

# 2023년 전지구 기후현황 보고서

WEATHER CLIMATE WATER



WORLD  
METEOROLOGICAL  
ORGANIZATION

WMO-No. 1347

APEC기후센터는 WMO의 승인하에 영어로 작성된 보고서 원문을 국문으로 번역하였습니다. 국문 번역 내용에 대한 책임은 APEC기후센터에 있으며, WMO는 번역된 내용에 대해서는 책임이 없습니다.

*This publication is a translation undertaken by the APEC Climate Center with permission from WMO, the publisher of the original text in English. WMO does not guarantee the accuracy of the translation for which the APEC Climate Center takes sole responsibility.*

**WMO-No. 1347**

© World Meteorological Organization, 2024

출판권(인쇄, 전자, 기타 모든 형태 및 모든 언어)은 WMO가 보유한다. WMO 출판물에서 발췌한 짧은 인용문은 출처가 명확하게 표시된 경우에 승인 없이 사용 가능하다. 이 출판물의 일부 또는 전체를 인쇄, 복사, 번역하기 위해서는 편집 서신과 요청서를 다음 주소로 보내야 한다:

Chair, Publications Board  
World Meteorological Organization (WMO)  
7 bis, avenue de la Paix  
P.O. Box 2300  
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Tel.: +41 (0) 22 730 84 03  
Email: [publications@wmo.int](mailto:publications@wmo.int)

표지 이미지: 떨어져 나간 얼음 덩어리가 있는 빙하. 배경 사진은 얼음 생성에 있어 지구 온난화가 미치는 영향을 담고 있음.  
Generative AI. Par Regina. N° de fichier: 640624130

주의

WMO 출판물에 사용된 명칭과 이 출판물에서 사용된 자료 제시는 국가, 영토, 도시 또는 지역, 또는 해당 당국의 법적 지위나 국경 또는 분계선의 한계에 관한 WMO 측의 의견을 전혀 의미하지 않는다.

특정 회사 또는 상품에 관한 언급은 본문에서 언급되지 않았거나 광고되지 않은 다른 유사한 성격의 회사 또는 제품보다 우선하여 WMO에서 승인하거나 추천한다는 의미가 아니다.

저자의 이름이 적혀 있는 WMO 출판물에 나타난 결과, 해석, 결론은 저자의 단독 소유이며 WMO 또는 WMO 회원국의 해석 및 결론을 반드시 반영하지 않는다.

# 목차

주요 메시지 .....	ii
서문 .....	iii
전지구 기후 지표.....	1
기준값.....	1
온실가스.....	2
기온 .....	3
해양 .....	5
빙권 .....	11
기후 모니터링 및 재생 에너지.....	18
성층권 오존과 오존 파괴 물질 .....	19
단기 기후 요인 .....	20
강수 .....	22
극한 기상 및 기후 현상.....	23
사회경제적 영향 .....	26
식량 안보.....	26
이동 .....	28
기후 금융 현황 .....	30
데이터 세트 및 방법.....	32
기여 저자 .....	40
미주 .....	42

## 피드백을 보내 주세요

올해부터 WMO는 기후현황 보고서에 대한 피드백과 개선 의견을 받는 절차를 마련하였습니다. 이 보고서를 다 읽으신 후 보고서 조사([to this short survey](#))에 응답하셔서 피드백을 주시기를 바랍니다. 의견은 감사하게 수렴 하겠습니다.

# 주요 메시지



2023년은 산업화 이전 평균보다  $1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$  상승하여 가장 따뜻한 해를 기록



세 가지 주요 온실가스(이산화탄소, 메탄, 아산화질소)의 농도가 2022년에 기록치 도달. 실시간 자료에 따르면 2023년에도 계속해서 상승



해양 열 용량은 지난 65년 관측치 중 가장 높은 수준을 기록



전지구 평균 해수면이 기록적으로 높아짐. 지난 10년(2014-2023년) 해수면 상승률은 처음 위성 기록이 시작된 10년(1993-2002년)에 비해 두 배로 증가



남극 해빙 면적은 2월 심각하게 줄어들어 기록치에 도달. 평균 최대 해빙 면적은 지난 최저 기록치보다 백만 $\text{km}^2$  줄어들



전지구 기준 빙하에 대한 잠정적 자료에 따르면 2022-2023년에 기준 빙하는 북미 서부지역과 유럽에서 발생한 심각한 음의 질량 균형으로 인해 1950-2023년 기록상 가장 많은 질량 손실이 발생함



스위스 빙하는 지난 2년동안 10%의 질량 손실 발생



극한 기상 현상은 계속해서 심각한 사회경제적 영향을 가져옴. 폭염으로 전세계 많은 곳에서 고통을 겪음. 캐나다, 유럽, 하와이에서 발생한 산불로 생명을 잃고 주거시설이 파괴되고 대규모의 대기 오염이 발생함. 지중해 사이클론 '다니엘'에서 야기된 홍수는 그리스, 불가리아, 튀르키예, 리비아에 피해를 가지고 왔으며, 특히 리비아에서 많은 사망자가 발생함



날씨 및 기후 재해가 전세계 많은 곳의 상황을 악화시키는 가운데 식량 안보, 인구 이동, 취약 계층에 대한 영향은 2023년에도 계속해서 중요한 고려사항으로 남음

# 서문



기후 위기는 인류가 직면한 아주 심각한 문제입니다.

WMO의 2023년도 전지구 기후현황보고서는 2023년에 모든 기후 지표가 이전 기록을 깨트렸음을 확인하고 있습니다.

역대 가장 뜨거운 해였습니다. 2023년에 전지구 평균 기온은 1850-1900년 평균에 비해  $1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$  높았습니다. 비록 일시적이긴 했지만 우리가 기후변화에 관한 파리 협정에서 정한  $1.5^\circ\text{C}$  한계선에 이렇게 가까웠던 적은 없었습니다.

온실가스 농도도 계속해서 상승했습니다. 해양 열용량과 해수면은 가장 높은 관측치를 기록했으며, 그 상승 속도가 가속화되고 있습니다. 남극 해빙은 줄어들었습니다. 주요 빙하는 심각한 손실을 겪었습니다.

폭염, 홍수, 가뭄, 산불, 심각한 태풍이 모든 대륙에 위해를 가했으며 심각한 사회경제적 손실을 일으켰습니다. 특히 취약 계층이 불균형적 영향으로 고통받으면서 이들에게 파괴적인 결과를 가져왔습니다.

극한 기후로 수백만이 심각한 식량 부족을 겪고 수십만이 거주지로부터 이동을 하는 등, 인류가 겪는 위기가 더욱 악화되었습니다.

WMO는 이러한 심각한 문제를 마주하여 국제 커뮤니티와의 협업을 확대하는데 노력을 기울일 것입니다.

WMO 및 회원국은 획기적인 모드를 위한 조기경보 이니셔티브를 달성하기 위해 생명을 구하는 조기경보 서비스를 확대하고 있습니다. 신규 전지구온실가스감시(GGGW)는 기후변화 완화를 위해 과학에 근거한 정보를 제공할 방법을 모색하고 있습니다. 맞춤형 기상 및 기후 서비스로 재생에너지로의 전환을 지원해야 합니다.

성공을 위해서 기후자료와 모니터링 향상에서 예측력 강화와 역량 강화까지 전반적인 가치 사슬에 걸친 노력이 필수적입니다. 우리는 반드시 기후 정보가 더욱 쉽게 접근할 수 있고 사용할 수 있게 하여 사회에 기여할 수 있도록 만들어야 합니다.

이 보고서가 기후행동의 시급성과 야심 찬 목표를 더욱 강화하기 위한 인지 제고에 도움이 되기를 바랍니다.

이 기회를 빌어 이 보고서를 발간하는데 기여한 저자들과 전문가들에게 감사를 드리며 축하의 말을 전합니다. 모든 저자들, 특히 WMO 회원인 각국 기상청과 지역 기후 센터, 유엔 기관에게 감사를 전합니다.

셀레스테 사울로 사무총장

# 전지구 기후 지표

전지구 기후 지표는 기후 시스템 변화에 대한 개요를 제시한다.<sup>1</sup> 여기에 제시된 상호 연계된 물리 지표 세트는 대기 구성의 변화, 기후 시스템의 에너지 변화, 이에 반응하는 토양, 해양, 빙하와 연결되어 있다.

전지구 기후 지표는 위성과 현장 네트워크를 포함한 다양한 관측 시스템에서 얻은 자료로 이루어진 다양한 데이터 세트를 기반으로 한다(이 보고서에서 사용된 데이터 세트에 대한 자세한 내용은 [Data set and methods](#) 참조).

이 보고서에서 주요 지표로 측정된 물리적인 기후의 변화는 유엔 지속가능발전목표(SDGs)에 대한 국가적 발전과 진전에 순차적인 영향을 미칠 수 있다.<sup>2</sup> 예를 들어, 해양의 산성도나 온도는 해양 생물에 영향을 미칠 수 있고, 이는 지역 어업에 생계와 식량 안보를 의존하는 해안 지역사회에 잠재적으로 영향을 주게 된다. 그럼에도 불구하고, 기후 과학은 지속가능한 발전을 촉진하는데 중요한 역할을 한다. 2023년 기후합동보고서(United in Science 2023)에서 설명한 바와 같이, 날씨, 기후, 물 관련 과학은 여러 SDG 달성을 지원한다.<sup>3</sup> 따라서 기후와 발전 간 상호연결성을 인지하는 것은 세계가 SDG와 파리 협정 목표 달성에서 모두 멀어지고 있는 상황에서 시너지를 낼 수 있는 행동을 이끌어낼 수 있다.<sup>4</sup>

## 기준값

기준값이란 일반적으로 30년 이상으로 이어지는 기간으로 현재 상황을 비교할 수 있는 고정된 기준으로 사용된다. 과학적, 정책적, 실용적인 이유로 이 보고서에서는 다양한 기준값이 사용되었고 텍스트와 그림에서 명시되고 있다. 가능한 경우, 가장 최근의 WMO 기후 표준값인 1991년부터 2020년까지를 사용하여 보고서의 일관성을 지키고자 하였다.

그러나, 일부 지표의 경우, 초기 기간에 측정값이 부족하여 표준값을 사용할 수 없다. 또한 두 가지 예외 상황이 있는데, 첫째, 전지구 평균 온도 시계열에서만 1850-1900년의 기준 기간을 사용한다. 이 기간은 기후변화정부간협의체(IPCC)의 제6차 평가보고서에서 제1실무그룹이 산업화 이전 조건으로 사용한 기준 기간으로 파리 협정의 맥락에서 진전을 이해하는 것과 관련이 있다. 둘째, 온실가스 농도는 얼음 중심부에 갇힌 기포를 사용하여 훨씬 오래 전까지 측정할 수 있다. 그러므로 이 보고서에서는 산업화 이전 온실가스 농도를 대표하는 데 1750년을 사용한다.

## 온실 가스

세 가지 주요 온실가스(이산화탄소, 메탄, 아산화질소)의 농도는 2022년에 최고치를 기록하였다. 2022년은 1984-2022년까지 사용할 수 있는 전지구 가용 자료 기간의 가장 최근에 해당한다. 2023년 특정 위치에서의 실시간 데이터는 세 가지 주요 온실가스 농도가 계속 상승하였음을 보여준다.

온실 가스의 대기 농도는 인간 활동, 자연원 및 흡수원에서의 배출 간 균형을 반영한다. 인간활동으로 인한 온실가스의 지속적 증가는 산업혁명 이후 기후변화의 주요 원인이었다. 이 보고서에서 “농도”라고 단순화하여 지칭하는 온실 가스의 전지구 평균 몰 분율은 WMO의 글로벌대기감시(GAW) 프로그램을 통해 다양한 지점에서 측정된 현장 관측자료와 파트너 네트워크의 자료를 기반으로 계산된다.

통합된 전지구 지표가 제공되는 가장 최신 연도인 2022년에 온실가스의 대기 중 농도는 새로운 최고치에 도달하여(그림 1), 이산화탄소의 전지구 평균 농도는  $417.9 \pm 0.2$ ppm, 메탄은  $1,923 \pm 2$ ppb, 아산화질소는  $335.8 \pm 0.1$ ppb로 산업화(1750년) 이전 대비 각각 150%, 264%, 124%에 달했다. 메탄 증가 속도는 2021년 다음으로 두 번째로 높았으며, 아산화질소의 증가율은 최고치를 기록했다. 이산화탄소의 증가율은 2.2ppm으로 10년 평균속도인 2.46ppm/년에 약간 미달하는 수치였다. 이산화탄소 증가율은 2022년처럼 보통 라니냐로 시작하는 해에 낮게 나타나고 2016년처럼 엘니뇨로 시작하는 해에는 높게 나타난다.<sup>5</sup> 미국 하와이주의 마오나 로아<sup>6</sup>와 호주 타스마니아의 케나욱/케이프 그림<sup>7</sup>을 포함한 특정 위치에서의 실시간 자료를 통해 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 수준이 2023년에도 계속 상승하였음을 알 수 있다.

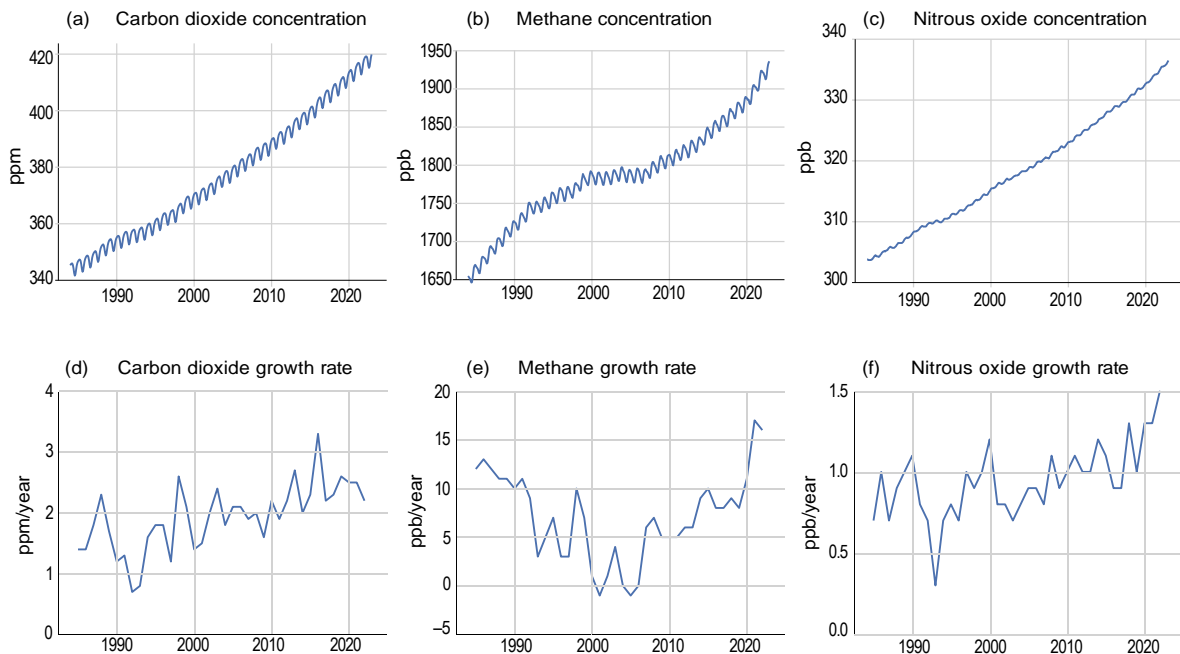


그림 1. 위: 1984년부터 2022년까지 전지구 월평균 몰 분율(대기 농도로 측정) (a) 이산화탄소(ppm), (b) 메탄(ppb), (c) 아산화질소(ppb). 아래 : 연속적인 연 평균 몰 분율을 나타내는 증가율 (d) 이산화탄소(ppm/년), (e) 메탄(ppb/년), (f) 아산화질소(ppb/년). 출처 : 온실가스 세계자료센터(WDCGG)

## 기온

2023년의 전지구 평균 지표근처 온도는 1850-1900년 평균보다  $1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$  높았다. 2023년은 174년 간의 관측 기록 중 가장 더운 해로, 이전에 공동으로 최고 기온을 기록했던 2016년( $1.29 \pm 0.12^\circ\text{C}$ )과 2020년( $1.27 \pm 0.13^\circ\text{C}$ )을 분명히 넘어섰다.

2015년부터 2023년까지 지난 9년은 모두 기록상 가장 더운 해로 기록되었다.

4월부터 12월까지 해양에서, 육지는 이보다 조금 늦게 7월부터 11월까지 기록적인 전지구 월별 지표근처 온도가 관측되었다.

2014-2023년의 10년 평균 전지구 온도는 1850-1900년 대비  $1.20 \pm 0.12^\circ\text{C}$  높아 기록상 가장 더운 10년이었다.

2023년 전지구 평균 지표근처 온도는 1850-1900년 평균보다\*  $1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$  높았다(그림 2). 이 분석은 6개의 전지구 온도 데이터세트를 종합한 것에 기초한다(Data set and methods 참조). 2023년은 6개 데이터세트 각각에서 174년간 기록한 것 중 가장 더운 해였다. 2015년부터 2016년까지 지난 9년은 모두 기록상 가장 더운 해였다. 이전에 가장 더웠던 두 해는 2016년( $1.29 \pm 0.12^\circ\text{C}$ )과 2020년( $1.27 \pm 0.13^\circ\text{C}$ ) 이었다.

전지구적으로, 6월부터 12월까지 모든 달이 해당 달에 대하여 기록적으로 따뜻한 달이었다. 특히, 2023년 9월은 이전의 기록을 크게 초과하며( $0.46^\circ\text{C}$ - $0.54^\circ\text{C}$ ) 모든 데이터세트에서 기록을 세웠다. 6개의 모든 데이터세트가 다루고 있는 지난 60년 기간 동안 이전 9월의 온도 기록은  $0.03^\circ\text{C}$ - $0.17^\circ\text{C}$ 로 훨씬 적었다. 일반적으로 7월이 전지구적으로 가장 더운 달이기 때문에, 2023년 7월은 기록상 가장 더운 달이 되었다.

전지구 온도의 장기적 증가는 대기 중 온실가스 농도 증가에 의한 것이다. 2020년 중반부터 2023년 초까지 지속된 라니냐에서 2023년 9월까지 완전히 발달된 엘니뇨로 전환(Short-term climate drivers 참조)된 것으로 2022년부터 2023년까지의 온도 상승 일부를 설명할 수 있다.

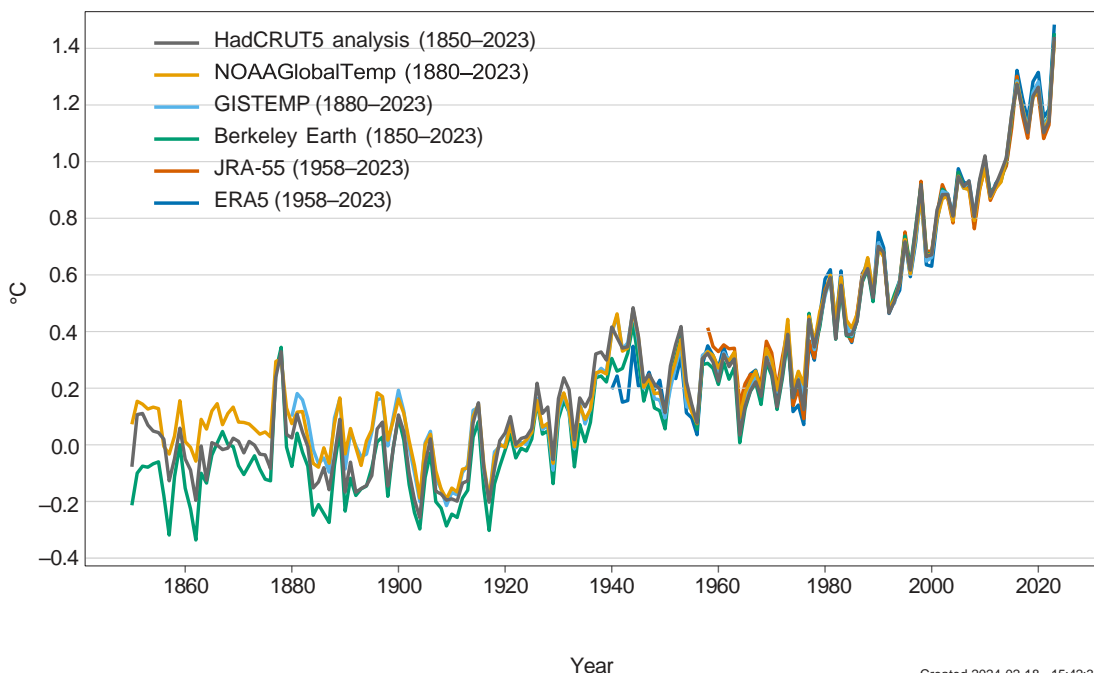


그림 2. 연평균 전지구 온도 아노말리(1850-1900 대비)  
출처: 6개 데이터 세트 자료.  
세부사항은 Data set and methods 참조

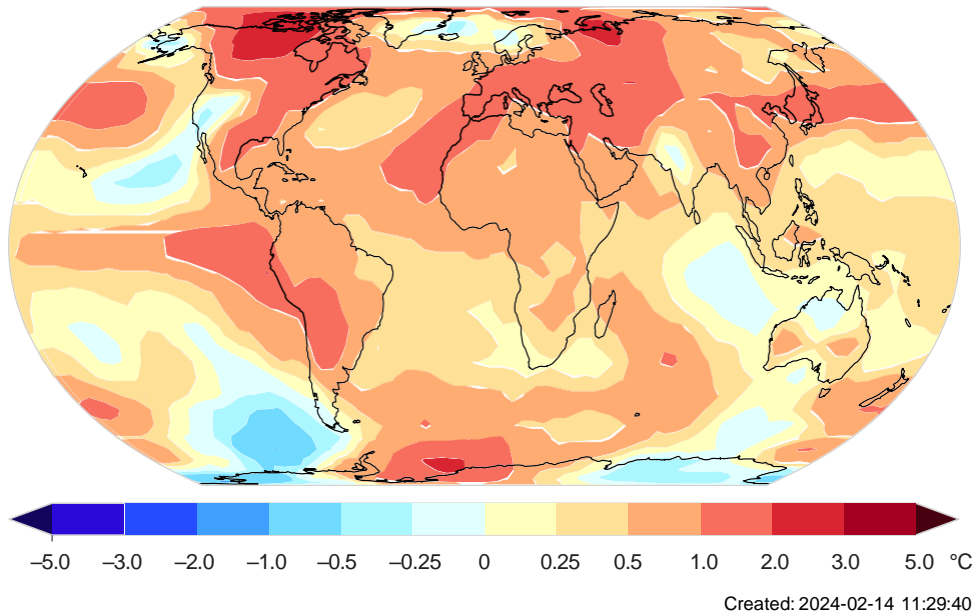


그림 3. 2023년 평균 지표근처 온도 아노말리(1991-2020 평균값 대비)

출처: 6개 데이터세트 자료. 세부사항은 [Data set and methods](#) 참조.

그러나, 북동대서양(그림 3)과 같은 일부 지역에서의 비정상적 온난화는 엘니뇨와 관련된 전형적인 온난화 또는 냉각 패턴과는 일치하지 않는다. 아직 조사 중인 다른 요인들로 인해 2022-2023년에 예외적인 온난화가 발생하였을 수도 있으며 내부 변동성만으로는 설명이 어렵다.<sup>9</sup>

2014년부터 2023년까지 지난 10년간 전지구 평균 온도는 1850-1900년 대비  $1.20 \pm 0.12^\circ\text{C}$ 로, 모든 6개의 데이터세트에서 기록상 가장 더운 10년을 기록하였다.

2023년 북반부의 늦봄부터 연말까지, 전지구 평균 해수면 온도(SST) 역시 최고 기록치에 도달했다. 7월, 8월, 9월의 기록은 각각 큰 폭( $0.21^\circ\text{C}$ 과  $0.27^\circ\text{C}$  사이)으로 깨졌다. 1991년부터 2020년까지 기준값에 비해 동부 북대서양과 멕시코만, 카리브해, 일본해로부터 동쪽으로 확장된 북태평양, 아라비아해, 남반구 행양의 넓은 지역에까지 넓은 지역에 걸쳐 이례적인 온난화가 기록되었다(그림 3; [Marine heatwaves and cold spells](#) 참조).

해수면 온도에 비해 다소 늦게 나타났으나, 전지구 지면 아노말리 또한 7월과 8월에 기록치에 도달하였고, 9월 평균값도  $0.53^\circ\text{C}$ 에서  $0.71^\circ\text{C}$ 까지 큰 폭으로 올랐다. 지난 60년 동안 두 번째로 큰 폭으로 기록을 세운 것은  $0.22^\circ\text{C}$ 에서  $0.27^\circ\text{C}$ 로 2022년 9월의 경우였다. 2023년에는 대부분의 육지가 1991-2020년 평균보다 따뜻한 것으로 나타났다(그림 3). 캐나다 북부, 미국 남부, 멕시코, 중미, 그리고 남미의 넓은 지역에서 비정상적인 온난화가 보고되었다. 중앙아시아부터 서부 유럽까지 넓은 지역, 북아프리카와 아라비아 반도 일부, 남동 아시아와 일본도 비정상적으로 더웠다.

## 해양

이산화탄소 및 기타 온실 가스의 인간 배출량이 증가함에 따라 대기 꼭대기에서 양의 복사 불균형이 발생하였다. 이 불균형으로 인해 지구 시스템에 열의 형태로 에너지가 축적되어 전 세계적 온난화가 촉진되었다.<sup>10,11</sup> 지구 표면의 70% 가량을 덮고 있는 해양은 열과 이산화탄소를 흡수하여 대기의 온난화 속도를 늦추는 역할을 한다. 그러나, 해양에 의해 흡수된 열로 인해 해양 온난화가 발생하고, 이는 육지의 얼음이 녹는 현상과 함께 해수면 상승을 초래하며, 이산화탄소의 흡수는 해양 산성화로 이어진다. 따뜻해진 해수와 해수면 상승, 해양 산성화는 모두 해양 뿐만 아니라 그 안에서 생활하는 식물과 동물, 그리고 생계를 유지하기 위해 이에 의존하는 사람들에게도 중요한 영향을 미치게 된다.

