

플라스틱 순환경제를 위한 바이오매스 기반 바이오플라스틱 기술개발 및 산업동향



이중복
 홍익대학교
 바이오화학공학과
 조교수



박경문
 홍익대학교
 바이오화학공학과
 교수

1. 서론

플라스틱의 생산량이 철강의 생산량을 넘어선 1980년대 이후 플라스틱은 일상생활에 쓰이지 않는 곳이 없을 정도로 우리 삶 깊숙이 침투하였고, 우리는 현재 플라스틱 시대에 살고 있다고 해도 과언이 아니다. 플라스틱은 투명하고, 가볍고, 저렴하고, 가공이 쉬우며, 썩지 않는 특성 및 우수한 기계 강도 등 무수한 장점으로 인해 다양한 생활용품부터 첨단 미래기술을 위한 소재로 활용되고 있다. 하지만 플라스틱은 우리 삶의 질을 한층 높여준 위대한 발명품인 동시에 플라스틱의 과도한 사용으로 인한 환경오염 문제를 초래하는 등 우리 삶을 위협하는 존재로 탈바꿈하고 있다. 플라스틱의 생산량은 1950년 약 150만톤에서 2021년 약 3억 9천만 톤으로 약 260배 증가하였고,¹ 2019년 기준 전 세계 플라스틱 폐기물 중 절반 가까이에 해당하는 약 46%는 매립, 약 17%는 소각, 약 22%는 자연환경으로 버려져 플라스틱의 재활용 비율은 약 15%에 그친다.² 1950년부터 2015년까지 생산된 플라스틱 (총 83억톤) 의 78%인 63억톤이 폐기물로 발생하였고, 그 중 57억톤이 매립되거나 소각되었고 약 9% (6억톤)만이 재활용되었다. 이 추세가 이어질 경우 2050년까지 120억톤의 플라스틱 쓰레기가 매립되거나 버려질 것이라는 보고가 있을 만큼 플라스틱 폐기

물에 의한 환경오염은 매년 감당하기 어려울 만큼 가파르게 증가하고 있다.³ 더욱이 2차 이상의 재활용으로 활용되는 양은 1억톤에 지나지 않아 대부분의 재활용 플라스틱도 1차 활용 이후 버려지거나 소각된다. 또한, 현재 우리가 일상생활에서 사용하는 플라스틱 대부분은 석유화학계 플라스틱으로 플라스틱의 생산, 소비 및 폐기 과정에서 발생하는 메테인 및 이산화탄소 등 온실가스 배출량이 기후변화에 큰 영향을 미치고 있으며, 플라스틱 원료 및 제품의 생산, 수·출입, 폐기물의 소각 등 전주기 평가를 통해 추산된 온실가스 배출량은 석탄화력발전소에서 배출하는 온실가스 배출량을 10년 내 추월할 것으로 본다.⁴

이와 같은 석유화학계 플라스틱이 가진 두 가지 문제점인 1) 폐기물 처리의 어려움과 2) 탄소 배출량의 증가를 해결하고 지속 가능한 사회를 구축하기 위한 대안으로 떠오른 것이 바로 바이오플라스틱이다. 본 총설에서는 바이오매스 기반 바이오플라스틱의 국내외 기술개발 및 산업동향에 대해 살펴보고자 한다.

2. 바이오매스 기반 바이오플라스틱

바이오플라스틱은 크게 원료의 유래 및 생분해 여부를 기준으로 옥수수나 사탕수수 등과 같이 식물에서 유래한 원료를 사용한 바이오매스 기반 플라스틱과 미생물에 의해 퇴비화가 될 수 있는 생분해성 플라스틱, 두 가지로 나눌 수 있다. 참고로 바이오매스 기반 플라스틱은 생분해가 될 수도 있고 되지 않을 수도 있으며, 생분해성 플라스틱은 석유화학 원료를 사용하여 만들 수도 있다.

표1. 바이오플라스틱의 분류⁵

	바이오매스 기반 난분해성 바이오플라스틱	바이오매스 기반 생분해성 바이오플라스틱	석유화학계 생분해성 바이오플라스틱
원료	옥수수, 사탕수수, 전분	옥수수, 사탕수수, 전분, 미생물	나프타
바이오매스 비중	20~25% 이상	50~70% 이상	-
제품	Bio-PE, Bio-PET, Bio-PVC, Bio-PA 등	PLA, PHA, PBS, PBAT, PGA 등	
장점	기계적 물성 우수, 탄소배출량 저감	탄소배출량 저감, 폐기물문제 해결가능	저렴한 원료, 폐기물문제 해결가능
단점	폐기물 문제 상존	비싼 제품가격, 기계적 물성 미흡	탄소배출량 저감 미미, 기계적 물성 미흡

