미래 기후 전망 자료 활용 기후 변화 영향 평가

김선태

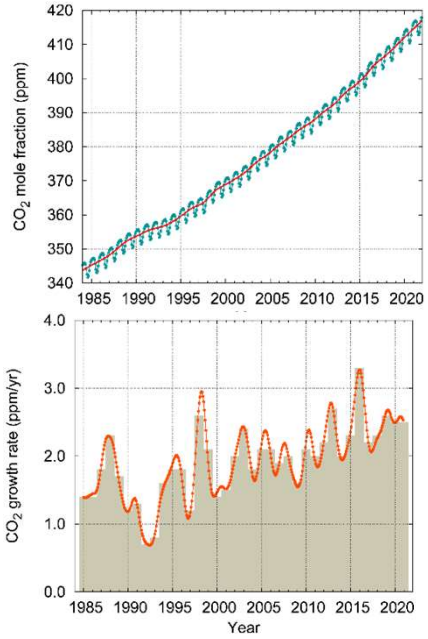
2023.7.12

기후정보생산 및 활용 사용자 워크숍

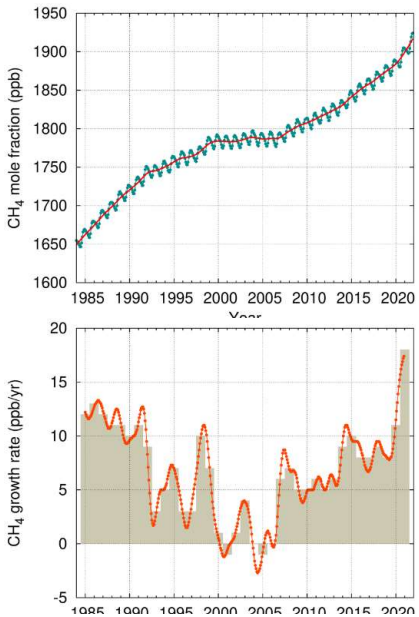
APCC
APEC 기후센터

GHG 농도

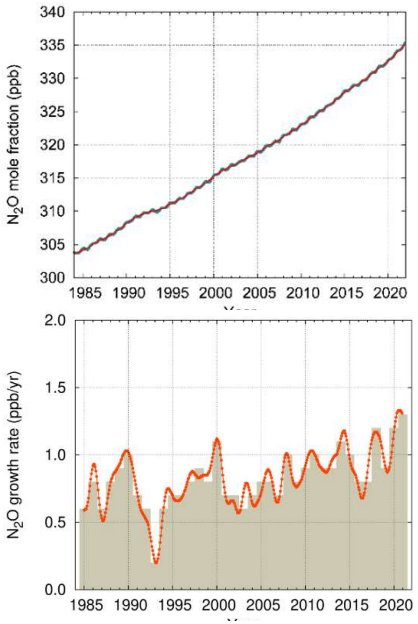
새로운 GHG 농도 기록 갱신, 메탄 농도 연 상승율이 역대 최대



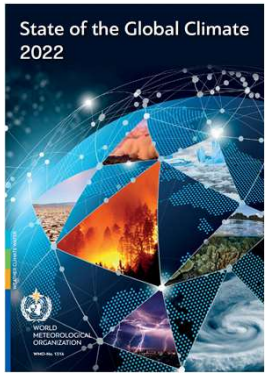
Carbon Dioxide
415.7 ± 0.2 ppm
149% of preindustrial
(1750년 기준)



Methane
1908 ± 2 ppb
262% of preindustrial



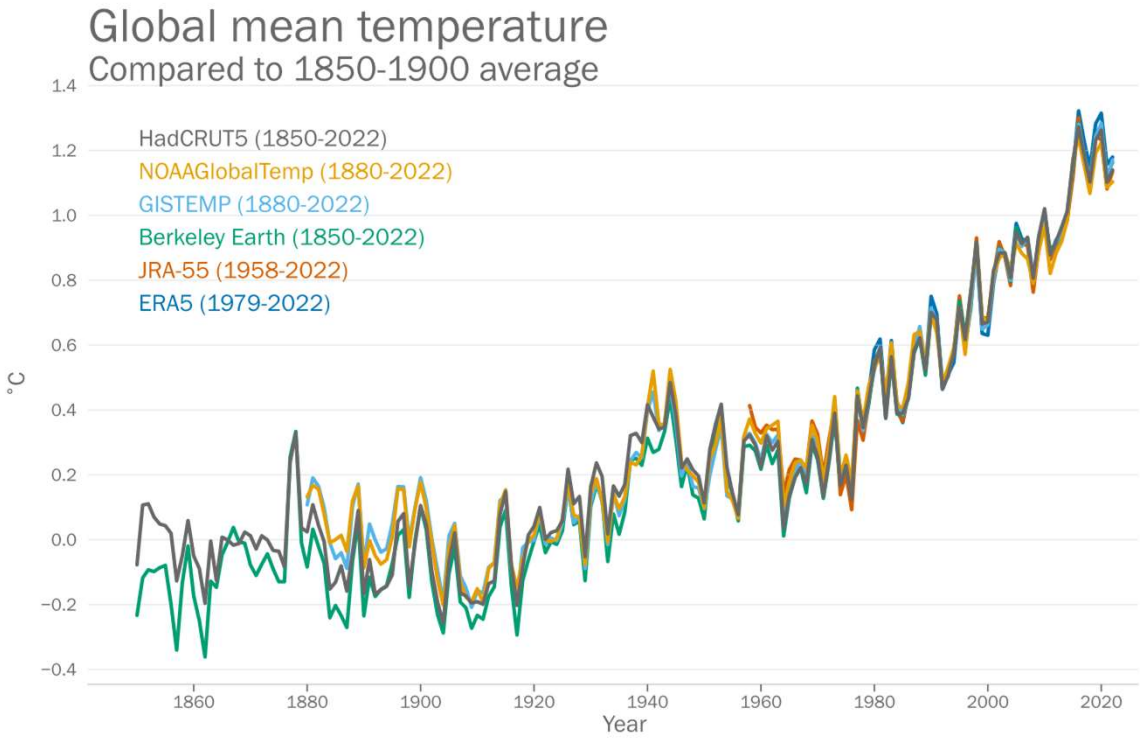
Nitrous Oxide
334.5 ± 0.1 ppb
124% of preindustrial



WMO State of Climate 2022

전지구평균기온

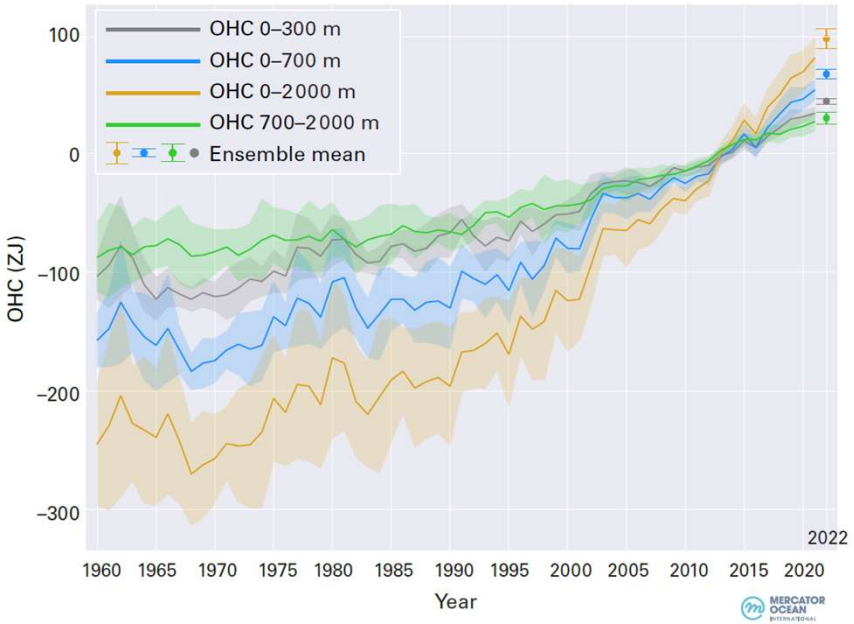
- 산업혁명 이전 기간 (1850-1900) 평균보다 1.15 [1.02 -1.28] °C 높았음
- 라니냐 발달 때문에 온난화가 주춤했으나, 1959년 이후 상위 5위를 기록함.
- 최근 10년 평균은 1.14 °C 로서 최고기록을 갱신함.



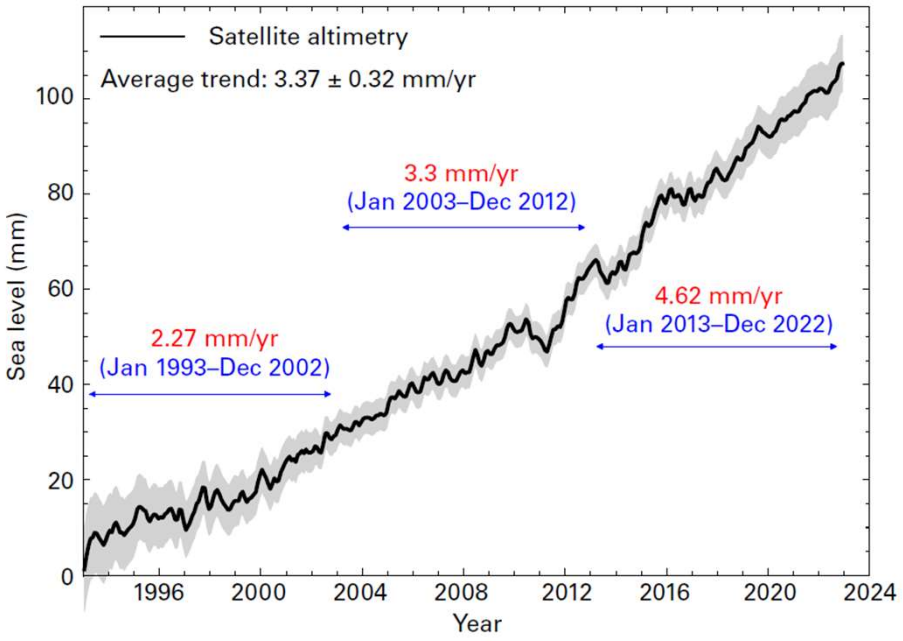
WMO State of Climate 2022

GMSL & OHC

- 해양 열용량
  - ✓ 최근 20년간 열용량 증가율이 높았음.
  - ✓ 새로운 record high 기록함



- 전지구 평균 해수면
  - ✓ 1993-2022 대비 3.4 ± 0.3 mm yr-1 상승하였으며, 새로운 record high 기록
  - ✓ 1993-2002년 대비 2013-2022 해수면 상승 두배

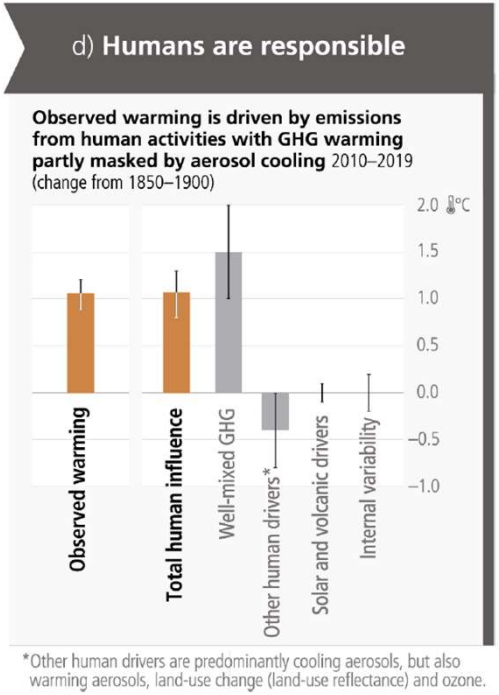


기후변화는 누구의 탓?

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)가 보는 기후변화의 원인

연도	IPCC 보고서	의미
1990	1차(AR1)	지구가 더워지는 기후변화 현상이 관찰되지만, 인간의 영향인지 확신할 수 없다.
1995	2차(AR2)	기후변화는 인간 영향이 원인 중 하나일 수 있다.
2001	3차(AR3)	기후변화는 인간 영향이 66% 이상이다.
2007	4차(AR4)	기후변화는 인간 영향이 90% 이상이다.
2013	5차(AR5)	기후변화는 인간 영향이 95% 이상이다.
2023	6차(AR6)	기후변화는 전적으로 인간 활동에 의해 초래됐다.

