



플라스틱 오염 현황과 그 해결책에 대한 과학기술 정책

Current status of plastic pollution
and the scientific policy
to solve this problem



플라스틱 오염 현황과 그 해결책에 대한 과학기술 정책

Current status of plastic pollution
and the scientific policy
to solve this problem

위원장

김 규 원 (한국과학기술한림원 정회원, 서울대학교 명예교수)

위원

계 형 산 (목원대학교 교수)

김 남 득 (부산대학교 교수)

손 태 권 (서울대학교 선임연구원)

이 현 승 (서울대학교 선임연구원)

정 해 영 (한국과학기술한림원 정회원, 부산대학교 교수)

홍 수 열 (자연순환사회경제연구소 소장)

요 약 문

연구과제명	국 문	플라스틱 오염 현황과 그 해결책에 대한 과학기술 정책		
	영 문	Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem		
연구책임자	성 명	김 규 원	한림원 소속부	의약학부
<p>플라스틱은 경제성과 사용의 편리성으로 다양한 분야에 소모용품과 일회용품으로 사용되고 있어, 오늘날 플라스틱이 없는 세상은 상상하기가 어렵다. 그러나 플라스틱의 장점으로 일회용 플라스틱 제품이 범람하게 되었고, 사용 후 쉽고 빠르게 쓰레기로 버려지게 되었다. 이렇게 버려지는 일회용 및 소모용 플라스틱 때문에 지구 환경은 많은 위협을 받고 있는 현실이다.</p> <p>일반적으로 플라스틱은 사용 후 적절한 회수·운반·처리를 거쳐 재사용, 재활용 또는 최종적으로 열회수 등을 거쳐 처리할 수 있는 유용한 자원이지만, 국내에서 발생된 후 관리되는 폐플라스틱의 5%가 매립, 34%는 소각되고 있고 수거되어 재활용되는 폐플라스틱은 61% 정도이다. 그러나 플라스틱으로 만들어진 포장지, 완구, 식기, 의류 등의 소비재와 산업 부품, 수산업 또는 양식업과 관련된 제품 등은 각자의 목적에 맞게 사용된 후 제대로 수거되지 못한 채 무분별하게 버려지고 있다. 이렇게 관리되지 못하고 버려지는 플라스틱은 해양으로 유입되는 전체 쓰레기의 대부분을 차지하는데, 전 세계의 해안쓰레기를 수집하여 조사한 결과 약 75%가 플라스틱류일 정도로 지구 생태계는 플라스틱에 의해 심각한 위협을 받고 있다.</p> <p>플라스틱 쓰레기는 금속, 목재 등과 같이 인간의 활동에 의해 소비되는 다른 물질들과 달리 자연 상태에서 완전히 생분해되지 못한다. 해양으로 유입된 플라스틱 쓰레기는 분해되지 못한 채 장기간에 걸쳐 자외선에 의한 광분해와 부식 및 풍화작용에 의해 5mm 이하 크기의 미세플라스틱과 이보다 작은 초미세플라스틱으로 부서진다. 미세플라스틱은 작은 크기로 인해 수거가 거의</p>				

불가능하여, 이미 해양과 연안뿐만 아니라 갯벌의 퇴적물에서도 발견되고 있다. 또한 육지와 식수에서도 미세플라스틱의 검출이 보고되고 있어, 생태계에 미세플라스틱이 광범위하게 오염되어 있을 것으로 짐작이 된다.

이러한 미세플라스틱이 해양생태계로 편입되면서 야기되는 문제는 매우 심각하다. 바다 표면에서 플랑크톤을 채취하여 조사하였을 때 플랑크톤 내에 미세플라스틱이 존재하는 것이 확인되고 플랑크톤을 먹이로 하는 무척추동물(단각류, 따개비, 조개, 갯지렁이 등)과 이를 먹이로 하는 척추동물인 어류에서도 미세플라스틱이 발견되고 있어, 생물축적(bioaccumulation) 과정을 통한 인체의 미세플라스틱 섭취에 대한 우려가 점차 확대되고 있다.

미세플라스틱은 그 자체로도 인체에 위해성을 나타낼 가능성이 높을 뿐만 아니라, 플라스틱 제조과정 중에 사용된 중합체와 첨가제는 미세플라스틱으로 부서지는 동안 용출될 수가 있다. 즉 다양한 플라스틱들은 간독성, 신경독성, 면역독성, 기형유발 등 인체에 독성물질로서 작용할 수 있다. 뿐만 아니라 플라스틱의 특성을 구현하기 위해 사용되는 가소제(프탈레이트), 브롬화난연제(BFRs), 비스페놀 A(Bisphenol A), 노닐페놀(Nonylphenol) 등과 같은 플라스틱 첨가제들도 내분비계 교란물질로서 기형유발, 유전독성, 생식독성을 일으킬 수 있으며, 발암성을 가진다는 보고도 있다. 그리고 플라스틱은 일반적으로 높은 소수성(hydrophobicity)을 가지고 있어서, 소수성이 강한 잔류성 유기 오염물질(Persistent organic pollutants, POPs)에 대해 높은 흡착특성을 보인다. 또한 크기가 작아진 미세플라스틱은 큰 플라스틱에 비해 표면적이 커지기 때문에 주변 해수 중에 존재하는 POPs를 중량대비 더 많이 흡착하게 된다. 따라서, 미세플라스틱 입자는 주변 해수에 비해 POPs를 $10^5 \sim 10^6$ 배의 높은 농도로 축적할 수 있다. 이와 같이 플라스틱에 흡착될 수 있는 물질들은 산업, 농업, 살충제 등에 널리 사용되는 PCBs, DDT, 중금속 등과 같은 소수성 물질과 플루오렌(Fluorene), 플루오란테인(Fluoranthene), 안트라센(Anthracene), 벤조피렌(Benzo(a)pyren) 등이 있고, 이들 미세플라스틱에 흡착된 독성물질들도 신경독성, 면역독성, 유전독성, 신장독성, 암유발 등

인체에 미치는 영향이 심각하다. 이처럼 미세플라스틱은 그 자체가 독성물질로 작용할 뿐만 아니라 독성물질의 전달자가 될 수가 있다. 하지만, 현재 미세플라스틱이 얼마나 인체에 축적되고 있는지, 어느 정도 섭취해야 위험한지, 어떤 기전으로 위해성을 나타내는지, 검출방법과 기준조차 마련되어 있지 않아 미세플라스틱에 대한 연구가 극히 미진한 실정이다.

플라스틱 중 높은 독성과 위해성을 유발하는 미세플라스틱 문제를 해결하기 위해서는 토양, 하천, 해양에 산재된 미세플라스틱의 검출과 수거뿐만 아니라 분해기술의 연구가 시급하다. 또한, 분해성 플라스틱은 물성의 한계로 인해 사용범위가 제한적이고, 제작비용이 높다는 단점이 있다. 따라서 플라스틱 대체재 기술이 보편화되기 전까지는 합성플라스틱 분해기술 활용이 증가하는 플라스틱 폐기물 문제를 대처하는 데 매우 중요하다고 할 수 있다. 분해기술은 플라스틱 분해능을 가진 미생물, 곤충 등 신규생물을 동정하고, 분해능을 확인하는 연구와 분해능을 가진 생물체내의 플라스틱 효소 분해능을 확인하고 개량하는 분야로 진행되고 있다. 특히, 극지방, 심해, 오지 등 다양한 환경에서 분해능을 가진 미생물의 탐색과 동정이 이루어지고 있다. 이처럼 국외에서는 세균, 방선균, 진균, 곤충에 이르기까지 플라스틱 분해능을 가진 다양한 생물종의 연구가 이루어지고 있으며, 그 분해기작 및 효소의 규명을 통해 새로운 합성 플라스틱 분해기술개발이 활발히 진행되고 있다. 하지만 국내에서는 플라스틱 분해 효소인 PETase 변이 효소 연구결과를 제외하면, 플라스틱 분해기술 연구가 극히 미미한 실정이며, 개발된 분해기술의 실용화, 대량화 등을 위한 연구 인프라도 매우 부족하다. 또한, 합성 플라스틱 분해 효소의 대량생산을 위해 분해 미생물의 최적 배양조건 및 배양기술 연구와 효소 대량생산 기술 개발이 필요하다. 그리고 폐기장의 특수한 환경조건에서도 안정적인 효소의 활성이 유지되어야 하고, 대량의 플라스틱 폐기물을 신속하게 처리할 수 있어야 하기 때문에 대량플라스틱 폐기물의 신속한 처리를 위한 효소 효율성 향상 연구가 진행되어야 한다. 한편으로, 플라스틱 분해능이 있는 미생물을 살포하였을 때 생태계에 미치는 영향이나 환경교란 등 부작용에 대한 연구도 뒤따라야 할 것이다.

플라스틱 쓰레기와 미세플라스틱에 의한 생태계에 대한 위협이 대두되면서, 기존의 플라스틱을 대체하기 위한 다양한 해결방법들이 모색되고 있다. 그중에 플라스틱의 가공성, 내구성, 기계적 성질을 유지하면서 추가로, 분해성이라는 기능이 부가되어 미세플라스틱의 발생없이 자연분해가 될 수 있는 생분해성 플라스틱의 수요가 증가하고, 이에 따른 개발 연구 역시 빠른 속도로 확대되고 있다. 초기 분해성 플라스틱의 개발은 기존의 플라스틱에 전분과 같이 자연적으로 분해되는 물질을 혼합한 생분괴성 플라스틱으로 시작하였으나, 최근에는 천연의 식물자원을 사용하고, 자연계 내에서 미생물에 의해 물과 이산화탄소로 완전히 분해될 수 있는 2세대 생분해성 플라스틱이 주류를 이루고 있다. 하지만, 플라스틱의 물성, 제조 단가 측면에서 기존 석유기반 플라스틱 소재들에 장점을 갖지 못하여 활용성 면에서 많은 제한이 있는 것 또한 사실이다. 현재 실용화 되고 있는 생분해 플라스틱은 지방족 폴리에스테르 및 전분과 지방족 폴리에스테르를 혼합한 플라스틱들이고, 이 중 가장 잘 알려진 PLA, PHA, PBS에 대한 연구가 활발하다. 따라서 멀지 않은 미래에 경제성과 산업성, 그리고 활용성이 우수한 바이오 플라스틱 소재들이 시장에 다수 등장할 것으로 예측된다. 이처럼 플라스틱 오염문제, 특히 미세플라스틱의 문제를 해결하기 위한 대체재 개발을 위한 노력은 생분해성 플라스틱의 개발에 그칠 것이 아니라, 혁신적인 대체 소재물질의 개발이 이루어져야 한다. 그리고 이를 활용하여 지속 가능한 순환형 플라스틱 대체재의 생산 시스템이 구축 될 수 있도록 중장기적인 과학기술정책이 필요한 시점이다.



Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem

목 차

목 차

- I. 플라스틱의 종류와 오염실태 1
 - 1. 플라스틱 개요 3
 - 2. 플라스틱 폐기물 발생현황 13
 - 3. 플라스틱 및 미세플라스틱의 환경오염 실태 24

- II. 미세플라스틱의 독성 및 위해성 현황 35
 - 1. 해양 플라스틱 쓰레기의 종류 및 미세플라스틱 성분 37
 - 2. 생태계에서의 미세플라스틱 39
 - 3. 해양 미세플라스틱의 생태계 위해성 44
 - 4. 미세플라스틱에 의한 생태계와 인간의 피해 상황 47
 - 5. 플라스틱 성분별 독성 및 위해성 52
 - 6. 첨가제(additives)의 독성 및 위해성 59
 - 7. 흡착성 물질의 독성 및 위해성 64

- III. 플라스틱 분해 미생물 균주 및 효소의 개발현황 83
 - 1. 플라스틱 분해 미생물 균주 85
 - 2. 플라스틱 분해 효소 102
 - 3. 플라스틱 분해를 위한 미생물 균주 및 효소 연구의 국내 현황 ... 113

- IV. 플라스틱 대체재의 개발 및 관련 산업 현황 121
 - 1. 바이오 플라스틱 125
 - 2. 분해성 플라스틱 131
 - 3. 실용화 단계의 분해성 플라스틱 138
 - 4. 국내 외 분해성 플라스틱의 기술 개발 동향 140
 - 5. 플라스틱 대체재로서의 바이오 플라스틱의 전망 143

목 차

V. 결론: 플라스틱 문제에 대한 과학기술 정책 제안	147
1. 미세플라스틱의 검출과 수거 방안	150
2. 미세플라스틱의 인체 독성 및 위해성 해결 방안	152
3. 미세 플라스틱의 생분해 방안	155
4. 플라스틱 대체재 개발 방안	156

표 목 차

〈표 1.1〉 플라스틱 종류별 용도	6
〈표 1.2〉 합성섬유 종류별 용도	7
〈표 1.3〉 분해, 생분해, 퇴비화에 대한 용어 정의	10
〈표 1.4〉 2002~2014년 전 세계 플라스틱 사용량	15
〈표 1.5〉 2016년 기준 폐합성 고분자 화합물 발생 및 처리현황	22
〈표 1.6〉 2016년 기준 폐합성수지 발생 및 처리현황	23
〈표 1.7〉 2010년 기준 플라스틱 폐기물 해양유입 상위 20개 국가	27
〈표 2.1〉 플라스틱의 종류와 밀도	38
〈표 3.1〉 플라스틱 분해 세균	86
〈표 3.2〉 PET를 분해하는 세균	89
〈표 3.3〉 플라스틱을 분해하는 방선균	90
〈표 3.4〉 플라스틱을 분해하는 진균	91
〈표 3.5〉 추운 환경에서 플라스틱을 분해하는 능력을 지닌 해양 미생물	94
〈표 3.6〉 플라스틱 표면에서 발견된 해양 미생물	96
〈표 3.7〉 PHAs 분해 미생물	98
〈표 3.8〉 PCL 분해 미생물	99
〈표 3.9〉 PBSA 분해 미생물	100
〈표 3.10〉 생분해성 플라스틱의 효모에 의한 분해	100



<표 3.11> 생분해성 플라스틱의 균류(fungus)에 의한 분해	101
<표 3.12> C-C backbone을 가진 플라스틱을 분해하는 미생물의 효소	105
<표 3.13> PUR을 분해하는 미생물의 효소	107
<표 3.14> PET를 분해하는 미생물의 효소	108
<표 3.15> 이중 효소 반응계	109
<표 3.16> 플라스틱 분해에 있어 유용한 <i>Pseudomonas</i> sp. 유래 효소	112
<표 4.1> 바이오 플라스틱의 분류	128
<표 4.2> 분해성 플라스틱의 용도 및 적용 수치	133
<표 4.3> 분해성 플라스틱의 분해 형태별 장단점	133
<표 4.4> 의료용으로 적용되는 생화학적 고분자	136
<표 4.5> 국내의 생분해성 플라스틱/고분자산업 현황	142

그림 목 차

<그림 1.1> 고분자 화합물의 종류	4
<그림 1.2> 합성 고분자 화합물 제조과정	4
<그림 1.3> 플라스틱 종류 구분	6
<그림 1.4> 반(半)합성 고분자 섬유 및 필름의 종류	8
<그림 1.5> 화석연료/바이오매스 플라스틱의 재활용성과 생분해 가능성	9
<그림 1.6> 바다에서 발견되는 플라스틱 폐기물 크기	12
<그림 1.7> 1950~2015년 전 세계 용도별 플라스틱 사용량	14
<그림 1.8> 1950~2015년 전 세계 재질별 플라스틱 사용량	14
<그림 1.9> 2016년 세계 플라스틱 원료 생산량 비율	16
<그림 1.10> 국내 합성 고분자 화합물 원료 생산 및 사용현황	17

목 차

〈그림 1.11〉 국내 플라스틱(합성수지) 원료 생산 및 사용현황	17
〈그림 1.12〉 국가별 플라스틱 원료 사용량	18
〈그림 1.13〉 플라스틱 제품 종류별 수명분포 함수	19
〈그림 1.14〉 1950~2015년 전 세계 용도별 플라스틱 폐기물 발생량 ..	20
〈그림 1.15〉 1950~2015년 전 세계 재질별 플라스틱 폐기물 발생량 ..	20
〈그림 1.16〉 1950~2015년 플라스틱 생산, 폐기물 발생 및 처리량 ..	21
〈그림 1.17〉 1950~2050년 누적 플라스틱 폐기물 발생 및 처리량 ..	21
〈그림 1.18〉 2016년 기준 폐합성 고분자 화합물 처리현황	23
〈그림 1.19〉 2010년 기준 해양으로 유출되는 플라스틱 폐기물의 양 ..	26
〈그림 1.20〉 전 세계 상위 10대 강에서 해양으로 연간 유입되는 폐기물의 양	28
〈그림 1.21〉 4개 지점(지중해, 흑해, 발틱해, 북해) 해변 폐기물 모니터링 결과	29
〈그림 1.22〉 전 세계 해양 내 미세플라스틱 상대 분포 추정	30
〈그림 1.23〉 2016년 국내 해안폐기물 모니터링 결과	31
〈그림 2.1〉 물벼룩 내장에 들어있는 미세플라스틱	41
〈그림 2.2〉 플라스틱 해양쓰레기의 크기에 따른 생물 영향	45
〈그림 2.3〉 먹이사슬을 통한 미세플라스틱의 생체축적	49
〈그림 3.1〉 미생물과 플라스틱의 상호작용	93
〈그림 3.2〉 플라스틱의 생분해 과정	103
〈그림 3.3〉 비정질 및 결정질 영역 (회색 영역)을 모두 포함하는 반 결정질 중합체	104
〈그림 3.4〉 Esterase, protease 그리고 urease에 의한 PUR 결합의 분해	106
〈그림 4.1〉 바이오 플라스틱의 정의	127
〈그림 4.2〉 다양한 형태의 생분해성 플라스틱 (bio-based/biodegradable)	137



약어목차

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene	아크리로나이트릴 부타디엔 스티렌
BA	Benz(<i>a</i>)anthracene	벤즈안트라센
BBP	Butyl benzyl phthalate	부틸 벤질 프탈레이트
BFRs	Brominated flame retardants	브롬계 난연제
BP	Benzo(<i>a</i>)pyrene	벤조피렌
BPA	Bisphenol A	비스페놀 A
DBP	Dibutyl phthalate	디부틸 프탈레이트
DDE	Dichlorodiphenyldichloroethylene	디클로로디페닐디클로로에틸렌
DDT	Dichloro-Diphenyl-Trichloroethane	디클로로디페닐트리클로로에탄
DEHP	Di(2-ethylhexyl) phthalate	디에틸헥실 프탈레이트
DEP	Diethyl phthalate	디에틸 프탈레이트
DIBP	Diisobutyl phthalate	디이소부틸 프탈레이트
DIDP	Diisodecyl phthalate	디이소데실 프탈레이트
DINP	Di-isononyl phthalate	디이소노닐 프탈레이트
DNOP	Di- <i>n</i> -octyl phthalate	디엔옥틸 프탈레이트
DMP	Dimethyl phthalate	디메틸 프탈레이트
EP	Epoxide	에폭사이드
EPS	Expanded polystyrene	발포성 폴리스티렌
GESAMP	Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection	해양환경보호를 위한 전문가그룹
GPGP	Great Pacific Garbage Patch	북태평양의 거대한 쓰레기 구역
HDPE	High-density polyethylene	고밀도 폴리에틸렌
LDPE	Low-density polyethylene	저밀도 폴리에틸렌
LiP	Lignin peroxidase	리그닌 페록시다아제
LLDPE	Linear low-density polyethylene	선형 저밀도 폴리에틸렌
LMWPE	Low molecular weight polyethylene	저분자량 폴리에틸렌

목 차

MCL-PHA	Medium chain length polyhydroxyalkanoates	중간사슬길이 폴리하이드록시알카노에이트
MF	Melamine-formaldehyde	멜라민 수지
MnP	Manganese peroxidase	망간 페록시다아제
MHET	Mono-2-hydroxyethyl terephthalate	메틸하이드록시에틸 테레프탈레이트
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development	경제협력개발기구
PAH	Polynuclear Aromatic Hydrocarbon	다환 방향족 탄화수소
PA	Polyamide	폴리아미드
PC	Polycarbonate	폴리카보네이트
PAN	Polyacrylonitrile	폴리아크릴로니트릴
PBAT	Polybutyrate	폴리부티레이트
PBS	Polybutylene succinate	폴리부틸렌 숙시네이트
PBSA	Polybutylene succinate adipate	폴리부틸렌 숙시네이트 아디페이트
PBTA	Polybutylene terephthalate	폴리부틸렌 테레프탈레이트
PCBs	Polychlorinated biphenyls	폴리염화비페닐
PCL	Polycaprolactone	폴리카프로락톤
PE	Polyethylene	폴리에틸렌
PEF	Polyethylene furanoate	폴리에틸렌 퓨라노에이트
PEG	Polyethylene glycol	폴리에틸렌글리콜
PES	Polyethylene succinate	폴리에틸렌 숙시네이트
PET	Polyethylene terephthalate	폴리에틸렌 테레프탈레이트
PFOA	Perfluorooctanoic acid	퍼플루오로옥탄산염
PGA	Polyglycolic acid	폴리글라이콜산
PHA	Polyhydroxyalkanoate	폴리하이드록시알카노에이트
PHB	Polyhydroxybutyrate	폴리하이드록시부티레이트
PHV	Polyhydroxyvalerate	폴리하이드록시발레레이트
PHBV	Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)	폴리 하이드록시부티레이트-코-하이드록시발레레이트
PLA	Poly(lactic acid)	폴리락트산
PMMA	Polymethyl methacrylate	메타크릴수지
POPs	Persistent organic pollutants	잔류성 유기 오염물질



Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem

PP	Polypropylene	폴리프로필렌
PPA	Polyphthalamide	폴리프탈아마이드
PS	Polystyrene	폴리스티렌
PTFE	Polytetrafluoroethylene	폴리테트라플루오로에틸렌
PVA	Polyvinyl alcohol	폴리비닐알코올
PVC	Polyvinyl chloride	폴리염화비닐
PVAc	Polyvinyl acetate	폴리비닐 아세테이트
PUR	Polyurethane	폴리우레탄
RPF	Refuse Plastic Fuel	폐플라스틱 고품연료
RDF	Refuse Derived Fuel	성형고체연료
SBR	Styrene butadiene rubber	스티렌 부타디엔 고무
sp.	Species	종
SRF	Solid Refuse Fuel	고형폐기물 연료
TDI	Toluene diisocyanate	톨루엔 디이소시아산
TPS	Thermoplastic starch	열가소성 전분
TPA	Terephthalic acid	테레프탈산
UNEP	United Nations Environment Program	유엔 환경 계획
UP	Unsaturated polyester	불포화 폴리에스테르
UV	Ultraviolet	자외선
VCM	Vinyl chloride monomer	염화비닐 단량체



I

플라스틱의 종류와 오염실태



I

플라스틱의 종류와 오염실태

Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem

1. 플라스틱 개요

가. 플라스틱의 정의

플라스틱(plastic)은 그리스어 플라스티코스(plastikos)에서 유래한 것으로, ‘조형이 가능한’ 또는 ‘금형으로 가공이 가능한’이라는 의미를 지니고 있다(진정일, 2013). 원하는 모양으로 가공이 가능한 물질을 뜻하는 것으로 인류가 오랫동안 사용해 왔던 전통적인 소재인 돌, 나무, 금속, 유리에 비해 가공성이 뛰어났기 때문에 이러한 명칭이 사용된 것으로 보인다.

플라스틱은 탄화수소 혹은 바이오매스(biomass)¹⁾를 원료로 가공공정을 거쳐 제조한 유기합성고분자화합물(synthetic polymer)²⁾을 통칭하는 광의의 개념으로 사용되기도 하고, 협의의 개념으로 합성고분자화합물 중 합성수지(synthetic resin) 혹은 합성수지와 합성섬유만을 지칭하는 개념으로 사용되기도 한다. 해양의 미세플라스틱 오염 등을 지칭할 경우 플라스틱은 합성수지와 합성섬유를 포괄하는 개념으로 사용되고 있다.³⁾ 본 보고서에서 플라스틱은 별도의 언급이 없을 경우에는 합성수지를 지칭하는 용어로 사용하고, 합성수지와 합성섬유, 합성고무를 포괄할 경우에는 합성고분자화합물이라는 용어를 사용하도록 한다(〈그림 1.1〉 참조).

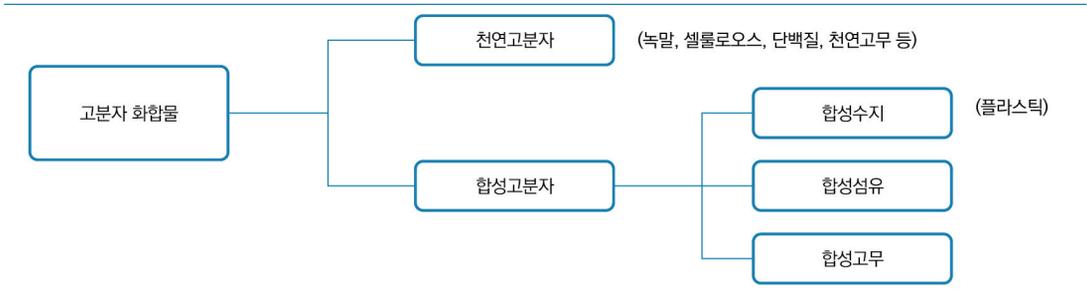
1) 태양에너지를 받은 식물과 미생물의 광합성에 의해 생성되는 식물체 및 균체와 이를 섭취하는 동물체를 포함하는 생명체의 양. 나무와 농산물, 사료작물, 농산폐기물, 해양생물 등에서 추출된 재생가능한 재료로서 에너지로의 전환이 가능한 유기물질을 말한다.

2) Polymer란 분자량이 큰(poly) 개체(mer)란 뜻이다.

3) 해양에서 검출되는 미세플라스틱 종류로 폴리에스테르 섬유까지 포괄하고 있다.



〈그림 1.1〉 고분자 화합물의 종류



자료: 강신호, 2018.

고분자화합물은 분자량이 10,000 이상인 화합물로서, 천연고분자화합물과 합성고분자화합물로 나눌 수 있다. 합성고분자 화합물은 합성수지, 합성섬유, 합성고무로 세분된다. 현재 우리가 사용하는 합성고분자화합물은 대부분 석유를 원료로 만든 것으로 석유를 정제하는 과정에서 발생한 나프타(납사)를 분해하여 에틸렌, 프로필렌 등 기초유분을 생산한 후 중합반응 등의 공정을 거쳐 다양한 합성고분자화합물을 생산한다. 합성고분자화합물은 각종 생활용품에서부터 컴퓨터, 자동차, 건설 등에 이르기까지 다양한 용도로 사용되고 있다(〈그림 1.2〉 참조).

〈그림 1.2〉 합성 고분자 화합물 제조과정



자료: 한국석유화학협회, <http://www.kpia.or.kr/index.php/pages/view/industry/use>.

플라스틱은 뛰어난 기능성으로 인해 ‘신이 내려준 물질’ 혹은 ‘기적의 소재’라는 찬사를 들으며 산업과 생활의 각 분야에서 기존의 천연소재를 대체하여 광범위하게 사용되고 있으며, 사용범위와 사용량이 지속적으로 확대되고 있다. 인류의 역사를 석기시대, 청동기시대, 철기시대로 구분한다면, 현대는 플라스틱 시대라고 말할 수 있을 정도로 플라스틱은 현대문명을 지탱하는 핵심소재로 사용되고 있다.

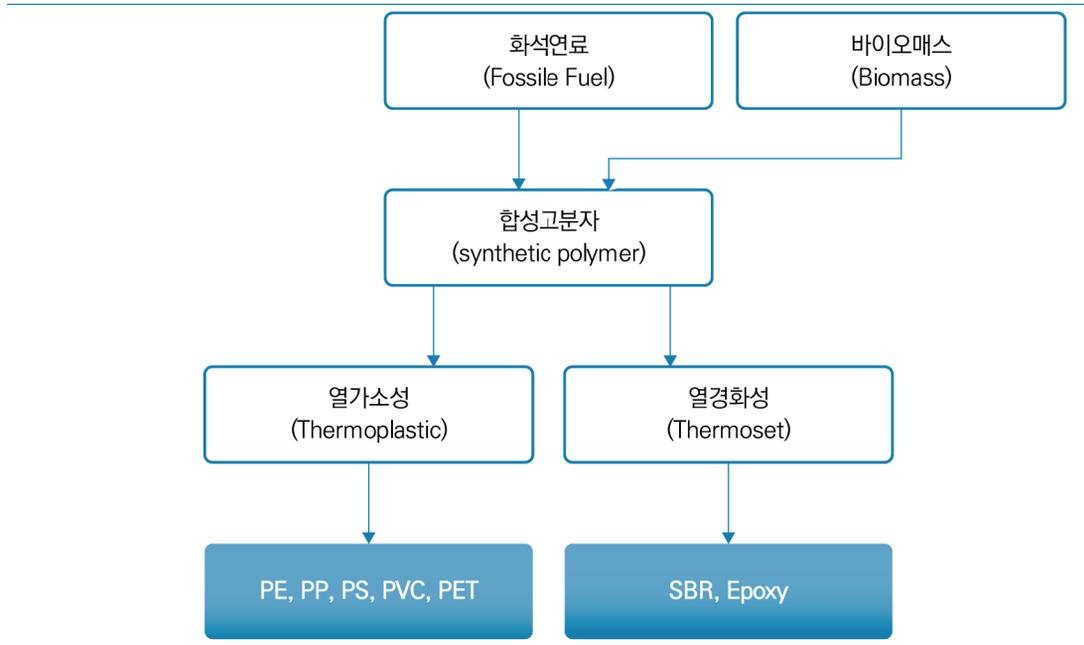
나. 플라스틱의 종류

플라스틱 분자구조의 핵심이 되는 탄소는 화석연료 혹은 바이오매스로부터 원료를 조달하며, 분자의 결합구조 및 성형가능성에 따라 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱으로 구분된다(〈그림 1.3〉 참조).

열가소성 플라스틱은 선형 혹은 가지형 구조로 결합력이 약하기 때문에 열을 가하면 분자구조가 변하면서 쉽게 변형이 가능한 반면, 열경화성 수지는 고분자 사슬이 교차하면서 그물구조를 이루기 때문에 열을 가해도 변형이 일어나지 않는다(〈표 1.1〉 참조). 열가소성 플라스틱은 폴리에틸렌 테레프탈레이트 (Polyethylene terephthalate, PET), 폴리에틸렌(Polyethylene, PE), 폴리프로필렌 (Polypropylene, PP), 폴리스티렌(Polystyrene, PS), 폴리카보네이트 (Polycarbonate, PC) 등으로써 전 세계에서 생산된 플라스틱의 91%를 차지하고 있다(CISION, 2015).



〈그림 1.3〉 플라스틱 종류 구분



자료: UNEP, 2018.

〈표 1.1〉 플라스틱 종류별 용도

구분	종류	용도
열가소성	PET	용기, 섬유, 카페트, 식품포장
	HDPE	용기, 식품포장, 파이프, 장난감
	PVC	창문틀, 장판, 파이프, 벽지, 용기, 의료용품
	LDPE	랩필름, 용기
	PP	요구르트 및 마가린 통, 자동차 부품, 섬유, 우유통
	PS	식품용기, 계란판, 1회용 칼, 발포용기, 단열재
	Others(PC 등)	다양한 용도
열경화성	UP	유리섬유 강화플라스틱
	Epoxy	접착제, 스포츠 장비, 전기 및 자동차 부품
	Phenolic resins	오븐, 토스트, 자동차 부품, 인쇄회로기판

자료: OECD, 2018.

섬유 및 로프용으로 사용되는 합성섬유는 대부분 폴리에스테르(Polyester)가 차지하지만, 그 외 폴리아크릴로니트릴(Polyacrylonitrile, PAN), 폴리아미드(Polyamide, PA), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 등이 있다(〈표 1.2〉 참조). 대부분의 합성섬유는 화석연료를 원료로 만들며, PET 섬유(폴리에스테르 섬유의 한 종류)의 경우에는 PET 수지로 만들고 있다(UNEP, 2018). 전 세계 합성섬유 시장에서 폴리에스테르 섬유의 시장점유율이 83%를 차지하여 압도적이며, 면섬유를 대체하여 생산량이 증가하고 있다(UNEP, 2018).

〈표 1.2〉 합성섬유 종류별 용도

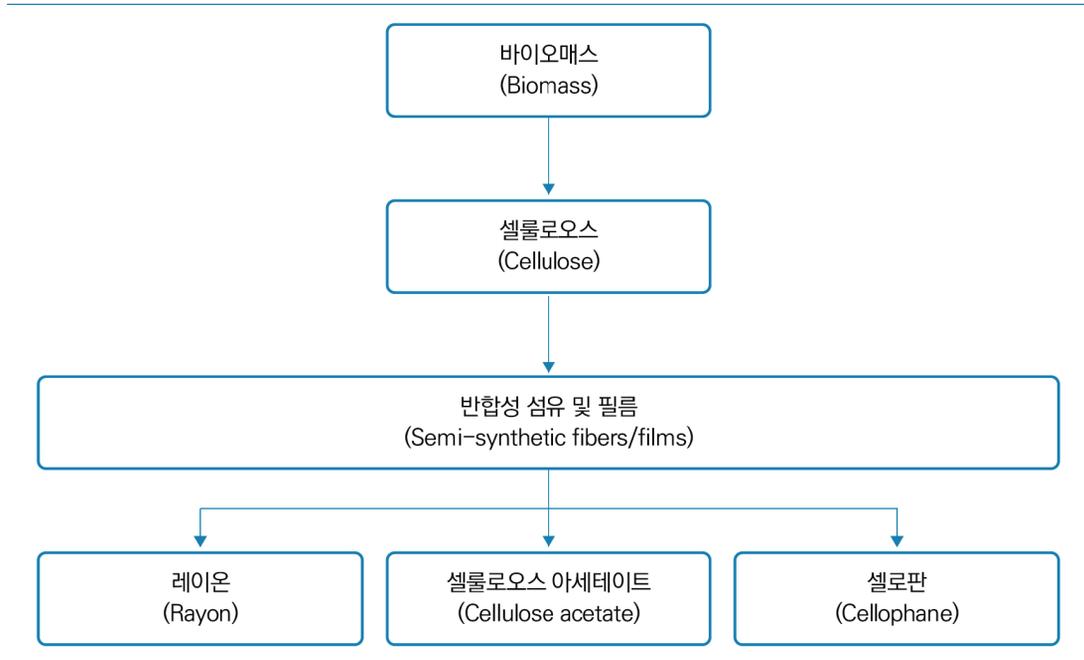
고분자		용도
Polyacrylonitrile	PAN	보온의류, 방화복, 카페트, 인조모피, 붙임머리, 보호의류
Polyamide(aliphatic)	PA	나일론 PA6, PA66 - 의류, 기타 섬유, 로프, 낚시줄
Polyamide(aromatic)	PA	방탄복, 돛, 자전거 타이어, 로프 등
Polyester		의류, 기타 섬유
Polyethylene terephthalate (polyester)	PET	아웃도어 의류, 기타 섬유
Polypropylene	PP	보온의류, 슬리핑백 충전재
Polyether-polyurea	Spandex	스포츠의류, 수영복, 속옷 등

자료: UNEP, 2018.

반(半)합성고분자 섬유 및 필름(Semi-synthetic fibers and films)은 바이오매스, 특히 셀룰로오스를 원료로 하여 만든 고분자물질이다(〈그림 1.4〉 참조). 셀룰로오스는 농업계 폐기물, 우드칩, 대나무 등을 원료로 만든 것이다. 반(半)합성고분자(semi-synthetic)라는 용어는 바이오매스를 원료로 하여 다양한 화학적 공정을 사용하여 만든 것으로, 가황고무, 레이온 섬유, 셀로판, 셀룰로오스 아세테이트 섬유 및 필름을 포함한다(UNEP, 2018). 이러한 반(半)합성고분자는 바이오매스를 원료로 하기 때문에 폐기물로 배출될 경우 분해가 가능하다는 장점이 있다고 예상되었지만, 바다쓰레기 모니터링 결과에 의하면 레이온 섬유 및 셀룰로오스 아세테이트 담배필터가 그대로 검출되고 있어, 이들 폐기물이 자연환경에서 분해되는 것이 한계가 있다는 것을 보여준다(UNEP, 2018).



〈그림 1.4〉 반(半)합성 고분자 섬유 및 필름의 종류

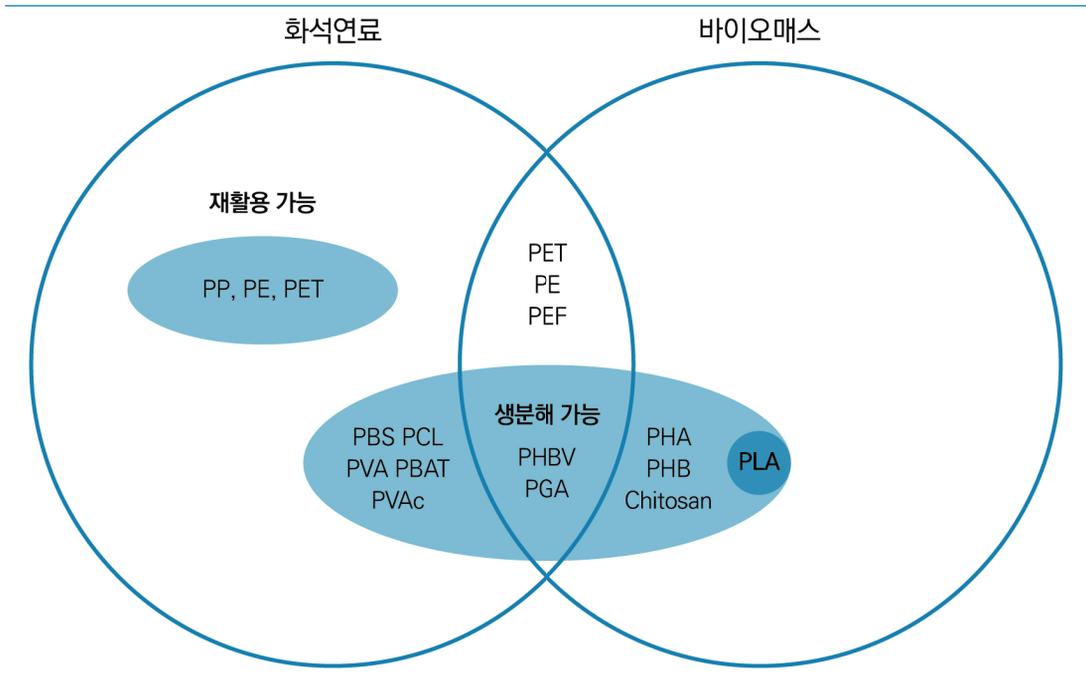


자료: UNEP, 2018.

바이오 플라스틱(bio-plastics)은 크게 두 가지 종류로 구분된다. 생분해 플라스틱(biodegradable plastics)은 미생물의 분해작용에 의해 물과 이산화탄소로 분해(호기성 조건에서 호기성 분해)되거나 물과 메탄으로 분해(혐기성 조건에서 혐기성 분해)될 수 있는 플라스틱을 말하며, 바이오매스를 원료로 하거나 화석연료를 원료로 하여 만들고 있다. 바이오 기반 플라스틱(bio-based plastics)은 사탕수수나 사탕무, 옥수수, 감자, 곡물, 식물성 기름 등을 원료로 만들며, 바이오 기반 플라스틱 중 생분해가 되지 않는 플라스틱도 있다(〈그림 1.5〉 참조). 어떤 종류의 바이오 기반 플라스틱은 화석연료로 만든 플라스틱과 동일한 화학적 성질을 가지고 있기 때문에 화석연료로 만드는 플라스틱 생산라인에서 화석연료로 만든 플라스틱 원료와 혼합하거나 대체할 수 있지만, 생분해는 되지 않는다. 바이오 플라스틱은 현재 대략 21 종류가 생산되고 있거나 개발 중에 있으며, 플라스틱 시장에서 시장점유율이 1% 미만에 불과하고, 바이오 플라스틱 중 생분해 플라스틱의

비율은 23.2%로서, 대부분 바이오 원료가 첨가된 PET 혹은 PE 형태로 생산되고 있다(OECD, 2018).

〈그림 1.5〉 화석연료/바이오매스 플라스틱의 재활용성과 생분해 가능성



자료: OECD, 2018.

다. 플라스틱의 분해

모든 플라스틱은 유기성 화합물이기 때문에 자연환경 내에서 분해가 가능하지만, 통상적인 화석연료로 만든 플라스틱의 경우 수백 년 이상의 기간이 필요하다. 따라서 플라스틱 종류 중 생분해 플라스틱의 구분 및 생분해 플라스틱의 재활용성을 평가하기 위해서는 개념정의가 필요하다. 분해는 미생물뿐만 아니라 광분해(자외선 노출), 산화분해등과 같이 여러 환경적 요인의 작용에 의해 플라스틱의 색깔이 변하거나 작은 파편으로 쪼개지는 것까지를 포함하는 것으로 플라스틱이 물과 이산화탄소/메탄으로 궁극적으로 분해되는 것만을 의미하는 것은 아니다(〈표 1.3〉 참조). 생분해는 정해진 시간 및 조건



속에서 분해가 일어나는 것을 말하는 것으로, 생분해성을 측정할 수 있는 보편적으로 합의된 기준은 현재 없으나, 퇴비화가능 플라스틱에 대해서 대략 58±2℃ 조건에서 6개월 이내에 중량 기준으로 최소 90% 이상이 생분해가 되어야 하고, 12주 이내에 2mm 미만으로 쪼개져야 하는 것으로 기준으로 하고 있다. 생분해 조건을 충족시킬 경우에는 퇴비화 시설에서 퇴비화 방식으로 재활용이 가능할 수 있지만, 현실적으로 현재 상업적 퇴비화 시설의 경우에 경제성을 확보하기 위해서는 퇴비화 기간이 8주에 불과하기 때문에 생분해 플라스틱이 퇴비화 시설에서 퇴비화로 재활용이 되는 것은 어려움이 있을 것으로 예상된다(OECD, 2018).

〈표 1.3〉 분해, 생분해, 퇴비화에 대한 용어 정의

용어	정의
분해(Degradation)	자외선, 산화, 미생물, 온도 등의 복합적 작용에 의해 부분 혹은 완전히 분자구조가 깨지는 것을 말함. 이 용어는 탈색, 표면균열, 파편으로 쪼개지는 것의 의미까지 포함
생분해(Biodegradation)	미생물(박테리아, 곰팡이)에 의한 생물학적인 과정을 통해 부분 혹은 완전히 물과 이산화탄소/메탄, 에너지, 새로운 바이오매스로 분해되는 것을 말함
퇴비화 시설 내 퇴비화 가능성 (Compostable-industrial)	퇴비화 공장에서 특정 조건과 시간 동안 인위적으로 높은 온도에서 생분해가 가능한 것을 말함
가정에서 퇴비화 가능성 (Compostable-domestic)	가정용 퇴비화 용기에서 상온의 낮은 온도에서 퇴비화가 가능한 것을 말함

자료: UNEP, 2018.

