

2024년 전지구 기후현황 보고서



WEATHER CLIMATE WATER



WORLD
METEOROLOGICAL
ORGANIZATION

WMO-No. 1368

WMO-No. 1368

© World Meteorological Organization, 2025

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

ISBN 978-92-63-11368-5

표지 이미지: 네팔 포카라 근처 간드룩 마을 풍경

Cover illustration from Adobe Stock by Richie Chan: Scenery of Ghandruk village near Pokhara in Nepal

WMO 간행물에 사용된 명칭과 이 간행물에서 제시된 자료는 특정국가, 영토, 도시 또는 지역의 법적 지위나 그 당국, 또는 국경이나 경계의 설정에 대한 WMO의 의견 표명을 의미하지 않는다.

특정 회사 또는 제품을 언급했다고 해서 WMO가 해당 회사 또는 제품을 다른 유사한 회사 또는 제품보다 우선적으로 지지하거나 추천한다는 것을 의미하지 않는다.

저자가 명시되어 있는 WMO 간행물에 제시된 연구결과, 해석 및 결론은 저자 개인의 것이며, WMO 또는 회원국의 의견을 반드시 반영하는 것은 아니다.

목차

| | |
|--|----|
| 서문 | ii |
| 핵심 지표 | 1 |
| 대기 이산화탄소 | 1 |
| 지구 평균 지표면 근처 온도 | 3 |
| 해양 열 함량 | 5 |
| 지구 평균 해수면 | 7 |
| 해양 pH | 9 |
| 빙하 질량 균형 | 11 |
| 해빙 범위 | 13 |
| 기후 인자 - 엘니뇨 남방 진동 | 17 |
| 온도 | 17 |
| 강수량 | 18 |
| 영향력이 큰 이벤트 | 19 |
| 파리협정을 위한 지구 온도 모니터링 | 21 |
| 2023/2024년 지구 평균 표면 온도 이상 현상 영향 요인 이해 | 23 |
| 데이터세트 및 방법 | 25 |
| 기여 저자 | 31 |
| 미주 | 34 |

피드백을 보내주세요

올해 WMO팀은 기후현황보고서와 개선사항에 대한 피드백을 수집하는 프로세스를 시작했습니다. 이 간행물을 다 읽으신 후, 간단한 설문조사([this short survey](#))에 참여하여 여러분의 의견을 들려주세요. 여러분의 의견은 매우 감사히 수렴하겠습니다.

서문



2024년 연평균 지구 지표면 근처 온도는 1850~1900년 평균보다 $1.55\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 높았습니다. 이는 175년간 관측 기록 중 가장 더운 해로, 직전 해에 세운 기록을 경신했습니다. 단 한 해라도 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 초과하는 온난화가 파리 협정의 장기적인 기온 목표 달성의 실패를 의미하는 것은 아니지만, 이는 우리가 우리의 생명, 경제, 그리고 지구에 대한 위험을 증가시키고 있다는 경각심을 일깨워 줍니다.

2024년 한 해 동안 우리 바다는 계속해서 온난화 되었고, 해수면은 계속 상승했으며, 산성화는 심화되었습니다. 지구 표면의 얼어붙은 부분, 즉 빙권은 놀라운 속도로 녹고 있습니다. 빙하 면적은 계속 줄어들고 있으며, 남극 해빙은

역사상 두 번째로 낮은 면적을 기록했습니다. 한편, 극심한 기상현상은 전세계적으로 계속해서 파괴적인 결과를 초래하고 있습니다.

이에 대응하여 WMO와 국제사회는 조기경보시스템과 기후서비스를 더욱 강화하여 의사 결정권자와 사회 전체가 극한 기상 및 기후에 더욱 회복력을 갖출 수 있도록 노력하고 있습니다. 우리는 진전을 이루고 있지만, 더 나아가야 하며, 더 빠르게 나아가야 합니다. 전세계 국가의 절반만이 적절한 다중 위험 조기 경보 시스템을 갖추고 있습니다. 이는 반드시 바뀌어야 합니다.

국가 기상 수문청(National Meteorological and Hydrological Services)에 대한 투자는 이러한 도전에 대응하고 더욱 안전하고 회복력 있는 공동체를 구축하기 위해 그 어느 때보다 중요합니다. 급변하는 세상에서 의사 결정을 내리기 위해서는 권위 있는 과학적 정보와 지식이 필수적이며, 이 보고서는 주요 기후 지표에 대한 우리의 지식 현황에 대한 최신 과학 기반 업데이트를 제공합니다.

셀레스타 사울로 사무총장

핵심 지표

대기 이산화탄소

주요 메시지

- 2023년에는 대기 중 이산화탄소 농도는 물론 메테인과 아산화질소 농도도 지난 80만년 중 최고 수준에 도달했습니다.
- 특정 지역의 실시간 데이터는 이 세가지 주요 온실가스 수준이 2024년에도 계속 증가했음을 보여줍니다.

지표 현황 (STATE OF THE INDICATOR)

대기 중 이산화탄소 (CO₂)의 전세계 물분율 (대기 농도)은 2023년에 새로운 관측 최고치를 기록했습니다. 2023년은 통합된 전세계 연간 수치가 제공되는 가장 최근 연도입니다. (그림 1). 2023년의 농도는 420.0 ± 0.1ppm으로, 2022년보다 2.3ppm 높았으며 산업화 이전 농도 (1750년)의 151%에 해당합니다. 1 420ppm의 농도는 대기 중 3,276 Gt의 CO₂에 해당합니다.

2023년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지 CO₂ 농도는 2.8ppm 증가했는데, 이는 1950년대 현대 CO₂ 측정이 시작된 이래 네 번째로 큰 연간 변화입니다. 이러한 증가는 엘니뇨 조건에서 더 높는데, 이는 화재 배출량 증가와 지구 순탄소 흡수원 감소로 인한 전반적인 증가 때문입니다. ([기후 인자 - 엘니뇨 남방 진동 참조](#)).

또 다른 두 가지 주요 온실가스인 메테인(CH₄)과 아산화질소(N₂O)의 농도 또한 2023년에 관측 사상 최고치를 기록했습니다. CH₄ 농도는 1,934 ± 2ppb(10억분의 1)에 도달하여 산업화 이전 수준의 265%에

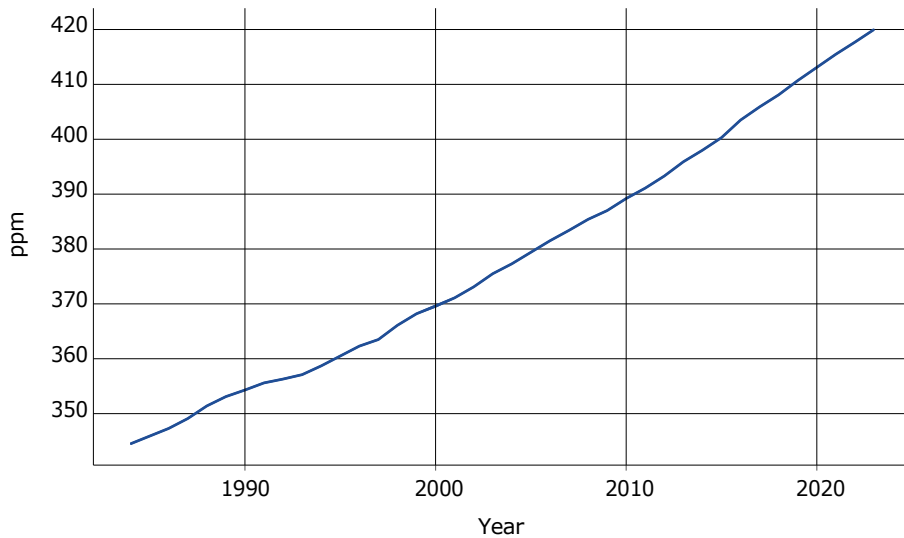


그림 1. 1984년부터 2023년까지 전 세계 대기 중 이산화탄소의 연평균 평균 물분율 (ppm)

출처: 세계 온실가스 데이터 센터 (WDCGG) [데이터세트 및 방법 참조](#)

달했고, N₂O 농도는 336.9 ± 0.1ppb로 산업화 이전 수준의 125%에 달했습니다. 실시간 데이터에 따르면 CO₂, CH₄, N₂O 농도는 2024년에도 계속 증가했습니다.

지표 배경 (INDICATOR BACKGROUND)

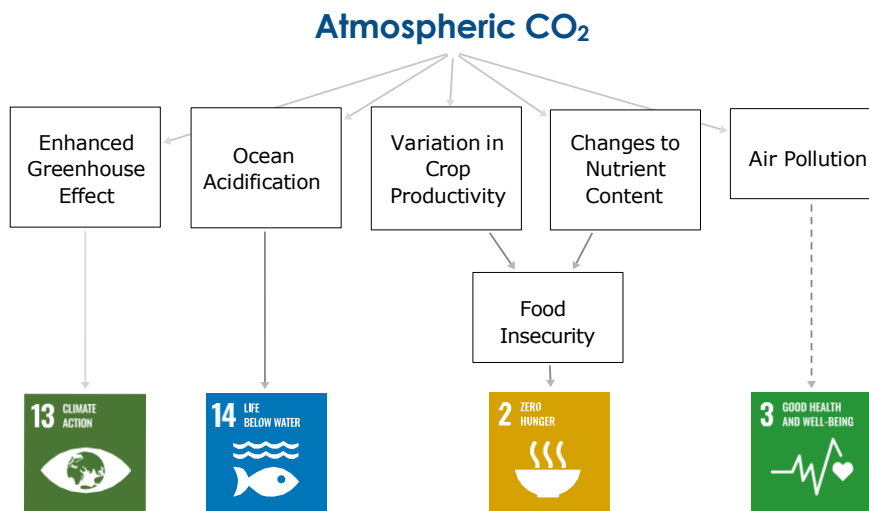
인간 활동으로 인한 대기 중 이산화탄소 농도 증가는 기후 변화의 가장 큰 원인입니다. 이산화탄소는 1750년 이래 모든 장수명 온실가스에 의한 복사 강제력(radiative forcing)의 약 66%를 차지하며, 지난 10년간 증가량의 약 79%를 차지합니다.² 현재 이산화탄소 농도는 최소 200만 년 만에 가장 높습니다.³ 메테인과 아산화질소 농도는 최소 80만 년 만에 가장 높습니다.

여기에서 제시된 온실가스 농도 (그림 1)는 1984년부터 2023년까지 전 세계적으로 조정된 네트워크를 통해 측정된 데이터를 바탕으로 추산되었습니다. 산업화 이전 (1750년)의 농도는 빙하에 포집된 공기를 이용하여 추산되었습니다.

대기중 이산화탄소 농도는 이산화탄소 발생원과 흡수원 간의 균형을 반영합니다. 인위적인 이산화탄소 발생원은 화석 연료 및 시멘트 생산과 관련이 있으며, 삼림 벌채와 같은 토지 이용 변화도 이산화탄소 발생원에 포함됩니다. 이산화탄소 흡수원에는 식물과 해양의 흡수가 포함됩니다.

인간 활동에 의해 배출된 이산화탄소 중 대기 중에 남아 있는 비율을 '대기 잔류물 (airborne fraction)' 이라고 합니다. 이는 이산화탄소 흡수원, 특히 육지의 이산화탄소 흡수원이 매우 자연적으로 변동하기 때문에 매년 달라집니다. 이산화탄소의 자연적 발생원과 흡수원 또한 기온 상승, 강수량 변화, 생물량 연소에 대한 민감성 변화 등을 통해 기후 변화의 영향을 받습니다.

2014년부터 2023년까지 인간 활동에 의해 발생한 총 배출량 중 48%가 대기에 잔류하여 대기 중 농도 증가를 초래했습니다. 추정된 해양 흡수원은 배출량의 26%를 차지했고, 추정된 육지 흡수원은 배출량의 30%를 차지했습니다.⁴



대기 중 CO₂와 지속 가능한 개발 목표 간 관련 위험

지구 평균 지표면 근처 온도

주요 메세지

- 2024년 연평균 지구 평균 지표면 온도는 산업화 이전 조건을 나타내는 데 사용된 1850~1900년 평균보다 $1.55\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 높았습니다.
- 2024년은 175년간의 관측 기록 중 가장 더운 해였으며, 이전 가장 더웠던 2023년의 기온을 $1.45\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 크게 앞지르며 1850~1900년 평균보다 높았습니다.
- 지구 평균 기온의 경우, 2015년부터 2024년까지 지난 10년 동안의 각 해가 모두 관측 이래 가장 따뜻했던 10개 해에 포함되었습니다.

지표 현황 (STATE OF THE INDICATOR)

2024년 연평균 지구 지표면 근처 온도는 1850~1900년 평균보다 $1.55\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 높았습니다. 2024년은 175년 관측 기록 중 가장 더운 해였습니다. 이전 가장 더웠던 해는 2023년으로, $1.45\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 보였습니다. 지난 2015~2024년은 각각 기록상 가장 더운 10년이었습니다. 이 분석은 6개의 지구 온도 데이터 세트를 종합하여 작성되었습니다. (그림 2).

연평균 전지구 평균기온이 1850~1900년 평균보다 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상 높은 해가 한 해 발생했다고 해서, 파리협정에서 정한 온도 상승 한계를 초과한 것은 아닙니다. (파리협정을 위한 지구 온도 모니터링 참조).

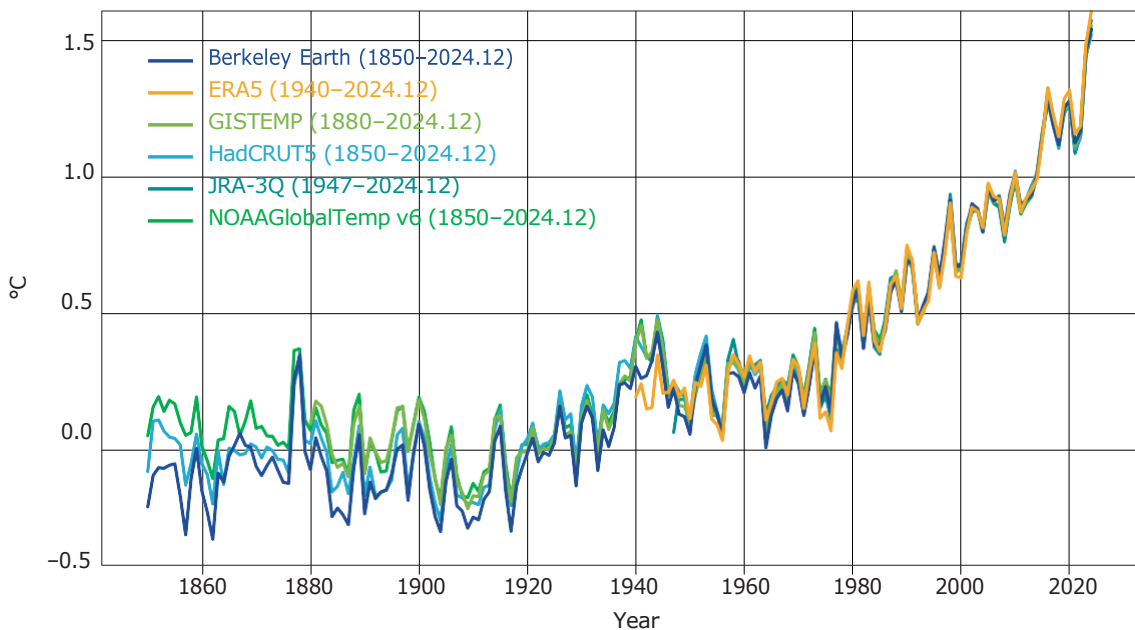


그림 2. 산업화 이전 (1850~1900) 기준 대비 1850년부터 2024년까지의 연간 지구 평균 기온 편차
출처: 데이터는 범례에 표시된 6개의 데이터세트에서 가져옴. 자세한 내용은 [데이터 세트 및 방법 참조](#)

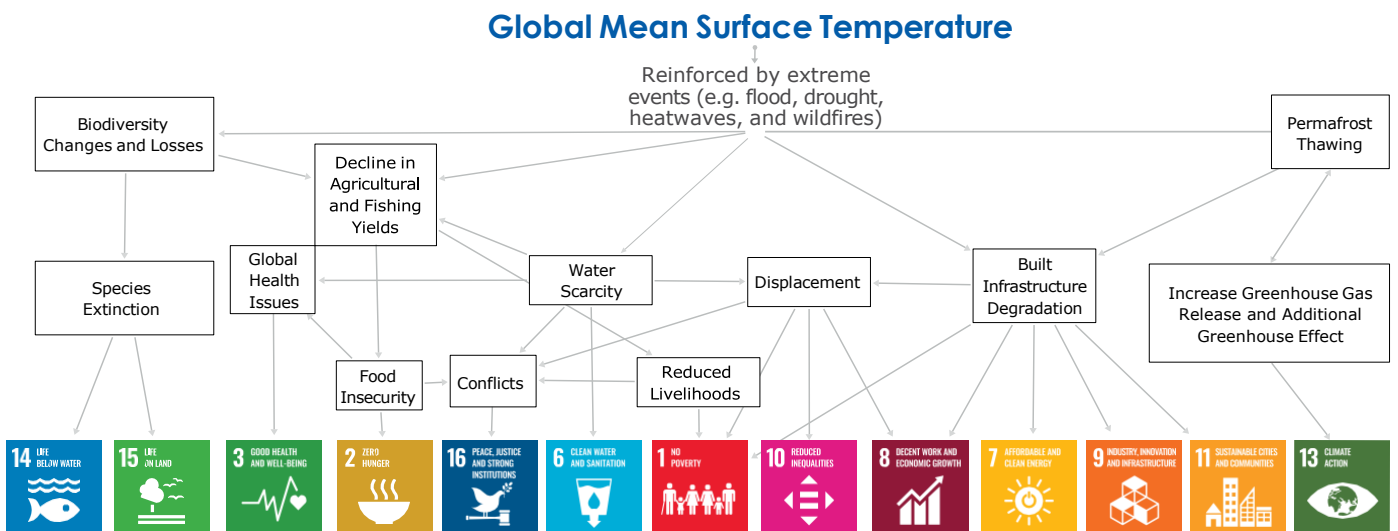
2024년 지구 평균 기온은 연초에 정점을 찍은 강력한 엘니뇨 현상으로 인해 상승했습니다. 그러나 2023년에는 이미 기온이 기록적인 수준에 도달했습니다. (2023/2024년 지구 평균 표면 온도 이상 현상에 대한 사이드바 참조) 2023년 6월부터 2024년 12월까지 매달 지구 평균 기온은 2023년 이전의 모든 월별 기록을 넘어섰습니다.

