

# Bio-based 공중합 PET의 사용 후 생분해성 평가를 통한 의류 폐기물 처리 방안 연구

김진수 · 김민경 · 김수경 · 이석언 · 구현진<sup>†</sup>  
(재)FITI시험연구원

## Study of Clothing Waste Disposal Methods through Biodegradability Evaluation of Bio-Based PET Copolymer

Jinsu Kim, Mingyeong Kim, Sugyoung Kim, Seokeon Lee, and Hyun-Jin Koo<sup>†</sup>

FITI Testing and Research Institute, Seoul 07791, Korea

<sup>†</sup>Corresponding Author: Hyun-Jin Koo  
E-mail: koojh@fitiglobal.com

Received December 9, 2024  
Revised February 13, 2025  
Accepted February 20, 2025

© 2025 The Korean Fiber Society

**Abstract:** In modern society, clothing waste made from mixed materials is being generated, contributing to environmental pollution due to limitations in recycling and reusing such mixed materials. Through our study, we confirmed that the use of biodegradable fibers can assist in addressing the challenges of waste management and recycling. Biodegradable fibers, compared to non-biodegradable materials, exhibit the potential for environmentally friendly circulation through natural decomposition processes. Particularly, bio-based materials demonstrate notably high decomposition rates in composting processes. The utilization of fibers possessing post-disposal biodegradability emerges as a potential solution to complement clothing waste management practices.

**Keywords:** biodegradable PET, aerobic biodegradation, anaerobic biodegradation, PET

### 1. 서 론

전 세계인이 사용하는 제품은 의복이다. 이러한 의복은 면, 린넨, 울, 실크 등의 고전적인 천연 소재뿐 아니라 현대에 이르러 폴리에스터, 나일론, 아크릴 등 다양한 합성소재로부터 생산된다. 매년 생산되는 의류의 양은 단순히 추정하기 어려우나 맥킨지 보고서 등에서는 2014년 이후 1,000억 벌 이상의 의류가 생산되어 유통되었다고 한다. 이렇게 대량의 의류가 생산되고 유통되는 이유는 빠른 소비 패션으로 불리는 빠른 트렌드 변화와 저렴한 가격 경쟁을 통해 소비자들에게 단기적인 소비를 유도하는 것으로 인해 발생할 수 있다. 이러한 전략은 사람들이 더 많은 옷을 빠르게 구매하고 버리게 만들어, 의류 생산량을 증가시키는 결과를 초래하였다[1,2].

더 많은 의류가 생산될수록 생산과정의 재단 중 버려지는 옷감 또한 늘어나게 되며 이는 자연스럽게 폐기물로 버려지게 된다. 의류 소재의 상당 부분은 옷으로 생산되기 전

에 이미 폐기물로서 버려지고 있다. 이렇게 버려진 소재는 자원의 소모와 환경오염을 증가시킬 것으로 예상된다[3,4]. 또한 재활용이 어려운 것으로 보인다[5]. 그 이유는 의류산업뿐 아니라 다양한 곳에 사용되는 섬유 소재는 천연 소재, 합성소재를 비롯하여 다양한 혼합 소재로 만들어지며 이러한 혼합 소재로 제조된 의류는 현실적으로 재활용 등에 사용되기 어려운 점을 가지고 있다. KOSIS의 통계자료를 확인해 보면 재활용가능자원 분리배출 형태 발생한 생활 폐기물 중 폐섬유류의 양은 2020년 27,083.2톤에서 2021년 15,655.6톤, 2022년 12,679.9톤으로 큰 폭으로 감소하였다. 반면 종량제 방식 등 혼합 배출을 통해 폐기된 폐섬유류는 2020년 370,664.1톤에서 2022년 368,397.1톤으로 크게 변하지 않은 것을 볼 수 있다. 그 이유는 두 가지 이상의 소재가 혼합된 의류는 원사의 배열구조 등으로 인해 소재를 분리하기 어려워지며 재활용 과정이 복잡해진다. 또한 분쇄 과정을 통해 단섬유화 시켜 분리하거나 화학적 처리를 통해 재활용하는 과정 등이 있으나 이러한 방법 등은 비용

등의 이유로 사용되기 어려운 경우가 대부분이다[6-8]. 또한 재활용 비율과 일반 종량제 방식의 폐기량을 비교해 보면 2020년 13배의 차이에서 2022년에는 일반 종량제 방식의 폐기 비율이 재활용 비율에 비해 29배가 차이 날 정도로 재활용 비율이 감소하였다.