라. 미세플라스틱(microplastics)의 정의

본 보고서에서는 플라스틱 오염에 의한 문제 중 최근 생태계와 인체에 중대한 위협이 되고 있는 미세플라스틱에 초점을 맞추고, 그로 인한 문제점에 대해 현황을 정리하고 앞으로의 대책을 심도 깊게 모색하고자 한다. 이번 장에서 미세플라스틱의 발견과 정의에 대해 간략히 소개하고, 다음 장에서

미세플라스틱의 독성 및 위해성 현황에 대해 자세하게 다루도록 한다.

바다표면을 떠다니는 작은 플라스틱 조각은 1970년대 초반부터 학계에 보고되기 시작하였으나, 2000년대 초반까지는 미세플라스틱에 대한 명확한 정의는 없었으며, 2000년대 후반에 기준이 제시되었다. 통상적으로 현미경으로 관찰할 수 있는 정도의 크기를 지칭하는 용어로 사용되었고, 밀리미터 크기에서 그 이하의 미세한 크기까지의 플라스틱 조각을 말하는 것이었다(GESAMP, 2015). ‘미세플라스틱’이라는 용어는 2004년 영국의 Thompson이 현미경 수준에서 식별되는 미세플라스틱의 양이 해양환경에서 증가하고 있다는 연구결과를 Science 지에 발표하면서 처음으로 사용되기 시작하였다(Thompson *et al.*, 2004).

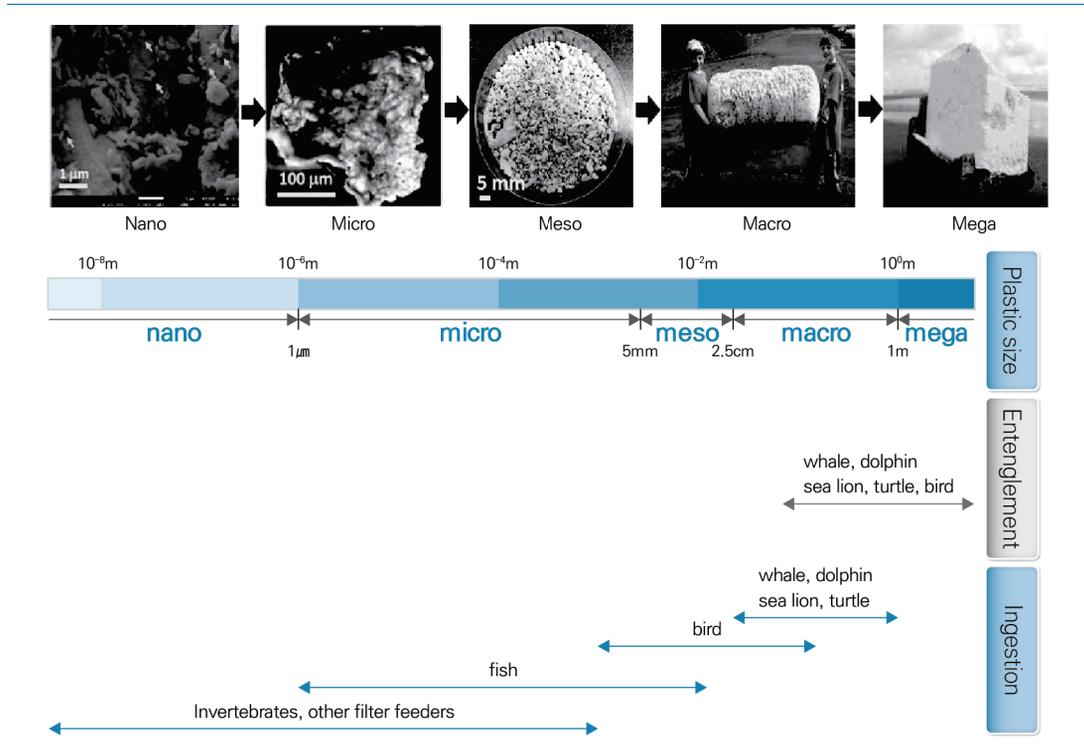
미세플라스틱 크기에 대한 정의는 2008년 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 주최한 바다 미세플라스틱 영향에 대한 국제 워크숍에서 처음으로 논의되었으며, 생물군에 의해 쉽게 섭취될 수 있고, 다양하게 생태계에 위협을 가할 수 있는 플라스틱 조각 크기의 기준으로 5mm 미만이 채택되었다(GESAMP, 2015)⁴⁾ (<그림 1.6> 참조).

해양 플라스틱 폐기물은 1미터가 넘는 대형크기에서 나노미터 단위의 미세한 크기까지 다양하다. 밧줄, 그물, 비닐봉투와 같이 크기가 큰 플라스틱 폐기물은 대형 해양생물이 먹거나 그물에 걸려서 죽게 만드는 피해를 야기하는 반면, 크기가 작은 플라스틱 폐기물은 주로 해양생물들이 섭취를 통해 생태계 먹이사슬을 따라 광범위한 피해를 야기할 수 있다.

4) 미세플라스틱 크기 기준에 대해서 학술적으로 엄격한 기준을 설정하기 어렵기 때문에 실용적(pragmatic) 관점에서 임의적(arbitrary)으로 설정되었다. (GESAMP, 2016 ; UNEP, 2018)



〈그림 1.6〉 바다에서 발견되는 플라스틱 폐기물 크기



자료: GESAMP, 2015.

미세플라스틱은 발생기인(origin)에 따라 1차 미세플라스틱(primary microplastics)과 2차 미세플라스틱(secondary microplastics)으로 구분된다. 1차 미세플라스틱은 세정용으로 사용되는 알갱이, 플라스틱 성형에 사용되는 플라스틱 분말, 화장품에 사용되는 마이크로비드, 산업용으로 다양하게 사용되는 나노입자들, 플라스틱 제품의 원료가 되는 펠릿을 말한다(GESAMP, 2015). 2차 미세플라스틱은 플라스틱이 환경에 노출되면서 작은 입자로 쪼개진 것을 말하며, 플라스틱 폐기물이 환경에 노출되었을 때 햇빛, 미생물 등의 작용에 의해 쪼개지면서 발생한다(GESAMP, 2015).

2. 플라스틱 폐기물 발생현황

가. 플라스틱 생산량

1) 전 세계 플라스틱 생산현황

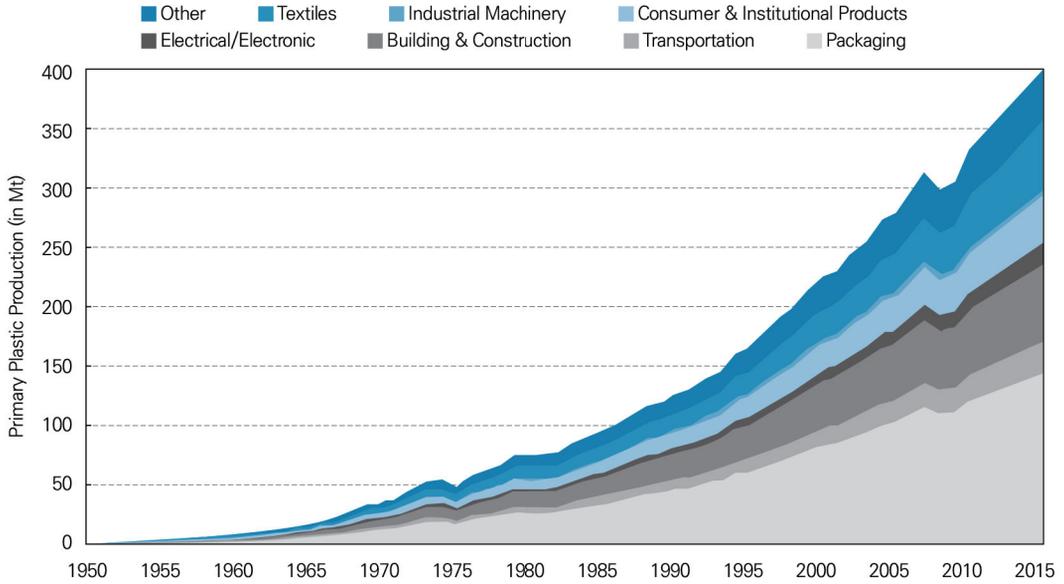
전 세계 플라스틱 생산량은 1950년 연간 2백만 톤에서 2015년 407백만 톤⁵⁾으로 65년 동안 2백배 이상 증가하였다. 플라스틱의 용도별 사용량(2002~2014년)을 보면 포장용으로 가장 많이 사용(45%)되고 있으며, 그 다음으로 건축용(19%), 소비재 제품(12%) 순으로 많이 사용되고 있다(〈그림 1.7〉 참조). 플라스틱의 재질별 사용량(2002~2014년)을 보면 PE(36%), PP(21%), PVC(12%), PET(10%) 순으로 사용되고 있다(Geyer *et al.*, 2017) (〈그림 1.8〉, 〈표 1.4〉 참조). 현재의 추세대로라면 2050년이 되면 플라스틱 생산량은 1,503백만 톤⁶⁾이 될 것으로 보고 있다. 2015년 기준으로 전 세계 석유소비의 6%가 플라스틱 생산에 사용되고 있지만, 2050년이 되면 20%가 사용될 것으로 예상이 된다. 따라서 현재 전 세계 탄소배출량의 1%가 플라스틱 생산 및 소비로 인한 것이지만, 2050년이 되면 20%로 증가할 것으로 예상이 된다(World Economic Forum, 2016).

5) 플라스틱 원료(resin) 생산량은 2015년 기준으로 연간 381백만 톤이지만, 첨가제 사용량(약 7%)까지 포함한 플라스틱 생산량은 407백만 톤이다.

6) 플라스틱 원료 생산량 기준이며, 첨가제 사용까지 포함한 플라스틱 생산량은 이 보다 많다.

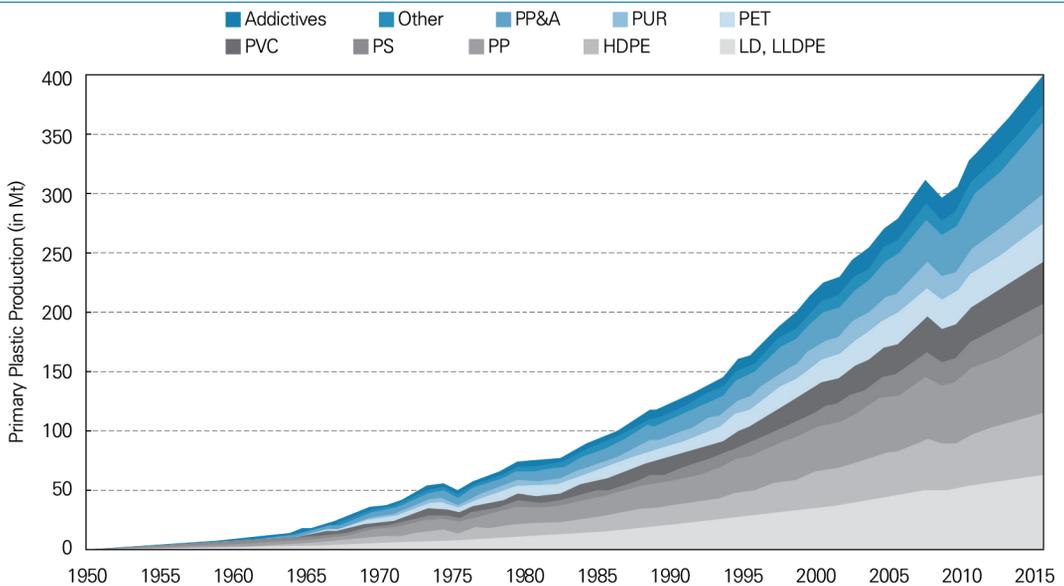


〈그림 1.7〉 1950~2015년 전 세계 용도별 플라스틱 사용량



자료: Geyer *et al.*, 2017.

〈그림 1.8〉 1950~2015년 전 세계 재질별 플라스틱 사용량



자료: Geyer *et al.*, 2017

〈표 1.4〉 2002~2014년 전 세계 플라스틱 사용량

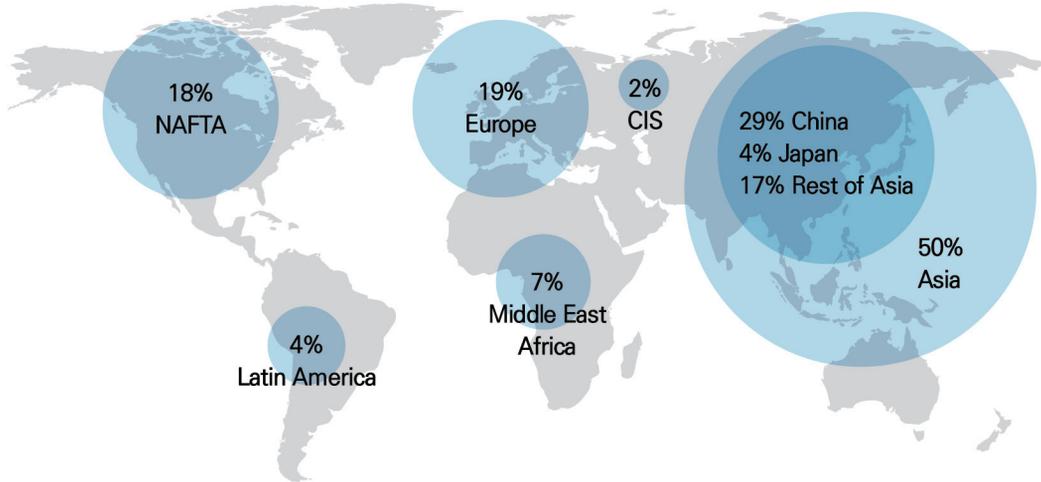
시장분야	LDPE, LLDPE	HDPE	PP	PS	PVC	PET	PUR	기타	합계
수송	0.1%	0.8%	2.6%	0.0%	0.3%	0.0%	1.6%	1.4%	6.7%
포장	13.5%	9.3%	8.2%	2.3%	0.9%	10.1%	0.2%	0.1%	44.8%
건물 및 건설	1.1%	3.3%	1.2%	2.2%	8.1%	0.0%	2.4%	0.5%	18.8%
전기/전자	0.5%	0.2%	0.9%	0.6%	0.4%	0.0%	0.4%	1.0%	3.8%
소비자 제품	2.9%	1.7%	3.8%	1.8%	0.6%	0.0%	1.0%	0.2%	11.9%
산업기계	0.2%	0.1%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.8%
기타	1.7%	0.9%	4.2%	0.7%	1.4%	0.0%	2.5%	1.7%	13.2%
합계	20.0%	16.3%	21.0%	7.6%	11.8%	10.2%	8.2%	4.9%	100.0%

자료: Geyer *et al.*, 2017.

2016년 기준 지역별 플라스틱 원료 생산현황을 보면, 아시아 지역에서 전 세계 생산량의 50%를 차지하고 있으며, 특히 중국이 전 세계 생산량의 29%를 생산하고 있다(〈그림 1.9〉 참조). 플라스틱 원료 생산량은 중국 및 기타 아시아 지역에서 지난 10년 동안 지속적으로 증가하였으며, 유럽 및 북미지역은 2008~2009년 경제위기로 인해 생산량이 급격하게 감소한 후 현재 경제위기 전 수준으로 회복한 상황이다(PlasticsEurope, 2017 ; OECD, 2018).



〈그림 1.9〉 2016년 세계 플라스틱 원료 생산량 비율



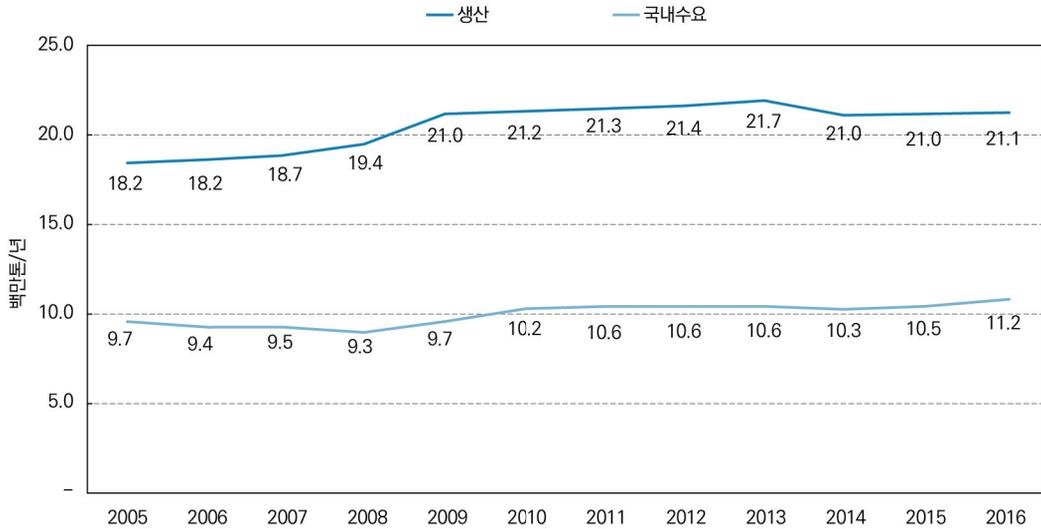
주: 열가소성 수지 및 폴리우레탄 수지만을 대상으로 집계

자료: PlasticsEurope, 2017.

2) 국내 플라스틱 생산 및 사용현황

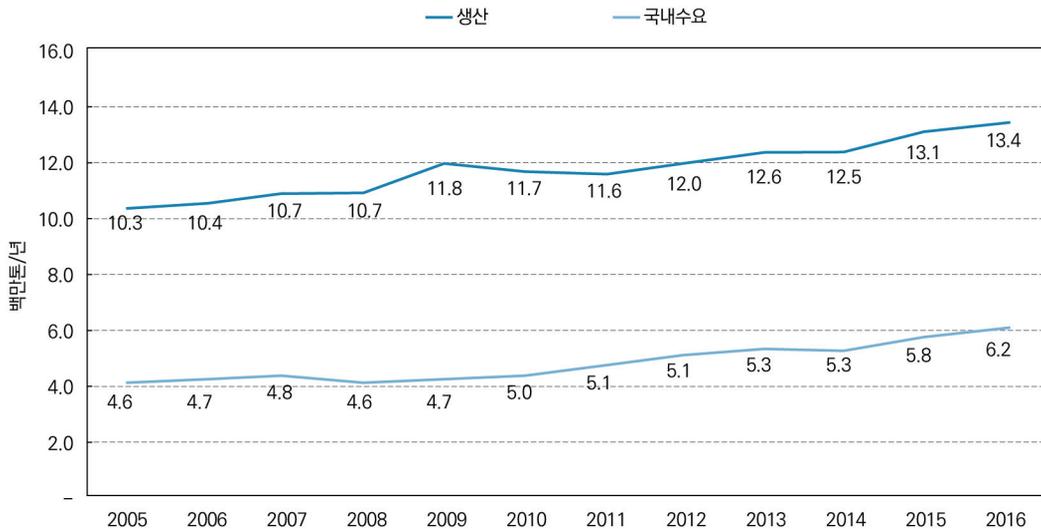
국내 합성고분자화합물 원료 사용량은 2016년 기준으로 11.2백만 톤이며, 이 중 플라스틱(합성수지) 원료 사용량은 6.2백만 톤이다(한국석유화학협회, 2017) (〈그림1.10〉, 〈그림 1.11〉 참조). 국내 합성고분자화합물 원료 소비량은 전 세계 사용량의 약 3%를 차지하고 있다(〈그림 1.11〉, 〈그림 1.12〉 참조).

〈그림 1.10〉 국내 합성 고분자 화합물 원료 생산 및 사용현황



자료: 한국석유화학협회, 2017.

〈그림 1.11〉 국내 플라스틱(합성수지) 원료 생산 및 사용현황

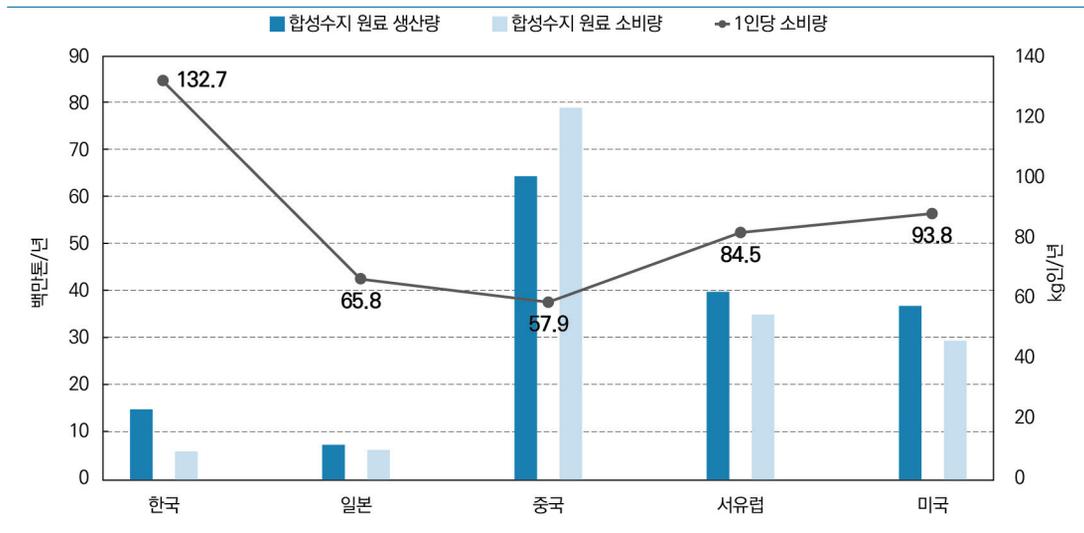


자료: 한국석유화학협회, 2017.



2015년 기준으로 국내 1인당 연간 플라스틱 원료 소비량은 132.7kg으로 세계 최고 수준(EUROMAP, 2016)이지만, 이것은 국민 1인당 최종 플라스틱제품의 소비량을 의미하는 것이 아니라 플라스틱원료를 사용하는 생산자의 원료 소비량을 말한다(<그림 1.12> 참조). 플라스틱 원료로 플라스틱 최종제품(플라스틱 제품, 자동차, 전자제품 등)을 생산한 후 수출하는 양이 많기 때문에 이를 감안하면 플라스틱 최종제품이 국내에서 소비되는 양은 미국, 일본 등과 비교하여 높지는 않을 것으로 판단된다.

<그림 1.12> 국가별 플라스틱 원료 사용량

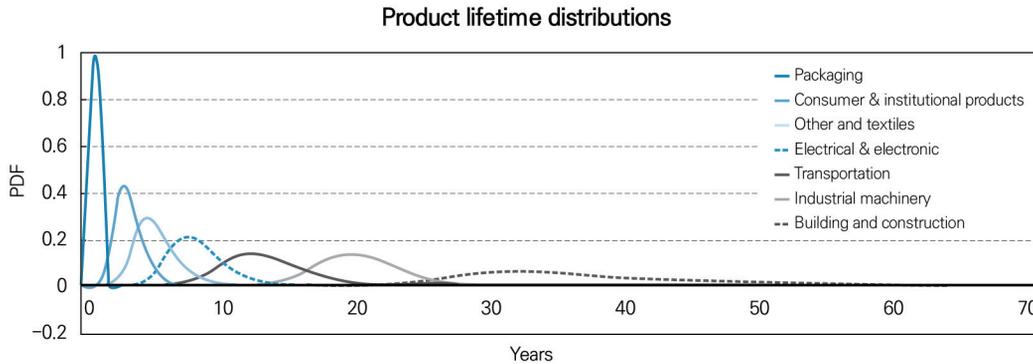


자료: EUROMAP, 2016.

나. 플라스틱 폐기물 발생현황

Geyer *et al.*(2017)은 1950년부터 2015년까지 플라스틱 생산량과 플라스틱 제품 용도별 수명분포함수를 이용하여 플라스틱 폐기물 발생량을 추정하였다(<그림 1.13> 참조). 포장재로 사용되는 경우에는 1년 이내에 소비되기 때문에 연간 생산량을 폐기물 발생량으로 볼 수 있지만, 건축용 제품과 같이 수십 년 이상 사용되는 내구재의 경우에는 수명분포 함수를 이용하여 폐기물 발생량을 추정하고 있다.

〈그림 1.13〉 플라스틱 제품 종류별 수명분포 함수



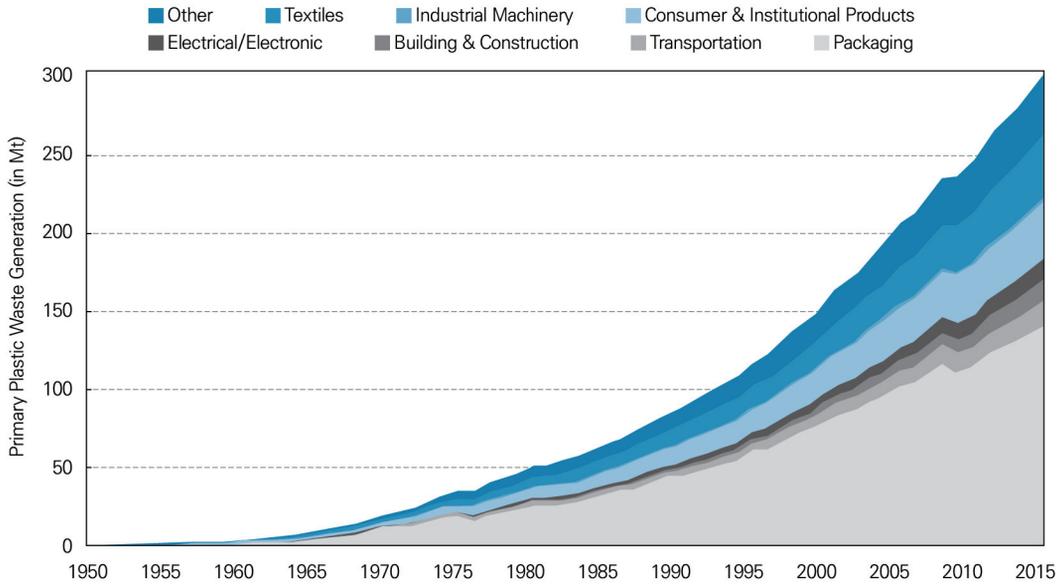
자료: Geyer *et al.*, 2017.

Geyer *et al.*(2017)의 연구결과에 따르면 2015년 기준으로 전 세계 플라스틱 폐기물 발생량은 302백만 톤으로, 전 세계 폐기물 발생량(70~100억 톤)의 약 3~4%를 차지하고 있다(OECD, 2018). 2015년 플라스틱 폐기물 발생량 중 포장재 폐기물 발생량이 47%로 가장 많고, 섬유폐기물이 14%, 기타 13%, 건설폐기물이 12%를 차지하고 있으며(〈그림 1.14〉 참조), 재질별로는 PE가 32%로 가장 많고, PP가 18%, PPA 섬유가 14%, PET가 11% 순으로 많다(Geyer *et al.*, 2017) (〈그림 1.15〉 참조).

2015년까지 8,300백만 톤의 플라스틱이 생산되었고, 이 중 5,800백만 톤이 폐기물로 배출되었다(〈그림 1.16〉 참조). 플라스틱 폐기물 중 4,600백만 톤은 바로 매립 혹은 투기되었고, 700백만 톤은 소각되었고, 500백만 톤은 재활용되었다. 재활용된 양 중 100만 톤은 다시 한 번 재활용이 되었고, 300백만 톤은 매립 혹은 투기되었고, 100백만 톤은 소각되었다. 재활용이 된 후 다시 재활용되거나 소각 혹은 매립된 양까지 포함할 경우 플라스틱 폐기물 발생량은 6,300백만 톤이며, 이 중 600백만 톤이 재활용되었고, 4,900백만 톤이 매립 혹은 투기되었고, 800백만 톤이 소각되었다. 현 추세대로 갈 경우 2050년까지 소각되는 양은 12,000백만 톤, 매립 혹은 투기되는 양은 12,000백만 톤, 재활용되는 양은 9,000백만 톤이 될 것으로 예상된다(Geyer *et al.*, 2017) (〈그림 1.17〉 참조).

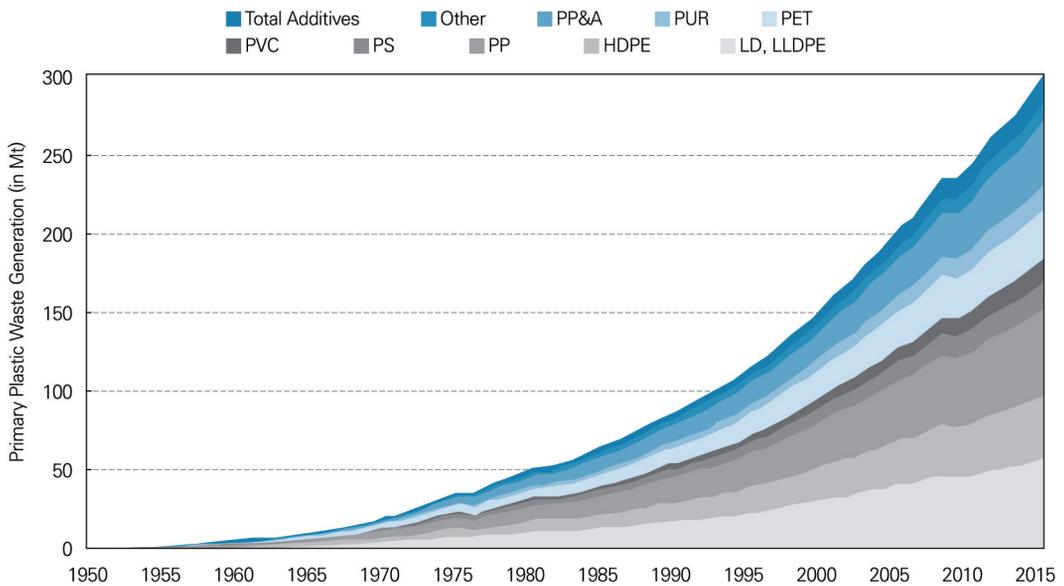


〈그림 1.14〉 1950~2015년 전 세계 용도별 플라스틱 폐기물 발생량



자료: Geyer *et al.*, 2017.

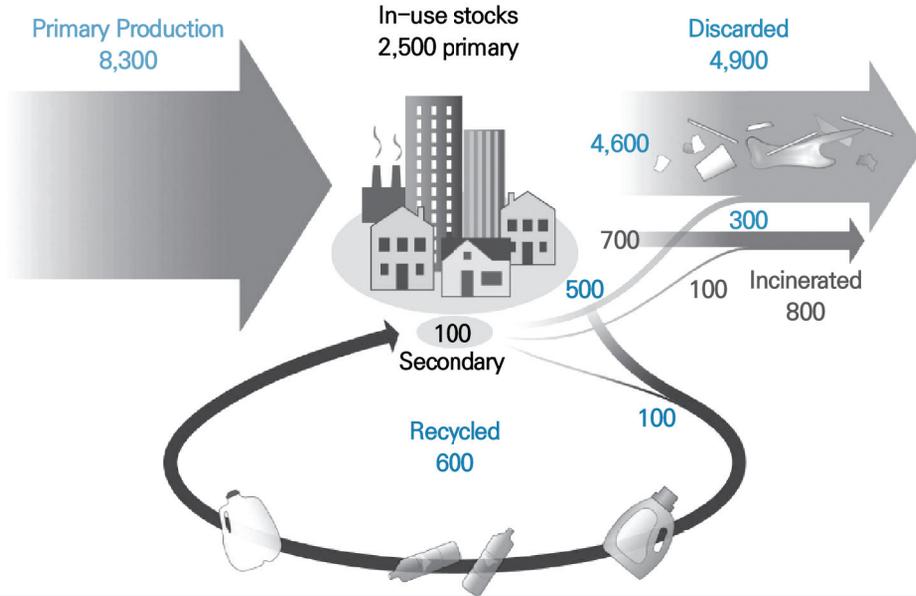
〈그림 1.15〉 1950~2015년 전 세계 재질별 플라스틱 폐기물 발생량



자료: Geyer *et al.*, 2017.

〈그림 1.16〉 1950~2015년 플라스틱 생산, 폐기물 발생 및 처리량

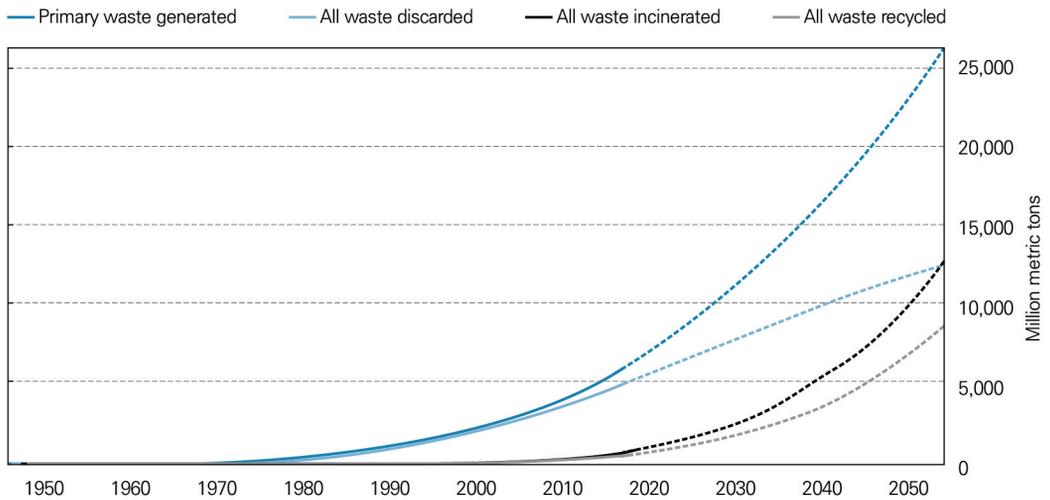
(단위 : 백만 톤)



자료: Geyer et al., 2017.

〈그림 1.17〉 1950~2050년 누적 플라스틱 폐기물 발생 및 처리량

(단위 : 백만 톤)



자료: Geyer et al., 2017



국내 폐기물통계에 따르면 2016년 기준으로 폐합성 고분자 화합물의 발생량은 연간 약 1,000만 톤이다(〈표 1.5〉 참조). 이 중 폐합성수지 발생량은 7백만 톤으로 폐합성 고분자 화합물의 약 70%를 차지하고 있다(〈표 1.6〉 참조). 연간 발생하는 폐합성 고분자 화합물 중 1백만 톤은 매립되고 있고, 4백만 톤은 소각되고 있으며, 5백만 톤은 재활용되고 있다(〈표 1.5〉 참조). 재활용량 중 1.5백만 톤은 물질로 재활용되고 있으며, 3.3백만 톤은 에너지로 회수되고 있다(〈그림 1.18〉 참조). 불법으로 처리되는 양과 환경에 투기되는 양도 있을 것으로 보이지만, 정확한 양에 대해서는 파악할 수 없는 실정이다.

〈표 1.5〉 2016년 기준 폐합성 고분자 화합물 발생 및 처리현황

(단위 : 톤/년)

구분	생활폐기물	사업장폐기물	건설폐기물	합계	
매립	977,689	35,369	5,694	1,018,752	
소각	2,464,590	1,355,026	246,813	4,066,429	
재활용	소계	1,725,179	2,987,124	269,991	4,982,294
	종량제	689,303	-	-	-
	필름류	622,258			
	플라스틱	413,618			
합계	5,167,458	4,377,519	522,498	10,067,475	

- 주: 1) 생활폐기물 재활용 중 종량제는 종량제 봉투로 배출된 고무피혁류와 플라스틱류 중 재활용된 양을 말하며, 필름류와 플라스틱은 재활용품으로 분리배출된 양을 말함
 2) 사업장폐기물은 폐합성 고분자 화합물(폐섬유류, 폐합성수지, 폐합성고무, 폐피혁)의 매립, 소각, 재활용량을 말함
 3) 건설폐기물은 폐합성수지 및 폐섬유의 매립, 소각, 재활용량을 말함

자료: 환경부, 2017.

〈표 1.6〉 2016년 기준 폐합성수지 발생 및 처리현황

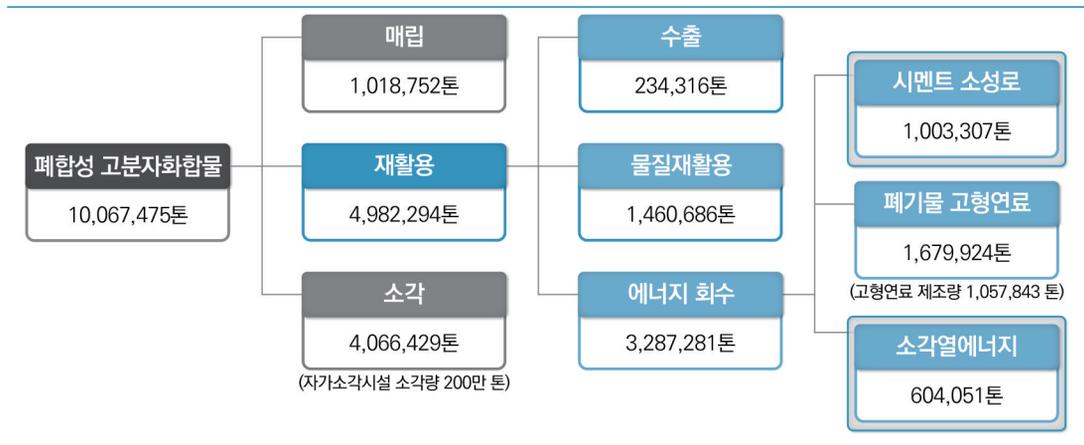
(단위 : 톤/년)

구분	생활폐기물	사업장폐기물	건설폐기물	합계
매립	329,084	31,354	4,490	364,928
소각	902,937	1,274,033	244,295	2,421,265
재활용	소계	2,669,501	269,589	4,318,681
	종량제	342,005		
	필름류	623,968	-	-
	플라스틱	413,618		
합계	2,611,612	3,974,887	518,374	7,104,874

- 주: 1) 생활폐기물 재활용 중 종량제는 종량제 봉투로 배출된 고무피혁류와 플라스틱류 중 재활용된 양을 말하며, 필름류와 플라스틱은 재활용품으로 분리배출된 양을 말함
 2) 사업장폐기물은 폐합성 고분자 화합물(폐섬유류, 폐합성수지, 폐합성고무, 폐피혁)의 매립, 소각, 재활용량을 말함
 3) 건설폐기물은 폐합성수지 및 폐섬유의 매립, 소각, 재활용량을 말함

자료: 환경부, 2017.

〈그림 1.18〉 2016년 기준 폐합성 고분자 화합물 처리현황



- 주: 1) 폐합성 고분자 화합물의 발생량, 매립 및 재활용, 소각량은 2016년 기준 환경부 통계자료(환경부, 2017). 다만 생활 폐기물, 가연성 폐기물 중 기타폐기물, 건설폐기물 중 혼합건설폐기물은 반영하지 않음
 2) 수출량은 2015년 기준 올바로시스템의 수출입폐기물포탈시스템 통계자료 (<https://exim.allbaro.or.kr/>)
 3) 시멘트 소성로 투입량은 2016년 기준 한국시멘트협회 통계자료로 페타이어(국내수입)가 포함된 양
 4) 폐기물고형연료 폐기물 반입량은 2016년 기준 한국환경공단 통계자료(한국환경공단, 2018)
 5) 소각열에너지 폐기물 반입량은 2016년 기준 환경부 내부 집계자료(총반입량 715,506톤 중 폐합성수지, 폐고무, 폐섬유 반입량만을 별도 집계)



3. 플라스틱 및 미세플라스틱의 환경오염 실태

가. 개요

플라스틱과 관련된 환경문제는 생산단계, 소비단계, 폐기단계로 구분되어 각 단계별로 쟁점이 되고 있으며, 단계별로 살펴보면 다음과 같다.

플라스틱 생산과 관련한 환경 및 인체 유해성과 관련한 영향을 정리한 보고서에 따르면 강화플라스틱 제조업체에서 스티렌 단량체(Styrene monomer)에 노출된 노동자의 암발생률 증가사례가 보고된 바가 있으며, 염화비닐 단량체(Vinyl chloride monomer, VCM) 공장의 노동자들이 VCM 질병이라 불리는 유전독성, 간암, 신경장애에 걸린 사례가 보고된 바도 있다. 또한 자동차용 플라스틱 생산공장의 노동자들은 사출성형 과정에서 발생하는 스프레이와 증기에 노출되고 있으며, 이 산업에 종사하고 있는 북미지역의 여성 노동자들 중 비정상적으로 높은 유방암 발병 및 생식장애가 보고되고 있다(UNEP, 2018).

플라스틱 소비와 관련된 인체 유해성 논란은 플라스틱에 가소제 등 첨가제로 사용되는 프탈레이트(Phthalates), 노닐페놀(Nonylphenol), 비스페놀A(BPA), 브롬계 난연제 (BFR) 등이 원인이 될 것으로 보인다. 이들 첨가제는 환경 호르몬이라고 불리는 내분비계 교란물질 혹은 발암물질(Carcinogenic)로 확정이 되거나 논란 중에 있기 때문이다. 내분비계 교란물질이 유방암, 당뇨병, 대사증후군, 심혈관 및 생식장애와 연관이 있다는 역학조사 결과가 있고, 산모의 내분비계 시스템에도 영향을 미쳐 태아의 뇌 발달에 이상을 초래할 수 있다. 임신기간 중 특정 프탈레이트에 노출될 경우 남자아기의 신경활동 장애와 연관이 있다는 연구결과도 있다(UNEP, 2018).

플라스틱 폐기 단계에서는 플라스틱폐기물을 처리하는 가장 보편적인 방법은 매립 혹은 소각, 재활용인데, 이 단계에서도 환경문제가 야기된다. 즉, 매립의 경우 장기간에 걸쳐 땅 속에서 플라스틱이 분해되면서 매립가스 발생 및 첨가제 등의 화학물질이 침출수로 유출될 수 있는 문제가 있다. 소각의 경우에는 연소되면서 연소가스를 통해 오염물질이 대기 중으로 유출될 수 있다. 재활용의 경우에도 재활용산업에 종사하는 노동자들이 플라스틱을 용융하는 과정에서

발생하는 유해물질에 노출될 수 있다.

플라스틱과 관련된 이상의 환경문제는 수십 년 동안 이미 많은 논의 및 연구가 축적된 문제들로서, 플라스틱 내 인체유해를 야기할 수 있는 첨가제는 일부 사용금지가 되고 있거나 대체물질이 개발되고 있다. 또한 작업장 내의 환경문제나 폐기물을 처리하는 과정에서 발생하는 문제에 대해서도 오염방지시설의 개선 및 기준의 강화 등을 통한 해결이 시도되고 있다.

이외에 플라스틱과 관련하여 최근에 새롭게 부각되고 있는 환경문제는 해양 플라스틱 폐기물 및 미세플라스틱 문제이다. 초기에는 환경에 투기된 플라스틱 폐기물이 바다로 유출되어 바다 표면을 떠돌면서 해양생물의 피해를 야기하는 문제가 부각되었으나, 점차 연구가 진행되면서 작은 조각으로 쪼개진 미세플라스틱이 생태계 먹이사슬을 따라 생체조직에 광범위하게 축적되고 있고, 인체 이상을 일으킬 수 있다는 사실이 알려지면서 문제의 심각성이 드러나고 있다. 해양을 비롯하여 환경에 광범위하게 투기된 플라스틱 폐기물은 미세화가 진행되면서 인간이 기술적으로 관리할 수 있는 범위를 넘어섰기 때문에 기존의 방법으로는 대응하기 어려운 상황이다.

