

생분해성 바이오플라스틱 생산기술과 산업동향

| 저자 | 이상호 바이오PD / KEIT

박경문 교수 / 홍익대학교

주정찬 선임연구원 / 한국화학연구원

SUMMARY

/// 생분해성 바이오플라스틱 산업과 동향분석

- ★ 전 세계적으로 페플라스틱과 미세플라스틱으로 인한 환경오염이 심화되어 난분해성 일회용 플라스틱 제품 사용 규제를 강화하고 있음.
- ★ 석유계 비분해성 플라스틱 대체를 위한 생분해성 바이오플라스틱시장이 급성장함에 따라 선진국은 생분해성 바이오플라스틱 제조기술 경쟁력 확보에 최선을 다하고 있으며, Starch blends, PLA, PBAT, PBS, PHA 등이 핵심 소재이며, Novamont, NatureWorks, Total Corbion PLA, BASF, Mitsubishi Chemical, Kaneka社 등이 글로벌 시장을 주도하고 있음.
- ★ 생분해성 바이오플라스틱 시장규모가 성장함에 따라 환경영향을 최소화하기 위해, 생분해성 바이오플라스틱의 순환기술(재활용(Recycling), 퇴비화(Composting), 혐기성 소화(Anaerobic digestion)기술 등이 개발 중임.

/// 시사점 및 정책제안

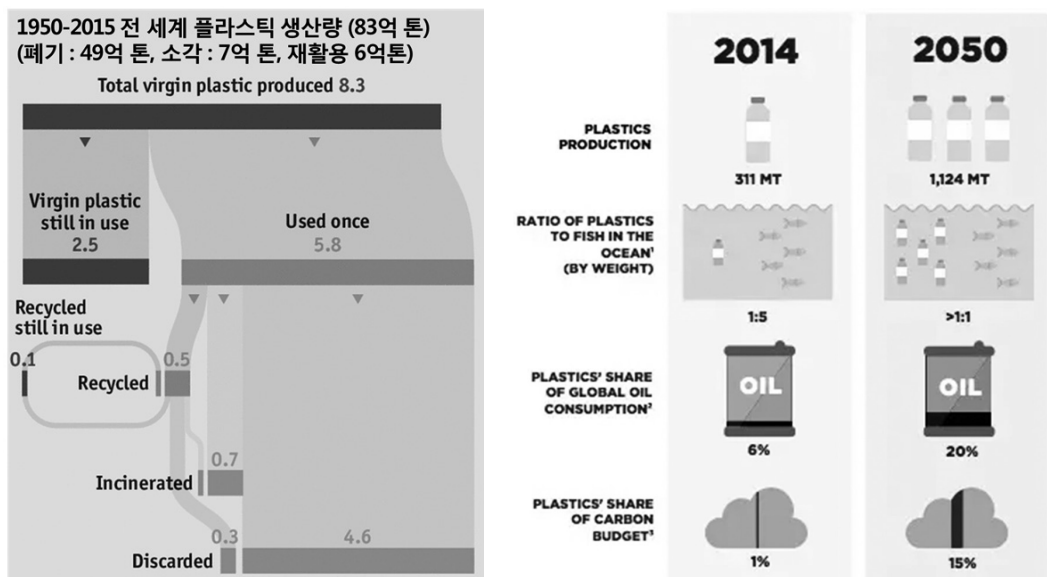
- ★ 새로운 소재 등장과 사용촉진제도의 도입 확대를 고려하면, 바이오플라스틱 시장은 예상('23년 262만톤)보다 더 빠른 속도로 증가할 것으로 예측되며, 기존 석유 유래 단량체를 100% 바이오매스 기반 단량체로 점차 대체할 것으로 예상됨.
- ★ 현재 생분해성 바이오플라스틱을 대부분 수입에 의존함에 따라 국내 생분해성 바이오플라스틱 소재 자립화를 위해 원료-소재-제품-순환의 전주기 기술 개발 및 실증, 바이오플라스틱 사용촉진제도 및 인증제도의 마련이 시급함.

1. 생분해성 바이오플라스틱 개요

플라스틱으로 인해 발생하는 사회문제 심화

★ 플라스틱 생산량 (1950~2015, 83억 톤)의 78%인 63억 톤이 플라스틱 폐기물로 발생했으나 9%만 재활용이 되고 12%는 소각, 79%는 매립 또는 투기되었고, 현재의 플라스틱 소비 형태를 유지할 경우, 2050년에는 연간 11억 톤 플라스틱을 전체 석유의 20%를 소비하여 생산되며, 이의 플라스틱 폐기물*로 인해 인류 생존에 위협

※ 2050년까지 누적 폐플라스틱 발생량은 330억 톤이며 120억 톤이 소각, 120억 톤이 매립 혹은 투기되며, 90억 톤만이 재활용될 것으로 예측



| 그림 1. 플라스틱 폐기물 발생과 문제점 |

(자료 : Geyer et al., 2017, Science Advances, The New Plastics Economy — Rethinking the future of plastics)

★ 네이처 지오사이언스지에 따르면 세계에서 가장 미세플라스틱으로 오염된 지역 2위와 3위가 각각 인천 및 낙동강 하류로 밝혀졌으며, 대한민국은 세계에서 가장 오염된 해안을 가지고 있는 상황임 [1].

플라스틱문제 해결을 위한 국제적 노력

★ 전 세계적으로 폐플라스틱과 미세플라스틱으로 인한 환경오염이 심화되어 일회용 플라스틱 제품 사용 규제를 강화하고 있음.

- 현재 프랑스, 이탈리아, 인도, UAE, 파키스탄 등 산화 생분해 플라스틱(Oxo-degradable bioplastic) 포장재 사용에 대한 법령을 제정하고 있음.
- EU에서는 플라스틱 면봉, 빨대, 풍선 막대, 그릇, 식기, 음료 막대, 병, 물티슈, 봉지, 포장지 등 일반인이 가장 많이 사용하는 10개 플라스틱 제품 사용을 금지하는 법안을 2021년부터 발효하여, 2025년까지 각 회원국은 전체 유통되는 플라스틱 음료수 병 중 90% 이상을 수거해야 함.
- EU의 플라스틱 전략은 △플라스틱 제품 재활용 △플라스틱 폐기물 발생량 감축 △투자 및 혁신 유도 △글로벌 대응으로 구분되며, 이를 통해 2030년까지 플라스틱 분리수거 및 재활용 산업 분야에서 20만 개의 일자리를 창출한다는 목표를 제시함.

표 1. 국내·외 플라스틱제품 관련 환경 규제 현황

국내		[환경부 고시] - 생분해성 제품은 1회용품 사용규제 대상에서 제외, 폐기물 부담금 제외 * 생분해성 제품: 환경기술개발 및 지원에 관한 법률, 제 1조에 따른 생분해성 수지 제품으로 환경표지 인증을 받은 제품
국외	유럽	- 일회용 플라스틱 제품 사용 규제를 위한 지침 제정안 2021년부터 발효 - 일회용 플라스틱 제품의 사용 금지 * 플라스틱 식기류(cutlery), 접시(plate), 빨대(straw), 발포폴리스티렌 음식물 용기(food container), 음료 용기(food container), 음료용 컵(cup), 플라스틱으로 제조된 면봉용 막대, 산화생분해성(oxo-degradable) 플라스틱으로 제조된 제품 - 2025년부터는 PET 음료 병의 25%는 재활용된 플라스틱으로 제조해야 하고, 2030년부터는 모든 플라스틱 병의 30%는 재활용플라스틱으로 제조 - 2029년까지 플라스틱 병의 90%를 의무적으로 수거 - 플라스틱이 함유된 담배 필터의 제조업자는 생산자책임재활용제도(Extended Producer Responsibility Scheme)가 대상
	이탈리아	- 비분해성 봉투 사용 규제 시행('14,10):90%이상 쇼핑백에 사용 중 (세계 최대 시장)
	프랑스	- 비분해성 일회용 쇼핑 봉투 사용 규제'16.7, 바이오매스함량 30% 봉투만 사용 ('17.1) - 2020년부터 플라스틱 컵과 접시 사용 금지
	독일	- 생분해성 봉투인 경우 Bio contents 비율 50% 고시 예정
	미국	- 캘리포니아주, 식품판매점에서 비닐봉지 제공 금지('16),식당에서 플라스틱 빨대 사용 금지('18) - 하와이주, 플라스틱 봉투 사용 금지('15.7) - 시애틀, 식당에서 빨대, 포트, 접시 등의 플라스틱 사용 금지('18) 위반 시 벌금부과(250\$) - 텍사스, 플라스틱 봉투 사용 시 벌금부과(5c/장)

국외	캐나다	- 몬트리올 지역 플라스틱 봉투 규제 예정('18) - 주 전역의 플라스틱 봉투 규제 검토 중
	호주	- 남호주(애들레이드, 시드니, 멜버른 등) 지역 플라스틱 봉투 규제 실시('09.4) - 북호주 지역 플라스틱 봉투 사용 금지('11.9) (다중용도 플라스틱 봉투, 롤백, 종이봉투, 생분해성 봉투 허용)
	뉴질랜드	- 일회용 비닐봉지 사용 전면금지('19)
	중국	- 길림성, 비분해성 봉투 사용 금지('15.1):PLA 35%(15년) 30%(16년)이상 사용

★ 분해되지 않는 플라스틱으로 인한 환경문제를 해결하기 위해 전 세계 30여 개의 글로벌 기업(BASF, DSM, Dow, Braskem, ExxonMobil, Total, Shell, Mitsubishi Chemical Holdings, Mitsui Chemicals, Procter & Gamble 등)들은 해양 폐플라스틱 감소 및 제거를 위한 솔루션을 증진하는 ‘플라스틱 쓰레기 제거 연합(AEPW, Alliance to End Plastic Waste)’을 결성하였음 [2].

