

생분해성 플라스틱 탄소순환기술 및 표준·인증 동향

저자 | 한정우 화학공정PD KEIT
김대훈 수석 KCL
전현열 선임 KRICT
구준모 교수 충남대
김현승 책임 KEIT

- 요약**
- 생분해성 플라스틱 산업은 선형경제(Linear Economy)의 틀을 넘어 원료부터 수거·회수 후 탄소순환까지 긴밀한 체계가 필수적인 순환경제(Circular Economy)가 바탕이 되어야 한다. 현재 탄소순환기술에 이르는 전(全)주기적 관점에서의 관리가 요구되는 시점으로, 이와 연관된 해외 선도 국가들의 모범 사례를 참고할 필요가 있다.
 - 기존의 일회용품 위주의 생분해성 플라스틱 생산에서 벗어나 고기능성, 고기능화, 고물성(高物性)이 필요한 고부가 가치 제품으로의 확대가 필요하다. 이를 위해서는 소재의 확보-응용 제품-최종 분해에 이르는 전주기적 관점에서의 저변 확대가 필요하다. 이를 통해 생분해성 플라스틱의 지속적인 단점 개선과 가격 경쟁력 극복, 고기능화, 순환경제 이행을 위한 탄소순환시스템의 구축을 통해 진정한 친환경성을 구축해야 한다.
 - 유럽, 미국 등 선도 국가에서는 생분해성 플라스틱의 탄소순환을 위해 소각이나 매립을 최소화하는 새로운 탄소순환(물리적·화학적·유기적) 시스템을 도입하여 확대하고 있다. 국내의 경우 폐플라스틱 재활용 위주로 정책이 시행되고 있다. 다만 생분해성 플라스틱은 재활용 불가능한 소재로 구분하고 있어서 관련 산업의 육성이 어려운 상황이다. 생분해성 플라스틱 산업은 원료부터 수거·회수 후 탄소순환까지 긴밀한 순환체계가 필수적이다. 또 다양한 탄소순환시스템을 기반으로 하여 생분해성 플라스틱 원료와 제품화 및 이를 회수·처리·탄소순환하는 기술 개발과 실증화 사업이 시급히 요구된다.
 - 최종 소비에서 끝날 것이 아니라 기계적·화학적으로 재활용하여 업사이클링을 통한 탄소순환시스템을 구축해야 한다. 이는 정책적·기술적·표준화 등 시스템 간의 긴밀한 협조가 수반되어야 한다. 또 기존의 소재 확보를 통한 기술 선점에서 벗어나 리빙랩(Living Lab) 시스템 등에서 획득한 피드백을 바탕으로 시장과 정책적 요구를 반영해야 한다. 나아가 기업들의 기술 경쟁력 향상과 대내외 규제를 개혁함으로써 부흥하는 방향으로 나아가야 한다.

1 개요

- 생분해성 플라스틱 산업은 기후 위기 극복, 탄소 중립, 플라스틱 쓰레기 문제 등의 대안으로 부상하고 있는데, 원료↔가공·제품↔수거↔탄소순환까지 긴밀한 순환 체계가 필요한 산업이다.



출처: 2022 글로벌 바이오플라스틱 컨퍼런스, 산업통상자원부 & 인천광역시

그림 1.

생분해성 플라스틱 산업의 밸류 체인

- 생분해성 플라스틱은 주로 'food contact'가 이뤄지는 봉투, 스푼, 빨대 등 일회용품 시장과 통상적으로 회수나 유실 가능성이 높은 생분해성 멀칭 필름, 어망, 어구 등 농어업 제품 시장으로 형성되어 있다. 해외에서는 정수기 필터, 고발포 폼, 차량용 플로어 매트 등 고기능화를 통해 비교적 장기간 사용되는 부품 소재 산업으로 확대되고 있다.



그림 2.

생분해성 플라스틱의 적용 제품

- 또 생분해성 플라스틱 제품의 사용 후 수거-회수-탄소순환으로 이어지는 다양한 탄소순환모델(물리적·화학적·유기적 재활용)이 반영된 기술이 개발되고 있다.

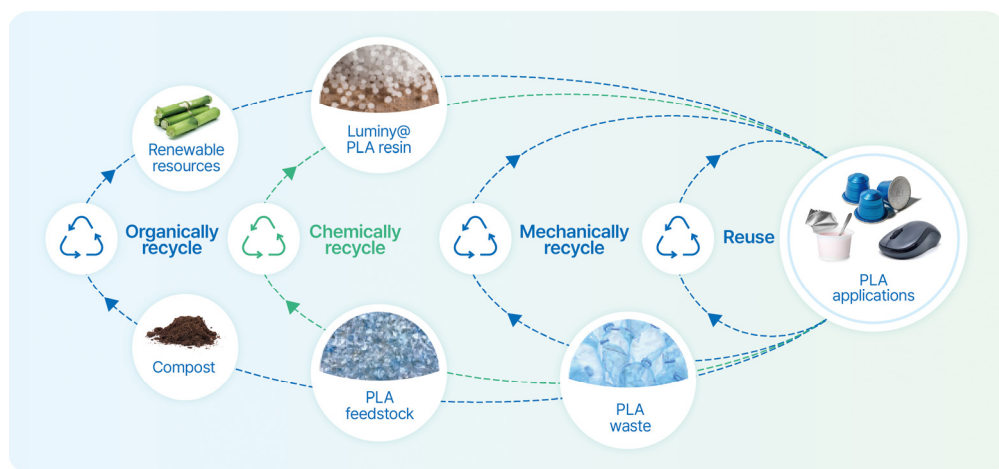


그림 3.

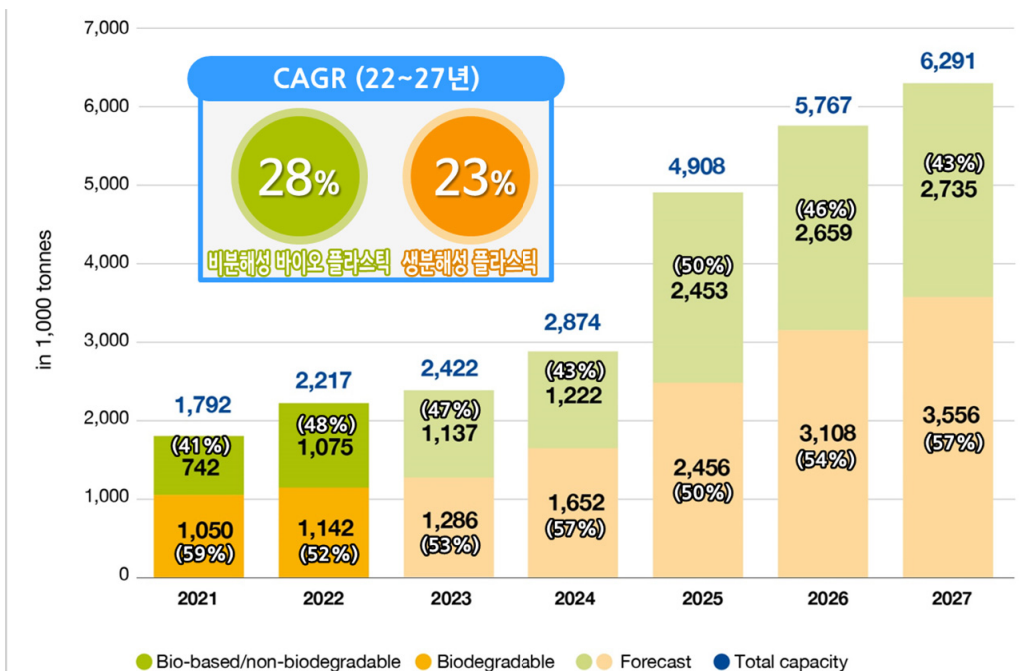
토탈에너지스 콜비온(TotalEnergies Corbion)의 PLA(Polylactic Acid) 탄소순환 공정

- 전 세계적으로 ESG 경영 및 순환경제의 기술적 측면과 더불어 국내에서는 생분해 플라스틱과 관련한 많은 정책이 수립되고 있다. 탄소 중립, 자원순환 등 생분해 플라스틱의 수요가 증가함에 따라 도시 기반 시설을 대상으로 전용 수거, 처리, 에너지 자원화 기술 개발 및 실증의 필요성이 제기되고 있다.

