



플라스틱으로 인한 해양 오염이 해양 생물종, 생물다양성 및 생태계에 미치는 영향

WWF와 알프레드 베기너 해양극지연구소 (AWI)의 연구 요약 보고서



요약

본 보고서는 플라스틱 오염이 전 세계의 해양, 해양생물 및 생태계에 미치는 영향과 앞으로의 변화에 대하여 포괄적인 설명을 제공한다. WWF(세계자연기금)의 주관으로 알프레드 베기너 해양극지연구소(AWI) 연구진이 집필하였으며, 빠르게 악화되고 있는 현 상황의 심각성을 보여주며 즉각적이고 통일된 국제적 행동이 요구됨을 시사한다.

- 오늘날 해양의 거의 모든 생물종들은 플라스틱 오염의 영향을 받고 있으며, 연구자들은 평가 대상 생물종의 90%가 부정적인 영향을 받고 있는 것을 확인했다.
- 플라스틱 오염은 해양 먹이사슬의 일부가 되었을 뿐만 아니라 산호초와 맹그로브 등과 같은 세계에서 가장 중요한 해양 생태계의 생산성에도 상당한 영향을 미치고 있다.
- 지중해, 동중국해, 황해 및 북극 해빙을 포함한 지구상 여러 핵심 지역은 이미 심각한 생태적 위험이 발생할 수 있는 플라스틱 오염 임계치를 초과했으며, 앞으로 몇 년 안에 더 많은 지역이 같은 처지에 놓일 것으로 예상된다.
- 플라스틱 오염 물질의 유입이 당장 중단된다 해도 해양 미세플라스틱은 2050년까지 2배 이상 증가할 것이며, 일부 시나리오에서는 2100년까지 50배 증가할 것으로 예상된다.

WWF는 각국 정부들에게 점진적으로 확대되는 위험에 처한 해양 생물들을 위한 국제 조약을 긴급히 논의하고 채택할 것을 촉구한다.

도입: 전 지구적 위기

플라스틱 오염은 전 세계 해양 어디에나 존재하며 오염 수준은 기하급수적으로 증가해왔다.

유엔은 이를 '전 지구적 위기'라고 부른다.¹ 극지방에서 외딴섬까지, 바다 표면에서 심해의 해구까지 해양 플라스틱 오염 문제는 기하급수적으로 증가하여 이제는 어디에나 존재한다. 현재의 기업 및 정부의 약속이 이행되더라도 플라스틱 오염은 계속 증가할 것으로 전망된다.² 체계적인 전 지구적 대응이 시급히 요구된다.

플라스틱 오염은 비교적 새로운 위협이다. 플라스틱은 제2차 세계대전 이후에야 널리 사용되기 시작했지만 지금까지 생산된 플라스틱의 전체 질량은 모든 육상 및 해양 동물을 합한 총 질량의 2배를 이미 넘어섰다.³ 플라스틱 생산량은 지난 20년 동안 급증했으며, 2003년부터 2016년까지 생산된 플라스틱은 그 이전에 생산된 모든 플라스틱을 합친 것만큼 많다.

2015년까지 생산된 모든 플라스틱의 60%는 이미 쓰레기가 되었고,⁴ 그중 상당량은 바다로 유입되었다. 추정치의 범위는 넓은 편이나 지금까지 8,600만에서 1억 5천만 톤(M/T)의 플라스틱이 바다에 축적된 것으로 본다.⁵ 2010년에는 480만에서 1,270만 톤의 플라스틱 쓰레기가 바다로 흘러간 것으로 추정되며,⁶ 2016년 최근 연구에서는 1,900만에서 2,300만 톤이 유입된 것으로 파악되는 등, 해양 플라스틱 오염 진행 속도는 지속적으로 빨라지고 있다.⁷

해양 플라스틱 오염은 고르게 분포하지 않는다. 지구상의 플라스틱 핫스팟은 5개의 거대 환류대(부유하던 플라스틱 조각들이 축적되는 '쓰레기 섬'), 주요 배출원인 도심을 관통하는 큰 강의 삼각주 인근 해안 및 해양 지역, 산호초, 맹그로브, 심해 바닥, 특히 해저 협곡 등이다.

전 세계 해양의 이 모든 플라스틱은 어디에서 오고 있을까? 많은 원인이 알려져 있지만 전부는 아니다. 주요 원인은 일회용품의 증가이다. 2015년에는 포장재가 전체 플라스틱 쓰레기의 절반을 차지했고,⁸ 2018년 수치에 따르면 일회용 플라스틱이 60~95%를 차지했다.⁹ 해안선과 내륙 강줄기를 따라 유입된 육상에서 발생한 플라스틱은 해양 플라스틱의 상당히 높은 비중을 차지한다. 최근 분석에 따르면 유럽은 매년 3억 70만~9억 2,500만 톤의 쓰레기를 바다로 흘려보내고 있으며, 그중 82%가 플라스틱이다.¹⁰ 하지만 해양에서 배출되는 플라스틱도 상당하다. 한 연구에서는 적어도 해양 쓰레기의 22%가 어업 활동에서 발생한다고 추정했다.¹¹ 대기 배출도 플라스틱 오염을 유발한다. 자동차 타이어와 브레이크의 마모는 주요한 미세플라스틱 배출원이며,¹² 폐기물 처리 과정과 도로, 농업에서 사용되는 플라스틱 코팅이 바람에 의해 마모되는 경우도 마찬가지이다.

그림 1: 나노플라스틱 입자는 고운 점토 입자보다 10배 더 작다.

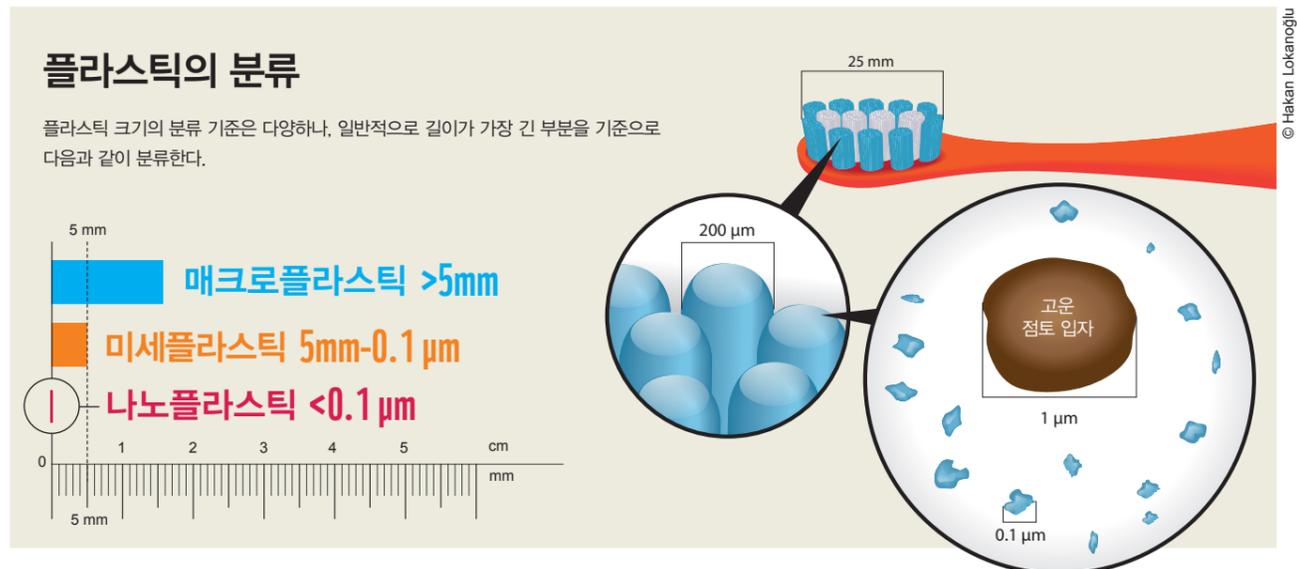


그림 2: 온두라스 연안의 로아탄 섬과 카요스 코치노스 섬 사이에 위치한 카리브해 동부의 플라스틱 쓰레기.

미세플라스틱의 급증

플라스틱은 바다에서 분해를 거듭하며, 분해될수록 그 위협은 몇 배로 증가한다.

