

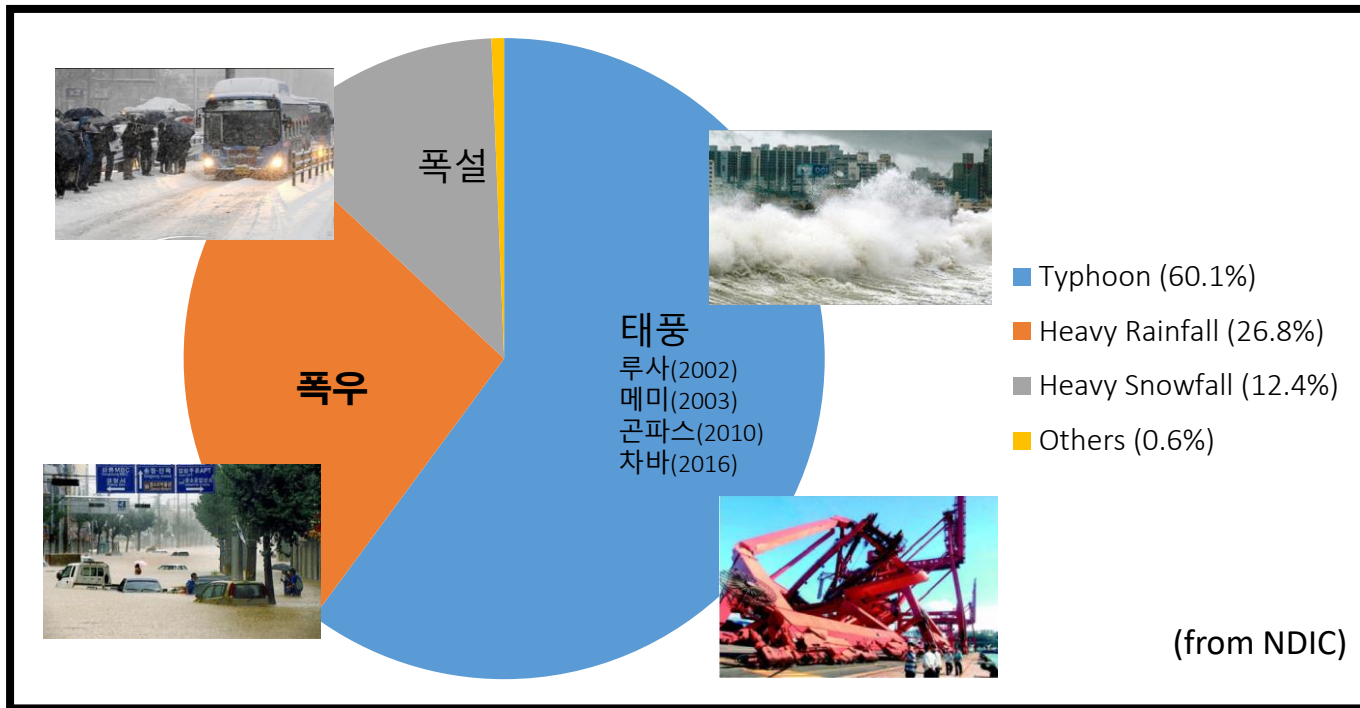
북서태평양 태풍의 최근 특성 및 미래 변화

차동현

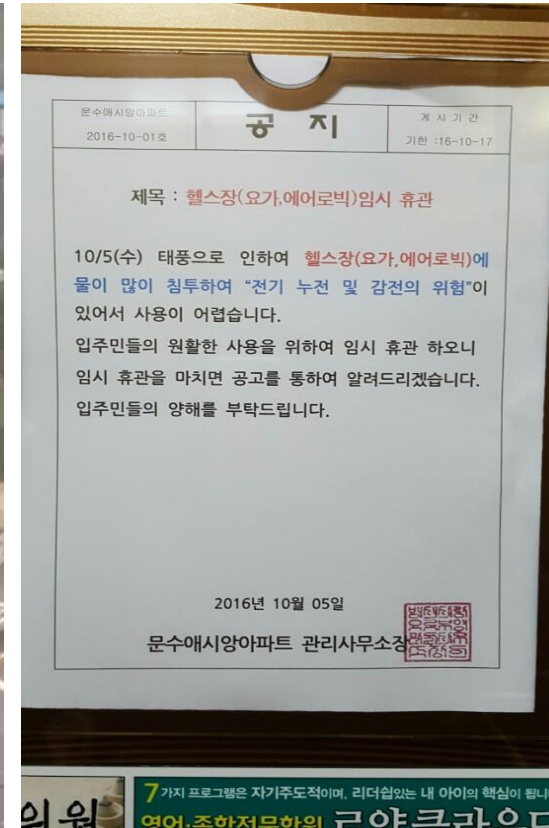
울산과학기술원 도시환경공학부

(이민규, 박해린, 황지원, 김은지, 조하은)

자연재해로 인한 경제적 손실(2001-2011)



● Typhoon CHABA (2016)



태풍의 정의



열대 해상에서 발생하는 전선을 갖지 않는 대류권내 저기압성 순환을 열대저기압으로 총칭한다. 태풍은 북태평양 서부에서 발생하는 열대저기압 중에서 중심 부근의 **최대 풍속이 17m/s 이상**의 강한 폭풍우를 동반하고 있는 것을 말한다.

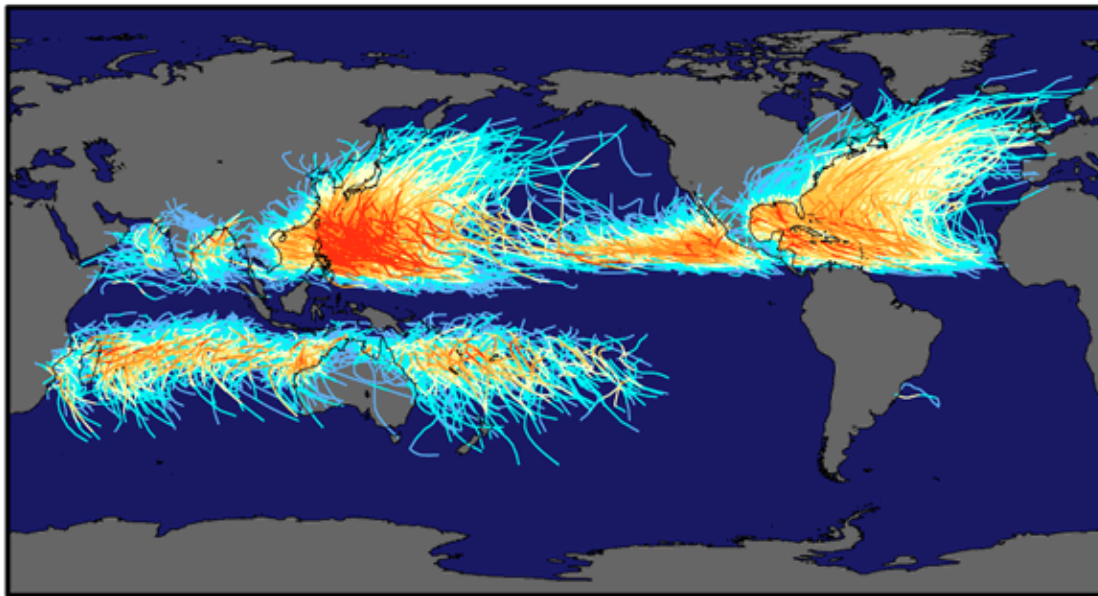
열대저기압(Tropical Cyclone)은 지구상 여러 곳에서 연간 평균 80개 정도가 발생하고 있으며, 그 발생 장소에 따라 명칭을 각각 달리하고 있다.



북태평양 서부에서 발생하는 것을 태풍(Typhoon), 북대서양 · 카리브 해 · 멕시코 만 · 북태평양 동부에서 발생하는 것을 허리케인(Hurricane), 인도양 · 아라비아 해 그리고 벥골 만에서 발생하는 것을 사이클론(Cyclone)이라고 부른다.

태풍 트랙 기후값

Tracks and Intensity of Tropical Cyclones, 1851-2006



Saffir-Simpson Hurricane Intensity Scale

NASA

- 적도에서는 발생 안함
- 북서태평양이 가장 활발
- 북서태평양과 북대서양 태풍 진로 연장 (Extratropical transition)
- 적은 남반구 태풍 수
- 아프리카 주변의 적은 태풍

태풍의 구분

태풍의 강도분류



구분	최대풍속	현상
-	17m/s(61km/h, 34kt) 이상 ~ 25m/s(90km/h, 48kt) 미만	간판 날아감
중 (normal)	25m/s(90km/h, 48kt) 이상 ~ 33m/s(119km/h, 64kt) 미만	지붕 날아감
강 (strong)	33m/s(119km/h, 64kt) 이상 ~ 44m/s(158km/h, 85kt) 미만	기차 탈선
매우강 (very strong)	44m/s(158km/h, 85kt) 이상 ~ 54m/s(194km/h, 105kt) 미만	사람, 커다란 돌 날아감
초강력 (super strong)	54m/s(194km/h, 105kt) 이상	건물 붕괴

태풍의 크기분류

태풍의 크기는 강풍반경을 기준으로 구분하였으나,

태풍정보서비스 개선에 따라 2020.5.15. 이후 크기 분류 대신 강풍반경과 폭풍반경 정보로 제공한다.

- 강풍반경 : 태풍 중심으로부터 풍속 15m/s 이상의 바람이 부는 반경(km)
- 폭풍반경 : 태풍 중심으로부터 풍속 25m/s 이상의 바람이 부는 반경(km)

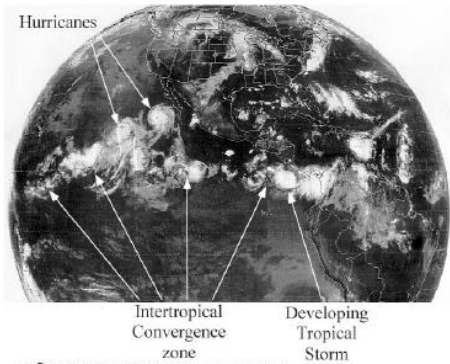
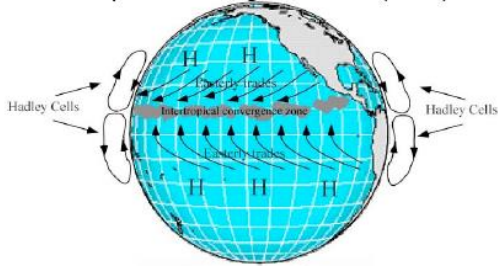
(참고)

단계	강풍반경(풍속 15m/s 이상의 반경)
소형(Small)	300km 미만
중형(Medium)	300km 이상~500km 미만
대형(Large)	500km 이상~800km 미만
초대형(Extra-large)	800km 이상

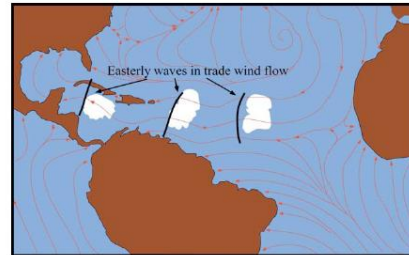
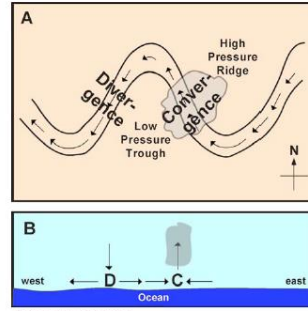
태풍 에너지 구분	강도
1950년 전세계 열소비량	100
태풍	1
크라카토아 화산 폭발	0.1
나가사키 원폭	0.0001
벼락	0.000000001
돌풍	0.0000000000001

태풍 Triggering 메커니즘

1. Intertropical Convergence Zone (ITCZ)

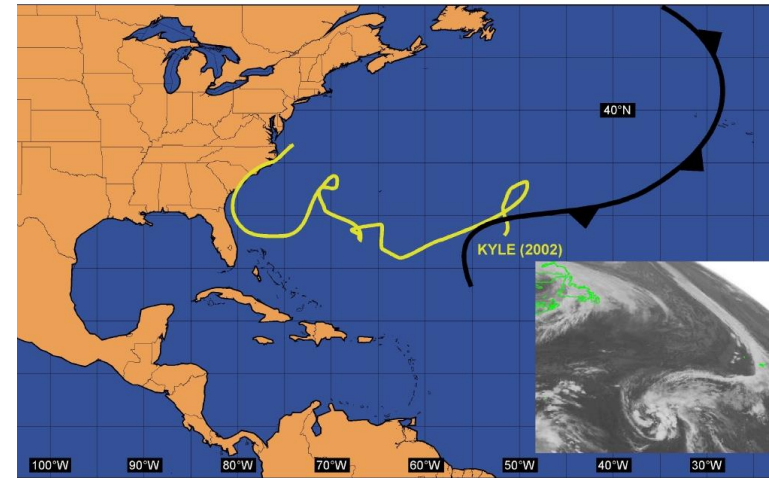


2. Easterly Waves



3. Mid-latitude cold fronts

Most common in fall



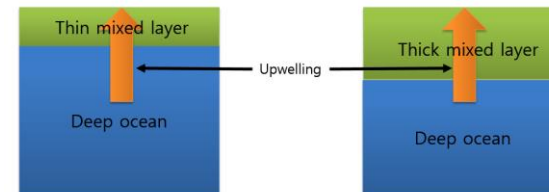
태풍의 발생 배경 조건

1. 높은 해수온 (26.5°C 이상)
2. 60m 이상의 해수혼합층
3. 약한 연직바람쉬어
4. 적도로부터 위도 5도 이상의 위치

Warm SST > 26.5°C



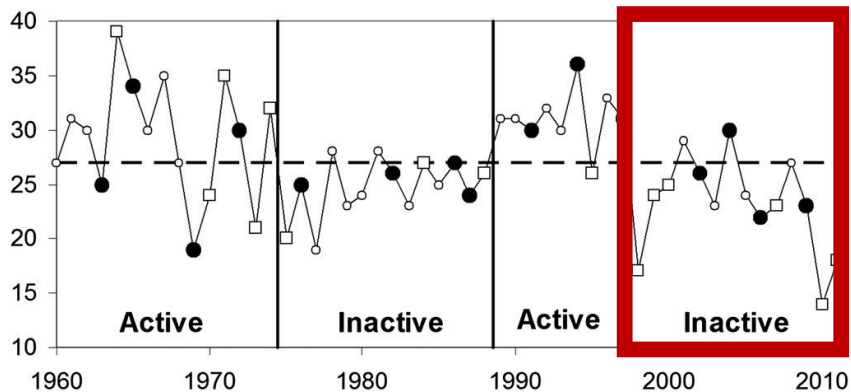
Deep layer of warm ocean surface



북서태평양 관측 태풍 특성 경향

북서태평양 태풍 활동 분석

✓ 북서태평양 태풍 발생



Time series of the annual number of tropical storms and typhoons over the western North Pacific (WNP). (1960–2011)

LIU AND CHAN (2013)

	1960–74 (A1)	1975–88 (B1)	1989–97 (A2)	1998–2011 (B2)
Length (yr)	15	14	9	14
Mean	29.3	24.6	31.1	23.2
Std dev	5.5	2.7	2.7	4.5
Below normal (<25)	3	6	0	9
Normal (25–29)	3	8	1	4
Above normal (>29)	9	0	8	1

Summary of TC activity in the WNP in the two active and two inactive periods.

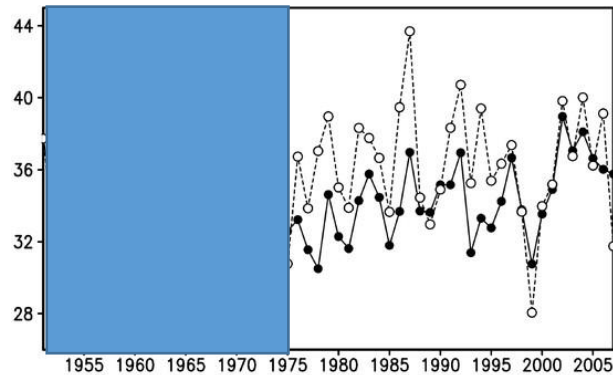
- 최근 1998-2011년 북서태평양의 태풍 평균 발생 개수는 23.2개로, 이는 이전보다 적은 수임.
- 1960년 이래로 최근 북서태평양의 태풍 발생 개수는 감소하는 경향을 보이고 있음.

북서태평양 관측 태풍 특성 경향

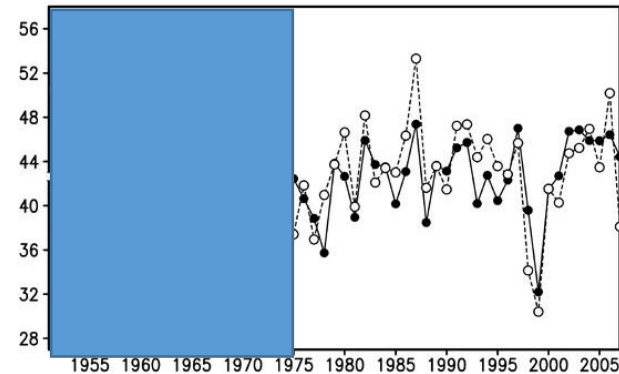
북서태평양 태풍 활동 분석

✓ 북서태평양 태풍 강도

the basinwide average intensity (m s^{-1})



the basinwide peak intensity (m s^{-1})



observations (closed dots) in the JTWC dataset during the period 1951–2007.

WU AND ZHAO (2012)

- 검은 점과 실선 -> JTWC의 태풍 관측 자료
- 전체 기간에 대해서 peak intensity는 뚜렷한 변화가 나타나지 않음.
- 70년대 후반부터 태풍 강도의 증가 추세가 나타남.