따라서 플라스틱 오염실태와 관련하여 본 보고서에서는 기존의 플라스틱 오염문제 보다는 새롭게 국제적인 환경문제로 대두되고 있는 해양 플라스틱 오염 및 미세플라스틱 문제와 관련하여 국내외 실태를 집중적으로 살펴보고자 한다.

나. 국외 플라스틱 및 미세플라스틱의 오염실태

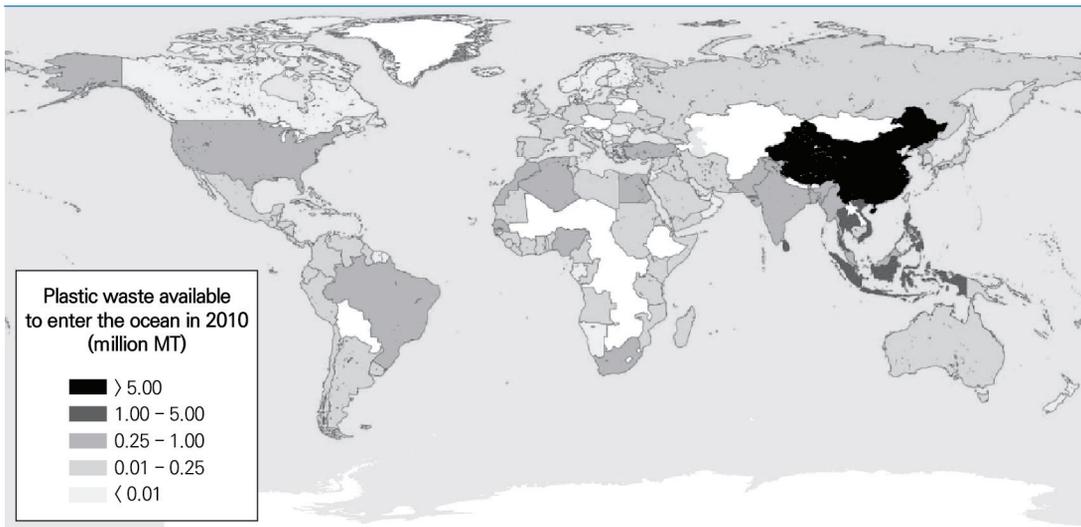
Jambeck *et al.*(2015)의 연구에 의하면 2010년 기준으로 해양으로 유입되는 플라스틱 폐기물의 양이 4.8백만~12.7백만 톤에 달하는 것으로 추정하였다. 바다와 접하고 있는 192개 해안가에서 50킬로미터 이내의 주거지역에서 발생하는 플라스틱 폐기물의 양이 99.5백만 톤이며, 이 중 31.9백만 톤이 제대로 관리되지 않고 투기되고 있는 폐기물이며, 이 중 4.8백만 톤에서 12.7백만 톤이 해양으로 유입되고 있다고 추정하였다. 연간 해양으로 유입되는 플라스틱



폐기물의 양은 192개 국가에서 발생하는 플라스틱 폐기물 총량의 1.7%~4.6%를 차지하는 양이다. 해양으로 유입되는 플라스틱 폐기물 상위 20개 국가를 보면, 중국이 압도적으로 많고, 중국을 비롯하여 인도네시아, 필리핀, 베트남, 스리랑카 등 동남아시아국가가 상위 5위까지 차지하고 있다(〈그림 1.19〉, 〈표 1.7〉 참조).

Schmidt *et al.*(2017)은 전 세계 10개의 큰 강을 대상으로 강에서 해양으로 유입되는 플라스틱 폐기물의 양을 추정하였는데, 중국의 양자강을 통해 해양으로 연간 유입되는 폐기물의 양이 약 1.5백만 톤으로 나머지 9개 강에서 유입되는 양보다 3배 이상 많은 것으로 나타났다(〈그림 1.20〉 참조).

〈그림 1.19〉 2010년 기준 해양으로 유출되는 플라스틱 폐기물의 양



자료: Jambeck *et al.*, 2015.

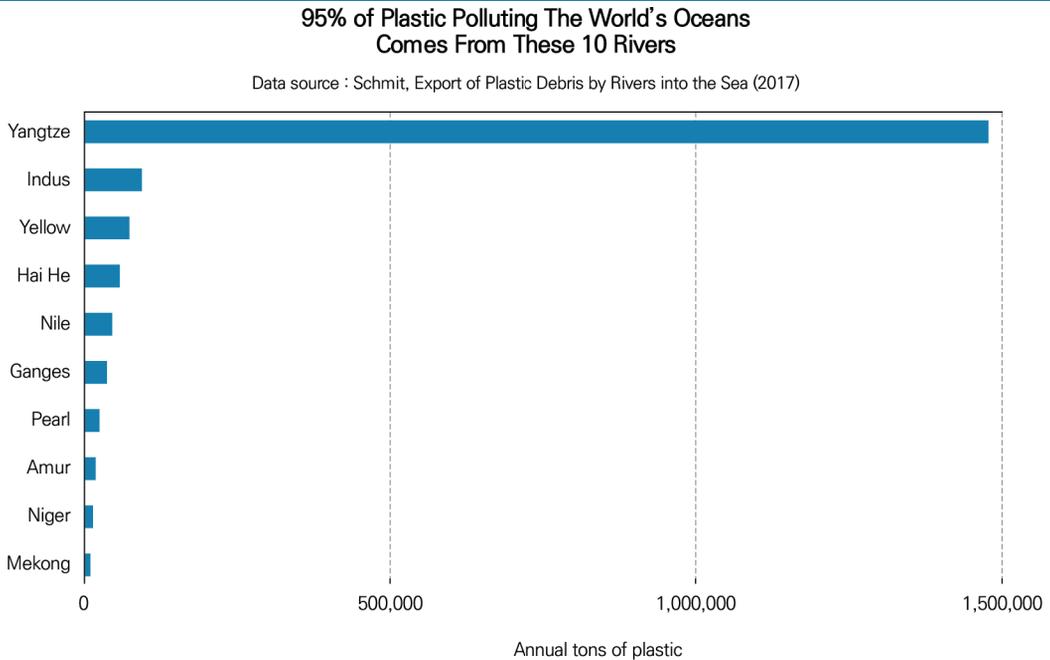
〈표 1.7〉 2010년 기준 플라스틱 폐기물 해양유입 상위 20개 국가

순위	국가	해안가 거주인구 (백만명)	폐기물 발생원 (kg/인·일)	플라스틱 폐기물 비율 (%)	투기되는 폐기물 비율 (%)	투기되는 플라스틱 폐기물 비율 (백만 톤/년)	투기되는 플라스틱 폐기물 비율(%)	해양유입 플라스틱 폐기물 (백만 톤/년)
1	중국	262.9	1.10	11	76	8.82	27.7	1.32-3.53
2	인도네시아	187.2	0.52	11	83	3.22	10.1	0.48-1.29
3	필리핀	83.4	0.5	15	83	1.88	5.9	0.28-0.75
4	베트남	55.9	0.79	13	88	1.83	5.8	0.28-0.73
5	스리랑카	14.6	5.1	7	84	1.59	5.0	0.24-0.64
6	태국	26.0	1.2	12	75	1.03	3.2	0.15-0.41
7	이집트	21.8	1.37	13	69	0.97	3.0	0.15-0.39
8	말레이시아	22.9	1.52	13	57	0.94	2.9	0.14-0.37
9	나이지리아	27.5	0.79	13	83	0.85	2.7	0.13-0.34
10	방글라데시	70.9	0.43	8	89	0.79	2.5	0.12-0.31
11	남아프리카	12.9	2.0	12	56	0.63	2.0	0.09-0.25
12	인도	187.5	0.34	3	87	0.60	1.9	0.09-0.24
13	알제리	16.6	1.2	12	60	0.52	1.6	0.08-0.21
14	터키	34.0	1.77	12	18	0.49	1.5	0.07-0.19
15	파키스탄	14.6	0.79	13	88	0.48	1.5	0.07-0.19
16	브라질	74.7	1.03	16	11	0.47	1.5	0.07-0.19
17	버마	19.0	0.44	17	89	0.46	1.4	0.07-0.19
18	모로코	17.3	1.46	5	68	0.31	1.0	0.05-0.12
19	북한	17.3	0.6	9	90	0.30	1.0	0.05-0.12
20	미국	112.9	2.58	13	2	0.28	0.9	0.04-0.11

자료: Geyer *et al.*, 2017.



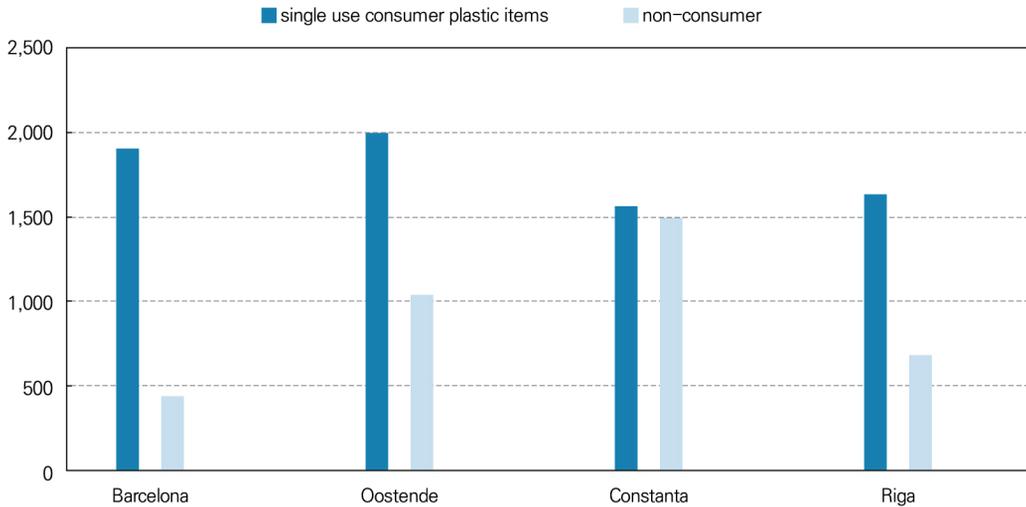
〈그림 1.20〉 전 세계 상위 10대 강에서 해양으로 연간 유입되는 폐기물의 양



자료: Schmidt *et al.*, 2017.

플라스틱 폐기물로 인한 해양오염에 관한 자료는 시민모니터링 활동에서부터 과학적 조사에 이르기까지 다양하지만, 조사방법이 상이하기 때문에 결과비교 및 해석의 어려움이 있다. 이러한 한계를 고려하여, 유사한 모니터링 방법을 적용하여 조사한 4개 지점(바르셀로나-지중해, 콘스탄타-흑해, 리가-발틱해, 오스텐데-북해)의 결과를 보면 다음과 같다(〈그림 1.21〉 참조). 해변가의 경우 1회용 플라스틱 소비재 제품(플라스틱 포장재 등)의 비율이 전체 플라스틱 폐기물의 54~59%에 달할 정도로 압도적으로 높다. 영국이나 중국 등의 조사결과에서도 플라스틱 폐기물의 비율이 매우 높는데 비해, 중국의 경우에는 양식장에서 사용되는 스티로폼 부표의 비율이 매우 높게 나타나는 것이 특징이다(UNEP, 2018).

〈그림 1.21〉 4개 지점(지중해, 흑해, 발틱해, 북해) 해변 폐기물 모니터링 결과



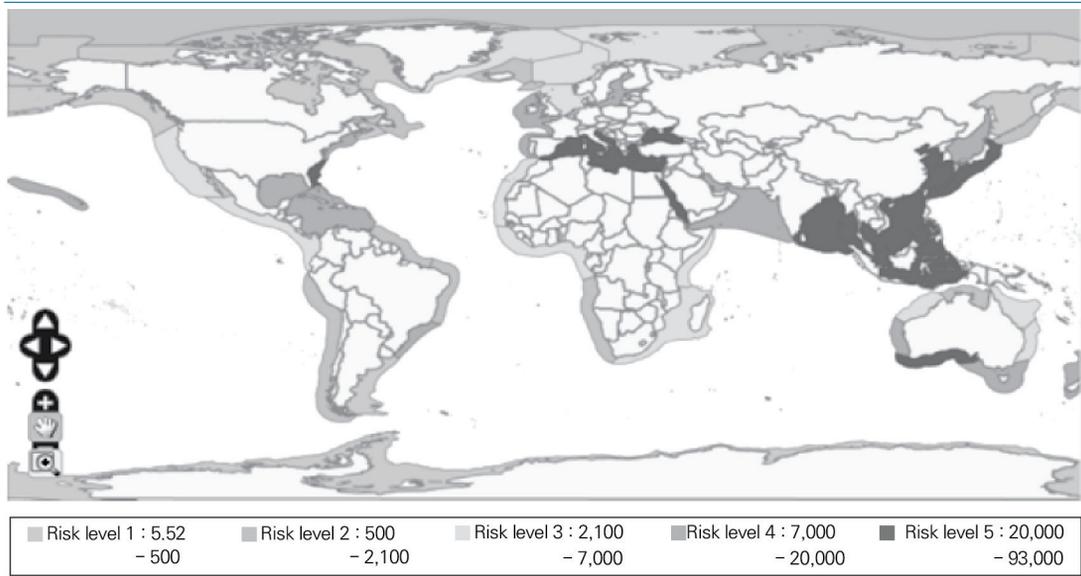
자료: UNEP, 2018.

해양으로 유입된 폐기물은 연안지역의 플라스틱 폐기물 오염도를 높이지만, 해류를 따라 떠돌면서 전 세계 해양을 오염시키고 있다. 특히 비중이 가벼운 플라스틱 폐기물(비중 1 미만의 PE, PP, EPS 등 재질의 플라스틱 폐기물)의 경우에는 바다표면을 떠다니면서 파편화되어 미세플라스틱 문제를 야기하고 있다.

해안가에서 해양으로 플라스틱 폐기물을 대량으로 배출하는 중국 및 동남아시아국가 연안의 경우에는 미세플라스틱의 농도가 가장 높은 고위험군에 속한다(〈그림 1.22〉 참조). 육상에서 배출된 플라스틱 폐기물은 해류를 따라 순환하면서 해양의 미세플라스틱의 농도를 높일뿐만 아니라 확산시키기도 한다(GESAMP, 2015). 북태평양 지대에 형성되어 있는 거대한 폐기물 지대(해양 내 플라스틱 폐기물 밀도가 높은 지대, Great Pacific Garbage Patch, GPGP)는 면적이 160만km²로 대한민국의 약 16배이며, 8만 톤의 플라스틱 폐기물이 있고, 1.8조 개의 미세플라스틱이 떠돌고 있는 것으로 추정된다 (Lebreton *et al.*, 2018).



〈그림 1.22〉 전 세계 해양 내 미세플라스틱 상대 분포 추정



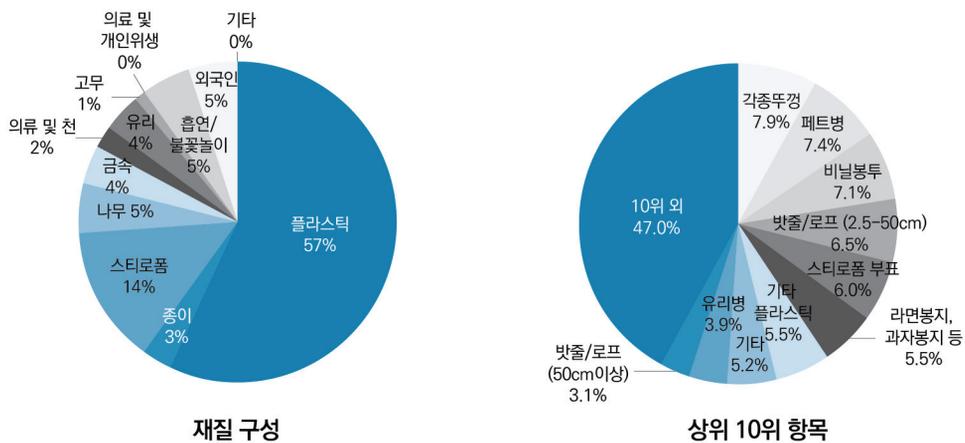
자료: GESAMP, 2018.

민간단체인 Orb Media가 2017년 세계 주요 권역별로 14개의 나라를 임의로 선정하여 159개 지역 수돗물 속 미세 플라스틱을 조사한 결과, 전체 83%에서 미세 플라스틱이 검출되었다. 미국은 94%, 레바논은 90% 이상이 오염된 것으로 확인되었다(Orb Media 홈페이지). 수돗물뿐만 아니라, 병에 들어 판매되는 생수에서도 미세 플라스틱이 발견되었으며, 일회용 및 PET로 만든 재사용 병과 유리병에서 미세 플라스틱이 발견되었다(Oßmann *et al.*, 2018). 유럽에서는 농업비료로 사용하기 위해 퇴비와 저온 살균 처리 슬러지를 사용하고 있는데, 하수 슬러지에서 플라스틱으로 제조된 개인위생용품과 가정용품에서 유래된 미세 플라스틱, 합성 섬유 등이 발견되었다는 보고가 있다. 육상에서도 플라스틱 폐기물의 매립에 의한 토양 오염뿐만 아니라, 미세 플라스틱을 포함한 비료에 의한 농지 오염이 일어나고 있으며, 실제 하수 슬러지를 비료로 사용한 토양에서 미세 플라스틱의 농도가 높다고 보고되고 있다(Zubris *et al.*, 2005).

다. 국내 플라스틱 및 미세플라스틱의 오염실태

우리나라의 해안폐기물 모니터링 결과에 따르면, 플라스틱류가 56%를 차지하고, 항목별로 보면 페트병과 비닐봉투, 마개, 밧줄, 스티로폼 부표 등이 비율이 높은 것으로 나타났다(이종명, 2018) (<그림 1.23> 참조).

<그림 1.23> 2016년 국내 해안폐기물 모니터링 결과



자료: 이종명, 2018.

한국해양과학기술원(Korean Institute of Ocean Science & Technology, KIOST)은 낙동강 하구와 인접한 거제 동부의 내·외해역의 21개 정점에서 해수표면의 미세플라스틱의 분포를 조사하였고, 전국 18개 해변가의 미세플라스틱 분포를 조사하였다. 조사결과 해수표면의 미세플라스틱 분포의 경우 거제 동부 연안의 풍도(abundance)가 외국의 결과와 비교했을 때 유사하거나 상대적으로 높은 값을 보였다.⁷⁾ 18개 해변의 플라스틱 폐기물 분포의 경우 중대형 플라스틱 폐기물은 외국과 비슷하였지만, 소형 플라스틱 폐기물의 풍도는 매우 높은 수준으로 나타났다. 이것은 다른 플라스틱에 비해 파편화가 매우 잘되는 어업용의 스티로폼 입자에 의한 영향으로 나타났다. 따라서 해양으로

7) 다만 이 결과는 지역별 차이보다는 시료 채취방법 차이에 따른 것일 수 있다.



배출되는 스티로폼을 수거하지 않는 한 풍화를 통해 끊임없이 파편화 될 수 있기 때문에 새로운 스티로폼 폐기물의 유입을 완전 차단한다고 하더라도 환경 중의 미세플라스틱은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다(한국해양과학기술원, 2015).

한국해양과학기술원의 국내 패류 내 미세플라스틱 잔류 실태 결과에 따르면, 굴에서 0.07 ± 0.31 개/g, 담치에서 0.12 ± 0.10 개/g, 바지락에서 0.34 ± 0.31 개/g, 가리비에서 0.08 ± 0.08 개/g이 검출되었으며, 바지락이 다른 3종의 패류에 비해 유의미하게 높은 값을 보였다. 검출된 미세플라스틱은 폴리에틸렌, 폴리스티렌, 폴리프로필렌, 폴리에스테르 4종이었다. 이번 조사결과는 국외에서 보고된 값보다는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 패류 4종의 체내에 함유된 미세플라스틱 양과 최근 3년간(2013~2015년) 국민 2만여 명을 대상으로 한 건강영양조사 상의 4종의 패류 평균 섭취량을 종합하면 패류 4종을 통한 1인당 연간 미세플라스틱 섭취량은 212개로 산정되었다(한국해양과학기술원, 2017).

환경부의 수돗물 미세플라스틱 실태조사결과에 의하면 국내 정수과정을 거치지 않은 원수 12곳 중에서 인천 수산정수장 1곳의 원수에서 1리터당 1개의 미세플라스틱이 검출되었고, 24개 정수장 중 서울 영등포, 인천 수산, 용인 수지 등 3개 정수장의 정수 과정을 거친 수돗물에서 1리터당 각각 0.4개, 0.6개, 0.2개의 미세플라스틱이 검출되었다(환경부 보도자료, 2017).

해양수산부가 목포대에 의뢰하여 2017년부터 2018년 초까지 국내에 시판 중인 천일염 내 미세플라스틱 잔류실태를 조사한 결과에 따르면 조사 대상 6개 천일염에서 모두 미세플라스틱이 검출되었다. 프랑스산 천일염에서는 100g당 최대 242개, 중국산 천일염에서는 17개, 국내산 천일염에서는 28개가 검출되었다(MBC 뉴스데스크, 2018년 9월 3일 보도).

참고문헌

- 강신호(2018), “플라스틱, 어떻게 할 것인가”, 제5차 시민정책포럼, 환경정의연구소, 한반도발전연구원, 녹색전환연구소, 시민환경연구소.
- 나근배(2011), 플라스틱 바로알기, (사)한국플라스틱포장용기협회.
- 미세 리발(2013), 역사상 가장 위대한 발명 150, 예담.
- 이종명(2018), “해양쓰레기 현황과 대응과제”, 해수욕장 이용문화 개선 토론회, 해양수산부, 해양환경공단.
- 진정일(2013), “우리는 지금 플라스틱 시대에 살고 있다”, GS칼텍스 미디어허브.
- 한국석유화학협회(2017), 2017 석유화학편람.
- 한국해양과학기술원(2015), 미세플라스틱에 의한 연안환경 오염 연구.
- 한국해양과학기술원(2017), 미세플라스틱 식품안전관리방안 연구.
- 한국환경공단(2018), 고형연료제품 제조사용수입 실적현황.
- 환경부(2017a), 2016년 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
- 환경부(2017b), 수돗물 중 미세플라스틱 함유실태 조사결과(환경부 보도자료).
- CISION(2015). Global Thermosetting Plastics Market - Segment by type, Industry and Geography - Trends and Forecasts.
- EUROMAP(2016). Plastics Resin Production and Consumption in 63 Countries Worldwide.
- Geyer, R., Jambeck, JR., & Law, KL.(2017). “Production, use, and fate of all plastics ever made”, Science Advance, Vol.3 No.7, e1700782, pp. 1~5.
- GESAMP(2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment.
- Jambeck, JR., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, TR., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. & Law, KL.(2015). “Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean”, Science, Vol.347 No.6223, pp. 768~771.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane,



- S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R. & Reisser, J.(2018). "Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic", Scientific Reports, Vol.8 No.1, pp. 1~15.
- OECD(2018). Improving Markets for Recycled Plastics.
- Oßmann, BE., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, SH. & Dicke, W.(2018). "Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water", Water Research, Vol.141, pp. 307-316.
- PlasticsEurope(2017). Plastics-the facts 2017, An analysis of European plastics production, demand and waste data.
- Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner. S.(2017). "Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea", Environmental Science & Technology.
- Thompson, RC., Olsen, Y., Mitchell, RP., Davis, A., Rowland, SJ., John, AWG., McGonigle, D. & Russell, AE.(2004). "Lost at sea: Where is all the plastic?", Science, Vol.304, pp. 838~838.
- UNEP(2018). Exploring the potential for adopting alternative materials to reduce marine plastic litter.
- World Economic Forum(2016), The New Plastics Economy Rethinking the future of plastics.
- Zubris KA V. & Richards, BK.(2005). "Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge", Environmental Pollution, Vol.138 No.2, pp. 201~211.
-



II

미세플라스틱의 독성 및 위해성 현황



II

미세플라스틱의 독성 및 위해성 현황

Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem

1. 해양 플라스틱 쓰레기의 종류 및 미세플라스틱 성분

해양으로 유입되는 쓰레기의 종류는 매우 다양하지만 플라스틱류가 주를 이루고 있고, 9개 북동 대서양 국가를 포함하여 전 세계의 해안에 버려진 쓰레기를 수집하여 조사한 결과, 수집된 쓰레기의 약 75%가 플라스틱류로 조사되었다(OSPAR Commission, 2007). 해양 플라스틱 쓰레기들은 주로 비닐 봉투, 식품 포장지, 컵, 플라스틱 패트병, 풍선 및 산업 관련 부품, 수산업 또는 양식업과 관련된 제품과 같은 소비재들이다(Gold *et al.*, 2013). 플라스틱 쓰레기가 바다로 유입되면 해류와 바람에 의해 장거리를 이동하다가 해류와 바람이 약해지는 5개 특정 지역(gyre)에 모이게 된다. 특히 북태평양의 쓰레기 지역[North Pacific Gyre 혹은 Great Pacific Garbage Patch(GPGP)]의 면적은 약 160만km²로 보고되고 있다. 놀랍게도 플라스틱 쓰레기는 바다 표면뿐만 아니라 해저 퇴적물과 해변 모래사장 등 전 세계 바다 전체에 분포하고 있고, 또 플라스틱 제조에 사용된 재료들인 폴리머의 종류도 아주 다양하다(〈표 2.1〉 참조). 이러한 플라스틱 재료들이 미세플라스틱의 주성분이 된다.



〈표 2.1〉 플라스틱의 종류와 밀도

폴리머 종류	밀도(g/mL)	비고
Polyolefins		
Polypropylene(PP)	0.90	부유성 해양폐기물의 80-90%
Polyethylene(PE, LDPE, HDPE)	0.92-0.96	부유성 해양폐기물의 5-15%
Polystyrene(PS)	≤1.05	폼(foam) 형태로 확장(예, 스티로폼)
Acrylonitrile-butadiene-styrene(ABS)	1.07	
Nylon	1.09	
Polycarbonate	1.36	
Cellulose acetate	1.42	
Polyvinyl chloride(PVC)	1.4	
Polyethylene terephthalate(PET)	1.55	음료수병

주: 1) 플라스틱의 밀도는 가공조건에 따라 달라질 수 있음

2) 해수의 밀도: 온도와 염도에 따라 보통 약 1.02-1.03g/mL

자료: Engler, 2012.

플라스틱은 다양한 밀도로 제조되기 때문에 물보다 밀도가 낮은 플라스틱은 표면에 뜨고, 물보다 밀도가 높은 플라스틱은 가라앉는다. 부유성 해양 플라스틱 쓰레기 중에는 주로 PP(요구르트 용기, 음료수병 등)과 PE(플라스틱 쇼핑백, 음료수 걸이 등)로 제조된 플라스틱 쓰레기가 대부분을 차지한다. 그리고 고밀도 플라스틱 쓰레기는 해저로 가라앉고, 미생물이 플라스틱에 부착하여 플라스틱 sink가 되기도 한다(Engler, 2012).

2. 생태계에서의 미세플라스틱

Carpenter와 Smith(1972)가 북대서양의 플라스틱 쓰레기들이 생태학적 위협이 될 수 있다는 연구 결과를 발표한 이래 해양 플라스틱에 관한 연구가 최근에 활발하게 수행되고 있다. 그리고 국내에서도 환경부, 해양수산부, 식품의약품안전처, 한국해양과학기술연구원, 해양수산과학기술진흥원, 한국환경정책평가연구원, 한국해양쓰레기연구소, 환경운동연합, (사)바다살리기국민운동본부, (사)동아시아바다공동체오션 등 다양한 정부 기관, 정부 출연 연구소, 민간 연구소, 환경보호단체 외 여러 대학에서 플라스틱 쓰레기 및 미세플라스틱의 위해성에 대한 연구들이 진행되고 있다. 이들 보고서 따르면 현재 미세플라스틱이 생태계에 미치는 영향에 관한 연구는 다섯 가지로 분류하는데, ① 퇴적물에서의 미세플라스틱, ② 플랑크톤 샘플 내의 미세플라스틱, ③ 무척추동물의 미세플라스틱 섭취, ④ 척추동물의 미세플라스틱 섭취, ⑤ 오염물질과 미세플라스틱의 상관성 등이다(박정규·간순영, 2014; 홍상희, 2015).

가. 해변(모래사장)과 퇴적물에서의 미세플라스틱

미세플라스틱은 세계 각지의 해변뿐만 아니라 갯벌의 퇴적물에서도 발견되고 있다(Juliana *et al.*, 2014). Thompson *et al.*(2004)은 영국의 18개 해변, Browne *et al.*(2010)은 영국 타마 해안의 퇴적물에서 1mm 이하의 초미세플라스틱이 존재하고 있음을 보고하였고, Costa *et al.*(2010)은 브라질 북동부에 위치한 Boa Viagem 해변의 경우 관광지에 버려진 플라스틱으로 인해 1차와 2차 플라스틱 쓰레기가 발생하고 있다고 보고했다. 그 외에도 일일이 보고가 되지 않는 않지만 전 세계에 존재하는 해변(모래사장)에 미세플라스틱이 퇴적되어 있는 것은 자명한 사실이다. 그렇기 때문에 이들을 포함한 전 세계 관련 연구자들은 한 목소리로 해양으로 유입되는 플라스틱의 양을 줄이는 것이야말로 미세플라스틱의 문제를 해결하는 최선의 방법이라고 제시하였다.



나. 해양 플랑크톤 내의 미세플라스틱

바다 표면에서 수집된 플랑크톤 샘플을 분석하여 바다에 떠다니는 플라스틱의 양과 미세플라스틱의 존재 유무를 연구한 결과들이 1970년대 초부터 보고되었다(Carpenter & Smith, 1972). 1970년대 초기 북대서양의 해양 표면에서 채취한 모자반(*Sargassum fulvellum*) 군집 샘플에서 많은 양의 폴리스티렌 플라스틱 펠릿(크기 1~2mm)이 발견되었다. 이것은 플라스틱 쓰레기가 1970년대 이전부터 바다에 존재하였으며, 플랑크톤 샘플에서 채취된 플라스틱 펠릿의 양이 증가하고 있음을 암시한다.

그 후 플랑크톤 샘플에서의 미세플라스틱에 관한 여러 연구 결과에 의하면 플라스틱의 양과 크기가 해양에 따라 다르게 나타났다. Law *et al.*(2010)은 북대서양 서부와 카리브해(북위 22~38도)에 있는 쓰레기 수렴대에는 해양 플라스틱이 대량으로 모여 있으며, 이곳에서는 주로 10mm 이하의 작은 플라스틱이 88%를 차지하는 것으로 나타났다. 그러나 적도 근처의 대서양에서는 암초어류(reef fish)와 새우, 가재, 게 등과 같은 십각류(Decapoda) 유충에서뿐 아니라 해저 근처에서도 플라스틱 쓰레기(5mm 이하 크기가 85%)가 발견되었다(Ivar do Sul *et al.*, 2013). 그리고 Shaw와 Day(1994)에 따르면, 1980년대에 수행된 연구에서도 태평양에 다양한 플라스틱 쓰레기들이 대량으로 존재함을 보고하였다.

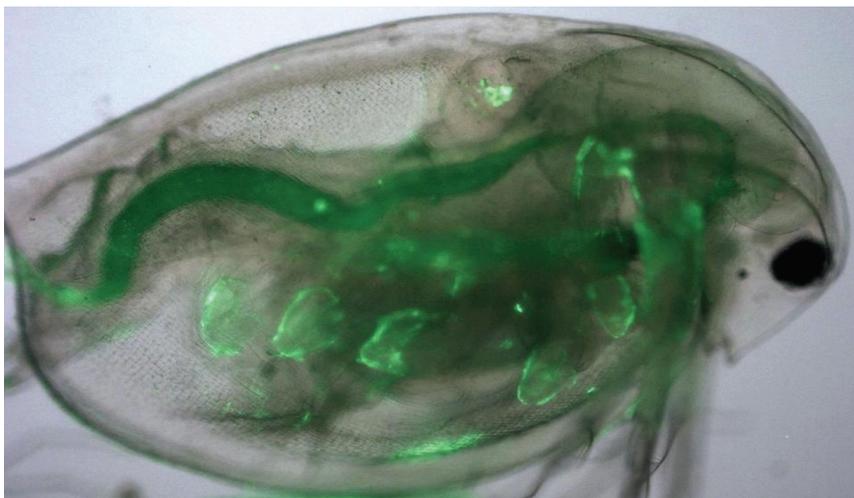
다. 해양 및 담수 무척추동물들의 미세플라스틱 섭취

해양 무척추동물의 미세플라스틱 섭취에 관한 연구는 주로 통제된 실험실에서 실시된다. Thompson *et al.*(2004)은 해양 무척추동물이 미세플라스틱을 섭취하는지를 조사하기 위해 미세플라스틱을 단각류, 갯지렁이와 따개비들에 섭취 시킨 결과, 미세플라스틱이 섭취되는 것을 관찰하였다. 이 외에도 홍합(*Mytilus edulis*)은 미세플라스틱 섭취와 관련한 연구에서 가장 일반적으로 활용되는 생물이다. Browne *et al.*(2008)은 홍합이 미세플라스틱(1mm 이하)을 12시간 이내에 섭취하고 또 조직 내에 미세플라스틱이 축적되는 것을 보고하였다.

또 다른 생물은 해삼류(Holothuria)가 활용되는데, 퇴적물이나 부유물이 많은 곳에서 채취된 해삼이 나일론과 PVC 조각(0.25~15mm)을 섭취함을 확인하였다. 따라서 사람이 직접 플라스틱을 먹지 않더라도 이러한 해삼 섭취는 유기오염물질이 인체에 도달하는 새로운 경로가 될 수 있다고 제시하였다.

담수 생태계의 대표적인 수서 무척추동물인 물벼룩(Daphnia)의 체내에 미세플라스틱이 관찰되었다(〈그림 2.1〉 참조). 물벼룩의 먹이는 작은 녹조류이고, 물벼룩은 물고기의 좋은 먹이임을 고려할 때 물벼룩을 통한 미세플라스틱의 이동 경로 또한 우려할 사항이다. 국내의 담수 생태계에서 미세플라스틱을 조사한 결과 유리물벼룩(*Daphnia galeata*) 알주머니까지 미세플라스틱이 침투해 생식 및 발달을 저해하는 현상을 발견했다고 보고했다(Cui *et al.*, 2017). 특히 미세플라스틱에 노출된 유리물벼룩 알의 83% 가량이 사망했고, 체내 지방 저장을 조절하는 지방소립의 개수가 알 형성 전후로 27~42% 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 물벼룩의 지방소립이 생식의 주요한 에너지원인 만큼, 지방소립의 개수 감소가 주요 독성 기전일 것이라고 추론했다.

〈그림 2.1〉 물벼룩 내장에 들어있는 미세플라스틱



주: 내장 채로 먹는 수산물을 통해 미세플라스틱(형광을 띤 초록색 물질)과 미세플라스틱에 함유된 유기오염물질이 몸속으로 고스란히 들어올 수 있다.

자료: Orb Media, 2017.



라. 해양 척추동물의 미세플라스틱 섭취

경골어류에 의한 미세플라스틱 섭취가 발견된 이후 유충과 치어에서도 미세플라스틱이 발견되는 등 미세플라스틱과 해양생물 사이의 상호작용에 대한 연구가 시작되었다. Boerger *et al.*(2010)에 따르면 최근 GPGP에 서식하는 플랑크톤 섭식 어류(planktivorous fish)의 35%에서 위장에 미세플라스틱이 발견되면서 척추동물의 미세플라스틱 섭취에 대한 우려가 심해지고 있다고 보고하였다.

지난 40여 년 동안 바닷새(seabird)들의 플라스틱 섭취량과 잔류 성분을 조사한 결과에 의하면, 이들이 섭취한 플라스틱은 대부분 육안으로 확인이 가능하고 macroplastic(5mm 이상)과 미세플라스틱(5mm 이하)이 함께 존재하고 있는 것으로 나타났다. 척추동물에 의한 미세플라스틱 섭취의 문제는 미세플라스틱에 흡착된 유기오염물질이 이들의 몸속에 잔류할 수 있기 때문이다. 실제로 Teuten *et al.*(2009)과 Tanaka *et al.*(2013)의 연구에 따르면, 습새(*Calonectris leucomelas*)와 쇠부리습새(*Puffinus tenuirostris*)에서 플라스틱으로부터 유래한 유기오염물질들이 검출되었다고 보고하였다.

마. 미세플라스틱과 유기오염물질의 상관성

최근에는 미세플라스틱의 오염물질 흡착에 관한 연구들이 다양하게 진행되고 있다. 일본의 해안에서 채취한 PP 플라스틱 스크랩에는 바닷물로부터 흡착된 PCBs, DDE 및 노닐페놀 등이 다량으로 함유되어 있는 것으로 나타났다(Mato *et al.*, 2001; Ogata *et al.*, 2009). 또한 북태평양의 GPGP와 캘리포니아 해변 근처에서 수거된 플라스틱 쓰레기에 PCBs, PAHs 및 DDT 등이 흡착되어 있다는 연구 결과가 보고되었다(Rios *et al.*, 2007). Gouin *et al.*(2011)도 소수성 유기오염물질들이 플라스틱 쓰레기에 흡착된다고 보고하였다. 플라스틱 종류별 유기오염물질의 흡착량을 파악하기 위한 연구도 진행되었는데, Rochman *et al.*(2013)은 HDPE, LDPE 및 PP가 PET와 PVC보다 PAHs와 PCBs를 더 많이 흡착한다고 하였고, 그 결과 HDPE, LDPE 및 PP를 포함한 플라스틱 제품은

PET와 PVC를 포함한 제품보다 해양 동물에 더 큰 위해를 줄 수 있다고 보고되었다.

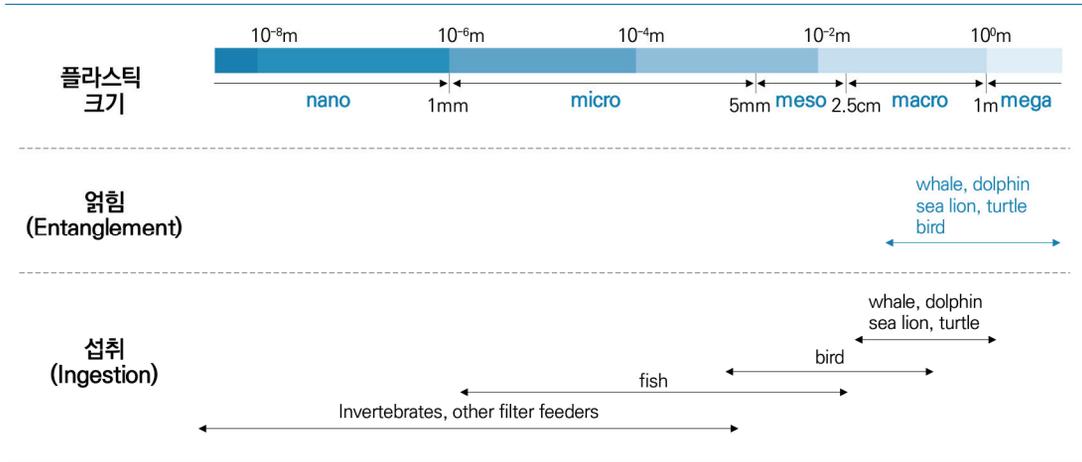


3. 해양 미세플라스틱의 생태계 위해성

해양 미세플라스틱은 두 가지 관점에서 해양 생태계에 심각한 위해를 줄 수 있다. ① 생태계 영향의 확대와 ② 독성물질들의 이동 매개체로서의 역할이다. 밧줄, 그물, 비닐봉지 등과 같은 대형 플라스틱 쓰레기들은, 상대적으로 해양생물의 ‘얽힘(entanglement)’ 영향이 ‘섭취(ingestion)’에 비하여 큰 데 반해, 미세플라스틱의 경우 ‘섭취’를 통해 생태계에 영향을 미친다. 플라스틱 입자의 크기가 작아지면 이들을 섭취하고 영향을 받는 생물이 범위가 해양포유류, 조류에서부터 해양 무척추동물까지 크게 확대될 수 있다(<그림 2.2> 참조).

북태평양 환류대에서 채집한 어류, 북유럽 풀마슴새(*Fulmarus glacialis*), 바다쇠오리류(Alcidae), 브라질 마젤란 펭귄(Spheniscidae)들의 위장에서 미세플라스틱 조각이 확인되었으며, 유럽 연안의 바닷가재, 홍합류 등의 무척추동물의 체내에서도 미세플라스틱이 확인되었다. 실제, 해양의 플라스틱 쓰레기의 크기가 작아지면서 이들을 섭취하는 해양 생물 종의 숫자는 꾸준히 증가할 것이고, 나아가 나노미터 크기로 작아질 경우 생물에 미치는 독성학적 기전과 영향에 관한 패러다임이 다시 변할 수 있다. 한국해양과학기술원 실시한 가속풍화실험 결과 스티로폼에서 나노입자 크기의 초미세 미세플라스틱이 생성될 수 있음이 밝혀졌다. 그러나 자연 풍화 환경에서 초미세 플라스틱이 생성되고 또 실제로 해양환경에 존재하는지 여부를 결정하기 위해서는 체계적인 과학적 연구가 필요하다.

〈그림 2.2〉 플라스틱 해양쓰레기의 크기에 따른 생물 영향



주: 크기가 큰 플라스틱 쓰레기는 '얽힘'의 위험이 높고 크기가 작은 쓰레기일수록 '섭취'에 의한 피해가 증가된다.

자료: GESAMP, 2015.

미세플라스틱에 함유된 오염물질은 그 기원에 따라 흡착성 유기오염물질과 플라스틱 첨가제 등 두 가지 유형으로 나눌 수 있다. 흡착성 유기오염물질은 플라스틱 자체에 함유되지 않았으나, 플라스틱(입자 또는 제품)이 해양으로 유입된 뒤 흡착된 유기오염물질을 통칭한다. 플라스틱은 높은 소수성(hydrophobicity)을 갖고 있어 소수성이 강한 잔류성 유기 오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs)에 대해 높은 흡착특성을 보인다. 크기가 작아진 미세플라스틱은 큰 플라스틱에 비해 비표면적이 커져 주변 해수 중에 존재하는 POPs를 증량대비 더 많이 흡착하게 된다. 플라스틱 입자는 주변 해수에 비해 POPs를 $10^5 \sim 10^6$ 배의 높은 농도로 축적할 수 있다(Mato *et al.*, 2001).

플라스틱에는 제조과정에서 성형의 용이성과 플라스틱의 기능성을 향상하기 위해 다양한 화학물질이 첨가되어 있다. 즉, 폴리머의 기본 골격 사이에 가소제, 난연제, 열·자외선 안정제, 산화방지제 등의 다양한 화학물질이 혼합되어 있으며, 플라스틱 제품이 사용되는 과정이나 분해되는 과정에서 이들이 주변 환경으로 용출될 수 있다(Rochman *et al.*, 2013). 이와 같이 흡착성 또는 첨가성 유기오염물질이 함유된 미세플라스틱을 해양생물이 섭식하였을 경우, 미세플라스틱에 의한 물리적인 영향과 더불어 미세플라스틱으로부터 유기오염



물질을 흡수하여 2차적인 영향을 받을 수 있다. 그 결과 ‘미세플라스틱이 해양 생물에 독성물질을 전달하는 매개체이며 해양생물의 건강에 영향을 미칠 수 있다’는 가설을 규명하기 위한 연구들이 최근 활발히 추진되고 있다.

