

2018년 1월 12일 오후 4시 | APEC Climate Center Seminar

이상치 기반의 극한 기상/기후의 상대성 평가 및 전례 없는 기후시기 전망

정 일 웅

강릉원주대학교 대기환경과학과

Knowledge for Tomorrow's
Extremes



I.

Ice Breaking



북쪽은 -50°C 남쪽은 47.3°C... 지구촌 '혹한혹서' 얇이

서울신문 | 2018-01-08

북반구는 혹한으로, 남반구는 혹서로 몸살을 앓고 있다. 미국 동부는 체감기온이 영하 70도 가까이 떨어지는가 하면 폭설과 강풍이 겹쳐 피해가 속출하고 있다. 서유럽에선 겨울 폭풍으로 곳곳이 썩대밭이 됐다. 여름인 호주에서는 기록적인 폭염으로 전기가 끊기고 비상사태가 선언됐다. 역시 지구온난화가 원인으로 지목된다.

7일(현지시간) CNN 등에 따르면 캐나다와 미국 동부 지역에 폭설과 강풍을 동반한 '폭탄 사이클론'(bomb cyclone)이 강타해 피해가 눈덩이처럼 커지고 있다. 지난 6일 뉴햄프셔주 마운트 워싱턴의 기온은 영하 38도, 체감기온은 영하 69.4도까지 떨어졌다. (중략)

반면 호주는 최악의 폭염에 시달리고 있다. 이날 시드니 서부 펜리스의 기온은 1939년 이후 가장 높은 47.3도까지 치솟았다. 이로 인해 올해 첫 테니스 메이저대회인 호주 오픈이 중단됐으며 수천 가구에 전기가 끊겼다. 뉴사우스웨일스주에는 비상사태가 선언됐다.



I . Ice Breaking



▲ 미국 동부 지역에 체감온도 영하 70도의 기록적인 한파가 몰아닥친 7일(현지시간) 미국 매사추세츠주 보스턴에서 현장을 정리하는 한 소방관의 모자가 얼음으로 뒤덮여 있다.



▲ 7일(현지시간) 지구 남반구에 있는 호주 시드니는 폭염에 시달렸다. 사진은 시드니 타마라마 비치에서 한 서퍼가 찬물을 끼얹으며 더위를 식히는 모습.



I . Ice Breaking



- ▲ 보스턴 홍수 현장에서 작업을 한 소방대원들이 보트를 끌고 있다.



- ▲ 플로리다의 한 지역에서 추위에 얼어붙은 이구아나



I. 강의에 들어가며: 현재 진행중인 전세계 극한 기상/기후 사건

"2100년 서울은 여름내내 '살인폭염'...지구온난화 원인"

현재 0일→2030년 3일→2050년 7일→2075년 35일

온실가스 배출추세 지속시 세계인구 74%가 20일 이상 폭염 노출

연합뉴스 | 2017-06-20

글로벌 온실가스 배출량 증가 추세가 지금처럼 지속한다면 서울에서 견디기 힘든 '살인폭염'을 겪는 날이 1년중 현재 0일에서 2100년 67일로 늘어날 것이라는 연구 결과가 나왔다. 사람이 죽을 정도의 폭염이 여름 내내 계속된다는 뜻이다.

세계 전체 인구 중 이런 살인 폭염에 연간 20일 이상 노출되는 인구의 비율은 현재 30%에서 2100년 74%로 늘어날 전망이다.

미국 마노아 하와이대(University of Hawaii at Manoa) 지리학과 카밀로 모라 교수 등은 이런 내용을 포함한 연구 결과를 과학 학술지 '네이처'의 자매지인 '네이처 기후변화'에 발표했다.

이들은 1980년 이후 사망자가 발생한 폭염 사례 중 정확한 날짜와 날씨 조건이 파악된 36개국 164개 도시의 사례 783건을 분석해 '살인폭염'의 기온과 습도 조건을 계산하고, 이를 바탕으로 지구 온난화에 따라 세계 각 지역에서 연간 살인폭염 일수가 연도별로 어떻게 늘어날지를 계산했다. '살인폭염'은 기온과 습도에 따라 기준이 달라진다. 예를 들어 습도가 60%이면 기온이 약 30도 이상, 습도가 80%이면 기온이 약 28도 이상, 습도가 90%이면 기온이 약 27도 이상에 해당한다.



I. 강의에 들어가며: 현재 진행중인 전세계 극한 기상/기후 사건

서울 '살인폭염' 일수 전망

현 증가 추세로 온실가스 배출량이 21세기 내내 지속되는 경우
(RCP 8.5 시나리오) 서울(북위 38도, 동경 127도)의 연간 살인폭염 일수

연간 살인폭염 일수



자료/ 네이처 기후변화

YONHAP NEWS

김토일 기자 / 20170620 / 페이스북 tuney.kr/LeYN1, 트위터 @yonhap_graphics



I . Ice Breaking

From

<http://www.climatecentral.org/>

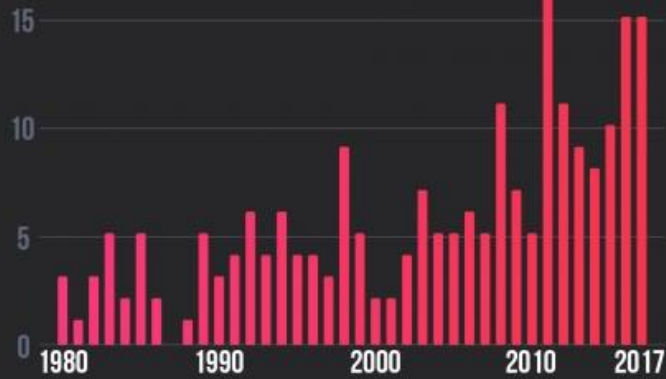
2017 BILLION-DOLLAR DISASTERS WEATHER AND CLIMATE IMPACTS



NOAA/NCEI, "Billion-Dollar Weather and Climate Disasters"
as of October 7. Costs for hurricanes and wildfires not yet finalized.

CLIMATE CENTRAL

U.S. BILLION-DOLLAR DISASTERS MORE WEATHER AND CLIMATE EVENTS



Source: NOAA/NCEI, "Billion-Dollar Weather and Climate Disasters"

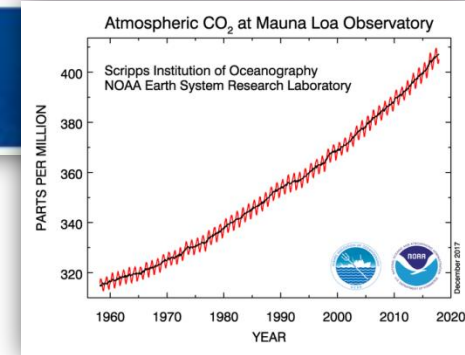
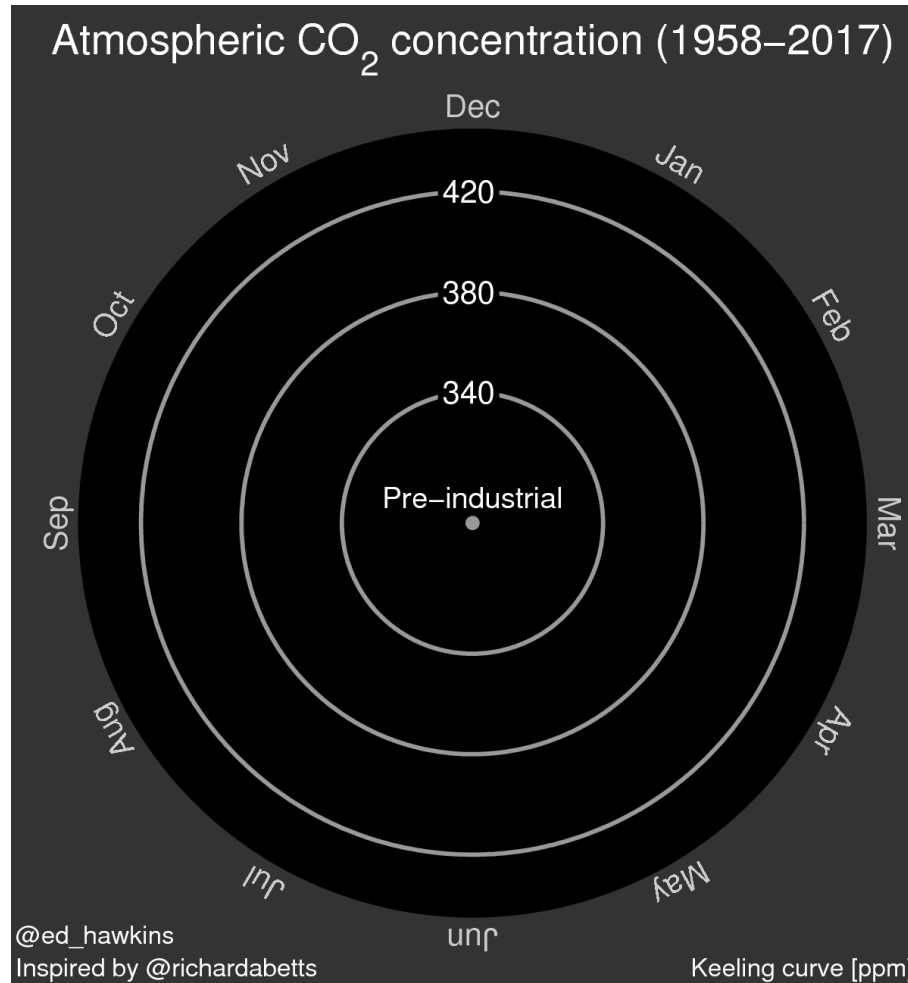
CLIMATE CENTRAL

APCC Seminar 2018



I . Ice Breaking

Climate Spiral



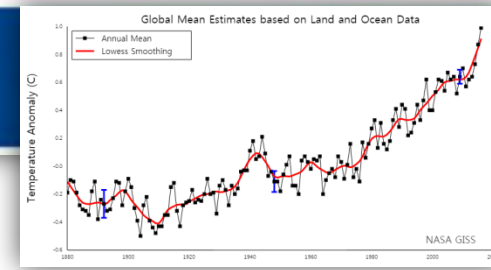
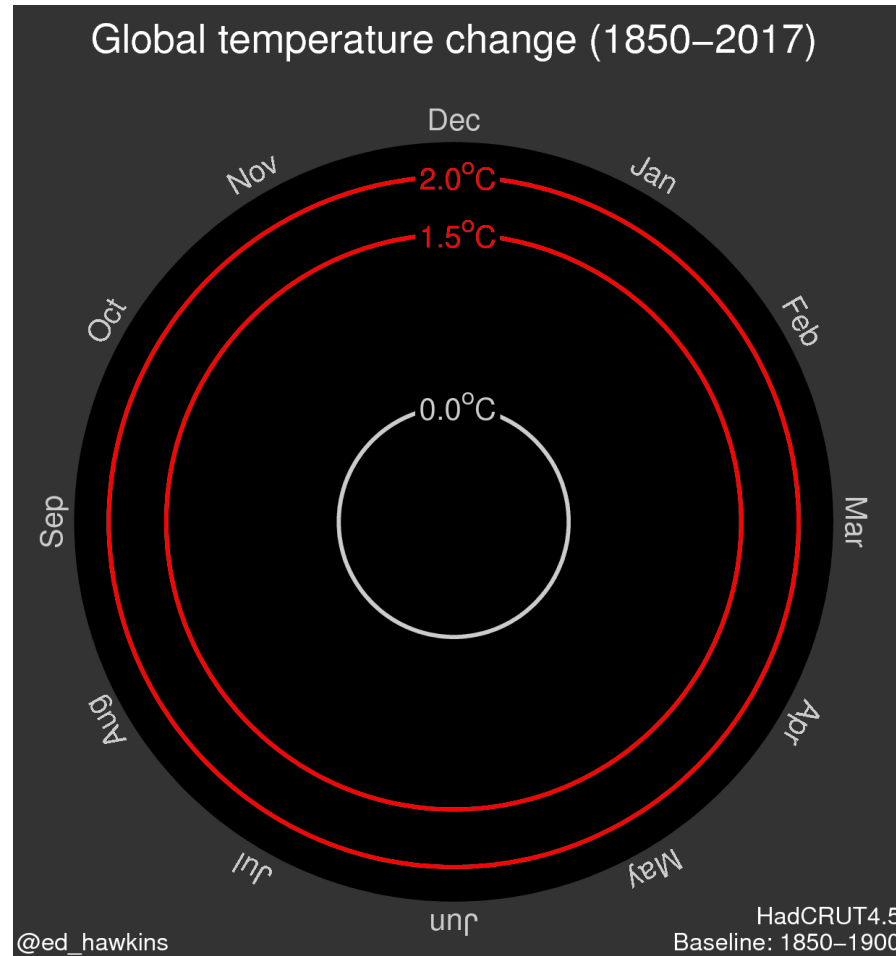
From Climate Lab Book Open Climate Science of Ed Hawkins' Blog
<http://www.climate-lab-book.ac.uk/>