북서태평양 관측 태풍 특성 경향

북서태평양 급강화 태풍 활동 분석

✓ Rapid Intensification (RI)



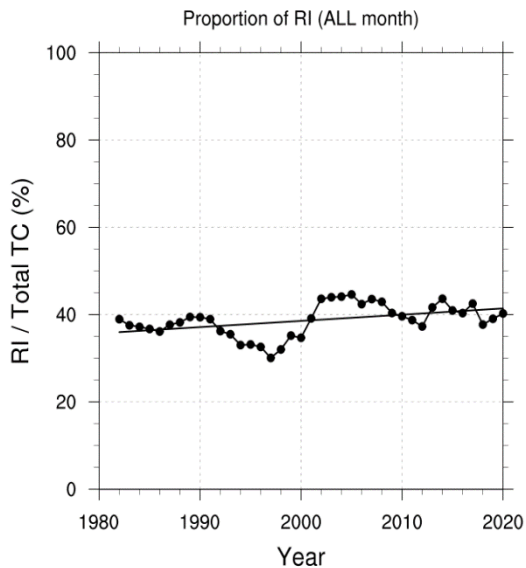
- 기상학에서 급격한 강화(RI)는 열대 저기압이 단기간내 급격하게 강해지는 상황을 말함.
- 미국 국립 허리케인센터(The United States National Hurricane Center)에서는 열대 저기압의 maximum sustained wind가 24시간동안 30노트(35mph, 55km/h) 이상 증가하였을 때로 정의하고 있음.

북서태평양 관측 태풍 특성 경향

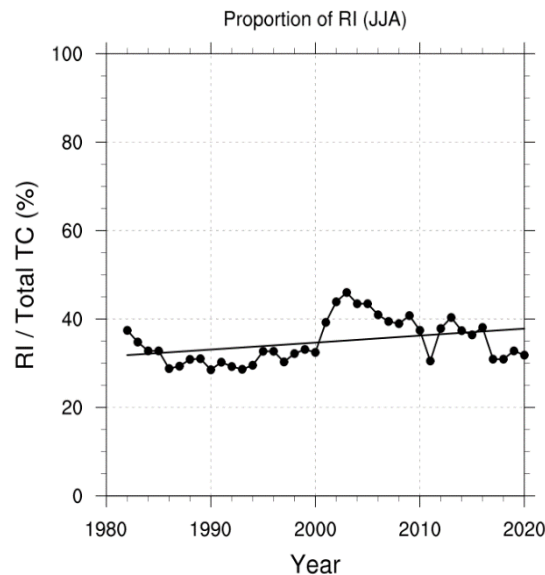
북서태평양 급강화 태풍 활동 분석

✓ 연간 변동성 (1982~2020)

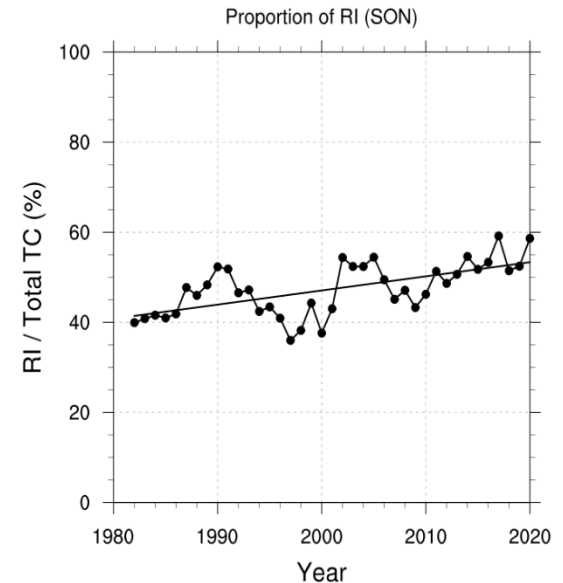
(6월~8월, 9월~11월) 계절별 RI / Total TC (%) 비율



(All month)



(Summer TC)



(Fall TC)

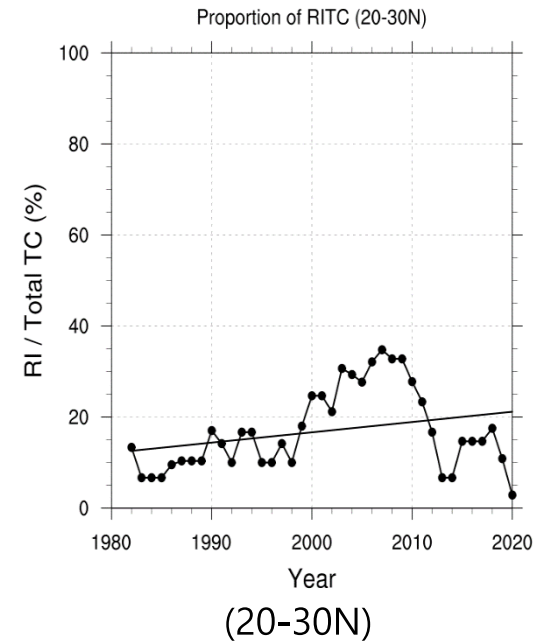
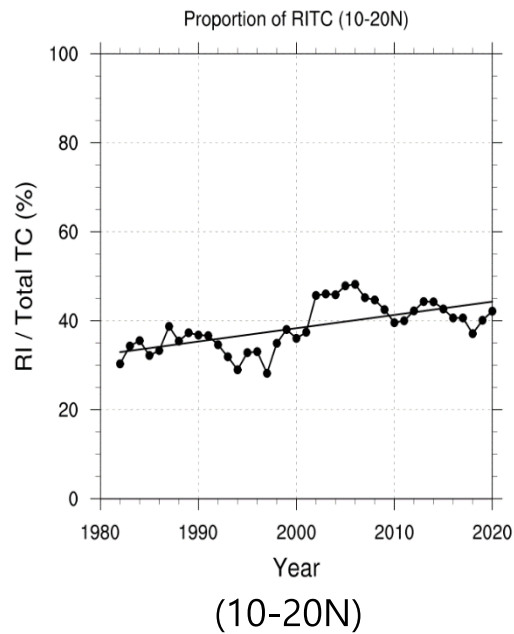
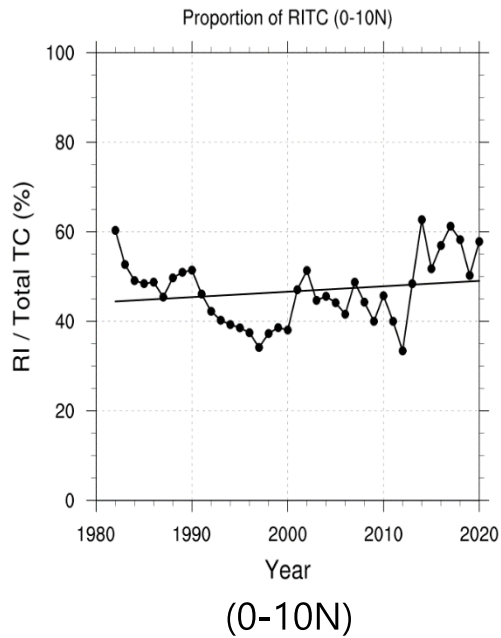
- 계절별 결과를 보면, 1982년부터 2020년까지 모든 월과 여름철(6~8월)에 대해 RI비율의 증가경향이 분명하지 않음. 하지만 가을(9~11월)로 분류된 태풍에서는 RI 비율의 증가가 뚜렷하게 나타남.

북서태평양 관측 태풍 특성 경향

북서태평양 급강화 태풍 활동 분석

✓ 연간 변동성 (1982~2020)

북위 0-10N, 10-20N, 20-30N에서의 RI / Total TC (%) 비율



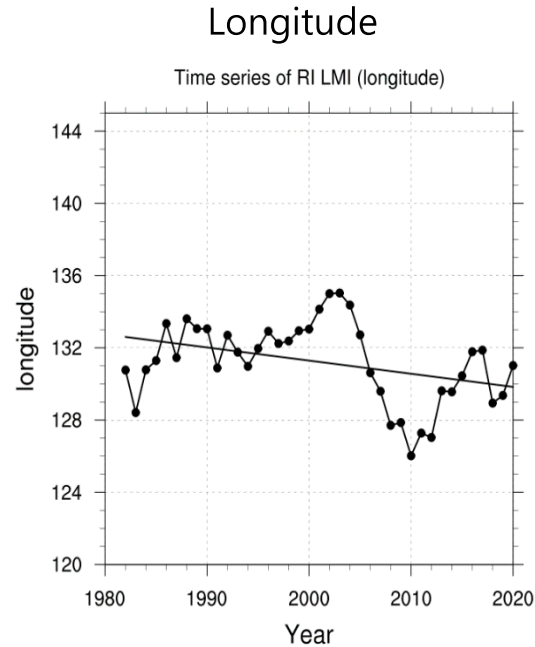
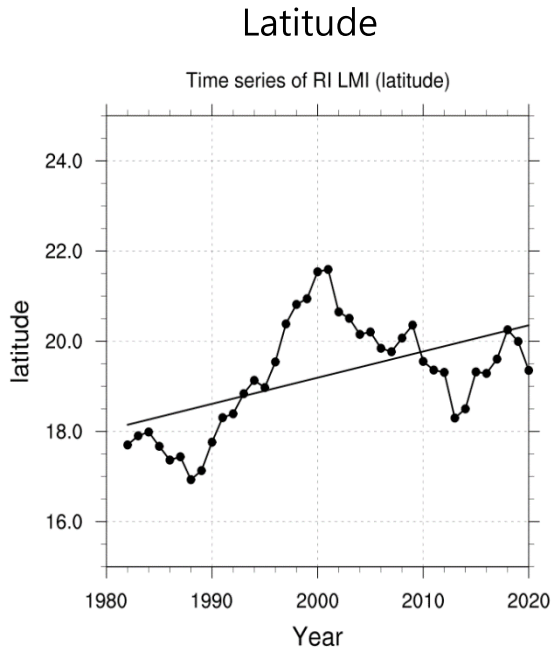
- 위도별 결과를 보면, 1982년부터 2020년까지 RI 태풍 발생 비율이 증가하는 추세를 보임. 특히 동아시아에 더 큰 영향을 줄 수 있는 10~20도, 20~30도에서 RI 태풍 비율의 증가추세가 더 크게 나타남.

북서태평양 관측 태풍 특성 경향

북서태평양 급강화 태풍 활동 분석

✓ 연간 변동성 (1982~2020)

RI 태풍의 LMI (Lifetime Maximum Intensity) 위치변화



	Mean Duration
RI	256.75 hour
Not RI	173.45 hour

- RI 태풍의 LMI 위치변화를 보면, 1982년부터 2020년까지 LMI가 발생하는 경도는 감소하지만 LMI가 발생하는 위도변화는 북상하고 있음. 이는 LMI 발생위치가 동아시아와 가까워졌음을 시사함.

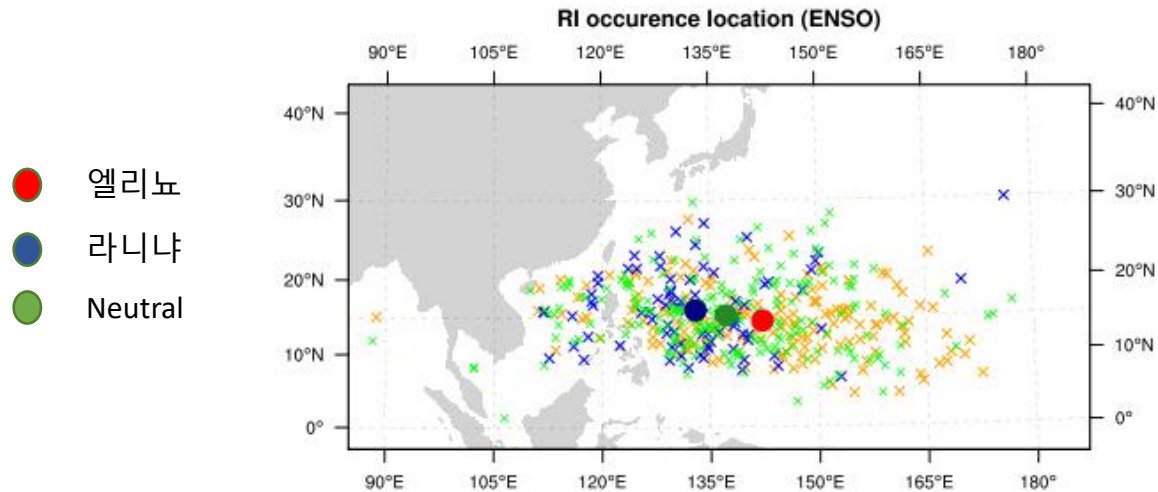
북서태평양 관측 태풍 특성 경향

북서태평양 급강화 태풍 활동 분석

✓ ENSO Major year (1982~2020)

RI 태풍의 LMI (Lifetime Maximum Intensity) 발생 위치와 크기 비교

	엘리뇨	라니냐	Neutral		엘리뇨	라니냐	Neutral		엘리뇨	라니냐	Neutral
위도	18.47	19.78	19.48	경도	134.77	127.05	130.76	강도(m/s)	61.19	57.17	59.13



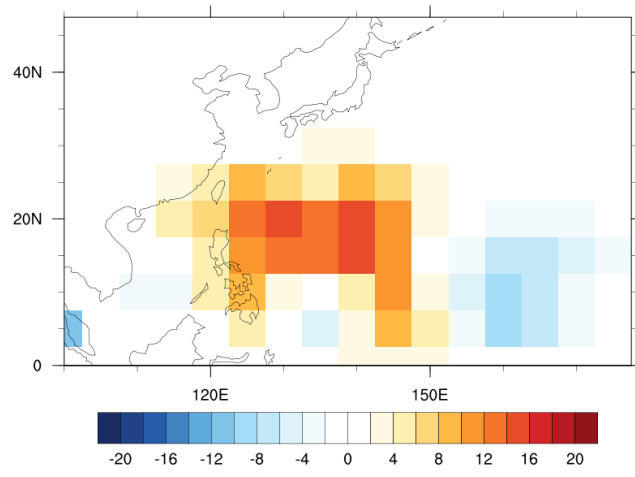
- 라니냐 연도에 북서쪽에서 RI태풍의 LMI가 나타났으며, 엘리뇨 해에는 동쪽에서 나타나는 경향이 있음.
- RI 태풍의 LMI의 크기는 라니냐 < Neutral < 엘리뇨 순서로 나타남

북서태평양 관측 태풍 특성 경향

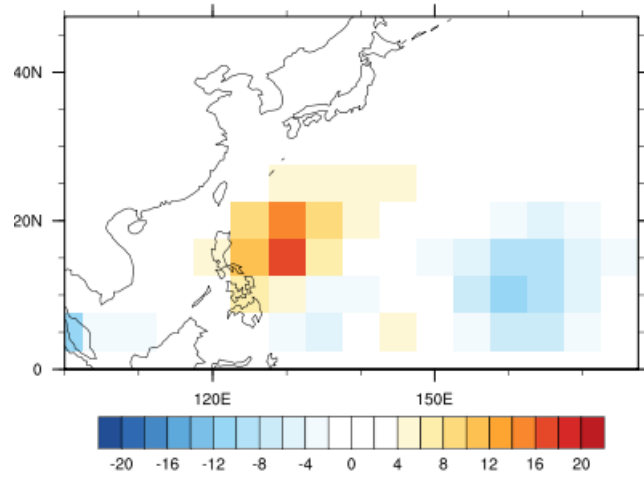
북서태평양 급강화 태풍 활동 분석

✓ 급강화 발생위치 difference

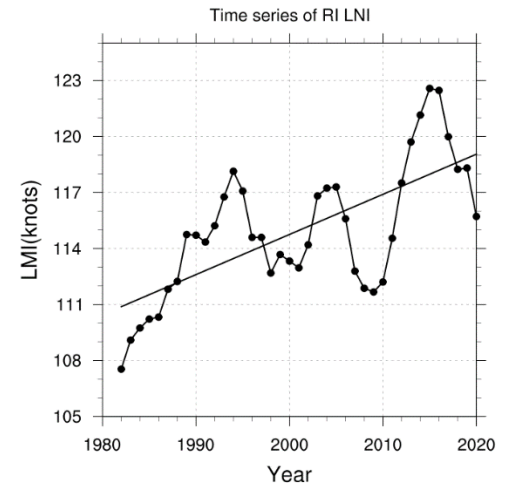
RI태풍의 전반기와(1982~2000) 후반기(2002~2020) RI발생 위치비교



(All month RI)



(Fall RI)

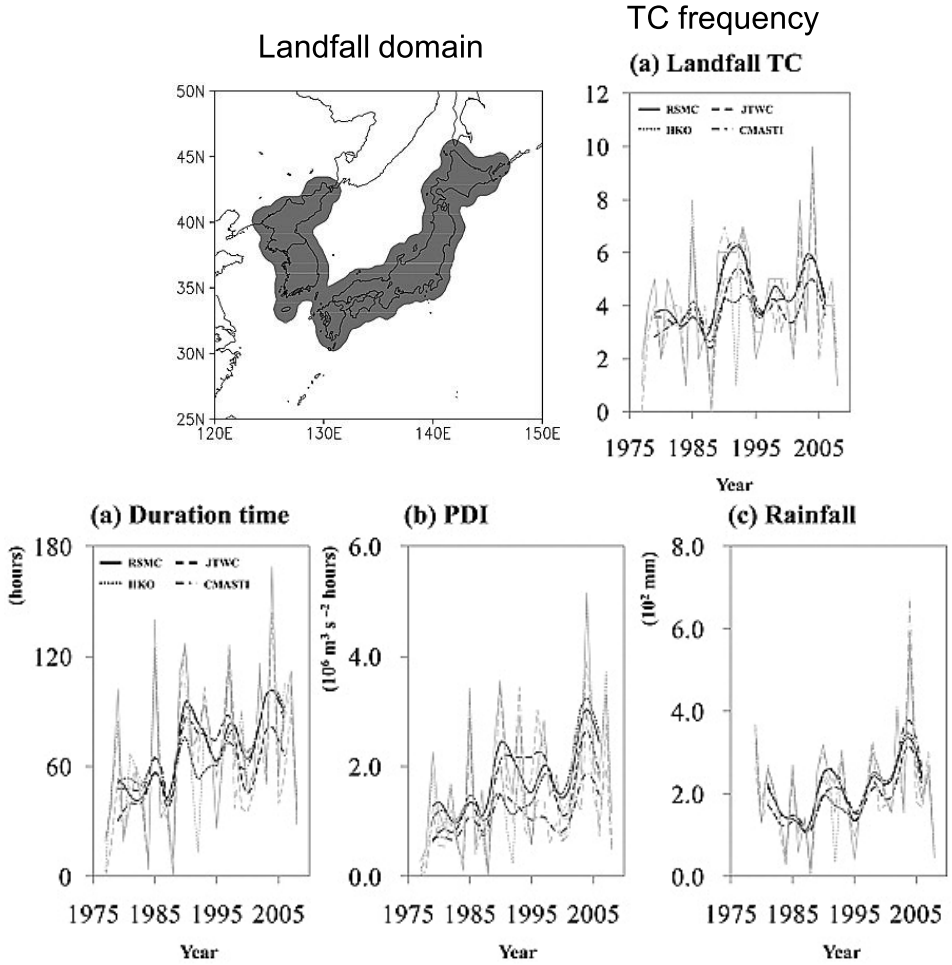


- 전반기보다 후반기에 RI 발생위치가 북서진하고 있으며, 여름철보다 가을철 태풍에서 경향이 뚜렷함
- RI 태풍의 LMI의 크기는 최근으로 갈수록 강해지는 경향이 있음.