그러나 미세플라스틱이 독성물질의 전달자가 될 수 있고 생물의 생리적 기능에도 영향을 미칠 수 있다는 여러 편의 연구논문이 발표되었음에도 불구하고(Browne *et al.*, 2008; Browne *et al.*, 2010), 아직까지 실제 환경에서 명확하게 증명된 바 없다. 그렇기 때문에 미세플라스틱의 위해성에 대해 회의적인 학자들도 있다. 이들은 해양생물에 미세플라스틱이 미치는 영향은 미약하며 오히려 독성물질을 제거하는 역할을 할 수 있다고 주장한다(Koelmans *et al.*, 2013). 미세플라스틱이 해양생태계에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구가 2010년 이후 급물살을 타고 있으나, 대부분이 실험실에서 확인하는 수준이며, 현재까지 구축된 정보 역시 매우 미약한 수준이다. 무엇보다도 실제 환경에서의 영향이 규명되어야 하며, 이를 근거로 미세플라스틱의 위해성이 평가되어야 할 것이다. 2015년 5월부터 해양수산부의 ‘해양수산환경기술개발사업’의 일환으로 ‘해양 미세플라스틱에 의한 환경위해성 연구’ 사업을 한국해양과학기술원이 주관하고, 안전성평가연구소 (Korea Institute of Toxicology)가 협동기관으로 참여하여 시작되었으며, 2020년까지 6년 동안 연구 과제가 진행되고 있다. 이 연구과제의 최종 목표는 ‘미세플라스틱의 오염과 영향을 평가하기 위한 요소기술을 개발하고 우리나라 해양환경에서 미세플라스틱에 의한 환경위해성을 규명하는 것’이다. 환경위해성 평가의 기본 틀에 따라, 노출평가(exposure assessment)와 영향평가(effect assessment)를 위한 요소기술을 우선적으로 확립하고 확립된 기술을 바탕으로 국내 연안해역의 미세플라스틱 오염평가를 시행하여 최종적으로 우리나라 해양환경의 미세플라스틱에 의한 위해성 수준을 제시할 예정이다. 중점 연구개발 분야로서 오염평가, 유입·이동·확산, 풍화(미세화), 생물영향을 설정하고 있다. 연안해역과 외해역, 해변과 부유를 아우르는 국내 해양환경 전반에 걸친 미세플라스틱 오염수준과 생물축적 현황을 규명함으로써, 환경 중 미세플라스틱의 노출수준과 실태를 종합적으로 평가할 것이다.

4. 미세플라스틱에 의한 생태계와 인간의 피해 상황

가. 물리적 피해

여러 형태의 플라스틱 쓰레기는 해양환경에 살고 있는 생물에 큰 위협이 된다. 가장 눈에 띄는 영향은 플라스틱 쓰레기 섭취와 얽힘으로 인한 죽음인데, 이러한 형태의 어업을 유령어업(ghost fishing)이라고 한다. 이것은 해양 생물이 낚시 어망, 어업 활동이나 태풍으로 인해 손실된 어망이나 쓰레기 그물에 갇혀 죽게 되는 것을 말한다. 작은 해양생물에서 고래에 이르기까지 생물체에서 플라스틱 섭취가 관찰되며, 이로 인해 질식, 기아 및 식욕감퇴, 소화 불량 및 내부 장기 손상 등과 같은 여러 가지 나쁜 영향이 나타나고 있다. 매년 수백만 마리의 바닷새, 바다거북, 물고기 및 해양 포유동물들이 플라스틱 조각을 섭취한 뒤 소화기 질환으로 죽어가고 있고 매년 3만 마리의 북방 바다표범(Phocidae)들이 그물에 걸려 질식사하고 있다. 어류뿐만 아니라 바다거북 종의 86%, 바닷새 종의 44%, 해양포유류의 43%를 포함하여, 적어도 267종의 해양생물이 플라스틱에 의해 영향을 받고 있는 것으로 나타났다(Laist, 1997). 매우 다양한 해양 생물들이 미세플라스틱을 대량으로 섭취할 수 있기 때문에 미세플라스틱은 해양환경에 아주 큰 잠재적 위협요인으로 작용하고 있다. 2011년 미국 UC-San Diego의 Scripps Institution of Oceanography 연구팀의 보고에 의하면 북태평양의 GPGP에서 포획한 27종 141마리의 어류 중 9.2%의 생선 위장에서 다양한 종류의 플라스틱 조각들을 발견하였으며, 이들 어류들이 연간 약 12,000~24,000톤의 플라스틱을 삼키고 있는 것으로 평가되었다. 이렇게 피해를 받고 있는 어종의 수는 예측하기 어려우며, 이로 인한 피해는 과소평가되고 있다.

나. 화학적 피해

미세플라스틱으로 인한 피해는 물리적 피해뿐만 아니라 화학적 피해를 일으킬 수 있다. 첫째, 여러 종류의 화학물질들이 미세플라스틱 표면에 흡착될 수 있으며, 그 결과 미세플라스틱이 먹이사슬을 통하여 상위 단계의 생물로 전달될 수 있다. 미세플라스틱은 산업, 농업, 살충제 등에 널리 사용되는 PCBs, DDT, 중금속

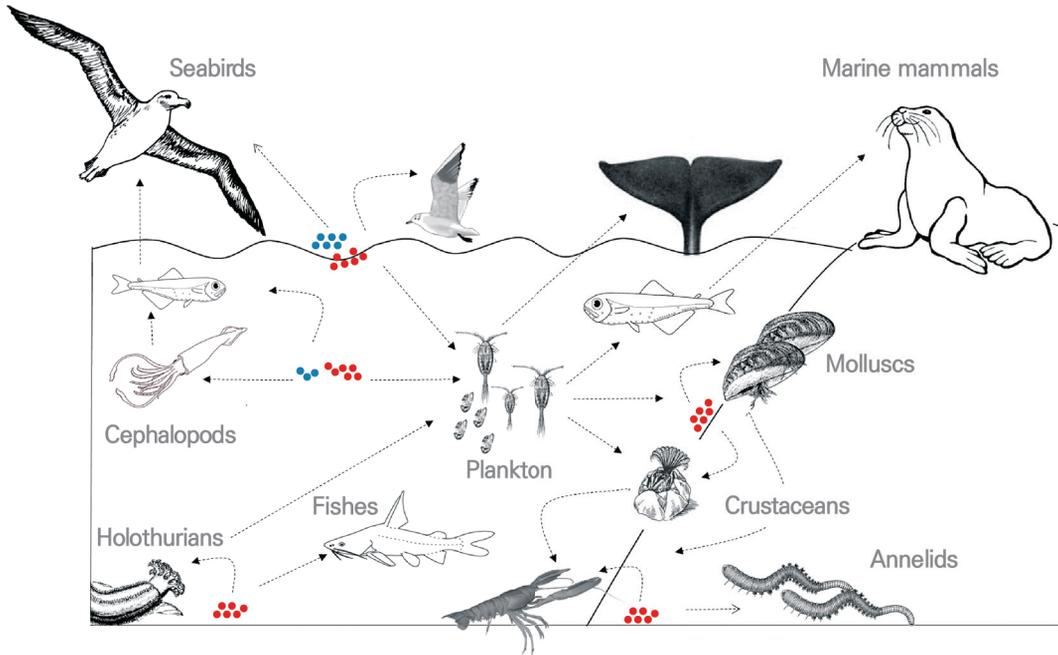


등과 같은 소수성 물질을 흡착할 수 있는 것으로 밝혀졌다(Mato *et al.*, 2001). 그리고 Betts(2008)의 연구결과에 따르면, 미세플라스틱에 흡착된 PCBs 농도는 주변 물에 함유된 PCBs 농도보다 약 1백만 배 더 높았음을 보고하였다. 또한 오래된 플라스틱이 새 플라스틱보다 오염물질을 더 많이 흡착할 수 있다고 하였다(Engler, 2012). 플라스틱 제조에 사용되었던 PCBs, DDT 및 노닐페놀과 같은 첨가제들은 장기간 환경에 잔존할 수 있으며, 소수성과 반휘발성(Semi-Volatile) 외에도 생체축적(bioaccumulation) 특성으로 인해 오랫동안 환경에 남아있고 또 쉽게 이동할 수 있는 독성물질이다. 특히 POPs 물질의 가장 중요한 특징 중 하나는 유기체에 축적될 수 있고, 그 농도가 먹이 사슬을 통해 상위 수준으로 옮겨 감에 따라서 점차적으로 증가한다는 것이며, 이러한 과정을 생체축적이라고 한다. 이것은 환경에서 적은 농도가 검출되더라도 오염 물질이 영양 단계에서 점진적으로 전이되고 또 축적되기 때문에 잠재적인 오염원이 될 수 있음을 시사한다(Moore *et al.*, 2002; Ilyina & Tatjana, 2006). 하위 단계의 해양생물이 POPs들이 흡착된 미세플라스틱을 섭취한 뒤 먹이 사슬의 상위 단계로 갈수록 POPs들이 고농도로 축적된다. 그리고 상위 단계의 해양생물의 경우 <그림 2.3>에서 볼 수 있듯이 낮은 밀도로 인해 해수 표면에 부유하는 미세플라스틱들을 직접 섭취할 수도 있다. 이로 인해 생식기계 장애나 죽음을 초래할 수 있고 또 질병 위험을 증가시키거나 호르몬 이상을 초래하기도 하고, 최종에는 인간에게까지 그 악영향을 미칠 수 있다(Ryan, 1988; Lee *et al.*, 2001).

둘째, 미세플라스틱에 함유된 첨가제가 용출되는 것이다. 플라스틱 제품을 제조할 때 플라스틱의 특성을 살리기 위해 비스페놀 A, 가소제(프탈레이트), 브롬화 난연제(BFRs) 등과 같은 다양한 종류의 첨가제들이 첨가될 수 있다. 이들 첨가제들은 해양환경에서 플라스틱으로부터 용출될 수 있으며 해양생물이 이러한 물질들을 섭취하면 내분비계 교란물질로 작용하여 <그림 2.3>과 같이 먹이사슬을 통해 생체축적이 된다. 섭취한 내분비계 교란물질이 먹이사슬을 통해 각 단계에서 흡수되는 정도(농도)와 전이되는 효율성에 대한 기전은 아직까지 알려지지 않았고, 또 해양생태계에 미치는 잠재적인 피해에 대해서도 계량화되지 않았기

때문에, 이 부분에 대한 추가 연구가 필요하다(Gold *et al.*, 2013).

〈그림 2.3〉 먹이사슬을 통한 미세플라스틱의 생체축적



- 주: 1) 파란색 = 해수보다 밀도가 낮은 폴리머(PE, PP 등)
- 2) 붉은색 = 해수보다 밀도가 높은 폴리머(PVC 등)
- 3) 화살표는 가정된 미세플라스틱의 생체축적 경로를 나타냄

자료: Juliana *et al.*, 2014.

다. 수돗물과 생수 속의 미세플라스틱

미세플라스틱의 잠재적 위해에 관한 연구는 대부분 해양생태계의 오염에 관한 것이었다. 그러나 최근에는 하천수도 미세플라스틱에 오염된 것으로 밝혀졌으며(Erkes-Medrano *et al.*, 2015), 2017년 9월 미국의 비영리 언론기관 Orb Media는 미네소타대학교 공중보건대학과의 공동조사를 통하여 미국과 유럽, 아시아 등의 14개 나라 수돗물 샘플 159개 중 83%에서 미세플라스틱이 검출됐다고 보고했다. 이로 인해 우리나라 환경부는 2017년 9월 7일 국내 수돗물 오염 실태를 파악하기 위한 조사를 추진할 계획이라고 밝혔다.



그러나 수돗물만은 아니다. 그 수돗물로 씻고 조리한 음식, 하천에서 서식하는 물고기, 하천수를 농업용수로 사용하여 재배한 작물 등이 모두 미세플라스틱 오염에서 벗어날 수 없다. 바다에서 나는 조개, 새우, 게, 생선 등 물고기나 김, 미역 등 다양한 해양수산물도 마찬가지다. 사실상 거의 모든 식재료와 음료수에도 미세플라스틱이 오염되었다고 봐야 할 것이다. 그렇기 때문에 언제부터인가 우리는 미세플라스틱과 그것에 흡착된 유해화학물질을 함께 먹고 마시고 있는 실정이다.

그리고 전 세계인이 매일 마시는 생수에도 미세플라스틱이 함유되어 있다는 놀라운 결과가 최근에 발표되었다. 세계적인 제품인 아쿠아피나[®], 다사니[®], 에비앙[®], 네슬레퓨어라이프[®], 생펠레그리노[®] 외에 아쿠아[®](인도네시아), 비스렐리[®](인도), 에푸라[®](멕시코), 게를스타이너[®](독일), 미날바[®](브라질), 와하하[®](중국) 등 나라별 대표 생수 속에 눈에 보이지 않는 미세한 크기의 플라스틱 성분이 검출되었다는 연구 결과가 미국 프리도니아 소재 뉴욕주립대 지구환경과학과 교수 연구진에 의해 발표되었다(BBC 뉴스, 2018년 3월). 이들은 미국 비영리 언론기관 Orb Media의 의뢰를 받아, 중국, 미국, 브라질, 인도, 인도네시아, 멕시코, 레바논, 태국, 독일 등 9개국에서 판매되는 11개 브랜드 생수 259개를 대상으로 연구를 진행한 결과, 조사 대상 생수 중 93%에서 미세플라스틱이 발견되었다. 주목할 사실은 생수 1리터당 사람 머리카락 굵기(평균 100 μ m)보다 큰 미세플라스틱이 평균 10.4개, 머리카락 굵기보다 작은 미세플라스틱은 평균 325개가 확인되었다는 것이다.

라. 먹이 사슬 속의 미세플라스틱

미세플라스틱은 작은 크기 때문에 생태계뿐만 아니라 사람에게도 전혀 예상치 못하게 직접적인 문제를 야기할 수 있다. 미세플라스틱은 크기가 작기 때문에 동물성 플랑크톤과 같은 매우 작은 유기체를 비롯하여, 다양한 식이 패턴을 가진 유기체 몸속에서 미세플라스틱이 발견된다. 우리나라도 예외가 아니어서, 한국해양과학기술진흥원의 ‘해양 미세플라스틱에 의한 환경 위해성 평가’(한국해양과학기술진흥원, 2016)에 따르면, 경남 거제와 마산 일대의 양식장과

근해에서 잡은 굴, 담치, 게, 갯지렁이 가운데 97%인 135개 개체의 몸속에서 미세플라스틱이 발견되었다(해양수산환경개발사업 중간평가, 해양 미세플라스틱에 의한 환경 위해성 연구, 한국해양과학기술진흥원, 2016. 12. 26.). 이는 크기가 큰 플라스틱 조각뿐만 아니라 생태계 먹이사슬 바닥에서부터 광범위하게 미세플라스틱의 오염이 진행되고 있음을 보여준다.

유엔에 소속된 해양환경보호 과학 전문가그룹(GESAMP)이 2016년에 발간한 보고서 ‘해양환경 속 미세플라스틱의 발생원, 동태와 영향’(GESAMP, 2016)을 보면, 해양생물의 몸속으로 들어간 미세플라스틱 대부분은 소화기관에 머물다 배설된다. 따라서 내장을 제거하고 먹는 물고기를 통해서 인간이 미세플라스틱에 노출될 가능성은 크지 않지만, 내장까지 모두 먹는 홍합, 굴, 새우 등의 섭취를 통해 미세플라스틱에 오염될 가능성이 높다고 예상된다. 이 연구에서 유럽인은 홍합과 굴 섭취를 통해서 해마다 평균적으로 1만 1,000개의 미세플라스틱을 먹는다고 한다. 어패류와 물고기의 내장까지 즐겨 먹는 한국인의 식습관을 고려하면 국내의 상황은 더욱 나쁠 것이라고 예상이 된다. 뿐만 아니라, 나노미터(10억분의 1m) 수준의 작은 미세플라스틱은 세포벽을 통과해 내장 이외의 조직까지 침투한다고 하니 내장을 제거하더라도 일부는 여전히 몸속에 남아 있을 가능성이 있다. 유엔환경계획(UNEP)은 2016년 5월 보고서 ‘해양 플라스틱 쓰레기와 미세플라스틱’(UNEP, 2016)에서 “나노 크기의 미세플라스틱은 태반과 뇌를 포함한 모든 기관 속으로 침투할 수도 있다”는 연구 결과를 소개하고 있으며, 실제로도 내장 이외의 체내 조직에 박혀있는 미세플라스틱이 이미 관찰되고 있다.



5. 플라스틱 성분별 독성 및 위해성

지금까지 플라스틱 쓰레기에서 발생하는 미세플라스틱의 위해성에 대해 전반적인 내용을 기술하였다. 여기서는 각종 미세플라스틱의 제조 과정에 사용된 여러 성분들의 용도 및 독성에 대해 기술하고자 한다. 독성 중 발암성여부는 국제연합 세계보건기구(WHO)의 산하인 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 분류한 바를 참고하였다(2018년 7월 30일 기준). 확실히 사람에게 암을 일으키는 물질은 1군(carcinogenic to humans) 120종, 사람에게 암을 일으킬 가능성이 높은 물질은 2A군(probably carcinogenic to humans) 82종, 사람에게 암을 일으킬 가능성이 있는 물질은 2B군(possibly carcinogenic to humans) 302종, 사람에게 암을 일으키는 것으로 분류가 되지 않는 물질은 3군(not classifiable as to its carcinogenicity to humans) 501종, 사람에게 암을 일으키지 않을 물질은 4군(probably not carcinogenic to humans) 1종이다. 미국 국립환경보건과학연구소(National Institute of Environmental Health Sciences, NIEHS) 산하의 독성물질국가관리프로그램(National Toxicology Program, NTP)은 IARC와는 다르게 두 군으로 분류하는데 ‘인체발암물질로 알려진 군(known to be human carcinogen)’ K군 62종과 ‘인체발암물질로 충분히 예측되는 군(reasonably anticipated to be human)’ R군 186종으로 분류한다. 그리고 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서는 인체 발암물질로 확인된 A1군, 인체 발암물질로 의심되는 A2군, 동물에서는 발암물질이지만 인체와의 관련성이 알려지지 않은 A3군으로 분류한다.

가. 폴리에틸렌(Polyethylene, PE)

- 용도: 전기 절연체로서 아주 높은 인성과 내화학성을 가지는 플라스틱으로 고밀도(high density), 저밀도(low density), 선형저밀도(linear low density) 폴리에틸렌으로 구분되며, 플라스틱 상자, 주방용품, 필름, 종이 코팅 및 섬유 경화제, 전선 및 케이블 코팅, 배관섬유, 휘발유 및 기름 용기 등에 사용된다.

- 독성: 고품 폴리에틸렌은 무독성 물질로 알려져 있다. 급성독성은 거의 없으며, 분진을 흡입한 실험동물의 폐에서 가벼운 염증이 일어날 수 있다. 열분해 산물에 노출 시 점막, 눈, 피부 자극, 두통, 메스꺼움, 호흡 곤란, 기침과 감기와 같은 증상을 보인다(Cosmetic Ingredient Review, 2007). 동물실험에서 간의 독성을 나타내었으며 열분해 산물을 장기 흡입한 경우 신경계의 부작용을 나타내었다. IARC는 인체 발암물질로 분류할 수 없는 3군으로 규정하였다(IARC, 1979).

나. 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)

- 용도: 내화학성, 고순도, 낮은 수분 흡수율 및 전기 절연성, 인장강도, 압축강도, 충격강도가 양호하다. 이러한 물성으로 큰 사이즈의 화학용기, 하수구 및 식품 수송부품, 포장재, 어망, 자동차 내장재, 의료제품 등에 사용된다.
- 독성: 의료기기로 이용이 될 정도로 PP는 독성이 거의 없다고 알려져 있다. 고품의 폴리프로필렌이 눈에 유입되면 결막이나 각막에 자극을 유발할 수 있으며, 열분해 산물인 폴리올레핀이 유해 화합물로 분류 된다(Grant, 1974). IARC는 인체 발암물질로 분류할 수 없는 3군으로 규정하였다(IARC, 1979).

다. 폴리염화비닐(Polyvinyl chloride, PVC)

- 용도: 내열성과 절연성이 우수하고, 경제성이 뛰어나 이상적인 건축자재로서 생산량의 50% 이상이 건설부분에서 사용된다. 고무 대체물, 인조가죽, 바닥재, 포장재, 불연성 실내장식물, 농업용 필름, 파이프, 전선용 파이프에 사용된다.
- 독성: 고품의 PVC에 의한 독성 사례 등을 보고되지 않았다. 하지만, 분진 입자에 반복적 또는 장기간 노출되면 폐에 영향을 주어 진폐증을 유발할 수 있다. 하지만, PVC 제조과정 중 원료물질인 염화비닐(vinyl chloride)은 과량 중독 시 중추신경계를 억제하고 심부정맥을 유발할 수 있다. 또한 신경독성, 면역독성, 기형유발, 간독성 등을 유발할 수 있다. IARC는 PVC가 암을 유발할 수 있는 증거가 부족한 3등급으로 규정하였다(IARC, 1979). 하지만, PVC의 원료물질인 염화비닐은 인간에서 드문 간암형태인 간혈관육종을



발생시키는 발암물질이며, 뇌종양, 폐, 혈액, 소화기암과 인과관계가 있으며, IARC는 1군 인체발암물질로 규정하였다(IARC, 1979).

라. 폴리우레탄(Polyurethane, PUR)

- 용도: 탄성 및 강인성이 풍부하고, 인열강도가 크며, 내마모성이 뛰어나다. 주로 쿠션재, 흡음재, 에어필터, 구두밑창, 합성피혁, 도로, 섬유 등에 사용된다.
- 독성: 폴리우레탄의 주된 원료가 되는 톨루엔 디이소시아나산(toluene diisocyanate, TDI)은 피부, 폐, 각막, 위장관에 대한 자극성이 있다. 다행감(euphoria), 운동실조, 정신착란, 민감화(주로 호흡기), 기관지염, 폐기종, 폐인성 심질환이 일어날 수 있다(McKerrow *et al.*, 1970; Le Quesne *et al.*, 1976). 장기적으로 지속되는 증상으로 인격장애, 과민함, 우울, 기억력 상실, 발기부전(심인성)을 유발할 수 있다(McKerrow *et al.*, 1970; Le Quesne *et al.*, 1976). 피부에 대한 자극으로 수포 형성, 홍반, 부종이 일어날 수 있다(US DHHS, 1988). 액체 또는 고농도의 증기에 노출 된 후에 심한 각막 자극 및 눈물이 나타날 수 있다(Axford *et al.*, 1976; Siribaddana *et al.*, 1998). IARC는 PUR이 암을 유발할 수 있는 증거가 부족한 3군으로 규정하였다. 하지만, IARC는 원료물질 TDI는 인체발암가능물질(possibly carcinogenic to humans) 등급인 2B군으로 분류하였으며, NTP에서는 인체발암물질로 충분히 예측되는 물질군으로 분류하였다(IARC, 1979).

마. 폴리에틸렌 테레프탈레이트(Polyethylene terephthalate, PET)

- 용도: 밀도가 높은 폴리에스테르 수지로 PET의 특성은 높은 투명성을 가지지만, 낮은 인장강도와 낮은 슬라이딩 특성을 가지고 있어 주로 병이나 포장용으로 사용된다. 우수한 강도, 낮은 수분 흡수율 등의 열적특성과 우수한 치수 안정성으로 인해, PET 소재는 복잡한 부품과 치수 정밀도 및 표면 품질이 까다로운 분야에 매우 적합하여, 전기 전자부품의 케이스, 자동차 내외장재, 의료기기 등에도 사용되고 있다.
- 독성: PET의 인간에 대한 독성사례는 보고되지 않았다. 동물실험에서도 PET

병에 몇 달간 접촉한 와인 추출물을 먹었을 때 독성을 나타내지 않았으며, 또한 PET 병에서 몇 달간 방치한 물에서 유전독성물질이 추출되지 않았다.

바. 폴리스티렌(Polystyrene, PS)

- 용도: 내수성, 치수 안정성이 좋으나 내충격성이 약하며, 가전제품의 완충 포장재, 스티로폼 용기, 건축재, 단열재 등으로 사용된다.
- 독성: 내열성이 매우 약해서 열이 가해지면 녹아 버리거나 형태의 변형을 가져올 수 있을 뿐 아니라 원료 물질로 들어간 발암물질인 포름알데히드가 나올 수 있다. IARC는 인체 발암물질로 분류할 수 없는 3군으로 규정하였다(IARC, 1979).

사. ABS 수지(Acrylonitrile butadiene styrene, ABS)

- 용도: 내구성과 내충격성이 우수한 고기능성 플라스틱으로, 가공성이 뛰어나고 다양한 색상 구현이 가능하다. 배관, 자동차 부품, 기기 부품, 산업용 기계 부품, 전화 및 전기 및 전자 장비, 파이프 피팅, 레크리에이션 차량 부품에 사용된다. 1977년 9월 이후, ABS는 음료 용기 제조에 더 이상 사용될 수 없게 되었다.
- 독성: 대만에서 실시된 역학 조사에 따르면 ABS 수지 성형공정에서 방출되는 열분해 산물이 후각기능을 악화시킬 수 있다고 보고되었다(Cheng, 2004). ABS 분해 생성물의 급성 독성은 다른 일반적인 고분자 물질의 열분해 생성물의 독성과 유사함이 발견되었다. IARC는 인체 발암물질로 분류할 수 없는 3군으로 규정하였다(IARC, 1979).

아. 메타크릴수지(Polymethyl methacrylate, PMMA)

- 용도: 투명도가 좋아 가시광선 투과율이 두께 3mm에서 93%가 되며, 아크릴이나 플라스틱 제품, 치과 보철물 제작에 사용된다.
- 독성: 흡입과 복강 내 투여로 중등도의 독성이 나타나고 섭취 시 약한 독성을



나타낸다. 피부, 눈, 코, 인후, 기관지 점막을 자극한다. 높은 농도로 노출 시 폐부종을 일으킬 수 있으며 어지러움, 과민증, 집중력 장애, 기억력 감소를 유발할 수 있다(Scolnick & Collins, 1988). 태아 발달에 장애를 줄 수 있고, 피부 알레르기를 일으킬 수 있다. IARC는 암을 유발할 수 있는 증거가 부족한 3군으로 규정하였다(IARC, 1979).

자. 폴리테트라플루오로에틸렌(Polytetrafluoroethylene, PTFE)

- 용도: 일반적으로 테프론(teflon)이라고 불리는 PTFE는 테트라플루오르에틸렌 단량체(-C₂F₄-)가 매우 길게 연결된 분자량이 매우 큰 중합체로, 매우 안정한 열가소성 고분자 물질이다. 주요 사용 분야는 씰 및 피스톤 링(유체 전달 시스템, 유압 실린더 및 무윤활 압축기)과 기계 베어링 및 베어링 패드 및 기계 테이프 및 합침 유리 섬유에 사용된다. 또한 의료용으로 심장 판막 및 대동맥 이식이나 혈액 투석 장비 등에 이용될 수 있으며, 주방용품의 코팅에도 사용된다.
- 독성: 과열 된 냄비로 인해 발생할 수 있는 연기의 위험성 이외에 테프론 코팅 조리 기구로 인하여 사람에게 알려진 위험은 없다(Sittig, 1985). IARC는 암을 유발할 수 있는 증거가 부족한 3군으로 규정하였다(IARC, 1979). 하지만, 원료물질인 테트라플루오로에틸렌은 인체발암가능물질인 2B군으로 분류하였다.

차. 발포성 폴리스티렌(Expanded polystyrene, EPS)

- 용도: 열가소성 수지인 폴리스티렌을 발포해 만든 소재로, 스티로폼이란 이름으로 더 잘 알려져 있다. 단열성, 완충성, 방수성, 방음성이 우수하여, 가전제품의 완충포장재, 건축 단열재, 식품 포장용기로 사용된다.
- 독성: 독성관련 연구가 미진하다. IARC는 암을 유발할 수 있는 증거가 부족한 3군으로 규정하였다(IARC, 1979).

카. 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC)

- 용도: 무색투명한 무정형의 열가소성 플라스틱 중합체이며, 안전유리, 저중량 안경렌즈 등에 사용된다.
- 독성: 독성 관련 사례가 보고되지 않았고, 암 유발 관련 인과관계도 보고되지 않았다.

타. 폴리아미드(Polyamide, PA)

- 용도: 나일론으로 알려져 있는 폴리아미드는 밀도가 낮고, 열안정성, 기계적 물성, 내충격성, 내마모성이 우수하고, 낮은 마찰계수로 인해 가장 많이 사용되는 플라스틱중 하나이다. 자동차 부품, 산업용 밸브 등과 같이 금속으로 만들어진 부품의 대체재로 쓰인다.
- 독성: 독성 관련 사례가 보고되지 않았고, 암 유발 관련 인과관계도 알려지지 않았다.

파. 에폭시(Epoxy)

- 용도: 전기적으로 성질이 우수하고, 내열성, 방한성, 내수성, 내습성이 좋고, 금속, 목재, 시멘트 등과의 접착성도 좋다. 가죽 생산의 마무리 단계, 금속, 목재, 콘크리트 및 기타 플라스틱의 보호 코팅, 접착제, 라미네이트, 공구 및 다이 캐스팅, 바닥 및 전기 장비에 사용된다.
- 독성: 알레르기성 접촉 피부염, 천식을 유발할 수 있다.

하. 불포화 폴리에스테르(Unsaturated polyester, UP)

- 용도: 저점도의 기계적 및 전기적 성질, 내수성과 내산성을 가지고 있으며, 사용법에 따라 상온에서 경화되는 장점을 가지고 있다. 유리섬유를 혼합하여 강화 플라스틱을 제조할 수 있다. 특히 이러한 우수한 물성에도 불구하고 다른 플라스틱 재료에 비하여 가격이 저렴하며 대형 플라스틱 성형에 매우 광범위하게 적용되고 있으며, 물탱크, 어선, 욕조, 간이 화장실, 정화조 등에



사용된다.

- 독성: 독성 관련 사례가 보고되지 않았다. 암 유발 관련 인과관계도 보고되지 않았다.

가. 멜라민 수지(Melamine-formaldehyde, MF)

- 용도: 멜라민과 포름알데히드를 염기성 촉매 하에 반응시킨 무색투명의 열경화성 수지이다. 비중이 1.48 정도이며 충전재에 의해 2.0 정도까지 가능하고 표면 경도가 현재 생산되고 있는 합성수지 중 가장 단단하여, 식기류, 1회용 커피컵, 일용품, 전기부품, 도료 등에 사용된다.
- 독성: 독성 관련 사례가 보고되지 않았고, 암 유발 관련 인과관계도 보고되지 않았다.

6. 첨가제(additives)의 독성 및 위해성

가. 부틸 벤질 프탈레이트(Butyl benzyl phthalate, BBP)

- 용도: 가소제로 사용되는 부틸 벤질 프탈레이트는 아크릴 수지, 접착제, 플라스틱, 자동차 코팅, 손톱 광택, 공기투과성 콘택트렌즈에 사용된다.
- 독성: 에스트로젠성 환경호르몬으로 간주되고 있다. 중추신경계를 억제하여 오심, 두통, 메스꺼움, 운동조절불능, 의식소실 등을 나타내며 만성적으로 노출 시 다발성신경증이 발생할 수 있다(Doull *et al.*, 1980). 눈과 피부에 접촉 시 자극을 유발하고 흡입 시 기관지의 자극을 유발하며 기관지 협착이 발생할 수 있다. 동물에서의 발암성에 관한 데이터는 제한적으로 암컷 집쥐에서 골수단핵구성 백혈병의 위험성이 증가한다는 보고가 있다(NTP, 1982). IARC는 암을 유발할 수 있는 증거가 부족한 3군으로 규정하였다(IARC, 1979).

나. 디에틸헥실 프탈레이트(Di(2-ethylhexyl) phthalate)

- 용도: 가소제로 사용되는 디에틸헥실 프탈레이트는 모조 가죽, 레인 코트, 신발류, 실내 장식품, 바닥재, 전선 및 케이블, 식탁보, 샤워 커튼, 식품 포장재 및 어린이 장난감과 같은 소비재에 사용된다.
- 독성: 접촉 시 눈, 피부, 점막에 자극을 일으킬 수 있다. 또한 1년 이상 장기간의 디에틸헥실 프탈레이트 섭취 시, 간 기능 손상을 야기할 수 있다(National Research Council, 1986). 랫드를 이용한 급성/반복 노출독성실험에서 세포사멸과는 관련이 없었다. 또한 생식/발달 독성, 유전독성, 면역독성 관련 인과관계도 찾을 수 없었다. IARC는 디에틸헥실 프탈레이트를 인체 발암 의심 물질인 2B군으로 분류하였다(IARC, 1979).

다. 디에틸 프탈레이트(Diethyl phthalate, DEP)

- 용도: 디에틸 프탈레이트는 무색, 무취 또는 매우 약한 방향성 냄새를 띠는 유성 액체로 향기 희석제, 알코올 변성제, 니트로셀룰로오스와 초산섬유소의



용매, 고체 로켓 추진제의 가소제, 염료 매개체, 습윤제, 향수의 고정제 등에 사용된다.

- 독성: 인체에서 발암성은 없다. 노출 시 두통, 현기증, 구역, 눈물 흘림, 다발성 신경병증, 전정기능 장애, 통증, 감각 이상, 쇠약, 팔 다리의 연축 증상을 포함한다. 민감한 사람에서 천식과 유사한 알레르기 반응이 나타날 수 있다. 반복 노출 시 신경손상을 일으킬 수 있다(Sittig, 2002). 눈과 피부를 약하게 자극하며, 눈에 튀기면 많은 양의 눈물이 분비되며 찌르는 듯한 아픔을 유발한다(Bingham *et al.*, 2001). 접촉시 접촉 피부염이 발생할 수 있다. IARC 발암물질 분류에 포함되어 있지 않다.

라. 디부틸 프탈레이트(Dibutyl phthalate, DBP)

- 용도: 디부틸 프탈레이트는 옅은 황색의 은은한 방향성의 향을 내는 유성의 액체이다. 주로 가소제, 살충제, 거품방지제, 방직섬유의 윤활제, 향수의 휘발방지제 및 용매로 사용된다.
- 독성: 디부틸 프탈레이트는 동물실험에서 급성독성정도가 낮게 나타났다. 그러나 장기간 투여 시 요도하열, 잠복고환, 전립선, 부고환, 정관의 발달 장애, 성상피의 퇴화, 고환 내 간질세포의 과다형성과 같은 생식독성이 유도되는 것이 관찰되었다. 또한 인체에 요도하열, 잠복고환, 정자수 감소 등의 생식독성을 일으키는 것으로 보고되었다(Spade *et al.*, 2014). IARC 발암물질 분류에 포함되어 있지 않다.

마. 디이소부틸 프탈레이트(Diisobutyl phthalate, DIBP)

- 용도: 디이소부틸 프탈레이트는 무취의 가소제로 내열성 및 내광성이 우수하여 높은 경제성의 가소제로서 사용된다. 그리고 DBP보다 낮은 밀도와 빙점을 가지고 있어 DBP 대체재로 사용된다.
- 독성: 디이소부틸 프탈레이트는 낮은 독성을 나타내나, 장기간 투여시 동물의 체중, 간 중량, 성 발달 변화를 유도한다는 보고가 있다. 디이소부틸 프탈레이트가 신경 독성 물질이라는 증거는 부족하다. IARC 발암물질 분류에

포함되어 있지 않다.

바. 디이소데실 프탈레이트(Diisodecyl phthalate, DIDP)

- 용도: 유연성을 높이기 위해 플라스틱 및 플라스틱 코팅 생산에 일반적으로 사용되는 가소제이다. 가구, 조리기구, 약품, 식품 포장지의 코팅에 사용된다.
- 독성: 미국과 유럽 연합에서 프탈레이트의 독성 및 생물 농축성에 대해 주목하고 연구하고 있다.

사. 디이소노닐 프탈레이트(Di-isononyl phthalate, DINP)

- 용도: 디이소노닐 프탈레이트는 플라스틱을 유연하게 만드는 데 사용되는 가소제로서 정원 호스, 수영장 라이너, 바닥 타일 및 방수포에 사용된다. 식품 포장에는 사용이 제한되어 있다. 미국은 어린이의 입에 넣을 수 있는 어린이 장난감 및 보육 용품에 0.1% 이상의 양으로 DINP, DIDP, DNOP 사용을 금지하고 있다.
- 독성: 동물을 이용한 만성독성 실험에서 간과 신장 독성 및 발암성을 나타내었다. 하지만 인간에서 발암성과의 인과관계는 확인되지 않았다.

아. 디엔옥틸 프탈레이트(Di-*n*-octyl phthalate, DNOP)

- 용도: 디엔옥틸 프탈레이트는 투명한 유상의 액체이며, 주로 플라스틱 제조에서 가소제로 이용된다.
- 독성: 동물을 이용한 독성실험에서 경구나 피부 경로를 통해 노출 시 독성이 낮은 것으로 여겨진다. 지속적인 섭취 시 중추신경계 억제가 일어날 수 있으며 지속적인 피부 접촉으로 건조, 갈라짐, 발진을 유발할 수 있다(EPA, 1985). 장기간 투여시 동물의 체중, 간 중량, 생식의 변화를 유도하고, 동물과 세포실험에서 돌연변이를 일으킬 수 있다는 보고가 있다. 하지만 발암성여부는 확인되지 않았다(Huber *et al.*, 1996).



자. 디메틸 프탈레이트(Dimethyl phthalate, DMP)

- 용도: 디메틸 프탈레이트는 플라스틱의 유연성을 증가시키기 위한 가소제로서 사용된다. 로켓 연료, 코팅제, 안전유리, 필름 등에 사용된다.
- 독성: 동물실험에서 생식독성이 있는 것으로 알려져 있으나, 확정적이지는 않다(ACGIH, 2013).

차. 브롬화 난연제(Brominated flame retardants, BFRs)

- 용도: 플라스틱, 전기, 인테리어 섬유, 자동차 쿠션, 도로 및 철도 제방, 포장 재료, 전기 및 전자 장비, 케이블 및 섬유코팅, 군사적 목적의 보호용 페인트의 발화방지용 난연제로서 폴리브롬화 비페닐(Polybrominated biphenyls, PBBs), 폴리브롬화 디페닐 에테르(Polybrominated diphenyl ether, PBDEs), 헥사 브로미네이티드 사이클로 도데케인(hexabromocyclododecane, HBCD/HBCDD), 테트라브로모비스페놀 A(Tetrabromobisphenol A, TBBPA) 등이 대표적이다.
- 독성: 헥사 브로미네이티드 사이클로 도데케인은 동물을 이용한 급성 독성실험에서 경구, 피부, 안점막 노출 시 독성 또는 자극이 없었다. 또한 반복 독성실험에서도 간독성이나 발암여부가 확인되지 않았다(EPA/Office of Pollution Prevention and Toxics, 2009).

카. 비스페놀 A(Bisphenol A, BPA)

- 용도: 투명용기, 접착제, 전자 코팅재, 보트 선체를 만드는 데 사용되는 플라스틱 원료의 핵심 성분인 가소제로서 사용되며, 소비재, 재사용 가능한 음료 용기, 식품 보관 용기, 통조림 식품, 어린이 장난감 및 영수증 등 다양한 목적으로 상품화되고 있다.
- 독성: 비스페놀 A는 잘 알려진 에스트로젠 활성을 갖는 내분비계 장애물질이다. 급성독성이 높지는 않지만, 지속적인 섭취 시 생식과 발생 및 대사를 포함하는 다양한 생리기능에 영향을 미친다(Delfosse *et al.*, 2012). 또한 DNA 손상과

세포독성을 유발하며, 동물 실험에서 암을 유발할 수 있다고 보고되었다(Murray *et al.*, 2007). 그러나 IARC에서는 아직 발암물질 분류에 포함시키지 않고 있다.

타. 노닐페놀(Nonylphenol)

- 용도: 플라스틱 식품 포장제의 안정제로서 사용되며, 폴리 염화 비닐(PVC)의 열 안정제로도 쓰인다. 세제, 도료, 살충제, 유화제 및 용해제 제조에도 사용된다.
- 독성: 생물학적인 분해가 잘 이루어지지 않으며 표층수 또는 토양에서 분해되는데 수개월 혹은 그 이상이 소요된다. 비생물학적인 분해는 매우 미미하다. 에스트로겐과 유사한 활성을 나타낼 수 있는 능력을 가진 관계로 내분비계 장애물질이 될 수 있다(Nagao *et al.*, 2000). 면역독성, 생식독성 등이 관찰되었으며, IARC에서는 아직 발암물질 분류에 포함시키지 않고 있다.



7. 흡착성 물질의 독성 및 위해성

가. 폴리염화비페닐(Polychlorinated biphenyl, PCB)

- 용도: 폴리염화비페닐은 전기절연 용도로 많이 사용되고 있는 물질이다. 또한, 전기 변압기 및 축전기 등, 전기 장치에 많이 사용되며, 작동액(hydraulic fluid), 윤활제, 가스터빈, 석유 첨가제, 열 전달액, 무탄소 용지, 살충제 증량제, 탈진제, 방화제, 가소제에도 사용된다.
- 독성: 폴리염화비페닐은 화학적으로 안정하여 환경 및 생체 내에 잔류하는 특성을 보인다. 대개 여러 가지 폴리염화비페닐 화합물들이 혼합된 형태로, 오염된 식품, 호흡, 피부를 통해 인간에게 오염된다. 먹이사슬 농축을 통해 노출이 증가될 수 있으며, 염소 함유량이 높은 구조에서 농축이 더 높게 나타난다. 폴리염화비페닐은 수용체를 활성화시킴으로서 발암성을 나타내는 것으로 보고되었고, 염소성 여드름(Chloracne) 및 특징적인 피부 증상, 암으로 인한 사망을 증가 등이 확인되었다. 염증 반응을 유발하며, 면역체계, 간 손상을 일으킨다고 보고되었다. 또한 내분비 장애물질로 알려져 있으며 유전독성을 나타내기도 한다. 따라서, 2016년, IARC에서는 폴리염화비페닐 화합물을 인간에게 암을 유발하는 것이 확실한 1군으로 분류하였다(IARC, 2016).

나. 디클로로디페닐디클로로에틸렌(Dichlorodiphenyldichloroethylene, DDE)

- 용도: 엔드린, 클로데인, 독사펜, 케폰, DDT, 미렉스, 엔도설판, 헤파타클로, 린데인과 페테인 등을 포함하는 유기염소계 살충제이다. 또한, 살충제 DDT의 대사산물로서, DDT 제조시의 불순물이기도 하다.
- 독성: 디클로로디페닐디클로로에틸렌에 노출되면 오심, 두통, 피로, 현기증, 무감각, 사지의 부분마비, 중증의 운동실조증, 일부 반사, 약한 발작, 사지의 고유수용감각과 진동 감각의 상실, 과민성 슬개 반사, 흥분, 혼돈, 호흡 증대 등이 나타난다. 다른 증상으로는 머리와 목의 떨림 현상, 심장과 호흡 장애가 나타나며 사망할 수도 있다. 혀와 입술, 안면의 마비를 유발할 수 있으며,

과민증(hypersensitivity), 어지럼증이 나타나기도 한다. 긴장성-간대성 발작을 유발할 수도 있으며, 황시증(xanthopsia)을 유발하기도 한다. 세포 실험에서는 염색체 손상이 나타났으며(USEPA, 1980), 동물실험에서 DDE에 노출되었을 때 간암 발생이 증가하였다 (IARC, 1991).