2 관련 시장 동향

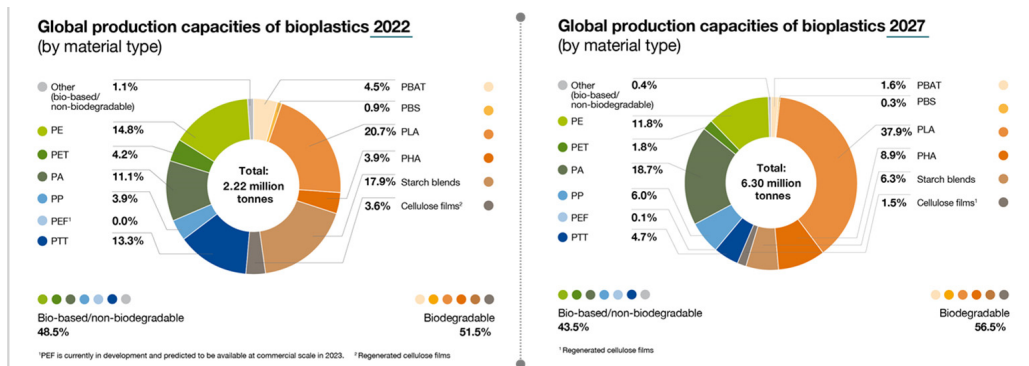
글로벌 바이오플라스틱 생산 능력

- 유러피언바이오플라스틱협회(European Bioplastics)에 따르면, 생분해성 플라스틱의 생산 능력은 2022년 114만 톤에서 2027년 356만 톤으로 연평균 23%씩 증가할 것으로 전망된다.
- 생분해성 플라스틱 중 바이오 기반인 PLA와 PHA(polyhydroxyalkanoate)의 생산 능력은 2022년에 각각 45.9만 톤과 8.7만 톤이었다. 2027년에는 238.4만 톤과 56.0만 톤으로 급증할 것으로 예상된다. 반면에 석유계 생분해성 플라스틱인 PBAT(Poly-Butylene Adipate Terephthalate)와 PBS(Poly butylene succinate)는 정제될 것으로 예상된다.
- 생분해성 플라스틱이 포함된 바이오플라스틱 제품은 고기능성이 요구되는 자동차/운송, 전기/전자, 경질 포장 분야로 영역을 확대하고 있다.



출처: european-bioplastics.org/market

그림 4
바이오플라스틱 글로벌 생산 능력



출처: european-bioplastics.org/market

그림 5.
소재별 바이오플라스틱 글로벌 시장 점유율

표 1. 소재별 바이오플라스틱 생산 능력

구분	소재	점유율 (%)		생산 능력(천 톤)	
		2022년(A)	2027년(B)	2022년 (Ax2022년 총생산능력)	2027년 (Bx2027년 총 생산능력)
비분해 바이오	PE	14.8	11.8	328.1	742.3
	PET	4.2	1.8	93.1	113.2
	PA	11.1	18.7	246.1	1,176.4
	PP	3.9	6.0	86.5	377.5
	PEF	-	0.1	-	6.3
	PTT	13.3	4.7	294.9	295.7
	기타	1.2	0.4	26.6	25.2
	소계	48.5	43.5	1,075	2,735
생분해	PBAT	4.5	1.6	99.8	100.7
	PBS	0.9	0.3	20.0	18.9
	PLA	20.7	37.9	458.9	2,384.3
	PHA	3.9	8.9	86.5	559.9
	Starch blend	17.9	6.3	396.8	396.3
	Cellulose films	3.6	1.5	79.8	94.4
	소계	51.5	56.5	1,142	3,556
합계		100	100	2,217	6,291

출처: european-bioplastics.org/market

국내외 시장 현황

- 최근 석유화학 계열 플라스틱을 바이오화학 소재로 대체되고 있다. 추후 국내 생분해성 플라스틱 원료의 생산 능력은 2019년 2.3만 톤(추정)에서 2025년 32만 톤까지 증가할 것으로 전망된다. 해양 쓰레기 문제 같은 글로벌 환경 이슈와 국내 화이트바이오 산업(White biotechnology)에 대한 육성 정책 등으로 국내 생분해성 원료 생산 기업을 중심으로 원료 생산 능력의 확대를 추진하고 있다. 또 고기능성이 확보된 다양한 응용 분야의 생분해성 플라스틱 원료 생산 기술의 개발과 상용화를 적극 추진하고 있어서 향후 고성장이 예상된다.

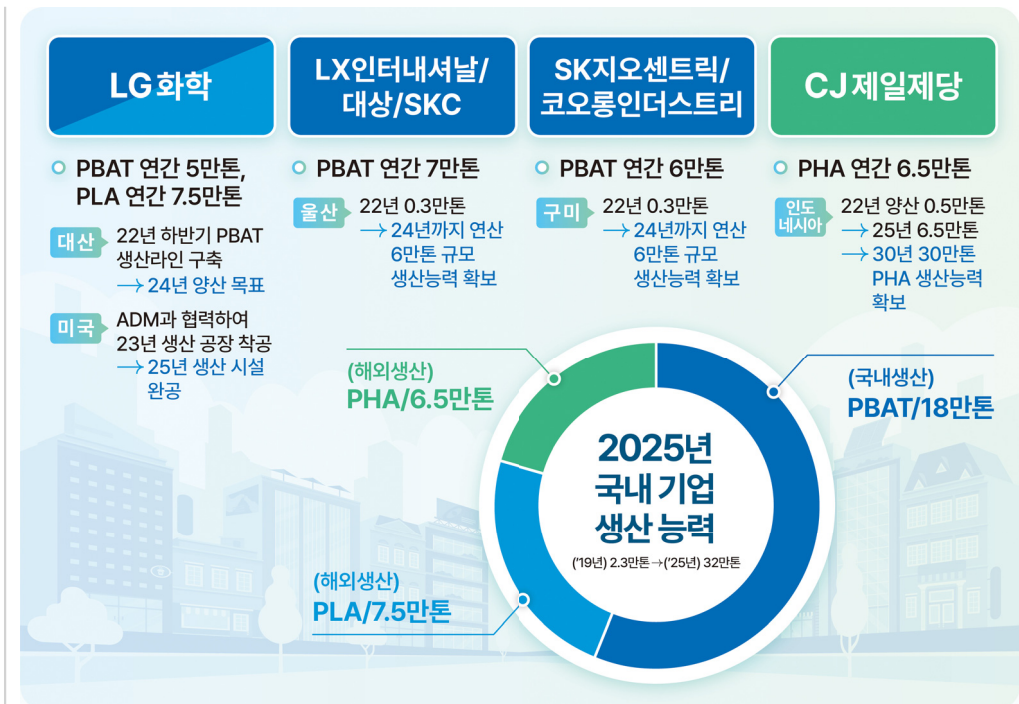


그림 6.