지표 배경 (INDICATOR BACKGROUND)

지구 평균 지표면 온도는 지구 표면 근처의 온도를 지표면 전체의 평균으로 나타낸 지표입니다. 약 1.5~2m 높이의 기상 관측소에서 측정한 기온과 선박 및 해양 부표에서 측정한 해수면 온도를 사용하여 추정합니다. 데이터는 품질 관리를 거치고 온도 측정방식의 변화에 따라 보정한 후, 통계적 방법을 사용하여 부족한 부분을 채웁니다. 지구 평균 기온은 기상 예보 시스템을 사용하여 위성 관측을 포함한 다양한 측정 방식을 결합하는 재분석을 통해서도 계산할 수 있습니다. 재분석 기반 추정치는 육지와 해양의 기온을 대표합니다.

이 보고서에서는 두 건의 재분석을 포함한 여섯 건의 데이터셋을 사용하여 지구 기온을 평가했습니다. (데이터셋 및 방법 참조). 이 데이터셋들은 1850년부터 현재까지의 기간을 포괄하지만, 모든 데이터셋이 1850년부터 전체 기간을 포괄하는 것은 아닙니다. (그림 2) 시리즈 간에는 약간의 차이가 있으며, 겹치는 기간 동안에는 대체로 동일한 변동을 보입니다. 기록 초기에는 차이가 더 커서 장기 변화 평가에 작은 차이 (약 0.1 °C)가 있습니다. 이러한 차이는 1850~1900년 대비 이상치(anomalies)에 대한 불확실성 추정치에 반영됩니다.

지구 평균 기온은 파리 협정의 장기 기온 목표의 기반입니다. 그러나 파리 협정은 일반적으로 개별 온도가 아닌 장기적인 변화 (10년 또는 그 이상)를 지칭하는 것으로 간주됩니다. 관련 쟁점에 대한 요약은 [파리협정을 위한 지구 온도 모니터링](#) 사이드바에서 확인할 수 있습니다.



지구 평균 표면 온도 증가와 지속 가능한 개발 목표 간 관련 위험

핵심 지표

해양 열 함량

주요 메시지

- 2024년 해양 열 함량은 65년 관측 기록 중 최고 수준에 도달했으며, 이는 2023년에 설정된 이전 최고 기록을 넘어섰습니다.
- 지난 8년 동안 매년 해양 열 함량에 대한 새로운 기록이 세워졌습니다.
- 지난 20년(2005~2024년) 동안 해양 온난화 속도는 1960~2005년 기간 동안 관찰된 속도의 두 배 이상입니다.

지표 현황 (STATE OF THE INDICATOR)

2024년 관측된 전세계 해양 열 함량은 2023년의 기존 기록을 16 ± 8 ZJ 상회하며 신기록을 세웠습니다 (그림 3). 지난 8년 동안 매년 해양 열 함량의 새로운 기록이 수립되었습니다. 계측 기록은 1960년경부터 시작되었습니다.

지난 20년 (2005~2024년) 동안 해양 온난화 속도 ($0.99\text{--}1.07$ W m⁻² 또는 연간 11.2~12.1 ZJ)는 1960~2005년 기간 동안 관찰된 속도 ($0.27\text{--}0.34$ W m⁻² 또는 연간 3.1~3.9 ZJ)의 두 배 이상입니다.

최근 기후변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC) 보고서는 1970년대 이후 해양 열 함량이 증가했음이 거의 확실하며, 주요 원인은 인간의 영향일 가능성이 매우 높다고 결론지었습니다. 이 연구에 사용된 데이터 세트에 따르면, 전세계 해양 열 함량은 1971년부터 2024년까지 해양 전체 평균 0.6 ± 0.1 Wm⁻² (연간 6.8 ZJ)의 비율로 증가했으며, 이는 IPCC 보고서와 일치합니다.⁵

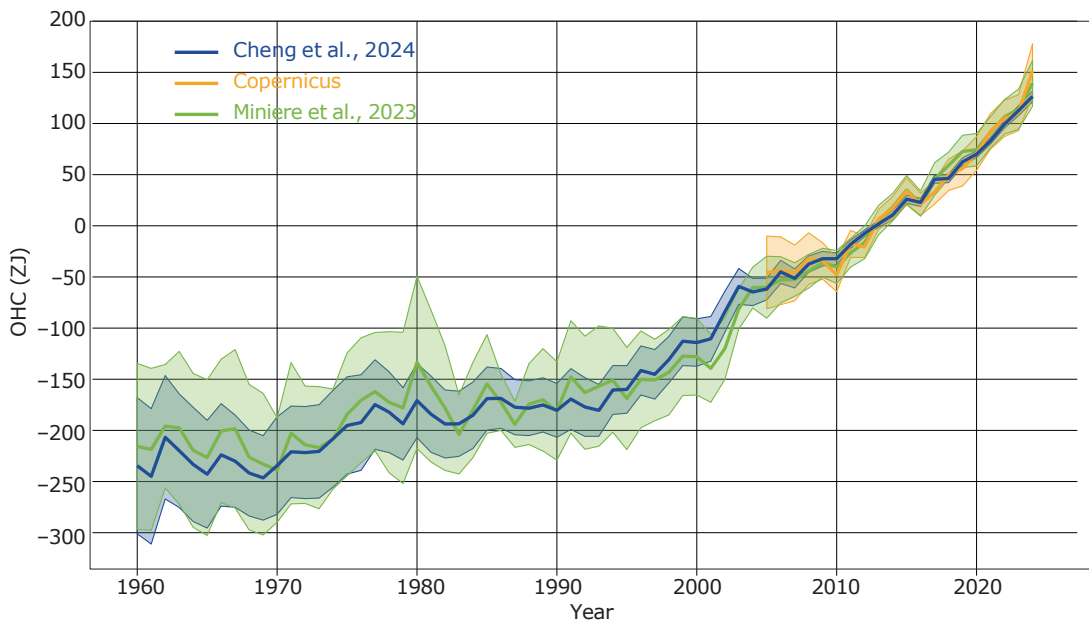


그림 3. 1960년부터 2024년까지 2000m 수심까지의 연간 전세계 해양 열 함량 (제타줄, 10²¹ J). 음영 처리된 영역은 각 추정치의 2-시그마 불확실성 범위를 나타냅니다. 자세한 내용은 데이터세트 및 방법을 참조하십시오.

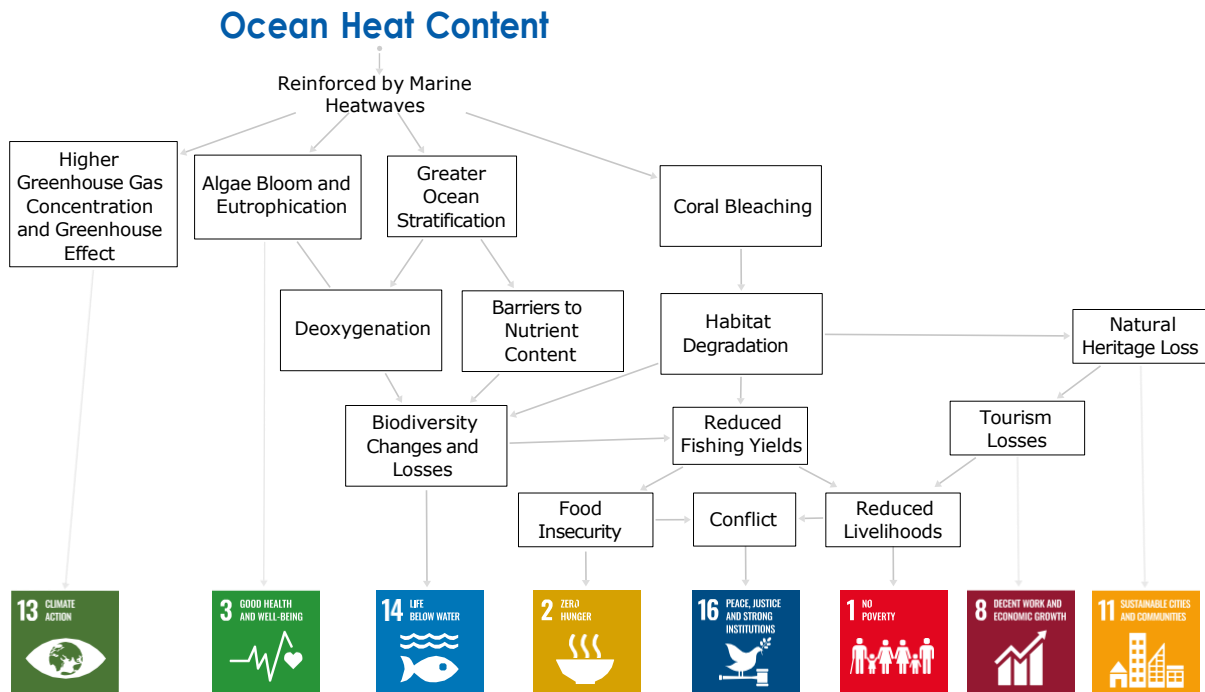
지표 배경 (INDICATOR BACKGROUND)

관측된 해양 온난화는 지구가 현재 에너지 균형을 벗어났음을 시사합니다. 온난화 속도는 지구 시스템에 기후 강제력으로 인해 발생하는 열의 형태로 잉여 에너지를 얼마나 빨리 가두고 있는지를 보여줍니다. 이 잉여 에너지의 약 5%는 육지를 데우고, 1%는 대기를 데우고, 4%는 빙권을 데우고 녹이는 데 사용됩니다. 그러나 약 90%의 대부분은 해양을 데우는 데 사용됩니다.⁶ 따라서 해양 열 함량 지표는 기후변화의 핵심 지표입니다.

표층에서 심해까지 (일반적으로 수심 2,000m까지)의 해양 온도를 통합하면 해양 열 함량을 측정할 수 있습니다.^{7,8} 해양 온도는 한 세기 넘게 연구선에 의해 측정되어 왔지만, 관측 자료가 너무 부족하여 1960년 이전의 전세계 평균을 도출하기 어렵습니다. 1970년대부터 선박에서 발사된 소모성 장비를 사용하여 추가 측정이 수행되었습니다. 2005년경부터는 자율형(autonomous) 아르고 부표가 수심 2,000m까지 거의 전 지구적인 범위를 측정하고 있습니다.

글로벌 규모에서 해양 열 함량의 시계열은 지구 해양이 분명히 온난화 되고 있음을 나타냅니다. 지구 해양 온도의 변화는 100년에서 1,000년 단위의 시간 규모에서는 돌이킬 수 없으며, 기후 예측에 따르면 저배출 시나리오에서도 해양 온난화는 21세기 후반과 그 이후에도 지속될 것으로 보입니다.⁹

해양 온난화는 해양 생태계 파괴, 생물 다양성 손실, 해양 탄소 흡수원 감소 등 광범위한 결과를 초래합니다. 또한 열대 및 아열대 폭풍을 촉진하고 극지방의 지속적인 해빙 손실을 악화시킵니다. 해양 온난화와 육지의 해빙 손실은 해수면 상승을 유발하고 있습니다.¹⁰



해양 열 함량 증가와 지속 가능한 개발 목표 간 관련 위험

핵심 지표

지구 평균 해수면

주요 메시지

- 2024년, 지구 평균 해수면은 위성 관측 사상 최고 기록을 경신했다 (1993년부터 현재까지).
- 지난 10년 (2015~2024년) 동안 지구 평균 해수면 상승률은 위성 기록이 시작된 첫 10년 (1993~2002년) 동안의 해수면 상승률의 두 배 이상이었습니다.

지표 현황 (STATE OF THE INDICATOR)

위성 기록이 시작된 이후 장기 해수면 상승률 (그림 4)은 두 배 이상 증가하여 1993~2002년 사이에 연간 2.1mm에서 2015~2024년 사이에 연간 4.7mm로 증가했습니다. 2024년에 지구 평균 해수면은 위성 기록상 (1993년부터 지금까지) 최고 기록을 달성했습니다.

장기적인 추세를 중심으로 한 지구 평균 해수면의 연도별 변동성은 엘니뇨-남방진동(ENSO)과 상관관계가 있습니다. [엘니뇨](#)와 [라니냐](#)로 인한 지구 평균 해수면의 상승과 하강은 해양과 육지 사이의 물 교환을 위한 강우 패턴의 특징적인 변화와 해양 열함량의 국지적 변화로 인해 발생합니다.^{11,12}

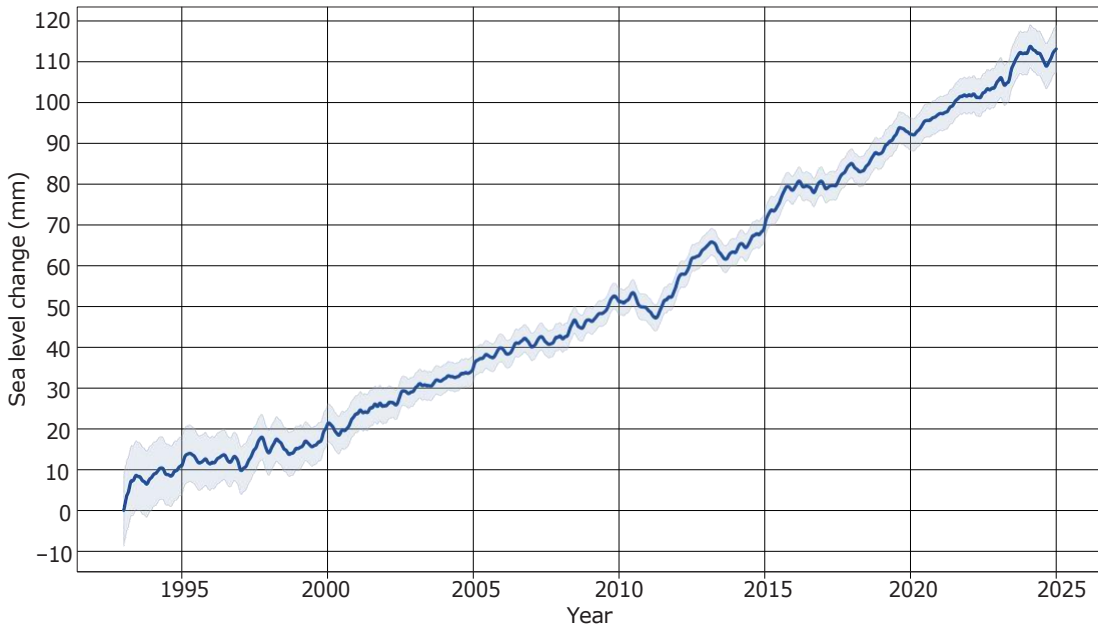


그림 4. 1993년부터 2024년까지의 계절별 지구 평균 해수면 변화입니다. 데이터에서 계절 주기를 제거했습니다. 음영 처리된 영역은 불확실성을 나타냅니다.

