

이상기후 대응을 위한

기후 감시분석 정보 개선 및 통합 시스템 구축

**Enhancing climate information and establishing
integrated information system to cope with
extreme climates**

김선태, 김선용, 명복순, 한정민, 이은정

기후사업본부 기후분석과

2023.12.15

APEC기후센터

Executive Summary

In the second year of the 6th phase of the Asia-Pacific project (2022-2024), non-linear composite analyses were performed to identify the detailed physical-dynamic processes in which major predictors affect the climate variability of the Korean Peninsula, and to use the results to develop objective and story-based forecasting methods. And for the optimal integration of various observation-based prediction information, a method for selecting the importance of predictors based on the reproducibility of detailed dynamic processes of the predictors was proposed. In addition, considering the impact of climate change, future renewable energy and drought characteristics changes on the Korean Peninsula were projected and their causes were analyzed. Lastly, in order to save resources and improve efficiency in analysis work, the monitoring processes for 3-month climate prediction were automated, and an advanced system for composite analysis and impact analysis on climate variability in Korean Peninsula was established.

In the analysis study of detailed dynamic process of summer predictors, a framework that can reveal the detailed physical-dynamic process of predictors was developed and applied to the temperature predictors in July. In the case of the positive phase of March European Z500 predictor, the overlapping of the subtropical/mid-latitude wave propagation resembling CGT pattern related to the South Asian monsoon activity in June and the east-west wave propagation from the Atlantic Ocean to East Asia seems to strengthen the barotropic high pressure in the Korean Peninsula and causes high temperatures. It was found that in the case of the positive phase, monitoring the strong South Asian monsoon index in June increases the reliability of the prediction and that in the negative phase, the large amount of snow in Central Asia in April and the low SST in the Gulf of Mexico in June increase the reliability of the prediction. In the case of the positive phase of April tropical SST tripole, after the high temperature of SST in the Philippine Sea is maintained until May in the situation where the Central Pacific type La Niña developed, low pressure and convection develops in the northern Philippine Sea in June-July, resulting in a positive P-J pattern. It was analyzed that the resulted high pressure in northeastern East Asia tends to cause high temperatures in the Korean Peninsula. It was found that prediction reliability could be increased by monitoring the strong South Asian monsoon index in June in the case of a positive phase and the low tropical SST tripole in May in the case of a negative phase. As such, the possibility of discriminating the importance of various predictive information was confirmed. As a result, in the case of the March European Z500 and the April tropical SST tripole, it was confirmed that the prediction reliability improved when the weight was assigned to the prediction of the factor according to the tendency of the monitoring factors. In the case of operational prediction, a method is suggested to determine the importance of the predictor by estimating the reproducibility of the monitoring factor using the model prediction result.

A significant positive relationship is found between the ENSO and Korean temperature and precipitation anomalies in December. However, the relationship is distinctively broken in January, so it is somewhat difficult to predict the Korean climate in January. The North Pacific Oscillation (NPO) in December is responsible for significant warm anomalies over Korean Peninsula that peak in January, exhibiting a 1-month leading role. The NPO-related anticyclonic anomalies in December may affect the precipitation decrease in the western North Pacific, then the East Asian anticyclonic circulation remains until January through the Rossby wave propagation. Additionally, as a result of NPO, the East Asian anticyclonic anomalies accompany the easterlies on the southern side in December modulate the Jet weakening. The SST anomalies near East Asia tend to increase in January due to the wind-evaporation-SST feedback, and the resultant warm SST is favorable for warm Korean Peninsula in January. The December NPO index as a new precursor may help us to better understand and predict the temperature variability over Korea in January with a 1-month lag, and shows an overall improved predictability than that of the Nino3.4 index.

For investigating the impact of the climate change on the wind and solar power generation potentials over South Korea considering ensemble projections from downscaled high-resolution bias-corrected future climate change scenario data taken from the National Institute of Meteorological Science in Korea. Under future global warming, solar power potentials over South Korea were projected to decrease in spring (March-May) and winter (December-February) seasons relative to present climate in the late 21st century (2081-2100), particularly showing the relatively large decrease in the northern part of South Korea. The decrease tendency was more significant and larger in the high-CO₂ emission scenario (SSP5-8.5) than low-CO₂ emission scenario (SSP2-4.5). The projected decrease in solar power potential in spring was mainly due to increased air temperature by future global warming and the decrease in winter was attributable to the projected increase in the air temperature and the decrease in solar radiation at the surface. Wind power potentials which were estimated with the wind energy density was generally projected to be decreased with future global warming in all seasons except for summer. This decrease tendency was also larger in the late 21st century of the SSP5-8.5 scenario, especially over the southern part of South Korea in winter and spring and over the northern part in fall. These results may help optimize the regional renewable energy generation system development and plans.

For analyzing the future changes in drought indices for regions in Korean Peninsula, we used the Standardized Precipitation Index (SPI), widely used as a meteorological drought index, and the Standardized Evapotranspiration Deficit Index (SEDI), used as an agricultural drought index. SPI calculates the drought index based only on precipitation data and does not reflect the impact of continued temperature rises. Therefore, using SEDI, which incorporates surface temperature, wind, net radiation, humidity, and precipitation, we analyzed the future changes and causes of drought indices in Korean Peninsula. Comparing historical periods(1985~2014),

the results suggest that SEDI forecasts a more severe drought situation in Korean Peninsula compared to SPI, especially during autumn and in high carbon emission scenario(SSP585). We investigated the intensification factors behind future drought indices in Korean Peninsula. During spring, although precipitation increases more than the present, the steep rise in temperature leads to a higher demand for evapotranspiration, surpassing atmospheric evaporation, resulting in more severe drought than the present. In autumn, the weakening of the southern winds entering Korean Peninsula leads to reduced precipitation. Furthermore, higher net radiation and temperature compared to the present are anticipated, indicating a more severe drought than during spring.

Due to frequent extreme climate events around the world, the need to quickly establish a climate monitoring system is increasing. It has become necessary to collect the latest observation data and establish a periodic extreme climate monitoring system in an effort to minimize damage to property and human life through continuous monitoring of increasingly severe extreme weather phenomena around the world. To build the system, a climate monitoring service and climate analysis service were developed based on observation data provided by NCEP and the Korea Meteorological Administration. The climate monitoring service provides up-to-date information on various climate variables, and the climate analysis service not only synthesizes data or provides results of time series analysis, but also standardizes the data collection system for quick response to abnormal climate. In addition, in order to provide rapid monitoring results, an automatic prediction factor production and information provision system and a time series-based synthetic information provision function were additionally built for user convenience. By automatically calculating and providing monthly related climate factors for monthly forecast discussions, work efficiency can be further improved

국문 요약

아태사업 6단계(2022~2024년)의 2차 연도에는 비선형적 합성장 분석을 통해 주요 예측인자가 한반도 기후에 영향을 미치는 세부적 역학과정을 규명하고 이를 활용하여 객관적이며 스토리가 있는 예측 방안 개발의 기반을 마련하였다. 이에 더해 다양한 관측기반 예측 정보의 최적 통합을 위해 인자의 세부 역학과정 재현성을 바탕으로 예측인자의 중요도를 선별하는 방안을 제시하였다. 또한 기후변화의 영향을 고려하여 한반도 미래 재생에너지 및 가뭄 변화를 전망하고 그 원인을 분석하였다. 마지막으로 분석 업무의 자원 절약 및 효율성 향상을 위하여 예보도의 모니터링 프로세스를 자동화하고, 관심 인자 합성장 분석 및 한반도 영향 분석 서비스를 구축하여 동아시아 이상기후 감시 시스템 및 기후 분석 시스템의 콘텐츠를 확대하고 개선하였다.

여름철 예측인자 세부 역학과정 분석 연구에서는 예측인자의 세부 역학과정을 밝혀낼 수 있는 프레임워크를 개발하고 이를 7월 기온 예측인자에 적용하였다. 양의 3월 유럽 Z500 인자의 경우 6월 남아시아 몬순 활발과 관련된 CGT 패턴의 아열대/중위도 파동 전파와 대서양에서 동아시아로의 동서 방향의 파동 전파의 중첩을 통해 한반도에 순압성 고기압을 강화시켜 고온을 유발하는 것으로 나타났다. 양의 위상의 경우 6월의 강한 남아시아 몬순 지수들, 음의 위상의 경우 4월 중앙아시아에 많은 눈과 6월 멕시코만의 낮은 SST를 감시하는 것이 예측 신뢰도를 높이는 것으로 나타났다. 양의 4월 열대 SST 삼극자의 경우 중태평양 타입 라니냐가 발달한 상황에서 필리핀해 SST의 고온이 5월까지 유지된 후 6~7월에 필리핀해 북부에 저기압 및 대류가 발달하여 양의 P-J 패턴이 발달하여 동아시아 북동부에 고기압을 유도, 한반도에 고온을 유발하는 것으로 분석되었다. 양의 위상의 경우 6월의 강한 남아시아 몬순 지수들, 음의 위상의 경우에는 5월의 낮은 열대 SST 삼극자를 감시하여 예측 신뢰도를 높일 수 있는 것으로 나타났다. 이렇듯 예측인자의 세부 역학과정을 분별하고 감시하여 다양한 예측 정보의 중요도 판별 가능성을 확인해 보았다. 그 결과 3월 유럽 Z500 와 4월 열대 SST 삼극자의 경우, 감시인자의 경향성에 따라 인자의 예측에 가중치를 부여했을 때 예측 신뢰도가 향상됨을 확인하였다. 현업 예측에 적용할 경우에는 모델 예측 결과 등을 활용하여 감시인자의 재현성을 추정하여 예측인자 중요도를 판별할 수 있다.

겨울철 예측인자 연구에서는 우리나라의 겨울철 신규 예측인자 선정과 원격상관 제시를 통해 기후 감시·분석 정보를 개선하기 위한 연구가 수행되었다. 대표적인 겨울철 예측인자인 ENSO는 우리나라의 12월 기온과 강수 예측성이 높지만 1월은 낮아, 우리나라의 1월 기후를 예측하는데 큰 어려움이 있다. 그로 인해 새로운 1월 예측인자의 선정에 대한 필요성이 증가하고 있다. 본 연구에서 제시된 12월 북태평양 진동(North Pacific Oscillation; NPO)은 두 가지의 역할을 통해 한 달 지연되어 우리나라의 1월 기온 변동에 영향을 줄 수 있다. 12월에 NPO의 영향으로 중위도 북태평양에 발생한 고기압성 순환은 북서태평양의 강수 감소를 유도하고, 상층 원격상관을 통해 1월까지 동아시아 고기압이 지속되게 한다. 우리나라는 고기압의 서쪽에 위치한 남풍 편차에 의해 1월 기온이 상승하는 경향이 있다. 또한, 12월 NPO 관련 고기압의 남쪽에 위치한 동풍 편차는 평균 서풍인 중위도 제트를 약화시켜 바람-증발-해수면온도 피드백의 작동으로 우리나라 연근해의 해수면온도가 상승하는데, 이는 우리나라의 1월 기온이 상승에 유

리한 조건으로 작용한다. 그러므로 12월 NPO 지수를 활용하면 우리나라의 1월 기온을 예측할 수 있으며, 기존 예측인자인 ENSO 보다 예측성이 향상되는 결과를 제시하였다.

미래 기후변화에 따른 재생에너지 변화 전망 연구에서 현재 기후 대비 저탄소 시나리오와 고탄소 시나리오 기반 미래 기후변화의 21세기 전/중/후반기에 태양광(PVpot) 및 풍력(WED와 풍력발전가용범위풍속 비율) 발전에 의한 전력 잠재량의 계절별 변화를 분석하였다. PVpot 변화는 저탄소 시나리오에서 봄/여름/가을철에 유의한 변화는 없었다. 하지만 고탄소 시나리오에서 봄철과 겨울철에 유의한 감소를 보였다. 고탄소 시나리오에서 현재 기후 대비 21세기 후반기에 봄철 PVpot의 유의한 감소는 기온증가 때문이며, 겨울철의 PVpot 감소 경향은 지구 온난화에 의한 유의한 기온증가와 RSDS 감소 때문이다. 겨울철 RSDS 감소는 현재 기후 대비 미래 기후변화에서 남서풍의 영향이 증가되어 구름양의 증가와 관련된다. 현재 기후 대비 저탄소 시나리오에서 WED의 변화는 봄철과 여름철에 대하여 통계적으로 유의한 변화는 나타나지 않았다. 가을철과 겨울철은 각각 남한의 서부 지역과 남부지역에서 21세기 후반기에 유의한 감소를 보였다. 고탄소 시나리오에서는 봄철에는 후반기에 거의 모든 지역에서 WED의 유의한 감소를 보였고, 가을철은 대부분 지역에서 유의한 감소가 나타났다. 겨울철은 21세기 후반기에 남한 남부 지역에서 유의한 감소를 보였고, 여름철에는 남한 내륙지역에서만 유의한 증가를 보였다. 이 같은 풍력에너지 감소는 21세기 후반기 봄/겨울철 남서풍, 가을철 북동풍의 영향이 더 커져서 현재 대비 풍속의 감소 및 결국 WED의 감소로 이어졌다. 현재 기후에서 풍력 발전 가용 범위의 풍속 비율 변화를 살펴보면, 저탄소와 고탄소 시나리오 모두 봄/가을/겨울철에 21세기 후반기에 내륙에서 비율이 증가하고, 해안 근접 지역에서 비율이 감소했으며, 이 같은 변화는 고탄소 시나리오에서 더 크게 전망되었다.

기후변화에 따른 기온 및 다양한 대기 순환장의 영향을 함께 살펴보기 위해 기상 가뭄 지수로 가장 널리 사용되는 표준 강수 지수(SPI)와 농업적 가뭄 지수로 사용되는 표준 증발산량 부족 지수(SEDI)를 이용하여, 우리나라 지역에 대한 가뭄 지수의 미래 변화를 분석하였다. SPI는 강수량 자료만을 사용하여 산정하는 가뭄 지수이기 때문에 지속적으로 상승하는 기온의 영향을 고려할 수 없기 때문에, 지표면 기온과 바람, 복사 등 다양한 자료를 이용하여 산정하는 SEDI를 이용하여, 우리나라의 미래 가뭄지수 변화 및 원인을 분석하였다. 미래 기간에 대해 비교 해 본 결과, SPI보다 SEDI가 더욱 우리나라 가뭄이 심화될 것으로 전망하고 있었으며, 특히 봄철보다 가을철, 저탄소보다 고탄소 시나리오에서 가뭄이 더 크게 심화될 것으로 보인다. 이와 관련하여, 우리나라 미래 가뭄지수의 심화 원인을 분석하였다. 봄철에는 현재보다 강수량은 더욱 늘어나지만, 가파르게 상승하는 기온에 따라 대기 증발산량보다 요구량이 더욱 많아져 현재보다 가뭄이 심해지는 결과를 보인다. 가을철에는 우리나라로 불어 들어오는 남풍이 약화하며, 강수가 줄어들고, 현재보다 순 복사량과 기온은 더욱 증가하여, 봄철보다 더욱 가뭄이 심화될 것으로 전망하고 있다.

세계적으로 빈번하게 발생하는 이상기후로 인해 신속한 기후감시 체계구축의 필요성이 더욱 증대되고 있어, 세계 각지에서 점점 강해지는 극한 기상현상에 대한 지속적인 감시를 통해 재산과 인명피해를 최소화에 대한 노력으로 최신의 관측 자료를 수집하고 주기적인 이상기후 감시 시스템 구축이 필요하게 되었다. 시스템 구축을 위해 NCEP과 기상청에서 제공하는 관측 자료를 기반으로 기후 감시 서비스와 기후분석 서비스를 개발하였다. 기후모니터링 서비스는

다양한 기후 변수에 대해 최신의 정보를 제공하고 기후분석 서비스는 자료를 합성하거나 시계열 분석의 결과를 제공할 뿐만 아니라, 이상기후에 대한 빠른 대처를 위해 자료수집 체계를 표준화하였고 신속한 감시 결과제공을 위해 사용자에게 편리하도록 예측인자 자동 생산 및 정보 제공 시스템, 시계열 기반 합성정보 제공기능을 추가로 구축하였다. 매월 시행하는 예보토의를 위해 월별 관련 기후인자를 자동으로 계산하고 제공함으로써, 업무 효율을 더욱 높일 수 있게 되었다.

목차

Executive Summary	ii
국문 요약	v
목차	viii
표 차례	xii
그림 차례	xiv
1. 서론	1
2. 여름철 기온 예측인자의 세부 역학과정 분석 및 예측인자 중요도 진단 방안 마련	4
2.1. 연구배경	4
2.2. 자료와 방법	4
2.3. 3월 유럽 Z500 인자 세부 역학과정 규명	7
2.4. 4월 열대 SST 삼극자 인자 세부 역학과정 규명	24
2.5. 예측인자 중요도 진단 방안	35
2.6 요약	39
3. 겨울철 신규 예측인자 선정 및 원격상관 제시를 통한 기후 감시·분석 정보 개선	41
3.1. 연구배경	41
3.2. 자료	42
3.2.1. 종관 기상 관측 시스템 자료	42
3.2.2. 재분석 자료	42
3.3. 결과	42
3.3.1. 기존 예측인자 (ENSO) 검증	42
3.3.2. 신규 예측인자 (NPO) 선정	46
3.3.3. NPO 원격상관 역학	50
3.3.4. NPO를 활용한 우리나라 겨울철 기온 예측성 검증	64
3.4. 요약	70
4. 미래 기후변화에 따른 한반도 재생에너지 전망	71
4.1. 연구배경	71

4.2. 자료와 방법	71
4.2.1. 관측자료	71
4.2.2. 고해상도 남한 상세 관측 및 기후변화 격자 자료	72
4.2.4. 재생에너지 발전 잠재량 평가	73
4.3. 태양광 에너지 발전 잠재량 변화 전망	75
4.4. 풍력 에너지 발전 잠재량 변화 전망	88
4.5. 재생 에너지 발전 잠재량 변화 원인	100
4.6. 요약	104
5. 미래 기후변화에 따른 한반도 가뭄 전망	106
5.1. 연구배경	106
5.2. 자료와 방법	107
5.2.1. 재분석 자료	107
5.2.2. 동아시아 고해상도 상세 기후 시나리오	107
5.2.3. 가뭄지수 계산	108
5.3. 우리나라 가뭄 지수의 미래 변화	111
5.3.1. 관측 자료에서 나타나는 가뭄지수 변화	111
5.3.2. 우리나라 가뭄지수 공간 분포 변화	112
5.3.3. PDF 분포 비교	120
5.3.4. 가뭄 강도별 분포 변화	121
5.4. 한반도 가뭄 지수에 기여하는 대기 순환장	123
5.4.1. 다중회귀분석을 이용한 변수별 기여도 분석	123
5.4.2. 대기순환장 미래 변화	126
5.5. 요약	135
6. 사용자 편의성 향상을 위한 기후 감시 분석 시스템 개선 및 확대	136
6.1. 연구배경	136
6.2. 자료와 방법	136
6.3. 감시분석 정보제공 자동화 서비스 개발	137
6.3.1. 월별 기후인자 자료처리 프로그램 개발	137
6.3.2. 예보토의 감시분석 정보 서비스 인터페이스 구성	138

6.3.3. 감시분석 정보 제공 자동화 서비스 기능 구성	141
6.3.3.1. 감시분석 인자에 대한 일자 선택	141
6.3.3.2. 해당 월에 대한 지도 기반 예측변수 정보	141
6.3.3.3. 테이블 기반 예측인자 상세 정보	142
6.3.3.4. 예측인자에 대한 상세 기작 제공	143
6.3.3.5. 예측인자별 표준화 시계열 그래프 제공	145
6.3.3.6. 예측인자별 편차 및 관측값 제공	145
6.3.3.7. 최근 3개월에 대한 감시분석 정보 제공	146
6.3.3.8. 태평양 지역 해양온도, 바람편차 정보 제공	147
6.3.3.9. ENSO 및 MJO전망 제공	148
6.3.3.10. 북극 해빙 현황 정보 제공	149
6.3.3.11. 눈 덮임 현황 정보 제공	149
6.3.3.12. AO와 NAO 현황 제공	150
6.4. 합성장 기반 기후영향 분석 서비스	151
6.4.1. 합성장 기반 기후영향 분석 서비스 인터페이스 구성	151
6.4.2. 합성장 기반 기후 영향 분석 서비스 기능 구성	153
6.4.2.1. 합성장 기반 기후 영향 분석 조건	154
6.4.2.2. 합성장 기반 기후 영향 시계열 분석	154
6.4.2.3. 시계열 기반 기후영향 합성장 분석	155
6.5. 요약	157
7. 요약 및 결론	158
References	162
부록	166
2023년 1월 기후분석 보고서	166
2023년 2월 기후분석 보고서	174
2023년 3월 기후분석 보고서	182
2023년 4월 기후분석 보고서	189
2023년 5월 기후분석 보고서	198
2023년 9월 기후분석 보고서	205

2023년 10월 기후분석 보고서218
우리나라 가뭄 미래 전망 보도자료225

표 차례

Table 2.1. Two primary predictors of July-mean temperatures. Accuracy is computed for 1973-2020.	5
Table 2.2. ACC (%) of “3월 유럽 Z500” predictor with respect to different thresholds for the past 40 years (1981-2020).	7
Table 2.3. Composite years of “3월 유럽 Z500” with the threshold of 0.75σ . Colors indicate July-mean temperature in South Korea. Red, black and blue colors indicate above-normal, near-normal, below-normal temperature in July.	8
Table 2.4. Descriptions of potential detailed dynamic process indices for “3월 유럽 Z500”	13
Table 2.5. Correlations of East Atlantic pattern (EA) and Scandinavia pattern (SCAN) in Jul with key variables for 1990-2020.	18
Table 2.6. ACC (%) of “4월 열대 SST 삼극자” predictor with respect to different thresholds for the past 40 years (1981-2020).	24
Table 2.7. Composite years of “4월 열대 SST 삼극자” with the threshold of 0.75σ . Colors indicate July-mean temperature in South Korea. Red, black and blue colors indicate above-normal, near-normal, below-normal temperature in July.	25
Table 2.8. Descriptions of potential detail-process indices for “4월 열대 SST 삼극자”	31
Table 2.9. Values of predictors and their monitoring variables when 4월 SST 삼극자 and 3월 유럽 Z500 are both positive with respect to the 0.43σ threshold.	38
Table 2.10. Values of predictors and their monitoring variables when 4월 SST 삼극자 and 3월 유럽 Z500 are both negative with respect to the 0.43σ threshold.	38
Table 2.11. Values of predictors and their monitoring variables when 4월 SST 삼극자 is positive and 3월 유럽 Z500 are negative with respect to the 0.43σ threshold.	39
Table 2.12. Values of predictors and their monitoring variables when 4월 SST 삼극자 is negative and 3월 유럽 Z500 are positive with respect to the 0.43σ threshold.	39
Table 3.1. Temperature and precipitation in December January during El Nino year (장기예보 가이드스; -: Below, 0: Normal, +: Above).	43
Table 3.2. The same as in Table 3.2 but for La Nina years.	44
Table 3.3. Correlation coefficients of the Korean temperature, precipitation indices and NDJ Nino3,4, WNP precipitation, and NPO indices in December and January, respectively. The symbol of *(**) denotes the 95%(99%) confidence level based on the student t-test.	50

Table 3.4. Correlation coefficients of the NPO index in December and NPO, Nino3,4, and WNP precipitation indices in December and January, respectively. The symbol of ****** denotes the 95%(99%) confidence level based on the student t-test.54

Table 3.5. The predictability of Korean temperature anomalies in December and January for its ± 0.5 standard deviation based on the NDJ Nino3.4 index with $\pm 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25$ standard deviation level.65

Table 3.6. The same as in Table 3.4 but for December NPO index.65

Table 3.7. The same as in Table 3.4 but for December NPO+NDJ Nino3.4 index.66

Table 3.8. Korean temperature anomalies in December and January when the December NPO+NDJ Nino3.4 index is above 0.5 standard deviation. Blue (red) shading indicates below-normal (above-normal) temperature anomalies in accordance with its $-(+)$ 0.5 standard deviation. BNA denotes the number of below-normal/normal/above-normal years.68

Table 3.9. The same as in Table 3.8 but for when the December NPO+NDJ Nino3.4 index is below -0.5 standard deviation.68

그림 차례

Figure 2.1. Definitions and areas for computation of South Asia Monsoon Index (SMI), Indian Monsoon Index (IMI), and Western North Pacific Monsoon Index (WNPMD).	5
Figure 2.2. Framework verifying details of dynamic processes of a climate predictor	6
Figure 2.3. Scatter plot (1981–2020) of the 3월 유럽 Z500 (x-axis) with Ts in July (y-axis in °C). Vertical dashed lines indicate the $\pm 0.75\sigma$ values of the predictor. Red (blue) diamond shows above-normal (below-normal) temperature in July while cross shows near-normal temperature in July.	8
Figure 2.4. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of March in the positive composite years of 3월 유럽 Z500. (d), (e), and (f) are for June, and (g), (h), and (i) are for July. In (a), (d), and (g), contour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), and (i), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.	9
Figure 2.5. Scatter plot (1981–2020) of NA_SST_tri in May (x-axis in °C) and Ts in Jul (y-axis in °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. Percentage in the title indicates accuracy.	10
Figure 2.6. Scatter plot (1981–2020) of East Atlantic (EA) pattern in July (x-axis) and Ts in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for Scandinavia (SCAN) pattern. Percentage in the title indicates accuracy.	11
Figure 2.7. Composite maps of anomalous snow cover in (a) March and (b) April in the positive composite years of 3월 유럽 Z500. Black contours indicate anomalies less than -0.25.	12
Figure 2.8. Composite maps of anomalous (a) Tair at 500 hPa and (b) OLR with winds at 850 hPa of April in the positive composite years of 3월 유럽 Z500. (c), and (d) are for May. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.	12
Figure 2.9. Scatter plot (1981–2020) of 3월 유럽 Z500 (x-axis) and Ts in Jul (y-axis in °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. Percentage in the title indicates accuracy.	14
Figure 2.10. Scatter plot (1981–2020) of snow cover fraction anomalies over the central Asia in April (x-axis) and Ts in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for air temperature anomalies	

over the central Asia in May. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.15

Figure 2.11. Scatter plot (1981–2020) of South Asian Monsoon index (SMI) anomalies in June (x-axis) and Ts in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for OLR anomalies over the western tropical Pacific in June. (e) and (f) are for Western North Pacific Monsoon index (WNPMI) anomalies in June. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.16

Figure 2.12. Scatter plot (1981–2020) of South Asian Monsoon index (SMI) anomalies in July (x-axis) and Ts in July (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for OLR anomalies over the western tropical Pacific in July. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.17

Figure 2.13. Schematic diagram of underlying mechanisms of positive phases of 3월 유럽 Z500 and impacts on Korean temperature in July.19

Figure 2.14. Monitoring indices and their accuracies of positive phases of 3월 유럽 Z500. In the scattor plots, relationships between the predictor and detail-process indices are adjusted to be positive.20

Figure 2.15. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of March in the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (d), (e), and (f) are for June, and (g), (h), and (i) are for July. In (a), (d), and (g), countour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), and (i), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.21

Figure 2.16. Scatter plot (1981–2020) of SST anomalies over the North Atlantic in June (x-axis) and Ts in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for OLR anomalies over the North Atlantic in July. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.22

Figure 2.17. Schematic diagram of underlying mechanisms of negative phases of 3월 유럽 Z500 and impacts on Korean temperature in July.23

Figure 2.18. Monitoring indices and their accuracies of negative phases of 3월 유럽 Z500. In the scattor plots, relationships between the predictor and detail-process indices are adjusted to be positive.24

Figure 2.19. Scatter plot (1981–2020) of the “4월 열대 SST 삼극자” (x-axis) with Ts in Jul (y-axis). Vertical dashed lines indicate the $\pm 0.75 \sigma$ values of the predictor. Red (blue)

diamond shows above-normal (below-normal) temperature in July while cross shows
 nea-normal temperature in July.25

Figure 2.20. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c)
 SST of April in the positive composite years of 4월 열대 SST 삼극자. (d), (e), and (f) are for
 May, (g), (h), and (i) are for June and (j), (k), and (l) are for July. In (a), (d), (g), and (j),
 contour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45];
 the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), (i) and (l), red line
 indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the
 95% level.26

Figure 2.21. Correlations of 4월 열대 SST 삼극자 with monthly ENSO indices. Blue, orange,
 and grey bars are of NINO4, NINO3, and NINO12, respectively.27

Figure 2.22. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c)
 SST of April in the negative composite years of 4월 열대 SST 삼극자. (d), (e), and (f) are for
 May, (g), (h), and (i) are for June and (j), (k), and (l) are for July. In (a), (d), (g), and (j),
 countour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45];
 the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), (i) and (l), red line
 indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the
 95% level.28

Figure 2.23. Scatter plot (1981-2020) of 4월 열대 SST 삼극자 (x-axis) and Ts in Jul (y-axis in
 °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽
 Z500. Percentage in the title indicates accuracy.29

Figure 2.24. Scatter plot (1981-2020) of tropical SST tripole anomalies in May (x-axis) and Ts
 in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years
 of 4월 열대 SST 삼극자. (c) and (d) are South Asian Monsoon index (SMI) anomalies in June.
 (e) and (f) are are South Asian Monsoon index (SMI) anomalies in July. (g) and (h) are for
 OLR anomalies over the western tropical Pacific in July. Percentage in the title indicates
 accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be
 positive.30

Figure 2.25. Schematic diagram of underlying mechanisms of positive phases of 4월 열대 SST
 삼극자 and impacts on Korean temperature in July.31

Figure 2.26. Monitoring indices and their accuracies of positive 4월 열대 SST 삼극자. In the
 scattor plots, relationships between the predictor and detail-process indices are adjusted to be
 positive.32

Figure 2.27. Schematic diagram of underlying mechanisms of negative phases of 4월 열대 SST
 삼극자 and impacts on Korean temperature in July.33

Figure 2.28. Monitoring indices and their accuracies of negative phases of 4월 열대 SST

삼극자. In the scatter plots, relationships between the predictor and detail-process indices are adjusted to be positive.34

Figure 2.29. (a) Interannual time series (1981-2020) of Ts in July (red) and SMI in June (blue), (b) their scatter plot, and (c) their 11-year moving window correlations.35

Figure 2.30. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of March in the positive composite years of South Asian Monsoon Index in June. (d), (e), and (f) are for April. In (a), and (d), countour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), and (i), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.36

Figure 2.31. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of May in the positive composite years of South Asian Monsoon Index. (d), (e), and (f) are for June, and (g), (h), and (i) are for July. In (a), (d), and (g), countour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), and (i), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.37

Figure 3.1. Schematic diagram for how El Nino influences the temperature and precipitation over Korean Peninsula in early winter (엘니노 백서).43

Figure 3.2. Regressed geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa (upper), precipitation (middle) and SST (lower) anomalies in December (left) and January (right) onto the NDJ Nino3.4 index, respectively. The hatches and black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.45

Figure 3.3. Composites of SST (left) and precipitation (right) anomalies in December and January when the December Korean temperature index is above 1 standard deviation. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.47

Figure 3.4. The same as in Figure 3.3 but for geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa (left) and 850 hPa (right). The black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.47

Figure 3.5. Composites of SST (left) and precipitation (right) anomalies in December and January when the December Korean temperature index is below -1 standard deviation. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.48

Figure 3.6. The same as in Figure 3.5 but for geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa (left) and 850 hPa (right). The black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.48

Figure 3.7. The second empirical orthogonal function mode of December sea level pressure (SLP) anomalies in the North Pacific (110° E-120° W, 20° -70° N). Time series of the second

principal component of December SLP anomalies in the North Pacific.	49
Figure 3.8. Regressed SST (left) and precipitation (right) anomalies in December and January onto the December NPO index, respectively. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.	52
Figure 3.9. The same as in Figure 3.8 but for geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa (left) and 850 hPa (right). The black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.	52
Figure 3.10. The same as in Figure 3.8 but for surface air temperature (left) and precipitation (right) anomalies.	53
Figure 3.11. Multiple regressed SST anomalies in December and January onto the NDJ Nino3.4 (left) and December NPO (right) index, respectively. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.	55
Figure 3.12. The same as in Figure 3.11 but for precipitation anomalies.	55
Figure 3.13. Multiple regressed geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa in December and January onto the NDJ Nino3.4 (left) and December NPO (right) index, respectively. The black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.	56
Figure 3.14. The same as in Figure 3.13 but for geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 850 hPa.	57
Figure 3.15. Multiple regressed surface air temperature anomalies in December and January onto the NDJ Nino3.4 (left) and December NPO (right) index, respectively. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.	57
Figure 3.16. The same as in Figure 3.11 but for precipitation anomalies.	58
Figure 3.17. The area-averaged regressed (blue) and multiple regressed (red) precipitation anomalies in December and January onto the December NPO index after removing NDJ Nino3.4 impact over the WNP (110-150E, 0-15N) region.	60
Figure 3.18. The climatological zonal (shading) and horizontal (vector) wind at 300 hPa in December (upper) and January (lower), respectively.	61
Figure 3.19. Composites of SST (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa in December and January when the December NPO (left) and December NPO+NDJ Nino3.4 (right) index is above 0.5 standard deviation. The colored and black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.	61
Figure 3.20. Latitudinal position and magnitude for climatological zonal wind (; black), summation of climatological zonal wind and composites of zonal wind anomalies () at 300 hPa	

in December when December NPO (solid) and December NPO+NDJ ENSO index (dash) is above 0.5 (red) and below -0.5 (blue) standard deviation, respectively. All values are zonally averaged from 120° E to 180°63

Figure 3.21. Multiple regressed latent heat flux anomalies in December onto the NDJ Nino3.4 (left) and December NPO (right) index, respectively. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.63

Figure 3.22. Scatter diagram between the December NPO and Korean temperature anomalies in December (left) and January (right). The values when the December NPO+NDJ Nino3.4 index and Korean temperature index is above (below) +(-)0.5 standard deviation are indicated by the red (blue) dots. The symbol of ** denotes the 99% confidence level based on the student t-test.66

Figure 3.23. Joint composites of surface air temperature anomalies in December and January when the December NPO+NDJ Nino3.4 index is above 0.5 (left) and below -0.5 (right) standard deviation. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test. 67

Figure 3.24. Flowchart of decision process for implementing the December NPO and ENSO to determine the Korean temperature anomalies in winter (December and January).69

Figure 3.25. Schematic diagram showing the teleconnection from WNP precipitation and WES feedback mechanisms in response of December NPO for warm temperature anomalies over Korean Peninsula in January with 1-month delay.70

Figure 4.1. Wind turbine power curve. Cut-in speed where the turbine begins to operate, rated output speed where the turbine begins to operate at its rated power and cut-in speed where the rotor is stopped are indicated.75

Figure 4.2. Seasonal distribution of photovoltaic power generation potential (PVpot) from observational MK-PRISM data.77

Figure 4.3. Seasonal distribution of downward shortwave radiation (RSDS) from observational MK-PRISM data.78

Figure 4.4. Change in seasonal mean PVpot under a future SSP245 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.79

Figure 4.5. Change in seasonal mean PVpot under a future SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.80

Figure 4.6. Map for nine administrative districts in South Korea.81

Figure 4.7. Box plots for change in seasonal mean PVpot under a future SSP245 (blue) and

SSP585 (red) scenario over long-term(2081~2100) period relative to present climate in nine administrative districts in South Korea. Boxes indicate the multi-model ensemble mean and circles indicate each ensemble member: filled with colors if change is significant and with gray if change is uncertain and they are empty if change is negligible.82

Figure 4.8. Change in annual mean PVpot under a future (upper panels) SSP245 and (lower panels) SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.83

Figure 4.9. Change in seasonal mean downward shortwave radiation at the surface (RSDS) under a future SSP245 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.84

Figure 4.10. Change in seasonal mean RSDS under a future SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.85

Figure 4.11. Change in annual mean RSDS under a future (upper panels) SSP245 and (lower panels) SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.86

Figure 4.12. Box plots for change in seasonal and annual mean (upper panels) PVpot and (lower panels) RSDS under a future SSP245 (blue) and SSP585 (red) scenario over long-term(2081~2100) period relative to present climate. Boxes indicate the multi-model ensemble mean and circles indicate each ensemble member: filled with colors if change is significant and with gray if change is uncertain and they are empty if change is negligible. 87

Figure 4.13. Box plots for RSDS-, TAS- and VWS-induced change (orange, green, purple respectively) in seasonal mean PVpot under a future (upper) SSP245 and (lower) SSP585 scenario over long-term(2081~2100) period relative to present climate averaged over South Korea. Boxes indicate the multi-model ensemble mean and circles indicate each ensemble member.88

Figure 4.14. Spatial distribution of seasonal mean wind energy density (WED) at 80m averaged over 2000~2019.89

Figure 4.15. Change in seasonal mean wind energy density (WED) at 80m under a future SSP245 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.91

Figure 4.16. Change in seasonal mean wind energy density (WED) at 80m under a future SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.92

Figure 4.17. Change in annual mean wind energy density (WED) at 80m under a future

(upper panels) SSP245 and (lower) SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.93

Figure 4.18. Box plots for change in seasonal and annual mean wind energy density (WED) at 80m under a future SSP245 (blue) and SSP585 (red) scenario over long-term(2081~2100) period relative to present climate. Boxes indicate the multi-model ensemble mean and circles indicate each ensemble member: filled with colors if change is significant and with gray if change is uncertain and they are empty if change is negligible.94

Figure 4.19. Frequency of wind speeds over (left panels) 3~25 m/sec, (middle) 3~7m/sec and (right) 7~13m/sec at 80m during spring, summer and winter seasons.95

Figure 4.20. Change in seasonal mean frequency of wind speeds over 3~25 m/sec at 80m under a future SSP245 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.96

Figure 4.21. Change in seasonal mean frequency of wind speeds over 3~25 m/sec at 80m under a future SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.97

Figure 4.22. Box plots for regionally-averaged change in seasonal mean frequency of wind speeds over (upper panels) 3~25 m/sec, (middle) 3~7m/sec and (lower) 7~13m/sec at 80m under a future SSP245 and SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period. Region corresponds to 한강동해 region.98

Figure 4.23Z Box plots for regionally-averaged change in seasonal mean frequency of wind speeds over (upper panels) 3~25 m/sec, (middle) 3~7m/sec and (lower) 7~13m/sec at 80m under a future SSP245 and SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period. Region corresponds to 회야수영 region.99

Figure 4.24. Box plots for regionally-averaged change in seasonal mean frequency of wind speeds over (upper panels) 3~25 m/sec, (middle) 3~7m/sec and (lower) 7~13m/sec at 80m under a future SSP245 and SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period. Region corresponds to 영산강남해 region.100

Figure 4.25. Spatial distribution of correlation coefficients of between (upper) PVpot and sea level pressure, (middle) PVpot and total cloud cover, and (lower) RSDS and total cloud cover from ERA5 reanalysis data. PVpot, RSDS and total cloud cover are DJF-averaged.102

Figure 4.26. Ensemble mean change in seasonal mean surface winds under a future (left panels) SSP126 and (right) SSP585 scenario over long-term (2081~2100) period relative to present climate.103

Figure 4.27. Schematic diagram for how the global warming affect the renewable energy change in the future.	105
Figure 5.1 Orographic mask data for CORDEX-EA Phase 2.	108
Figure 5.2 East Asia Drought Map in the APEC Climate Center Homepage (November, 2023). 110	
Figure 5.3 Temporal variations of (left panel) 1-month and (right) 9-month SPI and SEDI for the (upper panel) Korean Peninsula and (lower) East Asian region from 1979 to present. The bold line represents a 12-month moving average.	111
Figure 5.4 Spatial distribution of SEDI3 from 3MME for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP126 scenario. ...	112
Figure 5.5 Spatial distribution of SEDI3 from 3MME for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP585 scenario. ...	113
Figure 5.6 Spatial distribution of SEDI3 from HadGEM3-RA for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP126 scenario.	114
Figure 5.7 Spatial distribution of SEDI3 from HadGEM3-RA for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP585 scenario.	115
Figure 5.8 Spatial distribution of SEDI3 from PNU-WRF for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP126 scenario.	116
Figure 5.9 Spatial distribution of SEDI3 from PNU-WRF for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP585 scenario.	117
Figure 5.10 Spatial distribution of SEDI3 from POSTECH-CCLM for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP126 scenario.	118
Figure 5.11 Spatial distribution of SEDI3 from POSTECH-CCLM for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP585 scenario.	119
Figure 5.12 PDF distribution for SPI3 and SEDI3 in 3MME.	120
Figure 5.13 Spatial Distribution of D2(Severe), D3(Extreme), D4(Exceptional) Drought for (upper) MAM and (lower) SON season during 2021-2100 in SSP126 scenario.	121
Figure 5.14 Spatial Distribution of D2(Severe), D3(Extreme), D4(Exceptional) Drought for	

(upper) MAM and (lower) SON season during 2021–2100 in SSP585 scenario.	122
Figure 5.15 Contributions of 5 variables(TAS, RN, PR, UAS, VAS) for SEDI3 during MAM in SSP585 scenario.	123
Figure 5.16 Box plots of contribution of 5 variables(TAS, RN, PR, UAS, VAS) for SEDI3 during MAM in SSP585 scenario.	124
Figure 5.17 Contributions of 5 variables(TAS, RN, PR, UAS, VAS) for SEDI3 during SON in SSP585 scenario.	125
Figure 5.18 Box plots of contribution of 5 variables(TAS, RN, PR, UAS, VAS) for SEDI3 during SON in SSP585 scenario.	125
Figure 5.19 Surface air temperature difference pattern between P2(2081–2100) and HIST(1985–2014) for MAM in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.	126
Figure 5.20 Surface air temperature difference pattern between P2(2081–2100) and HIST(1985–2014) for SON in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.	127
Figure 5.21 TAS change during MAM and SON for the Near-future and Distant-future over Korean Peninsula.	127
Figure 5.22 Geopotential height difference pattern at 500hPa between P2(2081–2100) and HIST(1985–2014) for MAM in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.	128
Figure 5.23 Geopotential height difference pattern at 500hPa between P2(2081–2100) and HIST(1985–2014) for SON in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.	129
Figure 5.24 Precipitation difference pattern between P2(2081–2100) and HIST(1985–2014) for MAM in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.	130
Figure 5.25 Precipitation difference pattern between P2(2081–2100) and HIST(1985–2014) for SON in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.	131
Figure 5.26 PR change during MAM and SON for the Near-future and Distant-future over Korean Peninsula.	131
Figure 5.27 Surface meridional wind difference pattern between P2(2081–2100) and HIST(1985–2014) for MAM in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.	132
Figure 5.28 Surface meridional wind difference pattern between P2(2081–2100) and HIST(1985–2014) for SON in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.	132

scenario.	133
Figure 5.29 VAS change during MAM and SON for the Near-future and Distant-future over Korean Peninsula.	134
Figure 5.30 RN change during MAM and SON for the Near-future and Distant-future over Korean Peninsula.	134
Figure 6.1. In order to calculate predictive factors based on detailed epidemiology and provide results, programs for data processing by month, factor, and region were developed.	138
Figure 6.2. Automated service web interface that provides monitoring and analysis information for forecast discussions, a user interface was built to provide various information on a single web page.	140
Figure 6.3. In the Automated service web interface that provides monitoring and analysis information for forecast discussions, you can select the desired month and check it.	141
Figure 6.4. The locations of monthly predictors related to precipitation and temperature are indicated on the map	142
Figure 6.5. Detailed information was provided to users by providing a related index and which factors had an effect on a monthly basis. In addition, each factor plays a certain role and the accuracy is provided in the form of table.	143
Figure 6.6. In order to explain why each factor affects precipitation and temperature, detailed pages are used to explain the cause and reason for the mechanism.	144
Figure 6.7. Users want to compare how much correlation each predictor has with the observed data. Therefore, each factor from last 10 years to the present was expressed as a time series graph. In addition, it provides a function to compare and view only the parameters that the user wants to see by using the hide function.	145
Figure 6.8. The results of each predictor by year are provided as a table. Each predictor is displayed in color by comparing high, average, and low based on standard deviation. In this way, intuitive information can be delivered to users, and a sorting function is provided by selection a heading.	146
Figure 6.9. When you select a month for forecast discussion, climate variable monitoring information for the past three months is provided. If you select November, you can view information from September to the present.	147
Figure 6.10. For forecast discussion, information on changes in monthly sea surface temperature and wind direction and strength provided by NOAA is collected and provided to users	148
Figure 6.11. For forecast discussion, information on changes in monthly ENSO provided by	

NOAA and ECMWF are collected and provided to users	148
Figure 6.12. The Arctic sea ice information service automatically collects and provides users with data provided by NSIDC on changes in sea ice area in the Arctic region and sea ice in each sea area	149
Figure 6.13. Snow cover information provided by Rutgers University was collected and organized to provide daily snow cover change and monthly average and anomaly information on the map	150
Figure 6.14. AO and NAO information provided by NOAA was collected and organized to provide each 15 days AO and NAO change and monthly average and anomaly information on the graph	151
Figure 6.15. The user interface for the composite-based climate impact analysis service placed the condition input screen and result screen simultaneously on one website. This is to allow users to immediately identify changes in results through various re-input	153
Figure 6.16. In the composite-based climate impact analysis service, you can select the desired month for temperature and regions and check it.	154
Figure 6.17. This is the result of monthly time series analysis for the user' s desired region. Through time series analysis, you can find years that are Above and years that are Below. 155	
Figure 6.18. A composite map can be created for various variables through the Above and Below solutions obtained through time series analysis	156

1. 서론

APCC는 우리나라 기후 변동성에 영향을 미치는 주요 기후 감시 요소들(엘니뇨-남방진동, 인도양, 해빙, 눈덮임, 북극 진동 등)의 역학적 메커니즘을 분석하고, 우리나라 월별, 계절별 기온, 강수 변동성과 밀접한 관련성을 가지는 기후 인자를 발굴함으로써 신뢰도 높은 장기예보 생산에 이바지해왔다. 이러한 결과로 얻어진 예측 정보를 기반으로 2015년 장기예보 가이드스를 처음 발간한 이후 2021년에 기후 평년값의 변경에 따라 기존의 기후 정보를 변경하고 기후 예측인자의 최근 변화 경향을 반영하여 장기예보 가이드스를 개선하였다(APCC, 2021). 또한 지구 온난화 및 기후 변화의 영향으로 최근 빈번히 발생하고 있는 전 세계 및 한반도의 이상기후(폭염, 한파, 가뭄, 집중호우 등) 발생 시 동아시아 이상기후 감시 시스템과 사용자 친화적 인터페이스를 기반으로 한 기후 분석 시스템(Climate Analysis System, CAS)을 활용하여 그 원인을 신속히 분석하여 과학적인 이상기후 관련 정보를 제공해 왔다.

이러한 노력을 통해 얻은 방대한 기후 감시·분석 정보들이 실질적으로 장기예보 향상과 이상기후 대비에 기여하기 위해서는 예측 활용도 및 신뢰도의 향상과 함께 예측 정보의 중요도 분별 등을 통해 다양한 예측인자 정보의 최적 통합 방안이 필요하다. 또한 급변하는 기후변화가 한반도 이상기후 현상과 재생에너지 생산성에 미치는 영향에 관한 연구가 필요하다. 이에 본 과제의 6단계(2022~2024년)에서는 최근 중요도가 증가한 기후 요소들을 분석하고 기존 예측인자의 세부 역학과정을 검증하는 한편 한반도 기후 예측 신뢰도 향상을 위하여 다양한 감시/분석 정보를 최적의 방법으로 통합하고자 한다. 또한 이러한 감시와 분석이 신속하게 이루어질 수 있도록 정보 통합 시스템을 구축하여 이상기후에 대한 대응 능력을 강화하고자 한다.

6단계의 2차 연도에는 주요 예측인자의 단순 선형 상관관계에 기반한 예측을 지양하고, 예측인자가 한반도 기후에 영향을 미치는 세부적 역학과정을 규명하고 이를 활용하여 객관적이며 스토리가 있는 예측 방안 개발의 기반을 마련하고자 한다. 또한 현업 예측 업무 지원 시 관측기반 예측인자 정보 가운데 정보의 중요도를 선별하고 예보를 객관화(다양한 예측 정보를 통합하고 최적화)하기 위해 예측인자의 역학과정 재현성을 진단하여 인자의 중요도를 판별하는 가능성을 타진해 보고자 한다. 또한 기후변화에 따른 한반도 미래 재생에너지 및 가뭄 변화를 전망하고 그 원인을 분석하고자 한다. 이와 함께 동아시아 이상기후 감시 시스템 및 기후 분석 시스템의 콘텐츠를 확대하고 고도화하는 한편 안정적 운영을 도모하고자 한다. 또한 수동으로 이루어졌던 예보도의 모니터링 프로세스를 자동화하여 매일 감시 업무에 할애되었던 자원을 절약하고 분석 업무의 효율성을 높이기 위해 관심 인자 합성장 분석 및 한반도 영향 분석 서비스를 구축하고자 한다.

2장에서는 예측인자의 세부 역학과정을 규명하는 프레임워크를 개발하고 여름철 기온 예측인자에 적용하였다. 한반도 3개월 장기예보를 위한 관측기반 한반도 월별 기후 선행 예측인자들은 주로 2~4개월의 선행시간을 가지고 있다. 예측인자가 한반도 기후에 영향을 미치는 순차적 상세 프로세스에 대한 이해는 예측의 신뢰도를 높일 수 있으며 더 나아가 예측 이후 감시를 통해 극한 기후를 조기에 탐지할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 합성장 분석과 기존의 연구 결과들을 기반으로 7월의 기온 예측인자에 적용하여 예측인자가 한반도 기온을 조절하는 순차적 역학과정을 규명하였다. 특히 예측인자 또는 역학과정이 7월 기온과 비선형적으

로 관련되었을 가능성을 고려하여 위상을 분리하여 분석하였고 정확도 검증을 통하여 유의미한 세부 역학과정을 분별하였다. 한편 예측인자의 세부 역학과정 규명은 다양한 예측인자의 예측 결과가 상이한 경우 예측인자의 중요도를 선별하는 기준이 될 수 있다. 본 연구에서는 7월 기온 예측인자들의 세부 역학과정 분석 결과를 활용하여 세부 역학과정이 재현되고 있거나 재현될 것으로 예상되는 인자의 예측에 대한 신뢰도를 높이면 예측성의 향상이 있는지 확인해보았다.

3장에서는 ENSO 지수의 겨울철 기온 예측 향상 방안을 제시 하였다. ENSO는 북서태평양 대류활동에 의한 원격상관으로 우리나라 겨울철 기후에 영향을 미친다. 그러므로 ENSO는 우리나라 겨울철 예측에서 상당히 중요한 인자이다. 하지만, ENSO 관련 원격상관은 1월이 되면 약화되어 우리나라의 1월 기후 예측에 어려움이 존재한다. 그러므로 우리나라의 1월 기후 예측에 활용할 수 있는 신규 예측인자를 선정하고 관련 원격상관 역학을 이해할 필요가 있다. 이를 위해 신규 예측인자로 12월 NPO를 제안하고, 이와 관련된 한 달 지연 원격상관 역학을 분석하였다. 그리고 1월 기온 예측을 위한 ENSO 인자와 더불어 12월 NPO 인자 활용 방안을 제시하였다.

4장에서는 미래 기후변화에 따른 재생에너지 전망을 분석하였다. 지구 온난화가 진행됨에 따라 극한 기후는 점점 빈번해지고, 강도도 증가하고 있는 상황에서 지구 온난화를 완화시키기 위해서, 대기로의 탄소 배출을 줄여야한다. 이를 위해서 전 세계적으로 화석연료에 의한 전력 생산에서 재생에너지에 의한 전력 생산 비율을 점차로 증가시키고 있다. 하지만 기후의 영향을 받는 태양광 및 풍력 발전 같은 재생에너지는 기후변화에 취약 할 수 있다(예, Tobin et al. 2015; Jerez et al. 2015; Fant et al. 2016; Gernaat et al. 2021; Poddar et al. 2022). 그러므로, 재생에너지에 의한 전력 생산 의존도를 점차적으로 증가시키려는 정책 실행에 있어서 가까운 미래 혹은 먼 미래에서 이들 재생에너지 시스템에 의한 발전량에 영향을 미치는 기후적인 요소들이 어떻게 변할지에 대한 이해가 필요하다. 그러므로 1km 해상도의 남한 고해상도 기후 자료를 사용하여 기후변화에 따라 현재 기후 대비 미래 저탄소 시나리오와 고탄소 시나리오 기반 21세기 전반기(2021~2040), 중반기(2041~2060), 후반기(2081~2100)에 태양광 및 풍력 발전에 의한 전력 잠재량의 계절별 변화를 분석하였으며, 아울러 그 변화에 대한 기후적인 원인을 분석하고자 한다.

5장에서는 미래 기후변화에 따른 우리나라 봄철 및 가을철 가뭄 전망을 분석하였다. 이를 위해서 기상 가뭄 지수로 가장 널리 사용되고 있는 표준 강수 지수(SPI)와 실제 증발산량을 고려한 농업적 가뭄지수인 표준 증발산 부족 지수(SEDI)를 활용하였다. SPI는 기후변화 관련 기온 상승의 영향을 반영하지 못하는 단점이 있는데 반해서, SEDI는 강수 뿐만 아니라 기온의 영향을 많이 받는 실제 증발산량을 고려하기 때문에, 가뭄의 기후변화 영향을 분석하는데 효과적이다. 미래 기후변화에 따른 가뭄 변화에 대한 위 두 지수의 결과를 비교하고, 가뭄 강도가 얼마나 증가할지 분석 하였다. 아울러 가뭄 강도 변화에 대한 원인을 분석하였다.

6장에서는 사용자 편의성 향상을 위한 기후분석시스템(CAS)의 개선 및 확대에 관한 사항을 기술하였다. 기후분석시스템은 최신 관측된 지구자료와 한반도 관측 자료를 이용하여 다양한 기후 변수에 대해 평년 정보와 편차 정보를 서비스되도록 구성하였고 기후분석시스템은 전

지구 월별 자료를 이용하여 합성 정보와 시계열 정보를 제공하도록 구축되었다. 사용자의 편리성을 위해 웹 기반 서비스를 개발하였으며 사용자는 일별, 주별, 최근 7일별, 월별에 대한 모니터링 평균 정보와 편차 정보를 제공할 뿐만 아니라 30년을 기본으로 하는 평년 기간을 사용자가 자유롭게 변경하여 다양한 분석이 가능하도록 구성하였다. 기후분석 연구자와 개발 과정 공유를 통해 다양한 의견을 최대한 반영하여 효율적인 서비스 개발로 사용 측면의 업무 활용성 증대를 강화하고 W3C 표준과 웹 프레임 개발로 웹 취약성을 방지하고 접근성 확보를 통해 안정적인 서비스를 개발하였다. 또한, 동적 웹 기술 등 최신 웹 기술을 적용하여 접근 방식의 다양성 확보하고 관측 자료 변경 및 파일로 인한 오류에 즉시 대응할 수 있도록 체계적인 자료 관리 시스템 구축을 통해 운영의 편리성을 강화하였다. 2022년도 서비스 확대를 위해 월별 예측인자 통계 및 기작 모식도 제공 서비스를 개발하여 장기에보 분석 업무에 활용할 수 있도록 서비스를 제공하였으며 2023년도에는 매일 이뤄지는 예보토의를 위해 김시분석 정보 자동화 서비스를 개발하였으며 시계열 기반의 합성장 지도 생성 기능을 적용하여 연구자의 예보토의 준비시간을 줄이는 데 이바지하였다. 기존에 구축한 모니터링 서비스에 대해 감시·기후인자를 확대하고 서비스 개선을 통해 사용자 친화적인 서비스 개선을 확대하였다.

2. 여름철 기온 예측인자의 세부 역학과정 분석 및 예측인자 중요도 진단 방안 마련

2.1. 연구배경

3개월 장기예보를 위한 관측기반 한반도 월별 기후 선행 예측인자들은 주로 2~4개월 선행 시간을 가지고 있다. 예를 들어 7월 기온을 예측하기 위해 3월의 대기 또는 해양 자료를 이용하게 되는데 7월 기온 인자들의 경우 3분위 예측 정확도(19973-2020)는 55% 미만이다(APCC, 2021). 수개월 선행 예측인자의 정확도가 비교적 낮기 때문에 그 사이 기간인 4월~6월에 어떤 프로세스를 통해 7월 기온을 조절하게 되는지에 대한 역학적 분석 및 이해는 예측의 신뢰도를 향상시킬 수 있으며 예측 이후 감시를 통해 극한 기후를 조기에 탐지할 수 있는 장점이 있다. 기존 연구에 따르면 Pacific-Japan(P-J) 원격상관 패턴, circumglobal teleconnection(CGT) 패턴, 유라시아 파동전파 등 한반도 여름철에 고온 및 폭염을 일으키는 많은 역학들이 존재한다(Wu et al 2009, Lee and Lee 2016, Lim and Seo 2019, Yeo et al. 2019, Kim et al. 2019, Myoung 2021). 이러한 연구 결과들이 현업 예보에 활용되기 위해서는 다양한 측면에서의 검토가 필요하다. 한 예로 분석 기간의 차이에 따라 과거에는 중요했던 물리-역학 프로세스들이 최근에는 재현되지 않을 수도 있고 재현되더라도 특정한 상황에만 재현될 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 예측인자의 현업 활용도를 높이고자 순차적 세부 역학과정을 밝혀 내고 감시인자를 선정하는 프레임워크를 개발하고 이를 7월의 기온 예측인자에 적용하고자 한다. 특히 존재할 수 있는 예측인자와 목표 변수와의 비선형적 관계를 고려하여 위상을 분리하여 분석하고 정확도 검증을 통하여 유의미한 세부 역학과정을 분별하고자 한다.

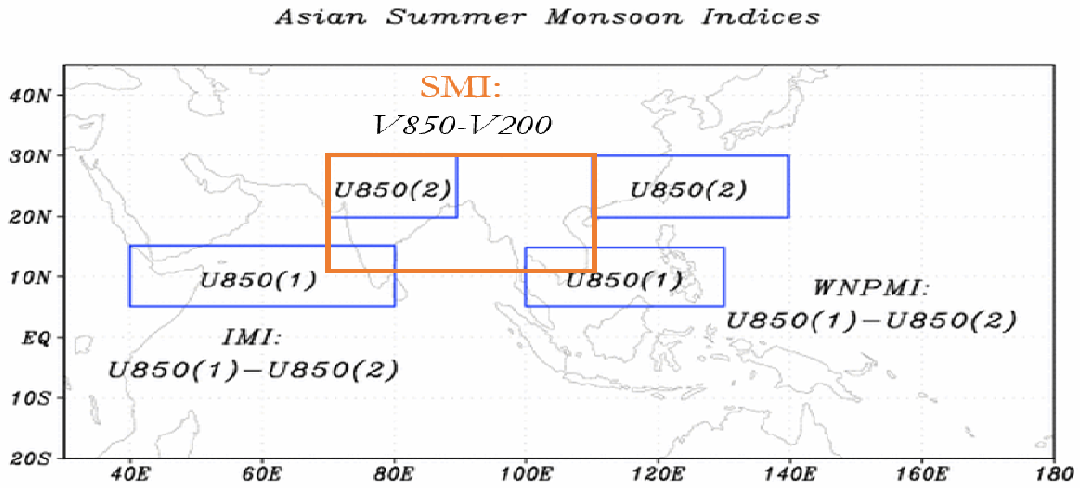
한편 예측인자가 다수인 월의 경우 다양한 예측인자로부터 얻는 정보들을 통합하기 위해 예측인자의 중요도를 판단할 수 있는 근거가 필요하다. 본 연구에서는 7월 기온 예측인자들의 세부 역학과정 분석 결과를 활용하여 인자의 중요도를 분별하는 방안을 제시하고자 한다.

2.2. 자료와 방법

이 연구에서 사용된 자료는 NCEP-NCAR Reanalysis 1 로써 200h Pa, 500 hPa, 850 hPa의 월별 지위고도(각각, Z200, Z500, Z850), 850 hPa 동서 바람장(U850), 남북 바람장(V850), 200 hPa 동서 바람장(U200), 남북 바람장(V200), 500 hPa 수직운동(OMG500)을 사용하였다(Kalnay et al. 1996). SST의 경우 ERSST v5, OLR의 경우 NOAA monthly interpolated OLR를 이용하였다.

대기 원격상관 패턴(East Atlantic 패턴, Scandinavia 패턴)은 NOAA Climate Prediction Center archives로부터 획득하였다(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/>). P-J 패턴은 북서태평양 두 지점(140N/35E와 120E/22.5N)의 sea level pressure 차이로 계산되었다. 인도 몬순 지수(Indian Monsoon Index, IMI), 북서태평양 몬순 지수(Western North Pacific Monsoon Index, WNPMI), 남아시아 몬순 지수(South Asia Monsoon Index, SMI)의 세 가지 몬순 지수를 사용하였

는데 그 정의와 지역을 Figure 2.1에 표시하였다(Wang and Fan 1999, Wang et al. 2001). 각각의 월 자료에 대하여 1991년에서 2020년의 평년 기간에 대한 편차가 계산되었다.



SMI Index – U850(70E 110E, 10N 30N) U200(70E 110E, 10N 30N)
 IM Index – U850(40E-80E, 5N-15N)-U850(70E-90E, 20N-30N)
 WNPM Index – U850(100E 130E, 5N 15N) U850(110E 140E, 20N 30N)

Figure 2.1. Definitions and areas for computation of South Asia Monsoon Index (SMI), Indian Monsoon Index (IMI), and Western North Pacific Monsoon Index (WNPMI).

우리나라 기온(Ts)과 강수량(Pr) 자료는 기상청에서 제공하는 Automated Synoptic Observing System (ASOS) 자료의 62개 지점 값의 평균값을 사용하였다. 기온 역시 월 평균값에 대하여 1991년에서 2020년의 평년 기간에 대한 편차가 계산되었다.

본 연구에서는 7월의 기온 예측인자(APCC, 2021) 중 예측성이 높은 두 개의 인자에 대해 분석을 수행하였다(Table 2.1).

Table 2.1. Two primary predictors of July-mean temperatures. Accuracy is computed for 1973-2020.

예측인자	상관계수	Accuracy	영역
3월 유럽 Z500	0.61	45%	[10~40E, 25~45N] + [60~90E, 20~50N] - [0~45E, 55~70N]
4월 열대 SST 삼극자	0.55	55%	[90~120E, 25~40S] + [120~140E, 0~20N] - [90~110E, 10S~5N]

예측인자, 역화과정을 나타내는 인자(역화과정 인자), 및 감시인자의 7월 기온 예측 정확도를 계산하기 위해 Accuracy(ACC)를 다음과 같이 계산하였다. 비선형성을 고려하였기 때문에

고온의 경우

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

TP: 고온을 고온이라 예측(True)

TN: 고온 아님을 고온 아님이라고 예측(True)

FP: 고온 아님을 고온이라고 예측(Type 1 error)

FN: 고온을 고온 아님이라고 예측(Type 2 error)

“고온 아님”은 중립 또는 저온의 경우를 말한다. 저온의 경우에는 저온 및 저온 아님(즉, 중립 또는 고온)으로 대체된다. 기온의 경우 3분위 기준을 적용하여 평년(1991-2020)에 비해 0.61도 이상인 경우 고온, -0.61도 이하인 경우 저온으로 규정하였다. 예측인자의 경우에도 3분위 기준을 적용한 반면 역학과정 인자와 감시인자의 경우 2분위 기준(평년 이상 또는 이하)을 사용하였다. 필요한 경우 역학과정 인자 및 감시인자의 경우 기준값을 변경할 수 있다.

인자별 세부 역학과정 규명을 위해 다음과 같은 프레임워크를 개발하고 적용하였다.

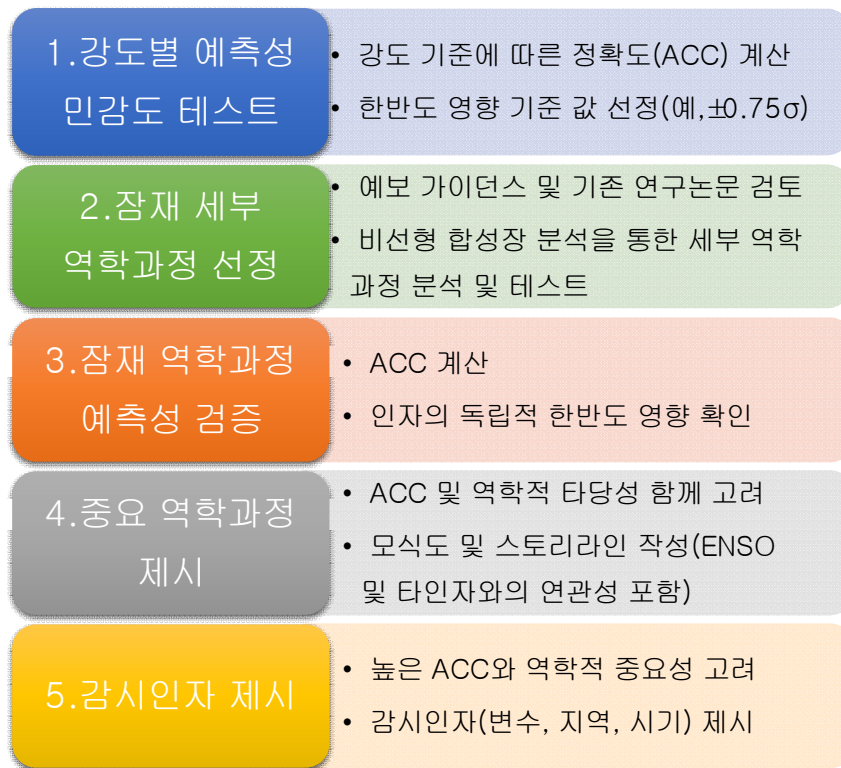


Figure 2.2. Framework verifying details of dynamic processes of a climate predictor

1. 강도별 예측성 민감도 테스트: 예측인자와 기온과의 관련성이 선형적이지 않을 경우 가장 좋은 예측성을 보이는 기준값을 찾기 위해 다양한 강도 기준에 따른 예측인자의 정확도를

계산하는 과정이다. 강도 기준을 높일수록 기준값을 초과하는 경우의 수 역시 줄어들기 때문에 예측에의 활용성이 떨어지므로 ACC 및 경우의 수의 조합을 살펴보고 적절한 값을 결정할 필요가 있다.

2. 잠재 세부 역학과정 선정: 결정된 강도 기준값에 따른 다양한 대기/해양 변수의 비선형 합성장을 분석하여 잠재 세부 역학과정을 선정하는 과정으로 장기예보 가이드스나 기존 연구 논문을 통해 제시된 역학과정을 참조할 수 있다.

3. 잠재 역학과정 예측성 검증: 역학과정을 나타내는 지수(역학과정 지수)와 7월 기온에 대해 ACC를 계산하여 역학과정의 중요성을 확인한다. 예측인자가 수개월 후 한반도 기온(기온 또는 강수)을 조절하는 역학과정을 정확히 분별해 냈다면 그 역학과정의 정확도 역시 높을 것으로 예상되기 때문이다. 역학과정 지수에 대한 합성장 분석을 독립적으로 수행하여 예측인자 및 한반도 기온과 기대한 연관성이 있는지를 확인하는 과정을 통해 역학과정의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

4. 중요 역학과정 제시: 잠재 역학과정의 ACC 및 물리-역학적 메커니즘의 타당성을 고려하여 중요 역학과정을 선정, 결과를 모식도와 스토리라인으로 정리한다. 예측인자 및 중요 역학과정의 ENSO 연관성 등 주요 기후 인자와의 관련성, 타 예측인자와의 연관성, 또는 예측성의 변화 정보 역시 제공할 수 있다.

5. 감시인자 제시: 중요 역학과정 중 높은 ACC와 역학적 중요성을 고려하여 감시인자를 선정하고 제시한다. 감시할 변수, 지역, 시기 및 ACC를 제공하여 감시할 수 있게 한다.

2.3. 3월 유럽 Z500 인자 세부 역학과정 규명

3월 유라시아 중위도에 양의 중층(500 hPa) 지위고도 편차, 고위도에 음의 지위고도 편차가 나타날 경우(Table 2.1, 3월 유럽 Z500) 한반도에 7월 고온 경향성이 있으며 반대의 경우 저온 경향성이 존재한다고 알려져 있다(APCC 2021). 3월 유럽 Z500 인자의 강도별 예측성 테스트 결과 0.75σ 의 경우 양의 값만 고려한 경우 66%, 음의 값만 고려한 경우 80%의 정확도를 갖으며 인자의 기준 강도가 높을수록 ACC가 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 인자가 -1.3σ 이하일 경우 100%의 높은 정확도를 보였다(Table 2.2).

Table 2.2. ACC (%) of “3월 유럽 Z500” predictor with respect to different thresholds for the past 40 years (1981-2020).

Threshold	Positive	Negative	All
$\pm 0.43\sigma$	50	53	51
$\pm 0.75\sigma$	66	80	73
$\pm 1.00\sigma$	66	83	73
$\pm 1.30\sigma$	80	100	85

3월 유럽 Z500과 7월 한반도 기온의 scatter plot에서 볼 수 있듯이(Figure 2.3) 두 값은 선형적인 관계를 지니고 있기 때문에 고온과 저온 모두 예측성이 높은 것으로 보인다.

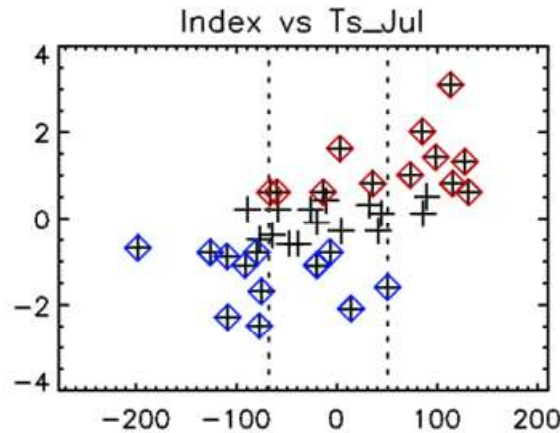


Figure 2.3. Scatter plot (1981-2020) of the 3월 유럽 Z500 (x-axis) with Ts in July (y-axis in °C). Vertical dashed lines indicate the $\pm 0.75\sigma$ values of the predictor. Red (blue) diamond shows above-normal (below-normal) temperature in July while cross shows near-normal temperature in July.

0.75 σ 의 기준으로 예측인자의 값이 컸던 해(양의 합성해)와 낮았던 해(음의 합성해)를 구분하고(Table 2) 각각의 합성해에 대한 월별 대기/해양 변수 합성장 및 주요 역학과정을 살펴 보았다. 양의 합성해에는(한반도에 폭염이 극심했던 1994년과 2018년을 포함) 3월 유라시아 중 위도에 고기압 편차, 유라시아 고위도에 저기압 편차가 발달한 것을 확인할 수 있다(Figure 2.4a). 3개월 후인 6월에는 인도 북서부에는 저층 저기압성 흐름(850 hPa)이 발달하고(Figure 2.4d), 아라비아해 부근에 남서풍이 발달하여 남아시아 몬순이 발달함에 따라 인도 대륙 및 벵골만에 대류가 활발해진다(Figure 2.4e). 또한 남중국해에도 저층(850 hPa) 저기압성 흐름이 발달하여 남중국해 및 필리핀해 북부에 대류가 평년보다 발달한 모습이 관찰된다. 이에 따라 인도 북서부 상층과 한반도에는 고기압 편차가 발달하는 CGT 유사 패턴이 나타난다(Figure 2.4d). 이러한 흐름은 7월에도 유지되는데 남중국해 대류 경우 6월보다 강도는 약간 약화하는 반면 일본 동남쪽에 저기압성 흐름이 강화되고 대류가 강화되는 특징이 보인다(Figure 2.4h).

Table 2.3. Composite years of “3월 유럽 Z500” with the threshold of 0.75 σ . Colors indicate July-mean temperature in South Korea. Red, black and blue colors indicate above-normal, near-normal, below-normal temperature in July.

Composite	3월 유럽 Z500									
Positive composite years	1981	1990	1994	2001	2008	2010	2013	2018	2019	
Negative composite years	1982	1984	1986	1987	1991	1993	1996	1999	2003	2007

한편 대서양에서는 유라시아를 가로지르는 순압구조의 대기 원격상관이 나타는데 특히 7월에는 캐나다 동부 해안에 고기압 편차, 북유럽에 고기압 편차, 바이칼호 주변에 저기압 편차, 동아시아 및 캄차가 반도에 고기압성 편차가 지속적으로 나타나 대서양에서 동아시아로의 파동 전파 형태가 나타난다(Figure 2.4g).

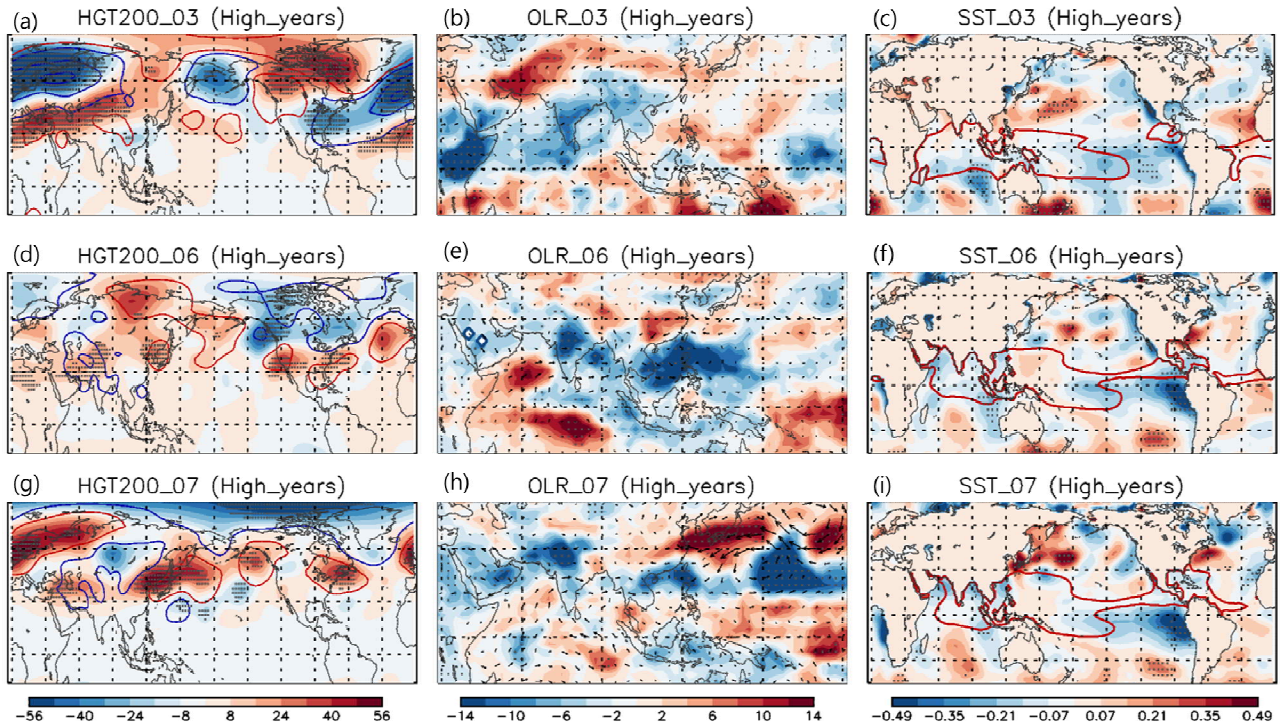


Figure 2.4. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of March in the positive composite years of 3월 유럽 Z500. (d), (e), and (f) are for June, and (g), (h), and (i) are for July. In (a), (d), and (g), contour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), and (i), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

남아시아 몬순 발달로 인한 대류 강화는 한반도에 Rossby 파동의 남북 전파 또는 CGT 파동 전파로 인해 한반도에 고기압 편차를 유도하는 한편 대서양~유라시아 지역 대기 파동 전파 역시 한반도에 고기압성 편차를 유도하기 때문에 한반도에 고기압성 편차가 중첩되어 강력한 순압 고기압을 유발하여 한반도에 고온 및 폭염이 나타나는 것으로 보이며 이러한 고온 발생 기작은 기존의 연구 결과와도 일치한다(Lee and Lee 2016, Lim and Seo 2019, Yeo et al. 2019, Myoung 2021). 이때 SST의 분포를 보면 동태평양에 유의미한 음의 SST 편차가 국지적으로 나타나 약한 라니냐의 형태를 보이긴 하지만 강한 ENSO와의 연관성은 나타나지 않았다.

그렇다면 3월 유럽 Z500이 강할 경우 4~5월 기간에 어떤 프로세스를 통해 위에 기술한 6~7월의 대기 특성을 유도하는지에 대한 분석이 필요하다. 장기예보 가이던스에 따르면 3월 유럽 Z500이 강할수록 봄철 대서양에 양의 SST 삼극자(NA_SST_tri; 고위도 양의 편차, 중위도 음의 편차, 저위도 양의 편차)가 여름철까지 유지되어 7월 유라시아 대기 중층에 EU-like 패턴 또는 Scandinavian 패턴(SCAN)의 대기 파동을 유도하여 한반도에 고기압 및 고온을 유발한다고

알려져 있다(APCC, 2021). 이를 확인하기 위하여 각각의 합성해에 대해 5월 NA_SST_tri와 7월 유라시아 원격상관 지수인 East Atlantic 패턴(EA)과 SCAN 값을 비교해 보았다. 5월 대서양 SST 삼극자는 아래에 표시된 A, B, C 지역의 5월 SST 평균값을 이용하여 다음과 같이 계산되었다.

$$NA_SST_tri=A(48-60N, 300\sim340E)+B(10-28N, 300\sim334E)-C(30-44N, 300\sim330E)$$

그 결과, 대체로 양의 합성해에는 대부분 양의 NA_SST_tri 값을, 음의 합성해에는 음의 NA_SST_tri 값을 보이지만 양의 합성해 경우 특히 두 경우가 강한 음의 NA_SST_tri 값을 보였는데(Figure 2.5.) 특히 이 두 경우는 한반도에 폭염이 극심했던 1994년과 2018년이었기에 주의가 필요하다. 많은 기존 연구에서 봄철 양의 NA_SST_tri 패턴이 동아시아에 고온을 유도함을 제시하였으나(Sung et al. 2006, Wu et al. 2009, Seo et al. 2013) 1994와 2018년은 대서양 SST 패턴이 그 반대의 경우임에도 극심한 폭염이 나타났기에 NA_SST_tri와 연관된 역학과정이 아닌 다른 프로세스가 작동할 가능성이 있음을 암시한다.

