



# 2022년도 기후과학합동보고서

기후변화, 영향 및 대응에 대한 가장 최신의 다기구 합동보고서



Photographer: Alkis Konstantinidis/Reuters





이 보고서는 주요 글로벌 파트너 조직의 최신 기후 과학 정보를 업데이트하기 위하여 유엔의 지시로 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization)에서 편찬하였다. 세계기상기구(WMO), 글로벌탄소프로젝트(GCP), UN환경프로그램(UNEP), 영국기상청(Met Office, UK), 도시기후변화연구네트워크(UCCRN), UN재난위험경감사무국(UNDRR), 세계기후연구프로그램(WCRP-WMO, IOC-UNESCO, 국제과학협회의회(ISC) 공동후원), 그리고 기후변화에관한정부간협의체(IPCC)가 작성에 참여하였으며, 각 장의 내용은 해당 기관에 각각 귀속된다.

이 보고서의 전자파일은 다음 링크에서 내려받을 수 있다: [https://public.wmo.int/en/resources/united\\_in\\_science](https://public.wmo.int/en/resources/united_in_science)

**표지사진:** 마다가스카르 마난자리(Mananjary)에서 한 남자가 사이클론 바치라이(Batsirai)의 여파로 파괴된 집에서 일하고 있다. 2022. 2. 8. (REUTERS/Aikis Konstantinidis).

**주저자 및 기여저자:** 총괄 조정 및 편집 주관 WMO – Lauren Stuart, Jürg Luterbacher, Laura Paterson, Rose Devillier and Sylvie Castonguay (편집자)

**대기중 온실가스 농도 (WMO Global Atmosphere Watch):** Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (Integrated Carbon Observation System (ICOS) Carbon Portal, Lund University, Sweden), Jocelyn Turnbull (GNS Science, New Zealand/Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, USA), Luciana V. Gatti (National Institute for Space Research, Brazil)

**전지구 온실가스 배출량과 배출허용총량 (Global Carbon Project):** Josep G. Canadell (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia), Robert B. Jackson (Stanford University, USA), Robbie M. Andrew (Centre for International Climate and Environmental Research (CICERO), Norway), Philippe Ciais (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France), Steven J. Davis (University of California, USA), Pierre Friedlingstein (University of Exeter, UK), Corinne Le Quéré (University of East Anglia, UK), Zhu Liu (Tsinghua University, China), Glen P. Peters (CICERO, Norway)

**2018-2022년 전지구 기후현황 (WMO):** Omar Baddour (WMO), John Kennedy (Met Office, UK), Peter Siegmund (principal author, Royal Netherlands Meteorological Institute, Netherlands).

**2022-2026 전지구 기후예측 (Met Office, UK/WMO/World Climate Research Programme (WMO/International Science Council/IOC-UNESCO)):** Leon Hermanson (Met Office, UK), Adam Scaife (Met Office, UK; University of Exeter, UK), Melissa Seabrook (Met Office, UK), Doug Smith (Met Office, UK)

**배출량 갭 (UN Environment Programme):** Anne Olhoff (CONCITO, Denmark's Green Think Tank), John Christensen (CONCITO, Denmark's Green Think Tank), Joeri Rogelj (Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis, Austria), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP)

**기후시스템의 임계점 (WMO/World Climate Research Programme (WMO/International Science Council/ IOC-UNESCO)):** Thomas F. Stocker (University of Bern, Switzerland), Gabriele C. Hegerl (University of Edinburgh, UK) James W. Hurrell (Colorado State University, USA), Timothy M. Lenton (University of Exeter, UK), Sonia I. Seneviratne (ETH Zürich, Switzerland), Ricarda Winkelmann (PIK Potsdam, Germany)

**기후변화와 도시 (Urban Climate Change Research Network):** Cynthia Rosenzweig (NASA Goddard Institute for Space Studies and Columbia University, USA), William Solecki (City University of New York – Hunter College, USA), Maria Dombrov (Columbia University, USA)

**극한 기상현상 및 사회경제적 영향 (WMO World Weather Research Programme):** Estelle De Coning (WMO), Lauren Stuart (WMO), Andrew King (University of Melbourne, Australia), Ram Dhurmea (Mauritius Meteorological Service, Mauritius), Peter Bissolli (Deutscher Wetterdienst, Germany), Marvin Manus (Deutscher Wetterdienst, Germany), Stefan Rösner (Deutscher Wetterdienst, Germany), Andrea Kreis (Deutscher Wetterdienst, Germany)

**조기경보시스템: 적응 및 재난위험경감 지원 (WMO/UN Office for Disaster Risk Reduction):** Laura Paterson (WMO), Lauren Stuart (WMO), Animesh Kumar (UNDRR), Serena Odianose (WMO), Lorena Santamaria (WMO), Victoria Alexeeva (WMO)

**IPCC 보고서:** IPCC 6차평가보고서의 정책입안자를 위한 요약(SPM)보고서의 주요 내용(제1실무그룹: 과학적 근거, 제2실무그룹: 영향, 적응 및 취약성, 제3실무그룹: 기후변화 완화)

## 발간사: UN사무총장, 안토니오 구테흐스

급속하게 가속화되는 기후파괴는 홍수, 가뭄, 폭염, 극심한 폭풍, 산불, 해수면상승과 같은 재난에서 아무도 안전하지 않다는 것을 의미합니다. 해답은 긴급한 기후행동에 있음에도 우리는 계속해서 화석연료를 공급하고 미래세대의 삶을 위협하고 있습니다.

기후변화에 관한 파리협정에서 정부는 전지구 온도상승을 1.5도로 제한하는 것에 합의하고 지역사회의 기후복원력을 강화하는데 동의하였습니다. 올해 기후과학합동보고서는 우리가 이 길을 벗어났다는 것을 보여줍니다. 이제는 우리의 약속을 행동으로 보여줄 시간입니다.

탄소배출을 줄이기 위해서는 재생 에너지 혁명이 필요합니다. 적응에 대한 투자도 두 배로 늘려야 합니다. 이를 위한 빠르고 비용대비 효과적인 첫번째 단계는 조기경보입니다.

조기경보는 기후 위협으로부터 생명과 삶을 구합니다. 그러나 많은 개발도상국은 여전히 그러한 시스템이 부족합니다. 사람들이 이상 기상현상, 가뭄과 다른 기후영향에 대비할 수 있기 위해서는 조기 경보를 보장하는 것이 필수적입니다.

저는 WMO가 향후 5년 이내에 전세계적인 조기 경보 적용 범위를 보장하기 위한 계획을 개발하고 있다는 것을 기쁘게 생각합니다.

그러나 실제적 기후 문제에 대처하려면 훨씬 더 많은 것이 필요합니다. 저는 모든 지도자들이 이 보고서의 사실에 주의를 기울이고, 과학을 기반으로 힘을 합쳐 야심찬 긴급 기후행동을 취할 것을 촉구합니다.



A. Guterres, Secretary-General UN

## 발간사: WMO 사무총장 페터리 탈라스

과학은 우리가 잘못된 방향으로 가고 있음을 명백히 말해줍니다.

온실가스 농도는 계속 증가하여 새로운 최고 기록을 경신하고 있습니다. 화석연료 배출은 이제 팬데믹 이전 수준을 넘어섰습니다. 지난 7년은 기록상 가장 따뜻했습니다. 전지구 배출량의 70%를 차지하는 도시들은 기후 영향에 매우 취약합니다.

이러한 추세는 화석 연료 배출량을 줄이기 위해 시급하게 행동하지 않는다면 계속될 것입니다. 파리협정의 1.5도 목표를 달성하려면 2030년 배출량 감축 공약에 대한 열정이 7배 높아야 합니다.

일부지역의 더 높은 온도와 습도의 복합적인 영향은 향후 수십년 안에 인간의 건강에 위험한 결과를 초래할 수 있습니다. 이는 기술적 지원 없이는 더 이상 인간의 야외 노동이 불가능한 생리학적 전환점으로 이어질 수 있습니다. 이에 대한 연구와 극지방 빙상이 녹는 것과 같은 기후 임계점에 대한 연구는 사회가 미래의 기후 완화 및 적응의 비용, 이점 및 잠재적 한계를 더 잘 이해하는데 도움이 될 것입니다.

기후과학은 인간이 유발한 기후변화로 인해 우리가 경험하는 많은 극한 기상현상에 대한 가능성이 더욱 커지고 강렬해짐을 보여줍니다. 지역사회의 현재와 미래 기후위험에 대한 회복력을 구축하기 위해 조기경보 시스템에 대한 조치를 확대하는 것이 그 어느때보다 중요합니다.

저는 이 전례 없는 시대에 기후과학 커뮤니티를 통합하여 최신 정보를 전달하기 위해 이 보고서에 참여한 많은 전문가 팀에 감사드립니다.



Prof. P. Taalas, Secretary-General WMO

# 요약(Summary)

---

기후과학합동보고서는 세계기상기구(WMO)와 파트너 기관들이 기후변화, 영향, 반응에 대한 최신 과학정보의 개요를 제공한다. 기후변화에 대한 긴급한 대응이 필요한 지금, 이 보고서는 정책입안자에게 합치된 기후과학을 제공하고 현재와 미래 기후에 대한 주요 물리적, 사회경제적 영향을 강조하여 제시하고자 한다.

WMO 지구대기감시에 따르면, 대기중 온실가스 농도는, 2020년 코로나 19 팬데믹으로 인한 봉쇄의 효과로 감소하였음에도 불구하고, 다시 계속 상승하고 있다. 또한, 전지구 탄소 프로젝트는 2021년 전지구 화석에 따른 이산화탄소 배출량은, 코로나 19에 따른 전세계 봉쇄로 인해 일시적이지만 크게 감소한 이후, 2019년 코로나 19 이전의 수준으로 돌아왔다고 밝혔다. 이러한 현상들로 전지구 지표면 온도와 여러 기후변화 지수들이 증가하게 되었으며, 이는 WMO에서 발간한 2021년 전지구 기후 현황 보고서에서도 강조한 바 있다. 2021년 전지구 기후 현황보고서에 따르면 2021년부터 2015년은 기록상 가장 따뜻한 7년이었다.

영국기상청은 세계 기후연구 프로그램과 함께, 향후 5년 중 적어도 일년은 1850-1900년 평균 기온 대비 일시적으로나마 연 평균 기온이 1.5°C 를 넘게 될 가능성이 48%임을 밝혔다. 또한, 같은 기간 동안 적어도 일년은 기록상 가장 더운 해가 될 가능성이 93%라고 밝혔다.

UN 환경프로그램에서 최근 발간한 배출량 갭 보고서에 따르면, 국가들이 적극 실행하겠다고 밝힌 완화 공약(2021년 11월 4일기준)은 부족하며, 전지구 기온을 산업화 이전 대비 1.5°C 아래로 지킬 수 없을 것이라고 한다. 이 보고서는 또한 전지구 기온 상승을 산업화 이전 대비 2°C 아래로 제한하려면 지금의 완화 공약보다 4배 강력한 공약이 필요하며, 1.5°C 미만으로 제한하려면 7배 강력한 공약이 필요하다고 밝혔다. 파리 협정의 목표가 도달할 수 없는 곳으로 멀어져 버리기 전에 더욱 강력한 완화 행동이 필요하다.

야심찬 행동 없이는, 기후변화에 따른 물리적, 사회경제적 피해는 처참할 것이다. 임계점이라고 알려져 있는 기후 시스템의 돌이킬 수 없는 물리적 변화를 배재할 수 없으며 전지구적 그리고 지역적으로 현저한 결과를 가져올 것이다. 도시 기후변화 연구 네트워크에 따르면, 인간활동에 의한 온실가스 배출량의 70%에 기여하는 도시는 증가하는 기후 영향을 마주할 것이며, 이는 사회경제적 불평등과 상호 연계할 것이다. 또한, 세계기상기구(WMO)의 세계기상연구프로그램은 최근 발생한 극한 기상 현상들에서 이미 본 것처럼 가장 취약한 계층이 가장 고통받을 것이고 강조하고 있다.

전 세계에 사는 수십억명의 사람들이 기후변화 영향에 크게 취약하다. 따라서, 기후 영향의 위험을 줄이기 위해서는 적응과 재난 위험 경감이 아주 중요하다. 세계기상기구와 UN 재난위험경감사무소에 따르면, 조기경보 시스템은 인명을 구하고 피해를 줄일 뿐만 아니라 재난 위험 경감에 기여하고 기후변화 적응도 지원한다. 그러나, 전 세계의 절반도 안되는 국가들만이 이 중요한 시스템을 갖추고 있으며 취약한 국가들은 특히 그 커버리지가 낮다. 이러한 문제를 다루기 위하여 안토니오 구테흐스 UN 사무총장은 향후 5년 안에 지구상의 모든 인간이 조기경보 시스템으로 보호받을 수 있는 새로운 행동을 촉구했다.

또한, 기후 변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)는 최근 *과학적 근거, 영향, 적응 및 취약성, 기후변화 완화*에 대한 각각의 실무그룹 보고서를 발간하였고, 제6차 평가보고서에 이 보고서들이 모두 포함되어 있다. 이 중요한 보고서는 다양한 분야에 대한 과학적 합치의 중요성을 보여주고 있으며 어떤 연구가 더 필요한지 설명하고 있다.

배출량을 줄이고 변화하는 기후에 적응하기 위해서는 긴급한 행동이 필요하다는 사실에 있어 과학은 명확하게 밝히고 있다. UN 시스템과 유관 기관들은 계속해서 세계를 선도하는 과학적 결과를 제시하여 정책 결정자에게 정보를 제공하고 전지구 기후 행동을 지원할 것이다.



## 주요 메세지

- 대기중 온실가스(GHG) 농도는 계속해서 증가하고 있고, 화석 연료에 따른 배출량은 2020-2021년 코로나 19 팬데믹에 따른 봉쇄 조치로 일시적인 감소를 보였으나 현재는 산업화 이전 단계보다 높아짐
- 최근 기온과 해양 열은 기록적으로 높으며, 향후 5년 중 적어도 일년은 일시적으로나마 1850-1900년 대비 연평균 기온이 1.5°C 높을 가능성이 48%임
- 파리 협정을 달성하기에 완화 공약은 현저히 부족함. 임계점이라 불리는, 기후 시스템의 돌이킬 수 없는 변화가 일어날 확률을 증가시키게 되는 지속되는 온난화 현상을 막기 위해서는 보다 강력한 행동이 필요함
- 전 세계의 수십억명의 사람들이 기후변화 영향에 노출되어 있음. 도시(인간 활동에 의한 온실가스 배출량의 70%에 기여)는 사회경제적 영향을 더 많이 받게 될 것이며, 최근 극한 기상 현상에서 보았듯 세계에서 가장 취약한 계층의 사람들이 가장 심각한 피해를 입을 것임
- 기후 영향에 대한 위험도를 낮추는데 적응은 필수적임. 조기경보 시스템은 생명을 구하고 손실과 피해를 줄이며 재난 위험 경감에 기여하며, 기후변화 적응을 지원함

## 주요 메시지

- 주요 온실가스 농도는 2021년과 2022년 상반기에 계속해서 증가
- 2020년 전반적인 배출량 감소는 대기 중 장기체류 온실가스 농도의 연간 증가에 큰 영향을 미치지 못함
- 탄소 중립 도달에 있어 생물권이 탄소를 흡수하는 현상의 역할은 보다 탄탄한 대기 관측이 수반되면 더 잘 이해할 수 있을 것임

## 전지구 온실가스 수준

대기중 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메테인(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 농도는 계속 상승하고 있다. WMO Global Atmospheric Watch(지구대기감시) 온실가스 관측 네트워크에서 확보한 자료의 예비 분석 결과 이산화탄소 농도는 2021년 전 기간동안 410 ppm을 초과한 것으로 나타났다. 또한, 2022년 북반구에서 계절적으로 정점에 도달하는 시기에 온실가스 농도<sup>1</sup>는 배경으로 설정된 몇몇 지역에서 430ppm까지 도달했다.

세 가지 주요 온실가스에 대한 전체적인 분석 결과(그림 1), 2020년에 이산화탄소의 대기중 전지구 평균은 413.2±0.2ppm, 메테인은 1889±2ppb(10억분율), 아산화질소는 333.2±0.1ppb에 도달하여, 1750년 산업화 이전 수준보다 각각 149%, 262%, 123% 임으로 나타났다.

2019년부터 2020년까지의 이산화탄소 증가는 2018년부터 2019년에 관측된 것보다 다소 낮았으나, 지난 10년동안 연간 증가율 평균보다는 높았다. 코로나 19 팬데믹과 관련된 규제로 인해 2020년 전지구 에너지 관련 이산화탄소 배출량이 5.4% 감소했음에도 불구하고 이러한 현상이 나타났다(전지구 온실가스 배출량과 배출허용총량 참고). 메테인과 아산화질소의 경우, 2018년-2019년 관측된 증가량보다 2019년-2020년 증가량이 더 많았으며, 지난 10년 연간 증가율 평균보다도 높았다(WMO, 2021).

2021년 최종 전지구 평균 값은 2022년 하반기에 나올 예정이지만, 마우나로아(미국 하와이)와 케이프그림(호주 태즈메이니아) 지구대기감시 관측소와 같은 대표 관측소를 포함한 모든 관측 지점의 자료에 따르면 2021년과 2022년의 이산화탄소 농도는 계속해서 증가함을 나타내고 있다(그림 2와

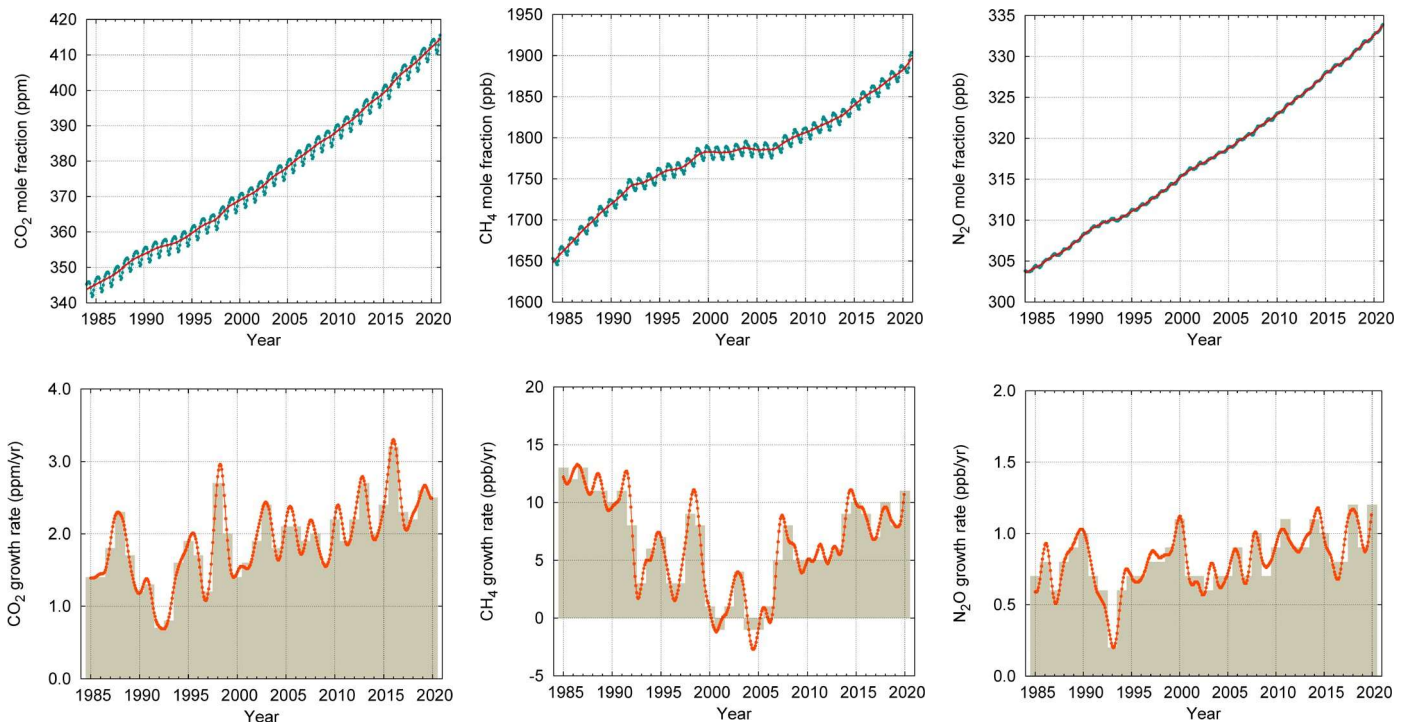


그림 1. (상행) 1984년부터 2020년까지 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 전지구 평균 몰분율(CO<sub>2</sub>는 ppm, CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O는 ppb)(상행)과 각각의 증가율(하행)을 나타냄. CO<sub>2</sub> 분석에는 139개 지정 관측 자료, CH<sub>4</sub> 분석에는 138개 지정 관측 자료, N<sub>2</sub>O 분석에는 105개 지정 관측 자료가 사용됨. 상행의 붉은 선은 계절 변동성이 제거된 월평균을 나타내며, 파란 점과 파란 선은 월평균을 뺀 값을 나타낸다. 하행의 음영 처리된 부분은 연속적인 연평균의 증가를 보여줌.

<sup>1</sup>이 섹션에서는 대기중 기체량과 관련되는 물리적 양(건조 몰 분율)을 “농도”라고 정의한다.

3). 2022년 6월, 마우나로아와 케이프그림의 이산화탄소 농도는 420.99ppm과 414.12ppm에 도달하였다. 2021년 6월에는 각각 418.94ppm과 411.64ppm이었다.