한반도 태풍 강수의 과거 추세

과거 태풍 변화 경향성

✓ 상륙 태풍의 과거 추세 (1975-2008년 한반도/일본 상륙 태풍 변화)



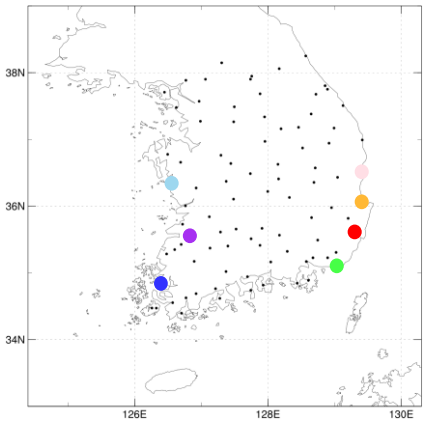
- 상륙 태풍의 누적 기간/강도/강수는 시간에 따른 상륙 태풍의 빈도 증가로 인해 나타남.
- 이는 극동아시아 주변의 종관 특성(해수면온도, 대기종관장)의 변화와 연관됨.

한반도 관측 태풍 특성 경향

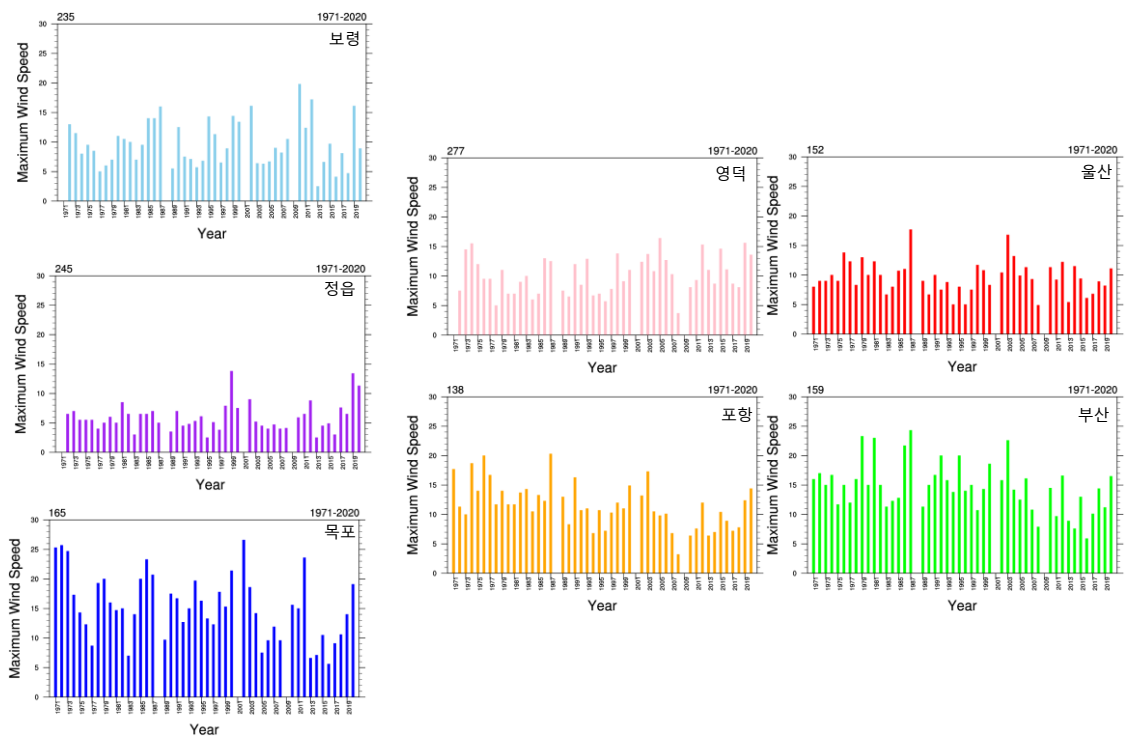
과거 태풍 강도 변화 경향성

✓ 우리나라 ASOS 지점의 연간 순간최대풍속 극값 변화 (1971-2020)

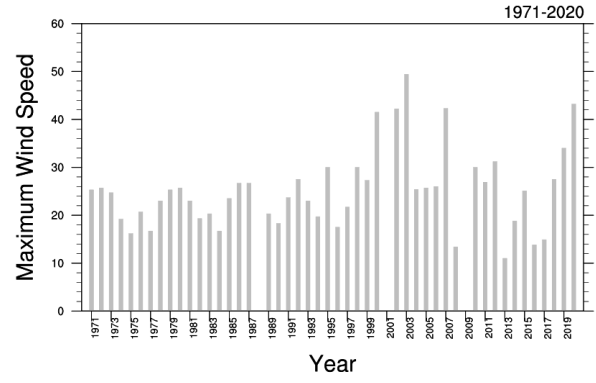
우리나라 ASOS 지점



우리나라 ASOS 지점별 연간 순간 최대풍속 극값



우리나라 88개 전체 ASOS 지점의
연간 순간 최대풍속 극값

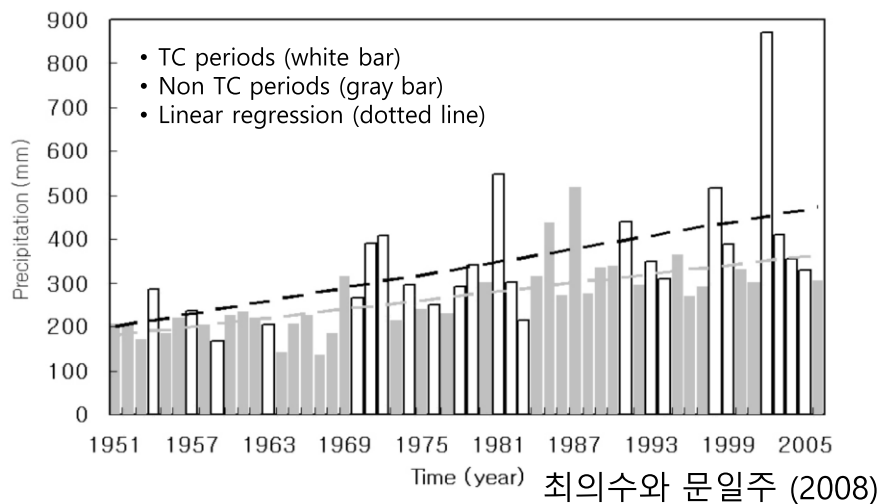


- ASOS 88개 지점, 태풍에 의한 우리나라 연간 순간최대풍속 극값 변화

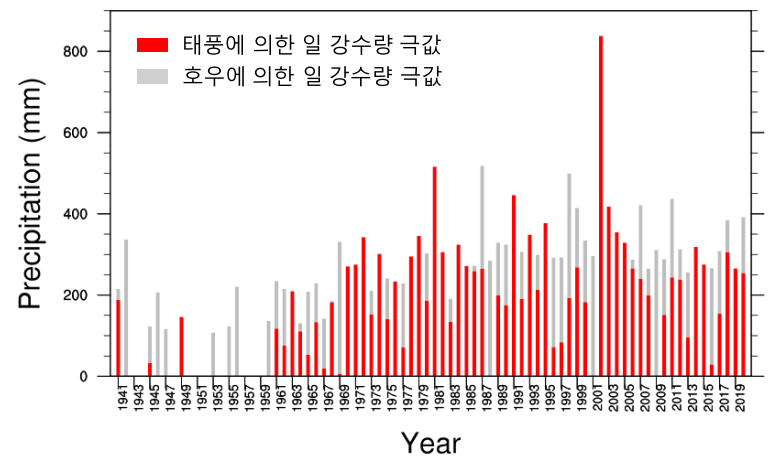
한반도 태풍 강수의 과거 추세

과거 태풍 강수 변화 경향성

✓ 태풍이 일강수량 극값에 미친 영향 (1955-2006년 일강수량 극값 (태풍/비(非)태풍 시기))



과거 80 년 (1941-2020) 태풍 시기의 일강수량 극값 (TC)

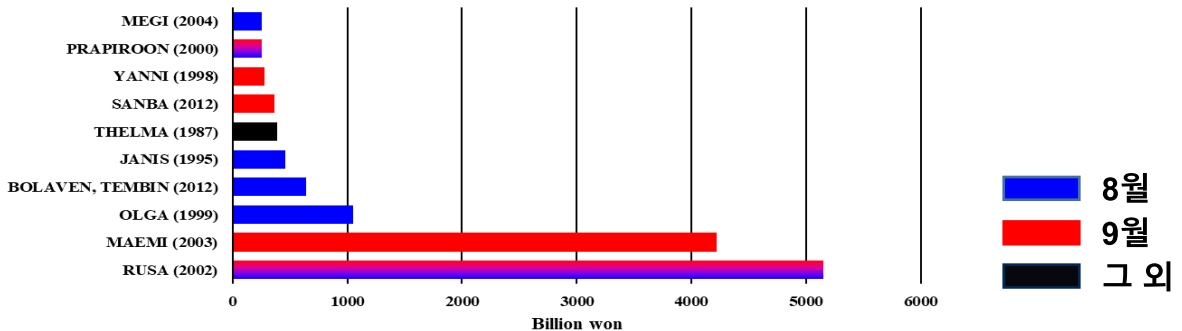


- 태풍 시기 일강수량 극값의 증가율(250 mm/56 yr)이 비태풍 시기(180 mm/56 yr)보다 높게 나타남.

태풍 활동의 변화 원인

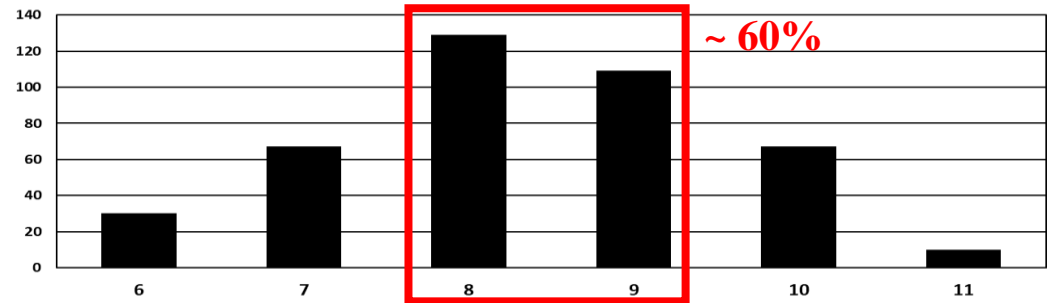
Pacific Decadal Oscillation (PDO)

- ✓ 분석 영역 (30-45°N, 120-150°E)
- ✓ 태풍에 의한 한국 재산 피해 순위



- 분석 기간은 1982년부터 2018년까지 총 37년을 분석함.
- 태풍의 중심이 분석영역을 통과했을 때 그 태풍은 TC_m이라고 명명함. 또한 태풍이 북서태평양에서 발생한 태풍은 TC_{WNP}라고 명명함.

✓ 37년간 월 별 TC_m 발생 빈도

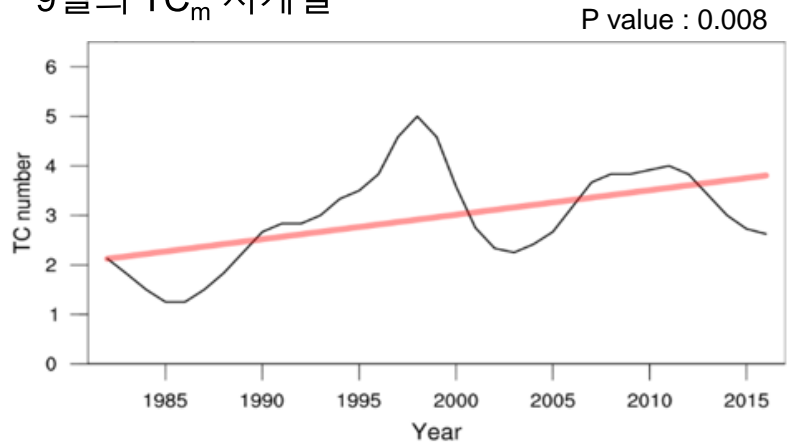


- 분석 영역을 통과한 태풍의 60% 이상이 8, 9월에 발생하였고 많은 재산피해를 야기하는 태풍 또한 8, 9월에 많이 발생했기에 8, 9월에 초점을 맞추어 연구를 진행함.

태풍 활동의 변화 원인

Pacific Decadal Oscillation (PDO)

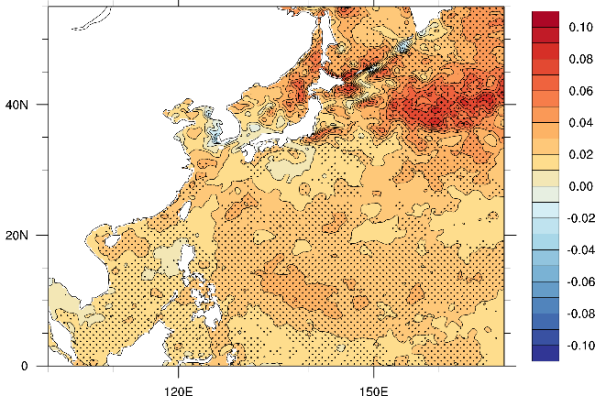
✓ 9월의 TC_m 시계열



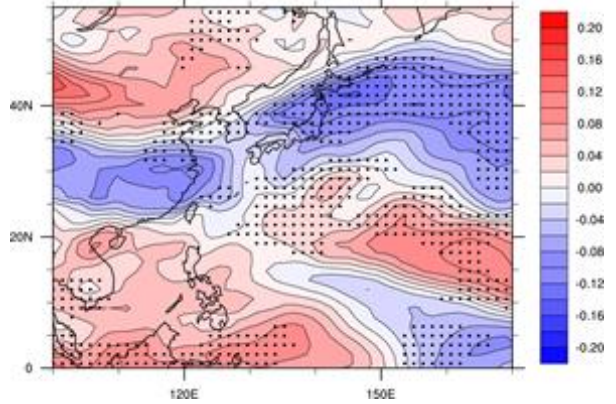
• 9월의 TC_m 빈도는 유의미한 증가 경향이 존재함.

✓ 9월의 증관장 Trend map

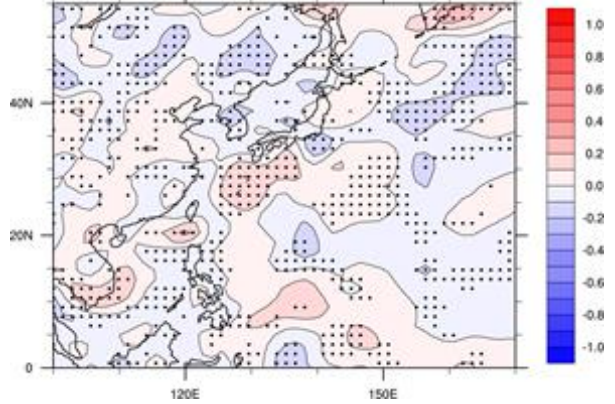
해수면 온도 [K year⁻¹]



연직 바람시어 [m s⁻¹ year⁻¹]



하층 상대와도 [10⁻⁶ s⁻¹ year⁻¹]



• 최근에 증관장이 태풍의 발생 및 경로가 중위도로 확장하기 좋은 조건을 형성함.

