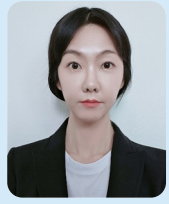
특집

미세플라스틱의 발생 원인과 저감용 필터 연구 동향

변지원

- 2021–2024. 단국대학교 파이버융합소재공학 학사
- 2024–현재. 단국대학교 파이버융합소재공학–한국생산기술연구원 학연 석사과정



김주란

- 2000–2004. 숙명여자대학교 의류학 학사
- 2008–2010. 조지아대학교 섬유공학 석사
- 2010–2014. 노스캐롤라이나주립대학교 섬유고분자 공학 박사
- 2014–2017. 코넬대학교 섬유공학 박사후 연구원
- 2019–현재. 한국생산기술연구원 선임연구원

1. 미세플라스틱의 정의와 입자 크기에 따른 분류

미세플라스틱은 크기 5 mm 이하의 작은 플라스틱 입자를 가리키는 말로 생성기원에 따라 1차 미세플라스틱, 2차 미세플라스틱으로 나뉘고 섬유형 미세플라스틱은 1:5 이상의 비등방성 입자를 말한다[1]. 미세플라스틱은 인구 밀도가 높은 도시부터 북극 및 남극과 같은 외딴 지역에 이르기까지 실외와 실내 환경 모두에서 발생되고 있으며, 1차 미세플라스틱은 제조 산업부터 개인 소비용품까지의 버려지는 합성 플라스틱이나 섬유 폐기물이 주요 원인이다. 2차 미세플라스틱은 버려진 플라스틱 제품의 분해, 타이어 마모(자동차, 트럭 및 항공기 타이어 포함) 및 의류, 카펫, 가구 및 가정용품에 사용되는 합성 섬유의 열화로부터 화학적, 물리적, 생물학적 과정을 통해 분해된다[2]. 이 과정을 통해 메조플라스틱(< 25 μm), 미세플라스틱 (< 5 μm), 그리고 궁극적으로 초미세플라스틱(< 100 nm)으로 불리는 2차 미세플라스틱으로 점차 분해된다(*Figure* 1)[3].

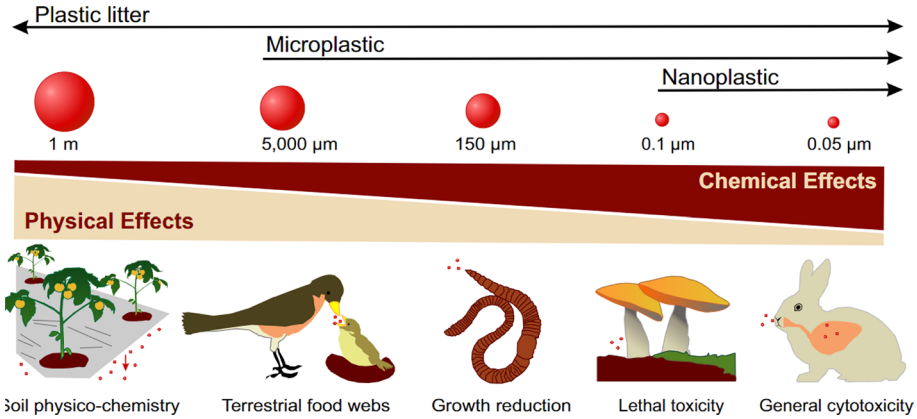


Figure 1. 크기에 따른 미세 플라스틱 분류[3].

2. 미세플라스틱의 발생 원인

대기 중의 미세 플라스틱의 발생원으로는 합성 섬유(35%), 교통수단(28%), 먼지(24%), 일회용 플라스틱, 합성코팅 순으로 발생된다고 보고되고 있다(*Figure* 2)[4,5]. 특히, 전 세계적으로 섬유는 매년 1억 5백만 톤 생산되고 있으며, 주로 의류에서는 주로 폴리에스터, 아크릴, 면혼방 등과 같은 합성 섬유가 많이 사용된다. 미세플라스틱 방출은 저가형 패스트 패션의 결과로 증가하고 있으며, 이는 많은 사람들이 유행에 따라 의류를 구매하고 폐기하는 과정에서 발생하게 된다. 또한 세탁기에서 의류를 세탁하고 건조하는 과정에서 섬유형 미세플라스틱(미세 섬유)이 방출되어 환경을 오염시킬 수 있다. 일반적인 6 kg 세탁물에서 약 70만 개의 개별적인 미세 섬유가 방출되는데 폴리머 유형, 구조, 실의 종류, 꼬임 정도 등 직물의 구조와 특성이 미세플라스틱 방출에 미치는 영향에 대한 연구는 현재까지 제한적이다[6].

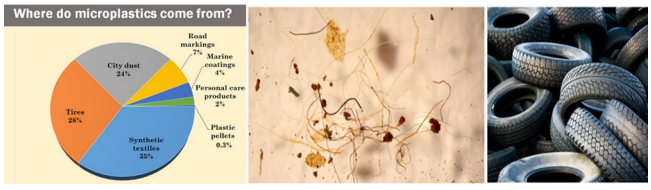


Figure 2. 미세플라스틱 발생 원인.