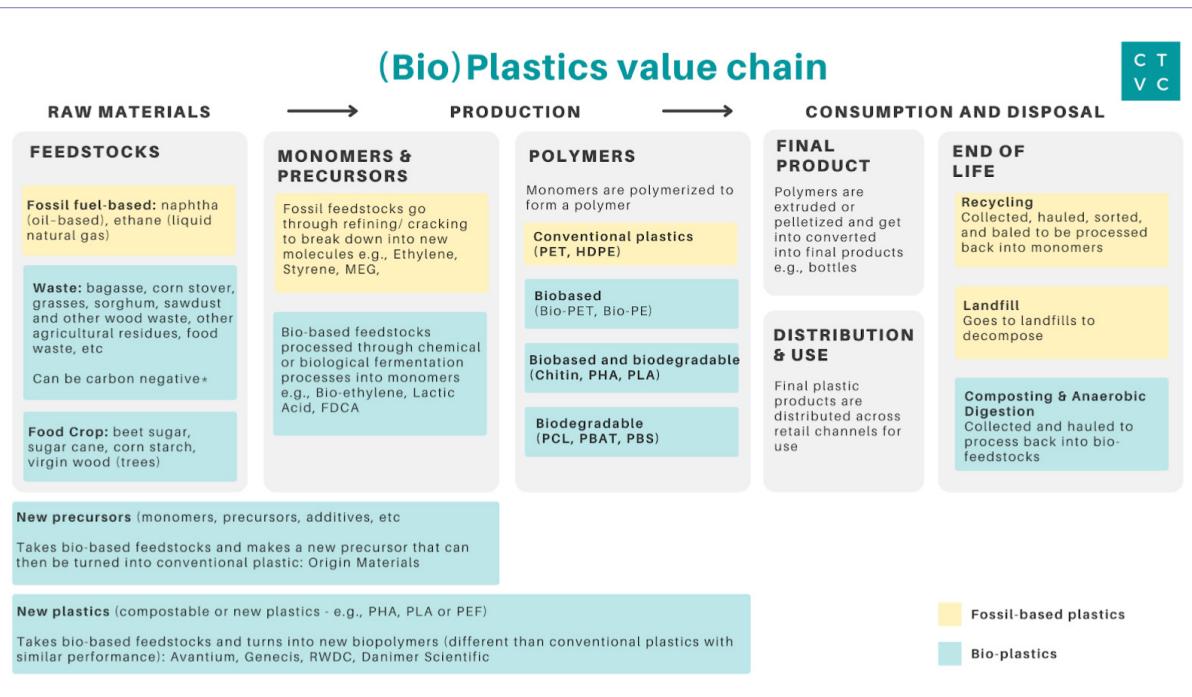


그림 1. 석유화학계 플라스틱 및 바이오플라스틱의 전주기 밸류 체인⁶

바이오매스 기반 바이오플라스틱은 우리 정부의 2050년 탄소중립 실현을 위한 온실가스의 감축 및 친환경 플라스틱 생태계를 구축하기 위한 필수 소재로 산업자원통상부는 바이오플라스틱의 개발 및 상용화를 통해 국내 석유화학산업의 이산화탄소 배출량에서 10.8% 저감을 목표로 하여 최대 1조 1,000억 원 수준의 환경비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 바이오매스 단량체 기반의 바이오플라스틱은 석유화학계 플라스틱 대비 약 30~70%의 탄소 배출 저감 및 약 42%의 탄소 발자국 저감효과를 보이며, 생산 시 석유화학계 플라스틱 대비 약 65%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다.⁷ 더욱이, 플라스틱의 환경 위협이 글로벌 이슈로 대두되면서 각국이 플라스틱 제품 사용 금지 정책을 강화함에 따라 2022년 115억달러 규모의 바이오플라스틱 시장은 연평균 18.9%로 성장해 2027년 273억달러 규모로 확대될 것으로 전망한다.⁸ 이와 같은 추세에 발맞춰 미국, 일본을 비롯한 유럽 등 글로벌 선도기업들 (NatureWorks, BASF, Novamont, Braskem, Mitsubishi Chemical Group, SULPA 등)은 바이오플라스틱을 위한 바이오매스 기반 단량체부터 바이오플라스틱 소재, 생산 공정 및 제품 개발에 박차를 가하고 있으며, 이와 동시에 바이오플라스틱 폐기물에 의한 환경 오염 및 재활용을 위한 자원 순환기술도 개발하고 있다. 국내 기업들 또한 대기업을 중심으로 바이오플라스틱 기술 개발 연구에 투자하며 바이오화학산업 육성에

힘써왔으나, 바이오매스를 활용한 단량체 생산 기술 등 상업화는 부진한 상황이며 대부분의 원료 소재를 수입에 의존하고 있어 국내 자립화가 어려운 상황이다.

