

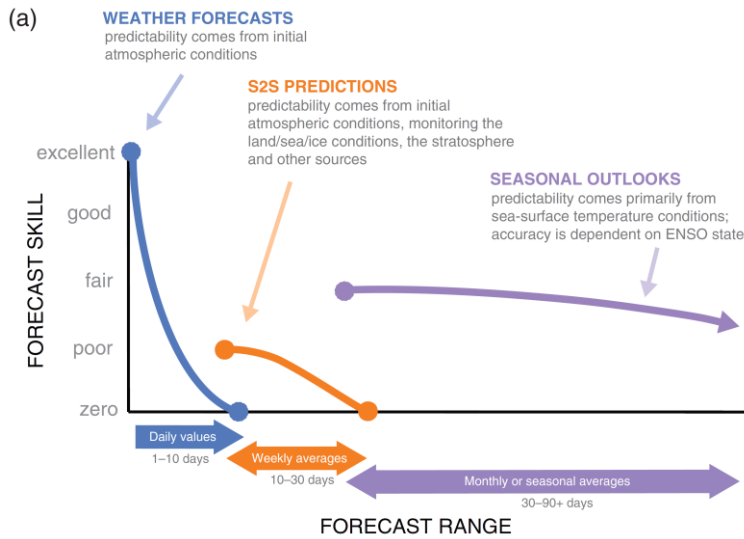
# 기후감시와 분석기반 장기예보

기후분석과  
임슬희

# 목차

- 기후 분석 기반 장기예보
- 겨울철 주요 영향 요소
- 여름철 주요 영향 요소

# 기후 분석 기반 장기예보



기온, 강수량에 대해  
1개월 전망 → 11일 이후  
부터 4주까지, 주별 예보  
3개월 전망 → 다음월 부  
터 3개월까지, 월별 예보

기온, 강수량, ENSO  
계절기후전망 → 다음  
다음 계절, 연4회  
연기후전망 → 다음해,  
1년에 한번

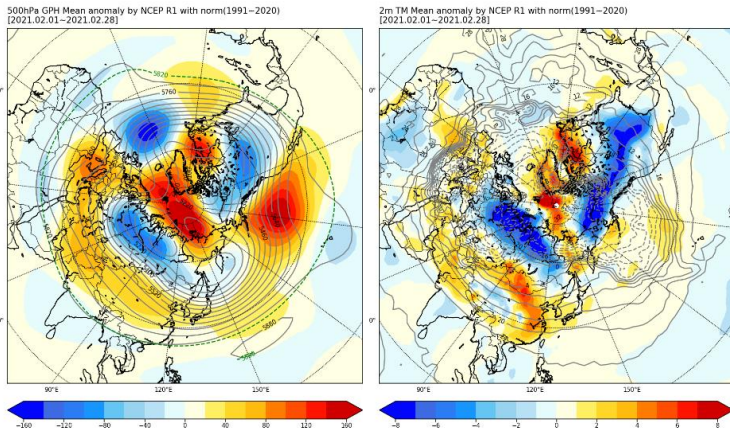
주단위, 월단위, 계절단위의 비교적 긴 시간규모에 대해 평년 대비 경향성 예보

- ✓ 장기예보에서는 비교적 긴 시간동안 대기와 상호작용하는 해양, 지면 상태 등이 중요하게 작용 → boundary condition (경계조건)
- ✓ 과거 경험(통계, 진단)을 바탕으로 유사한 해수면온도, 지면상태, 대류구조 나타났을 때의 특성을 장기예보에 활용 가능
- ✓ 모델 오차, 이상기후 발생 증가 → 모델 예측성의 한계 → 장기예보 정확도 향상을 위해 모델 예측결과와 과거자료로부터 얻어진 기후분석 결과 함께 활용

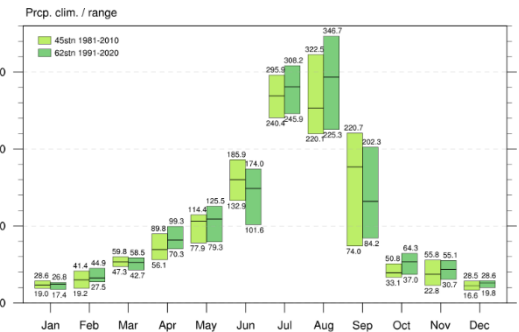
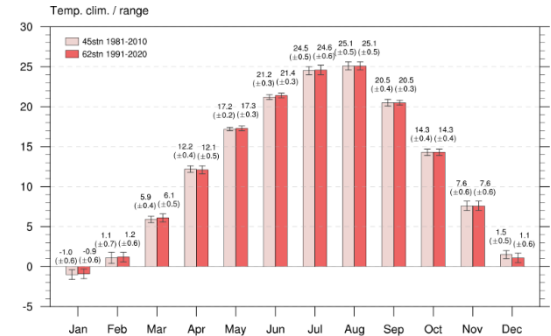


# 평년과 편차

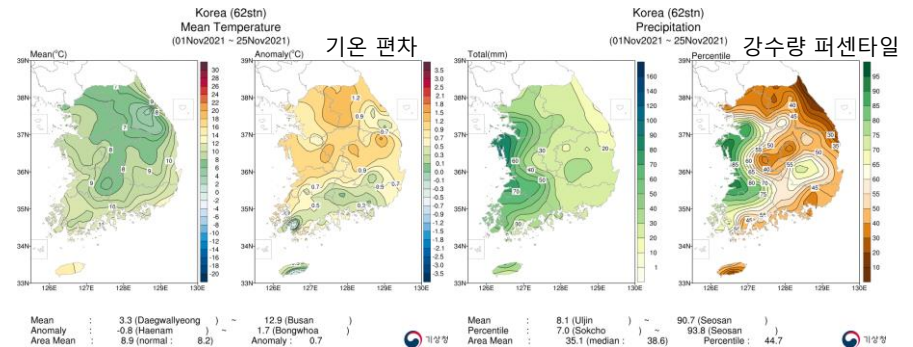
- ✓ 평년(기후값) : 과거 30년 기간의 평균 (1991-2020년)
- ✓ 편차 (anomaly) : 평균(기후값)을 뺀 값  $x' = x - \bar{x}$ 
  - 평년과 비교해 벗어나는 정도에 대한 정보
  - 장기예보(기후예측)에서 매일의 날씨를 예측할 수 없으므로 일정기간에 대한 평균상태를 과거 기후값을 기준으로 벗어나는 정도를 예측



- ✓ 양(음)의 지위고도 편차
  - 평년보다 높은(낮은) 기압
  - 기압능(기압골) 발달
  - 높은(낮은) 기온과 관련

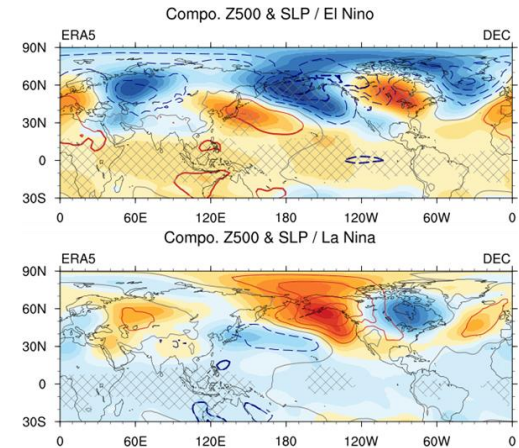
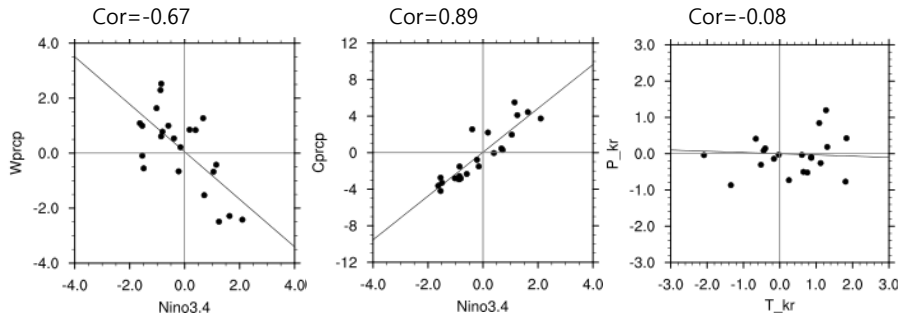


우리나라 월 평균기온과 강수량의 평년값



# 상관분석

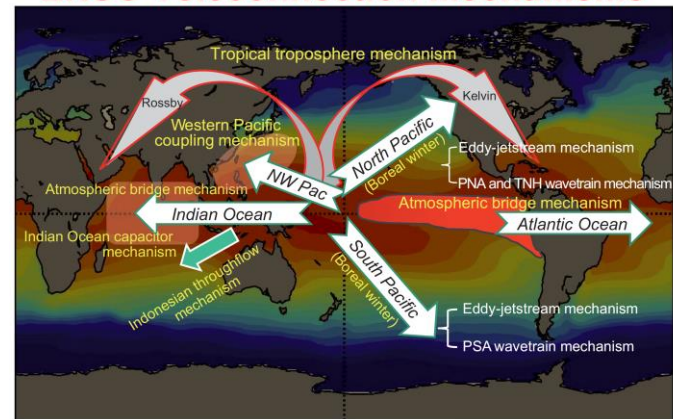
- ✓ 상관분석 (correlation analysis) : 변수 간의 밀접한 정도를 분석
- ✓ 회귀분석 (Linear Regression analysis) : 종속변수  $y$ 와 독립변수  $x$ 와의 선형 상관 관계를 함수로 모델링하는 통계기법  $y = ax + b$
- ✓ 합성장 분석 (Composite analysis) : 주어진 조건에 대하여 대상이 되는 변수의 추정값 (주어진 조건에 대한 대상 변수의 산술 평균)  
예) 엘니뇨 해의 500hPa 지위고도 합성장