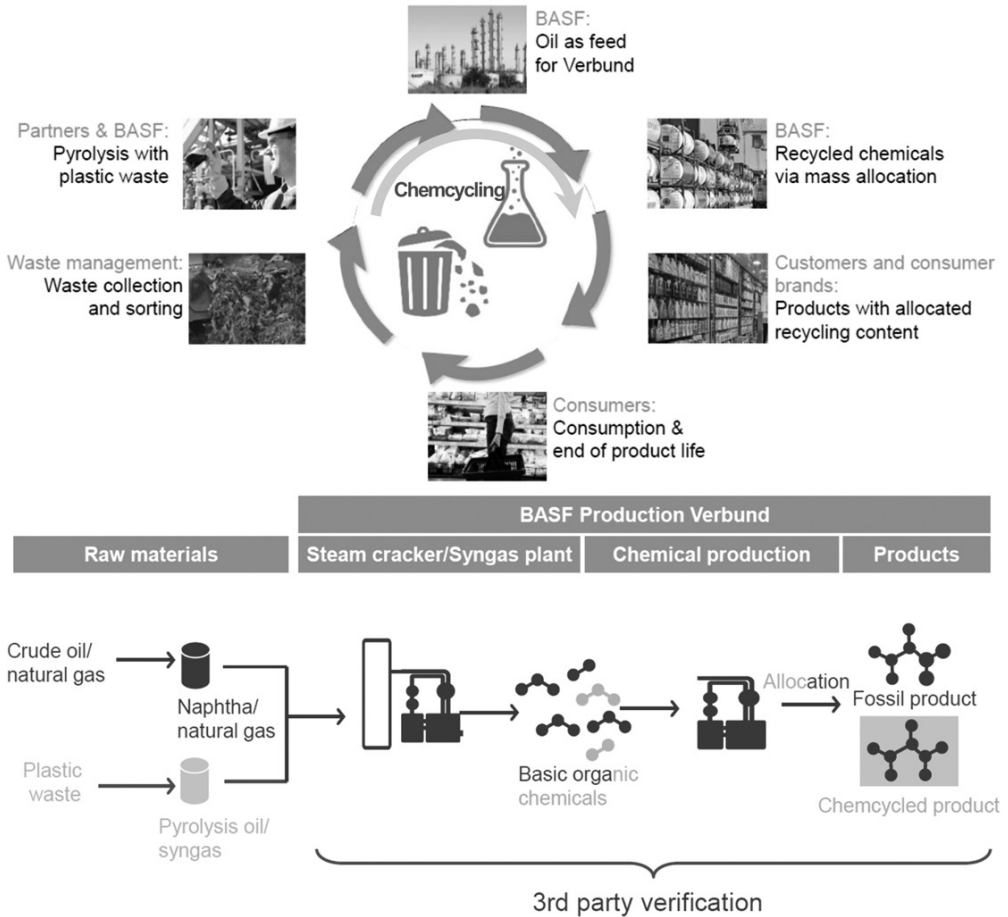
- AEPW는 5년간 15억달러 투자를 목표로 하며, 플라스틱 쓰레기 최소화를 위한 새로운 솔루션 개발은 물론, 폐플라스틱 재활용을 통해 순환경제에 기여하는 솔루션 또한 가속화 할 예정임.

★ BASF는 플라스틱 재활용을 증진시키는 혁신적인 기술 개발을 목표로 캄사이클링(ChemCycling) 프로젝트를 진행하여, 2018년 폐플라스틱의 화학적 재활용을 통한 생산된 첫 파일럿 제품을 발표하였음 [3].

(a)



(b)



| 그림 2. 폐플라스틱 감소 및 제거를 위한 노력 (a) 플라스틱 쓰레기 제거 연합(AEPW, Alliance to End Plastic Waste)

(b) BASF의 폐플라스틱의 화학적 재활용 공정 ChemCycling |

(자료 : <https://endplasticwaste.org/about-the-alliance-to-end-plastic-waste/>, Dr. Stefan Gräter, BASF SE presentation

The ChemCycling project—from plastic waste to high quality products)

생분해성 바이오플라스틱의 필요성

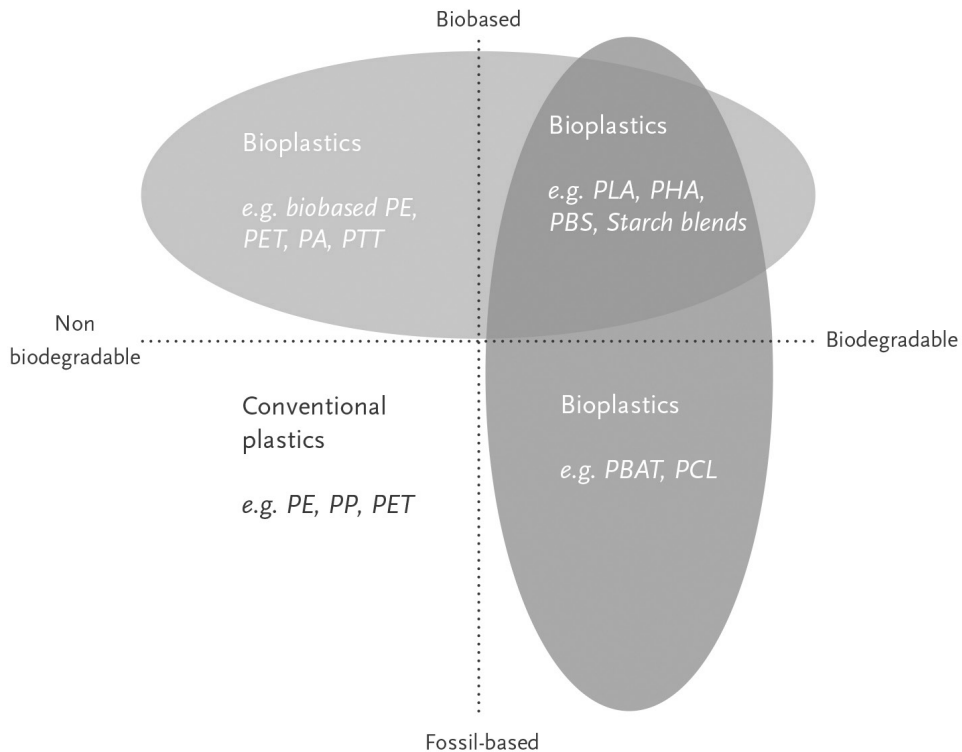
★ 생활플라스틱은 일상생활에서 사용하는 비닐봉투, 일회용컵, 포장용기, 위생용품 등 일상생활의 편의증진을 위해 사용되는 범용성 플라스틱 소재의 집합을 의미함.

★ 생활플라스틱에 사용되는 소재는 5대 범용 석유계 소재로 알려져 있는 폴리에틸렌(PE : polyethylene),

폴리프로필렌(PP : polypropylene), 폴리스티렌(PS : polystyrene), 폴리비닐클로라이드(PVC: polyvinyl chloride), 폴리아크릴(PMMA: Poly(methyl methacrylate))로 제조함.

- 난분해성 생활플라스틱은 자연 조건에서는 분해가 되지 않아, 적절한 분리수거 및 재활용 과정을 거치지 않고 토양 및 해양에 노출되면, 시간이 경과됨에 따라 미세플라스틱(직경 0.001 ~ 5 mm의 작은 플라스틱 입자)로 변환되어 바다로 흘러들어가 해양 생물이 섭식하고, 다시 인간에게 돌아와 생태계를 교란함.

