**플라스틱 순환과 벨류체인 구상**

이서진, 김현지, 박나림, 이나연

광영여자고등학교

ABSTRACT: 플라스틱의 생산부터 재활용까지 전 생애주기를 벨류체인 관점에서 분석하고, 지속 가능한 순환 시스템 구축을 위한 통합적 해결 방안을 모색하였다. 생산, 소비, 수거 및 폐기, 처리 및 재활용의 네 단계로 나누어 각 단계의 문제점과 기술·정책적 한계를 문헌조사와 환경자료를 통해 검토하였다. PLA, PHA 등 생분해성 플라스틱의 활용 가능성, 재활용을 고려한 친환경 디자인, RFID·AI 기반 스마트 수거 시스템, 열분해·광분해 자원화 기술 등을 중심으로 해결책을 제시하였다. 이를 바탕으로 각 단계가 유기적으로 연결된 순환 벨류체인을 구성하였으며, 시스템적 사고를 바탕으로 한 지역 단위 실천 방안의 적용 가능성을 함께 제안하였다.

서론 ( Introduction )

현대 사회는 플라스틱 없이는 일상생활을 영위하기 어려울 만큼 플라스틱에 의존하고 있다. 그러나 플라스틱은 생산부터 폐기까지 전 과정에서 환경에 심각한 영향을 미치며, 특히 처리 및 재활용 과정의 비효율성은 자원 낭비와 탄소 배출의 주요 원인 중 하나로 지적된다. 이에 따라 플라스틱의 전 생애 주기(Life Cycle)를 고려한 벨류체인(Value Chain) 분석은 지속 가능한 플라스틱 순환 시스템을 구축하는 데 핵심적인 접근법으로 부각되고 있다. 본 보고서에서는 플라스틱 벨류체인을 직접 구성해보고 각 단계별 문제점과 개선 방안을 모색하고자 한다.

현재 플라스틱 순환과 관련된 연구는 주로 폐기물 관리나 재활용 기술에 집중되어 있으며, 생산과 소비, 수거 및 처리 단계 간의 유기적 연결성에 대한 통합적 분석은 상대적으로 부족하다. 특히, 수거 및 분리 배출 단계에서의 정확도 부족은 전체 재활용률을 크게 저하시킬 뿐만 아니라, 이후 처리 단계의 비용 증가와 탄소 배출량 증가로 이어진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 플라스틱 벨류체인 전반에 걸친 기술적·정책적 대응이 필요하다.

본 연구의 필요성은 크게 세 가지로 요약될 수 있다. 첫째, 생산 단계에서부터 탄소 배출을 저감할 수 있는 기술 도입 방안을 살펴보고, 실제 적용 가능성을 검토할 필요가 있다. 둘째, 소비 단계에서는 단순한 사용 방식 변화만으로도 순환 효율에 영향을 줄 수 있기에 소비자 인식 개선의 가능성을 모색한다. 셋째, 폐기 및 수거 단계에서는 분리 정확도를 높이기 위한 시스템적 접근이 필요하며, 본 보고서에서는 실험적으로 학교에 도입할 수 있는 분리 수거 시스템을 제안한다. 마지막으로, 처리 및 재활용 단계에서는 현재 주목받는 열분해(Pyrolysis)와 광분해(Photodegradation) 기술을 비교하여 장단점과 적용 가능성을 평가한다.

이 보고서는 플라스틱의 순환을 ‘생산–소비–수거 및 폐기–처리 및 재활용’이라는 네 가지 단계로 나누어 분석하고, 각 단계에서 발생하는 문제점과 이에 대응할 수 있는 기술적·정책적 해결책을 제시한다. 특히, 플라스틱 순환을 학교 환경에서 실험적으로 구현해보는 구체적 시도는 작은 규모에서 시작할 수 있는 지속가능한 순환 시스템의 모델을 제공할 수 있을 것이다.

궁극적으로 본 보고서는 플라스틱 순환 시스템의 설계에 있어 각 단계가 독립적인 요소가 아닌, 상호 유기적으로 연결된 가치사슬이라는 점을 강조하고자 한다. 이러한 통합적 접근은 미래의 자원순환 사회를 실현하는 데 있어 중요한 기반이 될 것이다.

재료 및 방법 ( Materials and Methods )

본 연구는 플라스틱의 전 생애주기를 생산, 소비, 수거 및 폐기, 처리 및 재활용의 네 단계로 나누고, 각 단계에서의 문제점과 개선 방안을 분석한 뒤, 이를 토대로 직접 플라스틱 순환 벨류체인을 구상하는 것을 목적으로 수행되었다.

첫째, 문헌 조사와 환경 관련 공공자료(환경부, 한국환경공단 등)를 바탕으로 각 단계에서 발생하는 환경적 문제와 기술적 대응 방안을 조사하였다. 특히 생산 단계에서는 탄소 배출 저감 기술을 중심으로 생분해성 플라스틱 및 바이오 기반 소재 기술을 검토하였다.

둘째, 소비 단계에서는 플라스틱 사용 방식과 소비자 인식에 대한 일반적인 동향을 정리하여, 소비 단계에서의 간접적 개선 가능성을 탐색하였다.

