너지 절감을 목표로 하는 탄소중립사회를 구현하는 방법의 전제조건으로서 모든 플라스틱 제품의 원료·생산·가공·소비·폐기 전 과정에 이산화탄소 발생량 및 에너지소비량을 산출하는 전과정평가(Life Cycle Assessment)제도를 지원하고 국제적 기준과 연결되는 국내표준의 설립이 필요함.

이러한 정책적 실행과 더불어 플라스틱 폐기물과 관련된 기술 및 장치에 대한 연구개발을 대폭 지원하여야 함. 재활용이 용이한 플라스틱 제품 설계, 여러 가지 플라스틱의 열분해기구, 폐플라스틱의 개선된 물질적·화학적·열적 재활용 방법, 생분해성 플라스틱의 물성 및 가공성 개선, 새로운 생분해성 고분자의 연구개발, 생분해성 플라스틱의 분해 및 퇴비화 기준 등에 관한 연구를 지원하여야 함.

마지막으로 단언컨대, 미래에도 플라스틱은 인간의 일상생활이나 산업적인 측면에서 필수불가결한 재료로서, 플라스틱을 전혀 사용하지 않는 시대는 결코 오지 않을 것임. 따라서 플라스틱 폐기물 관련 처리기술 및 시스템 R&D와 함께 물리·화학·생물의 경계를 넘어선 융합 영역으로 재생가능한(renewable) 재료도 포함하여 지구환경에 부하를 최소화하는 제조 방법을 연구해야 함. 또한 플라스틱은 사용 후 폐기처리를 감안하여, 오랫동안 우리의 생활 속에서 현명하게 이용될 수 있도록 재료의 R&D를 끊임없이 해야 함.

I. 플라스틱문명시대의 향유와 폐단	15
1. 플라스틱산업의 태동과 현황	16
2. 플라스틱 폐기물 문제	22
3. 新 글로벌 플라스틱협약을 위한 UN의 로드맵	26
II. 세계의 순환경제 탄소중립전략	29
1. 전 세계 2050 탄소중립 장기전략 수립 가속화	30
2. 정부의 2050 탄소중립 장기전략 수립	31
3. 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)의 중요성	34
III. 세계 주요 국가의 플라스틱 폐기물에 대한 대책	39
1. 주요 국가의 플라스틱 규제 현황	42
2. 폐플라스틱의 재활용	48
3. 폐플라스틱의 처리 현황	51
4. 대체물질로서 바이오플라스틱과 생분해성 플라스틱의 역할	54

IV. 해외의 바이오플라스틱산업 동향	57
1. 생분해성 플라스틱들의 기술적 특성	58
2. 바이오플라스틱의 세계적 시장 동향	70
V. 국내 생분해성 바이오플라스틱산업 동향	79
VI. 국내 폐플라스틱 관리 및 정책	87
1. 폐플라스틱 발생 및 처리 상황	88
2. 폐기물 및 폐플라스틱 관리 정책	91
3. 플라스틱 폐기물 정책의 타당성	97
VII. 포스트 플라스틱 시대의 환경정책과 과학기술정책 제언	99

표 1.1	고분자 과학기술 발전 및 산업화 연대기	17
표 1.2	범용 플라스틱과 엔지니어링 플라스틱의 분류	19
표 1.3	한국의 플라스틱 생산량	21
표 1.4	플라스틱 규제에 관한 중요 국제협약	27
표 2.1	산업부문 업종별 온실가스 배출 현황	32
표 2.2	주요 부문별 온실가스 감축 수단 및 전망	33
표 3.1	EU의 플라스틱 관련 목표	43
표 3.2	EU의 플라스틱 저감 노력(EU Directive 2019/904)	44
표 3.3	미국 주정부의 플라스틱 규제 사례	45
표 3.4	중국의 플라스틱 규제 현황	46
표 3.5	중국의 '14.5 플라스틱오염 제어 행동계획'	47
표 3.6	플라스틱 재활용 기술별 장단점	48
표 3.7	일본 및 구미의 폐플라스틱 처리 내용	52
표 3.8	한국 및 외국의 플라스틱 폐기물 처리 현황	53
표 3.9	바이오플라스틱, 생분해성 플라스틱, 바이오매스 기반 플라스틱 용어 · 55	
표 3.10	생분해성 플라스틱으로 대체할 수 있는 우선순위	56
표 4.1	각종 바이오매스 기반 플라스틱의 특성과 제조회사	59
표 4.2	Mater-Bi 필름의 물성	60
표 4.3	대표적 지방족 및 방향족 폴리에스터	61
표 4.4	Mitsubishi Chemical Company(MCC)의 PBS 물성	62
표 4.5	DuPont사의 Biomax 이축연신 필름의 강도	63
표 4.6	NatureWorks PLA의 물성	67
표 4.7	LG화학의 새 PLA 공중합체 PLH와 기존 생분해성 플라스틱의 물성 비교	67
표 4.8	국내외 생분해성 플라스틱 주요 생산기업(2022년 9월 기준)	72
표 4.9	소재별 생분해성 바이오플라스틱의 사용량 추이	74
표 4.10	해외 생분해성 바이오플라스틱 용도별 수요(2021년 기준)	76
표 5.1	국내 생분해성 바이오플라스틱 용도별 수요	80
표 5.2	생분해성 환경표지 인증품목 및 인증기업(EL724, 2022.6.30.)	84
표 5.3	국내 생분해성 플라스틱 관련 중소기업	84
표 6.1	생활폐기물의 연도별 성상 변화	89

표 6.2	사업장비(非)배출시설계폐기물의 연도별 성상 변화	89
표 6.3	플라스틱 폐기물의 비중과 발생원	90
표 6.4	폐기물 관련 법률 현황	92
표 6.5	재활용폐기물 관리 종합대책의 부문별 전략 및 세부과제	93
표 6.6	'재활용을 통한 순환경제 완성' 국정과제	95

그림 1.1	고분자의 종류	16
그림 1.2	플라스틱의 종류	18
그림 1.3	플라스틱의 성능과 사용 가능 조건	20
그림 1.4	세계 플라스틱 생산량의 지역별 성장 추이 (OECD Global Plastics Outlook)	20
그림 1.5	세계 용도별 플라스틱 소비량 (OECD Global Plastics Outlook Database)	21
그림 1.6	글로벌 플라스틱의 생산, 소비 및 처리 현황(1950~2015)	22
그림 1.7	2030년 세계 주요 국가의 쓰레기 수입량 및 수출량	23
그림 1.8	해양환경의 미세플라스틱 오염 수준	24
그림 1.9	세계에서 미세플라스틱으로 심하게 오염된 지역	25
그림 1.10	글로벌 플라스틱협약을 위한 UNEA-5 회의 모습	26
그림 2.1	2030년 온실가스 감축목표	31
그림 2.2	산업별 온실가스 배출량 비중	32
그림 2.3	BASF의 Product Carbon Footprint	35
그림 2.4	전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 개념도	36
그림 3.1	플라스틱의 순환경제	41
그림 3.2	플라스틱의 재활용 및 열분해	48
그림 3.3	폐플라스틱의 재활용 공정도	49
그림 3.4	재생 플라스틱의 용도	50
그림 3.5	세계 각국의 폐플라스틱 처리 현황	52
그림 4.1	PLA의 중합화학	65
그림 4.2	젖산 및 lactide의 입체이성체	65
그림 4.3	NatureWorks사의 PLA 제조공정도	66
그림 4.4	미생물 내에 축적된 PHA	68
그림 4.5	PHA계 고분자의 기본적인 화학구조	69
그림 4.6	대량생산 시설을 보유한 PHA의 종류	70
그림 4.7	2021년 글로벌 바이오플라스틱 생산시설 규모	71
그림 4.8	바이오플라스틱의 세계시장 동향	71
그림 4.9	산업 영역별 바이오플라스틱의 사용량 분포도	75
그림 4.10	바이오매스 기반 플라스틱 탄소저감 효과	77

그림 5.1	3HP 응용 소재 및 예상 시장규모	81
그림 5.2	CJ제일제당사의 PLA+PHA 소재의 두부 포장용 필름	82
그림 5.3	바이오플라스틱 전·후방 산업 관련 국내 기업	83
그림 6.1	폐기물관리법 제2조 1호에 따른 폐기물 구분	88
그림 6.2	플라스틱 폐기물 처리 방법별 통계(한국과 일본)	91
그림 7.1	생분해성 플라스틱 로드맵	104

플라스틱의 영문 약자 풀이 및 국문 표기

- **EP**: engineering plastics
- **EPS**: expanded polystyrene, 발포폴리스티렌
- **HDPE**: high density polyethylene, 고밀도폴리에틸렌
- **LDPE**: low density polyethylene, 저밀도폴리에틸렌
- **LLDPE**: linear low density polyethylene, 선형저밀도폴리에틸렌
- **PBAT**: poly(butylene adipate terephthalate)
- **PBS**: poly(butylene succinate)
- **PBT**: poly(butylene terephthalate)
- **PE**: polyethylene, 폴리에틸렌
- **PET**: poly(ethylene terephthalate), 폴리에스터
- **PHA**: polyhydroxyalkanoates
- **PHB**: polyhydroxybutyrates
- **P3HB**: poly(3-hydroxybutyrates)
- **P4HB**: poly(4-hydroxybutyrates)
- **PHBD**: polyhydroxy(butyrate-decylates)
- **PHBH**: polyhydroxy(butyrate-hexylates)
- **PHBO**: polyhydroxy(butyrate-octylates)
- **PHBV**: polyhydroxy(butyrate-valerates)
- **PLA**: poly(lactic acid), polylactide, 폴리젓산
- **PP**: polypropylene, 폴리프로필렌
- **PS**: polystyrene, 폴리스티렌
- **PVC**: poly(vinyl chloride), 폴리염화비닐

포스트 플라스틱 시대를 위한 정책 제언
Policy Recommendations for the Post-Plastics Age

I

플라스틱문명시대의 향유와 폐단

KAST Research Report 2022
한림연구보고서 144

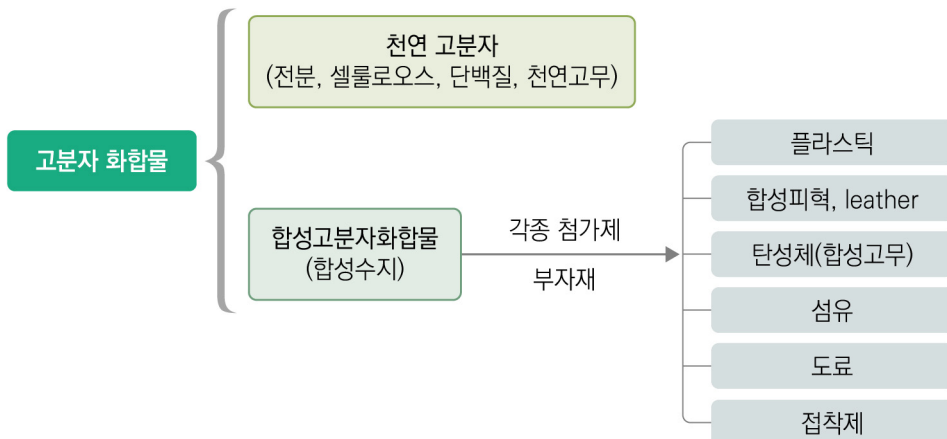
I. 플라스틱문명시대의 항유와 폐단

1. 플라스틱산업의 태동과 현황

■ 고분자란?

- 모든 생명체는 고분자(polymer)로 이루어져 있고 이를 사용하여 생명을 유지함. 동식물의 유전자인 DNA, 단백질과 탄수화물 등 생명유지활동과 관련된 에너지원 대부분이 고분자임.
- 고분자는 수천 개에서 수십만 개의 단량체(monomer)라고 하는 작은 분자들이 화학적 결합반응(중합반응: polymerization reaction)을 통하여 연결된 크기가 매우 큰 거대분자(macromolecule)를 말함. 한편 단량체가 수십·수백 개 연결된 것을 올리고머(oligomer)라 함(van Krevelen, 2009).
- 고분자는 단백질, 셀룰로오스, 천연고무, 실크 등 자연계에서 존재하는 천연고분자와 폴리에틸렌(polyethylene, PE), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리에스터(poly(ethylene terephthalate), PET) 등 인공적으로 만든 합성고분자로 구분할 수 있음.
- 합성고분자 화합물을 합성수지로 부르고 플라스틱과 혼용하여 사용해 왔음. 그러나 오늘날 합성수지는 원료적 의미를, 플라스틱은 제품적 의미를 갖는 용어로 쓰이고 있음.

그림 1.1 고분자의 종류



■ 고분자 과학기술 발전 및 산업화 주요 연대기(Gedde, 1995)

- 인류 역사와 함께한 천연고분자를 화학적 처리나 개질하여 사용한 것은 현재 자동차 타이어에 쓰고 있는 가황고무가 발명된 1839년부터임.
- 이어서 1910년 최초의 열경화성수지인 페놀-포름알데히드수지가 제조됨.
- 1920년 중합(polymerization)이란 단어를 처음 사용한 독일의 H. Staudinger 교수가 긴 사슬 모양의 거대분자(macromolecules) 고분자 개념을 정립함(Staudinger, 1920).
- 1920~1950년대 고분자합성 및 제조기술의 개발로 본격적인 고분자시대가 도래함.
- <표 1.1>에 고분자과학의 발전 및 산업화를 연대기 형태로 정리하였고 더불어 국내 산업화 연대도 같이 표시하였음(임승순, 2019; 최길영, 2019).

표 1.1 고분자 과학기술 발전 및 산업화 연대기

연도	고분자과학과 기술의 발전	한국 고분자 기술 발전
1839	• C. Goodyear: 가황고무 발명	-
1868	• W. Hyatt: 니트로셀룰로오스 합성	-
1882	• 비스코스레이온(Viscose rayon) 섬유 산업화	-
1910	• L. H. Baekeland: 최초 합성수지인 베이클라이트 (페놀-포름알데히드)(Bakelite (phenol-formaldehyde) 수지 발명	-
1914~18	• 천연고무 부족 타개를 위해 독일에서 메틸고무(methyl-rubber) 상업적 생산	-
1920	• H. Staudinger: 거대한 고분자(macromolecule)의 개념 정립	-
1923~24	• 아세트산 셀룰로오스(cellulose acetate) 자동차 래커(lacquer)(1923), 섬유(1924) 산업화	-
1929	• 요소수지(urea-formaldehyde) 발명	-
1930년대	• W. Carothers: 네오프렌(1931), 나일론(1935) 등 합성고분자 시대 창출 • O. Rohm: 폴리메틸메타크릴레이트(1931), 폴리(비닐아세테이트) 발명(1936) • I.G.Farben: 폴리스티렌(PS), ICI(Imperial Chemical Industries), 저밀도폴리에틸렌(LDPE)(1937) 공업화 개발, • Buna S 고무 및 Buna N(스티렌-아크릴로니트릴 공중합체), 나일론-66 섬유 산업화(1938) • 멜라민수지(melamine-formaldehyde) 산업화(1939)	-
1940년대	• R. Whinfield, T. Dickinson: PET 합성(1941)-산업화(1950), 저밀도폴리에틸렌(LDPE)(1941), 불포화폴리에스터(1942), 나일론-6, 테플론, 실리콘, 폴리우레탄(1943), 부틸고무(1943), 에폭시수지(1947) 등 산업화	• 1943년 국제고무 “말표 고무신” • 1946년 락희화학(현 LG화학) 플라스틱 생산 효시, PVC 사출 화장품 용기
1950년대	• PET 섬유·폴리아크릴로니트릴 섬유 산업화(1950) • K. Ziegler: 에틸렌 저압중합용 촉매 개발(1952) • H. Staudinger: 노벨상 수상(1953).	• 1957년 동성화학 폴리우레탄 발포체-독일기술 도입

연도	고분자과학과 기술의 발전	한국 고분자 기술 발전
	Ziegler-Natta형 촉매로 입체규칙성고분자 개발 • Szwarc: 리빙음이온 중합법 발명(1956). HDPE, PP, 폴리카보네이트 상업화(1957). 폴리아세탈 상업화(1958). 폴리부타디엔·폴리아소프렌 고무 개발(1959)	
1960년대	• 에틸렌-프로필렌 공중합 탄성체(1962) • 폴리이미드 상업화(1964) • G. Natta, K. Zieler: 노벨상 수상(1963) • 폴리설폰, 폴리페닐렌옥사이드 상업화 • 스티렌-부타디엔 블록공중합체 열가소성탄성체, 사출성형용 폴리에스터 • 나일론-12 발명(1965)	• 1963년 한국나일론 나일론-6 • 1966년 대한프라스틱 PVC • 1967년 한일합섬 아크릴 섬유 • 1968년 대한합성섬유 폴리에스터 • 1968년 한남화학(현 금호석유화학) 폴리스티렌 벌크중합공정
1970년대	• PBT, 폴리페닐렌설파이드 상업화(1970) • 방향족폴리아미드(Aramid), 폴리아릴에터설폰, IPN 발명(1974) • P. J. Flory: 노벨상 수상(1974) • 방향족 폴리에스터(1976)	• 1973년 울산석유화학단지 준공: PE, PP, PS, PVC 등 플라스틱과 BR(부틸고무), SBR(합성고무) • 1979년 여천석유화학단지 준공 • ABS, PBT 생산
1980년대	• 폴리에터이미드 상업화(1982) • 메탈로센 촉매 중합방법 발명(1983) • 열방성 액정폴리에스터 생산(1984)	• 섬유산업계를 위시로 외국 기술을 소화·흡수하여 개량화 연구 • 삼양사: 사출성형용 PET
1990년대	• 초고분자량폴리에틸렌, 나일론-46(Toyota), 나일론6-clay 나노복합체(1990) • de Gennes: 노벨상 수상(1991) • 탄소나노튜브 보고(1991)	• 외국의 첨단기술 도입 어려워짐에 따라 국내에서 원천기술 개발 본격화 • LG·삼양사: 폴리카보네이트
2000년대	• A. J. Heeger, A. G. MacDiamid, H. Shiragawa: 전도성고분자로 노벨상 수상 • P. Smith: 용융성형가능 불소수지 개발 • 나일론-4T 개발(2007)	• 화연, SKC, KOLON: 폴리이미드 필름 제조기술 • 효성: Spandex 및 기능성 합성섬유소재 개발

■ 플라스틱의 종류

- 플라스틱은 분자구조에 따라 열가소성과 열경화성 두 종류로 나뉜다. PE, PP, PET, PS와 같은 플라스틱은 선형 또는 가지형 구조로 이루어져 열과 압력을 가하면 쉽게 변형되어 흐르는 열가소성 플라스틱임. 한편 에폭시수지, 페놀수지, 불포화폴리에스터와 같은 고분자는 분자사슬이 가교되어 망(net)상구조이므로 열과 압력을 받아도 변형이 생기지 않고 흐르지 않는 불용·불용융 특성을 갖는 열경화성 플라스틱임.

그림 1.2 플라스틱의 종류

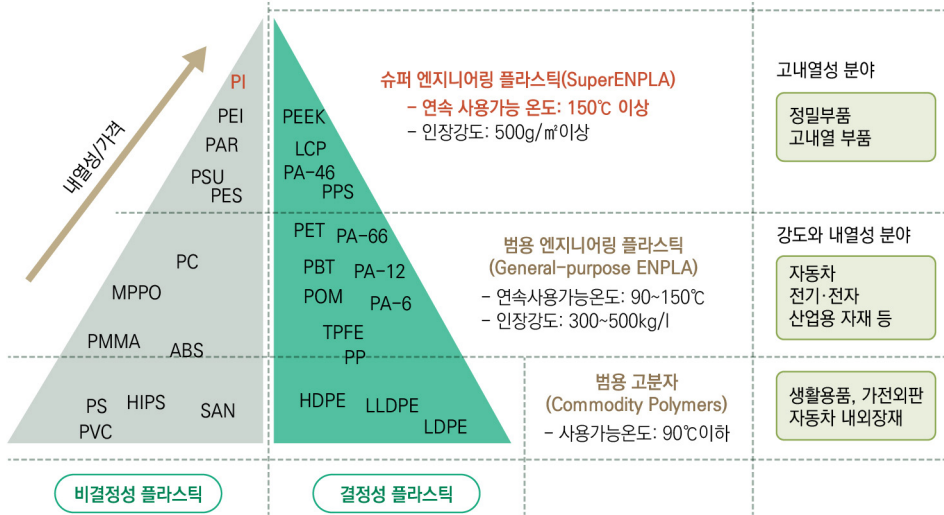


- 합성수지에 각종 첨가제 및 부자재를 배합하고 적당한 열과 압력을 가하여 최종 제품에 적합한 성형 방식[압출기(extruder), 사출성형기(injection molding machine)]으로 원하는 형상의 고체로 만든 것을 플라스틱이라고 함.
- 플라스틱은 열적 물성과 강도에 따라 범용 플라스틱과 엔지니어링 플라스틱(engineering plastics, EP)으로 분류함<표 1.2>(홍영웅, 2007).
- 이들 고분자의 용도를 살펴보면 우리 인간이 아침에 기상하여 밤에 잠자리에 들 때까지 사용하는 물품의 80% 이상이 플라스틱 제품(의복, 침구, 식기, TV 포함)임.
- 이는 플라스틱의 생산비용이 저렴하고, 경량이며 강하고 질기며, 분해되지 않거나 부식되지 않는 소재로서 가지고 있는 특별한 특성을 바탕으로 인간 생활을 풍요롭고 편리하게 영위 할 수 있도록 하기 때문이다.
- 따라서 포장재나 각종 용기 및 일반 생활용품, 공업용 내구성 부품 등은 물론이고 접착제, 화학섬유에 의한 의류, 침장 제품, 또한 최근의 과학기술 진보에 따른 전기자동차 배터리 등 전기·전자 용도의 기능성 제품에까지 사용되므로 20세기는 플라스틱 문명시대라고까지 일컬어지게 됨<그림 1.3>(이상선, 2016).
- 근본적으로 석유화학산업에 속하는 고분자산업은 국가 핵심기반산업으로 자리를 잡고 있음.
- 우리나라는 산유국이 아님에도 불구하고 에틸렌 기준 세계 4위의 석유화학산업국임.

표 1.2 범용 플라스틱과 엔지니어링 플라스틱의 분류

구분	대표적인 플라스틱(또는 고분자 소재)
범용 플라스틱 (Commodity Plastics) - 사용 온도: 100℃ 이하	• 열가소성 플라스틱(Thermoplastics) • 폴리에틸렌(PE)-저밀도(LD), 고밀도(HD), 선형저밀도(LLD) • 폴리프로필렌(PP) • 폴리스티렌(PS), ABS(아크릴로니트릴·부타디엔·스티렌 공중합체) • 폴리염화비닐(PVC)
엔지니어링 플라스틱 (Engineering Plastics, EP) - 사용 온도: 100℃ 이상	• 열경화성 플라스틱(Thermosets) • 페놀수지(phenol resin), 요소수지(urea resin) • 멜라민수지(melamine resin), 에폭시수지(epoxy resin) • 불포화폴리에스터(UPE), 폴리우레탄(polyurethane)
	• 범용 EP(General purpose EP)-사용 온도: 150 ℃ 이하 • 나일론(폴리아미드, PA): 나일론-6, 나일론-66 등 • 폴리에스터: PBT·PET, 폴리카보네이트(PC) 등 • 폴리아세탈(POM), 변성폴리페닐렌옥사이드(MPPO) • 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE) 등
	• 고성능 EP(Super EP)-사용 온도: 150 ℃ 이상 • 폴리설펜(PSU), 폴리테라설펜(PES), 액정고분자(LCP) • 폴리페닐렌설파이드(PPS), 폴리아릴레이트(PAR) • 아라미드(Aramid), 폴리에테르에터케톤(PEEK) • 폴리이미드(PI), 폴리에테리미드(PEI), 폴리아미드이미드(PAI) • 불소계 고분자-PTFE, ETFE, PVF, PVDF 등

그림 1.3 플라스틱의 성능과 사용 가능 조건



■ 세계 및 한국의 플라스틱 생산량

- 세계의 플라스틱 생산량은 1950년 200만 톤에서 2017년 3억 4,800만 톤, 2019년 4억 6천만 톤으로 급증하였고, 2040년에는 생산량이 현재의 2배로 증가할 것으로 예상됨. 플라스틱 생산은 현재 5,226억 달러 규모의 글로벌 산업이 되었음.
- OECD 통계에 의하면 지역별 수요량은 중국이 20%, 미국이 18%, OECD 유럽이 18%, OECD 비유럽이 9%를 차지하고 있음(그림 1.4). 인구 1인당 플라스틱 소비량은 세계 평균 60kg/인으로서 OECD 국가는 156kg/인, 비OECD 국가는 39kg/인임. 이 중에 미국이 255kg/인으로 제일 많고, 중국은 69kg/인이었음.
- 용도별 플라스틱 소비량은 포장재가 31%로 제일 높고 건축재는 17%로 포장재가 플라스틱 폐기물 발생의 큰 원인을 제공하고 있음.

그림 1.4 세계 플라스틱 생산량의 지역별 성장 추이(OECD Global Plastics Outlook)

In million tonnes (Mt), 1950~2021

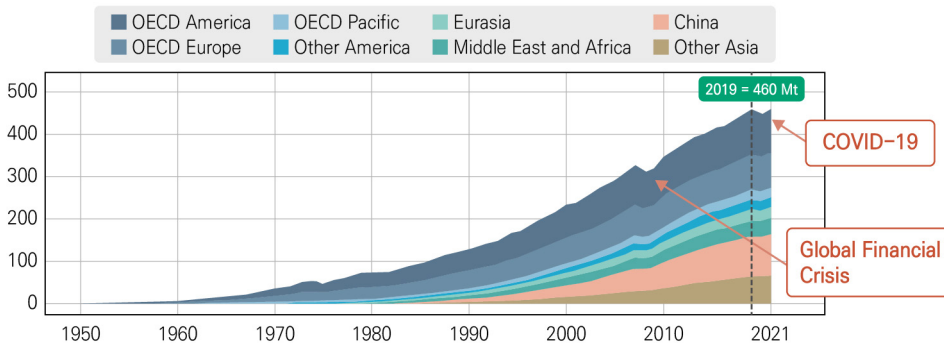
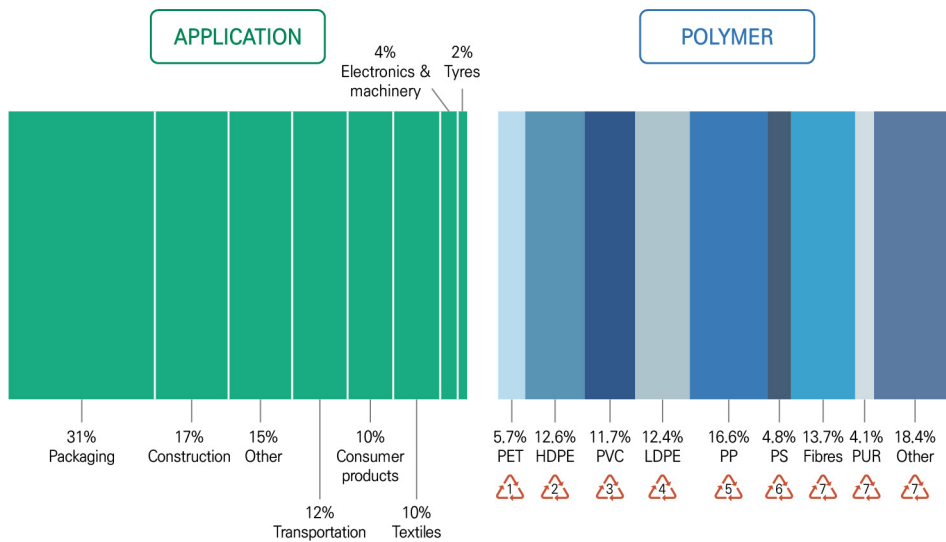


그림 1.5 세계 용도별 플라스틱 소비량(OECD Global Plastics Outlook Database)



Source: OECD Global Plastics Outlook Database, <https://doi.org/10.1787/c0821f81-en>.

- 우리나라는 에틸렌 기준으로 세계 4위의 석유화학산업국으로서, 2021년 플라스틱의 총 생산량은 1,500만 톤이 넘었고, 국내 소비량은 약 620만 톤인데 1인당 소비량은 약 120kg/인임(표 1.3). 국내 생산 플라스틱 중에서 포장재 및 일회용품으로 많이 사용되는 저밀도폴리에틸렌(LDPE)이 133만 톤, 고밀도폴리에틸렌(HDPE)이 106만 톤, 폴리프로필렌(PP)이 161만 톤, 폴리스티렌(PS)이 49만 톤, 그리고 음료수 용기인 PET병이 30만 톤으로(2018년 기준, 환경부, 2019, 폐트병 재활용체계 개선' 발표 자료) 추산되어 일회용품·포장재로 쓰이는 소비용 플라스틱의 합계는 약 479만 톤임.

표 1.3 한국의 플라스틱 생산량

(단위: 천 톤/년)

연도	생산량	수출량	국내 소비	LDPE	HDPE	PP	PS	PET병	소비재용총계*
2011	11,727	6,958	4,960	961	958	1,507	418	미상	-
2015	13,110	7,643	5,837	1,151	979	1,514	527	미상	-
2020	14,437	8,976	6,102	1,328	1,114	1,562	502	300이상	4,826
2021	15,436	9,730	6,178	1,330	1,063	1,613	487	300이상	4,793

* 소비재용은 포장재·일회용품으로 많이 쓰이는 LDPE, HDPE, PP, PS, EPS, PET의 합임.

LDPE=저밀도폴리에틸렌, HDPE=고밀도폴리에틸렌, PP=폴리프로필렌, PS=폴리스티렌, EPS=발포폴리스티렌,

PET=poly(ethylene terephthalate)(폴리에스테르)

출처: 한국석유화학편람(2022), 한국석유화학협회

2. 플라스틱 폐기물 문제

■ 플라스틱 폐기물에 의한 환경오염 현황

- 1950년부터 2015년까지 세계에서 생산된 플라스틱은 약 83억 톤으로 추산되고, 그중 25억 톤은 현재까지 사용되고 있음<그림 1.6>(Geyer et al., 2017). 한 번 사용된 58억 톤 중에서 46억 톤(79%)이 매립되거나 자연에 그대로 버려졌고, 7억 톤(12%)은 소각되었으며, 나머지 5억 톤(9%)만이 재활용되었으므로, 전체 중의 91%가 환경에 부정적 영향을 미쳤음. 더욱이, 한 번 재활용된 제품 5억 톤 중 80%인 4억 톤도 소각되거나 버려지는 것으로 파악되므로 궁극적으로 환경에 대한 악영향은 91%보다 큰 것으로 판단됨.
- 세계적으로 환경에 유출되는 폐플라스틱 양은 연간 3,000만 톤을 상회하며(Jambeck et al., 2015), 이 중 200만 톤 정도가 하천에서 바다로 흘러들어가 해양플라스틱 쓰레기가 됨(Lebreton et al., 2017).
- 폐플라스틱을 포함하는 폐기물의 일부는 개발도상국이나 저개발국가로 이동하고 있는데, 중국이 최대 수입국이었음. 중국은 자원 부족 문제를 해결하기 위한 방법으로써 수입한 폐플라스틱을 고품질연료로 사용하여 경제적 이익에 도움이 되었음. 그러나 급속한 산업화를 이룬 중국은 노동자의 인건비 상승 및 산업의 질을 높이고자 하는 중국 정책의 영향으로 환경문제에 대한 큰 관심을 가지게 되면서, 미세먼지의 주원인이 되는 석탄과 폐플라스틱 고품질연료 사용을 금지시키는 정책이 추진되었음.

