특집

폐플레이크를 이용한 리사이클 폴리에스터 기능성 복합사 소재 개발

김은경

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

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

1. 서 론

플라스틱 생산은 지난 반세기 동안 무려 25배나 늘었으며 현재 기하급수적으로 생산량이 증가하는 추세로 매년 수 백만 톤에서 수 천만 톤의 폐플라스틱이 바다로 유입되고 있으며 바다 동물의 몸속에서 발견되고 있다. 이에 전 세계적으로 이를 극복하고 대체할 녹색성장의 가치 창출 개발이 필연적으로 요구되고 있는 상황이며 생산단계부터 재활용을 고려한 제품 설계와 회수와 재활용에 적극적으로 검토가 필요하며 전 세계적으로 자원 순환형 사회를 만드는 것이 의무화되고 있다.

Figure 1. 폐플라스틱의 해양 오염 사례.

친환경과 재활용을 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 때문이다.

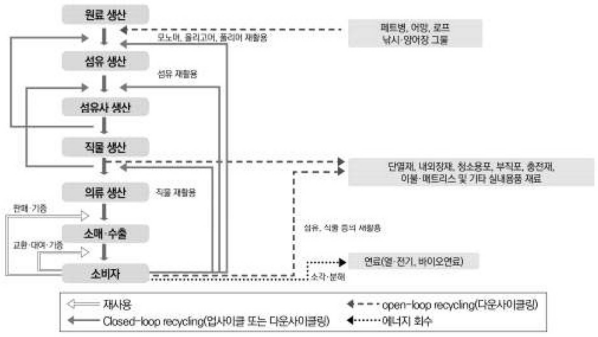
전 세계적으로 널리 사용되는 섬유인 폴리에스터의 2020년 생산량은 코로나19의 영향으로 전년대비 1% 감소한 5,710만 톤에 그쳤으나, 동 기간 리사이클 폴리에스터 섬유의 생산량은 840만 톤으로 전년대비 6.3% 증가했으며 시장 점유율은 전체 폴리에스터 섬유의 14.7%를 차지하고 있다. 대부분의 리사이클 폴리에스터는 주로 폐 PET 병을 사용한 물리적 리사이클 방식이 가장 널리 적용되고 있는데, 이는 전체 리사이클 폴리에스터의 99%를 차지하고 있으며 이 외에도 해양폐기물, 폴리에스터 폐직물과 같은 소비 후(post-consumer) 플라스틱이나 직물 스크랩과 같은 소비 전(pre-consumer) 가공 잔류물로도 리사이클 폴리에스터가 만들어지고 있다[1].

최근 글로벌 브랜드 내 리사이클 소재는 스토리텔링 중심의 밸류업을 위한 리사이클 폴리에스터 사용이 확대되는 추세로 리사이클 폴리에스터 마켓은 버려진 페트병을 중심으로 의류, 신발, 가구용, 자동차 등 다양한 용도에 사용 중이며 아디다스, GAP, H&M, Target 등 주요 브랜드의 경우 2025년까지 리사이클 폴리에스터 100% 사용 전환을 발표하였다[2]. 리사이클 소재가 적용된 제품의 잇따른 출시가 이어짐에 따라 수요가 크게 증가할 것으로 예상되므로 차별화된 리사이클 폴리에스터 소재 개발을 통한 가격 경쟁력 및 기술 경쟁력 확보가 필요하다. 이에 리사이클 폴리에스터와 차별화된 감성과 기능성을 가진 리사이클 폴리에스터 복합사 소재 개발에 대하여 소개하고자 한다.