친환경적인 의류산업을 설명하며 재활용 플라스틱 소재를 통한 섬유 생산을 이야기하는 경우에도 이러한 플라스틱 소재는 대부분 헌 옷이 아닌 병 등에서 재활용된 폴리에스터 소재를 사용한 것이다[9,10].

결과적으로 대부분의 생산된 섬유 소재는 폐기물로서 버려지게 되고 실질적으로 그 자체로서 재활용되는 비율이 낮은 것이 현실이다. 이렇게 버려지는 섬유 소재를 자연 친화적인 생분해성 소재로 만들게 되면 폐기물로서 버려진 섬유가 발생시키는 환경오염을 저감시킬 수 있을 것으로 예상된다.

일반적인 생분해성 소재의 경우 물성을 확보하기 쉽지 않아 비 분해성 소재로 만들어진 의류에 비해 약점을 가지고 있다. 이 연구에서는 이러한 약점을 극복하는 방법으로 비 분해성 소재로 알려진 PET 계열의 섬유 소재를 Bio-based 공중합 기술로 개발된 섬유의 사용 후 생분해성 평가 방법을 소개한다. 사용된 사용 후 생분해성 평가 방법은 ISO 21701 시험법으로 장시간 평가시간이 소요되는 시료를 항온 항습 조건을 통해 가수분해를 촉진한 후 생분해 평가를 하는 방법으로 기존 생분해 평가 방법에 비해 평가 시간을 단축할 수 있다. 추가로 시험된 ASTM D 5511 시험법은 혐기 분해 조를 모사한 환경에서 평가 시료가 분해되어 발생하는 가스양을 측정하여 생분해 도를 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 재료

연구에서 사용된 표준물은 20  $\mu\text{m}$  크기 이하의 TLC 등급 셀룰로스(Sigma-aldrich) 제품을 사용하였다. Bio-based PET 시편(이하 B-PET)은 국내 H사에서 제조된 생분해성 PET 계열의 섬유를 사용하였다. 분자량은 일반적으로 고분자로 분류되는 10,000 이상 분자량의 섬유 및 원사로서 제공되었다. 일반 비분해성 Virgin-PET(이하 V-PET)는 시중에서 사용되는 PET 재질의 일회용 컵을 구매하여 사용하였다. 사용된 호기성 퇴비는 (재)FITI시험연구원에서 제조된 생분해 실험용 퇴비를 사용하였다. 사용된 혐기성 접종물은 청주 하수처리장에서 운영 중인 혐기소화조에서 채취하여 사용하였다.