미세플라스틱이 인간 건강에 미치는 영향의 전체적인 범위는 여전히 불확실하지만, 합성소재의 생산과 사용이 건강 문제의 근본 원인임은 분명하다[7,8]. 흡입된 미세플라스틱은 눈에 보이지 않아 폐 시스템에 들어갈 수 있기 때문에 인간에게 상당한 건강 위험을 초래하는데 연구 결과에 따르면 공기 중에서 1 m^3 당 최대 5700개의 미세플라스틱 입자가 있다고 보고되고 있다[9]. 인간은 매년 최대 2200만개의 미세플라스틱을 흡입할 수 있으며[10], 한 연구에서는 인간 폐 조직 샘플에서 다수의 미세플라스틱이 발견되어 흡입을 통해 미세플라스틱을 인체 내로 유입되는 경로임을 처음으로 입증했다[11]. 또한 인간의 폐를 부검한 결과 미세플라스틱이 폴리프로필렌, 폴리에스터, 폴리에틸렌, 폴리테트라플루오로에필렌, 폴리스틸렌 순으로 발견되며 섬유 미세플라스틱 형태 49%, 파편 형태 43%로 나타나는 것을 볼 수 있다(*Figure* 3). 이러한 물질들은 신경독성, 면역독성, 유전독성, 신장독성, 암유발 등 인체에 미치는 영향이 심각하며 체내에 흡수될 경우 태아에게 전달될 뿐만 아니라 몸속 세포인 미토콘드리아에도 문제를 일으킨다는 사실이 보고되고 있다[12].

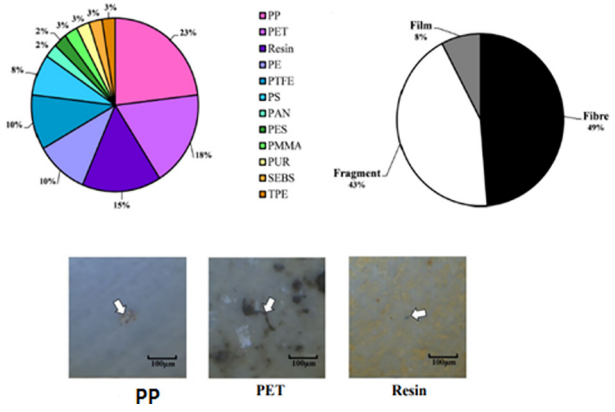


Figure 3. 공기 중 미세플라스틱의 발생원인 및 사람 폐에서 발견된 미세플라스틱 성분[11].

3. 대기 중 발생하는 미세플라스틱 저감용 필터 소재

대기 중에 미세플라스틱을 저감할 수 있는 연구가 진행되고 있는데 그 중 하나인 여과 시스템은 0.3 μm 크기만큼 작은 (초)미세플라스틱 입자도 실내 환경에서 제거할 수 있다. 여과 시스템에 사용되는 기능성 필터는 모든 기계 환기 시스템의 중요한 구성 요소이다. 그 중 하나인 전기방사 기술을 이용한 나노섬유 필터는 최근 연구자들로부터 상당한 관심을 받고 있다. 나노섬유 필터는 선택성, 구조적 강도, 친수성, 큰 비표면적 및 높은 공기 여과율 면에서 뛰어난 성능을 보이고 (초)미세플라스틱을 제거 가능한 공기 정화에 적용될 수 있다[13]. 폴리이미드(PI), 폴리우레탄(PUR), 폴리아크릴로나이트릴(PAN), 폴리아미드-66(PA-66), 폴리아미드-56, 폴리설폰을 포함한 다양한 고분자 재료를 전기방사하여 나노섬유 필터를 제작하였고 미세플라스틱 뿐 아니라 공기 중의 유해가스인 VOCs, 유해 가스 및 PM2.5를 제거하는 성능도 가지고 있음을 보여주었다[14-16].

(초)미세플라스틱을 섬유 필터의 내부 구조에 포집할 수 있는 첨단 재료를 이용한 기술이 (초)미세플라스틱 제거 기술로 사용된다[17]. *Figure* 4(a)는 전기방사로 공기 필터 분리막을 제작하는 과정을 보여준다. (초)미세플라스틱 포집에 효율성이 높은 소재를 전기방사하여 나노 섬유 필터를 생산하고 전기전도성이 우수한 2차원 나노 물질인 맥신(MXene)을 이용하여 필터 표면에 증착시킨 후 공기 중에서 (초)미세플라스틱을 포집할 수 있다[18,19]. 이 기술을 이용하여 효

과적인 공기 여과를 위한 Detect, Trap, Adsorb(DTA) 시스템이 제시되었다. 공기 청정기에 있는 지능 감지 기능으로 공기 중 (초)미세플라스틱 입자를 감지하고 전기전도성이 우수한 첨단 필터 소재를 이용하여 (초)미세플라스틱을 포집 후 표면에 흡착시켜 제거하는 원리이다. 이외에도 (초)미세플라스틱과 금속 이온 사이의 정전기적 인력을 이용하여 COF(Covalent Organic Framework)나 MOF(Metal Organic Framework)를 증착한 필터 소재가 연구되고 있는데 공기 내에 존재하는 (초)미세플라스틱을 포집하는데 *Figure* 4(c)는 효과적인 소재 기반 필터를 사용하여 구성된 최첨단 공기 청정기의 내부 모습이다.