2. 리사이클 폴리에스터 기능성 복합사 소재 개발

2.1. 리사이클 폴리에스터

지난 66년 동안 전 세계에서 생산된 플라스틱은 83억 톤으로 이 가운데 63억 톤이 쓰레기로 폐기되고 폐기된 쓰레기 중 약 9%만이 재활용되고 나머지는 소각, 매립되거나 자연에 버려지는 것으로 알려지고 있으며 현재의 플라스틱 생산량의 증가 추세로 볼 때 폐기되는 쓰레기의 양 또한 급증할 것으로 예상되고 있다. 리사이클 섬유는 버려지는 섬유 폐기물(폐섬유 소재, 폐의류, 폐섬유 제품(폐어망, 폐로프, 폐그물 등)) 및 비섬유성 폐기물(폐페트병 등)을 수거하여 물리적·화학적 재활용을 통해 제조된 섬유 소재(폴리에스터 섬유, 나일론 섬유, 셀룰로스 섬유 등) 및 섬유 제품(의류, 침구 제품 등)을 의미한다. 재활용은 물리적 재활용과 화학적 재활용으로 분류하며 물리적 재활용은 폐플라스틱(폐페트병, 폐필름 등)과 폐합섬 제품(폐어망, 폐로프, 폐그물 등)을 물리적으로 분쇄하거나 찢어서 플레이크(수거된 자원을 잘게 잘라낸 결과물을 플레이크라고 하며 폐페트병 조각을 페트 플레이크라고 함)나 펠릿으로 만들어 폴리에스터 및 나일론 섬유, 부직포, 단열재 등 다운사이클링 제품 등을 생산하고 있다.



자료: Sandin, G. and Greg M. Peters(2018), "Environmental impact of textile reuse and recycling-A review", *Journal of Cleaner Production*.

Figure 2. 섬유패션산업의 재활용 경로.

세계 리사이클 섬유 수요는 글로벌 패션기업은 물론 자동차, 건설 등 섬유 수요기업들이 리사이클 섬유 수요를 늘리면서 향후 사용량 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.

리사이클 폴리에스터 섬유 수요량은 2018년 25억 2,600만 달러로 리사이클 섬유 전체의 47.4%에 달하는 높은 수준으로 수요 증가율이 리사이클 나일론이나 리사이클 면에 비해 낮은 수준이지만 2018~2026년 기간 동안 연평균 4.9%의 증가율이 예상되고 있으며 그동안 폴리에스터 섬유 수요 증가에 힘입어 생산도 2008~2018년 기간 동안 연평균 12% 정도의 높은 증가율을 기록함으로써 폴리에스터 섬유 전체 생산에서 차지하는 리사이클 폴리에스터 섬유 비중도 2008년 8% 수준에서 2018년 현재 14%로 6%나 상승하고 있다. 의류용 리사이클 섬유 수요가 2018년 22억 9,500만 달러로 전체 43%를 차지하고 있으며 H&M, ZARA와 같은 SPA 브랜드는 물론 아디다스, 나이키

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"

와 같은 패션기업들이 사회적·윤리적 책임을 다하는 동시에 환경 부하를 최소화할 수 있도록 리사이클 섬유를 적용한 패션 의류 생산을 확대하려고 한다. H&M은 2019년 리사이클 폴리에스터 섬유를 사용한 패션 컬렉션을 발표하면서 2030년까지 모든 패션 제품에 친환경·리사이클 섬유를 사용하겠다고 발표하였으며, 아디다스는 2024년까지 섬유를 원료로 하는 버진 폴리에스터 섬유 사용을 중단하겠다고 발표하였다. 또한 ZARA는 2025년까지 전 패션 제품에 지속가능성이 높은 면화, 린넨, 리사이클 폴리에스터 소재를 사용하겠다고 발표하였다[3]. 세계 폴리에스터 섬유 생산량은 2008년 3,100만 톤에서 2019년 5,770만 톤으로 연평균 5.8%의 견실한 증가율을 기록하고 있으며 이는 세계 섬유 전체 생산량의 절반 이상인 52%에 달하고 있으며 리사이클 폴리에스터 섬유 생산량은 연평균 11.3%로 높은 증가를 보이고 있다. 코로나 19 이후 소비자 행동이 지속가능성을 추구하는 방향으로 바뀌었으므로 섬유 소재 산업도 리사이클 소재의 확대를 통해 브랜드 및 소비자들의 행동 변화에 대응할 필요가 있다. 또한 전 세계적으로 친환경 규제가 강화되면서 유럽연합의 여러 국가에서는 폐기물 관리법 등을 제정하여 모든 플라스틱은 재활용 가능한 원료로만 생산하도록 규제하는 등 폐기물 발생을 억제하고 자원순환과 폐기물의 환경친화적인 재활용을 확대하는 것을 주요 목표로 하고 있으므로 이에 대응하기 위한 리사이클 섬유 생산 시스템의 구축 및 대응 방안을 찾아야 하며 섬유 소재 기업에서는 차별화되는 고감성/고기능성의 리사이클 폴리에스터 소재 개발이 필요하다.