태풍 활동의 변화 원인

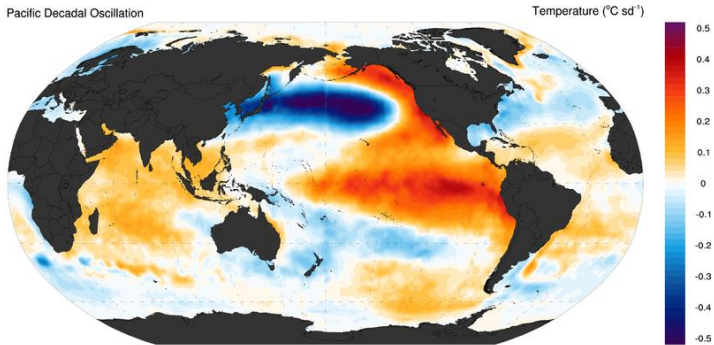
Pacific Decadal Oscillation (PDO)

- ✓ TC_m과 북서태평양 기후인자들과의 상관계수
 - ** 99 % significance level
 - * 90 % significance level

	PDO	Nino 3.4	Nino 4	IOD
8월 TC _m	-0.03	-0.01	0.00	-0.08
9월 TC _m	-0.52**	-0.33*	-0.32*	0.00

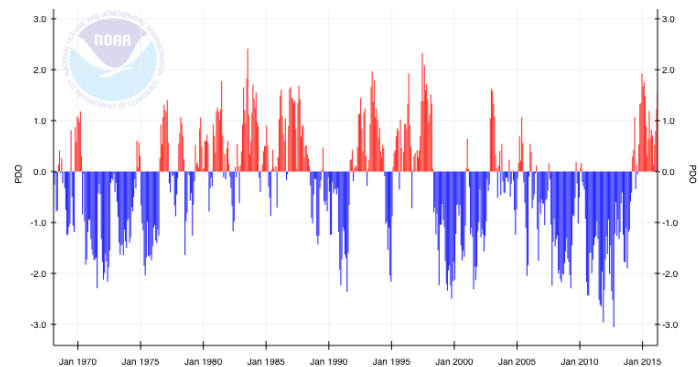
- PDO와 8월 TC_m은 상관관계가 없지만 9월에는 유의한 상관관계가 나타남.
- 다른 기후 인자들에 비해 9월의 TC_m과 PDO의 상관 계수가 가장 높게 나타남.

✓ 양의 PDO



- 양의 PDO phase에는 한반도, 일본을 포함한 북서태평양 중위도에는 차가운 해수면 온도가, 저위도에는 따뜻한 해수면 온도 분포가 나타남. 반대로 음의 PDO phase에서는 중위도에서 따뜻한 해수면 온도 분포를 보임.

✓ PDO 지수의 시계열

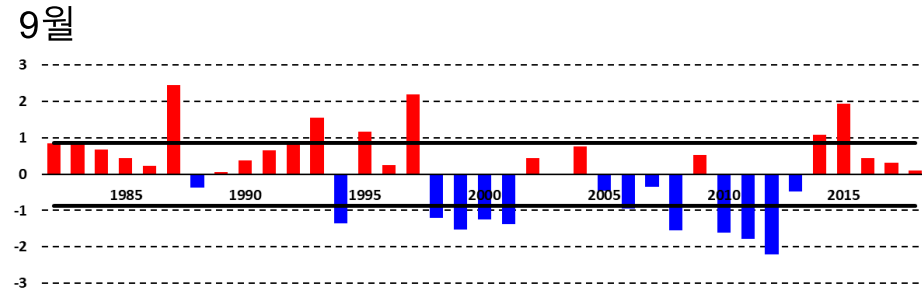
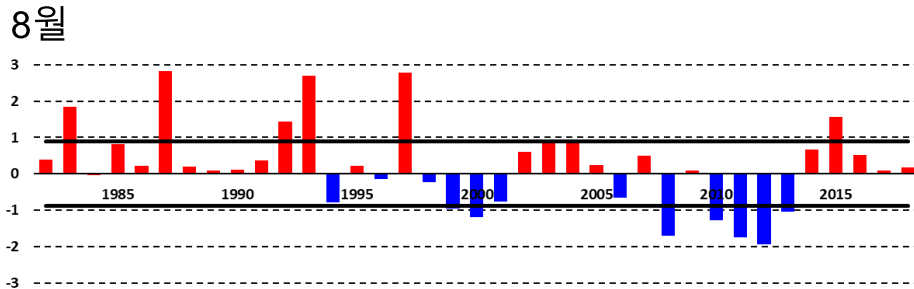


- PDO는 10~20년 사이의 주기가 가장 우세하나 경년변동성 및 이보다 더 짧은 주기의 변동성도 포함하고 있음.

태풍 활동의 변화 원인

Pacific Decadal Oscillation (PDO)

✓ 월 별 PDO 지수 시계열



8월

Positive PDO (PDO + 0.75std) & Not El Niño	1983, 1992, 1993
Negative PDO (PDO - 0.75std) & Not La Niña	2000, 2008, 2012, 2013

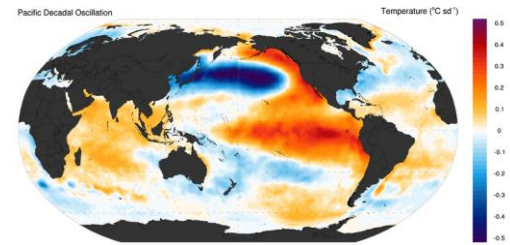
9월

Positive PDO (PDO + 0.75std) & Not El Niño	1983, 1993, 1995, 2014
Negative PDO (PDO - 0.75std) & Not La Niña	1994, 2000, 2001, 2006, 2008, 2012

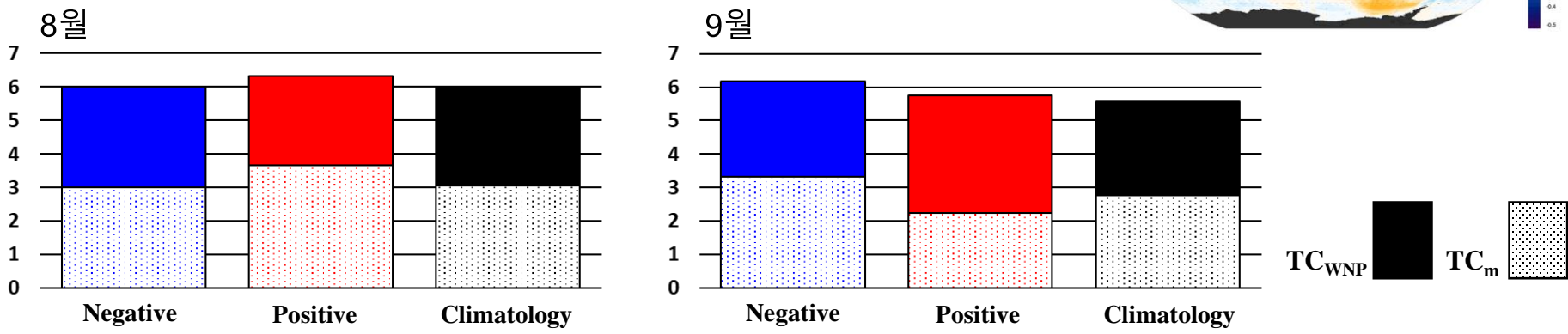
- Extreme PDO는 0.75 표준편차를 초과하는 연도로 설정함.
- PDO의 영향만을 확인하기 위해 강한 ENSO 연도를 제외하고 분석을 수행함.

태풍 활동의 변화 원인

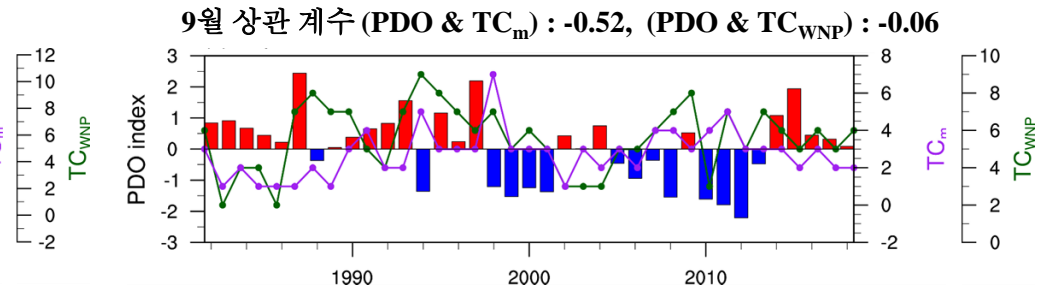
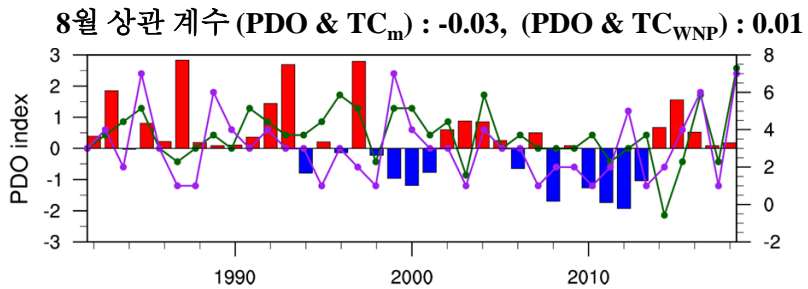
Pacific Decadal Oscillation (PDO)



✓ TC_m과 TC_{WNP}의 월 별 빈도 수



- 9월에 negative phase에서 positive phase에 비해 약 50% 많은 TC_m이 발생함.



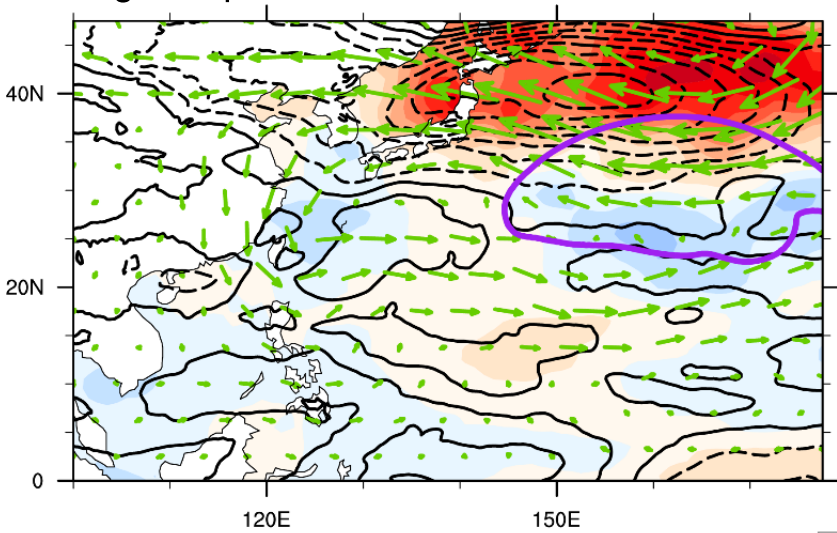
- 9월에는 PDO 지수와 TC_m의 상관 계수가 -0.52로 유의한 상관성이 나타남.

태풍 활동의 변화 원인

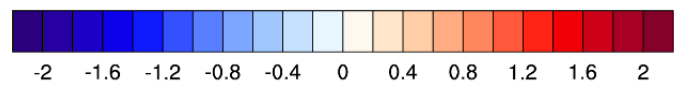
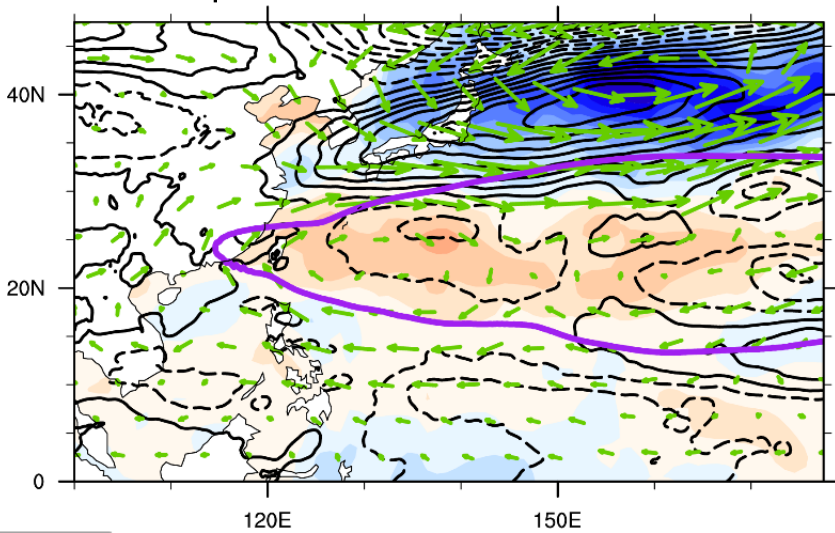
Pacific Decadal Oscillation (PDO)

✓ 9월의 종관장 (Shading – 해수면 온도 아노말리, Contour – 연직 바람시어 아노말리, Vector – 지향류 아노말리, 보라색 Contour – 5880 gpm 지위고도 at 500 hPa)

Negative phase



Positive phase

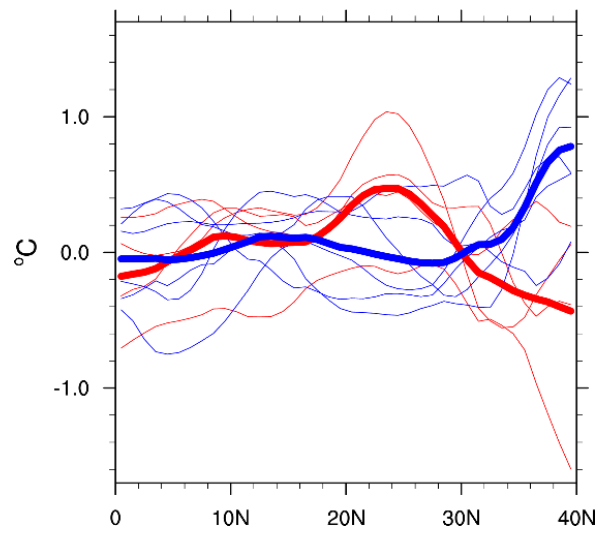


- Negative phase에서 약한 자오선 온도 경도로 인해 연직 바람시어가 약해져 중위도 태풍 활동에 호조건이 형성됨.
- 또한, 중위도에서의 동풍 지향류 아노말리 또한 태풍이 분석 영역으로 향하는데 유리한 조건임.
- 마지막으로, 상대적으로 수축한 북서태평양 고기압은 태풍이 서진하지 않고 북진하여 중위도로 향하게 함.

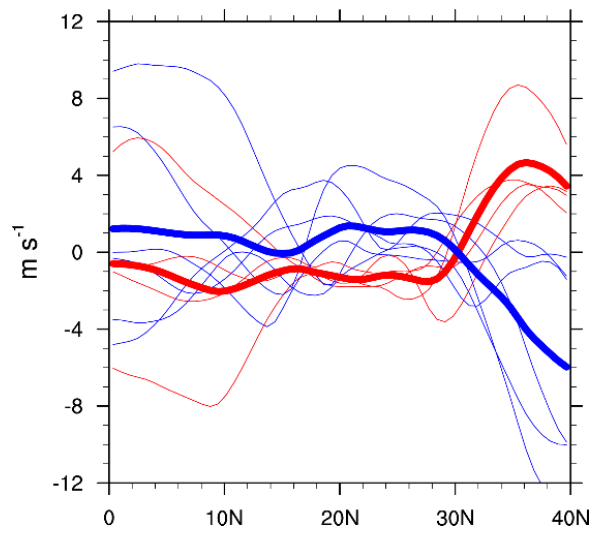
태풍 활동의 변화 원인

Pacific Decadal Oscillation (PDO)

Zonal mean 해수면 온도 아노말리

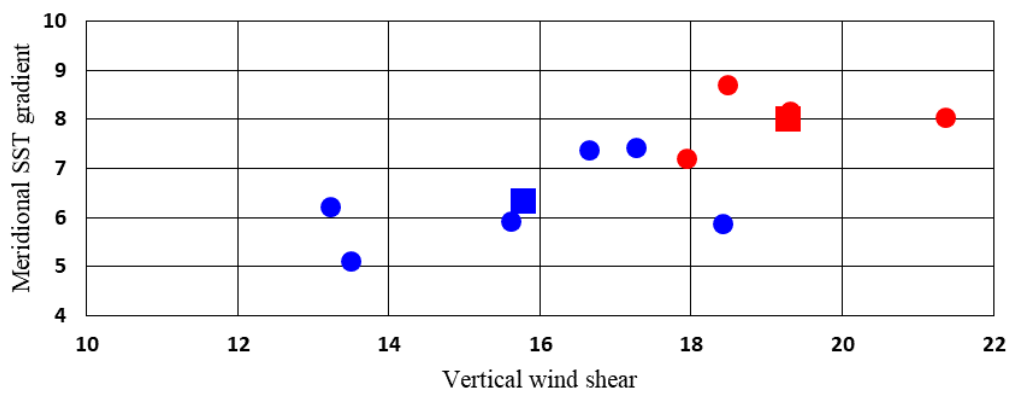


Zonal mean 연직 바람시어 아노말리



원 - 각 연도 파란색 - Negative phase
사각형 - 평균 빨간색 - Positive phase

자오선 해수면 온도 경도와 연직 바람시어



- 120-150E 영역을 Zonal mean 한 결과, 해수면 온도, 연직 바람시어 모두 중위도에서 두 phase간 유의미한 차이가 나타남.

- Negative phase에서 Positive phase에 비해 약한 온도 경도, 연직 바람시어가 대부분의 연도에서 나타남.

