

생분해성 고분자 소재 연구 및 선진 연구 개발 동향

| 저자 | 한정우 PD / KEIT 화학공정PD실
허필호 교수 / 부산대학교

SUMMARY

// 목적

- ★ 석유기반 합성 고분자와 유사한 물리화학적 및 기계적 성질을 가지며, 토양 매립 시 100%가 자연적으로 분해되는 천연물 또는 석유기반의 생분해성 고분자 기술 및 시장 현황을 소개
- ★ 이산화탄소 배출권을 규제하는 교토의정서의 틀 안에서 각 국가들은 이산화탄소를 절감하면서 현재 화학기반 플라스틱 사업의 주요 정책적 대안으로 지속 발전시키는 국내·외 생분해성 고분자 소재의 핵심 기술 개발 동향 및 선진 시장 동향을 파악하고 향후 국내 기술 개발 추진 방향을 제시

// 주요현황

- ★ 스페인 남부 모르시아 해변에서 죽은 항고래의 뱃속에서 플라스틱이 무려 115개 약 29kg, 우리나라에서도 지난 19일 전북 부안 앞바다에서 잡힌 아귀 뱃속에서 20cm 크기 플라스틱 생수병이 나오는 상황으로 우리나라의 국민 1인당 플라스틱 연간 사용량은 2016년 기준 98.2Kg으로 세계 1위를 차지하고, 포장 폐기물의 경우도 2017년 기준 64.12kg으로 세계 2위를 차지함
- ★ 전세계 수돗물 81%에서 미세 플라스틱이 검출되었고, 미세플라스틱은 대부분 PE로 만들어진 일회용 비닐 봉지로, 전세계 비닐봉지의 7%만 재활용되고, 78% 정도는 버려지게 되고, 그중의 90%는 바다로 흘러들고 있는 상황임
- ★ EU에서는 연간 2580만톤의 플라스틱 폐기물이 발생되고, 재활용율은 30% 수준 으로, EU 의회에서는 2021년까지 빨대·면 봉·접시·포크 등 일회용 플라스틱 제품을 재생가능한 친환경 소재로 대체하고, 2025년부터는 플라스틱병의 90%를 재활용 하는 것으로 가결됨
- ★ 2010년 미국의 생분해성 플라스틱의 수요는 25억 파운드로써 6억 천만 달러에 해당되며, 년 17% 증가할 것으로 예상됨. 생분해성 플라스틱의 평균가격은 경쟁적인 가격 구조와 석유기반 고분자들의 높은 공급 가격 및 보다 지속가능한 자원을 사용하고자 하는 정부, 환경 및 소비자의 점점 더 강화될 솔루션범으로 상대적으로 계속 낮아질 것으로 예상되고 있음

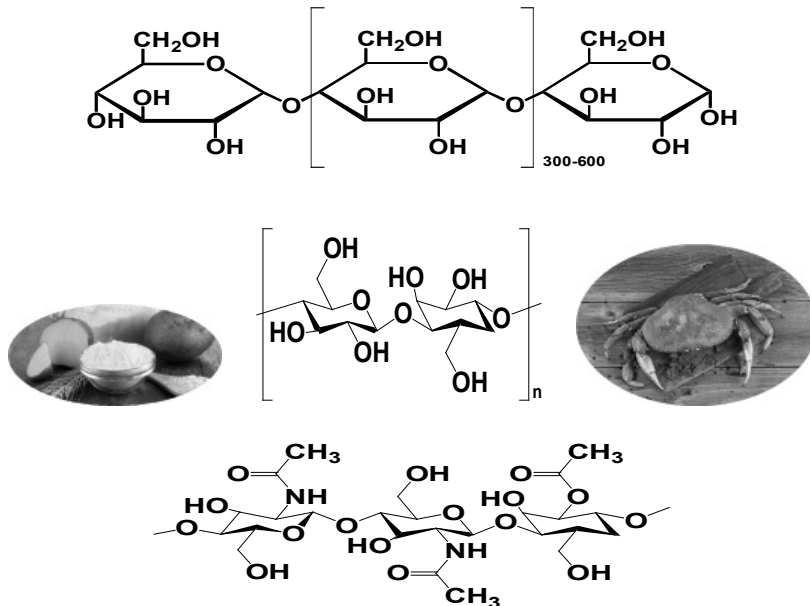
- ★ 생분해성 고분자/복합재료 플라스틱은 4억 2천만 파운드까지 매년 거의 20% 증가할 것으로 예측됨. PLA의 수요는 매년 30% 이상, 전분기반의 플라스틱 수요는 보다 저렴한 가격과 향상된 수지 혼합방식으로 매년 거의 18% 증가로, 폴리에스터 기반의 생분해성 수지의 수요는 계속되는 가격 감소와 필름 및 섬유 산업의 친환경성 관심 증대로 매년 24% 증가할 것으로 예측되고 있음

시사점 및 정책제안

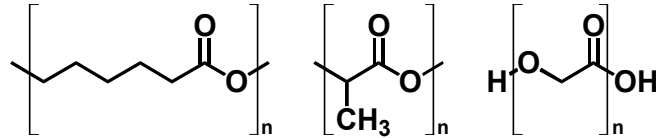
- ★ 세계 각국에서 기존 플라스틱과 비슷한 물성과 가격 경쟁력을 갖고, 인체에 무해하면서도 100% 완전 분해가 진행되는 생분해성 소재 개발과 상품화에 박차를 가하고 있음. 또한 이산화탄소 저감, 자연계에서 분해되어 환경 부하가 적게 되는 대체품 연구 개발이 지속적으로 이루어져 생분해 플라스틱(Biodegradable plastics), 산화생분해 플라스틱(Oxo-biodegradable plastics), 탄소저감형 바이오 베이스 플라스틱(Bio based plastics) 등의 친환경 고분자 제품이 식품 포장재, 산업용품, 농업용품, 생활용품, 자동차, 산업용품 등을 중심으로 출시되고 있으나, 현재 국내의 연구 및 제품화 기술 개발은 그 노력이 미흡한 상황임
- ★ 세계적으로 각종 플라스틱의 규제대상에서 생분해성 플라스틱은 제외되고 있으며, 연구 개발여하에 따라서 향후 생분해성 플라스틱의 수요가 점증할 것으로 예상되나, 국내 생분해성 고분자는 일부 산업분야에서 한정되어 사용되어지고 있어 그 제품화 영역이 종량제봉투, 완충포장재, 홍보용 제품 등에 한정됨. 국민소득 증대와 환경보호로의 확장된 인식 전환으로 생분해성 고분자에 대한 국내 기업의 관심은 폭발적이나, 자체적 소재 개발 및 제품 생산을 시도하기에는 경제성이 미미하여 여전히 기피 추세가 강해, 정부차원의 정책지원이 필요한 시점임