* Textile Exchange(2020), "Preferred Fiber & Materials Market Report 2020"

Figure 3. 리사이클 폴리에스터 섬유 생산 현황.

국내 리사이클 섬유산업은 리사이클 섬유의 원료로 사용되는 폐페트병, 폐나일론 제품, 폐섬유 등의 회수 부진, 리사이클 섬유의 높은 생산비용 및 시장창출의 어려움으로 생산 확대가 어려웠으며 대기업 화섬 3사 효성티앤씨, 티케이케미칼, 휴비스를 중심으로 2020년 1만 톤 정도에 그친 것으로 추정되는데 이는 대만의 파이스턴사 3만 톤을 포함해 8만 1,400톤에 비해 매우 저조한 수준이었으나, 최근 전 세계적으로 탄소중립 및 온실가스 저감에 대한 논의가 활발해지고 있는 가운데 패션기업 및 자동차, 건설 등 수요기업들의 리사이클 수요가 확대되고 있어 국내 섬유 기업들도 리사이클 섬유개발 및 생산능력을 확대하고 있다. 효성티엔씨는 리사이클 폴리에스터 원사 생산확대와 함께 전체 매출에서 차지하는 리사이클 폴리에스터 비중이 높아지고 있으며 친환경 인증 전문 기관인 컨트롤 유니온사로부터 GRS(글로벌 리사이클 표준) 인증을 획득하였으며, 우리나라에서 수거된 폐페트병을 재활용하기 위해 제주도, 서울시와 MOU를 체결하고 이 지역에서 수거된 폐페트병을 사용해 리사이클 폴리에스터 원사인 리젠제주, 리젠서울 등을 생산하고 있다. 휴비스는 고순도 리사이클 칩 생산이 가능한 자체 설비를 구축하고 원료부터 원사까지 일괄 공정 체제로 리사이클 폴리에스터 원사를 생산하고 있으며 폐페트병을 활용한 리사이클 원사인 에코에버를 연간 2,000톤 규모로 생산할 계획을 가지고 진행 중에 있다. 티케이케미컬은 국내에서 회수된 폐페트병으로 만든 고품질 플레이크를 사용해 리사이클 폴리에스터 원사를 생산하는 시스템인 K-rPET 순환 체계 프로젝트를 구축하고 리사이클 폴리에스터 원사인 ECOLON을 생산하여 의류업체인 블랙야크에 공급하고 있다[4]. 또한 ㈜서원테크는 원료에서 원사 및 차별화 감성을 위한 복합사까지 일괄 공정 시스템을 구축하였으며 GRS 인증과 OEKO-TEX 인증서를 확보하여 국내외 의류 브랜드에 공급하고 있다.

2.2. 리사이클 폴리에스터 천연감성 기능성 복합사

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 빚으로 돌아온다는 것을 소비자들이 직접 체험하고 있기 때문이다. 또한 천연섬유에 대한 사랑은 지속적으로 이루어져 왔으며, 이에 부응하기 위한 각 합성섬유의 천연섬유 like 제품들은 지속되어 왔으며, 그중에서도 cotton-like, wool-like, linen-like 제품들에 대한 고객의 요구와 수요는 꾸준히 증가하고 있다. 또한 의류산업 분야에서 상품 기획의 핵심은 소재와 스타일을 조화시켜 소비자의 감성을 효율적으로 반영하고 충족시키는 것으로 변화하고 있으며 소재 선택은 최종 제품에서 다른 요소와의 상호작용을 통해 전반적인 품질이 결정되므로 소재의 선택이 제품의 매출을 좌우한다고 볼 수 있다. 따라서 소비자들의 섬세한 감성 요구를 충족하기 위해서는 차별화된 고감성의 소재 개발이 필요하므로 이를 위한 소재 개발이 필요하다. 더욱이 기존 석유로 부터의 버진 폴리에스터 소재를 리사이클 폴리에스터 소재로 대체 되어야 하기 때문에 기존 버진 폴리에스터 소재의 천연섬유 like 소재들이 빠르게 개발되어야 글로벌 시장에서의 가격 경쟁력 및 기술 경쟁력 확보가 가능하다.