국내 기업의 생분해성 플라스틱 원료 생산 능력

- 글로벌 기업들은 생분해 플라스틱(PLA-NatureWork社, PBAT-BASF社 등)의 상용화를 이루어내고 전 세계적으로 상용화하여 공급 중이다. 현재 Bio-PET, Bio-PU, Bio-PE 등을 활용한 제품에 대한 상용화 단계까지 진입했다.
- 그에 반해 국내 시장의 경우, 소재 및 원료 측면에 있어서 여전히 다수 수입에 의존하는 실정이다. 기존 석유계 플라스틱에 비해 정책이나 경제성 등의 이유로 사업화 진행이 어려웠다.
- 최근 국내 대기업 중심으로 국산화를 위한 다양한 소재 개발과 상용화를 위한 단계에까지 진입했으며, 탄소순환(원료-제품화-수거-재생-순환기술) 기술 개발과 병행하여 진행 중이다. 또 CJ제일제당을 비롯한 많은 기업들이 생산 기술 다변화와 국내외 산학연 체계 구축, 산업/국가 정책적 R&D 지원,

해외 유관 기업들과의 협력을 통해 기술 경쟁력 향상을 꾀하고 있다. 이로 인해 상업화 등의 가시적 성과가 나올 것으로 기대된다.

- 특히 미국을 비롯한 선도국 대비 3년 이상의 기술 격차를 따라잡기 위해서는 생산 고도화와 상용화가 필요하다. 더불어 생분해 플라스틱 인증체계 지원/탄소순환 및 실증 기술 분야 등에 있어서도 기업별로 수요자 맞춤형으로 정부 차원의 적극적인 정책적 전략과 재정적 지원이 필요하다.

표 2. 국내 생분해성 플라스틱에 대한 탄소순환 관련 기술 수준과 기술 격차

구분	2021년 해당 기술 최고 기술 보유국가 대비	
	기술 수준	기술 격차
생분해성 플라스틱 수거/분류 기술	48.6%	3.3년
생분해성 플라스틱 전처리 기술	69.7%	2.6년
생분해성 플라스틱 자원화 기술	67.9%	4.2년

출처: 「탄소 중립도시형 생분해 플라스틱 자원화 플랜트 실증 연구 기획 최종보고서」, 국토교통부; 국토교통과학기술진흥원(2022).

3 생분해성 플라스틱 탄소순환 기술 동향

화학적 재활용

- **(화학적 재활용)** 전통적인 플라스틱 회수 시스템이나 렌탈, 배송 시스템 등 폐쇄형 수거 시스템(closed-loop)을 통하여 사용 후 생분해성 플라스틱 제품을 회수하고 화학적 해중합(depolymerization)과 재중합 공정을 거쳐 고품질의 생분해성 플라스틱 원료를 생산하는 기술이다. 현재 PLA 소재 기반으로 재활용 기술이 상업화되고 있다.
- 글로벌 PLA 원료 생산 1위 기업인 토탈에너지스 콜비온은 사용한 PLA 병을 수거·회수한 후 광학 등 선별 과정을 거쳐서 화학적 재활용과 물리적 재활용을 추진하고 있다. 화학적 재활용으로 생산된 rPLA(재생 PLA)는 신재료와 블렌딩하여 재활용 원료 20% 이상인 rPLA 원료를 생산하고, Luminity®를 세계 최초로 상품화했다.

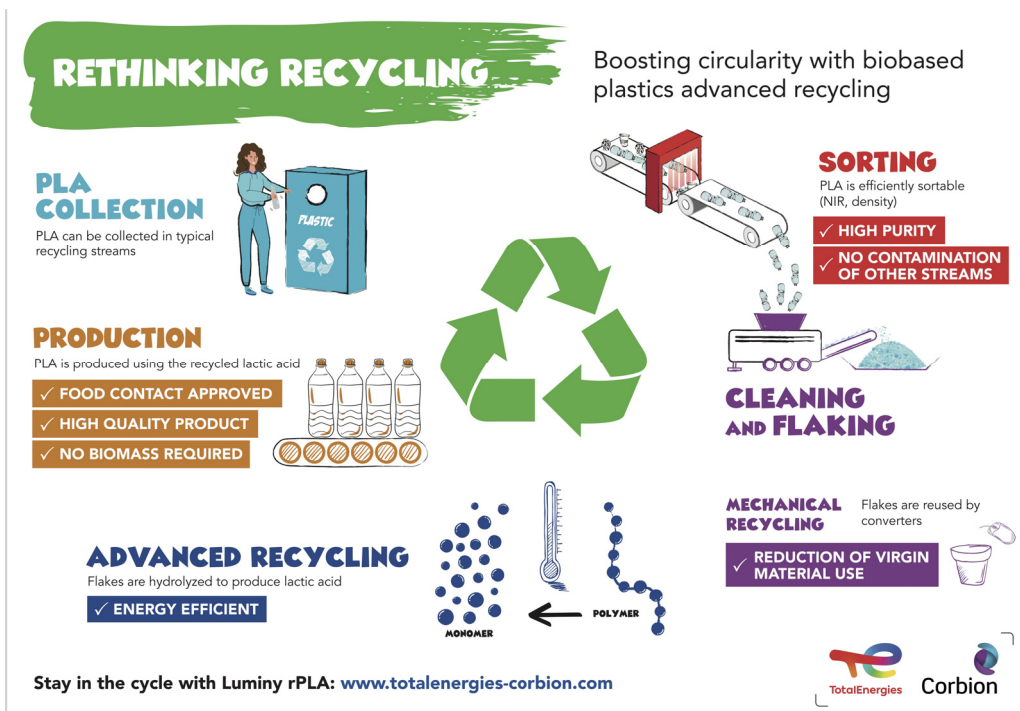


그림 7.

토탈에너지스 콜비온의 사용한 PLA 병을 활용한 rPLA 생산 프로세스

- 국내의 경우, 이슬산업이 산기평 탄소저감형 석유계 원료대체 화학공정 기술개발 사업의 rPLA 생산기술 개발을 총괄하고 있다. 이슬산업은 토탈에너지스 콜비온 및 포스코인터내셔널과의 업무 협력을 통하여 사용 후 회수되는 PLA를 화학적으로 재활용하는 리사이클링 기술 개발을 2026년까지 완료하고 상업화를 추진할 예정이다. 폐플라스틱의 화학적 재활용 기술 상용화와 더불어 생분해성 플라스틱

또한 화학적 재활용이 가능하다. 그러므로 탄소저감기술에 생분해성 플라스틱의 화학적 재활용 기술이 반영되어 다양한 탄소원을 기반으로 하는 기술 개발이 필요한 시점이다.