1. 생분해성 고분자 소재 개요

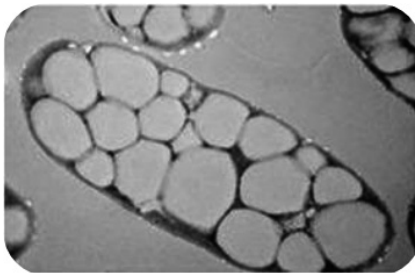
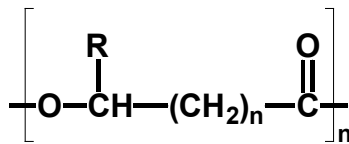
- ★ 분해성 고분자는 「빛, 열 및 수분 등의 환경조건하에서 화학구조가 현저히 변화하고, 그 물질 변화가 측정되는 고분자」로, 생분괴 고분자(Disintegrable Polymer), 생분해 고분자(Biodegradable Polymer), 광분해고분자(Photo-degradable Polymer)를 포괄하는 개념임. 그 중 생분해성 플라스틱은 토양 매립 시 100%가 자연적으로 분해되는 플라스틱으로, 이는 토양 매립에 따른 환경부하가 없으며, 유가 상승과 함께 석유자원의 고갈이라는 문제가 대두됨에 따라 대체 자원뿐 아니라 환경오염 해결 방안의 하나로 매우 각광을 받고 있는 분해성 플라스틱임
- ★ 특히, 생분해성 고분자는 천연 고분자, 합성고분자, 미생물 생산 고분자 및 천연물 고분자와 합성고분자의 블렌드(Blend)로 분류할 수 있음. 천연고분자류는 곡물에서 추출되는 starch(녹말), 게나 새우의 껍질에서 얻을 수 있는 chitin(키틴), Cellulose(셀룰로오스) 등이 생분해되는 생분해 고분자들이며, 합성하거나 미생물에 의해 생산된 생분해성 고분자에 비해 가공성은 떨어지지만, 가격이 상대적으로 저렴하다. 특히 전분은 가격이 저렴하고 가공성을 향상시킬 수 있는 다양한 변성 기술이 개발되고 있음.



- ★ 화학합성에 의한 생분해성 고분자는 poly(caprolactone)(PCL), poly(lactic acid)(PLA), 지방족(aliphatic) polyester, poly(glycolic acid)(PGA) 등이 있고, 생산이 비교적 수월하고, 물성의 조절이 용이하여 다양한 기능을 부여할 수 있으므로 플라스틱 용도로 상업적으로 생산되고 있음.

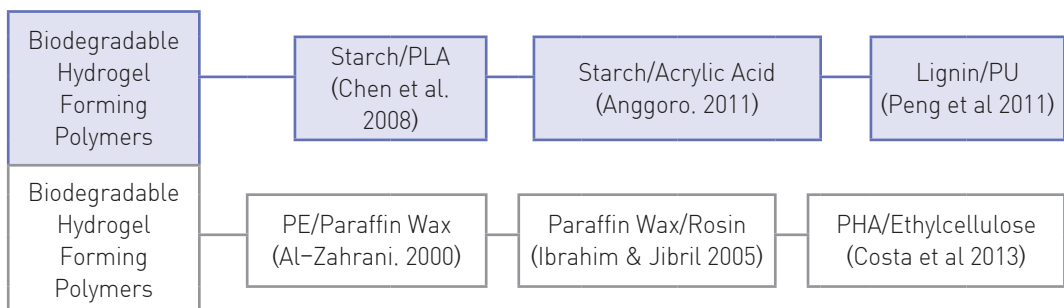


- ★ 탄소원이 존재하고 영양분이 제한된 조건에서 특정 미생물이 에너지 저장물질로 poly(hydroxyalkanoates, PHA)를 생산하며, PHA는 주쇄 탄소수와 치환기의 형태에 따라 여러 종류의 PHA가 존재한다. 배양기술의 발전으로 생산원가가 떨어지면서 용도가 확장될 것으로 기대됨