그림 1.6 글로벌 플라스틱의 생산, 소비 및 처리 현황(1950~2015)

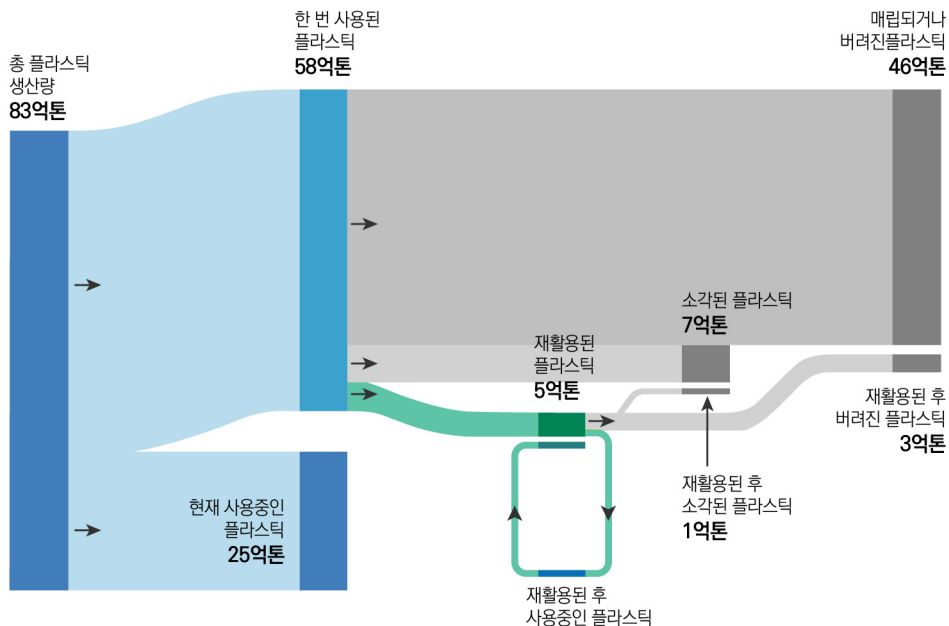
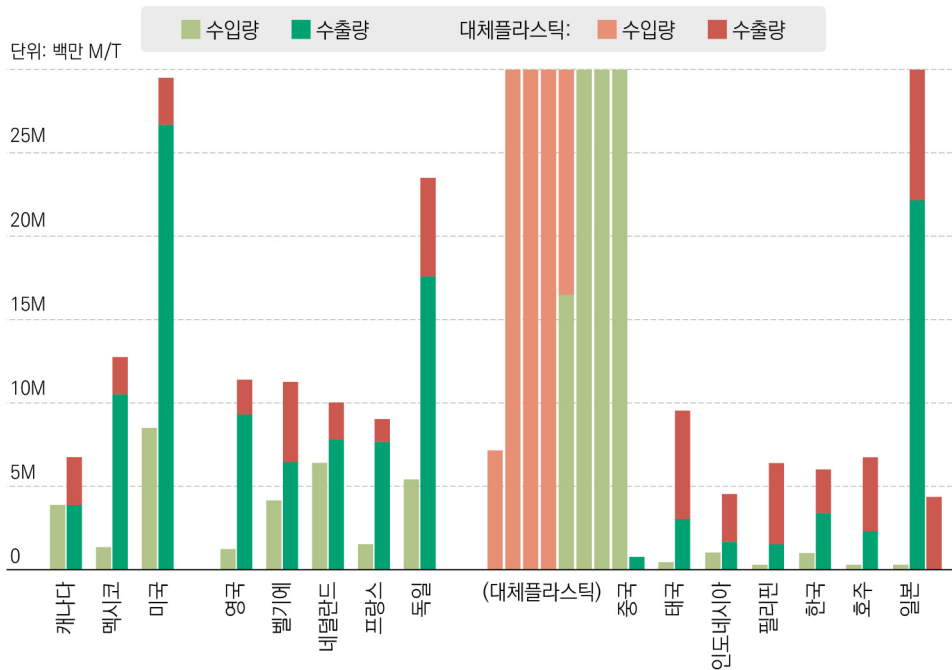


그림 1.7 2030년 세계 주요 국가의 쓰레기 수입량 및 수출량



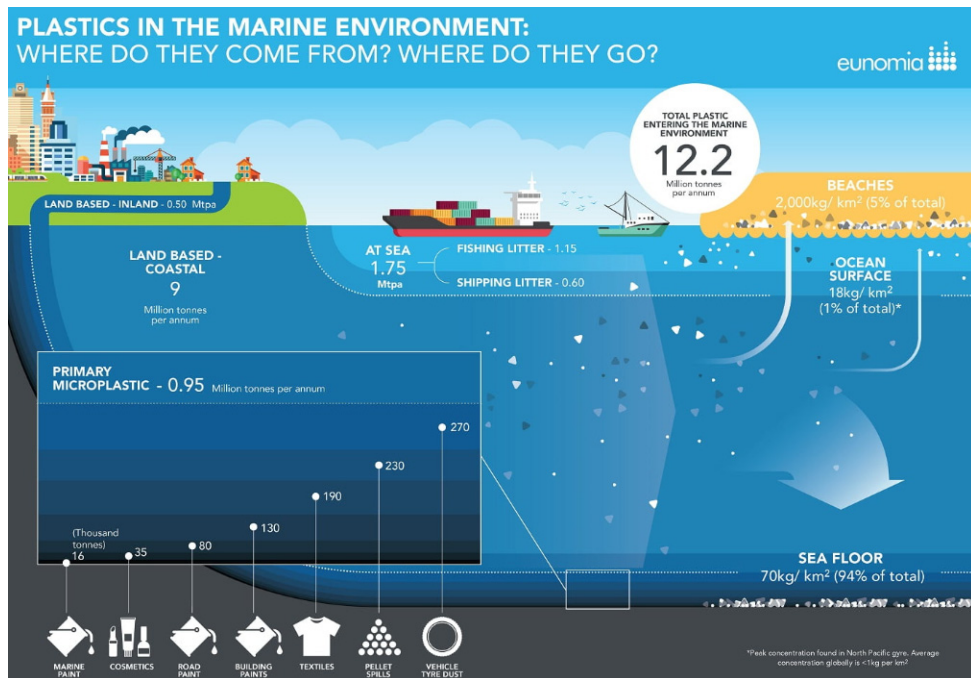
주) 적색선: 중국의 수입금지조치로 인해 버려지게 될 쓰레기량
 자료: University of Georgia

- 2018년 중국의 플라스틱 폐기물 수입금지에 따라 규제 수준이 약한 다른 개도국으로 플라스틱 폐기물이 대량 유입되었고, 이들 국가도 일시적 또는 영구적 수입금지조치를 채택하면서, 글로벌 폐플라스틱 교역에 큰 혼란이 초래됨. 따라서 2030년에는 전 세계에 1억 1천만 톤이 넘는 플라스틱 쓰레기가 처지 곤란한 상황에 놓일 것이라는 연구결과가 보고됨(그림 1.7)(Brooks et al., 2018).

■ 미세플라스틱이 자연생태계에 끼치는 위험성

- 해양환경에의 영향
 - 폐기된 플라스틱은 자연에서 물리적 힘 및 자외선등의 영향을 받고 산화되면서 조각으로 부서지고 이후 더욱 산화되어 잘게 부서져 궁극적으로는 크기 5mm 이하의 미세한 플라스틱 입자로 됨.

그림 1.8 해양환경의 미세플라스틱 오염 수준

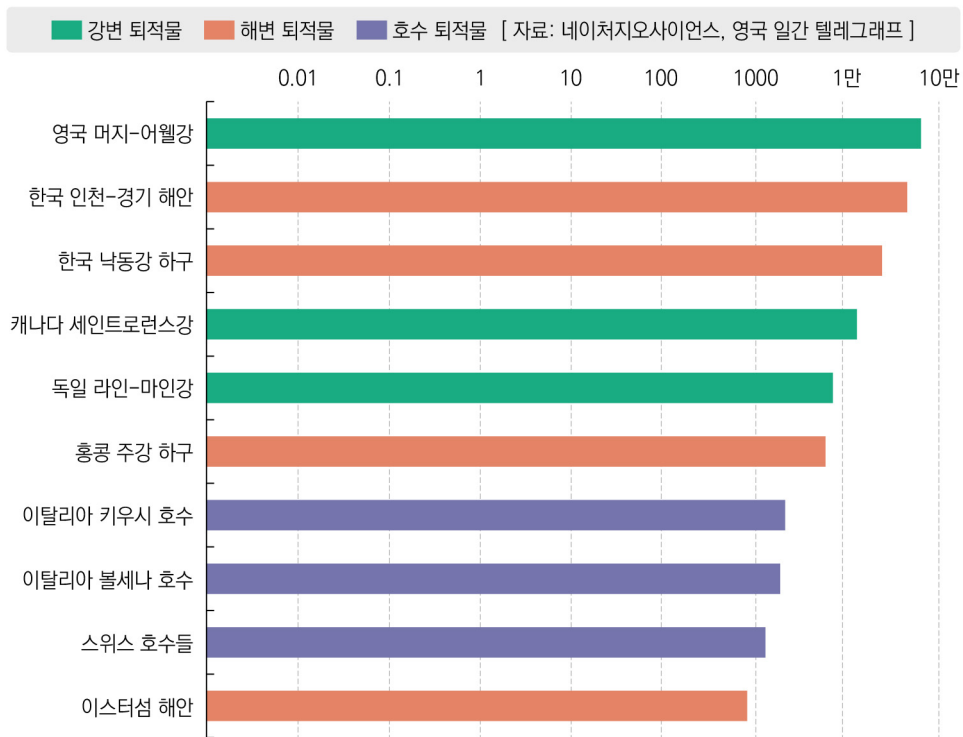


출처: <https://www.eunomia.co.uk/marine-plastics-we-should-fight-them-on-the-beaches>

- 이들 큰 플라스틱 조각과 미세플라스틱 외에도 치약, 세안용 스크럽 등 인위적으로 만들어 상품화된 각종 플라스틱 미세입자는 가볍고 썩지 않는 특성으로 인해 하수처리장에서 분리 제거되지 못하고 독성물질과 결합한 채 바다에 축적됨(Cole et al., 2011; Duis et al., 2016).
- 또한 사용된 플라스틱병, 칫솔 등이 하천을 거쳐 해안가에 쌓여 있고, 버려져서 썩지 않은 낚시줄과 어망들이 해양동물들을 묶어매거나 물리적 상처를 줌. 이와 같은 플라스틱 소비 속도를 유지한다면, 2050년까지 330억 톤의 플라스틱이 지구 표면에 넘칠 것으로 추산됨.
- 최근 신문기사에 의하면 세계에서 미세플라스틱으로 가장 심하게 오염된 지역에 우리나라가 2곳이 지적되어 있어 사태의 심각성을 말해 줌(그림 1.9).

그림 1.9 세계에서 미세플라스틱으로 심하게 오염된 지역

세계에서 가장 미세플라스틱으로 오염된 지역 1~10위 (1㎡당 미세플라스틱 개수)



출처: 경향신문(2018..4.8.), 미세플라스틱이 식탁에 오른다...인천 해안 '최악 오염'

- UN은 2018년 “해양플라스틱헌장(Ocean Plastic Charter)”을 채택하고 2021년에는 “2030 자연협정(Nature Compact)”를 통해 생물다양성 보호를 위한 핵심축의 하나로 해양플라스틱 문제를 다룸.

- 토양, 대기 및 인체에의 영향

- 이러한 미세플라스틱은 해양뿐만 아니라 토양 및 대기 중에서도 검출되었다는 보고가 있음 (Munyanenza et al., 2022). 프랑스 파리 근교의 대기에서 2~355개/㎡/일의 합성섬유 및 합성·천연섬유 입자가 포집되었다는 보고와(Dris et al., 2016), 중국 Yantai 근교의 대기에서도 합성섬유, 필름 조각, 발포체 조각들이 최대 600개/㎡/일 발견되었다는 보고(Zhou, 2017)가 있어서 사태의 심각성을 일깨워 줌.
- 이러한 미세플라스틱이 미시적으로 동·식물 세포·개체와 인체에까지 위험을 끼친다는 연구도 있음(류지현 외, 2017). 즉, 인체에 들어온 미세플라스틱이 세포에 작용하여 염증반응, 신진대사, 호르몬대사의 변화를 야기하고 암을 유발한다는 보고임.

3. 新 글로벌 플라스틱협약을 위한 UN의 로드맵

- 과도한 플라스틱 소비와 폐기는 지구의 기후변화, 자연 손실 및 오염을 초래하고, 인간이 플라스틱에 노출되면 해롭고 잠재적으로 생식력, 호르몬, 대사 및 신경계에 영향을 미쳐 재앙이 될 것이며, 플라스틱의 연소는 대기오염을 유발할 것이라고 UN 기구가 발표함.

그림 1.10 글로벌 플라스틱협약을 위한 UNEA-5 회의 모습



출처: The Guardian(2022.3.2.) "World leaders agree to draw up "historic" treaty on plastic waste"

- 2022년 2월 28일~3월 2일 케냐 나이로비에서 열린 UN환경총회, UNEA(United Nations Environment Assembly)에서 175개국 대표들이 모여 2024년 말까지 이러한 플라스틱오염을 종식시키기 위하여 법적 구속력이 있는 국제협약을 체결하자는 결의안을 선포하고 아래와 같은 세부조항을 규정하였음<그림 1.10>(United Nations, 2022).

- 첫 번째 항목: UNEA 결의안은 해양플라스틱이나 해양쓰레기에 국한되는 것이 아니라 육상을 포함한 모든 기타 환경을 다룸.
- 두 번째 항목: 플라스틱오염을 제한하거나 줄이는 것뿐만이 아닌 “해양 및 기타 환경에서 플라스틱오염의 장기적인 제거”를 목표로 함.
- 세 번째 항목: 플라스틱의 생산, 사용 및 폐기의 모든 전 주기 과정에 “Full life cycle”을 채택해야 함.
- 네 번째 항목: “플라스틱오염과 인간 건강에 대한 위험 및 인간의 웰빙과 환경에 대한 악영향을 방지”하기 위해 기존 국제환경조약 간의 조정을 촉진하는 것을 목표로 함.
- 다섯 번째 항목: 폐기물관리 개선, 자원효율성 향상 및 “순환경제” 접근 방식의 채택을 포함하여 “플라스틱의 지속가능한 생산 및 소비”의 모든 측면을 다루고자 함.
- 여섯 번째 항목: 제품 및 재료는 “재사용, 재생산 또는 재활용”될 수 있으므로 해당 자원과 함께 가능한 한 오랫동안 경제에 유지될 수 있고 폐기물 생성을 최소화할 수 있도록 지속가능한 설계(sustainable design)의 중요성을 강조할 필요가 있음(일회용 플라스틱을 대상으로 함).
- 일곱 번째 항목: “미세플라스틱”을 규제할 필요성이 있음.
- 여덟 번째 항목: 협약의 목표 달성을 위하여 민간부문을 포함한 모든 이해관계자의 역할 구상이 필요함.

■ 플라스틱에 관한 국제 거버넌스는 오염방지, 생물다양성, 화학물질, 폐기물 교역 등과 관련된 여러 개의 협약에서 부분적으로 다뤄지고 있는바, 플라스틱 전 주기에 걸친 오염방지를 위해서는 통합적인 거버넌스가 필요함<표 1.4>(이성희, 2022).

표 1.4 플라스틱 규제에 관한 중요 국제협약

주제	협약명	내용	참여국
오염	해양법에 관한 유엔협약 (UNCLOS)	• 해양 활동에 관한 법적 프레임워크 설정 ((플라스틱) 오염을 예방·저감·통제하기 위해 모든 조치를 취할 의무 등), 1994년 발효	167개국+EU
	런던협약 (폐기물 기타 물질의 투기에 의한 해양오염 방지 협약, 1972)과 런던의정서(1996)	• 해양 플라스틱 폐기물 직접 투기 또는 폐기 금지	87개국
	MARPOL협약 (해양오염방지 협약) 부속서 V	• MARPOL은 해양쓰레기 문제를 다루는 유일한 국제 협약, 부속서 V는 선박으로부터의 플라스틱 폐기물 투기 금지(해당 부속서는 1988년 발효)	156개국
생물다양성	생물다양성협약(CBD)	• 2020년까지(플라스틱) 오염을 생태계 기능에 해롭지 않은 수준으로 줄이는 것을 목표로 함 (아이치(Aichi) 생물다양성 목표 8), 2010년 채택 • Post-2020 글로벌 생물다양성 프레임워크 초안에 플라스틱 폐기물 배출 제거 포함(목표 7)	195개국+EU, 미국은 비준하지 않음
	유엔공해어업협정	• (플라스틱) 오염, 폐기물, 폐기, 폐어구로 인한 피해 최소화	59개국
화학물질	스톡홀름 협약 (잔류성 유기오염 물질에 관한 스톡홀름 협약)	• 잔류성 오염물질로 분류된 플라스틱에 사용되는 첨가제의 생산·사용·폐기를 규제, 2004년 발효	184개국
폐기물교역	바젤협약 (유해폐기물의 국가간 이동 및 그 처리의 통제에 관한 바젤협약)	• 유해폐기물 및 기타 (플라스틱) 폐기물의 교역을 금지하거나 교역 조건을 설정, 1992년 발효, 2020년 개정(통제대상에 플라스틱 폐기물 교역 포함)	188개국

자료: OECD(2022), Global Plastic Outlook,
http://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_de747aef-en(검색일: 2022. 4.20).

포스트 플라스틱 시대를 위한 정책 제언
Policy Recommendations for the Post-Plastics Age

II

세계의 순환경제 탄소중립전략

KAST Research Report 2022
한림연구보고서 144

II. 세계의 순환경제 탄소중립전략

1. 전 세계 2050 탄소중립 장기전략 수립 가속화

■ 온실가스는 기후를 변화시키는 중요 원인으로 생각되고 있음. 따라서 세계 각국은 온실가스 배출을 감축하고 에너지소비를 최소화하는 '탄소중립'을 추구하고 있음. 석유화학산업은 온실가스(이산화탄소, 메탄, 산화질소 등)를 많이 배출하는 산업임.

- 2050 탄소중립이 새로운 글로벌 패러다임으로 대두
 - 파리협정(2016년 발효) 및 UN기후정상회의(2019.9.) 이후 121개 국가가 기후목표 상향동맹¹⁾에 가입하여 2050 탄소중립의 글로벌 의제화
 - 파리협정은 기후변화 대응 정책의 장기적 비전 관점에서 각 당사국에게 장기 저탄소 발전전략(Long-term Low greenhouse gas Emission Development Strategy, LEDS)을 2020년까지 수립하도록 권고
- 전 세계 2050 탄소중립 선언 가속화
 - 코로나19 사태로 기후변화의 심각성 인식 확대, LEDS의 UN 제출 시한(2020.12월) 도래 등에 따라 주요국의 탄소중립 선언 가속화
 - 유럽연합(EU)(2019.12월), 중국(9.22.), 일본(10.26.), 미국(10.28.), 미국 바이든 대통령도 탄소중립을 위해 2조 달러 투자 공약 제시
 - 우리나라도 2050년 탄소중립 실현을 목표로, 그린뉴딜 전략을 통해 새로운 성장동력 창출 추진 중²⁾

1) 2050 탄소중립목표 기후동맹(2019년 UN기후변화협약 당사국 총회 의장국 칠레 주도 설립)

2) "저탄소산업 생태계 조성을 위해, 원료와 제품 그리고 폐기물의 재사용·재활용을 확대하여 에너지소비를 최소화하는 순환경제를 활성화"
(2050 대한민국 탄소중립 비전 선언, 문재인 대통령, 2020)

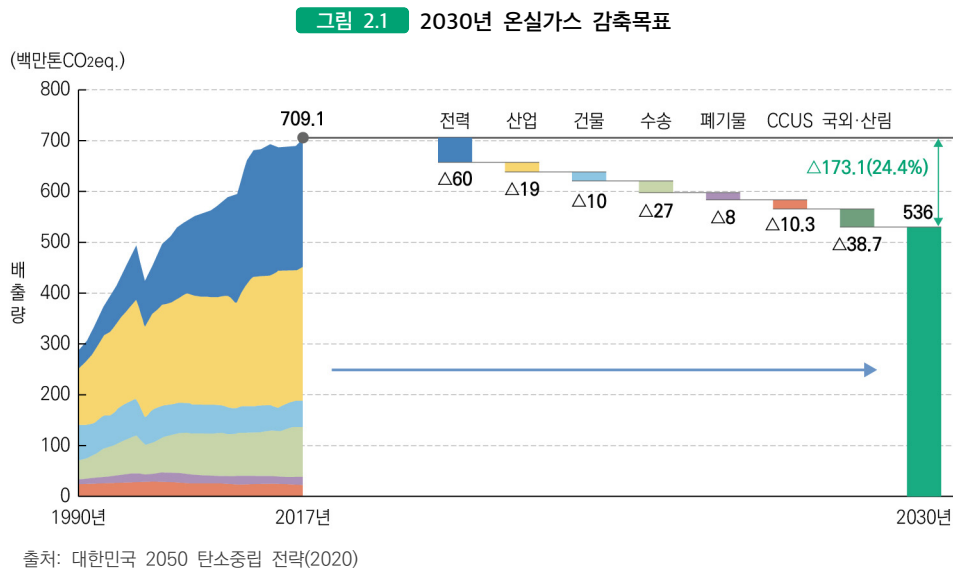
2. 정부의 2050 탄소중립 장기전략 수립

■ 우리나라 정부는 LEDS에서 2050 탄소중립 5대 기본 방향을 마련하고, 국가 전반의 녹색 전환을 위한 정책·사회·기술 혁신 방향을 제시함.

- 깨끗하게 생산된 전기·수소의 활용 확대
- 에너지 효율의 혁신적인 향상
- 탄소 제거 등 미래기술의 상용화
- 순환경제 확대로 산업의 지속가능성 제고
- 탄소 흡수 수단 강화

■ 정부는 2030년 온실가스 배출을 2017년 대비 24.4% 감축하도록 목표 설정

- 감축 후 2030년 예상 배출량은 536백만 톤 CO₂eq이며 발전, 산업, 건물, 수송 등 부문별 감축과 함께 산림흡수원, 국외 감축 등의 방법을 추가적으로 활용하여 감축목표를 달성할 계획임 〈그림 2.1〉.



■ 정부는 에너지(전력+열공급), 산업, 수송, 건물, 농축산, 폐기물, 공공, 산림 등 8개 부문에 대한 감축 잠재량을 분석하고, 가장 탄소배출량이 많은 산업부문에 적극적인 탄소저감 전략을 수립함.

- 깨끗한 환경을 요구하는 국민적 바람과 파리협정에 따른 국제적인 온실가스 감축 규제 움직임을 고려할 때, 기존 화석원료에 의존한 산업은 저탄소체제로의 혁신적인 전환이 필요임.

- 온실가스 배출 부문 중 산업부문은 우리나라 국가 배출량의 36%(2017년 기준, 간접 배출량 포함 시 54%), 온실가스 배출량 비중이 가장 높은 분야이기 때문에 적극적인 탄소저감 노력이 필요한 상황임.
- 산업부문의 온실가스 감축을 위한 방법으로는 에너지 이용 효율 개선, 저탄소 연료 전환, 탄소 포집·활용·저장(carbon capture, utilization, and storage, CCUS) 기술 도입, 혁신적인 산업공정 개선 등 다양한 방법이 제시됨.
- 온실가스 배출량을 획기적으로 줄일 수 있는 단 하나의 수단은 없으며, 업종별 차이와 특성(에너지이용 패턴, 온실가스 배출구조, 기술수준 등)을 고려해 다양한 수단을 활용하여 산업부문의 2050 비전 달성을 위한 기술개발 및 정책 수립이 요구됨.

■ 석유화학부문 온실가스 배출 실태

- 산업부문 전체 온실가스 배출량 350백만 톤 CO₂eq 가운데, 제1차 금속산업 38.2%, 화학 19.0%, 정유 10.9% 순임<표 2.1>.
- 화학산업은 대표적인 에너지 고사용, 온실가스 다배출 산업의 하나임<그림 2.2>.

표 2.1 산업부문 업종별 온실가스 배출 현황*

(단위: 천 톤 CO₂eq)

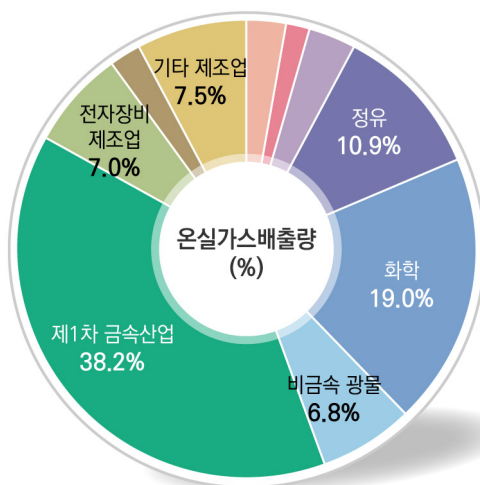
구분	음식료업	섬유	펄프, 종이	정유	화학	비금속 광물	제1차 금속산업	전자장비 제조업	자동차 제조업	기타 제조업
사용량	10,624	6,315	11,230	38,019	66,363	23,864	133,665	24,403	8,500	26,135

* 수송용 에너지 사용에 의한 온실가스 배출량 제외

출처: 한국에너지공단(2019), 2019 전 부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 통계

그림 2.2 산업별 온실가스 배출량 비중

(단위: %)



출처: 한국에너지공단(2018), 2018 산업부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 통계

표 2.2 주요 부문별 온실가스 감축 수단 및 전망

*(전망지표) ●고(유리), ◐중(보통), ○저(불리)

감축수단			전망지표*		
			감축효과	기술성숙	감축비용
에너지공급 (전력·열)	1. CO ₂ 포집·저장·활용(CCUS)		●	◐	○
	2. 에너지믹스 개선		●	●	●
	3. 수소경제 활성화	연료전지 도입	●	◐	◐
		수소 공급	●	◐	○
산업	1. 수소화 기술 및 원료 재활용		●	◐	○
	2. 신소재 전환 및 고부가 제품 확대		●	○	○
	3. 기기 효율개선		●	●	●
	4. 스마트 공장 및 산단		◐	●	◐
	5. CO ₂ 포집·저장·활용(CCUS)		●	◐	○
	6. 저탄소 연·원료 사용		○	●	●
	7. 산업공정 배출 감축		●	●	●
건물	1. 건축물 에너지 효율 향상		●	●	○
	2. 고효율 기기보급		◐	●	◐
	3. 스마트 에너지 관리		○	◐	◐
	4. 신재생 에너지 확대 및 미활용 열 활용		●	◐	○
수송	1. 도로부문 바이오연료 혼합		◐	●	◐
	2. 친환경차 보급 포함, 평균연비 개선		●	●	◐
	3. 철도부문 선진화		○	◐	○
	4. 항공부문 선진화		○	◐	○
	5. 해운부문 선진화		○	◐	○
	6. 교통 수요관리		◐	-	-
폐기물	1. 재활용·감량		●	●	○
	2. 메탄가스 회수	관리형 매립지	◐	●	◐
		생물학적 처리시설	●	●	◐
	3. 매립부문 호기성 운영 강화		●	○	◐
농축수산	4. 바이오 플라스틱 대체		●	○	●
	1. 스마트 농업(농업·축산·수산)으로의 전환		◐	●	◐
	2. 저탄소 농업기술 개발·보급 확대		●	◐	◐
	3. 정책 수요자 참여 정책 활성화		◐	◐	◐
탄소흡수원 (산림)	4. 친환경 에너지 확대		●	●	◐
	1. 탄소흡수원 확대(신규조림, 재조림)		◐	◐	◐
	2. 탄소흡수원 유지·관리(산림경영)		●	◐	●
탄소흡수원 (산림)	3. 목재공급량 확대		◐	◐	◐

출처: 2050 저탄소사회 비전 포럼(2020), 2050 장기 저탄소 발전전략 - 「2050 저탄소사회 비전」 검토안

3. 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)의 중요성

■ 지속가능한 순환경제 구현을 위한 온실가스 배출 저감과 천연자원의 효율적 사용 및 생태계로의 순환은 천연자원의 채취부터 소재-부품-제품으로의 생산과 가공 후 유통, 사용 후 폐기에 따른 전 과정에 걸친 탄소 중심의 탄소중립 효과의 객관적 평가가 전제됨. 지구 온난화 가스인 이산화탄소의 전 주기적 저감효과의 대표 지표인 탄소발자국(Carbon Footprint)의 평가도구로서 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)기술이 이용되며, 특히 특정 플라스틱 제품의 전 생애에 걸친 순수 이산화탄소 배출저감 성적을 해당 데이터 베이스 작성과 평가기준의 적용을 통해 산정함. 향후 순환경제의 지속성, 천연자원 및 재활용 제품 등 재생가능자원의 환경적·경제적 효과 검증 등 순환경제 New플라스틱사회로의 전환과정에서 사회적 인정에 요구되는 전과정평가 기반의 다양한 지표로 확대 중임.

• 전과정평가의 기능과 전망

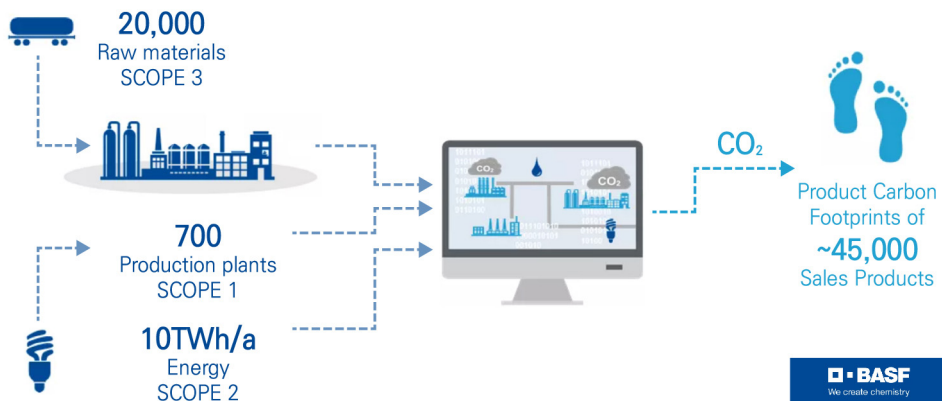
- 국가, 기업 등에서 목표로 설정하고 연구를 통해 줄여 나가고자 하는 탄소발생량은 “정의 및 계산 방식”에 대한 국제적인 표준화작업이 반드시 필요함. 특히, 플라스틱 전 주기의 탄소배출량을 정확하게 알고 판단하기 위해서는 체계적이며 표준화된 국제공인용 전과정평가 플랫폼 확보가 무엇보다도 필요한 시점임.
- 2015년 파리협약이 발효되고, 세계 각국에서는 지구 평균온도의 상승폭 제한을 위해 2050년까지 자국의 탄소배출 감축목표를 스스로 정하고 이 목표를 실천하기 위한 구체적인 움직임을 보이고 있음. EU, 일본 등이 2050년까지 탄소중립목표를 설정하였고, 실효성 있는 탄소저감 활동을 촉구하기 위해 EU와 미국에서는 ‘탄소국경세’를 2023~25년 도입할 계획임. 이런 탄소저감에 대한 변화는 국가적 차원뿐만 아니라 개인적 차원에서도 활발하게 진행되고 있음. 소비자들도 탄소저감을 위해 재활용된 친환경 플라스틱 제품을 선호하거나, 저전력 제품을 선택하고 환경인증 플라스틱 제품을 구매하는 등 소비 경향의 변화를 보이고 있음.
- 이러한 경향은 제품 제조의 공급선에 대한 새로운 요구를 동반하게 되었음. 소비자의 저탄소제품 요구는 원료 공급자들에게 해당 제품의 원료 및 제조공정에서 발생하는 탄소발생량 감축을 위한 활동을 촉구하게 되었고, 결과적으로 제품의 제조공정에 대한 탄소발생량 저감뿐만 아니라 원료 측면의 탄소발생 투입량까지 고려해야만 하는 상황이 되었음. 이에 제품 제조 시 탄소발생량 등을 평가할 수 있는 평가 방법에 대한 중요도가 매우 높아지고 있음.
- 기업 대 소비자 영업(business to customer, B2C) 업체는 오래전부터 제품에 대한 탄소발자국을 평가하고 친환경인증을 진행하는 등의 노력을 해오고 있음. 디스플레이(Display) 업계, 전자업계의 경우 탄소발자국 외에도 다양한 환경영향인자에 대한 LCA를 수행하여 그 결과를 고객들에게 제공하고 있으며, 영국의 Carbon Trust, 미국의 Carbon Free 등의 인증을 획득하고 있는 상황임.

- 이들 B2C 제조업체들의 경우 제품 제조 시 원료와 설비만이 사용되고, 제품 제조 단계에서 이산화탄소 등의 온실가스의 직접적인 배출은 제한적임. 결과적으로 이들은 제품 탄소발자국(Product Carbon Footprint)의 산정이 비교적 쉽다고 할 수 있음.
- 하지만 플라스틱 업계의 경우 반응 또는 부산물의 소각, 환경설비의 운용 등 온실가스의 직접 배출 부분이 존재하며 공정 특성상 재활용 stream 등이 존재하여 LCA 평가기법을 적용하는데 어려움이 있음. 결과적으로 고객사 요청, 국가 DB 구축 등 필요 부분에만 LCA를 수행하는 등 제한적으로 적용되어 왔음. 다만 최근 환경 변화에 따라 자사 제품에 대한 전방위적인 평가를 적용하고자 하는 움직임을 보이고 있으며, 이런 움직임의 선두주자로 독일의 BASF 사는 2021년 자사 전 제품의 제품 탄소발자국(Product Carbon Footprint)에 대한 결과를 제공하겠다고 발표하였음(그림 2.3).

그림 2.3 BASF의 Product Carbon Footprint

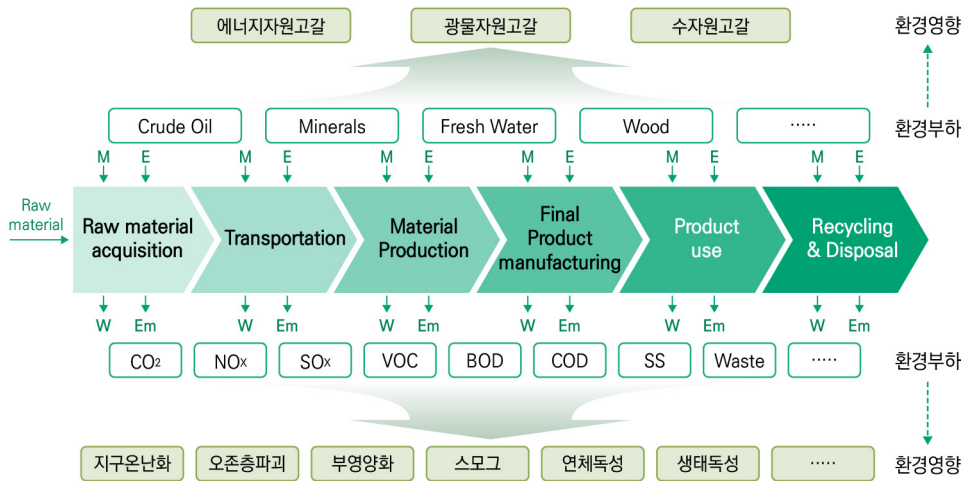
Product Carbon Footprints create transparency for customers

Digital application to calculate greenhouse gas emissions of 45,000 sales products



- Zheng et al.(2019)에 의하면 통상적인 플라스틱의 전 과정 이산화탄소 배출량은 2015년 1.7기가톤 CO₂eq이고 2050년까지 6.5 기가톤 CO₂eq으로 증가가 예상되는데, 재활용 강화, 재생에너지 사용을 활성화한다면 2015년 수준으로 유지할 수 있을 것으로 기대됨.
- LCA는 제품 전 과정 동안에 자원 투입량과 환경 배출량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 체계적으로 평가하는 도구임. <그림 2.4>에서 보는 것과 같이 어떤 제품을 제조하기 위해서는 물, 나무, 광석, 원유와 같은 초기 형태의 원료들이 필요함. 이런 원료들을 채취하기 위해서는 각각의 원료들별로 에너지나 또 다른 물질이 필요하고, 폐기물, 대기배출물 등이 발생됨. 이렇게 수집된 원료들은 운송, 중간체 제조 등의 단계를 거치며 추가적인 물질과 에너지를 사용하게 되고 최종 제품이 제조되어 소비자들이 사용하며 최종적으로 회수 재사용되거나 소각, 매립 처리됨. 이렇게 한 개 제품이 초기 원료로부터 최종 사용 후 폐기, 회수 등의 단계까지 제품의 전 주기에서 발생하는 환경부하를 종합하고 이에 대해 각 인자별 환경영향을 평가하는 것을 LCA라고 말함.

