2026학년도 1학기 문헌연구보고서



(미세플라스틱 문제의 통합적 처리 전략
: 물질 · 정보흐름의 연결 중심 시스템 설계)

이름	고*주
전공	융합바이오공학과
학번	2017****

미세플라스틱 문제의 통합적 처리 전략
: 물질·정보흐름의 연결 중심 시스템 설계

융합바이오공학과 2017**** 고*주

<목차>

1. 미세플라스틱 문제와 기존 처리 기술의 한계 ····· 2
2. 미세플라스틱 처리 과정에 대한 접근 방식의 전환 : 합성생물학 및 AI 기술 ····· 3
3. 합성생물학 및 AI 기술 기반의 연계 시스템 설계 ····· 4
3.1. 생분해 기술과의 연계 ····· 4
3.1.1. 물리적·화학적 기술 ····· 4
3.1.2. 다중 효소 시스템 ····· 4
3.1.3. 미생물 컨소시엄 ····· 6
3.2. 시스템 운영과의 연계 ····· 7
4. 파일럿 플랜트(Pilot plant) 통합처리시스템의 작동 메커니즘 ····· 8
5. 종합적 고찰 및 향후 과제 ····· 9
6. 참고문헌 ····· 10

1. 미세플라스틱 문제와 기존 처리 기술의 한계

현대 산업의 핵심 소재인 플라스틱은 사용 이후 점차 잘게 부서져 미세플라스틱[1)]이 된다. 미세

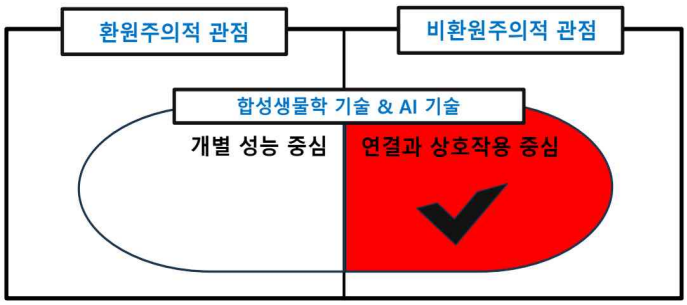
플라스틱 문제는 인간의 행위와 자연환경 사이에서 발생하는 영향이 순환되고 축적되면서 나타나는 현상 및 그 결과를 포괄하는 대표적 사례로, 한 가지 요인만으로 해석하기 어렵다. 그 과정에서 축적된 미세플라스틱이 건강, 환경 등 범지구적인 문제를 야기하고, 더 나아가 장기적으로는 지속가능성까지 위협한다.[2] 따라서 미세플라스틱을 해결하려면 플라스틱 분해 및 처리 과정에 대해 살펴볼 필요가 있다.

물론 현재 산업계는 플라스틱 처리를 위해 다양한 물리적·화학적·생분해 처리 기술[3]을 공정으로 연결하여 사용하지만, 각 기술들의 한계가 존재하며, 공정 간 피드백을 충분히 반영하지 못한다. 그 결과 플라스틱은 처리효율이 떨어지는 동시에 플라스틱을 완전하게 분해하지 못한다.[4]

2. 미세플라스틱 처리 과정에 대한 접근 방식의 전환 : 합성생물학 및 AI 기술

엔지니어들은 미세플라스틱이 축적되는 문제를 해결하기 위해 기존 처리 기술들의 성능을 개선하고자 노력해왔다. 최근에는 합성생물학 기술과 AI 기술도 이러한 흐름 속에서 플라스틱 처리에 필요한 분석 도구로 활용된다.[5] [6]

그러나 본 연구에서는 이 기술들이 단순히 분석적 기능만을 갖지 않는다는 점에 주목하였다. 이를 직관적으로 이해하기 위해 아래 <Figure 01>처럼 환원주의[7]와 비환원주의 관점으로 구분한 인식 틀을 활용하였다.



<Figure 01> 인식 틀을 활용한 합성생물학 및 AI 기술의 의미 탐색[8]