★ 바이오플라스틱(Bioplastics)은 기존 화석연료로 생산되는 플라스틱의 보완재 또는 대체재인 친환경 플라스틱 원료 및 제품으로서 유래와 생분해성에 따라 생분해성 플라스틱(Biodegradable plastics)과 바이오매스 기반 플라스틱(Bio-based plastics)으로 구분할 수 있음.



| 그림 3. 생분해성과 원료 유래에 따른 바이오플라스틱의 분류 |

(자료 : European Bioplastics, nova-Institute (2018) Bioplastic market data 2018)

★ 플라스틱은 분해의 기작에 따라 다양한 분해로 구분할 수 있으나 대표적으로는 물리적·화학적 분해에 의하여 단량체 단위로 분해가 되는 수준과 물, 이산화탄소, 바이오매스로 각각 분해가 되는 생분해로 크게 구분되며, 생분해성 바이오플라스틱은 폴리에스터 계열임.

- ★ 플라스틱 생분해는 대부분 매립 토양 혹은 해양에서 발견되는 미생물에 의해서 일어나므로 생분해 조절기술은 제품용도 및 사용 및 분해 환경 조건에 맞추어 개발이 필요함.

| 표 2. 플라스틱의 생분해성 특성 |

구분	바이오플라스틱 (Bioplastics)			
	생분해플라스틱 (Biodegradable plastics)		바이오베이스플라스틱 (Bio-based plastics)	
	천연물계	석유계	중합형	결합형
바이오매스 함량	50~70% 이상	자료 없음	20~25% 이상	
사용원료	천연물, 미생물계	석유원료	천연물-단량체 중합	천연물-고분자 중합
종류	PLA, TPS, PHA, AP, CA 등	PBS, PES, PVA, PCL, PBAT 등	Bio-PE, Bio-PP, Bio-PET, BIO-PA 등	
제조사	SK케미칼, NatureWorks, 소화고분자, UCC, BASF, TELLs, Novamont 등		SK 케미칼, Braskem, Evonik, BASF, Arkema, 롯데케미칼 등	
제품 형태	진공성형, 사출 성형 등		진공성형, 사출 성형 등	
규격기준	ISO 14855, ASTM D 6400, EN 13432, KS M 3100-1 등		ASTM D 6866, CEN/TR 15932 등	
장점	생분해 우수, 탄소저감 우수(천연물계), 내습성, 가공성, 제한적 물성 우수		이산화탄소 저감 우수(탄소 중립형 바이오매스), 제한적 물성/생산성 우수	
단점	제조 원가 고가, 물성 저하, 내수성, 유통중 분해 가능성		강도, 내수성 문제 가능	
분해기작	미생물 분해		-	
생분해 시험	- 6개월 이내 : 90% - 45일 이내 : 60%		-	
범용 플라스틱	사용 안 함		사용함	
생분해 기간	3~6개월 이내(6개월 이내 90%)		자료없음	

2. 생분해성 바이오플라스틱 산업 동향

글로벌 바이오플라스틱 생산 동향

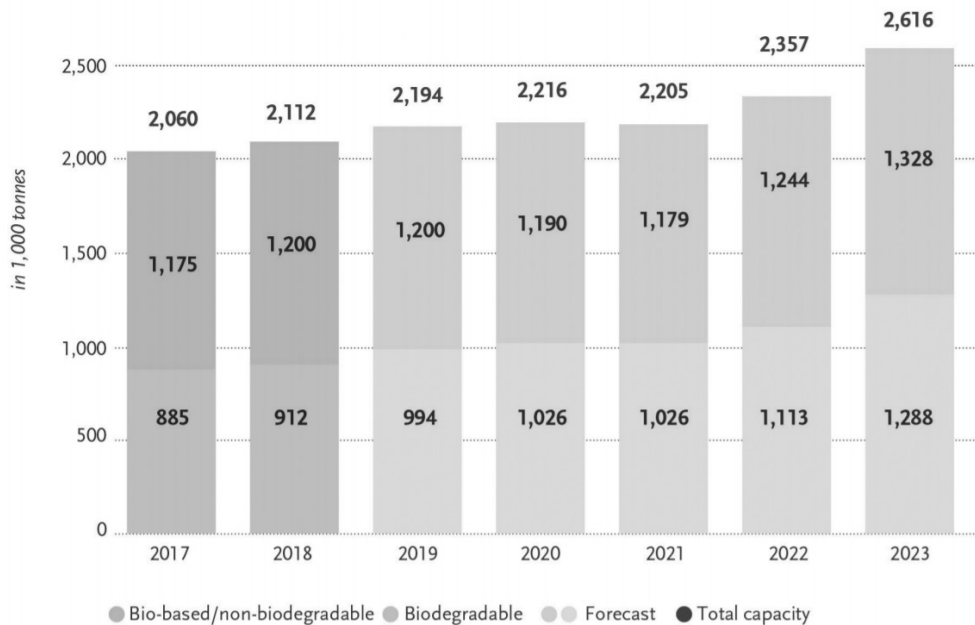
★ 바이오플라스틱은 석유계 플라스틱을 대체하는 친환경 플라스틱으로 시장 규모가 빠르게 성장하고 있으며, 유럽플라스틱협회는 세계 바이오플라스틱 생산 능력은 2018년 약 211만톤에서 2023년 262만톤으로 늘어날 것으로 예측함 [4].

- 211만톤 생산량의 56.8%(120만톤)는 바이오매스 기반 비분해성 바이오플라스틱이며, 43.2%(91만톤)는 생분해성 바이오플라스틱임.

★ 2018년 기준 글로벌 생분해성 바이오플라스틱 생산규모는 약 91만톤이며, 전분계 플라스틱인 Starch blends는 42.1%(38.4만톤), PLA는 23.8%(21.7만톤), PBAT는 16.7%(15.2만톤), PBS는 10.6%(9.7만톤), PHA는 3.2%(3만톤)를 차지하고 있음.

※ PLA : Polylactic acid, PHA : Polyhydroxyalkanoate, PBAT : Polybutylene adipate terephthalate, PBS : Polybutylene succinate, TPS : Thermoplastic starch (Starch blends)

(a)



(b)

Global production capacities of bioplastics 2018 (by material type)