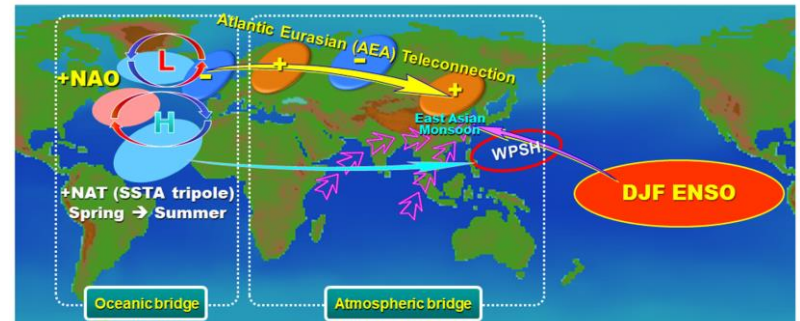
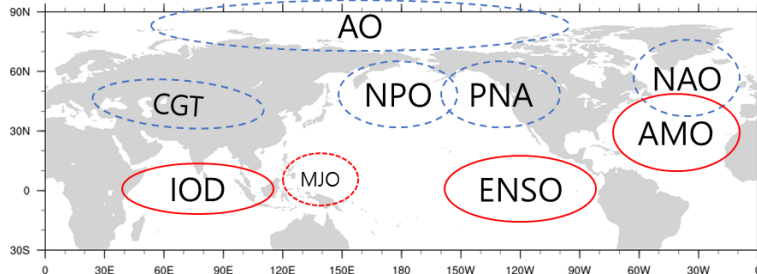
# 원격상관

- ✓ 원격상관 (Teleconnection) : 지리적으로 멀리 떨어진 지역의 변수가 서로 관련성을 보이는 기후 편차 (climate anomaly)
  - El Nino Southern Oscillation (ENSO)
  - North Atlantic Oscillation (NAO)
  - Pacific/North American pattern (PNA)
  - Arctic Oscillation (AO)
  - Circumglobal Teleconnection (CGT)
  - ...

## ENSO Teleconnection Mechanisms

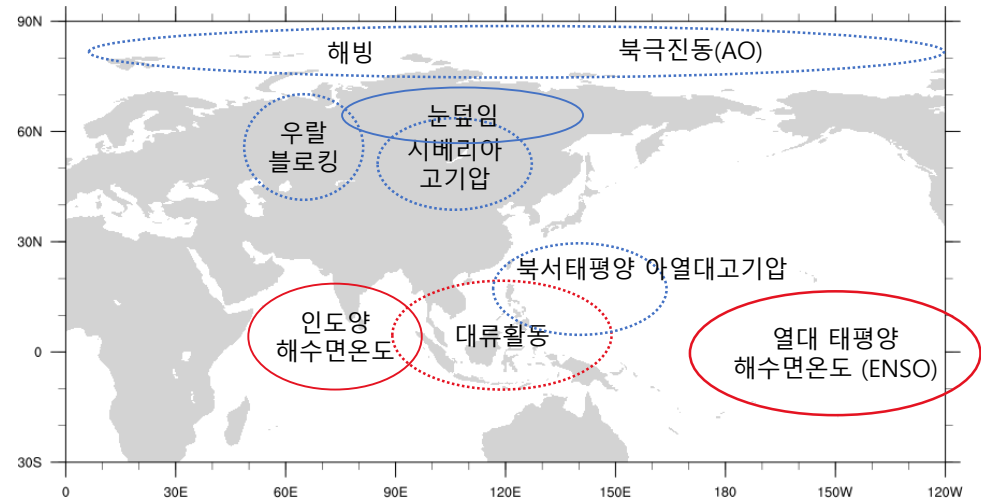
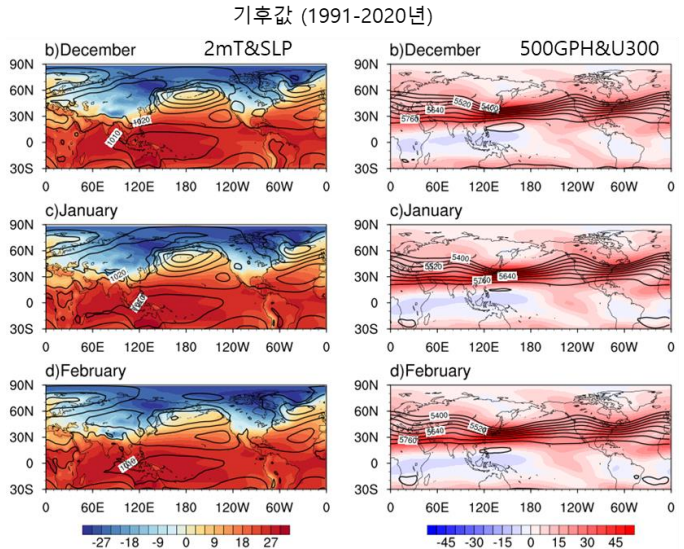


Yang et al. 2018



Li et al. 2019

# 겨울철 평년 순환장과 주요 영향 요소

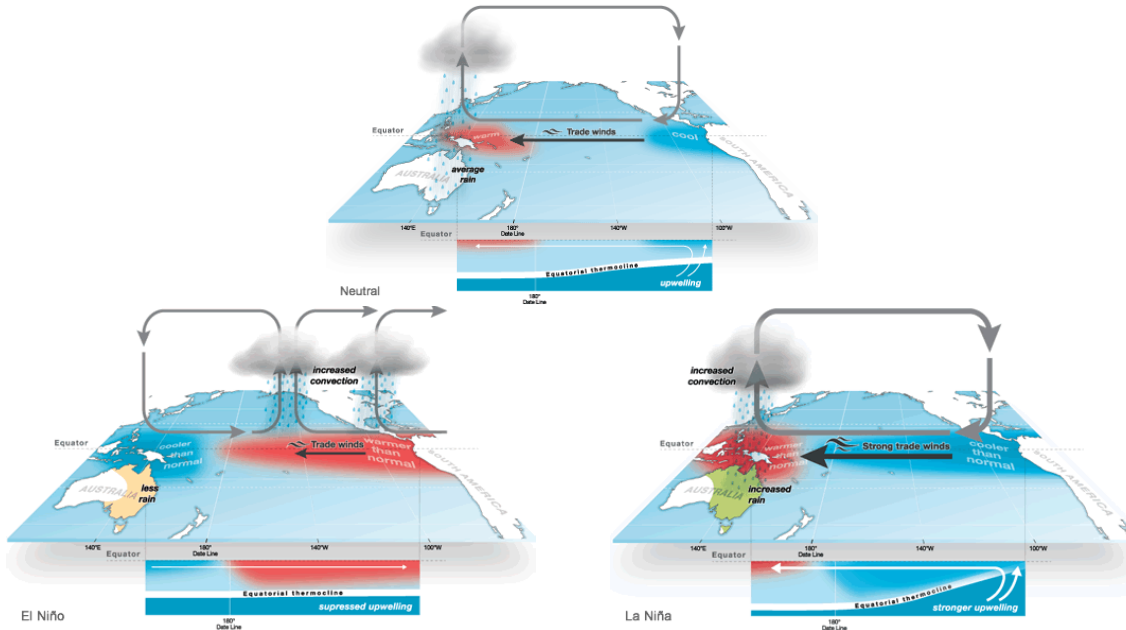
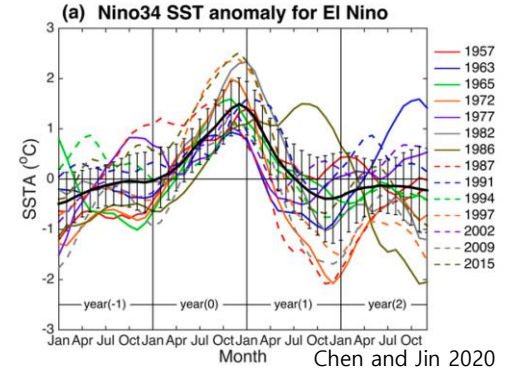


- ✓ 겨울철 지상기압 서고동저 형태 → 서쪽 대륙고기압, 동쪽 알류산 저기압 발달, 북풍계열 바람 지배적
- ✓ 우리나라 기온은 대륙고기압과 알류산 저기압 변동에 따른 북풍계열 바람 변동과 깊은 연관 → 대륙고기압 발달과 확장으로 북풍 계열 바람 강화되면 대륙의 찬 공기 남하로 기온 하강

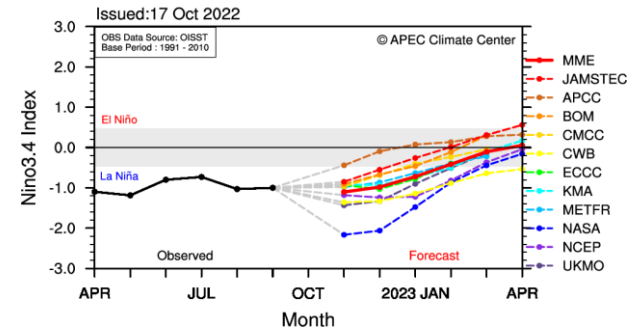
# 엘니뇨/라니냐 (ENSO)