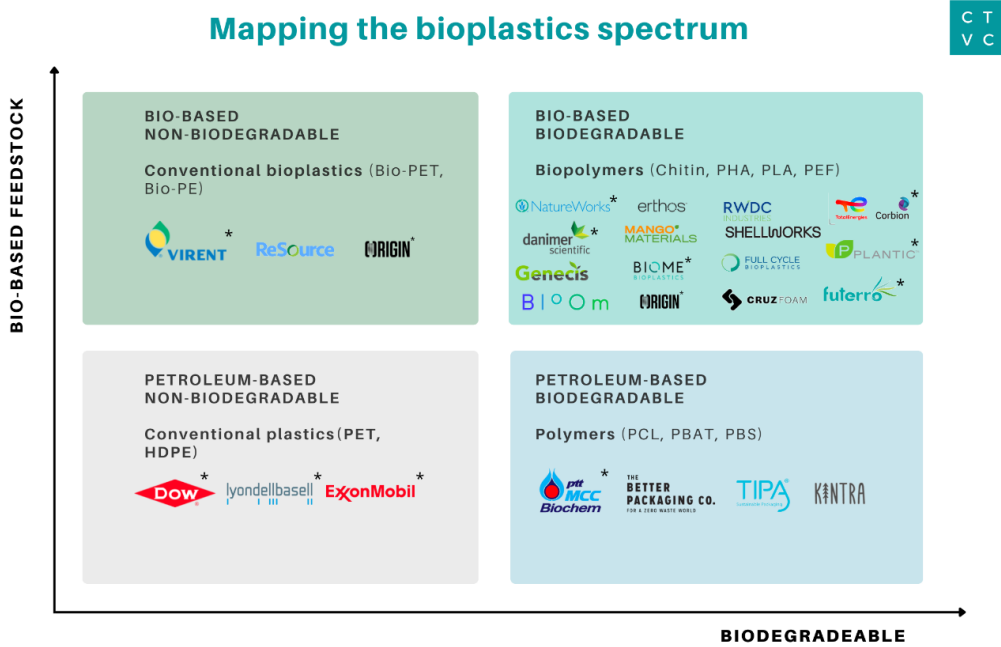


그림 2. 바이오플라스틱 주요 생산제품별 글로벌 선도그룹⁶

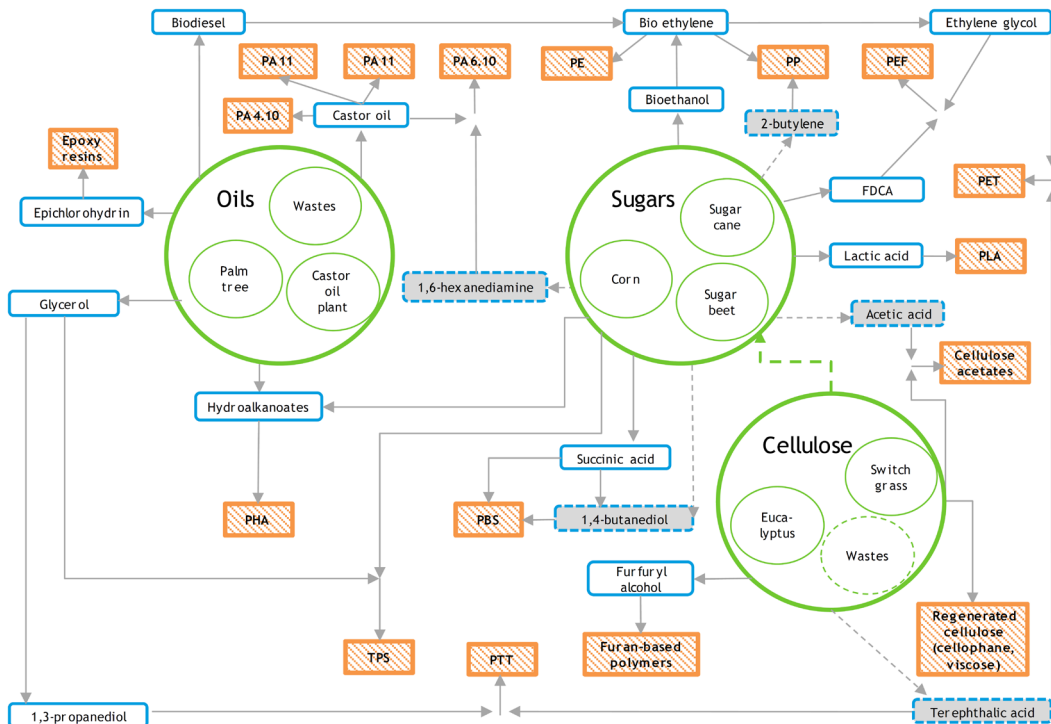


그림 3. 바이오플라스틱 생산을 위한 중간체 및 바이오매스 원료⁹

이로 인해 원료 개발을 위한 바이오매스 기반 단량체 생산 기술 및 바이오플라스틱 합성기술 개발보다는 바이오플라스틱을 수입하여 외국에 비해 상대적으로 우위에 있는 수지 가공 및 성형 기술을 활용하여 상용화 제품 개발 기술에만 집중하는 현상을 보여 산업 혁신 생태계 구축에 한계가 있다.

3. 바이오매스 기반 난분해성 플라스틱

바이오매스 기반 난분해성 플라스틱 (혹은 바이오베이스 플라스틱)은 기존 석유화학계 플라스틱 단량체의 약 20~25%를 바이오매스 유래 동일 단량체로 대체하여 생산하는 범용 플라스틱을 말하며, 일반적으로 기존 석유화학계 플라스틱 앞에 Bio를 붙여 명명하곤 한다 (ex. Bio-PE, Bio-PET 등). 사탕수수나 같은 식물 유래 단량체를 사용함으로써 플라스틱 생산 시 이산화탄소 저감효과를 보인다. 예를 들면, 바이오매스 기반 난분해성 플라스틱은 생분해성에 초점을 두고 제품을 생산하는 것이 아니므로 플라스틱 폐기물 문제를 해결할 수 있는 대안은 아니나 폴리올레핀 (PE) 최대 생산 업체인 Braskem (Brazil)은 사탕수수로부터 전환된 에틸렌을 단량체로 사용하여 Bio-PE 생산 시 Bio-PE 1톤당 약 3.09톤의 이산화탄소를 공기 중에서 제거할 수 있다고 보고하였다.¹⁰ 특히 바이오매스 기반 난분해성 플라스틱은 바이오매스 유래 동일 단량체를 일정량 사용하여 기존의 석유화학계 플라스틱과 동일한 플라스틱을 생산하는 것으로 기존 석유화학계 플라스틱의 장점 (우수한 기계적 강도, 투명성 등)을 유지하며 친환경적으로 플라스틱을 생산할 수 있다는 이점이 있다. 따라서, 기존 범용 플라스틱을 즉각 대체할 수 있으며 일반 플라스틱과 함께 분리배출이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 바이오매스 기반 난분해성 바이오플라스틱은 국내보다는 글로벌 선도그룹의 점유율이 독보적으로 높으나 최근 LG화학과 한화솔루션 등 국내 대기업에서도 개발에 뛰어들었다. 바이오매스 기반 난분해성 플라스틱에서 유의미한 점유율을 보이는 제품은 크게 Bio-PE, Bio-PET, Bio-PTT, Bio-PA, Bio-PP 5가지가 있다.