2.2.1 리사이클 Cotton-like 폴리에스터 기능성 복합사

리사이클 cotton-like 폴리에스터 기능성 신축성 복합사 개발을 위해서는 플레이크를 활용한 리사이클 폴리에스터 중공 POY사 개발을 진행하며 이를 위해서 먼저 플레이크 품질 규격이 필요하다. 플레이크 사이즈에 따라 방사 공정시에 문제점이 발생하여 플레이크의 사이즈 선택이 중요하다. 플레이크 사이즈가 크면 건조단계 진행 시 작업불량의 원인이 되며 플레이크 사이즈가 작으면 Extruder Feeding 및 토출 작업시 문제점이 발생한다.

Table 2. 플레이크의 품질 규격 현황

항목	규격	플레이크
입자크기 (mm)	5~15	
IV (dl/g)	0.7~0.8	
PVC (ppm)	90~200	
Moisture (%)	1~2	

다기능성을 확보한 리사이클 폴리에스터 중공 POY사 제조 모식도는 *Figure* 4와 같으며 플레이크의 건조 조건 확보 후 방사 공정을 진행하였으며 항균성 확보를 위해서 최종 원사의 기능성 물질 함량 1~3% 수준으로 항균 M/B 투입을 조절하였다.

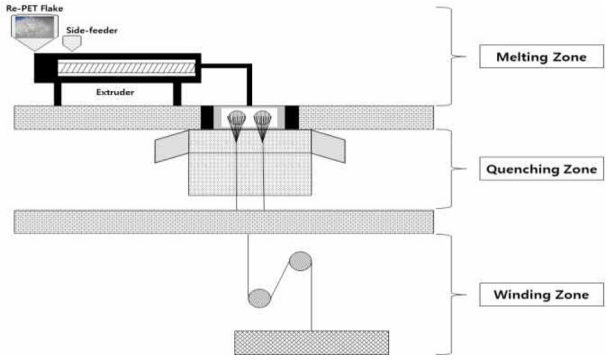


Figure 4. 친환경 및 다기능(항균/경량) recycle 중공 POY 제조 모식도

친환경성과 기능성의 리사이클 폴리에스터 신축성 cotton-like 소재 개발을 위하여 리사이클 PET/PET 잠재권축사 소재 설계를 통한 사가공 공정을 진행하였다.

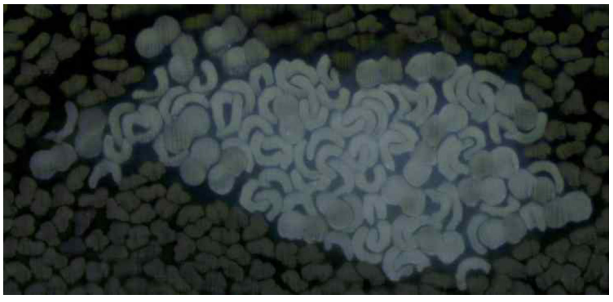


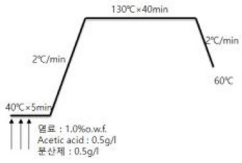
Figure 5. 리사이클 폴리에스터 다기능성 cotton-like 185De 단면.

리사이클 폴리에스터 다기능성 cotton-like 소재의 염색성 확인을 위하여 분산염료에 대한 염착 거동을 확인하기 위하여 Dye-o-meter를 이용하여 염색 거동을 확인하였다. 사용된 염료는 에너지 레벨이 다른 E-Type, S-Type의 3원색을 사용하였다.