셋째, 수거 및 폐기 단계에서는 학교 내 분리수거 시스템의 현실적 문제를 관찰하고, 분리 정확도 향상을 위한 실험적 개선방안으로 스마트 분리 시스템 또는 보완형 수거 구조를 제안하였다.

넷째, 처리 및 재활용 단계에서는 열분해와 광분해 기술에 대한 자료를 수집하고, 두 기술의 기본 원리 및 장단점을 비교 분석하였다. 이 과정은 기술적 효율성과 실제 적용 가능성을 파악하는 데 중점을 두었다.

마지막으로, 위의 분석을 종합하여 각 단계가 유기적으로 연결된 플라스틱 순환 벨류체인을 직접 구성하였다. 이 구상은 플라스틱 순환 구조의 실질적 개선 방향을 시각적으로 제시하는 것을 목표로 하였다.

본문 (Main Body)

1.생산 단계

1.1 기존 생산 방식 문제점 (석유 기반, 탄소 배출 등)

석유 기반 플라스틱은 현재 많은 산업에서 필수적인 재료로 사용되고 있다. 그러나 석유 기반 플라스틱은 자연적으로 분해되는 데에 매우 오랜 기간이 걸리기 때문에 많은 환경적 문제를 야기한다. Polyhydroxyalkanoate (PHA)는 석유기반 플라스틱 대체를 위한 가장 유망한 재료이며, 다양한 재생 가능한 생물원으로부터 생산 가능하다. 현재 일반적으로 사용하고 있는 플라스틱은 석유를 기반으로 생산된 플라스틱으로 2019년에 전 세계 플라스틱 누적 생산량은 95억톤에 도달하였다. 플라스틱은 경량성, 내구성, 다용도성 등의 장점으로 인해 거의 모든 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 현재 이러한 석유 기반 플라스틱 폐기물의 처리가 많은 환경오염을 야기하고 있다. 1950년부터 2015년까지의 플라스틱 중 30%는 현재까지 사용 중이고, 55%는 매립, 8%는 소각, 6%는 재활용되고 나머지 플라스틱은 해양으로 유출된다. 해양으로 유출되는 플라스틱의 추정치는 연간 900만~2300만 Mt이며 그 중 매크로 플라스틱은 800만Mt, 1차 미세플라스틱은 1.5 Mt으로 추정된다. 거의 700종의 해양종과 50종 이상의 담수종이 매크로플라스틱을 섭취했거나 신체 부위 등에 폐플라스틱이 얽힌 것으로 알려져 있고, 플라스틱이해양종뿐만 아니라 다양한 육지의 유기체에게도 섭취된다는 증거가 증가하고 있다.플라스틱의 자연환경에서의 분해는 오랜 시간이 소요되고, 그에 의해 해양 및 육지 생태계에 악영향을 끼치고 있다. 이와 같은 석유 기반 플라스틱 폐기물 처리의 문제점들을 해결하기 위한 플라스틱 대체제의 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.

1.2 대체 기술 (바이오 플라스틱, 재생 플라스틱)

현재 석유 기반 플라스틱의 대체 용품으로 바이오 플라스틱이 많은 관심을 받고 있다.

바이오 플라스틱은 전분과 식물성 기름과 같은 천연 자원에서 생성될 수 있는 플라스틱의 한 유형이다. 바이오 플라스틱은 크게 바이오 기반 및 생분해성, 두가지 특성으로 분류된다. 다양한 바이오 플라스틱 중 PHA는 100% 바이오 기반임과 동시에 생분해성인 플라스틱 제품군이다. PHA는 생존 매커니즘의 일부로 미생물의 내부 탄소 및 에너지 저장 장치로서 과량의 탄소가 있는 상태에서 영양소(N, P, S, O 등)가 제한될 때 다양한 미생물에 의해 생성된다.

PHA의 특성은 사용하는 박테리아의 종류, 발효 조건 및 기질에 따라 다양하게 변경될 수 있다. 바이오 플리스틱 종류 간의 자연환경에서의 분해도는 현저히 다르다. 현재 대체 플라스틱으로 많이 상용화된 PLA와 비교했을 때 PHA는 PLA와 달리 퇴비화가 가능하고, 해양 환경에서도 생분해가 가능하다. PLA와 PHA의 토양에서의 생분해를 연구한 결과에 따르면, PHA는 2개월 후 토양에서 모두 분해되었지만 PLA는 4개월이 지나도 눈에 띄는 분해가 일어나지 않았다. 또한 PLA는 해양환경에서 거의 분해되지 않는다. 따라서 플라스틱 폐기물의 처리에 있어 PHA는 환경에 악영향을 끼치지 않고, 분해가 빠르다는 장점을 가지고 있다.

이처럼 석유 기반 플라스틱을 PHA로 대체하면 화석 에너지의 사용을 줄이고 플라스틱 폐기 처리 과정에서 생성되는 온실가스의 배출량 또한 줄일 수 있다.

