

실용화 단계에 도달하는

# 생분해성 플라스틱

주지하는 바와 같이, 자연환경 속에서는 분해되지 않는 안정적 소재인 플라스틱의 대량 생산이 오늘날 커다란 환경문제로 대두되고 있다. 플라스틱으로 인한 환경오염문제 해결방안의 일환으로서, 사용 후, 미생물의 작용에 의해 물과 탄소가스로 분해되는 생분해성 플라스틱의 연구가 1980년대 후반부터 활발해졌으며, 현재까지는 미국, 유럽, 일본 등지에서 많은 제품이 개발돼 왔다. 생분해성 플라스틱은 농림·수산업자재, 토목·건축자재, 포장용 기분야 등에서의 용도가 기대되고 있으나, 범용플라스틱에 비해 아직은 가격이 훨씬 비싸다는 것이 그 용도확대의 걸림돌이 되고있다. 이 글에서는 생분해성 플라스틱의 개발동향, 시험법표준화와 안전성 등을 포함하여, 생분해성 플라스틱의 앞으로의 실용화 가능성을 살펴보기로 한다.

## 1. 연구·개발 활성화와 함께 용도 확대 예상

쓰고 난 플라스틱의 축적으로 인한 환경오염 문제의 해결책의 일환으로 1980년대부터 생분해성 플라스틱이 개발돼 왔다. 개발초기에는 생분해성 플라스틱이 마치 환경문제를 모두 해결할 수 있는 것처럼 선전되어, 어느 의미에서는 오해와 혼란을 야기하기도 했다.

현재에는 쓰고 난 후의 플라스틱은 우선 재생·재활용하여야 하며, 재생·재활용이 곤란한 용도나, 환경 속에 유출·축적되기 쉬운 용도분야를 생분해성 플라스틱으로 충당한다는 것이

공통적인 인식이다.

일반적으로 생분해성 플라스틱은 천연물이용계, 미생물산생계, 화학합성계로 분류되는 경우가 많은데, 이것을 제조방법에 의한 분류인 동시에, 생분해성 플라스틱의 개발동향에 따르는 분류이기도 하다.

### 1-1. 천연물이용계

천연물이용계의 생분해성 플라스틱은 본래 생분해성을 지닌 전분, 셀룰로오스 등 천연고분자를 플라스틱으로 이용한 것이다.

1970년대에는 폴리에틸렌 등에 전분이 첨가된 것이 개발되어 미국에서 상당히 많이 이용된

듯 하다. 그 후 이런 제품에 있어서 전분 가운데, 생분해하는 폴리에틸렌 부분은 형태상의 미세화가 생길 뿐 분해는 되지 않으며, 오히려 환경 속에 분산시키기만 한다는 비판이 일자, 오늘날 이와 같은 플라스틱은 붕괴성 플라스틱이라고 하여, 생분해성 플라스틱과는 구별되고 있다.

전분 등은 그 자체에는 열가소성이 없기 때문에, 그 후 전분과 여타의 생분해성 플라스틱이 혼합된 것이 생분해성 플라스틱으로 개발됐다.

또한 전분이나 셀룰로오스를 화학적으로 수식한 것과 키토산(chitosan), 셀룰로오스 및 전분의 혼합물도 개발되었다.

이런 것들에 이용되는 천연물의 분자골격은 다당류에 속하는 것들이다.

## 1-2. 미생물산생계

미생물생산계 생분해성 플라스틱은 미생물이 세포 내 지방족 폴리에스테르를 축적하는 성질을 이용하여 만드는 것이다.

1970년대말에 영국의 ICI사가 글루코스를 원료로 하는 발효법에 의해 폴리하이드록시낙산(polyhydroxy酪酸)과 폴리하이드록시길초산(polyhydroxy吉草酸)의 고중합물 제조기술을 개발하여, '바이오폴'이라는 상품명으로 상품화하였다. 현재는 이 사업을 미국의 몬산토사가 인수하고 있다.

미생물산생계 생분해성 플라스틱으로서 상품화돼 있는 것은 현재로서는 앞서 말한 '바이오폴' 뿐이지만, 이 계통의 연구자체는 세계각국에서 활발히 진행되고 있으며, 유전자 조작기술 등도 응용한 생산효율과 기능성이 높은 폴리에스테르의 제조 및 생분해기구의 해명 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국의 몬산토사에서는 유전자가 조작된 유채씨를 이용하여, 식물로 하여금 이런 폴리에스테르를 생성토록 하는데 성공하였다고 한다. 이와 같은 일련의 연구활동은 생분해성을 지닌 플라스틱의 개발과 함께 앞으로 닥쳐 올 석유자원의 고갈을 감안한, 식물을 토대로 한, 재생 가능한 플라스틱의 개발을 목표로 수행되고 있다.