그림 2.4 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 개념도



- LCA는 국제표준에 따른 작성지침이 존재하는데 이는 LCA 기본개념 및 구성요소를 설명하는 ISO 14040과 LCA 수행 단계별 세부 수행 방법을 설명하고 있는 ISO 14044(실제 LCA 수행에 따른 세부 수행절차는 ISO 14044에 따름)로 구성되어 있음. ISO 14040에 따르면 LCA는 수행 단계별로 1) 목적 및 범위 정의, 2) 전 과정 목록 분석, 3) 전 과정 영향평가, 4) 전 과정 해석으로 나뉘어져 있음.

- 지금까지는 현재 생산되고 있는 플라스틱 제품의 탄소배출량 분석 및 계산에 대한 내용을 주로 다루었지만, R&D 단계에서 준비하고 있는 신제품이나 신공정에 대한 탄소발생 수준을 평가하여 전략적으로 연구개발 방향을 수립하는 것도 중요함. 신제품·신공정 제품 탄소발자국(Product Carbon Footprint) 분석의 경우 LCA 플랫폼을 구축하면서 확보한 LCA 수행역량을 기존 공정분석능력과 접목하여 사업 및 기술 평가의 새로운 척도로 탄소 배출량을 제공하여 의사 결정에 기여할 수 있도록 진행하고 있음.

- 플라스틱 제조와 관련된 지속성(sustainability) 과제인 이산화탄소의 전기화학적 전환, 수전해공정, Dry reforming of methane 등에 대해서 탄소배출량을 정확히 따져봐야 할 시점이며 연구개발 목표에 지속성지표를 추가하여 공정의 근원적 탄소경쟁력을 확보할 수 있는 방향을 모색할 필요가 있음.

- 추가적으로 LCA와 관련해서 정부에 제안하고 싶은 내용은 아래의 세 가지로 정리할 수 있음.

- Global 수준의 정리된 LCA 수행 표준 필요

- ① LCA 정책 및 표준과 관련하여 국내의 수준은 해외와 비교하여 너무 느리게 대응하고 있음(오히려 산업계는 해외 변화에 대응하기 위해 정책 변경 등에 민감하게 반응하고 있음).

- ② 예를 들면 국내 LCA 국내 방법론을 통해 환경성적표지 인증을 수행하였으나, 이를 국제적으로 인정받을 수 없으므로 결국 IEPD(International Environmental Product Declarations) 기준 등으로 중복 수행이 필요하게 됨.

- ③ 온실가스 명세서 적용 탄소배출계수도 국내 적용 기준이 해외의 기준과 다름(국내: IPCC 2006 기준, 해외: IPCC 2013 기준).
- Scope 3³⁾ 공정데이터 공개 시 리스크를 조절할 수 있는 정책 또는 제도적 장치 마련 필요
 - ① 해외에서는 Scope 3 배출 관련 정책들이 마련되고 시행 준비 중에 있으나, 국내는 인식 수준이 낮아 원료 업체에 요청해도 쉽게 움직이지 않음.
 - ② 관련 정책을 마련하여 국제 분위기에 맞춰 나가야 할 필요성이 있음. 쉽지 않겠지만 시스템적으로 국가에서 관리할 수 있도록 하는 방안도 굉장히 좋을 것 같음.
- 컴파운딩 제품의 경우 세부 품종 수가 수백 개 되는 제품의 경우 환경성적표지 인증 확보가 어려움.
 - ① 현 기준으로는 각 품종별로 수행하여 인증해야 하는데 실제로는 불가능한 상황임. 일괄적인 방법을 통해 제품군 수준으로 수행하고 품종별 인증을 인정해 주는 방향도 필요함.

3) 기업의 탄소 배출은 그 성격과 측정 범위에 따라 Scope 1, 2, 3로 구분. Scope 1은 제품 생산 단계에서 발생하는 직접 배출, Scope 2는 사업장에서 사용하는 전기와 동력을 만드는 과정에서 발생하는 간접 배출, Scope 3은 직접적인 제품 생산 외에 협력 업체와 물류는 물론 제품 사용과 폐기 과정에서 발생하는 외부 배출을 의미

III

세계 주요 국가의
플라스틱 폐기물에
대한 대책

Ⅲ. 세계 주요 국가의 플라스틱 폐기물에 대한 대책

■ 세계 각국은 플라스틱 폐기물을 3R[감축(Reduce), 재사용(Reuse), 재활용(Recycle)] 원칙에 의하여 처리하고 있음.

- Reduce: 일회용 플라스틱의 사용 감소(쇼핑백 유료화 등) 및 용기포장의 감소로 배출량을 삭감함(세계 각국의 적극적인 1차 대책).
- Reuse: 쇼핑백 등을 재사용함. 단 일회용 음식물 포장용기 폐기물은 불가능함.
- Recycle: 물질을 재활용하는 ① 물리적 재활용, 재료를 분해하여 활용하는 ② 화학적 재활용 및 연소에너지를 얻는 ③ 열적 재활용이 있음.

■ 그러나 이 3R 원칙을 어떻게 합리적으로 계획하는가, 얼마나 철저하게 실행하는가, 또한 어느 정도의 효과를 보는가는 나라 간의 차이가 많음. 따라서 폐플라스틱의 부적절한 처리 때문에 육지뿐 아니라 해양으로 유출되는 양이 세계적으로 연간 수백만 톤에 이르러 지구의 환경오염이 심각함.

■ 이러한 범지구적인 폐플라스틱의 범람과 해양플라스틱 문제에 대한 대응은 UN의 지속 가능한 개발을 위한 목표(Sustainable Development Goals, SDGs)에서도 논의되어, 플라스틱 폐기물의 철저한 3R 및 열회수의 적정한 처리를 통하여 세계 전체로서의 “플라스틱 자원 순환체제”를 구축할 것을 촉구함.

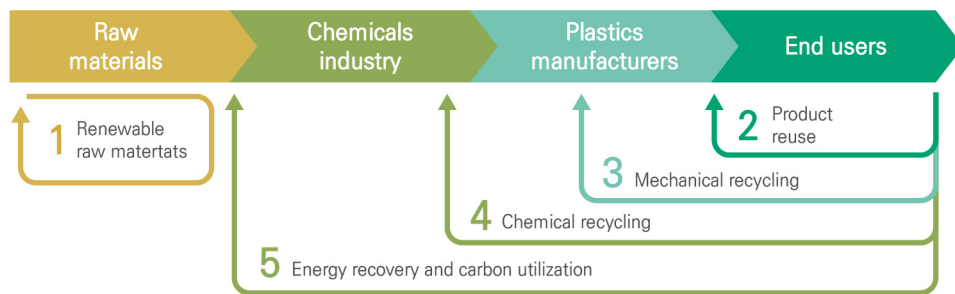
■ 1987년 Brundtland위원회(국제연합 환경특별위원회)는 지속가능한 발전(sustainable development)의 개념이란 “자원 추출에 대한 한계를 정하여 자연의 재생능력을 넘어서지 않도록 한다”는 것으로서, 미래세대의 욕구를 만족시키면서 현세대의 욕구를 충족시킬 수 있도록 하는 개발이라고 정의함(World Commission On Employment, 1987).

■ 최근 유럽을 중심으로 대량생산과 대량소비·폐기에 의한 경제성장을 추구한 linear경제 시스템을 지양하고, 앞으로는 지속가능한 순환형 사회·경제시스템인 순환경제(circular economy)로 전환해 가고 있음. 이러한 변화는 자원의 고갈이나 지구온난화를 방지함과 동시에 성장지상주의 기치 아래 확대된 경제·사회적 격차를 시정하는 계기가 됨. 또한

plastic circular economy를 기본으로 new plastic economy를 전면에 걸고 재사용, 재활용, 퇴비화를 통하여 플라스틱이 완벽하게 순환되는 구조를 마련하는 데 중점을 둠(Ellen MacArthur Foundation, 2016).

- 유럽은 2018년 “순환경제에 있어서 플라스틱을 위한 유럽전략(A European strategy for plastics in a circular economy)”을 공포하고, 2030년까지 EU에서 사용되는 모든 플라스틱 용기포장을 재사용(reuse), 재활용(recycle) 가능한 것으로 하여 매립을 금지하는 목표를 세움. 2018년 12월에는 재활용(recycle)과 재생 플라스틱의 이용 촉진을 위해 플라스틱 가치사슬(value chain)에 연관 있는 중요 EU 산업관계자가 참가하는 순환형 플라스틱 동맹(Circular Plastics Alliance)를 발족시킴(Ellen MacArthur Foundation, 2020a).

그림 3.1 플라스틱의 순환경제



- 국내도 “플라스틱 자원순환 전략”이 책정되어, 자원·환경 문제 해결과 동시에 지속가능한 경제성장과 고용 창출을 원하고 있음.
- 이상과 같은 국제적인 플라스틱 전략은 이미 언급한 바와 같이, 플라스틱을 가능하면 쓰지 말자는 플라스틱 저감 또는 전혀 사용하지 않을 수는 없으므로 환경영향을 최소화할 수 있는 플라스틱 순환구조의 확립과 대체물질의 개발 두 가지임.
 - 플라스틱 저감 전략은 화석연료에 기반한 플라스틱 사용을 줄이거나 순환을 통한 탄소저감으로 온실가스 배출을 줄이는 기후위기 대응의 한 축이라 할 수 있음.
 - 플라스틱 물질 대체란 일회용 플라스틱 제품과 플라스틱 포장재를 다른 물질로의 전환을 뜻함. 그러나 단순히 플라스틱을 유리, 금속, 목재, 종이 및 바이오매스 기반 플라스틱으로 대체하는 것은 탄소배출을 증가시킬 뿐 아니라, 에너지 과다 사용 등 환경에 악영향을 주기도 함.
- 3R 추진의 한계점
 - 그러나 3R은 플라스틱을 대체할 적합한 대안을 찾기 어렵다는 점, 재사용 또는 재활용 가능한 플라스틱 폐기물의 범위가 제한적이라는 점에서 한계성을 지님. 우선 플라스틱 사용을 줄이면 당연히 플라스틱의 폐기량도 줄어들지만 현실적으로 실행이 쉽지 않음.

- 플라스틱은 나무·알루미늄·종이 등 천연자원 대비 경제적인 생산이 가능하고 가공 및 활용이 편리하며, 이미 기술이 발전·진화되어 다양한 용도에 적용되어 왔기 때문에 플라스틱을 대체할 소재를 찾기 어려움.
- 한편 플라스틱 제품의 재사용을 가능하게 하려면 경제적 방법으로 회수되어야 하는데, 플라스틱의 다양한 용도와 사용 장소를 고려할 때 회수 가능 영역이 제한적이고, 분리배출·수집회수 체계가 명확치 않으며, 특히 음식물 등으로 오염되어 세척이 불가능한 제품, 얇은 필름류 등은 물성 특성상 재사용이 어려움.
- 또한, 재활용 역시 수집 및 전처리에 어려움이 존재하고, 플라스틱 종류별로 재활용 가능 여부에도 차이가 있어, 수거·회수된 모든 플라스틱이 재활용되기에는 한계가 있음.
 - 특히 두께가 얇은 플라스틱 필름류(PE·PP 등), 일회용 음식물 용기, 복합소재 적용(소비재, 코팅) 등 수집 분리 세척이 어려운 물성과 용도의 경우 재활용 stream에 포함되지 못함.
 - 플라스틱 순환구조의 난점은 현재 사용되고 있는 포장재 중 절반은 재활용이 불가능하고, 나머지 절반은 재활용 가능하나 배출·선별·재활용의 한계로 재활용하기 어렵다는 점에 있음. 포장재의 기능성을 유지하면서 재활용이 가능하도록 포장재 재질과 설계의 변화가 필요하고, 관련 연구개발을 확대하여야 함.

1. 주요 국가의 플라스틱 규제 현황

■ 최근 EU 선진 각국에서 플라스틱에 관한 규제 강화의 움직임이 활발하게 진행되고 있어 매년 회의가 개최되었음. 특히 2018년 6월 캐나다에서 개최된 선진 7개국 정상회의(G7 Summit)에서는 날로 심해지는 폐플라스틱 문제 해결을 위하여 일회용 플라스틱 사용 감소 목표 등을 정함. 또한 일회용 플라스틱 식기류 및 음료빨대와 플라스틱제 어업용품에 관한 규제나 법령을 도입하는 지침이 EU에서 승인되어 2021년까지 각국에서 법제화되었고 일부 제정되어 시행됨.

■ 세계 최대 플라스틱 소비국인 중국은 2020년 1월 ‘플라스틱오염 방지정책’을 강화하여 분리 수거 도입, 일회용품 생산 및 사용 제한, 폐플라스틱 수입금지 등의 규제를 단계적으로 강화해 가고 있음.

■ 유럽연합(EU)

- EU 전체의 플라스틱 관련 목표는 <표 3.1>에, 그에 따른 플라스틱 저감 노력은 <표 3.2>에 정리함(이성희, 2022).

표 3.1 EU의 플라스틱 관련 목표

구분	EU 플라스틱 전략 2030년	민간대응 (Global Commitment) 2025년	일본 플라스틱 자원순환 전략 2030년
감축 (Reduce)	일회용 플라스틱 지침에서 음료 컵, 식품 용기 삭감 요구(2026년 목표, 명확한 수치 없음)	재활용 관점에서 문제가 있거나 불필요한 플라스틱 폐지	일회용 플라스틱을 누적 25% 삭감
재사용 (Reuse) · 재활용 (Recycle)	- 모든 플라스틱 용기포장이 재이용 가능 혹은 경제적 효과가 높은 방법으로 재활용 가능 - EU에서 발생하는 플라스틱 폐기물의 50% 이상을 재활용함 - 플라스틱 용기포장의 재활용 목표 - 2023년 50%, 2030년 55%	- 적절한 경우 재이용 모델 적용 → 일회용 용기포장의 감소 - 모든 플라스틱 용기포장을 디자인 관점에서 100% 재이용 가능, 재활용 가능 또는 퇴비화 가능 - 모든 플라스틱 용기포장: 실제로 재이용, 재활용 혹은 퇴비화	2025년 재사용·재활용 가능한 디자인 채택 - 용기포장의 60%를 재사용, 재활용 - 사용이 끝난 플라스틱을 100% 재사용, 재활용 등에 의해 우선 이용(2035년) - 재생이용률 배증
바이오플라스틱 (Bioplastic)	-	-	바이오플라스틱 약 200만 톤 도입

- **이탈리아:** 이탈리아 정부는 ‘플라스틱 세금제도’를 도입하여 일회용 플라스틱 포장 및 용기 제조 수입업체는 kg당 0.45유로의 세금을 부담함. 다만 플라스틱 비율이 40% 미만으로 퇴비화가 가능하거나 재활용 제품은 과세 대상에서 제외. 생분해 및 퇴비화가 가능한 제품 생산에 투자되는 비용에 대해 최대 2만 유로까지 10% 세액을 공제하는 인센티브를 제공하여 생분해성 플라스틱 제품 개발을 촉진하고 있음.
- **스페인:** ‘일회용 플라스틱세’를 도입하여 재활용 불가능한 플라스틱 생산·수입자에 대해 kg당 0.45유로를 부과하기로 함. 2018년부터 일회용 플라스틱 봉투의 사용을 금지하고 있으며, 2021년부터는 퇴비화가 가능한 플라스틱 봉투만 판매를 허용하고, 봉투의 퇴비화 가능 여부와 두께에 따라 판매금지 또는 추가 요금을 징수함.
- **스위스:** 연방정부의 개입 없이도, 스위스 기업과 국민들의 환경에 대한 높은 관심과 참여 수준으로 인하여 향후 강력한 규제를 지양하고 각 산업에서 자발적인 해결책을 찾을 수 있도록 장려할 것으로 전망함. 그 예로 스위스의 글로벌 식품기업인 Nestle사는 2025년까지 자사의 커피캡슐을 포함한 모든 제품의 포장을 100% 재활용 가능 또는 생분해(biodegradable) 소재로 대체하겠다고 선언함.
- **벨기에:** 비닐봉투의 생산을 규제하고, 생분해 또는 재활용 원료를 이용한 비닐봉투를 생산하도록 의무화함. 이는 연방정부 차원이 아니라 지방정부 정책으로 추진 중임.

표 3.2 EU의 플라스틱 저감 노력(EU Directive 2019/904)

구분	주요 내용
바이오 기반, 생분해성, 퇴비화 가능한 플라스틱	• 화석연료 기반의 플라스틱을 대체하기 위한 바이오 기반의 생분해성 플라스틱 개발 및 사용 촉진 • 바이오 기반 생분해성 플라스틱에 관한 정책 프레임워크 개발 중(2022년 2·4분기 내 채택 계획)
플라스틱 비닐봉지	• 포장재 및 포장재 폐기물 지침(94/62/EC) 개정을 통해 플라스틱 비닐봉지 지침 마련(Directive (EU) 2015/720): 국가 차원의 저감 목표 설정, 사용 제한 또는 경제적 조치 도입 등 • 2020년부터 회원국은 경량 플라스틱 봉투의 연간 소비량 데이터 보고
일회용 플라스틱	• 일회용 플라스틱 지침(Directive (EU) 2019/904)을 통해 10개 품목 판매금지(2021년 7월 시행) • 설계요건 도입(예: 뚜껑과 용기가 연결된 디자인), 제품에 사용된 플라스틱 원료나 폐기 및 재활용 정보 레이블링 도입, 생산자책임(EPR) 도입 • ① 플라스틱병 분리수거율 2025년 77%, 2029년 90% 목표, ② 2025년부터 PET 음료수병 25% 재생 플라스틱 사용, ③ 2030년부터 모든 플라스틱 음료수병에 재생 플라스틱 30% 사용 목표
미세플라스틱	• 미세플라스틱에 관한 종합 지침 부재 → 표준, 인증, 규제 등을 마련하기 위한 작업 진행 • 합성섬유나 타이어 마모에서 발생하는 미세플라스틱 등에 관한 의견 청취 진행(2022년 1~5월)
플라스틱 포장재	• 관련 지침 개정(2015년 플라스틱 봉투의 소비 저감 조치 추가, 2018년 포장재에 대한 생산자책임제도 필수 설정 등), 2024년 말까지 모든 회원국은 모든 포장재에 대한 생산자책임재활용제도 도입 필요 • 플라스틱 포장재 재활용률 2025년 50%, 2030년 55% 목표
플라스틱세	• 2021년 1월부터 각 회원국에 재활용되지 않는 플라스틱 포장 폐기물 1kg당 0.8유로의 플라스틱세 부과

출처: European Commission, 홈페이지, Plastics, https://ec.europa.eu/environment/topics/plastics_en; European commission, Plastics own resources, https://ec.europa.eu/info/strategy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/revenue/own-resources/plastics-own-resource_en(검색일: 2022.4.20.); (이성희, 2022)

❏ 북미

- **미국:** <표 3.3>에 미국 몇몇 주정부의 플라스틱 규제 사례를 제시함.
 - 플라스틱을 포함한 폐기물 처리 시 수출이나 매립의 의존도를 감소시키고, 자국 내 재활용률을 높이기 위해 인프라 투자를 증가키로 함. 또한 일회용품 사용 제한이나 생산자책임(extended product responsibility, EPR) 재활용제도를 도입하는 주정부가 늘어남.
 - 난분해성 플라스틱 봉투의 사용 규제를 시카고, LA, 뉴욕주 등 미국 전역으로 확대하고, 퇴비화가 가능한 생분해성 봉투(compostable bag)로 대체하도록 규제하고 있음. 캘리포니아주의 경우, 주지사가 모든 포장재를 재활용 또는 퇴비화가 가능토록 규제하는 법안에 2022년 7월 27일 최종 서명하였음.
 - 하와이: 폴리스티렌, 폴리스티렌 발포체의 사용을 금지하고 생분해성 플라스틱의 사용을 권장함.
- **캐나다:** 2022년 일회용 플라스틱에 관한 금지 규정이 신설되었는데 비닐봉투, 식사도구류, 식품 용기, 음료 묶음포장(ring carriers), 커피스틱·빨대 등을 규제 대상으로 지정. PLA 식품 용기·기구(포장용기류, 컵, 그릇 등) 및 퇴비화가 가능한 생분해성 봉투는 규제 예외 대상임.

표 3.3 미국 주정부의 플라스틱 규제 사례

주(州)	주요 내용
캘리포니아	플라스틱 오염 생산자책임법(SB54): 2032년 1월부터 생산되는 일회용품, 포장재, 일회용 식품 용기 생산자는 재활용 또는 퇴비화가 불가능한 포장재나 제품 판매·배포·수입·주내 반입 불가. 2022.1월 상원 통과
일리노이	플라스틱오염 및 재활용 현대화법(SB3935): 특정 제품의 생산자는 생산자책임프로그램 관리조직에 등록, 생산자책임조직은 수거된 제품이 적정하게 재활용되도록 재활용시스템 참여자와 협력해야 함. 2022.1월 제안
워싱턴 D.C.	기본계획개정법(B24-001): 스튜어드십 프로그램을 제약, 섬유, 플라스틱병 등으로 확장. 2021.8월 발효
워싱턴	재활용 및 폐기물 저감을 위한 특정물질관리법(SB5022): 플라스틱 음료용기에 대해 재생 원료 사용 기준 마련(2023년 15%, 2031년 50%). 2021.7월 발효

출처: Retail Compliance Center, EPR Packaging Bills introduced to States, https://rilastagemedia.blob.corewindows.net/rila-web/rila.web/media/media/pdas/roc/epr-packaging-bills-introduces-to-states_1.pdf?ext=pdf; Openstates: <https://openstates.org>(검색일: 2022.4.25.)

■ 중국

- 2018년 중국은 전체 폐기물의 52%는 매립, 45%는 소각 처리하였으나, 플라스틱을 비롯한 폐기물의 재활용률의 공식 데이터는 파악이 어려움.
- 2020년 1월 세계 최대 플라스틱 생산 및 소비국인 중국은 ‘플라스틱오염 방지정책’을 강화하여 분리수거 도입, 일회용품 생산 및 사용 제한, 폐플라스틱 수입금지 등의 규제를 단계적으로 강화해 가고 있음(표 3.4, 3.5).
 - 일회용 플라스틱 제품의 생산·판매·수입 금지
 - 두께 0.025mm 미만의 플라스틱 쇼핑봉투 및 두께 0.01mm 미만의 농업용 멀칭필름(mulching film)의 생산, 판매 금지
 - 폐플라스틱 수입금지
 - 2020년 말 일회용 식기류 및 면봉 생산, 판매 금지
 - 플라스틱 microbeads를 포함하는 가정용 화학품의 2022년 말 판매금지
 - 소매점 등에서 환경을 배려한 천, 종이로 만든 제품, 생분해성 봉투 등 플라스틱이 아닌 제품 사용을 장려
 - 신선식품에는 생분해성 포장 필름·봉투 사용 장려
 - 바이오매스 기반 제품의 사용 촉진(예: 식품안전기준을 만족하는 짚으로 만든 도시락 용기나 생분해성 봉투 등)
 - 농업진흥에 대한 지원과 함께 분해성 필름 사용 촉진

표 3.4 중국의 플라스틱 규제 현황

대상품목	2020년 말	2022년 말	2025년 말
플라스틱 봉투 (비분해성)	주요 도시의 쇼핑물, 슈퍼마켓, 약국, 소매점, 테이크아웃 음식점 등에서 금지	대상범위를 전국 도시로 확대	대상범위를 신선식품 시장에도 확대
일회용 플라스틱 식기류 (비분해성)	- 전국 외식산업에서 빨대 금지 - 성 수준 이상 도시의 외식산업에서 식기류 금지	식기류 금지의 대상범위를 시 수준 이상 도시로 확대	성 수준 이상 도시에서의 외식산업에 식기류 사용량을 30% 삭감
호텔에서 공급되는 플라스틱 제품	-	전국 고급 호텔에서 플라스틱 제품 무료 배포 금지	대상범위를 모든 호텔, 민박 등에 확대
우편, 택배 용도의 플라스틱 제품 (비분해성)	-	주요 도시의 운송, 택배업에 있어서 플라스틱 포장봉투 및 부직포 봉투 금지	전국 운송·택배업에 있어서 플라스틱 포장봉투, 테이프 및 부직포봉투 금지

- 상기 규제의 실시와 함께 대체 제품이나 환경을 배려한 제품의 사용을 촉진해 가는 ‘행동계획서’를 제시함(표 3.5).
 - 플라스틱 제조업자는 관련 법률, 규제, 기준에 따라 제품을 생산하고, 인체·환경에 악영향을 주는 화학물질을 첨가하면 안 됨.
 - 안전성, 재활용(recycle)성을 높이기 위하여 환경을 배려한 제품 설계 촉진
 - 환경을 배려하고 기능성 높은 신소재의 적극적인 도입, 품질기준을 만족하는 재활용 플라스틱의 사용 증가, 쉽게 재활용이 가능하고 분해 가능한 대체소재·제품 개발의 촉진, 비용 저감, 효율적인 공급 증가 추진
 - 플라스틱오염 개선 행동계획: 과학적이고 신중한 플라스틱 대체 제품의 추진
 - 대나무·나무 제품, 종이 제품, 생분해성 플라스틱 제품의 life cycle에 있어서 자원·환경부하를 충분히 배려하고, 관련 제품의 식품안전기준을 향상시킬 것
 - 각종 분해성 플라스틱의 분해기구나 영향에 관한 연구를 행하고 환경안전성과 제어성을 과학적으로 평가함.
 - 기준제도의 개선, 생분해성 플라스틱의 기준 도입, 적용 지역의 분해 조건과 폐기 방법의 명확화(생분해성 플라스틱의 중요한 핵심기술의 연구개발과 성과의 전환을 진행하여, 제품의 품질과 성능을 끊임없이 향상시켜 응용 비용 삭감)
 - 생분해성 플라스틱산업의 질서 있는 발전을 촉진하고, 산업의 합리적인 배치를 지도하여 생산능력의 맹목적 확대를 방지
 - 완전 생분해성 농업용 필름의 응용을 촉진
 - 생분해성 플라스틱의 검사능력을 배증하여 생분해성 플라스틱의 허위, 위장 표시를 엄하게 조사, 대처하여 업계 질서를 규제

표 3.5 중국의 '14.5 플라스틱오염 제어 행동계획'

목표	주요 내용
플라스틱 생산과다 사용 원천 저감	- 플라스틱 제품의 녹색 설계: 표준 제정, 환경 유해성 제품 생산 제한, 과대포장 규제 - 일회용 플라스틱 제품 사용 저감, 판매 금지 및 제한, 전자상거래·배달 등 부문에서의 사용 저감, 공공부문에서의 일회용 플라스틱 사용 감축 - 플라스틱 대체품 보급 촉진: 대나무, 목재, 생분해성 플라스틱 등에 관한 연구 및 표준 도입
표준화된 재활용 및 폐기물 처분 촉진	- 표준화된 폐플라스틱 재활용과 처분 강화 - 농촌지역 플라스틱 폐기물 분리수거·운반·처분 시스템 구축 및 개선 - 플라스틱 폐기물 재활용 개선: 재활용산업 육성, 재활용기업 감독 강화, 첨단기술 및 장비 도입 - 폐기물 처분의 유해성 개선: 소각시설 및 처리 역량 개선, 생태계로의 유출 방지
핵심지역의 폐기물 정화	- 강, 호수, 바다의 플라스틱 폐기물 정화: 표준화된 정화 메커니즘, 해양폐기물과 미세플라스틱 조사, 선박 폐기물 불법 배출 단속 - 관광지에서의 플라스틱 폐기물 정화: 수거시설 확대, 표준화된 정화 메커니즘 - 농촌지역의 플라스틱 폐기물 집중 정화

http://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/20210915_1296580.html?code=&state=123

- **허난성:** 성 전역에서 플라스틱 제품 생산, 유통, 소비, 회수 처리 등 절차의 관리제도 및 체계 구축, 현 급 이상 도시에서 일부 플라스틱의 생산, 판매 및 사용 제한 및 금지, 일회용 플라스틱 제품 사용량 대폭 감소, 재활용 생분해성 대체 제품 사용 일반화, 다원적 공동관리체계 형성
- **지린성:** 일부 지역에서 플라스틱 제품의 생산, 판매 및 사용 제한 및 금지, 플라스틱오염 관리 특별행동 전개, 생분해성 플라스틱 제품 홍보 추진

■ 오세아니아 및 기타 지역

- **호주:** National Packaging 2025 규정을 발표하여, 각 주마다 로드맵은 다르지만 2025년부터는 다회용, 재활용 또는 생분해성 일회용 제품으로 사용해야 함. 각 가정에서 배출된 음식물쓰레기, garden-organic 쓰레기 등 생활쓰레기 중 호주 생분해인증(AS4736/5810 등)을 획득한 제품들은 주정부에서 별도 수거하여 산업적 퇴비화설비에서 퇴비화함[Food Organic Garden Organic (FOGO) 프로그램].
- **아프리카 케냐, 르완다, 탄자니아:** 난분해성 플라스틱 봉투 사용 규제(케냐에서는 사용 시 벌금 4,300만 원), 생분해성 비닐봉투 대체 사용
- **일본, 싱가포르, 태국:** 난분해성 플라스틱 봉투 사용 규제, 생분해성으로 대체
- **페루, 콜롬비아:** 난분해성 플라스틱 봉투 사용 규제, 생분해성으로 대체

2. 페플라스틱의 재활용

표 3.6 플라스틱 재활용 기술별 장단점

기술	설명	장점	단점
① 물리적 재활용(90%)	- 페플라스틱을 분류, 세척, 파쇄, 펠릿화하여 재활용하는 것(공정상 단량체 단위로의 분해는 불가능) - PET병 → PET 섬유로	고온·고압 등의 가혹조건이 필요 없어, 공정 구축 용이	폐기물 분류 미흡 또는 불순물(안료 등) 존재 시 물성 저하 (Down-cycling)
② 화학적 재활용(10%)	페플라스틱을 플라스틱 원료(단량체, 폴리머)로 분해하는 것(열분해, 해중합, 특정 폴리머만 녹인 후 정제하는 용매 기반 정제 등) → 중합 또는 화학적(chemical) 이용	혼합·복합 플라스틱 또는 불순물이 포함되어도 재활용 가능	반응에 에너지 소모가 많고, 대규모 시설 투자 필요
③ 열적 재활용(0%)	①과 ②의 처리에 적절치 못한 페플라스틱이나 화학적 재활용(chemical recycle)에 의한 가스화·유화시킨 것의 일부 소각	열에너지 회수 가능	대기공해를 유발하여 국제적으로는 재활용(recycle)으로 인정하지 않음
④ 생물학적 재활용(0%)	미생물 유래 효소 등을 활용하는 생물학적 분해를 통해 고분자를 모노머(단량체) 혹은 탄소로 전환하는 것	친환경적 공정	분해 시간이 오래 걸리며, 미개척 분야임(미생물별로 플라스틱을 선택적으로 분해)

■ <그림 3.2>에 플라스틱의 재활용 및 열분해 방식 개념도와 <표 3.6>에 상용화된 플라스틱 재활용 기술을 기재하였음. 재활용 방법을 보다 자세하게 기술하면 다음과 같음.

• 물리적(mechanical) 재활용

- 분리배출, 선별 등 재활용체계의 재정립이 필요함. 즉, 깨끗한 상태로 최대한 많이 회수하기 위하여 보증금체제의 확대, 분리배출의 확립, 수거 방식의 다양화, 소비자 참여를 위한 인센티브 제공 등
- 물리적 재활용으로 재생된 플라스틱은 가공 전 재료보다 물성이 저하되는 것이 많음.

