

재생폴리에스터 섬유의 산업 동향과 분석방법



김태우

- 1995. 부산대학교 섬유공학과 학사
- 1997. 부산대학교 섬유공학과 석사
- 2017. 한서대학교 화학과 박사
- 1997-현재. (재)FITI시험연구원 시험분석본부 본부장



김영미

- 2001. 송실대학교 섬유공학과 학사
- 2015. 송실대학교 유기신소재파이버공학과 석사
- 2018-현재. ISO/TC 38 WG22 Expert
- 2023-현재. TMC signatory member
- 2001-현재. (재)FITI시험연구원 시험품질 운영팀 팀장



이지희

- 2008. 전북대학교 섬유소재시스템공학과 학사
- 2011. 전북대학교 섬유공학과 석사
- 2010-현재. (재)FITI시험연구원 시험품질 운영팀 선임연구원



김지이

- 2009. 동아대학교 화학과 학사
- 2010-현재. (재)FITI시험연구원 섬유소재 평가팀 선임연구원

1. 서 론

전 세계적으로 탄소중립에 대한 관심이 높아지면서 ‘2050 탄소중립 실현을 위한 순환경제(circular economy)로의 전환’이 시대적 과제로 부상하고 있다. 현재 섬유산업의 탄소중립화는 글로벌 패션산업계가 주도하고 있으며, 2030년까지 2019년 대비 온실가스 배출량 50% 감축, 2050년 Net-Zero 실현을 계획하고 있다.

섬유패션 제품의 전 과정 온실가스 배출비중에서 Tier 4(원료 채취, raw material extraction)와 Tier 3(원료 가공, raw material processing)의 업스트림에서 신재(new material)에 의해 발생하는 탄소 배출을 재생폴리에스터 섬유를 사용함으로써 가장 손쉽게 배출량을 줄일 수 있는 이점이 존재한다. 재생폴리에스터 섬유가 닫힌 고리 재활용(closed-loop recycling)과 관련한 비판과 bottle-to-fiber 규제에 직면해 있음에도 불구하고 향후 규제가 본격화되기까지 섬유패션산업은 재생폴리에스터 섬유의 사용을 쉽게 포기하기 어려울 것으로 보인다.

한편, 재활용 소재 사용을 입증하는 제3자 인증에 대한 수요가 높아지면서 대표적인 인증으로 GRS와 RCS 인증제도가 널리 통용되고 있으나 인정절차의 까다로움은 별도로 하더라도 높은 초기 인증비용과 인증 유효기간 경과에 따른 비용 부담이 발생한다. 따라서, 상대적으로 간편한 절차, 낮은 입증 비용, 그리고 신속한 분석시간의 장점을 가진 제3자 시험에 대한 섬유패션산업계의 수요가 증가하고 있다.

Table 1. 선형경제와 순환경제의 차이[1]

구분	주요 내용
선형경제 (linear economy)	· 자원을 수취(take)한 후 제조(make)하고, 처분(dispose)하는 과정을 의미 - 즉, 선형경제에서는 사용 목적이 충족되고 나면 폐기되어 자원 순환이 일어나지 않음
순환경제 (circular economy)	· 기존 선형경제에서 벗어나 자원을 제조(make)하고 소비(consume)한 후 폐기될 경우 다시 회수(return)하여 재사용하는 과정을 의미 - 즉, 자원이 유실되는 선형적(linear)인 구조에서 벗어나 폐쇄 및 순환형 구조(closed-loop)를 구성하여, 자원이 경제시스템 내에 오래 머물도록 하는 것이 목적

2. 재생플리에스터 섬유의 정책 및 산업 동향

2.1. 정책, 인증 및 규제 현황

2.1.1. 국내·외 순환경제 정책 추진 동향

인간활동과 화석연료 사용 증가로 대기 중 온실가스가 끊임 없이 축적되고 지구의 온도는 지속적으로 상승해왔다. 1750년부터 2020년까지 온실가스의 주요 원인인 이산화탄소 누적 배출량은 미국이 1위(24.6%), EU는 2위(17.1%), 중국은 3위(13.9%)였고, 2021년에 가장 많이 배출한 나라는 중국 1위(33.0%), 미국 2위(12.6%), EU 3위(7.3%), 그리고 한국은 9위(1.7%)였다. 20세기까지는 유럽과 미국이 이산화탄소 배출 증가를 주도하였지만, 21세기부터는 중국 등 신흥경제국들이 배출 증가를 주도하고 있다. 탄소배출량을 기준으로 보면, 기후변화에 대한 책임의 무게는 나라마다 다르나 전세계가 뜻을 모아 기후 위기에 함께 대응하기 위한 노력이 절실히 필요하다[2].

2.1.1.1. 대한민국의 순환경제 활성화를 통한 산업 신성장 전략
2015년 ‘파리협정(Paris Agreement)’이후 2020년 ‘장기 저탄소 발전전략(LEDS)’을, 2021년 ‘기후 위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법’을 제정하여 2030년 온실가스 배출량을 2018년 대비 40% 이상 감축 목표를 설정하였다[3]. 2023년 6월 환경부는 ‘2050 탄소중립’ 목표를 위해 선형경제 구조를 벗어난 ‘순환경제 활성화를 통한 산업 신성장 전략’을 발표, 섬유산업에는 자원효율등급제(K-에코디자인)를 도입, 재활용 섬유 소재 활용 제품 개발 장려 및 해외 수출 지원을 위한 친환경 인증 체계 구축, 제품 전과정 환경 영향 평가, 제품설계 및 에코디자인 경영 전략 수립 교육과정 등의 정책이 시행될 예정이다[4].



Figure 2. 선형경제에서 순환경제로 구조변화. (출처: 순환경제 활성화를 통한 산업 신성장 전략, 비상경제장관회의, 2023)

2.1.1.2. EU의 지속가능한 순환 섬유 전략

2015년 ‘2050 탄소중립 구현 및 경제성장’을 목표로 EU 최초의 ‘순환경제 실행계획’이 발표되었고, 이 후 2020년 EU 그린딜(European Green Deal)의 일환인 ‘신순환경제 실행계획(New Circular Economy Action Plan, NCEAP)’이, 2022년에는 패스트 패션 트렌드에 따른 환경 부하 및 섬유 폐기물 급증으로 인하여 EU의 ‘지속가능한 순환 섬유 전략(EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles)’이 발표되었다.