## ✓ El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

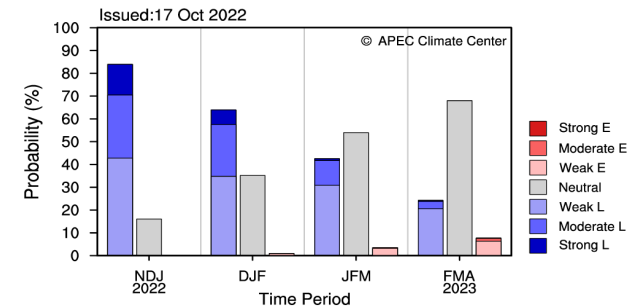
- 열대 동태평양과 중태평양 해수면온도가 평년보다 높은(낮은) 상태가 지속되는 현상 (엘니뇨/라니냐)
- 열대 태평양에서 나타나는 현상이지만 대기와 해양의 원격상관을 통해 전 지구에 영향
- 봄~여름철 발생해 겨울철에 최성기에 이르면 봄~여름철에 쇠퇴
- 열대 서태평양과 중태평양 대류활동 변화는 중위도로의 대기파동을 유발



Nino3.4 Index for 2022 NDJFMA



Probabilistic ENSO Forecast for 2022 NDJFMA



\* ENSO Intensity based on 3M Mean Nino3.4 SST Anomaly (Category Boundaries: +/-1.5, 1.0, 0.5°C)

# 겨울철 주요 기후감시 요소 - 엘니뇨 영향

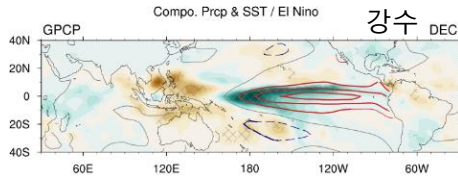


표 6.2. 엘니뇨일 때, 겨울철 우리나라 기온 및 강수 현황

+(-): 평년비숫범위보다 높은(낮은) 해 횟수, 0: 평년비숫범위 이내 해 횟수

엘니뇨 해	기온			강수		
	+	0	-	+	0	-
12월	10	7	0	10	4	3
1월	4	9	4	5	7	5
2월	6	4	7	7	6	4

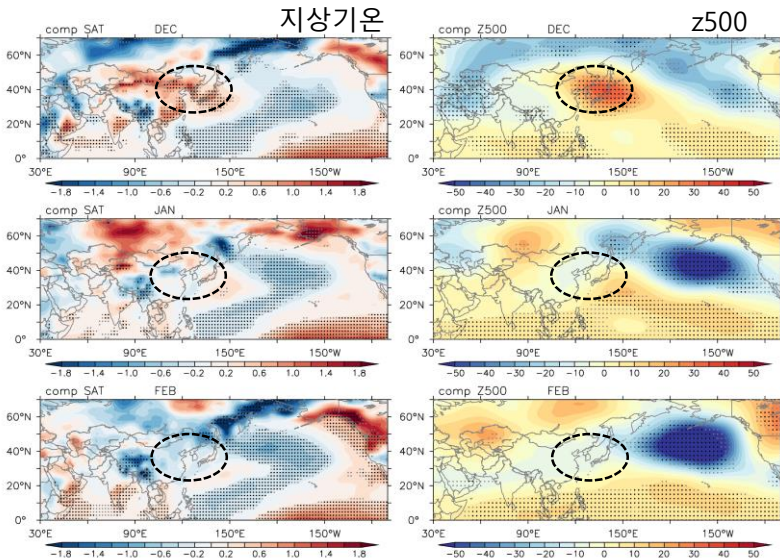


그림 6.9. 1973년 이후 엘니뇨 해에 대한 12월, 1월, 2월, (좌) 지상기온 편차 및 (우) 500hPa 지위고도 편차 합성도

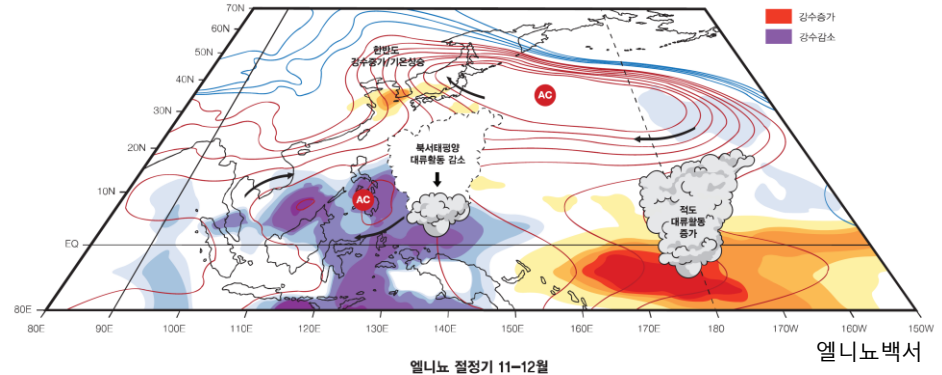


그림3-4-12. 엘니뇨 절정기 11-12월 한반도 영향 모식도.

- ✓ 엘니뇨 시기 중태평양 양의 강수 편차, 서태평양 음의 강수 편차 → Gill-Type 대기 반응, 로스비파 전파 (열대 지역 상층 저기압, 중위도 고기압성 흐름) → 중위도 한반도 동쪽에 연직 순압 구조 고기압성 순환 유도 → 남풍 편차 동반하며 온난 습윤한 공기 유입 → 우리나라 온난/습윤 경향

# 겨울철 주요 기후감시 요소 - 라니냐 영향

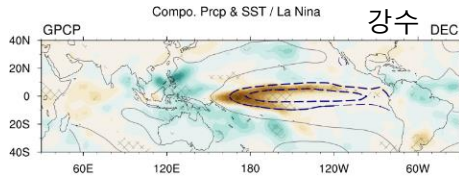


표 6.3. 라니냐일 때, 겨울철 우리나라 기온 및 강수 현황  
+(-): 평년비슷범위보다 높은(낮은) 해 횟수, 0: 평년비슷범위 이내 해 횟수

라니냐 해	기온			강수		
	+	0	-	+	0	-
12월	3	4	6	4	2	7
1월	2	6	5	4	4	5
2월	3	4	6	3	4	6

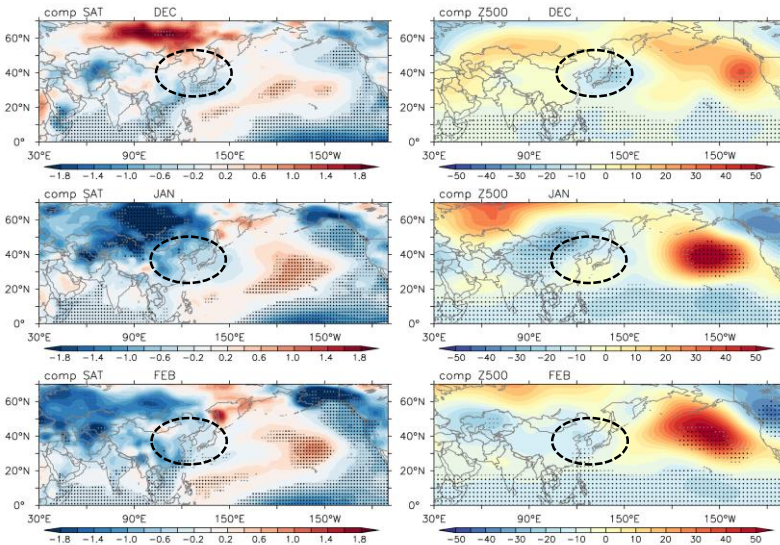


그림 6.10. 라니냐 해에 대한 12월, 1월, 2월, (좌) 지상기온 편차 및 (우) 500hPa 지위고도 편차 합성도

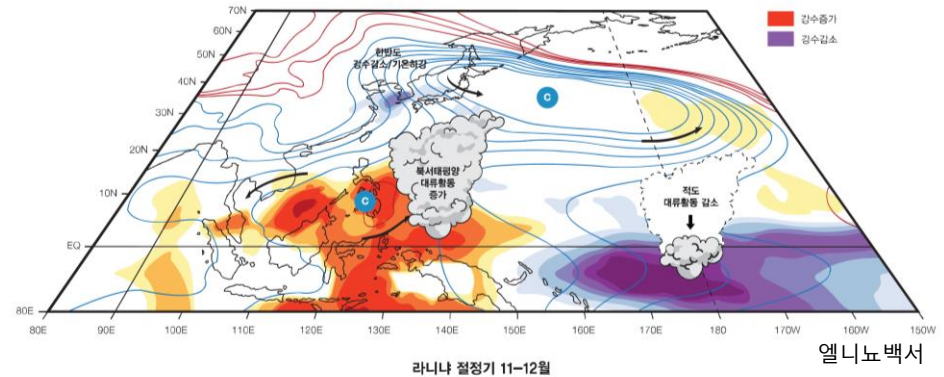
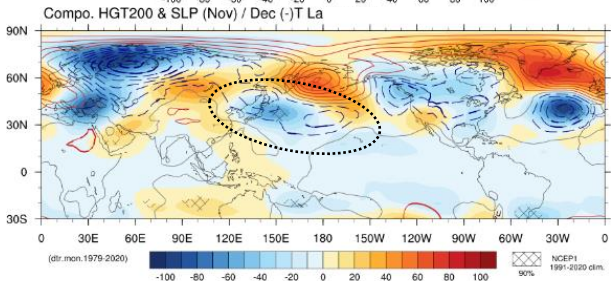
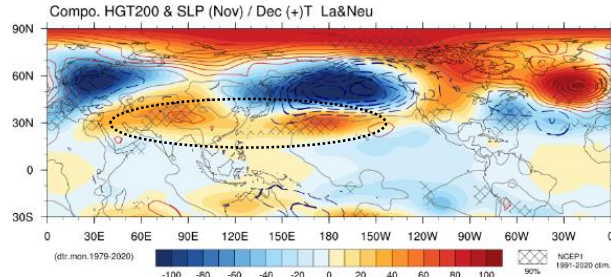


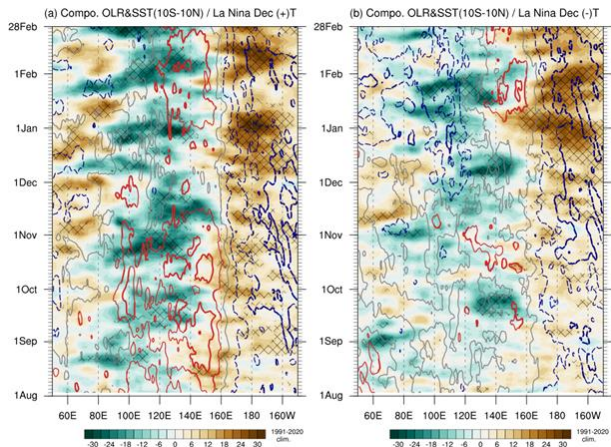
그림3-4-13. 라니냐 절정기 11-12월 한반도 영향 모식도.