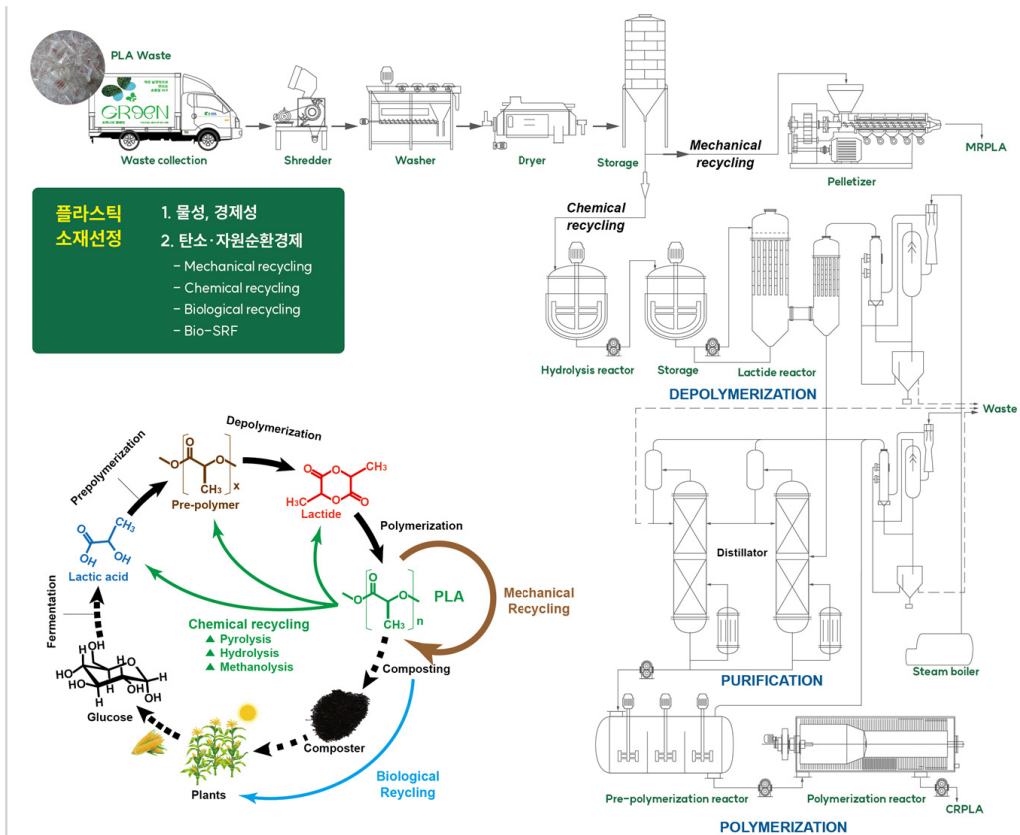


그림 8. 이슬산업의 PLA 화학적 재활용을 위한 탄소순환 공정 체계

유기적 재활용(바이오가스화와 퇴비화)

- (바이오가스화) 생분해성 플라스틱과 유기성 폐자원(음식물 쓰레기, 정원 쓰레기 등)의 통합 혐기소화(anaerobic digestion)를 통해 바이오가스를 생산하고, 이를 유용 자원화(연료, 전기, 퇴비 등)하는 탄소순환 기술이다. 생분해성 플라스틱 제품은 대부분 food contact가 이뤄지는 일회용품에 주로 사용된다. 다만 기존 물질의 재활용 체계에 편입이 불가하기 때문에 국제적으로 통용되는 유기적 재활용(organic recycling) 순환경제 체계 도입과 혐기성 분해방식으로 생분해성 플라스틱을 동시에 분해·처리하는 국내 기술의 개발과 실증사업이 필요하다.

- **(미국)** 캘리포니아 ZWE(Zero Waste Energy)는 음식물 쓰레기와 생분해가 가능한 일회용품(컵, 접시, 수저 등)을 통합 처리하는 5천 톤 규모의 바이오가스화 시설을 운영 중에 있다. 생분해성 일회용품이 담긴 생분해성 봉투를 개봉하여 음식물 쓰레기와 혼합하고 21일간 혐기소화 시설에서

- **(스위스)** Kompogas Winterthur AG는 정원 쓰레기, 음식물 쓰레기와 생분해성 봉투 등을 고온 혐기소화(55℃) 조건에서 14일간 분해 후 발생하는 바이오가스를 전력으로 변환한다. 슬러지는 호기성 퇴비화 공정을 통해 퇴비로 활용하는 유용 자원화 시설을 운영하고 있다.
- **(독일)** 이탈리아 기업인 노바몬트(Novamont)의 전분계 생분해성 봉투를 독일 대표 4개 혐기소화 시설[운전 온도: 고온(thermophilic), 중온(mesophilic) 조건]에서 분해성 및 분해 기간 확인 결과, 10주 이내 100% 분해가 되는 것을 확인했다.
- **(국내)** 우리나라의 경우, 생분해성 일회용품의 고온 혐기소화(55℃)와 화학 분리공정을 통해 이산화탄소와 메탄을 분리한다. 이를 탄소원으로 하여 PHA를 생산하는 연구개발 사업을 진행 중에 있다. 하지만 보급 확산을 위한 혐기소화 실증사업이나 혐기소화가 가능한 생분해성 원료 및 제품 개발이 필요하다.

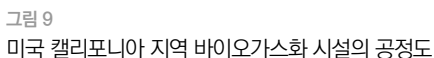


표 3. 독일 대표 4개 혐기소화 시설의 유기성 폐기물 처리 프로세스

Processing phase	Facility 1 Saerbeck	Facility 2 Braunschweig	Facility 3 Lingen	Facility 4 Brandholz
Pre-treatment	Bag opener	Rotating screw Manual sorting Disc grinder	Rotating screw	Double screw grinder Star screen
Anaerobic Digestion	4 Weeks	3 Weeks	3 Weeks	3 Weeks
Technology	Batch (thermophilic)	Plug flow (thermophilic)	Batch (mesophilic)	Plug flow (thermophilic)
Active Composting	1 Week	2 Weeks	1,5 Weeks	1 Week
Technology	Aerated tunnel	Aerated static piles	Aerated tunnel	Aerated tunnel
Maturation	5 Weeks	2 Weeks	5 Weeks	1 Week
Technology	Windrow turner	Front end loader	Windrow turner	Front end loader
Total duration	10 Weeks	7 Weeks	9,5 Weeks	5 Weeks

- **(퇴비화)** 퇴비화는 자연적으로 발생하는 미생물이나 박테리아 등이 나뭇잎, 음식물 쓰레기와 같은 유기물을 분해하는 호기성 과정으로, 영양분이 풍부한 토양 개량제인 ‘퇴비’를 생성하는 자연의 자원순환 프로세스다. 형성된 퇴비는 Carbon Sequestration(탄소 격리)를 하여 대기 중 CO₂를 감축시킬 수 있다. 또 온실가스 배출량을 감소시키고 토양의 구조 및 영양소를 보완하고 침식을 감소시킬 뿐 아니라 수분 유지, 홍수 완화 등 다양한 효과를 줄 수 있어 그 중요성이 각광받고 있다. 특히 PLA와 같은 Compostable Plastic들이 관심을 받으면서 퇴비화 과정에서 100% 분해되어 없어지고 생성된 퇴비에도 문제가 없는 것으로 알려져 플라스틱 분해에 새로운 방안으로 떠오르고 있다.



출처: 캘리포니아대학의 Ting Xu 그룹

그림 10.

퇴비화 조건에서 더 빠르게 분해될 수 있는 효소 내포형 플라스틱

- **(호주, 뉴질랜드)** 호주와 뉴질랜드에서 시행하고 있는 Compost Connect는 식품 서비스 사업체를 퇴비화 서비스에 연결하여 폐기물의 매립을 막고 지속 가능한 폐기물 관리 관행을 장려하는 비영리 퇴비화 계획이다. 호주에 국가적인 퇴비화 인프라가 없는 상황에서 음식물 쓰레기 재활용 위기에 대한 지역적 해결책이 필요했다. 이때 호주의 선도적인 식품 포장 회사인 BioPak은 식물성 포장재를 개발하여 음식물 쓰레기와 포장재를 같이 퇴비화하고 폐기물 순환고리를 달성하여 순환경제를 촉진시켰다.