2.1.2. 민간 인증제도 및 규제

세계 각국은 리사이클 섬유를 사용한 생산제품의 확대에 따라 이에 대한 품질인증을 요구하고 있으며, 환경오염 물질 배출 억제에 대한 요구가 증대됨에 따라 유해화학물질 함유 제품 등에 대한 무역 규제가 강화되고 있다.



Figure 3. 인증제도별 마크.

총 1조 6,965억 2,417만 톤

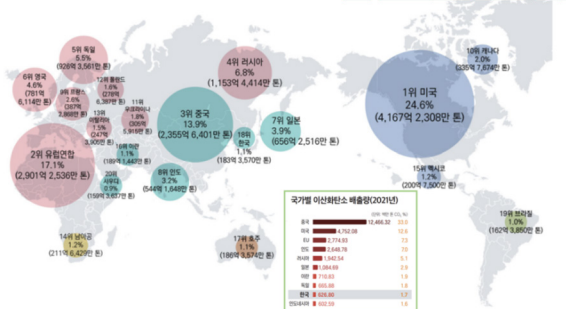


Figure 1. 국가별 이산화탄소 누적 배출량(1750 ~ 2020년)과 2021년 배출량. (출처: 탄소중립 한눈에 보기, 국회도서관, 2023)

Table 2. EU의 지속가능한 순환 섬유 전략에 따른 규제 사항[5~10]

<ul style="list-style-type: none"> • 폐기물 프레임워크 지침 개정(Waste framework directive) <ul style="list-style-type: none"> - 2023년 7월 섬유제품에 생산자책임재활용제도(EPR)¹⁾를 도입하는 개정안 발표 - 예방 → 재사용 → 재활용 → 회수 → 소각·매립으로 폐기물 우선 순의 설정
<ul style="list-style-type: none"> • 에코디자인 규정 개정(Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR) <ul style="list-style-type: none"> - 2023년 7월 채택, 디지털 제품 패스포트(digital product passport)²⁾ 도입 - 미판매 상품 폐기 금지 및 '계획된 노후화 금지 등의 의무를 강화
<ul style="list-style-type: none"> • 그린워싱방지 위한 친환경 표시 지침(Green Claims Directive) <ul style="list-style-type: none"> - 2023년 3월 '친환경 표시 지침'(안)을 발표 - 적용대상: 제품생애주기(원자재~폐기)에 기업이 자발적으로 표기한 제품과 기업 자체에 대한 친환경 표시
<ul style="list-style-type: none"> • 지속가능한 공급망 실사지침(Directive on Corporate Sustainability Due Diligence, CSDDD) <ul style="list-style-type: none"> - 유럽의회는 2023년 6월 채택 - 기업이 공급망 내 인권 및 환경에 대한 실사를 수행, 세부 정보 보고 요구

(1) RCS(Recycled Claim Standard) & GRS(Global Recycled Standard)

Textile Exchange에서 운영하는 인증제도로 원료에서부터 완제품 생산 및 판매까지 모든 공정을 추적하여 리사이클 제품임을 인증하는 프로그램으로 RCS는 5% 이상의 리사이클 원료를 사용한 제품에 적용되며, GRS는 제품에 리사이클 원료가 최소 20% 이상 포함되어야 인증되고 최소 50% 이상 혼용되어야 GRS 로고 사용이 가능하다[11~12].

(2) 블루사인(Bluesign®)

블루사인은 그린피스(Greenpeace)가 Scholler Textile AG사와 공동으로 협력하여 노동환경과 제품생산과정을 검증하는 시스템이다. 블루사인 시스템은 자원의 생산성, 대기 배출, 산업 보건 및 안전, 수계 배출, 그리고 소비자의 안전 등 5가지 원칙을 세워 모든 재료와 공정 및 상세한 시험뿐만 아니라 생산 환경까지도 지속가능한 제품으로 생산하는 것을 목적으로 한다[13].

¹⁾ 생산자책임재활용제도(Extended Producer Responsibility, EPR): 생산자의 의무를 재활용까지 확대하는 것으로 생산자에게 제품 디자인부터 마지막 단계인 폐기물 수거에 이르기까지 제품에 대한 일정책임을 부과하는 제도로 기업 등록 및 생산자 분담금, 폐섬유 재활용성 정보 제공, 회원국 의무사항 등을 규정

²⁾ 디지털 제품 패스포트(digital product passport): 소비자가 제품 구매 전 제품의 수리 및 재활용 방법과 제품의 환경적 영향에 대한 정보 확인

(3) ZDHC(Zero Discharge of Hazardous Chemicals)

의류 및 신발산업에서 유해화학물질 사용을 규제하기 위한 관리 시스템이다. 업체의 생산 제한 물질 목록(Manufacturing Restricted Substances List, MRSL)으로 제조공정에서 유해화학물질의 사용을 제한하고 섬유 제품에서의 검출 제한 물질 목록(Product Restricted Substances List, PRSL)으로 완제품에서 유해화학물질 검출을 제한하고 있다. 2022년 기준 39개 브랜드와 21개의 단체 및 기관을 포함하여 211개사가 가입되어 있다[14].

(4) 히그 인덱스(Higg Index)

지속가능의류연합(Sustainable Apparel Coalition, SAC)에서 개발한 의류와 신발에 대한 인증 프로그램으로 목적은 시설이 자가평가(self assessment)를 수행하고 제3자 기관을 통해 검증을 수행함으로써 제품의 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 통해 환경영향을 수치화하는 지표이다[15].