이 틀은 동일한 기술이라도 관점의 차이가 기술에 대한 이해 방식의 차이로 이어질 수 있음을

1) 일반적으로 미세플라스틱(microplastics)은 5mm 이하의 크기를 갖는 플라스틱 입자를 의미한다. Thompson, R. C. et al.(2004), Lost at Sea: Where Is All the Plastic?, *Science*, *304*(5672), p.838.
2) 허준석 외 2인, 「미세플라스틱이 인체에 미치는 영향과 그 검출 방법」, 『산업기술연구논문지』 30(4), 한국산업기술융합학회, 2025, 277-288쪽.
3) 물리적 처리 기술은 여과・흡착・응집 등을 통해 미세플라스틱을 분리하고 제거하는 방식이며, 화학적 처리 기술은 광분해・산화・열분해 등을 통해 플라스틱 구조를 분해하는 방식이다. 또한 생분해 처리 기술은 미생물 및 효소를 활용하여 플라스틱을 분해하는 접근을 의미한다. 물리적 처리는 플라스틱을 단순하게 분리하거나 일정 수준의 크기까지만 분해하는 경우가 많았고, 화학적 처리는 플라스틱이 분해되면서 2차 오염을 유발하기도 하였다. 생분해 처리 또한 분해 속도가 느리고, 환경 조건에 영향을 많이 받았으며, 적용할 수 있는 대상의 범위가 제한되었다. 김동욱, 「환경에 존재하는 미세플라스틱의 처리」, 『BioIN』, 2023.8.11, https://www.bioin.or.kr/board.do?bid=tech&cmd=view&num=321237. (2026.5.12.검색)
4) 김성민 외 5인, 「미세플라스틱 처리를 위한 연구 동향」. 『자원 리싸이클링』 29(5), 한국자원리싸이클링학회, 2020, 15-27쪽.
5) 김연화 외 5인, 「미생물 또는 효소를 이용한 플라스틱 분해의 최근 연구 동향」, 『KSBB Journal』 39(3), 한국생물공학회, 2024, 69-77쪽.
6) LeCun, Y. et al.(2015), Deep learning, *Nature*, *521*(7553), pp.436-444.
7) Van Regenmortel M. H.(2004), Reductionism and complexity in molecular biology. Scientists now have the tools to unravel biological and overcome the limitations of reductionism, *EMBO reports*, *5*(11), pp.1016-1020.
8) 벤다이어그램을 통해 인식 틀을 합성생물학 & AI 기술과 연결하여 직접 제작함.

나타낸다. 환원주의 관점은 복잡한 현상을 구성하는 개별 요소의 특성과 기능에, 비환원주의 관점은 요소들 간의 연결과 상호작용에 집중하기에 때문에 합성생물학 기술과 AI 기술을 개별 성능뿐만 아니라 기술 간 연결과 상호작용의 측면에서 바라볼 수 있는 가능성을 제공한다.

따라서 미세플라스틱 문제에 대한 접근은 개별 기술의 성능에 집중하는 방식에서 기술들을 유기적으로 연결하는 방식까지 확장될 수 있다. 이후 구체적인 논의는 후술하고자 한다.

3. 합성생물학 및 AI 기술 기반의 연계 시스템 설계

다양한 플라스틱[9] 중 PET(Polyethylene Terephthalate)[10]를 사례로 하여, 기능적으로 독립된 기존 처리 기술들을 생분해 기술 중심으로 한 상호 연결된 시스템으로 재구성하였을 때 나타나는 의미를 비교·분석하고자 한다.

3.1. 생분해 기술과의 연계

3.1.1. 물리적・화학적 기술

물리적・화학적 처리 과정에서 플라스틱은 AI와 연결되어 플라스틱을 분류하고 그에 맞는 공정을 선택할 수 있다.[11] 또한 화학 반응의 경로를 예측하고 그에 맞는 화학 반응을 조절하게 되는데,[12] 여기서 나온 부산물의 크기, 표면적, 결합상태 등의 물성을 반영하여 미생물에 반응 효율을 높여줄 반응 환경을 형성해줄 수 있다. 이후 합성생물학 기반의 효소 및 미생물 시스템으로 전달되면서 생분해 반응에 활용된다.[13] 이는 생분해 과정의 정방향 물질 흐름을 만든다.

물론 이러한 연결이 단순한 정방향의 물질 흐름만을 만드는 것은 아니다. 반대로 생분해 과정에서 생성된 중간산물이 축적되거나, 반응효율이 떨어진다면 이는 앞선 과정들의 조건이 문제가 있다고 판단가능하다. 그래서 이전 데이터 결과에 맞게 물리적 처리 과정의 분쇄 수준이나 화학적 처리 강도 등이 달라질 수 있다. 이처럼 생분해 과정의 반응 결과가 다시 이전 처리 과정의 조건에 영향을 줄 수 있다는 점에서 역방향의 물질 및 정보의 연결이 가능해지는 것이다.

3.1.2. 다중 효소 시스템

단일효소의 경우 특정 기질에 대해서는 높은 특이성과 활성을 갖는다. 그러나 독립적인 단일효소는 하나의 반응만을 진행하기 때문에 중간산물이 발생하여 확산되면 다른 효소와 반응하지 못한다. 그로 인해 중간산물이 분해되지 않고 누적되면서 병목현상으로 반응 효율이 떨어지게 된다.[14]

이 문제를 해결하기 위해 아래 <Figure 02> 같이 합성생물학 기술의 일종인 Linker fusion 방식[15]을 도입한다. 먼저 대장균의 플라스미드나 유전체에 유전자 조작 기술인 Gibson assem

---

9) 플라스틱은 PET(Polyethylene terephthalate), PE(Polyethylene), PP(Polypropylene), PS(Polystyrene) 등으로 구분되며, 각각은 분자 구조와 결합 특성에 따라 처리방식에 차이가 있다. Kaushal, J. et al.(2021), Recent insight into enzymatic degradation of plastics prevalent in the environment: A mini-review, *Cleaner Engineering and Technology*, *2*, article 100083.