APCC Seminar 2018



I . Ice Breaking

Climate Spiral



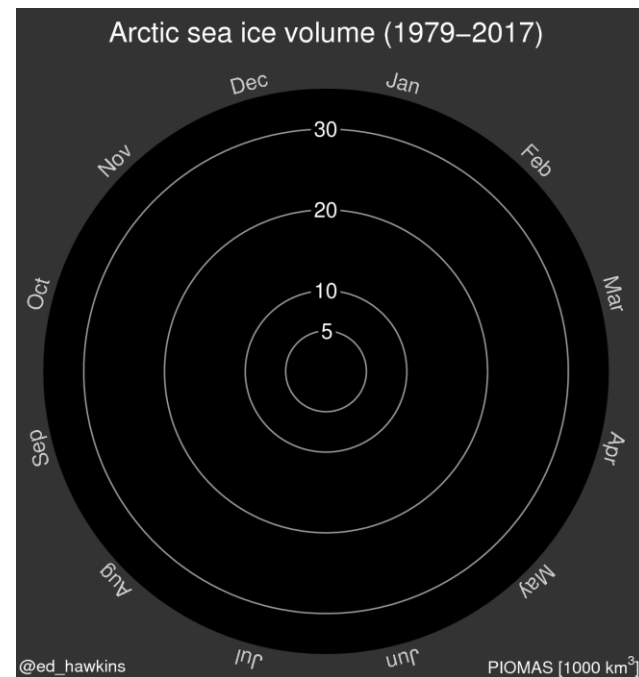
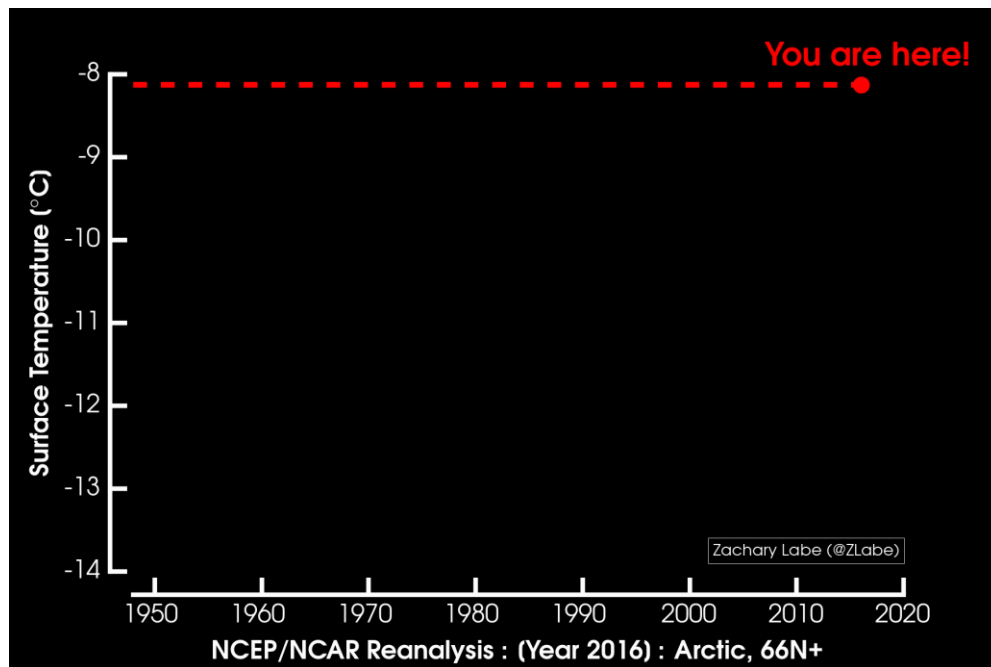
From Climate Lab Book Open Climate Science of Ed Hawkins' Blog
<http://www.climate-lab-book.ac.uk/>

APCC Seminar 2018



I . Ice Breaking

Climate Spiral

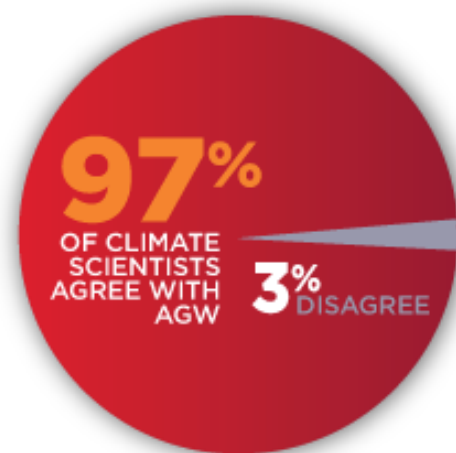
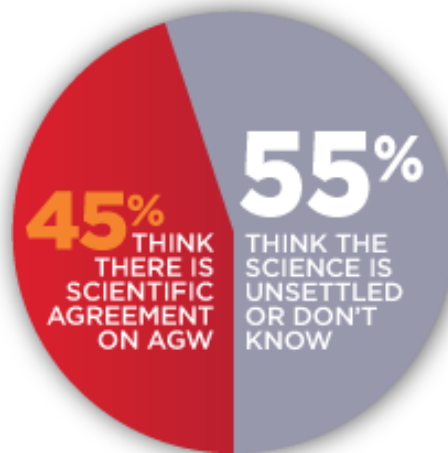
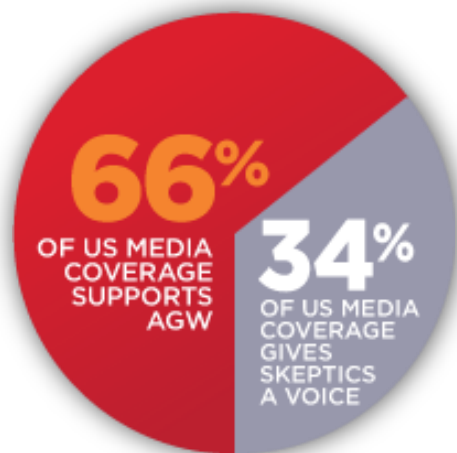


From Climate Lab Book Open Climate Science of Ed Hawkins' Blog
<http://www.climate-lab-book.ac.uk/> (right) and
<http://sites.uci.edu/zlabe/> (left)



I . Ice Breaking

WHY CONSENSUS MATTERS: THE CONSENSUS GAP There is a large gap between the public perception of consensus on anthropogenic global warming (AGW) and the reality of 97% agreement among climate scientists. This "Consensus Gap" has real-world implications. Research into climate change attitudes has found that a correct perception of scientific consensus is linked to support for climate policy. **In other words, when people don't realize there's a scientific consensus, they're less likely to support climate action.** This underscores the importance of closing the Consensus Gap.



II.

Introduction



II. Introduction: IPCC AR5에서의 극한 기상/기후 전망

현상 및 추세 방향	추가적인 변화 가능성	
	21세기 초반	21세기 후반
대부분의 육지 지역에서 추운 낮과 밤의 온난화 및/또는 빈도 감소	가능성 높음 {113}	사실상 확실함 {124}
	-	사실상 확실함 사실상 확실함
대부분의 육지 지역에서 더운 낮과 밤의 온난화 및/또는 빈도 증가	가능성 높음 {113}	사실상 확실함 {124}
	-	사실상 확실함 사실상 확실함
더위기간/열파. 대부분의 육지 지역에서 빈도 및/또는 지속기간 증가	정식으로 평가되지 않음 {113}	가능성 매우 높음 {124}
	-	가능성 매우 높음 가능성 매우 높음
호우현상 호우의 빈도, 강도 및/또는 양 증가	많은 육지 지역에서 가능성 높음 {113}	대부분의 중위도 육지 지역과 습윤한 열대 지역에서 가능성 매우 높음 {124}
	-	많은 지역에서 가능성 높음 대부분의 육상에서 가능성 매우 높음



II. Introduction: IPCC AR5에서의 극한 기상/기후 전망

현상 및 추세 방향	추가적인 변화 가능성	
	21세기 초반	21세기 후반
가뭄의 강도 및/또는 지속기간의 증가	낮은 신뢰도 {11.3}	지역 규모에서 전지구적 규모까지 가능성 높음 (중간 신뢰도) {12.4}
	-	일부 지역에서 중간 신뢰도 가능성 높음
강력한 열대 저기압의 빈도수의 증가	낮은 신뢰도 {11.3}	북서태평양과 북대서양에서 발생하지 않을 가능성보다 발생할 가능성 높음 {14.6}
	-	일부 해양에서 발생하지 않을 가능성보다 발생할 가능성 높음 가능성 높음
극한적 고해수위의 규모 및/또는 발생의 증가	가능성 높음 {13.7}	가능성 매우 높음 {13.7}
	-	가능성 매우 높음 가능성 높음



II. Introduction: IPCC AR5에서의 극한 기상/기후 전망

a) Wettest consecutive five days (RX5day)

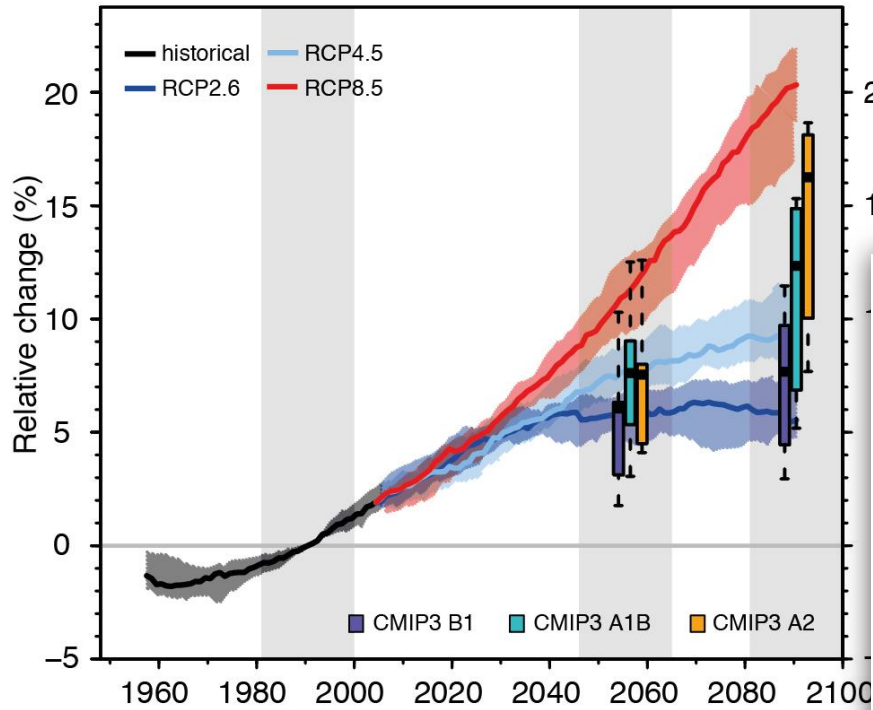
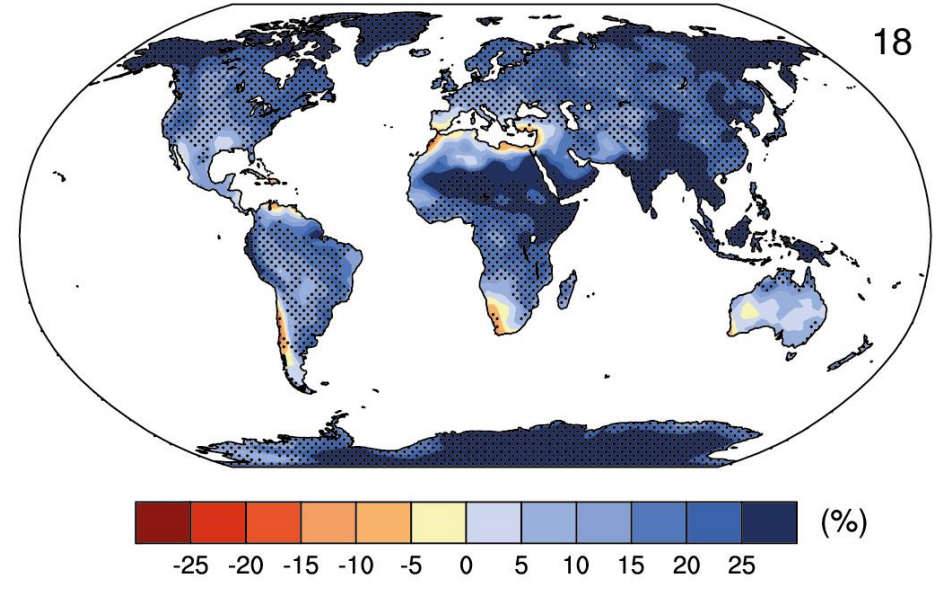


Fig. 12.26

b) max. 5 day precip RCP8.5: 2081-2100



❖ IPCC AR6에서 한 Chapter 할애

ipcc

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change

Chapter 11:

Weather and climate extreme events in a changing climate

FORTY-SIXTH SESSION OF THE IPCC
Montreal, Canada, 6 – 10 September 2017

- Extreme types, encompassing weather and climate timescales and compound events (including droughts, tropical cyclones)
- Observations for extremes and their limitations, including paleo
- Mechanisms, drivers and feedbacks leading to extremes
- Ability of models to simulate extremes and related processes
- Attribution of changes in extremes and extreme events
- Assessment of projected changes of extremes and potential surprises
- Case studies across timescales