2.2. 재생폴리에스터 섬유 산업동향

2.2.1. 재생폴리에스터 섬유 사용동향

세계적으로 의류소비량이 증가하면서 세계 폐의류 배출량은 2015년에서 2030년까지 연평균 3.2% 증가할 것으로 예상된다. 섬유폐기물 문제를 해결하는 방법에는 과잉 생산과 과소비 감소, 제품 수명 연장, 섬유 리사이클 확대로 순환성을 높이는 제품 설계 등의 방법이 있다[16].

폴리에스터 섬유는 2021년 기준 전 세계 섬유 생산량의 약 54%를 차지하고 있다. 세계 리사이클 섬유제품 생산 확대로 재활용 PET 섬유 생산량은 2016년 약 12.4%에서 2021년 약 14.8%로 증가하였다. 재활용 폴리에스터는 주로 PET 플라스틱 병으로 만들어지며 전체 재활용 폴리에스터의 99%를 차지하는 것으로 추정된다[17].

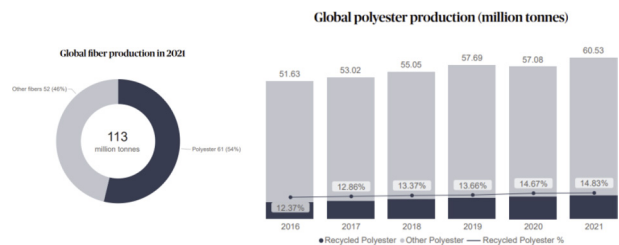
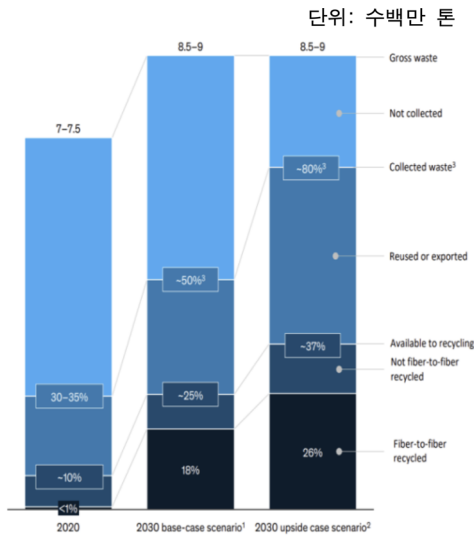


Figure 4. (좌)2021년 글로벌 섬유 생산량, (우)연도별 글로벌 폴리에스터 생산량. (출처: Textile Exchange, Preferred Fiber & Materials Market Report 2022)

McKinsey & Company에 따르면 PET의 화학적 재활용과 같은 기술이 상용화 직전에 있으며, 상용화시 재활용 가능한 섬유 폐기물의 70%가 fiber-to-fiber로 재활용 될 수 있다고 추정하고 있다. 그러나 오늘날 섬유 폐기물의 1% 미만이 fiber-to-fiber로 재활용되고 있다. 현재 가정용 섬유 폐기물의 수거율은 평균 30~35%이며, 분류되지 않은 총 폐기물의 상당 부분이 유럽 외부로 수출되고 있다. 따라서 정확하고 자동화된 섬유 분류 및 전처리 기술이 개발되고, fiber-to-fiber 재활용 기술이 섬유 혼합 처리 능력과 품질을 향상시켜 비용을 낮춘다면 2030 base-case scenario와 2030 upside-case scenario 처럼 폐기물의 50~80% 수거 시 fiber-to-fiber 재활용 비율은 18~26%까지 달성하여 폐기물 문제 해결에 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다[18].



2030 base-case scenario¹: 가정용 섬유 폐기물의 50%가 수거되는 상황
 2030 upside-case scenario²: 가정용 섬유 폐기물의 80%가 수거되는 상황
 Collected waste³: 소비자가 사용한 생활폐기물 수거율

Figure 5. EU-27 및 스위스 섬유폐기물 중 fiber-to-fiber 재활용 전망.
 (출처: McKinsey & Company report, 2022, Scaling textile recycling in Europe—turning waste into value)

2.2.2. 국내·외 생산기술 개발현황

대부분의 재생폴리에스터 섬유는 현재 PET 병에서 물리적으로 재활용되고 있다. 화학적으로 재활용된 폴리에스터 섬유는 현재 상업적으로 생산을 시작하거나 연구 개발 단계에 있다.

2.2.3. 패션브랜드 동향

환경문제와 자원낭비 등을 해소하기 위해 H&M, ZARA, MANGO와 같은 패스트패션 브랜드는 물론 파타고니아, 아디

Table 3. 국내외 재생폴리에스터 섬유 생산 현황

기업	생산품	생산품 내용
FENC	TOPGREEN®	상업적으로 제공되는 GRS 인증받은 화학적 재생폴리에스터
INVISTA	LYCRA®T400®EcoMade	전체 섬유 합량의 65% 이상 재생폴리에스터(PET병)와 재생 가능한 식물기반 자원(옥수수)의 조합
Ioniqa	-	재생폴리에스터의 화학적 재활용 공정을 개발 2019년 네덜란드, 10킬로톤 규모의 첫 번째 생산 공장 가동
Itochu	RENU	소비 전후의 식물로 만든 GRS 인증받은 화학적 재생폴리에스터
Jeplan	BRING Material™	소비 전후의 식물로 만든 GRS 인증받은 화학적 재생폴리에스터
Nan Ya Plastics	SAYA	소비 전후의 식물로 만든 GRS 인증받은 화학적 재생폴리에스터
Polygenta	perPETual	소비 전의 식물과 PET병으로 만든 화학적 재생폴리에스터
Teijin	ECOPET™	상업적으로 제공되는 화학적 재생폴리에스터
효성티앤씨	regen	재생폴리에스터(PET병) 원사 개발. GRS 인증 획득
휴비스	Ecoever	재생폴리에스터(PET병) 원사 개발
	CR-LMF	페플라스틱을 화학적으로 재생한 원료를 사용해 CR-LMF(Chemical recycle low melting fiber) 저융점 접착섬유개발. 12월 상업생산 목표
SK케미칼	CR-PET	화학적 재활용 페트(CR-PET) 원료 공급 '아트임팩트'와 '프로젝트 1907' 협업 화학적 재생소재 원단 출시
티케이 케미칼	ECOLON	재생폴리에스터(PET병) 원사 생산, 블랙야크에 공급
태광산업과 대한화섬	ACEPORA-ECO	재생폴리에스터(PET병) 식물 GRS 인증 획득 ZARA, MANGO, H&M 등 기업에서 사용