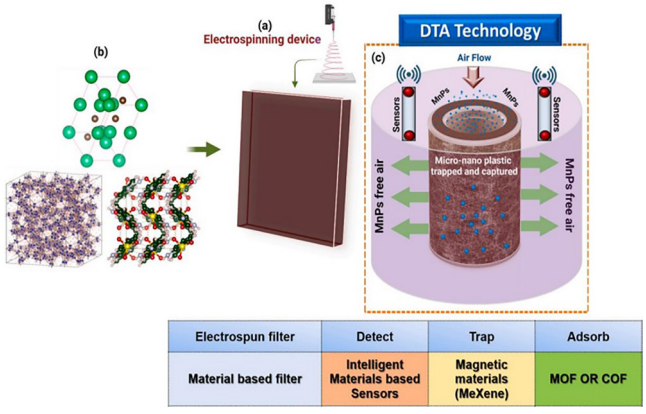


Figure 4. 실내 공기에 있는 미세/나노 플라스틱을 정화하기 위한 DTA (Detecting, Traping, absorb) 필터 기술 (a) 필터를 제조하기 위한 전기방사 장치 (b) 미세플라스틱 입자를 포착하고 흡착할 수 있는 효율적인 재료 (c) 실내 공기 중 미세플라스틱를 제거하기 위한 DTA 필터를 장착한 공기청정기[17].

(초)미세 플라스틱을 흡착하여 여과 시스템 필터에 사용할 수 있는 연구가 꾸준히 지속되고 있다[20]. 그 중에는 앞서 언급한 MOF와 COF가 있다. MOF는 금속 이온과 유기 리간드의 집합으로 제조된 다공성 결정질 물질로, 가스 저장, 분리, 촉매 작용, 감지 및 오염 물질 제거와 같은 많은 응용 분야에서 뛰어난 성능을 나타낸다[17,21]. 예를 들어, Cu-BTC/TiO_2/PS, ZIF-67 및 Cyclodextrins 기반 MOF 등이 있는데 그 중, Cr 기반 MOF를 통해 (초)미세플라스틱에 대한 흡착 효과를 연구한 결과 Polystyrene 미세플라스틱을 최대 96% 까지 제거하였다[22]. *Figure* 5는 Polystyrene 미세플라스틱을 Cr-MOF 매개로 제거하는 흡착 메커니즘에 대한 내용이다. 흡착을 지배하는 세 가지 주요 흡착 메커니즘으로 세가지가 있는데 첫번째는 양전하를 띤 Cr-MOF와 음전하를 띤 Polystyrene 미세플라스틱 사이의 정전기적 인력이고, 두 번째는 Cr-MOF와 Polystyrene 미세플라스틱에 존재하는 벤젠 고리의 상호작용이며, 세번째는 크롬과 황산염 에스터 그룹 사이의 산-염기 상호 작용이다[23].

Zeolitic Imidazolate Framework (ZIF-8) MOF는 (초)미세플라스틱에 효과적인 흡착제로 알려지고 있다. Aerogel 기판에서 in-situ growth 방법을 통해 ZIF-8을 합성하여 ZIF-8@Aerogel이라는 흡착제를 개발하였다[24,25]. Poly(1,1-difluoroethylene) (PVDF) 및 PS 필터 소재위에 ZIF-8@Aerogel을 부착하여 성능 평가한 결과, ZIF-8@Aerogel/PVDF와 ZIF-8@Aerogel/PS의 초미세플라스틱 제거 효율은 각각 91.4%와 85.8%로 우수한 성능을 보여주었다[25]. 이러한 연구는 MOF 내의 전하와 기능 그룹을 변화하여 다양한 성분의 초미세플라스틱을 제거할 수 있다. 또 다른 연구에서는 자기 특성을 가진 재료를 이용하여 (초)미세 플라스틱을 제거하는데 구조 내에서 입자를 끌어들이고 포집하거나 가둘 수 있다[26]. 전기적 힘을 이용한 (초)미세 플라스틱 포집 원리는 반대 전하를 띤 자기 입