다. 아세나프텐(Acenaphthene)

- 용도: 아세나프텐은 염료 매개체, 살충제, 살진균제로 사용된다. 또한 플라스틱 제조와 약 제조에도 이용된다.
- 독성: 아세나프텐은 암을 일으킬 것으로 의심되며, 수생생물에 매우 유독한 물질이다. 과량 삼켰을 경우 급성 구토를 야기할 수 있으며, 피부, 눈 및 점막에 자극을 줄 수 있다. 미생물 실험에서 아세나프텐 증기는 형태적 돌연변이 빈도를 증가시키며, 세포호흡 활성 감소를 보이는 돌연변이도 일으킨다. 돌연변이의 빈도는 아세나프텐 작용 시간에 의존한다(Imshenetskii *et al.*, 1985). 또한 아세나프텐은 다환방향족탄화수소(PAH)의 일종으로 피부 및 폐 흡입을 통해 노출되면 피부암과 폐암 발병률이 증가된다.

라. 플루오렌(Fluorene)

- 용도: 플루오렌은 플라스틱 생산 원료와 물감색소로 사용되고, 플루오렌 유도체는 제초제와 성장 조절제로 사용 된다.
- 독성: 동물 실험에서 특이한 독성은 나타나지 않았으나, 장기 노출 시 생식세포에 영향을 미칠 수 있다는 보고가 있다. 플루오렌에 90일간 노출 시 세정관에 거대 생식 세포가 나타나고, 노출된 수컷에서는 성숙 정자의 숫자가 줄어들었으며, 고환 무게의 감소가 확인되었다. 발암성에 대해서 IARC는 암을 유발할 수 있는 증거가 부족한 3군으로 분류하였다.

마. 플루오란테인(Fluoranthene)

- 용도: 플루오란테인은 콜타르 및 아스팔트 유래 석유 제품의 구성성분이며,



상수도관과 저장탱크의 강철 및 연철 내벽을 보호하는 내막물질로 사용된다.

- 독성: 인체 발암성의 물질로 분류되지는 않았으나, 장기간 노출 시 피부염을 일으킬 수 있다. 플루오란테인에 노출 시 피부와 눈의 접촉성 화상, 오심, 빈맥, 심부정맥, 간 손상, 폐부종, 호흡 정지 등이 나타날 수 있다. 피부 질환 환자에 민감한 영향을 끼칠 수 있다. IARC 발암성등급분류는 3군으로 인체발암물질로 분류할 수 없음에 해당한다. 동물 연구에서는 피부에서 광독성을 나타내었고, 눈에서 최대 흥반 반응을 나타냈다(Kochevar *et al.*, 1982).

바. 안트라센(Anthracene)

- 용도: 안트라센 오일은 다양한 용도의 물품 제조와 산업 현장 및 제조과정에서 제형 또는 재포장에 이용된다.
- 독성: 안트라센은 동물 실험에서 모발 손실 및 체중 감소 등의 모체독성과 유산, 기형 유발 등, 배아 독성이 관찰되었다. EU의 발암성 평가는 1B(인간에게 발암 가능성이 있다고 추정되는 물질)이다.

사. 크리센(Chrysene)

- 용도: 크리센은 유기 합성 및 연구용 시약으로 사용된다.
- 독성: 피부 접촉에 의해서 흥반, 피부화상, 여드름성 병변, 자극감등이 나타나며, 만성 독성으로 눈의 광과민성과 자극감, 호흡기 자극과 기침, 기관지염, 백반증 등이 나타난다. 그 외 간독성과 신독성, 혈뇨가 나타날 수 있다. 발암성등급분류는 IARC 기준 2B군이고(IARC, 1979), ACGIH 기준 A3군, 즉 사람과의 상관성은 알 수 없으나 동물에는 확실한 발암물질에 해당한다. 크리센은 병리학적으로 화학적 발암성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

아. 벤조피렌(Benzo(a)pyrene, BP)

- 용도: 연구 및 실험용으로 이용되고 있다.
- 독성: 피부에 오랜 동안 노출하면 홍반, 색소화, 낙설 현상이 나타나며, 사마귀가 생기기도 한다. 실험동물에 장기간 노출하면 재생불량성 빈혈, 백혈구감소증 등의 혈액적 변화로 인해 사망하기도 한다. 마우스에서는 저형성 빈혈이 나타나기도 한다. IARC 발암성등급분류는 인체발암물질인 1군이다(IARC, 1979). 벤조피렌은 돌연변이를 유발하며 발암 효과도 알려져 있다. 벤조피렌에 노출되면 성장이 지연되며, 부종과 사지 이상 증세가 나타나고, 또한 실험동물에 장기간 노출하면 재생불량성 빈혈, 혈구 감소증 등의 혈액적 변화로 인해 사망하기도 한다.

자. 벤즈안트라센(Benz(a)anthracene, BA)

- 용도: 벤즈안트라센은 연구용 화학물질로 사용된다.
- 독성: 환경에 존재하는 다핵 방향족 탄화수소 화합물의 주요 조성으로서 발암원이다. 체내 염색체와 DNA에 이상을 일으킨다. 흡연 및 오염된 공기 흡입, 폐수에 의해 오염된 음식과 물의 섭취를 통해 인체내로 흡수가 된다. 벤즈안트라센은 동물에서 방광과 피부의 암을 일으킨 것으로 나타났으며 인간에서도 발암원으로 알려져 있다. 그 외 인간에서 생식기계 손상을 일으킬 가능성이 보고되어 있다. 따라서, 벤즈안트라센은 실험동물에서 확인된 발암원이며, 에임스(Ames) 테스트에 의해 돌연변이원으로 확인되었다. IARC 발암성등급분류는 인체발암가능물질인 2B군이다(IARC, 1979).

차. 알드린(Aldrin)

- 개요: 알드린은 유기염소계의 토양 해충 살충제이다. 무색의 고체로 채소 해충, 보리 해충 등에 살충제 및 살균제로 사용된다. 알드린이 산화된 형태인 에폭사이드 디엘드린은 더 강력한 살충 효과를 가진다.
- 독성: 경구로 10mg/kg를 초과하는 농도에 급성으로 노출될 경우 중추신경계



이상이 발생할 수 있고, 3~7g를 섭취할 경우 사망할 수 있다. 독성 영향의 주요 표적은 중추 신경계이다. 중추 신경 흥분, 근간대성 경련, 재발성 발작이 발생할 수 있다. 그리고, 혼수를 동반하는 호흡기 억제가 발생할 수 있고 이것이 일반적으로 직접적 사망 원인이 된다. 발암성등급분류는 IARC 기준 3군이다(IARC, 1974). 세포 연구에서는 세포의 DNA 손상이 발견되었고, 염색체 이상 등, 돌연변이를 유발하였다(HSDB, 1997, RTECS, 1997). 알드린은 동물 실험에서 배자 독성이나 태자 독성이 보고되었으며(Schardein, 1985), 급성으로 노출된 동물에서는 간 괴사가 나타났다(Proctor *et al.*, 1988). 역학 연구 결과, 6~12개월 동안 알드린을 함유한 밀을 섭취한 환자에서 심전도 이상이 나타났다. 또한, 알드린에 심하게 노출된 근로자들에게 간질형 발작이 보고되었다(Gupta, 1975).

카. 디엘드린(Dieldrin)

- 용도: DDT 대응 광범위 살충제로 많이 사용되어 왔으나 최근에는 독성으로 인해 사용이 제한되고 있는 유기염소계 물질이다. 알드린과 구조적으로 유사한 물질로 알드린은 해충구제 효과가 없으나 체내에서 디엘드린으로 분해되면서 해충 구제 효과를 내는 것으로 알려져 있다.
- 독성: 자연계에서 잘 분해가 되지 않고 생체 농축되기 때문에 매우 해로운 것으로 판단된다. 생식독성, 중추신경계 독성, 면역독성, 암 유발 등 다양한 독성을 지니고 있다. 임신한 여성이 노출되었을 때 태아의 남성 생식기 발생 시 문제를 일으키는 것으로 보고된 바 있다. 파킨슨 병 및 유방암 관련성이 의심되기도 한다. 발암성등급분류는 IARC 기준 3군이고(IARC, 1979), ACGIH 기준 A3군으로, 사람과의 상관성은 알 수 없으나 동물에게는 확실한 발암물질로 알려져 있다.

타. 퍼플루오로옥탄산염(Perfluorooctanoic acid, PFOA)

- 용도: 퍼플루오로옥탄산염은 C8로 알려진 인공산으로, 공업용으로 많이 사용하고 있다.

- 독성: 동물실험에서 기형을 유발하고 간 독성을 나타내며 성적인 발달을 지연시키는 것으로 확인되었다. 사람에게 직접 노출 시 중증 통증, 기침, 질식, 기도자극, 폐부종, 혼수, 경련 및 심할 경우 사망한다. 인간 세포연구에서 퍼플루오로옥탄산염을 처리하면 DNA 손상 및 세포 사멸을 유발할 뿐만 아니라 세포 주기를 교란시킨다. 장기간 동안 고농도의 퍼플루오로옥탄산염에 노출되었을 때에는 세포가 일차 및 이차 괴사를 나타낸다. 동물실험에서 고환의 종양형성을 유발하였다(Klaassen, 2001).



참고문헌

- 박정규·간순영(2014). “잔류성·생물축적성 물질 피해 저감을 위한 미세플라스틱 관리방안”, 환경정책연구 13(2):65-98.
- 송창엽·김웅·계명찬(2017). “비스페놀류의 사용 현황과 위해성: 소고”, 한국환경생물학회.
- 유영선·오유성 외 2인(2015). “국내외 바이오 플라스틱의 연구개발, 제품화 및 시장 동향”, 한국청정기술학회.
- 홍상희(2015). “미세플라스틱 해양오염 관련 국제동향”, 한국해양과학기술원 해외기술정책동향/국제연구동향.
- Charles Moore, Cassandra Phillips, 이지연 옮김, “플라스틱 바다: 지구의 바다를 점령한 인간의 창조물”, 미지북스, 2013.
- Travis Hudson, 최정찬 외 역, “지구환경과학”, 시그마프레스, 2012.
- Abe, S., Nemoto, N. & Sasaki, M.(1983). “Comparison of aryl hydrocarbon hydroxylase activity and inducibility of sister-chromatid exchanges by polycyclic aromatic hydrocarbons in mammalian cell lines”, Mutation Research, Vol.122 No.1, pp. 47~51.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(2013). “Documentation of the TLVs and BEIs with Other World Wide Occupational Exposure Values”, 7th Ed. CD-ROM Cincinnati, OH 45240-1634, p. 1.
- ATSDR.(1993). “Polynuclear Aromatic Hydrocarbon(PAH) Toxicity, Case Studies in Environmental Medicine, Agency for Toxic Substances and Disease Registry”, US Dept of Health and Human Services, Atlanta, GA.
- Axford, AT., McKerrow, CB. & Jones, AP.(1976) “Accidental exposure to isocyanate fumes in a group of firemen”, British Journal of Industrial Medicine, Vol.33, pp. 65~71.
- Besseling, E., Wegner, A., Foekema, EM., van den Heuvel-Greve, MJ. & Koelmans, AA.(2013). “Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the

- lugworm *Arenicola marina*(L.)”, *Environmental Science & Technology*, Vol.47 No.1, pp. 593~600.
- Betts, K.(2008). “Why small plastic particles may pose a big problem in the oceans”, *Environmental Science & Technology*, Vol.42 No.24, p. 8995.
- Bingham, E., Cohrssen, B. & Powell, CH.(2001) “Patty's Toxicology” Vol. 1-9 5th ed. John Wiley & Sons. New York, N.Y.
- Boerger, CM., Lattin, GL., Moore, SL. & Moore, CL.(2010). “Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre”, *Marine Pollution Bulletin*, Vol.60, pp. 2275~2278.
- Bouwmeester, H., Hollman, PC. & Peters, RJ.(2015). “Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production chain: experiences from nanotoxicology”, *Environmental Science & Technology*, Vol.49 No.15, pp. 8932~8947.
- Browne, MA., Dissanayake, A., Galloway, TS., Lwe, DM. & Thompson, RC.(2008). “Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis*(L)”, *Environmental Science & Technology*, Vol.42 No.13, pp. 5026~5031.
- Browne, MA., Galloway, TS. & Thompson, RC.(2010). “Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines”, *Environmental Science & Technology*, Vol.44 No.9, pp. 3404~3409.
- Carpenter, EJ. & Smith, KL.(1972). “Plastics on the Sargasso Sea surface”, *Science*, Vol.175, pp. 1240~1241.
- Cheng, SF., Chen, ML., Hung, PC., Chen, CJ. & Mao, IF.(2004)“Olfactory loss in poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) plastic injection-moulding workers”, *Occupational Medicine* Vol.54 No.7, pp. 469~474.
- Cooper, GS., Martin, SA., Longnecker, MP., Sandler, DP. & Germolec, DR.(2004). “Associations between plasma DDE levels and immunologic measures in African-American farmers in North Carolina”, *Environmental Health Perspectives*, Vol.112 No.10, pp. 1080~1084.



- Costa, MF., Ivar do Sul, JA., Silva-Cavalcanti, JS., Araújo, MC., Spengler, A. & Tourinho, PS.(2010). “On the importance of size of plastic fragments and pellets on the strandline: a snapshot of a Brazilian beach”, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vo.168, pp. 299~304.
- Cosmetic Ingredient Review(2007) “International Journal of Toxicology, Final Report on the Safety Assessment of Polyethylene”, Vol.26(Suppl. 1), pp. 115~127.
- Cui, R., Kim, SW. & An, Y.(2017) “Polystyrene nanoplastics inhibit reproduction and induce abnormal embryonic development in the freshwater crustacean *Daphnia galeata*”, *Scientific Reports*, Vol.7 No.1, p. 12095.
- Delfosse, V., Grimaldi, M., Pons, JL., Boulahtouf, A., le Maire, A., Cavailles, V., Labesse, G., Bourguet, W. & Balaguer, P.(2012) “Structural and mechanistic insights into bisphenols action provide guidelines for risk assessment and discovery of bisphenol A substitutes”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.109 No.37, pp. 14930~14935.
- DHHS/ATSDR(2002). “Toxicological Profile for DDT, DDE, and DDD” (PB/2002/100137).
- Dickerson, RL., McMurry, CS., Smith, EE., Taylor, MD., Nowell, SA. & Frame, LT.(1999). “Modulation of endocrine pathways by 4,4'-DDE in the deer mouse *Peromyscus maniculatus*”, *Science Of The Total Environment*, Vol.233 No.1-3, pp. 97~108.
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, RC. & Aldridge, DC.(2015).“Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs”, *Water Research*, Vol.75, pp. 63~82.
- Engler, RE.(2012). “The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean”, *Environmental Science & Technology*, Vol.46, pp. 12302~12315.
- EPA/Office of Water; Federal-State Toxicology and Risk Analysis Committee (FSTRAC).(1985) “Summary of state and federal drinking water standards and guidelines (11/93) to present. EPA: EPA chemical profile on dioctyl phthalate”,

- Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- EPA/Office of Pollution Prevention and Toxics.(2009)“High Production Volume Information System(HPVIS) on Cyclododecane, hexabromo-(25637-99-4)”, Available from, as of February 23, 2009: <http://www.epa.gov/hpvis/index.html>
- Fendall, LS. & Sewell, MA.(2009).“Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers”, *Marine Pollution Bulletin*, Vol.58 No.8, pp. 1225~1228.
- Fitzhugh, OG., Nelson, AA. & Quaife, ML.(1964). “Chronic oral toxicity of aldrin and dieldrin in rats and dogs”, *Food and Cosmetics Toxicology*, Vol.2, pp. 551~560.
- Gatehouse, D.(1980). “Mutagenicity of 1,2 ring-fused acenaphthenes against *S. typhimurium* TA1537 and TA1538: structure—activity relationships”, *Mutation Research*, 78(2), pp. 121~135.
- GESAMP(2015). “Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment”, (Kershaw, P. J., ed.). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO /WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No.90, p. 96.
- GESAMP(2016). “Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part two of a global assessment”, (Kershaw, P.J., and Rochman, C.M., eds). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection).
- Gold, M., Mika, K., Horowitz, C., Herzog, M. & Leitner, L.(2013). “Stemming the tide of plastic marine litter: a global action agenda”, *Pritzker Environmental Law and Policy Briefs*, No. 5.
- Gouin T, Roche N, Lohmann R, Hodges G.(2011). “A thermodynamic approach for assessing the environmental exposure of chemicals absorbed to microplastic”, *Environmental Science & Technology*, Vol.45 No.4, pp. 1466~1472.
- Grant, WM.(1974). “Toxicology of the Eye”, 2nd ed. Springfield, Illinois: Charles C. Thomas, p. 842.



- Gregory, MR. & Andrady, AL.(2003). "Plastics in the marine environment". In *Plastics and the Environment*; Andrady, A.L., Ed. Wiley: New York.
- Gupta, PC.(1975) "Neurotoxicity of chronic chlorinated hydrocarbon insecticide poisoning--A clinical and electroencephalographic study in man", *Indian Journal of Medical Research*, Vol.63, pp. 601~606.
- Hayes Jr., WJ. & Laws Jr.. ER.(1991). "Handbook of Pesticide Toxicology", Volumes 1-3, Academic Press, Inc, San Diego, CA.
- Hathaway, GJ., Proctor, NH. & Hughes, JP.(1996). "Proctor & Hughes Chemical Hazards of the Workplace", 4th ed., Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, pp. 28~29.
- Hoogendam, I., Versteeg, JPJ. & De Vlieger, M.(1962). "Electroencephalograms in insecticide toxicity", *Archives of Environmental Health*, Vol.4 pp. 86~94.
- HSDB(1990). "Hazardous Substances Data Bank". National Library of Medicine. Bethesda, MD (Internet Version). Thomson Healthcare Inc., Greenwood Village, Co.
- Huber, WW., Grasl-Kraupp, B. & Schulte-Hermann, R.(1996). "Hepatocarcinogenic potential of di(2-ethylhexyl)phthalate in rodents and its implications on human risk", *Critical Reviews in Toxicology*, Vol.26 pp. 365~481.
- IARC.(2018) "Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans", Geneva: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. (Multi-volume works) (1972-Present). Retrieved September 20.
- Ilyina, TP.(2006). "The fate of persistent organic pollutants in the North Sea, multiple year modal simulations of γ -HCH, α -HCH an PCB 153", *Hamburg Studies on Maritime Affairs*, Vol.7. pp. 61~76.
- Imshenetskiï, AA., Kondrateva. TF & Linkova MA.(1985). "Mutagenic action of acenaphthene on haploid and diploid cultures of *Candida scotti*." *Mikrobiologiya* Vol.54 No.3, pp. 360~362.
- Ivar do Sul, JA., Costa, MF., Barletta, M. & Cysneiros, FJ.(2013). "Pelagic microplastics around an archipelago of the Equatorial Atlantic", *Mar. Pollut. Bull.*, Vol.75

- No.1-2, pp. 305~309.
- Ivar do Sul, JA. & Costa, MF.(2014). “The present and future of microplastic pollution in the marine environment”, *Environmental Pollution*, Vol.185, pp. 352~364.
- Klaassen, C.D.(2001), Casarett and Doulls Toxicology, “The Basic Science of Poisons”, 6th ed., New York, NY: McGraw-Hill, pp. 683.
- Kochevar, IE., Armstrong, RB., Einbinder, J., Walther, RR. & Harber, LC.(1982). “Coal tar phototoxicity: active compounds and action spectra”, *Photochemistry and Photobiology*, Vol.36 No.1, pp. 65~69.
- Kochhar, TS.(1982). “Effects of polycyclic hydrocarbons on the induction of chromosomal aberrations in absence of an exogenous metabolic activation system in cultured hamster cells”, *Experientia*, Vol.38 No.7, pp. 845~846.
- Kuroda, K. *et al.*(1983). Annual Report of the Osaka City Institute for Public Health and Environmental Sciences, 45, pp.37~39.
- Laist, DW.(1997). “Impacts of marine debris: entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records”. in: Coe, J. m., Rogers, D. B.,(eds.), “Marine debris - sources, impacts and solutions”, Springer-Verlag, New York, pp. 99~139.
- Law, KL., Morét-Ferguson, S., Maximenko, NA., Proskurowski, G., Peacock, EE., Hafner, J. & Reddy, CM.(2010). “Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre”, *Science*, Vol.329 No.5996, pp. 1185~1188.
- Lee, K., Tanabe, S. & Koh, C.(2001). “Contamination of polychlorinated biphenyls(PCBs) in sediments from Kyeonggi Bay and nearby areas, Korea”, *Marine Pollution Bulletin.*, Vol.42, pp. 273~279.
- Le Quesne, PM., Axford, AT. & McKerrow, CB.(1976) “Neurologic complications after a single severe exposure to toluene diisocyanate”, *British Journal of Industrial Medicine*, Vol.33 pp.72~78.
- Markita, Y., Matsuura, T., Oqata, R., Omura, M., Tanaka, A., Hirata, M. & Inoue, N.(2003). “Systemic toxicity of p,p'-DDE in aged male Wistar rats following oral administration”, *Fukuoka Igaku Zasshi, Hukuoka Acta Medica*, Vol.94



No.4, pp. 59~65.

- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C. & Kaminuma, T.(2001). "Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment", *Environmental Science & Technology*, Vol.35 No.2, pp. 318~324.
- McKerrow, CT., Davies, HJ. & Jones, PA.(1970). "Symptoms and lung function following acute and chronic exposure to toluene diisocyanate", *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, Vol.63 pp. 376~378.
- Moore, CJ.(2008). "Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat", *Environmental Research*, Vol.108 No.2, pp. 131~139.
- Moore, MR., Vetter, W., Gaus, C., Shaw, GR. & Müller, JF.(2002). "Trace organic compounds in marine environment", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.45 No.1-12, pp. 62~68.
- Mortelmans, K., Haworth, S., Lawlor, T., Speck, W., Tainer, B. & Zeiger, E.(1986). "Salmonella mutagenicity tests: II. Results from the testing of 270 chemicals", *Environmental and Molecular Mutagenesis*, Vol.8 Suppl 7, pp. 1~119.
- Mukhtar, H., Link, CM., Cherniack, E., Kushner, DM. & Bickers, DR.(1982). "Effect of topical application of defined constituents of coal tar on skin and liver aryl hydrocarbon hydroxylase and 7-ethoxycoumarin deethylase activities", *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol.64 No.3, pp. 541~549.
- Murray, TJ., Maffini, MV., Ucci, AA., Sonnenschein, C. & Soto, AM.(2007) "Induction of mammary gland ductal hyperplasias and carcinoma in situ following fetal bisphenol A exposure", *Reproductive Toxicology*, Vol.23 No.3 pp. 383~390.
- Nagao, T., Saito, Y., Usumi, K., Nakagomi, M., Yoshimura, S. & Ono H.(2000). "Disruption of the reproductive system and reproductive performance by administration of nonylphenol to newborn rats", *Human & Experimental Toxicology*, Vol.19 No.5, pp. 284~296.
- National Research Council.(1986) "Drinking Water and Health", Vol.6. Washington,

- D.C.: National Academy Press, pp. 340.
- Nigg, HN., Metcalf, RL. & Kapoor, IPl.(1976). "DDT and selected analogues as microsomal oxidase inducers in the mouse", Archives of Environmental Contamination and Toxicology, Vol.3 No.4, pp. 426~436.
- NTP(1982) "Carcinogenesis bioassay of butyl benzyl phthalate (CAS No. 85-68-7) in F344/N rats and B6C3F1 mice (feed study)", Research Triangle Park, NC, National Institutes of Health, National Toxicology Program (NTP Technical Report No. 213; National Technical Information Service Publication No. PB83-118398)
- Ogata, Y., Takada, H., Mizukawa, K., Hirai, H., Iwasa, S., Endo, S., Mato, Y., Saha, M., Okuda, K., Nakashima, A., Murakami, M., Zurcher, N., Booyatumanondo, R., Zakaria, MP., Dung, le Q., Gordon, M., Miguez, C., Suzuki, S., Moore, C., Karapanagioti, HK., Weerts, S., McClurg, T., Burres, E., Smith, W., Van Velkenburg, M., Lang, JS., Lang, RC., Laursen, D., Danner, B., Stewardson, N. & Thompson, RC.(2009). "International pellet watch: global monitoring of Persistent Organic Pollutants(POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs", Marine Pollution Bulletin, Vol.58 No.10, pp. 1437~1446.
- Olsen, GW., Burris, JM., Burlew, MM. & Mandel, JH.(2003). "Epidemiologic assessment of worker serum perfluorooctanesulfonate(PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) concentrations and medical surveillance examinations", Journal of Occupational and Environmental Medicine, Vol.45 No.3, pp. 260~270.
- OSPAR Commission.(2007). "OSPAR Pilot Project on Monitoring Marine Beach Litter: Monitoring of Marine Litter in the OSPAR Region", available at http://qsr2010.ospar.org/media/assessments/p00306_Litter_Report.pdf.
- Ottolenghi, AD., Haseman, JK. & Suggs, F.(1974). "Teratogenic effects of aldrin, dieldrin, and endrin in hamsters and mice", Teratology, Vol.9, pp. 11~16.
- Proctor, NH., Hughes, JP. & Fischman, ML.(1988). "Chemical Hazards of the Workplace", 2nd ed., JB Lippincott Co., Philadelphia, PA, pp.61~62.



- Rios, LM., Moore, C. & Jones PR.(2007). "Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.54, pp. 1230~1237.
- Rochman, CM., Browne, MA., Halpern, BS., Hentschel, BT., Hoh, E., Karapanagioti, HK., Rios-Mendoza, LM., Takada, H., The, S. & Thompson, RC.(2013). "Policy: Classify plastic waste as hazardous", *Nature*, Vol.494 No.7436, pp. 169~171.
- RTECS.(1990) "Registry of toxic effects of chemical substances", National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH (Internet Version), Thomson Healthcare Inc., Greenwood Village, CO.
- RTECS.(1997) "Registry of toxic effects of chemical substances", National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH (Internet Version), Thomson Healthcare Inc., Greenwood Village, CO.
- Ryan, PG.(1988). "Intraspecific variation in plastic ingestion by seabirds and the flux of plastic through seabird populations", *The Condor*, Vol.90 No.2, pp. 446~452.
- Schardein, JL.(1993). "Chemically induced birth defects", 2nd ed., Marcel Dekker, Inc, New York, NY, pp. 692~694.
- Scolnick, B. & Collins J.(1986). "Systemic reaction to methylmethacrylate in an operating room nurse", *Journal of occupational medicine*, Vol.28, pp. 196~198.
- Shaw, DG. & Day, RH.(1994). "Colour- and form-dependent loss of plastic microdebris from the North Pacific Ocean", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.28, pp. 39~43.
- Siribaddana, SH., Wijesundera, A. & Fernando, R.(1998). "Toluene diisocyanate exposure in a glove manufacturing plant", *Clinical Toxicology*, Vol.36, pp. 95~98.
- Sittig, M.(1985). "Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens", 2nd ed, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, pp. 742~743.
- Sittig, M.(2002). "Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens", 4th

- ed, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, pp. 143~144.
- Spade, DJ., Hall, SJ., Saffarini, CM., Huse, SM., McDonnell, EV. & Boekelheide, K.(2014). "Differential response to abiraterone acetate and di-n-butyl phthalate in an androgen-sensitive human fetal testis xenograft bioassay", *Toxicological Sciences*, Vol.138 No.1, pp. 148~160.
- Takagi, A., Sai, K., Umemura, T., Hasegawa, R. & Kurokawa, Y.(1991). "Short-term exposure to the peroxisome proliferators, perfluorooctanoic acid and perfluorodecanoic acid, causes significant increase of 8-hydroxydeoxyguanosine in liver DNA of rats", *Cancer Letters*, Vol.57, pp. 55~60.
- Tanaka, K., Takada, H., Yamashita, R., Mizukawa, K., Fukuwaka, MA. & Watanuki, Y.(2013). "Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.69 No.1-2, pp. 219~222.
- Teuten, EL., Saquing, JM., Knappe, DR., Barlaz, MA., Jonsson, S., Björn, A., Rowland, SJ., Thompson, RC., Galloway, TS., Yamashita, R., Ochi, D., Watanuki, Y., Moore, C., Viet, PH., Tana, TS., Prudente, M., Boonyatumanond, R., Zakaria, MP., Akkhang, K., Ogata, Y., Hirai, H., Iwasa, S., Mizukawa, K., Hagino, Y., Imamura, A., Saha, M. & Takada, H.(2009). "Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol.364 No.1526, pp. 2027~2045.
- Thompson, RC., Olsen, Y., Mitchell, RP., Davis, A., Rowland, SJ., John, AW., McGonigle, D. & Russell, AE.(2004). "Lost at sea: where is all the plastic?", *Science*, Vol.304 No.5672, p. 838.
- Tomatis, LV., Turusov, R., Charles, T. & Boicchi, M.(1974). "Effect of long-term exposure to 1,1-dichloro-2,2-bis(p-chlorophenyl)ethylene, to 1,1-dichloro-2,2-bis(p-chlorophenyl)ethane, and the two chemicals combined on CF-1 mice", *Journal of the National Cancer Institute*, Vol.52, pp. 883-891.
- UNEP.(2016)"Marine plastic debris and microplastics? Global lessons and research to



inspire action and guide policy change”, United Nations Environment Programme, Nairobi.

USEPA.(1980). Ambient Water Quality Criteria Doc: DDT pp. C~41.

US DHHS.(1988). “Occupational safety and health guidelines for chemical hazards”, DHHS (NIOSH) Publication, No 88-118, Supplement I-OHG.

WHO.(1993). Environmental Health Criteria 140: “Polychlorinated biphenyls and terphenyls”, Geneva: World Health Organization.

Wright, SL. & Kelly, FJ.(2017). “Plastic and human health: a micro issue?”, Environmental Science & Technology, Vol.51 No.12, pp. 6634~6647.

Yoshikawa, T., Ruhr, LP. & Flory, W.(1985). “Toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons. I. Effect of phenanthrene, pyrene, and their ozonized products on blood chemistry in rats”, Toxicology and Applied Pharmacology, Vol.79, pp. 218~226.

<https://www.mnn.com/earth-matters/animals/stories/fish-ingesting-plastic-from-great-pacific-garbage-patch> (2011년 7월 8일) “Fish ingesting plastic from Great Pacific Garbage Patch”

<https://www.scmp.com/news/world/article/2109930/tough-swallow-tiny-bits-plastic-have-infiltrated-most-tap-water-around> (2017년 9월 6일) “Tough to swallow: tiny bits of plastic have infiltrated most tap water around the world, study reveals”

<https://plasticoceans.org/wp-content/uploads/2017/09/Orb-Media-Plastics-Story-Toolkit.pdf>. “Invisibles: the plastic inside us”

<http://news.jtbc.joins.com/html/017/NB11533017.html> (2017년 10월 11일) “국내 해산물서 미세플라스틱... 인체 영향 우려”

<https://orbmedia.org/blog/water-tap-bottled-microplastics> (2018년 3월 15일) “Water: Tap, Bottled & Microplastics”

http://news.bbc.co.uk/2/shared/bsp/hi/pdfs/14_03_13_finalbottled.pdf “Synthetic polymer contamination in bottled water”

<https://www.bbc.com/news/science-environment-43388870> (2018년 3월 15일) “Plastic particles found in bottled water”

http://www.ytn.co.kr/_ln/0102_201809041313269468 (2018년 9월 4일) “국내 판매 천일염 6종에서 미세플라스틱 검출”

<https://orbmedia.org/stories/plus-plastic/multimedia> (2018년 9월 10일) “Microplastics found in global bottled water”

III

플라스틱 분해 미생물 균주 및 효소의 개발현황



III

플라스틱 분해 미생물 균주 및 효소의 개발현황

Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem

플라스틱은 저렴한 가격, 우수한 기능으로 현대인의 풍요로운 생활에 크게 기여하고 있는 반면, 플라스틱 폐기물을 매립하거나 소각할 경우 심각한 환경오염의 문제가 발생하고 있다. 즉, 반영구적이고 편리한 합성 플라스틱이 분해되는 데 300~400년이 걸리는데, 이는 난분해성 환경오염물이라는 부메랑이 되어 우리 앞에 나타나고 있다. 이를 해결하기 위한 방법 중 하나로 미생물이나 효소를 이용한 생물학적 분해과정이 있으며, 이것은 환경오염이 없는 플라스틱 폐기물 처리 기술이다. 이러한 생물학적 분해과정에는 세균 등의 원핵생물과 진균, 효모 등의 진핵생물들을 활용한 플라스틱 분해 연구가 최근 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 플라스틱 제품을 분해하기에는 너무나 미미한 분해능을 가지고 있다. 따라서 환경 친화적이고 무해한 생분해성 플라스틱의 제조를 통해 원가 절감, 강도, 물성, 가격 등의 단점을 극복한 우수 소재 개발과, 보다 쉽고 강력하게 생분해할 수 있는 미생물 발굴도 아울러 필요하다. 따라서 본장에서는 합성 플라스틱(플라스틱으로 이하 명기)과 생분해성 플라스틱의 분해 미생물(세균, 방선균, 진균)과 분해 효소에 대한 최근 연구동향에 대해 살펴보도록 한다.

1. 플라스틱 분해 미생물 균주

가. 플라스틱 분해 세균

〈표 3.1〉은 플라스틱 분해 세균들의 목록이며, 이들은 *Pseudomonas*, *Streptococcus*, *Corynebacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus* 및 *Rhodococcus* 등이 있다. 이들 중, *Pseudomonas*, *Streptomyces*에 대해 많은 연구들이 되어 있으며, 특히 *Pseudomonas*는 PE, PUR, PVC 등 여러 종류의 플라스틱 분해능을 가진다고 보고된 바 있다. 하지만, 아직까지 *Pseudomonas* 종 이외 다른 균주들은 플라스틱 분해에 대해 자세히 알려지지 않았고, 분해 속도가



미미하여 적은 양을 분해하더라도 오랜 기간이 걸린다.

〈표 3.1〉 플라스틱 분해 세균

Type of Plastic Used	Microorganisms
PUR	<i>Corynebacterium</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Pseudomonas cepacia</i> , <i>Pseudomonas</i> sp., and <i>Arthrobacter globiformis</i>
Isotactic PP	<i>Pseudomonas chlororaphis</i> , <i>Pseudomonas stutzeri</i> , and <i>Vibrio</i> sp.
Degradable PE	<i>Bacillus mycoides</i> , <i>Rhodococcus cepacia</i> , <i>Rhodococcus ATCC 29672</i> and <i>Nocardia steroids</i> GK 911
PE bags and plastic cups	<i>Streptococcus</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp., <i>Moraxella</i> sp., and <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp., <i>Diplococcus</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Serratia marcescens</i> , <i>Serratia marcescens</i> 724, <i>Bacillus cereus</i> , <i>Streptococcus aureus</i> (B-324), <i>Micrococcus lylae</i> (B-429), <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , and <i>Bacillus subtilis</i>
Natural and synthetic PE	<i>Pseudomonas</i> sp. (P1, P2, and P3)
PVC powder	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
LDPE	<i>Rhodococcus ruber</i> C208, <i>Pseudomonas stutzeri</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> PA01 (ATCC15729), <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC15692), <i>Pseudomonas putida</i> (KT2440 ATCC47054), <i>Pseudomonas syringae</i> (DC3000 ATCC10862), <i>Brevibacillus borstelensis</i> 707, <i>Staphylococcus epidermis</i> and <i>Bacillus cereus</i> C1
HDPE	<i>Arthrobacter</i> sp. and <i>Pseudomonas</i> sp.
LDPE and LLDPE	<i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , and <i>Brevibacillus borstelensis</i>
HDPE and LDPE	<i>Bacillus</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp., <i>Listeria</i> sp., and <i>Vibrio</i> sp.
HDPE, LDPE, and LLDPE	<i>Rhodococcus rhodochorus</i> ATCC 29672
LDPE powder	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp., and <i>Bacillus</i> sp.
Degradable plastic	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Bacillus subtilis</i> , <i>staphylococcus aureus</i> , <i>Streptococcus lactis</i> , <i>Proteus vulgaris</i> , and <i>Micrococcus luteus</i>

자료: Chandra, 2015.

1) 플라스틱 분해 *Pseudomonas* sp.

일상생활에서 널리 사용되는 플라스틱은 서서히 분해되는 고분자 환경 폐기물로 최근에는 플라스틱의 분해를 가속화하는 미생물들이 발견되고 있다. 특히 *Pseudomonas* sp.의 균이 여러 종류의 합성 플라스틱을 분해하는 능력을 가지기 때문에, 이에 대해 좀 더 구체적으로 소개하고자 한다.

Pseudomonas sp.은 PE, PP, PVC, PS, PUR, PET, PES, PEG와 PVA를 다양한 효율의 정도에서 분해하는 것이 확인되었다. *Pseudomonas* sp.의 분해 능력을 조절하는 요인으로는 biofilm 내부와 세포 표면, 고분자 폴리머의 산화 또는 가수분해에 관여하는 촉매인자, 고분자 단편화와 흡수 및 분포를 담당하는 생물학적 분해과정에 관여하는 화학적 요인들이 관여할 것으로 보고되었다 (Wilkes & Aristilde, 2017).

PE는 가장 널리 생산되는 플라스틱 소재로서 플라스틱 가방, 물통, 우유통, 식품 보관류와 장난감 생산 등에 주로 사용되며 에틸렌 결합을 가진 긴 사슬의 포화된 폴리머로서 높은 소수성을 나타낸다. PE는 밀도에 따라 두 가지로 나뉜다. 결정구조가 단단한 패키징을 방해하는 가지사슬을 가질 때를 저밀도 PE(LDPE)라 하며, 가지사슬이 거의 없고 분자들 사이의 강한 힘을 형성할 경우 고밀도 PE(HDPE)라 한다. 해양생태계에서 분리된 15개의 HDPE를 분해하는 박테리아 종으로부터 *Pseudomonas* sp.는 가장 효율적으로 분해하는 것으로 밝혀졌다. *Pseudomonas* sp.는 PE의 긴 사슬 폴리머 중합체에 친수성을 증가시키고, 그 결과 carbonyl기를 생성하고 저분자량 구성성분의 사슬을 절단시켜 폴리머를 분해한다. 플라스틱 폐기물 LDPE을 질산으로 전 처리 후, *P. aeruginosa*로 분해를 유도한 결과 2개월 동안 폐기물의 50.5%를 분해할 수 있다고 보고되어있다. 그러나 *Pseudomonas* AKS2는 LDPE를 분해하는 데 화학적 전처리가 필요하지 않고 질량의 5%정도가 45일 내로 분해되는 결과를 보였다. 또한 종의 구별이 확인되지 않는 *Pseudomonas* sp.는 어떠한 전처리도 없이 LDPE의 무게의 28.6%를 45일 안에 분해한다는 것을 확인하였다. 따라서 PE와 그와 관련된 플라스틱의 생물학적인 분해는 고분자 폴리머 중합체의 구조적 배열과 폴리머에 *Pseudomonas* sp.의 노출 형태 둘 다에 의해서 플라스틱



분해능이 결정된다(Wilkes & Aristilde, 2017).

PS는 가볍고 뻣뻣하며 일회용 컵, 포장재 및 실험실 장비에서 효과적인 단열재로 사용되며 구조는 탄화수소 사슬과 함께 phenyl기로 구성되어 있다. 비록 PS에 대한 생물학적 분해에 대한 연구는 부족하지만 이러한 PS 폴리머 중합체는 *Pseudomonas* sp.에서 스티렌, 톨루엔 그리고 벤젠과 같은 화합물로 분해될 수 있다. 또한 *Pseudomonas* NCIM2220은 PS를 이중 단량체로 분해할 수 있으며 미량의 젖당, 설탕 또는 포도당을 가진 무수 말레익산으로 분해할 수 있다(Wilkes & Aristilde, 2017).

PUR은 polyisocyanate와 polyol의 축합으로부터 형성된 urethane으로 폴리카프로락톤(polycaprolactone, PCL), 폴리에테르 또는 폴리에스터 등 쓰임새에 따라 다양한 구조를 가진다. PUR는 타이어, 스펀지, 냉장고 단열재, 가구 쿠션, 가스켓, 범퍼 그리고 페인트에서 사용되며 내적 특징으로는 불꽃에 대한 단열 효과와 항미생물 활성을 보이고 있으며 온도, pH, 화학약품 그리고 미생물의 분해 효과를 감소시킨다. 이와 같이 PUR은 생물학적인 분해에 역효과를 가지고 있음에도 불구하고 *P. fluorescens*, *P. aeruginosa*, *P. cepacia*, *P. protegens* 그리고 *P. chlororaphis*를 포함한 몇몇의 *Pseudomonas* sp.는 생물학적 분해과정에서 PUR을 분해한다고 알려져 있다(Wilkes & Aristilde, 2017).

PET는 소수성이 강하며 화학 물질에 내성이 있으며, 열·화학적으로 다소 안정하며 전자제품의 부품, 자동차 부품 및 섬유에 사용되며 현재 전 세계적인 생산량은 증가하고 있고 합성 플라스틱 제품의 약 50%로 추정된다. 화학전처리 유무에 관계없이 PET는 생물학적 분해가 쉽지 않으나 자외선으로 전처리한 후, *P. azotoformans*와 *P. stutzeri* 등에 의해 플라스틱 폴리머 중합체의 최소 중량 손실은 1년 후에 나타난다(Wilkes & Aristilde, 2017). PET를 생물학적으로 분해하거나 PET에 의해 번식하는 미생물과 관련되어서는 극히 소수의 연구결과가 보고되어 있다(Muller *et al.*, 2005; Nimchua *et al.*, 2007; Nimchua *et al.*, 2008; Ronkvist *et al.*, 2009; Sharon & Sharon, 2012; Yoshida *et al.*, 2016).

2) *Ideonella sakaiensis* 201-F6

최근에 Yoshida *et al.*(2016)은 흔히 사용되는 플라스틱 PET의 분자 결합을 해체하는 박테리아 종(*Ideonella sakaiensis* 201-F6)을 발견하였고, 저급 플라스틱을 6주 만에 거의 완벽히 분해하는 것으로 드러났다. 이는 다른 플라스틱 분해 박테리아들이나 최근 PET를 분해한다는 사실이 밝혀진 곰팡이보다도 훨씬 빠른 효능을 나타냄을 의미한다. 유전자 조사에 의하면 해당 박테리아는 지난 70년간 환경에 축적된 플라스틱에 대응하여 PET를 분해할 수 있는 효소를 생성하도록 진화했을 가능성이 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나 플라스틱 병에 사용되는 고결정 PET를 분해하는 데에는 오랜 시간을 소요되므로, 이를 산업 재활용 또는 오염 정화 작업에 효과적으로 활용하기 위해서는 많은 개선이 필요할 것으로 보인다. 그 외 현재까지 보고된 PET를 분해하는 미생물의 종류는 아래와 같이 수종이 알려졌다(〈표 3.2〉 참조).

