

미세플라스틱: 신종 오염 우려 물질

Microplastics: Contaminants of Emerging Concern

국회미래연구원 브라운백 세미나
국회의원 회관
2019년 11월 22일

심원준
한국해양과학기술원



우리는 지금 어느 시대에?



기원전 2,500,000 ----- 10,000 ----- 1,000 ----- 300 ----- 0 ----- 기원후 2019

구석기시대

신석기시대

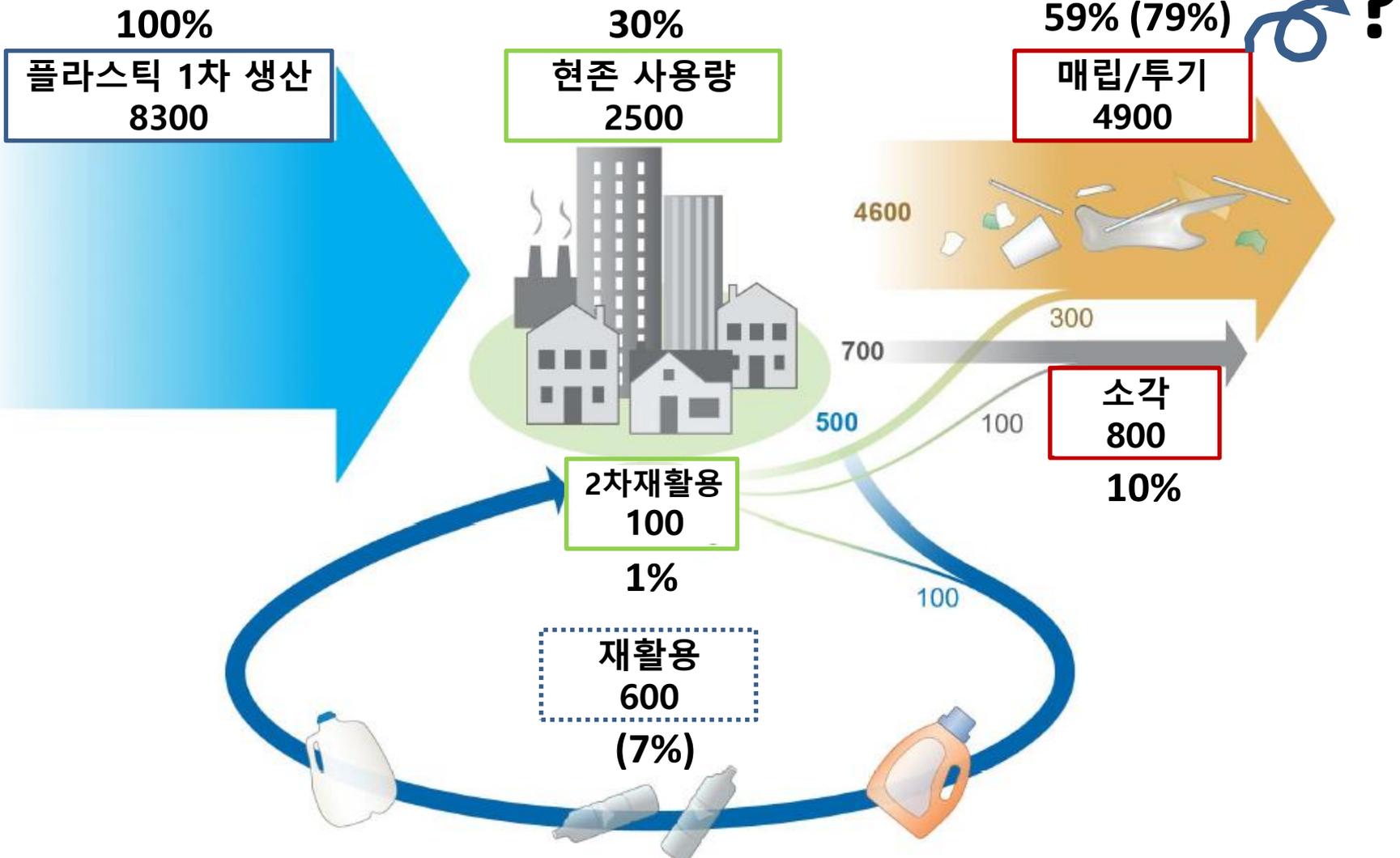
청동기시대

철기시대

?

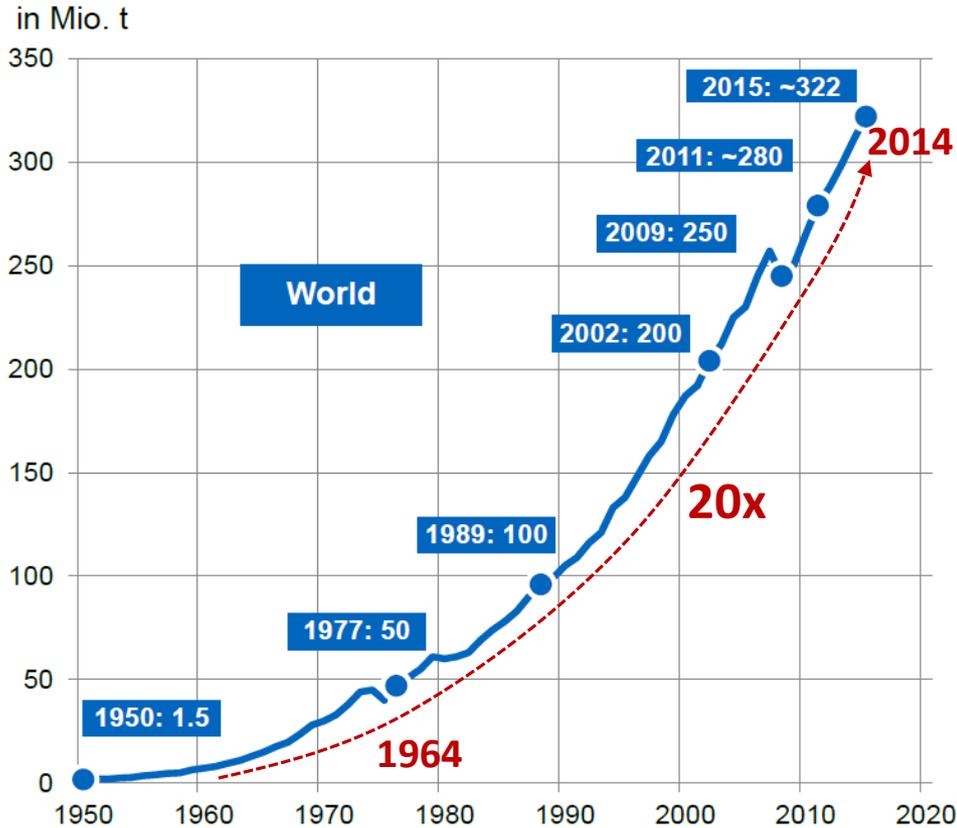
과거 65년간 플라스틱 누적 생산량과 폐기물 발생량

1950-2015년 (단위: 백만톤)



Geyer et al. (2017) *Science advances*

전세계 플라스틱 생산량 변화



Plastics Europe Report (2016)

● 2011년 2억8천만톤 생산
(PE, PP, PVC, PS, PET: 85%)

● 2010년 2억7천만톤 플라스틱 폐기물

● 2010년 8백만톤 해양 유입

최근 13년 간 전체 누적 생산량의 50% 생산

플라스틱 쓰레기의 해양 유입



<https://www.alamy.com>

참치 6백5십만 톤

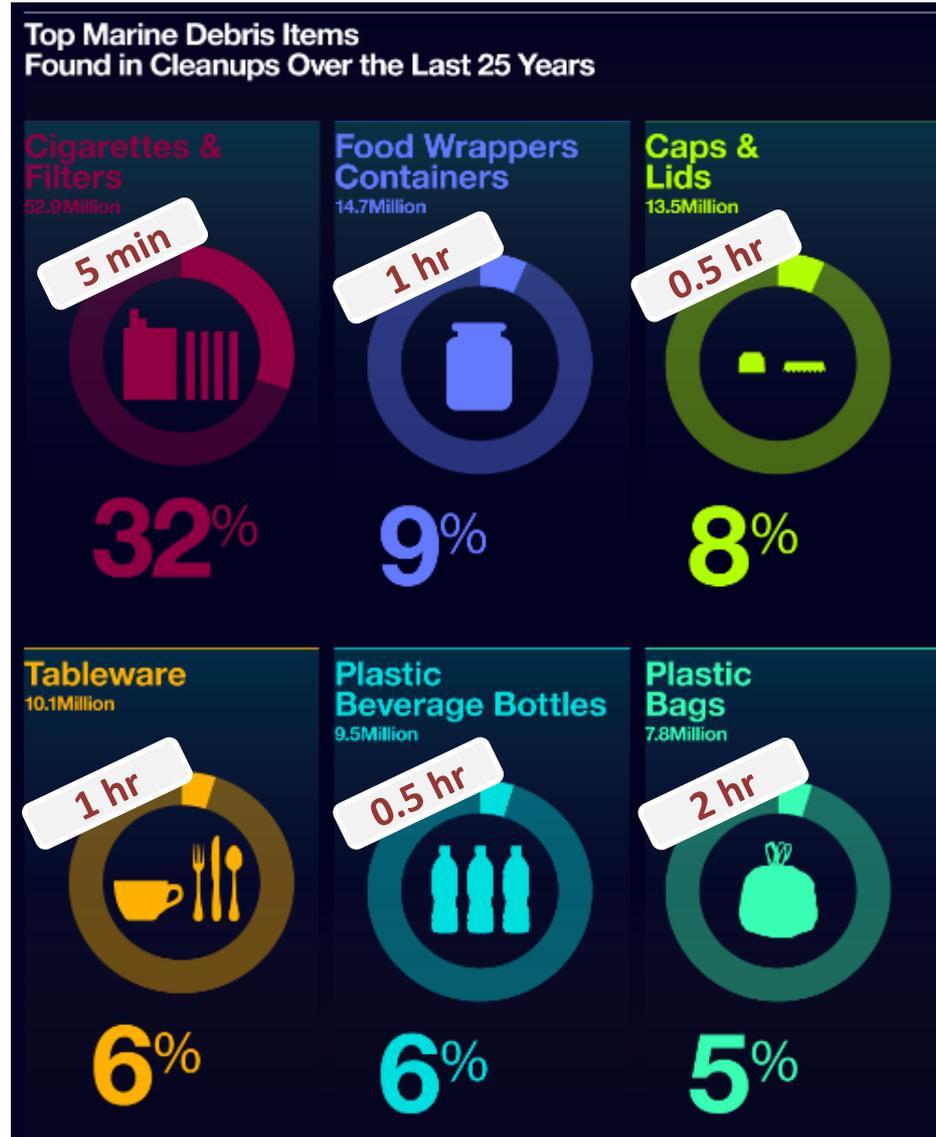
플라스틱 8백만 톤

<https://www.forbes.com>

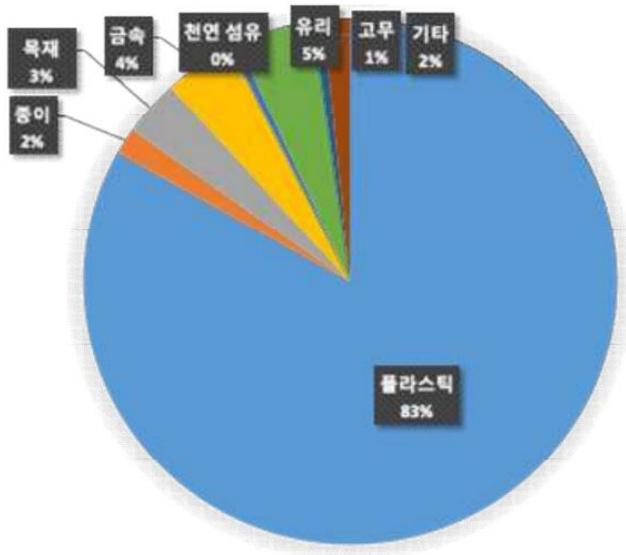


<https://public.wmo.int>

해안 플라스틱 쓰레기 종류: 전세계 평균



해안 플라스틱 쓰레기 종류: 우리나라



| 순위 | 재질 | 개수 | 플라스틱 중 비율 | 전체 쓰레기 중 비율 |
|-----------------|---------------|--------|-----------|-------------|
| 1 | 뱃줄(고인 것, 어업용) | 4,020 | 15.1% | 12.6% |
| 2 | 음료수병, 각종 뚜껑 | 3,656 | 13.8% | 11.5% |
| 3 | 경질 파편 | 2,440 | 9.2% | 7.6% |
| 4 | 스티로폼 부표 | 2,302 | 8.7% | 7.2% |
| 5 | 라면봉지, 과자봉지 | 1,694 | 6.4% | 5.3% |
| 6 | 비닐봉지 | 1,455 | 5.5% | 4.6% |
| 7 | 끈(노끈, 포장용끈) | 1,448 | 5.4% | 4.5% |
| 8 | 발포 파편 | 1,181 | 4.4% | 3.7% |
| 9 | 스티로폼 식품용기 | 888 | 3.3% | 2.8% |
| 10 | 기타 플라스틱 제품 | 768 | 2.9% | 2.4% |
| 그외 | | 6,718 | 25.3% | 21.0% |
| 플라스틱 합계 | | 26,570 | 100.0% | 83.2% |
| 전체 쓰레기 합계 | | 31,930 | | 100.0% |