다스, 나이키와 같은 글로벌 패션기업들이 사회적·윤리적 책임을 가지고 지속가능한 성장을 위해 리사이클 섬유를 패션의류 생산에 적용·확대하고 있다. 따라서, 의류용 리사이클 섬유

Table 4. 국내외 패션기업의 재생폴리에스터 섬유 사용 현황 및 확대 계획

패션기업	추진현황 및 목표
파타고니아	<ul style="list-style-type: none"> 2022년 제품내 88% 친환경 소재(유기농 순면, 재생폴리에스터 등) 사용 2025년 100% 재사용, 재생 혹은 재활용 가능한 포장지 사용 계획
H&M	<ul style="list-style-type: none"> 2020년 64.5%의 친환경 · 재생섬유소재 사용 2030년 100% 친환경 · 재생섬유 소재 사용 계획
아디다스	<ul style="list-style-type: none"> 2020년 전제품 60% 재생섬유소재 사용 2025년 100% 재생섬유소재 사용 계획
나이키	<ul style="list-style-type: none"> '친환경 소재' 표시 제품은 55% 이상 재생섬유 소재로 제작 2020년 '레코드' 패션브랜드와 협력 100% 폐의류 컬렉션 발표 2025년 80% 이상 재생섬유소재 사용 계획
ZARA	<ul style="list-style-type: none"> 2025년 100% 지속가능한 린넨과 재생폴리에스터 사용 계획
유니클로	<ul style="list-style-type: none"> 2019년 RE.UNIQLO(폐의류 재사용 또는 재활용) 캠페인 시작 페PET 재생폴리에스터 섬유로 의류 제작 (DRY-EX 등)
MANGO	<ul style="list-style-type: none"> 2022년 지속가능한 소재(오가닉 코튼이나 재생폴리에스터 등) 50% 이상 사용 2030년 100% 재활용 소재 사용 계획
랄프로렌	<ul style="list-style-type: none"> 2019년 100% 페PET병 사용한 친환경 제품 '어스폴로' 셔츠 출시 2025년 100% 재생폴리에스터 사용 계획
블랙야크	<ul style="list-style-type: none"> 2020년 티케이케미칼의 에코론을 사용한 의류 K-rPET 출시 2021년 K-rPET 재생섬유에 아웃도어의 기술을 더한 플라스틱(PLUSTIC) 친환경 제품 출시
영원무역	<ul style="list-style-type: none"> woven 약 20%, knit 약 50% 재생폴리에스터로 제조 리젠제주, 리젠서울 원사와 남해바다 해양 수거 페트병 재활용 원사 사용
코오롱 인더스트리 fnc	<ul style="list-style-type: none"> 업사이클에 기반을 둔 패션브랜드 '레코드(RE:CODE)' 운영 2023년까지 모든 상품 50% 친환경소재 공법으로 제작

수요가 2018년에는 섬유 전체의 43%를 차지하고, 2026년까지 연평균 5.0% 증가될 것으로 전망하고 있다[19].

지속 가능한 소재에 대한 소비자의 수요가 증가하고 브랜드, 투자자, 금융기관의 환경 인식이 높아지면서 여러 브랜드가 2025 ~2030년까지 자사 제품의 100% 재생폴리에스터 사용 달성을 목표로 하고 있다. 이러한 목표는 재활용 PET병으로 만든 폴리에스터를 대규모로 사용하여 PET병 산업생태계의 순환을 방해하는 결과를 초래하게 된다[20]. 올해 채택된 EU의 지속가능한 순환 섬유 전략은 기업이 bottle-to-fiber 재활용보다 fiber-to-

fiber 재활용의 충분한 용량을 확보하고, 섬유 조각과 매립을 최소화로 순환 섬유 생태계를 성장시킬 수 있기를 권장하고 있는 상황으로는 상황으로, 이로 인한 화학적으로 재활용된 폴리에스터의 시장 점유율은 향후 몇 년간 증가할 것으로 예상된다[5].

3. rPET/vPET 감별 방법과 표준화 동향

3.1. 재생폴리에스터 섬유의 분류

재생폴리에스터 섬유는 재생하는 방법에 따라 크게 화학적 재생폴리에스터(chemical recycled polyester)와 물리적 재생폴리에스터(mechanical recycled polyester)로 구분된다.

3.1.1. 화학적 재생폴리에스터(chemical recycled polyester, C-rPET)

화학적 재생폴리에스터는 페플라스틱을 화학적으로 분해하는 해중합 과정을 통해 고분자의 원래 형태인 단량체로 분리하고 이를 재합성하는 과정을 통해 PET로 제조된다. 이 과정에서 해중합이란 중합의 역반응을 일컫는 것으로 가용매 분해를 통해 고분자사슬을 절단하여 하나의 단량체 또는 올리고머를 만드는 것을 의미한다.

PET는 EG(ethylene glycol)와 TPA(terephthalic acid)의 에스테르화 반응이나 EG와 DMT(dimethyl terephthalate)의 반응에 의해 형성되는 다결정 폴리에스터이다. 일반적으로 PET 합성은 Figure 6과 같이 TPA와 DMT, EG를 이용하여 중간 단량체인 BHET를 형성하고, BHET를 통해 PET와 EG를 형성하는 두 반응 단계를 통해 이루어지는데 이것의 역반응인 페PET의 해중합은 첨가되는 수산기 함유 분자 즉 용매를 어떤 것으로 사용하느냐에 따라 크게 세 가지의 화학 원료화 방법이 있다.