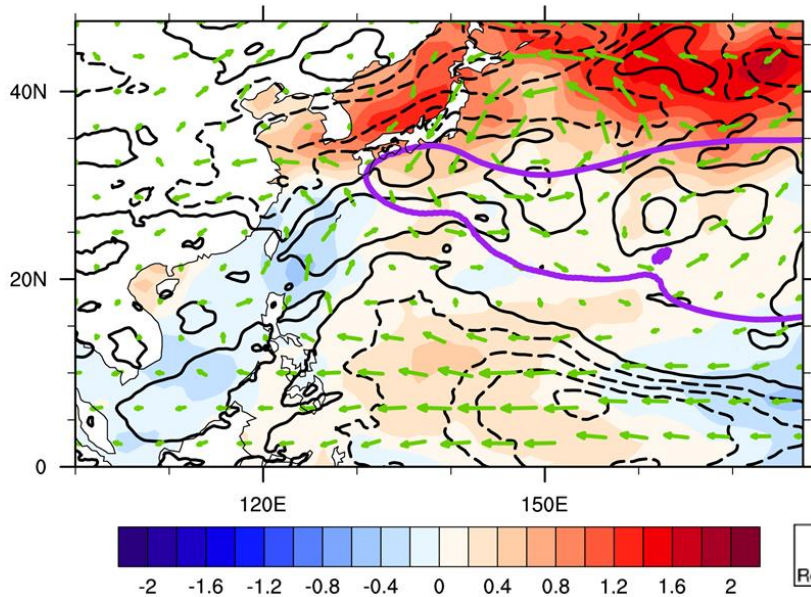
- Negative phase에서 중위도 태풍이 활동하기 좋은 조건이 형성됨.

태풍 활동의 변화 원인

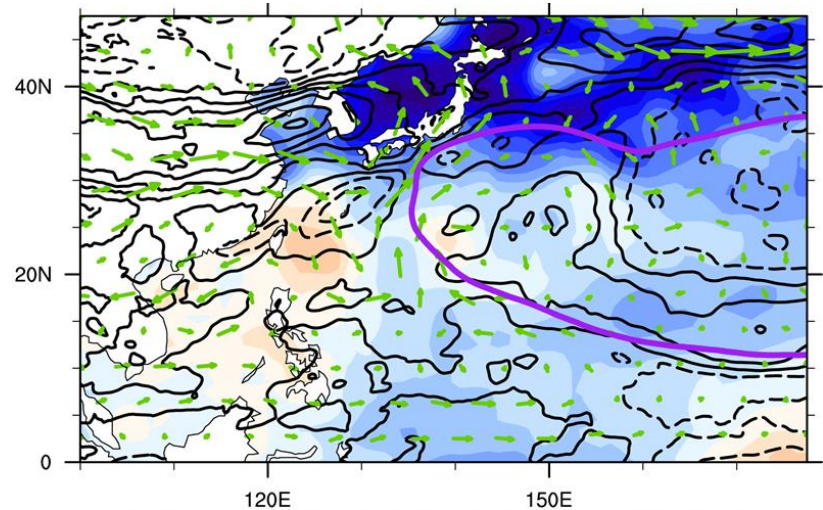
Pacific Decadal Oscillation (PDO)

- ✓ 8월의 종관장 (Shading – 해수면 온도 아노말리, Contour – 연직 바람시어 아노말리, Vector – 지향류 아노말리, 보라색 Contour – 5880 gpm 지위고도 at 500 hPa)

Negative phase



Positive phase

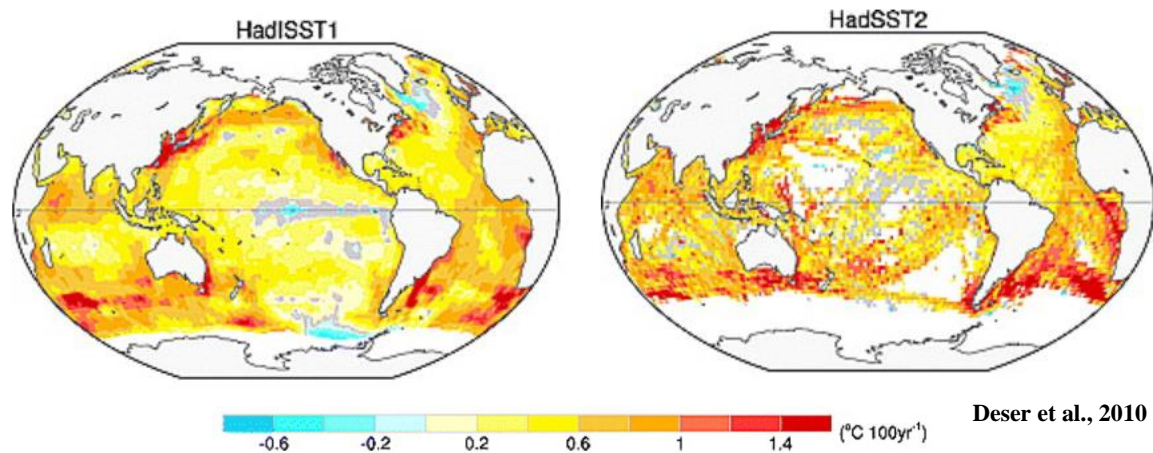


- 8월에는 PDO와 TC_m 의 관계가 뚜렷하게 나타나지 않음.
- 그 이유로 9월에 비해 종관장 차이가 유의미하지 않았음. 해수면 온도, 연직 바람시어, 지향류 아노말리 모두 9월에 비해 두 phase 간 차이가 크지 않았음.
- 북서태평양 고기압 또한 위치가 크게 차이가 나지 않았기에 8월에는 PDO의 영향이 거의 없었음.

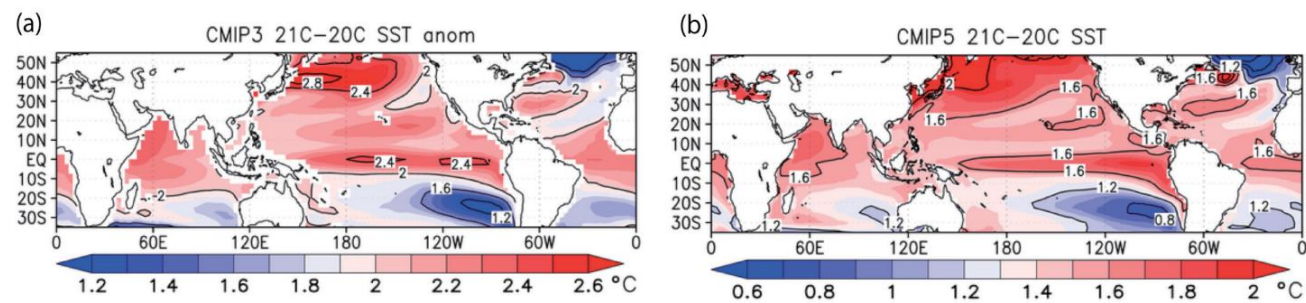
태풍 활동의 변화 원인

Pacific Decadal Oscillation (PDO), 수치 실험

✓ 과거 해수면 온도 변화 경향



✓ 미래 해수면 온도 변화 경향



Ogata et al., 2014

- 과거와 미래 시나리오 모두 온난화 경향이 중위도에서 더 강하게 나타남.
- 이는 negative phase와 유사하기에 미래에 중위도로 북상하는 태풍의 수가 증가할 가능성이 있음.

WGI AR6 Contents

Summary for Policy Makers
Technical Summary

Chapter 1: Framing, context, methods

Large-scale climate change

Chapter 2: Changing state of the climate system

Chapter 3: Human influence on the climate system

Chapter 4: Future global climate: scenario-based projections and near-term information

Climate Processes

Chapter 5: Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks

Chapter 6: Short-lived climate forcings

Chapter 7: The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity

Chapter 8: Water cycle changes

Chapter 9: Ocean, cryosphere, and sea level change

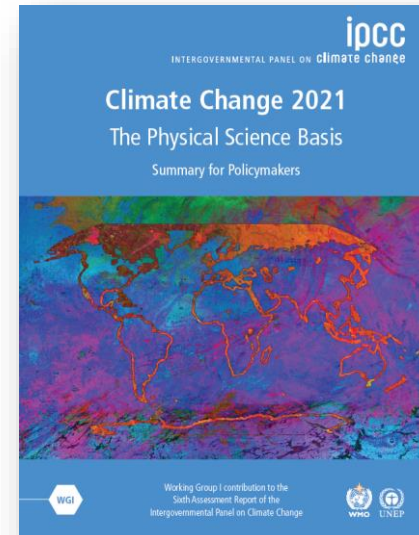
Regional climate information

Chapter 10: Linking global to regional climate change

Chapter 11: Weather and climate extreme events in a changing climate

Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment

Annex: Regional Atlas



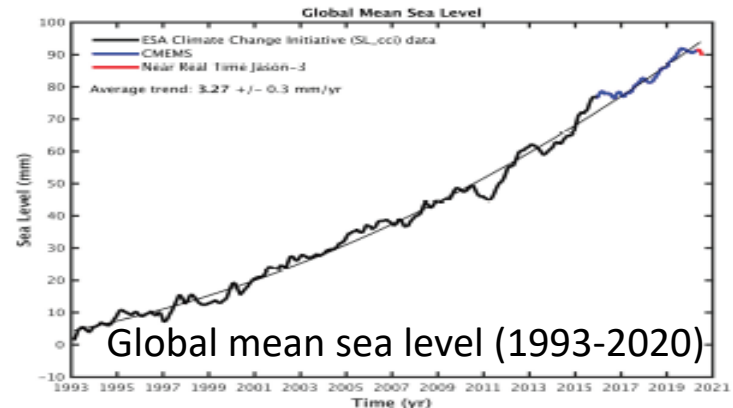
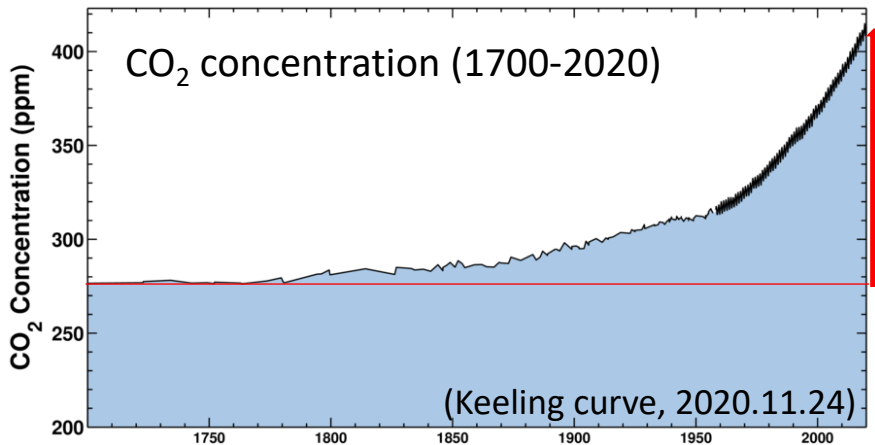
WGI AR6 Key Messages

- 지구온난화가 발생하고 있음은 이미 알음. 최근 기후변화는 광범위하고, 가속화되고 강해지고 있음.
- 인간활동이 기후변화의 원인이라는 것은 논란의 여지가 없음 (indisputable). 인간활동으로 인해 폭염, 호우, 가뭄 등 극한기후현상이 더 자주 더 강하게 발생함.
- 세계 각지에서 기후변화가 다양하게 영향을 미치고 있음. 우리가 경험하고 있는 변화는 미래에는 더 증가할 것임.
- 기후시스템의 변화 중 일부는 돌이킬 수 없음. 그러나 온난화를 제한한다면 이러한 변화 중 일부는 중지되거나 돌이킬 수 있음.
- 즉각적/대규모 온실가스 감축만이 온난화를 1.5°C 이하로 억제할 수 있음.
- 지구온난화를 제한하기 위해서 강하고, 빠르고, 지속적인 이산화탄소, 메탄 및 다른 온실가스 감축은 필수적임. 이러한 감축은 기후변화에 의한 영향을 완화시키고 더불어 대기질을 개선시킴.

IPCC 6차 기후변화 평가보고서

주요 기후변화요소 비교(AR6 vs AR5)

비교 요소 [기상청 2021.08.09 보도자료]		AR6 제1실무그룹 보고서 (2021년 발간)	AR5 제1실무그룹 보고서 (2013년 발간)
온실가스 농도*	이산화탄소(CO ₂)	410 ppm (2019)	390 ppm (2011)
	메탄(CH ₄)	1866 ppb	1803 ppb
	아산화질소(N ₂ O)	332.0 ppb	324.4 ppb
전지구 평균 지표면 기온 (1850-1900 대비)		1.09°C 상승 (2011-2020)	0.78°C 상승 (2003-2012)
전지구 평균 해수면 (1901 대비)		0.20 m 상승 (2018)	0.19 m 상승 (2010)
총 인위적 복사강제력 (1750 대비)		2.72 W/m² 증가 (2019)	2.29 W/m ² 증가 (2011)
역사적 이산화탄소 누적 배출량		2390 GtCO₂ (1850-2019)	1890 GtCO ₂ ((1861-1880)-2011)



기후변화 현황

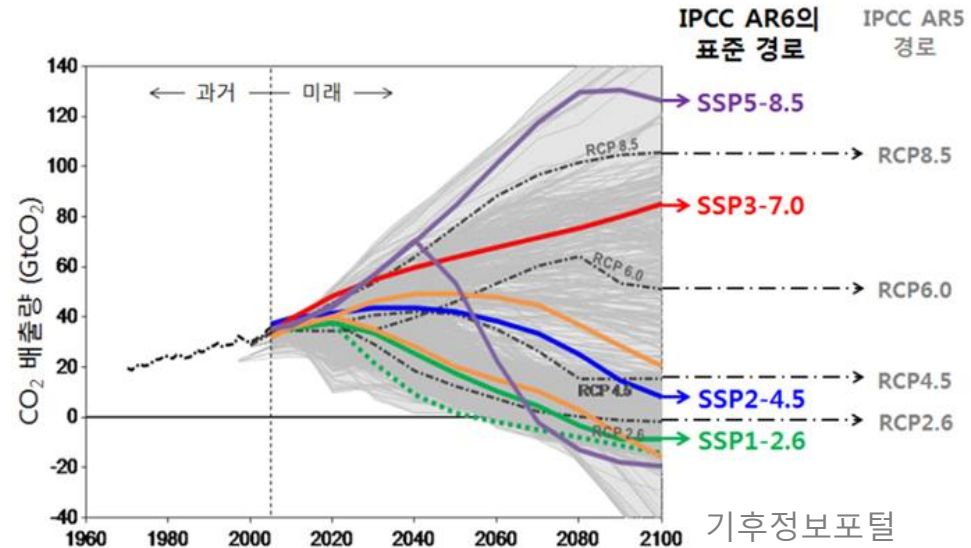
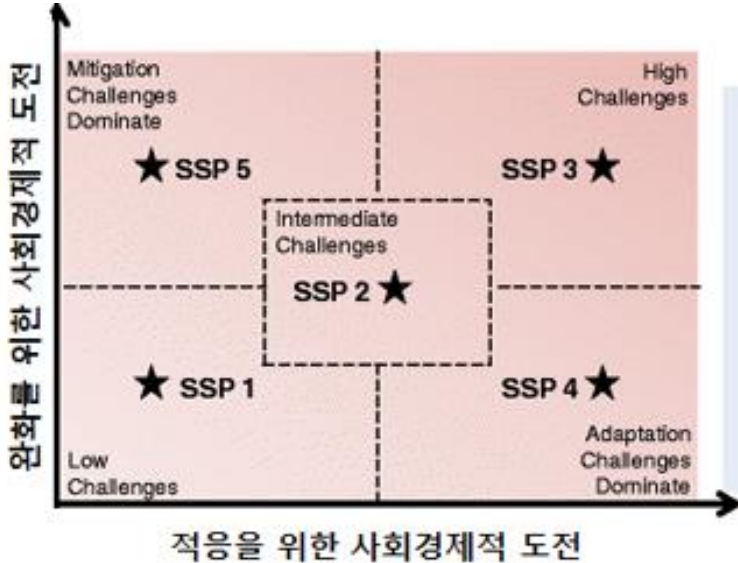
[기상청 2021.08.09 보도자료]

- **인간 영향이 대기, 해양, 육지를 온난화하는 것은 명백, 기후변화가 대기, 해양, 빙권, 생물권에서 광범위하고 신속하게 발생하고 있음.**
 - 육지와 해양은 지난 60년간 인간 활동에 의한 CO₂ 배출량의 약 56%를 매년 흡수
 - 지난 40년은 1850년 이후부터 해당 시기 전까지의 어느 10년보다 더 온난
 - 전지구 지표면 온도는 산업화 이전(1850-1900년) 대비 2011-2020년 1.09°C 상승
 - 인위적인 온난화는 산업화 이전(1850-1900년) 대비 1.07°C(0.8-1.3°C)
 - 온실가스는 1.0-2.0°C; 다른 인위적 인자(주로 에어로졸)는 -0.8-0.0°C; 자연적 인자(태양·화산 활동)는 -0.1-0.1°C; 내부 변동성은 -0.2-0.2°C
 - 지구 평균 육지 강수량은 1950년 이후 증가, 1980년대 이후 빠르게 증가, 중위도에서 폭풍 경로는 1980년대 이후 뚜렷한 계절적 추세를 동반하며 극쪽 편향
 - 인간 영향이 1990년대 이후 전지구 빙하의 감소; 1979-1988년과 2010-2019년 사이 북극해 해빙 면적 감소의 주요 인자
 - 인간 영향이 1970년대 이후 전지구 해양 상층부(0-700m) 온난화의 주요 인자
 - 지구 평균 해수면은 1901-2018년 사이 0.20 m 상승
 - 해수면 상승률: 1901-971년, 1.3 mm/년; 1971-2006년, 1.9 mm/년; 2006-2018년, 3.7mm/년
- **지구 기후 시스템에 걸친 최근 변화의 규모, 여러 측면은 수백 년에서 수천 년 동안 전례 없음**

