

Laser Direct 화학 이미징을 사용한 빠르고 자동화된 미세플라스틱 분석

해양 환경에서 채취한 물 시료 내 미세플라스틱의 특성
규명 및 정량



저자

Lars Hildebrandt, Fadi El Gareb,
Tristan Zimmermann, Ole Klein,
Kay-Christian Emeis,
Daniel Proefrock¹
Andreas Kerstan²

¹Institute of Coastal Research,
Helmholtz-Zentrum
Geesthacht, Germany

²Agilent Technologies

서론

지난 65년 동안 생산된 83억 톤의 플라스틱 중 75% 이상이 폐기물로 처리된 것으로 추정됩니다(1). 매년 최대 1,300만 톤의 폐기물이 바다로 버려지고(2), 최근 통계에 따르면 약 5.25조 이상의 플라스틱 입자가 전 세계 바다에 떠다니는 것으로 집계되었습니다(3).

과학자들은 수중 생태계에서 미립자 플라스틱의 보편성과 지속성을 입증했습니다(4). 모델에 따르면 해양 표면층에 있는 약 14%의 플라스틱 조각은 이른바 미세플라스틱 (일반적으로 크기가 1µm에서 5mm까지의 입자)으로 분류될 수 있는 것으로 예측할 수 있습니다(5). 이러한 섭취 가능하고 잠재적으로 유해한 입자는 보다 큰 조각에서 UV 유도, 기계적 또는 생물학적 분해에 의해 형성됩니다(6). 추산치를 검증하고 곧 실행될 규제 조치(예: 캘리포니아 상원 법안 1422) 및 지침안(MSFD, 2008/56/EC)을 충족하려면 정확하고 시간 효율적이며 강력한 분석 워크플로와 기술이 요구됩니다.

미세플라스틱 입자의 크기, 모양 및 폴리머 유형을 결정하고 각 유형을 빠르게 정량해야 하는 기술이 필요합니다. 본 문서를 작성할 당시의 통합된 표준 작업 절차서(SOP)가 부족한 관계로, 의심되는 입자를 분석하는 많은 연구 작업은 육안 식별 또는 FTIR(Fourier Transform Infrared) 또는 Raman 기반 기법에 의존했습니다. 이러한 기술은 시간 소모적이고 작업자 간의 편차가 발생하기 쉽습니다. 본 연구에서는 LDIR(Laser Direct Infrared) 이미징을 사용하는 혁신적인 미세플라스틱 분석 워크플로를 소개합니다.

실험

미세플라스틱 시료 전처리와 분석을 위한 표준 작업 절차서가 부족하여, 많은 응용 분석법이 쉽게 오염되고 시간 효율적이지 않거나 소량의 물만 처리할 수 있어 대표성을 가지지 못합니다(7). 샘플링, 매트릭스 분해 및 LDIR을 이용한 마이크로 분광 분석을 포함하여 본 연구에서는 분석 체인의 모든 단계를 포괄하는 절차를 개발하고 적용했습니다. 또한 대대적으로 오염 방지 조치와 증착 제어 조치를 적용했습니다. 절차적 바탕 시료를 사용하여 잔류 오염을 정량했습니다. 모든 실험실 작업은 실험실 및 해양 조사선에 있는 깨끗한 벤치(층류 캐비닛)에서 수행되었습니다. 벤치는 0.1 μm 보다 큰 입자에 대해 약 99.995%의 공기 여과 효율을 나타냈습니다(EN1822 1 표준에 따름). 또한 모든 실험실에서 Dustbox 공기 청정기¹를 가동하여 공기를 필터링했습니다.

샘플링

시료는 홍콩에서 포트 루이스로 가는 Sonne 270(2019) 크루즈 이동 중에 인도양에서 수집했습니다(그림 1). 샘플링 구역은 인도네시아 수마트라의 서쪽 지역부터 마다가스카르의 동쪽 지역에 이르는 넓은 해역을 걸칩니다.