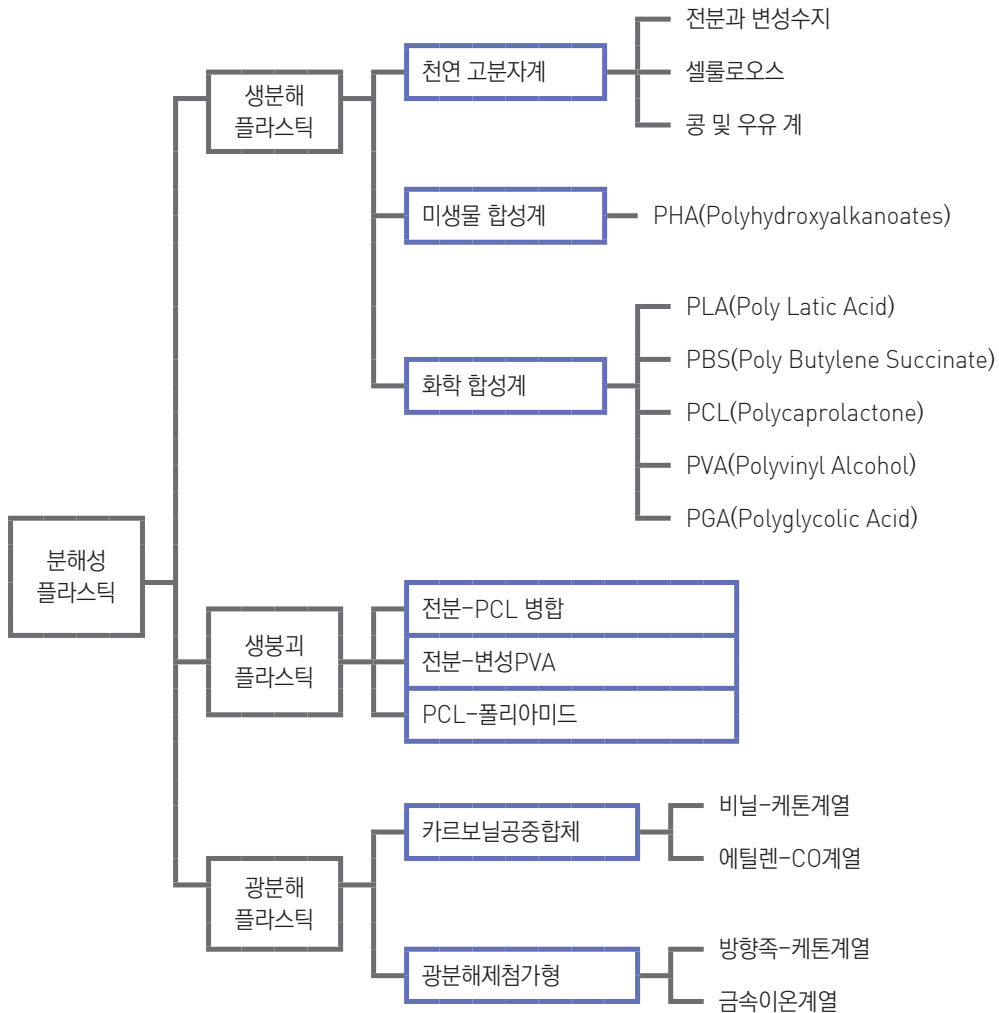


- | | | |
|-----|------------|---------------------------|
| n=1 | R=hydrogen | Poly(3-hydroxypropionate) |
| | R=methyl | Poly(3-hydroxybutyrate) |
| | R=ethyl | Poly(3-hydroxyvalerate) |
| | R=propyl | Poly(3-hydroxyhexanoate) |
| n=2 | R=hydrogen | Poly(4-hydroxybutyrate) |
| n=3 | R=hydrogen | Poly(5-hydroxyvalerate) |

- ★ 생분해성이 우수한 전분, PHB 등을 다른 고분자와 blending 하여 생분해도를 향상시키고 비용을 절감할 수 있으며, 주로 전분과 PLA, 전분과 PCL, 전분과 지방족 polyester, PHB와 PCL의 blend 등이 이용됨

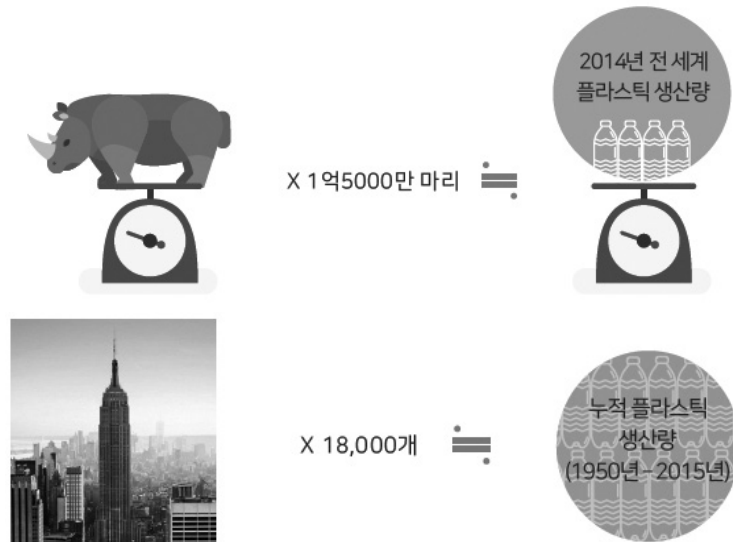


[표 1] 분해성 플라스틱의 종류



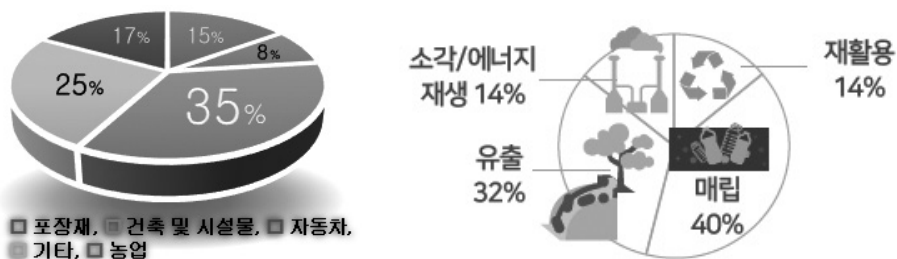
★ 일상생활에서 우리들은 일회용 물병과 같은 식품 용기·포장재, 장난감 등의 플라스틱을 직접 접하고 있으며, 건축, 자동차, 가전제품, 접착제, 가구 등의 다양한 영역에서도 플라스틱은 광범위하게 사용되고 있음. 전 세계적으로 1년에 생산되는 플라스틱의 수량은 3억 톤을 넘어서 계속 증가하고 있으며, 곧 5억 톤에 도달할 것이라고 예상하고 있어, 이를 환산하면 2014년 한 해 동안 생산된 전 세계 플라스틱 무게는 코볼소 수억 마리에 해당하는 무게와 비슷하고 1950년부터 2015년까지 생산된 플라스틱의 누적된 무게는 뉴욕의 엠파이어 스테이트 빌딩 1만 8천 개의 무게와 비슷할 것으로 추정됨