출처: AVISO CNES의 데이터. 자세한 내용은 [데이터 세트 및 방법 참조](#)

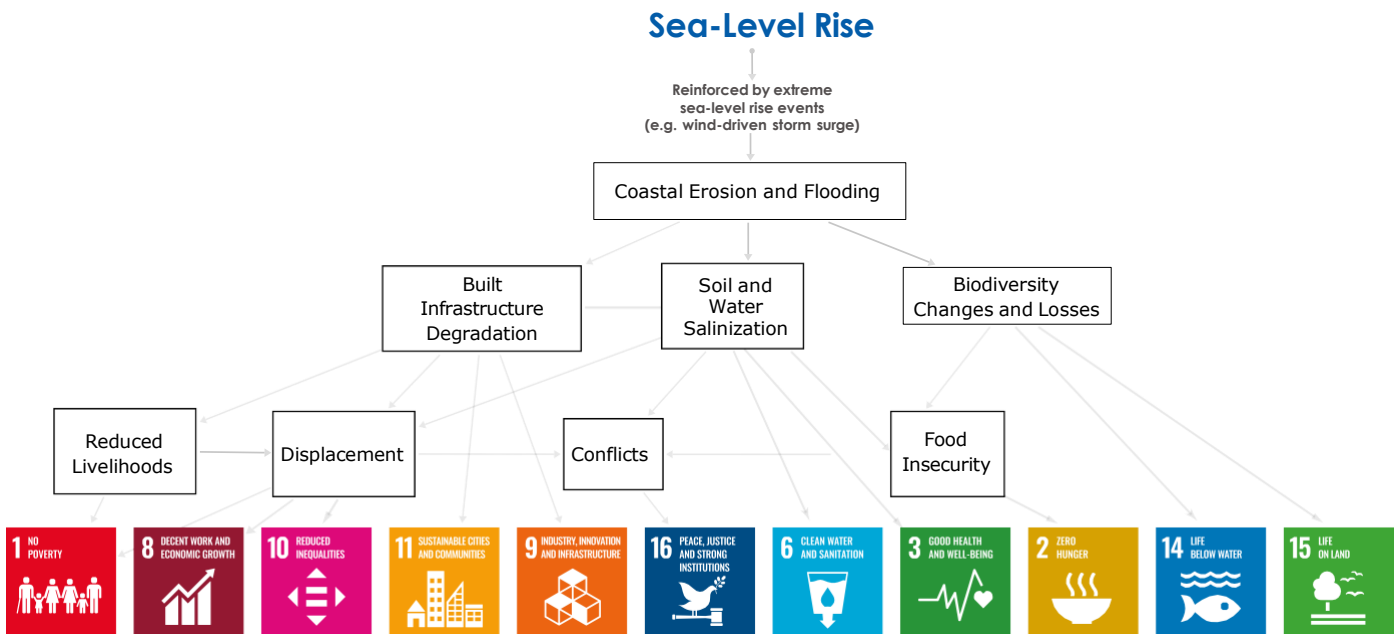
2023/2024년 강력한 엘니뇨 현상은 지구 평균 해수면을 수 밀리미터 일시적으로 상승시켰고, 2023/2024년 북반구 겨울에 정점에 도달했습니다. 2024년 초 지구 평균 해수면의 일시적인 하강은 엘니뇨가 끝나고 중립 상태로 복귀하는 시점과 일치했지만, 다른 요인들이 영향을 미칠 가능성도 있습니다.

지표 배경 (INDICATOR BACKGROUND)

지구 평균 해수면은 레이더 고도계를 사용하는 위성에 의해 측정되는데, 레이더 신호가 해수면에 도달하여 위성으로 돌아오는데 걸리는 시간을 기록합니다. 19세기 후반부터 전세계 해안선을 따라 조위계로 측정된 자료를 바탕으로 지구 평균 해수면에 대한 오래된 기록이 존재합니다.

해수면의 온난화는 해수면의 팽창을 초래하고 지구 평균 해수면 상승을 초래합니다. 육지의 얼음이 녹는 것 또한 해수면 상승에 기여합니다. 온실가스 배출이 중단되더라도 해수면의 온난화는 수세기 동안 지속될 것이므로, 해수면은 같은 기간 동안 계속 상승할 것입니다.

해수면 변화는 해안지역과 지역 사회에 광범위한 영향을 미칩니다. 해수면 상승은 연쇄적이고 복합적인 영향¹³을 초래하여 해안 생태계 및 생태계 서비스 손실, 지하수 염분화, 홍수, 해안 기반 시설 손상 등을 초래할 것입니다. 이러한 영향은 단기 및 장기적으로 생계, 정착지, 건강, 복지, 식량 및 수자원 안보, 그리고 문화적 가치에 대한 위협으로 이어집니다.



해수면 상승과 지속 가능한 개발 목표간 관련 위험

핵심 지표

해양 pH

주요 메시지

- 지난 39년동안 해수면의 산성화는 전세계 평균 해수면 pH의 꾸준한 감소에서 알 수 있듯이 지속되어 왔습니다.
- 지역적으로 해양 산성화는 균일하게 증가하지 않습니다.

지표 현황 (STATE OF THE INDICATOR)

전세계 해수면 pH는 1985년부터 2023년까지 10년마다 -0.017 ± 0.001 pH 단위의 속도로 변화했습니다. (그림 5). 2023년은 전세계 수치를 통합한 가장 최근 연도입니다. pH 감소를 해양 산성화라고 합니다. pH 변화율은 최신 IPCC 보고서의 추정치와 일치합니다.¹⁴

지역적으로 해양 산성화는 균일하게 진행되지 않았습니다. 지역 표면 pH의 가장 급격한 감소는 인도양, 남극해, 동적도 태평양, 북반구 열대 태평양, 그리고 대서양 일부 지역에서 관찰되었습니다. 전세계 해양 표본의 47%를 차지하는 이 지역에서 해양 표면은 전세계 평균보다 빠른 속도로 산성화되고 있습니다.¹⁵

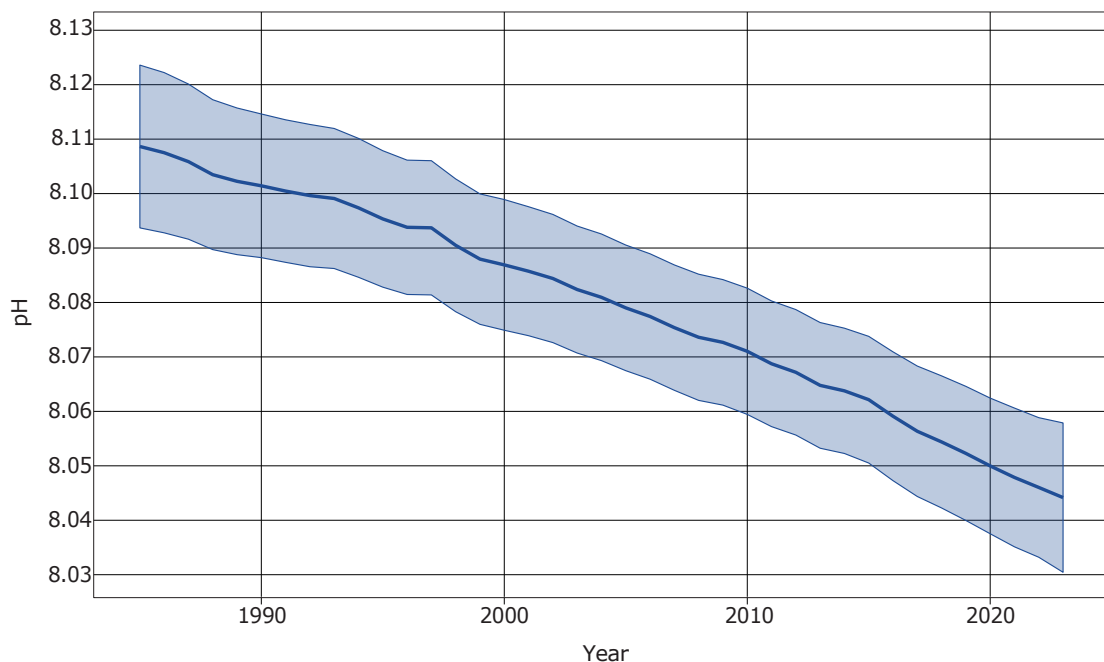


그림 5. 1985년부터 2023년까지의 연간 전세계 평균 표면 해양 pH. 진한 선은 중앙 추정치이고, 음영 처리된 영역은 불확실성 범위입니다.

출처: 코페르니쿠스 해양 환경 모니터링 서비스(CMEMS)의 데이터. 자세한 내용은 [데이터 세트 및 방법 참조](#)

지표 배경 (INDICATOR BACKGROUND)

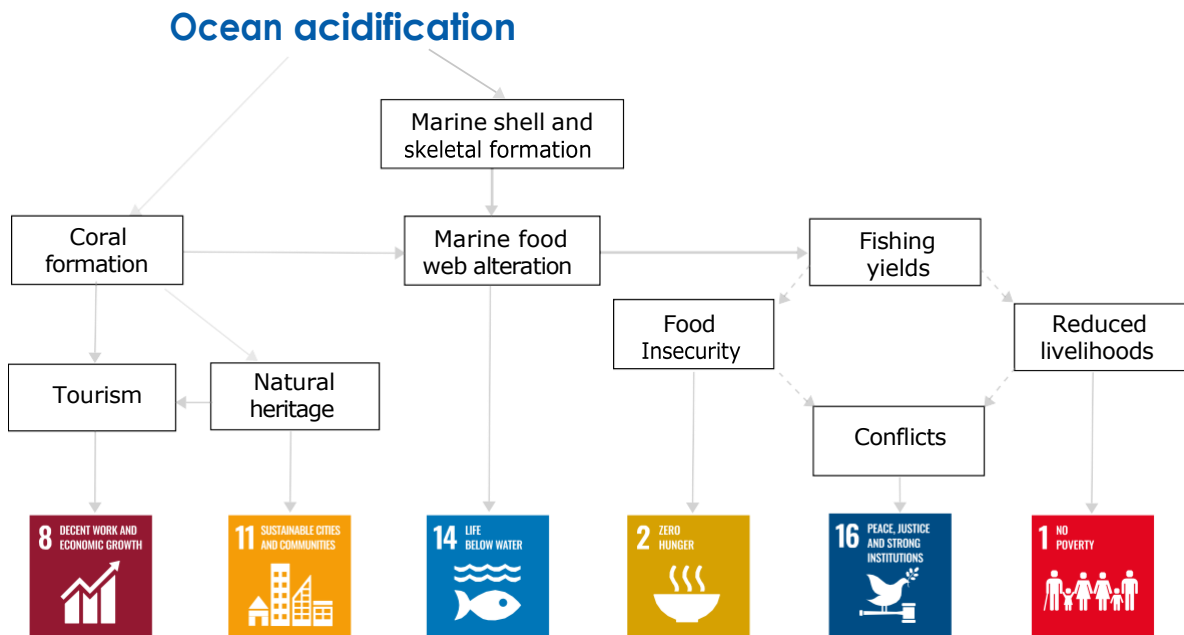
2014년부터 2023년까지 10년 동안 인간 활동으로 배출된 이산화탄소의 약 4분의 1이 해양에 흡수되었습니다.¹⁶ 이러한 과정은 해양의 탄산염 화학구조 변화를 일으켜 pH의 저하를 초래했습니다. 해양 pH는 7이상이기 때문에 해수는 약 알칼리성을 유지하지만, 관찰된 pH 감소를 해양 산성화라고 합니다.

기후 예측에 따르면 해양 산성화는 21세기에도 계속 증가할 것이며, 그 속도는 미래 배출량에 따라 달라집니다. 심해의 pH 변화는 100년에서 1,000년 단위로 돌이킬 수 없습니다.¹⁷

해양 산성화가 해양 생물에 영향을 미치고 있다는 것은 잘 알려진 사실입니다. 해양 생물들은 산성화, 해양 온난화, 산소 부족이라는 복합적인 영향에 대해 서로 다른 대사 수준에서 반응을 보이며, 여기에는 호흡 스트레스와 열에 대한 내성 감소 등이 포함됩니다.¹⁸

해양 산성화가 서식지 면적, 생물 다양성, 생태계 기능 및 생태계 서비스에 미치는 영향은 이미 명확하게 관찰되었으며, 조개류 양식 및 어업을 통한 식량 생산에도 부정적인 영향을 미치고 있습니다.¹⁹

따뜻한 바다에서 서식하는 산호초와 산호, 따개비, 홍합처럼 껍질이나 골격을 만드는 고착성 석회화 생물들이 지배하는 암반 해안도 극심한 수온 상승과 pH 변화의 영향을 받고 있습니다.²⁰ 표층 해양의 pH를 모니터링 하는 것은 여러 국제 과학 이니셔티브의 주요 과제로 떠올랐으며, 이는 **지속가능발전목표 (SDG) 14**의 목표 중 하나이기도 합니다.



해양 산성화와 지속 가능한 개발 목표 간 관련 위험

핵심 지표

빙하 질량 균형

주요 메시지

- 2021/2022년부터 2023/2024년까지의 빙하 질량 손실은 기록상 가장 부정적인 3년 연속 빙하 질량 균형을 나타내며 1950년 이후 가장 부정적인 연간 빙하 질량 균형 10건 중 7건이 2016년 이후에 발생했습니다.
- 노르웨이, 스웨덴, 스발바르 및 열대 안데스에서는 예외적으로 부정적인 질량 균형이 나타났습니다.

지표 현황 (STATE OF THE INDICATOR)

빙하 질량 균형, 즉 빙하가 획득하거나 잃은 질량에 대한 2023/2024년 수문연도(9월~8월) 데이터는 아직 완전히 확보되지 않았지만, 세계빙하모니터링서비스 (WGSS)에 매년 보고되는 빙하 데이터의 약 90%에 대한 예비 관측 결과에 따르면 2023/2024년도 역시 전세계적으로 극도로 부정적인 질량 균형을 기록한 또 하나의 해였던 것으로 나타났습니다. (그림 6).

노르웨이, 스웨덴, 스발바르 제도, 열대 안데스 지역에서는 특히 심각하게 부정적인 빙하 질량 균형이 관찰되었습니다. 현재까지 보고된 약 160개 빙하 중 141개에 대한 자료에서 단 2개 반이 양(+의 질량 균형을 보였으며, 약 60개의 전세계 기준 빙하 중 58개의 자료를 종합한 결과, 2021/2022년 및 2022/2023년의 매우 부정적인 질량 균형 연도와 일치하는 평균 질량 손실이 나타났고, 이는 수괴 환산 기준으로 약 -1.1미터에 이를 것으로 예상됩니다.

이는 2020년대 들어 가속화되고 있는 빙하 질량 손실 추세가 계속되고 있음을 보여줍니다. 최근 3개연도(2021/2022~2023/2024)는 관측 이래 가장 큰 규모의 질량 균형을 기록한 상위 10개 연도 중 7개가 2016년 이후에 발생했습니다.

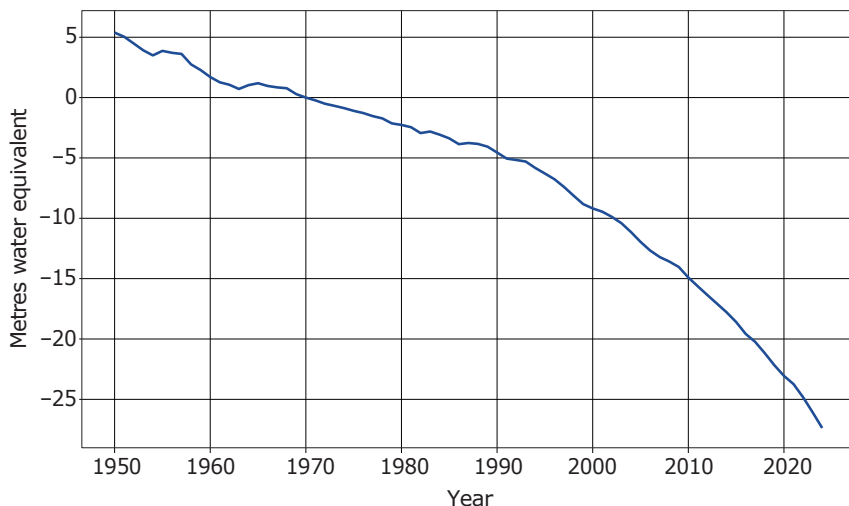


그림 6. 30년 이상 진행된 빙하학적 측정을 통해 얻은 기준 빙하의 누적 연간 질량 균형. 연간 질량 변화량은 미터당 물 환산량(mW/m²)으로 표시되며, 이는 제곱미터당 톤(1 000 kg m⁻²)에 해당합니다. 2024년 값은 예비치입니다. 자세한 내용은 [데이터 세트 및 방법 참조](#)

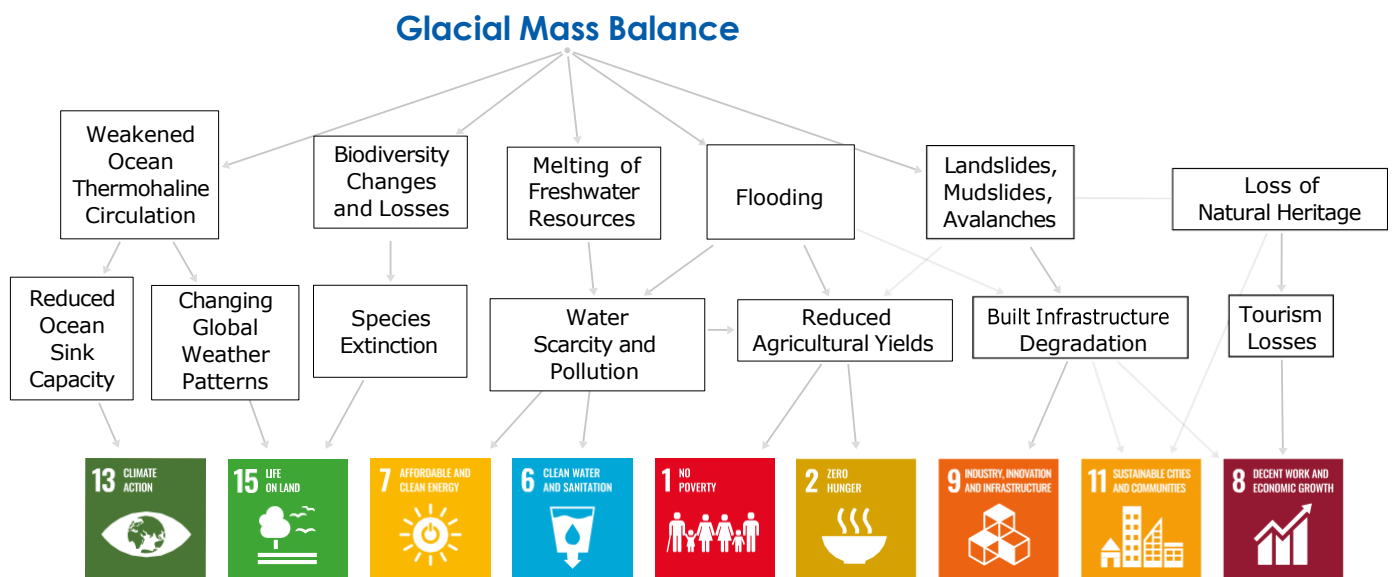
지표 배경 (INDICATOR BACKGROUND)

빙하는 눈이 압축되어 얼음이 되고, 그 얼음이 변형되어 산 아래로 흐르면서 형성됩니다. 빙하는 일반적인 두 개의 구역으로 나뉘는데, 하나는 눈의 축적이 얼음 손실보다 많은 축적대이고, 다른 하나는 용해 및 기타 작용으로 인한 얼음 손실이 축적보다 많은 소실대(용설대)입니다. 빙하가 호수나 바다에 도달하면, 얼음이 물과 맞닿은 부분에서 녹거나, 빙하의 일부가 떨어져 나가는 칼빙(calving) 현상을 통해 얼음 손실이 발생할 수 있습니다.

