

# 폴리에스터 화학적 재활용 기술 동향



**민기훈**

- 1998. 충남대학교 섬유공학과 학사
- 2000. 충남대학교 섬유공학과 석사
- 2011. 경북대학교 섬유시스템공학과 박사 수료
- 1999-2014. 도레이첨단소재(주) 원사개발 책임연구원
- 2014-현재. ㈜서원테크 대표이사



**김호근**

- 2010. 송실대학교 유기신소재공학과 학사
- 2010-2017. 도레이첨단소재(주) 원사 개발팀/원사마케팅팀 연구원
- 2017-2018. 클래비스 책임연구원
- 2018-현재. ㈜서원테크 연구소장 및 영업/마케팅팀 팀장 겸임



**박상태**

- 2019. 서울과학기술대학교 주택도시건축공학 석사
- 2023. 서울과학기술대학교 의공학-바이오소재 융합협동과정 박사
- 2004-현재. ㈜리뉴시스템 연구소장



**김은경**

- 2001. 충남대학교 섬유공학과 학사
- 2003. 충남대학교 섬유공학과 석사
- 2003-2005. 한국생산기술연구원 디지털 염색팀 연구원
- 2005-현재. 한국섬유소재연구원 섬유신소재 연구본부 수석연구원

## 1. 서론

21세기 들어 세계의 선진국들은 지구온난화의 방지, 재생 가능 자원의 사용 촉진을 통한 순환형 사회의 형성 등을 위해 다양한 산업적, 정책적인 전략들을 수립하여 추진 중에 있으며 우리 생활에 널리 쓰이는 여러 가지 자원 중 플라스틱은 자동차, 전기, 전자제품, 포장재, 건축 등 산업계 거의 전 분야에 사용되는 유용한 소재이며 플라스틱의 높은 활용도와 편리성 측면에서 플라스틱을 대체할 수 있는 신소재가 개발되지 않는 한 플라스틱의 재활용에 대한 문제에 대해서 중요하게 생각하지 않을 수 없다. 플라스틱은 필름, 음료수병, 섬유 등의 다양한 분야에서 그 활용도가 높으며 이로 인해 많은 양이 광범위하게 이용되고 있는데 반해 폐플라스틱의 재이용을 위한 회수율은 세계적으로 약 25% 수준에 머무르고 있으며 나머지 미회수 자원은 소각이나 매립 등의 방법으로 처리되고 있어서 환경오염을 유발할 뿐만 아니라 활용 가능한 자원의 최종 폐기에 의한 경제적 손실도 큰 것으로 분석되고 있다. 지구환경의 위기 시대에 살고 있으며 온실가스과 미세먼지는 국경의 구분 없이 글로벌 관점에서 최대의 문제로 인식되고 있으며 자국의 이익을 위해 환경을 보호하는 정책이 더욱 강화되고 있다. 특히 마구 버려지는 쓰레기는 지구 오염의 주범 중 하나로 모든 국가가 골치를 앓고 있으며 이제까지 전 세계 쓰레기의 상당량을 처리하던 중국이 쓰레기 반입을 금지함에 따라 모든 나라는 자국 안에서 쓰레기를 처리해야만 하는 문제에 당면하고 있다. 대한민국도 2030년까지 폐금속류 등 일부 품목을 제외한 모든 폐기물이 원칙적 수입 금지를 목표로 로드맵을 완성하였으며, 2022년

부터 국내 폐기물로 대체할 수 있거나 폐기물 수거거부 등 재활용 시장을 불안하게 했던 페플라스틱(20만 톤), 혼합폐지(36만 톤), 폐섬유(1.8만 톤)는 수입 금지 품목이 되었다. 매년 2억 톤 이상의 플라스틱 폐기물이 배출되고 있으며 연 10% 이상 증가하고 있으며 더욱 심각한 문제는 이중 90% 이상이 매립되거나 소각, 방치되고 있으며 바다로 흘러 들어간 플라스틱 폐기물은 썩는데 육지보다 더 오랜 시간이 걸리는 문제점을 가지고 있다. 코로나19는 플라스틱 폐기물 이슈를 증폭시키는 역할을 하였으며 위생에 대한 인식강화, 테이크아웃과 음식배달, 온라인 쇼핑 등으로 플라스틱 사용량이 폭발적으로 증가했으며 사람들은 매일 쏟아져 나오는 플라스틱을 마주하며 죄책감이라고 표현할 정도로 심리적 불편감을 호소하고 있으며 이에 강도 높은 해결 방안으로 재사용/재활용은 물론 플라스틱의 발생량 자체를 줄여야 한다는 소리가 높아지고 있으며 더불어 최근 ESG 경영이 강조되면서 기업들에게 플라스틱 폐기물 이슈 해결에 대한 근본적인 책임을 물어야 한다는 위기 또한 확산되는 추세이다.



