KOREAN J. FOOD SCI. TECHNOL. Vol. 40, No. 4, pp. 365~374 (2008)

Review

KOREAN JOURNAL OF
한국식품과학회지
FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY

©The Korean Society of Food Science and Technology

분해성 플라스틱의 개발 및 시장 동향

유영선 · 소규호[1] · 정명수[2,*]
(주)이엔포레코, [1]농업진흥청 농업과학기술원, [2]이화여자대학교 식품공학과

Trends in Development and Marketing of Degradable Plastics

Young-Sun You, Kyu-Ho So[1], and Myong-Soo Chung[2,*]
ENForECO Co., Ltd.
[1]National Institute of Agricultural Science and Technology
[2]Department of Food Science and Technology, Ewha Womans University

Abstract Plastics are comparatively new polymeric materials that are manufactured by chemical synthesis, making them different from natural materials such as wood, paper, stone, metal, and glass. Due to a wide range of properties, including processing capabilities and duration, plastics have become rapidly ubiquitous, being used in all industries, and have improved our quality of life. However, it is true that plastics cause environmental contamination problems that have become important social issues, such as environmental hormone leakage due to incineration or reclamation, difficulty in securing reclamation sites, and deadly poisonous dioxin generated by the incomplete incineration of waste plastic materials. To solve these problems, it is urgent to develop and commercialize degradable plastics that can be stably and conveniently used just as general plastics, and that are easily decomposed by sunlight, soil microbes, and heat generated from reclaimed land after use. This review presents recent worldwide trends in the development and marketing of environmentally degradable plastics.

Key words: degradable plastics, environment-friendly and non-harmful plastics, trends in development and marketing

서 론

플라스틱 소재는 다양하고 우수한 기능 및 저렴한 가격으로 현대인의 풍요로운 일상생활과 산업발달에 큰 공헌을 해 온 반면 대량으로 발생되는 각종 폐비닐, 스티로폼, 플라스틱 용기 등의 소각이나 매립에 따른 환경호르몬 누출, 맹독성의 다이옥신 검출 폐기물의 불완전 연소에 의한 대기오염 발생 등과 같은 심각한 환경오염의 원인으로 대두되고 있다. 이러한 플라스틱 폐기물의 문제를 해결하기 위하여 사용할 때는 플라스틱의 가공성, 내구성, 기계적 성질을 유지하면서 추가로 사용 후에는 분해성이라는 기능을 부가하여 플라스틱의 편리성과 환경오염 문제 해결을 할 수 있는 연구가 진행되고 있다(1,2).

현재 폐기된 플라스틱이 빛에 의해서 분해되는 광분해성 플라스틱이나 토양 중의 미생물에 의해 썩는 환경 친화적이고 무해한 플라스틱인 분해성 플라스틱의 실용화 및 의무화의 압력이 거세지면서 독일, 이태리, 미국 등 선진 각국에서는 쇼핑백, 플라스틱제 병의 분해성 수지 사용을 의무화하는 등 생분해성 플라스틱 및 광분해성 플라스틱 등의 실용화가 활발히 추진되고 있다. 반영구적이라는 플라스틱 개발 초기의 장점은 시간이 흐름에 따라 잘 썩지 않는다는 특징이 환경오염이라는 부메랑이 되어 우리 앞에 나타나고 있다. 이로 인해 플라스틱 폐기물에 의한 환경오염이 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 세계 각국은 앞 다투어 환경규제를 강화하고 있고(3), 우리 정부도 분해되기까지 300-500년 정도 소요되는 기존의 일반 난분해성 플라스틱 제품에 부과되는 폐기물 부담금을 2012년에는 평균 20배까지 인상하는 정책을 마련하고 있다 . 이에 따라 국내 플라스틱 산업이 많은 어려움에 직면할 것으로 예상된다. 폐기물 부담금 인상을 포함한 여러 환경 규제는 플라스틱 산업의 성장에 걸림돌로 작용할 것으로 본다. 이에 국내 플라스틱 산업은 이러한 외부의 도전을 극복하고 이를 디딤돌로 삼아야 한다. 오히려 이러한 어려움을 기능성, 분해성 등 추가 기능을 부여한 기술 및 제품 개발, 상용화 추진, 원가절감 등을 통하여 새로운 도약의 기회로 모색해야 할 필요가 있다.

우리나라는 그 동안 생분해성 등 분해성 플라스틱의 실용화가 미미한 편이었지만 2001년도에 쓰레기 종량제 봉투의 제조 시 생분해성 소재 함량 30% 이상 사용 의무화를 위한 환경부 지침이 개정되고 각 시, 군, 구 자치단체의 조례 개정작업이 완료되어, 우리나라도 생분해성 플라스틱 시장이 급속하게 성장할 것으로 예상했었다. 그러나 생분해성 플라스틱이 가진 단점들로 인해서 현재는 거의 사용되지 않고 있는 실정으로 다른 대안이 필요하게 되었다. 그 대안으로 개발되고 있는 제품이 기존 제품의 물성 개량, 경제성 등을 고려한 다양한 분해성 플라스틱의 개발 및 상업화 연구가 활발하다.

생분해성 플라스틱의 세계 시장규모는 2002년 현재 약 9조 원 정도였고(4), 최근 분해성 플라스틱과 관련한 지식재산권을 선점

*Corresponding author: Myong-Soo Chung, Department of Food Science and Technology, Ewha Womans University, Seoul 120-750 Korea
Tel: 82-2-3277-4508
Fax: 82-2-3277-4508
E-mail: mschung@ewha.ac.kr
Received July 11, 2008; revised July 29, 2008; accepted August 1, 2008

하기 위한 선진국과 국내 대기업 및 중소기업 등의 출원이 급증하였다. 최근에는 특허, 기술, 상업화가 중소기업 위주로 재편되어 가고 있는 실정이다. 특허청에 의하면 "선진국에서는 이미 분해성 플라스틱 사용을 의무화하는 등 실용화가 상당한 수준에 있으나 우리나라는 미미해 이에 대한 대책이 필요하다"며 향후 빛과 미생물에 의해 분해되는 정도를 조절하여 용도에 맞는 광분해, 생분해, 화학 분해 등 복합 분해도를 가지는 복합 물질을 만드는 방향으로 기술이 개발되고 있다고 한다. 실제적으로 업계, 학계에서는 기존 생분해 제품의 단점을 보완하기 위한 블랜딩(blending) 기술이 지속적으로 개발되고 있으며, 이를 상용화하는 업체들이 계속 출현하고 있다.

분해성 플라스틱

분해성 플라스틱의 정의는 세계적으로 활발한 논의가 계속되고 있으나 아직 국내외적으로 정확하게 규정지어진 것이 없다. 미국의 경우, 미국 ASTM(American Society for Testing and Materials)에 의하면 특정 환경 조건에서 일정시간 동안에 화학적 구조가 상당히 변화되어 그 성질 변화를 표준 시험 방법으로 측정 할 수 있는 플라스틱을 말하고, 이는 생분해성, 생광분해성(복합분해성), 광분해성 플라스틱으로 구분하고 있다. ASTM에서 규정한 분해성 플라스틱과 생분해성 플라스틱에 관한 용어의 정의를 살펴보면, 분해성 플라스틱은 "일정기간 동안 특정 환경 조건에서 화학구조가 상당히 변화되어 표준 시험방법으로 특정이 가능한 성질이 손실을 가져오도록 고안된 플라스틱"이며, 생분해성 플라스틱은 "박테리아, 곰팡이, 조류와 같은 천연 미생물의 작용으로 분해가 일어난 분해성 플라스틱"으로 되어 있다. 이 정의에서 보면 생분해성에 대한 정의가 다소 모호할 수도 있으나 실제로 ASTM에서 제시하는 표준 시험방법은 이산화탄소, 메탄가스의 발생량을 측정하여 생분해 정도를 측정하게 되어 있으므로 결국은 위의 전 과정을 반영하는 것으로 볼 수 있다.

또한 국제표준기구인 ISO(International Standard Organization)에서는 최종 생분해(ultimate biodegradation)를 미생물의 작용으로 유기물의 붕괴가 일어나고, 최종적으로 이산화탄소, 물과 무기염/생체물질을 생성하는 과정을 생분해로 규정하고 있다. ISO 472의 분해성 플라스틱에 대한 정의를 보면 분해성 플라스틱을 생분해성 플라스틱과 분해성 플라스틱으로 분류하였다. 이러한 생분해 고분자의 대한 정의는 미생물이 고분자의 분해에 있어서 어느 단계에 작용해야 하는지, 분해는 어느 수준까지 일어나야 하는지, 얼마나 빨리 분해되어야 하는지 등에 대한 구체적인 내용은 언급하지 않고 있다. 이는 생물체의 작용에 의한 변화에 대한 간단명료한 기준을 설정하는 것이 본질적으로 어려운 일이기도 하지만, ISO 표준의 내용에 따라 기업 간, 국가 간의 이해관계가 복잡하게 얽혀 있고, 가능한 모든 종류의 지구 환경오염을 줄일 수 있는 고분자의 출현을 촉진하기 위한 것으로 생각된다.