- ✓ 라니냐 시기 서태평양 양의 강수 편차, 중태평양 음의 강수 편차 → Gill-Type 대기 반응, 로스비파 전파 (열대 지역 상층 고기압, 중위도 저기압성 흐름) → 중위도 한반도 동쪽에 연직 순압 구조 저기압성 순환 유도 → 북풍 편차 동반하며 차고 건조한 공기 유입 → 우리나라 춥고 건조한 경향

# 겨울철 주요 기후감시 요소 - 대류활동 영향



라니냐/중립인 12월 기온 높은 해와 기온 낮은 해의 11월 200hPa 지위고도와 해면기압 합성장

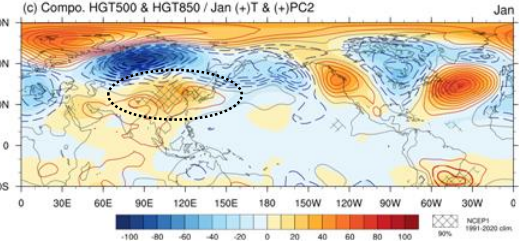
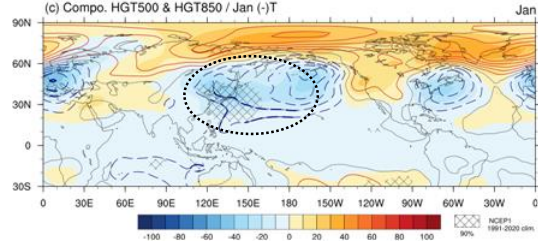
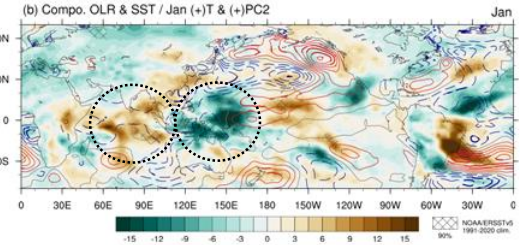
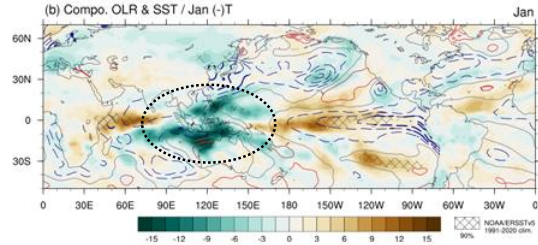


라니냐 12월 기온 높은 해와 기온 낮은 해 열대지역 OLR(shading), SST(contour) 합성장

✓ 라니냐 해 동인도양 높은 해수면온도와 대류활동 늦가을까지 지속 → 티베트 주변 상층 고기압성 순환 지속 → 우리나라 고기압성 순환 영향

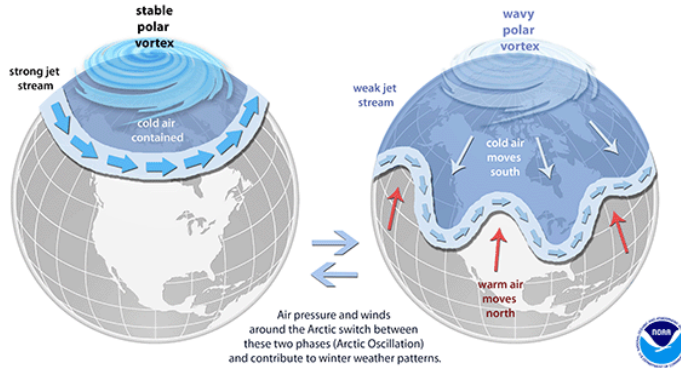
✓ 라니냐-like SST (서태평양(+)-중동태평양 (-)SST 경향) → 1월 서태평양 대류강화, 서인도양 대류 억제 경향 → 로스비파 전파로(라니냐 반응) 동아시아 저기압성 순환 유도

✓ 가을~겨울 CP엘니뇨-like SST (중태평양 (+)SST 경향) → 1월 서태평양 대류강화, 인도양 대류 억제 경향 → 동아시아 고기압성 순환 위치



✓ 열대 해수면온도 및 대류활동, 그와 연관된 아열대 순환장에 따라 우리나라에 미치는 영향 달라짐

# 겨울철 주요 기후감시 요소 - 북극진동



- ✓ 북극진동: 북극 찬 공기의 소용돌이가 수십 일, 수십 년을 주기로 강약을 되풀이하는 현상
  - 양의 북극진동 → 북극 소용돌이 강화, 극 지역 음의 지위도고 편차, 중위도 양의 편차 → 동아시아 양의 편차, 동아시아 기압골 약화 → 북풍 약화로 한기 남하 약화
  - 음의 북극진동 → 북극 소용돌이 약화, 극 지역 찬공기 남하로 한파 가능
- ✓ AO와 ENSO 위상이 같은 경우 (양의 AO+엘니뇨, 음의 AO+라니냐) → 동아시아 지역 고/저기압성 편차 발달 → 우리나라 고온/저온 경향

표 6.6. 북극진동지수와 우리나라 기온 및 강수량의 동시상관관계

상관계수	12월	1월	2월
기온	0.40*	0.46*	0.38*
강수	0.09	0.36*	0.16

※ 통계적으로 95% 수준에서 유의한 값은 \*표시, 분석기간: 1973~2020년

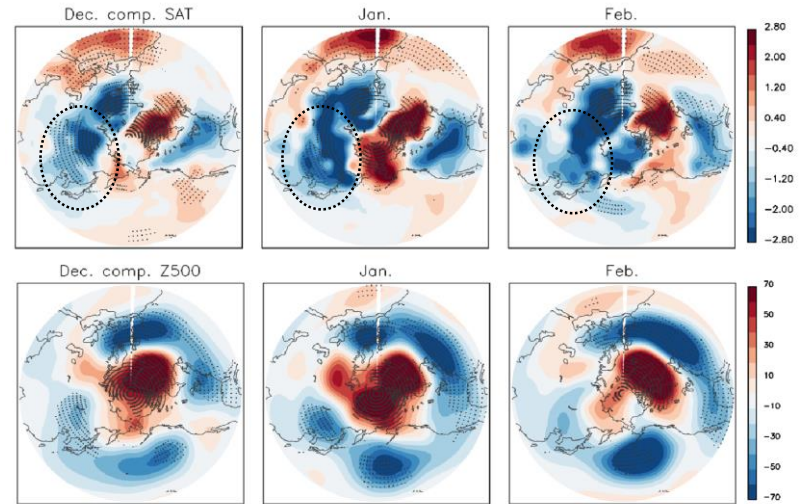
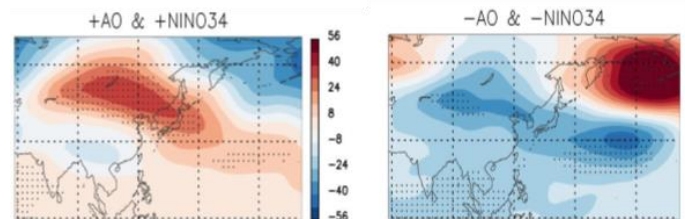


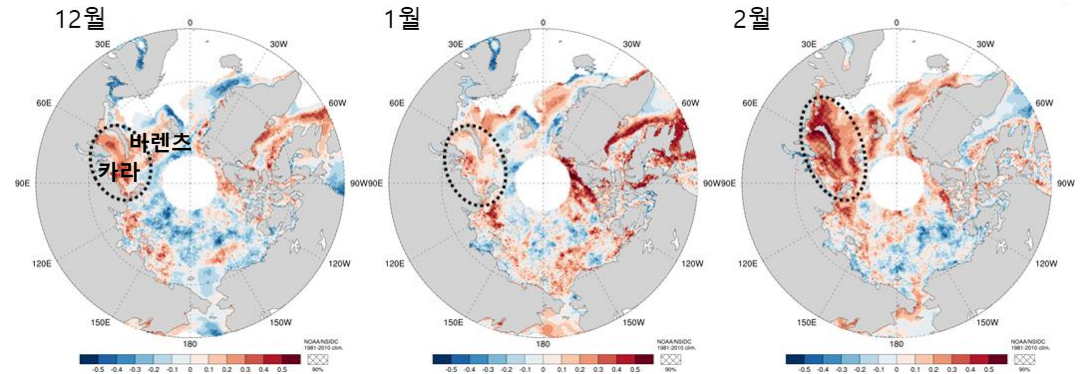
그림 6.19. 음의 북극진동 해(AO지수<-0.75 표준편차) 12월, 1월, 2월에 대한 (위) 지상기온 편차 및 (아래) 500hPa 지위고도 편차 합성도  
· : 통계적으로 95% 수준에서 유의한 지역