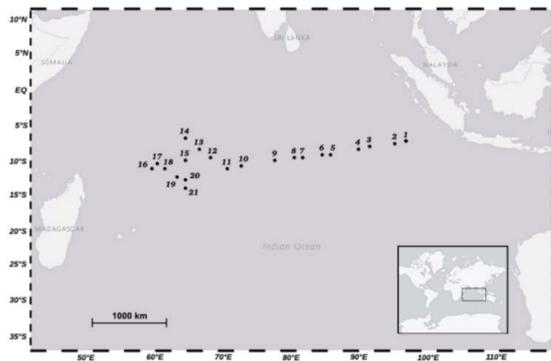


그림 1. 인도양을 횡단하는 샘플링 위치

그림 2와 같이 GIMPF(Geesthacht Inert Microplastic Fractionator)를 사용해 샘플링을 수행하여 해수에서 대량의 부유 입자상물질(SPM, $10\mu\text{m} \leq d_{\text{SPM}}$)을 필터링했습니다. 이중 채널 GIMPF는 온라인 SPM 분리(두 가지 메쉬 크기의 스테인리스 강 카트리지 필터 사용)를 지원하여 $> 300\mu\text{m}$ 및 $10\mu\text{m} \leq d \leq 300\mu\text{m}$ 의 두 가지 크기 등급의 입자로 분리했습니다. Flow-through 시스템은 해수면 6m 아래에 있는 해양 조사선의 문풀(moon pool)에서 해수를 끌어옵니다. 전체 샘플링 시스템은 스테인리스 강 부품(AISI-316L)으로 구성되었으며 알루미늄 판 위에 설치했습니다. 모든 씰은 샘플링 시스템에 의한 오염 위험을 최소화하기 위해 PFA로 피복 처리되었습니다. 샘플링 위치를 거칠 때마다 GIMPF 뒷면에 있는 2 μm 필터를 통해 시스템에 대해 백플러시를 수행했습니다. 총 61m³까지 샘플링했습니다. 카트리지 필터에서 시료를 PTFE 및 PC 멤브레인(기공 크기 5 μm)에 진공 여과하여 갈색 유리병에 보관했습니다.



그림 2. GIMPF(Geesthacht Inert Microplastic Fractionator)의 전면과 후면

시료 전처리 및 분석법 검증

모든 유리 제품은 사용 전에 Milli Q 물과 사전 필터링한 에탄올(30%)로 세 번 헹구었습니다. 간섭을 유발하는 천연 유기 및 무기 매트릭스 성분을 제거하기 위해 $10\mu\text{m} \leq d \leq 300\mu\text{m}$ 크기의 입자에 대해 호소 및 산화 분해 프로토콜을 적용했습니다. 간단히 요약하면, 시료를 Fe²⁺ 촉매제 및 키티나아제와 함께 프로테이나제 K, H₂O₂로 처리한 다음(그림 3), ZnCl₂ 용액($\rho = 1.7\text{g/mL}^{-1}$)을 사용하여 밀도 분리를 수행했습니다.

¹www.dustbox.de

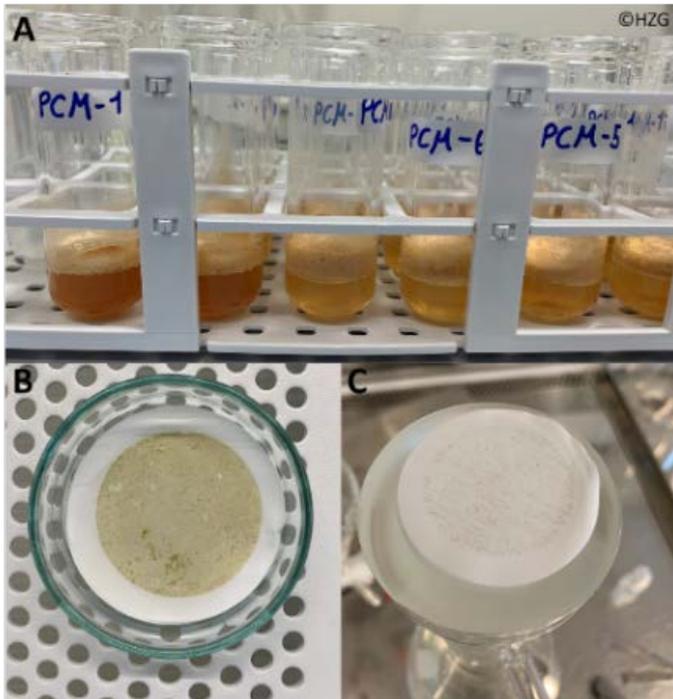


그림 3. 효소 및 산화 분해. A: Fe²⁺ 이용한 남아 있는 H₂O₂의 촉매 분해. B: 매트릭스 분해 전의 시료(PTFE 멤브레인). C: 매트릭스 분해 후의 시료.

기기

시료에서 미세플라스틱을 식별하고 정량하기 위해 Agilent 8700 LDIR 화학 이미징 시스템을 사용했습니다. LDIR(Laser Direct Infrared) 이미징은 작동 모드에서 파생되어 QCL(Quantum Cascade Laser)를 광원으로 사용합니다. QCL은 전자가 일련의 양자 웰로 터널을 뚫어 빛을 방출하는 반도체 기반 레이저로, 파장(λ^{-1}) 범위를 빠르게 조정하며, 본 실험에서 파장 범위는 1800cm⁻¹~975cm⁻¹입니다.

단일 포인트 MCT(mercury cadmium telluride) 검출기(온도 측정 냉각) 및 고속 스캐닝 광학 장치와 결합하면 두 가지 유용한 작동 모드가 실현됩니다. 첫 번째 모드에서 LDIR은 단일 파장을 선택하고 매우 빠른 속도로 시료 위를 이동하면서 대물 렌즈를 통해 스캔합니다. 두 번째 모드에서는 대물 렌즈가 단일 포인트에 고정되고, QCL은 범위 내에서 스위핑하여 1초 이내에 전체 스펙트럼을 얻습니다.

미세플라스틱 분석 워크플로에는 두 가지 모드를 모두 사용했습니다. 먼저, 스캐닝 모드에서 단일 wavenumber로 시료 영역을 빠르게 스캔했습니다. 여기서 얻은 IR 이미지를 이용해 시료에서 입자 위치를 파악하고 크기와 모양을 나타냈습니다. 위치를 파악한 다음에는 LDIR이 자동으로 각 입자로 신속하게 이동하여 해당 범위에서 전체 스펙트럼을 획득했습니다.

