Appl. Chem. Eng., Vol. 27, No. 3, June 2016, 245-251
http://dx.doi.org/10.14478/ace.2016.1034

Review

친환경 바이오 플라스틱의 동향

이재춘* · 배철민†

가톨릭대학교 성심캠퍼스 의약나노바이오과, *(주)웹스
(2016년 4월 11일 접수, 2016년 5월 4일 심사, 2016년 5월 10일 채택)

Trends of Environment-friendly Bioplastics

Jaechoon Lee* and Chaulmin Pai†

Department of Nano-Bio Convergence Studies, The Catholic University of Korea, NP 204, 43 Jibong-ro, Wonmi-gu, Bucheon-si, Gyeoggi-do 14662, Korea
**President, WAPS Ltd, 45 Centumdong-ro, Haeundae-gu, Busan 48059, Korea*
(Received April 11, 2016; Revised May 4, 2016; Accepted May 10, 2016)

초 록

지구온난화 방지 정책 및 플라스틱 쓰레기에 의한 환경오염 방지의 해결책으로 제시된 플라스틱의 원료 자체를 재생 가능한 원료로부터 생산된 일명 바이오매스 기반 바이오 플라스틱 중 대표적인 polylacticacid (PLA), 유해 화학물질이 포함될 가능성이 적은 장점으로 화장품 용도로 시장전개가 용이할 것으로 예상되는 polyglycolicacid (PGA), 미생물생산 바이오 플라스틱의 대표적인 polyhydroxyalkanoate (PHA), 가격 대비 우수한 물성의 전분/녹말계열 고분자 등의 동향을 살펴보고자 한다. 특히 포장재 분야, 일회용 위생용품 분야, 폐기물 발생량의 가장 많은 부분을 차지하고 있는 건설 폐기물 분야에 있어서의 환경 친화적인 바이오 플라스틱의 개발 동향을 고찰해보았다.

Abstract

Trends of bioplastics, especially biomass-based bioplastics which is one of the most promising ways to solve the depletion of fossil fuels and global warming problems, were investigated. Emerged bioplastic polymers such as polylacticacid (PLA), polyglycolicacid (PGA) for cosmetic additive, polyhydroxyalkanoate (PHA) produced by bacterial fermentation, and cost effective starch-based polymer were discussed with their general studies. Also recent technologies of environment-friendly bioplastics for packaging and construction materials as well as disposable hygienic goods were briefly reviewed.

Keywords: *bioplastics, biomass, degradable polymer, packaging materials*

1. 서 론

80년대부터 급격히 고갈된 화석에너지를 대체하기 위하여 고려되어 왔던 바이오 플라스틱은 최근 들어 세계적으로 2020년 배출 전망치의 30% 감축을 계획하고 있는 온실가스 효과에 따른 지구온난화 방지 정책과 산업 및 가정용 플라스틱 쓰레기에 의한 환경오염 방지라는 시대적 요구에 따라 더욱 더 중요성이 강조되고 많은 연구 개발이 진행되고 있다. 특히 산업 및 가정용 고분자의 폐기에 따른 환경오염 문제는 내구성이 타 소재에 비하여 큰 장점으로 인식되어 발전하였던 플라스틱 산업에 오히려 큰 걸림돌로 작용되었고 플라스틱 산업 전체를 다시 돌아보는 계기가 되었다. 이러한 문제를 해결하고자 대두된 여러 정책 중 가장 바람직한 대안으로 대두되고 있는 바이오 플라스틱산업은 기존의 플라스틱제품이 지니고 있는 환경오염에 대한 사회적 비용을 감소시키며 새로운 소재의 개발이라는 차원에서 최근 눈길을 끌고 있는 화이트 바이오 핵심기술의 일환으로 2020년에는 산업규모가 380억 불로 성장이 예상되는 미래지향적 산업이라 할 수 있다. 플라스틱 소재가 우수한 기능 및 저렴한 가격으로 풍요로운 일상생활에 큰 공헌을 해 온 반면 대량의 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. 현재 세계적으로 소각 및 폐기가 어려운 고분자 폐기물은 2010년에 이르러서는 전체 쓰레기의 12%를 상회하는 것으로 추정되며 오히려 더 늘어날 전망을 보임에 따라 유지, 소각, 생분해성 소재 사용 등 고분자 폐기물에 대한 전반적인 관리체계가 정부, 산업계 및 학계에서 부단히 연구 중에 있고 지속 가능한 순환형 시스템의 구축의 일환으로 바이오 플라스틱 개발이 가장 현실성 있는 대안으로 대두되고 있다[1].

바이오 플라스틱에는 다양한 종류의 고분자가 있는데 최근에는 생분해성 고분자, 그리고 바이오매스 기반 생분해 되지 않는 고분자 모두를 포함하여 분류되고 있으며 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째

† Corresponding Author: The Catholic University of Korea,
Department of Nano-Bio Convergence Studies, NP 204, 43 Jibong-ro,
Wonmi-gu, Bucheon-si, Gyeoggi-do 14662, Korea
Tel: +82-2-2164-5509 e-mail: cmpai@catholic.ac.kr

pISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 @ 2016 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

Table 1. Classification of Bio-Based Plastics and Petroleum Based Plastics

Biodegradable Plastics	Bio-based Plastics	PLA (Polylacticacid)
		PGA (Polyglycolicacid)
		PHA (Polyhydroxyalkanoate)
	Petroleum-based Plastics	PCL (Polycaprolactone)
		PBS (Polybutylene succinate)
		PBT (Polybutylene terephthalate)
Non-Biodegradable Plastics	Bio-based Plastics	Bio based Olefin
		Bio based Polyester
	Petroleum-based Plastics	Thermoset Plastics
		Engineering Plastics

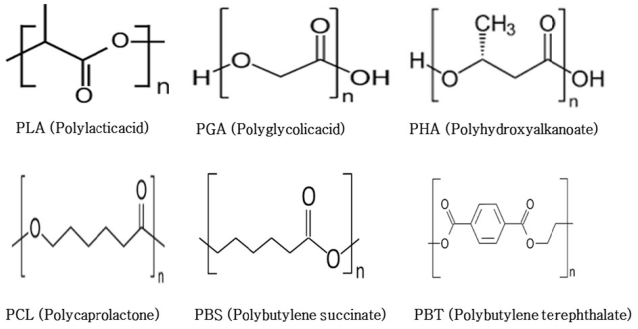

Figure 1. Chemical structures of bioplastics.