얼마전까지 패스트 패션 열풍이 불면서 폐섬유도 많아졌으며 패스트 패션의 경우 1~2주 단위로 신제품을 선보이기 때문에 옷을 만드는 양이 많아지면서 공장에서 나오는 폐섬유가 증가하며 심지어 팔리지 않은 신제품도 폐섬유로 분류된다. 또한 패스트 패션은 저렴한 가격으로 신제품을 단기간에 선보이기 때문에 대부분 합성섬유를 사용하며 합성섬유는 쉽게 분해되지 않고 미세플라스틱을 배출하며 합성섬유가 땅속에서 썩으려면 200년이 넘는 시간이 걸리며 태우거나 매립하는 과정에서 메탄과 이산화탄소, 다이옥신 등 환경오염을 유발하는 물질이 배출되는 문제점을 발생시키고 있다.



기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)는 의류산업의 연간 이산화탄소 배출량이 세계 전체 배출량의 10%를 차지한다고 분석했으며, 오는 2030년까지 패션산업의 온실가스 배출량은

50% 이상 급증할 것으로 전망하고 있다. 폐섬유의 심각성은 페플라스틱보다 알려지지 않은 상황이며 이에 전문가와 환경단체에서는 폐섬유에 대한 문제점을 인지해 해결해야 한다는 의견에 공감하고 있다. 이에 전 세계적으로 이를 극복하고 대체할 녹색 성장의 가치창출 개발이 필연적으로 요구되고 있는 상황이며 생산단계부터 재활용/재사용을 고려한 제품 설계와 회수 및 이에 대한 재활용에 적극적인 검토가 필요하며 폐섬유/페플라스틱의 궁극적인 문제점을 해결할 수 있는 자원 순환형 시스템을 만드는 것이 필요하다.

이에 본 고에서는 재활용 섬유의 가장 큰 분야인 폴리에스터의 재활용 기술 및 국내외 동향을 화학적 재활용을 중심으로 소개하고자 한다.

## 2. 폴리에스터의 재활용 기술

### 2.1. 재활용 기술의 분류

인류가 수십 년간 만들어낸 플라스틱은 약 83억 톤이지만 이제까지 생산된 플라스틱의 9% 만이 재활용되어 최근 페플라스틱이 일으키는 다양한 환경문제의 심각성을 깨닫고 전 세계가 다양한 규제를 통해 일회용 플라스틱을 줄이기 위한 노력을 기울이고 있으나 플라스틱 사용을 줄이는 것이 해결책이 아니라 플라스틱의 순환경제를 통해 문제를 해결해야 할 필요가 있다. 지금까지의 경제는 천연자원을 사용해 제품을 생산하고 해당제품을 소비한 이후 매립이나 소각을 통해 단순 폐기하는 선형경제 구조였으나, 이러한 한 선형경제는 자원고갈, 환경오염, 폐기물 발생이라는 심각한 문제를 낳았고, 순환경제는 산업국가 직면하게 된 각종 문제를 해결하기 위한 방안

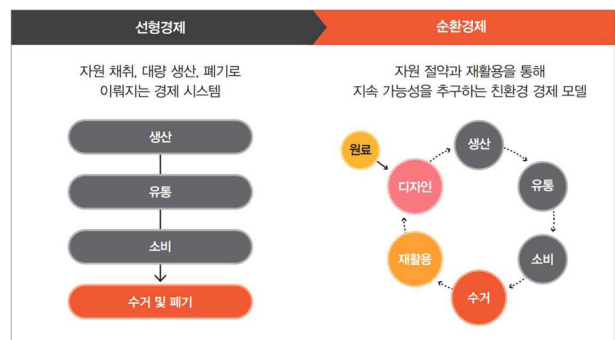


Figure 1. 선형경제 VS 순환경제. \*자료:PWC

으로 2010년 이후 본격적으로 대두되었다. 생산-소비-폐기라는 선형경제적 사이클에서 생산-소비-회수-재활용의 순환경제적 사이클로의 전환이 필요하다. 순환경제는 신규로 투입되는 자원의 양과 폐기되는 물질의 양이 최소화되고, 경제체내에서 순환되는 물질의 양이 극대화된 경제체계를 말한다[3].

플라스틱 재활용 처리 기술에는 물리적 재활용(mechanical recycling)기술, 열적 재활용(thermal recycling)기술, 화학적 재활용(chemical recycling)기술 3가지가 있다. 물리적 재활용은 세척, 파쇄, 용융, 배합 등 물리적 가공 과정을 통해 플라스틱을 펠릿 형태로 만들어 다시 사용하는 방식을 말하며 쉽고 안전해 현재 재활용 시장의 90% 이상을 차지하고 있으나, 재활용 가능한 플라스틱을 선별하고 세척하는 과정에서 많은 비용이 소요되고, 가공 과정에서 이물질이 혼합되어 강도, 탄성 등 기능이 떨어질 수 있어 재활용된 플라스틱의 활용 분야가 제한적이라는 단점이 있으며, 또한 여러 번 재활용 과정을 거치면 분자 구조간 결합력이 떨어지기 때문에 반복적으로 재활용하는 데에 한계가 있다. 열적 재활용은 플라스틱 폐기물을 소각하며 발생하는 열에너지를 활용하는 방법으로 플라스틱의 높은 발열점을 활용해 재활용이 불가능한 폐기물을 연소시켜 에너지를 회수할 수 있지만 소각 시 발생하는 유해물질로 인해 재활용의 궁극적 목적에 부합하지 않아 유럽연합이나 국제기구에서는 단순한 소각으로 보고 있다. 물리적 재활용이 플라스틱 본래의 성질을 변형시키지 않고 물리적인 형태만 바꾸는 개념인 반면, 화학적 재활용은 고분자(polymer)형태의 플라스틱을 화학적 반응을 통해 최초의 원료 형태인 모노머(monomer, 단량체)로 완전히 되돌리는 것을 의미한다.

