

KENTECH 4월 과제

“플라스틱의 순환과 밸류 체인 구상”

전북과학고등학교

김소연

류채은

임한나

Abstract

본 연구는 플라스틱 사용 증가로 인한 환경 문제를 해결하기 위해 친환경적 폐기 및 분해 방법, 재활용 및 업사이클링 기술 및 산업에 적용하여 얻을 수 있는 이익을 모색한다. 플라스틱의 수집 후 폐기 과정, 플라스틱 종류에 따른 미생물을 활용한 분해 방법 및 해당 산물을 통한 플라스틱의 업사이클링 기술에 대해 소개한다. 이를 통해 플라스틱 밸류체인을 구상하여 플라스틱 자원의 순환 과정을 만들어 내는데 기여하고자 한다.

Introduction

자원의 순환의 관점에서 보았을 때 현재의 플라스틱은 일회용품 등의 사용 증가로 많은 쓰레기를 발생시키며 해양 쓰레기의 85%라는 큰 비중을 차지하고 있다. 이는 편리함으로써 우리에게 다가왔지만 제작과정에서 발생하는 탄소부터 재생 불가능한 자원으로써 지구에 떠돌아 다니며 미세플라스틱으로 제공되어 우리 생활에 부정적인 영향을 미친다. 또한 이들이 자연적으로 분해되는 데는 매우 오랜 시간이 걸려 사용량이 증가할수록 폐기량도 그에 따라 증가할 수 밖에 없다. 편리함 속에 숨겨진 예기치 않는 환경오염을 방지하기 위해 플라스틱의 친환경적 분해 방법과 재활용 및 업 사이클링, 대체 가능한 소재를 찾는 것이 중요한 과제이며 위 문제를 해결하기 위한 방안을 찾는 것이 관심이 집중 되고 있다.

폐 플라스틱은 크게 물리적, 화학적, 열적 방법에 의해 분해되거나 리사이클링이 이루어 지며 자원의 가치가 업그레이드되는 업사이클 또한 이루어지고 있다. 이러한 방법에 의해 생성된 산물을 산업적으로 발전될 수 있도록 한다면 플라스틱 자원의 순환은 계속 될 수 있다. 현재의 기술로 플라스틱을 분리선별하는 과정 수거 과정들이 중요하게 여겨지고 있으며 복합 소재로 구성된 제품에 대해서도 함께 리사이클링 하는 기술 등에 힘쓰고 있는 상황이다. 산물에 대해

산업에 응용하여 창출 할 수 있는 이익에 대해 토의하여 생산된 물질이 여러가지 용도로 활용되는
방안에 대해 알아보는 과정은 중요하게 여겨지며 이를 통해 플라스틱의 순환과정에 이바지 하는
이론적 기반이 이루어질것이라고 생각한다.

Process

1. Question (2) 수집 : 대상으로 정한 플라스틱이 주로 어느 용도로 쓰이는지,
어떤 폐기 과정을 거치는지, 플라스틱 종류에 따른 분리수거비율 등에
집중하여 폐플라스틱이 환경에 미치는 영향을 제시한다.

1) 현황

플라스틱 재활용 협회(APR)에 따르면 미국 내 경질 플라스틱 포장재의 8할은 PET,
HDPE,PP로 이 중 21%만이 재활용되며(EPA 데이터 활용), PET 및 HDPE 병의 경우에
28%의 재활용률을 보인다. 미국의 기존 처리 인프라와 최소한의 추가 투자로 PET 및
HDPE 병 재활용률을 40% 이상으로 높일 수 있다고 전망하여 재활용 자원으로 가능성이
높다고 본다.

고전 폐기방식: 물질 재활용(플라스틱 원료로 다시 회수하여 플라스틱 제품으로
재활용하는 것)을 감안해도 많은 폐기물이 방치되고 있다. 실제로 플라스틱 재활용률은
30%가 채 안된다.

폐플라스틱 재활용 과정은 1차, 2차(기계적), 3차(화학적 공정)으로 나뉜다.
폐플라스틱의 원료와 순도에 따라 고부가치가 결정된다. 그런 점에서 물질로 재활용되는
것 외의 다른 종류의 폐플라스틱은 원유 기반이므로 매립이 아닌 에너지화로 재활용해야
한다.

2) 재활용이 완전히 되지 않는 경우

재활용품의 폐기과정은 수거-세척-재가공-재활용품 제조-소각으로 나눌 수 있다.
HDPE는 주로 가정에서 사용하는 일회용품에서 나온다. 우리나라에선 재활용품을 따로
수거하여 재활용 시설로 이동시킨다. 이 단계에서 HDPE가 다른 플라스틱과 혼합되어
수거되기도 하고, 사용한 용기는 기름이나 음식물에 의해 오염된 상태이므로, 추가적인
세척이 필요하며 심한 경우엔 재활용을 할 수 없다. 다른 플라스틱과 혼합되어 있어 이를

분리하는 과정도 비용이 많이 든다.

