



기후 변화
와
해양

왜 우리는 이산화탄소
배출을 줄여야 하는가

저자:

에스타 곤스탈라 (Esther Gonstalla)

악셀 팀머만 (Axel Timmermann)

발행처

IBS 기후물리연구단 (IBS Center for Climate Physics, ICCP)

부산대학교

대한민국

Copyright © 2018 ICCP, Busan (페이지 20-21, 26-29)

Copyright © 2017 oekom verlag, Munich (그 외 모든 페이지)

All rights reserved.

법정 예외사항 및 관련 집합적 라이선싱 계약의 조항을 따를 것을 조건으로 서면에 의한 출판사의 허락 없이 무단 전재와 복제를 금합니다.

번역 & 감수: 조화선, 김소래, 민지연, 김지, 권은영 박사, 추정은 박사

1988년 저작권 디자인 특허법(Copyright, Designs and Patents Act 1988)에 따른 권리는 Esther Gonstalla에게 있습니다.

일러스트레이션, 전면 표지 디자인, 레이아웃, 인포그래픽

Esther Gonstalla, Erdgeschoss Grafik

후면 표지 미로 디자인 Freepik

출판사는 모든 저작권자를 명기하고자 하였으나, 누락이 발생한 경우 향후 판본에서 수정할 것입니다.

면책 사항: 본 간행물에 포함된 제언은 발행 시점에 정확한 것으로 간주되나 저자(들)와 출판사는 본 간행물의 오류 및 본 간행물의 영향을 받아 취한 행동에 대하여 어떠한 책임도 부담하지 않습니다.

- 007 들어가며
- 008 개요
- 010 기후변화
- 032 실천방안
- 038 자료
- 039 작가에 대하여

바다의 미래는 우리 손에 달려있다

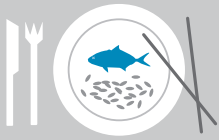
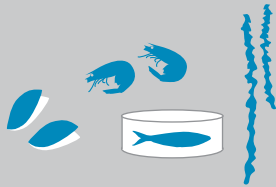
동해, 서해, 남해 삼면이 바다로 둘러싸인 한반도는 수려한 해안 풍경을 자랑하며 신선하고 맛 좋은 해산물로도 유명하다. 아직 눈에 보이지는 않지만, 겉보기에 견고해 보이는 해양환경은 위협을 받고 있다. 지난 한 세기 동안 바다의 온도는 더 높아졌고, 해수면은 무려 18cm나 상승했으며 해수의 산성도는 증가하고 있다. 과학자들은 이러한 오랜 시간에 걸친 변화가 화석 연료 사용을 비롯한 인간 활동에 기인함을 밝혔다. 기후변화에 대한 과학적 근거들은 대체로 잘 정립되어 있다. 하지만 관측 자료의 부족으로 인해 풀리지 않은 몇 가지 중요한 이슈들이 있다. 특히, 거대한 남극 빙상의 운명은 여전히 논쟁 중이다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 제시한 바대로 서남극 빙상이 앞으로 100-200년에 걸쳐 붕괴한다면, 이는 전 지구의 해수면 상승을 가속화시킬 것이며 많은 해안 저지대 지역이 위협에 처하게 될 것으로 예상된다. 이러한 일이 실제로 일어난다면, 전세계 수백만 인구가 다른 지역으로 이주해야 할 것이며 이는 역대 최대의 인구이동이 될 것이다. 이러한 이슈들에 관련된 기초과학적인 이해를 돕고 기후 변화가 바다에 미치는 영향에 대한 인식을 높이고자 이 소책자를 발간한다.



인류...

인류가 해양으로부터 얻는 혜택:

식량 공급
많은 사람의 주요
식자재인 어패류 및
해조류 공급



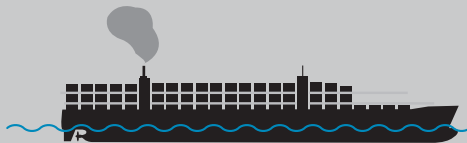
빈곤 감축
상당수 개도국에서 얻을 수
있는 저렴한 단백질 공급원은
어류가 유일

에너지 및 자원 공급
석유 시추 및
해상 풍력발전단지



고용 효과
전 세계 근로 인구 중
12%는 어업에 종사

운송 경로
매년 수십억 개의
상품을 해상을 통해
운송



의약품 원료 제공
해양에서 추출한 물질을
활용해 다수의 의약품
제조



휴식 및 여가 공간
여가 활동 및 휴가지로 인기있는
해변 및 해안 지방

인류가 해양에 가하는 위협:



기후변화



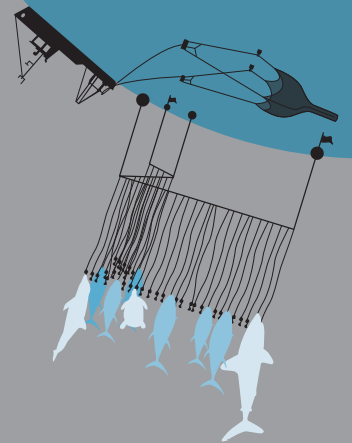
환경오염



산업화



남획



...그리고 해양

해양이 수행하는
주요 역할:

인류가
해양을
보호하는
방법:



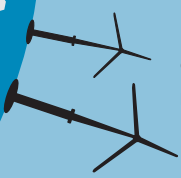
소비 습관 변화



재활용,
플라스틱 사용
자제



이산화탄소
배출 감축



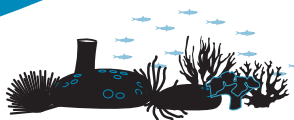
어류 소비 감축



해양보호구역
증대



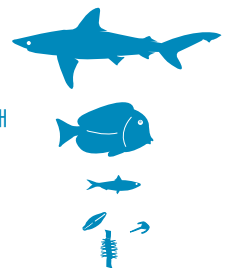
산란지 제공
산호초는 해양 생물의 번식
및 생물 다양성 보존을 위한
안전한 공간 제공



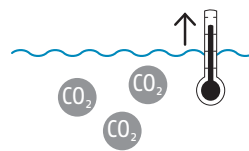
기후 조절
대기와 끊임없이
상호작용하며 기후를
조절하는 역할 수행



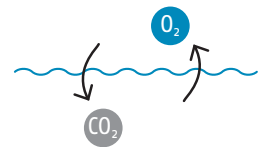
생물 서식지 제공
복잡한 먹이사슬을 통해
균형 잡힌 생물권 형성



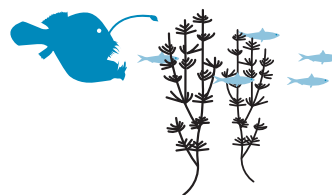
기후 보호
대기 중 이산화탄소 및
열을 흡수하여
»완충(buffer) 역할« 수행



산소 공급
이산화탄소를 전환해
산소를 비롯한 다양한
물질 공급



생태계 안정화
생물 다양성을 통해
안정적인 생태계 제공



해안 보호
해안에 형성된 숲,
맹그로브(mangroves)의 침식
및 홍수로부터 해안을 보호



→ 원인 → 직접적 결과 → 간접적 결과 → 해결 방안

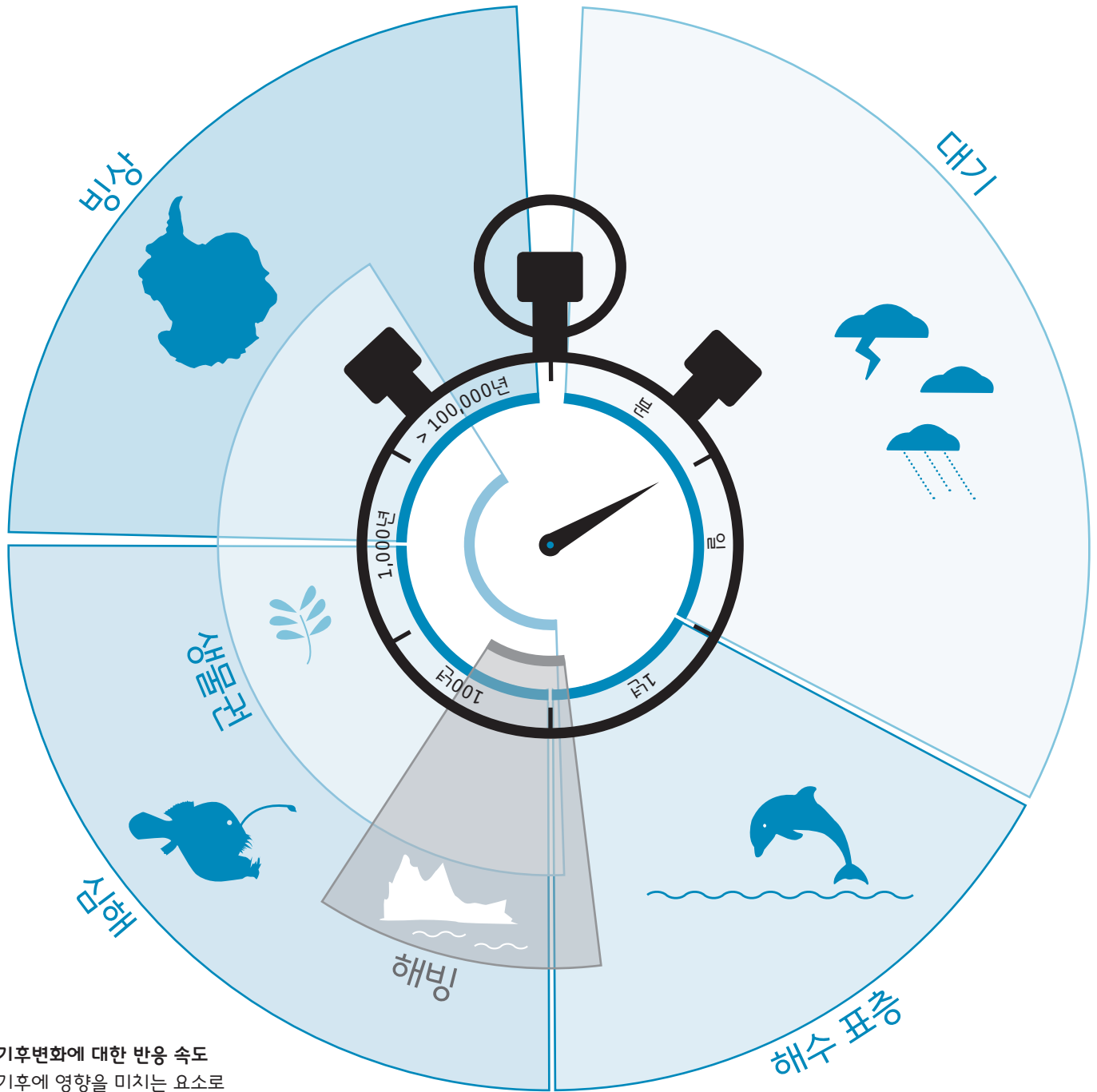


→ 미래 양식업

→ 재생 에너지

기후변화

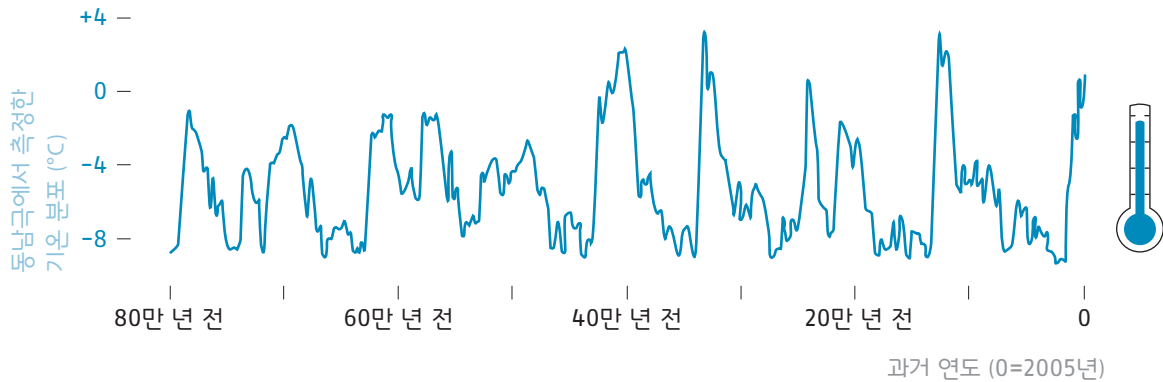
기후는 어떻게 형성되나?



기후변화에 대한 반응 속도
기후에 영향을 미치는 요소로
는 대기권, 빙권, 육상 및 해
양의 생물권 등 다양한 요소
를 들 수 있다. 각 요소의 기후
변화에 대한 반응 속도는
몇 분에서 수천 년까지 다양
하게 나타난다.