폐플라스틱의 자원화를 위해서는 발생된 플라스틱을 종류별로 분리 선별하는 것이 매우 중요하며 종류별로 선별된 폐플라스틱은 물리적 분쇄 및 고형화를 통해 리사이클링 제품으로 생산되어 소재로 순환 활용할 수 있으나, 이물질이 고부가 제품으로 리사이클링 될 수 없기 때문에 화학적 리사이클링으로 화학 원료 물질을 회수하여 원료로 순환 활용해야 한다. 지난 세기 동안 대량 생산 체제 기반에서 고속 경제성장을 통해 얻을 수 있었던 물질적 풍요는 21세기 들어 자원고갈 및 환경오염, 지구온난화, 생태계 파괴 등과 같은 심각한 후유증을 초래하게 된 바 전 세계적으로 이를 극복하고 대체할 녹색 산업의 성장 및 가치창출 개발이 요구되고 있는 상황이며 이에 대한 체계적인 대응 및 변화가 지연될 경우 섬유 및 자동차, 석

유화학, 철강 등과 같은 전통 주력 산업군은 성장 한계의 봉착이 예상된다. 지난 15년간 의류 생산은 두배 이상 증가했으며, 향후 20년 동안에도 섬유 수요가 84% 증가할 것이라는 전망이 있는데 이는 패스트 패션 산업의 성장과 함께 매년 의류 제품에 대한 가격이 하락하고 더 짧은 주기로 소비가 되기 때문이다. 친환경과 재활용은 이제 패션에서도 그냥 지나칠 수 없는 주제가 되었는데 이는 실제로 미세먼지나 황사, 급격한 기후 변화로 인해 일상과 건강에 미치는 영향이 커지면서 물건을 소비하는 것이 자연이나 환경에 대한 빚으로 돌아온다는 것을 소비자들이 직접 체험하고 있기 때문이며, 이로 인해 패션 브랜드에 있어서 친환경이 지속가능성을 가지기 위한 실천 방안 중 하나가 되었다.

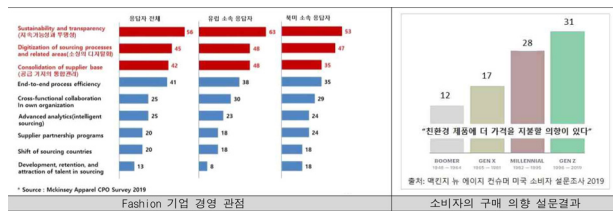


Figure 2. 친환경 제품에 대한 Fashion 기업 및 소비자 관점에 관한 설문조사 결과.

세계 친환경 섬유시장은(한화 약 138조 1,967억8,000만원) 전체 섬유시장에서의 비중도 2021년 4.9%에서 2030년 7.2%로 증가할 것으로 예상된다. 국내 친환경 섬유패션 시장 규모를 약1조 원, 전체 시장의 약 2%로 추정하고 있으며 생분해, 재활용 섬유 관련 기술력 부족과 폐의류 재활용 시스템 미비 등은 국내 친환경 패션 활성화의 장애요인이 되고 있다[4].

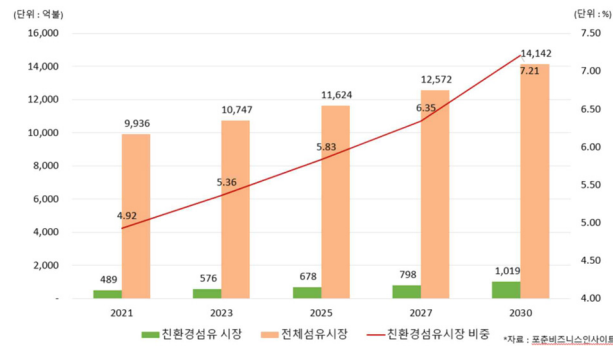


Figure 3. 세계 섬유 시장 중 친환경 섬유 비중.

세계 리사이클 섬유 수요는 글로벌 패션 기업은 물론 자동



차, 건설 등 섬유 수요기업들이 리사이클 섬유 수요를 늘리면서 향후 높은 증가가 예상되며 세계 리사이클 섬유 수요 규모는 2018년 53억 3,200만 달러에서 2026년 80억 200만 달러로 연평균 5.2% 증가할 것으로 전망되고 있으며 글로벌 패션기업은 물론 자동차, 건설 등 섬유 수요기업들은 사회적·윤리적 책임을 다하는 동시에 온실가스, 폐기물 등 환경부하를 최소화 할 수 있도록 리사이클 섬유를 활용한 제품 생산 확대를 계획하고 있다. 소재별 수요를 살펴보면 리사이클 폴리에스터가 가장 규모가 커 세계시장 확대를 주도할 것으로 예상하고 있다.

