

# 지구기후보고서

## THE GLOBAL CLIMATE

### [2015-2019]



WEATHER CLIMATE WATER

WMO-No. 1249



WORLD  
METEOROLOGICAL  
ORGANIZATION

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

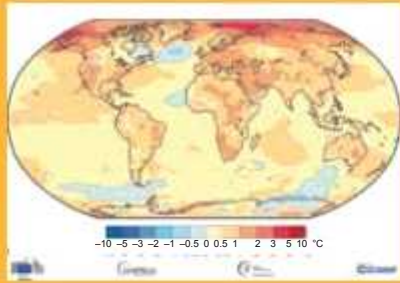
# 목 차

머리말 Foreword .....	3
요약 Executive summary .....	5
부문별 주요 현황 Key findings .....	6
온실가스 GREENHOUSE GASES .....	6
온도 TEMPERATURE .....	7
해양 OCEAN .....	9
빙권 CRYOSPHERE .....	11
강수 PRECIPITATION .....	15
극한 현상 EXTREME EVENTS .....	17
극한 현상의 원인 규명 ATTRIBUTION OF EXTREME EVENTS .....	23
기후관련 주요 재해 사례 HIGHLIGHTS OF PROMINENT CLIMATE-RELATED RISKS .....	24
참고문헌 REFERENCES .....	28

# 지구 기후 2015-2019

## 주요 기후지표

### 지구온도 상승



Global five-year temperature anomalies (relative to 1981-2010) for 2015-2019. Data are from ECMWF ERA5 Copernicus Climate Change Service

#### 2015 - 2019

- 가장 따뜻한 5년
- 2011-2015 기간 보다 0.2 °C 높다

#### 2016

- 기록상 가장 따뜻한 해, 산업화 이전보다 1 °C 상회

### 온실가스 농도 증가

전지구 지상 평균농도 2015-2018

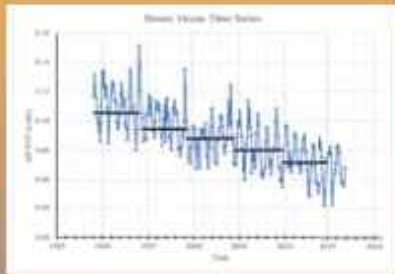
**CO<sub>2</sub>**  
404 parts  
per million

**CH<sub>4</sub>**  
1856 parts  
per billion

**N<sub>2</sub>O**  
330 parts  
per billion

### 해양산성화

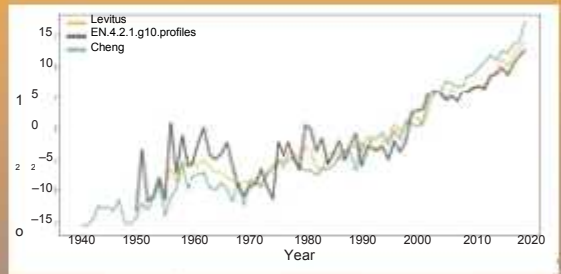
CO<sub>2</sub> 농도 상승으로 인한 해양산성화 가속



pH record from the HOTs long-term ocean observation station. Credit: IOC-UNESCO, NOAA-PMEL, IAEA, OA-ICC.

### 해양 온난화

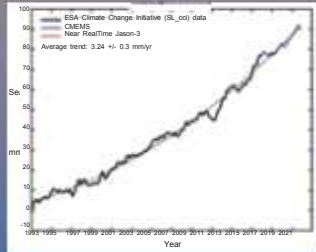
2018년에 전지구 해양 열 함량 기록적 수준 도달



Source: NOAA NCEI, UK Met Office, IAP, IES

### 해수위 상승 지속

전지구 해수면 상승 지속  
얼음 녹음이 주요 원인(기여자)



Data source: European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative (CCI) sea level data until December 2015, extended by data from the Copernicus Marine Service (CMEMS) as of January 2016

### 빙권

얼음 녹음은 지구온난화의 한 지표

#### Arcctic

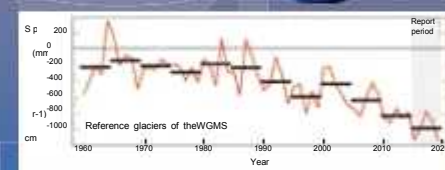


북극 해빙의 하계 최소면적과 동계 최대범위가 2015-2019년 기간 동안 해마다 1981-2010년 기간의 범위에 훨씬 못미쳤다.

#### Antarctic



남극은 해빙범위 역대 최소와 역대 두 번째 최소를 2017년과 2018년에 각각 보였다.

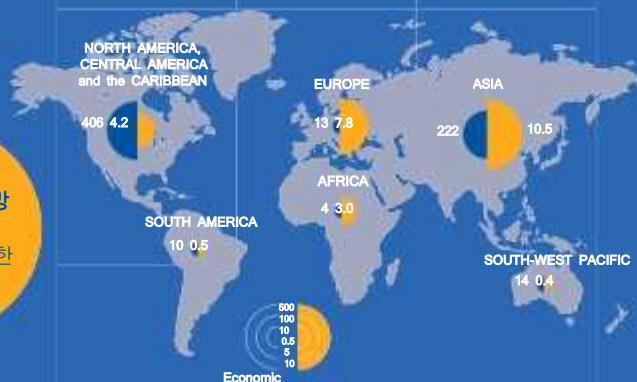


Average of observed annual specific mass-change rate of all World Glacier Monitoring Service (WGMS) reference glaciers, including pentadal means.

## 극한 기상재해 통계 Mortality and economic losses

**2017**  
**>2,000명 사망**  
원인: 푸에르토리코와 도미니카에 피해 준 허리케인 *Maria*

**2015-2019**  
**>11,000명 사망**  
원인: 지구 전역에 발생한 폭염



**2017**  
**>1,250억 달러 경제손실**  
원인: 허리케인 *Harvey*의 영향

**대규모 극한 폭염**  
원인: 인간활동의 영향

**2016**  
**>160억 달러 경제손실**  
원인: 캘리포니아 자연산불

## 머리말 Foreword

세계기상기구는 2005년에 지구 기후에 대한 다년 주기 평가보고서 시리즈를 발간하기로 하고, 지금까지 그 첫 번째 다년 주기 보고서인 '2001-2010년 지구기후보고서'와 '2011-2015년 지구기후보고서'를 각각 발간한 바 있으며, 이번에 '2015-2019년 지구기후보고서'를 발간하게 되었습니다.

'2015-2019년 지구기후보고서'는 앞선 보고서들과는 다음 두 가지 측면에서 차이가 있습니다.

(가) 2015년 파리협정 직후 기간을 다루고 있으며, WMO는 또 다른 차원의 기여로서 이 보고서를 통해 협정 채택 이후 기후의 변화 양상을 감시.

(나) 다양한 분야의 전문가들이 2017년에 권장한 새로운 접근 방식을 활용. 한 예로 콘텐츠를 두 가지 줄기로 분할하는 새로운 구조인데, 이 중 하나는 물리적 기후지표로서 기후변화 판별 지표의 몇 가지 결정적 상태에 초점을 맞추고 있고, 다른 하나는 기여기관들이 제공한 정보를 기반으로 선별된 기후변화 영향에 관한 것으로 대상은 식량안보, 인구이동, 보건, 환경, 사회경제적 개발 등임.

본 보고서는 독자들에게 지난 5년 동안의 기후 및 그 영향에 관한 사항을 종합 정리하여 제공하는 것을 목표로 합니다. 보고서는 기후시스템이 이 기간 중 발생했던 엘니뇨-남방 진동(ENSO) 현상과 같은 대규모의 자연적 동인으로 인해 연간 변동이 일어나는데 이를 넘어서는 물리적 변동에 관한 것도 다루고 있습니다. 우리는 기후시스템의 지속적 변화로 인해 주 관심대상인 육지, 바다, 대기, 빙권을 대표하는 핵심 기후지표들의 동태가 2015-2019년 동안 어떠했는지에 관해 주목하고 있습니다. 관찰을 통해 확인된 변화들 중 일부는 더욱 빨라지고 있는데, 해수면 상승 속도가 가속되는 것은 한 예로써 빙상과 빙하가 급격히 녹고 해양이 열적으로 팽창함으로 인해 발생합니다. 기후변화가 식량 안보, 보건, 인구 이동 등에 끼치는 영향은 특히 개발도상국에게 다른 우려의 원인이 되고 있습니다. 이들 나라에서는 갈등이 상존하고 구조적으로 사회 경제적 회복력이 약하다는 점이 사회경제적 발전을 저해하는 요인인데, 기후 변동 및 변화는 이것이 주는 영향을 더욱 악화시키고 있습니다.

우리의 과제는 최근 수년간 줄기차게 촉구되어 왔던 바로서, 유엔의 지속가능개발 목표를 달성하기 위해 가능한 모든 노력을 기울이는 가운데, 정부, 지역 이해관계자, 도시, 시민사회 등으로 하여금 이 하나밖에 없는 지구를 구하고 탄소중립으로

의 신속한 전환을 위한 혁신적 해결책 모색에 최선의 노력을 다하게 하는 것입니다.

마지막으로, 이 보고서는 WMO 회원국들의 협력과 수많은 국가·국제기관, 연구기관, 다양한 국가의 전문가들의 기여 없이는 불가능했을 것입니다. WMO를 대신하여 모든 기여자에게 감사드리며, 이 보고서의 높은 과학적 표준을 유지할 수 있도록 WMO에 도움을 주신 공동 저자들의 노고를 치하하는 바입니다.

(P. Taalas)

WMO 사무총장

## 요약 EXECUTIVE SUMMARY

기존 2011-2015년 보고서와 이번 2015-2019년 보고서에 나온 값을 비교해보면 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 배출 증가가 지속되는 가운데 CO<sub>2</sub>의 대기 중 농도가 이전 5년 보다 **18% 이상 높은 증가율**을 보이며 가속되고 있다는 것이다. 해양에서의 CO<sub>2</sub> 농도 증가는 해양 산성화를 높이는 결과를 가져왔다.

지난 5년간(2015-2019)의 전지구 평균 온도는 5년 단위의 기록상으로는 가장 따뜻하였고, 산업혁명 이후로는 **1.1°C 상승**하였으며, 앞선 5년보다는 **0.2°C** 더 높았다.

이러한 지속적이고 가속되는 추세는 여타 주요 기후 지표들 사이에서도 지배적으로 나타난다. 해수면 상승의 가속, 북극 해빙면적의 지속적 위축, 남극 해빙의 급격한 감소, 빙하지대와 그린란드 및 남극 빙상의 지속적 얼음 융해, 북반구 봄철 눈 덮임 면적 하향 추세 등이 그렇다.

더 많은 열이 해양에 갇히고 있는데, 수심 700미터까지의 해양 열 함유량(heat content)을 보면 2019년도가 기록상 가장 큰 값을 보였다. 강수는 지역에 따라 증감이 있었다. 2015-2019년 기간 동안의 최악의 기상학적 재해는 폭염이었다. 모든 대륙이 겪었으며, 그 결과 많은 국가에서 새로운 기온기록을 세웠고, 전례 없던 산불이 유럽, 북미, 호주, 아마존밀림은 물론이고 북극 지역에까지 발생했다.

날씨와 관련된 모든 재해 중 열대저기압(태풍, 허리케인 등)은 가장 큰 경제적 손실은 물론 홍수, 산사태, 인명피해, 재산손실 등을 일으켰다. 그 기간 중 가장 큰 비용을 초래한 것은 2017년에 발생한 허리케인 ‘하비(Harvey)’로 **1,250억 달러**가 넘는 경제적 피해를 입혔다고 추산된다.

기후변동 및 기후변화가 원인이 되는 기후관련 위기는 여러 지역 특히 **아프리카**에서 **식량 안보**를 악화시켰다. 주요 원인은 **가뭄**이며, 그로 인해 기후 관련 질병 또는 사망 위험이 커졌다. 해수면 온도가 더 높아지면서 해양 생물과 생태계를 위험에 빠트렸다. 온도가 높아질수록 개도국의 GDP는 악화되고 국가 발전이 가로막힌다.

# 부문별 주요 현황

## 온실가스 GREENHOUSE GASES

### CO<sub>2</sub> 배출이 늘었고 온실가스 농도는 상승

산업화 이전 시대부터 잔존해 온 수명이 긴 온실가스들 중 CO<sub>2</sub>가 전체 복사강제력의 약 66%를 차지하며, 메탄(CH<sub>4</sub>)은 17%, 아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 6%이다. 인위적으로 생성된 탄소의 경우 2015년 이후에도 전 지구적 수지(global budget)가 계속 상승했는데, 이는 화석연료(석탄, 석유, 천연가스)의 연소와 시멘트 생산으로 인한 CO<sub>2</sub> 배출량 증가에 따른 것이다. 2015-2019년 기간 동안 CO<sub>2</sub> 배출량은 최소 208 기가톤(Gt<sup>1</sup>)으로 추산되며, 이보다 앞선 2010-2014년 기간 동안에 배출했던 200 Gt보다 많은 양이다. CO<sub>2</sub> 흡수는 육지와 바다를 망라한 지구 표면 전체에 걸쳐 이뤄지는데, 열대역(30° S ~ 30° N)에서만 CO<sub>2</sub> 플럭스가 탄소 중립에 가깝다. 이는 CO<sub>2</sub> 흡수가 있긴 하지만 산림 파괴로 인한 CO<sub>2</sub> 배출로 인해 대체로 상쇄되기 때문이다. 남반구에서의 CO<sub>2</sub> 흡수는 주로 해양에 의해 이뤄지고, 북반구에서는 이보다 더 강한 흡수가 이뤄지는데, 이에 대해 육지와 해양 모두가 비슷한 정도의 기여를 한다.