지구 기후의 역사

북극 지방의 빙상에 갇힌 공기 방울을 분석하는 과학적인 방법으로 고대 지구의 평균 기온 및 대기 구성 성분의 변화를 추론할 수 있다. 공기 방울에 포집된 산소 비율을 통해 과거 80만 년 전까지 거슬러 올라가 지구 대기권의 역사를 파악하는 것이다.



오랜 세월 동안 지구의 기온은 여러 차례 상승하고 하락하길 반복했다. 지구의 태양에 대한 각도, 지구 표면, 대기권의 미묘한 변화 및 태양 에너지 강도 변동이 꾸준히 기후변화를 야기해 온 것이다. 예를 들어 온실 효과는 사실 인류의 생존을 위해 반드시 필요한 기후 요소다. 지구 대기권을 통과한 태양복사가 지구 표면에서 반사된 후 열로 전환되어 부분적으로 대기로 흡수되지 않는다면 지구의 기온은 영하로 떨어지게 될 것이다.

하지만 19세기 산업화를 거치며 이산화탄소를 포함한 온실 기체의 배출량이 증가하게 됨에 따라 지구 표면 온도는 추가적으로 상승하게 되었다. 인간 활동으로 인한 이산화탄소의 대기 중 배출이 증가 할수록 더 많은 복사열이 갇히게 되고 이에 따라 더 심각한 수준의 온실 효과가 발생하게 된다. 과학자들은 남극의 얼음에 깊은 구멍을 뚫어 채취한 아이스 코어를 분석하여 지난 80만 년간의 지구 기온 변화를 추적했다. 해당 데이터 및 기타 기후 기록에 따르면 현재 관찰되는 기후 변화는 과거 지구 온도 상승 때보다 훨씬 더 빠른 속도로 발생하고 있다.

이러한 기후변화는 해양에 심각한 악영향을 미친다. 바다 표면은 상대적으로 어두운 색을 띠므로 많은 양의 열을 흡수한다. 또한 느린 속도로 이동하는 해류를 통해 엄청난 양의 열과 이산화탄소가 이동하게 된다. 많은 양의 이산화탄소가 갑작스럽게 유입되면 해양 산성화가 발생하게 되는데, 이는 해양 생태계 및 산호초를 비롯한 해양 서식 생물에 되돌릴 수 없는 치명적 영향을 미치게 된다.

온실 효과가 해양 기후에 미치는 영향은 상대적으로 느린 속도로 나타나는 편이다. 바람의 영향을 받아 움직이는 해수 표층은 수 개월 혹은 수년 내 반응하지만, 심해의 경우 수백 년에서 심지어 천년에 이르는 시간이 걸리기도 한다. 특히, 빙상은 기후 변화의 영향을 드러내기까지 수백 년에서 수천 년이 소요되며 가장 느린 속도의 반응을 보인다. 하지만, 일단 그 영향이 나타나기 시작하면 광대한 영역에 영향을 미치는 변화를 인간의 힘으로 되돌릴 수 있는 방법은 없다. 전 세계 이산화탄소 배출량을 최대한 빠르게 감축해야 하는 이유가 바로 그 때문이다.

해양 열 분포

100%

80

60

40

20

0

전 세계 해양 열용량 변화율

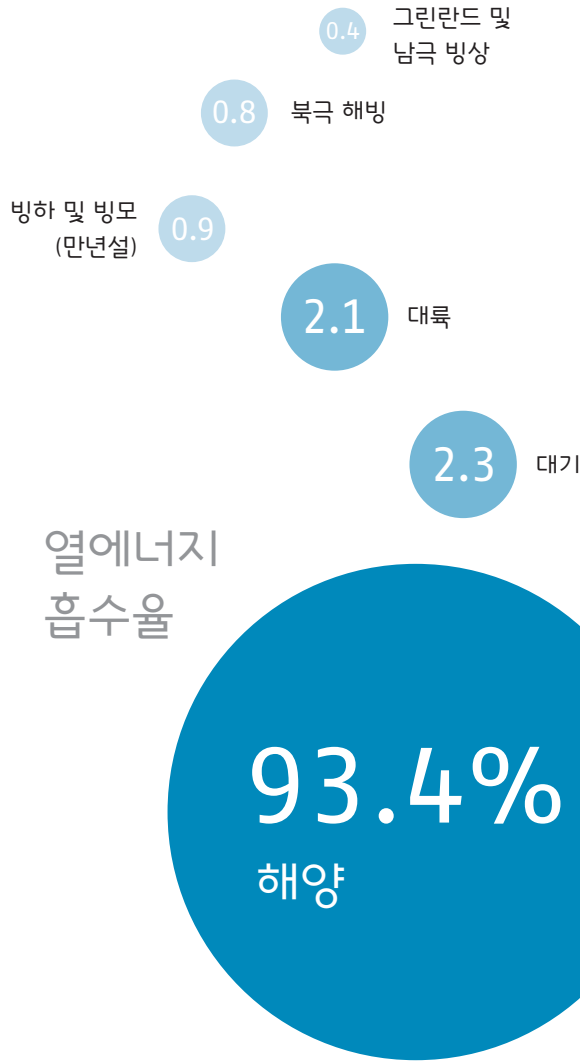
1860

1880

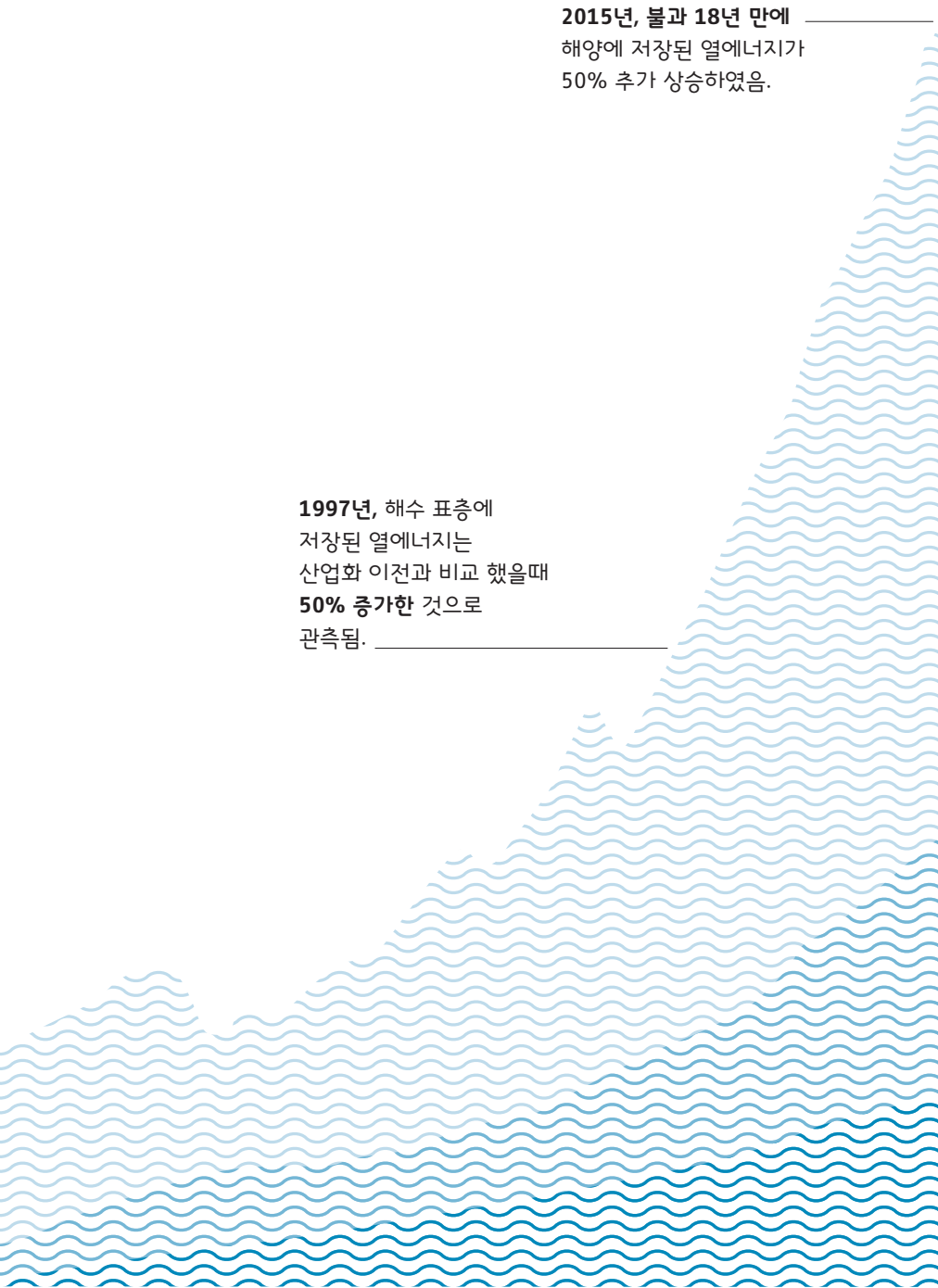
1900

1920

1940



측정 해양 수심 0-700 m 700-2,000 m 2,000 m 부터 해저까지



2015년, 불과 18년 만에
해양에 저장된 열에너지가
50% 추가 상승하였음.

1997년, 해수 표층에
저장된 열에너지는
산업화 이전과 비교 했을때
50% 증가한 것으로
관측됨.

해양은 지구상에서 가장 강력한 열에너지 저장 능력을 보유하고 있다. 대기권 온도는 계속해서 상승하기만 하지만, 해양은 인간 활동으로 발생한 기온 상승 속도를 상당 수준 늦춰주는 역할을 한다. 액체는 온도가 상승하면 그 부피가 증가하는데, 이로 인해 해수면 상승이 발생하게 된다. 초기에는 대부분의 열이 해수면 근처에 저장되지만, 차츰 심해까지 확산된다. 이러한 과정에서 열은 단순히 저장되기만 하는 것이 아니라 방출되기도 한다. 대부분 적도에 집중된 열을 대서양의 멕시코 만류(Gulf Stream) 같은 표층 해류가 북쪽으로 이동시키고 이곳에서 일부 열이 대기 중으로 방출되는 것이다.

1997년부터 2015년까지 해양의 열에너지 흡수는 표층의 경우 2배, 중층의 경우 35% 증가하였으며 같은 기간 동안 지구 온난화 또한 현저히 가속화되었다.

현재 해양은 육상 생물권과 더불어 기후 변화에 맞서 싸우는 데 가장 큰 역할을 수행하고 있다. 하지만 앞으로 얼마나 더 많은 열을 해양이 흡수할 수 있을지는 의문이다.

1960

1980

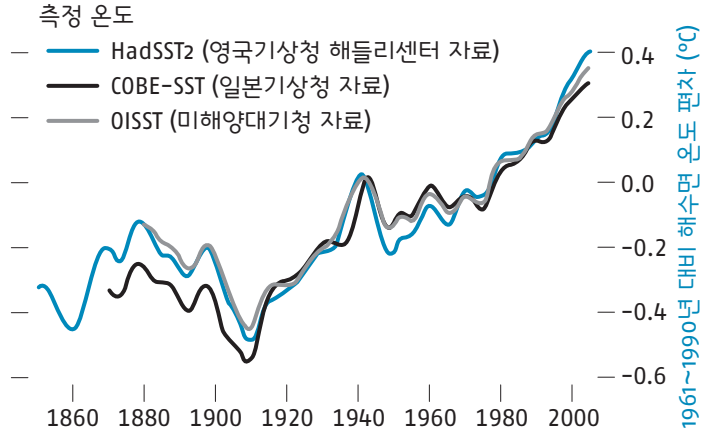
2000

2020 연도

지구 온난화가 가져올 결과

1 해수 온도 상승

해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST) 상승이 발생하게 된다. 세 가지 과학적 모델을 통해 확인할 수 있듯이 1961~1990년 대비 현재 해수면 온도는 약 0.4°C 상승했다.



2 백화 현상을 겪으며 죽어가는 산호초 증가

약 4년마다 발생하는 적도 동태평양 해역의 이상 고온 현상인 엘니뇨(EI Niño) 현상은 산호의 대규모 죽음을 유발한다. 지구 온난화 및 그로 인해 발생한 해수 온도 상승은 엘니뇨 현상을 강화시키고 장기간 지속되게 하는 결과를 낳는다. 반면 수온 상승 기간이 단축 될수록 산호의 생존율은 높아진다.