## 생물권의 온실가스 플럭스에 대한 더 나은 이해를 위한 대기관측의 활용

기후변화에 대한 정부간 협의체(IPCC, 2022)가 평가한 가장 야심찬 완화 시나리오는 이번 세기 하반기까지 총 배출량을 감소(net negative emissions)시키는 것이다. 새로 숲을 가꾸는 것과 기존의 숲을 다시 가꾸는 것은 생물권에서 탄소를 흡수(uptake) 하게 하면서 탄소 흡수원(carbon sink) 증가에 중요한 역할을 할 수 있다. 동시에, 토지 이용과 토지용도 변경, 임업으로 인한 인위적인 총 이산화탄소 배출량은 장기적 추세의 관점에서 보더라도 큰 연간 변동성을 보이며 불확실성이 크다. 자연적인 이산화탄소 유량은 연간 변동에 영향을 상당히 받는다. 생물권의 총 이산화탄소 유출입량을 정량화하는 데 대기 관측과 분석이 중요한 역할을 할 수 있으며, 그 예시를 아래에 제시한다.

### 뉴질랜드 배출량 목표치를 향한 진행 상황 추적

뉴질랜드에서 산림에 의한 탄소 흡수(uptake) 추정치는 아주 불확실하다. 유엔기후변화협약(UNFCCC)에서 설정한 배출량 목표치 진행 상황을 추적하는 국가 인벤토리 보고서는 산림에 의한 탄소 흡수를 추정하기 위해 지정된 국가 지정 장소에 있는 나무 지름과 높이 측정값을 사용한다(New Zealand Ministry for the Environment, 2021). 대기 이산화탄소 측정과 모델링을 통하여 독립적으로 추정한 바에 따르면, 국가 인벤토리 보고서와

육상 생물권 모델링 모두 산림에 의한 탄소 흡수를 크게 저평가하고 있다(Steinkamp et al., 2017). 최근 여러 연구들이 추가적인 측정과 모델링을 통해 이 탄소 흡수원을 확인하였고 적어도 10년은 지속되어 왔음을 보였다(그림 4).

최근 뉴질랜드 기후변화 위원회는 인공적인 숲 조성에 의존하는 것에서 벗어나 탄소 격리를 위한 토종 산림 조성을 권장하고 있다. 그러나 뉴질랜드의 독특한 토종 산림이 미래 기후변화에 미치는 민감성은 아직 크게 알려진 바가 없다. 현재 진행중인 관측을 통해 뉴질랜드 토종 산림이 기후변화에 얼마나 민감하게 영향을 주며 이 산림에 의한 탄소 흡수가 환경 변화에 어떻게 반응하는지 이해할 수 있을 것이다.

### 전지구 탄소 총량에 대한 아마존의 기여도 추정

아마존과 같은 열대지역은 전지구 탄소 총량에 큰 역할을 한다. 아마존은 지구에서 가장 큰 열대림이 있지만, 다른 열대림의 경우와는 달리 대규모 탄소 유출입량 감시에 필요한 현지 관측소는 많지 않다. 2010년에 전지구 탄소 총량에 대한 아마존의 기여도 추정을 향상시키기 위하여 아마존의 4개 지역(Alta Floresta (ALF), Rio Branco (RBA), Santarém (SAN), Tabatinga/Tefé (TAB/TEF))에서 항공기 측정 프로그램이 시작되었다. 전체적으로, 2010년-2018년 동안 항공기를 이용한 600개의 이산화탄소/일산화탄소 고도별 분포자료가 수집되었다(Gatti et al., 2021).

탄소 유출입량 및 장기 온도/강수 정보 계산을 위한 수연직 총량 기법과 고도별 분포 관측자료를 활용하면 자연 생태계와 교란된 생태계의 탄소 흡수원과 기후 스트레스에 대한 산림의 대응 정도를 더 잘 이해할 수 있다. 이는 탄소 중립에 도달하기 위해 아주 중요한 정보로, 만약 토지이용이나 토지용도 변경에 의해 산림이 흡수역량을 잃게 되면, 이미 인간에 의해 영향을 받은 여러 아마존 지역에서 이미 경험한 것처럼 탄소 중립을 이루기가 어려울 것이다.

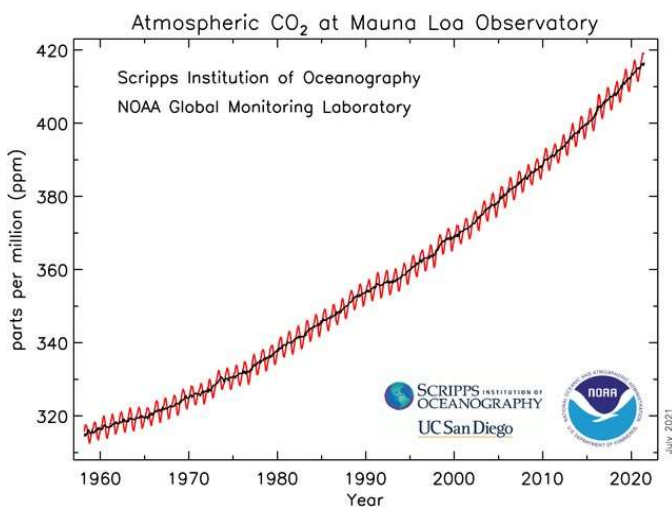


그림 2. 1958년 3월부터 2022년 6월까지 마우나로아 관측소에서 측정된 월 평균 이산화탄소 농도(단위: ppm). 붉은색 점선은 매월 중간일의 월평균값. 검은색 실선은 동일한 값을 나타내지만 여기서 평균 계절 변동은 통계처리해 제거됨 (Source: [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html)).

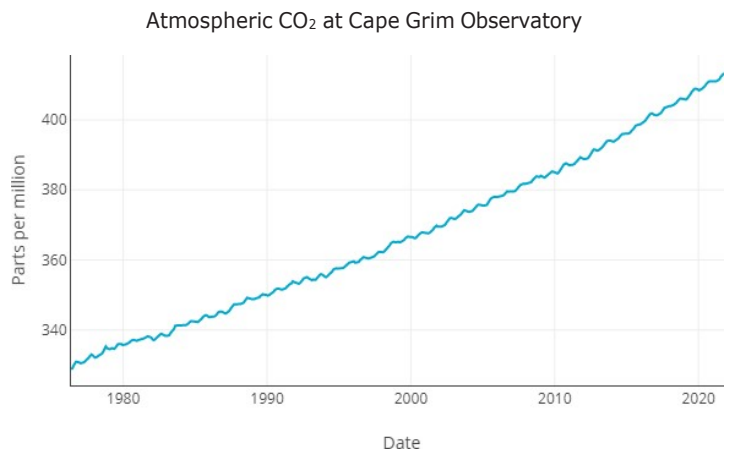


그림 3. 케이프그림 관측소에서 1976년 5월부터 2022년 6월까지 월 평균 이산화탄소 농도(단위: ppm) (Source: <https://www.csiro.au/greenhouse-gases/>).

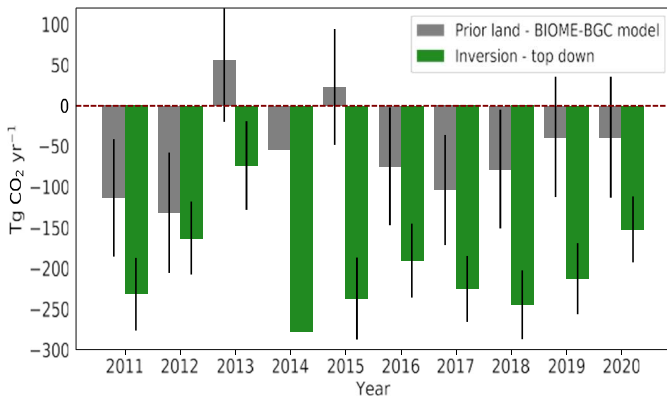


그림 4. Blome-BGC 모델로부터 추정된 뉴질랜드 육상 생물권의 연평균 탄소 유량(회색)과 대기 이산화탄소 측정 및 모델링으로부터 추정된 탄소 유량(녹색) (updated from Steinkamp et al., 2017)

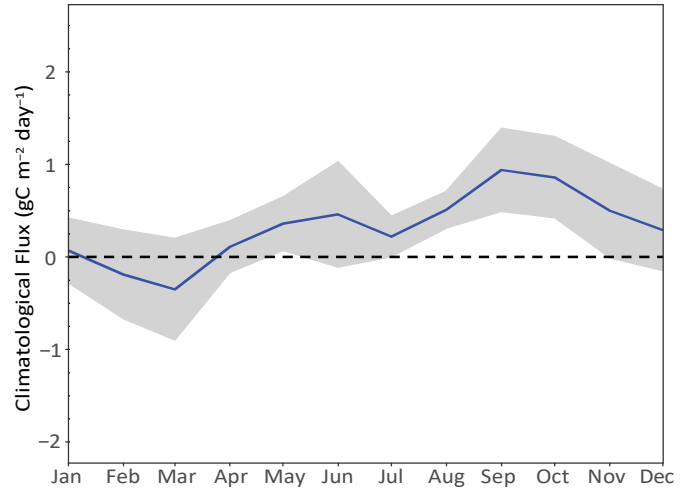


그림 5. ALF 탄소 유량의 9년(2010-2018) 월평균의 평균 (2010-2018). 회색 구간은 남동 아마존지역의 월평균과 9년 평균 기후값 탄소 유량의 표준 편차를 나타냄(Gatti et al., 2021).

자료 분석 결과, 남동지역(ALF 지역, 8.80° S, 56.75° W)에서 가장 많은 이산화탄소가 대기로 배출되었고(그림 5), 북동지역(SAN 지역, 2.86° S, 54.95° W)이 그 다음으로 나타났다. 연 평균 고도별 분포와 추정된 탄소 유출입량에서 나타난 이산화탄소량 변화는 토지이용이나 토지용도 변경에 더 많이 영향을 받은 지역에서 대기중으로 더 많은 탄소를 배출함을 보여준다. 아마존 동부 지역은 지난 40년 동안 건기 기온 상승이 아주 강력하게 나타났고, 강수량이 감소했으며, 많은 부분에서 산림 파괴를 겪었다. 반면 아마존 서부 지역은 상대적으로 인간의 간섭이 적었고 일반적인 건기 기후 트렌드를 경험했다.

관측에 기반한 온실가스 추정방법에 대한 지원은 분석 인프라에 상당한 발전을 불러올 것이라 인식되고 있다. 세계기상기구 전지구 온실가스 통합정보시스템(IG3IS)은 관측에 기반한 정보 시스템의 한 예로서 대기 관측자료와 분석 도구를 사용하여 온실가스원과 흡수원에 대한 지식을 국가 단위 및 소규모에서 향상시켰다.

점점 더 많은 국가에서 관측기반 배출량 자료를 배출 인자에 기반한 추정치 및 활동과 연계하는 프로그램을 시작하고 있다. IG3IS는 양질의 실무 문건을 제공하여 다양한 규모에서의 추정치와 여러 국가, 도시, 시설에서의 추정치를 서로 비교할 수 있게 하였다.

세계기상기구(WMO)는 현재 국가간 협의에 의해 대기중 온실가스 농도와 대기-토양-해양간 온실가스 유출입량을 관측 및 모의하는 현업 전지구 온실가스 감시 인프라 개발의 가능성을 검토하고 있다. 이 이니셔티브 개발은 현장 및 우주 기반 관측 기구의 대표 모델링 및 자료 동화 활동, 잠재적 사용자 커뮤니티와 함께 협의 중에 있다.

### 주요 메시지

- 인간활동에 의해 배출된 총 이산화탄소 양은 2020년 연간 38기가톤으로 추정되었고, 2021년에는 초기 추정치가 39.3기가톤으로 추정됨
- 초기 자료에 따르면 2022년 1월-5월동안 전지구 이산화탄소 배출량은 2019년(팬데믹 이전 시기) 동 기간에 기록된 것보다 1.2% 많은 것으로 측정됨
- 토지이용 변화에 따른 이산화탄소 배출량의 1/4은 국가간 식량 무역과 관련되어 있고, 이 중 3/4 이상이 방목지와 같이 농업을 위해 토지를 개간하는 활동과 연관됨

화석연료(석탄, 천연가스, 석유)를 포함하여 인간활동에 의해 배출되는 이산화탄소 양과 토지 이용 및 토지용도 변경, 임업(LULUCF)에 의한 이산화탄소 양은 2020년에 연간 38기가톤으로 추정되었다(1기가톤 = 1 1015gram = 10억톤). 2021년 초기 추정치는 연간 39.3기가톤이다(Friedlingstein et al., 2022; Jackson et al., 2022).

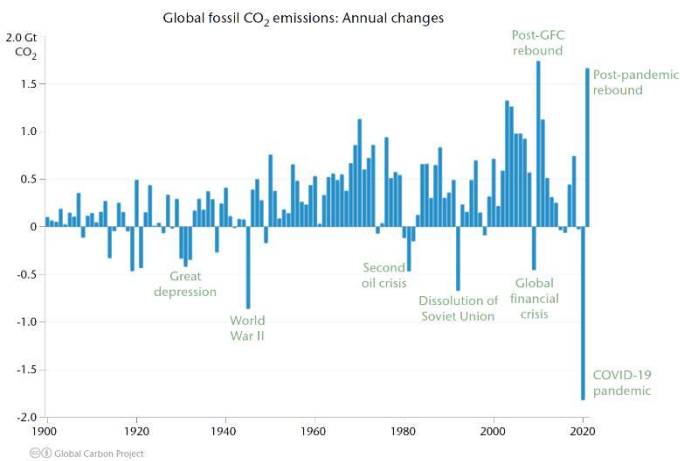


그림 1. 전지구 화석 CO<sub>2</sub> 배출의 연변화(Friedlingstein et al., 2022).

2020년 전지구 화석 CO<sub>2</sub> 배출량은 코로나 19 팬데믹으로 인한 봉쇄정책에 따라 2019년 팬데믹 이전 단계보다 5.4% 감소했다가 2021년에는 다시 이전 범위로 돌아왔다. 2020년 배출량 하락은 전 세계 경제 활동이 크게 하락하면서 이산화탄소 배출량 기록을 시작한 이후로 가장 큰 하락이었다(그림 1).

화석 CO<sub>2</sub> 배출량은 2021년에 4.8% 증가하여 연간 36.4 ± 1.8기가톤에 도달했다(그림 1). 2021년 석탄과 천연가스에 의한 2019년 값을 넘었으며, 석유에 의한 배출량은 2019년 값보다 낮았는데, 이는 특히 육상 이동과 국제 항공이 아직 팬데믹 이전으로 돌아가지 않았기 때문이다.

초기 자료에 따르면 2022년 1월-5월의 전지구 이산화탄소 배출량은 2019년 동기간과 비교하여 팬데믹 이전보다 1.2% 상향되었다(그림 2). 특히, 전기 생산(발전)과 산업분야 배출량은 각각 1.9%와 3.8% 증가하였다. 국내 및 국제 항공 분야는 1.4%와 31%에 머무르며 2019년 값보다 훨씬 낮은 값을 보여주었다(Carbon Monitor 2022; Davis et al., 2022; Liu et al., 2022).

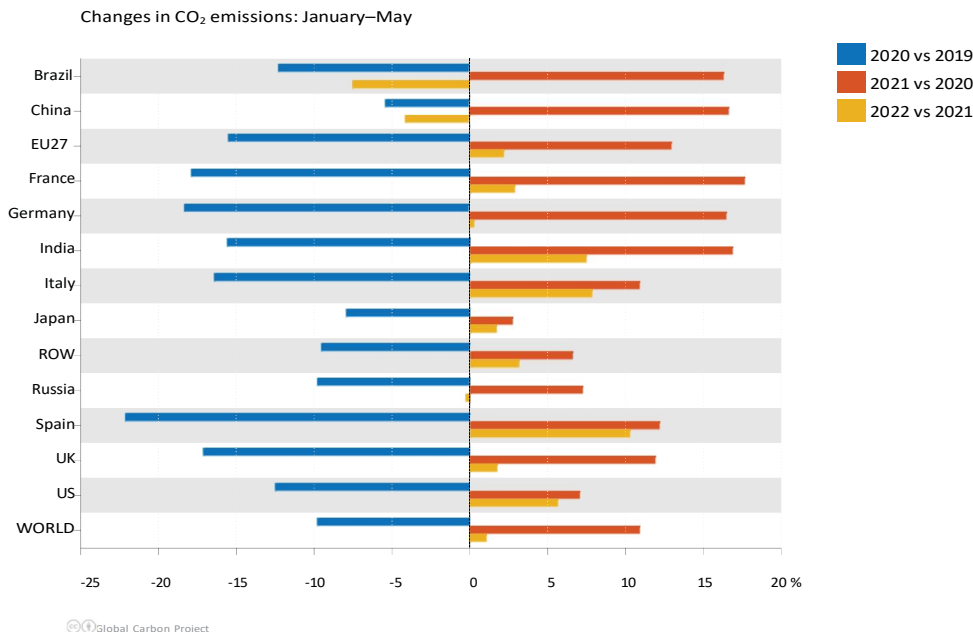
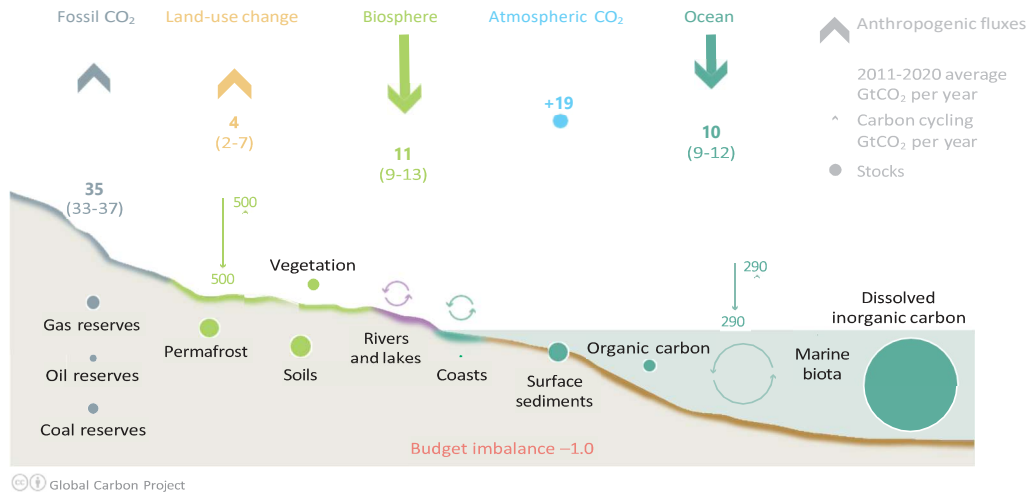


그림 2. 직전년도 동기간과 비교하여 2020년, 2021년, 2022년 1월-5월 동안 전세계 및 선별된 국가 그룹의 화석 연료에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 변화(Carbon Monitor, 2022).

# 전지구 온실가스 배출량과 배출허용총량 Global Carbon Project



© Global Carbon Project

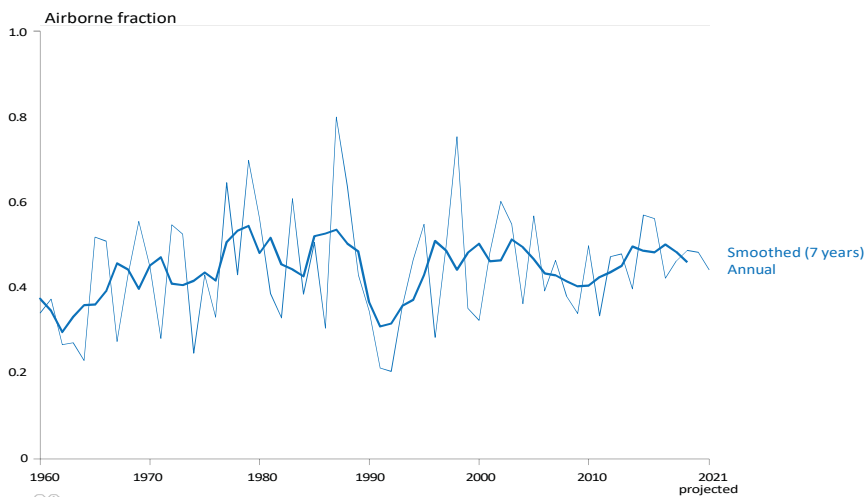
그림 3. 2011년~2020년 10년동안 전지구 탄소 총량에 대한 인간의 간섭 평균 값(Friedlingstein et al., 2022).

2022년 상반기 5개월동안 전지구 배출량의 증가는 크게 미국(+5.7%), 인도(+7.5%) 그리고 대부분의 유럽 국가에 의해 발생되었다. 브라질, 중국, 러시아와 같은 국가의 경우 2021년보다 그 값이 낮았다. 2022년의 전지구, 혹은 특정 지역별 추세를 살펴보면 국가들이 2020년 코로나 19 팬데믹에 따른 봉쇄로부터 벗어나던 2021년 1월부터 5월까지 즉각적인 반등을 보여준 것과는 다른 양상을 보여주었다. 2021년 배출량 증가가 경제의 빠른 회복과 직접적인 부양책에 의한 것인 반면, 2022년 일부 국가의 배출량 둔화와 감소는 2020년 위기 이후 경제 재조정, 지속적인 공급망 분란, 우크라이나 전쟁으로 인한 주요 상품의 부족에 의한 것이다. 중국의 배출량 감소는 중국 지역의 코로나 19 발생으로 인한 장기적인 봉쇄 정책과 국제 여행객 제한 때문이다.

지난 2.5년간 전지구 배출량의 큰 변동에도 불구하고, 2010년~2019년인 팬데믹 이전 십년에 비해 23개국에서 화석 CO<sub>2</sub> 배출

량이 현저히 감소하였고, 이는 전지구 배출량의 1/4에 해당 (9기가톤/년)한다. 여기에는 유럽 국가와 일본, 멕시코, 미국이 해당된다. 여전히 전지구 배출량이 상승 추세이기는 하지만, 이 국가들에서의 배출량 감소는 탈탄소화를 향한 진전을 보여준다(Friedlingstein et al., 2022; Le Quéré et al., 2021).