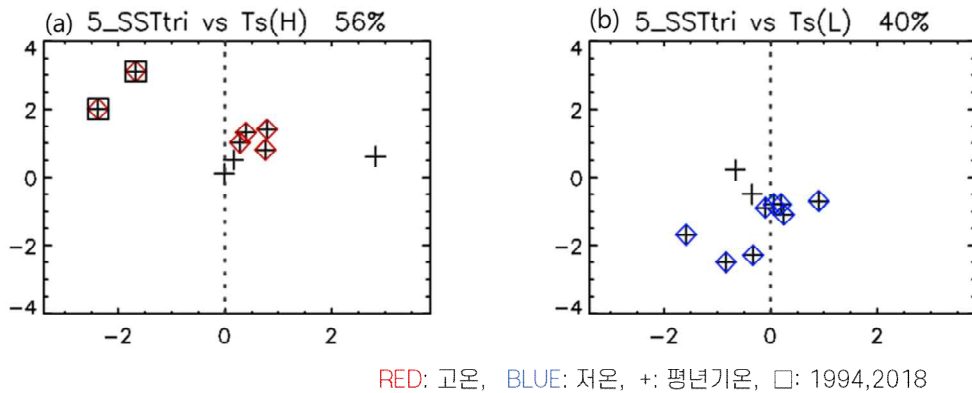


Figure 2.5. Scatter plot (1981-2020) of NA_SST_tri in May (x-axis in $^{\circ}C$) and Ts in Jul (y-axis in $^{\circ}C$) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. Percentage in the title indicates accuracy.

한편 7월의 EA와 SCAN은 예측인자가 양의 값을 갖는 경우 대부분 양의 값을 보이며 (Figure 2.6a and c) 7월 기온도 고온을, 예측인자가 음의 값을 갖는 경우 대부분 음의 값을 보이며 7월 기온도 저온을 예측하였다(Figure 2.6b and d). 이러한 결과는 3월 유럽 Z500 예측인자가 7월에 대서양에서 동아시아로의 원격상관 파동 전파를 통해 한반도 고온을 유도함을 의미하는데 Figure 2.4g에서 관찰되는 대서양~동아시아 파동전파의 형태 역시 이러한 사실을 뒷받침해 준다.

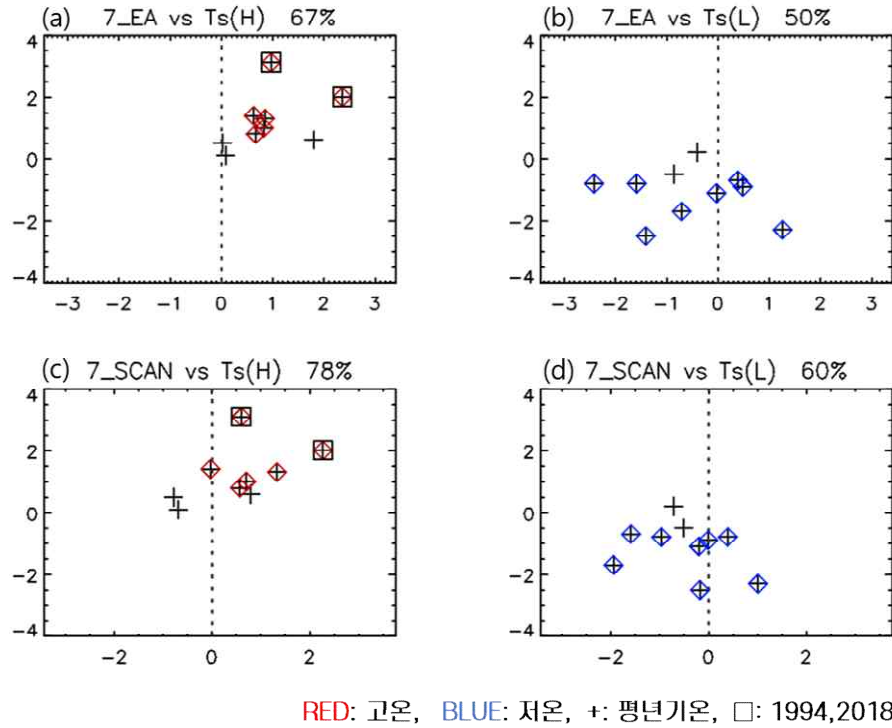


Figure 2.6. Scatter plot (1981-2020) of East Atlantic (EA) pattern in July (x-axis) and Ts in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for Scandinavia (SCAN) pattern. Percentage in the title indicates accuracy.

그렇다면 3월 유럽 Z500 지수가 높을 때 3개월 후 인 6월에 남아시아 몬순이 평년보다 강해지는 이유는 무엇일까? 기존 연구에 따르면 인도 및 남아시아 여름 몬순은 봄철 중앙아시아 지역 눈덮임과 음의 상관관계를 보이는데(Zhang et al. 2018) 제시된 관련 기작은 다음과 같다. 몬순은 여름철 대륙과 해양의 온도 차 증가로 발달하기 때문에 봄철에 중앙아시아의 눈덮임이 적을 경우 여름철에 그 지역의 토양수분 감소로 인해 현열 방출이 증가하면 대륙의 기온이 평년보다 더 상승하며 대륙과 해양의 기온차를 증가시켜 몬순을 강하게 한다. 이러한 가설을 기반으로 3월 유럽 Z500 예측인자의 양의 합성해의 봄철 눈덮임 편차와 5월 대기 중층(500hPa) 기온 편차의 합성장을 살펴보면 3~4월 중앙아시아 지역의 눈덮임이 평년보다 적고(Figure 2.7) 5월 인도 북부(60-90E, 30-50N 지역)의 대기 중층(500 hPa)에 평년 이상의 고온이 나타나는 동시에(Figure 8a) 북서 인도양에 남서풍이 발달하며 5월에 몬순 풍이 인도양에서 서서히 발달하는 현상이 관찰된다(Figure 2.8d).

(a) EU500 vs SNC_Mar

(b) EU500 vs SNC_Apr

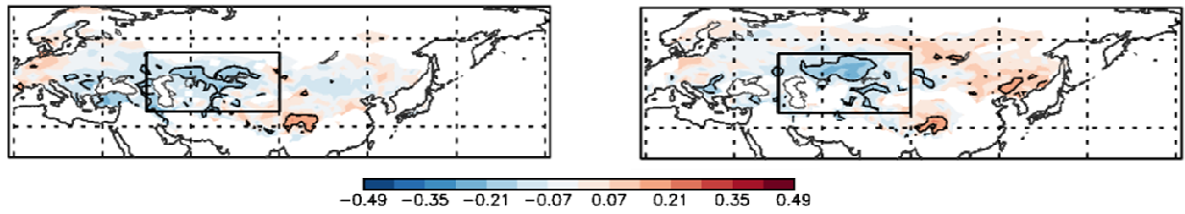


Figure 2.7. Composite maps of anomalous snow cover in (a) March and (b) April in the positive composite years of 3월 유럽 Z500. Black contours indicate anomalies less than -0.25.

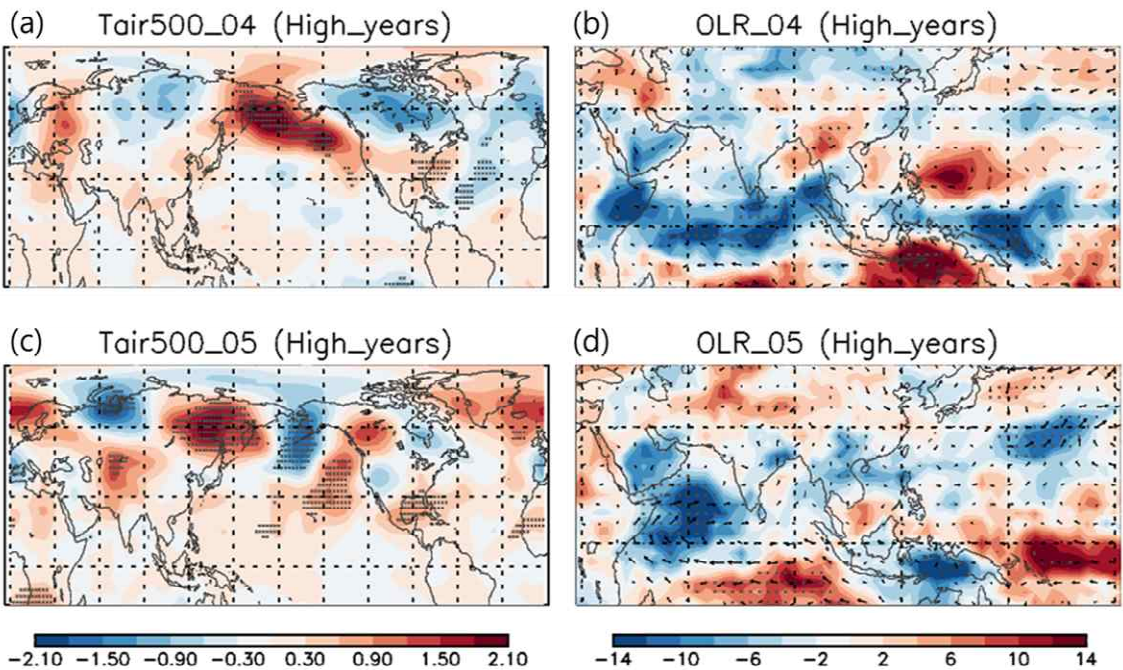


Figure 2.8. Composite maps of anomalous (a) Tair at 500 hPa and (b) OLR with winds at 850 hPa of April in the positive composite years of 3월 유럽 Z500. (c), and (d) are for May. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

상기 분석을 요약하면 3월 유라시아 지역에 지위고도 쌍극자가 발생(높은 3월 유럽 Z500)하여 4월 중앙아시아에 눈덮임이 감소하면 5월 대기가 가열됨에 따라 대륙-해양 기온차가 증가하여 6월 남아시아 몬순이 발달하며 북인도~벵골만~남중국해에 이르는 지역에 대류가 강화되어 7월의 남북 방향 로스비파 발달로 한반도에 고기압성 흐름을 유도하여 고온을 유발하게 된다. 한편 대서양 지역에서는 7월에 유라시아를 거쳐 동아시아로 양의 EA 또는 양의 SCAN 패턴의 동서방향 대기 파동을 야기하여 동아시아에 순압성 고기압, 일본 동쪽에 순압성 저기압

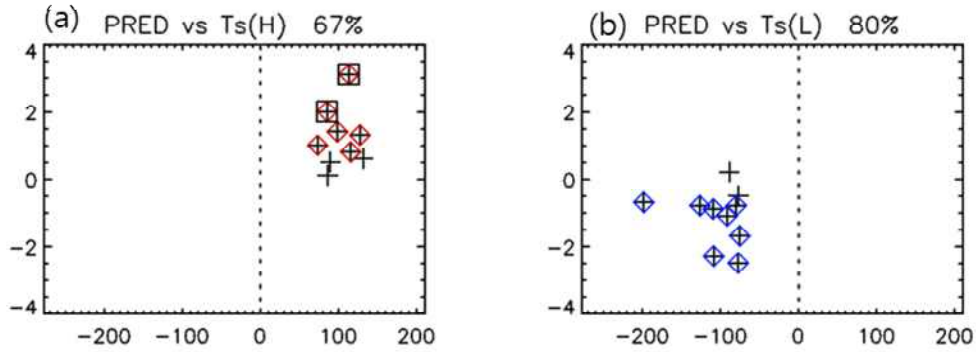
을 유도하게 된다.

이러한 역학과정들을 지수화 하고(Table 2.4) 각 지수에 대한 정확도를 계산하여 예측인자의 정확도와 비교해 보았다. 3월의 예측인자가 4개월 후 한반도 7월 기온을 조절하는 역학과정을 정확히 분별해 냈다면 이 역학과정은 실제로 고온이 발생한 해에도 예측이 적중할 뿐만 아니라, 예측이 실패한 해에 대해서는 예측이 실패할 것이라는 신호를 줄 수 있어야 한다. 예를 들어 예측인자와 양의 상관관계를 갖는 세부 역학과정의 경우, 3월 유럽 Z500이 높고 역학과정 지수 역시 평년보다 높을 경우 역학과정이 작동하여 평년보다 높은 기온을 유도할 것이다. 하지만 역학과정 지수가 평년보다 낮을 경우에는 예측인자의 관련 역학과정이 잘 작동하지 않음을 의미하고 이런 경우 고온이 발생하지 않을 것이기에 올바르게 분별된 세부 역학과정의 경우 그 지수의 예측의 정확도는 예측인자의 원래 정확도보다 유사하거나 높을 것으로 추측할 수 있다. 이러한 논거를 기반으로 예측인자와 유사하거나 높은 ACC값을 중요 세부 역학과정의 선정 기준으로 삼았다. 본 연구에서는 3월 유럽 Z500 예측인자에 대한 기준 값은 정확도가 비교적 높은 0.75σ 를 기준으로 하였고(Table 2) 역학과정 지수에 대한 기준 값은 평년 값으로 정하였다. 역학과정 지수의 경우 예측인자와 음의 상관관계를 갖는 경우(Table 4 참조) (-1.0)을 곱하여 양의 상관관계를 갖게 한 후 ACC를 계산하였다.

Table 2.4. Descriptions of potential detailed dynamic process indices for “3월 유럽 Z500”

Index	Variable	Month	Region	Relationship with predictor
4_SNC	Snow cover fraction	April	45-90E, 35-55N	Neg
5_T500ca	Tair at 500hPa	May	60-90E, 30-50N	Pos
6_SMI	V850-V200	June	70-110E, 10-30N	Pos
7_SMI	V850-V200	July	70-110E, 10-30N	Pos
6_WNPMI	U850(1)-U850(2)	June	1: 100-135E, 5-15N 2: 110-140E, 20-30N	Pos
6_OLRwp	OLR	June	115-140E, 10-20N	Neg
7_OLRwp	OLR	July	115-140E, 10-20N	Neg
6_SSTna	SST	June	270-290E, 20-40N	Pos
7_OLRna	OLR	July	270-290E, 20-30N	Neg

먼저 3월 유럽 Z500 인자의 양(음)의 값에 대한 정확도는 67%(80%)로 나타났다(Figure 2.9). 즉, 과거 40년의 기간(1981-2020)에 대해 유럽 Z500 인자가 0.75σ 이상인 총 9회의 경우 중 실제로 고온이 발생한 경우는 6회로 67%의 정확도를 보인다. 나머지 3회 중 저온을 기록한 해는 없었으며 모두 평년의 기온을 기록하였기에(Table 2.3 참조) 고온에 대해 비교적 좋은 예측성을 보인다.

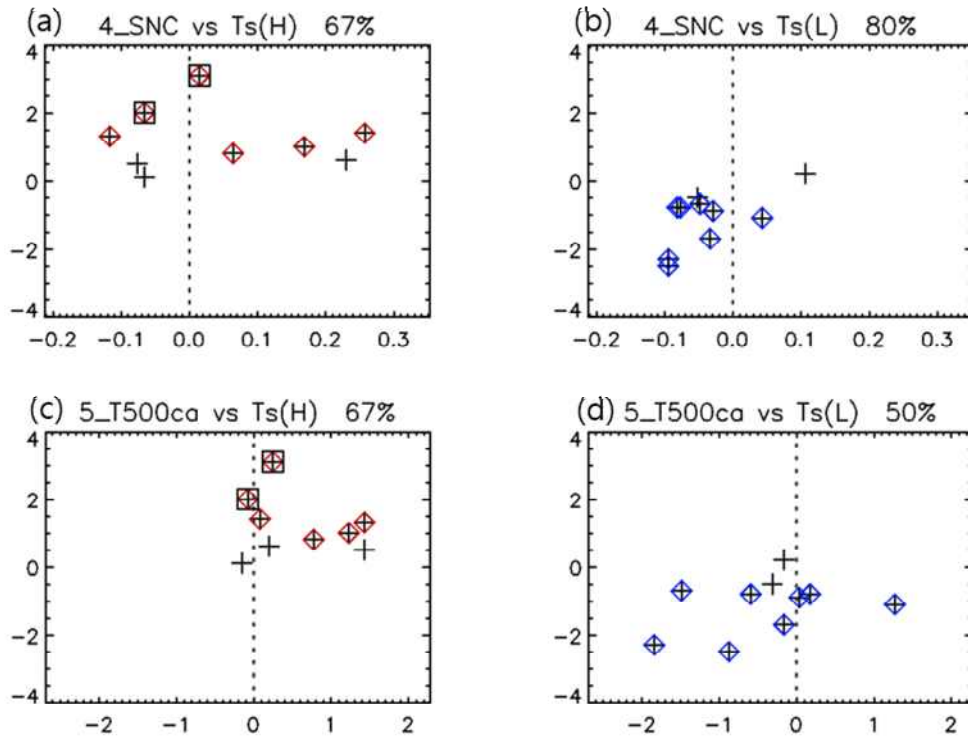


RED: 고온, BLUE: 저온, +: 평년기온, □: 1994,2018

Figure 2.9. Scatter plot (1981-2020) of 3월 유럽 Z500 (x-axis) and Ts in Jul (y-axis in $^{\circ}\text{C}$) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. Percentage in the title indicates accuracy.

3월 유럽 Z500 인자가 7월 한반도 기온을 조절하는 세부 역학과정으로 제시되었던 4월 중앙아시아 눈덮임과 5월 중앙아시아 중층 기온의 경우 역시 67%의 정확도를 보였다(Figure 2.10). 특히 5월 중앙아시아 중층 기온(5_T500ca)의 경우 1994년과 2018년에 평년과 유사하거나 평년 이상의 값이 관찰되었다.

5월 대륙의 기온이 높을수록 남아시아 몬순이 활발할 가능성이 높을 것으로 예상되는 가운데 6월 SMI 지수(6_SMI in Figure 2.11a)는 78%의 높은 ACC를 보여 위의 추측과 일치하는 결과를 보인다. 이때 남중국해와 필리핀해 북부 지역에 대류(6_OLRwp) 역시 활발해지며 78%의 ACC를 보이는데, 북서태평양 몬순 지수(6_WNPMD)와도 역시 78%의 높은 ACC를 보인다(Figure 2.11c and e). 한편 지난 40년간(1981-2020) 6월 남아시아 몬순 지수(6_SMI)와 남중국해/필리핀해 북부 지역 대류 지수(6_OLRwp)가 0.08의 상관지수를 보여 서로 관련성이 낮았다. 하지만 3월 유럽 Z500이 강할 경우 남아시아 몬순이 활발해지고 남중국해/필리핀해 북부 지역 대류가 강해지는 경향성이 존재하는 것으로 보이며 이러한 특성이 나타나는 이유에 대한 추가 분석이 필요하다.



RED: 고온, BLUE: 저온, +: 평년기온, □: 1994,2018

Figure 2.10. Scatter plot (1981-2020) of snow cover fraction anomalies over the central Asia in April (x-axis) and Ts in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for air temperature anomalies over the central Asia in May. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.

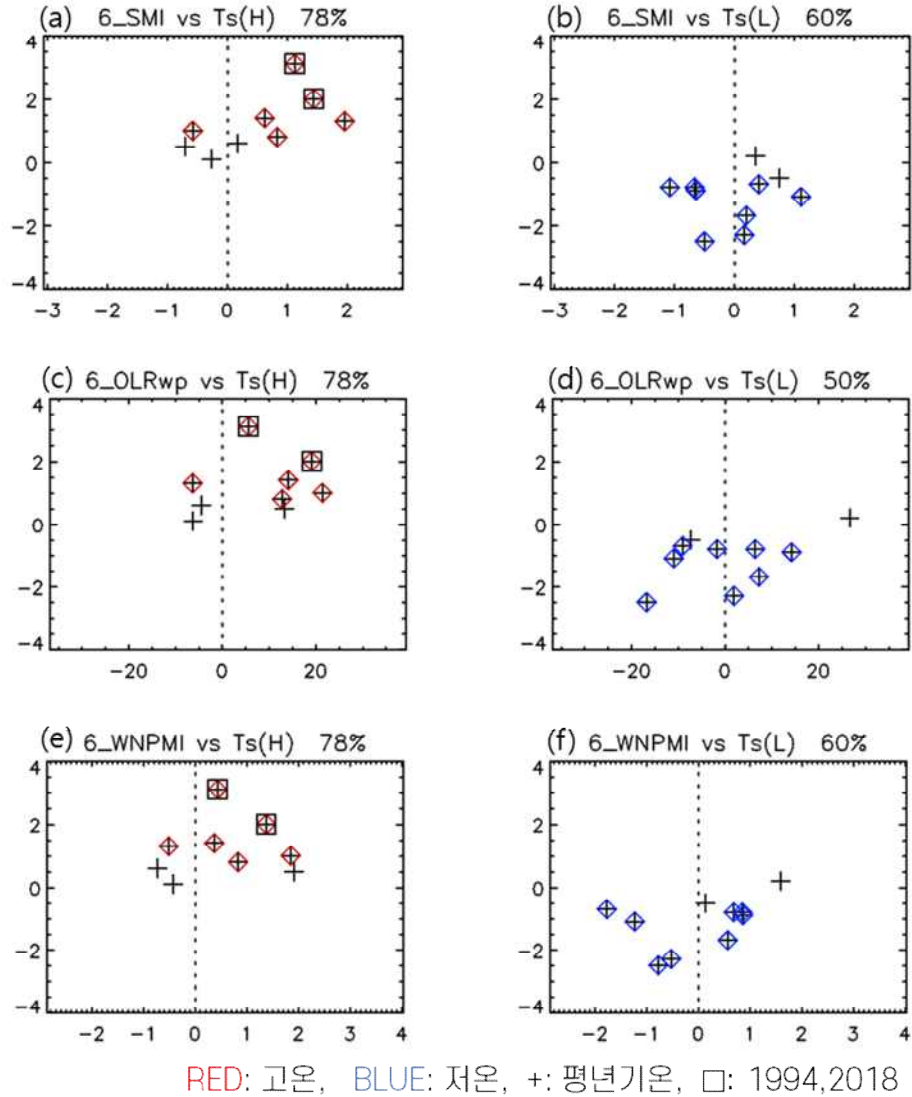


Figure 2.11. Scatter plot (1981-2020) of South Asian Monsoon index (SMI) anomalies in June (x-axis) and Ts in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for OLR anomalies over the western tropical Pacific in June. (e) and (f) are for Western North Pacific Monsoon index (WNPMI) anomalies in June. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.

7월에는 남아시아 몬순 지수(7_SMI)와 78%를, 남중국해와 필리핀해 북부 대류 지수(7_OLRwp)와는 89%의 ACC를 보인다(Figure 2.12a and c). 특히 7_OLRwp의 경우 평년보다 높을 때는 5회의 고온을, 평년보다 낮을 때는 3회의 평년 기온을 기록하여 총 9회의 케이스에 대하여 8회 적중하는 결과를 보여 89%의 높은 ACC를 기록하였다.

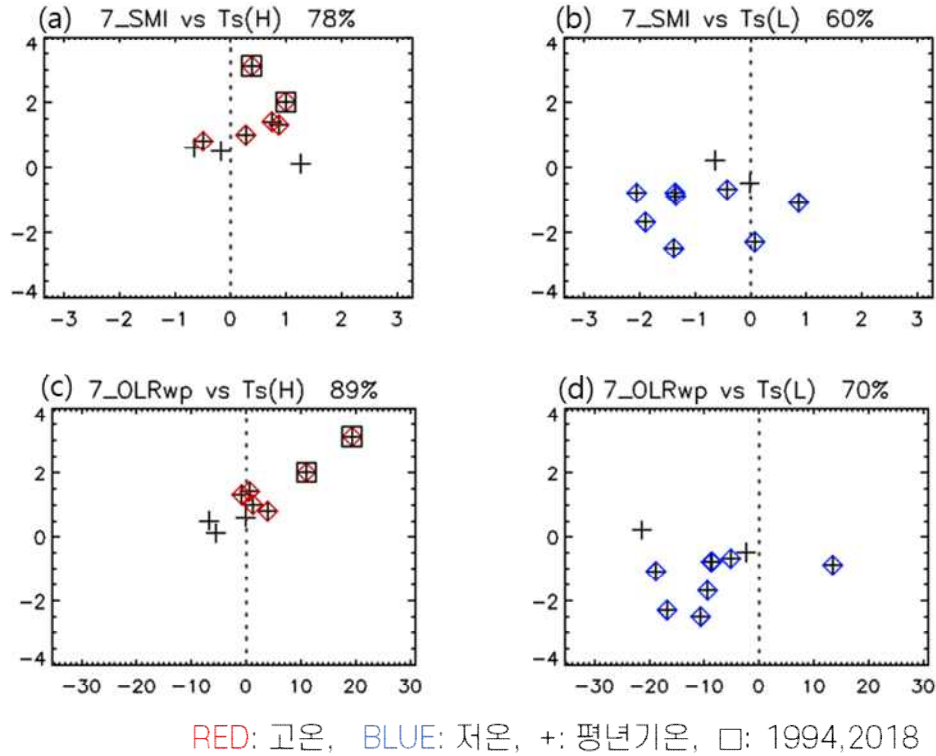


Figure 2.12. Scatter plot (1981-2020) of South Asian Monsoon index (SMI) anomalies in July (x-axis) and Ts in July (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (c) and (d) are for OLR anomalies over the western tropical Pacific in July. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.

상기의 결과들은 3월 유럽 Z500 인자가 강할 경우 봄철 중앙아시아의 눈덮임을 줄여 그 지역의 대륙 기온을 초여름에 상승시켜 6월 남아시아 몬순을 평년보다 더 활발하게 유도, 인도~벵골만~북부 필리핀해에 이르는 지역에 대류를 활발하게 하는 세부 역학과정들을 통하여 (남북방향의 로스비파 전파를 통해) 7월에 한반도에 고기압 편차와 고온을 유도한다는 사실을 뒷받침해 준다. 인도 몬순 지수(IMI)를 포함한 다양한 몬순 인자를 함께 테스트하였으나(Figure 2.1) SMI가 가장 높은 ACC를 보였으며 6월 P-J Index의 경우에는 56%의 ACC로 상대적으로 낮은 정확도를 보였다(그림 없음).

앞서 설명했듯이(Figure 2.6) 남북 방향의 로스비파 전파에 더해 대서양으로부터의 동서 방향 파동 전파 또한 한반도의 7월 고온에 기여하는데(Figure 2.6) 특히 1990년 이후에 7월의 EA 및 SCAN 지수의 한반도 7월 기온과 각각 유의미한 상관관계를 갖는다($r=0.39$ 와 0.40 as in Table 5). 1990년 이후의 기간 동안 EA와 SCAN은 남아시아 몬순 및 대류 변동성과 관련성이 높는데(Table 2.5) 7월 EA 지수의 경우 6월 남아시아 몬순 지수와 유의미한 양의 상관지수를 보이는 반면 7월 SCAN 지수의 경우 7월 남중국해/필리핀해 OLR과 유의미한 음의 상관지수를 보인다. 이 결과는 1990년대 이후 남아시아 몬순 및 서태평양 대류 변동성이 7월 대서양 및 유

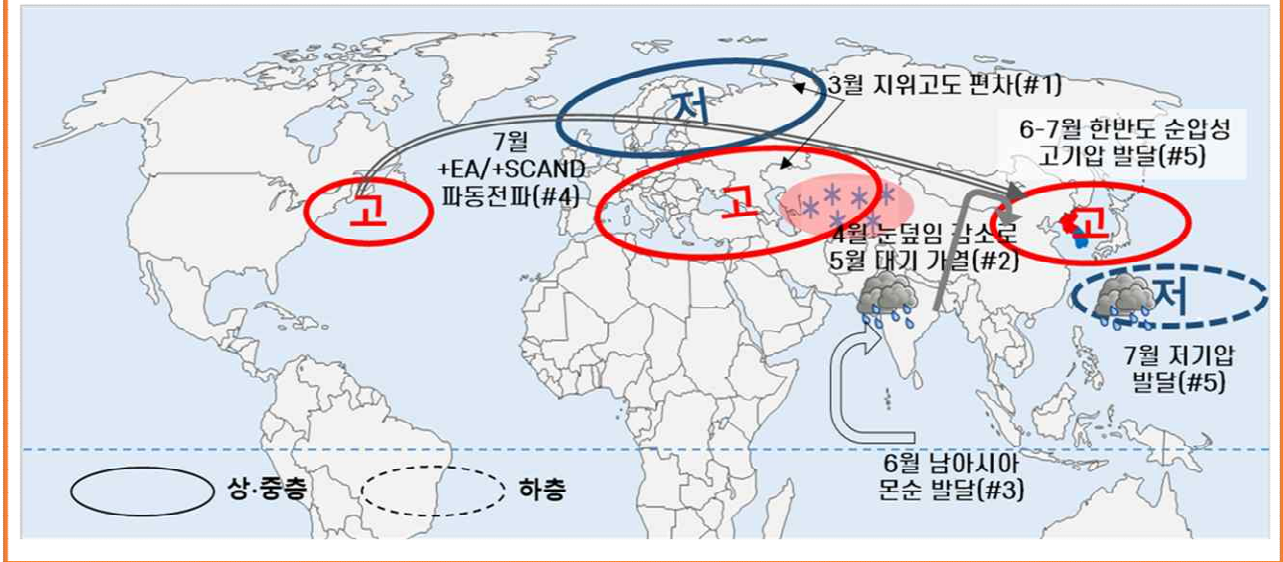
라시아 파동전파와 연관되어 있고 특히 3월 유럽 Z500 예측인자와 관련되어 이러한 특성이 잘 나타난다는 것을 의미하며 이러한 연관성에 대한 심도있는 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Table 2.5. Correlations of East Atlantic pattern (EA) and Scandinavia pattern (SCAN) in Jul with key variables for 1990-2020.

Index	EA in JUL	SCAN in Jul
Ts in Jul	0.39*	0.40*
3월 유럽 Z500	0.32	0.35*
6_SMI	0.37*	0.24
7_SMI	0.32	-0.08
6_OLRwp	-0.30	-0.31
7_OLRwp	-0.20	-0.51*

상기의 결과를 바탕으로 양의 3월 유럽 Z500 예측인자가 7월의 한반도에 고온을 유도하는 중요 세부 역학과정에 대한 모식도와 스토리라인을 작성하였다(Figure 2.13). 또한 역학적 중요성과 높은 ACC를 기반으로 다음과 같은 감시인자를 선정하였는데 5월 인도 북부의 고온, 6월 남아시아 몬순 활발, 6월 남중국해 대류 활발의 세 인자이며 각 인자에 대한 정확도(ACC)를 숫자 및 그래프로 표시하였다(Figure 2.14). 앞서 언급했듯이, 그래프에서 감시인자가 예측인자와 음의 관계를 갖는 경우(예, 남중국해 OLR) 독자의 편의성을 위해 (-1.0)을 곱하여 양의 값을 갖도록 만든 후 ACC를 계산하고 그래프로 표시하였다.

양의 3월 유럽 Z500 & 7월 고온 발생 상세 역학과정



- **(남아시아 몬순 발달)** 3월 유라시아에 지위고도 쌍극자가 발생하여(#1) 4월 중앙아시아에 눈덮임이 감소하면 5월 대기가 가열됨(#2)에 따라 대륙-해양 기온차가 증가하여 6~7월 남아시아 몬순이 발달함(#3).
- **(대서양 파동전파)** 7월 대서양에서 유라시아로 양의 East Atlantic 또는 Scandinavia 패턴의 동서방향 파동을 전파시켜(#4) 동아시아에 순압성 고기압, 일본 동쪽에 순압성 저기압을 유도함(#5)
- **(한반도)** 상기 서술된 남아시아 몬순에 의한 남북방향 파동전파(CGT 유사)와 대서양으로부터의 동서방향 파동전파의 중첩으로 한반도에 순압성 고기압이 발달하여 고온이 발생함(#5)
- **(ENSO 연관성)** 이전 겨울 약한 라니냐가 지속될 경우(남아시아 몬순 및 열대 서태평양 저기압 발달 호조건) 7월 고온 예측성 좋음

Figure 2.13. Schematic diagram of underlying mechanisms of positive phases of 3월 유럽 Z500 and impacts on Korean temperature in July.

감시인자 및 정확도(0.75σ 기준)

고온	3월	5월	6월	7월
상세 역학과정 (몬순 발달)	높은 3월 유럽 Z500	인도 북부 중층 대기 가 열	남아시아 몬순 활발	남아시아 몬순 활발
변수 및 지역	3월 유럽 Z500	500hPa Tair 60-90E 30-50N	V850-V200 70-110E 10-30N	V850-V200 70-110E 10-30N
정확도	67%	67%	78%	78%
상세 역학과정 (WP 대류 발 달)			남중국해 대류 활발	남중국해 대류 활발
변수 및 지역			OLR 115-140E 10-20N	OLR 115-140E 10-20N
정확도			78%	89%
상세 역학과정 (대서양 파동)				유라시아 파동전파
변수 및 지역				EA or SCAND
정확도				67%, 78%

* RED: 평년 이상, BLUE: 평년 이하

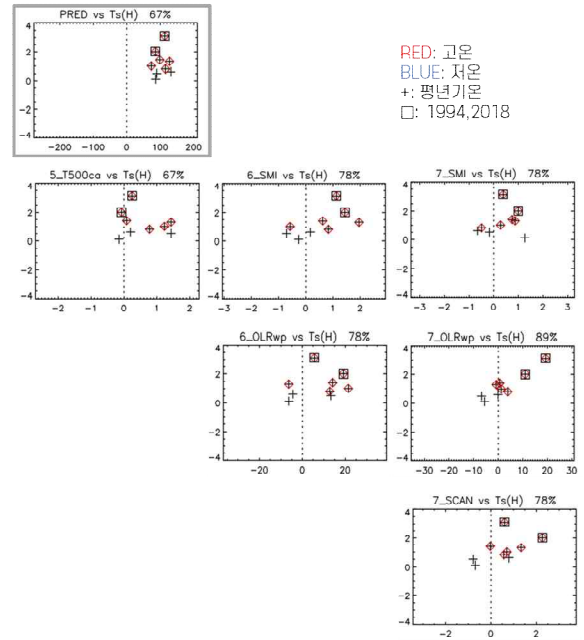


Figure 2.14. Monitoring indices and their accuracies of positive phases of 3월 유럽 Z500. In the scatter plots, relationships between the predictor and detail-process indices are adjusted to be positive.

3월 유럽 Z500 인자가 -0.75σ 보다 낮은 음의 합성해(Table 2.2) 경우 양의 합성해와 반대로 6~7월에 남아시아 몬순이 평년에 비해 약하고 남중국해 및 필리핀해 대류가 억제되는 특성을 보인다(Figure 2.15e and h). 이때 대서양 및 유라시아 지역에서는 6월에 멕시코만의 SST가 평년 이하임에 따라(Figure 2.15f) 7월에 멕시코만에 대류가 억제되어 음의 SCAN이 나타나는 특징을 보인다(Figure 2.15와 Figure 2.6d). 예측인자의 ACC를 살펴보면 음의 합성해에는 총 10 경우 중 8 경우에 저온이 나타나(Table 2.3) 80%의 높은 ACC를 보인다(Figure 2.9b). 역학과정 지수의 ACC는 4월 중앙아시아 눈덮임(4_SNC), 6월 멕시코만 SST(6_SSTna), 7월 멕시코만 대류(7_OLRna)의 경우 각각 80%, 80, 90%로 다른 지수들에 비해 높은 ACC를 보인다(각각 Figure 2.6b, 2.10b, and 2.16d). 따라서 6월 남아시아 몬순 억제(6_SMI, ACC=60% in Figure 2.11b) 보다는 4월 중앙아시아의 많은 눈과 6월 멕시코만의 저온 SST를 감시하는 것이 더 바람직할 것으로 추측된다. 이러한 비선형적인 결과를 고려하고 종합하여 3월 유럽 Z500 인자의 음의 값에 대한 모식도, 스토리라인, 감시인자를 Figure 2.17과 2.18에 도시하였다.

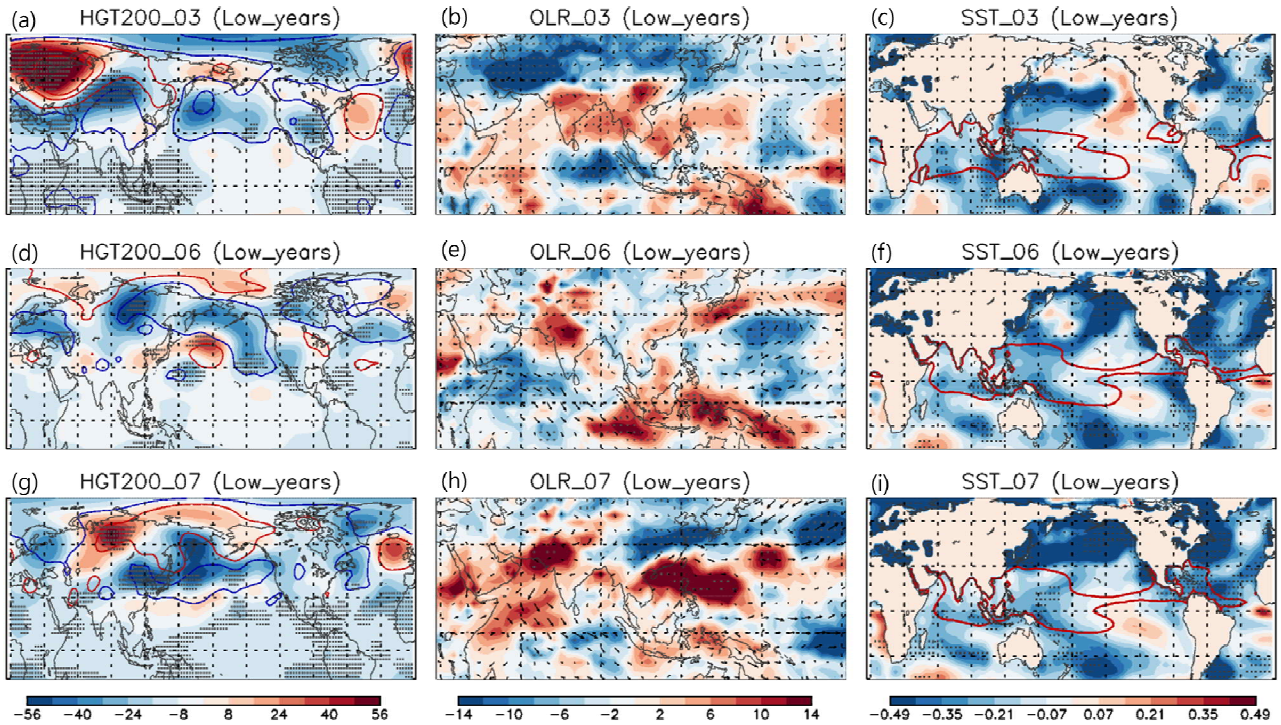


Figure 2.15. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of March in the negative composite years of 3월 유럽 Z500. (d), (e), and (f) are for June, and (g), (h), and (i) are for July. In (a), (d), and (g), countour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), and (i), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

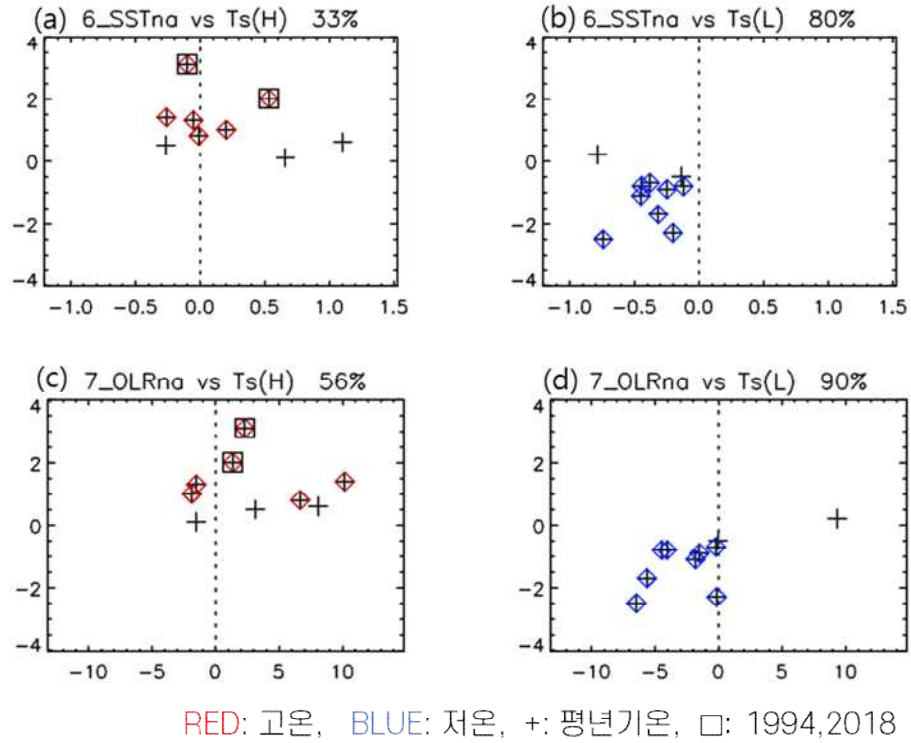
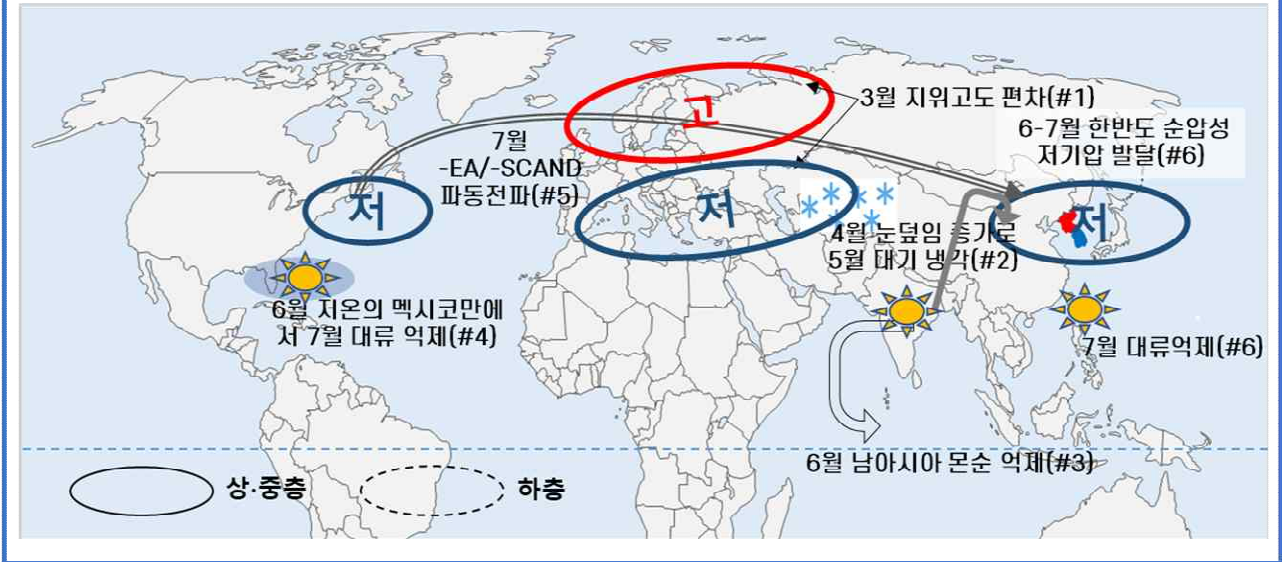


Figure 2.16. Scatter plot (1981-2020) of SST anomalies over the North Atlantic in June (x-axis) and Ts in Jul (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3 월 유럽 Z500. (c) and (d) are for OLR anomalies over the North Atlantic in July. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.

음의 3월 유럽 Z500 & 7월 저온 발생 상세 역학과정



- **(남아시아 몬순 억제)** 3월 유라시아에 지위고도 쌍극자가 발생하여(#1) 4월 중앙아시아에 눈덮임이 증가하면 5월 대기가 냉각됨(#2)에 따라 대륙-해양 기온차가 감소하여 6~7월 남아시아 몬순이 억제됨(#3).
- **(대서양 파동전파)** 6월 미국 멕시코만 동쪽에 해수면온도가 낮으면 7월 그지역에 대류가 억제되어(#4) 유라시아로 음의 East Atlantic 또는 Scandinavia 패턴의 동서방향 파동을 전파시켜(#5) 동아시아에 순압성 저기압, 필리핀 북쪽에 대류 억제를 유도함(#6)
- **(한반도)** 상기 서술된 남아시아 몬순에 의한 남북방향 파동전파와 대서양으로부터의 동서방향 파동전파의 중첩으로 한반도에 순압성 저기압이 발달하여 저온이 발생함(#6)
- **(ENSO 연관성 및 예측성)** ENSO와의 연관성은 낮으며 저온 예측성 좋았으나 최근 예측성은 감소 추세
- **(타인자 연관성)** 4월 북미 Z850과 유의미한 양의 상관성

Figure 2.17. Schematic diagram of underlying mechanisms of negative phases of 3월 유럽 Z500 and impacts on Korean temperature in July.

감시인자 및 정확도(0.75σ 기준)

고온	3월	4월	6월	7월
상세 역학과정 (몬순 억제)	낮은 3월 유럽 Z500	중앙아시아 많은 눈	남아시아 몬순 억제	남아시아 몬순 억제
변수 및 지역	3월 유럽 Z500	SNC 45-90E 35-55N	V850-V200 70-110E 10-30N	V850-V200 70-110E 10-30N
정확도	80%	80%	60%	60%
상세 역학과정 (WP 대류 억제)				남중국해 대류 억제
변수 및 지역				OLR 115-140E 10-20N
정확도				70%
상세 역학과정 (대서양 파동)			멕시코만 낮은 SST	멕시코만 대류 억제
변수 및 지역			SST 270-290E 20-40N	OLR 270-290E 20-30N
정확도			80%	90%

* RED: 평년 이상, BLUE: 평년 이하

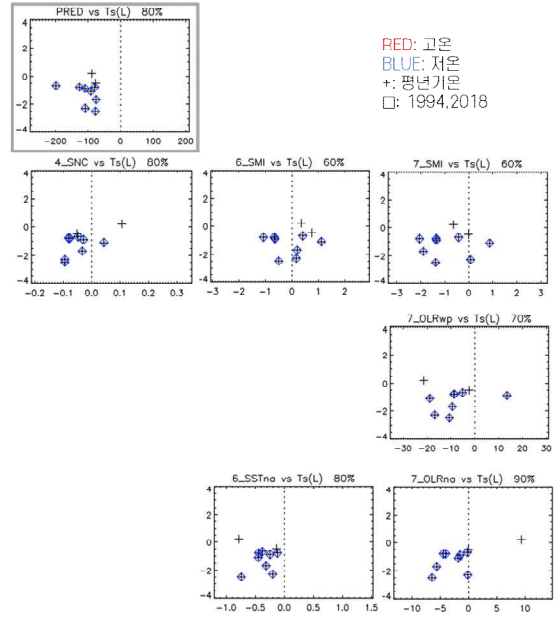


Figure 2.18. Monitoring indices and their accuracies of negative phases of 3월 유럽 Z500. In the scatter plots, relationships between the predictor and detail-process indices are adjusted to be positive.

2.4. 4월 열대 SST 삼극자 인자 세부 역학과정 규명

4월 열대 서태평양에 양의 SST 편차, 호주 서안에 양의 SST 편차, 동인도양에 음의 SST 편차가 나타날 경우(Table 2.6, 4월 열대 SST 삼극자) 한반도에 7월 고온 경향성이 있으며 반대의 경우 저온 경향성이 존재한다고 알려져 있다(APCC 2021). 4월 열대 SST 삼극자 인자의 강도별 예측성 테스트 결과 0.75σ의 경우 양의 값만 고려한 경우 40%, 음의 값만 고려한 경우 69%의 정확도를 갖으며 음의 값 경우 인자의 기준 강도가 높을수록 ACC가 증가하지만 양의 값은 증가 경향이 두드러지 않으며 특히 인자가 1.3σ 이상일 경우 오히려 낮은 정확도(29%)를 보였다.

Table 2.6. ACC (%) of “4월 열대 SST 삼극자” predictor with respect to different thresholds for the past 40 years (1981-2020).

Threshold	Positive	Negative	All
±0.43σ	38	56	45
±0.75σ	40	69	54
±1.00σ	40	60	48
±1.30σ	29	75	45

4월 열대 SST 삼극자와 7월 한반도 기온의 scatter plot에서 볼수 있듯이(Figure 2.19) $\pm 0.75\sigma$ 기준으로 값이 낮을 때는 저온 또는 평년 기온을 기록하며 고온의 경우가 없으나 값이 높을때는 고온과 평년 기온 뿐 아니라 저온을 기록한 해(1989, 1999, Table 2.7)도 존재하여 저온에 대한 예측성이 더 좋았다.

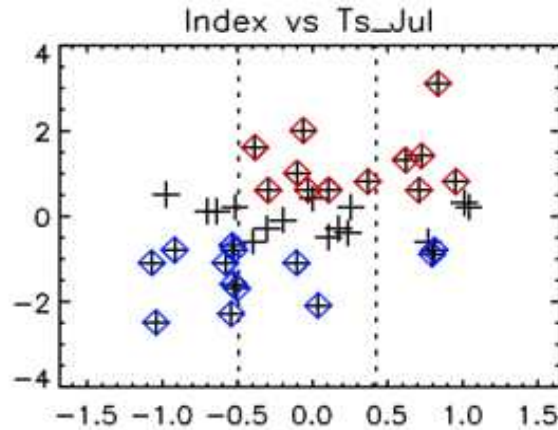


Figure 2.19. Scatter plot (1981-2020) of the “4월 열대 SST 삼극자” (x-axis) with Ts in Jul (y-axis). Vertical dashed lines indicate the $\pm 0.75\sigma$ values of the predictor. Red (blue) diamond shows above-normal (below-normal) temperature in July while cross shows near-normal temperature in July.

Table 2.7. Composite years of “4월 열대 SST 삼극자” with the threshold of 0.75σ . Colors indicate July-mean temperature in South Korea. Red, black and blue colors indicate above-normal, near-normal, below-normal temperature in July.

Composites	4월 열대 SST 삼극자												
Positive composite years	1984	1988	1989	1994	1999	2000	2008	2011	2012	2013			
Negative composite years	1982	1983	1986	1987	1990	1992	1993	1996	2003	2005	2006	2007	2019

0.75σ 의 기준으로 값이 높았던 해(양의 합성해)와 낮았던 해(음의 합성해)를 구분하고 (Table 2.7) 각각의 합성해에 대한 월별 대기/해양 변수의 합성장 및 주요 역학과정을 살펴보았다. 양의 합성해에는 4월 필리핀해에 양의 SST 편차, 호주 서안에 양의 편차, 인도양에 음의 편차가 발달한 것을 확인할 수 있으며 이러한 SST 삼극자 형태는 5월까지 이어진다(Figure 2.20c). 이때 열대 중태평양에는 강한 음의 SST 편차가 관찰되며 Central Pacific(CP) 타입 라니냐의 형태를 보인다. 호주 서안의 SST 양의 편차와 인도양 음의 편차는 7월까지 지속되는 반면 필리핀해 양의 편차는 6~7월에 약화된다(Figure 2.20i and l).

남중국해와 필리핀해에는 4월부터 7월까지 저층 저기압 편차가 나타나며 대류가 발달하는

모습이 지속적으로 나타나는데 시간에 따라 조금씩 북진하는 모습을 보인다(Figure 2.20b, e, h, and k). 동인도양에서는 5~6월에 남풍이 발달하고 인도~벥골만~남중국해에 대류가 활발해지는 남아시아 몬순이 평년보다 강하게 발달하는 특징이 관찰된다(Figure 2.20e and h). 6월과 7월에는 한반도 남쪽인 필리핀해 북부의 대류 활발로 인한 로스비파의 남북 전파로 인해 동아시아에 순압성 고기압 편차가 발달하는 P-J 패턴이 나타나는데 7월에는 고기압의 중심이 오호츠크해까지 북진하게 된다(Figure 2.20g and j). 7월 한반도에는 여전히 고기압 편차의 영향에 놓이지만 통계학적으로 유의미하지는 않기 때문에(Figure 2.20j) 4월 열대 SST 삼극자의 양의 값에 대한 예측 정확도가 비교적 낮은 것으로 보인다(Table 2.6).

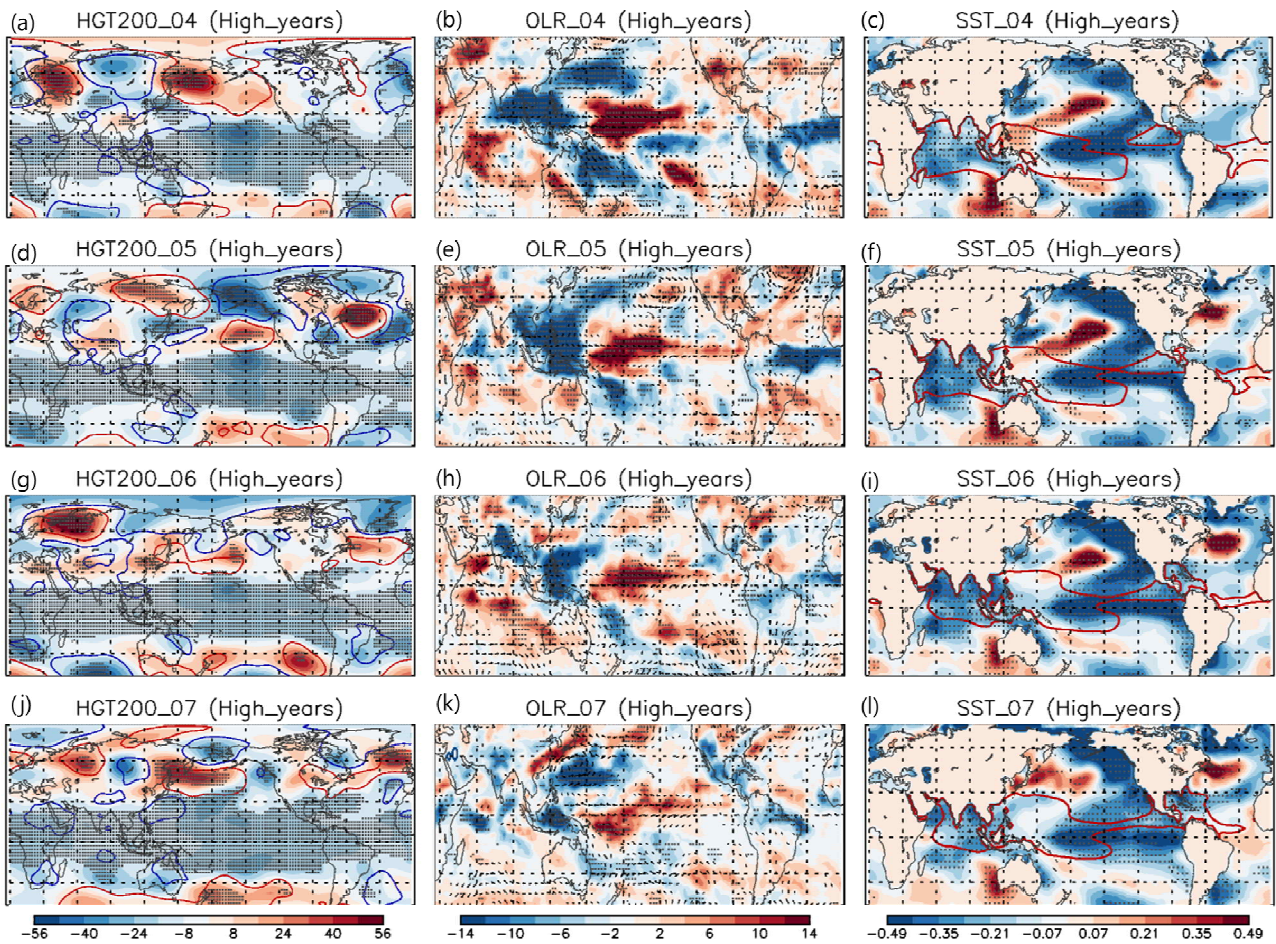


Figure 2.20. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of April in the positive composite years of 4월 열대 SST 삼극자. (d), (e), and (f) are for May, (g), (h), and (i) are for June and (j), (k), and (l) are for July. In (a), (d), (g), and (j), contour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), (i) and (l), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

4월 열대 SST 삼극자 예측인자와 다양한 월별 ENSO 지수와의 상관관계를 살펴보면

(Figure 2.21) 7월의 NINO 지수보다는 1월의 NINO 지수와 상관관계가 매우 강하며 NINO12 지수보다는 NINO4 지수와의 상관관계가 높은 형태를 보인다. 이 결과는 이전 겨울철에 CP 타입 라니냐가 발생했을 때 양의 4월 열대 SST 삼극자가 발생하고 7월에 한반도에 고온편차를 발생시키는 것을 의미한다.

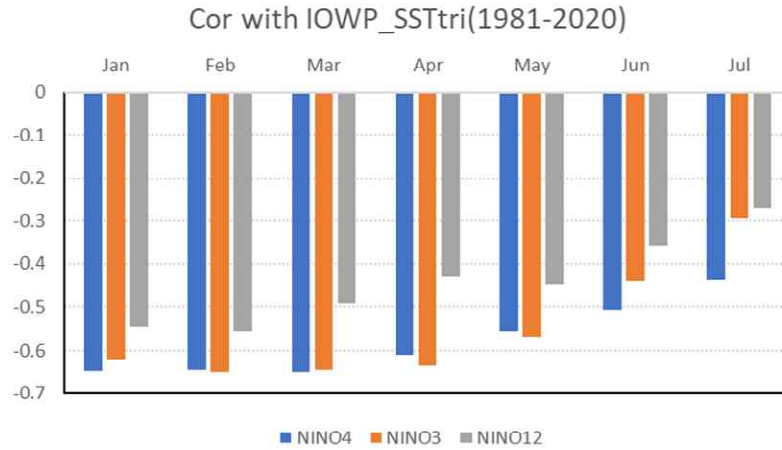


Figure 2.21. Correlations of 4월 열대 SST 삼극자 with monthly ENSO indices. Blue, orange, and grey bars are of NINO4, NINO3, and NINO12, respectively.

4월 열대 SST 삼극자 인자가 -0.75σ 보다 낮은 음의 합성해(Table 2.7) 경우 양의 합성해와 반대로 4월 필리핀해에 음의 SST 편차, 호주 서안에 음의 편차, 동인도양에 양의 편차가 나타나는데(Figure 2.22c) 필리핀해 음의 편차와 동인도양의 양의 편차는 비교적 약하며 호주 서안의 음의 편차만이 6월까지 강하고 유의미하게 유지된다(Figure 2.22i and l). 중태평양에는 양의 SST 편차가 나타나지만 강도도 약하며 통계적 유의성도 나타나지 않아 음의 합성해에 유의미한 CP타입 라니냐가 나타나는 형태(Figure 2.20)와 차이를 보인다.

남중국해와 필리핀해에는 4월부터 7월까지 대류가 억제되는 모습이 지속적으로 나타나는 데(Figure 2.22b, e, h, and k) 특히 5월에서 7월까지 동인도양에서는 북서풍이 발달하는등 남아시아 몬순이 평년보다 약한 특징이 관찰된다. 7월에는 한반도 남쪽인 필리핀해 북부의 대류 억제로 인한 로스비파의 남북 전파로 인해 동아시아에 순압성 저기압 편차가 발달하는 음의 P-J 패턴이 나타나게 되고 결과적으로 한반도에 7월 저온 편차를 유도하게 된다(Figure 2.22g and j). 한편 동아시아 저기압성 편차의 중심이 한반도와 일본에 위치하고 통계적으로 유의미하기 때문에(Figure 2.22j) 양의 합성해에 비해 음의 합성해에 예측 정확도가 더 높게 나타나는 것으로 보인다(Table 2.6 and 2.7). 4월 열대 SST 삼극자 예측인자의 음의 값에 대한 정확도는 69% 인 반면 양의 값에 대한 정확도는 40%로 낮게 나타났다(Figure 2.23).

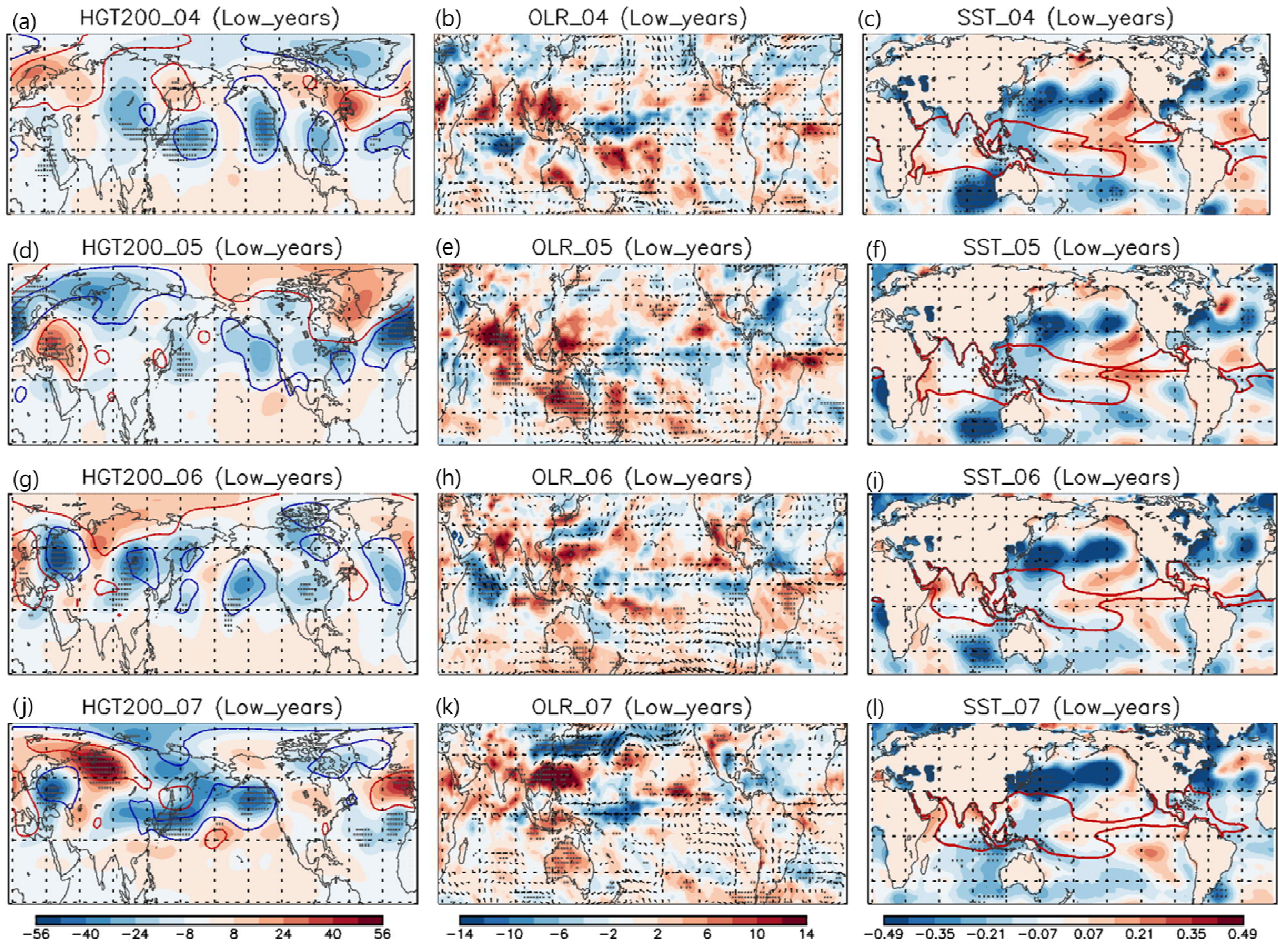


Figure 2.22. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of April in the negative composite years of 4월 열대 SST 삼극자. (d), (e), and (f) are for May, (g), (h), and (i) are for June and (j), (k), and (l) are for July. In (a), (d), (g), and (j), contour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), (i) and (l), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

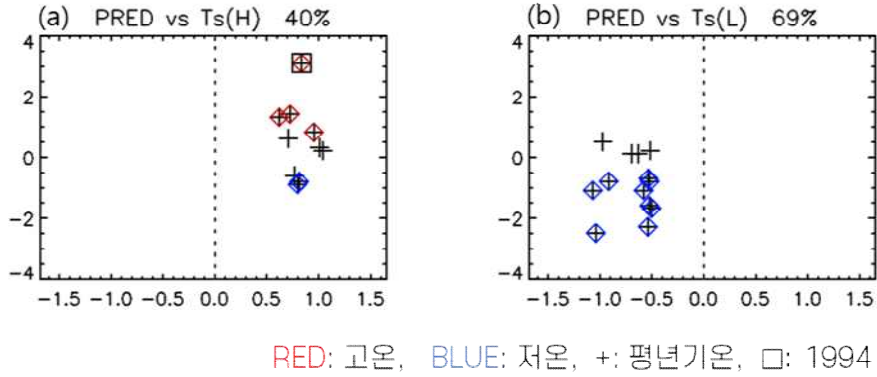
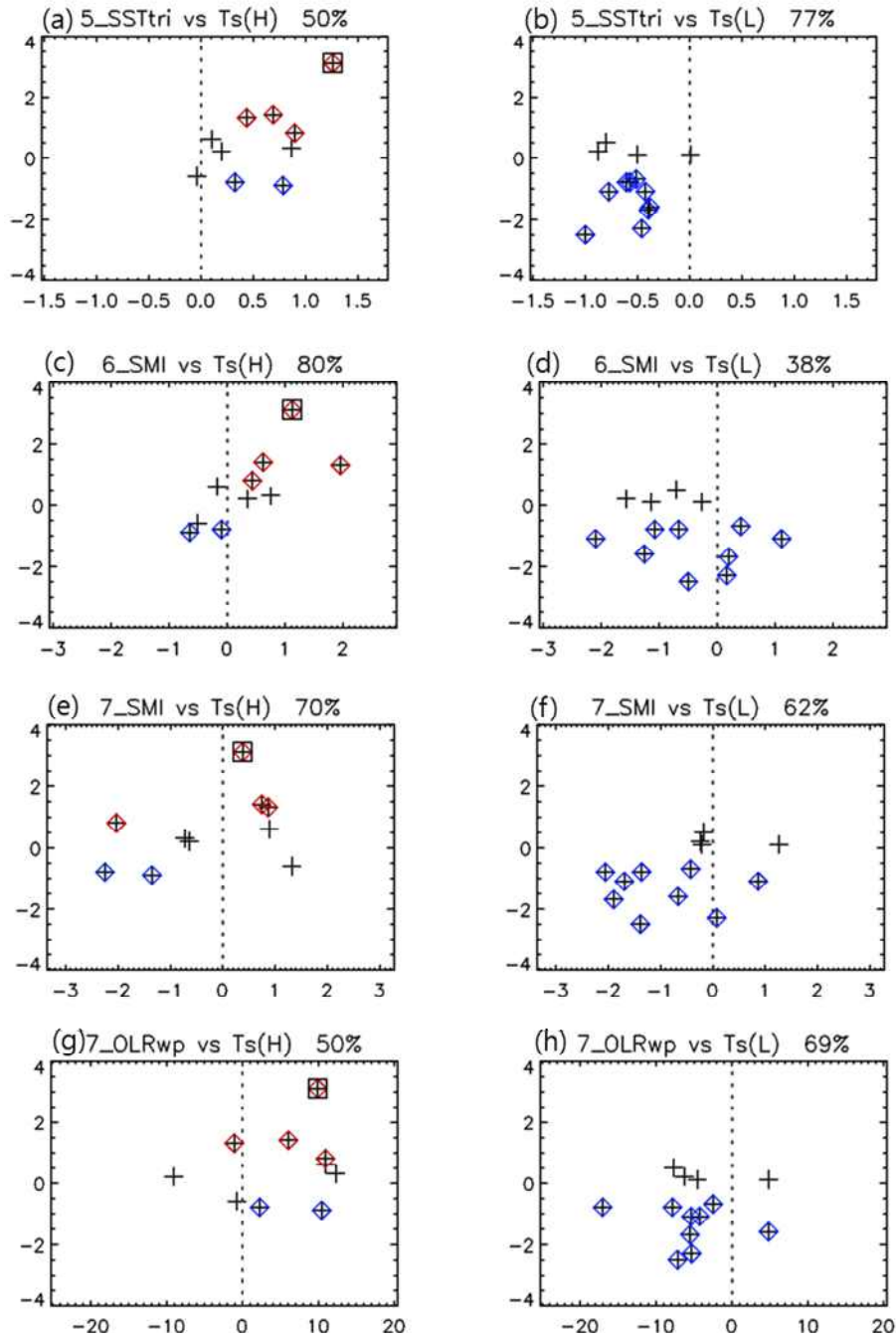


Figure 2.23. Scatter plot (1981-2020) of 4월 열대 SST 삼극자 (x-axis) and Ts in Jul (y-axis in $^{\circ}\text{C}$) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 3월 유럽 Z500. Percentage in the title indicates accuracy.

상기 기술된 역학과정들을 지수화 하고(Table 2.8) 각 지수에 대한 정확도를 계산하였다 (Figure 2.24). 예측인자가 0.75σ 이상일 때 6월과 7월 남아시아 몬순 지수(6_SMI, 7_SMI)는 각각 80%와 70%의 높은 ACC를 보였는데(Figure 2.24c and e) 이는 4월 열대 SST 삼극자가 40%의 ACC를 갖는 것과 큰 차이를 보인다. 즉 4월 열대 SST 삼극자가 양의 값이며 6월에 남아시아 몬순 지수가 양일 때는 고온 가능성이 매우 높고, 4월 열대 SST 삼극자가 양의 값이나 6월에 남아시아 몬순 지수가 음일 때는 고온 가능성(또는 신뢰도)이 낮음을 의미한다.

예측인자가 -0.75σ 이하일 경우엔 5월의 열대 SST 삼극자(5_SSTtri)가 높은 77%의 ACC를 (Figure 2.24b), 7월의 인도-서태평양 대류 억제가 69%의 높은 ACC를 갖으나(Figure 2.24g) 6월 SMI의 경우 38%의 낮은 ACC를 갖는다(Figure 2.24d). P-J 패턴은 7월 양의 합성해에 50%의 ACC를 보였으나 6월에는 낮은 ACC를 보였기에 감시인자로 선택되지 않았다.



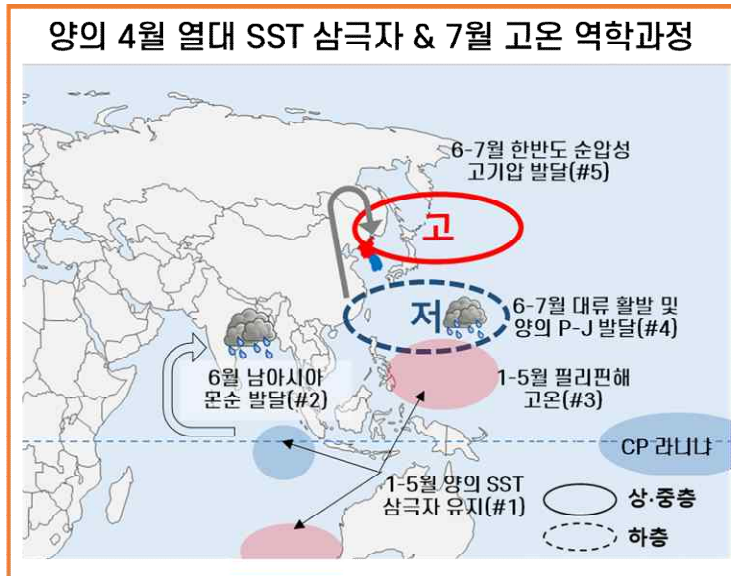
RED: 고온, BLUE: 저온, +: 평년기온, □: 1994

Figure 2.24. Scatter plot (1981-2020) of tropical SST tripole anomalies in May (x-axis) and Ts in July (y-axis, °C) for (a) the positive composite years and (b) the negative composite years of 4 월 열대 SST 삼극자. (c) and (d) are South Asian Monsoon index (SMI) anomalies in June. (e) and (f) are South Asian Monsoon index (SMI) anomalies in July. (g) and (h) are for OLR anomalies over the western tropical Pacific in July. Percentage in the title indicates accuracy. Relationships between Ts in July and detail-process indices are adjusted to be positive.

Table 2.8. Descriptions of potential detail-process indices for “4월 열대 SST 삼극자”

Index	Variable	Time	Region	Relationship
5_SSTtri	SST	May	[90~120E, 25~40S] + [120~140E, 0~20N] - [90~110E, 10S~5N]	Pos
6_SMI	V850-V200	June	70-110E, 10-30N	Pos
7_SMI	V850-V200	July	70-110E, 10-30N	Pos
7_OLRwp	OLR	July	115-140E, 10-20N	Neg

상기의 결과를 바탕으로 양의 4월 열대 SST 삼극자 예측인자가 7월의 한반도에 고온을 유도하는 중요 세부 역학과정에 대한 모식도/스토리라인 감시인자/정확도를 작성하였다(Figure 2.25과 2.26). 감시인자는 높은 정확도를 보인 6월 남아시아 몬순 지수이다.



- **(남아시아 몬순 및 필리핀해 대류 활발)** 라니냐가 약하게 유지되는 가운데 4월에 필리핀해 및 호주 서안에 고온이, 동인도양에 저온이 발달한 경우(#1) 인도양 저온이 봄철 인도양 전역으로 확장되어 6-7월 남아시아 몬순이 활발해짐(#2). 필리핀해에서는 고온이 5월까지 유지됨에 따라(#3) 6-7월에 필리핀해 북부에 저기압 및 대류가 발달하여(#4) 6-7월 양의 P-J 패턴이 발달하여 동아시아 북동부에 고기압을 유도(#5), 한반도에 고온이 발생함. (호주 서안 고온이 7월까지 유지)
- **(ENSO 연관성 및 예측성)** 대부분 이전 겨울 라니냐 해(CP 타입), 저온의 경우에 비해서 예측성 낮지만 최근 예측성 좋음(2019-2022)
- **(타인자 연관성)** 3-4월 북중국 눈덮임이 많음

Figure 2.25. Schematic diagram of underlying mechanisms of positive phases of 4월 열대 SST 삼극자 and impacts on Korean temperature in July.

감시인자 및 정확도(0.75 σ 기준)

고온	4월	6월	7월
상세 역학과정	높은 4월 열대 SST 삼극자	남아시아 몬순 활발	남아시아 몬순 활발
변수 및 지역	4월 열대 SST 삼극자	V850-V200 70-110E 10-30N	V850-V200 70-110E 10-30N
정확도	40%	80%	70%

* RED: 평년 이상, BLUE: 평년 이하

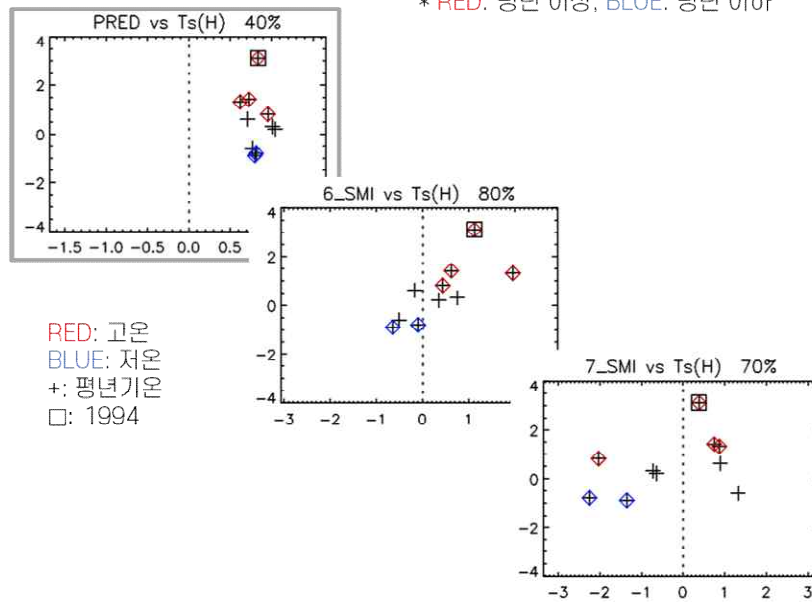
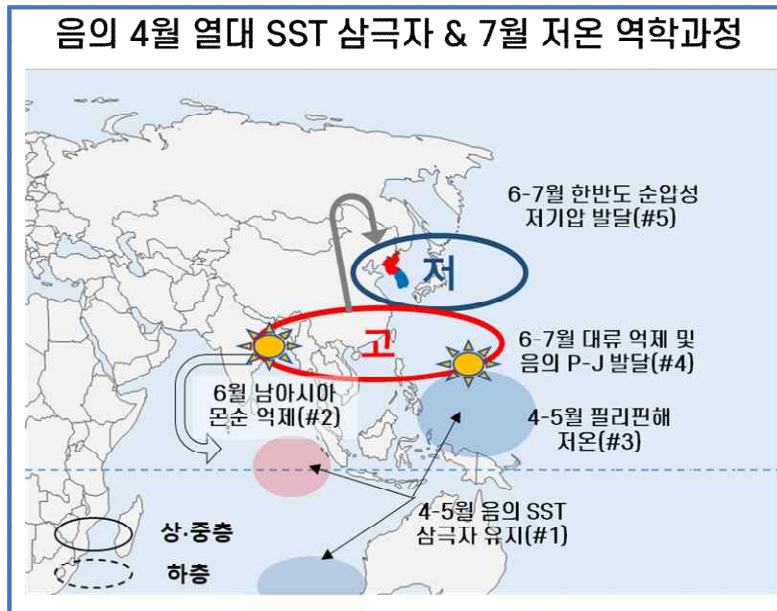


Figure 2.26. Monitoring indices and their accuracies of positive 4월 열대 SST 삼극자. In the scatter plots, relationships between the predictor and detail-process indices are adjusted to be positive.

음의 4월 열대 SST 삼극자 예측인자가 7월의 한반도에 저온을 유도하는 중요 세부 역학 과정에 대한 모식도/스토리라인 감시인자/정확도를 Figure 2.27과 2.28에 도시하였다.



- **(남아시아 몬순 및 필리핀해 대류 억제)** 4월에 필리핀해 및 호주 서안에 저온이, 동인도양에 고온이 발달한 경우(#1) 인도양 고온이 봄철 북쪽으로 확장되어 6-7월 남아시아 몬순이 억제됨(#2). 필리핀해에서는 저온이 5월까지 유지되고(#3) 6-7월에 필리핀해 북부에 고기압 및 대류가 억제되어(#4) 음의 P-J 패턴이 발달하여 6-7월 동아시아에 저기압을 유도(#5), 한반도에 저온이 발생함 (호주 서안 저온이 7월까지 유지)
- **(ENSO 연관성 및 예측성)** 약한 엘니뇨 유지 해가 많음, 저온 예측성 높으며 최근 예측성도 좋음 (2019-2022)
- **(타인자 연관성)** 3-4월 북중국 눈덮임이 적음

Figure 2.27. Schematic diagram of underlying mechanisms of negative phases of 4월 열대 SST 삼극자 and impacts on Korean temperature in July.