## 1-3. 화학합성계

폴리우레탄의 원료 등으로 사용되는 폴리카프로락톤(polycaprolacton)에 생분해성이 있다는 사실은 1970년대부터 알려져 왔다. 또한 폴리유산에는 생체흡수성이 있어, 옛부터 수술용 실 같은 의료용 재료로서 사용됐다. 이것들은 미생물산생계의 생분해성 플라스틱과 동일한 지방족 폴리에스테르 구조를 가지고 있는 것으로서, 현재 생분해성 플라스틱으로 개발되어 시판되고 있다. 그 후 같은 생분해성을 지니고 있는 지방족 폴리에스테르로서 폴리부틸렌삭시네이트(Polybutylenesuccinate), 폴리부틸렌삭시네이트/아디페이트(Polybutylenesuccinate/Adipate), 폴리에틸렌삭시네이트 등이 개발되었으며, 이것들은 대응하는 모노머의 중합반응에 의해 만들어지므로 화학합성계 생분해성 지방족 폴리에스테르라고 부른다.

화학합성계의 생분해성 폴리에스테르 중 폴리유산은 그 원료모노머인 유산이 옥수수나 감자 등의 전분으로 발효법을 이용하여 제조되기 때문에 식물을 기원(起源)으로 하는 재생 가능한 플라스틱이라고 생각할 수 있다. 이것 이 외의 화학합성계 플라스틱에 있어서도 그 원료모노머를 발효법을 이용하여 만들 수 있는 날이 멀지 않다고 전망된다.

한편 화학합성계 생분해성 플라스틱에 있어서는 지방족 폴리에스테르 이외에도 폴리비닐알코올이 있으며, 지방족 폴리에스테르 폴리카보네이트(일본), 지방족 폴리에스테르 아미드(독일), 방향족 폴리에스테르(독일, 미국), 폴리아미노산(일본) 등이 속속 개발되고 있어, 플라스틱으로서의 사용범위가 더욱 넓어질 것으로 기대된다.

생분해성 플라스틱의 용도는 확대되고 있지만, 양적(量的)으로는 범용(일반) 플라스틱에 비해 아직 미미한 단계에 있다. 앞으로는 제조회사마다 생분해성 플라스틱의 용도가 크게 확대될 것으로 기대하여 시장개척에 세를 집중하고 있으나 기대하는만큼 시장이 확대되지 않고 있다. 그 원인으로서 생분해성 플라스틱이 일반 플라스틱에 비해 가격이 훨씬 비싸고, 폐기물처리시설상의 문제가 있는 점을 들 수 있다.

가격면에 있어서 현재로서는 생산량이 적으므로 가격이 비싸고, 앞으로 생산량이 늘어나면 생산원가가 낮아질 것으로 예상되기는 하지만, 단순한 생산량증가를 통한 가격인하 뿐만 아니라 기술적 혁신에 의한 원가절감 노력도 함께 기울여 나갈 필요가 있다.

폐기물 처리시설에 관련된 문제로서는, 생분해성 플라스틱은 '사용 중에는 종래의 플라스틱과 같은 정도의 기능을 발휘하면서, 사용 후에는 자연계에 존재하는 미생물의 작용에 의해 전분자 화합물로 분해되어, 최종적으로는 물이나 탄산가스 등 무기물로 분해되는 고분자소재'라고 하듯이, 폐기단계에서 그 진가를 발휘한다.

생분해성 플라스틱은 폐기물로서 수집되었을 때, 물 쓰레기(주방 쓰레기) 등과 섞어서 퇴비화(堆肥化)할 수 있다는 점에 그 가치가 있다.

따라서, 앞으로 퇴비화시설을 얼마나 충실하게, 또 얼마나 빠른 속도로 확충해 나가느냐가 생분해성 플라스틱의 개발과 그 용도확대의 관건이 될 것이다.