WMO 지구대기감시망에서 얻은 최근 자료를 분석해보면 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 각각에 대한 전지구 지표부근 평균농도가 모두 새로운 고점에 도달했다. (Figure 1 참조)

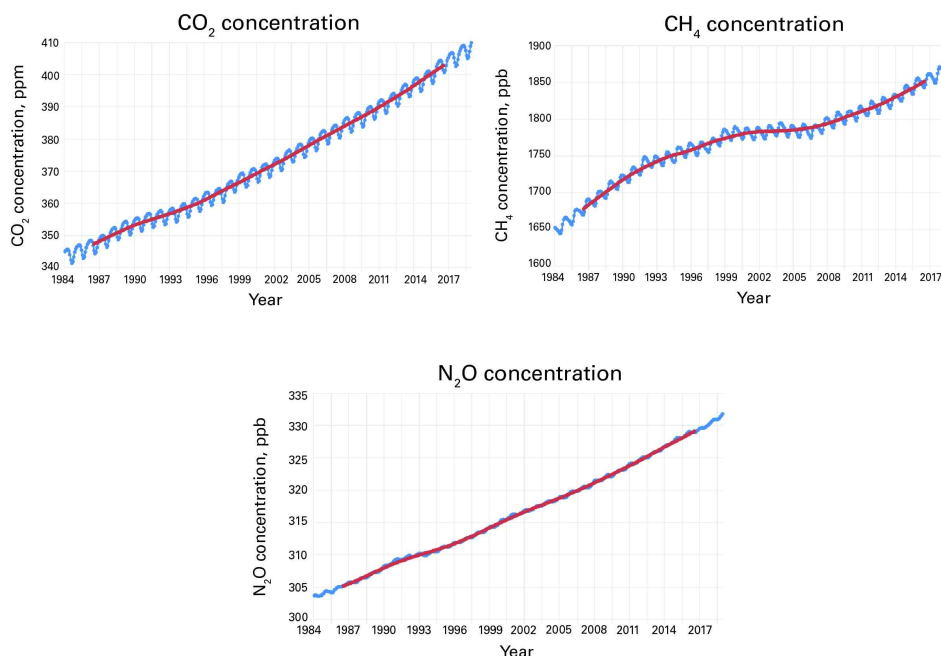


Figure 1. CO<sub>2</sub> (좌), CH<sub>4</sub> (우), N<sub>2</sub>O (하) 각각의 전지구 평균 농도 변화 시계열. 청색선은 전지구 월평균, 적색선은 5년 이동평균. Source: World Global Atmosphere Watch.

1) 1 gigaton = 10억 톤

**Table 1.** CO<sub>2</sub> (parts per million, ppm), CH<sub>4</sub> (parts per billion, ppb), N<sub>2</sub>O (ppb) 각각의 농도, 각 성분 농도의 지정 기간에 대한 연 평균 증가 속도, 2011-2015 및 2015-2018 기간 간의 증가속도 변화를, 산업화 이전(1750년 이전) 농도 대비 2015-2018 간 농도 비율. *Source: WMO Global Atmosphere Watch.*

	Concentration			Growth rate		
	2015-2018	2011-2015	2015-2018 % to pre-industrial	2015-2018	2011-2015	% change
CO <sub>2</sub>	404.2	395.5	145	2.5	2.2	+18%
CH <sub>4</sub>	1856.0	1826.4	257	9.0	7.2	+21%
N <sub>2</sub> O	329.6	326.2	122	0.95	1.0	-5%

2015-2018년 기간의 자료를 처리하여 분석한 결과 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 평균 증가속도가 2011-2015년 기간 대비 18% 높은 것으로 나타났다(Table 1)²).

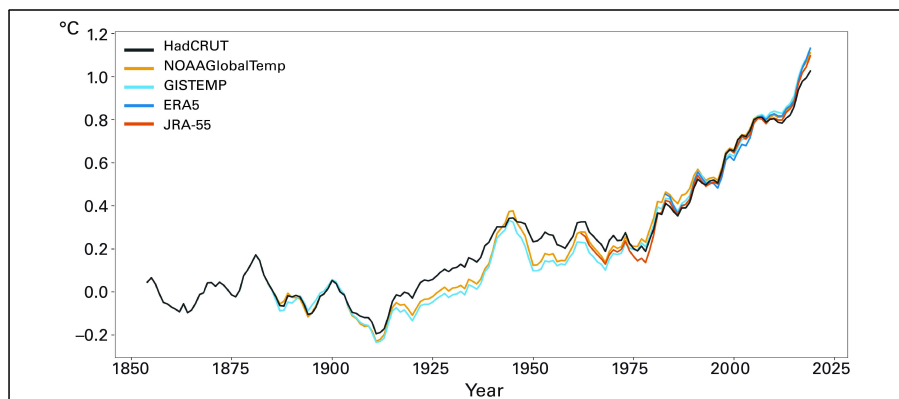
## 온도 TEMPERATURE

### 지구기온이 계속 상승중인 가운데

### 2015-2019년은 역사상 가장 따뜻한 5년

2015-2019년은 역대 가장 따뜻한 5년이었다. 이 기간 중 지구 평균기온은 산업화 이전(1850-1900)<sup>3)</sup> 보다 1.1±0.1 °C 더 따뜻했으며, 여타 5년 평균기온 중 가장 높았다. 2011-2015년 평균기온 보다는 0.21±0.08 °C 더 높았다(Figure 2). 2016년은 기록상 가장 따뜻했으며, 2019년은 두 번째로 따뜻한 해였다.

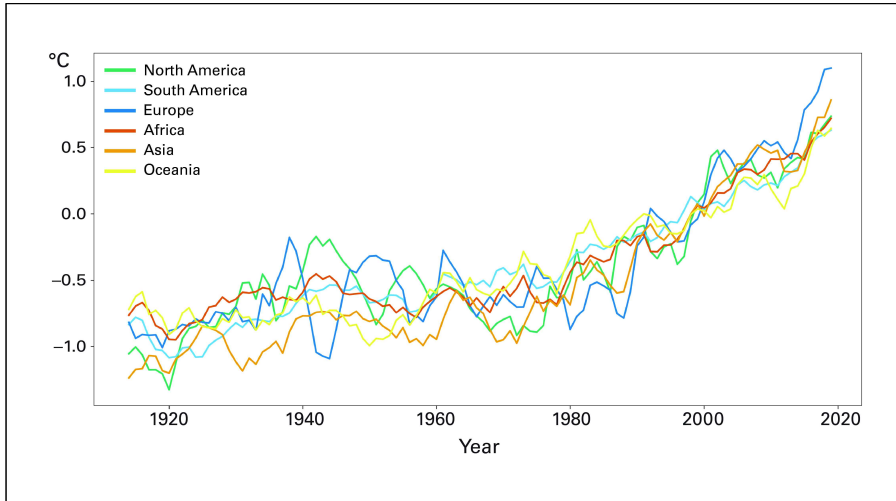
**Figure 2.** 1854-2019년 간 전지구 온도 편차(산업화 이전 대비)의 5년 이동평균. 이 그래프 산출에 활용한 dataset 5개는 HadCRUT.4.6.0.0, NOAAGlobalTemp v5, GISTEMP v4, ERA5, JRA-55 이다.



대륙의 평균온도는 전형적으로 전지구 평균보다 변동이 더 심한데, 그럼에도 불구하고 사람이 거주하는 대륙 각각에 대한 2015-2019년 평균 온도가 그 이전 어느 5년 평균온도 보다 높아 상승추세가 지속적으로 진행됨을 보였다(Figure 3).

2) CO<sub>2</sub>가 연 평균 2.5 ppm씩 증가한다는 것은 세계인구 1인당 매주 50 kg의 CO<sub>2</sub>를 배출한다는 것과 같다.

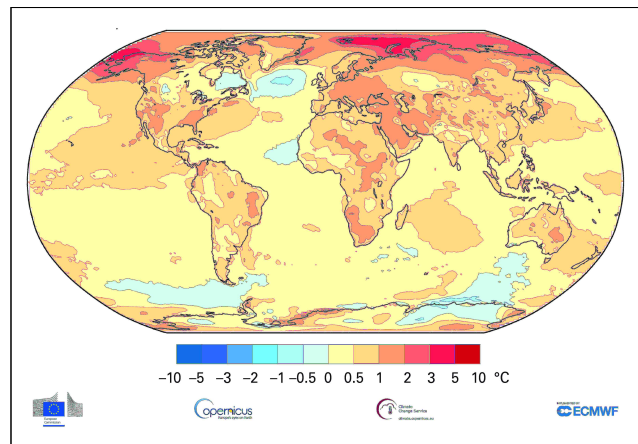
3) IPCC가 이 기간을 현재와 산업혁명 이전을 비교하기 위한 기준으로 삼았는데, 전지구 관측자료가 존재하는 초기기간으로서 이때의 기온이 산업혁명(1750년경)시의 기온과 유사한 것으로 추정됨.



**Figure 3.** 1910-2019년 간 대륙별 온도 편차 (1981-2010 대비)의 5년 이동평균.  
Data source: NOAA

Figure 4는 1981-2010년 장기 평균온도에 대해 2015-2019년 평균온도의 편차를 보여주는 그림이다. 2015-2019년 동안의 전지구 지표면 평균 기온은 산업화 이전보다 대략 1.7°C 높았고 2011-2015년 보다는 0.3°C 따뜻하다. 거의 모든 육지는 평균보다 따뜻했다. 다만 캐나다 일부 지역, 중앙아시아, 인도양에 속하는 남극 일부 지역은 예외였다. 5년 평균 기온이 가장 높았던 지역은 알래스카를 포함한 미국 땅의 반 이상, 남미의 동부, 유럽 및 중동 대부분, 유라시아 북부, 아프리카 남부와 동부였다.

2015-2019년의 전지구 평균 해수면 온도<sup>4)</sup>는 산업혁명 이전보다 대략 0.83°C 높으며 2011-2015년 보다는 0.13°C 따뜻했다. 평균 해수면온도보다 낮게 관측된 곳은 그린란드 남쪽 해역(지구적으로 오랜 기간 냉각이 이뤄지고 있는 몇 안 되는 지역 중 하나임), 서아프리카 연안 서쪽 해역, 남극해 등으로 나타났다. 기타 지구 대부분의 영역은 평균보다 따뜻했다. 태평양 북동부, 북대서양 서부, 인도양 서부, 타즈매니아 해역 등은 기록적으로 따뜻했는데, 그 영향으로 지난 5년간 해양 고수온(marine heatwave)일수가 크게 늘었다.



**Figure 4.** 1981-2010 대비 5년 평균 온도 편차.  
Data source: ECMWF ERA5 코페르니쿠스 기후변화서비스

4) 전지구 온도 평가는 다음 다섯 가지 데이터셋에 기반하고 있다: HadCRUT.4.6.0.0 (영국기상청 해들리센터 및 기후 연구유닛, 이스트앵글리아대), GISTEMP v4 (NASA 고다드 우주연구소), NOAA GlobalTemp (미 해양대기청 NOAA, 미 환경정보센터 NCEI), ERA5 (유럽중기예보센터), JRA-55 (일본기상청)

## 해양 OCEAN

### 해수면 고도 상승 지속

고도측정위성이 보여주듯이 해수면 고도가 계속 상승하고 있다. 전지구 평균 해수면 높이는 1993년 1월 처음 측정 이후 90 mm 상승한 것으로 나타났다. Figure 5는 1993-2019년 동안의 고도계 기반 전지구 평균 해수면 높이의 시계열 변화를 보여준다. 장기추세선과 겹쳐있는 검은 곡선은 양 또는 음의 편차를 오가는데 이는 엘니뇨와 라니냐 현상과 관련 있으며, 그래프에서 1997/98, 2011, 2015/16 시즌에 해당하는 부분을 보면 알 수 있다. 해수면은 27년간 연평균  $3.24 \pm 0.3$  mm씩

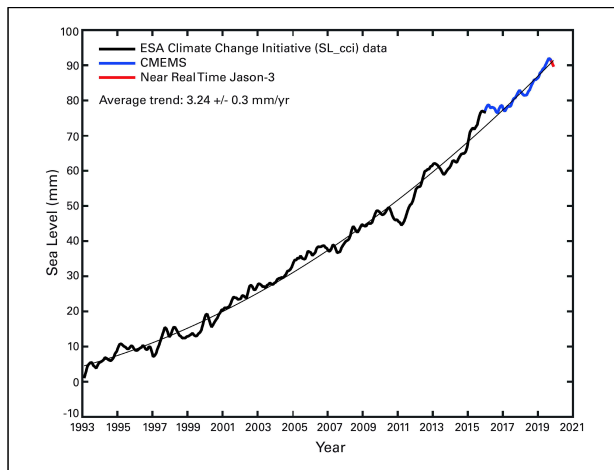


Figure 5. 1993-2019년 동안의 고도계 기반 전지구 평균 해수면 높이 변화 시계열. 가는 실선은 이차항수 모양이며 이는 해수면고도 상승이 가속되고 있음을 의미한다.