감시인자 및 정확도(0.75σ 기준)

저온	4월	5월	7월
상세 역학과정	낮은 4월 열대 SST 삼극자	낮은 5월 열대 SST 삼극자	인도-서태평양 대류 억제
변수 및 지역	4월 열대 SST 삼극자	5월 열대 SST 삼극자	RED 75-90E 15-30N & 120-140E 10-25N
정확도	69%	77%	69%

* RED: 평년 이상, BLUE: 평년 이하

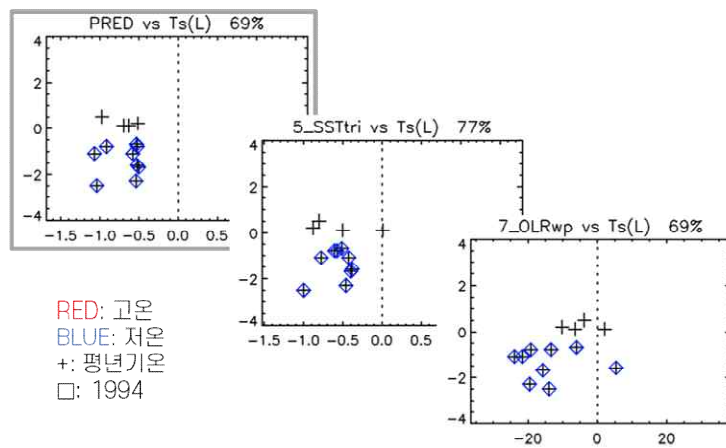


Figure 2.28. Monitoring indices and their accuracies of negative phases of 4월 열대 SST 삼극자. In the scatter plots, relationships between the predictor and detail-process indices are adjusted to be positive.

상기의 결과들은 4월 열대 SST 삼극자 예측인자가 강할 경우 6월 남아시아 몬순을 평년보다 더 활발하게 유도하고 필리핀해의 봄철 고온 및 여름철 남중국해/필리핀 북부 대류를 강화하여 7월 P-J 패턴을 유도하는 세부 역학과정들을 통하여 7월에 한반도 기온에 영향을 미친다는 사실을 의미한다. 3월 유럽 Z500 인자와 마찬가지로 남아시아 몬순 지수와 연관성이 높으나 3월 유럽 Z500 인자는 대서양에서의 파동전파가 중요한 반면 4월 열대 SST 삼극자는 P-J 패턴 발달이 더 중요한 것으로 사료된다.

이러한 예측인자 모식도, 스토리라인, 및 감시인자 결과물을 통해 7월 기온 예측인자가 한반도 7월 기온을 조절하는 각각의 세부 역학과정을 제시하였다. 이러한 정보들은 예측 시점 이후 감시에 있어서 상기의 역학과정 및 감시인자를 모니터링하는 경우에 예측인자의 신뢰도가 향상될 수 있음을 의미하며 7월 기온 예측성 향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

2.5. 예측인자 중요도 진단 방안

위에서 제시된 예측인자의 세부 역학과정 및 감시인자는 개별 예측인자의 예측 신뢰도를 향상시킬 수 있으나 현업에서 예측을 수행 할 경우에는 다양한 예측인자가 존재한다. 따라서 그 인자들이 예측하는 결과들은 동일 할 수가 없기 때문에 예측정보 통합을 위해 어떤 인자를 더 신뢰할 것인지를 판단할 수 있는 근거가 필요하다. 인자의 중요도를 진단하는 방안은 다양한데 과거 예측성이나 인자의 강도를 우선적으로 고려하는 비교적 간단한 통계적인 접근 방법이 있을 수 있다. 본 연구에서는 통계적 접근보다 역학적 접근 방안으로써, 예측인자의 중요도를 진단하기 위해 예측인자들의 세부 역학과정을 활용하는 방안을 테스트하고자 하며 7월의 중요 예측인자인 3월 유럽 Z500과 4월 열대 SST 삼극자의 세부 역학과정 분석 결과를 활용하였다.

3월 유럽 Z500과 4월 열대 SST 삼극자의 세부 역학과정 분석 결과, 두 예측인자 모두 6월에 남아시아 몬순 강도의 조절을 통하여 한반도 고온을 유도하는 과정이 중요한 것으로 밝혀졌다. 한반도 7월 평균 기온 편차와 6월 남아시아 몬순 지수(6_SMI)의 시계열을 살펴보면 1990년대 이후 6_SMI가 높을수록 7월 기온이 높은 경향성이 나타나는데 이는 두 값의 산포도에서도 관찰할 수 있다(Figure 29a and b). 11년 이동 기간 상관관계에서도 최근들어 상관관계가 증가한 사실이 확인된다(Figure 29c). 다만 6_SMI는 비선형성이 강하며 한반도 특히 고온의 경우 밀접히 관련되어 있다.

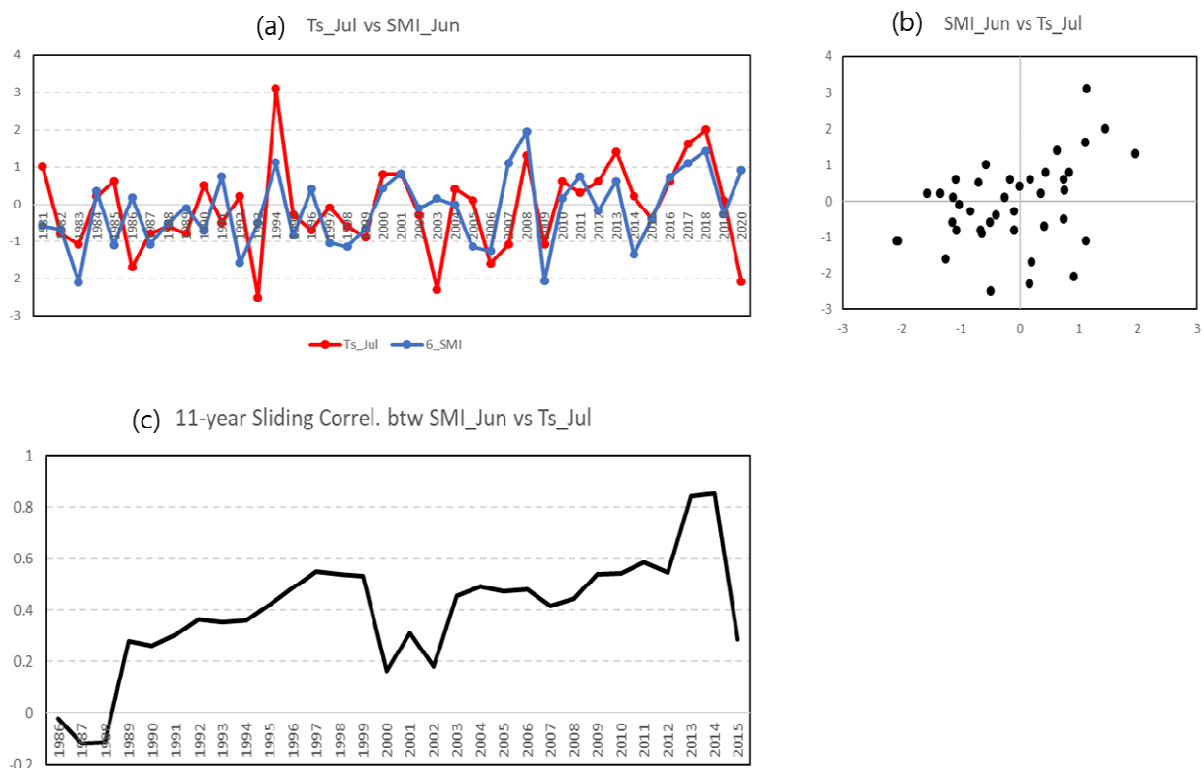


Figure 2.29. (a) Interannual time series (1981-2020) of Ts in July (red) and SMI in June (blue), (b) their scatter plot, and (c) their 11-year moving window correlations.

6_SMI가 한반도 고온에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위해 6_SMI가 0.75σ 이상인 해 (1991, 1994, 2001, 2007, 2008, 2011, 2013, 2016, 2017, 2018, 2020)의 월별 대기 및 해양 합성장을 분석하였다(Figure 2.30). 우선 3월에 지중해 및 중앙아시아에 고기압 편차, 북유럽에는 저기압 편차가 나타나 양의 3월 유럽 Z500의 형태가(Figure 2.30a), 4월에 필리핀해 SST 고온, 동인도양 저온, 호주 서안에 고온이 나타나 양의 4월 열대 SST 삼극자의 형태가 관찰된다(Figure 2.30f). 이 결과는 6월 남아시아 몬순이 강한 해에는 두 예측인자가 동시에 양의 값을 갖는다는 사실을 의미한다.

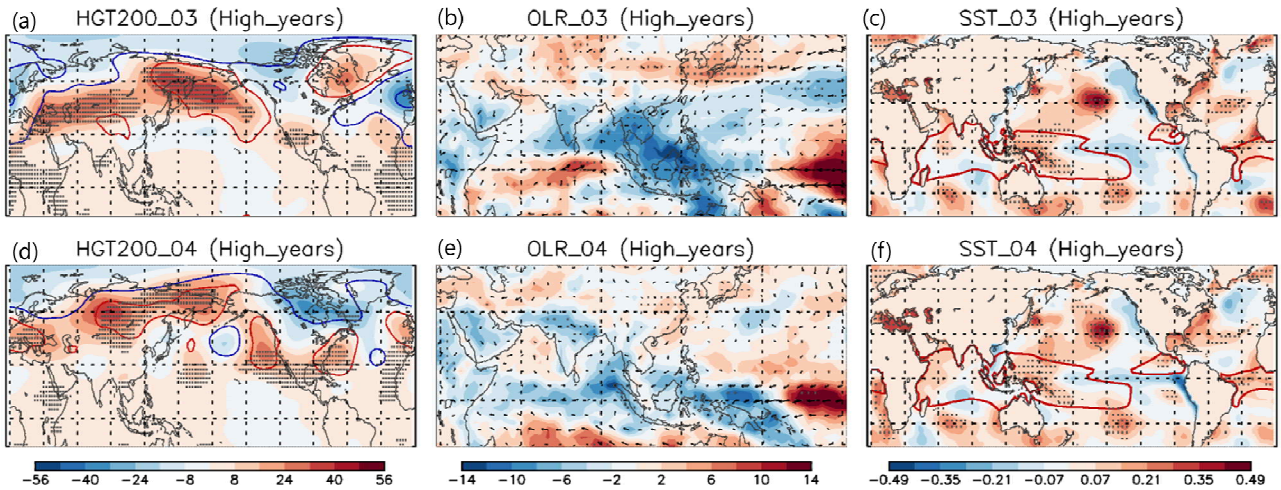


Figure 2.30. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of March in the positive composite years of South Asian Monsoon Index in June. (d), (e), and (f) are for April. In (a), and (d), contour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), and (i), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

6월 몬순 지수가 높을 때는 5월부터 동인도양에 남풍 편차가 발달하여 6월에는 아라비아 해 및 인도 대륙에 대류가 활발해진다(Figure 2.31b and e). 이에 따라 상층에는 고기압 편차가 발달하고 풍하측인 한반도에도 고기압 편차가 발달하는 CGT 형태의 파동 전파가 발달하게 되며 이러한 특성은 7월에도 유사하게 나타난다(Figure 2.31d and g). 이에 더해 7월에 대서양에서 동아시아로 양의 SCAN 패턴과 유사한 파동 전파가 관찰된다.

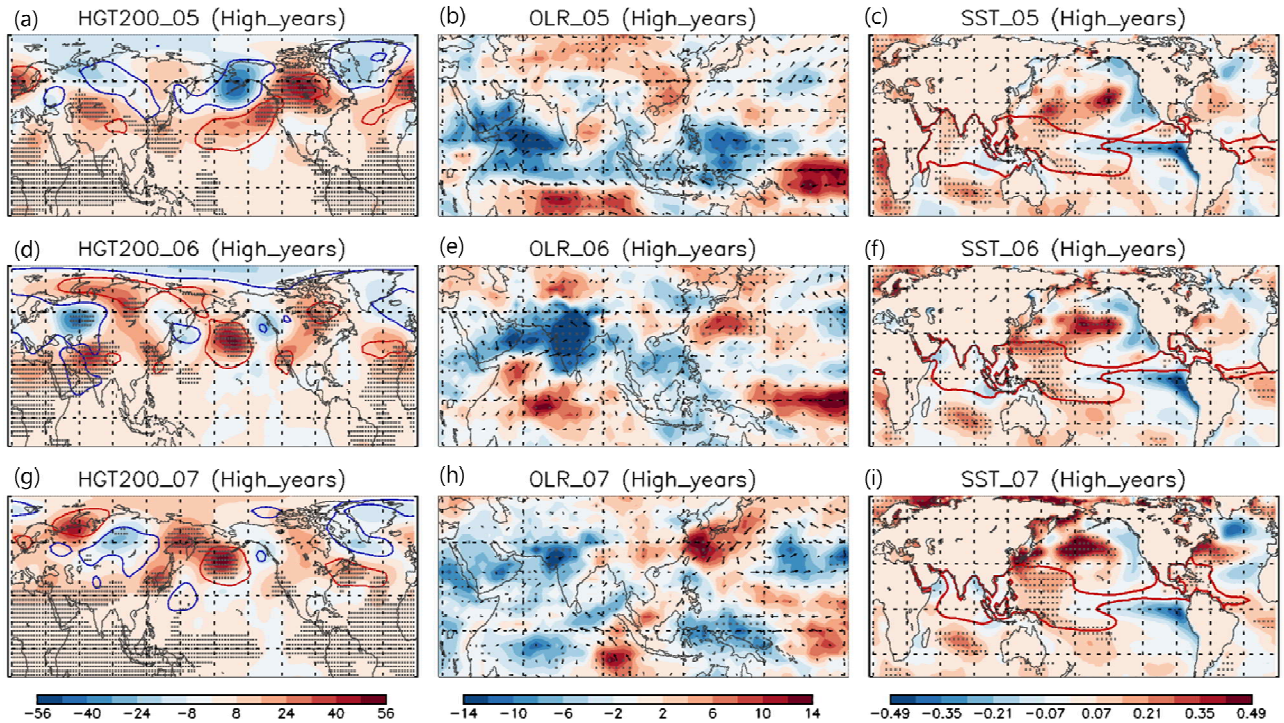


Figure 2.31. Composite maps of anomalous (a) Z200, (b) OLR with winds at 850 hPa, and (c) SST of May in the positive composite years of South Asian Monsoon Index. (d), (e), and (f) are for June, and (g), (h), and (i) are for July. In (a), (d), and (g), countour lines are 850 hPa geopotential anomalies with the levels of [-45, -30, -5, 5, 30, 45]; the first three are in blue and the last three are in red. In (c), (f), and (i), red line indicates climatological 28 °C level. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

7월 기온 예측인자 중 4월 열대 SST 삼극자와 3월 유럽 Z500는 가장 높은 예측성을 보이는 인자들인 반면(Table 2.1) 서로의 상관관계는 유의미하지 않다($r=0.13$, 181-2020). 따라서 두 인자의 조합과 그에 따른 감시인자의 경향성에 따라 7월 기온 예측 결과를 분석해 볼 필요가 있다. 이 분석에서는 예측인자의 기준점을 0.43σ 로 하향하였는데 그 이유는 0.73σ 를 기준으로 할 경우 해당되는 경우의 수가 너무 적었기 때문인데 0.73σ 기준으로 했을 경우 결과도 유사하였다.

첫 번째로 4월 열대 SST 삼극자와 3월 유럽 Z500의 두 인자가 모두 양의 값일 경우에는 감시인자인 6_SMI 역시 모두 양의 값을 보였기 때문에 고온 예측 신뢰도가 높아진다. 실제로 한반도 7월 기온은 모두 고온을 기록하였다(Table 2.9).

Table 2.9. Values of predictors and their monitoring variables when 4월 SST 삼극자 and 3월 유럽 Z500 are both positive with respect to the 0.43σ threshold.

	4월 SST 삼극자	3월 유럽 Z500	6_SMI	Ts_Jul
1994	0.83	113.18	1.12	3.11
2000	0.95	35.74	0.44	0.81
2001	0.37	115.54	0.83	0.81
2008	0.62	127.39	1.95	1.31
2013	0.72	98.43	0.62	1.41

두 인자가 모두 음인 경우, 4월 열대 SST 삼극자가 음일 경우의 감시인자인 5_SSTtri와 3월 유럽 Z500이 음일 경우의 감시인자인 6_SSTna 역시 모두 음의 값이었다. 이 경우 세부 역학과정을 고려하는 경우 저온 예측 신뢰도가 높아진다. 실제 한반도 7월 기온은 모두 저온을 기록하였다(Table 2.10).

Table 2.10. Values of predictors and their monitoring variables when 4월 SST 삼극자 and 3월 유럽 Z500 are both negative with respect to the 0.43σ threshold.

	4월 SST 삼극자	3월 유럽 Z500	5_SSTtri	6_SSTna	Ts_Jul
1982	-0.92	-79.95	-0.61	-0.44	-0.79
1986	-0.50	-75.29	-0.40	-0.32	-1.69
1987	-0.52	-126.15	-0.57	-0.12	-0.79
1993	-1.04	-77.35	-1.00	-0.74	-2.49
1996	-0.53	-198.17	-0.51	-0.38	-0.69
2003	-0.54	-108.68	-0.46	-0.20	-2.29
2007	-0.58	-91.55	-0.42	-0.45	-1.09

두 예측인자가 서로 반대 부호로, 4월 열대 SST 삼극자가 양이고 3월 유럽 Z500이 음일 경우를 분석하였다. 3월 유럽 Z500이 음일 경우의 감시인자 6_SSTna는 모두 음으로 신뢰도가 높은 반면 4월 열대 SST 삼극자가 양일 경우의 감시인자인 6_SMI는 1984년을 제외하고 모두 음의 값으로 신뢰도가 높지 않았다. 실제로 7월 기온은 대부분 평년 기온을 기록하였으며 1998년은 저온을 기록하였다(Table 2.11).

Table 2.11. Values of predictors and their monitoring variables when 4월 SST 삼극자 is positive and 3월 유럽 Z500 are negative with respect to the 0.43σ threshold.

	4월 SST 삼극자	3월 유럽 Z500	6_SMI	6_SSTna	Ts_Jul
1984	1.04	-88.72	0.35	-0.78	0.21
1985	0.11	-66.60	-1.09	-0.02	0.61
1988	0.77	-38.83	-0.51	-0.78	-0.59
1999	0.80	-109.44	-0.65	-0.25	-0.89
2012	0.71	-59.38	-0.17	-0.05	0.61

두 예측인자가 서로 반대 부호로, 4월 열대 SST 삼극자가 음이고 3월 유럽 Z500이 양인 경우는 한 케이스(2019년)로 4월 열대 SST 삼극자가 음일 경우의 감시인자인 5_SSTtri는 0, 3월 유럽 Z500이 양인 경우의 감시인자인 6_SMI는 음의 값이어서 두 인자 모두 신뢰도가 높지 않았다. 결과적으로 2019년의 기온은 평년 기온을 기록하였다(Table 12).

Table 2.12. Values of predictors and their monitoring variables when 4월 SST 삼극자 is negative and 3월 유럽 Z500 are positive with respect to the 0.43σ threshold.

	4월 SST 삼극자	3월 유럽 Z500	5_SSTtri	6_SMI	Ts_Jul
2019	-0.70	85.99	0.00	-0.26	0.11

이러한 결과는 다수의 예측인자의 통합 시 세부 역학과정을 분별하고 감시하여 인자의 신뢰도를 조절하는 경우 한반도 7월 기온의 예측성이 향상될 수 있음을 의미하며 이러한 방법으로 인자의 중요도 선별 또한 가능함을 암시한다. 현업 예측시에는 모델 예측 결과 등을 활용하여 감시인자의 재현성을 추정하여 예측인자 중요도를 판별할 수 있을 것으로 기대된다.

2.6 요약

본 연구에서는 예측인자의 세부 역학과정을 밝혀 낼 수 있는 프레임워크를 개발하고 이를 7월 기온 예측인자에 적용하였다. 세부 역학과정 분별을 위한 프레임워크는 강도별 예측성 민감도 테스트, 비선형 합성장 분석을 통한 잠재 세부 역학과정 선정, 독립적 합성장 분석 및 한반도 영향 평가등을 포함한 잠재 역학과정 예측성 검증, 예측 정확도와 물리-역학 메커니즘 타당성을 고려한 중요 역학과정 제시, 역학적 중요성과 높은 예측 정확도를 고려한 감시인자 선정의 프로세스로 이루어져 있다. 상기 프레임워크 적용을 통해 예측인자별 순차적 세부 역학과정 모식도와 스토리라인, 감시인자 및 예측 정확도의 결과물을 얻을 수 있었다.

7월 기온 예측인자 중 예측성이 높고 상관성이 낮은 3월 유럽 Z500와 4월 열대 SST 삼극

자에 대해 상기의 프레임워크를 적용하여 각각의 세부 역학과정을 규명하였다. 3월 유럽 Z500 인자가 강한 양의 값을 갖는 경우 4월 중앙아시아 눈덮임 감소 및 5월 대륙 기온 상승을 통해 6월 남아시아 몬순을 활발하게 유도하는 한편 7월에 양의 SCAN 패턴과 유사한 대서양에서 동아시아로의 파동전파를 유도한다. 전자는 CGT 유사 파동 전파를 통해, 후자는 동서 방향의 파동 전파를 통해 한반도에 순압성 고기압을 강화시켜 고온을 유발하는 것으로 나타났다. 3월 유럽 Z500가 0.73σ 이상일 경우 6월의 강한 남아시아 몬순 지수를 감시하는 것이 신뢰도를 높일 것으로 보인다. 3월 유럽 Z500 인자가 반대로 음의 값을 갖는 경우에는 남아시아 몬순 지수 대신 4월 중앙아시아에 많은 눈과 6월 멕시코만의 낮은 SST를 감시하는 것이 예측 신뢰도를 높인다.

4월 열대 SST 삼극자가 강한 양의 값을 갖는 경우에는 겨울철 CP 타입 라니냐가 약하게 유지되는 가운데 4월에 필리핀해 및 호주 서안에 고온이, 동인도양에 저온이 발달한 경우 인도양 저온이 봄철 인도양 전역으로 확장되어 6~7월에 남아시아 몬순이 활발해진다. 필리핀해에는 고온이 5월까지 유지된 후 6~7월에 필리핀해 북부에 저기압 및 대류가 발달하여 6-7월 양의 P-J 패턴이 발달하여 동아시아 북동부에 고기압을 유도, 한반도에 고온이 발생하게 된다. 4월 열대 SST 삼극자가 0.73σ 이상일 경우 예측 정확도는 40% 밖에 되지 않으나 6월의 남아시아 몬순 지수를 감시하는 경우 80%의 예측 정확도를 보인다. 음의 값을 갖는 경우에는 5월의 열대 SST 삼극자를 감시할 필요가 있다.

예측인자의 세부 역학과정을 분별하고 감시하는 일은 다양한 예측 정보의 중요도 판별을 가능하게 하는 것으로 나타났다. 즉, 3월 유럽 Z500와 4월 열대 SST 삼극자의 경우, 감시인자의 경향성에 따라 인자의 예측에 가중치를 부여했을 때 예측 신뢰도가 향상될 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 다수의 예측인자의 통합 시 세부 역학과정을 분별하고 감시하여 인자의 중요도 선별이 가능함을 의미하며 이를 통해 예측 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3. 겨울철 신규 예측인자 선정 및 원격상관 제시를 통한 기후 감시·분석 정보 개선

3.1. 연구배경

열대 태평양에서 발생하는 엘니뇨-남방진동(El Nino-Southern Oscillation; ENSO)은 지구상에서 관측되는 가장 큰 규모의 기후 변동성으로 전 지구의 기상 및 기후에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Bjerknes, 1969; Horel and Wallace, 1981). 특히 엘니뇨의 발생으로 인한 열대 태평양 해수면온도(sea surface temperature; SST)의 변동은 원격상관을 통해 우리나라를 포함한 동아시아의 겨울철 기후 시스템에 영향을 준다. 엘니뇨의 영향으로 발생한 북서태평양의 강수 감소와 동반된 상층 저기압 편차는 로스비 파 전파를 통해 동아시아에 고기압성 편차를 유도한다. 이 동아시아의 고기압 순환의 서쪽에 위치한 남풍 편차가 유입되어 우리나라는 초겨울(11-12월)에 평년보다 기온이 높고 강수가 많은 경향이 있다 (Son et al. 2014; Kim et al. 2015; 2017; 2018; Kim and Kug, 2018). 그러나 이러한 엘니뇨의 원격상관은 1월이 되면 약화되어 우리나라의 1월 기후 예측에 어려움이 있다. 그러므로 우리나라의 1월 기후 예측에 활용할 수 있는 신규 예측인자를 선정하고 관련 원격상관 역학을 이해할 필요가 있다.

특히 우리나라의 겨울철 기후에 직·간접적으로 영향을 주는 동아시아의 대기 순환은 ENSO 뿐만 아니라 북태평양 진동(North Pacific Oscillation; NPO)에 의해 발생할 수 있다. NPO는 북태평양의 남북 방향으로 해면기압의 부호가 서로 다른 쌍극자 패턴으로 고위도에 위치한 북쪽 해면기압은 동시베리아에서 캐나다 서부에 이르는 반면, 저위도에 위치한 남쪽 해면기압은 아열대를 포함한 20° N 부근까지 확장되어 있다 (Rogers, 1981; Wallace and Gutzler, 1981; Linkin and Nigam, 2008). 선행연구에서는 NPO가 열대 태평양, 북미, 그리고 동아시아의 기후에 미치는 영향을 제시한 바 있다 (Chen and Wu, 2017; Pak et al. 2014; Wang et al. 2007; Yeh and Kim, 2010; Yu et al. 2012).

그러나 지금까지 NPO가 우리나라의 겨울철 기후에 미치는 영향에 대해서는 연구가 부족하다. 엘니뇨(라니냐)의 원격상관에 의해 발생한 동아시아 고기압 (저기압) 편차와 마찬가지로 NPO 역시 중위도 북태평양에 고기압 (저기압) 순환을 유도하기 때문에, 남풍 (북풍) 유입으로 인한 우리나라의 겨울철 기온 상승(하강)과 강수 증가(감소)에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 우리나라의 겨울철, 특히 1월 기온 예측을 위해 신규 예측인자로 12월 NPO를 제시하고 한 달 지연 원격상관 역학을 제시하였다. 또한 12월 NPO 지수를 이용하여 우리나라의 1월 기온 예측성을 평가하고 추가적으로 2023년의 전지구 현황을 바탕으로 우리나라의 1월 기온을 예측하였다.

3.2. 자료

3.2.1. 종관 기상 관측 시스템 자료

본 연구에서는 우리나라의 겨울철 기후 변동성을 살펴보기 위해 기상청에서 제공하는 종관 기상 관측 시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 62개 지점에서 관측된 자료를 평균하여 월 평균 기온과 강수를 분석하였다.

3.2.2. 재분석 자료

전 지구 강수 변동을 살펴보기 위해 월 평균 Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation(CMAP; Xie and Arkin, 1997)을 사용하였다. 또한 월 평균 National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy Reanalysis 2(NCEP-DOE R2; Kanamitsu et al. 2002)의 대기 자료를 사용하였다. 강수와 대기 자료의 수평 해상도는 2.5° 이다. 해수면온도는 월 평균 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5; Huang et al. 2017) 자료를 사용하였으며 2° 의 수평 해상도를 가진다. 분석 기간은 1979/80년부터 2021/22년까지 43년이고, 겨울철 기후 변동성을 보기 위해 12월과 1월에 대해 분석하였다. 그리고 모든 변수의 월별 기후 평균과 선형 장기추세가 제거되었다.

3.3. 결과

3.3.1. 기존 예측인자 (ENSO) 검증

대표적인 겨울철 예측인자인 ENSO의 우리나라 기후에 대한 예측성과 활용성을 검증하기 위해서 ENSO의 원격상관 역학을 이해할 필요가 있다. 그림 3.1은 엘니뇨 백서에서 제시된 엘니뇨 절정기 12월에 우리나라에 미치는 영향을 나타낸 모식도이다. 엘니뇨가 발생하여 적도 중·동태평양의 해수면온도(sea surface temperature; SST) 편차가 상승하면 북서태평양에 대류 활동이 감소하고, 적도 중태평양에 대류 활동이 증가한다. 북서태평양의 대류가 감소하여 하층에는 고기압성, 상층에는 저기압성 편차가 발달하는데 이 상층 저기압은 로스비 에너지 파동 전파를 통해 중위도 북태평양에 고기압성 편차를 유도한다. 그 결과 중위도 북태평양의 대기 상·하층에서 순압적 연직 구조의 고기압성 순환이 나타나며 이는 상층에서 동아시아의 기압 골 약화와 하층에서 우리나라 부근으로의 남풍 편차가 강화되는 것을 의미한다. 남풍 편차의 강화로 따뜻하고 습한 공기가 유입되어 우리나라는 12월에 평년보다 기온이 높고 강수가 많은 경향이 나타난다.

엘니뇨 뿐만 아니라 연관된 열대 대기의 변동, 특히 북서태평양의 대류 현상이 강제력으로 작용하여 우리나라의 겨울철 기후에 영향을 미치는 원격상관 패턴을 만들기 때문에 중요한 겨울철 예측인자로 활용되고 있다. 또한 전 세계적으로 현업에 사용되고 있는 역학 모형은 열대 해수면온도와 엘니뇨/라니냐에 대해 6개월 이상의 신뢰할 수 있는 예측성을 보여주고 있어

ENSO는 우리나라의 겨울철 예측인자로의 활용성이 매우 크다.

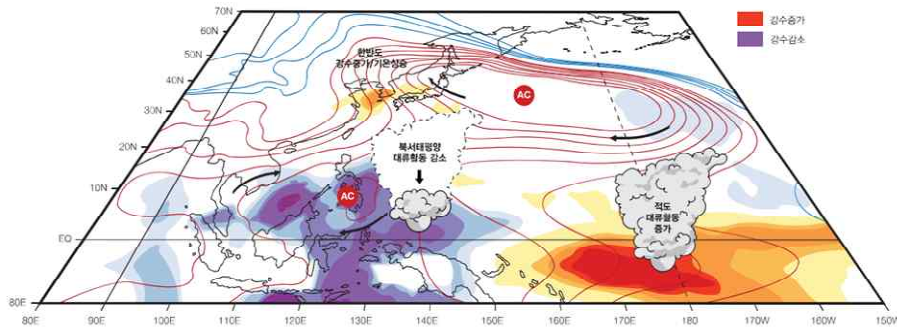


Figure 3.1. Schematic diagram for how El Niño influences the temperature and precipitation over Korean Peninsula in early winter (엘니뇨 백서).

장기예보 가이드스에서 제시된 엘니뇨와 우리나라 기온/강수의 상관성을 살펴보면 엘니뇨가 발생한 해의 12월은 평년보다 기온이 높고 강수가 많은 경향이 있다 (Table 3.1). 예를 들어 엘니뇨 해 12월은 평년보다 기온이 높은 10개 해, 평년과 비슷한 경우가 7개 해이며 평년보다 기온이 낮은 해는 관측되지 않았다. 강수 또한 평년보다 많은 10개 해, 평년과 비슷한 경우가 4개 해, 평년보다 적은 해는 3개 해로 관측되었다. 반대로 라니냐 해는 12월에 평년보다 기온이 낮고 강수가 적은 경향을 보인다 (Table 3.2).

이처럼 엘니뇨/라니냐와 우리나라 기후 관련성은 초겨울(11-12월)에 크지만, 늦겨울(1월)에 약해진다는 특징이 있다. 엘니뇨가 발생한 1월은 우리나라 기온과 강수 모두 평년과 비슷한 범위에 있으며, 라니냐 해에도 마찬가지로 평년과 비슷한 기온과 강수를 보인다. 그러므로 엘니뇨/라니냐는 우리나라의 12월 기후와 관련성이 강하지만 1월에는 약해지는 경향이 있으며, 1월 관련성이 낮은 원인을 이해하기 위해 추가적인 연구가 필요하다.

Table 3.1. Temperature and precipitation in December January during El Niño year (장기예보 가이드스; -: Below, 0: Normal, +: Above).

El Niño years	Temperature			Precipitation		
	-	0	+	-	0	+
December	0	7	10	3	4	10
January	4	9	4	5	7	5

Table 3.2. The same as in Table 3.2 but for La Nina years.

La Nina years	Temperature			Precipitation		
	-	0	+	-	0	+
December	3	4	6	4	2	7
January	2	6	5	4	4	5

엘니뇨와 관련된 12월과 1월 전 지구 패턴을 살펴보기 위해, 엘니뇨 감시구역인 11-1월 Nino3.4 (170° W-120° W, 5° S-5° N) 지역의 해수면온도 편차를 평균한 지수를 이용하여 회귀 분석 하였다 (Figure 3.2). 엘니뇨 원격상관 모식도에서 제시된 것처럼 12월에 우리나라를 포함한 동아시아 지역에 고기압성 흐름이 발생하여 고기압의 서쪽에 남풍 기류가 관측된다. 그리고 북태평양에는 강한 저기압성 흐름이 위치하며 이 저기압은 북미 대륙의 기후에 영향을 주게 된다 (Hoskins and Karoly, 1981). 그러나 1월에 중위도 북태평양의 동쪽에 위치한 저기압 순환이 강화되어 동아시아 고기압을 약화시키는 역할을 하고, 그 결과 엘니뇨가 우리나라에 미치는 영향이 약해진다. 엘니뇨와 관련된 12월과 1월 상층 지위고도 패턴의 상관관계를 계산하면 0.51의 상관계수가 나온다.

Nino3.4 지수에 회귀분석 한 해수면온도 결과에서 12월과 1월의 열대 해수면온도 상승 패턴이 유사한 것을 알 수 있으며, 두 해수면온도 패턴의 상관계수는 0.99이다. 또한 전체 분석 기간에 대한 12월과 1월 Nino3.4 지수의 상관관계를 구하면 상관계수가 0.98로 거의 비슷하게 나타난다 (그림 미제시). 그러므로 엘니뇨 변동성 자체는 12월과 1월에 시간적으로, 또 공간적으로 큰 차이가 없기 때문에 원격상관 패턴에서 차이가 나는 원인은 엘니뇨와 관련된 열대 강수의 반응에서 찾을 수 있다.

엘니뇨가 발생하면 일반적으로 적도 중태평양에 강수의 증가, 서태평양에는 강수의 감소가 나타난다. 특히 북서태평양에 위치한 음의 강수는 하층의 고기압, 상층의 저기압을 동반하여 동아시아에 고기압을 발달시키는데 중요한 역할을 한다. 엘니뇨의 반응으로 나타난 12월과 1월 강수는 비슷한 패턴을 보이지만, 강도에 차이가 나타난다. 1월에 북서태평양 음의 강수는 12월 보다 약 12% 약해지고, 적도 중태평양 양의 강수는 약 8% 강해지게 된다. 그 결과 1월에 북서태평양 음의 강수가 약화되면서 동아시아 고기압이 발달하기 어렵고, 적도 중태평양에서 강화된 양의 강수 영향으로 태평양/북미 순환형태 (Pacific North America; PNA) 패턴 발생에 좋은 조건으로 작용한다. 그러므로 열대 태평양에서 엘니뇨의 반응으로 발생한 12월과 1월 강수의 작은 차이가 동아시아로의 원격상관에서 큰 차이를 만들 수 있음을 의미한다.

REGR(Nino3.4, Z300/PRCP/Z300)

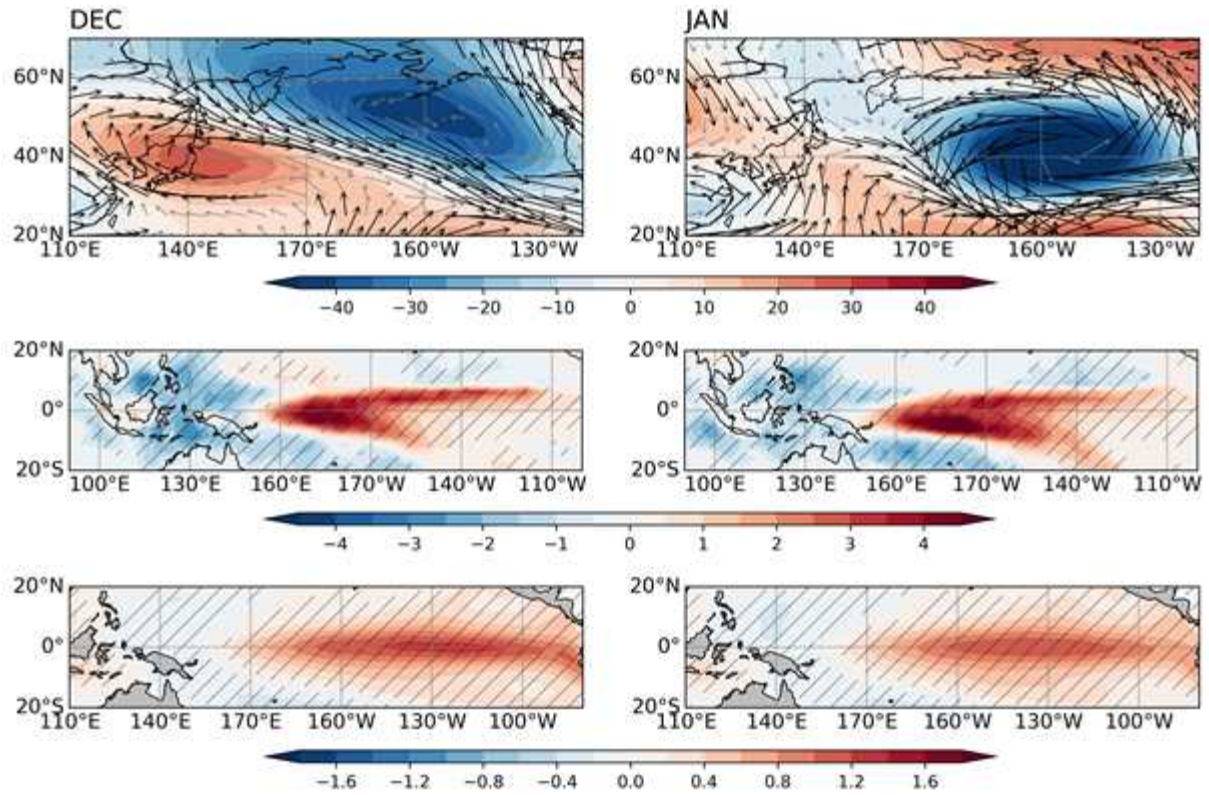


Figure 3.2. Regressed geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa (upper), precipitation (middle) and SST (lower) anomalies in December (left) and January (right) onto the NDJ Nino3.4 index, respectively. The hatches and black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.

3.3.2. 신규 예측인자 (NPO) 선정

엘니뇨 및 관련된 북서태평양 강수 변동성은 강제력으로 작용하여 우리나라의 겨울철 기후를 조절하는데 중요한 역할을 한다. 그러나 이 열대 인자들의 우리나라 12월 기후 예측성은 높지만 1월 예측성은 낮기 때문에 우리나라 겨울철 기후에 영향을 줄 수 있는 중·고위도 변동성을 고려할 필요가 있다. 먼저 우리나라의 62개 지점에서 관측된 12월 기온을 평균하여 1 표준편차 보다 큰 해들을 평균한 합성도 분석을 수행하였다 (Figure 3.3, Figure 3.4). 우리나라 12월 기온이 높을 때는 엘니뇨가 발생하여 적도 중·동태평양의 해수면온도가 상승한다. 엘니뇨의 반응으로 적도 중태평양의 강수 증가, 북서태평양 강수 감소가 나타나고, 이 북서태평양 강수와 동반된 상층 저기압의 로스비 파 전파로 우리나라를 포함한 동아시아에 고기압성 순환이 발달한다. 우리나라는 고기압 편차의 서쪽에 위치하여 남풍의 영향으로 12월에 평년보다 기온이 높고 강수가 많은 경향이 있다. 하층의 대기 순환을 살펴보면 12월 중위도 북태평양에 동서 방향으로 확장된 형태의 고기압 편차, 60N 부근에서 베링해를 중심으로 한 저기압 편차가 위치하며 북태평양 진동(North Pacific Oscillation; NPO)과 유사한 남북 방향의 쌍극자 패턴이 나타난다. 반면 1월에 적도 중·동태평양의 해수면온도 상승은 지속되지만, 북서태평양 강수의 약화와 적도 중태평양의 강수 증가가 발생한다. 또한 동아시아 고기압 편차는 거의 사라지고 중위도 북태평양 동쪽에서 저기압성 편차가 강화되어 유의미하지 않지만 동서 방향의 쌍극자 패턴이 나타난다. 그러므로 12월의 우리나라 기온 상승에 영향을 주는 동아시아 고기압 패턴은 1월에 뚜렷한 지속성을 보이지 않는다.

우리나라의 12월 강수가 많을 때를 기준으로 전지구 합성도 분석을 하면 (Figure 3.4, Figure 3.5), 기온이 높을 때와 비슷한 결과가 나타난다. 적도 중·동태평양의 해수면온도 상승 패턴이 나타나며 엘니뇨가 우리나라의 12월 기온 뿐만 아니라 강수와의 상관성이 높은 것을 의미한다. 다만 기온이 높을 때는 우리나라의 연근해와 일본 부근의 해수면온도가 상승한 것과 달리, 강수가 많을 때는 유의미하지 않지만 우리나라를 포함한 중위도 북태평양에 전반적으로 해수면온도 하강이 나타난다. 또한 1월 북서태평양 음의 강수 약화와 적도 중태평양 양의 강수의 강화가 뚜렷하다. 특히 기온이 높을 때 하층 대기에서 제시된 NPO와 유사한 남북 방향의 쌍극자 패턴이 나타난다. 특히 중위도에 위치한 고기압 편차는 우리나라에 남풍을 유도하여 기온 상승과 강수 증가에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 NPO가 우리나라 겨울철 기후에 미치는 영향을 이해한다면 예측인자로의 활용과 더불어 예측성 향상에 도움이 될 수 있을 것이다.

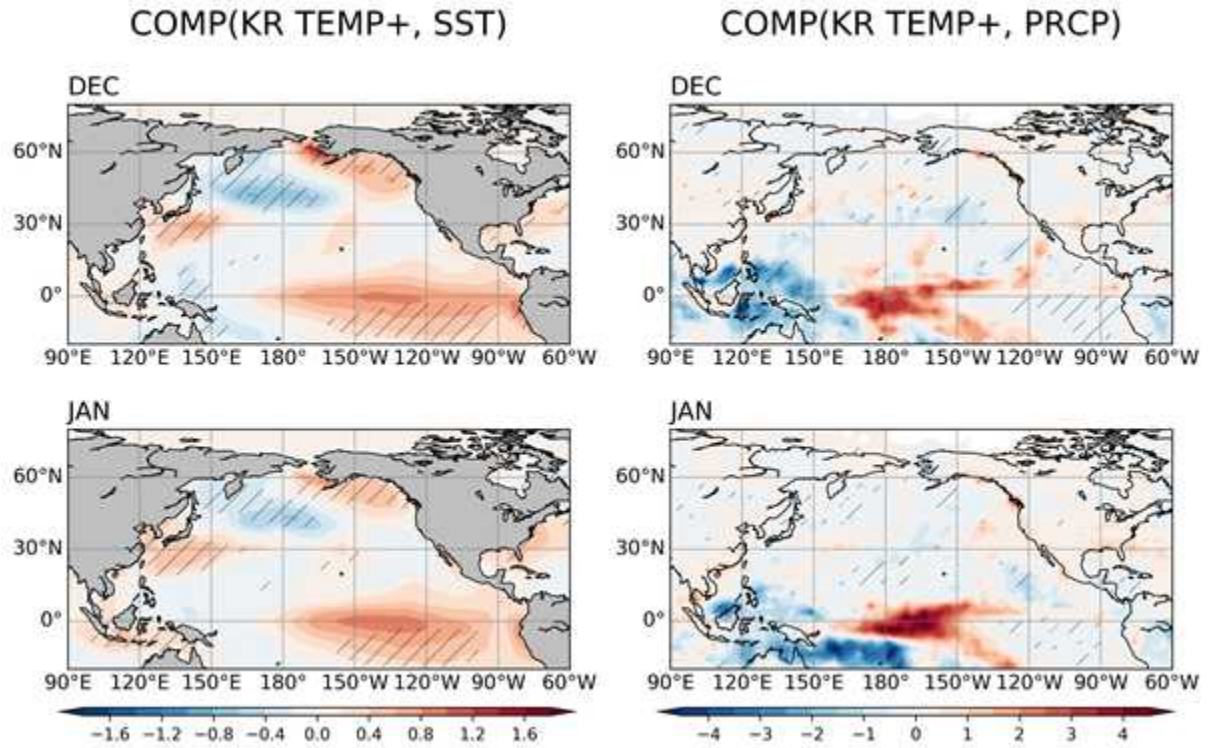


Figure 3.3. Composites of SST (left) and precipitation (right) anomalies in December and January when the December Korean temperature index is above 1 standard deviation. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.

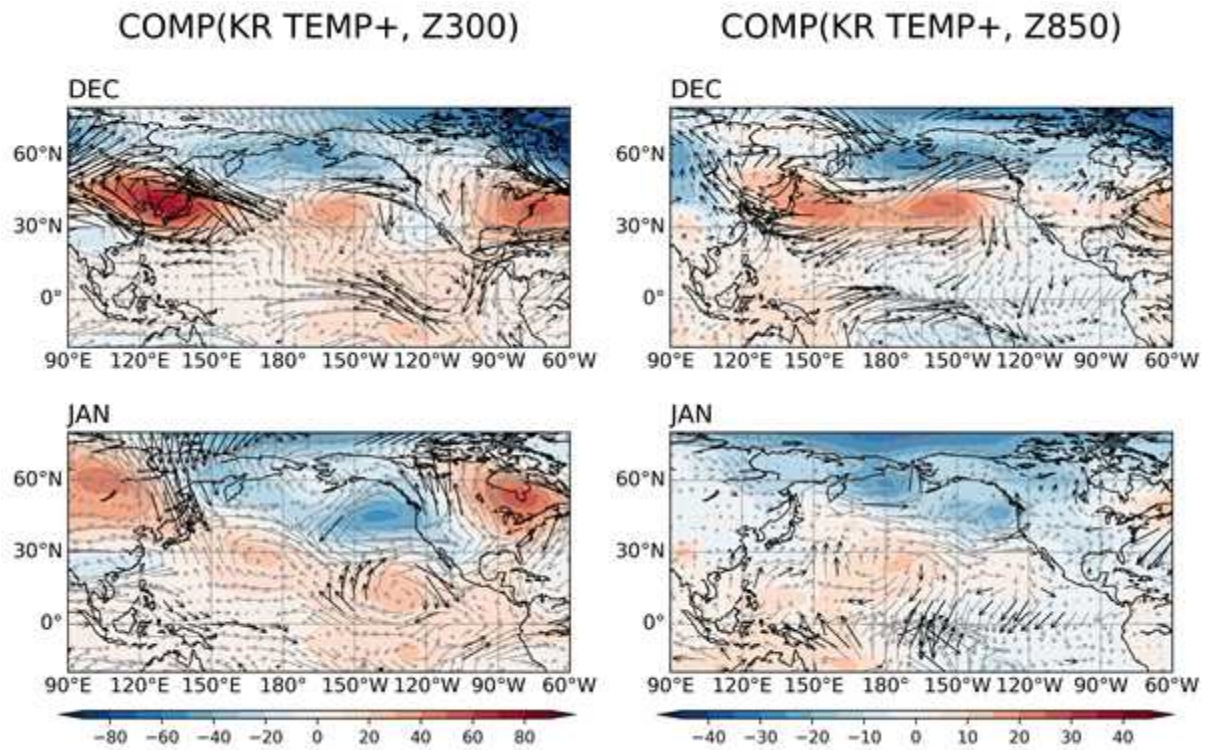


Figure 3.4. The same as in Figure 3.3 but for geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa (left) and 850 hPa (right). The black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.

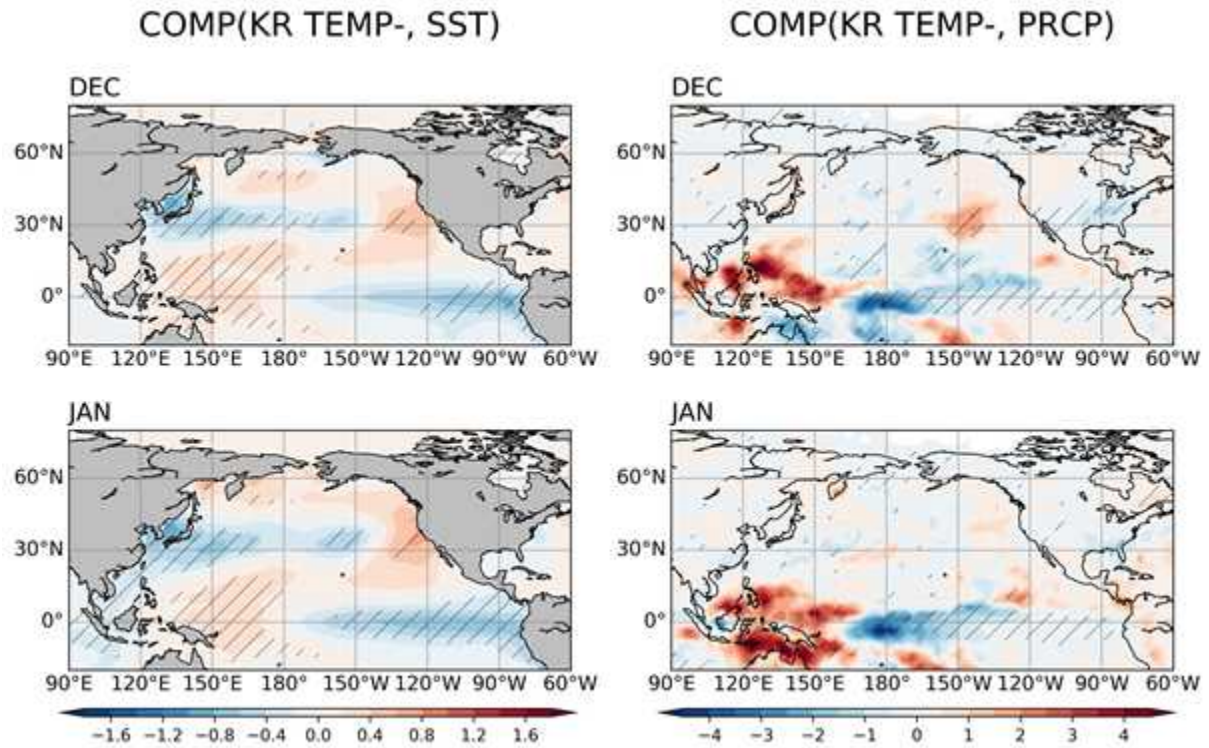


Figure 3.5. Composites of SST (left) and precipitation (right) anomalies in December and January when the December Korean temperature index is below -1 standard deviation. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.

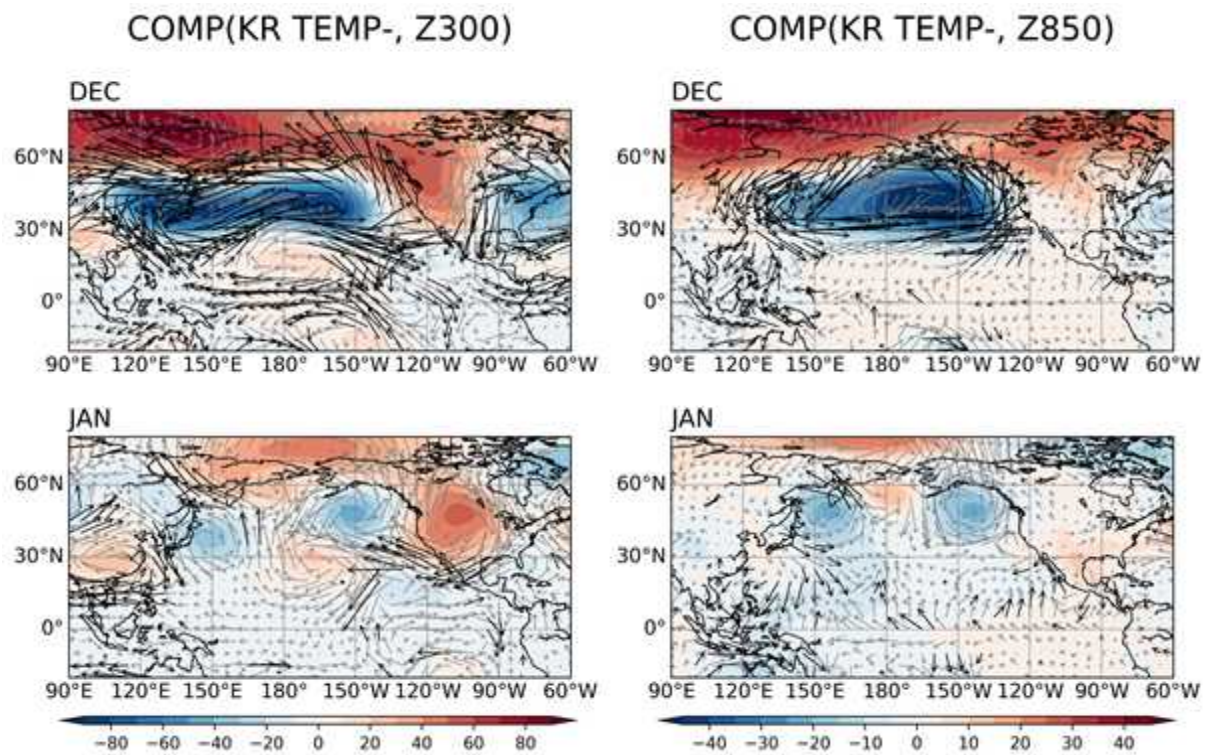


Figure 3.6. The same as in Figure 3.5 but for geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa (left) and 850 hPa (right). The black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.

NPO를 정의하는 방법은 다양한데 본 연구에서는 북태평양 (110° E-120° W, 20° -70° N) 영역에 대해 해면기압의 경험적 직교함수 (Empirical Orthogonal Function; EOF) 분석을 수행하였다. 첫 번째 EOF 모드는 알류산 저기압 패턴이고, 두 번째 EOF 모드는 남북 방향으로 부호가 서로 다른 쌍극자 패턴인데 본 연구에서는 이 두 번째 모드를 NPO로 정의하였다 (Figure 3.7). NPO 모드는 12월 북태평양 해면기압 전체 변동성의 26% 이상을 설명한다. 중위도 북태평양에 고기압 편차와 고위도에 저기압 편차가 위치할 때는 양의 NPO 위상을 나타내며, 우리나라는 고기압의 서쪽에 위치한 남풍 편차의 영향으로 평년보다 기온이 상승하는 경향이 있다. 이후 제시되는 결과에는 두 번째 EOF 모드의 주성분 (Principal Component; PC) 시계열을 이용하여 NPO와 우리나라 겨울철 기후의 관련성을 살펴보았다.

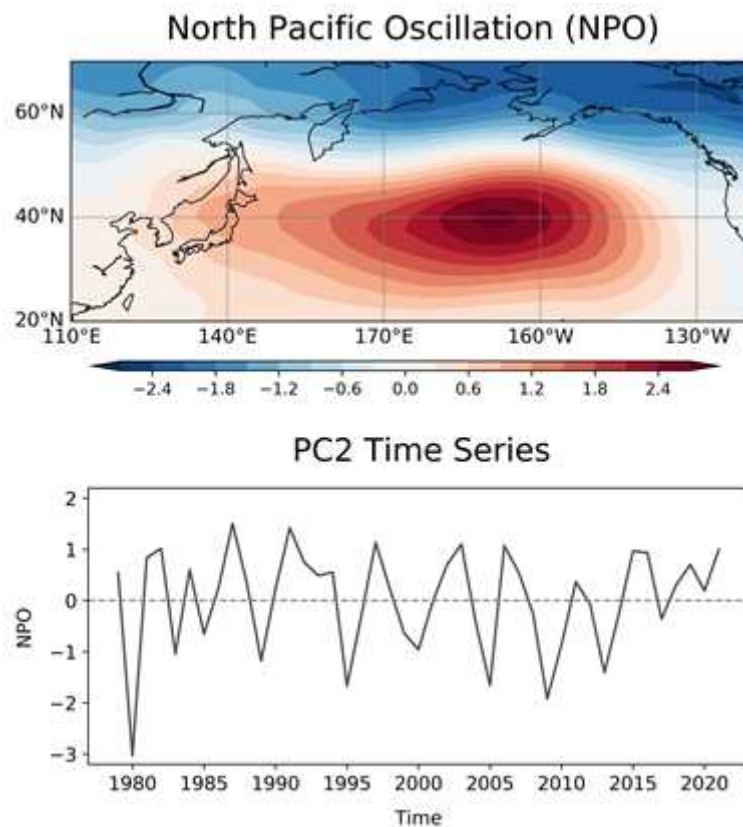


Figure 3.7. The second empirical orthogonal function mode of December sea level pressure (SLP) anomalies in the North Pacific (110° E-120° W, 20° -70° N). Time series of the second principal component of December SLP anomalies in the North Pacific.

우리나라의 겨울철 기온, 강수와 기존에 예측인자로 활용하는 Nino3.4, ENSO의 영향을 우리나라에 전달하는데 중요한 역할을 하는 북서태평양 지역의 강수, 그리고 NPO 지수의 상관성을 비교하였다 (Table 3.3). NDJ Nino3.4 지수는 우리나라 12월 기온과 0.33, 강수와 0.46의 상관계수를 가지며 통계적으로 유의미한 상관성을 나타낸다. 그러나 1월 상관성은 기온 0.20, 강수 -0.05로 낮아진다. 12월 북서태평양 강수는 우리나라의 12월 기온과 -0.53, 강수 -0.54로 유의미한 상관성을 가지지만 1월 지연상관은 거의 나타나지 않는다. 또한 1월 북서태평양 강수는 우리나라 1월 기온, 강수와 각각 -0.37, -0.21의 상관계수를 가지는데, 상관성이 그리 크지 않고 동시상관이기 때문에 우리나라의 1월 기온과 강수 예측에 활용하기에 어려움이 있다.

반면에 12월 NPO 지수는 우리나라의 12월 기온과 0.58, 한 달 지연상관으로 1월 기온과 0.44의 99% 유의미한 상관계수를 가진다. 그러나 12월 강수와의 상관성은 높지 않으며 1월 강수와 상관성은 나타나지 않는다. 동시상관으로 1월 NPO 지수는 1월 기온과 0.23, 강수와의 상관성은 0.35로 유의미하다. 그러므로 12월 NPO 지수는 ENSO 관련 인자보다 우리나라의 12월 기온과 더 높은 관련성을 보이며, 특히 한 달 지연상관으로 1월 기온의 예측인자로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 3.3. Correlation coefficients of the Korean temperature, precipitation indices and NDJ Nino3.4, WNP precipitation, and NPO indices in December and January, respectively. The symbol of *(**) denotes the 95%(99%) confidence level based on the student t-test.

Correlation		NDJ N34	DEC WNP	JAN WNP	DEC NPO	JAN NPO
KOR TEMP	DEC	0.33*	-0.53**		0.58**	
	JAN	0.20	-0.09	-0.37*	0.44**	0.23
KOR PRCP	DEC	0.46**	-0.54**		0.21	
	JAN	-0.05	-0.05	-0.21	-0.01	0.35*

3.3.3. NPO 원격상관 역학

12월 NPO와 관련된 전지구와 우리나라 기온, 강수의 동시/지연상관 패턴을 살펴보기 위해 회귀분석을 수행하였다. 12월에 중위도 북태평양 고기압-고위도 저기압의 쌍극자 해면기압 패턴이 발생하면 적도 중·동태평양의 해수면온도가 상승하는 엘니뇨를 동반하는 경향이 있다 (Figure 3.8). 또한 우리나라 연근해를 포함한 일본 동쪽으로 확장된 형태의 유의미한 해수면온도 상승이 나타난다. 동시에 적도 중태평양의 강수가 증가하고 북서태평양의 강수가 감소하는데, 이는 엘니뇨의 영향에 의한 것으로 고려된다. 북태평양의 대기 상·하층에는 중위도에 고기압, 고위도에 저기압이 위치하여 남북 방향으로 쌍극자 형태의 대기 순환이 발생한다 (Figure 3.9). 우리나라는 NPO와 관련된 중위도 고기압의 서쪽에 위치하여 남풍 편차의 영향으

로 12월 기온이 상승하는 경향이 나타난다 (Figure 3.10).

적도 중·동태평양의 해수면온도 상승은 1월까지 지속되는 경향이 있고, 12월에 우리나라에서 중위도 중태평양에 이르는 해수면온도 상승은 1월에 더 넓은 해역에서 뚜렷하게 나타난다. 또한 12월 NPO와 관련하여 1월에 적도 중태평양의 양의 강수가 강화되고, 흥미롭게도 북서태평양의 음의 강수 역시 강화된다. Figure 3.2에서 제시된 것처럼 엘니뇨의 반응으로 1월 북서태평양 음의 강수가 약화되는 반면, 12월 NPO는 한 달 지연상관으로 1월 북서태평양 음의 강수를 강화하는 경향이 있다. 북서태평양의 강수 변동성은 원격상관의 강제력으로 작용하기 때문에, 1월 북서태평양 음의 강수 강화는 동아시아의 대기 순환을 조절할 수 있다. 1월에 동아시아 지역의 상층에 고기압성 편차가 위치하고 하층에서도 고기압에 의한 남풍이 우리나라에 유입된다. 그 결과 우리나라와 일본을 비롯한 중국 북부 지역에서 유의미한 기온 상승이 나타난다. 12월 NPO는 12월과 1월 모두 우리나라 남쪽에 동서 방향으로 긴 형태의 강수대 형성에 영향을 주지만 우리나라의 강수와는 관련성이 없는 것으로 보인다.

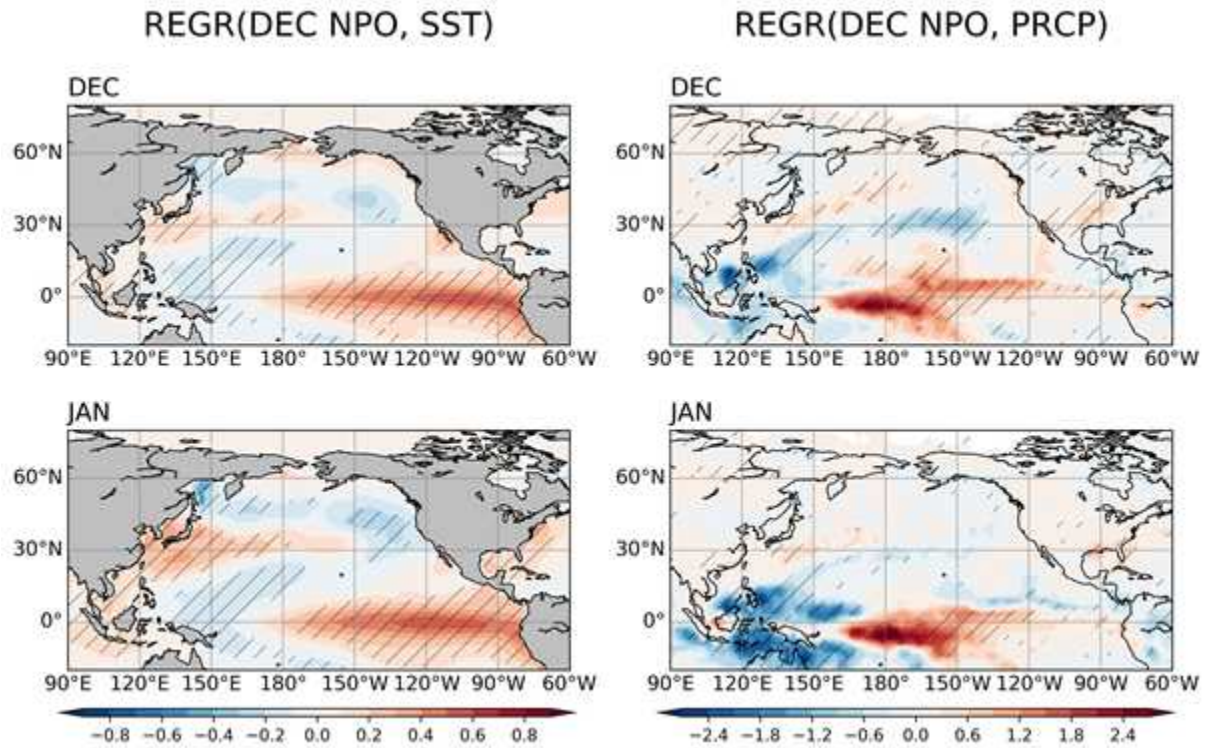


Figure 3.8. Regressed SST (left) and precipitation (right) anomalies in December and January onto the December NPO index, respectively. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.

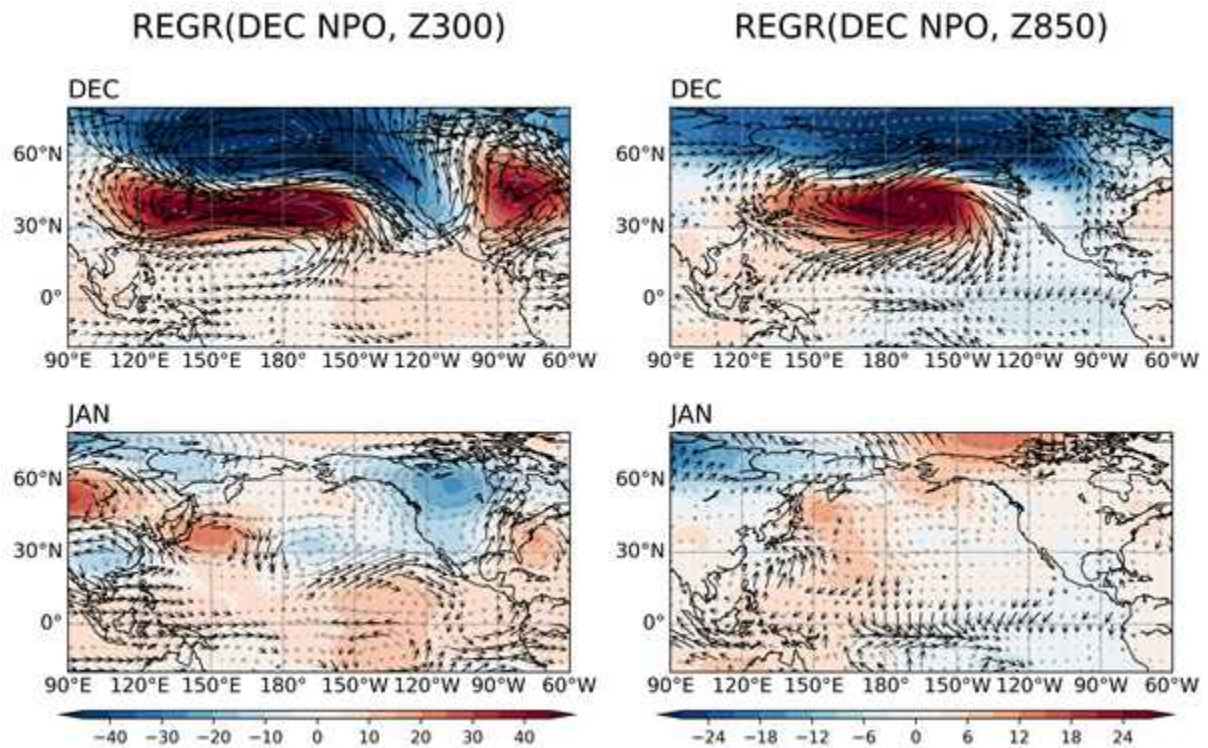


Figure 3.9. The same as in Figure 3.8 but for geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa (left) and 850 hPa (right). The black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.

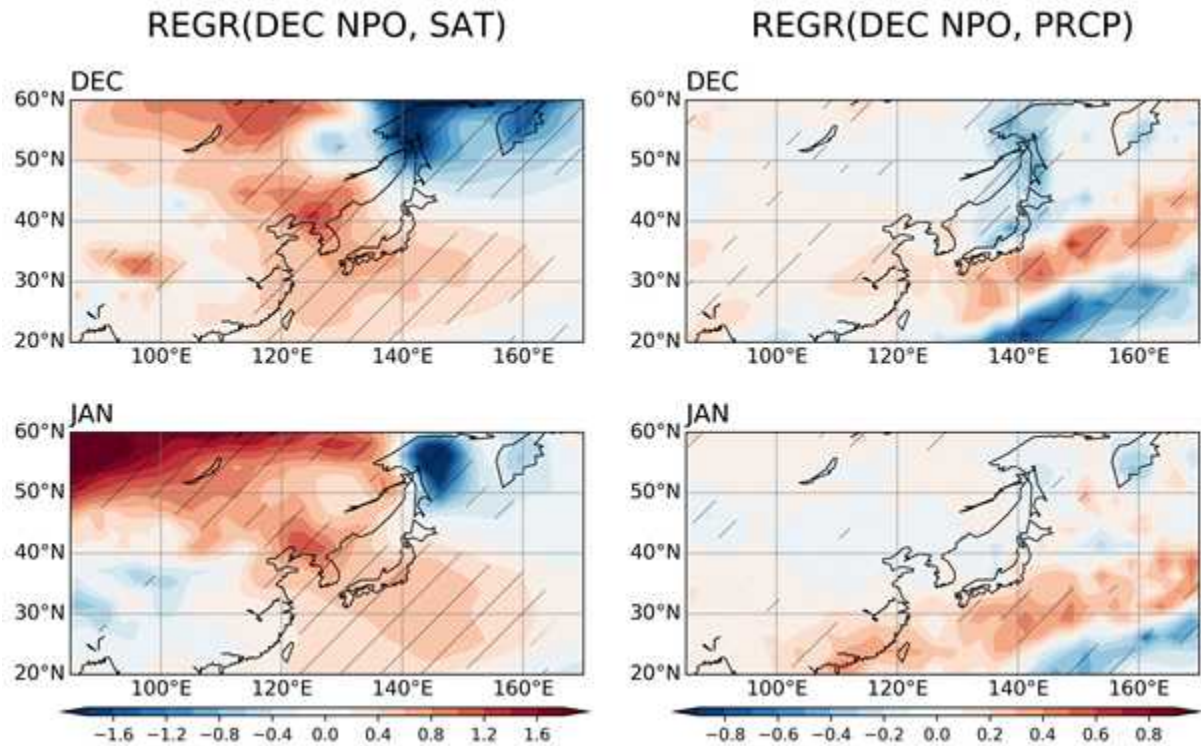


Figure 3.10. The same as in Figure 3.8 but for surface air temperature (left) and precipitation (right) anomalies.

지금까지 대부분의 선행연구에서는 경년 시간 규모에서 Seasonal Footprinting Mechanism (SFM)을 통한 NPO와 ENSO의 관련성을 제시하였다. 그러나 본 연구에서는 우리나라의 12월과 1월 기온 예측에 활용하기 위해 계절내 시간 규모에서 NPO의 관련성을 분석하였다. 12월 NPO는 1월의 NPO와 상관성이 거의 없는 것으로 나타나는데, 1월에 뚜렷하게 나타난 우리나라의 기온 상승은 대부분 NPO의 동시상관이 아닌 한 달 지연상관의 결과로 생각된다 (Table 3.4). 또한 12월 NPO는 Nino3.4 지수와 12월에 0.32, 1월 0.36의 유의미한 상관계수를 보이며 ENSO와 관련성을 나타낸다. Figure 3.8에서 제시된 것처럼 12월 NPO는 북서태평양 강수와 유의미한 관련성을 가지며 -0.35의 동시상관, -0.57의 지연상관을 보인다. 특히 12월 NPO와 1월 북서태평양 강수의 높은 관련성은 각각 또는 상호작용으로 우리나라의 1월 기온 상승에 영향을 줄 수 있기 때문에 관련 역학에 대한 이해가 필요하다.

Table 3.4. Correlation coefficients of the NPO index in December and NPO, Nino3,4, and WNP precipitation indices in December and January, respectively. The symbol of **(**)** denotes the 95%(99%) confidence level based on the student t-test.

Correlation	NPO	N34	WNP PRCP
DEC (lag0)	1	0.32*	-0.35*
JAN (lag+1)	0.003	0.36*	-0.57**

그러나 ENSO와 NPO가 유의미한 상관성을 가지기 때문에, 우리나라의 12월과 1월 기온 상승에 영향을 주는 동아시아 고기압이 ENSO의 영향인지 아니면 NPO의 영향으로 발생한 것인지 분리하기 위해 선형 다중 회귀분석을 수행하였다. 선형적으로 12월 NPO의 영향을 제거한 NDJ Nino3.4 지수에 의해 12월과 1월 모두 적도 중·동태평양에서 해수면온도의 상승이 발생하며 (Figure 3.11), 1월에 적도 중태평양 양의 강수 강화, 북서태평양 음의 강수 약화가 나타난다 (Figure 3.12). 또한 12월에 동아시아 지역에 상층 고기압 편차가 발생하지만 하층 고기압 편차 서쪽의 남풍 기류가 뚜렷하지 않아 (Figure 3.13, Figure 3.14), 우리나라의 기온 상승이 유의미하지 않다 (Figure 3.15). 동시에 적도 중태평양 양의 강수의 PNA 패턴에 의해 중위도 동태평양에는 저기압성 편차가 강하게 발달한다. 우리나라의 남쪽에 위치한 동서 방향으로 긴 형태의 강수대의 영향으로 우리나라는 일부 유의미한 강수 증가를 보이는데 (Figure 3.16), 이는 Table 3.3에 제시된 것처럼 Nino3.4 지수는 우리나라의 12월 기온보다 강수와 관련성이 더 크기 때문이다. 그러나 Nino3.4는 12월과 달리 우리나라의 1월 기온, 강수와 관련성이 나타나지 않는다.

12월 NPO의 영향을 살펴보면, NDJ Nino3.4의 영향을 제거하였기 때문에 열대 해수면온도의 변동이 뚜렷하지 않다. 적도 동태평양의 일부 지역에서 해수면온도가 상승하는 것은 Nino3.4 지역이 적도 중·동태평양에 한정되어 있기 때문으로 보인다. 12월 NPO의 회귀분석 패턴(Figure 3.8)과 마찬가지로 우리나라에서 중위도 중태평양에 이르기까지 해수면온도가 상승하며 특히 1월에 강화된다. 또한 12월 열대 강수와 동시상관이 나타나지 않지만, 1월 북서태평양 음의 강수와 유의미한 지연상관을 나타낸다. 12월 NPO의 영향으로 우리나라를 포함한 중위도 북태평양 전역의 대기 상·하층에 고기압 편차, 고위도에 저기압 편차가 발달한다. 고기압 편차의 서쪽에 위치한 남풍에 의해 우리나라는 12월에 기온이 상승하는 경향이 있고, 이 고기압성 순환은 약화되지만 1월까지 지속되어 우리나라의 1월 기온 상승에 영향을 주게 된다. 반면에 12월 NPO는 우리나라의 12월과 1월 강수와는 관련성을 보이지 않는다.

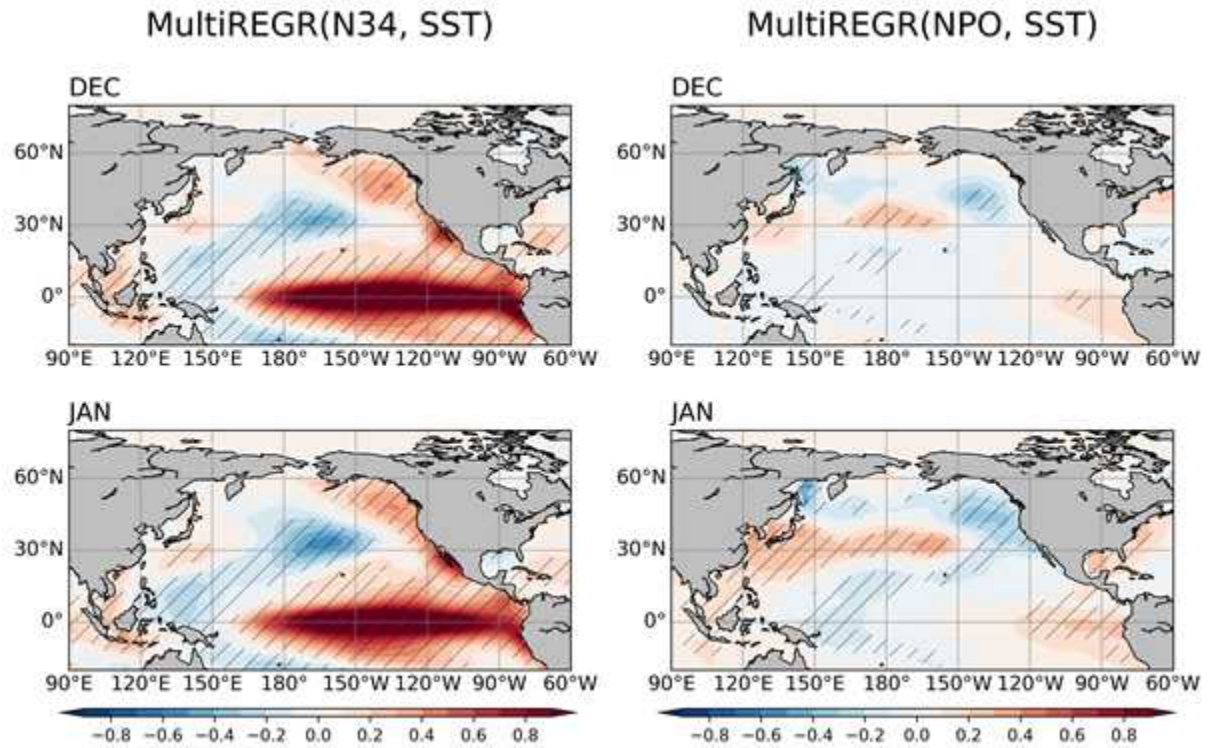


Figure 3.11. Multiple regressed SST anomalies in December and January onto the NDJ Nino3.4 (left) and December NPO (right) index, respectively. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.

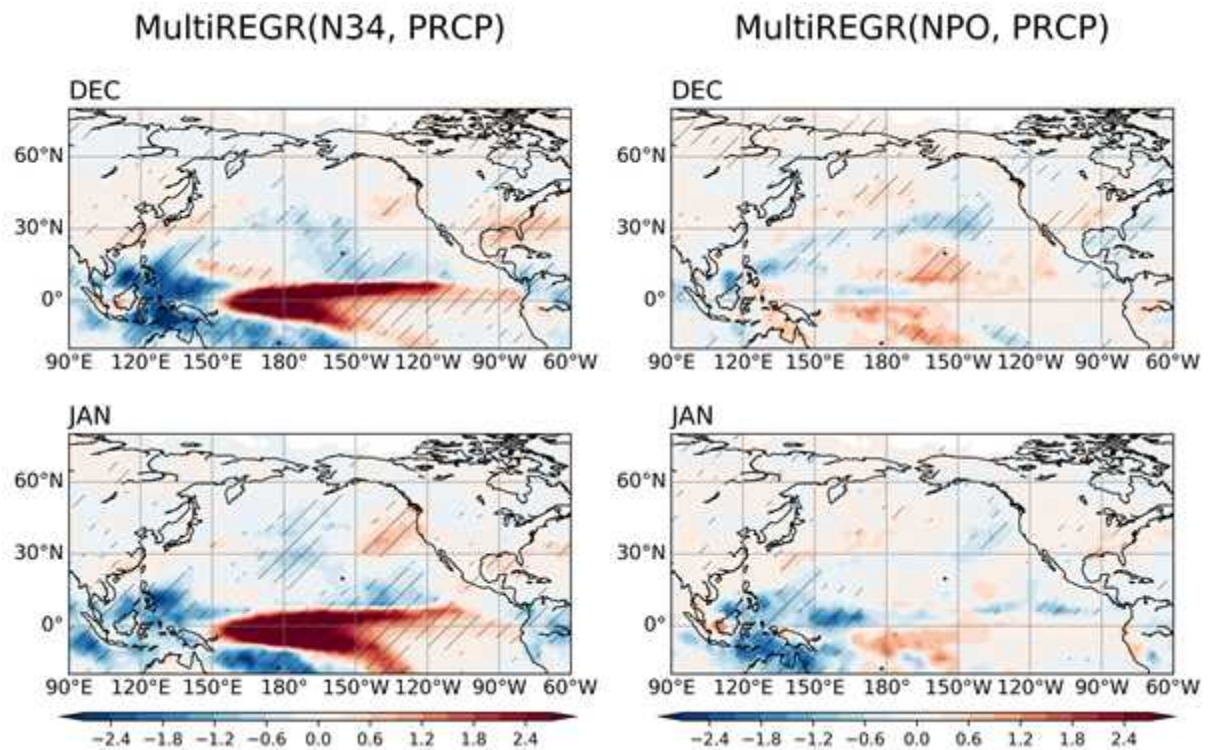


Figure 3.12. The same as in Figure 3.11 but for precipitation anomalies.