〈표 3.2〉 PET를 분해하는 세균

Microorganisms	Reference
<i>Hermobifida fusca</i> DSM43793 (bacteria)	Muller <i>et al.</i> , 2005
<i>Pseudomonas mendocina</i> (bacteria), <i>Thermobifida fusca</i> (bacteria)	Ronkvist <i>et al.</i> , 2009
Microbes (bacteria)	Sharon <i>et al.</i> , 2012
<i>Ideonella sakaiensis</i> 201-F6 (bacteria)	Yoshida <i>et al.</i> , 2016

자료: Yoshida *et al.*, 2016.

나. 플라스틱 분해 방선균

호기성 및 혐기성 조건에서 PHB를 분해하는 토양 미생물과 PHB 필름의 움푹 들어간 표면에서 다양한 세균, 진균, 방선균 등이 발견되었다. 이 사실은 다양한 균들이 복합적으로 상호작용하여 플라스틱의 분해가 일어난다는 것을 보여 준다.



〈표 3.3〉에 제시된 바와 같이 이와 관련된 미생물 중 *Streptomyces* 종은 LDPE, PUR 등을 분해한다고 보고된 바 있으며, *Actinetobacter*는 PUR을 분해한다고 알려져 있다(Chandra, 2015).

〈표 3.3〉 플라스틱을 분해하는 방선균

Type of Plastic Used	Microorganisms
Starch polyethylene-prooxidant degradable polyethylene	<i>Streptomyces badius</i> 252
Starch polyethylene-prooxidant degradable polyethylene	<i>Streptomyces setonii</i> 75Vi2 and <i>Streptomyces viridosporus</i> T7A
Disposable plastic films	<i>Streptomyces</i> sp. (8 strains)
LDPE powder	<i>Streptomyces</i> KU8, and <i>Streptomyces</i> KU5, <i>Streptomyces</i> KU1, and <i>Streptomyces</i> KU6
PE	<i>Streptomyces</i> sp., <i>Pseudonocardia</i> , <i>Actinoplanes</i> , <i>Sporichthya</i>
PUR	<i>Actinetobacter calcoaceticus</i> , <i>Actinetobacter gernerii</i> P7

자료: Chandra, 2015.

다. 플라스틱 분해 진균

플라스틱을 분해하는 다수의 호기성 및 혐기성 곰팡이는 토양이나 활성슬러지(sludge)와 같은 다양한 환경에서 〈표 3.4〉와 같이 발견되었다. *Trametes*는 HDPE, *Poliporusoersicolor*, *Pleurotus*, *Pleurotus*, *Aureobasidium*은 PVC, *Cladosporium*, *Penicillium*은 PUR, *Fusarium* sp.는 LDPE, *Aspergillus versicolor*, *Phanerochaete*는 PVC를 분해한다고 알려져 있다(Chandra, 2015). 또한 *Aspergillus flaous*는 LDPE 뿐만 아니라 HDPE도 분해가 가능하다. *Phanerochaete chrysosporium*, *Lentinus tigrinus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus sydowii* 균들은 PVC를 다른 균주들보다 상당히 빠른 속도로 분해 할 수 있다. 그러나 이들 진균들도 PVC를 완벽하게

분해한다는 보고는 아직 없으며, PVC를 분해하는 속도도 실용적으로 사용하기에는 느리기 때문에 앞으로 많은 연구를 필요로 한다.

〈표 3.4〉 플라스틱을 분해하는 진균

Type of Plastic Used	Microorganisms
PE	<i>Penicillium simplicissimum</i>
PE bags and cups	<i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Pleurotus ostretus</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus glaucus</i> , <i>Aspergillus ornatus</i> , <i>Aspergillus nidulans</i> , <i>Aspergillus cremeus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus candidus</i> , and <i>Aspergillus glaucus</i>
Degradable PE	<i>Cladosporium cladosporides</i> , <i>Penicillium frequentans</i>
PUR	<i>Chaetomium globosum</i> , <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Curvularia senegalensis</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i> , and <i>Cladosporium</i> sp.
Disposable plastic films	<i>Aspergillus flavus</i> and <i>Mucor rouxii</i> NRRL 1835
PVC	<i>Poliporus versicolor</i> , <i>Pleurotus sajor caju</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i> ME 446, <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Pleurotus sapidus</i> , <i>Pleurotus eryngii</i> , <i>Pleurotus florida</i>
Plasticized PVC	<i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Rhodotorula aurantiaca</i> , and <i>Kluyveromyces</i> spp.
PVC powder	<i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Geotrichum candidum</i> , <i>Alternaria alternaria</i> , <i>Cladosporium</i> sp., <i>Aspergillus</i> sp., <i>Penicillium</i> sp., and <i>Ulocladium atrum</i>
LDPE	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium funiculosum</i> , <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Gliocladium virens</i> , <i>Pullularia pullulans</i> , <i>Aspergillus oryzae</i> , <i>Fusarium</i> sp. AF4, and <i>Aspergillus</i> sp.
LDPE powder	<i>Penicillium pinophilum</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus nidulans</i> and <i>Aspergillus flavus</i>
HDPE	<i>Phanerochaete chrysosporium</i> ME-446 and <i>Trametes versicolor</i> (IFO 7043, IFO 15413), <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus oryzae</i> , and <i>Aspergillus flavus</i>
Degradable plastic	<i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus nidulans</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus glaucus</i> and <i>Penicillium</i> sp.
LDPE powder	<i>Aspergillus versicolor</i> and <i>Aspergillus</i> sp.

자료: Chandra, 2015.



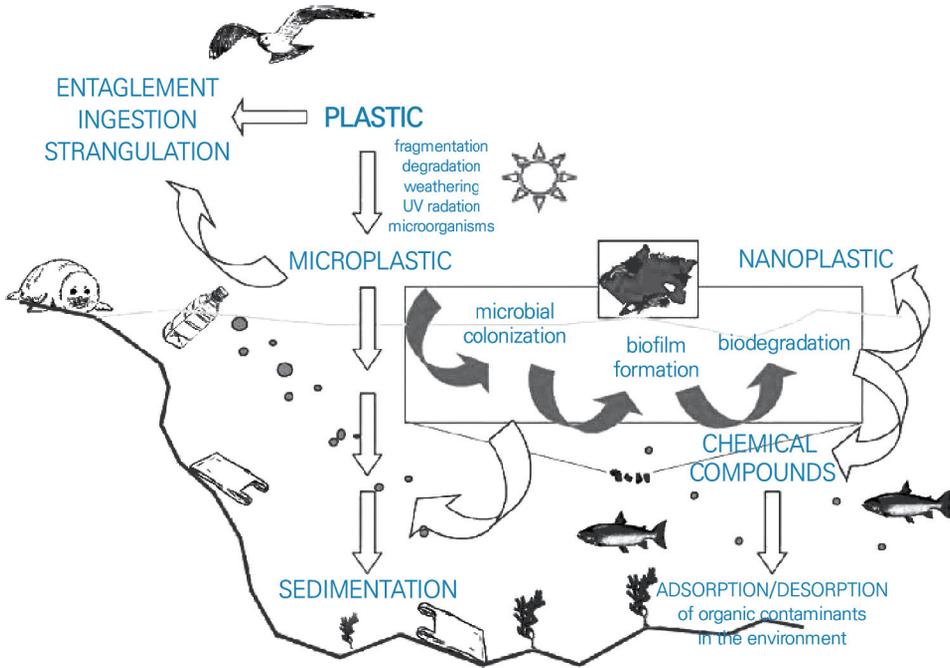
라. 플라스틱 분해 해양미생물

인간의 일상생활에서 나오는 플라스틱은 바다에 유입되는 주요 쓰레기 중 하나이다. 바다는 식량, 에너지, 수자원 등의 중요한 자원을 공급하고 국제 무역의 주요 통로가 되며, 기후를 조절하는 중요한 역할도 수행한다. 그러므로 플라스틱 오염과 같은 해양 생태계의 변화는 전 세계적인 규모로 엄청난 악영향을 일으킬 수도 있다. 이러한 해양 플라스틱 오염문제를 해결할 수 있는 방안 중 하나가 플라스틱 분해능을 가진 해양 미생물들을 발굴하는 것이다. 특히, 해저 속 추운지역에서 발견될 수 있는 해양 미생물의 활용에 대한 것이 주목받고 있다. 최근에 보고된 추운 해양 서식지에서 플라스틱 분해와 플라스틱-미생물의 상호작용에 대해 다음과 같이 정리하고자 한다(Urbanek *et al.*, 2018).

1) 해양 미생물들과 플라스틱의 상호작용

하천을 통해 바다로 유입되는 플라스틱은 단편화, 분해, 풍화, 자외선 그리고 미생물들을 통해 미세플라스틱으로 그 크기가 줄어들며 일부는 해저에 침전되고, 일부는 biofouling(생물오손)이라는 과정을 거친다. biofouling은 바다에 가라앉은 플라스틱 등에 군체 형성이 일어나는 과정을 의미하며, adsorption(흡착), immobilization(부동화 작용), consolidation(경화), microfouling(미생물이 관여) 등의 과정을 거친다. 미생물들은 microfouling(미세오손) 과정에 중요하게 작용하는데 특히 군체 형성 과정에 관여한다고 알려져 있다. 즉 미생물들은 플라스틱의 표면에 붙어 biofilm을 형성하며, 점차적으로 플라스틱의 분자 구조를 변화시키는 생물학적 분해를 일으킨다(Muthu, 2014). 이 과정을 통해 플라스틱은 작은 분자 구조로 분해되어 nanoplastic 또는 단순 유기 화합물로 분해되어 부유물로 존재하거나 해저에 침착 또는 탈착하는 과정을 거치게 된다(Harrison *et al.*, 2011) (<그림 3.1> 참조).

〈그림 3.1〉 미생물과 플라스틱의 상호작용



자료: Urbanek *et al.*, 2018.

2) 해양 환경에서 플라스틱을 분해하는 능력을 지닌 미생물

현재 추운 서식지에서 플라스틱 분해에 대한 연구는 크게 두 가지 방향으로 진행되고 있다. 하나는 해양 생태계와 미생물 서식지와의 상호작용을 연구하는 것이고, 또 하나는 해양 미생물들과 플라스틱과의 관계를 연구하는 것이다. 이러한 연구에서 플라스틱을 분해하는 미생물이 정확히 어떤 것인지 동정하기 위해서 16s rRNA의 염기서열을 이용한다(Ravenschlag, 1999). 상당수의 플라스틱 분해 미생물은 심해 침전물에서 다수 발견이 되는데, 심해가 4°C 미만의 온도를 가진 추운 환경이라는 점에서 추운 환경에서 해양 미생물이 플라스틱을 먹이나 서식지로 사용할 수 있을 것으로 예측된다(Ravenschlag, 1999). 이들 심해의 플라스틱 폐기물에서 발견된 균주에서 주목할 만한 플라스틱 분해능을 가진 미생물이 발견되었으며, 대표적으로 다음과 같다(〈표 3.5〉 참조).



〈표 3.5〉 추운 환경에서 플라스틱을 분해하는 능력을 지닌 해양 미생물

Microorganism	Source	Plastic
<i>Shewanella</i> , <i>Moritella</i> sp., <i>Psychrobacter</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	Deep-sea sediment, the Kurile and Japan Trenches	PCL
<i>Vibrio alginolyticus</i> , <i>Vibrio parahemolyticus</i>	Benthic zones of marine environments	PVA-LLDPE
<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Clonostachys rosea</i> , <i>Trichoderma</i> sp.,	The Arctic soil	PCL, commercial available bag based on potato and corn starch
<i>Zalerion maritimum</i>	Marine environment	PE
<i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Aspergillus</i> sp.	Kovalam coast—off the Bay of Bengal, 500m away from shore at the depth of 5m	LDPE
<i>Pseudomonas</i> sp.	Deep seawater of Tottori Prefecture and offshore in Toyama bay	PCL
<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Alcanivorax</i> sp., <i>Tenacibaculum</i> sp.	Deep seawater	Monofilament fibers of PCL, PHB/V, PBS

자료: Urbanek *et al.*, 2018.

〈표 3.5〉에 의하면 플라스틱 분해 미생물들은 대부분 심해나 북극의 흙에서 발견되는데, 특히 수온이 4℃ 미만인 심해의 침전물에서 다수 발견되었다(Russell, 1990; Ravenschlag *et al.*, 1999). 대표적으로 일본 도야마만 깊이 320m의 해저에서 분리된 균주는 *Pseudomonas* 속으로 이 균은 4℃에서 PCL을 분해 할 수 있다. 심해 5,000~7,000m의 침전물에서도 *Shewanella*, *Moritella*, *Psychrobacter* 및 *Pseudomonas*속 등의 해양미생물이 발견되었고, 이들 균주는 생분해성 PCL에 대해 우수한 분해능을 나타내었다. 또한, 심해 해수에서 낮은 온도에도 불구하고 PCL, PHB 및 polybutylene succinate(PBS) 섬유의 분해가 관찰되었다(Urbaneck *et al.*, 2018). 그 외 320~650m 깊이의 해수에서는 *Pseudomonas*, *Alcanivorax* 및 *Tenacibaculum* 속 등 5종의 PCL 분해 균주가 동정되었다.

최근 Raghul *et al.*(2014)은 폴리비닐알콜(PVA)과 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)을 *Vibrio alginolyticus*와 *Vibrio parahaemolyticus* 2종의 박테리아와 함께 15주간 함께 배양한 결과 플라스틱 표면에서 박테리아에 의해 균열과 흡이 발생함을 확인했으며, 2종 이상의 세균으로 더욱 용이하게 플라스틱이 분해됨을 보고 하였다(Raghul *et al.*, 2014). 2018년 Urbanek *et al.*(2018)에 의해 실시된 최근 연구에서는 polylactic acid(PLA), PCL, PBS 및 Polybutylene succinate adipate(PBSA)에 대한 미생물 활성 검사 결과, *Clonostachys rosea* 및 *Trichoderma sp.* 등의 곰팡이 균주와 *Pseudomonas* 및 *Rhodococcus gena* 속의 박테리아 균주는 PCL 필름 분해 기능과 PLA 필름에서도 빠른 성장이 관찰되어, PLA 분해능에 대한 가능성을 보여주었다(Urbanek *et al.*, 2018) (<표 3.5> 참조).

3) 플라스틱을 분해할 수 있는 해양 미생물 후보군

앞에서 언급한 바와 같이 미생물들은 인간이 살기 힘든 환경인 해저의 추운 서식지에서도 존재할 수 있으며, 이렇게 추운 환경에서 살아가는 미생물의 여러 능력 중에서도 플라스틱을 분해할 수 있는 능력이 주목받고 있다(Pauli *et al.*, 2017). 바다로 흘러들어가는 플라스틱은 해저 미생물들에게 새로운 기층(붙어서 자랄 수 있는 물질)으로 활용되어질 수 있으며, 용해된 유기 탄소를 방출하여 미생물들의 활성을 증가시키거나 미생물들이 새로운 형질을 가지게 만든다. 대표적인 형질이 바로 저온 활성 효소(cold-active enzyme)로서 이 효소는 추운 지역에서도 활성화가 잘 되므로 온도를 높이기 위해 에너지를 많이 사용할 필요가 없어 배양온도에 필요한 비용을 절감할 수 있으므로, 산업적으로 도입하는 데 관심이 증대되고 있다(Yadav *et al.*, 2017). 다음 표는 추운 환경에서 플라스틱에 붙어 발견되는 해양 미생물들을 정리하였으며, 이 미생물들도 플라스틱을 분해하는 잠재력을 가진 후보로 평가받고 있다(<표 3.6> 참조).



〈표 3.6〉 플라스틱 표면에서 발견된 해양 미생물

Microorganism	Source	Plastic
<i>Phormidium</i> , <i>Lewinella</i>	Microbial communities attached to PET drinking bottles submerged in the North Sea off the UK coast	PET
<i>Phormidium</i> sp., <i>Rivularia</i>	Microplastic from the North Atlantic	PP, PE
<i>Stanieria</i> , <i>Pseudophormidium</i>	Microbial communities attached to PET drinking bottles submerged in the North Sea off the UK coast	PET
<i>Pseudophormidium</i> sp., <i>Phormidium</i> sp.	Plastic particles harvested off the coasts of the UK, Germany, and Denmark	PP, PE
<i>Proteobacteria</i> , <i>Bacteroides</i>	Microplastic harvested off the Belgian part of the North Sea	Microplastic
<i>Arcobacter</i> , <i>Colwellia</i> sp.	Coastal marine sediments within the Humber Estuary, UK	LDPE

자료: Oberbeckmann *et al.*, 2016.

〈표 3.6〉과 같이 Oberbeckmann 등은 북해의 영국 쪽 해안에 가라앉아 있던 PET 병에 부착한 미생물 군집을 발견했으며, 이 미생물 종은 *Phormidium*과 *Lewinella* 였다고 보고했다(Oberbeckmann *et al.*, 2016). 또한, Zettler 등은 북대서양에서 PP, PE의 미세플라스틱 조각을 입수했는데, 이 미세플라스틱에서 *Phormidium* sp.와 *Rivularia* 등의 미생물이 부착된 것을 발견하였다(Zettler *et al.*, 2013). 그리고 영국의 북쪽에 위치한 Humber Estuary(험버 어귀)에서는 바다와 접하는 지역에서 LDPE의 침전물을 채취하여 분석한 결과 *Arcobacter*, *Colwellia* sp.가 부착되어 있음을 확인하였다(Harrison *et al.*, 2011). 그 외에도 *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Corynebacterium*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Rhodococcus* 등이 폐플라스틱에서 발견되었다(Pathak & Navnett, 2017). 뿐만 아니라, *Polaromonas*, *Micrococcus*, *Subtercola*, *Agreia*, *Leifsonia*, *Cryobacterium*, *Flavobacterium* 등의 미생물들이 빙하의 cryoconite(먼지들이 눈/빙하에 퇴적되어 쌓인 것)에서 발견되었으며 이들

균주들은 lipase를 생성한다고 보고되어 플라스틱을 분해할 수 있는 미생물로 예측된다(Singh *et al.*, 2014).

마. 생분해성 플라스틱을 분해하는 미생물

기존 플라스틱의 환경오염 문제점을 해결하기 위한 대책 중 하나로 생분해성 플라스틱이 주목을 받고 있으며, 이들 생분해성 플라스틱의 분해를 더욱 촉진시킬 수 있는 미생물들에 대한 연구가 진행되고 있다. 생분해성 플라스틱에 관해서는 IV장, 생분해성 플라스틱 부분에서 자세히 다루도록 한다.

1) PHAs를 분해하는 미생물

PHAs는 생분해성 플라스틱으로서 높은 잠재력을 갖는 열가소성의 폴리에스테르이다. 가장 많이 알려진 PHA는 PHB인데(Quinteros *et al.*, 1999), 이것은 탄수화물을 발효하는 다양한 세균에 의해 생성되며 세균 세포 내의 탄소원과 에너지 저장물질로서 축적되는 자연 발생적인 물질이다(Shimao, 2001). 이러한 PHA를 분해 하는 미생물은 토양, 담수 및 퇴비 등의 다양한 환경에 분포하고 있다. 토양에서 분리된 *Pseudomonas lemoignei*, *Comamonas* sp. 등이 있으며, 활성슬러지, 담수, 해수, 강 하구 퇴적물, 혐기적 하수 슬러지에서 *Alcaligenes faecalis*, *Comamonas* sp., *Comamonas testosteroni*, *Ilyobacter delafieldii*, *Clostridium* sp. 등이 분리되어 이들은 PHA를 분해하여 영양분으로 사용한다 (Colak & Guner, 2004) (<표 3.7> 참조).



〈표 3.7〉 PHAs 분해 미생물

Microorganism	Source	Plastic
<i>Ps. fluorescens</i> GK13		MCL-PHA
<i>Streptomyces exfoliatus</i> K10		MCL-PHA
<i>P. Maculicola</i>		MCL-PHA
<i>Paucimonas lemoignei</i>	토양	호기성 및 혐기성 PHB
<i>Comamonas</i> sp.	토양	호기성 및 혐기성 PHB
<i>Alcaligenes faecalis</i>	활성 슬러지	호기성 및 혐기성 PHB
<i>Comamonas testosteroni</i>	해수	호기성 및 혐기성 PHB
<i>Ilyobacter delafieldii</i>	강 하구 퇴적물	호기성 및 혐기성 PHB
<i>Clostridium</i> sp.	혐기적 하수 슬러지	호기성 및 혐기성 PHB

자료: 김말남, 2007.

2) PCL을 분해하는 미생물

PCL 분해 효소에 대해 많이 알려져 있지는 않지만 PHA 분해 세균과 유사하게 PCL 분해 세균은 토양 및 수서 환경에 다양하게 분포한다. PCL을 분해하는 미생물로는 진균인 *Fusarium* sp., *Aspergillus fumigatus* 등과 세균으로는 *Bacillus pumilis*, *Paenibacillus* sp. 등이 〈표 3.8〉과 같이 보고되어 있다.

〈표 3.8〉 PCL 분해 미생물

Microorganism	Source
<i>Fusarium</i> sp., <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Rhizopus delemar</i>	토양
<i>Paecilomyces lilacinus</i>	토양
<i>Bacillus pumilis</i> , <i>Paenibacillus</i> sp.	토양
<i>Paenibacillus amylolyticus</i>	토양
<i>Alcaligenes faecalis</i>	토양
<i>Amycolatopsis</i> sp.	토양
<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Erwinia</i> sp., <i>Bacillus</i> sp.	토양
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> , <i>Acinetobacter junii</i> , <i>Pseudomonas pavonaceae</i> , <i>Pseudomonas rhodensiae</i> , <i>Pseudomonas veronii</i> , <i>Pseudomonas lemoignei</i> , <i>Ralstoniapickettii</i> , <i>Matsuebacterchitosanotabidus</i> , <i>Filamentous bacterium</i> and <i>Variovorax paradoxus</i>	토양

자료: 김말남, 2007

3) PBS와 PBSA을 분해하는 미생물

PBS와 PBSA의 합성은 석유화학에 기반을 두고 있으며 PBS는 쉽게 구조 형성이 되고 LDPE film과 유사할 정도로 좋은 친수성을 갖지만 우리가 생활하는 자연 환경에서는 생분해가 어렵다는 단점이 있다(Zhu *et al.*, 2003). 현재까지 발표된 PBS 분해 미생물로는 *Aspergillus vesicolor*, *Penicillium* sp., *Bacillus* sp. 및 *Thermopolyspora* sp. 등이 분리되었다. PBSA 분해 미생물로는 토양, 퇴비 및 활성슬러지 등에 널리 분포하고 있으나 PBSA 분해 미생물에 대한 특성 연구는 아직 미미한 편이다. 지금까지 알려진 PBSA 분해 미생물로는 Uchida *et al.*(2000)은 *Acidovorax delafieldii*을, Hayase *et al.*(2004)은 *Bacillus pumilus*를 토양으로부터 분리하여 보고하였다. 그리고 Tomita *et al.*(2000)은 토양에서 *Bacillus stearothermophilus*를 분리하였다. Teeraphatpornchai *et al.*(2003)은 일본의 다양한 지점에서 채집한 토양에서 PBSA 분해 세균 *Paenibacillus amylolyticus*를 분리하였으며 이 세균은 PBSA뿐만 아니라 PLA, PCL 및 PES 등의 다양한 폴리에스테르를 분해하는 것으로 조사되었다. 또한, 진균인 *Aspergillus versicolor*를 Zhao *et al.*(2005)도 토양에서 분리하였다. 〈표 3.9〉에 제시된 것과 같이 수종의 PBSA 분해 미생물이 보고되었다.



〈표 3.9〉 PBSA 분해 미생물

Microorganism	Source
<i>Aspergillus vesicolor</i> , <i>Penicillium</i> sp., <i>Bacillus</i> sp. and <i>Thermopolyspora</i> sp.	
<i>Acidovoraxdelafieldii</i>	토양에서 강화배양
<i>Bacillus pumilus</i>	
<i>Bacillus stearothermophilus</i>	
<i>Paenibacillus amylolyticus</i>	채집한 토양을 clear zone method

자료: 김말남, 2007.

4) 생분해성 플라스틱을 분해하는 효모

〈표 3.10〉은 자연계에 존재하는 생분해성 플라스틱을 분해하는 효모들의 목록이다.

〈표 3.10〉 생분해성 플라스틱의 효모에 의한 분해

Cultivar name	Origin	Yeast population(cfu/g)		Strain no	Phenotype	Species designation
		YM	PBSA			
Shinei	Hokkaido	1×10^6	4×10^3	GB-1	Smooth	<i>C. flavus</i>
Akamai	Tohoku	6×10^5	1×10^4	GB-2	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>
Akinishiki	Niigata	2×10^5	5×10^4	GB-3	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>
Tankei	Ibaraki	3×10^6	5×10^5	GB-4(0)	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>
Tankei	Ibaraki	6×10^6	4×10^6	GB-4(1)S	Smooth	<i>C. laurentii</i>
			4×10^5	GB-4(0)W	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>
Nourin18	Kumamoto	8×10^5	6×10^5	GB-5S	Smooth	<i>C. rajasthanens</i>
			3×10^5	GB-5W	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>
Kanan 2	Taiwan	4×10^3	4×10^3	GB-6	Smooth	<i>C. laurentii</i>
Matsumae	Hokkaido	8×10^4	8×10^4	GB-7	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>
Ouu 52	Akita	8×10^5	8×10^5	GB-8	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>
Chibanishiki	Chiba	3×10^5	0×10^0	not found		
Saikai 124	Fukuoka	1×10^6	4×10^4	GB-10S	Smooth	<i>C. rajasthanens</i>
			4×10^3	GB-10W	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>
Kantou 135	Saitama	2×10^6	1×10^6	GB-11S	Smooth	<i>C. laurentii</i>
			4×10^4	GB-11W	Wrinkled	<i>P. antarctica</i>

주 1) YM: yeast-malt-glucose-peptone agar medium

자료: Kitamoto, 2011.

PBSA를 분해할 수 있는 효모의 개체군은 10종의 종자 껍질에서 $4 \times 10^3 \sim 4 \times 10^6$ cfu/g 범위로 존재한다. 대부분의 PBSA 분해 효모 개체군은 동일한 형태학적인 특징을 가지지만, *Tankei* 9001, *Nourin* 18, *Saikai* 124 및 *Kantou* 135 등과 같은 PBSA 분해 효모 개체군은 다른 형태학적인 특징을 가진 두 개체군이 같이 존재한다(Kitamoto, 2011).

5) 생분해성 플라스틱 분해 활성 균류

〈표 3.11〉에 제시된 바와 같이 생분해성 플라스틱을 분해하는 균류에는 MAFF 6종과 B47-9가 있다. MAFF 6종은 *P. chrysanthemicola* 균주와 *P. radicina* 균주로 구성되어 있으며, B47-9 균주는 강력한 생분해성 플라스틱 분해능을 가지고 있다.

〈표 3.11〉 생분해성 플라스틱의 균류(fungus)에 의한 분해

Strain	Species	DDBJ accession no.	Degradation area (%)	
		ITS region	PBSA	PBS
MAFF244948	<i>Paraphoma chrysanthemicola</i>	LC126022	44.1	30.4
MAFF244949	<i>Paraphoma chrysanthemicola</i>	LC126023	34.9	35.0
MAFF244950	<i>Paraphoma chrysanthemicola</i>	LC126024	32.3	17.5
MAFF244952	<i>Paraphoma radicina</i>	LC126025	59.4	47.0
MAFF244953	<i>Paraphoma radicina</i>	LC126026	67.5	65.5
MAFF245116	<i>Paraphoma chrysanthemicola</i>	LC126027	6.8	0.4
B47-9	Unidentified	AB693768	99.2	95.0

주 1) DDBJ: DNA Data Bank of Japan

2) ITS: Internal transcribed spacer

자료: Koitabashi *et al.*, 2016.

모든 MAFF 균주는 PBSA를 분해하였으며, PBSA와 PBS로 구성된 필름도 분해하였다. 이에 비해 B47-9 균주는 PBSA와 PBS 모두를 잘 분해한다. 따라서 *Paraphoma* 속에 속하는 모든 MAFF 균주가 강력한 생분해성 플라스틱 분해 능력을 가지고 있을 것으로 예측이 된다(Koitabashi *et al.*, 2016).



2. 플라스틱 분해 효소

가. 플라스틱 분해 효소 개요

플라스틱을 생분해할 수 있는 효소에는 lipase depolymerase(PHA depolymerase, PHB depolymerase, PLA depolymerase, PCL depolymerase), esterase, proteinase(proteinase K against PLA), cutinase, urease, 그리고 dehydratase 등이 있다. 이들 효소가 분해하는 플라스틱은 대부분 생분해성 합성수지지만, *Ideonella sakaiensis* 균은 합성 플라스틱 분해도 가능하다(Austin *et al.*, 2018).

합성플라스틱을 분해할 수 있는 효소로 PETase가 있다. 이 PETase는 지난 2016년 일본 연구팀이 탄소와 에너지의 원천으로 PET를 먹을 수 있는 *Ideonella sakaiensis* 박테리아에서 처음 발굴한 효소이다. PETase는 PET를 분해하여 mono-(2-hydroxyethyl) terephthalate(MHET)로 변형시키고, 이것을 다시 단위체인 terephthalic acid로 바꾼다. 국내에서도 *Ideonella sakaiensis* 균의 PETase의 단백질 결정 구조를 밝히고, 단백질 엔지니어링을 통해 PET 분해에 우수한 효소 원리 규명 및 새로운 활성 증가 변이 효소를 최초로 개발한 바가 있다(Joo *et al.*, 2018). 또한 Harry *et al.*(2018)은 플라스틱 분해능력을 향상시키기 위해 효소를 유전적으로 조작하여, PET의 대체물질인 PEF(polyethylene-2,5-furandicarboxylate)도 분해할 수 있다고 밝혔다.

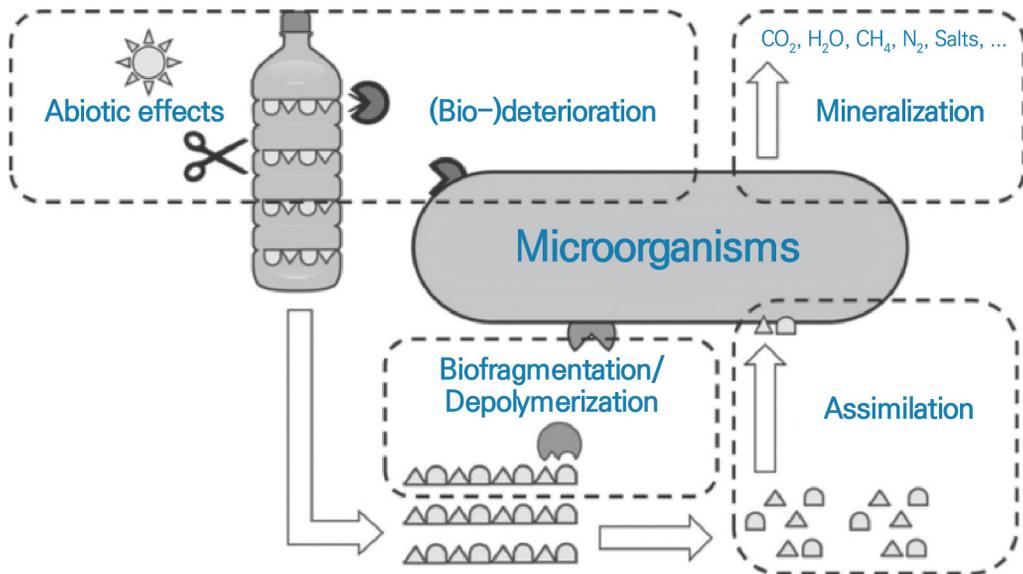
나. 플라스틱 분해 효소 및 생물학적 분해

최근에 난분해성 합성 고분자를 변형 또는 분해할 수 있는 미생물 효소들이 밝혀졌고 이 효소들이 플라스틱 원료 물질을 환경 지속 가능한 방식으로 회수할 수 있는 생물 촉매 플라스틱 재활용 공정의 개발 후보로 부상되고 있다. 여기에서는 PE, PS, PUR 그리고 PET와 같은 합성 플라스틱의 분해를 포함한 미생물의 효소 촉매에 초점을 맞추고 있다. 즉 PET building block을 회수하기

위한 폴리에스터 가수분해 효소의 적용과 플라스틱 폐기물 재활용 공정에서 이러한 효소의 적용에 대해 많은 논의가 진행되고 있다(Wei & Zimmermann, 2017).

생분해 과정은 많은 비생물적 및 생물적 요인들의 결합의 결과로 간주된다 (<그림 3.2> 참조). 비생물적 요인 및 미생물이 협력하여 플라스틱을 변질시킨 후, 노출된 표면부터 잘게 부수어진다. 플라스틱 분해 효소는 합성 중합체의 분해과정에서 결정적인 역할을 하며, 합성 중합체의 분자 크기가 10~50 탄소 원자의 범위로 감소되면, 분해 생성물은 세포 내로 흡수되어 추가적인 신진대사를 가능하게 한다.

<그림 3.2> 플라스틱의 생분해 과정



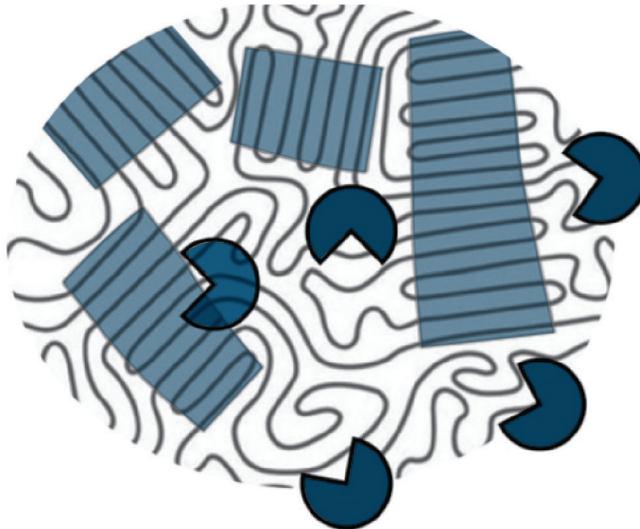
자료: Wei *et al.*, 2017.

대부분의 합성 고분자는 결정질(crystalline) 및 비정질(amorphous) 영역을 모두 포함하는 semi-crystalline 중합체이며, 비정질 영역은 미생물의 영향을 받기 쉽다(<그림 3.3> 참조). 따라서 중합체의 결정화도는 생분해성에 강한



영향을 미치게 되고 열로 전처리된 PE 샘플의 결정성 분획은 비정질 부분의 완전한 분해반응 후에 분해된다.

〈그림 3.3〉 비정질 및 결정질 영역 (회색 영역)을 모두 포함하는 반 결정질 중합체



자료: Wei & Zimmermann, 2017.

다. Carbon-carbon backbone을 가진 플라스틱의 효소에 의한 분해

PE은 C-C backbone을 가진 플라스틱 중 가장 흔하게 사용되는 종류이다. 그러므로 최근 수년간 다양한 종류의 PE에 대한 생물적 분해의 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 연구에 따르면, 미생물의 효소들 중 식물 세포벽에서 발견된 산화성 C-C bond를 가지고 있는 십자형 phenol성 폴리머인 lignin을 분해할 수 있는 효소들은 PE의 생물적 분해능도 포함하고 있다고 보고된 바 있다(Wei & Zimmermann, 2017). 이러한 효소들로는 laccase, manganese peroxidase (MnP), lignin peroxidase(LiP)가 있다. *Rhodococcus ruber* C208는 구리의 존재 하에서 laccase라는 효소를 이용하여 UV-irradiated PE film을 분해하며, *Trametes vericolor*도 같은 효소를 이용하여 1-hydroxybenzotriazole 존재 하에 PE 막을 분해하는 것으로 알려져 있다(〈표 3.12〉 참조). 〈표 3.12〉는 C-C

backbone을 가지는 플라스틱을 분해하는 미생물의 효소들과 반응조건을 나타낸 것이다.

〈표 3.12〉 C-C backbone을 가진 플라스틱을 분해하는 미생물의 효소

Enzyme	Condition	Plastic	Microorganism
Laccase	In culture supernatants and in cell-free extracts in the presence of copper, 2weeks of incubation, 37°C	UV-irradiated PE films	Rhodococcus ruber C208
Laccase	In presence of 1-hydroxybenzotriazole	PE membrane	Trametes vericolor
Manganse peroxidase (MnP)	Surfatants(Tween80, 20, CHAPSO) promote degradation of PE by partially purified MnP	PE membrane	Phanerochaete chrysosporium ME-446
MnP	-	PE membrane	IZU-154
Genes encoding the most active MnP	-	Oxidation of 2,6-dimethoxyphenol, degradation of nylon-66	IZU-154
Laccase, MnP	-	UV-irradiated PE	Bacillus cereus
Lignin peroxidase (LiP)	-	PE fraction of a heattreated plastic blend	Streptomyces species
Extracellular LiP, MnP	70% of PE sample, 15 days of incubation	preoxidized high molecular weight PE sample	Phanerochaete chrysosporium MTCC-787
Alkane hydroxylase (AH)	Converted 20% of the low molecular weight PE sample to CO ₂ , 80 days of incubation, 37°C	PE sample	Pseudomonas sp. E4 expressed in Escherichia coli BL21
Alkane mono-oxygenase, Rubredoxin, Rubredoxin reductase	A recombinant E. coli strain simultaneously expressing the complete AH system from Pseudomonas aeruginosa E7 degraded about 30% of this PE sample	PE sample	Pseudomonas aeruginosa E7
Hydroquinone peroxidase (EC)	In a two-phase system consisting of dichloromethane and water	PS	Azotobacter beijerinckii HM121
Have not been identified yet	-	PE and PS	Novel bacterial strains isolated from the guts of insect larva

자료: Wei & Zimmermann, 2017.

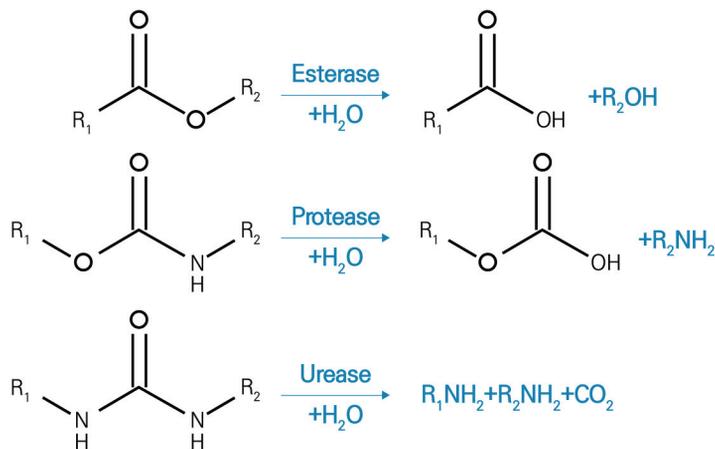


C-C backbone을 가진 또 다른 중요 플라스틱인 PVC는 현재까지 효소들이 직접적으로 분해한다는 결과는 아직 보고된 바 없다. 그러나 미생물 균집 또는 혼합 배양물을 이용하면 단일 미생물에 비해 PVC분해에서 향상된 효능이 나타난다고 보고되었다(Wei & Zimmermann, 2017).

라. PUR의 효소에 의한 분해

PUR은 carbamate(urethane) bond로 연결된 di- 또는 polyisocyanate 그리고 polyol로 구성된 폴리머이다. PUR은 플라스틱의 urethane과 ester bond를 가수분해하는 urease, esterase, 그리고 protease에 의해 단량체로 분해될 수 있다(〈표 3.13〉 참조). Protease는 amide와 urethane 결합을 가수분해하는 반면, urease는 urea 결합을 가수분해한다. 또한 esterase 및 protease들은 효소에 의한 중합분해반응을 주요 메커니즘으로 하여 polyester PUR의 ester 결합을 가수분해한다(〈그림 3.4〉 참조). PUR을 분해하는 미생물 효소로는 polyhydroxy-alkanoate depolymerase와 융합된 polyamidase와 esterase 등이 있지만 이에 대한 연구는 아직도 초기단계이다.

〈그림 3.4〉 Esterase, protease 그리고 urease에 의한 PUR 결합의 분해



자료: Wei & Zimmermann, 2017.

〈표 3.13〉 PUR을 분해하는 미생물의 효소

Enzyme	Condition	Plastic	Microorganism
Polyamidase fused to polyhydroxyalkanoate depolymerase	Compared with the wild-type enzyme, an increased yield in degradation products was observed following the incubation of a solid polyester PUR with a polyamidase from <i>Nocardia farcinica</i> fused to the hydrophobic polymer binding module of the polyhydroxyalkanoate depolymerase from <i>Alcaligenes faecalis</i> .	Solid polyester PUR	<i>Nocardia farcinica</i> + <i>Alcaligenes faecalis</i>
Esterase	-	PUR	<i>Delftia acidovorans</i>

자료: Wei & Zimmermann, 2017.

마. PET의 효소에 의한 분해

PET의 내구성 및 낮은 생분해성을 나타내는 이유는 backbone에 반복적인 방향족 테레프탈레이트 단위의 존재 및 중합체 사슬로 인한 제한된 이동성 때문이다. 반결정성 PET 폴리머는 비정질(amorphous) 및 결정질(crystalline) 분획물을 포함하고 있어 생분해성에 강력한 영향을 미친다. 65°C 이상의 PET의 유리전이온도(Tg)에 가까운 온도에서 폴리머의 비정질 부분은 유연해지므로 효소와의 반응이 보다 쉽게 일어날 수 있다. 결과적으로, 높은 Tg의 PET를 분해하기 위해서는 이 온도 범위에서 높은 안정성을 갖는 효소가 필요하다. 최근 30°C의 반응 온도에서 비정질 PET의 효소 가수분해가 보고된 바 있으나 분해 속도가 매우 느린 것으로 관찰되었다(Wei & Zimmermann, 2017).

곰팡이 및 방선균 종의 많은 lipase 및 cutinase가 비정질 PET를 가수분해하여 PET 필름 및 섬유의 표면을 변형시킨다(〈표 3.14〉 참조). Lipase의 구조는 뚜껑 구조(lid structure)가 매립된 소수성 촉매 센터를 가지고 있어 폴리머형태의 기질에 대한 접근성이 제한되어있기 때문에 PET에 대한 낮은 활성을 나타낸다. 대조적으로, 뚜껑 구조가 없는 cutinase는 비정질 PET 필름에 대해 분해활성을 나타낼 수 있다. 특히, *Thermomyces(formerly Humicola) insolens*에서 분리된 내열성 cutinase HiC 효소는 70°C, 96시간이면 PET film을 완전히



분해할 수 있으며, *Thermobifida fusca* KW3 균주의 polyester hydrolase TfCut2 효소는 금속이온이 없는 70°C의 조건에서 무정형 PET film을 분해할 수 있다고 알려져 있다.