입자 스펙트럼을 획득한 후, 즉시 미세플라스틱 스펙트럼 라이브러리와 비교하는 작업을 실시간으로 수행했습니다. 스펙트럼에 가장 적합한 매치 결과가 확인되고 각 입자에 대해 보고되었습니다. 이 라이브러리는 잘 확립된 소스를 기반으로 만들어졌으며 해수에서 얻은 시료의 미세플라스틱 분석과 관련된 다양한 스펙트럼을 포함했습니다.

이 기기는 넓은 시야의 카메라를 사용하여 시료의 전체 뷰를 얻고 현미경 등급 대물 렌즈를 사용하여 필요에 따라 고배율 시각적 이미지를 캡처했습니다. 800개 입자를 완전 자동으로 분석하고 생성된 스펙트럼을 데이터베이스와 비교하는 데 약 1시간이 걸렸습니다.

시료 분석

정제된 시료(< 300 μ m)를 에탄올(50%)에 부유시키고 적외선 반사 유리 슬라이드(7.5 x 2.5cm; MirrIR, Kevley Technologies)에 올려놓았습니다. 유리 슬라이드는 자동 LDIR(QCL) 이미징(8700 LDIR, 애질런트 테크놀로지스)을 이용해 반투과로 분석했습니다. LDIR을 작동시키는 Agilent Clarity 소프트웨어(버전 1.1.2) 내의 자동 입자 분석 프로토콜을 모든 분석에 이용했습니다. 감도는 최대로 설정하고 스펙트럼 분해능은 8cm⁻¹로 설정했습니다. 크기 범위가 20~5000 μ m인 입자를 분석했지만 자동화 모드에서는 약 10 μ m까지 확장할 수 있습니다.

Agilent Clarity 소프트웨어 내의 자동화된 워크플로에 따라 각 입자에서 IR 스펙트럼을 수집하고, 실시간으로 스펙트럼 데이터베이스 비교(> 420 레퍼런스 스펙트럼) 및 데이터 처리를 수행합니다. 분석 결과에 따라 통계와 양성 등급에 대한 임계값을 조정했습니다. 자동화된 워크플로를 실행한 후, 결과를 반투과 모드에서 수동으로 검증했으며, 부분적으로 LDIR의 μ -ATR 기능을 사용했습니다.

$d > 300\mu$ m의 잠재적인 미세플라스틱 입자와 섬유를 ATR-FTIR 분광법(다이아몬드 또는 게르마늄 크리스탈 사용) 및 LDIR의 반투과 모드와 μ -ATR 장치를 모두 사용하여 분석을 수행했습니다. ATR-FTIR 스펙트럼을 siMPle 데이터베이스(<https://simple-plastics.eu>)와 비교했습니다. 그러나 본 응용 자료에서는 300 μ m 이상 크기 범위는 자세히 논의하지 않습니다.

분석법 검증

지금까지 시장에서 사용 가능한 미세플라스틱의 인증된 레퍼런스 물질은 없습니다. 따라서, 내부 레퍼런스 PE, PET, PP 및 PVDC 입자(20 - 500 μ m)를 사용하여 검증을 수행했습니다(7). 위에서 설명한 워크플로를 사용하여 95% 이상의 입자가 올바르게 식별되었습니다. 또한 매트릭스 매칭 인증 레퍼런스 물질(Plankton, BCR-414, JRC)도 분석했습니다(그림 4). 두 분석 모두 LDIR 8700의 스펙트럼 라이브러리를 확장하는 데 사용되었으며, 자연 및 인위적 입자의 IR 스펙트럼이 추가되었습니다.

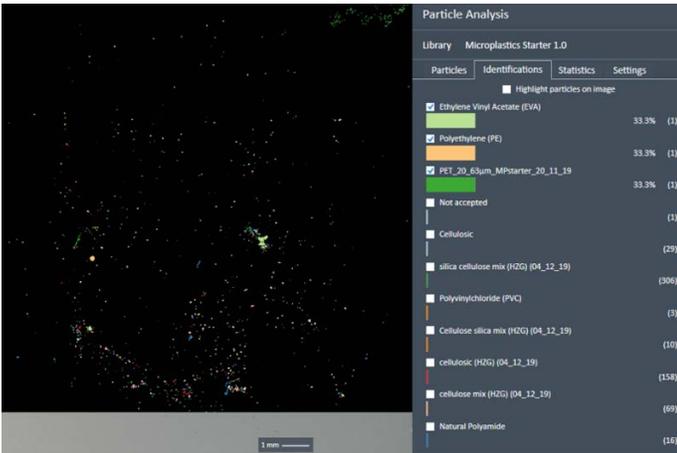


그림 4. 자동화된 LDIR 분석 워크플로에서 유도된 인증 레퍼런스 물질 플라스크톤 (BCR-414)의 적외선 IR 이미지와 폴리머 유형 통계

결과 및 토의

샘플링 위치 1~7에 대한 미세플라스틱 농도(>20 μm)는 10~226개 입자/섭유 m^{-3} 범위였습니다(표 1). 30,471개의 천연 입자, 635개의 합성 입자 및 14개의 다른 폴리머 클러스터가 7개의 시료에서 식별되었습니다. 존재비가 가장 높은 폴리머 클러스터는 아크릴레이트/폴리우레탄/바니시(39.2%) PET(26.0%), PE-Cl(7.1%), PVC(6.0%), PE(5.2%), PP(5.2%) 및 고무(4.3%)였습니다. 미세플라스틱 입자/섭유의 94.9%는 직경이 100 μm 미만이었습니다(그림 5).