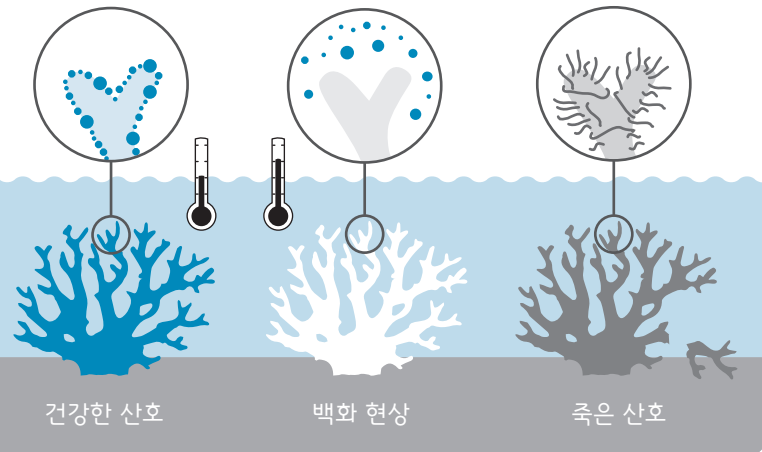
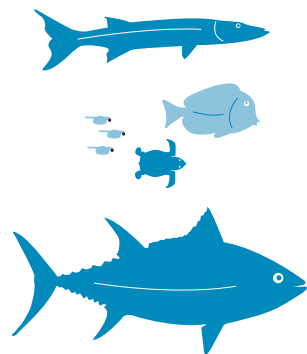
역대 최장기간 발생한 백화 현상은 2015년 10월에 시작되어 2016년 5월까지 지속되었다. 이로 인해 전 세계에서 가장 규모가 큰 산호초인 호주 그레이트 배리어 리프(Great Barrier Reef)의 93%가 피해를 입었는데, 특히 북동부에서는 백화 현상이 발생한 산호초 중 50%가 죽게 된 안타까운 상황이 발생했다.



산호는 자신의 생존을 위해 반드시 필요한 조류의 일종인 주산텔라(Zooxanthellae)와 공생 관계를 형성한다. 산호는 주산텔라로부터 영양분을 공급받고 아름다운 색 또한 얻는다.

해수 온도가 1°C 상승하면 주산텔라는 일종의 쇼크 상태에 빠져 산호의 영양분인 당류 대신 독성 물질을 생성한다. 그 결과 산호는 공생 관계의 주산텔라를 쫓아내고 색을 잃게 된다.

영양분을 공급받지 못하는 상태가 지속되면 산호는 결국 죽음에 이르는데, 이때 조류와 산호 표면에 위협을 주는 상황이 뒤따르게 되면 주산텔라가 다시 돌아오는 것은 거의 불가능해진다.



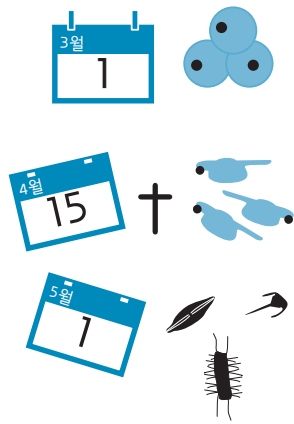
25%

의 해양 생물은 산호에 직접적으로 의존하고 있음.

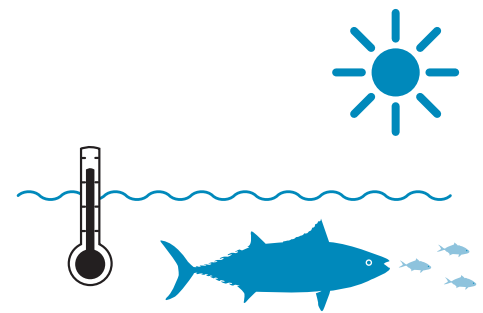


3 해양 생물의 행동 변화 발생

봄철 수온이 평균치보다 높으면 다수의 물고기는 산란 시기를 앞당긴다. 하지만 치어의 주된 먹이인 플랑크톤은 일조량과 계절에 큰 영향을 받기 때문에 알에서 부화하더라도 충분한 먹이 공급원을 찾지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 그 결과, 치어는 먹이를 찾지 못해 굶주리고 물고기 개체 수는 감소하게 된다.

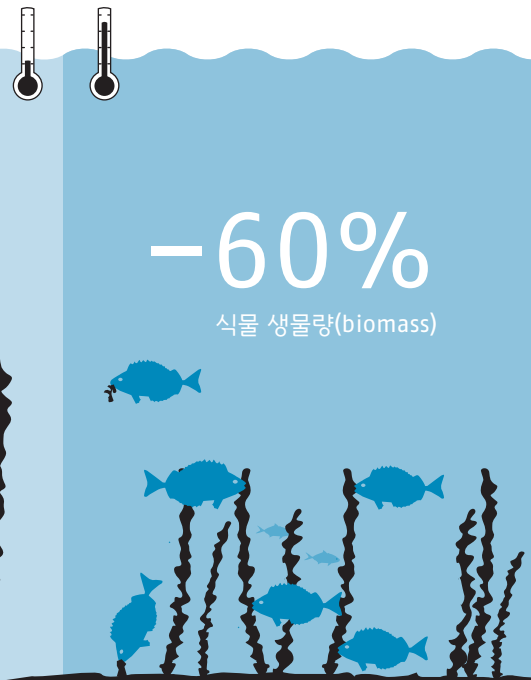


봄철 일조량 증가 및 여름철 해수 온도 상승과 같은 자연환경의 변화는 물고기의 먹이 습관 및 짝짓기 습관에 변화를 야기할 수 있다. 따라서 기후변화는 해양 생물의 자연스러운 행동을 왜곡시켜 생태계 균형을 무너뜨리게 된다.



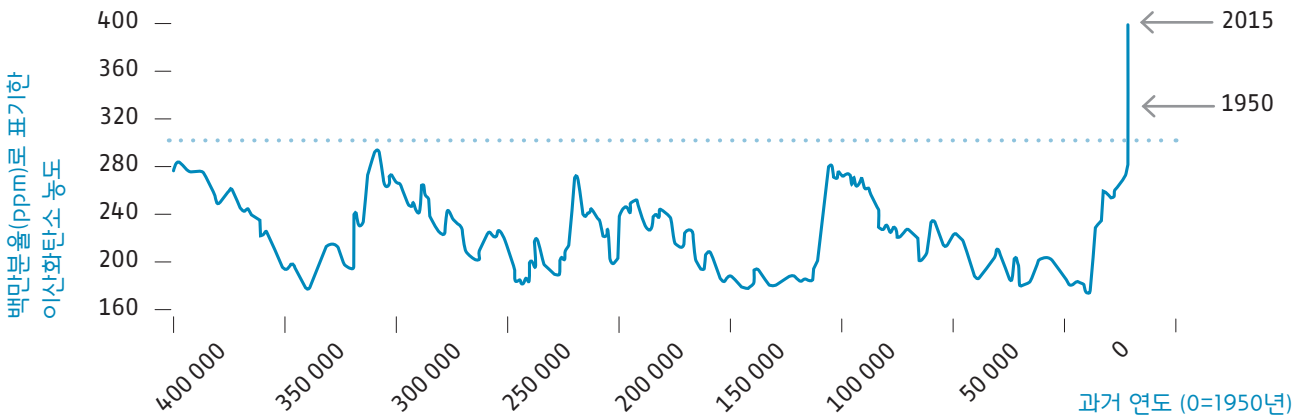
4 외래종의 확산 및 생태계 변화 발생

초식성 열대 물고기는 막대한 피해를 초래할 수 있다. 예를 들어 수에즈 운하를 통해 따뜻한 지중해로 이동한 마스크 래빗 피쉬(masked rabbit fish)는 대형 갈조류를 지칭하는 켈프와 해조류를 파괴적인 수준으로 먹어 치우고 있다. 이로 인해 환경 변화뿐만 아니라 자생 어류의 행동 변화 또한 발생하고 있다.



해양 산성화

65만 년 동안 대기 중 이산화탄소 농도는 300ppm 미만에서 변동하였으나, 산업혁명을 거치며 대폭 상승하였음.



산업혁명 이후 인류는 어마어마한 양의 화석연료를 사용하고 전례 없는 수준의 삼림 벌채를 수행하고 있다. 그 결과 대기 중 이산화탄소 농도는 꾸준히 상승하였으며 이는 해양에서도 마찬가지였다. 지난 6천만 년 동안 관찰된 것보다 훨씬 더 빠른 속도로 해수의 이산화탄소 농도가 증가하게 된 것이다. 1950년 이후, 해수의 pH 값은 8.2에서 8.1로 하락했는데, 이는 해양 산성도가 약 30% 증가했다는 의미이다. 2100년까지 이산화탄소 배출율이 현재 수준으로 유지된다면, 해양 산성도는 140% 추가 상승할 것으로 예측된다. 해수는 일반적으로 알칼리성을 띠며 이산화탄소를 흡수했을 때 산성화가 발생하고 이를 결합해 탄산(carbonic acid)이 생성된다. 해조와 같은 해양 식물은 광합성 작용을 통해 해수에 용해된 탄소를 흡수한 후 당분과 녹말을 생산한다. 또한 이산화탄소 농도가 높아지면 해파리의 성장이 촉진된다. 하지만 해양 pH 값이 지속적으로 낮아질 경우, 산호초 피해가

발생하고 무척추동물 중의 생존에 필수적인 석회 형성이 위협받는다. 아직 의미 있는 데이터를 제공할 만한 장기적 연구가 충분히 수행되지 않았기 때문에 pH 수치가 계속 하락할 경우 해양 생태계 전반에 어떤 변화가 발생 할지에 대해서는 추측만 할 수 있을 뿐이다.

- 이산화탄소 (CO₂)
- 물 (H₂O)
- 탄산 이온 (CO₃²⁻)
- 중탄산염 (2HCO₃⁻)

1950년 이전

이산화탄소 농도 증가로 인해
2100년까지 해양 산성도가
170% 상승하게 되면 해양 생
태계 균형이 무너질 것이다.

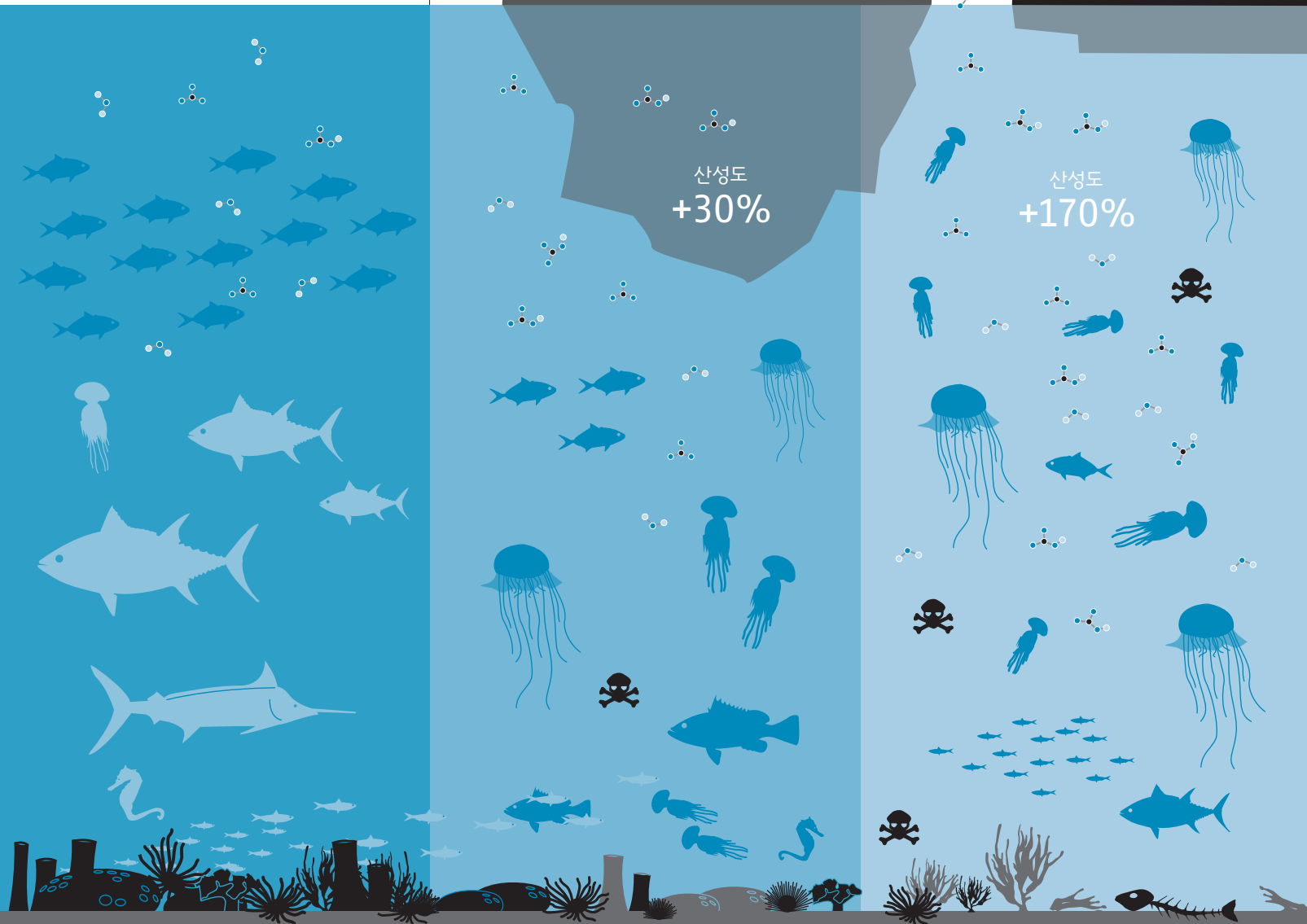
2016

2100



산성도
+30%

산성도
+170%



이산화탄소 증가로 물고기가 »사라지는« 이유

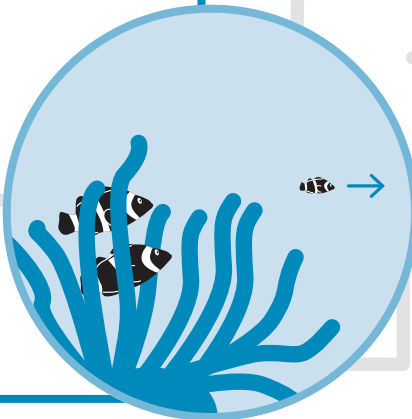
1

대기 중 이산화탄소 배출이 증가하면 해양 이산화탄소 농도가 증가하게 되는데, 이로 인해 해수의 산성도가 증가한다. 또한, 이산화탄소 농도 증가는 물고기를 비롯한 다양한 해양 생물의 대사작용에도 영향을 미친다.