| 그림 1. 년 세계 플라스틱 생산량과 2015년까지 누적 생산량 비교 |



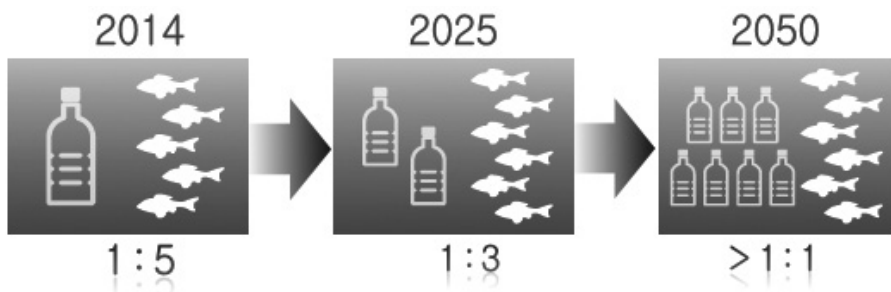
- ★ 폐플라스틱 문제를 해결하기 위해서는 생활스타일의 변화나 리사이클의 추진, 소각, 매립 등 폐플라스틱 처리기술의 개량도 활발하게 진행되고 있지만, 소재 측면에서도 지구 환경에 부담을 덜 주기 위하여 사후 처리가 쉬운 소재의 연구 개발이 진행되고 있으며, 미국, 독일, 일본 등 선진 소재 국가에서는 생분해성 플라스틱의 실용화 및 의무화의 압력이 거세지면서 플라스틱의 가공성, 내구성, 기계적 성질을 유지하면서도 추가로 분해성이라는 기능을 부여한 포장용품, 플라스틱 병 등의 사용을 의무화하는 등 생분해성 플라스틱의 실용화로 플라스틱의 편리성과 환경오염 문제 해결을 할 수 있는 연구가 진행되고 있으며, 필름(쇼핑백, 위생용품, 쓰레기봉투, 비닐장갑, 일반포장용, 농업용, 종이라미레이션, 완구/문구, 유아용품, 일회용품 등), 사출성형(의료·스포츠 용품, 화장품 용기, 사무용품, 세제용기, 일용잡화, 음료수병 등), 중공성형(삼푸병, 세제병, 화공약품병, 음료수병 등), 시트 및 진공성형(상품내·외부 포장재, 일회용 컵, 발포시트 등)을 이용하여 여러 소비재 또는 산업용 분야 등에 사용될 수 있음.
- ★ 특히, 플라스틱 생산량과 소비량의 급격한 증가로 인해 버려지는 플라스틱 폐기물에 대한 관리 문제가 세계적인 이슈로 떠오르고 있으며, 총 플라스틱 생산량의 가장 큰 몫인 26%를 차지하고 있는 포장재는 14%만이 재사용/재활용되고 있고 있는 상황이며, 14%는 소각, 나머지는 매립 또는 관리할 수 없는 형태로 유실되고 있음. 매립의 경우 충분한 매립지 확보가 용이하지 않고 매립 이후 자연계에서 반영구적으로 존재하는 플라스틱의 성질로 인해 플라스틱 쓰레기가 썩지 않고 그대로 남아 있게 되는 어려움이 있으며, 플라스틱을 소각할 때에는 다이옥신 및 일산화탄소 등의 유해가스 발생으로 인해 또 다른 오염을 초래하기도 하며, 소각 이후 남아있는 잔류물의 처리 또한 문제가 되고 있음

| 그림 2. 플라스틱 최종사용처 및 플라스틱 포장재의 사용 후 처리 현황 |



- ★ 2010년 한 해에 바다로 흘러 들어간 플라스틱 쓰레기의 양은 적어도 800만 톤에 해당할 것으로 추정되고 있고, 이러한 추세가 지속된다면 2050년도에는 바다에 있는 쓰레기 양과 물고기의 양이 같아질 것으로 전망하고 있음

| 그림 3. 향후 진행될 플라스틱 배출량 증가비와 환경침투 실태 비교 |



- ★ 자연계에 존재하는 미생물(조류, 박테리아 및 곰팡이 등)의 활동에 의해 물과 이산화탄소 또는 물과 메탄가스로 완전히 분해되는 플라스틱으로, 미생물이 분비하는 효소의 작용으로 플라스틱 물질이 붕괴되고 저분자화 된 후, 미생물이 이들 저분자를 흡수하여 대사 작용을 하고 최종적으로 미생물 균체와 이산화탄소, 메탄가스 등을 생성하는 최종분해 과정으로 구성되는 친환경 소재임

| 그림 4. 생분해 플라스틱의 분해 메커니즘 |

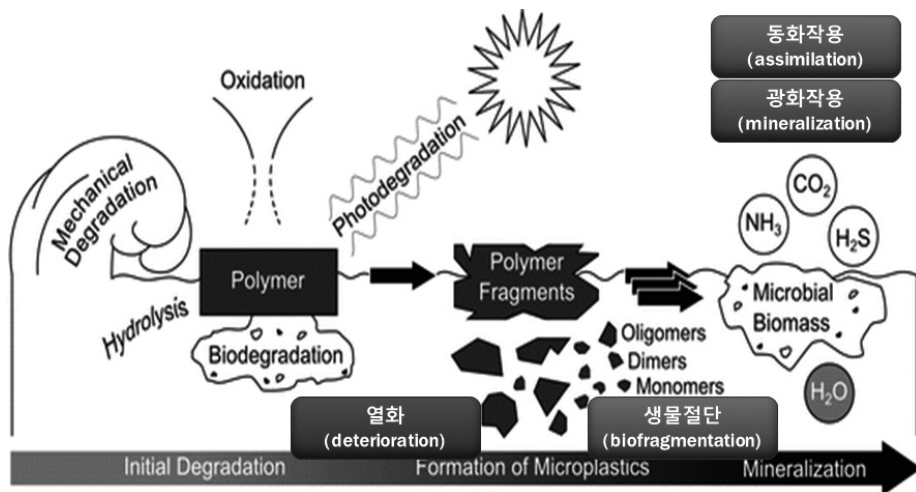


- ★ 현재 가장 대표적인 생분해성 플라스틱은 PLA(Poly Lactic Acid)로 옥수수를 원료로 만들어낸 제품이며, 세계 생산량의 대부분을 차지함. 이 PLA의 가장 큰 특징은 경제성이며, 범용 플라스틱과 유사한 정도의 가격을 형성하고 있어 생분해 플라스틱 중에서 가장 대표적이며 가장 상업적이라고 할 수 있으나, PLA 특유의 뻣뻣한 성질과 내열성 및 Barrier성 부족은 용도 확대에 큰 장애 요인이 되는 것으로 알려짐. PLA 외에 많은 관심을 끄는 것은 지방족 폴리에스테르인 PBS(Poly Butylene Succinate), PBAT(Poly Butylene Adipate Phthalate)로 PLA에 비하여 가격은 고가이나 PLA 대비 유연한 것을 특징으로 하고 있음.
- ★ 전분계수지의 주 용도는 포장용 재료로서 전체생산량의 거의 75%가 포장재로 사용되며, 나머지는 대부분 농업용으로 사용되고 있음. 그러나 향후 타이어용 충전재, 자동차의 PP제품 대체, 전기전자재료 등으로의 응용분야 확장이 기대되고 있음. PLA 생산량의 70%가 포장재로, 의류나 가구용 Textile이 28%, 그 외 농업용 필름, 전기재료에 각각 1%씩 사용되고 있는 상황이며, 최근에는 방열성 PLA의 개발로 향후 Textile용의 비중이 더욱 높아질 것으로 예상됨. PHAs(Polyhydroxyalkanoates)의 경우에는 80%가 포장재로 사용되며, 나머지는 농업용 필름으로 사용되는 것으로 알려져 있는 상황이나, 향후 PHAs의 응용분야가 전기전자 재료, 건축용 자재, 섬유분야로 확장될 것으로 기대됨.
- ★ 생분해성 고분자는 매립 후에 발생하는 토양오염에 대한 우려감이 낮고, 소각 처리하여도 석유화학 소재 플라스틱보다 공해가스 생성량이 적다는 유익한 장점을 가지지만, 필요한 식물자원을 대량생산하기 위한 화학물질로 생기는 오염과 생태계 질서가 무너질 수 있는 부작용에 대한 대책이 미비 상황이며, 식량자원에 대한 부족 문제에 대한 명확한 해결책 마련도 필요한 상황임