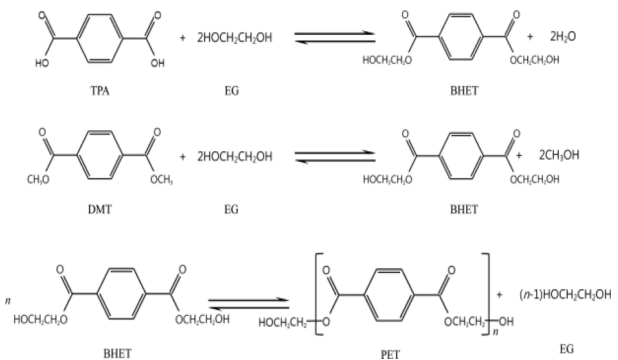


Figure 6. PET 합성 과정
(출처 : 폴리에스터 폐자원의 화학 원료화 기술, 2013)

(1) 메탄올리시스(methanolysis)

PET의 메탄올리시스는 메탄올을 사용하여 (180~280) °C의 고온과 (20~40) atm의 압력에서 PET를 분해하여 PET의 생산원료인 DMT와 EG를 얻는 방법이다. PET의 글리콜리시스에 의해 얻어진 단량체인 BHET와 비교할 때, DMT는 BHET에 비하여 분리 정제가 용이하기 때문에 훨씬 고순도의 제품을 얻을 수 있다. 그럼에도 불구하고 유기 불순물이 완벽하게 제거되지 않아 제품이 원하지 않는 색을 띠는 원인이 되기도 한다[22].

(2) 글리콜리시스(glycolysis)

PET 분해 방법 중 가장 간단하고 오래된 방법으로 (180~240) °C 사이에서 과량의 글리콜 또는 EG를 첨가하여 BHET를 생성시킨다. 생성된 BHET는 가압 하에서 용융여과를 이용한 정제를 거쳐 고순도화시킨 후 중합과정을 거쳐 새로운 PET 고분자를 제조할 수 있다. 이러한 글리콜리시스는 초기의 PET의 색상이 변화하지 않고 유지되는 장점이 있다[22].

(3) 가수분해(hydrolysis)

PET를 TPA와 EG로 가수분해하는 방법으로 산성, 알칼리, 중성 가수분해로 분류된다. 장점은 40 wt%까지 오염된 PET를 처리할 수 있다는 것이지만 TPA의 낮은 용해도와 낮은 증기압으로 정제가 어려우며 글리콜리시스나 메탄올리시스에 비해 반응이 느리다는 단점이 있다[22].

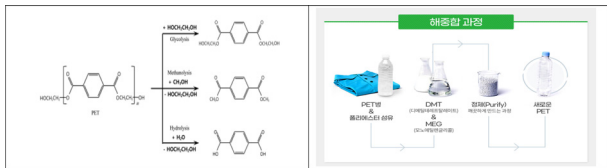


Figure 7. (좌)PET 다양한 해중합 과정, (우)화학적 재생 폴리에스터의 해중합 과정. (출처: (좌)폴리에스터 폐지원의 화학 원료화 기술, 2013, (우)플라스틱 순환경제 구축 위한 SK지오센트릭의 글로벌 파트너사 탐방기① - Skinno News)

이러한 반응들을 통해 해중합된 화학적 원료를 바탕으로 PET로 재합성이 이루어지고 재방사 과정을 거쳐 화학적 재생 폴리에스터가 생산된다.

화학적 재생폴리에스터는 virgin 폴리에스터와 동일하게 모든 용도에서 사용이 가능하며 반복 재활용에도 품질이나 물성의 저하가 없고 유색물질의 저품질의 플레이크(flake)까지 사용이 가능하여 완전 순환 경제로의 발전이 가능하다. 반면 까다로운 생산 공정으로 기술 개발 및 설비투자비용이 높아 큰

규모의 경계를 갖춘 기업만이 유리하다는 면에서 시장의 한계점이 있다. 이로 인해 아직은 화학적 재생 방법이 물리적 재생 방법에 비해 비교적 재생 시장에서의 입지가 좁은 편이다.

3.1.2. 물리적 재생폴리에스터(mechanical recycled polyester, M-rPET)

회수된 PET병에서 뚜껑과 라벨(label)을 분리하고 용도 및 색상에 따라 분별, 세정, 분쇄하는 과정을 통해 만들어진 플레이크(flake)가 원료이다. 이후 세정, 탈수, 재용융을 거쳐 폴리에스터 펠릿(pellet)으로 재생산된다[23].

물리적 재생폴리에스터는 원료가 무색 플레이크로 한정되어 있고 재생산 과정에서 고온의 열로 인한 물성의 저하로 사용 후에는 폐기되어 선형 경제에 그칠 수밖에 없는 한계점이 있다. 그러나 화학적 재생에 비하여 공정이 단순한 탓에 제조 변동비와 초기 투자비용이 적으며, 재합성 과정이 없어 탄소 배출량이 적다는 것이 가장 큰 장점으로 작용하고 있다.

2020년 환경부에서 시행된 페트병 분리배출 의무화는 일본에서 재생폴리에스터 칩을 수입해 오던 것에서 벗어나 재생폴리에스터 원사의 국산화를 실현시키는 것에 한 몫 했다고 할 수 있으며, 현재 공정과정의 개선과 고순도 제품화를 위한 다양한 움직임이 역시 활발하게 진행되고 있다.