IPCC 6차 기후변화 평가보고서

SSP 시나리오

- IPCC AR6를 위해 미래 사회 경제 변화를 기준으로 기후 변화에 대한 미래의 완화와 적응 노력에 따라 나눈 경로

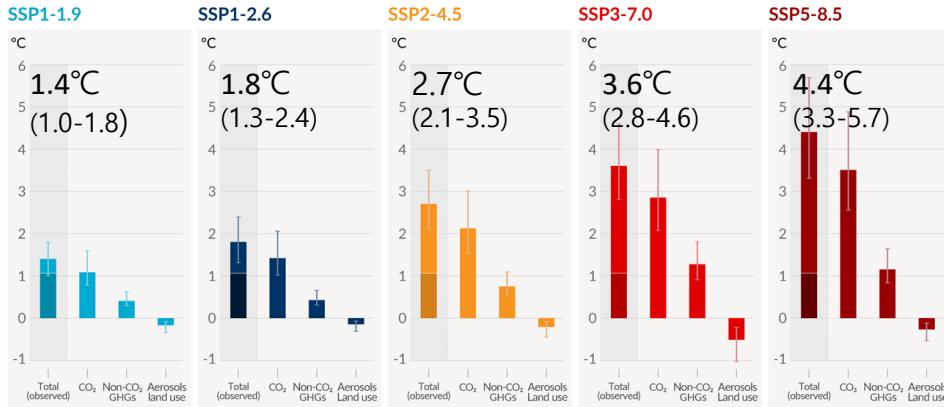


종류	의미
SSP1-2.6	재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정하는 경우
SSP2-4.5	기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우
SSP3-7.0	기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우
SSP5-8.5	산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우

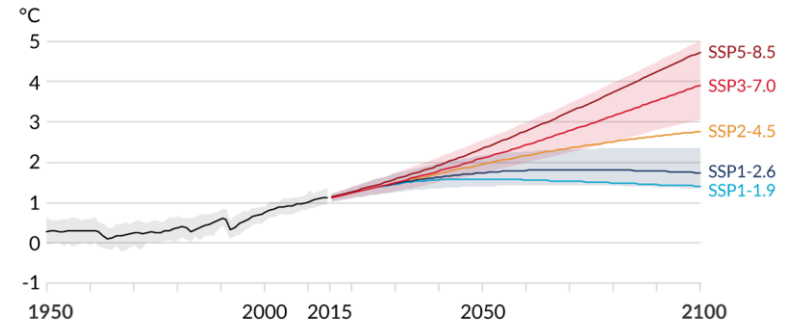
IPCC 6차 기후변화 평가보고서

AR6 미래 기후 전망(Projection)

Change in global surface temperature in 2081-2100 relative to 1850-1900 (°C)



a) Global surface temperature change relative to 1850-1900

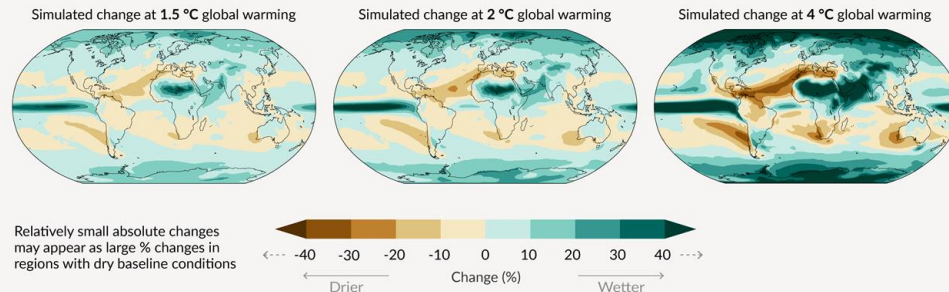


해수면 상승 [기준: 1995-2014]

0.38 m (0.28-0.55)	0.44 m (0.33-0.61)	0.56 m (0.44-0.76)	0.68 m (0.55-0.90)	0.77 m (0.63-1.02)
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

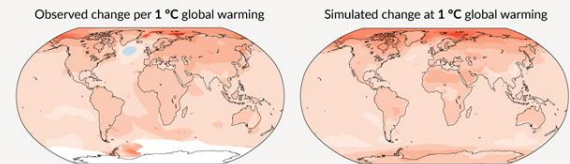
c) Annual mean precipitation change (%) relative to 1850-1900

Precipitation is projected to increase over high latitudes, the equatorial Pacific and parts of the monsoon regions, but decrease over parts of the subtropics and in limited areas of the tropics.



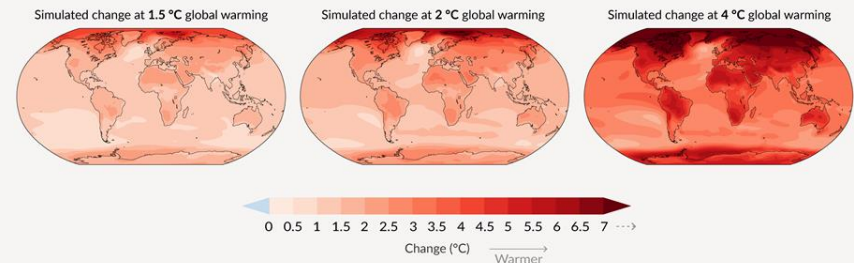
a) Annual mean temperature change (°C) at 1 °C global warming

Warming at 1 °C affects all continents and is generally larger over land than over the oceans in both observations and models. Across most regions, observed and simulated patterns are consistent.



b) Annual mean temperature change (°C) relative to 1850-1900

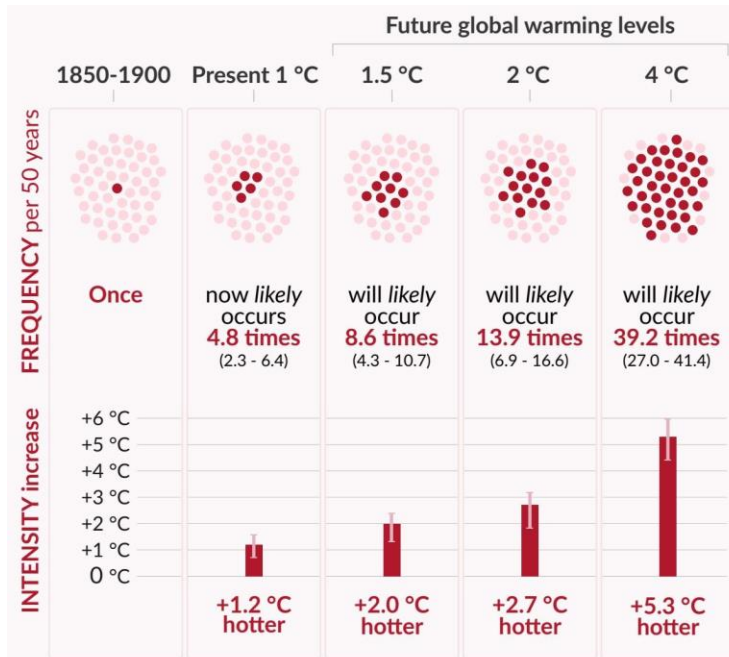
Across warming levels, land areas warm more than oceans, and the Arctic and Antarctica warm more than the tropics.



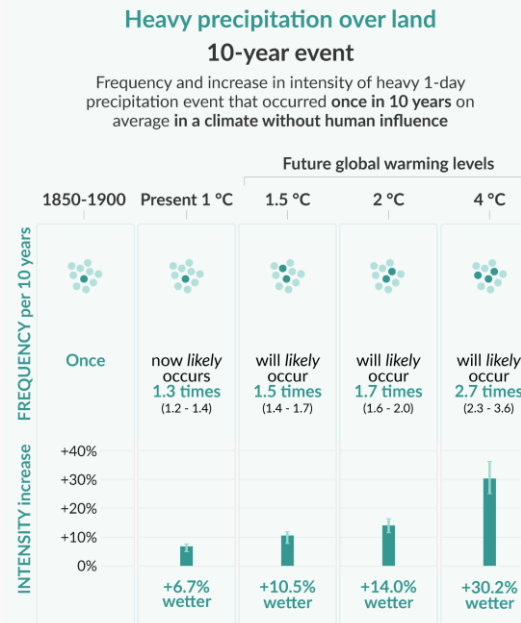
극한 기후

Projected changes in extremes are larger in frequency and intensity with a very additional increment of global warming.

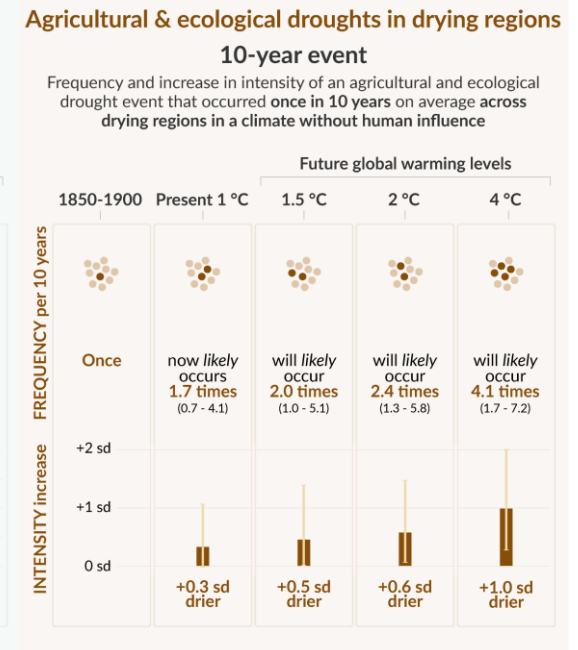
Heat Waves



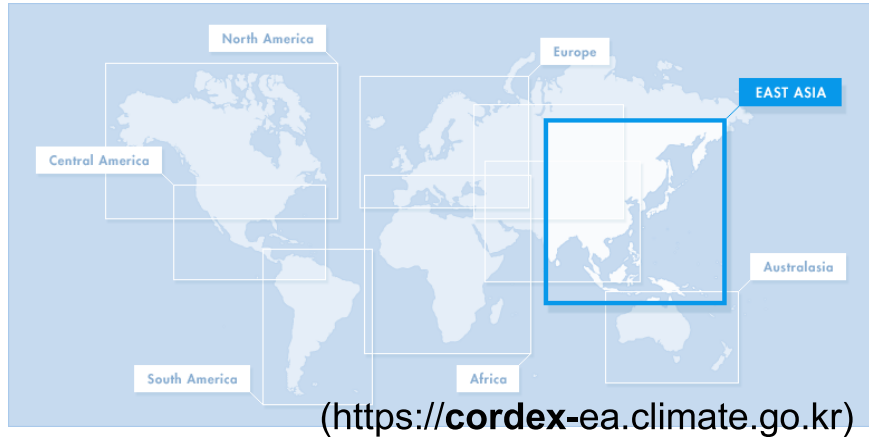
Heavy Precipitation



Droughts

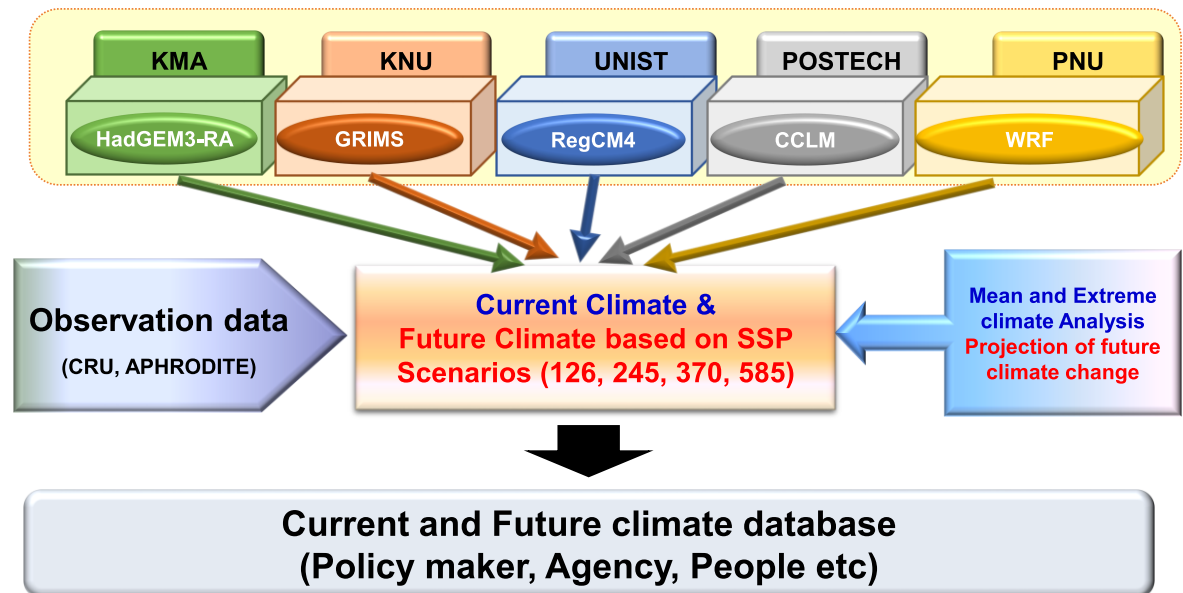


Coordinated Regional Downscaling Experiment(CORDEX)



- The World Climate Research Programme (WCRP) established in 2009 the Task Force for Regional Climate Downscaling (TFRCD), which created the CORDEX initiative to generate regional climate change projections for all terrestrial regions of the global within the timeline of the Fifth Assessment Report (AR5) and beyond.

Dynamical downscaling for CORDEX CORE



CORDEX 실험: 미래 태풍 변화

- GRIMs

2015-2050

2065-2100

RSMC

historical

SSP126 - historical

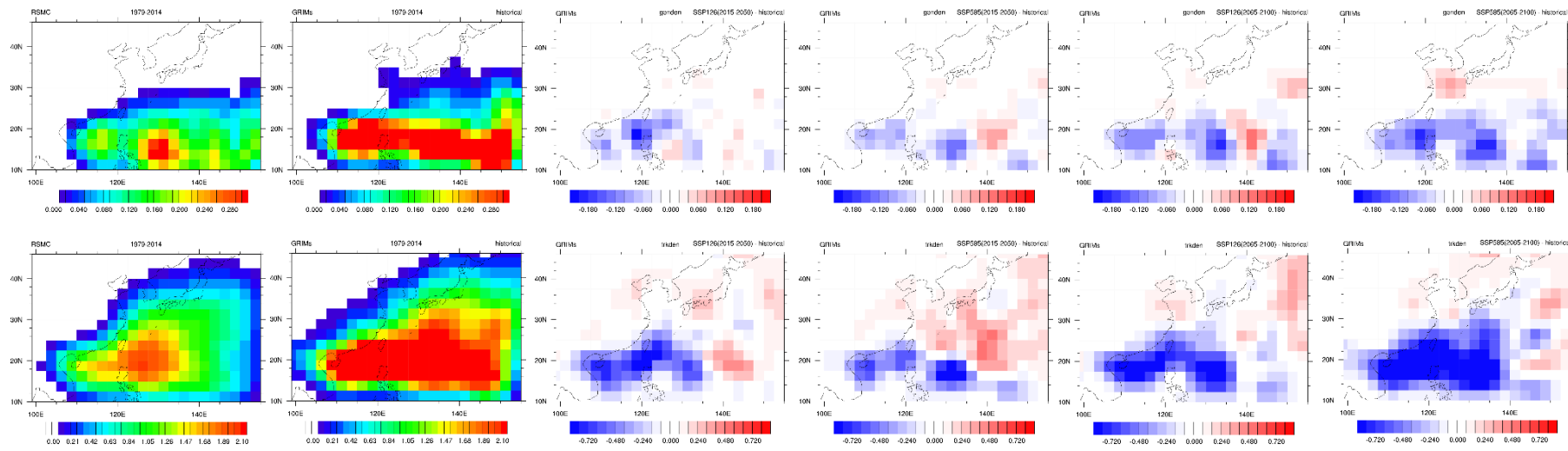
SSP585 - historical

SSP126 - historical

SSP585 - historical

발생 밀도

진로 밀도



GRIMs	RSMC (1979-2014)	historical (1979-2014)	SSP126 (2015-2050)	SSP585 (2015-2050)	SSP126 (2065-2100)	SSP585 (2065-2100)
NTC	17.1	30.8	28.0	29.2	27.5	24.2
LMI wind speed (m s ⁻¹)	38.1	30.1	31.7	31.6	31.6	34.0
LMI sea-level pressure (hPa)	956.2	980.4	978.1	978.2	978.5	974.3