해양 플라스틱은 수거가 어렵고 오래 잔류하는 특성 때문에¹³ 일단 해양에 유입되면 제거하는 것이 거의 불가능하다. 그리고 바다로 흘러 들어온 플라스틱은 분해를 거듭한다. 매크로플라스틱은 미세플라스틱으로, 미세플라스틱은 나노플라스틱으로 분해되어 회수 가능성은 더욱 낮아진다. 플라스틱 오염 물질의 유입이 당장 중단된다 해도 이러한 플라스틱 분해 과정으로 인하여 해양과 해변의 미세플라스틱 질량은 2020년에서 2050년까지 2배 이상 증가할 것이다.¹⁴

게다가 가까운 미래에 플라스틱 오염물질의 해양 유입이 사라지거나 유입 속도가 느려질 것이라는 증거는 거의 없다. 현재의 비즈니스 방식이 계속 유지될 때를 전제로 한 다양한 전망이 있으나, 모든 경우에서 쓰레기 배출량은 상당히 증가할 것으로 예상된다. 2010년 이후 플라스틱 산업은

새로운 공장 설립을 위해 1,800억 달러를 투자했다.¹⁵

플라스틱 생산은 2040년까지 2배 이상, 해양 플라스틱 오염은 3배 이상 증가할 것으로 예상된다.¹⁶ 따라서 2050년까지 해양 매크로플라스틱 농도는 4배 증가하고,¹⁷ 2100년에는 해양 미세플라스틱이 50배나 증가할 수 있다.¹⁸

초과 시 심각한 생태학적 위험을 발생시키는 미세플라스틱 농도의 임계치는 1m³당 1.21x10⁶로 추정되었다.¹⁹ 대서양, 동중국해, 황해,²⁰ 북극 해빙²¹ 등 일부 오염 핫스팟에서는 임계치를 이미 넘어섰다. 전 세계 해수면의 미세플라스틱 오염으로 인한 생태학적 위험은 21세기 말까지 크게 확산될 것으로 예상된다.²² 가장 낙관적인 시나리오도 상당한 증가를 예상하며 최악의 시나리오는 그린란드 면적의 2배가 넘는 해양에서 오염 임계치를 초과할 것으로 예상했다.

플라스틱과 자연의 상호작용

플라스틱 오염은 뒤엉킴, 섭취, 질식, 화학적 용출을 통해 해양 동식물에 악영향을 미친다.

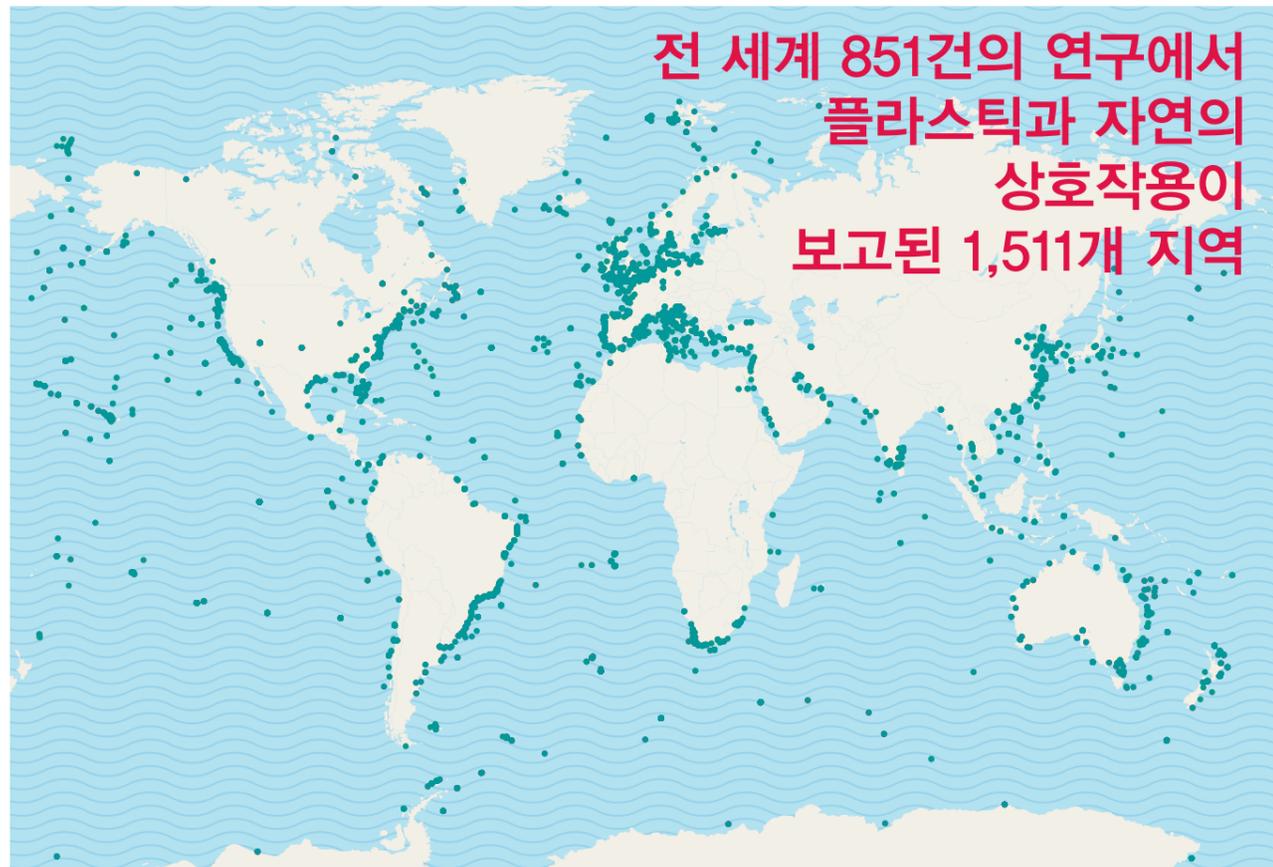
플라스틱 오염은 이제 해양 어디에서나 확인되며 거의 모든 해양 생물종이 영향을 받은 것으로 보인다. 최근 연구를 보수적으로 평가해 보았을 때, 지금까지 총 2,141개의 생물종이 서식지에서 플라스틱 오염을 겪고 있는 것으로 밝혀졌다.

해양의 플라스틱은 대부분 섭취, 뒤엉킴 또는 질식 등의 상호작용과 관련되어 있으며, 더 나아가 플라스틱에 오염된 738종의 생물은 플라스틱을 새로운 지역으로까지 확산시킨다.

실험실과 현장에서 수행한 모든 연구는 실험 조건하에 902종의 생물과 플라스틱의 상호작용을 조사했다. 연구에는

미세플라스틱 크기에 따른 미세플라스틱 섭취 연구와 뒤엉킴을 정량화하기 위한 유령 어구의 설치가 포함되었다. 902종의 생물종이 플라스틱과 접촉하는 방식에 대한 평가가 이루어졌고, 일부 연구에서는 상호작용과 부정적인 영향에 대한 조사도 실시했다. 일부 연구는 부상이나 죽음, 움직임의 제한, 식량 섭취 변화, 성장, 면역 반응, 생식, 세포 기능에 대한 영향까지 평가했다. 297종에서 보여진 연구 관찰 결과, 88%가 부정적 영향을 받는 것으로 나타났다.²³ 제한된 표본조사이기 때문에 폭넓게 적용하기는 어려우나, 플라스틱이 대부분의 해양 동식물에 부정적인 영향을 미친다는 경향성은 분명하다.

그림 3: 플라스틱 오염물질과 해양 동식물 간 상호작용 지도. 점들은 851건의 연구에서 보고된 1,511개 지역을 가리킨다(출처: LITTERBASE).



