

폐플라스틱 처리와 분해성 플라스틱의 개발동향(1)

정원범 / 삼성종합화학 연구소 신소재팀 선임연구원

목차

1. 쓰레기 및 폐플라스틱의 발생
2. 쓰레기 처리방법과 폐플라스틱의 재활용화
3. 플라스틱 폐기물과 분해성 플라스틱
4. 분해성 플라스틱의 정의
5. 광분해성 플라스틱
6. 생분해성 및 생분괴성 플라스틱

- 6-1. 미생물배양법에 의한 생분해성 POLYESTER
- 6-2. 화학합성법에 의한 생분해성 POLYESTER
- 6-3. 천연고분자 개질형 생분해성 플라스틱
- 6-4. 전분충전형 생분괴성 플라스틱
7. 생분괴/광분해성 플라스틱
8. 맺음말

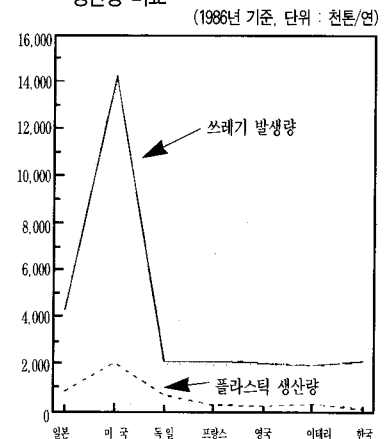
세계적으로 플라스틱 산업은 우수한 성능과 기능을 가진 무수한 고분자 소재의 개발로 인해 커다란 발전을 거듭하여 전 세계적으로 1억톤 이상이 화학합성되어 사용되어지고 있다. 그러나 현재 상품화되어 사용중인 플라스틱은 반영구적이기 때문에 사용하고 난 후에 폐기되는 플라스틱에 의한 환경 오염 문제가 심각한 사회문제로 대두되어 왔다.

이에 따라 사용시 편리성만을 비약적으로 향상시킨 플라스틱을 대체할 수 있고, 사용후 붕괴 또는 분해되어 자연의 순환 사이클로 흡수됨으로써 환경오염의 문제를 배제할 수 있는 분해성 플라스틱이라는 새로운 기능을 가진 고분자 물질에 대한 사회적인 요구가 급속히 높아 가고 있다. 따라서 폐플라스틱의 발생과 처리 동향 및 분해성 플라스틱의 개발 동향을 살펴보고자 한다.

1. 쓰레기 및 폐플라스틱의 발생

인간의 일상생활과 산업활동의 부산물인 폐기물은 생활수준이 향상될수록 발생량이 증가하고 그 종류 또한 다양하게 발생하고 있다. 이렇듯 급증하는 폐기물의 문제는 대량생산

(그림 1) 각국의 쓰레기 발생량 및 플라스틱 생산량 비교



과 대량소비에 기인하고 있으며, 제품의 라이프 사이클이 짧아지고 있기 때문이다.

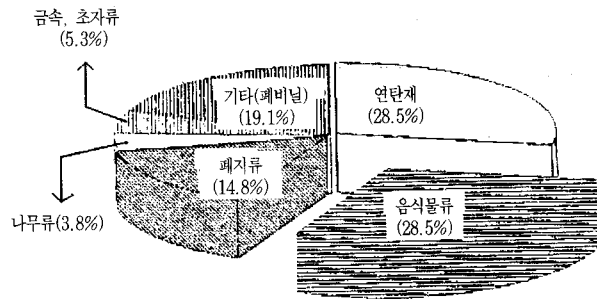
선진 주요국의 도시쓰레기 발생량을 보면, [그림1]과 같이 1986년 기준으로 미국은 1억4,300만톤, 일본은 4,300만톤, 서독, 프랑스, 영국, 이탈리아는 2,000여만톤이다. 그런데 쓰레기가 발생하는 정도를 비교하기 위하여 국민 일인당 하루 발생하는 쓰레기량을 살펴보면 1990년 기준으로 미국이 1.2kg, 일본이 1.0kg, 영국, 독일은 0.8kg 수준이다.