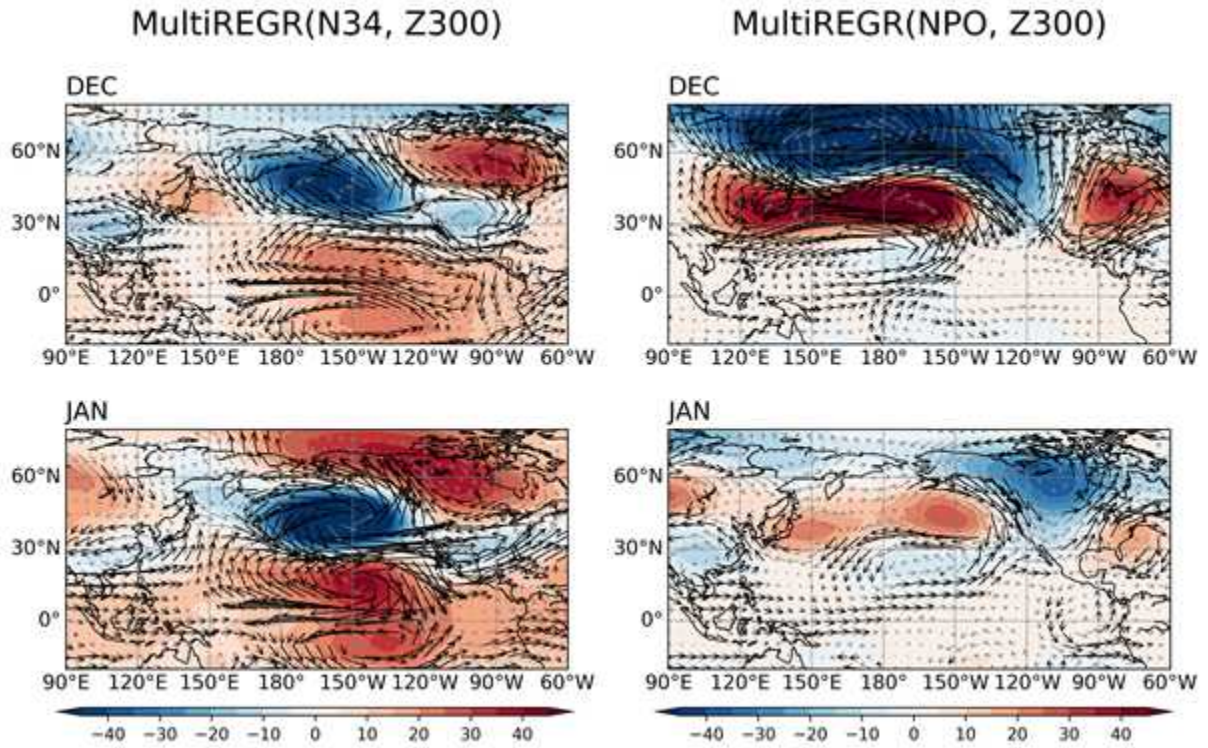


Figure 3.13. Multiple regressed geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa in December and January onto the NDJ Nino3.4 (left) and December NPO (right) index, respectively. The black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.

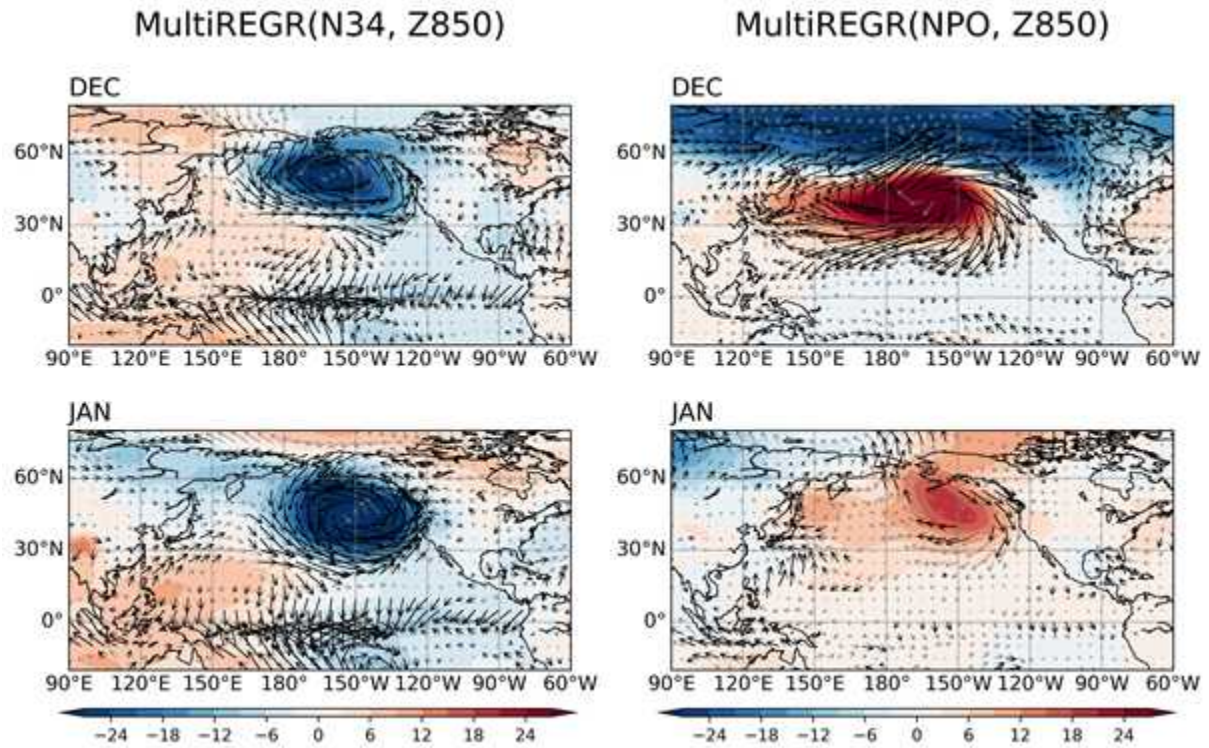


Figure 3.14. The same as in Figure 3.13 but for geopotential height (shading) and wind (vector) anomalies at 850 hPa.

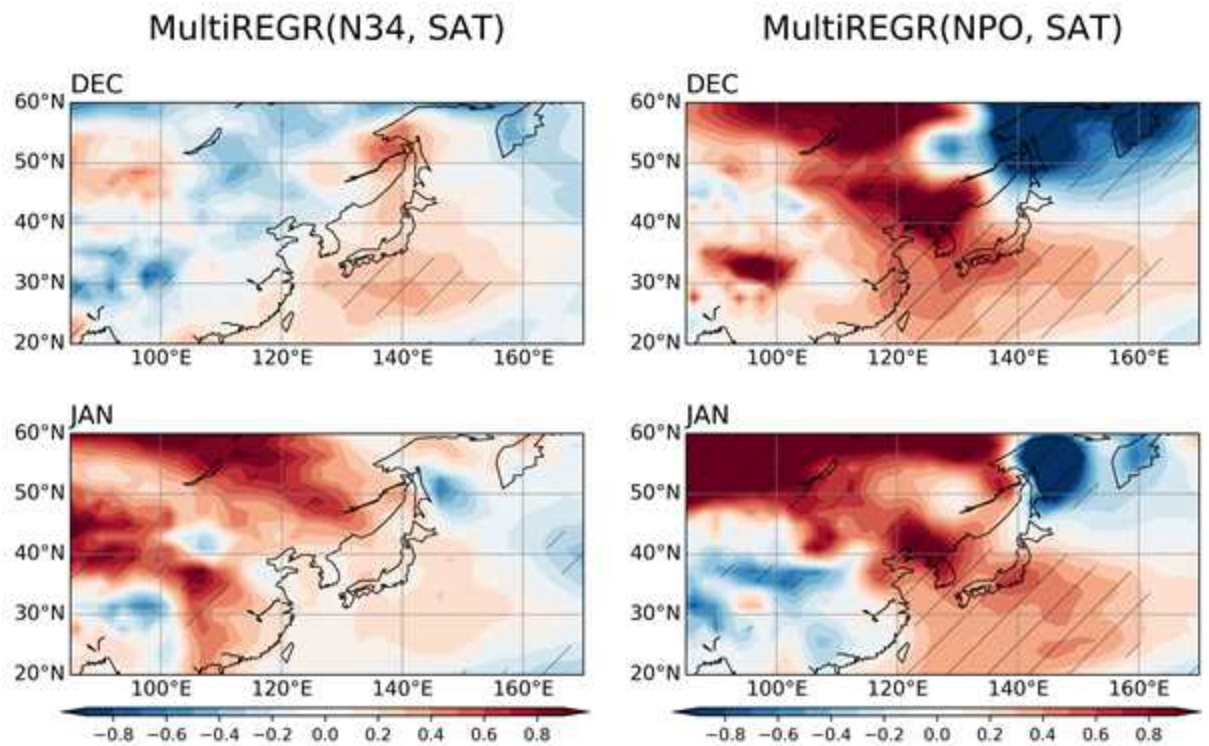


Figure 3.15. Multiple regressed surface air temperature anomalies in December and January onto the NDJ Nino3.4 (left) and December NPO (right) index, respectively. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.

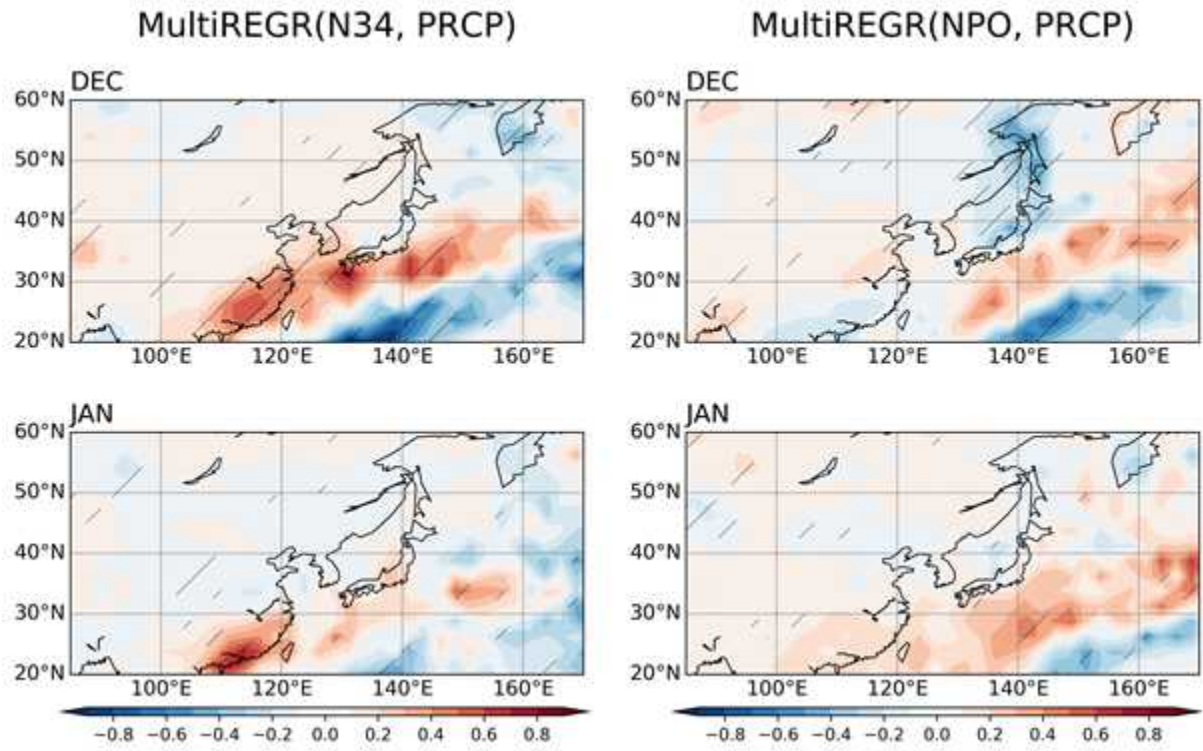


Figure 3.16. The same as in Figure 3.11 but for precipitation anomalies.

기존에 예측인자로 사용하는 Nino3.4 지수는 우리나라의 12월 기온, 강수와 상관성이 높지만 1월에는 상관성이 낮아지기 때문에, 우리나라의 1월 기온과 강수를 예측하는데 한계가 있다. 12월 NPO는 열대 태평양의 가장 강한 강제력인 ENSO와 독립적으로 우리나라의 12월 뿐만 아니라 1월 기온에 유의미한 영향을 주기 때문에 1월 기온 예측인자로 활용할 수 있다. 그러므로 12월 NPO가 어떻게 한 달 지연되어 우리나라의 1월 기온에 영향을 주는지 역학 과정을 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 12월 NPO의 우리나라 1월 기온에 미치는 영향에 대해 두가지 역학을 제시한다.

첫 번째는, 12월 NPO에 의해 발생한 1월 북서태평양 음의 강수의 원격상관 영향이다. 12월 NPO는 1월 북서태평양 강수와 -0.57 의 99% 유의미한 상관성을 가지며(Table 3.4), ENSO의 영향을 제거하면 12월에는 발생하지 않지만 1월에 북서태평양 음의 강수가 뚜렷하게 나타난다(Figure 3.12). 엘니뇨가 발달할 때 북서태평양 음의 강수와 동반된 상층 저기압의 로스비 파전파를 통해 동아시아 상·하층에 고기압 편차가 발생하는데 이러한 원격상관은 초겨울(11-12월)에 강하고, 늦겨울(1월)에는 사라진다. 그러나 12월 NPO는 동시상관 보다 한 달 지연상관으로 1월 북서태평양 음의 강수 발생을 유도하기 때문에 원격상관으로 우리나라의 1월 기온 상승에 영향을 줄 수 있다.

북서태평양 강수 변동성을 정량적으로 살펴보면, NPO에 회귀분석된 북서태평양 강수는 12월 -0.81 에서 1월 -1.19 로 약 32% 증가한다(Figure 3.17). 또한 ENSO의 영향을 제거하여 NPO에 다중 회귀분석 하면 북서태평양 강수는 12월 -0.28 에서 1월 -0.79 로 약 65% 증가한다. 그러므로 ENSO의 유무와 관계없이 12월 NPO의 자체적인 영향으로 1월 북서태평양 음의 강수가 강화되는 것으로 보인다. 또한 1월 북서태평양 음의 강수 강화는 우리나라의 1월 기온 상승에 영향을 줄 수 있다. 12월 NPO의 발생으로 중위도 북태평양에 하층 고기압 편차가 위치하면 고기압의 남서쪽에 북동풍이 유도된다. 이 북동풍 편차는 북서태평양 방향으로 불어 북서태평양에 차고 건조한 공기를 유입하고 이 지역의 강수가 감소할 가능성이 있다. 이 과정이 한 달의 지연을 가지며 결과적으로 1월에 북서태평양 강수가 감소하게 되면 상층 대기 원격상관에 의해 동아시아에 고기압이 발달하면서 우리나라의 1월 기온이 상승하게 된다. 그러므로 12월 NPO와 관련된 북동풍 편차의 유입으로 인한 1월 북서태평양의 강수 감소와 동아시아 고기압의 발달, 그리고 우리나라 기온 상승 역학에 대해서는 추가적으로 분석할 예정이다.

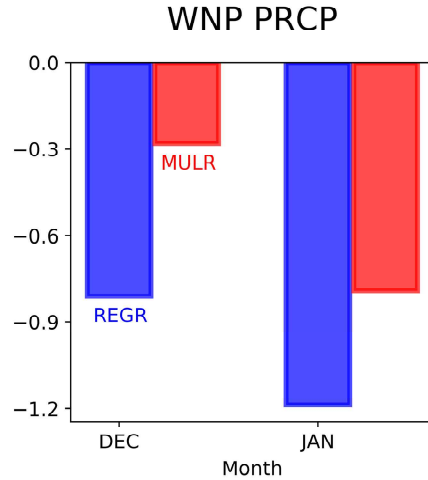


Figure 3.17. The area-averaged regressed (blue) and multiple regressed (red) precipitation anomalies in December and January onto the December NPO index after removing NDJ Nino3.4 impact over the WNP (110–150E, 0–15N) region.

두 번째는, 12월 NPO에 의해 발생한 상층 제트의 약화와 해수면온도 상승의 영향이다. 우리나라의 겨울철 기온은 주로 우리나라 상공에 위치하는 서풍 평균인 동아시아 제트기류의 위치와 강도에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 12월과 1월의 300 hPa 평균 바람장을 보면 중위도에 서풍이 강하게 나타나며 35N 부근에서 최대값을 가진다 (Figure 3.18). 12월 NPO 지수가 0.5 표준편차 이상인 해를 기준으로 합성도 분석을 하면 중위도 북태평양의 상층에 고기압성 편차가 위치하게 된다 (Figure 3.19). 1월이 되면 고기압이 거의 사라지며 12월 NPO와 관련된 바람이 지속되지 않지만 우리나라 연근해에서 20° N에 이르는 해역의 해수면온도가 상승한다. 마찬가지로 12월 NPO와 NDJ Nino3.4 지수 모두가 0.5 표준편차 이상인 해를 결합하여 합성도 분석을 한 경우에도 중위도 북태평양의 상층에 고기압성 편차가 뚜렷하게 나타난다. 중위도의 상층 고기압성 순환은 동아시아 부근으로 제한되지만 1월까지 지속되며, 중위도 동태평양에는 엘니뇨와 관련된 적도 중태평양 양의 강수의 PNA 패턴에 의해 발달한 저기압 편차가 위치하게 된다. 12월 NPO 회귀분석의 1월 지연 합성장에서 나타난 우리나라 연근해와 일본 남쪽 해역의 해수면온도 상승은 ENSO와 NPO의 결합 합성장에서 더 강하게 발생한다.

U300 CLIM

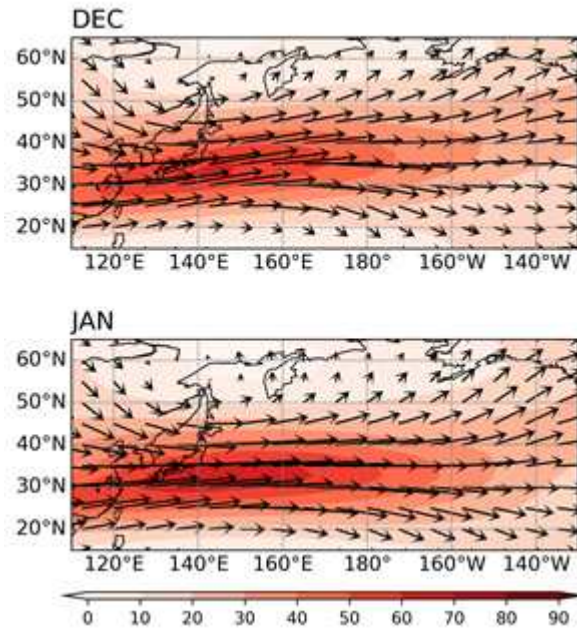


Figure 3.18. The climatological zonal (shading) and horizontal (vector) wind at 300 hPa in December (upper) and January (lower), respectively

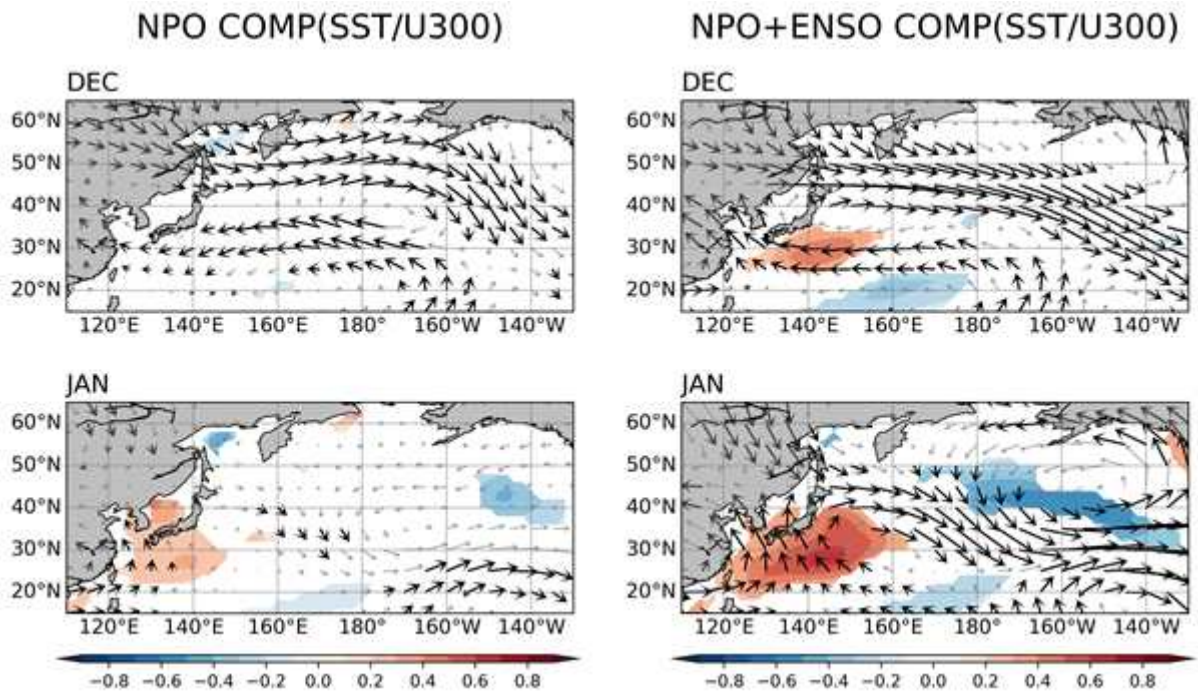


Figure 3.19. Composites of SST (shading) and wind (vector) anomalies at 300 hPa in December and January when the December NPO (left) and December NPO+NDJ Nino3.4 (right) index is above 0.5 standard deviation. The colored and black vectors denote the 90% confidence level based on the student t-test.

NPO와 관련되어 중위도에 발생한 상층 고기압성 순환의 경우, 고기압의 남쪽에 위치하는 동풍 편차가 중위도 상층의 서풍 평균인 제트기류와 반대 방향으로 작용하여 제트기류를 약화할 수 있다. 동시에 중위도의 대기 하층에도 고기압 순환이 발생하여 동풍 편차에 의해 겨울철 평균 바람인 서풍이 약화된다 (그림 미제시). 그 결과 우리나라 연근해와 일본 주변 해역의 표층 총 풍속(total wind speed)이 감소하며, 해양에서 대기로의 잠열속 (Latent Heat Flux; LHF) 감소를 유도한다. 그로 인한 표층 증발의 감소로 해수면온도가 상승하고 계속해서 표층의 총 풍속을 약화하는 피드백이 작용한다. 이는 바람-증발-해수면온도 (Wind-Evaporation-SST; WES) 피드백으로 대기와 해양의 열역학적 상호작용 현상이며, 양의 피드백 작용이다. 그러므로 12월 NPO에 의해 발생한 중위도 북태평양의 고기압 순환은 바람-증발-해수면온도 피드백을 통해 1월에 우리나라 연근해의 해수면온도를 상승시키고, 이는 우리나라의 1월 기온 상승에 유리한 조건이 될 수 있다. 이와 관련하여 우리나라 연근해의 해수면온도가 기온에 미치는 영향에 대해서는 추가적으로 분석할 예정이다.

먼저 상층 제트기류가 NPO의 영향으로 약화되는지 확인하기 위해, 12월의 상층 동서 바람 평균과 NPO 합성장의 동서 바람 편차, NPO와 ENSO 결합 합성장의 동서 바람 편차를 더해 총 풍속을 나타내었다 (Figure 3.20). 우리나라 연근해와 중위도 서태평양 지역인 120° E-180° 을 동서 방향으로 평균하여 제트의 강도 뿐만 아니라 남북 방향의 이동을 살펴보았다. 이 지역의 상층 서풍 평균은 32° N 부근에서 최대값을 가지며, 서풍 평균에 12월 NPO 지수가 0.5 표준편차 이상인 해의 동풍 편차를 더하면 제트기류가 약 6% 약화된다. 12월 NPO와 NDJ Nino3.4 지수 각각이 0.5 표준편차 이상인 해의 동풍 편차를 더하면 제트기류의 강도는 약 4% 감소한다. 또한 이 두 합성장이 고려된 제트의 경우, 제트의 중심이 35° N 부근으로 북상한다. 반면에, 12월 NPO 지수가 -0.5 표준편차 이하인 해는 제트기류는 약 8% 강화되고, 12월 NPO와 라니냐 해를 동시에 고려하면 제트의 강도가 약 10% 강화된다. 이 경우에는 제트의 이동이 뚜렷하지 않은데 NCEP 재분석 자료의 수평 해상도가 2.5° 로 크기 때문에 남북 방향의 이동을 보는데 어려움이 있다. 특히 제트기류 중심축의 북상은 따뜻한 열대의 대기를 북쪽으로 유입시켜 해수면온도의 상승을 유도할 수 있으며, 반대로 제트기류의 남하는 반대 기작을 통해 해수면온도의 하강에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 고해상도의 대기 자료를 사용하여 제트기류의 남북 이동과 그로 인한 해수면온도의 변동에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

다음으로 12월 NPO의 영향으로 중위도 서태평양 지역에서 바람-증발-해수면온도 피드백 과정을 통해 해양에서 대기로의 증발이 감소하는지 분석하였다 (Figure 3.21). NDJ Nino3.4와 12월 NPO 지수를 고려한 다중 회귀 분석에서 엘니뇨가 발생하면 우리나라 연근해 부근에서는 증발이 감소하지만 유의미하지 않게 나타난다. 반면에 ENSO의 영향을 제거한 12월 NPO가 발생하면 중위도 서태평양에 증발이 뚜렷하게 감소하며 이는 해수면온도의 상승에 영향을 줄 수 있다. 표층의 순 열속(Net Heat Flux)은 표층의 해수면온도 변동에 주요한 요인이며 잠열 뿐만 아니라 단파복사 또한 표층 해수면온도의 상승 및 하강에 영향을 미친다. 또한 제트 기류가 약화될 경우에는 표층 총 풍속의 약화로 인해 해수의 수직적인 혼합 효과가 감소하면서 우리나라 연근해를 포함한 중위도 서태평양의 해수면온도가 상승할 가능성이 있다. 그러므로 단파복사를 비롯한 해수 연직 혼합의 영향을 이해할 필요가 있다.

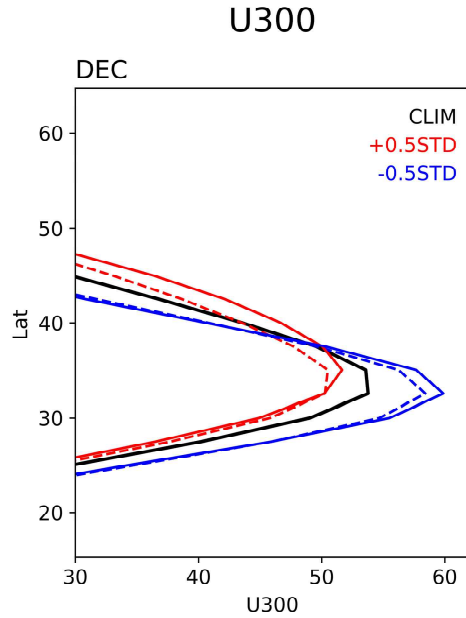


Figure 3.20. Latitudinal position and magnitude for climatological zonal wind ($\overline{U_{300}}$; black), summation of climatological zonal wind and composites of zonal wind anomalies ($\overline{U_{300}} + U_{300}'$) at 300 hPa in December when December NPO (solid) and December NPO+NDJ ENSO index (dash) is above 0.5 (red) and below -0.5 (blue) standard deviation, respectively. All values are zonally averaged from 120° E to 180° .

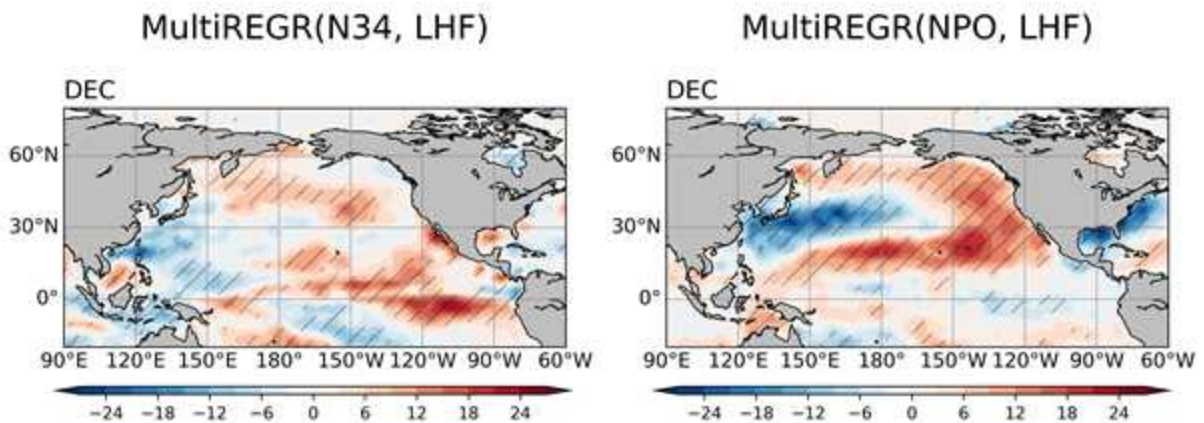


Figure 3.21. Multiple regressed latent heat flux anomalies in December onto the NDJ Nino3.4 (left) and December NPO (right) index, respectively. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.

3.3.4. NPO를 활용한 우리나라 겨울철 기온 예측성 검증

본 연구에서 제시한 신규 예측인자인 12월 NPO 지수를 예측에 활용하기 위해서는 우리나라 겨울철 기온과 강수에 대한 예측성을 검증하고 기존 예측인자와 비교할 필요가 있다. 앞선 결과에서 제시한 것처럼 12월 NPO는 우리나라의 12월, 1월 기온과 상관성이 크지만 강수는 상관성이 낮아 이후 결과에서는 기온 예측성을 중점적으로 살펴보았다. 먼저 NDJ Nino3.4 지수의 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 표준편차를 기준으로 어떤 강도를 고려할 때 우리나라의 기온 예측성이 높은지 확인하였다 (Table 3.5). 예를 들어, 1979년부터 2022년까지 총 43년의 분석기간 동안 NDJ Nino3.4 지수가 0.5 표준편차 이상인 해는 14개이며, 그 중에서 우리나라의 12월 기온이 0.5 표준편차 이상인 해는 9개이다. 즉, 겨울철에 0.5 표준편차 이상 강도의 엘니뇨가 발생하면 우리나라의 12월 기온이 0.5 표준편차 이상으로 상승할 확률이 약 64%인 것을 의미한다. 이 때 우리나라의 1월 기온이 0.5 표준편차 이상인 해는 6개로 약 43%의 예측성을 보인다. 전반적으로 엘니뇨의 강도와 상관없이 우리나라의 12월 기온 상승에 대한 예측성이 높지만, 1월에는 약간 낮아진다. 반면에 라니냐와 우리나라의 기온 하강 예측성은 12월과 1월 모두 엘니뇨와 우리나라의 기온 상승 예측성에 비해 낮게 나타난다.

12월 NPO 지수를 기준으로 우리나라의 기온 예측성을 보면, NPO의 강도와 상관없이 우리나라의 12월 기온 상승이 뚜렷하게 나타난다 (Table 3.6). 특히 12월 NPO 지수가 0.5 표준편차 이상인 17개 해 중에서 13개 해에 우리나라의 12월 기온 상승이 관측되어 76%의 높은 예측성을 보이며, 대부분의 경우에 NDJ Nino3.4 지수보다 12월의 기온 상승 예측성이 향상된다. 그러나 12월 NPO의 우리나라의 1월 기온 상승 정확도는 다소 낮은 경향이 있다. 반면에 12월 음의 NPO 지수는 우리나라의 12월 기온 하강을 약 44-60% 정도의 범위에서 예측하며, 기온 상승 예측성보다 낮지만 비교적 균일한 예측성을 나타낸다. 1월 기온 하강은 12월 기온 하강과 비슷하고 특히 0.50, 0.75 표준편차의 경우 예측성이 각각 55%, 56%로 높은 편이다. 앞서 12월 NPO의 회귀분석에서는 우리나라 1월 기온과의 상관성이 높게 나타났지만, 1월 기온 하강 예측성에 비해 기온 상승 예측성이 낮다. 이는 선형 회귀식이 특정값의 영향을 받을 가능성이 있기 때문에, 12월 NPO의 위상을 고려한 비선형 분석을 통해 각 위상의 특성을 이해할 필요가 있다.

Table 3.5. The predictability of Korean temperature anomalies in December and January for its ± 0.5 standard deviation based on the NDJ Nino3.4 index with $\pm 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25$ standard deviation level.

ENSO level	Positive temperature (+0.50 σ)		Negative temperature (-0.50 σ)	
	December	January	December	January
0.25 σ	65% (11/17)	35% (6/17)	28% (5/18)	33% (6/18)
0.50 σ	62% (9/14)	43% (6/14)	27% (4/15)	33% (5/15)
0.75 σ	64% (7/11)	37% (4/11)	20% (2/10)	30% (3/10)
1.00 σ	67% (4/6)	33% (2/6)	0% (0/6)	33% (2/6)
1.25 σ	60% (3/5)	40% (2/5)	0% (0/5)	20% (1/5)

Table 3.6. The same as in Table 3.4 but for December NPO index.

NPO level	Positive temperature (+0.50 σ)		Negative temperature (-0.50 σ)	
	December	January	December	January
0.25 σ	62% (13/21)	29% (6/21)	47% (7/15)	47% (7/15)
0.50 σ	76% (13/17)	29% (5/17)	45% (5/11)	55% (6/11)
0.75 σ	73% (8/11)	36% (4/11)	44% (4/9)	56% (5/9)
1.00 σ	71% (5/7)	57% (4/7)	57% (4/7)	43% (3/7)
1.25 σ	50% (1/2)	100% (2/2)	60% (3/5)	40% (2/5)

Table 3.6에서 제시한 12월 NPO와 우리나라의 12월, 1월 기온 관련성을 산점도로 나타내고, 그 중에서, 12월 NPO와 NDJ Nino3.4 지수가 각각 0.5 표준편차 이상인 해를 표시하였다 (Figure 3.22). ± 0.5 표준편차의 기준은 우리나라의 기온 예측성, 특히 예측에 어려움이 있는 1월 기온 예측성이 가장 높은 경우와, 예측인자를 활용하여 선정되는 해의 적절한 수를 경험적으로 고려한 것이다 (Table 3.7). 그 결과 12월에는 9개 해 중에서 7의 해에 우리나라의 기온 상승이 나타나며 약 78%, 기온 하강은 50%의 예측정확도를 나타낸다. 우리나라의 1월 기온 상승은 약 56%, 기온 하강은 50%의 예측성을 나타내며, 12월 NPO와 NDJ Nino3.4 지수를 활용하면 1월 기온의 예측성을 향상할 수 있을 것으로 예상된다.

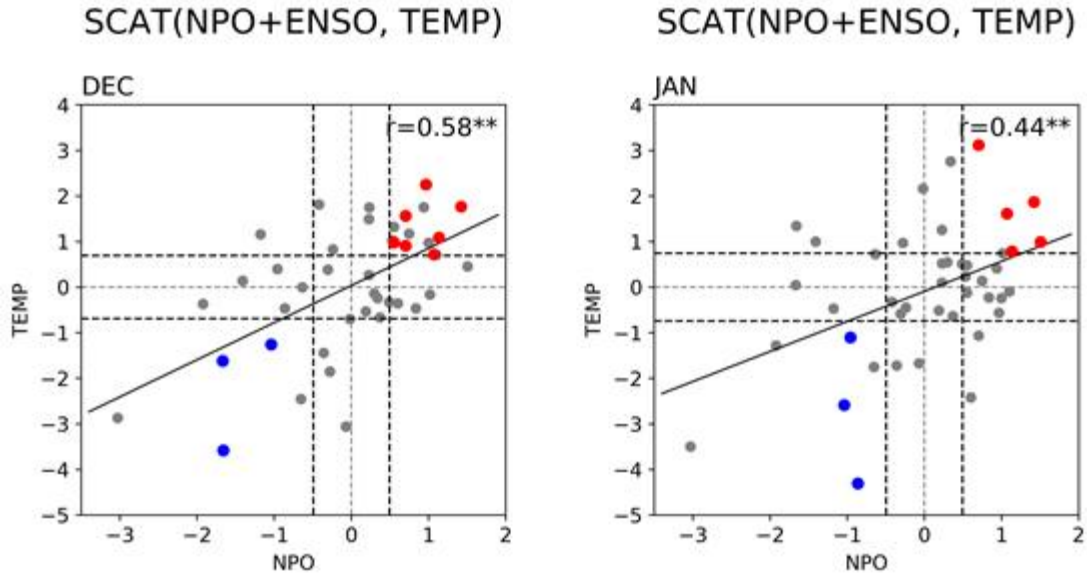


Figure 3.22. Scatter diagram between the December NPO and Korean temperature anomalies in December (left) and January (right). The values when the December NPO+NDJ Nino3.4 index and Korean temperature index is above (below) $+(-)0.5$ standard deviation are indicated by the red (blue) dots. The symbol of ** denotes the 99% confidence level based on the student t-test.

Table 3.7. The same as in Table 3.4 but for December NPO+NDJ Nino3.4 index.

NPO+ENSO level	Positive temperature ($+0.50\sigma$)		Negative temperature (-0.50σ)	
	December	January	December	January
0.25σ	75% (9/12)	42% (5/12)	56% (5/9)	56% (5/9)
0.50σ	78% (7/9)	56% (5/9)	50% (3/6)	50% (3/6)
0.75σ	67% (4/6)	67% (2/3)	67% (2/3)	67% (2/3)
1.00σ	67% (2/3)	67% (2/3)	0% (0/0)	0% (0/0)
1.25σ	100% (1/1)	100% (1/1)	0% (0/0)	0% (0/0)

12월 NPO와 NDJ Nino3.4 지수의 ± 0.5 표준편차를 기준으로 동아시아 지역의 표층 기온에 대해 합성도 분석을 수행하였다 (Figure 3.23.). 결합 지수가 양의 위상일 때, 12월에 우리나라를 비롯한 일본에서 유의미한 기온 상승이 관측된다. 기온 상승은 1월에도 지속되며, 특히 중국 북부에서 고온이 강하게 발생한다. 반면에, 음의 결합 지수를 고려할 경우에는 12월에 우리나라와 일본에서 유의미하지는 않지만 기온이 낮아지는 경향이 있다. 1월이 되면 우리나라와 중국 대부분의 지역, 그리고 일본에서 기온 하강이 관측된다. 그러므로 12월 NPO 지수는 우리나라 뿐만 아니라 동아시아의 일부 지역에서도 1월 기온을 예측하는 인자로 활용할 수 있다.

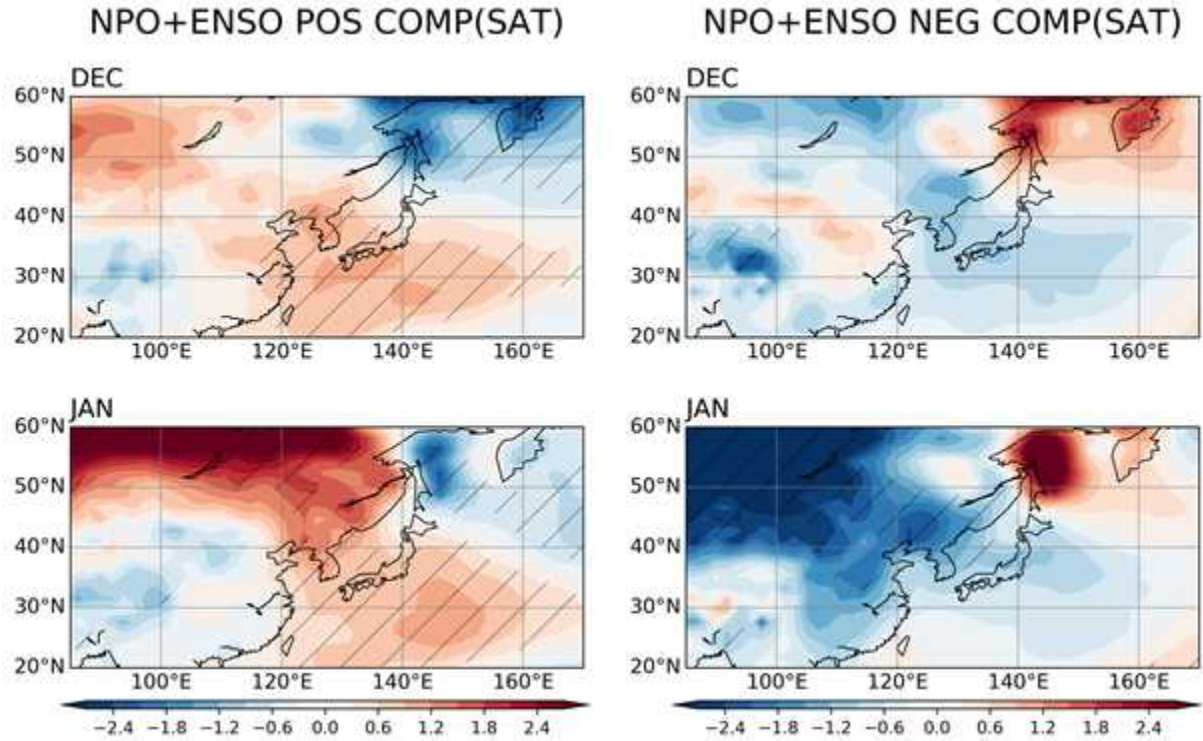


Figure 3.23. Joint composites of surface air temperature anomalies in December and January when the December NPO+NDJ Nino3.4 index is above 0.5 (left) and below -0.5 (right) standard deviation. The hatches denote the 90% confidence level based on the student t-test.

또한 12월 NPO와 NDJ Nino3.4 지수를 모두 고려하여 선정된 해에 대응하는 우리나라의 기온을 3분위(평년보다 낮음, 평년과 비슷, 평년보다 높음)로 구분하였다 (Table 3.8, Table 3.9). 결합 지수가 0.5 표준편차 이상일 때를 기준으로 선정된 9개의 해 중에서 12월에는 7개의 해가 기온 상승을 나타내며 2개 해는 평년과 비슷한 기온이 관측되었다. 1월은 5개의 해가 기온 상승, 3개 해에 평년과 비슷, 1개 해에 기온 하강이 나타난다. 그러므로 12월에 엘니뇨와 양의 NPO가 동시에 발생하면 우리나라의 12월과 1월 모두 평년보다 기온이 높을 것이라고 예상할 수 있다. 반면에, 결합 지수가 -0.5 표준편차 이하인 6개 해 중에서 12월에는 각각 3개 해가 평년보다 낮은 기온, 평년과 비슷한 기온으로 관측되었다. 1월에는 3개 해에서 기온 하강, 2개 해 평년 기온, 1개 해는 기온이 상승하였다. 결합 지수가 음의 위상일 경우에는 선정된 해가 양의 결합 지수에 비해 적고 예측성이 낮지만, 12월과 1월 모두 우리나라의 기온이 평년보다 낮거나 평년과 비슷한 경향이 있으므로 예측에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 3.8. Korean temperature anomalies in December and January when the December NPO+NDJ Nino3.4 index is above 0.5 standard deviation. Blue (red) shading indicates below-normal (above-normal) temperature anomalies in accordance with its ± 0.5 standard deviation. BNA denotes the number of below-normal/normal/above-normal years.

	December	January
2019	1.6	3.1
2015	2.3	-0.6
2006	0.7	1.6
2002	0.9	-1.1
1997	1.1	0.8
1994	1.0	-0.1
1991	1.8	1.9
1987	0.5	1.0
1982	-0.2	0.7
B/N/A	0/2/7	1/3/5

Table 3.9. The same as in Table 3.8 but for when the December NPO+NDJ Nino3.4 index is below -0.5 standard deviation.

	December	January
2010	-0.5	-1.3
2005	-3.6	1.3
2000	0.4	-1.1
1999	0.0	0.7
1995	-1.6	0.0
1983	-1.3	-2.6
B/N/A	3/3/0	3/2/1

지금까지의 결과를 바탕으로 12월 NPO와 ENSO의 정보를 이용하는 우리나라의 겨울철 기온 예측 순서도를 작성하였으며 예측 지수의 양의 위상을 고려하였다 (Figure 3.24). 엘니뇨와 라니냐는 역학 모형이나 통계 모형 뿐만 아니라 최근에는 인공지능을 이용한 예측 기술의 발달로 예측 기간과 정확도가 점점 향상되고 있다. 예를 들어, 겨울철에 엘니뇨의 발생이 예측되면, 일반적으로 엘니뇨의 최절정기인 12월에 우리나라의 기온이 평년보다 높을 것으로 예상할 수 있다. 다만 NPO를 예측하는데 다소 어려움이 있기 때문에, 북태평양의 대기 변동을 지속적으로 모니터링할 필요가 있다. 이후 12월에 NPO 양의 위상이 발생하면 한 달 지연되어 1월에 우리나라의 기온 상승을 예상할 수 있다. 그러므로 제시된 순서도를 통해 우리나라의 겨울철 기온 예측에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 보고서에는 엘니뇨 상태에서 12월에 NPO 음의 위상이 발생하면 우리나라의 1월 기온이 하강하는 경향, 라니냐 발달 등 두 지수가 반대 위상인 경우에 대해서는 자세히 다루지 않았지만, 추후 비선형성을 고려한 예측 정보를 제공하여 우리나라의 겨울철 기온 예측에 활용할 예정이다.

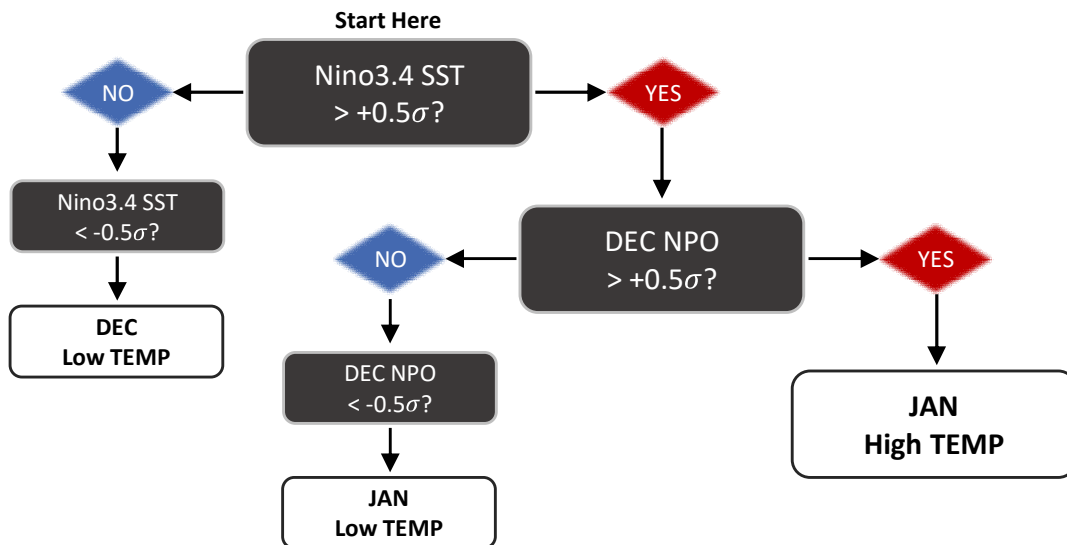


Figure 3.24. Flowchart of decision process for implementing the December NPO and ENSO to determine the Korean temperature anomalies in winter (December and January).

3.4. 요약

본 연구에서는 우리나라의 겨울철 기온 예측을 위한 신규 예측인자로 12월 NPO를 선정하고 우리나라 기온에 영향을 주는 상세 역학과정을 분석하였다. 12월 NPO는 두가지의 역학을 통해 한 달 지연되어 우리나라의 1월 기온 변동성에 영향을 주는 것으로 보인다. 먼저, 12월에 NPO와 관련된 중위도 북태평양에 고기압 순환이 위치하면 고기압의 남서쪽에 발생한 북동풍 편차가 북서태평양 지역으로 향하게 된다. 이 북동풍 편차에 의해 북서태평양에는 저온 건조한 공기가 유입되어 1월에 북서태평양 강수의 감소가 발생한다. 북서태평양 음의 강수와 동반된 상층 저기압의 로스비 파동 전파로 우리나라를 포함한 동아시아 지역에 고기압성 편차가 지속되며, 우리나라는 남풍 편차의 영향으로 기온이 상승하게 된다. 다음으로는 바람-증발-해수면 온도 피드백을 통해 우리나라를 연근해를 포함한 중위도 서태평양에서 발생하는 해수면온도의 상승이다. 12월에 NPO 관련 고기압의 남쪽에 위치한 동풍 편차가 평균 서풍인 중위도 제트와 만나 총 풍속이 약화된다. 이 때 바람-증발-해수면온도의 양의 피드백이 작동하여 총 풍속 감소로 인한 증발 감소가 발생하고, 결과적으로 1월에 우리나라 연근해의 해수면온도가 상승한다. 연근해 해수면온도의 상승은 우리나라의 1월 기온이 상승하는데 유리한 조건이 될 수 있다 (Figure 3.25).

또한 12월 NPO 지수를 이용하여 우리나라의 겨울철 기온 예측성을 검증함으로써 대표적인 겨울철 예측인자인 ENSO 보다 향상된 예측성을 제시하였다. 12월 NPO 지수와 NDJ Nino3.4 지수의 강도에 대한 민감도 평가를 통해, ± 0.5 표준편차를 이용할 때 예측 정확도가 가장 높은 것을 확인하였다. 특히, Nino3.4 지수는 우리나라의 12월 기온과 강수 예측성이 높지만 1월 예측에 어려움이 있기 때문에, 12월 NPO를 활용하면 우리나라의 12월 기온 뿐만 아니라 한 달 지연으로 1월 기온 역시 예측할 수 있다. 다만 NPO는 해면기압으로 정의되고 이와 같은 대기 변수는 지속성이 짧고 실제 예측에 어려움이 있다. ENSO의 경우 역학 모형과 통계 모형을 이용하여 예측이 가능하기 때문에 Nino3.4 지수를 활용하여 우리나라의 12월 기온과 강수를 예측하고, 12월 NPO 지수를 모니터링하면 1월 기온 예측에 활용할 수 있을 것이다.

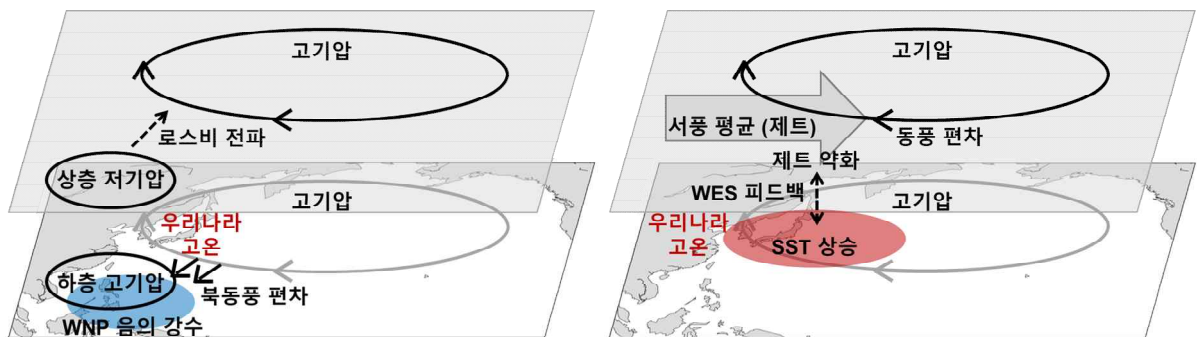


Figure 3.25. Schematic diagram showing the teleconnection from WNP precipitation and WES feedback mechanisms in response of December NPO for warm temperature anomalies over Korean Peninsula in January with 1-month delay.

4. 미래 기후변화에 따른 한반도 재생에너지 전망

4.1. 연구배경

지구온난화로 지구 온도는 가파르게 상승하고 있으며, 1850~1900년 평균기온 대비 최근 20년 (2001~2020년)은 약 0.99°C 상승하였고(IPCC, 2021), 최근 5년(2018-2022) 평균기온은 $1.17 \pm 0.13^\circ \text{C}$ 높았다(WMO, 2022). 더군다나 WMO의 2023년 임시의 전지구 기후 보고서에 의하면 2023년은 가장 기온이 높은 해로 기록되었으며, 2023년 10월 까지 전지구 기온은 산업혁명 이전 1850~1900 기간 대비 1.4°C 높았다고 보고되었다. 더군다나 WMO는 인류생존의 일종의 마지노선인 전 지구 평균이 1.5°C 를 앞으로 5년 이내에 넘을 것이라고 경고 하였다.

위와 같이 지구온난화가 가파르게 상승하는 원인 중에 그동안 에너지 생산에 있어서 화석연료 의존이 상당히 컸던 것과 관련이 있다(IEA 2020). 그러므로 지구온난화를 완화하기 위한 화석연료 의존 에너지 시스템에서 태양광(Photovoltaic, PV)과 풍력 발전 같은 재생에너지 시스템으로 전환하려는 전 세계적인 노력들이 진행 중이다. 가격이 비쌌던 재생에너지는 기술발전, 생산규모 확대, 유지관리 효율성 제고 등으로 빠르게 기존 발전 설비의 경제성을 따라 잡고 있다. 그러므로 재생에너지는 경쟁력이 있으며, 전 세계 많은 국가에서 재생에너지에 의한 전력 생산 비율도 꾸준히 증가하고 있다(REN21 2020). 2019년을 기준으로 재생에너지는 세계 전력 수요의 27.3%를 차지하였으며, 특히 풍력이 22%, PV는 10%의 세계 전력생산에 기여하고 있다.

우리나라는 PV와 풍력을 핵심 청정 에너지원으로 육성하여 보급이 확대될 전망이며, 2012년 대비 2030년 태양광은 2.7%에서 20.8%, 풍력은 2.2%에서 19.1%으로 보급 목표를 설정하였다 (산업통상자원부 2020). 이와 같이 기후변화를 완화하려는 노력의 일환으로 재생에너지에 의한 전력 생산 의존도를 점차적으로 증가시키려는 정책 실행에 있어서, 태양광 및 풍력 발전에 의한 안정적인 전력 공급계획을 위해서 가까운 미래 혹은 먼 미래에서 이들 재생에너지 시스템에 의한 발전량에 영향을 미치는 기후적인 요소들이 어떻게 변할지에 대한 이해가 필요하다. 즉 PV 발전을 위해서 복사량, 기온, 풍속, 구름량, 풍력 발전을 위한 풍속 등을 포함한 기후적인 요소들의 정확한 예측 혹은 전망 정보는 발전계획 및 에너지 생산 전망 등을 위해서 필수적이다. 더군다나 미래 기후변화를 고려하는 재생에너지 설치 입지 선정을 위한 PV 및 풍력 발전의 기후 변화 영향에 대한 세부적인 지역 정보 제공을 위해서 고해상도의 기후자료가 필요하다.

그러므로 이 연구에서는 1km 해상도의 남한 고해상도 기후 자료를 사용하여, 미래 기후 변화에 따른 남한의 PV와 풍력 발전에서 변화를 평가하고, 아울러 그 변화에 대한 기후적인 원인을 분석하고자 한다.

4.2. 자료와 방법

4.2.1. 관측자료

지면 단파 복사, 지면 기온, 바람, 지위고도, 총구름량에 대한 관측 자료는 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 reanalysis version 5 (ERA5; Hersbach et al. 2020)가 사용되었다. ERA의 자료 기간은 1940년부터 현재까지 이다. 이 연구에서는 1981~2020년 기간의 월평균 관측 자료들을 분석하였으며, 1981년에서 2010년을 평년 기간으로 하여, 1981년에서 현재까지의 지위고도, RSDS, 바람, 기온 편차장이 정의되었다.

4.2.2. 고해상도 남한 상세 관측 및 기후변화 격자 자료

미래 기후변화에 따른 남한 재생에너지 변화 전망 분석을 위해서 우리나라의 지형효과를 고려하는 1km의 고해상도 격자형 관측자료 및 SSP 기반 미래 기후 변화 시나리오 자료를 사용하였다(Kim et al. 2022b). 남한 상세 고해상도 관측자료는 고도, 거리, 지향면, 해양도 등을 고려한 통계적 상세화 방법인 MK-PRISM (Modified Korean - Parameter elevation Regressions on Independent Slopes Model) (Kim et al. 2012; 2013a; 2013b)을 적용하여 생산되었다. PRISM 상세화 방법은 다른 상세화 방법(KRIGING, Inverse Distance Weighting 등)에 비해서 산악 지역이 많은 우리나라의 지형적인 특성을 잘 나타낸다고 알려져 있다(Lee et al. 2014). MK-PRISM의 입력 자료로서 2000-2019 기간 동안 종관기상관측소(ASOS, Automated Synoptic Observing System) 97개소와 자동기상관측소(AWS, Automatic Weather System) 508개, 총 605개 관측소자료가 사용되었다.

수평해상도 1km의 고해상도 기후변화 시나리오는 MK-PRISM에 기반한 PRIDE (PRISM-based Dynamic downscaling Error correction) 기법을 사용하여 산출되었다 (Kim et al., 2016). 자료 산출 과정을 간략하게 소개하자면 [자세한 방법 및 검증 결과는 Kim et al. (2022b), Kim et al. (2021), Kim and Kim (2018) 참조], CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) 동아시아 2단계 프로젝트의 5개의 지역 기후 모델들을(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs) 통해 생산된 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 온실가스 경로인 SSP 기반 25km 해상도의 기후변화 시나리오 자료를 Barnes 객관 분석 기법 (Koch et al., 1983) 적용하여 남한 상세 관측자료와 같은 1km 해상도로 내삽하였다. 내삽된 고해상도 기후변화 시나리오 자료의 계통오차[지역기후 모델들의 계통오차 분석은 Kim et al. (2020, 2022a) 참조]는 제거하고 기후변화 강제력에 대한 반응은 유지하기 위해서 자료의 일별 계절 사이클을 남한 상세 관측자료의 일별 계절 사이클로 교체하였다. 그리고, 계통오차가 비교적 큰 강수량에 대해서는 QDM (Quantile Delta Mapping, Cannon et al. 2015) 방법으로 추가적으로 편의 보정을 수행하였다. 여기서 미래 기후 시나리오에 대한 지역 기후 모델들의 적분을 위한 경계장은 CMIP6 모형들 중 하나인 UKESM (UK Earth System Model)의 6시간 간격, 37층의 모의자료가 사용되었다(Sellar et al., 2019). CMIP6 온실가스 표준 경로는 총 5개의 종류가 있으며, 남한 상세 기후변화 자료는 SSP1-2.5, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 경로를 기반으로 생산되었다. SSP1-2.5는 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속한 경제성장을 가정하는 시나리오이며, SSP2-4.5는 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 정도라고 가정한 시나리오이고, SSP3-7.0은 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 구조를 가정하는 시나리오이다. SSP5-8.5는 산업기술의 빠른

발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정하는 시나리오이다. 이 연구에서는 고탄소 시나리오를 위해서 SSP5-8.5를 사용하였고, 이에 대비 탄소 배출이 적은 저탄소 시나리오는 SSP2-4.5를 사용하였다.

이 연구에서는 재생에너지 미래 변화에 대한 원인 분석을 위해서 한반도 상세 기후변화 시나리오 자료를 위해서 사용된 지역 기후 모델 3종(HadGEM3-RA, CCLM, WRF)의 모의자료를 이용하였다.

4.2.4. 재생에너지 발전 잠재량 평가

PV 에너지 발전 잠재량(power generation potential, PVpot)은 [4.1]과 같이 주변 조건 (즉 기후 조건)에 따라서 nominal 전력 용량 대비 태양광 셀들의 전력 용량을 무차원의 값으로 평가하는 Jerez et al. (2015)의 방법을 따랐다. PVpot 방정식은 주요 에너지원인 지표 단파 복사(RSDS) 뿐만 아니라 태양광 셀의 전력생산 효율에 영향을 미치는 대기 변수 즉 지표기온(TAS), 하층 풍속(VWS)의 함수로서 표현된다. 특히 기온이 올라가면 PV 전력용량은 감소한다(Radziemska 2003).

$$PV_{pot}(t) = P_R(t) \frac{RSDS(t)}{RSDS_{STC}} \quad [4.1]$$

여기서 STC 은 표준 시험 조건($RSDS_{STC} = 1000 \text{ Wm}^{-2}$)을 의미하며, P_R 은 성능비(Performance ratio)이며, 기온 변화에 따른 PV 셀 효율의 변화를 설명하기 위해서 [4.2]처럼 공식화 될 수 있다.

$$P_R(t) = 1 + \gamma [T_{cell}(t) - T_{STC}] \quad [4.2]$$

T_{cell} 은 PV 셀의 온도이고 [4.3]처럼 TAS, VWS, RSDS의 영향을 고려하여 모델링 되었으며 (Chenni et al. 2007), $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$, $\gamma = -0.005^\circ\text{C}^{-1}$ 이다.

$$T_{cell}(t) = c_1 + c_2 TAS(t) + c_3 RSDS(t) + c_4 VWS(t) \quad [4.3]$$

여기서 $c_1 = 4.3^\circ\text{C}$, $c_2 = 0.943$, $c_3 = 0.028^\circ\text{Cm}^2 \text{ W}^{-1}$, $c_4 = -1.528^\circ\text{C}$ 이다. 그러므로 주변 기후 조건이 표준 조건에 상응한다면, PV 전력 생산은 전격값(rated value)에 도달한다. Tcell이 25°C 보다 작고(크고), RSDS가 1000 Wm^2 보다 크면(작으면), PVpot은 1 보다 크고(작고) PV 전력 출력은 태양광 모듈의 공칭전력 보다 크게(작게) 된다.

기후변화에 따른 PVpot에 변화에 대한 TAS, RSDS, VWS 기여 정도를 평가하기 위해서 [4.1]-[4.3]을 합치면 다음과 같다.

$$PV_{pot}(t) = \alpha_1 RSDS(t) + \alpha_2 RSDS^2(t) + \alpha_3 RSDS(t) \cdot TAS(t) + \alpha_4 RSDS(t) \cdot VWS(t), \quad [4.4]$$

$$\alpha_1 = 1.1035 \times 10^{-3}, \alpha_2 = -1.4 \times 10^{-7}, \alpha_3 = -4.715 \times 10^{-6}, \alpha_4 = 7.64 \times 10^{-6}$$

그러므로, PVpot 변화는 다음처럼 주어진다:

$$\begin{aligned} \Delta PV_{pot}(t) = & \Delta RSDS(t)(\alpha_1 + \alpha_2 \Delta RSDS + 2\alpha_2 RSDS(t) + \alpha_3 TAS + \alpha_4 VWS) \\ & + \alpha_3 RSDS \cdot \Delta TAS \\ & + \alpha_4 RSDS \cdot \Delta VWS \\ & + \alpha_3 \Delta RSDS \cdot \Delta TAS \\ & + \alpha_4 \Delta RSDS \cdot \Delta VWS \end{aligned} \quad [4.5]$$

[4.5]에서 $\Delta RSDS = \Delta VWS = 0$ 을 취하면 PVpot변화에 대한 TAS의 기여, 비슷하게 $\Delta RSDS = \Delta TAS = 0$ 을 취하면 VWS 기여를 평가할 수 있다. RSDS 의 기여는 ΔPV_{pot} 에서 TAS의 기여와 VWS을 기여를 빼면 얻을 수 있다.

풍력 발전 평가는 전형적인 풍력 터빈 높이인 80m에서 [4.6]처럼 풍속의 3제곱에 비례하는 바람 에너지 밀도 (WED, Wind Energy Density)를 사용하여 수행되었다. 즉 WED는 풍력 발전 터빈의 날개가 회전하는 면적에 통과하는 운동에너지를 의미한다.

$$WED = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad [4.6]$$

여기서 ρ 는 공기밀도 ($=1.225 \text{ kg m}^{-3}$)이고 U 는 일정 높이에서 풍속이다. 남한 고해상도 자료의 풍속은 10m에서 값이므로 power law($U_H = U_{10} (H/10)^{1/7}$)를 이용하여 80m 까지 외삽되었다.

풍력 발전 터빈이 움직이고 전력이 생산되는 풍력 발전 가용 풍속 범위 즉 풍력 발전기의 시동(3 m/sec) 및 종단(25 m/sec) 풍속 구간에서 풍속 비율도 분석되었다(Fig. 4.1). 풍력 발전 터빈은 시동 풍속에서 전력을 생산하기 시작하고, 정격 출력 풍속(13 m/sec)까지 전력 생산이 최대로 증가하고, 이후 전력생산량은 더 이상 증가하지 않는다. 종단 풍속에 바람이 강해지면, 터빈은 멈추고 전력생산을 멈추게 된다. 어느 풍속 구간에서 기후변화에 영향을 많이 받는지에 대한 분석을 통해서 상대적으로 작은 전력을 생산하는 구간과 더 많은 전력을 생산하는 구간 중에서 어느 것이 더 기후변화에 영향을 많이 받는지 비교하였다.

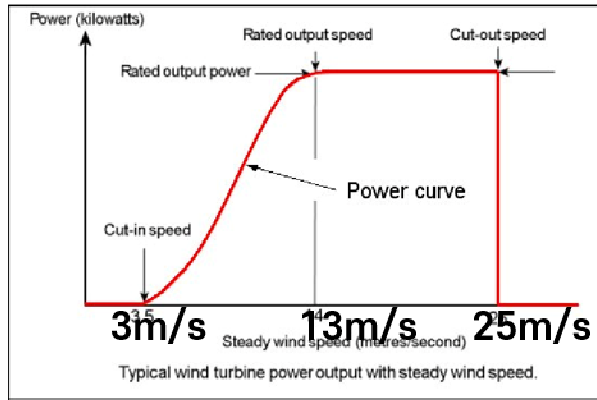


Figure 4.1. Wind turbine power curve. Cut-in speed where the turbine begins to operate, rated output speed where the turbine begins to operate at its rated power and cut-in speed where the rotor is stopped are indicated.

4.3. 태양광 에너지 발전 잠재량 변화 전망

먼저 관측의 현재기후(2004~2009)에서 PVpot의 계절적 변화 특징을 보면, 봄철(전국평균 0.20)에 가장 큰 PVpot을 보이고, 겨울철(0.12)에 가장 작은 잠재량을 보였으며, 지역적으로는 남한 중남부 지역에서 최대값을 나타냈다.(Fig. 4.3). 이 같은 지역적, 계절적 변화는 RSDS 변동과 가장 관계가 깊다(Fig. 4.4). 즉 태양 일사량은 봄철에 가장 크고, 다음은 여름철 그리고 겨울철에 가장 작은 값을 보인다. 또한 RSDS가 중남부 지역에서 다른 지역보다 상대적으로 큰 값을 보였다. 여름철이 봄철보다 RSDS가 작은 이유는 비가 가장 많이 내리는 계절이고 이와 함께 구름이 많이 발달할 가능성이 큰 계절이기 때문이다. 그리고 PVpot이 RSDS에 의해서 증가하지만, 기온상승이 여름철에 최대값을 보이기 때문에 기온의 태양광 셀의 에너지 발전 효율을 감소시키는 영향도 여름철 보다는 봄철에 최대값을 갖도록 기여한 것으로 보인다.

위와 같이 현재 기후대비 저탄소 시나리오와 고탄소 시나리오 기반 미래 기후변화의 21세기 전반기(2021~2040), 중반기(2041~2060), 후반기(2081~2100)에 PVpot의 계절별 변화 전망은 Figure 4.4와 4.5에서 각각 보여준다. 저탄소 시나리오에 대하여 대부분의 모델들은 봄철에는 전반기에 다소 증가 경향(90% 기준으로 통계적으로 유의하지 않음)을 보이다가, 중반기 이후에는 감소하는 것으로 전망되었다. 하지만 후반기에 통계적으로 유의한 감소는 강원도 북부 지역에서만 나타났다. 여름철은 봄철과 비슷한 양상을 보였는데, 즉 초반에 다소 증가 하였고, 중반기 이후 감소 경향을 보였다. 후반기에서는 현재 기후 대비 변화 경향에 대한 모델 간 불일치가 다른 계절에 비해서 가장 컸다. 가을철 PVpot은 다른 계절에 비해서 21세기 전반기에 가장 크게 증가하였으며, 특히 대부분 지역에서 90% 수준에서 유의하지 않았으며, 경상도 남부 지역에서만 유의한 증가를 보였다, 이후 후반기에 북서부 지역은 다소 감소 경향, 남동부 지역에서 다소 증가 경향을 보였다. 겨울철은 다른 계절과는 달리 21세기 전반기부터 감소하는 것으로 전망 하였고, 남한 북부 지역 즉 경기도, 강원도 전 지역, 충청남북도와 전라북도 일부 지역에

서 상당히 크게 감소하는 것으로 나타났다.

고탄소 시나리오에서 PVpot 변화는 저탄소 시나리오와 비슷한 특징을 보였지만, 변화는 더 크게 통계적으로 유의한 변화를 보이는 지역이 더 증가하였다. 봄철에는 전반기에는 다소 증가 경향을 보이지만, 중반기 이후 감소 경향을 보였다. 후반기에는 서울/경기도, 강원도, 전라남북도, 경상남도, 대구 지역에서 유의하게 감소하는 것으로 전망되었다. 여름철에는 중반기부터 모델간 불일치 지역이 상당히 늘어났으며, 후반기에는 유의한 증가를 보인 경상북도 남부 지역 제외 대부분 지역에서 기후변화에 따른 PVpot 변화에 대하여 불확실성을 나타내었다. 가을철에는 남한 북서부지역 감소 경향, 남동부 지역 증가 경향이 21세기 중반기부터 나타났다. 그 변화는 통계적으로 유의하지 않았다. 겨울철에는 21세기 전반기에 남한 전국에서 PVpot이 감소하였고, 특히 북부 지역에서 유의한 감소를 보였다. 그 유의한 감소는 점차적으로 남부 지역으로 확대 되었고, 후반기에 전국에서 통계적으로 유의한 감소를 보였다. 고탄소 시나리오에서 PVpot의 현재 기후 대비 21세기 후반기 감소폭은 남한 북부 지역에서 상대적으로 더 큰 것으로 전망되었다.

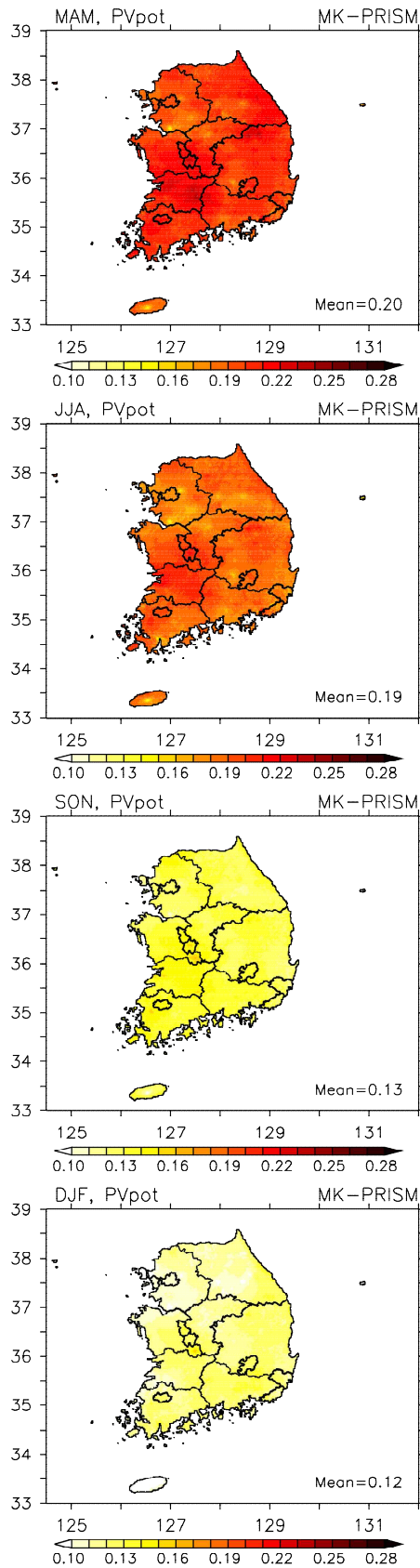


Figure 4.2. Seasonal distribution of photovoltaic power generation potential (PVpot) from observational MK-PRISM data.

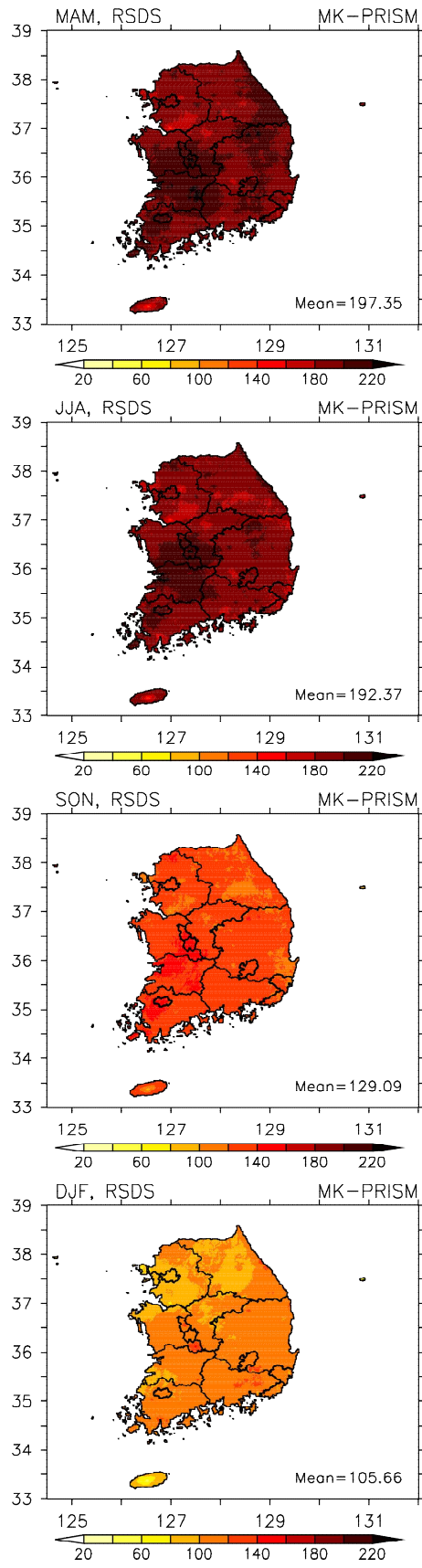


Figure 4.3. Seasonal distribution of downward shortwave radiation (RSDS) from observational MK-PRISM data.

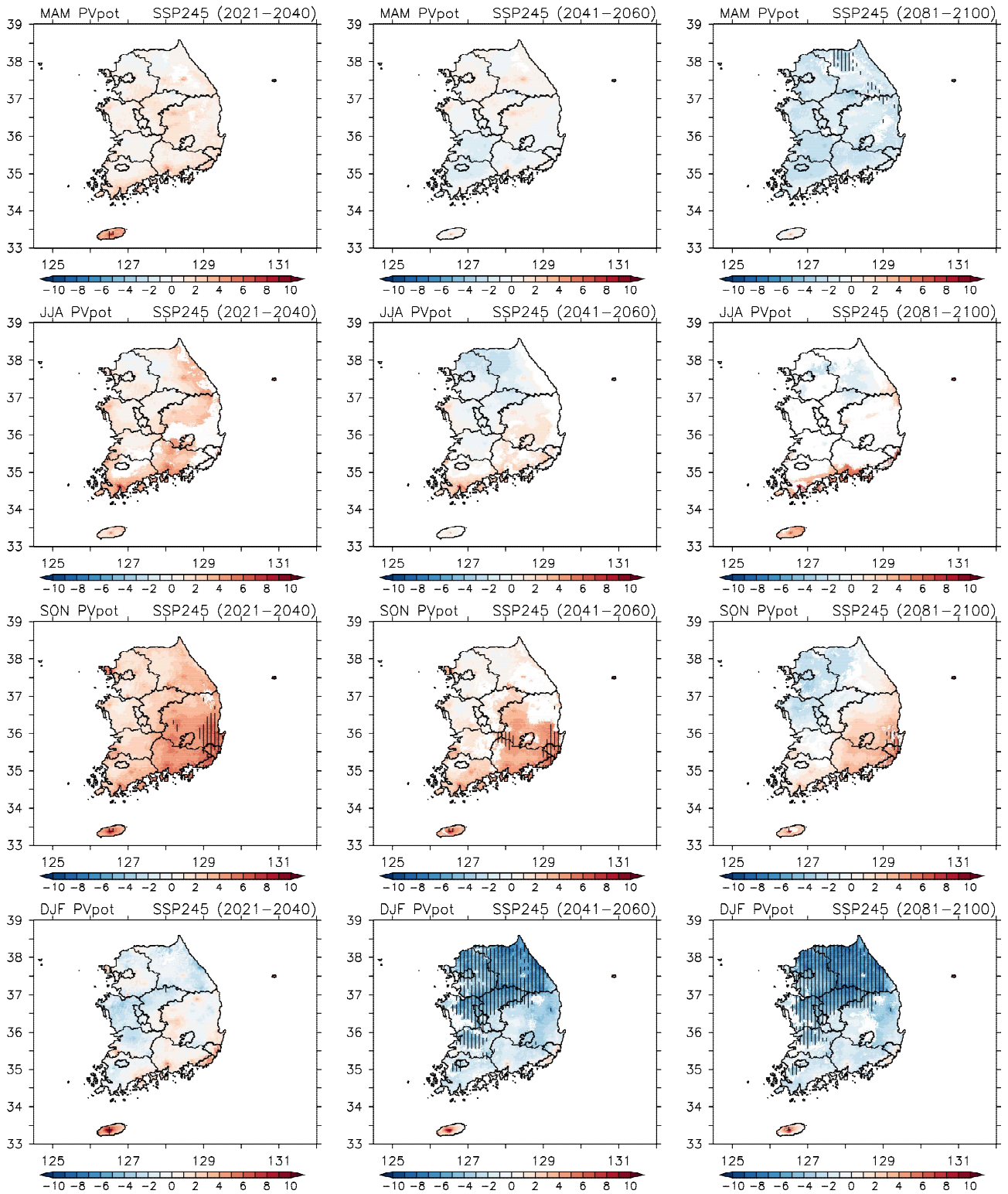


Figure 4.4. Change in seasonal mean PVpot under a future SSP245 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.