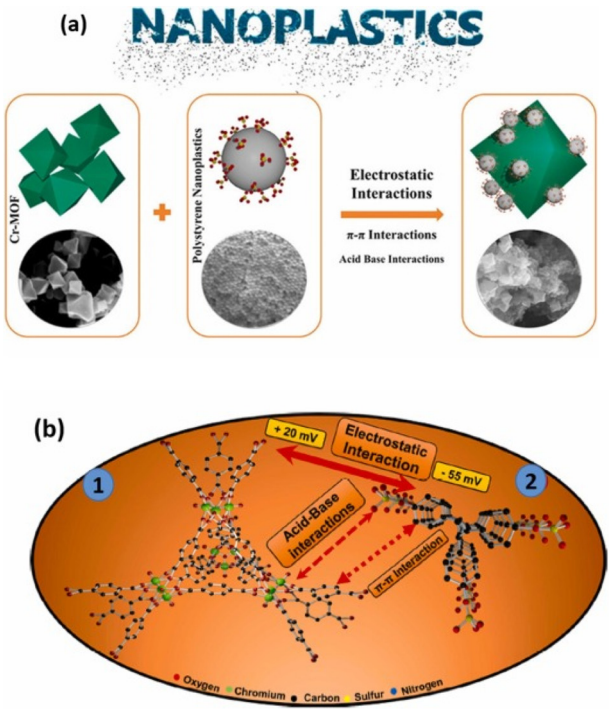


Figure 5. 금속–유기 프레임워크(MOFs) 및 공유–유기 프레임워크(COFs)에 의한 초미세플라스틱 포집 메커니즘. (a) Cr–MOF[22] (b) 황산에스테르 작용기를 갖는 Polystyrene 미세플라스틱의 분자 구조. 정전기, 산–염기, π – π은 Cr–MOF 상에서 Polystyrene 미세플라스틱의 흡착의 세 가지 주요 메커니즘[23].

자를 사용하여 이들을 포집하고 자석으로 수집하는 방식으로 (초)미세 플라스틱에도 적용될 수 있다[20,23].

4. 세탁 시 발생하는 미세플라스틱과 주요 원인

해양 환경으로 방출되는 (초)미세 플라스틱은 매년 약 250만 톤으로 추정되며 그 중 세탁 과정에서 방출되는 미세 섬유가 전체의 35%를 차지한다고 보고되고 있다[4]. 미세 섬유(미세 플라스틱)는 대부분 폴리에스터(PES) 또는 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET)로 구성되어 있는데 이들은 섬유 산업에서 의류업에서 가장 많이 사용되는 섬유이며, 세탁 시 의류에서 방출되어 폐수 처리장으로 배출된다[26]. *Figure* 6A는 여섯 개 대륙에 걸친 18개의 해안의 미세 플라스틱 오염도를 조사한 결과인데 샘플당 미세플라스틱은 250 mL의 퇴적물에서 폴리에스터(56%), 아크릴(23%), 폴리프로필렌(7%), 폴리에틸렌(6%), 폴리아미드 섬유(3%)가 발생하는 것을 조사되었다. *Figure* 6B는 인구 밀집 지역에서 더 많은 미세 플라스틱이 발견되었으며, 미세플라스틱 발생량과 인구 밀도 사이에 유의한 관계가 있음을 보여준다. 또한 해양 서식지의 하수 처리하지 않은 위치에서 미세플라스틱 샘플을 조사한 결과(*Figure* 6C) 250% 이상의 미세플라스틱이 더 발생하는 것을 보여주며 주로 폴리에스터(78%)와 아크릴(22%) 섬유로 구성되어 있다고 보고되고 있다. *Figure* 6D는 폐수 1리터당 100개 이상의 섬유를 방출했으며, 플리스는 일반 의류나 담요보다 180% 이상 더 많은 섬유를 방출했다고 분석하고 있다[27]. 또한 Almroth 등에 따르면, 세탁 시 폴리에스터 섬유가 약 7360 fibers·m^{-2}·L^{-2}를 방출하였고[28,29], Napper와 Thompson 연구에서는 6 kg의 합성 섬유(아크릴, PES와 면 혼합, PES)가 세탁 당 14만에서 70만 개의 섬유를 방출할 수 있다고 보고했다[30].

Özkan과 Gündoğdu의 미세 섬유 방출에 대한 연구에서는 Gyrowash 기계를 사용하여 세탁 시 PES 직물이 kg 당 167,436.58개의 섬유를 방출한 반면, 재활용 PET 니트 직물은 kg 당 368,094.07개의 섬유를 방출했으며, 세탁 사이클이 증가함에 따라 두 직물 유형 모두 섬유 방출량이 감소한다고 보고하고 있다[31]. *Figure* 7에서와 같이 Mahbub et al. (2022)의 연구에 따르면, 합성 섬유를 세탁할 때(162.49 mg/kg) 세제를 사용할 경우 세제를 사용하지 않을 때(13.32 mg/kg)보다 섬유 방출이 증가하는 것으로 나타났다[32]. 이러한 결과에 대한 한 가지 설명은 계면활성제를 포함한 일부 세제 성분이 섬유 표면에 축적되어 마찰을 줄이고 섬유 열화를 촉진함으로써 미세 섬유의 생성 및 방출을 유발할 수 있다는 것이다. 또한 pH, 산화 물질을 포함한 세제 조성, 세제 유형 등 미세 섬유 방출에 영향을 미치는 다른 요인들도 많이 있으며[33] 세제 유형이나 사용된 세제의 양은 미세 섬유 방출에 큰 영향을 미치지 않았다고 보고되고 있다[34].