그림 3.2 플라스틱의 재활용 및 열분해

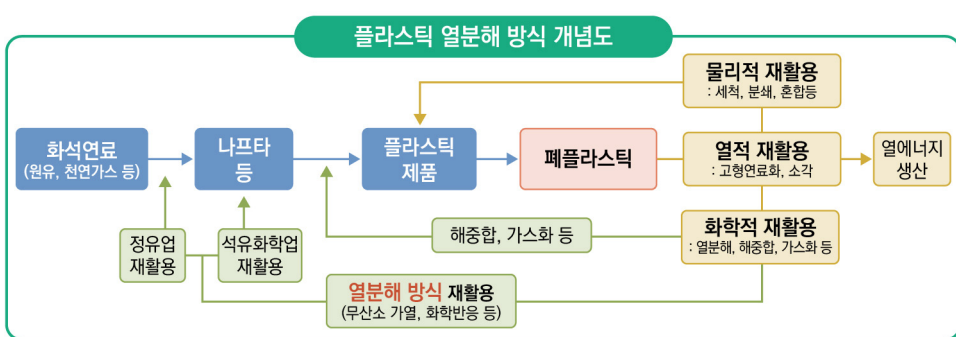
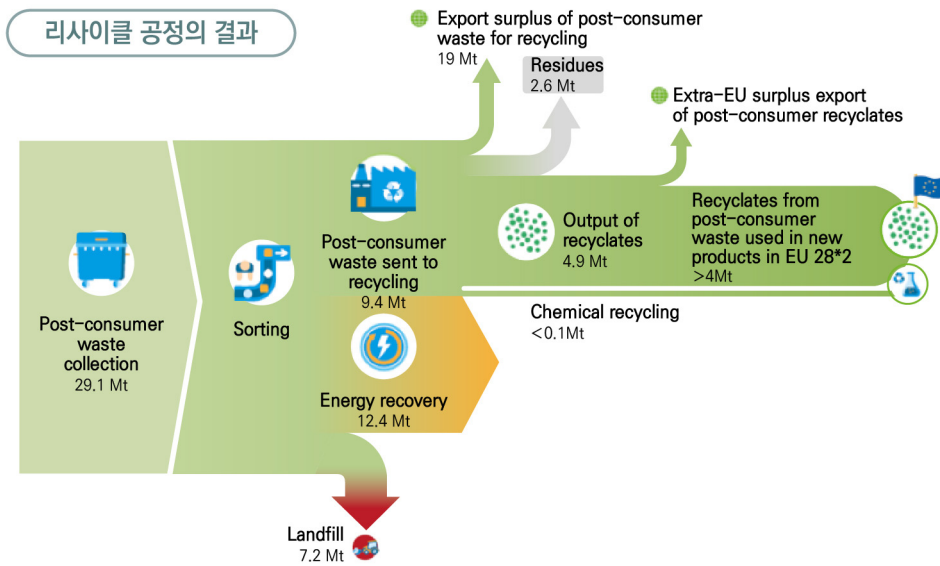


그림 3.3 폐플라스틱의 재활용 공정도



• 화학적(chemical) 재활용

- 화학적 재활용은 폐플라스틱을 가치 있는 원료물질로 업사이클(upcycle)하여, 고분자 제조 또는 다른 공정에 전용할 수 있으므로 재자원화에 의한 자원절약 효과가 매우 큼.

- 화학적 재활용의 대표적 방법(Ishimaru, 2020)

- ① [해중합법(원료 단량체화)] 한 종류의 폐플라스틱을 열분해하여 단량체로 재생해 중합 원료로 재사용함(폴리스티렌, 폴리메틸메타크릴레이트에 적합).
- ② [열분해법(유화)] 혼합된 폐플라스틱을 공기가 없는 조건하에서 열분해하여 열분해유(나프타(naphtha 등))를 제조하고, 여기서 각종 플라스틱 원료를 분리하여 사용함.
- ③ [가스화법] 혼합된 폐플라스틱을 공기 중에서 열분해하여 합성가스(일산화탄소와 수소)를 제조하고 이로부터 각종 화학품의 원료를 분리하여 사용함.
- ④ [코크스로 화학원료법] 석탄에 혼합된 폐플라스틱을 코크스로에 섞어 투입하여 공기가 없는 조건하에서 분해해서 가스, 오일, 코크스를 만들.
- ⑤ [고로환원제법(고로 원료화)] 코크스에 혼합한 폐플라스틱을 섞고 고로에 투입하여, 철광석의 환원제로 사용

- 특히 방법 ①과 ②가 순환경제 관점에 적합하여 활발히 개발되고 있으나, 현재 상업적으로 화학적 재활용이 활용되는 경우는 적음.

- 현재 가장 일반적이라고 생각되는 열분해를 이용한 화학적 재활용은 에너지소비량이 많고 또 생성물을 선택적으로 제조하기에 한계가 있음. 열분해온도를 낮추는 공정과 부가가치가 높은 화학물질을 선택적으로 제조하는 방법이 필요함(그림 3.2).

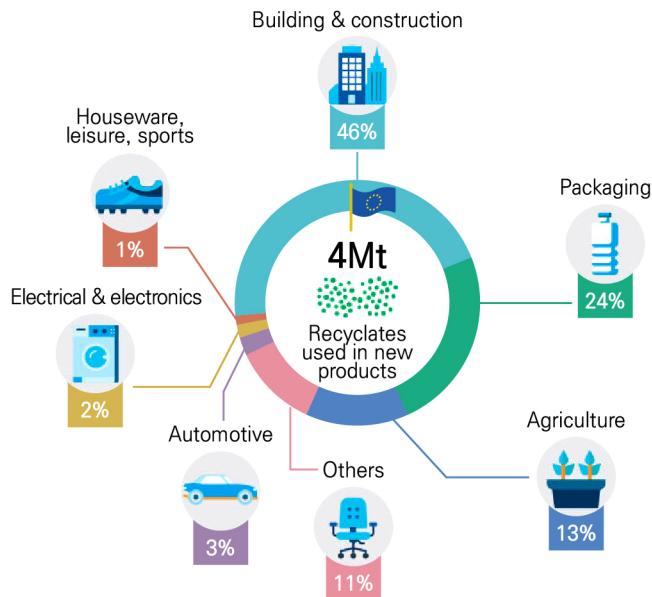
• 열적(thermal) 재활용

- 물리적 재활용이 적당치 않은 경우, 소각 및 열회수에 의해 대기 중으로의 이산화탄소 배출을 억제할 수 있으나, 금속소재가 효과적으로 재활용되고 있는 데 반하여 모든 플라스틱에는 적용시키기 어려우므로 플라스틱의 열적 재활용 비율은 매우 낮음.
- 2018년 UN환경계획(A roadmap for sustainability)에 의하면 세계 전체 포장용기의 재활용률은 14%, 열회수를 포함한 소각률은 14%로서 유효 이용되는 비율은 14~28%로 낮음.

■ 플라스틱의 재활용 특성(recyclability of plastics)(Mitsubishi UFJ 리서치&컨설팅, 2022)

- 앞에서 이야기한 감축(Reduce)과 재사용(Reuse)은 기술적으로 간단하지만, 폐플라스틱의 재활용(Recycle)은 기술적으로도 어려움에도 불구하고 대폭 확충되어야 함(그림 3.2).
- 현재 대부분의 폐플라스틱은 어떠한 형태로든 재활용이 가능하지만, 기술·경제·이론적 토대의 제한이 있어 실제로 재활용되는 양은 아주 적음.
- 생산과정 중의 스크랩처럼 특정 분야에서는 효율적으로 같은 용도로 재활용이 가능한 것도 있으나, 재활용이 어렵거나 순차적으로 재활용되는 것이 대부분임(그림 3.3).
- 이를 위하여, 플라스틱 관련 과학기술자는 현재 사용하고 있는 재활용 방법보다 더 효과적인 방법을 개발하여야 함.
- 플라스틱 폐기물·재생재의 가치가 높아지면, 플라스틱 제조업자·폐기물 처리업자의 회수·처리·재생으로의 인센티브가 높아짐.

그림 3.4 재생 플라스틱의 용도



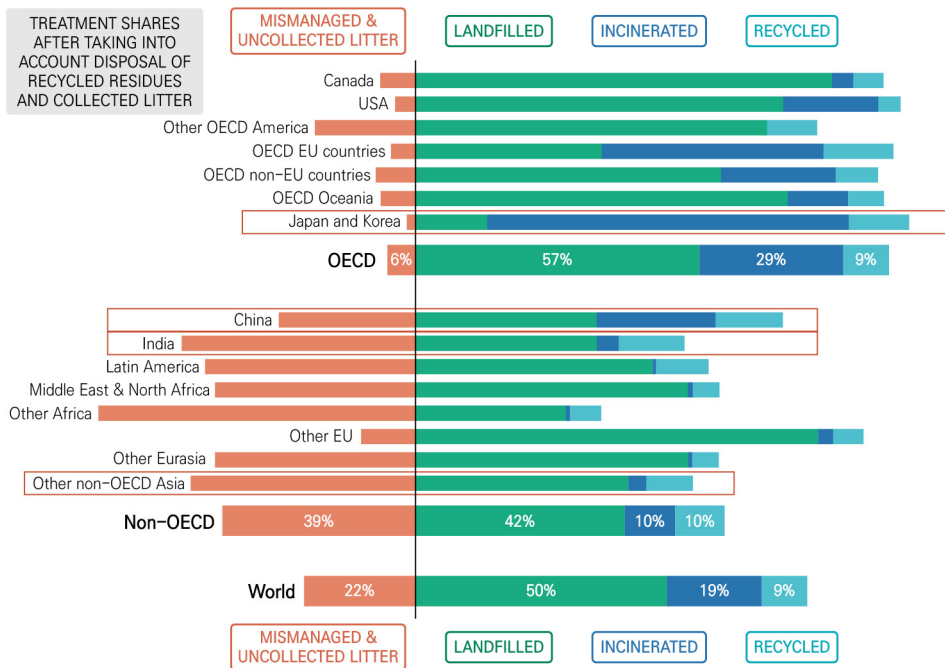
출처: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1899-circular-economy-plastics-european-overview>

- 생분해성 플라스틱도 자연으로 돌아가는 순환경제의 일환으로 재활용되는 한 가지 경로임.
- 생분해성 플라스틱은 자연에서 이산화탄소와 물로 분해되어 자연계의 탄소순환체계로 들어가므로 친환경적임. 따라서, 구미 각국에서는 생분해성 플라스틱의 퇴비화(composting)도 재활용의 한 종류로 인정하고 있음. 생분해성 플라스틱의 분해로 생기는 이산화탄소의 양은 매우 작음.
- 이에 따라 석유 기반 플라스틱의 대체물질로서, 즉 재생가능한(renewable) 자원 기반(바이오매스 등) 원료로부터 화학적 또는 생물학적 방법으로 얻어지는 바이오플라스틱과 자연환경에서 완전히 분해되는 생분해성 플라스틱이 활발하게 상업화되고 있음.
- 유럽과 일본 등 선진국에서는 폐플라스틱 문제 해결을 위한 3R+Renewable을 새로운 사업 창출의 기회로 보고, 환경부하를 주지 않는 대체소재의 개발·재사용이나 재생이용하기 쉬운 제품·시스템의 에코디자인(ecodesign) 설계, 자원을 유효 활용할 수 있는 재처리 방법의 개발 등에 적극적으로 나서고 있음.

3. 폐플라스틱의 처리 현황

- 폐기물은 매립(landfill), 소각(incineration) 또는 재활용(recycling)으로 처리됨. OECD 통계에 의한 세계 각국의 폐플라스틱의 처리 현황은 <그림 3.5>와 같음. 세계적으로 매립 처리의 비중이 평균 50%이고 이 중 OECD 국가들이 57%, 비OECD 국가들이 42%임. 반면에 버려지거나 잘못 처리되는 폐플라스틱의 비중은 세계 평균이 22%인데 OECD 국가들은 6%로 작지만 비OECD 국가들은 37%로 매우 높아서 환경을 해치고 있음.
- 특히 일본에서는 재활용을 위해 기술한 ①, ②, ③ 3가지로 분류하고 있음(舟橋, 2019). 그러나 유럽과 미국은 단순 recycle과 thermal recycle 두 가지로만 분류함<표 3.7>.

그림 3.5 세계 각국의 폐플라스틱 처리 현황



출처: OECD 통계(2022)

표 3.7 일본 및 구미의 폐플라스틱 처리 내용

(단위: 만 톤)

국가	연도	총 처리량	Material recycle	Chemical recycle	Thermal recycle	소각	매립
한국*	2017	711	222(31%)	-	77(11%)	293(41%)	39(5%)
일본	2017	903	211(23%)	40(4%)	524(58%)	76(8%)	52(6%)
	2018	891	208(23%)	39(4%)	503(56%)	73(8%)	68(8%)
국가	연도	총 처리량	Recycle		열처리	-	매립
미국	2017	3537	296(8%)		559(16%)	-	2682(76%)
유럽	2018	2910	940(32%)		1240(43%)	-	720(25%)

* 한국 통계(장용철 외, 2022)는 <표 1.3>에 2021년 국내 플라스틱 생산량이 총 620만 톤인 것과 비교하면 총 처리량이 과다하게 산정된 것으로 생각됨.

출처: 石丸(2020); 유럽은 EU 27개국과 영국, 노르웨이, 스위스 합계

한국의 플라스틱 폐기물에 관한 통계는 많지 않고 신뢰성이 약함(윤경준, 2020).

- 환경부와 한국환경공단은 매년 “전국 및 행정구역별 폐기물 통계”를 발표하고 있는데, 2020년 플라스틱 폐기물을 포함하는 생활계폐기물은 2,254만 톤이고, 연도별 성장 변화 통계에서 2020년 폐합성수지류를 387만 톤으로 집계하였음<뒤의 표 6.1, 6.2>.
- 한편, 연합뉴스(2020년 9월 13일)가 보도한 ‘전국 플라스틱 폐기물 발생량’은 2018년 233만 톤/년임.

- 또한, 한국석유화학협회 통계에 의한 한국의 총 플라스틱 소비량은 2020년 약 610만 톤/년이고, 그중에 포장재 및 일회용품으로 많이 사용되는 저밀도폴리에틸렌, 고밀도폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스티렌 및 음료수 용기인 PET병의 합계는 약 476만 톤임<표 1.3>.
- 결론적으로 2020년 현재 국내 플라스틱 폐기물의 양은 230만~390만 톤으로 보고되고 있는데, 보다 정밀한 통계가 필요함.

■ 장용철 외(2022)는 한국의 플라스틱 생산량, 소비량 및 플라스틱 폐기물의 양과 처리 방법에 대한 보고서에서<표 3.8>, 총 소비량이 695만 톤이고, 플라스틱 폐기물의 총량 711만 톤 중에 소각이 290만 톤(41%)으로 제일 많고, 재활용이 220만 톤(31%), 에너지 회수가 800만 톤(11%)이고 매립이 40만 톤(6%)으로 보고하였음. 그러나, 이 통계는 과다하게 산정된 것으로 보임.

표 3.8 한국 및 외국의 플라스틱 폐기물 처리 현황

구분	Korea 2017 (kilotons)	Japan 2018 (kilotons)	China 2017 (kilotons)	US 2015 (kilotons)	EU28+2 2018 (kilotons)	Global 2018 (kilotons)
Virgin resin Production	17,501	10,670	58,000	42,769	56,100	360,000
Recycled resin inputs	-	760	-	1,436	4,900	30,000
Consumption (per capita in kg)	6,952 (135)	9,920 (78)	63,320 (46)	35,547 (111)	55,400 (105)	385,000 (51)
Packaging (per capita in kg)	3,232 (63)	-	26,190 (19)	14,876 (46)	-	172,000 (23)
Waste generation	-	-	44,270	-	-	250,000
Waste collection (per capita in kg)	7,112 (138)	8,910 (70)	52,770 (72)	35,243 (110)	29,100 (55)	173,000 (23)
Landfill	389 (6%)	680 (8%)	24,200 (46%)	27,061 (77%)	7,200 (25%)	72,000 (42%)
Incineration	2,934 (41%)	730 (8%)	14,530 (28%)	5,013 (14%)	12,400 (43%)	51,000 (29%)
Energy recovery	765 (11%)	5,030 (56%)				
Recycling	2,218 (31%)	2,470 (28%)	13,200 (25%)	2,431 (7%)	9,400 (32%)	50,000 (29%)
Waste not collected	-	-	840	-	-	77,000

a) Source: L. PWMII(2019)

b) Covers five major plastics (i.e., PE, PP, PVC, PS, ABS) that account for 79% of the primary plastic production in china. Source : Jiang et al. (2020)

c) Covers seven major plastics (i.e., LDPE/LLDPE, HDPE, PET, PP, PS, PVC, ABS, SAN, PC, PI, PUS, and other). Source: Di et al.(2021)

d) Covers LDPE, HDPE, PP, PVC, PS, EPS, PA, PET, ABS, ASA, SAN, PMMA, and other plastics, including PUR Source : Plastics Europe(2019)

e) Extrapolated based on data from 44 countries that represent 60% of the world population and 80% of the global GDP(EU28, Norway, Switzerland, Turkey, United States, Canada, Brazil, Colombia, China, India, Japan, Indonesia, Philippines, Thailand, Malaysia, South Africa and Ghana). Source : Global Plastics Alliance(2019)

* Per-capita values were calculated using population statistics from the World Bank and Eurostat.

출처: 장용철 외(2022)

4. 대체물질로서 바이오플라스틱과 생분해성 플라스틱의 역할

- 목재 등을 비롯한 천연유기재료는 종류를 불문하고 이들 재료를 분해할 수 있는 미생물이 자연계에 존재하기 때문에 미생물의 작용으로 늦든 빠르든 최종적으로 이산화탄소와 물로 완전히 분해됨.
- 그러나, 종이는 자연계에서 썩으므로 플라스틱보다 무조건 환경친화적이라는 고정관념은 틀린 생각임. 종이는 이산화탄소를 흡수하는 나무를 벌목해야 하고 생산과정에서 과량의 폐수를 배출하고 표백제, 형광증백제 등의 약품처리 등으로 오히려 더 많은 에너지와 온실가스 배출을 유발한다는 보도도(뉴욕타임스) 있음. 또한, 종이와 플라스틱 봉투의 이산화탄소 배출을 비교한 논문(Lewis et al., 2010)은 플라스틱 봉투의 이산화탄소 배출량은 7.52kg/개 인데 종이팩은 훨씬 더 많은 44.74kg/개를 방출한다고 발표하였음. 따라서, 환경부의 정책 중 종이봉투·용기는 친환경으로 간주하여 일회용 포장재의 규제 대상에서도 제외되고 있는 것은 재고하여야 함.
- 석유 기반 플라스틱의 대체 전략으로 이상적으로 완전하지는 않지만 바이오플라스틱이 강조되고 있음. 바이오플라스틱은 재생가능한 자원으로부터 얻을 수 있는 바이오매스 기반 플라스틱과 완전히 분해되는 생분해성 플라스틱으로 나뉨. 바이오에탄올로부터 얻어지는 바이오폴리에틸렌과 같은 바이오매스 기반 플라스틱은 온실가스를 감축하는 효과가 있지만, 자연환경에서 분해되지 않는 결점이 있음. 생분해성 플라스틱의 물성과 강도는 현재 기존 석유 기반 플라스틱보다는 조금 미흡하지만, 사용 후에는 자연계에 존재하는 미생물의 작용으로 인해 최종적으로는 이산화탄소와 물로 분해되어 미세플라스틱 문제를 해결할 수 있는 전략임(임승순, 2021; Flury et al., 2021; Ghosh et al., 2021; Moshood et al., 2022).
- 바이오매스 기반 플라스틱과 생분해성 플라스틱의 명확한 구별 필요. 현재 '바이오플라스틱', '바이오매스 기반 플라스틱' 및 '생분해성 플라스틱'들이 섞여서 혼용되고 있음<표 3.9>.
- 이제까지 플라스틱 개발 목표는 더 강하고 질긴 특성이 요구되는 내구성 소비재와 강도가 중요하지 않은 비내구성 용도로 분류되고 있음.
- 모든 플라스틱을 생분해성으로 대체할 필요는 없으므로, 내구성 제품에 관하여서는 오히려 플라스틱이 분해되지 않는 기존 석유 기반 플라스틱이나 바이오매스 기반 플라스틱으로 사용하는 것이 바람직함.

■ 그러므로 기존 석유 기반 플라스틱과 바이오플라스틱(생분해성 플라스틱 포함)을 상호 보완하여 사용하여야 함을 정책 수립 시에 반드시 고려해야 함.

■ 또한 Ellen MacArthur 재단에서 제안하고 있는 “새로운 플라스틱 경제(New Plastic Economy)”는 플라스틱 순환경제구조로 폐플라스틱이 자원의 한 축으로 사용될 수 있는 경제구조를 뜻함. 생분해성 플라스틱은 분해 후 그 자원이 자연계에서 순환되어 이러한 순환경제구조에 포함됨.

표 3.9 바이오플라스틱, 생분해성 플라스틱, 바이오매스 기반 플라스틱 용어

구분	석유 기반	(석유+바이오매스) 기반	바이오매스 기반
생분해성 높음	<생분해성 플라스틱> • Poly(butylene adipate terephthalate)(PBAT) • Poly(ethylene terephthalate succinate) • 폴리비닐알코올 등	<바이오매스 기반 생분해성 플라스틱> • Bio poly(butylene succinate) (PBS) • poly(lactic acid)(PLA) + PBAT 블렌드 • Starch+Polyester 블렌드 • Poly(butylene terephthalate succinate)	<생분해성 바이오플라스틱> • PLA • Polyhydroxybutyrate(PHB) 등의 polyhydroxyalkanoate (PHA)
생분해성 낮음	<플라스틱> • 폴리에틸렌(PE) • 폴리프로필렌(PP) • Poly(ethylene terephthalate)(PET) • 폴리염화비닐(PVC) • 폴리스티렌(PS) • 폴리우레탄(PU) • 에폭시수지 등	<바이오매스 기반 플라스틱> • 바이오PET30 • 바이오폴리아미드(PA) 610,410, 510, 1012,10T, 11T, MXD10 • 바이오폴리카보네이트 • 바이오폴리우레탄 등	<협회의 바이오매스 기반 플라스틱> • 바이오PE • 바이오PET100 • 바이오PA11 • 바이오PA1010 등

■ 생분해성 플라스틱으로 우선 대체해야만 하는 것은 비내구성 제품으로 사용 후 회수가 이루어질 수 없는 용도인데, 예를 들면 일회용품, 포장재, 낚싯줄 및 어망(강·바다에 버려질 수 있음), 농업용 멀칭필름(폐필름 수거 노력 없어짐) 등이 있음.

■ 한편, PC나 가전제품 등 내구성 제품에 관해서는 오히려 플라스틱이 분해되면 안 되므로 기존 플라스틱을 계속 이용하되 적절히 회수·수거하여 재사용, 재활용하여야 함<표 3.10>.

■ 생분해성 플라스틱은 그 자체로서 일반 플라스틱과 같이 물질재활용이 가능함. 국내 가공 회사에서 식품포장용 PLA(polylactic acid) 트레이를 수거하여 신원료 PLA에 20~30% 혼합하여 유색 시트 제품으로 생산하고 있음. 또한 논문(Quitadamo et al., 2018) 발표에 의하면 기존 플라스틱과 혼합되어도, 예를 들어 고밀도폴리에틸렌을 PLA와 블렌드하여도 강도가 크게 감소하지 않았음. 중국에서는 PBAT(Poly(butylene adipate terephthalate))나 PLA를 단독으로 재활용한 수지나 또는 다른 고분자와 같이 블렌드한(예: PBAT+PLA+전분) 재생원료가 판매되고 있음(중국 ALIBABA 온라인 B2B 거래 플랫폼).

표 3.10 생분해성 플라스틱으로 대체할 수 있는 우선순위

구분	내구성 제품	비내구성 제품
회수·수거 가능	<생분해 불필요> 기존 플라스틱 제품을 계속하여 회수·처분함 → PC, 가전제품 등	<생분해 필요·우선순위 낮음> 생분해성을 부여하는 이점이 큰 것은 생분해성 플라스틱으로 대체 → 멀칭필름 등
회수·수거 불가능	<생분해 필요> 기존 플라스틱 제품의 회수·처리를 철저히 수행	<생분해 필요·우선순위 높음> 생분해성 플라스틱으로 필수적 치환 → 일회 용품, 포장재, 낚싯줄, 어망 등

IV

해외의
바이오플라스틱산업
동향

Ⅳ. 해외의 바이오플라스틱산업 동향

1. 생분해성 플라스틱들의 기술적 특성

■ 바이오플라스틱은 바이오매스(biomass)에서 유래된 원료로 제조되는 바이오매스 기반 플라스틱과 자연계에서 최종적으로 완전히 분해되는 생분해성 플라스틱으로 나뉨. 바이오매스 기반 플라스틱은 바이오에탄올로부터 제조한 에틸렌을 중합한 바이오폴리에틸렌, 그리고 발효로 얻어지는 propanediol과 기존의 terephthalic acid를 축합한 poly(trimethylene terephthalate)(PTT)가 대표적이고, 탄소저감에는 기여하지만 자연계에서 완전히 분해되지 않는 단점이 있음.

■ 플라스틱의 분해

- 여러 가지 생분해성 및 퇴비화 가능 플라스틱이 상업화되었는데, 그 용어의 의미나 분해에 필요한 조건·시간에 관하여 일반시민·산업계 간에 혼란도 있음.
- 모든 플라스틱의 서로 다른 조건에서의(즉, 자연계와 실험실 양쪽 환경에서) 분해거동 및 분해생성물의 최종 형태를 이해하기 위한 연구가 필요함. 얻어진 연구결과는 화학자가 내구성 또는 필요에 따라 분해되는 플라스틱을 설계하기 위하여 또한 비의도적인 환경에서의 플라스틱 제품의 분해를 방지하기 위한 측면에서 도움이 됨.

■ 생분해성 플라스틱의 정의

- ASTM D6400, ISO 17088에서 규정한 기간(45일) 내에 미생물의 작용으로 물질이 붕괴되고 저분자화된 후에(1차분해), 미생물이 이들 저분자를 흡수하여 대사 작용을 통해 최종적으로 미생물균체와 이산화탄소, 메탄가스 등을 만족할 수준으로 생성하는(최종분해) 플라스틱
- 또한, EU의 퇴비화 가능 플라스틱의 정의는(European standard, EN 13432) 12주 내에 2mm의 채 중에 초기 중량의 10% 이상이 남지 않도록 잘게 분해될 것을 요구하지만, 채를 통과한 플라스틱 조각도 완전히 분해될 필요가 있고, 분해까지의 허용 시간은 용도에 따라 달라짐.
- 현재 생산 사용되고 있는 여러 가지 생분해성 플라스틱의 기계적, 열적, 가공적 특성이 더욱 향상되고 싸게 대량생산하는 공정이 확립되어야만 기존 플라스틱 포장재 및 일회용품을 성공적으로 대체할 수 있음.
- 현재 상업화된 생분해성 플라스틱들의 특성과 제조회사는 <표 4.1>과 같음.

표 4.1 각종 바이오매스 기반 플라스틱의 특성과 제조회사

수지	각종 바이오매스 원료	최대 바이오매스 (%)	생분해성	용도	세계 생산능력 (만 톤)		제조회사
					2019년 (실적)	2024년 (예측)	
Bio PE	bioethanol 및 식물유 기반 bionaphtha	100	X	석유 기반 PE, PP, PET와 같은 용도	25	29	Braskem(브라질), LyondellBasell(미국), Dow(미국), SABIC(사우디아라비아)
Bio PP	식물유 기반의 bionaphtha	100	X		2	13	LyondellBasell(미국), Borealis(오스트리아), SABIC(사우디아라비아)
Bio PET	terephthal산 및 바이오매스 기반 ethylene glycol(EG)	약 30	X		21	15	[EG]: India Glycols(인도) [Polymer]: Indorama Ventures(태국), Lotte Chemical(한국), Far Eastern New Century(대만), Toray(일본), Teijin(일본), Toyobo(일본)
Bio PA	-	100	X	자동차부품, 전기전자 부품	25	30	Arkema(프랑스), Evonik(독일), BASF(독일), DSM(오스트리아), DuPont(미국), Toray(일본), Unitika(일본), Toyobo(일본), Mitsubishi gas(일본)
Bio PA 11	피마자유	100	X				
Bio PA610	피마자유 (한쪽 단량체)	약 60	X				
PLA	바이오매스 기반 젖산	100	O	식품 용기, 섬유, 농업용 자재	29	32	NatureWorks(미국), Total Corbion PLA(오스트리아), Zhejiang Hisun Pharmaceutical(중국)
PBS	바이오매스 기반 호박산 (한쪽 단량체)	약 50	O	농업용 자재, 각종 식기, 봉투	9	9	PTT MCC Biochem(태국)
PHA (PHBV, PHBH)	당 및 식물유 (미생물이 체내에 생성 축적)	100	O	식기류, 농업용 자재	3	16	Newlight Technologies(미국), Danimer Scientific(미국), Tianan Biologic Material(중국), Kaneka(일본)
전분+폴리 에스터수지	가소화전분+ 바이오 플라스틱과 블렌드	100	O	야채·과일 봉투, 농업용 자재	45	45	Novamont(이탈리아)
Bio PC	바이오매스 기반 isosorbide (한쪽 단량체)	약 60~70	X	자동차 용도	-	-	Mitsubishi Chemical(일본), Teijin(일본)

출처: European Bioplastics Association, nova-Institute(2021) "Bioplastic Market Development Update 2019"

■ 현재 생산되고 있는 생분해성 플라스틱은 전분계 블렌드(blends), PLA(poly(lactic acid), PHA(poly(hydroxyalkanoates), PBS(poly(butylene succinate))와 PBAT(poly(butylene adipate terephthalate))가 대표적이고, 그 특성과 생산공정은 아래와 같음.

• 전분계 블렌드

- 전분은 친수성이 매우 크고 용융되지 않으므로 소수성인 플라스틱과 블렌딩(blending)하기 어려움. 초기에는 전분을 에스터화하거나 부분적으로 호화시켜서 소수성을 증가시킨 가소화전분(thermoplastic starch)을 여러 가지 플라스틱과 블렌드한 제품들이 개발되었었음.

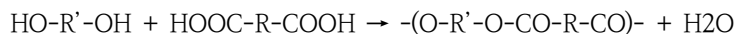
표 4.2 Mater-Bi 필름의 물성

Test	Procedure	Unit	Mater-Bi film	PE film
Melt Flow Index	ASTM D1238	dg/min	2-6	0.1-22
Strength at break	ASTM D882	MPa	25-45	8-16
Elongation at break	ASTM D882	%	350-1000	150-600
Young's modulus	ASTM D882	MPa	80-350	100-200
Tear strength	ASTM D1938	N/m	70-150	60
Processibility	-	%	80-100	100
Permeability	LYSSY	g/30um·m*24h	350-1000	15

- 1980년대 초반 이탈리아의 Novamont사가 가소화전분을 폴리비닐알코올과 혼합하여 가공성이 있는 전분계 블렌드 Mater-Bi를 발표하였음. 그 후 폴리비닐알코올 대신에 보다 생분해성이 뛰어나고 가공성이 우월한 폴리카프로락톤(polycaprolactone, PCL)을 블렌딩하여 내수성과 생분해성을 더욱 개선하였음. <표 4.2>는 가소화전분+Polycaprolactone계 Mater-Bi 필름과 폴리에틸렌(PE) 필름의 물성을 비교한 것임. 최근에는 폴리카프로락톤 대신에 보다 강도가 우월한 PBAT(poly(butylene adipate terephthalate))와 블렌드한 제품을 주로 생산하고 있고, Eastman Chemical사로부터 PBAT 사업을 인수하여 가소화전분+PBAT 수지를 총 15만 톤 생산하고 있음.

• PBS(poly(butylene succinate))와 지방족 폴리에스터

- 지방족 폴리에스터(aliphatic polyester)는 지방족 2염기산과 2가알코올의 축합중합으로 제조됨. 1940년대 DuPont사가 최초의 합성섬유로서 개발하다가 열과 수분에 약하고 강도가 약하여 포기하고, 지방족 폴리아미드로 전환하여 나일론을 개발하였음. 이 지방족 폴리에스터가 근래에 생분해성 플라스틱으로 다시 개발된 것임.



- <표 4.3>에서 보는 바와 같이 지방족 폴리에스터는 단량체의 탄소수가 증가할수록 융점이 낮아지고 강도가 감소하는 반면에 유연성은 증가됨. 이 중 butanediol과 succinic acid를 축합한 PBS(poly(butylene succinate))와 butanediol과 adipic acid를 축합한 PBA(poly(butylene adipate))가 강도가 적당하고 가공성이 우수하여 플라스틱으로 응용되고 있음.