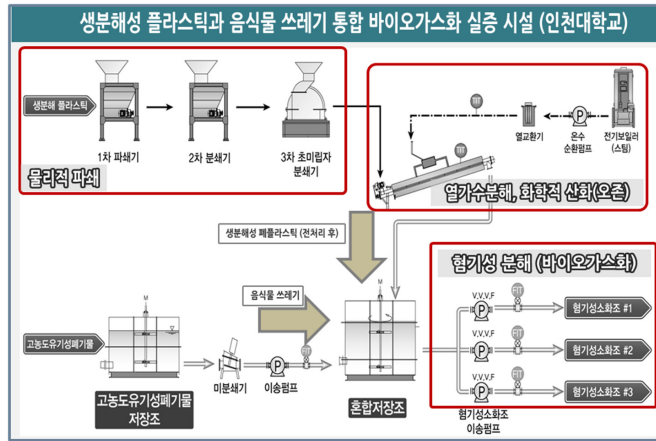


그림 11.
Compost Connect에서 제공되는 수거용 Compost bin

- **(호주)** 하گی스 기저귀 제조업체인 김벌리 클라크(Kimberly-Clark)는 호주에서 혁신적인 기저귀 재활용 시험인 '더 네이프 루프(The Nappy Loop)'를 운영 중에 있다. 호주에서 매년 약 15억 개에 달하는 일회용 기저귀가 매립되는 문제를 해결하기 위해 하گی스 기저귀를 수거하여 퇴비화 시설에 전달하고 처리했다. 혐기성 소화 과정에서 사용한 기저귀의 유기 물질은 영양이 풍부한 퇴비로 변하고, 플라스틱 성분은 분리되어 향후 재활용을 고려하고 있다. 또한 이 과정에서 바이오 에너지가 생성되며, 이 에너지는 포집되어 퇴비화 시설에 필요한 전력을 공급하는 데 사용된다.
- **(벨기에)** Ecowarf는 벨기에 루벤에 위치한 산업 퇴비화 시설로 연간 47,000톤의 유기성 폐기물을 처리하고 16,000톤의 퇴비를 생산한다. 퇴비화 전환율은 1/3이다. 바이오매스(biomass)의 3분의 1은 퇴비로 전환되고, 3분의 1은 물로, 3분의 1은 재퇴비화되거나 바이오매스로 사용될 잔여물로 전환된다. 현재 에코워프는 연간 약 100만 개의 퇴비화 가능한 비닐봉지를 처리하고 있으며, 그밖에도 컵, 수저, 포장재 등 대부분의 'OK HOME compost', 즉 가정용 퇴비 라벨이 부착된 제품도 처리하고 있다.

국내 생분해성 플라스틱 탄소순환 사례

- 인천대학교와 이슬산업은 사용 후 회수된 PLA/PHA 원료 기반 생분해성 일회용품을 혐기소화를 통해 바이오가스화하고 정제 후 인천대학교 기숙사의 난방 연료로 활용하는 과기부 실증특례사업을 2023년 하반기부터 추진 예정이다.



출처: 인천대학교

그림 12.

혐기소화를 통한 바이오가스화 실증 시설 사례

- 에코패키지솔루션(EPS)은 인천시 내 주요 행사(송도맥주축제, 인천펜타포트락페스티벌 등)에서 PLA 사용 후 전용 회수함을 통해 분리 배출된 컵과 보틀을 세척·분쇄하여 물리적 재활용과 화학적 재활용에 사용되는 원료로 탄소순환하고 있다.

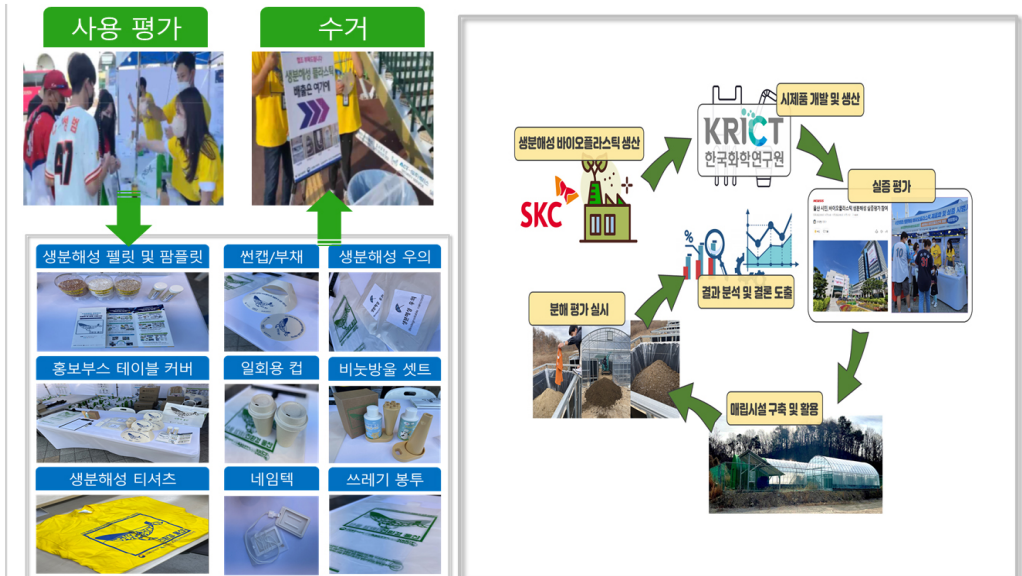


출처: 에코패키지솔루션

그림 13.

EPS의 생분해성 플라스틱 탄소순환 사례

- 한국화학연구원은 PBAT/CNC 복합체를 개발 적용한 응원 도구, 일회용 봉투 등 10종의 시제품을 울산시 문수야구경기장을 시범단지로 하여 사용 후 회수된 시제품을 퇴비화하는 순환 실증사업을 진행 중에 있다. 울산시 매립지의 필드 테스트를 통해 축진 분해 및 독성 안전성 검증을 병행하여 국내 퇴비화를 통한 탄소순환 가능성을 연구하고 있다.



출처: 한국화학연구원

그림 14.
생분해성 일회용품 퇴비화 탄소순환 실증

4 고기능 생분해성 플라스틱 제품 개발 사례

- **(필터)** 영국 TAPP2는 하우징에 PLA 기반 생분해성 소재로 적용하고, 필터 역할을 하는 카본 블록은 코코넛 껍질을 활용한 리필 카트리지를 사용해 세계 최초로 상용화했다. 미국 UV Care는 모든 부품이 6개월 이내 90% 이상 생분해되는 공기청정기 헤파필터(99.398% 파티클 제거 성능)를 출시했다.



그림 15.
가정용 정수기 필터

출처: 영국, Tapp2



그림 16
생분해성 공기청정기 필터

출처: 미국, UV CARE

- **(고발포 폼)** 독일 바스프(BASF)는 생분해성 원료에 펜탄을 충전하여 비드법 발포 폼을 개발했으며, EPS와 EPP의 중간 수준의 열전도율인 0.034W/mK의 성능을 구현했다. 국내의 BGF에코솔루션은 PLA 기반 항바이러스 기능을 갖는 압출법 폼을 세계 최초로 상용화했고, 5~10배 수준의 저발포 비율을 향상시키기 위한 기술 개발에 주력하고 있다.



그림 17.
비드법 발포 폼

출처: 독일, BASF



그림 18.
압출법 발포 폼

출처: BGF에코솔루션

- **(필름, 접착제)** 삼양이노켄은 옥수수 같은 바이오매스에서 추출 가능한 ‘이소소르비드(ISB)’를 세계 두 번째로 상용화했다. 기존의 석유 유래 소재인 생분해성 플라스틱 PBAT(Poly Butylene Adipate-co-Terephthalate)의 단점을 개선한 PBIAT(Poly Butylene Isosorbide Adipate-co-Terephthalate) 생분해성 플라스틱을 개발한 것이다. 이는 이소소르비드를 함유하여 기존 PBAT보다 더 강하고 질긴 특성을 나타낸다. 즉 적은 양의 원료로 얇고 질기며 토양에서의 분해 속도가 빨라 농업용 멀칭 필름 등에 적용이 가능하다. 또 일회용 생분해성 빨대나 테이프용 접착제 등에도 적용 가능하며, EU의 생분해성 플라스틱 규제 조건(바이오매스 함량 50% 이상)을 충족하므로 일회용 봉투로도 적용 가능하다.



출처: 삼양이노켄, PBIAT

그림 19.