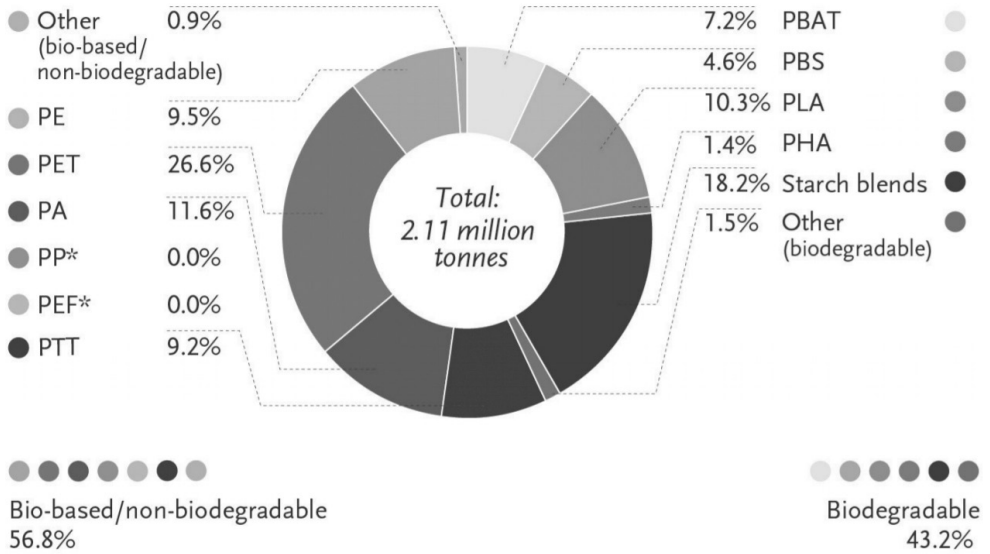


그림 4. 글로벌 바이오플라스틱 생산 현황 (a) 생분해성/비분해성 바이오플라스틱 생산 규모 (b) 용도별 바이오플라스틱 생산 규모

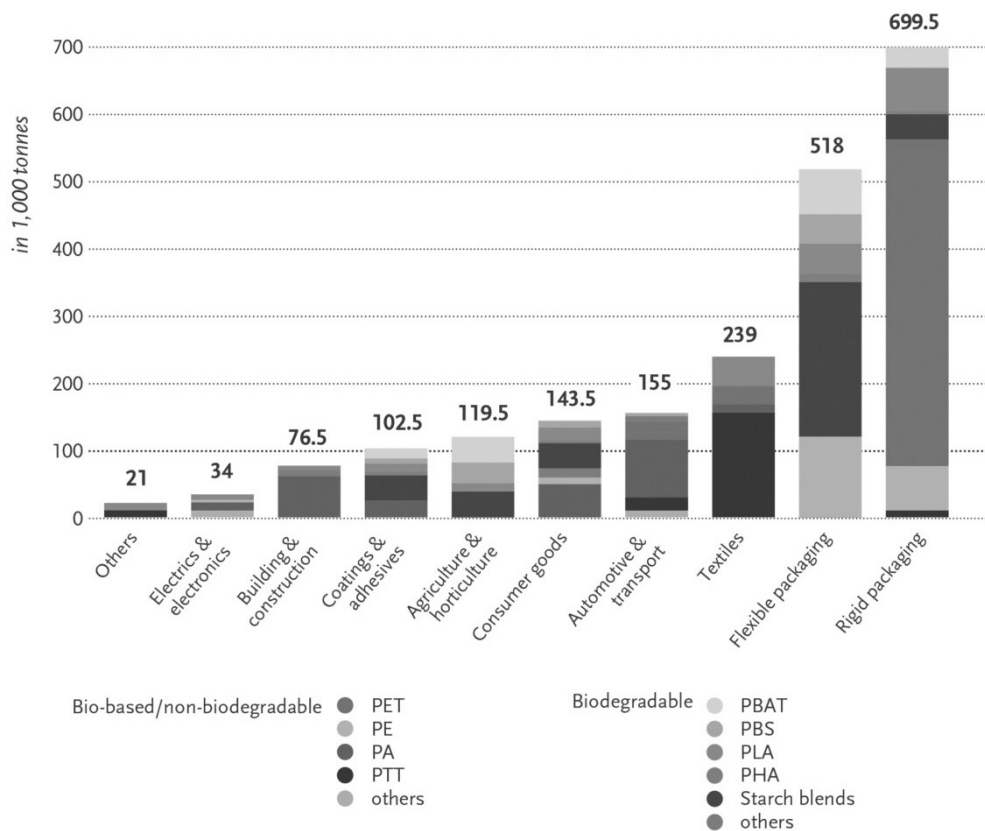
(자료 : European Bioplastics, nova-Institute (2018) Bioplastic market data 2018)

- ★ 지역별 바이오플라스틱 생산은 북미 지역이 16%, 서유럽 지역이 19%, 아시아가 55% 정도의 생산능력을 나타내고 있으나 향후, 북미, 서유럽에서 벗어나 바이오매스가 풍부하고 소비 규모가 큰 아시아 지역에서 생산이 확대될 것으로 예상됨.
- ★ 생분해성 바이오플라스틱은 높은 생분해성 특성으로 석유계 난분해성 바이오플라스틱이 사용되는 일상 플라스틱 제품 대체(비닐봉투, 컵, 포장재, 식품 용기 등) 및 자동차·전자기기 등에 사용 가능하고, 생분해성 소재 복합화를 통해 해양 및 토양 환경에서 분해가 가능한 생분해성 어구, 어망 등의 제품에 사용 가능함.

(a)



(b)



| 그림 5. 생분해성 바이오플라스틱 (a) 생산 국가 및 (b) 사용 분야 |

(자료 : European Bioplastics, nova-Institute (2018) Bioplastic market data 2018)

// 해외 생분해성 바이오플라스틱 기업 동향

- ★ 바이오플라스틱은 석유계 플라스틱을 대체하는 친환경 플라스틱으로 시장 규모가 새로운 소재 등장과 사용촉진제도의 도입 확대를 고려하면, 예상('23년 262만톤)보다 더 빠른 속도로 증가할 것으로 예측됨.
- ★ 글로벌 석유화학기업, 바이오기업은 바이오플라스틱 원료 및 소재 생산기술 경쟁력 확보에 최선을 다하고 있으며, 필요에 따라 석유화학기업과 바이오기업이 합자회사를 설립함.
 - Total Corbion PLA : 생분해성 바이오플라스틱 PLA 생산을 위해 Total(프랑스의 석유화학기업)과 Corbion(네덜란드의 식품첨가물기업)합자하여 설립함.
 - Succinity : BASF(독일의 화학기업)과 Corbion이 합자하여 Succinity GmbH 설립하여 바이오숙신산을 생산함.
 - Dupont Tate & Lyle BioProducts : Dupont(미국의 화학기업)과 Tate & Lyle(네덜란드의 바이오기업)이 합작 Dupont Tate & Lyle BioProducts 설립하여 1,3-Propanediol을 약 4만 5천톤/년 규모로 생산함.
- ★ 글로벌 기업 Novamont, NatureWorks, Total Corbion PLA, BASF, Mitsubishi Chemical, Kaneka, Danimer Scientific 등이 생분해성 원료 소재의 생산기술개발을 완료하고 생분해성 바이오플라스틱 시장을 선도하고 있음.
 - (Starch blends) Novamont는 전분계 바이오플라스틱 생산을 주도하고 있으며, 전분계 바이오플라스틱(TPS-PBAT) 수지를 10만톤/년 규모로 생산하고 있음.
 - (PLA) NatureWorks는 젖산(Lactic acid), 락타이드(Lactide), PLA 생산에 독보적인 기술을 보유하고 있으며 15만톤/년 규모로 PLA를 생산하고 있으며, 후발 기업인 Total Corbion PLA가 7만 5천톤/년 규모로 PLA를 생산하고 있음.
 - (PBAT) BASF에서 PBAT 수지/PBAT와 PLA를 혼합 수지를 약 7만 4천톤/년 규모로 생산하고 있음.
 - (PBS) Mitsubishi Chemical에서 바이오매스를 부분적으로 포함하고 있는 PBS 수지인 BioPBS™ 제품을 약 2만톤/년 규모로 생산하고 있음.
 - (PHA) Kaneka와 Danimer Scientific의 주요 생산 기업이며 Kaneka는 Biodegradable PBHB™ 제품을 약 5천톤/년 규모로 생산하고 있음.

| 표 3. 해외 생분해성 바이오플라스틱 주요 생산 기업 |

기업명	사업 제품
 NOVAMONT	Novamont는 TPS-PBAT 혼합수지인 Mater-Bi 제품을 10만톤/년 규모로 생산
 NatureWorks	NatureWorks는 Ingeo 브랜드로 15만톤/년 규모로 PLA의 생산
 TOTAL Corbion PLA BV	Total(프랑스의 화학기업)과 Corbion(네덜란드의 식품첨가물기업)이 합자하여 Total Corbion PLA를 설립하여 락타이드 모노머 Lumilact® 와 PLA 수지인 Luminy®를 7.5만톤/년 규모 생산
 BASF We create chemistry	BASF는 PBAT 수지 ecovio®와 PBAT와 PLA 혼합 수지 ecoflex®을 약 7만 4천톤/년 규모로 생산 중이며 증설 검토
 MITSUBISHI CHEMICAL	Mitsubishi Chemical에서 바이오매스를 부분적으로 포함하고 있는 PBS 수지인 BioPBS™ 제품을 약 2만톤/년 규모로 생산
 kaneka	Kaneka는 Kaneka Biodegradable PBHB™ 제품을 약 5천톤/년 규모로 생산

국내 생분해성 바이오플라스틱 산업 동향

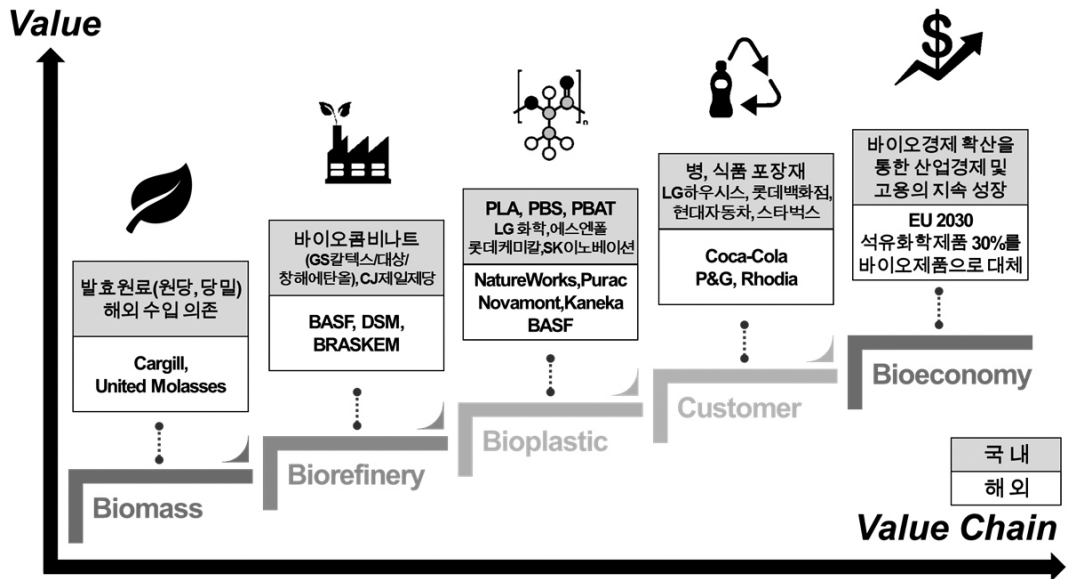
★ 국내 바이오플라스틱 시장은 약 4만톤 규모로 국내 플라스틱 시장의 0.5% 차지하며, 세계 바이오플라스틱 시장의 1~2% 내외를 점유하고 있음.