### 2.2. 실험방법

호기성 생분해 평가는 ISO 21701의 생분해 시험법을 적

용하였다. 해당 실험 방법은 섬유 재료의 퇴비화 처리 과정 중 비생물적 및 생물적 과정에서 발생하는 가수분해를 실험실에서 수행하기 위해 가속 가수분해를 수행하였으며 고분자 섬유 소재는 분자량 감소를 확인한 후 생분해 실험을 진행하였다. 해당 실험법은 석유 기반의 합성 생분해성 섬유 재료 등에 적용될 수 있다. 가수분해는 90 °C 및 95% 항온 항습 기기를 이용하여 진행하였다. 가수분해 후 분자량 감소는 GPC를 활용하여 측정하였으며 분자량 감소 후 화학적 성상 변화 확인을 위해 TGA를 측정하여 가수분해로 발생하는 작용기 변화를 관찰하였다. 퇴비화 실험은 ISO 21701의 시험방법을 적용하여 58 °C 항온 유지 장비에서 배양하였다. 시험 물질과 생분해성 퇴비의 비율은 건조 고형분으로서 비율 6:1로 50% 함수율의 퇴비 100 g 당 16.66 g의 시험 소재를 첨가하였다. 유속 100-500 ml/min의 속도로 공기를 흘려 호기 조건을 유지해 주며 발생하는 이산화탄소의 양을 180일간 연속 측정하였다. 생분해 실험의 표준물은 미세 분체 셀룰로스를 사용하였으며 시험 물질과 동일 한 비율로서 이산화탄소 발생량을 측정하였다.

추가적으로 일반적으로 생분해성 소재로 알려진 PLA, PBAT와 B-PET를 혐기성 생분해 모사 환경에서 평가하였다. 혐기성 생분해 시험방법은 ASTM D 5511의 시험방법을 적용하였으며 52 °C의 항온 수조에서 무산소 환경으로 유지한다. 배양 과정에서 발생하는 시험 물질과 혐기성 배양액으로부터 발생하는 이산화탄소 및 메탄가스의 양을 부피 측정법을 이용하여 측정하였다. 시험에 사용된 혐기 슬러지 및 고형물은 정상 운영 중인 청주 하수처리장에서 채취하여 고형물 비율 30% 이상으로서 조정하여 시험에 사용하였다. 시험에 사용된 혐기배양 액과 시험물의 비율은 본 시험에서는 혐기적 소화과정에서 발생한 이산화탄소와 메탄을 분리하지 않고 전량의 부피를 측정하였으며 시험 중에 발생한 가스양을 바탕으로 시험 소재에서 이론적으로 발생할 수 있는 최대 가스양과 비교하여 생분해 도를 계산하였다. 해당 두 실험에서 표준물은 셀룰로스를 사용하였다.

호기성 생분해 과정에서 예상되는 분해 기작은 일반적인 PET 사슬 사이에 Bio Based Polymer를 첨가하여 구조적으로 가수분해 과정 등에서 PET 사슬을 짧게 만들고 미생물 활동 과정에서 일반적으로 미생물이 소화하기 힘든 고분자 상태의 PET를 저분자로 만들어 주는 효과를 나타내었다. 이렇게 낮아진 분자량의 PET는 시험 과정에서 미생물의 소화 기작을 통해 이산화탄소로 분해되어 최종적으로 생분해가 됨을 실험을 통해 확인하였다.

### 2.3. 호기성 생분해도의 계산

호기성 생분해도 평가에 사용된 시험법에서의 생분해도의 계산 방법은 다음과 같다.

이론적 최대 이산화탄소 발생량의 계산

$$ThCO_2 = M_{TOT} \times C_{TOT} \times \frac{44}{12}$$

여기에서

$M_{TOT}$ : 시험 시작 시 퇴비에 첨가된 시험 물질 중 총 건조 고형분(g)

$C_{TOT}$ : 시험 물질의 총 건조 고형분에 포함된 유기탄소의 비율(g/g)

44,12: 이산화탄소의 분자량과 탄소의 분자량

호기성 생분해도의 계산

$$Biodegradability = \frac{(CO_2)_T - (CO_2)_B}{ThCO_2} \times 100$$

여기에서

$(CO_2)_T$ : 시험 물질에 담긴 퇴비화 용기로부터 발생한 이산화탄소의 누적량(g/용기)

$(CO_2)_B$ : 접종원 용기로부터 발생하는 이산화탄소 누적량의 평균(g/용기)

$ThCO_2$ : 시험 물질에 의해 발생하는 이론적 이산화탄소의 양(g/용기)

2.4. 혐기성 생분해도의 계산

가스 발생량의 환산: STP 조건으로 환산하였을 때 가스 체적 측정기에서 측정된 가스양 22.4 m<sup>3</sup>는 12 mg의 탄소가 가스로 발생하였으므로 치환된다.