자연에서 만들어진 천연고분자로서 polysaccharide, starch, gum, natural rubber 등이 대표적이다. 둘째 바이오매스 기반한 단량체를 중합하여 제조된 바이오 고분자(bio-based polymer)로서 polylacticacid (PLA), polyglycolicacid (PGA), polyhydroxyalkanoate (PHA)가 있다. 셋째 석유기반 단량체로 중합한 생분해성 고분자가 있는데 polycaprolactone (PCL), polybutylene succinate (PBS) 등을 들 수 있다. Table 1과 Figure 1에서 대표적인 바이오 플라스틱 고분자를 분류하였고 대표적인 바이오 플라스틱 고분자의 화학 구조를 나타내었다(Table 1, Figure 1). 바이오 플라스틱은 현재 아직도 전세계 플라스틱 사용량의 1% 수준을 겨우 차지하고 있으나 향후 지속적인 증가가 예상되는데 Figures 2, 3에서 석유기반 생분해성 플라스틱 및 석유기반과 바이오 매스 기반 바이오 플라스틱들의 연도별 생산량 및 해당 분야별 대표적인 고분자의 세계 생산량 비율을 나타내었다[2,3,4](Figures 2, 3). 특히 주목할 사실은 2010년부터 등장한 바이오 기반 polyethyleneterephtalate (bio-PET) 및 바이오 기반 polyethylene (bio-PE)의 경우 생산 공정에서 기존 설비를 그대로 사용할 수 있어 음료수병(bio-PET)과 비닐봉지(bio-PE)를 중심으로 최근 바이오 플라스틱 시장확대의 중추적 역할을 하고 있다[5]. 본문에서는 자원 고갈 및 환경 문제에 대한 해결책을 제시된 단량체를 석유화합물 원료를 사용하지 않고 재생 가능한 자원으로부터 생산하는 바이오매스 기반 플라스틱의 동향을 살펴보고자 한다. 더불어 환경오염 방지를 위한 친환경 소재인 바이오 플라스틱의 대표적인 적용 분야인 포장재 분야, 일회용 위생용품 분야, 나아가 국가 폐기물 발생량의 가장 많은 부분을 차지하고 있는 건설 폐기물 분야에 있어서 환경 친화적인 바이오 플라스틱의 최근 동향을 고찰해보고자 한다.

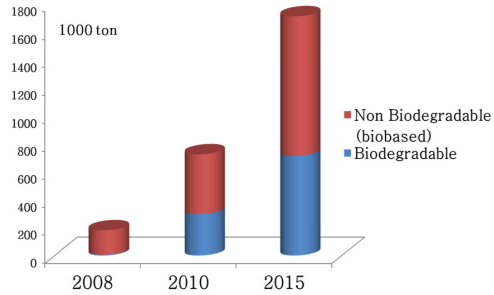

Figure 2. Global production capacity of bioplastics.

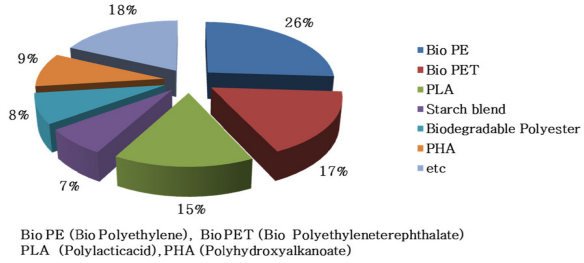

Figure 3. Global production capacity of different types of bioplastics (2015).

2. 바이오매스 기반 분해성 플라스틱

최근 들어 온실가스, 지구온난화의 환경관련 규제에 따른 일환으로 화석에너지를 대체하기 위해 꾸준히 개발되어온 생분해성 소재 관련 제품들이 관심을 받고 있으며, 특히 국제기구의 환경규제 강화에 일치하는 친환경 고분자 소재인 바이오매스 기반 분해성 플라스틱이 국내외에서 주목받고 있다. 지구온난화 규제와 방지를 위한 국제협약인 2005년 2월 16일 공식 발효된 교토 의정서를 근간으로 미국, 일본, 유럽연합 회원국(EU) 등 38개국은 1990년을 기준으로 2008~2012년까지 평균 5.2%의 온실가스를 의무적으로 감축해야 하였고 대한민국은 2002년 11월에 비준했으며 개발도상국으로 분류되어 아직 법적 의무는 부담하고 있지 않으나 OECD회원국으로서 멕시코와 더불어 온실가스 감축 압력을 받고 있다. 2002년 International Energy Agency (IEA)의 통계에 따르면 한국의 연간 이산화탄소 배출량은 2000년을 기준으로 했을 때 4억 3400만 톤으로 세계 9위이며, 세계 전체 배출량의 1.8%를 차지한 것으로 나타났으며 특히 세계 최고의 증가세를 기록하고 있기 때문에 의무대상국으로 분류될 가능성이 높다. 바이오매스 기반 바이오 플라스틱을 생산하면 화석원료 사용 대비 이산화탄소

배출량이 10～70%가량 줄어들 전망인 관계로 바이오매스를 원료로 제조되는 바이오매스 기반 분해성 플라스틱의 적용분야가 급속하게 확대되고 있다. 국제표준기구인 International Standard Organization (ISO)에서 규정된 것처럼 미생물의 작용으로 유기물의 붕괴가 일어나고, 최종적으로 이산화탄소, 물과 무기염/생체물질을 생성하는 과정을 통하여 재활용이 가능할 뿐만 아니라 매립할 경우 분해가 가능하며, 소각하는 중 다이옥신 등의 유해물질 배출이 없는 바이오매스 기반 분해성 소재란 기능성 석유 기반 합성 고분자 수준의 물성을 가지나 폐기 시에는 미생물의 활동에 의해 분해되어 최종적으로 자연 순환 물질인 물과 이산화탄소로 변환하는 소재를 말한다. 재생 가능한 유기 자원을 원료로 일상생활에 유용한 바이오매스 기반 분해성 소재는 화석자원 감축에 공헌하며 일회용 포장재 및 위생용품, 건축용 자재, 농업용, 원예용 분재 제품에 분해성 원료를 일부 혹은 전부 적용하여 사용 후에도 폐기물을 사용조건 하에서 적당한 기간 내에 분해되도록 설계함으로써 폐기물로 회수, 처리가 필요 없는 친환경 소재이다. 일반적으로 식물이나 미생물 등을 에너지원으로 이용하는 생물체를 말하나 포괄적 의미로는 작물과 나무, 농산품과 사료작물, 농작 폐기물과 찌꺼기, 임산 폐기물과 수초, 동물의 배설물, 도시 쓰레기, 그리고 여타의 폐기물에서 추출된 재생 가능한 유기 물질을 통틀어 말하기도 한다. 개발 초기 미흡한 제조 기술의 수준으로 가격이 높고 물성이 좋지 않아 외면되어 왔던 바이오매스 기반 분해성 플라스틱은 최근에는 기술의 발달과 함께 제조 가격이 현실화 되었고 신소재의 품질이 대폭 개선되어 현재 기술 수준에서 석유화학제품 대비 CO_2 배출량을 대폭 줄일 수 있어 저탄소 녹색성장산업의 핵심으로 시장에서의 요구가 급증하고 있다[6].