AO/ENSO 같은 위상일 때 z500 합성장

# 겨울철 주요 기후감시 요소 - 북극 해빙

우리나라 기온과 북극 해빙 상관관계

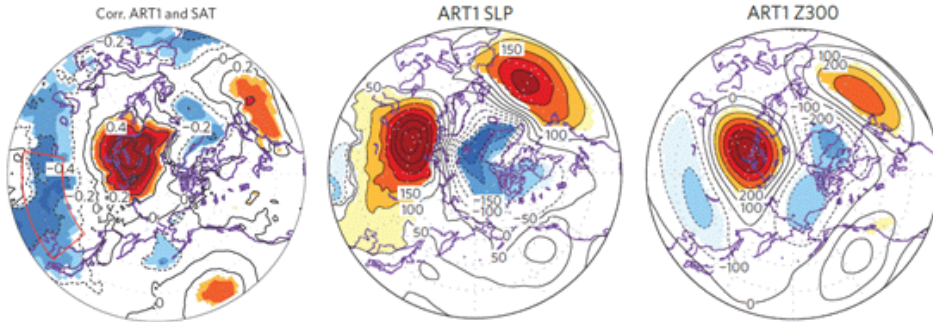


- ✓ 바렌츠/카라 해 해빙과 우리나라 12월, 2월 기온 양의 상관  
→ 해빙 평년보다 적으면 우리나라 기온 낮을 가능성

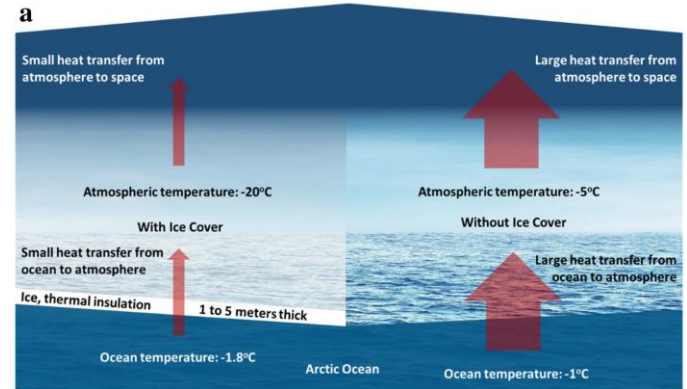
표 6.23. 겨울철 바렌츠/카라 해의 해빙이 적을 때, 우리나라 기온 및 강수 현황  
(+): 평년비슷 범위보다 높은(낮은) 해의 횟수, 0: 평년비슷 범위 이내 해의 횟수

평년보다 적은 바렌츠/카라 해 해빙	기온		
	+	0	-
12월	4	1	6
1월	4	5	2
2월	0	2	5

# 겨울철 주요 기후감시 요소 - 북극 해빙



겨울철(DJF) 바렌츠-카라해에서 평균한(30°-70°E, 70°-80°N) 지표기온 편차에 대한 (좌) 북극 지역 지표기온 편차와의 상관계수, (중) 해면기압과 (우) 300hPa 지위고도장의 선형회귀분석 (Fig.2, Fig.3 in Kug et al. 2015)



Hunt et al. 2020

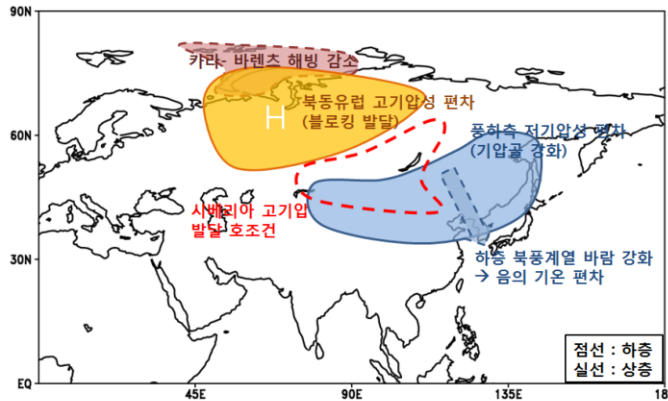
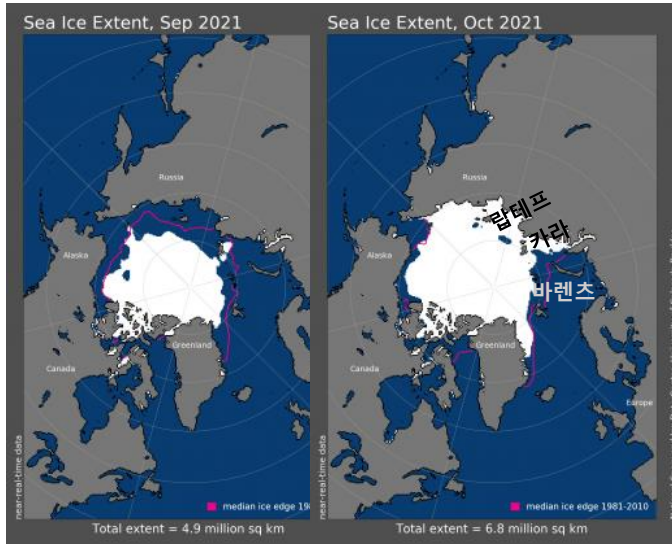


그림 6.30. 겨울철 바렌츠/카라 해 해빙이 많이 녹았을 때의 대기 순환장 및 한파 발생 모식도

- ✓ 바렌츠/카라 해 해빙 적으면
- 바다에서 대기로 열/수증기 방출 증가
- 해빙으로 덮였을 때 보다 대기 온도 증가
- 북동유럽 고기압성 편차 발달
- 동아시아 시베리아와 동아시아 지역 기압골 강화
- 우리나라 저온 유도

# 겨울철 주요 기후감시 요소 - 북극 해빙



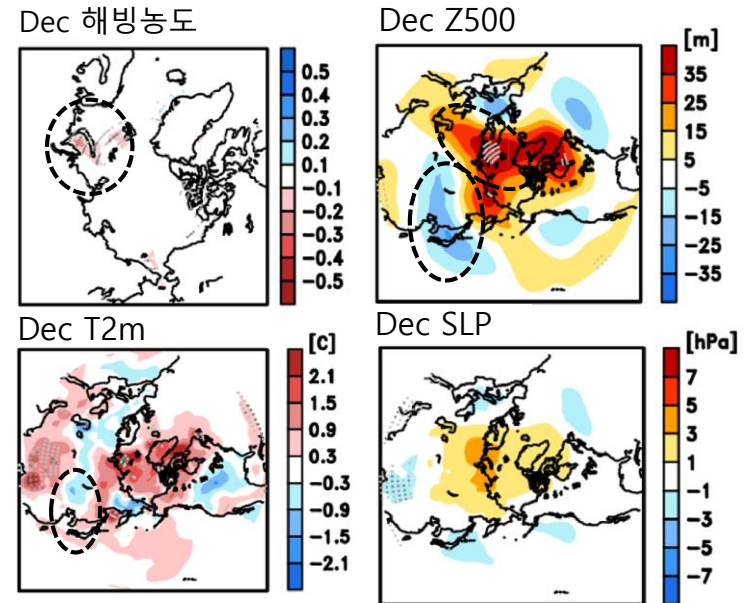
- ✓ 10월 랍테프 해 해빙이 적으면  
→ 12월에 바렌츠/카라 해 해빙도 적은 경향

표 6.25. 10월 랍테프 해 해빙지수와 우리나라 겨울철 기온과의 자연상관계수  
통계적으로 95% 수준에서 유의한 값은 \*표시, 분석기간: 1973/74~2020/21년

상관계수	12월	1월	2월
기온	0.39*	0.04	0.09
강수	0.00	0.14	-0.11

※ 랍테프 해 해빙지수: 65°N~80°N, 105°E~150°E 영역에서 평균된 해빙농도 편차

- ✓ 10월 랍테프 해 해빙이 적으면  
→ 12월에 바렌츠/카라 해 해빙도 적은 경향  
→ 12월 북동시베리아 지역 강한 양의 지위고도 편차  
→ 동아시아 지역 북풍 강화, 한기 남하로 기온 하강



10월 랍테프 해 해빙 적었던 해의 12월 해빙농도, 500hPa 지위고도, 지상기온, 해면기압 편차 합성장

# 겨울철 주요 기후감시 요소 - 눈덮임

- ✓ 유라시아 대륙이 얼마나 눈으로 덮여 있는지는 대륙고기압 발달과 밀접하게 관련
  - 10월에 눈덮임 속도가 빠르면 → 11월에도 유라시아 대륙에 눈덮임 많은 경향
  - 평년보다 빠른 유라시아 눈덮임 → 대륙의 대기 하층 공기를 차갑게 하고 대륙고기압의 이른 발달에 기여 → 초겨울 우리나라 한파 발생에 영향
- ✓ 10월 눈덮임 속도는 겨울철 북극진동과 연관
  - 10월 빠른 눈덮임 → 11월에도 눈덮임 많은 경향 → 행성파의 연직전파 강화 → 겨울철 성층권 극소용돌이 약화 (북극지역 양의 지위고도 편차) → 음의 북극진동 유도