Table 1. 세계 리사이클 섬유 시장 전망

구분	규모			구성비			연평균 증가율 (2018 ~2026)
	2018	2022	2026	2018	2022	2026	
리사이클 폴리에스터	2,526	3,045	3,706	47.4	46.8	46.3	4.9
리사이클 나일론	1,721	2,134	2,671	32.3	32.8	33.4	5.6
리사이클 면	556	681	842	10.4	10.5	10.5	5.3
리사이클 울	419	510	628	7.9	7.8	7.8	5.2
기타	110	130	156	2.1	2.0	2.0	4.5
전체	5,332	6,500	8,002	100	100	100	5.2

\*Allied Market Research(2020), "Recycled Textile Market"

글로벌 브랜드인 ZARA, 아디다스, GAP, H&M, Target 등 59개 글로벌 패션 기업은 2030년까지 리사이클 폴리에스터 비중을 100%까지 늘리겠다고 발표하였으며 리사이클과 같은 친환경 제품을 잇따른 출시가 이어짐에 따라 수요가 앞으로 증가할 것으로 예상된다. 이러한 글로벌 브랜드 제조사들은 전세계 섬유패션 시장의 60%를 차지하며 소재 공급망에도 근본적인 변화를 요구하고 있는 가운데, 관련 공급망 기업들과 함께 LCA 평가를 통해 지속 가능한 소재 라이브러리(higg MSI, sustainable apparel coalition)를 구축하고 있어 이러한 지속 가능한 소재를 개발하고 DB를 구축하는 것은 대부분이 수출에 의존하고 있는 국내 섬유패션산업에서는 필수적 요소이다. 이제 섬유패션산업은 글로벌 브랜드와 소비자 행동의 변화에 따른 흐름에 빠르게 대처해야 할 필요가 있다.

## 2.2. 폴리에스터의 물리적 재활용 기술

국내 섬유산업은 원자재를 수입/가공, 완제품을 수출하는 해외의존형, 수출주도형 산업구조인데, 정부의 생활폐기물 탈 플라스틱 대책에 따른 섬유패션산업의 구조적 전환이 시급하다. 섬유패션 제품의 대량 생산과 소비가 환경문제와 자원 파괴를 야기하고 있다는 공감대가 형성되면서 현재의 환경과 자원의 파괴를 최소화할 수 있도록 하는 섬유패션 제품의 라이프 사이클인 원료생산-제조-마케팅-물류-유통에 이르기까지 모든 과정에서 환경부하를 최소화하면서 성장하는 전략이 필요하다. 이에 선진 섬유 기업들은 신시장으로 부상하고 있는 글로벌 친환경 리사이클 섬유 시장을 선점하기 위해 폐페트병, 페그물, 페로프, 폐합성섬유 및 생산공정에서 배출되는 폐섬유 소재를 재활용한 리사이클 섬유개발 및 생산을 확대하고 있다. 국내의 경우 대기업 및 중견기업의 합성섬유 기업을 중심으로 투명 생수병 및 플레이크를 이용한 의류용 용도의 리사이클 폴리에스터 장섬유가 생산되고 있으나 아직 경쟁력이 떨어지며 국내에서 발생하는 폐플라스틱/폐섬유의 자원순환에 도움이 되지 않고 있다.

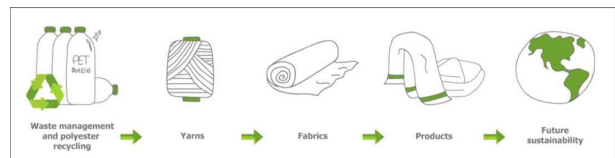


Figure 4. 투명 생수병을 재활용한 리사이클 PET 생산 공정도.

물리적 재활용 기술을 이용한 리사이클 폴리에스터 섬유는 폐페트병 등을 수거·선별·세척·이물질 제거 후 플레이크(flake)-칩(chip)-방사공정을 거쳐 생산된다. 그러나 국내 폐페트병은 배출·회수 단계에서 이물질, 라벨부착, 색상혼합 등으로 인한 품질 저하로 아직은 고품질 원료의 사용에 한계를 가지고 있어 고품질의 페트병 재생 원료(flake)는 주로 일본, 대만 등지로부터 수입에 의존하고 있다. 이에 환경부는 폐페트병이 의류용 섬유 등 고품질 제품으로 재활용이 가능하도록 생산·수거·처리 단계의 제도 개선을 진행하고 있으며 2019년 12월 25일부터 음료·생수병에는 투명 페트병만 사용하도록 제도를 시행하고 있으며 페트병의 라벨을 쉽게 제거하여 분리·배출할 수 있도록 병 몸통이 아닌 병마개에 라벨 부착, 라벨 2열 절취선 도입, 일반 접착제보다 잘 떨어지는 알칼리성 접착제 사용 등을 시행하고 있다. 또한 수거 단계에서 깨끗한 투명 페트병이 모일 수 있도록 재활용 가능 자원의 분리수거 등

에 관한 지침을 개정하여 공공주택의 투명 페트병 분리 배출을 의무화하여 시행하고 있어 이에 따라 국내 전체 페트병 생산량에서 투명 페트병이 차지하는 비중이 10%에서 33%로 높아질 전망이다. 재활용 가능한 페트병 출고량도 점차 증가하고 있다. 이러한 노력은 2022년에는 수입에 의존하고 있는 의류용 2만 2,000톤을 포함해서 7만 8,000톤 규모의 재생 페트병 수입을 대체하고 있다.