바이오 플라스틱 중 대표적 천연고분자인 전분/녹말계열 고분자는 지난 10여 년간 바이오 플라스틱 시장의 39%로 가장 큰 비중을 차지하여 왔었으나 최근 바이오 기반 PET와 바이오 기반 PE로 대체되고 있다. 전체 생산량의 75%가 포장재로 사용되며 나머지는 농업용 및 일회용품, 전자재료로 사용되고 있는데 다양한 기술 개발로 향후 타이어용 충진재, 자동차의 PP제품 대체, 전기재료 등으로 응용 분야의 확장이 기대되고 있다[7]. 대표적인 천연 고분자인 독성이 거의 없는 전분 유도체는 공급이 풍부하여 다양한 변성기술이 개발되어 왔는데 그 자체로서의 상용화에 어려움이 있어 범용 고분자와의 혼합을 통하여 제품화하고 있으며 분해성과 가공성은 다소 떨어지나 가격이 상대적으로 저렴하다는 장점으로 시장 점유율이 컸었다. 유럽의 대표적인 생분해성 플라스틱 개발업체인 이탈리아 Novamont사, 독일 Biotech사, 벨기에 Slovay사, 영국 Zeneca사 등이 전분계열 생분해성 플라스틱의 기술력 및 매출액 분야에서 세계 선두 위치를 확보하고 있는 것으로 알려져 있다. 1980년대 중반부터 무한한 전분 자원을 바탕으로 St. Lawrence Starch사가 옥수수 전분과 PE 혼합용전분계 생분해성 플라스틱 Ecostar을 시판을 개시하였고, Warner-Lambert사는 전분에 물과 가소제를 첨가하여 가소화하고 합성고분자를 혼합한 생분해성 플라스틱인 Novon을 상품화하였고, National Starch and Chemical사는 전분계열 발포체 Ecofoam을 출시하였다. Eastman Chemical사는 지방족/방향족 폴리에스터 공중합체(CAP)를 개발하여 다른 생분해성 플라스틱 및 전분과의 상용성이 우수한 EastarBio을 상품화하였으며 Avebe사는 사출용 전분계열 플라스틱을, Rodemburg사는 전분계열 생분해성 플라스틱인 Solanyl을 개발하였으며 VTT Chemical Technology사는 Cohpol을 개발하였고, Rhone-Poulene사는 초산 셀루로우즈를 원료로 한 Bioceta와 Biocellat 및 Tubize Plastics을 개발하였다. 1990년대 Novamont사는 전분과 PCL을 혼합하여 내수성과 생분해성을 더욱 개선하여 최초의 상업적으로 성공한 생분해성 플라스틱 Mater-Bi을 상품화하였다[8]. 최근에는 식용자원인 전분을 사용하는 것보다 비식용계 유기성 폐자원을 이용한 연구개발이 매우 활발하고, 무한자원에 속하는 일년생 작물, 해조류, 산업 폐기물을 사용하는 연구가 광범위하게 진행 중이다.

Figure 4. Examples of bioplastics materials made of polylactic acid.

바이오매스 기반으로 상용화된 가장 대표적인 바이오 플라스틱으로는 식물 자원을 발효시켜 제조된 젖산을 중합하여 제조된 PLA이다. 전분 등 재생 가능한 자원에서 미생물로 발효해 만든 L-유산을 단량체로 이용하여 합성된 PLA가 기존의 합성 PLA보다 가격이 저렴하여 많은 양이 사용되고 있는데 PLA는 종래 일반적으로 물로 가수 분해된 후 미생물에 의해 분해된다고 이해되었으나 최근 PLA를 직접 분해하는 각종의 미생물이 발견되고 있다. PLA는 수분 투과성이나 통기성에 뛰어나서 포장재, 섬유 등 다방면에서의 사용이 기대되며 또한 식물의 생육을 촉진하는 것으로 알려져 있어서 멀칭 필름, 이식용 포트, 식재용 네트 등 농림업 분야에의 이용도 많이 기대된다. PLA는 poly(α-hydroxy acid) 일종으로 지방족 폴리에스터이며 일반적인 지방족 폴리에스터처럼 열 및 수분에 약하며 가수분해 될 수 있는 점에서 정형외과용 제품, 약물 방출 제형 및 생분해성 봉합사로도 상품화되었다. PLA의 경우 생산량의 70%가 포장재로 사용되며, 의류나 가구용 섬유제품이 28%, 그 외 농업용 필름, 전기재료에 1%씩 사용되고 있다. 미국 NatureWorks사는 PLA 생산 공장을 1994년 완성하였으며 현재 바이오매스 기반 PLA의 세계 최대 공급처로서 Ingeo란 상품명으로 제품들을 생산하고 있다. 세계 2위 플라스틱 생산국인 일본은 농약병, 쇼핑백, 쓰레기봉투, 농업용 멀칭 필름, 완충재 등의 다양한 분야에서 PLA의 사출제품, 진공성형 제품화가 시도되고 있는데 특히 일본을 중심으로 전자산업에서 환경친화적인 물질을 이용하여 전자제품을 제조하려는 움직임으로 NEC사는 옥수수로부터 제조된 바이오매스 기반 PLA를 Unitika사와 공동 연구하여 보다 높은 내열성과 우수한 내구성의 PLA 조성물을 개발하여 향후 전자산업의 모든 플라스틱을 바이오매스 기반 플라스틱으로 대체할 것으로 계획하고 있다. 또한 유수 자동차회사인 Toyota사는 기계적 강도가 우수한 PLA를 예비타이어, wheel cover, 자동차 내부 깔개 등 자동차 내장재로 개발하는 목표를 세워 주목받고 있다. 최근 방열성 PLA의 개발로 향후 섬유용도의 비중이 높아질 것으로 예상되고 있는데 Kanebo사가 잘 젖지 않고 비단과 같은 감촉을 가져 운동복, 내의류 용도로 유망한 PLA 섬유를 개발하였고 Toray사는 가정용 PLA 카페트를 개발하였다[9](Figure 4). PLA는 2015년 25억 불 시장에 진입하였고 향후 범용 플라스틱 소재로 진입에 성공한다면 시장은 250억 불이 넘어설 거라 예상된다.