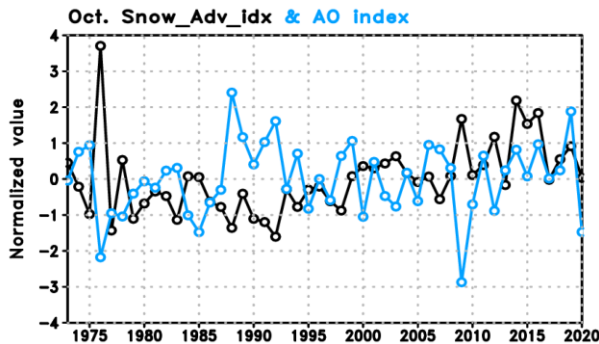
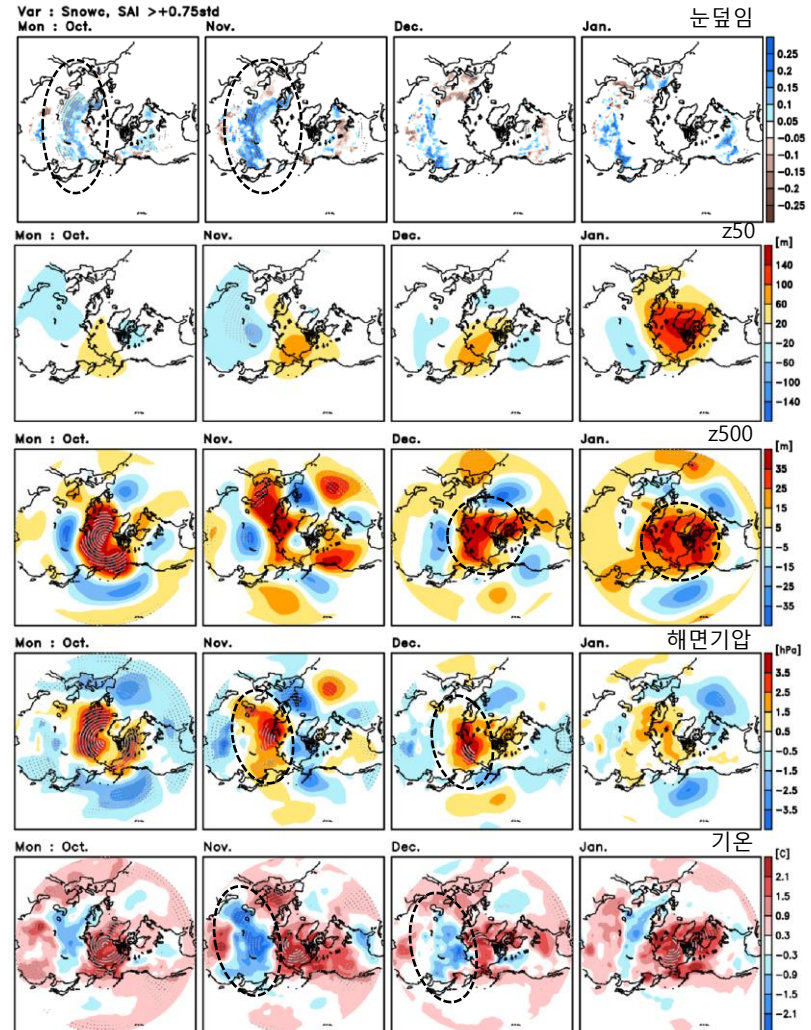
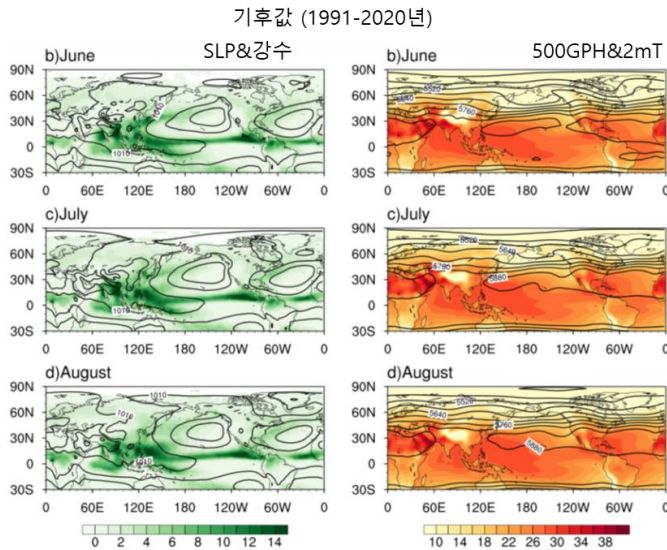


그림 6.38. 1973~2020년 동안 10월 유라시아 눈덮임속도 지수(검정선: NOAA CDR (Climate data record) 자료)와 겨울철 평균 북극진동지수(파랑선) 시계열

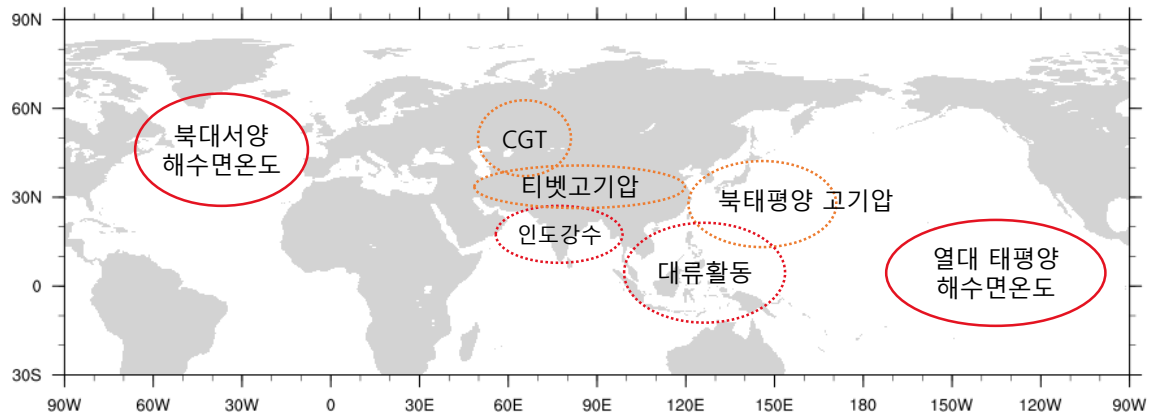


10월 유라시아 눈덮임이 빠를 때 합성장 눈덮임, 50hPa 지위고도, 500hPa 지위고도, 해면기압, 지표 기온 편차

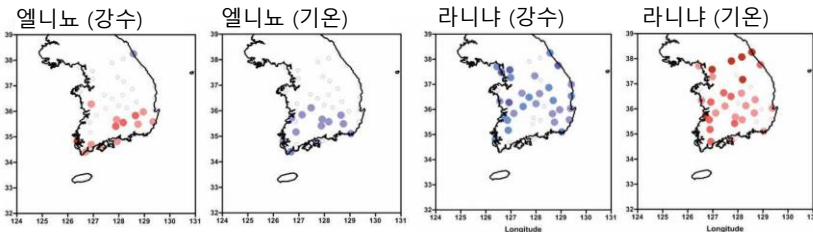
# 여름철 평년 순환장과 주요 영향 요소



- ✓ 북반구 여름철 → 북태평양 고기압, 북대서양 고기압이 지배적
- ✓ 북태평양고기압 강도, 형태에 따라 우리나라에 미치는 영향 달라짐 → 북태평양고기압의 서쪽 가장자리 변동성이 기온, 강수 변동성에 큰 영향



# 여름철 주요 기후감시 요소 - ENSO 영향



엘니뇨,라니냐 시기 여름철(7/7-8/16) 우리나라 기온,강수 합성장

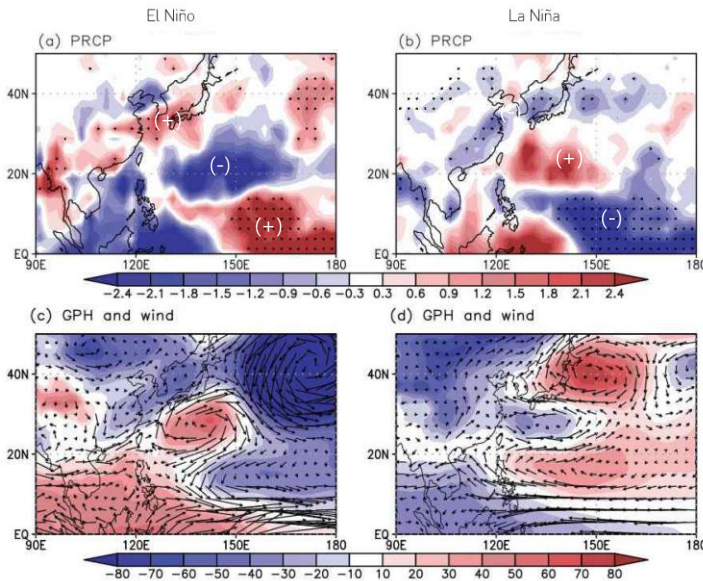
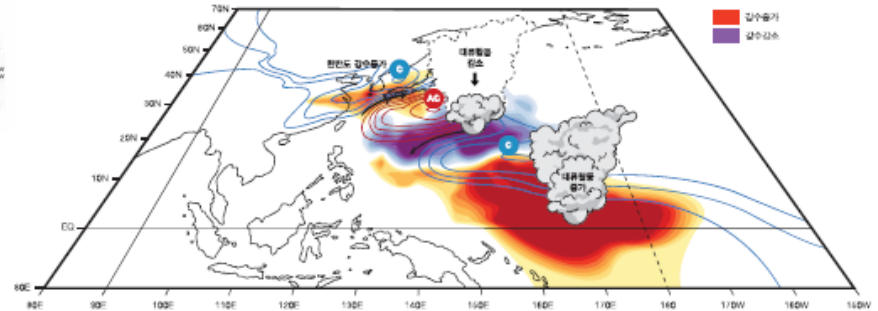
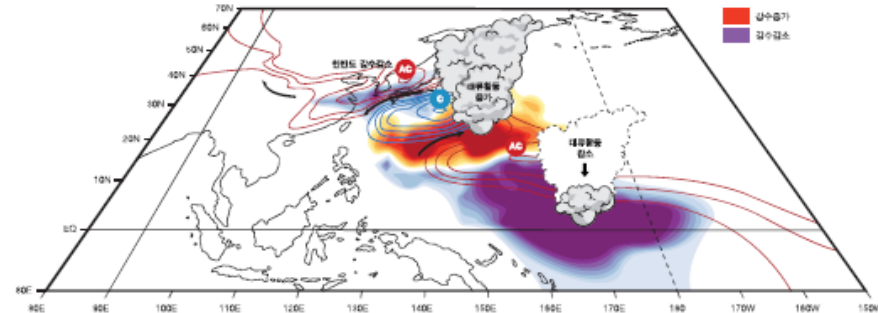


그림3-2-6. 엘니뇨·라니냐에 따른 여름철 강수와 순환장의 합성도(기간: 7/7-8/16, 검은색 점: 90% 이상 유의한 지역을 의미함).