2. 생분해성 고분자의 생분해 메커니즘

- ★ 생분해성 고분자의 생분해를 분자량이 큰 고분자가 작은 분자량을 갖는 작은 분절들로 변하는 것으로 정의한다면, 그 주요한 분해 메커니즘은 『열화(Deterioration) ▶ 생물절단(Biofragmentation) ▶ 동화작용(Assimilation) ▶ 광화작용(Mineralization)』로 분해에 결합사슬들이 절단 분해되는 것이며, ‘열화’는 미생물, 비생물학적 요소들에 의해 분해성 고분자들이 작은 조각으로 나뉘게 되는 과정이며, ‘생물절단’은 미생물에서 나온 효소나 라디칼에 의해 고분자의 분자량이 감소되는 과정으로, ‘동화작용’은 미생물의 세포질 안에서 대사과정을 통해 다양한 대사물질을 생산하는 과정이고, ‘광화작용’은 대사물질로부터 산소, 이산화탄소, 질소, 메탄, 물, salts와 같은 작은 물질로 배출되는 과정임
- ★ 비생물학적 열화는 미생물의 대사과정에 앞서 고분자 재료들이 기후, 노화, 땅속과 같은 환경에 노출되어 기계적 분해, 광분해, 열분해, 화학적 분해 등으로 작은 조각으로 나누어지는 것이며, 생물학적 열화는 미생물이 점착물질을 분비하여 고분자 표면에 붙어서 열화를 진행하는 물리적 접근, 미생물에서 만들어진 세포 외 물질이 고분자에 침투하여 열화를 진행하는 화학적 접근, 물질 속으로 침투가 어려워 표면에서 열화(surface erosion)이 일으키는 미생물에서 나온 효소에 의한 열화인 효소적 접근이 분류됨

| 그림 5. 생분해 고분자 분해 과정 개요 |

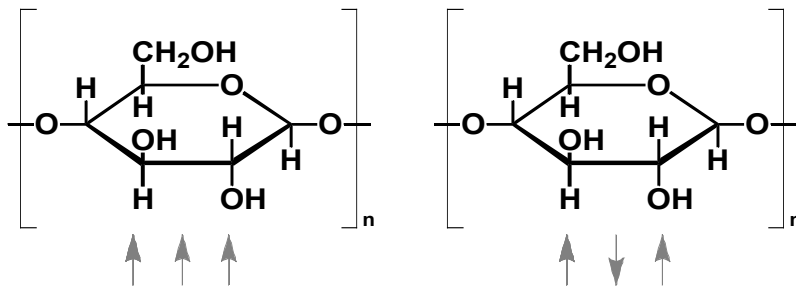


- ★ 열화가 일어난 고분자들이 미생물의 세포막을 통과하기 위해서는 작은 분자로 절단되어야 하며, 생물절단(biofragmentation)는 주로 효소에 의해서 일어나며, 효소는 생물체내에서 화학반응이 쉽게 일어나도록 활성화 에너지를 낮추는 촉매 단백질임. 생물절단에 주로 관여하는 효소들로는 가수분해 효소, 산화 환원 효소가 대표적이며, 가수분해는 ester, amide, urethane, acetal, anhydride 등 가수분해에 불안정한 결합들이 절단 분해되는 것이고, 효소의 덩치가 커서 고분자의 결정성 영역이나 입체장애를 받는 영역에는 절단이 쉽게 일어나지 않음. 산화 환원 효소 및 과산화 효소들이 알코올 또는 과산화 그룹을 형성하여 절단을 유도할 수 있음

- ★ 동화작용은 미생물들이 분해된 고분자 물질들을 영양분으로 세포 내에서 소모하는 작용으로, 고분자의 단량체는 세포막을 통과한 후 산화되어 ATP(에너지원)를 생산하거나 세포구조에 필요한 요소를 만드는데 활용되며, 호기성 호흡, 혐기성 호흡, 발효 세 가지 방법으로 동화작용이 이루어짐
- ★ 완전히 산화된 대사물질로부터 산소, 이산화탄소, 질소, 메탄, 물, 염(salts)등 작은 물질들이 미생물로부터 배출되는 과정이 광화작용으로, 이 과정을 통해 생분해성 고분자가 분해되어 최종적으로 자연으로 돌아가게 됨