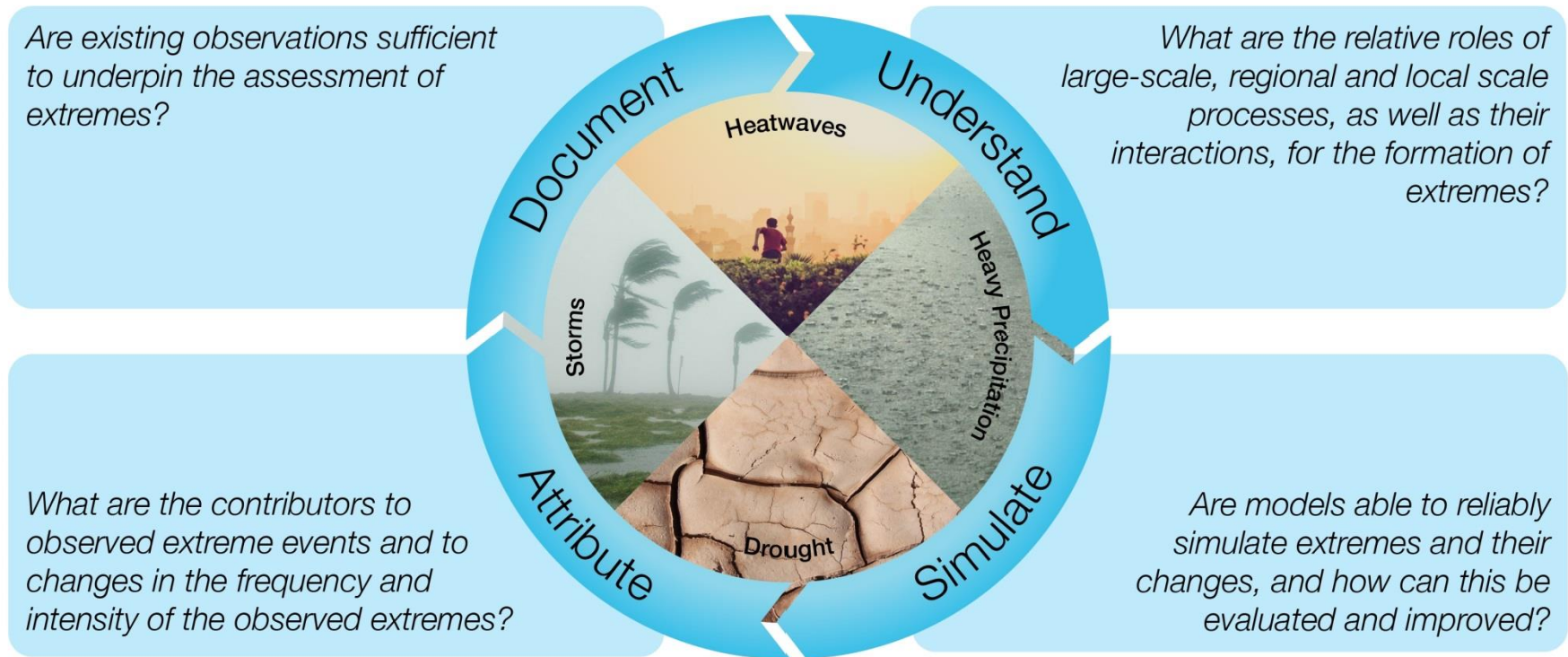
II. Introduction: WCRP Grand Challenges

- Melting Ice and Global Consequences
- Clouds, Circulation and Climate Sensitivity
- Carbon Feedbacks in the Climate System
- **Weather and Climate Extremes**
- Water for the Food Baskets of the World
- Regional Sea-Level Change and Coastal Impacts
- Near-term Climate Prediction



II. Introduction: WCRP Grand Challenges

The Extremes Grand Challenge is organised around four over-arching themes (**Document**, **Understand**, **Simulate**, **Attribute**) with a main focus on four core events (**Heavy Precipitation**, **Heatwave**, **Drought**, **Storm**).



II. Introduction: WCRP Grand Challenges

Specific Scientific Questions from the White Paper

1. How can we improve the collation, dissemination and quality of observations needed to assess extremes and what new observations do we need?
2. Can models be further improved to better simulate, predict and project extremes?
3. What do we understand about the interactions between large-scale drivers and regional-scale land-surface feedbacks that affect extremes and how can these processes be improved in models?
4. To what extent can detected changes in extremes be attributed to forcing external to the climate system and/or to internal factors such as modes of variability?
5. What factors have contributed to the risk of a particular observed event?
6. How has drought changed in the past and what were the causes, and how will it change in the future?
7. Are changes in the frequency and intensity of extremes predictable at seasonal to decadal scale and if so, how can we best realize that potential, and how can society best use such forecasts?
8. How will large-scale phenomena such as monsoons and modes of variability change in the future, and how will this affect extremes?



Ⅲ.

이상치 기반의 극한 기상/기후의 상대성 평가



(1) Literature Survey

- Stephenson(2008): “극한 날씨 사건을 인지하는 것은 대체로 쉽지만 정의하기는 어렵기 때문에”, 극한 날씨 사건을 정의하고 그 사건의 극한 정도를 정량화하는 통일된 방법은 없음.
- Beniston et al.(2007): 날씨(기후) 사건이 극한적이라고 식별하기 위해 일반적으로 사용되는 3가지 특성은 (i) 희귀성(rairity), (ii) 강도(intensity), (iii) 심각성(severity)임.
- Müller & Kaspar(2014) & Müller et al.(2015): 극한 기상 및 기후의 극한도를 평가할 수 있는 새로운 지수들을 개발하고, 체코 지역에서 발생했던 홍수 사례들에 적용함으로써 그 극한도를 비교 평가함.



(2) Background

- 우리나라의 2015년 11월 강수량은 127.8 mm로 11월 평년 강수량인 46.7 mm의 약 2.7배에 달할 정도로 많은 강수량을 기록함.
- 강릉, 동해, 속초, 춘천, 홍천은 관측 이래 11월 월강수량 최댓값을 갱신함.
- 특히 영동 지방에는 동풍의 영향이 더해져서 2015년 11월 강수량은 평년의 약 5배에 도달했음.
- 또한 463.5 mm의 월강수량을 기록한 속초에서는 11월 6일부터 11월 14일까지 연속해서 9일 동안 강수가 내렸으며, 이는 1912년 관측 이래 11월 연속 강수 발생일수의 최고 기록임.



Question

속초에서의 2015년 11월 극한 강수 사건

VS

강릉에서의 2002년 8월 극한 강수 사건

극한성의 정도가 어느 쪽이 더 클까?



Ⅲ. 이상치 기반의 극한 기상/기후의 상대성 평가

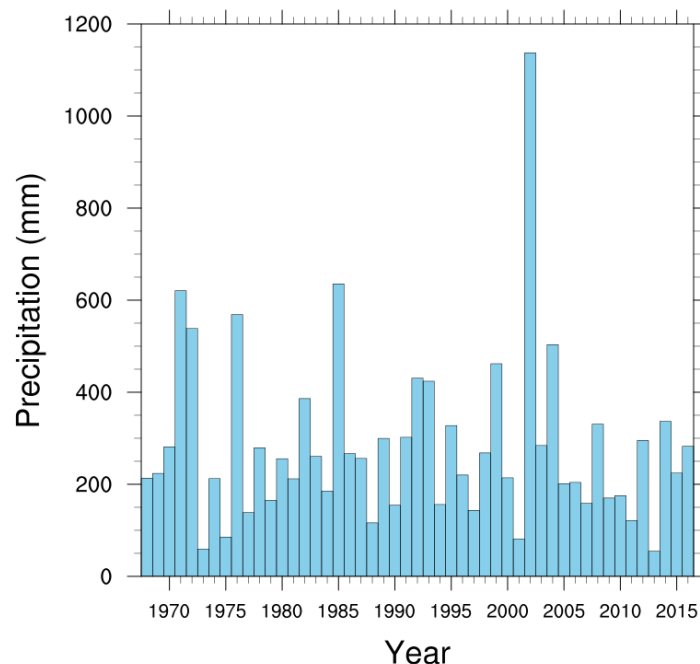
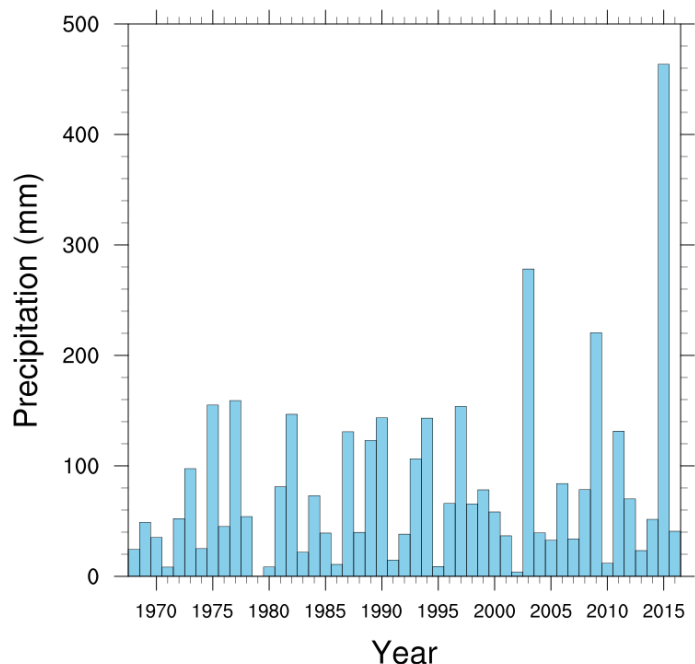
순위	재해기간	주요피해원인	주요피해지역	사망·실종(명)	재산피해(억원)
1	2002년 8.30~9.1	태 풍(루사)	전 국	246	51,479
2	2003년 9.12~9.13	태 풍(매미)	전국(서울, 인천 제외)	131	42,225
3	2006년 7.9~7.29	호 우, 태 풍(에위니아)	전 국	62	18,344
4	1998년 7.31~8.18	호 우	전 국(제주 제외)	324	12,478
5	1999년 7.23~8.4	호 우, 태 풍(올가)	전 국	67	10,490
6	2002년 8.4~8.11	호 우	경기, 강원, 충북, 경북, 경남 등	23	9,181
7	1990년 9. 9~9.12	호 우	서울, 경기, 강원, 충북	163	5,203
8	2004년 3.4~3.5	대 설	충남, 충북, 대전, 경북 등	-	6,734
9	1987년 7.15~7.16	태 풍(셀마)	경남, 강원	345	3,913
10	1995년 8.19~8.30	호 우, 태풍(제니스)	서울, 경기, 충청	65	4,563



Ⅲ. 이상치 기반의 극한 기상/기후의 상대성 평가

❖ 이상치(outlier)란?

어떤 집단으로부터 무작위로 추출한 표본에서 다른 값들에 비해 비정상적으로 떨어져 극단적으로 크거나 작은 값



속초 11월 월강수량 (좌) & 강릉 8월 월강수량 (우)



(3) Methods

- 이상치(outlier) 검출을 위해 Grubbs Test를 사용함:
 - 먼저, 매해(i) 월강수량을 X_i 라 할 때, 이 값의 표준점수 값인 Z_i 는 다음 식으로 계산됨(\bar{X} : 평균, σ : 표준편차):

$$Z_i = \frac{|\bar{X} - X_i|}{\sigma}$$

- Grubbs 검정 기법에 따르면, 이상치가 되기 위한 최소 Z 값인 Z_{crit} 는 다음 식으로 계산됨(N : 샘플 크기, α : 유의수준):

$$Z_{crit} = \frac{N-1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{t^2_{(\alpha/(2N), N-2)}}{N-2 + t^2_{(\alpha/(2N), N-2)}}$$

여기서 $t_{(\frac{\alpha}{2N}, N-2)}$ 는 $(N-2)$ 의 자유도와 $\alpha/(2N)$ 의 유의수준을 가진 t-분포의 임계값임. (e.g. $N=45$ 일 경우, $\alpha=0.01$ 에서 $Z_{crit} = 3.435$)



Ⅲ. 이상치 기반의 극한 기상/기후의 상대성 평가

- 이 Z_{crit} 보다 더 큰 Z 값이 이상치로 검출되며, 위의 Z 식으로 부터 임계 이상치 강수량 X_{crit} 은 다음 식으로 계산됨:

$$X_{crit} = \sigma Z_{crit} + \bar{X}$$

- 본 연구에서는 극한 강수 사건의 극한도 DoE 를 다음과 같이 X_{crit} 에 대한 실제 극한 강수량 X_{ext} 의 비로서 다음과 같이 정의함:

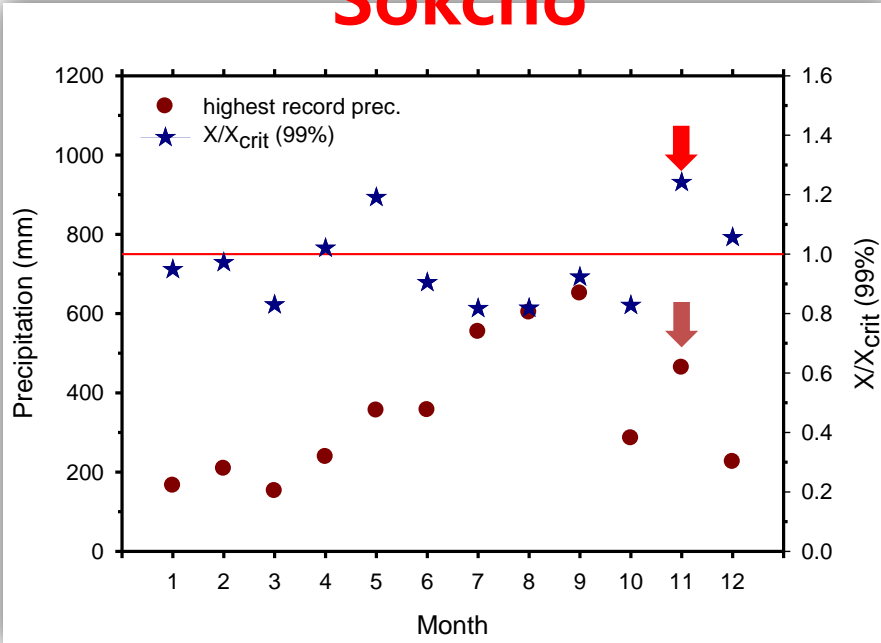
$$DoE = \frac{X_{ext}}{X_{crit}}$$

- 분석 자료: ASOS 월강수량, 분석 기간: 1973-2016 (44년)

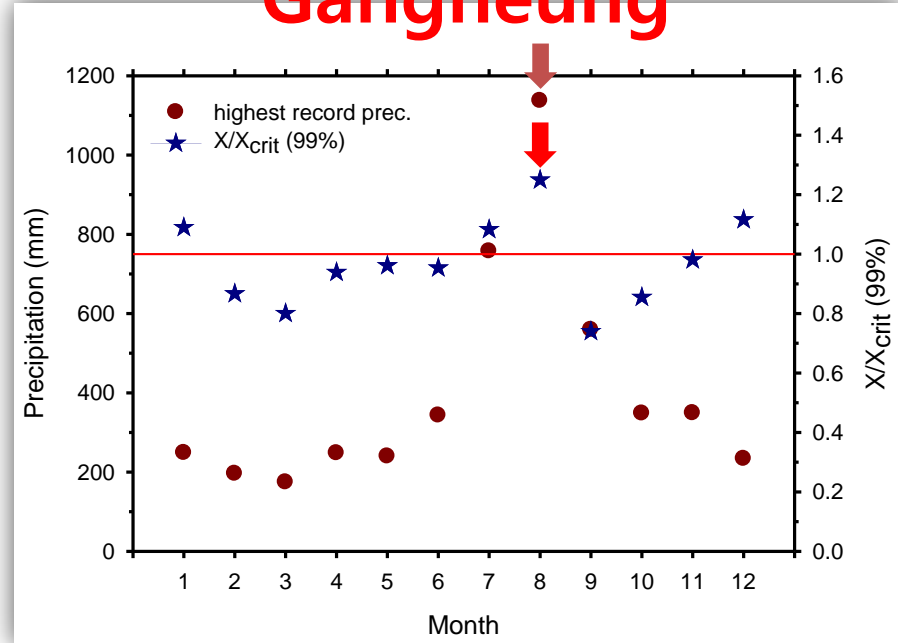


(4) Results: Sokcho vs Gangneung

Sokcho



Gangneung



속초(좌) 및 강릉(우)의 월강수량 최고 기록들(적색 원) 및 DoE들(청색 별). 이 그래프에서, 1보다 높이 있는 청색 별(i.e. $X/X_{crit} > 1$)은 99% 유의 수준에서의 outlier이다.



Ⅲ. 이상치 기반의 극한 기상/기후의 상대성 평가

Sokcho

	Event	P (mm)	Z value	Z/Z _{crit} (95%)	Z/Z _{crit} (99%)	X/X _{crit} (95%)	X/X _{crit} (99%)
1	Nov 2015	463.5	4.492	1.46	1.311	1.348	1.241
2	May 1997	355.6	4.334	1.409	1.265	1.286	1.191
3	Dec 1991	225.9	3.668	1.192	1.071	1.15	1.057
4	Apr 1977	238.3	3.528	1.147	1.03	1.097	1.02

Gangneung

	Event	P (mm)	Z value	Z/Z _{crit} (95%)	Z/Z _{crit} (99%)	X/X _{crit} (95%)	X/X _{crit} (99%)
1	Aug 2002	1137	4.65	1.512	1.358	1.346	1.25
2	Dec 1991	233.6	3.92	1.274	1.144	1.215	1.116
3	Jul 2006	757.3	3.851	1.252	1.124	1.163	1.083
4	Jan 1989	248.5	3.829	1.245	1.118	1.182	1.09



Ⅲ. 이상치 기반의 극한 기상/기후의 상대성 평가

분석기간 : 1972-2016 (45년)
분석지점: 속초, 강릉, 춘천, 원주

지점	사례	강수량 (mm)	DoE ($\alpha = 0.05$)	DoE ($\alpha = 0.01$)
속초	Nov 2015	463.5	1.358	1.251
강릉	Aug 2002	1137.0	1.324	1.230
춘천	Jan 1972	81.8	1.128	1.042
원주	Dec 1992	78.6	1.071	0.997



IV.

이상치 기반의 전례 없는 기후시기 전망



IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (1) ToE & TUC란?

❖ ToE (Time of Emergence of Global Warming Signal)

- AR4까지는 다루지지 않았던 기후변화 신호의 출현시기(ToE)에 관한 주제가 AR5에서는 Chapter 11을 통해 처음으로 다루어짐
- ToE를 측정하는 단일 측도(metric)이 존재하지 않음: 변수, 시공 규모, 변화 측정의 근거(baseline) 기간, 출현을 정의하는 임계값 등이 연구자의 선택에 달려 있어 다분히 주관적임 (Sui et al., 2014)
- 대개 Hawkins and Sutton(2012)의 SNR(Signal-to-Noise Ratio)을 사용하고(S: 온난화 추세, N: 내부 or 자연 변동성), S/N이 어떤 특정 임계값(예를 들어, 0.5, 1, 2)을 넘어서는 시작 시기로 정의함: 작은 임계값은 over-estimation (즉 early onset)→과도한 기후 정책, 큰 임계값은 under-estimation (즉 late onset)→미흡한 기후 정책
- Mahlstein et al.(2011)은 여름철 CMIP5 평균 지표기온 자료를 이용하여 S/N로 추정된 ToE가 저위도 국가에서 더 빨리 찾아올 수 있음을 제기함



IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (1) ToE & TUC란?

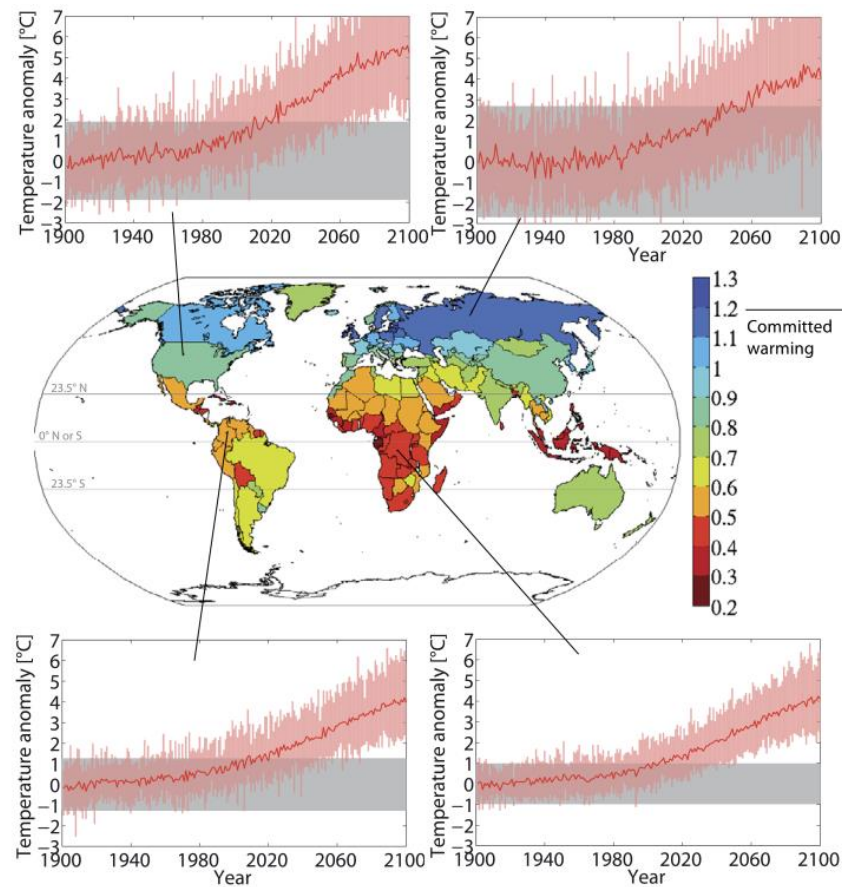


Figure 2. The map shows the global temperature increase (°C) needed for a single location to undergo a statistically significant change in average summer seasonal surface temperature (TAS), aggregated on a country level. The black line near the colour bar denotes the committed global average warming if all atmospheric constituents were fixed at year 2000 levels. The small panels show the interannual summer-season variability during the base period (1900–29) (± 2 standard deviations shaded in grey) and the multi-model mean summer surface temperature (red line) of one arbitrarily chosen grid cell within the specific country. The shading in red indicates the 5% and 95% quantiles across all model realizations.



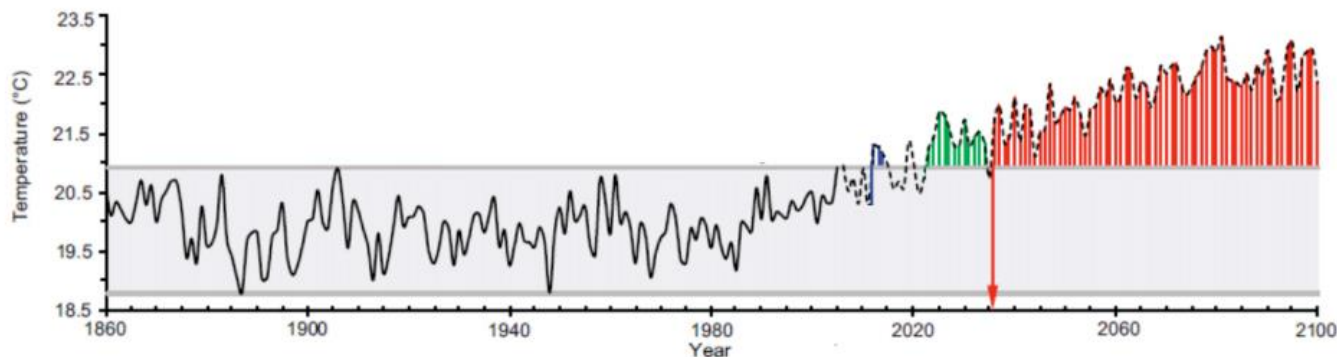
IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (1) ToE & TUC란?

❖ TUC (Timing of Unprecedented Climate)

- TUC는 ToE의 극단적인 경우로 이해될 수 있음
- 따라서 TUC를 측정하는 단일 척도 또한 존재하지 않음
- TUC를 정의하기 위한 임계값의 선택 방법에 민감할 수 있음: 과거 기간에 나타난 최대값(임계값) 밑으로 내려오지 않는 미래의 시점

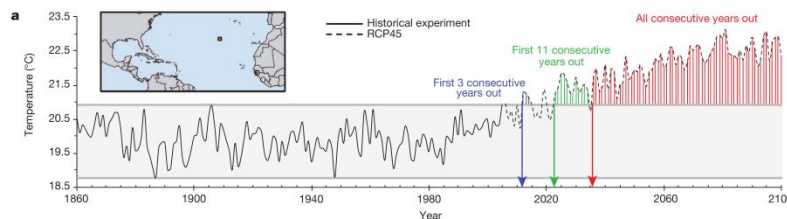
What Does “Unprecedented Climate” Mean?

Starting in just 30 years, the coldest year will still be hotter than any year in the past 150 years



IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (1) ToE & TUC란?

- Mora et al.(2013)은 CMIP5 연평균 지표기온 자료를 이용하여 과거모의자료의 최댓값을 임계값으로 전례없는 기후시기를 추정함.

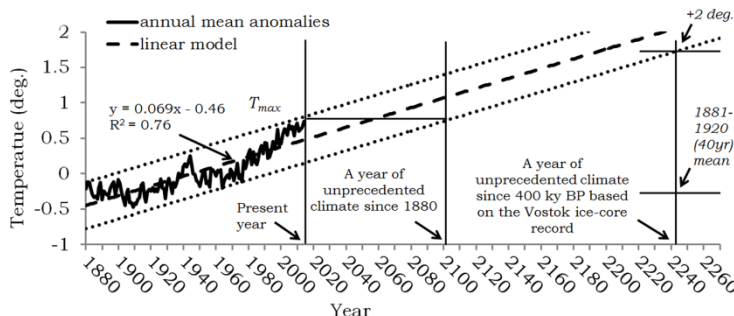


RCP4.5 : 2069년(±18년)
RCP8.5 : 2047년(±14년)

Figure 1 | Estimating the projected timing of climate departure from recent variability. **a.** Mean annual temperatures of an example grid cell (small square on map) exceed historical climate bounds (grey area) for three consecutive years starting in 2012 (blue arrow) and for 11 consecutive years after 2023 (green arrow); after 2036 (red arrow) all subsequent years remained outside the bounds (data from the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System

Model 2G). **b, c.** Effect of using different historical reference periods (**b**) and different numbers of consecutive years exceeding historical bounds (**c**) on the projected timing of climate departure from recent variability for global multi-model averages under RCP85. **d.** Comparison of the projected timing of climate departure from recent variability under RCP85, using the 'historical' and the 'historicalNat' experiments as reference to set the bounds of historical climate variability.