아울러, 생분해성 플라스틱의 존재 자체마저도 충분히 알려져 있지 않고 있는 상황에서 분해성 플라스틱에는 생분해성, 광분해성 및 붕괴성 플라스틱이 존재한다는 사실을 모르고, 이들 모두를 생분해성 플라스틱으로 오인·혼동하는 것도 생분해성 플라스틱의 개발진전과 그 용도확산을 가로막는 원인 중 하나가 되고 있다고 생각된다. 따라서 생분해성 플라스틱에 대한 올바른 인식을 확산시킬 필요가 있다. 이와 함께 생분해성 플라스틱을 보다 널리 보급(普及)하기 위해서는 다음 장(章)에서 소개하는 생분해도시험, 안전성의 확인시험 등 각종 시험방법을 더욱 충실화할 필요가 있다.

## 2. OECD의 테스트-가이드라인에서 ISO규격으로

플라스틱은 일상생활이나 산업에 불가결한 소재로서 세계적으로 매년 1.2억톤이 생산되고, 그 중 50~60%가 또는 그 이상의 양이 폐기된다고 한다. 이들 쓰고난 후의 폐플라스틱은 대부분의 나라에서 주로 매립되거나 소각되는데, 지구환경 오염에 대한 우려의 목소리가 높아져, 이와같은 처리방법의 재검토가 필요해졌다.

그 해결책으로서 근본적으로, 이른바 3R을 들 수 있다. 우선 불필요하게 과잉사용을 하지 말것(Reduction), 다음에는 재생·재활용할 것(Reuse), 끝으로 재순환시킬 것(Recycle) 등이 그것이다. 그러나 환경 속에서 사용되므로 회수

하기가 어렵거나, 회수하거나 재사용하기 위해서는 에너지를 추가로 사용할 필요가 있는 분야에서 사용되는 것에 대해서는 폐기 후 환경속에 보편적으로 존재하는 미생물에 의해 분해되는 생분해성 플라스틱이 요구된다.

생분해성 플라스틱의 연구가 시작된지 약 15년이 지났다. 새로운 재료를 세상에 선보일 때에는 그 재료의 특성·성능을 밝히기 위해 각종 데이터를 제시할 필요가 있는데 그것이 전혀 새로운 개념의 소재인 경우에는 그 특성, 성능 등을 밝힐 수 있는 시험방법조차 없을 수 있다.

생분해성 플라스틱의 생분해성능을 측정하는 시험방법이 바로 이런 범주에 속하며, 시험방법 자체가 없었다. 세계에서 최초로 이 분야의 시험방법 개발에 착수한 것은 ASTM(미국시험·재료협회)이었다(1995년경).

일본의 경우를 예로 든다면, 통상산업성이 일본바이오인더스트리협회(Bio-Industry Association)에 위탁하여 1989년부터 시험방법 개발에 착수하였다. 활성오니(活性汚泥)를 이용하는 방법, 토양 속에서의 시험방법, 특정미생물·효소를 이용하는 시험방법, DNA Probe를 이용한 예측방법 등을 검토해 본 바 있다.

한편, 일본 생분해성 플라스틱연구회에서는 자연환경 하에서의 분해작용을 인지하여, 실험실에서 나온 시험결과와의 상관관계를 밝혀 내실에서 밝혀내기 위해, 1990년 가을부터 일본국내의 1개소와 미국의 1개소에서, 또 해수(海水) 중의 1개소와 담수(淡水) 중의 1개소에서 여러 가지 다른 종류의 생분해성 플라스틱을 사용하여 현장시험을 실시하였다.

1995년에는 그 후 새로 개발된 각종 생분해성 플라스틱에 대해 2차 현장시험을 실시하였고,

나아가 생분해성 플라스틱은 어떠한 경우에도 빨리 분해되는 것과, 분해가 서서히 진행되는 것, 통상적 조건 하에서는 즉시 분해되지 않는 것, 그리고 거의 분해되지 않는 것 등으로 분류할 수 있음을 알아냈다.

여러모로 검토를 거친 시험방법 중, OECD의 테스트·가이드라인(Test Guide line-시험지침)에 생분해성능 시험방법으로 정해져 있는, 활성오니(活性汚泥)를 이용한 분해성 시험방법을 각종 분해성 폴리머에 적용한 결과, 현장시험과의 상관성도 확실히 나타났고, 고분자에도 응용할 수 있음이 판명되었다. 따라서 이 시험방법을 1994년, JIS K 6950으로서 표준화시킨 바 있다. 이것이 훗날 ISO규격의 기초가 되었다.