염색이 되는 과정에서 분산염료가 피염물에 흡진되는 거동을 확인하기 위하여 염료의 농도를 1% o.w.f. 액비 1:10으로 상온에서 130 ℃까지 1.0 ℃/분의 속도로 130 ℃까지 승온한 후 130 ℃에서 40분간 유지하여 리사이클 폴리에스터 다기능성

cotton-like 소재의 저온형 E-Type과 고온형 S-Type의 분산염료의 흡착 거동을 Dye-O-meter로 실시간 염료 잔액의 흡광도를 측정한 결과는 *Figures* 6~9와 같다.

Table 3. 염착 거동 측정 조건

Dye-o-Meter	염료	염색 Recipe
	Red FB Yellow 3GE Blue FBL	
	Red BS Yellow 3-4G Blue S-2G	

저온형 분산염료의 경우 염료농도 1% o.w.f.의 Red는 80% 이상의 높은 염착율을 보였으며, Yellow의 경우 100%에 가까운 염착율을 보였으나 Blue는 60% 정도의 염착율을 보였으며 고온형 분산염료의 경우 1% o.w.f의 경우 80% 이상의 염착거동을 보이고 있으므로 색상에 따라 흡진 속도와 흡진율이 다르기 때문에 염료를 혼합하여 사용할 경우에 흡진속도가 유사한 계열을 사용해야 한다. 또한 Build-up 성을 확인을 위해 0.1%, 1.0%, 5.0% o.w.f의 염색을 진행하였으며, 색강도 및 균염성 분석을 위해 CCM을 측정하였다. 이때 색강도는 K/S를 측정하였으며 균염성은 한 시료에서 각기 다른 곳 5회를 무작위로 측정하여 색차 △E값을 구하여 평가하였다. 리사이클 폴리에스터 섬유와 기존의 버진 폴리에스터 섬유의 염착거동은 크게 차이가 없었으며 불균염성은 확인할 수 없었다.

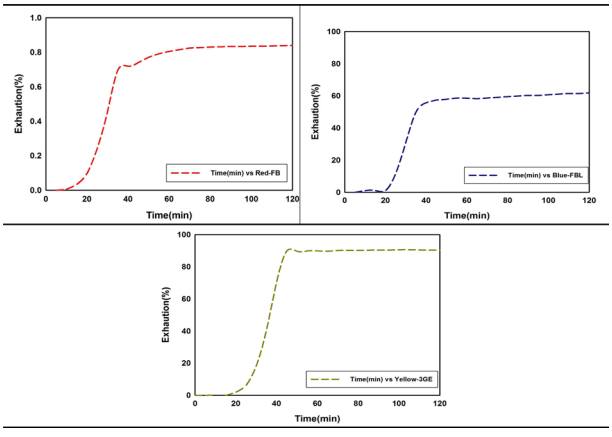


Figure 6. 저온형 분산염료의 염착거동 결과.

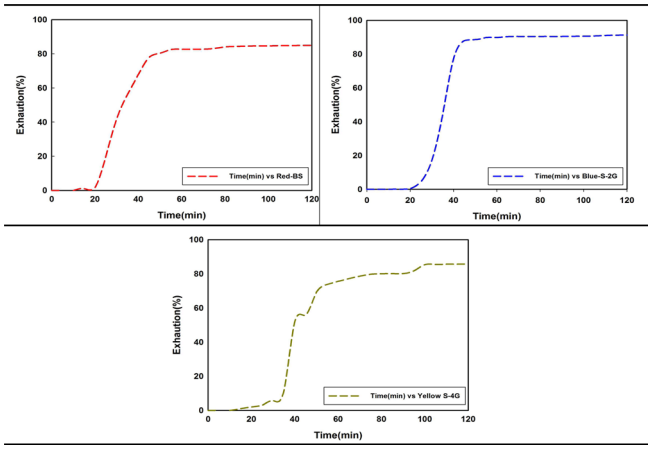


Figure 7. 고온형 분산염료의 염착거동 결과.