- 신호정과 장찬주(2016)은 GISTEMP 연평균 지표기온 아노말리 자료를 이용하여 선형 추세에 따른 전례없는 기후시기를 추정함.



2101년

Fig. 2. An illustration of timing of unprecedented climate defined as the first year when a predicted temperature exceeds the maximum temperature record in a historical data and remains as such since then. The thick solid line represents the GISTEMP global and annual mean time-series of surface temperature anomaly (°C) from January 1880 to December 2014 and the dashed line represents its linear regression model. A maximum displacement from the regression line is defined as the magnitude of internal variability and a dotted-line passing through the maximum displacement is drawn in parallel with the regression line as an upper/lower bound of temperature variation. The year of unprecedented climate since 1880 as defined above is marked with an arrow. So is the projected year of unprecedented climate since the 400 ky BP that the global mean surface temperature will exceed the pre-industrial mean temperature by 2 degrees.



IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (1) ToE & TUC란?

Background of Presentation in Dasan Conference 2016

- Now, weather develops in a different environment than before.
- Especially, most of the social and economic costs associated with climate change results from shifts in extreme weather events, such as intense heat and cold wave, large flood, and long spell drought.
- As the climate has warmed, extreme weather events have become more frequent and severe in recent decades.
- **In the future, this extreme weather patterns will be likely to be a new normal.**
- Reducing the future risk of extreme weather requires reliable projection for the future changes of the extreme weather events in regional or local scale.



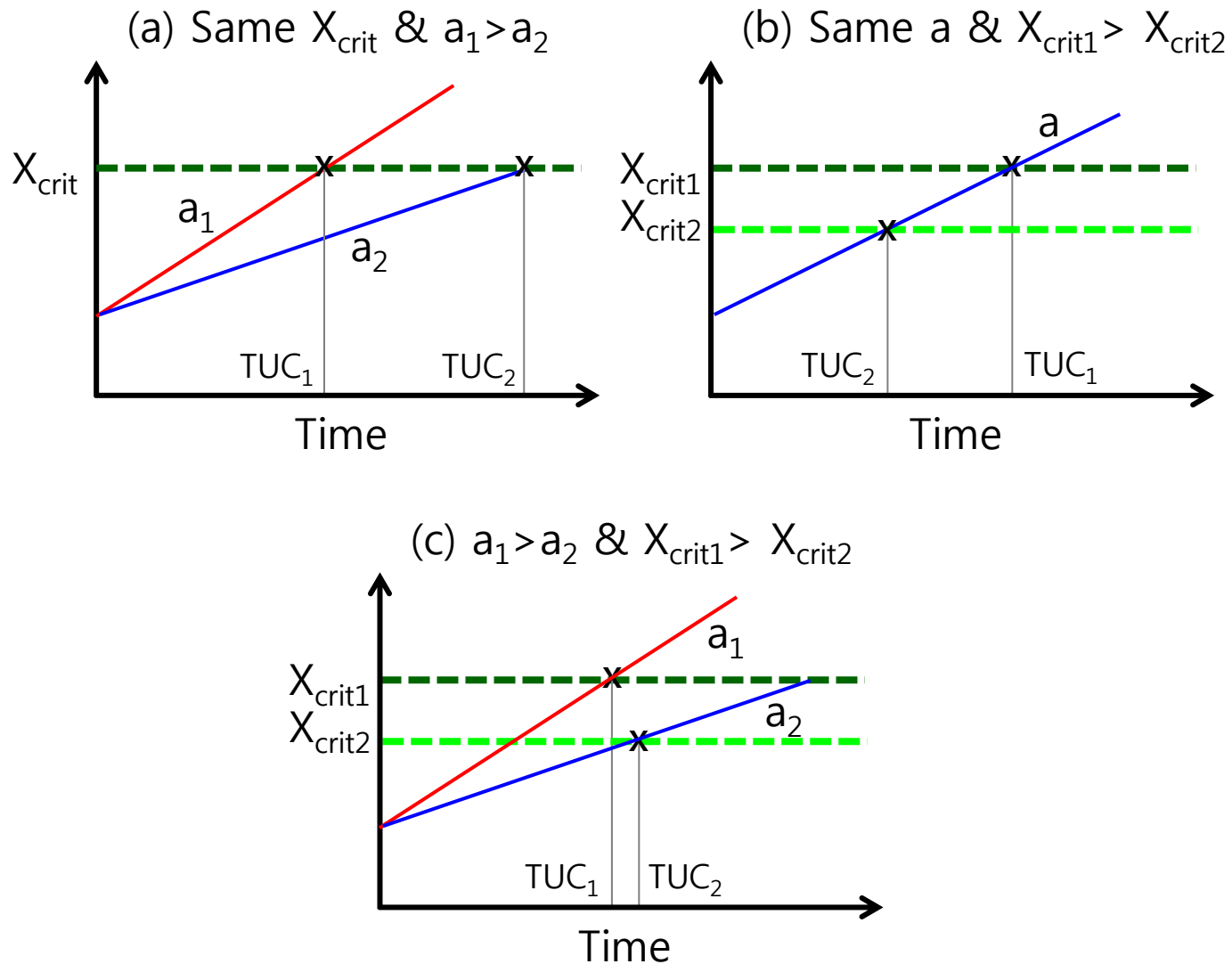
Question

TUC를 다음과 같이 정의해 보는 것은 어떨까?

- Baseline 과거 기후(예를 들어, 1901-2000년 기간의 기후)에서는 어떤 임계값을 넘어 극한 사건이라 불렀는데, 미래 언젠가부터 줄곧 이 임계값을 넘을 때, 이것이 시작되는 시점을 TUC로 정의
- 임계값을 어떻게 정해줄 것인가?
 - 이상치 (outlier)
 - 특정 재현기간(return period)에 대한 재현수준(return level)
- 관측 자료에 근거한 TUC를 얻기 위해서 미래값은 선형 추세를 통해 얻음

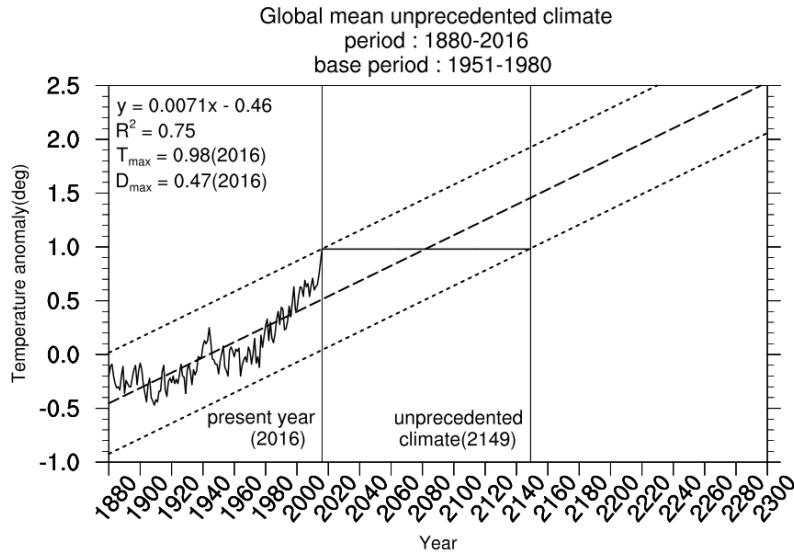


IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (1) ToE & TUC란?



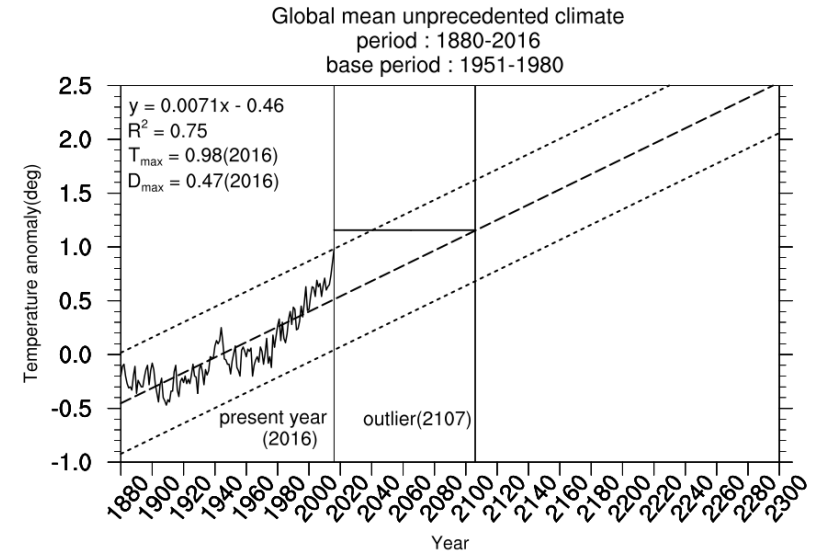
IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (2) 방법

(a) TUC by Shin & Chang (2016)



- 1차원 회귀모형: $T = at + b$
- 예측 모형의 하한 값 \geq 관측 최대값: $at + b - D_{max}T \geq T_{max}$
- 전례 없는 기후 시기: $t \geq (T_{max} - b + D_{max}T)/a$
- **전례 없는 기후 시기: 2149년**

(b) Outlier-based TUC in this study



- 1차원 회귀모형: $T = at + b$
- 임계 outlier: $crit_value = z_crit \times sd + mean$
- 예측 모형의 값 \geq 임계 outlier: $at + b \geq crit_value$
- 전례 없는 기후 시기: $t \geq (crit_value - b)/a$
- **전례 없는 기후 시기: 2107년**



❖ Datasets

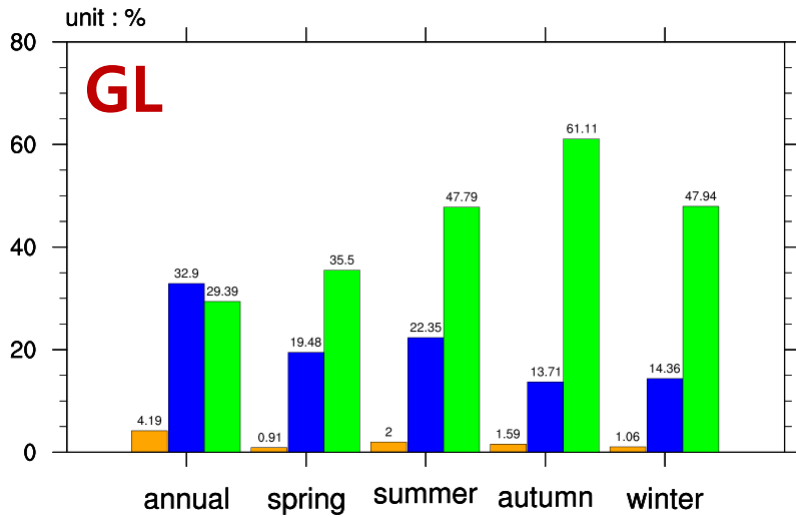
- 전 지구 평균 연 평균 지표기온 : NASA GISTEMP
- 전 지구 육지 월 평균 지표기온 : CRU TS 4.00 [0.5°x0.5°]
- 전 지구 월 평균 지표 기온 : HadGEM2-AO [1.25°x1.875°]

❖ Analysis Periods

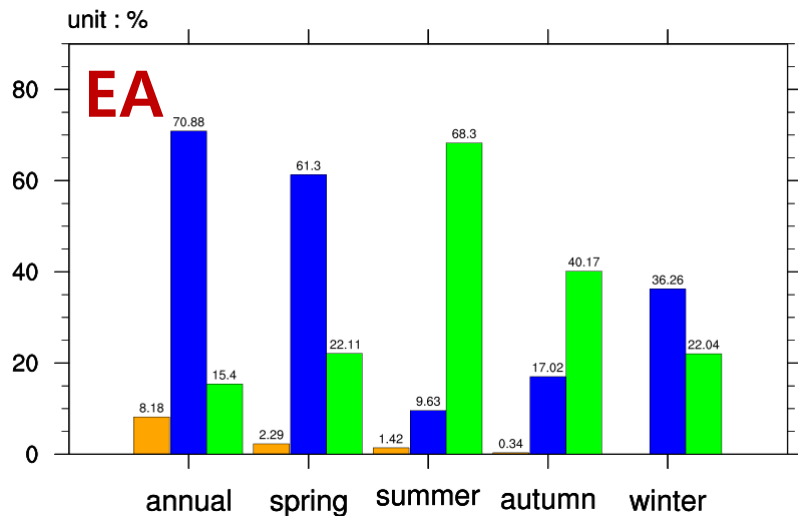
- NASA GISTEMP : 1880~2016 [137년]
- CRU TS 4.00 : 1901~2015 [115년]
- HadGEM2-AO Historical Run : 1860~2005 [146년]



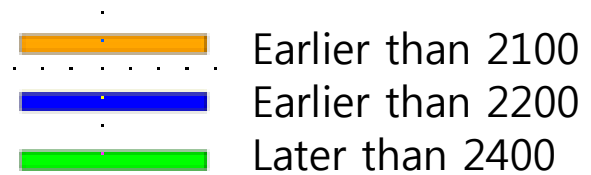
IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (3) 결과