혐기성 생분해도의 계산:

$$Biodegradability = \frac{m_{c,g}(test\ sample) - m_{c,g}(black\ sample)}{m_{c,i}} \times 100$$

여기에서

$m_{c,g}$ : 시험 용기로부터 발생한 가스양으로부터 계산된 탄소 함량(g)

$m_{c,i}$ : 시험 용기에 첨가된 시험물질의 탄소 함량(g)

3. 결과 및 고찰

3.1. 가수분해 후 분자량 변화

가수분해 후 GPC를 측정하여 가수분해 결과 발생한 B-PET와 V-PET의 분자량 감소를 측정하였다. 그 결과는 Table 1과 같다. 분석 결과 가수분해 후 분자량이 두 시료에서 모두 감소한 것을 확인할 수 있었고 Bio based copolymer로 인한 파편화가 일반 V-PET에 비해 같은 전처리 기간 동안 더 쉽게 발생하였음을 알 수 있다.

Table 1. Changes in molecular weight before and after hydrolysis

Name	M <sub>w</sub> -GPC	Reduction rate
B-PET	Before hydrolysis	35,584
	After hydrolysis	1,708
V-PET	Before hydrolysis	3,522
	After hydrolysis	1,705

3.2. 열적 거동 분석

가수분해로 인해 발생할 수 있는 화학적 거동 변화를 관찰하기 위해 열중량분석기(TGA 8000, Perkinelmer)를 이용해 수행하였다. 가수분해 후 TGA 분석을 통해 대상 소재의 화학적 변화를 측정 결과 V-PET와 B-PET의 결과를 나타내었다. V-PET의 가수 분해 전후 TGA 분석 결과는 Figure 1 및 Figure 2와 같다. V-PET의 Offset point는 가수분해 전 Offset X=418.10 °C 가수분해 후 Offset X=404.77 °C 이며, B-PET의 가수분해 전후 TGA 분석 결과는 Figure 3 및 Figure 4와 같다. B-PET의 Offset point는 가수분해 전 Offset X=407.09 °C 가수분해 후 Offset X=403.46 °C로서 측

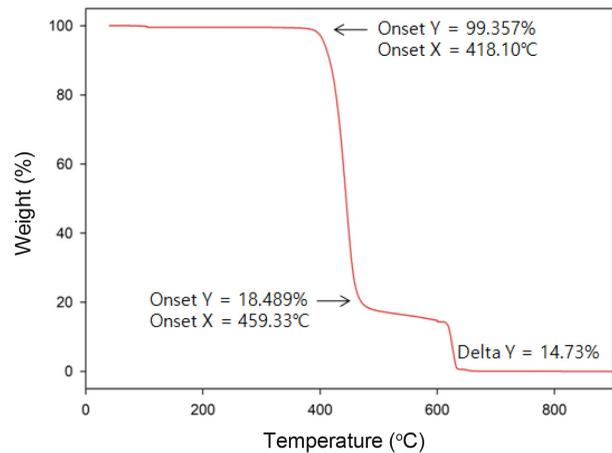


Figure 1. TGA analysis results of V-PET (before hydrolysis).