10) 「폴리에틸렌테레프탈레이트(PET)」, ≪네이버 지식백과≫,https://terms.naver.com/entry.naver?docId=6077437&cid=67350&categoryId=67350. (2026.5.12. 검색)

11) 김동영 외 5인, 「딥러닝 기반 AI 모델 EfficientNet과 YOLO를 사용한 일회용 플라스틱 재활용 분류 시스템 개발」, 『한국정밀공학회 추계 학술발표대회 논문집』, 한국정밀공학회, 2023, 313쪽.

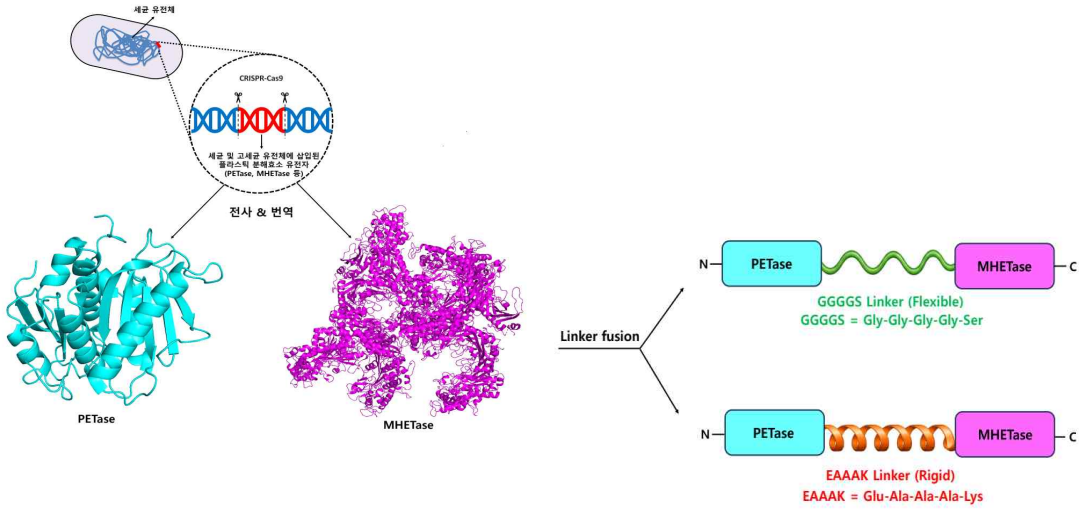
12) Segler, M. H. S. et al.(2018), Planning chemical syntheses with deep neural networks and symbolic AI, *Nature*, *555*(7698), pp.604-610.

13) 위와 같음.

14) Zhang Y. H.(2011), Substrate channeling and enzyme complexes for biotechnological applications, *Biotechnology advances*, *29*(6), pp.715-725.

15) Linker fusion 방식은 서로 다른 단백질이나 효소를 하나의 단백질 구조로 연결하는 단백질 공학 기법 중 하나이다. 이는 두 효소 사이에 특정 아미노산 서열을 갖는 linker를 삽입하여 물리적으로 이어준다. Linker는 효소 간

bly[16], CRISPR-Cas 9[17] 등을 활용하여 목적 유전자를 만든다. 이 유전자가 전사와 번역을 거쳐 linker로 연결된 다중 효소가 생성된다. PET의 경우 PETase-linker-MHETase를 만들 수 있다. PETase가 PET 기질과 먼저 반응하여 MHET를 생성하고, 생성된 MHET가 다른 곳으로 확산되기 전에 바로 인접한 MHETase 활성부위에서 MHET가 최종 반응 과정의 결과로 테레프탈산(Terephthalic acid, TPA)이 생성되며, 동시에 다른 분해 산물인 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, EG)도 생성된다.[18] 이는 중간산물의 이동 경로 자체를 최소화하여 연속적인 물질 흐름을 형성한다는 점에서 의미가 있다.



<Figure 02> Linker fusion 방식 모식도[19]

여기에 교반기(Slurry reactor)를 결합하여 미세플라스틱과 효소들이 잘 반응할 수 있게 만들 수 있다. 이에 더해 효소 반응 환경의 변화를 AI와 연계하여 실시간으로 조절한다면 효소들과 미세플라스틱이 지속적인 충돌을 유지할 수 있게 된다. 특히 AI가 반응 속도, 중간산물의 축적 정도, 점도 변화, 교반 상태 등의 데이터를 분석하게 되면 시스템 내부에서 어떤 조건이 병목현상을 유발하는지 실시간으로 판단할 수 있게 된다. 이에 따라 교반 강도나 반응 조건들이 다시 조절되면서 효소 반응의 안정성이 유지될 수 있다. 이는 Linker fusion 방식 그 자체만의 활용보다 반응 효율이 더 증가한다.[20]

거리와 구조적 안정성을 조절하며, 각 효소가 정상적으로 접히고 기능할 수 있도록 돕는 역할을 한다. 대표적으로는 유연성이 높은 GGGGS 계열의 flexible linker와 일정한 구조를 유지하는 EAAAK 계열의 rigid linker가 사용된다. Knott, B

. C. et al.(2020), Characterization and engineering of a two-enzyme system for plastics depolymerization, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *117*(41), pp.25476-25485.

