

나일론 화학적 재활용 기술



김대신

- 2017. 부경대학교 화학공학과 졸업
- 2019. 고려대학교 NBIT융합전공(석사)
- 2021-2023. 칠원플라즈마 산업기술연구원 연구원
- 2023-현재. 한국신발피혁연구원 선임연구원



김태완

- 2004. 부경대학교 화학공학과 졸업
- 2007. 부산대학교 재료공학과(석사)
- 2012. 부산대학교 재료공학과(박사)
- 2013-2015. 오사카대학교 특임연구원
- 2015-2017. 미래소재연구단 과장
- 2017-현재. 부산테크노파크 책임연구원 (센터장)



김일진

- 2010. 부산대학교 응용화학공학부 졸업
- 2013. 고려대학교 화공생명공학과(석사)
- 2023. 부산대학교 응용화학공학부(박사)
- 2010-2011. (주)효성 울산공장 생산관리팀
- 2013-2015. LG화학 기술원 중앙연구소
- 2015-현재. 한국신발피혁연구원 책임연구원



이동진

- 1992. 부산대학교 섬유공학과 졸업
- 1994. 부산대학교 섬유공학과(석사)
- 1998. 일본 동경대학교 화학생명공학과 (박사)
- 1998-2000. 부산대학교 생산기술연구소 연구원
- 2000-2005. 삼성토탈 연구소 선임연구원
- 2005-2012. 한국세라믹기술원 책임연구원
- 2012-현재. 한국신발피혁연구원 수석연구원 (단장)

1. 서론

최근 기후변화 및 코로나19 확산은 소비자들의 보건·환경에 대한 관심 증대와 함께 소비 형태에도 변화가 나타나고 있다. 유럽, 미국 등은 글로벌 패션기업을 중심으로 지속가능 중심의 친환경 섬유 사용 확대 정책을 가속화하고, 유럽, 미국 등은 플라스틱 재활용 소재 사용 의무화 규제가 강화되어 파타고니아, 겍, 나이키 등 글로벌 기업들이 지속가능한 비즈니스를 실천하기 위한 전략으로 자체적으로 리사이클 프로젝트를 수행 중이다.

특히, 파타고니아는 업사이클링 프로젝트의 일환으로 '16년부터 100% 리사이클 폴리에스터로 만든 의류도 출시되고 있다.

‘재활용 섬유’란 버려지는 섬유 폐기물(폐섬유 소재, 폐의류, 폐섬유 제품(폐어망, 페로프, 페그물 등)) 및 비섬유성 폐기물(폐페트병 등)을 수거하여 물리적·화학적 재활용을 통해 제조되는 섬유 소재(폴리에스터 섬유, 나일론 섬유, 셀룰로스 섬유 등) 및 섬유 제품(의류, 침구 제품 등)을 의미하고 추가로 섬유 폐기물을 원료로 사용해 다운사이클 제품(단열재, 내외장재, 충전재, 청소용포 등)과 업사이클 제품을 생산하거나 에너지를 추출하는 것까지 포함하는 것으로 정의된다.

페플라스틱의 발생지는 다양하지만, 그중에서도 해양에서 발생하는 페플라스틱에 대한 관심이 많아지고 있다. 해양 페플라스틱의 경우 용도 특성상 분해성이 떨어지고, 생분해성 소재를 개발하여 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 해양에서 발생하는 페플라스틱의 재활용 기술에 대한 세계적인 관심이 많아지고 있다. 해양 페플라스틱 중 많은 부분을 차지하는 것이 페어망, 페로프, 페그물이다. 이러한 해양 폐기물은 유실되는 비율이 높을 뿐만 아니라, 망가질 시 폐기하는 데에 자연적 분해 시간이 수백 년이 소요된다. 따라서 이러한 해양 폐기물 재활용 기술개발이 전 세계적으로 연구가 되고 있다. 해양 페플라스틱의 주성분은 나일론으로, 현재 페플라스틱의 재활용 기술적 측면에서 다양한 방면으로 연구가 진행되었지만, 산업에 적용 가능한 나일론 재활용 기술에 대한 발전은 미미한 편이다. 실제 나일론의 경우 리사이클 나일론의 수요는 30% 정도이지만, 실제 나일론 생산량 대비 리사이클 나일론은 1% 미만으로 조사되었다.

이에 본 고에서는 나일론의 재활용 기술 및 국내외 동향을 화학적 재활용을 중심으로 소개하고자 한다.

2. 나일론 재활용 기술

2.1. 재활용의 기술의 분류

재활용은 크게 4단계로 분류하고 있는데, 1차 재활용 공정은 제조자가 제조단계에서 물질을 재사용하는 것을 말하고, 2차 재활용은 물리적 재활용(MR), 3차 재활용은 화학적 재활용(CR)을 말하며, 4차 재활용은 에너지 회수(energy recovery) 하는 공정으로 구분하여 나누고 있다.

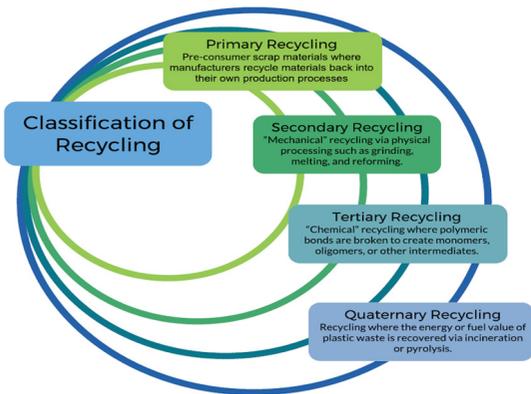


Figure 1. 재활용의 4단계 분류 체계. 출처: Chemical Recycling, Greenblue

2차 재활용인 물리적 재활용은 페플라스틱(페페트병, 페필름 등)과 폐합성 제품(페어망, 페로프, 페그물 등)을 물리적으로 분쇄하거나 찢어서 펠릿으로 만들어 폴리에스터 및 나일론 섬유, 부직포, 단열재 등 다운사이클링(down-cycling) 제품 등을 생산하는 기술이며, 폐직물을 찢어서 섬유를 회수하는 것도 물리적 재활용이라고 할 수 있다.