 재생 플라스틱 또한 석유 기반 플라스틱의 대체 용품로 주목받고 있으며, 환경 부담을 줄이고 자원을 효율적으로 활용할 수 있는 지속 가능한 소재이다. 이는 기존에 사용된 플라스틱 제품을 수거하고 세척, 분쇄, 재가공하여 다시 사용하는 방식으로 생산되며, 자원 순환과 탄소 배출 저감에 기여한다. 재생 플라스틱의 가장 큰 장점은 석유와 같은 신규 자원 소비를 줄일 수 있다는 점이다.

1.3 기술 적용 시 한계와 극복 방안

PHA의 장점에도 불구하고 아직까지 PLA에 비하여 상용화가 되지 않은 이유는 PHA의 생산 비용이 높기 때문이다. 그러므로 현재 PHA의 생산가를 낮추기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세이다.

1.3.1 PLA를 이용한 생분해 포장재 생산 모델

단계1: 원료 확보 및 전처리 과정

이 과정에서는 옥수수나 사탕수수 등의 식물에서 추출한 전분을 이용해 포도당을 얻고, 이를 유산균이 발효 가능한 기질로 전환한다.

단계2: 젖산 발효 과정

유산균을 이용해 포도당을 젖산으로 발효시킨다. 이때 발효 조건(온도, pH, 기질 농도 등)을 최적화하여 젖산 수율을 높이는 것이 중요하다.

단계3: 폴리머화(중합) 단계

발효를 통해 얻은 젖산을 축합 반응을 통해 고분자인 PLA로 중합한다. 이때 고온 조건과 촉매를 이용해 반응 효율을 높이며, 최종적으로 PLA 수지 형태의 펠릿을 얻는다.

단계4: 포장재 성형 및 가공 단계

생산된 PLA 수지를 압출, 사출성형, 필름 블로잉, 진공성형 등의 공정을 거쳐 식품 포장재로 가공한다. PLA는 기존 석유계 플라스틱 성형 설비와의 호환성이 높기 때문에 설비 교체 없이도 손쉽게 가공 가능하다는 장점이 있다. 필요에 따라 전분이나 PBAT와 혼합하여 유연성이나 내열성을 보완할 수 있다.

단계5: 제픔 적용 및 생분해 단계

완성된 PLA 포장재는 식품용기, 과일 포장재, 도시락 용기 등 다양한 분야에 활용되며, 사용 후에는 산업용 퇴비화 조건(온도, 습도, 미생물 존재하에 180일 이내)에서 완전히 분해된다.

1.4 바이오 플라스틱(PLA, PHA 등) 생산 방식 조사

1.4.1 PLA

PLA는 옥수수, 사탕수수, 밀, 타피오카 등 식물성 자원에서 추출한 전분을 주원료로 하여 생산된다. 먼저, 전분은 효소 처리 과정을 거쳐 포도당으로 분해되며, 이 포도당은 젖산균에 의해 발효되어 젖산으로 전환된다.

이렇게 얻어진 젖산은 정제 과정을 거친 후 두 가지 방식 중 하나로 중합된다. 첫 번째는 젖산을 직접 축합하여 PLA를 만드는 직접 중합 방식이며, 두 번째는 젖산을 락타이드라는 고리형 화합물로 전환한 후 이를 개환 중합하여 고분자 PLA를 생성하는 방식이다. 산업적으로는 고분자량을 얻기 쉬운 두 번째 방식이 주로 사용된다.

1.4.2 PHA

PHA는 특정 미생물이 에너지를 저장하기 위해 세포 내에 축적하는 고분자 물질로, 생물학적 발효 과정을 통해 생산된다. 우선, 미생물이 성장할 수 있는 배양 조건을 갖춘 발효조에 식물성 유지, 당류, 또는 유기성 폐기물과 같은 탄소원을 공급한다. 탄소는 풍부하게 공급하되, 질소나 인과 같은 필수 영양소는 제한하여 미생물이 스트레스를 받도록 유도한다.

이러한 조건에서 미생물은 생존 전략의 일환으로 PHA를 세포 내에 과립 형태로 축적한다. 일반적으로 많이 사용되는 미생물에는 Cupriavidus necator, Ralstonia eutropha, Bacillus spp. 등이 있으며, 이들은 다양한 탄소원에서 효율적으로 PHA를 생산할 수 있다.

배양이 완료되면, 세포를 수확하여 기계적 파쇄, 효소 처리 또는 화학적 방법을 통해 세포벽을 분해하고 내부에 저장된 PHA를 추출한다.

1.5 재생 플라스틱(rPET 등) 품질 한계와 해결 방안

재생 플라스틱은 사용된 플라스틱을 수거하고 세척, 분쇄, 재가공하여 다시 활용하는 방식으로 생산된다. 대표적으로 rPET(recycled PET)가 많이 사용되며, 음료병, 섬유, 포장재 등으로 활용된다. 하지만 rPET에는 다음과 같은 품질상의 한계가 있다.

① 기계적 성질 저하: 반복적인 열처리 과정으로 인해 고분자 사슬이 짧아지고, 인장 강도 및 내열성이 저하된다.

② 불순물 혼입: 수거 및 세척 과정에서 비PET 소재나 색상, 오염물질이 섞여 품질 균일성이 떨어진다.