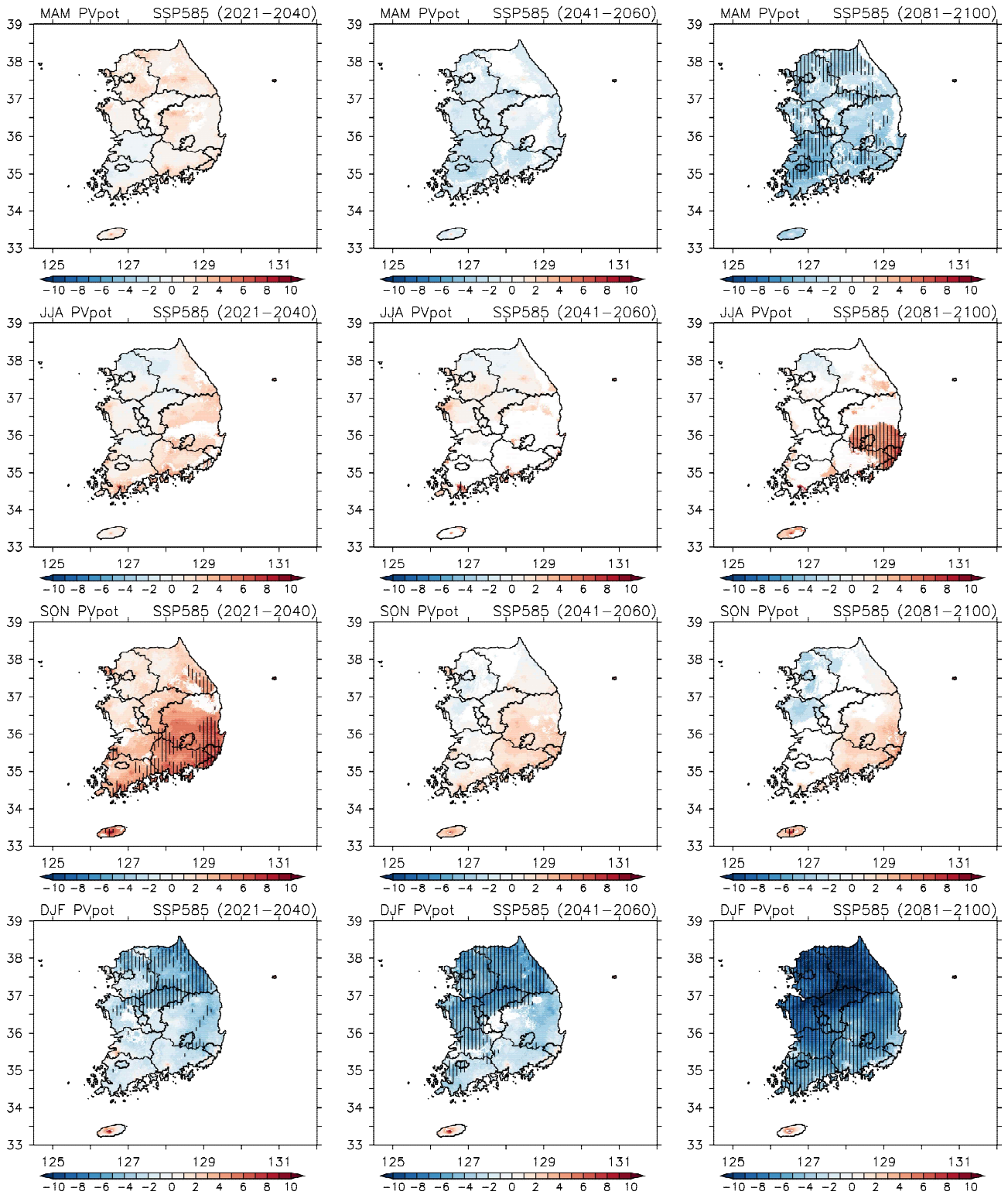


Figure 4.5. Change in seasonal mean PVpot under a future SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.

남한 지역별로 상세한 분석을 위해서 남한 9개 행정구역별 (Fig. 4.6) 평균된 21세기 후반기 PVpot 변화를 Figure 4.7에서 보여준다. Figure 4.5에서 나타난 것처럼 봄철과 겨울철에만

통계적으로(90%) 유의한 변화를 갖는 지역들이 존재하였다. 봄철에는 고탄소 시나리오에서 서울/경기/인천, 강원, 충남/대전/세종, 전북 지역에서 유의한 감소를 저탄소 시나리오에서는 강원 지역에서만 유의한 감소를 보였다. 여름철에는 유의한 변화를 보이는 지역은 없었으며, 대부분 지역에서 모델들이 변화에 대하여 유의성과 변화 방향에 대한 robust한 결과를 보여주지 못했다. 가을철에는 대부분 지역에서 현재 기후 대비 PVpot의 무시할만한 정도의 변화를 보였다. 겨울철에는 저탄소와 고탄소 시나리오 양쪽 모두 서울/경기/인천, 강원, 충남/세종/대전, 충북, 전북 지역에서 유의한 감소를 나타내었다. 전남/광주, 부울경, 경북/대구는 고탄소 시나리오에 대해서 유의한 감소를 보였다.

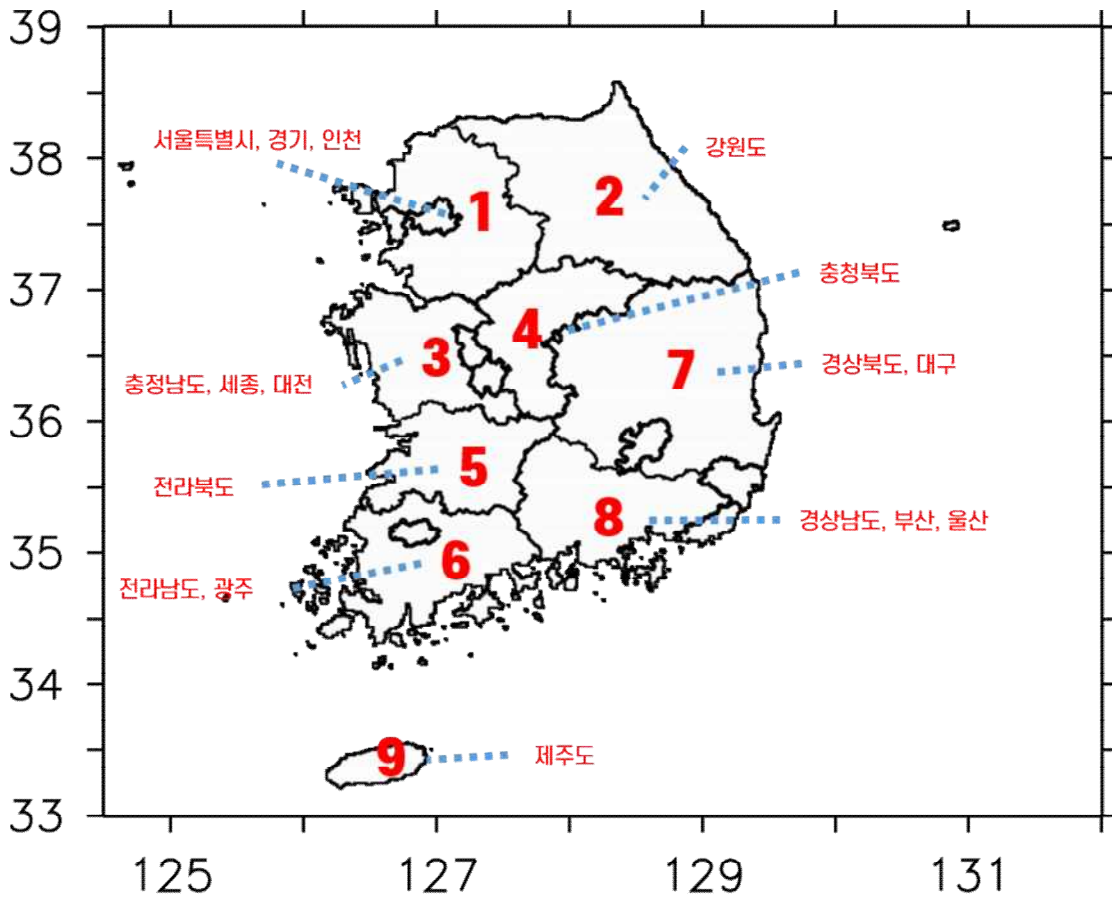


Figure 4.6. Map for nine administrative districts in South Korea.

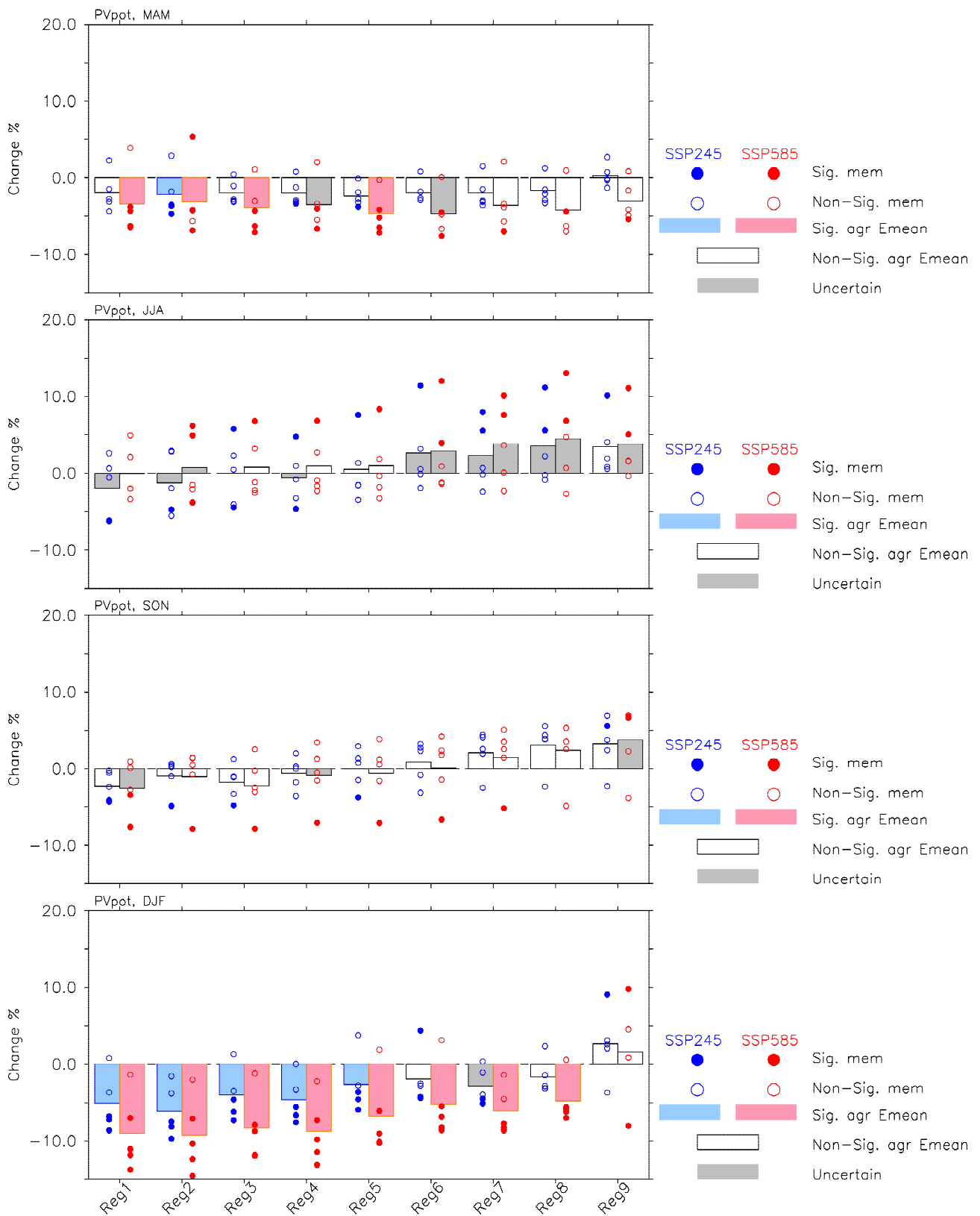


Figure 4.7. Box plots for change in seasonal mean PVpot under a future SSP245 (blue) and SSP585 (red) scenario over long-term(2081~2100) period relative to present climate in nine administrative districts in South Korea. Boxes indicate the multi-model ensemble mean and circles indicate each ensemble member: filled with colors if change is significant and with gray if change is uncertain and they are empty if change is negligible.

Figure 4.8은 미래 기후변화에 따른 연평균 PVpot 변화 전망을 보여준다. 미래 저탄소 시나리오에서 연평균 PVpot은 21세기 초반 동부 지역에서 더 큰 증가를 보이고, 북서부 감소, 남동부 감소의 구조가 중반기에 나타나며, 후반기에는 북서부 지역의 감소 경향은 통계적으로 유의한 값으로 커지고, 남동부 지역의 증가 경향은 다소 감소하여, 유의한 변화 보여주지 않는다. 고탄소 시나리오에서는 저탄소 시나리오와 비슷한 변화 전망을 보여주었으며, 후반기 서부/북서부 지역에서 감소폭이 더 컸다. 하지만 남동부 지역에서 PVpot 변화 전망은 모델들은 유의성이나 변화 방향에 대한 분명한 결과를 보여주지 않았다.

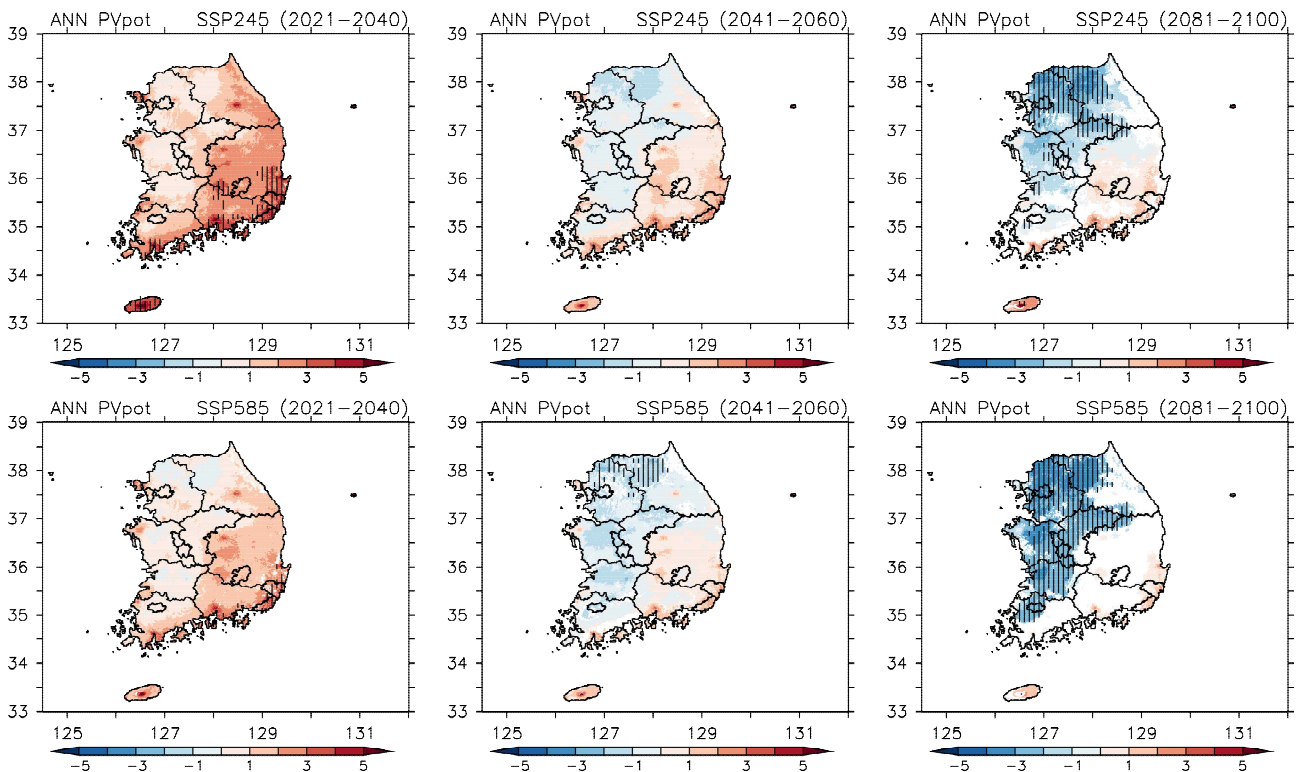


Figure 4.8. Change in annual mean PVpot under a future (upper panels) SSP245 and (lower panels) SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.

현재 기후 대비 저탄소와 고탄소 시나리오에서 태양광 에너지 발전의 주요 에너지원인 지표에서 하향 단파 복사 에너지(RSDS) 즉 태양 일사량의 변화는 각각 Figure 4.9과 4.10에서 보여준다. 저탄소와 고탄소 시나리오 모두 봄철에는 RSDS가 다소 감소하는 경향을 보이고, 특히 남부 지역에서 감소폭이 컸지만, 두 시나리오 모두 유의한 변화를 보이지 않았다. 여름철에는 저탄소/고탄소 시나리오 모두 남부 혹은 남동부 지역에서 유의한 증가를 보여주었다. 특히 고탄소 시나리오에서 증가폭이 더 컸다. 겨울철에는 21세기 후반기에 감소하는 것으로 전망되며, 특히 남한 북부 지역에서는 통계적으로 유의한 감소를 보여주었으며, 고탄소 시나리오에서 역시 감소 폭이 더 컸다. 연평균 RSDS(Fig. 4.11)는 저탄소 시나리오에서 남동부 지역에서 유의한 증가를 보였지만, 고탄소 시나리오의 21세기 후반기에는 유의한 증가를 갖는 동부 해안이 접한

지역을 제외하고 분명한 변화는 보여주지 않았다.

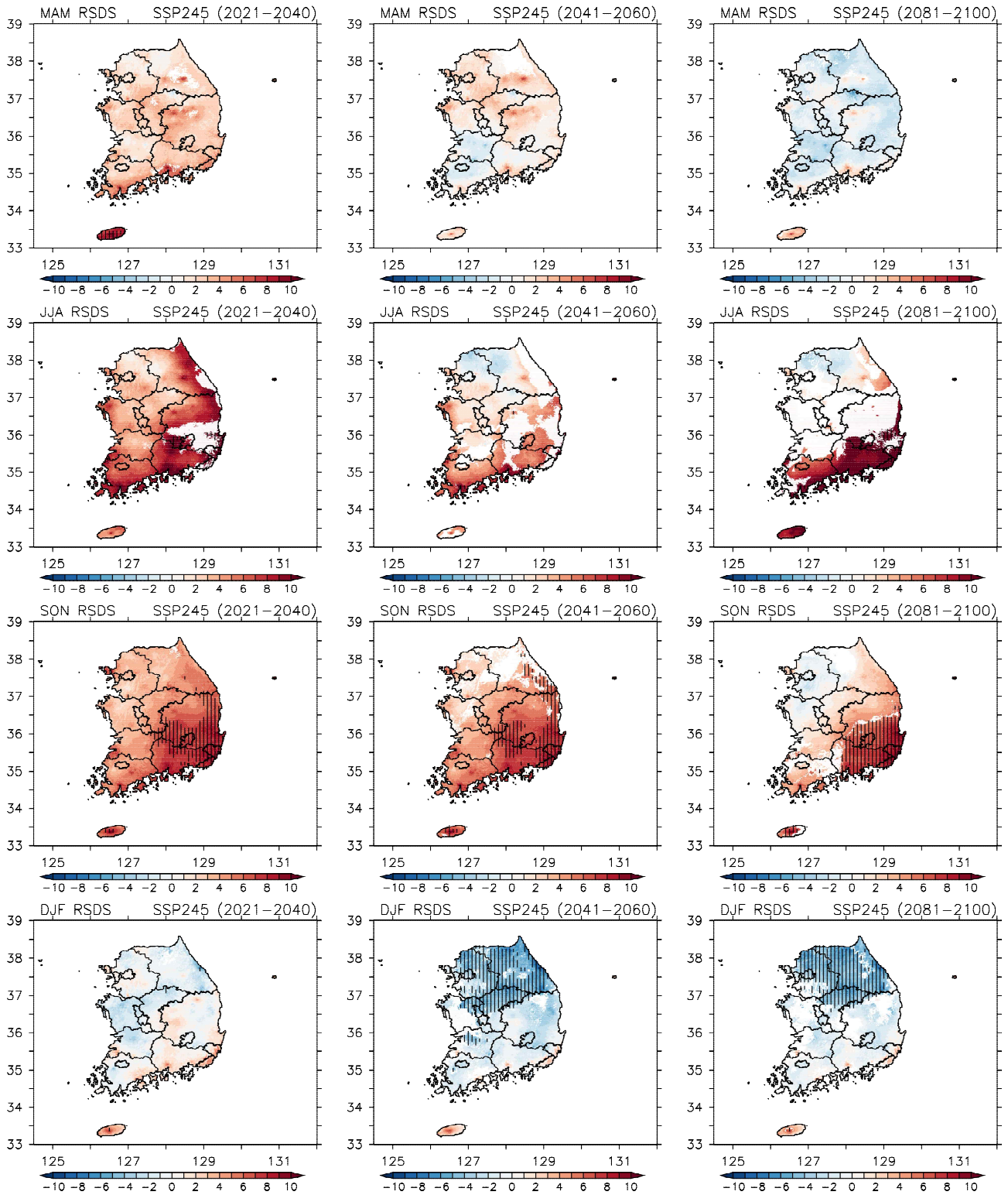


Figure 4.9. Change in seasonal mean downward shortwave radiation at the surface (RSDS) under a future SSP245 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.

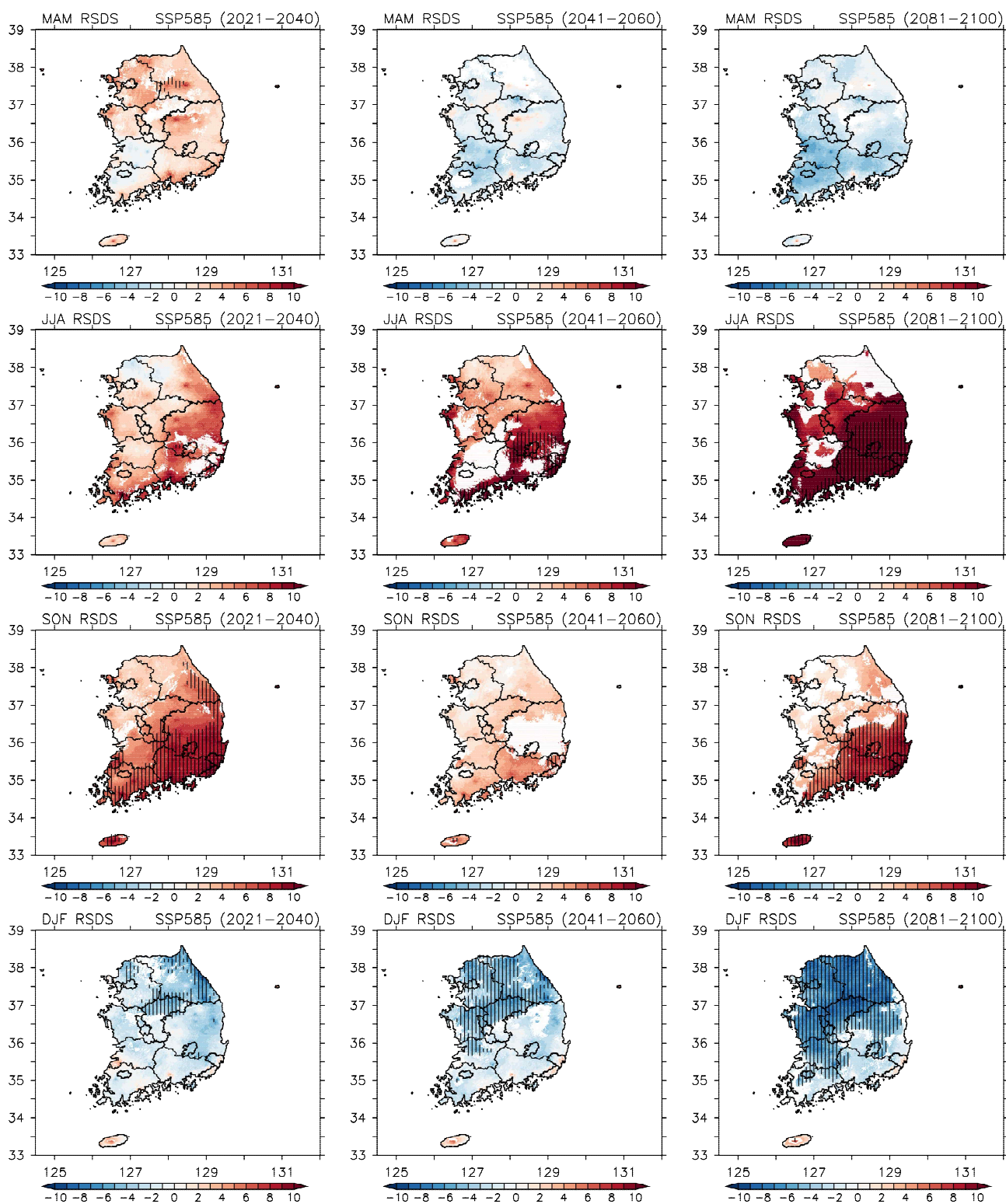


Figure 4.10. Change in seasonal mean RSDS under a future SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.

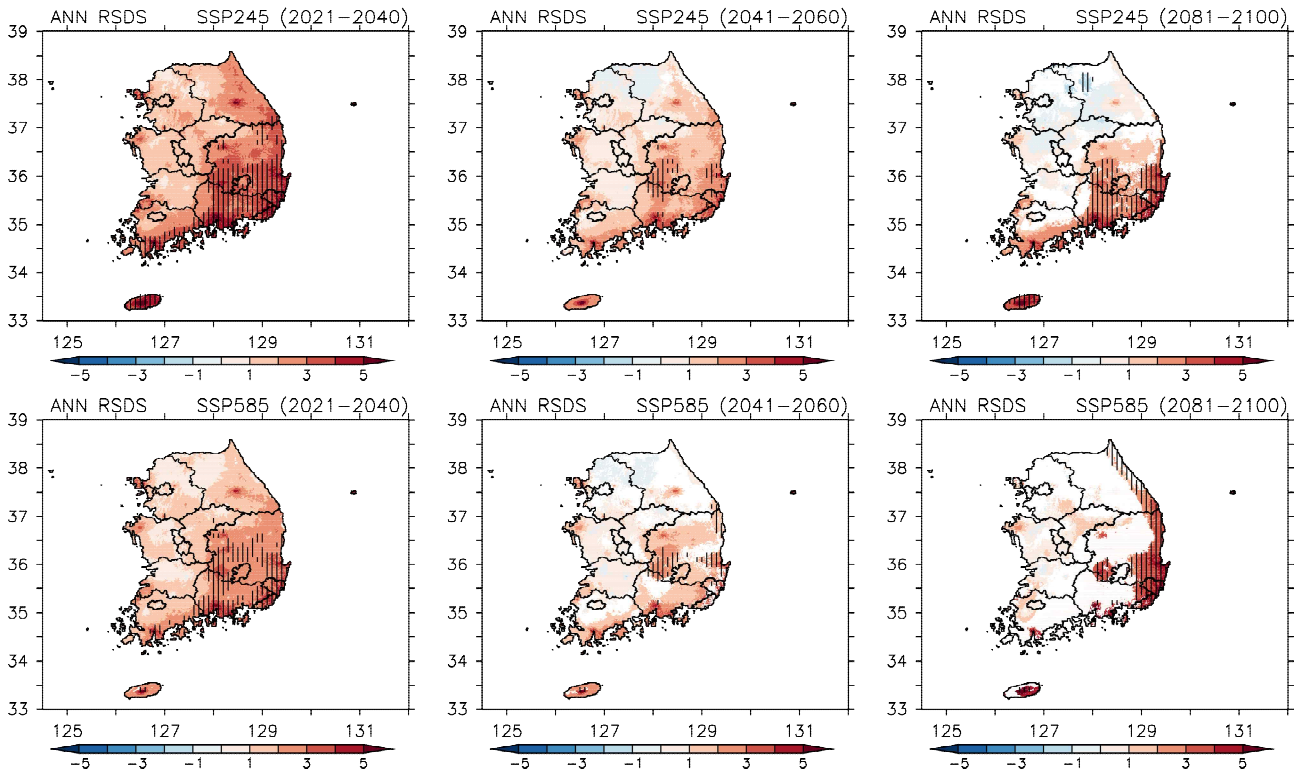


Figure 4.11. Change in annual mean RSDS under a future (upper panels) SSP245 and (lower panels) SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term(2081~2100) period.

Figure 4.12는 21세기 후반기에 현재 기후대비 전국 평균 PVpot과 RSDS의 변화를 보여준다. 이 Figure을 통해서 고탄소 시나리오에서 저탄소 시나리오 보다 PVpot이 기후변화에 더 취약하다는 것을 암시하고 있다. 봄철은 두 시나리오 모두 1개 제외 대부분의 모델에서 감소하나 저탄소 시나리오 경우 유의하지 않고, 고탄소 시나리오에 대해서 60% (즉 7 모델 중 3개)가 유의한 감소를 전망하였다. 여름철은 저탄소 시나리오에서 유의한 변화를 보이지 않았고, 고탄소 시나리오에서는 이전 문단에서 언급했듯이 유의성에서나 변화 방향에서 모델간 consensus를 찾기 어려웠다. 가을철은 PVpot 변화는 무시할 수 있을 정도로 상당히 작았다. 겨울철은 두 시나리오 모두 통계적으로 유의하게 감소하였고, 특히 고탄소 시나리오에서 더 큰 감소를 보였다. 태양광 발전 잠재량의 주요 에너지원인 RSDS의 전국 평균은 고탄소 시나리오의 가을철과 겨울철에 유의한 변화를 보였다. 즉 가을철에는 유의한 증가, 겨울철에는 유의한 감소를 전망하였다. 봄철은 RSDS의 변화가 상당히 작지만, PVpot은 유의한 감소를 보였고, 가을철은 RSDS의 유의한 증가가 나타났지만, PVpot의 증가는 무시할 정도의 크기였다.

이는 Figure 4.13에서 보여주듯이 지구 온난화에 의한 기온 상승으로 태양광 셀의 발전 효율이 감소한 것과 관련이 있다. Figure 4.13은 저탄소 및 고탄소 시나리오에서 PVpot 변화에 대한 TAS, VWS, RSDS의 기여를 보여준다. 가장 큰 기여를 하는 기후 변수는 TAS와 RSDS이고 특히 TAS는 전 계절에서 PVpot 감소에 기여하였다. 현재 기후 대비 21세기 후반기에 봄철 PVpot의 유의한 감소(즉 Fig. 4.12)는 기온증가와 RSDS 감소 때문이며, RSDS의 유의한 감소는 없었기 때문에 기온증가의 기여가 더 큰 것으로 보인다. 여름철과 가을철은 RSDS(PVpot 증가 원인)와 TAS(PVpot 감소 원인)의 기여가 상쇄되어 PVpot은 유의한 변화가 나타나지 않았다. 겨

울철의 PVpot 감소 경향은 특히 고탄소 시나리오에서 지구 온난화에 의한 유의한 기온증가와 RSDS 감소와 연결될 수 있다.

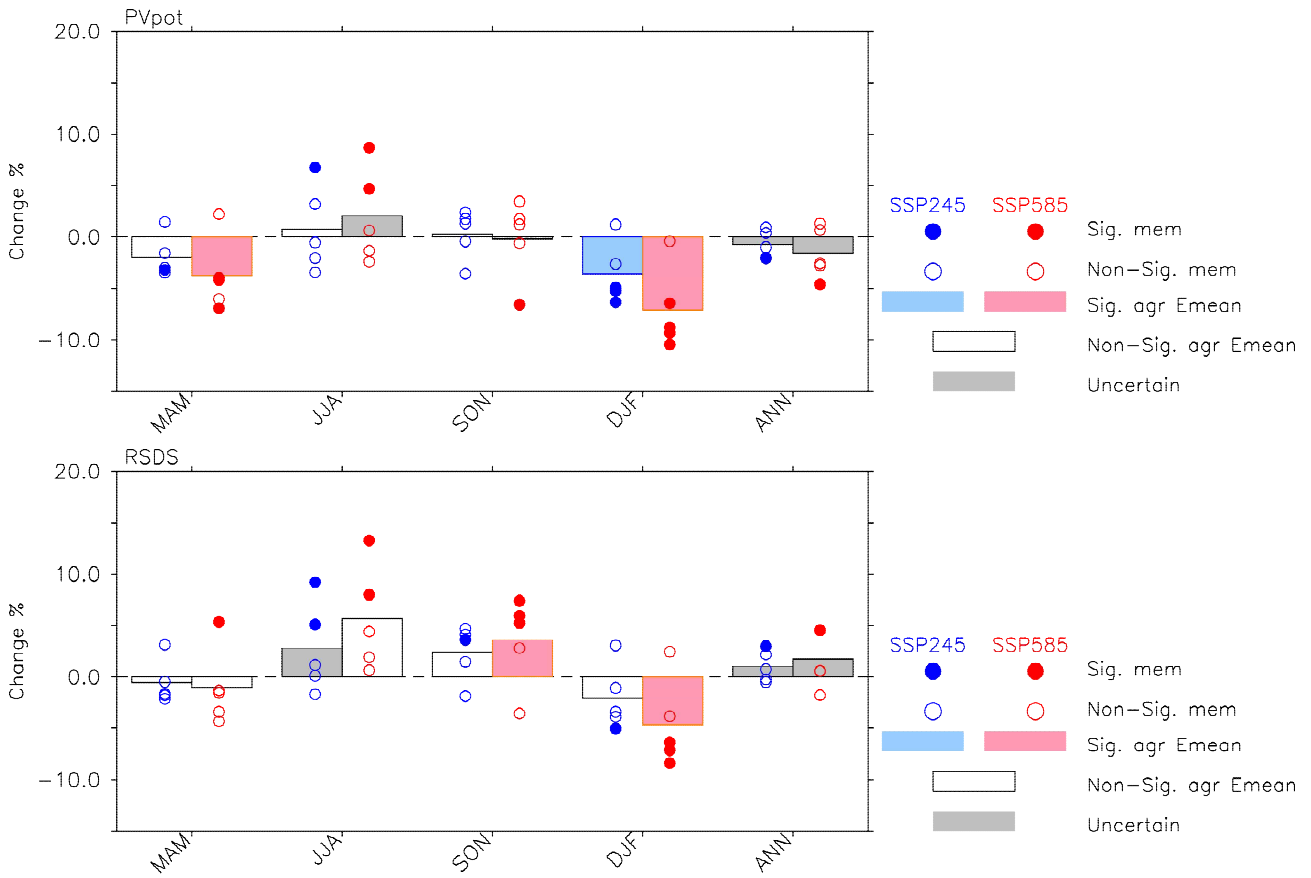


Figure 4.12. Box plots for change in seasonal and annual mean (upper panels) PVpot and (lower panels) RSDS under a future SSP245 (blue) and SSP585 (red) scenario over long-term(2081~2100) period relative to present climate. Boxes indicate the multi-model ensemble mean and circles indicate each ensemble member: filled with colors if change is significant and with gray if change is uncertain and they are empty if change is negligible.

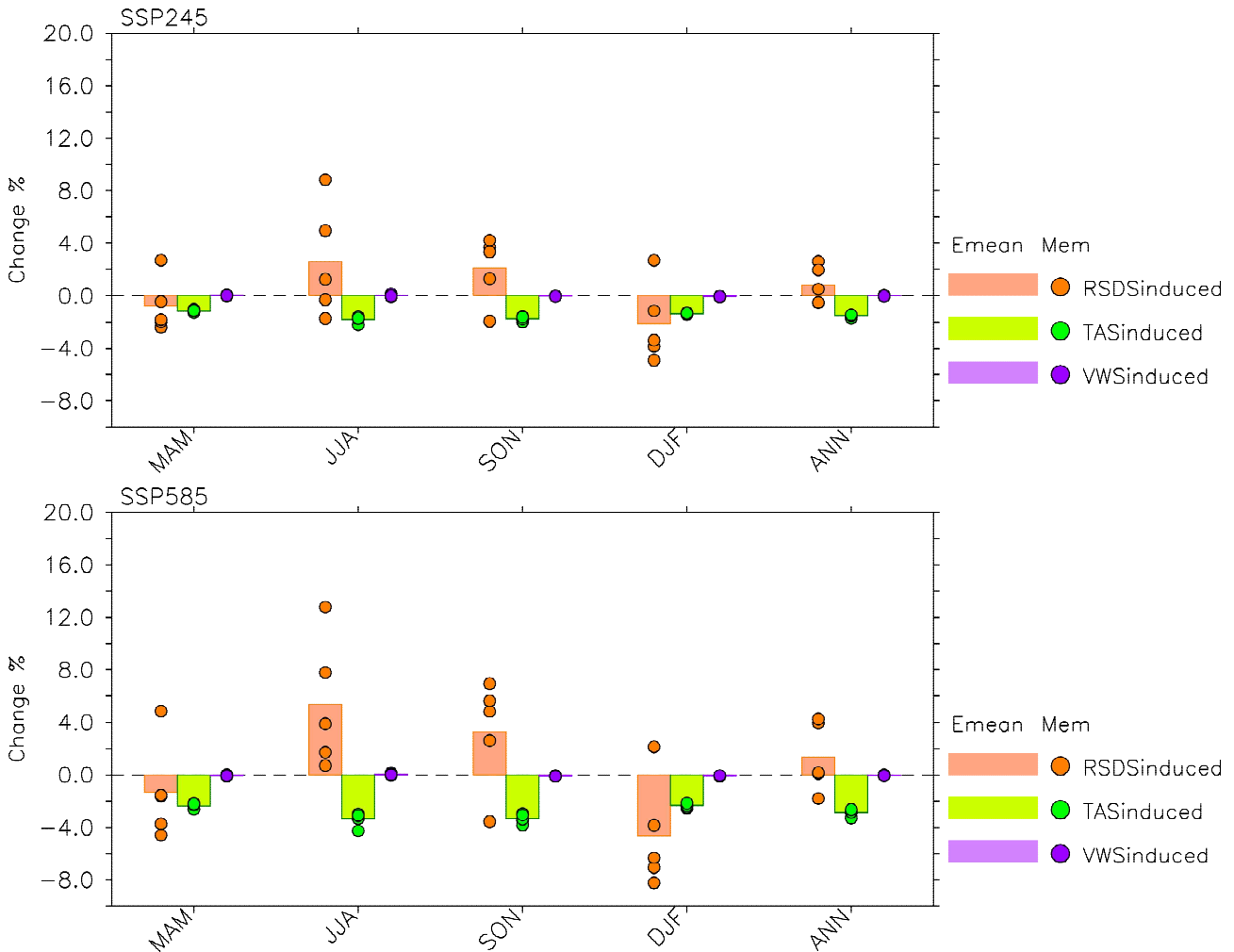


Figure 4.13. Box plots for RSDS-, TAS- and VWS-induced change (orange, green, purple respectively) in seasonal mean PVpot under a future (upper) SSP245 and (lower) SSP585 scenario over long-term(2081~2100) period relative to present climate averaged over South Korea. Boxes indicate the multi-model ensemble mean and circles indicate each ensemble member.

4.4. 풍력 에너지 발전 잠재량 변화 전망

Figure 4.14는 80m 높이에서 WED의 2000~2019 기간의 계절 평균 공간 분포를 보여준다. 봄철에 가장 큰 값을 보이고, 가을철에 가장 작은 값을 보였다. 일반적으로 해안이 접한 지역에서 다른 지역보다 상대적으로 더 컸는데, 이들 지역은 강원도 동북부 지역, 충북 북서부, 전남 남서부, 부산시, 제주도 등을 포함한다. 특히 이들 지역에서 봄철 및 겨울철에 50 W/m^2 이상의 값을 보였다. 반면에 충북, 강원도 서부, 경기도 서부, 경북 지역에서 여름철과 가을철에 5 W/m^2 이하로 값이 상당히 작았다.

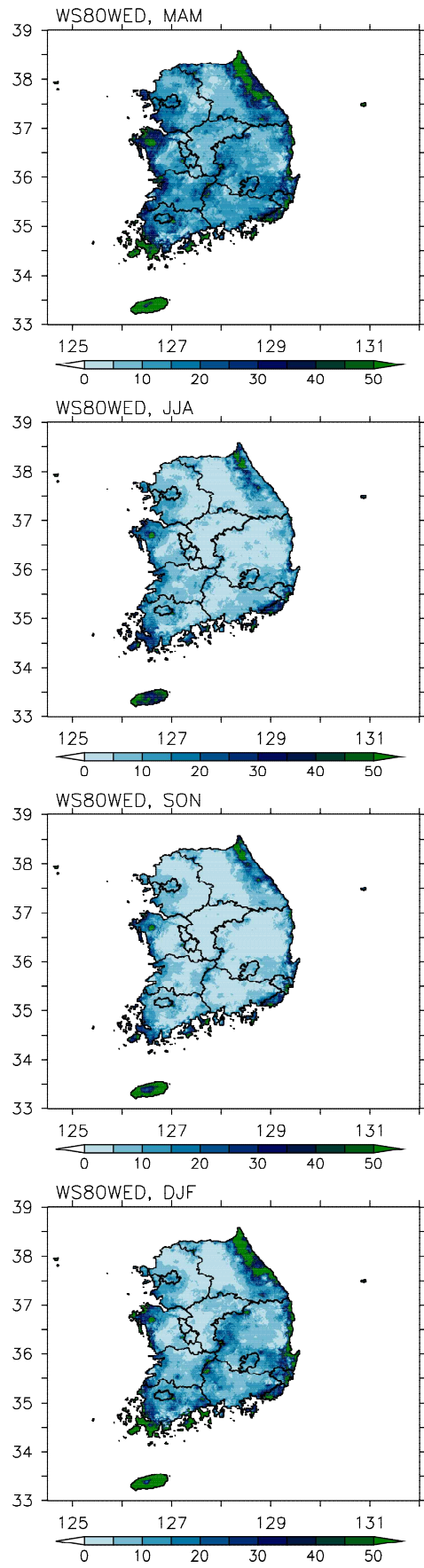


Figure 4.14. Spatial distribution of seasonal mean wind energy density (WED) at 80m averaged over 2000~2019.

위와 같은 현재 기후 대비 미래 기후의 저탄소 시나리오에서 WED의 변화를 Figure 4.15에서 보여준다. 봄철에는 21세기 전반기 즉 2021~2040 기간 동안 다소 증가 경향을 보였다. 특히 충청과 경북 북부지역, 경기도 동부 지역에서 90% 기준에서 통계적으로 유의한 증가가 나타났다. 하지만 중반기를 거치면서 후반기에 유의한 변화는 보이지 않았다. 여름철은 전/중반기에 증가 경향 보이지만 유의한 변화를 보이는 지역은 상당히 적었다. 21세기 후반기에 전남 남부 해안가 지역에서 유의한 증가를 보였고, 이외 많은 지역에서 모델들은 통일된 결과를 보여주지 못했다. 가을철은 경상남북도 지역에서 전반기에 유의한 증가가 나타났고, 이후 감소 경향을 보였는데, 특히 중반기에 강원도 동북부, 후반기에는 남한 서부 지역들에서 분석된 모델 60%이상 유의한 감소를 전망했다. 겨울철은 상당히 많은 지역에서 전반기에 유의한 증가를 보였고, 그 증가는 중반기 이후에 약해져서, 후반기에는 남한 남부지역 즉 전남, 부울경 지역에서 유의한 감소를 보였다.

이에 반해 고탄소 시나리오에서(Fig. 4.16) 미래 기후변화 21세기 후반기에 여름철 제외 모든 계절에서 유의한 감소를 보이는 지역이 더 증가하였다. 봄철에는 중반기까지 증가 경향 보이다가 이후 후반기에 강원도 지역 제외 모든 지역에서 WED의 유의한 감소를 보였고, 가을철은 경남, 경북 북부 지역에서 전반기에 유의한 증가를 보였고, 중반기에 증가 경향 감소하고, 이후 후반기에 이들 지역에서 감소 경향 보였다. 또한 이들 지역 제외 대부분 지역에서 유의한 감소가 나타났다. 겨울철은 전/중반기에 남한 동부 증가, 서부 지역 감소 경향 우세하다가, 후반기에 남한 남부 즉, 전남 지역과 부울경 지역에서 유의한 감소를 보였다. 여름철에는 21세기 전반기에 다소 증가경향 나타났고, 중반기에 뚜렷한 결과 보이지 않다가 후반기에 남한 내륙지역(즉, 경남 동부, 경북 서부, 충북, 경기도 동부 지역)에서 유의한 증가, 이외 지역에서 상당히 변화가 작은 경향을 보였다.

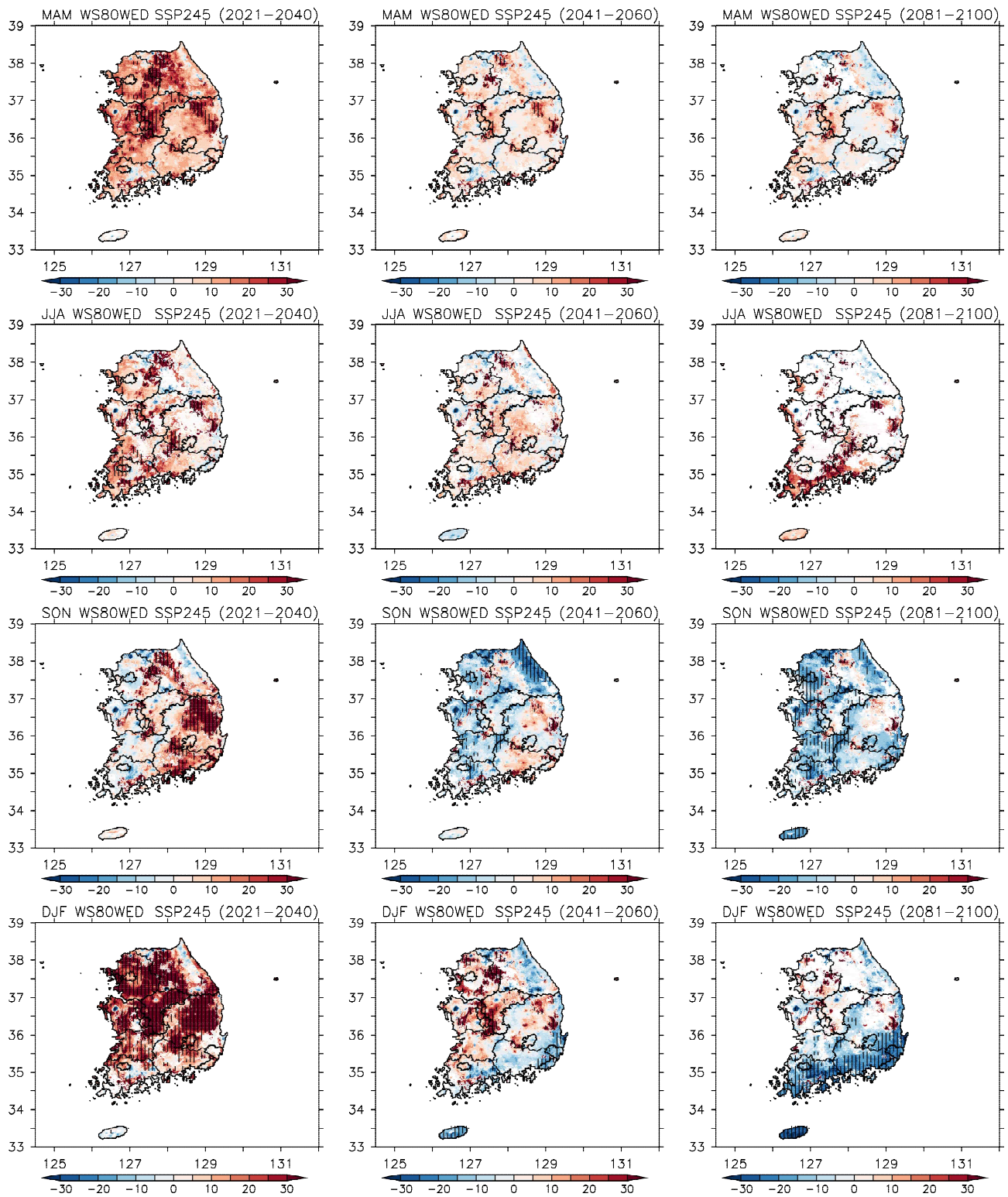


Figure 4.15. Change in seasonal mean wind energy density (WED) at 80m under a future SSP245 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.

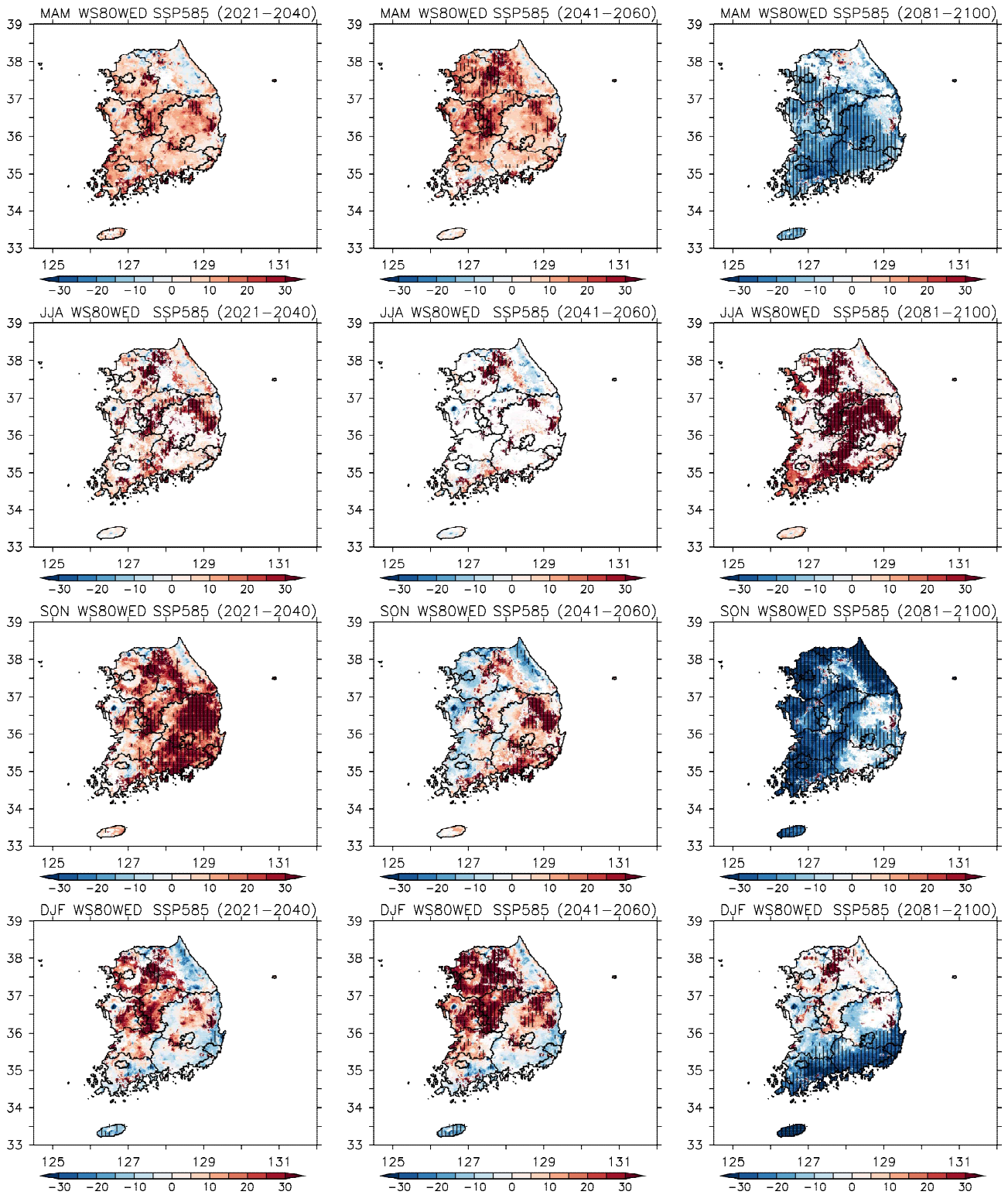


Figure 4.16. Change in seasonal mean wind energy density (WED) at 80m under a future SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.

Figure 4.17은 현재 기후 대비 기후변화 시나리오에서 연평균 WED 변화의 공간 분포를 보여준다. 이 Figure에서 분명하게 확인할 수 있듯이 고탄소 시나리오에서 저탄소 시나리오 보

다 현재 기후 대비 후반기에 더 강하고, 더 넓은 지역에서 유의한 감소를 보였다. 21세기 후반기 현재 기후 대비 전국 평균 WED의 계절 및 연평균 변화(Fig. 4.18)에 대하여 봄철은 전국 평균이 저탄소 시나리오에서 유의한 변화 없고, 고탄소 시나리오에서 -20% 이상의 유의한 감소를 보였다. 여름철은 대부분의 모델들이 양의 변화를 보였지만, 변화의 유의성 여부에서는 분명한 결과를 보여주지 않았다. 가을철은 현재 기후 대비 저탄소 시나리오에서 -20%, 고탄소 시나리오에서 -40% 이상 유의한 값으로 감소하는 것으로 전망되었다. 겨울철에도 역시 저탄소/고탄소 시나리오 모두 유의한 값으로 감소하였다 (각각 -20%, -25%). 연평균은 저탄소 시나리오에서 -8%, 고탄소 시나리오에서 -15% 감소하는 것으로 나타났다.

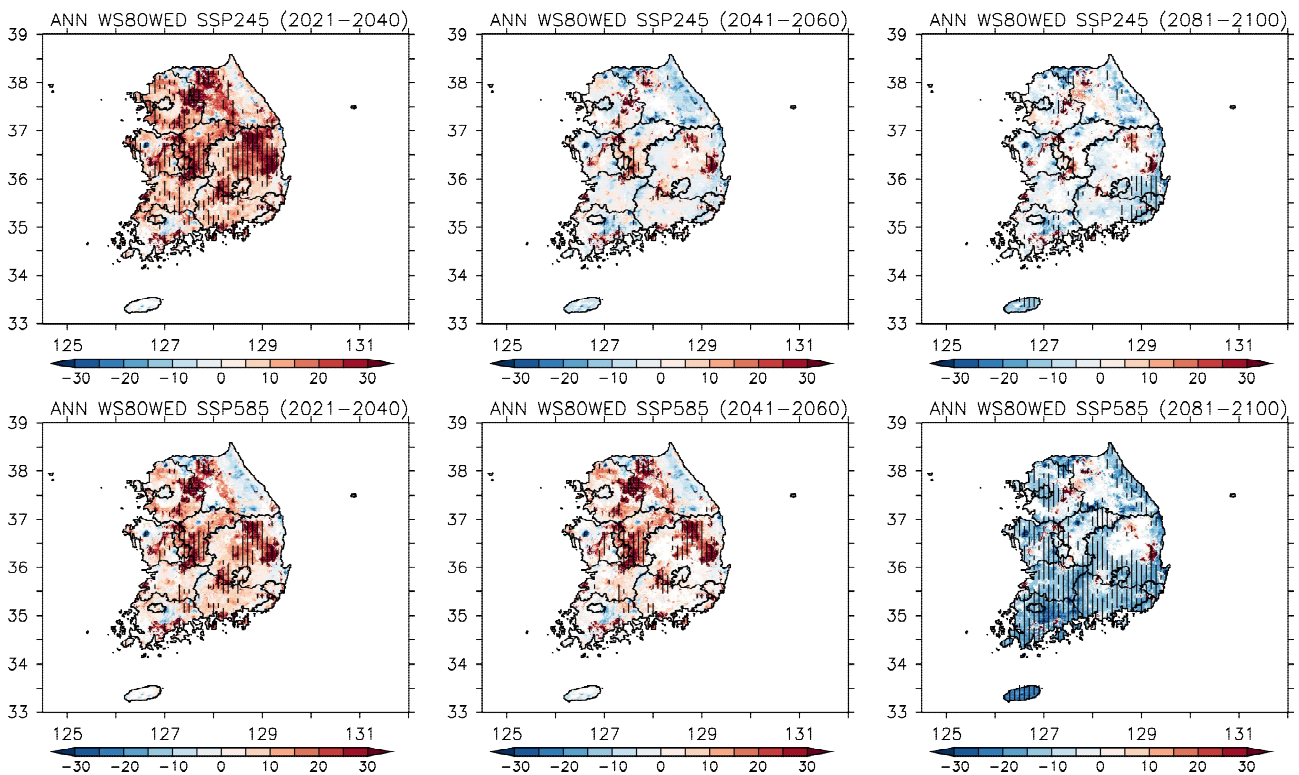


Figure 4.17. Change in annual mean wind energy density (WED) at 80m under a future (upper panels) SSP245 and (lower) SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.

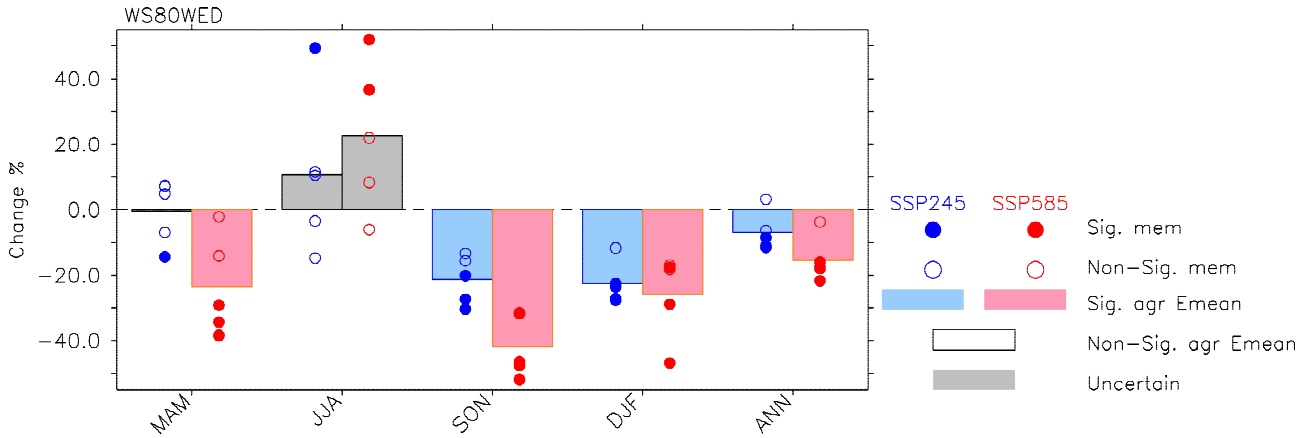


Figure 4.18. Box plots for change in seasonal and annual mean wind energy density (WED) at 80m under a future SSP245 (blue) and SSP585 (red) scenario over long-term(2081~2100) period relative to present climate. Boxes indicate the multi-model ensemble mean and circles indicate each ensemble member: filled with colors if change is significant and with gray if change is uncertain and they are empty if change is negligible.

Figure 4.19는 현재 기후 동안 80m 높이에서 풍력 발전 가용 풍속 범위 즉 풍력 발전기의 시동(3 m/sec) 및 종단(25 m/sec) 풍속 구간에서 풍속 비율의 공간 분포를 보여준다. WED의 계절 변화처럼 가용 풍속 비율 분포도 비슷한 특성을 보였다. 즉 봄철과 겨울철에 발전 가용 풍속 범위 비율이 가장 컸으며, 여름철에 가장 작았다. WED와 마찬가지로 해안이 접한 지역에서 다른 지역보다 상대적으로 더 컸다. 강원도 동북부 지역, 충북 북서부, 전남 남서부, 부산시, 제주도 등에서 비율이 80% 이상이었다. 반면에 충북, 강원도 서부, 경기도 서부, 경북 지역에서 여름철과 가을철에 비율이 10% 이하로 값이 상당히 작았다. Figure 4.1에서 나타난 것처럼, 풍속이 증가할수록 전력 생산량도 증가한다. 상대적으로 적은 전력을 생산하는 3~7m/sec 범위가 대부분의 비율을 차지했고, 상대적으로 더 많은 전력을 생산하는 구간인 7~13m/sec 범위의 비율은 20~30% 비율을 보인 강원도 북동부 지역을 제외하고 대부분 지역에서 10% 이하로 상대적으로 적은 비율을 차지 하였다.

먼저 현재 기후에서 3~25 m/sec 범위의 풍속 비율과 미래 저탄소 시나리오 기간에서 비율의 차이로 평가된 발전 가용 풍속 비율 변화를 살펴보면(Figure 4.20), 봄/가을/겨울철은 전반기에 내륙에서 비율이 증가하고, 해안 근접 지역에서 비율이 감소했으며, 21세기 후반기로 갈수록 내륙에서 비율 증가는 다소 감소하고, 해안 근접 지역에서 비율 감소는 다소 증가하는 경향을 보였다. 하지만 여름철에는 풍력 발전 가용 풍속 비율이 후반기로 갈수록 증가하였다. 이와 같은 결과는 고탄소 시나리오에서도 나타났다. 하지만, 내륙에서 가용 풍속 비율 증가가 후반기로 갈수록 더 크게 감소하였고, 해안 근접 지역에서 발전 가용 풍속 비율의 감소가 더 크게 증가하였다(Figure 4.21).

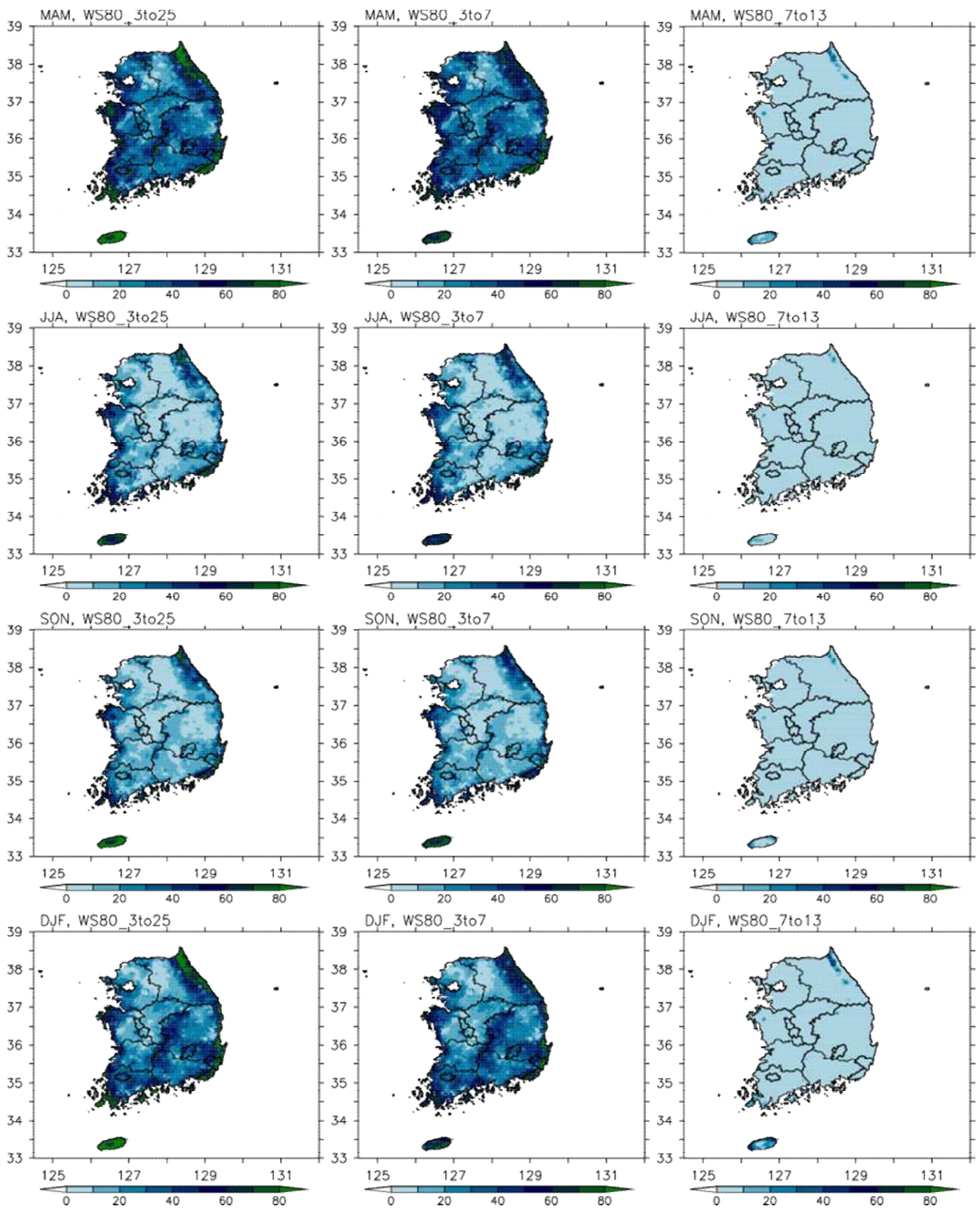


Figure 4.19. Frequency of wind speeds over (left panels) 3~25 m/sec, (middle) 3~7m/sec and (right) 7~13m/sec at 80m during spring, summer and winter seasons.

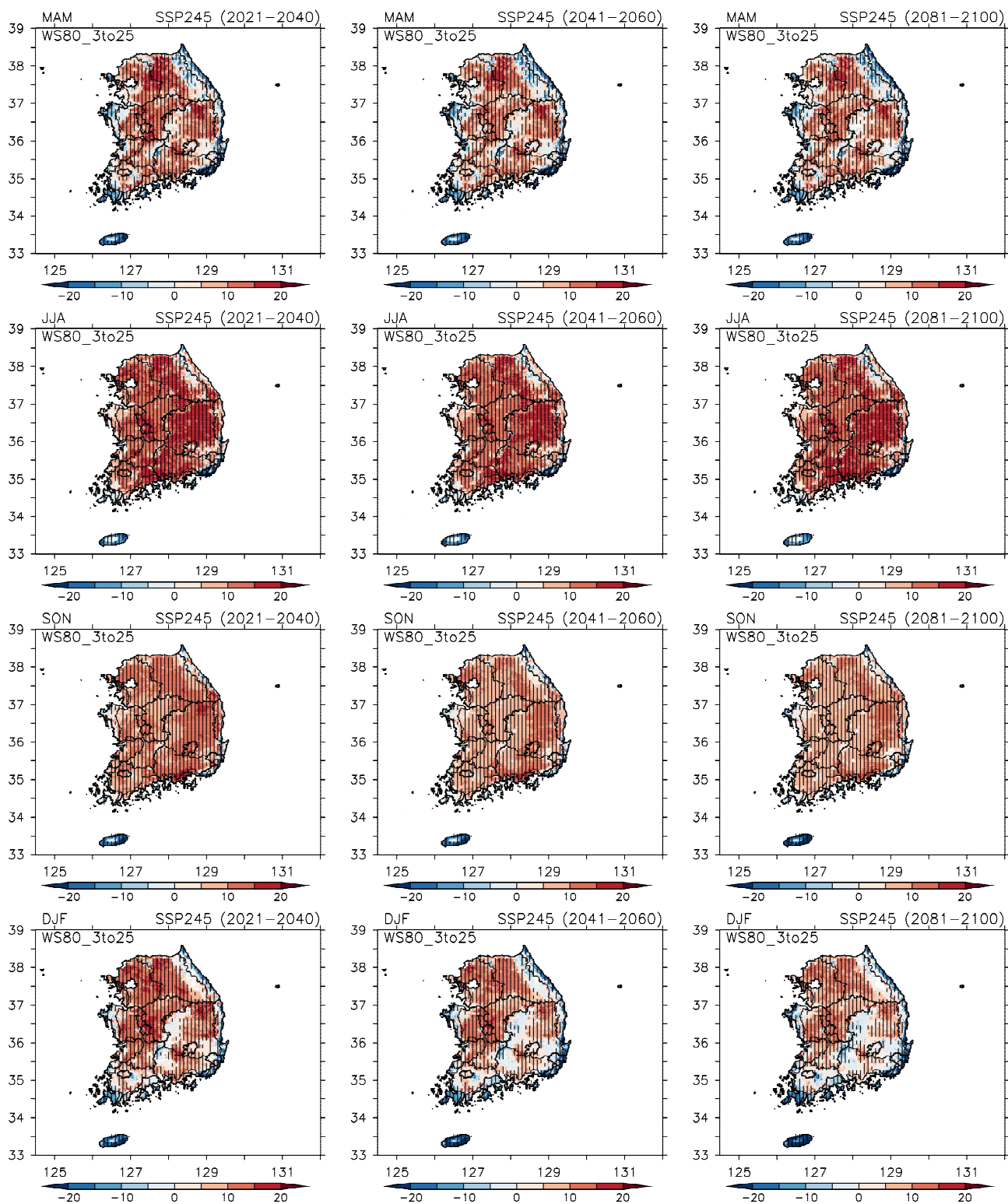


Figure 4.20. Change in seasonal mean frequency of wind speeds over 3-25 m/sec at 80m under a future SSP245 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.

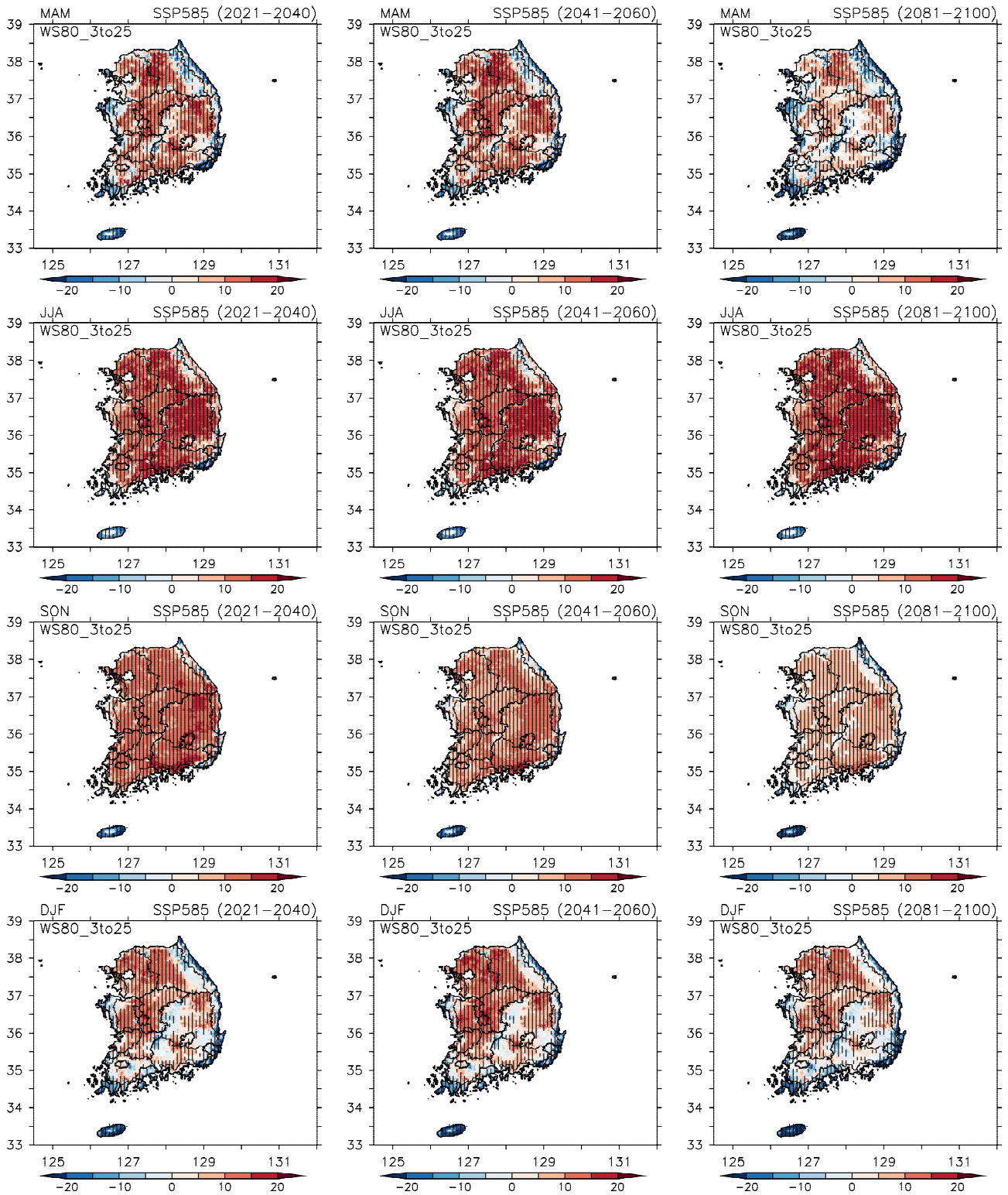


Figure 4.21. Change in seasonal mean frequency of wind speeds over 3~25 m/sec at 80m under a future SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period.

가용 풍속 비율의 가장 큰 변화를 보인 해안 근접 지역에서 구간을 세분화해서 풍속 비율 변화를 분석하였다. 강원도 동북부 지역에서 평균된 풍속 비율 변화를 살펴보면(Fig. 4.22),

3~25 m/sec 비율은 봄철에서 감소하였고, 여름철에는 증가하였다. 가을철에는 고탄소 시나리오의 21세기 후반기에만 유의한 감소를 보였다. 봄철과 겨울철에 3~7m/sec 풍속 구간에서 풍속 비율 감소에 가장 큰 기여를 하였으며, 이 범위보다 전력 발전 생산이 더 큰 7~13m/sec에서는 비율이 약 8% 정도로 증가하였다. 여름철은 3~7 m/sec 범위의 풍속 비율은 거의 차이가 없었으며, 7~13 m/sec 범위 풍속 비율은 증가하여, 3~25m/sec 범위 풍속 비율 증가에 대부분의 기여를 했다. 가을철은 3~7 m/sec 범위의 풍속 비율은 후반기로 갈수록 감소하였으며, 7~13 m/sec 범위 풍속 비율은 증가 경향을 보이나, 후반기로 갈수록 증가폭이 감소하였다. 부산지역 (Fig. 4.23)과 전남 서남부(Fig. 4.24) 해안 근접 지역에서는 미래 기후변화 기간의 모든 계절에서 발전 풍속 가용 비율이 감소하였다. 이들 감소에서 3~7m/sec 풍속 비율의 감소폭이, 7~13m/sec 증가폭 보다 더 컸던 것과 관련시킬 수 있다.

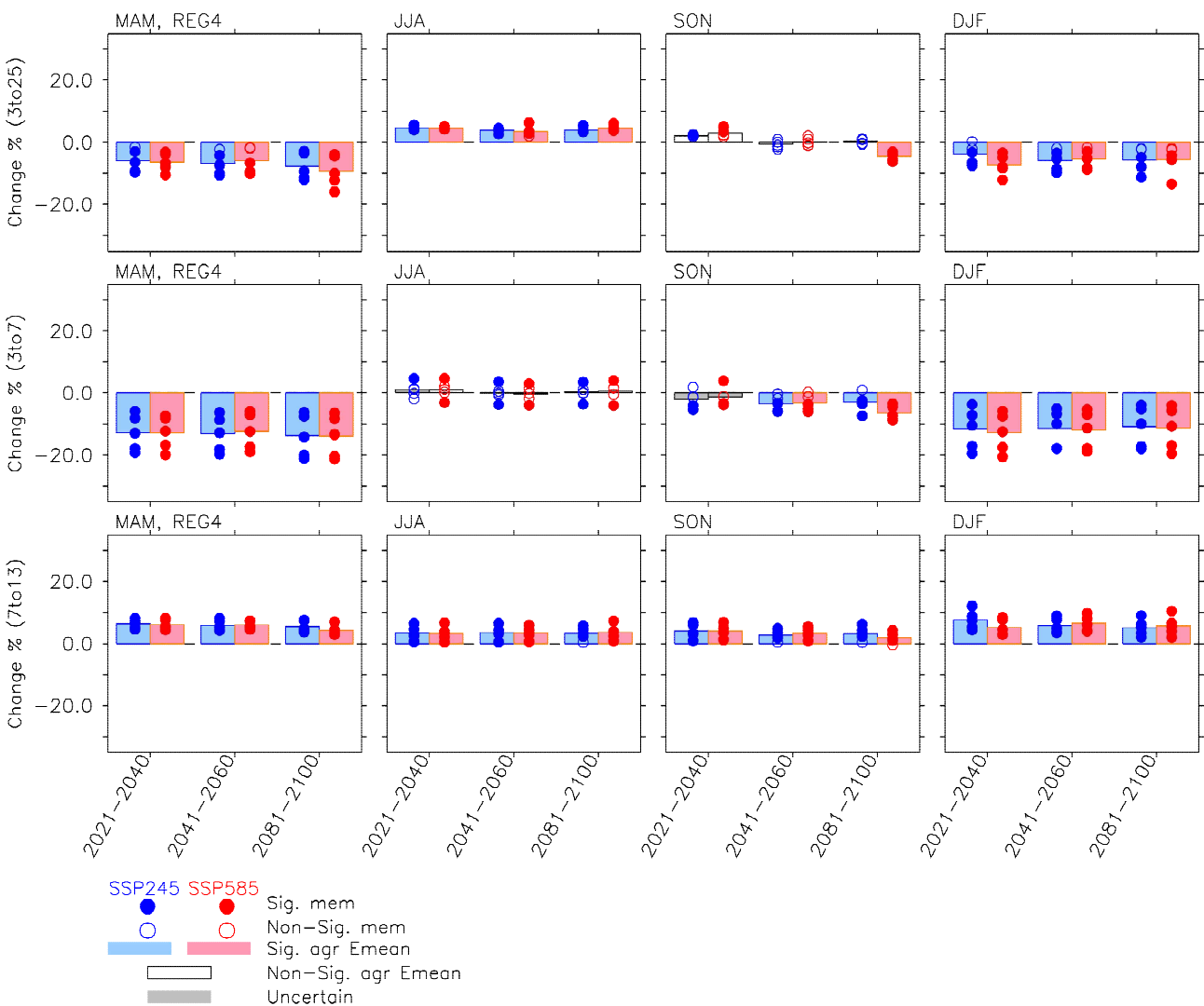


Figure 4.22. Box plots for regionally-averaged change in seasonal mean frequency of wind speeds over (upper panels) 3~25 m/sec, (middle) 3~7m/sec and (lower) 7~13m/sec at 80m under a future SSP245 and SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period. Region corresponds to 한강동해 region.