이와 같이 넓은 의미를 부여한 정의에 따르면, 어떤 물질이든지 분자량이 작으면 자연계에서 생물체에 의하여 완전분해될 수 있으므로 어떤 고분자가 생물체의 작용이 없이도 충분히 낮은 분자량 물질로 분해되기만 하면 그 고분자에서 생분해가 일어난 것처럼 되어 버린다. 예를 들어, 다른 화합물의 영향이 없이 물과 고분자 사이의 반응에 의하여 가수분해 되는 폴리락트산(polylactic acid, PLA)은 분자량 감소에 미생물이 작용하지 않았으므로 일반적으로 생분해가 일어났다기 보다는 가수분해 되었다고 하는 것이 적절하다. BEDPS(Bio/Environmentally Degradable Polymer Society)는 분해성 플라스틱을 아래의 4가지 범주로 분류한다(5).

① 광분해성 플라스틱(photo-degradable plastic):
태양광에 의한 광산화, 케톤 광분해 등 화학반응에 의한 분해성 플라스틱
② 산화분해 플라스틱(oxidatively-degradable plastic):
온도 등의 영향에 의한 산화반응에 의해 분해되는 플라스틱으로 생붕괴, 생광분해, 복합분해라는 개념과 동일
③ 가수분해 플라스틱(hydrolytically-degradable plastic):
가수분해반응에 의해 분해되는 플라스틱
④ 생분해 플라스틱(bio-degradable plastic):
미생물, 효소 등에 의해 분해되는 플라스틱

분해성 플라스틱이란 생분해성, 복합분해성(화학분해 또는 생붕괴), 광분해성, 붕괴성을 총칭하는 개념으로 성형품, 포장재, 위생용품, 농업용품 등으로 사용한 플라스틱을 폐기 시에 소각처리하지 않고 단순히 매립함으로 위의 범주에서 1가지 이상의 분해 기능에 의해서 수개월 내지 수년 이내에 물, 이산화탄소, 메탄가스, 바이오매스 등으로 완전 분해되는 플라스틱을 말한다. 이중 붕괴성의 경우는 분해되는 300-500년 소요되는 기존 난분해성 플라스틱보다는 분해가 빠르지만 자연계에서 분해되는 50-100년 정도 소요되는 이유로 분해성 플라스틱의 범주에 포함시키지 않는 경우가 많다. 분해성 플라스틱은 재활용이 가능할 뿐만 아니라 매립 시 분해가 가능하며, 소각 시 다이옥신 등의 유해물질 배출이 없고, 열량은 4,000-7,000 kcal로, 범용 플라스틱과 비교하면 현격히 열량이 낮고 소각로를 손상시키는 리스크도 억제할 수 있다. 참고로 범용 플라스틱에서는, 가장 연소 열량이 적은 폴리에틸렌에서도 11,000 kcal 열량을 발생한다.

분해성 플라스틱 연구 · 개발 배경 및 현황

분해성 플라스틱 연구 · 개발 배경

플라스틱은 신이 인간에게 주신 선물, 인류 최대의 발명품이라고 지칭되면서, 인간생활의 편리성을 비약적으로 발달시킨 고분자 재료로서 가볍고, 성형성, 가공성, 경제성이 우수한 장점과 더불어 비교적 열에 안정하고 녹이 슬지 않으며, 빛 또는 수분 등에 의해 분해되지 않는 우수한 내구성으로 인하여 점차 유리, 금속, 종이, 목재, 석재 등과 같은 기존의 재료들을 대체하여 산업용 재료로 부터 1회용 소모품에 이르기까지 여러 용도로 사용되고 있다. 그러나 산업 포장용, 식품 포장용, 생활용, 농원예용 등 범용적으로 사용되는 대부분의 플라스틱은 자연계에서 분해되지 않은 상태로 반영구적으로 존재하기 때문에 방치된 플라스틱은 하천이나 해양 등에서 외관상 악영향을 미칠 뿐만 아니라 생물 환경적으로도 나쁜 영향을 끼치고 있다.

환경부의 발표에 의하면 2000년 기준으로 1일 발생되는 일반 폐기물 총량 22만 7천 톤 중에서 약 20%에 달하는 4만 6천 톤이 생활 폐기물인데, 이중 매일 약 2,400톤의 폐플라스틱이 버려지고 있고, 재활용을 감안하더라도 매일 약 2,000톤의 폐플라스틱이 쓰레기로 버려지고 있다고 한다. 또한 농업용으로 사용된 후 발생되는 폐비닐은 2000년에 23만 8천 톤이었던 것이 2004년 25만 7천 톤으로 증가하였고, 이에 대한 수거처리 실적은 2000년 6만 7천 톤에서 2004년 14만 6천 톤으로 증가하였다. 하지만 수거처리 실적은 아직까지는 발생량의 절반에도 미치지 못하는 실정이다. 이에 대한 대책으로 수거보상 금액을 지급하고 있으나 kg당 평균 100원 정도로 소액이므로, 실질적 대안이 되지 않아 아직도 방치된 폐비닐은 토양에 매립되어 작물의 생육 저해, 방치에 따른 영농면적 감소가 거의 30%에 육박하고 있으며, 미관

상 문제 및 불법 소각되어 2차적으로 대기오염을 일으키기도 하는 실정이다. 자원재생공사에 의하면 전국의 폐비닐 처리장 60곳 중 32곳이 포화상태에 달해 폐비닐 방치량이 매년 2만 톤 이상씩 증가하고 있는 현실이다. 그리고 새로 증가하는 폐비닐의 절반 정도는 불법 소각 중이며, 현재 32만 7천 톤의 폐비닐이 야적장에 쌓여 있는 것으로 집계되었다. 한국 자원재생공사에 따르면 2001년 전국에서 발생한 농업용 폐비닐은 25만 8천 톤이며 이중 12만 1천 톤(51%)은 수거되어 적정 처리되었으나, 나머지 11만 7천 톤(49%)은 불법소각 또는 매립되거나 방치되고 있는 실정이다.

대부분의 국가에서는 폐플라스틱을 매립, 소각, 재활용의 방법을 통해 처리하고 있으나, 매립 시에는 매립지 확보가 어려울 뿐만 아니라 매립된 플라스틱이 땅속에서 썩지 않기 때문에 지반이 안정되지 않아 매립지의 이용에 문제가 있다. 따라서 폐기 후 썩어 없어지는 분해성 플라스틱을 상용화하여 매립지 지반 안정화, 매립지 사용 수명 연장 등을 도모하여야 한다. 한편, 소각 시에는 비산 분진 발생과 더불어 다이옥신, 일산화탄소 등의 유해가스 등 2차 오염이 발생하여 대기오염, 인간 건강 및 지구 환경에 심각한 위해 요인이 되며, 또한 고열에 의한 소각로의 손상을 야기 할 수 있으며, 소각 후 20% 정도 잔류물 처리가 문제가 되고 있다. 폐플라스틱의 가장 바람직한 방법은 재활용이지만, 플라스틱 폐기물이 너무 산재하여 이를 수거하는데 비용이 많이 들기 때문에 작은 부피의 플라스틱만이 재활용에 적합한 형편이다.

폐플라스틱과 관련된 환경오염의 제반 문제를 해결하기 위해 국내는 물론 전 세계적으로 환경보전의 필요성 및 방법 등에 대한 관심이 증대되었고, 일반 플라스틱처럼 간편하게 쓸 수 있고 사용 후에는 토양중의 미생물에 의해 분해되는 환경 친화적이고 무해한 분해성 플라스틱의 실용화 및 의무화의 압력이 거세지면서, 각국의 정부 산하 연구기관, 학계 그리고 산업계에서 분해성 플라스틱의 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다.

국내외 분해성 플라스틱 연구 · 개발 현황

우리나라의 분해성 플라스틱 기술에 대한 연구는 생분해성 플라스틱 연구가 93년 과기처의 기술개발 과제로 선정되면서부터 제일합섬, 삼양사, 이래화학, SK, LG화학, 대상 등에서 본격적으로 연구를 진행하였으나 현재 국내 대기업 및 중소기업 등의 분해성 플라스틱과 관련된 기술은 일부 기업 이외에는 선진국 수준에는 현저히 못 미치는 것으로 평가되어, 원천 기술개발의 저변 확대가 필요하다. 분해성 플라스틱 관련 기술개발 및 특허 현황은 주로 전분, 식물체, 지방족 폴리에스테르 관련 기술이고 원료 특성상 제품 다양화에 한계가 있어 응용제품 개발 및 원료기술 개발이 시급한 실정이다.

생분해계 기술은 (주)대상 등에서 TPS라는 전분계 생분해성 플라스틱의 소재를 개발했다고 발표한 바 있지만 SK, 네이처웍스, 네오엠씨씨, 이레화학, 엔피아이, 파인엔지 등이 기술개발, 제품화를 하고 있다. 하지만 대부분의 원천기술이라고 할 수 있는 원료 개발보다는 원료에 대한 응용 기술에 관한 것이 다수를 점하고 있어 원료 개발 등에 관심을 가질 필요가 있다.