③ 식품 포장에의 제한: 안전성과 투명성 문제로 인해 식품용으로 사용되기 어려운 경우가 있다.

▶해결 방안

① 고급 정제 기술 도입: 화학적 재활용 방식으로 분자 단위로 분해한 뒤 고순도 모노머로 재합성하면 품질을 새 제품과 동등하게 유지할 수 있다.

② 멀티레이어 필름 구조: 외부 층에 rPET를 사용하고 내부에는 신재를 사용하여 품질과 위생을 동시에 확보하는 방식이 개발되고 있다.

1.6 생산 단계에서 탄소 배출량을 줄일 수 있는 기술 도입 방안

① 공정 내 CCU 기술

플라스틱 제조 공정에서는 석유 기반 원료의 정제, 모노머 생산(ex. 에틸렌, 프로필렌), 중합 반응, 열처리 등의 단계에서 많은 양의 에너지가 소비되고, 그 과정에서 이산화탄소가 상당량 배출된다. 특히, 고온의 열분해 과정이나 증기 크래킹 공정은 탄소 배출의 주요 원인이다. 이 기술을 통해 포집된 이산화탄소는 합성 연료, 탄산염 화합물, 플라스틱 원료 등으로 전환 가능하여 탄소 자원화가 가능하다. 또한 기존 설비에 추가 장치 설치만으로 구현이 가능하며, 전체 생산 설비를 교체할 필요가 없다. CCU 기술은 바이오 플라스틱이나 재활용 플라스틱과 결합할 때 전체 수명 주기에서의 탄소 발자국을 최소화할 수 있다.

② 에너지 효율 공정

플라스틱 제조 과정에서는 높은 온도와 압력을 필요로 하는 반응 단계가 많기 때문에 에너지 소비가 크다. 이에 따라 제조 공정 전반에서 에너지 사용을 줄이기 위한 기술적 개선이 이루어지고 있으며, 대표적인 방법으로는 저온 중합 기술, 촉매 최적화, 연속식 공정 도입이 있다.

⑴ 저온 중합 기술

저온 중합은 기존보다 낮은 온도에서 고분자 중합 반응을 유도하는 기술로, 열에너지 소비를 획기적으로 줄일 수 있는 방법이다. 특히 PLA나 PHA와 같은 생분해성 고분자는 중합 온도가 150~200℃에 달하는 경우가 많으나, 저온 활성 촉매나 전처리 기술을 활용하면 100℃ 이하에서도 중합이 가능해진다. 이는 에너지 비용 절감뿐 아니라 열에 민감한 첨가제나 기능성 성분의 안정성 유지에도 유리하다.

⑵ 촉매 최적화

촉매는 중합 반응의 반응 속도와 효율을 결정짓는 핵심 요소이며, 고활성·저에너지형 촉매의 개발은 전체 공정의 에너지 효율을 높이는 데 기여한다. 최근에는 금속 기반 촉매나 생체모사 촉매가 개발되어 중합 반응 온도와 시간을 단축하고, 불필요한 부반응을 억제함으로써 에너지 낭비를 최소화한다. 또한 촉매의 재사용성과 반응 선택성을 향상시키는 기술이 함께 발전하고 있어, 공정 지속 가능성을 높이는 데에도 중요한 역할을 한다.

⑶ 연속식 공정 도입

기존의 플라스틱 제조는 배치 방식이 주로 사용되었으나, 최근에는 연속식 공정이 도입되면서 에너지 효율성이 크게 개선되고 있다. 연속식 공정은 반응이 끊기지 않고 지속적으로 이루어지기 때문에, 가열과 냉각 과정에서의 에너지 손실이 적고, 공정 중단 없이 대량 생산이 가능하다. 또한 자동화와 공정 제어 시스템을 결합할 수 있어 에너지 소비를 실시간으로 최적화할 수 있다는 장점이 있다.

1.7 친환경 첨가제, 가소제 비교 분석

1.7.1 친환경 첨가제

친환경 첨가제는 생분해성 고분자나 식물성 원료를 기반으로 하며, 제품의 기능을 강화하면서도 생분해성을 저해하지 않는 특성이 있다. 예를 들어, 전분 유도체, 셀룰로오스 미세입자, 천연 안료, 식물 유래 안정제 등이 PLA, PHA와 같은 바이오플라스틱에 적용된다. 이들 첨가제는 내열성, 내충격성, 산화 안정성 등을 개선하며, 플라스틱의 최종 생분해성에도 큰 영향을 미치지 않는다.

1.7.2 친환경 가소제

가소제는 고분자의 유연성과 가공성을 높이는 데 필수적인 물질이다. 기존에는 프탈레이트계(DEHP, DBP 등)가 주로 사용되었지만, 환경 호르몬 논란과 독성 문제로 대체가 시급해졌다. 이에 따라 식물성 오일 유래 가소제, 폴리에스터 기반 가소제, 이소소르비드 기반 가소제 등이 개발되었으며, 이는 인체에 무해하고 휘발성도 낮아 장기 사용에 적합하다.