화석 CO<sub>2</sub> 배출과는 달리, LULUCF(토지 이용 및 토지용도 변경, 임업)에 의한 대기 CO<sub>2</sub> 영향은 산림 벌채와 같은 인간 활동에 의해 탄소가 배출되는 것과 숲 조성과 같은 활동으로 탄소가 흡수되는 것을 모두 반영한 결과이다. LULUCF에 따른 총배출량은 2.9±2.6기가톤/년으로 추정되며 불확실성이 굉장히 크다. 이는 2011~2020년의 십년 평균인 4.1±2.6기가톤/년 보다 작다. 십년 단위의 총량은 순배출량 14±2.2기가톤/년에서 관리하고 있는 토지에서의 탄소 제거로 9.9±1.5기가톤/년이 부분적으로 상쇄된 값이다.



© Global Carbon Project

그림 4. 1960년부터 2021년까지 대기중에 남아 있는 인간활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량(화석 및 LULUCF)(Friedlingstein et al., 2022).

2021년의 전지구 평균값이 아직 확정되지 않았으나, 자료에 따르면 인간활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량이 전지구 대기 이산화탄소 농도 증가에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나, 대기 중의 이산화탄소가 증가함에 따라 이산화탄소가 자연적으로 땅과 바다에 흡수되는 양도 증가하여, 평균적으로 2011-2020년에 해양으로 10.2±1.5기가톤/년, 토지로 11.2±2.2기가톤/년만큼 이산화탄소가 흡수되었다(그림 3). 이산화탄소 흡수가 증가되어, 인간 활동에 의해 배출된 이산화탄소 중 대기에 남아 있는 부분은 연간 변동성이 크기는 하지만 평균적으로 45% 정도가 된다(그림 4). 즉, 평균적으로 인간활동에 의한 이산화탄소 배출량의 55%는 토양과 해양에 자연적으로 제거된다는 것을 의미하며, 향후 기후와 대기 변화에 따른 이들의 특성 변화를 이해하는 것이 더욱 중요할 것이다.

## 식량관련 탄소 배출 경로

상품, 서비스 및 화석 연료의 국제 무역은 상품 및 서비스를 소비하거나 화석 연료를 추출하는 국가와 화석 연료를 태우고 관련된 배출량을 보고하는 국가로 구분된다. 그러나, 국제적으로 거래된 식량이 전지구 토지 이용(즉, 비 에너지) 관련 배출량과 어떻게 연관되어 있는가는 거의 알려져 있지 않다.

농업 및 토지 이용 변화에 따른 토지 이용 온실가스 배출량에 대한 새로운 분석에 따르면, 식량 무역에 따른 배출량은 2017년에 5.8기가톤의 이산화탄소를 배출한 것(이산화탄소 환산 톤)과 같은 양이었고, 이는 토지 이용 변화에 따른 온실가스 배출량의 27%에 해당하는 수치였다(Hong et al., 2022). 이산화탄소 환산에는 이산화탄소, 메테인, 아산화질소 등 주요 온실가스가 모두 포함된다.

거래된 배출량의 3/4 이상이 목초지 조성 과 같이 농경지 확장을 위한 토지 이용 변화와 연관되어 있다. 거래된 식량 관련 배출량의 최고 수출국은 브라질과 인도네시아였으며, 이는 크게 탄소 밀도가 높은 숲의 벌채가 많이 이루어졌기 때문이다(그림 5). 브라질은 토지 이용에 따른 배출량의 40%를, 인도네시아는 42%를 수출하는 셈이다.

식품 생산과 관련하여 탄소 배출 경로를 자세히 살펴보는 것은 토지 이용에 따른 배출에 관한 국제 협력에 도움이 된다.

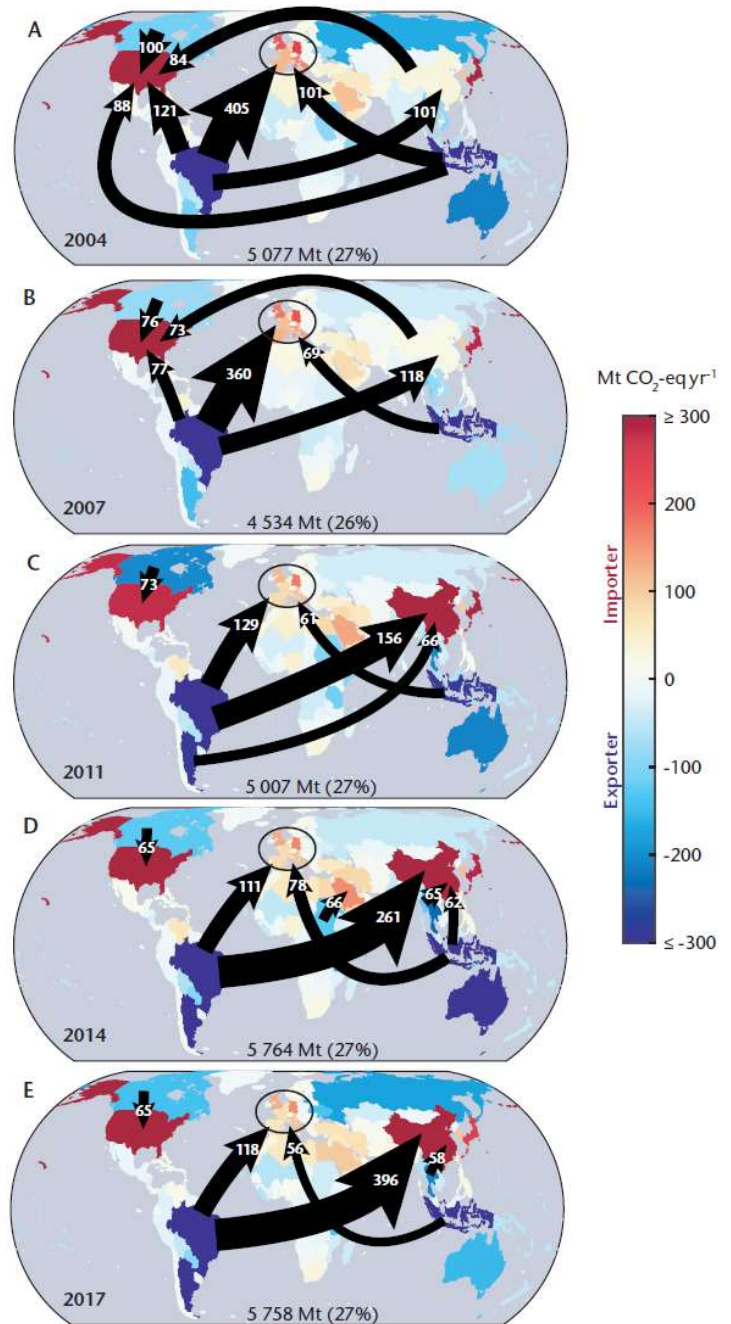


그림 5. 지역간 무역에서 토지이용에 의한 배출량의 전지구 분포. 2004년(A), 2007년(B), 2011년(C), 2014년(D), 2017년(E) (Hong et al., 2022).

## IPCC 주요내용

- 인간에 의해 배출된 순온실가스의 총량은 2010-2019년 동안 계속해서 증가함(IPCC Working Group III, 2022)
- 2010-2019년 동안 연평균 온실가스 배출량은 그 전의 어떠한 십년단위 값보다 높았으나, 2010-2019년의 상승률은 2000-2009년보다는 낮았음(IPCC Working Group III, 2022)
- 인간에 의한 온실가스 순배출량은 2010년 이후 전세계 주요 분야에서 상승함(IPCC Working Group III, 2022).

## 주요 메시지

- 2018-2022년 동안 전지구 5년 평균 기온은 1850-1900년 평균 기온보다  $1.17 \pm 0.13^\circ\text{C}$  높으며, 이는 2016-2020년, 2015-2019년, 2017-2021년의 5년 평균 기온에 이어 4번째로 높은 5년 평균 기온임
- 2018-2022년, 5년간 해양 열 용량(해양에 저장되어 있는 열을 측정하는 값)은 최고치를 기록
- 2018-2022년 동안 북극 해빙은 평균적으로 1981-2010년의 장기간 평균치보다 낮았으며, 남극 해빙은 기록상 최저 또는 두번째로 가장 낮은 것(어떤 자료를 사용하는가에 따라)으로 나타남

세계기상기구(WMO)에서 매년 발간하는 전지구 기후 현황 보고서는 전지구 기온, 해양 열 및 지구 빙권 지수 등 전지구 기후 지표 현황에 대한 요약 정보를 제공한다. 이 보고서에는 각국 기상청과 기후 센터, 전세계 과학자 및 전문가, 다양한 UN 파트너들이 참여하고 있다. 이 장에서는 2021년 보고서의 주요 내용을 간략히 요약해서 제공하고 2018년부터 2022년 6월까지 5년동안 최신 업데이트된 내용을 제공한다.

## 전지구 기온

2015년부터 2021년까지는 기록상 가장 따뜻한 7년이었다. 2018-2022년(2022년 5월 또는 6월까지 자료 사용) 전지구 평균 기온은 1850-1900년 평균값보다  $1.17 \pm 0.13^\circ\text{C}$  높은 것으로 추정된다. 이 수치는 6종의 데이터세트<sup>1</sup> 평균 값이며, 개별적으로  $1.13^\circ\text{C}$  부터  $1.21^\circ\text{C}$ 의 범위를 가진다. 이는 모든 데이터세트를 조사한 결과 2016-2020년, 2015-2019년, 2017-2021년에 이어 기록상 4번째로 높은 5년 단위 평균 기온 값이다(그림 1). 또한, 서로 중복되지 않는 기간 중 가장 따뜻한 기간이었고, 두 번째는 2013-2017년이었다.

5-year Global Mean Temperature Difference ( $^\circ\text{C}$ )  
Compared to 1850-1900 average

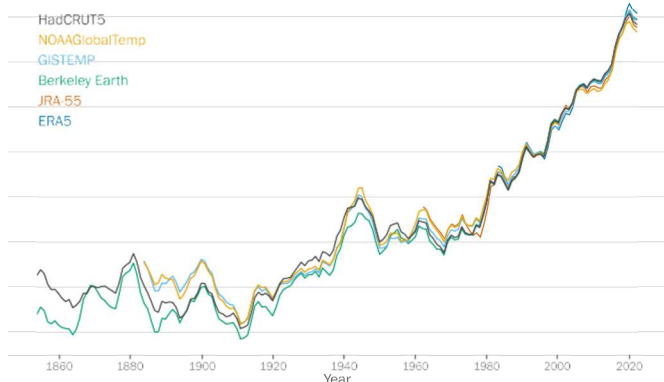


그림 1. 1850-1900년 평균값에 대하여 1850-1854년부터 2018-2022년(5월 또는 6월까지의 자료)까지 전지구 5년 단위 평균 기온 편차. 데이터세트 6종 사용

가장 최근에 보이는 5년 평균 값의 경미한 하락은 2015/2016에 발생한 강력한 엘니뇨로부터 2021년과 2022년 상반기까지 계속해서 영향을 미친 라니냐로 전환되는 것과 연관이 있다. 엘니뇨는 전지구 기온을 단기간 상승시키는 효과가 있고, 반면 라니냐는 일반적으로 기온을 다소 떨어뜨리는 효과가 있다.

확장된 라니냐의 영향은 태평양 지역에서 볼 수 있는데, 열대 태평양 지역의 동부에서는 지표면 온도가 1981-2010년 기간에 비해 하락하였고 북태평양과 남서태평양 지역은 평균보다 따뜻한 것으로 나타났다. 전 세계의 일부 지역(북아메리카 일부, 남극해, 그린란드 남부 지역)만이 최근 평균보다 기온이 낮았고 전세계 대부분 지역은 최근 평균보다 기온이 높았다. 2018-2022년 기간의 평균 기온은 유라시아, 아프리카 대부분, 호주, 남아메리카 및 중앙아메리카 일부 지역에서 특히 높게 나타났다.

## 해양 열 용량

온실가스 농도가 증가함에 따라 지구 시스템에 축적되는 대부분의 잉여 에너지는 해양에 의해 흡수된다. 이렇게 흡수된

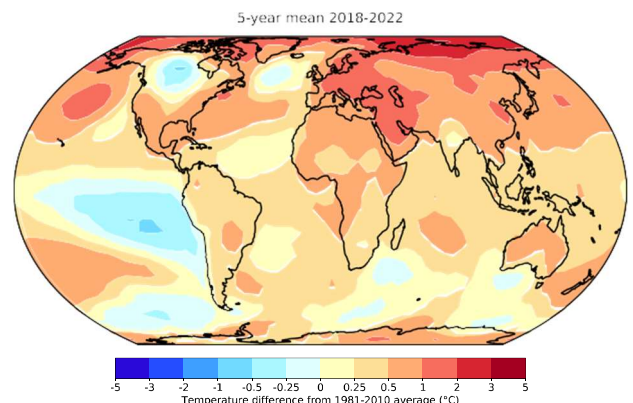


그림 2. 1981-2010년 평균값에 대하여 2018-2022년(5월 또는 6월까지 자료 사용) 기간 동안 5년 평균 지표근처 기온의 차이. 각 지도의 격자 값은 6개 데이터세트(HadCRUT5, GISTEMP, NOAAGlobalTemp, Berkeley Earth, JRA-55, ERA5) 값의 중앙값으로 계산.

<sup>1</sup>사용된 6종 데이터세트: HadCRUT5(2022년 5월까지)와 GISTEMP, NOAAGlobalTemp, Berkeley Earth, ERA5, JRA-55(2022년 6월까지)

에너지는 해양을 따뜻하게 하여 결과적으로 물의 열팽창을 가져와 해수면을 상승시키게 된다. 여기에 육지의 얼음이 녹으면서 해수면 상승에 기여하게 된다. 해양의 표면층은 심해보다 빨리 따뜻해지고 이는 전지구 평균 해양 표면온도를 상승시켜 해양 폭염 발생을 증가시킨다.

지구 시스템에 축적된 열의 90% 정도가 해양에 저장되는데 이를 해양 열 용량으로 측정할 수 있다. 표면에서 700미터 깊이까지 측정한 결과, 2018-2022년 전지구 열용량은(2022년 5월까지 자료 사용) 그 이전의 어떤 해보다도 높았다(그림 3). 국립환경정보센터(National Centers for Environmental Information, NCEI) “Levitus” 데이터세트의 2018년-2022년 선형변화율은  $0.8 \times 10^{22}$  Joule/년으로, 0-700미터 해양층의 열용량(flux)이  $0.7 \text{ Watt/m}^2$ 인 것에 해당한다.

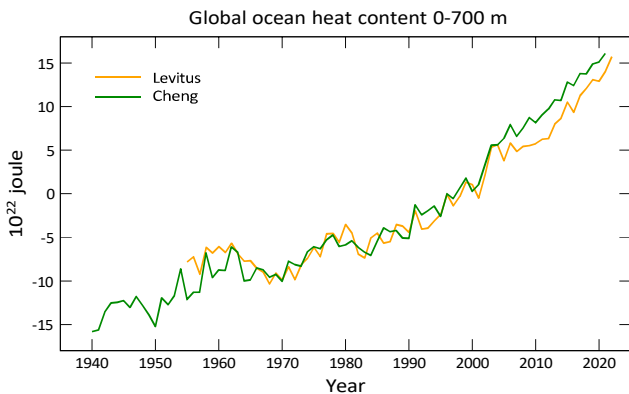


그림 3. 1940년부터 2022년 5월까지 0-700m 전지구 해양 열 용량(Institute of Atmospheric Physics ocean analysis).

해양의 상층부 2000m는 2021년에도 계속해서 따뜻해지고 있고, 앞으로도 계속해서 온도가 상승할 것으로 예상되며, 이는 향후 수백에서 수천년동안은 되돌릴 수 없는 변화이다(Riser et al., 2016 and Roemmich et al., 2019).

모든 데이터세트에서 해양온도 상승률이 특히 지난 20년동안 크게 증가했음을 말해준다. 2000m 깊이까지의 해양온도 상승률은 (해양표면과 비교하여) 2006년-2021년(1971년-2021년) 기간동안  $1.0(0.6) \pm 0.1 \text{ W/m}^2$ 에 도달하였다. 참고로, 상층부 700미터 깊이의 값은 2006년-2021년(1971년-2021년) 기간 동안  $0.7(0.4) \pm 0.1 \text{ W/m}^2$ 이다. 2000미터 아래에서도 해양은 따뜻해지고 있긴 하지만 온도 증가율은  $0.07 \pm 0.04 \text{ W/m}^2$ 으로 다소 낮다(Purkey et al., 2010).

## 지구 빙권

1979-1988년과 2010-2019년 사이 북극 해빙 지역의 감소(9월에는 40%, 3월에는 10% 감소)는 인간의 영향이 주

원인일 가능성이 아주 높다(IPCC, 2021). 현재 북극 해빙은 연간 및 늦 여름 모두 1850년 이후 가장 작게 나타나고 있으며, 2050년 이전에 적어도 한번은 여름철에 거의 얼음이 없는 상황에 처하게 될 것이라고 예측된다.

1979년부터 2020년까지 남극 해빙 지역에서는 지역 역추세와 대규모 연간 변동성 때문에 특별한 추세는 보이지 않는다(IPCC, 2021). 남극 해빙은 그림 4에서 보는 것처럼 위성 관측이 시작된 이래 2015년 경까지 천천히 증가했다. 그러나, 2015년과 2017년 사이에 급격히 줄어들었다가 2017년부터 2021년 사이에는 장기간 평균으로 회복하였고, 2022년 2월에는 사용하는 데이터세트에 따라 기록상 최저 또는 2번째로 낮은 값에 도달하였다.

빙하는 기온 및 강수, 일조량, 해양 온난화 등의 인자들에 매우 민감하다. 2000-2019년 기간 동안, 전지구 빙하와 만년설(그린란드와 남극 빙상은 제외)은 평균적으로 연간  $267 \pm 16$ 기가

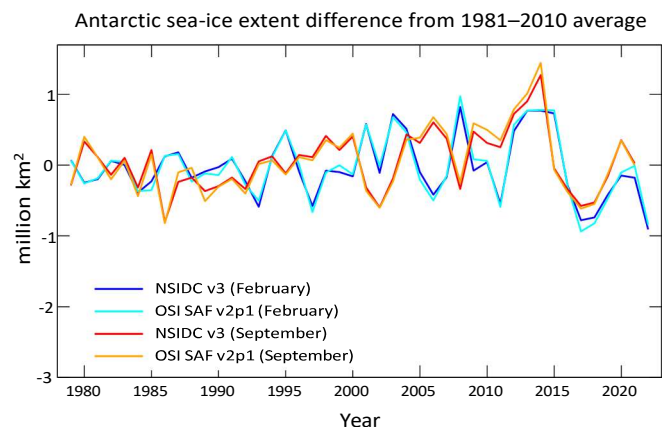
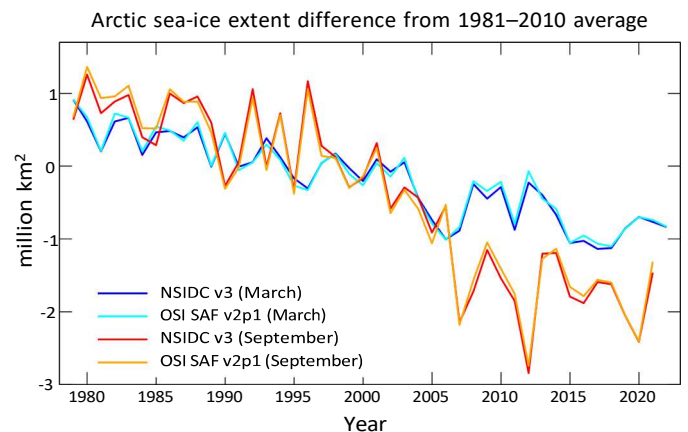


그림 4. 북극(위)과 남극(아래)의 최대 얼음 면적(북극은 3월, 남극은 9월)과 최소 얼음 면적(북극은 9월, 남극은 2월)이 발생하는 기간 동안 1979-2022년 3월 자료와 1981-2010년 평균 해빙 범위 차이(US National Snow and Ice Data Center(NSIDC), EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility(OSI-SAF)).

톤의 손실을 겪었다. 빙하 손실은 2015-2019년 후반부에 연간  $298 \pm 24$ 기가톤으로 가장 컸다. 그러나 2015-2019년 사이 중위도 지역의 여러 빙하는 전지구 평균( $0.52 \pm 0.03$ m/년)보다 2배 이상 얇아 졌다. 그 예로 뉴질랜드 빙하는 연간 1.52m, 알래스카는 1.24m, 중앙 유럽은 1.11m, 알래스카를 제외한 서북아메리카는 1.05m가 얇아졌다.

전 세계 빙하 모니터링 서비스는 전지구 빙하의 양을 수집, 분석하고 있고, 장기간 관측을 위해 42종의 기준 빙하를 확보하고 있다. 32종의 기준 빙하에서 나온 초기 자료에 따르면, 2020/2021 빙하 연도에 전지구 평균 빙하 양은  $-0.77$ m의 물 환산 값(m w.e.)<sup>2</sup>으로 나타났다. 이는 지난 십년(2011-2022년) 평균 값( $-0.94$ m w.e.)보다는 작은 손실이지만, 1991-2020년 동안의 평균 손실량인  $-0.66$ m w.e. 보다는 큰 값이다.

## 2021년 극한 기후 현상

광범위한 규모의 기후 변화를 이해하는 것도 중요하지만, 폭우나 폭서, 가뭄, 폭염, 한파, 태풍, 사이클론과 같은 극한 기상 및 기후 현상이 발생할 때 날씨와 기후가 주는 심각한 영향을 가장 잘 느끼게 된다. 이러한 현상들은 홍수, 산사태, 산불, 눈사태와 같은 고위험 현상들을 일으킬 수 있다. 이 장에서는 WMO 회원국으로부터 받은 정보를 바탕으로 2021년의 극한 기상 현상을 설명한다.