빙하 질량 균형, 즉 빙하가 얻거나 잃은 질량은 일반적으로 빙하 면적에 걸쳐 평균한 연간 두께 변화로 표현되며, 미터 단위의 물 환산량으로 표시됩니다. 1 미터 물 환산량은 대략 제곱미터당 1톤과 같습니다. 1993년부터 2018년까지 빙하에서의 얼음 손실은 총 해수면 상승의 약 21%를 차지했으며, 이는 해양 온난화로 인한 해수 팽창(42%)의 절반 정도이지만, 그린란드(15%)와 남극(8%)의 빙상 용해로 인한 기여도보다는 더 큰 수치입니다.²¹

개별 빙하의 질량 균형은 기온, 강수량, 습도, 구름량의 변화에 영향을 받습니다. IPCC 제6차 평가보고서 (AR6)는 1990년대 이후 전세계 빙하 후퇴의 주요 원인이 인간 활동일 가능성이 매우 높다고 결론지었으며, "1950년대 이후 전세계 빙하의 거의 대부분이 동시다발적으로 후퇴하는 전지구의 빙하 후퇴 현상은 적어도 지난 2000년 동안 전례 없는 현상입니다(중간 신뢰도)." 라고 언급했습니다.²²

빙하 용해 속도는 빙하 알베도, 즉 빙하 표면이 반사하는 태양광의 비율에 의해서도 크게 영향을 받습니다. 노출된 빙하 얼음은 계절적 눈덮임보다 어두워 알베도가 낮으며, 광물 먼지, 블랙 카본, 조류 활동, 산불로 인한 낙진 등으로 인해 더 어두워질 수 있습니다. 눈 덮임 감소, 긴 용해 기간, 산불 활동은 모두 빙하 표면에 어두운 물질을 집중시켜 알베도를 낮추고, 이로 인해 용해 속도가 증가합니다.



빙하 질량 균형과 지속 가능한 개발 목표 간 관련 위험

핵심 지표

해빙 범위

주요 메시지

- 2024년 북극 해빙의 일일 최저 면적은 관측 기록(1979년 이후) 중 일곱 번째로 낮았습니다.
- 위성 기록에서 가장 낮은 18개의 북극 해빙 최저 면적은 모두 지난 18년 동안 발생했습니다.
- 남극 해빙의 연간 최저 및 최고 면적은 각각 관측 기록(1979년 이후) 중 두 번째로 낮았습니다.

지표 현황 (STATE OF THE INDICATOR)

남극 및 북극 지역의 해빙 면적은 모두 연중 내내 1991년부터 2020년까지의 평균보다 다 낮았습니다. (그림 7).

2024년 북극 해빙의 일일 최저 면적은 9월 11일 기준 428만 km²로, 46년간의 위성 관측 기록 중 7번째로 낮은 수치입니다. 이는 1991년부터 2020년까지의 평균 최저 일일 면적보다 117만 km² 적은 값입니다. 위성 기록에서 가장 낮은 18개의 최저 해빙 면적은 모두 지난 18년 동안 발생했습니다.

2024년 남극 지역의 일일 최저 면적은 2월 20일 기준 199만 km²로, 위성 관측 시대에서 두 번째로 낮은 최저 해빙 면적과 같으며, 남극 해빙 최저 면적이 200만 km² 아래로 떨어진 것은 3년 연속입니다. 이 세 해는 위성 기록상 남극 해빙 최저 면적이 가장 낮은 세 해에 해당합니다.

남극의 해빙 면적은 연중 1991~2020년 평균보다 모두 낮았으며, 9월 19일 경 연간 최대 일일 면적인 1,716만 km²에 도달했습니다.

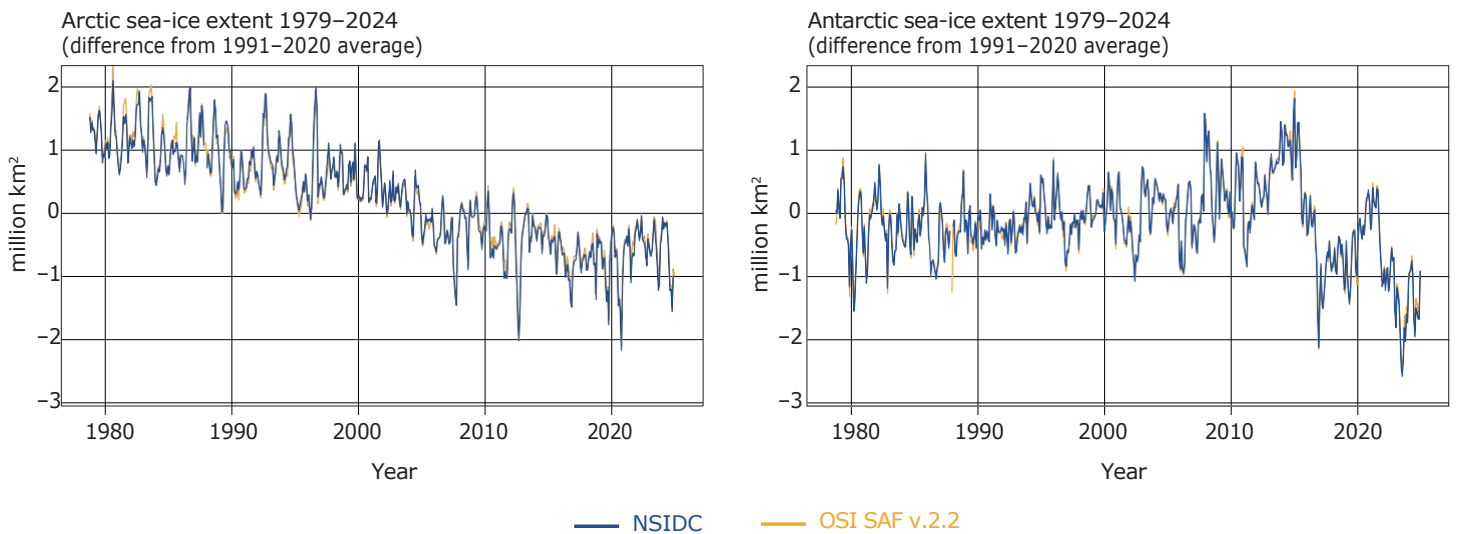


그림 7. 1979년부터 2024년까지의 월별 북극(왼쪽)과 남극(오른쪽) 해빙 면적 이상치(1991년~2020년 평균과의 차이) (단위: 백만 제곱킬로미터)

출처: NSIDC 및 OSI SAF의 데이터. 자세한 내용은 [데이터 세트 및 방법 참조](#)

최대 해빙 면적 근처에서 6일간 데이터가 누락되었다는 것은 정확한 범위와 날짜에 약간의 불확실성이 있음을 의미합니다. 관측된 최대 해빙 면적은 1991년부터 2020년까지 남극 최대 일일 빙하 면적 평균보다 155만 km² 적었으며, 기록상 두 번째로 낮은 최대 해빙 면적입니다. 이보다 더 낮았던 해는 2023년뿐입니다. 연말에는 해빙면적이 1991년부터 2020년까지 평균보다 약간 낮은 상태로 마무리되었습니다.

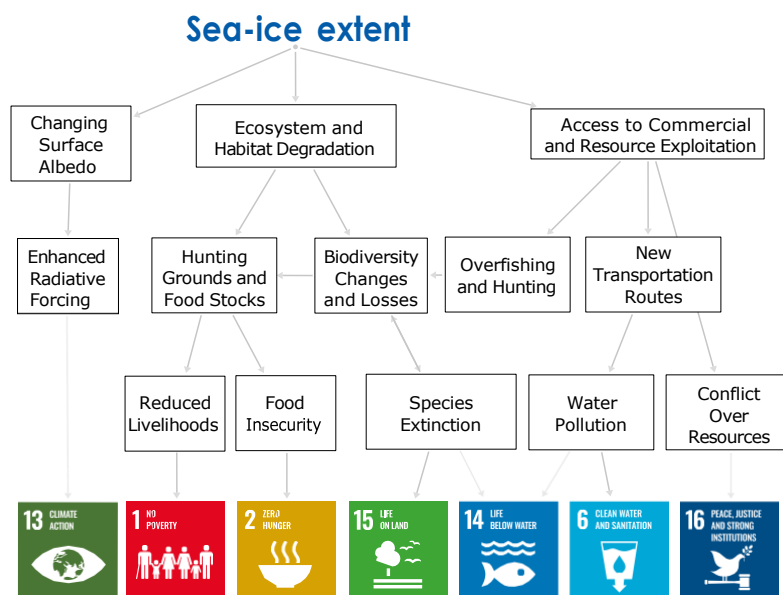
지표 배경 (INDICATOR BACKGROUND)

해빙은 바다 표면에 떠 있는 얼어붙은 바닷물입니다. 해빙 면적은 매년 가을과 겨울에 지구 극지방에서 확대되는데, 이는 대기와 바닷물이 냉각되면서 바닷물이 얼기 때문입니다. 여름철에는 기온 상승으로 인해 이러한 계절적 얼음의 상당 부분이 녹으며, 각 반구의 연간 해빙 최소화는 일반적으로 늦여름이나 초가을(북반구 9월, 남반구 2월)에 기록됩니다. 해빙 면적의 변화는 해양 순환, 대기 역학 및 지표면 가열에 영향을 미칠 수 있습니다.

해빙 면적은 해빙이 15%이상 덮여 있는 해양의 면적으로 정의됩니다. 이는 역동적인 값으로, 열역학적 성장(결빙)과 감소(용해)는 물론, 해빙이 바람과 해류에 따라 이동함에 따라 변화합니다. 해빙 면적과 분포는 마이크로파 위성 영상을 사용하여 지도화 됩니다.

북극 해빙 면적의 장기적인 변화는 계절 주기 전반에 걸쳐 관측되어 왔습니다. 1979년부터 2024년까지 북극 해빙 최저 면적은 10년마다 1991~2020년 평균의 약 14%씩 감소하는 추세를 보였으며, 이는 연간 약 77,000 km²의 해빙이 사라진 것에 해당한다.

2015년까지는 남극 해빙 최대 면적에 대해 작지만 긍정적인(증가하는) 장기 추세가 있었습니다. 그러나 최근의 낮은 해빙 면적 이후로는 더 이상 그런 추세가 이어지지 않고 있습니다. 지난 3년간 남극 해빙 면적은 이례적으로 낮았지만, 남극 해빙에 근본적인 체제 전환(regime shift)이 발생했는지는 아직 확실하지 않습니다.^{24,25}



해빙 범위와 지속 가능한 개발 목표 간 관련 위험

기후 인자

엘니뇨-남방 진동

주요 메시지

- 2023/2024년 강력한 엘니뇨는 2020년 말부터 2023년 초까지 3년 연속 발생한 라니냐 현상에 이은 것입니다.
- 엘니뇨 현상은 2023년 중반에 형성되었고, 2023년 말에 강해졌다가 2024년 2분기에 소멸되었습니다.

엘니뇨-남방 진동 (ENSO) 현황

2020년부터 2023년 초까지 지속된 장기간의 라니냐 현상 이후, 엘니뇨는 2023년 9월까지 엘니뇨 현상이 뚜렷하게 나타났습니다. 이 엘니뇨는 2023년 11월부터 2024년 1월 사이에 절정에 달했으며, 당시 해양 니노 지수는 2.0 °C에 도달했습니다. 이는 2015/2016년 엘니뇨 이후 가장 높은 수치이며, 시계열 시작 시점인 1950년 이후 다섯 번째로 높은 수치였습니다.

2024년 1월부터 열대 동태평양의 해수면 온도 편차가 감소하기 시작하여 6월경 ENSO 중립 상태로 돌아왔습니다. 2024년 말까지는 중립 또한 약한 라니냐 상태가 유지되었습니다.

엘니뇨가 발생하면 전지구 기온이 상승하는 경향이 있는데, 실제로 2023년과 2024년의 지구 기온은 그 이전 해들 보다 높았습니다. 2024년에는 매달 기록적인 또는 거의 기록적인 더위가 기록되었고, 연평균 기온은 사상 최고치를 기록했습니다. 그러나 다른 요인들도 작용했을 가능성이 높습니다. ([2023/2024년 지구 평균 표면 온도 이상 현상 참조](#)). 2024년의 강수 패턴 중 일부, 남아메리카 북부와 남아프리카의 건조한 기후 등은 전형적인 엘니뇨의 특징을 보였습니다. (그림 8 참조).

Typical impacts of El Niño on precipitation January–June

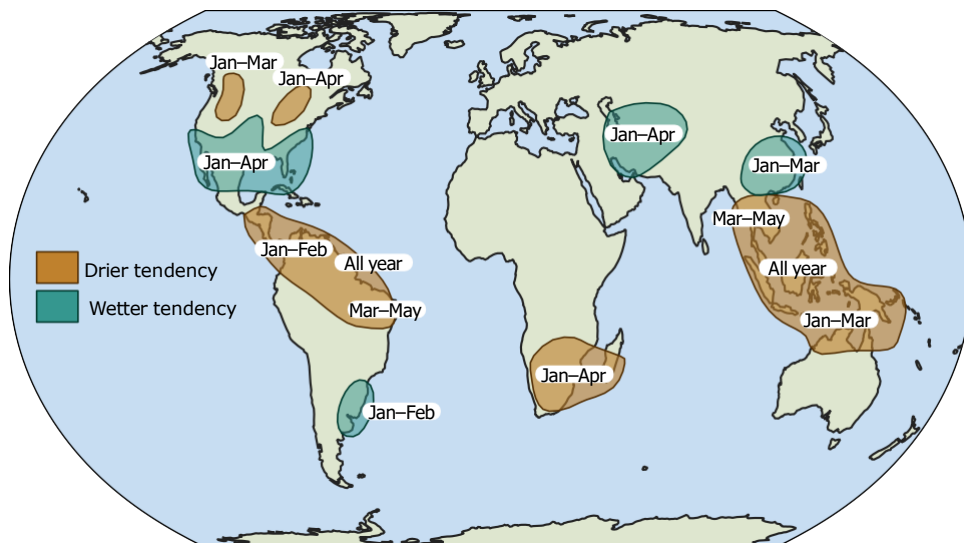


그림 8. 다양한 출처를 기반으로 한 1월부터 6월까지의 전형적인 엘니뇨 계절 강수량 효과는 데이터셋 및 방법을 참조하세요. 이는 예측이 아니며, 엘니뇨와 강수량 간의 과거 연관성을 기반으로 합니다.

2024년 엘니뇨에서 중립상태로의 전환은 전세계 평균 해수면의 일시적인 하락과 관련이 있을 가능성이 높습니다.

기후 인자 배경 (Driver Background)

엘니뇨 남방진동(ENSO)은 전세계 기상 패턴의 연중 및 계절적 변동성을 유발하는 가장 중요한 요인 중 하나입니다. 이는 폭우, 홍수, 가뭄, 폭염, 한파와 같은 재해의 발생 및 분포 변화와 관련이 있습니다.