Figure 5. 페트병 재활용 체계 및 제품.

### 2.3. 폴리에스터의 화학적 재활용 기술

폴리에스터의 화학적 재활용은 PET 고분자 사슬의 변화를 수반하는데 보통 가용매 분해를 통해 고분자사슬을 절단하여 하나의 단량체 또는 올리고머를 만드는 해중합 과정으로 PET는 작용기로 에스터 그룹을 갖는 폴리에스터이기 때문에 물, 알코올, 산, 글리콜 및 아민과 같은 시약을 분해할 수 있다. 또한 PET는 가역 중합반응을 통해 형성되고 반대 반응으로 단량체 또는 올리고머 단위로 변환할 수 있는데, 이 저분자 제품은 정제과정을 거친 다음 고품질의 화학제품을 생산하는 원료로 재사용할 수 있다. PET 폐자원의 화학 원료화는 지속 가능한 개발 공정의 중요한 방법으로 이것은 고분자가 원래의 원료 형태인 잔량체로 전환되기 때문에 PET 생산을 위한 추가 자원이 필요하지 않고 환경적으로도 매우 유익하다. 페 PET의

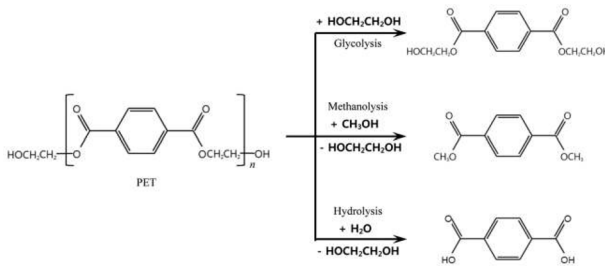


Figure 6. 폴리에스터의 화학적 재활용 공정도.

해중합을 위하여 첨가되는 수산기 함유 분자에 따라 다른 세 가지의 주요한 화학 원료화 방법으로 용매로 글리콜을 이용하는 글리콜리시스, 메탄올을 이용하는 메탄올리시스, 물을 이용하는 하이드롤리시스가 있으며 다른 방법으로 암모놀리시스, 아미놀리시스 등이 있다. 이러한 PET의 화학적 재활용 연구는 반세기 가 넘게 이어져 왔으며 제품의 수율을 개선하기 위해 많은 연구가 수행되고 있다.

페플라스틱의 화학적 재활용은 물리적 재활용에 대비 완벽한 불순물 제거 공정을 통한 고순도의 원료 물질(단량체)을 얻을 수 있으며, 재중합을 통해 기존의 플라스틱 물성과 동일한 재활용 원료를 기대할 수 있으며, 전 주기적으로 지속 가능한 순환계를 형성할 수 있다.

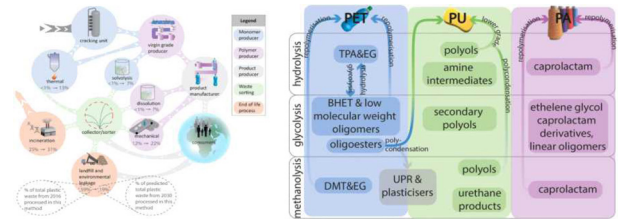


Figure 7. 페플라스틱의 화학재생 방법에 따른 분류.

특히, PET 합성을 위한 단량체로 사용될 수 있는 TPA, DMT와 BHET를 생산하기 위한 여러 가지 공정들이 있으며 이러한 공정 들은 장단점을 가지고 있다. 알코올리시스에 속하는 메탄올리시스와 글리콜리시스는 비교적 안정적인 온도와 압력에서 해중합이 이루어지고 거의 순수한 단량체를 얻을 수 있으나 PET의 분해속도가 매우 느려서 반응 시간을 줄이기 위한 촉매를 사용하여야 하며 하이드롤리시스는 촉매를 사용하지 않고 높은 반응 속도를 얻을 수 있으나 400 °C, 30 MPa의 고온, 고압 조건에서 반응이 일어나야 하는 단점을 가지고 있다.

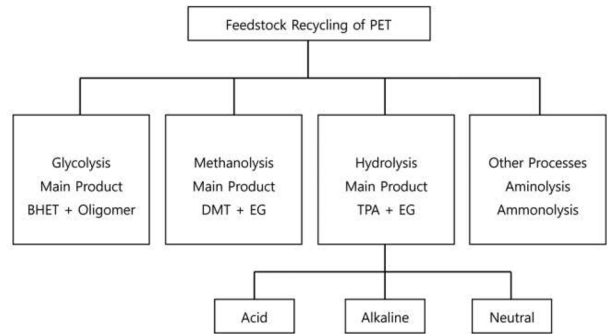


Figure 8. PET 화학적 재활용 공정 분류.