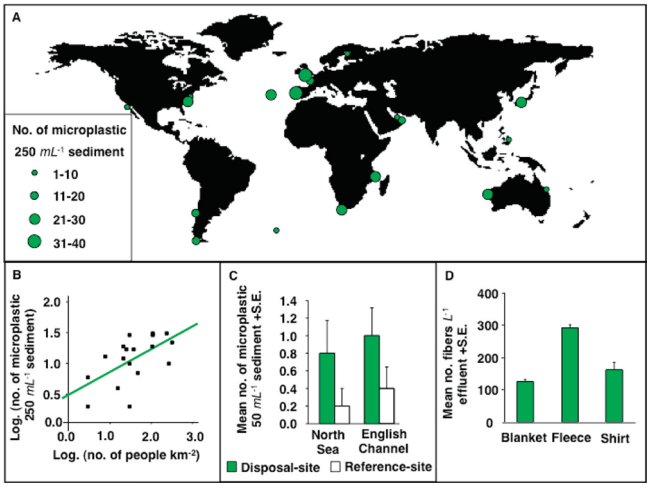


Figure 6. (A) Fourier transform 적외선 분광법에 의해 플라스틱으로 식별된 미세플라스틱의 전 세계 분포. 채취된 해안선의 침전물에서 발견된 미세플라스틱 입자의 수 (B) 인구 규모와 해안선 침전물에서 발견된 미세플라스틱 입자 수와의 관계 (C) 영국의 하수 처리장과 기준 지점에서 채취한 침전물의 미세플라스틱 입자 수 (D) 세탁기에서 플리스, 담요, 셔츠를 세탁할 때 방출되는 PES 섬유의 양[28].

세탁 횟수에 따른 미세 섬유 방출량에 대한 연구에서는 모든 섬유가 폐수 1리터당 100개 이상의 섬유를 생산하며 단일 의류는 세탁 시 1900개 이상의 섬유를 방출할 수 있고 일반적으로 세탁 횟수가 많아질수록 각 세탁 시 방출되는 미세 섬유의 양이 감소하는 경향을 보인다고 보고되고 있다[34]. PES-PA 혼합 운동복과 PES 셔츠에 대한 세탁 테스트에서 처음 세탁 주기와 비교하여 네 번과 두 번의 세탁 후 미세 섬유 질량이 50% 감소하였다[35]. 또 다른 연구에서는 PES 티셔츠의 미세 섬유 질량이 처음 세탁과 비교하여 네 번의 세탁 후 최대 10배까지 증가하였다[36]. Pirc와 Sillanpää의 연구에서는 각각 열 번과 다섯 번의 세탁 후 미세 섬유 방출의 상대적으로 높은 감소를 보였다[37,38]. Mahbub 등에 따르면(*Figure* 8), 첫 번째 세탁 주기와 비교하여 일곱 번째 세탁 및 건조 주기 후에 미세 섬유가 덜 방출되었으며, 연속적인 세탁 및 건조 주기에서 미세 섬유 방출이 감소하는 패턴을 보였으며 5회 세탁 후에는 섬유 방출량이 일정해지면서 서서히 방출이 감소된다고 보고하고 있다[32].

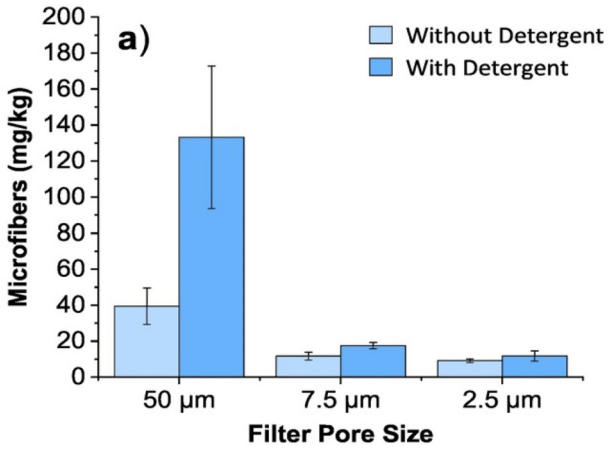


Figure 7. 세제 유무에 따른 세탁 시 발생되는 미세 섬유 방출량[32].