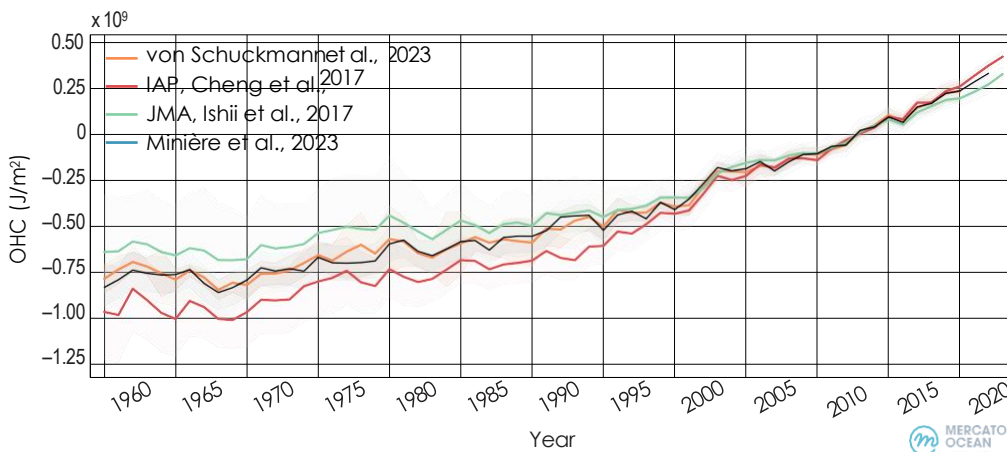
### 해양 열 용량

2023년, 해양 열 용량은 65년 관측 기간동안 최고치에 도달했다.

1971년 이후 지구 시스템에 축적된 에너지의 약 90%가 해양에 저장되어 있다. 해양에 에너지가 축적되면서 해양이 따뜻해졌고 전세계 해양 열 용량이 증가했다(그림 4).

여러 개별 데이터세트를 기반으로 한 종합 분석에 따르면, 2023년에도 해양 상층부 2,000미터는 계속해서 온난화 되었다.<sup>12</sup> 온난화는 계속될 것이라고 예상되고 있고, 이는 백년에서 천년 단위의 시간 규모에서 돌이킬 수 없는 변화이다.<sup>13,14</sup> 2023년의 해양 열 용량은 최고 기록치로, 2022년 값을  $13 \pm 9 \text{ZJ}$  만큼 초과했고(그림 4)<sup>15</sup>, 이는 2024년 초에 발표된 추정치와 일치한다.<sup>16</sup>

모든 데이터세트에서, 해양 온난화율은 특히 지난 20년 동안 강하게 증가했다. 1971년부터 2023년까지 0-2,000미터의 해양층에서 해양 온난화율은 평균적으로  $0.7 \pm 0.1 \text{Wm}^{-2}$ 이었으나, 2005년-2023년(Argo programme에서 다루는 기간)까지  $1.0 \pm 0.1 \text{Wm}^{-2}$ 이다. 해양 온난화율의 꾸준한 증가<sup>17,18</sup>는 현지 관측소에서 직접적으로 얻은 추정치와 원격 감지를 통한 간접적 추정치, 그리고 위성으로 측정된 대기 꼭대기에서의 순 플럭스의 직접적 추정치 모두에서 일관되게 나타난다.<sup>19</sup> 이 변화의 다양한 원인에 대한 논의는 문헌에서 다루지만, 그 중에는 인위적 기후 강제 요인<sup>20</sup>과 자연 변동성<sup>21</sup>의 변화도 포함된다. 2,000미터 이하의 심해 해양 온난화율은 1992년부터 2022년까지  $0.07 \pm 0.03 \text{Wm}^{-2}$ 로 추정된다.<sup>22</sup>



**그림 4.** 1960-2023년까지 0-2,000미터 깊이층에 대하여 2005-2021년 평균 대비 상대적 해양 열 용량 아노말리(주황), 앙상블 평균 시계열과 앙상블 표준편차(2-표준편차, 음영부분). Schuckmann et al., 2023 (빨강); Cheng et al., 2017 (초록); Minière et al., 2023 (하늘); and Ishii et al., 2017 (짙은 파랑).

출처: Mercator Ocean international.

해양 열 용량은 전체 수직 물기둥에 걸쳐 강하게 증가하였으나, 온난화율은 모든 곳에서 동일하게 나타나지 않았다.<sup>23</sup> 2,000미터 상층부에서 가장 강한 온난화를 보이는 곳은 남반구 해양(남위 60° - 남위 35°), 북대서양(북위 20° - 북위 50°), 남대서양(남위 60° - 남위 0°) 이었다(그림 5). 남반구 해양 영역은 열이 가장 많이 저장되는 곳으로, 1958년 이후 2,000미터 상층부에서의 전지구 해양 열 용량 증가의 32%를 차지한다.<sup>24</sup> 대서양은 전지구 0-2,000미터 해양 열 용량 증가의 약 31%를 차지하며, 태평양은 약 26%를 차지한다.

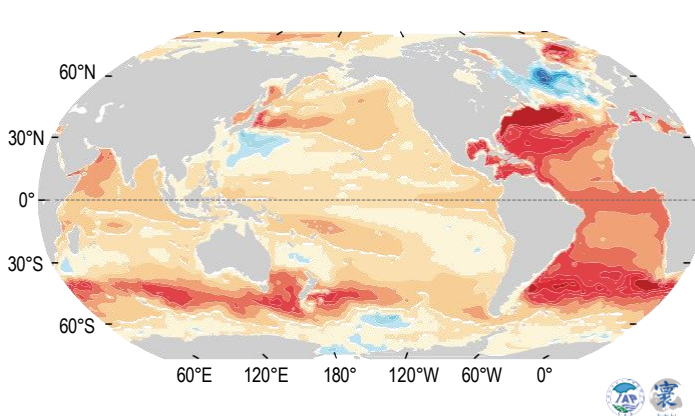


그림 5. 1958-2023년 2,000미터 상층부에서 관측된 해양 열 용량  
출처: Cheng et al. 업데이트<sup>25</sup>

일부 상대적으로 작은 지역에서 냉각이 진행되고 있는데, 여기에는 북극에 가까운 북대서양 해양이 포함되며, 표면 부근에서 깊이 800미터 이상에 이르는 영역(또한 표면에서 냉각이 나타나는 유일한 지역)이다. 북대서양의 냉각(북위 50° - 북위 70°)과 온난화

(북위 20° - 북위 50°)의 대조적인 패턴은 대서양 경도 순환의 감속과 공기와 바다 간의 지역적 상호작용과 관련이 있다.<sup>26</sup> 다른 냉각 지역으로는 북서태평양, 남서태평양, 남서인도양이 포함된다.

### 해수면

2023년에 전지구 평균 해수면은 1993년부터 현재까지 위성 기록 중 높은 기록에 도달하여, 계속되는 해양 온난화와 빙하 및 빙산의 녹음 현상을 반영하였다.

2014-2023년의 지난 10년간 전지구 평균 해수면 상승률은 위성 기록의 첫 10년(1993-2002년)간 해수면 상승률의 두배 이상이다.

2023년에도 전지구 평균 해수면(GMSL)은 계속해서 상승했다(그림 6). 2020년 중반부터 2023년 초까지 라니냐는 2011년 라니냐가 전지구 평균 해수면을 몇 밀리미터 감소시킨 일시적인 현상을 일으킨 것과는 상이하게 전지구 평균 해수면에 거의 영향을 미치지 않았다. 2023년에 관측된 급속한 상승은 일부 엘니뇨 영향이 있는 것으로 보인다. 장기적 해수면 상승률은 위성 기록이 시작된 이후 거의 두배 증가하여, 1993년과 2002년간 2.13mm/yr에서 2014년과 2023년간 4.77mm/yr로 증가하였다. 2023년 1월부터 3월까지 열대태평양 서쪽 해수면은 장기(1993-2012년) 평균보다 높았다(그림 7). 이는 엘니뇨 남방진동(ENSO)의 중립 조건과 관련하여 해수가 따뜻해졌기 때문이다. 북대서양과 열대태평양 동쪽의 해수면은 장기 평균보다 낮았다.

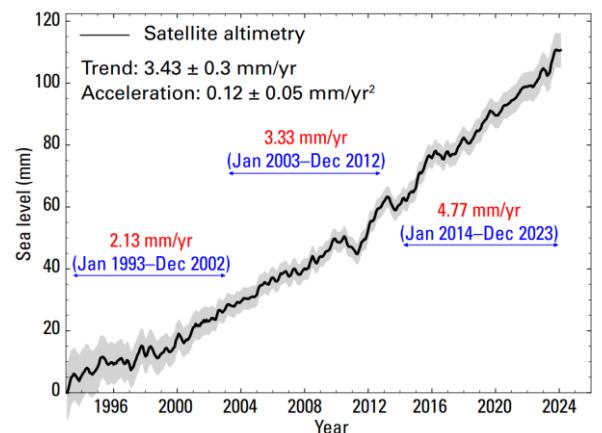


그림 6. 위성 고도계 기반 1993년 1월과 2023년 12월 사이 전지구 평균 해수면 변화. 검은색 선은 최적의 추정치, 회색 음영은 불확실성을 나타냄. 빨간색 주석과 파란색 주석은 30년 기록 중 평균 해수면 상승률을 나타냄

출처: AVISO 고도계

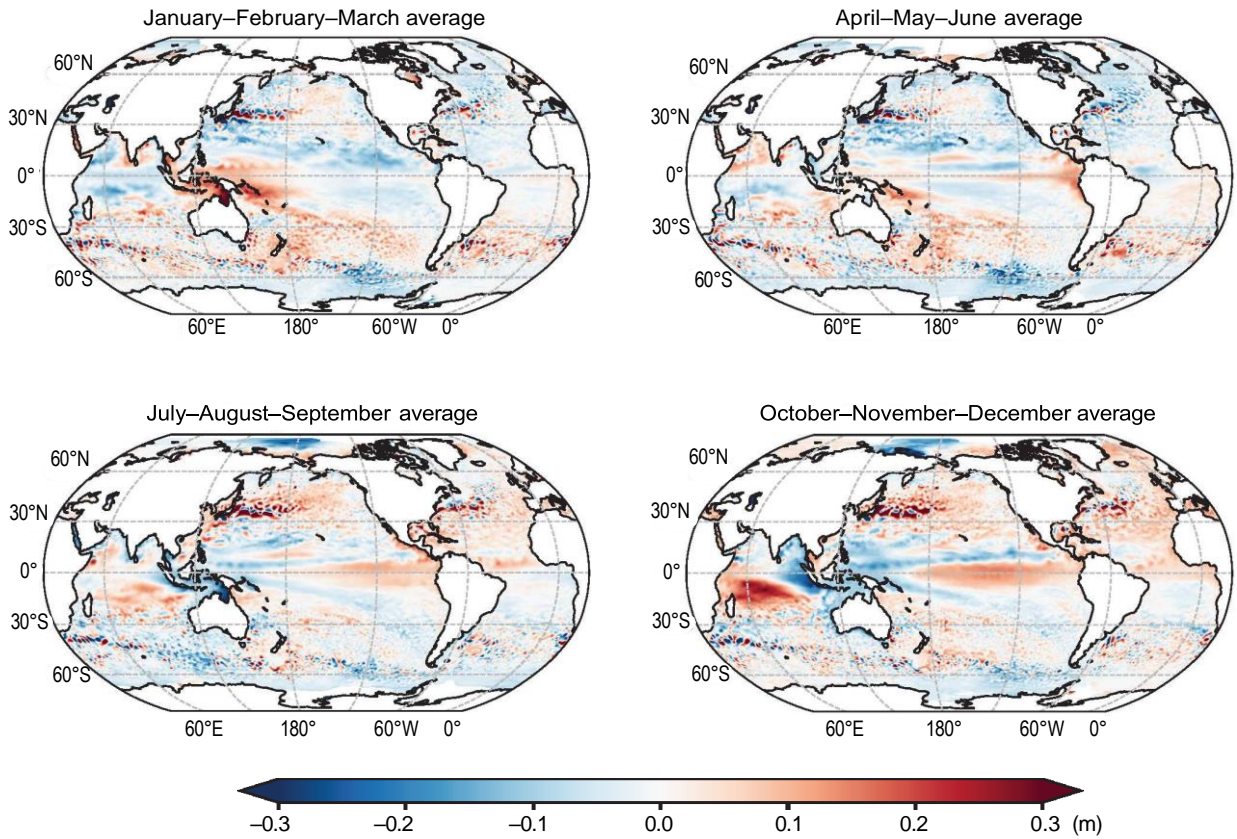


그림 7. 고도계 기반 3개월 평균 해수면 아노말리(1993-2012년 기후값 평균 대비) (왼쪽 위) 2023년 1월-3월, (오른쪽 위) 2023년 4월-6월, (왼쪽 아래) 2023년 7월-9월, (오른쪽 아래) 2023년 10월-12월

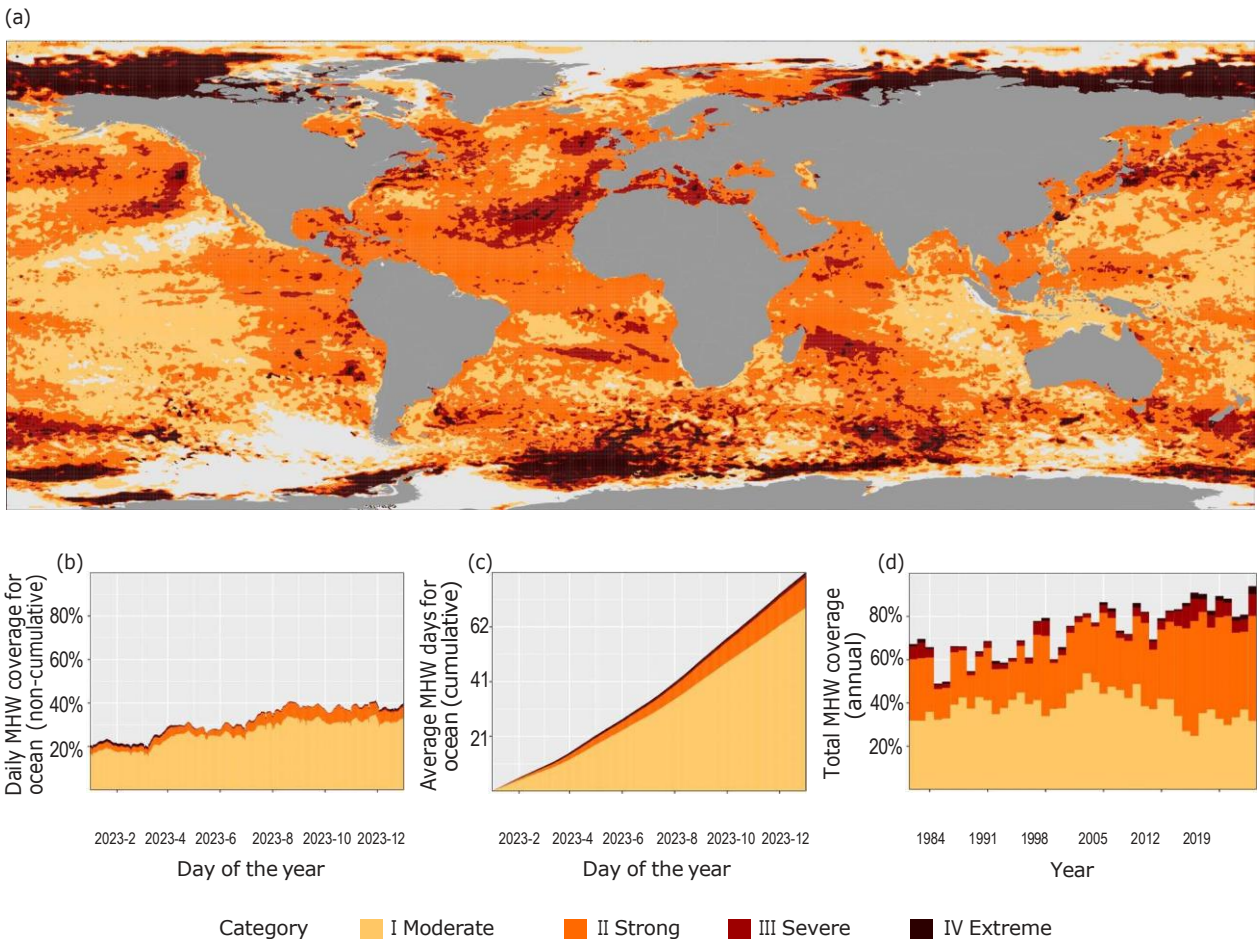
출처: Copernicus Marine Service에서 다운 받은 자료

2023년 엘니뇨 발생 초기 단계에서 발생한 열대 태평양 동쪽의 해수면 온난화(Short-term climate drivers 참고)로 인해 4월과 6월 사이 열대 태평양 동쪽의 대부분 영역에서 장기간 평균에 비해 해수면이 상승하였다. 7월과 9월 사이, 엘니뇨 특성이 명확히 보이면서 중부 열대 태평양부터 중남미 해역까지 평균 이상의 해수면 상승이 있었다. 또한 열대 지역 및 북동대서양에서도 평균 이상의 해수면 상승이 관측되었다. 이는 북반구 여름 동안 이 지역에서의 이상 기온 상승과 연관이 있다. 10월부터 연말까지 엘니뇨 패턴은 계속 발전했다. 인도양 쌍극자(IOD)의 양상이 양으로 전환됨에 따라 서부 인도양에서 평균 이상의 해수면 상승이 나타났고, 동부에서는 낮은 수준의 해수면이 관측되었다(Short-term climate drivers 참고).

### 해양 열파와 한파

육지의 폭염과 한파와 마찬가지로, 해양 열파와 한파는 해양에서 극도로 높거나 낮은 온도가 지속적으로 이어지는 기간으로 해양 생물과 이에 의존하는 지역사회에 다양한 결과를 가져올 수 있다.<sup>27</sup> 해양 열파는 20세기 후반 이후로 점점 더 빈번하고 강하게 지속 기간이 길어지고 있으며, 같은 측정방법으로 해양 한파는 줄어들고 있다. 해수면 온도(SST)의 위성 검색 결과를 사용하여 전 세계적으로 해양 열파와 한파를 모니터링하고 있고, 이 보고서에서는 “중간”, “강한”, “심각한”, “극심한”, “얼음”으로 분류하고 있다(정의에 대해서는 [Data set and methods](#) 참조).

엘니뇨 사건들은 일반적으로 동쪽 열대 태평양에서 광범위한 해양 열파를 유발하는 경향이 있다. 2023년에도 이 지역에서는 강한 해양 열파가 10월까지 지속되었고(그림 8b), 이후에도 중간 정도의 해양 열파가 계속되었으나, 전반적으로 지난 엘니뇨 경우보다 해양 열파의 면적 범위는 더 작았다.



**그림 8.** (a) 2023년 동안 각 픽셀에서 경험한 최고 해양 열파 범주(정의에 대해서는 [Data set and methods](#) 참조)를 보여주는 세계 지도(기준 기간 1982-2011). 밝은 회색은 해당 연도 동안 전체적으로 해양 열파가 발생하지 않은 픽셀을 나타냄; (b) 연중 해양 열파를 경험한 해양 표면 비율을 나타내는 누적 막대 그래프; (c) 해양 열파가 발생한 누적 날 수를 해양표면에 대해 평균한 누적 막대 그래프로, 해양 열파 발생 일의 누적 합계를 해당 픽셀의 표면에 가중치를 두어 나눈 값; (d) 1982년부터 현재까지 해양 열파를 경험한 해양 표면의 총 비율을 보여주는 누적 막대 그래프. 자료는 미국해양대기청(NOAA) 최적 보간 해수면 온도(OISST)에서 제공

출처: Robert Schlegel

2023년에 주목할 사항 중 하나는 북대서양에서 해양 열파가 넓은 범위로 지속된 점으로, 북반구 봄에 시작하여 9월에 가장 넓은 범위까지 퍼진 후 연말까지 지속되었다. 12월에 그 범위는 줄어들었으나 강도는 증가했다. 2023년 말에 북대서양 전역에 걸쳐 강력하고 극심한 해양 열파가 발생하여 해양에서 +3°C의 온도 아노말리가 나타났다.

지중해도 기준 기간에 비해 비정상적으로 따뜻했으며, 12년 연속으로 강하고 극심한 해양 열파가 거의 전 범위에 나타났다. 남반구에서는 1월부터 9월까지 (~270일) 뉴질랜드 주변의 해수가 장기 평균보다 1-2°C 정도 높았다.

2023년 말, 적도의 약 20°N부터 20°S 범위에 있는 전지구 대부분의 해양에서 11월 초부터 해양 열파를 겪고 있다. 반면, 2023년에 적도의 60°N부터 60°S 범위에 있는 해양에서는 해양 한파가 거의 발생하지 않았다(그림 9a 참고).

세계 해양은 평균적으로 매일 32%의 해양 열파를 겪으면서(그림 8b 참고) 이전 기록인 2016년의 23%를 크게 넘어섰다. 그에 반해 해양 한파의 평균 일일 범위는 4%에 불과하여(그림 9b 참고) 2022년의 7%보다 훨씬 낮았다.

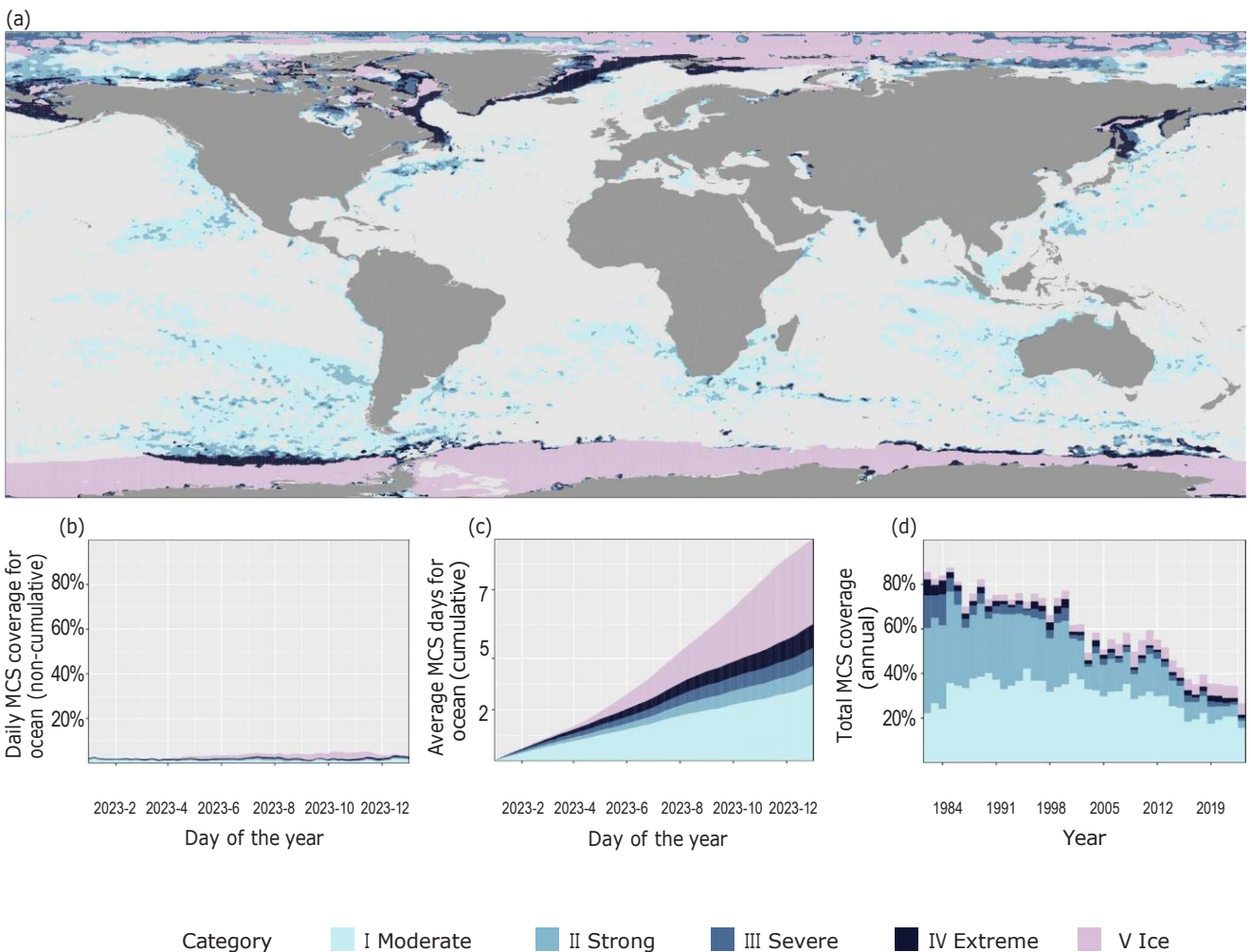


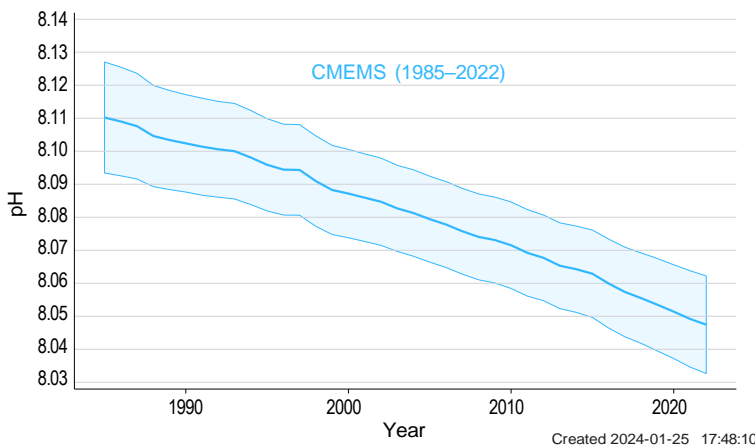
그림 9. 그림 8과 유사하나 해양 열파가 아닌 해양 한파를 보여줌. 자료 출처는 NOAA OISST

출처: Robert Schlegel.