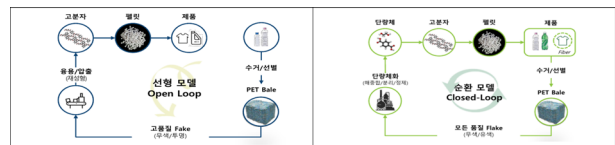


Figure 8. (좌)물리적 재생 방법, (우)화학적 재생 방법. (출처: 롯데케미칼 플라스틱 리사이클링 사업, 2021)

Table 6. 물리적 재생과 화학적 재생의 공정과정 비교

구분	화학적 재생	물리적 재생
페트(PET) 1t 당 온실가스 저감 능력	1.5 t 저감	2.4 t 저감
재활용 원료	복합 재질이거나 오염된 폐플라스틱도 가능	단일 성분의 깨끗한 폐플라스틱만 가능
재활용된 플라스틱의 품질	원유로 생산한 플라스틱과 유사	원유로 생산한 플라스틱보다 품질 저하
재활용 횟수	영구적	제한적
재활용 공정 설비 투자비용	높음	낮거나 보통

(출처: 재활용 플라스틱에도 '급'이 있다, 이데일리, 2021)

3.2. 재생폴리에스터 섬유의 분석방법과 표준화 동향

친환경 소재에 대한 구매 조건을 부각시키기 일환으로 재생 원사의 인증에 대한 각 기업들의 관심은 높은 편이다. 하지만 현재 GRS 인증은 인증 범위가 입·출고 균형만 확인하는 수준에 있고, 리사이클 원료를 전부 사용하지 않거나 저품질 원료를 사용해도 서류상 원료 사용 비율만 맞으면 인증서가 발행된다는 것에 그 한계가 있다. 또한 2022년 중소기업을 대상으로 실시한 중소기업 인증제도 실태조사에 따르면 79.7%의 기업이 인증 취득 비용에 대해 부담을 느낀다고 답하였다[24]. 이는 제품군별로 각각 진행되고 있어 인증 취득 비용에 대한 기업의 부담이 더욱 높아져 가고 있는 것 역시 현실이다.

현재 재생폴리에스터 감별에 대해서 다양한 방법들이 소개되고 있다. 그러나 이러한 시험법 대부분은 폐 PET병 내에 있는 일부 물질들을 대상으로 한 분석이기 때문에 물리적 재생에 한정되어 적용되며, 모노머(monomer) 단위로 분해한 후 재합성 과정을 통해 virgin PET와 동일한 성질을 갖게 되는 화학적 재생의 경우에는 적용이 불가능하다.

3.2.1. Py/GC-MS를 활용한 분석

최근 각 시험기관에서 재생폴리에스터 섬유에 대한 분석방법 개발이 활발한 가운데 Py/GC-MS를 이용한 물리적 재생폴리에스터 감별 방법에 대한 시험서비스가 독일의 대표적인 시험인증기관인 TÜV SÜD에서 실시되고 있다. Py/GC-MS를 이용한 분석은 폴리에스터 섬유 내에는 없지만 PET병 합성에 사용되는 원료 중 하나인 이소프탈산(isophthalic acid, IPA)을 타겟 물질로 하여 이것의 농도 분석을 통하여 폴리에스터 재생 여부를 확인한다. PET 플라스틱의 공정에서 그 양은 제품마다 차이가 있지만 보통 매우 적은 양이 함유되는데, 이는 주를 이루는 물질을 분석하는 일반적인 기기분석 방법과는 차이가 있어 다른 물질을 분석할 때 보다 더 많은 양의 시료가 필요하며 시험의 정밀도가 요구된다.

3.2.2. LC/MS를 활용한 분석

물리적 재생폴리에스터에 대한 대부분의 분석방법은 국가 또는 국제 수준의 표준화 작업이 이루어지지 않은 채 각 시험기관의 노하우와 연구개발을 바탕으로 하여 자체적 방법(in house method)으로 분석이 이루어지고 있다. LC/MS를 이용한 분석 방법은 ‘GB/T 39026-2020 Test Method for the Identification of Recycled Polyethylene

Terephthalate(PET) Fiber’로 2020년에 표준으로 제정되었다. GB/T 39026-2020은 메탄올리시스(methanolysis) 및 팽윤-추출 방법을 기반으로 시험이 진행된다. 이는 일정 유속 및 제한된 컬럼(column) 조건 아래에서 러닝 타임 내에 검출되는 7개 특정 피크의 상대 면적 비율 계산으로 이루어지는데, 산출된 결과값 4개 모두가 0보다 크게 되면 재생 폴리에스터 성분이 포함되어 있다고 보며, 결과값 모두가 0보다 작게 되면 virgin 폴리에스터라고 판단한다. 해당 표준을 활용하여 현재 중국의 시험기관인 CTI에서 2022년 5월부터 시험 서비스를 실시되고 있다[25-26].

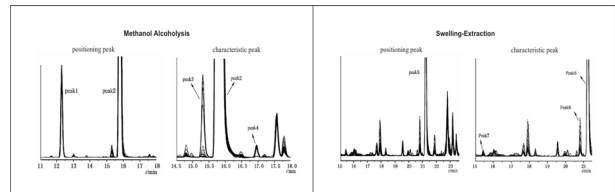


Figure 9. (좌)메탄올리시스 과정의 주요 피크, (우)팽윤-추출 과정의 주요 피크. (출처: CTI Guidelines for recycled PET test)

3.2.3. FT-IR을 활용한 케모메트릭스(Chemometrics) 분석(부분최소제곱법, PLS법)

케모메트릭스(Chemometrics)는 데이터 구동 수단을 통해 화학계로부터 정보를 추출하는 과학이다. 이는 본질적으로 다변량통계, 응용수학, 컴퓨터 과학과 같은 데이터 분석 분야에서 자주 사용되는 방법을 이용하여 화학, 생화학, 의학, 생물학 및 화학 공학의 문제를 해결하는 분석 방법이다. 케모메트릭스 방법은 산업체의 생산품질 모니터링, 농축산물의 품질평가, 식품 가공 산업, 재료산업 등 화학적 물성분석이 필요한 전 분야에 걸쳐 응용되는 기술이라고 할 수 있으며 이러한 케모메트릭스 분석은 FT-IR 뿐만 아니라 다양한 분석 장비를 통해 구현이 가능하다.