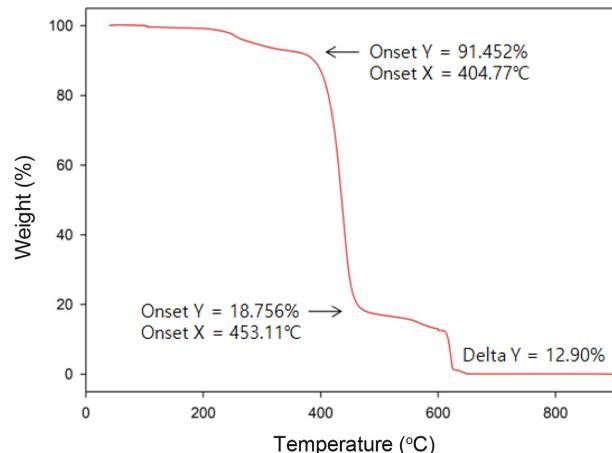
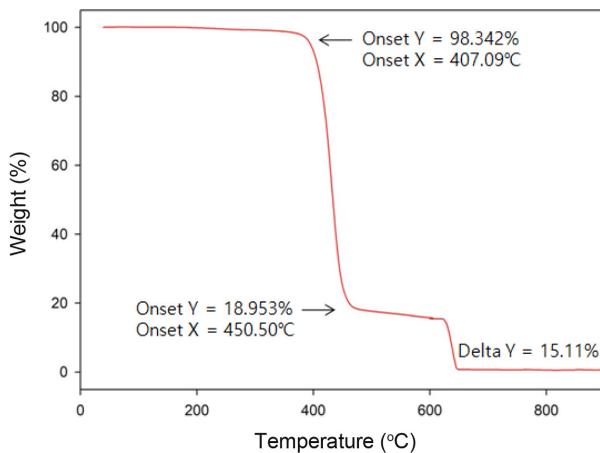
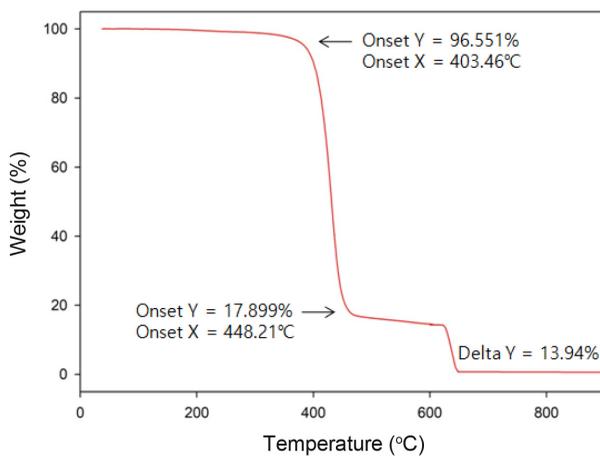


Figure 2. TGA analysis results of V-PET (after hydrolysis).



**Figure 3.** TGA analysis results of B-PET (before hydrolysis).

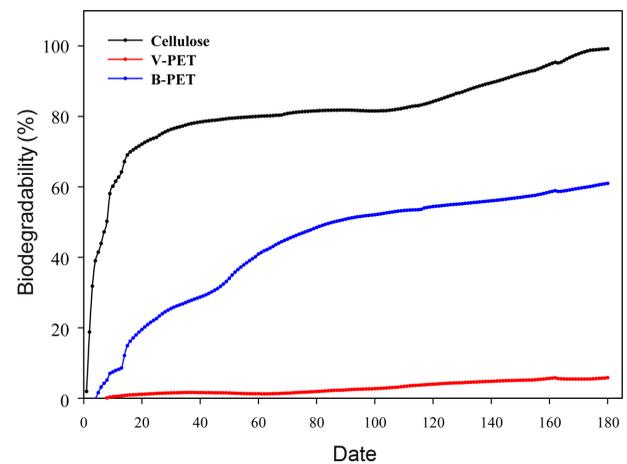


**Figure 4.** TGA analysis results of B-PET (after hydrolysis).

정되었다. 열 중량 분석 결과 V-PET와 B-PET 모두 가수분해 전후의 대표적인 화학적 사슬의 변화는 없는 것으로 확인할 수 있다.