3. 생분해성 고분자의 소재 기술 동향

| 그림 6. Starch(전분)과 Cellulose(셀룰로오스) 구조 개요 |



- ★ 천연 고분자계(Naturally Occurring Polymers)는 식물에서 유래한 천연고분자인 Cellulose, Hemicellulose, Pectin, Lignin, Starch 등과 동물에서 유래한 천연고분자인 Chitin 등을 기초로 만들어진 생분해성 고분자로 양모, 견사등의 동물성 단백질이나 polyhydroxyalkanoates등의 폴리에스테르계도 포함됨. Starch로 만든 천연고분자는 그 자체가 가수 분해성을 가지고 물리적 성질도 약하여 자체적으로 상용화하기엔 문제가 많아 범용고분자와의 블렌드를 통해 생분괴성 플라스틱으로 많이 생산되고 있음. 이러한 천연 고분자계를 이용한 소재는 원료의 가격이 매우 저렴하며, 자연에서 무수히 재생산되기 때문에 원료고갈의 염려가 없으나, 직접 사용하게 되면 수분에 취약하거나, 점성이 부족하여 기계적 물성이 낮은 등의 문제점이 있으나, 열처리 등을 통해 습윤상에서도 일정 수준 이상의 기계적 물성을 갖는 신소재들이 속속 개발되고 있음. E. Khashoggi Industries(EKI)에서는 감자전분과 석회로 수지를 만드는 기술을 개발했는데, 전분을 죽처럼 끓인 후 석회/나무섬유소를 혼합하여 제조하며, 수분함량이 20%를 넘지 않는 한 결합력이 유지된다고 함. 가격은 종이나 PS에 비해서도 저렴하며 토양 중에서의 분해속도도 무척 빠르다고 하며, 맥도날드사는 앞으로 이 소재를 사용할 예정임. Chitin은 주로 의약품 생체재료로 이용됨
- ★ 미생물 합성계(Microbially Synthesized Biodegradable Polymers)는 일부 미생물이 양분의 저장형태 또는 배설물의 형태로 생산한 고분자로, 생분해성이 뛰어나지만 생산량 및 속도에 제약이 많을 뿐만 아니라 분자량 면에서도 범용수지로 사용하기에는 부족한 경우가 많으며 가격 또한 고가임. 대표적인 예인 PHB(polyhydroxybutyrate)이는

polyhydroxyalkanoate의 일종으로 D-3-hydroxy-butyric acid가 직선상으로 연결된 단일 중합체로 생산성이 높으나, 결정성이 커 기계적 물성이 나쁘고 열분해 되기 쉬워서 가공에 어려운 점이 있어 PHB의 가공 물성을 향상시키기 위해 PCL과 혼용하는 방법, PHV와 공중합체를 형성하는 방법 등이 제시되고 있음. Pediococcus pentosaseus를 이용해서 5 탄당을 젖산이나 초산 등의 유기산으로 전환시킨 후 전환된 유기산을 다른 미생물(alcaligenes eutrophus)가 고분자생산을 하는 공정을 도입하여 제조원가를 낮추는 방법과 Alcaligenes eutrophus의 합성요소 유전자를 재조합한 대장균은 3-비드로키시브탄산 이라는 광학활성단량체가 직쇄 상으로 연결된 입체규칙성 폴리머를 생성하는데, 분자량이 최고 3500만에 이른다고 하며, 일본의 이화학연구소가 이 기술을 보유하고 있다고 함

★ 화학 합성계(Chemically Synthesized Biodegradable Polymers)는 생분해성이 없는 ‘방향족 폴리에스테르’의 분자구조 중 벤젠고리 부분을 탄화수소로 대체하여 지방족 폴리에스테르화 시킨 물질로 자연환경에서 완전 생분해가 가능하고 가공성이 뛰어나 많은 용도로 쓰이고 있으며, 기존의 범용 플라스틱 대체물질로 부각되고 있으나 여전히 생산원가가 높아 실용화에 한계가 있음. 대표 화학 합성계인 Polylactic Acid(PLA; 폴리유산)는 투명하며 강도가 높고 T_m 은 170℃, T_g 는 59℃의 열가소성 수지로 압출/사출등 다양한 가공이 가능하며, 사용초기에는 수술용 봉합사 등으로 많은 사용량을 보였고, 최근에는 DDS, 혈관이식재료 등으로도 그 이용이 증대되고 있는 상황임. 또한, 곰팡이에 대한 저항력이 강해 재사용에도 유리할 뿐만 아니라, 강성도 일정 수준에 이르고 있음. PCL은 ϵ -카프로락톤의 개환중합에 의해 합성되는 지방족 폴리에스테르이며, 저융점(T_m : 62℃)이지만 200℃ 이상에서도 안정하여 가공이 용이하며, 다른 고분자(폴리에스테르, 폴리아미드, 폴리우레탄 등)와의 혼용성도 뛰어나 용도 개발에 대한 폭넓은 전개가 기대되며, PLA보다 느린 생분해 속도로 인공피부 등에 적용되는 사례를 보임. PBS(Polybutylene Succinate)는 폴리에스테르계열의 열가소성 공중합체 수지로 Succinic Acid와 1,4-Butheleniol(BDO)의 다중 축합반응에 의해 생성된 생분해성 지방족 폴리에스테르이며, 용융온도가 100℃를 초과하는 결정성 폴리에스테로 생분해성 플라스틱의 내열성이 필요한 분야에 적용이 가능하고, 일반적으로 가공온도가 200℃ 정도까지 사용 가능하며, LDPE와 유사한 물성을 가짐. 특히, PBS는 유연성, 천연 섬유 호환성, 내열성, 생분해성에서 PBAT 및 PLA 보다 장점을 가지며 높은 용점에서도 PLA보다 유연하여 깨지지 않으며, 거의 모든 가공공정(압출, 사출, 열성형, 섬유, 필름)에 적합한 다양한 용융 지수를 가짐.

표 2. 생분해성 고분자와 범용고분자 간의 물성비교

	PBS	PBSA	PLA	HDPE	LDPE	PS	PP
유리전이온도 (T_g , °C)	-32	-45	55	-120	-120~-40	105	-5
녹는점(°C)	114	96	140~180	129	110	-	163
열변형 온도 (°C)	97	69	55	82	49	95	110
인장강도 (J/m)	34	19	66	28	10	46~60	33
연신율(%)	560	807	4	700	300	3~4	415
결정도(%)	34~45	20~30	0~40	69	49	0	56

또한, PBS의 가공성은 유연성과 충격강도에 관한 특성을 유지하면서 여러 가지 Blending 전략(PLA, PBAT 등)에 의해 더욱 향상 될 수 있음.

| 표 3. PBS compound 종류에 따른 다양한 특성 변화 |

PBS Compounds/Blends	Improved Properties
PBS	결정성, 인장강도, 생분해성
PLA	투명도, 생분해성
PBS + PLA	인장강도, 탄성율, 신장율, 파단강도, 유연성
PBSA + PLA	충격강도, 강성, 유연성
PBS + talc	비용, 열변형 온도, 파단강도
PBS + PBAT	인장강도, toughness
PBS + carbon nanotube	인장 탄성율, 전도율, 저장 탄성율
PBS + PLA + CaSO ₄	결정화, 내열성, 내충격성, 파단 신장율

PBAT(Polybutylene Adipate Terephthalate)는 화석연료 기반의 생분해성 플라스틱으로 1,4-부탄디올, 아디프산, 테레프탈산 등으로 이루어진 공중합 폴리에스테르(지방족-방향족)임. PBAT는 우수한 인장 및 인열 강도, 일정기간 동안의 내구성과 시간에 따른 적절한 생분해도, 뛰어난 가공성을 두루 갖추고 있으며, 현재 필름, PLA 개질제, 쇼핑백, 쓰레기 종량제 봉투, 롤백, 종이컵 코팅, 명함, 멀칭필름, 일회용 제품(위생장갑, 식탁보등)에 적용되고 있음.