### 해양 산성화

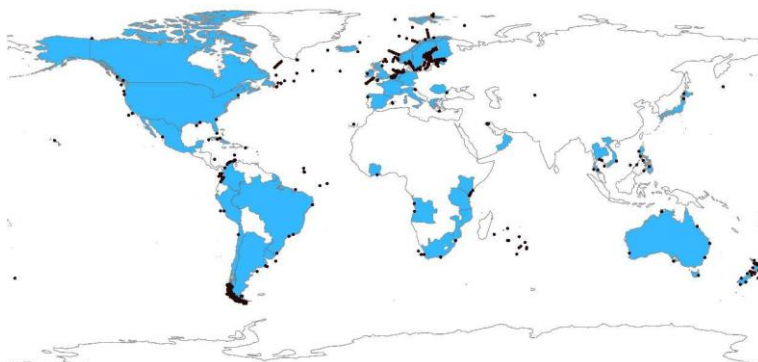
해양은 인간 활동에 의해 대기에 배출되는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 연 배출량의 약 1/4을 흡수한다.<sup>28,29</sup> 이산화탄소는 해수와 반응하여 탄소의 화학구조를 변경시키면서 "해양 산성화"로 알려진 pH 감소를 가져온다(그림 10 참조). 해양 산성화는 생물다양성을 감소시키고 서식지 환경을 악화시키며, 어업과 양식업을 위협함으로써 식량 안보와 같이 생물과 생태계 서비스에 영향을 미친다.<sup>30</sup> IPCC의 제6차 평가보고서(AR6)에 따르면 "현재의 해양 표면 pH 값은 최소한 26,000년 동안 전례 없는 것이 거의 확실하며(high confidence), 현재의 pH 변화 속도는 적어도 이 시기 동안 전례 없는 것이다"라고 한다.<sup>31</sup>

정부간해양과학위원회(IOC), 유엔교육과학문화기구(UNESCO), 전세계해양산성화관측네트워크(GOA-ON), 유엔 지속가능성을 위한 해양산성화 연구(OARS) 프로그램과 같은 다양한 전지구적 노력이 해양산성화 관측소의 수를 증가시켰음에도 불구하고, 아직 많은 지역에서 샘플의 수가 적다. 지속가능목표(SDG) 지표 14.3.1(합의된 대표 샘플링 지점에 측정된 평균 해양 산성도(pH))에 따르면, 현재 관측 범위는 적절하지 못하고(그림 11 참조), 모든 지역의 경향성과 격차를 판별하기에 관측값의 시계열이 충분하지 못하다. 전세계 해양 표면 pH의 감소를 보여주는 글로벌 추세(그림 10 참조)를 통해 이산화탄소 배출의 대규모 영향을 볼 수 있다. 그러나 해양 산성화의 변화속도, 패턴, 규모는 지역적, 시간적 변동성이 매우 크며, 이 변동성을 이해하기 위해서는 영향을 받는 지역사회와 관련된 규모에서 고해상도, 장기간 관측이 필요하다.



**그림 10.** 1985-2022년간 전세계 평균 해양 표면 pH(파랑). 음영처리된 부분은 불확실성을 의미.

출처: 코페르니쿠스 해양환경모니터링서비스



**그림 11.** IOC.UNESCO에 의해 SDG 지표 14.3.1 (합의된 대표 샘플링 지점에서 측정된 평균 해양 산도(pH)) 해양 산성화를 위해 제공받은 표면해양 탄산염 화학 측정 위치 표시. 연한 파란색으로 표시된 국가는 SDG 14.3.1 방법에 따라 데이터를 보고한 국가. 검은 점은 데이터가 수집된 샘플링 지점 위치 표시

출처: IOC/UNESCO

## 빙권

빙권은 지구의 얼어붙은 부분으로 구성되고, 주로 빙하와 빙상, 해빙, 눈, 영구동토층을 의미한다. 빙권은 얼음이 형성되는 혹독하고 종종 먼 곳에 위치한 환경 때문에 장기적인 측정을 수행하기에 힘든 점이 있었다. 동시에 빙권에서 볼 수 있는 심각한 변화로 기후변화의 전지구적 규모를 명확히 보여준다.

## 해빙

북극 해빙은 2023년에도 평균 이하를 유지하여, 연간 최대 및 연간 최소 범위는 지난 45년 동안 위성 관측이 이루어진 이래 각각 5번째와 6번째로 낮은 수치를 기록했다.

남극 해빙은 1979년부터 현재까지 위성 관측 기간 동안 절대적인 최저값에 지난 2월 도달했다. 해빙 범위는 6월부터 11월 초까지 기록적으로 낮았으며, 9월의 연 최대값은 지난 최대값의 최저 기록에 비해 100만 km<sup>2</sup> 낮았다.

북극의 해빙 범위는 3월 6일 연 최대값인 1,462만km<sup>2</sup>에 도달하여, 위성 기록 이후 5번째로 낮은 값을 기록했다.<sup>32</sup> 북극 해빙 범위는 9월 19일에 423만km<sup>2</sup>로 최소값에 도달하여(그림 12 왼쪽 참조),<sup>33</sup> 1991-2020년 장기 평균값인 약 550만km<sup>2</sup> 보다 훨씬 낮았다. 이는 1979-2023년의 위성 기록 중 6번째로 낮은 북극 해빙 최소 범위이며, 2012년이나 2020년처럼 극심하지는 않지만 2007년, 2016년, 2019년보다 조금 높은 수준으로 늦여름과 초겨울의 북극 해빙이 장기적으로 감소하는 추세가 계속되고 있음을 보여준다. 주요한 음의 아노말리는 축치와 동시베리아해에서 관측되었다(그림 12 오른쪽 참조). 2023년 말에는 장기 평균에 가까운 범위를 기록했으나 여전히 위성 기록상 9번째로 낮은 범위였다.<sup>34</sup>

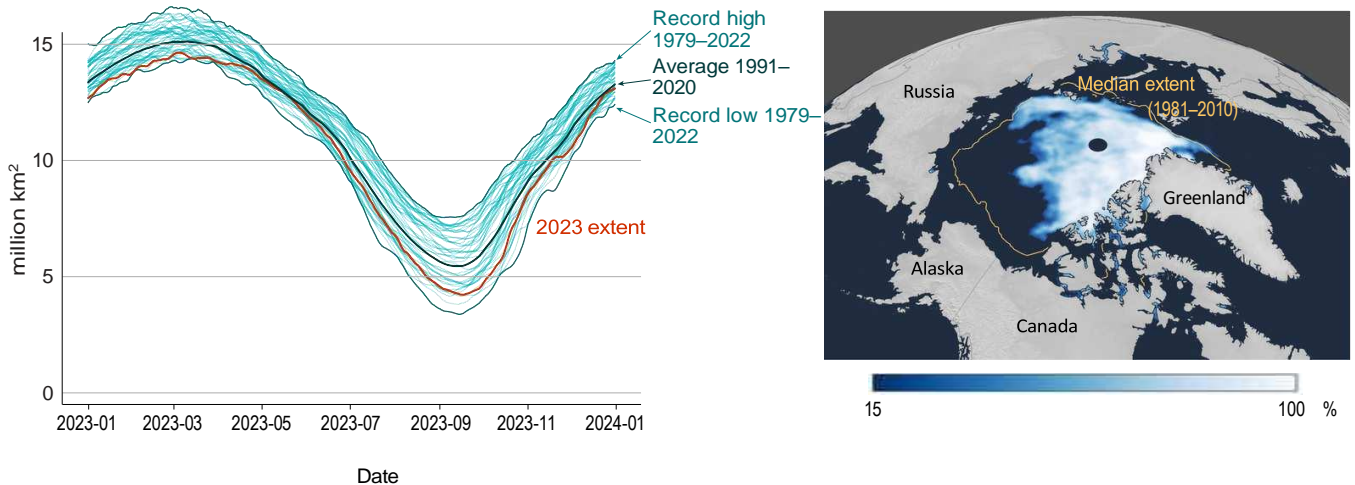


그림 12. (왼쪽) 1월부터 12월까지의 북극 해빙의 일범위를 나타내는 그래프로, 1991-2020년 기후 기준(진한 파란색)에 대하여 2023년(빨간 선), 각 날짜별 최고 및 최저 범위 기록(중간 파란색)을 표시. 개별 연도는 연한 파란색으로 표시. (오른쪽) 2023년 9월 19일의 해빙 농도로 연 최저 북극 해빙 범위. 노란색 선은 1981-2010년 기간의 해빙 경계 중간 값을 의미.<sup>35</sup>

출처: 미국 국립빙설자료센터(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)의 자료 및 지도.

2023년 2월 21일 남극 해빙 범위는 179만km<sup>2</sup>로 감소하여(그림 13 왼쪽 참고), 1979년부터 지금까지 위성 기록 중 사상 최저치이자 2022년에 수립된 이전 최저 기록보다 약간 낮은 수치를 보였다.<sup>36</sup> 해빙 범위는 성장기가 시작되면서 평균 이하를 유지하였고 5월에는 기록적으로 낮은 수준에 도달하였다. 느린 성장이 지속되어 7월과 연간 최대치 사이 예외적으로 낮은 기록을 보였는데, 이는 남극해의 온난화와 관련이 있을 가능성이 있다.<sup>37</sup> 2023년 남극 해빙의 최대 면적(그림 13 오른쪽 참고)은 9월 10일의 1,696만km<sup>2</sup>로 1991-2020년 평균보다 약 150만km<sup>2</sup> 낮은 수치이며 1986년에 기록된 이전 최저 최대치보다 100만km<sup>2</sup> 낮았다.<sup>38</sup> 연중 기록적으로 낮은 해빙 범위는 11월 초까지 계속되었으나 12월에는 평균보다 느린 감소율을 보이며 연말까지 해빙 범위가 장기 평균에 가까워졌다.<sup>39</sup>

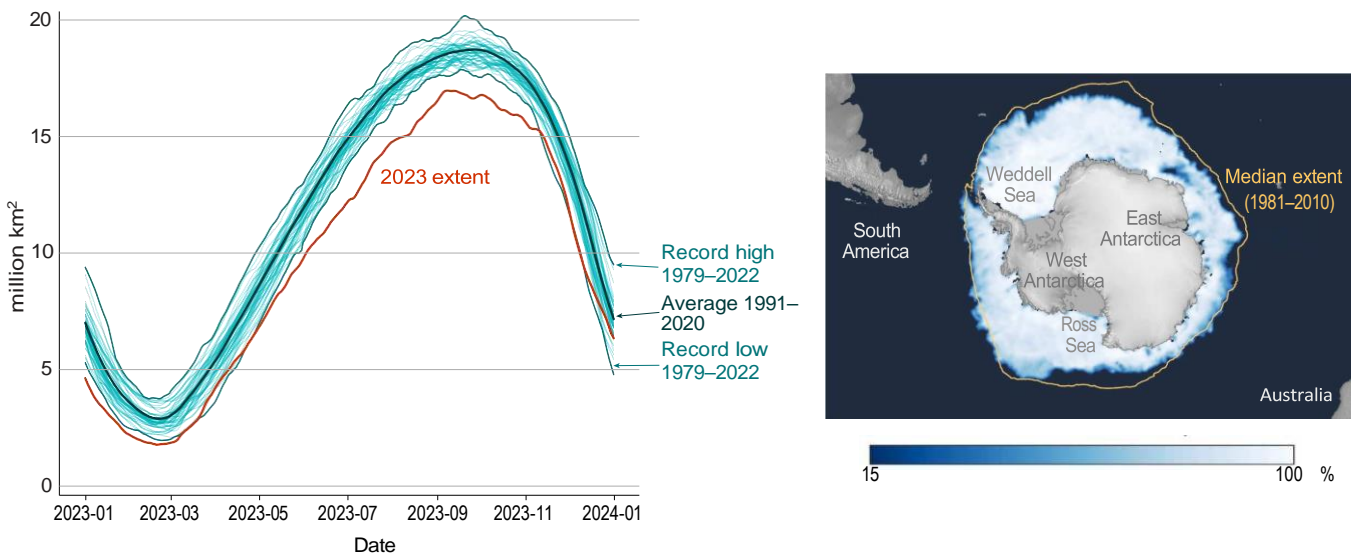


그림 13. (왼쪽) 1월부터 12월까지 남극 해빙의 일범위를 나타내는 그래프로, 1991-2020년 기후 기준(진한 파란색)에 대하여 2023년(빨간색 선), 각 날짜별 최고 및 최저 범위 기록(중간 파란색)을 표시. (오른쪽) 2023년 9월 10일 해빙 농도로 2023년 연간 최대 범위. 노란색 선은 1981-2010년 기후값 기간 동안 얼음 경계 중간 값을 의미.<sup>40</sup>

출처: 미국 국립빙설자료센터(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)의 자료 및 지도.

### 빙상

서밋 관측소에서 기록된 가장 따뜻한 여름으로 1991-2020년 평균보다 3.4°C 더 따뜻했고, 이전 기록보다 1.0°C 더 따뜻했다.

빙상<sup>41</sup>은 육지에서 시작되어 50,000km<sup>2</sup> 이상의 면적을 덮고 있는 얼음의 확장으로 볼 수 있다. 현재 기후 시스템에서 그린란드와 남극에 두 개의 주요 빙상이 있다.<sup>42</sup> 빙상의 총 질량 균형은 표면 질량 균형, 해양 질량 균형, 기저 질량 균형의 세 가지 요소의 합이다. 표면 질량 균형은 축적된 눈과 빙상에서 녹아 내린 물의 유출량 간의 차이이다. 해양 질량 균형은 빙상의 분리와 해양과 접촉되는 얼음의 용해로 인한 가장자리에서의 질량 손실이다. 기저 질량 균형은 지역과 얼음 지반을 따라 미끄러지면서 생기는 마찰로 인해 빙상 바닥이 녹는 것이다. 음의 질량 균형이란 얼음 질량이 줄어든 것을 말하고, 양의 질량 균형은 얼음 질량이 증가한 것을 말한다.

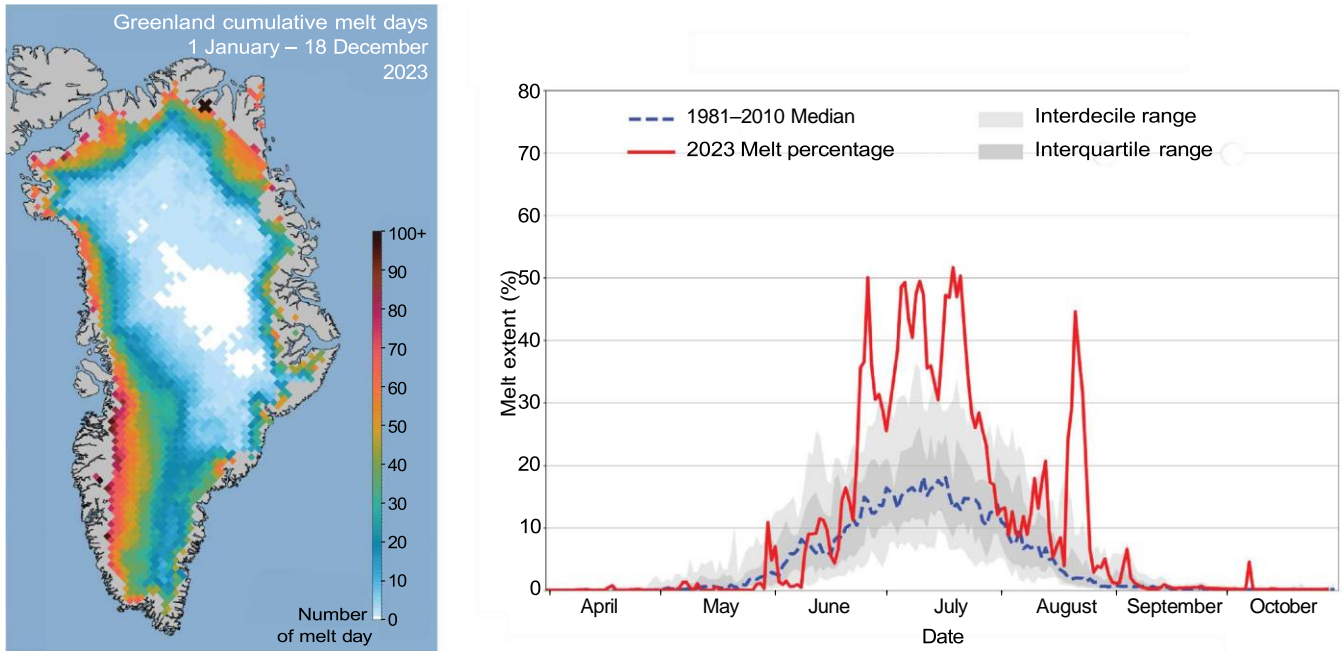


그림 14. 그린란드 빙상의 2023년 상황, (왼쪽) 2023년 그린란드의 누적 용해 일수로 하얀색 지역은 용해가 일어나지 않음을 의미. (오른쪽) 일별 빙상이 용해 조건을 경험한 비율

출처: 조지아 대학교 Thomas Mote와 미국 국립빙설자료센터(NSIDC)에서 그림과 분석 제공

지역 기후 모델 앙상블의 추정에 따르면, 그린란드 빙상은 2022/2023년 수문 연도(2022년 9월 1일 ~ 2023년 8월 31일)에 질량 손실이 계속되었다.<sup>43</sup> 대부분의 연도에 그린란드 전체에서 연간 눈 축적량은 여전히 표면 용해를 초과하여 양의 표면 질량 균형을 유지한다. 2022-2023년에 이 값은 +317Gt으로 추정되어 장기간 평균보다는 낮으나 2011-2012년과 2018-2019년의 극심한 용해가 일어난 해보다는 높았다. 기저 질량 균형(-27Gt)과 해양 질량 균형(-504Gt)을 합쳐서 2022-2023년 빙상의 총 질량 균형은 약 -217Gt로 추정된다.

2023년 여름철 용해 시즌은 7월과 8월의 극심한 폭염으로 상대적으로 강력하다.<sup>44</sup> 위성 용해 범위 자료에 따르면, 빙상은 2012년과 2010년의 극심한 용해 시즌에 이어 1978-2023년 동안 기록상 세 번째로 높은 누적 녹는 날 면적<sup>45</sup>을 기록했다(그림 14 참고). 서밋 스테이션에서는 1987년 이후 현재까지 기록상 가장 더운 여름<sup>46</sup>으로 1991-2020년 평균보다 3.4°C 따뜻하고 이전 기록 보다 1.0°C 따뜻하였다.<sup>47</sup> 서밋 스테이션은 기록상 다섯 번째(2012년, 2019년, 2021년, 2022년, 2023년)로 용해를 경험하였으며, 빙하 코어 기록에 따르면 상당한 용해 상황이 마지막으로 발생한 것은 19세기 말이라고 한다.<sup>48</sup>

빙상 질량 균형의 상호 비교(Ice Sheet Mass Balance Inter-comparison Exercise)를 통해 그린란드와 남극의 빙상이 1992-2020년 위성 기록 기간 동안 질량 손실이 가속화되고 있음이 밝혀졌다.<sup>49</sup> 그린란드와 남극 빙상이 이 기간 동안 잃은 총 질량 균형의 평균은 각각 -169Gt/년와 -92Gt/년으로,<sup>50</sup> 이를 합치면 -261Gt/년이다. 빙상 두개를 합치면 2010년 이후 기록상 7번째로 많은 용해가 일어난 해가 되며 평균 질량 손실율은 1992년과 1996년 사이에 105Gt/년, 2016년과 2020년 사이에 372Gt/년이다. 이는 후반 기간 동안 극지방 빙상에 기인한 전지구 해수면 상승이 연간 약 1mm에 해당한다는 뜻이다.

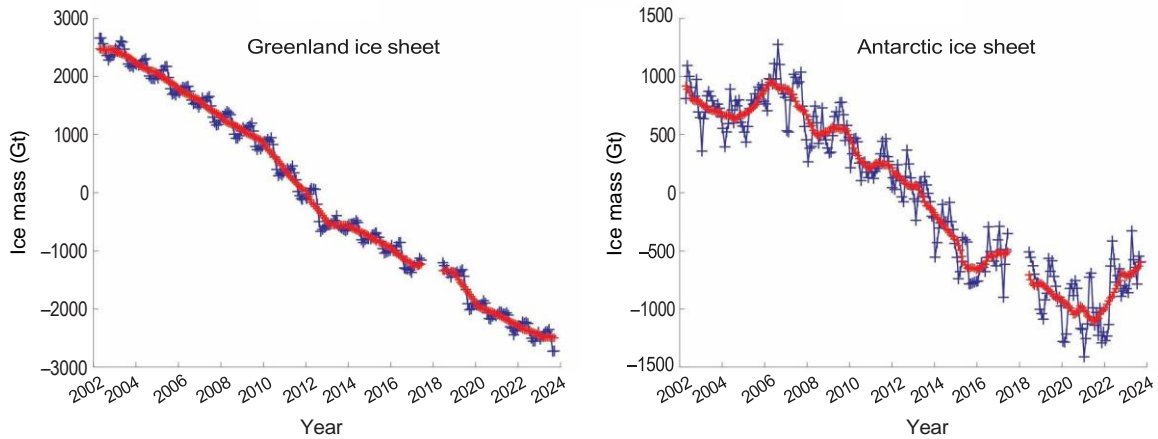


그림 15. 2002년 4월부터 2023년 9월까지 그린란드와 남극 빙상에 대한 GRACE 위성 미션에서 나온 중력 질량 균형 자료

출처: Isabella Velicogna이 자료 및 분석 제공

2023년 질량 균형의 자료와 모의 추정치는 그린란드의 최근 질량 손실률과 일치하나, 남극 빙상은 작년부터 일년 반 동안 평소보다 높은 눈의 축적으로 질량이 늘었다(그림 15 참고). 중력 회복및기후실험(GRACE) 위성 미션에서 확보한 2022/2023 수문년도 중력 질량 균형 자료를 보면 그린란드에서 -196Gt의 질량 변화가 추정되며, 이는 빙상의 장기 질량 손실률에 가깝다. 남극 빙상은 같은 기간동안 122Gt이 증가하였다.

## 빙하

잠정적 자료에 따르면 수문년도 2022/2023년의 전지구 기준 빙하의 연 질량 균형은 물 당량 -1.2m이다. 이는 1950-2023년 동안 얼음이 가장 많이 손실된 것으로, 북미 서부와 유럽에서 극심한 음의 질량 균형이 발생한 것에 의한 것이다.

북미 서쪽과 유럽 알프스 빙하에서 극심하게 녹는 시즌을 경험하였으며, 스위스는 지난 2년동안 남아있는 빙하의 약 10%가 손실되었다.

빙하는 눈이 압축되어 얼음이 형성된 후 변형되어 언덕 아래로 흐르면서 형성된다. 빙하는 두 개의 구역으로 나뉘는데, 하나는 눈이 내려서 축적된 양이 얼음 손실을 초과하는 축적 구간이고, 다른 하나는 녹거나 다른 메커니즘으로 인해 얼음 손실이 축적보다 많아지는 소실 구간이다. 빙하가 호수나 바다에서 끝나는 경우, 얼음이 물과 만나는 지점에서 녹거나 빙하 조각이 떨어져 나가면서 얼음 손실이 발생할 수 있다.

빙하 질량 균형, 즉 빙하에 의해 질량을 얻거나 줄어드는 질량의 양은 일반적으로 빙하 면적에 대해 연간 두께 변화를 평균한 것으로 물 등가(w.e.) 높이(m)로 표현된다.<sup>51</sup> 빙하가 녹는 비율은 빙하 표면에 의해 반사되는 햇빛의 비율인 빙하 반사율에 크게 영향을 받는다. 노출된 빙하 얼음은 더 어두워서 계절적 적설층(snowpack) 보다 반사율이 낮으며, 이는 또한 광물 먼지, 블랙 카본, 조류 활동, 산불로 인한 난진으로 인해 더 어두워 지기가 쉽다. 눈으로 덮인 부분의 감소, 장기간 녹는 시즌과 산불은 모두 빙하 표면에 어두운 물질을 집중시켜 반사율을 감소시키고 용해를 증가시킨다.

세계빙하모니터링서비스(WGMS)에서 관찰한 기준 빙하의 예비 자료에 따르면 2022/2023 수문연도의 전지구 평균 질량 균형은 -1.2m 물 등가로, 약 60개 세계빙하모니터링서비스(WGMS) 기준 빙하에 대한 2021/2022년 수치보다 약간 더 질량이 손실된 것을 나타낸다. 현재 가용한 빙하 자료에 따르면, 이는 명목상 기록적으로 낮은 질량 균형이다(1950-2023년, 그림 16 참고). 이러한 기록적 손실은 북미 서부와 유럽 모두에서 극심한 질량 손실(음의 질량 균형)이 있었던 것에 기인했으며, 가장 큰 질량 손실이 발생한 연도 10개의 해 중 7개의 해가 2010년 이후에 발생하였다.

2022-2023년 스위스 빙하의 연 질량 손실은 남아 있는 얼음 부피의 4.4%로, 1950년부터 현재까지 기록상 두 번째로 컸다(그림 17 참고). 2021-2022년의 기록적인 5.9% 질량 손실과 합치면, 스위스 빙하는 단 2년만에 남아 있는 얼음 부피의 약 10%를 손실한 것이다. 이는 매년 적은 적설량과 따뜻한 여름으로 인한 것으로, 평소보다 더 오랜 기간 동안 빙하 얼음이 노출되고, 고도가 높은 지역에 있는 설빙(firn)이 손실되면서 빙하가 어두워지는 현상이 누적되어 빙하의 손실에 잠재적 영향을 미치게 된다.<sup>53</sup>

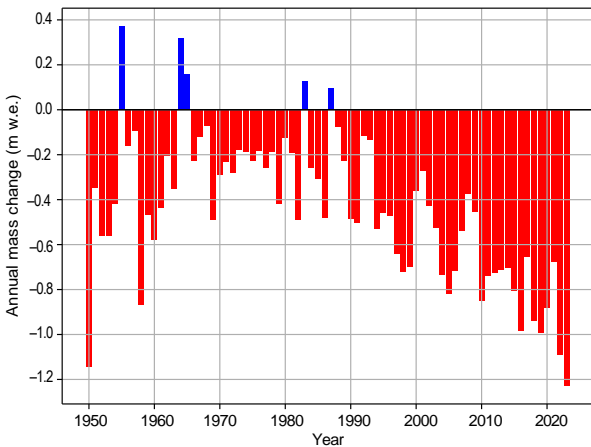


그림 16. 30년 이상 빙하 측정이 진행중인 기준 빙하의 연간 질량 균형. 연간 질량 변화량은 Y축에 1 제곱미터당 톤(1,000kg/m<sup>2</sup>)에 해당하는 물 등가 높이(m)로 표시.