〈표 3.14〉 PET를 분해하는 미생물의 효소

Enzyme	Condition	Plastic	Microorganism
Carboxyl-esterase	-	PET fibers, PET oligomers	<i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Thermobifida fusca</i>
Thermostable cutinase HiC	HiC hydrolysed a low crystalline (7%) PET film almost completely, 96h, 70°C	PET film	<i>Thermomyces (formerly Humicola) insolens</i>
Thermostable bacterial LC-cutinase	Approximately 25% of a low crystalline PET film for 24 h, 70°C	PET film	Thermostable bacterial LC
Several polyester hydrolase	Bivalent metal ions, such as Ca ²⁺ and Mg ²⁺ enhanced the thermostability of several polyester hydrolases	PET	Actinomycete
Polyester hydrolase TfCut2	Degraded amorphous PET films at 70°C in the absence of metal ions	Amorphous PET films	<i>Thermobifida fusca</i> KW3
Esterase	A truncation of 71 N-terminal residues of an esterase facilitated its adsorption to PET and improved its hydrolytic activity	PET	<i>Clostridium botulinum</i>
Polyester hydrolase	By modification of the size and the hydrophobicity of these residues, the hydrolytic activity against PET could be increased	PET	<i>Fusarium solani</i> , <i>Thermobifida fusca</i>
PETase	A recently described enzyme from <i>Ideonella sakaiensis</i> 201-F6, which catalysed specifically the hydrolysis of MHET, could be a further candidate for a one-pot system to promote PET hydrolysis in an enzyme reactor.	PET, MHET	<i>Ideonella sakaiensis</i> 201-F6
IsPETase	-	PET	(Enzyme variant)

자료: Wei & Zimmermann, 2017.

결정성이 30% 이상이고 PET 섬유가 40% 이하인 PET 음료수 병은 일반적인 PET 제품으로 효소 분해에 대한 높은 저항성을 가지고 있다. 일부 폴리에스터 가수분해 효소는 50℃ 이상의 온도에서 반응 시 비정질 PET 물질에 대해 높은 활성을 나타냈지만, 결정성 및 이축연신성(수지를 압축하여 형틀에서 압축시킬 때 가로 및 세로방향으로 중합체의 사슬을 잡아당겨 배향시키는 것으로 충격강도와 투명성을 증가시킴) PET는 동일한 반응조건에서 훨씬 적게 분해된다. 따라서 결정성 또는 이축연신성의 비율이 높은 PET 섬유 및 음료수 병을 짧은 반응 시간 내에 완전히 분해시키는 것은 현재 어려운 실정이다.

Ethylene glycol, terephthalate, mono-(2-hydroxyethyl) terephthalate (MHET)와 bis-(2-hydroxyethyl) terephthalate(BHET)은 PET의 효소 가수분해로부터 얻어지는 주요 수용성 생성물들로서, PET를 가수분해하는 polyester hydrolase TfCut2 효소에 대해 강력한 저해작용을 나타낸다(〈표 3.15〉 참조). 따라서, 초미세여과막이 장착된 효소 반응기에서 무정형 PET 필름의 가수분해를 수행함으로써 발생하는 MHET 및 BHET를 연속적으로 제거하여 효소 억제를 막을 수 있는 기술이 개발되고 있다(Wei & Zimmermann, 2017). 하지만 PET 분해 효소의 이중 효소 반응계에 대한 연구는 미미한 편이다.

〈표 3.15〉 이중 효소 반응계

Enzyme	Condition	Plastic	Microorganism
TfCut2 + TfCa	With a dual enzyme reaction system composed of TfCut2 and the immobilized carboxylesterase TfCa, a twofold higher yield of degradation products could be obtained compared with those without TfCa.	PET TfCa:MHET, BHET	<i>Thermobifida fusca</i> KW3
HiC + CalB	The fungal polyester hydrolase HiC and the lipase CalB also showed a 7.7-fold increase in the yield of terephthalate obtained due to the concomitant degradation of MHET catalysed by CalB.	PET, CalB:MHET	<i>Candida antarctica</i>

자료: Wei & Zimmermann, 2017.



바. 기존의 IsPETase보다 PET 분해능이 뛰어난 IsPETase의 개발

PET 분해성 세균인 *Ideonella sakaiensis*에서 분리된 PETase(IsPETase)의 결정 구조가 보고되어 활성부위에 Ser-His-Asp 촉매 삼중체를 가지고 있으며 PET가 갖는 4개의 MHET 부분을 수용하기 위한 최적의 기질 결합 부위를 함유하고 있다고 알려졌다. 그 후 돌연변이 유발 실험에 의해, PET를 분해하여 MHET, terephthalic acid 및 ethylene glycol로 만드는 상세한 과정이 규명되었고, 잠재적으로 높은 PET 분해 활성을 갖는 다른 PETase 후보 효소들도 제시되었다. 최근에는 IsPETase와 PET를 대체할 수 있는 유사 기질 간의 도킹 시뮬레이션을 진행하여 PET에 특이적인 IsPETase 분해능의 원리를 구조적 특징으로 재입증하였고 이를 기반으로 효소 엔지니어링을 진행하여 야생형 IsPETase보다 우수한 변이 효소 IsPETase를 개발하였다(Joo *et al.*, 2018).

사. *Pseudomonas* sp. 유래의 플라스틱 분해 효소

일반적인 효소적 분해는 질량 감소와 작용기의 첨가라는 두 가지의 중요한 과정을 포함한다. 효소적 분해에 대한 화학적 또는 생물학적 산화 반응은 박테리아를 흡착시키거나 분해를 향상시킬 수 있는 관능기 즉, alcohol기 또는 carbonyl기를 첨가하여 친수성을 증가시킴으로써 효소적 분해를 가능케 한다. Carbonyl기의 분해로 생성된 생성물은 TCA cycle에 의해 세포 안으로 들어가 β -oxidation을 통해 대사된다.

Depolymerase와 hydrolase와 같은 세포외 효소는 큰 플라스틱 중합체에 작용하여 더 작은 분자로 분해하는 역할을 한다. 가수분해는 중합체 사슬말단(exo-attack) 또는 중합체 사슬의 중간 부위(endo-attack) 둘 다에서 일어날 수 있다. Exo-attack은 박테리아가 세포 내로 동화 될 수 있는 작은 올리고머 또는 단량체를 생성하며 endo-attack은 일차적으로 폴리머의 분자량을 감소시키고 그 결과 생성물은 더 이상의 분해가 없어 세포 내로 동화될 가능성도 없게 된다. *Pseudomonas* sp.으로부터 분리된 세포외 depolymerase는 브롬처리된 PS를 분해하는 데 효과적이며 *P. stutzeri* JA1001에 의한 PEG의 분해는 glyoxylic

acid를 생성하는 세포 내 PEG dehydrogenase에 의하여 플라스틱을 분해하는 데 도움이 된다.

Esterase, lipase 그리고 cutinase는 플라스틱 분해에 있어 유용한 가수분해 효소이다(〈표 3.16〉 참조). 이러한 가수분해 효소는 이전 산화 반응에 의해 생성된 carbonyl탄소 원자에 대해 친핵성 공격을 통해 에스테르 결합을 억제하고 효소 중합체를 절단하는 매우 중요한 역할을 한다. 생물학 요소들이 증가된 토양에서 *Pseudomonas* AKS2에 의한 PES의 분해는 효소학적 분석에 의해 결정되는 가수분해 효소와 탈수소 효소 활성화에 의해 촉진된다(Wilkes & Aristilde, 2017). 〈표 3.16〉에 제시된 바와 같이 PE, PS, PUR, PET, PE가 hydrolase, esterase, protease, lipase, polyurethanase, alkane monooxygenase, alkane hydroxylase 등에 의해 분해된다는 것이 알려져 있다.



〈표 3.16〉 플라스틱 분해에 있어 유용한 *Pseudomonas* sp. 유래 효소

Plastic	Microorganism	Enzymes
PE		
LDPE	<i>Pseudomonas</i> sp. AKS2	Hydrolase
LMWPE	<i>Pseudomonas</i> sp. E4	Alkane hydroxylase
PS		
High impact	<i>Pseudomonas</i> sp.	Esterase
Vinyl chloride	<i>P. putida</i> AJ	Alkene monooxygenase
PUR		
Polyester	<i>P. chlororaphis</i>	Polyurethanase
Polyester	<i>P. aeruginosa</i>	Esterase
Polyester	<i>P. aeruginosa</i> MZA-85	Esterase
Polyester	<i>Pseudomonas</i> sp.	Lipase
Polyester	<i>P. fluorescens</i>	Esterase
Polyester	<i>P. fluorescens</i>	Protease
Polyester	<i>P. protegens</i> BC2-12	Lipase
Polyester	<i>P. protegens</i> CHA0	Lipase
Polyester	<i>P. protegens</i> Pf-5	Lipase
Polyester	<i>P. fluorescens</i> A506 and Pf0-1	Lipase
Polyester	<i>P. chlororaphis</i>	Lipase
Polyester	<i>P. fluorescens</i>	Esterase/protease
PET	<i>Pseudomonas</i> sp.	Lipase
PES	<i>Pseudomonas</i> sp. AKS2	Esterase
PEG	<i>P. stutzeri</i>	PEG dehydrogenase
PVA	<i>P. vesicularis</i> PD	Esterase

자료: Wilkes & Aristilde, 2017.

3. 플라스틱 분해 미생물 균주 및 효소 연구의 국내 현황

우리나라 과학기술부는 2018년 생활폐기물재활용기술개발사업에 57억 원의 연구예산을 배정하였고, 미래선도기술개발 현안 해결형사업으로 '재활용 필요 없이 자연 분해되는 플라스틱 대체 소재 개발'의 공모를 하는 등, 폐플라스틱 분리, 선별, 재활용 분야 및 생분해, 친환경 플라스틱 등 분해를 고려하여 생산하는 분해성 플라스틱 분야에는 지속적인 연구가 진행되고 있다. 그 결과로 천연고분자, 펄프, 생분해 고분자, 복합분해, 바이오플라스틱 등 다양한 분해성 소재 기반의 기술이 개발되어 있지만, 국내의 합성 플라스틱 분해 기술 연구는 대단히 미흡한 상황이다. 그리고 분해성 플라스틱은 물성의 한계로 인해 사용범위가 제한적이고, 제작 비용이 높다는 단점이 있다. 따라서, 플라스틱 대체재 기술이 보편화되기 전까지는 합성플라스틱 분해기술 활용이 증가하는 플라스틱 폐기물 문제를 대처하는 데 유용할 것으로 예상된다.

플라스틱 분해 효소에 대한 국내 연구 사례는 다음과 같다. 2018년 국내 연구팀은 기존 알려진 효소보다 우수한 PET 분해능력을 가지는 효소의 구조를 밝히고, 이 효소의 우수한 PET 분해 원인 규명 및 PET 분해 활성이 증가된 변이 효소를 개발하였다(Joo *et al.*, 2018). 그들은 PET 분해 효소가 높은 분해능을 갖는 원인을 탐색하여 단백질 구조에 있다는 것을 확인하였으며, 이 효소 특정 부위의 돌연변이 유도를 통해 PET 분해 기작에 중요한 역할을 하는 잔기(residue)를 규명한 후, 효소 엔지니어링을 거쳐 개발된 PETase 변이 효소는 기존 효소에 비해 증가된 PET 분해 활성을 가지고 있다고 보고하였다. 그러나 이 효소를 플라스틱 폐기물 처리 현장에 투입하기 위해서는 실용화를 위한 생산 비용의 절감과 대량 생산 공정 개발이 뒤따라야할 것으로 예상된다.

플라스틱 분해 효소의 실질적인 이용을 위해서는, 생산 비용 절감을 위한 합성 플라스틱 분해 효소의 분해능 향상 연구가 필요하다. 합성 플라스틱 분해 효소의 대량 생산을 위해 분해 미생물의 최적 배양조건 및 배양기술 연구와 효소 대량생산 기술 개발이 필요하다. 또한, 폐기장의 특수한 환경조건에서도 안정적인 효소의 활성이 유지되어야하고, 대량의 플라스틱 폐기물을 신속하게 처리할 수



있어야하기 때문에 대량 플라스틱 폐기물의 신속한 처리를 위한 효소 효율성 향상 연구가 진행되어야 한다. 한편으로, 플라스틱 분해능이 있는 미생물을 살포하였을 때 생태계에 미치는 영향이나 환경 교란 등, 부작용에 대한 연구도 뒤따라야 한다.

국외에서는 세균, 방선균, 진균, 곤충 등 플라스틱 분해능을 가진 다양한 종의 연구가 이루어지고 있으며, 그 분해 기작 및 효소의 규명을 통해 새로운 합성 플라스틱 분해 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 위 변이효소 연구결과를 제외하면, 플라스틱 분해 기술 연구가 극히 미미한 실정이며, 개발된 분해기술의 실용화, 대량화 등을 위한 연구 인프라도 부족하다. 따라서 플라스틱 분해 원천기술 개발 및 실용화를 위해서는 더 많은 연구와 지원이 필요하다.

참고문헌

- 김달남(2007). "Microorganisms capable of plastics degradation", 자연과학연구, 제18권, pp. 1-9.
- Austin, H. P., Allen, M. D., Donohoe, B. S., Rorrer, N. A., Kearns, F. L., Silveira, R. L., Pollard, B. C., Dominick, G., Duman, R., El Omari, K., Mykhaylyk, V., Wagner, A., Michener, W. E., Amore, A., Skaf, M. S., Crowley, M. F., Thorne, A. W., Johnson, C. W., Woodcock, H. L., McGeehan, J. E. & Beckham, G. T.(2018). "Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol.115 No.19, pp. 4350~4357.
- Chandra, R.(2015). "Environmental Waste Management", CRC Press, pp. 341~370.
- Colak, A. & Gune, S.(2004). "Polyhydroxylakanoate degrading hydrolase-like activities by Pseudomonas sp. isolated from soil", International Biodeterioration & Biodegradation, Vol.53, pp. 103~109.
- Harrison, P., Sapp, M., Schratzberger, M. & Osborn, A. M.(2011). "Interactions between microorganisms and marine microplastics: a call for research", Marine Technology Society Journal, Vol.45 No.2, pp. 12~20.
- Hayase, N., Yano, H., Kudoh, E., Tsutsumi, C., Ushio, K., MiYahara, Y., Tanaka, S. & Nakagawa, K.(2004). "Isolation and characterization of poly(butylene succinate-co-butylene adipate)-degrading microorganism", Journal of Bioscience and Bioengineering, Vol.97 No.2, pp. 131~133.
- Joo, S., Cho, I. J., Seo, H., Son, H. F., Sagong, H. Y., Shin, T. J., Choi, S. Y., Lee, S. Y. & Kim, K. J.(2018). "Structural insight into molecular mechanism of poly(ethylene terephthalate) degradation", Nature Communication 9, No.382, pp. 1~12.
- Kitamoto, H. K., Shinozaki, Y., Cao, X. H., Morita, T., Konishi, M., Tago, K.,



- Kajiwara, H., Koitabashi, M., Yoshida, S., Watanabe, T., Sameshima-Yamashita, Y., Nakajima-Kambe, T. & Tsushima, S.(2011). "Phyllosphere yeasts rapidly break down biodegradable plastics", *AMB Express*, Vol.1 No.44, pp. 1~11.
- Koitabashi, M., Sameshima-Yamashita, Y., Koike, H., Sato, T., Moriwaki, J., Morita, T., Watanabe, T., Yoshida, S. & Kitamoto, H.(2016). "Biodegradable Plastic-degrading Activity of Various Species of *Paraphoma*", *Journal of Oleo Science*, Vol.65 No.7, pp. 621~627.
- Muthu, S.S. (Ed).(2014). "Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing", Springer, pp. 83~123.
- Oberbeckmann, S., Osborn, A. M. & Duhaime, M. B.(2016). "Microbes on a bottle: substrate, season and geography influence community composition of microbes colonizing marine plastic debris", *PLoS One*, Vol.11 No.8, pp. e0159289.
- Pathak, V. M. & Navneet, P.(2017). "Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach", *Bioresources and Bioprocessing*, Vol.4, pp. 15.
- Pauli, N. C., Petermann, J. S., Lott, C. & Weber, M.(2017). "Macrofouling communities and the degradation of plastic bags in the sea: an in situ experiment", *Royal Society Open Science*, Vol.4 No.10, pp. 170549.
- Quinteros, R., Goodwin, S., Lenz, R. W. & Park, W. H.(1999). "Extracellular degradadingof medium chain legth poly(β -hydroxyalkanoates) by *Comamonas* sp.", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol.25 No.1~3, pp. 135~143.
- Raghul, S. S., Bhat, S.G., Chandrasekaran, M., Francis, V. & Thachil, E.T.(2014). "Biodegradation of polyvinyl alcohol-low linear density polyethylene-blended plastic film by consortium of marine benthic vibrio", *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Vol.11 No.11, pp. 1827~1834.
- Ravenschlag, K., Sahm, K., Pernthaler, J. & Amann, R.(1999). "High Bacterial Diversity

- in Permanently Cold Marine Sediments”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.65 No.9, pp. 3982~3989.
- Russel, N. J.(1990). "Cold adaptation of microorganisms”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol.326, pp. 595~611.
- Shimao, M.(2001). "Biodegradation of plastics”, *Current Opinion in Biotechnology*, Vol.12 No.3, pp. 242~247.
- Singh, P., Singh, S. M. & Dhakephalkar, P.(2014). "Diversity, cold active enzymes and adaptation strategies of bacteria inhabiting glacier cryoconite holes of High Arctic”, *Extremophiles*, Vol.18 No.2, pp. 229~242.
- Teeraphatpornchai, T., Nakajima-Kambe, T., Shimogeno-Akutsu, Y., Nakayama, M., Nomura, N., Nakahara, T. & Uchiama, H.(2003). "Isolation and characterization of a bacterium that degrades various polyester-based biodegradable plastics”, *Biotechnology Letters*, Vol.25 No.1, pp. 23~28.
- Tomita, K., Kuroki, Y., Hayashi, N. & Komukai, Y.(2000). "Isolation of a thermophile degrading poly(butylene succinate-co-butylene adipate)”, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol.90 No.3, pp. 350~352.
- Uchida, H., Nakajima-Kambe, T., Shigeno-Akutsu, Y., Nomura, N., Tokiwa, Y. & Nakahara, T.(2000). "Properties of a bacterium which degrades solid poly(tetramethylene succinate)-co-adipate, a biodegradable plastic”, *FEMS Microbiology Letters*, Vol.189 No.1, pp. 25~29.
- Urbanek, A. K., Rymowicz, W. & Mirończuk, A. M.(2018). "Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol.102 No.18, pp. 7669~7678.
- Wei, R. & Zimmermann, W.(2017). "Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?”, *Microbial biotechnology*, Vol.10 No.6, pp. 1308~1322.
- Wilkes, R. A. & Aristilde, L.(2017). "Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges”, *Journal of Applied Microbiology*, Vol.123 No.3, pp. 582~593.



- Yadav, A. N., Verma, P., Kumar, V., Sachan, S. G. & Saxena, A. K.(2017). "Extreme cold environments: a suitable niche for selection of Novel psychrotrophic microbes for biotechnological applications", *Advances in Biotechnology & Microbiology*, Vol.2 No.2, pp. 555584.
- Yamada, O. K., Mukumoto, H., Katsuyaya, Y., Saiganji, A. & Tani, Y.(2001). "Degradation of polyethylene by a fungus *Penicillium simplicissimum* YK", *Polymer Degradation and Stability*, Vol.7, pp. 323~327.
- Yayasekara, R., Harding, I., Bowater, I. & Lonergan, G.(2005). "Biodegradability of selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment of biodegradation.", *Journal of Polymer Environment*, Vol.13, pp. 231.
- Yoko, T., NariakiIshii, Ken-ichi, K. & Hiroshi, M.(2004). "Degradation of poly(ethylene succinate) by mesophilic bacteria", *Polymer Degradation and Stability*, Vol.84 No.1, pp. 115~121.
- Yoon, M.G., Jeong, J.H. & Kim, M.N.(2012). "Biodegradation of polyethylene by a soil bacterium and AlkB cloned recombinant cell", *Journal Bioremediation and Biodegradation*, Vol.3 No.4, pp. 1~8.
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y. & Oda, K.(2016). "A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)", *Science*, Vol.351 No.6278, pp. 1196~1199.
- Yuji, O., Hiroyuki, A., Teizi, U. & Kenzo, T.(1995). "Microbial degradation of poly(3-hydroxybutyrate) and polycaprolactone by filamentous fungi", *Journal of Fermentation and Bioengineering*, Vol.80 No.3, pp. 265~269.
- Zettler, E. R., Mincer, T. J. & Amaral-Zettler, L.A.(2013). "Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris", *Environmental Science & Technology*, Vol.47 No.13, pp. 7137~7146.
- Zhao, J. H., Wang, X. Q., Zeng, J., Yang, G., Shin, F. H. & Yan, Q.(2005). "Biodegradation of poly(butylene succinate-co-butylene adipate) by

Aspergillus versicolor”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.90 No.1, pp. 173~179.

Zhu, C., Zhang, Z., Liu, Q., Wang, Z. & Jin, J.(2003). “Synthesis and biodegradation of aliphatic polyesters from dicarboxylic acids and diols”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.90 No.4, pp. 982~990.

IV

플라스틱 대체재의 개발 및 관련 산업 현황



IV

플라스틱 대체재의 개발 및 관련 산업 현황

Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem

플라스틱이라는 소재는 이미 현대인의 생활에 있어서 매우 다양한 분야에서 필수불가결한 소재로 자리매김을 하였다. 다양한 재료가 개발되었고 특정 플라스틱은 구조물로서 기존의 금속과 무기물 소재가 사용되던 토목·건축 분야의 상당 부분을 대체하면서 문명의 발전에 일익을 담당하기도 하였다. 또한 디자인과 접목되면서 플라스틱은 인테리어 소재 및 가정용 소품으로 인류의 생활에 다양한 편익을 제공하고 있는 소재이다(Sudesh & Iwata, 2008).

오늘날 플라스틱이 없는 세상은 상상하기 어려울 정도로 우리의 일상 속 구석구석 어디를 둘러봐도 플라스틱이 사용되지 않는 곳이 없다. 플라스틱은 다양한 가공 방법으로 제품 생산이 가능할 뿐만 아니라, 첨가제 및 타 소재와의 배합과 생산 방법의 변화에 의해 특정한 물성을 가진 제품 생산이 가능하다. 또한 플라스틱은 성형이 쉽고 가벼우며 썩지 않는다는 장점 때문에 각종 포장재, 일상용 소비제품, 부품 충전재 및 포장용으로 가장 널리 쓰이는 소재이다.

이렇게 플라스틱은 대량 생산이 용이하고 생산비가 저렴하고 편리하다는 이유로 다양한 분야에 소모용품과 일회용품으로 적용되었다. 그 결과 일회성 소모품용 플라스틱 제품이 범람하게 되었으며 사용 후 쉽고 빠르게 쓰레기로 버려지게 되었다. 이렇게 버려지는 일회용 및 소모용 플라스틱 때문에 지구 환경은 많은 위협을 받고 있는 현실이다. 플라스틱 쓰레기가 지구 환경에 미치는 영향을 생각하면 일회용 및 소모용 플라스틱은 당연히 퇴출이 되어야 하겠지만 위와 같은 다양한 이유 등으로 플라스틱의 전면적 퇴출은 현실적으로 불가능한 상황이다.

일반적으로 플라스틱은 사용 후 적절한 회수·운반·처리를 거쳐 재사용, 재활용 또는 최종적으로 열회수 등을 거쳐 처리할 수 있는 유용한 자원이지만 통계에 의하면 발생하는 폐플라스틱의 5%가 매립, 34%는 소각되고 있고 수거되어



재활용되는 폐플라스틱은 61% 정도로 발표되고 있다(〈표 1.6〉 참조). 재활용 용도를 살펴보면 다른 제품의 생산에 적용되는 비율이 60%, RPF, RDF 등의 연료물질로 재생산하여 발전(25%)에 사용된 바 있었으나 RPF, RDF를 SRF 원료로 바꾸면서 발열량 등의 문제로 열병합 발전소 등에서 사용하지 않고 있는 실정이다. 이웃하는 일본의 경우 폐플라스틱의 83%를 재활용하고 있으며 그 중 발전(32%), 열이용 소각(9%) 등 전체 재활용량의 41%를 에너지회수로 처리하고 있다고 발표된 바 있다(2015년 기준, 일본플라스틱순환이용협회). 일본의 재활용 통계를 보면 폐플라스틱은 버려지는 쓰레기라기보다는 아주 유용한 자원으로 거듭남을 알 수 있으며 따라서 우리나라도 플라스틱의 사용금지 혹은 전면적인 퇴출 보다는 우선 재활용 처리 방안을 논의하여야 할 것이다. 하지만 한정된 처리 공간과 방법의 한계를 고려하고, 또 사용 후 폐기되는 플라스틱에 의한 2차 피해를 생각할 때 이 피해를 최소화하기 위한 노력이 시급한 상황이 도래하였다고 판단된다.

통계에 의하면 현재 생산하는 플라스틱의 40% 정도가 일회용품을 만드는 데 사용되고 있다. 일회용 플라스틱이 사용 후 수거가 되지 않고 버려지면서 결국 국토의 오염과 하천을 통한 해양 유입으로 해양 오염 또는 수생물에 대한 2차, 3차 피해가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 문제를 인식하고 전 세계적으로 쓰레기와 환경오염을 줄이기 위한 다각도의 노력을 하고 있으며, 생분해성과 광분해성, 생분괴성, 광분괴 플라스틱 및 천연재료의 이용분야 등이 그 대상이 되고 있다. 아직은 품질의 달성도, 제조 단가 측면에서 획기적인 성공을 거두지는 못하고 있지만, 향후 생체적합성 소재, 천연자원을 이용한 고분자 물질의 제조가 플라스틱 대체재로서 다음과 같이 활발히 이루어 질 것이다(ReSEAT 분석리포트).

1. 바이오 플라스틱

대량으로 발생하는 각종 폐비닐, 스티로폼, 플라스틱 용기와 같은 합성 플라스틱 소재 등은 쉽게 분해되지 않아 소각이나 매립으로 처리하였고 그 결과 환경호르몬 누출, 맹독성의 다이옥신 검출, 폐기물의 불완전 연소에 의한 대기오염 발생 등과 같은 심각한 환경오염의 원인이 되었다. 이러한 플라스틱 폐기물의 문제를 해결하기 위하여 사용할 때는 플라스틱의 가공성, 내구성, 기계적 성질을 유지하면서 추가로, 분해성이라는 기능이 부가되어 자연분해가 될 수 있는 생분해성 플라스틱의 수요가 빠른 속도로 증가하고 있다. 그에 따른 기술개발 연구 또한 활발히 진행되고 있을 뿐만 아니라, 생분해성 플라스틱의 실용화 및 의무화 압력도 거세지고 있다(유영선 외, 2011; Brown, 1992; Chung *et al.*, 2003).

독일, 이탈리아, 미국 등 선진 각국에서의 쇼핑백 및 플라스틱 병의 분해성 수지 사용 의무화 추세 등, 세계 각국은 앞 다투어 환경규제를 강화하고 있고, 우리 정부도 기존의 일반 난분해 플라스틱 제품에 부과되는 폐기물 부담금을 인상하는 정책을 마련하고 있는 것으로 발표되고 있다(대한민국 환경부, 2018).

우리나라는 생분해 등 바이오 플라스틱의 실용화가 미미한 편이었지만, 2001년 쓰레기 종량제 봉투에 생분해 소재를 30% 이상 의무 사용하기 위한 환경부 지침의 개정과 각 시, 군, 구 자치단체의 조례 개정작업 완료 등으로 우리나라도 생분해 플라스틱 시장이 급속하게 성장할 것으로 예상했었다. 그러나 생분해 플라스틱이 가진 물성 및 원가의 한계점들로 인해서 현재는 거의 사용되지 않고 있다. 그 대안으로서 기존 제품의 물성 개량 및 경제성 등을 고려한 산화생분해 플라스틱과 바이오 베이스 플라스틱의 개발 및 상업화 연구가 활발하게 추진되고 있다.

최근 바이오 플라스틱과 관련한 지식재산권을 선점하기 위한 국내외 특허 출원이 급증하는 추세이며, 특히 중소기업 위주로 특허, 기술 개발, 상업화가 재편되어 가고 있는 실정이다. 특허청에 의하면 “선진국에서는 이미 바이오 플라스틱 사용을 의무화하는 등 실용화가 상당한 수준에 있으나 우리나라는



미미해, 이에 대한 대책이 필요하다”며, 햇빛과 미생물에 의해 분해되는 정도를 조절할 수 있는 신개념 분해성 제품이 개발되고 있다(Lee, 2011; You *et al.*, 2014).

전 세계에서 인체에 무해하고, 재활용이 용이하면서도, 가격 경쟁력을 유지하고, 또한 기존 플라스틱의 물성을 유지하는 원료 및 제품 개발에 박차를 가하고 있다. 실제적으로 업계 및 학계에서는 기존 생분해 제품의 단점을 보완하기 위한 블렌딩(blending) 및 컴파운딩(compounding) 기술이 개발되고 있으며, 이를 상용화하는 업체들이 계속 출현하고 있다. 또한, 이산화탄소 저감 및 자연계에서 분해되어 환경 부하가 적은 대체품 연구 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 그러한 연구결과로 상당수의 생분해 플라스틱, 산화생분해 플라스틱, 탄소저감형 바이오 베이스 플라스틱 등 친환경 고분자 물질이 출시되었고, 이중 일부는 실용화 단계까지 도달해 있다.

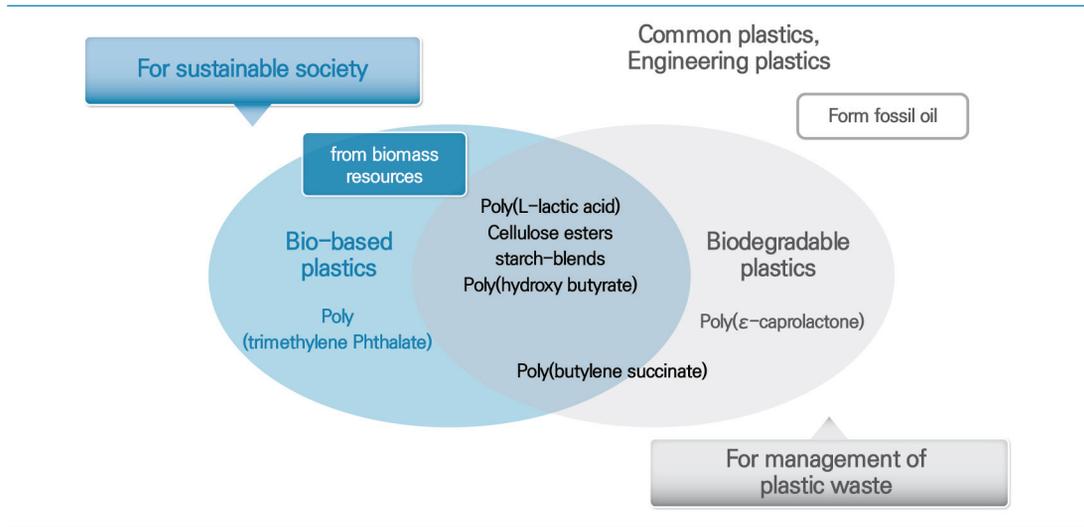
가. 바이오 플라스틱의 정의 및 특성

바이오 플라스틱이란 바이오매스와 같은 생물자원을 이용하여 제조된 바이오 기반 고분자(bio-based polymer)를 의미하며, 친환경 플라스틱, 그린 플라스틱, 환경 배려 플라스틱 등으로 불리고 있다(〈그림 4.1〉 참조).

바이오 플라스틱은 바이오매스 기반의 플라스틱 전체를 의미한다. 기존의 바이오 폴리머는 생분해성에 초점이 맞추어져 있어서 생분해성 고분자 전체를 바이오 폴리머라 하였고, 바이오 플라스틱은 바이오매스 기반의 고분자 플라스틱 전체를 의미하므로 여기에는 생분해성이 아닌 고분자들이 포함되어 있다. 즉 바이오 플라스틱은 식물유래자원 등 재생 가능한 물질을 포함하는 원료를 이용하여 화학적 또는 생물학적 공정을 거쳐 생산된 고분자를 지칭하는데, 좀 더 확대된 개념에서는 “석유 기반 생분해 고분자를 포함한 바이오매스 유래 고분자의 총칭”으로 사용되고 있다. 바이오 플라스틱이란 개념은 지구온난화와 밀접한 관계가 있다. 지구온난화의 주요인이 이산화탄소로 인식되면서 석유기반 고분자 플라스틱을 대체할 수 있는 새로운 친환경 소재가 필요하게 되었고, 이산화탄소

중립(Neutralization) 개념이 등장하면서 바이오매스 기반 고분자가 바이오 플라스틱 이라는 이름으로 사용하게 되었다.

〈그림 4.1〉 바이오 플라스틱의 정의



자료: Jegal, 2012

이러한 바이오 플라스틱 범주에 일부에서는 분해성 플라스틱을 포함시키기도 한다. 분해성 플라스틱은 생분해성, 산화생분해성, 산화분해성, 광분해성, 붕괴성을 총칭하는 개념이다. 성형품, 포장재, 위생용품, 산업용품, 농업용품 등으로 사용한 플라스틱을 폐기 시에 소각처리 하지 않고 단순히 매립함으로 위의 범주에서 한 가지 이상의 분해 기작에 의해서 수개월 내지 수 년 이내에 물, 이산화탄소, 메탄가스 등으로 완전 분해되는 플라스틱을 말한다. 그러나 붕괴성의 경우는 분해 기간이 200~300년 소요되는 난분해성 플라스틱보다는 분해가 빠르지만, 자연계에서 분해되는 기간이 50~100년 정도 소요되어 친환경 플라스틱이라고 보기는 어렵다. 또한 바이오 베이스 플라스틱은 분해성 플라스틱 범주라기보다는 탄소 저감에 초점이 맞춰져 있어 분해성 플라스틱의 범주에 포함시키지 않는 경우가 많다. 이중 바이오매스를 이용한 탄소저감 및 산화생분해 개념을 포함시킨 플라스틱 대체품으로서의 바이오 플라스틱이 있다.



분해성 플라스틱은 사용 중에는 일반 플라스틱과 유사한 기능(강도, 내수성, 성형가공성, 내열성 등)을 갖는다. 사용 후 폐기되면 자연계에서 미생물의 활동에 의하여 고분자 화합물이 절단되고 저분자화합물에 의해 변화하는 과정을 통하여 최종적으로는 물과 이산화탄소 등 환경에 악영향을 끼치지 않는 무기물로 분해되는 플라스틱을 말한다.

위와 같이 분해성 플라스틱에 대한 확립된 정의는 아직 국내외적으로 정확하게 규정지어진 것이 없다. 하지만 분해 기전을 유도하는 사용 기질에 의하여 생분해 고분자수지(biopolymer) 혹은 유기 플라스틱(organic plastics)이라 분류하고, 기존의 원유로 부터 생산된 화석연료 플라스틱과 대별하여 식물로부터 유도된 식용유, 녹말, 단백질 등의 바이오매스를 활용한 플라스틱으로 통용되고 있다.

바이오 플라스틱의 경우, 사용하는 바이오매스의 함량, 사용 원료 및 종류, 분해 기작, 기간, 기존 고분자와의 상용 여부 등에 따라 <표 4.1>과 같이 나눌 수 있다.

<표 4.1> 바이오 플라스틱의 분류

Division	Bio plastics				
	Biodegradable		Oxo-biodegradabe	Bio based	
	Natural systems	Petroleum base		Combined	Polymerized
Biomass content	≥50-70%	-	-	≤20-25%	
Materials	Natural, microbial	Petroleum polymeraization	Article biodegradable oxidation, biomass, plants, etc	Natural-polymer conjugates	Natural-monomer polymeratization
Varitey	PLA, TPS, PHA, AP, CA etc,	PBS, PES, PVA, PCL, PBAT etc	Oxo-PE, Oxo-PP, etc	Bio-PE, Bio-PP, Bio-PET, etc.	
Feature	Biodegradability, expensive, poor physical properties		Microbial degradation following oxidative degradation	-	
Universal Plastic	Not use		Use	Use	
Biodegradation period	6 months or less Within 6 month 90% or 45 days 60%		36 months or less Within 6 months 60%	-	

나. 생분해성 플라스틱(Biodegradable plastics)

생분해성 플라스틱은 바이오매스로부터 전처리, 당화과정을 거쳐 당을 제조 후, 이를 발효과정을 통해 산업용으로 사용이 용이한 고분자 단량체(monomer)로 생산한 후 이 단량체를 중합하거나 석유화학 유래물질을 이용하여 제조하는 플라스틱으로서, 다음 분해성 플라스틱 항목에서 좀 더 자세히 다루도록 한다.

다. 산화생분해성 플라스틱(Oxo-biodegradable plastics)

산화생분해성 플라스틱은 기존 범용 플라스틱에 바이오매스, 산화생분해제, 상용화제, 생분해 촉진제, 자동산화제 등을 첨가하여 만들어지는 플라스틱을 지칭한다. 산화생분해 플라스틱은 열, 빛, 미생물, 효소, 화학 반응 등의 복합적 작용에 분해가 촉진된다. 산화생분해성 플라스틱은 기존 생분괴성, 생/광분해성, 화학분해성 등을 포함하는 개념으로, 기존 생분괴성, 생/광분해성의 단점으로 지적된 완전 분해까지 분해기간을 1~5년으로 단축하기 위해 분해 촉진제를 사용하며, 최종 생분해 기간 제어가 가능한 신개념 분해성 플라스틱이다. 현재 그 물성, 원가, 분해 기간 조절의 장점 등이 부각되어 연구 개발 및 제품화가 활발하다. 하지만 관련 표준의 미비 및 최종 생분해기간의 불명확성 등으로 국제적 인증이 어려운 면이 있으나, 최근 아랍에미레이트(UAE)에서 산화생분해 관련 규격기준인 UAE Standard 5009를 제정하였고, 2014년 1월 1일부터 난분해 플라스틱 포장재에 대한 규제를 전면 시행하여 산화생분해성 포장재 및 제품만 UAE 역내 수입을 허용하면서 다시 산화생분해성 플라스틱의 수요가 급속하게 늘고 있다. 최근 뉴욕에서는 2015년 1월 1일부터 강력규제를 시작하였고, 6개월 유예기간을 주고 2015년 7월 1일부터 친환경 플라스틱 이외에 사용하는 위반업소에는 막대한 벌금을 부과할 계획이 발표 되면서 향후 관련 연구 및 제품 생산이 늘어날 것으로 전망되고 있다.



라. 바이오 베이스 플라스틱(Bio-based plastics)

바이오 베이스 플라스틱은 바이오매스와 기존 난분해성 플라스틱을 중합하거나 가교 결합하는 방식으로 구성되는 플라스틱을 지칭한다. 바이오 베이스 플라스틱은 분해성에 초점을 두지 않고 탄소중립형 바이오매스를 일부 적용하여 이산화탄소 저감을 통한 지구온난화 방지를 강조한다. 바이오 베이스 플라스틱은 페트병에서 자동차 분야까지 그 적용 범위가 확장되고 있고, 식량자원의 사용에 대한 문제점을 해결하기 위해 셀룰로오스, 볏짚, 왕겨, 옥수수대, 대두박, 옥수수 껍질, 사탕수수, 팜 부산물 등 풍부한 비식용계 부산물 자원을 바이오 플라스틱 원료 소재로 사용하고 있으므로, 산업용품, 자동차, 건축, 토목, 매립형 제품, 포장재, 농원에 등의 다양한 분야까지 적용이 되고 있다(You, 2014).

2. 분해성 플라스틱

분해성 플라스틱(degradable plastics)이란 미국 및 유럽의 표준화기구에서 정의한 개념에 따르면, 분해란 ‘빛, 열, 수분 등의 특정한 환경조건하에서 시간이 경과함에 따라 화학적 구조에 변화가 발생해 기존 재료가 지닌 성질이 상실되는 것’을 말한다. 따라서 분해성 플라스틱이란 ‘특정 환경 조건에서 일정기간 동안에 화학적 구조가 상당히 변화되어 그 성질 변화를 표준 시험방법으로 측정할 수 있는 플라스틱’을 말하며 크게 광분해성, 생분괴성, 생분해성 플라스틱으로 나눌 수 있다.

- (1) 광분해성 플라스틱이란 광산화(光酸化) 또는 케톤 광분해 등의 형태로 빛에 의해 분해되는 플라스틱을 말한다. 그러나 광분해성 플라스틱은 빛이 차단된 땅속에 매립되었을 때 분해가 되지 않는 단점이 있다.
- (2) 생분괴성 플라스틱이란 비분해성의 일반적인 범용수지(PE, PP, PS 등)에 전분 같은 생분해성 물질을 일정량 첨가하여 제조한 부분 분해성 플라스틱으로 국내에서는 생분해성 플라스틱과의 혼동을 피하기 위해 ‘생분괴성 플라스틱’이란 용어를 사용하여 별도로 구분하고 있다(〈표 4.2〉 참조).
- (3) 생분해성 플라스틱이란 일반적으로 플라스틱 자체가 박테리아, 이끼 같은 조류(藻類), 곰팡이와 같은 자연계에 존재하는 미생물에 의해 물과 이산화탄소 또는 물과 메탄가스로 완전히 분해되는 플라스틱을 말한다.

생분해성 플라스틱은 기존에 사용 중인 비분해성 플라스틱의 폐기물 처리문제 해결을 위한 대안의 하나로 1980년대 후반부터 등장하기 시작했다. 생분해성 플라스틱의 기본개념은 근본적으로 지속 가능한 순환형 재료생산 시스템 구축에 있다. 즉, 생분해성 플라스틱이 실용화되면 자연계에 거의 무한대로 존재하는 바이오매스를 이용하여 생산이 이루어지고 사용 후에는 물과 이산화탄소로 분해되어 다시 바이오매스의 원료로 이용됨으로써 플라스틱에 의한 환경문제와



자원부족문제가 상당 부분 해결될 수 있을 것으로 판단하고 있다.

기존의 비분해성 플라스틱에 전분과 같은 생분해성 플라스틱을 혼합하여 제조하는 일반적인 분해성 플라스틱(생분괴성 플라스틱)이 1세대 제품이라면, 생분해성 플라스틱은 2세대 제품에 해당한다고 말할 수 있다. 이는 생분해성 플라스틱의 원료가 주로 천연의 식물자원을 사용하므로 기존의 석유계 플라스틱과 확연히 구분될 뿐만 아니라, 자연계 내에서 미생물에 의해 물과 이산화탄소로 완전 분해되는 청정성을 지니고 있기 때문이다. 따라서 최근의 세계적인 추세도 생분해성 플라스틱이 주류를 이루고 있는 상황이다(〈표 4.3〉 참조).

현재 국제적으로도 용어정의나 분해도 평가방법 등이 통일되지 않는 가운데 각 개별국가에서는 독자적으로 분해성 플라스틱에 대한 연구개발과 산업화가 추진되고 있다. 우리나라도 1997년부터 생분해성 고분자 개발 사업이 시작되었으며, 2003년에는 합성수지의 생분해도 측정에 관한 측정방법과 인증기준을 마련하였다(KS M ISO 14855-1). 현재 국제표준인 ISO 14855-1와 KS표준에서는 분해성 플라스틱의 정의를 [초기 45일 동안 생분해도가 표준물질 대비 60% 이상(절대치 42%이상 분해)이거나, 180일 기간 동안 생분해도 값이 표준물질 대비 90% 이상(절대치 63%이상 분해)]으로 규정하고 있다(KS M ISO 14855-1, 2014).