16) 「Gibson assembly」, ≪WIKIPEDIA≫, https://en.wikipedia.org/wiki/Gibson_assembly. (2026.5.17. 검색)

17) 「CRISPR Cas 시스템」, ≪네이버 지식백과≫, https://terms.naver.com/entry.naver?docId=5144794&cid=61232&categoryId=61232. (2026.5.13. 검색)

18) Knott, B. C. et al.(2020), 앞의논문, pp.25476-25485.

19) PETase와 MHETase의 아미노산 서열을 바탕으로 Alphafold3을 이용하여 구조를 예측하고, Pymol을 활용하여 단백질 구조를 시각화함. Linker fusion 방식으로 효소를 연결한 다중 효소 시스템을 본인이 재구성하여 PPT로 제작함.

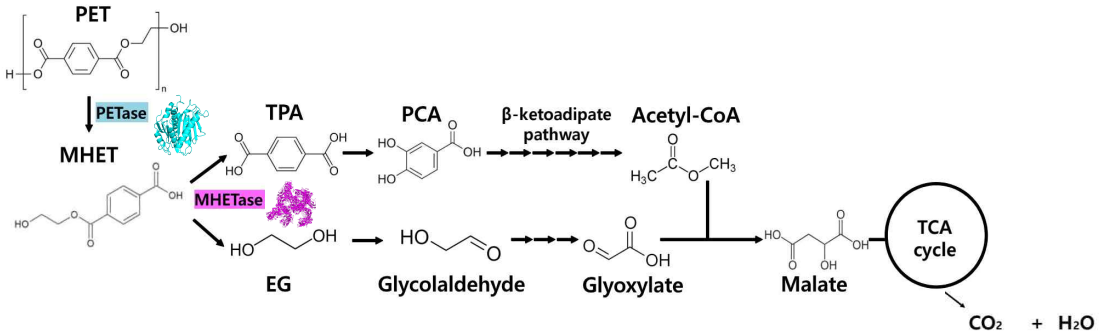
20) Tournier, V. et al.(2020), An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles, *Nature*, *580*(7802), pp.216-219.

3.1.3. 미생물 컨소시엄

야생형 미생물의 경우 생물공학자의 의도대로 TPA와 EG 등의 분해산물을 지속적으로 소비할 수 없다.[21] 또한 CRISPR 등의 유전자 기술들을 이용하여 하나의 미생물이 여러 기능을 동시에 갖도록 하는 연구가 진행 중이지만, 이 방식은 미생물 대사 부담이 증가하고 반응 효율이 감소한다.[22]

합성생물학 기술을 이용하여 미생물이 분해 산물을 가능한 빠르게 해당과정(glycolysis)이나 TCA회로(tricarboxylic acid cycle) 등으로 유입시키는 것이 핵심이다.[23] 그래서 미생물들이 서로 다른 대사경로를 갖도록 경로 관련 유전자 일부를 조작하여 분업화시키면 미생물 컨소시엄(microbial consortium)을 형성한다.[24] 이 컨소시엄을 통해서 대사 과정 도중 정체가 생기는 것을 막고, 전체 시스템에서 계속적인 물질 흐름을 유지할 수 있다. 대표적으로 미생물들은 PET를 분해하는 과정에서 생성된 TPA와 EG 등의 중간산물이 축적되지 않고 빠르게 무기물(CO_2, H_2O 등)로 만드는 소비 모듈(Consumption module)로 활용되거나, 그 중간산물을 전환하여 고부가가치의 물질을 생산하는 업사이클링 모듈(Upcycling module)로 활용될 수 있다.

먼저 소비 모듈(Consumption module) 미생물의 경우, 아래 <Figure 03>과 같이 변경된 대사 과정을 통해 중간산물이 무기물이 되어 대기로 방출되거나, 수중의 탄산계를 형성하거나, 광합성 생물들에 의해 다시 고정되는 생태계 순환이 이루어진다.[25]