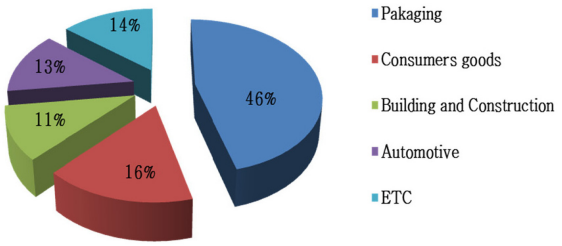

Figure 5. Global shares of bioplastics production in different market (2020).

Figure 6. Percentages of plastics by packaging type.

PGA는 의료분야에서 흡수성 봉합사로 개발되어 체내 분해성 의료 제품으로 사용되고 있다. 1970년대 미국 American Cyanamid사는 PGA로 세계 최초 흡수성 봉합사를 상품화하였고, 1987년 일본 메디칼서플라이사가 PGA 봉합사를 출하하였으며, 국내 회사 삼양사는 PGA 및 PLA 봉합사를 2000년부터 상업화하였다. PGA 경우 고가 원료인 glycolic acid (GA)를 바이오매스를 이용하여 생물학적 방법으로 생산하는 기술이 활발히 개발 중이며 GA 생산성의 획기적 증대를 위하여 글리옥실산 회로를 통한 GA 합성 등의 신규 대사공학 전략과 내산성 효모 사용을 고려하고 있다. 바이오매스 기반으로 만들어진 GA는 유해 화학물질 포함 가능성이 적은 장점으로 화장품용, 피부주름제거 화장품, 모발 유연제 등의 용도로 시장 전개가 용이할 것으로 예상된다[10].

미생물생산 고분자는 미생물이 만들어내는 분해성 고분자를 활용하여 플라스틱과 같은 기능을 갖는 물질을 만드는 것으로써 분해성과 물성에서는 우수하였지만 생산성과 용도가 제한되며 기존 제품과 비교 가격이 고가인 단점이 있다. 대표적인 고분자는 PHA, poly-hydrolybutyrate (PHB), Pullulan 등이 있다. 영국의 ICI사가 최초 개발한 대표적인 PHB 계열의 생분해성 플라스틱 Biopol은 높은 생산원가로 인해 상용화가 실패하였고, 현재 대량 상업화 단계에 진입 신규 용도를 전개 중에 있는 미생물 생산 분해성 고분자 중 대표적인 것에는 PHA를 들 수 있다. 미생물에 의해 만들어진 미생물 PHA는 열가소성 고분자로 필름, 섬유 등으로 가공이 가능하여 공업적 이용이 기대되고 있는데 현재 PHA도 80%가 포장재로 사용되며, 나머지는 농업용 필름으로 사용되고 있으며 향후 전기전자재료, 건축용 자재, 섬유분야로 확장될 것으로 기대하고 있는데 PHA는 연평균 30%의 비교적 높은 성장을 전망하고 있다. PHA 계열의 고분자 생산회사는 Metabolix사, P&G사 등이 있으며 현재 양산을 통해 생산원가 인하를 추진하고 있는 단계이다[11,12].

바이오매스 기반 생분해성 소재 단가를 기존 석유기반 합성 고분자와 비교할 시 아직은 고가이나 석유기반 합성고분자는 탄소세 부가로 고분자시장에서 경쟁력 약화 가능성이 있다. 미국, 일본을 비롯한 유럽의 선진국에서는 바이오매스 기반 바이오 플라스틱 개발을 위주로 다양한 용도 제품 실용화 개발 및 판매가 이루어지고 있는데 특히 산화 생분해성 기능을 추가한 고분자 개발 완료 및 추가 개발에 전력을 다하고 있으며 기존 폴리올레핀계 열가소성 플라스틱의 완전분해에 관한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 현재 국내에서는 세계적 화학기술 보유 역량을 기반으로 생분해성 플라스틱과 관련된 연구를 대기업 및 연구기관, 벤처기업들을 중심으로 꾸준하게 이루어지고 있지만 아직은 시장 규모가 작고, 높은 가격으로 인해 사업화는 활발하지 못한 실정이다. PLA는 Nature Works사로부터 거의 전량 수입하고 있는 실정이나 KP 케미칼사는 PET의 단량체 ethyleneglycol (EG)을 바이오매스를 이용하여 추출 30%의 바이오매스 함량을 갖는 PET를 생산하고 있으며 롯데케미칼사는 EG 뿐만 아니라 terephthalic acid 대체 물질도 바이오매스를 이용하여 추출 100% 바이오매스 기반 PET 대체 소재를 개발 중이다. 2009년 삼성전자에서는 핸드폰 외장 40%를 옥수수에서 추출한 PLA 컴파운드를 사용하고 전체 단말기의 80%를 재활용 할 수 있는 바이오 플라스틱으로 제작한 리클레임폰을 미국에서 출시한 바 있다. SK케미칼사도 친환경 생분해성 필름으로 미국 프리토레이사 썬칩의 스낵용 포장재로 세계 최초로 양산하였고 최근 투명성, 가공성, 내화학성을 가지면서 동시에 내열성과 친환경성을 보유한 바이오매스 기반 신제품으로 친환경, 내열, 고투명수지인 ECOZEN을 세계 최초로 상업화에 성공했으며 이를 기반으로 중소기업에서 화장품 용기나 식품용기, 포장재 및 산업용 필름이나 시트, 가전제품 등 다양한 용도의 ECOZEN 제품 시장 진출이 기대된다. 바이오매스 기반 바이오 플라스틱을 성공적으로 세계 시장에 진입시키기 위한 기술적 난점으로는 저가 단량체 제조를 위한 효율적인 발효 기술 개발, 단량체 형태로 변환하는 화학적 변환 기술, 바이오매스 단량체를 높은 분자량의 고분자로 전환하기 위한 고분자 중합 기술, 고분자의 정제 및 가공 기술을 통한 저가의 생산 공정을 확보하는 것이다.