※ 자료: IPCC, 〈식량위기 대한민국〉(남재작) 등



IPCC AR6 (2023)

기후변화란 무엇인가?

일반적인 정의

인간의 활동에 의한 온실 효과 등의 인위적인 요인과 화산폭발, 성층권 에어로졸의 증가 등의 자연적 요인에 의한 효과를 포함하는 전체 자연의 평균 기후변동

기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법상 정의

기후변화: 사람의 활동으로 인하여 온실가스의 농도가 변함으로써 상당 기간 관찰되어 온 자연적인 기후변동에 추가적으로 일어나는 기후체계의 변화 (기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법 제2조)
기후위기: 기후변화가 극단적인 날씨뿐만 아니라 물 부족, 식량 부족, 해양산성화, 해수면 상승,생태계 붕괴 등 인류 문명에 회복할 수 없는 위험을 초래하여 획기적인 온실가스 감축이 필요한 상태를 말한다. (기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법 제2조)

IPCC 정의 | Intergovernmental Panel on Climate Change

장기간에 걸친 기간(수십년 또는 그 이상)동안 지속되면서, 기후의 평균상태나 그 변동 속에서 통계적으로 의미있는 변동 "인간 행위로 인한 것" 이든 "자연적인 변동(Variability)"이든 시간의 경과에 따른 기후의 변화를 포괄

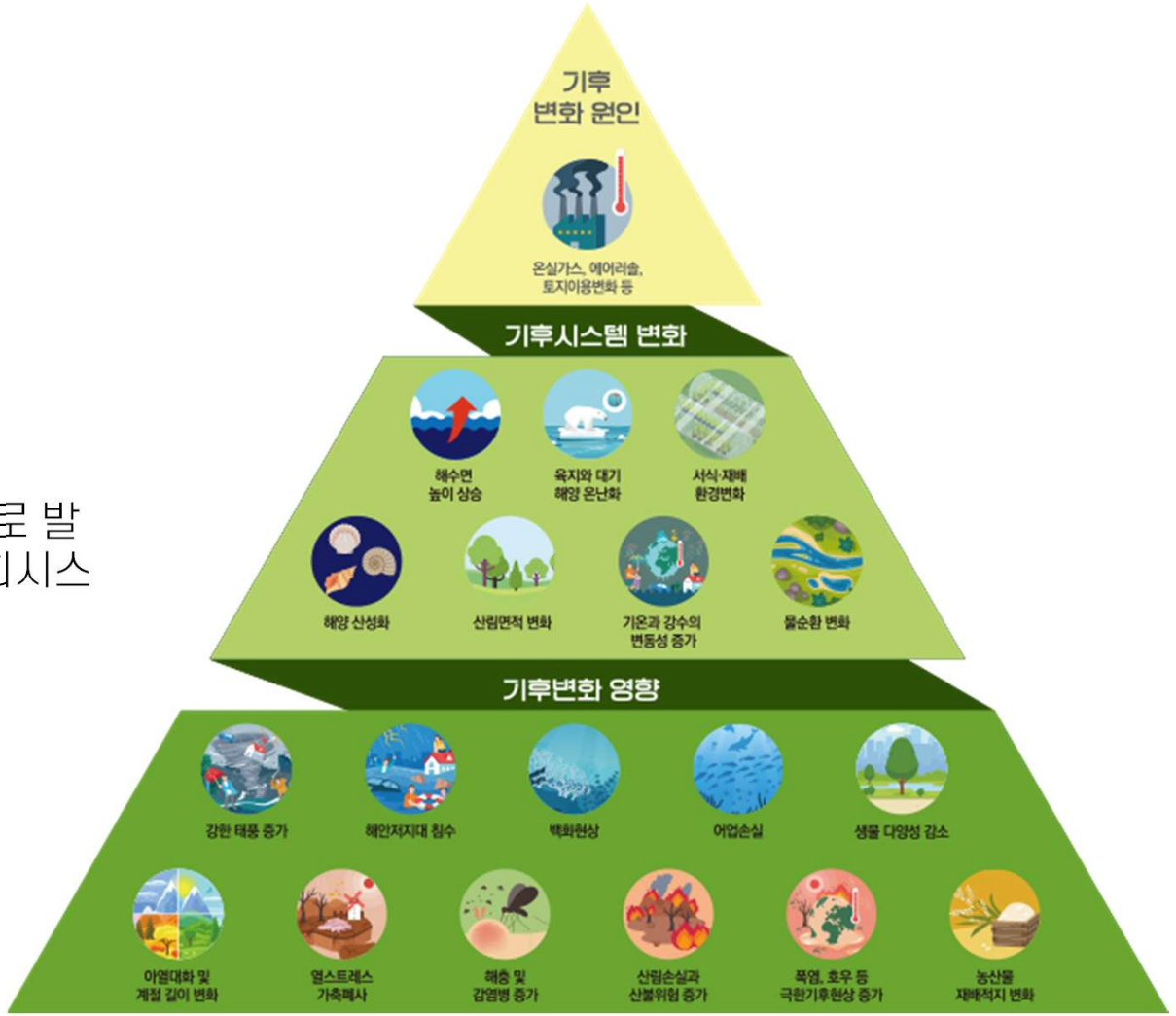
UNFCCC 정의 | United Nations Framework Convention on Climate Change

전 지구 대기의 조성을 변화시키는 인간의 활동이 직접적 또는 간접적으로 원인이 되어 일어나고,충분한 기간 동안 관측된 자연적인 기후변동성에 추가하여 일어나는 기후의 변화. 기후변화협약은 "인간 행위에 의한 기후변화"만으로 정의. UNFCCC는 대기 조성을 변경시키는 인간활동으로 인한 기후변화와 주로 자연적 원인에 의해 일어나는 기후변동성을 구분

기후변화 영향 정보

기후변화 영향

자연적이거나 인공적인 원인으로 발생한 기후의 변화가 자연과 사회시스템에 미치는 영향



기상청 기후정보포털, www.climate.go.kr

전 지구 기온 1도 증가의 의미?

전 지구 기온 1도 증가의 의미?

파리 (2도 제한) 협약

파리협약
미국, 캐나다 등의 불참, 중국, 인도 등이 개발도상국으로 분류되어 감축의무 제외, 감축의무 국가들의 온실가스 배출량이 전체 22%에 불과, 새로운 기후체계 필요서 제기
산업혁명 이전 보다 2도 이하 제한 감축 목표 동의

환경개발에 관한 UN회의 (UNCED):
114개국 정상들이 지구환경문제 논의, 기후변화협약(UNFCCC)채택(형평성, 공통의 그러나 차별화된 책임 및 개별국의 능력 원칙에 따라 선진국과 개도국에 다른 종류의 기후변화 대응 의무 부과)

당사국 회의(COP) 매년 개최 시작

교토 의정서

기후변화에 관한 정부 간 패널 (IPCC)

- 세계기상기구(WMO)과 산하기관인 환경계획(UNEP)에 의해 1988년 설립
- 인간활동에 대한 기후변화의 위험을 평가하여 그 영향 및 실현 가능한 대응 전략을 주기적으로 평가하고, 기후변화에 대한 UNFCCC의 실행에 대한 기후변화 평가보고서 발행(5~6년 주기)
- 제6차 평가보고서(2023)는 총 4개의 보고서로 구성
  - ✓ 3개의 실무그룹(WGI, II, III) 보고서와 1개의 종합보고서(SyR; Synthesis Report)
  - ✓ WG Ⅰ:기후변화의 과학적 근거, WG Ⅱ: 기후변화의 영향·적응·취약성, WGⅢ: 기후변화의 완화

기후변화 시나리오

SSP(Shared Socioeconomic Pathways, 공통사회 경제 경로)자료

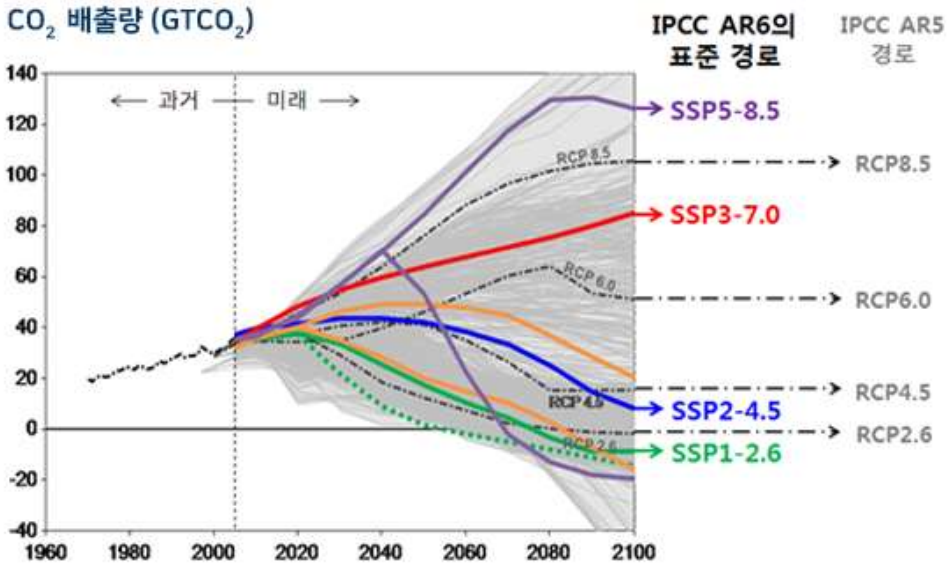
- IPCC 6차 평가 보고서를 위해 2100년 기준 복사강제력 강도와 함께 미래 사회 경제변화를 기준으로 기후변화에 대한 미래의 완화와 적응노력에 따라 5개의 시나리오를 구별
- 인구 통계, 경제발달, 복지, 생태계 요소, 자원, 제도, 기술발달, 사회적 인자, 정책 고려