3차 재활용인 화학적 재활용은 폐기물을 화학적 방법으로 처리하여 섬유를 생산하는 기술이다.



Figure 2. 물리적 재활용과 화학적 재활용. 제공: 한화솔루션 (2020)

2.2. 나일론의 물리적 재활용 기술

나일론의 물리적 재활용은 분리수거 된 나일론을 분류, 분쇄하고, 세척/건조를 통해 원료화한 후 용융/성형을 통해 가공하여 제품을 생산하는 것 기술이다.

국내에서는 효성티앤씨에서 섬유 생산 시 발생하는 부산물을 기계적 재활용 방법을 통해 친환경 나일론을 제조하고 있다.

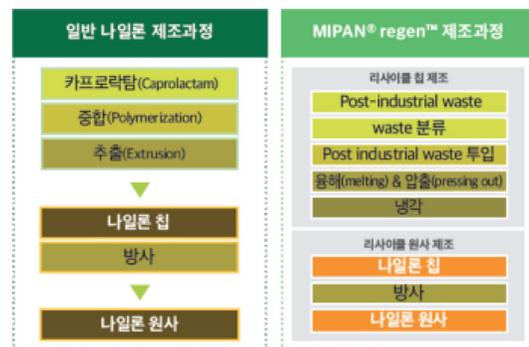


Figure 3. 효성티앤씨의 나일론 재활용 제조과정.

최근 벨기에 섬유기업 Beaulieu International Group은 나일론 원사 생산 시 발생하는 소비 전(pre-consumer) 폐기물로 나일론 섬유를 제조하고 있다.

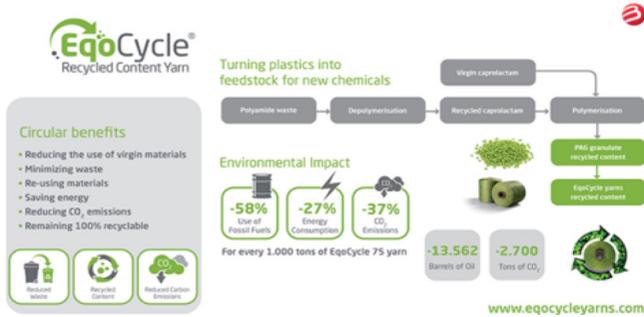


Figure 4. eqocycle 시스템 모식도, 제공: Beaulieu International Group

2.3. 나일론의 화학적 재활용 기술

나일론의 3차 재활용이라고도 불리는 화학적 재활용 기술은 페나일론에 화학적 변화를 일으켜 다른 물질로 전환하여 재활용하는 것으로, 나일론의 고분자 구조를 분해하여 화학 공정에서 추출되는 카프로락탐과 동일한 카프로락탐을 생산하는 기술이다.

나일론의 화학 재생 기술은 글리콜리시스, 하이드롤리시스 등의 방법으로 분류할 수 있다. 나일론의 화학 재생은 폴리에스터만큼 연구가 활발하지 않은 상황이며, 폐어망, 폐어구 등의 재활용을 통한 해양 보호 관점에서 연구가 수행되고 있다. 화학적 재활용 방법에 따라 다른 종류의 부산물이 발생하고 이에 따른 처리 방법의 연구가 진행되어야 하며 화학적 재활용은 크게 아래와 같이 분류할 수 있다.