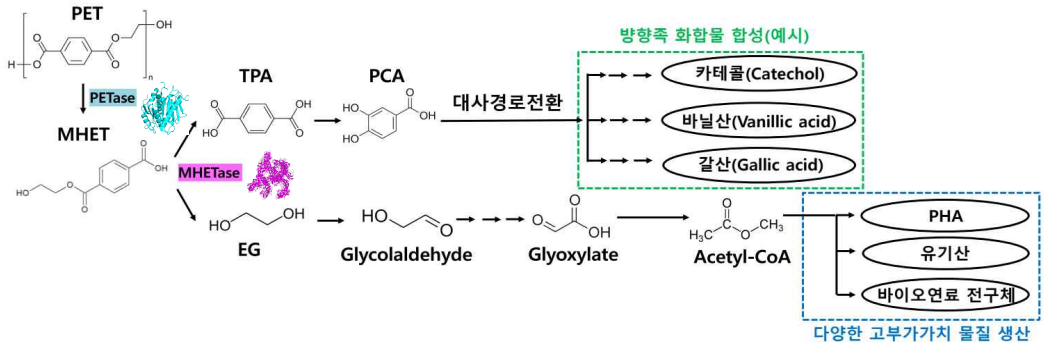


<Figure 03> Consumption module의 미생물 대사 과정(무기물화) 모식도[26]

그 다음 Upcycling module의 미생물을 설계하는 것은 아래 <Figure 04>과 같이 대사경로를 변화시켜 TPA와 EG를 실생활에 필요한 고부가가치의 물질로 전환하는 것이다.[27] PET의 경우 TPA로부터 유도된 프로토카테쿠산(Protocatechuate, PCA)를 이용하여 다양한 방향족 물질들을 생성하거나, EG에서 글리옥실산(Glyoxylate), 아세틸-CoA(Acetyl-CoA)를 활용하여

21) 주은재 외 2인, 「미생물 대사 공학을 통한 페놀산 생산: 대사 경로 설계와 숙주 균주 최적화의 최신 전략」, 『생명과학회지』 35(10), 한국생명과학회, 2025, 919-933쪽.
22) 김연화 외(2024), 앞의 논문, 69-77쪽.
23) 위와 같음.
24) Diao, J. et al.(2025), Engineering microbial consortia for mixed plastic upcycling, *Nature communications, 17*(1), p.637.
25) 위와 같음.
26) 기존에 밝혀진 PET분해와 대사경로를 기반으로 재구성한 그림. 일부 화학 구조식은 https://www.sejinci.co.kr에서 참고. (2026.5.13. 검색)
27) Diao, J. et al.(2025), 앞의 논문, p.637.

폴리하이드록시알카노에이트(Polyhydroxy alkanoate, PHA)와 같은 생분해성 고분자, 유기산, 바이오연료 전구체 등을 생산한다.[28] 또한 플라스틱의 주요 원료가 석유인 점을 고려할 때, 고유가 상황에서 석유를 확보하지 못하는 것은 전반적인 산업에 부정적 영향을 미칠 수 있다.[29] 그래서 분해 산물을 회수하여 재활용하는 재료공학적 접근이 주목받고 있으며, 이는 단순히 분해하는 것을 넘어 자원 순환 측면에서 의미가 있다.



<Figure 04> Upcycling module의 미생물 대사 과정(고부가물질 생산) 모식도[30]

3.2 시스템 운영과의 연계

기존 운영방식은 실험자가 결과 데이터를 보고 시스템의 조건들을 수동적으로 조절하였다. 이 과정은 시간적·물질적으로 비효율적이며, 공정의 안정성 차원에서도 한계가 존재한다. 특히 전체 시스템을 유지하는 조건들로는 크게 산소 전달 효율, pH, 교반 상태, 온도, 기질 농도, 중간산물 등이 포함되는데, 이 조건들을 실시간으로 조절하지 못할 경우 시스템 효율이 떨어지게 된다.[31] 이에 따라 본 연구에서는 반응 환경 조건들과 반응 속도를 결정하는 바이오 촉매 시스템이 AI 기술과 결합되었을 때 어떤 의미가 나타날 수 있는지 살펴보고자 한다.

효소와 미생물은 환경적 조건에 매우 민감하다. 엔지니어 입장에서 여러 조건들 중 미생물에게 산소를 잘 전달하는 것이 가장 중요하다. 앞서 언급한 미생물 컨소시엄이 목적에 맞게 잘 유지되려면 충분한 산소 공급이 필요하다. 특히 미생물이 산소의 사용에 있어 가장 중요한 것이 산소전달속도(Oxygen transfer rate, OTR)와 산소소비속도(Oxygen uptake rate, OUR)의 균형이다. 만약 OTR이 OUR과 균형이 맞지 않으면 PET 분해속도가 떨어지고 중간대사산물이 축적될 것이다.[32] 따라서 미생물에게 산소 공급뿐만 아니라 실시간으로 조절되는 수준까지 도달하려면 AI를 도입하여 학습시켜야 한다. 그러면 산소농도의 미세한 변화까지도 컴퓨터 데이터로 확인이 되어 기존방식보다 공정의 안정성을 높인다.[33]