1) Bio-PE (Biopolyethylene) & bio-pp (biopolypropylene)

폴리에틸렌 (PE)과 폴리프로필렌 (PP)은 석유화학계 플라스틱 중 가장 많은 생산량을 갖는 플라스틱으로 포장, 각종 필름 및 용기 등으로 사용된다. 따라서 Bio-PE 혹은 Bio-PP의 바이오매스 함유량을 높이면 나프타 기반 에틸렌과 프로필렌의 절대적 사용량을 줄일 수 있다. Bio-PE를 생산하기 위한 단량체인 바이오 에틸렌은 옥수수나 사탕수수의 발효를 통해 바이오 에탄올로 전환한 후 바이오 에탄

올의 탈수 과정을 통해 생산된다. 옥수수과 사탕수수는 성장 과정에서 대기 중의 이산화탄소를 흡수하게 되고 이는 발효를 통해 바이오 에탄올로 고정되는 과정으로 이산화탄소를 제거하게 된다. PE는 가장 단순한 구조를 갖는 고분자임과 동시에 가장 많이 사용되는 플라스틱으로 바이오매스 기반 난분해성 플라스틱 중에서도 높은 시장 점유율을 차지한다. 바이오 에탄올은 바이오 에틸렌을 생산하기 위한 전구체인 동시에 바이오 프로필렌을 생산하는 전구체이다. 바이오 에탄올을 바이오 에틸렌으로 전환하는 기술은 현재 상업화되었지만, 바이오 에탄올을 바이오 프로필렌으로 전환하는 기술은 기술적 장벽이 높아 아직 상업화 초기 단계에 머물러 있으며, Bio-PP 시장은 바이오매스 기반 난분해성 바이오플라스틱 중에서 2020년 기준 약 3%의 점유율만을 차지하고 있을 만큼 미미한 편이다. 하지만, PP의 상업적 이용가치 및 시장 점유율을 고려하면 가장 높은 성장세를 보여줄 것으로 예상된다. 이에 LG 화학은 미국의 지보 (Gevo)와 공동연구개발 (JDA)을 체결하여 2026년까지 바이오 프로필렌 상업화를 목표로 하고 있다.¹¹ 또한, 바이오 에틸렌은 bio-PVC의 원료로 사용될 수 있는데 LG 화학과 한화솔루션은 bio-PVC 상업화를 위한 투자를 확대하고 있다.¹²

2) Bio-PET (Biopolyethylene terephthalate) & Bio-PTT (biopolytrimethylene terephthalate)

PET는 TPA (terephthalic acid)와 MEG (monoethylene glycol)가 에스터 결합으로 연결된 플라스틱으로 기계적 강도 및 투명도 등 우수한 특성으로 인해 우리가 일상생활에서 가장 흔히 사용하는 플라스틱 중 하나이다. PET는 폴리에스터의 한 종류임에도 불구하고 반결정성 특성 및 방향족 단량체로 인한 극히 낮은 가수분해성으로 인해 미생물에 의한 분해 저항을 가져 난분해성 플라스틱으로 분류한다 (참고로 화학적 분해 기술은 상용화가 이뤄졌다). PET는 비닐계열 플라스틱과는 다르게 두 개의 단량체를 사용하여 생산되며, bio-PET는 앞서 설명한 bio-PE 혹은 bio-PP와는 다르게 MEG만 바이오매스 유래 단량체인 bio-MEG로 대체하여 합성하는 것이 일반적이며, 가장 대표적인 예가 코카콜라의 친환경 PET병인 ‘플랜트 보틀’ (Plantbottle™)이다. 이는 기존 PET 수지의 30%를 사탕수수로부터 유래된 bio-MEG를 사용하여 생산하였다. 참고로 PET의 MEG를 bio-MEG로 전부 대체하였을 때 바이오매스 함유량이 약 30% 정도가 된다. Bio-PET 생산에 있어 bio-MEG만 바이오매스 원료를 사용하는 이유는 TPA를 바이오매스로 전환하는 기술적 장벽이 크기 때문이다. TPA는 화학적으로 나프타 크래킹 과정을 거쳐 얻어진 파라자일렌(pX)의 산화과정을 거쳐 합성할 수 있는 방향족 물

질이다. 하지만 생체축매 시스템을 활용하여 바이오매스로부터 TPA를 생산하는 것은 기술적으로 매우 어렵다. 이와 같은 기술적 장벽을 극복하기 위해 글로벌 기업들은 여러 바이오매스 출발 물질 (이소부탄을 (Gevo), 리그노셀룰로오스 (Anellotech) 등)로부터 화학적 반응을 통해 pX을 합성하였고, 이는 추가적인 화학적 전환 혹은 생체축매 시스템을 통해 bio-TPA로 전환될 수 있다. 2020년 코카콜라는 이와 같은 방법으로 생산한 bio-TPA와 bio-MEG를 사용하여 바이오매스 함유량이 100%인 PET병을 선보인 바가 있다. PTT는 PET의 유사체로 MEG 대신 탄소 한 개가 늘어난 1,3-PDO (1,3-propanediol)를 사용하여 만든다. PTT는 PET와 PBT (polybutylene terephthalate) 대비 성공적이지 못한 고분자였지만, 최근 들어 PTT 섬유가 PET 섬유 대비 얼룩 저항이 우수하고 부드러운 특성이 있어 카페트나 신축성 의류에 적용되고 있다. 참고로, PTT는 분자 내 1,3-PDO가 약 35 wt%를 차지하고 있어 bio-PDO를 사용하면 바이오매스 함량이 약 35%인 bio-PTT를 생산할 수 있다. 바이오매스 기반 폴리에스터 계열 플라스틱에는 bio-PET와 bio-PTT 외에도 bio-PBT와 bio-PEF를 예로 들 수 있다. Bio-PEF는 100% 바이오매스 기반 플라스틱으로 bio-MEG와 FDCA (2,5-furandicarboxylic acid)를 사용하여 합성할 수 있는데, FDCA는 100% 바이오매스를 통해 합성할 수 있어 친환경 물질로 분류된다. 특히, PEF는 뛰어난 가스 투과 차단 특성으로 인해 음료 포장재로써 PET보다 우수한 면이 있어 FDCA는 TPA를 대체할 수 있는 바이오매스 유래 유망물질로 거론되고 있다. 하지만, 현재까지는 FDCA의 높은 가격으로 인해 PEF의 생산량은 미미한 수준이다. Bio-PET 및 bio-PTT 시장은 다른 바이오매스 기반 플라스틱과는 다르게 성장률이 주춤하거나 역성장 세에 돌입할 것으로 예측하고 있다. 이는 전 세계적인 일회용 플라스틱 사용규제로 인해 사용 기간이 짧은 PET와 같은 강성포장재 분야가 생분해성 포장재로 대체될 것이라는 판단 때문이다. 국내에서는 PET 생산 1위 기업인 롯데케미칼이 약 1만톤 이상의 bio-PET를 생산하고 있으며 2030년 7만톤 이상으로 확대할 계획을 갖고 있다.¹³