전분계 관련 기술은 전분가격이 싸고, 발포가 가능한 장점이 있으나, 신규 기계개발이 필요하고 또한 내수성 해결, 제품 강도 약화 및 분해기간이 너무 짧아 제품 응용성 및 생산성이 저하되는 단점이 있어 추기 기술 개발이 없이는 사업화에 어려움이 있다. 전분을 변성시키지 않고 생전분 상태 그대로 물, 열을 이용하여 발포시켜 제품 내에 공기층을 만들어 열차단성이 유지되는 전분 발포 포장재 제조 사업을 대상, 율촌화학, 네오엠씨씨, 피앤아이디, 그린벽 등이 활발하게 추진하고 있다.

천연물계는 볏짚, 밀대, 톱밥, 두부박, 팜, 전분 등 유기물계 식물 자원을 주로 이용하기 때문에 원료 원가는 저가인 장점이 있지만, 신규 기계개발, 내수성 해결, 자동화 생산 등에 따라 제조원가가 상승하고, 분해기간 조절, 열차단성 및 색상 조절이 어려운 단점이 있으며 볏짚 등에 함유된 농약 등을 제거하기 위한 공정이 추가될 수 있다.

복합 분해계는 기존 생분해성 제품의 제품 응용 및 생산성 저하, 광분해 제품의 단점, 고가의 합성 고분자 제품의 단점을 보완한 기술이다. 전 세계적으로 기존 생분해 기술의 단점으로 지적된 고가의 원료비 개선, 생산성 및 가공성 증가, 물성 등을 개선시키기 위해 복합적 분해 메커니즘에 의한 플라스틱 분해기술 개발이 활발하다. 해외에서는 캐나다 EPI, 미국과 일본의 합작사인 노본저팬, 미국의 MRI 등이 제품을 판매하고 있으며 polyethylene(PE), polypropylene(PP) 등 폴리올레핀계 플라스틱의 자연환경에서의 완전분해(물, 이산화탄소 및 바이오매스로 분해)에 관련한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 국내의 삼성종합화학, 호남석유화학, SK 등에서 폴리올레핀, 전분, PCL, 지방족 폴리에스테르, 광분해제 등을 이용하여 생분해/광분해가 가능한 복합분해 관련 기술이 있으나, 제조원가가 높거나 분해기간 조절이 어려운 단점 등이 있어 현재 실용화하지 않고 있다. 국내의 복합 분해 기술은 소재 관련한 원천 기술보다는 응용 기술 분야에 치우치고 있어 소재 기술 개발이 필요한 실정이다.

플라스틱 대체 제품으로 현재 가장 많이 실용화 되어 있는 펄프, 종이계 제품은 아직 플라스틱 대비 상당히 고가이고 펄프를 이용한다는 자체가 오히려 환경 마인드에 반하는 약점이 있다. 제품 수요처 입장에서는 안정적으로 제품을 생산 공급하고 있다는 장점이 있기 때문에 사용하고 있지만, 향후 설비 자동화를 통한 대량생산 체제 및 제품 생산성을 높이는 연구가 필요하다.

분해성 플라스틱의 종류별 특성

분해성 플라스틱은 사용하는 원료에 따라 천연고분자계, 화학합성 고분자계, 미생물생산 고분자계, 전분과 생분해성 고분자의 혼용, 복합 분해계, 광분해계 등 크게 6가지 형태로 분류할 수 있다(5-13). 분해성 플라스틱의 일반적인 분해 경향은 다음과 같다.

1. C-C 주쇄로 되어있는 부가중합체는 생분해가 거의 되지 않으므로 PE, PP, polystyrene(PS), polyvinyl chloride(PVC) 등 많은 경제적인 범용수지를 분해성에서 배제한다.
2. C-C 주쇄형 고분자가 직선형이고 분자량이 낮을 때(분자량 40,000 이하) 생분해성의 가능성이 있다. 고분자는 기계적물성의 필수조건이며, 적절한 가교 및 곁사슬로써 수지의 용융점도를 조절하는 것이 필요한 경우에는 불리하다.
3. 주쇄에 탄소이온의 원자를 갖는 부가중합체는 생분해성이 있다.
4. 축중합형태의 수지에 있어서 그 형태에 따라서 분해성이 달라진다.
   - 화학구조에 따라 esters > ethers > amide > urethane 순으로 분해성이 감소한다.
   - 분자량이 작을수록 빨리 분해한다.
   - 비정형이 결정성보다 빨리 분해한다.
   - T_g가 낮을수록 잘 분해한다.
   - 친수성이 높을수록 잘 분해한다.
5. 특수한 광학이성질체는 분해가 잘된다.

천연 고분자계(naturally occurring polymers)

식물에서 유래한 천연고분자인 셀룰로오스(cellulose), 펙틴(pectin), 헤미셀룰로오스(hemicellulose), 리그닌(lignin), 전분(starch), 볏짚, 톱밥, 두부박, 왕겨, 옥수수대, 갈대펄프, 목재펄프 등과 동물에서 유래한 천연 고분자인 키틴(chitin) 등을 기초로 만들어진 생분해성 고분자를 천연고분자계 생분해성 고분자라고 한다. 전분은 그 자체의 점착성, 열 또는 물을 이용하여 발포되는 발포성을 이용하여 전분 발포 용기, 전분 발포 포장재, 완충재 등에 적용되어 실용화되어 있다. 또한 생분해 고분자로서 다른 용도로서는 전분은 그 자체의 가수분해성이 매우 우수하지만, 물리적 성질이 약하여 자체적으로 상용화하기에 문제가 있는 분야에서는 복합분해성, 생분해 수지와 혼합형으로 많은 종류가 개발하여 실용화되고 있다.

최근에는 플라스틱 가공에 적합한 물성을 보유할 수 있도록 전분의 물리, 화학적 변성 기술이 다양화 되어, 다양한 방법으로 변성화된 전분이 생분해성 필름 용도는 물론 다른 생분해성 고분자와 혼합 사용하거나, 전분만으로 생분해성 용기나 완충용 발포제를 제조할 수 있어 향후 생분해성 플라스틱의 주원료로서 활용가치는 더욱 높아질 것으로 전망된다. 대표적인 전분 변성 기술로는 기존 범용 수지인 폴리에틸렌, 폴리스티렌, 폴리프로필렌 등처럼 일정 온도 이상에서 탄화되지 않고 형태가 자유자재로 바뀔 수 있는 열가소성을 전분에 부여한 열가소성 전분(TPS, thermoplastic starch)을 들 수 있다.

화학합성고분자계(chemically occurring polymers)

화학합성고분자는 일반적으로 PCL(polycaprolactone), PLA(polylactic acid), Diol/Diacid계 AP(alphatic polyester), Aro/Ali(aromatic/aliphatic copolyester), PGA(polyglycolic acid), PBS(polybutylene succinate), poly phosphate ester, poly phosphazene 등 다양한 종류가 개발되었는데 모두 지방족계 폴리에스테르의 중간계이다. 보통의 폴리에스테르는 방향족계 폴리에스테르라고 불리고 방향족환(벤젠환)을 그 분자 구조 중에 포함하지만, 지방족계 폴리에스테르는 지방족 분자(탄소가 쇄상에 붙어있는 분자)가 에스테르 결합을 한 고분자이다. 합성 고분자의 생분해성은 공기 중에서는 그다지 열화가 진행되지 않기 때문에 실제 사용하는 단계에서는 대부분 통상의 제품과 동일하게 사용가능하다. 그러나 토양매립, 물에서는 생분해성 플라스틱의 종류에 따라 차이가 있지만, 필름형태의 경우 수주에서 수개월, 1 mm 두께 정도의 판상의 물질 또는 섬유로서는 1년에서 몇 년에 걸쳐 분해된다. 또한 다시 이 중에는 그것의 수-수십 배 정도의 속도로 분해가 되어 어떤 필름은 1-2일에서 분해된다고 보고되고 있다. 이들은 아직 가격이 고가인 관계로 일반 분해성 포장재 또는 생분해성 플라스틱 제품의 용도로 사용이 되기에는 아직 어려운 면이 있으나, 일부 실용화가 되고 있으며 지속적으로 원가절감, 생산성, 물성개량 등 연구가 진행이 되고 있다. 기타 고부가가치를 얻을 수 있는 의료용 재료로도 활용되고 있다.

미생물 생산 고분자계(microbiologically occurring polymers)

미생물생산 고분자는 미생물이 만들어내는 분해성 고분자(바이오폴리머)를 활용하여 플라스틱과 같은 기능을 갖는 물질을 만드는 것으로써, 분해성과 물성면에서 뛰어나지만 생산성과 용도가 제한되며, 가격이 고가인 단점이 있다. 대표적으로 polyhydroxyalkanoate(PHA), polyhydroxybutyrate(PHB), pullulan과 같은 다당류(polysaccharides) 등이 있다.

전분과 화학합성 또는 미생물 생산 고분자의 혼합형

일반 포장재 용도로서 가격이 저렴하며 생분해성이 우수한 전분을 이미 개발된 다른 생분해성 고분자와 혼합하여 비용 절감, 생분해도 향상, 물성 개량 등을 꾀할 수 있는 기술 개발 및 활용이 점점 증가하고 있다. 적용하고자 하는 각각의 용도나 보유기술에 따라 전분과 PLA, 전분과 PCL, 전분과 diol/diacid계 aliphatic 폴리에스터 등의 혼합물에 대한 혼합 비율이나 기술적 방법이 다소 차이가 있다. 미생물 생성 PHB와 PCL의 배합은 PCL 단독보다 내열성이 있고 가공 물성도 좋아서 미생물로 poly(3-hydroxybutyrate co-3-hydroxyvalerate)(PHBV) 공중합체를 만드는 것보다 간단히 일정 조성의 생분해성 플라스틱을 얻을 수 있어 원가 절감의 이점이 있다.