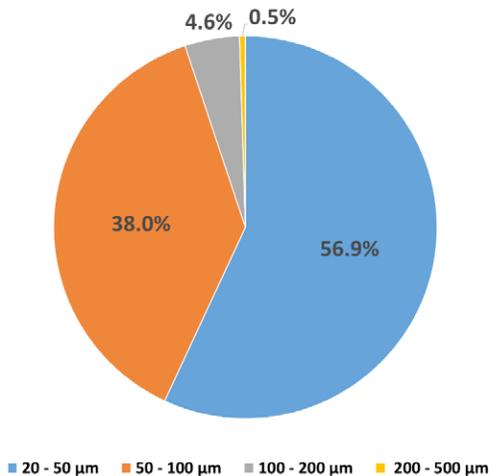


그림 5. 식별된 미세플라스틱 입자/섭유의 다양한 크기 등급 백분율

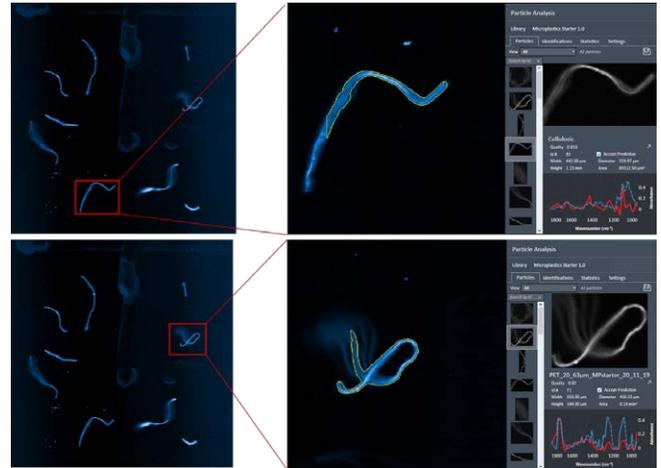


그림 6. 300 μm 이상의 이러한 섭유는 셀룰로오스(상단 이미지, Raman 분석에 의해 인도고 염료를 포함한 것으로 확인됨), PET(하단 이미지) 및 PP(표시되지 않음)인 것으로 식별되었습니다. 이러한 섭유에 대한 ATR-FTIR 분광법과 LDIR 이미징은 100% 일치했습니다.

매트릭스를 거의 완전히 제거한 후에도 식별된 입자의 97.4%는 자연적 기원(셀룰로오스, 규산염, 석탄, 키틴 및 천연 폴리amide IR 스펙트럼)을 가졌으며, 2.6%만 합성 폴리머 유형인 것으로 보였습니다(그림 7). Domogalla-Urbansky 등 (2018)은 미세플라스틱 입자/천연 입자 비율이 1:100과 1:1000 사이인 것을 설명하는 논문을 발표했습니다(마찬가지로 시료 전처리 후)(8).

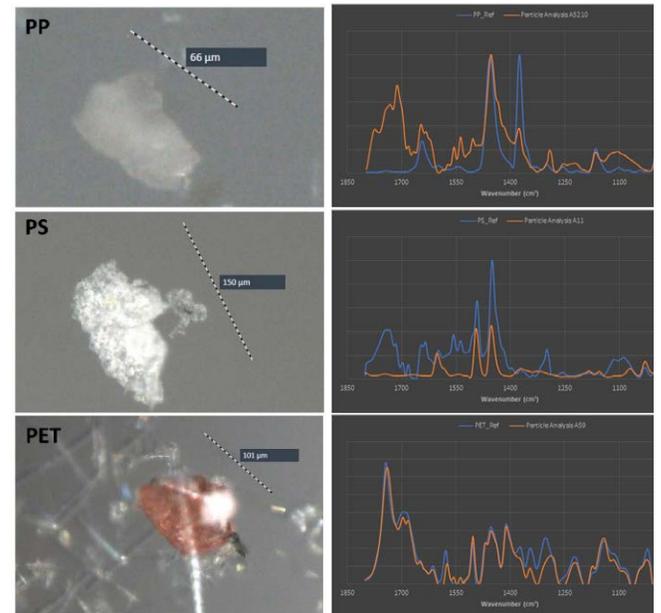


그림 7. 인도양의 해수 시료(< 300 μm)에서 다양한 유형의 미세플라스틱이 검출되었습니다. 폴리프로필렌(상단) 및 폴리스티렌(중간) 스펙트럼은 수동으로 기록되었으며, 폴리에틸렌 테레프탈레이트(하단) 스펙트럼은 자동 분석으로 얻었습니다.

표 1. 필터링된 부피, 시료 위치 및 각 스테이션에서 검출된 미세플라스틱의 수. 또한 각 스테이션에서 존재비가 가장 높은 폴리머 유형도 나열했습니다.