SSP5-8.5 산업기술의 빠른 발전, 화석연료 사용 높고, 도시위주 무분별한 개발 가정

SSP3-7.0 기후변화 완화정책에 소극적, 기후변화에 취약한 사회구조 가정

SSP2-4.5 기후변화 완화와 경제발전정도가 중간 단계를 가정

SSP1-2.6 화석연료 사용 최소, 친환경적 지속가능 경제성장 가정

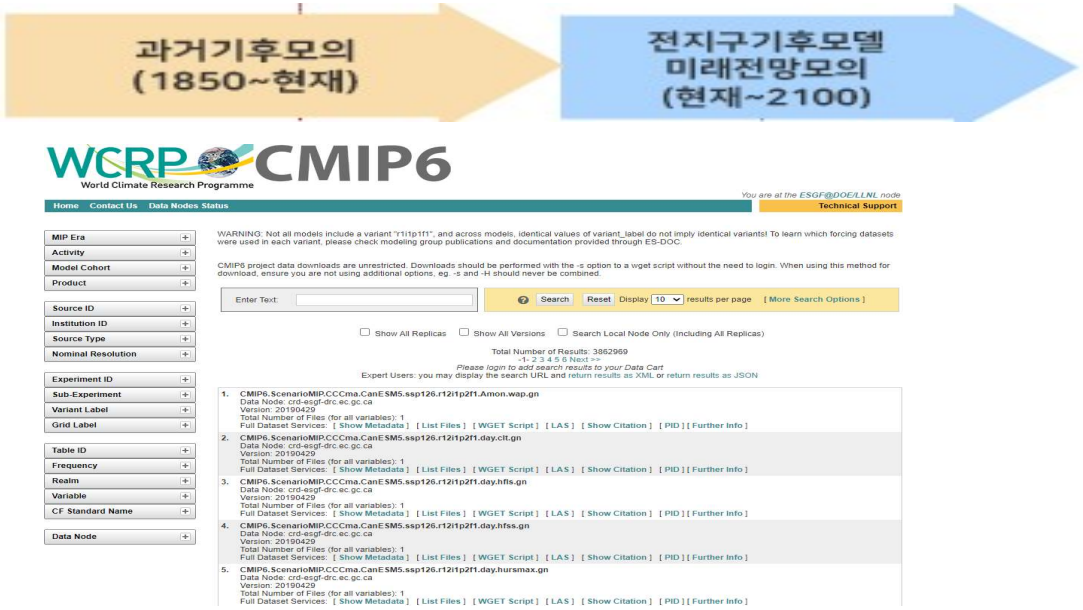


기상청 기후정보포털, www.climate.go.kr

기후변화 시나리오

산출 방법

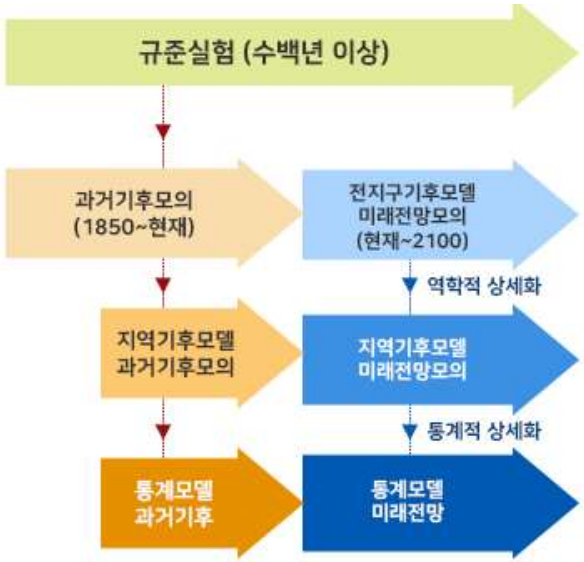
- 과거기후모의 (historical run): 1850년 부터 현재(2014년)까지의 관측된 기후 강제력에 의한 모의
- 미래 전망 모의(SSP run): 과거기후 모의 자료의 마지막 값에서 시작 SSP 강제력에 따른 2100년까지 모의
- 세계기후연구프로그램 (WCRP)의 CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) 이라는 프로젝트를 통해 산출
- 세계 유수 기후 센터에서 in-house 모델을 사용 공통된 시나리오 자료를 강제력으로 기후 자료 생산 함.
  - ✓ 다중 모델 자료 활용 과거기후 대비 미래 기후에서 주요 기후 변수들의 변화 분석 가능
  - ✓ 모델 consensus, 모델들의 과거 기후 모의 스킬 등 활용 하여 미래 기후변화 영향 결과 도출

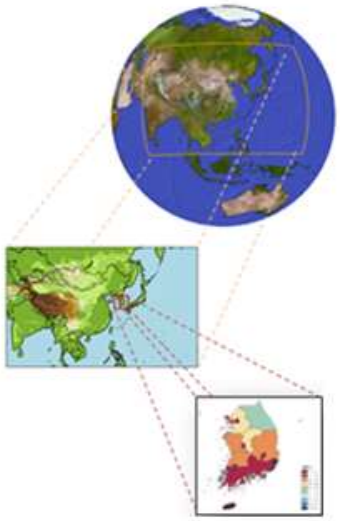


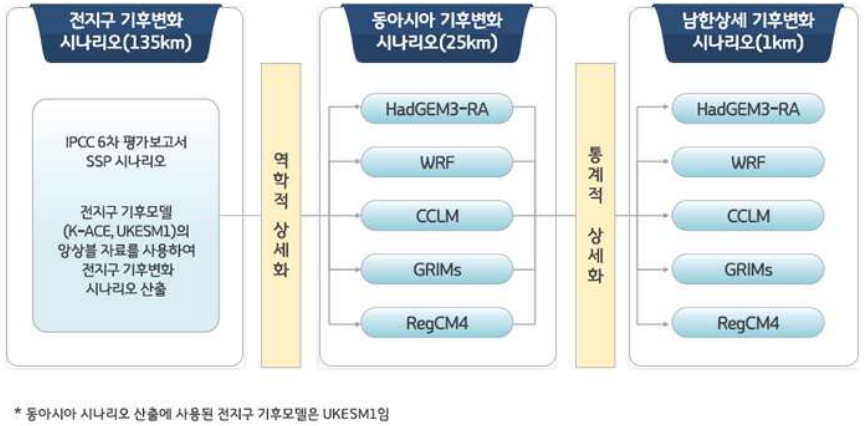
4AOP-v1-5	ECMWF-IFS-HR	MPI-ESM-1-2-HAM
ACCESS-CM2	ECMWF-IFS-LR	MPI-ESM-1-2-HR
ACCESS-ESM1-5	ECMWF-IFS-MR	MPI-ESM-1-2-LR
ARTS-2-3	FGOALS-f3-H	MPI-ESM-1-2-XR
AWI-CM-1-1-HR	FGOALS-f3-L	MRI-AGCM3-2-H
AWI-CM-1-1-LR	FGOALS-g3	MRI-AGCM3-2-S
AWI-CM-1-1-MR	FIO-ESM-2-0	MRI-ESM2-0
AWI-ESM-1-1-LR	GFDL-AM4	NESM3
BCC-CSM2-HR	GFDL-CM4	NICAM16-7S
BCC-CSM2-MR	GFDL-CM4C192	NICAM16-8S
BCC-ESM1	GFDL-ESM2M	NICAM16-9S
CAMS-CSM1-0	GFDL-ESM4	NorCPM1
CAS-ESM2-0	GFDL-GRTCODE	NorESM1-F
CESM1-1-CAM5-CMIP5	GFDL-OM4p5B	NorESM2-LM
CESM1-CAM5-SE-HR	GFDL-RFM-DISORT	NorESM2-MM
CESM1-CAM5-SE-LR	GISS-E2-1-G	RRTMG-LW-4-91
CESM1-WACCM-SC	GISS-E2-1-G-CC	RRTMG-SW-4-02
CESM2	GISS-E2-1-H	RTE-RRTMGP-181204
CESM2-FV2	GISS-E2-2-G	SAM0-UNICON
CESM2-WACCM	GISS-E3-G	TaiESM1
CESM2-WACCM-FV2	HadGEM3-GC31-HH	TaiESM1-TIMCOM
CIESM	HadGEM3-GC31-HM	UKESM1-0-LL
CMCC-CM2-HR4	HadGEM3-GC31-LL	
CMCC-CM2-SR5	HadGEM3-GC31-LM	
CMCC-CM2-VHR4	HadGEM3-GC31-MH	
CMCC-ESM2	HadGEM3-GC31-MM	
CNRM-CM6-1	HiRAM-SIT-HR	
CNRM-CM6-1-HR	HiRAM-SIT-LR	
CNRM-ESM2-1	IITM-ESM	
CanESM5	INM-CM4-8	
CanESM5-CanOE	INM-CM5-0	
E3SM-1-0	INM-CM5-H	
E3SM-1-1	IPSL-CM6A-ATM-HR	
E3SM-1-1-ECA	IPSL-CM6A-LR	
EC-Earth3	IPSL-CM6A-LR-INCA	
EC-Earth3-AerChem	KACE-1-0-G	
EC-Earth3-CC	KIOST-ESM	
EC-Earth3-LR	LBLRTM-12-8	
EC-Earth3-Veg	MCM-UA-1-0	
EC-Earth3-Veg-LR	MIROC-ES2L	
EC-Earth3P	MIROC6	
EC-Earth3P-HR		
EC-Earth3P-VHR		

기후변화 시나리오

산출 방법







- CMIP 전 지구 기후 시나리오 자료들은 135km 공간 해상도를 가짐 – 세부적인 지역의 기후 분석의 어려움이 있음
- 역학적 상세화: CMIP 시나리오 자료를 입력 값으로 하는 지역 기후 모델을 활용 동 아시아 등 특정 지역의 고해상도(25km) 자료 생산. 전지구 모델에서 표현하기 어려운 작은 규모의 대기현상과 지형효과 등이 반영 될 수 있음.
- 통계적 상세화: 통계적 방법 활용 국가 공간 규모(예: 대한민국)의 초 고해상도 (1km 해상도) 기후변화 시나리오 자료 생산.

기상청 기후정보포털, www.climate.go.kr

기후변화 시나리오

Large Ensemble

- Single model initial-condition large ensemble(SMILE): 다른 초기조건 사용, 동일 외부 강제력 (예 지구온난화 시나리오)과 한 개의 모델 사용 →단일 모델의 수십개 이상의 자료 생산 가능
  - ✓ 기후시스템의 내부변동성과 외부 강제력(즉 인간활동에 의한 지구온난화)의 영향을 정량화 및 분리할 수 있음.
    - ➢ CMIP 모델 자료는 한 개의 모의 결과여서 모델 내부 변동성과 외부 강제력 영향 분리 불가능
  - ✓ 기후 이벤트(특히 이상기후 이벤트)의 sample을 증가시켜서 좀더 분명한 외부 강제력 즉 지구 온난화의 기후 이벤트 발생에 대한 영향 결과 획득 가능

Modeling Center	Model Version	Model Resolution (atm/ocn)	Years	Initialization Method	Forcing (Number of Members)	Reference (*ESGF reference)
CCCma	CanESM5	~2.8°x2.8°/~1.4°x0.9°	1850-2014	Macro	hist-nat (50), hist-GHG (50), hist-aer (30), hist-sol (50), hist-volc (50)	??
CNRM	CNRM-CM6-1	~1.4°x1.4°/nominal 1°	1850-2014	Macro	hist-nat (10)	*Voldoire (2018)
NASA	GISS-E2-1-G	~2°x2.5°/~1°x1.25°	1850-2014	Macro	hist-nat (20)	*NASA GISS (2019)
IPSL	IPSL-CM6A-LR	~2.5°x1.25°/~1.0°x0.5°	1850-2014	Macro	hist-nat (10)	Boucher et al. (in review)
MIROC	MIROC6	~1.4°x1.4°/nominal 1°	1850-2014	Macro	hist-nat (50)	Tatebe et al. (2019)
NCAR	CESM1-CAM5	~1.3°x0.9°/nominal 1.0°	1920-2080	Micro	everything-but-GHG (20), everything-but-anthropogenic-aer (20), everything-but-biomass-burning (15; only until 2029), everything-but-LULUC (5; only until 2029)	Deser et al. (2020, J. Climate)
NCAS	HadGEM3-GC3.1	~1.25°x1.9°/nominal 1.0°	1850-2014	Macro	Aerosol scaling: 0.2× (5), 0.4× (5), 0.7× (5), 1.0× (5), 1.5× (5)	Dittus et al. (2020, Geophys. Res. Lett.)