엘니뇨 발달기 여름 (7월 중순-8월 중순)

그림3-2-9. 엘니뇨 발달기 여름 한반도 영향 모식도.



라니냐 발달기 여름 (7월 중순-8월 중순)

그림3-2-10. 라니냐 발달기 여름 한반도 영향 모식도.

엘니뇨백서

## ✓ 엘니뇨/라니냐 발달기 여름철 (3-셀 구조)

- 엘니뇨 발달기, 열대 중태평양 양의 강수 편차 → 아열대 저기압성 순환, 음의 강수 유도 → 음의 강수 북서쪽(한반도 남동쪽)에 고기압성 흐름 유도 → 한반도에 남서풍 영향, 온난 습윤 공기 유입

# 여름철 주요 기후감시 요소 - ENSO 영향

- ✓ 대체로 엘니뇨 상태 기온 낮은 경향, 라니냐 상태 기온 높은 경향 보이지만,
- ✓ 엘니뇨/라니냐가 같은 시기 발생/소멸하는 것은 아님, ENSO 진화 과정에 따라 월별로 우리나라 기온/강수 특징이 다르게 나타남  
→ 실제 예보에 적용하기 위해서는 열대 태평양에서의 대류활동 및 기압계 발달 상황 감시 필요

표 7.1. 엘니뇨와 라니냐의 진화 특성에 따른 분류

진화 과정	해당 연도
중립 상태에서 엘니뇨 발달 → 7.1	1979, 1982, 1986, 1990, 1994, 1997, 2002, 2004, 2006, 2009, 2015
중립 상태가 1년 이상 지속	1981, 2001, 2013, 2014
이전 겨울철 엘니뇨 최성기 이후 당해 겨울철 라니냐로 전이된 해 → 7.2	1988, 1995, 1998, 2007, 2010, 2016, 2020
이전 겨울철 엘니뇨 최성기 이후 당해 겨울철 중립이나 엘니뇨로 전이된 해 → 7.3	1980, 1983, 1992, 2003, 2005 (중립) 1987, 1991, 2019 (엘니뇨)
이전 겨울철 라니냐 최성기 이후 당해 겨울철 중립이나 라니냐로 재발달 된 해 → 7.4	1985, 1989, 1996, 2000, 2008, 2012 (중립) 1999, 2011, 2017 (라니냐)
이전 겨울철 라니냐 최성기 이후 당해 겨울철 엘니뇨로 전이된 해	2018

El Nino developing year(79,82,86,90,94,97,02,04,06,09,15) Summer

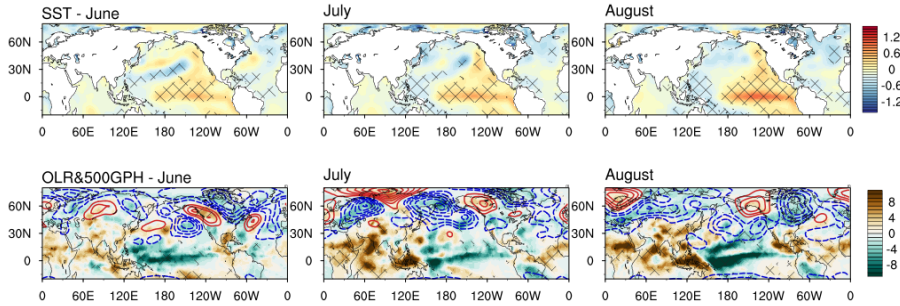
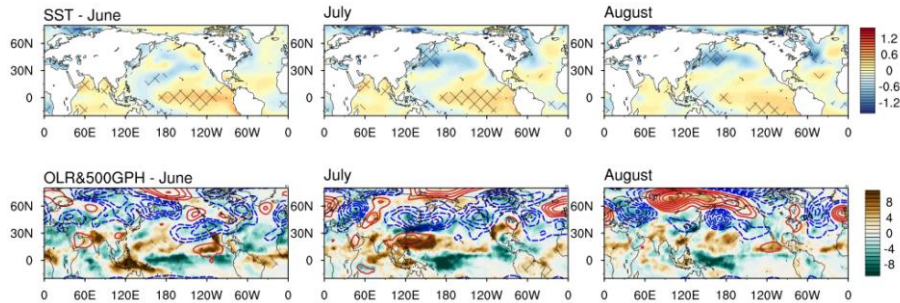


표 7.3. 엘니뇨 발달 해(중립에서 엘니뇨 발달의 6~8월 우리나라 기온(°C)와 강수량(mm), 붉은(파란) 색서: 평년보다 높은(낮은) 기온, 녹색(갈색) 색서: 평년보다 많은(적은) 강수량. \* 각 요소의 평년비숫범위

연도	6월		7월		8월	
	기온편차(°C)	강수량(mm)	기온편차(°C)	강수량(mm)	기온편차(°C)	강수량(mm)
	±0.3*	1016~1740*	±0.6*	2459~3085*	±0.5*	2253~3467*
1979	0	290.1	-0.5	179.3	-0.2	296.2
1982	-0.3	33.3	-0.8	199.3	0	277.2
1986	-0.4	230.1	-1.8	219.2	-0.5	233
1990	-0.4	318.8	0.5	269.4	1.1	168.2
1994	-0.4	112.8	3.1	87.8	1.6	218
1997	0.3	193.1	-0.1	319	0	229
2002	-0.5	71.5	-0.3	240.7	-1.5	614
2004	0.2	233.5	0.4	307.9	-0.3	318.9
2006	-0.3	153.7	-1.6	642.2	1.2	125.5
2009	0.3	132.2	-1.1	498.8	-0.8	152.6
2015	0.1	96	-0.4	181.5	-0.1	113.4

- ✓ 7월, 8월 대류억제신호 동아시아까지 확장 → 건조경향
- 7월 저기압성 순환 영향 → 기온 낮은 경향
- 8월 저기압성 편차 남하 → 저온경향 약화됨

El Nino persistence year(80,83,92,03,05/87,91,19) Summer



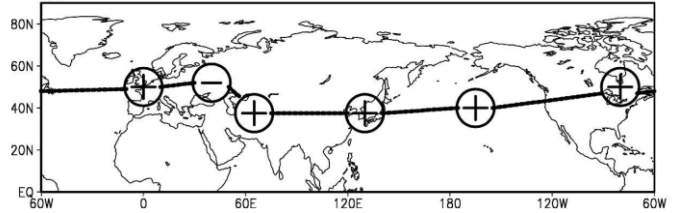
연도	6월		7월		8월	
	기온편차(°C)	강수량(mm)	기온편차(°C)	강수량(mm)	기온편차(°C)	강수량(mm)
	±0.3*	1016~1740*	±0.6*	2459~3085*	±0.5*	2253~3467*
1980	0.1	165	-2.0	336.4	-3.1	309.7
1983	-0.4	109.9	-1.1	268.9	0.5	184.3
1992	-1.4	42.2	0.2	181	-1.0	259.2
2003	-0.7	188.9	-2.3	472.5	-1.5	339.5
2005	0.8	163.7	0.1	295.5	-0.3	304.7
1987	-0.2	139.7	-0.8	464.3	-0.8	451.3
1991	0.6	148.6	-0.5	395.1	-1.4	239.9
2019	-0.2	148.3	0.1	225.8	0.9	136.4

- ✓ 7월부터 북서태평양 대류억제, 우리나라 주변 저기압성 편차 → 7월, 8월 기온 낮은 경향

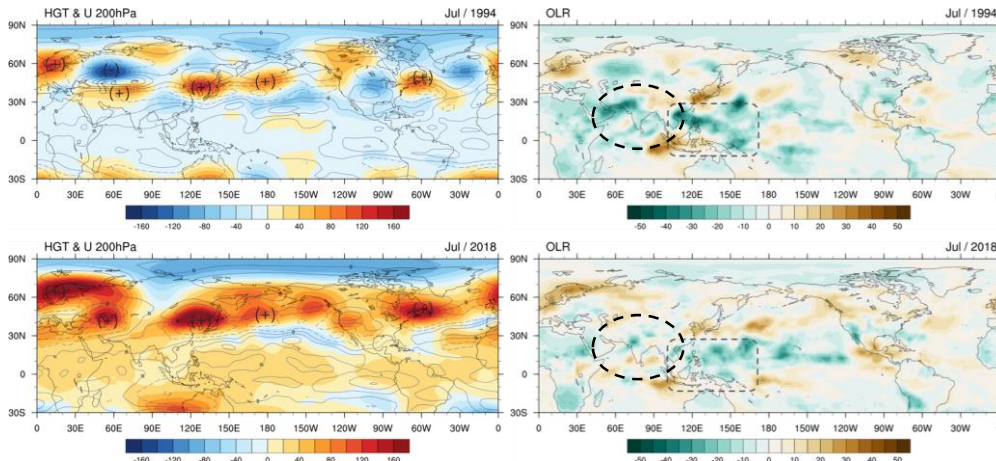
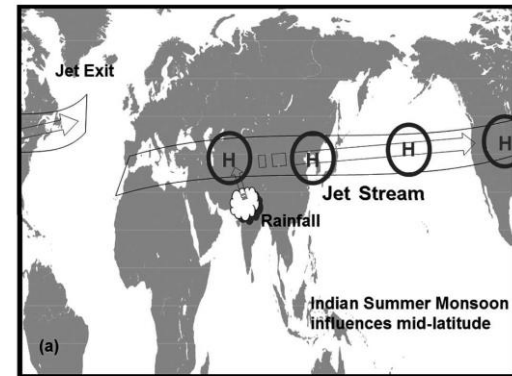
# 여름철 주요 기후감시 요소 - CGT