2. 소비 단계

소비 단계는 플라스틱 제품의 실질적인 사용 및 분리배출이 이루어지는 구간으로, 자원 순환의 효율성을 결정짓는 중요한 부분이다. 소비자의 분리배출 의식 부족과 1회용품 소비 확대는 재활용률을 저해하며, 이는 전체 폐기물 처리의 부담으로 이어진다. 이에 따라 친환경 소비를 유도하기 위한 다양한 제도와 기술적 보완이 요구되고 있다.

2.1 분해 용이한 디자인 (Design for Recycling)

음료 패키지 용기의 구조는 생산, 소비, 폐기 전 과정에서 환경적 영향을 고려해야 하며, 그중에서도 재사용과 재활용이 가능한 디자인은 친환경 실천에서 핵심적인 역할을 한다. 이를 위해 기본적으로 재활용 가능한 소재를 사용하고, 폐기 시 부피를 최소화할 수 있으며, 소비자가 분리배출을 용이하게 할 수 있도록 설계되어야 한다.

2.2 국내 기업 사례 분석

(1) 롯데칠성음료

롯데칠성음료는 *아이시스* 제품을 통해 플라스틱 사용량 감축을 실현하고 있다. 제품 라벨을 제거하고 무색 페트병에 음각으로 제품명을 표기하는 방식으로 재활용 용이성을 향상시켰다. 소비자는 이러한 친환경 패키지를 구매하는 행위 자체를 환경보호 참여로 인식하고 있으며, 이는 기업의 친환경 마케팅 전략으로도 활용되고 있다. 또한, 환경부 및 생수 제조업체들과 협약을 체결하여 라벨 없는 페트병 사용 확대를 추진하였다.

(2) 매일유업

매일유업은 빨대 없는 멸균우유 제품을 출시하여, 패키지 용기 디자인 변경을 통해 플라스틱 사용량을 절감했다. 절취선을 활용해 빨대 없이도 음용이 가능하도록 설계했으며, 단일 소재를 적용하여 재활용 용이성도 강화하였다. 더불어 *슬로우밀크* 제품은 기존 플라스틱 용기 대신 종이팩으로 변경되어 연간 약 147톤의 플라스틱 저감 효과를 달성하였다.

(3) 동아오츠카

동아오츠카는 *포카리스웨트* 제품을 중심으로 지속적인 친환경 패키지 개선을 추진해 왔다. 2010년부터 패키지 경량화 및 에너지 저감화를 통해 탄소성적표지 인증을 획득하였으며, 페트병 생산과 충진 공정을 통합한 *O-Hot Pack* 시스템을 도입하여 이산화탄소 배출을 21% 절감했다. 또한 라벨 분리선을 도입하고, 이를 기반으로 한 *블루 라벨 캠페인*과 *BLUE UP 프로젝트*를 통해 소비자의 자발적 재활용 참여를 유도하고 자원순환 체험 기회를 제공하였다.

2.3 사례 분석을 통한 시사점

첫째, 재활용 용이성을 높이기 위한 단일 소재 사용과 부피 경감, 라벨 제거 및 분리 안내선 도입 등이 패키지 디자인의 핵심요소임을 확인하였다.

둘째, 소비자가 친환경 제품을 선택하도록 유도하기 위해서는 친환경 패키지에 대한 인식제고와 더불어 리워드 시스템과 같은 소비자 참여형 캠패인이 효과적임을 알 수 있었다.

셋째, 정부 및 기업 간 협력체계 구축이 친환경 패키지 보급 확대에 긍정적인 영향을 미치며, 정책적 지원과 산업계의 자발적 노력이 상호 보완적으로 작용해야 함을 확인했다.

3. 폐기 및 수거 단계

3.1 문제점

현재 전 세계적으로 플라스틱 생산량과 폐기물 발생량은 꾸준히 증가하고 있으나, 이에 비해 재활용률은 현저히 낮은 수준에 머무르고 있다. 환경적으로 건전하지 않은 폐기물 처리 과정은 환경오염뿐만 아니라 경제적 문제 또한 야기하고 있다.

특히 수거 과정에서는 복잡한 분리 기준과 정확하지 않은 분리 배출로 인해 2차 환경오염이 발생하며, 재활용률 역시 저하되고 있다. 이로 인해 폐기물 선별 작업이 제대로 이루어지지 않으며, 혼합 폐기물들이 장기간 방치되는 사례도 발생한다. 더불어 폐기물 처리 인프라가 부족하여 매립 및 소각에 의존하는 비율이 높고, 이로 인한 비용도 지속적으로 증가하는 추세이다. 매립 시 분해까지 수십 년이 소요되는 점도 심각한 문제 중 하나이다.

또한 PVC 계열 제품은 재활용이 어려울 뿐만 아니라, 소각 과정에서 유해 물질이 발생하므로 수거 및 폐기 과정에서 심각한 환경적 문제를 유발한다.