Data source: 2015년까지는 유럽우주국 기후변화이니셔티브가 생산한 해수면고도데이터. 그 이후 데이터는 코페르니쿠스 해양서비스가 2016년 1월 현재, 그리고 Jason-3가 2019년 10월 현재 생산한 것임.

상승한 것으로 나타났는데, 시간이 갈수록 상승속도가 빨라졌다. 2014-2019년 동안에는 전지구 해수면이 연 평균 5 mm씩 상승하였는데, 2015/2016 시즌의 강한 엘니뇨가 일부 원인이다. 한편 전지구 해수면의 연평균 5 mm 상승을 물의 부피로 환산하면 아마존 강이 약 3개월간 바다로 유출시키는 물의 부피와 같다. IPCC에 따르면, 2006~2015년 동안 지구해수면이 연평균 3~4 mm/yr의 속도로 상승했으며, 이는 1901~1990년 동안 1~2 mm씩 상승한 것에 비해 2.5배 빠른 속도다.

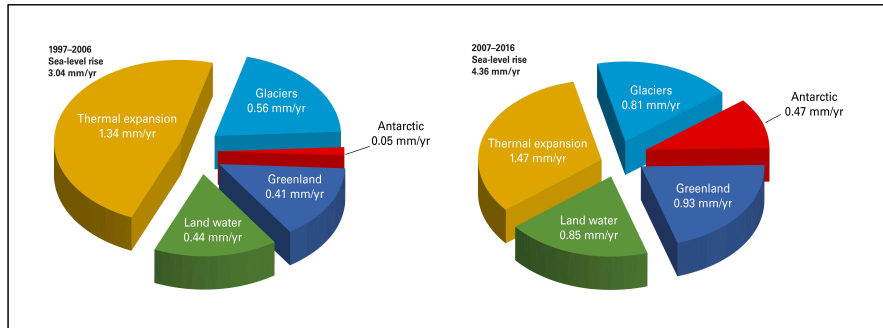
전지구 평균해수면 상승속도는 증가 일로에 있는데, 관측 자료를 보면 1997-2006년 동안은 3.04 mm/yr이었고 2007-2016년 동안은 4.36 mm/yr로 상승속도가 빨라졌다(Figure 6). 1993-2016년 동안의 해수면 수지(Sea-level budget) 오차는 0.3 mm/yr이다. 전세계 빙하들과 그린란드 및 남극 대륙 얼음이 녹으면서 해수면이 상승했으며, 지금은 이 부분이 해수면 수지를 지배하고 있다. (World Climate Research Programme Sea Level Budget Group, 2018).

### 더 많은 열이 해양에 흡수

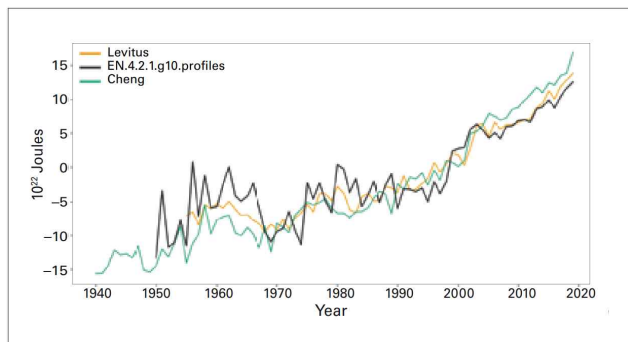
바다의 열 흡수 용량은 기후시스템을 좌우하는 결정적 부분이다. 인위적 기후변화로 인해 복사 불균형이 발생하는데 바다가 그 중 90%를 흡수한다고 추정된다. 지난 15년간 새로운 관측시스템이 개발되었는데, 특히 표류형 부표 아르고(Argo)

시리즈는 해양 열 함유량에 대한 준-지구적 규모의 체계적인 감시를 가능케 했다. 2005년 이전에는 샘플링 주기도 더 길었고 기기 간 공간도 더 넓어서, 이로 인한 해양 열 함량 추정치의 불확실성도 훨씬 컸다.

**Figure 6.** 전지구 평균해수면고도 상승을 일으키는 요소별 일정 기간(좌: 1997-2006, 우: 2007-2016)에 대한 기여도. 각 파이그래프의 좌측 상단에 적시된 값은 연간 상승속도의 관측 값이다. 이 값과 각 파이그래프의 개별 요소를 모두 합한 값과의 차이는 일부 요소에 내재된 오류일 수도 있고 sea level budget 계산에서 누락된 요소가 기여하는 값일 수도 있다.  
Data source: 유럽우주국 Sea Level Budget Closure Project (v2 version)



2015년 이후 해양 열 함유량의 신기록이 작성되었다. 해수면으로부터 수심 700 m까지의 층에 대한 2015-2019년 기간 중의 열 함유량 측정값은 앞선 어느 해보다 더 높았다(Figure 7). NCEI의 “Levitus” 데이터세트에서 2019년의 해양 열 함유량 편차(기준기간 1981-2010년 대비 재계산값)는 0-700 m 층은  $13.9 \times 10^{22}$  J, 0-2000 m 층은  $19.8 \times 10^{22}$  J이다. 2015년 이전에는 각각  $9.4 \times 10^{22}$  J,  $14.5 \times 10^{22}$  J이었다.5)

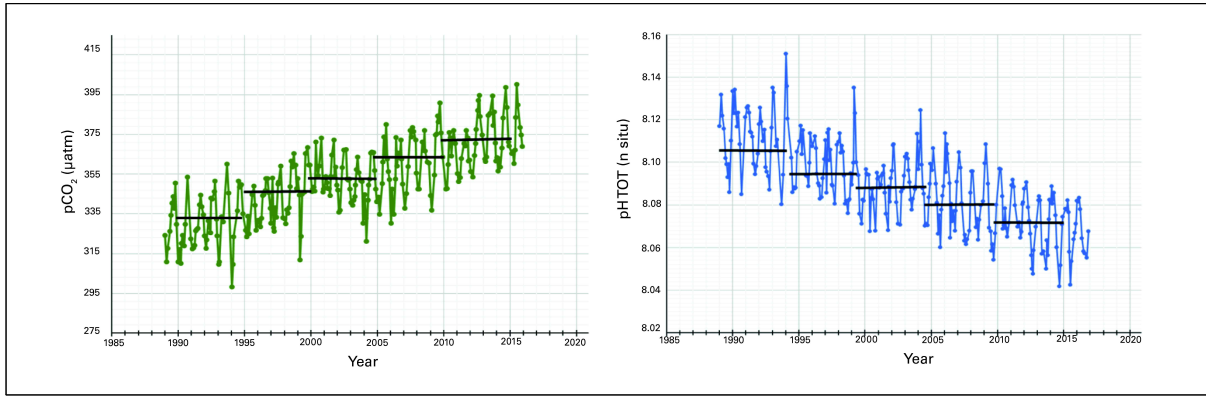


**Figure 7.** 기준기간 1981-2010년 대비 0-700 m 층의 전지구 해양 열 함유량 변화( $\times 10^{22}$  J). 위 선들은 연평균치를 보여주며 각각은 NOAA NCEI가 내놓은 Levitus 분석, 영국기상청 해들리 센터가 산출한 EN4 분석, 중국대기물리연구소의 해양분석 자료를 기반으로 한다(Cheng *et al.*, 2019).

## 바닷물은 더욱 산성화

해양은 대기로 배출되는 인위적 CO<sub>2</sub> 양의 23%를 흡수함으로써 지구에 미치는 기후변화 영향을 제거하는데 도움을 준다. 다만, 흡수된 CO<sub>2</sub>가 바닷물과 반응해서 해양의 산성도를 변화시키기 때문에 해양에 대해 생태학적으로 치러할 비용은 높다. 바닷물의 산성화는 탄산칼슘으로 이뤄진 조개나 동물 뼈 같은 탄소화합물질에도 변화를 일으킨다. 지난 20~30년에 걸쳐 이뤄진 해양 관측 결과를 보면 해양 산성화 경향이 뚜렷이 나타난다. 이는 바닷물에 CO<sub>2</sub> 농도가 높아지고 있기 때문이다(Figure 8).

5) 수심 2000미터까지의 전세계 해양 열 함량의 현 증가율은  $1 \times 10^{22}$  J/yr. 이는 전세계 연간 주요 에너지 소비의 약 20배이다. 즉 2017년 한해에 13,511 백만 톤의 기름을 썼고 에너지는  $0.05 \times 10^{22}$  J 만큼 소비했는데, 이것의 20배를 소비한 것에 해당한다.

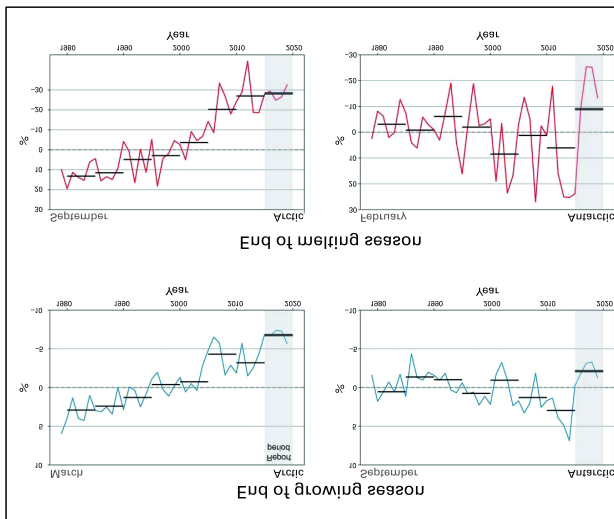


**Figure 8.** 태평양의 하와이 해에 대한 pCO<sub>2</sub> 및 pH 기록 시계열 변화 그래프이다. 검은 선분들은 각각 pCO<sub>2</sub>와 pH의 이동평균을 나타낸다. 자료출처: UNESCO 정부간해양학위원회(IOC-UNESCO), NOAA태평양 마린환경연구소, 국제원자력기구(IAEA) 해양산성화국제조정센터

연안 곳곳에서 일어나고 있는 해양 산성화 추세는 평가하기가 더욱 난해한데, 이는 온도 변화, 담수 및 영양물질 유입, 생물 활동, 대규모 해양 진동 등의 영향을 받는 매우 역동적이고 변동성이 높은 연안환경 때문이다. 산업혁명 시작 이후 연안 산성도는 전반적으로 26% 높아졌다.

## 빙권 CRYOSPHERE

### 해빙면적은 계속 감소



**Figure 9.** 해빙범위 최대를 보이는 북극의 3월과 남극의 9월 그리고 해빙범위 최소인 북극의 9월과 남극의 2월에 대한 1981-2010 기간 평균 대비 해빙범위 편차 시계열

Source: Sea Ice Index, version 3 (Fetterer et al., 2017)

에 약 13%씩 줄어든 것으로 나타났다.

북극의 해빙면적은 9월(여름)이 최소인데, 2015-2019년 기간 중의 9월 평균면적은 1981-2010년의 평균에 훨씬 미치지 못했다. 2015-2019년 동안 여름철 평균면적의 변동성은 2011-2015년 동안에 비해 그리 크지 않았다. 참고로 2012년에는 해빙면적이 기록적으로 작았었다. 2015-2019년 기간에 북극의 해빙면적이 북극 중심에서 현격히 줄어들었는데, 이 현상은 특히 뷰포트해 Beaufort Sea와 추크치해 Chukchi Sea에서 두드러졌다. 최근 장기간 1979-2019년 기간 중의 장기 추이를 보면 북극의 여름철 해빙면적이 10년

북극의 해빙면적은 3월(겨울)이 최대인데, 1979-2019년 기간의 3월 평균면적 역시 줄어들었고, 그 비율은 -2.7%/10년이었다. 2015-2019년 기간의 겨울철 평균 해빙면적은 2011-2015년 기간에 비해 더 작았다. 2015-2019년 전 기간 동안 겨울철 평균 해빙면적은 1981-2010년 평균치에 비해서도 훨씬 작았고, 그 5년 기간 중 해빙면적 최저치 기록 4개가 작성되었다. 동 기간 중 가장 크게 축소된 해역은 바렌츠해Barents Sea와 베링해Bering Sea였다.