스테이션	시료 부피 [m ³]	좌표	입자/섬유 수	미세플라스틱 입자/섬유 수	존재비가 가장 높은 미세플라스틱 유형(#)	미세플라스틱 농도 [MPs m ⁻³]
1	2.3	07°17.86'S, 97°45.85'E	3150	47	PET (20)	21
2	5.7	07°33.607'S 95°59.252'E	524	54	PET (32)	10
3	1.1	08°08.165'S 92°05.016'E	2112	67	PP (22)	62
4	1.3	08°20.93'S 90°38.76'E	16687	293	아크릴레이트/폴리우레탄/ 바니시(116)	226
5	1.3	08°55.25'S 86°45.32'E	2938	109	PET (40)	86
6	1.4	09°06.639'S 85°27.92'E	5110	239	아크릴레이트/폴리우레탄/ 바니시(69)	165
7	1.4	09°32.11'S 82°34.58'E	857	15	PS (5)	11

본 연구에서는 시료 현탁액의 일부분이나 필터링된 시료의 작은 영역만 분석하는 다른 연구(9, 10)와 달리, 대형 현미경 슬라이드의 분해 프로토콜과 LDIR 이미징을 통해 각 시료를 모두 분석할 수 있었습니다. 이 측정 기술은 추론으로 인한 불확실성을 줄였습니다.

그림 8과 같이, 자연 및 무색 합성 입자들은 종종 유사한 모양 (비드의 경우에도)을 갖기 때문에 육안 식별뿐만 아니라 분광 입자 분석도 사용하는 것이 중요합니다.

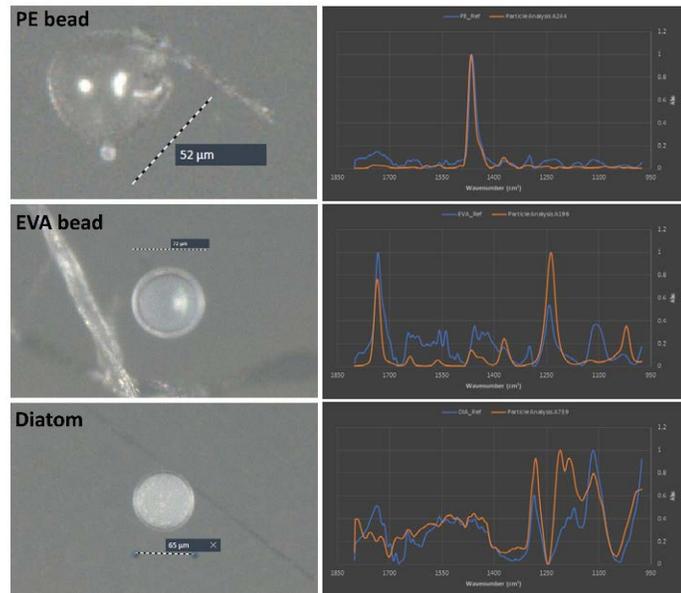


그림 8. 두 개의 미세플라스틱 비드(PE 및 EVA)의 시각적 이미지(왼쪽)와 IR 스펙트럼(가장 적합한 라이브러리 스펙트럼과 비교). 아래 이미지는 시료에서 LDIR 분석으로 식별된 구조를 보여줍니다.

그림 9는 미세플라스틱 입자가 자연 입자(규조류 등)에 어떻게 부착되는지를 보여줍니다. 이 경우, LDIR의 μ -ATR 기능을 사용하여 폴리머 유형을 확인했습니다(라이브러리 스펙트럼과 매우 높은 일치성 보임). 자동 분석 결과를 교차 확인하기 위해 구조류에 부착된 입자 위에 직접 결정을 배치하는 것도 가능했습니다.

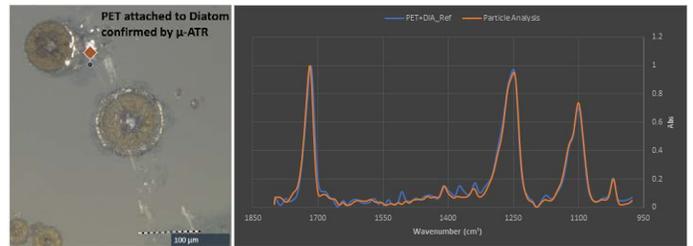


그림 9. 구조류에 부착된 PET 입자(주황색 마커로 표시)의 시각적 이미지(왼쪽)와 μ -ATR-IR 스펙트럼(가장 적합한 라이브러리 스펙트럼과 비교).

연장 인자(종횡비)가 3(11)인 점을 감안할 때 대다수의 미세플라스틱은 마이크로 섬유가 아닌 조각으로 식별되었습니다. 섬유 인식은, 특히 단일 포인트 이미징 기반 접근 방식의 경우 식별이 매우 어렵지만 LDIR 이미징은 환경 시료에서 섬유를 쉽게 식별할 수 있습니다(그림 6 참조).

공기 중 섬유로 인한 측정 오염 문제에 대해서는 과학적 일치를 달성했습니다(12). 결과적으로, 깨끗한 벤치를 엄격하게 사용한 것이 다른 연구에 비해 미세 섬유의 비율이 낮다는 것을 설명할 수도 있습니다.



그림 10. LDIR에 의해 기록된 셀룰로오스 섬유와 자연 입자의 응집체를 보여주는 시각적 이미지.