US CLIVAR Large Ensemble Working Group

CMIP 시나리오 자료 활용

IPCC AR6 SPM

With every increment of global warming, regional changes in m
climate and extremes become m
widespread and pronounced

IPCC AR6 Figure SPM.2

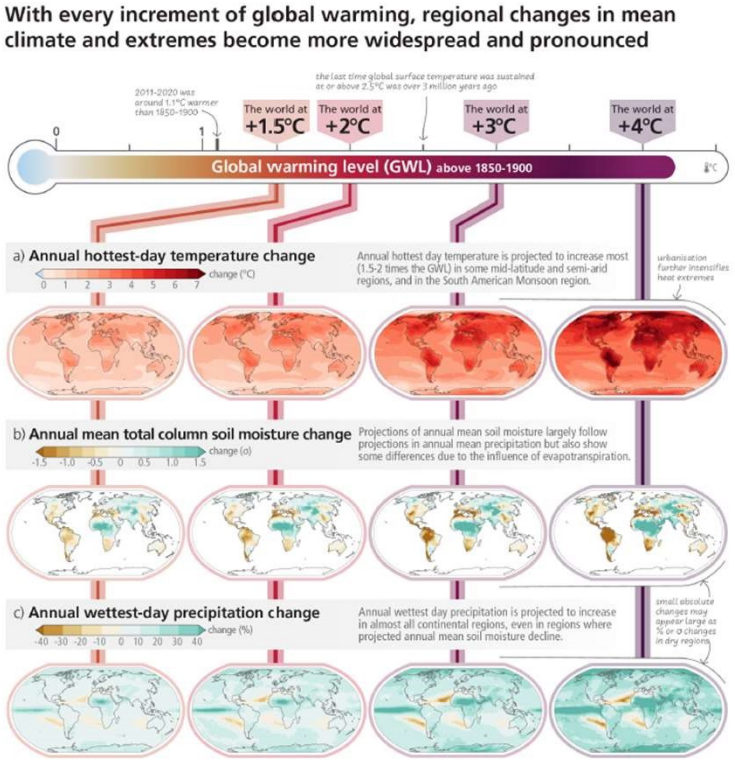
지구 온난화가 증가할 때마다, 평균 기후와
적 변화는 더 광범위해지고 뚜렷해진다

Sixth Assessment Report | Synthesis Report

지구온난화 수준별 연간 일최고기온의 변화

지구온난화 수준별 가뭄 강도 변화

지구온난화 수준별 연간 최대 1일 강수량 변화



ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change

Future climate change is projected to increase the severity of impacts across natural and human syst increase regional differ

IPCC AR6 Figure SPM.3

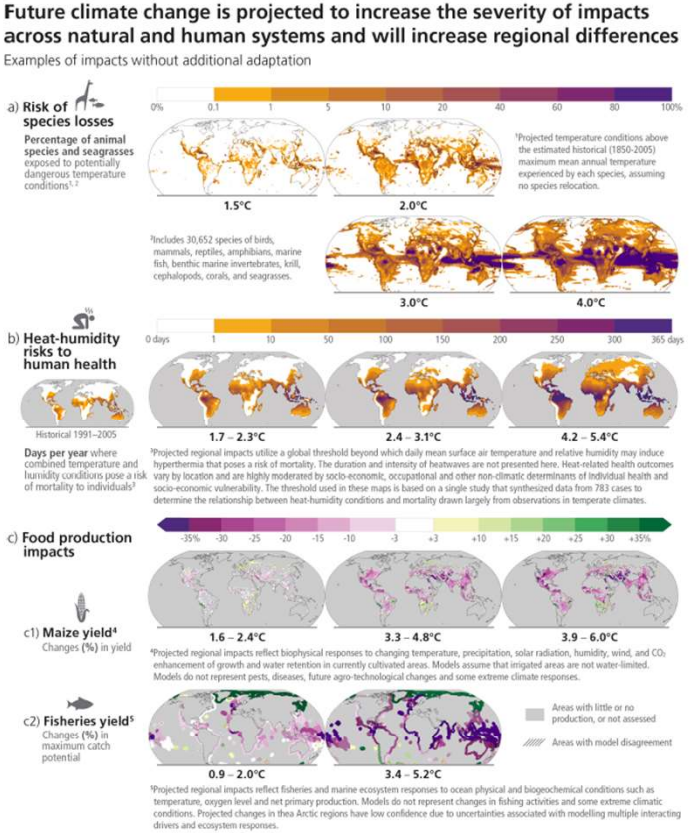
미래 기후변화는 자연과 인간 시스템 전반에
각성을 증가시키고, 지역적 차이를 증가시킬

Sixth Assessment Report | Synthesis Report

다양한 지구온난화 수준에서의 위험
온도 조건에 노출 되는 동물 종의 비율

지구 온난화 수준 별 인간 건강에 치명적인 극한 기온과 습도 조건이 발생하는 한해 동안 총 날수

식품 생산에 미치는 영향
옥수수 생산량의 변화
최대 어업 잠재력 변화



ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change

동아시아 상세시나리오 자료 활용

APCC 연구결과

한반도 태풍 미래 전망

전지구모형 기반 태풍활동지수 변화

- CMIP6 전지구 시나리오 모델 중 UKESM 모형을 이용하여 기후변화에 따른 시나리오별 미래 태풍 변화 전망을 태풍 활동 지수, Genesis Potential Index(GPI)를 이용하여 분석
- 현재(Historical, 1979-2014) 대비 저탄소 시나리오와 고탄소 시나리오 전망을 비교

GPI(Genesis potential index)

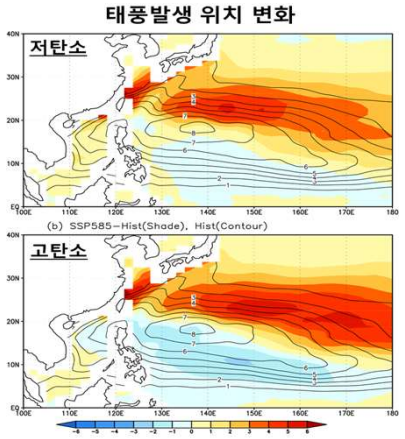
- Genesis potential index (GPI) (Murakami and Wang, 2010)

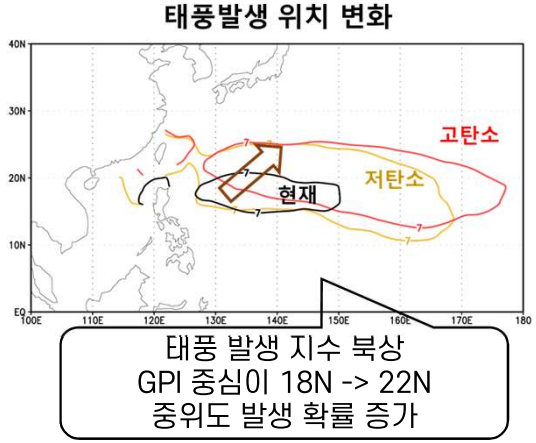
$$\text{Modified GPI} = \underbrace{|10^5\eta|^{\frac{3}{2}}}_{\text{Absolute vorticity at 850-hPa}} \underbrace{\left(\frac{RH}{50}\right)^3}_{\text{Relative humidity at 700-hPa}} \underbrace{\left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^3}_{\text{Potential intensity}} \underbrace{(1+0.1V_s)^{-2}}_{\text{Vertical wind shear}} \underbrace{\left(\frac{-\omega+0.1}{0.1}\right)}_{\text{Omega at 500-hPa}}$$

PI(Potential Intensity)

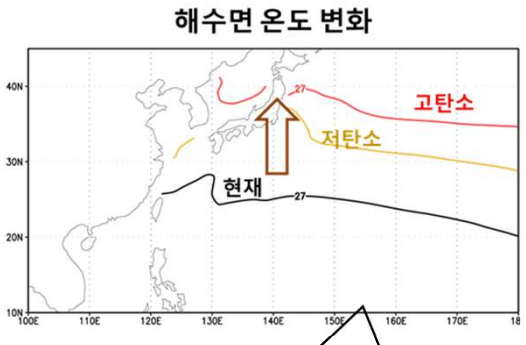
$$V_{max} = \alpha \sqrt{\left\{\left(\frac{C_k}{C_D}\right)\left(\frac{T_s}{T_o}\right)(CAPE^* - CAPE)_m\right\}}$$

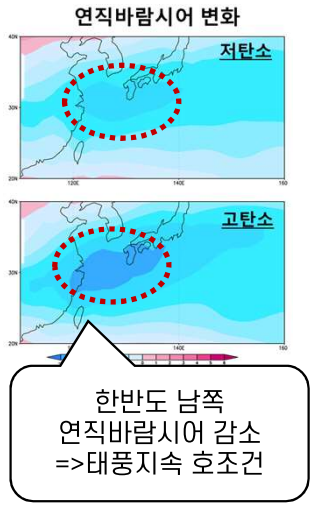
$\frac{C_k}{C_D} = 0.9$
C_k = the exchange coefficient for enthalpy
C_D = a drag coefficeint
T_s = SST
T_o = the mean outflow temperature
(temperature at the level of neutral buoyancy)
$CAPE^*$ = the convective available potential energy of air lifted from saturation at sea level in reference to the environmental sounding
$CAPE$ = that of boundary layer air (the vertical sounding is an environmental sounding)





- 태풍발생 위치(GPI>7)가 현재 북위 18도에서 미래 북위 22도로 북상하는 동시에 동서로 확장함,
- 고탄소 시나리오에서 더욱 뚜렷한 공간패턴 변화 및 강도 변화를 보임



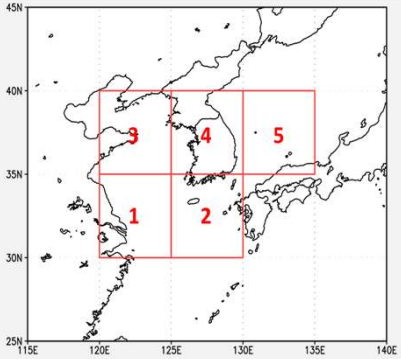


- 태풍 활동 지수 (GPI)기여 변수 상세 분석 결과, **잠재강도(PI)관련 SST**는 고탄소 중위도 지역에서 매우 강한 고온 현상을 보이며 이러한 고온 지역이 한반도 인근까지 확장됨
- **연직바람시어**(VWS)는 **중위도 지역에서 큰 감소**, 이러한 변화는 WNP에서 발생한 태풍이 한반도 주변 지역까지 도달할 경우 **태풍이 더 오래 지속**될 수 있음을 의미함

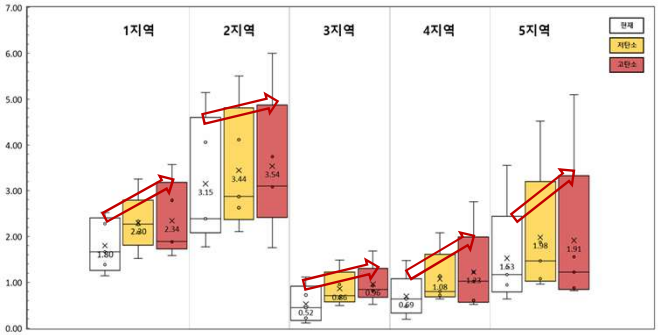
한반도 태풍 미래 전망

동아시아 고해상도 모형 기반 태풍 밀도 변화 분석

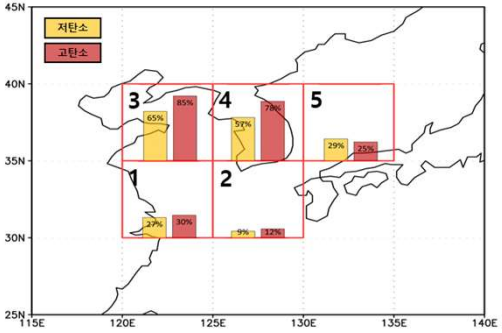
- 태풍활동지수를 통해 주요 태풍 발생 해역(WNP)의 태풍 발생 미래 변화는 알 수 있지만, WNP 발생 태풍 중 **한반도에 직간접적 영향을 주는 태풍의 미래 변화**에 대해서는 알 수 없으므로, **고해상도 상세 기후 시나리오로 추가 분석**
- CORDEX-EA 25km 5개(RegCM, GRIMs, WRF, CCLM, HadGEM3-RA)**모형** 6시간 자료를 이용, 모형별 임계값(하단 파란 박스)에 기반하여 태풍을 감지하고 추적함
- 한반도 인근 5개 지역을 선정(하단 붉은 박스)하고, 현재 대비(1979-2014) 지역별 미래 전망 분석



태풍 진로 밀도 미래변화



변화율

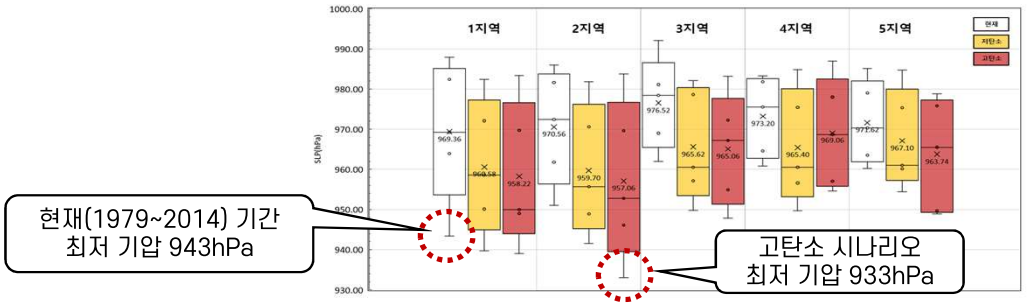


- 5개 지역 모두 증가 추세(증가율 12~85%)이며 고탄소 시나리오에서 증가율이 특히 높음
- 현재 기후에서 태풍발생 고밀도 지역(1,2,5 지역)의 증가율보다 저밀도 지역(3,4지역)의 증가율이 높음
- 서해>내륙>남서해>동해>남해 순으로 증가율이 높을 것으로 전망되며, 고탄소 시나리오 경우 서해(3지역)와 내륙(4지역)에서 85%, 78%의 증가율로 각각 전망됨

한반도 태풍 미래 전망

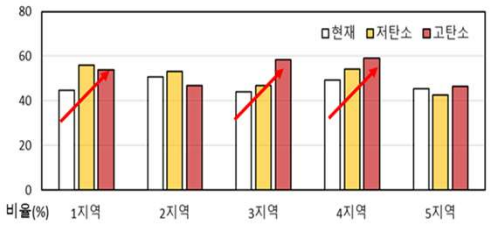
동아시아 고해상도 모형 기반 태풍 강도 변화 분석

최저 중심 기압 미래변화

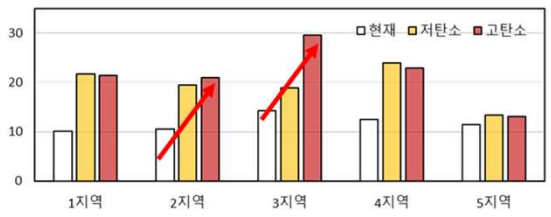


- 중심 기압은 현재 대비 모든 지역에서 강화되는 추세로 나타남.
- 고탄소 시나리오에서는 2지역에서 최저 중심기압 933hPa의 태풍을 전망함.