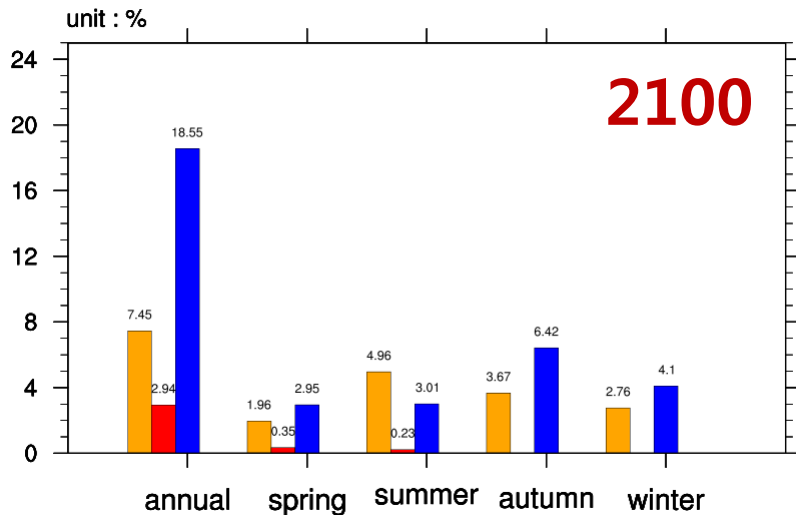
전지구(남극 빙상 제외) 및 동아시아 육지 격자에 대해 TUC가 2100 및 2200년 이전, 그리고 2400년 이후에 도래하는 격자의 수 비율의 연평균 및 계절별 결과



Baseline Period: 1901-2000

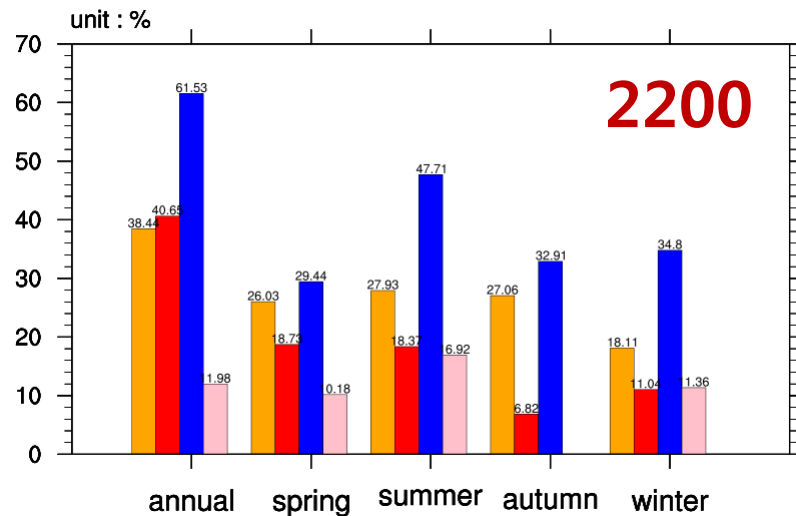


IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (3) 결과



전지구(남극 빙상 제외) 육지
격자에 대해 위도별 및 계절
별 2100 및 2200년 이전 도래
TUC의 격자 수 비율

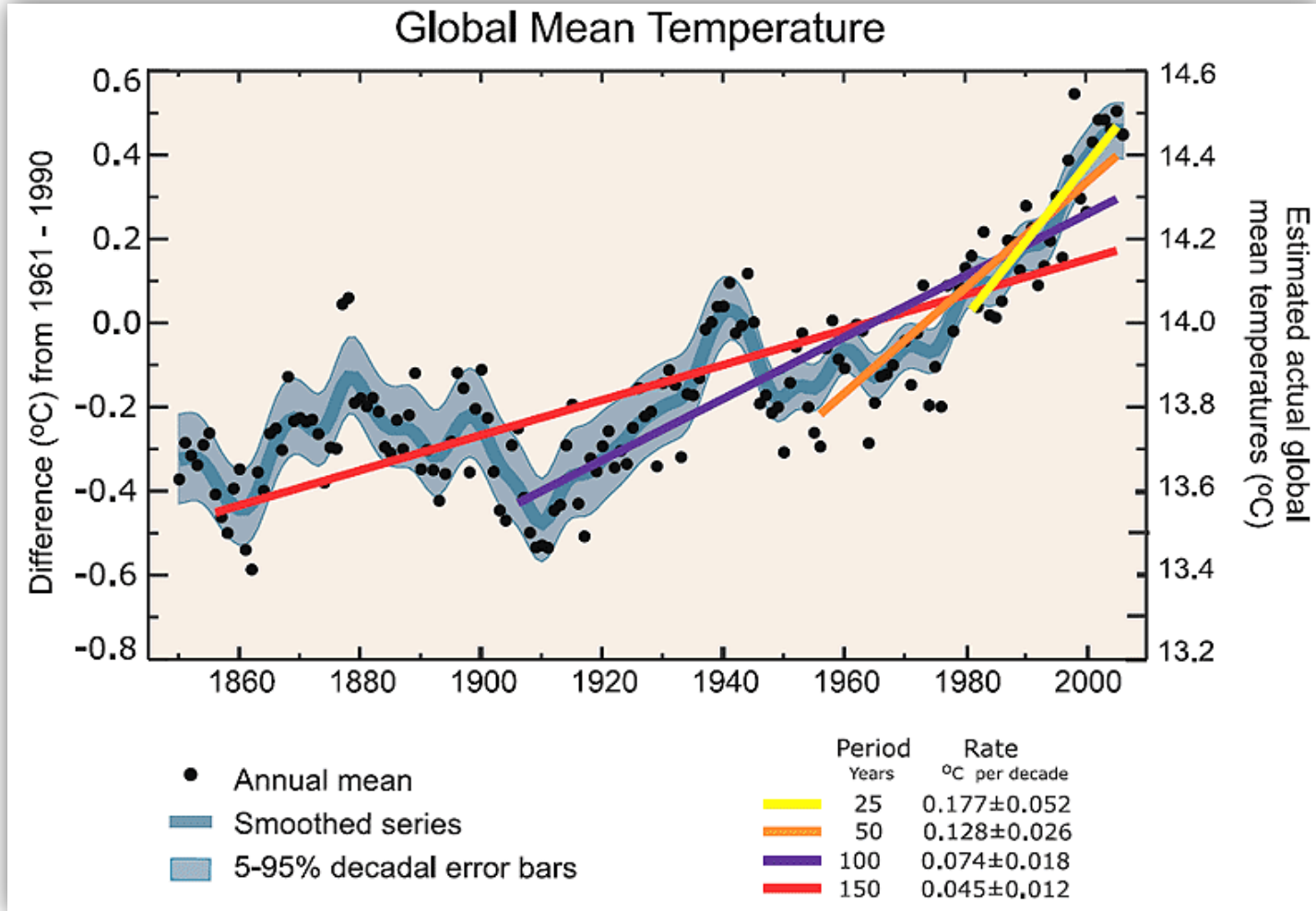
Baseline Period: 1901-2000



IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (3) 결과

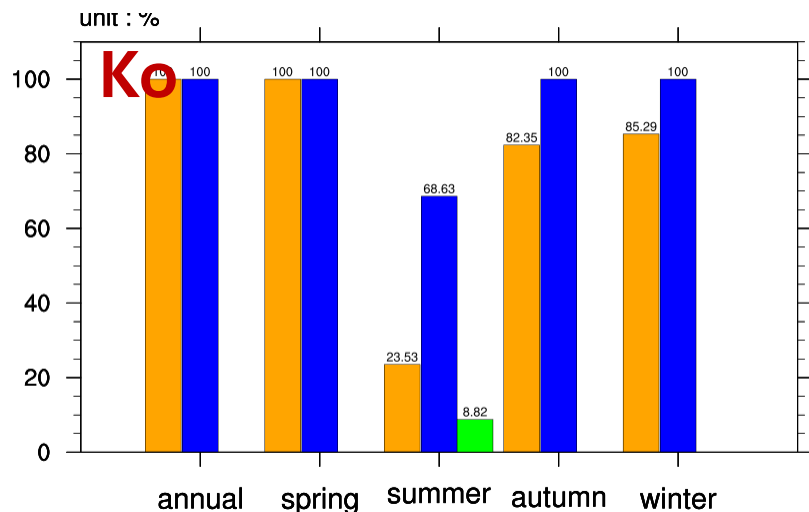
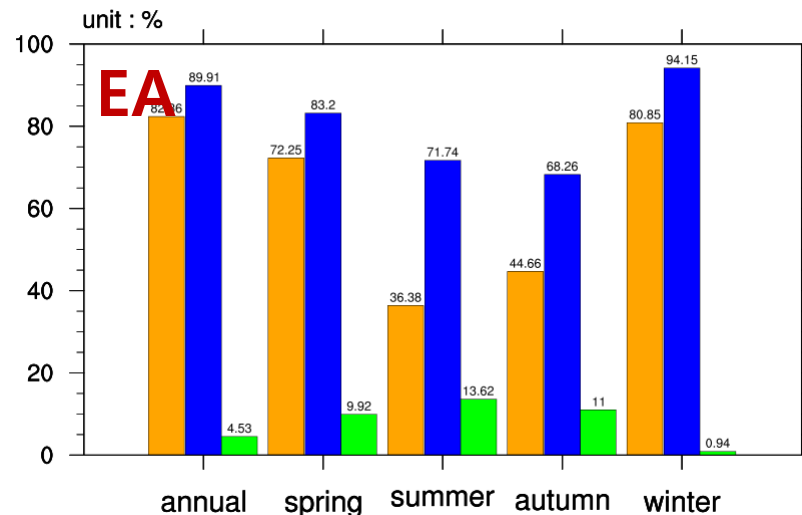
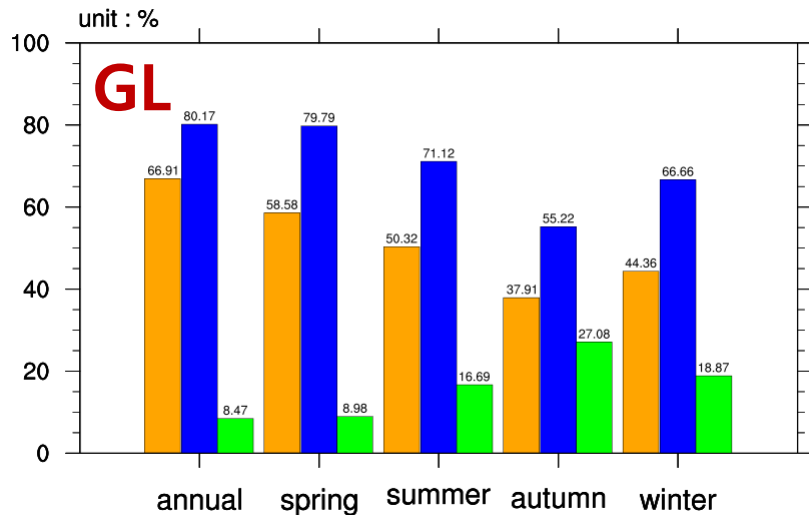
❖ TUC Response to Intensified GW (BP: 1951~2000)

IPCC AR4 Fig.TS 6



IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (3) 결과

❖ TUC Response to Intensified GW (BP: 1951~2000)



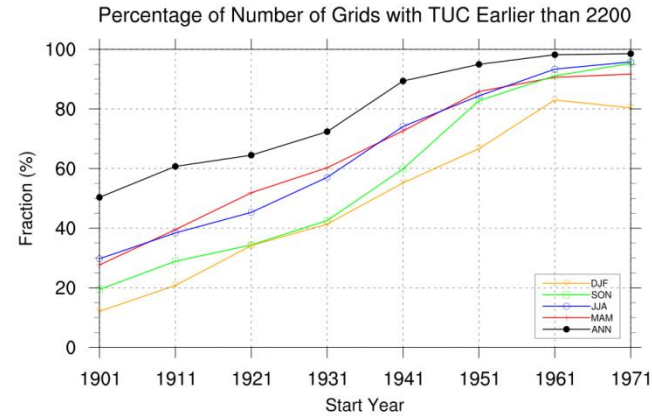
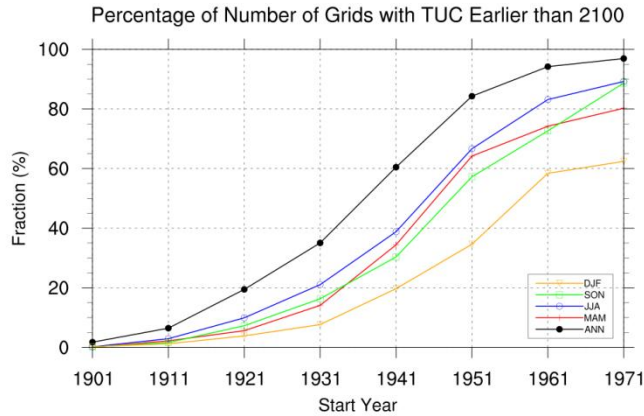
- Earlier than 2100
- Earlier than 2200
- Later than 2400