플라스틱의 주요 부정적 영향 :

뒤엉킴(Entanglement) - 유기, 분실 또는 폐기된 어구에서 나온 밧줄, 그물, 닛, 단섬유는 해양 동물을 감싸고 서로 뒤엉켜 목졸림이나 상처, 움직임 제한, 죽음을 야기한다. 새들도 동지를 만드는 데 해양 쓰레기 조각을 사용하며, 이는 어미와 갓 부화한 새끼들을 묶어낼 수 있다. 하와이 오아후에서는 상호 군락 중 65%가 낚시줄과 뒤엉켜 있으며,²⁴ 80%가 부분적으로 또는 완전히 폐사한 상태이다. 북극해 심해 해면 군락도 최대 20%가 플라스틱과 뒤엉켜 있으며 이러한 뒤엉킴 현상은 점차 확대되고 있다.²⁵

섭취(Ingestion) - 먹이사슬의 최상위 포식자에서 기저부의 플라크톤까지 모든 종류의 해양 동물이 플라스틱을 섭취한다. 플라스틱 섭취는 가짜 포만감이나 소화기 폐색과 내부손상을 유발하여 동물들의 먹이 섭취에 심각한 해를 입힐 수 있다. 연구실 실험은 먹이가 다량의 미세플라스틱으로 오염되었을 때 물고기의 생장이 억제되었다는 것을 보여주었고,²⁶ 다른 극단적인 사례로 태국에서 고래상어 죽음의 원인이 내장 안에 있던 플라스틱 빨대 하나였을 가능성이 있는 것으로 나타났다.²⁷ 바닷새의 플라스틱 섭취는 전 세계적으로 만연하며 더욱 증가하고 있다. 현재 전체 바닷새의 최대 90%와 ^{28, 29} 전체 바다거북의 52%가 플라스틱을 섭취하는 것으로 추정된다.³⁰ 쇠약해진 채로 해변에 좌초된 많은 고래와 돌고래들도 매크로플라스틱을 섭취한 것으로 밝혀졌다. ^{31, 32, 33, 34} 일부 연구는 플라스틱 영향을 받은 생물종에서 섭식의 변화 또는 감소, 성장, ^{35, 36, 37, 38} 면역 반응, 생식 및 번식에서의 부정적인 영향뿐만 아니라 세포의 기능과 행동 변화를 확인했으며, 노출 농도와 피해 정도가

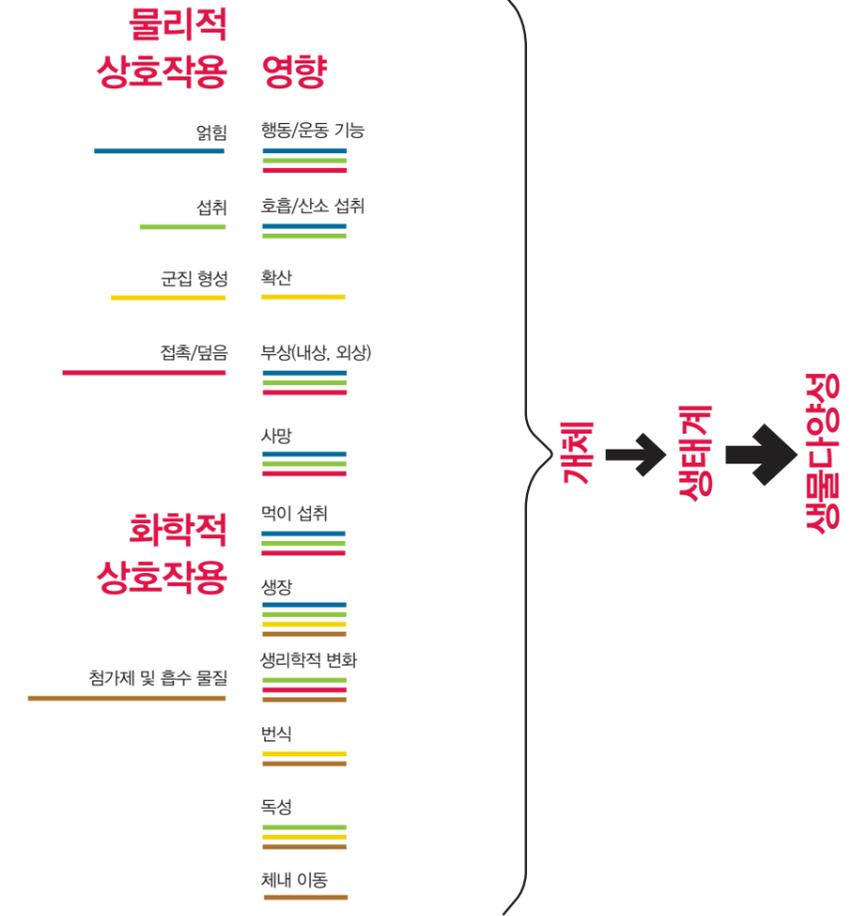


그림 4: 가장 빈번히 보고된 상호작용과 생물이 받는 영향(출처: LITTERBASE). 색상은 각각의 상호작용을 나타낸다.

직접적으로 관련이 있는 것으로 나타났다.³⁹

질식(Smothering) - 플라스틱 오염은 산호와 해면, 저서동물들로부터 빛, 먹이, 산소를 앗아가고 퇴적물의 산소 결핍을 유발하며 퇴적물에 서식하는 유기체의 수를 감소시킨다. ^{40, 41} 이는 생태계에 부정적 영향을 미칠 수 있으며 해양 생물에 치명적일 수 있는 병원균의 번식 조건을 마련해 준다. 질식은 특히 산호초와 맹그로브에 피해를 준다(아래 참조).

화학적 오염(Chemical Pollution) - 플라스틱의 모든 성분이 해로운 것은 아니지만 많은 성분이 해로우며 플라스틱에서 용출된 성분⁴²은 해양 환경으로 유입될 수 있다. 가장 작은 플라스틱 입자는 해양 동물의 체세포에 침투할 수 있으며 일부는 뇌까지 이를 수 있다.^{43, 44}

가장 문제가 되는 플라스틱의 화학물질은 다음과 같다.

내분비계 장애물질 - 내분비계 장애물질은 호르몬을 교란시켜 많은 해양 생물종의 번식, 발달, 행동을 방해한다.⁴⁵ 심지어 식품안전 등급으로 분류되는 플라스틱 일부도 수생 동물과 사람 모두에게 강한 독성 효과를 미칠 수 있다.^{46, 47}

잔류성유기오염물질(POPs) - 폴리염화비페닐(PCB)과 같은 잔류성유기오염물질은 오랜 시간 잔류하면서 유기체와 환경 조건에 영향을 미친다.⁴⁸ 잔류성유기오염물질은 분해되지 않고 바람과 물에 의해 멀리 퍼질 수 있기 때문에 발생원에서 멀리 떨어진 곳에서도 오랜 기간 지속적인 영향을 미친다.