현재 대비 강한 태풍 비율



현재 대비 매우 강한 태풍 비율



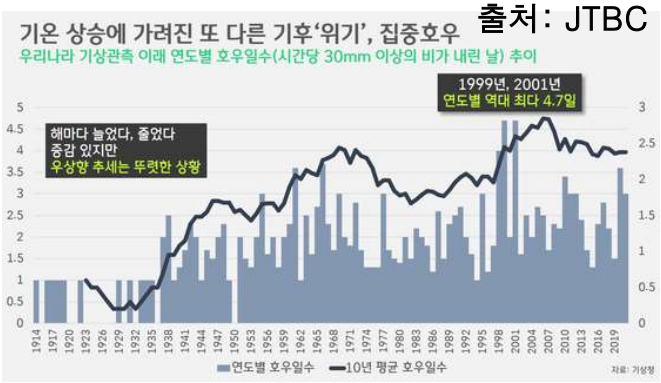
※ 태풍은 중심기압이 낮고 풍속이 빠를수록 위력이 강력함

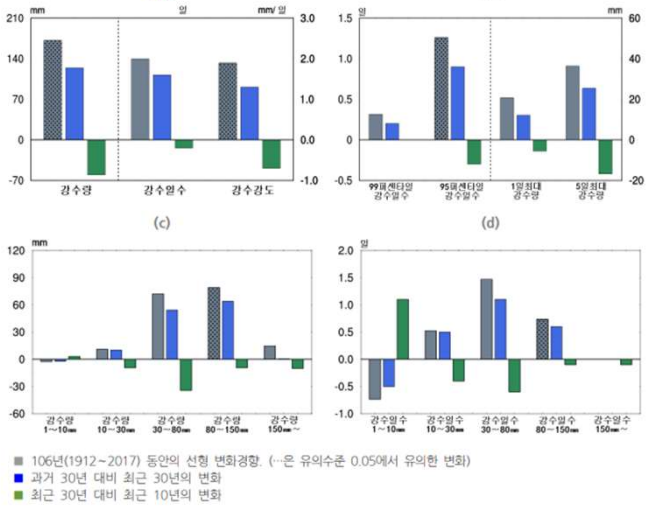
한반도 상세시나리오 자료 활용

APCC 연구결과

미래 홍수위험도 전망

출처: JTBC



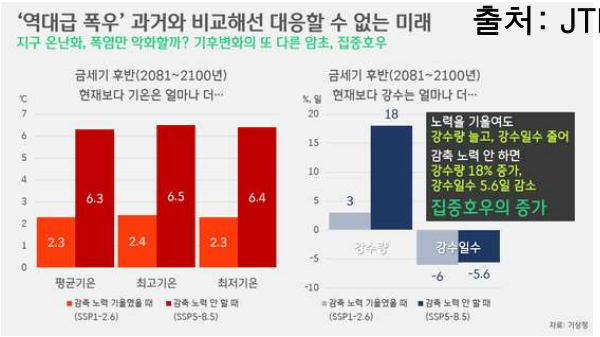


[우리나라의 106년(1912~2017) 동안 강수 및 강수관련 극한기후지수 변화]

출처:한반도 100년 기후변화, 기상청

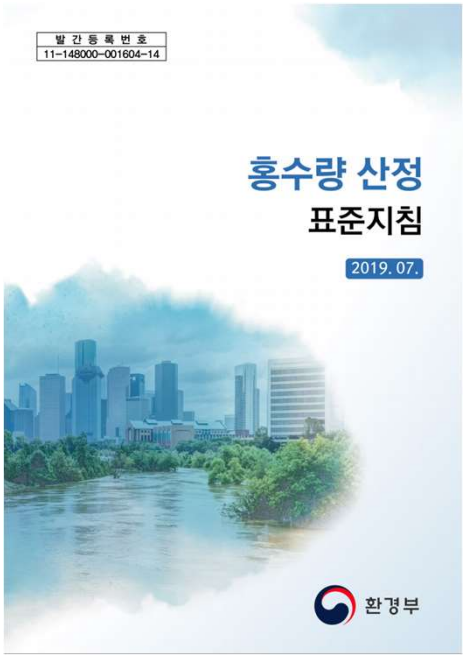
- 2020년 우리나라는 태풍, 호우로 인해 1조 2,585억원의 재산 피해, 46명 인명피해 발생→최근 10년 대비 약 3배 이상의 피해
- 2022년 8월 상순 후반 (8~11일) 정체 전선에 의한 수도권, 서울을 중심으로 강한 집중 호우 내림. 특히, 8월 8일에 서울과 경기도를 중심으로 시간당 100 mm가 넘는 기록적인 강수가 내려 저지대 곳곳이 침수되는 등 많은 피해 발생
- 지난 106 년동안 우리나라 연강수량은 증가 (+16.3mm/10년)하였으나, 강수일수 변화 없음.
  - ✓ 강한 강수 증가하고, 약한강수 감소
  - ✓ 강수일수의 변화는 없으나, 강한 강수 (80mm 이상)의 강수일수가 증가함.
- 미래 고탄소 시나리오의 경우 집중 호우 증가 양상

출처: JTBC



미래 홍수위험도는 ?

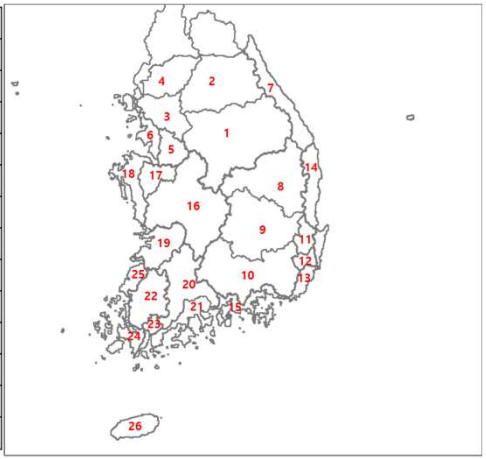
미래 홍수위험도 전망



- 수공 구조물 설비 설계는 강수량 빈도해석(예, 100년 빈도 강수량, 즉 100년에 한번 나타날 극한 강수량)에 의한 확률 강수량을 기반으로 이루어짐.
- 현재 과거 관측 자료의 확률 강수량을 기반으로 설계 되어있어서, 기후변화 영향으로 예를 들면 100년 빈도 강수량의 크기가 증가한다면 수공구조물의 홍수 위험도가 증가한다는 것을 의미함.
- 미래 기후변화의 피해를 최소화하고 잘 적응하기 위해서 미래 기후변화에 따른 확률 강수량 변화를 평가해야함.

- 기상청 대권역(26개) 하천별 미래 기후변화 시나리오에 따른 홍수위험도[재현빈도(20,50,100년) 강수량 변화율 기반]를 산정하고자 함

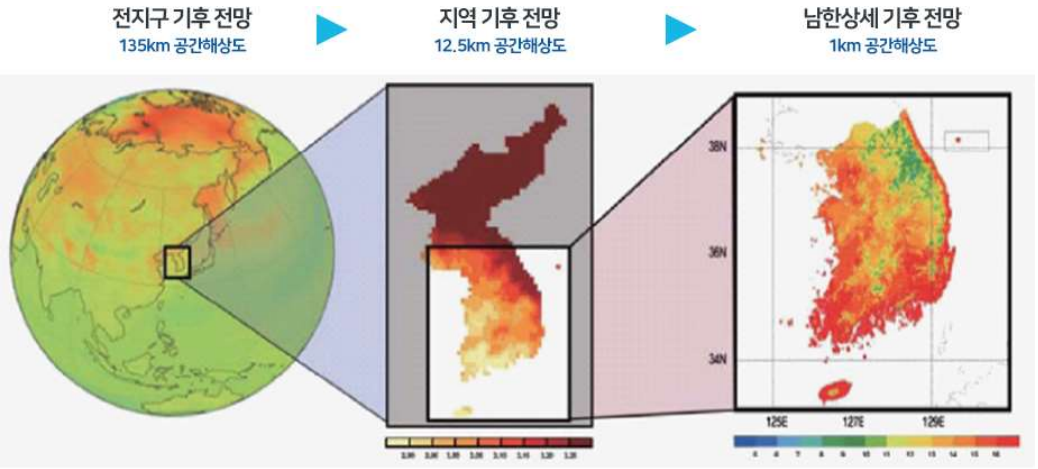
번호	KMA 대권역	번호	KMA 대권역
1	남한강	14	낙동강동해
2	북한강	15	낙동강남해
3	팔당댐 하류	16	금강
4	임진강	17	삽교천
5	안성천	18	금강서해
6	한강서해	19	만경동진
7	한강동해	20	섬진강
8	낙동강상류	21	섬진강남해
9	낙동강중류	22	영산강
10	낙동강하류	23	탐진강
11	형산강	24	영산강남해
12	태화강	25	영산강서해
13	회야·수영	26	제주도



미래 홍수위험도 전망

한반도 상세(1Km) 일 누적 강수자료

- 현재 관측자료 (2000-2019): 한반도 관측 자료 사용 통계적 상세화 적용 (MK-PRISM)
- 미래 시나리오(2021-2100): SSP1-2.6, SSP5-8.5 (역학적, 통계적 상세화 적용)
  - ✓ 지역 기후 모델: HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs
  - ✓ 변수: 평균기온, 최고기온, 최저 기온, 강수량
  - ✓ 격자: 1km



HadGEM2-AO

CMIP6 모델(UKESM) 시나리오 자료

HadGEM3-RA

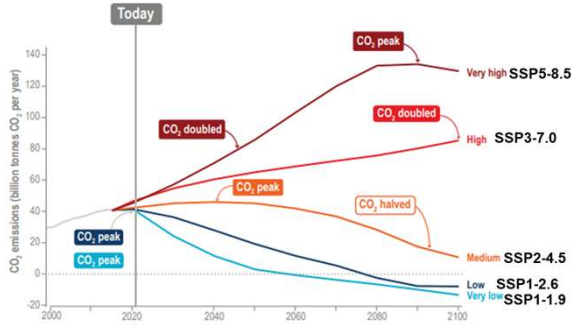
지역 기후 모델 (역학적 상세화)

PRIDE

통계적 상세화

기상관측자료를 PRIDE에 적용하여 상세 관측 자료 생산

SSP (Shared Socioeconomic Pathway) 시나리오 경로



고탄소 시나리오 (SSP5-8.5)

저탄소 시나리오 (SSP1-2.6)

미래 홍수위험도 전망

강우 빈도 해석을 위한 확률 분포형

- 수문자료 가운데서 강우자료에 적합한 분포형으로 GEV와 Gumbel 분포형이 자주 선정됨
- 확률 강우량도(건교부, 2000)에서는 한반도 강우자료에 적합한 확률 분포형으로 Gumbel 분포형을 채택

GEV−1 $[\beta(\text{shape}) = 0]$ 분포 (GEV: $F(x) = exp\left[-\left(1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha}\right)^{(1/\beta)}\right]$)