이후 추가적인 세척이 완료되어 라벨, 뚜껑이 없는 상태의 HDPE는 작은 조각으로 분쇄된다. 분쇄된 조각은 고온에서 녹여 새로운 제품을 만들고, 펠릿 형태로 만들어져 다양하게 활용될 수 있다. 재활용되면, 다른 재질과 혼합되어 물리적 특성이 떨어질 수도 있으며 재활용 과정에서 오히려 환경오염이 유발되기도 한다. 또한 저렴한 가격으로 구매한 HDPE는 일회용으로 사용하지만, 재활용 HDPE는 오히려 더 비싸서 공급과 수요가 적절하지 않아 비효율적이다. 더하여 오히려 비싼 가격에 떨어지는 품질의 플라스틱으로 수요가 충분하지 않을 수 있다. 이는 재활용 공정이 지속적으로 이루어지는 것을 어렵게 한다.

폐기해야 할 HDPE는 소각되거나 매립지로 보내진다. 소각의 경우, 에너지를 회수할 수 있지만, 환경호르몬 등 여러 유해 물질이 발생할 수 있으며, HDPE의 분해에는 오랜 시간이 걸려 환경에 잔여해 토양, 수질을 오염시킬 수 있다. 현재 문제점으로 재활용 기술이 발전하지 않아 모든 폐기물을 효율적으로 재활용하는데에는 어려움이 있으며, 재활용 및 환경에 대한 정책 및 규제가 미비하여 발전하기 어렵다.

3) 새로운 폐기 방식

HDPE를 완전히 재활용할 수 있으며, 잠재적으로 생분해될 수 있는 물질로 바꾸는 방법이 개발되었다. 촉매를 사용하여 HDPE 중합체 사슬 말단의 반응기를 포함하는 더 짧은 조각으로 절단하는 방식이다. 이는 HDPE를 원형 재처리에 적합한 텔레케릭 매크로모노머로 바꾼다. 알켄 수용체가 없는 Ir-POCOP 촉매를 이용해 촉매탈수소를 통해 HDPE를 불포화시킨다. 또한 2-하이드록시에틸아크릴레이트와 수소화반응을 통한 교차 대사가 이렇게 부분적으로 불포화된 HDPE를 텔레케릭 매크로모노머로 변형시킨다. 폐플라스틱 열분해 기술로 저급 폐피닐을 열로 분해하여 고품질의 열분해유를 생산하는 것으로 폐비닐 처리의 변화와 수소 생산까지 이어져 새로운 수소 경제 구축에 기여할 것으로 보인다.

2. Question (3) 분해 및 업사이클링: 광분해와 열분해를 비롯하여 여러 종류의 플라스틱 분해 방법 중 어떤 종류의 분해방법을 응용할 것 이고 업사이클링을 통해 어떤 물질이 생산되는지를 제시한다.

1) 플라스틱 분해 방법

a) 광분해

광분해는 자유 라디칼(free radicals)의 생성과 전달을 통해 매개되는 일련의 연쇄 화학 반응을 통해 플라스틱을 분해하는 방법이다. 기본적으로 280-420nm 파장의 자외선(UV)의 높은 에너지는 플라스틱을 구성하는 C-C 결합(375 kJ/mol)이나 C-H 결합(420 kJ/mol)을 해리시킬 수 있다. 결합의 해리 반응을 통해 생성되는 알킬 라디칼(alkyl-radical, R*)이 산소(O₂)와 반응하여 ROO*를 형성하며, 이후 ROO*는 다시금 플라스틱 고분자(RH)와 반응하여 ROOH와 알킬 라디칼(R*)을 반복하여 만드는 원리를 통해 플라스틱을 저분자 화합물로 분해시키는 것이다.

광분해는 이론적으로 무한한 에너지원에 기반한다는 점에 플라스틱 분해를 위한 이상적인 기술로 보이지만, 실제로 지표면에 도달하는 UV의 에너지는 크게 높지 않으며, UV가 조사되는 플라스틱 표면적이 상대적으로 적어 분해 속도 측면에서 큰 한계를 가진다.

이를 극복하고자 광촉매(photocatalyst) 활용을 통한 라디칼 형성 촉진과 관련된 연구들이 많이 진행되어왔다. 기본적으로 광촉매의 밴드갭(bandgap) 에너지보다 높은 에너지를 갖는 UV가 조사될 때 전자(electrons)가 발생한다는 점을 이용한다. 발생한 전자는 산소의 단계적 환원 반응을 통해 과산화수소(H₂O₂)를 생성케 하며, 이러한 과산화수소가 추가로 환원되며 OH* 라디칼을 발생시켜 각종 플라스틱 결합과의 반응 및 분해를 유도하게 된다. 대표적으로, TiO₂는 높은 뛰어난 산화 환원 능력, 화학적 안정성을 바탕으로 가장 많이 활용되어 온 광촉매이며, PS, PP, PVC에 대해서 최대 2.5배가량 빠르게 촉진 시킬 수 있다는 것을 보인 바 있다. 이외에도 ZnO, FeO₂, CdS를 포함한 다양한 광촉매가 플라스틱 분해에 사용된 바 있다.