이에 반하여 한국은 1980년 이후 쓰레기 발생량이 급격히 증가하여 1984년에 2000만톤, 1992년에 3400만톤의 쓰레기가 발생하였고, 1992년 기준으로 일인당 하루에 1.8kg이 발생하여 외국보다 많은 양의 쓰레기가 발생함을 알 수 있다.

우리나라 쓰레기 조성중에는 연탄재가 차지하는 비중이 상당히 높으며, 음식문화의 차이점 때문에 음식물 찌꺼기가 차지하는 비율 또한 선진국에 비교하여 매우 높은 편이고, 폐플라스틱도 약 20%로써 심각한 상태에 놓여 있다. 그리고 음식물 찌꺼기나 일반쓰레기를 회수용 비닐백이나 쇼핑백에 담아 버리는 게 일반적인 현실이다.

한편 플라스틱 생산량을 1989년 기준으로 살펴보면 미국은 2,400만톤, 일본은 1,260만톤, 서독은 900만톤, 이탈리아는 430만톤, 프랑스는

(그림2) 우리나라의 쓰레기 조성(1991)



430만톤이다. 이것을 국민 일인당 기준으로 볼 때 일본은 94kg, 서독은 133kg, 미국은 101kg이다.

이에 반해 한국은 1990년대 들어 석유화학공장의 증설에 따라 플라스틱의 생산량과 소비량이 급격히 증가되어 1990년에는 475만톤, 1992년에는 560만톤이 소비되었고, 이것을 국민 일인당 소비량으로 보면 79kg으로 중진국 수준을 넘어 선진국 수준과 근접해 있는 상태이다. 그러나 한국에서 이러한 플라스틱이 사용된 후 폐기되는 양은 1989년 기준으로 약 100만톤 규모이고, 1993년에는 약 130만톤으로 추정되어 연간 약 12%의 증가 추세를 보이고 있다.

전체적으로 볼 때 플라스틱 소비량과 도시 쓰레기 발생량은 비례적인 관계가 있는데 이는 그 나라의 경제적인 수준에 따라 달라지고 생활패턴과 소비구조 등의 요소에 영향 받는다고 볼 수 있다.

한편 폐플라스틱에 의한 해양오염은 더욱 심각한 상태에 있는데 [표2]

에서 보듯이 북태평양 해역에서의 표류 쓰레기의 분포를 보면 발포스티렌을 포함한 플라스틱 폐기물이 거의 절반에 육박함을 알 수 있어, 해양에 있어서도 폐플라스틱의 문제는 심각한 상태에 있다.

2. 쓰레기 처리 방법과 폐플라스틱의 재자원화

수거된 쓰레기 처리 방법은 크게 소각, 매립, recycle로 나누어진다. [그림3]과 같이 쓰레기 처리의 흐름을 보면 쓰레기를 수거하여 매립장에 운송하여 직접 매립장에 매립하는 경우가 있고, 소각 가능한 쓰레기와 매립할 수 있는 쓰레기를 분별 수거하여 소각하고, 소각후에 발생하는 소각 잔사를 매립장에 매립하는 경우도