엘니뇨는 열대 동태평양의 해수면 온도가 평균보다 높고 해역의 무역풍이 약해지는 것이 특징입니다. 약해진 무역풍은 남미 해안을 따라 차가운 해수의 용승을 감소시켜 해수면 온도를 상승시킵니다.

라니냐는 중부 및 열대 동태평양의 해수면 온도가 평균보다 낮고 무역풍이 강해지는 것이 특징이며, 일반적으로 엘니뇨와 반대되는 효과를 나타냅니다.

엘니뇨는 일반적으로 지구 평균 기온에 일시적인 온난화 영향을 미치고, 라니냐는 일반적으로 일시적인 냉각 영향을 미칩니다. 가장 큰 온난화 또는 냉각효과는 일반적으로 이벤트 정점 후 2~3개월 후에 발생합니다. 해양의 과도한 가열 또는 냉각이 대기로 환산되는 데 시간이 걸리기 때문입니다.

엘니뇨와 라니냐는 전세계 지역 강우 패턴에 영향을 미치며, 이는 이벤트의 강도와 시점, 그리고 기타 동시 기상 요인에 따라 달라질 수 있습니다. 그림 8은 엘니뇨 조건에 유리한 몇 가지 일반적인 강우 이상 현상을 보여줍니다. 그러나 각 엘니뇨는 다르며, 다른 요인들도 강우에 영향을 미칩니다.

강우 패턴의 변화는 해수면에도 영향을 미칠 수 있는데, 엘니뇨 발생 시에는 지구 평균 해수면이 상승하고, 라니냐 발생 시에는 지구 평균 해수면이 하락합니다.

2024년 이벤트에 대한 자세한 내용은 [강수량 및 영향력이 큰 이벤트](#) 섹션을 참조하십시오. ENSO의 진화에 대한 자세한 내용은 [WMO 엘니뇨/라니냐 업데이트](#)에서 확인할 수 있습니다.

지구 기온 및 강수량 패턴

기온

2024년에는 대부분의 육지 지역이 장기 평균 (1991~2020년)보다 더 따뜻했으며, 아이슬란드, 남극 대륙 일부, 남미 남단 주변 일부지역에서는 평균 기온보다 낮은 기온이 나타났습니다. (그림 9) 남미와 중앙 아메리카 동쪽에서 태평양 서부에 이르는 열대 지방의 넓은 지역에서 기록적이거나 기록에 가까운 연평균 기온이 관측되었습니다. 열대 지방 이외의 다른 육지 지역도 북미 동부, 북아프리카, 유럽, 남아시아 및 동아시아를 포함하여 예외적으로 높은 연평균 기온을 경험했습니다.

열대 및 북대서양, 열대 인도양, 서태평양 일부 지역, 남극해 일부 지역에서 해수면 온도가 사상 최고치를 기록했습니다. 연초 엘니뇨 현상에도 불구하고 남아메리카 서해안에서는 평균보다 낮은 수온이 관측되었으며, 적도를 따라 서쪽으로 갈수록 평균 이상의 수온이 더욱 뚜렷하게 나타났습니다.

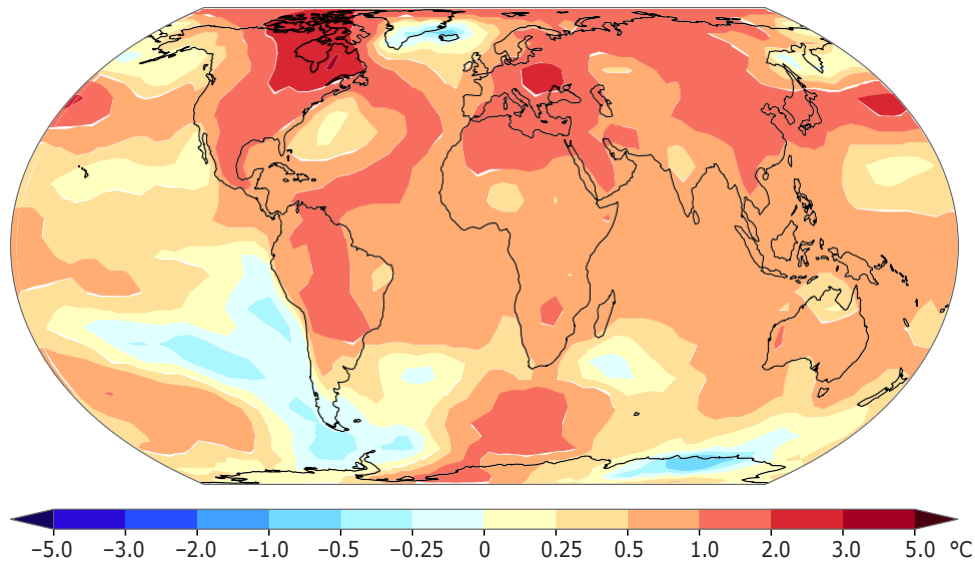


그림 9. 1991~2020년 평균 대비 연평균 기온 편차. 표시된 값은 6개의 전세계 기온 데이터 세트의 중앙값입니다.

출처: 6개의 글로벌 온도 데이터 세트에서 얻은 데이터. 자세한 내용은 [데이터 세트 및 방법 참조](#).

강수량

2024년에는 남부 아프리카 대부분 지역, 서아프리카 해안 일부 지역, 그리고 북아프리카 해안을 따라 평년보다(1991~2020년) 건조한 상황이 관측되었습니다. (그림 10) 아마존 저지대와 북부 안데스 산맥에서 판타날 습지에 이르기까지 남미의 대부분 지역도 평년보다 건조했습니다. 멕시코 북서부, 카리브해 일부 섬, 그리고 북미 북부 일부 지역은 강수량이 비정상적으로 적었습니다. 호주 남부 해안, 뉴질랜드 북부, 뉴칼레도니아, 그리고 폴리네시아 중부 및 동부 섬 지역은 평년보다 강수량이 적었습니다. 또한 남부 및 남동부 유럽은 평년보다 건조했습니다.

사헬 지역 일부 지역과 중부 및 남부 동아프리카 지역은 평년보다 습했습니다. 중부 및 서부 유럽 또한 장기 평균보다 습했습니다. 폴리네시아 서부 섬들, 멜라네시아 북부, 뉴질랜드 남부, 그리고 호주 동부 및 북부 일부 지역은 평년보다 강수량이 많았습니다. 캐나다 군도와 멕시코만 주변 일부 지역은 평년보다 강수량이 많았습니다. 북동부, 동아시아, 중앙아시아 대부분 지역에서 평년보다 많은 강수량이 관측되었으며, 동남아시아, 남아시아, 남서아시아에서도 다소 높은 강수량이 관측되었습니다.

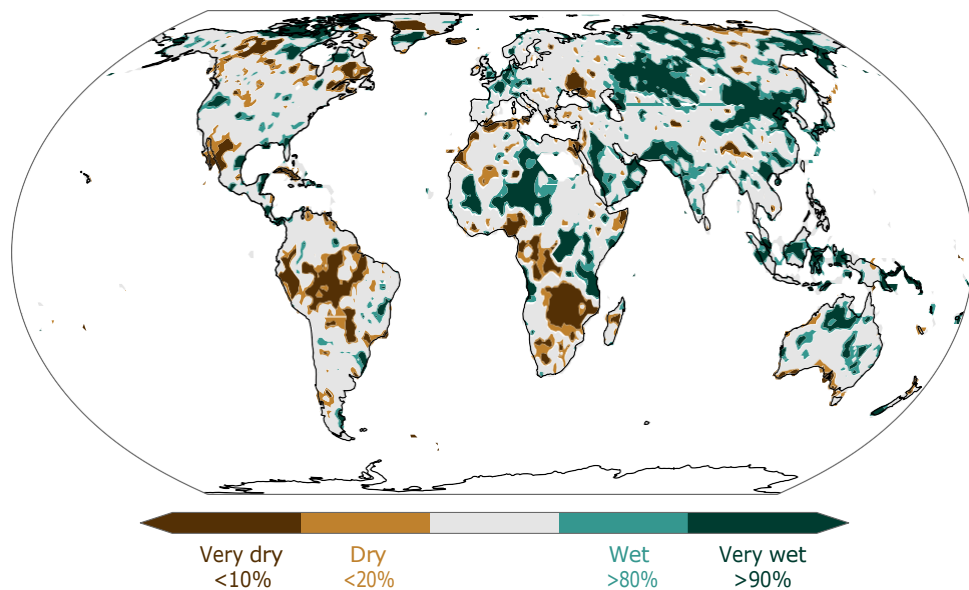


그림 10. 2024년 연간 강수량은 1991~2020년 분포를 기준으로 백분위수로 표시했습니다. 갈색 지역은 비정상적으로 건조한 지역입니다. 녹색 지역은 비정상적으로 습한 지역입니다.

출처: GPCC(Global Precipitation Climatology Centre)의 데이터.

영향력이 큰 이벤트

이 섹션에서는 2024년에 발생한 주요 기상 및 기후 사건과 그 사회경제적 영향에 대해 설명합니다. 더 자세한 목록은 [극한 기상 현상에 대한 보충자료](#)와 [극한 기상 현상에 대한 인터랙티브 지도](#)를 참조하십시오.

2024년 극심한 기상 현상으로 인해 2008년 이후 한 해 동안 기록된 가장 많은 수의 신규 이재민이 발생했습니다. 신규 이재민 뿐만 아니라, 이동 중인 이주민, 장기 체류 중인 이주민은 등도 불안정하거나 분쟁 영향을 받는 지역에서 대규모로 영향을 받았습니다. 이러한 극한 기상 현상은 주택, 핵심 인프라, 삼림, 농지, 생물 다양성을 파괴할 뿐만 아니라, 회복력을 약화시키고 이동 중인 사람들과 이미 이주민으로 살고 있는 사람들에게 심각한 위험을 초래합니다. 2024년 중반까지 전세계 18개국에서는 분쟁 심화, 가뭄, 높은 국내 식량 가격 등 다양한 충격이 복합적으로 작용하면서 식량 위기가 악화되었습니다.²⁶ 2024년에는 8개국에서 2023년 연간 최대치보다 최소 100만 명 더 많은 사람들이 심각한 식량 불안에 직면했습니다. 전세계적인 곡물 수확량 감소는 광범위한 가뭄의 결과이며, 남아프리카와 같은 일부 지역에서 엘니뇨 현상과 연관되어 있습니다.

2024년에 발생한 가장 큰 피해 사례 중 다수는 열대성 저기압으로 인해 발생했습니다. 태풍 야기(*Yagi*)는 9월 초 필리핀과 중국 최남단을 통과한 후 베트남 북부에 상륙했습니다. 베트남, 필리핀, 라오스, 태국, 미얀마에서 사상자²⁷와 이재민이 보고되었습니다.²⁸ 중국과 필리핀에서는 심각한 강풍 피해가 발생했습니다.

미국에서는 9월 말 허리케인 헬렌(*Helene*)과 10월 밀턴(*Milton*)이 플로리다 서해안에 강력한 허리케인으로 상륙했습니다. 두 허리케인 모두 상륙 시 심각한 피해를 입혔고, 헬렌은 미국 남동부 내륙 지역, 특히 노스캐롤라이나 서부 지역에 이례적인 폭우와 극심한 홍수를 초래했습니다. 두 허리케인 모두 수백억 달러에 달하는 경제적 피해를 입혔습니다. 헬렌과 관련된 사망자는 200명²⁹이 넘었으며, 이는 2005년 카트리나 이후 미국 본토에서 발생한 허리케인 중 가장 많은 인명 피해입니다.

12월 남반구에서는 열대성 사이클론 치도(*Chido*)가 프랑스령 인도양 마요트를 지나 모잠비크에 상륙하여 말라위로 이동하면서 세 나라 모두에 심각한 피해와 인명 피해를 입혔습니다. 모잠비크에서는 사이클론 치도로 인해 약 10만 명이 이재민이 되었고,³⁰ 30채의 가옥이 파괴되었으며, 도로와 통신망이 심각하게 파손되어 이미 많은 이재민이 발생한 지역의 구호 활동에 차질이 발생했습니다. 마요트의 취약한 지역사회 또한 사이클론 치도가 가져온 파괴로 인해 더 큰 위험에 직면했습니다.^{31,32,33}

아프가니스탄, 그리고 인접한 지역인 파키스탄 및 이란은 2024년 늦여름과 봄 동안 연이어 재해를 겪었습니다. 2월 말에서 3월 초에는 이례적인 한파와 고산지대의 폭설이 있었고, 이후 몇 달 동안 여러 차례의 홍수가 발생했으며, 그 중 가장 심각한 홍수는 5월 10일부터 17일 사이 아프가니스탄에 영향을 미쳤습니다. 5월 30일에는 약 3만 5천만 헥타르의 농경지가 침수되었습니다.³⁴ 홍수로 인해 수백 명이 사망한 것으로 보고되었으며,³⁵ 한파 또한 상당한 인명 피해를 초래했습니다.

연중 중반부터 시작된 이례적으로 활발한 몬순은 아프리카 사헬 지역 여러 곳에 대규모 홍수를 초래했습니다. 이 지역의 거의 모든 국가에서 큰 피해가 보고되었으며, 광범위한 농경지가 침수되고³⁶ 상당한 인명 피해가 발생했습니다. 3월부터 5월 사이에는 주로 적도 동아프리카 지역이 홍수의 영향을 받았고^{37,38,39}, 케냐와 탄자니아 등에서는 많은 인명 피해와 함께 이재민 발생, 농지 파괴, 가축 손실이 있었습니다. 빅토리아 호수는 사상 최고 수위를 기록했으며, 그로 인한 하류 지역의 홍수는 이후 남수단에 심각한 피해를 입혔습니다.

반면, 평소 우기인 2023년 말과 2024년 초에 건조한 기후가 이어지면서 북서 아프리카와 남부 아프리카 내륙 지역의 많은 곳에서⁴⁰ 심각한 가뭄이 발생했습니다. 특히 짐바브웨, 잠비아,⁴¹ 보츠와나, 나미비아에서 큰 영향을 받았습니다. 이번 극심한 가뭄은 농업과 수력발전에 중대한 피해를 초래했습니다.

칠레는 올해 초 파괴적인 산불을 겪었습니다. 2월 2일부터 3일 사이 비냐 델 마르(Viña del Mar) 인근에서 발생한 산불로 300명 이상이 사망⁴²하고 수천 채의 건물이 피해를 입었으며, 이는 21세기 들어 전세계에서 발생한 산불 중 가장 큰 인명 피해 중 하나로 기록되었습니다. 캐나다에서도 매우 활발한 산불 시즌이 이어졌으며,⁴³ 산불로 인한 탄소 배출량은 기록이 시작된 2003년 이후 두 번째로 많았고,⁴⁴ 피해 면적은 1983년 이후 다섯 손가락 안에 들 만큼 컸습니다. 미국 서부 지역 역시 활발한 산불 시즌을 겪었습니다. 이 두 나라에서 보고된 산불 관련 이재민 수는 총 30만 명을 넘었습니다.⁴⁵

미주 지역의 많은 곳이 가뭄의 영향을 받았습니다. 멕시코와 중미 일부 지역에서는 2023년에 시작된 극심한 가뭄이 2024년 초까지 이어졌고,⁴⁶ 남아메리카 내륙 지역 대부분에서도 심각한 가뭄이 발생했습니다. 브라질 마나우스의 네그로 강과 파라과이 아순시온의 파라과이 강은 모두 사상 최저 수위를 기록했으며, 브라질 아마존 지역의 산불 발생 건수는 2010년 이후 가장 많았습니다.

남아메리카 전반의 건조한 기후와는 달리, 브라질 남부 히우그란지두술(Rio Grande do Sul) 주에서는 5월 초에 홍수가 발생했습니다. 지속적인 폭우로 인해 포르투알레그리(Porto Alegre) 시와 주변 지역 대부분이 침수되었으며,⁴⁷ 농업과 어업에 큰 피해를 주었고 200명 이상의 사망자가 발생했습니다.⁴⁸

10월 29일, 스페인 남부 상공의 상층 한랭 저기압의 영향으로 발렌시아 지역에는 극심한 폭우가 발생해 심각한 돌발 홍수가 일어났습니다. 발렌시아 서부의 투리스(Turis)에서는 1시간 동안 185mm의 비가 내려 스페인 역대 시간당 강수량 기록을 경신했으며, 6시간 동안 621mm, 24시간 동안 총 722mm의 폭우가 쏟아졌습니다. 이로 인해 하류 지역에 예외적인 홍수가 발생했고, 특히 발렌시아 대도시권 남부가 큰 피해를 입었습니다. 발렌시아 자치 지역과 주변 지역에서는 200명 이상의 사망자⁴⁹와 심각한 피해가 보고되었습니다.

2024년에는 여러 차례의 주요 폭염이 발생했으며, 많은 지역에서 장기간에 걸친 고온 현상이 이어졌고 수많은 관측소에서 기록이 경신되었습니다. 세계기상기구의 2023년 기후서비스 현황보고서⁵⁰에 따르면, 극심한 폭염과 열파의 영향은 과소평가되고 있으며, 폭염 관련 사망자 수는 현재 추정치보다 몇 배나 더 많을 수 있는 것으로 나타났습니다.