하지만, 광촉매를 이용한 광분해 역시 광촉매 자체의 경제성이나 전처리 과정이 필수적이라는 점에서 실제 플라스틱 분해에 활용되는 데 한계가 존재한다. [1]

b) 열산화 분해

광분해와 기본적인 분해 메커니즘은 동일하지만, 자유 라디칼의 발생이 자외선이 아닌 고온 혹은 자연적으로 발생한다는 점에서 근본적인 차이를 갖는다. 고온 환경에서 그리고 극히 드물게는 자연적으로도 R*이 생성될 수 있으며 이후 산소 분자와의 반응을 통해 생성되는 ROO*이 연쇄 분해 반응을 일으킨다. 이러한 분해는 광분해만큼 분해 속도가 빠르지는 않지만, 플라스틱을 사용하는 다양한 환경에서 진행될 수 있으며, 기계적 물성 변화나 색상 변화와 같은 플라스틱의 특성 변화를 가져온다는 점에 플라스틱 사용 수명을 줄이는 주요 원인이 되어왔다. 하지만, 최근에는 이러한 열산화 분해를 막고자 다양한 플라스틱에 자유 라디칼 스캐빈저, 과산화질소 스캐빈저와 같은 각종 산화 방지제를

처리하고 있으며, 때문에 열산화 분해를 통한 플라스틱의 자연적 분해를 어렵게 만들고 있다. 더불어 산소가 필수적으로 관여하기 때문에 매립이나 해양 환경에서는 이러한 분해를 크게 기대하기 힘들다. [1]

c) 가수분해

가수분해는 플라스틱 표면의 수분이 플라스틱 내부로 일부 확산되며 분해가 진행되는 반응이다. 물이 플라스틱 내부로 확산되면, 카르복실(carboxyl), 아민(amine), 에스테르(ester)와 같은 산성 말단 작용기 그룹(acidic end-group)에서는 자가 촉매(autocatalysis) 가수분해가 진행될 수 있으며, 이러한 과정을 통해 플라스틱이 저분자 화합물로 분해된다. 에스테르화(esterification) 반응을 통해 제작되는 PET의 경우, 역반응인 가수분해를 통해 분리될 수 있는 플라스틱의 대표적인 사례다. PET의 에스테르 결합의 가수분해 과정에서는 카르복실(carboxyl), 하이드록실(hydroxyl) 말단이 형성되기 때문에 자가촉매 과정을 통해 지속적인 분해가 가능하다. 비슷하게 폴리우레탄(polyurethane)에서도 내부의 에스테르, 우레아(urea), 우레탄(urethane) 결합으로부터 가수분해가 자가촉매 과정을 통해 진행될 수 있다. 하지만 이러한 플라스틱들의 가수분해는 일부 pH 조건에서 촉진될 수 있다고는 알려져 있으나, 일반적인 환경에서는 기본적으로 아주 느리다는 한계가 존재한다. 한편, 가수분해는 몇몇 생분해성 플라스틱들의 주된 분해 방법으로 활용되고 있다. 알려진 PLA (polylactic acid)의 경우, 에스테르 결합을 주된 결합으로 구성됨과 동시에 비교적 간단한 단량체 구조를 가지기 때문에 50도 이상의 온도에서 빠르게 가수분해될 수 있는 것으로 알려져 있다. 비슷하게 PBAT (poly-butylene adipate-co-terephthalate), poly-caprolactone (PCL) 역시 높은 가수분해성을 갖는 것으로 알려져 있다. [1]

d) 미생물 분해

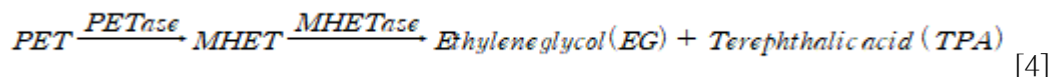
미생물을 사용하여 미세플라스틱을 분해하면 환경에 해를 끼치지 않고 미세플라스틱 제거가 가능하며, 자연적인 생물학적 정화를 촉진하고 부정적인 영향을 주지 않기 때문에 유망하고 환경적으로 안정적인 전략이다. 미생물에 의한 생분해는 미생물의 작용에 의해 고분자 사슬이 분해되는 것을 말하며, 크게 2단계를 거친다. 첫 번째 단계는 고분자 사슬을 올리고머(oligomer)와 단량체(monomers)로 분해하는 조각화(fragmentation) 단계로서, 가수분해, 산화 등에 의해 발생하게 된다. 두 번째 단계는 올리고머와 단량체가 미생물에 의해 광물화(mineralization)가 되는 것으로서, 궁극적으로 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 물, 바이오매스 등을 형성하는 단계이다. 미생물을 활용한 미세플라스틱의 생분해 연구가 활발히 진행되고 있다. 매립지로부터 분리한 Bacillus sp.와 Paenibacillus sp.이 PE를 탄소원으로 성장하며, PE 미세플라스틱의 중량과 크기를 감소시켰다.