3.2 보완 기술

(1) RFID 분류 기술

RFID 태그를 폐기물에 부착하여 불필요한 물질을 사전에 제거하고, 재사용을 위한 정보 저장 기능을 통해 효율적인 분류 및 수거를 가능하게 한다. 이 기술은 폐기물 정보를 보다 쉽게 획득할 수 있게 하여 재분류 및 재선별 과정을 효율적으로 수행할 수 있도록 돕는다. 또한, 재활용 불가능한 물질의 삽입을 사전에 방지하며, 폐기물 수거에 대한 처리, 추적 및 관리 정보를 생성함으로써 전체적인 수거 관리 체계의 정밀도를 높일 수 있다.

(2) AI 분류 기술

RFID 기술과 AI를 결합함으로써 수집된 정보를 실시간으로 관리할 수 있다. AI 기반 쓰레기 자동 분류 시스템은 폐기물의 종류를 정확히 인식하며, 스마트 수거함과 같은 장비를 통해 투입된 쓰레기의 종류를 자동으로 분류한다. 이를 통해 수거 과정의 정확도가 향상되고, 분리수거 오류가 현저히 줄어드는 효과를 기대할 수 있다.

3.3 실제 적용

(1) RFID 기반 분리배출 시스템의 도입

RFID기술은 폐기물에 대한 정보 저장 및 추적 기능을 제공함으로써, 수거 과정의 정밀도와 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 우리 학교와 같은 교육기관에 이 기술을 도입할 경우, 특정 구역(예: 교실, 복도, 매점 인근 등)에 RFID 리더기가 탑재된 분리배출 전용 수거함을 설치하고, 배출 대상이 되는 폐기물(예: 플라스틱 음료 용기, 종이컵 등)에 간단한 태그나 코드 부착을 유도하는 방식이 고려될 수 있다. 이를 통해 수거되는 폐기물의 종류, 빈도, 분류 정확도 등을 실시간으로 기록 및 분석할 수 있으며, 향후 폐기물 처리 및 교육적 피드백의 기초자료로도 활용 가능하다.

(2) AI 기반 자동 분류 수거함 설치

AI 비전 기술을 활용한 자동 분류 수거 시스템은 분리배출 오류를 최소화하는 데 효과적이다. 교내에 설치된 스마트 수거함은 폐기물이 투입될 때 카메라 및 센서를 통해 물품의 형태와 재질을 자동 인식하고, 내장된 알고리즘을 통해 이를 적절한 분류함으로 유도하거나, 사용자가 분리배출 오류를 인지하고 수정할 수 있도록 시각적 피드백을 제공한다. 이러한 시스템은 학생 개개인의 분리배출 습관 개선과 교내 전체의 분리 정확도 향상에 실질적인 기여를 할 수 있다.

(3) 수거 데이터 기반의 환경교육 및 인센티브 제도

RFID 및 AI 기술을 통해 축적된 분리배출 데이터를 기반으로, 학급별 또는 학년별 폐기물 배출 현황과 재활용률을 정기적으로 공개함으로써, 학생들의 자발적인 참여를 유도할 수 있다. 예컨대, 일정 기간 동안 가장 높은 분리배출 정확도를 기록한 학급에게 환경 포인트를 부여하거나, 친환경 캠페인 참여 실적을 기록하여 생활기록부에 반영하는 등의 보상 체계를 마련할 수 있다. 또한, 수거 데이터를 활용한 시각 자료(차트, 인포그래픽 등)를 통해 학생 주도 환경 보고서 작성, 교내 발표회 등 교육 프로그램과 연계하면, 단순한 시스템 도입을 넘어 교육적 효과를 극대화할 수 있을 것이다.

4. 처리 및 재활용 단계

4.1 열분해 기술

(1). 원리와 작동 매커니즘

열분해(Pyrolysis)는 무산소 또는 극소산소 조건하에서 폐플라스틱을 \*\*300~800℃\*\*의 고온에서 가열하여, 고분자 사슬을 절단하여 액상유(열분해유), 가연성 가스, 고형탄소물질(Char) 등으로 분해하는 기술이다.

폐플라스틱의 주 사슬인 C–C 결합과 C–H 결합이 열에 의해 균열되며, 이로 인해 다양한 탄화수소류가 생성된다. 특히 PE, PP는 고분자 사슬이 단순하고 산소 함량이 낮아 열분해 효율이 높다

기본적인 반응 과정은 다음과 같다:

1. 흡열 반응: 고분자에서 결합이 끊어지고 라디칼이 형성됨

2. 라디칼 재배열 및 탈수소화: 다양한 중간체가 생성

3. 종결 반응: 저분자 탄화수소 생성 → 열분해유 및 가스

특히 PE는 340~500℃ 범위에서 거의 완전히 열분해되어 0.5% 이하의 찌꺼기만 남기며, PET는 에스터 결합이 주로 분해되며 약 50%의 Char가 남는다.

(2). 환경적 효과

열분해는 다음과 같은 특징과 장점을 갖는다:

혼합 폐기물 처리 가능: 플라스틱이 섞여 있거나 오염된 상태에서도 처리 가능하다.

원료화 가능성: 생성된 열분해유는 나프타, 디젤, 벙커C유 대체 연료로 활용 가능하다.

온실가스 감축: 매립 및 소각 대비 온실가스 배출량을 50% 이상 감축할 수 있다.