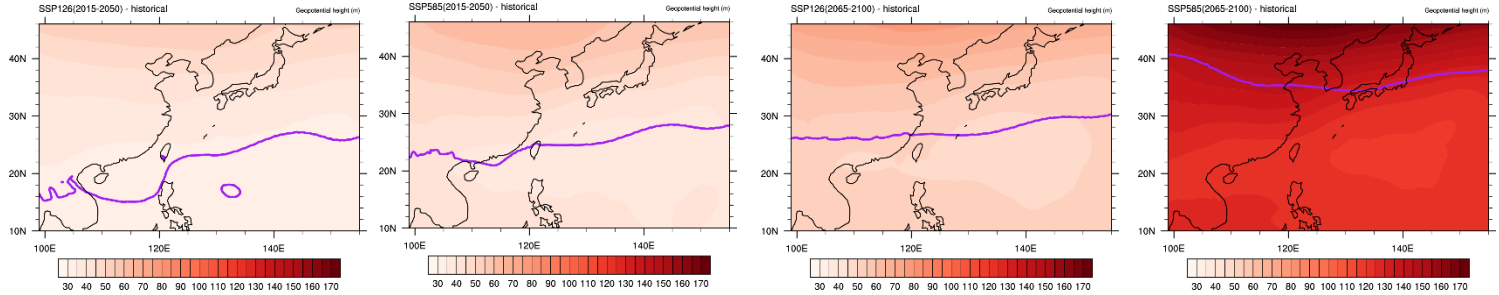
CORDEX 실험: 미래 태풍 변화

- GRIMs

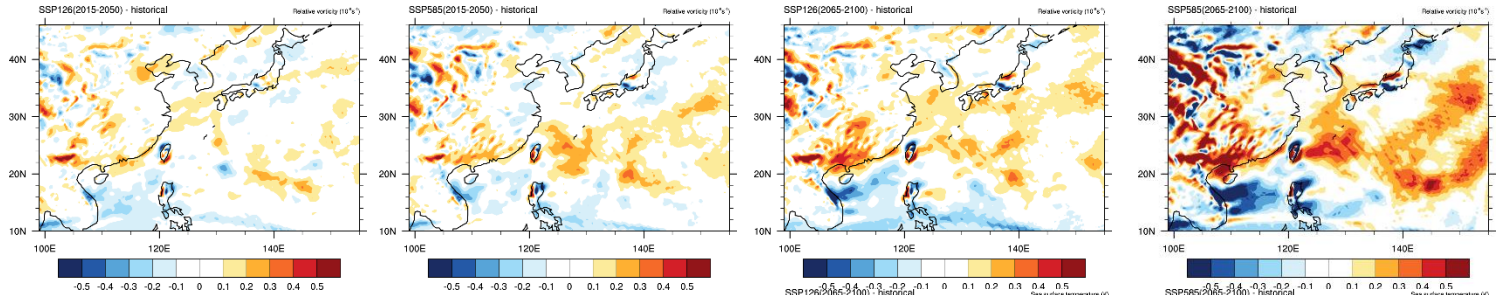
SSP126 2015-2050 SSP585
- historical - historical

SSP126 2065-2100 SSP585
- historical - historical

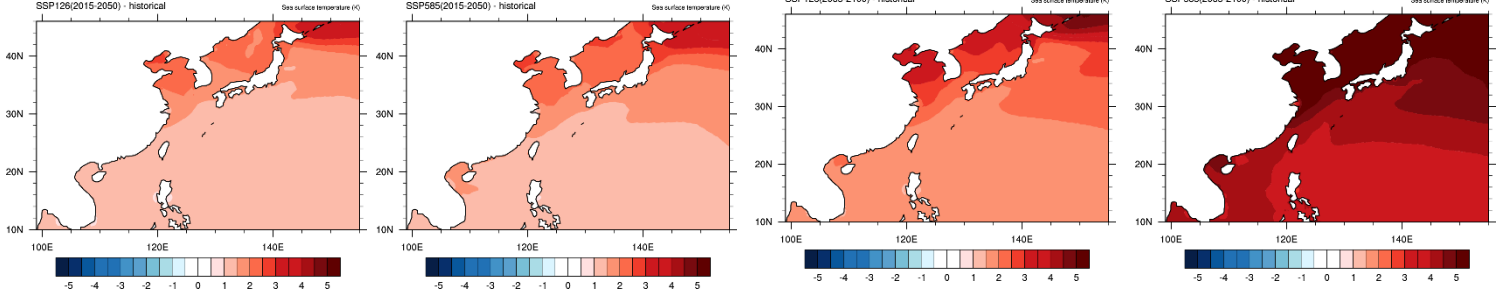
500 hPa
지위고도
[m]



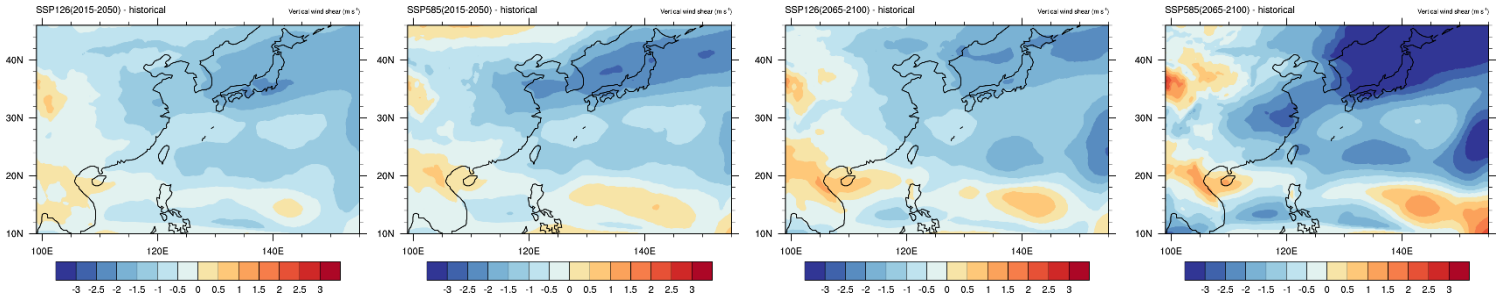
850 hPa
상대와도
[$10^{-5} s^{-1}$]



해수면 온도
[K]

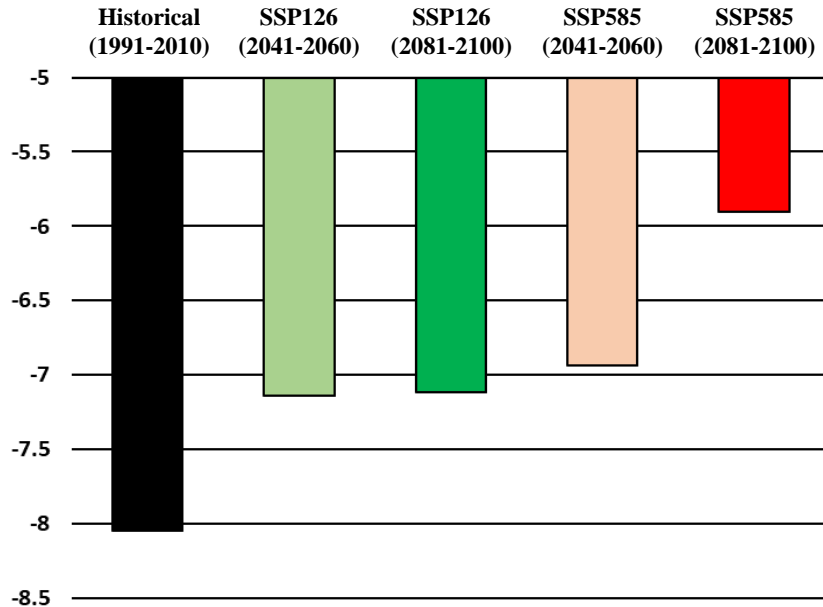


연직 바람 시어
[$m s^{-1}$]

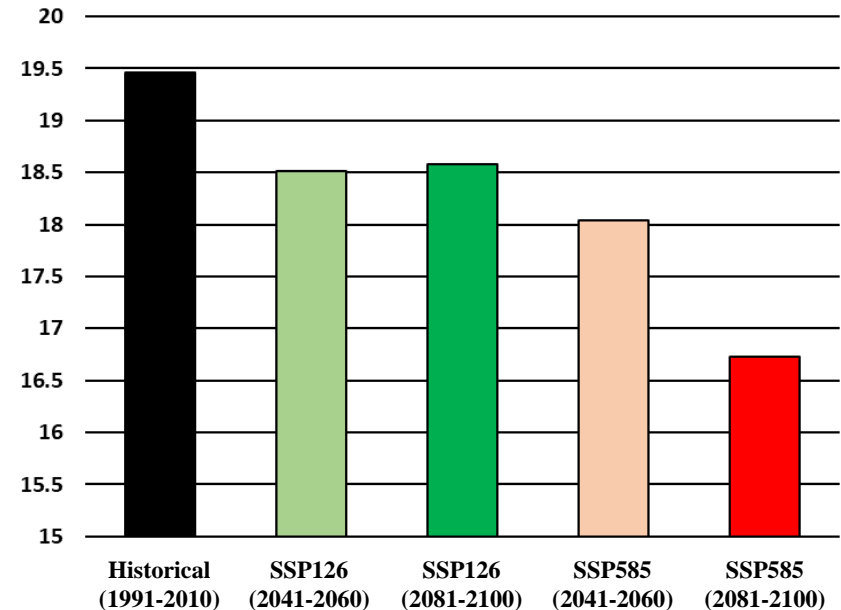


IPCC 6차 보고서 참여 CMIP6 모델 11개 앙상블 결과

남북방향 온도경도 (120-150E, 25-40N)



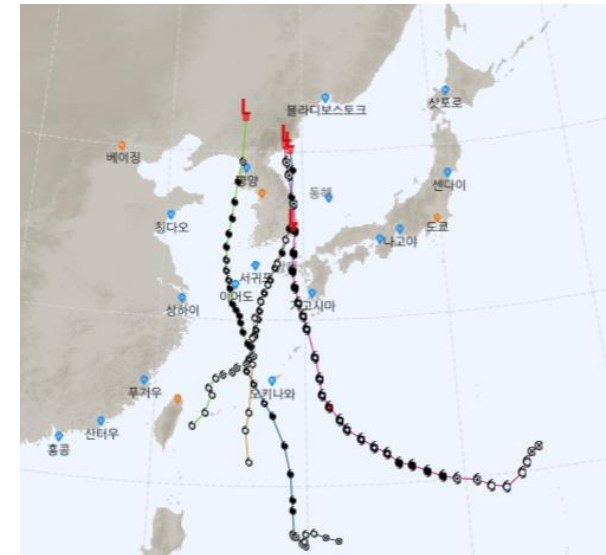
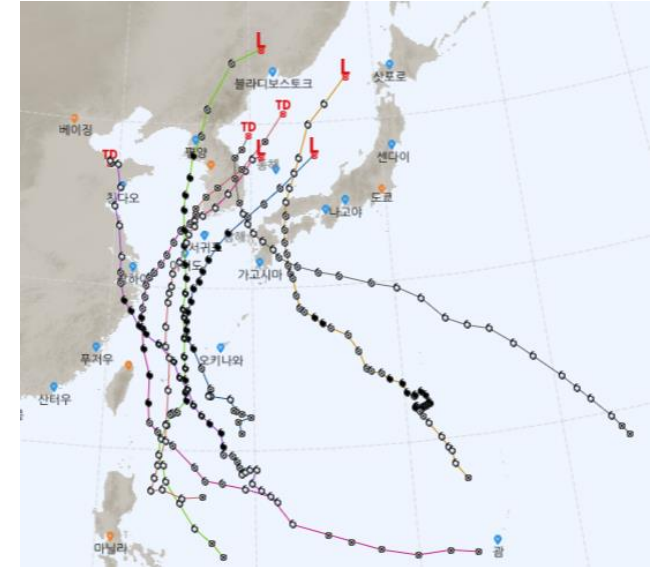
연직바람시어 (120-150E, 25-40N)



- 최근 북서태평양에서 급강화 태풍의 발생 위도가 북쪽으로 확장하고 있고, 한반도에 영향을 주는 태풍으로 인한 바람강도와 강수가 증가하는 추세임.
- 이러한 이유는 자연변동성과 온난화의 영향일 수 있음.
- 상세기후변화 시나리오에 따르면 미래 한반도 주변의 재해기상 현상의 강도가 더욱 증가해 더 큰 피해를 초래할 것으로 전망함. 특히, 미래 태풍의 강도는 증가하고 중위도로 확장하는 확률이 높아져 한반도에 피해를 증가할 수 있고, 온난화의 영향으로 대기불안정도가 상승해 집중호우 발생 가능성도 높아질 수 있음.
- 원전 스트레스 평가 시 해수면의 상승, 태풍의 강도와 빈도 증가, 집중호우의 강도 증가를 고려해 기후변화의 영향을 반영할 필요가 있음.

2019, 2020년 영향 태풍

연도	태풍 번호	태풍명	발생 ~ 소멸 (UTC)
2019	201908	프란시스코(FRANCISCO)	2019/08/02 00:00 ~ 2019/08/06 12:00
	201909	레끼마(LEKIMA)	2019/08/04 06:00 ~ 2019/08/12 12:00
	201910	크로사(KROSA)	2019/08/06 06:00 ~ 2019/08/16 12:00
	201913	링링(LINGLING)	2019/09/02 00:00 ~ 2019/09/08 00:00
	201917	타파(TAPAH)	2019/09/19 06:00 ~ 2019/09/23 00:00
201918	미탁(MITAG)	2019/09/28 00:00 ~ 2019/10/03 03:00	
2020	202005	장미(JANGMI)	2020/08/08 18:00 ~ 2020/08/10 08:00
	202008	바비(BAVI)	2020/08/22 00:00 ~ 2020/08/27 06:00
	202009	마이삭(MAYSAK)	2020/08/28 06:00 ~ 2020/09/03 03:00
	202010	하이선(HAISHEN)	2020/09/01 12:00 ~ 2020/09/07 12:00



해수면 상승에 대한 리스크

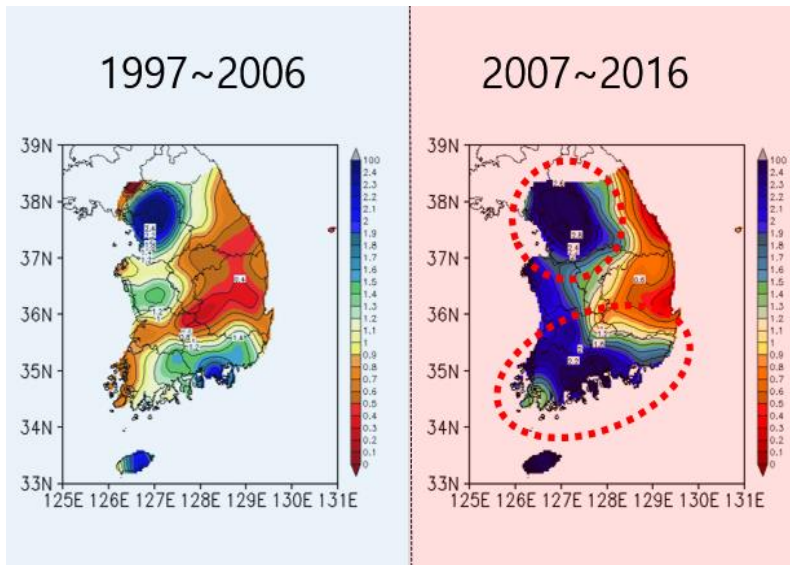


기후변화 리스크

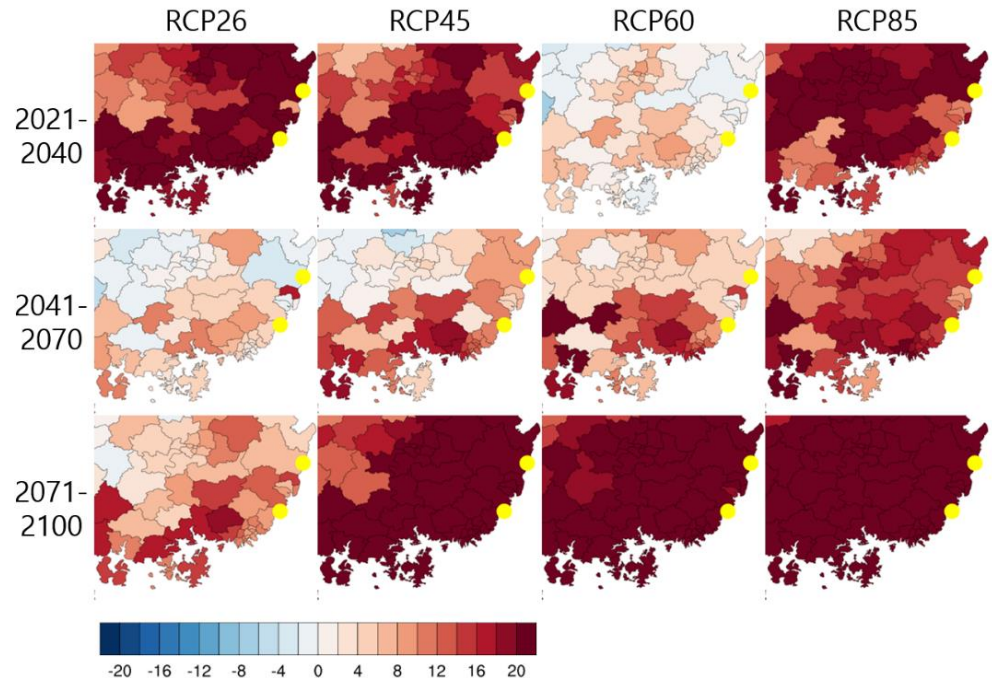
호우(침수)에 대한 리스크

- 온난화로 인한 대기 하층의 수증기 증가로 대류불안정도가 증가해 미래 집중 호우 발생 가능성이 더욱 높아짐.
- 특히 이러한 경향은 동남권 해안 지역에 더욱 뚜렷하게 나타남.