(표2) 해양에서의 표류 폐기물(쓰레기)의 분포

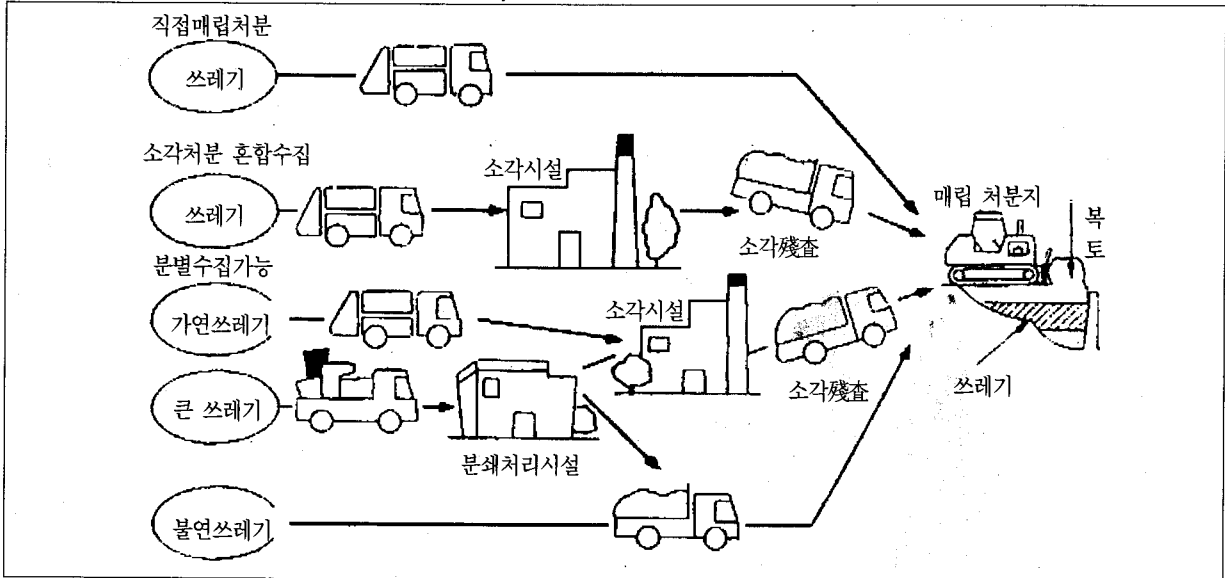
쓰레기 종류	북태평양 해역	일본 근해
플라스틱	21.3%	46.4%
발포스티렌	24.2%	23.8%
섬유	—	3.9%
어구, 어망	9.9%	—
금속	1.4%	12.2%
유리	2.1%	5.2%
기타	41.0%	8.4%
폐기된 총 수량	26,936개	300,000개

(표1) 플라스틱의 생산량 및 폐플라스틱의 발생량(1989년 기준)

(단위: 만톤/년)

구분	한국	미국	일본	독일	이탈리아	프랑스
플라스틱 생산량	230	2,400	1,260	900	430	430
폐플라스틱 발생량	100	1,200	560	170	122	150

(그림3) 쓰레기 처리의 흐름



있다. 불연 쓰레기는 바로 매립장에 운송하여 매립한다. 이때 매립장에서 매립할 때는 쓰레기 회수용 차량에서 하차된 쓰레기를 고른 다음에 그 위에 흙으로 복토하는데 이는 매립장의 지반을 안정시키기 위한 것이다.

한편 각국에서 매립장의 확보가 갈수록 어렵고, 매립에 의한 처리 방법 자체가 장기적으로 불 때 환경오염이 누적된다고 보고 있어 매립에

의한 처리가 갈수록 어려워지고 있다. 이런 면에서 불 때 소각처리는 유리한 점이 있으나 소각로 설치 비용이 많이 들고, 소각할 때 발생하는 유독 가스의 문제 등으로 인하여 소각할 수 있는 쓰레기 종류가 제한적이라는 단점이 있다.

그리고 소각시에 이산화탄소가 발생하는데, 지구 대기중의 이산화탄소의 농도가 급격히 증가됨에 따라 지구의 온난화 문제가 발생하여 온실효과가 나타나고 있다고 보고되고 있다.

분자량이 큰 고분자인 폐플라스틱이 연소될 때는 융해, 증발의 과정을 거치지 않고 분자주쇄의 결합에너보다 높은 에너지가 가해짐에 따라 화학결합이 절단되는 과정을 거쳐 고분자가 분해된다.

Polyolefin은 연소열이 [표3]에서 보는 바와 같이 비교적 높아 소각로의 수명을 단축시킨다는 문제가 있는데, 이를 해결하기 위해 일부 국가에서는 탄산칼슘을 충전시켜 가공한 제품을 개발하여 사용함에 따라 연소열을 낮추어서 소각로의 수명을 연장하고자 하는 노력을 기울이고 있다.