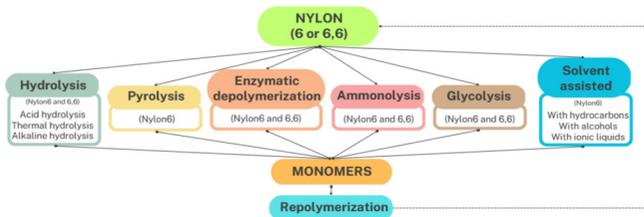


Figure 5. 나일론의 화학적 재활용 모식도, 출처: Chem, Eng, Trans. 2023, 100, 727-732

Table 1. 나일론 해중합법의 종류 및 특징

해중합법	특징
Hydrolysis (가수분해법)	<ul style="list-style-type: none"> - 물을 사용하여 고온, 고압 하에서 카프로락탐 모노머로 해중합 하는 방법임 - 폴리에스터와 마찬가지로 다른 화학재생에 비해 비교적 반응시간이 길고 정제가 어려움 - 해중합 시 사용하는 물의 pH에 따라 산, 염기, 중성 해중합으로 나뉨 - 산 해중합에서는 촉매 물질로 황산, 질산, 염산 등이 사용되고 ortho-phosphoric acid와 boric acid 같은 무기산이 촉매로 사용되기도 하는데 이때 순수한 카프로락탐을 얻기 위해서 정제과정을 거쳐야 함 - 염기 해중합에는 수산화칼륨과 수산화나트륨이 촉매로 사용됨
Pyrolysis (열분해법)	<ul style="list-style-type: none"> - 물 사용 없이 불활성 분위기에서 열을 사용하려 분해하는 방법임 - 일반적인 메카니즘은 분자 내 고리화로 300 °C 이상에서 아미드기의 탈 양성자화를 촉진하여 카프로락탐을 형성함 - 염기성 촉매를 사용하면 반응을 가속할 수 있으며, 이때 알칼리 및 알칼리 토류 수산화물과 산화물, 나트륨 및 칼륨 카르복실산염, 탄산칼륨 등이 사용됨 - 가수분해법과 비교하여 진공상태에서 진행되기 때문에 카프로락탐을 쉽게 회수할 수 있다는 장점이 있지만 상업적으로 적용하기에는 제한됨
Enzymatic depolymerization (효소해중합)	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 사용촉매가아닌 나일론6를 분해하는 효소를 이용한 해중합법 - 중합체 사슬의 아미드 결합을 효소적으로 분해하며, 이로인해 올리고머가 형성됨 - 이러한 올리고머는 다시 모노머로 분해되거나 새로운 나일론을 제조하는데에 사용됨 - 이 방법은 유해촉매를 사용하는 방법보다 지속 가능한 대안이 될 가능성이 있지만 공정최적화 및 양산화를 실행하기 위해서는 더 많은 연구가 필요함
Ammonolysis (가아모니아 분해법)	<ul style="list-style-type: none"> - 고온(280~330 °C)에서 나일론의 고분자 사슬이 아미드화 되고 암모니아와 반응하여 분해하는 방법 - 변환되지 않은 올리고머가 재순환되면 전환율이 거의 100%라는 장점이 있음 - 많은 연구가 진행되지 않은 분야이지만 DSM에서 특허를 보유하고 있으며 지속적인 연구가 진행되고 있음

Table 1. Continued

해중합법	특징
Glycolysis (당분해법)	<ul style="list-style-type: none"> EG가 나일론의 아마이드 결합을 분해하여 해중합 하는 방법임 EDA(Ethylenediamine)의 추가 사용 유무에 따라 글리콜리시스 혹은 아미노글리콜리시스라고 나타냄 EG와 EDA를 촉매로 사용하여 해중합하게 되면 나일론의 종류에 따라 HMDA (Hexamethylene diamine) 혹은 카프로락탐으로 분해됨 이 때 반응을 마친 EG는 다시 회수가 가능하므로 재활용을 통한 연속공정이 가능함 하이드로탈사이트는 비교적 낮은 온도에서 반응하고 회수가 쉽고 최종결과물의 순도가 높다는 특징이 있음 아직 수율이 낮고 일부 부산물이 생성되기 때문에 산업적으로 적용하기에는 제한이 있음
Solvent-assisted depolymerization (용매 보조 해중합법)	<ul style="list-style-type: none"> 초임계, 아임계 또는 고비점 용매를 사용하여 해중합하는 방법 용매 분자가 나일론의 구조를 파괴하여 고온의 혼합물을 만들고, 아마이드기의 분자 내 고리화를 촉진하여 카프로락탐의 형성을 촉진함 현재는 실험실 규모로 연구가 진행되고 있음 물에 소량의 탄화수소를 첨가하여 진행되는 방법, 알콜류를 사용하는 방법, 이온성 액체를 사용하는 방법 등이 보고되고 있음

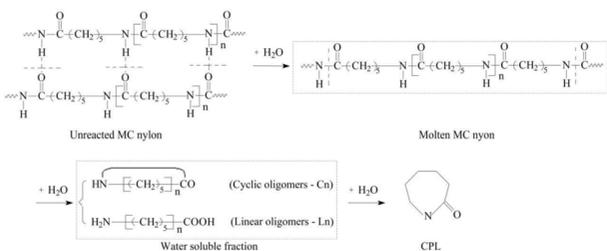


Figure 6. Hydrolysis of nylon.
출처: Polym. Degrad. 2017, 136, 112-120

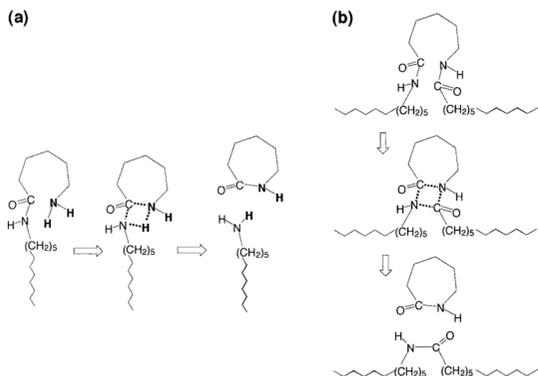


Figure 7. Pyrolysis of nylon.
출처: Polym. Degrad. 2000, 67, 21-33

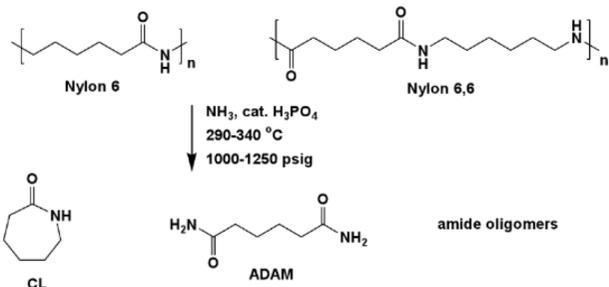


Figure 8. Ammonolysis of nylon.
출처: Allgeier, Koch and Sengupta, Catalysis of Organic Reactions, Taylor & Francis, 2005, 37-43