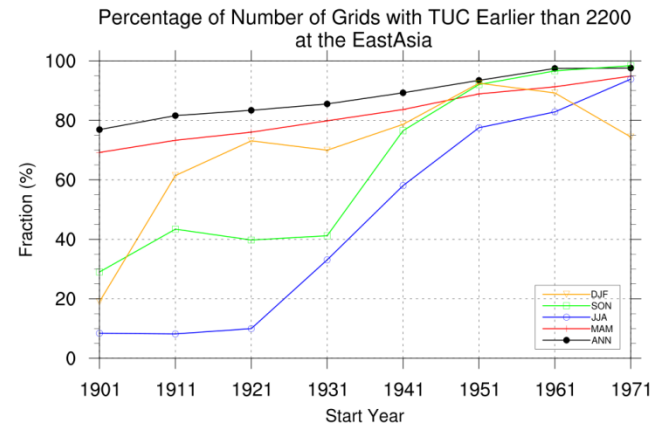
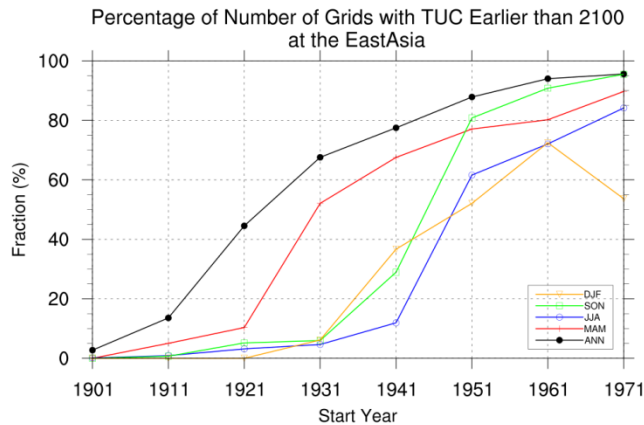
IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (3) 결과

Observation (CRU TS4.0)

GL



EA



Earlier than 2100

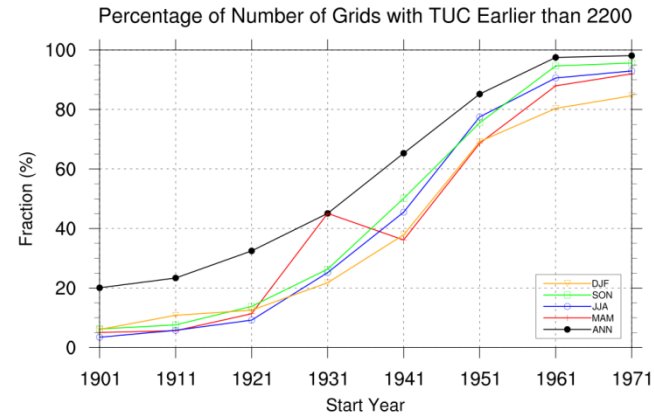
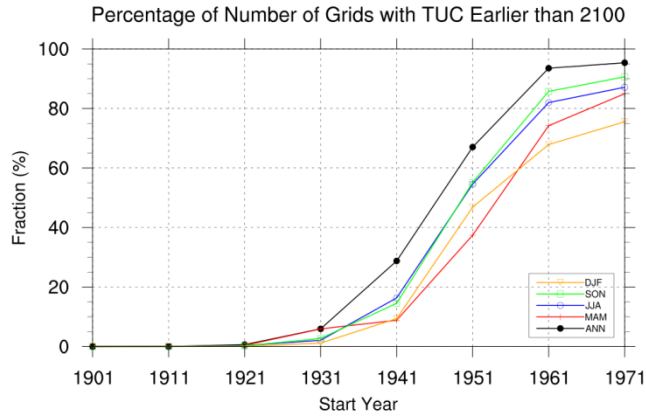
Earlier than 2200



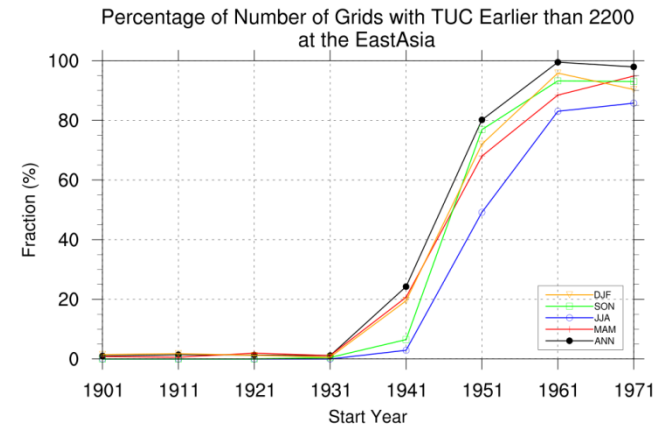
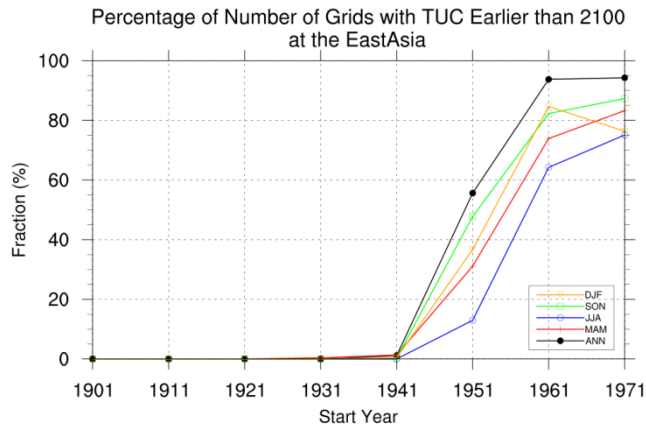
IV. 이상치 기반의 전례없는 기후시기 전망: (3) 결과

Simulation (HadGEM2-AO)

GL



EA



Earlier than 2100

Earlier than 2200



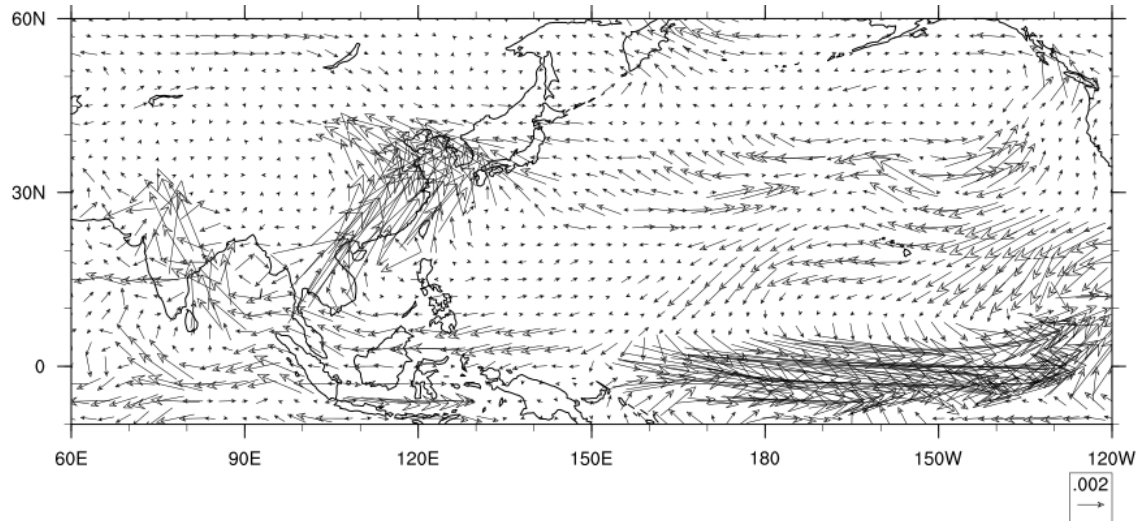


Thank You

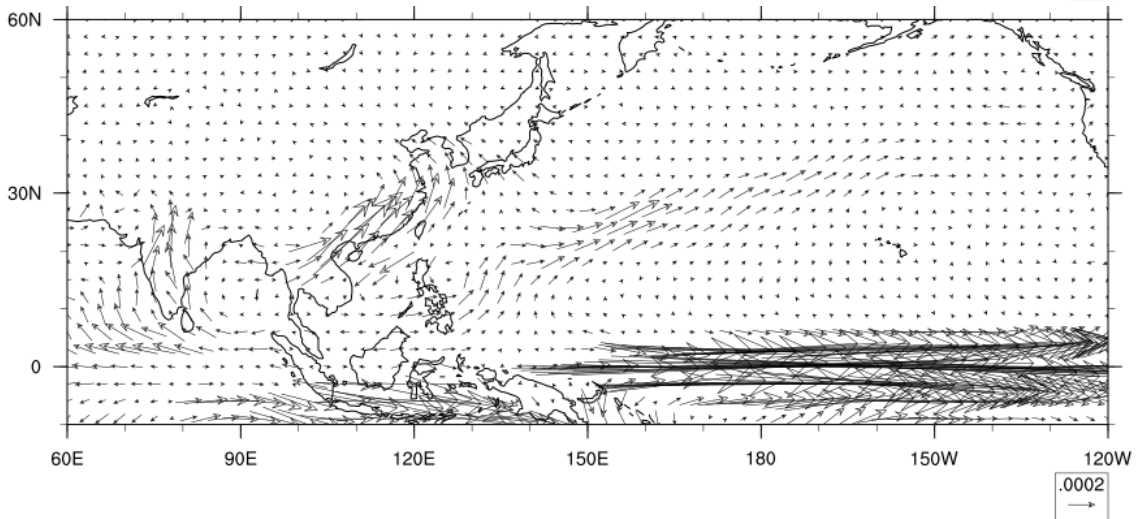


Moisture Flux

2015
Anomaly



ENSO
Mode



Supplementary: GEVD 기반의 TUC 추정

● 자료 선택

	종류	변수	기간
재분석자료	20CR	지표기온	1851~2014 (겨울철)
CMIP5 23개 모델	과거모의실험	극한기후지수	1861~2005 (겨울철)
	RCP 4.5/8.5 시나리오	극한기후지수	2006~2100 (겨울철)

● 영역 선택

- 위도 : 34~43°N, 경도 : 124~131°E
- Land + Sea

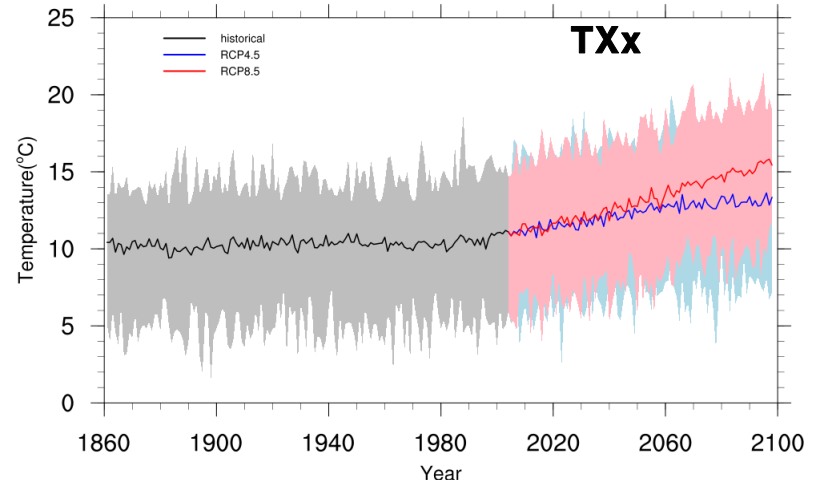
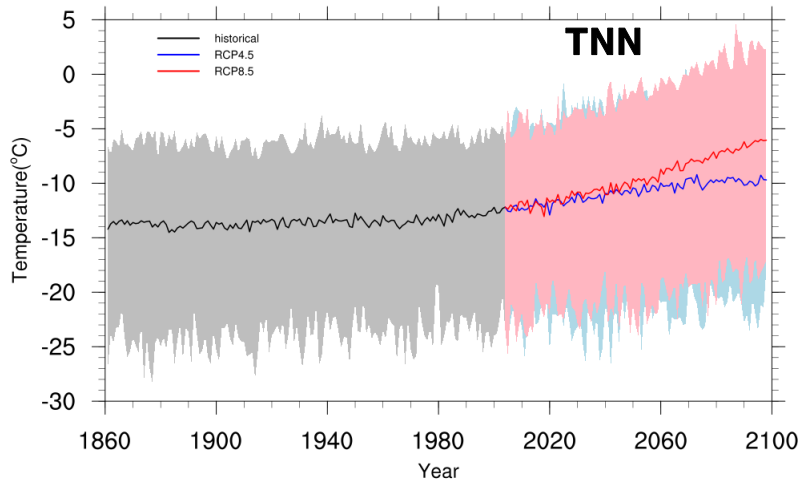