2021년에는 북서 아메리카가 이례적인 폭염으로 크게 영향을 받았다. 캐나다의 브리티시 콜롬비아는 그 전까지의 최고 기온보다  $4.6^{\circ}\text{C}$  더 높은 온도인  $49.6^{\circ}\text{C}$ 를 경험하였다. 폭염은 미국까지 확장되어 미 전역에 걸쳐 평균했을 때 기록상 가장 더운 여름을 경험하였다. 또한 중앙 유럽과 지중해 지역에도 전반적으로 폭염이 발생하여 이탈리아 시칠리아의 시라쿠사(Syracuse)에서는 온도가  $48.8^{\circ}\text{C}$ 에 도달하였다. 이 폭염 기간 동안과 그 이후로 캐나다부터 시베리아 지역까지 여러 차례 주요 산불이 발생하여, 3년 연속 산불 발생을 경험하게 되었다.

2021년 7월 중반에 서유럽은 기록상 가장 심각한 홍수를 겪었다. 가장 크게 피해를 입은 곳은 독일 서부지역과 벨기에 동부지역으로, 7월 14-15일에 100에서 150mm의 비가 내렸으며, 독일 하겐(Hagen) 지역은 22시간 동안 241mm의 비가 내렸다고 보고했다. 이와 동시에 세계의 다른 지역에서는 가뭄으로 피해를 입었다. 동아프리카 지역(Greater Horn of Africa), 그 중에서도 특히 소말리아와 케냐, 에티오피아 일부 지역에서는 3년 연속 평균보다 적은 강수량에 이어 가뭄이 찾아왔다.

2021년 2월 중반에 미국 중앙 지역과 멕시코 북부에서는 이례적인 한파가 발생하였다. 텍사스는 1989년 이후 가장 낮은 기온으로 큰 피해를 입었다. 또한 북아시아 지역의 여러 나라에서 2020/2021년 겨울이 특히 추웠다. 러시아는 2009/2010년 이후 가장 추운 겨울을 경험하였고 일본에서는 12월 후반과 1월 초반에 평균보다 기온이 낮았다. 중국 대부분 지역도 이 시기에 이례적인 겨울을 경험하였고, 베이징은 2021년 1월 7일에  $-19.6^{\circ}\text{C}$ 로 1966년 이후 가장 낮은 기온을 경험하였다.

<sup>2</sup>물 환산 미터(m w.e.): 얼음이 녹아서 전 세계 빙하 지역으로 퍼진다고 가정할 때 발생하는 물의 깊이

# 2022-2026년 전지구 기후 예측

Met Office, UK/WMO/World Climate Research Programme (WMO/International Science Council/IOC-UNESCO)



WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

Met Office



## 주요 메세지

- 2022년부터 2026년까지 적어도 한 해는 산업화 이전 수준(1850-1900년 평균)보다 온도상승이 1.5 °C 를 일시적으로 초과할 가능성이 거의 50%에 달함
- 2022년과 2026년 사이의 최소 1년은 기록상 가장 따뜻한 해(2016)보다 더 따뜻할 확률이 93%이며, 2022-2026년의 5년 평균기온은 2014-2021년의 평균 기온보다 높을 것임
- 향후 5년(2022-2026년)동안 사헬, 북유럽, 알래스카, 시베리아 북부에서는 더 습하고, 아마존에서는 5월부터 9월까지 더 건조한 기후가 나타날 가능성이 높아짐

WMO 선도센터(1년-10년 기후예측)는 향후 5년간의 예측을 요약해서 제공한다(Hermanson et al., 2022). 이러한 예측은 WMO 지정 글로벌 생산 센터와 비지정 기여 센터에서 세계 최고의 10년 예측 시스템을 기반으로 하기 때문에, 근래 기후예측에 관한 한 최고의 추정정보이다. 이러한 예측에는 계절예측에 사용되는 관측기반 기반 초기조건과 기후변화 전망에 활용되는 경계 강제력 모두를 적용한 총 120개의 결과를 포함하고 있다. 이러한 예측은 해당 기간 동안 대형 화산 폭발이 발생하지 않는다고 가정한다. 이 장에서는 2022-2026년 기간에 대한 WMO 선도센터의 예측을 주로 다룬다.

## 2022-2026년에 대한 기후예측

### 전지구 온도

전지구 평균 표면온도는 2022년부터 2026년까지 상승할 것이며, 1991년부터 2020년까지의 기준치를 훨씬 웃돌 것이다. 이 5년동안 전지구 연평균 기온은 1850년에서 1900년 사이의 평균 기온인 산업화 이전 수준보다 1.1-1.7°C 더 높을 것으로 예측된다.

산업화 이전부터의 온난화에 대한 최선의 추정치를 사용하면 향후 5년 중 적어도 한 해의 연평균 전지구 표면온도가 산업화 이전수준보다 일시적으로 1.5°C를 초과할 가능성은 48%이며, 그 가능성은 시간이 지남에 따라 증가하고 있다. 그러나 5년 평균이 이 임계값을 초과할 확률은 매우 낮다(10%). 파리협정에서 합의한 온도 상승 제한인 1.5°C는 장기적인 온난화를 의미하지만, 전지구 기온이 이 임계값에 가까워짐에 따라 1.5°C 이상 온도가 상승하는 해(year)가 규칙성을 증가시키면서 발생할 것으로 예상된다.

향후 5년 중 적어도 1년은 기록상 가장 따뜻한 해(2016년)보다 따뜻할 확률이 93%이며, 2022-2026년의 평균기온은 지난 5년보다 높을 것이다. 과거 재현자료(hindcast)의 예측성이 높기 때문에 전지구 평균기온 예측에 대한 신뢰도는 높다.

1991-2020년 평균과 비교한 2022-2026년의 예측 온도 패턴은 그림 1에서 보여준다(왼쪽: 5월에서 9월, 오른쪽: 11월에서 3월). 향후 5년간 5월에서 9월까지의 온도 패턴은 거의 모든 곳에서 1991-2020년 평균보다 높을 것으로 예측되며, 북반구의 육지에서 온난화가 강화된다.

Near-surface temperature anomalies relative to 1991-2020

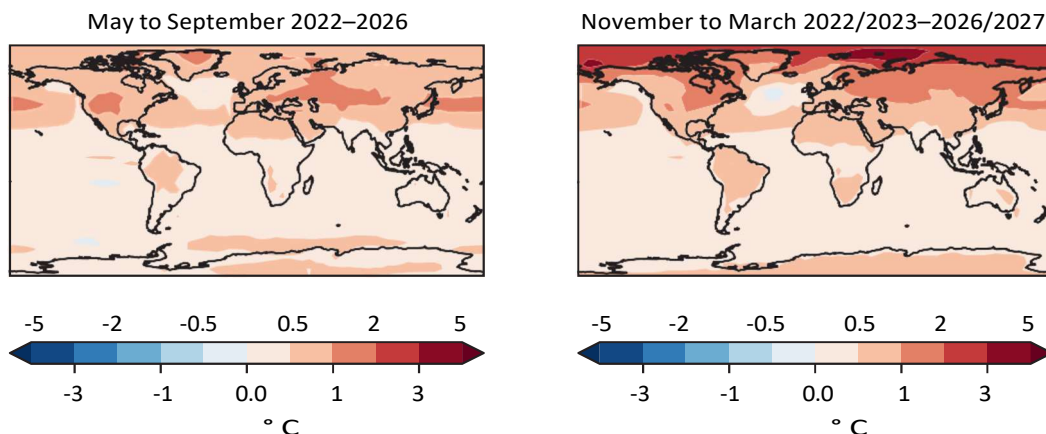


그림 1. 1991-2020년 대비 향후 5개 계절(5-9월)의 지표 온도 편차(°C) 예측. 2022-2026년 5월-9월 앙상을 평균 예측(왼쪽), 2022/2023-2026-2027년 11-3월 앙상을 평균 예측(오른쪽).

# 2022-2026년 전지구 기후 예측

Met Office, UK/WMO/World Climate Research Programme (WMO/International Science Council/IOC-UNESCO)



WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

Met Office



향후 5년간 11-3월 계절에 대한 예측은 거의 모든 곳에서 온난 편차를 보여주며, 육지 온도는 해양보다 더 큰 편차를 보여준다. 북극(위도 60°N 북쪽) 표면 온도 편차는 전지구 평균 편차보다 3배 이상 크다. 북태평양 일부지역, 아시아, 호주, 남양의 일부 지역을 제외하고 대부분의 지역에서 두 계절 모두 중간에서 높은 예측 신뢰성을 보인다.

## 전지구 강수

그림 2는 5월부터 9월(왼쪽)과 11월부터 3월(오른쪽)까지 계절에 대해 평년(1991-2020년) 대비 2022년부터 2026년까지의 예측 강수 패턴을 보여준다. 향후 5년간 5-9월 계절에 대한 예측은 사하라 사막 남쪽지역, 북유럽, 알래스카, 시베리아 북부에서 평년보다 많은 강수가, 아마존에서는 평년보다 적은 강수가 발생할 가능성이 증가했음을 보여준다. 이 지역에 대한 신뢰도는 낮음에서 중간정도 수준이다. 남아시아와 동아시아에는 평년보다 많은 강수 가능성이 있지만, 이 지역의 5년 평균 강수에 대한 기후모델의 예측 성능은 높지 않다.

2022/2023-2026/2027년 11월부터 3월까지의 계절에 대해 강수량 예측은 북반구의 고위도 지역 평균 조건보다 더 습할 것으로 보인다. 열대 및 고위도 지역의 강수량이 증가하는 패턴과 아열대 지역의 강수량 감소하는 패턴은 기후 온난화와 일치한다. 유라시아 북부, 그린란드, 캐나다 북극 군도 대부분의 지역에서 예측성은 보통 수준이며, 이러한 지역의 강수확률 증가에 대한 예측성은 낮음 또는 중간 정도이다.

이 예측은 WMO 기후서비스 개발의 일환으로 세계 기후 연구 프로그램(WCRP)과 협력하여 수행된다. 이 예측은 각 국가 기상 수문 서비스 기관과 전 세계 연구 프로젝트에서 활용되며, 곧 WMO 지역기후센터에서 기후위험의 영향을 완화하기 위한 조기경보를 제공하기 위해 활용될 예정이다.

Precipitation anomalies relative to 1991-2020

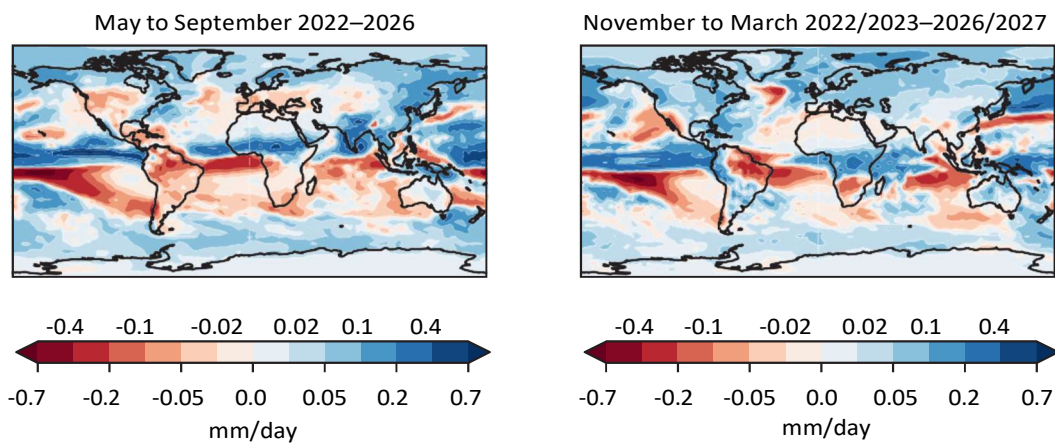


그림 2. 1991-2020년 대비 향후 5개 계절의 강수 편차(mm/day) 예측, 2022-2026년 5-9월 양상들 평균 예측(왼쪽), 2022/2023-2026/2027년 11-3월 양상들 평균 예측(오른쪽).

## 주요 메시지

- 2021년 11월 4일 기준, 신규 2030 국가완화공약에 따르면 온실가스 배출량에 대한 진전이 조금 보이기 는 하지만, 전지구 배출량에 대한 집합적 효과는 파리 협정의 목표치를 맞추기에는 아직 부족함. 전지구 온난화를 2°C로 제한하려면 지금 보다 4배, 1.5°C 미만으로 제한하려면 7배 더 강력한 공약이 필요함
- 21세기 지구 온난화는 현재 공약을 유지한다면 2.8°까지 도달할 것으로 예상되며(2.3-3.3°C 범위, 확률 66%), 새로운 공약이 완전히 적용되었을 경우 2.5°C에 머물 것으로 예상됨(2.1-3.0°C 범위, 확률 66%)
- 최근 업데이트된 조건부 및 무조건 국가온실가스 감축목표(NDC)와 함께 모든 탄소중립 공약이 완전히 실행되고 현재까지 발표된 공약이 모두 평가에 반영이 될 경우, 21세기 온난화는 66% 확률로 2.1°C(1.9-2.3°C 범위)와 1.9°C(1.9-2.2°C 범위)미만으로 제한될 것으로 예상됨

미래 온실가스 배출량 추정치와 파리 협정 목표를 달성했을 때의 전지구 배출량 수준 간의 차이를 과학적으로 분석한 배출량 갭 보고서가 매년 발표된다. 이 보고서는 각국이 기후완화 공약을 이행할 경우 미래 전지구 온실가스 배출량과, 전지구 온난화를 2°C 이하로 제한하고 1.5°C를 목표로 하는 것과 연결하여 최소 비용의 방법일 때 전지구 배출 수준을 분석한다. 2021년도 보고서에서는 2030년 기후완화 공약의 신규 혹은 업데이트 된 버전이 가지는 의미와 탄소중립 배출 공약 및 경로에 관한 현황,

현 정책과 공약, 시나리오 상에서 금세기 말의 전지구 온난화 정도 추정치가 중요하게 다루어 졌다.

2021년도 배출량 갭 보고서 부록의 마감일인 2021년 11월 4일까지, 전지구 온실가스 배출량의 88%에 해당하는 152개국에서 새로운 또는 업데이트된 2030년 완화 공약을 제시하였다. 신규 또는 업데이트 된 60% 이상의 완화 공약은 2030년까지 배출량이 낮아진다는 결과를 낳는 일부 진전을 보여준다. 또한 업데이트된 공약은 이전 공약보다 전반적으로 이전보다 더 투명해졌으며 더 많은 온실가스 감축을 목표로 하고 있다. 이들 국가들 중 브라질과 대한민국은 2021년 11월 4일 이전에 이러한 발표를 하여 평가보고서에 포함되었다. 호주는 강화된 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 2022년 6월 16일에 제출하였으며 그 효과는 평가 보고서에 아직 반영되지 않았다. 2022년에 제출된 신규 또는 업데이트된 완화 공약들은 전지구 배출량 예측에 영향을 미치는 데 한계가 있다.

새로운 또는 업데이트된 완화 공약이 미치게 되는 종합적인 영향에는 한계가 있다. 이들은 전지구 온실가스 배출량을 2030년까지 연간 4.8기가톤(이산화탄소 환산 수치) 정도만 감소시킨다. 종합적인 감소량은 이산화탄소 배출량으로 환산할 경우 2021년 9월 30일 마감일에 제출되었거나 발표된 공약에 기반하여 산정된 2021년 배출량 갭 보고서에서 보고된 것 보다는 0.7기가톤이 더 많은 수치이다(UNEP, 2021b).



그림 1. 과거 공약과 비교하여 2030년 전지구 배출량에 관한 2030 완화 공약의 효과  
 주의: 그림에 보이는 수치는 2021년 11월 4일자로 신규 혹은 업데이트된 완화 공약에 기반하며 호주에서 제출한 업데이트된 국가 온실가스 감축목표는 포함하지 않음(UNEP, 2021a).

## 배출량 갭은 여전히 큼

2030 배출량 갭(그림 2)은 새로운 또는 업데이트된 완화 공약은 이전 공약과 비교하여 배출량 갭이 다소 줄어든 반면 아직 그 갭을 줄이기에는 크게 부족함을 강조하고 있다. 전체적으로 2°C를 맞추기 위해서는 새로운 공약이 지금보다 4배 더, 1.5°C를 맞추기 위해서는 7배 더 강력해져야 한다는 분석이다.

무조건부 공약을 모두 이행한다면 1.5°C까지 이산화탄소로 환산하여 27기가톤(범위: 24-29기가톤)이 남은 것으로 추정된다. 이는 2020년 보고서에서 평가한 갭보다 5기가톤이 작은 것으로 업데이트된 NDC와 현재 발표된 완화 공약에 따른 것이다. 만약 조건부 NDC가 모두 이행된다면 배출량 갭은 3.5기가톤으로 더 줄어들 것이다.

2°C 목표와 무조건부 NDC 및 공표된 완화 공약 간의 배출량 갭은 이산화탄소로 환산 시 12.5기가톤(범위: 9-15기가톤)이며, 작년보다 2.5기가톤이 낮은 셈이다. NDC 및 완화 공약으로 전지구 배출량은 전년도보다 4.5기가톤 줄어들지만 최근 업데이트된 2030년 2°C 시나리오에서 추정된 값이 전년도 배출

량 갭 보고서보다 2기가톤이 낮아, 전체 갭이 2.5기가톤만 줄어든 것과 같다.

현 정책을 유지하면 전지구 배출량은 2030년에 55기가톤(범위: 52-58기가톤)에 도달할 것으로 예상된다. 이는 2020년 배출량 갭 보고서에서 제시한 중앙값 추정치보다 4기가톤 작은 것이며(UNEP, 2020), 2010년 정책 시나리오보다 9기가톤이 작은 것인데, 이를 통해 2010년 이후 새로운 기후 정책이 없었다면 전지구 배출량이 어떻게 변화했을 것인지를 알 수 있다. 2020년과 2021년 배출량 갭 보고서 간 감소한 값의 절반은 각국에서 보여준 기후 정책의 성과에 의한 것이며, 나머지 반은 코로나 19 팬데믹으로 인한 전반적인 경제 침체에 의한 것이다.

종합적으로, 국가들은 현재 실행하고 있는 정책으로는 새로운 혹은 업데이트된 공약을 지키기가 어렵다. 이 2030년 실행 갭은 무조건부 NDC의 경우 3.5기가톤이고 조건부 NDC의 경우 7기가톤이다. 그룹으로 보면, G20 국가들은 그들의 기존 공약이나 2030년 공약 어떤 것도 손조롭게 달성하고 있지 않다. G20의 10개국(아르헨티나, 중국, 유럽, 인도, 일본, 러시아, 사우디아라비아, 남아프리카, 튀르키예, 영국)만이 그들의 이전 NDC 달성을 지키고 있다. 이 중 인도, 러시아, 튀르키예 3개국만이 현 정책으로 이들의 무조건적 NDC 목표에서 제시한 배출 목표치에 적어도 15% 작게 감축할 수 있을 것으로 예상되어, 이들은 추후 NDC 목표치를 올릴 수 있는 충분한 여력이 있는 것으로 보인다.

## 장기 탄소중립 배출량 공약 공표

### - 긍정적 발전

전 세계 74개국에서 국가 법령, 정책 문서, 또는 정부 공약에 탄소중립 배출 목표치를 포함시켰다. 이 공약은 현재 전지구 국내 온실가스 배출량의 76%, 국내총생산의 83%, 전 세계 인구의 64%를 차지한다. 숫자로 보면, 이 수치의 대부분이 전지구 기온을 1.5°C로 제한함에 있어 IPCC에서 필수적이라고 제시한 2050년까지의 목표치이다.

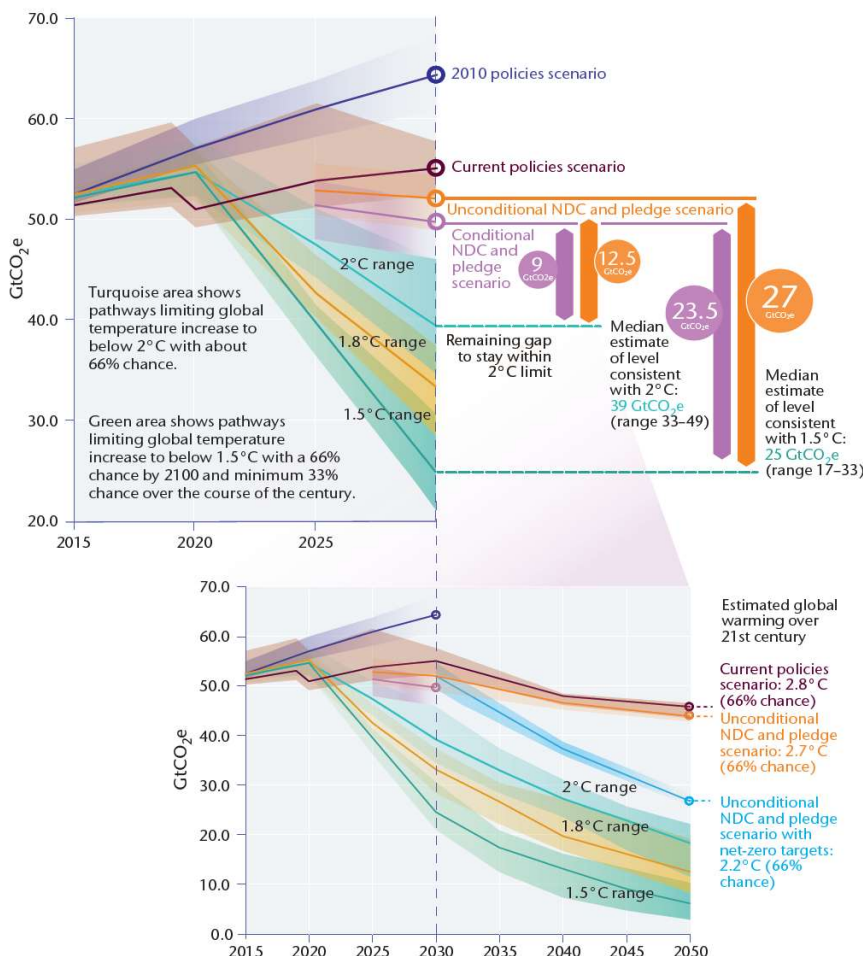


그림 2. 여러 시나리오별 전지구 온실가스 배출량 및 2030년 배출량 갭(중앙값 추정치와 10에서 90 백분위수 범위) (UNEP, 2021a; 2021b).