새로 개발된 화학물질을 시판(市販)하기 위해서는 안전성에 대한 검토가 필요하다. 우선 필요한 것은 세계 여러나라에서 실시되고 있는 바와 같이, 시판 전에 이 화학물질을 등록하는 일이다. 일본에서는 화학심의법, 안전위생법 등 법령에 의거, 미국에서는 TSCA, EU에서는 EC지령에 의거, 각각 새로 개발된 화학물질을 등록한다. 실제로 취급하는 나라에 따라 큰 차이가 있으나, 고분자와 분해성 플라스틱에 대한 일본, 미국 및 EU의 취급규정에 있어서, 뒤 표에서 보는 바와 같이, 상호 유사한 부분이 많다.

일반적으로 분자량이 수백 내지 천을 초과하는 화학물질은 생체의 세포에 침투하지 않는다고 하며, 저분자 화합물보다는 고분자 화합물이 안전하다고 생각되고 있다.

따라서 대부분의 나라에서는 특별한 유해관능기(有害官能基)나 중금속이 함유 돼 있지 않는 폴리머는 시판 전에 신고·등록하도록 엄격히 규제하고 있지는 않다. 특히 EU에서는 모노머

(표) 일본·미국·EU에 있어서의 생분해성 플라스틱의 규제

구분	일본	미국	EU
근거법령	화학심의법	TSCA	EC 7차 지령
정의	OECD	OECD	OECD
폴리머의 신고 (분지량에 따라 제한)	안정돼 있고 Mn1,000이하의 성분이 1%이하	10,000>Mn이상 및 Mn<500 10%이하 Mn<1,000 25%이하는 사후신고.	기존 화학물질목록(EINECS)에 있는 모노머로 구성된 폴리머는 신고할 필요없음 신규 화학물질목록에 있는 모노머로 구성된 폴리머는 신고
신고할 경우 필요한 데이터	Polymer-Flow-Scheme	일부의 원소, 관능기가 함유된 폴리머는 사전신고	Base Set라고 하는 기본데이터
생분해성 플라스틱	Polymer-Flow-Scheme에서 안정돼 있거나 저분자에 적용되는 생분해성 시험에서 분해되기 쉽다고 판단되지 않은 한 공정시험방법	일반적으로 필요하다고 판단되는 현존 데이터를 제출 위와 동일	규정은 없으며, 모노머가 EINECS 또는 ELINCS에 기재돼 있느냐에 따라, 위에 제시한 것 중 하나.

가 기존 화학물질인 경우는 분해성이 있고 없고에 관계없이 신고할 필요가 없다.

폴리머의 생분해에 의해 시료의 중량이 가벼워지는데, 분지량은 크게 줄어들지 않기 때문에 폴리머의 생분해는 우선 폴리머 표면으로부터 나오는 효소에 의한 가수분해반응이 일어나고, 이어서 생성되는 저분자 화합물(원료 모노머 또는 올리고머)이 미생물의 체내에 침투, 소화흡수 되어, 최종적으로 물과 이산화탄소로 변한다고 생각돼 왔다. 따라서, 가수분해에 의해 어떠한 중간생성물이 생기며, 그것이 측정할 수 있을 정도의 양인지의 여부, 또 중간물이 생성되더라도 추적되지 않고 최종적으로 물과 이산화탄소로 까지 변하는지의 여부가 판명된다면, 안전성에 대해서는 상당히 밝혀낼 수 있지 않나 생각해서 검토가 계속되고 있는 상황에 있다.

예컨대, 독일에서는 생분해성 플라스틱의 사

용분야 및 처리방법으로서 퇴비화(堆肥化-Compost)가 고려되고 있으며, 이를 위한 시험 방법으로서 DIN 54900이 거론되고 있다.

DIN 54900은 아래와 같은 4개 부분으로 구성돼 있다.

가. 화학데이터 : 기초적인 분해성과 붕괴성의 시험, 원소분석(중금속 등의 제한 있음).

나. 시험실데이터 : DIN 14851, 14852 및 14855에 의거한 시험, 호모폴리머에 있어서는 60%이상, 혼합물에 있어서는 90%이상.

다. 퇴비화시험(Compost Test) : 실험실 규모와 공장규모에 있어서의 퇴비화 시험에서 2mm 이하가 90%.

라. 환경독성시험(環境毒性試驗) : 보리과(大麥科) 고추나무류의 발아시험(發芽試驗), 지렁이와 물벼룩을 이용한 시험이 고려되고 있다. ☐