### 3.3. 호기성 미생물 환경 생분해 평가

가수분해 후 V-PET와 B-PET의 산업적 퇴비화 시 생분해성을 평가하기 위해 분석 장비(CO<sub>2</sub> Respirometer, ECHO Instruments)를 사용하여 분석을 수행하였다. 실험 조건은 58°C 항온 조건을 유지해 주었으며 발생하는 이산화탄소를 NDIR 센서를 이용해 실시간 측정하여 생분해도를 계산하였다. PET 소재 기반의 섬유를 비교 평가한 결과는 Figure 5와 같다. 그림에서 180일 경과 후 virgin PET는 표준물 대비 약 5%, bio-based PET는 60% 가량 분해되었다. 이를 볼 때 bio-based 공중합 과정을 통해 일반적으로 분해되기 힘든 PET 사슬 체인이 공중합 과정 후 사슬 체인 사이 포함된 bio-based 물질로 인하여 가수분해 시 고분자의 파편화가 발생하였고 미생물의 분해 기작을 통해 퇴비화 과정에서 생분해가 발생함을 확인하였다.



**Figure 5.** Composting biodegradation results by analysis period (180 days).

호기성 퇴비화 과정에서 분해되는 B-PET 재료를 사용한 시험 결과는 V-PET 재료와 비교했을 때 여러 가지 친환경적 장점을 보여주었다. 생분해성 플라스틱은 퇴비화 조건에서 미생물에 의해 분해되면서 최종적으로 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 물, 그리고 퇴비로 사용할 수 있는 부산물을 생성한다. 이는 비분해성 플라스틱이 퇴비화 공정 중 물리적으로는 붕괴 되더라도, 화학적으로 분해되지 않아 최종퇴비에 미세플라스틱의 형태로 남을 가능성이 있는 것과 대조적이다.

탄소 순환 측면에서도 B-PET는 퇴비화 과정에서 분해되어 탄소순환을 이루는 것과 반대로 V-PET는 장기간 분해되지 않고 오랜 기간 환경에 잔류하면서 순환하지 못하는 것과 차별화되는 점이다.

위 실험 결과를 통해 판단컨대 호기성 퇴비화 조건에서 생분해성 플라스틱은 비분해성 플라스틱과 비교해 폐기물 감량, 탄소 순환 등 여러 방면에서 긍정적인 결과를 보였으며, 이는 지속 가능한 폐기물 관리와 자원 순환 경제 실현에 기여할 수 있음을 시사한다.

### 3.4. 혐기성 미생물 환경 생분해 평가

일반적으로 잘 알려진 생분해성 소재인 PLA, PBAT, 등과 비교하여 B-PET의 혐기 조건에서의 생분해 성능을 평가하기 위해 Gas Endeavour(BPC Instruments)를 사용하여 분석을 수행하였다. 실험 조건은 52°C의 항온조건을 유지해 주었으며 발생하는 가스량을 측정하여 생분해도를 측정하였다. 생분해도 결과는 Figure 6과 같다. 30일간 측정하는 시험 결과 혐기 조건에서 PLA와 B-PET는 미생물의 적응 기간을 거친 후 분해가 되는 것을 확인할 수 있다. 반면 생분해성 고분자로 알려진 PBAT는 30일의 기간은 분해가 진행되지 않았다. 혐기성 환경에서의 생분해 평가는 추후 매립 또는 혐기적 소화조를 이용한 폐기물 처리 시설에서의 효율을 확인할 수 있다. 혐기성 소화조에서 분해되는 이리

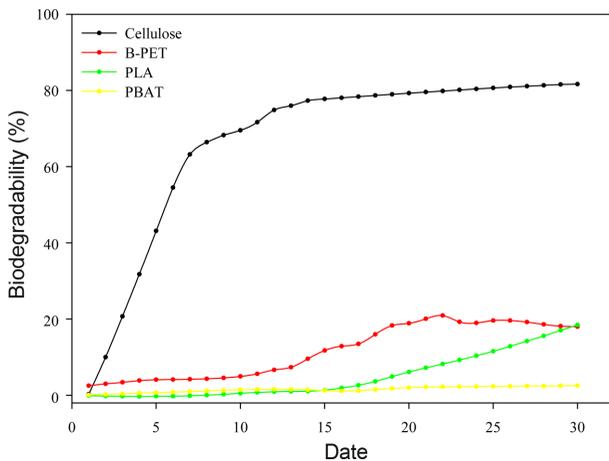


Figure 6. Anaerobic biodegradation results by analysis period (30 days).