‘이소소르비드’ 적용 생분해성 플라스틱

- **(고기능성 폴리에스터 섬유)** 휴비스(Huvis)는 재생 PET에 바이오 고분자(Biopolymer)를 개질(reforming, 改質)하고 공중합(copolymerization, 共重合) 과정을 거쳐 생분해 가능한 폴리에스터(Poltester)를 생산했다. 특히, 바이오매스 함량을 늘릴수록 생분해 속도가 우수하며, 물성의 조절이 가능할 뿐 아니라 내구성/내열성/생분해 속도 조절 측면에서 이점이 있다. 또 기존 PLA의 사용 수명이 6~12개월 정도인 반면, 생분해 PET는 수명이 4~10년이다. 내구성 측면에서도 PLA가 1.3년인 반면, 생분해 PET는 4.8년 정도 경과해야 물성 저하가 일어나는 것으로 알려져 있다. 생분해도는 180일 경과 시 61.7%(ISO 21701)/생태독성평가(OECD 시험지침 208)를 만족하는 것으로 평가되었다. 현재 자동차용 시트, 필터, 의류, 산업용 소재, 농업용 멀칭 필름 등에 적용 가능하다.



출처: Huvis, ecoen

그림 20.
생분해성 폴리에스터 섬유

- **(고성능 사출품 및 필름)** 안코바이오플라스틱스(ANKOR Bioplastics)는 PBS(Polybutylene succinate) 및 PLA 등과의 컴파운딩을 통한 고기능성 원료 개발을 통해 고기능성 가정용 정수기 필터 하우징(내수압 및 내충격)을 개발하여 시판 중이다. 또 해양에서 일정 시간 경과 후 분해가 가능하면서도 기존 대비 강도는 10%, 유연성은 20% 향상된 PBEAS(Poly Butylene Succinate-co-Butylene Adipate-co-Ethylene Succinate-co-Ethylene Adipate) 생분해성 소재 및 어망을 개발하여 현장에 보급 중이다.



출처: 안코바이오플라스틱스, PBS 및 PBEAS

그림 21.
토양 및 해양 생분해성을 가진 고기능성 소재

- **(고유연성 포장재)** CJ제일제당은 미생물 발효에 의한 비결정성 PHA(Polyhydroxyalkanoate)를 생산하는 데 성공했다. 특히 비결정성으로 인해 유연성/내화학성/해양 생분해도에 있어 이점이 있다. 포장재로 적용하여 시판 중이며, 그 외 PLA 등과의 컴파운딩을 통한 사출품 등으로 응용 제품을 다변화하는 중이다.



출처: CJ제일제당

그림 22.
PHA 유연 필름 및 응용 제품

5 생분해성 플라스틱 순환경제 산업 육성의 필요성 및 연구개발 방향

- 생분해성 플라스틱은 물질의 재활용, 화학 융합 공정기술 등을 통해 다양한 방식으로 자원순환이 가능하다. 다만 2021년 7월 환경부 고시 개정에 따라 재활용이 불가능한 자원으로 규정되어 있다.
 - 「폐기물관리법」 시행규칙 별표 4의3에 열거된 폐기물 종류별 재활용 유형에 따라 재활용이 가능하나, 현재 생분해성 플라스틱별도 구분되어 있지 않다. 폐합성수지류(51-03-01 또는 91-06-01)에 해당되어 재활용이 불가하다.



※ ‘도포·첩합 등’이란 영 제18조제1호에 따른 제품·포장재 중 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 제품·포장재의 구성부분에 타 소재·재질(금속, 생분해성 수지 등)이 혼합되거나, 도포(코팅) 또는 첩합(라미네이션) 등의 방법으로 부착된 것으로서, 타 소재·재질이 해당 구성부분으로부터

출처: 환경부고시 제2021-140호에 따른 분리배출 표시(한국환경공단 홈페이지)

그림 23.

생분해성 플라스틱의 자원순환 불가 도안

- 사용자가 사용 후 폐기되는 플라스틱 폐기물 전량을 자체 회수하여 탄소순환 등 재생산하여 기존 분리수거 체계를 훼손하지 않고 역회수하는 사업은 인정되고 있다.
 - 사례: 이마트 물류센터에서 사용되는 스트레치 필름을 전량 자체 회수한 후 유화 과정을 거쳐서 재생 스트레치 필름으로 재생산하고 있다.
- 생분해성 플라스틱 산업은 현 정부의 국정과제 24번 “미래전략산업 초격차 확보”에 따라 신산업 육성을 위해 별도의 분리·회수를 통한 자원순환 체계의 편입과 역회수 방식의 순환기술 확보가 필요하다.
- 산업통상자원부에서는 2022년부터 탄소순환 기술이 반영된 기술개발 사업을 지원하고 있으나, 해당 사업에는 수거·회수 체계에 대한 기술개발이 미흡한 상황이다. 향후 개발 방향으로 수거·처리 등 탄소순환(역회수 포함) 기술이 반영된 전주기 기술개발 사업의 추진이 요구된다.

표 4. 탄소순환 분야 연구개발 추진 현황(탄소저감형 화학 공정 기술개발 사업)

사업명	주요 내용
석유계 분해성 플라스틱 폐기물 분해 기술 및 발생 온실가스 활용 PHA 생산 기술 개발	생분해성 플라스틱 ⇒ 바이오 공정 ⇒ rPHA
화학적 리사이클링 락타이드(lactide)를 활용한 고내열성 PLA 복합소재 제조 기술 및 친환경 부품화 기술개발	PLA ⇒ 화학적 리사이클링 ⇒ rPLA



그림 24.

생분해성 플라스틱의 전주기적 탄소순환 기술 개요

6 국제 표준 및 인증 현황

국제 표준(ISO) 개발 동향

- **(탄소순환 표준)** 2022년 11월 일반 플라스틱뿐만 아니라 생분해성 플라스틱 및 기타 유기 재료 등 광범위한 화학 물질의 화학적 재활용에 대한 지침과 요구사항이 반영된 회수 가능한 유기성 자원에 대한 화학적 재활용(Chemical Recycling) 국제 표준을 2024년 제정 목표로 개발 진행 중이다.
- **(시험 표준)** 2020년 이후 생분해성 플라스틱 분야의 시험 표준은 일본과 유럽을 중심으로 개발·제정되고 있다. 해양 분야의 생분해도 평가, 해양 생태계 기반 독성 안전성 평가, 실제 해양에서의 실험경 붕괴도 실증 평가 방법(Real Field Test)으로 구성되어 있다.
 - 우리나라의 경우, 2023년부터 국가기술표준원을 중심으로 한국건설생활환경시험연구원 에코자원 순환센터와 한국바이오플라스틱협회가 협력해 해양 퇴적물을 접종원(Inoculum, 接種原)으로 하여 호기성 미생물과 혐기성 미생물에 의해 분해되는 C1 가스(CO_2 , CH_4)를 검출하고 평가하는 호·혐기 복합 생분해도 시험법 국제 표준의 개발을 추진하고 있다.