출처: WGMS (2023, updated and earlier reports<sup>52</sup>)

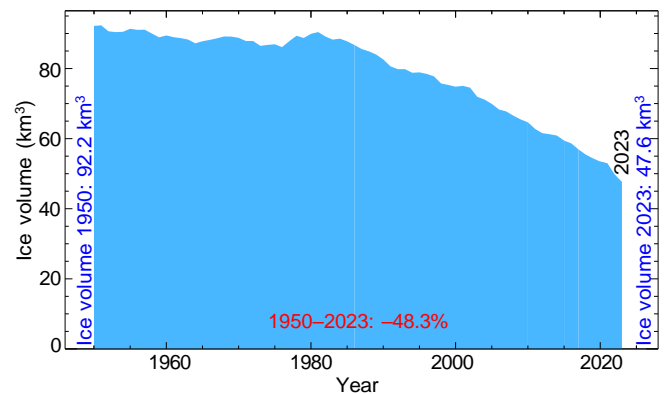
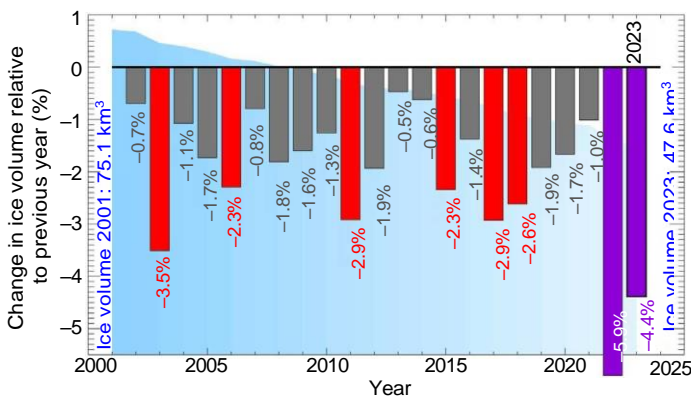
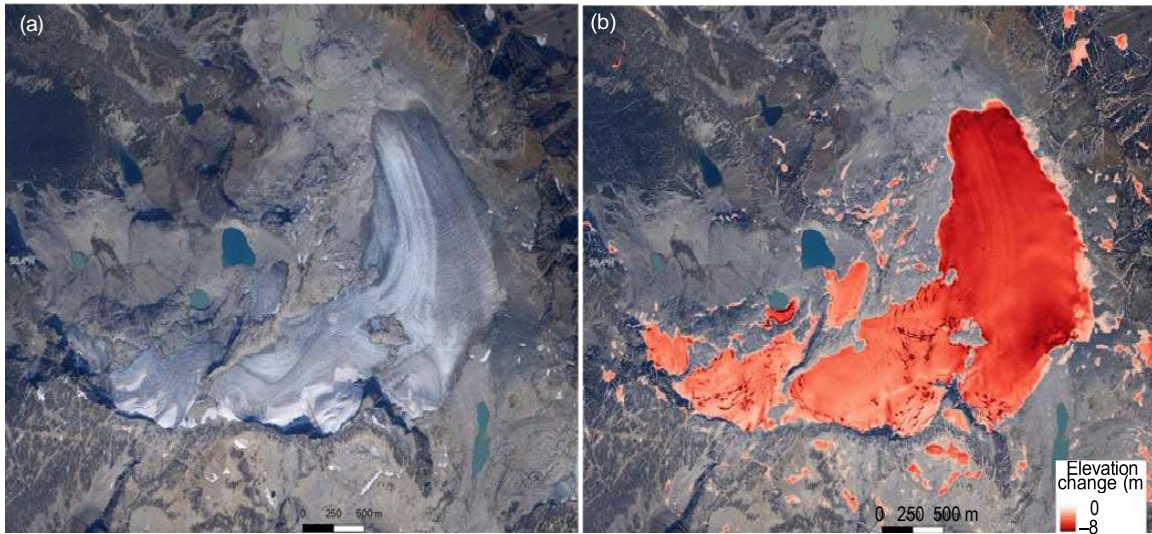


그림 17. (왼쪽) 스위스 빙하의 현재 부피 대비 총 연간 손실량. 수직 막대는 작년 대비 얼음 부피 변화율이며, 빨간색과 보라색 막대는 기록상 가장 큰 질량 손실이 있었던 8개 연도 표시. 보라색 막대는 2022년과 2023년 상대 질량 손실량 표시. 왼쪽과 오른쪽 그래프 배경에 파란색으로 표시된 영역은 전체 얼음 부피를 표시. (오른쪽) 1850-2023년 스위스 빙하 총 얼음 부피

출처: Matthias Huss, based on Glacier Monitoring Switzerland, 2022: *Swiss Glacier Mass Balance (Release 2023)*, <https://doi.org/10.18750/massbalance.2022.r2022>.



**그림 18.** (a) 2023년 8월 16일 캐나다 브리티시 콜롬비아 주 해안 산맥 서부의 플레이스 빙하로 계절 눈 부족과 어두운 설빙 및 얼음 표면을 표시 (b) 2022년 10월 18일부터 2023년 9월 16일까지 고도 변화로 LiDAR를 통해 얻은 자료 (c) 현장 측정에서 보여지는 플레이스 빙하의 장기 균형 기록(파란색 원)과 현재 얼음 면적을 이용한 LiDAR 조사(빨간색 원), Hugonnet et al.(2021)에서 사용된 빙하선(분홍색 사각형). 회색 및 주황색 사각형은 Hugonnet et al.(2021)에서 각각 2000-2009년, 2010-2019년 기간 동안 측정 질량 변화 추정치를 나타냄

출처: Brian Menounos, University of Northern British Columbia and the Hakai Institute Airborne Coastal Observatory.

북미의 서부에서는 2023년에 기록적인(1950년부터 현재까지) 빙하 질량 손실을 경험하였으며 캐나다 록키 산맥과 남부 해안 산맥의 LiDAR로 모니터링<sup>54</sup>한 빙하 지점에서 빙하 평균 연 두께 감소가 3.5 m를 초과하였다. 지역 LiDAR 조사를 기반으로, 북미 빙하는 2000-2019년 동안 측정된 속도보다 5배 빠른 속도로 질량이 감소하였다.<sup>55</sup> 설빙 및 얼음 밀도에 대한 LiDAR 고도계 자료를 조정한 결과, 장기 측정 장소인 플레이스 빙하와 헤이그 빙하의 질량 균형 추정치는 각각 물 등가  $3.1 \pm 0.5 \text{m}$ 와  $-3.8 \pm 0.6 \text{m}$ 이다. 이 두 지점에서의 현지 질량 균형 측정은 각각 물 등가  $-3.7 \text{m}$  및  $-4.1 \text{m}$ 로 추정되었는데, 이는 장기 평균 값보다 훨씬 낮은 값이며 이전 기록보다 물 등가 1m 이상 낮은 값이다.

대규모의 부정적인 질량 균형(질량 손실)은 평균보다 작은 겨울철 적설량과 직후에 따라오는 봄철 폭염으로 인한 것으로 캐나다 남서부에 있는 대부분의 빙하와 얼음지역에서 빠른 시기에 많은 얼음에 그대로 노출하게 된다. 계절 눈은 여름 중순에 대부분의 빙하에서 거의 모두 사라져서 더 어두운 설빙이나 얼음이 더 오랜 용해 기간에 노출되었다(그림 17 참조). 캐나다 서부에서 일어난 여름철 평균 이상의 온도와 기록적 산불 활동<sup>56</sup>([Extreme weather and climate events](#) 참고)으로 인해, 산불 때문에 발생한 입자 침전물이 빙하 표면을 더 어둡게 만들어 더욱

극심한 용해를 촉진하였다. 빙하 표면 불순물이 점점 집중되고 많은 산악 빙하에서는 설빙 층이 사라지면서 지난 몇 년간 있었던 높은 누적 용해율도 한 가지 요인으로 작용하였을 수 있다. 이러한 요인들은 지속적으로 발생하고 있으며, 2020-2023년 사이 북미 서부 지역 빙하는 2020년 부피의 9%가 손실되었다고 추정된다.

### 눈 덮임

북반구의 계절적 눈 덮임은 늦봄과 여름에 장기간 감소 추세를 겪고 있다. 5월의 북반구 눈이 덮인 면적은 1967-2023년의 기록상 8번째로 작았다. 2023년 5월 북미의 눈 덮임 면적은 1967-2023년 기록상 가장 작았다.

북반구의 계절적 눈 덮임은 늦봄과 여름에 장기적 감소 추세를 겪고 있으며, 2023년에도 이 추세는 계속되었다. 2023년 1월부터 4월까지 북반구 눈 덮임 면적은 1991-2020년 장기 평균에 가까웠으나 북미의 북서부 지역에서 발생한 봄철 폭염이 광범위한 용해를 가져왔다. 2023년 5월 북미의 눈 덮임 면적은 1967-2023년 기록상 가장 낮은 수치인 747만km<sup>2</sup>로, 장기 평균보다 157km<sup>2</sup>(17%) 작았다. 반면 전체 북반구 눈 덮임 면적은 1,674km<sup>2</sup>로 1967년 이후 8번째로 낮은 수치이며 장기 평균보다 147km<sup>2</sup> 작았다(그림 19 참고).

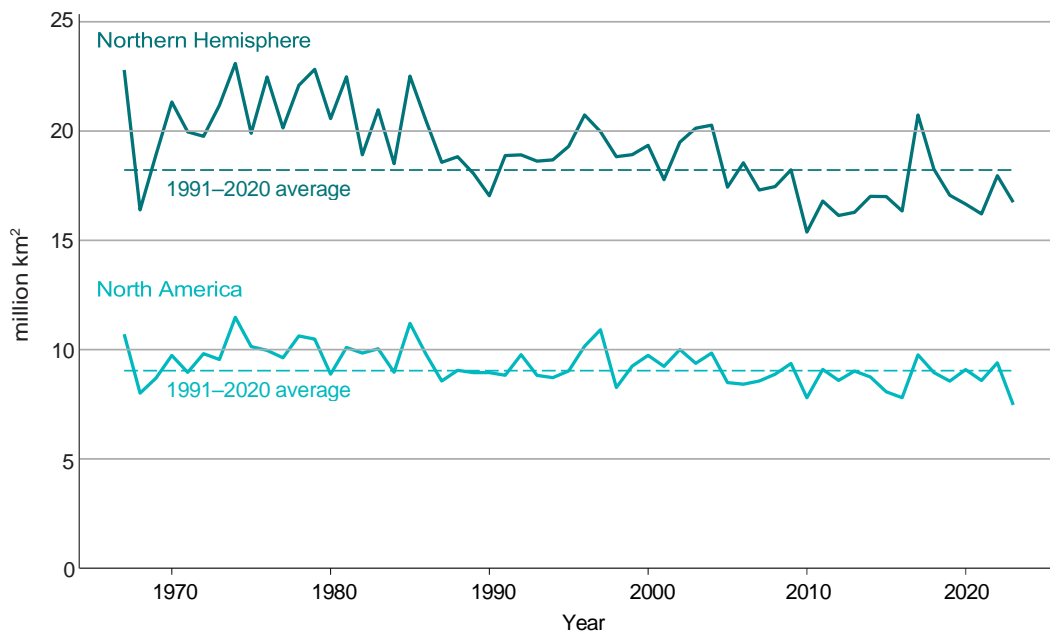


그림 19. 1967-2023년, 5월 북반구 눈 덮임 면적(진한 파란색)과 북미 눈 덮임 면적(밝은 파란색). 각 지역의 1991-2020 평균은 수평 점선으로 표시.

출처: Data from the Rutgers University Global Snow Lab<sup>57</sup>.

# 기후 모니터링 및 재생 에너지

Hamid Bastani 및 Roberta Boscolo

재생에너지 생산은 주로 태양복사, 바람, 물 순환의 역학적 힘에 의해 기인하며, 탈탄소 목표 달성을 위한 잠재성으로 인해 기후행동의 최전선에 서게 되었다. 전 세계적으로 상당한 에너지 전환이 진행되고 있다. 2023년에 재생에너지 용량은 2022년과 비교하여 거의 50%이상 추가 되어 510GW에 달했다.<sup>58</sup> 이러한 성장은 지난 20년 동안 관찰한 것 중 가장 높은 비율을 기록했으며, 국제에너지기구(IEA)에 따르면 이는 제28차 기후변화회의(COP 28)에서 2030년까지 전 세계 재생에너지 용량을 세 배로 늘려 11,000GW에 도달하기 위한 청정에너지 목표를 달성할 수 있는 잠재성을 보여 주는 것이다.<sup>59</sup>

이 거대하고 빠른 재생에너지 전환의 시대에 기후 변동성과 재생에너지 사이의 중요한 연계성을 이해하는 것이 아주 중요하다. 기후가 재생 에너지 가용성과 수요에 어떻게 영향을 미치는지를 종합적으로 이해하는 것은 에너지 자원의 운영과 계획, 투자 최적화에 필수적이다. WMO와 국제재생에너지기구(IRENA)에서 최근 공동으로 발간한 [2022년 리뷰: 기후에 의한 글로벌 재생에너지 잠재 자원 및 에너지 수요](#)는 재생에너지 자원과 기후 조건 사이의 본질적 연계성을 강조하고 있다. 이 보고서는 특히 에너지 접근성이 주요 우선순위인 아프리카 등 개발도상국에서 청정 에너지 시스템을 개발할 수 있는 잠재력을 강조하며, 에너지 자원의 운영, 관리, 계획을 개선하기 위해 기후 변동성을 더 잘 고려할 것을 촉구한다.

기후 변동성을 고려하는 것이 중요하다는 것은 그림 21에서 확인할 수 있는데, 이 그림은 2022년 보츠와나, 모잠비크, 나미비아, 남아프리카, 짐바브웨의 월별 에너지 공급과 수요 이상치를 1991-2020년 기준 기간의 평균과 비교하여 보여준다. 이러한 이상치(아노말리)는 풍력발전, 태양광 발전, 수력 발전의 대리 지표로서 가중된 총 강수량, 에너지 수요의 대리 지표로서 에너지 정도 일수(degree days)의 용량 계수<sup>60</sup>로, 네 가지 정의된 에너지 지표로 측정된다.

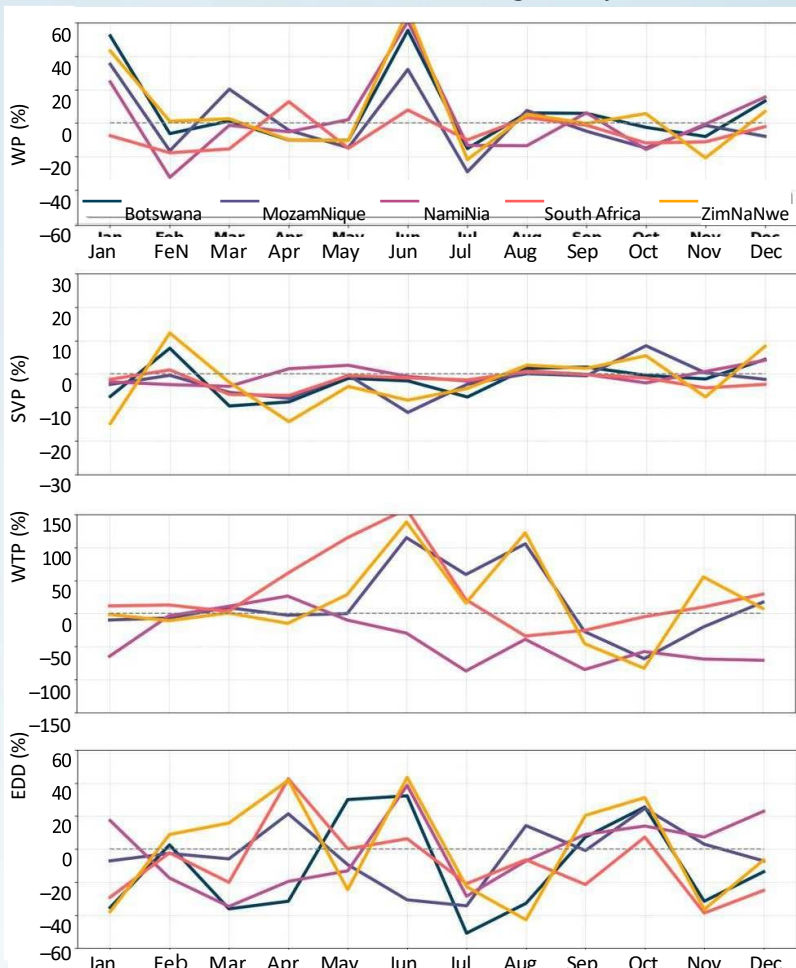


그림 해석 방법을 설명하기 위해 10월을 예로 들면, 이 시기에 다섯 국가 모두에서 에너지 수요가 평균보다 5~30% 높으며 잠재적 발전량의 상당 부분이 평균보다 낮다(모잠비크와 짐바브웨의 태양광 발전, 짐바브웨의 풍력 발전에서의 소폭 증가 제외). 이러한 상황에서는 전력 균형을 맞추기 위한 신중한 계획이 필요하다. 예를 들어, 다음 우기(일반적으로 10-11월에 시작)전에 이전 우기(일반적으로 5월 종료) 동안 수력 발전 댐에 충분한 물을 확보하는 것이 필요하다.

지표에 대한 보다 자세한 정보 및 다른 지역과 전 세계 결과에 대한 추가적인 설명은 [publication](#)을 참조하기 바란다.<sup>61</sup>

**그림 20.** 범례에 표시된 대로 아프리카 남부에 있는 5개국에서 1991-2020년 기준 기간의 해달 월에 대하여 4가지 에너지 지표인 풍력(WP), 태양광(SPV), 가중치를 둔 총 강수량(WTP)(수력 대리 지표), 에너지 정도 일수(EDD)(에너지 수요 대리 지표)의 2022년 월간 비율 이상치. 보츠와나는 수력발전소가 없어 해당 지표는 산정되지 않았고, Y 축은 지표의 범위에 따라 다양함을 주의하길 바람

출처: WMO-IRENA

## 성층권 오존 및 오존 파괴 기체

몬트리올 의정서의 성공 이후, 할론과 염화불화탄소(CFS)의 사용이 중단된 것으로 보고되었지만 이들의 대기 중 농도는 계속 모니터링 되고 있다.<sup>62</sup> CFS의 긴 수명 때문에 이러한 화합물들은 수십년 동안 대기 중에 남아 있을 것이며, 새로운 배출이 없더라도 현재 남아 있는 염소와 브롬의 양은 8월부터 12월까지 남극의 오존을 완전히 파괴시킬 수 있을 정도로 충분한 양이다. 그 결과, 남극 오존 구멍의 형성은 연례적인 봄철 이벤트로 계속되며, 그 크기와 깊이의 연도별 변동은 대기 조건에 크게 좌우된다. “구멍”은 엄밀히 말하면 구멍이 아니라 성층권의 전체 오존 층이 220 톱슨 단위 이하로 떨어지는 영역을 말한다.<sup>63</sup>

2023년, 오존 구멍의 발달은 이례적으로 일찍 시작되었고, 위성 기록이 시작된 이래 여섯 번째로 큰 규모가 되었다. 미항공우주국(NASA)<sup>64</sup>과 코페르니쿠스대기모니터링서비스(CAMS)<sup>65</sup>의 분석에 따르면, 9월 21일에 오존 구멍은 2,600만km<sup>2</sup>으로 확장되어(그림 20 참고), 이전 2년(2021년과 2022년)과 비슷하고 2015년의 2,820만km<sup>2</sup>와 2006년 2,960만km<sup>2</sup>과 같이 초기에 관측되었던 최대치에 가까운 수치였다. NASA는 2023년 10월 3일 최저 오존 농도가 99 톱슨이었다고 보고했다. 오존 구멍의 면적은 10월초까지 일반적인 방식으로 감소했음에도 불구하고 월말로 가면서 다시 증가하였고 12월 첫째 주까지 1,500만km<sup>2</sup> 정도를 유지했다. 2023년의 오존 구멍은 이례적으로 오래 지속되었지만, 그 지속 시간은 지난 3년간의 오존 구멍과 비슷했다.

지난 3년동안 오존 구멍이 이례적으로 지속된 것은 성층권 온도가 평균 이하였고 12월까지 극 소용돌이가 강하게 지속되었기 때문이다. 관측된 강한 극 소용돌이의 여러 잠재적 원인으로 훈가통가-훈가 하파이 화산 폭발로 인해 성층권으로 수증기 주입, 남반구 바람 패턴, 기후변화 등이 식별되었다.

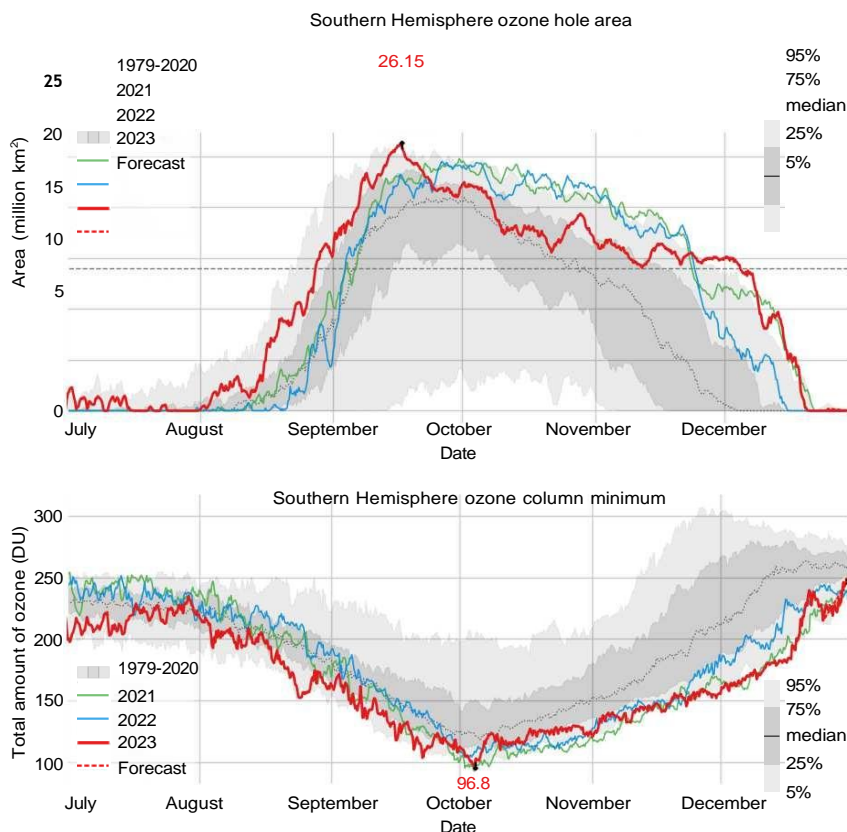


그림 21. 총 오존층이 220 톱슨 이하로 내려간 면적(백만km<sup>2</sup>) 및 최저 오존량이 빨간색으로 나타남. 완만하고 두꺼운 회색선은 1979-2020년 평균을 나타냄  
출처: 코페르니쿠스 대기 모니터링 서비스(CAMS)

## 단기 기후 동인

2020년 중반부터 2023년 초까지 지속된 라니냐가 엘니뇨로 전환되었고, 2023년 9월까지 엘니뇨가 자리 잡으면서 2023년 동안 관측된 전 세계 평균 해수면 온도 상승에 기여하였다.

종종 기후 패턴이나 기후 모드라고 불리는 다양한 자연 현상은 수 일부터 수 개월, 심지어 수 년에 이르는 시간 규모로 날씨와 기후에 영향을 미친다. 2023년에는 엘니뇨 남방진동(ENSO), 인도양 쌍극자(IOD), 북대서양 진동(NAO)이 전 세계 넓은 지역에 걸쳐 주요 기상 및 기후 현상에 기여하였다.

### ENSO – 엘니뇨 남방 진동

ENSO는 전 세계 기상 패턴에 연도별 변동성에 가장 중요한 기후 요인 중 하나로, 호우, 홍수, 가뭄, 폭염, 한파와 같은 재해와 연결되어 있다. 엘니뇨는 동부 열대 태평양에서 평균보다 높은 해수면온도와 무역풍의 약화를 특징으로 가지고 있으며 보통 전지구 온도 상승에 영향을 미친다. 라니냐는 중부 및 동부 열대 태평양에서 평균보다 낮은 해수면 온도와 무역풍의 강화를 특징으로 가지며 엘니뇨와 반대의 영향을 미친다.

2020년 중반에 시작된 다년간의 라니냐는 2023년 초에 끝이 났다. 그 후 동부 열대 태평양의 해수면 온도는 상승하였고 6월까지 일반적인 엘니뇨 임계값(그림 22에서  $0.5^{\circ}\text{C}$ )을 넘었다. 그러나 대기는 천천히 반응하여 엘니뇨가 대기과 해양 모두에서 확실히 자리 잡은 것은 9월 초 이후였다. 연말까지 강한 엘니뇨가 지속되었고 11월에서 1월 사이 해양의 니뇨 지수가  $2.0^{\circ}\text{C}$ 에 도달하여, 2015/2016년 엘니뇨 이후 가장 높은 값을 기록했다.

엘니뇨는 지역 강수 패턴에 영향을 미친다. 일부 지역에서는 강수 이상치(아노말리)는 엘니뇨의 일반적 현상으로, 해양 동남아시아와 멕시코 남부부터 남아메리카 북부까지의 지역에는 평소보다 건조한 현상이, 칠레 일부에는 평균보다 많은 강수가 발생하였다(그림 23 참고).

동남아시아의 몬순 강수량 감소는 엘니뇨와 연관이 있다. 인도의 케랄라 주에서는 몬순 시작이 평소보다 7일 빠른 6월 8일에 시작되었다. 9월 말까지 인도는 일반적인 몬순 강수량의 94%가 내렸으나<sup>66</sup>, 인더스 강 하부와 인도 중부 지역에서는 평균 이상의 강수량이 관측되었다.