얽혀있는 섬유(포함된 폴리머의 경우)와 입자 응집체(그림 10)를 분석하기 위해, LDIR의 수동 단일 피크(그림 11) 또는 하이퍼 스펙트럼 이미징 기능이 적용되었습니다.

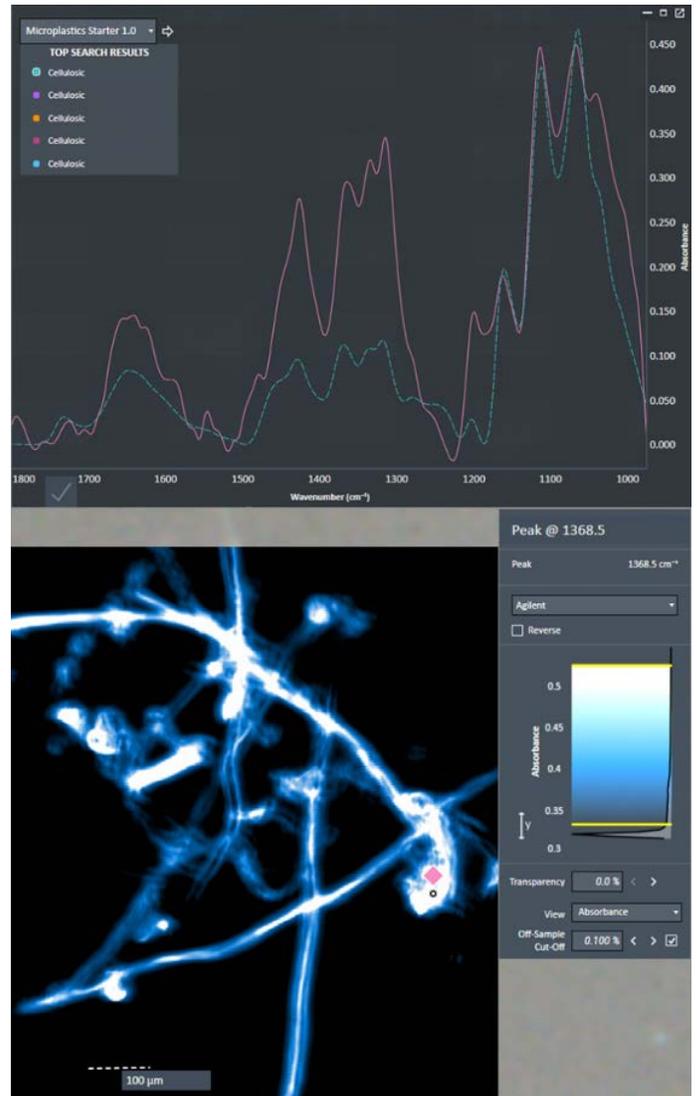


그림 11. 그림 10에 표시된 셀룰로오스 섬유와 자연 입자의 응집체가 $\tilde{\nu} = 1368.5\text{cm}^{-1}$ (오른쪽 하단)에서의 IR 단일 피크 이미지 및 IR 스펙트럼(상단).

μ -ATR과 함께 다중 피크 분석을 이용하면 생체막으로 채워진 영역을 포함한 입자 분석에 유용한 것으로 입증되었습니다. 예를 들어, 그림 12는 명확한 셀룰로오스 IR 스펙트럼과 우수한 PU 및 아크릴레이트 스펙트럼을 보여주는 영역을 나타내는 대형 폴리우레탄(PU) 입자를 보여줍니다. 둘 모두 수동 반투과 및 μ -ATR 분석으로 확인되었습니다. LDIR은 환경 응집체의 다양한 여러 영역 사이에서 훌륭한 공간 분별력을 제공하지만, 폴리머 혼합물과 복합물로 구성된 입자의 경우에도 유용합니다. 다중 피크는 환경 미세플라스틱에서 이러한 혼합물의 다양한 성분을 식별하는 데 도움을 줄 수 있습니다.