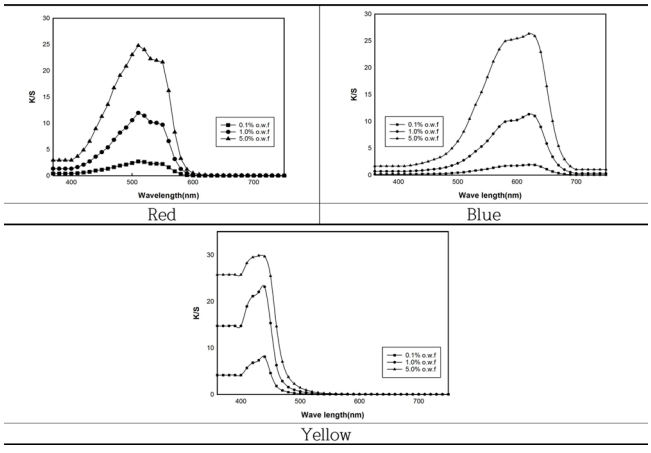


Figure 8. 저온형 분산염료의 K/S 결과.

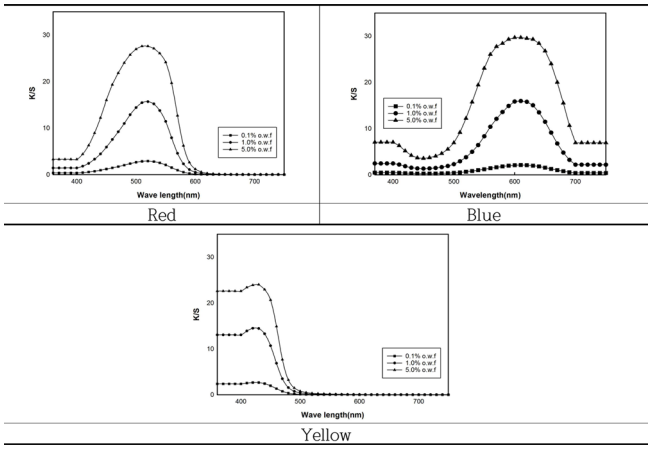


Figure 9. 고온형 분산염료의 K/S 결과.

2.2.2 리사이클 Linen-like 폴리에스터 기능성 복합사

리사이클 Linen-like 폴리에스터 기능성 신축성 복합사 개발을 위해서는 플레이크를 활용한 리사이클 폴리에스터 FD POY사 개발을 진행하기 위하여 플레이크의 균질화(건조온도, 건조시간, 용융, 이물질제거, 고유점도 균일화, 방사온도, 방사시간, 냉각온도, 냉각풍향, 권취속도 등)를 위한 공정인자 조건을 설계하여 이를 적용하였다. 친환경성과 기능성의 리사이클 폴리에스터 신축성 Linen-like 소재 개발을 위하여 리사이클 PET/PBT 잠재권축사 소재 설계를 통한 사가공 공정을 진행하였다.

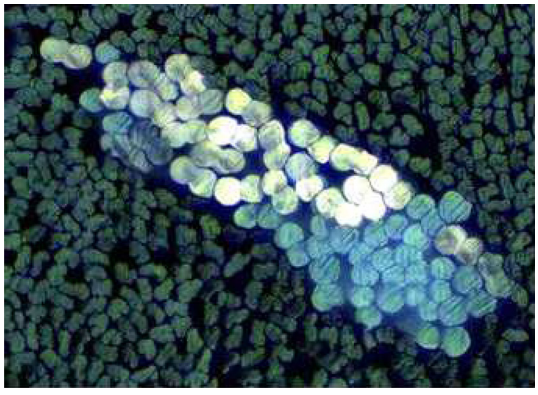


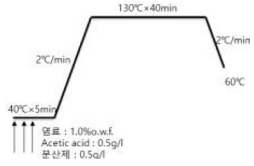
Figure 10. 리사이클 폴리에스터 다기능성 linen-like 160De 단면.