3. 바이오 플라스틱 포장재

일찍부터 환경보호운동이 활발하였던 유럽 국가들은 1994년부터 포장과 포장폐기물 처리 법령을 시행하여 왔던 배경으로 서유럽 중심으로 친환경 소재인 생분해성 바이오 플라스틱 개발과 응용이 활발하였다. 세계 산업별 플라스틱 소비규모를 살펴보면 포장재가 34.7%로 압도적인 우위를 차지하며, 건설(23.4%), 자동차(9.9%), 전자 · 전기제품(6.2%) 순이었고 포장재의 경우 주로 플라스틱 백 형태가 주요 형태이며 컵 및 용기, 랩 형태의 순이었다[13,14](Figures 5, 6). 특히 친환경 생분해 포장재의 시장은 매년 10~15%의 성장이 가능할 것으로 예상되는데 선진국 주도형의 고부가 가치 시장으로써 기술력으로 인해 시장 진입 장벽이 높다는 것이 가장 큰 특징이라고 할 수 있다. 아직은 선진국에 비하여 기술적으로 다소 미흡한 상황이나 최근 국내에서도 비분해성 종량제 쓰레기봉투 대비 가격이 약 3배나 되는 생분해성(30% 분해도) 종량제 쓰레기봉투 사용을 환경부 등 중앙정부가 강력히 추진하고 있으며, 또한 최근 농진청 주도로 개발한 친환경 농자재인 생분해성 성분이 최대 95~100% 함유된 생분해성 육묘용 포트, 멀칭 비닐 바이오 플라스틱 필름은 벼 부산물로 제조된 토양 중에서 작물 생육과 더불어 자연스럽게 생분해 되는 친환경제품으로 토양 피복용 멀칭 비닐에 비해 인장력은 절반 정도지만, 필름의 강도는 3배 이상 강해 잘 찢어지지 않으며, 특히 폐비닐 처리비용 등 생산에서 폐기까지 모든 비용을 고려하면 일반 비닐대비 30% 이상의 예산 절감

효과가 있다고 한다. 일반 포장재 용도로서의 생분해성 바이오 플라스틱의 최근 개발 방향은 가격이 저렴하며 우수한 생분해성 전분을 다른 생분해성 고분자와 혼합하여 비용의 절감, 생분해도의 향상 등을 꾀하는 기술 및 전분과 PLA, 전분과 PCL, 전분과 diol/diacid계 aliphatic polyester 등의 혼합물 등 상대적으로 소수성인 생분해성 고분자와의 상용성 및 분산성의 개선을 위한 전분 변성 기술이 전체적인 전분계열 포장재의 핵심 기술이라 볼 수 있다. 특히 미생물 생성 PHB와 PCL의 배합은 PCL 단독보다 내열성이 있고 가공 물성도 좋아서 PHBV 공중합체를 만드는 것보다 간단히 생분해성 바이오 플라스틱을 얻을 수 있어 원가 절감의 이점이 있다. 최근 주목할 사실은 기존 PET와 물성이 동일한 바이오 기반 PET, 바이오 기반 PE의 경우 음료수병(bio-PET)과 비닐봉지(bio-PE)를 중심으로 최근 바이오 플라스틱 포장재 시장의 많은 부분을 차지하고 있다[15].

친환경 분해성 소재의 사용 분야 중 플라스틱 제품 사용 후 회수 재이용이 곤란한 분야인 식품 포장재의 경우 수거체계가 미흡하고, 음식물에 오염이 되어 있는 경우가 많고 수거비가 과다하게 소요되는 등 현실적으로 수거에 의한 재활용이 어려운 실정이다. 친환경 소재의 개발이 시급한 식품 포장재의 경우 생분해성 고분자 소재로서 수분 및 기체 차단성이 우수한 경우가 가장 바람직하나 고난이의 기술이 요구된다. 최근 신선한 식품에 대한 요구 증대로 고추장, 된장, 김치 등 발효식품 포장재의 경우 제품 중에 미생물이 살아 있는 경우가 많고, 유통기한이 길고 이산화탄소 등 가스 발생 우려가 있어 길기 때문에 적절한 포장재 분해기간 조절 및 포장재에 숨쉬는 기능을 부여하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 기체 차단성 포장용 바이오 플라스틱의 기술 동향 및 수준을 살펴보면 과거에는 기존에 많이 쓰이는 범용 플라스틱 소재를 혼합 혹은 복합재료로 제조하거나 다층형 필름 형태로 제작하여 기체 차단성을 향상시켰다. 일본 Kuraray사에서는 ethylene vinyl alcohol copolymer (EVOH)를 이용해 EVAL이라는 산소 차단성이 다른 어떠한 포장재보다 월등히 우수한 제품을 개발하였으며 현재 EVAL 등장 이후 EVOH의 산소차단성에 근접하면서 EVOH의 단점인 수분에 취약하다는 점을 보완하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 일본 Mitsubishi Gas Chemical사에서는 polyamide 계열인 Nylon-MXD6라는 물질을 개발하였는데 이는 Nylon6에 비해 우수한 기계적 성질뿐 아니라 이축 연신을 했을 시 EVOH에 상당히 근접한 산소 차단성을 가지면서 수분에 둔감해 다습한 환경에서는 EVOH를 능가하는 산소 차단성을 보인다. 일본촉매사는 PE, PP보다 강도가 우수하고 산소투과 방지성이 우수한 식품 포장용 지방족 폴리에스터인 polyethylene succinate (PES)를 상품명 Lunare SE로 개발하고 있으며 일본의 Kureha사는 차단성이 EVOH를 능가하는 고분자량 PGA (상품명 Kuredux) 개발에 성공하여 광범위한 식품포장재 용도로 시장 전개를 활발히 모색 중이다. 이러한 글리콜산계 차단성 수지 필름은 EVOH, polyacrylonitrile (PAN) 등 기존 차단성 필름을 대체할 수 있으며 또한 실리카, 알루미나 등 무기물 증착 투명 필름이 차지하고 있는 광학용 및 디스플레이용 필름 시장에 진출하는 것도 기대할 수 있다고 사료 된다. 최근 DuPont사는 지방족/방향족 폴리에스터 공중합체 copolymeric aliphatic polyester를 개발하여 Biomax라는 이름으로 상품화하였는데 투명하고, 인열 강도가 높으며 기체투과도가 낮으므로 식품포장재로서 유망하다. 고차단성 포장재의 시장 규모를 살펴보면 최근의 시장전망에 따르면 2014년 세계의 고차단성 포장 필름 소비량은 176만 톤(159억 달러) 규모이며, 2019년에는 224만 톤(200억 달러) 규모로 예측된다[16]. 현재 고부가 가치를 위하여 식품포장재에 고산소 차단성을 부여하기 위해서는 기술적으로 film, bottle 형태로 성형 후 추가 코팅 공정이 필요하다. 하지만 복잡한 추가 코팅 공정을 거친 후에도 EVOH, MXD-6 등 기존 고차단성수지는 흡습성이 있어 습도에 따라 차단성이 저하되는 치명적인 문제가 있으나 PGA 계열 바이오 플라스틱 필름은 흡습성이 없어 습도에 의해 기체 차단성이 영향을 받지 않는다는 장점으로 최근 주목 받고 있다. Figure 7에서 보여지는 것처럼 현재 바이오 플라스틱을 사용하여 다양한 포장소재 용도로 사용되고 있다[17](Figure 7).