순환경제 실현: 기존 화학공정의 원료로 활용되며, 원유를 대체할 수 있다.

또한, 열분해는 플라스틱을 거꾸로 조립 해체하여 모노머 또는 연료로 환원시키는 유일한 화학적 경로이며, 이는 일종의 인공적 석유 재생 시스템으로 평가받는다. 이로 인해 '진정한 폐플라스틱 순환' 기술로 주목받고 있다.

(3). 열분해에서의 분자 결합을 끊을 때의 필요한 에너지

열분해에서 고분자 결합을 끊기 위해서는 상당한 에너지가 필요하다. 주요 결합에 대한 결합해리 에너지(Bond Dissociation Energy)는 다음과 같다:

결합 유형 평균 결합 에너지 (kJ/mol) 관련 플라스틱 예시

C–C 313 PE, PP

C–H 410 PE, PS

C–O 358 PET, PLA

예를 들어, PE는 주로 C–C 결합으로 구성되어 있으며, 1kg의 PE를 완전히 열분해하려면 약 7개의 C–C 결합을 절단해야 하며, 이는 약 2191 kJ 이상의 흡열 에너지를 요구한다.

이때 전체 반응은 다음과 같은 헤스의 법칙 경로로 설명할 수 있다:

ΔH₁: 플라스틱 → 라디칼/분해 단량체 (흡열)

ΔH₂: 라디칼 → 연료유, 가스, Char (발열)

ΔH\_total = ΔH₁ + ΔH₂

실험에 따르면 PE의 열분해 반응은 평균적으로 약 187 kJ/mol의 활성화 에너지를 필요로 하며, 이는 열분해의 효율과 수율을 결정짓는 핵심 요인이다.

(4). 경제적 가치

열분해는 단순한 처리 기술이 아니라 다음과 같은 경제적 가치를 창출하는 산업으로 진화하고 있다:

4-1. 고부가가치 열분해유 생산

PE 기준 1톤 처리 시 500~700kg의 열분해유 생산 가능

열분해유는 정제 시 나프타로 전환되어 석유화학 공정 원료로 활용

열분해유 가격: 톤당 약 300~450 USD 수준

4-2. 에너지 자립 및 운영비 절감

열분해 시 생성되는 가스(약 15~20%)는 자체 공정에 재사용되어 에너지 자립률 70% 이상 확보

기존 소각 대비 운영비 20~40% 절감 효과

4-3. 탄소배출권 활용

소각 대비 CO₂ 약 0.9톤/톤 폐플라스틱 저감

EU 탄소거래시장 기준 톤당 50~80 유로 수익 창출 가능

4-4. 산업 활용 확대 및 기술 투자

SK지오센트릭, LG화학 등 대기업이 열분해 공장 설립 중 (SK: 66,000톤 규모 / LG: 초임계 열분해 방식 도입 중)

세계 최대 플라스틱 재활용 스타트업인 Plastic Energy, Mura Technology 등과 기술 제휴

5. 종합 평가 및 기술적 전망

플라스틱 열분해는 단순한 처리 기술이 아닌, 고도화된 화학적 자원화 기술로서 폐기물 문제 해결과 탄소중립을 동시에 달성할 수 있는 핵심 솔루션이다. 에너지 회수, 원료화, 고부가가치 생산 가능성 등에서 뚜렷한 경쟁력을 보이며, 열역학적 접근을 통해 반응 최적화와 수율 개선이 가능하다. 앞으로 순환경제 실현을 위한 실질적인 산업 모델로 자리매김할 것으로 기대된다.

4.2 광분해(Photodegradation) 기술

(1) 원리와 작동 메커니즘

광분해는 자외선(UV) 또는 가시광선과 같은 고에너지 광원을 이용하여 고분자 물질을 저분자 화합물로 분해하는 기술이다. 고분자 물질이 광에너지를 흡수하면 화학 결합이 파괴되고 라디칼이 형성되며, 이는 연쇄적인 산화반응을 유도하여 고분자 사슬을 끊는다. 이 과정은 플라스틱의 분자량을 점차 감소시키고, 최종적으로 이산화탄소, 물, 알데하이드, 유기산 등의 저분자 물질로 전환된다.
최근에는 이산화티타늄(TiO₂)과 같은 광촉매를 활용한 기술이 주목받고 있다. 광촉매는 자외선을 흡수하여 강력한 산화력을 지닌 전자·정공 쌍을 생성하며, 이를 통해 플라스틱 표면의 화학 결합을 선택적으로 분해할 수 있다. 이와 같은 촉매 기반 광분해는 플라스틱에 코팅된 상태로 실외에서 자외선에 노출되거나, 정수처리·하수처리 등 수계 환경에서 적용될 수 있다.