Rhodococcus sp.이 PP 미세플라스틱 분해 능력이 있음을 확인했으며, 미세플라스틱의 구조적, 형태학적, 화학적 변화가 있었다. [2]

2) 선정된 플라스틱 분해 방법 : 미생물을 활용한 플라스틱의 분해

a) PET의 PETase에 의한 분해

Ideonella sakaiensis 201-F6에서 발견된 PETase의 PET 분해 기작은 다음과 같다.



[Fig1. PETase의 PET 분해 기작]

해당 기작을 통해 미생물을 활용하여 친환경적으로 PET를 단량체로 분해할 수 있다.

b) PE의 분해

PE의 분해 과정은 C-C 결합이 끊어져 상대적으로 분자량이 작은 중간물질이 만들어지고 이후 산화과정을 거쳐 지방산의 형태로 전환될 것으로 예상된다. 이때 C-C 결합을 끊어낼 수 있는 효소들의 작용이 중요하며 그 예로는 lignin peroxidase, maganese poerxidase, laccase 등이 있다. 약 20여 종의 박테리아가 PE 분해능을 가지는 것으로 보고되었다. [1]

c) PS의 분해

PS는 구조적으로 PET, HDPE/LDPE와 유사하지만, 단량체의 구조적 특징으로 보다 높은 소수성을 가져 가수분해가 거의 이루어지지 않는다. PS를 분해하는 갈색거저리가 보고되었고, 최근 연구에서는 갈색거저리 소화기관에 PS의 소화를 돕는 효소가 존재하며, *Citrobacter*, *Serratia*, *Klebsiella*를 포함하는 장내 미생물 군집이 소화를 돕는 것이 밝혀졌다. [1]

d) PP의 분해

PP는 탄소 결합으로 연결되는 비교적 간단한 분자 구조를 갖지만, 각 결합이 포함하는 메틸기로 인해 가수분해가 어렵다. *Brevibacillus*, *Aneurinibacillus* 군집이 50도 환경에서 140일간 약 50% 가량의 PP를 분해할 수 있음이 알려지기도 했다. 또한 갈색거저리와 슈퍼밀웜의 소화기관 내에서 동정된 *Citrobacter*, *Enterobacter*의 미생물 군집이 PP 분해에 중요한 역할을 하는 것으로 알려졌다. [1]

3) 이를 활용한 업사이클링 방법 및 이로 인해 생성되는 물질

유전자를 재조합한 미생물을 활용하여 PET를 TPA, EG로 분해한 후 그 산물을 재가공하여 mcl-PHA를 얻는 과정에서 기존의 문제점인 수득률이 낮은 것을 보완할 수 있다고 한다. 또한 해당 박테리아 군집을 활용하여 PET 분해 산물을 mcl-PHA와 MA(뮤코산 염)로 전환하고 이를 이용해 폴리우레탄과 아디프산을 합성하는데 성공했다. [6]

해당 연구를 통해 가장 널리 사용되는 플라스틱 중 하나인 PET에 대한 업사이클링 방안을 확인해볼 수 있다.

또한 PET를 제외한 다른 플라스틱인 PE, PS, PP 등 다양한 플라스틱의 미생물을 활용한 분해도 연구되고 있기 때문에 앞으로 더 다양한 플라스틱에 대해서도 미생물을 활용한 분해가 적용될 수 있을 것으로 생각된다. 미생물뿐만 아니라 플라스틱 분해능을 가지는 생물들이 발견되고 있으며 앞으로 생물적이고 친환경적인 플라스틱 분해 기술이 발전할 것으로 보인다.

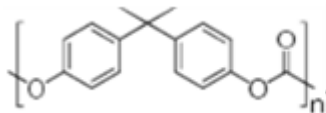
3. Question (4) 업사이클링 산물 활용 방안 : 업사이클링을 통해 생산된 산물을 산업에 응용하여 창출할 수 있는 이익에 대해 토론한다.

우선 버려진 플라스틱을 기반으로 새로운 제품을 만들어 낼 수 있다. 플라스틱은 SIO(society of Plastic)에 따라 폴리에틸렌과 테레프탈레이트, 고밀도 폴리에틸렌, 폴리 비닐 클로라이드와 폴리 염화 비닐, 저밀도 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스타이렌과 나머지로 나뉜다. 이 중에서 플라스틱은 또 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱으로 녹는점에 의해 변성 정도가 다른 두 가지 물질로 변화시킬 수 있는데, 열가소성 플라스틱의 경우 앞서 말한 1~7가지로 잘 분리가 된 전제조건 하에, 조금의 열을 가해도 사슬 간의 약한 반데르발스 상호 작용에 의해 새로운 플라스틱으로 성형하여 재사용이 가능하다. 이에 해당하는 플라스틱은 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스티렌, 폴리카보네이트, 내 충격성 폴리스티렌, 폴리 염화비닐, 불소수지, 충전 열가소성 플라스틱등이 있으며 이는 음료수병, 생수병, 세제 용기, 플라스틱 장난감 및 생활용품 등으로 사용되어 우리 주변에서 쉽게 볼 수 있는 것들을 이룰 수 있어 산업적인 이익을 불러일으킨다.