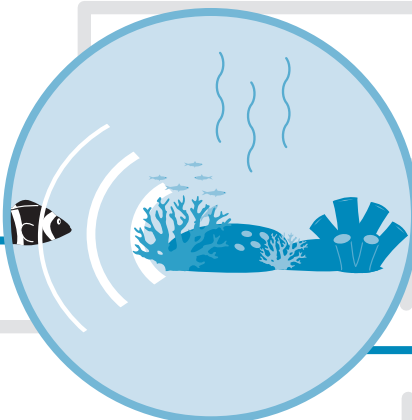
2

흰동가리 치어는 부화한 후 새로운 산호초 서식지를 찾아 떠난다.



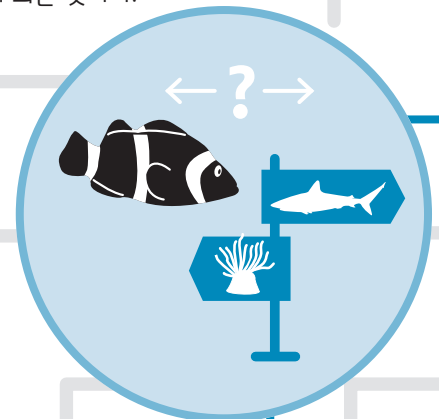
3

치어는 새로운 서식지를 찾기 위해 청각 및 후각 등의 감각을 활용한다.



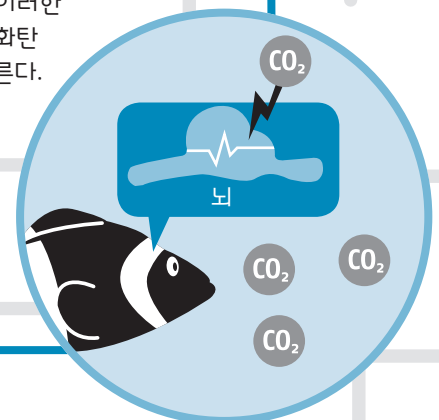
5

그 결과, 흰동가리의 청각 및 후각이 둔화된다. 포식자의 냄새를 맡으면 도망가는 것이 아니라 그 냄새에 이끌리게 되는 것이다.



4

이산화탄소 농도가 증가하면 흰동가리의 뇌 기능에 이상이 생기고 행동이 변화한다. 이러한 증상을 »과이산화탄소혈증«이라 부른다.



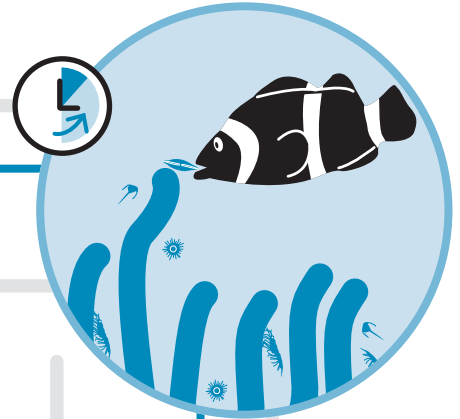
6

또한, 흰등가리는 더 대담해지고 활동성이 높아지는데, 이로 인해 치명적인 포식자와 마주하는 상황이 발생한다.



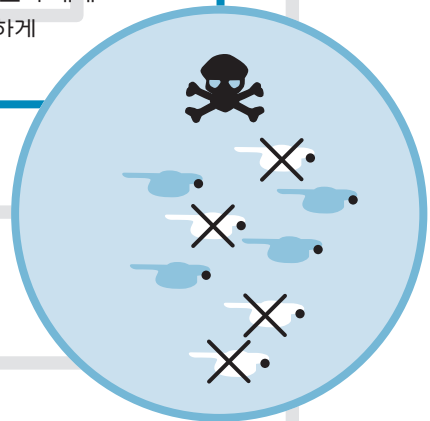
7

활동성 및 호기심 증대로 인해 먹이를 먹는 시간도 줄어든다.



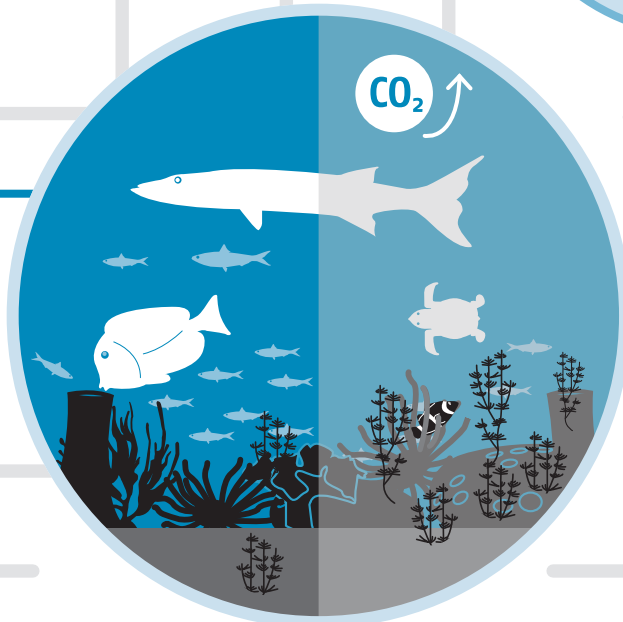
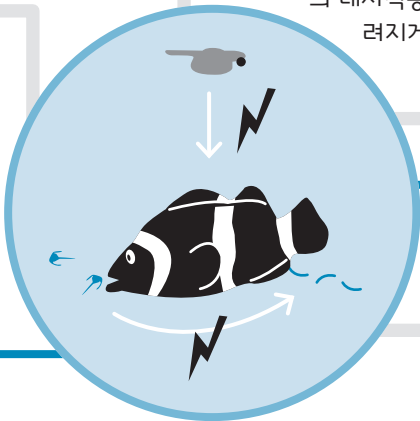
8

특히, 자어(어린 물고기)가 가장 취약한 상태에 놓인다. 해양 이산화탄소 농도가 상승함에 따라 자어의 생존율이 낮아지며 그 결과 물고기 개체수가 감소하게 된다.



9

이산화탄소 농도 증가로 인해 해양 산성화가 발생하면 일부 물고기의 대사작용 속도가 느려지게 된다.



10

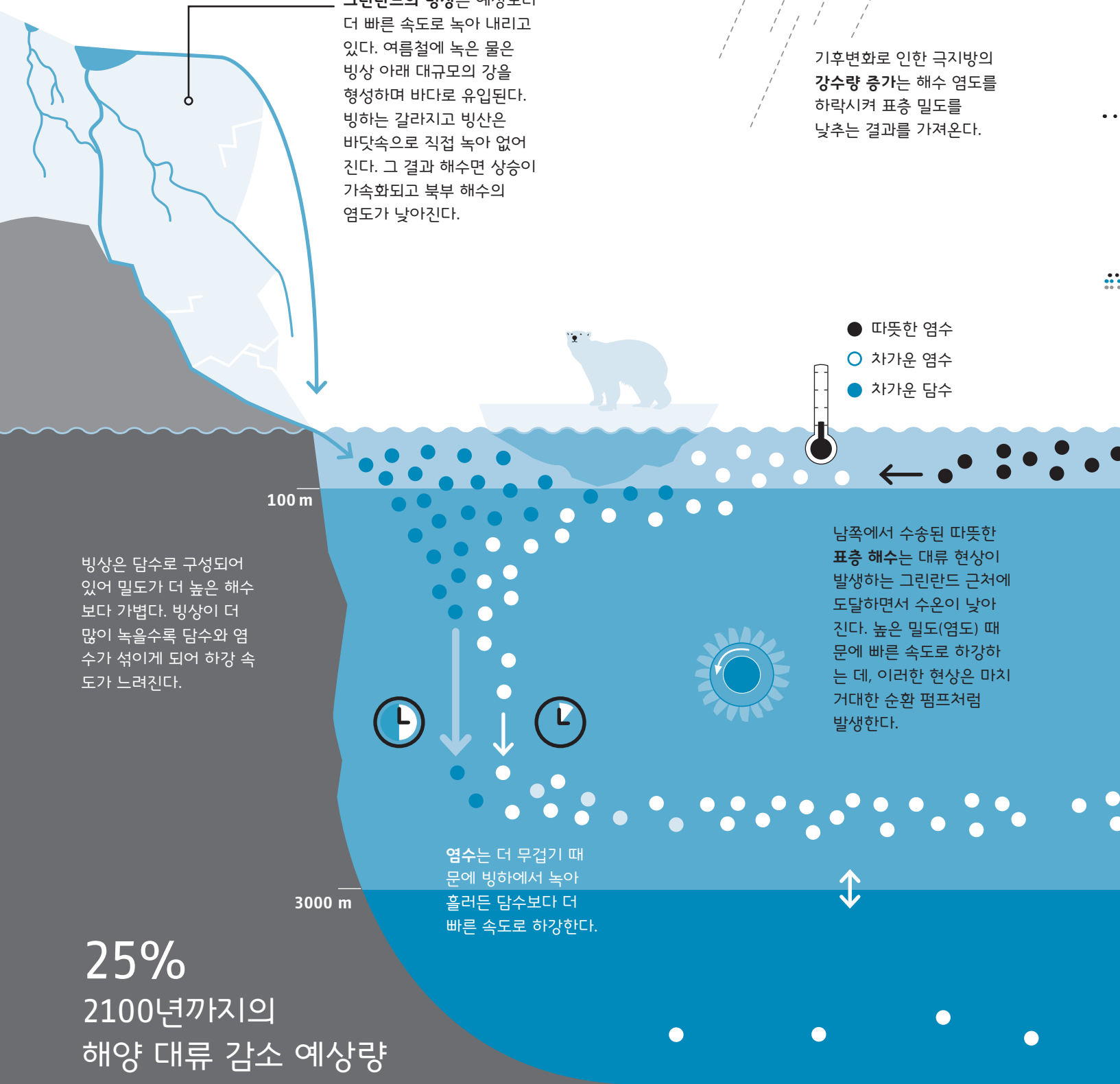
인간 활동으로 발생한 이산화탄소 배출 및 그에 따른 과도한 해양 이산화탄소 흡수는 산호초 생태계를 교란시킬 수 있다. 이러한 생태계 변화는 해수 온도 상승이 유발하는 산호초 백화 현상으로 인해 더욱 가속화될 것이다.

해류 교란



기후변화로 인한 극지방의 강수량 증가는 해수 염도를 하락시켜 표층 밀도를 낮추는 결과를 가져온다.

그린란드의 빙상은 예상보다 더 빠른 속도로 녹아 내리고 있다. 여름철에 녹은 물은 빙상 아래 대규모의 강을 형성하며 바다로 유입된다. 빙하는 갈라지고 빙산은 바닷속으로 직접 녹아 없어진다. 그 결과 해수면 상승이 가속화되고 북부 해수의 염도가 낮아진다.



빙산은 담수로 구성되어 있어 밀도가 더 높은 해수보다 가볍다. 빙산이 더 많이 녹을수록 담수와 염수가 섞이게 되어 하강 속도가 느려진다.