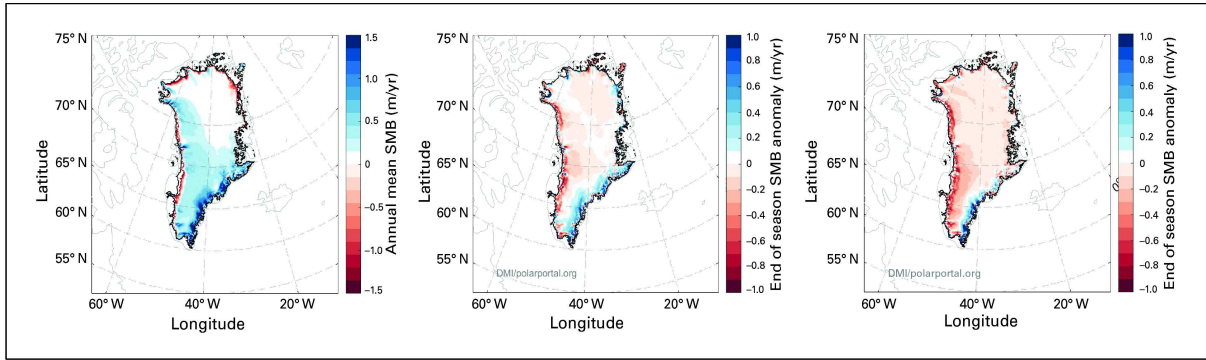
남극의 경우 2월(여름)에 해빙면적이 최소가 되고 최대는 9월(겨울)에 나타나는데, 2015-2019년 기간 중 나타난 눈에 띄는 특징은 2016년부터 해빙면적이 1981-2010년 기간의 해당 계절의 평균면적 보다 훨씬 줄어들었다는 것이다. 이는 2011-2015년 기간과는 대조적이다. 기간을 좀 더 길게 잡아 1979-2019년 기간 전체적으로 여름과 겨울철 모두에서 해빙범위가 증가하는 경향을 보였지만, 2015-2019년 기간에는 여름철 해빙범위가 2017년에 최소치, 2018년에는 두 번째 최소치를 기록했다. 특히 2018년에는 겨울철 해빙범위도 두 번째 최소치를 보였다. 이 5년 기간 중 해빙범위 위축 현상이 여름에는 주로 로스해Ross Sea에서, 겨울에는 주로 로스해와 웨델해Weddell Sea에서 거의 매년 나타났다.

## 빙상 질량 상실 지속

그린란드 빙상은 최근 수십 년에 걸쳐 현저한 변화의 과정을 밟았다. 빙상 전반의 질량은 1981-2000년 동안 꽤 안정적이었는데, 2000년대로 들어서면서 얼음 상실의 가속이 관측되었다. 그린란드는 1992-2018년 기간 동안 총 3,800 Gt 가량의 얼음이 줄었고, 이것은 동 기간 동안 전지구 평균해수면 고도가 약 10.6 mm 상승하는데 기여했다. Figure 10은 그린란드의 표면질량수지(Surface Mass Balance: SMB)의 지역 분포를 보여준다. 맨 왼쪽 그림은 참고기간 1986~2005년의 평균 SMB이고, 가운데와 맨 오른쪽 그림은 2015~2019과 2018~2019년 기간 각각의 참고기간 대비 편차를 보여준다.<sup>6)</sup>

그린란드 안쪽에서 대부분 실제로 적은 양의 질량 증가가 나타난 반면 강한 질량 상실은 가장자리에서 나타났다. 그린란드의 북동부 건조지역에서는 유의할만한 질량변화는 일어나지 않았다. 2015-2019년 기간의 음의 편차는 그린란드 서해안의 빙상 융삭지역 대부분과 북부에서 나타났고, 그린란드 남동부 가장자리는 1981-

6) SMB는 빙상의 몇몇 지점에서 직접 측정되긴 하지만, 여기서 보여주는 SMB는 컴퓨터모델로 계산한 값이다. Figure 10에서 왼쪽 그림 2가지는 고분해능의 지역기후모델(HIRHAM5) 아웃풋을 기반으로 하며, 가장 최근 자료인 맨 오른쪽 그림은 날씨예측 모델(HARMONI-AROME)의 아웃풋을 기반으로 한다. 후자의 경우는 얻어진 모든 관측자료의 동화를 통해 아웃풋을 낸다.



**Figure 10.** 맨 왼쪽은 1986~2005 기간의 평균 SMB, 가운데 그림은 참고기간 대비 2015~2019 기간의 편차, 맨 오른쪽 그림은 2018~2019 기간의 시즌 말 SMB를 보여준다. *Source: DMI/polarportal.dk*

2010년 기간의 평균보다 높은 양의 값을 갖는 질량변화를 보였다. 이러한 패턴은 2018/19년 시즌(우측 그림)에서도 나타났는데, 이때는 SMB가 그린란드의 남동 지역에서만 양의 편차였다. 그린란드의 빙상 안쪽을 포함한 여타 지역에서는 SMB가 눈에 띄만한 음의 값을 보였는데, 이는 8월 초에 절정을 이룬 이례적인 하계 폭염과 강한 상관관계를 갖는다. 이 때문에 빙상으로부터 하루 최대 110억 톤까지 질량 유출이 일어났다.<sup>7)</sup>

남극 빙상으로부터의 연간 얼음 상실량은 1979년과 2017년 사이에 최소 여섯 배 증가했다. 빙상으로부터의 질량손실 총량은 1979-1990년 기간 중 연간 40 Gt에서 2009-2017년 기간에는 연간 252 Gt으로 늘어났다. 남극 빙상의 질량 상실로 해수면이 연평균  $0.36 \pm 0.05$  mm씩 높아졌고 1979년부터 누적하면 지금까지  $14.0 \pm 2.0$  mm 높아졌다. 남극빙상의 얼음 상실은 대부분 빙봉<sup>8)</sup> 하부가 녹으면서 시작하는데, 원인은 상대적으로 따뜻한 해수의 유입 때문이다. 특히 남극대륙의 서부와 상실 정도는 비교적 약하지만 대륙 반도부 및 동부에서 이런 일이 발생한다.

## 빙하 질량의 역대급 상실

빙하의 질량변동에 영향을 주는 것은 주로 여름철 기온, 고체강수, 태양복사이다. 따라서 빙하의 장기 누적 질량 변화는 지구기후계를 이루는 여러 성분들이 눈과 얼음에 어떻게 영향을 끼쳤는지를 살펴볼 수 있는 귀중한 지표이다.

세계빙하감시서비스가 참고하는 빙하들의 2015-2019년 기간 데이터에 따르면 구체적으로 연 평균 978 mm 높이의 물이 빠진 정도의 질량 상실이 있었다고 지적한다. 이 정도의 상실규모는 2011-2015년 기간을 포함해서 1950년 이래 그 어느

7) 이 양은 아마존강 유출량의 약 0.6배에 해당한다.

8) 빙봉(ice shelves)은 육지에 접해 있으며 해상에 떠 있는 대규모의 얼음덩어리

5년도 이처럼 큰 규모로 상실된 적은 없었다. (Figure 11).

지구 전체의 빙하 질량 변화 추정 값은 곳곳에 산재되어 있는 지점의 관측 자료를 이용한 외삽을 통해 얻을 수 있다. 전 지구적 규모의 평가(Zemp *et al.*, 2019)에 따르면, 1985년 이후 (그 전에 약하게 음의 값을 보인 적이 있음) 빙하질량 상실이 가속되고 있다고 지적한다. 지난 10년간 빙하 질량 상실이 연평균 200 Gt 만큼 있었고, 해마다 약 0.8 mm의 해수면 상승에 기여했다.

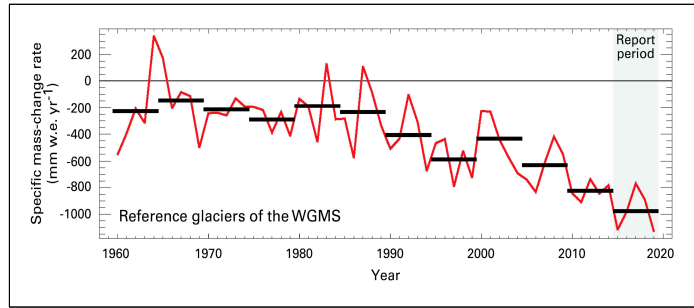


Figure 11. 세계빙하감시서비스(World Glacier Monitoring Service)가 참고하는 모든 빙하들에 대한 관측된 연평균 질량 변화를 시계열. 흑색 Bar는 5년 평균.

## 봄철 눈 덮임 영역 감소

북반구 봄철에 눈 덮임이 발견되는 곳은 고산지대, 아북극권, 북극권 등이다. 눈 덮임이 가을과 겨울에는 감소폭이 적은 반면 이것이 가장 큰 시기는 5월과 6월이다. 1967-2019년 기간 중 5월의 눈 덮임 감소폭은  $-3.4 \pm 1.2\%/10년$ 이었고, 6월의 경우  $-7.0 \pm 1.9\%/10년$ 이었다(Figure 12). 2017년과 2018년 5월-6월의 눈 덮임이 역대 평균 수준 혹은 그 보다 살짝 오르긴 했지만, 2019년 6월에 북극권의 눈 덮임 영역 평균보다 낮아지면서 하락 추세로 복귀하였다. 데이터 기록상 2011-2015년과 2015-2019년 기간의 봄철 눈 덮임은 그보다 앞선 5년보다 더 작다.

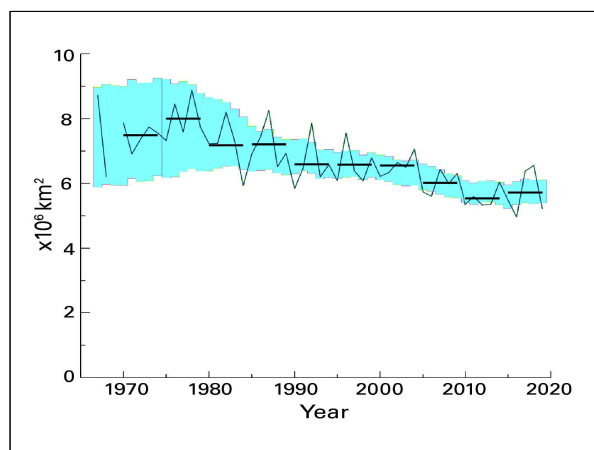


Figure 12. 1967-2019 기간 6월의 북반구 눈 덮임 영역 변화 (5년 평균 포함) 시계열. 하늘색 그늘 부분은 다음 6가지 데이터세트들의 상호 분산의 정도 즉 불확실도를 나타낸다.

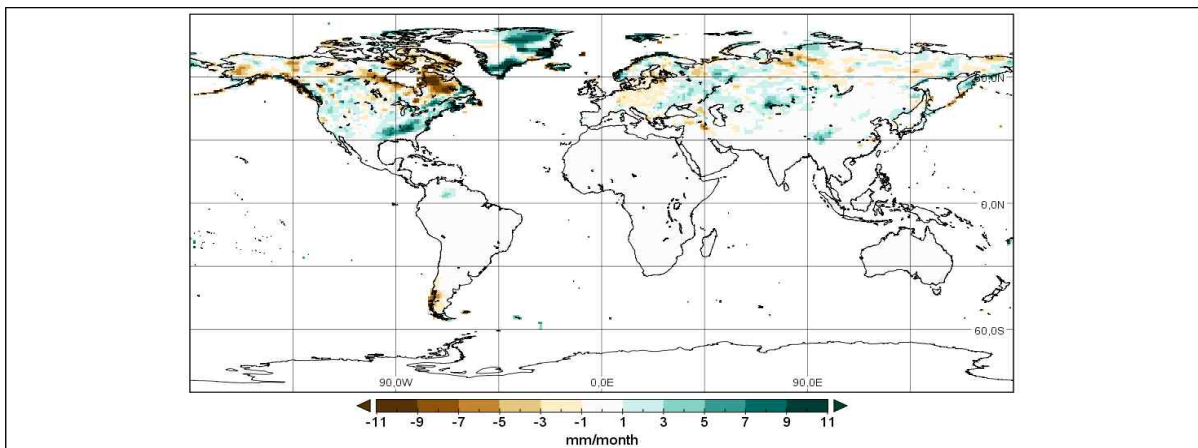
- (1) NOAA Rutgers CDR, Estilow *et al.*, 2015;
- (2) GlobSnow version 2.0, Takala *et al.*, 2011;
- (3) MERRA-2, Reichle *et al.*, 2017;
- (4) Crocus snowpack model driven by ERA Interim, Brun *et al.*, 2013;
- (5) temperature index model driven by ERA Interim, Brown *et al.*, 2003.
- (6) JASMES SCE product; Hori *et al.*, 2017.