북반구 여름 동안 폭염의 영향을 특히 많이 받은 지역은 동아시아, 남동유럽, 지중해 및 중동 지역, 그리고 미국 남서부였습니다. 이는 3월 말부터 5월까지 문순 이전 기간 동안 북반구 열대 지역의 여러 지역에서 기록적인 폭염이 발생한 데 이어 나타난 현상이었습니다. 당시에는 동남아시아, 서아프리카 및 사헬 지역, 중앙아메리카, 북인도 등에서도 극심한 고온 현상이 관측되었습니다.

가장 중요한 사건 중 하나는 6월 사우디아라비아에서 발생한 폭염으로, 메카 인근에서는 하지 순례 기간 동안 기온이 50도까지 치솟았습니다. 순례 기간 동안 많은 인명 피해가 보고되었으며, 그 대부분은 극심한 고온과 직접적으로 연관된 것으로 밝혀졌습니다.

조기경보시스템은 재난 발생 전부터 정부가 지역사회를 위험에서 대피시키거나 현장에서 재난을 관리할 수 있도록 돕는 효율적인 체계임이 입증되었습니다. 신뢰할 수 있는 데이터와 효과적인 재난 위험 감소 정책은 생명을 구하는 데 매우 중요합니다. 세분화된 데이터-이재민 발생 빈도, 원인, 발생 순서 등을 보여주는 데이터-는 대응 및 개발 계획 수립자들이 이재민과 그들을 수용하는 지역사회의 피해를 줄이는데 도움을 줄 수 있습니다.

파리 협정을 위한 지구 온도 모니터링

1850-1900년 평균 대비 연간 전세계 평균 기온이 일시적으로 1.5°C를 초과하는 해가 있더라도, 파리협정에서 명시한 “지구 평균 기온 상승을 산업화 이전 대비 1.5°C 이내로 제한하려는 노력”의 목표가 불가능해졌다는 것을 의미하지는 않습니다.

전세계 기온은 해마다 일정하게 상승하는 것이 아닙니다. (그림 2). 온실가스 배출로 인한 장기적인 온난화 경향 (그림 1) 외에도, 엘니뇨와 라니냐, 화산 활동, 해류 변화와 같은 자연적인 기후 변동 요인들로 인해 해마다 기온에는 상당한 차이가 발생할 수 있습니다.

IPCC는 기후변화를 “수십 년 또는 그 이상 지속되는 기후 상태의 변화”로 정의합니다. 따라서 파리협정에서 언급된 지구 평균 기온 상승 1.5°C 및 2.0°C 초과 여부도, 비록 협정 자체에는 명확한 정의가 없지만, 마찬가지로 일정 기간 이상 지속되는 초과로 이해되어야 합니다.

지구 온난화가 계속됨에 따라, 파리협정에서 제시된 목표에 따라 온도 상승을 명확히 정의하고, 측정하며, 모니터링할 필요성이 정책적으로 커지고 있습니다. 최신 IPCC 평가보고서는 미래의 지구 온난화 수준을 1850-1900년 평균 기온 대비 20년 평균으로 정의하고 있습니다. 예를 들어 1.5°C와 같은 특정 온도 상승 수준을 초과한 해는, 해당 수준을 처음으로 초과한 20년 기간의 중간 연도로 간주됩니다.

이 정의에 따르면, 1.5°C의 온난화는 관측된 기온이 20년 동안 그 수준에 도달해야만 공식적으로 확인됩니다. 따라서 특정 수준을 연도로부터 10년이 지나야 그 초과가 확정되므로, 장기 온도 목표의 초과를 인식하고 대응하는 데 10년의 지연이 발생하게 됩니다. IPCC 제6차 평가보고서나 제1차 글로벌 이행 점검(First Global Stocktake)에서처럼 평균 기온을 10년으로 줄이더라도, 여전히 5년의 지연이 발생합니다.

WMO와 국제 과학 공동체는 보다 신속한 보고를 가능하게 하기 위해 여러가지 접근법을 검토 중입니다. 이러한 접근법은 크게 세 가지 범주로 나뉩니다. 첫 번째는 최근 10년간의 관측된 기온 자료와 기후 모델을 활용한 향후 10년간의 기온 예측을 결합하는 방식입니다.⁵¹ 두 번째는 장기적인 온난화 추세를 보다 정확히 파악하기 위해 과거 관측 자료에 추세선이나 함수 모델을 적용하는 방식입니다.⁵² 세 번째는 온실가스와 같은 기후 시스템의 주요 인간 유발 요인들의 과거 변화에 기반하여, 인위적인 기후 변화 요인이 초래한 온난화 수준을 추정하는 방식입니다. (Forster et al., 2024년 연구 업데이트 참조⁵³).

이 세 가지 접근법을 통해 추정된 현재 지구 온난화 수준은 1850-1900년 기준 대비 약 1.34 °C에서 1.41 °C 사이로 나타났습니다. 그러나 불확실성 범위를 고려할 때, 이미 1.5 °C를 초과했을 가능성도 배제할 수 없습니다. (그림 11). 이 문제를 보다 면밀히 탐구하기 위해, WMO는 국제 전문가 팀을 구성하여 적절한 지표를 정의하고, IPCC의 접근 방식과 일치하는 방식으로 이를 모니터링할 수 있는 방법을 제안하도록 하고 있습니다. 이는 장기적인 지구 평균 기온 변화를 일관되고 신뢰성 있게 추적하기 위한 노력의 일환입니다.

궁극적으로 중요한 것은, 지구 평균 기온을 추적하는 데 사용되는 방법론과 상관없이 기온 상승의 작은 차이 하나하나가 모두 중요하다는 점을 인식하는 것입니다. 지구 온난화 수준이 1.5°C 이하이든 초과하든, 기온이 조금씩 더 오를 때 마다 극한 현상이 더 심해지고, 위험도 커진다는 것은 분명한 사실입니다.

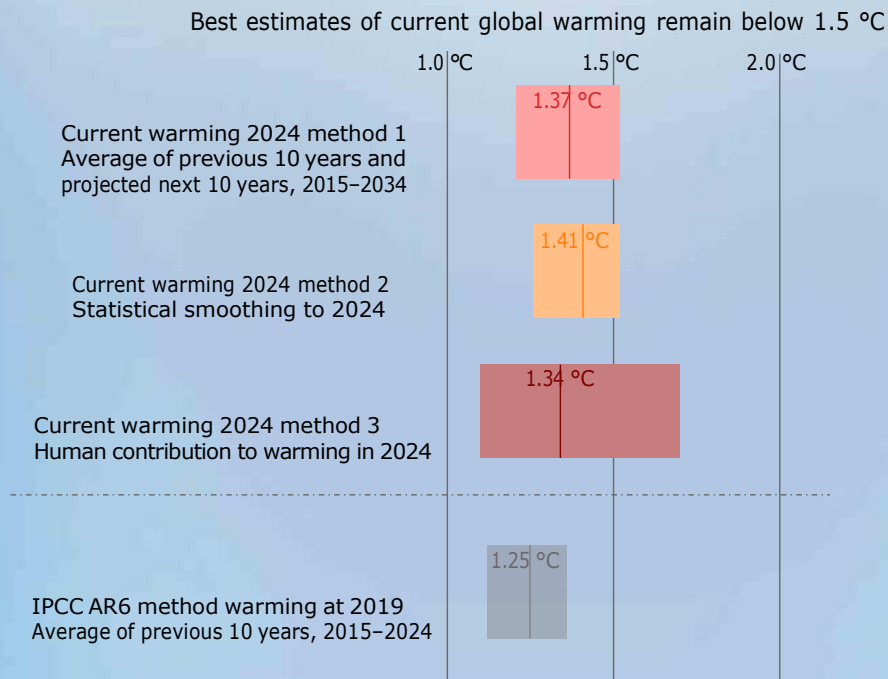


그림 11. 2024년 현재 지구 온난화에 대한 최신 추정치를 수립하기 위한 세 가지 방법을 제시합니다. 위 그림은 지난 10년간의 평균값을 사용하고 2019년까지의 온난화를 대표하는 IPCC AR6 방법과 비교한 것입니다. 각 방법을 통해 도출된 최적의 추정치는 세로선으로 표시되었으며, 불확실성 범위는 음영 처리된 영역으로 표시되었습니다.

2023/2024년 지구 평균 표면 온도 이상 현상: 영향 요인 이해

이 섹션에서는 오픈 사이언스 문제를 탐구하고 있으며, 이 주제에 대한 연구는 여전히 진행 중입니다.

2023년과 2024년에 기록된 지구 평균 온도는 인위적인 온실가스 배출 증가에 따른 기온 상승 추세 속에서 발생한 것입니다. 그러나 라니냐에서 엘니뇨로의 전환에도 불구하고, 2023년의 온도 이상치(그리고 2024년의 경우는 다소 덜하지만)의 규모는 개별 예측 모델의 범위 경계에 있거나 이를 벗어났다는 점에서 주목을 받았습니다. 일부 분석(예: Rantanen와 Laaksonen⁵⁴의 연구)에 따르면, 이러한 온도 이상은 기후 모델이 추정된 추세와 내부 변동성의 조합으로 기대할 수 있는 범위와는 달랐습니다.

이러한 기록적인 온도 상승을 설명하는 데 도움이 될 수 있는 추가적인 요인들이 몇 가지 있습니다. 예를 들어, 예상보다 빠르게 시작된 제25 태양 주기(Solar Cycle 25), 2020년 1월부터 시행된 국제해사기구(IMO)의 선박 연료 내 황 함유량 규제의 영향, 2022년 1월 훈가통가-훈가하야파이(HTHH) 화산 폭발, 그리고 동아시아 지역의 에어로졸 배출량 감소 추세(그림 12) 등이 있습니다. 또한 사하라 사막 먼지가 대서양 상공에서 보인 사하라 먼지 내부 변동성의 비정상적인 패턴이나 남극 해빙 면적의 변화도 일부 영향을 미쳤을 가능성이 있습니다.

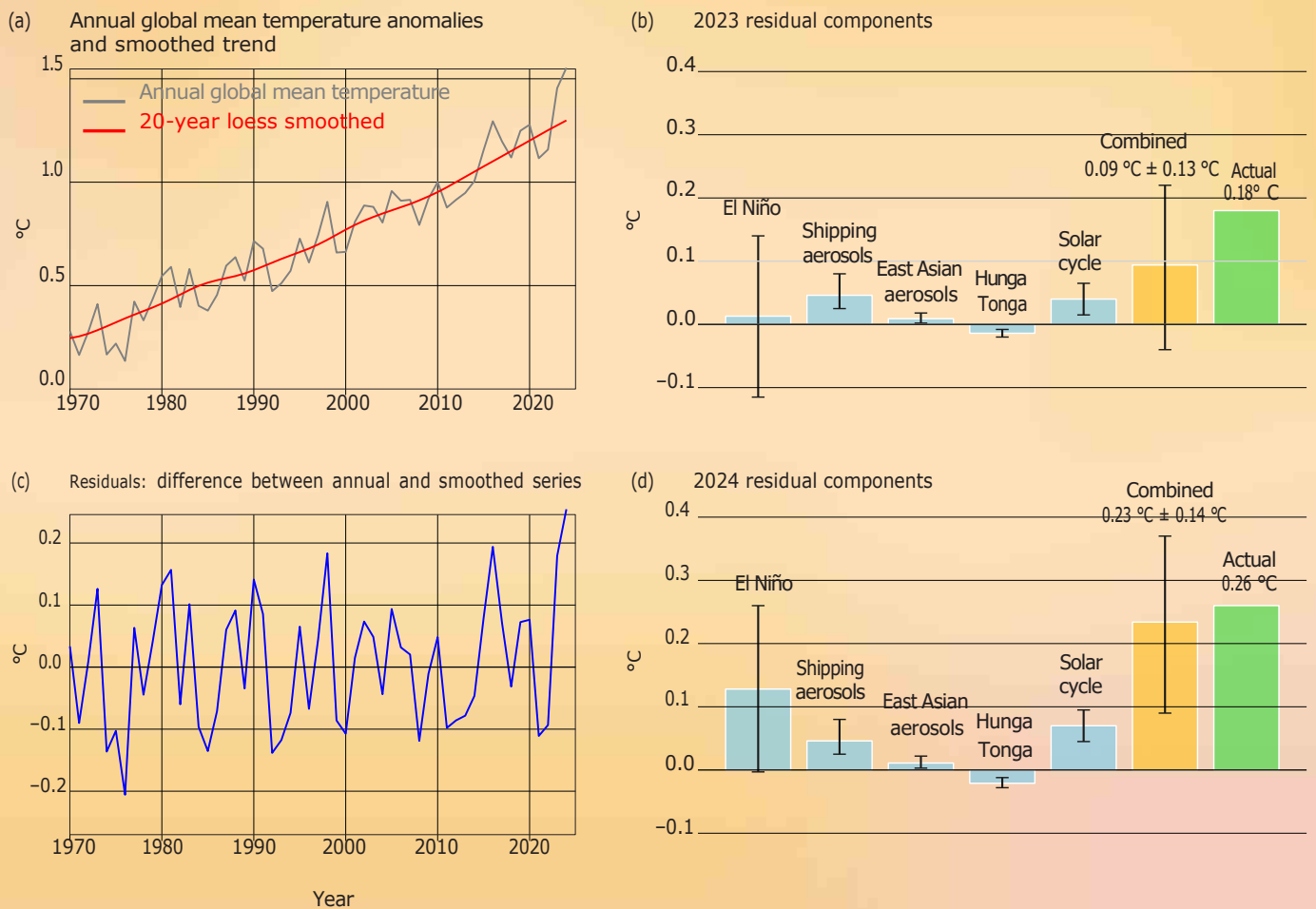


그림 12. (a) 연간 지구 평균기온. (b) 2023과 (d) 2024의 상대적 온도 잔차 추정치는 ENSO와 예측되지 않았거나 부분적으로만 예측된 네 가지 강제력에 기인합니다. (c) 잔차는 연간 지구 평균 기온과 2022년까지의 데이터에 맞춰진 20년 황토 평활화(loess smoothing) 곡선을 뺀 값으로 계산합니다. 불확실성은 명목상 95% 신뢰 수준을 따릅니다.

이러한 각 요인이 지구 기온에 미친 영향을 정확히 판단하는 것은 과거 배출량 추정치를 수집하는 데 시간이 걸리기 때문에 복잡합니다. 따라서 아직 완전히 포괄적인 종합 분석은 발표되지 않았습니다. 그럼에도 불구하고, 최신 연구들의 결과를 결합하여 대략적인 추정은 가능합니다. 자세한 방법은 [데이터 세트 및 방법](#)을 참조하십시오.

여기에서는 2022년 말까지의 기간을 기준으로 계산된 완만한 상승 추세에서 벗어난 차이, 즉 “잔차(residuals)”(그림 12c)에 주목합니다. 2023년과 2024년의 잔차는 각각 0.18°C와 0.26°C로 나타났습니다. 우리는 2023년과 2024년의 잔차에 대해 정량화 가능한 5가지 외부 요인(GHG, 선박 에어로졸, 동아시아 에어로졸, HTHH 화산 폭발, 태양 주기)의 기여도를 추정하였으며, 여기에 추가로 ENSO의 영향을 포함했습니다. ENSO는 2023년 초의 수년간 지속된 라니냐 상태에서 2023년 말 엘니뇨로 전환되었고, 2024년 말에는 중립 또는 약한 라니냐 상태로 돌아갔습니다. 이 두 해 동안 온실가스의 잔차에 대한 영향은 작으며, 0.01°C 미만으로 추정됩니다. 이는 GHG의 변화가 이미 완만하게 상승하는 추세선에 반영되어 있기 때문입니다. 다만, 산업화 이전 대비 이상값에서는 GHG가 주요 원인으로 작용합니다.

최근 몇 년 동안 이러한 요인들로부터 발생한 추가 복사 강제력은 총 약 0.14 W/m²로 추정되며, 이에 따른 기온 상승 효과(약 0.1°C)가 ENSO의 영향과 결합되면서 잔차를 더 잘 설명할 수 있습니다. (불확실성을 감안했을 때 특히 2024년에 더 잘 들어맞음. 그림 12(b) 및 (d) 참조) 선박 및 동아시아 에어로졸 감소로 인한 온난화 기여는 지속될 가능성이 높으며, 이는 현재의 기후 예측에 완전히 반영되지 않은 장기 기온의 소폭 상승을 유발할 수 있습니다.

이러한 요인들과 내부 기후 변동성의 역할에 대한 보다 정교한 분석을 위해서는 지구 시스템 모델을 활용한 국제적인 실험이 필요하며, 현재 이에 대한 연구가 진행 중입니다. 각 모델이 갖는 구름 피드백(cloud feedback)이나 에어로졸-구름 상호작용의 강도에 따른 영향 민감도는 아직 명확히 밝혀지지 않았습니다. 우리는 이 분석이 예비적인 추정치임을 강조하며, 보다 정교한 연구가 진행됨에 따라 이 추정치는 추후 보완되고 정밀화 될 것입니다.