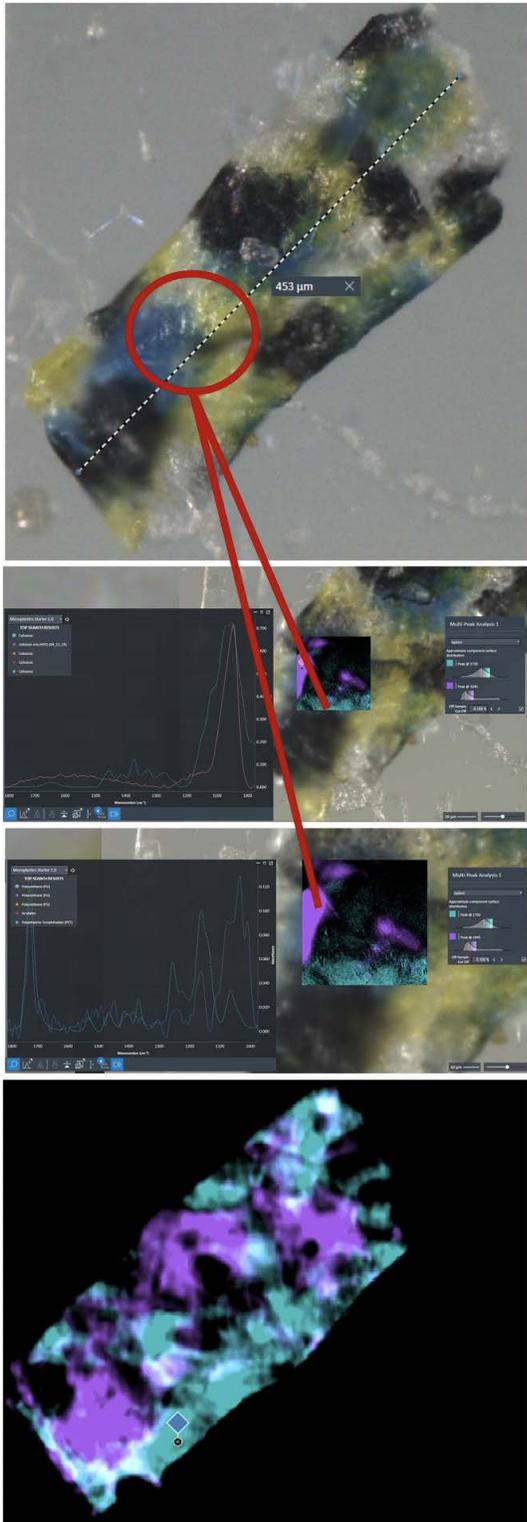


그림 12. $\tilde{\nu} = 1045\text{cm}^{-1}$ 및 $\tilde{\nu} = 1730\text{cm}^{-1}$ (중간)에서 강한 흡수를 보여주는 다중 피크 이미징(하단) 분석 결과로, 생체막으로 채워진 PU 입자(상단)로 추정됨. 보라색 영역은 셀룰로오스 레퍼런스 스펙트럼(두 번째 그림)과 높은 일치성을 보여주는 반면, 청록색 영역은 PU 및 아크릴레이트 스펙트럼(세 번째 그림)에 해당합니다.

다른 미세플라스틱 연구와 비교

연구 상호 비교는 서로 다른 분석법(샘플링 및 검출)을 적용했기 때문에 어려움이 따르지만 보고된 농도($10\sim 226\text{MPs m}^{-3}$)는 FTIR 또는 Raman 마이크로 분광법을 기반으로 한 다른 연구와 잘 일치합니다. Lorenz 등 (2019)은 북해 남부(지표수)에서 만타 망(manta net)으로 채취한 시료에서 $0.1\sim 245.4$ 개의 미세플라스틱 입자 m^{-3} 를 발견했습니다(9). Enders 등(2015)은 대서양(수면 아래 3m)에서 분취 여과 장치로 채취한 시료에서 $13\sim 501\text{MPs m}^{-3}$ 의 입자를 검출했습니다(13). 모델링 및 모니터링 데이터에 따르면, 지표수의 미세플라스틱 농도는 수주(water column)에 비해 최대 30배까지 더 높을 수 있습니다(14-16). 따라서, 샘플링 지역은 미립자 플라스틱 오염도가 비교적 높을 수 있습니다(해수면에서 높은 농도를 나타냄).

본 연구에서 검출된 폴리머 유형은 이 가설을 뒷받침합니다. 본 연구에서 발견된 두 번째(PET), 세 번째(PE-Cl) 및 네 번째(PVC)로 높은 존재비를 보이는 폴리머의 전형적인 밀도는 모두 해수의 밀도를 초과했습니다(첫 번째로 존재비가 가장 높은 아크릴레이트/폴리우레탄/바니시는 보다 큰 밀도 분포를 가질 수 있음). 주목할 만한 사실은 저밀도 폴리머 PE와 PP(생산량의 약 50%)가 발견된 각 미세플라스틱에서 모두 5.2%만을 차지한다는 것입니다. 이러한 폴리머는 생물 오손(biofouling)으로 인해 가라앉고 해저로 이동할 때까지 해수면에 남아 있습니다. 그러나 이 가설은 향후 다양한 깊이에서 시료를 채취해 입증해야 합니다(심도있는 프로파일링).

결론

LDIR 이미징은 대량의 해수 시료에서 미세플라스틱 입자 및 섬유를 검출하고 특성을 규명하는 데 성공적으로 적용되었습니다. 결과는 미세플라스틱 오염도가 비교적 높은 것으로 나타났습니다.

자동화된 워크플로의 결과는 육안 검사, 최소 5회의 수동 반투과 IR 측정, 그리고 부분적으로 $\mu\text{-ATR IR}$ 분석을 통해 철저한 재검증을 수행했습니다. $300\mu\text{m}$ 보다 큰 경우, 잘 확립된 미세플라스틱 스펙트럼 데이터베이스를 사용하는 LDIR 이미징과 기존 ATR-FTIR 분석 사이에서 뛰어난 일치성을 실현했습니다. 일반적인 매트릭스 스펙트럼으로 데이터베이스를 확장하여 워크플로의 정확도를 더욱 높일 수 있었습니다.

LDIR 화학 이미징은 시간 효율적이고 고도로 자동화되어 빠른 데이터 제공이 필요한 대규모 미세플라스틱 연구 또는 모니터링 활동과 같은 마이크로 분광법의 우선 선택이 될 가능성이 높습니다.