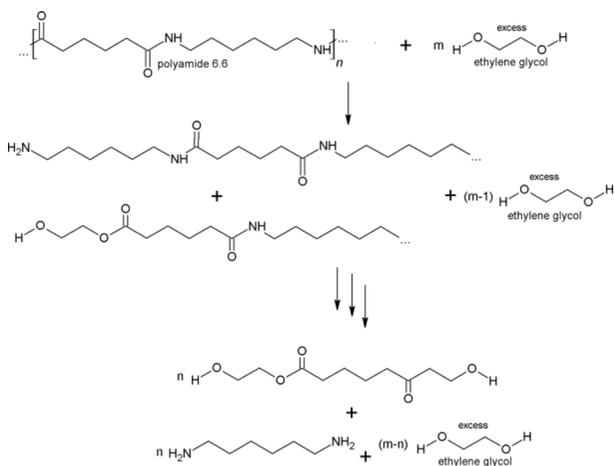


Figure 9. Glycolysis of nylon.
출처: Polym. Degrad. 2006, 91, 1545-1555

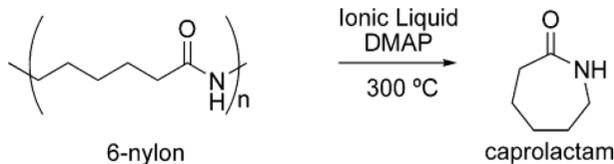


Figure 10. Solvent-assisted depolymerization of nylon.
출처: Org. Lett. 2007, 9, 2553-2535

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 지속가능한 순환계를 형성할 수 있다.

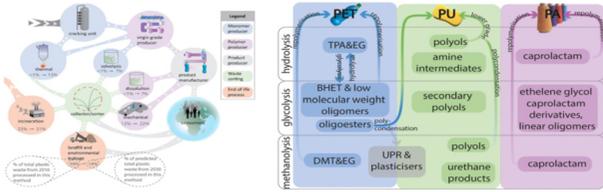


Figure 11. 페플라스틱의 화학재생 방법에 따른 분류. 출처: Angew.Chem. Int. Ed. 2020, 59,15402

3. 나일론 재활용 기술의 동향

3.1. 국내외 연구동향

우리나라는 「생활폐기물 脫플라스틱 대책」추진에 따른 섬유패션산업의 구조적 전환 필요성이 증대됨에 따라 환경부는 2020년 12월 24일 제120차 국정현안 조정점검 회의에서 「생활폐기물 脫플라스틱 대책」을 확정 발표하였다. PET, PP 등 플라스틱 재생원료 의무 사용 제도를 '21년부터 단계적으로 시행하여 '30년 재생 원료 사용 비율을 30%까지 확대를 목표로 설정하였으며, 환경부는 투명 페트병 분리배출 의무화 정책('20.12)으로, '22년까지 필라멘트 용도 고품질 페트 재활용률 10만 톤 규모로 확대, 완전 수입 대체 계획을 발표하였다.

* 포장재는 생산 단계부터 재활용이 용이한 재질/구조 사용 권고, 음료·생수병('19.12월 적용) 외 품목(주류 등)으로 무색 의무화 확대('21년), 투명 페트병 등은 별도 분리배출, 고품질화

또한, 페트 등 섬유 추출을 위해 수입하는 폐섬유 수입(1.8만 톤)을 '22년부터 완전 금지하고 국내 폐페트 또는 폐섬유로 대체하는 방식으로 추진 중에 있다.

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

이에 따라 자원 순환형 친환경섬유 소재산업 육성을 위한 기반 조성으로 그린섬유 생태계 육성에 투자 결정하였다.

유럽의 EC는 폐어망을 적극적으로 수거 후 재활용하고 있는데, '12년부터 '15년까지 어업용 쓰레기를 수집, 분류, 재활용하는 'EUfir 시스템' 프로그램을 구축하였다.

'08년 설립된 노르웨이의 농업, 어업 폐기물 처리업체인 노피르(Nofir)사는 어망 분리 수집시설과 나일론 재활용 공장이

Table 2. 섬유패션산업의 비전 및 주요 추진 전략

비전	그린·디지털 혁신을 통한 섬유패션산업 선도국가 실현
1. 그린	① 친환경섬유 소재 개발 ② 염색업종 그린산업 전환 ③ 자원순환형 그린섬유 생태계 육성 ④ 친환경·디지털분야 전문인력 양성
2. 디지털	① 공정별 디지털 제조기술 개발 및 실증 ② 빅데이터 플랫폼 구축 및 활용 ③ K-패션 디지털 생태계 조성 ④ 디지털 비즈니스 모델 창출
3. 안전	① K-방역산업 생태계 육성 ② 안전보호 소재산업 육성 ③ 부직포 소재산업 고도화 ④ 첨단 산업소재 자립화
4. 연대와 협력	① 지역거점 봉제 혁신공정 구축 ② 섬유스트립간 기술협력 강화 ③ 수요-공급기업간 연대협력 기반조성 ④ 의류생산 리쇼어링 기반조성

* 출처 : 산업부, 제 34회 섬유의 날 기념식 보도자료, 2020.11.11

연계하여 어선 어업에서 발생하는 폐어망 수거, 재활용시스템을 유럽에 구축하였다.

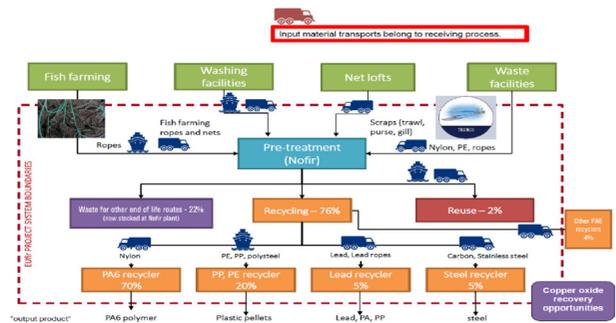


Figure 12. EUfir 시스템의 폐어망 수거, 처리 프로세스. 출처: Life Cycle Assessment of EUfir system (2016)

현재까지 유럽 9개국에 EUfir 시스템을 구축하였으며, '17년 한 해 동안 어망 7,428톤을 재활용하였는데, 이 중 나일론(PA6)이 76.2%에 달했으며, 그밖에 PP와 PE가 각각 12.6%, 8.7% 수준이었다.