현재 목표치는 어떤 분야와 온실가스를 포함하는지에 있어 모호성이 크고 범위에 차이가 크다. 국제 항공 및 해운으로부터 배출되는 양을 포함시킬 것인지와 국제적으로 상쇄되는 부분을 활용할 것인지에 대해서는 아직 정해지지 않았거나 불명확하다.

## G20의 소수 국가만이 탄소중립을 위해 배출량 목표를 명확히 하고 있음

그림 3은 단기적 활동과 탄소중립 목표 간의 일관성을 나타내는 지표로서, G20 하위그룹에서 제시한 현 NDC와 탄소중립 목표를 통해 알 수 있는 배출량 경로를 보여준다. G20 회원국 중 9개 국가만 각 국 탄소중립 목표치와 NDC에 근거하여 배출량 경로를

추정하여 나타냈고, 이 중 어떤 국가도 2050 탄소중립 목표까지 배출량을 가속화하여 급격하게 줄이겠다는 NDC 목표를 설정하지 않았다. 9개 국가 중 5개 국가(전지구 국내 온실가스 배출량의 1/5을 차지)에서 탄소중립을 달성하기 위해 국내 배출량을 매년 일정한 양만큼 감축(선형감축)하겠다는 NDC 목표를 제시하고 있다. 나머지 4개 국가는 현재부터 2050년 탄소중립 목표까지 선형적으로 감축하는 것 보다 25-95% 많은 양을 2030년까지 배출하는 NDC 계획을 제시하고 있다. 국가마다 처한 환경이 다를 수 있지만 탄소중립 목표가 달성될 수 있도록 이들 국가는 더 강력하고 야심찬 단기 기후 계획이 시급하게 필요하다.

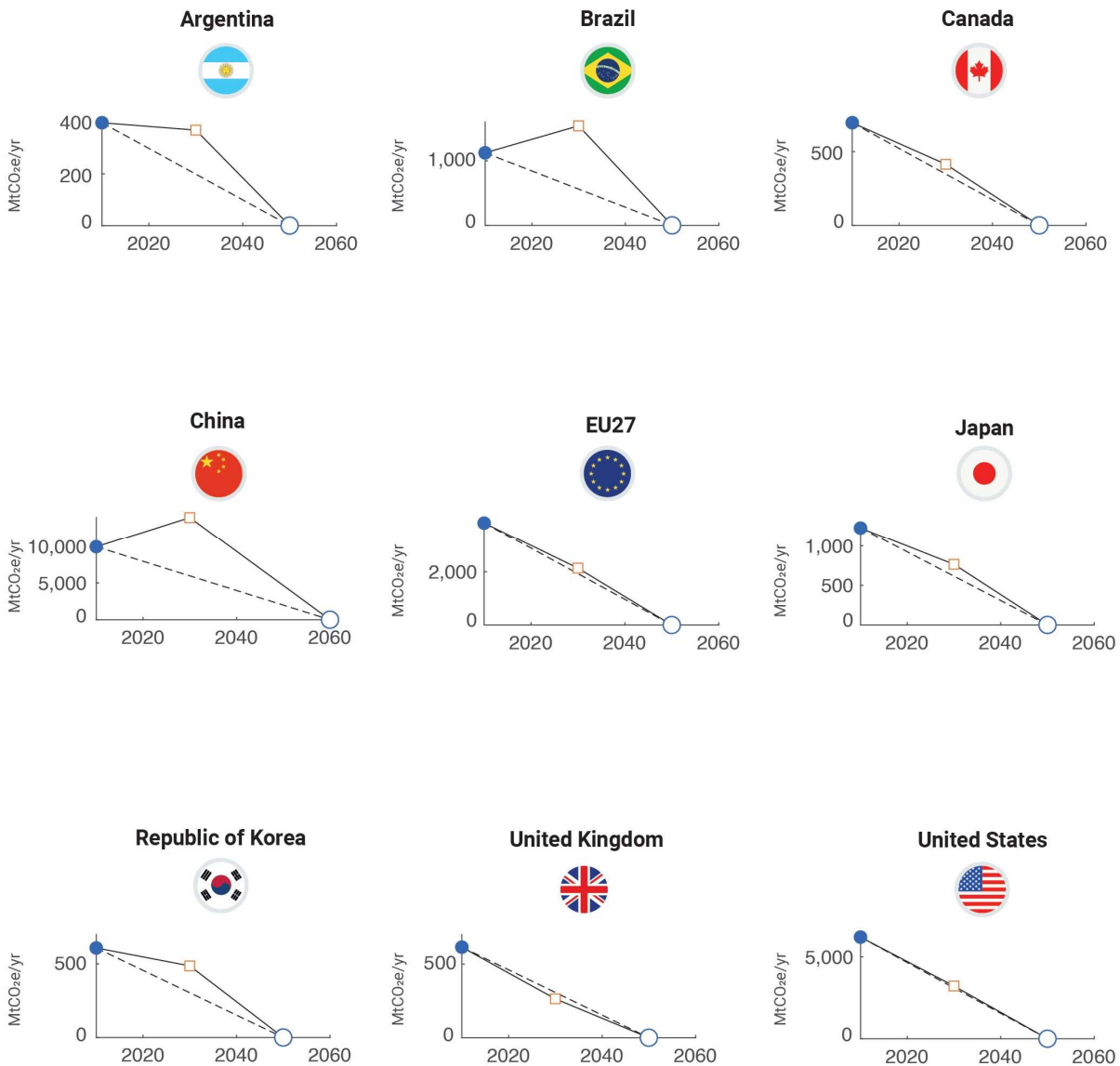


그림 3. 일부 G20 국가에서 발표한 기후 공약에서 제시한 탄소중립으로의 계획 개요(UNEP, 2021b).

## 지구 온난화 시사점: 파리 협정 목표까지 갈 길 멀어

현재 정책을 계속 유지하게 되면 21세기 동안 66% 확률로 전지구 온난화가 2.8°C까지(범위: 2.3-3.3°C) 진행될 것이라고 예측되며, 이는 특히 2030년 이후 얼마나 많이 배출될 것인지에 대한 불확실성으로 인해 특히 그 예측범위가 크다.

새로운 혹은 업데이트된 무조건부 NDC와 다른 공약들을 계속 실행한다면 21세기 온난화는 66%의 확률로 2.7°C까지(범위: 2.2-3.1°C) 제한될 것이다. 조건부 공약이 전면적으로 실행된다면 2.5°C까지(범위: 2.1-3.0°C) 낮아질 것이다. 앞서 언급한 것과 같이, 현재 2030 실행 갭은 무조건부 NDC의 경우 이산화탄소로 환산 시 3.5기가톤이며, 조건부 NDC의 경우 7기가톤이다.

업데이트된 조건부 및 무조건부 NDC와 함께 모든 탄소중립 정책 및 공약이 실행 되어야만 파리 협정 목표치에 가까워질 것이다. 이 시나리오에 따르면, 21세기 동안 온난화는 66%의 확률로 2.1°C(범위: 1.9-2.3°C) 및 1.9°C(1.9-2.2°C)로 제한 될 것이다.

그러나 몇 가지 고려사항은 있다. 탄소중립 공약의 투명성 부족과 보고 및 검증 체계 부족, 그리고 탄소중립 목표까지 향하는 과정에서 2030 공약을 확실히 보여준 국가가 매우 소수라는 점에서, 탄소중립 달성 가능 여부는 여전히 불확실하다.

## IPCC 주요 내용

- UNFCCC의 제26차 당사국총회(COP26) 이전에 발표된 국가 온실가스 감축목표(NDC)로 예측한 전지구 온실가스 배출량에 따르면 전지구 온난화는 1.5°C를 넘을 것이고 2030년 이후 2°C 미만으로 제한하는 것이 어려울 것이라 전망(IPCC Working Group III, 2022)
- 전지구 배출 경로 예측에 따르면, 온난화를 1.5°C(>50%) 및 2°C(>67%)로 제한하고 즉각적인 행동을 한다고 가정할 때, 전지구 온실가스 배출량은 2020년과 2025년 사이에 최고점에 도달할 것임. 두 경우 모두 2030년, 2040년, 2050년에 급격한 온실가스 배출량 감소가 예상됨(IPCC Working Group III, 2022)
- 2020년 말까지 이행된 것을 넘어 더 강력해진 정책이 없으면 온실가스 배출은 2025년이 지나도 계속 증가할 것이며 2100년에는 전지구 온난화로 기온 중앙값이 3.2°C(2.2-3.5°C)에 이를 것(중간 신뢰도)(IPCC Working Group III, 2022)

# 기후 시스템의 임계점

## WMO/World Climate Research Programme (WMO/International Science Council/IOC-UNESCO)



### 주요 메시지

- 주요 임계 현상은 대서양 자오선 역전순환류(Atlantic Meridional Overtuning Circulation) 변화, 극지방 빙상의 용해, 대규모 기상 및 기후 패턴의 이동, 아마존 우림의 건식화, 몬순과 같은 주요 기상 시스템 교란 등을 포함
- 어떤 지역에서 더운 기간에 고온과 습기가 결합되어 향후 수십년 안에 위험한 상황까지 도달하게 되면 이는 생리적 임계점에 도달하게 하거나 기술적 지원이 없는 야외노동이 더 이상 불가능하게 되는 한계점에 이르게 됨
- 사회가 미래 기후 완화 및 적응에 대한 비용과 편의, 잠재적 한계점을 보다 잘 이해하기 위해서는 임계점에 관한 연구가 더 필요함

임계점(tipping points)은 복잡한 시스템에서 비선형 변화의 여러 측면에 대해 널리 사용되는 용어이다. 현재 우리가 종합적으로 “기후 시스템에서의 임계점”이라고 사용하는 것은 IPCC 제3차 평가 보고서에서 “서프라이즈”로 처음 지칭되었으며(Stocker et al., 2001), “대규모 일회성 현상” 또는 “기후 시스템의 단절”로 “걱정해야 할 이유”라고 하였다(IPCC, 2001). 이 임계점은 전지구적 그리고 지역적 영향을 미치며 대서양 자오선 역전순환류(AMOC)의 변화, 극지방 빙상의 용해, 대규모 기상 및 기후 패턴의 이동, 아마존 우림이 말라가는 현상을 포함한다.

### 전지구에 영향을 주는 임계점

AMOC는 지역 및 전지구적으로 기후 시스템에서 열과 염분, 물을 분배하는 아주 중요한 인자이다. 고기후의 대체 자료에 따르면 AMOC는 지난 천년 동안 어떤 때보다 약해지고 있음이 제시되었다(Caesar et al., 2021). 또한, 최근 모델들에 따르면 이산화탄소가 증가하면서 AMOC가 약해진다는 것이 끊임없이 제시되었다(Weijer et al., 2020). 2004년 이후 직접 측정된 자료에 따르면 현저한 추세는 나타나지 않지만(Worthington et al., 2021), 모델들에 따라 강력하게 제시되는 것처럼(Jackson et al., 2022) AMOC가 지속적으로 장기간 약해지면 빙상과 빙하가 녹으면서 나오는 담수의 이동과 같은 여러 변화들에 대한 취약성을 증가시킬 수 있다. 그 결과, AMOC에 대한 지속적인 연구와 정의, 잠재적 임계점에 대한 조기 경보 시그널에 대한 관측이 중요하다(Boers, 2021).

그린란드와 남극의 극지방 빙상이 녹는 현상은 수년동안 임계 요소로 고려되었다(그림 1). 이러한 임계 현상은 수세기에서 수천년의 시간 규모에서 해수면을 크게 상승시킬 수 있기에 전지구적으로 특히 심각한 결과를 가져온다(Clark et al., 2016). IPCC 제5차 평가보고서는 전지구 온난화에 대한 중요 한계값(threshold)인 1°C에서 4°C를 넘어서면 그린란드 빙상의 용해가 돌이킬 수 없게 될 수도 있다고 밝혔다(Stocker et al., 2013). 그러나 이 범위는 1.5°C에서 2°C이거나 이 보다 조금 높다고 재조정 되었으며, 파리 협정에서 전지구 온난화 한계 목표치로 설정되었다(Pattyn et al., 2018). 이정도 온난화 수준에서 남극의 서부 빙상은 얼음의 영구 손실이라는 리스크에 놓일 가능성이 크다(Garbe et al., 2020). 기저에 깔려 있는 물리적 메커니즘에 대한 연구가 잘 되어 있고 이론에 대한 이해가 잘 되어 있다해도, 개별 빙하 지역에 현실적인 조건과 지형을 고려하여 중요 한계점을 결정하는 것은 아주 어려우며 불확실성도 크게 남아 있다(Pattyn and Morlighem, 2020).



그림 1. 남극의 해빙 불안정성, 그린란드 얼음 물줄기로부터의 급속한 방류와 같은 교차 임계점은 전 지구적으로 심각한 영향을 미칠 수 있음(아콕샤는 빙하의 열광소, T.F. Stocker 사진).

# 기후 시스템의 임계점

## WMO/World Climate Research Programme (WMO/International Science Council/IOC-UNESCO)



### 지역 임계점

최근, 대규모 날씨 및 기후 패턴의 이동, 극한 현상과 복합 현상의 변화, 아마존 우림의 건조현상과 같은 지역 임계점에 초점이 맞춰지고 있다. 이들의 영향이 지역 사회에 심각한 결과를 초래할 수 있으며(그림 2) 잠재적인 지역적 가뭄의 영향과 같은 전지구 피드백 현상이 전지구 탄소 사이클에 더 큰 연쇄적 충격을 가지고 올 수도 있다(Humphrey et al., 2018). 전반적으로 이러한 임계 현상은 여러 지역에서 지역적으로 처음 생길 수 있으나 시간이 지나면서 그 영향이 누적되고 복합적이 되면서 전지구 규모에서 더해질 수도 있다(e.g., Kornhuber et al., 2020).

대규모 기상 또는 기후 패턴이 점차적으로 이동하는 것은 지역적으로 임계 현상이 새로운 국면에 진입하는 것으로 간주될 수 있다. 예를 들면, 고기후 기록으로 지난 3만년 동안 대규모 반구 기후 변화에 반응하여 몬순 벨트의 강도가 이동하거나 변화한 때를 알 수 있다(Brovkin et al., 2021). 최근 연구 결과에 따르면 미래 온난화는 인도 몬순의 강도와 변동성이 강화될 수 있으며 이는 단기간 집중 호우를 가져올 수 있다고 한다(Katzenberger et al., 2021).

중위도 지역에서는 토양 수분의 변화가 증발 체계에 전환 효과를 가져오고 극한의 열에 대한 비선형적 증폭과 연관될 수도 있다(Seneviratne et al., 2010; Miralles et al., 2014; Vogel et al., 2018). 더욱이 한계값에 기반한 극한 기후의 빈도는 일반적으로 지구 온난화가 증가하면 가장 극한 현상에 대해서 상대적으로 가장 크게 변화를 보이며 비선형적으로 증가한다.

지역 평균 기후와 극한 기후의 강도 변화는 지구 온난화에 따라 선형적으로 변화하는 경향이 있다(Wartenburger et al., 2017). 그러나 이들 역시 지역 생태계의 한계값을 넘어(Guiot and Cramer 2016; Warren et al., 2018; Ratnayake et al., 2019; Breshears et al., 2020) 식생 변화와 사회적 대응과 연계하여 기후 체계를 변화시킬 수 있다. 한 예로 미국의 모래바람(dust bowl) 기간을 들 수 있다(e.g., Cowan et al., 2020).

해양 환경도 지역 임계 현상이 되기 쉽다. 예를 들면 해양 폭염이 더욱 빈번하고 강력하게 발생할 수 있다(Frölicher et al., 2018). 탄소 흡수원으로서 대기에 증가하는 이산화탄소를 해양이 흡수하면서 발생하는 해양 산성화로 산호 표백과 다른 해양 생태계에 영향을 미치면서 그 한계값을 넘을 수 있다(Hoegh-Guldberg et al., 2019). 지구 온난화, 해양 산성화, 탈산소와 같은 지역 임계 현상들은 복합적으로 전지구에 영향을 미친다(Heinze et al., 2021).

아마존 우림은 전 세계에서 중요한 가치를 가지는 특별한 생태계로서 인간활동에 의한 기후변화와 산림 벌채로 압박을 받고 있다. 미래 변화에 대한 예측이 크게 불확실하기는 하지만, 연구 결과에 따르면 아마존 우림이 현재보다 더 건조해 질 것이다(Baker et al., 2021). 건기와 극한 가뭄 현상이 더 늘어나고 자체적으로 피드백이 보강되면서 숲의 면적은 더욱 줄어들 것이며(Zemp et al., 2017), 이로 인해 숲이 지속가능하지 못하게 되는 임계점에 도달할 수도 있다(Boulton et al., 2022). 아마존 우림의 손실은 지역 기후와 생물다양성, 사회적 체계에 치명적인 영향을 끼치게 되고 잠재적으로 수문 및 탄소 순환의 변화를 통해 더 큰 영향을 가지고 올 것이다.



그림 2. 지역 사회와 생태계 서비스에 결과적으로 영향을 주면서 지역 날씨 패턴과 극한 현상에서 한계점(thresholds)과 임계점(tipping points)이 점점 더 자주 충돌할 수 있음(2020년 스페인 에브로델타 지역의 가뭄과 폭풍 발생 현상, WMO/Agusti Descarrega Sola 사진)

# 기후 시스템의 임계점

## WMO/World Climate Research Programme (WMO/International Science Council/IOC-UNESCO)



### 인간의 건강과 웰빙에 임계점이 미치는 영향

기후 변화가 인간의 건강에 미치는 영향은 잠재적 위협이 다양하기 때문에 큰 주목을 받고 있다(Romanello et al., 2021). 여러 지역에서 더운 기간동안 고온 다습한 현상은 향후 수십년간 위험한 수준에 도달할 수 있고(Pal and Eltahir, 2016), 이는 기술적 지원이 없이는 야외노동이 불가능한 생리적 임계점을 초래할 수 있다. 또한 오늘날 열과 관련된 사망의 많은 부분이 인간활동에 의한 온난화에 의한 것이며(Vicedo-Cabrera et al., 2021) 이 추세의 범위와 규모가 계속 증가하고 있다. 따라서, 중기적 시간 규모에서 사회경제적 영향이 강력하고 돌이킬 수 없을 것으로 예상됨에 따라 이러한 현상들은 생물권, 탄소 순환, 사회가 포함되는 지구 시스템에서 임계점과 전환적 현상을 일으킬 수 있다.

종합적으로 볼 때, 기후 시스템에서의 임계점은 대중이 큰 관심을 가지는 과학 주제이다. 일례로 WCRP는 이론적-수학적 접근방법과 관측 모니터링, 종합적인 기후 모델링 효과를 합친

국제 플랫폼을 통하여 이 문제를 WCRP의 프로젝트인 '등대활동(Lighthouse Activity)' 중 하나의 주제로 지정하였다. 기후 시스템의 비선형적 과정은 임계 요소에 기원을 두고 있어, 고해상도 결합 지구 시스템 모델링 개발과 대규모 컴퓨팅 인프라 활용에 대한 국제적인 공동의 노력으로(Slingo et al., 2022; Hewitt et al., 2022) 기후 피드백과 임계 요소를 담당하는 역학적 반응을 보다 잘 이해할 수 있을 것이다

마지막으로 기후 리스크를 추정하는 데 핵심이 되는 임계점과 비가역적 기후 변화에 대한 공식적인 과학적 합의는, 아직 불확실성이 크긴 하지만, 정책과 연결되어 있다. 가장 최근에 발표된 IPCC 보고서는 임계점을 분석하고 현재 가용한 지식의 한계를 설명하고 있다. "거주 가능성과 자원에 대한 기후 임계점과 결과"에 관한 IPCC 특별 보고서는 이 주제에 대해 합의를 강화하고 보다 통합적으로 적응과 완화 전략을 알리기 위해 과학적 이해가 훨씬 필요함을 촉진하는데 도움이 될 것이다.