5. 세탁 시 발생하는 미세플라스틱 저감 필터 소재

해양 환경으로 배출되는 미세섬유(미세플라스틱)을 저감하기 위해 상용화된 세탁기용 섬유 필터 소재를 이용한 제품을 비교하는 연구가 진행되었다(*Figure* 9). 이 연구에서 사용된 제품은 두가지 세탁망(the Guppyfriend , Langbrett, Germany; Fourth Element, U.K.)과 3종류의 외부 장착 필터(Lint LUV-R, Environmental Enhancements, NS, Canada; PlanetCare, U.K.; XFiltra, Xeros Technology Group, U.K.)이며 이 섬유 필터 소재의 SEM 이미지를 *Figure* 10에서 보여주고 있다[39]. 이러한 제품은 세탁 주기 동안 드럼 내부

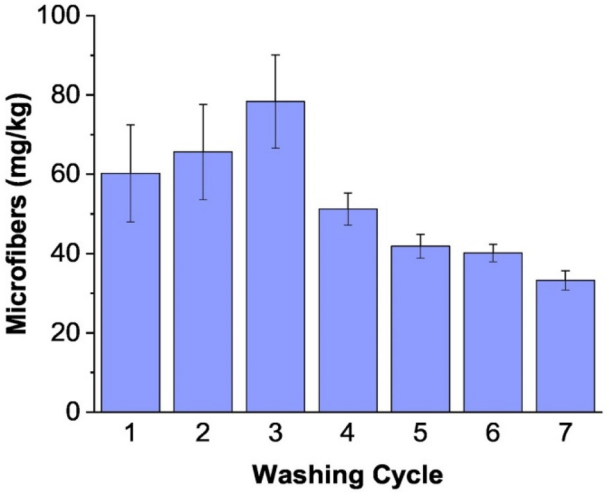


Figure 8. 세탁 횟수에 따른 미세 섬유 방출량[32].

Figure 9. 상용화된 세탁 시 발생하는 미세플라스틱을 저감하는 섬유 필터 상품.

에 배치되거나 외부에 설치되어 배출되는 폐수에 포함된 미세플라스틱을 섬유 필터 소재를 통하여 포집하도록 설계되었다. 이 연구에서는 세탁 중 옷에서 방출되는 미세플라스틱을 어떤 장치도 사용하지 않았을 때의 미세 섬유 배출량(대조군)과 비교했을 때, XFiltra 필터가 78% 포집률을 보이고 Guppyfriend 세탁망은 두 번째로 54%의 미세플라스틱을 포집하는 효과를 보여주었다.

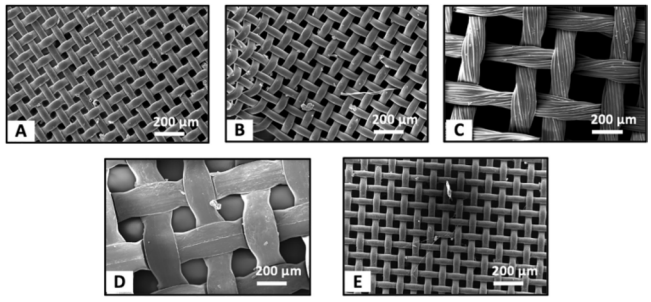


Figure 10. 미세플라스틱 저감 상품에 사용되는 필터의 SEM 이미지, A–Fourth Element; B– Guppyfriend; C –Lint LUV–R; D– PlanetCare; E–XFiltra[39].

세탁 시 발생하는 미세플라스틱을 저감하는 생체모방형 미세플라스틱 포집 섬유 필터에 대한 연구도 진행되었다. 직경이 다른 PET 모노 필라멘트(0.4, 0.6, 0.8 mm)를 커팅하여 거미의 한 종류인 타란툴라 털의 특성과 유사한 구조를 가진 "가시 필터"(BF)를 개발하였다(*Figure* 11). 가시 필터는 다양한 길이의 미세 섬유를 효과적으로 포획하고 날카로운 가시를 특징으로 dry adhesion 효과가 있어 기존의 제어 필터보다 우수한 성능을 발휘하여, 세탁 시 최대 91%의 미세플라스틱을 포집하는 효과를 보여주었다[40].

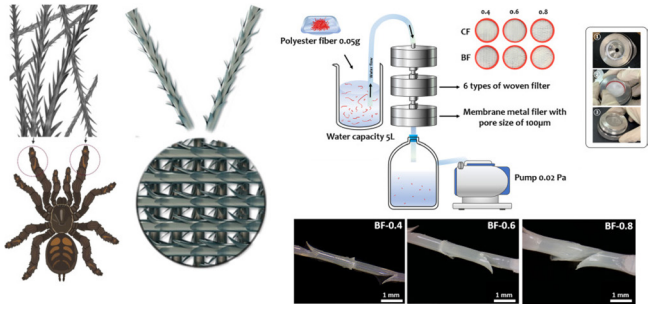


Figure 11. 생체모방형 미세플라스틱 포집 필터[40].