※ 국내 바이오플라스틱시장은 '16년 229억원, 세계 시장('17년 35억불)의 1% 수준

★ 석유화학기업 중심으로 바이오플라스틱 생산 중(원료 중합)이나, 리파이너리(원료 추출·가공)는 기술개발 단계로 해외 원료 수입에 의존하고 있음.

★ 바이오플라스틱산업은 발효원료(원당, 당밀) 확보, 바이오리파이너리를 통한 플랫폼 화합물의 생산, 바이오플라스틱의 제조, 최종 소비재로 가공 등의 가치 사슬이 존재함.

★ 국내는 바이오플라스틱 최종 소비재 가공 기술이 확보된 상황이며 바이오매스 및 바이오리파이너리 기술은 연구 개발 단계임.



| 그림 6. 국내 바이오플라스틱산업의 가치사슬과 기업 |

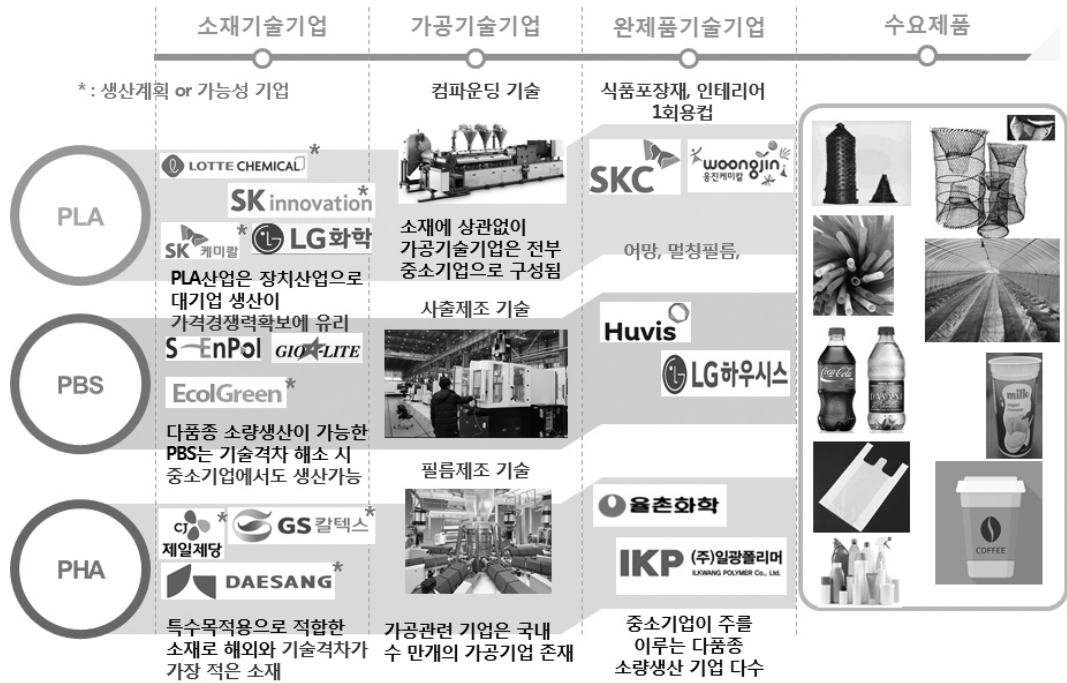
- ★ 현재 국내 바이오플라스틱산업은 원료 및 플랫폼(platform) 중심의 업스트림(Upstream)보다는 가공제품 중심의 다운스트림(Downstream)부문이 더욱 활발함.

※ PLA, PBS, PBAT 등 원료를 수입하여 최종제품(필름, 섬유, 합성수지 등)으로 생산하는 가공 중심의 바이오플라스틱산업이 우선적으로 성장함.

- ★ 글로벌 화학기업들과는 달리 국내 화학기업들은 국내외 규제 및 무역 장벽 등에 대비하여, 기술 개발 중이나 제도 불확실성 등으로 사업화 투자 부진한 상황임.

※ LG화학(식품포장재→가격문제로 담보), 롯데정밀화학(바이오원료→사업성 악화로 철수), 롯데케미칼(Bio-PET→가격문제로 판매 부진), SKC(산업용필름→원료수급·가격문제로 철수)

- ★ 정부의 적극적인 시장확대제도 도입 및 기업의 투자확대가 필요한 상황임.



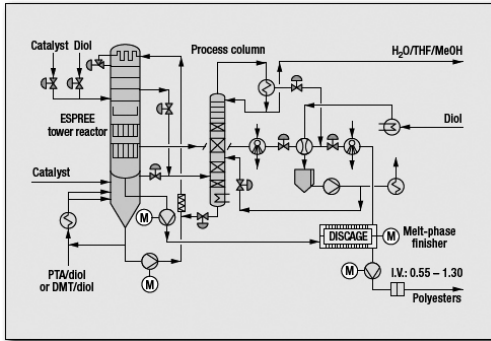
| 그림 7. 국내 바이오플라스틱 전·후방 산업과 관련 기업 |

3. 생분해성 바이오플라스틱 기술 동향

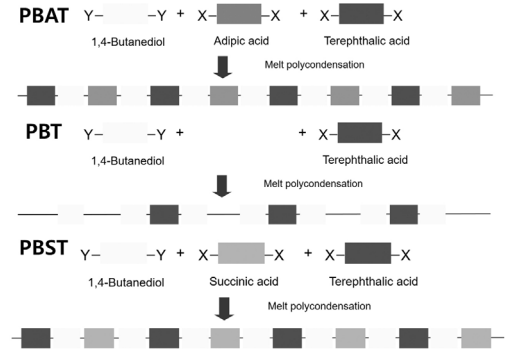
해외 생분해성 바이오플라스틱 소재 및 생산공정 기술 동향

- ★ 글로벌 생분해성 바이오플라스틱 주요 생산 기업은 1) 신규 바이오플라스틱 소재/공정/제품용도 개발, 2) 바이오플라스틱의 고품량화를 위한 바이오 단량체 생산 기술 개발, 3) 생분해성 바이오플라스틱의 순환기술 개발에 집중하고 있음.
- ★ BASF는 UIF proprietary two-reactor (2R) process를 생분해성 폴리에스터 PBS/PBAT 제조 공정에 적용하여 연속 생산공정을 구축하여 ecovio®와 ecoflex®를 생산 중임.
- ★ BASF는 PBAT의 단량체 아디프산(Adipic acid)을 숙신산(Succinic acid)으로 대체하여 새로운 물성의 생분해성 바이오플라스틱 소재(PBST)를 개발하였으며, PBAT 수지인 ecovio®를 활용하여 포장재 및 필름 등 다양한 제품 용도를 개발함.