한 플라스틱 재료는 친환경적 장점을 보여줄 것으로 예상된다. 혐기성 소화 과정에서 플라스틱이 분해되며 메탄( $\text{CH}_4$ )과 같은 바이오가스가 생성되며 이는 에너지원으로 활용되어 재생 가능 에너지 생산에 기여할 수 있다. 또한 이러한 분해를 통해 최종적으로 매립지로 보내거나 소각해야 하는 폐기물의 양이 감소하며, 환경에 유해할 수 있는 미세플라스틱의 발생량 또한 줄어들 것이다. 해당 플라스틱 재료가 바이오 기반 원료로 제작되었을 경우 탄소 순환 주기에 참여하여 전체 탄소 배출량 저감에 기여할 가능성이 높다. 이러한 특성은 온실가스 배출을 최소화하면서 탄소 중립 달성에 도움을 줄 수 있다. 혐기성 소화를 통해 생성된 부산물은 에너지원 또는 퇴비화할 수 있는 물질로 재활용될 수 있어 자원 순환 경제 실현에 기여할 수 있다. 이러한 결과들은 해당 플라스틱 재료가 환경적 부담을 최소화하면서 지속 가능한 폐기물 관리 및 에너지 자원화에 기여할 수 있음을 시사한다.

#### 4. 결 론

현대 사회에서 석유계 소재를 완전히 배제하고 전 세계적으로 사용되는 모든 섬유 소재를 자연 유래 성분으로만 대체하는 것은 기술적, 경제적, 생산량 측면에서 사실상 불가능할 것이다. 그러나 석유계 소재 섬유의 사용이 환경 문제를 초래하는 주된 이유는 이들 소재가 자연 순환 사이클에 통합되지 못하고 오랜 기간 동안 환경에 잔류하거나 미세플라스틱으로 분해되어 토양과 해양 생태계를 오염시키기 때문이다. 이로 인해 순환되지 못한 석유계 섬유 소재는 탄소 순환 주기에서도 방해 요소로 작용하며, 탄소가 안정적으로 자연으로 환원되지 못하고 장기적으로 대기 중 탄소 농도를 증가시키는 원인이 된다. 이러한 환경적 부하를 줄이기 위한 해결책의 일부로서 생분해성으로 개질된

섬유 소재의 활용이 주목받고 있다. 생분해성 섬유 소재는 사용 후 적절한 조건에서 자연 분해 과정을 거쳐 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ), 물, 그리고 퇴비화 또는 혐기적 처리를 통해 순환 가능한 물질로 환원될 수 있어 탄소 순환을 활성화시키고 순환경제 체계에 기여할 수 있다. 이와 같은 소재의 활용은 단순히 폐기물 문제를 해결하는 것에 그치지 않고, 탄소의 자연 순환 주기에 적극적으로 참여하여 전 지구적 탄소 배출량 저감과 기후 변화 완화에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 따라서 생분해성으로 개질된 섬유 소재의 개발 및 도입은 추 후 지속 가능한 환경 보호 전략을 위해 석유계 소재로부터 발생하는 순환 불가능성 문제를 극복하기 위한 중요한 대안이 될 것으로 예상된다.