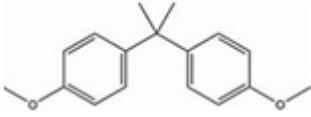
열 경화성 플라스틱의 경우 플라스틱을 구성하는 단량체가 삼차원의 가교 결합 된 입체적인 그물구조를 이루고 있어 내구성이 강하다는 특징이 있다. 페놀 수지, 유레아수지, 멜라민 수지, 불포화 폴리에스터수지, 에폭시수지, 폴리우레탄이 이에 해당 된다. 이의 경우 녹지 않아 열 가공이 불가능 하고 매우 높은 열을 가했을 때 열분해 되는 동시에 유독가스를 대기 중에 방출한다. 이러한 열 경화성 플라스틱을 업 사이클 할 수 있는 여러 방안이 제공되고 있으며, 광 잠재성 촉매를 사용해 분자 사슬 간 가교 결합의 가역적 교환반응을 활성화하는 예시가 이에 해당한다. 이는 자가 치유를 기반으로 수행되는 작업으로, 빛을 받았을 때 활성화되어 비트리머를 원하는 시간에 필요한 부위에 시행할 수 있어 타이어 등 물리적힘이 항시적으로 가해져 변성이 일어나는 부위에 효과적으로 사용돼 제품을 다시 사는 횟수만큼의 이익을 창출할 수 있을것으로 예상된다.

폴리카보네이트는 비스페놀 a에 의해 중합되는 방법으로서 우수한 성능을 가진 합성법으로 생산이 이루어지고 있다. 내 충격성이 매우 뛰어나며 기계적 강도 및 전기 절연성이 우수하다는 특징을 가지며 유연하고 가벼울 뿐더러 가시광선 투과율이 높아 표면 광택이 좋다. 단열 및 자외선 차단 목적으로 건축자재 및 자동차용품에 활용, 각종 보호구에 활용될 만큼 단단한 이는 구성 물질인 비스페놀 a의 회수 과정에 의해 재활용이 이루어지게 되었다. poly는 알코올 분해 반응, 아민 분해 반응, 글라이콜 분해 반응, 열분해 반응, 가수분해등으로 해 중합이 가능하다는 결과에 도출할 수 있었다. 또한 poly를 유기촉매와 금속 촉매를 사용해, 해중합 하면서 비스페놀 a가 회수될 뿐만 아니라 카보닐 소스를 이용해 여러 플라스틱 및 고효율의 유기 탄산염들을 얻게 되어 업사이클링에도 활용이 될 수 있었다. 여기서 나온 비스페놀 a는 우리 몸에 환경 독소로 작용하는 물질로 내분비계 교란 물질임을 알 수 있다. 하지만 그럼에도 많이 사용되는 데에는 플라스틱의 제조에 첨가되어 큰 영향을 발휘하는 산업용 화학물질이기 때문이다.

(CH₃)₂C(C₆H₄OH)₂를 갖는 비스페놀류의 이 물질은 폴리카보네이트와 에폭시 수지의 원료로 사용이 되며 이는 경제적 측면과 플라스틱의 성능에 긍정적인 효과를 제공하고 있어 회수가 진행될 시 엄청난 순환 효과를 볼 수 있을 것이라 예상이 된다. 또한 불투명하거나 투명한 제품을 제작하는데 용이함으로 치아의 채움 용 물질로도 사용될 수 있으며, 캔 음식의 코팅 부분, 영수증에서도 사용될 수 있을 것이며 더욱 산업적인 측면에서 플라스틱이 주로 사용되는 곳인 전자제품, 자동차 부품, 건축 자재 등에 섞여 주요 산업에 이바지할 것으로 예상된다.



[Fig2. poly(bisphenol A carbonate)구조]