Source: Environment and Climate Change Canada

Figure 13은 겨울철에 주로 눈의 형태로 내리는 고체강수의 월간 총량을 물로 환산한 값의 전 지구적 변화 상황을 보여준다. 동유럽과 미국 동부에서는 평균 이상

의 강설이 있었던 것으로 관측되고, 캐나다는 평균 미만의 강설이 있었던 것으로 나타났다. 중유럽과 남미 남부도 평년 미만의 강설이 있었다. 음의 편차는 강수량이 상대적으로 적었거나 눈이 차지하는 비율이 상대적으로 낮은 것이 원인일 수 있다. 후자의 경우는 따뜻한 계절에 눈 녹음으로 인해 공급되는 물의 양이 줄었다고 볼 수 있다.

여기에 표현되진 않았지만 눈이 내리는 모든 지역에서 가장 최근 5년이 그보다 앞선 5년 기간들보다 더 많은 눈이 내렸는데, 이는 자연 변동으로 설명이 가능하다.



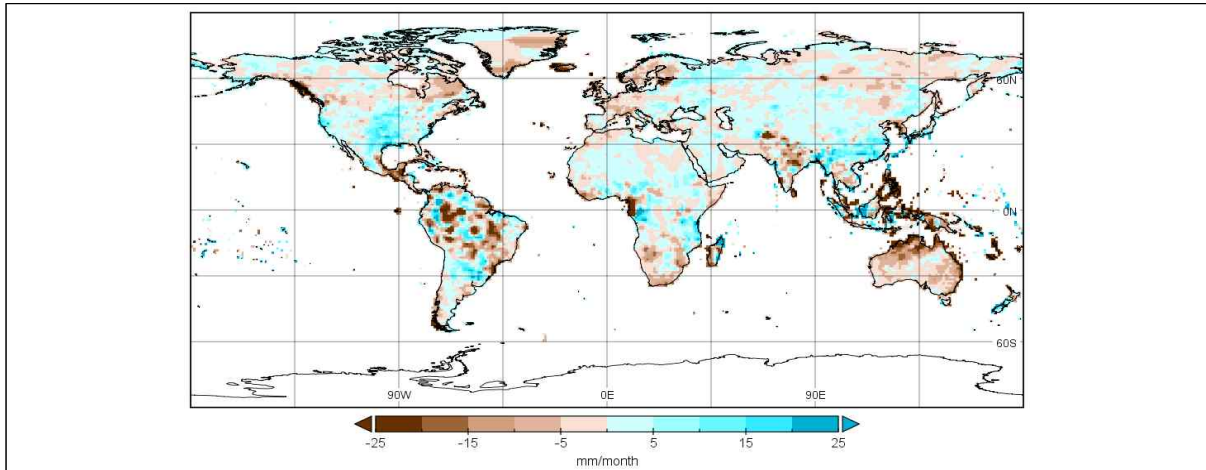
**Figure 13.** 1982~2010 간의 눈의 물 상당량 장기 평균 대비 2015.1월~2019.3월에 해당하는 값의 편차. 근거자료: 전지구강수기후학센터(GPCC)의 Monitoring Product V6 (DOI: 10.5676/DWD\_GPCC/MP\_M\_V6\_100). Source: GPCC, Deutscher Wetterdienst, Germany.

## 강수 PRECIPITATION

### 강수 증감의 지역편차 심화

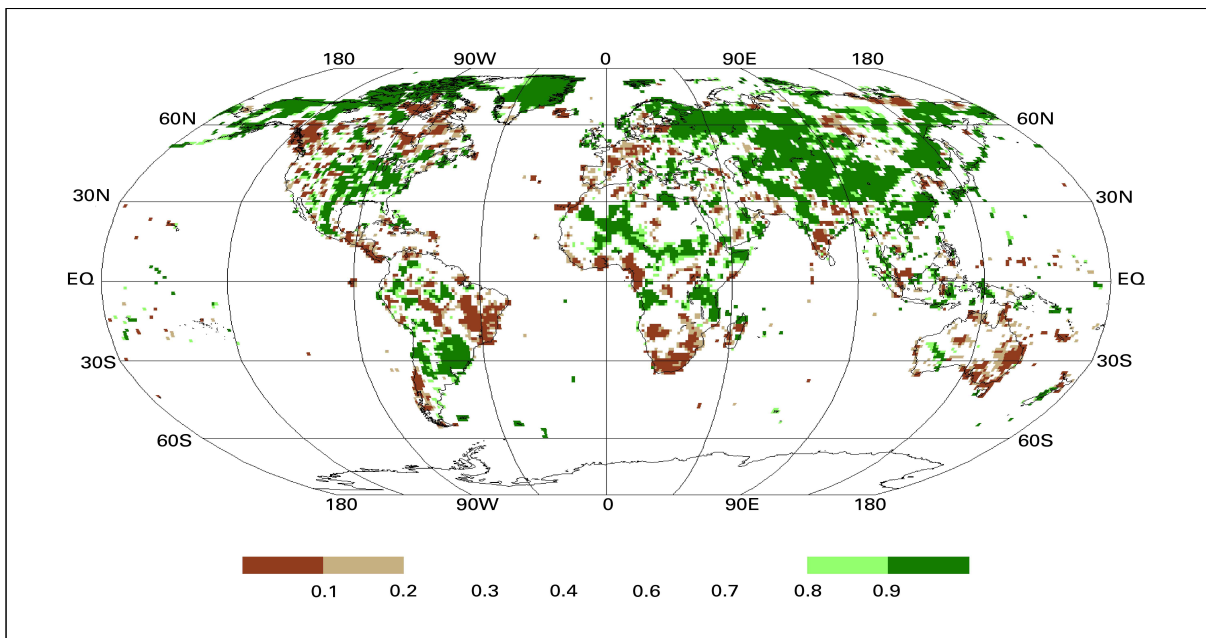
2015-2019년 기간의 총강수량을 이전의 여러 5년 단위 기간들의 그것과 비교하였다. 연간변동의 경우 어떤 곳에서는 양과 음의 편차가 서로 균형을 맞춰 나타난다.

평균 총강수량에 관하여 최근 5년 즉 2015-2019년을 앞선 5년인 2011-2015년과 비교해보면 Figure 14에서 보듯이 북미 및 남미의 각 남부, 동부 유럽, 아프리카 열대 지역, 그리고 아시아 대부분의 지역에서 후자의 기간보다 강수가 더 많았던 것으로 나타났다. 이와 대조적으로 서유럽 일대, 열대 및 남부 아프리카 일부 지역, 동 아프리카(Greater Horn of Africa), 북미 북부, 중미 및 카리브 지역, 남미의 상당 지역, 인도 몬순지역, 호주 대부분, 인도네시아-말레이시아지역(Maritime Continent) 등지에서는 강수가 더 적었다.



**Figure 14.** 2015-2019년 기간과 2011-2015년 기간 간 월평균 총강수량 차이. *Source: GPCC, Deutscher Wetterdienst, Germany.*

비교 대상 기간을 짧게 하다 보면 경우에 따라 엘니뇨-남방진동(ENSO)이나 인도양 다 이플(IOD)과 같이 서서히 변동하는 순환 패턴의 효과가 크게 나타날 수도 있다. 따라서 2015-2019년 기간의 평균 총 강수량을 긴 기간인 1951-2010년과 비교하였다. 북반구의 상당 부분이 가장 습한 사례 상위 20%에 들만큼의 강수가 있었다(Figure 15).



**Figure 15.** 2015-2019년 기간의 총 강수량을 참고기간인 1951-2019년 기간의 퍼센타일로 표현. 참고기간 동안 가장 건조한 20%는 갈색으로, 가장 습한 20%는 녹색으로 처리되었다. 더 진한 갈색 및 녹색 그늘 부분은 가장 건조한 10%와 습한 10%를 의미한다. *Source: GPCC, Deutscher Wetterdienst, Germany.*

아프리카와 아시아에 걸쳐있는 적도 일부 지역에서도 그와 비슷한 정도의 강수가 있었고 호주 서부 내륙과 남미 남부도 유사한 정도의 강수가 있었다. 이와 반대로 가장 건조한 사례 상위 20%에 들만큼 비가 적게 내린 지역은 남미 및 북미 북부, 중미 남부와 카리브지역, 남아프리카와 서아프리카, 인도 몬순지역, 유럽, 호주 북부 및 남동부 등이었다.

## 극한 현상 EXTREME EVENTS

### 치명적 폭염과 큰 경제적 타격을 주는 열대저기압

기후가 끼치는 주요 피해 중 대부분은 극한의 기상현상들과 결부되어 있다. 이들은 열대저기압 같이 짧게 끝나는 현상일 수도 있고 가뭄과 같이 수개월~수년에 걸쳐 나타나는 현상일 수도 있다. 일부 극한 기상현상은 상당 규모의 인명손실과 이재민을 낳기도 하고, 인명피해는 작지만 크나 큰 경제적 피해를 일으키기도 한다.

Figure 16은 2015-2019년 기간 동안 극한의 기상·기후 현상들이 불러일으킨 6개 WMO 지역 각각의 사망자 및 경제적 손실에 관한 통계를 보여준다.

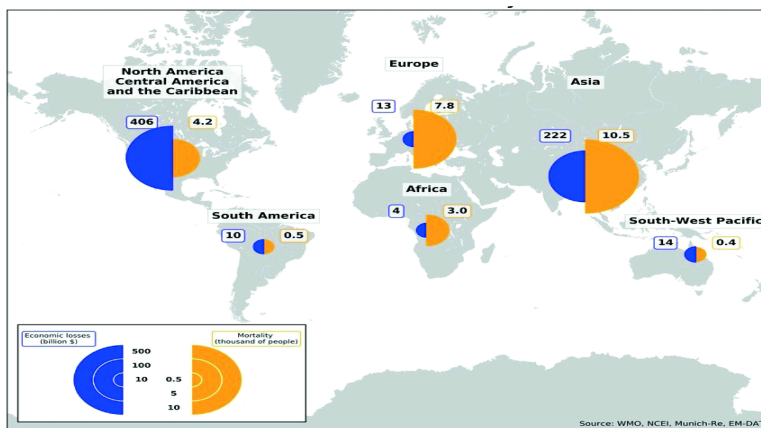


Figure 16. 2015-2019년 기간 동안의 극한 기상으로 인한 사망자와 경제적 손실. 숫자들은 사망자 및 경제적 손실을 가장 많이 준 극한기상현상 99건을 선정하여 통계 낸 결과이다. Source: the NCEI Billion-dollar Weather and Climate Disasters list, the EM-DAT International Disaster Database, and the NatCatSERVICE of Munich Re.

동 기간 중 가장 극심했던 기상학적 재해는 폭염이었고, 이와 더불어 산불마저 이 발생하였는데 그린란드, 알래스카, 시베리아 등을 비롯한 북극지방과 아마존 산림 지역에서 특히 심했다. 2019년 여름, 북극에서는 전례 없는 규모의 산불이 발생하였는데, 특히 6월 한 달 간 산불로 인해 대기 중 배출된 CO<sub>2</sub>의 양은 50 Mt에 달한다. 2010-2018년 기간을 통틀어 산불로 인한 어느 6월 배출량도 이보다 많지는 않았다.

자연재해 중 가장 큰 경제적 피해를 입히는 것은 태풍, 허리케인 같은 열대저기압이다. 2017년은 대서양에서 허리케인 피해가 최악으로 기록된 해 중 하나였는데, 허리케인 ‘하비’만 해도 1,250억 달러(한화 150조)를 넘는 경제적 손실을 입혔다. 인도양에서는 2019년 3월과 4월에 열대저기압이 모잠비크를 전례 없이 연달아 강타하여 엄청난 피해를 입혔다.

인명 및 경제적 관점에서 대형 피해를 입힌 기상재해가 Table 2에 수록되어 있는데, 재해별로 가장 큰 충격을 줬던 사례 다섯 가지가 피해규모와 지리적 대표성을 바탕으로 각각 정리되어 있다.

## 열대저기압

지구적 차원에서 봤을 때 2015년 이래로 열대저기압 활동이 위성시대(1992-2016) 평균에 근접했다. 2018년에는 특별히 활발했는데, 21세기 들어 가장 많은 수의 열대저기압이 발생했던 것이다. 북반구에서는 평균보다 많이 발생했고 그중 북동 태평양은 열대저기압 누적 에너지(Accumulated Cyclone Energy: ACE) 최대치를 기록하였다. 2016년과 2017년에는 전 지구적으로 평균에 약간 못 미쳤는데 이 2016/17 시즌의 남반구는 위성시대 들어 열대저기압 활동이 가장 약했던 여러 시즌 중 하나에 든다. 다만 그 두 해 동안에도 열대저기압 활동이 활발한 지역들도 있었다.