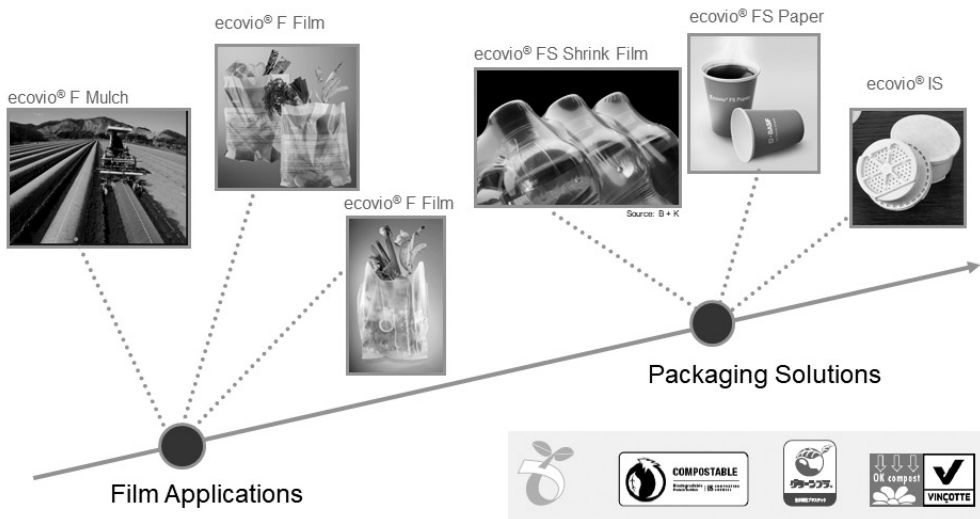
(a) UIF proprietary two-reactor (2R) process
폴리에스터 제조공정 개발



(b) 신규 생분해성 바이오플라스틱 소재 개발



(c) 생분해성 바이오플라스틱 소재의 제품화 기술 확보



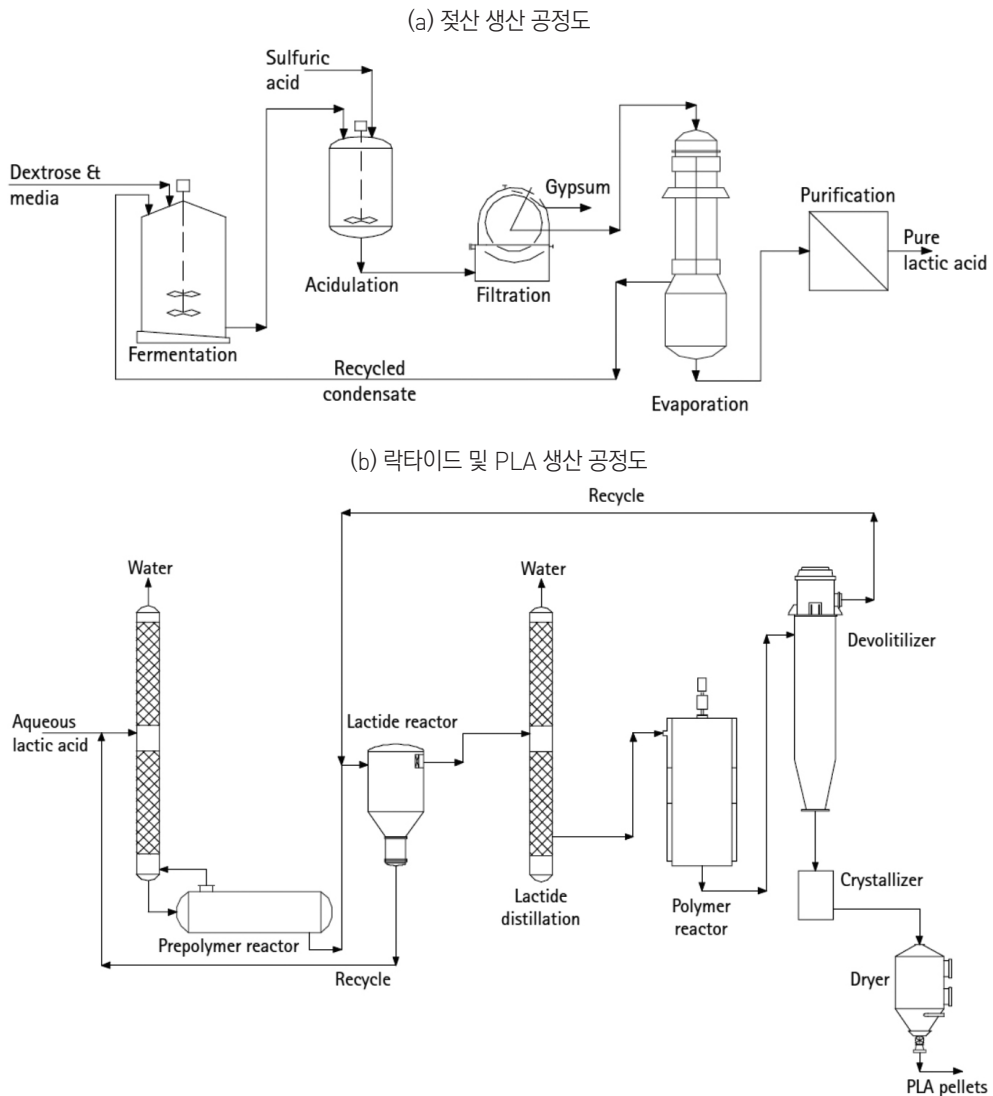
| 그림 8. BASF의 생분해성 바이오플라스틱 PBAT 상용화 기술 |

(자료 : Andreas Künkel, BASF SE presentation, BASF's Biodegradable and Renewable Polymers

<http://www.processengineer.info/petrochemical/polyalkylene-terephthalates-pet-pbt-ptt-pen-process-by-uhde-inventa-fischer.html>

★ NatureWorks는 장기간 연구개발을 통해 젯산, 락타이드, PLA를 생산하는 공정을 최적화하였으며 개별 공정의 생산 수율이 95%이상이며, 전체 공정의 수율은 80%이상으로 석유 유래 소재 수준의 매우 높은 가격 경쟁력을 확보하고 있음 (1.5~2.0 USD/kg).

- ★ NatureWorks는 젖산 발효 공정에서 분리정제 비용을 최소화하기 위해 낮은 pH (~ pH 3)에서 발효를 통해 protonated lactic acid를 생산하는 균주를 개발하여 gypsum 생성을 최소화하였고, 락타이드 및 PLA 생산 공정에서 각 단계에 손실되는 젖산과 락타이드를 공정 내에서 재활용하여 높은 경제성을 확보하였으며, Total Corbion PLA도 공정 기술을 확보하였으나 효율이 떨어짐.

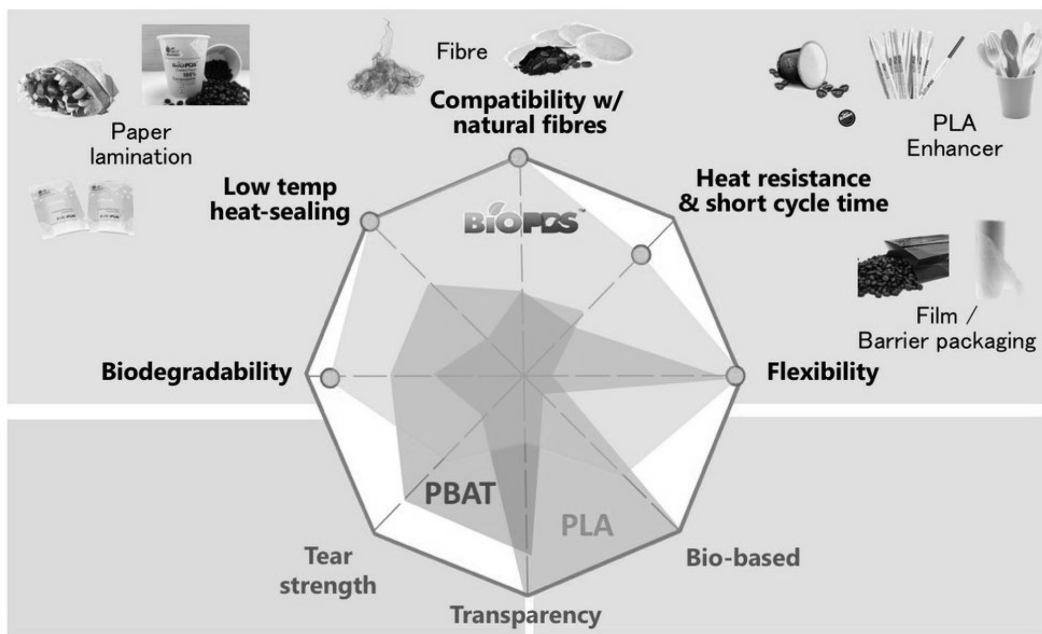


| 그림 9. NatureWorks의 젖산, 락타이드, PLA 생산 공정 |

(자료 : Erwin T.H. Vink et al., 11 (3) JUNE 2015 INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY, Erwin T.H. Vink et al., 3 (1) April 5, 2007)