비교 실험 결과, 일반적인 비분해성 석유계 소재로 조제된 섬유(V-PET)는 최종 폐기물 처리 과정에서 생분해성이 거의 없거나 매우 낮으며, 재활용 또한 기술적·경제적 제약으로 인해 실질적으로 어려운 것으로 확인되었다. 반면, 생분해성 소재로 개질된 섬유는 사용 후 환경 모사 과정에서 추가적인 화학 처리나 부가 물질을 사용하지 않더라도 호기성 퇴비화 과정에서 분해되어 폐기물 순환 사이클의 일부로 작동할 가능성을 보여주었다. 특히, 실험 결과 호기성 조건에서 bio-based로 개질된 생분해성 소재는 약 60%의 분해율을 나타냈으며, 혐기 조건에서도 시험기간 동안 PLA와 유사한 수준, PBAT보다 높은 수준의 분해 경향을 보였다. 이는 생분해성 섬유 소재가 혐기적 환경에서도 분해될 수 있음을 시사하며, 폐기물 처리 과정에서 발생하는 바이오가스를 메탄( $\text{CH}_4$ ) 등의 형태로 회수해 에너지원으로 재사용할 가능성 또한 뒷받침한다.

이와 같은 혐기성 소화 과정은 단순히 폐기물 감량에 그치는 것이 아니라 탄소 순환 주기에 적극적으로 기여할 것으로 보인다. 생분해성 소재가 혐기 조건에서 분해되면서 생성된 바이오가스를 회수하여 에너지로 활용하게 되면, 탄소가 안정적으로 순환되며 대기 중 탄소 농도 증가를 억제하는 역할 또한 할 수 있다. 이는 화석연료 기반 에너지 사용을 대체할 수 있는 친환경적 에너지 자원으로서의 전환 가능성을 의미한다.

따라서 생분해성 소재가 함유된 섬유의 사용을 확대하는 것은 폐기물의 물리적 감축뿐만 아니라, 호기성 및 혐기성 분해 과정을 통해 탄소가 자연 순환 사이클로 환원될 수 있도록 돕고, 혐기 분해 과정에서 발생하는 바이오가스를 에너지원으로 재활용함으로써 지속 가능한 순환 경제 체계를 강화할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 접근은 현재 알려진 생분해성 소재의 한계점을 보완하는 해결책으로 보인다.

**감사의 글:** 이 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국 산업기술평가관리원의 소재부품기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(20016078).

## References

1. R. Bick, E. Halsey, and C. C. Ekenga, "The Global Environmental Injustice of Fast Fashion", *Environmental Health*, 2018, **17**, 92.
2. M. Stenton, V. Kapsali, R. S. Blackburn, and J. A. Houghton, "From Clothing Rations to Fast Fashion: Utilising Regenerated Protein Fibres to Alleviate Pressures on Mass Production", *Energies*, 2021, **14**, 5654.
3. K. Niinimäki, G. Peters, H. Dahlbo, P. Perry, and A. Gwilt, "The Environmental Price of Fast Fashion", *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **1**, 189–200.
4. K. Bailey, A. Basu, and S. Sharma, "The Environmental Impacts of Fast Fashion on Water Quality: A Systematic Review", *Water*, 2022, **14**, 1073.
5. D. G. K. Dissanayake and D. U. Weerasinghe, "Fabric Waste Recycling: A Systematic Review of Methods, Applications, and Challenges", *Materials Circular Economy*, 2021, **3**, 1–20.
6. J. Riemens, A. A. Lemieux, S. Lamouri, and L. Garnier, "A Delphi-Régnier Study Addressing the Challenges of Textile Recycling in Europe for the Fashion and Apparel Industry", *Sustainability*, 2021, **13**, 11700.
7. R. Nayak, L. Nguyen, A. Patnaik, and A. Khandual, "Waste Management in the Fashion and Textile Industries", Woodhead Publishing, 2021, pp.3–29.
8. P. Athanasopoulos and A. Zabaniotou, "Post-consumer Textile Thermochemical Recycling to Fuels and Biocarbon: A Critical Review", *Science of the Total Environment*, 2022, **834**, 155387.
9. E. Sarioğlu and H. K. Kaynak, "Polyester-production, Characterization and Innovative Applications", Intech, 2017, pp.5–20.
10. C. A. Tshifularo and A. Patnaik, "Sustainable Technologies for Fashion and Textiles", Woodhead Publishing, 2020, pp.311–326.