### 2.3.1 글리콜리시스(Glycolysis)

PET 분해 방법 중 가장 간단하고 오래된 방법으로 가압 하에서 온도범위 180~240 °C 사이에서 과량일 글리콜 또는 EG를 첨가하여 BHET를 생성시키며 생성된 BHET는 가압 하에서 용융여과를 이용하여 정제하여 고순도화 시킨 후 중합과정을 거쳐 새로운 PET 고분자를 제조할 수 있다. 글리콜리시스 공정은 일반적으로 아연이나 리튬 아세테이트 촉매의 존재 하에서 이루어지고 초기의 폐 PET 색상이 변화하지 않고 유지되며 메커니즘은 먼저 고분자로의 글리콜의 확산, 이 확산 침투에 의한 고분자의 팽창, 에스터 결합을 가진 글리콜의 반응으로 이루어진다. 반응 속도는 고분자 표면에 비례하기 때문에 초기의 폐 PET는 분쇄에 의해서 작은 크기의 분자로 만들어 주는 것이 유리하다. 글리콜리시스 공정은 PET 생산라인과 쉽게 통합할 수 있어 회수된 BHET를 버진 BHET와 혼합할 수 있다. 그러나 오염의 위험성이 높기 때문에 일관된 품질을 유지하기 위해서는 세심한 관리가 필요하며 글리콜리시스에 의해 제조된 BHET와 올리고머 용액은 결정화와 증류 같은 기존의 기술로는 정제하기가 매우 어려운 단점을 가지고 있다.

### 2.3.2 메탄올리시스(Methanolysis)

메탄올리시스공정에서 메탄올이 PET 고분자사슬을 공격하여 고분자 분해를 거쳐 단량체인 DMT와 EG가 생성되며 이 반응에는 전형적인 에스터 교환 반응 촉매가 사용되고 그 중 아연 아세테이트가 가장 폭넓게 사용되고 있다. PET의 메탄올리시스는 180~280 °C의 고온과 20~40 atm의 압력에서 메탄올을 사용하여 PET를 분해하여 PET의 생산 원료인 DMT와 EG를 얻는 방법으로 PET의 글리콜리시스에 의해 얻어진 단량체인 BHET와 비교할 때, DMT는 BHET에 비하여 분리 정제가 용이하기 때문에 훨씬 고순도의 제품을 얻을 수 있다. 메탄올리시스는 장치비가 크고 원료화 비용이 큰 단점이 있으나 오염된 PET 폐기물을 처리할 수 있기 때문에 보다 싼 PET 폐기물을 사용할 수 있는 장점이 있다. 메탄올리시스의 주요 생산품은 DMT로 대부분의 PET 생산라인은 정제된 TPA에 기반하고 있기 때문에 DMT를 TPA로 전환하는 추가 가수분해 공정이 필요할 수 있다.

### 2.3.3 하이드롤리시스(Hydrolysis)

폐 PET를 화학적으로 처리하는 또 다른 방법은 PET를 TPA와 EG로 가수분해하는 것으로 화학적 재활용 방법으

로 얻어지는 TPA의 순도와 물성이 일반적인 PET 직접 중합에서 사용될 수 있을 정도가 되도록 하는 것이 중요하다. 가수분해 방법의 장점으로로는 40 wt%까지 오염된 PET를 처리할 수 있으나 공정의 경제성이 최종 제품의 생산량, 순도, 시장에 민감하고 TPA는 낮은 용해도와 낮은 증기압을 갖고 있기 때문에 정제가 어려운 단점을 가지고 있으며 글리콜리시스나 메탄올리시스에 비해 반응이 느리다는 단점도 가지고 있다.

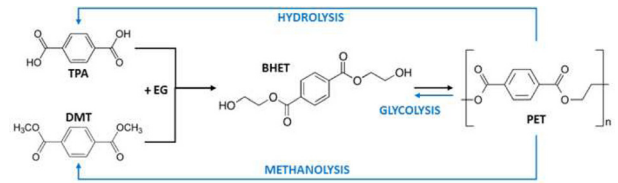


Figure 9. PET의 화학적 재활용 기술.

## 3. 저온메탄올리시스 공정을 이용한 폴리에스터 화학재생

산업통상자원부는 자원순환형 그린 섬유 생태계 육성 전략을 시행하여 2020년 11월 「섬유패션산업 한국판 뉴딜 실행전략」을 발표하였다. 하지만 지속 가능한 그린 섬유의 수요 및 중요성이 증대되고 있으나, 국내 연구개발 인프라 및 산업기반 취약한 상황이다.

이에 따라 자원 순환형 친환경섬유 소재 산업 육성을 위한 기반 조성으로 그린섬유 생태계 육성에 투자 결정하였다. 국내 섬유산업은 원자재를 수입/가공, 완제품을 수출하는 해외 의존형, 수출주도형 산업 구조인데, 정부의 생활폐기물 탈플라스틱 대책에 따른 섬유패션산업의 구조적 전환이 시급하다. 섬유제품의 물리적 수명은 향상되었으나, 유형의 변화 속도가 빨라져 섬유 폐기량은 점차 증가하는 추세로 '20년 기준, 전 세계 폐섬유 발생량은 2,500만 톤이나 전 세계적으로 발생된 섬유 폐기물의 70%는 소각, 매립되는 실정이며 사용 후 섬유는 미생물에 의한 분해가 어렵고, 소각/매립에 의한 환경오염을 유발하며 톤당 20~30만 원의 처리비용이 발생되어 관련 기업의 부담이 증가하고 있다.