출처: 국가해안쓰레기모니터링 보고서(2018) 해양수산부·해양환경공단

해양쓰레기에 의한 환경 및 경제적 피해



©자남준

- 생물/생태계 영향 (전세계 연간 피해 13조원: UNEP 보고서)
 - 얽힘(entanglement) 및 섭식(ingestion) 피해
 - 서식지 훼손 및 파괴



- 심미적 및 관광 영향(2011거제도 관광피해 ~419억원: Jang et al. 2014)
 - 경관 해변의 심미적 영향
 - 관광 피해



©김상수

- 수산업 영향(경상남도 연간 피해 1,348억원: UNEP-IEEP 보고서)
 - 폐어구에 의한 유령어업
 - 작업 중 피해



©강대석

- 선박 안전(전체 선박사고의 11%/연간피해 680억원: 해양수산부)
 - 폐어구에 의한 추진기 얽힘
 - 냉각계통 막힘

국내 사례



생물피해:얽힘
(천연기념물 노랑부리저어새)



생물피해:섭식(2018. 8.29 제주 중문 방류 붉은바다거북이
9월 9일 부산에서 좌초된 채 발견(12일 간 먹은 플라스틱)



관광피해(거제도 해변)



어업피해(거제도 동쪽 해안 주민 지인망)

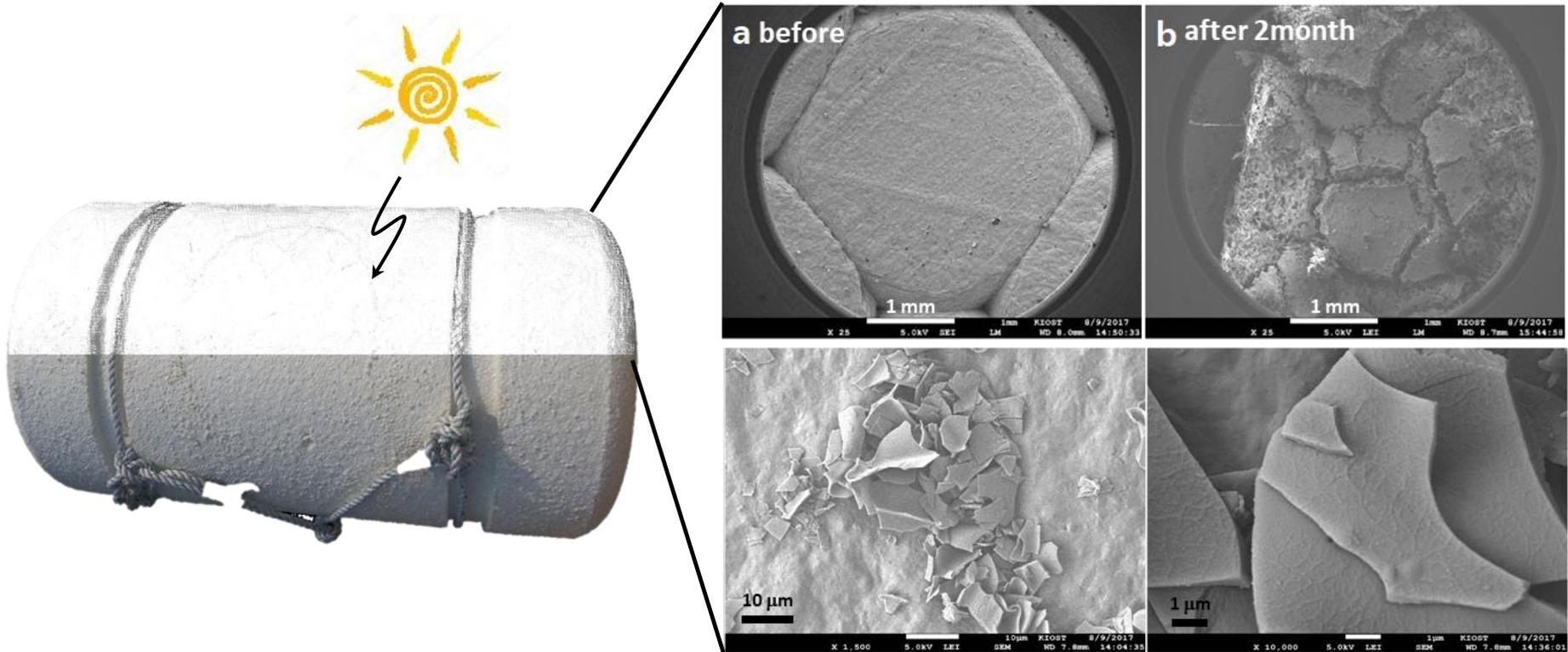


선박 안전(2019.5.31 전북부안 어선 전복 사고 발
단은 플라스틱 로프 쓰레기의 프로펠러 얽힘)

플라스틱 분해되는데 수십 / 수 백 년 걸릴까?

네! 생물학적 분해

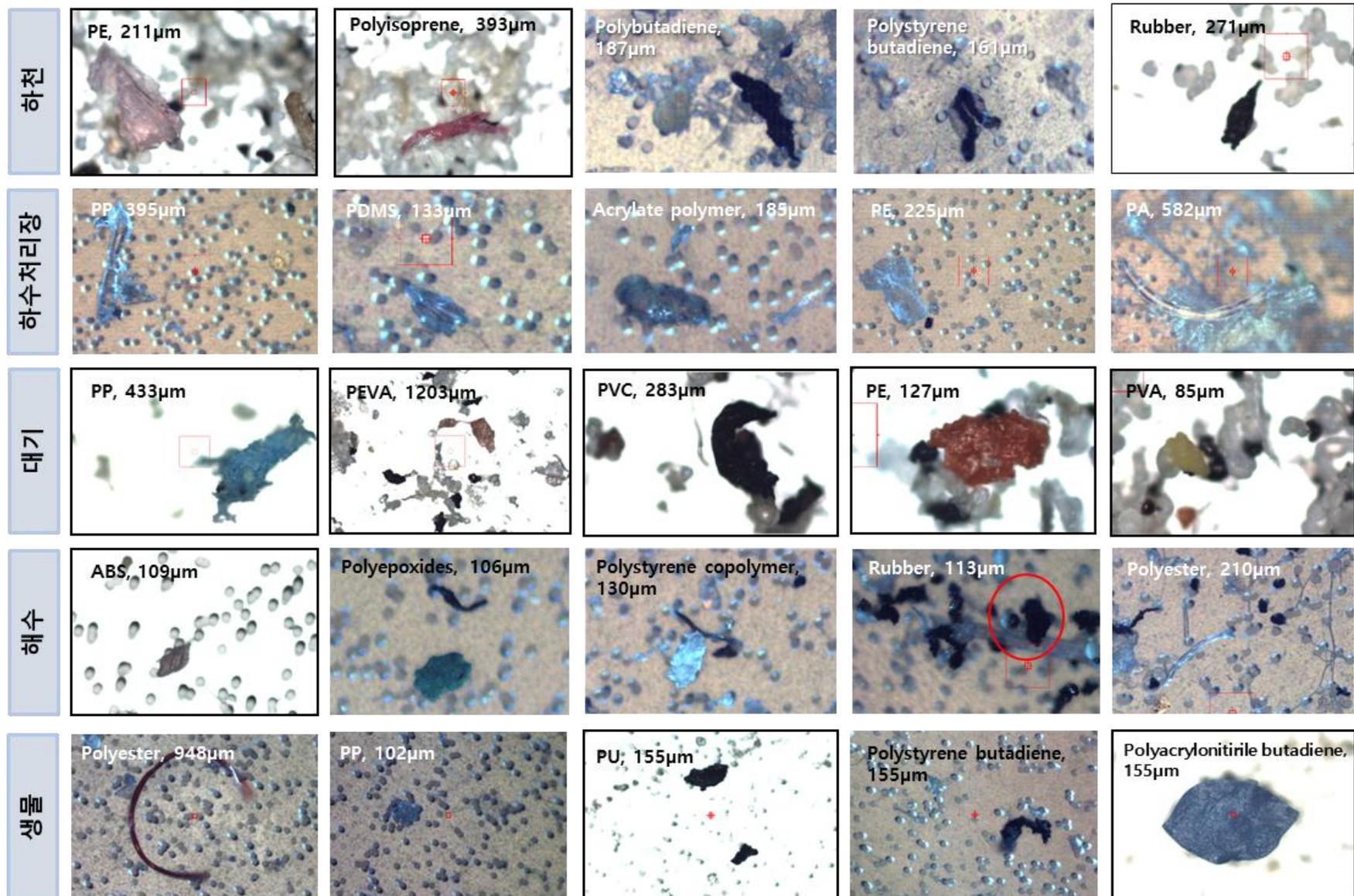
아니요! 광분해



● 폴리스티렌 컵이 생분해 되는데 80년 소요

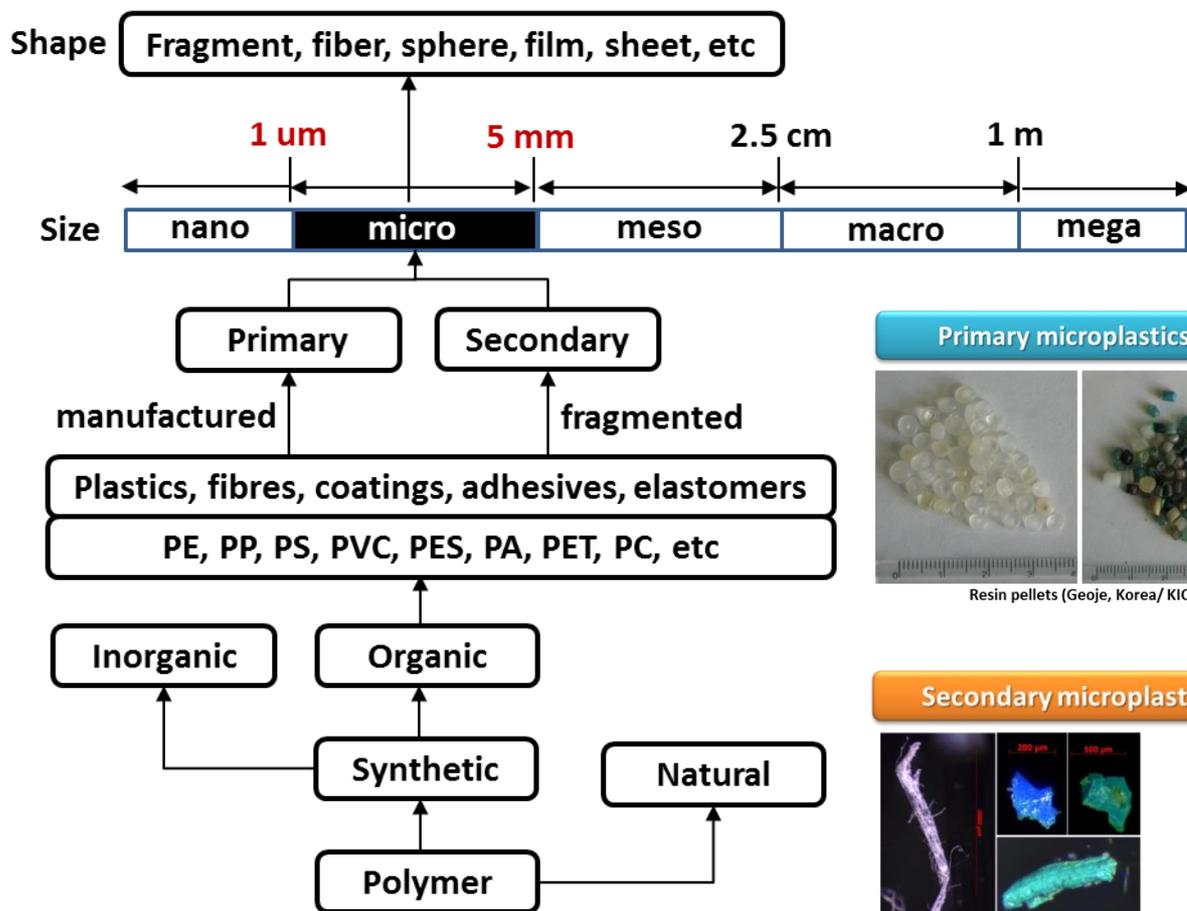
U.S. National Park Service; Mote Marine Lab, Sarasota, FL.
 "Garbage In, Garbage Out", Audubon magazine, Sept/Oct 1998.