(2)환경적 효과

광분해 기술은 고온 처리를 필요로 하지 않기 때문에 에너지 소비가 낮으며, 열분해에서 흔히 발생하는 다이옥신, 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 2차 오염물질 생성이 상대적으로 적다. 또한, 자연광 또는 저에너지 인공광을 활용할 수 있어 저탄소 기반의 폐기물 처리 기술로평가된다.
일부 연구에서는 자연광에 6개월 이상 노출된 고분자(예: PE, PET)의 분자량이 최대 40% 이상 감소하였으며, 촉매 적용 시 분해 시간이 획기적으로 단축될 수 있음이 확인되었다. 그러나 분해가 불완전할 경우, 중간 생성물 또는 미세플라스틱이 잔존할 수 있어 생태계로의 2차 유입 가능성이 존재한다.

(3) 경제적 가치 및 한계

광분해는 태양광을 활용한 수동적 처리 방식으로 운용 시 유지관리 비용이 낮고, 복잡한 설비 없이도 소규모 지역이나 개방된 환경에서의 적용이 가능하다는 장점이 있다. 이는 해안 폐기물이나 농촌 지역 분산형 처리에 적합하다. 반면, 초기 설치비용(광촉매 소재, 반응기 구조 등)과 처리 효율의 한계로 인해 대규모 상업화에는 기술적·경제적 과제가 존재한다. 또한, 실시간으로 부산물을 회수하거나 에너지화하는 체계가 부재하기 때문에 열분해처럼 직접적인 자원 회수는 어렵다.

(4) 종합 평가 및 기술적 전망

광분해는 자외선이나 자연광을 활용할 수 있다는 점에서 환경적 지속가능성이 매우 높으며, 미세플라스틱 감소, 저에너지 소모, 친환경적 공정이라는 측면에서 우수한 대안 기술로 간주된다. 특히 해양 유입 전 단계의 플라스틱 처리, 농어촌 지역 소규모 쓰레기 저감, 학교나 공공기관의 교육용 시범사업 등에서 현실적 응용 가능성이 크다.
향후 기술 발전은 고활성·고내구성 광촉매 개발, 부산물의 무해화 및 회수 시스템, 광반응기의 모듈화 등으로 이어질 필요가 있다. 특히 열분해와의 병행 적용, 즉 ‘전처리용 광분해 – 후처리용 열분해’의 연계 방안은 처리 효율과 환경성을 동시에 확보하는 통합적 폐기물 처리 시스템으로서 주목할 만하다.

결과 ( Results )

![](data:application/octet-stream;base64...)

그림 1. 플라스틱 벨류체인 도식화

토의(Discussion), 결론(Conclusion)

본 탐구는 플라스틱의 전 생애주기를 네 단계(생산, 소비, 수거 및 폐기, 처리 및 재활용)로 구분하여 분석하고, 각 단계별 문제점과 해결 방안을 기술적·정책적으로 제안했다는 점에서 의미가 크다.

우선, 생산 단계에서는 석유 기반 플라스틱의 탄소 배출 문제를 인식하고, PLA와 PHA 같은 바이오 플라스틱의 대체 가능성과 한계를 분석했다. 특히 PHA의 해양 분해 가능성은 주목할 만하나, 상용화 비용 문제는 여전히 해결 과제로 남는다.

소비 단계에서는 친환경 디자인 사례(무라벨, 종이팩 등)를 중심으로, 소비자의 행동 변화와 기업의 설계 노력이 재활용 효율에 큰 영향을 미친다는 점을 확인했다. 소비자 인식 개선 캠페인과 정책적 인센티브 도입이 병행될 필요가 있다.

수거 및 폐기 단계에서는 RFID·AI 기술을 활용한 스마트 수거 시스템의 가능성을 제안했다. 이 시스템은 현장의 분리 정확도 향상뿐 아니라, 데이터 기반 환경교육 및 인센티브 설계에도 기여할 수 있다는 점에서 현실적 대안이 될 수 있다.

마지막으로 처리 단계에서는 열분해와 광분해 기술의 원리, 효과, 한계를 비교하며, 미래형 플라스틱 자원화 시스템의 핵심축으로서의 가능성을 검토했다. 특히 열분해는 고부가가치 열분해유 생산 및 온실가스 감축 효과 측면에서 산업적 확장성이 크다.

본 탐구를 통해 확인한 바와 같이, 플라스틱 문제는 단순한 재활용을 넘어 전 생애주기 전체에 걸친 통합적 접근이 필요하다. 생산부터 처리까지의 각 단계는 서로 유기적으로 연결된 순환 구조 속에 있으며, 어느 하나만 개선되어서는 전체 시스템의 효율을 담보하기 어렵다.

이를 위해 기술적 대응과 더불어 소비자 행동 변화, 제도적 기반 강화, 산업계 참여가 함께 이루어져야 하며, 본 연구에서 제안한 스마트 수거 시스템, 바이오 플라스틱 전환, 자원화 기술 도입은 실제로 학교나 지역사회 단위에서부터 실험적으로 적용해 볼 수 있는 구체적 방안이 될 수 있다.

향후에는 이 시스템을 기반으로 실제 플라스틱 흐름 데이터를 수집·분석하고, 그에 따라 지역 맞춤형 정책이나 교육 프로그램을 설계하는 후속 연구로 이어지는 것이 바람직할 것이다.

REFERENCES

국내 기업 음료 패키지 사례 :

국내석사학위논문 인천대학교 대학원, 2022. 인천