- ✓ Circumglobal Teleconnection (CGT)
- ✓ 북반구 여름철 200hPa 지위고도장에서 제트기류 지역을 따라 동서방향으로 변동성 크게 나타나는 패턴
- ✓ 중앙아시아 지역의 큰 변동성이 원격상관을 통해 동아시아에 영향
- ✓ 인도지역 강수와 관련
- ✓ CGT패턴이 나타났을 때 인도 북서쪽에서 강수 증가 신호 (인도 여름몬순 강화) → 강화된 강수에 의한 상승운동 강화 → 이로 인해 유도된 강제력이 중앙아시아 지역 상층에 고기압성 순환 형성 → 중위도 제트기류를 따라 파동을 형성 → 동아시아 지역 고기압성 편차, 덥고 건조한 영향

(c) CG teleconnection

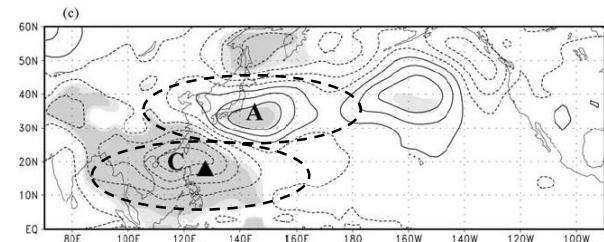
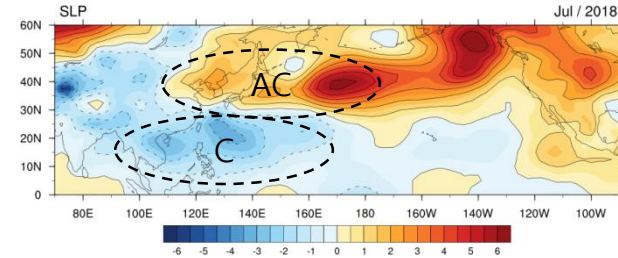
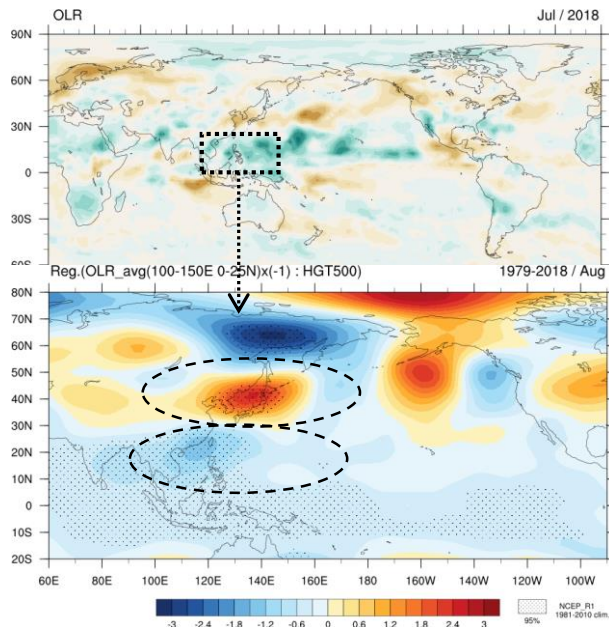


Ding and Wang 2005

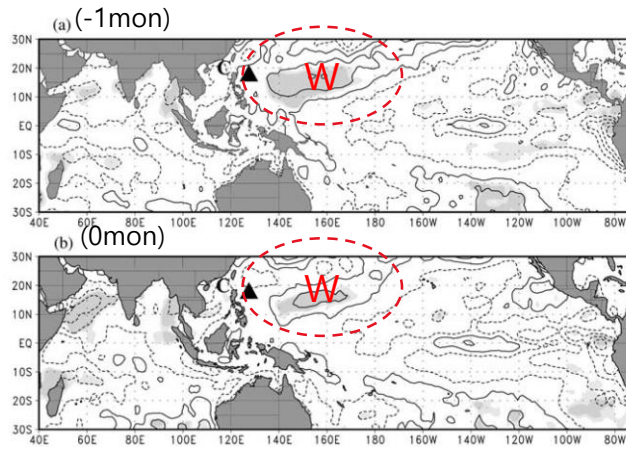


# 여름철 주요 기후감시 요소 - PJ패턴

- ✓ Pacific-Japan (PJ) 패턴
- ✓ 열대(아열대) 서태평양 지역의 대류활동에 의해 유도되는 남북방향의 대기 파동
- ✓ 아열대 서태평양 지역 대류활동 강화 & 저기압성 순환, 일본 남동쪽 대류활동 억제 & 고기압성 순환 발달
- ✓ 양의 PJ 패턴과 관련해 필리핀 해 주변 지역 양의 해수면 온도 편차 뚜렷

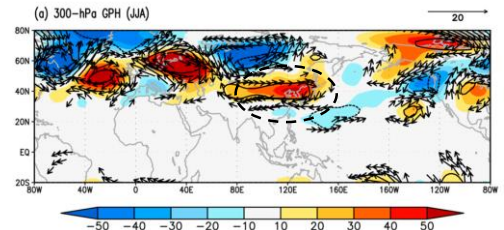
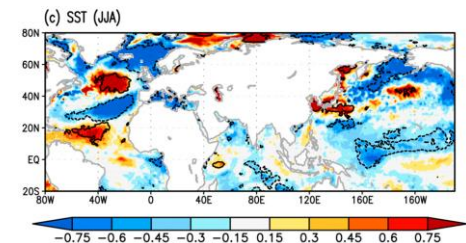
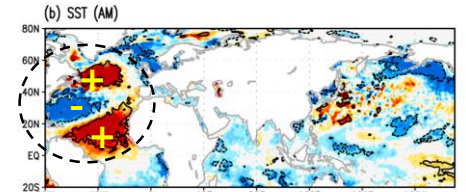
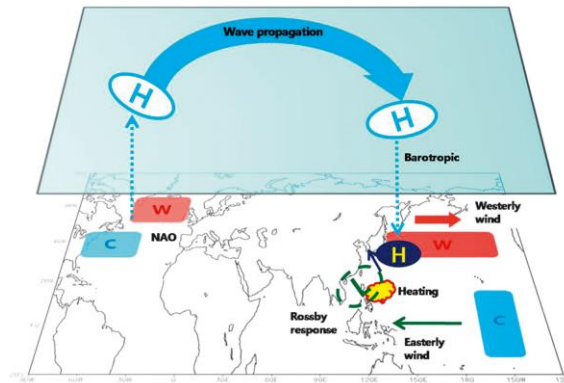
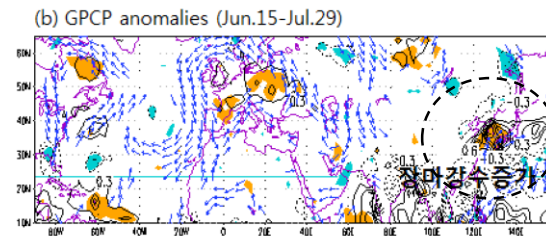
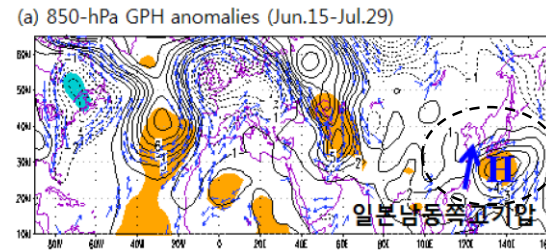
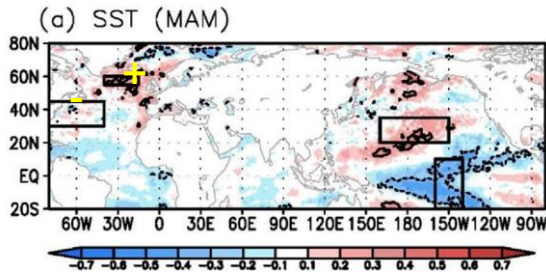


Kosaka and Nakamura 2006



양의 PJ 패턴일 때 해수면온도 편차 합성장

# 여름철 주요 기후감시 요소 - 북대서양 영향



북대서양지수(폭염과 관련됨)에 회귀분석한 해수면온도, 강한 북대서양지수해의 300hPa 지위고도 합성장 (Lim and Seo 2019)

장마강수에 회귀분석한 봄철 해수면온도와, 북대서양지수(장마 지수)에 회귀분석한 장마기간 850hPa 지위고도와 강수량 (Lee and Seo 2013, Kim et al. 2017)

- ✓ 북대서양 남북방향 해수면온도 편차(또는 NAO)로 인해 형성된 대기 파동이 유라시아 대륙을 지나 한반도에 영향
- ✓ 북대서양으로부터 동아시아 쪽으로 전파되는 파동으로 **일본 남동쪽에 고기압성 순환** 형성 → 남풍 계열 바람이 한반도 쪽으로 수증기 수송을 증가시켜 장마 강수 증가에 기여

- ✓ 여름철 폭염도 유사한 기작으로 영향 (부호는 장마강수와 반대)
- ✓ 봄철부터 북대서양 삼극(tripole) 형태 해수면온도 (NAO와 관련) → 동쪽으로 대기파동 전파 → 우리나라 고기압성 순환 형성

**감사합니다**