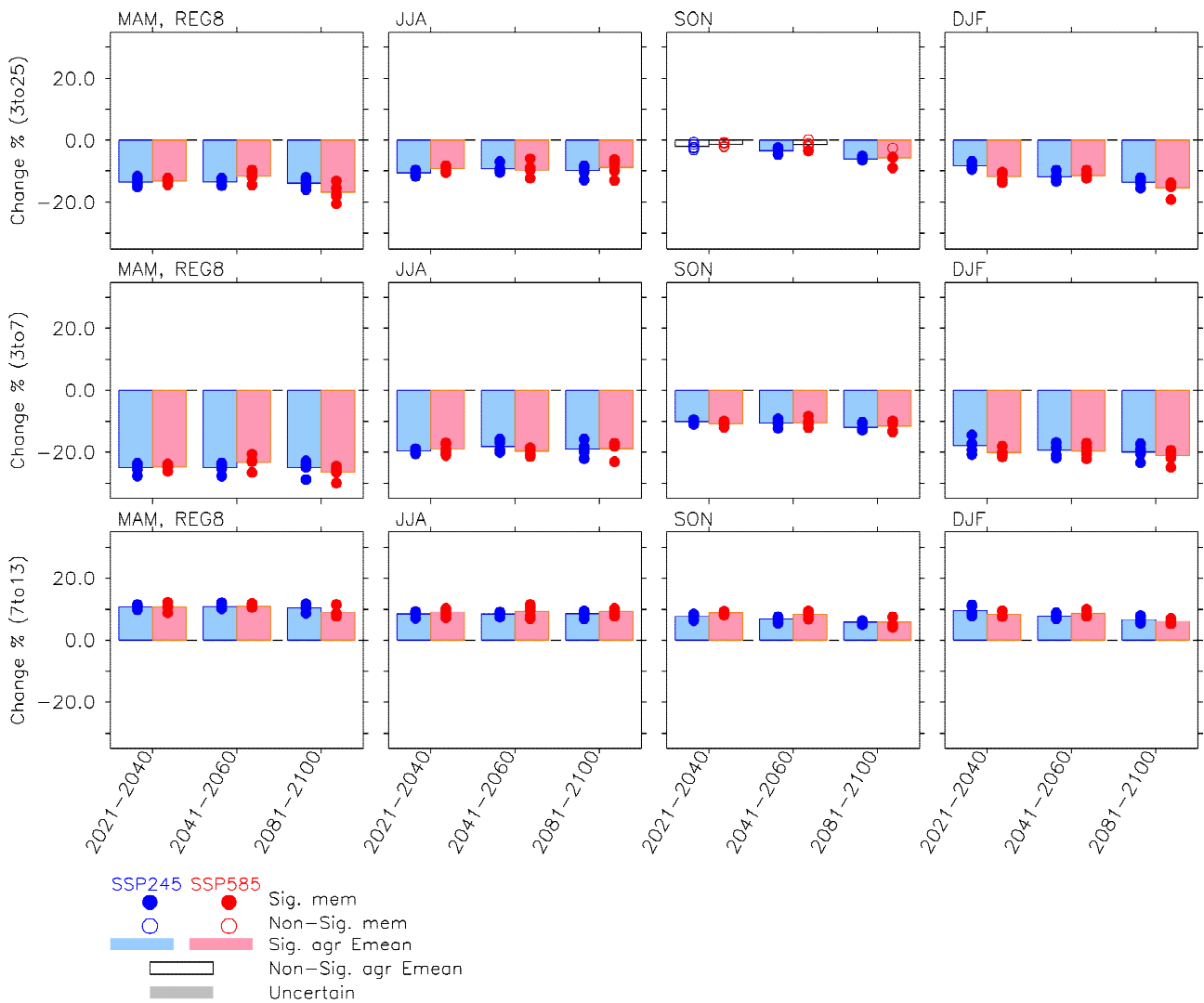


Figure 4.23Z Box plots for regionally-averaged change in seasonal mean frequency of wind speeds over (upper panels) 3~25 m/sec, (middle) 3~7m/sec and (lower) 7~13m/sec at 80m under a future SSP245 and SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period. Region corresponds to 회야수영 region.

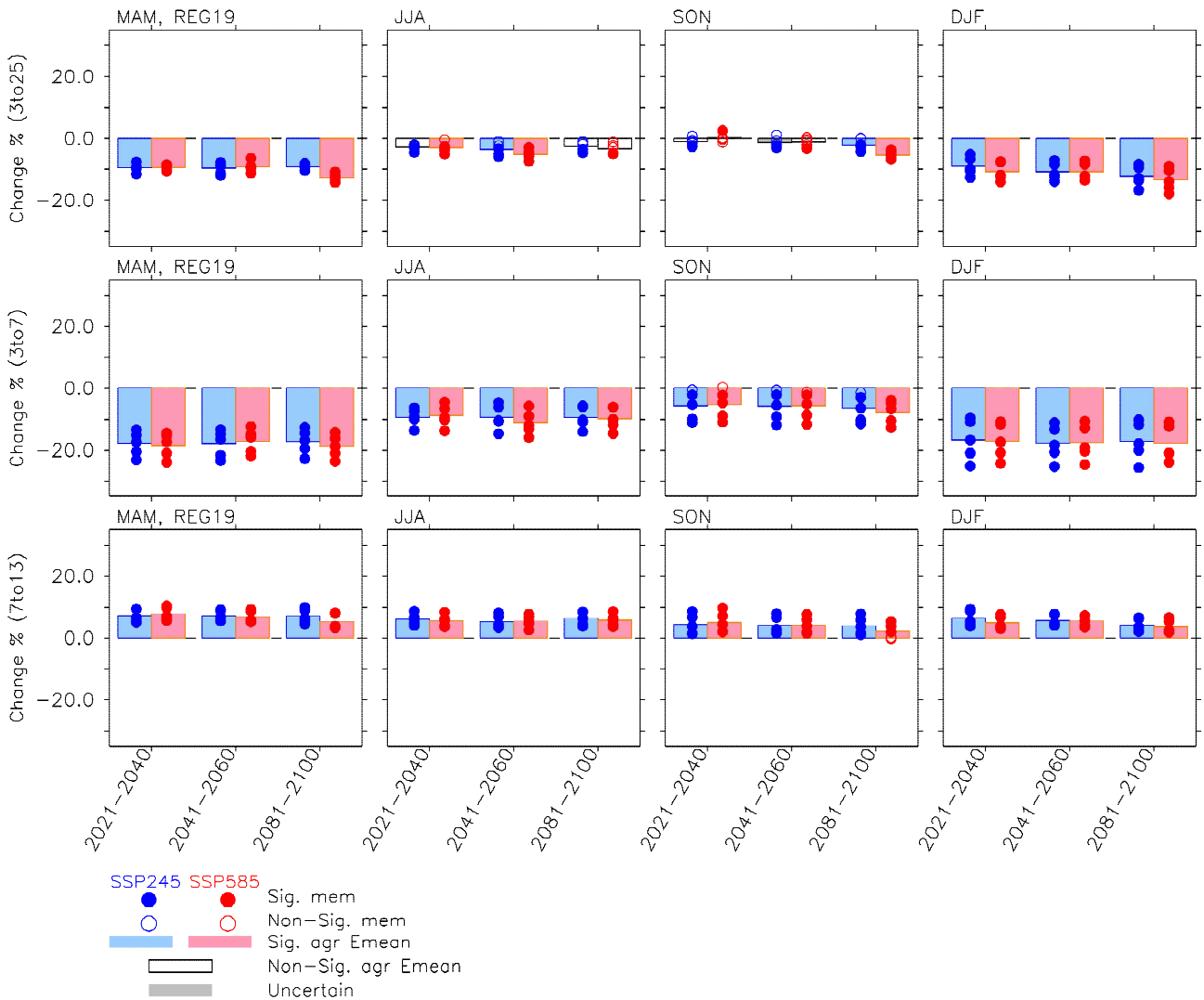


Figure 4.24. Box plots for regionally-averaged change in seasonal mean frequency of wind speeds over (upper panels) 3~25 m/sec, (middle) 3~7m/sec and (lower) 7~13m/sec at 80m under a future SSP245 and SSP585 scenario relative to present climate over near-term (2021~2040), mid-term (2041~2060), and long-term (2081~2100) period. Region corresponds to 영산강남해 region.

4.5. 재생 에너지 발전 잠재량 변화 원인

미래 기후변화 시나리오 21세기 후반기에 겨울철 PVpot은 현재 기후대비 감소 하였는데, 이와 같은 감소 원인은 기온 상승에 의한 PV 셀의 발전 효율 감소와 PV 전력 생산 주 에너지 원인 RSDS의 감소와 관련이 있음을 이전 4.3 절에서 언급하였다. 그래서 이 절에서는 PVpot의 변화에 관련되는 RSDS의 변화는 어떤 대기 순환장과 관련이 있는지 분석을 하였다. 먼저 관측에서 겨울철 평균 PVpot과 해수면 기압, 총 구름양, RSDS와 총 구름양의 상관관계 분석을 수행하였다(Fig. 4.25). RSDS와 변화에 대하여 대기의 구름양 뿐만 아니라 대기의 에어로졸 양도 영향을 미칠 수 있다. 하지만 여기서는 구름양과의 관계만을 분석하였다. 먼저 총 구름양과 상관관계 분포는 한반도 주위에서 RSDS는 음의 상관관계를 가지고 있음을 보여준다. 아울러 총 구름양과 PVpot 또한 한반도 주변에서 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 총 구름양이 많을

(적을)수록 지표에 도달하는 RSDS의 양이 감소(증가)하고, 결국 PVpot 또한 감소(증가)할 수 있다는 것을 제안한다. 그리고 PVpot과 해면 기압의 상관계수 공간 분포는 한반도 주변 총 구름양의 변화가 유라시아 대륙과 일본 동쪽으로 북태평양 사이의 기압차이에 의한 북풍 혹은 남풍의 영향과 관련됨을 보여준다. 즉 고온다습(저온건조)한 남풍(북풍) 유입 증가는 구름양의 증가(감소)를 야기하고, 이는 RSDS와 PVpot의 감소(증가)로 이어진다. 이 같은 결과는 20년 평균 PVpot의 변화는 20년 기간 동안 북풍의 영향이 더 많았는가 혹은 남풍의 영향이 더 많았는가로 평가될 수 있다는 것을 의미한다.

그러므로, 지역 기후 모델들의 historical run의 20년 기간(1981~2010) 대비 기후변화 시나리오 후반기 20년 즉 2081~2100 기간에서 계절별로 하층 바람장 평균 차이를 분석하였다(Fig. 4.26). Figure 4.26에서 확인 할 수 있듯이, 겨울철에는 21세기 후반기에 중국에서 한반도로 들어오는 남서풍의 영향이 더 강해진 것을 확인할 수 있다. 즉, 현재기후 보다 미래 기후변화에서 남서풍의 영향이 더 강해져, 구름양이 증가하고 이는 겨울철 PVpot 감소를 이끌었다고 결론을 내릴 수 있겠다.

이와 같은 평균 하층 바람장 변화는 21세기 후반기 풍력에너지 변화와도 관련지을 수 있다. 즉 현재 기후에서 봄철 및 겨울철, 가을철 평균 바람은 북서풍으로서 21세기 후반기 봄/겨울철 남서풍의 우세, 가을철 북동풍의 우세는 풍속의 감소를 의미한다. 이는 결국 풍력 발전 감소로 이어진다. 고탄소 시나리오에서 저탄소 시나리오 보다 남서풍 혹은 북동풍의 영향이 더 커져서, 겨울철 PVpot 감소, 봄/가을/여름철 풍력 발전 감소가 고탄소 시나리오에서 더 컸다.

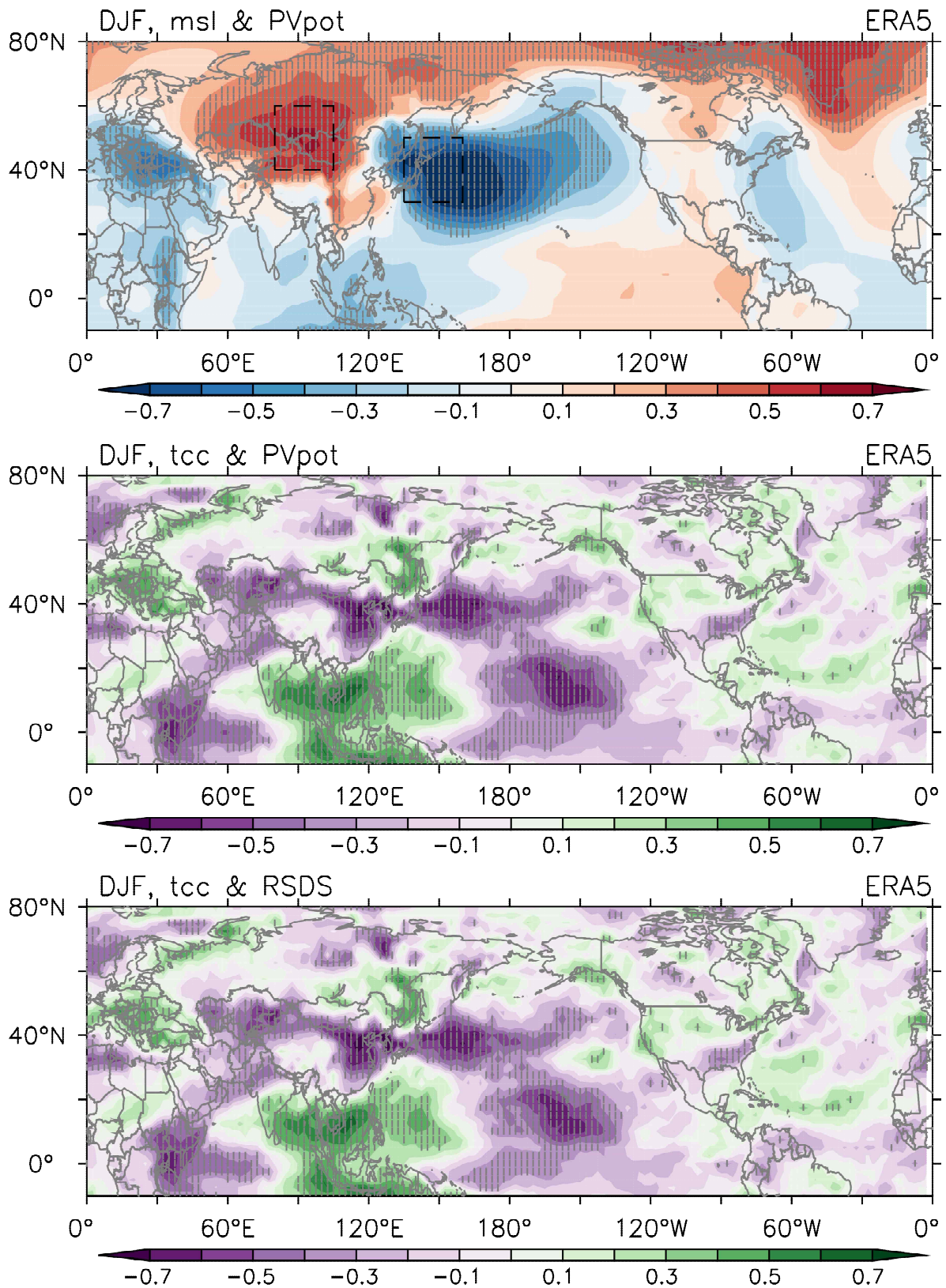


Figure 4.25. Spatial distribution of correlation coefficients of between (upper) PVpot and sea level pressure, (middle) PVpot and total cloud cover, and (lower) RSDS and total cloud cover from ERA5 reanalysis data. PVpot, RSDS and total cloud cover are DJF-averaged.

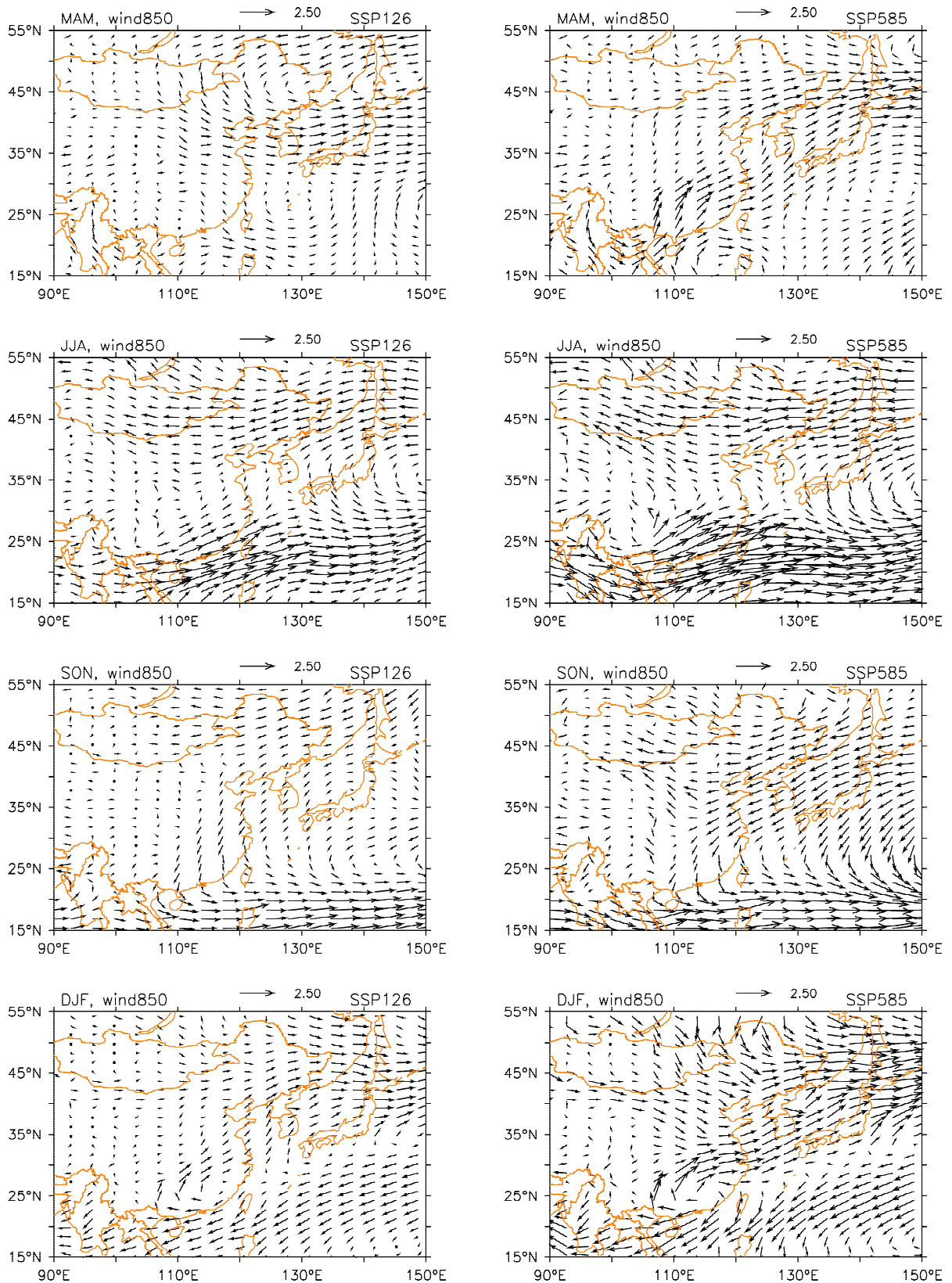


Figure 4.26. Ensemble mean change in seasonal mean surface winds under a future (left panels) SSP126 and (right) SSP585 scenario over long-term (2081~2100) period relative to present climate.

4.6. 요약

이 연구에서 현재 기후대비 저탄소 시나리오와 고탄소 시나리오 기반 미래 기후변화의 21세기 전반기(2021~2040), 중반기(2041~2060), 후반기(2081~2100)에 태양광(PVpot) 및 풍력(WED와 풍력발전가용풍속 비율) 발전에 의한 전력 생산 잠재량의 계절별 변화를 분석하였다. 두 시나리오에 대하여 봄철과 여름철 평균 PVpot은 대부분의 모델들에서 21세기 중반기 이후에 감소하는 것으로 전망되었다. 가을철 PVpot은 후반기에 북서부 지역은 다소 감소 경향, 남동부 지역에서 증가 경향을 보였다. 겨울철은 다른 계절과는 달리 21세기 후반기로 갈수록 남한 북부 지역에서 상당히 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이들 변화는 고탄소 시나리오에서 더 큰 값으로 통계적으로 유의한 변화를 보이는 지역이 더 많이 증가하였다. 저탄소 및 고탄소 시나리오에서 PVpot 변화에 대한 가장 큰 기여를 하는 기후 변수는 TAS와 RSDS이고 특히 TAS는 전계절에서 PVpot 감소에 기여하였다. 고탄소 시나리오에서 현재 기후 대비 21세기 후반기에 봄철 PVpot의 유의한 감소는 기온증가 때문이며, 여름철과 가을철은 RSDS와 TAS의 기여가 상쇄되어 유의한 변화가 나타나지 않았다. 겨울철의 PVpot 감소 경향은 특히 고탄소 시나리오에서 지구 온난화에 의한 유의한 기온증가와 RSDS 감소 때문이다. 겨울철 RSDS 감소는 현재 기후 대비 미래 기후변화에서 남서풍의 영향이 증가되어 구름양의 증가와 관련된다.

현재 기후 대비 미래 저탄소 시나리오에서 WED의 변화는 봄철에 대하여 21세기 중반기를 거치면서 후반기에 감소 경향을 보였지만 통계적으로 유의한 변화는 나타나지 않았다. 여름철은 21세기 후반기에 남한 서부 지역들에서 대부분의 모델들은 유의한 감소를 전망했다. 겨울철은 상당히 많은 지역에서 전반기에 유의한 증가를 보였고, 중반기 이후에 증가경향은 약해지고, 후반기에는 남한 남부지역 즉 전남, 부울경 지역에서 유의한 감소를 보였다. 고탄소 시나리오의 21세기 후반기에 여름철 제외 모든 계절에서 유의한 감소를 보이는 지역이 더 많이 증가하였다. 즉 봄철에는 후반기에 거의 모든 지역에서 WED의 유의한 감소를 보였고, 가을철은 경남, 경북 북부 지역 제외 대부분 지역에서 유의한 감소가 나타났다. 겨울철은 21세기 후반기에 남한의 남부 지역에서 유의한 감소를 보였다. 여름철에는 후반기에 남한 내륙지역에서만 유의한 증가를 보였다. 현재 기후에서 봄철 및 겨울철, 가을철 평균 바람은 북서풍으로서 21세기 후반기 봄/겨울철 남서풍, 가을철 북동풍의 영향이 더 커지는 것으로 분석되었으며 이는 이들 계절에서 풍속의 감소를 의미하며, 결국 WED의 감소로 이어진다. 고탄소 시나리오에서 저탄소 시나리오 보다 남서풍 혹은 북동풍의 영향이 더 커져서, 봄/가을/여름철 풍력 발전 감소가 고탄소 시나리오에서 더 컸다. 현재 기후에서 풍력 발전 가용 풍속 (3~25 m/sec) 범위의 풍속 비율과 미래 시나리오 기간에서 비율의 차이로 평가된 발전 가용 풍속 비율 변화를 살펴보면, 저탄소와 고탄소 시나리오 모두 봄/가을/겨울철은 전반기에 내륙에서 비율이 증가하고, 해안 근접 지역에서 비율이 감소했으며, 21세기 후반기로 갈수록 내륙에서 비율 증가는 다소 감소하고, 해안 근접 지역에서 비율 감소는 다소 증가하는 경향을 보였다. 여름철에는 풍력 발전 가용 풍속 비율이 후반기로 갈수록 증가하였다. 위와 같은 변화 경향은 고탄소 시나리오에서 더 크게 전망되었다.

위와 같은 지구온난화에 의한 기후변화가 재생에너지 발전에 미치는 영향을 모식도로 정리하였다.

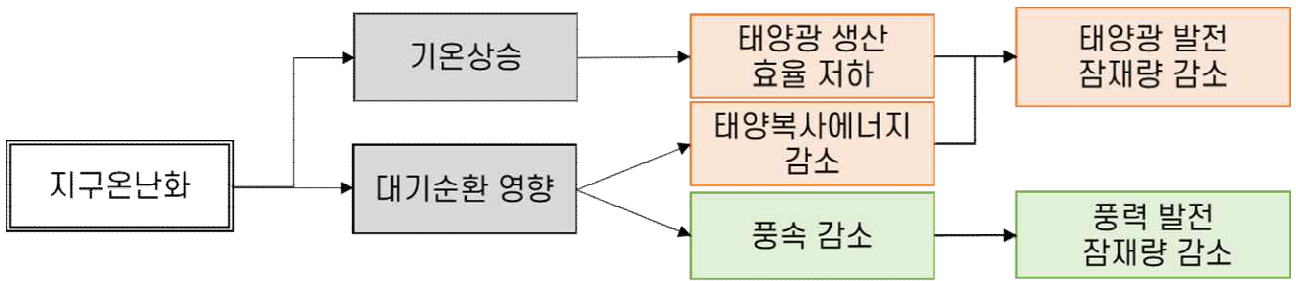


Figure 4.27. Schematic diagram for how the global warming affect the renewable energy change in the future.

5. 미래 기후변화에 따른 한반도 가뭄 전망

5.1. 연구배경

기상청이 발표한 ‘2022년 연 기상 가뭄 발생 특성’에서는 남부지방 기상 가뭄이 1974년 이후 역대 가장 오래 지속되었다고 발표하였다. 전국 역대 기상 가뭄 발생일수 순위 1위는 2015년, 2위는 2022년, 3위는 2017년으로 모두 최근 10년 사이에 발생하였음을 알 수 있다. 전국 중 남부지역에 한해서는 2022년이 1위로 나타났다.

지구온난화로 인한 기후변화로, 과거에는 볼 수 없었던 이례적인 극한기후 현상이 빈번해지고 있으며, 그 강도 또한 강해지고 있다. 기후변화 시나리오 온실가스 농도 증가에 관한 미래 기후전망 연구는 다양한 분야에 대해 진행되고 있으며, 그중에서도 사회·경제적으로 재난 피해 규모가 막대한 기후재난 중 하나인 가뭄에 관한 관심이 최근에 급증하고 있다. 최근 10년 사이에 더욱 심각해진 기상 가뭄은 그 단계 또한 더욱 심화되고 있다. 더욱 가치 있는 기상 가뭄 정보를 제공하여 선제적으로 가뭄에 대응하기 위해서는 미래 기후변화 시나리오 정보를 이용하여 다양한 기후 인자를 고려한 가뭄의 기후변화를 분석할 필요가 있다.

현재 기상청 수문기상 가뭄정보 시스템에서는 기상가뭄 현황 및 1개월/3개월 전망 정보를 제공하고 있다. 또한 현황 정보에서는 표준 강수 지수 및 표준 강수 증발산 지수 정보를 감시할 수 있으며, 예보에는 표준 강수 지수를 이용하여 기상 가뭄을 전망하고 있다. 기상청에서 매일 발표하는 1개월 기상 가뭄은 최근 6개월 누적 강수량을 이용하여 산출한 표준 강수 지수로, 최근 누적 강수량과 과거 동일 기간의 강수량을 비교하여 가뭄 정도를 나타내는 지수이다. 가장 널리 사용되는 가뭄지수이지만 강수량만으로 강수의 부족을 판단하는 지수이기 때문에, 기후변화에 따라 지속적으로 상승하는 기온이 가뭄 발생에 미치는 영향은 제대로 반영하지 못하는 단점이 있다. 이러한 단점 개선을 위해 잠재증발산량의 변화를 동시에 고려할 수 있는 표준 강수 증발산 지수를 함께 감시하고 있다. 이는 기상학적 수분공급량인 강수량과 대기 수분요구량을 비교하여 가뭄을 정의하는데, 이러한 잠재증발산량을 추정하는 방법에 따라 가뭄심도가 다르게 나타나므로 실제증발산량을 함께 고려하여, 대기의 요구량 대비 지표의 수분 부족량을 통해 가뭄 상태를 정의할 수 있는 표준 증발산 부족 지수를 사용할 필요가 있다.

증발산량은 강수량과는 달리 수요량과 소비량의 개념을 모두 포함하기 때문에, 가뭄의 상태를 더 명확히 평가할 수 있다 (Chun and Kim, 2019). 특히 최근의 우리나라 강수량 패턴을 살펴 보면, 우리나라 강수량은 여름철에 오히려 증가하고 있으며, 우기 강수는 늘어나고, 건기 강수는 줄어드는 특징을 보이고 있다. 최근에는 폭염-가뭄 피드백에 따라, 폭염형 급성가뭄 또한 더욱 증가하고 있음을 알 수 있다.

APEC 기후센터에서는 매일 우리나라를 포함한 동아시아 지역에 대해 1개월 동아시아 가뭄 모니터링 웹서비스를 실시하고 있으며, 이 중 기상가뭄 지수인 SPI와 실제 증발산량을 고려한 가뭄지수 SEDI를 함께 모니터링 현업을 운영하고 있다. 현재 기상청에서 제공하고 있는 감시정보인 SPI, SPEI 뿐만 아니라 미래 기후변화에서 나타나는 기온 및 강수량 변화에 따른 가뭄지수의 변화를 더욱 상세히 분석할 필요가 있다. 이 연구에서는 동아시아 고해상도 상세 기

후 시나리오 모형 자료 3종을 이용하여, 우리나라에서의 가뭄지수 미래 변화 및 우리나라를 포함한 동아시아 지역에서의 대기 순환장 변화를 함께 분석하였다.

5.2. 자료와 방법

5.2.1. 재분석 자료

과거 기간에 대해 기상가뭄 지수인 표준 강수 지수(SPI)와 표준 증발산 부족 지수(SEDI)의 과거 기후 특성을 분석하기 위해 NCEP 1 재분석 자료를 사용하였다. 재분석 자료를 이용한 과거 가뭄지수 특성 분석을 위해서 1979년~2022년 기간의 월자료를 사용하였으며, 기후변화 시나리오의 현재 재현 기간과 비교 분석을 위해 사용한 자료 기간은 전체 기간 중 1985~2014년으로 총 30년 동안의 월자료이다. 과거 기간 동안의 SEDI 가뭄 지수 산출을 위해 사용한 NCEP1 재분석 자료의 지표면 기온, 단파 복사, 장파 복사, 동서 방향 바람과 남북 방향 바람, 절대 습도 등을 사용하여 산출하였다.

5.2.2. 동아시아 고해상도 상세 기후 시나리오

CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 온실가스 경로인 SSP(Shared Socioeconomic Pathways)를 기반으로 하여, 동아시아 지역에 대한 25km 고해상도 상세 기후 모형인 CORDEX(COordinated Regional climate Downscaling Experiment)-EA(East Asia, 동아시아) 2단계 프로젝트 자료를 이용하였다. CORDEX는 세계 기후 연구 프로그램(World Climate Research Programme, WCRP)에서 추진하고 있는 기후변화 영향평가 및 적용에 활용가능한 고해상도 지역 기후변화 전망 자료를 산출하기 위해 만들어진 국제사업이며, 동일한 지역에 대해 각국의 여러 참여기관들이 고유의 지역기후모형을 이용해서 생산하고 있다. CORDEX-EA는 동아시아 영역에 대해 연구하고, 국내의 여러 대학들이 참여하여 동아시아 고해상도 상세 기후 모형을 제공하고 있다.

CORDEX-EA Phase 2로부터 생산된 5개의 지역 기후 모델들(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs) 중 우리나라 미래 가뭄 전망 분석을 위한 입력 변수 자료가 모두 제공되는 3개의 모형(HadGEM3-RA, WRF, CCLM)만을 사용하였으며, 우리나라 가뭄지수 미래 전망을 위해서 MME(Multi Model Ensemble) 기법을 사용하였다.

이 연구에서 사용된 CORDEX-EA Phase 2 프로젝트 자료의 수평 해상도는 25km이며, Phase 1에 비해 더욱 상세한 해상도로 산출되었다. 사용된 변수는 장파 복사, 단파 복사, 지표면 기온, 절대습도, 지표면 남북 방향 바람, 지표면 동서 방향 바람 등이며, 시간 단위는 월 자료를 사용하였다. 현재 재현 기간인 Historical experiment로 제공하는 1979~2014년 중 1985~2014년, 총 30년 기간에 대해 현재 재현 분석을 실시하였다. 더불어 미래 변화 분석을 위해서는 온실가스 경로 2종 SSP1-2.6(이하 저탄소 시나리오, SSP126), SSP5-8.5(이하 고탄소 시나리오, SSP585)를 사용하여, 현재 대비 미래 변화를 비교 및 분석을 실시하였다. 여기서 SSP126

은 화석 연료의 사용을 최소화하고, 획기적으로 탄소 배출량을 감축하는 지속성장 경로를 대표하는 저탄소 시나리오이며, SSP585는 현재와 유사하거나 좀 더 높은 탄소를 지속적으로 배출하는 고속성장 경로를 대표하는 고탄소 온실가스 시나리오이다. 미래 기후 전망을 분석하기 위해서, 분석 기간을 전체 미래 기간(2015~2100) 중 근미래(2021~2040), 먼미래(2081~2100)로 설정하였다. 또한 가뭄지수 계산을 위해 사용된 CORDEX-EA 모형의 지형 자료는 Figure 5.1에서 보이는 qrparm orographic 자료이며, 분석 지역은 동아시아 및 우리나라 지역이다.

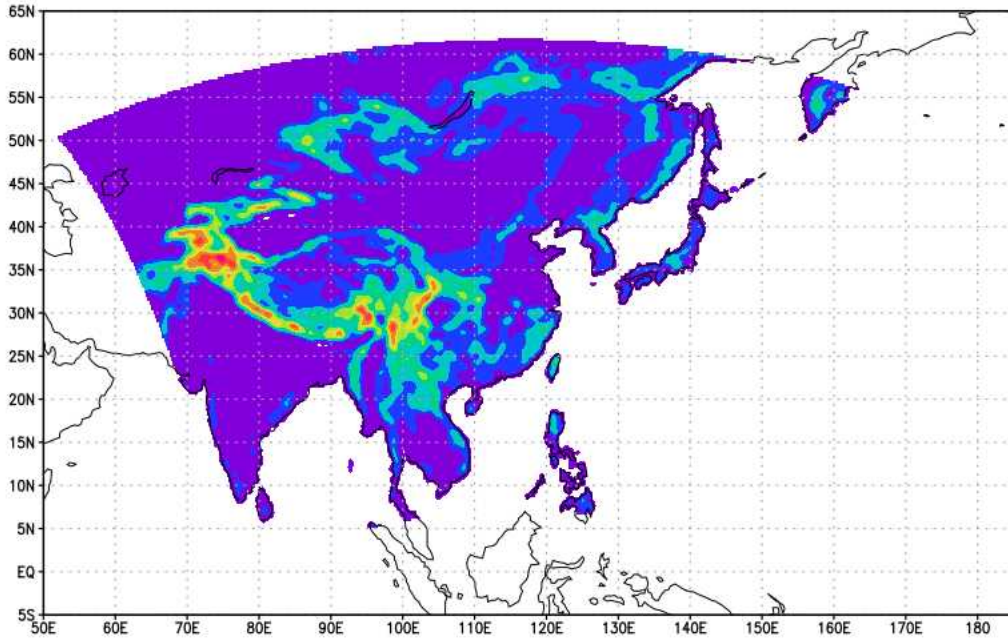


Figure 5.1 Orographic mask data for CORDEX-EA Phase 2.

5.2.3. 가뭄지수 계산

Mckee, Doesken & Kleist(1993)이 개발한 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index)는 강수량만을 이용하여 가뭄 심도를 산정하는데, 각 지역의 강수량 데이터를 이용하여 설정한 기간에 대한 강수량 분포를 계산하고, 평균적인 강수량 대비 얼마나 부족한지 또는 초과했는지 알 수 있기 때문에 기상학적으로 가장 많이 사용하고 있는 가뭄 지수이다. SPI는 정규 분포를 따르도록 변환된 값이기 때문에, 평균 대비 현재의 상태는 어느 정도에 위치해 있는지 수치화가 가능하고, 최소 1개월부터 장기 누적 가뭄까지, 다양한 시간 스케일에 적용할 수 있기 때문에, 기상학적 가뭄의 심각성을 파악하는 데에도 유용하게 사용되고 있다. 더불어, 세계 기상 기구(WMO)에서는 기상학적 가뭄 감시를 위한 대표적인 가뭄지수로 권고하여, 기상청에서도 월별 가뭄 감시 및 예보에 활용하고 있다.

SPI는 강수량 자료만을 이용하기 때문에, 기후변화에 따른 기온 및 다른 변수들의 변화를 반영하지 못 하는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해, 다양한 가뭄지수들이 제시되고 있으며, 그

중 Vincente-Serrano et al. (2010)은 강수와 대기 증발 요구량 ET_p 을 정의하여, 지표의 습윤과 건조 상태를 추적할 수 있음을 보였다. Beguria et al. (2014)은 소비된 물의 양과 대기 수분 요구량의 차이로 물 부족 상태를 정의할 수 있다고 제안하였고, 이렇게 제안된 지표 물 소비량은 대부분 증발산 과정과 연결이 되고, 이러한 증발산 요구량은 ET_w 로 나타낼 수 있다.

앞서 언급했듯이, 기상학적 가뭄지수로 사용되는 SPI는 강수량과 강수량 평균값의 차이 정도로 가뭄을 정량화하고, 증발산은 고려하지 않는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 제시된 지수는 SPEI로, 증발산을 고려하는 SPEI는 강수량(기상학적 수분공급량)과 대기 수분 요구량을 비교하여 가뭄을 정의하였다.

Kim and Rhee(2016)에서 제시된 표준 증발산 부족 지수(SEDI, Standardized Evapotranspiration Deficit Index)는 대기의 요구량 대비 지표의 수분 부족량을 나타내며, 이 부족량이 커질수록 심한 가뭄 상태가 된다는 것을 의미한다. Kim and Rhee(2016)에서는 전지구적으로 SEDI의 활용성 검증 결과, 1개월 SEDI는 3개월 이하 짧은 지속기간의 SPEI와 상관성이 가장 높게 나타났다. 또한 기후특성이나 지표조건을 고려하지 않고도, 농업지역이나 자연식생 지역의 가뭄심도를 잘 설명하는 가뭄지수로, 미래 기후에서의 다양한 환경 변화에 따른 가뭄심도의 변화를 더욱 잘 고려할 수 있는 가능성을 보였다.

미래 기후변화 시나리오에서의 가뭄지수 산출을 위하여, 상호보완이론(Generalized Complementary Relationship, GCR) 이론에 사용되는 PT 계수는 NCEP 1 재분석 자료와 동일하게 사용하였다. 여기서 PT계수는 상호보완이론의 유일한 매개변수로 추정되는 실제증발산량에 직접적인 영향을 미친다. PT계수가 작아질수록 실제증발산량은 과소추정되지만, SEDI로 표준 정규화될 때는 실제증발산량이 가지는 편의도 함께 표준 정규화되기 때문에 가뭄 분석에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되기 때문에, 현재 기후에서와 동일한 PT 계수를 사용하여 SEDI 가뭄지수를 산출하였다.

가뭄은 다양한 시간 규모로 분석이 가능하기 때문에 최소 1개월부터 수개월, 수십 개월 누적으로 계산하여 분석이 가능하다. 일반적으로 누적 기간을 너무 짧게 잡으면, 변동이 너무 크고 빈번하게 나타날 수 있으므로, 6~9개월 가뭄지수를 많이 이용하고 있다. 하지만 최근의 가뭄발생은 거의 모든 지역에서 돌발가뭄으로 전환되고 있다는 연구가 있으며, 과거에 많이 사용해 오던 6개월, 그 이상의 누적 가뭄 지수로는 돌발적으로 발생할 수 있는 가뭄 위험이 명확하게 계산되지 않을 수 있다. 그렇기 때문에 앞으로 가뭄 위험 분석의 timescale은 점점 짧아질 것으로 예상하고 있으며, 이 연구에서는 6개월보다 짧은 봄철 및 가을철에 대해 3개월 누적 가뭄지수를 계산하여 비교하였다.

East Asia Drought Map

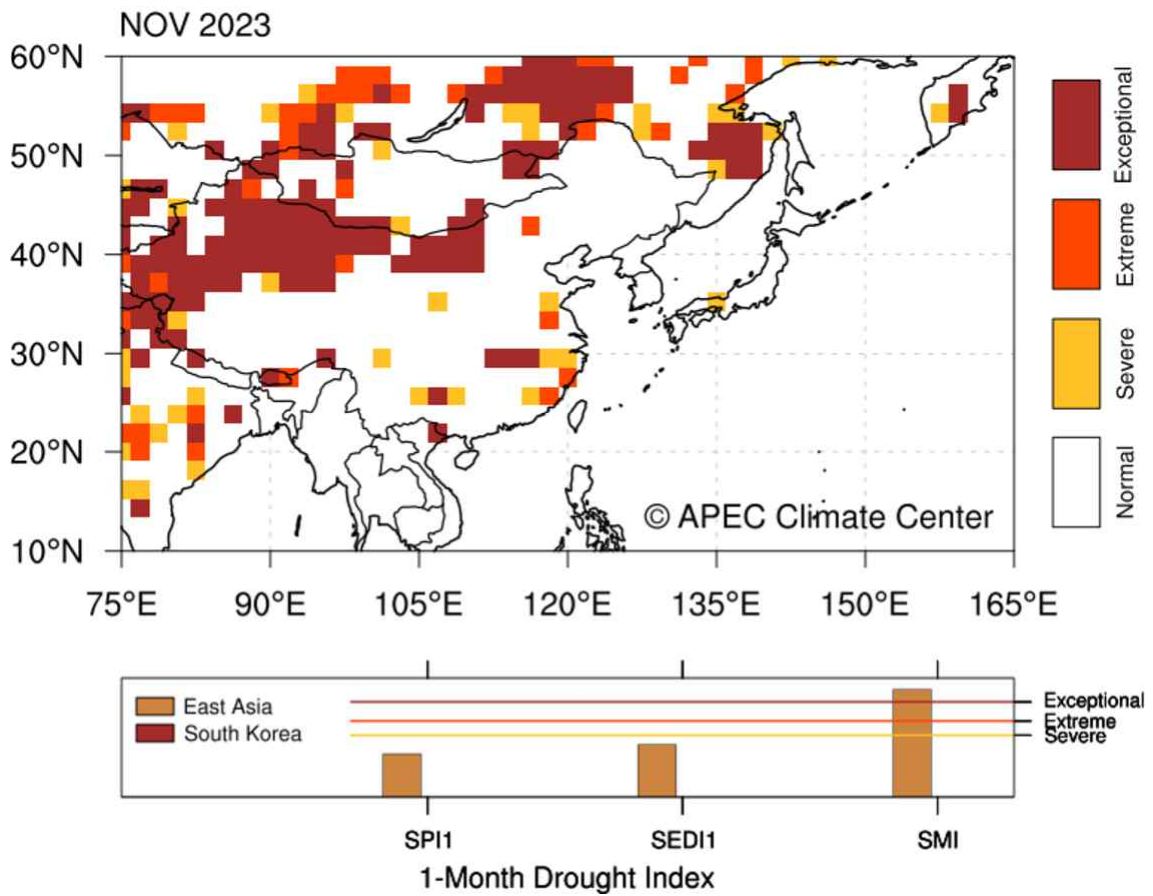


Figure 5.2 East Asia Drought Map in the APEC Climate Center Homepage (November, 2023).

APEC 기후센터 홈페이지 내 월별 이상기후 모니터링 웹서비스를 운영하고 있으며, 동아시아 가뭄 통합 지도에서는, SPI1, SEDI1, 그리고 토양 수분 자료를 이용한 SMI, 총 3개의 가뭄 지수를 한 눈에 볼 수 있다 (Figure 5.2). 매월 모니터링을 위해 1개월 가뭄지수 SPI1, SEDI1, SMI를 계산 후, 3개의 가뭄지수 중 대푯값의 동아시아 지역에 대한 공간 분포를 보여주고 있다.

5.3. 우리나라 가뭄 지수의 미래 변화

5.3.1. 관측 자료에서 나타나는 가뭄지수 변화

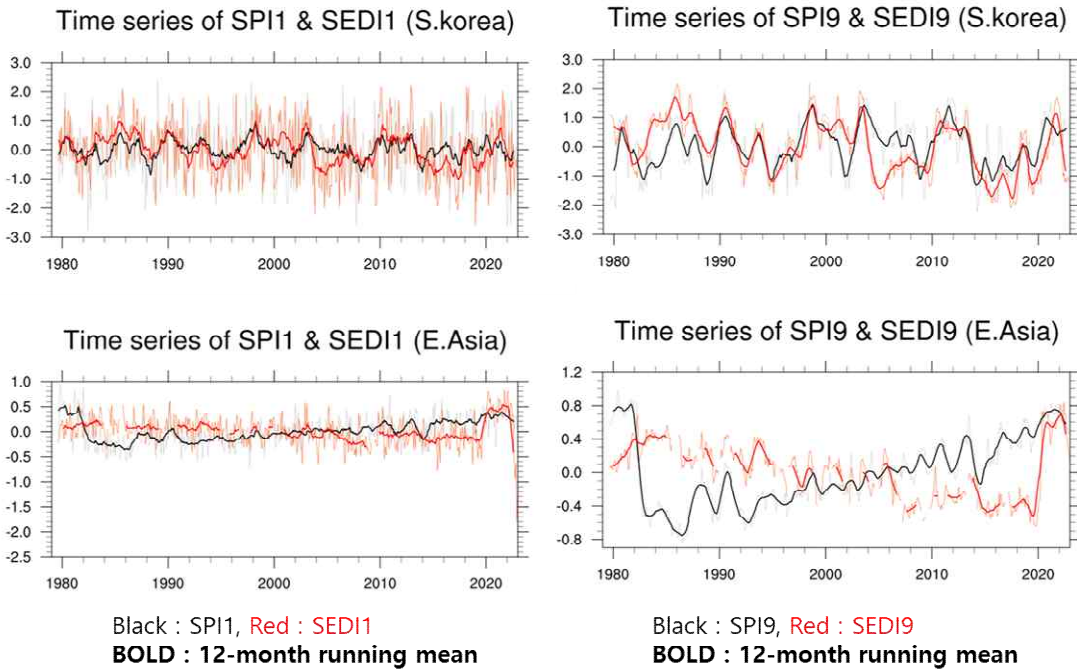


Figure 5.3 Temporal variations of (left panel) 1-month and (right) 9-month SPI and SEDI for the (upper panel) Korean Peninsula and (lower) East Asian region from 1979 to present. The bold line represents a 12-month moving average.

1979년부터 현재까지 관측 및 재분석 자료를 이용하여 기상가뭄지수(SPI)와 실제 증발산량을 고려한 가뭄지수(SEDI)의 특징 비교 분석을 실시하였다. Figure 5.3에서는 과거 기간(1979~2022년) 동안의 재분석 자료를 이용하여, 우리나라 및 동아시아 지역에서의 SPI, SEDI의 변동을 비교하였다. 시계열 분석에 사용된 누적 개월 수는 1개월 및 9개월이며, 추세를 함께 살펴보기 위해 12개월 이동 평균도 함께 분석하였다. 1개월 누적 가뭄지수인 SPI1, SEDI1, 9개월 누적 가뭄지수인 SPI9, SEDI9의 연변동을 나타내고 있으며, 우리나라와 동아시아 지역에서 가뭄지수의 변동 추세가 어떻게 다르게 나타나는지 보여주고 있다.

먼저 단기 변동인 1개월 누적 가뭄지수의 경우, 우리나라 지역에 대해서는 SPI1과 SEDI1 모두 비슷한 변동을 보이지만, 동아시아 지역에 대해서는 두 가뭄지수가 서로 다른 변화 추세가 있으며, 1개월보다 9개월 누적 가뭄지수에서 더욱 상반되게 나타나고 있다. 동아시아 지역에서의 SPI9는 지속적으로 증가하는 특징을 보이며, SEDI9는 지속적으로 감소하다가 최근에 급격하게 증가하는 특징을 보인다.

동아시아 지역 평균 SPI9는 1980년대 중반 이후로 갑자기 강하게 감소하고, 그 이후로는 강한 상승 추세를 보이고 있지만, 동아시아 지역 평균 SEDI9는 1980년대부터 계속해서 감소하는 패턴을 보이다가, 2020년 이후로 갑자기 급격하게 증가하는 특징을 보인다. SEDI1에서 보

면, 최근에는 다시 극심한 가뭄 상태를 보이는 것을 알 수 있다. 동아시아 지역 평균의 경우, 중국 대륙에서의 변화가 가장 크게 반영되고 있으므로, 우리나라 가뭄 지수의 변동을 분석하기가 어렵다.

5.3.2. 우리나라 가뭄지수 공간 분포 변화

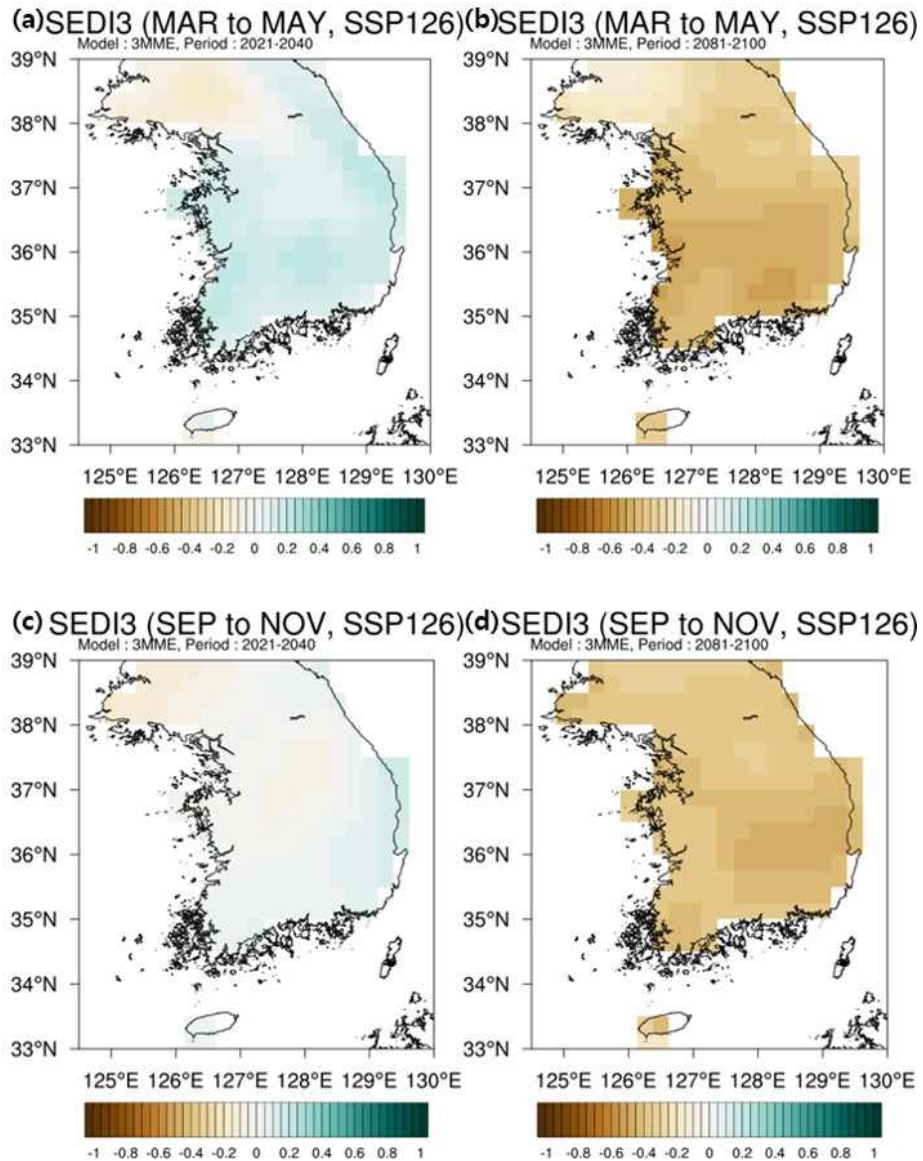


Figure 5.4 Spatial distribution of SEDI3 from 3MME for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP126 scenario.

Figure 5.4는 RCM 3종 모형에서 계산된 SEDI3 가뭄지수를 앙상블 평균하여 저탄소 시나리오 SSP126에서 모의하는 우리나라 지역 공간 분포를 보여주고 있다. 봄철 및 가을철에 대해 근미래(2021~2040년)와 먼미래(2081~2100년) 기간에서의 공간적 특성이 다르게 나타나는 것을

볼 수 있다. 먼저 근미래에는 봄철과 가을철 모두 평균과 비슷하거나 조금 더 습한 특징을 보이며, 먼미래에는 봄철과 가을철 모두 우리나라 전 지역에서 현재보다 더욱 건조해지는 특징을 보인다.

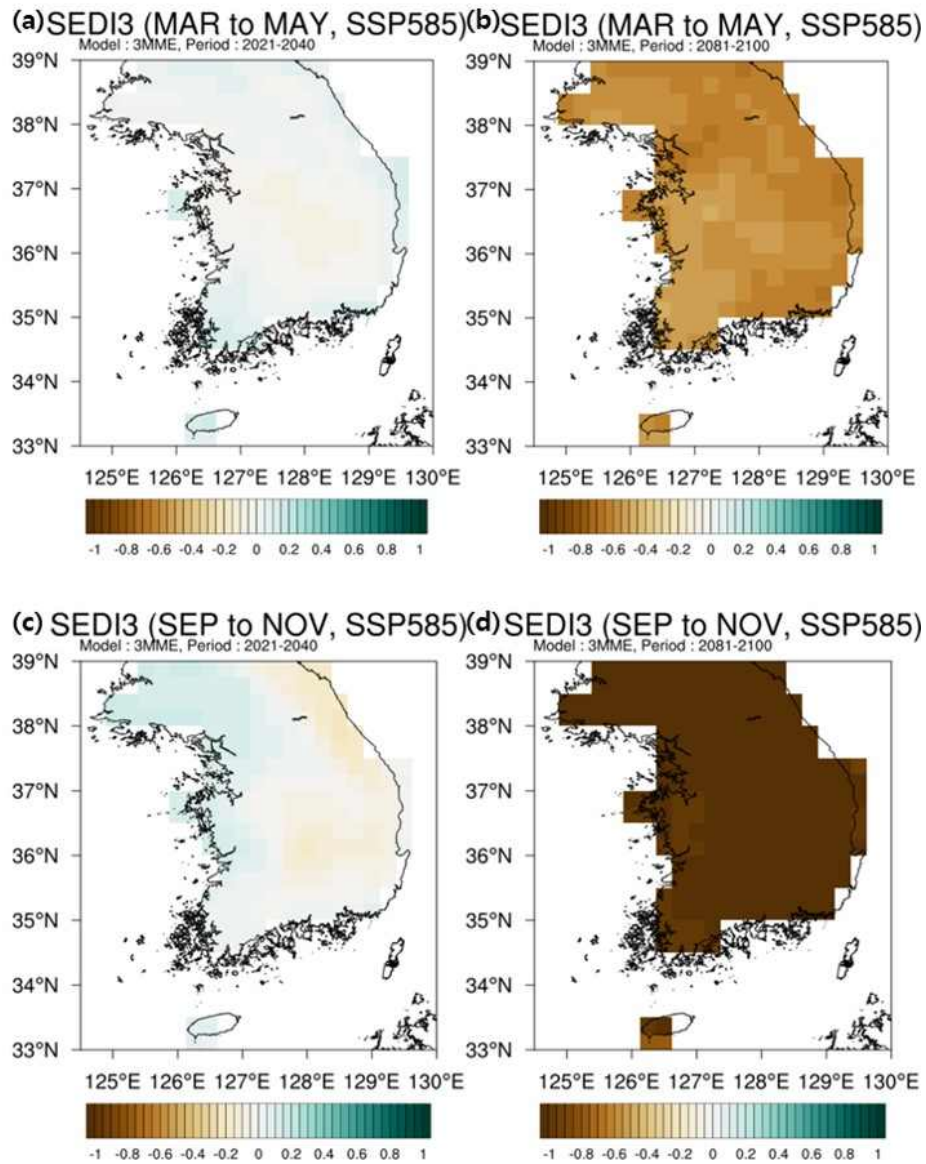


Figure 5.5 Spatial distribution of SEDI3 from 3MME for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP585 scenario.

근미래와 먼미래 간 공간 분포의 차이는 저탄소보다 고탄소 시나리오 SSP585에서 더욱 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 봄철의 경우, 근미래에는 우리나라 전지역이 평균과 비슷한 상태를 보이고 있지만, 먼미래가 되면서 우리나라 전 지역에 대해 가뭄이 심화될 것으로 전망하고 있다.

고탄소 시나리오에서 논의하는 가을철의 경우, 근미래에는 지역별로 차이가 있고, 서쪽을

제외하고는 건조한 공간 분포를 보여주고 있지만, 강도는 매우 약하고 평균과 비슷한 수준이다. 하지만 먼미래가 되면서 우리나라 전 지역에서 매우 뚜렷한 가뭄 심화를 전망하고 있다. 먼미래 기간에 대해 봄철과 가을철의 공간 분포를 비교 해 보면, 봄철보다 가을철에 더욱 가뭄이 심해지고 있으며, 가뭄 심도 또한 가을철에 더욱 강하게 나타나고 있다. (Figure 5.5)

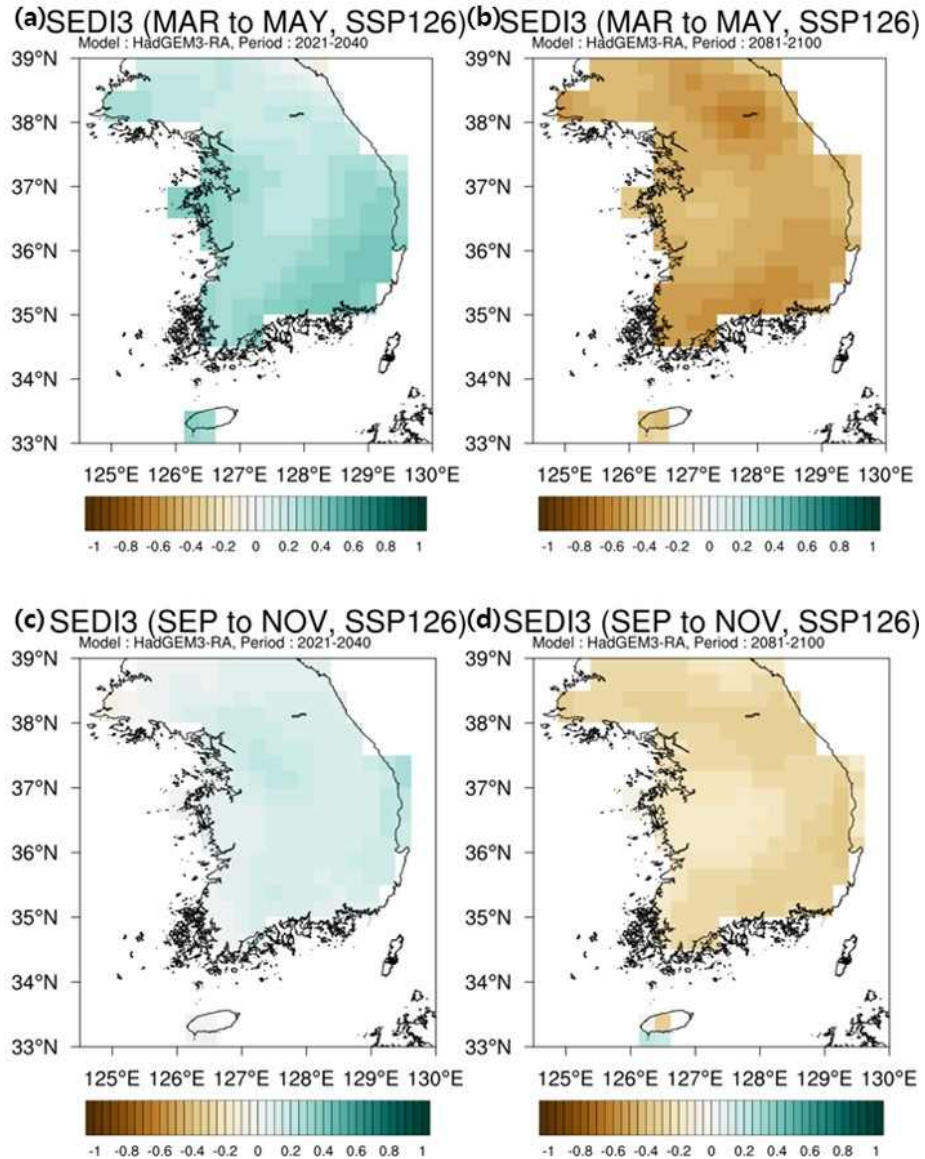


Figure 5.6 Spatial distribution of SEDI3 from HadGEM3-RA for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP126 scenario.

앞서 살펴 본 Figure 5.4와 5.5는 3개 모형 앙상블 평균 된 SEDI3 가뭄지수의 공간 분포를 나타내고 있어서, 각 모형에서 모의하는 지역별 공간 분포 특성이 상쇄되는 특징을 볼 수 있다. 개별 모형의 특성을 비교하기 위해, HadGEM3-RA, WRF, CCLM 총 3종 RCM에 대해 각각 SEDI3 가뭄지수의 공간 분포를 봄철/가을철, 근미래/먼미래, 저탄소/고탄소 시나리오에 대해 공간 분포 특징을 비교하였다.

Figure 5.6과 5.7에서는 HadGEM3-RA 모형이 모의하는 우리나라 SEDI3 가뭄지수 공간 분포를 저탄소 시나리오 SSP126과 고탄소 시나리오 SSP585에 대해 나타내고 있다. 저탄소 시나리오 SSP126에서는 오히려 봄철 먼미래가 가을철 먼미래보다 더욱 가물어질 것으로 전망하고 있다.

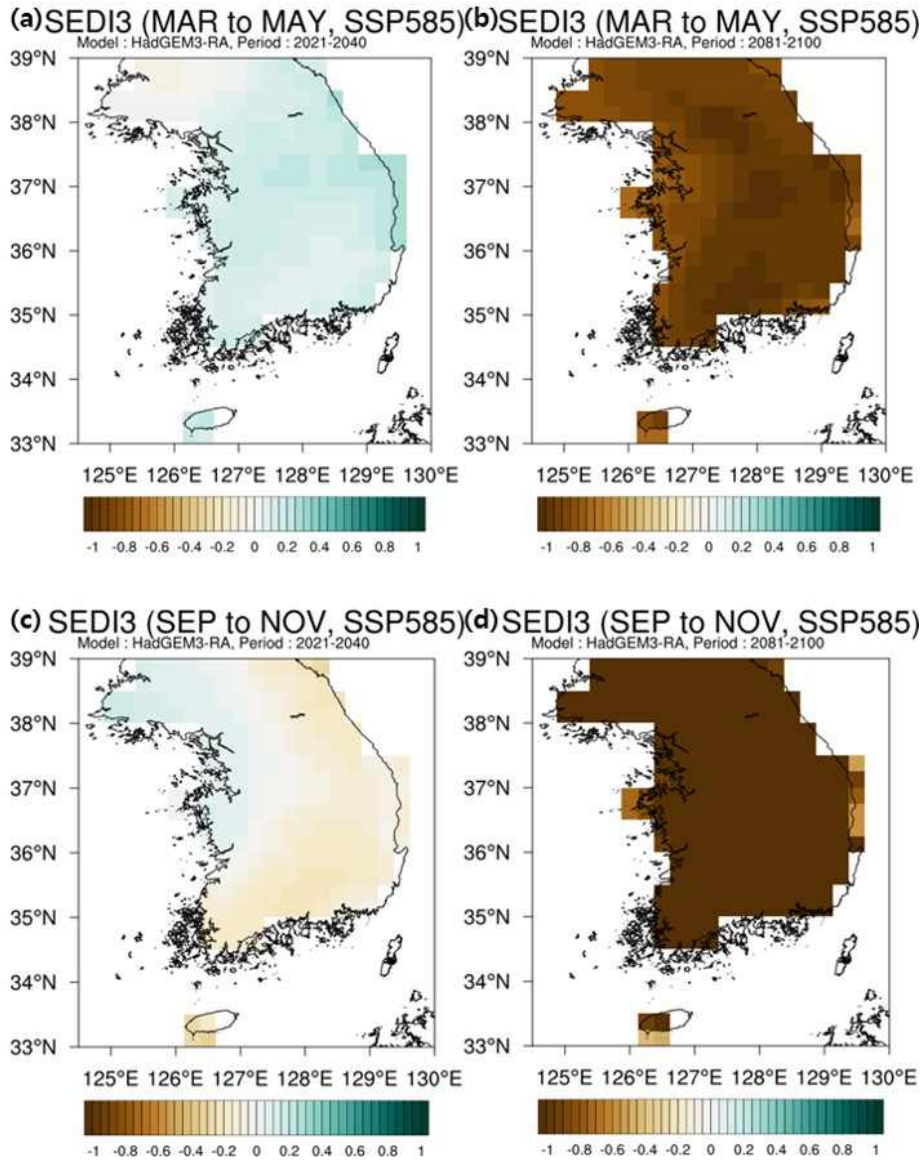


Figure 5.7 Spatial distribution of SEDI3 from HadGEM3-RA for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP585 scenario.

고탄소 시나리오 SSP585에서는, 봄철에는 근미래에 평균과 비슷, 또는 약간 습한 상태를 전망하다가, 먼미래에는 매우 강하게 우리나라 전 지역에 대해 가뭄이 심화될 것을 전망하고 있다. 가을철에는 근미래에는 동서 지역간 차이가 약간 나타나고, 서쪽보다는 동쪽에서 더욱 건조할 것으로 전망하고 있는데, 먼미래 기간에는 우리나라 전지역에 대해 매우 강하게 건조한 가뭄을 전망하고 있다.

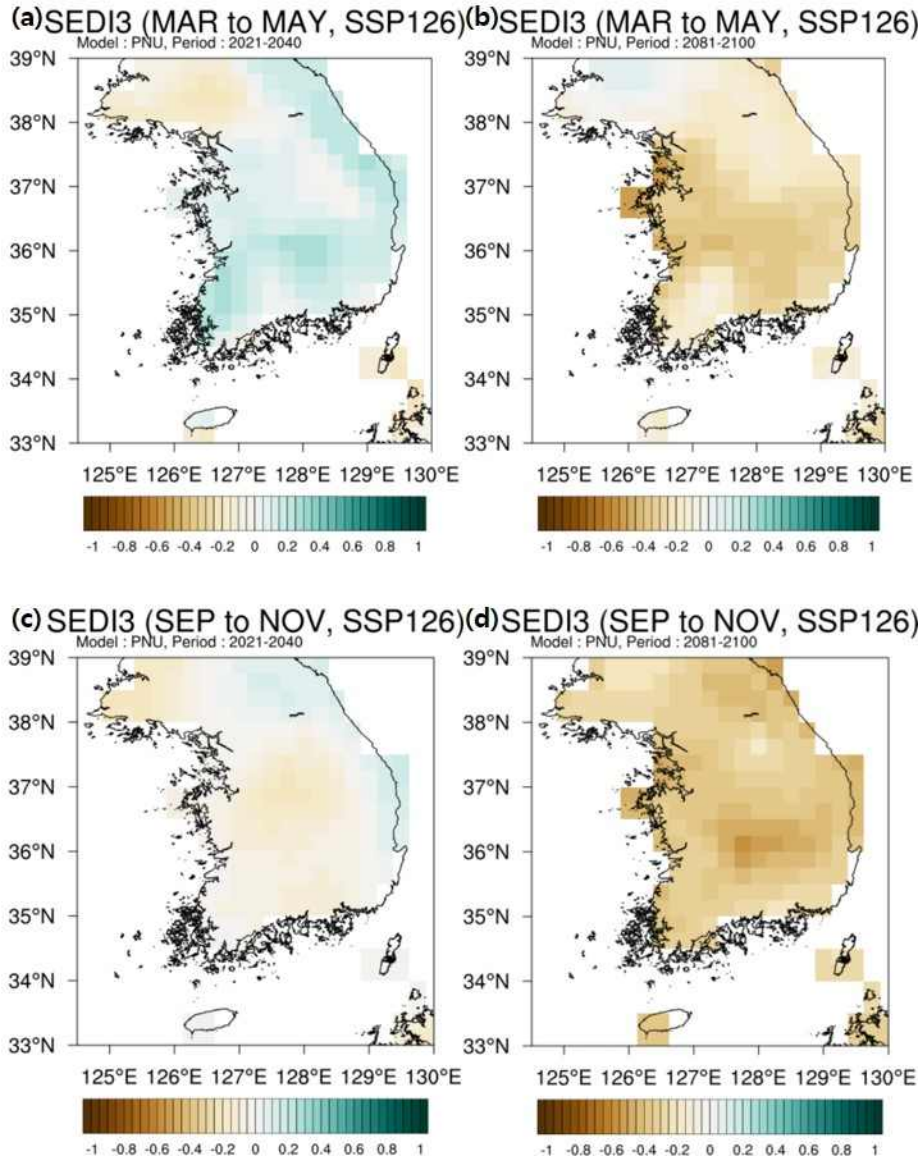


Figure 5.8 Spatial distribution of SEDI3 from PNU-WRF for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP126 scenario.

Figure 5.8과 5.9는 PNU-WRF 모형에서의 우리나라 저탄소/고탄소 시나리오에서의 봄철/가을철 가뭄지수의 근미래/먼미래 기간에 대한 공간 분포를 나타내고 있다. 먼저 저탄소 시나리오에 비해 고탄소 시나리오에서 먼미래 기간에 우리나라 전 지역에 대해 더욱 가물게 전망하는 것을 볼 수 있다.

PNU-WF모형은 HadGEM3-RA 모형과는 다른 공간분포를 보여주는데, 저탄소 시나리오 SSP126에서 근미래 기간에 대해 살펴보면, 봄철에는 약간 습윤하고, 가을절에는 지역별로 차이가 있지만 약간 건조한 특징을 보인다. 모두 먼미래 기간에는 봄철과 가을철 모두 현재보다 약간 더 가물어질 것으로 전망하고 있다. (Figure 5.8)

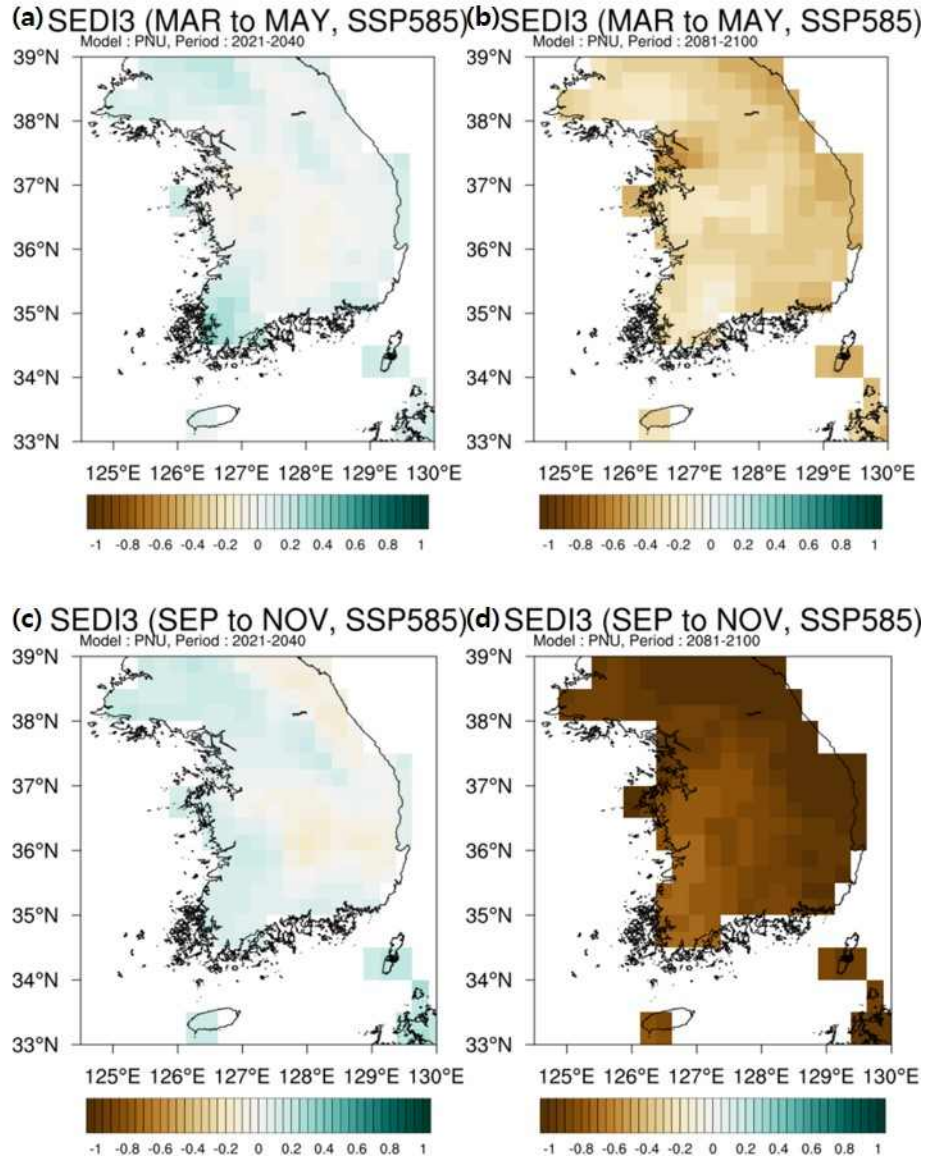


Figure 5.9 Spatial distribution of SEDI3 from PNU-WRF for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP585 scenario.

저탄소 시나리오 SSP126에 비해 고탄소 시나리오 SSP585에서는 매우 뚜렷한 변화 양상을 보이고 있는데, 근미래 기간에는 봄철/가을철 모두 지역적으로 편차가 있어 보인다. 하지만 먼 미래가 되면서, 봄철보다는 가을철 가뭄이 매우 뚜렷해지는 것을 볼 수 있다.

먼미래 기간에는 봄철에도 우리나라 전 지역에 대해 현재보다 더욱 가물어지고 있지만, 가을철에는 가뭄 강도가 매우 커질 것으로 전망하고 있다.

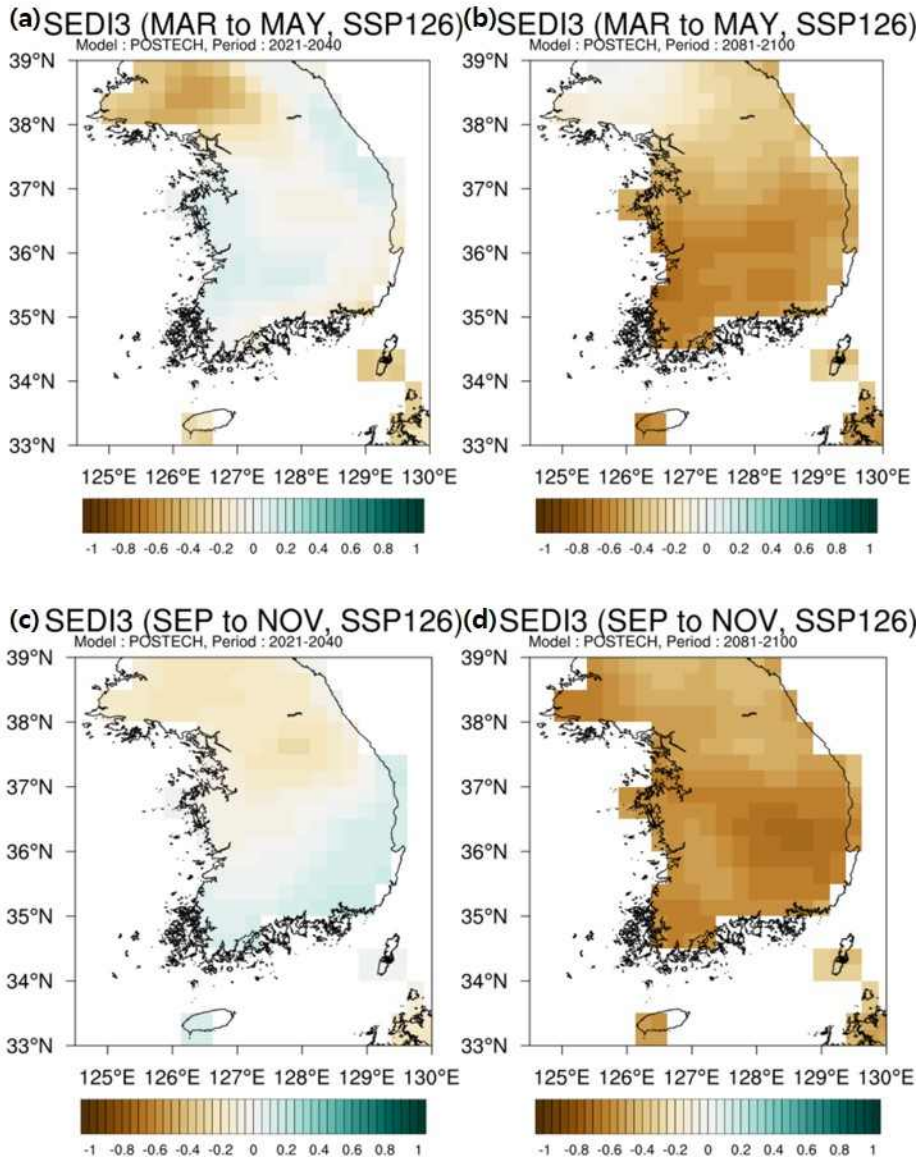


Figure 5.10 Spatial distribution of SEDI3 from POSTECH-CCLM for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP126 scenario.

Figure 5.10과 5.11에서는 POSTECH-CCLM 모형에서 모의하는 가뭄지수 SEDI3의 저탄소/고탄소 시나리오에서의 봄철/가을철에 대하여 근미래/먼미래 기간에 나타나는 우리나라 지역의 분포를 보여주고 있다.

저탄소 시나리오 SSP126에서는 근미래 기간 동안 봄철에는 지역마다 편차가 있으며, 가을철에는 남쪽 지역보다는 중북부 지역에서 더욱 가물어지는 것을 볼 수 있다. 하지만 먼미래 기간이 되면서 봄철/가을철 모두 우리나라 전 지역에 대해서 가뭄이 더욱 심해질 것으로 전망하고 있다. 앞서 살펴본 2개의 모형에 비해, POSTECH-CCLM 모형에서 먼미래 기간에 더욱 가뭄을 강하게 모의하는 것을 볼 수 있다.