모든 해양에 다량으로 확산된 플라스틱 오염

약 2,150종의 해양생물이 플라스틱에 노출

● 배출원
● 결과

그림 5: 플라스틱이 해양으로 유출되는 경로

© Anita Drobnik/WWF: own illustration according to AWI

먹이사슬의 오염

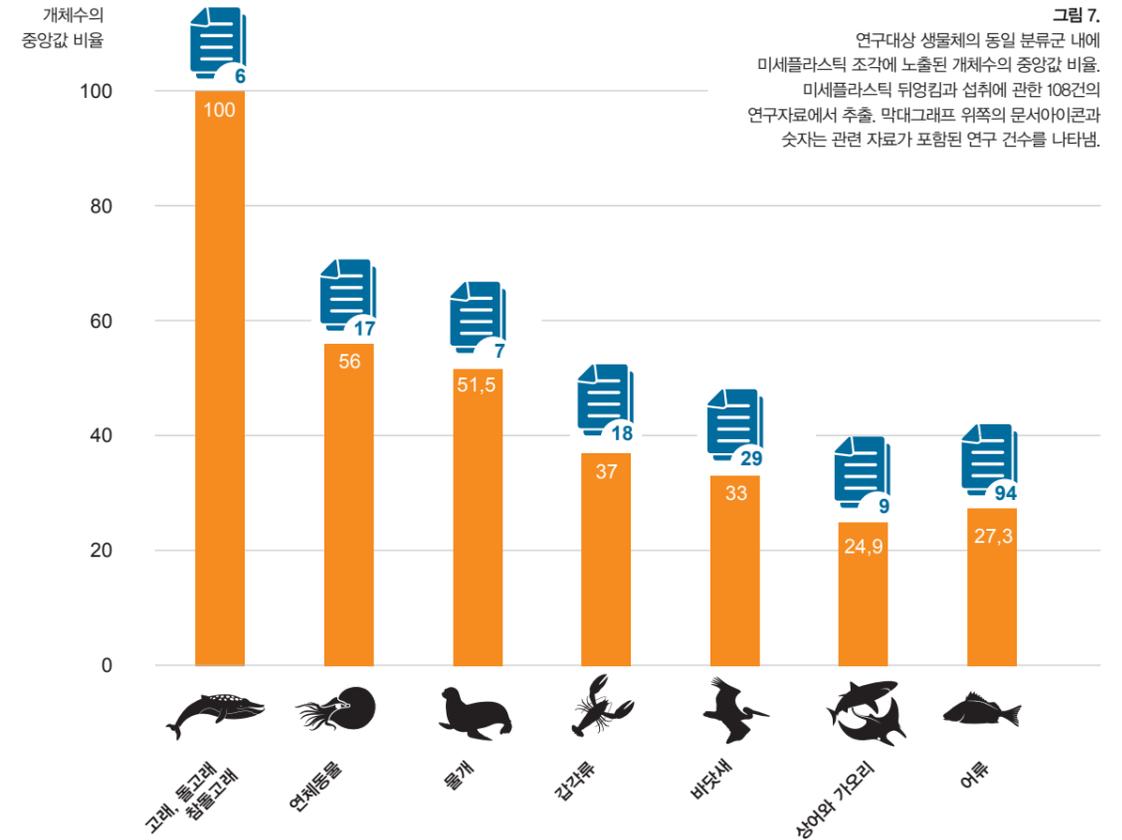
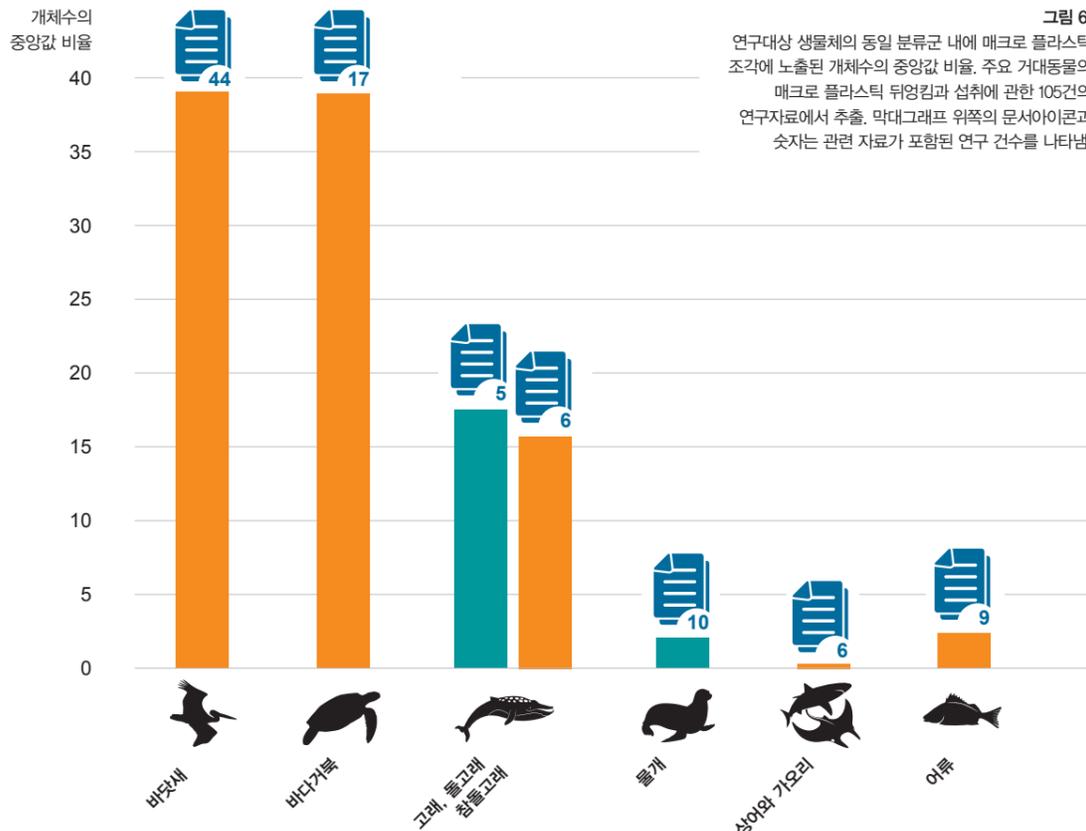
해양 동물이 섭취한 플라스틱은 해양 먹이사슬의 상단까지 이동하여 이제는 인간이 섭취하는 식품에서도 발견되고 있다.

현장과 연구실 실험에서 해양 동물의 플라스틱 섭취를 통해 플라스틱과 관련된 화학 오염물질이 해양 먹이사슬의 상단으로 올라갈 수 있음이 입증되었다.

연구를 통해 해수기둥에 미세플라스틱이 존재하며, 미세플라스틱 입자가 가라앉아 있는 응집체와 결합한다는 것을 확인했다.^{49, 50, 51} 이렇게 가라앉은 입자들은 해양 먹이사슬의 기저를 이루는 플랑크톤과 작은 유기체들에 의해 부분적으로 또는 완전히 섭취된다.^{52, 53} ^{54, 55} 플라스틱의 섭취로 인해 생물학적 과정이 교란되면 해저에 도달하는 먹이의 양에 영향을 줄 수 있으며, 이는 먹이가 한정적인 해저 생태계에 변화를 초래할 수 있다. 향후 발생할 수 있는 이러한 가능성은 해양 생물종인 살프

(salps)를 다양한 농도의 미세플라스틱에 노출시켜 실험한 최근 연구에서 밝혀졌다.⁵⁶ 나노플라스틱의 잠재적 위험에 대한 우려는 확산되고 있으나, 알려진 바는 아직 많지 않다. 물벼룩 '다프니아 마그나(Daphnia magna)'를 나노플라스틱에 노출시킨 실험에서 물벼룩의 생존율은 급격히 감소했고, 실험 개체군의 100%까지 사망한 일부 사례도 있었다. 플라스틱에 노출된 물벼룩을 물고기의 먹이로 주었을 때, 나노플라스틱이 물고기의 혈액-뇌 장벽을 침투하여 먹이 섭취가 줄어들고 움직임이 감소하는 등 행동 변화를 유발한 것을 확인할 수 있었다.⁵⁷ 이러한 악영향은 먹이사슬을 통해 확산되어 생태계의 기능을 광범위하게 손상시킬 수 있다.

플라스틱이 유기체에 미치는 영향에 대한 연구가 최근 급증했음에도 불구하고, 놀랍게도 인간 건강에 미치는 잠재적 영향에 대해서는 거의 알려져 있지 않다. 하지만 이미 사람들이 플라스틱을 흡입하고 섭취하고 있다고 말해도 무방하다. 예를 들어 초록잎홍합의 미세플라스틱 섭취는 자연산과 양식 대부분에서 확인되었고,^{58, 59} ⁶⁰ 굴도 마찬가지다. 사람들은 초록잎홍합과 굴을 통째로 섭취하기 때문에 여기에 포함된 플라스틱을 피할 방법이 없다.⁶¹ 마찬가지로 연구자들은 정어리와 청어 통조림 20개 브랜드 중 4개에서 플라스틱 입자가 함유되어 있음을 확인했다.⁶²



위기에 처한 핵심 생태계

플라스틱 오염은 특히 산호초와 맹그로브에 큰 타격을 입고 있다.

플라스틱 오염은 이미 전 세계 해양 어디서나 발견되고 있다. 일부 핵심 해안과 해양 생태계는 이미 위협에 처해 있으며 플라스틱 오염의 증가로 그 위험성은 더욱 증대되고 있다. 산호초와 맹그로브와 같이 생물다양성이 높은 핵심 생태계는 해양생물뿐만 아니라 인간에게도 필수적인 이익을 제공하기 때문에 플라스틱이 생태계 기능에 부정적 영향을 주게 되면 인간도 직접적으로 영향을 받게 된다.

플라스틱은 지구 온난화로 인해 이미 위기에 처해 있는 산호초에 엄청난 규모의 위협을 가한다. 2010년 아시아 태평양 지역의 산호초는 111억 개의 플라스틱 쓰레기와 뒤영겨 있었던 것으로 추정되며⁶³ 이러한 오염은 2025년까지 40% 증가할 것으로 예상된다. 플라스틱에 얽힌 산호초는 질병에 걸릴 확률이 20배에서 89배까지 높아진다는 점이 특히 우려되는 부분이다.⁶⁴

중종 '유령 어구'로 불리는 유실되거나 버려진 어구도 전 세계 산호에 심각한 위협을 가하고 있다. 수십 년간 산호초와 뒤영겨 채로 산호 군락의 질식, 손상, 마모를 일으키고, 산호초 생태계 전체의 폐사를 초래하기도 했다.^{65, 66} 산호는 미세플라스틱을 산호폴립 내부와 외부에 축적시켜 산호 자신과 공생하는 조류(algae)에 부정적인 영향을 주고 암초 군집 구조를 변화시킨다.⁶⁷

해안 지역의 식량 확보와 홍수 방어의 역할을 하는 맹그로브는 플라스틱이 축적되는 강어귀 근처에 서식하는 경우가 많으며 복잡한 뿌리 구조로 플라스틱을 가두어 플라스틱 저장고가 된다. 몇몇 맹그로브 숲은 세계에서 쓰레기 밀도가 가장 높은 지역 중 하나이며, 심각한 오염은 맹그로브의 건강 악화로 이어진다.^{68, 69, 70, 71, 72, 73} 자바 맹그로브 숲에서의 최근 연구를 따르면, 숲의 100㎡당 2,700개 밀도의