복합분해성 고분자(multi-degradable polymers)

기존 생분해성 제품의 제품 응용 및 생산성 저하, 광분해제품의 단점, 고가의 합성 고분자 제품의 단점을 보완하여, 기존 양산설비 사용, 제조원가 절감, 강도 등 물성이 약한 단점 극복 등을 통한 실용화 기술로 전 세계적으로 기술 개발이 활발하다. 기본 범용 플라스틱에 생분해성 수지, 분해첨가를 사용하여 제품을 생산하고 그 분해 메커니즘은 열, 광, 미생물, 효소, 화학 반응 등의 복합적 분해 작용에 분해가 촉진되는 기술이다. 복합 분해성 플라스틱은 기존 생붕괴성, 생/광분해, 화학분해 등을 포함하는 개념으로 기존 생붕괴성, 생광분해의 단점으로 지적된 완전 분해까지 분해기간을 1-5년으로 단축하기 위해 분해 촉진제를 사용하여 생분해성이라기보다는 퇴비화라는 측면에서의 신개념 분해성 플라스틱이다. 현재 그 물성, 원가, 분해 기간 조절의 장점 등이 부각되어 연구 개발, 제품화가 활발하다.

광분해성 고분자(photo degradable polymers)

광분해성 플라스틱은 기본적으로 태양광선의 자외선에너지를 이용, 고분자 고리를 끊어 수지의 물리적 성질을 저하시키고 궁극적으로 분자량이 낮게 되어 분해되는 플라스틱을 의미한다. 광분해 플라스틱은 자외선 안정제와 광분해 활성제 이 두 가지 성분을 조화 있게 활용, 원래의 물리적 성질을 유지하면서 원하는 일정기간에 분해가 가능하도록 만든 플라스틱의 일종이다. 광분해 플라스틱의 분해에 이용되는 빛에너지는 보통 290-315 nm 사이의 자외선이다. 모든 플라스틱은 각기 고유속도로 서서히 광분해되는데 그 화학적 구조에 따라 자외선을 잘 흡수하는 것과 그렇지 못하는 것이 있다. 광분해성 고분자는 금속 이온계 고분자 마스터배치 첨가형, 비닐 케톤계 공중합 master batch(MB) 첨가형, 에틸렌-일산화탄소 공중합체가 있다. 고분자 마스터배치 첨가형은 전이 금속을 첨가하여 금속 이온이 고분자쇄중 산화로 생성된 peroxide나 carboxyl기의 분해 촉매 작용을 일으킨 것이다. 비닐 케톤계 공중합 MB 첨가형과 에틸렌-일산화탄소 공중합체형 고분자는 고분자에 자외선 흡수 관능기(EI-CO)가 도입되었다.

기타 분해성 플라스틱의 범주와는 구별이 되고 있지만, 기존의 붕괴성은 전분 등의 녹말첨가형과 지방족 폴리에스테르 첨가형이 있다. 녹말 첨가형은 범용수지에 녹말을 첨가하여 녹말이 생분해되어 고분자가 분해되는 것이다. 쓰레기봉투, 쇼핑백, 기저귀 커버, 기타 일회용 포장재 등이 이러한 고분자로 만들어져 있다. 지방족 폴리에스테르 첨가형 고분자는 폴리카프로락톤(polycaprolactone)과 일반 범용 수지와의 고분자 블랜드이다. 이와 같은 방법으로 만들어지는 붕괴성 고분자는 활발히 연구 개발되고 있으며, 그 산업성 활용이 다른 분해성 고분자에 비하여 신속히 진행되어 왔다. 현재 미국에서는 PE에 전분을 적게는 6%에서 많게

는 90%까지 섞는 붕괴성 고분자가 실용화되고 있는데, 이는 잉여농산물 이용과 석유자원의 절약이라는 측면에서 기대가 크다. 전분을 충전한 붕괴성 고분자는 완전한 분해가 이루어지기까지 매우 오랜 기간이 필요하지만, 사회적 필요와 정부 및 지방자치단체의 법적 규제에 대한 대응책으로서 연구개발과 그 산업화를 가속시켜 쓰레기 봉지나 쇼핑백 이외의 각종 일회용 제품에도 그 실용화를 확산시킬 움직임을 보이고 있다.

실용화단계의 분해성 플라스틱

현재 상업적으로 생산 판매되고 있어 실용화 되고 있는 분해성 플라스틱은 PCL, PLA, PHA, PHB, PBS 등 지방족 폴리에스테르 및 전분과 지방족 폴리에스테르를 혼합 사용한 것이다. 또한 플라스틱 대체용 제품으로 볏짚, 목분, 톱밥 등 유기성 폐자원류; 종이, 펄프류; 등 천연계 고분자를 원료로 이용하여 제품화를 한 것도 있다. 천연계 고분자 중에서도 전분이 생분해성 플라스틱 원료로 가장 선호되고 있고, 실제로 전분을 원료로 한 분해성 플라스틱이 포장 용도로서 현재 가장 많이 실용화되고 있는 추세이다(14-17).

폴리락트산(PLA)

전분 등 재생 가능한 자원에서 미생물로 발효해 만든 L-락트산을 단량체로 이용하여 화학 합성된 폴리락트산(PLA, T_m: 175℃)이 기존의 합성 PLA보다 가격이 저렴하여 많은 양이 사용되고 있으며 필름이나 섬유에 2차 가공된 PLA는 내가수분해성도 뛰어나다. PLA는 종래 일반적으로 물로 가수 분해되어 저분자화한 후 미생물에 의해 분해된다고 이해되었다. 그러나 필름이나 섬유로 2차 가공된 PLA는 내가수분해성에도 우수한 것으로 알려져 있다. 최근 폴리 락트산을 직접 분해하는 각종의 미생물이 발견되고 있다. 폴리 락트산은 천연에 존재하는 폴리-3-히드록시 부틸레이트와 마찬가지로 생체 내에서 분해 흡수되는 폴리머이며, 생체 내에서 산이나 알칼리에 의해 분해되어 출발 물질인 락트산으로 분해되고, 이것이 대사되어 체외로 배출된다. 락트산은 생체 내에 존재하여도 독성이 없기 때문에 의료용 재료로서 기대된다.

PLA는 수분이나 가스의 차단성이 낮다고 알려져 있다. 이것은 거꾸로 생각해 보면 수분의 투과성이나 통기성에 뛰어나다는 것이며, 이 특성을 살린 용도로 섬유 등 다방면에서의 사용이 기대된다. 락트산에는 D-락트산과 L-락트산이 있기 때문에 폴리 D-락트산, 폴리 L-락트산, 폴리 D, L-락트산의 3종류가 있다. 이 중 폴리 D-락트산과 폴리 L-락트산은 용융 방사하면 분자가 배향되어 강한 강도를 갖게 된다. 실제 이용되는 것은 폴리 L-락트산으로, 현재 의료 재료 중 봉합사로 사용된다. 생체 흡수 봉합사로서 쓸 경우, 봉합 부분이 유합할 때까지는 필요한 강도를 유지하되 그 후에는 가급적 빠르게 분해 흡수되어야 한다. 한편 락트산, 락티드, PLA는 식물의 생육을 촉진하는 것으로 알려져 있는데, PLA의 멀칭 필름, 이식용 포트, 식재용 네트 끈 등 농림업 분야에의 이용도 많이 기대된다. 또한 폴리 락트산과 유사한 것으로 폴리 글라이콜산이 있다.

폴리카프로락톤(PCL)

석유화학 원료에서 합성된 지방족 폴리에스테르 중에서도 비교적 저렴하게 제조될 수 있는 PCL은 저융점이지만, 200℃ 이상의 고온에서도 안정하여 가공성이 우수하고, 다른 분해성 플라스틱과의 혼화성이 좋은 장점이 있으며, 또한 생분해성이 뛰어나기 때문에 생분해성 플라스틱의 표준물질로서의 위치를 차지하고 있다. PCL은 다른 폴리머와 혼화성이 좋기 때문에 폴리에스테르, 폴리아마이드, 폴리우레탄 등과의 혼합체나 그들 모노머와의 공중합체에 대해서도 생분해성을 갖는 새로운 재료로서의 용도 전개가 기대된다. 또한 저분자량의 PCL diol은 생분해성 폴리우레탄의 원료로도 이용할 수 있다. 하지만 단독 사용 시 인장강도, 신장률, 충격강도 등의 기계적 물성이 우수하지만 저융점(60-62℃) 때문에 필름 성형성 및 개구성이 좋지 않은 단점이 있다.