Figure 7. Examples of bioplastics packaging materials.

4. 생분해성 일회용 위생용품

생분해성 바이오 플라스틱이 주로 포장재에 쓰이고 있으나 향후에는 분해성 일회용 기저귀, 일회용 생리대, 일회용 플라스틱 종묘화분 등의 응용이 주목되고 있다. 특히 기저귀를 비롯한 거의 대부분 일회성 제품은 사용 후 자연계에 버려져 분해되지 않고 환경을 오염시키고 있어 사회적으로 큰 문제가 되고 있어서 대책으로서 생분해성 제품이 시급히 요청되고 있는 실정이다. 일회용품 등의 사용금지 법안 발효시점인 2003년부터 국내 기업들도 정부의 방침에 따라 식품 포장재, 산업용 포장재, 면도기, 칫솔, 포크, 수저 등의 다양한 일회용 플라스틱 제품을 급속하게 바이오매스 소재로 대체하고 있어 생분해성 바이오 플라스틱 일회용 위생용품도 급속하게 성장이 예견되었다[18]. 이에 소비자의 욕구에 부합하는 새로운 개념인 우수한 기계적 물성 및 고투습성을 가질 뿐만 아니라 환경 친화적인 생분해성을 가진 초경량 통기성 필름 통기성 필름으로 제조된 일회용 위생용품이 출현하면 시장 전망은 매우 밝다고 예상된다. 통기성 필름은 필름 내부에 미세 pore가 존재하여 입자가 큰 물방울은 통과하지 않고 수증기만 통과하게 되는 특성을 가짐에 따라 생리대, 기저귀 및 하우스 랩 결로 방지용 건축자재와 같은 산업용 제품 등 다방면에 사용되고 있다. 현재 통기성 필름은 생리대용, 기저귀용 등 점차 그 용도가 확대되고 있는데 그 수요를 보면 2011년 국내 약 600억 원, 세계 약 3,600억 원의 큰 시장이며 용도로 보면 생리대용 55%, 기저귀용 35%, 기타 산업용 10%의 시장 점유율을 보이고 있는데 가격 경쟁력이 우수하면서도 소비자의 욕구에 부합하는 새로운 개념의 초경량 생분해성 제품의 개발이 주목받고 있다. 유아용 기저귀와 여성용 생리대 등의 위생제품은 요구 특성상 다른 분야보다도 일회용 제품의 개발이 활발히 진행되어 왔으며 특히 부직포 소재의 응용으로 제품 설계에 많은 변화가 있었다. 과거에는 기저귀, 생리대 등과 면과 같은 흡수성이 뛰어난 천연섬유가 이용되었으나 세탁의 불편함으로 개발한 가볍고 통기성이 뛰어난 부직포를 사용한 일회용 위생제품의 수요가 급증하고 있다. 개발 당시에는 단지 일회용이란 것으로 획기적인 것이었으나 현재는 일회

용 위생재가 보편화됨에 따라 착용시 더욱 향상된 쾌적성, 편리성, 흡수성, 환경친화성 등의 성능개선이 요구되어 지속적으로 연구개발이 진행되고 있다. 국내의 일회용 위생제품은 70년대 중반 여성용 위생재가 처음으로 출현한 후 계속적인 성장을 거듭하여 현재 여성용 위생재를 비롯하여 유아용 기저귀, 노인용 위생재 등이 급속하게 보급되고 있다.

유아용 기저귀의 경우 일회용 위생제품의 대부분을 차지하고 있으며 초기부터 상당한 개발이 진행되어 기저귀 외에도 배변 연습용 팬티(training pants)도 현재 세계적으로 시판되고 있다. 1942년 스웨덴에서 처음 개발된 일회용 기저귀는 일자형 흡수층과 방수커버 형태로 스칸디나비아, 이탈리아, 스웨덴 등의 유럽지역에서는 아직도 광범위하게 사용되고 있다. 미국에서는 1961년 P&G사가 Pamper를 상품화하였으며, 이는 흡수층과 방수층이 일체화되고 접착테이프가 달린 일회용 기저귀였으나 계속적인 P&G사의 연구로 1976년 고무밴드가 부착된 팬티형 기저귀를 발매하여 일회용 기저귀에 새로운 전환점을 마련하였고 그 후 다리 사이로 새는 것을 방지하기 위한 사이드개더와 허리밴드를 부착하여 착용감을 더욱 향상시킨 팬티형 기저귀를 개발하여 현재 널리 사용되고 있다. 또한 생활이 편리해짐에 따라 간편한 디자인이 요구되어 기존 제품보다 더욱 얇은 제품이 개발되어 1992년 미국의 KC사에서 기존 제품에 비해 제품 두께가 50% 정도 얇고 흡수력이 우수한 초박막 기저귀인 UltraTrim을 출시하였다. UltraTrim은 전통적으로 사용하는 스펀본드 부직포에 매우 부드러운 이중 적층의 열적 결합법을 사용했으며 다리 부분에 탄성재질을 사용하여 고정성을 더욱 개선한 제품이다.

여성용 위생제품은 유아용 기저귀와 함께 일반화된 위생용품으로 생리대, 팬티라이너, 템폰, 산모용 패드 등이 있으며 생리대도 사용 용도에 따라 다양한 종류의 제품이 생산되고 있다. 제1차 세계대전 당시 군대 간호원이 부상병 치료에 사용하던 혈액 처리용 위생거즈를 생리 시 사용했던 것을 착안하여 미국의 KC사가 최초의 일회용 생리대를 개발하여 시판하였다. 그 후 성능이 우수한 제품생산을 위해 커버스톡으로 사용되는 부직포나 흡수층의 흡수력 향상을 위한 계속된 연구개발의 결과로 현재 P&G사에서는 커버스톡으로 구멍이 뚫린 플라스틱 필름을 사용하고 고흡수성 고분자를 흡수층에 사용하여 아주 얇으면서도 흡수력은 뛰어난 초박형 제품까지 시판되어 일반화되고 있다[19].