## 홍수

열대저기압은 전세계적으로 가장 파괴적이었던 대분의 홍수를 일으킨 주범이었지만, 2015년 이후에는 이와 다른 성격의 대형 홍수들이 다수 발생하였다. 몬순계절 동안 열대지방에서 지나치게 많은 강수로 인해 비교적 오래 지속된 홍수도 있었고, 돌발홍수의 예처럼 단발성 홍수도 많았다. 집중 호우는 지역에 따라 대형 산사태의 원인이 되기도 했다.

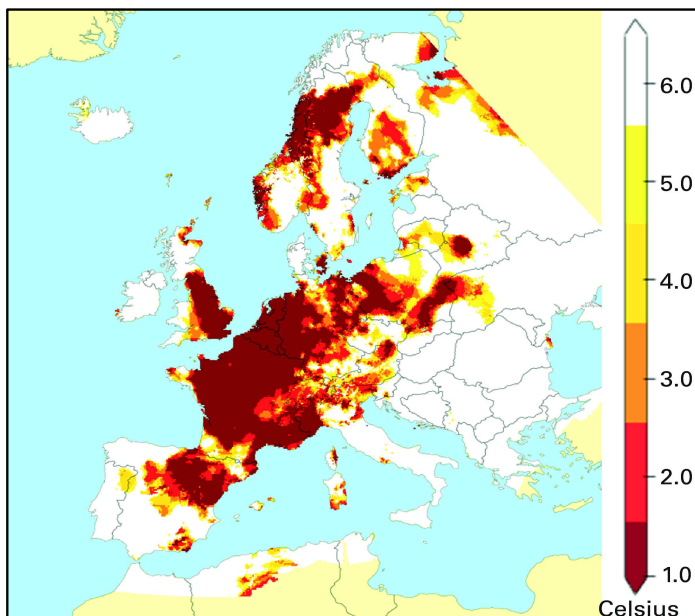


Figure 17. 유럽대륙에서 1950년 이래로 2019년 6월과 7월에 가장 높은 온도기록을 보였는데, 색깔이 진해질수록 기록 경신의 정도를 나타 낸다. Data source: E-OBS. Source: Copernicus Climate Change Service (C3S)/Royal Netherlands Meteorological Institute.

## 폭염

2015-2019년 기간 동안 세계 곳곳에서 수없이 많은 이상고온 현상과 폭염 사례가 발생했다. 폭염은 인간의 건강에 특별히 큰 영향을 미치는 것으로 이 기간 동안 날씨 또는 기후가 원인이 된 인명 피해 규모 중 폭염으로 인한 것이 가장 심각했다.

## 토네이도 및 국지성 폭풍

지난 5년간 기상재해로 인해 전지구적으로 300명이 넘는 인명피해와 미화로 76억 달러 이상의 경제적 손실을 입었는데, 주로 토네이도, 온대저기압, 우박을 동반한 폭풍이 원인이었다. 미국의 경우, 규칙적으로 업데이트되는 자료에 따르면, 지난 5년에 걸쳐 토네이도 활동은 전반적으로 평균 수준이었다. 2017년에는 평균을 웃돌았고, 2016년과 2018년에는 토네이도 발생횟수가 평균 미만이었다. 2019년 5월은 2011년 4월 이후 월별 토네이도 발생횟수가 두 번째로 많은 달이었고, 2019년 한해는 2011년 이후 토네이도 활동이 가장 활발한 해였다.

## 가뭄

가뭄은 2015년 이래 지구촌 곳곳에 두루 영향을 크게 미쳤는데, 특히 인간의 일상과 경제에 입힌 피해가 매우 컸다. 대륙별로 심각한 수준의 가뭄이 있었고 (Figure 18은 호주대륙의 강수 부족 현황을 보여준다) 최악의 피해는 주로 아프리카에서 발생했다. 수백만이 식량 부족을 겪어 원조를 절실히 필요로 하는 상황에 처했고 물을 찾아 거주지를 옮겨 다녀야 했다.

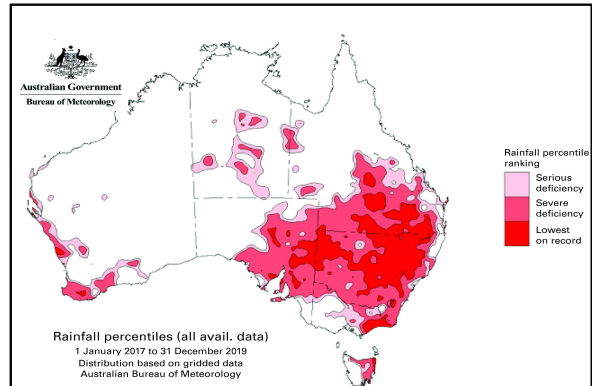


Figure 18. 호주의 2017-2019년 기간 동안 보인 강수 부족 현황. Source: Australian Bureau of Meteorology

## 자연발화(산불)

산불은 엄밀히 말해서 그 자체가 기상현상은 아니지만 날씨와 기후의 영향을 강하게 받는다. 가뭄은 산림 지역의 산불 발생 위험성을 상당히 높인다(초지의 경우는 가뭄으로 인한 연료 부족으로 화재의 위험성이 줄어들 수는 있다). 특히 그 강력한 영향력은 화재의 불씨가 꺼지지 않고 길어지도록 부채질 한다. 산불로 인해 입은 경제적 피해 기록 중 최악 3건이 지난 4년 동안 나타났다. 2019년 북극에서는 유래 없는 자연화재 그리고 아마존 밀림에서는 광범위한 영역을 집어삼킨 대형 산불이 발생했다. 이 모두는 환경에도 큰 재앙이었다. 그해 말경, 호주 동부에서는 그 범위와 기간이 모두 예외적인 수준의 화재가 발생하여 그 지역을 초토화시켰다.

## 한파

지난 5년의 평균기온은 상대적으로 더 높았지만, 극심한 한파와 폭설도 만만치 않게 있었다. 이들 현상 대부분은 북미에서 발생했다.

**Table 2.** 재해별로 2015-2019년 기간 동안의 피해규모 기록 상위 5건

### <열대저기압>

시기	장소	재해명	내역
2016.10.	북대서양(아이티, 미국)	허리케인 ‘매튜’	경제손실 추정치: 미화 100억 달러, 인명손실 : 아이티 546명, 미국 49명 사망
2017.08.	북대서양(미국 텍사스)	허리케인 ‘하비’	경제손실 추정치: 미화 1,250억 달러, 인명손실 : 89명 사망
2017.08-09.	북대서양(카리브해, 미국)	허리케인 ‘어마’	경제손실 추정치: 미화 570억 달러, 인명손실 : 134명 사망
2017.09.	북대서양(도미니카, 푸에르토리코)	허리케인 ‘마리아’	경제손실 추정치: 미화 900억 달러, 인명손실 : 폭풍 직접 피해인원 최소 140명 사망. 푸에르토리코에서는 간접 피해 추정인원 2천여 명
2019.03.	남서인도양(모잠비크, 짐바브웨)	사이클론 ‘이다이’, ‘케네스’	인명손실 : 사이클론 ‘이다이’로 인해 최소 1,236명 사망(100년 동안 남반구 최대 인원). ‘케네스’는 ‘이다이’보다 세력이 더 강력했지만 인구밀도가 적은 지역으로 상륙해 인명피해는 적었음.

### <홍수>

시기	장소	재해명	내역
2016.06-07.	중국	홍수	경제손실 추정치: 미화 140억 달러, 인명손실 : 최소 310명 사망
2017.08.	인도(북동부), 방글라데시, 네팔	홍수	인명손실 : 3국 합계 최소 1,200명 사망 대체로 4천만 명이 피해를 입었는데 수인성 질병의 확산이 피해의 주요인
2017.08.	시에라리온	산사태	피해규모: 대규모 파괴 인명손실 : 1,102명 사망
2018.06-07.	일본	홍수	피해규모: 6,767 가구 파괴 인명손실 : 최소 245명 사망
2018.08.	인도(케랄라)	홍수	경제손실 추정치: 미화 43억 달러 피해규모: 140만 명의 이재민 발생. 540만 명이 간접 피해 받음. 인명손실: 최소 223명 사망

<폭풍과 토네이도>

시기	장소	재해명	내역
2016.04.	미국(텍사스)	우박폭풍	경제손실 추정치: 미화 35억 달러, (미 역사상 최고 피해기록)
2016.06.	중국	토네이도	인명손실 : 최소 99명 사망 *중국 역사상 최악의 토네이도 중 하나
2018.05.	인도(북부)	폭풍우, 먼지	인명손실 : 최소 112명 사망(대부분 우타르프라데시에서 강풍과 최악의 대기 질로 인해 사망자 다수 발생)
2018.06.	미국(달라스, 덴버)	우박폭풍	경제손실 추정치: 델러스-포트워스 13억 달러, 덴버 22억 달러
2018.10.	지중해(특히, 이탈리아, 슬로베니아, 크로아티아)	온대성 사이클론	일부 국가에서 특급 강풍과 홍수 피해가 있었고, 이탈리아에서는 30명의 인명피해.

<폭염>

시기	장소	재해명	내역
2015.05-06.	인도, 파키스탄	폭염	인명손실 : 인도 2,248명, 파키스탄 1,229명 사망
2015/16 여름	남아프리카공화국	폭염	전국에 무수히 많은 폭염사례 발생. 프리토리아는 3회에 걸쳐 폭염기록 경신
2015년과 2018년 여름	유럽	폭염	프랑스에서 2015년과 2018년 폭염으로 인해 각각 3,275명과 1,500명의 추가 사망자 발생
2018/19 여름	호주	폭염	호주 관측 이래 최고 온도 기록. 2016/2017 및 2017/2018 여름도 심각 수준의 폭염 발생. 뉴사우스웨일스 주가 대표적임. 2019년 12월은 호주에서 가장 더운 기록을 세운 날이 들어 있음.
2019.06-07.	유럽	폭염	이 기간 중 여러 나라에 걸쳐 길고도 광범위한 기록 경신 수준의 폭염이 발생. 프랑스 남부에서는 국가 최고기록인 46.0℃가 관측되었고 독일, 벨기에, 네덜란드, 룩셈부르크, 영국에서도 국가 기록이 세워졌다. 열돔이 북쪽으로 스칸디나비아를 거쳐 그린란드까지 확대되면서, 이곳의 얼음 녹는 속도가 이미 평균 수준을 초과한 상태인데도 이를 더욱 가속시킴. 프랑스, 벨기에, 네덜란드 합계 2,400여명의 추가 사망자 발생.

<가뭄>

시기	장소	재해명	내역
2015/16	남미(북서부), 중미, 카리브	가뭄	2015/2016 엘니뇨로 인한 가뭄은 남미 북부 일대, 중미, 카리브를 휩쓸었다. 아마존 유역의 평균 강수량은 역대 최저 기록
'15-'18	아프리카	가뭄	남아공 케이프주에 심각한 물 부족 현상 발생. 이로 인해 케이프타운 지역은 2018년 한 해 동안 물고갈 위험에 처함. 이에 앞서 '15년과 '16년에 남부 아프리카 일대가 극심한 가뭄을 겪음. 이는 '14-'15와 '15-'16 우기에 연속으로 강수량이 적었기 때문. '16-'17 기간 동아프리카 지역 중 소말리아는 가뭄이 가장 극심할 때 670만 명이 식량부족을 경험했다가 '17년 말에 사태가 완화되면서 540만 명으로 감소
'17-'19	호주 (동부 일원)	가뭄	심각한 농사 피해가 있었고, 달링 강 흐름이 멈추면서 물고기 떼죽음 현상 발생. 뉴사우스웨일스주와 머레이달링 강 유역에 내린 3년 강수량은 이전 최저기록보다 약 10% 적었음.
'17.10.-'18.03.	북아르헨티나, 우르과이	가뭄	하계 농작물 수확 손실이 극심했음. 경제적 피해 규모는 미화 59억 달러.
2018	유럽(북유럽 및 중앙유럽)	가뭄	많은 국가들의 농사 피해 규모가 매우 컸음. 라인강 수위가 낮아져 수상교통을 일부 마비시켰고 이로 인해 심각한 경제적 손실 발생.

<산불>

시기	장소	재해명	내역
2015	인도네시아	산불	가뭄으로 인해 2015년 하반기 인도네시아에 광범위한 산불을 야기함. 260만 헥타르의 산지가 불에 탔고 34명의 사망자 발생
2016.05.	캐나다(앨버타)	산불	앨버타주의 포트맥머레이에서 보험으로 감당한 손실액이 미화 30억 달러를 초과. 간접피해액은 수십억 달러 추가해야 할 정도.
2018.07.	그리스	산불	산불이 시속 124km 강풍으로 인해 빠르게 확산, 아테네 일대에 큰 피해 중. 최소 99명의 사망자. 이 기록은 2009년 이래 세계 최대.
2018.11.	미국(캘리포니아)	산불	빠르게 이동하는 산불로 인해 파라다이스 타운이 크게 파괴됨. 85명이 사망자와 미화 165억 달러의 경제적 손실 발생. 지금까지 세계 최대의 손실액
2019	호주 동부지역	산불	2019년 말엽에 호주 동부지역에서 유래 없는 극심하고 오래 지속된 산불 발생. 화재는 최초 9월 초에 발생했으며 2020년 초까지 이어졌음. 퀸스랜드 주 남부에서 빅토리아 주에 이르는 영역 1천만 헥타르 이상의 산지면적이 화마에 휩쓸림. 남 호주에서도 화재 발생함. 최소 33명의 사망자가 있었으며, 예비 평가결과 미화 수십억 달러의 경제적 손실 발생.