3) Bio-PA (Biopolyamide)

PA (Polyamide)는 탄력성 및 내마모성이 우수하고 낮은 마찰계수 및 높은 충격강도 등 기계적 특성이 매우 우수한 대표적인 엔지니어링 플라스틱으로 나일론이라는 이름으로 우리에게 더욱 친숙한 소재이며 자동차 부품 및 건축자재로 많이 사용되고 있다. 이는 방향족 단량체를 사용하였을 시 뛰어난 내열성 및 인장강도로 인해 내열 소재 및 방탄 소재로 사용된다. PA는 아마이드 결합으로 연결된 고분자로 PA를 합성하는 방법은 사용하는 단량체를 기준으로 크게 3가지로

구분할 수 있다. 각각의 반응에 사용하는 단량체는 아미노산, 다이카르복실산-다이아민, 락탐을 이용하여 비슷하거나 동일한 폴리아마이드를 합성할 수 있다. 그 중에서도 아미노산을 이용하여 합성할 수 있는 특징을 갖고 있어 bio-PA는 다른 바이오매스 기반 플라스틱 대비 역사가 오래됐다. PA 11 (Nylon 11, Rilsan™)은 1940년대 개발 당시에도 이미 피마자유 (castor oil)를 출발물질로 사용하여 11-aminoundecanoic acid라는 탄소 11개를 포함한 아미노산을 합성하고 이의 축합중합을 통해 개발되었고 1955년에 상업화에 성공하였다. 이름에서 알 수 있듯이 PA는 아마이드 사이에 존재하는 탄소의 개수로 명명되며 PA의 특성은 탄소의 개수, 구조 및 분자 간 수소결합 등에 영향을 받는다. PA는 앞서 언급한 바이오매스 기반 난분해성 플라스틱과는 다르게 특정 고분자만을 지칭하는 소재가 아니라 아마이드 결합을 고분자 모체에 포함하는 고분자의 통칭이다. 따라서, bio-PA는 다양한 자연 유래 아미노산으로부터 합성할 수 있어 바이오매스 단량체 생산에 이점이 있으며, 분자 내 아마이드 그룹의 비율이 높아지면 녹는점, 흡수성 및 강성이 증가하는 특성이 있어 기존의 플라스틱을 친환경적으로 생산하는 것만이 아닌 다양한 단량체로부터 새로운 특성이 부여된 신소재 개발 또한 가능하여 앞으로의 성장성이 기대되는 소재이다. 또한, 지방족 PA는 통상 흡수성 특성을 가져 면과 비슷한 특성을 구현할 수 있는 유망소재이며 분자 내 구조에 따라 생분해성 PA의 개발도 가능하다. 국내에서는 대상이 라이신으로부터 Bio-PA 단량체인 cadaverine을 생산 기술을 개발하여 2023년 6월 시범 생산에 성공한 바 있다.

4. 바이오매스 기반 생분해성 플라스틱

생분해성 플라스틱은 특정 퇴비화 조건에서 자연계에 존재하는 미생물에 의해 36주 이내에 셀룰로오스 대비 90% 이상 분해되어 물과 이산화탄소로 분해되는 플라스틱을 말한다. 미생물에 의한 플라스틱의 생분해는 일반적으로 에스테르 결합의 분해를 통해 일어나게 되므로 생분해성 플라스틱은 에스테르 결합이 포함된 고분자인 지방족 폴리에스테르가 대부분을 차지한다. 생분해성 플라스틱을 합성하는 방법은 크게 2가지로 분류할 수 있는데 1) 석유화학계 원료를 사용하여 합성하는 석유화학계 기반 생분해성 플라스틱과 2) 바이오매스를 활용한 바이오매스 기반 생분해성 플라스틱으로 나뉜다. 바이오매스 기반 생분해성 플라스틱은 다시 바이오매스 유래 단량체를 사용하여 합성하는 방법 (바이오매스 함유량 50% 이상)과 미생물이 양분의 저장형태 및 배설물의 형태로 고분자를 생산하는 방법으로 나눌 수 있다. 바이오매스 기반 생분해성 플라스틱은 바이오매스를 원료로 사

용함으로써 석유화학 산업 및 플라스틱 산업에서의 탄소 배출 저감에 크게 기여할 것으로 판단하며 동시에 기존 난분해성 플라스틱이 자연에 의해 분해되지 않아 발생하는 환경오염 문제를 줄일 수 있는 친환경 플라스틱으로 주목받고 있다. 하지만 생분해성 플라스틱 또한 플라스틱 문제를 완벽하게 해결할 수 있는 대안이 되기는 어렵다. 예를 들면, 지방족 폴리에스테르가 대부분인 생분해성 플라스틱이 광범위한 응용 분야 각각에 맞는 특성을 만족시키는 것은 거의 불가능에 가깝다. 또한, 플라스틱의 썩지 않는 특성은 현재 우리 환경에 위협으로 다가오고 있으나, 플라스틱을 분해될 수 있게 만든다는 것은 산업적인 관점에서 플라스틱의 가장 큰 장점을 버리는 것과 같다. 일반적으로 생분해성 플라스틱은 대체하고자 하는 기존 석유화학계 플라스틱 대비 기계적 특성이 미흡하며 투명도가 부족하여 응용 분야가 제한된다. 또한, 국내에선 생분해성 플라스틱의 분리배출 체계 미확립 및 전문 퇴비화 시설의 부재로 인해 대부분 생분해가 아닌 소각되는 상황으로 생분해성 플라스틱이 갖는 환경친화적 특성을 온전히 이용하기 어려운 상황이다. 따라서, 이러한 기술적 장벽을 극복하고 환경친화적인 플라스틱을 개발하기 위해 글로벌 선도기업을 중심으로 장기간 연구개발이 진행되었고, 이는 현재 시장에서의 높은 경쟁력으로 연결되고 있다. 국내에서 바이오매스 기반 생분해성 플라스틱 분야는 바이오매스 기반 난분해성 플라스틱보다는 활발한 투자 및 연구개발이 이뤄지고 있으며 대기업 (LG화학, 대상, SKC, CJ제일제당, 롯데케미칼 등)을 중심으로 바이오매스 기반 생분해성 바이오플라스틱 원료 생산부터 합작사를 통한 소재 생산을 추진 중이다.⁵ 바이오매스 기반 생분해성 플라스틱에서 점유율 및 성장성을 고려하면 가장 대표적인 소재는 PLA, PBAT, PBS 및 PHA가 있다.