리사이클 폴리에스터 다기능성 linen-like 소재의 염색성 확인을 위하여 분산염료에 대한 염착 거동을 확인하기 위하여 Dye-o-meter를 이용하여 염색 거동을 확인하였다. 사용된 염료는 에너지 레벨이 다른 E-Type, S-Type의 3원색을 사용하였다.

염색이 되는 과정에서 분산염료가 피염물에 흡진되는 거동을 확인하기 위하여 염료의 농도를 1% o.w.f. 액비 1:10으로 상온에서 130 ℃까지 1.0 ℃/분의 속도로 130 ℃까지 승온한 후 130 ℃에서 40분간 유지하여 리사이클 폴리에스터 다기능성 linen-like 소재의 저온형 E-Type과 고온형 S-Type의 분산염료의 흡착 거동을 Dye-o-meter로 실시간 염료 잔액의 흡광도를 측정한 결과는 *Figures* 11~14와 같다.

저온형 분산염료의 경우 염료농도 1% o.w.f. 의 Red와 Yellow는 100% 이상의 높은 염착율을 보였으며, Blue는 80% 정도의 염착율을 보였으며 고온형 분산염료의 경우 1% o.w.f의 경우 80% 이상의 염착거동을 보이고 있으므로 색상에 따라 흡진 속도와 흡진율이 다르기 때문에 염료를 혼합하여 사용할 경우에 흡진속도가 유사한 계열을 사용해야 한다. 또한 Build-up 성을 확인을 위해 0.1%, 1.0%, 3.0% o.w.f의 염색을 진행하였으며 색강도 및 균염성 분석을 위해 CCM을 측정하였다. 이때 색강도는

Table 4. 염착 거동 측정 조건

Dye-o-Meter	염료	염색 Recipe
	Red FB Yellow 3GE Blue FBL	
	Red BS Yellow 3-4G Blue S-2G	

K/S를 측정하였으며 균염성은 한 시료에서 각기 다른 곳 5회를 무작위로 측정하여 색차 △E값을 구하여 평가하였다. 리사이클 폴리에스터 섬유와 기존의 버진 폴리에스터 섬유의 염착거동은 크게 차이가 없었으며 불균염성은 확인할 수 없었다.

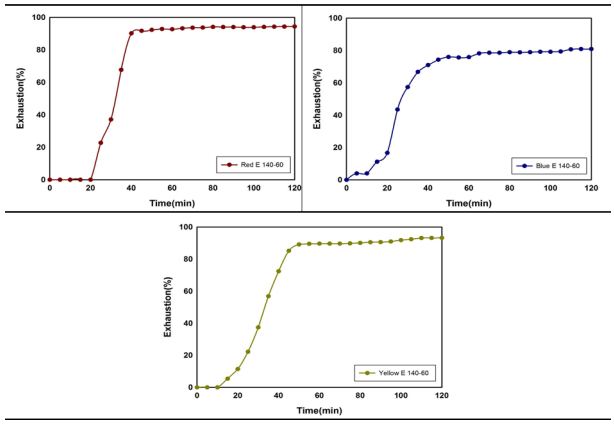


Figure 11. 저온형 분산염료의 염착거동 결과.

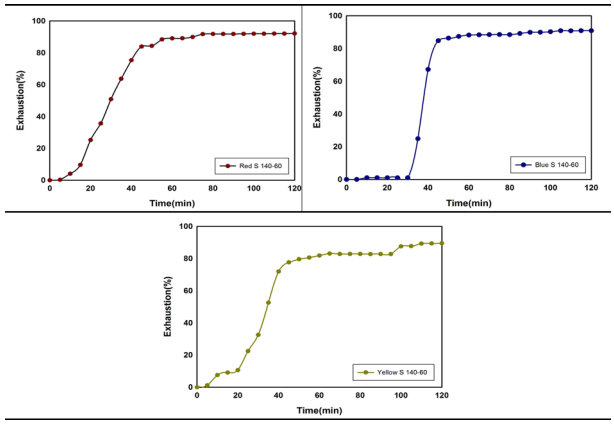


Figure 12. 고온형 분산염료의 염착거동 결과.