## <한파>

시기	장소	재해명	내역
2015.02.	미국 동부와 캐나다	한파	미국 북동부와 캐나다 동부에서 한파 지속. 미국 북동부가 경험한 한파는 역대 두 번째.
2016.01.	동아시아	한파	1월 말, 동중국에서 시작한 비정상적 저온 현상은 남중국까지 확장됐고 심지어 태국까지 미침. 광저우와 난닝에서는 각각 1967년과 1983년 이래 최초로 눈이 내림.
2017.07.	아르헨티나	한파	아르헨티나 바릴로체에서 7월16일 기온이 -25.4℃까지 하락. 이 값은 이전 최저기록보다 무려 4.3℃ 낮음.
2018.02.-03.	유럽	한파/폭설	늦겨울과 초봄에 이르기까지 유럽 일대에 이상 한파. 아일랜드 동부의 경우는 50여 년 만에 최악의 폭설. 곳에 따라 적설량 50 cm 초과
2019.01.-02.	미국 북중부, 캐나다 서부내륙	한파	미국 북중부와 캐나다 서부내륙에서 1월말부터 2월에 걸쳐 혹한 지속

## 극한 현상의 원인 규명 ATTRIBUTION OF EXTREME EVENTS

### 폭염 발생 가능성이 인위적 기후변화로 인해 현격히 상승

극한기상현상 발생 가능성에 인위적 기후변화가 영향을 줬다면 과연 어느 정도인지를 규명하는 일이 이제 하나의 활발한 연구 분야가 되었고, 지난 5년간 이와 관련된 수백편의 논문이 출판되었다. 논문들은 극한 기상현상 발생 후 1-2년 뒤에야 수없이 많이 발표되지만, 극한현상 발생 직후 기존의 방법을 이용한 현상 특성 분석에 대해서도 관심이 높아지고 있다.

최근 미국기상학회지 연례 보충판에 실린 논문에 따르면 2015-2018년 기간 동안 인위적 영향 여부를 평가하기 위해 94건의 기상이변을 선정했는데, 이 중 76건이 직·간접적으로 인위적 원인에 의해 발생했다고 밝혀졌다. (예를 들면, 대기순환 패턴에 대한 인위적 영향의 결과로 극한 기상현상 발생).

2015년 이래로 폭염에 관한 연구논문 마다 밝힌 사실은 인위적 기후변화 영향으로 폭염 가능성이 급격히 늘어났다는 것이다. 예를 들면, 한 논문에서는 2018년 7월 일본을 휩쓸었던 폭염<sup>9)</sup>은 인간 영향이 아니면 불가능했을 것임을 증명했다. 일반적으로 지표면이 가진 특성에 대해 가장 확실한 결과를 얻으려면 넓은 영역에 대해 상당히 오랜 기간에 걸쳐 분석하면 된다. 기간도 수일에 불과하고 대상지도 몇 개 안 된다면 불확실도는 더욱 커진다.

9) Imada *et al.*, 2019

인간의 영향이 극한의 강수를 일으킬 위험성을 높인다고 밝힌 연구 결과가 갈수록 늘어나고 있다. 인간의 영향은 ENSO와 같은 주요 기후현상과 결합되어 나타나기도 한다. 일례로 중국 동부지역에 2016년 6-7월 간 극단적인 폭우가 내렸는데, 이에 관한 두 번의 연구<sup>10)</sup>에서 인간의 영향력이 그 폭우 위험성을 급격히 증가시켰다고 주장했다. 다만 3번째 연구<sup>11)</sup>에서는 징후가 그리 명확치 않다고 밝힌 것이다.

전부가 다 그런 것은 아니지만, 우리가 겪는 가뭄 중 일부는 직·간접적으로 인간의 영향에 의해 발생했다고 할 수 있는데, 일례로 2016/17년 동아프리카 가뭄<sup>12)</sup> 같은 경우는 서인도양의 따뜻한 해수면 영향을 강하게 받아 발생했는데, 해수면 온도 상승을 일으킨 장본인은 인간이었다.

소규모로 발생하는 뇌우와 토네이도와 같은 위험기상현상에 관한 연구가 여럿 있었지만 인간의 흔적을 발견한 적은 거의 없었고, 제한적으로나마 화재가 발생하기 쉬운 날씨에 미치는 인간의 영향에 관한 연구는 있었다. 한 예가 2017년 2월에 호주 뉴사우스웨일스에서 발생했던 화재에 관한 연구였는데, 이마저도 완전한 결론을 도출하지는 못했다. 다만 예외로 든 확실한 결론 하나는 바로 기상조건이 2019년 말에 시작해 2020년 초까지 이어진 호주 동부 산불을 일으켰다는 것이고, 기상조건으로 인한 산불 발생 확률이 1900년 이래 최소 30% 높아졌는데, 이는 인위적 기후변화<sup>13)</sup>의 결과라는 것이다. 열대저기압의 세기와 빈도에서는 인위적 영향의 흔적이 그리 뚜렷하게 발견되지 않지만, 그에 동반되는 강수량 증가에는 인간이 영향을 미쳤다는 게 밝혀졌다. 한 가지 눈길을 끄는 연구가 있었는데, 2017년 휴스턴 일대를 강타한 허리케인 하비를 대상으로 이뤄졌고, 여기서 인간의 영향이 강수량을 15% 가량(8%~19%)<sup>14)</sup> 증가시켰다고 결론지었다.

## 기후 관련 주요 재해 사례

### 가뭄의 영향으로 최근 들어 식량불안정 및 전지구적 기근 현상 심화

식량농업기구(FAO)의 연례보고서 중 ‘세계 식량 안보 및 영양 실태’라는 장에서, 최근 지구촌 기근 발생이 늘어난 것은 기후변동과 기상이변이 근본 원인이며 심각한 식량 위기를 야기하는 원인 중 하나로 꼽고 있다(Figure 20). 기후변동과 이변은 변해가는 속성을 갖는데 이것이 식량안보와 관련된 모든 방면(식량 보유·확

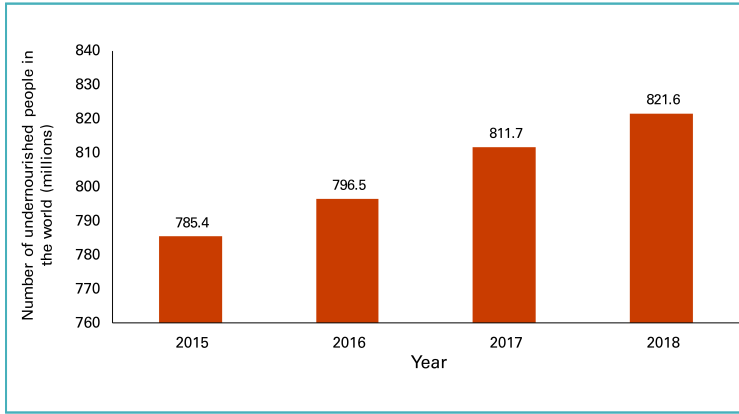
10) Sun and Mial, 2018; Yuan *et al.*, 2018.

11) Zhou *et al.*, 2018.

12) Funk *et al.*, 2019.

13) Van Oldenborgh *et al.*, 2020.

14) Van Oldenborgh *et al.*, 2017.

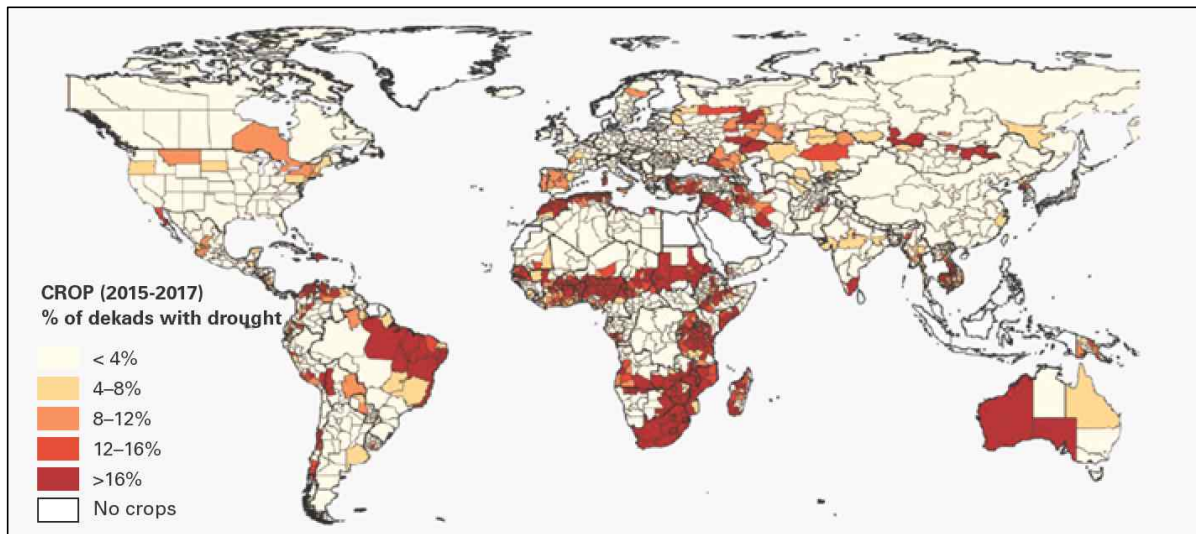


**Figure 20.** 전세계 영양결핍 인구 수(2015-2018). *Source: FAO, International Fund for Agricultural Development (IFAD), United Nations Children's Fund (UNICEF), World Food Programme (WFP) and World Health Organization (WHO), 2019.*

보·이용·안정성)에 악영향을 주고 있다.

2015-2016년 동안 발생한 엘니뇨는 가뭄을 일으켜 농사를 망치게 했는데, 2015-2017년의 가뭄 발생 횟수가 이를 명확히 뒷받침한다. Figure 21을 보면 아프리카 대륙 일부, 중미 일대, 브라질, 카리브 등지와 그밖에 호주와 근동지역에서 2015-2017년 간 가뭄 발생

횟수가 14년간의 평균에 비해 크게 늘었다.



**Figure 21.** 2015-2017년 기간 작물재배지역 25% 이상을 대상으로 산정한 정규식생지수(NDVI: 관측 대상의 녹색식생 존재 여부를 평가하는 지수)를 기준으로 하여, 농업생산의 이상 지역(ASAP) 식별 시스템이 농업생산에 이상 조짐이 있다고 평가한 기간 중 지역별로 활성식생을 가진 기간이 차지하는 비율. *Source: FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO, 2018.*

식량 불안정과 영양결핍으로 인해 겪게 되는 위험의 정도가 오늘날 더 커졌는데, 이는 (특히 가난한 사람들의) 생계와 생계 자산이 변해가는 기후변동 패턴과 기상 이변에 더 많이 노출되고 취약하기 때문이다. 아프리카의 뿔(Horn of Africa) 지역의 경우 2016-2017년 우기에 강우 부족으로 인해 농사에 실패했으며, 이로 인해 동아프리카 지역에서 식량부족을 겪는 인구가 급격히 늘어났다. 소말리아에서는 농지의 반 이상이 가뭄을 겪었으며, 죽어가는 가축이 늘고 불가피한 출혈 투매로 인해 가축 수가 40~60% 만큼 줄었다. 말라위의 경우, 2015년 홍수로 인해 큰 피해를 입었는데, 주로 작물수확, 가축, 어류양식, 임업자산, 물류 등에서 큰 손실이

있었다. UN 난민구호고등판무관에 따르면, 2018년도 1월부터 12월에 걸쳐 말라위 내에서 약 883,000명의 난민이 발생했는데, 이것이 당시 국내 분쟁의 원인 중 36%를 차지하며, 그 뒤를 홍수(32%)와 가뭄(29%)이 따른다. 2018년 9월 현재, 총 90만에 이르는 로힝야족 난민들 중 약 20만이 이들 자연재해에 노출되어 있다.

## 기후 관련 질환 또는 사망 위험도가 전반적으로 상승

WHO 데이터 및 분석에 따르면, 더위로 인해 병에 걸리거나 사망에 이를 위험이 1980년 이래 꾸준히 커지고 있고, 세계 인구의 30% 가량이 연중 적어도 20일 동안 온도가 사망에 이르게 할 만한 기후 조건에서 살고 있다고 한다.