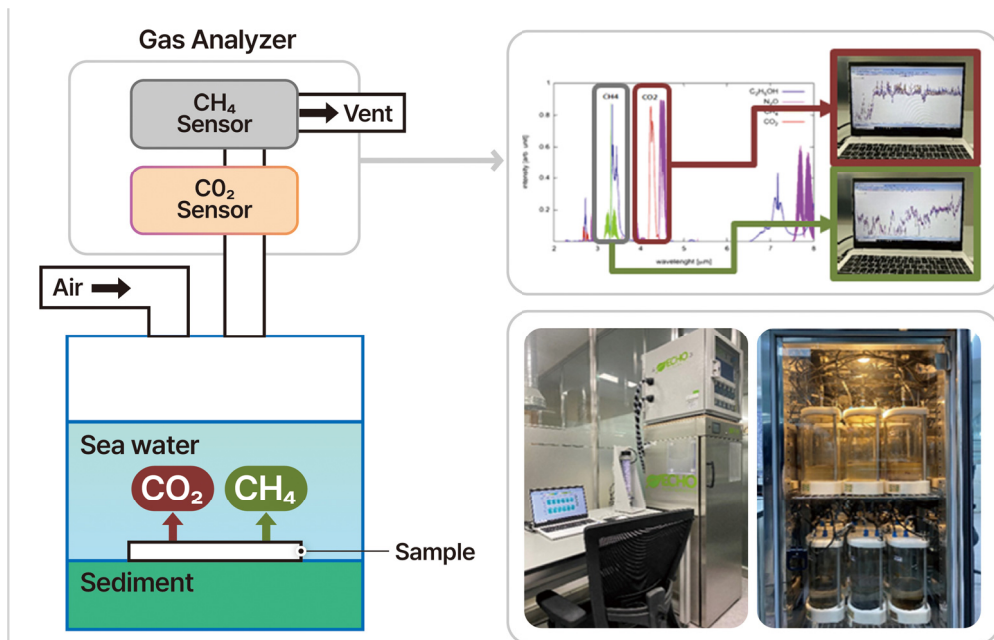


그림 25.
C1 가스 검출을 통한 해양 생분해도 평가 방법 측정 모식도

- **(제품 표준)** 최근 생분해성 플라스틱 기반으로 하는 제품 표준이 중국과 유럽을 중심으로 자연 토양 조건과 퇴비화 조건에서 분해되는 제품에 대해 개발·제정이 이뤄지고 있다. 다양한 분해 조건에서의 생분해도, 붕괴도, 생태독성 시험법이 개발 완료되었고, 이를 기반으로 하는 제품의 국제 표준이 확대될 것으로 전망된다. 국내 또한 신산업 창출과 표준 경쟁력 강화를 위해 제품 기반 국제 표준 개발 추진이 필요한 시점이다.

표 5. 2020년 이후 국제 표준(ISO) 개발 동향

구분	표준번호	표준명	주요 내용
시험 표준	ISO 5430:2023	Ecotoxicity testing scheme for soluble decomposition intermediates from biodegradable plastic materials and products used in the marine environment – Test methods and requirements	생분해성 플라스틱 분해산물에 대한 해양 생태독성 평가 방법
	ISO/CD 16623 (개발 중)	Optimized intertidal seawater and sediment preparation for marine biodegradation testing of plastics	해양 생분해성 평가를 위한 해수 및 해저 퇴적물 준비 절차
	ISO/CD 16636 (개발 중)	Disintegration field test of plastics under water environmental conditions	해수면 아래(1.5m) 떠 있는 상태에서 붕괴도 평가
	ISO/WD 18957 (개발 중)	Determination of the aerobic biodegradation of plastic materials exposed to seawater using accelerated conditions in laboratory	가속 조건에서의 호기성 해양 생분해도 평가 방법
	ISO 22766:2020	Determination of the degree of disintegration of plastic materials in marine habitats under real field conditions	해양 실환경 조건에서의 붕괴도 평가 방법
제품 표준	ISO 23517:2021	Soil biodegradable materials for mulch films for use in agriculture and horticulture – Requirements and test methods regarding biodegradation, ecotoxicity and control of constituents	농업용·원예용 생분해성 멀칭 필름의 요구사항
	ISO 5424:2022	Industrial compostable plastic drinking straws	퇴비화 생분해성 빨대의 요구사항
	ISO 5412:2022	Industrial compostable plastic shopping bags	퇴비화 생분해성 쇼핑백의 요구사항
	ISO/PFR 5425 (개발 중)	Specifications for use of poly(lactic acid) based filament in additive manufacturing applications	퇴비화 생분해성 PLA 필라멘트의 요구사항
탄소순환 표준	ISO/WD 16294 (개발 중)	Chemical recycling of organic materials – Organic recoverable resources and chemical recycled resources	회수 가능한 유기 재료의 화학적 재활용 표준

자료 출처: iso.org

생분해 인증 현황

- 최종 폐기 단계 또는 탄소순환과정(퇴비화, 바이오가스화 등)에서의 생분해성 플라스틱의 유기적 재활용 확대와 비분해성 제품을 생분해성 제품으로 대체하여 다양한 환경 문제를 해결할 수 있다. 이를 위한 인증 체계로 생분해성 유기 소재로 구성된 제품이 특정 분해 환경에서 특정 기간 이내 생분해와 붕괴도를 평가하고 분해 물질과 생분해성 제품의 안전성을 평가하여 인증하는 제도이다.

표 6. 주요 생분해 인증 평가 목록

구분	주요 내용
생분해도	특정 분해 환경(토양, 물, 퇴비, 해양 등) 조건에서 일정 기간 이내 생분해
붕괴도	분해 환경에서 일정 기간 이내, 생분해성 필름이 작은 조각으로 붕괴
생태독성	특정 기간 경과 또는 특정 비율 이상 분해된 접종원(퇴비, 토양, 해수 등)을 활용하여 생태계에 미치는 영향을 확인하기 위한 독성 안전성 평가
유해물질	원료 및 제품 내 유해중금속과 화합물의 정량적 평가

- DIN CERTCO(독일 표준협회기관)와 TUV AUSTRIA(유럽 생분해인증기관), BPI(미국 생분해성 제품인증기관) 인증이 전 세계적으로 널리 통용되고 있다. 다양한 분해 환경 조건(산업 퇴비화, 가정 퇴비화, 토양, 해양)의 생분해 인증이 활용되고 있으며, 최종 폐기 단계에서의 퇴비화 인증이 대부분(DIN CERTCO 기준)인 상황이다.

표 7. DIN CERTCO 생분해 인증 유지 현황(글로벌, 2023년 2월 기준)

구분	퇴비화 (산업, 가정)	자연 토양 조건 생분해	해양 생분해
인증 건수	1,825	8	2023년 신설
















자료 출처: dincertco.de/din-certco/en

- DIN CERTCO에서는 최근 해양 생분해 제품의 인증 스킴(scheme)을 발표하고, 2023년 해양 실환경 실증(ISO 22766)과 해양 생태 독성 평가(ISO 5430)가 반영된 인증제도를 시행한다. 최근 UNEP*와 IMO** 등 해양 플라스틱 오염 관련 국제 협약과 지침이 제정될 예정이다. WTO 등 통상에 환경(해양)을 연계하는 논의가 진행 중으로, 국내 기업의 경쟁력 확보를 위한 신규 인증 기반 제품 개발과 인증 지원 체계의 구축이 필요한 시점이다.

* UNEP: 유엔환경계획 ** IMO: 국제해사기구

- 국내의 경우, 환경산업기술원에서 2022년 12월 자연 토양 조건 생분해 제품 인증 기준이 마련되었다. 올해부터 해양 생분해 제품에 대한 인증 기준을 마련 중에 있다. 글로벌 인증과 국내 환경 표지 인증 간의 상호 호환성을 위해서는 평가 종류와 방법에 대한 부합화가 필요한 상황이다.

표 8. 글로벌 및 국내 생분해 인증 현황

구분	(유럽) DIN CERTCO	(유럽) TUV AUSTRIA	(호주) ABA	(미국) BPI	(한국) 환경산업기술원
산업적 퇴비화					
	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div>	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div>	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div> <p>* 추가 요구사항: 지령이 생태 독성</p>	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div> <p>* 추가 요구사항: 코발트 확인 시험</p>	<div>생분해 -</div> <div>- 유해물질</div>
가정 퇴비화					
	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div>	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div>	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div> <p>* 추가 요구사항: 지령이 생태 독성</p>		
자연 토양 생분해					
	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div>	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div>	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div>		<div>생분해 -</div> <div>생태독성 유해물질</div>
해양 생분해					
	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div> <p>* 추가 요구사항: 해양 실험실 실증</p>	<div>생분해 붕괴도</div> <div>생태독성 유해물질</div>			개발 중

- 보다 안정적으로 글로벌 인증제와의 상호 호환을 위해 우선적으로 한국산업표준 개발을 선행하고, KS인증제도를 통하여 국내 생분해성 플라스틱 제품의 인증을 단기적으로 추진할 필요가 있다. KS인증은 인증 라벨, 표시 등에 제약 조건이 있어 중장기적으로 민간에서 운영하는 인증 체계 개발을 통하여 글로벌 인증과의 상호 인정 체계를 구축하는 것이 바람직하다.