남쪽에서 수송된 따뜻한 표층 해수는 대류 현상이 발생하는 그린란드 근처에 도달하면서 수온이 낮아진다. 높은 밀도(염도) 때문에 빠른 속도로 하강하는데, 이러한 현상은 마치 거대한 순환 펌프처럼 발생한다.

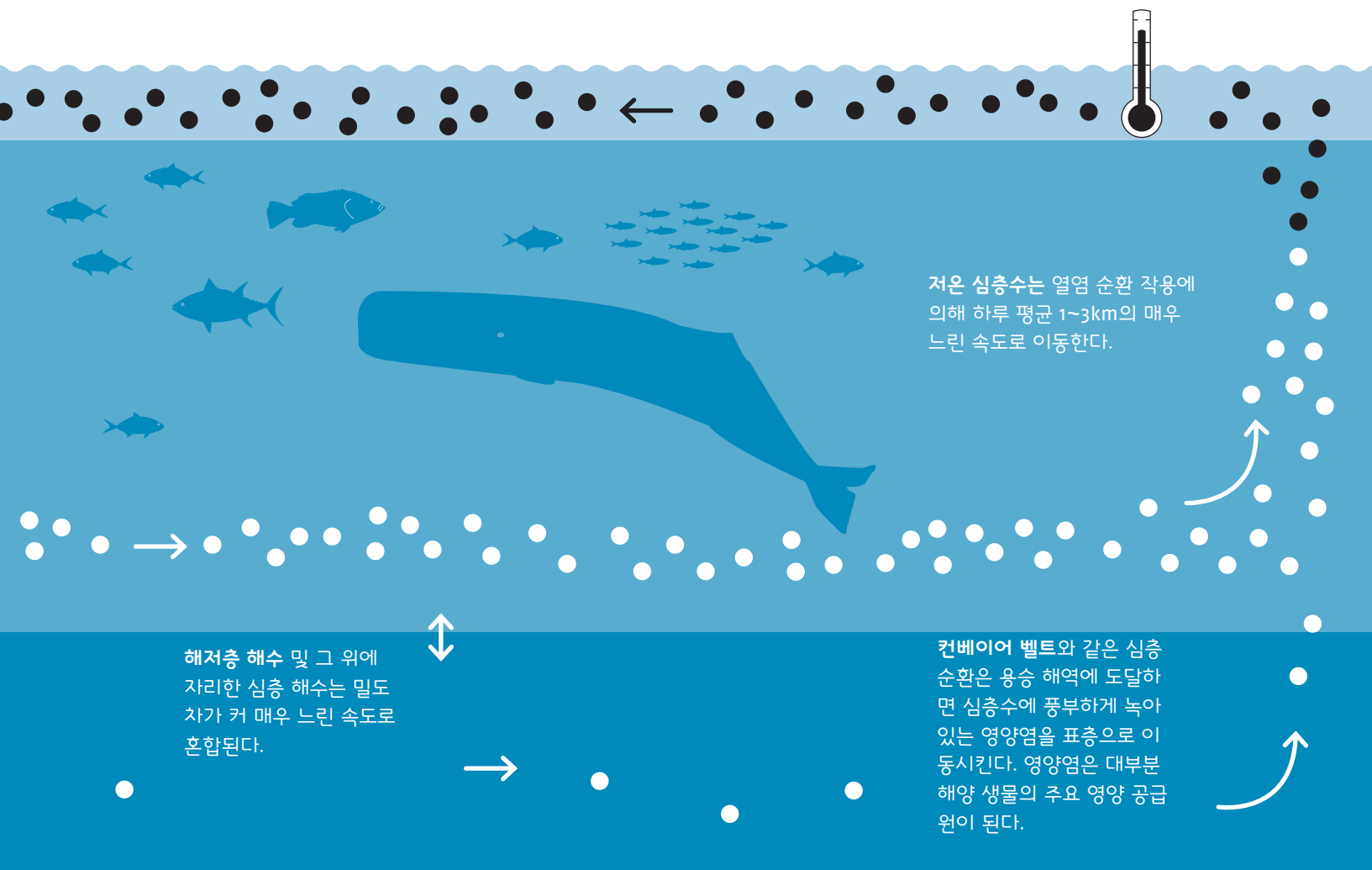
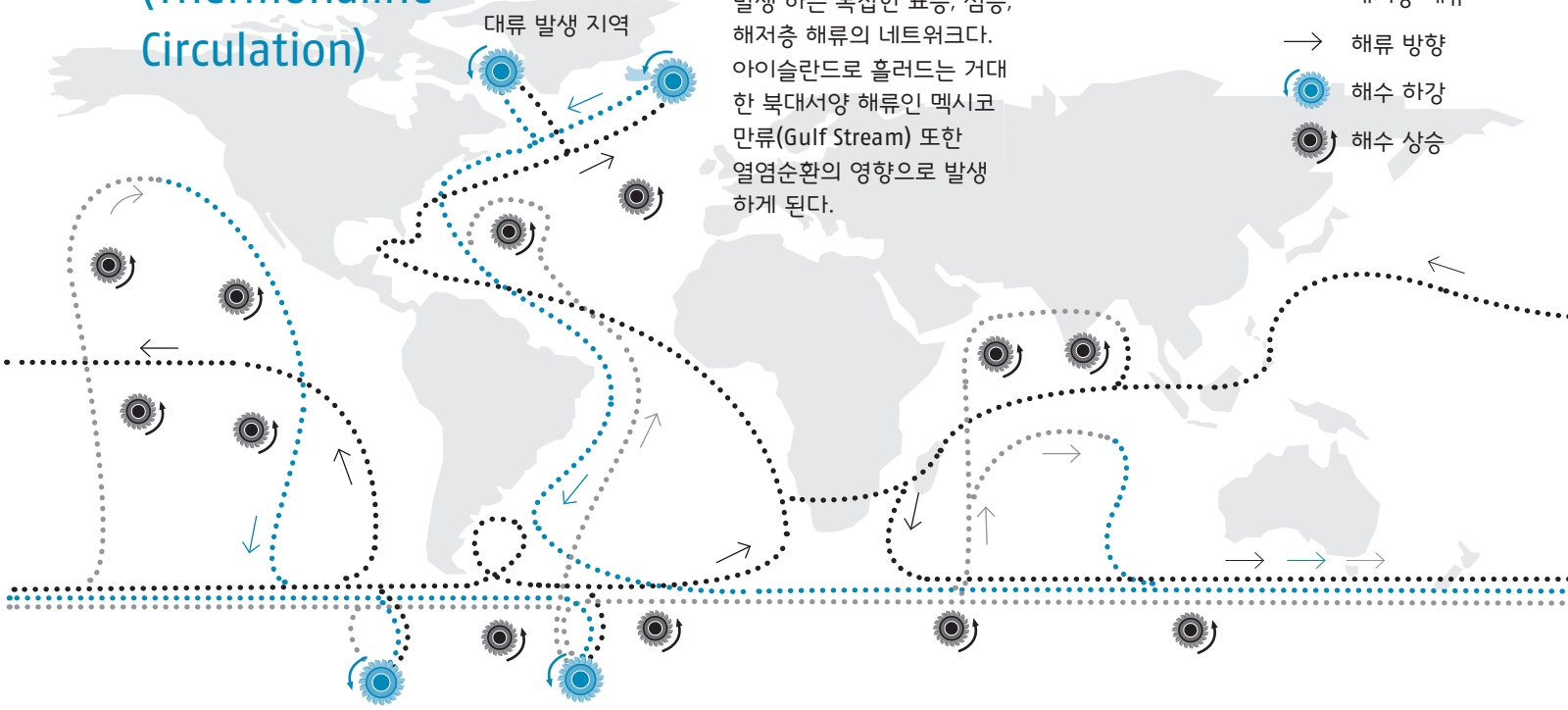
염수는 더 무겁기 때문에 빙하에서 녹아 흘러든 담수보다 더 빠른 속도로 하강한다.

25%
2100년까지의
해양 대류 감소 예상량

열염순환 (Thermohaline Circulation)

열염순환(컨베이어벨트라고도 알려진)은 수온과 염분의 차이 및 바람의 영향을 받아 발생하는 복잡한 표층, 심층, 해저층 해류의 네트워크다. 아이슬란드로 흘러드는 거대한 북대서양 해류인 멕시코 만류(Gulf Stream) 또한 열염순환의 영향으로 발생하게 된다.

- 표층 해류
- 심층 해류
- 해저층 해류
- 해류 방향
- ⊙ 해수 하강
- ⊙ 해수 상승



저온 심층수는 열염 순환 작용에 의해 하루 평균 1~3km의 매우 느린 속도로 이동한다.

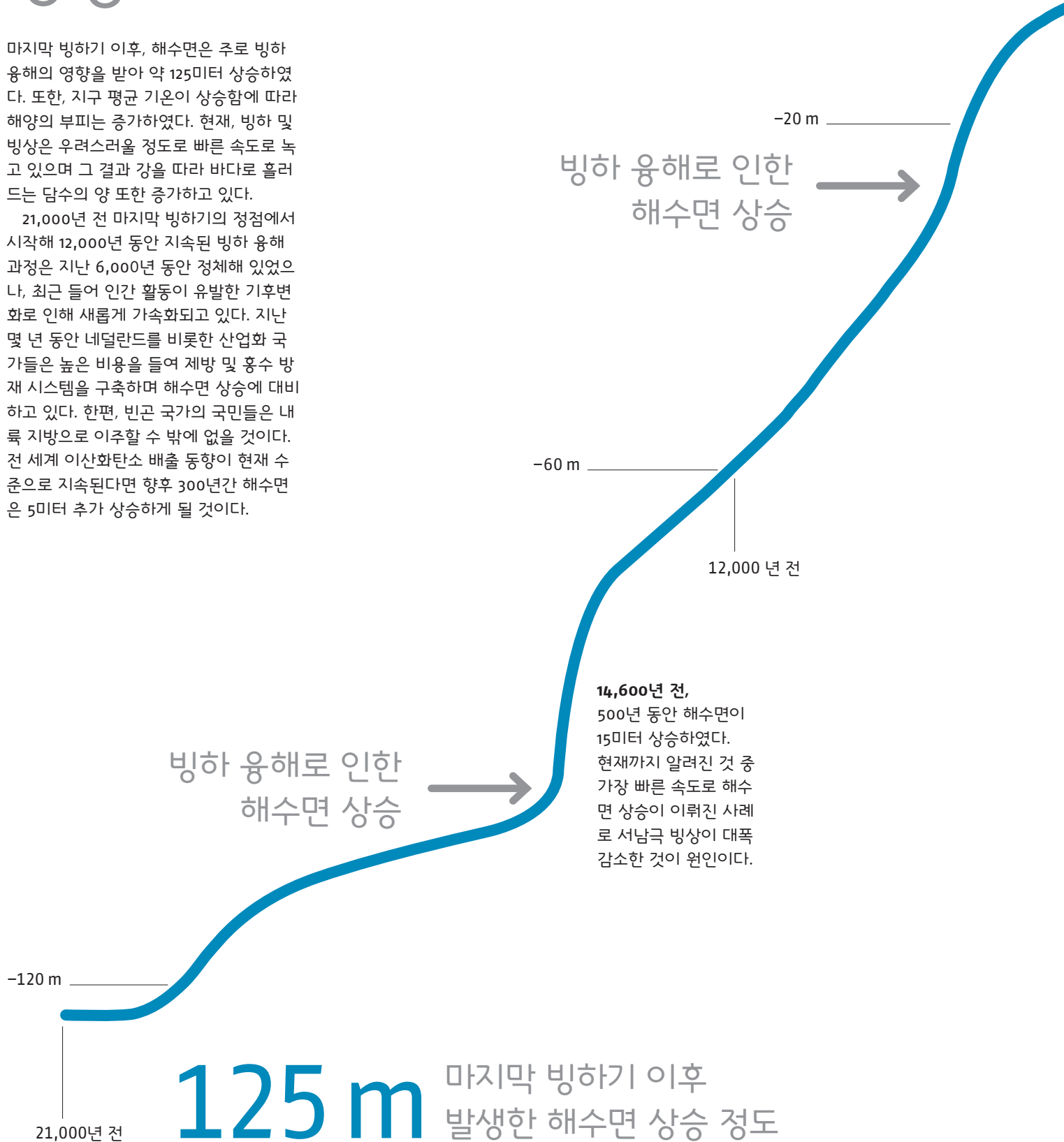
해저층 해수 및 그 위에 자리한 심층 해수는 밀도 차이가 커 매우 느린 속도로 혼합된다.