다양한 환경시료 중에서 검출된 미세플라스틱



미세플라스틱

- 크기 범위 0.001-5 mm의 고형의 합성수지(플라스틱)



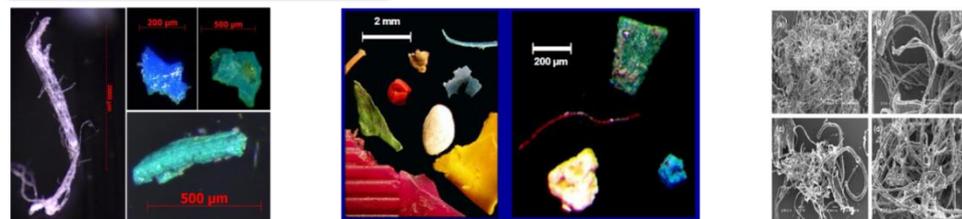
Primary microplastics



Resin pellets (Geoje, Korea/ KIOST)

PE microbeads in cosmetics

Secondary microplastics

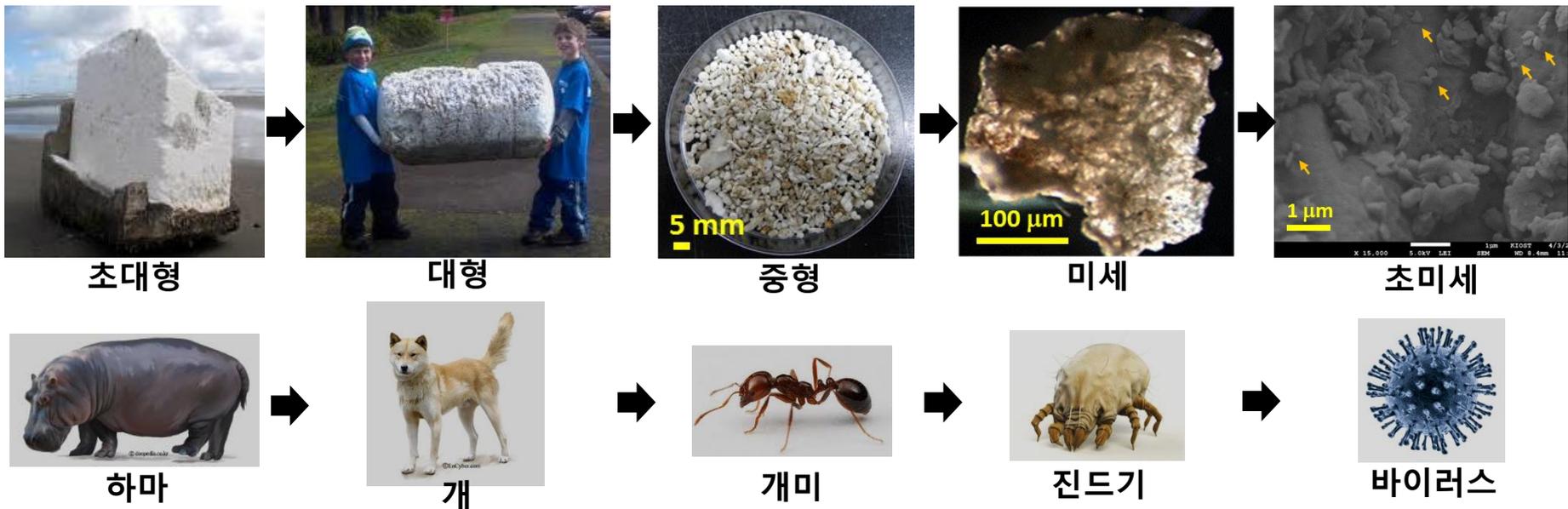


Sand beach (Geoje/KIOST)

Sewage sludge (Zubris & Richards, 2005)

Lobster (Murray & Cowie, 2011)

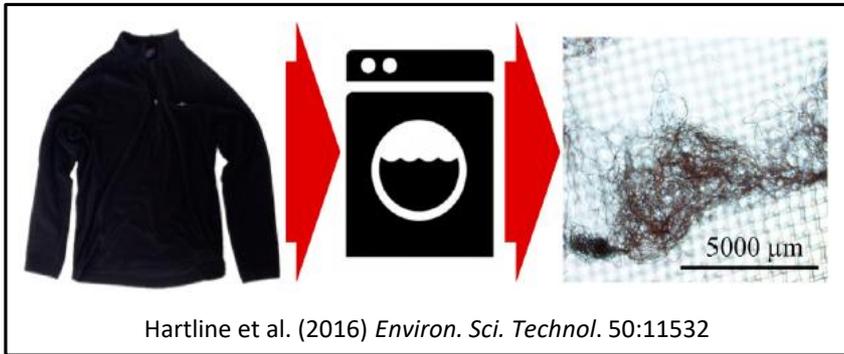
미세플라스틱 오염: 플라스틱 오염의 패러다임 전환



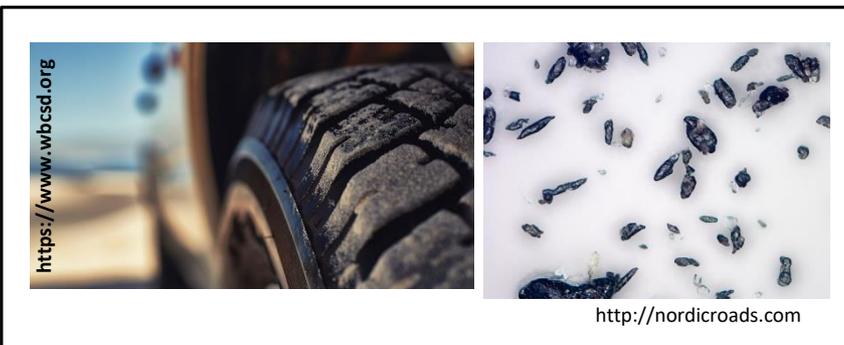
증가 ...

- 숫자
- 생물이용도
- 섭식생물
- 독성
- 검출 어려움
- 수거처리 어려움

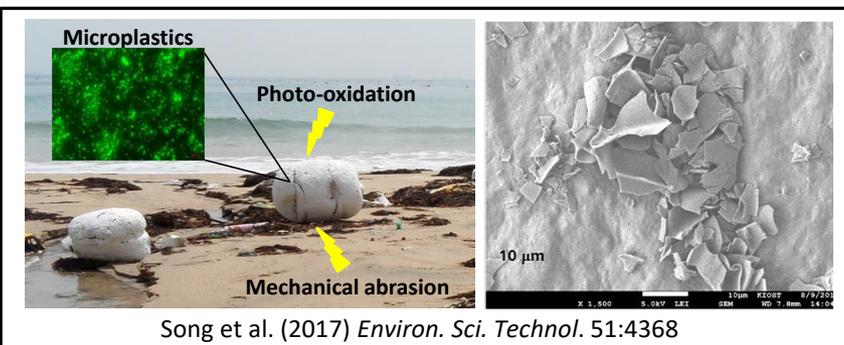
2차 미세플라스틱의 주요 발생원



- 섬유
- 세탁 시 마찰력
- 미세섬유
- 세탁기 -> 하수종말처리장 -> 강 -> 바다



- 차량 타이어
- 운행 중 도로와의 마찰
- 타이어 마모 입자(Tyre wear particle)
- 도로 먼지 -> 표면수 -> 강 -> 바다



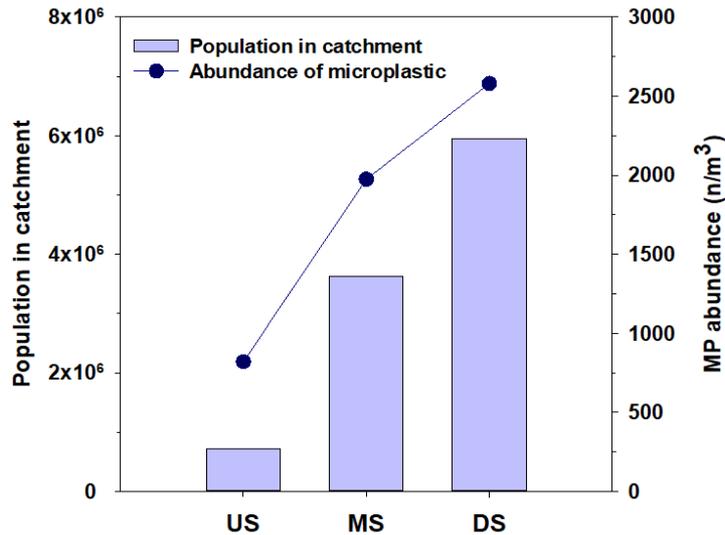
- 환경 중 플라스틱 쓰레기
- 광화학적 산화
- 조각(Fragment), 섬유
- 환경으로 직접 유입

2차 미세플라스틱의 주 발생원, 형태, 재질 예시

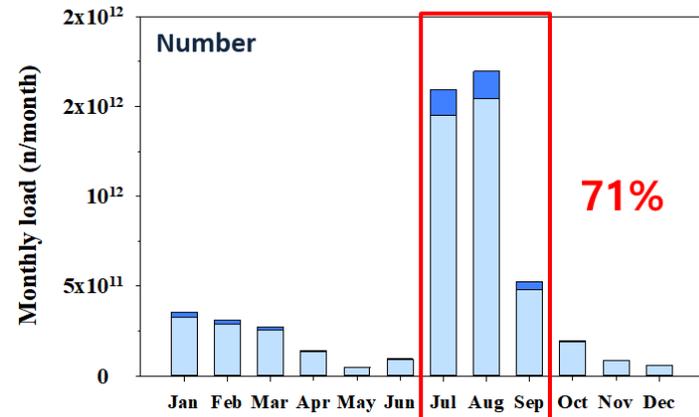
- **옷 세탁 시 이탈**: 섬유 형태(폴리에스터, 나일론, 아크릴)
- **자동차 타이어 마모**: 파편 형태(합성고무; SBR)
- **비닐봉지**: 필름 형태 (PE, PVC)
- **각종 플라스틱 제품**: 파편 형태 (PE, PP, PET, PC, PVC)
- **양식 부자**: 구형 또는 파편 형태 (발포스티렌; EPS)
- **어구(어망, 밧줄 등)**: 섬유 형태(PE, PP)
- **페인트**: 파편 형태(alkyd)
- **FRP선**: 파편 형태(poly(styrene:acrylate))