그림 26.
글로벌 인증과 상호 인정을 위한 체계 구축 단계

바이오매스 인증 현황

- 재생 가능한 유기 소재를 활용한 바이오 기반 제품의 사용 확대, 기후 변화(석유 의존도 감소) 등 환경 문제 대응을 위한 인증 체계가 바이오매스 인증이다. 이는 전체 또는 일부 유기성 소재가 바이오 기반으로 구성되어 있는지 정량적으로 바이오매스 함량을 인증하는 제도이기도 하다.
- **(미국)** 미국농무부(USDA)에서 2002년 바이오 기반 제품의 구매 및 사용 확대를 위해 바이오 프리퍼드(BioPreferred[®]) 프로그램을 시행하고 있다.
 - 현재 건축/산업/가정/농업 등 다양한 분야*에서 품목 특성**을 고려하여 264개 품목의 최소 바이오매스 함량을 규정하고 있다.
 - * 플라스틱뿐만 아니라 중간재, 윤활제, 연료, 생활용품, 해충 방지제 등
 - ** (사례) 생분해성 폼 25% ↑, 제품 포장 25% ↑, 건축 플라스틱 단열 폼 7% ↑, 폴리우레탄 코팅 25% ↑, 쓰레기봉투 22% ↑, 가솔린 연료첨가제 92% ↑
 - 264개 품목 중 USDA가 의무적인 연방정부 구매 품목(FP)은 171개로 규정하고, 그 외 93개 품목은 구매 권유 품목으로 활용하고 있다.
- **(유럽)** 독일 DIN CERTCO*, 벨기에 TUV Austria**, NEN(네덜란드 표준화연구재단) 인증이 운영 중이며, ASTM D6866(미국재료시험협회 기준)에 따라 바이오매스 평가를 시행하고 있다.
 - * (DIN CERTCO): 20~50%, 50~85%, 85% 이상
 - ** (TUV Austria): 20~40%, 40~60%, 60~80%, 80% 이상

- 플라스틱(생분해, 비분해), 연료, 고무류, 단량체, 접착제 등 다양한 품목의 바이오매스 인증*
 - * (DIN CERTCO 인증 사례) PHA 원료 100%, 바이오폴리아미드 33%, 바이오 PU 접착제 59%, 전분 기반 원료 99%, 바이오 PE 봉투 100%, BBQ 연료 100%
- **(한국) 환경부 환경표지인증(EL727)으로 생산-유통-사용-폐기의 전 과정에서 에너지 및 자원의 소비를 줄이고, 오염 물질 최소화를 위한 인증 기준이다.**
 - 현행 재활용 체계 내 물질 재활용이 가능하면서 최소 바이오매스 함량이 40% 이상인 제품 인증(생분해, 일회용품 제외)*
 - * Bio PE, PP 플라스틱 제품으로 해외와 같이 다양한 제품 인증의 한계
 - 바이오화학산업은 국가적으로 육성되고 있으나 개정(2022.12.29 시행) 이후 현재까지 신규·갱신 인증(EL727)* 받은 기업은 전무한 상황이다. 국내 바이오 기반 산업 육성을 위해 원료·중간재·제품별로 구분된 바이오매스 함량 인증 정책이 시급히 마련되어야 한다.
 - * (신규·갱신) 2021년 335건 → 2022년 319건 → 2023.01~2023.04 0건

7 결론

- 생분해성 플라스틱 산업은 기후 위기 극복, 탄소 중립, 플라스틱 쓰레기 문제 등의 대안으로 부상하는 산업으로, 원료 ⇒ 가공·제품 ⇒ 수거 ⇒ 탄소순환(퇴비화, 바이오가스화 등) 긴밀한 순환 체계가 필수적이다. 유기적·화학적·물리적 재활용 기술이 성공적으로 개발되고 탄소순환실증을 통해 검증 기술이 마련된다면 국내 생분해 산업의 경쟁력 확보와 해외 시장 선점에 기여할 것으로 전망된다.
- 일회용품 중심으로 형성된 국내 생분해성 플라스틱 산업의 고기능화를 이루고 비교적 장기간 사용 후 회수될 수 있는 생분해성 플라스틱의 제품화를 통해 국내외적인 신시장 창출이 필요하다.
- 최근 해양 분야의 생분해도 평가, 생태 독성 평가, 실환경 실증 평가 방법이 국제 표준으로 제정되었다. 이를 기반한 해양 생분해 제품 인증제(DIN CERTCO)의 시행과 해양 플라스틱 오염에 관한 국제 협약·지침 제정 동향을 고려할 때 해양 생분해성 원료 및 제품 기술개발을 적극 추진해야 할 것이다.
- ISO를 중심으로 다양한 분해 조건에서의 생분해 제품 표준이 확대될 것으로 전망되며, 국내 신산업 창출과 표준경쟁력 강화를 위해 제품 기반의 국제 표준 개발 추진이 필요한 시점이다.
- 국내 환경표지인증(EL727) 범위에 생분해성 플라스틱은 제외되어 있어서 국내 생분해 산업 육성에 어려움을 겪고 있는 현실이다. 미국농무부(USDA)의 BioPreferred® 프로그램을 벤치마킹하여 다양한 생분해성 원료·중간재·제품 또한 바이오매스 함량 인증이 가능한 정책의 마련으로 바이오화학산업의 발전을 위한 정책적 건인이 필요하다.

출처 및 참고자료

1. Review on standards for biogasification, Open-BIO (2014)
2. 「지속가능한 생분해성 플라스틱 산업 지원 방안」, 2022, 산업통상자원부
3. 환경표지(마크) 인증제품 현황, 한국환경산업기술원
4. 미국농무부 홈페이지(BioPreferred[®] 프로그램)
5. ISO 홈페이지(생분해성 플라스틱 시험 및 제품 표준 제·개정 현황)
6. totalenergies-corbion 홈페이지
7. 「바이오플라스틱」, 브리프 28, 한국과학기술기획평가원
8. 「바이오플라스틱의 기초 및 최신 동향」, 연구자료 제964호, 2021, 국립산림과학원
9. 「생분해성 바이오플라스틱 생산기술과 산업동향」, PD ISSUE Report, 19-10:20-42, 2019, 한국산업기술평가관리원
10. 「지속가능성을 위한 친환경 바이오 플라스틱 산업 동향」, ISSUE 160, 2022, 한국바이오협회
11. <https://www.huvis.com>(휴비스, ecoen)
12. <https://an-korbio.co.kr>((주)안코바이오플라스틱스, PBS, PBEAS)
13. <https://www.saysamyang.com>(삼양그룹, 이소소르비드)
14. <https://www.samyanginnochem.com>(삼양이노켄, 이소소르비드, PBIAT)
15. <https://www.cjbio.net>(CJ제일제당, PHA)
16. G. Kumari., A. Tiwari, 'LDPE-biodegradation using microbial consortium by the incorporation of Cobalt Ferrite Nanoparticle as the enhancer for biodegradation', 2017, (Engineering)
17. 「순환경제로의 전환을 위한 플라스틱 관리전략 연구」, 2019, 한국환경정책평가연구원
18. 「바이오플라스틱 시장 동향」, BIO ECONOMY BRIEF, 2020, 한국바이오협회
19. 「국내외 바이오 플라스틱 종류, 최신동향 및 제품적용 현황」, 융합연구리뷰, Vol5, 2021, 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
20. 「화이트바이오 산업 활성화를 위한 유망 분야 도출 및 정부지원 방안」, 이슈페이퍼, 브리프 통권 제 331호, 2022년, 한국과학기술기획평가원
21. 「탄소 중립도시형 생분해 자원화 플랜트 실증 연구 기획보고서」, 2022년, 국토교통과학기술진흥원