- ★ PLA, PHA는 100% 바이오매스로부터 생산이 가능한 생분해성 바이오플라스틱 소재이나, PBS/PBAT는 석유원료 유래 단량체를 사용하고 일부는 바이오매스 유래 단량체를 사용하나 바이오매스 함량이 낮음.
 - Mitsubishi Chemical은 바이오 숙신산을 사용하여 50% 바이오매스 함량의 BioPBS™ 수지를 생산하고 있으며, 바이오매스 유래 1,4-부탄디올(1,4-Butanediol)이 상용화가 될 경우, 100% 바이오매스 기반 PBS를 개발할 예정임.
- ★ PBS/PBAT의 단량체인 1,4-부탄디올, 아디프산(Adipic acid), 테레프탈산(Terephthalic acid) 등을 바이오매스로부터 생산하는 생물공정 또는 화학공정기술을 연구 개발 중에 있으며, 상용화에 성공할 경우 바이오매스 고함량 PBS/PBAT 생산이 가능함.
 - (숙신산, Succinic acid) BASF와 Corbion이 합작하여 설립한 Succinity GmbH가 바이오숙신산을 생산(10,000 톤/년)하며 Bio-PBS™ 제조에 사용 중임.
 - (1,4-부탄디올, 1,4-Butanediol) Genomatica는 GENO BDO™ process 개발 완료 후 바이오 1,4-Butanediol 상용화 추진 계획 발표함. (Genomatica and BASF, 75,000 톤/년, Genomatica and Novamont 30,000 톤/년)
 - (아디프산, Adipic acid) Genomatica는 바이오 나일론(Nylon 6, 66) 생산을 위해 Hexamethylenediamine, caprolactam, adipic acid의 생물학적 생산기술을 개발하고 Horizon 2020 사업에서 EFFECTIVE 프로젝트를 통해 파일럿 규모 실증 중임.
 - (테레프탈산, Terephthalic acid) Virent는 보유하고 있는 Bioforming® process를 활용하여 바이오매스로부터 para-xylene를 생산하여 100% 바이오매스 유래 테레프탈산 생산 기술 개발함.
 - (2,5-퓨란디카르복실산, 2,5-Furandicarboxylic acid) Avantium은 XYZ technology를 개발하여 바이오매스 Fructose로부터 테레프탈산을 대체하는 2,5-퓨란디카르복실산을 제조하고 이를 PET 대체 100% 바이오매스 유래 PEF(Polyethylene 2,5-furandicarboxylic acid)를 개발하고 5,000 톤/년 생산 규모 공장 건립 계획을 발표함.

(a) PLA/PBS/PBAT의 물성 및 바이오매스 함량



(b) 바이오매스 유래 단량체 생산 기술 개발 현황

Succinity BIOBASE YOUR SUCCESS	• 바이오 숙신산 10,000 톤/년 생산 • Bio-PBS™ 제조에 사용 (50% 바이오매스 함량)
genomatica	• 바이오 숙신산 10,000 톤/년 생산 • Bio-PBS™ 제조에 사용 (50% 바이오매스 함량)
genomatica	• GENO BDO™ process 개발 후 상용화 추진 계획 발표 • Genomatica and BASF, 75,000 톤/년 • Genomatica and Novamont 30,000 톤/년
VIRENT	• Bioforming® process로 바이오매스 유래 para-xylene을 생산하고 이를 다시 테레프탈산 전환하는 기술
avantium	• XYZ technology를 개발하여 바이오매스 Fructose로부터 테레프탈산을 대체하는 2,5-퓨란디카르복실산을 제조 • 5,000 톤/년 생산 규모 공장 건립 계획 발표

| 그림 10. PLA/PBS/PBAT의 물성 및 바이오매스 함량 |

(자료 : <https://packagingeurope.com/compostable-bioplastic-packaging-pbs/>)

// 생분해성 바이오플라스틱 순환기술 개발

- ★ 선진국은 생분해성 바이오플라스틱의 시장규모가 확대됨에 따라 생분해성 바이오플라스틱의 환경 영향을 최소화하기 위해 생분해성 바이오플라스틱 순환기술(생물학적 분해 및 물리적 재활용, 퇴비화, 혐기성 소화 등) 개발에 집중하고 있음.
- ★ 생분해성 바이오플라스틱의 시장규모가 빠르게 성장하고 있으나, 현재까지 사용 후 생분해성 바이오플라스틱 폐자원의 순환기술은 물리적(Mechanical recycling), 유기적 재활용(Organic recycling)에 그치고 있음.
 - (물리적 재활용) 생분해성 바이오플라스틱을 기계적으로 분쇄하여 바이오플라스틱 원료로 재사용하는 기술로 주로 비분해성 바이오플라스틱에 이용됨.
 - (유기적 재활용) 생분해성 바이오플라스틱을 분해하는 미생물을 이용하여 퇴비화 또는 혐기성 소화를 통해 생분해성 바이오플라스틱을 분해하는 기술임.
- ★ 난분해성 석유계 플라스틱을 대체(Drop-in)하는 바이오매스 유래 PE, PP, PET는 기존 석유계 플라스틱 재활용 시스템에 적용이 가능하지만, PLA, PBS, PBAT, PHA 등의 생분해성 바이오플라스틱은 기존 석유계 플라스틱 재활용 시스템에 사용할 수 없어 새로운 분해 및 재활용 기술 개발이 필요함.
- ★ 특히, PLA는 잠재적으로 재활용이 가능하지만 별도의 재활용 시스템이 아직 개발되지 않았으나 이미 PLA 선별 기술이 사용 가능하므로, PLA 시장 규모가 충분히 성장하면 PLA 재활용 시장도 형성이 될 것으로 예상됨.
 - 유럽은 이미 다수의 PLA 재활용 기술 개발을 위한 프로젝트 (WRAP (영국), COREPLA (이탈리아), Re-PLA Cycle (독일), r-PLA (벨기에))를 진행하였음.
 - PLA, PBAT, PBS, PET 등 폴리에스터계 플라스틱을 분해하는 미생물을 탐색하고 가수분해 반응을 통해 생분해성 바이오플라스틱을 분해하는 효소의 발굴 및 개량 연구가 진행 중임 [5, 6].
- ★ 퇴비화(Composting)는 생분해성 바이오플라스틱을 산소에 민감하지 않는 미생물을 이용하여 물과 이산화탄소로 분해하는 기술이며, 유럽 규격 퇴비화 및 생분해 표준화 조건인 EN 13432 (최소 6개월 안에 90% 분해, 봉지의 90%는 미생물과의 접촉 시 3개월 내로 2mm 이하의 크기로 해체 및 분해)보다 훨씬 빨리 생분해가 일어나는 50-70°C 산업용 퇴비화 공정이 개발됨.
- ★ 혐기성 소화(Anaerobic digestion)는 생분해성 바이오플라스틱을 산소에 민감한 혐기성 미생물을 이용하여 혐기 분해를 하고 바이오가스를 얻는 방법으로 혐기성 소화로 얻어지는 주요 가스인 메탄은 에너지원으로 사용이 가능함.
- ★ 유럽은 Horizon 2020 프로그램 내 BIONTop 프로젝트를 통해서 8개 국가 20개 기관이 참여하여 바이오매스 함량이 85% 이상인 생분해가 가능한 새로운 바이오플라스틱을 개발하고 있으며, 바이오플라스틱의 순환을 위해 소각 또는 매립을 최소화하는 새로운 물리적 재활용, 유기적 재활용을 시스템을 개발하고 있음.

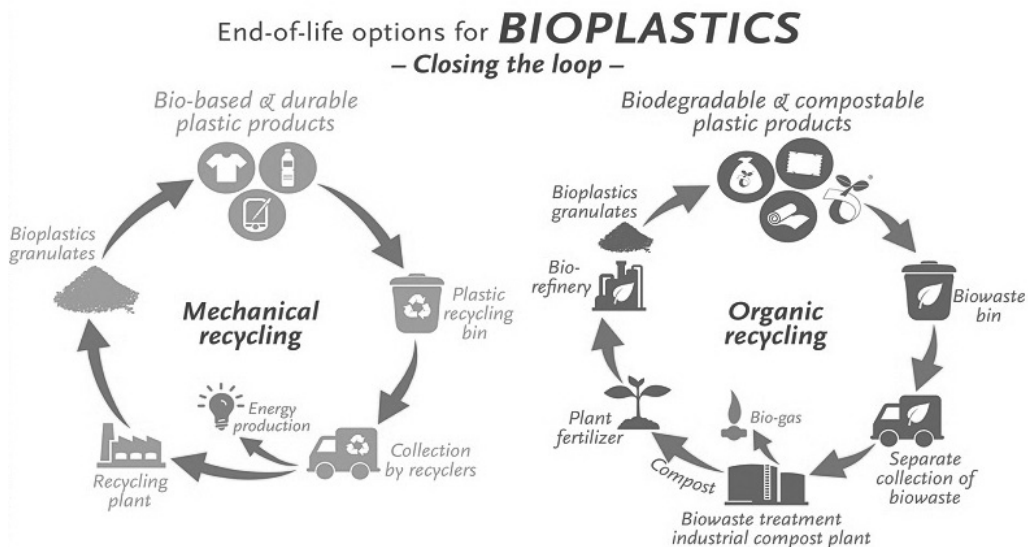


그림 11. 바이오플라스틱의 기계적/유기적 순환 기술

(자료 : European Bioplastics, nova-Institute (2018) Bioplastic market data 2018)

국내 생분해성 바이오플라스틱 기술 동향

★ 국내 생분해성 바이오플라스틱 산업은 PLA/PBS/PBAT 등 생분해성 원료 소재를 수입·가공하여 플라스틱 제품을 생산하는 중소·중견기업을 중심으로 바이오플라스틱 전·후방 산업생태계가 구축되어 있으며, 생분해성 원료 소재는 대기업을 중심으로 아직 연구 단계에 머물러 있는 상황임.