플라스틱 품목이 발견되었으며 숲 바닥의 50% 까지 플라스틱이 덮여 있는 지역이 여러 군데 나타났다. 한 실험에서는 뿌리가 플라스틱으로 완전히 뒤덮인 나무의 경우 잎면적지수(leaf area index)와 생존율이 낮은 것으로 밝혀졌다. 게다가 맹그로브 묘목이 플라스틱에 갇혀 질식사하면, 상태가 악화된 맹그로브 지역의 복원 효과가 떨어질 수 있다.⁷⁶

플라스틱 오염은 해수면에서 10km이상 떨어진 지구상에서 가장 깊은 마리아나 해구에서도 발견되었다.^{77, 78} 마리아나 해구의 환경은 비교적 안정적이기 때문에 수백 년 동안 쓰레기가 같은 상태로 존재할 수 있다. 일부의 경우 플라스틱이 깊어 해저 진흙 안에서 단단한 인공 구조물이 되어 새로운 생명체들의 서식지를 만들기도 한다.⁷⁹ 이러한 경우에는 플라스틱이 생명체들에게 도움이 되지만, 플라스틱의 존재 자체는 고유 생태계의 군집 구조를 변화시킬 수 있다.^{80, 81}



상가 효과 (ADDITIVE EFFECT)

플라스틱 오염은 해양생물에 대한 다른 위협들과 결합하여 더욱 심각한 결과를 일으킨다.

플라스틱이 해양 생태계에 미치는 영향은 단독으로 고려되어서는 안된다. 플라스틱 오염은 해양 온난화, 남획, 해양 산성화, 부영양화, 탈산소화, 해운 활동, 수중 소음, 외래종, 서식지 파괴 및 단편화, 기타 형태의 화학적 오염 등 인간이 초래한 여러 위협들 중 하나이다.

일반적으로 해양 생물 감소의 결정적인 한 가지 요인을 꼽는 것은 매우 어렵다.⁸² 하지만 몇몇 위협이 중복되면 부정적 영향은 심화되며, 이미 위협에 처한 생물종에게는 특히 치명적이다. 여러 위협 요인이 결합될 때 일어나는 '상가' 또는 '시너지' 효과를 충분히 설명하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하지만,^{83, 84, 85, 86, 87, 88} 이러한 효과는 심각한 결과를 일으키고 그 경향은 앞으로 더욱 악화될 것이다. 많은 전문가들은 지구가 이미 대멸종 위기에 처해있으며^{89, 90, 91, 92} 플라스틱 오염을 방지한다면 이는 지구 위기를 악화시키는 명백한 요인이 될 것이라 평가하고 있다.

미래를 전망할 때 유념해야 할 점이 또 있다. 해양 플라스틱 오염 축적이 지속되면, 지금까지 기록되어온 모든 해로운 영향들이 증가하게 된다. 이는 더욱 많은 계군(subpopulations), 생물종, 생태계의 위험 임계치⁹³를 실제로 초과할 가능성이 있다. 연구자들은 플라스틱 오염이 현재의 속도로 계속 증가한다면, 2050년까지 모든 바닷새 종의 99.8%이 플라스틱을 섭취할 것으로 예상했으며,⁹⁴ 이미 모든 바다거북 종에서는 플라스틱 섭취나 뒤영킴의 증거가 발견되고 있다.⁹⁵

문제의 근본적인 원인 공략

플라스틱 오염은 발생 원인을 공략하는 것이 오염을 제거하는 것보다 훨씬 효과적이다.

기후 위기와 마찬가지로 플라스틱 문제는 전 지구에 영향을 끼친다. 플라스틱 오염은 지속적으로 증가하고 있으며 전 세계적이고 체계적인 해결책만이 이 문제에 성공적인 대응책이 될 수 있을 것이다. 다행히 플라스틱 문제에 대한 대중의 관심이 높아지고 있고, 플라스틱 오염이 해양 생물종 및 생태계의 회복탄력성 한계치를 넘어서기 전에 현재의 상황을 전환시킬 국제적 결단을 요구하는 목소리 또한 커지고 있다.⁹⁶

자주 거론되는 해결방안 중 하나는 해양 플라스틱 오염물질을 수거하고 제거하는 것이다. 기후변화 완화를 위하여 일부에서 탄소포집기술을 제안하는 것과 마찬가지로, 미래지향적이지만 아직 검증되지 않은 해결방안인 해양 플라스틱 오염의 대규모 제거기술을 도입하지는 목소리가 커지고 있다.^{97, 98, 99, 100}

하지만 해양플라스틱 제거기술이 이론적으로 가능할지라도 광범위하게 적용하기 위해서는 상당한 경제적 비용이 필요하며, 플라스틱 오염의 흐름을 막기에는 역부족으로 보인다.^{101, 102} 게다가 제거기술이 해양생태계에 미치는 영향은 충분히 평가 되지 않았다.¹⁰³ 이러한 제거기술은 의도치 않게 해양생물을 포획해 사망률을 높이고, 특히 그 제거 규모가 커질 때 먹이가 한정된 바다에서 상당한 양의 바이오매스를 지속적으로 제거한다면 득보다 실이 많을 수 있다. 또한 이 제거기술은 상당한 탄소발자국을 남길 것이며 작은 플라스틱을 제거하지 못할 것은 거의 확실하다. 미세플라스틱을 제거하는 방법이 없는 것은 아니지만, 대부분 폐수처리에만 활용되고 있다.¹⁰⁴

따라서 플라스틱 오염이 자연에 유입되기 전에 막는 것이 더 중요하다. 이는 플라스틱이 초기 생산 단계에서부터 감축되어야 함을 의미한다. 이러한 접근 방식으로 플라스틱의 생산과 운송, 폐기 과정에 걸쳐 자원을 절약하고 오염이 감소하는 부가적인 혜택을 얻을 수 있다.

전 세계는 수십 년의 지체 끝에 마침내 기후 위기에 대응하기 위해 집단적으로 과감한 행동에 나서기 시작했다. 전 지구적 플라스틱 위기 또한 우리 모두에게 시급한 사안이 되어야 한다. 지체할 시간이 없다. 바로 지금 행동을 시작해야 한다.

© Alex Mustard / WWF

행동 촉구

구속력 있는 국제 조약이 시급히 필요

플라스틱에 대한 새로운 국제 조약은 반드시 구속력 있고 도전적인 목표를 가지고 전 국가들이 공통의 행동 기준을 준수하도록 해야 한다. 조약은 플라스틱의 생애주기에 걸쳐 글로벌 플라스틱 오염 위기에 효과적으로 대응할 수 있도록 구체적이고 명확하며, 보편적으로 적용 가능한 규칙과 의무를 포함해야 한다. 또한 조약은 지속적인 평가와 더불어 점차 강화되어야 하며, 전 세계적 형평성을 향상시키고 참여 및 이행을 장려하는 규정을 포함해야 한다.

조약에서 다뤄야 할 사항은 다음과 같다.

- 사전주의 원칙과 플라스틱 오염의 파괴적인 영향에 대한 인식에 근거하여 플라스틱이 직간접적으로 자연에 배출되는 것을 근절하는, 명확하게 수립된 비전
- 플라스틱 오염의 예방, 관리, 제거에 관한 도전적이고 효과적인 국가 행동 계획을 수립하고 시행할 의무
- 플라스틱 생애주기 전반에 걸쳐 플라스틱 오염을 막는 효율적이고 조화로운 전 지구적 노력을 위한 하기의 내용을 포함한 공통의 정의, 방법, 기준 및 규정:
 - 순환성을 보장하는 명확한 요구사항
 - 특정 일회용 플라스틱 제품과 의도적으로 첨가된 미세플라스틱과 같이 환경에 특정 위험을 초래하는 것으로 간주되는 특정 플라스틱 제품에 대한 금지
- 플라스틱 쓰레기를 하천과 수중에 고의로 투기하는 행위 등과 같이 조약의 목적과 의도를 훼손하는 특정 행위에 대한 명시적 금지
- 플라스틱 오염 근절을 위해 국내외의 진척 상황을 추적하는 합의된 측정, 보고 및 검증 계획
- 플라스틱 오염의 규모, 범위, 발생원인을 평가 및 추적하며, 과학적 방법론들을 조율하고 최신 지식을 취합하여 의사결정과 이행을 위한 조언을 제공하는 전문적이고 포용적인 국제 과학 기구의 마련
- 모든 당사자가 조약을 효과적으로 이행할 수 있도록 하는 글로벌 금융, 기술 및 기술 이전의 지원
- 시간 경과에 따라 이러한 조치와 의무를 최신판, 개정, 수립하겠다는 약속