미국은 민관 공동으로 '친에너지어업(fishing for energy)' 프

로젝트로 수거한 페어망을 연료로 사용하여 에너지를 회수하여 연안 지역주민에 공급하는 프로젝트를 추진하고 있다. '08년부터 'Fishing For Energy'를 실시하여 페어구가 바다로 유입되지 않도록 예방하면서 동시에 재활용하고 있으며, 이 사업은 '해양쓰레기 프로그램(Marine Debris Program)'을 운영하는 NOAA(해양대기청)과 NFWF(국립 어류 야생동물 기금), 금속 재활용회사인 슈니처스틸(Schnitzer Steel Industries), 폐기물 및 에너지 재활용 회사인 코반타(Covanta)가 협력하는 민관 협력 방식으로 추진 중에 있다.

현재, 13개 주 56개 수거함(collection bins)을 설치하고 연간 4백 만 파운드의 어구를 수거하여 금속 재활용업체인 슈니처스틸사가 금속 자재를 분리하고, 이후 코반타사는 재활용이 불가능한 나머지 자재를 지역 에너지원으로 사용하는 사업을 추진 중에 있다.

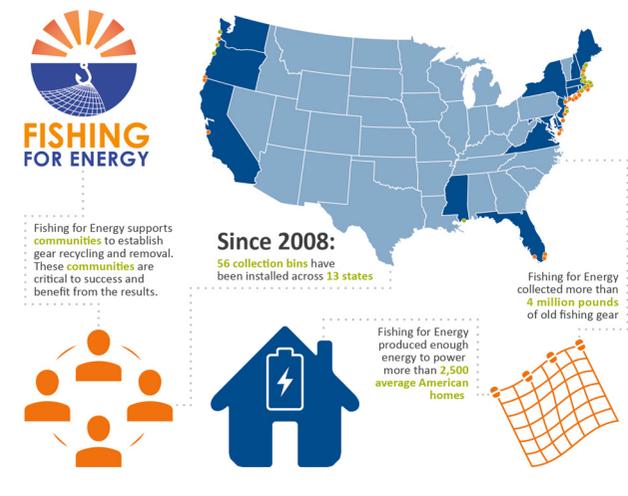


Figure 13. Fishing for Energy 프로젝트.
제공: National Fish and Wildlife Foundation 2020 Annual Report

세계 2위 해양쓰레기 배출국인 인도네시아는 '17년 3월 세계해양정상회의(World Oceans Summit)에서 해양조정부(Coordinating Ministry for Maritime Affairs) 장관이 "25년까지 바다로 버려지는 플라스틱 쓰레기 배출량을 70% 이상 감축" 하겠다는 계획을 발표하였고, 인도네시아 해양조정부 차관은 공공사업부(Ministry of Public Works and Housing)와 함께 '플라스틱 도로' 건설 계획을 '17년 발표한 후, 그해 7월 말 발리에서 시범사업을 실시하고 있다.

아스팔트에 플라스틱 쓰레기를 혼합하면 안정성(stability),

내구성(resistance)이 강화되기 때문에, 도로의 유지보수비의 절감도 가능하며 플라스틱 쓰레기가 '19년 925만 톤 발생할 것으로 예상, 이를 사용하여 19만 km의 도로를 포장할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

세계 최대의 섬유제품 생산기지로 나일론 섬유의 활용도가 매우 높은 편인 중국에서는 페나일론 섬유를 재활용한 나일론 컴파운드 설비공정을 도입했으며, 중국 매체 인민망에 따르면 허난성 핑딩산시 나일론 신소재 산업단지에서 나일론 관련 60.2억 위안 규모의 프로젝트를 착공했고, 이와 관련하여 중국의 국영기업 China Pingmei Shenma Group에서 발표한 프로젝트는 연간 30만 톤에 이르는 나일론 부산물 재활용 공장을 포함하고 있다.

나일론의 화학적 재활용 연구도 과거부터 현재까지 전 세계적으로 진행되고 있다.

3.2. 국내외 주요 기업 현황

효성의 재활용 섬유 브랜드, 리젠(regen)은 페어망에서 업사이클 나일론 원사를 생산하는 기술을 개발하여 네덜란드 컨트롤 유니온(control union) 사의 글로벌 재활용 기준 인증을 획득하였다. 효성티앤씨는 세계 최초로 섬유 생산 시에 발생하는 부산물을 재활용해 만든 친환경 섬유인 나일론 고강력사 브랜드 '마이판 리젠 로빅'을 출시하여 1톤 당 955kg의 석유자원 절약 효과가 있으며, 일반 나일론 제품 대비 27% 자원 절약 효과가 있다.

글로벌 섬유패션 기업들도 산업 폐기물, 어망 등을 재활용한 나일론 섬유를 적용하여 다양한 제품을 선보이고 있다. H&M은 앞으로 10년 이내에 산업 폐기물로 만든 나일론 등 재활용 소재만 사용하겠다고 발표하였고, 2020년 노스페이스에서는 '자원순환의 날(9월 6일)'을 맞아 폴리에스터 안감을 비롯해 나일론 걸감과 인공 충전재에 이르기까지 재활용 소재를 적용한 재킷을 판매하고 있다.