표 4.3 대표적 지방족 및 방향족 폴리에스터

고분자	구조식	융점(°C)	인장강도(MPa)	연신률(%)
PBS poly(butylene succinate)	$-O-CH_2CH_2CH_2CH_2-O-OC-CH_2CH_2-CO-$	114	21	320
PES poly(ethylene succinate)	$-O-CH_2CH_2-O-OC-CH_2CH_2-CO-$	100	38	500
PEA poly(ethylene adipate)	$-O-CH_2CH_2-O-OC-CH_2CH_2CH_2CH_2-CO-$	55	-	-
PBA poly(butylene adipate)	$-O-CH_2CH_2CH_2CH_2-O-OC-CH_2CH_2CH_2CH_2-CO-$	70	-	-
PET poly(ethylene terephthalate)	$-O-CH_2CH_2-O-OC-\text{C}_6\text{H}_4-CO-$	270	57	50-130
PBT poly(butylene terephthalate)	$-O-CH_2CH_2CH_2CH_2-O-OC-\text{C}_6\text{H}_4-CO-$	224	56	250
PBAT poly(butylene adipate terephthalate)	$-O-CH_2CH_2CH_2CH_2-O-OC-CH_2CH_2CH_2CH_2-CO-OC-\text{C}_6\text{H}_4-CO-$	115	21	670

- 반면에, 보통 폴리에스터로 부르고 있는 PET(poly(ethylene terephthalate))는 2가 알코올인 ethylene glycol과 방향족 2염기산인 terephthalic acid를 축합시킨 구조로서 합성섬유, 음료수 용기, 식품 트레이 등으로 많이 쓰이고 있으나, 생분해되지 않음. PBT(poly(butylene terephthalate))는 butanediol과 terephthalic acid를 축합한 것으로(표 4.3), PET보다 사출·압출 가공성이 우월하나 역시 생분해되지 않음.
- 1993년 일본의 Showa Highpolymer사는 PBS(poly(butylene succinate))계 플라스틱을 개발하여 Bionolle라는 제품을 소개하였음. 핵심기술은 축합으로 제조된 저분자량 고분자를 추가로 diisocyanate로 결합(coupling)하여 고분자량으로 제조하는 방법임. PBS는 융점이 114℃로서 강도와 연신율, 특히 가공성이 PE와 비슷하여 특히 중소 가공업체의 호평을 받았음(Barletta et al., 2022). 후에 PBA(poly(butylene adipate)) 단위를 추가로 도입하여 융점을 약 100℃로 낮춘 PBSA(poly(butylene succinate adipate)) 공중합체를 개발하였음. 초기의 생산규모는 3,000톤/년이었으나, 2016년 생산을 종결하였음.

표 4.4 Mitsubishi Chemical Company(MCC)의 PBS 물성

Properties	test method	unit	BioPBS		
			FZ71	FZ91	FZ92
Density	ISO1183	g/m ³	1.26	1.26	1.24
MFR (190℃, 2.16kg)	ISO1133	g/10min	22	5	4
Melting Point	ISO3136	℃	115	115	84
Yield Stress	ISO527-2	MPa	40	40	17
Stress at Break	ISO527-2	MPa	30	36	24
Strain at Break	ISO527-2	%	170	210	380
Flexural Modulus	ISO178	MPa	630	650	250
Flexural Strength	ISO178	MPa	40	40	18
Izod Impact Strength	ISO180	KJ/m ²	7	7	47
Heat Deflection Temperature(0.45MPa)	ISO75-2	℃	95	95	63
Rockwell Hardness	ISO2039-2	R Scale	107	107	56
Remarks	-	-	Standard grade		Flexible grade

- 2003년 일본의 Mitsubishi Chemical Company(MCC)가 diisocyanate 결합공정이 생략된 고분자량 PBS를 3,000톤 생산하여 GSPla(Green Sustainable plastics)라는 이름으로 시장에 진출하였고, 최근에 태국과 합작회사 PTT MCC Biochem사를 세우고 2만 톤/년을 생산하고 있음. <표 4.4>에서 PBS로 보이는 standard grade의 강도는 저밀도PE보다 강하여 고밀도PE 및 폴리프로필렌(PP)에 가까운 반면에 신장률은 다소 떨어짐. PBSA 공중합체로 보이는 flexible grade는 특히 신장률이 매우 커서 유연성이 증가되었고 필름의 강도가 고밀도PE보다 높은 반면에 인열강도가 다소 낮음.

- 또한 중국 Zhejiang Hangzhou Xinfu Pharmaceutical사가 1만 3천 톤의 PBS를 생산하고 있음.

- 국내는 1980년대 이래화학이 독자 기술로 PBS를 개발하여 그 기술력을 국제적으로 인정받았으나, 경영 악화로 삼성정밀화학, 다시 롯데정밀화학, 새한폴리머로 인수되었다가, 최근에 티엘씨코리아-베트남 안팏(AnPhat) 합작회사가 인수하여 안코바이오플라스틱으로 개명하였으며 생산규모는 2,000톤/년임.

• PBAT(poly(butylene adipate terephthalate))와 지방족·방향족 폴리에스터 공중합체

- PET, PBT와 같은 방향족 폴리에스터는 강도가 우수한 반면에 생분해되지 않고, PBS와 같은 지방족 폴리에스터는 강도가 약하지만 생분해성이 우수함. 따라서 이 두 가지 물질을 혼합하여, 즉 지방족 폴리에스터에 방향족 단위를 도입하여 강도와 생분해성을 겸비한 지방족·방향족 폴리에스터 공중합체가 개발되었음. 방향족 단위의 함량이 증가하면 생분해성이 낮아지므로 방향족 단위의 화학적 구조 및 그 배합 비율과 미세구조 조절이 핵심기술임.

- Butanediol과 adipic acid+terephthalic acid를 공축합한 PBAT(poly(butylene adipate terephthalate))가 제일 대표적으로서 물성과 가공성이 가장 우수하고 생분해성이 확인되었음 (Jiao et al., 2020). PBAT의 용점은 약 110℃, Tg는 -30℃로서 저밀도PE와 비슷한 물성을 나타냄. 또한 이러한 PBAT는 현재의 PET 회사들이 기존의 PET 생산설비에서 그대로 생산할 수 있는 이점도 있어 앞으로 활발한 시장 전개가 예상됨.
- 세계적인 PET 생산회사인 미국 Eastman Chemical사, DuPont사 및 독일의 BASF사가 각각 EastarBio, Biomax, Ecoflex라는 상품명의 PBAT를 시장에 출시하였음. BASF사의 Ecoflex는 PBT에 아디핀산을 도입하고 추가로 branching을 도입하여 유연성이 큰 소재로 알려졌고, 생산규모는 독일에 7만 4천 톤/년, 중국에 6만 톤/년임. Eastman Chemical사의 EastarBio는 Ecoflex와 조성은 비슷하나 선형구조이며, 이탈리아의 Novamont사로 매각되었음. DuPont사의 Biomax는 PET에 아디핀산을 도입한 것으로서, 이 두 제품은 보다 강하고 유연성은 작은 특성이 있는 것으로 알려져 있음. PBAT 필름은 인열강도와 신장률이 뛰어나며 퇴비화 조건에서 생분해성이 확인되었음.

표 4.5 DuPont사의 Biomax 이축연신 필름의 강도

	unit	method	biomax®	PLA	OPP	O-PET
Thickness	Micron	-	20	20	20	25
Specific Gravity	103kg/m ³	JISK7112	1.35	1.26	0.91	1.40
Tensile Strength (MD/TD)	MPa	JISK7127	130/130	100/120	130/260	210/220
Elongation(MD/TD)	%	JISK7127	180/170	110/90	200/60	120/120
Tensile Modulus (MD/TD)	MPa	JISK7127	3200/3300	3300/4200	2100/4200	5200/5400
Tear Strength (MD/TD)	N	JISK7128	0.35/0.10	0.25/0.15	0.25/1.0	0.15/0.15
Imapck Strength	J	film impact (1/2 inch method)	0.8	0.9	0.7	1.0
Haze	%	JISK6711	1.0	1.2	2.0	3.0
Transparency	%	JISK6711	90	93	92	88
Thermal Shrinkage (MD/TD)	-	-	-	-	-	-
100℃× 15min	%	-	1.5/0.5	1.0/0.5	1.0/0.5	0.5/0.0
120℃× 15min	%	-	2.5/0.5	2.5/0.5	2.5/1.0	0.5/0.5
Water Vapor Transmission Rate (40℃, 90%RH)	g/m ² ·d	JISK7129	80	250	5	20
Gas Transmisssion Rate(20℃, 60%RH)	-	JISK7126	-	-	-	-
O ₂	cc/m ² ·d·atm	-	80	800	2500	60
CO ₂	cc/m ² ·d·atm	-	400	2500	7000	300

- <표 4.5>는 DuPont사의 Biomax 이축연신 필름의 강도를 다른 소재와 비교한 것인데, 강도는 PET보다는 물론 떨어지나 PP보다는 높고, PLA(poly(lactic acid))와 대등함. Biomax 필름의 장점은 투명하고, 인열강도가 높으며 기체투과도가 낮으므로 식품포장재로서도 유망하다고 함. BASF는 PBAT와 PLA를 혼합한 수지를 약 7만 4천 톤/년 규모로 생산하고 있음.
- 베트남 Anphat사도 한국의 안코바이오플라스틱(전 이래화학)를 공동인수하고 극동 시장 진출을 위해 PBAT 7만 톤/년 규모의 생산시설 건립을 추진 중에 있음.
- 한국도 세계적인 PET 생산국으로서 SKC, 코오롱이 기존 PET 생산시설을 활용하여 PBAT 생산을 계획하고 있고, LG화학도 연간 5만 톤 규모 PBAT 생산 공장을 신설하여 2024년 본격 양산을 목표하고 있음.
- 이탈리아의 전분 블렌드 제조사인 Novamont는 2004년 Eastman Chemical사의 PBAT(EastarBio) 부문 사업을 사들여 PBAT를 현재 Origo-Bi 상표로 PBAT 10만 톤/년을 생산하고 있는데 가소화전분+PBAT 블렌드를 합치면 총 15만 톤/년을 생산하고 있음.
- 중국은 최근에 플라스틱 규제가 더욱 강화되어 PBAT 생산시설을 대폭 신설하고 있음. 2022년 현재 중국의 생산량은 Kingfa사가 12만 톤/년, Xinjiang사가 13만 톤/년 등 총 33만 톤/년이고 2023년까지 146만 톤/년으로 증설되며 앞으로도 1,277만 톤/년의 생산시설 확장이 추가적으로 검토되고 있음.
- PLA(poly(lactic acid), polylactide)
 - PLA는 젖산(lactic acid)의 중합체로서 일찍부터 체내분해성 의료용 소재로 개발 응용되어 왔음. PGA(poly(glycolic acid), -O-CH₂-CO-)가 용점이 220℃로 높고 생분해 기간이 약 3개월로 짧아서 체내분해성 수술봉합사로만 쓰이는 데 반하여, PLA는 생분해 기간이 약 1년으로 길므로 장기간이 요구되는 정형외과용 소재로 응용되었음.
 - PLA의 용점은 175℃로 PP와 유사하고 강도가 우수하여 분해성 플라스틱으로 적합함. PLA는 강도가 우수한 반면에 연신율이 4%로서 유연성이 낮고 열에 약하여 가공이 쉽지 않음. 따라서, 공중합 또는 chain branching을 도입하여 유연성을 증가하고 가공성을 개선한 제품을 출하하고 있음. 한편 PLA는 매우 투명하여 포장용 필름으로 이상적이고, 수분이나 가스 차단성이 좋으므로 식품포장용 소재로도 유망함. 또한 PLA를 연신가공한 필름이나 섬유는 쉽게 가수분해되지 않으므로 최근에는 비단 질감의 특수 의류뿐만 아니라 자동차부품 및 전자부품 소재로도 개발되고 있음.
 - PLA는 젖산을 직접 축합하면 얻어지는 중합체의 분자량이 작고, 저분자량 PLA를 열분해하여 만드는 고리형 2산무수화합물인 락티드의 개환중합으로 고분자량 PLA를 합성할 수 있음 <그림 4.1>(Naser, 2021; Ranakoti et al., 2022; Jimenez et.al., 2019).

그림 4.1 PLA의 중합화학

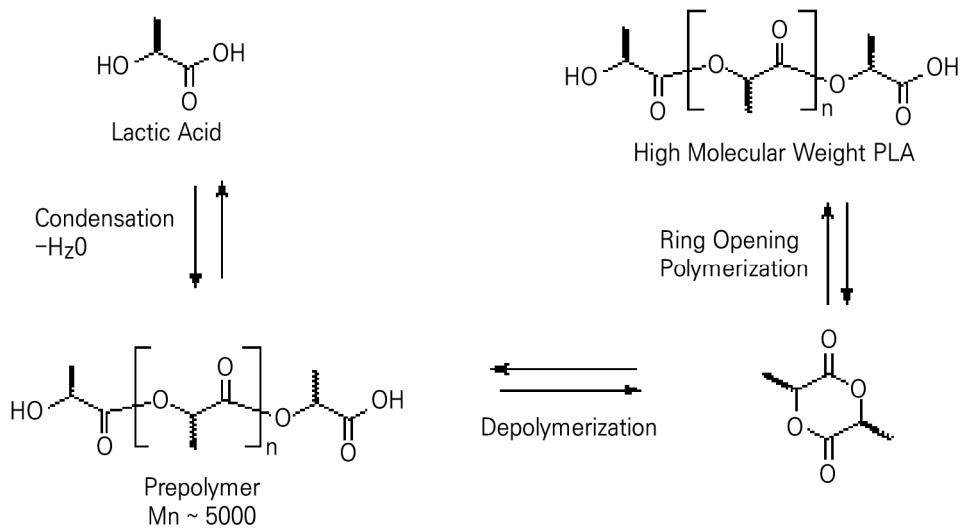
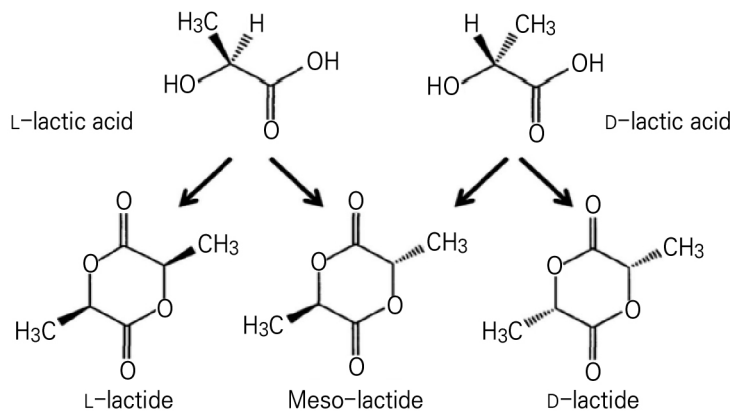
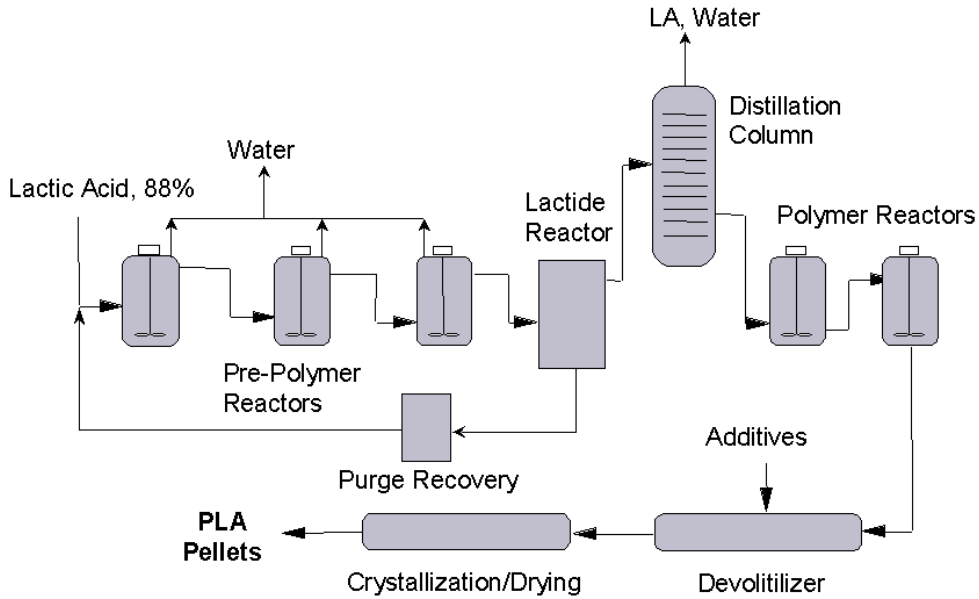


그림 4.2 젖산 및 lactide의 입체이성체



- 젖산은 D-형과 L-형의 입체이성체를 가짐(그림 4.2). 순수한 L-PLA 또는 D-PLA는 결정성 및 용점이 높으나 혼합된 DL-PLA는 무정형이며 강도가 낮음. 자연계에 존재하는 젖산은 L-형으로서 전분, 포도당으로부터 발효로 생산되고, 95% 이상의 광학적 순도가 요구되므로 PLA의 가격은 원료인 젖산의 생산가와 직결되어 있음.
- PLA는 1970년대부터 의료용 재료로 응용되어 Purac과 Evonik 등이 소규모로 생산하고 있었음. 1980년대 중반부터 세계적 농산물 회사인 Cargill사가 '옥수수로부터 고가의 플라스틱 생산'을 명제로 2,000톤/년 규모의 파일럿 공장을 운영하였음.

그림 4.3 NatureWorks사의 PLA 제조공정도



- 1997년 Cargill사는 Dow Chemical사와 공동으로 Cargill Dow Polymers사를 설립하였고, 2001년 말에 연산 15만 톤의 PLA 공장을 가동시키고 상품명은 NatureWorks로 하여 3~4US\$/kg의 비교적 저렴한 가격으로 공급함으로써 생분해성 플라스틱의 상업화를 개척하였음. 최근에는 회사명도 NatureWorks로 바꾼 후 태국과 합작회사를 설립하여 규모를 대폭 확장할 계획임.
- NatureWorks사의 PLA 제조공정은 lactide의 개환중합공정으로서, 젖산을 축합하여 분자량 수천의 PLA를 만들고, 이를 열분해하여 lactide를 제조하고, 이를 다시 stannous octoate와 같은 촉매 존재하에서 고분자량 PLA를 합성하는 공정임(그림 4.3). 이 공정의 핵심기술은 열분해공정에서의 lactide의 효율적인 분리와 정제 및 중합공정의 엔지니어링임.
- <표 4.6>은 NatureWorks PLA의 물성을 일반 플라스틱과 비교한 것임. 인장강도가 PET보다는 떨어지나, 폴리스티렌(PS)이나 폴리프로필렌(PP)보다 월등하고, 유연성의 척도인 연신율(elongation)은 PP보다 크게 떨어지나 PS와 대등함. PLA 이축연신 필름의 물성은 다른 소재에 비하여 강인성(toughness)은 조금 열세이나 투명성, 차단성이 우수하고, 특히 열로 봉합할 수 있는 장점이 있다고 함. PLA는 바이오매스 기반이므로 차세대 공업용(자동차 등) 플라스틱으로 기대되지만 열변형온도가 55℃로서 경쟁되는 PP의 110℃, PBS의 97℃, PET의 약 140℃보다 낮은 결점이 있음.

표 4.6 NatureWorks PLA의 물성

	PLA	PS	PET	PP
Tensile Strength(psi)	7,700	6,600	8,500	5,200
Elongation at Break(%)	4.1	1.4	5.5	350
Tensile Modulus(psi)	500,000	440,000	500,000	190,000
Izod Impact(ft-lb/in)	0.3	0.4	0.5	0.9
Tg(°C)	60	102	74	-20
Melting Point(°C)	170	none	270	165
Density(g/cc)	1.25	1.05	1.35	0.9

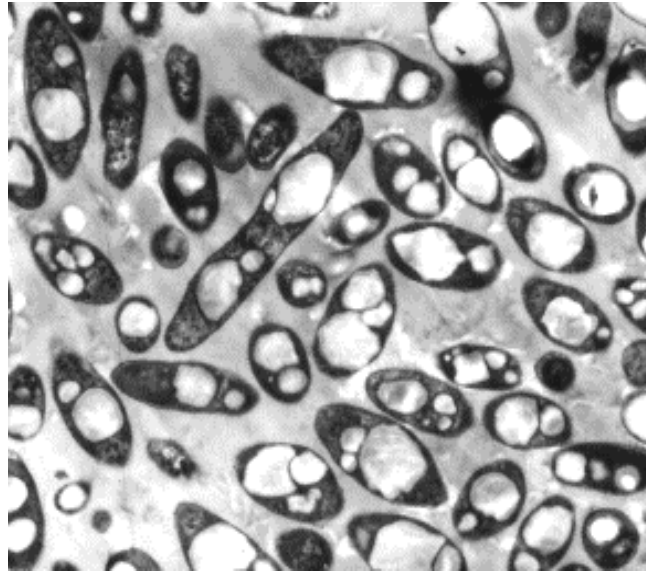
- 젯산의 대규모 생산기업인 Purac은 1980년대부터 의료용 PLA를 생산해 왔음. 근래에 Corbion 계열로 바뀌었고, Corbion사는 Total사와 합작하여 TotalEnergies Corbion사를 설립하고 태국에 7만 5천 톤 규모의 생산설비를 설립하였음. 중국은 최근 플라스틱 규제에 PLA의 생산이 초대규모로 급증하고 있는데, 2022년 현재 Anhui BBBC Biochemical & Futerrro사가 10만 톤/년, Zhejiang Hisun Pharmaceutical사의 4만 5천 톤/년 등 20만 톤/년을 생산하고 있고, 2023년까지 Anhui BBBC Taifu의 30만 톤/년 등 61만 톤/년의 생산시설이 확충되고, 추가로 182만 톤/년이 건설 계획 중임.
- LG화학은 미국 곡물회사 ADM사와 합작 법인을 설립하여 2025년까지 7만 5천 톤 규모의 PLA 공장 및 이를 위한 젯산(LA) 공장을 미국 현지에 건설할 예정임. 이외에도 LG화학은 포도당과 페글리세롤로부터 3HP(3-Hydroxypropionic산)를 생산하는 생물공정을 개발하였고, 젯산과 3HP의 공중합체인 신규 생분해성 PLH(Polylactate hydracrylate)를 독자 개발하였음. 이 소재는 다른 생분해성 플라스틱보다 바이오 함량이 높고, 기존 PLA의 약점인 brittleness를 해결하였으며 투명성과 가공성이 대폭 개선되었음(표 4.7). LG화학은 미국 곡물회사 ADM사와 합작법인을 설립하여 2025년까지 7만 5천 톤 규모의 PLA공장 및 이를 위한 LA공장을 미국 현지에 건설할 예정임.

표 4.7 LG화학의 새 PLA 공중합체 PLH와 기존 생분해성 플라스틱의 물성 비교

구분	생분해성				난분해성
	전분 블렌드	PLA	PLA/PBAT	LG화학 PLH	PP
바이오 함량	Medium	100%	Medium	100%	0%
투명도	Low	High	Low	High	High/Low
인장강도	Low	High	Medium	Medium	Medium
연신율	Low	Low	High	High	High

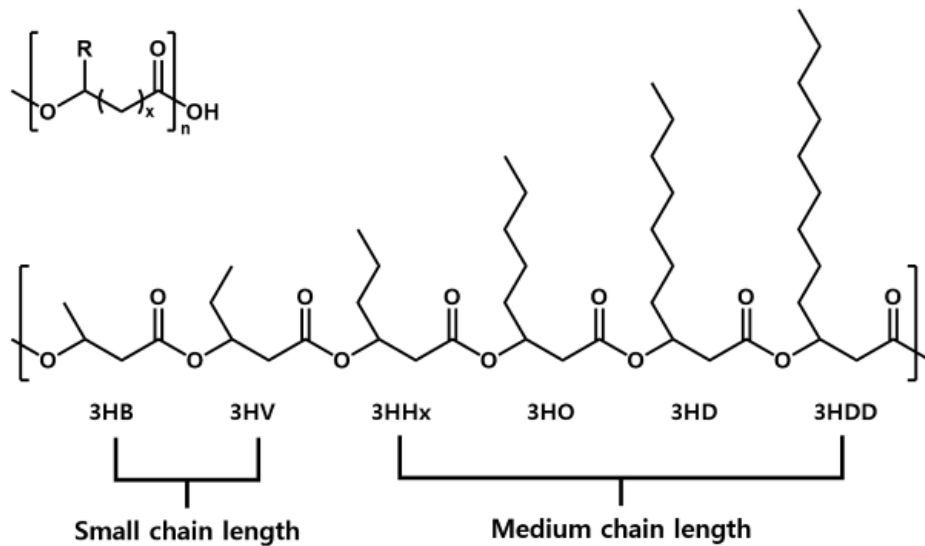
- PHA(polyhydroxyalkanoates)

그림 4.4 미생물 내에 축적된 PHA



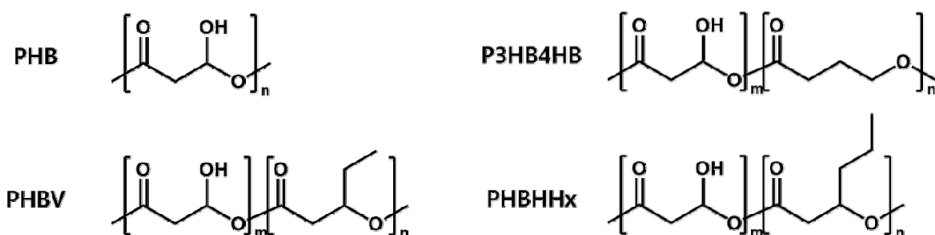
- *Alcaligenes eutrophus* 등 일부 미생물은 체내에 PHA계 지방족 폴리에스터를 축적함 <그림 4.4>(Kourilova et al.,2019). 대표적인 고분자는 갈가자(R)가 메탈기인 PHB(poly- β -hydroxybutyrate), (또는 P3HB, poly-3-hydroxybutyrate)이고<그림 4.5>, 용점이 175℃로서 폴리프로필렌과 비슷하고 강도도 유사하지만, 유연하지 못하고 가공 시에 열분해되기 쉬운 결점이 있었음.
- 1970년대 말기에 영국의 Zeneca사가 약 15%의 valeric산 단위를 도입하여 용점을 150℃로 낮추고 유연성과 가공성을 개선한 PHBV(polyhydroxybutyrate-valerate) 공중합체를 상품명 Biopol로 소개하여, 대중에게 생분해성 플라스틱을 인식시켰음. 그러나 생산가가 10US\$/kg 이상으로 비싼 한계를 극복하지 못하고, 미국의 Monsanto사로 넘어갔음. PHBV 공중합체는 강도가 우수하나 아직도 유연성이 부족함.
- 2000년대에 Proctor & Gamble(P&G)사는 PHBV보다 알킬기가 긴 PHBH, PHBO, PHBD <그림 4.5 참조> 구조의 공중합체 Nodax®를 개발하였고, 목표 가격은 1.50~2.50US\$/kg라고 발표하였음. 이 제품은 강도와 유연성이 저밀도PE와 고밀도PE의 중간 값을 나타내고, 분자량이 50만 이상으로 크므로 특히 강인하다고 하며, 가공성은 PE와 비슷하게 우수하다고 함. 반면에 용매용해성, 내습성, 염색성, 접착성, 인쇄성은 폴리에스터의 특성을 나타낸다고 함. 특히, Nodax® PHA는 PLA와 블렌딩 가공성이 우수하여 PLA의 단점인 brittleness를 개선하는 impact modifier 기능이 있다고 발표함.

그림 4.5 PHA계 고분자의 기본적인 화학구조



- Danimer Scientific사는 2007년 P&G사의 Nodax® 기술을 인수받아 2002년 1만 5천 톤/년 규모의 생산공정을 완공하였고, 2024년까지 2만 8천 톤/년을 증설할 계획이라고 발표함.
- 미국의 Metabolix사는 1992년에 P3HB4HB[Poly(3-Hydroxybutyrate-co-4-Hydroxybutyrate)] 공중합체를 개발하였음(그림 4.6). 기존의 P3HB에 P4HB를 도입하여 결정성과 용점을 낮추어 유연성을 증가시켰고, rubbery한 비결정성(amorphous) PHA를 생산하는 특허를 확보하였음. 또한 Metabolix는 천연의 PHA 생산균주 대신에 대장균 플랫폼을 활용하여 생산성을 높였다고 함.
- 한국의 CJ제일제당은 2016년 Metabolix의 기술을 인수하여 유전공학 기반 균주를 개발하고 발표공정 규모를 확대하여 경제성이 개선된 비결정성 PHA(상품명 PHACT) 생산기술을 확보하였음. 현재 30톤/년 규모의 안산 파일럿 공장과 인도네시아에서 5천 톤/년을 생산하고 있는데 2023년까지 1만 5천 톤/년으로 2025년까지 6만 5천 톤까지 확대할 예정임.
- 또한, 이 비결정성 P3HB4HB 공중합체를 PLA와 블렌드하면 PLA의 단점인 brittleness를 개선하는 impact modifier 기능이 우수한데, 종전의 impact modifier인 석유계 PBAT 대신에 P3HB4HB를 쓰면 생분해성이 월등하여 완전히 퇴비화할 수 있는 장점이 있음. CJ제일제당은 2021년 PLA 필름 제조업체인 SKC사와 협동연구로 식품포장용 PLA+P3HB4HB 필름을 상용화하였음.
- 일본의 Kaneka사는 해양분해성이 우월한 PHBH를 5천 톤/년 생산하고 있으며 2021년 쇼팽백, 쌀대, 식기류 등 일회용 제품의 대체 제품 중심으로 판매 중임.
- 중국 Tianan Biologic Material사는 PHBV를 2,000톤/년을 생산하고 있음.
- 한편 미국의 Newlight사는 공기 중의 이산화탄소를 포집하여 원료로 하는 PHA 발효공정을 파일럿 규모로 개발하고 있는데, 이 새로운 공정의 향후 개발이 관심받고 있음.

그림 4.6 대량생산 시설을 보유한 PHA의 종류



2. 바이오플라스틱의 세계적 시장 동향

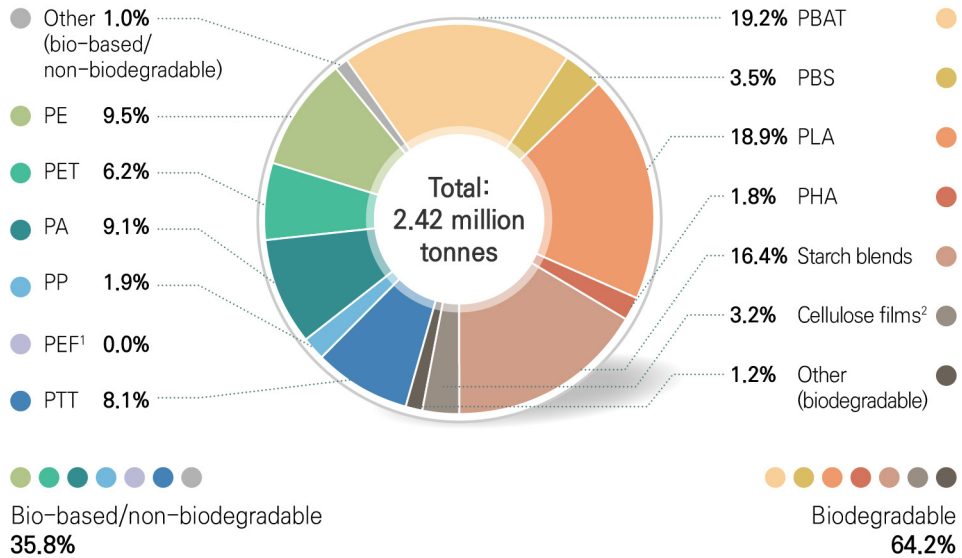
■ 「European Bioplastics 2021」 통계에 의하면, 바이오플라스틱 생산시설규모는 2021년 기준 242만 톤이고, 이 중 완전히 분해되는 생분해성 플라스틱은 64%인 155만 톤임 <그림 4.6>. 이는 2019년 세계 플라스틱 총 생산량 4억 6천만 톤의 0.34%에 불과하게 아주 작은 시설규모임. 생분해성 플라스틱 중에서는 PBAT와 PLA의 생산규모가 각각 약 19%로 높고 전분블렌드가 약 16%임.

■ 다른 통계(MarketsandMarkets, 2021)에 의하면, 생분해성 플라스틱의 생산액은 2021년 76억US\$이고, 2026년에는 232억US\$로 증가할 것으로 예상됨<그림 4.7>.

- 포장산업 수요의 증가와 전 세계적 친환경정책의 강화가 바이오플라스틱 시장의 성장을 주도하고 있음.
- 주요 기업은 향후 5년간 확장 인수 및 신제품 출시 등의 다양한 전략을 통해 유리한 기회를 얻을 것으로 예상됨.
- 특히 아시아 태평양 지역은 바이오플라스틱 생산능력의 증가로 가장 높은 성장속도를 보일 것으로 예상됨.

그림 4.7 2021년 글로벌 바이오플라스틱 생산시설 규모

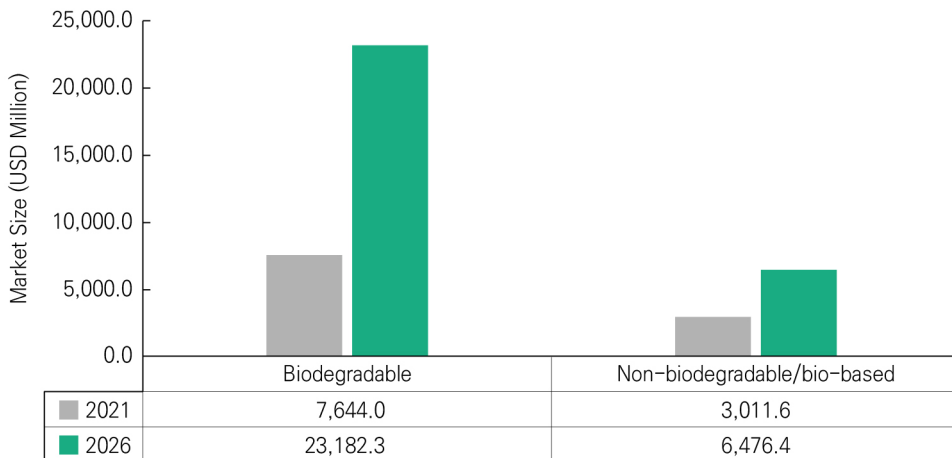
Global production capacities of bioplastics 2021 (by material type)



¹PEF is currently in development and predicted to be available at commercial scale in 2023. ²Regenerated cellulose films

출처: European Bioplastics 2021(2021)

그림 4.8 바이오플라스틱의 세계시장 동향



Type	2021	2022	2023	2024	2025	2026	CAGR (2021~2026)
Biodegradable	7,644.0	9,551.9	11,896.5	14,811.2	18,432.9	23,182.3	24.8%
Non-biodegradable/bio-based	3,011.6	3,547.5	4,042.8	4,583.7	5,166.8	6,476.4	16.5%
Total	10,655.6	13,099.4	15,939.3	19,394.9	23,599.8	29,658.8	22.7%

출처: MarketsandMarkets(2021)

■ 특히 최근 중국은 탄소중립 및 폐플라스틱 저감을 위한 각종 정부 정책을 추진하고 있음. 국가발전계획위원회 생태환경부를 중심으로 두께 0.025mm 이하의 플라스틱 쇼핑백과 두께 0.01mm 이하의 농업용 폴리에틸렌 필름의 생산 및 판매를 금지하고, 생분해성 플라스틱을 적극 보급하고 있으므로 생분해성 플라스틱의 생산이 급증하고 있음.