그리고 [표4]와 같이 소각할 때 발생하는 가스는 polyolefin일 경우에 hydrocarbon류가 주류를 이루고 있으므로 비교적 인체에 무해하지만 PS, PVC 등은 인체에 유해한 물질이 일부 생성된다고 보고되고 있다. 특히 PVC는 [그림4]와 같이 연소시킬 때 탈염산반응을 거쳐 주쇄에 이중결합을 갖는 화합물이 생성되고, 이것이 benzene 고리 모양과 비슷하

(표3) 플라스틱의 연소열

재료명	연소열(kcal/kg)
LDPE	11,140
HDPE	10,965
PP	10,506
EPS	9,800
PS	9,604
ABS	8,424
PVC	4,315
PMMA	6,265
도시 쓰레기	700~2,000
목재	약 4,500
목탄	3,000~4,000
석탄	5,000~7,000
등유	약 10,500

(표4) 고분자의 소각시 열분해 생성물

고분자 종류	주요 열분해 생성물
POLYETHYLENE	부탄, 부텐, 프로판, 프로필렌, 에틸렌, 펜탄, 펜텐, 핵산
POLYSTYRENE	스티렌, 2~4 스티렌 중합체, 톨루엔, 일산화탄소, 에틸벤젠
POLYVINYLCHLORLDE	염산, 벤젠, 톨루엔, 염소

계 C-C와 C=C 결합이 서로 배열되어 반응이 일어나 방향족 화합물이 생성하게 된다.

이 과정에서 염소나 염산 가스가 발생하여 연소 소각로를 부식시킨다는 문제를 같이 안고 있다. 그래서 세계의 여러 국가에서는 PVC와 PS 등을 포장재료로의 사용을 금지하는 법률을 시행하고 있고, 우리나라 역시 PVC와 PS를 일부 용도의 제품에 사용을 금지하는 법률을 시행중에 있다.

세계적으로 소각비율을 1985년 기준으로 살펴보면 [그림5]와 같이 덴마크가 81%로 세계에서 가장 높고, 일본이 72%, 서독이 33%, 영국이 10%, 이탈리아가 18%인데 소각비율이 낮은 나라는 상대적으로 매립비율이 높다고 볼 수 있다.

매립에 의한 처리에 있어서는 매립된 쓰레기가 어느 기간동안에 걸쳐 썩어서 분해되어야 미래의 국토 재이용이라는 차원에서 효과적이지만, 쓰레기중에 페플라ستيك과 같이 썩지 않는 물질이 섞여 있을 경우에 장기적으로 볼때 환경오염이 심각하게 된다.

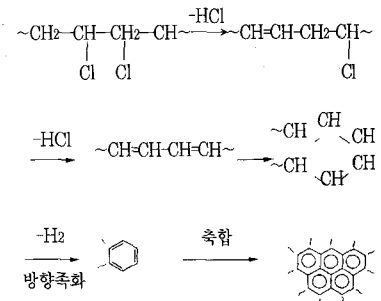
미국에서는 매립에 의한 의존도가 높고, 위생매립에 의한 쓰레기 처리가 주류를 이루고 있다. 그 이유는 먼저 국토가 넓어 매립처리에 요구되는 매립지의 확보가 쉽기 때문이고, 또한 매립처리의 비용이 톤당 5~7달러로써 소각처리 비용보다 비교적 경제적이기 때문이다. 반대로 일본이 소각 비율이 높고 세계적으로 최대로 많은 소각로 대수를 보유하고 있는 것은 비교적 국토면적이 협소하고 평야 부분이 적기 때문이다.

그런데 유럽에서는 기본적으로 처리 비용을 중시하는 면이 강조되는 경향이 있다. 예를 들어 미국에 비해

국토면적이 좁은 영국은 소각비율이 미국과 동등 수준인데 이는 처리 비용에서 비교적 저렴한 매립 처리가 주류를 이루고 있다. 그러나 서독이나 프랑스는 소각비율이 이에 비해 상대적으로 높은 나라이고, 그밖의 국가들도 소각 비율을 높이려는 노력을 활발히 전개하고 있다고 알려져 있다.