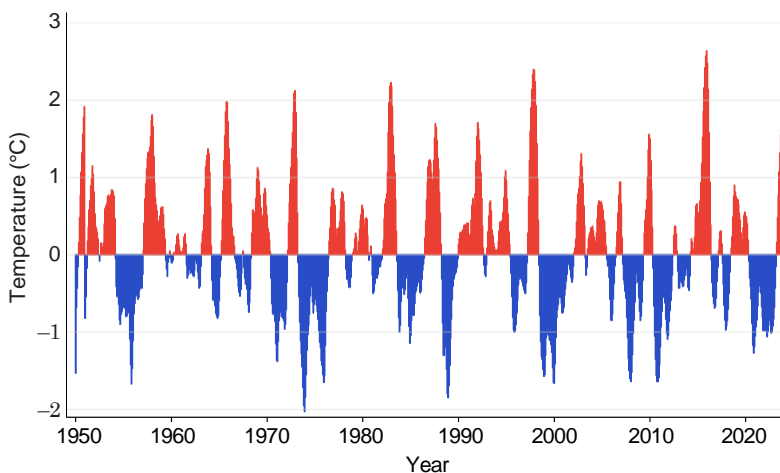


그림 22. 1950년 1월부터 2023년 12월까지 NOAA의 해양 니뇨 인덱스 시계열로 3개월 평균 기간 동안 평균보다 차가운 조건(파란색)과 평균보다 따뜻한 조건(빨간색). 1991-2020년 평균 해수면온도를 기준으로 함

출처: NOAA NCEP

호주에서 라니냐는 평소보다 더 많은 강수량을, 엘니뇨는 평소보다 건조한 조건과 연관이 있다. 1월에는 라니냐가 점차 끝나감에 따라 호주의 강수량이 평년보다 35% 정도 많았으나, 8월에는 엘니뇨가 강화됨에 따라 강수량이 평소보다 50%정도 적었다. 이러한 건조함과 함께 호주는 7-9월 평균 온도가 114년 동안 가장 높았다. 9월은 기록상 가장 건조한 달이었으며, 8월에서 10월까지의 3개월은 124년 관측 기록상 가장 건조한 3개월이었다. 그러나 엘니뇨 현상에서는 다소 이례적으로 호주 동부의 많은 지역에서 11월과 12월이 평년보다 강수량이 많았다.

라니냐에서 엘니뇨로 전환되는 기간동안 전세계 평균 기온 아노말리가 증가하면서 중국 일부, 유럽, 멕시코, 북아프리카, 중동, 시베리아, 남아메리카, 미국을 포함하여 많은 지역에서 폭염이 발생하였다. 유엔환경프로그램(UNEP) 프론티어 보고서<sup>67</sup>에서는 엘니뇨와 관련된 변동성이 생물량 및 화재를 유발하는 날씨에 영향을 미쳐<sup>68</sup> 일부 지역에서는 대형 및 강한 산불의 위험이 증가한다고 강조하였다. 극한 기상 및 기후 이변에 대한 자세한 내용은 [Extreme weather and climate events](#)를 참고할 수 있다.

## 인도양 쌍극자

인도양 쌍극자의 양의 단계는 동부 인도양에서 평년보다 낮은 해수면 온도와 해수면 레벨을 특징으로 하며, 서부 인도양에서는 평년보다 높은 해수면 온도와 해수면 상승을 특징으로 한다. 음의 단계는 이와 반대의 양상을 보인다. 해양 분지 전역에 걸쳐 해수면 온도 변화는 주로 적도 지역과 남반구 주변의 날씨에 영향을 미친다. 양의 인도양 쌍극자는 반드시 그런 것은 아니지만 종종 엘니뇨와 연관이 있고 음의 인도양 쌍극자는 라니냐와 연관이 있다.

엘니뇨 발생과 함께 2019년 이후 첫 번째 양의 인도양 쌍극자 현상은 초봄에 발달하여 2023년 10월에 최고치에 달했다. 양의 인도양 쌍극자는 이 기간 동안 호주 일부 지역을 이례적으로 더 건조하고 따뜻하게 만드는데 기여하였다. 반면, 10월에서 12월 사이 아프리카 뿔 지역의 우기 동안 강수량은 평년보다 훨씬 많아, 에티오피아와 케냐, 소말리아에서는 홍수가 발생하였다. 이 지역은 2022년부터 2023년 초까지 라니냐 현상과 중립에서 음의 인도양 쌍극자 현상이 주로 존재하면서 장기간 가뭄이 지속된 바 있다.

## 북대서양 진동

북대서양의 평균 해수면 기압은 아이슬란드 근처의 저기압 지역인 아이슬란드 저기압과 아조레스 제도 중심의 고기압 지대인 아조레스 고기압이 특징이다. 북대서양 진동(NAO)은 아이슬란드 저기압과 아조레스 고기압 사이의 해수면 기압 차이를 기반으로 한다. 이는 주로 북대서양 분지, 유럽, 지중해의 기상 조건과 연관이 있다. 양의 NAO는 북대서양과 고위도 지역에서 평균보다 낮은 기압, 중앙 대서양과 미국 동부, 유럽의 서부 지역에서는 평균보다 높은 기압이 특징이다. 음의 NAO는 이와 반대 양상을 보인다. 대기의 기압 변화가 NAO의 양 또는 음의 단계를 결정되므로, 해양의 온도에 따라 몇 개월에서 몇 년 주기로 변동하는 ENSO와 같은 다른 기후 동인과는 다르게 NAO는 며칠에서 몇 주 사이에 빠르게 변동할 수 있다.

2023년 6월 말과 7월에 있었던 음의 NAO와 연관된 고기압은 폭염을 발생시켜 남부 그린란드의 눈과 얼음을 상당히 많이 녹였다. 이 기간 동안 여러 차례 광범위한 지역에서 눈과 얼음이 녹았다. 아일랜드는 124년만에, 벨기에의 오랜 역사를 가진 우클(Uccle) 관측소는 191년 만에 가장 따뜻한 6월을 기록하였다. 동부 캐나다의 많은 지역에서도 7월에 기록적인 더위를 보고했다.

## 강수

2023년 누적 강수량은 다음 지역에서 장기 평균보다 높았다: 동아시아와 중앙 아시아, 북부 아시아의 일부 지역, 서부 인도 여름 몬순 지역, 해양 대륙의 일부 지역, 뉴질랜드 북부, 아프리카 서부, 중부, 남부, 동부, 유럽의 서부, 중앙, 동남부, 남부 스칸디나비아, 서부 중동, 북서, 남서 및 동남 북아메리카, 대 안틸레스, 남동 남아메리카의 일부 지역.

남아메리카의 남동 지역, 아마존 분지 및 중앙 아메리카 대부분, 캐나다 남부, 서부 지중해 지역과 남서 유럽, 북서, 중부, 남부 아프리카의 일부 지역, 중앙 아시아 일부 지역, 동인도 몬순 지역, 동남 아시아와 해양 대륙의 일부 지역, 호주 남서 및 연안 북부, 그리고 많은 태평양도서국에서는 강수량이 현저히 부족하였다.

서아프리카 몬순 시작은 평소와 비슷했다. 장기 가뭄을 겪고 있던 아프리카 뿔 지역에는 엘니뇨와 양의 인도양 쌍극자 현상과 관련된 많은 강우가 이어지면서 2023년에 심각한 홍수 피해를 입었다([Extreme weather and climate events](#) 참고).

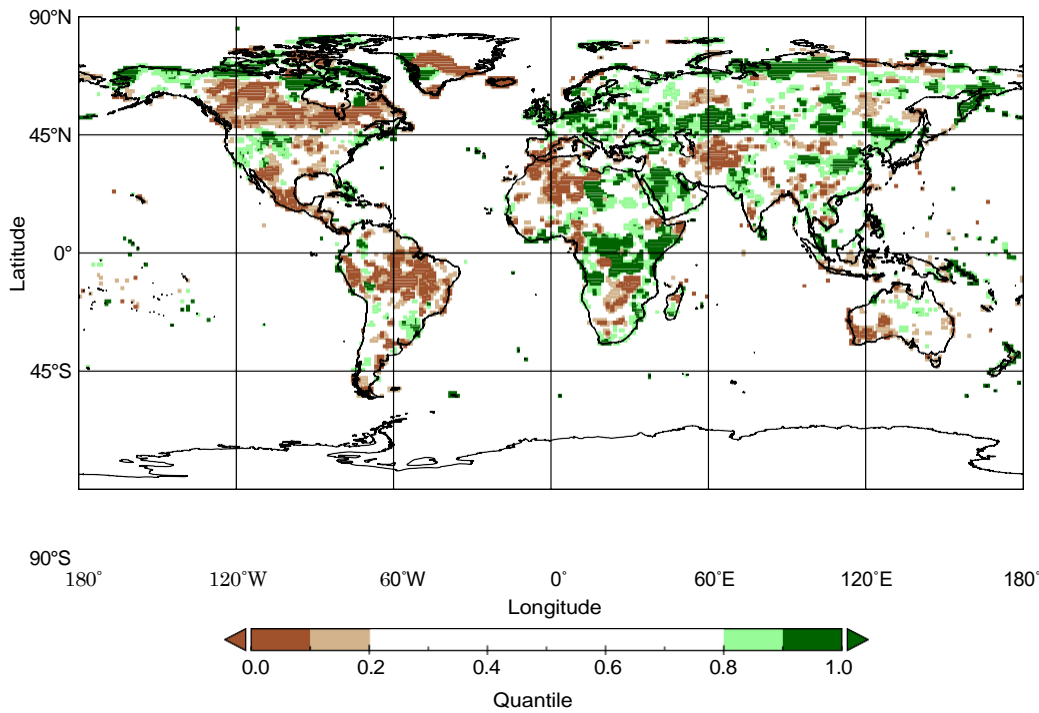


그림 23. 1991-2020년 기준 기간 대비 2023년의 총 강수량 백분위 분포도. 가장 건조한 곳 20%(갈색), 가장 습한 곳 20%(녹색). 갈색과 녹색의 짙은 음영은 각각 가장 건조한 곳 10%와 습한 곳 10% 나타냄

출처: Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), Deutscher Wetterdienst (DWD), Germany. For more details, see [Data set and methods](#)

# 극한 날씨 및 기후 현상

극한 날씨는 계속해서 심각한 사회경제적 영향을 초래한다. 극심한 폭염으로 전세계 많은 곳이 영향을 받았다.

캐나다, 유럽, 미국 하와이에서 일어난 산불로 많은 사람들이 생명을 잃었고, 많은 가정이 파괴되었으며, 대규모 대기 오염이 발생하였다.

지중해 사이클론 다니엘(Daniel)의 많은 강수로 인해 발생한 홍수는 그리스, 불가리아, 터키, 리비아에 영향을 끼쳤고 특히 리비아에서 많은 사상자를 발생시켰다.

극한 날씨와 기상 현상은 2023년 사람이 거주하는 모든 대륙에 큰 영향을 미쳤다. 여기에는 대규모 홍수(이 중 몇 개는 열대저기압과 관련), 극심한 폭염과 가뭄, 이와 연관된 산불이 포함되며 물과 식량 부족과 사람들의 복지에 어려움을 가져왔다.<sup>69,70</sup> 몇 가지 심각한 재해현상에 대해 지금부터 설명하고자 하며, 더 많은 정보는 온라인 첨부문서를 통해 제공되었다.

가장 많은 사상자를 낸 단일 날씨 관련 재해 중 하나로, 9월에 발생한 지중해 사이클론 다니엘(Daniel)이 있다. 다니엘 발생 초기 단계에서는 불가리아 남부와 그리스, 터키 일부 지역에 극한 호우를 가져왔으며, 이때 스페인에서는 다른 폭풍 시스템이 생성되었으며, 아주 많은 집중 호우가 발생하여 곡물생산에 심각한 악영향을 가지고 왔다.<sup>71</sup> 가장 심각한 호우는 그리스의 테살리아 지역에서 아테네 북쪽까지 이어졌으며 펠리온 지역의 자고라 마을에서는 9월 5일 760mm 강수량을 기록했으며, 9월 4일부터 8일까지 5일 동안 총 1,096mm의 비가 내렸다. 또한 불가리아 코스티에서는 9월 4일에서 5일까지 16시간 동안 329mm의 비가 내렸다. 이후 폭풍은 천천히 이동하면서 지중해 동부에서 며칠간 정체하다가 9월 10일, 11일에 리비아 북동부에 많은 비구름을 생성하였다. 극심한 호우는 해안과 인근 산악 지역에 영향을 미쳐, 9월 10-11일 사이 알바이다에서 24시간 동안 414mm의 비가 내렸으며, 이 호우로 인해 그 지역에 심각한 홍수가 발생하였다. 가장 극심한 영향은 데르나(알바이다에서 동쪽으로 50km 떨어진 도시)에서 일어났는데, 두 개의 댐이 붕괴되어 중앙 도시의 대부분이 홍수로 파괴되었다. 리비아에서는 적어도 4,700명이 홍수로 인해 사망한 것으로 확인되었으며<sup>72</sup>, 12월 15일을 기준으로 8,000명이 여전히 실종 상태이다. 불가리아와 그리스에서 19명이 추가로 사망하였다.<sup>73</sup>

2월과 3월에 발생한 열대성 저기압 프레디(Freddy)는 전 세계 역사상 가장 오래 지속된 열대성 저기압이었다. 프레디는 2월 6일에 호주 서부 연안에서 생성되어, 마다가스카르와 모잠비크에 상륙한 뒤, 3월 11일에 모잠비크에 최종적으로 상륙하여 내륙으로 천천히 이동하였다. 프레디의 주요 영향은 마다가스카르와 모잠비크에서 최종 상륙시 발생한 홍수 때문으로, 극심한 호우가 내렸다(모잠비크에 폭풍이 온 동안 672mm의 비가 내림). 말라위와 모잠비크의 일부 지역은 2022년 폭풍으로부터 아직 다 회복되지 않았다. 말라위가 특히 심각한 피해를 입었는데, 최소 679명이 사망하였고 659,000명이 국내에서 이동하였다고 보고되었다. 그리고 모잠비크에서는 적어도 165명이 추가적으로 사망하였다.<sup>74</sup> 마다가스카르와 짐바브웨<sup>75</sup>, 모리셔스 근처 바다에서도 사상자가 발생하였다.

5월에 발생한 열대성 저기압 모카(Mocha)는 벙갈만에서 관측된 사이클론 중 가장 강력한 것 중 하나로, 10분 단위 풍속이 115kt까지 도달하였다. 모카는 5월 11일에 생성된 후 5월 14일에 방글라데시와 미얀마 국경 근처에 상륙하여, 이로 인해 170만명이 스리랑카에서 미얀마로, 인도와 방글라데시의 다른 지역으로 이동하였다.<sup>76</sup> 방글라데시에서는 미얀마 출신 로힝야 난민 900,000명 이상이 거주하고 있는 세계 최대 난민 정착지인 콕스 바자르(Cox's Bazar)에서 이동이 보고되었다<sup>77</sup>. 29,000명 이상의 사람들이 임시로 이동하였다.<sup>78</sup> 총 156명이 미얀마에서 사망하였고<sup>79</sup>, 270,000개 이상의 건물이 손상되거나 파괴되었다.<sup>80</sup> 이미 갈등과 폭력으로 인해 이동한 이주민을 수용하고 있는 캠프에서 최소 63,000건의 이동이 있었다.<sup>81</sup> 사이클론 모카의 영향과 함께 갈등 격화, 사상 최고 수준의 식품 가격 상승으로 인해 인도적 지원이 필요하다고 평가된 340만명의 취약한 사람들을 대상으로 식량 불안이 심각하게 악화되었다.<sup>82</sup>

2023년 경제적 손실이 가장 큰 단일 사건은 허리케인 오티스(Otis)로, 10월 멕시코의 태평양만을 강타한 것이다. 오티스는 10월 24일 UTC 12시에 허리케인급 강도에 도달하여, 15시간만에 5단계 카테고리까지<sup>83</sup> 강도가 높아져 위성 관측 이래 가장 빠른 속도로 변화하였다. 이후 아카폴코 서쪽에 거의 최대 강도로 상륙하여 지속 풍속이 시속 260km에 달하였으며, 멕시코 태평양 만에 상륙한 최초의 5단계 허리케인이 되었다. 이로 인해 아카폴코와 주변 지역에 광범위한 피해가 발생하여 120억 미국 달러의 경제적 손실이<sup>84</sup> 있었다고 추정되었다. 대부분 바다에서 48명 이상이 사망하고<sup>85</sup> 추가로 32명이 실종되었다.

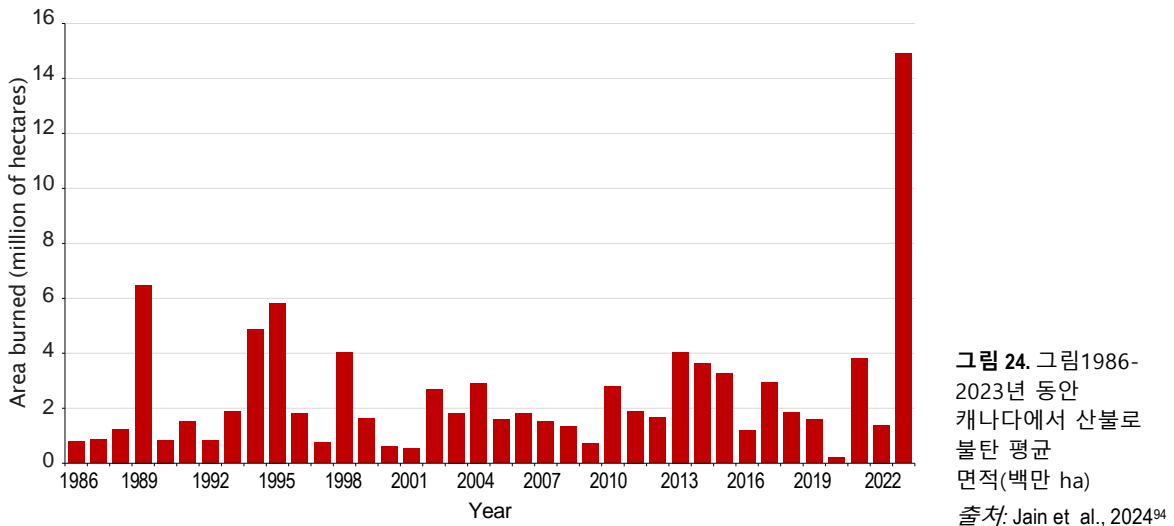
뉴질랜드 북섬은 1월과 2월 사이 빈번하게 발생한 극심한 호우와 홍수로 피해를 입었다. 가장 심각한 사건은 2월 13-14일 허리케인 가브리엘(Gabrielle)이 열대성 시스템 이후(post-tropical system)의 상태로 북섬의 동쪽을 지나가면서 발생하였다. 북섬 동쪽의 일부 지역에서 일강수량이 500mm를 초과하였고 오클랜드에서는 기록상 최저기압(971.5hPa)이 나타났다. 허리케인 가브리엘로 인해 11명의 사망자가 발생하였고, 1월 27-28일에 오클랜드에서 지역적 홍수로 4명이 사망하였다. 이 두가지 사건으로 인한 경제적 손실은 53-86억 미국달러로 추정되며<sup>86</sup>, 뉴질랜드에서 지진이 아닌 재해 중 가장 많은 경제적 손실을 끼친 재해였다.

2023년에 전 세계의 다양한 지역에서 심각한 폭염이 다수 발생하였다. 가장 심각한 것 중 일부는 남부 유럽과 북 아프리카에서 특히 7월 하반기에 심각하게 오랜 기간 지속되면서 발생하였다. 이탈리아는 특히 더 영향을 크게 받았는데, 7월 24일 사르데냐 지역의 로초라이(Lotzorai)와 예르추(Jerzu)는 기온이 48.2°C까지 올라가, 2021년 시칠리아에서 관측된 유럽의 기록적 기온보다 0.6°C 낮은 수치를 기록하였다.<sup>87</sup> 8월 23일, 밀라노 브레라(Brera) 관측소에서는 일평균 기온이 32.98°C로 관측되어 1763년 이후 최고 온도 기록을 세웠다. 기록적으로 높은 온도를 경험한 다른 지역으로는 튀니스(7월 24일에 49.0°C), 티라나(7월 25일에 43.0°C), 모로코 아가디르(8월 11일에 50.4°C), 알제(7월 23일에 49.2°C)가 있다. 폭염은 7월 말 유럽의 남동쪽으로 이동하였고 8월 말과 9월 초에 서-중앙 유럽에 영향을 미쳤다. 프랑스 남부, 스페인 북부, 스위스 서부의 여러 지점에서 이 시기에 기록적인 온도를 경험하였는데, 여기에는 프랑스 툴루즈(8월 23일에 42.4°C<sup>88</sup>)도 포함된다. 또한 여름철에는 특히 그리스(본토 및 섬 모두에서)에서 광범위한 산불도 일어났다. 8월 말과 9월 초 그리스 북동부에서 발생한 산불로 96,000ha가 불타 유럽에서 관측된 것 중 가장 큰 산불로 기록되었다.<sup>89</sup>

2023년 캐나다 산불은 기존에 기록되었던 어떠한 것보다 심각했다. 4월 말에 심각한 산불이 발생하기 시작하여 아주 따뜻하고 건조한 5월동안 그 영역을 확장하였고, 여름과 초가을까지 지속되었다. 2023년 한 해 동안 불탄 영역은 1,490만ha에 달하여 1986-2022년의 장기간 평균에 비해 7배, 이전 기록이었던 1989년의 계절 총합인 670만ha(그림 24 참고)보다 훨씬 많은 영역을 불태웠다. 전체적으로 297번의 대피 명령이 235,000명의 사람들을 대상으로 내려졌다.<sup>90</sup> 또한 산불로 인해 심각한 대기오염이 광범위하게 발생하였고, 특히 캐나다 동부 사람들이 많이 거주하는 지역과 미국 북동부에서 6월 상반기에 발생하였다. 산불로 인해 직접적으로 사망한 사람은 4명이었지만 연기로 인한 광범위한 건강 피해는 아직 완전히 분석되지 않았다.

2023년에 발생한 가장 치명적인 단일 산불 사건은 미국 하와이 마우이 섬의 서쪽에서 일어난 산불이다. 극한 산불이 일어날 수 있는 기상 조건, 습도가 낮고 북쪽으로 강한 고기압과 남쪽으로 허리케인 도라(Dora)의 순환 사이에 발생하는 압력 차이로 인한 강한 돌풍, 그리고 기존의 가뭄이 합쳐지면서 강력한 산불이 빨리 번질 수 있게 하였다. 가장 심각하게 영향을 받은 지역은 라하이나(Lahaina) 주변으로 2,200개 이상의 구조물이 파괴되었다. 지역 내 7,500명의 사람들을

대상으로 대피명령이 내려졌다.<sup>91</sup> 1000명 이상이 사망하여<sup>92</sup> 미국 역사 100년 이상 동안 산불로 인한 사망자 중 최고를 기록하였으며, 400개의 집이 파괴되었고<sup>93</sup>, 56억 미국달러의 경제적 손실이 있었다. 이 정도의 강도와 속도를 가진 산불은 열대지방에서는 아주 드문 현상이다.



아프리카 북서부와 이베리아 반도 일부, 중앙 및 서남아시아 일부에서 장기적으로 가뭄이 지속되었고 중앙아메리카의 많은 지역과 남아메리카 북부, 미국 서부에서는 가뭄이 더 악화되었다. 가뭄으로 인해 가장 크게 영향을 받은 지역으로 아열대 남아메리카가 있고, 아르헨티나 북부와 우르과이에 집중되었다. 북부 및 중앙 아르헨티나 지역에서 1월부터 8월까지의 강수량은 평균보다 20~50% 낮았고, 몇몇 지역은 평균 강수량보다 심각하게 낮은 강수량을 4년 연속 경험하였다. 우루과이는 물 저장량이 심각하게 낮아져, 몬테비데오와 같은 주요 지역에서 공급하는 수질이 크게 악화되었는데, 다행히 8월부터는 상황이 조금 개선되었다. 2023년 하반기에 들어 아열대 남아메리카의 가뭄 상황이 조금 완화되기는 했으나, 아마존만의 많은 지역을 포함하여 대륙의 내부에서는 여러 곳에서 상황이 악화되었다. 브라질의 8개 주에서는 지난 40년 동안 가장 낮은 7-9월 강수량을 기록하였다. 마나우스에 있는 리오네그로(Rio Negro)는 10월 26일에 1902년 관측을 시작한 이후 가장 낮은 강수량으로 2010년의 이전 기록보다 0.93m 낮은 수치를 기록하였다.<sup>95</sup>

장기간 가뭄을 겪고 있는 아프리카 뿔(Greater Horn of Africa) 지역은 엘니뇨와 양의 인도양 쌍극자(IOD)와 연관된 많은 비가 온 후 2023년 하반기에 심각한 홍수로 고통을 겪었다(Short-term climate drivers 참고). 가장 심각한 피해를 겪은 곳은 남동부 에티오피아와 북동부 케냐, 서부 소말리아 지역 주위이다. 10월과 11월 Deyr 우기 동안 이 지역의 평균 강수량은 100~200mm이고, 지역적으로는 200mm를 초과하여, 장기 평균보다 몇 배가 많았다. 세 국가에서 적어도 352명의 사망이 보고되었다.<sup>96</sup> 브룬디, 에티오피아, 케냐, 소말리아, 남수단, 우간다, 탄자니아를 걸쳐 광범위하고 심각한 홍수로 인해 180만명이 이주하였는데,<sup>97</sup> 여기에는 지부티, 에티오피아, 케냐, 소말리아에서 5년동안 지속된 가뭄으로 국내 또는 국경을 넘어 300만명의 사람들이 벌써 이동하고 있었다<sup>98</sup>. 이곳의 습한 상황은 장기간 가뭄으로 피해를 입은 목축과 곡물 상황을 다소 회복시켰다. 12월 초 산사태와 홍수로 탄자니아 북부에서 적어도 89명이 사망하였다.<sup>99</sup> 목축업은 2년 연속 가뭄으로 인해 재산 손실로 계속해서 영향을 받았으며 농업 생산량이 계속해서 피해를 입어 2022년에 비해 2023년에 곡물 생산량이 감소되었다.<sup>100</sup>

# 사회경제적 영향

기상 및 기후 재해가 전 세계 여러 지역에서 상황을 더욱 악화시키면서 식량안보, 거주민 이동, 취약계층에 미치는 영향은 2023년에도 지속적으로 큰 문제였다.