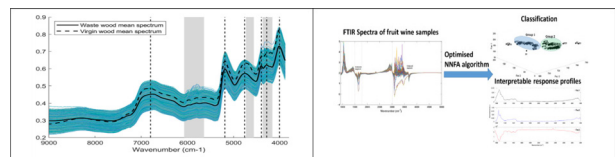


Figure 10. (좌)NIR을 활용한 케모메트릭스의 예, (우)FT-IR 케모메트릭스를 활용한 와인의 분류 예. (출처: Novel Applications of Chemometrics in Analytical Chemistry and Chemical Process Industry)

케모메트릭스 분석 방법을 토대로 폴리에스터 섬유의 재생 여부에 대한 분석이 이루어지고 있는 곳이 일본의 Nissenken Quality Evaluation Center와 한국의 FITI시험연구원이다. 먼저 Nissenken은 분석기기에서 추출되는 값으로 재생폴리에스터 섬유의 여부를 확인 하는 것이 아닌 적외선 분광광도계(FT-IR)를 활용하여 스펙트럼을 수치화 하는 과정을 통해 파형으로 알 수 없는 미묘한 차이를 이용하여 분석하고 있다. 이 분석방법은 PET병을 기반으로 물리적 재생 방법을 통해 생산된 경우 분자 내 올리고머(oligomer)의 연결고리가 적다는 점이나 재생 과정에서의 재용융 등에 따른 고온처리로 인한 열 이력이 수치 차이의 주된 영향으로 파악되고 있다.

FITI시험연구원 역시 케모메트릭스 분석 방법 중 하나인 부분최소제곱법(Partial Least Square, PLS)에서 그 방법을 착안하여 내부적인 방법(FITI TM A 0006)을 통해 물리적 재생폴리에스터 분석을 진행하고 있다. PLS 법은 종속 변수와 독립 변수 사이의 상관관계를 바탕으로 다변량 데이터를 분석하는 방법으로 PLS 회귀를 이용한 적외선 흡수 스펙트럼 데이터와 더미 변수 간의 계산 모델인 캘리브레이션 모델을 통해 섬유의 물리적 재생 여부를 분석한다. 이 역시 IPA의 함유 여부에 따른 적외선 흡수 스펙트럼의 미세한 차이에서 기인 할 뿐 아니라 재생 공정 과정상의 여러 이력들이 수치 차이에 영향을 미친 것으로 보인다. 해당 방법은 타 기관과 수차례 실시한 유효성 검증에서도 일치한 결과를 보였으며, 또한 실제 의뢰된 시료들을 분석한 결과 정확도가 매우 높을 뿐 아니라 물리적 재생 방법으로 제조된 폴리에스터 섬유 원단 내의 일부가 이에 해당하지 않는 것을 분석한 사례도 있다.

케모메트릭스 분석을 이용한 사례는 실제로 ISO 표준으로 제정된 바 있는데 이는 ISO 21915-1 Textiles - Qualitative and quantitative analysis of some cellulose fibres (lyocell, cupro) and their blends - Part 1: Fibre identification using scanning electron microscopy and spectral analysis methods로 유사한 성분으로 감별이 어려운 재생 셀룰로오스계 섬유인 리오셀(lyocell)과 큐프로(cupro)를 PLS 분석을 통해 두 섬유를 쉽게 감별할 수 있다고 설명하고 있다[27-28].

케모메트릭스를 활용한 분석은 크로마토그래프(chromatograph)와 같은 분석 장비를 사용하는 대신에 FT-IR, NIR, 그리고 NMR 등의 분광기를 사용하여 얻은 파장별 흡광도 등의 데이터를 이용하여 분석함으로써 빠른 시간 내에 비파괴적 분석이 가능하다. 또한 적은 양의 시료를 사용하였음에도 아주 작은 차이의 확인을 통해 신속하고 정확하게 분석이 가능하여

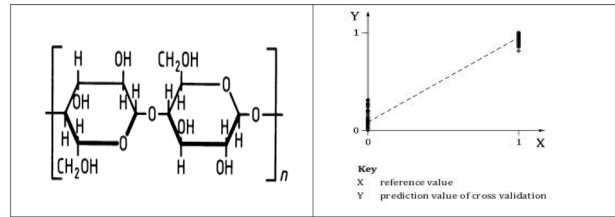


Figure 11. (좌)리오셀과 큐프로의 분자구조식, (우)PLS 법을 활용한 리오셀-큐프로 감별의 시험실간 교차검증. (출처: ISO 2076:2021, ISO 21915-1:2020)

시험 품질 및 생산성 향상의 효과 역시 기대할 수 있다.

3.2.4. 기타 분석방법

물리적 재생폴리에스터 섬유를 분석하는 다른 방법으로는 SEC(Size Exclusion Chromatography)-MALDI-TOF와 침전법(precipitation method)을 활용한 분석하는 방법이다. 이는 PET 내의 올리고머 추출을 통해 분석이 이루어지는 방식으로 재활용 폴리에스터의 복잡한 올리고머 특성에 기인하여 분석이 이루어진다[29].

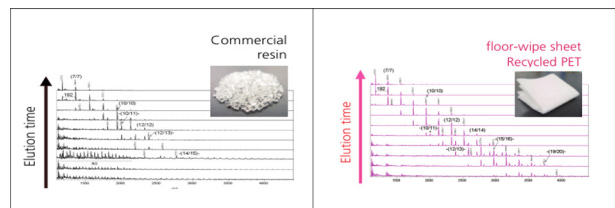


Figure 12. (좌) vPET 올리고머의 SEC-MALDI-TOF 분석, (우) rPET 올리고머의 SEC-MALDI-TOF 분석. (출처: Analysis of Recycled Polyesters using SEC-MALDI-TOF and Precipitation Method)

소개한 장비들 이외에도 NMR이나 ICP, XRF 등의 장비를 활용하여 폴리에스터의 재생 여부를 감별하는 분석이 진행된다.

한편, 실제로 재생 과정에서 폴리머의 재구성으로 인해 강도의 차이를 보이는 것을 제외하고는 virgin 폴리에스터와 재생폴리에스터의 화학적 특성은 비슷하여 정확한 감별을 위해서는 앞서 설명된 기기분석이 수반되어야 한다.