지방족 폴리에스터와 전분의 블랜드

일반 포장재 용도로서의 생분해성 플라스틱의 최근 개발 방향은 가격이 저렴하며, 생분해성이 우수한 전분을 이미 개발된 다른 생분해성 고분자와 혼합하여 비용의 절감, 생분해도의 향상 등을 꾀하는 기술 개발 및 활용이 점점 증가하고 있다. 적용하고자 하는 각각의 용도나 보유 기술에 따라 전분과 PCL, 전분과 PLA 그리고 전분과 diol/diacid계 aiphatic 폴리에스터 등의 혼합물에 대한 혼합 비율이나 기술적 방법이 다소 차이가 있다. 한 개의 포도당 unit당 3개의 OH 작용기를 가지고 있는 전분은 친수성이 강한 고분자로 상대적으로 소수성인 다른 생분해성 고분자와의 상용성 및 분산성의 개선을 위한 전분 변성 기술이 전체적인 혼합형 생분해성 플라스틱의 핵심 기술이라 볼 수 있다.

변성 전분과 PCL로 되는 블랜드는 값싼 재생 가능 자원인 범용 분해성 플라스틱으로서 상당한 주목을 받고 있다. PCL은 저융점이나 가공 중에도 안정한 지방족 폴리에스터이기 때문에 변성 전분과 블랜드하여 얇은 필름을 제조하는 것이 우수하다. 이 필름으로 만든 봉지는 이탈리아와 독일에서 생 쓰레기용의 퇴비화 봉투로 보급된다. 전분은 저렴한 가격, 단순한 조성(아미로스와 아미로펙틴), 비교적 균일한 크기의 과립(수-수 십 미크론), 고분자 결정성 등의 특징을 가져 플라스틱 소재로서 매우 유망하다. 전분의 종류로는 옥수수나 감자 전분 외에 타피오카 등 열대산 전분도 유망하다. 이러한 전분은 공업용 원료로서 증산하는 것도 가능하다.

폴리부틸렌석시네이트(PBS)

중축합 반응에 의해 합성되는 고분자량의 지방족 폴리에스테르가 주목받고 있다. 중축합 반응법으로는 각종의 diol과 디카본산의 조합을 선택함으로써 융점이 높은 지방족 폴리에스테르도 합성할 수 있다는 이점이 있다. 이미 높은 융점을 갖는 폴리 부틸렌 석시네이트(PBS, T_m: 113℃) 및 폴리에틸렌석시네이트(PES, T_m: 100℃)를 베이스로 하는 고분자량 폴리에스테르가 공업 생산되고 있다.

내열성 고분자인 PBS 및 PES는 미생물에 의해 분해된다는 보고가 있다. 한편 효소 분해에 대해 분자량 5만 이상의 PBS가 *Rhizopus* 리파아제에 의한 가수 분해를 거의 받지 않는다는 보고가 있으나, PBS에 아디핀산을 공중합하면 생분해성이 현저하게 향상된다는 것이 밝혀지고 있다. 특히 PBS 및 PES를 분해하는 미생물의 자연 환경에 있어 분포 상황은 같은 정도이나 PCL 분해균에 비하면 양쪽의 분해균이 상당히 제한된다.

폴리-3-히드록시 부틸레이트(PHB)와 그 공중합체

미생물이 다량의 탄소원 존재 하에 영양분 제한 조건에서 탄소원 및 에너지 저장물질로써 합성 및 축적하는 hydroxyl kanoates로서 이루어진 고분자 물질인 열가소성 고분자 소재로 폴리 히드록시 알카노에이트(PHA)의 연구는 세계 각국에서 활발하게 진행되고 있다. 또한 미생물은 측쇄에 방향 고리를 갖는 폴리에스터(폴리-3-히드록시 페닐 발러레이트; PHBV)도 제조할 수 있다.

폴리-3-히드록시 부틸레이트(PHB, Tm: 175℃)는 생산성이 높으며 생물로부터 유래하는 열가소성 소재로, 전부터 기대되어 왔으나 결정성이 커 기계적 물성이 나쁘고, 열분해되기 쉬워 가공하기 어렵다는 등의 결점이 있었다. 따라서 가공물성도 좋고 원가 또한 절감이 가능한 PHB와 PCL로 되는 블랜드체가 개발되었다. 이는 PHB 단독 사용보다 가공 물성이 좋으며, 미생물에서 PHBV 공중합체를 합성하는 것에 비하여 간단하게 일정한 조성의 생분해성 플라스틱을 얻을 수 있어 비용이 원가가 낮아지는 장점이 있다. 한편 PHB의 가공 특성을 개선하기 위해 PHB와 폴리-3-히드록시 발러레이트(PHV)로 되는 공중합체(PHBV)의 미생물 생산이 확립되었다.

생분해성 플라스틱과 퇴비화 과제

폐기물의 적절한 처리는 공중위생의 향상과 환경보호 관점에서 극히 중요한 일이다. 그러나 폐기물처리가 원천적으로 쉽지 않고, 통상적인 재활용에도 한계가 있다. 현재로는 유기재료를 퇴비화하여 자연계와 조화시키는 것이 대안으로 생각되어지고 있으며, 80년대 후반부터 분리 수거된 폐기물의 퇴비화에 관한 연구가 진행되었다(1). 특히 폐기물 중 포장재의 재활용 및 퇴비화와 유기폐기물의 분리수거 퇴비화가 확대되고 있으며 법적인 규제수단이 일부 도입되었고 향후 확대되는 단계에 있다.

퇴비화란 생 쓰레기를 미생물의 활동을 이용하여 호기적으로 분해하여, 식물에 적당한 양분을 갖는 안정한 성분으로 바꾸는 것이다. 이 과정에서 발효열에 의해 재료의 온도가 상승하여 재료에 함유되는 잡균류, 잡초의 종자, 해충의 알이나 유충도 사멸하고, 수분이 대폭 감소하고 감량화될 뿐 아니라 냄새도 거의 없어진다. 이 퇴비는 적정한 비료 성분을 함유하는 것 외에도 비료나 농약을 많이 투입하여 쇠약해진 지력을 회복하고 흙을 과립구조로 만들어 떼알 구조를 개선시킨다. 이같이 생 쓰레기의 퇴비화는 매립이나 소각에 비해 환경에 우수한 처리법으로, 재활용이 곤란한 생 쓰레기의 재활용을 가능케 하는 수단으로서 최근 주목 받고 있다. 현재 주방 쓰레기 등은 PE 봉지 등에 넣어 처리하는 것이 일반적이나, 생분해성 플라스틱 봉지를 사용 회수하여 봉지 쓰레기를 그대로 퇴비화하면 생 쓰레기를 퇴비 원료로 사용하는 것이 가능하게 되어 생분해성 플라스틱의 특징을 잘 살리게 된다.

현재 과제는 생분해성 비닐의 경우 음식물 쓰레기와 분해속도가 달라(음식물 7-15일 이내, 생 필름 3-6개월) 음식물 쓰레기 처리 시, 음식물보다 분해가 늦게 진행되는 비닐이 처리 설비에 감기는 등 문제점이 완전 해소되지 않아, 결국은 선별이라는 공정을 거쳐 생 필름을 별도로 선별하고 있는 것이 현실이다. 또한 생 필름은 강도 및 물성이 약해 중량이 많이 나가는 음식물 등 생 쓰레기를 담는 경우 파손이 쉬운 문제점이 있어, 분해 속도를 빠르게 하면서도 강도 물성을 유지시킬 수 있는 추가 연구 개발이 필요하다. 또한 분해성 플라스틱의 퇴비화에 관여하는 미생물이나 물리화학적 인자 등 기초적 연구는 거의 행하여지지 않고 있다. 분해성 플라스틱의 환경 적합성을 더 높이기 위해 효율적인 퇴비화의 기술과 제조된 퇴비의 안전성에 대한 연구가 필요하다.

분해성 평가방법

현재까지 이용되고 있는 분해성 플라스틱의 분해성 평가방법으로는 미생물, 효소 그리고 토양(수중, 공기 중 포함)에 의한 분해성 평가방법이 있다(18-20). 미생물에 의한 분해성 평가방법은 오래 전부터 플라스틱재료의 곰팡이 저항성 시험에 널리 이용되어 온 방법으로 fungi, actinomycetes, bacillus 등의 미생물을 이용하여 플라스틱을 분해시킬 때 중량 감소, 현미경 관찰, 분자량 감소 그리고 물성 저하 등을 분석하여 평가하며, 화학구조가 다른 여러 가지 플라스틱 재료의 분해성을 일차적으로 탐색하여 조사하는데 적합한 방법이다.

이에 해당하는 방법은 일본의 JIS Z 2911(곰팡이 저항시험), MITI(각종 화학물질에 대한 활성오니의 분해능시험)와 미국의 ASTM G 21-70(곰팡이 저항시험), MIL-STD-810B 또는 D(곰팡이 저항시험) 등이 있다. 효소에 의한 분해성 평가방법은 amylase, cellulase 그리고 protease 등 가수분해 효소의 작용 결과 플라스틱의 일부가 저분자화하여 반응액 중으로 용출되어 나오는 것을 정량하는 방법이며, 분해성 플라스틱의 개발을 위한 분자설계에 적합한 방법으로 평가되고 있고, 토양에 의한 평가방법은 실제로 자연환경에서의 분해성을 중시한 평가방법으로, 구미에서 주로 이용되고 있다. 그러나 이 방법은 야외토양 중 매몰시험, 바다 속 침지시험, 그리고 일정한 토양을 혼합하여 항온실에서 유지하는 pot 시험법 등이 개발되고 있으나, 평가하는 시간이 매우 길고, 재현성이 낮으며, 또 분해 생성물의 정량성을 평가할 수 없기 때문에 정확한 분해기구 규명에는 적합하지 않다. 최근에는 특정 미생물 및 퇴비화 조건에서의 생분해도 측정방법이 주로 사용되고 있다.