6. 결 론

미세플라스틱은 일회용품, 의류 제품 등의 과도한 소비로 인해 환경과 생태계에 큰 영향을 미치며 농작물의 생장과 토양, 해양 생태계에 부정적인 영향을 미친다. 호흡, 섭취를 통해 인간에게 폐질환, 호흡곤란, 폐기능저하를 발생시킬 뿐 아니라 장기적으로는 인체 내에서 분해되지 않고 혈액과 림프절을 통해 점막, 상피세포, 태아까지 이동하여 다양한 질병(염색체 손상, 혈액질환, 피부병, 발암, 유전자 변이 등)을 일으킨다고 보고되고 있다. 특히, 세탁 시 발생되는 미세플라스틱이 전체 미세플라스틱 발생율의 30-40%를 차지한다고 보고되고 있는데, 많은 국가에서 미세플라스틱에 대한 규제를 강화하고 있으며 EU에서는 2025년부터 모든 세탁기에 미세플라스틱 저감용 필터 설치를 의무화하고 있다. 이러한 미세플라스틱 환경오염 문제를 해결하기 위해 소비 패턴의 변화와 더불어 효과적인 섬유 필터 소재의 개발이 필요하다. 나노필터, 생체모방 소재, 재생 가능한 소재, 자기특성 소재 등 여기서 소개된 다양한 접근법을 통해 미세플라스틱을 줄이고 생태계를 보호할 수 있는 지속적인 연구를 통해 더욱 효율적이고 환경 친화적인 솔루션이 섬유 산업에서 연구되어야 한다. 이는 궁극적으로 인간과 자연 모두에게 건강한 미래를 제공하는 데 기여할 것이다.

참고문헌

1. A.P. Periyasamy, A. Tehrani-Bagha, "A review on microplastic emission from textile materials and its reduction techniques", *Polym. Degrad. Stab.*, 2022, 199, Article Number: 109901.
2. D. Huang, J. Tao, M. Cheng, R. Deng, S. Chen, L. Yin, R. Li, "Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures", *J. Hazard. Mater.*, 2021, 407, Article Number: 124399.
3. A.A. de Souza Machado, W. Kloas, C. Zarfl, S. Hempel, M.C. Rillig, "Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems", *Glob. Change Biol.*, 2018, 24, 1405-1416.
4. Where do microplastics come from? (https://www.horiba.com/int/scientific/resources/science-in-action/where-do-microplastics-come-from/, accessed June 18, 2024).
5. Facciolà A, Visalli G, Pruiti Ciarello M, Di Pietro A., "Newly Emerging Airborne Pollutants: Current Knowledge of Health Impact of Micro and Nanoplastics", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, 18, Article Number: 2997.
6. J. Boucher, D. Friot, Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources, Iucn Gland, Switzerland, 2017.
7. R. Zhang, L. Lu, Y. Chang, M. Liu, "Gas sensing based on metal-organic frameworks: Concepts, functions, and developments", *J. Hazard. Mater.*, 2022, 429, Article Number: 128321.
8. K. Zhang, A.H. Hamidian, A. Tubić, Y. Zhang, J.K. Fang, C. Wu, P.K. Lam, "Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review", *Environ. Pollut.*, 2021, 274, Article Number: 116554.
9. C. Li, R. Busquets, L.C. Campos, "Assessment of microplastics in freshwater systems: A review", *Sci. Total Environ.*, 2020, 707, Article Number: 135578.
10. K.D. Cox, G.A. Covernton, H.L. Davies, J.F. Dower, F. Juanes, S.E. Dudas, "Human consumption of microplastics", *Environ. Sci. Tech.*, 2019, 53, 7068-7074.
11. L.C. Jenner, J.M. Rotchell, R.T. Bennett, M. Cowen, V. Tentzeris, L.R. Sadofsky, "Detection of microplastics in human lung tissue using μFTIR spectroscopy", *Sci. Total Environ.*, 2022, 831, Article Number: 154907.
12. J.C. Prata, J.P. da Costa, I. Lopes, A.C. Duarte, T. Rocha-Santos, "Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects", *Sci. Total Environ.*, 2020, 702, Article Number: 134455.
13. T. Lu, J. Cui, Q. Qu, Y. Wang, J. Zhang, R. Xiong, W. Ma, C. Huang, "Multistructured electrospun nanofibers for air filtration: a review", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13, 23293-23313.
14. C. Zhu, Y. Kanaya, R. Nakajima, M. Tsuchiya, H. Nomaki, T. Kitahashi, K. Fujikura, "Characterization of microplastics on filter

substrates based on hyperspectral imaging: Laboratory assessments", *Environ. Pollut.*, 2020, 263, Article Number: 114296.