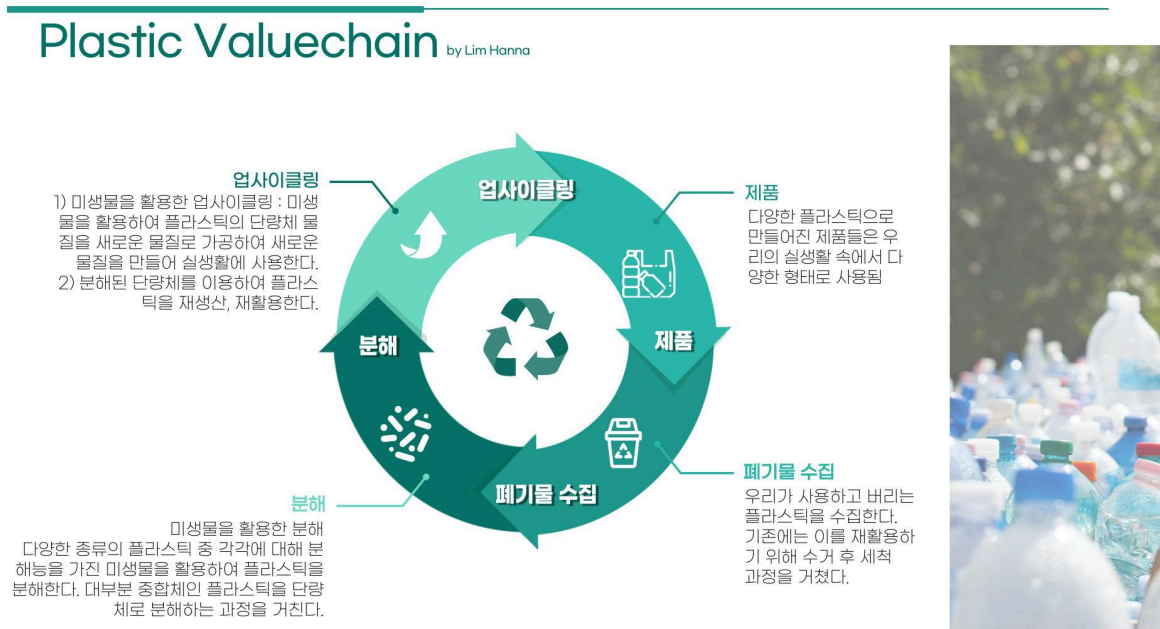


[Fig3. bisphenol a의 구조]

바이오매스 및 플라스틱의 가스화 효율을 높이기 위한 탄산염 촉매 또는 ni based 촉매를 혼합한 시료에 대하여 고정 층 반응기를 이용하여 급속 등은 열분해 실험을 수행하게 되면, 수소를 얻어낼 수 있게 된다. 최대 수소 수율을 위한 조건은 900°C-900°C, 20 wt%의 ni-ZrO₂ZrO₂(1:9) 촉매가 혼합된 Pitch Pine, Polyethylene 시료에 대하여 65.9 vol%의 높은 수소수율의 결과를 얻을 수 있는데 수소는 연료전지를 통해 전기와 열을 생산할 수 있어 차량 발전소 건물 등 다양한 분야에서 활용이 가능하고 연소 시에 물과 열만이 생성되는 청정한 에너지원임을 알 수 있다. 수소를 산업 프로세스로 발전시킨다면 화학물질 생산, 공급망 보강, 탄소 중립 등 다양한 용도로 활용될 수 있으므로 미래 에너지 시스템에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

4. 플라스틱 밸류체인 구상

1) Plastic Value Chain 1



[Fig4. plastic value chain 1]

플라스틱 원료 -> 플라스틱 제품 -> 플라스틱 폐기물 수집

-> 플라스틱 분해

- 미생물을 활용한 분해 : 다양한 종류의 플라스틱 중 각각에 대해 분해능을 가진 미생물을 활용하여 플라스틱을 분해한다. 대부분 중합체였던 플라스틱을 단량체로 분해하는 과정을 거친다.

-> 플라스틱 업사이클링

(1) 미생물을 활용한 업사이클링 : 미생물을 활용하여 플라스틱을 구성하는 단량체의 물질을 새로운 물질로 가공하여 새로운 중합체를 형성하여 실생활에 사용한다.

(2) 분해된 단량체를 활용하여 플라스틱을 재생산, 재활용한다.

-> 플라스틱 및 다른 제품의 원료

해당 과정을 통해 순환적인 플라스틱 밸류체인 구조를 만들 수 있을 것이라고 생각된다.

2) Plastic Value Chain 2

밸류체인 구축에 앞서 플라스틱의 재활용률을 높이려면 기본적으로 재사용 가능한 상태의 플라스틱을 회수하는 것을 목표로 해야한다. 즉, 소비자들의 플라스틱 재활용 플랫폼이 존재해야만 이후 밸류체인 구축에 있어 큰 효과를 얻을 수 있을 것이라고 본다. 따라서 소비자들이 옳은 플라스틱 재활용에 자발적으로 참여하도록 해야한다. 이를 위해선 재활용은 쉽고 재밌어야 한다. 플랫폼 형성을 위해 가정에서부터 참여하는 재활용 습관을 만드는 것을 목적으로 한다. 요새는 팝업을 통해 단기적으로 사람들에게 노출되어도 이벤트라는 것 자체가 사람들의 참여를 유도한다. 따라서 팝업을 통해 집에서 간단히 할 수 있는 재활용 방법이나 취미로 업사이클링에 관심이 생길 수 있도록 미션의 형태로 제시한다면, 흥미를 느끼고 참여할 것이고 일부는 실제 가정에서도 경험을 바탕으로 재활용을 이어갈 수 있을 것이라 생각한다.