생분해성 수지를 분해되는 정도에 따라 분류하면, 기계적 성질을 잃고 물리적으로 와해가 일어나는 수준인 생분괴성 플라스틱과 그 성형제품의 물리적 와해뿐만 아니라 고분자의 주쇄 절단에 의한 분자량 감소가 일어나는 생분해성 수지로 나눌 수 있다. 또한 생분해성 제조방법에 따라 분류하면 통상의 합성 플라스틱 생산에 이용하는 방법과 같은 화학합성계, 미생물의 발효생산에 의한 미생물생산계, 식물의 광합성 작용에 의한 식물 생산계, 또한 이들 각각의 조합으로 이루어진 복합형으로 나눌 수 있다.

〈표 4.2〉 분해성 플라스틱의 용도 및 적용 수지

구분	내용	적용수지
생분해성	- 식품 및 화학제품 첨가제, 의학용 재료, 분해성 포장재, PP대체용 - 봉합사, 방출조절성 의학용재료 - 의료용	- PHB계, 다당류계 - PCL, PLA, PG 등 - 다당류계, Chittin계, Oil계
생분괴성	- Disposable diaper liner, Trash bag, Shopping bag, Mulch film - PCL과 각종 범용수지 blend	- PE + 전분 - PE + PCL

자료: 한국기술정보컨설팅, 1991.

〈표 4.3〉 분해성 플라스틱의 분해 형태별 장단점

구분	장점	단점
생분해성	완전분해	- 고가, 물성저하 - 범용제품 사용곤란
생분괴성	가격 저렴, 범용화(PE,PP)	- 장기간에 걸친 분해 (단기에는 붕괴만 발생)

가. 생분해성 플라스틱

생분해성플라스틱의 종류는 천연화합물을 원료로 하는 천연고분자계의 생분해성 고분자, 미생물이 생산하는 젖산(lactic acid)과 같은 물질을 합성원료로 사용한 미생물생산 생고분자, 그리고 생화학적 고분자 등으로 나눈다(〈그림 4.2〉 참조).

1) 천연고분자계 생분해성 고분자

천연고분자를 원료로 한 생분해성 고분자는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, pectin, lignin 및 저장 탄수화물인 전분 등 식물에서 유래하는 것으로 PLA, TPS(thermo plastic starch) 등과 새우, 게 등의 껍질을 포함한 chitin질을 기초로 한 동물 유래의 것들이 있다. 이들 중 전분은 가장 우수한 생분해도, 저렴한 가격, 풍부한 자원, 용이한 공급, 무독성 등의 특성으로 인해 가장 널리 사용되는 주원료로 부각되어 있다. 근래에는 플라스틱 가공에 적합한 물성을



보유할 수 있도록 전분의 물리·화학적 변성기술이 다양화되어 생분해성 필름으로의 용도는 물론 다른 생분해성 고분자와 혼합하여 사용하거나 전분만으로 생분해성 용기나 완충용 발포체를 제조할 수 있어 향후 생분해성 플라스틱의 주원료로 활용 가치가 더욱 높아질 것으로 기대된다. 그러나 천연고분자를 이용하여 제조된 생분해성 플라스틱은 분해성은 뛰어나지만 품질이 균일하지 않은 단점이 있다.

2) 미생물생산 생고분자

미생물생산 고분자는 미생물이 만들어내는 생고분자(바이오폴리머)를 활용하여 플라스틱과 같은 기능을 갖는 물질을 만드는 것으로써, 여기에는 PHB, PHV 등의 polyalkanoates 및 세포내 고분자와 pullulan과 같은 polysaccharides인 세포벽 고분자로 나눌 수 있다.

가) PHB

PHB는 PHA족의 일종인 천연 폴리에스테르로서 D-3-hydroxy-butyric acid가 직선상으로 연결된 단일 중합체이며, 매우 다양한 세균들이 세포 내에 합성하는 에너지 저장물로서 녹말이나 glycogen과 같은 생물학적 기능을 가진다.

나) Polysaccharide 종류

미생물의 세포 밖으로 배출되는 점액성의 생고분자인 extracellular polysaccharides가 이에 속하며, 대표적 예로는 xanthan gum, alginate, pullulan, curdlan, dextran 그리고 levan 등을 들 수 있다.

히알루론산(HA)는 D-glucuronic acid 및 N-acetyl glucosamine이 상호 결합된 직쇄상의 무색투명한 고점도 polysaccharide의 일종이다. HA의 분자량은 원료와 제조공법에 따라 수만에서 수백만에 이르며, 저분자량 물질은 화장품용으로, 고분자량 물질은 의약품용으로 쓰인다. 특히 일본의 화학, 제약, 화장품 및 식품관련의 10여개 회사들은 이미 1980년대 초에 이 분야를

본격적으로 연구하여 1985년 이후부터 HA를 세계적으로 공급하고 있는 실정이다.

3) 생화학적 고분자

생화학적 고분자란 발효기술에 의해 낮은 가격으로 제조된 아미노산, 당, 폴리에스테르 등의 원료를 합성기술로 만든 고분자물질을 말한다. 생화학적 고분자는 미생물생산고분자가 갖고 있는 단점을 보완하여 생산이 비교적 수월하고, 기존의 플라스틱과 물성이 유사하고 기능의 조절이 용이하다. 이러한 이유로 제품 개발 시 응용분야가 다양하여 이상적인 생분해성 고분자로 평가되고 있다. 이런 고분자로는 PCL, PGA, PLA, polyorthoester, phosphagene, polypeptide 등 많은 종류가 개발되었으며 이들 대부분은 가격이 상당히 고가이기 때문에 의료용 재료 등 고부가가치 제품에 한하여 이용되고 있다(〈표 4.4〉 참조). 그러나 옥수수 전분을 발효하여 젖산을 생산하고 이를 중합하여 생산하는 PLA는 대량생산이 가능하므로 장기적으로는 범용플라스틱을 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 바이오매스 유래 단량체 중합형 플라스틱은 석유계 플라스틱과 생산 공정이 유사하여 기존 플라스틱 생산기술을 활용할 수 있으므로 많은 석유화학기업 및 바이오 관련 기업에서 연구개발이 활발히 진행되고 있다.



〈표 4.4〉 의료용으로 적용되는 생화학적 고분자

생화학적 고분자	용도
PLA PGA	임상사용이 가장 먼저 승인된 합성생분해성 고분자 수술용 봉합사, drug delivery system, 정형외과용 이식재료, 혈관 이식재료로 사용
PCL	PGA나 PLA보다 매우 느린 생분해속도를 나타내는 폴리에스테르 필름이나 포말형태로 인공피부로 사용. 이식재료나 피임제로서 제 1상 임상시험이 완료된 상태
Polydioxanone	흡수 가능한 결찰용 클립으로서 ASBOLOK이라는 상품명으로 판매되고 있음
Polycyanoacrylate	Bio-adhesive로 사용됨
Polyanhydride	Drug delivery system을 위해 특별히 고안된 표면 부식 고분자, 현재 뇌암 등의 치료를 위한 이식용 delivery system으로서 제 3상 임상시험 진행 중
Polyorthoester	Drug delivery system을 위해 개발되어 탐색중인 고분자
Poly(γ -ethylglutamate)	분해되는 봉합재료와 drug delivery를 위해 조사 중, 합성 poly(amino acid)에 기초하고 있음
Pseudo-poly(aminoacids)	일반적인 poly(amino acid)의 기본골격에 non-amino결합을 끼워 넣음으로써 얻어진 고분자군, serine 및 hydroxyproline으로부터 나온 polyester와 tyrosine으로부터 나온 polyiminocarbonate가 보고됨. 고강도의 정형외과용 이식재료, drug delivery system 및 면역활성 보조제로의 응용이 제안되었음

자료: 한국과학기술정보연구원, 2002.

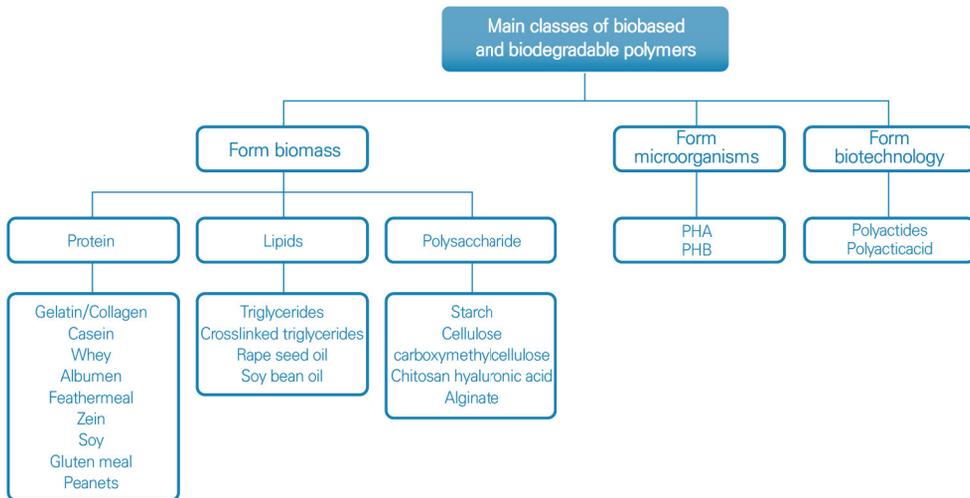
나. 생분괴성 플라스틱

생분괴성 플라스틱은 전분과 같은 자연적으로 분해되는 물질을 PE, PP, PS 등과 같은 플라스틱과 섞어서 만든다. 더불어 분해가속제로 각종 첨가제를 넣어 분해를 촉진시켜 주는 것으로 알려졌다. 이와 같은 방법으로 만들어지는 생분괴성 플라스틱은 현재 미국 등에서 활발히 연구개발 되고 있으며, 그 산업적 활용도 다른 분해성 플라스틱에 비하여 신속히 진행되고 있으며, 우리나라에서도 대학연구기관과 민간 기업이 협동체계를 이루어 연구 중에 있다.

예를 들면 전분을 충전한 생분괴성 플라스틱은 완전한 분해성을 갖는 것은 아니지만 미국, 캐나다 등지의 대학연구기관이나 민간기업에서는 사회적 필요와

정부 및 지방자치단체의 법적 규제에 대한 대응책으로써 연구개발과 산업화를 가속화시켜 쓰레기주머니나 쇼핑백 이외의 각종 일회용 제품에도 그 실용화를 확산시키고 있다. 그러나 정확한 분해시기의 제어방법과 2차 잔유물의 유무에 대한 논란이 지속되고 있어 향후 이 분야에 대한 분해도 평가방법이나 용어정의가 국제적으로 통일되어야 할 것이며, 아울러 현재의 생산가격을 더 낮출 수 있어야만 그 용도 개발은 물론 실용화를 앞당길 수 있을 것이다.

〈그림 4.2〉 다양한 형태의 생분해성 플라스틱(bio-based/biodegradable)





3. 실용화 단계의 분해성 플라스틱

가. 바이오 기반 분해성 플라스틱

현재 실용화 되고 있는 바이오 플라스틱 소재 중 생분해 플라스틱은 PCL, PLA, PBTA(polybutylene terephthalate), TPA (terephthalic acid), PVA (polyvinyl alcohol), PES (poly ethylene succinate), PHA, PHB, PBS 등으로 지방족 폴리에스테르 및 전분과 지방족 폴리에스테르를 혼합한 플라스틱들이다. 이중 다음과 같이 PLA, PHA, PBS를 통한 연구가 활발하다.

1) PLA

- 폴리락트산(PLA)은 옥수수 전분, 사탕수수, 밀 및 타피오카 뿌리와 같은 재생 가능한 자원에서 추출한 열가소성 폴리에스테르
- 세계 PLA 시장은 2020년까지 52억 달러에 이를 것으로 예상되며, 소비량 측면에서 가장 큰 바이오 플라스틱 중 하나임

2) PHA

- 폴리하이드록시 알카노에이트(PHA)는 일반적으로 O, N 등과 같은 성장제한 영양소가 존재할 때 다양한 미생물에서 세포 내 탄소/에너지 저장 과립으로서 축적되는 3-, 4-, 5- 및 6- 하이드록시 카복실산을 함유하는 미생물 폴리에스테르
- 과량의 탄소원이 존재하는 토양, 해수 및 하수에 존재하는 미생물에 의해 이산화탄소와 물로 분해되기 때문에 독성 폐기물이 전혀 발생하지 않고 완전 생분해성임
- 생분해성 외에도 이 고분자들은 생체 적합성을 가지며 폴리프로필렌과 같은 열가소성 수지와 유사한 성질을 가지고 있어서 기존의 석유 화학 플라스틱에 대한 이상적인 대체 물질로 예상됨

3) PBS

- 폴리부틸렌 숙시네이트(PBS)는 숙신산과 부탄디올의 중축합에 의해 합성된 생분해성 열가소성 중합체

- 화석 연료 또는 재생 가능한 자원에서 생산 할 수 있으며 현재 상업적으로 입수할 수 있는 PBS는 화학적으로 유도된 단량체로부터 합성됨

나. 석유화학 기반 분해성 플라스틱

1) PCL

- PCL은 생분해성을 갖는 석유 화학 중합체
- 메틸렌 단위와 에스테르기로 구성된 폴리에스테르로 60℃의 낮은 용점을 가지며 박테리아와 곰팡이에 의해 분해 될 수 있음
- PCL은 가수분해에 불안정한 지방족 에스테르 결합이 존재하며 PCL이 모래 토양보다 점토 토양에서 더 많이 분해됨. 토양의 pH, 열 및 호기성 환경이 분해 과정을 가속화함



4. 국내 외 분해성 플라스틱의 기술 개발 동향

가. 국외 분해성 플라스틱의 기술개발 동향

최근의 분해성 플라스틱에 대한 많은 연구에 의하면 생분해성 고분자가 식물성 바이오매스 외의 다양한 종류의 바이오매스뿐만 아니라 미생물이나 바이오 기술(biotechnology)을 이용하여 생분해성 고분자를 개발할 수 있는 것으로 보고되고 있다 (<그림 4.2> 참조). 기존의 식물성 바이오매스 외에 동물성 단백질과 지방질(lipid)과 사카라이드(polysaccharides) 등이 사용되고 있으며, 옥수수에서 생화학적으로 추출된 단량체(bio-derived monomer)를 합성하여 만들어지는 bio-based 고분자 등이 있다(Bugnicourt, 2014).

미국, 일본을 비롯한 유럽은 바이오 기반 분해성 플라스틱 소재 개발을 위주로 연구 및 사업화를 추진하고 있다. 쇼핑백, 쓰레기봉투, 진공성형 제품, 사출품, 농업용 멀칭 필름, 완충재, 다층 필름, 기능성 필름 등의 다양한 용도의 바이오 플라스틱 관련 제품의 개발 및 판매가 이루어지고 있다.

또한 분해성 플라스틱의 생산량을 보면 그 성장속도가 매우 빠르며, 바이오 플라스틱 제조에 사용될 수 있는 다양한 바이오메스를 개발하기 위한 연구도 지속적으로 진행하고 있다.

미국의 MRI, 스위스의 시바 스페셜티 케미칼스 홀딩 Inc., 일본 KONICA Corp., 일본 다이셀 화학공업, 캐나다 EPI, 영국 Wells, 미국 EPI-Global, 영국 Symphony, 스웨덴 ADD-X Biotech, 싱가포르 Winrigo 등이 산화생분해성 기능을 추가한 고분자 개발 완료 및 추가 개발에 전력을 다하고 있으며, 영국 등 유럽에서는 판매가 활발하다. 기존 폴리에틸렌계 열가소성 플라스틱의 자연 환경에서의 완전분해(물, 이산화탄소 및 바이오매스로 분해)에 관련한 연구는 G. Scott, Albertsson, Kostyniak 교수 등에 의해 정립되어 있고, 이후 활발한 연구가 이루어지고 있다(Scott, 1990; Albertsson *et al.*, 1992; <http://www.biopack.or.kr>, 2014).

바이오 플라스틱 기술과 더불어 유망한 플라스틱 패키징 분야의 한 부분인

감량화는 PET 용기를 중심으로 진행되고 있다. 특히 음료용기 제조 분야에서 경쟁력을 가지고 있는 일본은 감량화 기술의 상용화에 근접하고 있다.

2017년 6월에 미국 국방부는 Ecovative Design에 필라멘트를 생산하는 자연 발생 곰팡이의 일종인 균사체 기반 기술로 100% 퇴비화 되는 포장재료를 만들기 위한 기술 개발을 진행하고 있다. 현재 미국의 경우 바이오 플라스틱의 가장 큰 활용도는 포장재이며, 그 다음 섬유, 의료용으로 사용되는 추세이다.

나. 국내 분해성 플라스틱의 기술개발 동향

우리나라의 바이오 플라스틱 기술 연구 수준은 선진국에 비하여 현저히 떨어지는 것으로 평가되어 원천 기술개발의 저변 확대가 필요하다. 또한 우리나라의 생분해성 제품 관련 규격기준은 표준물질 대비 90%로, 미국과 일본의 60%에 비해 지나치게 엄격하여 생분해 원천기술을 확보가 미흡한 국내기업은 대부분 사업을 중단하고 있는 실정이다. 이에 따라 국내 규격 기준을 완화하여, 생분해성 물질을 30% 첨가한 생분괴성 플라스틱 규격 기준을 마련하고 이를 종량제 봉투에 적용하였으나 인장, 신장 등 물성이 약하고, 생산성이 부족하여 현재는 사업화되지 않고 있다.

바이오 플라스틱의 기술 개발 및 실용화를 위해 초창기 국내에서는 SKC, 대상, SK케미칼, 롯데케미칼(이전 호남석유화학), 한화, 이레화학, 새한 등이 연구에 참여하여 왔으나, 협소한 시장규모와 해외에 비하여 엄격한 생분해 제품 관련 환경마크 인증규격 문제, 바이오매스 제품 원천기술 개발 미흡 등으로 인해 사업 보류, 중단을 한 바 있으나 현재 국내 상황을 반영하여 다시 연구에 나서는 등 관련 분야에 대한 정비가 되어 가고 있는 실정이다(<http://www.en.europeanbioplastics.org>, 2014).

현재 국내 기업들은 다른 외국에 비해 상대적으로 우위에 있는 수지의 가공 및 성형기술을 활용하여, 신소재 개발보다 제품화 위주로 전환되어 가고 있는 새로운 국면에 접어들고 있다. 실제 바이오 플라스틱의 상용화 제품, 기존 플라스틱의 대체 제품, 화석연료 사용 절감을 위한 대체 제품 등이 속속 출시되고 있다.



이러한 추세에 맞춰 최근의 연구 중심은 감량화, 용이한 재활용, 탄소저감 그리고 산화 생분해 등으로 기울고 있는 추세이다.

바이오플라스틱의 국내시장은 아직 매우 빈약한 상태인데, 주로 생분해성 고분자를 중심으로 시장이 형성되어 있으며, 특히 전분계와 셀룰로오스계 등 천연고분자와 선형 폴리에스테르 등을 중심으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 최근에 들어서는 세계 시장의 변화와 함께 국내 시장에도 PLA를 중심으로 한 바이오 플라스틱의 시장이 형성되고 있으며 이를 아래의 <표 4.5>에 나타내었다. 국내 시장은 전분계나 다당계 고분자를 선형 폴리에스테르와 혼련하여 제조된 생분해성 혹은 생분괴성 고분자 시장이 주를 이루고 있다.

<표 4.5> 국내의 생분해성 플라스틱/고분자산업 현황

회사명	상품	특징
SK Chemicals	SKY GREEN	Aliphatic polyester and / or its starch blend
새한 Industries	ESLON GREEN	Aliphatic polyester and / or its starch blend
SK	GREENPOL	Polycaprolactone/plasticized starch blend
대상	BIONYL	Modified starch containing aliphatic polyester
이레화학	EnPol	Aliphatic polyester

자료: Jegal, 2012.

5. 플라스틱 대체재로서의 바이오 플라스틱의 전망

전 세계적으로 또한 국지적으로 플라스틱을 대체하기 위한 다양한 연구가 지속될 것으로 전망된다. 하지만 이미 다양한 범위로 사용되는 플라스틱을 갑자기 퇴출시키기에는 현실적으로 이를 대체할 수 있는 물질이 너무 없다는 문제가 발생한다. 따라서 편리함과 환경오염의 두 부분을 적정한 범위에서 조정을 하여 모두 살리는 현명함을 보여야 할 것이라 판단된다. 즉, 구조물에 적용되는 플라스틱과 같이 반드시 내구성이 적용되어야 할 부분에는 플라스틱을 계속 사용하고, 한번 쓰고 쉽게 버리는 일회용이나 포장재 같은 소모품용 플라스틱은 줄이거나 다른 물질로 대체하는 방안과 정책적인 뒷받침이 필요하다고 판단한다. 또한 환경오염은 어느 한 국가만의 문제가 아니라 글로벌 문제이므로 세계 각국의 정부도 이러한 정책적인 목표를 공유하고 문제 해결에 협조를 하여야 할 것이다.

일회용 및 소모용 플라스틱 대체재로서의 바이오플라스틱 또는 생분해성 및 생분괴성 플라스틱은 반드시 연구가 되어야 할 분야이고 기존의 플라스틱과 병행하여 사용되어야 할 재료일 것이다. 반면, 바이오플라스틱의 개발은 전 세계적으로 아직은 초기단계이다. 하지만 난분해성 플라스틱에 의한 환경오염을 방지하기 위한 시대적인 요구와 관련 제품을 요구하는 시장 요청에 의해 현재 다양한 종류의 산업적 활용성이 우수한 바이오플라스틱들이 개발, 상용화되고 있다. 아직은 제조된 바이오플라스틱들의 물성이 기존 석유기반 플라스틱 소재들에 비하여 낮은 것이 분명하고 따라서 활용성 면에서 많은 제한이 있는 것도 또한 사실이다. 그러나 점차 이제는 고부가가치화 할 수 있는, 물성이 우수한 바이오 플라스틱들의 개발이 많이 진행되고 있고 이들 중 일부 상용화된 제품들도 있다. 즉 이러한 우수한 물성을 지닌 소재들을 경제성이 있도록 제조·생산하는 기술들이 집중적으로 연구되고 있으며, 바이오와 화학기술의 접목으로 많은 우수한 기술들이 개발되고 있다. 따라서 멀지 않은 미래에 경제성과 산업성, 그리고 활용성이 우수한 바이오 플라스틱 소재들이 시장에 대거 등장할 것으로 예측이 된다.



참고문헌

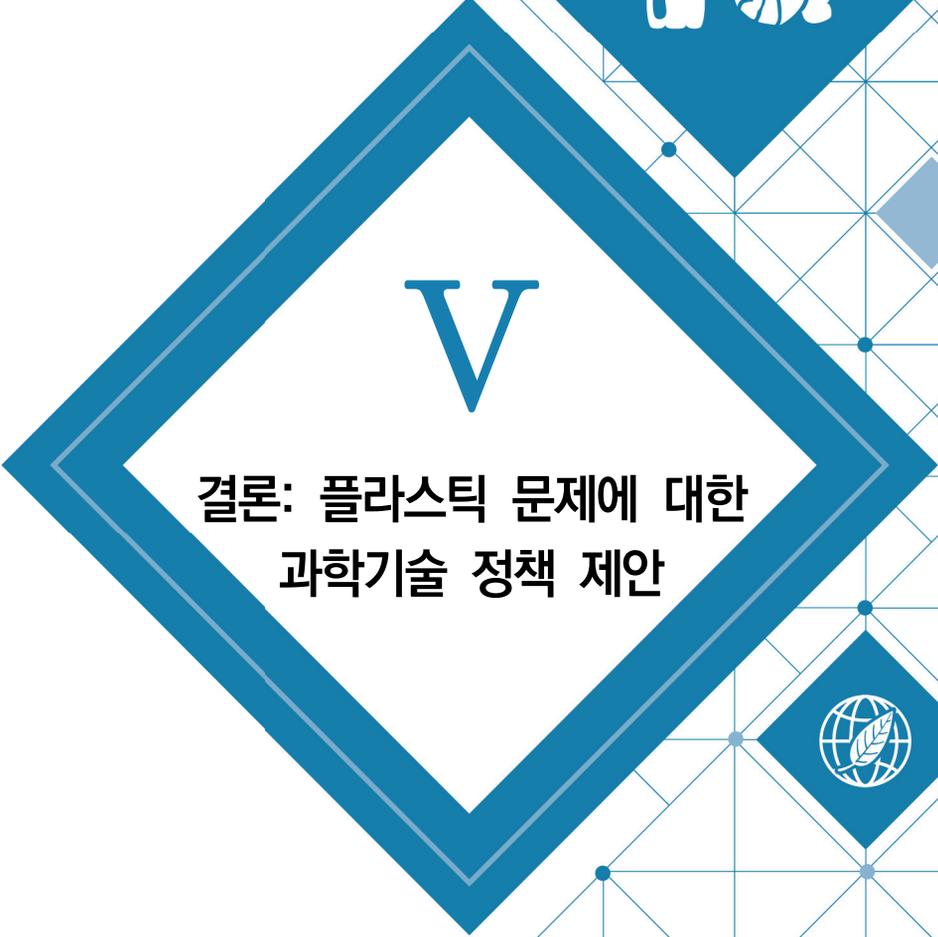
- 유영선 외(2011), “생분괴성 플라스틱 포장재의 제조 및 제조된 소재의 안전성과 분해성 연구”, Food Engineering Progress, Vol.15 No.3, pp. 257~261.
- 한국과학기술정보연구원(2002), “생분해성플라스틱”
- KS M ISO 14855-1(2014), “퇴비화 조건에서 플라스틱의 호기성 생분해도 및 붕괴도의 측정 - 제 1부 : 적정에 의한 발생 이산화탄소의 정량법”
- Albertsson, A-C., Barenstedt. C. & Karlsson, S.(1992). “Susceptibility of Enhanced Environmentally Degradable Polyethylene to Thermal and Photo-oxidation”, Polymer Degradation and Stability, Vol.37, 163~171.
- Brown, D. T.(1993). “Plastic Waste Management,” Mustafa, N. (ed.) pp. 1~35. Marcel Dekker Inc., New York.
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A. & Alvarez, V.(2014). “Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging”, eXPRESS Polymer Letters, Vol.8 No.11, pp. 791~808.
- Chung, M.S., Lee W.H., You Y.S., Kim H.Y. & Park K.M.(2003). “Manufacturing Multi-Degradable Food Packaging Films and Their Degradability,”Korean Journal of Food Science and Technology, Vol.35 No.5, pp. 877~883.
- Jegal, J.(2012), “State and Prospects of Bioplastics”, Korea Industrial Chemistry News, Vol.15 No.4, pp. 21~25.
- Lee, J. W.(2011), “Bio-plastics,” KISTI Market Report, Vol.1 No.1, pp. 24~27.
- Scott, G.(1990), “Photo-biodegradable Plastics: Their Role in the Protection of the Environment,” Polymer Degradation and Stability, Vol.29 No.1, pp. 135~154.
- Sudesh, K. & Iwata, T.(2008). “Sustainability of biobased and biodegradable plastics”, Clean-Soil, Air, Water, Vol.36, pp. 433~442.
- You, Y.S., Kim, M.K., Park, M.J. & Choi, S.W.(2014). “Development of Oxo-biodegradable

Bio-plastics Film Using Agricultural By-product Such as Corn Husk, Soybean Husk, Rice Husk and Wheat Husk,” Clean Technology, Vol.20 No.3, pp. 205~211.

You, Y.S.(2014). “2014 The Present and Future of Eco-friendly Bio-plastics Industry,” The Monthly Packaging World, Vol.02, pp. 102~105.

European Bioplastics, <http://www.en.europeanbioplastics.org>, Accessed Dec. 15, (2014).
“재활용 폐기물 관리 종합대책”, 2018. 5. 10, 대한민국 환경부.

Korean Bio Material Packaging Association, <http://www.biopack.or.kr>, Accessed Dec. 10, (2014).



V

결론: 플라스틱 문제에 대한 과학기술 정책 제안



V

결론: 플라스틱 문제에 대한 과학기술 정책 제안

Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem

앞에서 살펴본 바와 같이 플라스틱에 의한 환경오염문제는 매우 심각하다. 특히 미세플라스틱에 의한 환경오염과 그 위해성은 조만간 인간의 건강과 생존까지도 위협할 정도로 심각성을 내포하고 있다. 이 미세플라스틱들은 생태계에 이미 광범위하게 확산되어 우리가 먹는 해산물, 생수 등에도 다수 검출이 되고 있어서 문제의 심각성을 보여주고 있다. 그럼에도 불구하고 토양, 동식물, 하천 등에는 얼마나 오염되어 있는지 조사가 되어 있지 않은 실정이다. 뿐만 아니라 이러한 미세플라스틱들이 인간을 비롯한 생물체에 어떤 독성과 위해성을 나타내는지에 대해서도 연구가 거의 이루어지지 않은 상황이다. 이러한 상황에서도 플라스틱들은 계속 사용하지 않을 수 없고, 따라서 일부는 자연 생태계로 계속 유입되고 있으므로 미세플라스틱의 오염량은 앞으로도 지속적으로 증가할 전망이다.

이 시점에서 단기적으로는 플라스틱, 특히 일회용 플라스틱의 사용량을 감소시키고, 사용한 플라스틱들을 효과적으로 수거하여 재활용하는 것이 시급히 추진해야 할 과제이다. 이에 대해서는 관련 정부기관이나 언론에서 이미 인지하여 국민들에 대한 여론과 정책이 수립되고 있다. 따라서 본 보고서에서는 좀 더 근원적이고, 장기적인 대책 마련을 위한 과학기술 정책을 다음과 같이 제안하고자 한다.



1. 미세플라스틱의 검출과 수거 방안

가. 미세플라스틱 문제는 이미 해양으로 유입되어 해양 표면을 떠돌거나 바다 속으로 가라앉은 플라스틱 폐기물이 시간이 경과하면서 점차 미세플라스틱으로 변해갈 것이라는 점에 심각성이 있다. 즉 추가적인 플라스틱 폐기물의 해양유입이 없다고 하더라도 미세플라스틱 문제는 시간이 경과할수록 심각해질 것이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 해양으로 이미 유입된 플라스틱 폐기물을 어떻게 효율적으로 제거할 수 있을 것인가에 대한 방안 마련이 필요하다. 그리고 현재 기술로는 불가능한 미세 플라스틱의 환경영향을 저감할 수 있는 방안이 필요하다.

나. 최근 네덜란드의 24세 청년인 보안 슬렛은 비영리단체의 ‘오션클린업(The Ocean Cleanup)’ 재단을 설립하고, 직접 고안한 해양 쓰레기 수거장치를 2018년 8월 캘리포니아에서 시험 가동하였다. 이처럼 거대 해양 플라스틱 오염의 문제를 해결하기 위해 다양한 노력이 있지만, 미세플라스틱의 관점에서는 이러한 시도는 적합한 수거방법이 될 수 없다. 따라서, 미세플라스틱을 지구의 환경에서 제거하기 위한 획기적이면서도 다양한 접근방법이 필요하며, 이를 위한 연구개발 정책이 필요하다고 판단된다.

다. 해양으로 유입되는 플라스틱을 막기 위해서는 해양으로 유입되는 발생원과 경로를 추적하여 발생원별 맞춤형 대책이 필요하다. 폐기물 관리체계가 구축되어 있지 않은 저개발국가의 경우에는 국제협력을 통해 플라스틱 폐기물 투기를 막기 위한 폐기물 수거 및 처리체계 구축에 대한 지원이 필요하다. 어업활동으로 인해 해양으로 유입되는 플라스틱 폐기물의 경우에는 어민들이 그물 등 어업폐기물을 해양으로 투기하지 않도록 다양한 접근이 필요하다. 어업폐기물 수매제와 같은 인센티브 정책과 어구 생산자의 폐기물 처리에 대한 책임강화, 대량으로 어구폐기물을 발생시키는 배출자에 대한 책임강화 정책이 필요하다. 어민들에 대한 교육을 강화하여 어구의 해양투기가 해양을 오염시켜 소비자의 해산물 소비를 급감시킬 수 있음을 주지시킬 필요도 있다. 해수욕장 등 해변을 이용하는

행위 중 플라스틱 폐기물을 해변가에 투기하는 행위에 대한 집중단속도 필요하다. 해변가 내 음식물을 반입하여 섭취하는 행위나 폭죽 등을 이용하는 행위, 1회용 플라스틱 용기를 사용하는 행위 등에 대한 규제가 필요하다. 또한 의류의 세탁과정에서 미세섬유가 하수도로 유입된 후 방류되는 문제와 관련하여 하수도 정화처리과정에서 미세섬유 문제에 대응할 수 있는 기술적 접근도 필요하다.

라. 외국에서 실시하고 있는 재활용 제품 보증금 환급제도를 활용할 필요가 있다. 이 제도는 플라스틱 제품 유형별 보증금 징수 및 플라스틱 공병, 플라스틱 쓰레기 환급제도이다. 또한 생산자 및 유통업체 등에 대한 책임을 생산자 책임 재활용제도로 확립하여 플라스틱 제품에 대한 생산자 재활용 혹은 처리책임을 강화하고, 유통업체 및 음식물을 판매하는 사업자의 1회용품 사용을 억제할 필요가 있다.

마. 보다 근본적인 대응방법으로 플라스틱의 사용량을 억제하거나 자연환경 조건에서 분해가 용이한 재질로 플라스틱 재질이 대체될 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다.

바. 미세플라스틱의 효율적인 처리를 위해서는 분해 기술뿐만 아니라, 검출, 수거 기술 연구도 진행되어야 한다. 미세플라스틱의 검출은 FT-IR 적외선 분광법, 가스 크로마토그래피, 라만 분광법 등 다양한 분석기기를 이용할 수 있으나, 현장에서 간편하고 신속한 측정을 위한 미세플라스틱 전용 검출장비의 연구와 개발이 요구된다.



2. 미세플라스틱의 인체 독성 및 위해성 해결 방안

가. 미세플라스틱 섭취에 관한 역학 조사

연안과 도서지방은 내륙과 달리 해양의 미세플라스틱에 직간접적으로 노출이 많이 되어있다. 연안/도서지방의 미세플라스틱 섭취 표본조사와 질병발생 현황과 역학조사가 필요하다.

나. 미세플라스틱 관련 인체 독성 및 위해성 관련 연구

1) 미세플라스틱에 의한 독성 및 위해성 가이드라인의 제정

플라스틱과 첨가제에 관한 독성에 관한 연구 결과들은 보고되어 왔으나, 미세플라스틱 섭취에 의한 인체 위해성과 관련한 어떠한 기준도 마련되어 있지 않다. 즉 미세플라스틱을 얼마나 섭취해도 안전한지, 또 미세플라스틱 섭취 시 어떤 독성 또는 부작용이 있을 수 있는 지 등 다양한 연구를 통한 미세플라스틱 독성 및 위해성 가이드라인의 제정이 필요하다.

2) 입자 크기에 따른 독성 및 위해성 규명 필요

지금까지 미세플라스틱(크기: 0.1~5000 μ m)의 독성 및 위해성에 대해 기술 하였으나, 짐작하는바와 같이 나노플라스틱(크기: < 0.1 μ m) 또한 먹이사슬에 의해 생물체의 체내에 존재할 것이라는 것은 자명하다. 따라서 향후에는 미세 플라스틱과 나노플라스틱 등을 입자 크기별로 분리하여 이들의 독성에 대한 연구가 필요하다.

3) 미세플라스틱의 체내 흡수 및 분포 경로

미세플라스틱은 섭취된 뒤 체내 소장에서 림프관을 따라 흡수된 뒤 여러 장기에 분포된다. 이때 입자의 크기에 따라 흡수되는 부위가 다르지만 주로 소장 특히 회장의 페이어판(Peyer's patch)을 통해 흡수되고 때로는 대장(결장)의 점막을 통해 흡수된다(Bouwmeester *et al.*, 2015). 그러나 아직까지 명확하게

미세플라스틱의 체내 흡수 경로와 장기별 분포에 대한 연구가 부족하다.

4) 미세플라스틱의 잠재적 독성

현재까지 미세플라스틱에 의한 인체 독성(*in vivo*)이나 *in vitro* 독성에 대한 명확한 연구 보고서가 없다. 설치류를 활용한 일부의 실험 결과, 섭취된 미세플라스틱의 체내 흡수율이 매우 낮으며($< 1\%$), 흡수된 후 이것들은 림프관을 따라 이동한 뒤 최종에는 이자(spleen)에서 제거되는 것으로 추론된다(Bouwmeester *et al.*, 2015). 그렇지만 이 부분에 대한 구체적인 연구가 필요하다.

5) 용출 가능성 첨가제들의 독성

앞서 기술한 바와 같이 플라스틱 제품에 포함된 첨가제들, 특히 프탈레이트와 비스페놀 A 등은 내분비계 장애물질임이 규명되었다. 그렇기 때문에 다른 여러 첨가제들의 독성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

6) 미세플라스틱에 흡착된 잔류성 유기 오염물질들(POPs)의 독성

미세플라스틱에 흡착된 잔류성 유기 오염물질들은 주변의 여러 인자들, 예를 들어 폴리머의 특성(소수성 혹은 친수성), 폴리머의 구멍 크기, 유기물의 크기, pH, 폴리머 주변 액체의 이온강도 등에 의해 용출되는 양이 다르다. 그러나 미세플라스틱으로부터의 용출되는 양이나 속도에 대한 정보가 거의 없기 때문에(Besseling *et al.*, 2013), 이에 대한 연구가 필요하다.

7) 체내 잔류하는 미세플라스틱의 분해 및 해독

먹이사슬에 의한 미세플라스틱 축적을 고려할 때, 이미 체내에는 다양한 경로를 통해 미세플라스틱이 잔류하고 있을 것이다. 그러므로 체내에 잔류하는 미세플라스틱을 배출하고 미세플라스틱에 의한 독성을 해독할 수 있는 치료법에 대한 연구가 필요하다. 동시에 미세플라스틱 첨가제 및 흡착제의 인체독성에 대한 장기적인 추적 연구가 요망된다.



8) 현재 심각한 환경문제인 대기 중의 미세먼지 속에 미세플라스틱들이 얼마나 함유되어 있는지, 또 이들에 의한 인체 독성 및 위해성 규명도 필요하다.

3. 미세 플라스틱의 생분해 방안

가. 플라스틱 분해 미생물 균주 발굴 및 개발연구

플라스틱 분해를 위한 세균, 방선균, 진균 등에 대하여 주로 연구가 진행되고 있으나, 내구성이 강한 플라스틱을 분해하는 속도가 느리고, 분해력이 미미하여 보다 강력한 분해능을 가지는 미생물 균주 개발 연구가 필요하다. 또한 플라스틱 분해능이 있는 신규 미생물 균주들을 해저, 극지방, GPGP와 같은 곳에서 탐색하여 발굴 할 수 있는 연구지원이 필요하다

나. 고분자 플라스틱을 분해할 수 있는 미생물 균주 및 효소의 연구

현재 진행되고 있는 연구들은 플라스틱 자체의 고분자(polymer)보다는 저분자(oligomer) 수준의 연구로서, 실제 고분자의 플라스틱 분해에 활용 가능한 미생물 균주나 효소의 개발이 필요하다.

다. 거대 분자량 polymer인 플라스틱이 쉽게 분해되기 위해서는 미생물과 효소와의 접촉이 많이 되는 것이 유리하므로, 이러한 방안으로 소분자로 먼저 분해시킬 수 있는 기술 등 플라스틱 분해 미생물이나 분해 효소를 좀 더 효과적으로 이용할 수 있는 기술 개발이 요구된다.

라. 생분해성 플라스틱의 생산비의 고가로 인해 이를 분해하는 미생물이나 효소 연구는 최근 많은 연구가 진행되고 있지 않는데, 가격, 물성, 강도 등의 단점을 극복한 생분해성 플라스틱 개발과 병행하여 강력한 생분해성 플라스틱 분해 미생물 균주나 효소의 개발이 절실하다. 이러한 균주나 효소의 산업화를 위해 생분해의 최적 환경 조건 및 대량 분해 공정 개발을 위한 생분해 시험장 건립이 미세플라스틱 생분해 해결에 많은 도움을 줄 것으로 예상된다.



4. 플라스틱 대체재 개발 방안

일회용 및 소모용 플라스틱 대체재로서의 바이오플라스틱 또는 생분해성 및 생봉괴성 플라스틱은 앞으로 빠른 시일 내에 개발되어야 하고, 기존의 플라스틱과 병행하여 사용되어야 할 재료일 것이다. 현재까지는 제조된 바이오 플라스틱들의 물성이 기존 석유기반 플라스틱 소재들에 비하여 열등하기 때문에 활용성 면에서 많은 제한이 따르는 문제점이 있다. 따라서 지금부터 경제성과 산업성, 그리고 활용성이 우수한 바이오 플라스틱 소재들이 개발될 수 있는 과학기술 정책들이 뒷받침 되어야 한다.

가. 분해성 플라스틱의 개발 연구

기존의 플라스틱 분해 미생물이나 효소가 분해하기 어려운 난분해성 플라스틱인 고분자 폴리머에서 저분자 폴리머로 용이하게 분해될 수 있는 분해성 플라스틱 제조법 연구 개발이 필요하다.

나. 바이오와 화학기술을 접목한 경제성 있는 분해성 플라스틱의 개발

분해성 플라스틱이 경제성(가격), 산업성/활용성(물성, 강도)을 기존의 석유화학기반의 플라스틱 수준이 될 수 있도록 이에 대한 연구 개발 지원이 필요하다. 즉 생분해 플라스틱의 물성 강화에 대한 기술 개발을 통하여, 장기적으로 현재의 플라스틱의 특성을 유지하면서 환경오염과 고비용 등의 단점이 해소된 새로운 소재의 개발에 대한 과학기술 연구가 추진되어야 한다.

다. “지속 가능한 순환형 플라스틱 대체재”의 생산 시스템 구축 방안

궁극적으로 생분해성 플라스틱 제재를 제조하고, 이를 사용한 후 완전 분해가 되어 환경오염 문제를 해소시킬 수 있는 지속 가능한 순환형 플라스틱 대체재를 개발하고, 이를 이용하여 산업적인 적정량 생산시스템의 구축이 미래에 바람직한 방향이 될 것이다. 이러한 시스템의 확립을 통해 기존의 플라스틱 시장을 대체할

수 있는 새로운 산업분야의 개척이 가능하므로 이에 대한 연구개발 지원 체계가
요망된다.

한림연구보고서 123

플라스틱 오염 현황과 그 해결책에 대한 과학기술 정책

Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve this problem

발 행 일 2018년 11월
발 행 처 한국과학기술한림원
발 행 인 이명철
전화 031) 726-7900
팩스 031) 726-7909
홈페이지 <http://www.kast.or.kr>
E-mail kast@kast.or.kr

편집/인쇄 (주)세일포커스 02) 2275-6894

I S B N 979-11-86795-32-3 94080

I S B N 979-11-86795-29-3 (세트)

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



이 책은 한국과학기술한림원에서 발간하는
연구총서 중의 하나인 한림연구보고서입니다.

KAST 한국과학기술한림원
The Korean Academy of Science and Technology

[13630] 경기도 성남시 분당구 돌마로 42 (구미동)

Tel: (031) 726 -7900 **Fax:** (031) 726 -7909

E - mail: kast@kast.or.kr **Website:** www.kast.or.kr

본 사업은 과학기술진흥기금 및 복권기금으로 지원되고 있습니다.

비매품/무료



9 791186 795323

ISBN 979-11-86795-32-3

ISBN 979-11-86795-29-3(세트)