스페인 의류 브랜드 에코알프(ecoalf)는 '13년부터 버려진 그물망을 직물로 제작해 의류 제작 중이며, 미국 섬유기업 Unifi는 중국 Highsun Holding Group(이하 HSCC)와 협업하여 리사이클 나일론 브랜드 REPVEVE®를 아시아 시장에 공급할 예정이다(HSCC를 통해 주로 공급될 제품은 REPVEVE® 나일론 장섬유와 단섬유임).

Nylstar는 Meryl® 원사 생산 시 GRS(Global Recycled Standard) 인증을 받은 INVISTA 리사이클 나일론 6.6 폴리머를 사용하기로 하였고, 신규 리사이클 Meryl® 원사는 50% 이



Figure 14. Unifi의 REPREVE®.

상의 리사이클 원료가 사용되지만 기존 Meryl®의 명성에 걸맞게 품질은 매우 우수할 것으로 기대되고 있다. 동 제품은 도프 염색한 색상을 띠며, 솔벤트와 실리콘이 사용되지 않으며, 미세 플라스틱으로 인한 오염을 발생하지 않고, 자연스러운 신축성을 가진 것이 특징이다. 에어백과 카펫용 섬유가 생산되고 있는 캐나다 Kingston 공장에서 포스트 인터스트리얼 나일론 6.6 소재를 소싱하고 있으며, 자사의 독자적인 공정을 통해 포스트 인터스트리얼 섬유 웨이스트를 펠릿 형태로 만들고 있다.

이태리 원사 제조기업 아쿠아필(aquafil)에서 재생나일론인 에코닐(econyl)을 개발하였다. 해중합을 통해 원료인 카프로락탐까지 되돌려 불순물을 완전히 제거해 버진 소재와 동등한 품질로 재사용 가능한 ‘순환 재활용시스템’을 구축하고, Econyl 지속가능 원사는 어망, 직물 스크랩, 바닥용 카펫, 산업용 플라스틱을 비롯하여 폐기물로 만들어져, Econyl 원재료 10,000톤 당 원유 70,000톤을 줄이고, 57,100톤 상당의 이산화탄소 배출량을 절감할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 나일론 및 나일론의 원료인 카프로락탐의 세계 최대 규모 딜러인 Itochu에서는 Econyl과의 파트너십을 통해 나일론 폐기물 회수부터 제품 개발, 생산, 판매까지 함께 진행할 예정이다.

프라다는 ‘리나일론 프로젝트’를 통해 아쿠아필과 파트너십을 맺고 ‘22년까지 모든 나일론 백을 화학재생 나일론 섬유로 만들 계획을 발표하였다.

분해되지 않는 플라스틱으로 인한 환경문제를 해결하기 위해 전 세계 30여 개 글로벌 기업*은 해양 플라스틱 감소 및 제거를 위한 솔루션을 증진하는 ‘플라스틱 쓰레기 제거 연합

(Alliance to End Plastic Waste, AEPW)’을 결성하여 5년간 15억 불 투자를 목표로 하며, 플라스틱 쓰레기 최소화를 위한 새로운 솔루션 개발은 물론, 폐플라스틱 재활용을 통해 순환경제에 기여하는 솔루션 개발을 가속화하고 있다.

* BASF, DSM, Dow, Braskem, ExxonMobil, Total, Shell, Mitsubishi Chemical Holdings, Mitsui Chemicals, Procter&Gamble 등

Table 3. 국내 대표기업의 나일론 재활용 섬유 동향

기업명	비고
넷스파	<ul style="list-style-type: none"> • 폐어망을 리사이클 나일론으로 재활용하는 공정 개발에 나서며 파일럿 플랜트를 부산에 설치할 계획(‘21.01) • 국내 화학섬유업계와 리사이클링 플랜트를 거친 폐어망의 원료 품질 확보와 리사이클 나일론 샘플 방사 시작 단계(‘21.01)
효성티앤씨	<ul style="list-style-type: none"> • Pre-consumer waste를 재활용하여 리사이클 나일론 원사 제작(MIPAN regen)
카프로 (舊, 한국카프로락탐)	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 유일의 카프로락탐 제조업체로 환경친화적인 원료 소싱에 관심
태광산업	<ul style="list-style-type: none"> • 나일론 원사 제조 업체로 공정 중 발생한 스크랩을 재활용하여 나일론 생산 (ACEPORA®-ECO NYLON)
코오롱인더스트리 효성화학 제이케이머티리얼즈	<ul style="list-style-type: none"> • 나일론 필름 제조 시 발생한 스크랩을 재활용

4. 화학재생그린섬유 개발 사업

4.1. 사업개요

산업통상자원부는 2022년부터 2025년까지 난분리 폐섬유와 복합재질의 유색 플라스틱을 원료로 한 화학재생 그린섬유 개발로 섬유산업 순환경제 구축을 목적으로 화학재생그린섬유 개발사업을 추진 중에 있다.

세부 추진 사업은 폴리에스터 및 나일론계 폐섬유, 폐플라스틱 해중합 기술개발, 해중합 물질 분리, 정제를 통한 단량체 회수기술 개발 및 검증, 폴리에스터, 나일론 재중합 및 방사기술 개발 및 검증, 화학재생 테스트베드 구축, 운영을 통한 환경영향평가(실증) 등으로 3개의 기술개발과 3개의 기반구축으로 구성되어 있다.