극한 기상 및 기후 조건은 2023년에도 새롭고 오래 지속되는 이차적 인구 이동을 가지고 왔으며 여러 요인의 복합적인 이유로 갈등과 폭력에 의해 이미 떠밀려 있던 많은 사람들의 취약성을 증가시켰다.

재난 위험 저감을 위한 샌다이 체제가 채택된 이후 지역 재난 위험 저감 전략의 개발과 실행이 증가하였다.

재해 영향을 줄이기 위한 핵심 요소 중 하나는 효과적인 다중 재해 조기 경보 시스템을 구축하는 것이다.

위에서 설명한 사건들과 그 외 많은 사건들은 보다 넓은 맥락에서 발생한다. 극한 날씨와 기후 현상은 물과 식량 안보, 인구 이동, 환경 파괴와 관련된 상황과 상호 작용하며 경우에 따라 이러한 상황을 유발하거나 악화시키기도 한다.<sup>101,102</sup>

## 식량 안보

식량 부족을 심각하게 겪고 있는 전세계 인구의 수는 코로나 팬데믹 이전 149백만 명에서 2023년에 333백만명으로 두 배 이상 증가하였다(세계식량프로그램(WFP)에서 모니터링하고 있는 78개국 대상).<sup>103</sup> 전 세계 기아 수준은 2021-2022년 동안 변하지 않았으나 여전히 코로나 팬데믹 수준 이전보다는 높은 수준으로, 2019년 전 세계 인구의 7.9%(612.8백만명)가 영양 부족이었던 것에 비해 2022년에 전 세계 인구의 9.2%(735.1백만명)가 영양 부족 상황이었다(그림 25 참고).<sup>104</sup> 현재 전 세계 식량 및 영양 위기는 현대인의 역사상 최대 규모이다.<sup>105</sup> 지속적인 충돌, 경제 침체, 높은 식품 가격이 전 세계 식량 불안정이 높아진 근본적인 이유이다. 농업 부문의 높은 비용은 전 세계적으로 지속되고 있는 대규모 갈등으로 인해 농업 투입 비용이 높아지면서 악화되었으며, 극한 기상 및 기후 현상의 영향으로 전 세계 높은 식량 불안정이 더 커졌다. 일례로 남아프리카는 2023년 2월 사이클론 프레디와 같은 극한 현상이 발생하여 마다가스카르, 말라위 남부, 모잠비크, 짐바브웨 지역에 큰 영향을 미쳤다. 사이클론에 의해 발생한 홍수로 농경지역이 광범위하게 물에 잠기면서 곡물에 심각한 피해를 발생시켜 느린 경제 회복을 악화시켰다.<sup>106</sup>

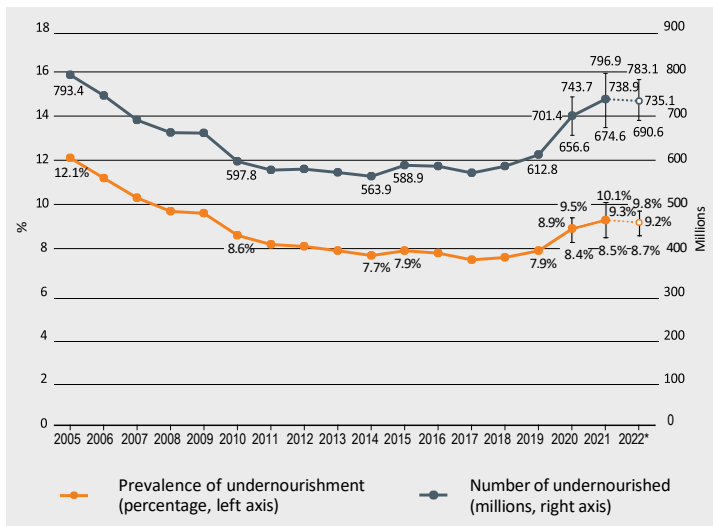


그림 25. 2005년 이후 전세계 영양부족 만연도(%) 및 영양부족 인구수(백만명)

출처: *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, Agrifood Systems Transformation and Healthy Diets Across the Rural-Urban Continuum*<sup>107</sup>의 발간 이후 수집한 정보를 반영하여 업데이트 함

전 세계적으로 2000년대 이후 기상 및 기후 재해로부터 발생한 연간 경제적 손실은 계속해서 증가하였다.<sup>108</sup> 2007년과 2022년 사이 재해가 발생한 이후 필요성 평가 조사가 60개국에서 88개 재해에 대해 실행되었으며, 그 결과 가뭄에 의해 발생한 손실의 65%가 곡물과 가축 생산 손실을 포함하여 농업 분야에서 나왔다고 밝혔다. 홍수, 폭풍, 사이클론의 경우 손실의 20% 가량이 농업에서 나타났다.<sup>109</sup>

2023년 초, 남수단은 건기에도 수위가 높이 유지되는 극심한 홍수를 겪었다. 상대적으로 지역의 건조한 상황에도 불구하고 나일강 상류에서 흘러 들어오는 많은 양의 물과 이미 발생했던 홍수로 인해 배수가 느리게 진행됨에 따라 홍수가 지속되었다. 지속되는 홍수로 인해 사람들은 식량과 깨끗한 물, 의료와 같은 생활 필수품에 접근하기가 어려워져 지역 생계가 거의 무너지게 되었다. 2023년 4월과 7월 사이에 남수단 전체 인구수의 2/3에 해당하는 7.8백만 인구가 심각한 식량 부족에 시달린 것으로 예측되었다.<sup>110</sup>

아프가니스탄에는 눈이 녹거나 비가 내린 양이 현저하게 줄어들어 또다시 작황이 부진한 시기를 보냈다. 이로 인해 특히 북부와 북동부 지역에서 심각한 식량 부족이 광범위하게 발생하였다. 2023년 5월과 10월 사이 심각한 식량 부족에 직면한 아프가니스탄 국민의 수가 15.3백만명일 것으로 예상되었다.<sup>111</sup> 예멘은 2022년 10월부터 12월까지 53%의 인구가 심각한 식량 부족 또는 그 이상으로 분류되었다. 높은 식품 가격과 연료 가격, 그리고 2023년 3월부터 9월까지 지속된 홍수와 장기적인 갈등으로 인해 식량 불안정은 더 악화되었다.

인도네시아는 엘니뇨와 양의 인도양 쌍극자(IOD) 모드([Short-term climate drivers](#) 참고)와 관련된 기상학적 가뭄이 건기에 발생하여 2023년 8월까지 쌀 재배지 23,450ha에 영향을 주고 6,964ha에서 작물 수확 실패가 발생하였다. 2023년 10월까지 쌀 생산이 645,000톤 감소할 것으로 예측되었고<sup>112</sup> 2023년 후반기에 작물 재배가 지연되었다.

2023년, 브라질에서 기록적인 옥수수 생산이 달성됨에 따라 남아메리카, 특히 아르헨티나에서 오랜 가뭄으로 인해 지난 5년 평균 대비 곡물 생산량이 15% 감소할 것으로 예상되는 등 수확량이 평균 이하로 된 경우를 어느 정도 메꾸었다. 2023년 엘니뇨가 돌아오면서 중앙아메리카와 남아메리카 북부 지역의 전체 옥수수 생산 주기에 악영향을 가져왔다. 이 지역에서는 물 부족과 고온으로 인해 식물 재배 면적과 수확량이 줄어들어 마지막 생산 과정에 악영향을 주었고 특히 건조 지대(Dry Corridor)에 거주하는 더욱 취약한 가구와 소작농에게 부정적인 영향을 미쳤다. 이 계절의 후반부에는 열대성 폭풍과 예상치 못한 폭우가 발생하여 중앙아메리카 태평양 연안 근처 특정 지역의 일반적인 곡물 생산을 방해하였다. 아이티에서는 고강도 강우 기간과 같은 불규칙한 계절성 강우로 인해 주요 곡물의 생산성을 감소시켰다.<sup>113</sup>

전 세계적으로 가장 가파른 곡물 생산량 연간 감소율이 보인 곳은 오세아니아로 2022년 대비 2023년에 31.1%가 감소하였다. 그러나 이는 2022년에 이례적으로 높은 생산을 하여 평균에 가까운 수치로 돌아온 것을 의미하며 2023년에는 5년 평균에 비해 조금 감소한 수준이다.<sup>114</sup>

9월에 폭풍 다니엘은 리비아의 해안 지역과 북동부 지역에 폭우를 발생시켜 특히 알 마르지와 데르나 지역에서 3,000ha에 가까운 논밭이 침수되었다. 이 지역은 리비아 동부의 주요 농지 지역으로 생계의 주요 원천이 되는 곳이다. 데르나 댐이 붕괴됨에 따라 관개 시스템이 영향을 받았고 홍수가 발생하여 도로와 곡물 저장고, 전체적인 시장 유통로를 훼손함에 따라 농식품 가치사슬의 많은 부분에 영향을 주었다. 유엔식량농업기구(FAO)의 세계정보조기경보시스템(GIEWS)에 따르면, 리비아는 홍수 발생 이전인 2023년 7월에 이미 식량 위기 상태로 외부의 지원이 필요했다.<sup>115</sup>

## 이동

전 세계에서 국내 이동 인구, 난민, 이주민을 포함한 수백만명의 사람들은 기후 스트레스와 충격, 더욱 악화된 재해로 인해 거주지와 지역사회에서 강제로 떠나야 했거나 혹은 현재 이동 중이다. 기상 재해는 2023년에도 신규의 지속적이고 이차적인 이동을 유발하였고, 복잡하고 다양한 원인에 의한 갈등과 폭력 상황으로 이미 떠나야 했던 많은 사람들의 취약성을 증가시켰다. 이러한 추세는 기후 충격과 스트레스에 대한 취약성이 회복력을 약화시키고 새로운 보호 위험을 만들어내고 있음을 명백히 보여주는 것으로, 이는 지속가능발전목표(SDG) 달성을 위협하는 것이다.

이집트, 이라크, 요르단, 레바논, 시리아에서 난민 또는 국내 이동 인구 3,400백만명(추정치)이 2023년 극한의 겨울에 대응하기 위해 많은 지원을 필요로 하는 상황에 있었다.<sup>116</sup> 시리아 북서부에서 1월과 3월 사이에 눈폭풍과 홍수로 인구 이동이 유발되어, 이미 국가의 장기적 갈등으로 내몰려 있던 많은 사람들이 반복적으로 이동을 해야 하는 상황이었다. 마찬가지로 예멘에서도 4월에 폭우가 내려 국내 이주민을 위한 마리브 일부 지역이 파손되었고, 수십 명의 사상자가 발생하였다.<sup>117</sup>

소말리아로 들어오는 많은 이주민들은 2023년 6월과 7월에 아덴 만을 건너기에 더 좋은 날씨를 기다리면서 예멘으로 건너가기 위한 주요 연안 통로인 보사소(Bossaso)시에 갇혀 있었다. 하르게이사(Hargeisa)에서는 다른 곳으로 이동하기 위한 이주민 단체가 극심한 폭염에 시달려 그 중 일부는 탈수로 사망하는 일이 발생하였다.<sup>118</sup>

2023년에 고-영향 재난에 의해 발생한 새로운 이동에 더하여, 사람들은 전년도에 발생한 기후 관련 이동의 지속적인 영향으로 여전히 고통을 받고 있는 중이다. 파키스탄에는 2022년 몬순 홍수로 금 세기 가장 큰 재난에 의한 이동이 일어났으며, 2023년에도 장기간 지속되는 영향을 계속 겪고 있다. 이주 커뮤니티는 여전히 2023년 6월에 호우가 발생하였을 때에도 여전히 회복중인 상황이었고 홍수로 수인성 질병 및 벡터 매개 질병이 발생하였다.<sup>119</sup>

기후변화와 환경 오염으로 인한 이동은 보통 다양한 원인에 의한 것이다. 사람들은 대부분 사회적, 정치적, 경제적, 환경적, 그리고 인구 통계적 요인의 조합으로 인해 이동을 하게 되고, 이 모든 상황은 기후와 환경 변화에 의해 영향을 받고 있으며 또한 앞으로도 계속 영향을 받을 것이다. 소말리아에서만 2023년에 주로 갈등으로 인해 653,000명의 사람들이 이동한 것에 더해 지속되는 가뭄으로 약 531,000명의 사람들이 이동하였다.<sup>120</sup> 10-12월 우기 동안 발생한 홍수로 인해 240만명 이상의 사람들이 영향을 받았으며, 100만명 이상의 사람들이 이동하였다.<sup>121</sup> 폭풍 다니엘(Daniel)로 인해 리비아 북동부에서 약 45,000명이 이동했다고 추정된다.<sup>122</sup> 또한, 와디 데르나(Wadi Derna)와 인접한 저지대에 상당 수의 이주민이 거주하고 있어, 홍수로 인해 그들의 정착지 중 많은 곳이 파괴되어 많은 사람들이 희생되었을 것으로 우려된다.<sup>123</sup>

기후와 관련된 충격과 스트레스는 이주와 이동이라는 맥락에서 사람들의 생계에 영향을 미치고 이는 가난(SDG 1번)<sup>124</sup>과 기아(SDG 2번)<sup>125</sup>를 더욱 악화시키고, 생명과 복지(SDG 3번)<sup>126</sup>에 직접적인 위협을 가하며, 불평등 격차(SDG 10번)<sup>127</sup>를 더욱 넓히고, 양질의 교육(SDG 4번)<sup>128</sup>과 물과 위생(SDG 6번)<sup>129</sup>, 깨끗한 에너지(SDG 7번)<sup>130</sup>에 대한 접근을 제한한다. 여성과 소녀들(SDG 5번)<sup>131</sup>은 이미 존재하는 성 불평등과 사회경제적 불평등으로 취약성이 증가함에 따라 가장 심각한 피해를 입는다.<sup>132</sup>

이러한 문제들에 대비하기 위하여, 정부와 지역사회, 시민사회, 유엔에서는 모든 단계에서 기후 회복성을 강화하고 효율적인 재난 위험 저감을 강화하고자 노력하고 있다. 지역사회에 높은 우선순위를 두어 조기경보체제와 비상대비를 포함한 사전대응 노력을 가속화하고 있다.<sup>133</sup> 총 126개 국가에서 재난위험 관리전략을 보유하고 있으며, 이 중 99개국은 지역 정부가 재난위기 저감 전략을 가지고 있다고 보고했다. 지역 재난위험 저감 전략의 구축과 실행은 2015년 재난위기저감을 위한 샌다이 프레임워크가 채택된 이후 증가되어 왔다.<sup>134</sup>

재난의 영향을 줄이기 위한 핵심 구성요소 중 하나로 효과적인 다중재해 조기경보 시스템(MHEWS)를 가지는 것이고, 이를 위해 재난위험 정보 생산, 조기 경보 생성 및 배포, 경보에 대한 대응 계획 마련의 시스템을 구축하는 것이다. 2023년까지 전 세계 국가의 절반 이상인 102개 국가들이 다중재해 조기경보 시스템을 보유하고 있다고 보고하였다. 모두를 위한 조기경보 이니셔티브는 2022년 3월 UN 사무총장이 시작하였으며 2027년 말까지 생명을 구하는 조기 경보 시스템을 통해 지구상의 모든 사람들이 날씨와 물, 기후와 관련된 재해로부터 보호받는 것을 목표로 한다.

# 기후 금융 현황

## 기후 정책 이니셔티브

2021-2022년에<sup>1</sup> 전지구 기후 재원은 약 1.3조 미국달러(USD)에 이르러 2019-2020년 수준의 두 배에 달했다(그림 26). 이러한 상승은 주로 2019-2020년 대비 4,390억 미국달러까지 완화 자금이 대규모 증가한 것에 의한 것이다. 2021-2022년에 관측된 상승의 나머지는 *Global Landscape of Climate Finance*에 사용된 방법론 개선과 여기에 사용된 추가 데이터 소스에서 비롯되었다. 기후 금융의 이러한 성장 동력에도 불구하고 추적된 자금은 전 세계 국내 총생산(GDP)의 약 1%에 불과했다.

추적된 기후 금융 흐름과 필요액의 예상치를 비교하면 상당한 자금 공백이 드러난다. 평균 시나리오<sup>2</sup>에서 1.5°C 경로를 위해 연간 기후 금융 투자는 6배 이상 증가하여 2030년까지 약 9조 미국달러까지 늘어야 하고, 2050년까지는 추가로 10조 미국 달러가 필요하다.

자금의 공백이 크긴 하지만, 기후 비행동의 비용은 더 크다<sup>3</sup>. 2025-2100년 기간 동안 종합적으로 보면 기후 비행동의 총 비용은 1,266조 미국 달러로 예상되며, 이는 온실가스 배출을 규제하지 않는 시나리오(BAU)<sup>4</sup>와 1.5°C 경로 사이에 발생하는 손실의 차이이다. 그러나 이 수치는 실제 비행동의 비용을 과소 평가한 것으로 여겨진다. 그 이유는 자연 및 생물 다양성의 손실, 갈등과 이주로 인한 손실과 같은 다른 요인들에 의한 손실을 고려하고 있지 않기 때문이다. 실제로 비행동의 비용은 불충분한 완화와 적절하지 않은 적응으로 인해 더욱 증가할 전망이다.

전 세계 기후 금융의 흐름을 세분화해 보면 분야 및 지역에 걸쳐 성장이 부족하고 일관되지 않음을 알 수 있다. 2021-2022년 전 세계 기후 금융 증가는 소수의 국가에서 청정 에너지에 많은 투자를 한 것에 주로 기인했다. 중국, 브라질, 유럽, 인도, 일본, 미국에서 자금 증가분의 90%를 받았다. 여러 기후 취약 국가들을 포함한 다른 지역과, 농업 및 산업과 같은 다른 중요한 분야에서는 이들의 중요한 완화 잠재력에 비해 불균형적으로 작은 금융을 받는 상황이다. 게다가 배터리 저장 기술과 수소와 같은 신형 완화 기술은 민간 금융을 조금씩 유치하기 시작해 아직 규모가 확장되지도 않았다.

1 기후 정책 이니셔티브(CPI) 보고서는 (연간) 자료의 변동성을 완화하기 위해 격년 평균을 보여준다.

2 기후 금융의 필요액은 특정 기후의 물리적 자산에 대한 직접 투자를 기반으로 하여 전환과 관련된 화석 연료의 무감소 금융을 제외한 상한, 하한, 평균적 필요액을 포함한 넓은 범위로 추정된다.

3 여기서 기후 비행동은 1.5°C 경로 유지를 실패한 것을 의미하며, 더 자세한 사항은 기후 정책 이니셔티브(CPI), 2024를 참조하기 바란다: The Cost of Inaction, <https://www.climatepolicyinitiative.org/the-cost-of-inaction/#:~:text=CPI's%20estimate%20of%20USD%201%2C266,%2C%20warming%20scenarios%2C%20and%20timeframes.>

4 여기서 BAU 시나리오는 3°C 경로를 의미한다.

**특히 적응 자금의 지연이 우려된다.** 비록 적응 자금이 2021-2022년에 630억 미국 달러로 사상 최고치를 달성했지만, 세계적인 적응 자금의 공백은 크게 확대되고 있어, 개발도상국을 대상으로만 해도 2030년까지 매년 2,120억 미국달러가 필요하다고 추정된다. 추적된 적응 자금은 공공 분야(98%)에서 대부분 사용되고 있으며, 추적(tracking)에 대한 어려움으로 인해 민간 분야가 적응 조치를 어떻게 취하고 있는지에 대해 명확히 파악하는 것이 힘들다. 적응 자금의 대부분이 물과 하수처리에 집중되고 있어, 물 부족에 대한 회복력을 강화하기 위한 노력을 반영하고 있다. 그러나 농업과 같이 적응 잠재력이 넓은 다른 분야들은 계속해서 최소한의 자금만을 받고 있다. 발전 경로에 적응과 회복력을 주류화 하는 것이 특히 고도로 취약한 개발도상국에게 필수적이다.

**앞으로, 모든 분야에서 기후 금융의 양적, 질적 규모 확대를 위한 긴급한 노력이 필요하다.** 더 많고 더 나은 기후 금융을 보장하기 위한 주요 우선 사항으로 저신용 금융과 위험 완화에 중점을 두고 금융 시스템을 전환하는 것, 기후와 개발 필요성을 연결하는 것, 인류와 자연 모두에게 이득을 주는 시너지를 강화하는 것, 정책과 규제 프레임워크 활용에 중점을 두고 국내 자본을 동원하는 것, 그리고 성과를 측정하고 관리하기 위한 고품질, 세분화된 데이터의 가용성과 접근성을 향상시키는 것이 있다.

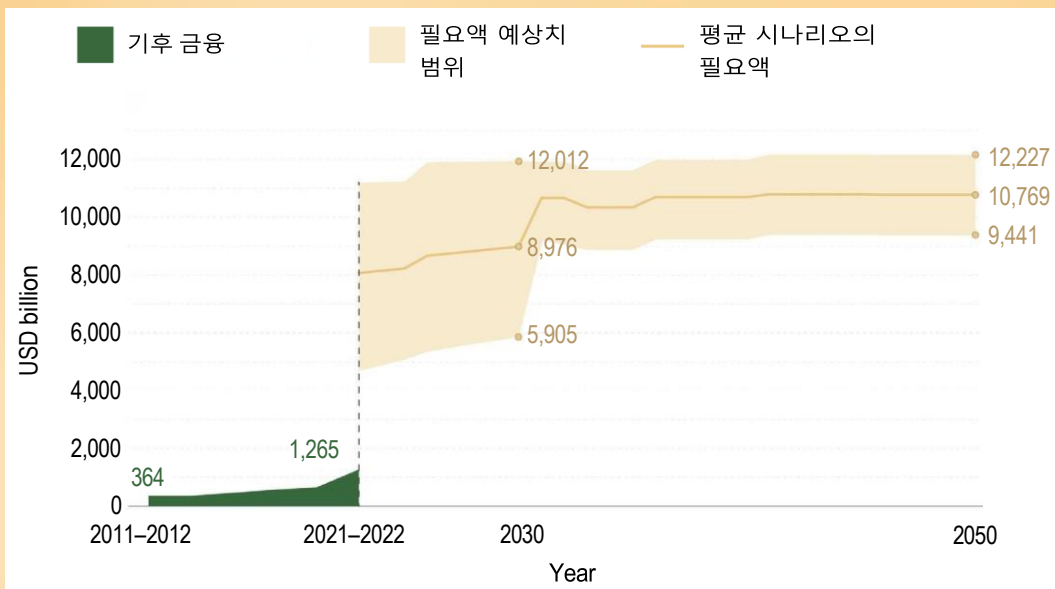


그림 26. 2011-2012년에서 2050년까지 전세계 추적된 기후 금융과 연평균 필요액 추정치

출처: 기후 정책 이니셔티브(CPI)

# 데이터 세트 및 방법

## 온실가스 자료

산업화 이전 상황을 대표하기 위해 1750년부터 농도 추정치를 사용하였다. 계산은 산업화 이전 이산화탄소 몰 분율 278.3ppm, 메탄 몰 분율 729.2ppb, 아산화질소 몰 분율 270.1ppb를 가정하였다.

세계온실가스데이터센터(WDCGG)는 일본기상청(JMA)에서 운영한다. <https://gaw.kishou.go.jp>.

세계기상기구(WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin – No. 19: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations Through 2022*. Geneva, 2023.

## 전지구 온도 자료

### 전지구 평균 기온 시리즈

1850-1900년 기준값 대비 전지구 평균 기온 이상치(아노말리)를 계산하는 방법은 IPCC 제6차 평가보고서의 실무 그룹 I(IPCC AR6 WG I)에서 작성한 장기 변화와 불확실성 평가에 기반한다. 2021년에 IPCC AR6 WG I은 타 기간 대비 1850-1900년 변화를 데이터 세트 4개(HadCRUT5, Berkeley Earth, NOAA Interim, Kadow et al.(2020))의 평균에 기반하여 평가하였고 이 데이터 세트는 1850년에 시작하여 현대까지 전지구 또는 거의 전지구에 가까운 자료를 가지고 있다.

보다 짧은 데이터 세트는 최근의 기온 변화를 더욱 잘 이해하는데 도움이 되며 이 보고서에서 사용된 자료로 1850-1900년과 1981-2010년 사이의 기온 변화를 위해 IPCC가 만든 추정치는 1850-1900년 대비 2023년의 이상치를 계산하기 위해 6개 데이터 세트에서 1981-2010년과 현 연도 사이(관측범위가 좋은 기간)의 변화 추정치를 합친 것이다.

데이터 세트의 분포로 인한 추가적인 불확실성은 1850-1900년부터 1981-2010년까지의 변화에 대한 불확실성을 IPCC가 추정된 것과 합쳐졌다. 전지구 평균 기온 이상치는 다음과 같은 단계를 이용하여 각 데이터 세트에 대한 전지구 월평균 기온에 대한 시계열부터 시작하여 1850-1900년 기준값에 대비하여 계산되었다:

1. 각 데이터세트에서 1981-2010년 매월의 평균을 각각 추출하여 아노말리 계산
2. 월평균 아노말리를 이용하여 연평균 아노말리 계산
3. IPCC AR6 WG I에서 제시한 방법을 이용하여 계산한 1850-1900년 및 1981-2010년 차이 추정치에 기반하여 각 시계열에 0.69°C를 더함(그림 1.12에 제시된 문헌 참고)
4. 추정치 평균 및 표준 편차 계산
5. IPCC 추정치와 표준 편차가 서로 독립적이며 IPCC 불확실성 범위(0.54°C – 0.79°C)가 90% 신뢰구간(1.645 표준 편차)을 대표한다고 가정하여 IPCC 추정치에 표준 편차를 더함

이 보고서에서 2023년 수치로 언급된 것( $1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$ )은 이러한 방식으로 계산되었으며, 7개 추정치의 평균은  $1.45^\circ\text{C}$ , 표준 편차는  $0.03^\circ\text{C}$ 이다.