15. P. Risch, C. Adlhart, "A chitosan nanofiber sponge for oyster-inspired filtration of microplastics", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 3, 4685-4694.
16. J. Zhuang, N. Rong, X. Wang, C. Chen, Z. Xu, "Adsorption of small size microplastics based on cellulose nanofiber aerogel modified by quaternary ammonium salt in water", *Sep. Purif. Technol.*, 2022, 293, Article Number: 121133.
17. M. Sheraz, J. Kim, J. Kim, "Nano/microplastics in indoor air: A critical review of synthesis routes for toxicity testing and preventative measure strategies", *Process Saf. Environ.*, 2023, 180, 274-304.
18. M. Urso, M. Ussia, F. Novotný, M. Pumera, "Trapping and detecting nanoplastics by MXene-derived oxide microrobots", *Nat. Commun.*, 2022, 13, Article Number: 3573.
19. Y. Gogotsi, B. Anasori, "The Rise of MXenes", *ACS Nano*, 2019, 13, 8491-8494.
20. M. Sarcletti, H. Park, J. Wirth, S. Englisch, A. Eigen, D. Drobek, D. Vivod, B. Friedrich, R. Tietze, C. Alexiou, D. Zahn, B. Apeleo Zubiri, E. Spiecker, M. Halik, "The remediation of nano-/microplastics from water", *Mater. Today*, 2021, 48, 38-46.
21. S. Modak, M. Kasula, M.R. Esfahani, "Nanoplastics Removal from Water using Metal–Organic Framework: Investigation of Adsorption Mechanisms, Kinetics, and Effective Environmental Parameters", *ACS Appl. Eng. Mater.*, 2023, 1, 744-755.
22. D. Chakraborty, S. Naik, S. Kumar, N. Chandrasekaran, A. Mukherjee, "Exploring the interactions between protein coronated CdSe quantum dots and nanoplastics", *New. J. Chem.*, 2021, 45, 7951-7958.
23. S.-H. Huo, X.-P. Yan, "Facile magnetization of metal–organic framework MIL-101 for magnetic solid-phase extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental water samples", *Analyst*, 2012, 137, 3445-3451.
24. Y. Li, S. Zhang, S. Liu, Y. Chen, M. Luo, J. Li, S. Xu, X. Hou, "Eco-friendly hydrophobic ZIF-8/sodium alginate monolithic adsorbent: An efficient trap for microplastics in the aqueous environment", *J. Colloid Interface Sci.*, 2024, 661, 259-270.
25. Z. Honarmandrad, M. Kaykhaii, J. Gębicki, "Microplastics removal from aqueous environment by metal organic frameworks", *BMC Chem.*, 2023, 17, Article Number: 122.
26. D. You, Y. Zhao, W. Yang, Q. Pan, J. Li, "Metal-organic framework-based wood aerogel for effective removal of micro/nano plastics", *Chem. Res. Chin. Univ.*, 2022, 38, 186-191.
27. S. Ziajahromi, P.A. Neale, L. Rintoul, F.D.L. Leusch, "Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics", *Water Res.*, 2017, 112, 93-99.
28. M.A. Browne, P. Crump, S.J. Niven, E. Teuten, A. Tonkin, T. Galloway, R. Thompson, "Accumulation of Microplastic on Shorelines Woldwide: Sources and Sinks", *Environ. Sci. Tech.*, 2011, 45, 9175-9179.
29. B.M. Carney Almroth, L. Åström, S. Roslund, H. Petersson, M. Johansson, N.-K. Persson, "Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles; a source of microplastics released into the environment", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2018, 25, 1191-1199.
30. I.E. Napper, R.C. Thompson, "Plastic Debris in the Marine Environment: History and Future Challenges", *Global chall.*, 2020, 4, Article Number: 1900081.
31. İ. Özkan, S. Gündoğdu, "Investigation on the microfiber release under controlled washings from the knitted fabrics produced by recycled and virgin polyester yarns", *J Text. I*, 2021, 112, 264-272.
32. M.S. Mahbub, M. Shams, "Acrylic fabrics as a source of microplastics from portable washer and dryer: Impact of washing and drying parameters", *Sci. Total Environ.*, 2022, 834, Article Number: 155429.
33. F. De Falco, E. Di Pace, M. Cocca, M. Avella, "The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution", *Sci. Rep.*, 2019, 9, Article Number: 6633.
34. E. Hernandez, B. Nowack, D.M. Mitrano, "Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing", *Environ. Sci. Tech.*, 2017, 51, 7036-7046.
35. A. Folkö, "Quantification and characterization of fibers emitted from common synthetic materials during washing", Examensarbete i miljö-och hälsoskydd. Stockholms Universitet och Käppalaförbundet, 2015.
36. M.R. Kelly, N.J. Lant, M. Kurr, J.G. Burgess, "Importance of water-volume on the release of microplastic fibers from laundry", *Environ. Sci. Tech.*, 2019, 53, 11735-11744.
37. M. Sillanpää, P. Sainio, "Release of polyester and cotton fibers from textiles in machine washings", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2017, 24, 19313-19321.

38. U. Pirc, M. Vidmar, A. Mozer, A. Kržan, “Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2016, 23, 22206-22211.
39. I.E. Napper, A.C. Barrett, R.C. Thompson, “The efficiency of devices intended to reduce microfibre release during clothes washing”, *Sci. Total Environ.*, 2020, 738, Article Number: 140412.
40. M. Sheraz, S. Han, K.E. Lee, M. Yanilmaz, M. Kwon, J. Kim, J. Sim, J. Kim, “Innovative tarantula hair-inspired washing machine filters for enhanced microfiber capture”, *Sci. Total Environ.*, 2024, 926, Article Number: 171807.