CDF: $F(x) = exp\left\{-exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right]\right\}$

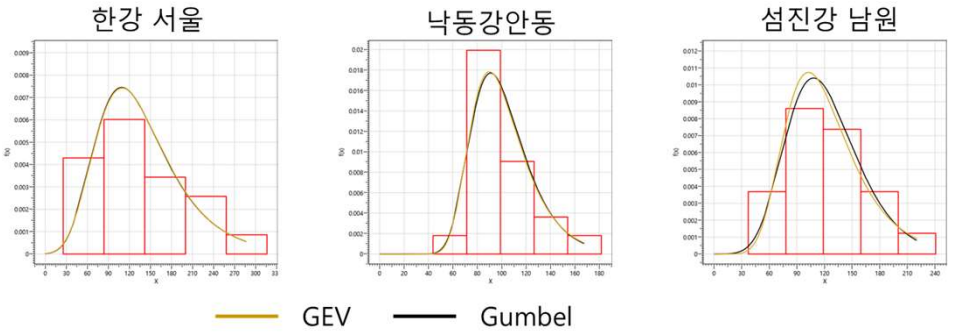
PDF: $f(x) = \frac{1}{\alpha} exp\left\{-\frac{(x-x_0)}{\alpha} - exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right]\right\}$,
$-\infty < x < \infty$, α: scale, x_0: location

- ✓ 2개의 매개변수를 결정해야함.
- ✓ 환경부 홍수량 산정 표준 지침 (2019.7)에서는 확률 가중 모멘트법 채택을 원칙으로 제시하고 있음

확률 분포형의 CDF의 역함수를 사용하여 계산

Gumbel: $x_T = x_0 - \alpha ln - ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)$
재현 기간 T의 강수량 x_T

재현기간별 확률강수량

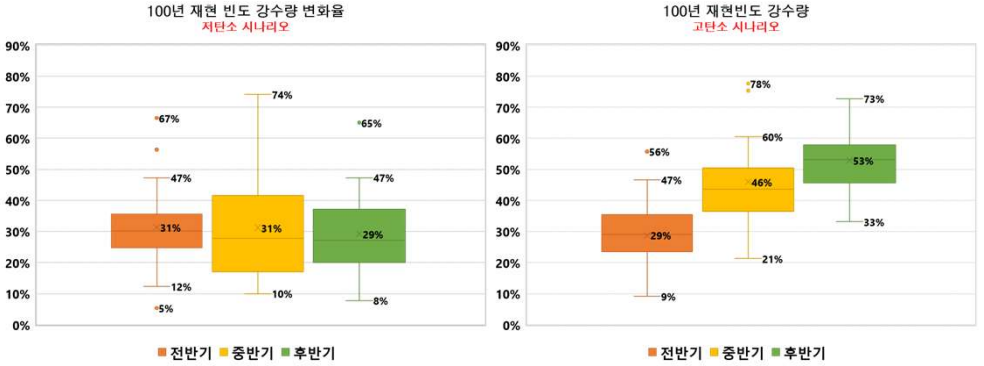


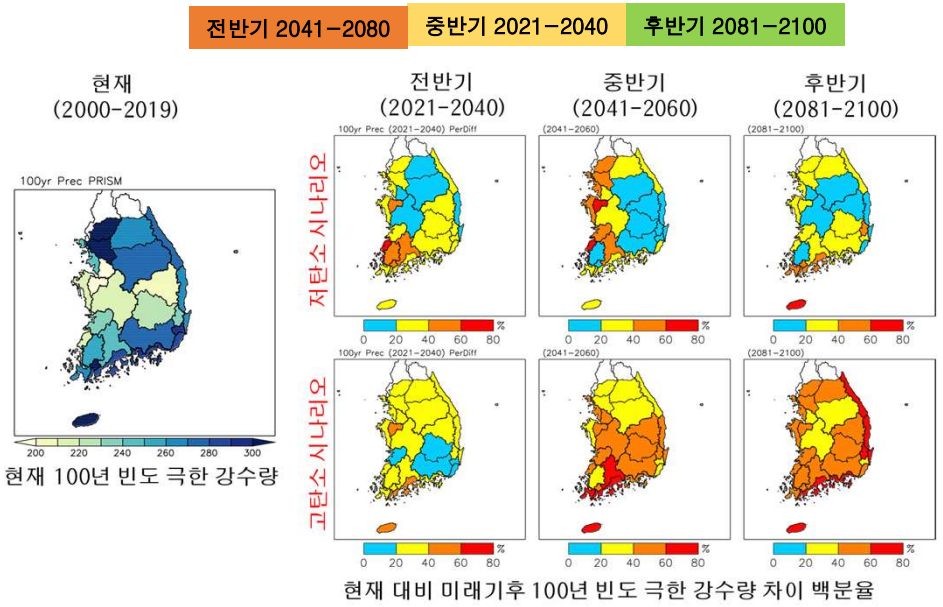
GEV: Generalized Extreme Value
CDF: Cumulative Distribution Function
PDF: Probability Density Function

미래 홍수 위험도 전망

전국 및 26개 권역별 평균

- 미래 유역별 현재(2000~2019년) 대비 기후 변화 시나리오에 따른 재현빈도 극한 강수량의 변화량(백분율)으로서 정량화함
- 고탄소 시나리오: 100년 재현빈도 극한 강수량 변화율은 현재 대비 21세기 전/중/후반기에 각각 29%, 46%, 53% 증가하는 것으로 전망
- 저탄소 시나리오: 현재 대비 21세기 전/중/후반기에 100년 빈도 극한 강수량이 각각 31%(14.35~162.6mm), 31%(5.68~168.0mm), 29%(18.94~280.56mm) 증가가 예상, 전반기 이후에는 고탄소 시나리오의 극한 강수량 증가에 비해 상당히 감소할 것으로 전망
  - ✓ 이는 향후에 탄소중립 정책의 효과로 지구온난화 진행속도가 줄어들 수 있어, 홍수의 원인이 되는 극한 강수의 감소로 인한 홍수발생 가능성을 낮출 수 있다는 것을 암시함





태양광 에너지 전망

태양광 잠재량 평가

$$PVpot(t) = P_R \frac{RSDS(t)}{RSDS_{stc}}$$

- *STC*: 표준 시험 조건 ($RSDS_{STC}$= 1,000 Wm^{-2})을 의미하며 이 조건에 대해서 측정된 전력 출력으로 PV 장치의 공칭 용량이 결정됨.
- P_R : 성능비율 (performance ratio), 셀 온도의 변화에 기인하는 PV 셀 효율성 변화를 나타내는 식

$$P_R = 1 + \gamma(T_{cell}(t) - T_{STC}),\ T_{STC} = 25℃,\ \gamma = -0.005℃^{-1}$$

$$T_{cell}(t) = c_1 + c_2 TAS(t) + c_3 RSDS(t) + c_4 VWS(t)$$

$$c_1 = 4.3℃,\ c_2 = 0.943,\ c_3 = 0.028℃m^2W^{-1},\ c_4 = -1.528℃sm^{-1}$$

- 주변조건이 STC에 상응한다면 PVpot =1 이고 전력생산량은 정격값에 도달함.

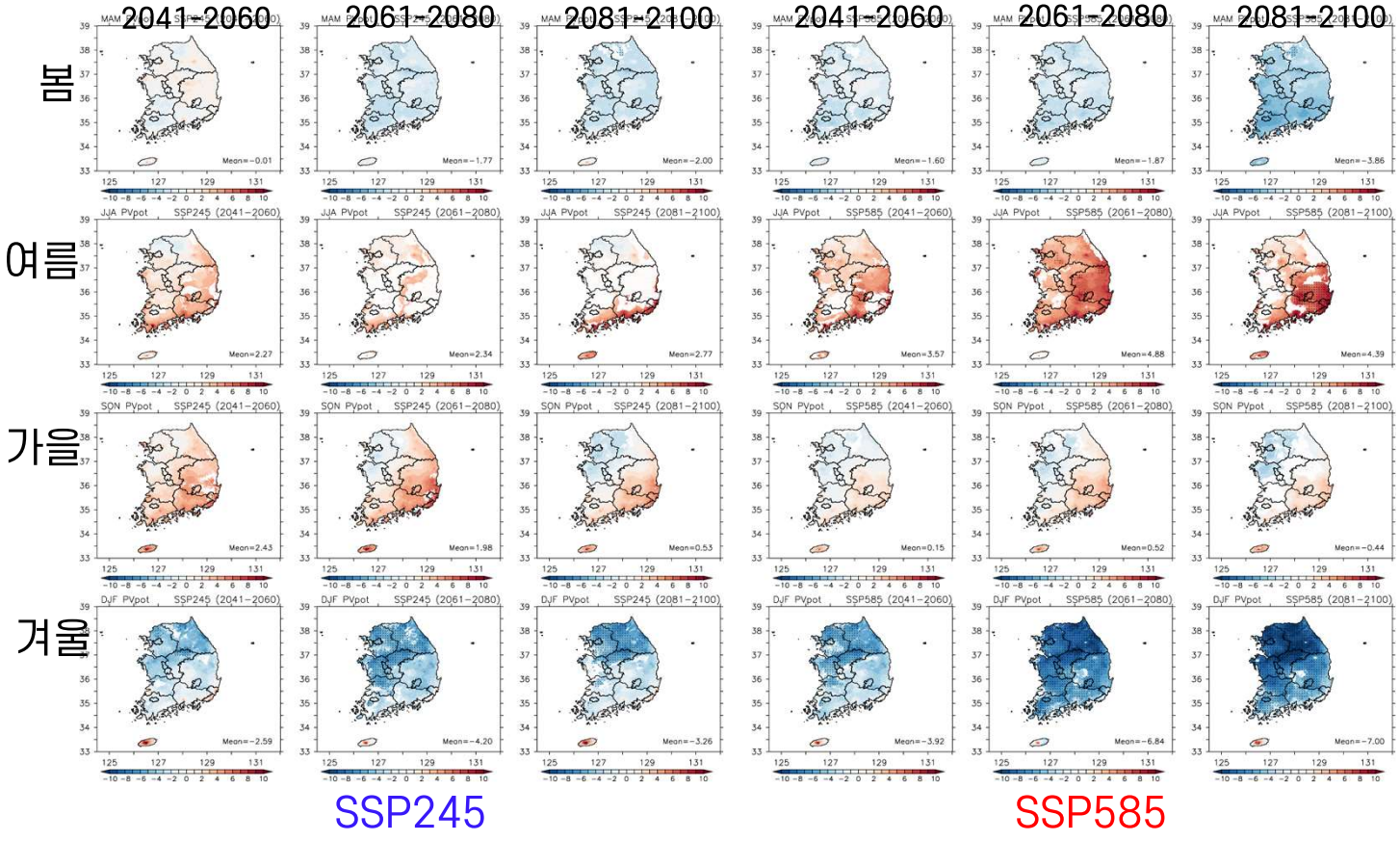
Jerez et al. 2015, Park et al. 2022, Poddar et al. 2021

태양광 에너지 전망

태양광 잠재량 변화

(2021-2040) 평균대비

- 모델 간 consensus와 변화 유의성을 고려 (Tabaldi et al. 2011)
  - ✓ 변화가 통계적으로 유의하며, 50% 이상 모델이 같은 sign : significant agreement, dot 로 표시
  - ✓ 변화가 통계적으로 유의하지 않고, 50% 이상 모델이 같은 sign: non-significant agreement, 색깔 음영
  - ✓ 50% 미만으로 모델간 불일치: uncertain, white로 표시



- (봄/겨울철) 후반기로 갈수록 잠재량 감소 경향.
  - ✓ 고탄소 시나리오에서 감소 경향 더 큼
  - ✓ 겨울철에만 유의한 감소 경향 보임
  - ✓ 서울,경기,인천, 충청남/북도에서 상대적으로 잠재량 감소폭 더 큼
- (여름철) 잠재량 증가 경향
  - ✓ 고탄소 시나리오에서 증가 경향 더 강하지만, 통계적 유의한 증가는 21세기 후반기 경상남/북도 지역에서만 나타남.
  - ✓ 저탄소 시나리오에서 모델간 증가 경향에 대한 일치는 보이나 유의한 변화에 대하여는 불확실성을 보임.