세계 시장 규모를 살펴보면 가장 먼저 통기성 필름을 시장에 도입한 일본이 2007년 1,230억의 시장을 형성하고 있으며, 남미, 유럽시장이 점차 성장세에 있고 특히 가장 인구가 많은 중국의 약진이 기대된다. 국내 대표적인 통기성 필름 제조업체로서는 한진피앤씨를 비롯하여, 대명, 화승인더스트리, 대동 등 업체가 있으며 경쟁이 치열한 상태에 있는데 최근 이러한 치열한 경쟁 분위기를 돌파하는 수단으로서 경량화 및 원가절감, 친환경 제품을 동시에 확보될 수 있는 박막형 생분해성 통기성필름 개발에 몰두하고 있다. 가령 경량화 기저귀의 경우 착용감이 좋고 외출할 때 무겁지 않아야 하며 생리대용 경우가 착용감 측면에서 더욱 시급히 요청되고 있다. 또한 용도 특성상 사용 후 재활용되지 않고 폐기되므로 커다란 환경 부담을 초래하고 있다는 점을 비추어볼 때 소재의 경량화와 생분해성은 시급한 문제이다. 상기와 같은 소재의 경량화 욕구를 위해 필름의 박막화를 통해 이를 해결하고자 하고 있는데 박막화는 단위면적당 원가를 낮출 수 있다는 부수적인 효과도 있어 개발 열기가 가속되고 있다. 박막화를 위한 하나의 방법으로 연신비를 높이는 것을 고려할 수 있는데 단순히 연신비만 높이면 파단의 우려가 있으므로 PE계 수지의 formulation이 매우 중요하게 된다. 가령 통상 사용하고 있는 low density polyethylene 또는 linear low density polyethylene 대신에 high densisty polyethylen를 전부 또는 일부 첨가 사용하는 것도 시도되었으나 이 경우 수지의 물성은 향상되나 두께 한계를 극복하지 못하고 있어 획기적인 대안의 출현이 절실히 갈망되고 있다. 한편 치열한 경쟁 분위기를 돌파하는 또 하나의 수단으로서 생분해성 통기성 필름 개발도 시급히 진행되고 있는데 대표적인 방법으로서는 생분해성 지방족 폴리에스테르 등과 같은 열가소성 수지 및 무기충전제로 구성되는 조성물을 용융압출 성형한 원판 sheet를 연신하여 생분해성 열가소성 수지와 무기 충전제 사이에 미세한 다공을 형성케 함으로써 생분해성 통기성 필름을 얻는 방법이 최근 연구되고 있으나 생분해성 수지의 가격이 워낙 고가인 관계로 PE계 통기성 필름 대비 가격이 수배에 이르기 때문에 현재 상업적으로 거의 채택되지 못하고 있다. 전분, 목분 등과 같은 다소 값싼 생분해성 수지를 병행 사용하는 방법 등이 시도되고 있으나 현저한 기계적 물성의 저하로 만족할 만한 결과를 얻지 못하고 있어 획기적인 그 대안의 출현이 절실히 요청되고 있는 실정이다.

5. 건축용 생분해성 고분자

세계적으로 현재 탄소 저감을 위한 각종 정부정책과 방안을 모색하고 있는 상황에서 현재 우리나라도 토목 및 건설공사에 다양한 친환경 자재의 연구 개발이 모색 중인데 특히 국토교통부에서는 토목 및 건축 시설물의 탄소배출량 최소화를 위한 정책 및 연구를 진행 중에 있다. 환경부 통계자료에 의하면 국가 총 폐기물 발생량의 51%가 건설폐기물(2009년)이며 현재까지 지속적인 증가추세에 있는데 건설폐기물이 전체 폐기물 증가율 상승에 주도적인 역할을 하고 있는 실정이다. 1990년대 연간 1천 6백만 톤 발생하던 건설폐기물은 2008년 연간 약 6천 4백만 톤으로 5배 이상 증가하였으며 2010년도 폐기물 구성비는 생활폐기물 13.4%, 사업장배출 폐기물 37.8%, 건설폐기물 48.8%로서 건설폐기물이 가장 큰 비율을 차지하고 있는 실정이다. 현재 세계적으로 건설폐기물의 여러 해결책을 구축하여 추진 중에 있으나 아직은 건설 소재 분야에 있어서의 바이오 플라스틱 사용은 극히 미미한 수준이다. 하지만 건축 폐기물 해결 노력의 방안으로 토목 건설 자재인 단열재, 산간 바닷속 등의 회수 곤란한 토목 공사의 형틀, 토사 붕괴 방지재, 황무지 사막의 녹화용 네트, 공사용 등의 보수 시트, 식생매트 등의 분야에서 분해성 바이오 플라스틱 건설소재가 주목되고 있다[20]. 그러한 노력의 일환으로 건설재료분야에 적용 가능한 생분해성 바이오 플라스틱 건설자재로서 가능성이 높은 식생매트를 중심으로 성능평가방법 및 제조에서 분해단계까지 전과정평가를 통해 친환경성 평가를 위한 방법론을 구축하는 여러 연구가 시행 중이다. 하천 안정용 식생매트를 살펴보면 우리나라의 하천 호안 공사에는 대부분 콘크리트 블록이 사용되어 콘크리트 사용으로 인한 CO_2 배출량 증대 및 환경오염의 주원인이 되었는데 네덜란드에서 사용되던 앵커매트를 도입하기 시작한 후 국내에서 식생매트가 사용되기 시작하였다. 식생매트는 하천 호안, 도로 비탈의 녹화 및 토사유출방지, 침식방지 기능을 하며 식생의 보강으로 토양을 안정화시키고 식생기반을 조성하는 것으로 이러한 식생매트는 하천, 제방, 유속이 빠른 중소하천, 호안가, 저수지 및 산사태 복구지역 도로의 연약지반 등 비탈 녹화를 통하여 일차적으로 침식방지와 토사유출 방지 및 홍수 발생시 제방의 비탈을 보호하는 기능을 가지며 이차적으로 신속하게 자연 친화적으로 녹화하여 환경 복원기능을 가진다. 하지만 기존의 인공 및 천연재료 식생매트를 가지고 사면녹화를 진행하여 식생의 안정적인 정착을 유도하였으나 산사태나 강우량 증가로 인한 하천의 빠른 유속