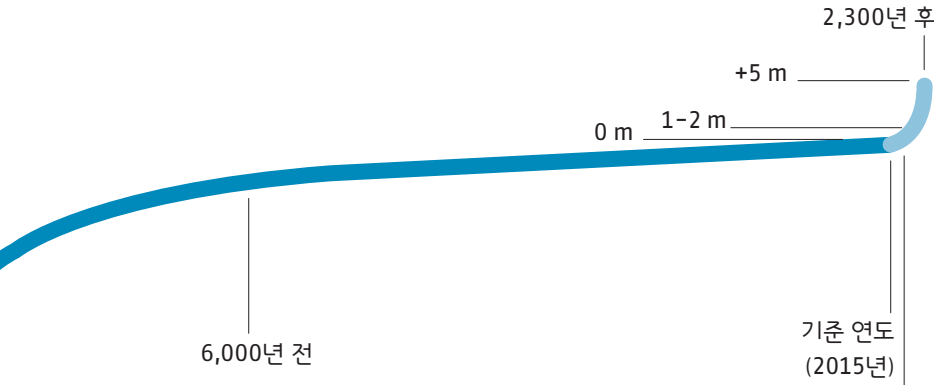
컨베이어 벨트와 같은 심층 순환은 용승 해역에 도달하면 심층수에 풍부하게 녹아 있는 영양염을 표층으로 이동시킨다. 영양염은 대부분 해양 생물의 주요 영양 공급원이 된다.

해수면 상승

마지막 빙하기 이후, 해수면은 주로 빙하 용해의 영향을 받아 약 125미터 상승하였다. 또한, 지구 평균 기온이 상승함에 따라 해양의 부피는 증가하였다. 현재, 빙하 및 빙상은 우려스러운 정도로 빠른 속도로 녹고 있으며 그 결과 강을 따라 바다로 흘러드는 담수의 양 또한 증가하고 있다.

21,000년 전 마지막 빙하기의 정점에서 시작해 12,000년 동안 지속된 빙하 용해 과정은 지난 6,000년 동안 정체해 있었으나, 최근 들어 인간 활동이 유발한 기후변화로 인해 새롭게 가속화되고 있다. 지난 몇 년 동안 네덜란드를 비롯한 산업화 국가들은 높은 비용을 들여 제방 및 홍수 방재 시스템을 구축하며 해수면 상승에 대비하고 있다. 한편, 빈곤 국가의 국민들은 내륙 지방으로 이주할 수 밖에 없을 것이다. 전 세계 이산화탄소 배출 동향이 현재 수준으로 지속된다면 향후 300년간 해수면은 5미터 추가 상승하게 될 것이다.





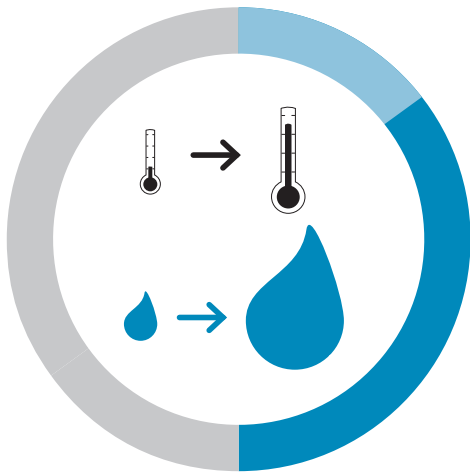
향후 300년 내

해수면 5미터 추가 상승 가능

6,000년 동안

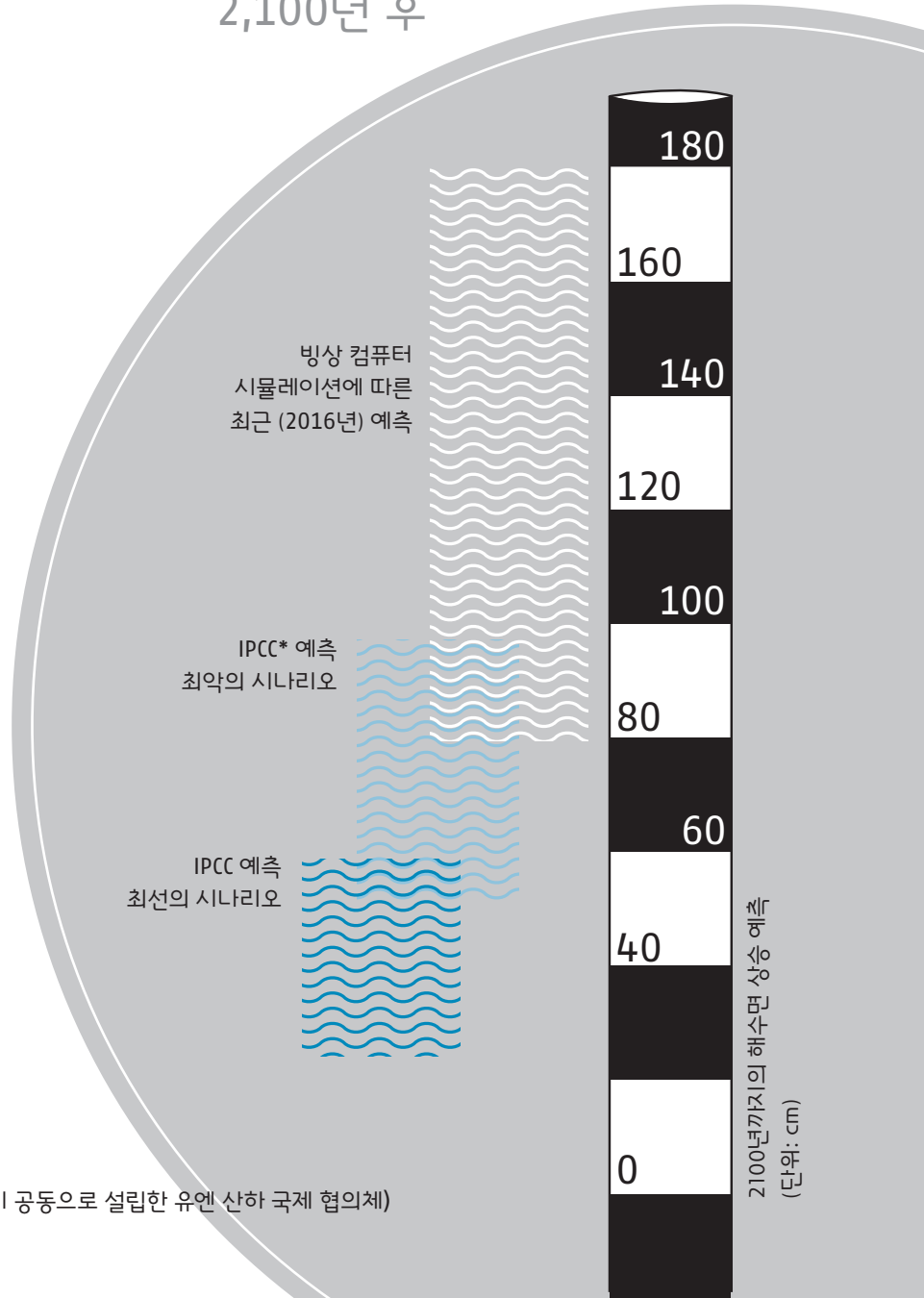
해수면은 거의 동일한 높이를 유지했음

2,100년 후



15-50%

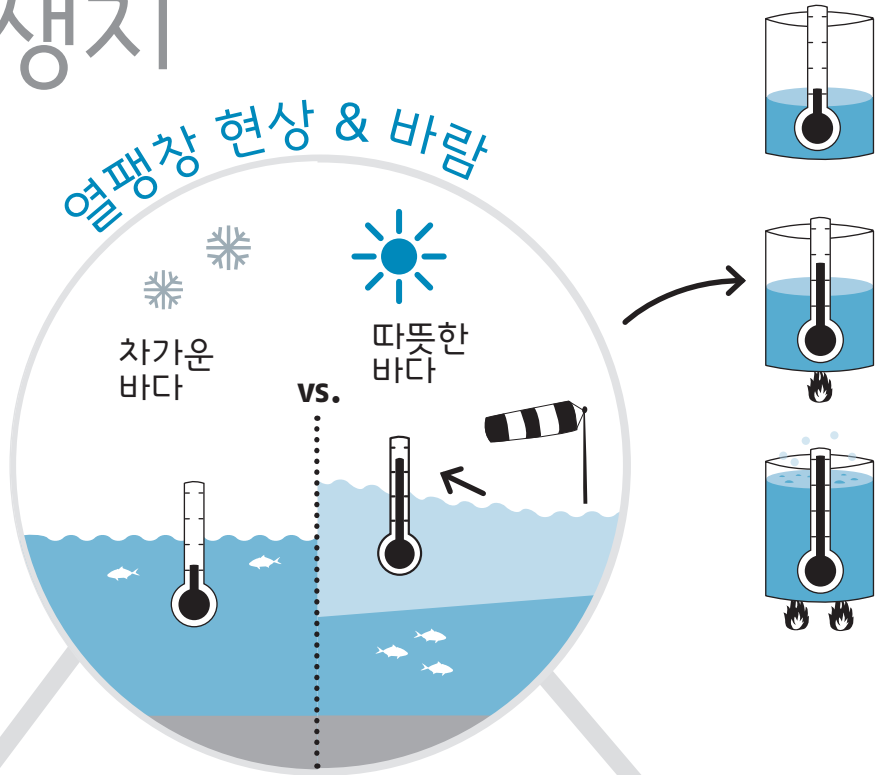
지구 온난화 및 해수 팽창이 해수면 상승에 미치는 영향도



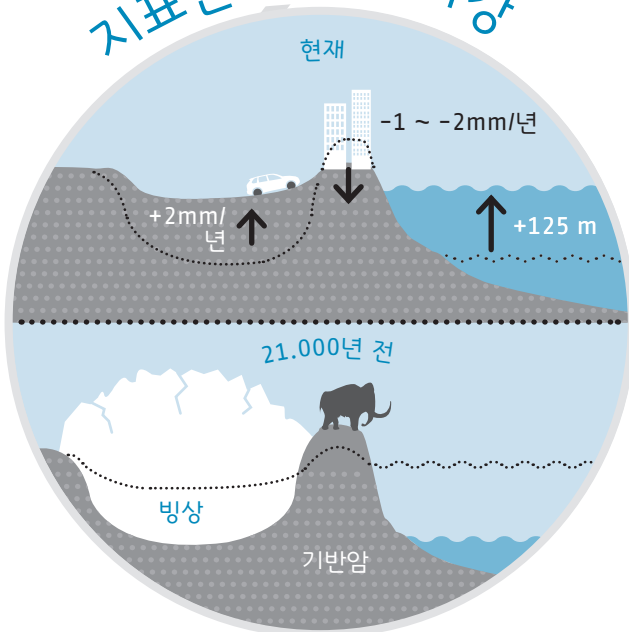
* IPCC (세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 유엔 산하 국제 협의체)

해수면 상승 주요 발생지

온실 효과는 바닷물 온도 상승, 열팽창 (부피 증가), 해수면 상승을 유발한다. 바람장의 변화에 따라 따뜻한 해수의 배치가 달라지고 해역간 해수면 높이 차가 발생한다.

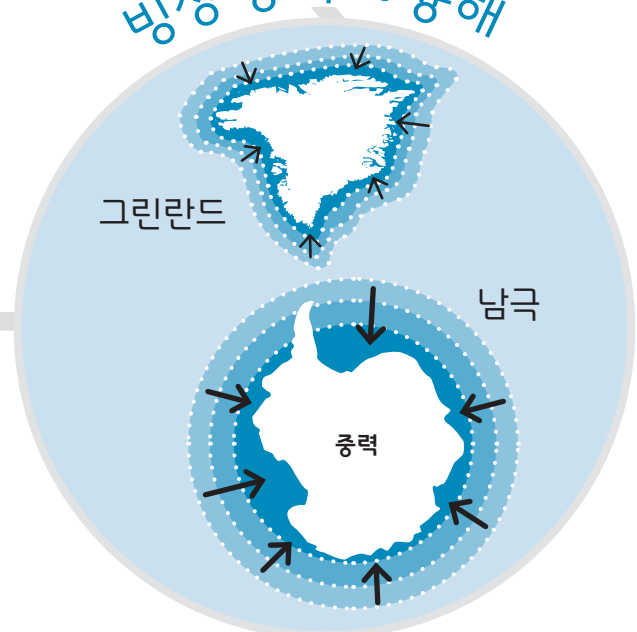


지표면 상승 & 하강



지각 변동, 화산 활동, 빙하 기반암 변화로 인한 지표면의 수직적 움직임에 따라 지역별 해수면 변화가 발생하기도 한다. 일부 지역에서는 지반 융기가 발생하는 한편, 미국 동부를 비롯한 다른 지역에서는 지반 침하가 발생한다.