태양광 에너지 전망

011)

significant agreement, dot 로 표시

gn: non-significant agreement, 색깔 음영

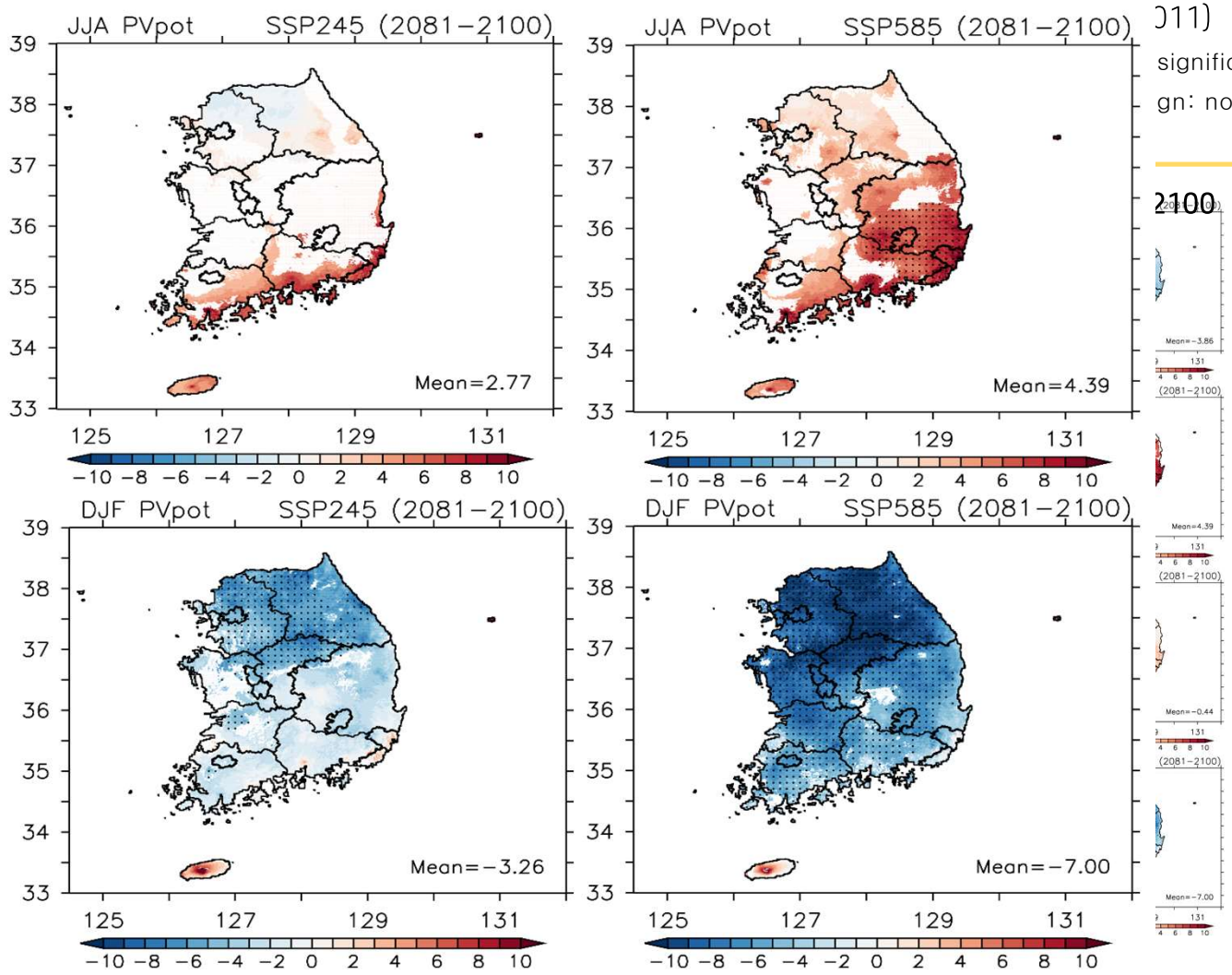
2100

봄

여름

가을

겨울



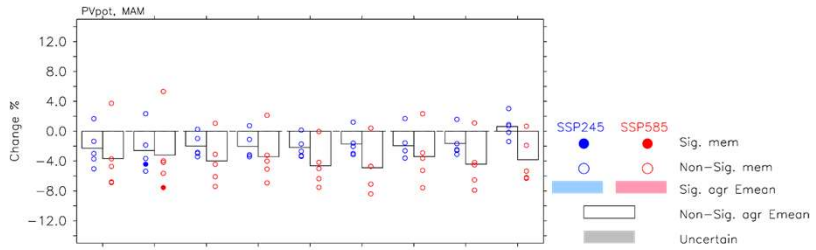
- (봄/겨울철) 후반기로 갈수록 잠재량 감소 경향.
  - ✓ 고탄소 시나리오에서 감소 경향 더 큼
  - ✓ 겨울철에만 유의한 감소 경향 보임
  - ✓ 서울,경기,인천, 충청남/북도에서 상대적으로 잠재량 감소폭 더 큼
- (여름철) 잠재량 증가 경향
  - ✓ 고탄소 시나리오에서 증가 경향 더 강하지만, 통계적 유의한 증가는 21세기 후반기 경상남/북도 지역에서만 나타남.
  - ✓ 저탄소 시나리오에서 모델간 증가 경향에 대한 일치는 보이나 유의한 변화에 대하여는 불확실성을 보임.

태양광 에너지 전망

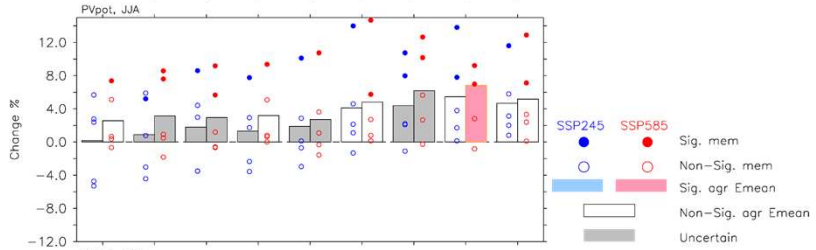
태양광 잠재량 변화

현재기후(2014-2019) 평균대비 21세기 후반(2081-2100) 변화

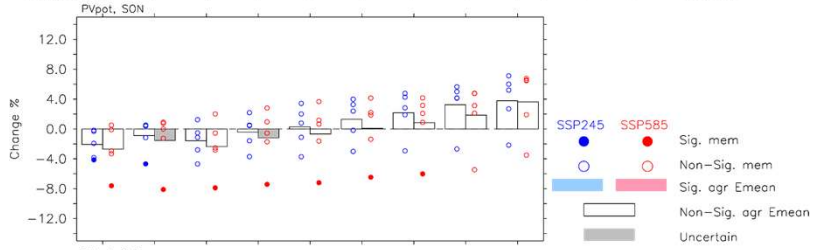
봄



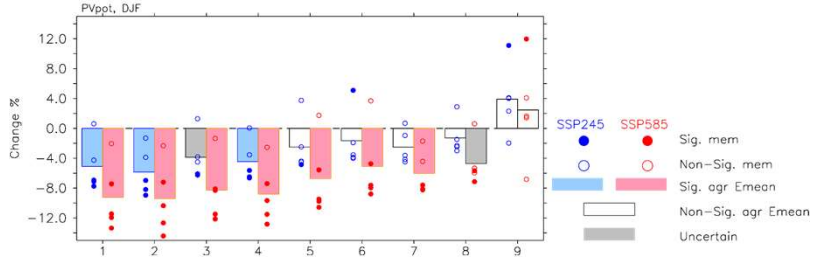
여름

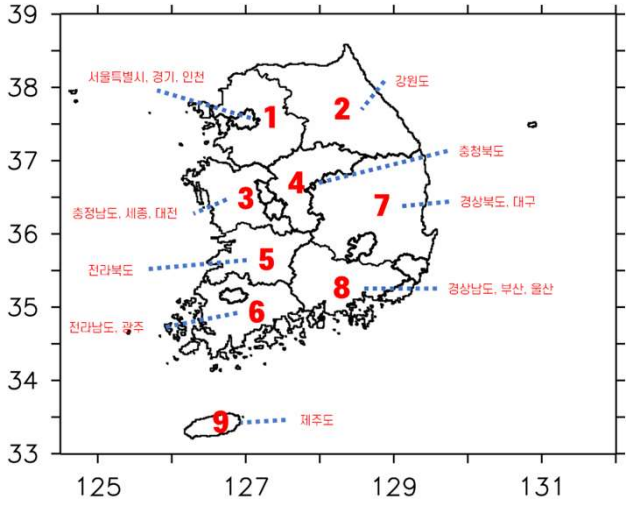


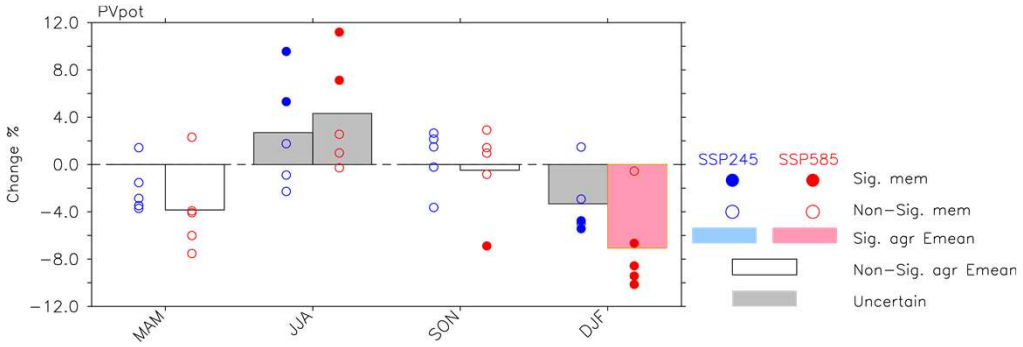
가을



겨울







Large Ensemble 모델 자료 활용

Climate Change Attribution

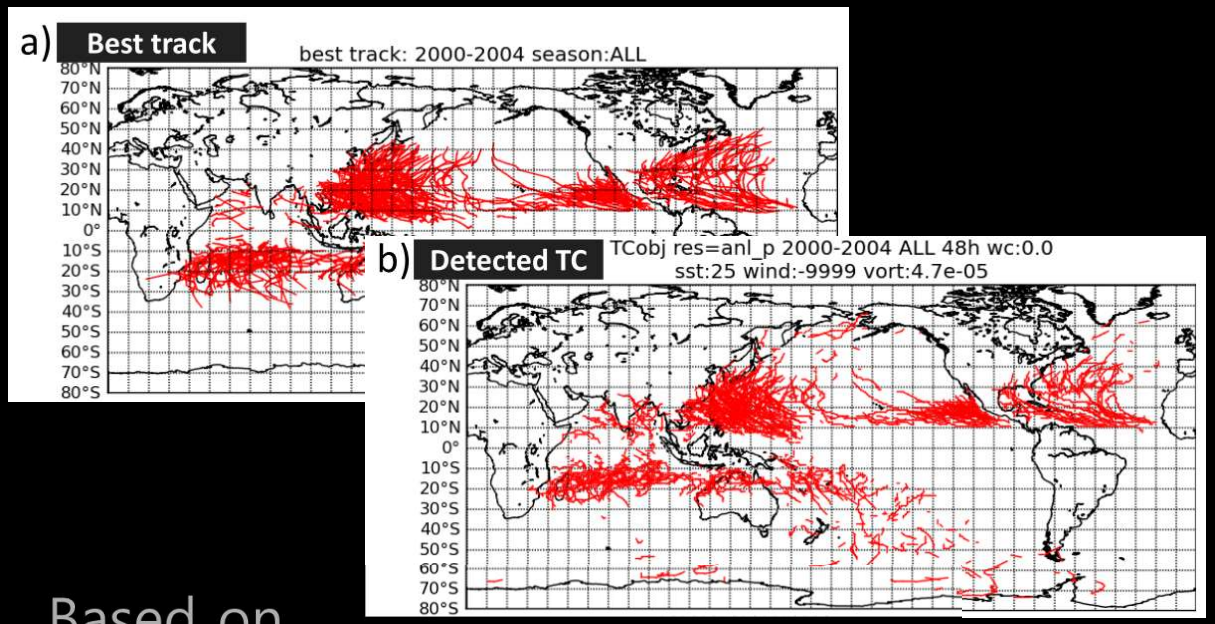
Large Ensemble Climate Simulation & Objective Detection

d4PDF

database for Policy Decision making for Future climate change

- Mizuta et al., 2017

+ AMIP-type experiments
+ 60km resolution
+ Historical / Non-warming experiments
+ 100 ensemble simulations for each experiment (1961 – 2010)