Endnotes

- 1 MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B., Jahnke, A., 2021. The global threat from plastic pollution. *Science* 373 (6550), 61–65
- 2 Borrelle, S. B., Ringma, J., Law, K. L., Monnahan, C. C., Lebreton, L., McGivern, A., Murphy, E., Jambeck, J., Leonard, G. H., Hilleary, M. A., Eriksen, M., Possingham, H. P., De Frond, H., Gerber, L. R., Polidoro, B., Tahir, A., Bernard, M., Mallos, N., Barnes, M., Rochman, C. M., 2020. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science* 369 (6510), 1515–1518
- 3 Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y. M., Milo, R., 2020. Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature* 588 (7838), 442–444
- 4 Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 3 (7), e1700782
- 5 Ocean Conservancy, Stemming the Tide: Land-based strategies for a plastic-free ocean. 2015, McKinsey & Company and Ocean Conservancy.
- 6 Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L., 2015. Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347 (6223), 768–771.
- 7 Borrelle, S. B., Ringma, J., Law, K. L., Monnahan, C. C., Lebreton, L., McGivern, A., Murphy, E., Jambeck, J., Leonard, G. H., Hilleary, M. A., Eriksen, M., Possingham, H. P., De Frond, H., Gerber, L. R., Polidoro, B., Tahir, A., Bernard, M., Mallos, N., Barnes, M., Rochman, C. M., 2020. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science* 369 (6510), 1515–1518
- 8 Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 3 (7), e1700782
- 9 Schnurr, R. E. J., Alboiu, V., Chaudhary, M., Corbett, R. A., Quanz, M. E., Sankar, K., Strain, H. S., Thavarajah, V., Xanthos, D., Walker, T. R., 2018. Reducing marine pollution from single-use plastics (SUPs): A review. *Mar Pollut Bull* 137, 157–171
- 10 González-Fernández, D., Cózar, A., Hanke, G., Viejo, J., Morales-Caselles, C., Bakiri, R., Barceló, D., Bessa, F., Bruge, A., Cabrera, M., 2021. Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean. *Nat Sustain* 4 (6), 474–483
- 11 Morales-Caselles, C., Viejo, J., Martí, E., González-Fernández, D., Pragnell-Raasch, H., González-Gordillo, J. I., Montero, E., Arroyo, G. M., Hanke, G., Salvo, V. S., Basurko, O. C., Mallos, N., Lebreton, L., Echevarría, F., van Emmerik, T., Duarte, C. M., Gálvez, J. A., van Sebille, E., Galgani, F., García, C. M., Ross, P. S., Bartual, A., Ioakeimidis, C., Markalain, G., Isobe, A., Cózar, A., 2021. An in shore–offshore sorting system revealed from global classification of ocean litter. *Nat Sustain* 4 (6), 484–493
- 12 Evangeliou, N., Grythe, H., Klimont, Z., Heyes, C., Eckhardt, S., Lopez-Aparicio, S., Stohl, A., 2020. Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. *Nat Commun* 11 (1), 3381
- 13 MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B., Jahnke, A., 2021. The global threat from plastic pollution. *Science* 373 (6550), 61–65
- 14 Lebreton, L., Egger, M., Slat, B., 2019. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9 (1), 12922
- 15 www.theguardian.com/environment/2017/dec/26/180bn-investment-in-plastic-factories-feeds-global-packaging-binge
- 16 PEW and SYSTEMIQ, 2020. Breaking the plastic wave. *Pew Charitable Trusts*, 1–154.
- 17 Lebreton, L., Egger, M., Slat, B., 2019. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9 (1), 12922
- 18 Everaert, G., Van Cauwenbergh, L., De Rijcke, M., Koelmans, A. A., Mees, J., Vandegehuchte, M., Janssen, C. R., 2018. Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions. *Environ Pollut* 242 (Pt B), 1930–1938
- 19 Everaert, G., De Rijcke, M., Lonneville, B., Janssen, C. R., Backhaus, T., Mees, J., van Sebille, E., Koelmans, A. A., Catarino, A. I., Vandegehuchte, M. B., 2020. Risks of floating microplastic in the global ocean. *Environ Pollut* 267, 115499
- 20 Everaert, G., De Rijcke, M., Lonneville, B., Janssen, C. R., Backhaus, T., Mees, J., van Sebille, E., Koelmans, A. A., Catarino, A. I., Vandegehuchte, M. B., 2020. Risks of floating microplastic in the global ocean. *Environ Pollut* 267, 115499
- 21 Peeken, I., Primpke, S., Beyer, B., Gütermann, J., Katlein, C., Krumpfen, T., Bergmann, M., Hehemann, L., Gerdts, G., 2018. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nature Communications* 9 (1), 1505
- 22 Everaert, G., De Rijcke, M., Lonneville, B., Janssen, C. R., Backhaus, T., Mees, J., van Sebille, E., Koelmans, A. A., Catarino, A. I., Vandegehuchte, M. B., 2020. Risks of floating microplastic in the global ocean. *Environ Pollut* 267, 115499
- 23 M.B. Tekman, L. Gutow, C. Peter, M. Bergmann, 2021. LITTERBASE: Online Portal for Marine Litter, Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, litterbase.org
- 24 Yoshikawa, T., Asoh, K., 2004. Entanglement of monofilament fishing lines and coral death. *Biol Conserv* 117 (5), 557–560
- 25 Parga Martínez, K. B., Tekman, M. B., Bergmann, M., 2020. Temporal trends in marine litter at three stations of the HAUSGARTEN observatory in the Arctic deep sea. *Front Mar Sci* 7, 321
- 26 Naidoo, T., Glassom, D., 2019. Decreased growth and survival in small juvenile fish, after chronic exposure to environmentally relevant concentrations of microplastic. *Mar Pollut Bull* 145, 254–259
- 27 Haetrakul, T., Munanansup, S., Assawawongkasem, N., Chansue, N., 2009. A case report: Stomach foreign object in whaleshark (*Rhincodon typus*) stranded in Thailand. *Proceedings of the 4th International Symposium on Seastar 2000 and Asian Bio-Logging Science*, 83–85
- 28 Wilcox, C., Van Sebille, E., Hardesty, B.D., 2015. Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (38), 11899–11904
- 29 Wilcox, C., Van Sebille, E., Hardesty, B.D., 2015. Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (38), 11899–11904.
- 30 Schuyler, Q.A., Wilcox, C., Townsend, K.A., Wedemeyer-Strombel, K.R., Balazs, G., van Sebille, E., Hardesty, B.D., 2015. Risk analysis reveals global hotspots for marine debris ingestion by sea turtles. *Global Change Biology*.
- 31 Kasteleine, R. A., Lavaley, M. S. S., 1992. Foreign bodies in the stomach of a female harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) from the North Sea. *Aquat Mamm* 18, 40–46
- 32 Baird, R. W., Hooker, S. K., 2000. Ingestion of Plastic and Unusual Prey by a Juvenile Harbour Porpoise. *Mar Pollut Bull* 40 (8), 719–720
- 33 Barros, N. B., Odell, D. K., Patton, G. W., 1990. Ingestion of plastic debris by stranded marine mammals from Florida. In: Shomura, R. S., Godfrey, M. L. (Eds.), *Proceedings of the Second International Conference on Marine Debris*. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, Honolulu, Hawaii, USA, 746
- 34 Lusher, A.L., Hernandez-Milian, G., Berrow, S., Rogan, E., O’Connor, I., 2018. Incidence of marine debris in cetaceans stranded and bycaught in Ireland: Recent findings and a review of historical knowledge. *Environmental Pollution* 232 (Supplement C), 467–476
- 35 Byrd, B. L., Hohn, A. A., Lovewell, G. N., Altman, K. M., Barco, S. G., Friedlaender, A., Harms, C. A., McLellan, W. A., Moore, K. T., Rosel, P. E., 2014. Strandings as indicators of marine mammal biodiversity and human interactions off the coast of North Carolina. *Fish Bull* 112 (1), 1–23
- 36 De Stephanis, R., Gimenez, J., Carpinelli, E., Gutierrez-Exposito, C., Canadas, A., 2013. As main meal for sperm whales: plastics debris. *Mar Pollut Bull* 69 (1–2), 206–214
- 37 Dickerman, R. W., Goelet, R. G., 1987. Northern Gannet starvation after swallowing styrofoam. *Mar Pollut Bull* 18 (6), 293