---

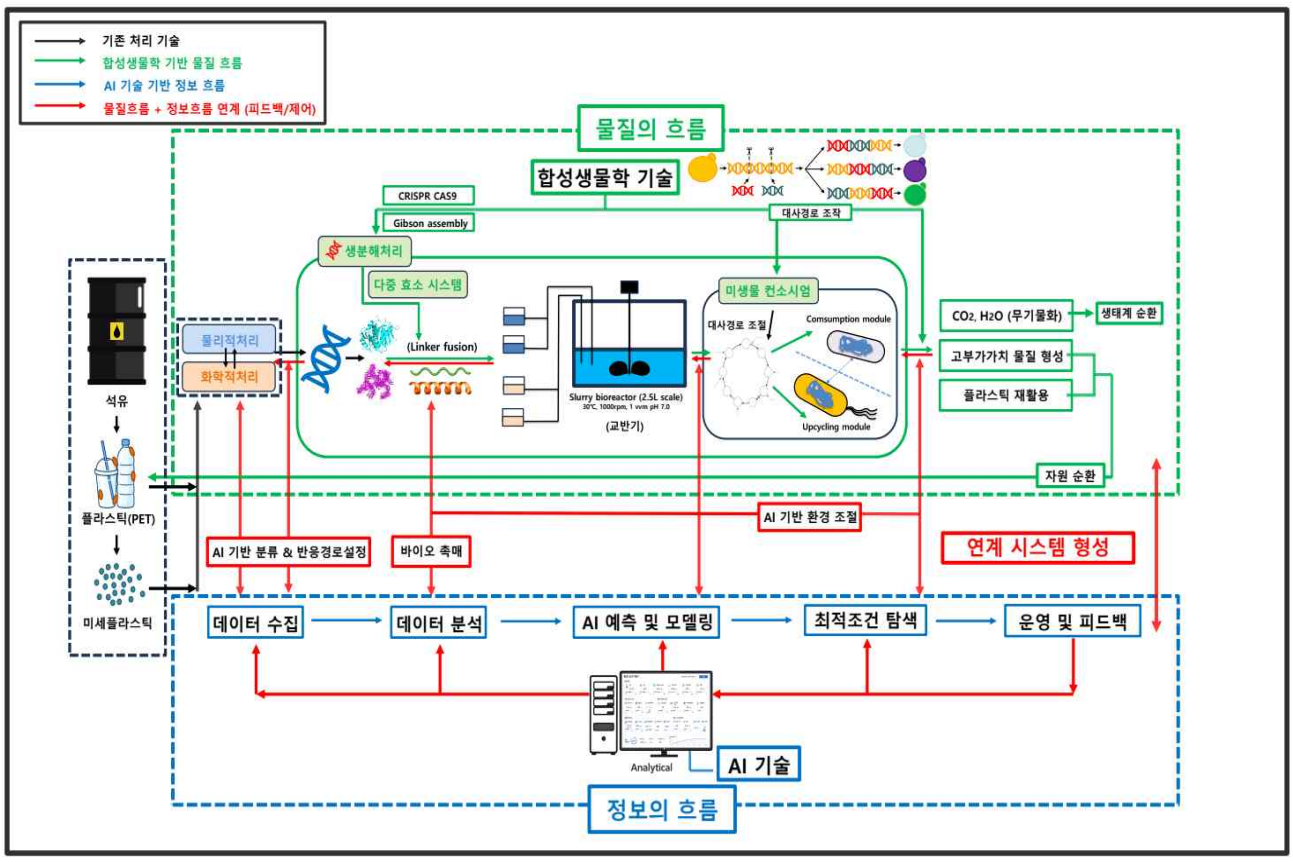
28) 위와 같음.
29) 구정모, 신선미(2026.04.03.),「플라스틱 제품 생산차질 현실화할까 조마조마…대체재 확보 나서」, ≪연합뉴스≫, https://www.yna.co.kr/view/AKR20260402149500030. (2026.5.13. 검색)
30) 기존에 밝혀진 PET분해와 대사경로를 기반으로 재구성한 그림. 일부 화학 구조식은 https://www.sejinci.co.kr에서 참고. (2026.5.13. 검색)
31) Garcia-Ochoa, F. et al.(2010), Oxygen uptake rate in microbial processes: an overview, *Biochemical engineering journal, 49*(3), pp.289-307.
32) Garcia-Ochoa, F. et al.(2009), Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: an overview, *Biotechnology advances, 27*(2), pp.153-176.
33) Cheng, Y. et al.(2023), Artificial intelligence technologies in bioprocess: Opportunities and challenges, *Bioresource Technology*, *369*, article 128451.

또한 바이오촉매 효소(enzyme)는 특이성, 선택성, 정밀성이 있어서 다양한 산업 분야에 이용되고 있다. 효소 탐색 및 설계를 통해 산화환원 반응, 전이 반응, 가수분해 반응, 이탈 및 부가 반응 등을 촉매하는 일반적인 기능은 물론이고, 고온, 고압, 유기용매 등의 특수한 반응 조건에서도 촉매반응을 할 수 있다. 따라서 바이오 촉매를 플라스틱 분해에 적용하게 되면 활용 가치가 매우 높은 반응 매개체가 될 것이다.[34] 반응의 결과를 반영하여 촉매 설계와 공정 운영이 분리되지 않는 데이터 기반의 연결 구조를 유지할 수 있게 된다.