강의 미세플라스틱의 오염과 강을 통한 해양 유입: 낙동강 사례

시공간 분포

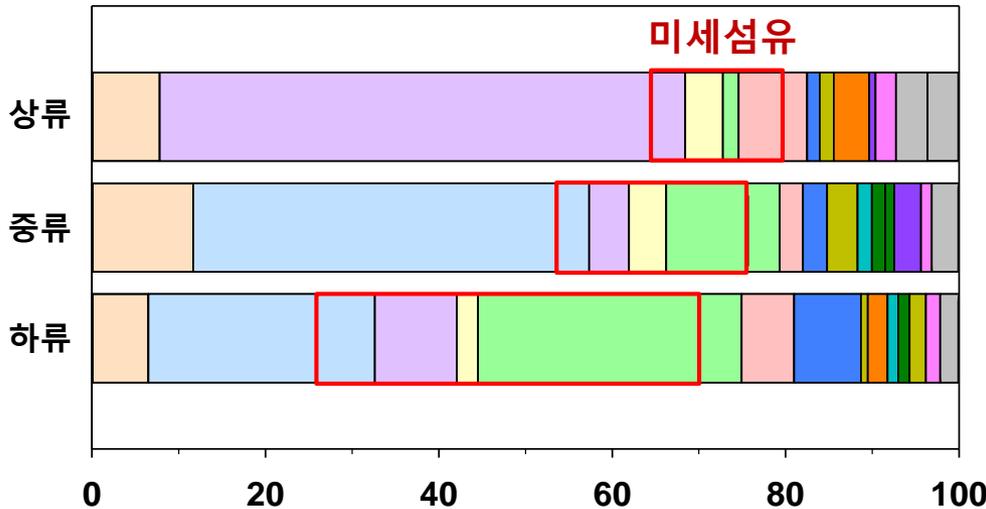


강을 통한 유입량 추정 (2017 기준)



Eo et al. (2019) *Water Res.* 160: 228

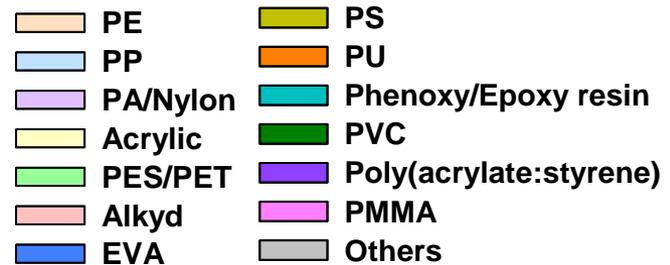
플라스틱 조성



✓ 년간 유입량

- 5.4×10^{12} n/yr

- 53.3 ton/yr



세탁을 통한 미세섬유 배출

세탁기 배출수 시범 조사



1. polyester 100%
2. polyester 100%
3. polyester 95% + spandex 5%
4. polyester 95% + spandex 5%
5. polyester 95% + spandex 5%
6. polyester 100%
7. polyester 100%
8. Nylon 100%



유기물
제거



- 104 mg fiber/kg textile
- 848,804 fiber/kg textile
- 229,571 fiber/# of textile

대기 침적을 통한 해양 유입: 마산만 돌섬 대기 침적 시료 중 미세플라스틱

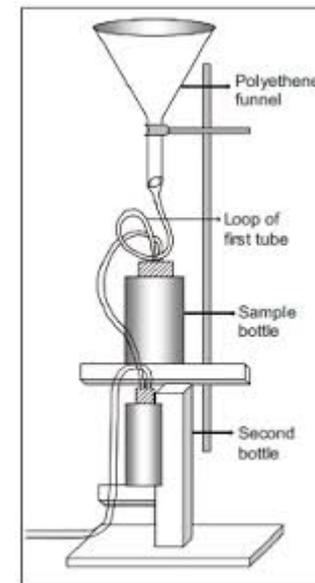
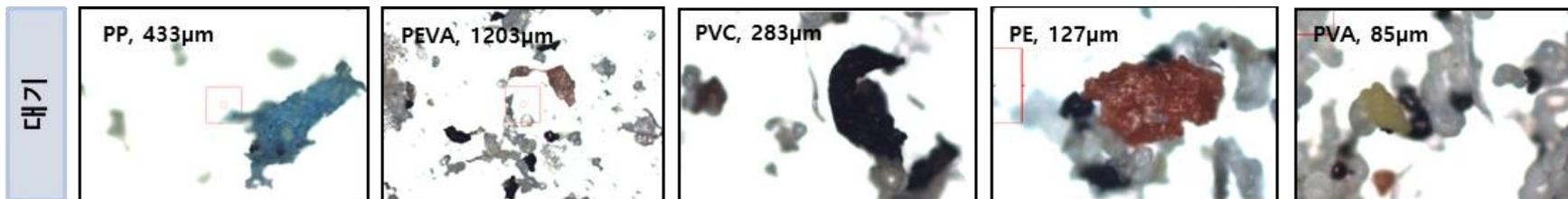


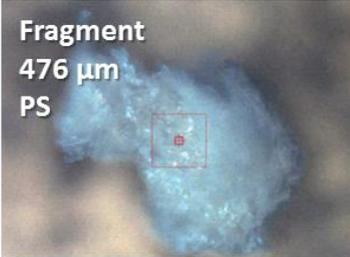
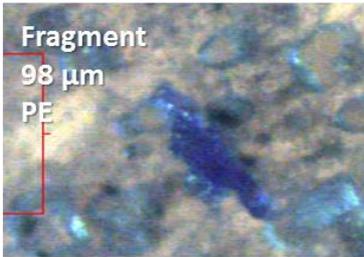
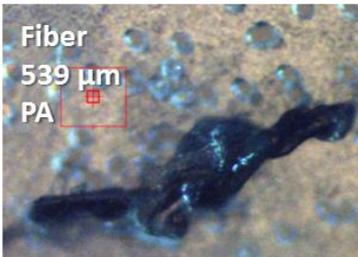
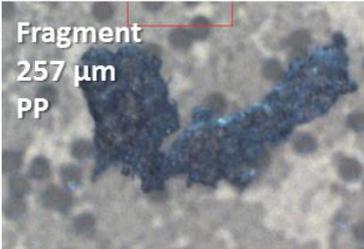
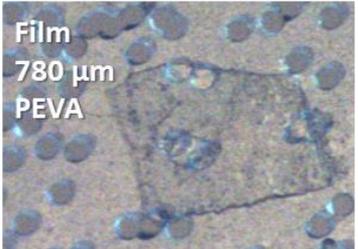
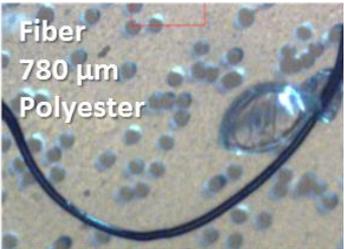
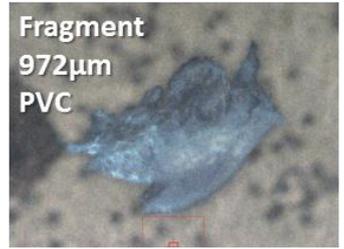
Fig. 2. Sample collector.



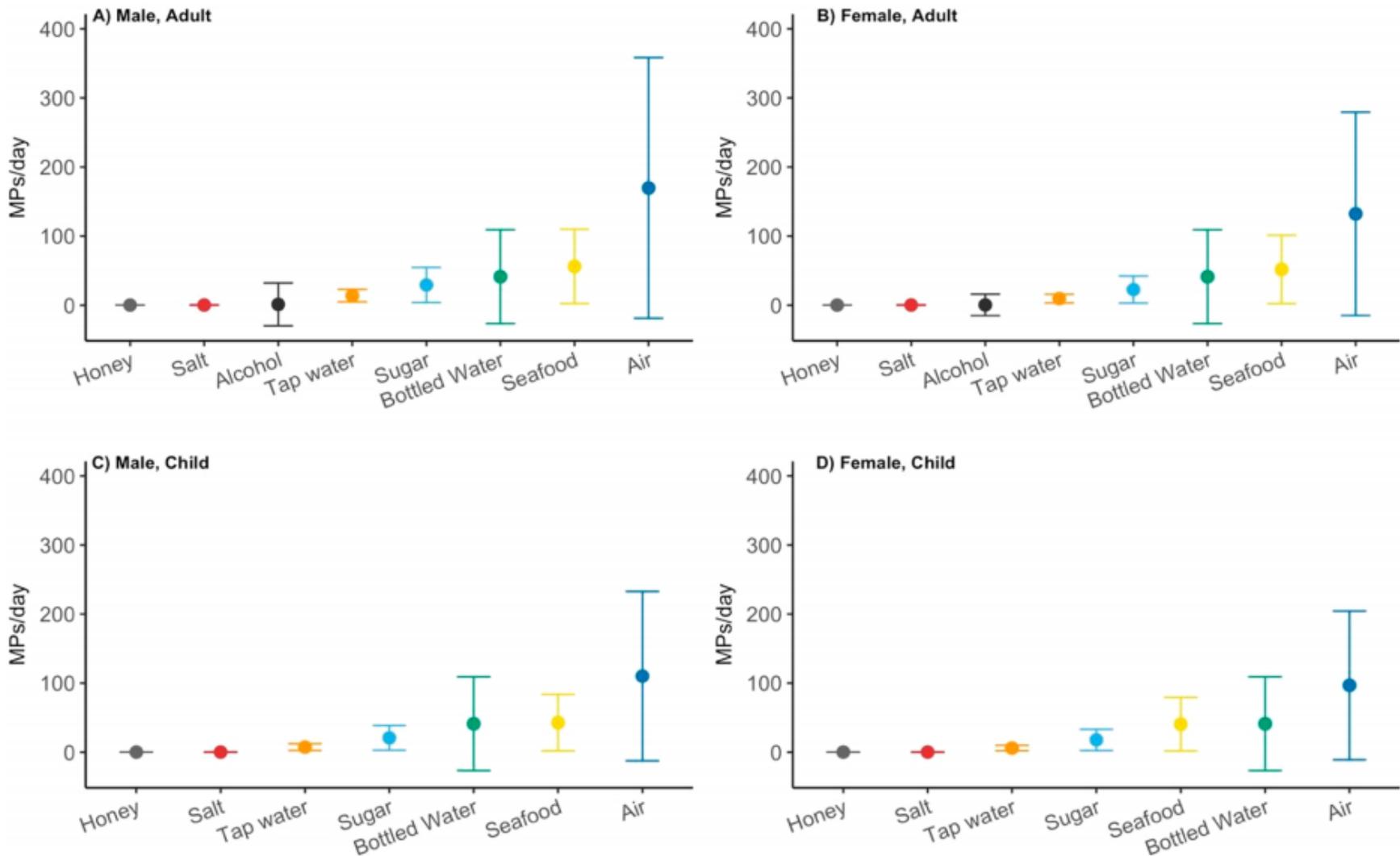
미세플라스틱은 전 지구적으로 분포 예시

- 해양
 - 연안, 외해, 대양, 극지방 해수
 - 연안 및 심해 퇴적물
 - 극지방 빙하
 - 동물플랑크톤, 패류, 갯지렁이, 어류, 갑각류, 새, 고래
- 육상/담수
 - 하천수 및 하천 퇴적물
 - 호수 및 퇴적물
 - 담수 어패류
 - 토양
 - 하수/폐수 종말처리장 방출수 및 슬러지
- 대기
 - 실내·외 공기
- 음용수/식품
 - 수돗물, 먹는샘물, 맥주, 소금, 꿀, 수산물