생분해성 관련 ISO 규격

1990년대 후반 ISO TC61의 SC5에서 생분해성 고분자에 대한 논의가 활발히 이루어져 ISO(International Standard Organization)에서도 활성 오니 및 퇴비화 조건에서의 호기적 생분해도 측정방법을 도입하여 Table 1과 같이 규격화하여 사용되어 오고 있다. 전 세계적으로 플라스틱 물질을 수계 배양액 중의 호기적 방법으로 생분해도를 측정하는 방법(폐쇄 호흡계를 이용한 산소소비량 측정)인 ISO 14851, 플라스틱 물질을 수계 배양액 중의 호기적 방법으로 생분해도를 측정하는 방법(폐쇄 호흡계를 이용한 이산화탄소 발생량 측정)인 ISO 14852, 플라스틱 물질을 제어된 퇴비화 조건에서 호기적 생분해도 및 붕괴를 측정하는 방법(이산화탄소 발생량을 측정)인 ISO 1488 등이 생분해 시험법으로 인정되고 있으며, 그 중에서도 ISO 14855가 가장 널리 사용되고 있다.

생분해성 관련 ASTM 규격

생분해성 플라스틱의 생분해도 시험방법을 선진 각국에서 제시하고 있는데 시험방법에 대한 연구를 가장 먼저 활발하게 진행해 온 미국에서는 ASTM 산하 ISR(Institute for Standard Research)에서 활성 오니를 이용한 호기적 또는 혐기적 조건에서의 플라스틱 물질의 생분해도 시험방법, 특정 미생물 및 퇴비화 조건에서의 플라스틱 물질의 호기적 생분해도 측정법, 매립 조건에서의 플라스틱 물질의 혐기적 생분해도 측정법이 Table 2와 같이 ASTM 규격으로 제정되어 사용되고 있다.

생분해성 관련 JIS 규격

일본에서는 1990년 통상산업성(현재 경제산업성) 주관으로 생분해성 고분자 표준시험 방법 개발에 관한 소위원회를 두고 연구를 진행하여 MITI 법을 보완한 표준 시험방법을 마련하여 사용하고 있다. 일본에서도 활성 오니를 이용한 호기적인 조건에서 생분해 정도를 측정하는 방법과 퇴비화 조건에서의 호기적 생분해도 측정 방법이 규격화되어 사용되고 있다.

Table 1. ISO testing methods for biodegradability

No.	Title
14851	Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium: Method by measuring the oxygen demand in a closed respirimetry.
14852	Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium: Method by analysis of evolved carbon dioxide.
14855	Determination of ultimate aerobic biodegradability and disintegradation of plastic materials: Method by analysis of evolved carbon dioxide.
14853	Plastics-Determination of the ultimate anaerobic biodegradability in an aqueous system: Method by measurement of biogas.
15985	Plastics-Determination of the ultimate anaerobic biodegradability and disintegradation under high-solids anaerobic-digestion conditions: Method by analysis released biogas.
16929	Plastics: Determination of the disintegradation of plastics materials under defined composting conditions in a pilot-scale test.
EN13432	Packing: Requirements for packing recoverable through composting and biodegradation: Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packing.

Table 2. ASTM testing methods for biodegradability

No.	Title
D5209	Standard test method for determining the aerobic biodegradation of plastic materials in the presence of municipal sewage sludge.
D5271	Standard test method for assessing the aerobic biodegradation of plastic materials in an activated - sludge - wastewater - treatment.
D5338	Standard test method for determining the aerobic biodegradation of plastic materials under controlled composting conditions.
D5929	Standard test method for determining biodegradability of materials exposed to municipal solid waste composting conditions by compost respirimetry.
D5247	Standard test method for determining the aerobic biodegradability of degradable plastics by specific microorganisms.
D5210	Standard test method for determining the anaerobic biodegradation of plastic materials in the presence of municipal sewage sludge.

국내외 시장 동향

산업생산 공정에서 효소나 미생물을 이용하는 기술로 친환경 부분에 초점을 맞춘 기술 분야인 화이트 바이오 기술이 최근 각광을 받고 있다. 화이트 바이오 기술은 석유나 석탄처럼 유해 물질을 방출하지 않고도 깨끗한 에너지를 생물체에게서 뽑아내는 기술이나 기존의 합성 화학 물질 대신 식물과 미생물을 이용해서 실생활에서 접할 수 있는 생활에 밀접한 음식, 연료, 옷감, 플라스틱 등을 생산하는 기술 분야인데, 2006년 시카고에서 개최된 "바이오 2006"에서는 다양한 레드 바이오, 그린 바이오 및 화이트 바이오 신기술이 선보였다. 이중 가장 눈길을 끈 것이 화이트 바이오 기술이었다. 분해성 플라스틱이 이러한 화이트 바이오의 핵심기술의 일종으로 주목을 받고 있다.

국내 시장 동향

국내에서 생분해성 플라스틱과 관련된 연구는 1990년대 이후 SK, 대상 등 대기업 및 연구기관, 벤처기업들을 중심으로 꾸준하게 이루어지고 있지만, 아직은 시장 규모가 작고, 높은 가격으로 인해 사업화는 활발하지 못한 실정이다. 과거에 쓰레기 종량제 봉투, 음식물 쓰레기 봉투 등 일부 분야에서 사용이 되었지만 현재는 거의 실용화가 이루어지지 않고 있다. 쇼핑백의 경우 사용을 억제하기 위해 쇼핑몰이나 백화점 등에서 유상 제공하고 있으나 사용이 크게 줄지 않아 정책의 실효성을 거두지 못하고 있다. 이에 따라 사용할 수 있는 환경친화형 쇼핑백이 출시되고 있어 대체 전망은 밝다.

정부시책 및 시민들의 환경의식 고취, 교토의정서에 의한 지구온난화 등의 인식전환에 의해 환경 피해를 줄이기 위한 움직임이 활발하다. 소비자들의 높아진 의식구조로 환경배려형 상품의 수요가 늘어가고 있으며, 분해성 플라스틱의 수요도 급속하게 증가하고 있는 추세이다. 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 시행으로 분해성 시장이 확대되고 있으며 이마트, 홈플러스, 롯데마트 등 대형마트, 중소형 마트, 백화점 등의 식품매장은 이미 플라스틱 대체품인 펄프 트레이가 사용되고 있고, 베이커리 업체, 도시락 용기 등은 법적 규제에 의해 생분해성 소재 또는 천연소재로 시장 교체가 이루어지고 있다. 풀무원, 삼성전기, 제과업체, 화장품 업체 등 기억의 식품 포장재, 산업용 포장재 수요가 급속히 증가하고 있는 실정이다.

해외 시장 동향

The Freedonia Group에서 발표한 "Degradable Plastics to 2008" 보고서에 따르면 미국의 분해성 합성수지 수요는 매년 9% 정도씩 증가하여 2008년까지 4.6억 달러에 이를 것으로 전망하고 있으며, Nikkei Biotechnology Annual Report에 따르면 유럽, 일본 등의 천연물 포장재 시장은 환경 규제에 의해 급속히 성장하여 9조 원 이상이 될 것으로 전망하고 있다. 인도, 방글라데시 등 동남아 지역은 전통적으로 플라스틱 포장재의 사용량이 많고, 유럽 등지로 제품을 수출하는 생산 기지의 역할을 하고 있었는데 최근 플라스틱에 대한 사용 규제가 강화되면서 분해성 제품에 대한 수요가 급증하고 있는 추세이다. 서유럽의 폴리머 시장 규모는 연간 3,812만 톤(2002년 기준)으로 주요 소비 산업은 식품용기, 랩(wraps), 네트(nets), 폼(foams) 등의 포장재류와 식품 쓰레기 수거 및 슈퍼마켓용 플라스틱 백, 케이터링 제품(일회용 접시와 컵), 농업, 위생용품 등이다. 이 중 첫 번째와 두 번째 그룹인 포장재와 플라스틱 백에 대하여 유럽의 플라스틱 업계에서 유럽의 '생물분해 가능한 재료/제품' 규격을 준수한 제품을 생산한다는 자율 협정을 맺었으며 주요 참가 업체들은 BASF(독일), Cargill Dow(미국), Novamont(이태리), Rodenburg Biopolymers(네덜란드) 등이다.