### IPCC 주요 내용

- 과거와 미래 온실가스 배출량 변화는 수세기, 수천년 간 돌이킬 수 없으며, 특히 해양과 빙상, 전지구 해수면의 변화가 그러함(IPCC Working Group I, 2021)
- 지구 온난화 수준이 높을수록 큰 영향을 미치는, 발생 확률이 낮은 사건의 발생 가능성이 증가함(높은 신뢰도). 남극 빙상 용해의 강력한 증가, 숲 마름 등과 같은 기후 시스템의 임계점과 돌발 반응은 배제할 수 없음(높은 신뢰도)(IPCC Working Group I, 2021)
- 자연 및 인간 시스템이 적응할 수 있는 범위를 넘어서게 되면서 극한 기상 및 기후 현상의 증가는 돌이킬 수 없는 영향을 가지고 있음(높은 신뢰도)(IPCC Working Group II, 2022)

### 주요 메시지

- 전세계 인구의 55%인 42억명이 거주하는 도시는 인간이 배출하는 배출량의 70% 책임이 있으며, 기후변화의 영향에도 매우 취약함
- 도시의 기후변화는 강수량 증가, 해수면 상승 가속화, 급성 및 만성 해안 홍수, 가뭄, 연평균 기온보다 높은 기온 및 극심한 더위 현상으로 이어져 사회 경제적 도전과 불평등을 악화시킬 것임
- 도시는 지속 가능한 개발 목표(SDGs) 달성에 기여하고 농촌 사회에 도움이 되는 방식으로 포괄적이고 긴급하며 규모가 확대된 완화 조치를 시행하고, 수십억 도시 주민의 적응 능력을 증가시켜 기후변화를 해결하는 데 중요한 역할을 함

살기 좋은 미래를 위해 기후 적응, 완화 및 회복력에 대한 의미있고 전세계적 조치를 취할 수 있는, 분명하지만 동시에 빠르게 사라지는 기회가 있다. 도시와 정착촌은 이 기회를 활용하기 위해 매우 중요한 역할을 할 것이다. 도시는 인간이 초래하는 배출량의 최대 70%의 책임이 있으며, 이웃과 주요 기반 시스템은 종종 매우 취약하기 때문에 기후 변화에 대한 초기 대응 주체가 된다. 현재 도시는 전세계 인구의 55%인 42억명을 수용하고 있으며, 도시 거주자 수는 2050년까지 68%로 증가할 것으로 예상된다(UN, 2019). 그러므로 지금이야말로 지속가능한 개발과 함께 적응과 완화를 끊임없이 역동적인 도시 환경에 통합해야 할 때이다.

### 전 세계 도시의 기후 문제

지구 기후 모델링 시나리오에서 제시된 바와 같이, 도시의 기후변화는 기후 범위의 방향 이동과 극한 현상의 빈도 및 강도 증가로 나타날 것이다. 이러한 기후변화에는 연평균 기온 상승, 폭염 장기화, 호우 발생률 증가, 해수면 상승 가속화, 해안 침수 악화가 포함된다. 폭우와 폭우 발생 빈도가 높아지면서 이미 내륙 해안도시의 홍수가 더 자주 발생하고 있다.

오늘날, 도시는 1950년대 조건과 비교하여 더 빈번하고 더 심한 폭염에 직면하고 있다(Rosenzweig et al., 2021). 예를 들어 2022년 3월과 5월 사이에, 인도의 델리는 최고 49.2 °C(120.5°F)에 달하는 기록적인 온도에 도달하는 다섯 번의 폭염을 경험했다. 최근의 원인 연구는 기후변화로 인해 이러한 장기간의 더운 날씨가 발생할 가능성이 30배 더 높았으며, 같은 현상이 산업화 이전 기후에서는 약 1°C 더 낮았을 것이라고 결론지었다. 델리 주민의 절반은 저소득 비공식 거주지에 살고 있어 극심한 더위에 대한 취약성은 증가하고 있다(Zachariah et al., 2022)

전 세계적으로 2050년대까지 970개 이상의 도시에 거주하는 16억 명이 넘는 사람들이 최소 35°C(95 °F)에 달하는 3개월 평균기온에 정기적으로 노출될 것이다(Rosenzweig et al., 2021).

### 도시의 건강 위험: 폭염과 현저한 취약성

기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC) 제6차 평가보고서는 체온 조절에 대한 인체의 용량이 정기적으로 초과되는 것을 고려하면, 세계 일부 지역이 이미 연중 가장 더운 달에 안전한 작업 활동에 대한 국제 표준을 초과하고 있다고 강조한다(IPCC, 2022). 작업장의 과도한 열은 인지 및 신체 업무 수행력의 감소와 병가의 증가를 초래하여 생산성 손실로 이어지는 심각한 건강 위험을 나타낸다(Jay et al., 2021).

기존 건강 상태(예: 심혈관 질환), 사회경제적 차원(예: 불안정한 주택), 인구통계학적 요인(예: 연령 및 성별), 지리적 측면(예: 수문 스트레스 지역) 및 사회정치적 요인(예: 정치적 불안정)을 포함한 폭염에 대한 노출 및 기존 취약성에 따른 건강상 불평등은 특히 도시 환경에서 두드러진다. 건축 환경의 특성이 도시 내 온도 변화에 기여하기 때문에 도시 열섬 강도는 거의 모든 미국 주요 도시에서 유색인종과 빈곤층 모두에게 더 나쁜 것으로 밝혀졌으며, 이는 소수자(minority)와 저소득 인구가 더위 위험에 대한 도시 악화의 직격탄을 맞고 있다 것을 의미한다(Hsu, 2021).

미래의 IPCC 시나리오는 더 강력한 폭염과 화재로 인한 부상, 질병 및 사망의 더 큰 위험이 커짐에 따라 건강에 중대한 변화가 발생할 것임을 매우 높은 신뢰도로 나타낸다(IPCC, 2022). 그러나 기온 상승과 더 빈번하고 강렬한 폭염은 단독으로 발생하는 것이 아니라, 복합적이고 연쇄적인 기후 위험, 직간접적인 건강 영향, 도시 특성과 복잡한 시스템의 일부로 이해해야 한다. 이러한 복잡성을 해소하고 지속가능한 도시 전략을 마련하기 위해서는 도시 전략과 조치의 핵심에 건강을 두는 학제적, 부문간 교차 접근법의 통합이 매우 중요하다.

그림 1은 세계 도시들의 현재 및 예상되는 미래 도시 인구에 대한 폭염 위험을 보여준다. 폭염과 가뭄이 동시에 발생할 가능성이 전 세계적으로 더 높아졌으며, 이는 가능한 복합 위험 조합의 한 예다.

방콕(태국), 휴스턴(미국), 베네치아(이탈리아) 등 저지대 해안 도시와 거주지역은 해수면 상승, 폭풍 해일, 지반의 침하 등으로 인해 더 빈번하고 광범위한 해안 침수에 직면할 가능성이 높다. 또한 작은 섬들의 도시지역은 현재 자연재해에 적절히 대비하고 대응할 수 있는 능력이 없다. 2019년 9월, 바하마의 두 주요 도시인 나소와 프리포트는 카테고리 5 허리케인 도리안으로 인해 엄청난 피해를 입었다. 폭풍으로 인해 34억 달러의 피해가 발생했고, 74명이 사망했다(Zegarra et al., 2020). 도시의 기후 관련 재난의 수와 심각성은 향후 수십 년 동안 증가할 것으로 예상된다(Gencer et al., 2018).

기후변화는 도시들에게 분리된 하나의 도전이 아니다. 기후변화는 현재의 중요한 인프라 문제, 재정적 제약 및 시스템 불평등과 연관되어 있다. 발생하는 기후문제를 계속 해결하다 보면 의사 결정자는 사전 조치보다는 대응적인 위치에 놓이게

된다. 도시와 정착지 내에는 생태적, 사회적, 경제적, 기후 정의의 요구와 같이 긴급히 해결해야 하는 문제들이 있다.

### 도시의 글로벌 책임과 앞으로의 기회

도시는 포괄적인 의사 결정과 다단계 거버넌스에 대한 신속한 실험이 이루어질 수 있는 현장이다. 이것은 녹지공간 그리고 생물 다양성과 건강에 대한 이점을 포함하고, 자연과 사람 모두에게 효과적인 기후 복원력을 구축할 수 있는 조건을 만든다. 도시 지역은 예를 들어 지역사회 주도 그룹, 지역 및 원주민 또는 청년 운동과 같은 상향식 접근방식과 하향식 기후변화를 촉발하는 원인과 기후행동이 결합되어 있다. 도시 설계에 역동적인 기후 접근 방식을 통합하는 것은 도시가 기후 행동 계획을 확장하는데 필수적이다. 기후 복원력은 도시와 대도시 지역이 내리는 모든 재정적 결정에서 중심이 되어야 한다.

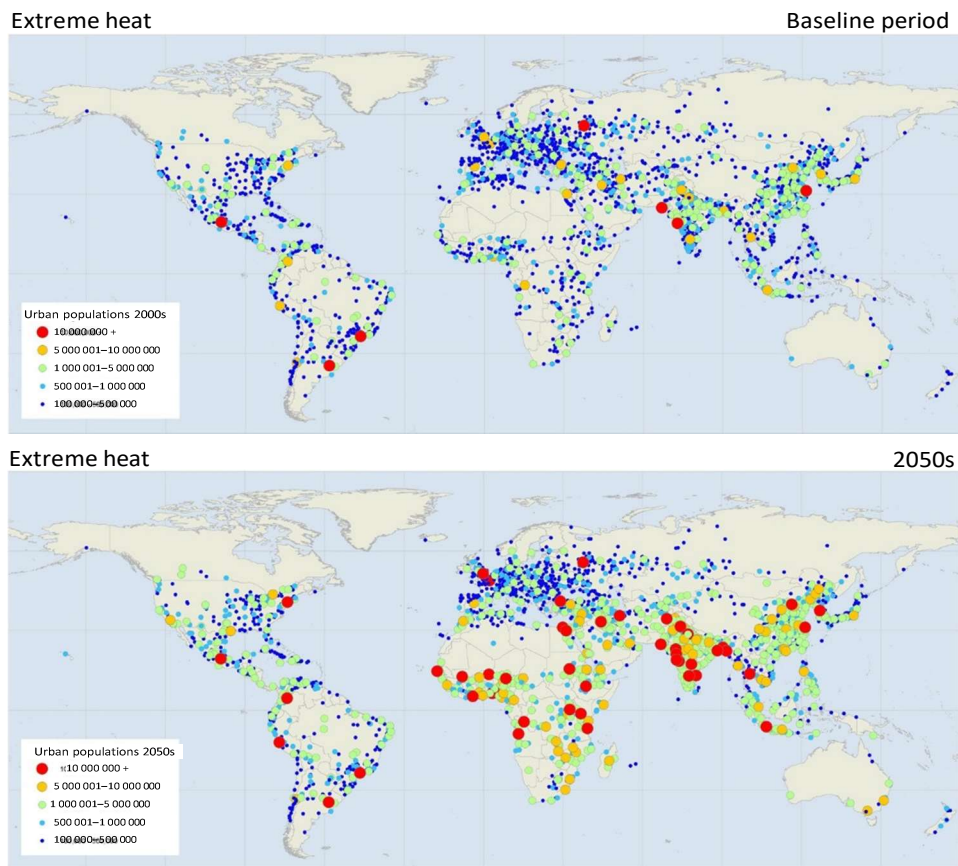


그림 1. 2000년대 인구 10만명 이상인 도시(상), 2050년대 도시 추정 인구(하). Natural Earth Dataset의 2000년대 기준 인구에 대한 데이터 소스임. 2050년대 인구에 대한 데이터 소스는 2000년대 Natural Earth Dataset(Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), 컬럼비아 대학교 (Rosenzweig et al., 2021)의 기준 인구 데이터에 적용된 글로벌 농촌-도시 매핑 프로젝트 인구 증가 추정치에서 추정함

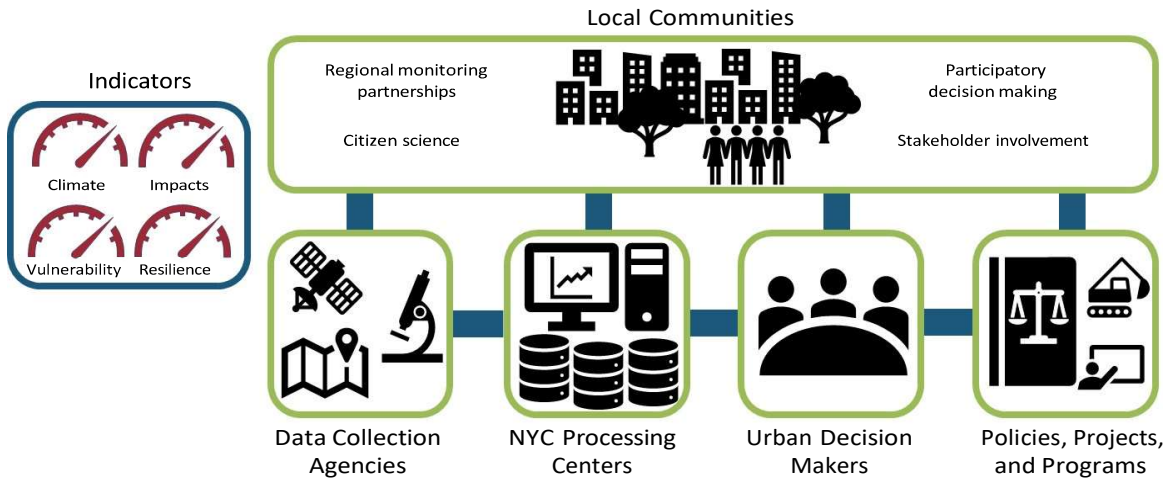


그림 2. 뉴욕시 기후변화 복원력 지표 및 모니터링 시스템(New York City Climate Change Resilience Indicators and Monitoring System, NYCLIM)은 데이터 수집 기관, 처리 센터, 도시 의사결정자 및 기타 4가지 유형의 지표와 정책, 프로젝트 및 프로그램을 추적함. 제안된 NYCLIM 시스템은 과학자, 실무자 및 지역사회가 공동으로 뉴욕시의 기후변화를 계획하고 준비하는데 가장 유용한 지표를 결정함(Rosenzweig et al., 2019).

효과적인 도시 기후 적응 및 실행 전략은 주요 지역 기후 지표에 대한 지속적이고 일관되며 신뢰할 수 있는 고해상도의 공간 및 시간 모니터링을 필요로 한다. 장기적인 품질 관리 도시 데이터는 환경 문제를 이해하는데 필수적이다(Solecki et al., 2022). 이해당사자들과 함께 작업하면서 지식과 연구를 공동으로 만들어 내는 것은 도시 수준에서 사용 가능한 기후 데이터를 만드는데 매우 중요하다. 그림 2는 뉴욕시의 예를 보여주며, 이는 시간 경과에 따른 복원력 지표 추적 및 모니터링에 초점을 맞추고 있다.

질병 예방 및 통합 건강 커뮤니케이션에 대한 표준을 만드는 것을 포함하여 코로나바이러스 팬데믹에서 배워야 할 많은 교훈이 있다. 전염병이 사라지고 있으므로, 기후변화는 이제 회복의 일부가 되어야 한다. 환경적으로 정의로운 도시의 정책과 관행은 신체적, 정신적 생활 수준을 높일 뿐만 아니라 기후 변화와 미래의 전염병에 대한 취약성을 전반적으로 낮출 것이다. 이러한 발전을 위해서는 녹지공간과 자연 기반 솔루션에 대한 접근성을 높이는데 중점을 두어야 한다.

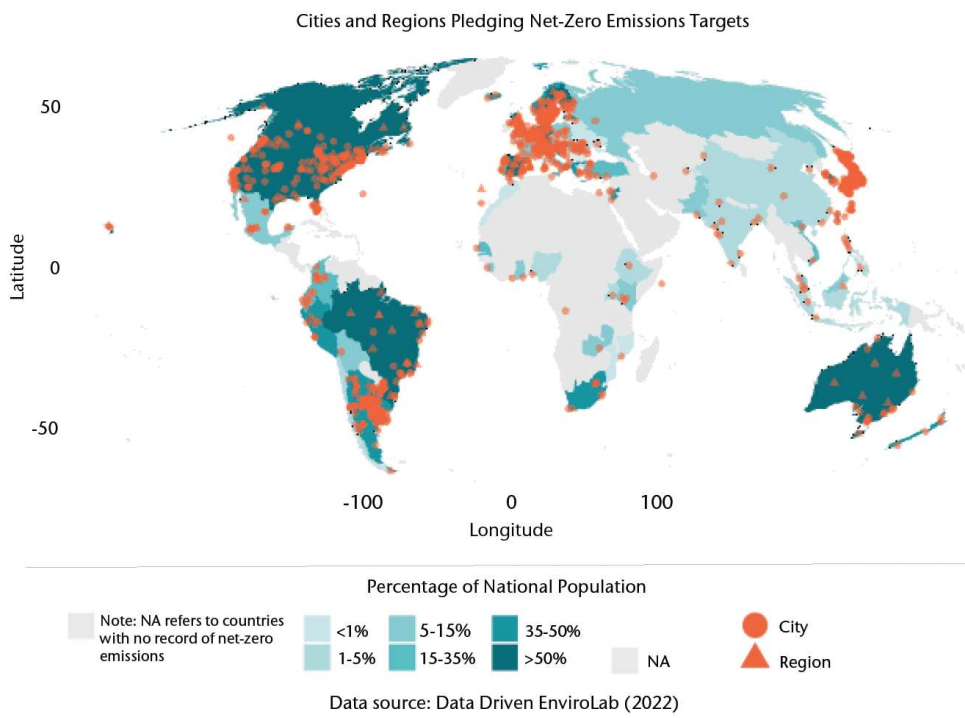


그림 3. 14% 이상의 도시 및 지역이 순 제로 배출에 도달하겠다고 약속함(Data-Driven EnviroLab, 2022)

도시 기후변화 연구 네트워크(Urban Climate Change Research Network, UCCRN), 시장 글로벌 규약(Global Covenant of Mayors, GCoM), C40, 국제 지방 환경 이니셔티브 협의회(International Council for Local Environmental Initiatives, ICLEI), 연합 도시 및 지방 정부(United Cities and Local Governments, UCLG) 등과 같은 네트워크의 지원을 받는 도시는 파리 기후협정 및 SDG 11- 지속가능한 도시 및 지역사회의 요구 사항에 따라 기후행동을 재평가하는데 필요한 관리 및 거버넌스 역량을 효과적으로 개발할 수 있다. 현재 전 세계 인구의 14% 이상을 차지하는 1,676개 도시와 146개 지역이 순배출량 제로 달성을 약속했다(Data-Driven EnviroLab, 2022, 그림 3). 이것은 큰 가능성을 보여주지만, 14%는 지지를 약속하는 것을 넘어선 정치적 행동과 혁신적인 실행으로 전환해야 한다.

사회 및 생태학적 시스템, 녹색 및 회색 인프라, 의료 서비스 및 기술 발전에 대한 기후 포괄 계획과 투자는 도시의 적응 능력을 높일 수 있는 상당한 능력을 가지고 있다. 저소득층과 소외계층, 그리고 주변 대도시는 기후 의사결정 과정 전반에 걸쳐 고려되어야 한다.

우리에게 긴급함이 필요하다. 기후변화에 대한 과학적 이해는 그 어느 때보다 확실하고, 위험, 취약성 및 노출을 포함한 도시 중심 위험에 대한 인식이 높아졌다. 도시는 복원력을 향상시키고, 온난화 정도를 제한하며, 지구를 살기 좋게 유지하는 데 필요한 포괄적이고 긴급하며, 확대된 도시 기후 조치를 시행하는 중요한 역할을 해야 한다.

### IPCC 주요내용

- 도시는 인간에 의한 온난화를 지역적으로 심화시키고, 더 많은 도시화는 더 빈번한 고온 현상과 함께 폭염의 심각성을 증가시킬 것임(매우 높은 신뢰도). 또한 도시화는 도시 또는 도시의 풍하측에서 폭우를 증가시키고(중간 신뢰도) 결과적으로 물의 유출 강도를 증가시킴(높은 신뢰도). 해안 도시에서는(해수면 상승과 폭풍 해일로 인한) 극단적인 해수면 현상과 극단적인 강우/하천 흐름 현상이 결합되면서 홍수가 더 발생할 가능성이 높아짐(높은 신뢰도)(IPCC 제1실무 그룹, 2021)
- 변화하는 도시 형태, 노출 및 취약성 간의 상호작용은 도시와 정착촌에 기후변화로 인한 위험과 손실을 초래할 수 있음. 그러나 도시화의 세계적인 추세는 단기적으로 기후 복원력 개발을 진전시킬 수 있는(높은 신뢰도) 중요한 기회를 제공함(IPCC제2실무그룹, 2022)
- 도시 지역은 배출량 순제로화를 위한 저배출 개발 경로를 통해 기반시설과 도시형태의 체계적인 전환을 이룸으로써 자원 효율성을 높이고 GHG 배출량을 크게 줄일 수 있는 기회를 창출할 수 있음(IPCC제3실무그룹, 2022)

### 주요 메시지

- 지난 50년동안 기상, 기후 및 수문 관련 재난의 수가 5배 증가하여 매일 평균 2억 2백만 달러의 손실을 초래함
- 극한 기상현상은 특히 가장 취약한 지역사회에서 오랫동안 지속되는 사회경제적 영향을 야기하며, 이러한 지역은 보통 대응, 복구 및 적응할 준비가 가장 덜 되어 있음
- 2022년 인간이 야기한 기후변화는 전 세계적으로 폭우와 폭염과 관련된 상당한 경제적 손실과 인명 피해를 초래함

극한 기상 현상은 심각한 사회경제적 영향을 초래한다. WMO는 지난 50년 동안 기상관련 재해의 수가 5배 증가하여 평균 115명의 생명을 앗아가고 매일 2억 2백만 달러의 손실을 입혔다고 보고한다(WMO, 2021). 원인 규명 과학이 계속해서 발전함에 따라, 인간이 유발한 기후변화와 폭염, 호우, 열대성 저기압과 같은 관측된 극한 현상 사이의 연관성에 대한 증거가 강화되었다(IPCC 2021). 그리고 극한 기상 현상이 누구에게나 영향을 미칠 수 있지만, 세계에서 가장 취약한 인구, 특히 빈곤과 소외된 지역사회에 사는 사람들이 가장 큰 피해를 보고 있다.

### 2022년 극한 기상 현상

#### 열대성 폭풍 애나(Ana) 및 열대성 사이클론 바치라이(Batsirai)

2021-2022년 인도양 남서부 열대성 저기압은 12개의 폭풍을 동반했다. 그 열대성 저기압 중 5개는 강력했다. 열대성 폭풍 애나(Ana)는 2022년 1월 말에 마다가스카르, 말라위, 모잠비크, 짐바브웨에 강풍, 폭우 및 광범위한 홍수를 가져오는 시즌 첫 폭

풍이었다. 그림 1과 같이 훨씬 더 강력한 열대성 저기압인 바치라이(Batsirai)가 뒤를 이었다.