Table 4. 주요 추진과제

과제명	하이드롤리시스 복합기술 기반 폴리에스터 화학재생 섬유 개발 (TRL : [시작] 4단계 ~ [종료] 7단계)
개념 및 정의	

- 물질재생이 불가능한 난분리 유색 폴리에스터 폐섬유와 폐플라스틱을 하이드롤리시스 복합기술을 통한 폴리에스터 화학재생섬유 개발
 - 폐섬유와 폐플라스틱 등을 전처리 후 해중합하여 TPA, EG 등 핵심 단량체를 분리/정제하고, 이를 재중합, 방사하여 폴리에스터 화학재생섬유를 개발
 - 개발기술의 생애주기에 대한 전과정평가(LCA) 수행으로 자원순환 기술 상용화 근거 마련
- * 본 사업의 폴리에스터 화학재생 LCA에 활용할 기초 LCI(Life Cycle Inventory) 데이터는 별도 구축 테스트베드를 통해 산출한 화학재생 공정(Flake-to-Resin)의 투입/배출 정량적 데이터를 활용

과제명	메탄올리시스 기술 기반 폴리에스터 화학재생섬유 개발 (TRL : [시작] 4단계 ~ [종료] 7단계)
개념 및 정의	

- 물리·화학적 재활용이 어려운 유색 폐폴리에스터 섬유 및 폐플라스틱을 메탄올리시스 기반 해중합 및 불순물 정제를 통해 폴리에스터계 재생섬유 개발
 - 메탄올리시스 기반 혼성 에스테르 교환반응(hybrid transesterification)을 통해 폐폴리에스터로부터 해중합 제품을 제조한 후 분리·정제에 의해 단량체를 제조하고, 재중합-방사-섬유화를 통해 화학재생 폴리에스터 섬유 제조 기술개발
 - 개발된 기술에 대한 생애주기에 대한 전과정평가(LCA) 수행으로 자원순환기술 상용화 근거 마련
- * 본 사업의 폴리에스터 화학재생 LCA에 활용할 기초 LCI(Life Cycle Inventory) 데이터는 별도 구축 테스트베드를 통해 산출한 화학재생 공정(Flake-to-Resin)의 투입/배출 정량적 데이터를 활용

과제명	하이드롤리시스 기술 기반 나일론 화학재생섬유 개발 (TRL : [시작] 4단계 ~ [종료] 7단계)
개념 및 정의	

- 나일론계 폐섬유(어망, 어구 등)와 복합재질 폐플라스틱을 하이드롤리시스 기술로 화학재생한 나일론 섬유 개발
 - 폐섬유를 전처리 후 해중합하여 카프로락탐 등 핵심 단량체를 분리/정제하고, 중합, 방사하는 기술을 연구하여 화학재생 나일론 섬유를 개발하고, LCI 데이터 확보와 생애주기 동안의 전과정평가(LCA)를 포함
- * 본 사업의 나일론 화학재생 LCA에 활용할 기초 LCI(Life Cycle Inventory) 데이터는 별도 구축 테스트베드를 통해 산출한 화학재생 공정(Flake-to-Resin)의 투입/배출 정량적 데이터를 활용

Table 4. Continued

과제명	하이드롤리시스 복합기술 기반 해중합 폴리에스터 섬유 실증 테스트베드 구축 2022-화학재생-기반-지정-01
개념 및 정의	

- 난분리 유색 폴리에스터계 폐기물의 하이드롤리시스 복합기술 기반 해중합 테스트베드 설계 및 구축을 통한 폴리에스터 화학재생 섬유 실증 기반 확보
 - * 본 기반구축 사업은 연구개발 사업과 연계하여 실증 지원 필수
 - 하이드롤리시스 복합기술 기반 폴리에스터 해중합 테스트베드(전처리, 해중합, 분리, 정제 등) 설계 및 구축
 - 화학재생 TPA, EG 단량체 제조, 성능검증을 위한 재생 단량체 기반의 폴리에스터 중합, 방사 공정 적용 테스트
 - 화학재생 폴리에스터 섬유 공정 환경 데이터 수집장치 구축
 - 화학재생 폴리에스터 섬유 공정 이산화탄소 배출량 모니터링 시스템 구축

과제명	하이드롤리시스 해중합 나일론 섬유 실증 테스트베드 구축 2022-화학재생-기반-지정-03
개념 및 정의	

- 난분리 유색 나일론6계 폐기물의 하이드롤리시스 기반 해중합 테스트베드 설계 및 구축을 통한 나일론 화학재생 섬유 실증 기반 확보
 - * 본 기반구축 사업은 연구개발 사업과 연계하여 실증 지원 필수
 - 하이드롤리시스 기반 나일론6 해중합 테스트베드(전처리, 해중합, 분리, 정제 등) 설계 및 구축
 - 하이드롤리시스 해중합 카프로락탐 단량체 제조와 화학재생 단량체 검증을 위한 재생 카프로락탐 기반의 나일론 중합 및 방사 공정 테스트
 - 화학재생 나일론6 섬유 공정 환경 데이터 수집장치 구축
 - 화학재생 나일론6 섬유 공정 이산화탄소 배출량 모니터링 시스템 구축

4.2. 하이드롤리시스 해중합 공정을 이용한 나일론 화학재생

하이드롤리시스 해중합 공정을 이용한 나일론 화학재생은 폐어망을 활용하여 나일론을 화학적으로 재생하고 이를 활용한 섬유 제품을 개발 및 나일론 해중합 공정 테스트베드를 구축 하는 사업으로 현재 9개 기관 및 기업이 2022년부터 2025년까지 수행 중에 있다.

본 사업은 폐어망의 전처리에서 해중합 공정 개발, 재활용 섬유의 활용을 위한 제품 기술개발로 구성되어 있다. 또한 나일론 해중합 공정을 위한 실증 테스트베드를 구축하여 전과정

환경영향평가를 통하여 이산화탄소 저감 30%를 목표로 하고 있다.