- 2022년 말까지 모든 지구급 이상의 도시건설구역과 연해지역 현청 건설구역의 재래시장에서는 일반 플라스틱 봉투를 사용 금지함에 따라 2025년 일회용 생분해성 봉투 시장은 전체 일회용 플라스틱 봉투의 30%인 약 256만 톤으로 추산됨.
- 일회용 플라스틱 식기의 경우에는 2020년 약 100만 톤 규모인데, 2025년에는 플라스틱 식기의 약 60% 정도가 생분해성 플라스틱으로 대체될 것으로 전망됨.
- 한편, 농업용 멀칭필름은 일반 멀칭필름 대비 2~3배 고가이므로 보조금 없이는 대체가 어려워 2025년 약 1% 정도의 대체율, 3만 톤 정도의 시장이 예상되나 보조금 정책 면에서 긍정적인 변화가 있을 것으로 보임.
- 택배포장 플라스틱 포장 수요는 2020년 현재 약 50만 톤이나 약 20% 정도의 성장률을 감안하면 2025년 생분해성 플라스틱 포장은 119만 톤 수준에 이를 것으로 예상됨.
- 이와 같은 중국의 생분해성 플라스틱 사용량 증가 추세에 따라 2022년 6월 현재 중국의 PLA 생산규모가 연 20만 톤, PBAT 생산규모는 연 33만 톤이고, 2023년까지 완공이 예상되는 추가 생산규모는 PLA 61만 톤, PBAT 146만 톤이며, 추가 검토가 진행 중인 생산규모는 PLA 182만 톤, PBAT 1,277만 톤에 달하는 거대한 규모임(중국 생분해성 플라스틱 최신 동향 및 정책, BBKA Biochemical & Futerro 발표, 제1회 국제 바이오플라스틱 컨퍼런스, 2022. 9. 14., 인천 송도컨벤시아).

■ 글로벌 바이오플라스틱 시장은 아직 초기로서 기존 글로벌 석유화학기업들이 주도하고 있으며, 시장규모가 점차 증가함에 따라 참여 기업이 증가하고 생산규모의 증설이 진행되고 있음.

표 4.8 국내외 생분해성 플라스틱 주요 생산기업(2022년 9월 기준)

종류	국외 회사 및 생산규모(톤/년)	국내 생산규모
PLA	• NatureWorks(미국): 17만 톤, 2025년 태국 7만 5천 톤 증설 • TotalEnergies Corbion PLA(오스트리아): 태국 7만 5천 톤, 2025년 프랑스 10만 톤 증설 (중국 20만 톤 생산 중) • Zhejiang Hisun Pharmaceutical: 4만 5천 톤 (중국 2025년 추가 61만 톤 완공) • Anhui BBKA Biochemical & Futerro PLA: 30만 톤, Zhejiang Haichuangda Biomaterials: 15만 톤, Zhejiang Youcheng: 20만 톤 • Shandong Tongbang New Material Technology: 20만 톤, Suzhou Jiutai Group: 20만 톤 등	• LG화학: PLA 공중합체 2025년 7만 5천 톤 신설 • 삼양바이오팜, 메타바이오메드: PGA(polyglycolide) 500톤
PBAT	• BASF(독일): PBAT Ecoflex® 및 PBAT+PLA Ecovio® 7만 4천 톤, (중국 6만 톤)	• SK지오센트랙-코오롱: 3천 톤, 2024년 6만 톤 증설

종류	국외 회사 및 생산규모(톤/년)	국내 생산규모
	- Novamont(이탈리아): Eastman Chemical의 EastarBio인수, Origo-Bi® 10만 톤 - DuPont: PBAT Biomax® (중국 33만 톤 생산 중) - King Fa: 12만 톤, Tun He: 12만 톤 등 (중국 2025년 추가 146만 톤 완공) - ChangHong: 60만 톤, LianChuang: 12만 톤 - Jin Hui: 12만 톤, Qi Cheng 10만 톤 등 (중국 추가 1,277만 톤 건설 검토 중) - Wang Jing Long: 260만 톤 등	- LG화학: 2024년 5만 톤 신설 - SKC, LX인터내셔널, 대상: 2023년 7만 톤 신설
PBS	- PTT MCC Biochem(태국): 2만 톤 - Zhejiang Hangzhou Xinfu(중국): 1만 3천 톤	- 안코바이오플라스틱스: 2천 톤 - 솔테크: 2천 톤
PHA	- Danimer Scientific(미국): PHA 1만 5천 톤, 2024년 3만 톤 증설 - Kaneka(일본): PHBH 5천 톤, 2024년 1만 5천 톤 증설 - RWDC(미국): 4천 톤, 2023년 5만 톤 증설, 2024년 5만 톤 싱가포르 증설 - Tianan Biologic Material(중국): PHBV 2천 톤, 2024년 1만 톤 증설	CJ제일제당: P3HB4HB 5천 톤 인도네시아, 2023년 1만 톤 증설, 2025년 5만 톤 증설
전분 블렌드	Novamont(이탈리아): 전분+PBAT(Mater-Bi) 15만 톤/년	-

출처: European Bioplastic Association "Bioplastic Market Development Update 2019"와 중국 현황(제1회 국제 바이오플라스틱 컨퍼런스, 2022.9.14.) 종합

- 현재 바이오매스 기반 원료 소재의 생산기술을 토대로 바이오플라스틱 시장을 선도하고 있는 기업으로는 NatureWorks, TotalEnergies Corbion PLA, Novamont, BASF, Mitsubishi Chemical, Danimer Scientific, Kaneka, CJ제일제당 등이 있는데, 최근 중국의 Anhui BBKA & Futerro, Kingfa, Tun He 등의 대규모 생산회사들이 새롭게 진입하고 있음.
- <표 4.8>에 생분해성 플라스틱 소재별 국내의 생산현황을 표기하였음. 특히 최근에 중국의 생산량이 거대한 규모로 급증하고 있고 곧 세계 최대 생산국이 될 예정인 점을 감안하여 같이 기재함.
- PLA
 - 선두주자인 NatureWorks는 젖산(Lactic acid), lactide, PLA 생산에 독보적인 기술을 보유하고 있으며, 17만 톤/년 규모로 PLA를 생산하고 있음. 제품의 품질이 독보적으로 우수하여 수요가 증가하고 있으며, 2021년에는 태국에 약 7만 5천 톤/년을 추가 증설할 계획을 발표한 바 있음. 후발 기업인 TotalEnergies Corbion PLA도 태국에 7만 5천 톤/년의 신규 공장을 건립하였고, 차후 프랑스에 10만 톤/년의 공장을 추가할 계획임.
 - 중국은 최근 PLA 생산이 급증하여 2022년 현재 Anhui BBKA 10만 톤/년과 Zhejiang Hisun 4만 5천 톤/년 등 20만 톤/년을 생산하고 있고, 2025년까지 Anhui BBKA 30만 톤/년, Zhejiang Haichuangda 15만 톤/년 등 61만 톤/년이 추가 준공될 예정이고, 추후 182만 톤/년의 생산시설이 추가 검토되고 있어 곧 PLA의 최대 생산국이 될 예정임.

- 한국은 PLA와 중합공정이 같은 PGA(polyglycolic acid)를 삼양바이오팜 및 메타바이오메드에서 의료용으로 500톤 생산하고 있음. 최근 LG화학이 젯산과 PLA 공장을 2025년 7만 5천 톤 건설 예정임.

• PBAT

- 시발업체인 BASF는 PBAT 수지(Ecoflex®)와 PBAT와 PLA를 혼합한 수지(Ecovio®)를 약 7만 4천 톤/년 생산하고 있으며, 2020년에 중국 상하이에 약 6만 톤/년 공장을 추가하였음. 또 다른 시발업체인 Eastman Chemical사는 2004년 이탈리아의 가소화전분(thermoplastic starch, TPS) 블렌드 생산자인 Novamont사로 인수되었음. Novamont사는 인수한 PBAT(Origo-Bi®)를 약 10만 톤/년 생산하고 있고, 전분계 블렌드인 TPS-PBAT(Mater-Bi®)를 합치면 약 15만 톤/년을 생산하고 있음.

- 중국의 PBAT 생산규모도 최근 급증하여 곧 세계 최대 생산국이 될 예정임. 2022년 King Fa사가 12만 톤/년, Tun He사가 12만 톤/년 등 33만 톤/년을 생산하고 있고, 2025년까지 ChangHong사가 60만 톤/년, Jin Hui사가 12만 톤/년, Qi Cheng사가 10만 톤/년 등 146만 톤/년이 추가 증설되며, 추후 1,277만 톤/년의 생산시설 확장이 추가적으로 검토되고 있는 막대한 규모임.

- 한국도 세계적인 규모로 PET를 생산하고 있고 PBAT를 지속적으로 개발하여 왔음. SK지오센트릭-코로롱은 3천 톤/년을 생산하고 있고 2024년 6만 톤/년 증설을 발표하였음. 또한 SKC-LX 인터내셔널-대상도 2023년 7만 톤/년 생산을 발표하였고, LG화학도 2024년 5만 톤/년 공장을 신설할 예정임. TLC Korea와 베트남 Anphat의 합작회사인 안코바이오플라스틱스(전 이레화학)의 규모는 2천 톤/년이고, 추가로 베트남에 약 3만 톤/년 규모의 PBAT 공장 건립을 추진 중에 있음.

• PHA

- 미국 Danimer Scientific은 P&G사로부터 인수한 Nodax PHA(polyhydroxy butyrate-hexylate-octylate)를 1만 5천 톤/년 생산하여 현재 최대 PHA 생산회사이고, 일본 Kaneka사가 PHBH 5천 톤, 미국의 RWDC사가 4천 톤/년, 중국의 TianAn Biopolymer사가 PHBV 2천 톤/년 생산하고 있음. 한국의 CJ제일제당이 출발은 조금 늦었지만 현재 P3HB4HB를 5천 톤/년 생산하고 있고 향후 6만 5천 톤/년까지 증설을 통하여 세계 최대의 PHA 생산시설을 목표하고 있음.

표 4.9 소재별 생분해성 바이오플라스틱의 사용량 추이

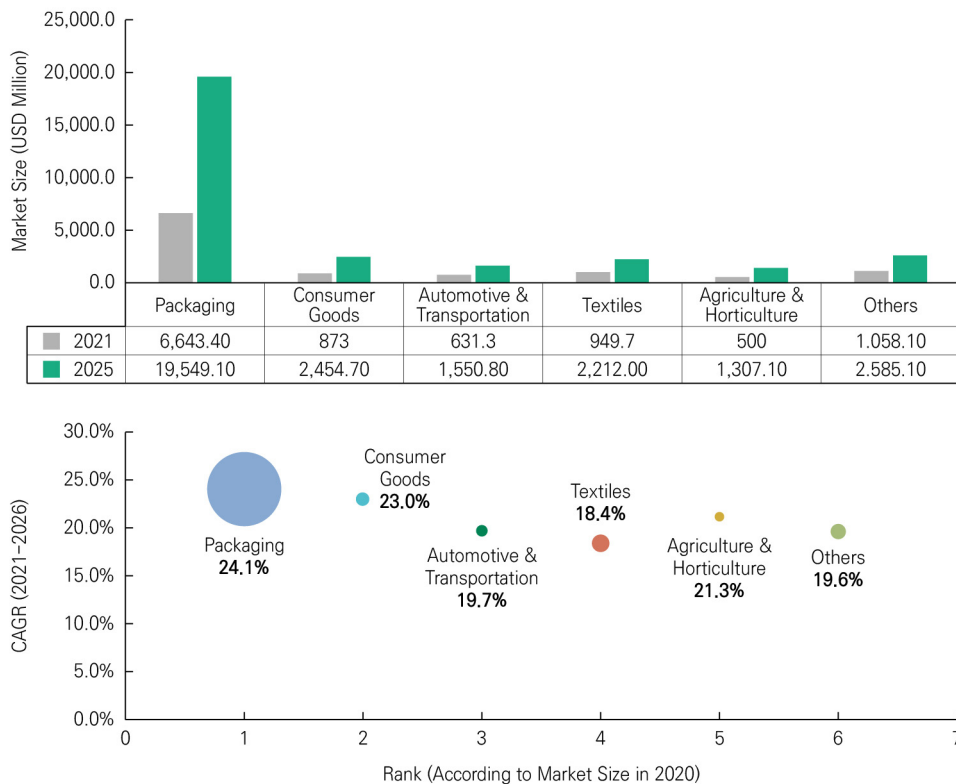
Sub-Type	2021	2022	2023	2024	2025	2026	CAGR (2021~2026)
PLA	2,778.3	3,569.8	4,563.6	5,822.9	7,416.4	9,534.4	28.0%
Starch blends	1,729.6	2,122.5	2,595.7	3,173.0	3,876.9	4,787.2	22.6%
PBAT	2,238.1	2,794.7	3,477.9	4,326.3	5,379.5	6,759.8	24.7%
PBS	405.5	488.5	586.6	704.1	844.7	1,024.1	20.4%
PHA	97.0	112.9	131.4	153.0	178.1	207.3	16.4%
Others	395.5	463.4	541.2	631.8	737.4	869.6	17.1%
Total	7,644.0	9,551.9	11,896.5	14,811.2	18,432.9	23,182.3	24.8%

출처: MarketsandMarkets(2021), Bioplastics & Biopolymers Market

■ 소재별 바이오플라스틱의 시장 동향

- MarketsandMarkets(2021) 통계, <표 4.9>에 의하면, PLA는 전체 생분해성 플라스틱 시장 중의 28%를 점유하여 가장 많이 사용되는 소재임. PLA는 강하고 투명한 장점이 있지만, brittle한 단점과 단순한 가수분해형으로 인하여 자연환경에서 생분해 속도가 다소 미흡하다는 평가를 받고 있음.
- PBAT는 강도와 유연성이 우수하여 비닐봉투 및 멀칭필름에 주로 사용되고 전체 생분해성 플라스틱 시장 중의 25%를 점유하고 있음, PBAT는 유연성이 우월하여 연신율이 작은 전분계 및 PLA에 블렌드 첨가제로도 사용되고 있음.
- 전분계는 유연성이 미흡하지만 생분해 속도가 빠르고 상대적으로 낮은 가격의 장점으로 수요가 꾸준히 이어질 것으로 전망됨.
- PBS는 생분해성, 용융가공성, 내열성 및 내화학성 등이 좋고, 가공성이 우수하므로 농업, 어업, 포장산업 등에서의 수요가 증가하고 있음.
- PHA는 천연고분자로서 생분해성이 가장 뛰어나고, 구조 다양화로 물성 개질이 가능하며, 특히 PLA와 블렌드하여 PLA의 brittle한 단점을 해결하고 퇴비화성을 증가시키는 등 다양한 생분해성 소재로의 용도가 확대될 것으로 기대되고 있음.

그림 4.9 산업 영역별 바이오플라스틱의 사용량 분포도



출처: MarketsandMarkets(2021), Bioplastics & Biopolymers Market

■ 용도별 바이오플라스틱 시장 동향

- 용도별 바이오플라스틱의 수요를 보면<표 4.10>, 포장산업 및 소비재 분야는 전체 시장에서 2020년 기준 63%로 가장 큰 점유율을 차지했고, 환경규제가 강화됨에 따라 생분해성 플라스틱에 대한 수요가 증가하였음.
- 섬유산업은 바이오플라스틱 및 생분해성 플라스틱의 핵심 응용 분야의 하나이고, PLA는 우수한 질감과 수분 유지 특성의 이점으로 섬유산업에서 넓게 사용될 수 있음.
- 농업 분야에서는 작물생산성과 식품품질을 개선하기 위해 이용되는 바이오플라스틱 테이프, 멀칭필름 등은 폐기 후에는 퇴비화되거나 생분해되어 수거 필요가 없어지므로 소비 증가가 기대됨.

표 4.10 해외 생분해성 바이오플라스틱 용도별 수요(2021년 기준)

구분 \ 용도	연질 포장	경질 포장	소비재	섬유	농업·원예	화학 제조	전기·전자	기타	총계
생분해성 플라스틱 (PBAT, PBS, PLA, PHA 등)	48	29	18.5	5	21	11	2	20.5	155
바이오매스-기반 플라스틱(PET, PE, PP, 등)	18	20	8.5	19	-	-	4	2	72
합계	66 (29%)	49 (22%)	27 (12%)	24 (11%)	21 (9.3%)	11 (4.8%)	6 (2.6%)	22.5 (9.9%)	227 (100%)

출처: European bioplastics, Nova institute(2021)

- 바이오플라스틱의 이산화탄소 감축효과
 - 바이오매스 기반 플라스틱은 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소를 흡수한 식물성 바이오매스를 원료로 하므로 기존 석유 기반 플라스틱 대비 탄소 감축효과가 있음.
 - 생분해성 바이오플라스틱은 생산과정에서 온실가스 배출량을 일반 플라스틱보다 60~80% 감축할 수 있다고 보고되어 있음.
 - TotalEnergies Corbion사의 자료에 의하면, 태국 젓산 공장의 이산화탄소 배출계수(kgCO₂eq/kg)는 -0.224이며, 이는 젓산 1톤을 생산할 때마다 대기 중의 이산화탄소 224kg이 감소함을 의미함(공정 이산화탄소 배출량 1,243kg, 사탕수수 광합성 시 이산화탄소 1,467kg 흡수)(Morão et al., 2019). 또한, PLA 기준 배출계수는 0.5이며, 2030년까지 -0.909로 저감 목표를 수립함.
 - NatureWorks LLC(Limited liability company) 자료에 따르면, PLA의 이산화탄소 배출계수는 0.6으로, 물성이 비슷한 석유 기반의 PET에 비해서는 70%, 포장재로 많이 쓰이는 PE보다는 60%의 이산화탄소 배출 감축효과가 있음(Vink et al., 2015).
 - 또한, BioPE의 경우 이산화탄소 배출계수는 -1로, BioPE 1톤 생산 시 석유계 PE보다 약 4톤의 이산화탄소 감축효과가 있을 것으로 보고되어 있음(Benavides et al., 2020).

- Braskem사에서는 재활용과 재생에너지를 사용 시 BioPE 1톤 생산 시 석유계-PE 대비 5톤의 감축효과를 확인하여 Carbon Trust에서 인증 받음.
- PBAT의 바이오원료인 bio-butanediol은 1톤당 석유계 butanediol 대비 3.3톤의 이산화탄소 감축효과가 있는 것으로 나타남(Adom et. al., 2014).
- PHA는 본격 상업생산에 의한 이산화탄소 영향에 대한 개선이 기대됨.
- PBS와 PBAT는 석유계 원료로부터 제조되므로 일반 석유계 플라스틱 대비 탄소배출량이 크게 감소되지는 않음.

그림 4.10 바이오매스 기반 플라스틱 탄소저감 효과



출처: Braskem, <https://www.braskem.com.br/imgreen/about-im-green>

포스트 플라스틱 시대를 위한 정책 제언

Policy Recommendations for the Post-Plastics Age



국내 생분해성 바이오플라스틱산업 동향

KAST Research Report 2022

한림연구보고서 144

V. 국내 생분해성 바이오플라스틱산업 동향

■ 국내 생분해성 바이오플라스틱산업 동향

- 바이오플라스틱산업은 바이오매스(바이오슈가) 확보 기술, 바이오리파이너리를 통한 플랫폼화합물 생산(단량체), 바이오플라스틱의 제조, 최종 소비재를 위한 가공기술로 구분되어 가치사슬이 존재하는데, 국내의 기업은 바이오매스 자원이 많지 않으므로 바이오플라스틱 제조와 가공기술에 집중되어 있는 것이 현실임.
- 최근에 대기업을 중심으로 생분해성 플라스틱 원료의 개발과 생산능력 확보를 위한 인프라 구축이 진행되고 있으며, 중소중견기업에서는 새로운 원료로 다양한 제품 개발을 추진 중임.
- 바이오플라스틱 중에서 바이오매스 기반 플라스틱을 제외한 생분해성 바이오플라스틱 국내 수요는 2022년 기준 3만 톤 규모로 국내 총 플라스틱 수요 460만 톤의 0.6%를 차지하며, 세계 생분해성 바이오플라스틱 규모 총 155만 톤의 약 2%를 차지함.
※ 국내 바이오플라스틱 시장은 2016년 229억 원, 세계 시장(2017년 35억 달러)의 1% 수준
- 생분해성 바이오플라스틱은 2026년까지 약 8만 3천 톤으로 급증할 것으로 예상됨. 2022년 수요 3만 톤 중 포장재와 소비재가 약 2만 2천 톤으로 전체의 71.4%를 차지하고 있음(표 5.1).
- 2019년 총 7종의 비분해성봉투(고밀도폴리에틸렌PE)를 약 2억장(월 약 1,700만 장) 사용하였으나, 생분해성 플라스틱 봉투로 사용 전환함으로써 2021년에는 총 4종의 생분해성 봉투를 약 9,500만 장(약 790만 장/월) 사용하여 약 48%의 비닐봉투 절감효과를 보았음.

표 5.1 국내 생분해성 바이오플라스틱 용도별 수요

연도	6품목	농업용 필름	어망 어구	포장 제품 (봉투류)	식품 용기	식품 기구	식탁보	숙박 용품	기타	합 계
2022	중량(톤)	1,040	600	11,000	10,000	800	300	200	6,060	30,000
	금액(억 원)	110	100	1,200	440	62.5	18	25	303	2,258.5
2026	중량(톤)	10,000	2,000	26,900	17,900	1,221	2,000	488	22,119	82,628
	금액(억 원)	1,058	333	2,935	1,079	153	200	61	1,106	6,925

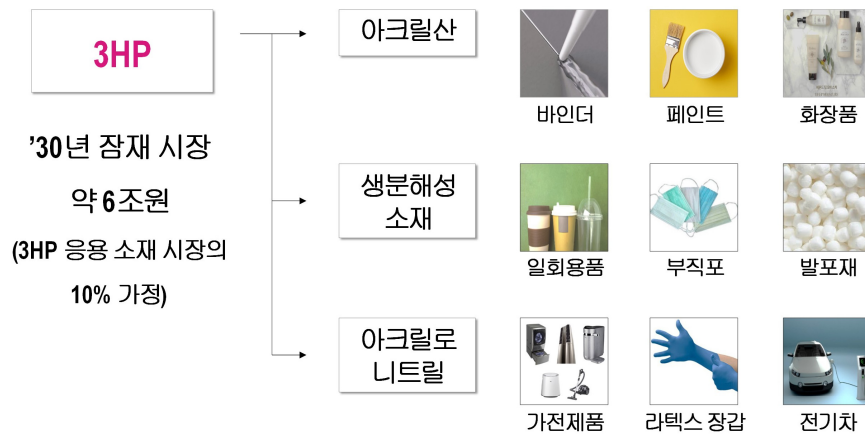
- 국내 바이오매스기술을 보유한 기업은 대상, CJ제일제당, LG화학이 있음. 플랫폼화합물 생산의 경우 GS칼텍스의 2,3-butanediol과 삼양사의 isosorbide를 대표적인 상용화 사례로 들 수 있으며, 특히 삼양사의 경우 군산에 5,000톤/년 공장을 설립하고 양산을 위해 노력하고 있는 중임. 바이오플라스틱 제조 기업의 경우, 롯데케미칼과 SK지오센트릭이 각각 BioPET와 바이오납사 기반 제품을 상업 생산 중임.

■ 국내 기업의 생분해성 바이오플라스틱 상용화 확대

• LG화학

- 바이오매스로부터 3HP(3-Hydroxypropionic acid)를 생산하는 생물공정을 개발하였음. 3HP는 아크릴산, 아크릴로니트릴 등의 전구체로 사용될 수 있는 바이오 중간체임. 3HP는 아직 시장이 형성되어 있지 않으나, 전환될 수 있는 응용소재들의 약 10% 시장만을 점유해도 2030년 약 6조 원의 시장이 형성될 것으로 예측됨(그림 5.1).

그림 5.1 3HP 응용 소재 및 예상 시장규모



출처: LG화학

- 현재 경쟁사인 Cargill사가 미생물발효공정에 의한 3HP 생산기술을 개발하였으나, 아직 상용화하지는 못하고 있음. 따라서 관련 시장이 막대한 3HP를 상용화한다면 글로벌 친환경 소재 시장을 선도할 수 있을 것으로 기대됨. LG화학은 2021년 GS칼텍스와 3HP 양산 기술개발 및 시제품 생산을 위한 공동개발협약을 체결하였고, 2022년 7월 파일럿 공장을 여수에 착공하여 2023년 하반기부터는 3HP 시제품 및 3HP 응용제품을 본격 생산할 예정임.
- LG화학은 또한 젯산과 3HP의 공중합체인 신규 생분해성 바이오플라스틱 PLH(Polylactate hydracrylate)를 독자 개발하였음. 이 소재는 다른 생분해성 플라스틱보다 바이오 함량이 높고, 기존 PLA의 약점인 brittleness를 해결하였으며 투명성과 가공성이 대폭 개선되었다고 발표함(앞의 표 4.7). LG화학은 미국에 2025년까지 7만 5천 톤 규모의 공장을 신설하여 상용화를 추진하고 있으며, 미국 곡물회사 ADM사와 젯산 생산을 협력하고 있음. LG화학은 또한 2024년 PBAT 5만 톤/년 공장을 신설할 예정임.

• CJ제일제당

- 2016년 미국 Metabolix사의 P3HB4HB[Poly(3-Hydroxybutyrate-co-4-Hydroxybutyrate)] 공중합체 생산기술을 인수하고, 유전공학 기반 균주를 개발하고 발효공정 규모를 확대하여 rubbery한 부정형 PHA의 경제성 있는 생산기술 확보에 성공하였음(상품명 PHACT). CJ제일제당은 현재 안산에 30톤/년 규모의 파일럿 공장과 인도네시아에 5천 톤/년의 생산시설을 운영하고 있는데, 앞으로 인도네시아에 2023년 1만 5천 톤/년, 2025년에는 총 6만 5천 톤/년까지 생산용량을 확대할 예정이다.
- 또한 PLA 필름 제조사인 SKC사와의 협동으로, 이 고분자의 impact modifier 기능을 활용해 PLA에 첨가함으로써 유연성이 크고 강인한 식품포장용 필름 개발에 성공하였음(그림 5.2). 통상 PLA의 impact modifier로 혼합되는 석유계 PBAT보다 더 투명하고 생분해성이 월등히 증가되어 빠르게 퇴비화(compostable)되므로 생분해가 느린 PLA의 단점도 해결할 수 있음. 따라서, PLA 1위 생산회사인 NatureWorks사와도 PLA+PHA 블렌드 소재의 확대를 위한 사업협력 계약을 추진하고 있음. 또한, 2022년 2월 플라스틱 컴파운딩 전문업체인 HDC 현대EP사와 합작으로 컴파운딩 전문의 CJ HDC Biosol사를 설립하였고 2022년 4분기부터 본격적으로 생분해플라스틱 컴파운드 생산을 개시할 예정임.

그림 5.2 CJ제일제당사의 PLA+PHA 소재의 두부 포장용 필름



• SKC, LX인터내셔널, 대상

- 2023년 연간 7만 톤 규모의 PBAT 생산시설 설립을 확정하였음.

• SK지오센트릭, 코오롱인더스트리

- 2022년 3천 톤 규모의 PBAT 공장을 가동하고 있으며, 2024년까지 연간 6만 톤으로 생산능력을 확대할 계획임.

• 롯데케미칼

- 2030년 석유 C1-화합물 기반의 PHA 생산기술 확보 및 제품 생산을 계획하고 있음.
(그림 5.3)과 같이 바이오플라스틱 전·후방 산업의 연계는 국내 대기업뿐만 아니라 연관 중소기업의 성장과 무역 수출에 큰 힘이 됨.

그림 5.3 바이오플라스틱 전·후방 산업 관련 국내 기업

	소재기술기업	가공기술기업	완제품기술기업
PLA	PLA산업은 장치산업으로 대기업 생산이 가격경쟁력 확보에 유리 	 컴파운딩 기술 소재에 상관 없이 가공기술기업은 전부 중소기업으로 구성됨	식품포장재, 인테리어 1회용컵 
PBS	다품종 소량생산이 가능한 PBS는 기술격차 해소 시 중소기업에서도 생산 가능 	 사출제조 기술	어망, 멸칭필름 
PHA	특수목적용으로 적합한 소재로 해외와 기술격차가 가장 적은 소재 	 필름제조 기술 가공 관련 기업은 국내 수만 개의 가공기업 존재	중소기업이 주를 이루는 다품종 소량생산 기업 다수 

출처: KEIT, 이베스트증권 리서치센터

■ 국내 생분해성 플라스틱 가공업체 현황

- 국내 가공업계에서 생분해성 플라스틱 인증업체는 2022년 6월 말 기준으로 약 225개 업체로서 원료 제조, 컴파운딩, 시트원단 제조, 성형가공업에 참여하고 있으며, 대부분이 영세한 중소기업임 (표 5.2).
- 국내의 대표적인 완제품 생산기업은 코스닥 상장기업인 세림비앤지로서 생분해성 플라스틱을 연 약 3600톤을 사용하여 관련 업계 1위이고, 생분해성 플라스틱 관련 사업 확장과 추가 설비 투자를 계획하였으나 최근 환경부의 환경표지 인증 중단에 따라 추가 투자를 보류하고 있음. 그 외에 성형, 가공 및 완제품 제조 회사로는 PLA 용기 판매 1위인 두레, 생분해성 빨대 분야 글로벌 1위인 서일 등이 있음.
- 생분해성 플라스틱 소재는 도일एको텍과 솔테크 등이 PBS와 PBAT를 생산하고 있으나 지적재산권 문제로 국내 판매에만 한정하고 있음. TLC Korea-베트남 Anphat 합작회사인 안코바이오플라스틱사는 국내에서 생산하여 태국 등 해외로 수출하고 있음. 이외에도 그린케미칼과 이솔산업 등이 PLA 원료를 수입하여 시트원단을 제조해서 국내 용기 제조업계에 공급하고 있음(표 5.3).

표 5.2 생분해성 환경표지 인증품목 및 인증기업(EL724, 2022.6.30.)

연번	대분류	중분류	업체 수
1	포장제품	일반봉투	78
		식품봉투, 롤형	10
		식품봉투	1
		쇼핑봉투	6
		위생봉투	3
		우산봉투	1
2	식품 기구	빨대	10
		스푼	5
		포크	5
		나이프	4
3	식품 용기	식품 용기	17
4	식탁보	식탁보	16
5	위생장갑	위생장갑	3
6	숙박용품	치솔	1
7	농업용 필름	농업용 필름	27
8	분골함	분골함	2
9	수의	수의	1
10	녹화공법용 네트 및 섬유	녹화공법용 네트 및 섬유	1
11	연약지반 개량용 배수재	연약지반 개량용 배수재	1
12	원료	원료	33
합계			225

출처: 세림비엔지

표 5.3 국내 생분해성 플라스틱 관련 중소기업

구분	회사명	주생산품	비고
성형·가공 완제품	 세림비엔지	PLA 트레이, BIOPET 용기, 생분해성 필름 및 봉투, 일회용 장갑, 기능성 생분해 필름	생분해성 완제품 분야 업계 1위 생분해성 플라스틱 사용량: 3,600톤/년
	두레	PLA 트레이, 종이트레이	PLA 용기 판매 1위
	조은플라텍	PLA 트레이	-
	삼보케미칼	PLA 트레이	-
	서일	생분해성 빨대	생분해성 빨대 분야 글로벌 1위
	프로팩	생분해성 봉투	포천
	그린바이오	생분해성 봉투	함평
	유일화학	합성수지 봉투, 생분해성 봉투	김포
	제일산업화학	합성수지 봉투, 생분해성 봉투	부산

구분	회사명	주생산물	비고
	세경화학	합성수지 봉투, 생분해성 봉투	화성
	케이아이피	합성수지 봉투, 생분해성 봉투	화성, CU 납품
	태성화학	합성수지 봉투, 생분해성 봉투	화성, CU 납품
	협성씨엔티	합성수지 봉투, 생분해성 봉투	김포
	부경프라스틱	합성수지 봉투, 생분해성 봉투	부산
	세종그린팩	합성수지 봉투, 생분해성 봉투	부산
	엔비코	생분해성 식탁보	부산
소재 및 컴파운딩	도일एको텍	WPC(합성목재), 생분해성 수지 M/B (마스터배치)	PBAT 생산 국내 한정(지재권)
	안코바이오 플라스틱스	PBS, PBAT, 생분해성 수지 M/B	PBS, PBAT 생산 해외 수출
	솔테크	PBS, PBAT, 생분해성 수지 M/B	PBS, PBAT 생산 국내 한정(지재권)
	남광케미칼	생분해성 수지 M/B	프로팩 자회사 추가 설비 투자 보류
	우성케미칼	합성수지 M/B, 칼라 M/B, 생분해성 수지 컴파운딩	일부 생분해성 매출
	R&F 케미칼	합성수지 컴파운드, 생분해성 수지 M/B, PE 항균필름	OEM 생산, 판매
	프렉스	생분해성 수지 M/B	-
	진바이오컴	생분해성 수지 M/B	-
생분해성 원단가공	그린케미칼	PLA 시트 원단	-
	이솔산업	PLA 시트 원단	-

출처: 세림비앤지

- 많은 영세 플라스틱필름 등 가공회사들이 그동안 환경오염 문제로 인한 플라스틱 규제에 의하여 영업에 큰 곤란을 겪어 왔음. 그나마 친환경 생분해성 일회용 포장재 생산이 규모는 작지만 주요한 시장이었는데, 이번 환경부의 환경표지 인증 중단 조치로 그 시장이 없어질 위기에 있음. 큰 시장은 아니지만 정부의 생분해성 플라스틱 사용 권장 정책을 믿고 오랫동안 기술개발과 막대한 자금을 투자한 국내 생분해성 포장재산업계가 존폐 위기에 처하고 있음. 계획대로 2024년 말 생분해성 일회용품 환경표지 인증 유효기간이 만료되면 2022년 기준으로 관련 회사 225개 중 약 160개사가 도산할 것으로 추정됨.