4. 파일럿 플랜트(Pilot plant) 통합 처리 시스템의 작동 메커니즘

3장에서 비교·분석하여 도출된 내용을 바탕으로 아래 <Figure 05>와 같이 통합처리 시스템을 설계해 보았다. 이 시스템은 개별 기술들의 병렬적 나열이 아닌 기술들 사이의 정보의 흐름과 물질의 흐름을 중심으로 연결되어 순환적 구조를 형성할 수 있다.

기존 처리 기술과 달리 통합처리 시스템의 합성생물학 공정에서는 먼저 다중 효소 시스템으로 미세플라스틱을 연속적으로 분해한다. 그런 다음 미생물 컨소시엄을 만들어 중간산물들이 소비목적과 업사이클링 목적에 맞게 각각 전환되는 분업구조가 완성된다. 그 다음 AI 기술 공정에서는 다양한 처리 공정과 연계되어 측정된 데이터를 실시간으로 수집하고 분석하면서 물리적·화학적 처리 및 환경 조건과 바이오 촉매를 실시간으로 조절하고 반영할 수 있다.



<Figure 05> 통합처리시스템 작동 메커니즘 모식도[35]

34) Seo, H. et al.(2025), Landscape profiling of PET depolymerases using a natural sequence cluster framework, *Science, 387*(6729), eadp5637.

35) 본 그림은 3의 내용을 기반으로 PPT로 직접 설계한 모식도. PET, 컴퓨터UI 그림만 생성형 AI를 활용하여 제작.

5. 종합적 고찰 및 향후 과제

본 연구에서 제시한 작동 메커니즘의 핵심은 환원주의적 기술 자체를 부정하지 않는다. 그 속에서 개별 기술들이 합성생물학 및 AI 기술과 연결되는 방식에서 의미들을 새롭게 도출할 수 있었다. 먼저 물리적·화학적 처리와의 연계에서 물리적·화학적 처리는 합성생물학이 적용된 생분해적 기술과 양립할 수 없는, 즉 상충되는 접근이 아닌 상호보완적 접근이 가능한 것임을 확인하였다. 또한 다중 효소 시스템에서 Linker fusion 된 효소들의 반응 효율을 극대화시킨다는 점과 미생물 컨소시엄에서 미생물들이 상황에 맞는 물질을 적재적소에 빠르게 생산하고 이용할 수 있다는 점 모두 경제적 가치를 창출하는 전략적 수단이 된다고 판단하였다. 그리고 엔지니어 입장에서 AI와 연계되어 플라스틱 반응 환경과 미생물 배양 환경 등의 공정 운영을 실시간으로 최적화시키는 방식들이 단순한 자동화를 넘어 인간이 인지하기 어려운 부분의 예측된 데이터를 제공한다는 점에서 인식의 지평을 넓혀줄 수 있는 중요한 전환점이 될 것이다.

물론 통합 시스템이 실제로 대규모 산업에 적용되기 위해서는 여러 가지 보완점이 존재한다. 시스템 내적으로 발견되지 않은 미생물에 대한 연구, 이를 뒷받침할 유전자 기술에 대한 연구가 필요하다. 실제 대규모 공정으로 확대(Scale-up)되기 위해 견고한 시스템 내적 안정성도 함께 고려해야 된다. 또한 시스템 외적으로 시스템의 안정성 확보와 대규모 공정으로 이어질 수 있는 정부와 지자체의 경제적인 부분까지 도움을 받는다면 더욱 의미가 있을 것이다.

그럼에도 필자는 통합적 처리 시스템의 설계로 미세플라스틱이 단순한 분해 대상에 머무르지 않고, 물질과 정보의 흐름 속에서 자원 순환의 형태로 다시 활용된다면 지속가능성이 유지될 수 있다고 판단하였다. 또한 이런 문제의 형태가 미세플라스틱에만 국한된다고 생각하지 않는다. 여러 지속가능성 문제가 존재하며, 그에 대한 접근 중 하나로 활용 시 새로운 접근의 패러다임으로 이어질 수 있다고 생각한다. 이러한 흐름은 지속가능성 문제의 해결에 대해 대상 자체에만 시선을 두기보다는 대상들이 만들어내는 관계성에 초점을 맞출 필요가 있음을 시사한다.

6. 참고문헌

6.1. 논문과 단행본

김동영 외 5인, 「딥러닝 기반 AI 모델 EfficientNet과 YOLO를 사용한 일회용 플라스틱 재활용 분류 시스템 개발」, 『한국정밀공학회 추계 학술발표대회 논문집』, 한국정밀공학회, 2023, 313쪽.

김연화 외 5인, 「미생물 또는 효소를 이용한 플라스틱 분해의 최근 연구 동향」, 『KSBB Journal』 39(3), 한국생물 공학회, 2024, 69-77쪽.