- ★ 천연물 블렌드계란 전분 같은 천연물과 올레핀 등의 기존 수지를 혼련 하여 생산하는 형태로 공정도 비교적 간단하고 원가도 그다지 많이 들지 않기 때문에 많이 선호되고 있으나, 결국 분해가 되는 것은 천연물뿐이고 기존 수지는 여전히 분해가 되지 않기 때문에 엄밀한 의미의 분해성 수지라고 할 수는 없음. 분해성을 강조하기 위해 전분 함량이 많게 되면 결국 기계 물성의 감소를 가져오게 되므로 이의 균형을 조절하는 것 또한 하나의 과제라고 할 수 있음. 이러한 면을 개선하고자 많은 노력이 시도 되고 있는데 그 중 하나를 소개하면 다음과 같음. Enviromental Tech.의 자회사인 Clean Green Polymer가 보유하고 있는 USP 5,321,064에 따르면 전분함량을 80%까지 높이더라도 기계 물성의 저하를 막을 수 있음. 즉, 뛰어난 인장강도와 충격강도를 가지면서도 파운드당 1달러의 저렴한 가격, 그리고 높은 생분해성을 고루 갖춘 소재의 생산이 가능하다는 것임

4. 생분해성 고분자 소재 관련 국내·외 시장 동향

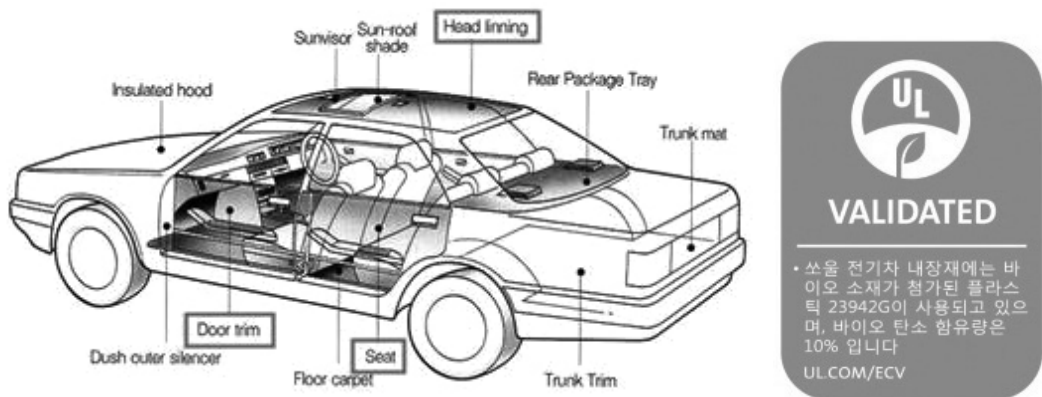
- ★ 기존의 석유화학 회사(SK, GS칼텍스, LG화학 등)와 발효 전문회사(CJ제일제당, 대상 등)를 중심으로 발효를 통한 바이오 화학 제품 연구개발을 진행 중이거나 일부 기업은 제품을 생산하고 있음
- ★ (주)CJ의 경우 옥수수 가공 공장을 통해 옥수수 전분당을 제조하며, 바이오매스 전처리 관련 연구도 수행하고 있고 상업화를 계획하고 있음
- ★ 대상그룹 지주회사 대상홀딩스(주)는 국내 식품업계 최초로 인도네시아에서 팜오일 공장을 준공하고 본격적인 생산에 돌입하고 있음
- ★ 현대자동차는 2014년 8월, 현대자동차(주)는 SK케미칼(주)과 공동으로 '자동차 내장 부품용 내(耐)크랙성이 향상된 바이오매스를 포함한 PC/ABS 복합재 제조기술'을 개발해 신기술로 인증받는 등, 최근 들어 바이오플라스틱 사업화에 집중하고 있음. 또한, SK케미칼(주)이 개발한 바이오 PETG(브랜드명: '에코젠')등 친환경성 소재를 기존 내장재와 혼합해 환경호르몬과 탄소배출량은 감소시키고 내크랙성을 개선하는 새로운 소재개발에 성공함으로써, 향후 '에코젠'이 자동차 내장재로 상용화될 경우, 자동차 내부의 친환경성이 제고 될 수 있음

| 표 4. 국내 바이오화학 개발 관련 생산기업 |

기업명	개발현황
LG화학	PLA Copolymer 및 중합기술 개발
삼성SDI(제일모직)	PLA/PC 컴파운딩, 바이오 폴리아미드, Nylon 4T
GS칼텍스	BDO, Nylon 4 개발, n-BuOH(Butyl alcohol)
삼양사	이소소르비드(Isosorbide) 상업생산 성공
SK이노베이션	CO2로부터 폴리카보네이트(PC) 개발
롯데케미칼	바이오 PET 개발, 일본 도요타통상(원료공급)과의 협력을 통해 바이오 PET을 생산하여 펄스콜라 PET용으로 납품, PLA 개발
일신화학	생분해성 농업용 멀칭필름
대상	전분계 바이오플라스틱(바이오닐), PLA, Nylon 4, 그린카본 당화효소 개발
CJ제일제당	Nylon 4T, PLA, BDO 그린카본 전처리/당화기술 개발
SKC	PLA 콘칩 포장재 개발(스카이웰)
LG하우시스(주)	PLA 벽지, 바닥재 출시(지아마루)
웅진케미칼	스트레치 원사 개발
SK케미칼	에코젠, 유연 PLA 개발
휴비스	바이오 섬유
도레이첨단소재	PLA 시트(Ecodear)
Green Chemical	PLA 컴파운드
에콜바이오텍	옥수수 전분 기반의 PLA를 활용 친환경 생분해성 에콜그린 개발