물리적 재생폴리에스터 섬유에 대한 분석이 다양한 방법으로 이루어지고 있는 것을 살펴 볼 수 있었다. 그러나, 현재까지 표준으로 제정된 분석법은 하나에 불과하며 다른 분석방법들의 유효성 검증 근거는 다소 부족해 보인다. 화학적 재생폴리에스터의 생산이 일반화될 때까지 bottle-to-fiber를 활용한 물

Parameters	Virgin polyester	Recycled polyester
<i>Crystallinity</i>		
Crystalline region	37.2	28.5
Amorphous region	62.8	71.5
<i>Thermal properties</i>		
Glass transition property (°C)	75.35	87.27
Melting point	242.72	244.15
Degradation temperature residue	419.99	419.62
	0.79	10.80

Figure 13. virgin 폴리에스터와 재생폴리에스터의 열적특성 비교.
(출처: Recycled Polyester—Tool for Savings in the Use of Virgin Raw Material)

리적 재생의 수요는 당분간 계속 될 전망이므로 각 시험기관에서 활용하고 있는 방법의 표준화와 유효성 검증 작업이 요구되고 있다.

4. 결 론

2022년에 EU는 지속가능한 순환 섬유 전략을 발표하여 bottle-to-fiber 재생폴리에스터 섬유의 녹색 주장 정확성에 대한 우려를 나타냈다. 그 이유는 1회용 플라스틱 제품 및 포장에 대한 EU 규정의 목적을 충족하기 위한 PET병의 순환 모델과 일치하지 않기 때문이다. 미세 플라스틱 오염에서 합성 섬유의 역할을 고려할 때, 우려는 더 가중되고 있다. 위원회는 녹색 주장의 정확성을 보장하기 위해 섬유 제품의 루프를 폐쇄하여 fiber-to-fiber 재활용 노력에 우선할 것을 권장하고 있으며, 이 정책은 향후 지침(directive) 또는 규칙(regulation)으로 규제될 것으로 예상된다. 한편, 글로벌 기업은 시장과 고객의 요구 사항을 우선시하여 규제보다 더 발 빠르게 공급망에 대한 요구 사항을 변경하는 경향이 있다. 특히, 하나의 글로벌 기업이 정책 변화를 주도할 경우, 다른 기업으로 급속하게 파급될 수 있다. 따라서 섬유와 패션 산업계에서는 재생폴리에스터 섬유에 대한 EU와 미국 등 주요 선진국의 정책 및 규제 변화와 더불어 글로벌 기업의 공급망 요구 변화에 주시할 필요가 있다.

fiber-to-fiber 재활용으로의 정책과 규제의 방향성에도 불구하고 물리적 재생폴리에스터의 탄소중립 기여 효과는 분명하여 손쉬운 탄소저감 방법으로 활용되고 있다. 화학적 재생의 상대적으로 낮은 탄소 중립 기여도와 기술적인 한계로 인하여 물리적 재생폴리에스터의 수요는 당분간 유지될 가능성이 높

다. 이러한 상황을 고려할 때 물리적 재생폴리에스터의 사용을 입증하는 적합성 평가의 필요성은 계속적으로 요구되며 인증에 의한 적합성 평가를 보완하기 위한 간편하고 수요자의 부담을 경감시키는 제3자 시험의 적용은 확대될 것이다. 특히, 다변량 통계분석에 기반한 케모메트릭스(chemometrics) 방법은 동일한 성분의 고분자 분석에서 분자량과 열이력 등에 기인한 미세한 차이를 구분해 내는 최신의 기법으로 향후 표준화를 통하여 물리적 재생폴리에스터를 분석하는데 널리 사용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 순환경제 사회 전환을 위한 폐기물처리 및 재활용시장의 산업분석과 기술전략, 좋은정보사, 2021.
2. 탄소중립 한눈에 보기, 국회도서관, 2023.
3. 파리협정 함께 보기, 환경부, 2022.
4. 순환경제 활성화를 통한 산업 신성장 전략, 비상경제장관회의, 2023.
5. EU Strategy for Sustainable and Circular Textile, European commission, 2022.
6. On waste directive, European commission, 2023.
7. On making sustainable products the norm, European commission, 2022.
8. On substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive), European commission, 2023.
9. On Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive, European commission, 2022.
10. 유럽의회 공급망 실사 지침 본회의 통과, 김도연, KOTRA 경제통상 리포트, 2023.
11. Recycled Claim Standard 2.0, Textile Exchange, 2018.
12. Global Recycled Standard 4.0, Textile Exchange, 2018.
13. Bluesign®SYSTEM Version 3.0, bluesign technologies, 2020.
14. Annual Report 2022, ZDHC, 2022.
15. SLCP-Higg Index FSLM 검증, FITI시험연구원, https://www.fiti.re.kr/?sub_num=721
16. Pulse of the fashion industry, the Boston Consulting Group, 2017.
17. Preferred Fiber & Materials Market Report 2022, Textile

- Exchange, 2022.
18. Scaling textile recycling in Europe—turning waste into value, McKinsey&Company, 2022.
 19. Recycled Textile Market, Allied Market Research, 2020.
 20. 기후변화 대응과 섬유 · 패션산업의 탄소중립화, 김유겸, 고봉균, 섬유기술과 산업, 2023.
 21. EU, 지속가능한 의류 · 섬유제품 위한 규제 마련 중, KOTRA, 2023.
 22. 폴리에스터 폐자원의 화학 원료화 기술, 2013.
 23. 합성섬유의 리사이클, 2008.
 24. 중소제조업 인증제도 실태조사, 2022.
 25. GB/T 39026-2020, Test Method for the Identification of Recycled Polyethylene Terephthalate(PET) Fiber.
 26. CTI Guidelines for recycled PET test.
 27. ISO 2076:2021 Textiles – Man-made fibres – Generic names.
 28. ISO 21915-1:2020 Textiles – Qualitative and quantitative analysis of some cellulose fibres (lyocell, cupro) and their blends – Part 1: Fibre identification using scanning electron microscopy and spectral analysis methods.
 29. Analysis of Recycled Polyesters using SEC-MALDI and Precipitation Method, SHIMADZU.
 30. Recycled Polyester—Tool for Savings in the Use of Virgin Raw Material, 2019.