독일에서는 2005년 6월부터 시행되는 신규 포장법령에 따라 포장 용기류 생산업자, 유통업자 및 소재 생산자들이 생분해성 플라스틱 소재를 사용할 경우 쓰레기 처리비를 별도로 지불할 필요가 없고, 바이오쓰레기통(밤색) 또는 일반 쓰레기통(회색)에 추가 비용 없이 버릴 수 있도록 하고 있으므로 기존의 플라스틱 제품 보다 높은 원자재 가격을 보완할 수 있다. 전 세계적으로 유럽의 Novamont, 미국의 Cargil-Dow Polymers, 일본의 Showa Polymers 등 수십 개의 기업들이 생분해성 플라스틱 시장에 참여하고 있고 현재 미국 50%, 유럽 40%, 일본이 10%를 점하고 있다.

국내외 시장 전망

최근 석유 유래의 합성수지에 대한 논란이 뜨거워지고 있다. 우리 생활 주변에서 폭넓게 사용되고 있지만 환경문제가 만만치 않기 때문이다. 특히 일단 버려지면 분해되기까지 300년 이상 소요되어 환경오염의 주범으로 인식되어 소비자들이 점차 친환경 제품을 원하는 쪽으로 분위기가 바뀌고 있다. 기존 석유화학 유래의 난분해성 플라스틱의 기업, 특히 식품가공업체 등이 분해성 천연 폴리머 제품의 수요가 늘고 있다. 특히 PET, PP 등 포장재의 주원료인 원유 값이 급등하면서 식물 유래의 분해성 고분자를 이용하는 분해성 플라스틱이 크게 각광을 받고 있다. 또한 분해성 플라스틱의 응용범위가 가전제품, IT기기, 장난감 등 생활용품 전방에 걸쳐 확대되고 있어 시장 전망이 매우 밝다.

국내 시장 전망

분해성 플라스틱은 플라스틱의 여러 가지 문제 해결을 위한 대안의 하나로 1980년대 후반부터 대두된 기존 플라스틱의 대체시장으로 1990년대 중반이후 환경 규제가 강화되면서 새롭게 부각되고 있는 신흥 산업 분야이다. 우리나라의 경우 생분해성 플라스틱의 실용화가 미미한 편이었으나 2001년 하반기부터 쓰레기 종량제 봉투 제조 시 생분해성 소재 함량 30% 이상 사용 의무화를 위한 환경부 지침이 개정됨에 따라 각 시, 군, 구 지자치 단체의 조례 개정작업이 완료되어 현재 적용 중에 있고, 일회용품 등의 사용금지 법안 효시점인 2003년 1월 1일부터는 우리나라의 생분해성 플라스틱 시장도 급속하게 성장되고 있다.

국내 기업들은 정부의 방침에 따라 식품 포장재, 산업용 포장재, 면도기, 칫솔, 포크, 수저 등의 다양한 일회용 플라스틱 제품에 대한 대체원료를 출시하여 일회용 플라스틱 제품을 급속하게 생분해성 소재로 대체하고 있어, 추후 분해성 플라스틱의 국내시장 규모는 최소 5조 원 이상이 될 것으로 예상하고 있다. 현재 분해성 플라스틱은 물성이 기존 플라스틱 제품에 미치지 못하고 가격이 상대적 고가여서 상업적으로 사용이 미미한 실정이나 플라스틱 폐기물에 대한 규제 강화가 증가되고 있고 국민들의 환경의식 수준이 높아짐에 따라 생분해성 플라스틱에 대한 수요는 지속적으로 증가할 전망이다. 기존 플라스틱의 물성을 유지하면서도 원가절감이 이루어진 분해성 플라스틱 제품이 지속적으로 출시되고 있고, 물성 및 가격이 기존 난분해성 범용 플라스틱과 유사한 복합분해 플라스틱이 상용화되면 폭발적인 시장 확대가 예상된다.

특히 식품 포장 및 용기의 경우 수거체계가 미흡하고, 고추기름 등 이물질에 오염이 되어 있는 경우가 많고, 수거비가 과다하게 소요되는 등 현실적으로 수거에 의한 재활용이 어려운 실정이다. 이러한 재활용의 어려움 및 소각에 따른 환경 문제가 상존하고 있는 현 실정에서, 퇴비화가 진전될 경우 일반 음식 쓰레기와 동시처리가 가능하다는 장점으로 향후 급속한 대체가 예상된다.

해외 시장 전망

세계적으로 분해성 플라스틱의 수요는 1998년 미국, 유럽, 일본의 경우 약 18천 톤(9천 5백만 달러)이었고, 2003년까지 매년 약 37%씩 증가하여 약 91천 톤 가량이 될 것으로 예상된다(SRI International, Meu'o Park, CA, USA). 일본 시장의 규모는 확정적이지는 않지만, 2001년에 전년 대비 50% 이상 성장하여 6,000톤 규모의 생분해성 시장을 형성하였으며 매년 20% 이상 빠르게 시장이 확대되고 있으며, 1만 톤 규모 형성을 향해 확대 기조에 있는 것으로 추정되고 있다. 현재의 시장 구조는 전분계를 근거로 한 완충재를 대표로 하는 곤포자재 용도 35%, PBS계를 주재료로 한 농림수산 토목자재 용도 30%, PBS 계 및 PLA계를 바탕으로 한 음식물 쓰레기 회수 봉투 등 포장자재 용도 10%, PLA를 주로 한 투명봉투나 필기구류 등의 문구 및 그 외 산업부자재 용도로 25%가 추정되고 있다.

1999년 5월 일본경제신문에 따르면, 세계적으로는 2000년에 930억 엔 정도인 생분해성 플라스틱 시장이 2020년에는 1조 3828억 엔으로 크게 성장할 것으로 예측하였다. 과거 화제가 되었던 곡물 메이저 회사인 Cargill사(현 네이처웍스)와 세계 최대의 유산 메이커인 PURAC사가 미국의 네브래스카(Nebraska)주에 연간 20만 톤까지의 증산이 가능한 유산 공장을 완성하였다. 더구나 Cargill사는 화학 최대 기업인 Dow Chemical사와 1999년도 말에는 4만 톤의 폴리 유산의 공급 체제를 확립하고 구체적인 장래 계획으로서 연간 60만 톤 규모의 공장 건설도 공표하였다. 또한 Cargill사는 선전용 팜플렛에 1 kg당 1 영국 파운드로 폴리 락트산의 공급을 공언하였다. 이 가격은 범용 플라스틱의 가격과 비슷한 것으로, 전술한 연 40억 달러의 규모를 이 가격으로 환산하면 약 2백만 톤의 시장이 된다. 앞으로 생분해성 플라스틱도 본격적으로 유통될 것으로 예상된다. 또한 금세기 초에는 전체 플라스틱 시장의 1-5%를 차지하나, 2010년 이후에는 10% 이상을 점유하는 산업으로 성장할 것으로 전망된다.

난분해성 플라스틱 사용에 대한 국내외 규제 현황

국내의 경우 2002년 2월 4일에 공포된 "자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률(법률 제 6653호)의 개정 법률" 취지에서와 같이 폐기물을 생산 단계에서부터 억제하기 위해 포장 재질 및 포장 방법에 대한 기준과 일회용품 사용 억제를 강화하는 것이 전체적인 추세이며 대중음식점이나 대형 유통 판매업소 등에서 사용하는 일회용품에 관한 규제도 점차 강화되고 있다. 플라스틱에 관련된 환경 법규는 이미 20년 전인 1979년에 발효되어 폐합성수지의 수거, 처리, 비용분담 등에 관한 사항을 규정하고 국민과 정부, 사업자의 역할을 각각 부여하였다. 이 법에 따라 합성수지 분담금 제도가 처음으로 시행되었으며 한국자원재생공사(현 한국환경자원공사)가 농촌의 폐비닐과 농약병을 수거하는 업무를 전담하기 위해 설립되었다.

플라스틱 제품의 사용규제 제도 중 업계에 큰 타격을 주는 것이 일회용품 사용규제제도에 포함된 합성수지 봉투 및 도시락 용기이며 대체 도시락 용기 제작과 유통 준비 미비로 "자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 시행규칙"이 1994년 12월에 개정 공포되었으나 1996년 2월과 1996년 8월로 두 번이나 연기되기까지 하였다. 관련 업계에서 규제 제도 철폐를 강력하게 주장하고 있지만 합성수지 폐기물은 폐기물의 재질별 처리 비용이 종이나

고철, 유리병 등과 비교하여 가장 많이 들고 재활용 시 드는 비용이 크기 때문에 합성수지 폐기물의 재질을 가급적 재활용 또는 처리가 쉽고 처리비용은 적게 드는 재질로 대체하던지, 또는 분해되어 자연으로 돌아가는 분해성 플라스틱 사용이 불가피하리라고 본다.