- 38 Macedo, G. R., Pires, T. T., Rostán, G., Goldberg, D. W., Leal, D. C., Garcez Neto, A. F., Franke, C. R., 2011. Anthropogenic debris ingestion by sea turtles in the northern coast of Bahia, Brazil. *Cienc Rural* 41 (11), 1938–1941
- 39 Prokić, M. D., Radovanović, T. B., Gavrić, J. P., Faggio, C., 2019. Ecotoxicological effects of microplastics: Examination of biomarkers, current state and future perspectives. *Trends Analyt Chem* 111, 37–46
- 40 Green, D. S., Boots, B., Blockley, D. J., Rocha, C., Thompson, R., 2015. Impacts of discarded plastic bags on marine assemblages and ecosystem functioning. *Environ Sci Technol* 49 (9), 5380–5389
- 41 Balestri, E., Menicagli, V., Vallnerini, F., Lardicci, C., 2017. Biodegradable plastic bags on the seafloor: A future threat for seagrass meadows? *Science of The Total Environment* 605–606, 755–763.
- 42 Rochman, C.M., 2015. The complex mixture, fate and toxicity of chemicals associated with plastic debris in the marine environment. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Berlin, pp. 117–140.
- 43 Mattsson, K., Johnson, E.V., Malmedal, A., Linse, S., Hansson, L.-A., Cederwall, T., 2017. Brain damage and behavioral disorders in fish induced by plastic nanoparticles through the food chain. *scientific reports* 7, 11452
- 44 Prüst, M., Meijer, J., Westerink, R.H.S., 2020. The plastic brain: neurotoxicity of micro- and nanoplastics. *Particle and Fibre Toxicology*, 17:24.
- 45 Porte, C., Janer, G., Lorusso, L.C., Ortiz-Zarragoita, M., Cajaraville, M.P., Fossi, M.C., Canesi, L., 2006. Endocrine disruptors in marine organisms: Approaches and perspectives. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 143, 303-315.
- 46 Hamlin, H.J., K. Marciano, and C.A. Downs, Migration of nonylphenol from food-grade plastic is toxic to the coral reef fish species *Pseudochromis fridmani*. *Chemosphere*, 2015. 139: p. 223-228.
- 47 Muncke, J., Andersson, A.-M., Backhaus, T., Boucher, J.M., Carney Almroth, B., Castillo Castillo, A., Chevrier, J., Demeneix, B.A., Emmanuel, J.A., Fini, J.-B., Gee, D., Geueke, B., Groh, K., Heindel, J.J., Houlihan, J., Kassotis, C.D., Kwiatkowski, C.F., Lefferts, L.Y., Maffini, M.V., Martin, O.V., Myers, J.P., Nadal, A., Nerin, C., Pelch, K.E., Fernández, S.R., Sargis, R.M., Soto, A.M., Trasande, L., Vandenberg, L.N., Wagner, M., Wu, C., Zoeller, R.T., Scheringer, M., 2020. Impacts of food contact chemicals on human health: a consensus statement. *Environmental Health* 19 (1), 25.
- 48 Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 3 (7), e1700782
- 49 Long, M., Moriceau, B., Gallinari, M., Lambert, C., Huvet, A., Raffray, J., Soudant, P., 2015. Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: impact on their respective fates. *Mar Chem* 175, 39–46
- 50 Tekman, M. B., Wekerle, C., Lorenz, C., Primpke, S., Hasemann, C., Gerdts, G., Bergmann, M., 2020. Tying up loose ends of microplastic pollution in the Arctic: Distribution from the sea surface through the water column to deep-sea sediments at the HAUSGARTEN observatory. *Environ Sci Technol* 54 (7), 4079–4090
- 51 Zhao, S., Ward, J. E., Danley, M., Mincer, T. J., 2018. Field-Based Evidence for Microplastic in Marine Aggregates and Mussels: Implications for Trophic Transfer. *Environ Sci Technol* 52 (19), 11038–11048
- 52 Brandon, J.A., A. Freiboth, and L.M. Sala, Patterns of suspended and salp-ingested microplastic debris in the North Pacific investigated with epifluorescence microscopy. *Limnol. Oceanogr.* Lett., 2020. 5(1): p. 46-53
- 53 Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Goodhead, R., Moger, J., Galloway, T. S., 2013. Microplastic ingestion by zooplankton. *Environ Sci Technol* 47 (12), 6646–6655
- 54 Davison, P., Asch, R. G., 2011. Plastic ingestion by mesopelagic fishes in the North Pacific Subtropical Gyre. *Mar Ecol Prog Ser* 432, 173–180
- 55 Katija, K., Choy, C. A., Sherlock, R. E., Sherman, A. D., Robison, B. H., 2017. From the surface to the seafloor: How giant larvaceans transport microplastics into the deep sea. *Sci Adv* 3, e1700715
- 56 Wieczorek, A. M., Croot, P. L., Lombard, F., Sheahan, J. N., Doyle, T. K., 2019. Microplastic Ingestion by Gelatinous Zooplankton May Lower Efficiency of the Biological Pump. *Environ Sci Technol* 53 (9), 5387–5395
- 57 Mattsson, K., Johnson, E. V., Malmendal, A., Linse, S., Hansson, L. A., Cedervall, T., 2017. Brain damage and behavioural disorders in fish induced by plastic nanoparticles delivered through the food chain. *Sci Rep* 7 (1), 11452
- 58 Mathalon, A., Hill, P., 2014. Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia. *Mar Pollut Bull* 81 (1), 69–79
- 59 Li, J., Qu, X., Su, L., Zhang, W., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D., Shi, H., 2016a. Microplastics in mussels along the coastal waters of China. *Environ Pollut* 214, 177–184
- 60 Qu, X., Su, L., Li, H., Liang, M., Shi, H., 2018. Assessing the relationship between the abundance and properties of microplastics in water and in mussels. *Sci Total Environ* 621, 679–686
- 61 Zeytin, S., Wagner, G., Mackay-Roberts, N., Gerdts, G., Schuurmann, E., Klockmann, S., Slater, M., 2020. Quantifying microplastic translocation from feed to the fillet in European sea bass *Dicentrarchus labrax*. *Mar Pollut Bull* 156, 11210
- 62 Karami, A., Golieskardi, A., Choo, C. K., Larat, V., Karbalaei, S., Salamatinia, B., 2018. Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats. *Sci Total Environ* 612, 1380–1386
- 63 Lamb, J. B., Willis, B. L., Fiorenza, E. A., Couch, C. S., Howard, R., Rader, D. N., True, J. D., Kelly, L. A., Ahmad, A., Jompa, J., Harvell, C. D., 2018. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359 (6374), 460–462
- 64 Ibid.
- 65 Al-Jufaili, S., Al-Jabri, M., Al-Baluchi, A., Baldwin, R. M., Wilson, S. C., West, F., Matthews, A. D., 1999. Human Impacts on Coral Reefs in the Sultanate of Oman. *Estuar Coast Shelf Sci* 49, 65–74
- 66 Angiolillo, M., Lorenzo, B. D., Farcomeni, A., Bo, M., Bavesstrello, G., Santangelo, G., Cau, A., Mastas-cusa, V., Cau, A., Sacco, F., Canese, S., 2015. Distribution and assessment of marine debris in the deep Tyrrhenian Sea (NW Mediterranean Sea, Italy). *Mar Pollut Bull* 92 (1–2), 149–159
- 67 Tang, J., Wu, Z., Wan, L., Cai, W., Chen, S., Wang, X., Luo, J., Zhou, Z., Zhao, J., Lin, S., 2021. Differential enrichment and physiological impacts of ingested microplastics in scleractinian corals in situ. *J Hazard Mater* 404 (Pt B), 124205
- 68 Luo, Y. Y., Not, C., Cannicci, S., 2021. Mangroves as unique but understudied traps for anthropogenic marine debris: a review of present information and the way forward. *Environ Pollut* 271, 116291
- 69 Suyadi, N., Manullang, C. Y., 2020. Distribution of plastic debris pollution and its implications on mangrove vegetation. *Mar Pollut Bull* 160, 111642
- 70 Martin, C., Almahasheer, H., Duarte, C. M., 2019a. Mangrove forests as traps for marine litter. *Environ Pollut* 247, 499–508
- 71 van Bijsterveldt, C. E., van Wesenbeeck, B. K., Ramadhani, S., Raven, O. V., van Gool, F. E., Pribadi, R., Bouma, T. J., 2021. Does plastic waste kill mangroves? A field experiment to assess the impact of macro plastics on mangrove growth, stress response and survival. *Sci Total Environ* 756, 143826
- 72 Debrot, A. O., Meesters, H. W., Bron, P. S., de Leon, R., 2013a. Marine debris in mangroves and on the seabed: largely-neglected litter problems. *Mar Pollut Bull* 72 (1), 1