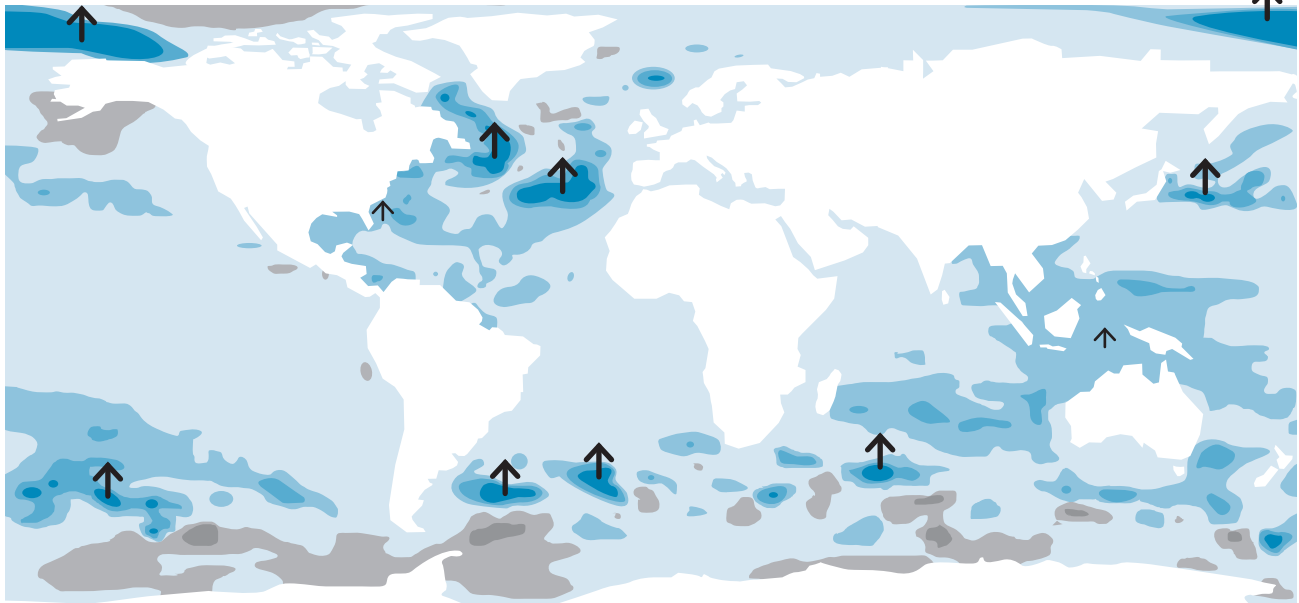
빙상 중력 & 융해



남극대륙 및 그린란드를 덮고 있는 초대형 빙상은 주변 해수를 중력으로 끌어당기기 때문에 인근 해수면의 높이는 상대적으로 높은 편이다. 하지만, 빙상이 녹으면 빙상 주변 해수면의 높이가 낮아지고 이에 따라 다른 지역의 해수면 상승을 유발하게 된다.

과거 해수면 변화 1993-2017

■ -8 ~ -10 ■ -4 ~ -8 ■ -4 ~ 0 ■ 0 ~ 4 ■ 4 ~ 6 ■ 6 ~ 8 ■ >8 mm/년 ↑ 해수면 상승 주요 발생지



자료: Ocean Reanalysis, S4, ECMWF

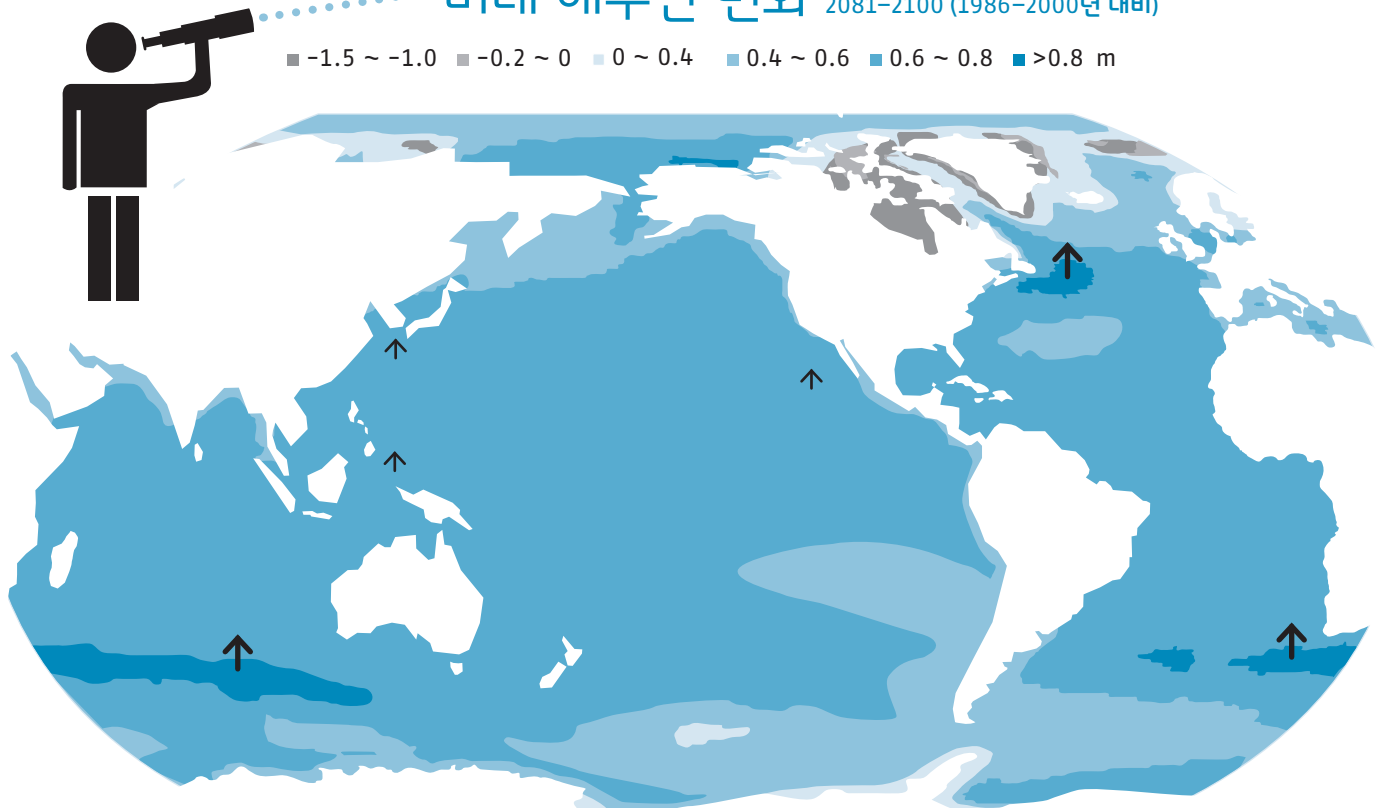
해수면 상승은 지역별로 불균등하게 발생하는데, 이러한 현상의 부분적 원인으로 자연적 가변성과 바람장 변화를 들 수 있다. 현재 연평균 해수면 상승 수치인 3.3mm는 열팽창, 빙하 및 빙상 용해 등



지구 온난화로 인한 변화와 관련되어 있다. 해수면 상승 속도는 2100년까지 가속화될 것으로 예측되는데, 남극 빙상의 용해가 그 원인 중 하나이다.

미래 해수면 변화 2081-2100 (1986-2000년 대비)

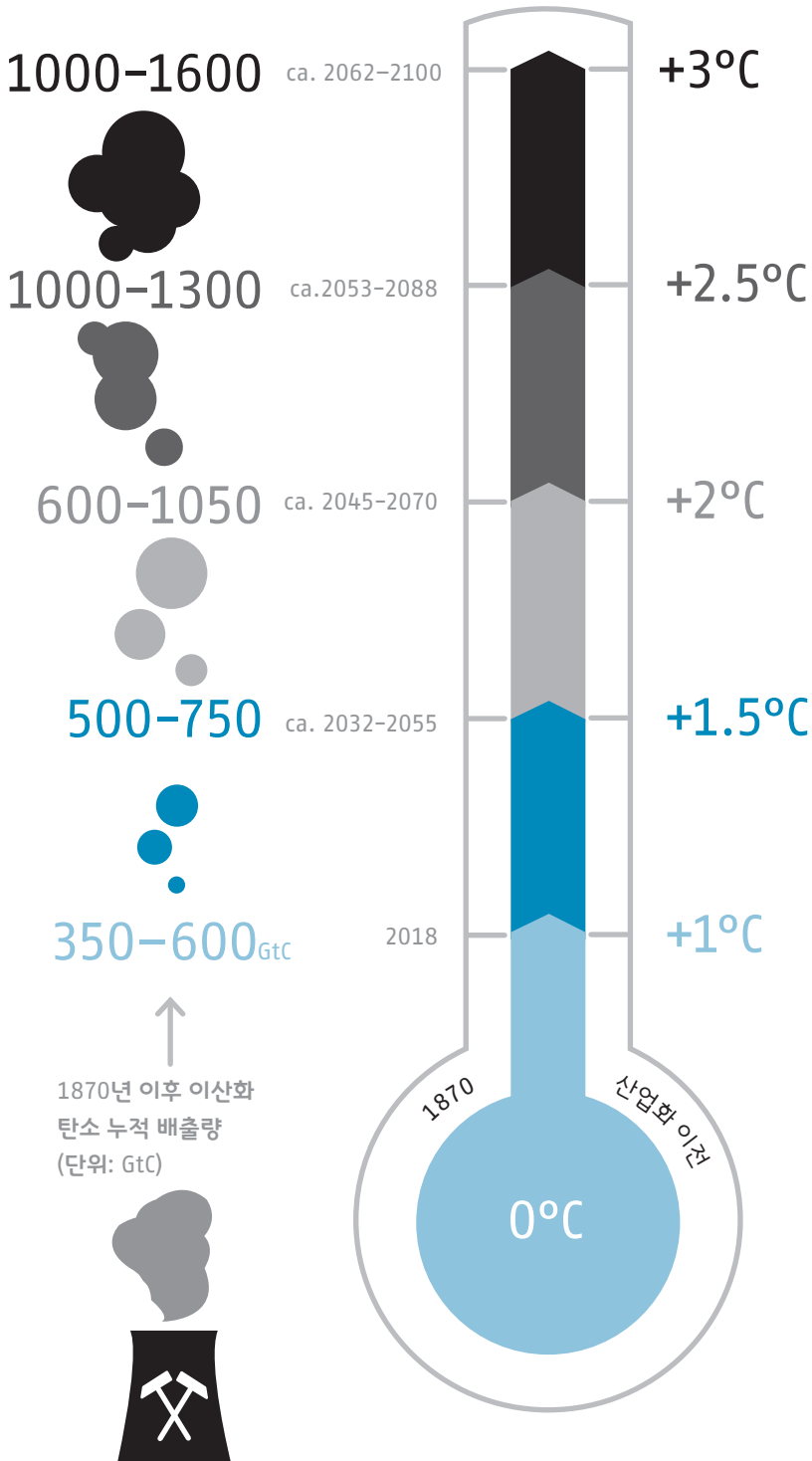
■ -1.5 ~ -1.0 ■ -0.2 ~ 0 ■ 0 ~ 0.4 ■ 0.4 ~ 0.6 ■ 0.6 ~ 0.8 ■ >0.8 m



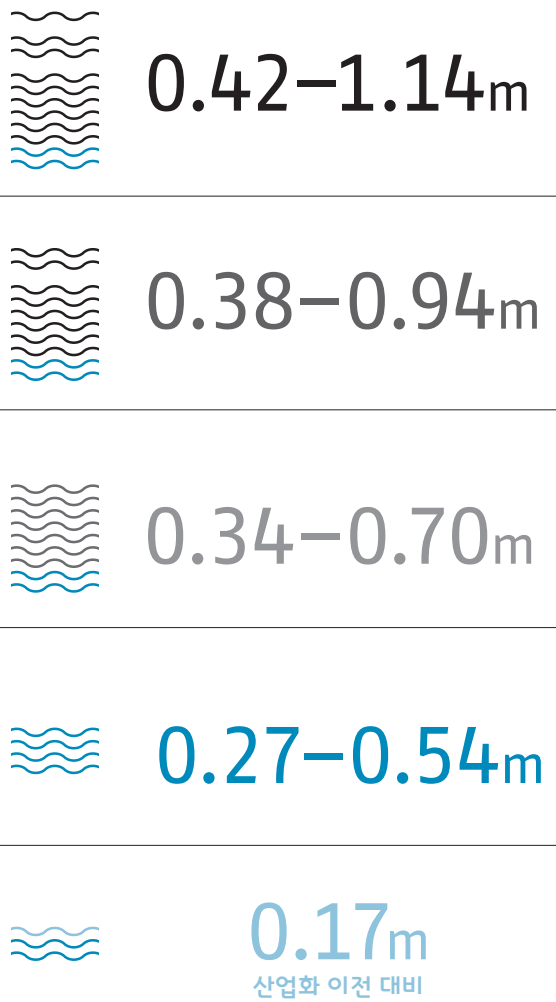
이산화탄소 배출이 감소하지 않을 경우 초래될 결과

이산화탄소 배출량

이산화탄소 배출량 증가율이 »현재 수준« 으로 유지될 경우 (RCP 8.5)



해수면 상승



해수면 상승은 전세계 많은 해안 도시와 마을을 위협할 것이다. 특히, 저지대 도서 국가들은 매우 취약한 상태에 놓여있으며 이들 중 상당수는 가까운 미래에 사람이 거주할 수 없는 환경으로 변모할 수도 있다. 침수 위험 증대와 더불어 염수가 담수 대수 층으로 유입돼 사람들의 생계와 식수 접근성에 악영향을 미칠 수 있다.