국내 시판(서울, 부산, 광주) 패류 조직 중 검출 미세플라스틱

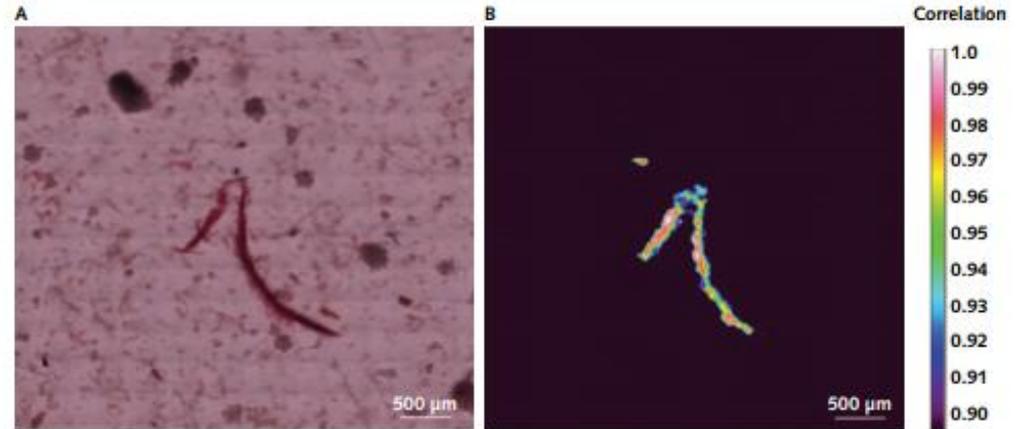
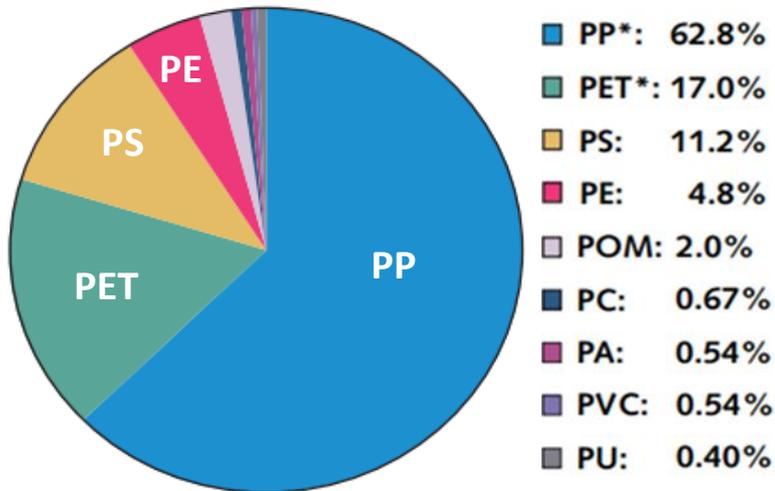
| | | | | |
|------------|---|---|--|---|
| <p>껍질</p> | <p>Fragment 476 μm PS</p>  | <p>Fragment 98 μm PE</p>  | <p>Fiber 539 μm PA</p>  | <p>Fiber 706 μm PP</p>  |
| <p>담치</p> | <p>Fragment 157 μm PS</p>  | <p>Fragment 257 μm PP</p>  | <p>Film 780 μm PEVA</p>  | <p>Fiber 780 μm Polyester</p>  |
| <p>바지락</p> | <p>Fragment 461 μm PP</p>  | <p>Fragment 183 μm PE</p>  | <p>Fragment 250 μm PET</p>  | <p>Fiber >1 mm Acrylic</p>  |
| <p>가리비</p> | <p>Fragment 103 μm PP</p>  | <p>Fragment >1 mm Polyester</p>  | <p>Fragment 346 μm PET</p>  | <p>Fragment 972 μm PVC</p>  |

미세플라스틱의 인체 노출: 복미 1일 노출량



Cox et al. (2019) *Environ. Sci. Technol.* 53: 7068

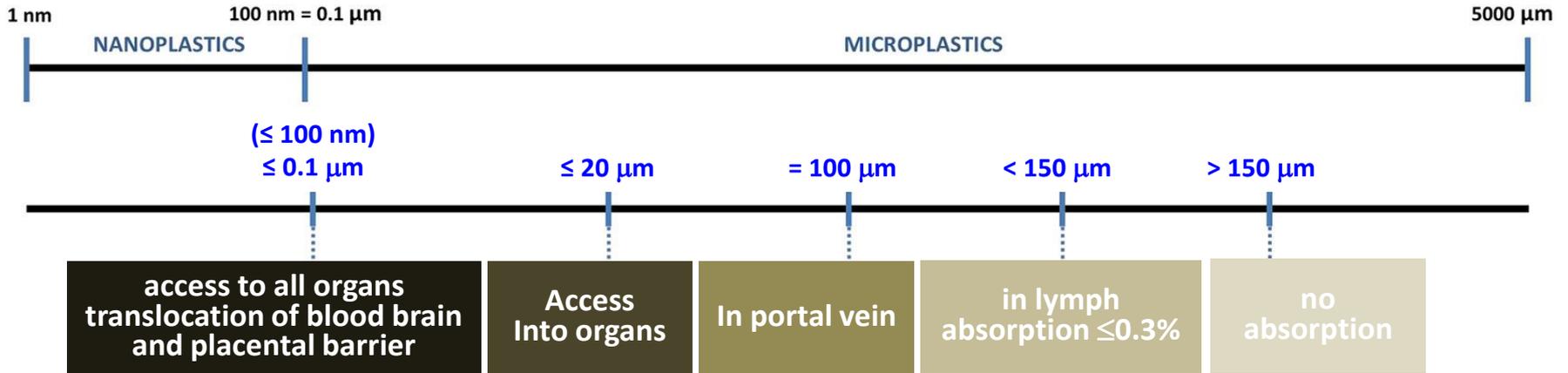
인체 노출: 인분 중 미세플라스틱 검출



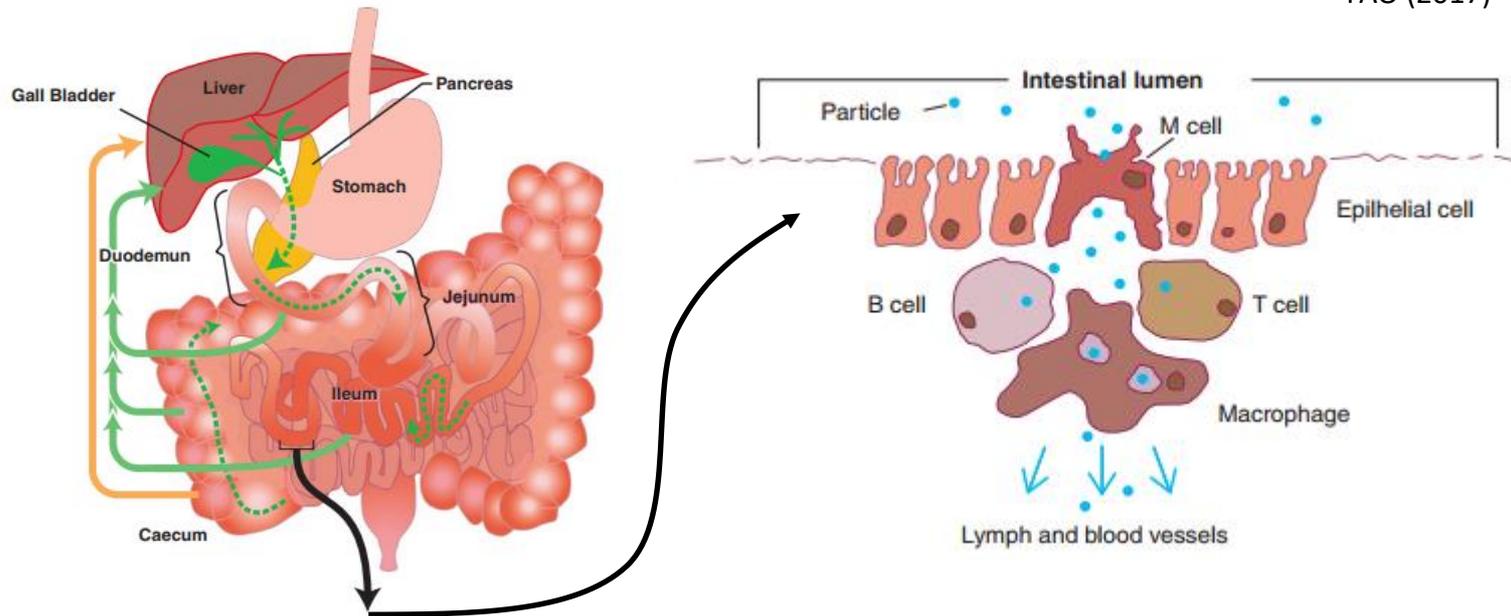
- 오스트리아, 필란드, 일본, 이탈리아, 네덜란드, 러시아, 폴란드, 영국 8명의 지원자
- 6-7일 간 대변 시료 채취 (8-39 g/ 중앙값 34 g)
- 음식 제한 없음 (6명은 시료 채취 기간 중 수산물 섭취)
- > 50 μm 미세플라스틱 FT-IR 맵핑/ATR 모드 분석 (3-11 g / 중앙값 7 g 시료 분석)
- 검출율: 100%
- 18-172 particles/10 g stool (중앙값 20 particles/10 g stool)

Schwabl et al. (2019) *Annals and Internal Medicine* 171: 453

(초)미세플라스틱의 포유류 체내 거동



FAO (2017)

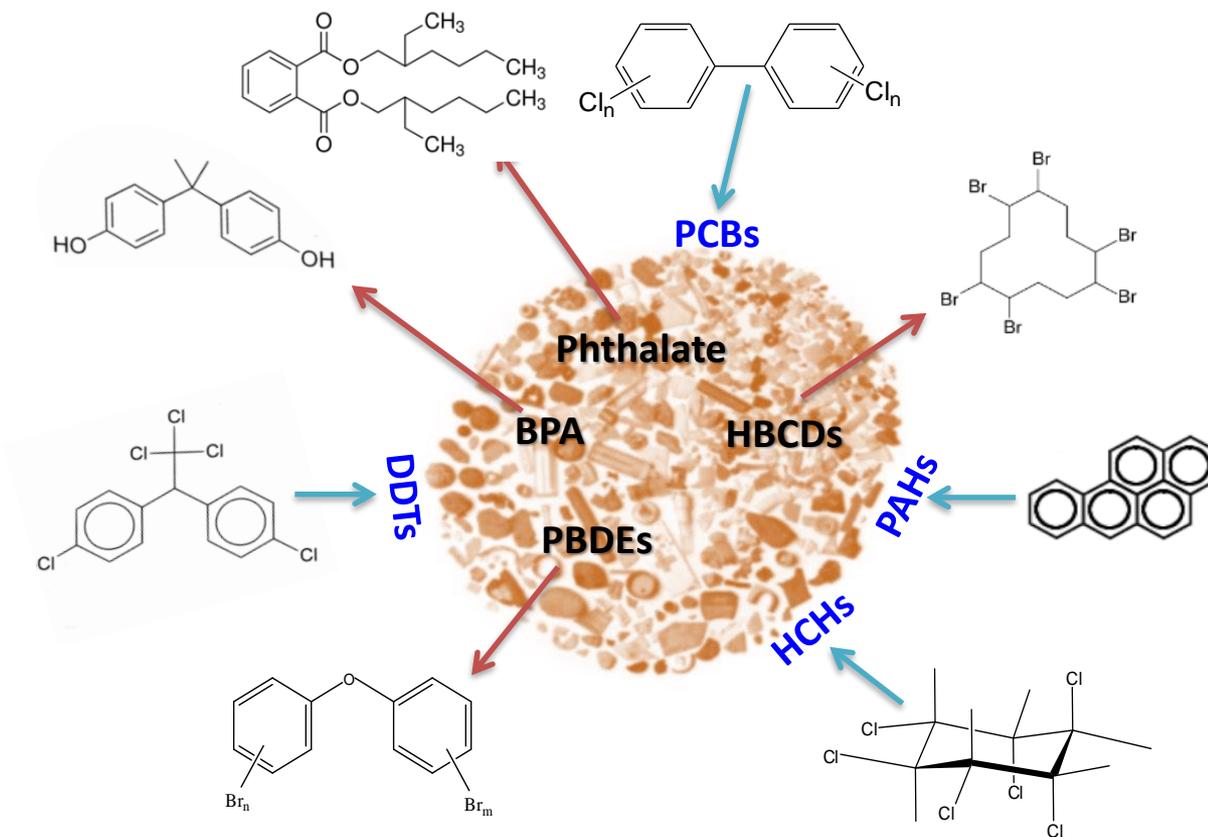


Galloway (2015) *Micro- and nanoplastics and human health*. In: *Marine Anthropogenic Litter*, Springer

미세플라스틱은 화학물질 콕테일?