조사한 바에 따르면 UPy 분자체의 사중 수소결합에 의한 초분자형 고분자는 독특한 물성 발현으로 산업적 응용이 기대되고 있다고 한다. 또한 앞서 언급한 불포화와 수소화 교차대사로 형성되는 텔레케릭 매크로모노머는 초분자형 고분자 형성에 관여할 수 있다고 한다. 이런 매크로모노머의 구조에 따라 초분자형 고분자의 물성은 달라질 수 있다. 플라스틱 폐기물에 대해 불포화 및 수소화 공정을 통해 수소 순환과도 연결될 수 있으면서 플라스틱 제품의 고품상 업사이클링을 가능하게 할 것으로 예측한다. 영향과 경제성 측면에서 본다면, 불포화를 통해 기존의 단위체로부터 다시 생산하는 것으로 단위체로 만드는데, 이를 다시 업사이클링하는데

우회하는 경로이므로 에너지와 비용을 사용할 것이다. 그리고 이미 생분해를 기반으로 한 촉매 폐기법으로 이후 잠정적으로 환경에 미칠 영향은 비교적 긍정적이라고 볼 수 있을 것 같다.

Conclusion

본 연구를 통해 플라스틱 사용 증가로 인한 환경 문제를 해결하기 위해 플라스틱 밸류 체인의 구축이 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 이를 위해 친환경적 폐기 및 분해 방법, 재활용 및 업사이클링 기술에 대한 지속적인 연구가 필요하며 플라스틱의 분리선별 및 수거 과정의 중요성과 플라스틱 소재에 따른 다양한 친환경적 분해 방법, 복합 소재 제품의 리사이클링 기술 발전, 산업적 응용을 통한 이익 창출 방안을 모색해야 한다. 또한 다양한 기술이 개발됨에 따라 이를 상용화 하고자 하는 노력도 병행되어야 할 것이다. 이러한 플라스틱 밸류체인을 통해 우리는 플라스틱 자원의 순환을 촉진하고 지속 가능한 환경을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

Supporting information

1. 플라스틱의 종류

(1) polyethylene terephthalate (PET) : terephthalic acid와 ethylene glycol을 먼저 esterification시켜 BHET(bis(2-hydroxyethyl) terephthalic acid)를 합성하고, 합성된 BHET를 추가 반응시킴으로써 PET를 얻는다. 내열성, 내약품성, 내유성 등이 우수하다. [1] 방향족 성분의 비율이 높아 물리적인 영향을 제외하고 화학적으로 반응이 거의 없는 불활성 상태가 대부분이기 때문에 미생물 분해가 어려운 것으로 알려져 있다.

(2) high-density polyethylene (HDPE) : Ethylene을 중합하여 얻으며, 충격에 강하고 내한성이 양호하다. [1]

특성 및 용도: 고밀도이며 단단하여 외부 충격에도 잘 견딘다. 또한 내화학성이나 내한성도 양호하다. 내후성이 좋아 파이프로도 이용되며, 내열온도도 90~120도 정도로 높아 전자레인지 용기로도 많이 사용되며, 유해한 화학성분이 배출되지 않아 안전한 플라스틱으로 볼 수 있다. 파이프의 경우, 높은 불 투과성과 단단한 분자결합을 가져 유연하고 내식성 및 내충격성이 있는 고압 파이프 라인에 활용된다. 부식 또는 전식이 없으므로 녹 및 관석이 생기지 않아 유량에

영향을 미치지 않는다. (위생성)열 용착, 전기 용착, 소켓 용착 같은 다양한 용착 방법을 사용하여 연결한다. 100% 재활용이 가능하여 가치가 높은 자원이다.

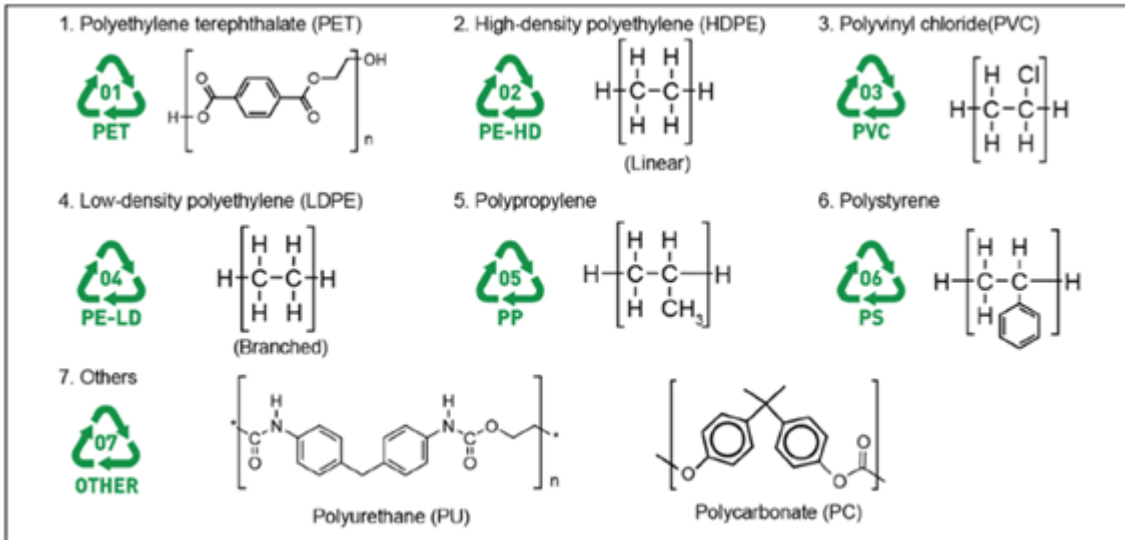
환경에 미치는 영향: 종종 화석 연료로부터 생산된다. 사용 후 대부분 소각되거나 환경에 버려지며, 재활용을 하더라도 품질이 낮다.