- (CJ제일제당) 미국 메타볼릭스(Metabolix)의 PHA 관련 자산인수를 통해 미국 보스턴에 위치한 연구시설과 고급 연구인력 및 네트워크 확보하고 상용화 연구 진행하고 있음.
- (SK이노베이션, SK케미칼) PLA 생산 원천 기술 연구 및 PLA 기반 유연 생분해성 바이오플라스틱 ECOPLAN FLEX 판매하고 있음.
- (대성) 전분계 생분해성 바이오플라스틱 연구개발을 진행하고 있음.
- (롯데케미칼) PBCT(Polybutylene carbonate-co-terephthalate) 기술이전 후 파일럿 규모 생산 연구개발을 진행하고 있음.
- (SKC) 세계최초 PLA 이축연신 필름 상용화에 성공하여 판매중이나 시장성 성장의 둔화로 소량 판매 중임.
- (에스엔폴) PBS, PBAT를 2천톤/연 규모로 생산 중이나 경제성 문제로 베트남 기업에 매각됨.

| 표 4. 국내 생분해성 바이오플라스틱 주요 생산 기업 |

기업명	사업 제품
 제일제당	미국 메타볼릭스(Metabolix)의 PHA 관련 자산을 인수하여 상용화 추진
 이노베이션 SK 케미칼	- 젯산 및 PLA 생산 원천 기술 연구 - PLA 기반 유연 생분해성 바이오플라스틱 ECOPLAN FLEX 판매
 DAESANG	전분계 생분해성 바이오플라스틱 연구개발 진행
 LOTTE CHEMICAL	PBCT(Polybutylene carbonate-co-terephthalate) 기술이전 후 파일럿 규모 생산 연구개발 진행
 SKC	세계최초 PLA 이축연신 필름 상용화에 성공하여 판매
 S-EnPol Eco Friendly Polymer	OPBS, PBAT를 2천톤/년 규모 생산 설비를 구축하고 있으나, 경제성 문제로 베트남 기업에 매각

4. 결론

- ★ 전 세계적으로 플라스틱 제품 사용 규제를 강화하고 있으며, 석유계 비분해성 플라스틱 대체를 위한 바이오플라스틱 시장이 급성장에 따라 글로벌 기업은 바이오플라스틱 제조기술 경쟁력 확보하고 글로벌 시장 선점에 나서고 있음.
- ★ 특히, 유럽은 지속가능한 바이오매스 자원으로부터 생분해성 바이오플라스틱을 생산하고, 사용 후 버려지는 플라스틱 폐기물을 재활용하는 기술을 개발하여 바이오플라스틱산업을 일방형에서 순환형 구조로 전환하고 있음.
- ★ PLA, PBS, PBAT 등 주요 생분해성 바이오플라스틱 원료 소재는 특정 기업에서 오랜 연구를 통해 경제성 있는 바이오·화학 융합 공정을 개발하여, 글로벌 시장을 주도하고 있으나 국내 기업은 협소한 시장 규모와 바이오플라스틱 전주기적 요소기술의 부재로 시장 진입이 어려운 상황임.
- ★ 따라서 생분해성 바이오플라스틱을 대부분 수입에 의존함에 따라 생분해성 바이오플라스틱 국산화 및 자립화를 위해 원료-소재-제품-순환의 전주기 기술의 개발 및 실증이 시급함.
 - 신규 소재 및 산업화 기술 개발에 대한 지원 확대, 기존 플라스틱의 업사이클링(Upcycling) 기술 개발 등
- ★ 국내 바이오플라스틱 산업 발전 속도를 고려한 다양한 바이오플라스틱 육성 정책의 도입이 절실함.
 - 바이오매스 함량이 높은 소재의 단계적 사용 촉진 제도, 바이오매스 활용 제품 인증 제도, 바이오플라스틱의 마켓시범사업과 민간 얼라이언스 추진을 통해 조기 민간 투자를 유도 등
- ★ 석유계 플라스틱 글로벌 경쟁력을 확보하고 있는 국내 플라스틱 대·중소기업들이 바이오플라스틱 제조기술 경쟁력 확보 및 사용촉진제도 등을 통해 국내 시장 규모를 확보할 경우, 바이오플라스틱 소재 자립화 및 국내 기업의 글로벌 시장 진출 가능할 것을 기대됨.

[참고문헌]

1. “Microplastic contamination of river beds significantly reduced by catchment-wide flooding”, Rachel Hurley 외 2인 (2018), Nature Geoscience, 11, 251–257
2. “플라스틱 쓰레기 제거 연합(AEPW, Alliance to End Plastic Waste)”, <https://endplasticwaste.org/>
3. “BASF 캄사이클링 기술”, <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/management-and-instruments/circular-economy/chemcycling.html>
4. European Bioplastics, nova-Institute (2018) Bioplastic market data 2018
5. “A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)”, Shosuke Yoshida 외 9인 (2016), Science, 351 (6278), 1196–1199
6. “Screening and characterization of novel polyesterases from environmental metagenomes with high hydrolytic activity against synthetic polyesters”, Mahbod Hajighasemi 외 20인 (2018), Environmental Science & Technology 52 (21), 12388–12401
7. “The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics”, Ellen MacArthur Foundation (2016)
8. “Production, use, and fate of all plastics ever made”, Roland Geyer 외 2인 (2017), Science Advances, 3 (7), e1700782
9. “Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo™ Polylactide Production”, Erwin T.H. Vink and Steve Davies (2015), Industrial Biotechnology, 11 (3), <https://doi.org/10.1089/ind.2015.0003>
10. “The eco-profiles for current and near-future NatureWorks® polylactide (PLA) production”, Erwin T.H. Vink 외 4인 (2007), Industrial Biotechnology, 3 (1), <https://doi.org/10.1089/ind.2007.3.058>

[국내외 주요 기술개발 현황]

연구기관명	프로젝트명	개요	연구기간
Bio-based Industries Joint Undertaking 과제 (8개 국가 20개 기관이 참여)	○ BIONtop (Novel packaging films and textiles with tailored end of life and performance based on bio-based copolymers and coatings)	○ 바이오매스 함량이 85% 이상인 생분해가 가능한 새로운 바이오플라스틱을 개발하고 있으며, 바이오플라스틱의 순환을 위해 소각 또는 매립을 최소화하는 새로운 물리적 재활용, 유기적 재활용을 시스템을 개발	2019.6 - 2023.5
Bio-based Industries Joint Undertaking 과제 (7개 국가 13개 기관이 참여)	○ NEWPACK (Development of new Competitive and Sustainable Bio-Based Plastics)	○ 농업부산물로부터 생분해가 가능하며 향산화, 항균 등 특수 기능이 추가된 새로운 바이오플라스틱을 개발	2018.6 - 2021.5
(주) 에이치피엠글로벌	○ 생분해성 플라스틱을 활용한 비분해 포장재 대체 제품개발	○ 비분해 플라스틱이 활용되는 다양한 적용처(식품포장필름, 용기, 사출제품, 일회용 봉투, 음식물쓰레기 봉투 등) 중 생분해 플라스틱을 활용하여 구성 재질을 대체 연구 개발	2018.6 - 2022.3
(주) 덕양산업	○ 자동차용 고성능 바이오폐리우레탄 생산기술 개발	○ 자동차 부품 및 내장재를 그린카본 유래 플라스틱으로 전환하기 위한 기술개발	2015.7 - 2019.6