백화된 산호초 비율

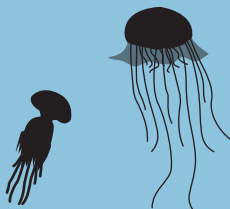
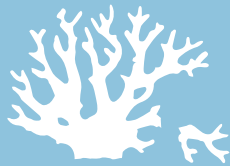


산호초는 생물 다양성에 있어 핵심적 역할을 한다. 백화 현상과 해양 산성화로 인해 산호초가 사라질 경우, 전 세계 해양 생태계에 극적인 변화가 발생할 수 있으며, 이는 식량 안보 및 해안 보호에 부정적 영향을 미칠 것이다. 이를 완화하기 위해 즉각적이고 지속적인 이산화탄소 배출 감축이 필요하다.

극심한 폭염 현상*



이산화탄소 농도가 증가함에 따라 신체의 온도 적응 능력을 초과하는 높은 기온이 연중 수일 동안 지속되는 현상을 의미하는 극심한 폭염 현상이 더욱 빈번하게 발생할 것이다. 특히 열대 지방이 가장 큰 타격을 입을 것이다.



»

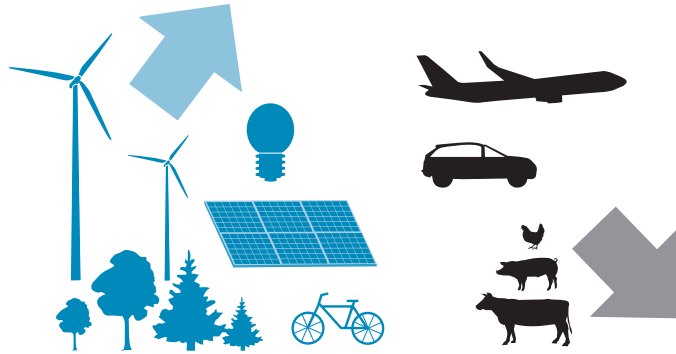
이산화탄소 배출을 증가시키며
인류는 전례 없던 방식으로
지구 기후를 변화시키고 있다.
미래에는 바다의 수온이 상승
하고 산성화가 발생해 산호초,
해양 먹이 사슬, 생물 다양성이
위협받게 될 것이다.
협상의 시기는 지났다.
한참 전부터 움직였어야 했다.

«

IBS 기후물리 연구단
악셀 팀머만 (Axel Timmermann) 단장

지구를 살리기 위해 우리가 할 일...

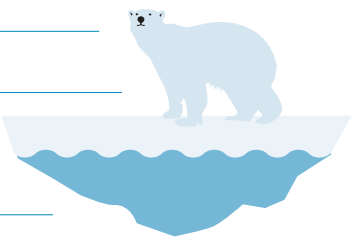
일상생활에서 실천할 수 있는 이산화탄소 감축 방법: 출장 및 개인적 목적의 비행기 이용 줄이기, 소형 자동차 운전, 대중교통 이용, 차량 공유 (카셰어링) 및 자전거 이용, 지역 농산물 구입, 재활용 실천, 청정 전력 사용, 에너지 효율성이 높은 가전기기 사용, 탄소상쇄 (CO2 offset) 활동 참여, 주거지 단열 강화, 태양광 패널 설치, 소고기 및 유제품 섭취 줄이기, LED 전구 사용, 나무 심기



지구를 살리기 위한 여러분의 다짐은?



Lined writing area consisting of 25 horizontal blue lines.



자료

- 008 | 009 Heinrich Böll Stiftung (HBS) (2017): Meeresatlas 2017. Daten und Fakten über unseren Umgang mit dem Ozean <https://www.boell.de/de/2017/04/25/meeresatlas-daten-und-fakten-ueber-unseren-umgang-mit-dem-ozean> (01.06.2017)
- 012 | 013 Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., et al. (2007): Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800 000 Years. *Science* Vol. 317, No. 5839, 793-797, 10 August 2007. doi: 10.1126/science.1141038
- Maribus (2010): World Ocean Review – Mit den Meeren leben (S. 10). <http://worldoceanreview.com> (03.06.2016)
- NASA (2015): Featured Article: How is Today's Warming Different from the Past? <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/page3.php> (03.06.2016)
- 014 | 015 EPA (2014): Climate Change Indicators in the United States: Ocean Heat. <http://www.epa.gov/climatechange/indicators>
- Gleckler, P.J., Durack, P.J., Stouffer, R.J., Johnson, G.C., Forest, C.E. (2016): Industrial-era global ocean heat uptake doubles in recent decades. *Nature Climate Change* 18th January 2016. doi: 10.1038/nclimate2915
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (14.04.2017)
- 016 | 017 ARC Centre of Excellence, Coral Reef Studies (ARC) (2016): Heat sickens corals in global bleaching event. <https://www.coralcoe.org.au/media-releases/heat-sickens-corals-in-global-bleaching-event> (14.04.2017)
- IPCC (2014): Synthesis Report, Fifth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (14.04.2017)
- Neuheimer, A.B., Hartvig, M., Heuschele, J., Hylander, S., Kiørboe, T., et al. (2015): Adult and offspring size in the ocean over 17 orders of magnitude follows two life history strategies. *Ecology*, 96: 3303-3311. doi: 10.1890/14-2491.1
- Vergés, A., et al. (2014): The tropicalization of temperate marine ecosystems: climate-mediated changes in herbivory and community phase shifts. *Proc. R. Soc. B* 281: 20140846. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2014.0846> (03.06.2016)
- XL Catlin Seaview Survey (2016): Coral Reefs. <http://catlinseaviewsurvey.com/science/coral-reefs> (03.06.2016)
- 018 | 019 IGBP, IOC, SCOR (2013): Ozeanversauerung. Zusammenfassung für Entscheidungsträger Third Symposium on the Ocean in a High-CO2 World. <http://www.igbp.net/download/18.2fc4e526146d4c130b72cf/1411549163212/OzeanversauerungZfE.pdf> (14.04.2017)
- Maribus (2010): World Ocean Review – Mit den Meeren leben. <http://worldoceanreview.com> (03.06.2016)
- Climate Central (CC) (2010): Ocean Acidification Process. <http://www.climatecentral.org/gallery/graphics/ocean-acidification-process> (03.06.2016)
- NOAA (2016): Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division (GMD) <https://www.esrl.noaa.gov> (01.06.2017)
- 020 | 021 Cripps, I.L., Munday, P.L., McCormick, M.I., (2011): Ocean Acidification Affects Prey Detection by a Predatory Reef Fish. *PLoS ONE* 6(7): e22736. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022736> (14.10.2018)
- Frommel, A.Y. et al. (2012): Severe tissue damage in Atlantic cod larvae under increasing ocean acidification. *Nature Climate Change* 2, 42-46 (2012). <https://www.nature.com/articles/nclimate1324> (14.10.2018)
- Jutfelt, F., Bresolin de Souza, K., Vuylsteke, A., Sturve, J. (2013) Behavioural Disturbances in a Temperate Fish Exposed to Sustained HighCO2 Levels. *PLoS ONE* 8(6): e65825. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065825> (14.10.2018)
- Munday, P.L. et al. (2010): Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification. *PNAS*, vol. 107, no. 29
- Nilsson, G.E. et al (2012): Near-future carbon dioxide levels alter fish behaviour by interfering with neurotransmitter function. *nature climate change letters*. published online: 15 january 2012 | doi: 10.1038/nclimate1352
- Ou, M. et al. (2015): Responses of pink salmon to CO2-induced aquatic acidification. *Nature Climate Change* volume 5, pages 950-955 (2015) <https://www.nature.com/articles/nclimate2694> (14.10.2018)
- Pistevos, J.C.A. et al (2015): Ocean acidification and global warming impair shark hunting behaviour and growth. *Scientific Reports* volume 5, Article number: 16293 (2015) <https://www.nature.com/articles/srep16293> (14.10.2018)
- Rosa, R., Seibel, B.A. (2008): Synergistic effects of climate-related variables suggest future physiological impairment in a top oceanic predator. *PNAS*, vol. 105, no. 52
- 022 | 023 Maribus (2010): World Ocean Review – Mit den Meeren leben. <http://worldoceanreview.com> (03.06.2016)

- NASA (2012): Satellites See Unprecedented Greenland Ice Sheet Surface Melt. <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/greenland-melt.html> (03.06.2016)
- Rahmstorf, S., Box, E., Feulner, G., et al. (2015): Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change*, 23. März 2015. doi: 10.1038/nclimate2554
- 024 | 025 IPCC (2014): Synthesis Report, Fifth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syrl> (14.04.2017)
- Maribus (2010): World Ocean Review – Mit den Meeren leben. <http://worldoceanreview.com> (15.03.2016)
- Pollard, D., DeConto, R.M. (2016): Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*. <http://dx.doi.org/10.1038/nature17145> (06.06.2016)
- Vermeer, M., Rahmstorf, S. (2009): Global sea level linked to global temperature. *PNAS*. <http://www.pnas.org/content/106/51/21527.full.pdf> (14.04.2017)
- 026 | 027 IPCC (2014): Synthesis Report, Fifth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syrl> (14.10.2018)
- Timmermann, A., McGregor, S. Jin, F.F. (2010): Wind Effects on Past and Future Regional Sea Level Trends in the Southern Indo-Pacific. *Journal of Climate*, Vol. 23
- Widlansky, M.J., Timmermann, A., Cai, W. (2015): Future extreme sea level seesaws in the tropical Pacific. *Science Advances*. <http://advances.sciencemag.org/content/1/8/e1500560> (14.10.2018)
- 028 | 029 Eakin, C.M., et al. (2018): Unprecedented three years of global coral bleaching 2014–17. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8), S74–S75
- IPCC (2014): Synthesis Report, Fifth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syrl> (14.10.2018)
- IPCC (2018): Summary for Policy Makers. IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C. <https://www.ipcc.ch/report/sr15> (14.10.2018)
- Mora, C. et al. (2017): Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change* volume 7, pages 501–506 (2017) <https://www.nature.com/articles/nclimate3322> (14.10.2018) and <https://maps.esri.com/globalriskofdeadlyheat> (14.10.2018)
- NOAA (2018): Sea Level Rise Viewer. <https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/Slr> (14.10.2018)
- WRI (2018): Reefs at risk revisited. Interactive map. <https://www.wri.org/our-work/project/reefs-risk/interactive-map#project-tabs>

작가에 대하여



Esther Gonstalla는 '독일 최고의 책 디자인' 수상경력에 빛나는 인포그래픽 디자이너로 독일어, 일본어, 영어로 작품이 출간되었다. 시리즈의 첫번째 책인 그녀의 'The Atom Book: Radioactive Waste and Lost Atom Bombs'는 '2009년 가장 아름다운 독일 책 중의 하나'로 알려졌다.

그녀의 다음 작품인 'The Climate Book' 에 이어서 'The Ocean Book'이 나왔으며, 이 책은 우리 해양의 상태와 인간이 만들어낸 문제를 중점적으로 다루고 있다.

감사의 말

이 책이 나올 수 있기까지 도와 준 모든 분께 감사드리며, 특히 Axel Timmermann 교수, Hartmut Grassl 교수, Martin Visbeck 교수, Mojib Latif 교수, Daniel Pauly 교수, Matthias Schaber 박사, Malte Stuecker 박사, Sven Petersen 박사, Marcus Eriksen 박사님께 감사드립니다.

또한 독일 해양 재단(German Ocean Foundation)의 지원에 감사를 포함합니다.



»미래의 바다는
어떤 모습이어야 할까?
바다의 미래를 위해 당신은 무엇을
희생할 것인가?
작은 일부터 시작하면 된다.
작은 실천 하나하나가 모두 중요하며
이러한 노력이 모여 결국에는
더 큰 변화를 이끌어 낼 수 있다.«

에스타 곤스탈라 (Esther Gonstalla)