구분	개발 내용
기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 난분리 나일론 폐기물의 전처리 기술 개발 • 난분리 유색 나일론 폐기물의 하이드롤리시스 해중합 공정기술 개발 • 해중합 단량체(카프로락탐)의 분리, 정제 기술개발과 요구순도 및 수율 확보 • 해중합 단량체의 재증합 및 방사를 통한 사중별 원사 제조 • 구축 테스트베드를 이용한 환경영향평가(LCA)를 실시하여 이산화탄소 배출량 저감 효과 산출 • 나일론6 화학재생 섬유를 이용한 섬유패션산업 적용 실증 추진 <ul style="list-style-type: none"> - 화학재생 그린섬유소재 탄소라벨링(한국, 영국 등) 인증 - 국내의 수요처를 대상으로 제품 적용 테스트
기반 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 하이드롤리시스 기반의 화학재생 공정을 통해 핵심 단량체를 확보하고, 재증합, 방사하여 나일론 섬유를 제조하는 테스트베드 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 테스트베드를 이용하여 섬유 제조가 가능한 순도의 화학재생 단량체(카프로락탐) 획득 기술 확보 및 최적화 - 기존 설비를 이용한 하이드롤리시스 기반 화학재생 단량체의 재증합과 방사공정 최적화 테스트 - 하이드롤리시스 기반의 화학재생 나일론6 제조 LCI 데이터 확보 및 DB 구축 - 하이드롤리시스 기반의 나일론6 화학재생 섬유의 LCA 평가 시스템 구축 - 테스트베드를 이용한 환경영향평가를 실시하여 이산화탄소 배출량 저감 효과 산출

5. 결론

본 고에서는 재활용 섬유 중 나일론의 화학적 재활용 국내의 동향에 대해 기술하였다. 국제적으로 산업 부산물인 페나

일론을 단순히 물리적으로 재활용하는 것이 아닌, 사용 후 버려지는 폐섬유, 폐플라스틱으로부터 페나일론을 재활용하기 위한 화학적 재활용 기술에 대한 정책 및 연구가 이루어지고 있으며, 화학적 재활용을 통한 고순도 원료의 회수 및 재증합을 통해 기존의 나일론 물성과 동일한 재활용나일론을 기대할 수 있으며, 전주기적으로 지속가능한 순환계를 형성할 수 있다. 아직까지는 수입 나일론 대비 재활용나일론의 가격 경쟁력은 현저히 떨어지는 것이 현실이다. 재활용 원료의 품질 향상을 위한 연구와 더불어 경제성을 고려한 연구가 병행이 필수적이다.

유럽, 미국, 인도네시아, 중국의 사례에서 살펴보았듯, 선진 국가들은 해양쓰레기들을 수거하고, 연료화/재활용 시스템을 구축 또는 추진 중에 있다. 우리나라도 기업에게 일방적인 재활용플라스틱 사용의 의무만 부여할 것이 아닌, 정부 사업 투자로 기업 이익을 도출하여, 재활용 플라스틱 소재의 자발적 사용을 야기할 수 있는 체계를 구축해야 한다.

현재, 진행되는 정부 사업인 나일론 해중합 시스템 구축으로 소재 재활용 기술 향상, 자원 절약, 대체 제품 서비스 소재 개발, 불가피한 부산물로 부터의 가치 창출 등과 같은 혁신이 가능하며, 기업에게 새로운 경쟁력을 확보하는 기회를 제공할 것으로 기대되며, 폐플라스틱 재활용 산업 성장을 통한 탄소 중립 실현으로 인한 전략산업 기술 주도권 확보 및 국가 경쟁력 상승효과를 가져올 수 있을 것으로 예상된다.

더불어 폐어망과 같은 폐기물의 화학적 재생을 통한 재활용 기술 확보 및 탄소 중립을 실현하고, 온실가스 의무 감축 국가로서, 폐플라스틱을 자원의 대상으로 보고, 탄소세를 부담하는 사업이 아닌 탄소배출권을 판매할 수 있는 사업으로 인식을 전환할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

1. Greenblue “Chemical Recycling: Making Fiber-to-Fiber Recycling a Reality for Polyester Textiles” (2017).
2. Giulia Tonsi et al., Nylon Recycling Processes: a Brief Overview, *Chem, Eng. Trans.*, 2023, 100, 727-732.
3. Wei Wang et al., Hydrolysis of waste monomer casting nylon catalyzed by solid acids, *Polym. Degrad.*, 2017, 136, 112-120.
4. R.S. Lehrle, I.W. Parsons and M. Rollinson, Thermal degradation mechanisms of Nylon 6 deduced from kinetic

- studies by pyrolysis-g.c., *Polym. Degrad.*, 2000, 67, 21-33.
5. Allgeier, Koch and Sengupta, Catalysis of Organic Reactions, *Taylor & Francis*, 2005, 37-43.
 6. Kap Jin Kim et al., Mechanism of glycolysis of nylon 6,6 and its model compound by ethylene glycol, *Polym. Degrad.*, 2006, 91, 1545-1555.
 8. Aishwarya Kulkarni and Harshini Dasari, Current Status of Methods Used In Degradation of Polymers: A Review, *Org. Lett.*, 2007, 9, 2553-2535.
 9. Ina Vollmer et al., Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2020, 59, 15402.
 10. 산업통산자원부, 제 34회 섬유의 날 기념식 보도자료, (2020. 11. 11.).
 11. Life Cycle Engineering “Life Cycle Assessment of EUfir system” (2016).
 12. National Fish and Wildlife Foundation 2020 Annual Report.