다른 나라에서도 이미 일회용 봉투나 스티로폼으로 만든 도시락 용기 등의 사용을 규제하고 있으며 플라스틱의 폐기 처리에 관한 문제 때문에 이태리에서는 쇼핑백, 플라스틱제 병에 생분해성을 의무화하고 있고, 미국에서도 이와 관련한 주 법안 및 조례안 등이 통과 혹은 심의되고 있는 등 선진 각국에서는 난분해성 플라스틱 사용규제 및 생분해성 플라스틱 사용 의무화 규정이 강화되고 있어 생분해성 플라스틱에 대한 실용화가 활발히 진행되고 있다. 또한 The Alchemist-The ChemWeb's Magazine에 의하면 영국에만 100억 개의 슈퍼마켓 백이 매년 사용되고 있으며 미국에서는 슈퍼마켓 5곳 중 4곳에서 플라스틱 백을 사용 중이다. 중국은 1,600만 톤, 인도는 450만 톤, 영국은 100만 톤의 쓰레기를 발생시키는데 영국은 그 중의 80만 톤 이상이 polyethylene으로 되어 있다. 유럽 전체에서 매년 250만 톤의 플라스틱이 매립되고 있다. 인도의 봄베이, 델리와 방글라데시에서 1988년과 1998년의 홍수 때 도시의 하수 시스템이 플라스틱 쓰레기들에 막혔던 경험을 한 후로 사용을 금지하고 있다. 대만과 싱가포르에서도 사용을 금지할 계획이며 영국 정부도 올해 초에 플라스틱 백에 소비세 부과를 검토 중이며, 아일랜드에서는 2002년 3월 4일부터 플라스틱 쇼핑백 1개당 15센트씩 과세하고 있다.

생분해성 플라스틱 기술의 발전 방향

분해성 플라스틱을 수출산업 육성계기로 활용하기 위해서는 분해성 수지 연구개발을 활성화 할 수 있는 식품 포장재, 산업용 포장재, 생활용품, 쇼핑백 등에 분해성 수지 의무화와 같은 관계부처의 계속적인 정책적 지원 및 실천이 필요한 실정이다. 특허청에서는 현재 중소기업을 지원하기 위해 운영 중인 플라스틱 기술 협의회와 고분자 신소재 연구회 등을 활용하여 기존 소재를 분해성 플라스틱을 응용한 환경 친화적 소재로 대체한 제품을 개발할 수 있도록 관련 기술에 대한 정보를 제공하여 환경친화소재의 시장개발에 따른 국내시장 보호는 물론 세계시장 진출과 우리나라가 환경소재 생산국으로 도약할 수 있도록 계속적인 지원을 수행할 계획으로 진행 중이다.

한편, 선진국의 견제와 신흥경제성장국의 추격 사이에서 국내 플라스틱 산업이 경쟁력을 확보하기 위해서는 기존의 범용 플라스틱 제조에서 벗어나 부가가치가 높은 엔지니어링 플라스틱(EP) 산업의 활성화를 추구해야 한다. 고성능 엔지니어링 플라스틱의 대표적인 적용 분야로는 자동차와 항공우주가 있다.

'건강' 역시 빼놓을 수 없는 화두이다. 최근 요업기술원은 '기능성 고분자-세라믹 하이브리드 나노입자'를 이용해 손상된 뼈와 치아를 재생시키는 기술에 개발에 성공해 상용화를 위한 연구를 진행하고 있다. 또한 최근에는 충치 치료 시에 기존의 아말감 대신 레진을 사용하는 등 의료분야에서도 플라스틱의 역할이 점점 커지고 있다. 항균 고분자의 경우에는 의료뿐만 아니라 가정용 플라스틱 제품, 에어컨 필터, 자동차 내장재, 신발 등에 폭넓게 응용될 수 있을 것으로 예상되고 있다.

또 다른 잠재시장으로는 날로 국민들의 관심이 높아지고 있는 스포츠·레저 분야이다. 최근 스포츠·레저용품 산업은 꾸준히 증가하고 있으나 스키용품과 같은 고가의 상품은 여전히 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 분야에 대한 적극적인 투자는 관련 시장의 확대 및 수입 대체 효과도 누릴 수 있을 것이다. 환경 규제는 친환경 기술을 잘 활용한다면 오히려 시장 개척의 새로운 기회를 부여해주기 때문에, 이와 관련된 기능성 플라스틱의 개발과 기술이전 등 사업화를 위한 발 빠른 노력이 플라스틱 업계에 요구된다.

국내 환경의 보호를 위해서도 생분해성 플라스틱의 사용이 필요하나 플라스틱 폐기물에 대한 규제는 선진국들을 위주로 통합적인 움직임을 보이고 있어 향후 수출품 포장에 반드시 분해성 물질을 사용해야 하는 규제가 실시되고 있고 향후 더욱 확대될 가능성이 있는 등, 국제적인 환경 보호 움직임에 대한 국가 경제적인 측면의 대책으로 생분해성 플라스틱의 개발이 필요하다. 또한 고가의 시험비용 및 시험소요 기간으로 인한 업체의 부담을 경감시키기 위해 보다 신속하고 저렴한 시험방법의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

요 약

환경문제가 대두되면서 이미 선진국의 포장재 공급업체들은 소비자의 관심과 재활용 규제가 친환경 포장재 수요를 불러일으킬 것으로 전망하였다. 이러한 수요에 대응하기 위해 옥수수와 같은 식물을 활용해 만든 여러 형태의 바이오 플라스틱을 출시해 왔으며, 국내 업체들에서도 점차 이에 대한 관심을 높여가고 있다. 점차 강화되고 있는 폐기물 부담금과 불안정한 국제 유가를 고려할 때, 바이오 플라스틱은 소비자들의 친환경 제품에 대한 관심과 연결되어 국내 플라스틱 산업의 새로운 활로가 될 것으로 기대된다. 이를 위해서는 비교적 초기단계에 있는 국내 친환경 플라스틱 기술에 대해 기업과 대학에서 활발한 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다. 빠르면 2-3년 내에 생분해성 플라스틱을 주원료로 한 도시락 용기, 컵라면 용기 및 각종 상품용 포장용기가 실용화되고, 장기적으로는 폐수내의 중금속 이온 제거제를 비롯하여 생체 의료용제 등과 같은 첨단의 고부가 생명 공학기술을 응용한 다양한 종류의 환경 친화 제품의 출시가 예상되며, 향후 생분해성 플라스틱 산업은 시장 잠재력과 성장성이 무한한 환경 관련 사업으로 평가된다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 이화여자대학교 연구비 지원(2006-0098-1-1)으로 수행한 결과로서 이에 감사드립니다.

문 헌

1. Brown DT. Plastic Waste Management. Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA. pp. 1-35 (1993)
2. Guillet JE. Polymers and Ecological Problems. Plenum Press, New York, NY, USA. pp. 45-60 (1973)
3. Narayan R. Impact of governmental policies, regulations, standards activities on an emerging biodegradable plastics industry. pp. 261-272. In: Biodegradable Plastics and Polymers. Doi Y, Fukuda K (eds). Osaka, Japan (1993)
4. Huag JH, Shetty AS, Wang MS. Biodegradable plastics, A review. Adv. Polym. Tech. 10: 23-30 (1990)
5. Hamid SG, Maadhah AG, Amin MB. Handbook of Polymer Degradation. Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA. pp. 219-230 (1992)
6. Bloembergen S, David J, Geyer D, Gustafson A, Snook J, Narayan R. Biodegradation and composting studies of polymeric materials. pp. 601-609. In: Biodegradable Plastics and Polymers. Doi Y, Fukuda K (eds). Osaka, Japan (1993)
7. Chung MS, Lee WH, You YS, Kim HY, Park KM. Degradability of

multi-degradable HDPE and LDPE food packaging films. Food Sci. Biotechnol. 12: 548-553 (2003)
8. Jitendra KP, Singh RP. UV-irradiated biodegradability of ethylene-propylene copolymers, LDPE, and I-PP in composting and culture environments. Biomacromolecules 2: 880-885 (2001)
9. Jung BW, Shin CH, Kim YJ, Jang SH, Shin BY. A study on the biodegradability of plastic films under controlled composting conditions. J. Int. Industrial Technol. 27: 107-116 (1999)
10. Lee SI, Sur SH, Hong KM, Shin YS, Jang SH, Shin BY. A study on the properties of fully bio-photodegradable composite film. J. Int. Industrial Technol. 29: 129-134 (2001)
11. Ryu KE, Kim YB. Biodegradation of polymers. Polymer Sci. Technol. 9: 464-472 (1998)
12. Scott G. Photo-biodegradable plastics: their role in the protection of the environment. Polym. Degrad. Stabil. 29: 136-143 (1990)
13. Shin BY, Lee HB, Cho MH. Photodegradation of HDPE film containing mechanically induced photosensitive groups. Environ. Res. 15: 31-40 (1995)
14. Cole MA. Agricultural and Synthetic Polymers. America Chemical Science, New York, NY, USA. pp. 76-90 (1988)
15. Doane WM. USDA research on starch-based biodegradable plastics. Starch-Starke 44: 292-295 (1992)
16. Koenig MF, Huang SJ. Biodegradable blends and composites of polycapolactone and starch derivatives. Polymer 36: 1877-1882 (1995)
17. Na K, Shin EK, Kim YE, Kim DW, Lee KY. Preparation of biodegradable film using polysaccharides. J. Res. Int. Catalysis 20: 117-123 (1998)
18. ASTM. Annual book of ASTM standards. Standard practice for determining degradation end point in degradable polyethylene and polypropylene using a tensile test (D3826-98). American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA (1998)
19. ASTM. Annual book of ASTM standards. Standard practice for determining resistance of synthetic polymeric materials to fungi (G21-96). American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA (1996)
20. Korea Food & Drug Administration. Test method for plastics. Chapter 6. Standards for containers and packaging. pp. 28-60. In: Food Code. Korea (2001)