### 연간 기온 지도

2023년 기온 아노말리 지도에서 6개 데이터세트의 중앙값이 사용되었고, 위경도가  $5^\circ$ 로 해상도가 가장 낮은 데이터세트(NOAAGlobalTemp, HadCRUT5)의 공간 격자로 재구성하였다. 중앙값은 개별 격자에서 잠재적인 이상치를 최소화하기 위한 방법으로 사용되었다. 데이터세트 범위의 절반은 불확실성을 제시하고 있고, 데이터가 잘 없는 지역인 고위도 및 중앙 아프리카 지역에서 데이터세트 간 차이가 가장 컸다.

### 타 기간 대비 2023년 전지구 평균 기온 이상치(아노말리)

표 1은 4개의 기준값에 대해 2023년 개별 데이터세트의 전지구 평균 기온 아노말리를 나타낸다. 3개의 현대 기준값(1981-2010, 1991-2020, 1961-1990)에서 나타난 불확실성은 가용한 추정치에 1.645를 곱한 표준편차로 불확실성 90% 범위를 나타낸다.

표 1. 4개 기준값에 대한 2023년 개별 데이터세트의 전지구 평균 기온 아노말리

Period	1850–1900	1981–2010	1991–2020	1961–1990
HadCRUT5	1.44	0.75	0.56	1.09
NOAAGlobalTemp	1.43	0.74	0.55	1.05
GISTEMP	1.44	0.75	0.56	1.07
Berkeley Earth	1.45	0.76	0.57	1.12
ERA5	1.48	0.79	0.60	1.12
JRA-55	1.43	0.74	0.56	1.07
Mean of the six datasets	$1.45 \pm 0.12$	$0.76 \pm 0.03$	$0.57 \pm 0.03$	$1.09 \pm 0.04$

일반적인 4개의 데이터세트를 포함하여 아래의 6개 데이터세트가 사용되었다:

Berkeley Earth: Rohde, R.A.; Hausfather, Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. *Earth System Science Data* **2020**, *12* (4), 3469–3479. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>.

GISTEMP v4: GISTEMP Team, 2022: *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), Version 4*. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

HadCRUT.5.0.2.0: Morice, C.P.; Kennedy, J.J.; Rayner, N.A. et al. An Updated Assessment of Near-surface Temperature Change from 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2021**, *126* (3), e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>. HadCRUT.5.0.2.0 data were obtained from <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5> on 17 January 2024 and are © British Crown Copyright, Met Office 2024, provided under an Open Government Licence, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

Lenssen, N.J.L.; Schmidt, G.A.; Hansen, J.E. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2019**, *124* (12), 6307-6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.  
 NOAAGlobalTemp-Interim v5.1: Vose, R.S.; Huang, B.; Yin, X. et al. Implementing Full Spatial Coverage in NOAA’s Global Temperature Analysis. *Geophysical Research Letters* **2021**, *48* (4), e2020GL090873. <https://doi.org/10.1029/2020GL090873>.

And two reanalyses:

ERA5: Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. *ERA5 Monthly Averaged Data on Single Levels from 1940 to Present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.f17050d7?tab=overview>.  
 JRA-55: Kobayashi, S.; Ota, Y.; Harada, Y. et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **2015**, *93* (1), 5-48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>.

IPCC는 추가 데이터를 사용하였다. 현재 보고서에서 사용한 6개 데이터세트와 Kadow et al.(2020)을 합쳐 2023년의 전지구 평균 추정치를 0.01°C 줄이고 비슷한 양만큼 불확실성 범위를 증가시킨다:

Kadow, C.; Hall, D.M.; Ulbrich, U. Artificial Intelligence Reconstructs Missing Climate Information. *Nature Geoscience* **2020**, *13*, 408-413. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0582-5>.

JRA-3Q에서 생산한 새로운 재현자료도 사용 가능하다. 이 보고서에서는 2023년 12월에 나온 잠정적 자료와의 일치성을 위하여 JRA-55가 사용되었다. 비교를 위해 JRA-3Q와 JRA-55의 4개 기준값에 대한 2023년 값이 표 2에 나타나 있다. 6개 데이터세트 평균에서 JRA-55를 JRA-3Q로 대체하는 것은 2023년 전지구 평균 기온에 대해 영향을 거의 미치지 않는다.

표 2. JRA-3Q 및 JRA-55의 4개 기준값 대비 2023년 전지구 평균 기온

Period	1850–1900	1981–2010	1991–2020	1961–1990
JRA-3Q	1.47	0.78	0.58	1.11
JRA-55	1.43	0.74	0.56	1.07
Mean of the six datasets using JRA-3Q	1.45±0.12	0.76±0.03	0.57±0.03	1.09±0.04

### 육상 기온 및 해수면 기온

육상 기온 평가는 데이터세트 세 개에 기반한다:

Berkeley Earth: Rohde, R.A.; Hausfather, Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. *Earth System Science Data* **2020**, *12* (4), 3469-3479. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>.  
 CRUTEM.5.0.2.0: Osborn, T.J.; Jones, P.D.; Lister, D.H. et al. Land Surface Air Temperature Variations Across the Globe Updated to 2019: The CRUTEM5 Data Set. *Journal of Geophysical Research* **2021**, *126* (2), e2019JD032352. <https://doi.org/10.1029/2019JD032352>.  
 CRUTEM.5.0.2.0 data were obtained from <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/crutem5> on 17 January 2024 and are © British Crown Copyright, Met Office 2024, provided under an Open Government Licence, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

GHCnv4: Menne, M.J.; Gleason, B.E.; Lawrimore, J. et al. *Global Historical Climatology Network – Monthly Temperature [Global mean]*. NOAA National Centers for Environmental Information, 2017. doi:10.7289/V5XW4GTH.

The sea-surface temperature (SST) assessment is based on two datasets:

HadSST.4.0.1.0: Kennedy, J.J.; Rayner, N.A.; Atkinson, C.P. et al. An Ensemble Data Set of Sea Surface Temperature Change from 1850: The Met Office Hadley Centre HadSST.4.0.0.0 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2019**, 124 (14), 7719-7763. <https://doi.org/10.1029/2018JD029867>. HadSST.4.0.1.0 data were obtained from <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadsst4> on 17 January 2024 and are © British Crown Copyright, Met Office 2024, provided under an Open Government Licence, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

ERSSTv5: Huang, B.; Thorne, P.W.; Banzon, V.F. et al. *NOAA Extended Reconstructed Sea-Surface Temperature (ERSST), Version 5. [Global mean]*. NOAA National Centers for Environmental Information, 2017. doi:10.7289/V5T72FNM.

## 해양 열 용량

양상블 평균은 공동의 국제적 노력의 결과를 업데이트 한 것으로<sup>135</sup>, 사용된 모든 정보는 이곳에 참조되어 있다. 전지구 해양 열 용량 수치는 북위 60°와 남위 60° 사이의 해수면의 값으로, 개별 정보에서 300미터보다 깊은 영역에는 제한되어 있다. 2022년 수치는 업데이트 정보가 가용한 정보의 세부내용에 기반한다. 해양 열 용량 시계열에는 2005-2021년 기준값이 사용되었는데(그림 4 참고), 이는 Argo 지표하부 관측장치 네트워크 덕분에 이 시기에 전지구를 거의 다 반영할 수 있기 때문이다.

2023년 수치는 아래에 나와있는 것과 같이 Minière et al.(2023)과 Cheng et al.(2017)의 추정치에 기반한다.

Minière, A.; von Schuckmann, K.; Sallée, J.-B. et al. Robust Acceleration of Earth System Heating Observed Over the Past Six Decades. *Scientific Reports* **2023**, 13, 22975. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49353-1>.

## 2022년까지 사용된 자료:

Cheng, L.; Trenberth, K.E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* **2017**, 3 (3). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.

Gaillard, F.; Reynaud, T.; Thierry, V. et al. In Situ-Based Reanalysis of the Global Ocean Temperature and Salinity with ISAS: Variability of the Heat Content and Steric Height. *Journal of Climate* **2016**, 29 (4), 1305-1323. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0028.1>.

Ishii, M.; Fukuda, Y.; Hirahara, S. et al. Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA* **2017**, 13, 163-167. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-030>.

Kuusela, M.; Giglio, D. *Global Ocean Heat Content Anomalies based on Argo data [2.0.0]*. Zenodo, 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7562281>.

Levitus, S.; Antonov, J.I.; Boyer, T.P. et al. World Ocean Heat Content and Thermocline Level Change (0-2 000 m), 1955-2010. *Geophysical Research Letters* **2012**, 39 (10). <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.

Lyman, J.M.; Johnson, G.C. Estimating Global Ocean Heat Content Changes in the Upper 1 800 m since 1950 and the Influence of Climatology Choice. *Journal of Climate*, **2014**, 27 (5), 1945-1957. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00752.1>.

von Schuckmann, K.; Le Traon, P.-Y. How Well Can We Derive Global Ocean Indicators from Argo Data? *Ocean Science* **2011**, 7 (6), 783-791. <https://doi.org/10.5194/os-7-783-2011>. Data available at: <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators>.

### 추가, 2021년까지 사용된 자료:

- Desbruyères, D.G.; Purkey, S.G.; McDonagh, E.L. et al. Deep and Abyssal Ocean Warming from 35 Years of Repeat Hydrography. *Geophysical Research Letters* **2016**, 43 (19), 10356-10365. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>.
- Desbruyères, D.; McDonagh, E.L.; King, B.A. et al. Global and Full-depth Ocean Temperature Trends During the Early Twenty-first Century from Argo and Repeat Hydrography. *Journal of Climate* **2017**, 30 (6), 1985-1997. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0396.1>.
- Good, S.A.; Martin, M.J.; Rayner, N.A. EN4: Quality Controlled Ocean Temperature and Salinity Profiles and Monthly Objective Analyses with Uncertainty Estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2013**, 118 (12), 6704-6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>.
- Hong, L.; Xu, F.; Zhou, W. et al. Development of a Global Gridded Argo Data Set with Barnes Successive Corrections. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2017**, 122 (2), 866-889. <https://doi.org/10.1002/2016JC012285>.
- Hosoda, S.; Ohira, T.; Nakamura, T. A Monthly Mean Dataset of Global Oceanic Temperature and Salinity Derived from Argo Float Observations. *JAMSTEC Report of Research and Development*, **2008**, 8, 47-59. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/8/0/8\\_0\\_47/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/8/0/8_0_47/_article).
- Kuusela M.; Stein, M.L. Locally Stationary Spatio-temporal Interpolation of Argo Profiling Float Data. *Proceedings of the Royal Society A* **2018**, 474, 20180400. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0400>.
- Roemmich, D.; Gilson, J. The 2004-2008 Mean and Annual Cycle of Temperature, Salinity, and Steric Height in the Global Ocean from the Argo Program. *Progress in Oceanography* **2009**, 82 (2), 81-100. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.03.004>.
- Roemmich, D.; Church, J.; Gilson, J. et al. Unabated Planetary Warming and its Ocean Structure Since 2006. *Nature Climate Change* **2015**, 5, 240-245. <https://doi.org/10.1038/nclimate2513>.

### 추가, 2020년까지 사용된 자료:

- Church, J.A.; White, N.J.; Konikow, L.F. et al. Revisiting the Earth's Sea-level and Energy Budgets from 1961 to 2008. *Geophysical Research Letters* **2011**, 38 (18). <https://doi.org/10.1029/2011GL048794>.
- Domingues, C.M.; Church, J.A.; White, N.J. et al. Improved Estimates of Upper-ocean Warming and Multi-decadal Sea-level Rise. *Nature* **2008**, 453, 1090-1093. <https://doi.org/10.1038/nature07080>.
- Li, Y.; Church, J.A.; McDougall, T.J. et al. Sensitivity of Observationally Based Estimates of Ocean Heat Content and Thermal Expansion to Vertical Interpolation Schemes. *Geophysical Research Letters* **2022**, 49 (24), e2022GL101079. <https://doi.org/10.1029/2022GL101079>.
- Wijffels, S.; Roemmich, D.; Monselesan, D. et al. Ocean Temperatures Chronicle the Ongoing Warming of Earth. *Nature Climate Change* **2016**, 6, 116-118. <https://doi.org/10.1038/nclimate2924>.

## 해수면

Copernicus Climate Change Service (C3S), 2018: Sea Level Daily Gridded Data from Satellite Observations for the Global Ocean from 1993 to Present. C3S Climate Data Store (CDS), <https://doi.org/10.24381/cds.4c328c78>.  
 GMSL from CNES/+, <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level/data-acces.html#c12195>.

## 해양 열파 및 한파

해양 열파는 해수면 온도(SST)가 기후 분포의 90번째 백분위수를 초과하는 상태가 5일 이상 지속될 때 보통 수준으로 분류한다. 그 외 카테고리는 해수면 온도와 기후 분포 평균 간의 차이에 따라 정의된다. 기후 분포 평균과 90번째 백분위수 간 차이의 2배 이상, 3배 이상, 4배 이상일 경우에 각각 "강함", "심각", "극심"으로 표현한다<sup>136</sup>.

해양 한파 분류는 열파 분류와 유사하지만, "얼음" 카테고리를 제외하고 기후 분포의 10번째 백분위수 이하의 날을 계산한다. 얼음 카테고리는 해양 한파가 발생한 날의 임계값이  $-1.7^{\circ}\text{C}$  이하인 모든 경우에 적용된다<sup>137</sup>. 그러므로 이는 극심한 온도 변동이 아닌 해빙과 관련하여 고려한다.

해양 열파 및 한파에 사용된 기준값은 1982-2011년으로, 위성 SST 관측 시계열이 1982년부터 모두 존재하기 때문에 표준 정상 기간인 1981-2010년에서 일년을 옮겨 조정한 것이다. 이 기간은 현재 표준 정상 기간인 1991-2020년으로 업데이트되지 않았는데, 이는 기준값 변경이 결과에 큰 영향을 미치며 이 보고서의 이전 버전에 있는 해양 열파/한파 통계와 비교할 수 없기 때문이다.

모든 해양 열파 및 한파는 NOAA  $1/4^{\circ}$  일 최적 보간 해수면 온도(OISST) v2.1 데이터세트를 사용하여 추적하였다(Huang et al., 2021).

- Hobday, A. J.; Alexander, L. V.; Perkins, S. E. et al. A Hierarchical Approach to Defining Marine Heatwaves. *Progress in Oceanography* **2016**, *141*, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>.  
 Hobday, A. J.; Oliver, E. C. J.; Sen Gupta, A. et al. Categorizing and Naming Marine Heatwaves. *Oceanography* **2018**, *31* (2), 1-13. <https://www.jstor.org/stable/26542662>.  
 Huang, B.; Liu, C.; Banzon, V. et al. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *Journal of Climate* **2021**, *34* (8), 2923-2939. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0166.1>.  
 Schlegel, R. W.; Darmaraki, S.; Benthuisen, J. A. et al. Marine Cold-Spells. *Progress in Oceanography* **2021**, *198*, 102684. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102684>.

## 빙상

- Mankoff, K.D.; Fettweis, X.; Langen, P.L. et al. Greenland Ice Sheet Mass Balance from 1840 Through Next Week. *Earth System Science Data* **2021**, *13* (10), 5001-5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>.  
 Mankoff, K.; Fettweis, X.; Solgaard, A., et al. *Greenland Ice Sheet Mass Balance from 1840 Through Next Week*: GEUS Dataverse, V791, 2021. <https://doi.org/10.22008/FK2/OHI23Z>.

그린란드와 남극 빙상의 중력 측정(중력 회복 및 기후 실험, GRACE) 얼음 질량 시계열은 Velicogna et al.(2020) 이후 JPL RL06v1의 구면 조화함수(spherical harmonics)를 이용하여 계산하였다. 1도 지구 중심(geocentre)은 Loomis et al.(2019)의 C2, 0과 C3, 0 계수를 이용하여 Sutterley and Velicogna(2019)로 계산하였다. 남극을 대상으로 하여 지역 IJ05-R2 빙하 지각 균형 조정(GIA) 모델(Ivins et al., 2013)을 이용하고 그린란드를 대상으로 지역 GIA 모델(Simpson et al., 2009)을 이용하여 고체 지구의 GIA 장기 추세로 GRACE/GRACE 후속(GRACE-FO) 자료를 보정하였다. 이러한 지역 GIA 모델에는 빙상 밖의 현실적인 GIA 신호를 포함하지는 않는데, 이로 인해 그린란드와 남극 외, GIA 보정은 Geruo et al.(2013)과 ICE6G 얼음 내력(Peltier et al., 2015)에 기반한다.

- Geruo, A.; Wahr, J.; Zhong, S. Computations of the Viscoelastic Response of a 3-D Compressible Earth to Surface Loading: An Application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. *Geophysical Journal International* **2013**, *192* (2), 557-572. <https://doi.org/10.1093/gji/ggs030>.
- Ivins, E.R.; James, T.S.; Wahr, J. et al. Antarctic Contribution to Sea Level Rise Observed by GRACE with Improved GIA Correction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **2013**, *118* (6), 3126-3141. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50208>.
- Loomis, B.D.; Rachlin, K.E.; Luthcke, S.B. Improved Earth Oblateness Rate Reveals Increased Ice Sheet Losses and Mass-driven Sea Level Rise. *Geophysical Research Letters* **2019**, *46* (12), 6910-6917. <https://doi.org/10.1029/2019GL082929>.
- Peltier, W.R.; Argus, D.F.; Drummond, R. Space Geodesy Constrains Ice Age Terminal Deglaciation: The Global ICE-6G\_C (VM5a) Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **2015**, *120* (1), 450-487. <https://doi.org/10.1002/2014JB011176>.
- Simpson, M.J.R.; Milne, G.A.; Huybrechts, P. et al. Calibrating a Glaciological Model of the Greenland Ice Sheet from the Last Glacial Maximum to Present-day Using Field Observations of Relative Sea Level and Ice Extent. *Quaternary Science Reviews* **2009**, *28* (17-18), 1631-1657. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.03.004>.
- Sutterley, T.C.; Velicogna, I. Improved Estimates of Geocenter Variability from Time-variable Gravity and Ocean Model Outputs. *Remote Sensing* **2019**, *11* (18), 2108. <https://doi.org/10.3390/rs11182108>.
- Velicogna, I.; Mohajerani, Y.; Geruo, A. Continuity of Ice Sheet Mass Loss in Greenland and Antarctica from the GRACE and GRACE Follow-on Missions. *Geophysical Research Letters* **2020**, *47* (8), e2020GL087291. <https://doi.org/10.1029/2020GL087291>.

## 빙하

전지구 빙하 모니터링 정보는 세계빙하모니터링서비스(WGMS)에서 제공한다:

World Glacier Monitoring Service (WGMS), 2024: *Fluctuations of Glaciers (FoG) Database*, <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2024-01>.

**해빙**

European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility Sea Ice Index v2p2<sup>138</sup> 와 국립빙설데이터센터(NSIDC) v3 해빙 지수<sup>139</sup>에서 자료를 제공한다. 해빙 농도는 위성의 마이크로파 주파수로 추정하였다. 해빙 범위란 해빙 농도가 15%를 넘는 해양 격자 셀의 면적을 지칭한다. 이 데이터세트들 간에는 절대적 범위에 대해서는 어느 정도 차이가 있지만, 연간 변화 및 추세에 대해서는 동의하고 있다. 이 보고서 주요 내용으로 NSIDC 수치를 절대적 범위와 순위로 보고했다. 해양 및 해빙 위성 응용시설에 대한 비교값을 표 3에 제시하였다.

표 3. 2023년 NSIDC 수치와 EUMETSAT 해양 및 해빙 위성 응용시설 비교

Metric	NSIDC	Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility
Arctic daily minimum	4.23 million km <sup>2</sup> , 19 September. Sixth lowest on record.	4.71 million km <sup>2</sup> , 16 September. Sixth lowest on record.
Arctic daily maximum	14.62 million km <sup>2</sup> , 6 March. Fifth lowest on record.	14.64 million km <sup>2</sup> , 3 March
Antarctic daily minimum	1.79 million km <sup>2</sup> , 21 February. Lowest on record.	2.00 million km <sup>2</sup> , 16 February. Lowest on record.
Antarctic daily maximum	16.96 million km <sup>2</sup> , 10 September. Lowest on record.	17.60 million km <sup>2</sup> , 12 September. Lowest on record.

European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, 2023: *Sea-ice Index 1978-onwards, Version 2.2, OSI-420*. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, data extracted from [Sea-ice index | OSI SAF \(eumetsat.int\)](https://www.eumetsat.int/sea-ice-index).

Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W.N. et al. *Sea Ice Index, Version 3: National Snow and Ice Data Center (NSIDC)*, 2017. <https://nsidc.org/data/G02135/versions/3>.

Lavergne, T.; Sørensen, A.M.; Kern, S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI Sea-ice Concentration Climate Data Records. *The Cryosphere* **2019**, 13 (1), 49-78. <https://doi.org/10.5194/tc-139-2019>.

**강수**

다음과 같은 전지구강수기후값센터(GPCC) 자료를 분석을 위해 사용하였다.

- First Guess Monthly, [https://doi.org/10.5676/DWD\\_GPCC/FG\\_M\\_100](https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FG_M_100)
- Monitoring Product (Version 2022), [https://doi.org/10.5676/DWD\\_GPCC/MP\\_M\\_V2022\\_100](https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/MP_M_V2022_100)
- Full Data Monthly (Version 2022), [https://doi.org/10.5676/DWD\\_GPCC/FD\\_M\\_V2022\\_100](https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2022_100)
- Precipitation Climatology (Version 2022), [https://doi.org/10.5676/DWD\\_GPCC/CLIM\\_M\\_V2022\\_100](https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/CLIM_M_V2022_100)

그림 22에서, 아이스란드는 장기 평균보다 훨씬 건조하고, 중국은 훨씬 습한 것으로 표시되었다. 이는 실시간 자료를 처리하는 방법이 변경되었기 때문이며 실제 상황을 모두 반영하는 것은 아니다.

# 기여 저자

## WMO 회원국

Algeria, Andorra, Argentina, Armenia, Australia, Azerbaijan, Bahrain, Barbados, Belgium, Belize, Bosnia and Herzegovina, Brazil, Brunei, Bulgaria, Canada, Chile, China, Croatia, Cyprus, Czechia, Côte d'Ivoire, Denmark, Ecuador, Estonia, Finland, France, Georgia, Germany, Hungary, Iceland, India, Iran (Islamic Republic of), Ireland, Israel, Italy, Japan, Jordan, Kazakhstan, Latvia, Libya, Lithuania, Luxembourg, Malaysia, Mali, Mauritius, Mexico, Morocco, Myanmar, Netherlands (Kingdom of the), New Zealand, Nigeria, Norway, Pakistan, Panama, Paraguay, Peru, Poland, Republic of Korea, Republic of Moldova, Russian Federation, Saudi Arabia, Senegal, Serbia, Singapore, Slovakia, Slovenia, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Türkiye, Ukraine, United Arab Emirates, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, United Republic of Tanzania, United States of America, Uruguay, Venezuela (Bolivarian Republic of), Viet Nam.

## 개별 저자

Vicente Anzellini (IDMC), Omar Baddour (WMO), Paul M. Barker (University of New South Wales), Joseph Basconcello (Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration (PAGASA)), Hamid Bastani (WMO), Jorge Alvar-Beltrán (FAO), Jana Birner (UNHCR), Nicholas Bishop (IOM), Jessica Blunden (NOAA), Roberta Boscolo (WMO), Tim Beyer (NOAA NCEI), Anny Cazenave (LEGOS), Xuan Che (UNDRR), Lijing Cheng (Institute of Atmospheric Physics (IAP), Center for Ocean Mega-Science), John Church (University of New South Wales), Damien Desbroyères (IFREMER), Catia Domingues (National Oceanography Centre (NOC)), Robert Dunn (Met Office), Elisabeth du Parc (IOM), Arianna Gialletti (FAO), Giancarlo Pini (WFP), Donata Giglio (University of Colorado Boulder), John E. Gilson (SIO), Alashiya Gordes (FAO), Atsushi Goto (WMO), Sarah Grimes (WMO), Flora Gues (CELAD, Mercator Ocean International), Peer Hechler (WMO), Christopher Hewitt (WMO), Shigeki Hosoda (JAMSTEC), Matthias Huss (ETH Zürich), Amanda Ignatia (UNHCR), Kirsten Isensee (IOC/UNESCO), Piyush Jain (Northern Forestry Centre), Gregory C. Johnson (NOAA PMEL), Christopher Kadow (DKRZ), Hideki Kanamaru (FAO), Maarten Kappelle (UNEP), John Kennedy (WMO), Rachel Killick (Met Office), Brian King (NOC), Nicolas Kolodziejczyk (University of Western Brittany), Animesh Kumar (UNDRR), Mikael Kuusela (Carnegie Mellon University), Gernot Laganda (WFP), Lancelot Leclercq (LEGOS), Yuehua Li (Yunnan University), Ricardo Locarnini (NOAA NCEI), John Lyman (NOAA PMEL), Shawn Marshall (ECCC and University of Calgary), Jesse Mason (WFP), Jutta May (UNDRR), Trevor McDougall (University of New South Wales), Brian Menounos (University of Northern British Columbia), Atsushi Minami (JMA), Audrey Minère (Mercator Ocean International), Oe Mitsuho (JMA), Lev Neretin (FAO), Julien Nicolas (ECMWF), Didier Paolo Monselesan (CSIRO), Sarah Purkey (SIO), James Reagan (NOAA NCEI, University of Maryland), Dean Roemmich (SIO), Sylvain Ponsérre (IDMC), Ileana Sinziana Puscas (IOM), Claire Ransom (WMO), David Robinson (Rutgers, The State University of New Jersey), Rogerio Bonifacio (WFP), Kanako Sato (JAMSTEC), Abhishek Savita (GEOMAR), Yousuke Sawa (JMA), Robert Schlegel (University of Paris 1 Panthéon-Sorbonne, National Center for Scientific Research (CNRS), Laboratoire d'Océanographie de Villefranche), Katherina Schoo (IOC/UNESCO), Serhat Sensoy (Turkish State Meteorological Service), Fumi Sezaki (JMA), Jose Álvaro Mendes Pimpao Alves Silva (WMO), Mike Sparrow (WMO/World Climate Research Programme (WCRP)), Johan Stander (WMO), Martin Stendel (Danish Meteorological Institute (DMI)), Toshio Suga (Tohoku University, JAMSTEC), Oksana Tarasova (WMO), Caterina Tassone (WMO/Global Climate Observing System (GCOS)), Blair Trewin (BOM), Thea Turkington (Meteorological Services Singapore/Association)

of Southeast Asian Nations (ASEAN) Specialized Meteorological Centre), Isabella Velicogna (University of California), Alex Vermeulen (Integrated Carbon Observation System (ICOS)), Karina von Schuckmann (Mercator Ocean International), Ying Wang (UNEP), Susan E. Wijffels (CSIRO, WHOI), Ahmat Younous Abdel-lathif (WFP), Markus Ziese (DWD, GPCC).