데이터 세트 및 방법

기준선

기준 기간(Baselines)은 현재 및 미래의 기후 조건을 비교하기 위한 고정된 기준점으로 사용되는 보통 30년 이상의 기간을 말합니다. 과학적, 정책적, 실용적인 이유로 이 보고서에서는 여러 가지 다른 기준 기간이 사용되며, 각각의 텍스트와 도표 내에 명시되어 있습니다. 가능한 경우, 가장 최근의 WMO 기후 표준 기간은 1991-2020년이 일관된 보고를 위한 기준선으로 사용됩니다.

그러나 일부 지표의 경우, 해당 기간 초반의 관측 자료 부족으로 인해 표준 기준 기간(standard normal)을 사용할 수 없습니다. 또한 두가지 주요 예외가 있습니다. 첫째, 전지구 평균 기온 시계열의 경우에만 1850-1900년 기간이 기준으로 사용됩니다. 이 기준은 IPCC 제6차 평가보고서의 제1실무그룹이 산업화 이전 조건을 나타내기 위해 사용한 것으로, 파리협정과 UNFCCC의 맥락에서 진전 상황을 이해하는 데 중요한 기준입니다. 둘째, 온실가스 농도는 1850년보다 훨씬 이전까지도 빙하 코어(ice cores)에 갇힌 기체 방울을 통해 추정할 수 있습니다. 따라서 이 보고서에서는 산업화 이전의 온실가스 농도를 나타내기 위해 1750년을 기준 연도로 사용하며, 이는 IPCC AR6 WG I 기준과 일치합니다.

온실가스 자료

산업화 이전 상황을 나타내기 위해 1750년의 추정 농도가 사용되었습니다. 계산은 산업화 이전 CO₂의 몰분율이 278.3 ppm, CH₄의 몰분율이 729.2 ppb, N₂O의 몰분율이 270.1 ppb라고 가정합니다.⁵⁵

데이터 및 분석 출처:

World Data Centre for Greenhouse Gases operated by the Japan Meteorological Agency, <https://gaw.kishou.go.jp/>
World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin - No. 20: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023*. Geneva, 2024.

전지구 온도 자료

전지구 평균 기온 시리즈

1850-1900년 기준선에 대한 전지구 평균 지표면 근처 온도 이상치를 계산하는 방법은, IPCC AR6 WG I에서의 장기변화와 그 불확실성에 대한 평가를 바탕으로 합니다. 2021년에 IPCC AR6 WG I은 1850-1900년 기간과 다른 기간들 간의 온도 변화를 평가하기 위해 네 가지 데이터 세트 평균값을 사용했습니다. 이 네 가지 데이터세트는 다음과 같으며, 1850년부터 시작되어 현대에 이르기까지 전지구적으로 또는 거의 전지구적으로 완전한 자료를 제공합니다. - HadCRUT5, Berkeley Earth, NOAA Interim, Kadow et al. (2020). 이러한 데이터세트의 평균을 통해, 산업화 이전 대비 현대의 기온 상승 추정치와 불확실성 범위를 산정합니다.

최근 기온 변화를 더 잘 이해하기 위해 짧은 기간의 데이터세트도 포함할 수 있도록, 이 보고서에서는 다음과 같은 방식으로 2024년의 온도 이상치를 1850-1900년 기준 대비로 산출했습니다. IPCC가 산정한 1850-1900년과 1981-2010년 사이의 온도 변화량을 먼저 사용하고, 이어서 1981-2010년과 현재(2024년) 사이의 온도 변화량을 여섯 개의 데이터세트를 통해 추정해 결합합니다. 사용된 여섯 가지 데이터세트는 다음과 같습니다. - HadCRUT5, Berkeley Earth, NOAA GlobalTemp v6, GISTEMP, ERA5, JRA-3Q (아래 참조) - 이러한 데이터세트는 1981-2010년부터 현재까지의 기간에 대해 관측 자료가 잘 확보되어 있어 변화 추정에 있어 상호 일치도가 높습니다. 또한 데이터세트 간의 편차에서 오는 추가적인 불확실성은 1850-1900년부터 1981-2010년까지의 변화에 대한 IPCC의 불확실성 추정치와 함께 고려되어 최종적으로 2024년의 1850-1900년 대비 온도 이상치와 그 불확실성을 계산합니다.

1850-1900년 기준선 대비 지구 평균 기온 이상치는 다음과 같은 절차를 통해 계산되었습니다. 이 계산은 각 데이터세트 별 지구 월간 평균 기온 시계열을 기반으로 수행되었습니다.

1. 각 데이터세트에 대해, 1981-2010년 평균값을 기준으로 이상값을 산출했습니다. 각 월별로 1981-2010년 평균을 빼서 월별 이상값을 계산했습니다.
2. 이렇게 얻은 월별 이상값을 연 단위로 평균 내어, 연평균 이상값을 계산했습니다.
3. 이후 1850-1900년과 1981-2010년 사이의 온도 차이(0.69°C)를 각 시리즈에 더했습니다. 이 값은 IPCC AR6 WG I 보고서(그림 1.12 주석)에서 제시한 방법으로 추정되었습니다.
4. 여섯 개 데이터세트 각각의 결과에서 평균값과 표준편차를 계산했습니다.
5. IPCC의 불확실성 추정치(0.54°C-0.79°C)를 90% 신뢰구간(즉, 1.645 표준편차)으로 간주하고, 해당 범위에서 계산된 IPCC 불확실성을 데이터세트 간 표준편차와 독립적인 요소로 간주해 합산하여 이를 통해 최종 불확실성을 추정했습니다.

결과적으로 이 보고서에서 제시한 2024년 수치는, 평균기온 이상값 1.55 °C, 불확실성(표준 오차 포함) 0.13°C입니다. (여기서 0.05°C는 데이터세트간 표준편차이며, 나머지는 IPCC 추정 불확실성과 결합한 값입니다.)

연간 기온 지도

2024년 기온 이상치 지도에는 6개 데이터세트의 중앙값을 사용하여 가장 낮은 해상도의 데이터세트(NOAA GlobalTemp 및 HadCRUT5)의 공간격자에 맞춰 재격자화 했습니다. 이 데이터세트들은 위도 5° x 경도 5° 격자로 표현되어 있습니다. 중앙값은 평균보다 우선적으로 사용되며, 이는 개별 격자 셀의 잠재적 이상치 영향을 최소화하기 위함입니다. 데이터세트의 절반 범위는 불확실성을 나타냅니다. 데이터세트 간의 분포는 고위도와 중앙 아프리카 지역에서 가장 크며, 두 지역 모두 데이터 관측 데이터가 부족하기 때문입니다.

타 기간 대비 2024년 전지구 평균 기온 이상치(아노말리)

표 1은 2024년 개별 데이터세트에 대한 지구 평균 기온 이상치를 네 가지 기준선과 비교하여 보여줍니다. 세 가지 최신 기준선(1981-2010년, 1991-2020년, 1961-1990년)에 대해 나타난 불확실성은 90% 불확실성 범위를 나타내기 위해 사용 가능한 추정치의 표준 편차에 1.645를 곱한 값입니다.

표 1. 4개 기준선에 대한 2024년 개별 데이터세트의 전지구 평균 기온 아노말리

| Period | 1850–1900 | 1981–2010 | 1991–2020 | 1961–1990 |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| HadCRUT5 | 1.52 | 0.83 | 0.63 | 1.17 |
| NOAA GlobalTemp | 1.53 | 0.84 | 0.66 | 1.15 |
| GISTEMP | 1.55 | 0.86 | 0.67 | 1.18 |
| Berkeley Earth | 1.54 | 0.85 | 0.65 | 1.20 |
| ERA5 | 1.60 | 0.91 | 0.72 | 1.24 |
| JRA-3Q | 1.57 | 0.88 | 0.69 | 1.21 |
| Mean of the six datasets | 1.55 ± 0.13 | 0.86 ± 0.05 | 0.67 ± 0.05 | 1.19 ± 0.05 |

일반적인 4개의 데이터세트를 포함하여 아래의 6개 데이터세트가 사용되었습니다.

- 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/>. Lenssen, N.; Schmidt, G.; Hansen, J. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2019**, *124*(12), 6307–6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.
- 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 19 January 2025 and are © British Crown Copyright, Met Office 2025, provided under an Open Government Licence, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.
- NOAA v6: Huang, B.; Yin, X.; Menne, M. J. et al. *NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 6.0.0*. NOAA National Centers for Environmental Information, 2025. <https://doi.org/10.25921/rzxcg-p717>.

그리고 2개의 재분석 자료가 사용되었습니다.

- 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://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>.
- JRA-3Q: Kosaka, Y.; Kobayashi, S.; Harada, Y. et al. The JRA-3Q Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II* **2024**, *102*(1), 49–109. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-004>.

IPCC는 추가적인 데이터세트를 사용했습니다.

- Kadow et al.: 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>.

해양 열 용량

지구 해양 열 용량값은 남위 60° ~ 북위 60° 사이의 해수면에 대해 제공되며, 수심 300m보다 깊은 지역으로 제한됩니다. 아르고 지하 부유체 네트워크 덕분에 이 기간 동안 거의 전 지구적인 데이터를 이용할 수 있으므로, 2005년부터 2021년까지의 해양 열 용량 시계열을 기준으로 합니다. 제곱미터당 와트 단위의 온난화율은 해양 표면적을 나타냅니다. 지구 전체 표면(예: 유네스코 해양 현황 보고서)에 대한 수치를 얻으려면 0.71을 곱합니다. 해양 열 용량 변화는 제곱미터당 와트와 연간 제타줄(ZJ)의 두 가지 단위로 제공됩니다. (1 W m⁻² 는 연간 11.35 ZJ 에 해당).

2024년 평가는 다음 세 가지 데이터세트를 기반으로 합니다.

- Cheng, L.; Pan, Y.; Tan, Z. et al. IAPv4 Ocean Temperature and Ocean Heat Content Gridded Dataset. *Earth System Science Data* **2024**, *16*(8), 3517–3546. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3517-2024>.

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>.

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>.

해수면 데이터

GMSL from CNES/Aviso+, <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level/data-acces.html#c12195>.

해양 pH 데이터

이 지표는 코레르니쿠스 해양 서비스에서 제작되었습니다. 참고문헌은 다음과 같습니다.

Chau, T. T. T.; Gehlen, M.; Chevallier, F. A Seamless Ensemble-based Reconstruction of Surface Ocean pCO₂ and Air-Sea CO₂ Fluxes over the Global Coastal and Open Oceans. *Biogeosciences* **2022**, *19*, 1087–1109. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1087-2022>.

Gehlen M.; Chau, T. T. T.; Conchon, A. et al. Ocean Acidification. *Journal of Operational Oceanography* **2020**, *13*(sup1), s88–s91. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2020.1785097>.

빙하 데이터

세계 빙하 모니터링 서비스는 지구 빙하 모니터링 정보를 제공합니다.

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

해빙 데이터

데이터는 유럽 기상위성개발기구(EUMETSAT) 해양 및 해빙 위성 응용 시설(OSI SAF) 해빙 지수 V2.2(Lavergne et al., 2019; <https://osisaf-hl.met.no/v2p2-sea-ice-index>) 및 국가 설빙 데이터 센터(NSIDC) v3 해빙지수(Fetterer et al., 2017)에서 가져왔습니다. 해빙농도는 위성에서 측정한 마이크로파 복사량을 통해 추정됩니다. 범위는 해빙 농도가 15%를 초과하는 해양 격자 셀 영역입니다. 데이터세트 간에는 절대 범위에 약간의 차이가 있지만, 연도별 변화 및 추세는 잘 일치합니다. 이 보고서의 본문에서는 NSIDC 값의 절대 범위와 순위를 보고합니다. OSI SAF에 대한 비교 수치는 표2에 제시되어 있습니다.

표 2. 2024년 EUMETSAT 해양 및 해빙 위성 응용 시설 수치와 비교한 NSIDC 값

| Metric | NSIDC | OSI SAF |
|-------------------------|--|--|
| Arctic daily minimum | 4.28 million km ² , 11 September | 4.64 million km ² , 13 September |
| Arctic daily maximum | 15.01 million km ² , 14 March | 15.02 million km ² , 11 March |
| Antarctic daily minimum | 1.99 million km ² , 20 February | 2.24 million km ² , 18 February |
| Antarctic daily maximum | 17.16 million km ² , 19 September | 17.65 million km ² , 28 September |

European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF). *Sea Ice Index 1978-Onwards, Version 2.2, OSI-420*. EUMETSAT OSI SAF, 2023. Data extracted from OSI SAF FTP server: (1978-2025). Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W. N. et al. *Sea Ice Index, Version 3*. National Snow and Ice Data Center (NSIDC): Boulder, USA, 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-13-49-2019>.

강수량 데이터

분석에는 다음과 같은 지구강수기후센터(GPCC) 데이터세트가 사용되었습니다.

- First Guess Monthly, 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
- Full Data Monthly (Version 2022), 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

ENSO 지도

강수량에 대한 전형적인 엘니뇨 영향에 대한 지도는 다음을 포함한 다양한 출처의 정보를 기반으로 작성되었습니다.

- <https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/IFRC/FIC/EINinoandRainfall.pdf>
- https://interagencystandingcommittee.org/sites/default/files/migrated/2019-02/inter_agency_sops_for_early_action_to_el_nino_la_nina_episodes.pdf
- <https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/gallery/metofficegovuk/images/research/climate/global/el-nino-precip.jpg>
- <https://climexp.knmi.nl/effects.cgi?id=someone@somewhere#precipitation>
- <https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/climate/ENSO/elnino.html>
- <https://confluence.ecmwf.int/display/COPSRV/ENSO+impacts+on+Europe>
- Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET). *El Niño and Precipitation; Agroclimatology Fact Sheet Series; Vol. 1; 2020.*

사이드바 -

2023/2024년의 지구 평균 표면 온도 이상 현상:

영향 요인 이해

사용된 지구 온도 계열은 [전지구 온도 자료](#)에 설명된 6개의 지구 온도 데이터 세트의 평균입니다. 완만한 상승 추세는 2022년까지의 데이터에 적합하고 2024년까지 예측된 황토 평활화 곡선을 사용하여 추정되었습니다.

ENSO가 기온에 미치는 영향은 여러 가지 방법으로 추정할 수 있습니다. 2월/3월 Niño 3.4 지수에 대한 연평균 상대 이상치의 선형 회귀 분석을 사용했으며, 2022년, 2023년, 2024년에 이어 각각 $-0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 영향을 시사합니다. (95% CI, $\pm 0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$). 산업화 이전 제어 기후 모델 시뮬레이션의 일부 결과에 따르면⁵⁶ 삼중 라니냐에서 엘니뇨로의 전환은 전환 연도에 최대 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 이상 기온 상승을 초래할 수 있지만, 실제로 경험한 ENSO 변화에 대한 영향을 조건으로 설정해야 하기 때문에 이를 2023년에 어떻게 적용할지는 불분명합니다.

2020년 IMO 규정 변경으로 연간 약 7 TgSO_2 가 빠르게 감소했고, 복사 강제력은 $0.15\text{ }[0.1-0.2]\text{ W m}^{-2}$ 만큼 단계적으로 변화했습니다. (다양한 연구에서 추정된 범위^{57,58,59,60,61}). 검토된 각 연구들을 통해 계산된 2023년 기온 영향은 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ 사이이며, 2024년에는 그보다 약간 더 큼니다.

25번째 태양주기는 예상보다 약간 일찍 시작되었고, 더 강했으며, 2023년의 총 태양 복사량(TSI) 이상치가 지난 20년 평균과 비교하여 0.97 W m^{-2} 의 복사 강제력과 1~2년의 지연으로 지구 표면 평균 기온에 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$0.05-0.10$] $^{\circ}\text{C}$ 의 영향을 미칠 것으로 추산됩니다.⁶² 따라서 2023년과 2024년에 미치는 영향은 각각 약 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.025\text{ }^{\circ}\text{C}$)입니다.

동아시아의 황산염 에어로졸 배출량은 2006년 정점(연간 38 TgSO_2)에서 급격히 감소했습니다. 2014년 3분의 1(연간 23 TgSO_2)이 감소했고, 그 이후로는 50%가 추가로 감소했습니다. (2022년에는 연간 11 TgSO_2) 이러한 감소는 동아시아 에어로졸 배출량이 2006년 수준을 유지했던 전세계와 비교했을 때, 2023년에는 0.14 W m^{-2} 의 추가적인 복사 강제력과 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$)의 온난화를 초래할 것입니다. 그러나 이러한 감소 중 일부는 이미 장기적인 추세에 영향을 미쳤을 것이므로, 2020년 대비 2023년의 이상치는 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 불과합니다. (Finite Amplitude Impulse Response (FaIR) 모델⁶³을 사용하여 계산(Leach et al., 2021)).