- ★ 기아자동차는 2014년에 최초로 공개된 기아의 전기차 ‘쏘울 E5’는, 친환경 내장재를 대거 적용해 자동차 업계 최초로 미국 UL사로부터 환경마크(Environmental Claim Validation)을 획득함. 내장트림용 셀룰로스 기반 플라스틱, 표피재용 바이오 열가소성 탄성체, 카펫용 바이오 섬유, 내장재용 바이오 도료, 콘솔용 폴리우산 함유 고내열·고충격 플라스틱 등을 최초 차량에 적용함.

| 그림 7. 자동차 내장재 부위별 친환경 소재 적용 및 ‘쏘울 E5’가 미국 UL社로부터 획득한 환경마크 |



- ★ 전기전자, 디스플레이 분야 바이오 소재 적용 현황에서는 구조/내열특성을 가지는 Engineering Plastics(EP)를 중심으로 가전산업 분야에서 바이오 개발이 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 일본 및 유럽시장을 중심으로 개발되어 전기/전자 시제품으로 출시됨. ‘갤럭시 시리즈’에 친환경 기술 적용을 확대해가며, 최첨단 바이오 기술을 적용하기 위해 지속적인 개발을 하고 있으며, 국제적 인증기관인 미국 UL(Unerwriters Laboratories)로부터 친환경 성능 인증인 ‘EC5(environmental claim validation)’를 받음. 갤럭시 S5의 매뉴얼과 포장케이스에 100% 재활용 종이 포장재를 사용하였고, S3와 S4, 노트3 등과 포장재와 부품에 재활용 플라스틱을 적용하는 등, 차세대 친환경 소재로 각광받는 바이오 기술을 적용한 ‘갤럭시 시리즈’로 친환경 기술 선도를 위해 노력하고 있는 것으로 확인됨. 또 한, 2014년 2월부터 국내 업계 최초로 사탕수수를 원료를 첨가한 바이오 플라스틱 필름을 도입하여 리모컨, 설명서 등의 T5 액세서리 포장에 적용하기 시작했으며, 프리미엄 스마트 T5와 UHD T5의 액세서리 포장재로 100% 재생지를 사용한 친환경 박스와 미국대두협회(ASA)의 친환경 인증을 취득한 식물성 공기를 잉크를 사용해 올해의 녹색상품상, 그린스타 인증, 그리고 83개의 T5모델에 대해 미국 전자제품 환경평가 인증인 EPEAT (Electronic Product Environmental Assessment Tool)를 획득한 것으로 확인됨

| 그림 8. 디스플레이 분야에서 진행되는 바이오 개발 현황 |



- ★ 건축 내장재 분야 바이오 소재 적용 현황으로는 국내 LG하우시스가 독보적으로 건축 내장재용 바이오 소재가 앞장서고 있으며, 세계적으로도 가장 앞서 나가고 있음. LG하우시스는 옥수수 원료로 만들어진 바이오플라스틱을 활용한 건축 내장재를 개발하여 현재 제품을 생산 및 판매하고 있으며, 친환경 바닥재 부문에서 세계 선두의 위치에 있으며, 신체 접촉이 가장 빈번한 인테리어 제품인 바닥재를 천연소재로 대체하고 있음, 실제로 옥수수를 주원료로 한 ‘지아마루(바닥재)’와 ‘지아벽지’를 시장에서 선보이고 있음. 그외 타켓, 저플로, 포보 등 3개 업체가 있음.

| 표 5. LG하우시스(주)와 외국업체 간 친환경소재 적용 경쟁력 비교 |

업체명	친환경 소재 활용 현황
LG하우시스(주)	‘Z:IN’ 이라는 브랜드는 친환경 제품라인을 가지고 있으며, 세계 최초 옥수수 원료(PLA)로 만든 ‘지아마루’에서부터 인체에 무해한 친환경 가스제를 사용한 바닥재(지아소리잠, 지아7+, 지아3)까지 개발
타켓(Tarkett)	Linoleum 리놀륨 제품 개발
저플로(Geflow)	MIPOLAM SYMBIOZ라는 옥수수과 밀을 주 원료로 하는 친환경 제품라인 운영 중
포보(Forbo)	리놀륨(Linoleum)을 개량하여 만든 독자 브랜드인 Marmoleum® 이라는 제품라인 운영 중

- ★ Cargill과 DuPont의 합작기업인 Natureworks는 이 바이오매스 원료를 이용하여 발효에 의한 젖산(lactic acid)을 생산(1차변환)하고 있으며, 이후 젖산 전환 및 PLA 중합을 통하여 PLA 수지를 생산함. Bioplastic Global 시장규모는 2017년 195억 달러에서 2022년 656억 달러가 될 것으로 예상됨(CAGR 22.23%)
- ★ 포장재 부문에서 2022년 72억 달러 시장을 형성 (CAGR 17%, 2017~2022)하며, 생분해성 Bag과 Sack의 시장은 2017년 14억 달러에서 2022년 20억달러로 성장할 전망이며, PLA와 PHA의 생산량은 2011년과 2020년 사이에 4배 이상 증가될 것으로 예상됨

[참고문헌]

1. www.gnckor.com/page18.html.
2. “Potential of Plastics Industry in Northern India With Special Focus on Plasticulture and Food Processing”, FICCI, 2014.
3. “The New Plastics Economy Rethinking the Future of Plastics”, World Economic Forum, 2016.
4. “생분해성 플라스틱의 기술 개발 동향”, 황선일 (2002).
5. “http://www.dicer.org/Webzine/html/09_main5_body.htm.”
6. “Research and Markets”
7. “European Plastics News”, Posted 8 March 2013
8. “<http://www.e-patentnews.com/newnews/print.php?uid=4316>”
9. “분해성 플라스틱의 개발 및 시장 동향”, 유영선 (2008) ㈜이엔포레코
10. “분해성 플라스틱의 최근 동향 및 플라스틱 대체품 개발현황”, (2007) 한국환경기술진흥원
11. “범용 플라스틱 대용 분해성 소재 기술 개발”, (2008) 한국산업기술재단
12. “Handbook of Polymer Degradation”, Hamid, S. G., Maadhah, A. G. and Amin, M. B. (1992). Maecel Dekker Inc., New York.
13. “Biodegradable Blends and Composites of Polycaprolactone and Starch Derivatives”, (1995). Polymer, 36.
14. “European Bioplastic association”
15. “식품음료신문, 2018.12.03., 9.19”, “중앙일보 2018.11.24.”
16. “아시아 경제, 2018.10.25.”