■ 국내 생분해성 바이오플라스틱 인증 현황과 문제점

- 정부는 최근 코로나 사태로 인한 무분별한 일회용 플라스틱의 남용으로 환경문제가 심각해짐에 따라 이를 해결하기 위한 여러 정책들을 발표하고 있음.
- 환경부 「자원순환기본법」(2020. 5. 26. 시행)에서 생산자책임재활용제도(EPR)와 폐플라스틱의 재활용을 강조하고 있으나, 비대면사회로의 전환과정에서 포장재 사용량이 급증하였음에도 발생된 폐플라스틱의

안전한 처리 및 생분해성 플라스틱의 확대와 같은 구체적 제도는 없음. 또한, 아직까지 우리나라는 기존 석유화학 기반 플라스틱을 대체할 바이오 및 생분해성 플라스틱에 대한 국제표준에 부합하는 표준규격조차 마련되어 있지 못한 현실임.

- 환경부 산하 한국환경산업기술원 주관 환경표지인증제도에서는 EL724(생분해성수지 제품)와 EL727(바이오매스합성수지 제품)을 포함하여 다양한 친환경 제품에 대해 공적 인증을 수행해 왔으나, 최근에 기존 EL724의 신규 인증을 중단하고 토양생분해에 한정된 시험방법으로의 개정을 준비 중임. 이러한 경향은 해외에서 보편적으로 채택하여 시행 중인 퇴비화 방법과 새롭게 부각 중인 혐기소화 방법에 의한 유기성 자원순환의 경로 및 해당 제품 시장의 형성과는 상이한 정책 방향이므로 폐플라스틱 문제 해결에 장애로 작용할 우려가 큼.
- 유럽, 미국, 일본의 경우처럼 자원순환경제 추구와 생태계 플라스틱 오염방지 차원에서 플라스틱 포장재에 관한 국제적 호환성을 전제한 독립적 인증제도의 구축이 요구됨.
- 폐플라스틱 발생량을 효과적으로 감축하려면 불필요한 사용량 저감, 내구성 증대, 재활용 및 생분해성 고분자의 응용이 동시에 고려되어야 함. 생분해성 플라스틱의 선택적 사용을 고려한 일회용 플라스틱 용기류와 포장재의 친환경적 사용을 검증하기 위해 생분해성 플라스틱과 바이오매스 기반 플라스틱에 대한 국제공인 수준의 인증이 시급한 시점이지만, 인증제도의 부재로 인하여 친환경 녹색포장 기술의 개발과 사업화가 부진한 실정임. 즉, 국내 녹색포장 의무 사용과 친환경 재료의 보급 확대는 물론 해외 수출 제품에 대한 환경규제 대응 차원에서도 인증제도의 조속한 운영이 절실히 요구됨.
- 산업용 바이오플라스틱과 폐플라스틱 용기 재활용에 관한 국가기술개발사업이 과기정통부, 산업부, 환경부에서 지원된 사례가 있지만, 각각 자원화를 대상으로 하는 매우 제한적인 과제로 추진됨으로써 범사회적 현안인 포장재의 공해 문제 해결책을 위한 지원제도로는 크게 미흡함.
- 비대면 쇼핑 증가에 연동된 포장재 폐기물관리 시 배달요리, 가공식품, 비식품류별 재활용 여부, 제도적 처리 조건에 따라 포장재의 천연물 기반 재료의 함량과 생분해성, 내구성과 재자원화 가능성 등을 구분하여 자원순환성 제고와 환경부하 감소를 총체적으로 관리하는 정책이 필요함.

포스트 플라스틱 시대를 위한 정책 제언
Policy Recommendations for the Post-Plastics Age

VI

국내 폐플라스틱 관리 및 정책

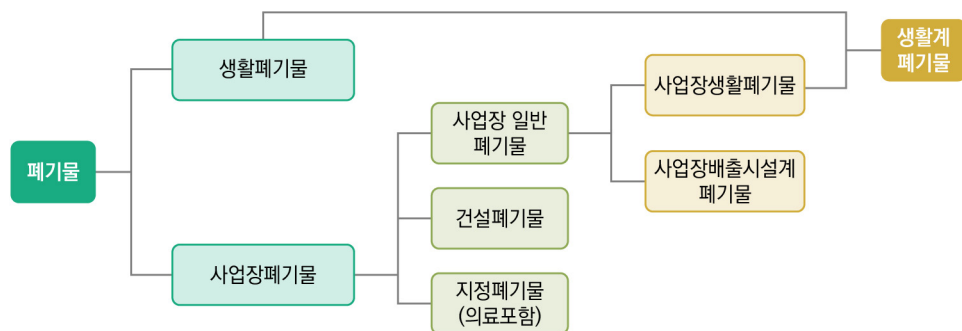
KAST Research Report 2022
한림연구보고서 144

VI. 국내 폐플라스틱 관리 및 정책

1. 폐플라스틱 발생 및 처리 상황

■ 우리나라는 1986년 제정된 「폐기물관리법」 제2조 1호에 따라 생활폐기물과 사업장폐기물로 나누어 관리체계가 일원화되었음. 환경부와 한국환경공단은 매년 전국 및 행정구역별 폐기물 통계를 발표하고 있으며, 2020년 전체 폐기물 양은 19,546만 톤이고, 플라스틱 폐기물을 포함하는 생활계폐기물은 2,254만 톤인데 그중 생활폐기물이 1,730만 톤, 사업장비배출시설계 폐기물이 524만 톤이었음. 그 외 사업장배출시설계(폐수, 하수, 분뇨물 등) 폐기물이 8,087만 톤, 건설폐기물이 8,644만 톤이었음<그림 6.1>(환경부·한국환경공단, 2021, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2020년도); 윤경준, 2020).

그림 6.1 폐기물관리법 제2조 1호에 따른 폐기물 구분



■ 또한, 생활계폐기물 및 사업장비(非)배출시설계폐기물의 연도별 성상 변화 통계에서 2020년 폐합성수지류를 각각 251만 톤, 136만 톤 총 387만 톤으로 집계하였음<표 6.1, 6.2>. 이 양은 지난 2018년 총 193만 톤, 2019년 총 167만 톤에서 2020년 총 387만 톤으로 급증하였으므로 최근 코비드 상황으로 인해 배달음식이 급증한 점을 감안하여도 신뢰성이 약한 것으로 사료됨.

■ 한편, 연합뉴스(2020.9.13.)가 보도한 ‘전국 플라스틱 폐기물 발생량’은 2018년 6,375톤/일, 이를 환산하면 233만 톤/년이므로, 위의 193만 톤에 가까운 숫자임.

■ 또한, 한국석유화학협회 통계에 의한 한국의 총 플라스틱 소비량은 2020년 약 610만 톤/년 이고, 그중에 포장재 및 일회용품으로 많이 사용되는 저밀도폴리에틸렌(LDPE)이 133만 톤, 고밀도폴리에틸렌(HDPE)이 111만 톤, 폴리프로필렌(PP)이 156만 톤, 폴리스티렌(PS)이 50만 톤 그리고 음료수 용기인 PET병이 25만 톤으로(환경부 '페트병 재활용체계 개선'발표 자료) 추산 되어 일회용품·포장재로 쓰이는 소비용 플라스틱의 합계는 약 476만 톤임<표 1.3>.

표 6.1 생활계폐기물의 연도별 성상 변화

구분		'18	'19	'20
총계		2,045	2,116	2,254
종량제방식 등 혼합배출	소계	933	1,077	852
	폐지류	189	182	186
	폐합성수지류	178	271	190
	폐유리류	27	23	23
	폐금속류	18	16	16
	기타	521	584	437
분리배출	소계	583	516	886
	폐지류	156	129	140
	폐합성수지류	145	131	251
	기타	283	256	495
음식물류 폐기물 분리배출	소계	528	522	516

출처: 환경부·한국환경공단, 2021, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2020년도)

표 6.2 사업장비(非)배출시설계폐기물의 연도별 성상 변화

구분		'18	'19	'20
총계		339	440	524
종량제방식 등 혼합배출	소계	190	312	48
	폐지류	7	4	3
	폐합성수지류	41	110	19
	폐유리류	4	1	0.3
	폐금속류	2	1	0.2
	기타	136	195	25
혼합배출 외 분리배출	소계	108	85	427
	폐지류	14	2	1
	폐합성수지류	48	36	136
	기타	46	48	291
음식물류 폐기물 분리배출	소계	41	43	49

출처: 환경부·한국환경공단, 2021, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2020년도)

■ 환경부·한국환경공단 통계에 의한 폐플라스틱 양 387만 톤 가운데 81%가 폐플라스틱으로 버려지는 것으로 계산되는데, 통계 연도별로 차이가 있지만 이는 다소 과다해 보임.

■ 결론적으로 2020년 현재 국내 플라스틱 폐기물의 양은 200만~390만 톤으로 보고되고 있는데, 보다 정밀한 통계가 필요함.

■ 앞의 53쪽에서 서술한 바와 같이 장용철 외(2022)는 한국의 플라스틱 생산량, 소비량 및 플라스틱 폐기물의 양과 처리 방법에 대한 보고서에서<표 3.8>, 총 소비량이 695만 톤이며, 플라스틱 폐기물의 총량 711만 톤 중에 소각이 290만 톤(41%)으로 제일 많고, 재활용이 220만 톤(31%), 에너지회수가 800만 톤(11%), 매립이 40만 톤(6%)으로 보고하였으나, 이 숫자 역시 과다하게 평가되었음.

■ <표 6.3>에 상기 환경부·한국환경공단 발표 자료를 바탕으로 플라스틱 폐기물의 비중과 발생원을 정리하였는데 몇 가지 특징이 있음.

- 생활폐기물 중 플라스틱 폐기물 비중이 매년 증가하는데, 이는 플라스틱 포장재나 생활용품의 증가에 기인함.
- 플라스틱 폐기물 근원의 비율은 사업장폐기물(56.6%)과 생활폐기물(35.9%)이고, 건설폐기물의 비중은 낮음.

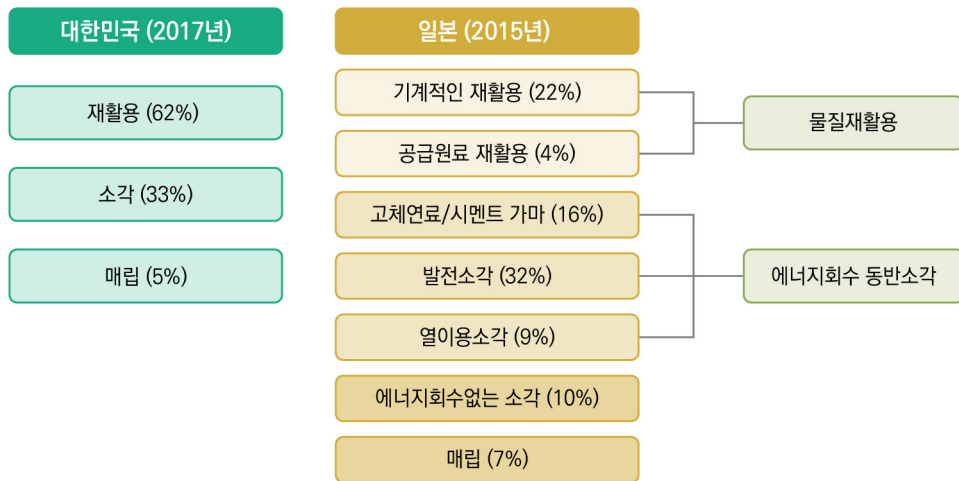
■ <그림 6.2>에 한국과 일본의 폐플라스틱의 처리 방법을 비교하였음. 일본은 폐플라스틱 처리 방식을 7가지로 나누어 정확한 통계를 제시하고 있는 데 반하여, 우리는 재활용을 최우선시하고 있지만 관련된 통계가 확실하지 않음(윤경준, 2020).

표 6.3 플라스틱 폐기물의 비중과 발생원

구분		2013년	2014년	2015년	2016년	2017년	2018년
폐기물 유형별 플라스틱 폐기물의 비중(%)	전체 폐기물 중 플라스틱 비중	4.5	4.7	4.9	5.0	5.5	5.6
	생활폐기물 중 플라스틱 비중	11.7	12.1	12.5	13.3	15.0	15.5
	사업장배출시설계폐기물 중 플라스틱 비중	6.6	6.9	7.5	7.4	7.9	8.2
	건설폐기물 중 플라스틱 비중	0.9	0.9	0.8	0.7	0.9	0.9
플라스틱 폐기물의 발생원별 비중(%)	생활계폐기물 기원 플라스틱	33.1	33.3	32.4	34.8	35.1	35.9
	사업장배출시설계폐기물 기원 플라스틱	57.1	58.0	59.2	58.3	57.0	56.6
	건설폐기물 기원 플라스틱	9.9	8.7	8.4	6.9	7.9	7.5

출처: 환경부·한국환경공단 발표 자료

그림 6.2 플라스틱 폐기물 처리 방법별 통계(한국과 일본)



- 일본은 폐플라스틱의 물질재활용이 26%인데 그중에 기계적 재활용이 22%이고, 고체연료 및 발전·열이용 소각을 합친 에너지회수 동반 소각이 57%로 매우 높으며, 기계적 재활용과 에너지회수 소각을 합치면 79%로 재활용 비율이 매우 높음. 한편, 단순 소각은 10%, 매립은 7%로 높지 않음. 한국은 재활용이 62%, 소각이 33%이고 매립은 5%에 불과함. 이 통계에서 재활용이 62%로 생각보다 높은 것은 통계의 신뢰성이 약한 점을 고려할 필요가 있다고 사료됨.
- 국내에서 성공적으로 물질재활용되고 있는 품목은 투명PET병임. 환경부에서 '페트병 재활용 체계 개선' 계획(2019.11.18. 발표)에 의하여 투명페트병을 별도로 분리수거·수집·운반하여 재활용하고 있음. 2018년 기준으로 국내 투명페트병의 생산량은 약 30만 톤으로 그중 24만 톤(80%)이 재활용되고, 특히 2만 9천 톤(10%)은 고품질 원료인 시트(sheet) 등으로 재활용되고 있음.
- 그러나 다른 플라스틱은 종류가 다양할 뿐 아니라, 재질별로 분리수거하기가 기술적·시스템적으로 거의 불가능한 것이 현실임.

2. 폐기물 및 폐플라스틱 관리 정책

- 국내 폐기물관리 정책은 <표 6.4>와 같이 1986년 「폐기물관리법」 제정으로 시작되어 생활 폐기물과 사업장폐기물의 관리체계가 일원화됨. 그 후 폐기물에 관련된 주요 정책들이 도입되었음.

■ 정부의 폐기물 정책 변화:

- 1단계: 1980년대 안전관리에 중점
- 2단계: 1990년대(1992년 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」(약칭: 자원재활용법) 제정 이후)부터 재활용을 강조하였음.
- 3단계: 2000년 중반 이후 자원순환에 초점을 맞추고 있음.

표 6.4 폐기물 관련 법률 현황

법률명(약칭)	제정(시행) 연도	주요 내용
폐기물관리법	1986(1987)	• 폐기물 처리절차, 처리 기준 및 방법 • 폐기물처리업 관리 및 불법 폐기물 방지
자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 (자원재활용법)	1992(1993)	• 일회용품 사용 억제, 재활용산업 육성 지원 • 폐기물부담금제도, 생산자책임재활용제도
폐기물의 국가 간 이동 및 그 처리에 관한 법률 (폐기물 국가간이동법)	1992(1994)	• 폐기물 수출입 허가 및 신고 • 불법 수출입 폐기물 반출명령
폐기물처리시설 설치촉진 및 그 주변지역지원 등에 관한 법률 (폐기물시설촉진법)	1995(1995)	• 산업단지 등 개발 시 처리시설 설치의무 • 폐기물처리시설 주변영향지역 지원
건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률 (건설폐기물법)	2003(2005)	• 건설폐기물 처리절차, 처리 기준 및 방법
전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률 (전자제품등자원순환법)	2007(2008)	• 유해물질 사용 제한 대상 및 함유기준 • 재활용 촉진을 위한 재질 및 구조개선
자원순환기본법	2016(2018)	• 자원순환기본계획 수립·시행 • 시·도 및 사업자의 자원순환 성과 관리

■ 정부는 「자원순환기본법」 11조에 의거 2018년 9월 ‘제1차 자원순환기본계획(2018-2027)’을 수립하고 세 가지 목표를 설정하였음.

- 원단위 폐기물 발생량(국내총생산 10억 원당 폐기물 발생량)을 95.5톤에서 76.4톤으로 20% 이상 감소
- 순환이용률(폐기물 발생량 중 실질 재활용 비율)을 70.3%에서 82%로 증가
- 최종처분율(폐기물 중 최종 처분량 비율)을 9.1%에서 3.0%로 설정하였고, 이 목표를 달성하기 위하여 12개의 추진과제 제시

■ 그러나 자원순환 기본계획에 플라스틱 폐기물 문제가 거의 언급되지 않았음.

■ 현재 플라스틱 폐기물 정책을 담고 있는 것은 ‘재활용폐기물 관리 종합대책’인데(중국의 재활용폐기물 수입제한 조치(2018.1.)에 따라 제정됨), 그 주 내용은 다음과 같음.

- 2030년까지 “플라스틱 폐기물 발생량 50% 감축” 및 “플라스틱 폐기물 재활용률 70% 달성”의 두 가지 목표 제시. 플라스틱 생애단계를 제조, 생산, 유통·소비, 분리·배출, 수거·선별, 재활용으로 구분하고 단계별 문제점 진단을 바탕으로 <표 6.5>과 같은 세부과제를 도출함.

■ 우리나라도 UN-SDGs(sustainable development goals)체계를 따라 국제적 정세에 대응하면서, 국내 여건도 반영할 수 있도록 K-SDGs를 마련하였고, 제3차 기본계획을 변경하여 '제4차 지속가능발전 기본계획(2021~2040)'을 확정함.

표 6.5 재활용폐기물 관리 종합대책의 부문별 전략 및 세부과제

구분	전략	세부과제
제조·생산	제품설계	재질구조 평가 의무화 및 분담금 차등화
		순환이용성 평가
		재활용 친화형 소재·디자인 개발
	생산자책임(EPR) 강화	품목 확대
		재활용의무율 상향
		면제 대상 관리 강화
유통·소비	포장 최소화	운송포장재(택배) 과대포장기준 강화
		일반포장재 과대포장기준 강화
	일회용품 사용 최소화	일회용 컵 감량·회수·재활용 대책
		비닐봉투 감량대책
		공공부문 사용 감축
	이행 강화	제도 개선(재활용법 및 시행령 개정)
		점검 강화
분리·배출	홍보·모니터링	올바른 분리배출 집중 홍보
	체계 개선	분리배출기준 명확화
		취약지역 인프라
수거·선별	공공관리 강화	공동주택 민간수거 보고 의무화
		비상대응체계 마련
		공공선별장 확충
	수거·선별업체 지원	수거업체 수익 안정화
		고물상 환경 개선
		선별업체 지원 확대
재활용	시장안정화	모니터링 및 관리체계 구축
		수입관리 강화
		국산 재생원료 사용 제고
	수요 확대	공공구매 확대
		재활용 제품 R&D
	고형폐기물연료(SRF) 관리 개선	환경안전성 강화
홍보·교육	실천운동	관리체계 개선
		대국민 집중 홍보
	자원순환 교육	실천운동 확산
		수요자 맞춤형 교육
		체험 기반 강화

출처: 관계부처합동계획(2018)을 바탕으로 작성

- 국가 지속가능발전과 관련하여 이미 성립된 국제적 합의 이행과 동시에 2050 탄소중립 지원과 지속가능발전을 촉진하기 위하여 폐기물 감량과 재활용을 통한 순환성 강화를 목표로 하는 'K-순환경제 이행계획'을 발표(2021.12.31.)함.

■ 상기 기본계획은 5년마다 수립키로 함. 즉, 환경부 판(제4차 지속가능발전 기본계획, 2020-2040)에 의하면 지속가능한 생산과 소비에 있어서 “플라스틱이 선순환하도록 플라스틱의 재활용률을 증가시키고 친환경 재료 개발을 통해 플라스틱의 환경 유출 방지”를 목표로 1인당 플라스틱 소비량을 122kg/인/년(2018년) → 110kg → 98kg으로 줄여나가며, 폐플라스틱의 재활용률을 58.9%(2017년) → 70% → 100%로 증가시켜 나가는 목표를 세움(목표 12-9). 그러나, 일반 국민의 환경문제에 대한 의식이나 폐플라스틱 저감에 대한 인식이 최근 더 낮아지고 있다는 현실에 비추어, 위에 적은 플라스틱 소비량을 크게 줄이는 것은 쉽지 않을 것임.

■ K-순환경제 이행계획 추진 내용 및 목표

- 폐기물 제로
 - 매립·소각을 최소화하고 폐자원을 완전히 재활용하는 것으로, 즉 폐기물을 물질적 또는 화학적으로 재활용하고, 재활용 후 남은 폐기물은 소각하여 폐기물 제로화를 추진
 - ※ 감량(발생량 저감) → 재사용·재제조(제품 수명 연장) → 물질 재활용(원료로 재사용) → 화학적 재활용
[고형폐기물연료(Solid Refuse Fuel, SRF), 연료유 생산] → 모든 잔재물 재활용
 - 목표
 - 폐기물 매립률: 6.1%(2021년) → 1%(2030년) → 0%(2050년)
 - 탄소중립을 위한 폐기물 분야 온실가스 배출량
: 17.1백만 톤(2021년) → 9.9백만 톤(2030년) → 4.4백만 톤(2050년)
- 순환경제
 - 폐기물 부문에 한정하지 않고, 생산-유통-소비 전 과정에서 자원을 효율적으로 이용하고 순환이용을 활성화하는 친환경 경제체제로 재편하고자 함.
- 재활용
 - 음식물, 가축분뇨, 하수찌꺼기 등은 통합 바이오가스화 체계로 개편할 계획이며, '유기성 폐자원을 활용한 바이오가스의 생산 및 이용 촉진법'을 2021년 6월 발의하여 관련법 제정을 추진 중임.
 - 「폐기물관리법」상 재활용 유형 및 세부기준을 시정하여 재활용이 어려운 폐플라스틱은 열분해를 통해 나프타(석유화학제품 원료)로 활용할 수 있게 하고 재정지원도 확대할 방침이며, 내년부터 화학적 방식으로 재활용된 플라스틱 제품에 대해서도 폐기물부담금을 감면해 줄 계획임.

- 또한 환경부에서는 2022년 국정과제를 <표 6.6>과 같은 '재활용을 통한 순환경제 완성'으로 선정하여 관련 정책을 추진하고 있음.

표 6.6 '재활용을 통한 순환경제 완성' 국정과제

과제 목표	생산·유통·소비·재활용 전 과정에서 폐기물 감량 및 고부가가치 재활용을 확대하는 순환경제로 전환	
주요 내용	발생량 저감	- 생산부터 폐기까지 전 과정에서 자원 낭비 및 폐기물 발생 감축 - 일회용 컵 보증금제 시행 등 일회용품 감축 지속 확대 - 고부가가치 폐자원 순환자원으로 지정, 폐기물 규제 제외
	회수·선별 고도화	- 재활용 효과를 높이는 회수·선별 고도화 - 선별시설에 광학선별기 설치 의무화, 공공선별장 현대화(~26년, 62.6%) - 버스정류장, 지하철역 등에 일회용 컵 무인회수기 설치
	고부가가치 재활용	- 고품질 플라스틱은 재생원료의 사용을 의무화하고, 복합재질 등 재활용이 어려운 플라스틱은 열분해하여 원료로 활용 - 페PET등 플라스틱 재생원료 사용 의무화: PET 1만 톤/년 이상 생산자 등 - 페플라스틱을 열분해하여 석유·화학원료, 수소원료로 재활용 허용

■ 환경부의 플라스틱 사용 규제 및 플라스틱 포장재 감량 정책 추진

- 일회용품 사용 줄이기(2022년 11월 24일부터 시행)
 - 배경
 - 근래에 1인 가구 증가로 인한 배달 및 소규모 구매 증가, 커피문화 확산 등으로 일회용 컵, 봉투, 접시, 용기 등 일회용품 사용량 증가
 - '재활용폐기물 종합대책(2018.5)' 시행에 따라 일회용품 및 포장재가 일부 감소되는 시점도 있었으나 COVID-19 발생 이후 최근에 다시 증가하는 추세임.
 - (2019년) 커피전문점 일회용 컵 75% 감축, 제과점 비닐봉투 84% 감축, 그러나 (2020년) 전년 동기 대비 택배 19.8% 증가, 음식 배달 75.1% 증가, 페플라스틱 14.6% 증가, 페플라스틱 봉투 11% 증가
 - 일회용품 사용으로 자원 낭비 및 환경피해가 발생하고, 음식물 등이 묻거나 다양한 재질로 인한 재활용이 어려움.
 - 내용
 - 플라스틱 일회용품은 대상 시설 및 업종에 따라 원칙적으로 무상제공 금지 및 사용 억제
 - * 집단 급식소와 식품접객업 분야에서 컵·접시·용기·젓가락·수저·포크·나이프·식탁보·빨대·젓개 등의 일회용품 사용 금지, 백화점 등 대규모 점포 내 식품 제조·가공·즉석 판매업에서 합성수지 용기 사용 금지, 대규모 점포·도소매업종에서 일회용 봉투 사용 금지
- 플라스틱 발생 원천 저감
 - 플라스틱 용기의 타 재질 전환 목표 설정
 - 폐기물부담금 부과율 현실화

- 공공기관(약 28,000개) 사무실, 회의, 행사에서 일회용품 사용 제한
- 재포장 금지 제도 시행
- 배달용 플라스틱 포장재 감량 및 포장재 없는 점포 확산 추진
- 일회용 컵 보증금 제도 시행(2022년 11월)
- 과대포장 사전 검사제도 도입

■ 친환경 생분해성 플라스틱 관련 정책

- 생분해성 플라스틱 및 바이오매스 플라스틱의 일회용 포장재에 대한 환경표지 인증이 중단되었으며, 특히 생분해성 수지는 농업용 필름 및 수의용품에 한해 인증이 유지됨(2021년 11월 4일).
- 이유: 일회용품의 환경표지 인증 부여가 일회용품 사용을 도리어 권장한다는 논리
 - 생분해성 환경표지 인증기업 수(EL724): '22년 6월 말 기준 총 225개사
 - 생분해성 인증(EL 724), 바이오매스 인증(EL727)의 신규 인증 및 인증기간 연장 불가
- 일회용품 사용 줄이기의 대상에서 생분해성 환경표지 인증 유효기한이 남아 있는 제품에 한해 일부 예외규정을 두고 있으나, 환경표지 신규 인증 및 기간 연장이 중지된 상황에서 유명무실함.
 - 종이 재질 봉투 및 쇼핑백은 일회용품이 아니라고 규제 대상에서 제외
 - 편의점은 생분해성 유무 관계없이 플라스틱 봉투 사용 불가
 - 환경표지 인증된 생분해성 제품 예외 대상

* 예시 : 식품 용기, 대규모 점포(매장면적 3000㎡ 이상)의 쇼핑백, 식품 배달용(매장 및 배달 겸하는 종합소매업은 사용 불가)

■ 결론적으로 앞으로는 플라스틱 일회용품은 원칙적으로 생산·사용이 금지되고 불가피한 영역에는 생분해성 또는 재생가능 원료로 대체될 것으로 사료됨.

■ 그러나, 플라스틱 일회용품 사용의 원칙적 금지 정책에도 불구하고 배달문화 확산, COVID-19 감염병 시대로 일회용품이 증가하는 추세에 단순한 사용 제한 또는 재활용 정책만으로 폐플라스틱을 줄이는 것은 실효성에 한계를 보일 것임.

■ 한편, 일방적인 일회용품 및 플라스틱의 사용 금지는 일회용품 사용량을 일정 수준 저감할 수 있는 긍정적인 요인이지만, 무조건적으로 지속적인 금지는 아래 예와 같이 기술적 진보를 퇴화시키고 산업의 활성화를 저해하며 오히려 환경부하도 늘리는 경우도 생김.

- 예시 1: PET 용기의 생산기술은 PE, PP와 같은 다른 소재에 비하여 더 얇고·가볍고·튼튼한 용기를 제조 판매하여 플라스틱 폐기량 저감에 일조함.

- **예시 2:** 국내 회사들의 즉석밥 용기의 경우 25년 전 초기 제품에 비해 현재는 1/4 수준의 가격에 생산하고 있으며, PET와 유사한 수준의 재활용 기술을 확보하기에 이룸. 유가와 인건비의 꾸준한 상승에도 불구하고, 제조원가가 지속적으로 낮아질 수 있었던 것은 사용량의 증가 이외에도 지속적인 사용에 따른 소재·가공 기술력의 발전이 주요 요인임. 이렇게 확보된 기술력은 즉석밥 외 다른 즉석(레토르트)식품 등에 적용되어 식품포장 기술에서 세계적인 수준을 확보하여 식품의 글로벌 경쟁력 확보에 일조한 사례임. 만약 즉석밥 및 즉석식품의 제품화 초기에 재활용이 어렵고, 환경오염을 일으킨다는 이유로 규제가 있었다면 이러한 발전은 불가능하였을 것임.
- **예시 3:** 국내 업체의 주름형 굴곡가능 일회용 빨대는 세계시장의 30% 이상을 점하고 있음. 이는 단순한 일자형 빨대를 벗어나 자유로이 굽힐 수 있는 혁신적인 주름형 빨대를 개발하고, 우수한 제조기술력을 바탕으로 자동화라인을 구축하여 생산성을 극대화한 결과임. 또한 관련된 빨대 제조기, 빨대 포장기, 빨대 부착기 등 다양한 연관 산업을 확산 발전시켰음. 만일 초기에 환경오염을 이유로 빨대 사용 규제가 있었다면 이러한 세계적인 발전이 불가능하였음.
- **예시 4:** 택배용 송장(배송라벨)은 특수지를 사용한 부착형 제품으로 종이박스에 붙여 배출될 경우 재활용에 장애가 되나, 택배물류 자동화와 배송오류 방지를 위해 꼭 필요한 제품임. 업계의 끊임없는 기술개발과 원가 개선 노력으로 최근에는 부착형 대신에 일반 공산품의 제조일자 표기 방법과 유사한 인쇄 방식으로 배송라벨을 박스에 직접 인쇄하는 기술을 개발·적용하고 있음. 이는 규제가 없어도 기술의 개발과 업계의 자율적인 노력으로 환경오염을 최소화한 사례임.

3. 플라스틱 폐기물 정책의 타당성

- 정부는 「자원순환기본법」(2018년) 및 「제1차 자원순환기본계획(2018-2027)」에서 폐기물 발생을 감축하고 폐기물 재활용 비율을 올리고 최종처분율을 크게 감축하는 3가지 목표를 설정하고 12개의 추진과제를 제시하였음.
- 중국의 재활용폐기물 수입제한 조치(2018.1.)를 계기로 제정된 「재활용폐기물 관리 종합 대책」에 의하여, 2030년까지 플라스틱 폐기물의 발생량을 50% 감축하고, 재활용률을 70%로 올리는 2가지 목표를 제시하였음. 또한, 플라스틱 생애단계를 제조, 생산, 유통·소비, 분리·배출, 수거·선별, 재활용으로 구분하고 단계별 문제점 진단을 바탕으로 <표 6.5>와 같은 세부과제를 도출하였음.
- 정부는 「제4차 지속가능발전 기본계획(2021~2040)」에 따라 2050 탄소중립 지원과 지속가능발전을 촉진하기 위하여 「K-순환경제 이행계획」을 발표(2021.12.31.)함. 환경부의 「제4차 지속가능발전 기본계획(2021~2040)」에 의하면 플라스틱의 환경 유출 방지를 목표로 1인당 플라스틱 소비량을 122kg/인/년(2018년) → 110kg → 98kg으로 줄여나가며, 폐플라스틱의 재활용률을 58.9%(2017년) → 70% → 100%로 증가시켜 나가는 목표를 세움.