Based on
+ Sea level pressure
+ Vorticity
+ Wind speed
+ Temperature profile (warm core)

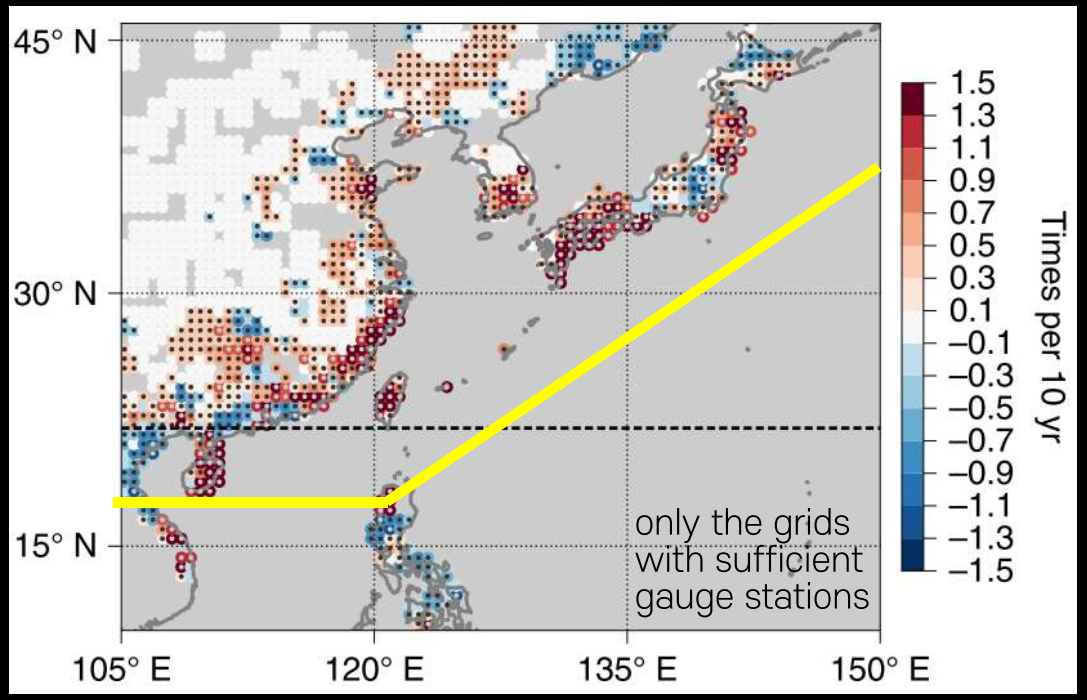
Utsumi, Kim et al. (*J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016)

KAIST 김형준 교수 발표자료

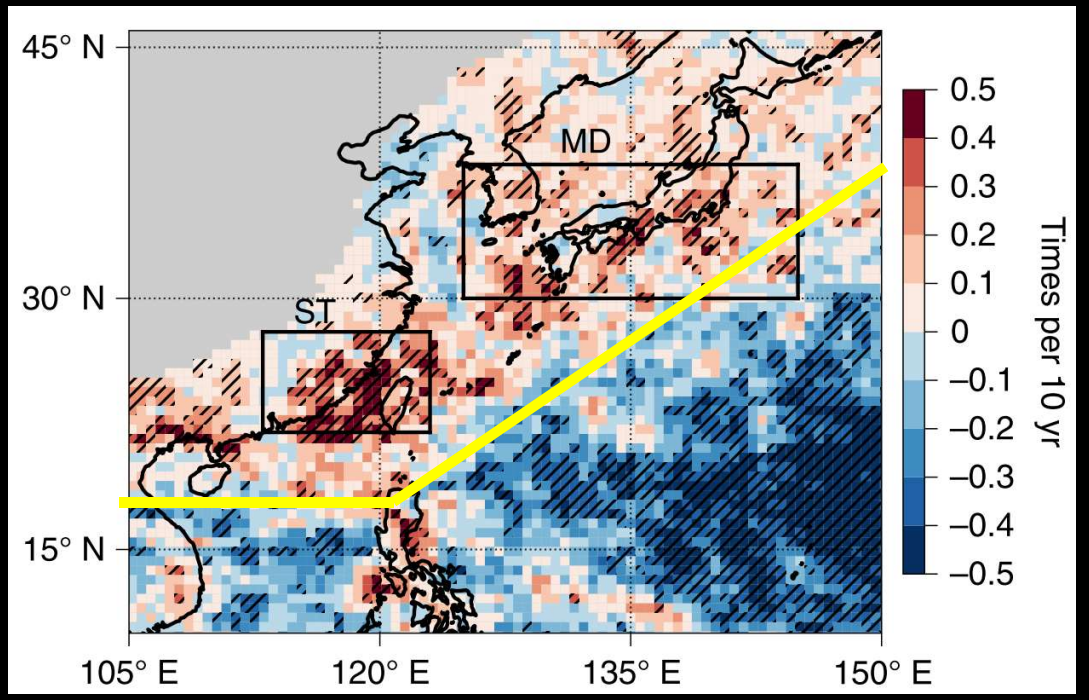
Pattern Similarity

동아시아 지역 태풍 관련 극한 강수의 최근 증가는 인간활동에 의한 온난화 때문임

Typhoon Heavy Rainfall Changes (OBS)
1961-1985 to 1986-2015



Typhoon Heavy Rainfall Changes (SIM)
Hist - Nat: (1981~2010)



+ Frequency changes in observed typhoon heavy rainfall **vs** human impact on typhoon heavy rainfall show similar spatial patterns.

KAIST 김형준 교수 발표자료

Climate simulation dataset

To detect the front
- 6 hourly, JRA55
- Weather chart (2000–2010; Utsumi et al., 2014) → For verifying the detected front

To detect the frontal rainfall
- Daily, APHRODITE

To demonstrate anthropogenic greenhouse gases forcing impacts
- Daily, CESM1 LE historical (HIST, 40ens)
- & all-but-greenhouse gases forcing (XGHG, 20ens) Fixed greenhouse gas forcing at 1920 condition

Research periods:
- historical earlier period (P1) : 1958 – 1982 (25-yr)
- historical later period (P2) : 1991 – 2015 (25-yr)

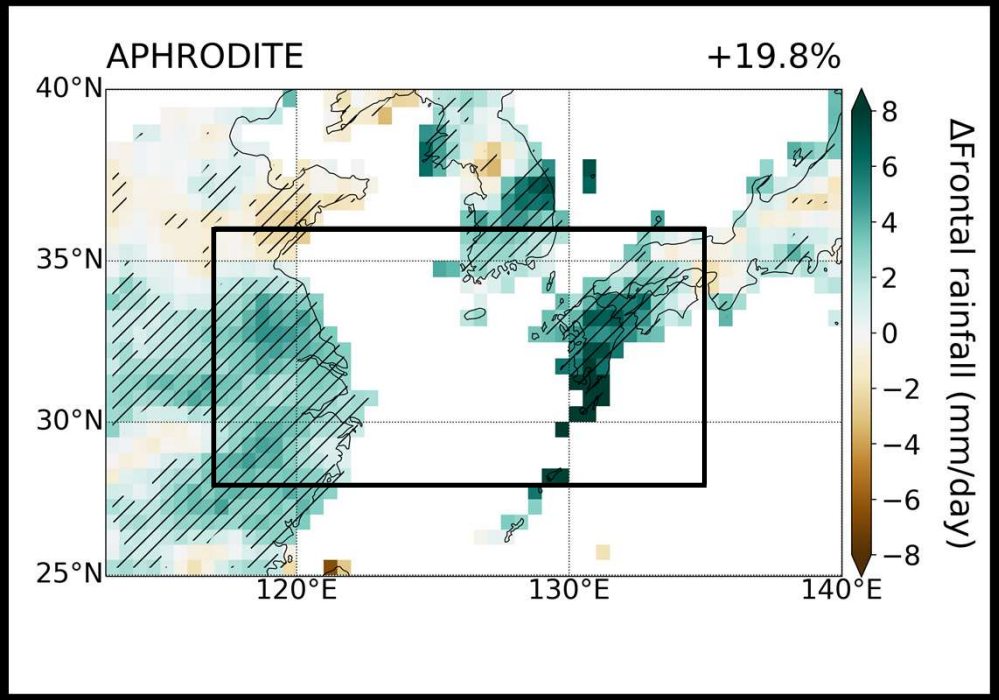
Target season: Active front season (16 June – 15 July, 30 days)

KAIST 김형준 교수 발표자료

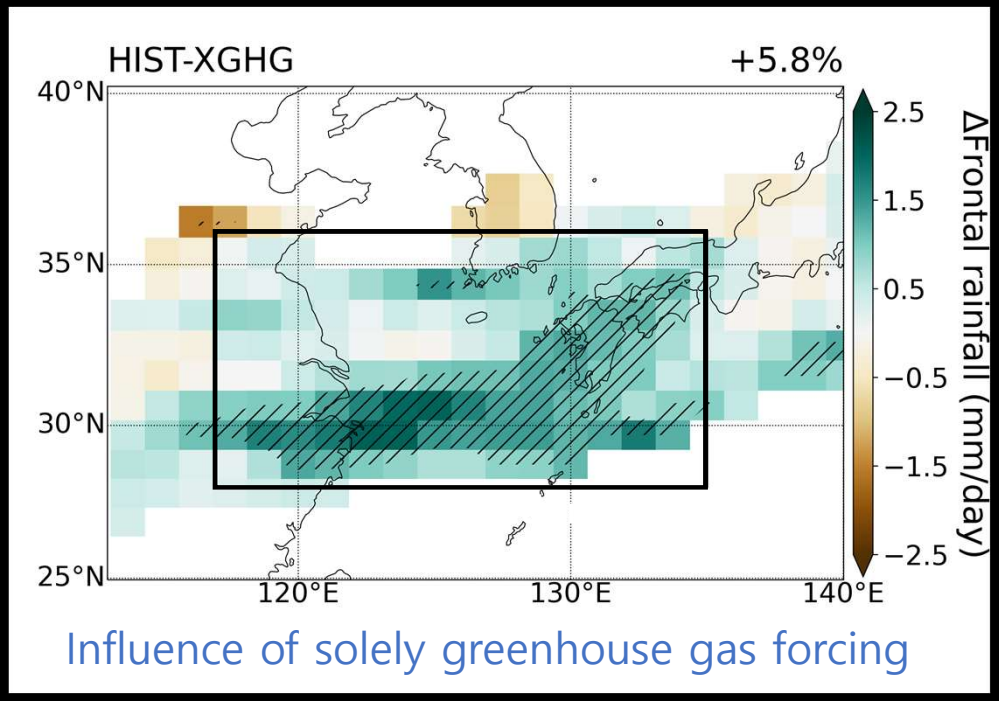
Observed changes in frontal rainfall intensity

동아시아 몬순 (장마) 강수 최근 증가는 인간활동에 의한 온난화 때문임

P2 (1991–2015) – **P1** (1958–1962)



HIST – XGHG during P2 (1991–2015)



Influence of solely greenhouse gas forcing

+ In the recent period, the intensification of frontal rainfall has been influenced by greenhouse gas forcing.
+ The intensity of frontal rainfall became enhanced by 19.8% along the coastal regions of EA.

KAIST 김형준 교수 발표자료

APCC
APEC 기후센터
감사합니다.
기후위기 대응 골든타임 앞으로 10년, 무엇을 하시겠습니까?
2023년 바로 지금 행동할 때 달라질 수 있습니다.
부산기후변화협의체
부산광역시
BUSAN METROPOLITAN CITY
부산지방기상청
Busan Regional Meteorological Administration
BDI 부산연구원
APCC
APEC 기후센터