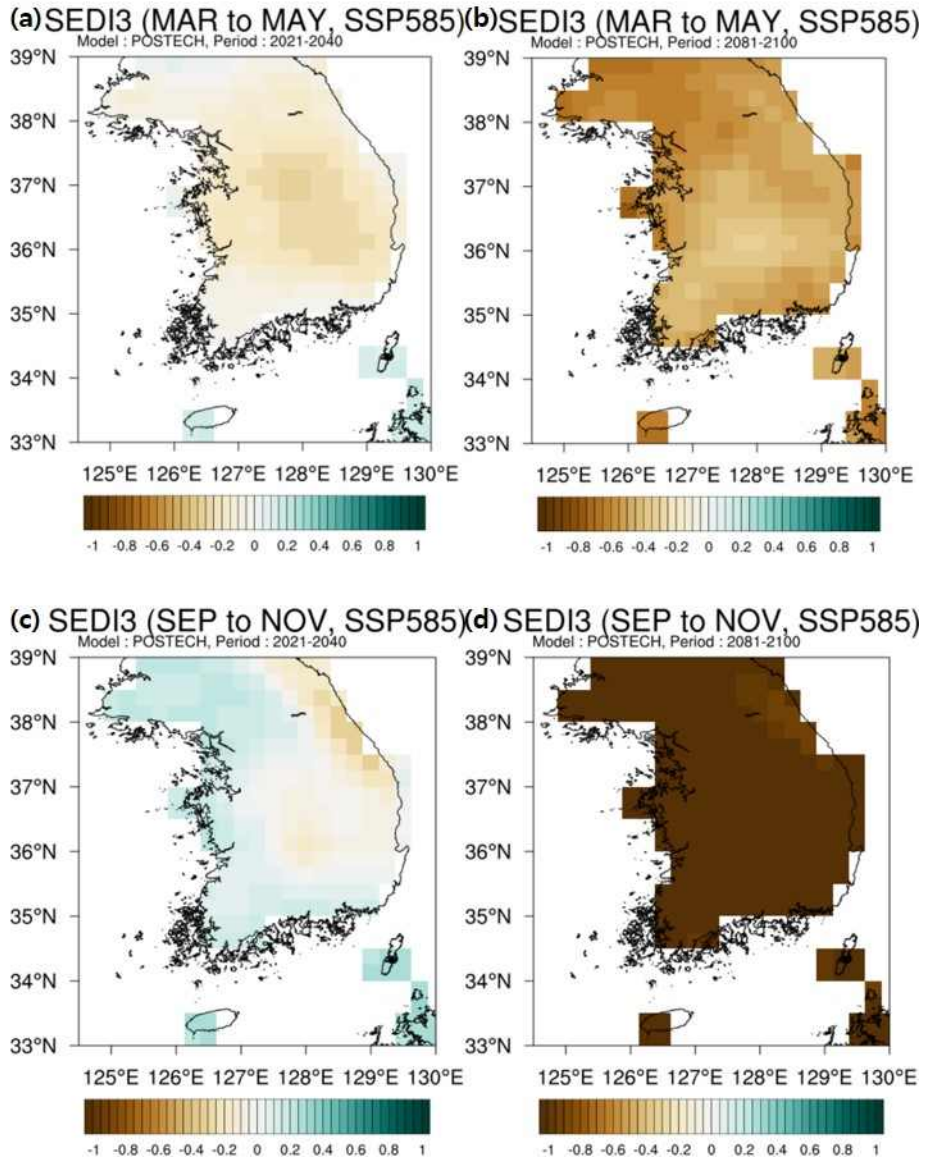


Figure 5.11 Spatial distribution of SEDI3 from POSTECH-CCLM for (a), (b) MAM and (c), (d) SON during (a), (c) near-future(2021~2040), and (b), (d) distant-future(2081~2100) in SSP585 scenario.

고탄소 시나리오 SSP585에서는 그 차이가 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다. 봄철에는 근미래/ 먼미래 기간 모두 현재보다 더욱 가물어질 것으로 전망하고 있으며, 먼미래가 될수록 그 강도를 강하게 모의하고 있다. 가을철에는 근미래에는 지역 간 편차가 있어보이나, 먼미래가 되면서 우리나라 전지역에 대해 매우 강한 가뭄을 전망하고 있다.

이렇게 3개의 모형의 전망하는 공간 분포를 개별적으로 살펴 본 결과, 근미래 기간에는 각 모형마다 습윤/건조 지역이 다양하게 나타나고 있어서, 모형 간 편차가 있어 보이며, 앙상블 평균 시 이러한 시그널들이 상쇄되어, 그 강도가 매우 약하게 나타나는 특징이 보인다. 하지만 고탄소 시나리오 먼미래 기간이 되면, 모든 모형에서 강도는 다르지만 봄철/가을철 두 계

절에 대해 현재보다 더욱 가뭄이 심해질 것이라고 공통적으로 모의하고 있는 것을 알 수 있다.

5.3.3. PDF 분포 비교

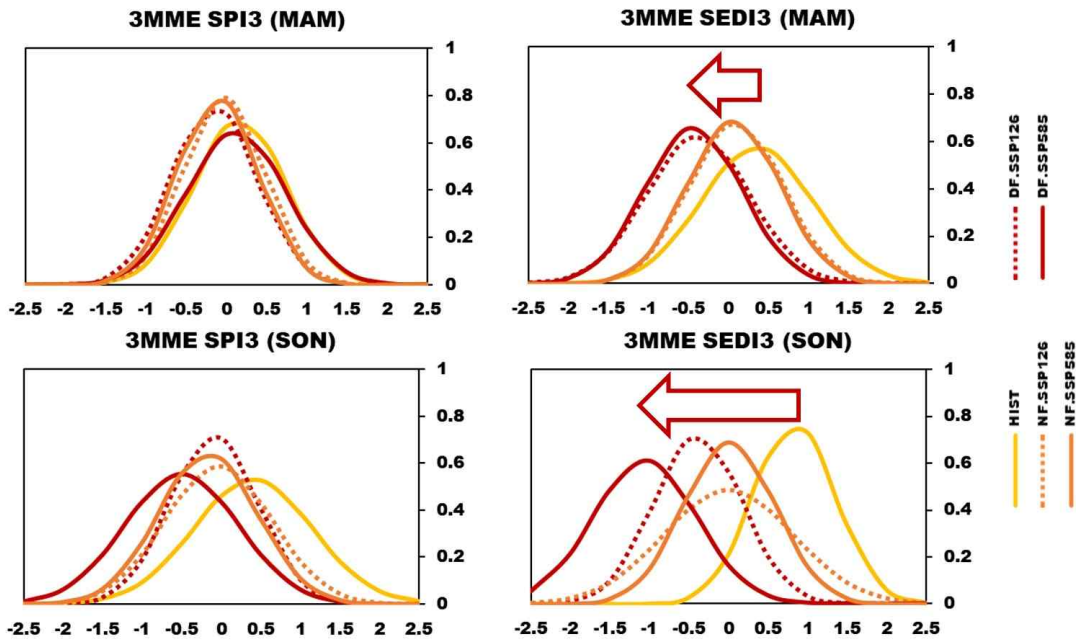


Figure 5.12 PDF distribution for SPI3 and SEDI3 in 3MME.

저탄소/고탄소 시나리오에서 현재 대비 근미래/먼미래 기간 동안 우리나라 3개월 누적 가뭄지수인 SPI3, SEDI3의 분포가 어떻게 변하는지 보기 위해, 현재 재현 기간의 PDF 분포와 저탄소/고탄소 시나리오의 근미래/먼미래 분포를 함께 비교하였다. SPI3와 SEDI3 가뭄 지수는 음의 부호가 클수록 더욱 가뭄의 심도가 심하다는 것을 의미한다.

먼저 강수량만을 이용하여 계산하는 기상학적 가뭄지수인 SPI3은 봄철에는 저탄소/고탄소 시나리오에서 모두 현재와 유사한 분포를 보이고 있으며, 먼미래에도 현재 대비 큰 변화가 나타나지 않고 있다. 하지만 가을철 SPI3는 저탄소 시나리오에서는 현재보다 약간 감소하는 특징을 보이며, 근미래와 먼미래의 큰 차이는 보이지 않는다. 하지만 고탄소 시나리오에서는 현재보다 근미래, 근미래보다 먼미래에 더욱 가뭄지수가 큰 감소를 보이면서 매우 가뭄이 심화되는 것을 전망하고 있다.

실제 증발산량을 고려한 표준 증발산 부족량 지수 SEDI3의 경우, 봄철과 가을철 모두 현재보다 가뭄이 심화될 것으로 전망하고 있다. 봄철 SEDI3는 동일 시나리오 내에서는 근미래와 먼미래 간 차이는 적었지만, 같은 기간에 대해 비교를 해 보면 저탄소와 고탄소 시나리오 간 차이가 크게 나타났다. 현재보다 저탄소 시나리오에서, 그리고 저탄소 시나리오보다 고탄소 시나리오에서 더욱 가뭄의 심화를 전망하고 있다. 가을철 SEDI3는 봄철 SEDI3에 비해 더욱 그 변화의 폭이 크게 나타나고 있으며, 고탄소 시나리오 먼미래 기간에는 가장 극심한 가뭄을 전

망하고 있다.

5.3.4. 가뭄 강도별 분포 변화

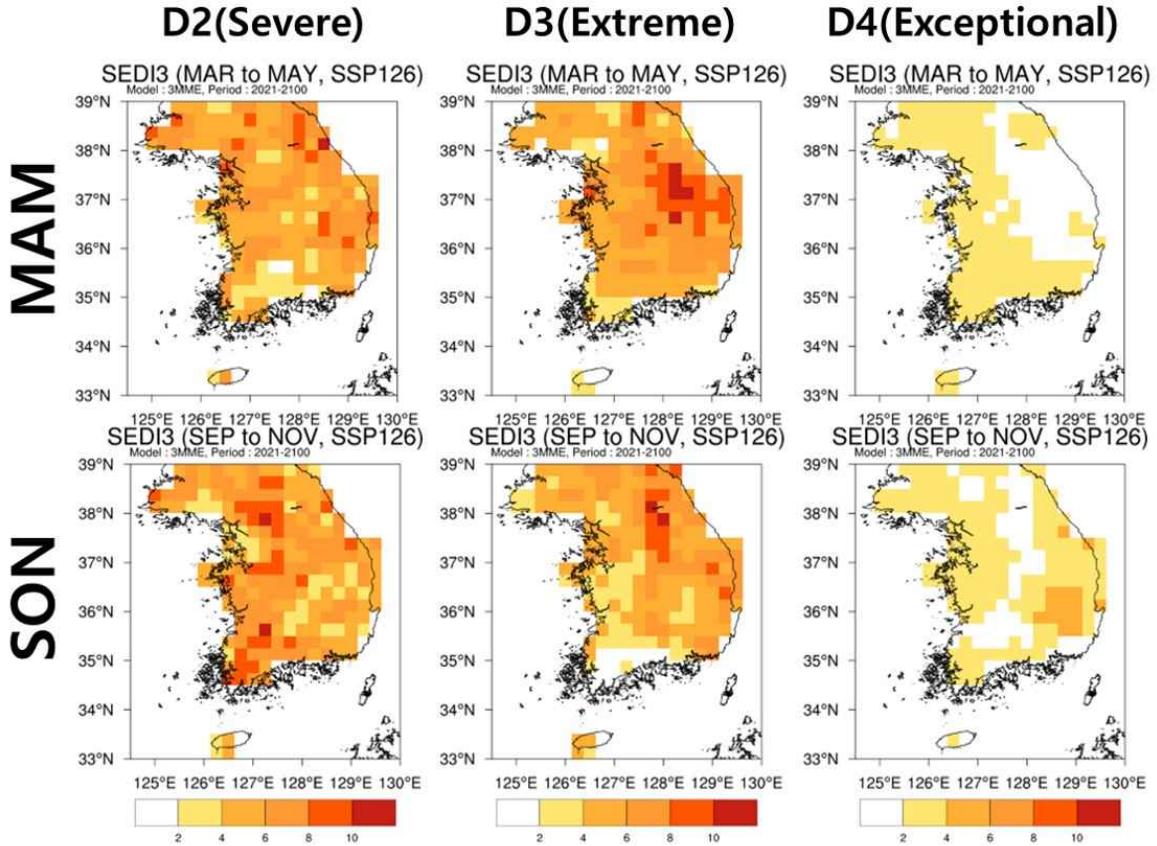


Figure 5.13 Spatial Distribution of D2(Severe), D3(Extreme), D4(Exceptional) Drought for (upper) MAM and (lower) SON season during 2021-2100 in SSP126 scenario.

산출된 가뭄지수를 이용하여 가뭄 강도 분류가 가능하다. SPI 또는 SEDI 가뭄지수의 값이 -0.49 이상일 때에는 None 단계로 평년 또는 습한 상태를 나타낸다. $-0.5 \sim -0.79$ 는 D0(Abnormally Dry, 비정상적인 건조 상태), $-0.8 \sim -1.29$ 는 D1(Moderate Droguth, 약한 가뭄), $-1.3 \sim -1.59$ 는 D2(Severe Drought, 심각한 가뭄), $-1.6 \sim -1.99$ 는 D3(Extreme Drought, 극심한 가뭄), -2.0 이하는 D4(Exceptional Drought, 이례적으로 극심한 가뭄)으로 분류할 수 있다.

가뭄 강도별 발생빈도의 공간 분포를 살펴보기 위해, D2, D3, D4 가뭄의 발생 횟수를 우리나라 지역별 공간 분포로 나타내었다. 먼저 저탄소 시나리오 SSP126에서는 봄철과 가을철 모두 비슷한 특징을 보이고 있는데, D2와 D3 강도의 가뭄은 우리나라 전 지역에 대해 골고루 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 가장 강도가 강한 D4 가뭄의 경우, D2, D3 가뭄에 비해서는 발생횟수가 적은 편이지만, 현재 기후에서는 거의 발생하지 않을 정도의 이례적인 가뭄이 미래 기후에서는 발생할 수도 있음을 보여주고 있다. (Figure 5.13)

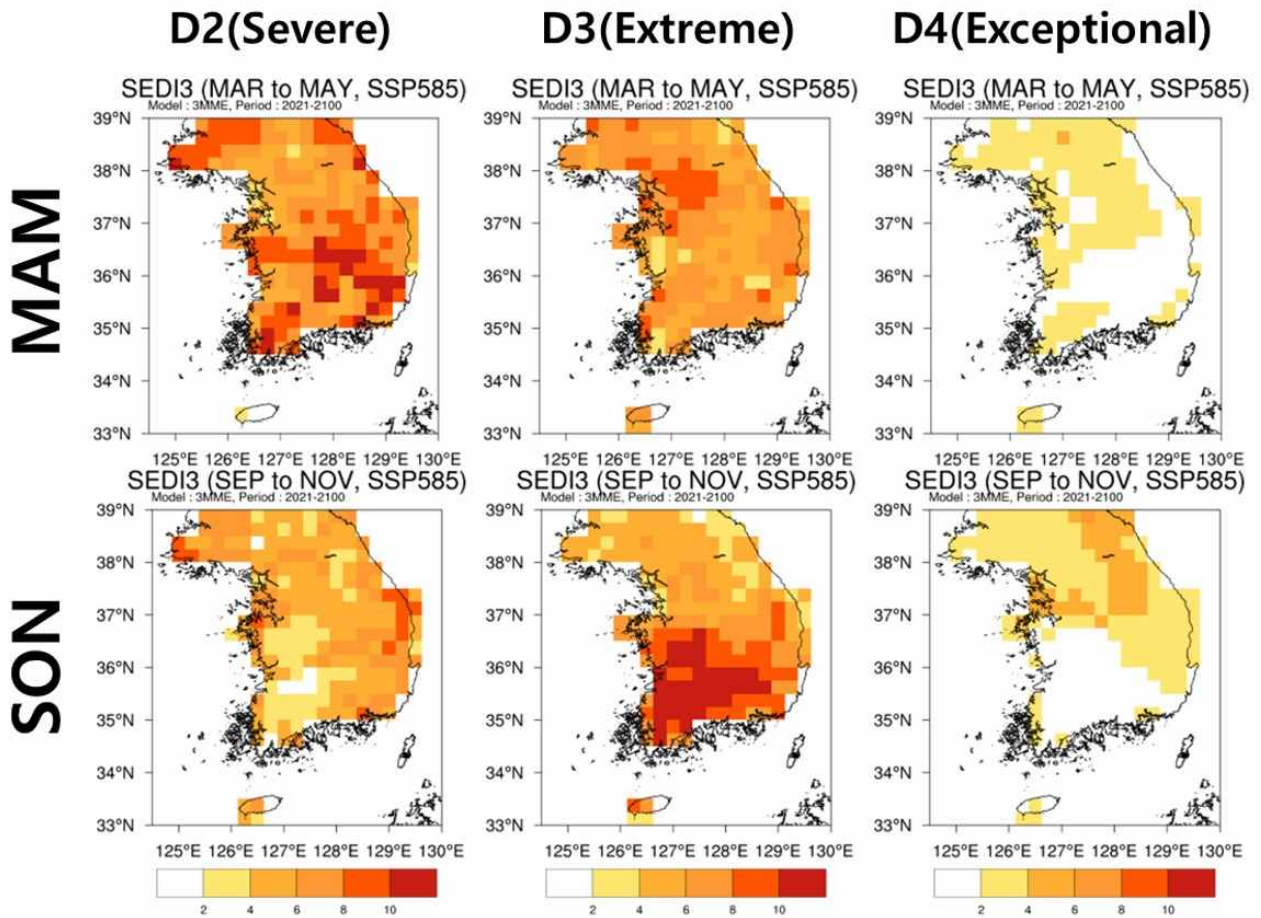


Figure 5.14 Spatial Distribution of D2(Severe), D3(Extreme), D4(Exceptional) Drought for (upper) MAM and (lower) SON season during 2021-2100 in SSP585 scenario.

이러한 공간 분포 변화는 고탄소 시나리오 SSP585에서도 볼 수 있는데, 지역별로 발생 위치는 서로 다르지만 저탄소 시나리오에 비해 발생횟수가 훨씬 더욱 많이 나타나고 있음을 알 수 있다. 고탄소 시나리오에서는 봄철에는 남부지방에서 약간 더 D2 가뭄 발생이 많이 나타나는 것으로 보임, D3와 D4 가뭄은 중부 지역에서 더욱 많이 나타나는 것으로 보인다. 가을철에는 특히 D3 극심한 가뭄이 남부지방에서 많이 발생하는 것으로 전망하고 있으며, D4 가뭄의 경우 남부보다는 중북부 지역에서의 발생이 더욱 많을 것으로 전망하고 있다. (Figure 5.14)

5.4. 한반도 가뭄 지수에 기여하는 대기 순환장

5.4.1. 다중회귀분석을 이용한 변수별 기여도 분석

SEDI 가뭄지수의 미래 변화에 대해 각 변수별 기여도를 살펴보기 위해, 입력 변수들을 이용하여 다중 회귀 분석을 실시하였으며, 이를 통해 산출해 낸 표준화 계수를 이용하여 변수별 기여도를 비교하였다.

기여도 분석에 이용한 변수는 지표면 기온(TAS), 순 복사량(RN, Net Radiation), 강수량(PR), 지표면 동서 방향 바람(UAS), 지표면 남북 방향 바람(VAS)로 총 5가지이다. 이외에도 SEDI 가뭄지수를 계산하는데 필요한 절대 습도(HUS)의 경우, 지표면 기온(TAS)의 함수로 높은 다중공선성을 보이고 있어 분석에서 제외하였다.

강수량 자료를 이용하여 산정하는 기상학적 가뭄지수인 SPI는 단일 변수를 사용하기 때문에, 강수량의 변동과 매우 큰 연관이 있지만, 다양한 변수를 입력자료로 하여 생산하는 SEDI 가뭄지수의 경우 어떤 변수가 가뭄지수의 미래 변화에 영향을 끼치는지 상세하게 분석 할 필요가 있다.

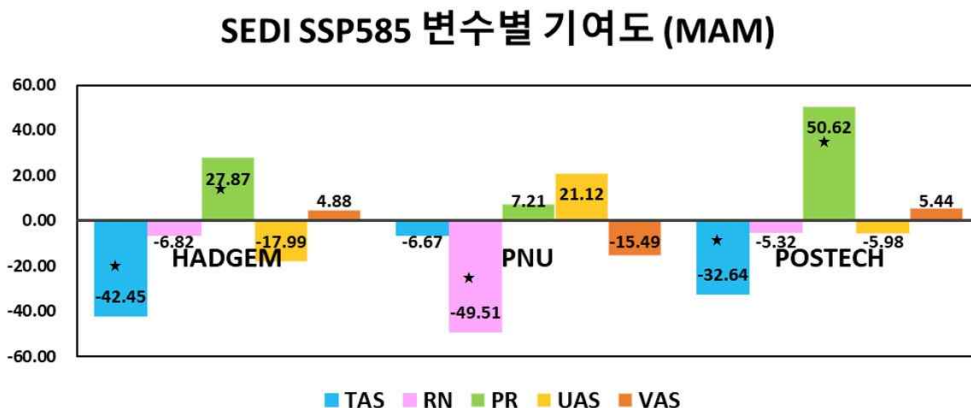


Figure 5.15 Contributions of 5 variables(TAS, RN, PR, UAS, VAS) for SEDI3 during MAM in SSP585 scenario.

누적강수량 자료만을 사용하는 표준강수지수(SPI)보다 표준증발산부족량지수(SEDI)에서의 가뭄 심화 미래 전망에 대한 원인분석을 위해 입력 자료로 필요한 변수(지표면 기온(TAS), 순 복사량(RN), 강수량(PR), 동서 방향 바람(UAS), 남북 방향 바람(VAS))에 대해 변수별 기여도를 분석하였다. 가뭄지수에 대한 기여도의 양/음 부호는 변화의 상관성과 관련이 있으며, 기여도가 양의 부호로 값이 클수록 가뭄 약화, 음의 부호로 클수록 가뭄 심화와 관련이 있다.

Figure 5.15은 고탄소 시나리오 SSP585의 봄철 SEDI 가뭄지수 변동에 대한 3종 RCM 모형의 변수별 기여도를 나타내고 있다. 유의한 값은 ★로 표시하였다. 각 변수에 대해서 3개의 모형 중 2개 이상의 모형이 같은 기여도 부호를 가지고, 유의한 값을 가지는 경우 Figure 5.16에

유색으로 표시하였으며, 그렇지 않은 경우는 회색으로 표시하였다.

봄철 SEDI3 가뭄지수 변동에 기여하는 변수별 기여도를 살펴보면, HadGEM3-RA 모형에서는 TAS가 -42%, PR이 +28%로 유의하게 나타났으며, 나머지 세 변수는 유의하지는 않지만 RN은 -7%, USAS는 -18%, VAS는 +5%의 기여도를 보인다. PNU-WRF 모형에서는 RN이 -50%로 유의한 값을 보이고 있고, 나머지 네 변수는 유의하지는 않지만 TAS는 -7%, PR은 +7%, UAS는 +21%, VAS는 -15%의 기여도를 보인다. POSTECH-CCLM 모형에서는 TAS가 -33%, PR이 +51%로 유의한 기여도를 보이고 있으며, 나머지 세 변수는 유의하지는 않지만 RN은 -5%, UAS는 -6%, VAS는 +5%의 기여도를 보인다.

SEDI SSP585 변수별 기여도 (MAM)

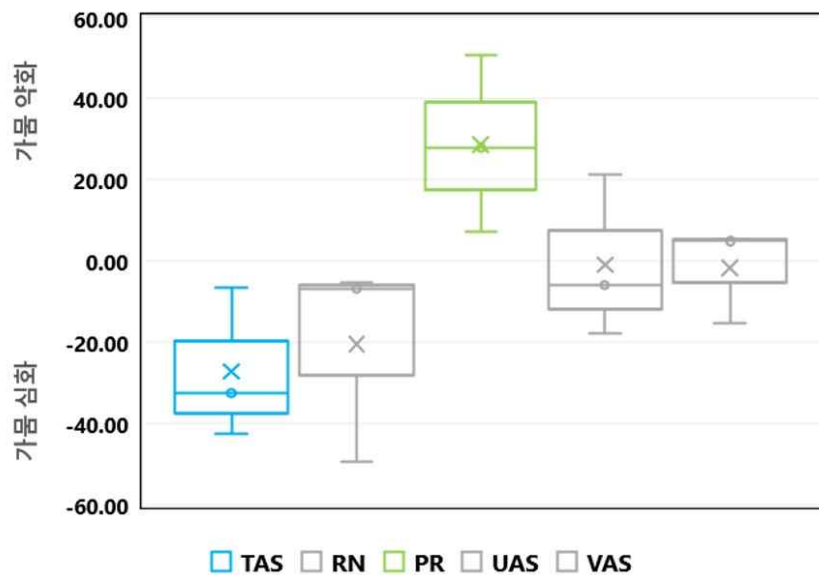


Figure 5.16 Box plots of contribution of 5 variables(TAS, RN, PR, UAS, VAS) for SEDI3 during MAM in SSP585 scenario.

개별 모형을 함께 살펴보기 위해 Box Plot을 이용하여 정리해 보면, 봄철 가뭄지수의 변화에 대한 변수별 기여도는 3종 RCM 평균 지표면 기온(TAS)이 -27%, 순 복사량(RN)이 -20%로 음의 기여도를 보이고 있고, 강수(PR)는 +28%로 양의 기여도를 보이는 것을 알 수 있다. 봄철에는 기온과 순복사량이 증가할수록 가뭄 심화에 기여하고, 강수량이 증가할수록 가뭄 약화에 기여한다는 것을 알 수 있다.

SEDI SSP585 변수별 기여도 (SON)

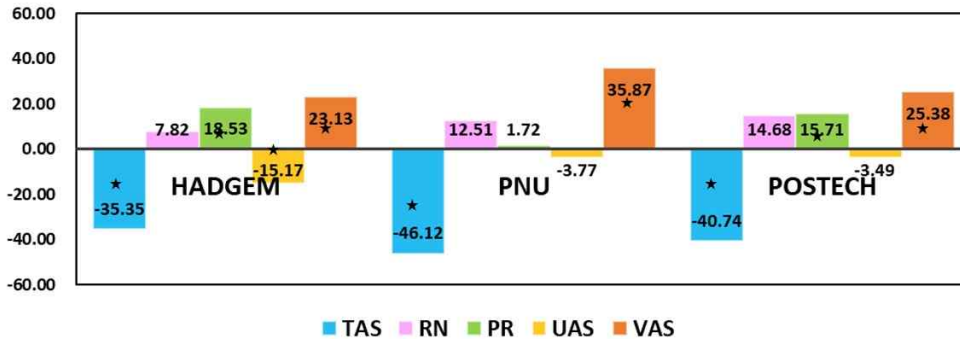


Figure 5.17 Contributions of 5 variables(TAS, RN, PR, UAS, VAS) for SEDI3 during SON in SSP585 scenario.

Figure 5.17은 고탄소 시나리오 SSP585의 가을철 SEDI 가뭄지수 변동에 대한 3종 RCM 모형의 변수별 기여도를 나타내고 있다. 가을철에는 TAS와 VAS의 변화가 3개의 모형에서 모두 유의한 기여도를 보이고 있다. HadGEM3-RA 모형에서는 TAS가 -35%, PR이 +19%, VAS가 +23%, UAS가 -15%로 유의한 기여도를 보이고 있으며, 나머지 변수인 RN은 +8%의 기여도를 보인다. PNU-WRF 모형에서는 TAS가 -46%, VAS가 +36%로 유의한 기여도를 보이고 있으며, 나머지 세 변수는 유의하지는 않지만 RN은 +13%, PR은 +2%, UAS는 -4%의 기여도를 보인다. POSTECH-CCLM 모형에서는 TAS는 -41%, PR은 +16%, VAS는 +25%로 유의한 기여도를 보이고 있으며, 나머지 두 변수는 유의하지는 않지만 RN은 +15%, UAS는 -3%의 기여도를 보인다.

SEDI SSP585 변수별 기여도 (SON)

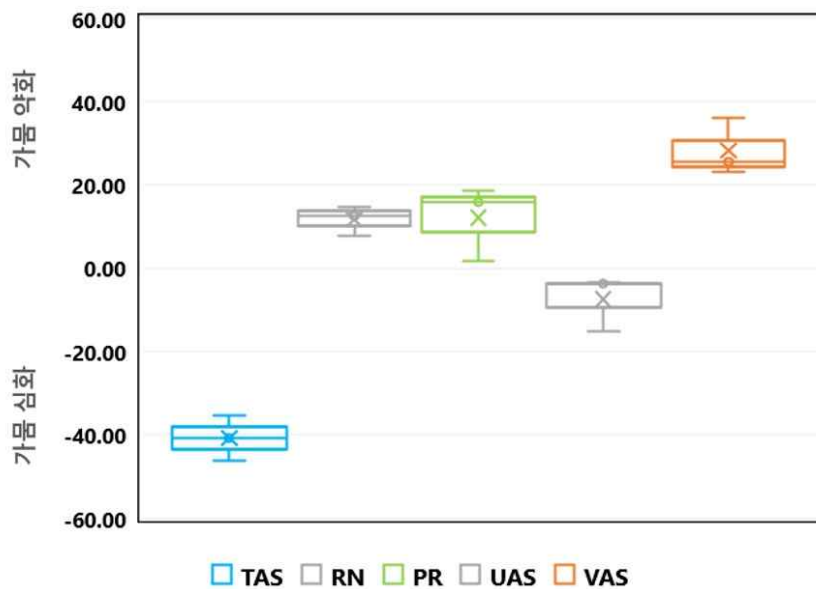


Figure 5.18 Box plots of contribution of 5 variables(TAS, RN, PR, UAS, VAS) for SEDI3 during SON in SSP585 scenario.

개별 모형을 함께 살펴보기 위해 Box Plot을 이용하여 정리해 보면, 가을철 가뭄지수의 변화에 대한 변수별 기여도는 3종 RCM 평균 지표면 기온(TAS)이 -40%로 음의 기여도를 보이고 있고, 강수(PR)는 +12%, 남북 바람 방향(VAS)는 +28%로 양의 기여도를 보이는 것을 알 수 있다. 가을철에는 기온과 증가할수록 가뭄 심화에 기여하고, 강수량과 남북 바람 방향이 증가할수록 가뭄 약화에 기여한다는 것을 알 수 있다. (Figure 5.18)

5.4.2. 대기순환장 미래 변화

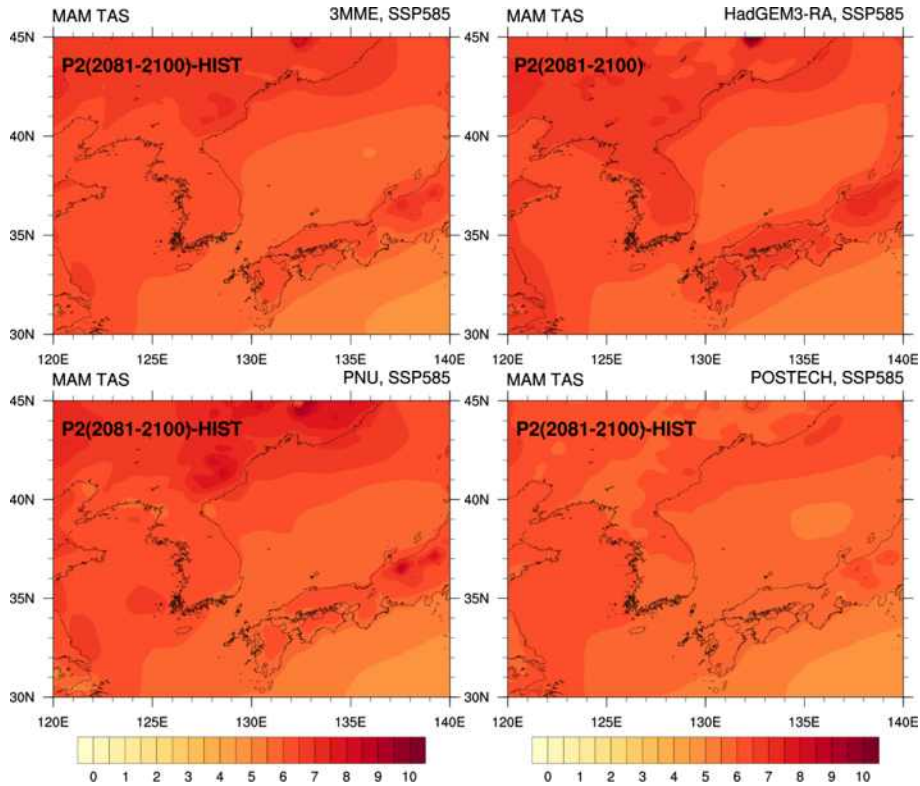


Figure 5.19 Surface air temperature difference pattern between P2(2081-2100) and HIST(1985-2014) for MAM in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.

Figure 5.19는 먼미래 기간 동안 봄철 지표면 기온의 현재 대비 고탄소 시나리오에서의 변화 공간 분포를 보여준다. HadGEM3-RA, WRF, CCLM 모형 모두 우리나라 전 지역에 대해 지표면 기온이 현재에 비해 증가할 것이라고 전망하고 있다. 그 강도나 분포는 모형마다 지역 별로 상이하게 나타나고 있어, 3MME에서는 분포나 강도가 약간 상쇄되어 약하게 보인다.

개별 모형의 공간 분포를 비교 해 보면, 현재 대비 봄철 기온이 가장 크게 나타나는 모형은 HadGEM3-RA 모형이다. 반면, POSTECH-CCLM 모형에서는 현재 대비 기온의 변화가 가장 적게 나타났다.

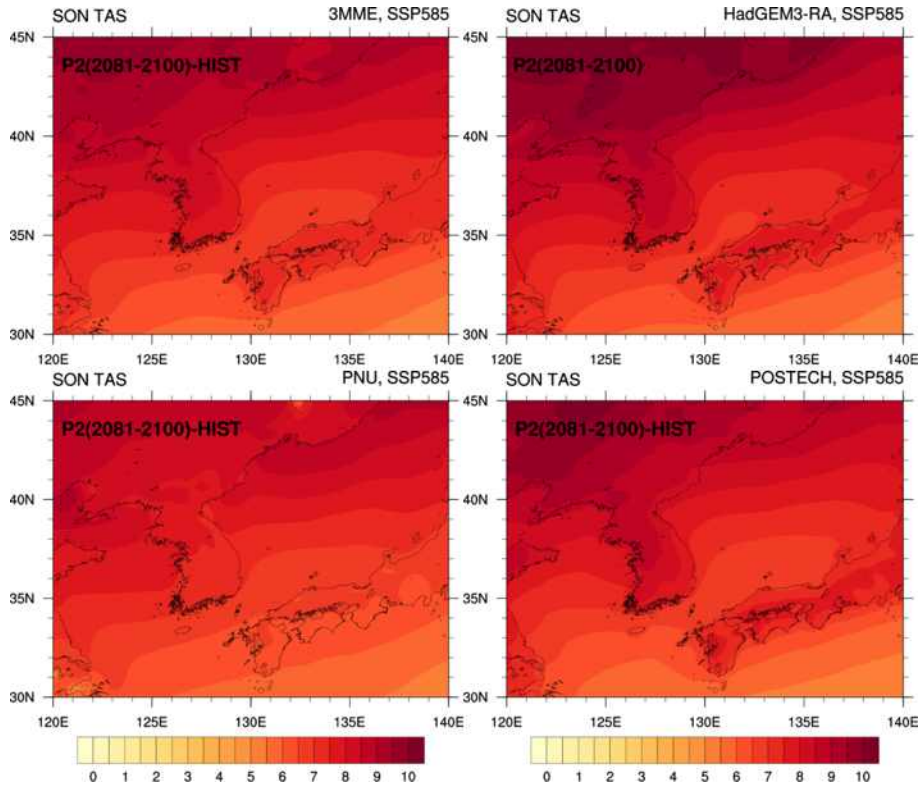


Figure 5.20 Surface air temperature difference pattern between P2(2081-2100) and HIST(1985-2014) for SON in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.

고탄소 시나리오에서의 지표면 기온 상승은 봄철보다 가을철에 더욱 크게 나타나고 있다. 더불어 봄철보다 남북 경도가 더욱 크게 나타나고 있다. 3MME에서는 개별 모형에 비해 강도는 약하지만, 봄철에 비해 가을철에 현재 대비 기온 증가가 더욱 뚜렷하게 나타난다.

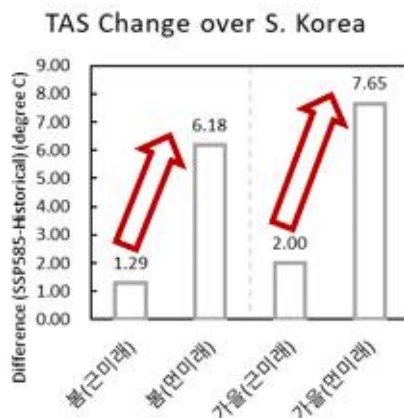


Figure 5.21 TAS change during MAM and SON for the Near-future and Distant-future over Korean Peninsula.

고탄소 시나리오에 대해 정리 해 보면, 우리나라 지역평균 지표면기온은 근미래에 비해 먼미래에 봄철, 가을철에 모두 증가하는 양상을 보인다. (Figure 5.21)

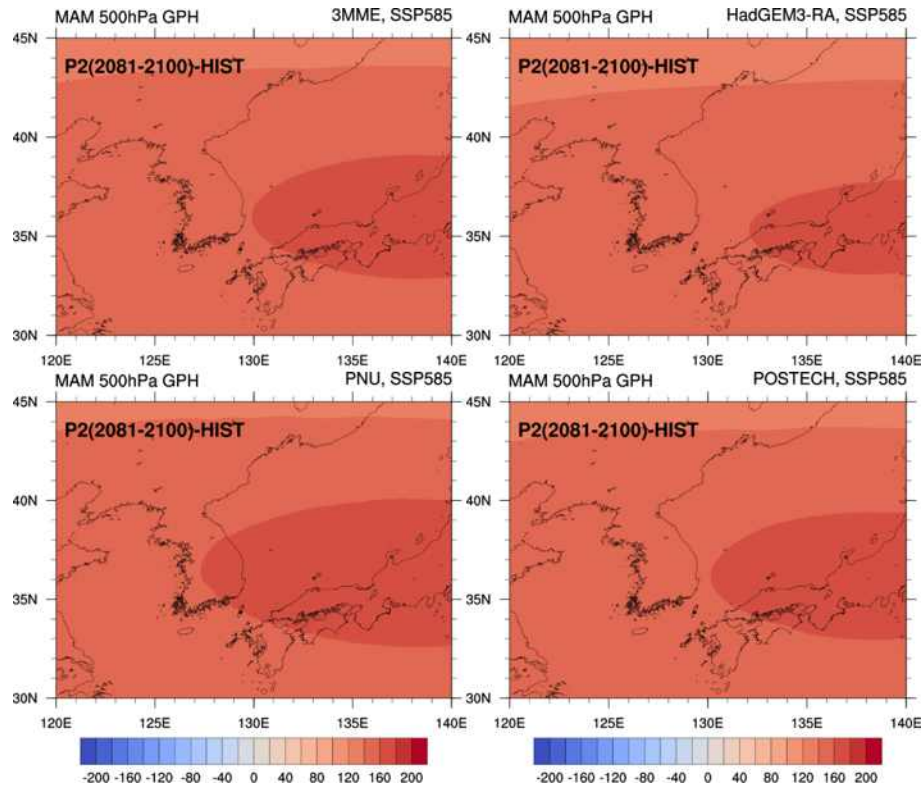


Figure 5.22 Geopotential height difference pattern at 500hPa between P2(2081-2100) and HIST(1985-2014) for MAM in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.

지표면 기온과 함께 대기 순환장의 변화를 보기 위해 500hPa에서의 지위고도장을 현재 대비 비교해 본 결과, SSP585 고탄소 시나리오에서 먼미래 봄철에는 한반도 동쪽에 고기압 아노말리가 위치하는 특징을 보이고 있다. 모형마다 고기압 아노말리의 위치는 약간 편차가 있지만, 이러한 지위고도의 분포는 우리나라에 남풍이 더욱 불어들어오면서 강수를 유발하는 패턴으로 보인다 (Figure 5.22).

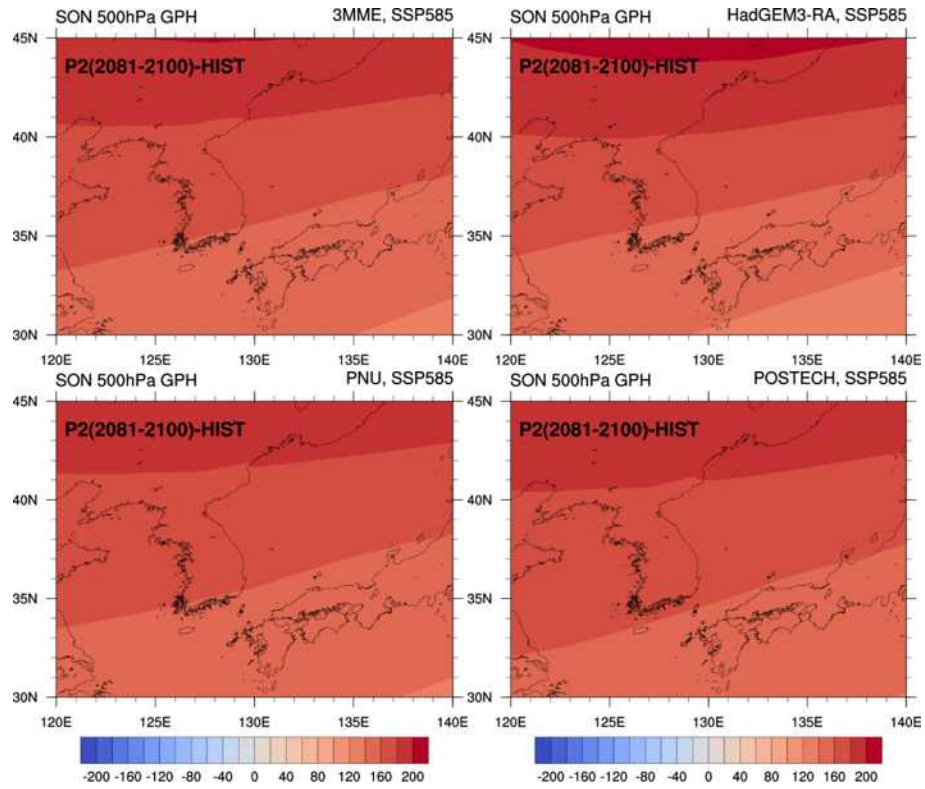


Figure 5.23 Geopotential height difference pattern at 500hPa between P2(2081-2100) and HIST(1985-2014) for SON in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.

Figure 5.23에서는 가을철에는 봄철보다 더욱 강한 고기압이 북쪽에 위치하고 있는 특징을 보이고 있다. 가을철 강수의 경우, 남풍이 우세할 때 강수량이 증가하지만, 가을철 먼미래에는 고기압이 북쪽에 위치하고 있어 남풍이 약해질 것으로 전망하고 있다.

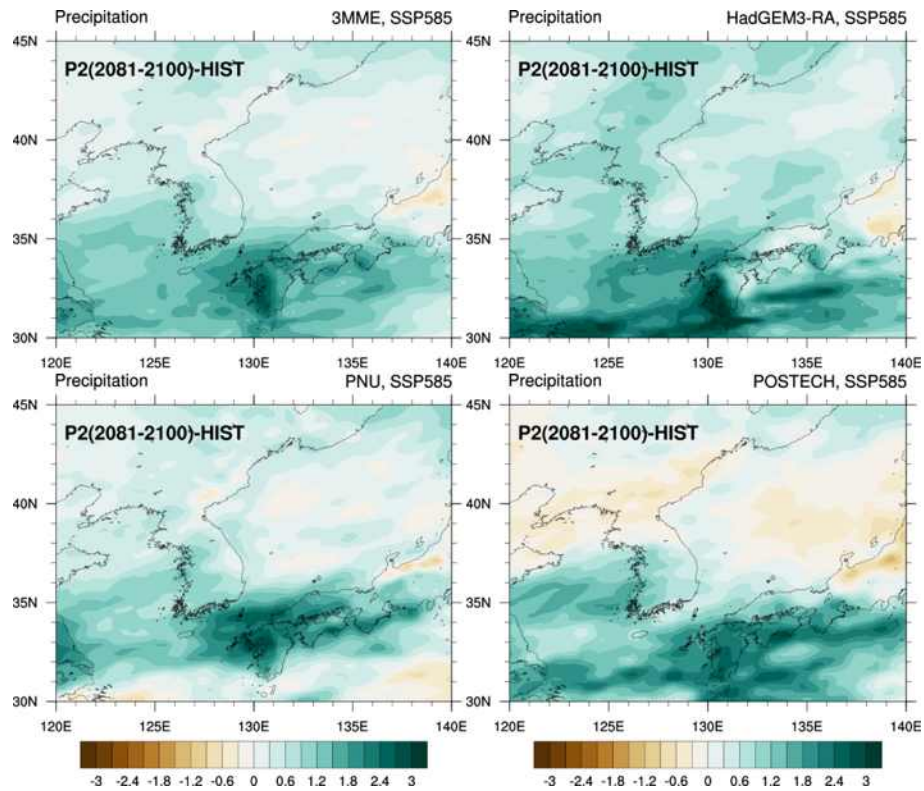


Figure 5.24 Precipitation difference pattern between P2(2081-2100) and HIST(1985-2014) for MAM in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.

봄철 강수량의 경우 현재 기간보다 한반도 지역에서 전반적으로 증가하고 있는 특징을 보이고 있다. 모형마다 공간적인 분포는 다르지만, 3MME에서는 동부보다는 남부 및 서부 지역에서 강수량이 현재보다 먼미래에 더욱 증가하는 특징을 보이고 있다. HadGEM3-RA 모형에서는 중부지방에서 현재보다 강수량이 증가할 것으로 전망하고 있다. 세 가지 모형 모두, 고탄소 시나리오에서 봄철 기간 동안 현재보다 먼미래에 강수가 한반도 전 지역에 대해 증가할 것이라고 전망하였다.

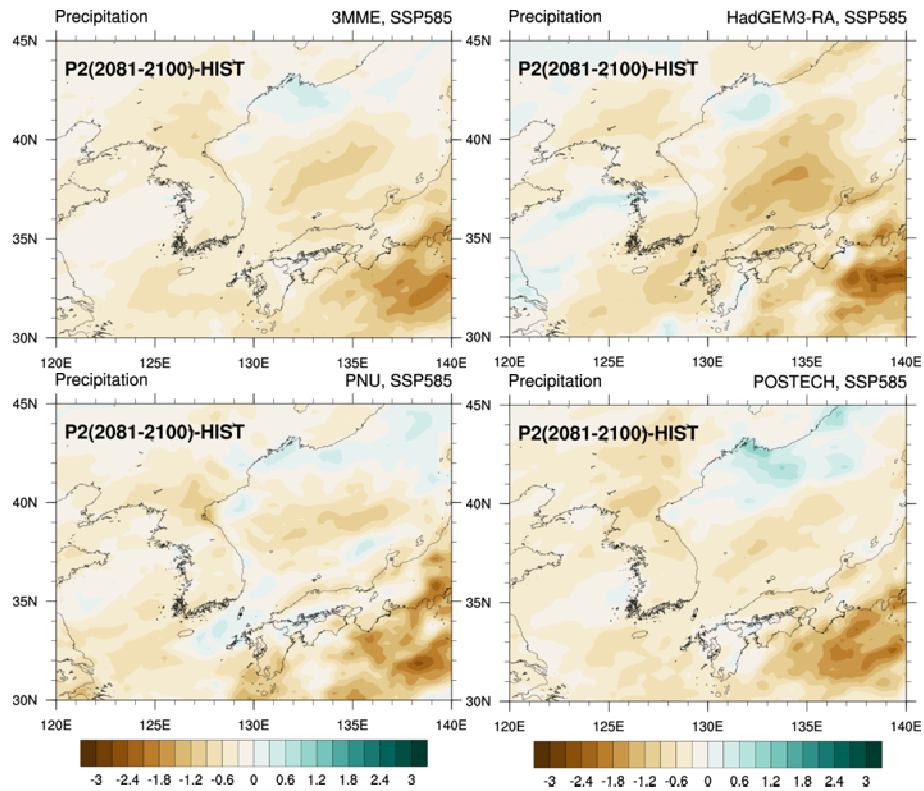


Figure 5.25 Precipitation difference pattern between P2(2081-2100) and HIST(1985-2014) for SON in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.

하지만 가을철의 경우, 봄철과 상반되는 공간 분포를 보이고 있는데, 한반도 전 지역에서 현재보다 강수량이 감소하는 특징들을 보여주고 있다. 개별 모형 뿐만 아니라 3MME에서도 한반도 전지역에 대해 고탄소 시나리오에서 가을철 강수가 먼미래에 감소하는 공통적인 시그널을 전망하고 있다.

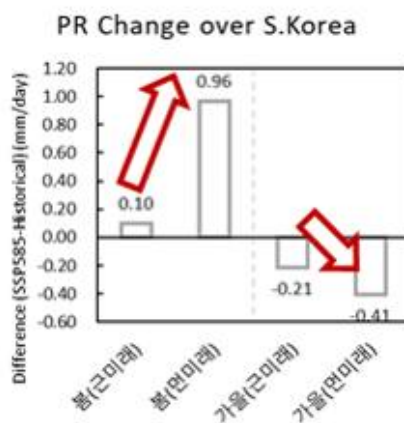


Figure 5.26 PR change during MAM and SON for the Near-future and Distant-future over Korean Peninsula.

고탄소 시나리오에서 봄철과 가을철의 강수량 변화를 근미래, 먼미래에 대해 정리해보면, 봄철에는 근미래보다 먼미래에 더욱 강수량이 증가하고 있으며, 가을철에는 근미래보다 먼미래에 강수량이 감소하는 것을 알 수 있다.

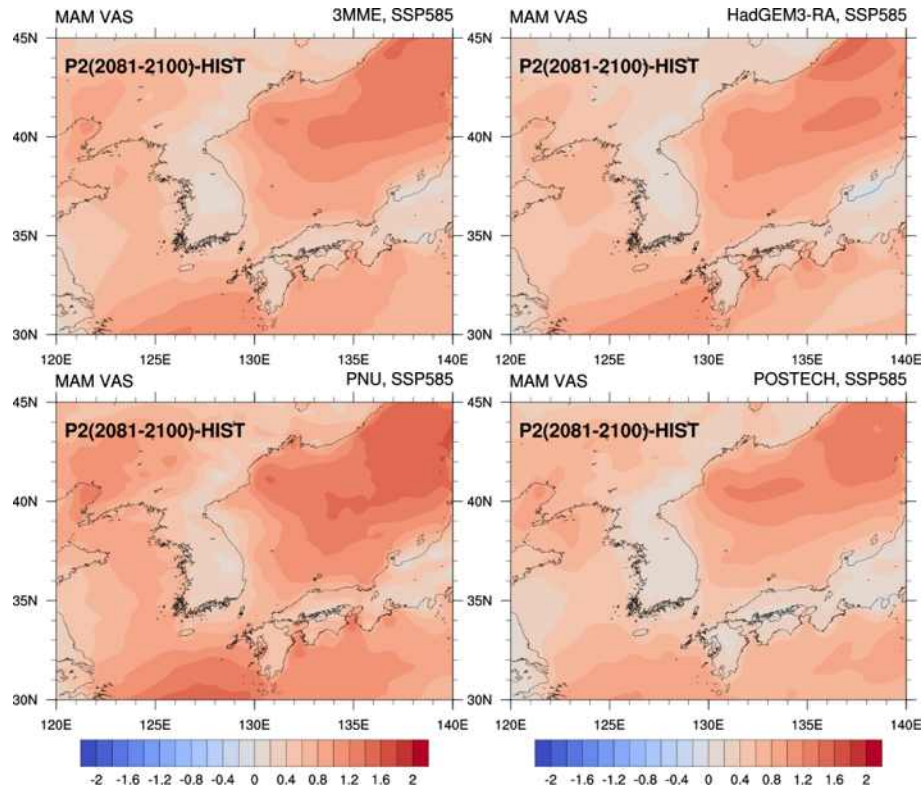


Figure 5.27 Surface meridional wind difference pattern between P2(2081-2100) and HIST(1985-2014) for MAM in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.

앞서 살펴 본 것처럼, 봄철에는 고기압 아노말리가 우리나라의 동쪽에 위치하면서 남북 방향 바람 중 남풍이 현재 대비 증가하는 특징을 보이고 있다. 봄철 먼미래에 강수가 증가하는 이유 또한 남풍이 현재보다 더욱 우세해지기 때문인 것으로 보인다.

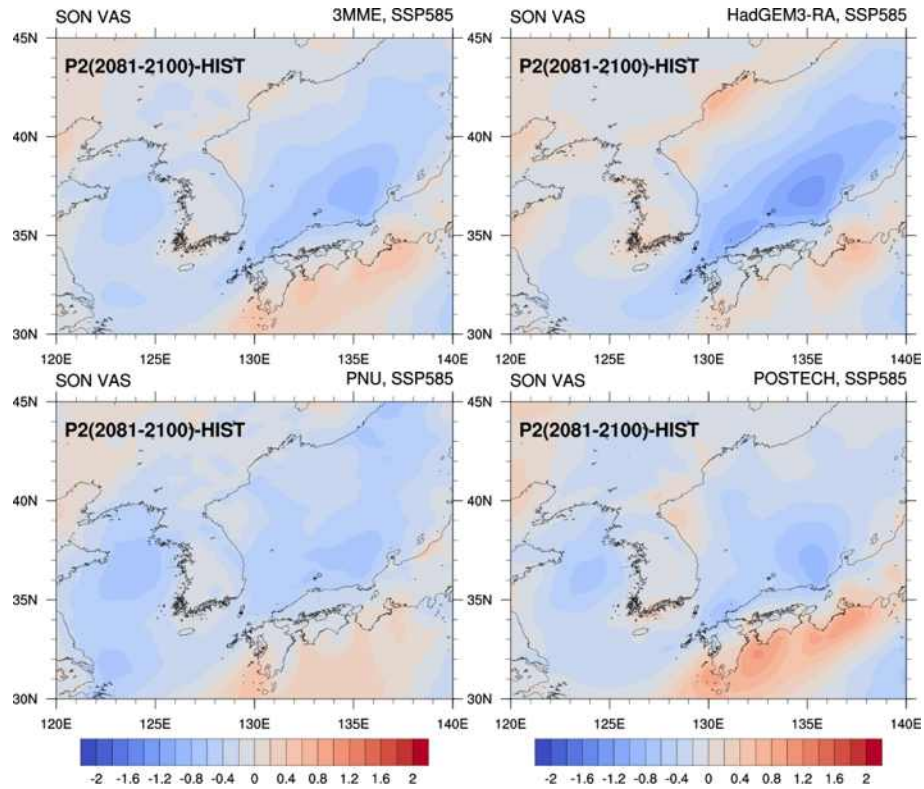


Figure 5.28 Surface meridional wind difference pattern between P2(2081-2100) and HIST(1985-2014) for SON in 3MME, HadGEM3-RA, PNU-WRF, POSTECH-CCLM in SSP585 scenario.

가을철에도 한반도로 불어들어오는 주풍 중 남풍이 우세해야, 따뜻하면서도 다습한 공기가 남쪽으로부터 불어 들어오면서 강수가 많은 패턴을 만들게 되는데, 3개의 모형 모두 현재보다 더욱 남풍이 줄어들 것으로 전망하고 있다. 앞서, 가을철 강수량이 한반도 전지역에 대해 현재보다 감소할 것을 전망하고 있는데, 이러한 이유 중 하나로 남북 방향 바람 중에서도 남풍이 현재보다 약해진 것을 들 수 있다.

Figure 5.29에서 고탄소 시나리오에서 봄철과 가을철의 남북 방향 바람 변화를 근미래, 먼미래에 대해 정리해보면, 봄철에는 근미래보다 먼미래에 더욱 남풍이 증가하고 있으며, 가을철에는 근미래보다 먼미래에 남풍이 감소하는 것을 알 수 있다. 봄철에는 남풍이 증가하며 더욱 많은 강수를 야기하고, 가을철에는 남풍이 감소하여 더욱 강수 또한 감소하는 것으로 보인다. 또한 가을철 먼미래에는 현재보다 순복사량이 더욱 증가하고 있어서, 이 또한 더욱 가을철 가뭄을 심화하는 것으로 보인다. (Figure 5.30)

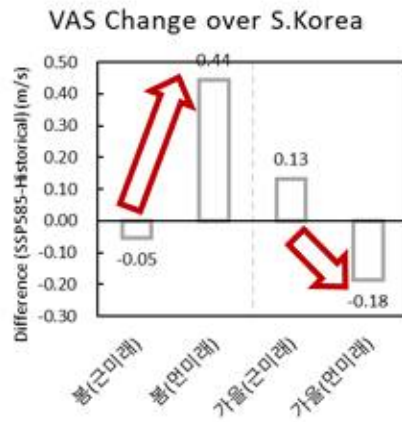


Figure 5.29 VAS change during MAM and SON for the Near-future and Distant-future over Korean Peninsula.

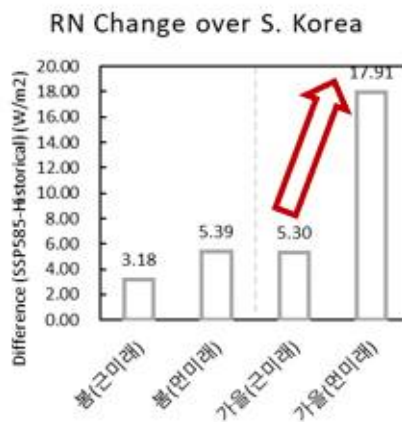


Figure 5.30 RN change during MAM and SON for the Near-future and Distant-future over Korean Peninsula.

5.5. 요약

이 연구에서는 기상 가뭄 지수로 가장 널리 사용되고 있는 표준 강수 지수(SPI)와 실제 증발산량을 고려한 농업적 가뭄지수인 표준 증발산 부족 지수(SEDI)의 우리나라에서의 미래 기후 변화와 관련된 대기 순환장의 변화, 그리고 변수별 기여도를 함께 분석하였다.

강수 자료만 사용하는 SPI와는 다르게 다양한 변수를 이용하여 계산되는 SEDI의 미래 기후 변화 양상은 매우 상이하게 나타나고 있다. 특히 고탄소 시나리오, 먼미래에서 더욱 뚜렷한 차이가 보이는데, 계절적으로는 봄철보다 가을철 먼미래에서 SPI보다는 SEDI 가뭄지수가 우리나라 전 지역에 대해 가뭄이 매우 심해질 것으로 전망하고 있다.

이러한 원인을 분석하기 위해, 대기 순환장의 변화와 변수별 기여도를 분석하였는데, 봄철에는 현재보다 먼미래에 우리나라 동쪽에 고기압 아노말리가 위치하면서 남풍이 더욱 우세해지게 되고, 이로 인해 강수량 또한 증가하는 것으로 보인다. 강수량은 증가하지만 변수별 기여도 분석 결과 봄철에는 가뭄을 심화시키는 기온이 더욱 증가하고 있어, 가파르게 상승하는 기온에 따라 가뭄이 심화되는 것으로 보인다. 가을철에는 우리나라 상공에 강한 고기압이 위치하면서, 기온은 봄철보다 더욱 가파르게 증가하고, 강수를 유발하는 남풍이 줄어들면서 강수 또한 현재보다 더욱 적을 것으로 전망하고 있다.

6. 사용자 편의성 향상을 위한 기후 감시 분석 시스템 개선 및 확대

6.1. 연구배경

한반도의 월별 기후에 영향을 미치는 요소는 다양하며 계절이나 월에 따라 미치는 영향의 강도 또한 다르다. 전 세계적으로 빈번하게 발생하는 이상기후로 인해 한반도에 미치는 예측인자들은 지속해서 변하고 있어 연구자는 다양한 인자를 일일이 비교하고 분석해야 하는 번거로움이 발생하고 있다. 이에 따라, 신속한 기후 감시 체계구축의 필요성과 빠른 분석 서비스의 필요성이 더욱 증대되고 있다. 또한, 세계 각지에서 점점 강해지는 극한 기상현상에 대한 지속적인 감시를 통해 재산과 인명피해를 최소화에 대한 노력으로 최신의 관측 자료를 수집하고 주기적인 이상기후 감시와 예측인자 자동 생산 및 정보 제공 서비스 구축이 필요하게 되었다. 또한, 매월 예보토크를 위해 APCC는 여러 국가에서 제공하는 관측 자료 및 예보자료를 수집하여 검증하고 있다. 그리하여 한반도의 월별 예측인자에 대한 빠른 분석과 대처를 위해 표준화된 자료수집 체계 및 신속한 감시 결과 제공하여 시의적절한 원인분석이 가능하도록 월별 감시분석자료 자동화 수집 및 통계 서비스 제공을 목표로 하였다.

6.2. 자료와 방법

예보토크의 감시분석 정보 자동화 서비스를 위해 APCC의 기후감시분석시스템(Climatic Analysis System, CAS)의 일별, 주별, 월별 모니터링 정보와 예측인자 통계현황 서비스에서 제공되고 있는 월별 예측인자의 정보를 기반으로 구축하였다. 기본자료는 NOAA의 CDC (Climate Data Center)에서 제공하는 파일을 정기적으로 수집하였으며 그 외에 NSIDC에서 제공하는 해빙정보, 눈덮임 정보를 활용하였다. 파일 포맷은 기후 분야에서 공통으로 사용하는 NetCDF (Network common Data form)으로 구성되어 있으며 이런 파일 포맷은 시간과 공간정보를 하나의 파일에 표기할 수 있는 장점이 있다. 또한, NetCDF파일처럼 제공되지 않는 이미지나 그래프 정보는 그대로 수집하여 제공하였다. 수집된 변수는 해수면 온도(sea surface temperature), 지표면 기온(surface air temperature), 강수량(precipitation), 지구 장파 복사량(Outgoing Long Radiative; OLR), 해면기압(mean sea level pressure), 눈 덮임 및 해빙(snow cover and sea ice), 850hPa에서의 기온(air temperature at 850hPa), 850hPa에서의 바람장 및 절대습도(wind vector and relative humidity at 850hPa), 500hPa에서의 지위고도(geo-potential height at 500hPa), 200hPa에서의 바람장(wind vector and zonal wind at 200hPa), 300hPa에서의 바람장(wind vector and zonal wind at 300hPa), 200hPa에서의 속도퍼텐셜 및 발산풍(velocity potential and divergent wind vector)이다. 자료생산 기간은 일별 자료를 기반으로 월별 자료를 생산하여 사용하였다.

NCEP의 재분석 자료는 NetCDF (Network Common Data form)으로 구성되어 있으나 자료의 특성에 따라 하나의 파일에 다른 구조의 정보를 담고 있다. 해상도 또한, $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 와

0.5° × 0.5° 의 수평 해상도를 가지며 Level 정보를 갖는 기온(Air Temperature) 정보나 그렇지 않은 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST) 등 다양한 형태로 구성된다.

6.3. 감시분석 정보제공 자동화 서비스 개발

월별 예보의 예측성을 향상을 위해서는 월별로 관련성이 높은 예측인자를 찾는 것이 중요하여 월별 예측성이 높은 지역에 대한 정보를 연구자들에게 제공하는 서비스 구축이 필요하다. 예보토의를 준비하는 연구자 관점에서 각 인자에 대한 자료수집 및 처리, 분석에 대한 시간과 노력이 많이 소요되어 이런 절차를 줄이는 것 또한, 매우 중요한 요소 중 하나이다. 기후 감시 분석 시스템의 감시분석 정보 제공 자동화 서비스는 사용자들에게 강수, 기온에 대해 월별 예측인자의 종류와 위치정보 그리고 상세 역학에 대한 정보를 제공하도록 사용자 인터페이스를 구성하였고, 최근 10년부터 현재까지 인자별로 관측 정보와 비교하여 상관계수가 어떻게 변하는지 시계열 정보를 제공하고 각 값이 표준편차에 따른 높음과 낮음을 색상으로 표시하여 사용자 정보전달을 편리하게 구성하고자 하였다.

6.3.1. 월별 기후인자 자료처리 프로그램 개발

한반도에 영향을 미치는 기후인자는 월별로 다르며 지역이나 예측인자를 제공하는 형태 또한 다르다. 예측을 위해 사용되는 인자의 제공기관과 제공되는 형태가 상이하기 때문에 정보 서비스를 위한 자료처리 프로그램도 기후인자에 따라 다르게 코딩되어야 한다. 상세 역학을 기반으로 예측인자를 처리하고 결과를 제공하기 위해 월별, 인자별, 지역별 자료처리 프로그램을 별도로 개발하여 통합적인 자료처리 서비스를 구축하고 자료수집 시점별로 자동화 처리 프로그램을 통해 자동화된 처리시스템을 구축하였다. 처리된 자료는 테이블 형태의 엑셀 파일로 저장하고 월별 예측인자의 특성은 웹 문서로 저장하도록 프로그램을 구성하였다. 사용되는 인자의 영역은 지도 기반 이미지로 저장하여 사용자가 원하는 변수와 월을 선택하면 그에 해당하는 각 웹페이지 및 관련 값을 추출하여 웹 브라우저에서 새로 웹프로그램을 작성하도록 구성되었다. 데이터의 전송은 리스트 형태로 제공하여 재정렬 기능을 활용하여 자료처리 결과를 받아 볼 수 있도록 하였다.

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Spyder Editor

made by Dr JM,Han
"""
from __future__ import print_function
from django.http import HttpResponse
import simplejson as json
import os
import numpy as np
import Ngl, Nio
import time
import pandas as pd
import xlwt
import datetime as dt
import cftime as nc4
#import getColor_Table as ct
import netCDF4 as nc
from netCDF4 import num2date, date2num, date2index

#from cdo import *
#import geojsoncontour

def getVariableExtraced(file, lat_minindex, lat_maxindex, lon_minindex, lon_maxindex):
    goal_value = file[lat_minindex:lat_maxindex,lon_minindex:lon_maxindex]
    return(goal_value)

def getTnum(y,m,time_unit,f_vari):
    if f_vari == 'olr':
        tnum = nc4.date2num(dt.datetime(int(y), int(m), 16),time_unit,calendar='standard')
    else:
        tnum = nc4.date2num(dt.datetime(int(y), int(m), 1),time_unit,calendar='standard')
    print(tnum)
    return(tnum)

def getTdate(num,time_unit):
    tdate = nc4.num2date(num,time_unit,calendar='standard')
    year =tdate.year
    month = tdate.month
    day = tdate.day
    #print("tdate=",tdate.year)
    return(tdate)

def getDate(times, units):
    tyear = nc4.num2date(times, units).year
    tmonth = nc4.num2date(times, units).month
    tday = nc4.num2date(times, units).day
    thour = nc4.num2date(times, units).hour
    #tminute = nc4.num2date(times, units).minute
    #hour,minute,second
    #daysinmonth,
    return(tyear, tmonth, tday, thour)