1. 흡착 화학물질

2. 첨가 화학물질



해안 플라스틱 쓰레기 함유 화학물질

대상 플라스틱
쓰레기 선정

Food(18) ,Fisheries(17),
Construction(2),Genera(12),Paint chip(5)



비표적
스크리닝 분석



플라스틱 쓰레기
함유 화학물질의 식별

230 종 이상 검출

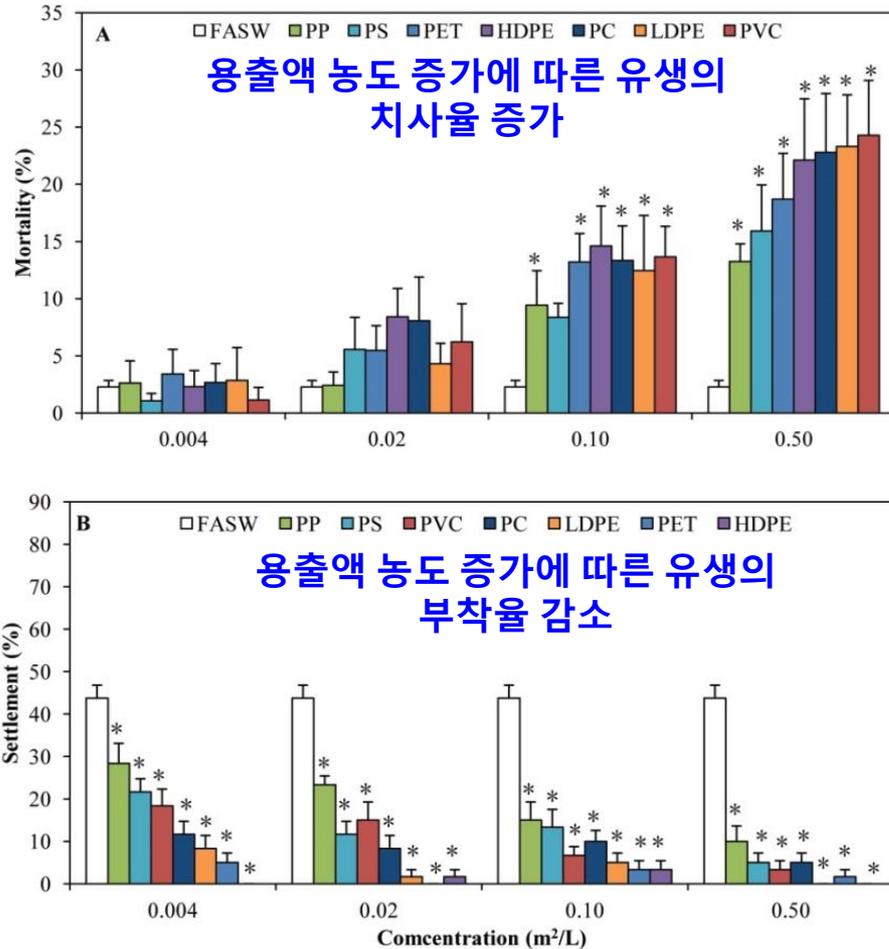
- 산화방지제
- 가소제
- 자외선안정제
- 난연제
- 농약
- 윤활제
- 전구물질
- 기타

| | | |
|--------------------|--|--|
| EPS XPS | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Flame retardants ❖ Anti-oxidant ❖ Fatty acids ❖ Toxin | |
| PE | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Plasticizer ❖ UV-stabilizer | |
| PP | <ul style="list-style-type: none"> ❖ UV-stabilizer ❖ Anti-oxidant ❖ Plasticizer | |
| PP PE | <ul style="list-style-type: none"> ❖ UV-stabilizer ❖ Flame retardants | |
| Acrylic Styrene | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Antioxidant ❖ UV-stabilizer | |

Rani et al. (2015) Arch Environ Contam Toxicol. 69: 352

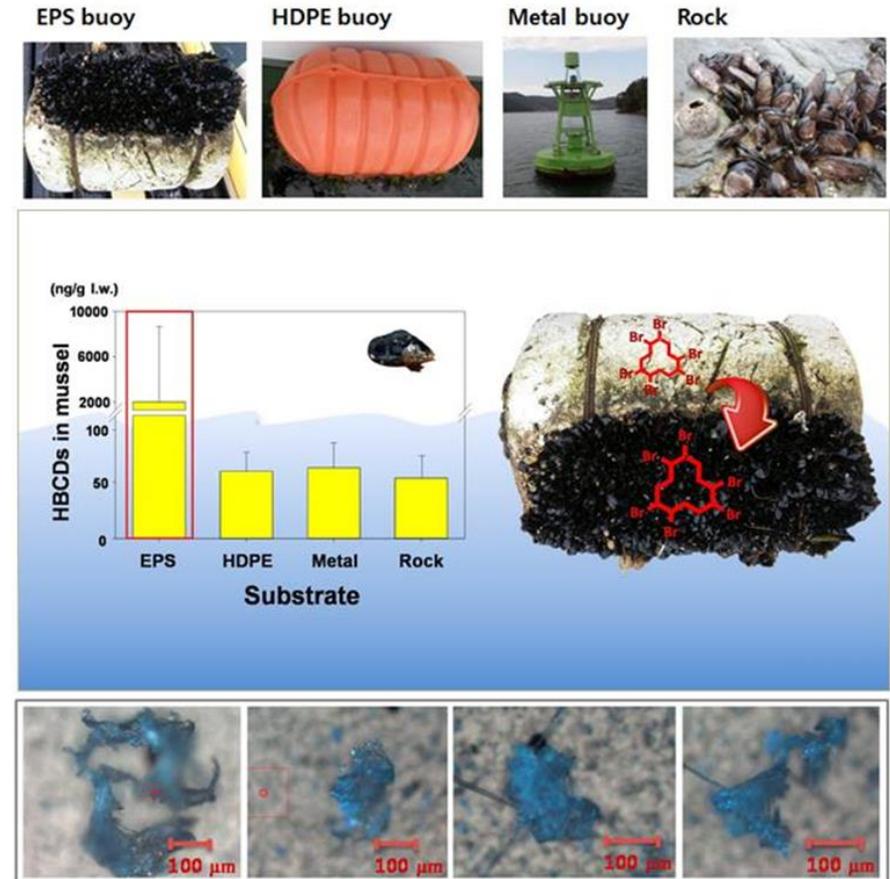
미세플라스틱 유래 화학물질의 생물 전이와 영향

플라스틱 해수 용출액의 생물 영향



Li et al. (2016) *Environ. Sci. Technol.* 50:924

플라스틱 함유 화학물질의 생물전이



Jang et al. (2016) *Environ. Sci. Technol.* 50: 4951

미세플라스틱에 의한 생물 영향 예시

- 식물플랑크톤 흡착에 의한 광합성 저해 (Bhattacharya et al., 2010)
- 동물플랑크톤의 섭식률 저하 (Cole et al, 2013)
- 동물플랑크톤의 생식률 저하 (Lee et al., 2013)
- 갯지렁이 체중감소 (Besseling et al., 2013)
- 갯지렁이 저장 에너지 감소 (Wright et al., 2013)
- 홍합 염증면역 반응 (Von Moos et al., 2012)
- 굴의 난모세포 개수와 크기, 정자 속도, 유생 발생률 감소
(Sussarellu et al., 2016)

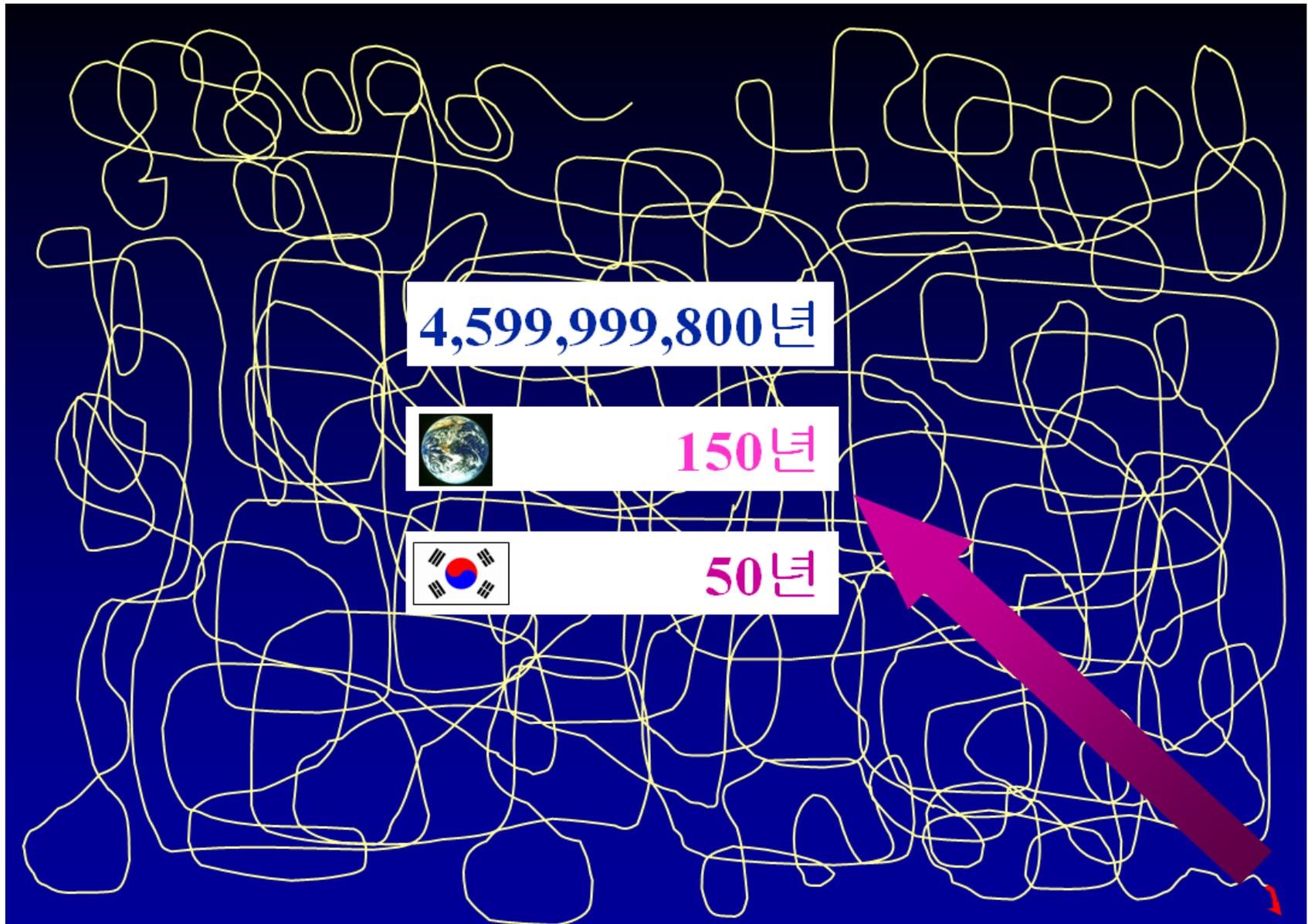
+ MP 흡착/첨가 화학물질에 의한 독성은 별개

해양 미세플라스틱 오염의 시사점

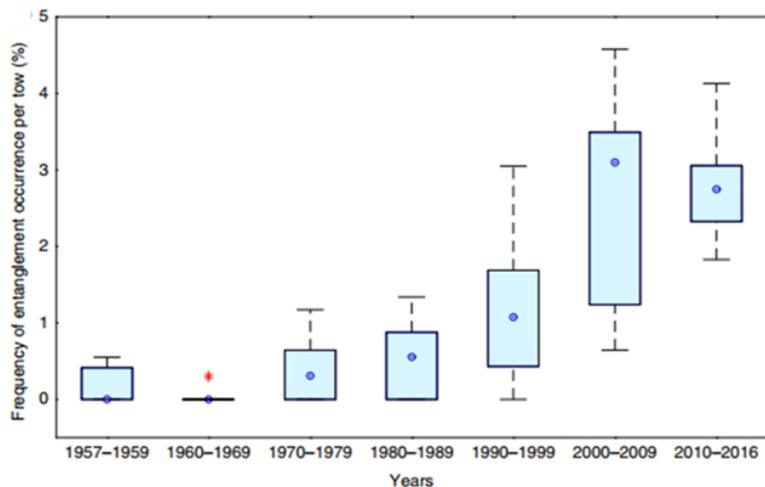


우리가 버린 플라스틱은 다시 우리 식탁에 오른다!