Supplementary: GEVD 기반의 TUC 추정

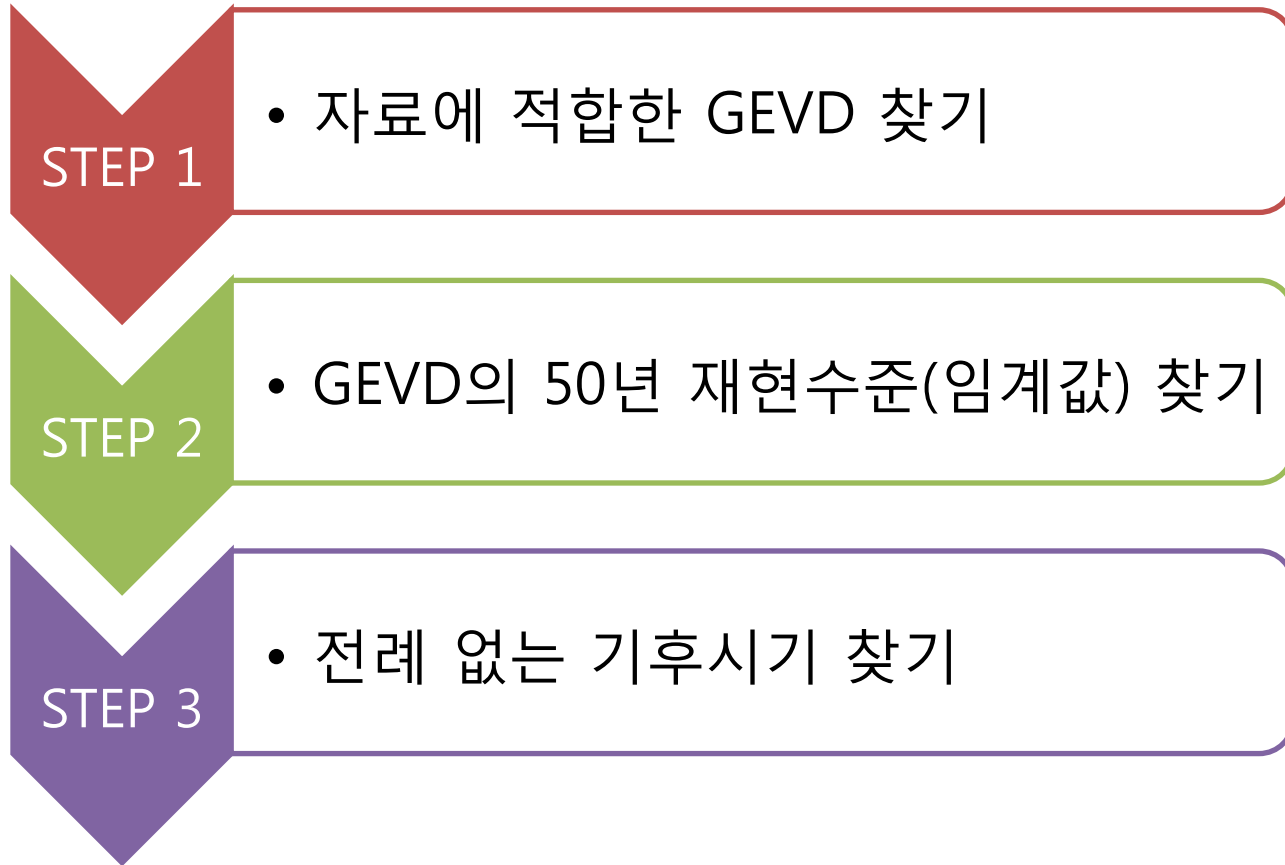
● 극한기후지수

- CLIVAR ETCCDI(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)에서 개발함.
- 4종의 재분석자료와 다수의 CMIP5 모의실험자료
- 총 27종의 핵심지수

Climate Extremes Indices	Name	Explanation of indices
TNn	Monthly minimum value of daily minimum temperature	Let TNn be the daily minimum temperature in month k, period j. The minimum daily minimum temperature each month is then; $TNn_{kj} = \min(TNn_{kj})$
TXx	Monthly maximum value of daily maximum temperature	Let TXx be the daily maximum temperature in month k, period j. The maximum daily maximum temperature each month is then; $TXx_{kj} = \max(TXx_{kj})$



Supplementary: GEVD 기반의 TUC 추정



GEVD(Generalized Extreme Value Distribution)

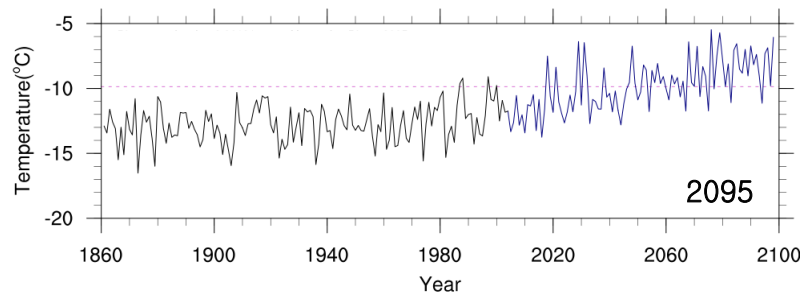
$$G(z) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\},$$

위치(location) 모수: μ
척도(scale) 모수: σ
형상(shape) 모수: ξ

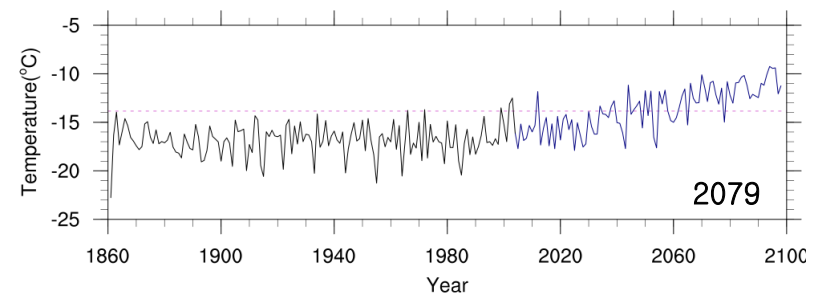
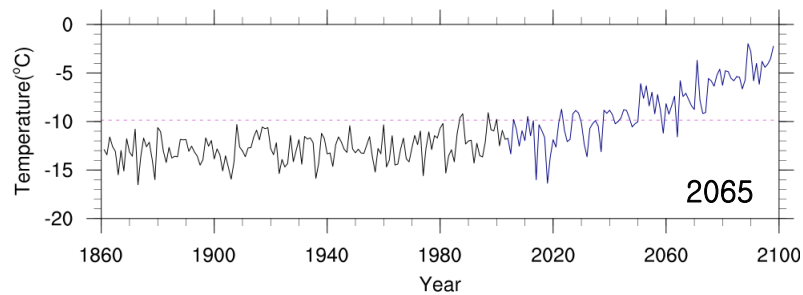
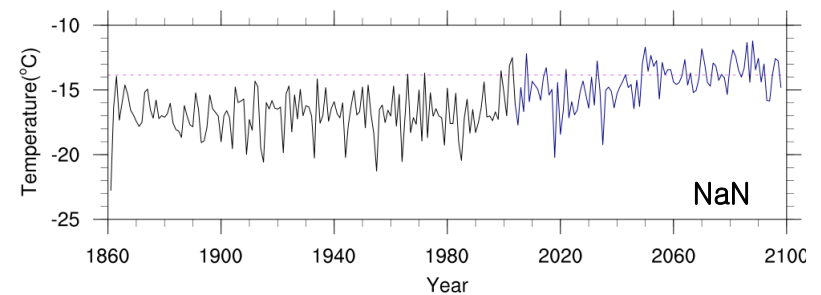


Supplementary: GEVD 기반의 TUC 추정

ACCESS1.0

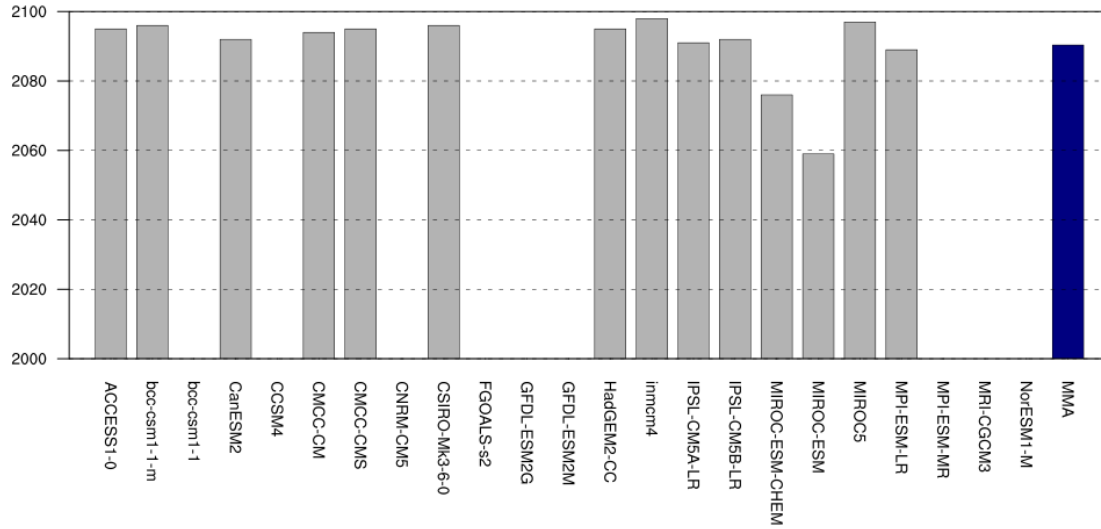


CNRM-CM5



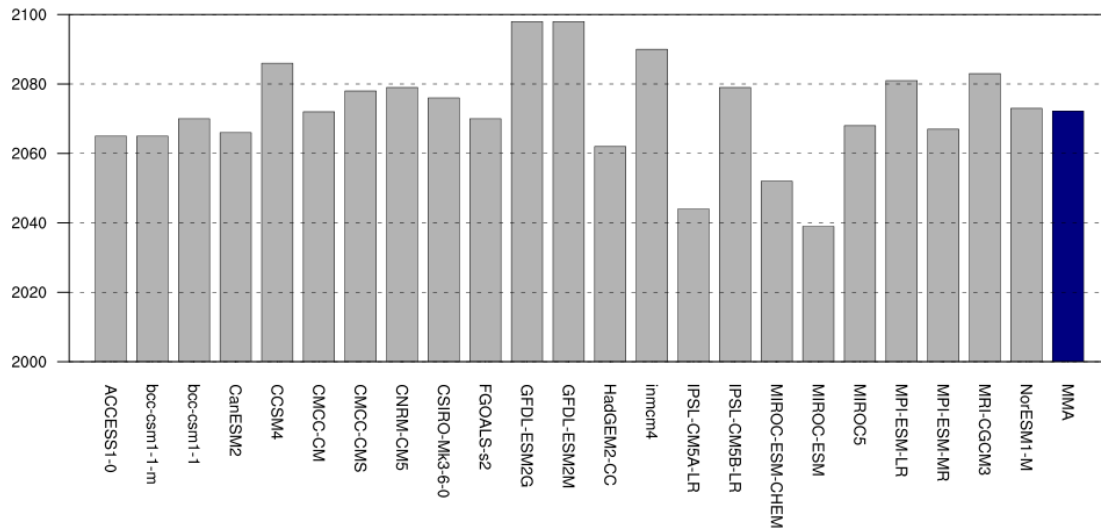
Supplementary: GEVD 기반의 TUC 추정

RCP4.5



2090년
(2059~2098년)

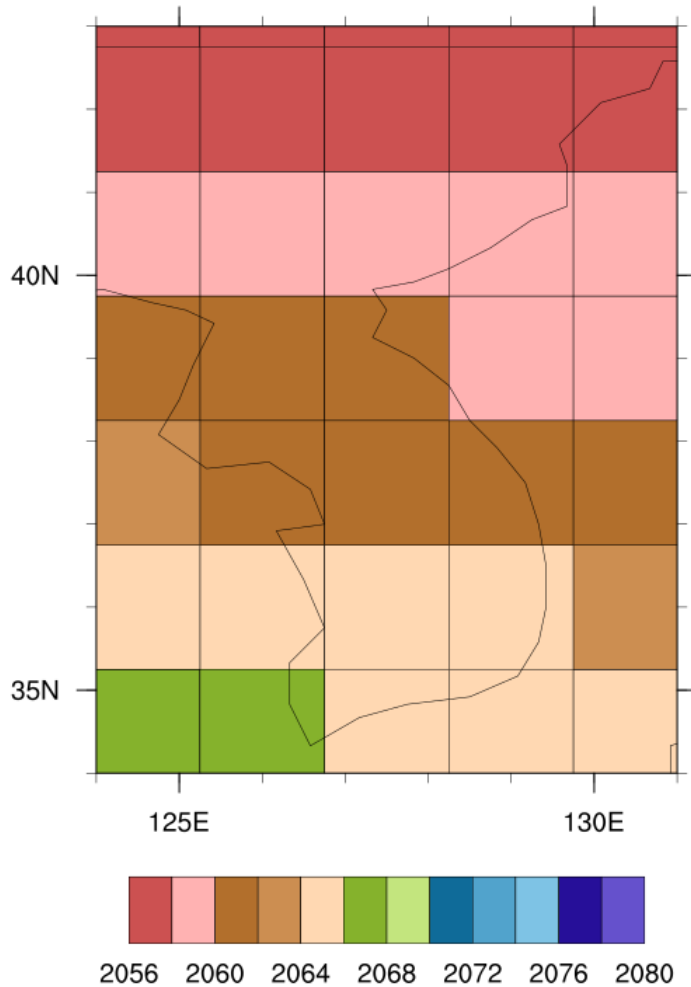
RCP8.5



2072년
(2039~2098년)



TNn under RCP8.5



TXx under RCP8.5