김성민 외 5인, 「미세플라스틱 처리를 위한 연구 동향」. 『자원 리싸이클링』 29(5), 한국자원리싸이클링학회, 2020, 15-27쪽.

주은재 외 2인, 「미생물 대사 공학을 통한 페놀산 생산: 대사 경로 설계와 숙주 균주 최적화의 최신 전략」, 『생명과학회지』 35(10), 한국생명과학회, 2025, 919-933쪽.

허준석 외 2인, 「미세플라스틱이 인체에 미치는 영향과 그 검출 방법」, 『산업기술연구논문지』 30(4), 한국산업기술융합학회, 2025, 277-288쪽.

Cheng, Y. et al.(2023), Artificial intelligence technologies in bioprocess: Opportunities and challenges, *Bioresource Technology*, *369*, article 128451.

Diao, J. et al.(2025), Engineering microbial consortia for mixed plastic upcycling, *Nature communications, 17*(1), p.637.

Garcia-Ochoa, F. et al.(2009), Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: an overview, *Biotechnology advances, 27*(2), pp.153-176.

Garcia-Ochoa, F. et al.(2010), Oxygen uptake rate in microbial processes: an overview, *Biochemical engineering journal, 49*(3), pp.289-307.

Kaushal, J. et al.(2021), Recent insight into enzymatic degradation of plastics prevalent in the environment: A mini-review, *Cleaner Engineering and Technology*, *2*, article 100083.

Knott, B. C. et al.(2020), Characterization and engineering of a two-enzyme system for plastics depolymerization, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *117*(41), pp.25476-25485.

LeCun, Y. et al.(2015), Deep learning, *Nature*, *521*(7553), pp.436-444.

Segler, M. H. S. et al.(2018), Planning chemical syntheses with deep neural networks and symbolic AI, *Nature*, *555*(7698), pp.604-610.

Seo, H. et al.(2025), Landscape profiling of PET depolymerases using a natural sequence cluster framework, *Science, 387*(6729), eadp5637.

Thompson, R. C. et al.(2004), Lost at Sea: Where Is All the Plastic?, *Science*, *304*(5672), p.838.

Tournier, V. et al.(2020), An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles, *Nature*, *580*(7802), pp.216-219.

Van Regenmortel M. H.(2004), Reductionism and complexity in molecular biology. Scientists now have the tools to unravel biological and overcome the limitations of reductionism, *EMBO reports*, *5*(11), pp.1016-1020.

Zhang Y. H.(2011), Substrate channeling and enzyme complexes for biotechnological applications, *Biotechnology advances*, *29*(6), pp.715-725.

6.2. 기타자료

구정모, 신선미(2026.04.03.), 「플라스틱 제품 생산차질 현실화할까 조마조마…대체재 확보 나서」, ≪연합뉴스≫, https://www.yna.co.kr/view/AKR20260402149500030. (2026.5.13 검색)

김동욱,「환경에 존재하는 미세플라스틱의 처리」,『BioIN』, 2023.8.11.,https://www.bioin.or.kr/board.do?bid=tech&cmd=view&num=321237. (2026.5.12.검색)
김현경(2025.01.03.), 「[정책브리핑] 플라스틱 생분해 바이오 촉매 개발」, ≪ESG경제≫, https://www.esgeconomy.com/news/articleView.html?idxno=9493. (2026.5.13.검색)
「폴리에틸렌테레프탈레이트(PET)」, ≪네이버 지식백과≫, https://terms.naver.com/entry.na.ver?docId=6077437&cid=67350&categoryId=67350. (2026.5.12. 검색)
「CRISPR Cas 시스템」, ≪네이버 지식백과≫, https://terms.naver.com/entry.naver?docId=5144794&cid=61232&categoryId=61232. (2026.5.13. 검색)
<Figure 01> 벤다이어그램을 통한 인식 틀과 합성생물학 & AI 기술을 연결하여 직접 제작함.
<Figure 02> PETase와 MHETase의 아미노산 서열을 바탕으로 Alphafold3을 이용하여 구조를 예측하고, Pymol을 활용하여 단백질 구조를 시각화함. linker fusion 방식으로 효소를 연결한 다중효소시스템을 본인이 재구성하여 제작함.
<Figure 03> 기존에 밝혀진 PET분해와 대사경로를 기반으로 재구성한 그림. 일부 화학 구조식은 https://www.sejinci.co.kr에서 참고. (2026.5.13. 검색)
<Figure 04> 기존에 밝혀진 PET분해와 대사경로를 기반으로 재구성한 그림. 일부 화학 구조식은 https://www.sejinci.co.kr에서 참고. (2026.5.13. 검색)
<Figure 05> 본 그림은 3의 내용을 기반으로 PPT로 직접 설계한 모식도. PET, 컴퓨터 UI 그림만 생성형 AI를 활용하여 제작.
「Gibson assembly」, ≪WIKIPEDIA≫, https://en.wikipedia.org/wiki/Gibson_assembly. (2026.5.17. 검색)