쓰레기 중에 재활용이 가능한 것을 회수하여 재사용하는 recycle 방법이 있는데, 자원의 재활용 면에서나 환경오염의 최소화의 측면에서 아주 효과적인 방법이라고 인식되고 있어, 세계 각국에서는 recycle을 확대하려는 노력이 많아지고 있다. 이러한 recycle은 효과면에서 뛰어나므로 앞으로 한국을 비롯한 각국에서 관심을 가지고 추진해 나가야겠지만 아직

(그림4) PVC의 탈염산화 방향족분자의 생성과정



까지는 노력에 비해 성과가 미흡한 상태에 있다. 그 이유는 recycle 과정 상 수거 비용이 많이 들고, 이를 다시 제품화시키는데 비용이 많이 든다는 문제가 있다.

예를 들어 독일에서는 페플라ستيك을 회수하여 recycle시키는 산업을 육성하고자 정부 및 석유화학업체가

(표5) 페플라ستيك의 재자원화 및 처리방법

처리 방법	내용 설명	특 징	
재생이용	단순재생	신규 생산 수지와 혼합 또는 단독으로 성형하여 pellet화하여 가공원료(2급원료)로 이용.	대상은 열가소성수지(PE, PP, PVC, PS)에 한정. 단일 종류의 폐수지가 집중적으로 발생하는 경우에 적용.
	복합재생	다소 품질이 떨어지는 혼합수지로부터 상자, 시트, 봉 등의 외관이나 비교적 품질에 문제가 없는 제품을 직접 제조.	단순재생과 같이 대상은 열가소성수지로 한정. 오염이 적고 수지 혼합비율이 어느정도 일정해야 함.
monomer 환원	페플라ستيك을 열분해 또는 가수분해하여 monomer로 환원하고, 이것을 polymer 제조 원료로 사용.	실제로 환원하여 원료로 사용하는 수지는 극소수. 실시에로는 PMMA.	
연료화	연료유, 가스화	페플라ستيك을 혼합물 그대로 열분해하여 연료유나 연료 가스를 제조.	수지에 따라 열분해 특성이 달라 기술적으로 어렵다.
	고형연료	페플라ستيك에 목분이나 폐지를 혼합하여 성형후 고형연료로 이용.	전용 연소로가 필요하여 실제 사용자 확보가 선행되어야 함.
에너지 회수	일반 쓰레기와 동시에 소각하여 발생열을 증기 또는 전력으로 회수하여 사용.	소각로 별로 실시 가능. 이차 공해유발에 대책이 강구되어야 함.	
매립	일반 쓰레기와 같이 매립장에 매립.	매립장의 확보 및 수명단축의 문제 유발.	

공동으로 많은 투자를 하였으나 recycle하는 업체가 큰 경영난을 겪고 있는 처지이며, 그 이유는 바로 경제성이 없기 때문이라고 하고 있다.

또한 재생 이용뿐만 아니라 [표5]와 같이 연료화, 소각에너지 회수, monomer 환원 등이 활발히 연구 개발되고 있고, 일부 상업화하여 가동 중에 있는 것도 있지만 앞으로 충분한 연구개발이 진행되어 경제성을 갖출 때만이 실제 적용이 활발할 것으로 보여진다.

한국에서는 폐지, 유리병 등이 수거되어 재활용되고 있으나 그 양은 아직 미미한 상태에 있고, 특히 폐플라스틱의 recycle은 1%도 안되는 실정이다. 그나마 한국자원재생공사와 지방자치단체에서 이를 수거하는 노력이 있으나 재생가공업체 대부분이 영세하여 물리적인 방법에 의한 단순 재생방법에 의존하고 있는 실정이다.

3. 플라스틱 폐기물과 분해성 플라스틱

폐플라스틱 처리에 있어서 보다 효과적인 방법이라고 말하는 recycle이 활발하게 추진되어야 할 것이다. 그러나 recycle의 방법은 플라스틱의 종류도 다양하고 서로 혼합되어 있는 플라스틱 제품도 많으며 비용면에서도 불리한 입장에 있는 것이 현재의 현실이다. 그리고 에너지 회수, monomer 환원, 연료화 등의 방법도 현 단계에서는 발생하는 폐플라스틱의 많은 부분을 처리하기에는 어려운 상태이다.