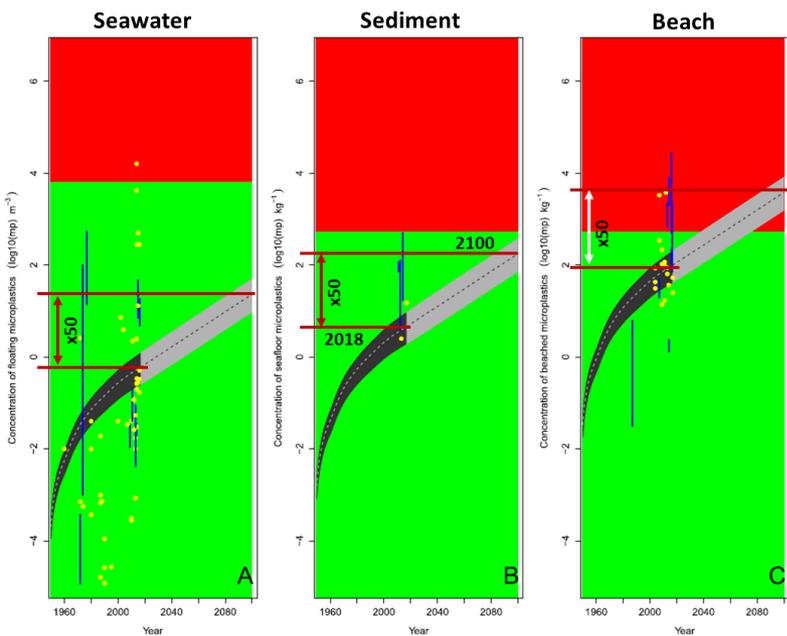
시간적 규모



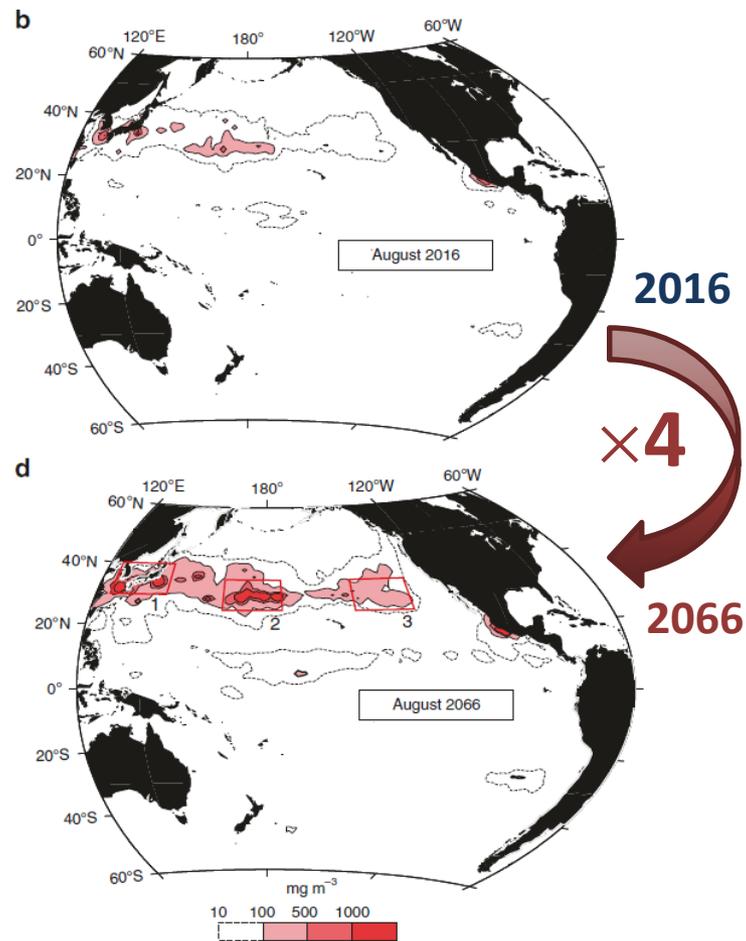
오염은 증가 추세



Ostle et al. (2019) *Nat Comm.* 10:1622



Everaert et al. (2018) *Environ Pollut* 242: 1930



Isobe et al. (2019) *Nat Comm.* 10: 417

미세플라스틱의 인체 노출

당신은 일주일에
신용카드 한 장(5 g)을 섭취 중



WWF (2019)

당신의 (증·고)손자·손녀는 2100년에
일주일에 신용카드 50장
일년에 신용카드 2,500장을 섭취 할 수도



현재의 플라스틱 생산량 증가율과,
현재의 플라스틱 폐기물·쓰레기 관리 정책이 지속되면

(미세)플라스틱 환경 오염의 시사점

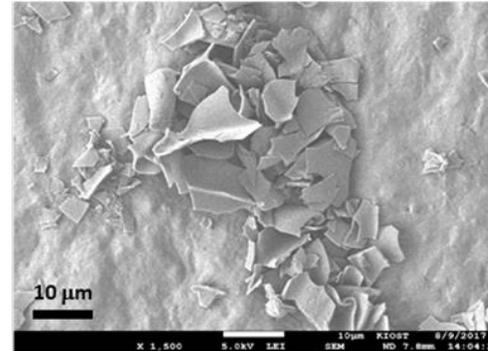
중대형플라스틱 쓰레기



기존 오염물질
보기 싫은 쓰레기
남들의 문제

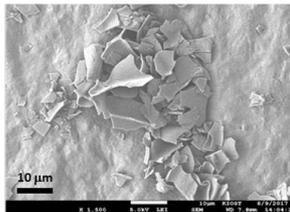


(초)미세플라스틱



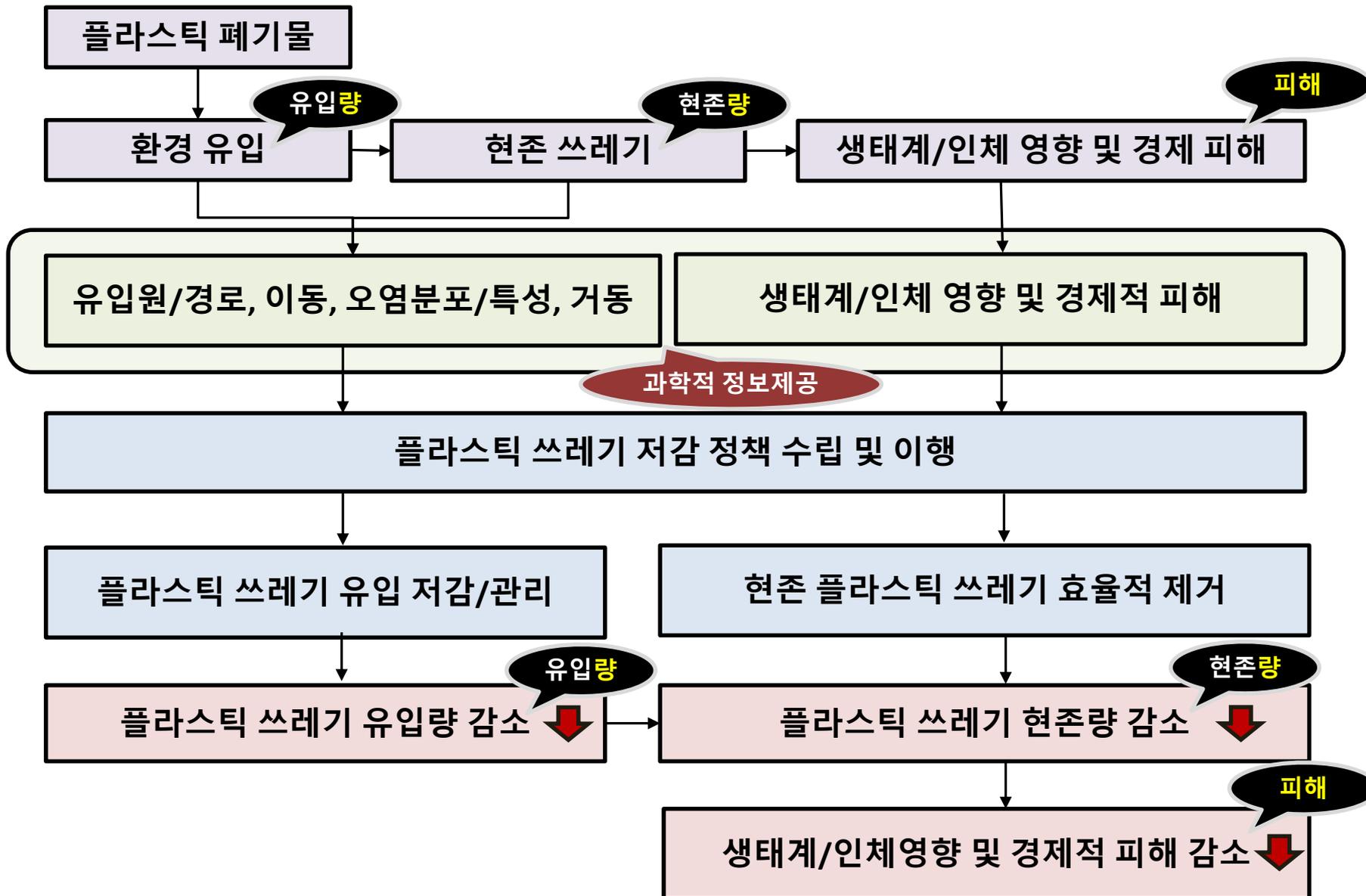
신종 오염물질
유해한 물질
나의 문제

문제해결은 중대형 플라스틱으로 부터~



현재는 아주 초기 단계의 경보!

(미세)플라스틱 쓰레기 관리 및 저감 방안 흐름도



조금 더 노력하면 하얀 스티로폼사(沙)
해변을 많이 만들 수 있어요TT





몽돌 해변



당금마을 몽돌 해변은 가파른 절벽과 몽돌,
그리고 아름다운 쪽빛 바다가 어우러진 매물도
내 유일한 해수욕장으로 물이 맑고 수심이
낮아서 가족단위 피서지로 안성맞춤이다.
조그마한 조약돌이 형형색색으로 빛나고 있어
이국적 정취를 만끽할 수 있으며 주위에 경관
과 어우러져 한폭의 동양화를 연상케 한다.



몽돌 해변



당금마을 몽돌 해변은 가파른 절벽과 플라스틱
그리고 아름다운 쪽빛 바다가 어우러진 매물도
내 **흔한** 해수욕장으로 물이 맑고 수심이
낮아서 가족단위 피서지로 안성맞춤이다.
조그마한 **스티로폼이 매우 하얗게** 빛나고 있어
이국적 정취를 만끽할 수 있으며 주위에 경관
과 어우러져 한폭의 동양화를 연상케 한다.

스티로폼 부자 손익분석

- 저렴한 가격
- 사용 편의성
- 높은 부력
- 영세한 제조업체 보호

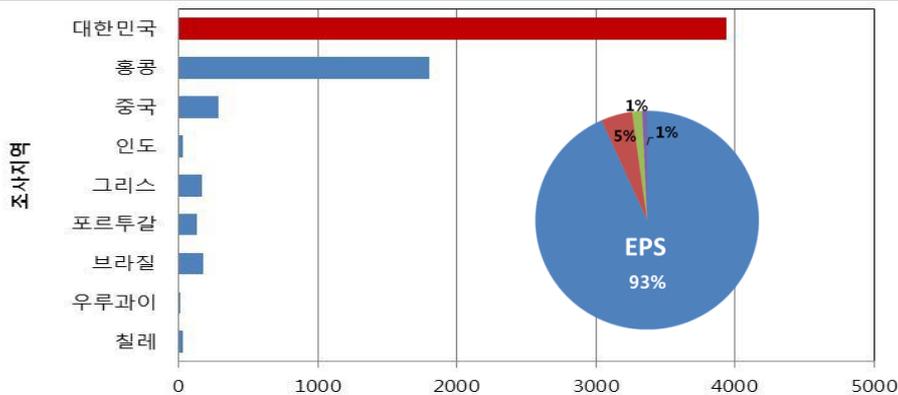
스티로폼 부자의 이득

- 해안 오염
- 심미적 영향

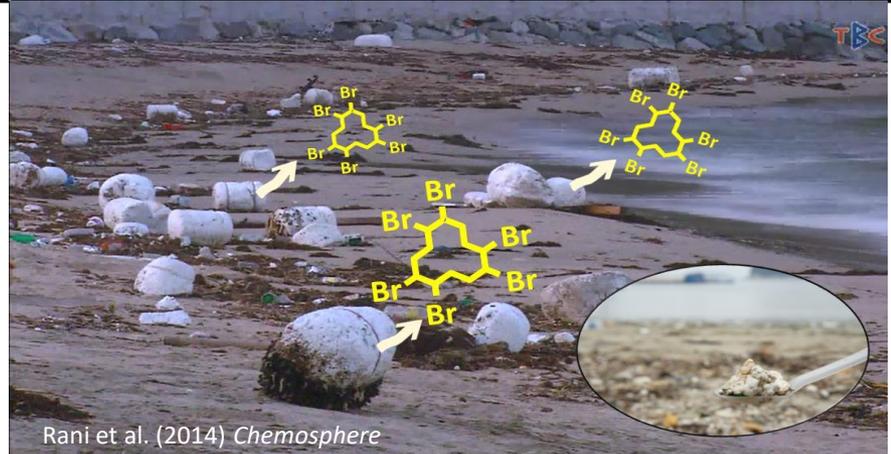
스티로폼 부자의 손실

연구결과에 따른 정책 변화

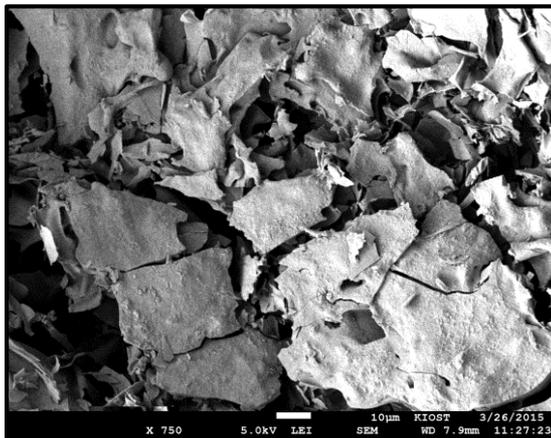
① 국내해안의 높은 스티로폼 알갱이 오염

Lee et al. (2013) *Mar. Pollut. Bull.*평균밀도 (partilces/m²)