1) PLA (Polylactic acid)

PLA는 옥수수나 사탕수수의 발효로부터 얻어진 젖산 (lactic acid)을 단량체로 활용하여 생산하는 플라스틱으로 바이오플라스틱 시장에서 가장 높은 시장 점유율을 차지하고 있으며 단일 제품 기준으로 가장 큰 시장규모를 보유하고 있어 가격경쟁력이 우수하다. PLA는 우수한 투명성 및 열 가공성으로 인해 다양한 방식의 가공이 가능하여 응용 분야가 꽤 다양한 편에 속한다. 특히, 최근 들어 3D 프린팅의 필라멘트로 석유화학계 ABS 소재 다음으로 많이 사용되고 있다. 하지만 PLA는 60~65°C의 낮은 유리전이온도로 인해 소재의 사용온도가 다소 제한적이며, 유리전이온도 이하의 온도에서는 취성이 높아 쉽게 깨지는 단점이 있다. 또한, PLA는 자연환경 (토양 및 해양)에서 분해가 느려 수년 후에도 분해가 되지 않

는다는 보고가 있다.¹⁴ LG화학은 기존 PLA 대비 유연성을 20배 이상 개선하면서 투명성을 유지할 수 있는 PLA 기반 공중합체인 PLH (polylactate hydracrylate) 소재를 개발하여 2025년 양산을 목표로 하고 있다. PLA 시장은 미국 최대 곡물 업체인 Cargill과 태국의 석유화학 업체인 PTTGC의 JV인 NatureWorks가 약 38%를 점유하고 있으며 프랑스 석유회사인 Total과 네덜란드 바이오화학업체인 Corbion의 JV인 Total Corbion이 18%를 점유하고 있어 세계 1,2위 그룹이 PLA 시장의 56%를 점유하고 있다.⁵ 이처럼 글로벌 선도기업들은 바이오매스의 원료 확보 및 소재 생산 개발의 효율성을 높이기 위해 글로벌 합작법인을 설립하여 원료 공급부터 제품생산까지 망라하는 통합 시스템 구축이 활발한 상황이다. 하지만 국내에선 LG화학만이 PLA 생산 계획이 있으며, SKC에선 PLA 필름을 제조하여 판매하고 있지만 PLA 소재는 수입하여 사용하고 있다. PLA는 빠른 상용화 속도로 인한 높은 가격경쟁력 및 다양한 응용 분야로 인해 시장규모는 2020년 39.5만톤에서 2025년 56.0만톤으로 빠른 성장을 보일 것으로 전망한다.⁵

2) PBAT (Polybutylene adipate terephthalate)

PBAT는 PBT와 PBA (polybutylene adipate)의 불규칙 공중합체로 PBAT 합성을 위해선 1,4-BDO (1,4-butanediol), AA (adipic acid) 및 TPA 총 3개의 단량체가 필요하다. 따라서, 100% 바이오매스 기반 PBAT의 생산을 위해선 모든 단량체를 바이오매스로부터 전환해야 하므로 기술적 장벽 및 생산비용이 높다는 단점이 있다. 이로 인해 현재 생산되는 대부분의 PBAT는 석유화학계 원료를 사용한다. 하지만, 상대적으로 기술적 난이도가 낮은 1,4-BDO와 AA를 바이오매스로부터 생산하게 되면 약 68%의 바이오매스 함유량을 갖는 PBAT를 생산할 수 있다. PBAT는 PLA와는 다르게 연신율이 600~800%에 달할 정도로 우수한 유연성을 갖는 것이 특징이며 범용 플라스틱인 LDPE와 비슷한 특성을 가져 인쇄성 및 가공성이 우수하다. 따라서, 비닐봉투, 포장용 랩 등 유연 포장재로 가장 많이 사용되며, 생분해성 또한 우수하여 농업용 멀칭필름으로 사용된다. PBAT는 AA 혹은 TPA 대신 다른 단량체를 사용함으로써 PBAT의 단점을 보완할 수 있어서 PBAT 유사체의 생분해성 플라스틱 개발도 가능하다. BASF에서는 AA 대신 SA (succinic acid)를 사용하여 새로운 물성을 갖는 PBST (polybutylene succinate terephthalate) 개발에 성공했다. PBAT는 2020년 28.5만톤에서 2025년 39.6만톤으로 성장할 전망이다.⁵ 앞서 언급한 바와 같이 PBAT는 생분해성에 초점을 맞춰 가격경쟁력이 우수한 석유화학계 PBAT가 높은 점유율을 보이며 PBAT 시장에서 높은 점유율을 보유한 기업은 BASF, Kingfa, Novamont 등이 있다. 국내에서는