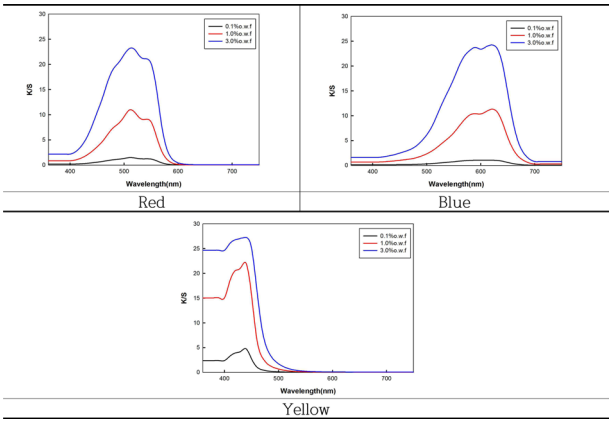


Figure 13. 저온형 분산염료의 K/S 결과.

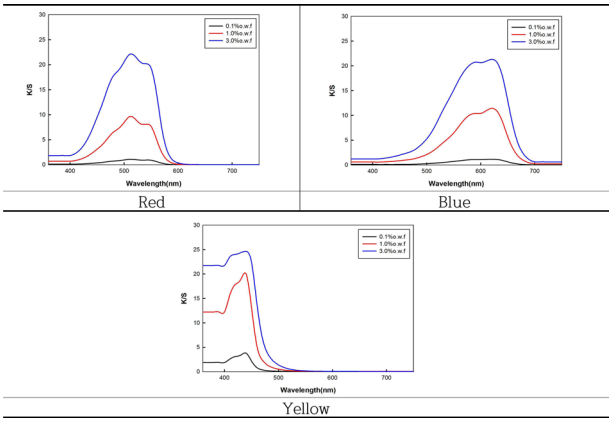


Figure 14. 고온형 분산염료의 K/S 결과.

3. 결 론

전 세계적으로 패션기업은 물론 자동차, 건설 등 섬유 수요기업들이 사회적·윤리적 책임을 다하는 동시에 환경부하를 최소화할 수 있도록 리사이클 섬유를 사용한 제품 생산을 확대하면서 리사이클 섬유 수요는 크게 증가하고 있다. 그러나 국내 리사이클 섬유산업은 아직 기술 수준이 낮고 차별화된 소재 개발에 대한 어려움을 가지고 있다. 연구개발력의 미흡, 설비 노후화, 인력의 고령화 등으로 생산성과 경쟁력이 취약한 단점을 가지고 있어 리사이클 소재 산업의 산업 생태계 구축이 늦어지고 있어 소재 산업의 발전에 걸림돌이 되고 있다. 또한 리사이클 폴리에스터 원사의 원료로 사용되는 고품질의 플레이크는 국내 고품질 페페트병 수거 부족으로 일본, 대만에서 수입해 사용하고 있어 이를 해결하기 위한 방안이 필요하다. 글로벌 시장에서의 기술력의 우위를 확보하고 가격 경쟁력을 위해서는 기존 버진에서 상업화 되어져 있는 기능성 폴리에스터 소재 대체뿐만 아니라 차별화 감성까지 갖춘 리사이클 폴리에스터 복합 소재 개발을 통하여 업스트림에서 다운스트림 까지의 유기적인 협력관계를 가진 선순환 발전이 필요하다. 이를 위해 기업들의 생산역량 강화를 위한 노력이 필요하며 리사이클 섬유 순환자원의 수거 및 선별 시스템 개선, 인증기반 구축, 현대화된 생산설비 확충이 함께 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 2020년 리사이클 폴리에스터 섬유 생산량 전년대비 증가, 한국화학섬유협회, 화섬정보 9.10 (2021).
2. 글로벌 브랜드, 리사이클 소재 전환에 속도낸다, 박용준, Fashion Insight (2023).
3. 친환경 · 리사이클 섬유패션산업 육성 전략, 이자연, 박훈 (2021-11) 15-18.
4. 리사이클 섬유산업 현황과 정책 과제, 박훈 (2021) 35.