변화로 식생매트가 조기에 탈착이 되는 경우가 다반사로 발생한다. 기존의 식생매트의 경우 인공 및 천연소재로 구성된 네트는 식생이 정착한 후에도 장기간 잔류하게 되어 급변하는 환경변화에 식생의 활착으로 인한 토양 유실방지효과가 떨어질 수 있다. 현재 이러한 부분을 극복하기 위하여 건설재료로 사용 가능한 생분해성 바이오 플라스틱 소재를 활용하여 기존 식생매트의 단점을 보완하여 일정기간 식생 정착기간 동안 안정적으로 식생 활착이 가능하도록 시간제어가 가능한 생분해성 바이오 플라스틱 소재로 식생매트를 제작함과 동시에 블록 및 말뚝과 같은 자재를 추가적으로 제작하여 복합형 식생매트를 통한 친환경적 식생녹화에 주목하고 있다.

6. 결 론

바이오 플라스틱산업은 기존의 플라스틱제품이 지니고 있는 환경오염에 대한 사회적 비용을 감소시키며 신소재의 개발이라는 차원에서 미래지향적 산업이라 할 수 있다. 환경 친화적이고 무해한 바이오 플라스틱의 실용화 및 의무화의 압력이 거세지면서 각국의 정부 산하 연구기관, 학계 그리고 산업계에서 바이오 플라스틱의 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 바이오 플라스틱 수요의 대부분은 서유럽, 북미, 선진국이 차지하고 있으며 경제규모에 비해 상대적으로 선진화가 늦은 것으로 인식되고 있는 중국도 세계시장 점유율이 7.8%에 이르고 있다. 하지만 우리 정부의 지속적인 녹색성장 정책, 친환경 소재 개발 등의 활성화로 국내 기술 수준은 해외에 뒤처지지 않은 것으로 분석되고 있으나 원천기술에 대한 해외 의존도가 상대적으로 높고 세계 10위권의 경제대국인 우리나라의 수요는 4,000톤 수준으로 세계시장의 겨우 2%만을 점유하고 있는 상태이다. 현재 바이오 플라스틱은 플라스틱의 대체재로서 주목을 받고 있으나 적절한 석유기반 플라스틱 대비 가격 경쟁력 확보, 내열성, 가공성, 내구성 등 제품의 물성 개선, 실용적인 가공 기술의 확보, 표준화 및 규격기준 제정 미비, 일례로 bio-PET의 원료인 TPA를 바이오매스에서 제조한 회사는 없다는 점 등 아직 해결할 과제가 많이 남아 있는 실정이다. 국내 석유 소비량의 100%를 수입에 의존하는 국내 실정에 비추어 다각적인 학계 산업계의 노력으로 해외 기술과 기술격차를 빠른 시일 내에 줄이면서 국내에서도 바이오매스 기반 바이오 플라스틱의 다양한 시장 창출이 필요하다고 사려된다.

References

1. A. Iles and A. N. Martin, Expanding bioplastics production: Sustainable business innovation in the chemical industry, *J. Clean. Prod.*, **45**, 38-49 (2013).
2. A. L. Andrady, Assessment of environmental biodegradation of synthetic polymers, *Polym. Rev.*, **34**, 25-76 (1994).
3. Korea Biomaterial Packaging Association, http://biopack.or.kr.
4. Europa Bioplastics, Production capacity, http://en.european-bioplastics.org.
5. R. L. Reddy, V. S. Reddy, and G. Anusha, Study of bio-plastics as green & sustainable alternative to plastics, *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, **3**, 82-89 (2013).
6. J. Yu and L. Chen, The greenhouse gas emissions and fossil energy requirement of bioplastics from cradle to gate of a biomass refinery, *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 6961-6966 (2008).
7. P. J. Hocking, The classification, preparation, and utility of degradable polymers, *J. Macromol. Sci. Polym. Rev.*, **32**, 35-54 (1992).
8. M. F. Koening and S. J. Huang, Biodegradable blends and composites of polycarprolactone and starch derivatives, *Polymer*, **36**, 1877-1882 (1995).
9. A. P. Gupta and V. Kumar, New emerging trends in synthetic biodegradable polymers, *Eur. Polym. J.*, **43**, 4053-4074 (2007).
10. D. K. Gilding and A. M. Reed, Biodegradable polymers for use in surgery poly(glycolicacid)/poly(lacticacid) homo and copolymers, *Polymer*, **20**, 1459-1464 (1979).
11. G. Q. Chen, A microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) bio-based materials industry, *Chem. Soc. Rev.*, **38**, 2434-2446 (2009).
12. K. D. Snell and O. P. Peoples, PHA bioplastic: A value added coproduct for biomass biorefineries. *Biofuels Bioprod. Biorefin.*, **3**, 456-467 (2009).
13. Europa Bioplastics, Bioplastics at a glance, http://en.european-bioplastics.org.
14. J. C. Philp, R. J. Ritchie, and K. Guy, Biobased plastics in a bioeconomy, *Trends Biotechnol.*, **31**, 65-67 (2013).
15. A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed, and S. Ahmed, Biological degradation of plastics: a comprehensive review, *Biotechnol. Adv.*, **26**, 246-265 (2008).
16. N. H. Park, D. H. Kim, B. Park, E. S. Jeong, and J. W. Lee, The industry trend analysis and perspectives of biodegradable polymers, *Biomater. Res.*, **17**, 114-120 (2013).
17. N. Peelman, P. Ragaert, B. de Meulenaer, D. Adons, R. Peeters, and L. Cardon, Application of bioplastics for food packaging, *Trends Food Sci. Technol.*, **32**, 128-141 (2013).
18. J. Sarasa, J. M. Gracia, and C. Javierre, Study of the bio disintegration of a bioplastic material waste, *Bioresour. Technol.*, **100**, 3764-3768 (2009).
19. Diapers market - Global industry analysis, market size, share, growth and forecast, Transparency Market Research, 2011-2017 (2012).
20. P. F. Harmsen, M. M. Hackmann, and H. L. Bos, Green building blocks for bio-based plastics, *Biofuels Bioprod. Biorefin.*, **8**, 306-324 (2014).