이처럼 환경 보전을 위한 사람들의 관심 증대와 섬유 폐기물량의 증가 추세 및 각국의 환경 정책과 규제로 인해 재활용률의 중요성은 더욱 커질 것으로 예상되나 세계 폐섬유 재활용률은 전체 폐섬유의 1%에 불과한 미미한 수준이며 국내



폐섬유류 재활용업체는 281개이며, 재활용 폐기물량은 '15년 기준 7,000 t에서 '18년 기준 136,287 t 규모로 3년 사이 약 5만 톤 증가하고 있다. 대량 소비와 생산으로 야기된 환경문제와 자원 낭비 등을 해소하기 위해서는 에너지, 천연자원 등의 효율적인 사용과 함께 섬유 리사이클 확대가 매우 중요하며 매년 대규모로 버려지는 폐의류 및 생산 공정에서 발생하는 폐섬유 회수 뿐 아니라 폐플라스틱 등의 비섬유성 폐기물을 재활용하여 리사이클 폴리에스터 섬유의 생산 확대가 필요하다. 비섬유성 폐기물 및 합섬 제품 폐기물을 재활용해 리사이클 섬유를 생산할 수 있는데 폐페트병의 물리적 재활용을 통한 방법과 폐폴리에스터 제품의 해중합화를 통한 화학적 재활용으로 리사이클 폴리에스터 섬유를 생산할 수 있다. 특히 유색플라스틱이나 폐섬유를 재활용하기 위해서는 물리적 리사이클링과 열적 리사이클링에 한정된 기술을 확장하여 화학적 리사이클링의 연구가 필요하며 화학적으로 원료화 하는 것이 최선의 방법으로 화학적 리사이클링을 위해서는 플라스틱을 만드는 역방향의 반응이 필요하며 이때 가장 중요한 것은 공정비용이 회수 플라스틱 비용보다 저렴해야 하며 이를 위해 공정의 최적화 기술이 필요하다. 국내 화학섬유 및 화학 산업체는 상업화 수준의 폴리에스터 메탄올리시스 해중합 기술을 확보하지 못하고 있으며 최근 폐플라스틱 재활용을 위한 사업화 검토가 대기업을 중심으로 진행되어지나 해외 선진기술에 의존하여 MOU 체결이 이루어지고 있다.



Figure 10. 국내 대기기업의 친환경 사업 투자 동향.

이에 해외 선진기술에 의존하고 있는 폴리에스터 메탄올리시스 해중합 공정 국산화 기술로 폴리에스터 핵심 단량체인 DMT와 EG를 화학재생기술을 통하여 확보하여 재중합 및 방사공정에 적용하여 투명 생수병의 물리적인 리사이클 공정에만 의존하고 있는 리사이클 폴리에스터 소재에서 유색 폐플라스틱/폐섬유의 화학재생 폴리에스터의 국산화 기술의 완성이 필요하다. 이에 저온 촉매 메탄올리시스 기술을 활용한 수율 98% 이상의 DMT(단량체) 전환 원천 기술을 적용하여 에너지를 소모하지 않고도 완전한 분해를 유도할 수 있는 화학

적 반응경로 및 상온 해중합 반응 메커니즘을 활용하여 화학재생 폴리에스터 및 기능성 복합 소재를 개발하는 사업으로 현재 2개 기업 및 3개 기관이 2022년부터 2025년까지 수행 중에 있다. 저온 메탄올리시스 기술에서는 저가의 불균일계 촉매가 활용될 수 있으며, 현재 메탄올리시스 기반 해중합 반응 분야의 양대 혁신기술로 알려진 루프인터스트리와 IBM의 VolCat 반응기술의 성능을 추월할 수 있는 기술로 주목 받고 있으며 또한, 2차 교환에스터화에 의한 고부가 재생 단량체 제조가 가능한 플랫폼 기술을 보유하고 있어서, 경제성 확보뿐만 아니라 사업 다변화 추진이 가능한 다목적 핵심기술로 평가받고 있다.

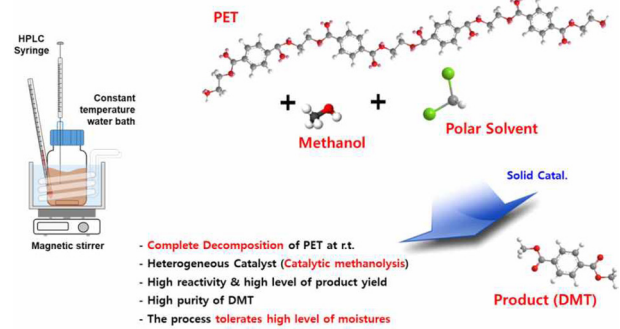
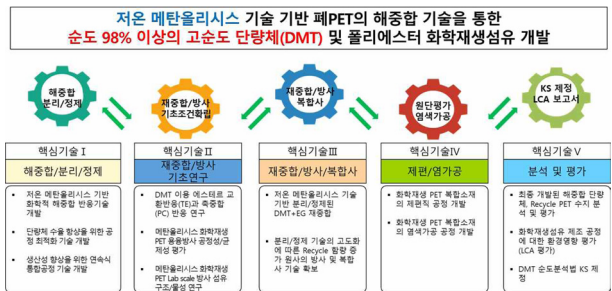


Figure 11. 저온 메탄올리시스 기반 해중합 반응의 개념도.