외국 선진 국가에서는 플라스틱의 사용에 대한 규제를 실시하고 있다. [표6]에서 보는 바와 같이 미국에서는

음료수캔 연결링을 분해성 플라스틱으로 사용을 의무화하고 있고, 플라스틱 bottle에 deposit 제도를 실시하고 있다. 유럽에서는 recycle과 플라스틱 deposit 제도를 여러 국가에서 실시중이며, 특히 이탈리아에서는 비분해성 플라스틱으로 된 shopping bag이 수입될 때 세금을 부과하여 분해성 플라스틱 사용을 유도하고 있다.

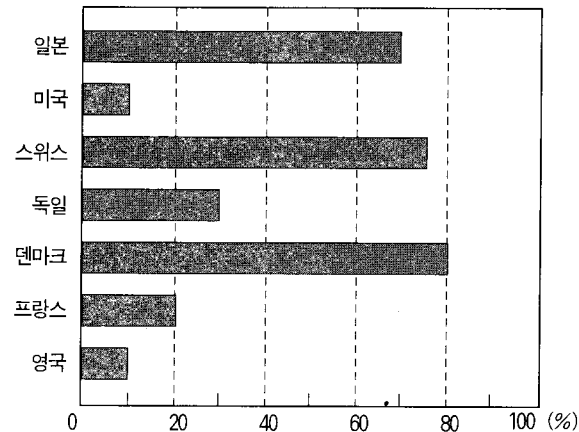
따라서 폐플라스틱에 의한 환경오염 문제를 해결하는 방법이 뚜렷하게 부각되고 있지 않은 상황에서 분해성 플라스틱이 이의 문제를 일부 해결할 수 있는 방법으로 대두되고 있다. 즉 플라스틱이 사용후 폐기되었을 때 일

정기간내에 분해되어 이산화탄소와 물로 분해되어 자연의 순환 사이클로 순환시킴으로써 폐플라스틱에 의한 환경오염 문제를 해결하고자 하는 것이다.

4. 분해성 플라스틱의 정의

적어도 분해의 한 과정에 있어서 생물의 대사 또는 태양광이 간여하여 저분자량의 화합물로 변환하는 것을 특징으로 하는 플라스틱을 생분해성 플라스틱 또는 광분해성 플라스틱이라고 볼 수 있다. 그런데 아직까지 분해성 플라스틱의 정의는 완전히 정

(그림5) 각국의 소각처리 비율



(표6) 미국, 유럽의 플라스틱 관련 규제 동향

국가명	규제내용
미국	9개주에서 플라스틱 BOTTLE에 DEPOSIT 제도 실시 16개주에서 음료수캔 연결링에 분해성 플라스틱 사용 의무화
이탈리아	비분해성 플라스틱 SHOPPING BAG 수입시 100리라 과세 액체 식품 용기의 RECYCLE 의무화
독일	PET BOTTLE에 50페니히 DEPOSIT 또는 80% RECYCLE 법안 지방자치단체별 PVC BOTTLE 사용 금지
덴마크	일회용 포장재 PVC 사용 금지 재사용 불가능한 음료용 BOTTLE 사용금지
스위스	RECYCLE 불가능한 용기의 사용 금지 법안
오스트리아	PVC 포장재 사용 금지 법안 PET BOTTLE, ALUMINIUM 용기의 DEPOSIT 제도

립되어 있지 않고 많은 논의를 계속하고 있다. 따라서 현재 분해성 플라스틱에 대한 정의 및 시험방법에 대해 활발하게 연구되고 있다.

미국의 ASTM에서는 1991년에 분해성 플라스틱에 대해 정의를 하였는데, 분해성 플라스틱(degradable plastics)을 특정 환경에서 고분자의 화학적 구조가 상당히 변화되어 그 성질의 변화를 표준방법으로 측정할

수 있는 플라스틱이라고 하였다. 또한 생분해성 플라스틱(biodegradable plastics)은 자연에 존재하는 미생물, 즉 박테리아, 곰팡이, 조류 등의 작용으로 분해가 일어나는 플라스틱이라고 하였고, 광분해성 플라스틱(photodegradable plastics)은 자연광의 작용에 의해 분해가 발생하는 플라스틱이라고 정의하고 있다.