- 73 Smith, S. D., 2012. Marine debris: a proximate threat to marine sustainability in Bootless Bay, Papua New Guinea. *Mar Pollut Bull* 64 (9), 1880–1883
- 74 van Bijsterveldt, C. E., van Wesenbeeck, B. K., Ramadhani, S., Raven, O. V., van Gool, F. E., Pribadi, R., Bouma, T. J., 2021. Does plastic waste kill mangroves? A field experiment to assess the impact of macro plastics on mangrove growth, stress response and survival. *Sci Total Environ* 756, 143826
- 75 Ibid.
- 76 Smith, S. D., 2012. Marine debris: a proximate threat to marine sustainability in Bootless Bay, Papua New Guinea. *Mar Pollut Bull* 64 (9), 1880–1883
- 77 Taylor, M., 2017. \$180 bn investment in plastic factories feeds global packaging binge. *The Guardian*
- 78 Taylor, M., Plastic pollution discovered at deepest point of ocean, in *The Guardian*, 2018.
- 79 Tekman, M. B., Krumpfen, T., Bergmann, M., 2017. Marine litter on deep Arctic seafloor continues to increase and spreads to the North at the HAUSGARTEN observatory. *Deep-Sea Res Part I* 120, 88–99
- 80 Song, X., Lyu, M., Zhang, X., Ruthensteiner, B., Ahn, I.-Y., Pastorino, G., Wang, Y., Gu, Y., Ta, K., Sun, J., 2021. Large plastic debris dumps: New biodiversity hot spots emerging on the deepsea floor. *Environ Sci Technol* Lett.
- 81 Katsanevakis, S., Verriopoulou, G., Nicolaidou, A., Thessalou-Legaki, M., 2007. Effect of marine litter on the benthic megafauna of coastal soft bottoms: a manipulative field experiment. *Mar Pollut Bull* 54 (6), 771–778
- 82 Werner, S., Budziak, A., van Franeker, J., Galgani, F., Hanke, G., Maes, T., Matiddi, M., Nilsson, P., Oosterbaan, L., Priestland, E., Thompson, R., Veiga, J., Vlachogianni, T., 2016. Harm caused by marine litter. *MSFD GES TG Marine Litter – Thematic Report*. JRC Technical report EUR 28317 EN. European Union
- 83 Landos, M., Smith, M. L., Immig, J., 2021. Aquatic pollutants in oceans and fisheries. *International Pollutants Elimination Network, National Toxics Network*
- 84 Gunderson, A. R., Armstrong, E. J., Stillman, J. H., 2016. Multiple stressors in a changing world: The need for an improved perspective on physiological responses to the dynamic marine environment. *Ann Rev Mar Sci* 8, 357–378
- 85 Orr, J. A., Vinebrooke, R. D., Jackson, M. C., Kroeker, K. J., Kordas, R. L., Mantyka-Pringle, C., Van den Brink, P. J., De Laender, F., Stoks, R., Holmstrup, M., Matthaei, C. D., Monk, W. A., Penk, M. R., Leuzinger, S., Schafer, R. B., Piggott, J. J., 2020. Towards a unified study of multiple stressors: divisions and common goals across research disciplines. *Proc Biol Sci* 287 (1926), 20200421
- 86 Coe, M. T., Marthews, T. R., Costa, M. H., Galbraith, D. R., Greenglass, N. L., Imbuzeiro, H. M., Levine, N. M., Malhi, Y., Moorcroft, P. R., Muza, M. N., Powell, T. L., Saleska, S. R., Solorzano, L. A., Wang, J., 2013. Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south-southeastern Amazonia. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 368 (1619), 20120155
- 87 Kroeker, K. J., Kordas, R. L., Harley, C. D., 2017. Embracing interactions in ocean acidification research: confronting multiple stressor scenarios and context dependence. *Biol Lett* 13 (3), 20160802
- 88 McComb, B. C., Cushman, S. A., 2020. Synergistic effects of pervasive stressors on ecosystems and biodiversity. *Front Ecol Evol* 8, 398
- 89 Pereira, H. M., Leadley, P. W., Proenca, V., Alkemade, R., Scharlemann, J. P., Fernandez-Manjarres, J. F., Araujo, M. B., Balvanera, P., Biggs, R., Cheung, W. W., Chini, L., Cooper, H. D., Gilman, E. L., Guenette, S., Hurt, G. C., Huntington, H. P., Mace, G. M., Oberdorff, T., Revenga, C., Rodrigues, P., Scholes, R. J., Sumaila, U. R., Walpole, M., 2010. Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science* 330 (6010), 1496–1501
- 90 Barnosky, A. D., Hadly, E. A., Bascompte, J., Berlow, E. L., Brown, J. H., Fortelius, M., Getz, W. M., Harte, J., Hastings, A., Marquet, P. A., Martinez, N. D., Moores, A., Roopnarine, P., Vermeij, G., Williams, J. W., Gillespie, R., Kitzes, J., Marshall, C., Matzke, N., Mindell, D. P., Revilla, E., Smith, A. B., 2012. Approaching a state shift in Earth’s biosphere. *Nature* 486 (7401), 52–58
- 91 Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., Garcia, A., Pringle, R. M., Palmer, T. M., 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Sci Adv* 1 (5), e1400253
- 92 Jackson, J. B., 2008. Colloquium paper: ecological extinction and evolution in the brave new ocean. *Proc Natl Acad Sci USA* 105 Suppl 1, 11458–11465
- 93 Everaert, G., De Rijcke, M., Lonneville, B., Janssen, C. R., Backhaus, T., Mees, J., van Sebille, E., Koelmans, A. A., Catarino, A. I., Vandegehuchte, M. B., 2020. Risks of floating microplastic in the global ocean. *Environ Pollut* 267, 115499
- 94 Wilcox, C., Van Sebille, E., Hardesty, B. D., 2015b. Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing. *Proc Natl Acad Sci USA* 112 (38), 11899–11904
- 95 M.B. Tekman, L. Gutow, C. Peter, M. Bergmann, 2021. LITTERBASE: Online Portal for Marine Litter, Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, litterbase.org
- 96 Walther, B., Nation engulfed by plastic tsunami, in *Taipei Times*. 2015. p. 8
- 97 Barceló, D. and Y. Pico, Case studies of macro-and microplastics pollution in coastal waters and rivers: Is there a solution with new removal technologies and policy actions? *CSCEE*, 2020. 2: p. 100019.
- 98 Schmaltz, E., Melvin, E. C., Diana, Z., Gunady, E. F., Rittschof, D., Somarelli, J. A., Virdin, J., Dunphy-Daly, M. M., 2020. Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environ Int* 144, 106067
- 99 Helinski, O. K., Poor, C. J., Wolfand, J. M., 2021. Ridding our rivers of plastic: A framework for plastic pollution capture device selection. *Mar Pollut Bull* 165, 112095
- 100 Slat, B., How the oceans can clean themselves: a feasibility study. 2014, Ocean Cleanup Foundation
- 101 Hohn, S., et al., The long-term legacy of plastic mass production. *Sci. Total Environ.*, 2020. 746: p. 141115
- 102 Cordier, M. and T. Uehara, How much innovation is needed to protect the ocean from plastic contamination? *Sci. Total. Environ.*, 2019. 670: p. 789-799.
- 103 Morrison, E., et al., Evaluating The Ocean Cleanup, a marine debris removal project in the North Pacific Gyre, using SWOT analysis. *Case Stud. Environ.*, 2019. 3(1): p. 1-6.
- 104 Padervand, M., et al., Removal of microplastics from the environment. A review. *Environ. Chem. Lett.*, 2020. 18(3): p. 807-828.

An underwater photograph of a coral reef. A large, clear plastic bag is floating in the water, partially covering the coral. The coral is mostly white and yellow, indicating bleaching. A small yellow fish is visible near the plastic.

**UNCHECKED PLASTIC POLLUTION
WILL BECOME A CONTRIBUTING
FACTOR TO THE ONGOING SIXTH
MASS EXTINCTION LEADING
TO WIDESPREAD ECOSYSTEM
COLLAPSE AND TRANSGRESSION OF
SAFE PLANETARY BOUNDARIES.**

© Steve De Neef / National Geographic Creative



Working to sustain the natural
world for the benefit of people
and wildlife.

together possible™ panda.org

© 2022

© 1986 Panda symbol WWF – World Wide Fund for Nature (Formerly World Wildlife Fund)

® “WWF” is a WWF Registered Trademark. WWF, Rue Mauverney 28, CH-1196 Gland, Switzerland. Tel. +41 22 364 9111. Fax. +41 22 364 0332.

For contact details and further information, please visit our international website at www.panda.org