(3) polyvinyl chloride (PVC) : Vinyl chloride monomer를 첨가 중합하여 얻는다. 탄소 사슬의 움직임이 상대적으로 제한되어 있어, 가소성을 높이기 위해 가소제(plasticizer)를 첨가한다. [1]

(4) Low-density polyethylene (LDPE) : HDPE와 마찬가지로 ethylene을 중합하여 얻는다. 중합체에 가지(branch)가 있어 선형인 HDPE보다 밀도가 낮으며 신축성이 좋아 가공이 쉽다. [1]

(5) Polypropylene (PP) : Propylene의 중합체로 가공성이 뛰어나고 내화학성이 우수한 것으로 알려져 있다. [1]

(6) Polystyrene (PS) : Styrene의 라디칼 중합반응으로 생산하고, 열에 안정하고 무색투명하여 활용도가 높다. 산 혹은 염기에 강한 편이나 지용성 용매에는 약하다. [1]



[Fig3. 플라스틱의 종류 및 구조식]

2. mcl-PHA

mcl-PHA는 천연 기원, 향상된 생체 적합성, 생분해성 및 세포 성장 및 증식을 지원하는 능력으로 인해 동맥 및 신경 축삭 재생을 위한 스캐폴딩과 같은 생물 의학 응용 분야에 매력적인 재료입니다. mcl-PHA의 가장 일반적인 예는 폴리(3-하이드록시헥사노에이트)(P(3HHx)) 및 폴리(3-하이드록시옥타노에이트)(P(3HO))와 같은 열가소성 엘라스토머입니다. 이러한 재료는 부드럽고 유연하며 결정화도가 낮고 엘라스토머 성질이 낮으며 축쇄 길이와 관련된 특성이 있습니다(축쇄 길이가 증가함에 따라 특성이 증가함). mcl-PHA는 고가의 탄소 공급 원료, 높은 회수 비용 및 상대적으로 낮은 PHA 수율로 인해 발생하는 높은 PHA 생산 가격으로 인해 널리 사용되지 않았습니다. [5]

3. PETase

PETase란 PET를 분해할 수 있는 효소이다. PET를 포함한 합성 폴리에스터를 분해할 수 있는 cutinases, lipases, carboxylesterases, esterases과 같은 가수분해 효소가 곰팡이 및 박테리아에서 발견되었으나 분해능이 미미한 것으로 알려졌다. 이후 PET를 주요 에너지원과 탄소원으로 사용할 수 있는 *Ideonella sakaiensis* 201-F6 종을 분리하여 PET를 분해할 수 있는 효소를 IsPETase로 정의하였다. [3]

References

- [1] 미생물을 활용한 플라스틱 생물학적 분해 동향, BRIC View 동향리포트, 임현규
- [2] 수중 미세플라스틱 제거를 위한 플라스틱 분해 미생물의 분리, 2022, 차한솔
- [3] PET 생분해에 관여하는 방선균 유래 PETase 유전자의 이종숙주 발현, 2022, 양수빈, 유연진, 김응수, 최시선
- [4] Structure of the plastic-degrading *Ideonella sakaiensis* MHETase bound to a substrate, nature communication, Gottfried J. Palm, Lukas Reisky, Dominique Böttcher, Henrik Müller, Emil A.P. Michels, Miriam C. Walczak, Leona Berndt, Manfred S. Weiss, Uwe T. Bornscheuer & Gert Weber
- [5] Biosynthesis of medium chain length polyhydroxyalkanoates (mcl-PHAs) from palm oil, Pinanong Tanikkul, Geraint L. Sullivan, Sarper Sarp, Nipon Pisutpaisal
- [6] Engineering microbial division of labor for plastic upcycling, Teng Bao, Yuanchao Qian, Yongping Xin, James J. Collins & Ting Lu
- [7] 정현진, 2021, 폴리카보네이트의 화학적 업사이클링
- [8] 김채빈, 2022.3.28, journal of Materials Chemistry
- [9] 덕산 케미칼, Bisphenol A의 다양한 용도
- [10] 플라스틱 및 바이오 매스의 촉매 열분해에 의한 수소 생성 특성