■ 문제점

- 위와 같은 정부의 정책은 이론상으로는 매우 적합해 보이지만 폐플라스틱의 발생량과 재활용 목표 설정에 있어서 현실 상황을 반영하지 못하였고, 목표-수단의 연계성도 충분한 검토가 부족한 것으로 사료됨.
 - OECD 전망에 의하면, 세계 플라스틱 생산량은 계속 증가하여 2050년에는 현재의 4배가 되고, 2040년의 세계 플라스틱 폐기물 양은 2016년의 2~8배에 이를 것으로 전망한다는 보고임. 따라서, 우리나라의 플라스틱 폐기물 발생량을 2030년까지 현재의 50%로 감축하도록 설정한 목표는 실현 가능성이 매우 낮음.
 - 이에 따라, 자연에 폐기되는 폐플라스틱의 양도 계속 증가할 것임.
 - 또한 플라스틱 폐기물 재활용 목표를 2030년까지 70%로 제시한 것은 과학적 근거가 전혀 없음. 이는 2021년 현재 재활용률이 34%에 불과한 현실을 무시한 목표이고, 유럽의 재활용 31%보다 2배 이상 높은 목표임(이정임 외, 2019).
 - 현재의 폐플라스틱의 수거 및 재활용제도는 재질의 종류 및 상태에 따라 차이를 두지 않아서, 분리하여 모아 놓은 폐기물을 수거과정에서 마구 섞어 운반하는 현상이 자주 목격됨. 폐기물의 재활용률을 높이려면 수거·운반제도가 합리적으로 수정되어야 함. 현재의 성공적인 예는 투명 PET를 별도로 분리·수거하고 있는 시스템임.
 - 물질적으로 재활용되지 못한 플라스틱 폐기물을 처리하는 구체적인 계획이 제시되지 않음.
 - 에너지회수를 위하여 고형폐기물연료(Solid Refuse Fuel, SRF)의 관리를 개선하는 방향이 유일함.
 - 다른 처리 방법, 즉 열분해를 통한 에너지회수 또는 원료화합물 생산에 대한 구체적 계획이 부족함.
 - 플라스틱 폐기물 통계의 신뢰성을 제고하는 방법이 제시되지 않음. 일본의 통계는 기계적 재활용, 공급원료 재활용, 고체연료·시멘트·가마, 발전 소각, 열이용 소각, 단순 소각 및 매립으로 세분화되어 있음. 이러한 상세한 통계는 플라스틱 폐기물처리계획을 수립하는 데 절대적으로 필요함.
 - 환경부는 플라스틱 폐기물 문제의 대응으로 종이 봉투·용기를 친환경 소재로 간주하여 일회용 포장재의 규제 대상에서 제외하고 있음. 그러나 종이는 이산화탄소를 흡수하는 소중한 나무를 벌목해야 하고 제조 과정에서 과량의 폐수를 배출하며 표백제, 형광증백제 등의 약품처리로 인해 오히려 더 많은 에너지와 온실가스 배출을 유발한다는 언론 지적에 더해 플라스틱 봉투의 이산화탄소 배출량은 7.52kg/개인데 종이팩은 훨씬 더 많은 44.74kg/개가 방출되었다는 논문 결과도 있어 플라스틱보다 환경친화적이지만은 않음.

포스트 플라스틱 시대를 위한 정책 제안
Policy Recommendations for the Post-Plastics Age

VII

포스트 플라스틱 시대의 환경정책과 과학기술정책 제안

KAST Research Report 2022
한림연구보고서 144

VII. 포스트 플라스틱 시대의 환경정책과 과학기술정책 제안

■ 플라스틱은 환경오염의 주범이 아니고 환경친화적 소재임!

- 플라스틱은 강하고 경량이며 부식되지 않거나 분해되지 않는 소재로서 각종 생활용품, 포장재는 물론이고, 자동차, 전기전자 용도의 기능성 제품에까지 사용되어 오늘날 인류는 플라스틱문명시대를 누리게 되었음.
- 플라스틱은 금속, 세라믹보다 여러 가지 형태로 쉽게 가공되는 특징이 있고, 생산·가공하는 데 소요되는 에너지·비용이 적으므로 총괄적인 면에서 금속, 세라믹보다 환경보전에 긍정적인 기능이 큼.
 - 플라스틱은 생산·가공 단계에 필요한 에너지가 적으므로 대기오염물질과 온실가스 발생을 감소시킨.
 - 예로서 콜라 용기 용도의 알루미늄 캔과 PET(poly(ethylene terephthalate)병을 비교하면, 알루미늄의 용점은 660℃로 높지만 PET의 용점은 260℃이므로 PET를 가공하는 데 들어가는 열에너지가 알루미늄의 1/3에 불과함. 또한, 알루미늄은 원광석 채취 및 제련에 따른 환경오염이 더 큼.
 - 플라스틱은 금속, 유리보다 가벼우므로 자동차 등 운송기관의 경량화로 연비를 줄임.
 - 플라스틱 포장재는 가볍고 견고하여 유통과 관리체계에 소요되는 에너지가 적음. PET 음료수 용기를 예로 들면 유리보다 가볍고 취급 도중 깨지지 않아 안전함.
 - 플라스틱 식품포장재는 식품안정성이 우월하여 음식물 유통과 보관에 우월하고 이에 따라 음식물폐기물 배출이 감소함.
 - 플라스틱 배관은 녹슬지 않고 내구성이 높아 사용수명이 길어 상하수도 배관, 아파트 난방 배관, 도시 기반 시설용 케이블로 사용 시 위생적이고 자원을 절감함.
 - 플라스틱 봉투와 종이봉투의 환경친화성 비교
 - 종이는 자연계에서 썩으므로 플라스틱보다 무조건 환경친화적이라는 고정관념은 틀린 생각임. 종이는 이산화탄소를 흡수하는 나무를 벌목해야 하고 생산과정에서 과량의 폐수를 배출하고 표백제, 형광증백제 등의 약품처리 등으로 오히려 더 많은 에너지와 온실가스 배출을 유발한다는 보도(뉴욕타임스)도 있음. 또한, 종이와 플라스틱 봉투의 이산화탄소 배출을 비교한 논문(Lewis et al., 2010)은 플라스틱 봉투의 이산화탄소 배출량은 7.52kg/개인데 종이봉투는 훨씬 더 많은 44.74kg을 방출한다고 발표하였음. 따라서, 환경부의 정책 중 종이 봉투·용기는 친환경으로 간주하여 일회용 포장재의 규제 대상에서도 제외되고 있는 것은 재고되어야 함.

- 석유화학산업·플라스틱산업은 국가 핵심기반산업으로 자리를 잡고 있고, 우리나라는 산유국이 아님에도 불구하고 에틸렌 기준으로 세계 4위의 석유화학산업국임. 우리나라는 국토면적이 좁아 바이오매스가 절대적으로 적지만, 동남아 지역을 근거로 바이오매스 기반산업도 핵심기반산업으로 키울 수 있는 역량이 충분함.

■ 폐플라스틱의 환경오염 문제

- 소비재용 플라스틱 사용이 급증하면서 일회용품 및 포장재용 플라스틱 폐기물은 자연계에서 썩지 않아 범지구적인 환경오염을 초래하고 있으며, 일반 플라스틱의 궁극적 분해물인 미세플라스틱은 해양오염을 일으키고 인간을 포함한 자연생태계를 파괴하고 있음.
- 근래에 세계 각국은 온실가스 배출을 감축하고 에너지소비를 최소화하는 등 2050 탄소중립을 추구하고 있는데, 플라스틱 생산을 포함하는 석유화학산업은 온실가스를 많이 배출하는 산업의 하나임. 우리나라도 2050년 탄소중립 실현을 목표로 저탄소산업계 조성을 위해 원료와 제품 그리고 폐기물의 재사용·재활용을 확대하여 에너지소비를 최소화하는 순환경제를 활성화하는 계획을 수립하여 시행하고 있음.
- 유엔을 중심으로 세계 각국은 폐플라스틱 공해 문제를 해결하려는 노력을 기울여 왔고, 2022년 유엔환경총회에서 175개국 대표들이 모여 플라스틱 환경오염을 종식시키기 위하여 2024년 말까지 법적 구속력이 있는 국제협약을 체결하자는 결의안을 채택하였음.
- 따라서, 앞으로는 플라스틱도 순환경제에 포함되어 생산·가공·폐기 단계에서 에너지소비와 탄소발생을 최소화하고, 폐플라스틱도 재활용하여 자원순환체계에 들어가야 하는 시대가 도래하였음.

■ 합리적이고 체계적인 폐플라스틱 물질재활용체제 확립

- 플라스틱 폐기물 처리의 최우선 방안이 재활용임은 틀림없음. 전술한 대로 정부는 폐플라스틱의 재활용률을 2021년 34%에서 2030년 70%까지 올린다는 목표를 세웠으나, 이는 현실을 무시한 것일 뿐만 아니라 유럽의 재활용률 31%보다 2배 이상 높은 숫자로 달성이 어려울 것으로 사료됨. 재활용률을 제고하기 위하여서는 아래와 같은 합리적이고 체계적인 조치가 필요함.
- 플라스틱 폐기물의 물질재활용은 순환경제의 핵심이자 많은 전후방 산업이 연계되는 중요한 과제임. 이를 위하여서는 플라스틱 폐기물의 분리배출과 분리수거가 철저히 이루어져야 함.
- 물질재활용 제품의 상품화를 촉진하고 인센티브를 부여하여야 함.
 - 플라스틱 폐기물의 분리수거체제 확립
 - 현재 일반쓰레기, 음식물쓰레기, 종이류, 플라스틱 폐기물로 나누어 요일별로 분리배출 수거하고 있음. 그러나 종종 일반쓰레기와 플라스틱 폐기물을 한꺼번에 수거하거나 분리배출한 플라스틱 폐기물을 수거단계에서 섞어버리는 경우가 발생하고 있음.
 - 플라스틱 폐기물도 PET병, 일반플라스틱 제품, 필름 및 포장재로 나누어 배출 수거하여야 함. 이러한 분리수거제도는 현재도 효과적으로 시행되고 있으나, 좀 더 철저히 시행되도록 홍보 및 추진시켜야 함.

- 폐플라스틱의 재질별 선별장치의 자동화
 - 폐플라스틱을 PET, 폴리에틸렌(PE)+폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 및 폴리염화비닐(PVC)로 나누면 물질재활용 및 열분해 재활용을 체계적으로 추진 가능함. 특히, PVC는 연소가 어렵고 연소 시 다이옥신과 같은 독성 물질이 배출되므로 분리 처리하여야 함.
- 생산자책임 재활용제도 강화
 - 플라스틱 제품의 생산자에게 재활용 처리 책임을 강화하여야 함.
- 생분해성 플라스틱 사용량이 증가하면 별도 분리수거 및 처리 인프라 구축이 필요함.

■ 용도별 생분해성 플라스틱 사용 확대

- 플라스틱 폐기물의 근본 방향은 3R[감축(Reduce), 재사용(Reuse), 재활용(Recycle)]이 원칙임.
- 플라스틱 폐기물 문제를 해결하는 최선 방안은 플라스틱을 덜 쓰고, 플라스틱 폐기물 발생량을 줄이면 되지만, 현실적으로는 지극히 어려움. 정부는 플라스틱 폐기물 발생량을 2030년까지 현재의 50%로 감축하겠다는 목표를 세웠으나, 이는 현실적으로 도달하기 어려움.
- 플라스틱 재질의 특성에 따라, 즉 비분해성 및 분해성에 따라 분류하고, 추가로 용도별·품목별로 구분하여 일회용 쇼핑백, 포크·스푼·컵·빨대 등의 식사용구류, 테이블 보, 식품포장용 소형용기 등으로 나누어 관리가 필요함.
- 생분해성 플라스틱은 다양한 환경에서 미생물에 의해 이산화탄소와 물, 그리고 부식토로 완전히 분해되어 순환되는 구조이므로 환경에 전혀 부담을 주지 않는 소재이며, 그 원료는 석유계 또는 바이오매스로부터 생산됨(앞의 54쪽 참조). 현재 몇 가지 생분해성 플라스틱이 사용되고 있으나 일반 석유 기반 플라스틱보다 3~5배로 비싼 현실임. 또한 강도와 가공특성이 아직 부분적으로 떨어지는 점이 있으나, 생산량이 늘고 기술이 발전하면 석유 기반 플라스틱과 동등한 수준에 도달할 것으로 기대되고 있음.
- 생분해성 소재 의무 적용 품목 지정: 사용 시 더럽혀지고 재활용이 거의 불가능한 품목은 의무적으로 생분해성 소재를 사용하도록 규정하되, 이를 ① 의무적 적용, ② 사용 권장, ③ 규제 완화 등으로 용도별 세분화가 필요함. 즉, 일회용 제품은 생분해성 플라스틱으로만 생산하도록 유도하면 효과적임.
 - ① 의무적 적용 품목: 생분해성 소재로 전환이 가능하다는 전제하에 회수가 힘들어 재활용이 어렵고 생태계에 유출되기 쉬운 품목
 - ② 사용 권장 품목: 생분해성 소재로 전환이 가능하다는 전제하에 재활용이 어려워 사용량을 줄여야 할 품목. 생분해성 소재를 사용 시 인센티브 부여.
 - ③ 규제 완화 품목: 생분해성 소재 기술이 개선되어 응용이 확대되면 규제를 완화하며 생분해성 소재로 대체하도록 유도

- ④ 일회용 플라스틱 제품 중에서 위의 생분해성 플라스틱 재질의 의무 사용 및 권장 사용 품목에 대해 기존 비분해성 플라스틱 재질을 사용하는 제품에 대해서는 환경부담금을 부과하는 “비분해성 플라스틱 환경부담금 제도”를 도입, 시행함이 바람직함. 이는 무분별한 일회용품의 남용을 억제하는 효과를 가져올 뿐만 아니라, 환경부담 비용을 상대적 고가인 생분해성 플라스틱과 저가인 비분해성 플라스틱의 가격 차이만큼 부과함으로써 친환경 생분해성 플라스틱의 사용을 보다 확대할 수 있음.

■ 환경에 부담을 주는 농·어업용 제품의 생분해성 플라스틱으로 전환을 유도

- 농업용 멀칭(mulching)필름, 모종용 소형용기도 생분해성 플라스틱을 사용하도록 권장함.
- 버려진 어업용 어망 및 낚시줄도 해양오염을 일으키고 있으므로, 생분해성 플라스틱을 사용하도록 유도함. 어업용 생분해성 플라스틱은 아직 개발 초기단계임.

■ 국제공인 생분해성 인증제도 도입

- 현재 국제적으로 공인된 생분해성의 정의: ASTM, ISO에서 규정한 기간(45일) 내에 미생물의 작용으로 물질이 붕괴되고 저분자화된 후에(1차분해), 미생물이 이들 저분자를 흡수하여 대사 작용을 통해 최종적으로(180일, 표준물질 대비 90% 이상) 미생물균체와 이산화탄소, 메탄가스로 분해되는(최종분해) 플라스틱
- 또한, EU의 퇴비화 가능 플라스틱의 정의는 12주 내에 2mm의 채 중에 초기 중량의 10% 이상이 남지 않도록 잘게 분해될 것
- 국내에도 다양한 생분해 환경(토양, 해양, 퇴비화 시설 등)을 반영하는 국제공인 생분해성 인증제도를 도입하고 공공기관 우선구매, 폐기물부담금 면제 등 생분해성 플라스틱을 위한 인센티브를 제공하여 생분해성 플라스틱산업의 국제 경쟁력을 제고

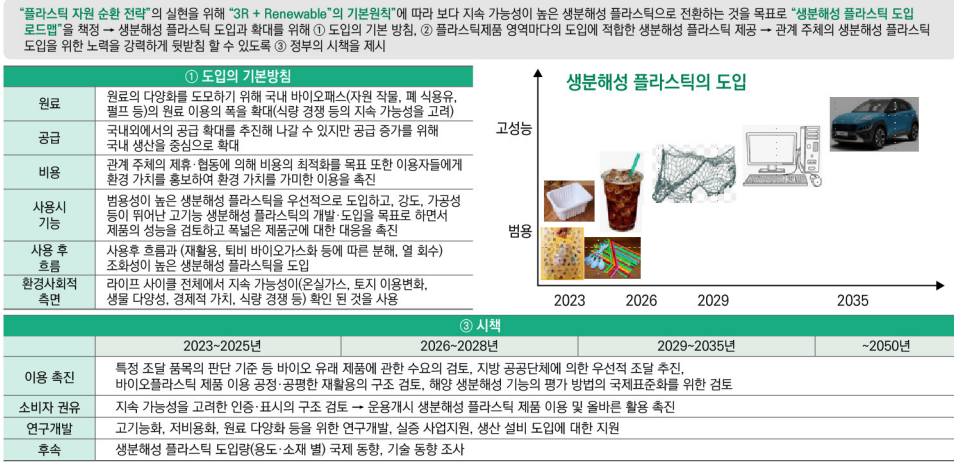
■ 환경표지 인증 부활

- 환경부가 2022년 1월 생분해성 소재의 일회용품에 대한 환경표지 인증을 제외하였으나(환경표지 인증이 오히려 일회용품의 사용을 증가시킨다는 이유), 재검토하여 부활하여야 함.

■ 생분해성 플라스틱산업에 대한 지원 강화

- 생분해성 플라스틱산업은 개발 역사가 짧아 세계적으로 산업화 초기단계이고, 석유 기반 플라스틱에 비해 아직 비싸며 강도와 가공특성이 다소 떨어지는 점이 있지만, 근래에 기술개발이 활발히 전개되어 많이 개선되고 있음.
- 그러나 생분해성 플라스틱은 폐플라스틱 문제를 해결할 수 있는 주요 수단이고, 미래의 석유평가시대에 대비할 수 있는 바이오매스로부터 얻어지는 미래지향적이며 환경친화적 소재임.
- 따라서, 일회용품 및 재활용 불가능 품목의 소재로서 적극 유도하고, 관련 산업계를 지원하여 수출산업화하여야 함.

그림 7.1 생분해성 플라스틱 로드맵



■ 퇴비화 및 바이오가스 생산시설 확충

- 음식물쓰레기, 식품산업용 폐기물, 정수처리용 오니, 잔디쓰레기 등 유기쓰레기들은 분리수거하여 소각·매립 대신에 퇴비화시키면 온실가스 발생량을 줄이고 퇴비화를 통해 비료 및 부생가스로의 자원화가 가능함.
- 현재 우리나라는 퇴비화시설이 매우 부족함. 음식물쓰레기의 일부는 재가공하여 가축용 사료로 활용하고 있지만, 염분이 많아 사료로 적합하지 않다는 지적이 많고 위생 문제가 있음.
- 생분해성 플라스틱도 퇴비화가 가능하므로 일회용 플라스틱 및 포장재에 생분해성 플라스틱을 적용하면 자원화가 가능함.

- * 예시 1: 호주 Biopak사는 사업자용 유기폐기물 퇴비화네트워크(Compost Connect)를 구축하여 생분해성 소재 패키징 제안
(<https://www.biopak.com/au/disposal/compost>)
- * 예시 2: 북미 컴포스트위원회는 퇴비화 가능 기저귀를 연구하던 P&G의 주도로 설립하여, 퇴비 제조업체, 유기물재활용 업체, 주·연방정부 직원 등을 포함한 800명 이상의 단체로 성장함
(<https://www.compostingcouncil.org/page/AboutUs>).
- * 예시 3: Green Sports Alliance는 스포츠산업에서 친환경활동을 주도하는 단체로서 다양한 스포츠 팀·리그 및 기업 등이 참여하고 있으며, 특히 음식폐기물의 분류 및 퇴비화 관련하여 다양한 실천 사례들을 만들어 내고 있음. "Food Waste Diversion and Compostable Packaging Playbook"(<https://lnkd.in/d9AB9iZp>)에서 다양한 case study 확인 가능(<https://greensportsalliance.org/>)
- * 예시 4: CJ제일제당의 시범사업: 규제 특례제도를 활용, 인천 서구 강소특구(송도) 내 카페·음식점에서 '생분해성 일회용품 사용 → 수거 → 음식물 혐기발효설비로 완전 퇴비화' 실증실험('22년 말~'23년)을 통하여 생분해성 소재와 음식물쓰레기의 퇴비화 병행 및 발생 부생가스 자원화 실증을 추진 중임.

■ 플라스틱 폐기물의 화학적 재활용(chemical recycle) 시스템 구축

- 물질적으로 재활용하기 어려운 폐플라스틱은 열분해하여 단량체로 재생해 중합원료로 재사용하거나, 또는 열분해하여 열분해유(naphtha 등)를 제조하고 여기서 각종 화공원료를 분리하여 사용하는 시스템을 구축하여야 함. 이러한 사업은 경제성이 약하므로 국가적 차원에서 세제 혜택 및 판로 개척 등을 지원하여야 함.

■ Global 수준의 정리된 전과정평가(Life Cycle Analysis, LCA) 수행 표준 필요

- 전과정평가기술은 이산화탄소의 전 주기적 저감효과의 대표적 지표인 탄소발자국(Carbon Footprint)의 평가도구로서, 특히 특정 플라스틱 제품의 전 생애에 걸친 순수 이산화탄소 배출저감 성적을 산정하는데, 향후 순환경제의 지속성, 천연자원 및 재활용 제품 등 재생가능자원의 환경적·경제적 효과 검증의 지표로 확대되고 있음.
- 해외와 비교하여 이제 시작 단계인 국내 LCA 정책을 발전시키고, 국제적으로 인정받을 수 있는 기준 및 산정 방법을 개발하여야 함.

■ 플라스틱 폐기물 통계시스템 구축

- 적절한 플라스틱 폐기물 처리 방법, 특히 재활용을 시행하려면 성상별 발생량과 세분화된 처리 방법에 따른 처리량이 정확히 조사되어야 함. 정확한 통계가 있어야 적절한 처리시설의 확충 및 시행이 가능함.

■ 플라스틱 폐기물 관련 재료·기술·시스템 연구개발 지원 강화

- 석유 기반 플라스틱을 대체할 수 있는 바이오플라스틱 및 생분해성 플라스틱의 신규 개발 및 성능 개선에 관한 연구 지원
- 여러 가지 플라스틱 제품에 대한 전과정평가를 통한 탄소가스의 배출 및 환경에의 영향을 분석하는 기법 연구 지원
- 플라스틱 폐기물을 물질적·화학적으로 재활용하는 기술과 설비의 개발
- 플라스틱의 분해기구, 특히 열분해 및 화학적 재활용 방법·설비에 관한 연구

■ 결론적으로 인류는 플라스틱 없이는 생존할 수 없으므로 플라스틱 폐기물 발생에 대비하여야 함. 플라스틱 폐기물의 처리는 규제 중심의 정책 대신에 3R(Reduce, Reuse, Recycle)을 기본으로 한 종합적이고 체계적인 처리시스템을 구축하여 공해와 탄소배출을 줄이고 폐자원의 재생을 통해 자원을 순환시키는 순환경제체제로 전환되어야 함. 특히 일회용 플라스틱 제품을 대상으로 생분해성 플라스틱의 응용이 한 축이 되는 4R(기존 3R + Bio-Renewable) 처리체제 구축이 필요함. 순환경제와 대체물질 개발 산업 진흥에 따른 경제성장을 추구하여 산업 발전과 환경보전이 함께 이루어질 수 있는 정부 정책이 필요함.

참고문헌

- 류지현, 조충연(2019). “미세플라스틱 현황과 인체에 미치는 영향”, 공업화학전망, 제22권 제2호, pp. 1-12.
- 우상선(2016). “고기능성 EP소재 산업의 현황과 전망”, 2016 고분자포럼, pp. 3-14, 한국고분자학회.
- 윤경준(2020). “플라스틱폐기물 정책의 평가와 개선방안”, 현대사회와 행정, 제30권 제4호, pp. 1-28.
- 이성희(2022). “국제사회의 플라스틱 규제 현황과 시사점”, KIEP 세계경제 포커스, 제5권 제13호, pp. 1-14.
- 이정임, 정혜윤(2019). “폐플라스틱 관리정책의 한계와 시사점”, 이슈&진단, No.368, pp. 1-25.
- 임승순(2019). “한국산업기술발전사: 섬유·식품”, 한국공학한림원, pp. 21-26.
- 임승순(2021). “지속가능성 고분자: 생분해 고분자를 중심으로”, KASSE 첨단과학기술 동향, 제5권 제3호, pp. 1-10.
- 장용철, 손민희, 박주영(2022). “한국의 2017-2019년 플라스틱 물질흐름분석”, 한국폐기물자원순환학회지, 제39권 제3호, pp. 194-206.
- 최길영(2019). “한국산업기술발전사: 소재(고분자)”, 한국공학한림원, pp. 271-277.
- 홍영웅(2007). “최신 엔지니어링 플라스틱 편람”, 기전연구사, pp. 22-23.
- Adom, Felix, Dunn, Jennifer B., Han, Jeongwoo, & Sather, Norm(2014). “Life-Cycle Fossil Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Bioderived Chemicals and Their Conventional Counterparts”, Environmental Science & Technology, Vol.48 No.24, pp. 14624-14631.
- Barlettaa, Massimiliano et al.(2022). “Poly(butylene succinate) (PBS): Materials, processing, and industrial applications”, Progress in Polymer Science, Vol.132, 101579.
- BBCA Biochemical & Futerro(2022). “중국 생분해성 플라스틱 최신 동향 및 정책”, 제1회 국제 바이오플라스틱 컨퍼런스, 2022. 9. 14., 인천 송도컨벤시아
- Benavides, Pahola T., Lee, Uisung, & Zarè-Mehrjerdi, Omid(2020). “Life cycle greenhouse gas emissions and energy use of polylactic acid, bio-derived polyethylene, and fossil-derived polyethylene”, Journal of Cleaner Production, Vol.277, 124010. doi/10.1016/j.jclepro.2020.124010
- Brooks, Amy L., Wang, Shunli, & Jambeck, Jenna R.(2018). “The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade”, Science advances, Vol.4 No.6, doi: 10.1126/sciadv.aat0131
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S.(2011). “Microplastics as contaminants in the marine environment: a review”, Marine Pollution Bulletin, Vol.62 No.12, pp. 2588-2597.

참고문헌

- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B.(2016). “Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?”, *Marine Pollution Bulletin*, Vol.104 No.1-2, pp. 290-293.
- Duis, K. & Coors, A.(2016). “Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects”, *Environmental Sciences Europe*, Vol.28. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
- Ellen MacArthur Foundation(2016). “The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics”. United Kingdom.
- Ellen MacArthur Foundation(2020). “Global Commitment 2020; Progress made, but acceleration needed to meet targets on plastic waste and pollution”. United Kingdom.
- European Union(2019). “Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment”, *Official Journal of the European Union*.
- Flury, Markus & Narayan, Ramani(2021). “Biodegradable plastic as an integral part of the solution to plastic waste pollution of the environment”, *Current Opinion in Green and sustainable chemistry*, Vol.30, e100490.
- Gedde, Ulf W.(1995). “Polymer Physics”, Chapman & Hall, pp. 16-18.
- Geyer, Roland, Jambeck, Jenna R., & Law, Kara L.(2017). “Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made”, *Science advances*, Vol.3 No.7, doi: 10.1126/ sciadv.1700782
- Ghosh, Koushik & Jones, Brad H.(2021).“Roadmap to Biodegradable Plastics—Current State and Research Needs”, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol.9 No.8, pp. 6170-6187.
- Jambeck, Jenna R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, Theodore R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L.(2015). “Plastic waste inputs from land into the ocean”, *Science*, Vol.347 Iss.6223, pp. 768-771.
- Jiao, Jian, Zeng, Xiangbin, & Huang, Xianbo(2020). “An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)-PBAT”, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol.3, No.1, pp. 19-26.
- Jimenez, L., Mena, M.J., Prendiz, J., Salas, L., Vega-Baudrit, J. (2019). “Polylactic Acid(PLA) as Bioplastic and its Possible Applications in

참고문헌

- the Food Industry”, Journal of Food Science and Nutrition, Vol.5 Iss.2, pp. 10048-10053.
- Lebreton, Laurent C. M., van der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J.(2017). “River plastic emissions to the world's oceans”, Nature Communications, Vol.8 No.1, 15611.
- Lewis, Helen, Verghese, Karli, & Fitzpatrick, Leanne(2010). “Evaluating the sustainability impacts of packaging: the plastic carry bag dilemma”, Packaging Technology and Science, Vol.23 No.3, pp. 145-160.
- MarketsandMarkes(2021) “Bioplastics & Biopolymers Market Report”
- Morão, Ana & de Bie, François(2019). “Life Cycle Impact Assessment of Polylactic acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand”, Journal of Polymers and the Environment, Vol.27, pp. 2523-2539. doi/10.1007/s10924-019-01525-9
- Moshood, Taofeeq D., Nawansir, G., Mahmud, F., Mohamad, F., Ahmad, M. H., & AbdulGhani, A.(2022). “Biodegradable plastic applications towards sustainability: A recent innovations in the green product”, Cleaner Engineering and Technology, Vol.6, 100404.
- Munyaneza, J., Jia, Q., Qaraah, Fahim A., Hossain, Md F., Wu, C., Zhen, H., & Xiu, G.(2022). “A review of atmospheric microplastics pollution: In-depth sighting of sources, analytical methods, physiognomies, transport and risks”, Science of The Total Environment, Vol.822, 153339.
- Naser, Ahmed Z., Deiab, I., & Darras, Basil M.(2021). “Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review”, RSC Advances, Vol.11, pp. 17151-17196.
- Pandey, A., Adama, N., Adjallé, K., & Blais, J.-F.(2022). “Sustainable applications of polyhydroxyalkanoates in various fields: A critical review”, International Journal of Biological Macromolecules, Vol.221, pp. 1184-1201.
- Quitadamo, A., Massardier, V., Santulli, C., & Valente, M.(2018). “Optimization of Thermoplastic Blend Matrix HDPE/PLA with Different Types and Levels of Coupling Agents”, Materials (Basel), Vol.11 No.2, pp. 2527. doi:10.3390/ma11122527
- Ranakoti, L., Gangil, B., Mishra, S. K., Singh, T., Sharma, S., Ilyas, R. A., & El-Khatib, S.(2022). “Critical Review on Polylactic Acid:

참고문헌

- Properties, Structure, Processing, Biocomposites, and Nanocomposites”, Materials, Vol.15 No.12, 4312.
- Staudinger, H.(1920). “Über Polymerisation”, Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series), Vol.53 No.6, pp. 1073-1085.
- United Nations(2022). Draft Resolution - End plastic Pollution: Towards on International legally binding instrument. UNEP/EA.5/L.23/Rev.1.
- van Krevelen, D. W.(2009). “Properties of Polymers: Their correlation with chemical structure”, Elsevier, pp. 44-45.
- Vink, Erwin T. H. & Davies, Steve(2015). “Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo™ Polylactide Production”, Industrial Biotechnology, Vol.11 No.3, pp. 167-180. doi/10.1089/ind.2015.0003
- World Commission On Employment(1987). “Report of the world commission on environment and development: our common future”, Oxford University Press.
- Zheng, Jiajia & Suh, Sangwon(2019). “Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics”, Nature Climate Change, Vol.9, pp. 374-378.
- Zhou, Q., Tian, C., & Luo, Y.(2017). “Various forms and deposition fluxes of microplastics identified in the coastal urban atmosphere”, Chinese Science Bulletin, Vol.62 No.33, pp. 3902-3909.
- 石丸 美奈(2020). “プラスチックごみ問題の現状と対応”, 共済総研レポート No.170, pp. 58-66, JA共済総合研究所.
- 舟橋龍之介(2019). “生分解性 プラスチックの課題と将来展望”, 三菱総合研究所, 技術レポート.
- 三菱UFJリサーチ&コンサルティング(2022.3). “令和3年度 バイオプラスチック及び再生材利用の促進に向けた調査・検討委託業務 報告書”
- ASTM D6400 - Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities.
- European standard, EN 13432 “Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging”.
- ISO 17088 - Specifications for Compostable Plastics.
- Compost Connect: <https://www.biopak.com/au/disposal/compost>
- Composting Council: <https://www.compostingcouncil.org/page/AboutUs>
- European commission, Environment: <https://ec.europa.eu/environment/>

참고문헌

- circular- economy/pdf/pla...
- European commission, Plastics: https://ec.europa.eu/environment/topics/plastics_en
- European commission, Plastics own resource: https://ec.europa.eu/info/strategy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/revenue/own-resources/plastics-own-resource_en
- Green Sports Alliance: <https://greensportsalliance.org/>
- Marine plastics: <https://www.eunomia.co.uk/marine-plastics-we-should-fight-them-on-the-beaches>
- Retail Compliance Center-Retail Industry Leaders Association: <https://www.rila.org/retail-compliance-center>
- European bioplastics: <https://www.european-bioplastics.org/market/>

KAST Research Report 2022
한림연구보고서 144

포스트 플라스틱 시대를 위한 정책 제안

Policy Recommendations for the Post-Plastics Age

발 행 일 2022년 12월
발 행 처 한국과학기술한림원
발 행 인 유욱준
전화 031) 726-7900
팩스 031) 726-7909
홈페이지 <http://www.kast.or.kr>
E-mail kast@kast.or.kr
편집/인쇄 경성문화사 02) 786-2999
I S S N 2799-5135
977-2799513-00-9 44

- 이 책의 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.
- 한국과학기술한림원의 동의 없이 내용의 일부를 인용하거나 발췌하는 것을 금합니다.



이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금 지원을 통한 사업으로
우리나라 사회적 가치 증진에 기여하고 있습니다.