SKC, 대상이 JV 법인인 에코벤스를 통해 단일규모로는 세계 최대인 연간 7만톤 규모의 PBAT 생산 공장을 베트남에 설립하여 2025년 상용화할 계획이다.¹⁵ SKC는 나노셀룰로오스 첨가제를 활용한 고강도 PBAT 생산을 담당하며, 대상은 현재 바이오매스 유래 1,4-BDO 개발을 진행하고 있어 PBAT 생산에 필요한 바이오매스 유래 1,4-BDO를 제공하는 역할을 한다. LG화학은 현재 서산에 연간 5만톤 규모의 PBAT 생산 공장을 짓고 있으며 이르면 2024년 가동할 계획이다.¹⁶

3) PBS (Polybutylene succinate)

PBS는 1,4-BDO와 SA를 사용하여 제조하는 소재로 가공성이 뛰어나 공정 적용 범위가 넓으며 우수한 토양 및 해양 생분해성으로 인해 다양한 응용 분야에 사용되는 플라스틱이다. PBS 또한, PBAT처럼 개발 초반에는 생분해성에 초점을 맞춰 가격경쟁력이 우수한 석유화학계 단량체를 사용하여 생산하였지만 최근 바이오매스 유래 1,4-BDO 및 succinic acid의 생산으로 인해 100% 바이오매스 기반 PBS 생산에 돌입했다. Mitsubishi Chemical과 PTTGC의 JV인 PTT MCC Biochem은 2017년부터 바이오매스 유래 succinic acid를 활용하여 PBS를 생산하였고, 최근에는 바이오매스 유래 1,4-BDO를 활용하여 바이오매스 함량 100% PBS를 개발하고 있다. PBS의 현재 시장규모는 약 8.7만톤으로 PBAT와 유사하게 유연포장재 등에 많이 사용되고 있으며, Zhejiang Hangzhou Xinfu Pharmaceutical이 가장 높은 점유율을 보이고 있다. 하지만 PBS의 약한 물성 및 PHA에 의한 대체 가능성으로 인해 2025년 8.6만톤의 시장규모로 성장세가 감소할 것으로 전망한다.⁵ 국내에선 PBS의 규모 있는 생산은 이뤄지지 않고 있지만 PBAT 및 PBS에 모두 사용되는 바이오매스 유래 1,4-BDO를 대상에서 개발 중이다. PBS는 특히 해양 생분해성이 우수하여 어구 어망에 활용되기 적절하므로 소재의 성공적인 개발을 통해 PBS의 성장성을 증가시킬 수 있으며, 국내에서는 안코바이오플라스틱스에서 어구, 어망용 PBS 제품을 생산하고 있다.¹⁷

4) PHA (Polyhydroxyalkanoates)

PHA의 이름 자체가 갖는 의미는 ‘폴리에스테르’가 갖는 의미와 크게 다르지 않다. 하지만, 학계 및 산업계에서 통용되는 PHA는 다양한 미생물이 세포 내 탄소와 에너지 저장형태 및 배설물의 형태로 합성되는 세포 내 생체고분자 계열로 정의될 수 있으며 butyrate가 포함된 PHA는 PHB로 부르기도 한다. 따라서, PHA는 모두 100% 바이오매스 기반 바이오플라스틱으로 간주할 수 있다. PHA는 다른 바이오플라스틱 소재들이 보통 화학적 합성을 통해 최종 고분자를 생산하는

것과는 다르게 순수 미생물 기반으로 생산된다는 차별성을 갖는다. PHA의 화학적 조성은 사용되는 단량체의 성분과 조합에 따라 조정될 수 있으며, 단일중합체 혹은 공중합체로 생산될 수 있다. 따라서, 고분자의 종류를 매우 다양하게 생산할 수 있으며 그 종류가 현재 150가지 이상이 된다. 또한, 사용되는 단량체의 성분 및 조합에 의해 다양한 물성을 갖게 되므로 광범위한 응용 분야에 적용할 수 있다. PHA는 PBS처럼 토양 생분해뿐만 아니라 해양 생분해성을 갖는 소재도 존재하여 뛰어난 생분해성을 보이는 장점이 있다. 그중 산업적으로 가장 많이 생산되는 PHA는 P3HB (poly-3-hydroxybutyrate)로 PP와 물성이 유사하며 우수한 생분해성 및 생체적합성을 보이지만 PLA와 같이 깨지기 쉬운 특성이 있다. 이와 같은 P3HB의 높은 취성은 4HB (4-hydroxybutyrate)와의 공중합체를 제조하면 극복할 수 있다. P3HB-P4HB 공중합체는 4HB의 함량이 증가할수록 비결정성이 증가하고 유연성이 향상되는 특징이 있다. 따라서, 4HB의 함량을 조절할 수 있는 균주를 개발하면 반결정성 PHA (scPHA)부터 비결정성 PHA (aPHA)의 제조가 가능하다. CJ제일제당은 2022년 PHACT™를 선보이며 인도네시아 공장에서 연간 5천톤 규모의 aPHA 양산을 시작했다. 특히, CJ제일제당은 scPHA 생산 라인 착공에 돌입하며 전 세계에서 최초로 aPHA와 scPHA 모두 생산할 수 있는 기업으로 PHA 분야에 있어 유리한 위치를 선점하게 됐고, 2025년에는 PHA 생산규모를 연간 6만 5천톤까지 확대할 계획이다.¹⁸ 또한, CJ제일제당은 국내 합성수지 컴파운딩 가공 1위 업체인 HDC 현대EP와 JV를 설립하여 원료 생산부터 소재 개발 및 생산까지 PHA 소재 활용을 극대화하기 위한 노력을 기울이고 있다. 현재 글로벌 PHA 시장은 Danimer Scientific 이 가장 높은 점유율을 보유하고 있으며 2024년까지 연간 7만톤의 생산 능력을 보유할 계획이다.⁵ PHA는 화학적 중합의 접근이 어려운 고분자 혹은 단량체 생산이 어렵거나 단가가 높은 단량체를 사용하여 제조하는 고분자 등 고전적인 합성법의 접근이 제한된 신소재를 개발할 수 있다는 가능성을 제시할 수 있어 앞으로도 가파른 시장 성장률을 보일 것으로 전망한다. 하지만 미생물 기반의 PHA의 생산은 여타 다른 바이오플라스틱보다 가격경쟁력이 떨어지며 미생물을 통해 생산한 고분자의 분자량 및 분자량 분포의 재현성 및 고분자량의 고분자 생산 능력 등 산업적 소재로 사용되기 위해 넘어야 할 기술적 장벽이 여전히 높다.