시간당 30mm 이상의 집중호우 발생 빈도 변화



RCP 시나리오 기반 동남권 지역 연최대일강수량의 변화



감사합니다

문헌 자료 조사

Number	pub. Year	Authors, Title, Journal, and Volumn (APA style)	Target date	Keywords
1	2019	Kim, D., Ho, C. H., Park, D. S. R., & Kim, J. (2019). Influence of vertical wind shear on wind-and rainfall areas of tropical cyclones making landfall over South Korea. <i>Plos one</i> , 14(1), e0209885.	1998-2013	영향 태풍 특성
2	2017	강현웅, 박진혁, 장수형, 손찬영, & 김정민. (2018). 시기별 한반도 영향 태풍의 활동 특성 및 강우 변화 분석. <i>한국수자원학회 학술발표회</i> , 321-321.	1977-1994 (Period 1) 1995-2012 (Period 2)	영향 태풍 특성
3	2016	Kim, J. S., Kang, H. W., Son, C. Y., & Moon, Y. I. (2016). Spatial variations in typhoon activities and precipitation trends over the Korean Peninsula. <i>Journal of hydro-environment research</i> , 13, 144-151.	1966 - 2009	태풍 강수
4	2012	Lee, M. H., Ho, C. H., Kim, J. H., & Song, H. J. (2012). Low-frequency variability of tropical cyclone-induced heavy rainfall over East Asia associated with tropical and North Pacific sea surface temperatures. <i>Journal of Geophysical Research: Atmospheres</i> , 117(D12).	1961–2005 (June–October)	long-term climate change in Korea a
5	2012	Byun, K. Y., & Lee, T. Y. (2012). Remote effects of tropical cyclones on heavy rainfall over the Korean peninsula—statistical and composite analysis. <i>Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography</i> , 64(1), 14983.	1981–2009.	간접 태풍 강수 영향
6	2011	Park, D. S. R., Ho, C. H., Kim, J. H., & Kim, H. S. (2011). Strong landfall typhoons in Korea and Japan in a recent decade. <i>Journal of Geophysical Research: Atmospheres</i> , 116(D7).	1977–1988 (Period 1) 1997–2008 (Period 2)	상륙 태풍 강수
7	2011	Kim, J. S., & Jain, S. (2011). Precipitation trends over the Korean peninsula: typhoon-induced changes and a typology for characterizing climate-related risk. <i>Environmental Research Letters</i> , 6(3), 034033.	1966–2007 (June–September)	강유역 태풍 강수 River basin TC Rainfall
8	2008	Choi, E. S., & Moon, I. J. (2008). The variation of extreme values in the precipitation and wind speed during 56 years in Korea. <i>Atmosphere</i> , 18(4), 397-416.	1951-2006	
9	2008	Oh, T. S., & Moon, Y. I. (2008). Special quality analysis of extreme rainfall by typhoon. <i>Journal of the Korean Society of Civil Engineers</i> , 28(5B), 459-473.	1961 - 2005	태풍 극한강수 특성
10	2007	Oh, T. S., Ahn, J. H., & Moon, Y. I. (2007). A study on special quality of hourly precipitation of typhoon happened in Korea. <i>Journal of Korea Water Resources Association</i> , 40(9), 709-722.		태풍의 시간 강우량 특성
11	2006	Kim, J. H., Ho, C. H., Lee, M. H., Jeong, J. H., & Chen, D. (2006). Large increase in heavy rainfall associated with tropical cyclone landfalls in Korea after the late 1970s. <i>Geophysical Research Letters</i> , 33(18).	1954–2005	상륙 태풍 강수

태풍의 구분

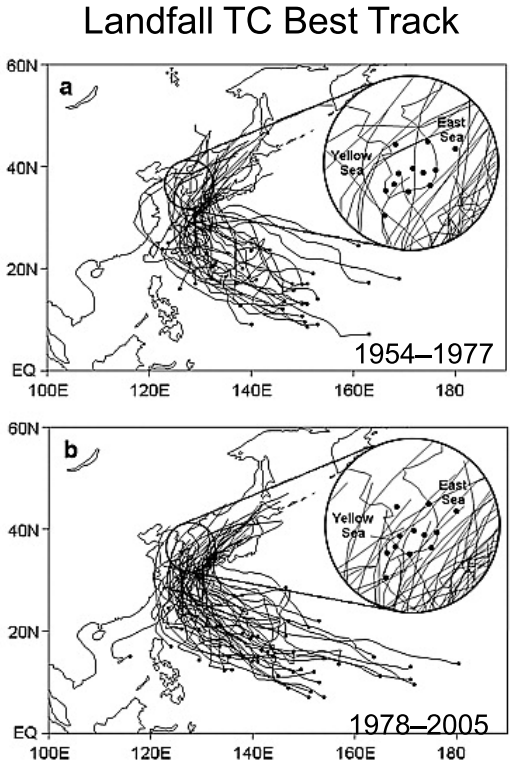
북대서양 동태평양 : Saffir-Simpson Scale

Saffir-Simpson Hurricane Category	Maximum Sustained Wind Speed (V_{MAX} ; 1-minute average)			Expected Level of Damage
	$m\ s^{-1}$	$km\ h^{-1}$	mph	
1	33–42	119–153	74–95	Minimal
2	43–49	154–177	96–110	Moderate
3	50–58	178–208	111–129	Extensive
4	59–69	209–251	130–156	Extreme
5	70+	252+	157+	Catastrophic

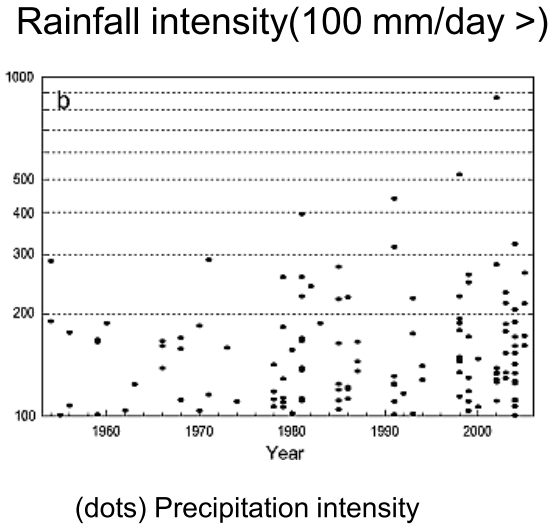
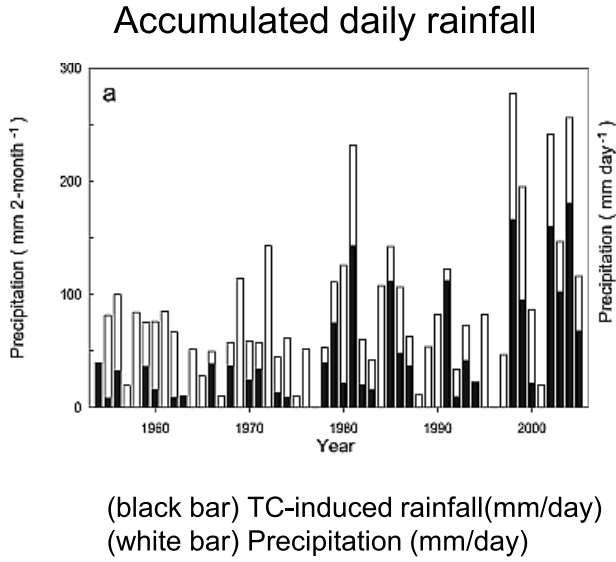
한반도 태풍 강수의 과거 추세

과거 태풍 강수 변화 경향성

✓ 상륙 태풍의 강수 과거 추세 (1954-1977년 8-9월 상륙 태풍 강수 변화)



(a) 1954-1977, (b) 1978-2005
(dots) 12 Observation stations



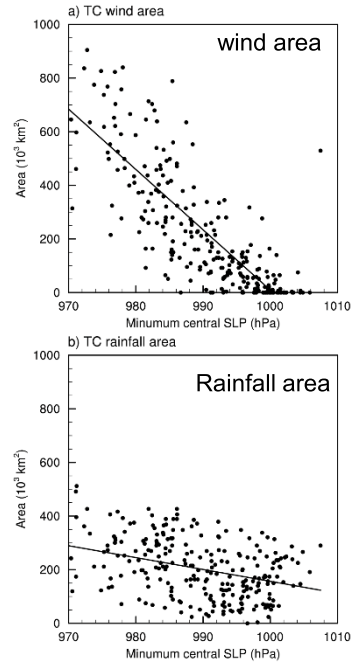
- 태풍의 빈도는 1978-2005년(50개, 평균 1.8 yr⁻¹) 기간에 1954-77년(40개, 평균 1.7 yr⁻¹)보다 약간 증가한 것으로 나타남.
- 태풍에 의해 유도된 강수량과 강수 강도는 증가하는 추세를 보임.

한반도 태풍 강수의 종관 환경

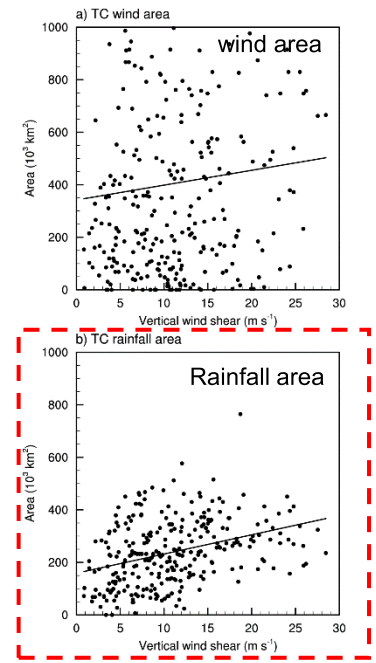
태풍 강수의 종관 환경 영향

✓ 한반도 영향 태풍의 강수/바람 면적(Area)에 작용하는 종관 환경(Vertical shear)

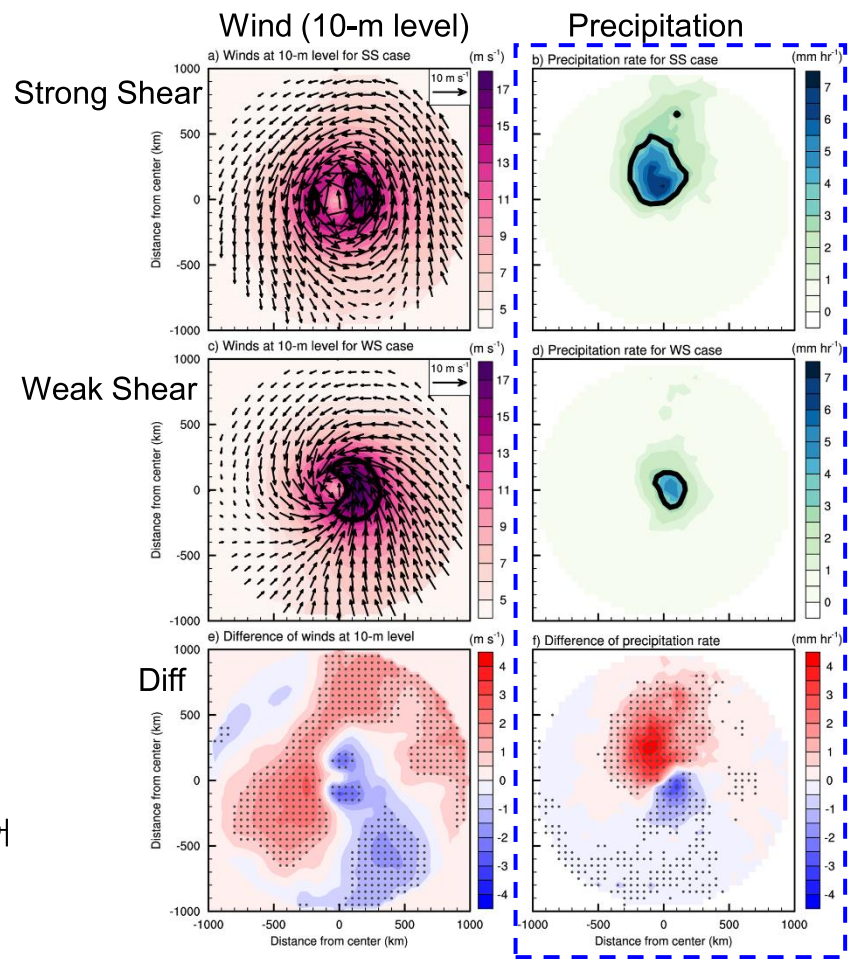
wind area, and rainfall area according to the **minimum SLP**



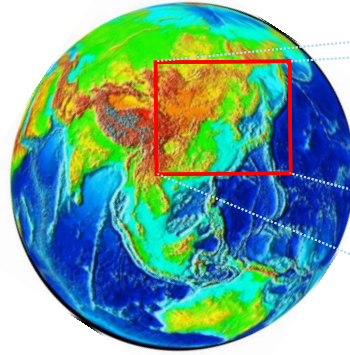
wind area, and rainfall area according to the **vertical shear**



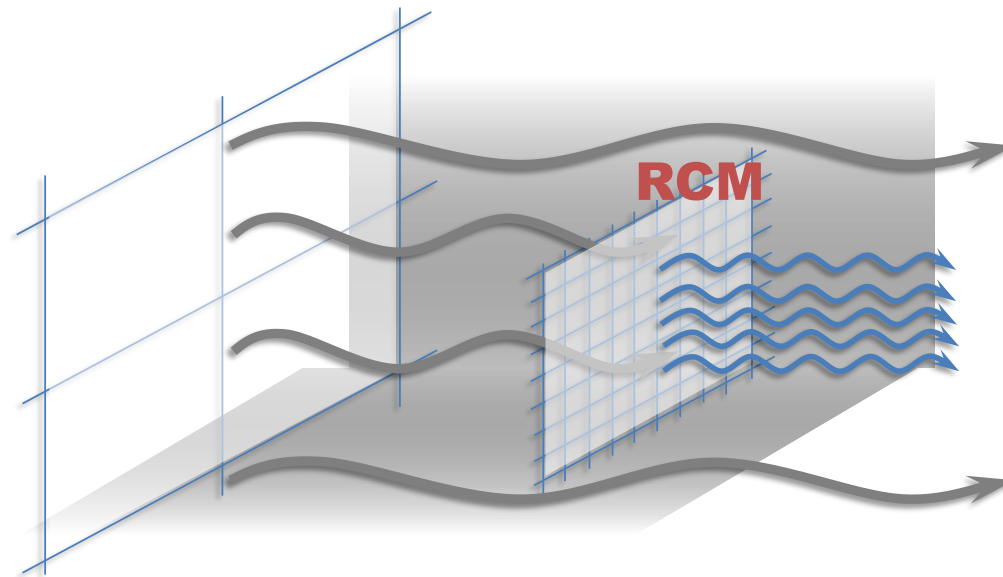
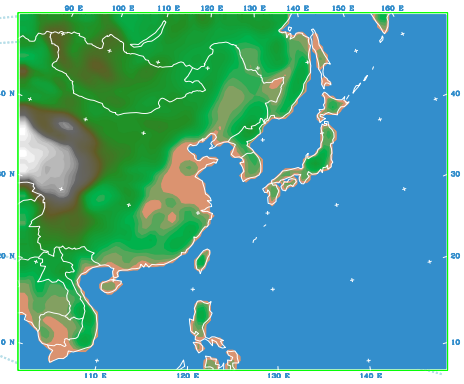
- 태풍의 바람과 달리 강수는 수직풍 시어가 강할수록 면적이 넓어지는 경향이 있음 ($r=0.37$ 95% confidence level).
- 태풍 강수 면적은 수직풍 시어가 강할수록, 비대칭적인 구조가 나타나고 태풍 진행 방향 앞쪽에 강수가 강화됨.



Global data



RCM



CORDEX 실험: 미래 태풍 변화

- RegCM4

2015-2050

2065-2100

RSMC

historical

SSP126 - historical

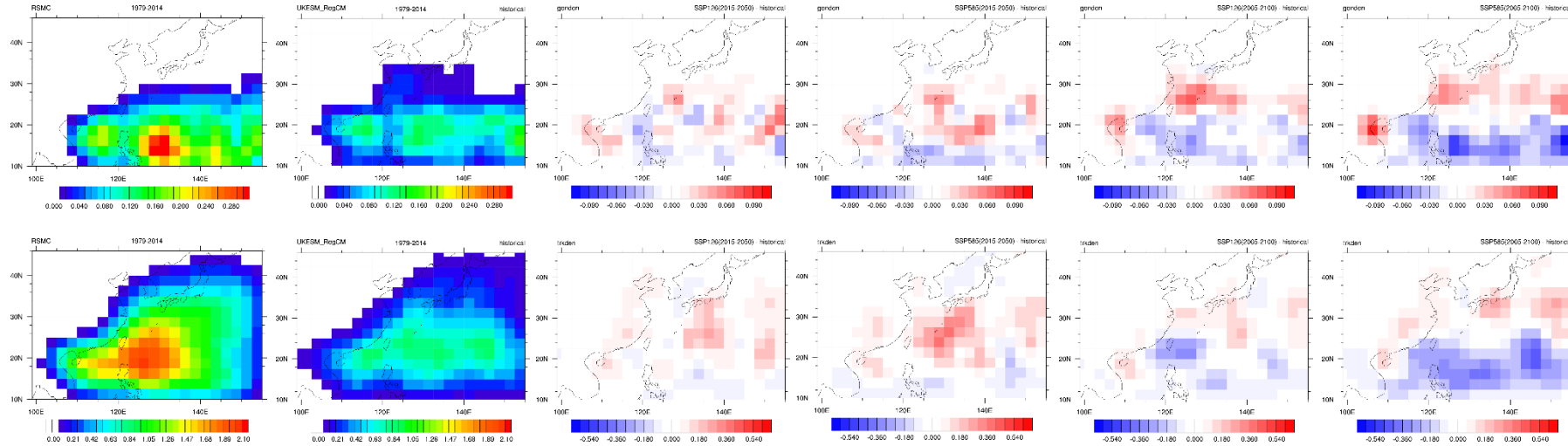
SSP585 - historical

SSP126 - historical

SSP585 - historical

발생도

진로도



RegCM4	RSMC (1979-2014)	historical (1979-2014)	SSP126 (2015-2050)	SSP585 (2015-2050)	SSP126 (2065-2100)	SSP585 (2065-2100)
NTC	17.1	10.6	11.1	10.9	10.5	9.3
LMI wind speed (m s ⁻¹)	38.1	22.9	23.0	23.1	22.9	24.0
LMI sea-level pressure (hPa)	956.2	994.9	995.2	995.3	995.0	994.9

CORDEX 실험: 미래 태풍 변화

• RegCM4

500 hPa
지위고도
[m]

850 hPa
상대와도
[$10^{-5} s^{-1}$]

해수면 온도
[K]

연직 바람 시어
[$m s^{-1}$]