참고 문헌

1. Geyer, R., J.R. Jambeck, and K.L. Law, *Production, use, and fate of all plastics ever made*. Science Advances, **2017**, 3(7): p. e1700782.
2. Jambeck, J.R., R. Geyer, C. Wilcox, T.R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, and K.L. Law, *Plastic waste inputs from land into the ocean*. Science, **2015**, 347(6223): p. 768.
3. Eriksen, M., L. Lebreton, H. Carson, M. Thiel, C. Moore, J. Borerro, F. Galgani, P. Ryan, and J. Reisser, *Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea*. PLoS ONE, **2014**, 9.
4. Ivleva, N.P., A.C. Wiesheu, and R. Niessner, *Microplastic in Aquatic Ecosystems*. Angewandte Chemie International Edition, **2017**, 56(7): p. 1720-1739.
5. Koelmans, A., M. Kooi, K. Law, and E. Seville, *All is not lost: Deriving a top-down mass budget of plastic at sea*. Environmental Research Letters, **2017**, 12.
6. Song, Y.K., S.H. Hong, M. Jang, G.M. Han, S.W. Jung, and W.J. Shim, *Combined Effects of UV Exposure Duration and Mechanical Abrasion on Microplastic Fragmentation by Polymer Type*. Environmental Science & Technology, **2017**, 51(8): p. 4368-4376.
7. Hildebrandt, L., N. Voigt, T. Zimmermann, A. Reese, and D. Proefrock, *Evaluation of continuous flow centrifugation as an alternative technique to sample microplastic from water bodies*. Marine Environmental Research, **2019**, 151: p. 104768.
8. Domogalla-Urbansky, J., P.M. Anger, H. Ferling, F. Rager, A.C. Wiesheu, R. Niessner, N.P. Ivleva, and J. Schwaiger, *Raman microspectroscopic identification of microplastic particles in freshwater bivalves (*Unio pictorum*) exposed to sewage treatment plant effluents under different exposure scenarios*. Environ Sci Pollut Res Int, **2019**, 26(2): p. 2007-2012.
9. Lorenz, C., L. Roscher, M.S. Meyer, L. Hildebrandt, J. Prume, M.G.J. Löder, S. Primpke, and G. Gerdts, *Spatial distribution of microplastics in sediments and surface waters of the southern North Sea*. Environmental Pollution, **2019**, 252: p. 1719-1729.
10. Domogalla-Urbansky, J., P.M. Anger, H. Ferling, F. Rager, A.C. Wiesheu, R. Niessner, N.P. Ivleva, and J. Schwaiger, *Raman microspectroscopic identification of microplastic particles in freshwater bivalves (*Unio pictorum*) exposed to sewage treatment plant effluents under different exposure scenarios*. Environmental Science and Pollution Research, **2019**, 26(2): p. 2007-2012.
11. Cole, M., *A novel method for preparing microplastic fibers*. Scientific Reports, **2016**, 6(1): p. 34519.
12. Prata, J.C., J.L. Castro, J.P. da Costa, A.C. Duarte, T. Rocha-Santos, and M. Cerqueira, *The importance of contamination control in airborne fibers and microplastic sampling: Experiences from indoor and outdoor air sampling in Aveiro, Portugal*. Marine Pollution Bulletin, **2020**, 159: p. 111522.
13. Enders, K., R. Lenz, C.A. Stedmon, and T.G. Nielsen, *Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10\mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution*. Marine Pollution Bulletin, **2015**, 100(1): p. 70-81.
14. Kooi, M., J. Reisser, B. Slat, F.F. Ferrari, M.S. Schmid, S. Cunsolo, R. Brambini, K. Noble, L.-A. Sirks, T.E.W. Linders, R.I. Schoeneich-Argent, and A.A. Koelmans, *The effect of particle properties on the depth profile of buoyant plastics in the ocean*. Scientific Reports, **2016**, 6(1): p. 33882.
15. Brunner, K., T. Kukulka, G. Proskurowski, and K.L. Law, *Passive buoyant tracers in the ocean surface boundary layer: 2. Observations and simulations of microplastic marine debris*. Journal of Geophysical Research: Oceans, **2015**, 120(11): p. 7559-7573.
16. Lenaker, P.L., A.K. Baldwin, S.R. Corsi, S.A. Mason, P.C. Reneau, and J.W. Scott, *Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column and Surficial Sediment from the Milwaukee River Basin to Lake Michigan*. Environmental Science & Technology, **2019**, 53(21): p. 12227-12237.

더 자세한 정보

본 응용 자료에는 분석법 개발과 대규모 데이터 세트에 구성된 진행 중인 연구 작업의 내용이 일부 포함되어 있으며, 피어 리뷰 과학 저널에 발표할 예정입니다.

www.agilent.com/chem

DE.6083912037

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

© Agilent Technologies, Inc. 2020
2020년 10월 12일, 한국에서 인쇄
5994-2421KO

한국에질런트테크놀로지스(주)
대한민국 서울특별시 서초구 강남대로 369,
A+ 에셋타워 9층, 06621
전화: 82-80-004-5090 (고객지원센터)
팩스: 82-2-3452-2451
이메일: korea-inquiry_lsca@agilent.com

 **Agilent**
Trusted Answers