이 폭풍은 세계에서 가장 가난하고 취약한 지역 중 하나에 심각한 인도주의적 영향을 미쳤다. 예를 들어 모잠비크에서는 인구의 거의 64%가 극도의 빈곤 속에서 살고 있으며, 마다가스카르에서는 5세 미만 어린이의 42%가 만성 영양실조에 시달리고 있다(세계은행, 2021; 세계식량계획, 2021). 그 결과 수만명의 이재민이 발생했고, 기반시설이 파괴되었으며, 침수된 농경지는 식량 불안을 더욱 악화시켰다(Otto et al., 2022).

World Weather Attribution 이니셔티브는 피어리뷰(peer-review) 방법을 사용하여 기후변화가 이러한 폭풍과 관련된 강우 강도를 증가시켰을 가능성이 있다는 것을 발견했다(Otto et. al., 2022). 대기가 따뜻해짐에 따라 평균적으로 더 긴 우기와 더 많은 비를 내리는 현상을 유발하는 많은 물을 보유한다. 더 많은 배출량과 기온 상승으로 애나(Ana)나 바치라이(Batsirai)와 같은 폭우 에피소드가 더 일반적이 될 것이다.

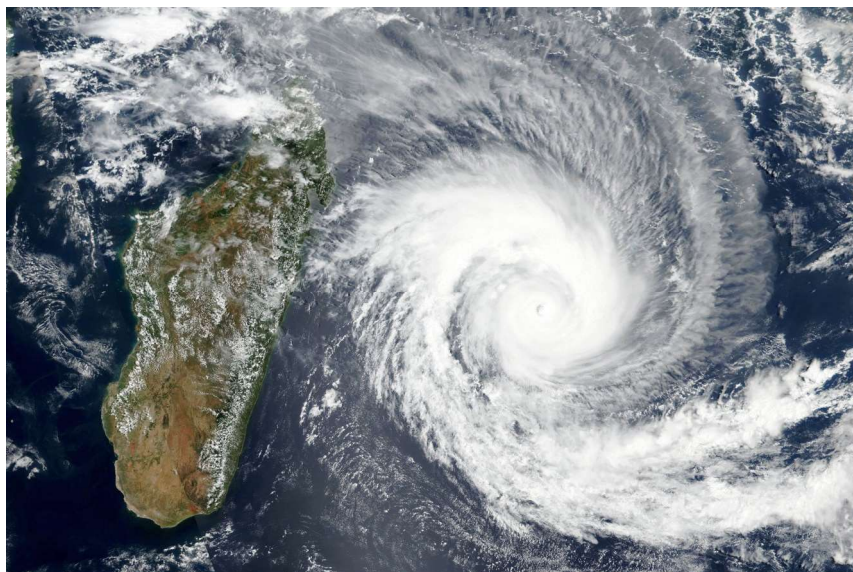


그림 1. 인도양 남서부 마다가스카르 앞바다에 위치한 열대성 사이클론 바치라이(Batsirai) (<https://earthobservatory.nasa.gov/images/149418/cyclone-batsirai>).

애나(Ana)나 바치라이(Batsirai) 같은 폭우에 영향을 받은 취약한 인구는 변화하는 기후에 대응하고 회복하며 적응할 수 있는 자원이 적기 때문에 극단적인 기상현상으로 매우 큰 타격을 받는다. 재난은 지속가능한 개발목표 달성을 위한 진정을 지연시키고 기존의 빈곤과 불평등을 악화시킨다. 그러나 조기경보시스템의 실행과 같은 효과적인 적응은 기후위험을 줄이고 손실과 피해를 최소화하며 기후 복원력 개발을 지원할 수 있다(조기경보시스템: 적응 및 재난위험경감 지원 챗터 참조)(IPCC, 2022).

### 호주 동부지역의 홍수

2022년 내내 호주 동부지역에 연속적인 폭우가 내리면서 대규모 홍수가 발생했다. 2022년 2월 하순과 3월 초순, 대기의 수증기 수송(atmospheric river)이 많은 양의 수분을 호주 해안으로 운반하여 기록적인 폭우를 초래하였고, 호주 역사상 최악의 홍수로 이어졌다. 호주에서 세 번째로 큰 도시인 브리즈번에서는 3일 연속 200mm 이상의 비가 내렸는데 이 기록은 기상관측이 시작된 이후 처음이다. 그 후 2022년 3월부터 7월까지 비가 많이 내린 지역에 계속해서 폭우가 내리면서 추가로 심각한 홍수가 발생했다(그림 2).

이 극심한 강우로 인해 급격히 불어난 홍수는 광범위한 파괴와 경제적 손실을 초래했다. 호주의 지역사회는 일반적으로 저소득 국가의 지역사회에 비해 대응, 복구 및 적응 능력이 우수하지만, 홍수는 여전히 취약성을 악화시키는 사회 경제적 불평등을 부각시켰다. 예를 들어 황폐해진 리스모어 마을(Lismore)에서 소외된 원주민 커뮤니티는 특히 큰 타격을 입었고, 홍수가 발생하기 쉬운 지역에서 살거나 홍수 보험을 감당할 수 없는 저소득 가정도 마찬가지였다(Williamson, 2022).

일부지역은 며칠동안 계속되는 폭우를 경험하고, 다른 지역은 짧지만 매우 강한 비가 내리는 극단적인 강우의 다양한 특성으로 인해 이 현상이 인간이 초래한 기후변화와 어떻게 연결될 수 있는지 정의하는 것은 어려운 일이다. 기후과학은 인간이 유발한 온난화가 지속되면서 단시간에 매우 극심하게 내리는 폭우의 위험이 증가하고 있음을 보여준다.

### 유럽의 폭염

2022년 6월과 7월, 유럽은 북아프리카의 따뜻한 공기가 북쪽과 동쪽으로 퍼지면서 중부유럽과 영국에 두 번의 극한 폭염이 발생했다. 이베리아(Iberia) 일부 지역에서는 일 최고기온이 40°C가 넘었는데, 이는 평년보다 7-12°C 높았다. 포르투갈에서는 최고기온이 47.0°C로 측정되었는데, 이는 1995년 7월 기준 최고기온인 46.5°C를 넘어선 것이다. 또한 영국의 기온은 7월 19일 코닝스비(Coningsby)에서 기록된 잠정 기록온도 40.3°C와 함께 사상 처음으로 40°C를 넘어 2019년에 설정된 이전 기록인 38.7°C를 넘어섰다. World Weather Attribution 이니셔티브에 따르면 인간이 초래한 기후변화로 인해 영국의 폭염이 최소 10배이상 발생할 가능성이 높아졌다(Zachariah et al., 2022). 그림 3은 1950년부터 2022년 7월까지의 남서부 유럽 전역의 폭염을 보여준다.



그림 2. 2022년 3월 1일 호주 브리즈번 교외의 코린다와(Corinda)와 옥슬리(Oxley)에서 발생한 홍수(게티이미지/Bradley Kanaris/Intermittent)

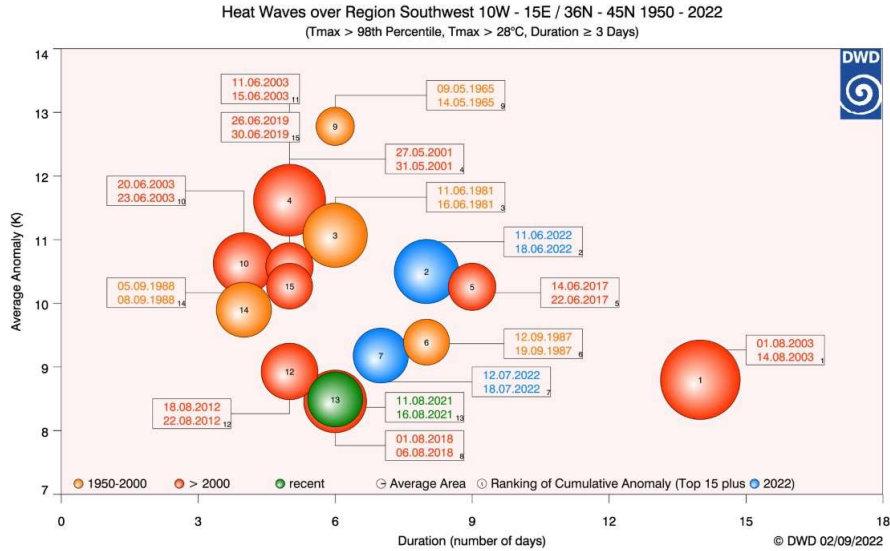


그림 3. 1980년부터 2022년 7월 21일까지 유럽 남서부(포르투갈, 스페인, 프랑스 남부, 이탈리아 동부) 폭염의 지속시간(x축), 강도(평균이상, y축)에 대한 의존성. 동그라미(반경)의 크기는 폭염의 공간적 확장을 보여주고, 주석은 폭염의 시작일과 종료일을 나타냄. 동그라미 색상은 발생연도를 나타냄. 파란색: 2022년, 녹색: 2022년 이전 가장 최근, 빨간색: 21세기, 주황색: 20세기 (독일기상청, [https://www.dwd.de/EN/ourservices/rcccm/int/rcccm\\_int\\_hwkltr.html](https://www.dwd.de/EN/ourservices/rcccm/int/rcccm_int_hwkltr.html)).

여름철 폭염은 인간과 생태계 건강에 상당한 위험을 초래한다. 노인과 만성적인 건강 문제를 가진 사람들은 특히 취약하지만, 사회 경제적 조건, 근무 환경, 도시화 및 대응 수준과 같은 다른 요인들도 취약성을 증가시킬 수 있다. 런던의 경우, 도시 열섬은 도시를 주변 지역보다 훨씬 더 따뜻하게 만들었고, 높은 수준의 불평등은 취약성을 악화시켰다(Zachariah et al., 2022). 유럽 전역에서, 첫번째 보고서에 따르면 폭염으로 인해 수천명이 사망했지만, 이러한 극한 현상으로 인한 인명 피해를 모두 알기에는 너무 이르다. 게다가 동시에 발생하는 해양 폭염은 해양 생물에 치명적인 결과를 초래했고, 유럽 전역에 걸친 장기간의 가뭄은 낮은 수위의 강물, 식물 스트레스, 그리고 산불을 유발시켜 민물과 기타 수생 생태계에 영향을 미쳤다.

### IPCC 주요내용

- 인간이 초래한 기후변화는 이미 전 세계 모든 지역의 날씨와 극한 기후현상에 영향을 미치고 있음. IPCC 제5차 평가보고서(IPCC제1실무그룹, 2021) 이후, 폭염, 집중호우, 가뭄, 열대성 사이클론 등 극단적 변화, 특히 인간의 영향에 의해 발생한 부분에 대한 관측된 증거들이 강화됨
- 지구온난화가 심화됨에 따라 모든 지역은 기후영향을 촉발하는 동시적 다중 변화를 경험할 것으로 예상됨 (IPCC제1실무그룹 I, 2021)
- 서서히 발현되는 피해와 이상기후 현상을 포함하여 기후변화에 기인하는 전반적인 경제적 악영향이 점점 더 명확해지고 있음(중간 신뢰도) (IPCC제2실무그룹, 2021)

### 주요 메시지

- 조기경보시스템은 인명을 구조하고, 손실 및 피해 감소, 재난 위험 경감에 기여하고, 기후변화 적응을 지원함
- 전세계 모든 국가의 절반 미만이 다중위험 조기경보시스템(Multi-Hazard Early Warning Systems, MHEWS)을 보유한 것으로 보고했으며, 특히 아프리카, 최빈개도국 및 군소도서국에서 적용범위가 낮음
- 지구상의 모든 사람을 MHEWS에 의해 보호하려면 다양한 행위자와 혁신적인 재정 솔루션 간의 협업이 필요함

33-36억명의 사람들이 기후변화에 매우 취약한 환경에 살고 있기 때문에(IPCC, 2022), 국제사회가 배출량 감소 뿐 아니라 기후변화, 특히 극단적인 이상기후와 복합적인 현상들에 적응하기 위해 야심찬 행동을 취하는 것이 그 어느때보다 중요하다.

다중위험 조기경보시스템(Multi-Hazard Early Warning Systems, MHEWS)은 위험 정보와 위험 분석을 통합하여 정부, 지역사회, 및 개인이 임박한 기후현상과 그 위험을 이해하고 영향을 최소화하기 위해 행동할 수 있도록 하는 의미 있는 조기경보를 제공한다. 그림 1에 표시된 이러한 시스템은 재해 위험 지식, 모니터링, 관측 및 예측, 경보 커뮤니케이션 및 대비의 네 가지 요소로 구성된다. 이 시스템에 적절하게 실현될 경우, MHEWS는 생명을 구하고 손실과 피해를 줄이며, 재해 위험 경감에 기여하며, 기후변화 적응을 지원한다. 또한 조기경보시스템의 사회경제적 이익에 대해 아래 상자에서 강조한 것처럼 상당한 투자 수익을 제공한다.



그림 1. 다중위험 조기경보시스템의 요소

(WMO의 모든 사람에게 조기경보: 지구 적응 실현을 위한 UN 전지구 조기경보 이니셔티브, 2022.8월 업데이트)

### 조기경보시스템의 사회경제적 이익

여러 연구는 MHEWS에 대한 투자에 대한 강한 경제적 명분을 제공할 수 있도록 높은 수익을 지속적으로 보여준다. 전지구 적응위원회(2019)에 따르면 MHEWS 평균 비용편익 비율(9:1)은 새로운 기반시설을 탄력적으로 만들거나 건조지 농업작물 생산량을 향상시키기에 앞서 다른 적응 대책보다 높다. 이는 조기경보시스템에 1달러를 투자할 때마다 평균적으로 9달러의 순 경제적 이익을 얻을 수 있음을 의미한다. 그러나 MHEWS의 사회경제적 혜택은 잠재적인 생명을 구하는 것과 같이 혜택을 수익화하기 어렵기 때문에 과소평가될 가능성이 있다.

Countries reported having MHEWS by year (2015–2021)

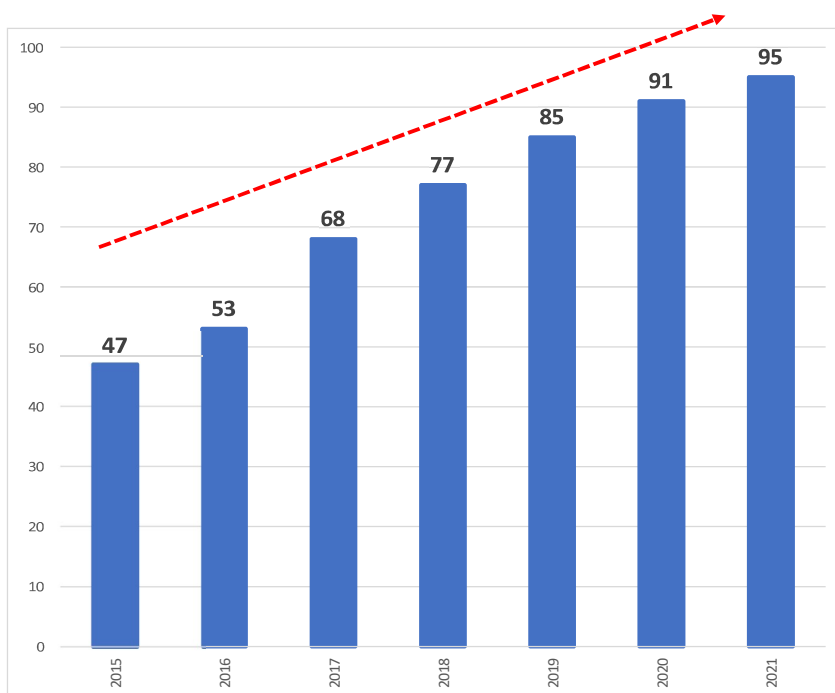


그림 2. 2015년부터 2021년까지 MHEWS를 보유하고 있다고 보고한 국가의 수. 모든 데이터는 2022년 4월자로 누적되어 있음. (UNDRR: Sendai Framework Monitor, 2022).

MHEWS는 재난위험경감(DRR) 및 기후변화 적응의 중요한 요소로 인식된다. 그 결과 UN 지속가능개발목표에 기여하는 것 외에도 2015~2030년 센다이 재난위험경감 프레임워크와 파리협정 모두에 반영되었다. 센다이 프레임워크의 7가지 목표 중 하나는 “2030년까지 다중위험 조기경보시스템의 가용성과 접근성을 크게 높이는 것”(목표 G)이다.

그러나 2022년 4월 현재, 전 세계의 절반 미만의 국가들이 MHEWS 시스템을 갖춘 것으로 보고했으며, 특히 아프리카에서는 그 범위가 특히 낮은 것으로 알려졌다. 또한 최빈국(LDC)의 절반 이하와 군소도서국(SIDS)의 3분의 1만이 MHEWS 시스템을 갖춘 것으로 보고했다(Sendai Framework Monitor, 2022). 또한 WMO가 2022년 6/7월에 수집한 데이터 분석에 따르면, 훨씬 더 적은 국가들이 MHEWS의 효과를 보장하기 위해 필수적인 국가 법률 및 규제 프레임워크에 기반을 둔 MHEWS를 보유하고 있다. 그리고 MHEWS의 적용 범위가 증가하고 있지만, 이러한 시스템을 통해 위험에 대한 정보를 제공하고, 조기 경보가 발령되거나 즉시 실행할 수 있는 비상 조치를 마련하는 데에는 거의 진전이 없다.

이 중대한 문제를 해결하고 기후 적응을 지원하기 위하여 안토니오 구테흐스 UN 사무총장은 UN이 5년 이내에 지구상의 모든 사람들이 조기경보시스템에 의해 보호되도록 하는 새로운

행동을 주도할 것이라고 발표했다. WMO는 이 이니셔티브를 주도할 것을 요청받아, 주요 파트너들과 함께 글로벌, 지역, 국가 및 지역 범위에서 조기 행동 가치사슬에 대한 완전한 조기경보를 실행하기 위하여, “모든 사람에 대한 조기 경보”를 전달하는 방안을 계획을 개발하고 있다.

효과적인 실행을 위해서는 국가기상수문청, 국가재난관리청, 학계, 정책입안자, 기타 UN 기관 등 다양한 이슈(기술, 혁신, 금융 등)가 모두 투입되는 것이 필요하다. 예를 들어, UNDRR과 WMO는 센다이 프레임워크 보고서의 WMO 데이터 기반으로한 조기경보시스템의 글로벌 현황 분석을 개발하기 위해 협력하고 있다.

이 실행계획을 구현하려면 새롭고 혁신적인 금융 솔루션이 필요하다. 체계적 관측 재정지원 체계(Systematic Observations Financing Facility, SOFF), 전지구 수문정보서비스(Global Water Information Services, GWIS), 그리고 기후위험 조기경보시스템(Climate Risk Early Warning Systems, CREWS) 이니셔티브에 투자하는 것이 중요할 것이다. 또한 주요 다자개발은행(Multilateral Development Banks, MDBs)의 가속화된 투자 프로그램과 혁신적인 새로운 금융상품은 지구상의 모든 사람들이 MHEWS의 보호를 받는 데 중요한 역할을 할 것이다.

### 체계적 관측 재정지원 체계(Systematic Observations Financing Facility, SOFF): UN 조기경보시스템 이니셔티브의 기본 요소

조기경보는 이를 뒷받침하는 데이터만큼만 효과적일 수 있다. 2021년 전지구기본관측망(Global Basic Observing Network, GBON)이 설립되어 모든 국가가 기상 및 기후 기초 데이터를 생산하고 교환할 것을 약속했다. 그러나 오늘날 국제적으로 합의된 데이터의 10% 미만만이 LDC와 SIDS에서 이용 가능하다. 이러한 중요한 데이터 격차는 전 세계적으로 고품질 기후서비스 제공을 저해한다.

이러한 이유로 WMO, UNDP, UNEP는 초기 자금 파트너 그룹의 지원을 받아 UN 다중 파트너 신탁 기금으로서 체계적 관측 재정지원 체계(SOFF)를 설립했다. SOFF는 LDC와 SIDS를 중심으로 GBON 데이터 격차를 해소하기 위해 용량 격차가 가장 큰 국가에 장기적으로 기술적, 재정적 지원을 제공한다. 이 새로운 메커니즘은 효과적인 기후서비스와 조기경보에 필수적인 향상된 기상기후 관측을 통해 파리협정의 적응 및 체계적인 관측 목표를 달성하는데 기여한다.

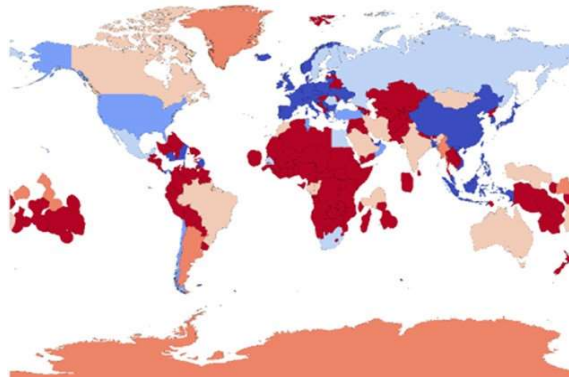


그림 3. 짙은 빨간색으로 표시된 지역은 GBON의 가장 중요한 요구사항을 충족하는 것과는 거리가 먼 지역을 나타냄. 옅은 빨간색으로 표시된 영역은 GBON의 요구사항을 충족하는 지역임. 파란색 음영의 영역은 요구조건을 충족하거나 초과하는 지역을 나타냄(WMO 사무국, 2022).