5. 결론 및 전망

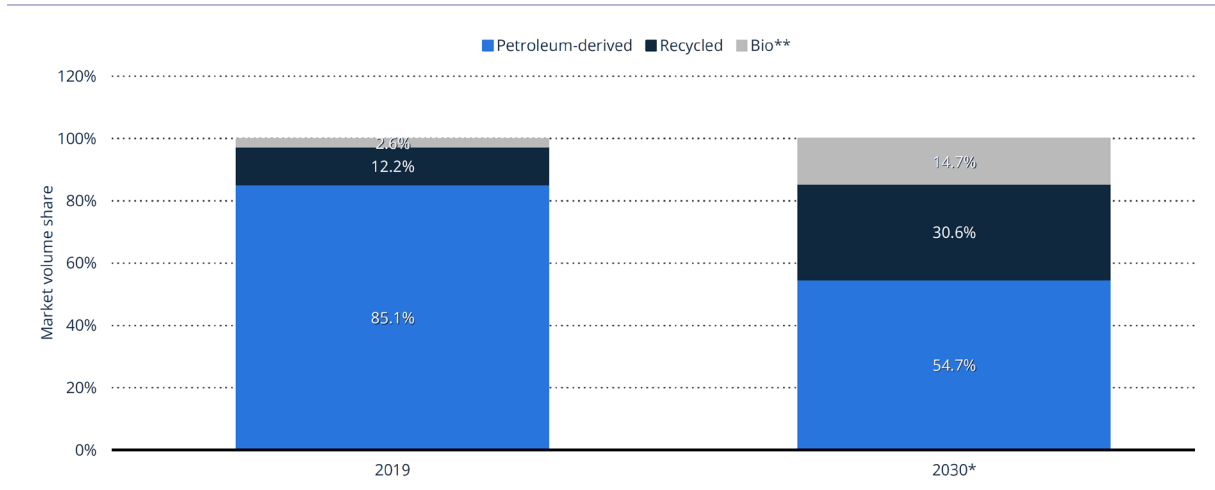


그림 4. 플라스틱의 2019~2030년 시장점유율 전망

우리 삶에 큰 편의를 가져다준 플라스틱은 우리 삶에 없어서는 안 될 중요한 소재이지만 과도한 사용으로 인해 현재 우리 삶을 위협하고 있다. 전 세계는 이런 플라스틱이 당면한 문제를 해결하기 위한 플라스틱 순환경제 전략을 세워 플라스틱의 재활용, 재사용 및 신소재 개발 등 전 분야에 걸쳐 전방위적 노력을 기울이고 있다. 전 세계적인 탄소 저감 정책 및 노력으로 인해 석유화학계 플라스틱의 생산량은 줄어들고 재활용 및 바이오매스 기반 바이오플라스틱의 생산량은 가파르게 증가할 전망이다. 현재는 석유화학계 플라스틱의 가격경쟁력이 바이오플라스틱보다 월등히 우수하지만 향후 생산량 규모의 증대로 인한 바이오플라스틱의 가격경쟁력 향상은 바이오플라스틱이 시장에 정착할 수 있는 중요한 요소가 될 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 탄소 저감 및 플라스틱 폐기물 저감효과를 갖는 바이오매스 기반 바이오플라스틱은 플라스틱 경제에 새로운 패러다임을 가져올 수 있는 하나의 대책일 수 있지만 극복해야 하는 여러 문제점으로 인해 아직은 유일한 해결책이라고 보기는 어렵다. 하지만 현재 우리 사회가 플라스틱이 당면한 문제점을 잘 인식하고 있고 그 문제를 해결하기 위한 적극적인 노력을 기울이고 있는 현재 상황이 계속된다면 플라스틱은 조만간 더 나은 미래를 맞이할 것이 분명하다.

6. 참고문헌

1. PlasticsEurope (PEMRG). (2022). Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2021 (in million metric tons). Statista.
2. OECD. (2022). Distribution of plastic waste management worldwide in 2019, by region and method. Statista.
3. R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law. *Sci. Adv.* 2017, 3, e1700782.
4. Beyond Plastics. (2021). The New Coal: Plastics and Climate Change.
5. 플라스틱: 뿌린 씨를 거둘 때, 삼성증권 (2021).
6. <https://www.ctvc.co/life-in-bioplastic>.
7. Predence Research. (2023). Bioplastics Market, Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023-2032.
8. MarketsandMarkets. (2022). Bioplastics & Biopolymers Market by Type, End-Use Industry, & Region – Global forecast to 2027.
9. CE Delft. (2017). Biobased Plastics in a Circular Economy.
10. <https://www.braskem.com.br/news-detail/braskem-affirms-commitment-to-circular-economy-and-to-achieve-carbon-neutrality-by-2050>.
11. <http://www.hitnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=44817>.
12. <http://www.goodkyung.com/news/articleView.html?idxno=204685>.
13. <https://www.theguru.co.kr/news/article.html?no=53844>.
14. S. J. Royer, F. Greco, M. Kogler, D. D Deheyn. *PLOS ONE* 2023, 18, e0284681.
15. <https://zdnet.co.kr/view/?no=20230925084129>
16. <https://icnweb.kr/2022/50053/>
17. <http://sisa-news.com/news/article.html?no=151686>
18. <https://www.cj.co.kr/kr/about/news-detail/1479>
19. KPMG. (2019). Market volume share of plastics worldwide in 2019 and 2030 by feedstock type. Statista.