본 기술개발로 개발되는 친환경 리사이클 폴리에스터 소재의 경우 국내에서 발생하는 유색 및 저품질의 폐플라스틱 화학적 재활용 기술을 바탕으로 하는 소재이며, 화학적 재활용 기술은 물질 재활용 기술과 상호보완적인 장점을 가지고 있어 국내에서 발생하는 모든 무색 폐플라스틱과 유색 및 저품질 폐플라스틱의 등급을 구분하지 않고 친환경 Recycle 소재로 사용 가능할 것으로 예상되며 이를 바탕으로 우수한 품질 및 높은 원가 경쟁력 확보가 가능하여 생산량 및 판매량 증대가 가능하다.



구분	개발 내용
기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 저온 메탄올리시스 기반 혼성 에스테르 교환 반응 공정 기술 개발</li> <li>• 고순도, 고수율 해중합 단량체 DMT, EG 제조를 위한 분리정제 기술 개발</li> <li>• 해중합 단량체의 재중합 및 방사를 통한 리사이클 폴리에스터 및 복합사 개발</li> <li>• 개발 원사의 제/편직 및 염색가공 기술을 통한 고부가가치 친환경 섬유 제품화 기술</li> <li>• 해중합 단량체(DMT)의 순도 분석법 표준화 개발</li> <li>• 환경영향평가(LCA)를 실시하여 이산화탄소 배출량 저감 효과 산출</li> </ul>

#### 4. 결 론

본 고에서는 재활용 섬유 중 폴리에스터의 물리적/화학적 재활용 기술 공정에 대해 기술하였다. 미세플라스틱과 폐기물로 인한 환경오염의 주범으로 지목되어지고 있는 섬유패션산업에 필환경의 시대가 왔다. 섬유패션산업은 글로벌 탄소중립 정책에 크게 영향을 받을 것으로 보이며 MZ 세대를 중심으로 지속가능한 패션에 대한 소비자의 심리가 확산되고 있어 가치 사슬별 친환경 흐름에 대응해야 한다. 업스트림에서는 재활용 폴리에스터 섬유 시장이 크게 성장하고 있으며 바이오/생분해/비건 소재를 활용하는 패션기업 및 관련 산업 분야의 기업들이 글로벌 시장에 진출하고 있다. 이제는 기업의 생존을 위한 필수인 친환경 흐름 속에서 스트림간 전략적 협업체계를 구축하면서 적극적인 소재 개발의 국산화 및 고급화/차별화를 위한 기술개발이 필요하다. 폐플라스틱/폐섬유를 물리적으로 재활용하는 것이 아닌, 화학적 재활용 기술에 대한 정책 및 연구가 이루어지고 있으며, 화학적 재활용을 통한 고순도 원료의 회수 및 재중합을 통해 버진 폴리에스터의 물성과 동일한 리사이클 폴리에스터를 기대할 수 있으며, 전주기적으로 지속가능한 순환계를 형성할 수 있다.

국내 리사이클 섬유패션산업의 기술 수준은 일본보다 4~5년 정도 뒤쳐져 있고 기업 역량도 취약한 상황이며 폐섬유와 폐플라스틱 등 재활용 가능 제품에서 고품질의 소재 생산 관련 기술력이 부족해 물리적 재활용에 그치는 상황이다. 향후 리사이클 섬유 기술 개발력 제고 및 기업 역량 강화가 이루어지지 못할 경우 선진국에 대한 기술 종속 우려가 크며 경쟁국들의 시장 잠식이 우려되는 상황이므로 이를 위한 기업들의 기술 개발 및 기반 시설의 투자가 필요하다. 이에 폐플라스틱/폐섬유 등의 화학적 재생을 통한 재활용 기

술의 국산화 및 탄소 중립을 실현하고, 온실가스 감축 등 환경 부하를 최소화하는 동시에 미래 세대를 위한 환경친화적인 산업으로 전환할 수 있기를 기대한다.

#### 참고문헌

1. Greenblue “Chemical Recycling: Making Fiber-to-Fiber Recycling a Reality for Polyester Textiles” (2017).
2. 폴리에스터 폐자원의 화학 원료화 기술, 충남대학교 화학공학과, 조상환, Korean Chem. Eng. Res., 52(1), 17-25 (2014).
3. 순환경제로의 전환과 대응전략(플라스틱과 배터리를 중심으로) 삼일PwC경영연구원 2022. 05 4.
4. “MZ 세대를 잡아라”버려지던 쓰레기 친환경 의류로 새롭게, 산업인NEWS, 최인영, 2022.09.02.
5. 전국공동주택에서 투명 페트병 별도 분리 배출 의무화, 환경부 보도자료, 2020.12.22.
6. Angew.Chem, Int. Ed. 2020, 59,15402.
7. 미세플라스틱 대응 화공/바이오 융합 공정 기술 개발, 김용환, NEWS & INFORMATION FOR CHEMICAL ENGINEERS, Vol. 38, No. 5, 2020.