### IPCC 주요내용

- 진전사항이 있었음에도 불구하고, 현재 기후적응 수준과 기후위험(높은 신뢰도)을 줄이는 데 필요한 수준 사이에는 격차가 존재함. 저소득 인구 집단에서 가장 큰 적응 격차가 존재함(높은 신뢰도) (IPCC제2실무그룹, 2022)
- 효과적인 적응방법이 있더라도, 한계에 도달하기 전에는 모든 손실과 피해를 예방하지 않음. 손실과 피해는 시스템, 지역, 각 분야에 걸쳐 불평등하게 분포되어 있으며, 특히 취약한 개발도상국은 현재의 재정상태, 거버넌스 및 제도에 의해 포괄적으로 다루어 지지 않음(IPCC제2실무그룹, 2022)
- 재해 위험 관리, 조기경보 시스템, 기후서비스 및 위험 확산과 공유와 같은 다양한 적응 옵션이 있으며, 이러한 옵션은 여러 분야에 걸쳐 광범위하게 적용 가능하고, 다른 옵션과 결합될 경우 더 큰 이점을 제공함(높은 신뢰도) (IPCC제2실무그룹, 2022)

## 참고문헌

---

### Atmospheric Greenhouse Gas Concentrations – WMO Global Atmosphere Watch

- International Energy Agency, 2021: Global energy review: CO<sub>2</sub> emissions in 2020, [https://www.iea.org/articles/global-energy-review-CO<sub>2</sub>-emissions-in-2020](https://www.iea.org/articles/global-energy-review-CO2-emissions-in-2020).
- WMO, 2021: WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 17: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10904](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10904)
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926
- New Zealand Ministry for the Environment, 2021: New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990-2019. Wellington, <https://environment.govt.nz/publications/new-zealands-greenhouse-gas-inventory-1990-2019/>
- Steinkamp, K., S.E. Mikaloff Fletcher, G. Brailsford, D. Smale, S. Moore, E.D. Keller, W.T. Baisden, H. Mukai and B.B. Stephens, 2017: Atmospheric CO<sub>2</sub> observations and models suggest strong carbon uptake by forests in New Zealand. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17: 47–76, <https://acp.copernicus.org/articles/17/47/2017/>
- Gatti, L.V., et al., 2021: Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595: 388–393, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

### Global Greenhouse Gas Emissions and Budgets – Global Carbon Project

- Carbon Monitor, 2022: <https://carbonmonitor.org/>
- Davis, S.J. et al., 2022: Emissions rebound from the Covid-19 pandemic. *Nature Climate Change*, 12, 412–414. <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01332-6>
- Friedlingstein, P., et al., 2022: Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data*, 14,1917–2005. <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022/>
- Global Carbon Project, 2022: <https://www.globalcarbonproject.org/>
- Global Carbon Budget, 2022: <https://globalcarbonbudget.org/>
- Hong, C., et al., 2022: Land-use emission embodied in international trade. *Science*, 376, 597–603. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abj1572>
- Jackson, R.B., et al., 2022: Global fossil carbon emissions rebound near pre-COVID-19 levels. *Environmental Research Letters*, 17, 031001. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac55b6>
- Le Quéré, C., et al., 2022: Fossil CO<sub>2</sub> emissions in the post-COVID-19 era. *Nature Climate Change*, 11, 197–199. <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01001-0>
- Liu, Z., et al., 2022: Global patterns of daily CO<sub>2</sub> emissions reductions in the first year of COVID-19. *Nature Geoscience*, 15, 615–620. <https://www.nature.com/articles/s41561-022-00965-8>

### State of the Global Climate: 2018–2022 – WMO

- Cheng, L., Abraham, J., Trenberth, K.E. et al., 2022: Another Record: Ocean Warming Continues through 2021 despite La Niña Conditions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39, 373–385. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-1461-3>
- GISTEMP Team, 2019: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
- Hersbach, H. et al., 2020: The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, 1999–2049, doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Huang, B., et al., 2020: Uncertainty Estimates for Sea Surface Temperature and Land Surface Air Temperature in NOAA GlobalTemp Version 5. *Journal of Climate*, 33, 1351–1379, <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/33/4/jcli-d-19-0395.1.xml>.
- Lenssen, N.J.L. et al., 2019: Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124, 6307–6326, doi: <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.
- Kobayashi, S., et al., 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan Series II* 93, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/93/1/93\\_2015-001/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/93/1/93_2015-001/_article).
- Mallett, R. D. C.; Stroeve, J. C.; Cornish, S. B. et al., 2021: Record winter winds in 2020/21 drove exceptional Arctic sea ice transport. *Communications Earth & Environment*, 2, 149. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00221-8>.
- National Snow and Ice Data Center, <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/03/arctic-sea-ice-reaches-uneventful-maximum>
- 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, 6336–6351.

## 참고문헌

---

Riser, S. C.; Freeland, H. J.; Roemmich, D. et al., 2016: Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*, 6, 145–153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>.

Roemmich, D., Alford, M. H.; Claustre, H. et al., 2019: On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array. *Frontiers in Marine Science*, 6, 439. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00439>

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

Trewin, B., et al., 2021: Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, E20–E37, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>

WMO, 2022: The State of the Global Climate 2021, WMO-No.1290, [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=11178](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11178)

World Glacier Monitoring Service, 2022. <https://wgms.ch/>

Zhang, H.-M., et al., NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 5.0. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V5FN144H, <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00934>.

### **Global Climate Predictions: 2022–2026 – Met Office, UK/WMO/WCRP**

Hermanson, L., et al., 2022: WMO Global Annual to Decadal Climate Update: A prediction for 2021–2025. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103, E1117–E1129, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0311.1>

### **Emissions Gap – UN Environment Programme**

United Nations Environment Programme (2021 a). Addendum to the Emissions Gap Report 2021: A preliminary assessment of the impact of new or updated nationally determined contributions, other 2030 pledges and net-zero emissions pledges announced or submitted since the cut-off dates of the Emissions Gap Report 2021. Nairobi.

United Nations Environment Programme (2021b). Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises. Not Yet Delivered. Nairobi.

United Nations Environment Programme (2020). Emissions Gap Report 2020. Nairobi, <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>

### **Tipping Points in the Climate System – WMO/World Climate Research Programme (WMO/International Science Council/IOC-UNESCO)**

Baker, J.C.A., L. Garcia-Carreras, W. Buermann, D.C. de Souza, J.H. Marsham, P.Y. Kubota, M. Gloor, C.A.S. Coelho, and D.V. Spracklen, 2021: Robust Amazon precipitation projections in climate models that capture realistic land-atmosphere interactions. *Environmental Research Letters*, 16, 074002.

Boers, N., 2021: Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Climate Change*, 11, 680–688.

Boulton, C.A., T.M. Lenton, and N. Boers, 2022: Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature Climate Change*, 12, 271–278.

Breshears, D.D., H.D. Adams, D. Eamus, N.G. MacDowell, D.J. Law, R.E. Will, A.P. Williams, and C.B. Zou, 2020: The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off. *Frontiers in Plant Science*, 4, 266, doi: 10.3389/fpls.2013.00266.

Brovkin, V., E. Brook, J.W. Williams, S. Bathiany, T.M. Lenton, M. Barton, R.M. DeConto, J.F. Donges, A. Ganopolski, J. McManus, S. Praetorius, A. de Vernal, A. Abe-Ouchi, H. Cheng, M. Claussen, M. Crucifix, G. Gallopin, V. Iglesias, D.S. Kaufman, T. Kleinen, F. Lambert, S. van der Leeuw, H. Liddy, M.F. Loutre, D. McGee, K. Rehfeld, R. Rhodes, A.W.R. Seddon, M.H. Trauth, L. Vanderveken, and Z.C. Yu, 2021: Past abrupt changes, tipping points and cascading impacts in the Earth system. *Nature Geoscience*, 14, 550–558.

Caesar, L., G.D. McCarthy, D.J.R. Thornalley, N. Cahill, and S. Rahmstorf, 2021: Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14, 118–120.

Clark, P.U., J.D. Shakun, S.A. Marcott, A.C. Mix, M. Eby, S. Kulp, A. Levermann, G.A. Milne, P.L. Pfister, B.D. Santer, D.P. Schrag, S. Solomon, T.F. Stocker, B.H. Strauss, A.J. Weaver, R. Winkelmann, D. Archer, E. Bard, A. Goldner, K. Lambeck, R.T. Pierrehumbert, and G.-K. Plattner, 2016: Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change. *Nature Climate Change*, 6, 360–369.

Cowan, T., G.C. Hegerl, A. Schurer, S.F.B. Tett, R. Vautard, P. Yiou, A. Jezequel, F.E.L. Otto, L.J. Harrington, and B. Ng, 2020: Ocean and land forcing of the record-breaking Dust Bowl heatwaves across central United States. *Nature Communications*, 11, 2870.

Frölicher, T.L., E.M. Fischer, and N. Gruber, 2018: Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 560, 360–364.

Garbe, J., Albrecht, T., Levermann, A., Donges, J.F., and R. Winkelmann, 2020: The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature*, 585, 538–544.

## 참고문헌

---

- Guiot, J., and W. Cramer, 2016: Climate Change: The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems. *Science*, 354, 465–468.
- Heinze, C., T. Blenckner, H. Martins, D. Rusiecka, R. Doscher, M. Gehlen, N. Gruber, E. Holland, O. Hov, F. Joos, J.B.R. Matthews, R. Rodven, and S. Wilson, 2021: The quiet crossing of ocean tipping points, *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 118, e2008478118.
- Hewitt, H., B. Fox-Kemper, B. Pearson, M. Roberts, and D. Klocke, 2022: The small scales of the ocean may hold the key to surprises. *Nature Climate Change*, 12, 496–499.
- Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, T. Guillen Bolanos, M. Bindi, S. Brown, I.A. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijikata, S. Mehrotra, C.W. Hope, A.J. Payne, H.-O. Portner, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2019: The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, 365, eaaw6974.
- Humphrey, V., J. Zscheischler, P. Ciais, L. Gudmundsson, S. Sitch, and S.I. Seneviratne, 2018: Sensitivity of atmospheric CO<sub>2</sub> growth rate to observed changes in terrestrial water storage. *Nature*, 560, 628–631.
- IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [J.J. McCarthy, et al. (eds.)], 1031 pp., Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2001.
- IPCC, 2021: 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. 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* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- Jackson, L.C., A. Biastoch, M.W. Buckley, D.G. Desbruyeres, E. Frajka-Williams, B. Moat, and J. Robson, 2022: The evolution of the North Atlantic Meridional Overturning Circulation since 1980. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 241–254.
- Kharin, V. V., Flato, G. M., Zhang, X., Gillett, N. P., Zwiers, F., & Anderson, K. J., 2018: Risks from climate extremes change differently from 1.5°C to 2.0°C depending on rarity. *Earth's Future*, 6, 704–715. <https://doi.org/10.1002/2018EF000813>
- Katzenberger, A., J. Schewe, J. Pongratz, and A. Levermann, 2021: Robust increase of Indian monsoon rainfall and its variability under future warming in CMIP6 models. *Earth System Dynamics*, 12, 367–386.
- Kornhuber, K., D. Coumou, E. Vogel, C. Lesk, J. F. Donges, J. Lehmann, and R. M. Horton, 2020: Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions. *Nature Climate Change*, 10, 48–53.
- Miralles, D. G., Teuling, A. J., Van Heerwaarden, C. C., Vilà-Guerau de Arellano, J. G. Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation, 2014. *Nature Geoscience*, 7, 345–349.
- Pal, J.S., and E.A.B. Eltahir, 2016: Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nature Climate Change*, 6, 197–200.
- Pattyn, F., and M. Morlighem, 2020: The uncertain future of the Antarctic Ice Sheet. *Science*, 367, 1331–1335.
- Pattyn, F., et al., 2018: The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5 °C global warming. *Nature Climate Change*, 8, 1053–1061.
- Ratnayake, H.U., M.R. Kearney, P. Govekar, D. Karoly, and J.A. Welbergen, Forecasting wildlife die-offs from extreme heat events. *Animal Conservation*, 22, 386–395, 2019.
- Riahi, K., et al., 2017, The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, 42, 153–168, doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- Romanello, M., et al., 2021: The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future., *Lancet*, 398, 1619–1662.
- Seneviratne, S.I., T. Corti, E.L. Davin, M. Hirschi, E.B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky, and A.J. Teuling, 2010: Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99, 125–161, doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- Slingo, J., P. Bates, P. Bauer, S. Belcher, T. Palmer, G. Stephens, B. Stevens, T. Stocker, and G. Teutsch, 2022: Ambitious partnership needed for reliable climate prediction. *Nature Climate Change*, 12, 499–503.
- Stocker, T.F., G.K.C. Clarke, H. Le Treut, R.S. Lindzen, V.P. Meleshko, R.K. Mugara, T.N. Palmer, R.T. Pierrehumbert, P.J. Sellers, K.E. Trenberth, and J. Willebrand, Physical Climate Processes and Feedbacks, in *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by J.T. Houghton, et al., pp. 417–470, Cambridge University Press, 2001.
- Stocker, T.F., et al., Technical Summary, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by T.F. Stocker, et al., pp. 33–115, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

## 참고문헌

---

Trusel, and M. van den Broeke, 2018: The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5 °C global warming. *Nature Climate Change*, 8, 1053–1061.

Vicedo-Cabrera, A.M., et al., 2021: The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature Climate Change*, 11, 492-500.

Vogel, M.M., J. Zscheischler, and S.I. Seneviratne, 2018: Varying soil moisture-atmosphere feedbacks explain divergent temperature extremes and precipitation in central Europe. *Earth System Dynamics*, 9, 1107–1125.

Warren, R., J. Price, E. Graham, N. Forstnerhaeusler, and J. VanDerWal, 2018: The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C. *Science*, 360, 791–795.

Wartenburger, R., M. Hirschi, M.G. Donat, P. Greve, A.J. Pitman, and S.I. Seneviratne, 2017: Changes in regional climate extremes as a function of global mean temperature: an interactive plotting framework. *Geoscience Model Development*, 10, 3609–3634.

Weijer, W., W. Cheng, O.A. Garuba, A. Hu, and B.T. Nadiga, 2020: CMIP6 models predict significant 21st century decline of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Geophysical Research Letters*, 47, 10.1029/2019GL086075.

Worthington, E.L., B.I. Moat, D.A. Smeed, J.V. Mecking, R. Marsh, and G.D. McCarthy, 2021: A 30-year reconstruction of the Atlantic Meridional Overturning Circulation shows no decline. *Ocean Science*, 17, 285–299.

Zemp, D.C., C.F. Schlessner, H.M.J. Barbosa, M. Hirota, V. Montade, G. Sampaio, A. Staal, L. Wang-Erlandsson, and A. Rammig, 2017: Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, 8, 14681, 10.1038/ncomms14681.

### Climate Change and Cities – Urban Climate Change Research Network

Gencer, E., Folorunsho, R., Linkin, M., Wang, X., Natenzon, C. E., Wajih, S., Mani, N., Esquivel, M., Ali Ibrahim, S., Tsuneki, H., Castro, R., Leone, M., Panjwani, D., Romero-Lankao, P., and Solecki, W. 2018: Disasters and risk in cities. In Rosenzweig, C., W. Solecki, P. Romero-Lankao, S. Mehrotra, S. Dhakal, and S. Ali Ibrahim (eds.), *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*. Cambridge University Press. New York. 61–98, [https://uccrn.ei.columbia.edu/sites/default/files/content/pubs/ARC3.2-PDF-Chapter-3-Disasters-and-Risk-wecompress.com\\_.pdf](https://uccrn.ei.columbia.edu/sites/default/files/content/pubs/ARC3.2-PDF-Chapter-3-Disasters-and-Risk-wecompress.com_.pdf)

Hsu, A., et al., 2021: Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. *Nature Communications*, 12, 2721.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem (eds.)]. 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* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Jay, Ol., et al., 2021: Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities. *The Lancet* 398, 10301, P709-724.

Data-Driven EnviroLab, *Global climate action from cities, regions and businesses*. Utrecht University, German Institute of Development and Sustainability (IDOS), CDP, Blavatnik School of Government, University of Oxford. 2022 edition, forthcoming.

Rosenzweig, C., et al., 2019: New York Panel on Climate Change 2019 Report Executive Summary. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1439:1, 11–21. doi.org/10.1111/nyas.14008

Rosenzweig, C., et al., 2021: *The Future We Don't Want*: <https://www.c40.org/what-we-do/scaling-up-climate-action/adaptation-water/the-future-we-dont-want/>

Solecki, W., et al., 2022: *Climate Change and U.S. Cities: Urban Systems, Sectors, and Prospects for Action*. Island Press, Washington, D.C., USA, 269–300.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019: *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations, <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

Zachariah, M., et al., 2022: Climate change made devastating early heat in India and Pakistan 30 times more likely: [https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/India\\_Pak-Heatwave-scientific-report.pdf](https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/India_Pak-Heatwave-scientific-report.pdf)

Zegarra, M.A., et al., 2020: Impact of Hurricane Dorian in The Bahamas: A View from the Sky: [https://publications.iadb.org/publications/english/document/Impact\\_of\\_Hurricane\\_Dorian\\_in\\_The\\_Bahamas\\_A\\_View\\_from\\_the\\_Sky.pdf](https://publications.iadb.org/publications/english/document/Impact_of_Hurricane_Dorian_in_The_Bahamas_A_View_from_the_Sky.pdf), <https://dx.doi.org/10.18235/0002163>

### Extreme Weather Events and Socioeconomic Impacts – WMO/World Weather Research Programme

Bissolli, P., et al., 2022: Trockenheit in Europa 2022: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20220706\\_trockenheit\\_europa\\_2022.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20220706_trockenheit_europa_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=7)

Deutscher Wetterdienst, 2022: Hitzewelle endet historisch: [https://www.dwd.de/DE/wetter/thema\\_des\\_tages/2022/7/21.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2022/7/21.html)

Imbery, F., et al., 2022: Intensive Hitzewelle im Juni 2022 in Deutschland und Mitteleuropa, 2022: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20220629\\_temperatur\\_hitzewelle-juni.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20220629_temperatur_hitzewelle-juni.pdf?__blob=publicationFile&v=5)

Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2022: Tempo muito quente - 18 de Julho: [https://www.ipma.pt/pt/media/noticias/news.detail.jsp?f=/pt/media/noticias/textos/Tempo\\_muito\\_quente\\_julho\\_2022.html](https://www.ipma.pt/pt/media/noticias/news.detail.jsp?f=/pt/media/noticias/textos/Tempo_muito_quente_julho_2022.html)

## 참고문헌

---

IPCC, 2021: 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, Chapter 11 Sonia I. Seneviratne (Switzerland), Xuebin Zhang (Canada), Muhammad Adnan (Pakistan), Wafae Badi (Morocco), Claudine Dereczynski (Brazil), Alejandro Di Luca (Australia/Canada/Argentina), Subimal Ghosh (India), Iskhaq Iskandar (Indonesia), James Kossin (United States of America), Sophie Lewis (Australia), Friederike Otto (United Kingdom/Germany), Izidine Pinto (South Africa/Mozambique), Masaki Satoh (Japan), Sergio M. Vicente-Serrano (Spain), Michael Wehner (United States of America), Botao Zhou (China).

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem (eds.)]. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Met Office, UK, 2022: Unprecedented extreme heatwave, July 2022, 2022: 2022\_03\_july\_heatwave (metoffice.gov.uk), [https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/weather/learn-about/uk-past-events/interesting/2022/2022\\_03\\_july\\_heatwave.pdf](https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/weather/learn-about/uk-past-events/interesting/2022/2022_03_july_heatwave.pdf)

Otto, F.E.L, et al., 2022: Climate change increased rainfall associated with tropical cyclones hitting highly vulnerable communities in Madagascar, Mozambique & Malawi: <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/WWA-MMM-TS-scientific-report.pdf>

Williamson, B., 2022: Like many disasters in Australia, Aboriginal people are over-represented and under-resourced in the NSW floods: <https://theconversation.com/like-many-disasters-in-australia-aboriginal-people-are-over-represented-and-under-resourced-in-the-nsw-floods-178420>

World Bank Group, 2021: Poverty and Equity Brief, Mozambique: [https://databank.worldbank.org/data/download/poverty/987B9C90-CB9F-4D93-AE8C-750588BF00QA/SM2021/Global\\_POVEQ\\_MOZ.pdf](https://databank.worldbank.org/data/download/poverty/987B9C90-CB9F-4D93-AE8C-750588BF00QA/SM2021/Global_POVEQ_MOZ.pdf)

World Food Programme, 2021: WFP Madagascar Country Brief: [https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000131081/download/?\\_ga=2.241612164.701433475.1631606348-1055501472.1562658913](https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000131081/download/?_ga=2.241612164.701433475.1631606348-1055501472.1562658913)

World Meteorological Organization, 2021: WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019): [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=21930#.YS9GdY4zbIW](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21930#.YS9GdY4zbIW)

World Meteorological Organization Regional Association VI, Regional Climate Centre (RCC) Network, [www.rccra6.org](http://www.rccra6.org)

Zachariah, M., et al., 2022. Without human-caused climate change temperatures of 40°C in the UK would have been extremely unlikely: <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/UK-heat-scientific-report.pdf>

### **Early Warning Systems: Supporting Adaption and Disaster Risk Reduction – WMO/UN Office for Disaster Risk Reduction**

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem (eds.)]. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001

Global Commission on Adaptation, 2019: Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience. [https://gca.org/wp-content/uploads/2019/09/GlobalCommission\\_Report\\_FINAL.pdf](https://gca.org/wp-content/uploads/2019/09/GlobalCommission_Report_FINAL.pdf)

UNDRR analysis based on Sendai Framework Monitor reports as of April 2022: <https://sendaimonitor.undrr.org>

### **IPCC Headline Statements – IPCC**

IPCC, 2021: 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem (eds.)]. 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001

*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.*



For more information please visit:  
[public.wmo.int/en/resources/united\\_in\\_science](http://public.wmo.int/en/resources/united_in_science)