HTHH 화산 활동으로 인해 성층권(고도 최대 56km)에 SO_2 와 수증기가 모두 추가되었습니다. SO_2 가 황산염 에어로졸로 빠르게 산화되는 것이 분출 후 첫 2년 동안 복사 강제력을 지배했기 때문에 대류권계면의 순복사 강제력은 음수일 가능성이 높습니다. 2022년과 2023년에⁶⁴ 각각 -0.04 Wm^{-2} 와 -0.15 Wm^{-2} 였습니다. 이는 FaIR 모델을 사용하여 계산한 $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$-0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$]의 온도 영향을 의미합니다.

기여 저자

WMO 회원국

Algeria, Argentina, Armenia, Australia, Azerbaijan, Bahrain, Bangladesh, Barbados, Belgium, Belize, Benin, Bosnia and Herzegovina, Botswana, Brazil, Brunei Darussalam, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China, Comoros, Costa Rica, Côte d'Ivoire, Croatia, Cuba, Cyprus, Czechia, Denmark, Democratic Republic of the Congo, Dominica, Dominican Republic, Ecuador, Egypt, El Salvador, Estonia, Eswatini, Finland, France, Germany, Ghana, Greece, Guatemala, Guinea-Bissau, Hong Kong, China; Iceland, India, Islamic Republic of Iran, Iraq, Ireland, Israel, Italy, Japan, Kazakhstan, Kenya, Latvia, Libya, Lithuania, Macao, China; Malawi, Malaysia, Mali, Mauritius, Monaco, Morocco, Mozambique, Myanmar, Namibia, Kingdom of the Netherlands, New Zealand, Norway, Pakistan, Paraguay, Peru, Philippines, Poland, Portugal, Republic of Korea, Republic of Moldova, Russian Federation, Rwanda, Saint Vincent and the Grenadines, Saudi Arabia, Senegal, Serbia, Singapore, Slovakia, Slovenia, South Africa, Sudan, Sweden, Switzerland, Syrian Arab Republic, Thailand, Trinidad and Tobago, Tunisia, Türkiye, Ukraine, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, United Republic of Tanzania, United States of America, Uruguay

UN 기구

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), International Organization for Migration (IOM), United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR)

기관 및 데이터 제공자

Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO), France; Berkeley Earth, USA; Bureau of Meteorology (BOM), Australia; CELAD, France; Climatic Research Unit (CRU), University of East Anglia, UK; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia; Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES), University of Colorado, Boulder, USA; Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS); Ecole Nationale Supérieure (ENS), France; Egyptian Meteorological Authority; Environment and Climate Change Canada (ECCC); European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF); European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF); Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), Germany; Graduate School of International Studies (GSIS), Korea University; Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS); Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA); Integrated Carbon Observation System (ICOS) – European Research Infrastructure Consortium (ERIC)/Lund University, Sweden; Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC); Japan Meteorological Agency (JMA); Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), France; Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France; Max Planck Institute (MPI) for Biogeochemistry, Germany; Mercator Ocean International, France; Met Office Hadley Centre, UK; National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA; NOAA Global Monitoring Laboratory (GML), USA; NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI), USA; National Snow and Ice Data Center (NSIDC), USA; Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, USA; Stripe, Inc., USA; Turkish State Meteorological Service (TSMS); Universidade Estadual Paulista/Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (UNESP/CEMADEN), Brazil; Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brazil; University of Bremen, Germany; University of California, Los Angeles (UCLA), USA; Wageningen University and Research, Kingdom of the Netherlands; World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG); World Glacier Monitoring Service (WGMS)

섹션별 저자

Lead author and scientific coordinator – John Kennedy (WMO)

Carbon dioxide – Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (ICOS ERIC), Xin Lan (NOAA GML, CIRES), Kazuhiro Tsuboi (JMA, WDCGG), Andrew Croswell (NOAA GML, CIRES), Christoph Gerbig (MPI), Armin Jordan (MPI), Zoë Loh (CSIRO), Ingrid Lujikx (Wageningen University and Research), John Miller (NOAA GML), Ray Weiss (Scripps Institution of Oceanography), Thorsten Warneke (University of Bremen, Germany), Camille Yver (LSCE)

Global mean temperature – John Kennedy (WMO)

Ocean heat content – Karina von Schuckmann (Mercator Ocean international), Audrey Minière (ENS, LMD), Lijing Cheng (IAP/CAS), Flora Gues (CELAD)

Global mean sea level – Anny Cazenave (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS)), Lancelot Leclercq (LEGOS)

Ocean pH – Karina von Schuckmann (Mercator Ocean international), Flora Gues (CELAD)

Glacier mass balance – Shawn Marshall (ECCC)

Sea-ice extent – Shawn Marshall (ECCC)

El Niño–Southern Oscillation – Jessica Blunden (NOAA NCEI)

Global patterns of temperature and precipitation – Markus Ziese (GPCC, DWD), John Kennedy (WMO)

High-impact events – Blair Trewin (BOM), Jorge Alvar-Beltran (FAO), Arianna Gialletti (FAO), Jana Birner (UNHCR), Rosi-Selam Reusing (UNHCR), Elisabeth du Parc (IOM), Vicente Anzellini (IDMC), Sylvain Ponsérre (IDMC)

Monitoring global temperature for the Paris Agreement – Richard Betts (University of Exeter and Met Office Hadley Centre), Fatima Driouech (University Mohammed VI Polytechnic (UM6P)), Robert Dunn (Met Office Hadley Centre), Piers Forster (University of Leeds), Yu-Kyung Hyun (Korea Meteorological Administration), Jose Marengo (UNESP/CEMADEN, GSIS), Karen McKinnon (UCLA), Colin Morice (Met Office Hadley Centre), Matthew Palmer (Met Office Hadley Centre and University of Bristol), Chris Smith (Vrije Universiteit Brussel), Peter Thorne (Irish Climate Analysis and Research UnitS (ICARUS) Climate Research Centre, Maynooth University), Blair Trewin (BOM), Tristram Walsh (University of Oxford), Jonathan Winn (Met Office Hadley Centre), Panmao Zhai (Chinese Academy of Meteorological Sciences)

Sidebar: Global mean temperature anomalies in 2023/2024 – Gavin A. Schmidt (NASA GISS), Zeke Hausfather, (Stripe, Inc.)

REVIEWERS

Omar Baddour (WMO), Jesse Cruz (WMO), Nilay Dogulu (WMO), Robert Dunn (Met Office Hadley Centre), Awatif Ebrahim (Egyptian Meteorological Authority), Veronica Grasso (WMO), Peer Hechler (WMO), Christopher Hewitt (WMO), Anahit Hovsepyan (WMO), Andries Kruger (South African Weather Service), Renata Libonati (UFRJ), Belén Martin Míguez (WMO), Atsushi Minami (JMA), Nakiete Msemo (WMO), Clare Nullis (WMO), Claire Ransom (WMO), Serhat Sensoy (TSMS), Peter Siegmund (KNMI), Álvaro Silva (IPMA), Mxolisi Shongwe (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)), Michael Sparrow (WMO), Johan Stander (WMO), Peter Thorne (Maynooth University), Blair Trewin (BOM), Freja Vamborg (ECMWF), Robert Vautard (IPCC)

WMO 프로그램 코디네이션

Omar Baddour (Chief, Climate Monitoring and Policy Services (CMP)), Claire Ransom (Associate Scientific Officer, CMP), Peer Hechler (Scientific Officer, CMP), Amir Delju (Senior Scientific Officer, Services), Wilfran Moufouma Okia (Chief, Regional Climate Prediction Services (RCP)), Saeed Vazifekhhah (Scientific Officer, RCP), Benjamin Welch (CMP)

미주

- ¹ World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 20*: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023; WMO: Geneva, 2024.
- ² Montzka, S. A. *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory, 2024. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- ³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- ⁴ Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data* **2024** [preprint]. <https://doi.org/10.5194/essd-2024-519>.
- ⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- ⁶ 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/10.1029/2012GL051106>.
- ⁷ Levitus, S.; Antonov, J. I.; Boyer, T. P. et al. World Ocean Heat Content and Thermosteric Sea Level Change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters* **2012**, *39* (10). <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.
- ⁸ Cheng, L.; von Schuckmann, K.; Abraham, J. P. et al. Past and Future Ocean Warming. *Nature Reviews Earth & Environment* **2022**, *3*, 776–794. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00345-1>.
- ⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- ¹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*; Portner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2019. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- ¹¹ Piecuch, C. G.; Quinn, K. J. El Niño, La Niña, and the Global Sea Level Budget. *Ocean Science* **2016**, *12*, 1165–1177. <https://doi.org/10.5194/os-12-1165-2016>.
- ¹² WCRP Global Sea Level Budget Group. Global Sea-level Budget 1993–present. *Earth System Science Data* **2018**, *10*, 1551–1590. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>.
- ¹³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Portner, H.-O.; Roberts, D. C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- ¹⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- ¹⁵ von Schuckmann, K.; Moreira, L.; Cancet, M. et al. The State of the Global Ocean. In: *Copernicus Ocean State Report*, 8th edition; von Schuckmann, K.; Moreira, L.; Grégoire, M. et al., Eds.; Copernicus Publications, 2024. <https://doi.org/10.5194/sp-4-osr8-1-2024>.
- ¹⁶ Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data* **2024** [preprint]. <https://doi.org/10.5194/essd-2024-519>.

- ¹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- ¹⁸ Bindoff, N. L.; Cheung, W. W. L.; Kairo, J. G. et al. Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*; Portner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2019. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.007>.
- ¹⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Portner, H.-O.; Roberts, D. C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>.
- ²⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*; Portner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2019. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>.
- ²¹ WCRP Global Sea Level Budget Group. Global Sea-level Budget 1993–present. *Earth System Science Data* **2018**, *10*, 1551–1590. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>.
- ²² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- ²³ National Snow and Ice Data Center (NSIDC). *2024 Antarctic Sea Ice Maximum Extent Finishes at Second Lowest*; NSIDC, 3 October 2024. <https://nsidc.org/sea-ice-today/analyses/2024-antarctic-sea-ice-maximum-extent-finishes-second-lowest>.
- ²⁴ Purich, A.; Doddridge, E. W. Record Low Antarctic Sea Ice Coverage Indicates a New Sea Ice State. *Communications Earth & Environment* **2023**, *4* (1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00961-9>.
- ²⁵ Dinneen, J. Another Extreme Low for Antarctic Sea Ice Signals a Permanent Shift. *New Scientist*, 12 September 2024. <https://www.newscientist.com/article/2447700>.
- ²⁶ <https://www.fsinplatform.org/sites/default/files/resources/files/GRFC2024-MYU-en.pdf>
- ²⁷ EM-DAT lists 890 deaths in 6 countries
- ²⁸ <https://ahacentre.org/situation-update/situation-update-no-8-combined-effects-of-tropical-cyclone-yagi-and-southwest-monsoon-27-september-2024/>
- ²⁹ A total of 219 deaths according to <https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/events/US/2024>
- ³⁰ Preliminary Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC) figures
- ³¹ <https://www.unhcr.org/news/briefing-notes/cyclone-chido-leaves-trail-destruction-mozambique-and-beyond-displacing>
- ³² <https://reliefweb.int/report/mayotte-france/acaps-briefing-note-mayotte-impact-tropical-cyclone-chido-19-december-2024>
- ³³ <https://reliefweb.int/report/mayotte-france/situation-overview-overview-impact-cyclone-chido-mayotte-18122024>
- ³⁴ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Floods in Afghanistan, 2024: The Impact of the Floods on Agriculture and Livelihoods*; FAO Data in Emergencies Hub, 2024.
- ³⁵ <https://www.unhcr.org/news/briefing-notes/flood-hit-communities-afghanistan-need-urgent-humanitarian-support>
- ³⁶ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Flooding in the Sahel Countries: What Impact on Agriculture and Food Security?* FAO, 2024. <https://www.fao.org/africa/news-stories/news-detail/flooding-in-the-sahel-countries--what-impact-on-agriculture-and-food-security/en>.

- ³⁷ <https://www.unocha.org/publications/report/kenya/eastern-africa-heavy-rains-and-flooding-flash-update-1-3-may-2024>
- ³⁸ <https://www.unhcr.org/news/stories/five-things-know-about-catastrophic-flooding-east-and-horn-africa>
- ³⁹ <https://reliefweb.int/report/kenya/eastern-africa-heavy-rains-and-flooding-flash-update-4-30-may-2024>
- ⁴⁰ <https://www.unhcr.org/sites/default/files/2024-09/Southern-Africa-75-ExCom-English.pdf>
- ⁴¹ <https://reliefweb.int/report/zambia/unhcr-zambia-drought-emergency-update-no-1-31-july-2024>
- ⁴² EM-DAT
- ⁴³ <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/ten-most-impactful-weather-stories/2024.html>
- ⁴⁴ <https://atmosphere.copernicus.eu/cams-global-wildfires-review-2024-harsh-year-americas>
- ⁴⁵ Preliminary Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC) data, Global Report on Internal Displacement (GRID) 2025
- ⁴⁶ Thiem, H. *Multi-year Drought and Heat Waves Across Mexico in 2024*; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 22 July 2024. <https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/multi-year-drought-and-heat-waves-across-mexico-2024#:~:text=2024's%20drought%20impacts%20on%20crops,directly%20due%20to%20the%20 drought.>
- ⁴⁷ <https://www.unhcr.org/news/briefing-notes/unhcr-supports-brazils-response-devastating-floods>
- ⁴⁸ EM-DAT
- ⁴⁹ <https://www.lamoncloa.gob.es/info-dana/Paginas/2024/131224-datos-seguimiento-actuaciones-gobierno.aspx>
- ⁵⁰ World Meteorological Organization (WMO). *2023 State of Climate Services: Health* (WMO-No. 1335). Geneva, 2023.
- ⁵¹ Betts, R. A.; Belcher, S. E.; Hermanson, L. et al. Approaching 1.5 °C: How Will We Know We've Reached This Crucial Warming Mark? *Nature* **2023**, *624* (7990), 33–35. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-03775-z>.
- ⁵² Betts, R. A.; Belcher, S. E.; Hermanson, L. et al. Approaching 1.5 °C: How Will We Know We've Reached This Crucial Warming Mark? *Nature* **2023**, *624* (7990), 33–35. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-03775-z>.
- ⁵³ Forster, P. M.; Smith, C.; Walsh, T. et al. Indicators of Global Climate Change 2023: Annual Update of Key Indicators of the State of the Climate System and Human Influence. *Earth System Science Data* **2024**, *16* (6), 2625–2658. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2625-2024>.
- ⁵⁴ Rantanen, M.; Laaksonen, A. The Jump in Global Temperatures in September 2023 is Extremely Unlikely Due to Internal Climate Variability Alone. *npj Climate and Atmospheric Science* **2024**, *7*. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00582-9>.
- ⁵⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- ⁵⁶ Raghuraman, S. P.; Soden, B.; Clement, A. et al. The 2023 Global Warming Spike was Driven by the El Niño–Southern Oscillation. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2024**, *24*, 11275–11283. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-24-11275-2024>.
- ⁵⁷ Gettelman, A.; Christensen, M. W.; Diamond, M. S. et al. Has Reducing Ship Emissions Brought Forward Global Warming? *Geophysical Research Letters* **2024**, *51*. <https://doi.org/10.1029/2024GL109077>.
- ⁵⁸ Jordan, G.; Henry, M. IMO2020 Regulations Accelerate Global Warming by up to 3 Years in UKESM1. *Earth's Future* **2024**, *12*. <https://doi.org/10.1029/2024EF005011>.
- ⁵⁹ Quaglia, I.; Visioni, D. Modeling 2020 Regulatory Changes in International Shipping Emissions Helps Explain 2023 Anomalous Warming. *The EGU Interactive Community Platform* **2024** [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1417>.
- ⁶⁰ Yoshioka, M.; Grosvenor, D. P.; Booth, B. B. B. et al. Warming Effects of Reduced Sulfur Emissions from Shipping. *The EGU Interactive Community Platform* **2024** [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1428>.

- ⁶¹ Yuan, T.; Song, H.; Oreopoulos, L. et al. Abrupt Reduction in Shipping Emission as an Inadvertent Geoengineering Termination Shock Produces Substantial Radiative Warming. *Communications Earth & Environment* **2024**, *5*. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01442-3>.
- ⁶² Misios, S.; Mitchell, D. M.; Gray, L. J. et al. Solar Signals in CMIP-5 Simulations: Effects of Atmosphere–ocean Coupling. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2016**, *142* (695), 928–941. <https://doi.org/10.1002/qj.2695>.
- ⁶³ Leach, N. J.; Jenkins, S.; Nicholls, Z. et al. FalRv2.0.0: A Generalized Impulse Response Model for Climate Uncertainty and Future Scenario Exploration. *Geoscientific Model Development* **2021**, *14*, 3007–3036. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3007-2021>.
- ⁶⁴ Schoeberl, M. R.; Wang, Y.; Taha, G. et al. Evolution of the Climate Forcing During the Two Years After the Hunga Tonga– Hunga Ha'apai Eruption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2024**, *129*. <https://doi.org/10.1029/2024JD041296>.



Food and Agriculture Organization
of the United Nations



UNHCR
The UN Refugee Agency



World Food
Programme

자세한 정보는 아래로 연락해주세요.

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: cpa@wmo.int

wmo.int