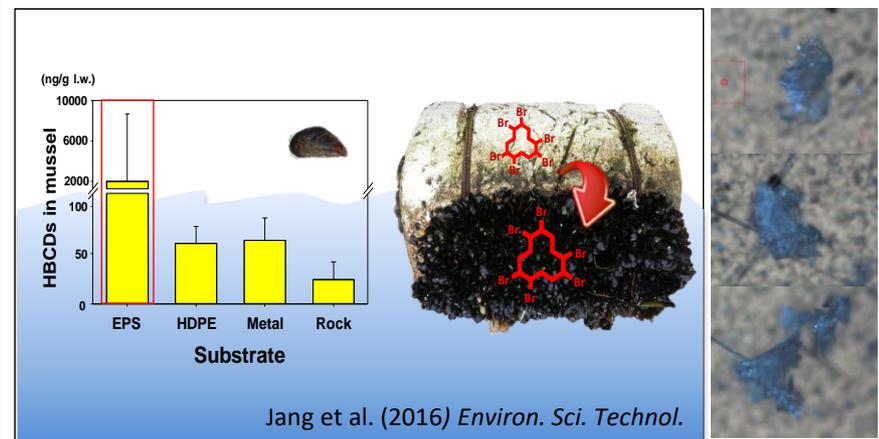
② 스티로폼 내 높은 난연제 성분 발견

Rani et al. (2014) *Chemosphere*

③ 풍화에 의한 스티로폼의 빠른 미세화

Song et al. (2017)
Environ. Sci. Technol.

④ 스티로폼 함유 화학물질의 생물전이

Jang et al. (2016) *Environ. Sci. Technol.*

스티로폼 부자 손익분석



- 스티로폼 부자를 환경친화 부자로 대체 (정부 가격의 70% 보전)
- 사용 스티로폼 부자의 회수율 증대 (10% → 50%)
- 2017년 부터 스티로폼 부자에 난연제 사용규제
- 환경친화적 부자 개발 촉진

- 저렴한 가격
- 사용 편이성
- 높은 부력
- 영세한 제조업체 보호

- >94% 중형플라스틱
- 빠른 미세화
- 난연제 용출/전이
- 생물섭식

- 해안 오염
- 심미적 영향

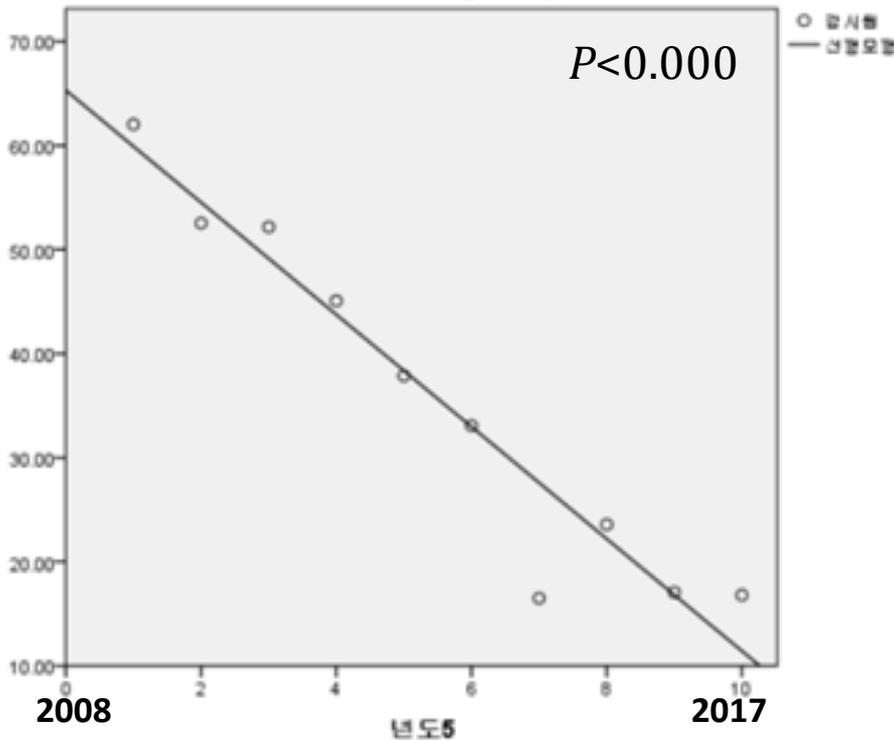
스티로폼 부자의 이득

스티로폼 부자의 손실

해안 스티로폼 부표 쓰레기 오염 변화 추세('08-'17)

스티로폼 부표(2.5~50cm)

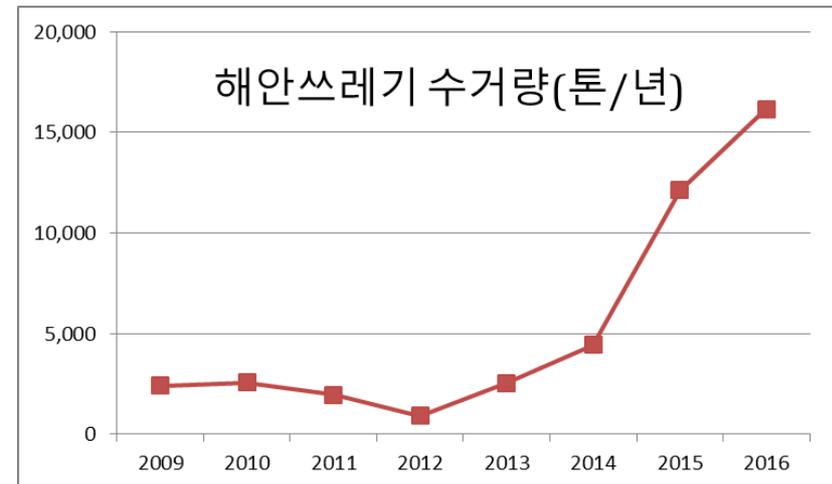
상위1개수



- 전세계적으로 해양쓰레기의 현저한 감소를 가시적으로 보여주는 거의 유일한 사례

자료출처: 해양수산부, 해양환경공단, (사)동아시아바다공동체 오션

- 고밀도 부표 지원사업(2009)
- 친환경부표 지원사업(2015)
- 페스티로폼 회수지원사업(2016)
- 해안쓰레기 수거량 증가
- 선상집하장 보급



선상집하장 보급 실적

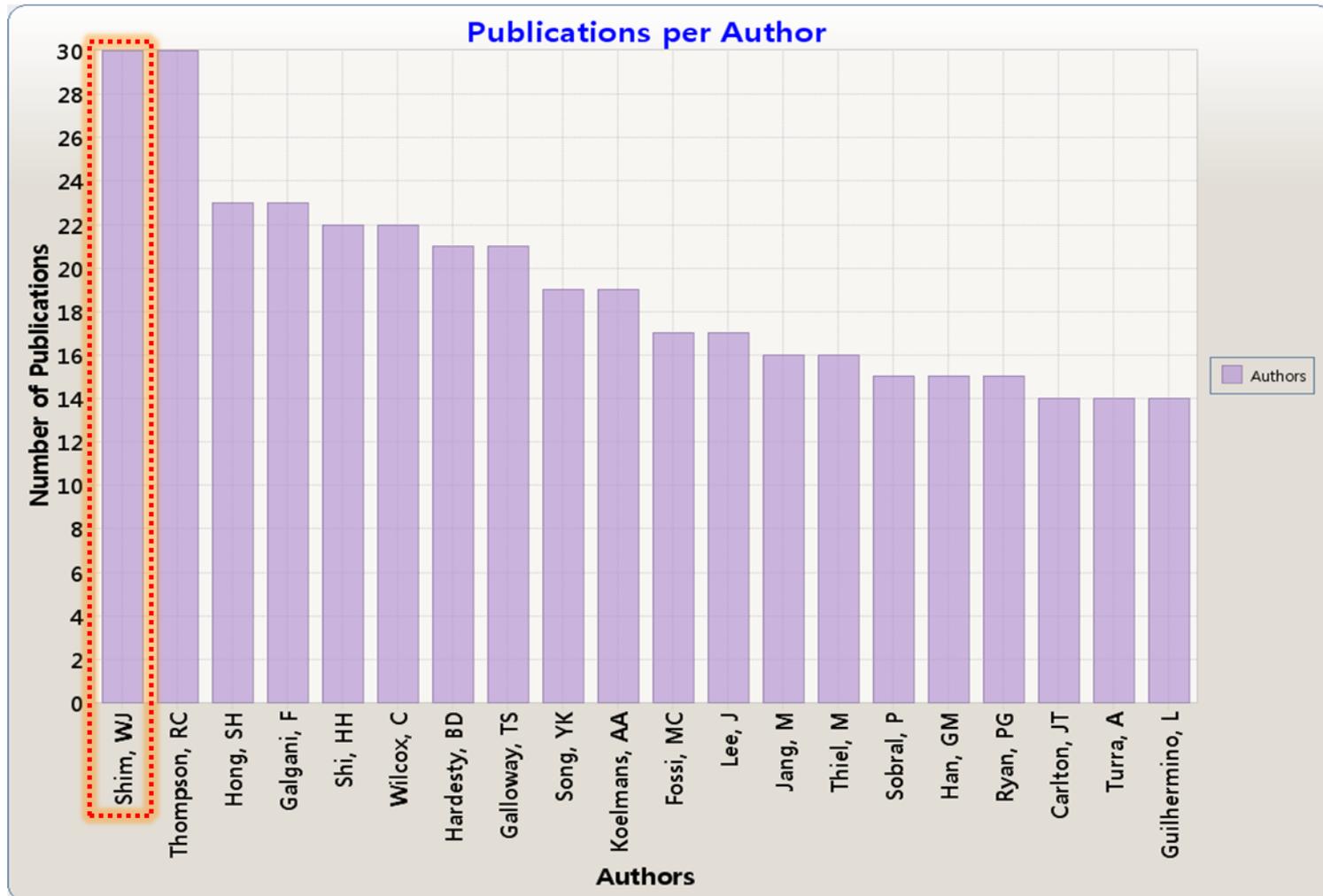


우리나라 플라스틱 (해양)쓰레기 문제점

- 외국에 비해 어업기인(부표, 폐어구, 밧줄 등) 쓰레기 비율이 높다
- 세계 (중)상위권의 오염 수준은 높은 인구밀도와 해역 이용도를 반영
- 육상/담수 환경의 플라스틱 쓰레기 관련 정보 극히 부재
- 쓰레기 종량제 실시/공공쓰레기통 제거에 따른 환경 중 쓰레기 증가?
- 플라스틱 생산, 사용, 폐기물 발생, 재활용률, 쓰레기 발생 관련 통계자료 미흡
- 예방 중심 보다는 수거와 처리 중심의 정책/예산 배분에 따른 효용성 문제
- 영향(피해) 저감 기반의 관리정책 부재에 따른 효용성 문제
- 관리/저감 정책의 효용성을 평가할 지표 및 관리 수단 제한
- 생물/환경 영향 및 경제적 영향 저감에 기반한 정책 수립 필요
- 이해당사자 설득 및 정책수립을 위한 과학적 자료 필요(예; 유입원, 유입경로, 유입량, 현존량, 분포, 오염특성, 생태/경제피해 등)

해양과학기술원은 해양미세플라스틱 연구의 선두 그룹

Top 20 scientists in the world



사 사



O·S·E·A·N Our Sea of East Asia Network

Thank you for
your attention!