## 기관

Australian Bureau of Meteorology (BOM), Australia; Carnegie Mellon University, United States of America; CELAD, France; Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, China; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), CSIRO Oceans and Atmosphere, Australia; Cooperative Institute for Satellite Earth Systems Studies (CISESS), United States; Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ), Germany; Deutscher Wetterdienst (DWD), Germany; Environment and Climate Change Canada (ECCC), Canada; ETH Zürich, Switzerland; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), United Kingdom; French Research Institute for Exploitation of the Sea (IFREMER), France; GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany; Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), Germany; Hong Kong Observatory (HKO), Hong Kong, China; Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China; Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC), Switzerland; Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan; Japan Meteorological Agency (JMA), Japan; Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, France; Laboratory for Studies in Spatial Geophysics and Oceanography (LEGOS), France; Mercator Ocean International, France; Met Office, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Centers for Environmental Information (NCEI), United States; National Oceanography Centre, United Kingdom; NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL), United States; Northern Forestry Centre, Canadian Forest Service, Natural Resources Canada, Canada; OceanScope, France; Rutgers, The State University of New Jersey, United States; Scripps Institution of Oceanography (SIO), United States; Tohoku University, Japan; Turkish State Meteorological Service, Türkiye; University of Calgary, Canada; University of Colorado Boulder, United States; University of New South Wales, Australia; University of Northern British Columbia, Canada; University of Paris 1 Panthéon-Sorbonne, France; University of Western Brittany, France; Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), United States; Yunnan University, China.

## UN 기구

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO); International Organization for Migration (IOM); Office of the United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR); United Nations Environment Programme (UNEP); United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR); World Food Programme (WFP).

# 미주

- <sup>1</sup> Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring, *Bulletin of the American Meteorological Society* **2021** 102 (1), E20–E37. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>.
- <sup>2</sup> World Meteorological Organization (WMO). *Climate Indicators and Sustainable Development: Demonstrating the Interconnections* (WMO-No. 1271). Geneva, 2021.
- <sup>3</sup> World Meteorological Organization (WMO). *United in Science 2023: Sustainable development edition*; WMO: Geneva, 2023.
- <sup>4</sup> United Nations; Department of Economic and Social Affairs. *Synergy Solutions for a World in Crisis: Tackling Climate and SDG Action Together*; 2023. <https://sdgs.un.org/synergy-solutions-world-crisis-tackling-climate-and-sdg-action-together>.
- <sup>5</sup> Betts, R. A.; Jones, C. D.; Knight, J. R. et al. El Niño and a Record CO<sub>2</sub> Rise. *Nature Clim Change* **2016**, 6 (9), 806–810. <https://doi.org/10.1038/nclimate3063>.
- <sup>6</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>. Measurements at Mauna Loa were interrupted by a volcanic eruption and the measurement site was temporarily relocated to Maunakea observatories 21 miles to the north.
- <sup>7</sup> Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). *Latest Kennaook / Cape Grim greenhouse gas data. The latest greenhouse gas (GHG) data updated monthly from one of the cleanest air sources in the world*. <https://www.csiro.au/greenhouse-gases/>.
- <sup>8</sup> For anomalies relative to other baselines see [Global mean temperature anomalies for 2023 relative to other periods..](#)
- <sup>9</sup> Rantanen, M.; Laaksonen, A. The Jump in Global Temperatures in September 2023 Is Extremely Unlikely Due to Internal Climate Variability Alone. *npj Clim Atmos Sci* **2024**, 7 (1), 1–4. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00582-9>.
- <sup>10</sup> Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P. et al. Earth's Energy Imbalance and Implications. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2011**, 11 (24), 13421–13449. <https://doi.org/10.5194/acp-11-13421-2011>.
- <sup>11</sup> von Schuckmann, K.; Palmer, M. D.; Trenberth, K. E. et al. An Imperative to Monitor Earth's Energy Imbalance. *Nature Clim Change* **2016**, 6 (2), 138–144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>.
- <sup>12</sup> von Schuckmann et al. (2020). Heat stored in the Earth system: where does the energy go? *Earth Syst. Sci. Data*, 12(3), 2013–2041. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020>
- <sup>13</sup> Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* **2017**, 3 (3), e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.
- <sup>14</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/01\\_SROCC\\_SPM\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/01_SROCC_SPM_FINAL.pdf).
- <sup>15</sup> Ocean heat content is measured in zettajoules. A zettajoule is 1 021 joules, which is 1 000 000 000 000 000 000 joules.
- <sup>16</sup> Cheng, L.; Abraham, J.; Trenberth, K. E. et al. New Record Ocean Temperatures and Related Climate Indicators in 2023. *Adv. Atmos. Sci.* **2024**. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-3378-5>.
- <sup>17</sup> von Schuckmann, K.; Minière, A.; Gues, F. et al. Heat Stored in the Earth System 1960–2020: Where Does the Energy Go? *Earth System Science Data* **2023**, 15 (4), 1675–1709. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1675-2023>. Loeb, N. G.; Johnson, G. C.; Thorsen, T. J. et al. Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate. *Geophysical Research Letters* **2021**, 48 (13), e2021GL093047. <https://doi.org/10.1029/2021GL093047>.
- <sup>18</sup> Minière, A.; von Schuckmann, K.; Sallée, J.-B. et al. Robust Acceleration of Earth System Heating Observed over the Past Six Decades. *Sci Rep* **2023**, 13 (1), 22975. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49353-1>.
- <sup>19</sup> Minière, A.; von Schuckmann, K.; Sallée, J.-B. et al. Robust Acceleration of Earth System Heating Observed over the Past Six Decades. *Sci Rep* **2023**, 13 (1), 22975. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49353-1>.
- <sup>20</sup> Raghuraman, S. P.; Paynter, D.; Ramaswamy, V. Anthropogenic Forcing and Response Yield Observed Positive Trend in Earth's Energy Imbalance. *Nat Commun* **2021**, 12 (1), 4577. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24544-4>. Kramer, R. J.; He, H.; Soden, B. J. et al. Observational Evidence of Increasing Global Radiative Forcing. *Geophysical Research Letters* **2021**, 48 (7), e2020GL091585. <https://doi.org/10.1029/2020GL091585>.
- <sup>21</sup> e.g., Loeb, N. G.; Johnson, G. C.; Thorsen, T. J. et al. Satellite and Ocean Data Reveal Marked Increase in Earth's Heating Rate. *Geophysical Research Letters* **2021**, 48 (13), e2021GL093047. <https://doi.org/10.1029/2021GL093047>. Hakuba, M. Z.; Frederikse, T.; Landerer, F. W. Earth's Energy Imbalance From the Ocean Perspective (2005–2019). *Geophysical Research Letters* **2021**, 48 (16), e2021GL093624. <https://doi.org/10.1029/2021GL093624>.

- <sup>22</sup> Purkey, S. G.; Johnson, G. C. Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990s and 2000s: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets. *Journal of Climate* **2010**, *23* (23), 6336–6351. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3682.1>.
- <sup>23</sup> Cheng, L.; Abraham, J.; Trenberth, K. E. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* **2023**, *40* (6), 963–974. <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>. Cheng, L.; von Schuckmann, K.; Abraham, J. P. et al. Past and Future Ocean Warming. *Nat Rev Earth Environ* **2022**, *3* (11), 776–794. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00345-1>.
- <sup>24</sup> Changes of these percentages from the provisional report reflect an update to the Cheng et al. dataset, see Cheng, L.; Abraham, J.; Trenberth, K. E. et al. New Record Ocean Temperatures and Related Climate Indicators in 2023. *Adv. Atmos. Sci.* **2024**. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-3378-5>.
- <sup>25</sup> Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* **2017**, *3* (3), e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.
- <sup>26</sup> Cheng, L.; von Schuckmann, K.; Abraham, J. P. et al. Past and Future Ocean Warming. *Nat Rev Earth Environ* **2022**, *3* (11), 776–794. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00345-1>.
- <sup>27</sup> Smale, D. A.; Wernberg, T.; Oliver, E. C. J. et al. Marine Heatwaves Threaten Global Biodiversity and the Provision of Ecosystem Services. *Nat. Clim. Chang.* **2019**, *9* (4), 306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1>.
- <sup>28</sup> World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin – No. 18: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2021*. Geneva, 2022.
- <sup>29</sup> Friedlingstein, P.; O’Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data* **2020**, *12* (4), 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- <sup>30</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Core Writing Team, H. Lee and J. Romero, Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2023. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- <sup>31</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Chapter 2, section 2.3.3.5 Ocean pH, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- <sup>32</sup> Numbers in main text are from National Snow and Ice Data Center (NSIDC). OSI SAF figures are provided in [Data sets and methods](https://nsidc.org/arcticseaicenews/2023/03/arctic-sea-ice-maximum-at-fifth-lowest-on-satellite-record/). <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2023/03/arctic-sea-ice-maximum-at-fifth-lowest-on-satellite-record/>, <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2023/04/polar-dawn-to-dusk/>.
- <sup>33</sup> National Snow and Ice Data Center (NSIDC). *Arctic sea ice minimum at sixth lowest extent on record*. <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2023/09/arctic-sea-ice-minimum-at-sixth/>.
- <sup>34</sup> Fast December expansion, Arctic Sea Ice News and Analysis (nsidc.org) <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2024/01/fast-december-expansion/>
- <sup>35</sup> 1981–2010 is the period used by NSIDC for their monitoring
- <sup>36</sup> Liu, J.; Zhu, Z.; Chen, D. Lowest Antarctic Sea Ice Record Broken for the Second Year in a Row. *Ocean-Land-Atmosphere Research* **2023**, *2*, 0007. <https://doi.org/10.34133/olar.0007>.
- <sup>37</sup> Purich, A.; Doddridge, E. W. Record Low Antarctic Sea Ice Coverage Indicates a New Sea Ice State. *Commun Earth Environ* **2023**, *4* (1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00961-9>.
- <sup>38</sup> <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2023/09/antarctic-sets-a-record-low-maximum-by-wide-margin/>.
- <sup>39</sup> Fast December expansion, Arctic Sea Ice News and Analysis (nsidc.org) <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2024/01/fast-december-expansion/>.
- <sup>40</sup> The period 1981–2010 is used by NSIDC for their monitoring.
- <sup>41</sup> Weyer, N. M., Ed. Annex I: Glossary. In IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2019. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/glossary/>. Note that the Antarctic ice sheet can be further subdivided into West Antarctic, East Antarctic and the Antarctic Peninsula, but is treated here as a single entity.
- <sup>42</sup> Note that the Antarctic ice sheet can be further subdivided into West Antarctic, East Antarctic and Antarctic Peninsula, but is treated here as a single entity.

- <sup>43</sup> Mankoff, K. D.; Fettweis, X.; Langen, P. L. et al. Greenland Ice Sheet Mass Balance from 1840 through next Week. *Earth System Science Data* **2021**, *13* (10), 5001–5025. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5001-2021>.
- <sup>44</sup> National Snow and Ice Data Center (NSIDC). *Late-season melt spike*. <https://nsidc.org/ice-sheets-today/analyses/late-season-melt-spike>. *Sudden shift to southern heat*. <https://nsidc.org/ice-sheets-today/analyses/sudden-shift-southern-heat>.
- <sup>45</sup> Cumulative melt-day area is the area of the ice sheet that experienced melting conditions each day (diagnosed by the presence of liquid water at the surface), summed over the number of days in the melt season.
- <sup>46</sup> Summit Station is the highest point on the Greenland ice sheet, at an altitude of 3 216 m.
- <sup>47</sup> <https://www.dmi.dk/nyheder/2023/varmerekorder-pa-indlandsisen/>
- <sup>48</sup> Nghiem, S. V.; Hall, D. K.; Mote, T. L. et al. The Extreme Melt across the Greenland Ice Sheet in 2012. *Geophysical Research Letters* **2012**, *39* (20). <https://doi.org/10.1029/2012GL053611>.
- <sup>49</sup> Otosaka, I. N.; Shepherd, A.; Ivins, E. R. et al. Mass Balance of the Greenland and Antarctic Ice Sheets from 1992 to 2020. *Earth System Science Data* **2023**, *15* (4), 1597–1616. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1597-2023>.
- <sup>50</sup> A gigatonne (Gt) is 1 000 000 000 t, and 1 Gt of ice corresponds to a volume of about 1.09 km<sup>3</sup>.
- <sup>51</sup> m w.e. is the depth of water equivalent to the change in ice thickness. Glacier ice is less dense than water, so the equivalent depth of water is slightly less than the thickness of ice lost.
- <sup>52</sup> WGMS (2023): Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020-2021). Michael Zemp, Isabelle Gärtner-Roer, Samuel U. Nussbaumer, Ethan Z. Welty, Inès Dussaillant, and Jacqueline Bannwart (eds.), ISC (WDS) / IUGG (IACS) / UNEP / UNESCO / WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 134 pp. Based on database version <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09>.
- <sup>53</sup> Firn is multi-year snow, which has a higher albedo than glacier ice.
- <sup>54</sup> LiDAR stands for Light Detection and Ranging, which uses a laser to determine the height of the glacier surface.
- <sup>55</sup> Hugonnet, R.; McNabb, R.; Berthier, E. et al. Accelerated Global Glacier Mass Loss in the Early Twenty-First Century. *Nature* **2021**, *592* (7856), 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>.
- <sup>56</sup> Parisien, M.-A.; Barber, Q. E.; Flannigan, M. D. et al. Broadleaf Tree Phenology and Springtime Wildfire Occurrence in Boreal Canada. *Global Change Biology* **2023**, *29* (21), 6106–6119. <https://doi.org/10.1111/gcb.16820>.
- <sup>57</sup> Robinson, David A.; Estilow, Thomas W.; and NOAA CDR Program (2012): NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5N014G9>.
- <sup>58</sup> IEA (2024), Renewables 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- <sup>59</sup> <https://www.cop28.com/en/global-renewables-and-energy-efficiency-pledge>
- <sup>60</sup> In general, a capacity factor is a measure of how often a power plant operates at its maximum capacity over a certain period, expressed as a percentage.
- <sup>61</sup> World Meteorological Organization (WMO), International Renewable Energy Agency (IRENA). *2022 Year in Review: Climate-driven Global Renewable Energy Potential Resources and Energy Demand*. Geneva, 2023.
- <sup>62</sup> World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin – No. 19: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022*. Geneva, 2022.
- <sup>63</sup> A Dobson unit is the depth (in units of 10 μm) of the pure gas you would get if it were extracted from the air column and reduced to standard temperature and pressure. 300 DU corresponds to 3mm.
- <sup>64</sup> <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>
- <sup>65</sup> <https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>
- <sup>66</sup> <https://mausam.imd.gov.in/responsive/monsooninformation.php>

- <sup>67</sup> United Nations Environment Programme (UNEP). *Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches-Emerging Issues of Environmental Concern*. Nairobi, 2022.
- <sup>68</sup> Fire weather is weather conducive to wildfires, including high temperatures, low humidity, and high winds.
- <sup>69</sup> United Nations, 2022: *The Sustainable Development Goals Report 2022*, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>
- <sup>70</sup> United Nations, 2023: *The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition*, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>.
- <sup>71</sup> <https://www.mapa.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-146--del-territorio-est%C3%A1-en-emergencia-por-escasez-de-agua-y-el-274--en-alerta/tcm:30-659894>
- <sup>72</sup> <https://www.unocha.org/publications/report/libya/libya-flood-response-humanitarian-update-15-december-2023>
- <sup>73</sup> <https://reliefweb.int/report/greece/greece-severe-weather-and-floods-update-greek-civil-protection-hellenic-national-meteorological-service-copernicus-emsr-echo-daily-flash-11-september-2023>
- <sup>74</sup> <https://www.preventionweb.net/media/87994/download?startDownload=true>
- <sup>75</sup> <https://reliefweb.int/report/mozambique/unhcr-mozambique-cyclone-freddy-flash-update-3-24-march-2023>
- <sup>76</sup> <https://story.internal-displacement.org/2023-mid-year-update/>
- <sup>77</sup> <https://sentinel-asia.org/EO/2023/article20230514MM.html>
- <sup>78</sup> <https://reliefweb.int/report/bangladesh/bangladesh-cyclone-mocha-humanitarian-response-situation-report-14-may-2023>
- <sup>79</sup> National contribution
- <sup>80</sup> [https://ahacentre.org/wp-content/uploads/2023/05/AHA-DRAFT-Situation\\_Report-9-TC-MOCHA-Myanmar-1.pdf](https://ahacentre.org/wp-content/uploads/2023/05/AHA-DRAFT-Situation_Report-9-TC-MOCHA-Myanmar-1.pdf)
- <sup>81</sup> <https://story.internal-displacement.org/2023-mid-year-update/>
- <sup>82</sup> <https://reporting.unhcr.org/myanmar-emergency-flash-update-2-cyclone-mocha>.
- <sup>83</sup> [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP182023\\_Otis.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP182023_Otis.pdf)
- <sup>84</sup> Emergency Events Database (EM-DAT). See also <https://www.fitchratings.com/research/insurance/mexico-re-insurers-not-materially-affected-by-hurricane-otis-31-10-2023>.
- <sup>85</sup> <https://reliefweb.int/report/mexico/mexico-hurricane-otis-situation-report-no-01-8-november-2023>
- <sup>86</sup> <https://www.treasury.govt.nz/sites/default/files/2023-04/impacts-from-the-north-island-weather-events.pdf>
- <sup>87</sup> Merlone, A.; Pasotti, L.; Musacchio, C. et al. Evaluation of the Highest Temperature WMO Region VI Europe (Continental): 48.8°C, Siracusa Sicilia, Italy on August 11, 2021. *International Journal of Climatology* **2024**, *44*, 721–728. <https://doi.org/10.1002/joc.8361>.
- <sup>88</sup> <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/fortes-chaleurs-aout-2023>
- <sup>89</sup> <https://atmosphere.copernicus.eu/2023-year-intense-global-wildfire-activity>
- <sup>90</sup> <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/top-ten-weather-stories/2023.html>
- <sup>91</sup> <https://www.disastercenter.com/FEMA%20Daily%20Ops%20Briefing%20085-2023.pdf>
- <sup>92</sup> [https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/events/US/2023?disasters\[\]=wildfire](https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/events/US/2023?disasters[]=wildfire)
- <sup>93</sup> [https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/PDAReport\\_FEMA4724DRexpedited-HI.pdf](https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/PDAReport_FEMA4724DRexpedited-HI.pdf)
- <sup>94</sup> Piyush, J.; Barber, Q.E.; Taylor, S. et al. Canada Under Fire – Drivers and Impacts of the Record-Breaking 2023 Wildfire Season. *Ess Open Archive* **2024**. <https://essopenarchive.org/users/747500/articles/719254-canada-under-fire-drivers-and-impacts-of-the-record-breaking-2023-wildfire-season>.
- <sup>95</sup> <https://www.portodemanaus.com.br/?pagina=niveis-maximo-minimo-do-rio-negro>

- <sup>96</sup> Ethiopia: <https://www.unocha.org/publications/report/ethiopia/ethiopia-oct-nov-dec-rainy-season-flash-update-1-18-december-2023>. Kenya: <https://www.unocha.org/publications/report/kenya/kenya-heavy-rains-and-floods-impact-and-response-20-december-2023>. Somalia: <https://www.unocha.org/publications/report/somalia/somalia-situation-report-26-dec-2023>.
- <sup>97</sup> <https://dtm.iom.int/reports/east-and-horn-africa-flood-snapshot-july-november-2023>
- <sup>98</sup> <https://dtm.iom.int/reports/horn-africa-drought-human-mobility-snapshot-january-june-2023>
- <sup>99</sup> National contribution. .
- <sup>100</sup> <https://www.fao.org/3/cc6806en/cc6806en.pdf>
- <sup>101</sup> United Nations, 2022: *The Sustainable Development Goals Report 2022*, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>.
- <sup>102</sup> United Nations, 2023: *The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition*, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>.
- <sup>103</sup> [https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000153758/download/?\\_ga=2.87190362.312982961.1705667005-702211395.16952869333](https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000153758/download/?_ga=2.87190362.312982961.1705667005-702211395.16952869333).
- <sup>104</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); International Fund for Agricultural Development (IFAD); United Nations Children's Fund (UNICEF) et al., 2023: *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, Agrifood Systems Transformation and Healthy Diets Across the Rural–Urban Continuum*, <https://doi.org/10.4060/cc3017en>.
- <sup>105</sup> [docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000150404/download/](https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000150404/download/)
- <sup>106</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2023: *Crop Prospects and Food Situation – Quarterly Global Report No. 2, July 2023*, <https://doi.org/10.4060/cc6806en>.
- <sup>107</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); International Fund for Agricultural Development (IFAD); United Nations Children's Fund (UNICEF) et al., 2023: *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, Agrifood Systems Transformation and Healthy Diets Across the Rural–Urban Continuum*, <https://doi.org/10.4060/cc3017en>.
- <sup>108</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021: *The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security: 2021*, <https://doi.org/10.4060/cb3673en>.
- <sup>109</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2023: *The Impact of Disasters on Agriculture and Food Security 2023: Avoiding and Reducing Losses through Investment in Resilience*, <https://doi.org/10.4060/cc7900en>.
- <sup>110</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2023: *Crop Prospects and Food Situation – Triannual Global Report No. 3, November 2023*, <https://doi.org/10.4060/cc8566en>.
- <sup>111</sup> Ibid.
- <sup>112</sup> World Food Programme (WFP), 2023: *Indonesia – Monitoring Bulletin: July–September (Q3) 2023*, <https://www.wfp.org/publications/indonesia-monitoring-bulletin-july-september-q3-2023>.
- <sup>113</sup> Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), 2023: *Latin America & The Caribbean Weekly Situation Update (as of 4 September 2023)*, <https://reliefweb.int/report/cuba/latin-america-caribbean-weekly-situation-update-4-september-2023>.
- <sup>114</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2023: *Crop Prospects and Food Situation – Triannual Global Report No. 3, November 2023*, <https://doi.org/10.4060/cc8566en>.
- <sup>115</sup> <https://data-in-emergencies.fao.org/apps/e451e32a054847469b1c1c731a8e5cff/explore>
- <sup>116</sup> <https://www.unhcr.org/news/briefing-notes/un-refugee-agency-warns-extreme-hardship-forcibly-displaced-families-winter>
- <sup>117</sup> <https://go.ifrc.org/emergencies/6435>, <https://reliefweb.int/disaster/fl-2023-000068-yem>
- <sup>118</sup> <https://dtm.iom.int/reports/migration-along-eastern-corridor-july-2023>

- <sup>119</sup> <https://reliefweb.int/report/pakistan/early-needs-identification-report-monsoon-flood-affected-areas-pakistan-august-2023>
- <sup>120</sup> <https://prmn-somalia.unhcr.org/yearly-displacement>
- <sup>121</sup> <https://reliefweb.int/report/somalia/unhcr-somalia-factsheet-december-2023>
- <sup>122</sup> <https://reliefweb.int/report/libya/libya-impact-storm-daniel-update-displacement-and-needs-november-2023>
- <sup>123</sup> <https://dtm.iom.int/reports/libya-storm-daniel-flash-update-2-13-september-2023>
- <sup>124</sup> End poverty in all its forms everywhere
- <sup>125</sup> End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture.
- <sup>126</sup> Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages.
- <sup>127</sup> Reduce inequality within and among countries.
- <sup>128</sup> Ensure inclusive and equitable quality education and promote lifelong learning opportunities for all.
- <sup>129</sup> Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all.
- <sup>130</sup> Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all.
- <sup>131</sup> Achieve gender equality and empower all women and girls.
- <sup>132</sup> <https://www.unhcr.org/protection/environment/5f21565b4/gender-displacement-and-climate-change.html>
- <sup>133</sup> United Nations Environment Programme (UNEP), 2022: *Climate Change and Security Partnership Project – Final Report: March 2017–February 2022*, <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/40549>.
- <sup>134</sup> <https://sendaiframework-mtr.undrr.org/publication/report-midterm-review-implementation-sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015–2030>
- <sup>135</sup> von Schuckmann, K.; Cheng, L.; Palmer, M.D. et al. Heat Stored in the Earth System: Where Does the Energy go? *Earth System Science Data* **2020**, *12* (3), 2013–2041. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020>.
- <sup>136</sup> Hobday, A.J.; Oliver, E.C.J.; Gupta, A.S. et al. Categorizing and Naming Marine Heatwaves. *Oceanography* **2018**, *31* (2), 162–173. <https://www.jstor.org/stable/26542662>.
- <sup>137</sup> Schlegel, R.W.; Darmaraki, S.; Benthuisen, J.A. et al. Marine Cold-spells. *Progress in Oceanography* **2021**, *198*, 102684. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079661121001683>.
- <sup>138</sup> Based on Lavergne, T.; Sørensen, A.M.; Kern, S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI Sea-ice Concentration Climate Data Records. *The Cryosphere* **2019**, *13* (1), 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-139-2019>.
- <sup>139</sup> Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W.N. et al. *Sea Ice Index, Version 3*: National Snow and Ice Data Center (NSIDC), 2017. <https://nsidc.org/data/G02135/versions/3>.



Food and Agriculture Organization  
of the United Nations



**UNHCR**  
The UN Refugee Agency



**World Food  
Programme**

보다 자세한 정보는 아래로 연락해 주시기 바랍니다.

## **World Meteorological Organization**

7 bis, avenue de la Paix - P.O. Box 2300 - CH 1211 Geneva 2 - Switzerland

**전략 커뮤니케이션실(Strategic Communications Office)**

**사무총장실(Cabinet Office of the Secretary-General)**

Tel: +41 (0) 22 730 83 14 - Fax: +41 (0) 22 730 80 27

Email: [communications@wmo.int](mailto:communications@wmo.int)

**wmo.int**