그밖에 기후와 관련된 폭우와 그에 동반되는 홍수와 같은 현상들은 다양한 종류의 전염병이 발생하기 좋은 조건을 제공한다. 콜레라가 풍토병인 나라들의 어림잡아 13억 인구가 위험에 노출되어 있고, 아프리카만 해도 약 4천만 인구가 콜레라 다발 지역에 살고 있다. WHO가 확인한 바에 따르면, 아프리카 대륙 동부

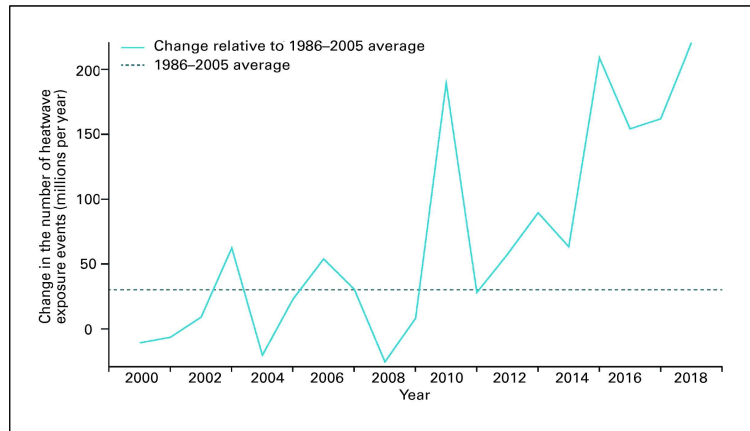


Figure 22. 1986-2005년 기간 평균 대비 2000-2018년 기간 동안 매년 폭염에 노출되는 인구 수 변화 경향. Source: Watts et al., 2019.

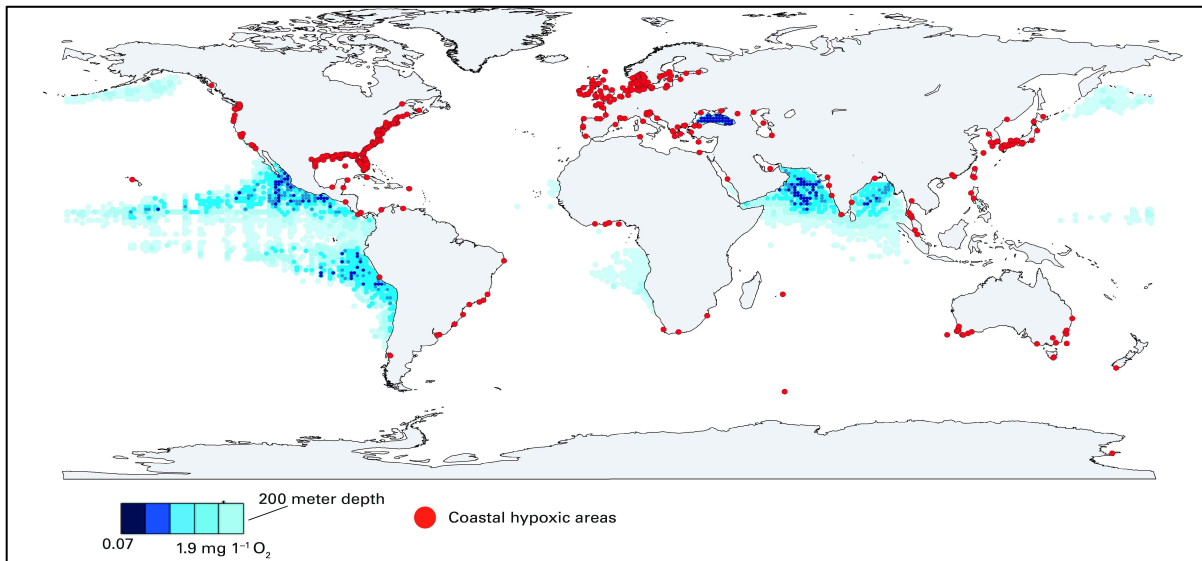
와 중앙부 그리고 나중에 남부에서 콜레라가 크게 창궐했는데, 가능한 원인으로 엘니뇨가 유발한 기상조건을 꼽으며 이로 인해 강수와 홍수가 크게 발생해 콜레라 창궐 여건을 강화시켰다는 것이다. 2017년 8월 방글라데시 홍수에 관한 보고서에서 알 수 있듯이 홍수가 발생하면 종종 수인성 질병 또는 열악한 위생상태와 연관된 질병이 뒤따른다.

## 해양 생물 및 생태계가 해수면 온도 상승으로 위협받아

UNESCO 정부간해양학위원회(IOC)에 따르면, 해수면 온도가 현격하게 더 높다는 (일부 해역은 평균 대비 +3°C) 것은 그 해역의 해양환경이 물리·화학·생물학적으로 크게 변했다는 것을 의미하며, 이는 먹이사슬과 해양생태계에 큰 영향을 주고

있고 그로 인해 사회경제적으로 중요한 의미를 갖는 어업에도 영향을 끼친다. 영향을 가장 크게 받은 해역 및 국가들로는 호주 동부 연안 쪽의 그레이트배리어리프(대보초), 태평양도서국들(피지, 키리바시 등), 일본 오키나와 일대 등을 들 수 있다. IOC는 이들 해역의 산호초 과사율이 50~70%에 달한다고 밝혔다.

IOC의 보고에 따르면, 대해와 연해에서 산소량이 줄고 있고, 강어귀와 만에서도 마찬가지다. 지난 세기 중반부터 전지구 해양 산소는 대략 1~2% 감소했다. 역사적으로 산소농도가 적었던 해역들이 점차 확대되고 있고 저산소 해역들이 새롭게 등장하고 있다. 지구온난화는 이러한 산소 감소 경향을 직접 가중 시킬 것으로 예상된다. 이는 산소의 물에 녹는 성질이 따뜻한 물일수록 감소하며, 산소가 바다 내부에 유입되는 기작이 되는 해양대류가 간접적이긴 하지만 지구온난화의 영향으로 줄어들기 때문이다.



**Figure 23.** 산소 최소 구역(청색)과 연안 저산소 구역(적색)의 전세계 현황. 여기 표시된 연안 저산소 지점들은 산소 농도가 2 mg/L 미만으로 기록된 곳이며 여기에서는 인위적 부영양화가 주요 원인이다.  
Sources: data from Diaz and Rosenberg (2008), figure adapted after Breitburg et al., 2018.

## 개도국 GDP는 기온 상승에 반비례

국제통화기금(IMF)은 연평균기온이 25°C인 중/저 소득 개도국의 경우 기온 1°C 상승시마다 경제성장률이 1.2% 하락한다는 사실을 밝혔다. 기온상승으로 인해 경제적 타격을 크게 받는 국가들은 2016년 현재 세계 GDP의 약 20%에 불과했다. 다만 이들은 현재 지구 전체 인구의 60%에 달하며 금세기 말경에는 75%에 달할 것으로 전망된다.

## 참고문헌 REFERENCES

- BP, 2019: BP Energy Outlook, 2019 Edition, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>.
- Breitburg, B., L.A. Levin, A. Oschlies, M. Grégoire, F.P. Chavez, D.J. Conley, V. Garçon, D. Gilbert, D. Gutiérrez, K. Isensee, G.S. Jacinto, K.E. Limburg, I. Montes, S.W.A. Naqvi, G.C. Pitcher, N.N. Rabalais, M.R. Roman, K.A. Rose, B.A. Seibel, M. Telszewski, M. Yasuhara and J. Zhang, 2018: Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. IOC Global Ocean Oxygen Network. *Science*, 359(6371), <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>.
- Brown, R.D., B. Brasnett and D. Robinson, 2003: Gridded North American monthly snow depth and snow water equivalent for GCM evaluation. *Atmosphere-Ocean*, 41(1):1–14, <https://doi.org/10.3137/ao.410101>.
- Brun, E., V. Vionnet, A. Boone, B. Decharme, Y. Peings, R. Valette, F. Karbou and S. Morin, 2013: Simulation of Northern Eurasian local snow depth, mass, and density using a detailed snowpack model and meteorological reanalyses. *Journal of Hydrometeorology*, 14: 203–219, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-012.1>.
- Cheng, L., et al., 2019: 2018 Continues record global ocean warming, *Advances in Atmospheric Sciences*, 36:249–252, <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8276-x>.
- Estilow, T.W., A.H. Young and D.A. Robinson, 2015: A long-term northern hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring. *Earth System Science Data*, 7:137–142, <https://doi.org/10.5194/essd-7-137-2015>.
- Fetterer, F., K. Knowles, W.N. Meier, M. Savoie and A.K. Windnagel, 2017: Sea Ice Index, Version 3. National Snow and Ice Data Center, <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>.
- Funk, C., D. Pedreros, S. Nicholson, A. Hoell, D. Korecha, G. Galu, G. Artan, Z. Segele, A. Tadege, Z. Atheru, F. Teshome, K. Hailermariam, L. Harrison and C. Pomposi, 2019: Examining the potential contributions of extreme "western V" sea surface temperatures to the 2017 March–June east African drought. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100:S55–S60, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0108.1>.
- Hope, P., M.T. Black, E. Lim, A. Dowdy, G. Wang, R.J. Fawcett and A.S. Pepler, 2019: On determining the impact of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> on the record fire weather in eastern Australia in February 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100:S111–116, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0135.1>.
- Hori, M., K. Sugiura, K. Kobayashi, T. Aoki, T. Tanikawa, K. Kuchiki, M. Niwano, H. Enomoto, 2017: A 38-year (1978–2015) northern hemisphere daily snow cover extent product derived using consistent objective criteria from satellite-borne optical sensors. *Remote Sensing of Environment*, 191, 402–418, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.023>.
- Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama and M. Arai, 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *Scientific*

*Online Letters on the Atmosphere*, 15A:8–12, <https://doi.org/10.2151/sola.15A-002>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

Oldenborgh, G.J. van, K. van der Wiel, A. Sebastian, R. Singh, J. Arrighi, F. Otto, K. Haustein, S. Li, G. Vecchi and H. Cullen, 2017: Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017. *Environmental Research Letters*, 12(12):124009, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9ef2>.

Oldenborgh, G.J. van, F. Krikken, S. Lewis, N. Leach, F. Lehner, K. Saunders, M. van Weele, K. Haustein, S. Li, D. Wallom, S. Sparrow, J. Arrighi, R. Singh, M. van Aalst, S. Philip, R. Vautard, F. Otto, 2020: Attribution of the Australian bushfire risk to anthropogenic climate change, [https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/WWA-attribution\\_bushfires-March2020.pdf](https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/WWA-attribution_bushfires-March2020.pdf), submitted to *Natural Hazards and Earth System Sciences*.

Reichle, R.H., C.S. Draper, Q. Liu, M. Girotto, S.P. Mahanama, R.D. Koster and G.J. De Lannoy, 2017: Assessment of MERRA-2 land surface hydrology estimates. *Journal of Climate*, 30:2937–2960, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0720.1>.

Sun, Q. and C. Miao, 2018: Extreme rainfall (R20mm, RX5Day) in Yangtze-Huai, China, in June–July 2016: the role of ENSO and anthropogenic climate change. *Bulletin of the*

*American Meteorological Society*, 99:S102–S106, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0091.1>.

Takala, M., K. Luojus, J. Pulliainen, C. Derksen, J. Lemmetyinen, J.-P. Kärnä, J. Koskinen and B. Bojkov, 2011: Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(12):3517–3529, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>.

Watts, N., M. Amann, N. Arnell, S. Ayeb Karlsson, K. Belesova, M. Boykoff, et al., 2019: The 2019 report of The Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate. *The Lancet*, 394(10211): 1836–1878, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)32596-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)32596-6).

Yuan, X., S. Wang and Z. Hu, 2018: Do climate change and El Niño increase likelihood of Yangtze River rainfall? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99:S113–S117, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0089.1>.

Zemp, M., M. Huss, E. Thibert, N. Eckert, R. McNabb, J. Huber, M. Barandun, H. Machguth, S. U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, L. Thomson, F. Paul, F. Maussion, S. Kutuzov and J.G. Cogley, 2019: Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382–386, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>.

Zhou, C., K. Wang and D. Qi, 2018: Attribution of the July 2016 extreme precipitation event over China's Wuhan. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99:S107–S112, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0090.1>.



**This work was originally published by the World Meteorological Organization, Geneva, and is translated by permission.  
Copyright © 2020. World Meteorological Organization.  
Translation by Sewon Kim, Expert Adviser, APCC, copyright © 2020  
For copyright reasons this edition is not available outside the Republic of Korea.**

**The presentation of material therein does not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the WMO concerning the legal status of any country, area or territory or of its authorities, or concerning the delimitation of its borders.**

**The responsibility for opinions expressed in signed articles, publications, studies and other contributions rests solely with their authors, and their publication does not constitute an endorsement by the WMO of the opinion expressed in them.**

**Reference to names of firms and commercial products and process does not imply their endorsement by the WMO, and any failure to mention a firm, commercial product or process is not a sign of disapproval.**

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