한편 분해성 플라스틱을 분해과정

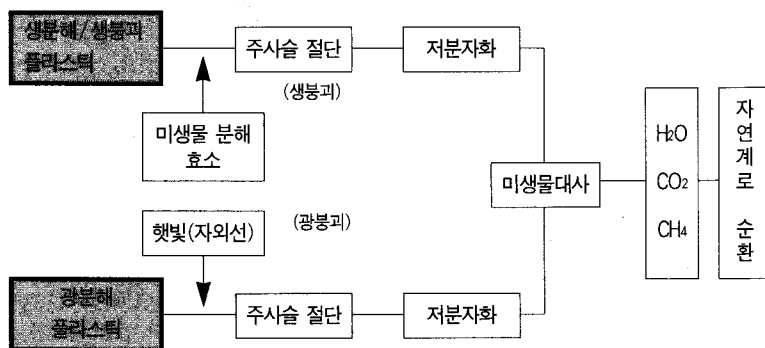
으로 살펴보면 (그림6)과 같다. 고분자재료의 생분해는 먼저 미생물의 균체 밖으로 분비되는 분해효소가 재료 표면에 흡착하고, 균체외분비효소에 의해 고분자의 주사슬이 절단되어 저분자화하는 과정을 생분해성 플라스틱에 있어 일차분해(Primary Degradation)과정이라고 부른다. 광분해성 플라스틱에 있어서는 태양광의 작용으로 화학결합이 절단되어 고분자사슬이 저분자화한다. 이 과정은 생분해성 플라스틱의 일차 분해과정과 유사하다.

분해성 고분자가 효소나 태양광에 의해 저분자량 화합물로 분해된 후, 미생물 체내에 섭취된다. 일반적으로 분자량이 수백 이하의 화합물이 되면 미생물의 세포내에 투과가 가능하다. 분해생성물은 미생물 내의 다양한 대사경로를 통해 각종 생체고분자를 합성하는데 이용되거나, 또는 에너지 생산을 위해 이용되어 호기적인 환경에서는 탄산가스과 물로 되고, 혐기적인 환경에서는 메탄, 탄산가스, 물로 변환한다. 이 과정을 완전분해(Ultimate Degradation) 과정이라고 부른다.

그리고 분해성 플라스틱의 개발 못지 않게 분해성능을 평가하는 기술의 중요성이 인식되고 있는 가운데 이에대한연구가 활발히 진행되고 있다. 생분해성의 평가는 [표7]과 같이 자연상태의 토양에 매몰에 의한 field test 방법, 활성오니(혐기적, 호기적 조건)에 의한 방법, 특정 미생물 또는 효소에 의한 평가방법이 있고, 광분해성은 옥외노출에 의한 폭로시험과 옥내가속시험(weather-meter, UV-CON 이용) 방법이 있다.

(계속)

(그림6) 분해성 플라스틱의 분해 과정



(표7) 생분해성 및 광분해성 평가 방법

분 류	미생물 등의 종류	시험방법	분석항목	소요기간 정량성
토양에 의한 분해성	경작지, 매립지, 산림 의 자연환경	토양매몰 해수 침적	CO ₂ 발생 O ₂ 흡수	1개월~2년 정량성 낮음
미생물에 의한 분해성	곰팡이 저항성 시험 활성오니시험	한천평판시험 액체배양시험	곰팡이 생육도 시험 균체량 측정 CO ₂ 발생 O ₂ 발생 무게 감량 측정 물성 저하 측정 분자량 감소측정	1주일~1개월 정량성 중간 수준
효소에 의한 분해성	리파아제, 세룰라제, 아밀라제 등의 가수 분해 효소	가용화 시험 말단기 정량화 시험	전 유기탄소량계에 의한 가용화율 측정 무게 감량 측정 물성 저하 측정 분자량 측정	수시간~수일 정량성 높음
광에 의한 분해성	태양광 UV LAMP XENON-ARC LAMP	옥외폭로시험 옥내가속시험	물성 측정 분자량 측정	수일~수개월 정량성 중간 정도