def getdatetoindex(y,m,times):
    # tindex = nc.num2date(num,time_unit,calendar='standard')
    tindex = date2index(dt.datetime(int(y),int(m),1), times, calendar='standard', select='nearest')
    #print("tdate=",tdate.year)

```

Figure 6.1. In order to calculate predictive factors based on detailed epidemiology and provide results, programs for data processing by month, factor, and region were developed.

6.3.2. 예보토의 감시분석 정보 서비스 인터페이스 구성

기후 감시분석 시스템의 예보토의를 위한 감시분석 정보제공 자동화 서비스는 사용자들에게 한반도의 기온과 강수에 미치는 주변의 기후인자를 찾고 관련 인자의 정보를 제공할 뿐만 아니라 계산 방식, 상관계수, 영역 등 다양한 정보를 제공하였다. 그리하기 위해 관련된 월별

예측인자에 대해 쉽게 파악할 수 있도록 하나의 웹 화면에 전체를 표시하는 방식으로 사용자 인터페이스를 구성하였다. 상단에는 예보하는 월을 사용자가 선택하면 관련된 예측 정보, 관측 정보를 한꺼번에 제공하는 방식으로 메뉴를 구성하였다.

예측 변수는 강수와 기온에 대한 1월부터 12월까지 검색할 수 있도록 하였다. 다음에는 선택한 변수와 달에 대해 미치는 기후인자의 위치정보를 지도 위에 영역으로 표시하여 사용자들이 시각적으로 바로 확인할 수 있도록 지도표시를 제공하였고 지도에 표시된 예측인자 정보를 보다 자세히 설명하는 표를 제공하였다. 예측인자의 종류, 상관계수, 정확도, 영역에 대한 좌표정보 그리고, 예측인자가 한반도의 강수와 기온에 미치는 상세 역학을 자세히 설명하고 있다. 지도 기반의 위치정보와 표 형식의 예측인자 정보 제공 다음에는 예측 인자별로 표준화된 그래프를 통해 최근 10년부터 현재까지 예측인자의 변화를 시계열로 표출하였다. 여러 인자의 상관성을 쉽게 파악할 수 있도록 그래프 서비스를 제공하고 예측 인자별 편차 정보와 관측값을 수치로 표현한 표를 제공함으로써 사용자는 정확한 값을 확인할 수 있도록 하였다. 각 표의 인자값은 정렬 기능을 통해 오름차순이나 내림차순으로 원하는 값을 비교할 수 있도록 구성하였다.

기후 감시 영역에서는 사용자가 선택한 월의 최근 과거 3개월에 대한 기후 변수의 변화를 보여주도록 구성하였다. 예보에 많이 사용하는 850hPa에서의 기온(air temperature at 850hPa), 지구 장파 복사량(Outgoing Long Radiative; OLR), 해수면 온도(SST), 지표면 기온(surface air temperature)에 대해 월평균 편차 정보를 제공하였다. 마지막 월에는 일별 자료를 이용하여 선택한 누적 일에 대한 정보를 제공하도록 구성하였다. 이를 통해 최근의 변화를 확인할 수 있게 하였다. APCC에서 자체 생산하지 않는 NINO지수, 적도 태평양 해양 온도, 바람 편차 현황, MJO전망, 북극 해빙 현황, 눈 덮임 현황, AO, NAO 지수 등은 정보를 제공하고 있는 기관에서 자동으로 수집하여 제공하도록 구성하였다.

예보토의 감시분석 정보

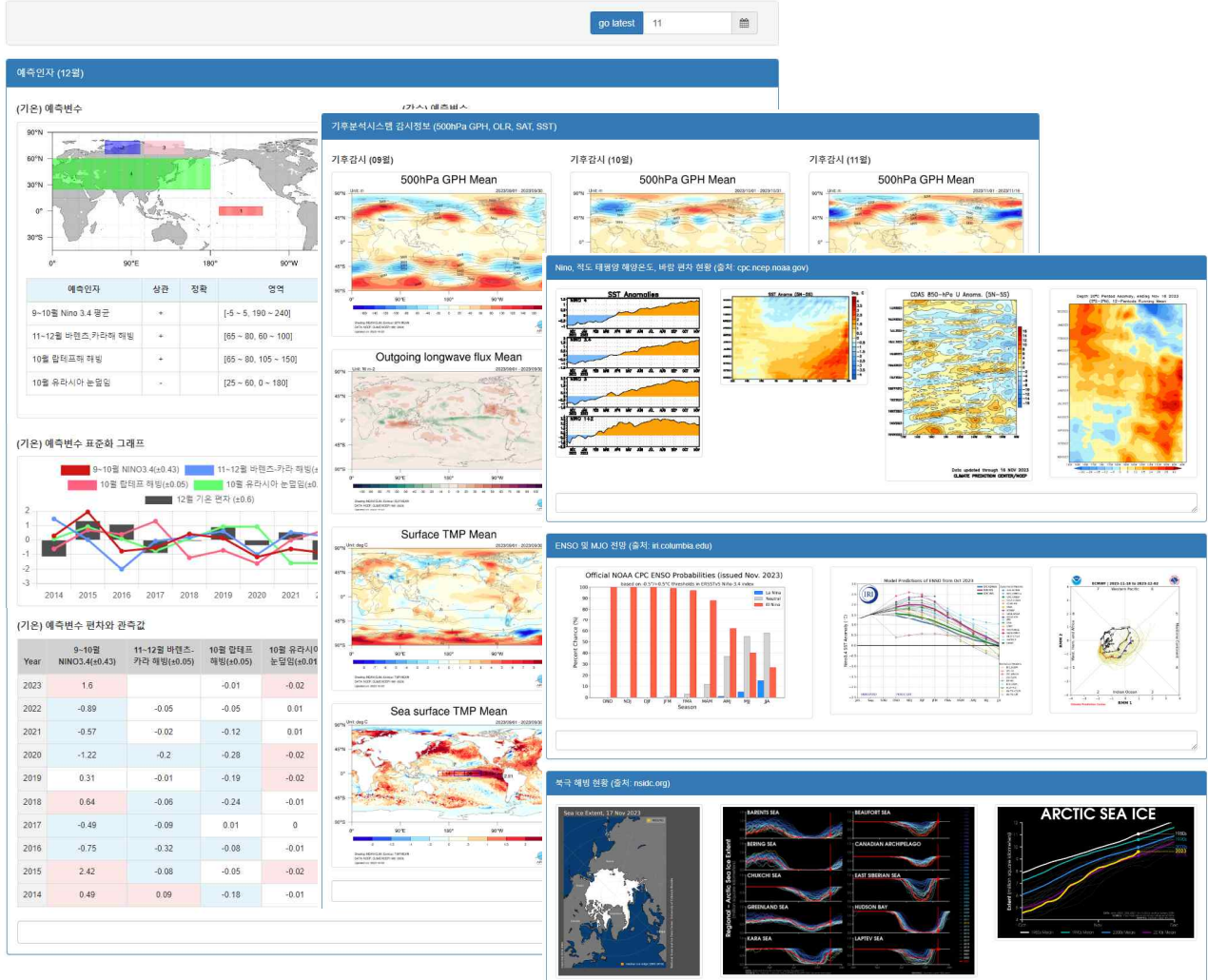


Figure 6.2. Automated service web interface that provides monitoring and analysis information for forecast discussions, a user interface was built to provide various information on a single web page.

6.3.3. 감시분석 정보 제공 자동화 서비스 기능 구성

예보토의를 위한 감시분석 정보 제공 자동화 서비스는 월별 자료를 기준으로 하였으나 눈 덮임의 경우, 7일 자료를 활용하여 웹 서비스를 구성하였다. 또한, 사용자가 선택하는 날짜까지 정보를 제공하기 위해 기본 자료는 일별 생산자료를 기준으로 월평균 정보를 제공하는 형태이다. 영역별로 전체 지도를 기반으로 각 인자의 위치정보와 영역을 제공하고 각 인자가 미치는 영향을 설명한 정보를 팝업으로 제공하도록 구성하였다. 각 인자의 값을 평준화하여 연도별 흐름에 따른 변화를 다른 인자와 비교할 수 있도록 그래프로 제공하고 인자들은 선택을 통해 보이거나 사라지도록 구성하고, 각 인자의 값을 편차 대비 높고 낮음을 색으로 표기하여 사용자들에게 쉽게 볼 수 있도록 웹 서비스를 개발하였다. 월별 기후분석 예측인자 정보 제공 기능에 대한 각 서비스는 다음과 같다.

6.3.3.1. 감시분석 인자에 대한 일자 선택

감시분석 정보 서비스를 이용하기 위해서는 찾고자 하는 예측 정보를 검색해야 한다. 현 서비스에서는 기온과 강수에 대한 정보를 기본으로 제공하고 있다. 하지만, 사용자는 강수나 기온을 선택하지 않아도 원하는 날짜를 선택하게 되면 자동으로 강수와 기온에 대한 정보를 동시에 보여주도록 구성하였다. 사용자의 날짜 선택에 대한 편리성을 고려하여 1월부터 12월까지 달력 형태로 구성하여 제공하고 있다. 사용자들은 직관적으로 원하는 달을 선택할 수 있다.

예보토의 감시분석 정보

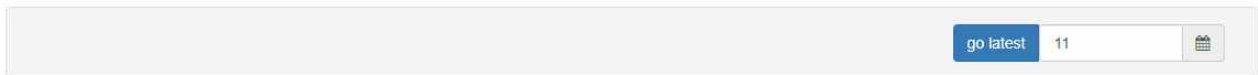


Figure 6.3. In the Automated service web interface that provides monitoring and analysis information for forecast discussions, you can select the desired month and check it.

6.3.3.2. 해당 월에 대한 지도 기반 예측변수 정보

다음 그림과 같이 11월을 선택했을 경우, 다음 월인 12월부터 1월, 2월에 대한 예측변수에 대한 정보를 제공하도록 구성하였다. 각 월에 대한 기온과 강수에 대한 예측변수 영역과 상관성에 대한 정보 정확성에 대한 정보를 제공함으로써 각 예측인자가 해당 월에 대해 어느정도 신뢰성을 갖는지 보여주도록 하였다. 또한, 정확한 좌표정보를 제공하여 사용자에게 객관적인 수치로 정보를 제공할 수 있도록 구성하였다. 그 뿐만 아니라 각 예측인자가 해당변수에 대해 어떠한 역학적 관계가 있는지 자세한 설명자료를 제공함으로써 예보토의에 대한 상세 정보로 활용할 수 있도록 구성하였다. 여러 예측인자는 그 특성에 따라 색상을 다르게 하여 시계열 정보를 제공하는 그래프에 대해 같은 색상으로 구성하여 사용자에게 시간의 흐름에 따른 변화를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 또한, 예측인자로 사용되는 지역의 면적과 위치를 지도상에서

표기해 줌으로써 직관적인 판단이 가능하다.

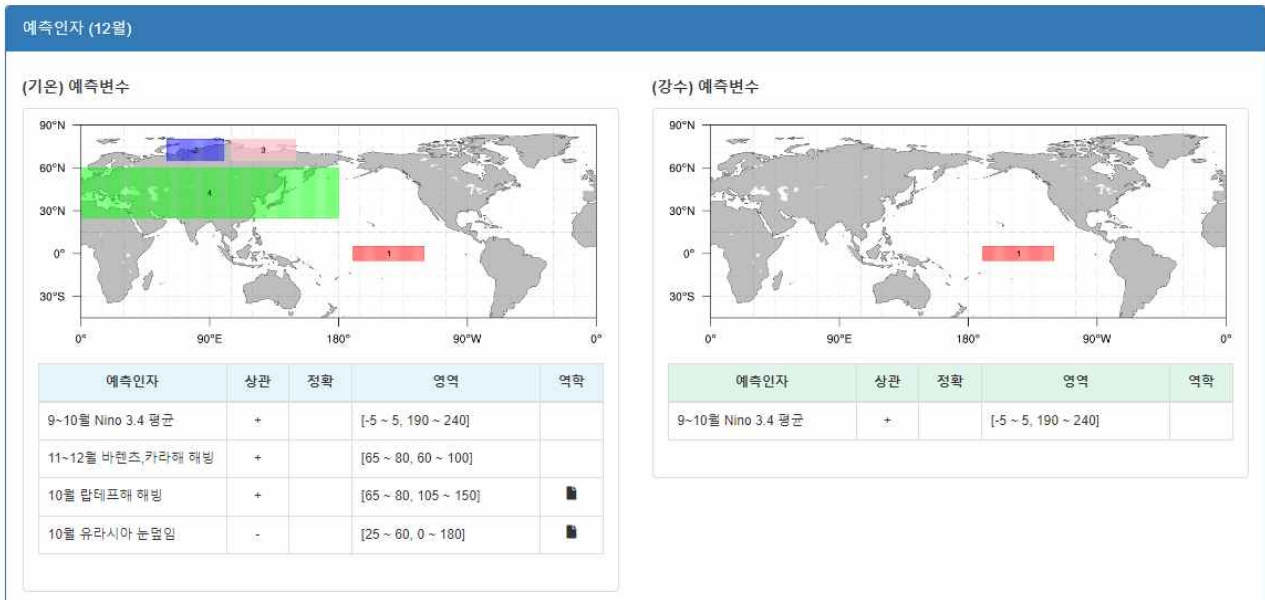


Figure 6.4. The locations of monthly predictors related to precipitation and temperature are indicated on the map

6.3.3.3. 테이블 기반 예측인자 상세 정보

예보토의를 위해서는 각 인자가 미치는 객관적인 수치정보가 필요하다. 그리하여 월별 예측 변수에 영향을 미치는 인자들에 대한 상관정보와 정확성에 대해 수치 테이블을 제공함으로써 신뢰성 향상을 위해 노력하였다. 다양한 예측인자의 정보와 기간, 인덱스 정보를 제공하고 선택한 인자가 해당하는 월 기온과 강수에 어떠한 영향을 미치는지 상관계수 정보와 정확도 정보를 제공하고 있어 사용자들에게 자세한 정보를 제공하고 있다. 또한, 예측인자의 좌표정보와 예측인자의 계산 방식을 함께 보여줌으로써 사용자들에게 자세한 정보를 추가로 제공하고 있다.

예측인자	상관	정확	영역	역학
4월 유라시아 동부~서부 눈 덮임 차이	0.52	30%	[120 ~ 135E, 40 ~ 55N] + [100 ~ 120E, 53 ~ 60N] - [55 ~ 70E, 50 ~ 60N] - [20 ~ 45E, 45 ~ 53N]	■
2월 호주 북쪽 해수면 온도	0.60	55%	[115 ~ 150E, 0 ~ 20S]	■
3월 호주 북쪽 강수량	0.53	55%	[110 ~ 185E, 5 ~ 25S]	■
4월 인도양 해수면 온도	-0.56	45%	[90 ~ 105E, 10S ~ 0]	
4월 만주지역 눈덮임	0.54	50%	[120 ~ 140E, 40 ~ 50N]	
3~4월 베링해 해빙	0.57	45%	[180 ~ 165W, 55 ~ 65N]	
4월 북대서양 해수면 온도	-	45%	[40W ~ 0, 55 ~ 65N]	

예측인자	상관	정확	영역	역학
4월과 1월의 북대서양 해수면 온도 차이	-	50%	[295 ~ 330E, 60 ~ 65N] - [285 ~ 320E, 35 ~ 50N]	
4~5월 인도양 해수면 온도	+	50%	[60 ~ 110E, 20S ~ 25N]	
5월 북서태평양 해수면 온도	+	35%	[115 ~ 150E, 35 ~ 45N] - [125 ~ 180E, 10 ~ 30N]	
4~5월 대서양 해수면 온도	0.42	25%	[60W ~ 10E, 30S ~ 30N]	
3~4월 열대 서태평양 해수면 온도	-	30%	[140 ~ 160E, 0 ~ 10N]	

Figure 6.5. Detailed information was provided to users by providing a related index and which factors had an effect on a monthly basis. In addition, each factor plays a certain role and the accuracy is provided in the form of table.

6.3.3.4. 예측인자에 대한 상세 기작 제공

월별 기후분석에 필요한 예측인자 제공 서비스는 월별 자료를 기준으로 다양한 예측인자의 역학관계를 파악하여 정보를 제공하고 있다. 제공되는 정보가 어떤 이유로 선정되었고 한반도에 영향을 미치는 원리에 대한 상세 기작 정보를 제공한다. 다음 화면에서 보는 바와 같이 눈 덮임의 경우, 3월 중국 북동부 지역의 눈 덮임이 증가하면 한반도 6월 기온이 상승하는 원리를 자세하게 설명하고 있다. 이를 통해 사용자는 월별 계절 예측에 적용되는 예측인자의 계산 방법뿐만 아니라 영향을 미치는 원리를 이해할 수 있다.

3월 눈덮임

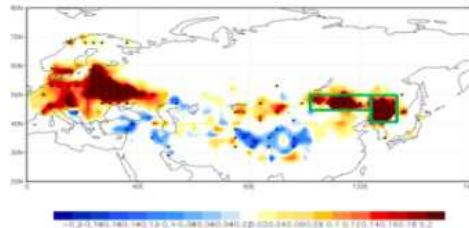
기간	3월
영역	(103~123°E, 45~50°N) + (123~133°E, 40~50°N)

- 3월 중국 북동부 지역의 눈덮임이 증가하면, 한반도 6월 기온이 상승함
- 3월의 눈덮임이 녹으면서, 다량의 토양 수분이 형성되고, 봄철을 지나면서 토양 수분의 영향은 지면 강제력으로 작용됨. 즉 evaporative cooling 및 강수과정을 통해 동쪽으로 대기 파동이 유도됨. 이로 인해 6월 한반도 상층에 고기압성 순환, 오호츠크 해에 저기압성 순환, 고위도에는 다시 고기압성 순환을 형성하는 파동 패턴이 형성되며 한반도 상층 고기압성 순환으로 우리나라 6월 기온은 상승함

* 2~3월의 AO와 연관

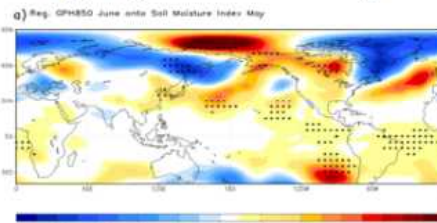
- ▶ 예측성이 비교적 있는 편이었으나 신평년을 적용하면 6월 기온 현황이 평년보다 높음에서 평년과 비슷함으로 다수 바뀌면서 예측성 낮아짐
- ▶ 최근 10년간 (2011~2020년) 예측성은 높지 않음
- ▶ 최근 지면-대기 피드백이 약화 되면서 고기압성 순환 형성 기작 적용에 주의가 필요함

Regressed Snow anomalies during March against Kor. June Temp.

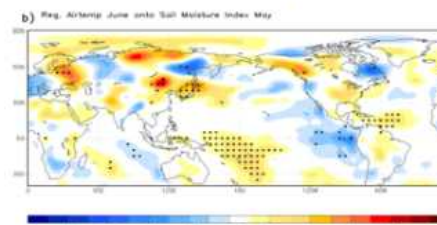


한반도 6월 기온 시계열을 이용하여 계산한 3월 유라시아 대륙 눈덮임의 회귀 패턴

Regressed GPH at 850hPa anomalies during Jun. against Soil moisture May Index



Regressed Air Temp anomalies during Jun. against Soil moisture May Index



5월 토양 수분 지수를 이용한 6월 a) 850hPa 지위고도와 b) 기온에 대한 회귀 패턴

Close

Figure 6.6. In order to explain why each factor affects precipitation and temperature, detailed pages are used to explain the cause and reason for the mechanism.

6.3.3.5. 예측인자별 표준화 시계열 그래프 제공

감시분석 정보 제공 자동화 서비스는 선택한 달마다 사용되는 예측인자가 다양하다. 사용자에게 한반도의 기후 변수에 미치는 예측인자의 시간에 따른 변화를 비교할 수 있도록 각 인자를 표준화하여 그래프로 제공하고 있다. 양의 상관계수는 표준화 처리하고 음의 상관계수는 역으로 표준화 처리하여 관측 변수와 같은 패턴으로 변화하는지 변화의 폭이 어느 정도인지 쉽게 비교할 수 있도록 제공한다. 다양한 그래프를 하나의 화면에 표시하기 때문에 사용자는 한 두 가지의 인자만 선택하여 비교하길 원할 수 있다. 그리하여 동적 웹 기반 서비스 기술을 이용하여 사용자가 원하는 예측인자만을 선택하여 화면에 표기함으로써 쉽게 이해할 수 있도록 구현하였다. 사용자는 특정 인자만 보고자 하는 경우 각 인자에 대한 범례를 선택하면 그래프가 사라지거나 표시되어 보다 정확하게 시간에 따른 인자의 변화를 확인할 수 있다. 또한, 두 개의 인자를 비교하고자 할 경우, 유용하게 사용할 수 있다. 마우스를 그래프 상단에 위치하게 되면 그래프의 값을 표출하여 정확한 수치를 확인할 수 있도록 구성하였다.

(기온) 예측변수 표준화 그래프



(강수) 예측변수 표준화 그래프



Figure 6.7. Users want to compare how much correlation each predictor has with the observed data. Therefore, each factor from last 10 years to the present was expressed as a time series graph. In addition, it provides a function to compare and view only the parameters that the user wants to see by using the hide function.

6.3.3.6. 예측인자별 편차 및 관측값 제공

예보토의를 위해서는 각 인자가 어느 정도의 영향을 미쳤는지 확인하는 것이 중요하다. 각 수치를 통해 연도별 세력을 확인할 수도 있지만, 사용자에게는 일일이 찾아야 하는 번거로움이 발생하게 된다. 그리하여 각 예측인자에 대해 정렬 기능을 제공하여 사용자는 어느 해에 어떤 인자가 큰 영향을 미쳤는지 순위를 확인할 수 있다. 또한, 각 수치의 강도에 따라 색상을 제공하여 3분위 수에 대한 편차 정보를 제공함으로써 Above, below, normal을 확인할 수 있도록 시각화 정보도 같이 제공하고 있다. 편차 정보는 정확한 수치정보로 제공하여 기후 변수와의 관련성을 명확히 파악할 수 있도록 하였다. 이는 최근 10년부터 현재까지 각 변수를 자동으로 계산하여 제공하고 있으며 사용자들의 편리성을 위해 각 예측 인자별로 정렬 기능을 제공하여 관심 예측인자에 대한 정렬을 통해 최댓값과 최솟값에 해당하는 연도를 비교할 수 있다. 사용자는 각 인자에 대한 분석과 특성을 메모할 수 있도록 메모할 수 있는 기능을 제공하여 간략하게 특성을 정리하여 예보토의에 활용할 수 있는 기능을 제공하였다.

(기온) 예측변수 편차와 관측값

Year	9~10월 NINO3.4(±0.43)	11~12월 바렌츠- 카라 해빙(±0.05)	10월 람테프 해빙(±0.05)	10월 유라시아 눈덮임(±0.01)	12월 기온 편차 (±0.6)
2023	1.6		-0.01	-0.02	
2022	-0.89	-0.05	-0.05	0.01	-2.5
2021	-0.57	-0.02	-0.12	0.01	0.7
2020	-1.22	-0.2	-0.28	-0.02	-0.8
2019	0.31	-0.01	-0.19	-0.02	1.3
2018	0.64	-0.06	-0.24	-0.01	-0.3
2017	-0.49	-0.09	0.01	0	-1.7
2016	-0.75	-0.32	-0.08	-0.01	1.6
2015	2.42	-0.08	-0.05	-0.02	2
2014	0.49	0.09	-0.18	-0.01	-2.1

(강수) 예측변수 편차와 관측값

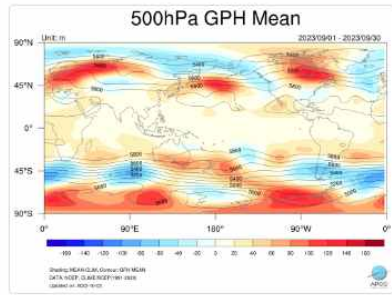
Year	9~10월 NINO3.4(±0.43)	12월 누적 강수 (19.8-28.6)
2023	1.6	
2022	-0.89	15.2
2021	-0.57	7.2
2020	-1.22	7.8
2019	0.31	26.5
2018	0.64	28.4
2017	-0.49	22
2016	-0.75	65
2015	2.42	40.6
2014	0.49	25.5

Figure 6.8. The results of each predictor by year are provided as a table. Each predictor is displayed in color by comparing high, average, and low based on standard deviation. In this way, intuitive information can be delivered to users, and a sorting function is provided by selection a heading.

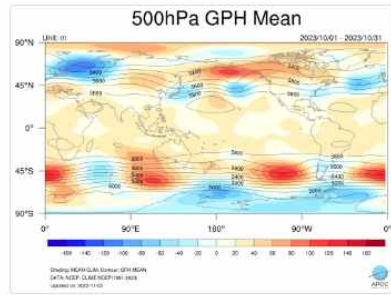
6.3.3.7. 최근 3개월에 대한 감시분석 정보 제공

예보토의를 위해서는 예측인자도 중요하지만, 최근의 기후인자들의 변화 파악도 중요하다. 그리하여 예측인자와 더불어 최근 3개월에 대한 감시정보를 자동으로 제공하도록 기능을 구성하였다. 사용자가 11월에 예보토의를 준비한다면 감시정보는 9월, 10월, 11월에 대해 제공한다. 9월과 10월은 월별 정보에서 과거이지만, 11월은 현재에 포함되고 있어 9월과 10월은 월별 평균과 편차에 대한정보를 보여준다. 하지만, 11월은 사용자가 선택한 날짜까지의 누적정보에 대한 평균과 편차를 보여주도록 구성하였다. 그리하여 해당 월에 대한 초기 변화를 정확히 파악할 수 있어 예보토의에 적극적으로 활용할 수 있다. 해당 월의 경우 일별자료를 기반으로 누적정보를 제공하고 있다. 또한, 각 변수는 예보에 많이 사용하는 850hPa에서의 기온(air temperature at 850hPa), 지구 장파 복사량(Outgoing Long Radiative; OLR), 해수면 온도(SST), 지표면 기온(surface air temperature)에 대해 월평균 편차 정보를 제공하였다. 해수면 온도의 경우, NINO지역을 구분하여 각 지역의 NINO지수를 제공함으로써 엘니뇨 발달에 대한 크기를 수치적으로 표현하였다.

기후감시 (09월)



기후감시 (10월)



기후감시 (11월)

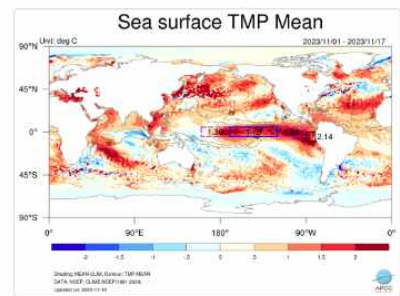
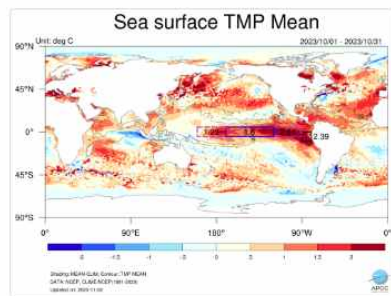
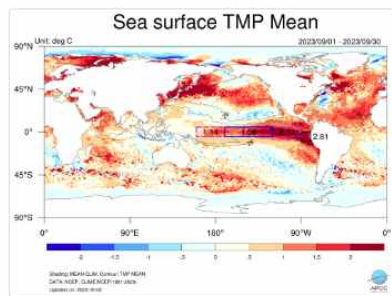
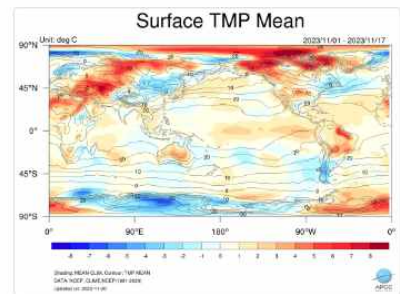
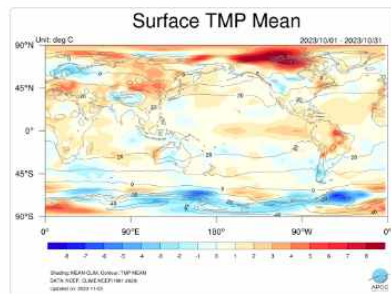
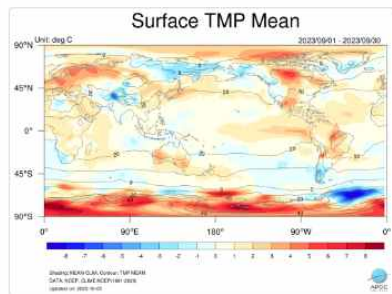
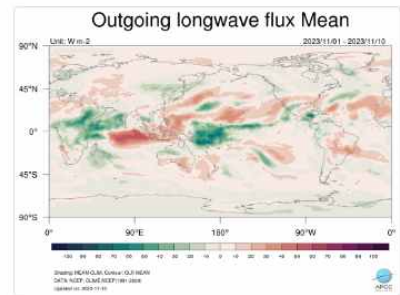
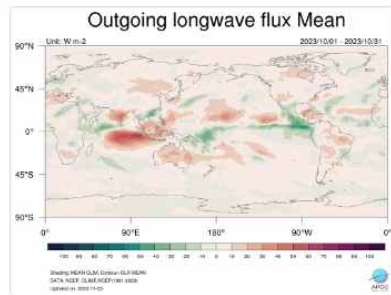
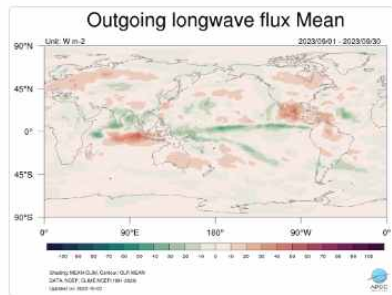
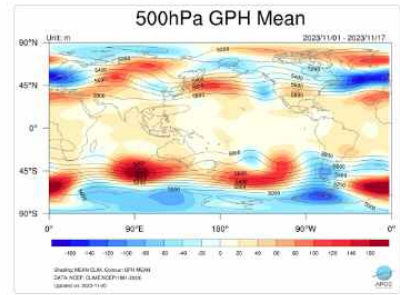


Figure 6.9. When you select a month for forecast discussion, climate variable monitoring information for the past three months is provided. If you select November, you can view information from September to the present.

6.3.3.8. 태평양 지역 해양온도, 바람편차 정보 제공

예보토의를 위한 감시분석 정보 제공 자동화 서비스를 위해 월별 해수면 온도 편차정보 변화와 북위 50도와 남위 50도 사이에서의 해양온도 변화, 그리고 바람장의 편차값 변화에 대한 모니터링 정보를 같이 제공하고 있다. 적도 태평양 지역의 해양온도는 월별 연도별 지구의

기후패턴에 많은 영향을 미치기 때문이다. 이를 위해 NOAA의 NCEP 를 활용하여 제공하도록 구현하였다.

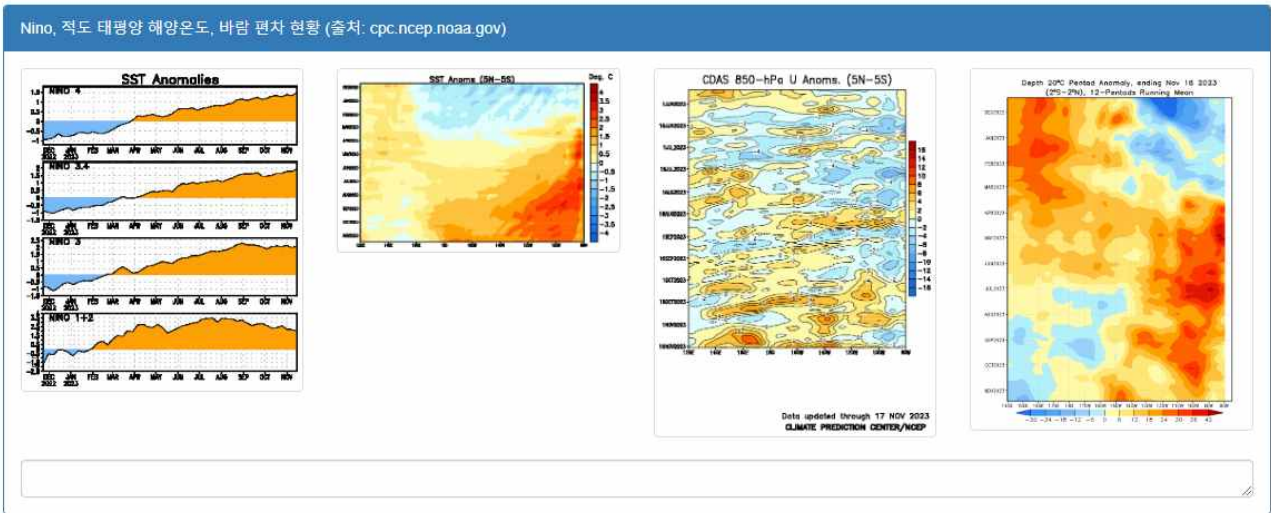


Figure 6.10. For forecast discussion, information on changes in monthly sea surface temperature and wind direction and strength provided by NOAA is collected and provided to users

6.3.3.9. ENSO 및 MJO전망 제공

예보토의를 위한 감시분석 정보 제공 자동화 서비스를 위해 월별 해수면 온도 모니터링 결과 뿐만 아니라 NOAA에서 제공하는 ENSO전망 정보와 IRI의 모델정보 그리고 ECMWF의 MJO모델 예측정보에 대해 최신 정보를 수집하여 제공하도록 구현하였다. 예측정보를 제공하는 각 기관마다 예측 정보 발표일이 다르기 때문에 최신의 정보를 제공하고 있는지 자동으로 점검한 후에 제공하고 있다.

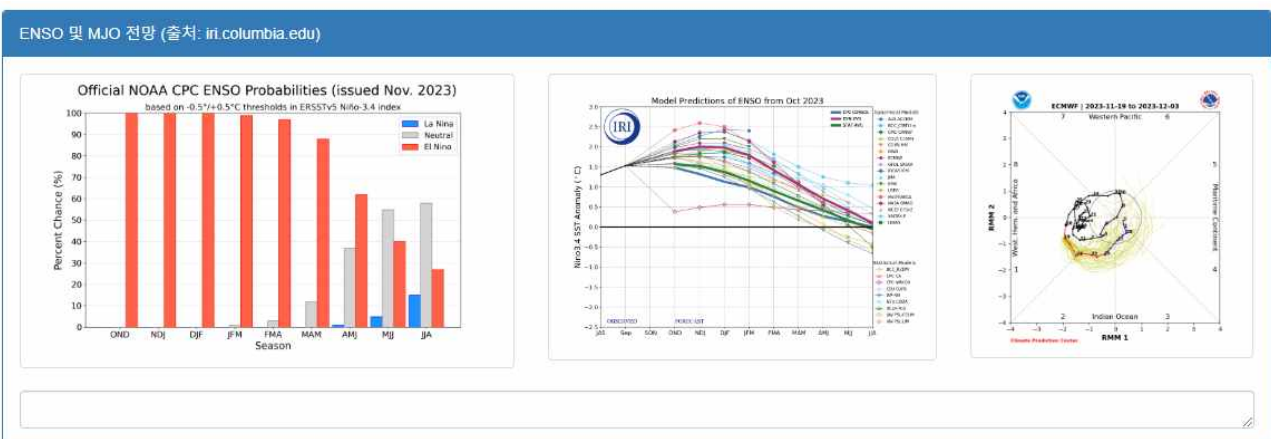


Figure 6.11. For forecast discussion, information on changes in monthly ENSO provided by NOAA and ECMWF are collected and provided to users

6.3.3.10. 북극 해빙 현황 정보 제공

한반도의 월별 예보를 위해서는 북극의 해빙정보를 분석할 필요가 있다. 이를 위해 NSIDC에서 제공하고 있는 북극의 월별 해빙정보와 각 해역의 해빙변화에 대한 정보를 수집하여 제공하고 있다. 북극 전체 지역의 해빙변적 시계열 변화 그래프와 지도기반의 해빙현황 정보를 제공하고 바렌츠해, 베링해, 척치해, 그린란드해, 카라해, 베어포트해, 라테프 해역을 나누어 월별 해빙면적에 대한 정보를 수집하여 제공하도록 구성하였다.

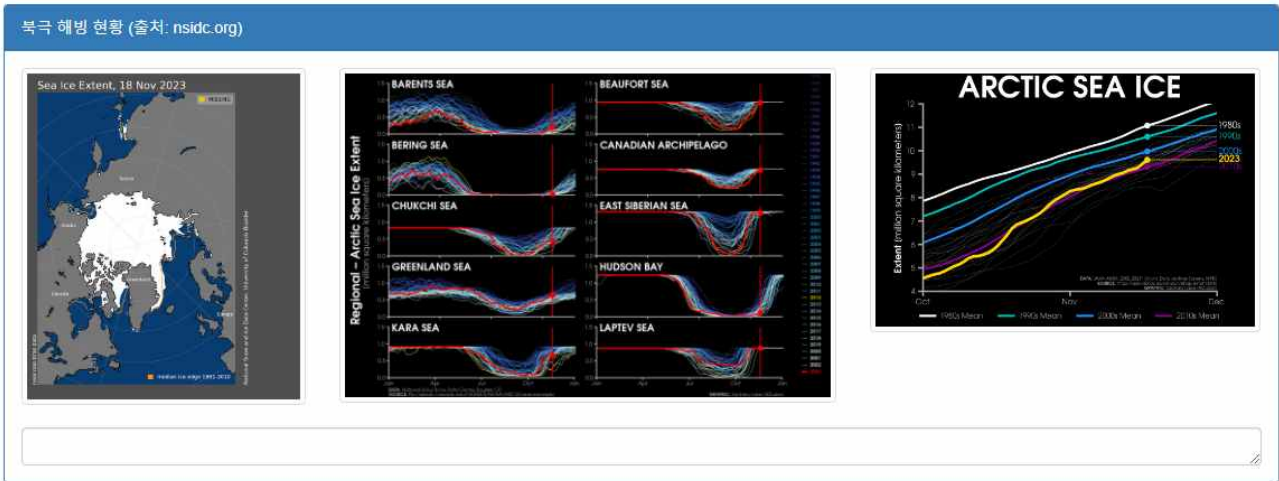


Figure 6.12. The Arctic sea ice information service automatically collects and provides users with data provided by NSIDC on changes in sea ice area in the Arctic region and sea ice in each sea area

6.3.3.11. 눈 덮임 현황 정보 제공

예보토의를 위한 다양한 감시분석 정보 중에서 북극의 해빙 정보와 함께 관측해야 하는 것이 북극 지역의 눈 덮임 정보다. 그리하여 rutgers 대학에서 제공하고 있는 눈 덮임 정보를 수집하여 일별 눈 덮임 면적의 변화와 월별 평균, 편차 정보를 지도상에서 표출하여 보여주도록 구성하였다. 편차 정보는 1981년부터 2010년의 평균값과 비교하여 차이를 제공하였다.

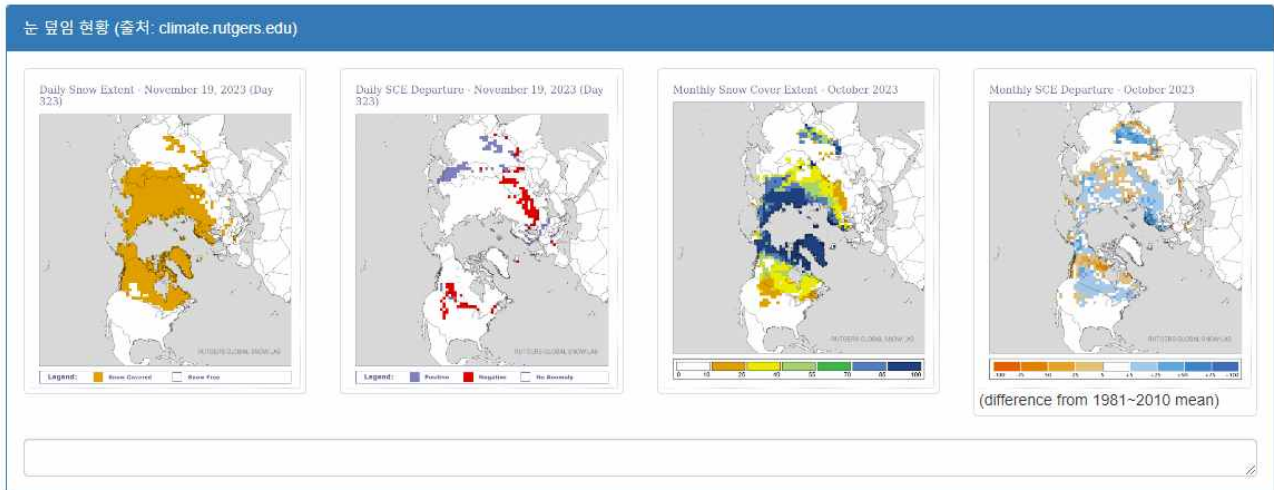


Figure 6.13. Snow cover information provided by Rutgers University was collected and organized to provide daily snow cover change and monthly average and anomaly information on the map

6.3.3.12. AO와 NAO 현황 제공

NOAA에서 제공하는 북극진동(AO)과 북대서양 진동(NAO)에 대한 관측 및 예측 인덱스 정보에 대해 일별 수집을 통해 15일 간격으로 이뤄지는 현황을 제공하도록 구성하였다. 이 또한, 사용자가 직접 설명을 추가하여 정리할 수 있도록 구성되어 있으며 7월 21일부터 11월 17일까지의 GPH 편차정보를 보여준다.

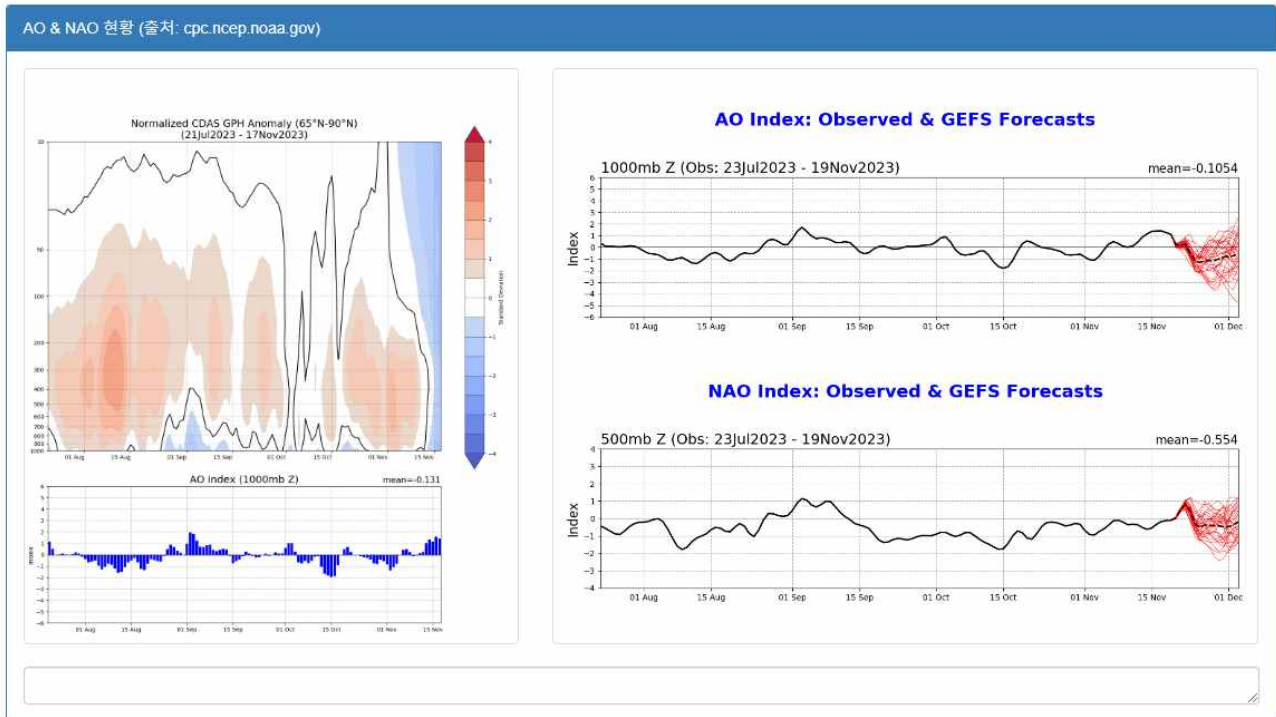


Figure 6.14. AO and NAO information provided by NOAA was collected and organized to provide each 15 days AO and NAO change and monthly average and anomaly information on the graph

6.4. 합성장 기반 기후영향 분석 서비스

예보토의를 준비하는 연구자 관점에서 각 인자에 대한 자료수집 및 처리, 분석에 대한 시간과 노력이 많이 소요되어 이런 절차를 줄이는 것 또한, 매우 중요한 요소 중 하나이다. 월별 예보의 예측성을 향상을 위해서는 월별로 관련성이 높은 예측인자를 찾는 것이 중요하여 월별 예측성이 높은 지역에 대한 정보를 연구자들에게 제공하고 원인분석을 위한 분석 서비스 제공이 필요하다. 기후 감시분석 시스템의 감시분석 정보 제공 자동화 서비스는 사용자들에게 강수, 기온에 대해 월별 예측인자의 종류와 위치정보 그리고 상세 역학에 대한 정보를 제공하도록 사용자 인터페이스를 구성하였고, 최근 10년부터 현재까지 인자별로 관측 정보와 비교하여 상관계수가 어떻게 변하는지 시계열 정보를 제공하고 각 값이 표준편차에 따른 높음과 낮음을 색상으로 표시하여 사용자 정보전달을 편리하게 구성하고자 하였다. 이 모든 과정은 자동화 처리를 통해 최근의 월에 대해 자동 계산되어 제공된다. 또한, 사용자가 원하는 지역을 선택하면 선택된 지역에 대한 시계열 정보를 제공하고 시계열 분석을 통해 추출된 3분의 분석 결과를 통해 Above인 해와 Below인 해만 선정하여 자동으로 합성장 분석을 진행한다. 입력변수는 SST를 기반으로 했고 합성장은 가장 많이 사용하는 OLR, SAT, SST 등을 선정하였다.

6.4.1. 합성장 기반 기후영향 분석 서비스 인터페이스 구성

합성장 기반 기후 영향 분석 서비스는 사용자가 원하는 변수와 기간, 위치정보를 선택하여 분석된 결과를 시계열 정보로 제공하는 기능이다. 시계열 분석 결과를 통해서 편차 정보가 평년보다 높거나 낮은 결과를 보여준다. 또한 평년에 비해 높고 낮을 뿐만 아니라 3분위를 통해 Above, Normal, Below를 색상으로 표현하고 3분위의 값을 기준으로 각 기후 변수에 대해 합성장을 계산하여 지도 기반으로 시각화된 정보를 제공한다. 분석 알고리즘의 검증을 위해 입력변수는 해수면 온도를 기준으로 하였고 해수면 온도가 평년보다 높은 연도와 낮은 연도를 추출하여 모든 변수에 대해 합성장을 표출하고 표출된 정보를 제공하는 사용자에게 제공하도록 하였다. 자료는 1981년부터 현재의 월별 자료를 이용하였다. 또한, 각 월에 대한 시계열 변화를 분석하고 분석에 기본이 되는 해수면 온도, 장파 복사량, 지표면 온도를 자동으로 계산하도록 하였다.

TIME-SERIES to COMPOSITE

Variable: Sea Surface Temperature **Level:** 1000
Method: Anomaly
Period: Monthly **Jan** Year: 2014 ~ 2023
 Coordinate: 5, 190, 240, -5
 Region: Nino3.4

Show Graph

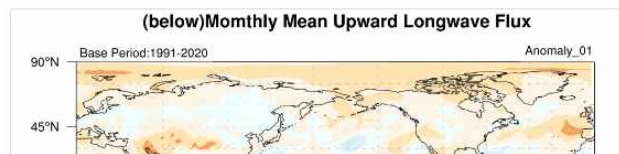
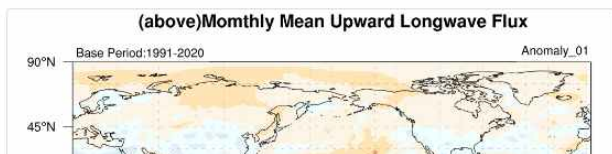
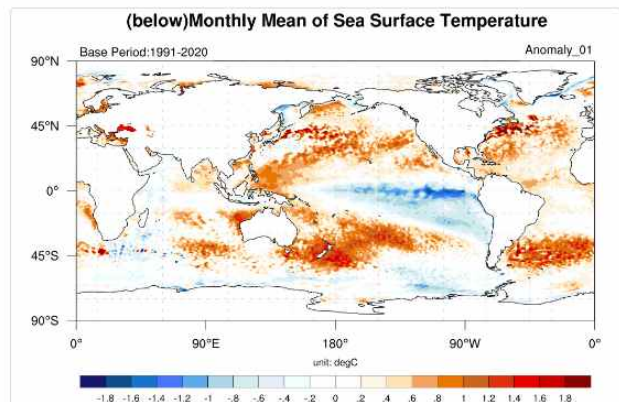
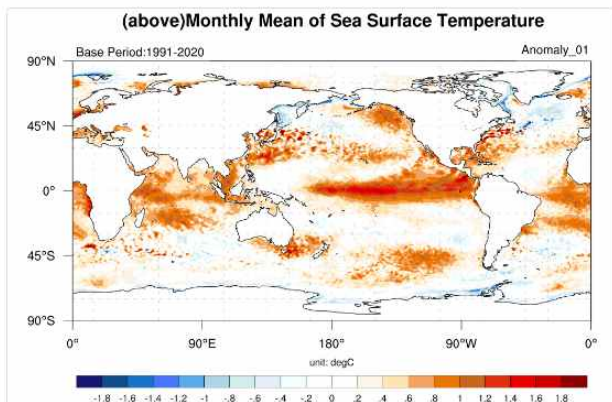
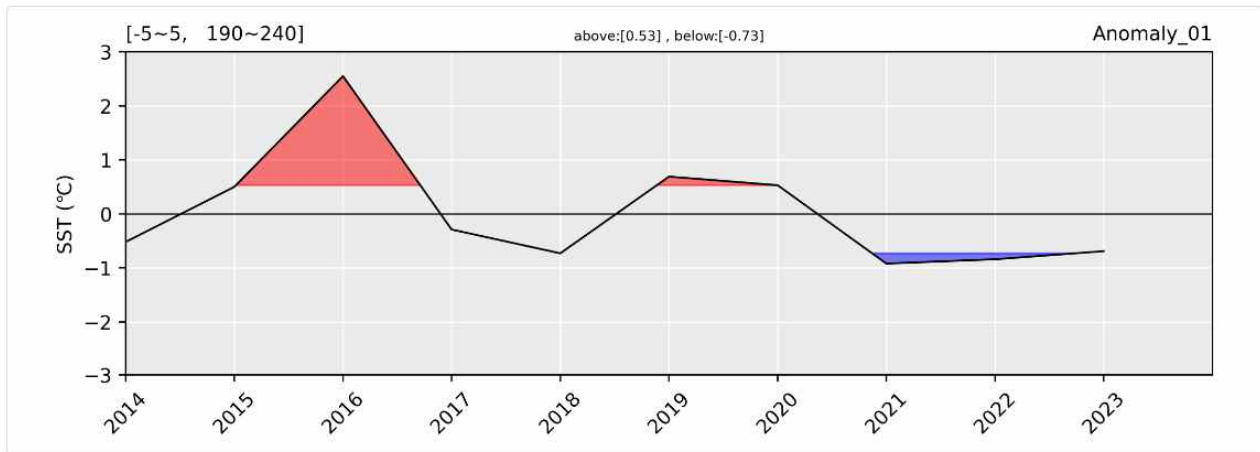


Figure 6.15. The user interface for the composite-based climate impact analysis service placed the condition input screen and result screen simultaneously on one website. This is to allow users to immediately identify changes in results through various re-input

6.4.2. 합성장 기반 기후 영향 분석 서비스 기능 구성

합성장 기반 기후 영향 분석 서비스는 하나의 웹사이트에 입력조건과 출력 정보를 동시에 보여주도록 구성하였다. 웹페이지를 3단으로 구성하였으며 첫 번째에는 기후 변수 및 조건을

입력하도록 구성하였고 입력조건에 대한 분석 결과를 2단에서 보여주도록 하였다. 2단에서는 지역 및 기간에 대한 시계열 분석 결과를 그래프로 보여주고 1차 분석된 시계열 정보를 통해 Above 지역과 Below 지역을 구분하여 영역에 포함하는 연도를 추출하여 합성장 분석 프로그램의 입력조건으로 다시 전달하도록 하였다. 전달받은 프로그램은 Above 영역과 Below 영역으로 구분하여 합성장을 구하고 이를 시각화 정보로 제공하도록 기능을 구분하였다. 정보 제공 기능에 대한 각 서비스는 다음과 같다.

6.4.2.1. 합성장 기반 기후 영향 분석 조건

합성장 기반 기후 영향 분석을 위해서 하나의 웹사이트에 입력과 출력 정보를 동시에 보여주도록 서비스를 구성하였다. 입력 정보에는 분석하고자 하는 기후 변수, 변수에 따른 기압 정보, 그리고 평균과 편차 중에 기본적으로 편차 정보를 분석하도록 세팅하였다. 기간은 월평균에 대한 분석으로 1월부터 12월까지 월 단위 분석하도록 제약을 걸었으며 계절을 배제하였다. 또한, 기간은 1981년부터 현재까지를 사용자가 선택할 수 있으나 기본기간은 10년을 기본으로 하였다. 또한, 전 지구의 기후변수 중에서 사용자가 원하는 지역을 선택할 수 있도록 좌표를 사용자 스스로 입력하거나 미리 정해진 지역을 선택하여 분석할 수 있도록 입력조건을 확장시켰다.

TIME-SERIES to COMPOSITE

Figure 6.16. In the composite-based climate impact analysis service, you can select the desired month for temperature and regions and check it.

6.4.2.2. 합성장 기반 기후 영향 시계열 분석

앞에서 제시한 입력조건을 이용하여 시계열 정보를 생산하고 생산된 시계열 정보를 기준으로 3분위 계산을 진행한 결과를 웹페이지에 제공하는 역할을 수행한다. 3분위로 계산된 결과는 다시 합성장 프로그램으로 전달되는데, Above 연도와 Below 연도로 나누어서 제공하게 되므로 시계열 분석 정보는 합성장을 위해 중요한 역할을 수행하고 있다. Above 지역은 붉은색으로 표시하였고 Below 지역은 푸른색으로 표시하였다. 또한 사용자가 선택한 지역의 좌표정보를 제공하여 어느 지역에 대한 시계열 정보인지 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 결과를 제공하고 있다. 또한, Above 영역의 기준값과 Below 지역의 기준값을 제공함으로써 객관적인 수치를 통해 현재 3분위의 기준점이 어디인지 명확하게 제공하고자 하였다. 오른쪽 상단에 현재 분석된 결과가 Anomaly이고 1월을 기준으로 시계열 정보를 생산하였다는 정보를 제공하였다.

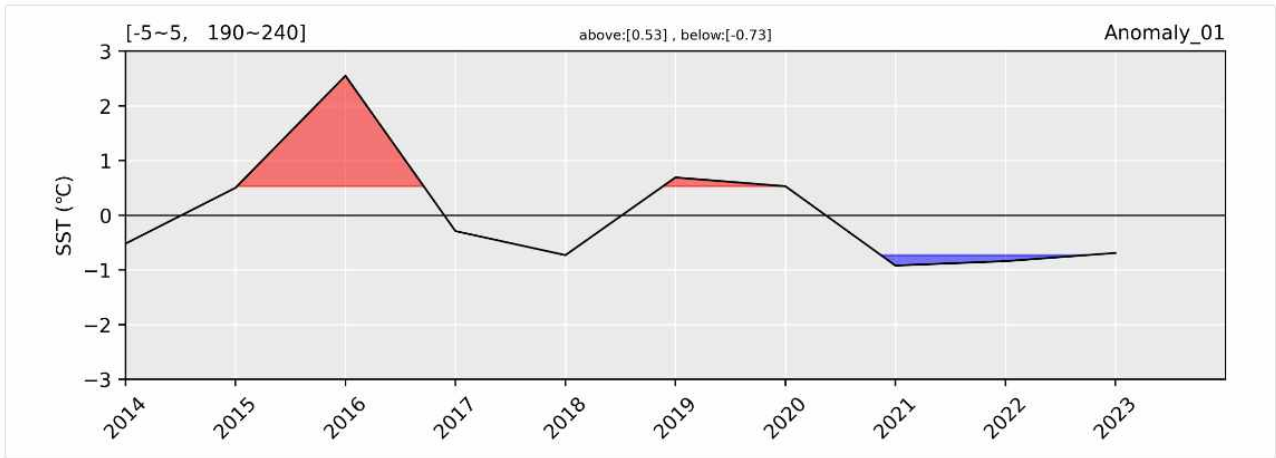


Figure 6.17. This is the result of monthly time series analysis for the user's desired region. Through time series analysis, you can find years that are Above and years that are Below.

6.4.2.3. 시계열 기반 기후영향 합성장 분석

앞에서 설명한 시계열 정보는 자료에 대한 기본적인 분석 결과를 제공하는 동시에 합성장 분석을 위한 입력 정보로 활용된다. 3분위를 기준으로 제공되는 연도를 분리하여 합성장을 생산하는 변수에 값을 전달하게 되면 추출된 연도를 기준으로 합성장을 생산하고 분석된 결과를 웹 페이지를 통해 제공하도록 구성되었다. 제공되는 기후 변수는 해수면 온도, 장파복사, 지표면 기온으로 다양한 변수를 제공할 예정이다. 지도 기반으로 평년 정보를 제공하고 현재 제공되고 있는 합성정보가 Above인지 Below인지 설명자료를 제공하고 있다.

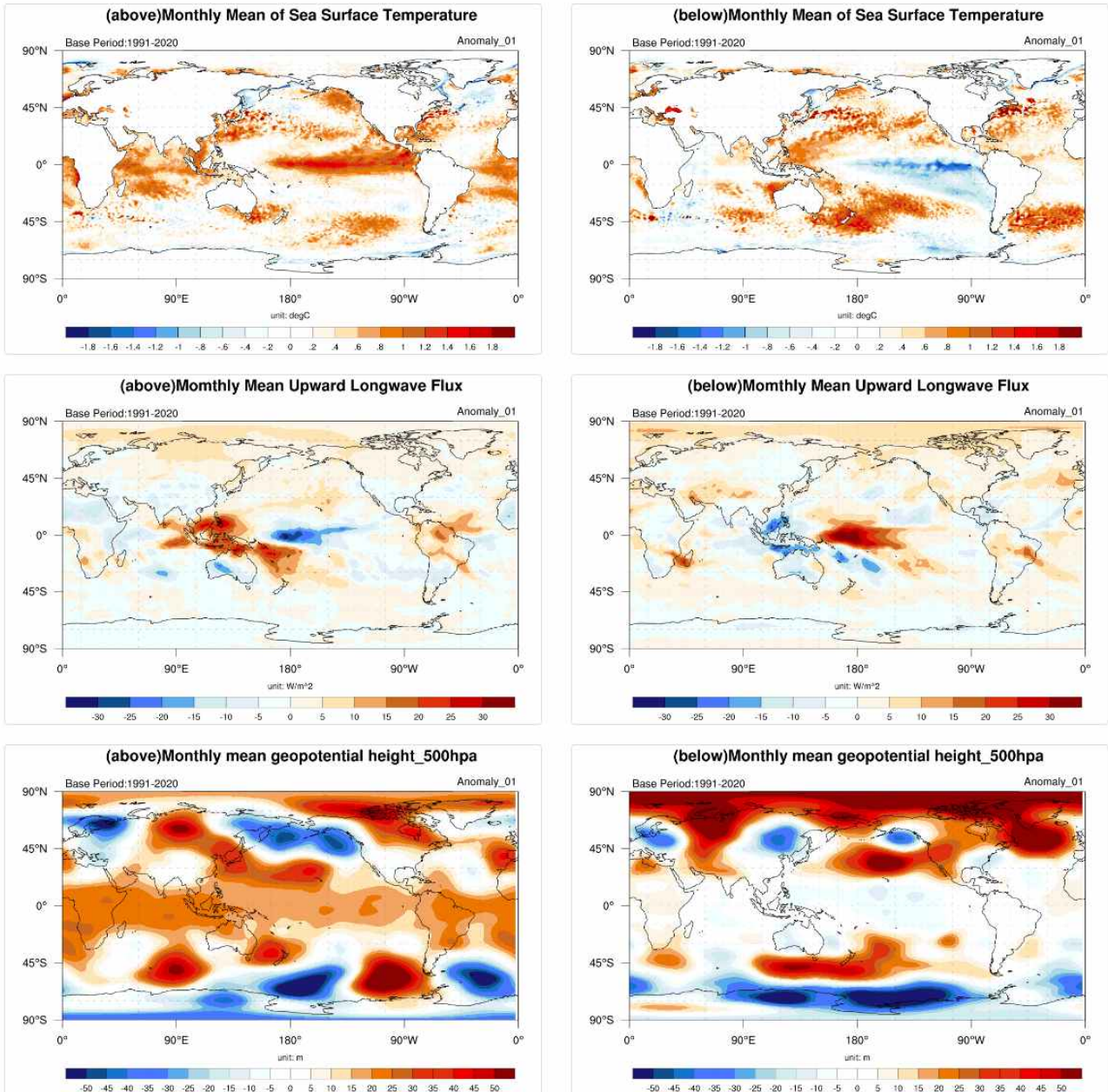


Figure 6.18. A composite map can be created for various variables through the Above and Below solutions obtained through time series analysis

6.5. 요약

전 세계적으로 빈번하게 발생하는 이상기후로 인해 한반도에 미치는 예측인자들은 지속적으로 변하고 있어 연구자는 다양한 인자를 일일이 비교하고 분석해야 하는 번거로움이 발생하고 있다. 이에 따라, 신속한 기후 감시 체계구축의 필요성과 빠른 분석 서비스의 필요성이 더욱 증대되고 있어 점점 강해지는 극한 기상현상에 대한 지속적인 감시를 통해 재산과 인명피해를 최소화에 대한 노력으로 최신의 관측 자료를 수집하고 주기적인 이상기후 감시와 예측인자 자동 생산 및 정보 제공 서비스 구축이 필요하게 되었다. 그리하여 한반도의 월별 예측인자에 대한 빠른 분석과 대처를 위해 표준화된 자료수집 체계 및 신속한 감시 결과 제공하여 시의적절한 원인분석이 가능하도록 월별 예보토의를 위한 감시분석 정보 제공 자동화 시스템을 구축하였다.

감시분석 정보 제공 자동화 서비스 구축을 위해 APCC에서 생산되고 있는 기후감시자료와 예측자료, 장기에보 가인던스를 기반으로 한 한반도 예측인자 정보 및 NOAA의 CDC (Climate Data Center)에서 제공하는 월별 기후자료를 정기적으로 수집하여 사용하였다. 자료생산 기간은 일별 자료를 수집하여 월별 자료로 생산하여 기본 자료로 활용하였다. 기후감시분석시스템에 예보토의를 위한 월을 선택하면 사용자에게 해당하는 월의 강수와 기온 정보를 자동으로 계산하여 제공하고 예측인자의 종류와 위치정보 그리고 상세 역학에 대한 정보도 같이 제공하도록 사용자 인터페이스를 구성하였다. 최근 10년부터 현재까지 인자별로 관측 정보와 비교하여 상관계수가 어떻게 변하는지 시계열 정보를 제공하고 각 값이 표준편차에 따른 높음과 낮음을 색상으로 표시하여 사용자 정보전달을 편리하게 구성하였다.

7. 요약 및 결론

아태사업 6단계(2022~2024년)의 2차년도에는 비선형적 합성장 분석을 통해 주요 예측인자가 한반도 기후에 영향을 미치는 세부적 역학과정을 규명하고 이를 활용하여 객관적이며 스토리가 있는 예측 방안 개발의 기반을 마련하였다. 이에 더해 다양한 관측기반 예측 정보의 최적 통합을 위해 인자의 세부 역학과정 재현성을 바탕으로 예측인자의 중요도를 선별하는 방안을 제시하였다. 또한 기후변화의 영향을 고려하여 한반도 미래 재생에너지 및 가뭄 변화를 전망하고 그 원인을 분석하였다. 마지막으로 분석 업무의 자원 절약 및 효율성 향상을 위하여 예보도의 모니터링 프로세스를 자동화하고, 관심 인자 합성장 분석 및 한반도 영향 분석 서비스를 구축하여 동아시아 이상기후 감시 시스템 및 기후 분석 시스템의 콘텐츠를 확대하고 고도화하였다.

2장에서는 여름철 예측인자 세부 역학과정 분석 연구에서는 예측인자의 세부 역학과정을 밝혀낼 수 있는 프레임워크를 개발하고 이를 7월 기온 예측인자에 적용하였다. 양의 3월 유럽 Z500 인자의 경우 6월 남아시아 몬순 활발과 관련된 CGT 유사 패턴의 아열대/중위도 파동 전파와 대서양에서 동아시아로의 동서 방향의 파동 전파의 중첩을 통해 한반도에 순압성 고기압을 강화시켜 고온을 유발하는 것으로 나타났다. 양의 위상의 경우 6월의 강한 남아시아 몬순 지수를, 음의 위상의 경우 4월 중앙아시아에 많은 눈과 6월 멕시코만의 낮은 SST를 감시하는 것이 예측 신뢰도를 높이는 것으로 나타났다. 양의 4월 열대 SST 삼극자의 경우 중태평양 태평양 라니냐가 발달한 상황에서 필리핀해 SST의 고온이 5월까지 유지된 후 6~7월에 필리핀해 북부에 저기압 및 대류가 발달하여 양의 P-J 패턴이 발달하여 동아시아 북동부에 고기압을 유도, 한반도에 고온을 유발하는 것으로 분석되었다. 양의 위상의 경우 6월의 강한 남아시아 몬순 지수를, 음의 위상의 경우에는 5월의 낮은 열대 SST 삼극자를 감시하여 예측 신뢰도를 높일 수 있는 것으로 나타났다. 이렇듯 예측인자의 세부 역학과정을 분별하고 감시하여 다양한 예측 정보의 중요도 판별 가능성을 확인해 보았다. 그 결과 3월 유럽 Z500와 4월 열대 SST 삼극자의 경우, 감시인자의 경향성에 따라 인자의 예측에 가중치를 부여했을 때 예측 신뢰도가 향상됨을 확인하였다. 현업 예측에 적용할 경우에는 모델 예측 결과 등을 활용하여 감시인자의 재현성을 추정하여 예측인자 중요도를 판별할 수 있다.

3장에서는 우리나라의 겨울철 기온 예측을 위한 신규 예측인자로 12월 NPO를 선정하고 우리나라 기온에 영향을 주는 상세 역학과정을 분석하였다. 12월 NPO는 두가지의 역학을 통해 한 달 지연되어 우리나라의 1월 기온 변동성에 영향을 주는 것으로 분석되었다. 한가지는 북서태평양 대류 활동에 영향을 주어 로스비 파에 의한 영향, 하나는 중위도 순환장에 영향을 주어 남중국해 해수면 온도 상승에 의한 영향이다. 또한 1월 남한 기온 예측성 향상을 위한 ENSO 예측 인자와 함께 1월 기온 예측에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 한가지 흥미로운 점은 12월 NPO와 NDJ Nino3.4의 결합 지수와 우리나라의 기온 관련성이 장주기 변동성에 영향을 받을 수 있다는 점이다. Yeh et al. (2018)은 NPO 패턴이 1990년대 중반 이후 동쪽으로 이동하여 ENSO와의 관련성이 약화되었다는 결과를 제시하였다. 최근 기간에 발생한 NPO와 ENSO의 관련성 약화는 원격상관 역학에 영향을 주고 우리나라의 기온 관련성 역시 달라질 수 있다. 그러므로 더 긴 시간 규모에서 NPO와 ENSO의 관련성, 그리고 우리나라에 영향을 미치는 원격상

관 역학의 장주기 변동성에 대해 연구가 필요하다. 또한 NPO의 이동이나 강도에 대한 민감도 뿐만 아니라 ENSO의 형태에 따른 민감도 등 우리나라의 겨울철 기후에 미치는 영향을 이해하기 위해 다양한 분석이 이루어져야 한다. 2023년에는 적도 중·동태평양의 해수면온도가 이례적으로 일찍 상승하면서 강한 엘니뇨가 발생하였다 (2023년 12월 중순 현재). 엘니뇨의 영향으로 12월에 북서태평양의 강수가 감소하고 동아시아에는 고기압이 발달하여 우리나라는 남풍 편차에 의해 평년보다 높은 기온이 기록하고 있다. 현재 중위도 서태평양에 양의 해면기압, 알래스카와 북미 대륙 서안을 중심으로 음의 해면기압이 발달하여 동서 방향의 쌍극자 패턴이 관측된다. 이 중위도 동태평양의 저기압성 순환은 엘니뇨의 반응인 적도 중태평양 양의 강수에 의한 PNA 패턴의 영향으로 보인다. 현재 NPO 발생이 뚜렷하지 않지만 지속적으로 북태평양의 대기 순환과 NPO의 발달을 모니터링 해야된다. 또한 NPO를 비롯한 북극 진동 (Arctic Oscillation; AO), 북대서양 진동 (North Atlantic Oscillation, NAO), 매든-줄리안 진동 (Madden-Julian Oscillation; MJO), 북극 해빙 등 우리나라의 겨울철 기후에 영향을 미치는 다양한 기후 모드와의 상호작용 역시 추가적으로 분석할 필요가 있다.

4장에서 미래 기후변화에 따른 재생에너지 변화 전망 연구에서 현재 기후 대비 저탄소 시나리오와 고탄소 시나리오 기반 미래 기후변화의 21세기 전반기(2021~2040), 중반기(2041~2060), 후반기(2081~2100)에 태양광(PVpot) 및 풍력(WED와 풍력발전가용풍속 비율) 발전에 의한 전력 잠재량의 계절별 변화를 분석하였다. PVpot 변화는 저탄소 시나리오에서 봄/여름/가을철에 유의한 변화는 없었다. 하지만 고탄소 시나리오에서 봄철과 겨울철에 유의한 감소를 보였다. 고탄소 시나리오에서 현재 기후 대비 21세기 후반기에 봄철 PVpot의 유의한 감소는 기온증가 때문이며, 여름철과 가을철은 RSDS와 TAS의 기여가 상쇄되어 유의한 변화가 나타나지 않았다. 겨울철의 PVpot 감소 경향은 지구 온난화에 의한 유의한 기온증가와 RSDS 감소 때문이다. 겨울철 RSDS 감소는 현재 기후 대비 미래 기후변화에서 남서풍의 영향이 증가되어 구름량의 증가와 관련된다.

현재기후 대비 미래 기후에서 저탄소 시나리오에서 WED의 변화는 봄철과 여름철에 대하여 통계적으로 유의한 변화는 나타나지 않았다. 가을철과 겨울철은 각각 남한의 서부 지역과 남부지역에서 21세기 후반기에 유의한 감소를 보였다. 고탄소 시나리오에서는 봄철에는 후반기에 거의 모든 지역에서 WED의 유의한 감소를 보였고, 가을철은 경남, 경북 북부 지역 제외 대부분 지역에서 유의한 감소가 나타났다. 겨울철은 21세기 후반기에 남한 남부 지역에서 유의한 감소를 보였다. 여름철에는 후반기에 남한 내륙지역에서만 유의한 증가를 보였다. 현재 기후에서 봄철 및 겨울철, 가을철 평균 바람은 북서풍으로서 21세기 후반기 봄/겨울철 남서풍, 가을철 북동풍의 영향이 더 커지는 것으로 분석되었으며 이는 이들 계절에서 풍속의 감소를 의미하며, 결국 WED의 감소로 이어졌다. 고탄소 시나리오에서 저탄소 시나리오 보다 남서풍 혹은 북동풍의 영향이 더 커져서, 봄/가을/여름철 풍력 발전 감소가 고탄소 시나리오에서 더 컸다. 현재 기후에서 풍력 발전 가용 범위의 풍속 비율 변화를 살펴보면, 저탄소와 고탄소 시나리오 모두 봄/가을/겨울철에 21세기 후반기에 내륙에서 비율이 증가하고, 해안 근접 지역에서 비율이 감소했으며, 이 같은 변화는 고탄소 시나리오에서 더 크게 전망되었다. 미래에 전력 생산에서 재생에너지 의존율을 높여가는 세계적 흐름 속에서 미래의 안정적인 전력 수급과 현재와 같은 전력 수급 정책을 이어가려면, 지구 온난화를 완화하기 위한 탄소 중립 정책이 실현되어야 하고, 혹은 약한 풍력에도 효율을 극대화 할 수 있는 풍력 터빈, 높은 기온에도 전력 생산

효율을 보장할 수 있는 태양광 셀의 개발이 필요한 것으로 보인다.

5장에서는 기상 가뭄 지수로 가장 널리 사용되고 있는 표준 강수 지수(SPI)와 실제 증발산량을 고려한 농업적 가뭄지수인 표준 증발산 부족 지수(SEDI)를 활용하여 미래 기후변화에 따른 우리나라 가뭄변화를 분석하였다. 아울러 미래 가뭄 전망 관련 가능한 원인을 제시하였다. 강수 자료만 사용하는 SPI와는 다르게 다양한 변수를 이용하여 계산되는 SEDI의 미래 기후 변화 양상은 매우 상이하게 나타났다. 특히 고탄소 시나리오, 먼미래에서 더욱 뚜렷한 차이가 보이는데, 계절적으로는 봄철보다 가을철 먼미래에서 SPI보다는 SEDI 가뭄지수가 우리나라 전 지역에 대해 가뭄이 매우 심해질 것으로 전망하였다. 이는 SEDI가 기후변화 관련 기온상승의 영향을 잘 반영하기 때문인 것으로 보인다. 미래 기후변화에서 봄철보다 가을철에 가뭄이 심해지는 원인으로서는 봄철에는 현재보다 먼미래에 우리나라 동쪽에 고기압 아노말리가 위치하면서 남풍이 더욱 우세해지게 되고, 이로 인해 강수량 또한 증가하는 것으로 전망되지만, 가을철에는 우리나라 상공에 강한 고기압이 위치하면서, 기온은 봄철보다 더욱 가파르게 증가하고, 강수를 유발하는 남풍이 줄어들면서 강수가 감소되어 가을철에 가뭄이 더 심해지는 것으로 분석되었다.

6장에서는 사용자 편의성 향상을 위한 기후분석시스템(CAS)의 개선 및 확대에 관한 사항을 기술하였다. APCC 기후감시분석시스템(CAS)은 이상기후에 대한 빠른 원인분석과 대처를 위해 기후분석 연구자를 보조하는 시스템으로 관측 자료 및 재분석 자료를 통해 다양한 감시와 분석을 할 수 있도록 구현한 서비스다. 시스템의 확장 서비스와 신규 서비스 개발을 위해 사용자의 요구사항을 수집하고 연구를 지원하는 서비스를 집중하여 개발하였다. 그리하여, 매일 실시하는 예보토의를 위해 사용자의 편리성을 강화하고자 한반도 지역의 기온 및 강수에 관련된 월별 예측인자를 수집하고 과거 통계 정보와 예측 시점의 현황 등을 자동으로 계산하여 제공하도록 하였다. 또한, 기작 모식도 제공을 통해 사용자가 쉽게 이해할 수 있도록 하였다. 이런 자료처리 과정을 자동화하여 사용자 편의성을 향상에 기여하였으며 다양한 월별(1~12월) 강수와 기온 예측인자에 대해 자동으로 정보를 수집하고 대용량 자료 계산을 통해 빠르게 그 정보를 제공하도록 하였다. 구축을 위해 관측 자료의 위치를 파악하고 자료의 특성에 따른 수집 방법을 정의하고 자료의 위치정보, 생산기관, 생산기간, 및 파일 포맷 등 연구에 활용될 수 있는 자료인지 검증을 통해 자료관리 프로그램을 개발하였다. 생산기관에 따라 배포되는 자료의 시간이 다르고 배포 형식도 상이하여 수집 후 표준화(Climat Forecast conversion) 포맷으로 전처리하는 과정을 거치도록 하였다. 준비된 자료를 기반으로 사용자의 조건에 맞도록 실시간 자료 분석 프로그램과 시각화 제공 프로그램을 개발하였다. 최적의 시각화 제공을 위해 사용자에게 지도나 그래프 기반으로 분석 결과를 제공하고 지도 기반 서비스는 사용자가 원하는 지역, 색상, 평년 기간 설정 등 다양한 옵션을 제공하여 시각화정보를 제공하도록 구성하였다. 또한, 그래프 기반의 서비스는 연도에 따른 구분을 위해 다양한 색상을 적용하고 마우스를 올려놓으면 기본적인 정보를 제공하며 연도를 선택하여 목록에서 삭제하거나 표출할 수 있도록 구성하였다. 예보토의를 위해 모니터링 정보와 월별 관련 예측인자의 관측 자료, 그리고 시계열 기반의 합성장 분석 등 다양한 분석 방법을 제공하였다.

사사

이 연구는 APCC의 지원을 통해 수행 되었습니다.

References

- 산업통상자원부, 2020: 2020 신 재생에너지 백서, 914pp.
- APCC, 2021: 기후 감시 및 분석 기반의 장기예보 가이드선스, 324pp.
- Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, **97**, 163-172.
- Chen, J., X. Wang, W. Zhou, Z. When, 2017: Interdecadal change in the summer SST-precipitation relationship around the late 1990s over the South China Sea. *Climate Dynamics*, **51**, 2229-2246, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4009-y>.
- Chenni, R. M. Makhlouf, T. Kerbache, and A. Bouzid, 2007: A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy*, **32**, 1724-1730.
- Fant, C., A. Schlosser, and K. Strzepek, 2016: The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. *Applied Energy*, **161**, 556-564.
- Gernaat, D. E. H. J., H. S. de Boer, V. Daioglou, S. G. Yalew, C. Muller, and D. P. van Vuuren, 2021: Climate change impacts on renewable energy supply, *Nature Climate Change*, **11**, 119-125.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, et al. 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999-2049.
- Horel, J. D., and J. M. Wallace, 1981: Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, **125**, 773-788.
- Huang, B., P. W. Thorne, V. F. Banzon, T. Boyer, G. Chepurin, J. H. Lawrimore, M. J. Menne, T. M. Smith, R. S. Vose, and H.-M. Zhang, 2017: Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, **30**(20), 8179-8205. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0836.1>.
- Hueging, H., R. Haas, and K. Born, 2013: Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate model ensemble projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 903-917.
- IEA, 2021: World energy balances: Overview, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>.
- IEA, 2020: World energy outlook 2020, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

- Jerez, S., I. Tobin et al., 2015: The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe, *Nature Communications*, **6**, 10014, doi:10.1038/ncomms10014.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 1631-1643, <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>.
- Kim, M. K., J. S. Oh, C. K. Park, S. K. Min, K. O. Boo, and J H Kim, 2019: Possible impact of the diabatic heating over the Indian subcontinent on heat waves in South Korea. *International Journal of Climatology*, **15**, 1166-80.
- Kim, S., and J.-S. Kug, 2018: What controls ENSO teleconnection to East Asia? Role of western North Pacific precipitation in ENSO teleconnection to East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 406-422, <https://doi.org/10.1029/2018JD028935>.
- Kim, S., H.-Y. Son, and J.-S. Kug, 2018: Relative roles of equatorial central Pacific and western North Pacific precipitation anomalies in ENSO teleconnection over the North Pacific. *Climate Dynamics*, **51**, 4345-4355, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3779-6>.
- Kim, S., H.-Y. Son, and J.-S. Kug, 2017: How well do climate models simulate atmospheric teleconnections over the North Pacific and East Asia associated with ENSO? *Climate Dynamics*, **48**, 971-985, <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3121-8>.
- Kim, S., H.-S. Kim, S.-K. Min, H.-Y. Son, D.-J. Won, H.-S. Jung, and J.-S. Kug, 2015: Intra-winter atmospheric circulation changes over East Asia and North Pacific associated with ENSO in a seasonal prediction model. *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*, **51**, 49-60, <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0059-9>.
- Lee, W. S., and M. I. Lee, 2016: Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *International Journal of Climatology*, **36**, 4815-4830 <https://doi.org/10.1002/joc.4671>
- Lim, W., and K. Seo, 2019: Physical-Statistical Model for Summer Extreme Temperature Events over South Korea. *Journal of Climate*, **32**, 1725-1742.
- Linkin, M. E., and S. Nigam, 2008: The North Pacific Oscillation-West Pacific teleconnection pattern: Mature-phase structure and winter impacts. *Journal of Climate*, **21**(9), 1979-1997, <http://doi.org/10.1175/2007JCLI2048.1>.
- Myoung, B., 2021: Recent trend of cold winters followed by hot summers in South Korea due to the combined effects of the warm western tropical Pacific and North Atlantic in spring. *Environmental Research Letters*, **16**, p084014, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1134>.

- Pak, G., Y. H. Park, F. Vivier, Y. O. Kwon, K. Chang, 2014: Regime-dependent nonstationary relationship between the East Asian Winter Monsoon and North Pacific Oscillation. *Journal of Climate*, **27**(21), 8185–8204, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13.00500.1>.
- Poddar, S., J. P. Evans, M. Kay, A. Prasad, and S. Bremner, 2021: Estimation of future change in photovoltaic potential in Australia due to climate change. *Environ. Res. Lett.*, **16**, 114034.
- Radziemska, E. 2003: The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renew. Energ.* **35**, 1387–1390.
- REN21, 2020: Renewables 2020 Global status report, <https://www.ren21.net/gsr-2020/>
- Rogers, J. C., 1981: The North Pacific Oscillation. *International Journal of Climatology*, **1**(1), 39–57, <https://doi.org/10.1002/joc.3370010106>.
- Seo, K., J.-H. Son, S.-E. Lee, T. Tomita, and H. S. Park, 2012: Mechanisms of an extraordinary East Asian summer monsoon event in July 2011. *Geophys. Res. Lett.* **39**, L05704, <https://doi.org/10.1029/2011GL050378>
- Sung, M. K., W. T. Kwon, H. J. Baek, K. O. Boo, G. H. Lim, and J. S. Kug, 2006: A possible impact of the North Atlantic oscillation on the east Asian summer monsoon precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L21713. doi:10.1029/2006GL027353.
- Tobin, I., R. Vautard, I. Balog, et al. 2015: Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections. *Climate Change*, **128**, 99–112.
- Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, **109**(4), 784–812, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2).
- Wang, L., W. Chen, and R. Huang, 2007: Changes in the variability of North Pacific Oscillation around 1975/1976 and its relationship with East Asian winter climate. *Journal of Geophysical Research*, **112**, D11110, <https://doi.org/10.1029/2006JD008054>.
- Wang, B. and Z. Fan, 1999: Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 629–638.
- Wang, B., R. Wu, K.-M. Lau, 2001: Interannual variability of Asian summer monsoon: Contrast between the Indian and western North Pacific–East Asian monsoons. *J. Climate*, **14**, 403–4090
- Wu, Z., B. Wang, J. Li, and F.-F. Jin, 2009: An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO. *J. Geophys. Res.* **114**, D18120

[https://doi.org/ 10.1029/2009JD011733](https://doi.org/10.1029/2009JD011733).

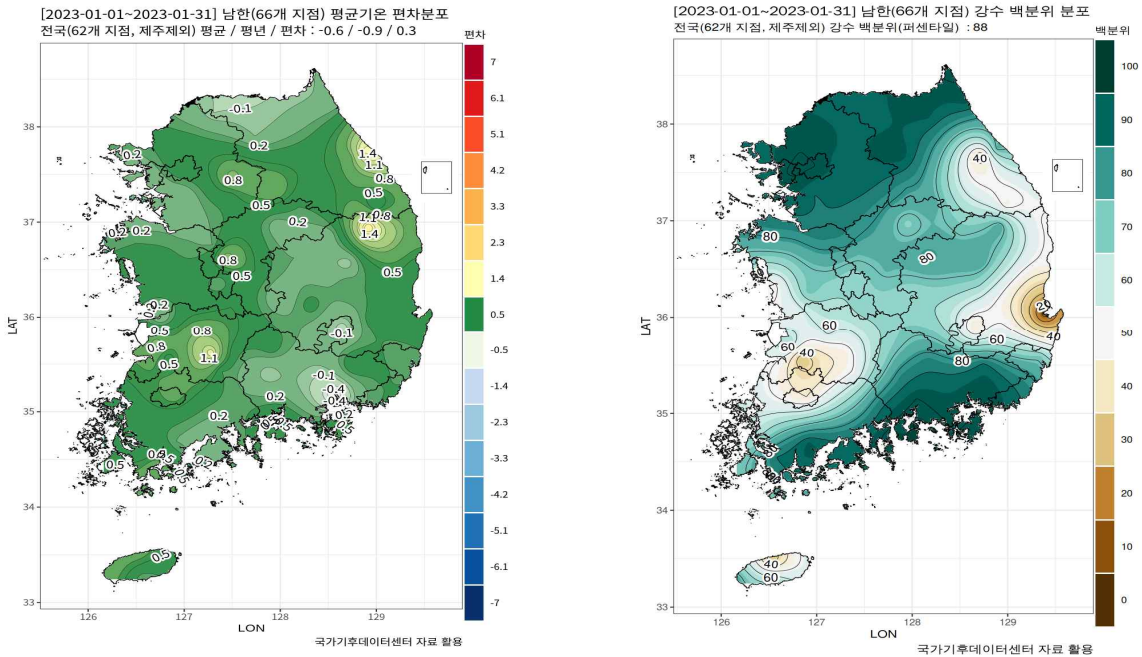
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Am. Meteorological Society*, **78**, 2539–2558, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3c2539:GPAYMA%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3c2539:GPAYMA%3e2.0.CO;2).
- Yeh, S.-W., and C.-H. Kim, 2010: Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation. *Continental Shelf Research*, **30**(13), 1428–1434, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.05.002>.
- Yeh, S.-W., D.-W. Yi, M.-K. Sung, Y. H. Kim, 2018: An eastward shift of the North Pacific Oscillation after the mid-1990s and its relationship with ENSO. *Geophysical Research Letters*, **45**(13), 6654–6660, <https://doi.org/10.1029/2018GL078671>.
- Yeo, S.-R., S.-W. Yeh, and W.-S. Lee, 2019: Two types of heat wave in Korea associated with atmospheric circulation pattern. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **124**, 7498–7511 <https://doi.org/10.1029/2018JD030170>.
- Yu, J. Y., M. M. Lu, and S. T. Kim, 2012: A change in the relationship between tropical central Pacific SST variability and the extratropical atmosphere around 1990. *Environmental Research Letter*, **7**(3), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034025>.
- Zhang, T., T. Wang, G. Krinner, X. Wang, T. Gasser, et al. 2019: The weakening relationship between Eurasian spring snow cover and Indian summer monsoon rainfall. *Science advances*, **5**, eaau8932.

부록

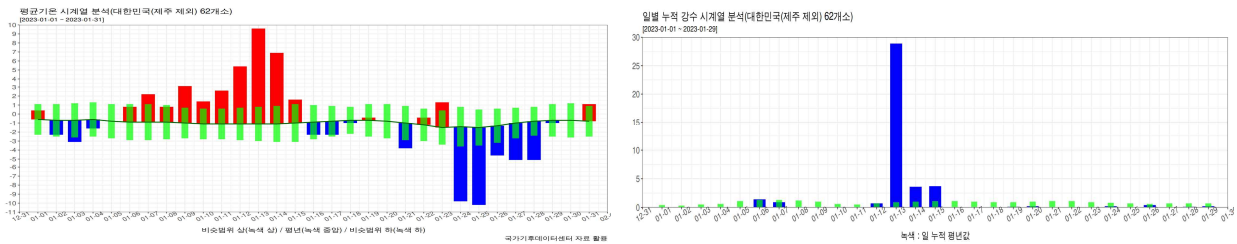
2023년 1월 기후분석 보고서

□ 2023년 1월 우리나라 기온 및 강수량 현황과 특징

[Fig.1] 2023년 1월(1~31일) 우리나라 기온과 강수량 분포도



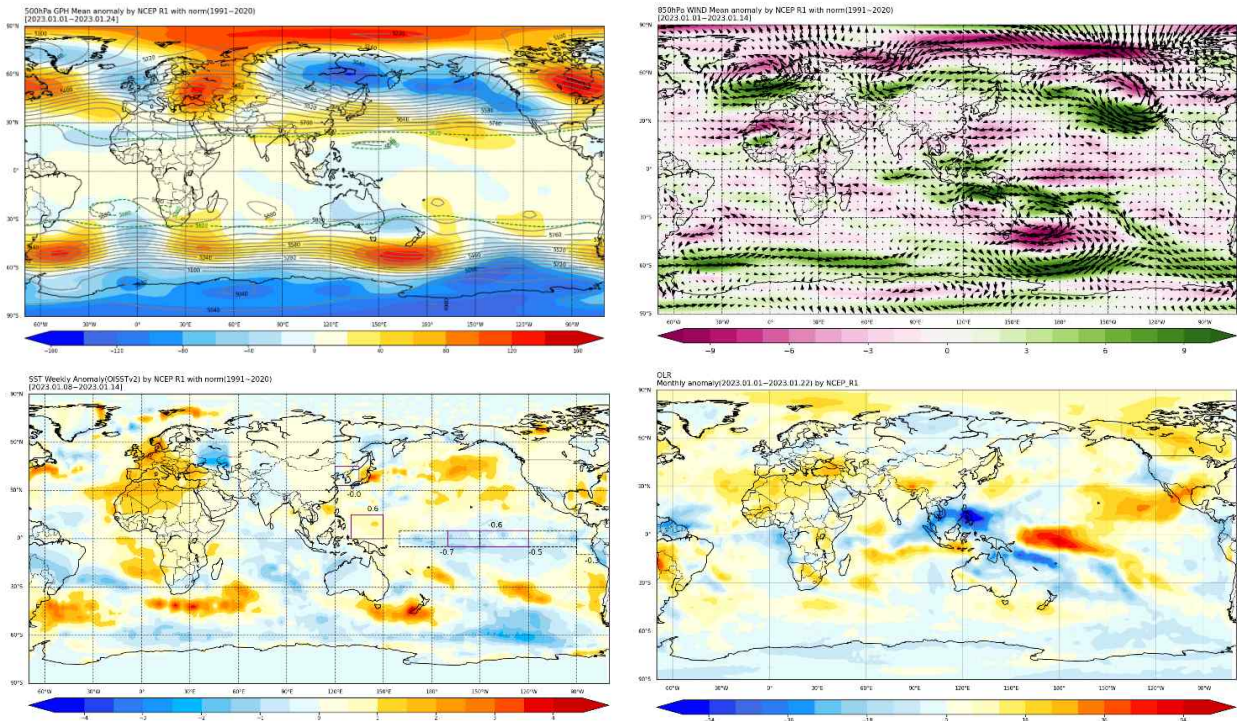
[Fig.2] 2023년 1월(1~31일) 우리나라 기온과 강수량 시계열



- 1월 전국 평균 기온은 -0.6°C 로 평년(-0.9°C)보다 0.3°C 높은 평년 기온을, 강수량은 40.5mm 로 평년의 88%에 해당하는 높은 값을 기록함
(※ 1월 기온의 평년 비슷 범위는 $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$, 강수의 평년 비슷 범위는 $17.4\text{--}26.8\text{mm}$)
- 전반부에는 유라시아 파동 전파로 인한 고기압성 흐름의 강화로 고온 편차가, 후반부에는 러시아 북쪽 강한 저기압성 편차의 남동진으로 한파를 동반한 저온 편차가 발달하였음. 특히 2주차(9~15일) 평균 기온은 역대 2위, 강수량은 역대 1위에 해당함. 13일에 있었던 전국적 강수(28.9mm)로 강수량이 많았음

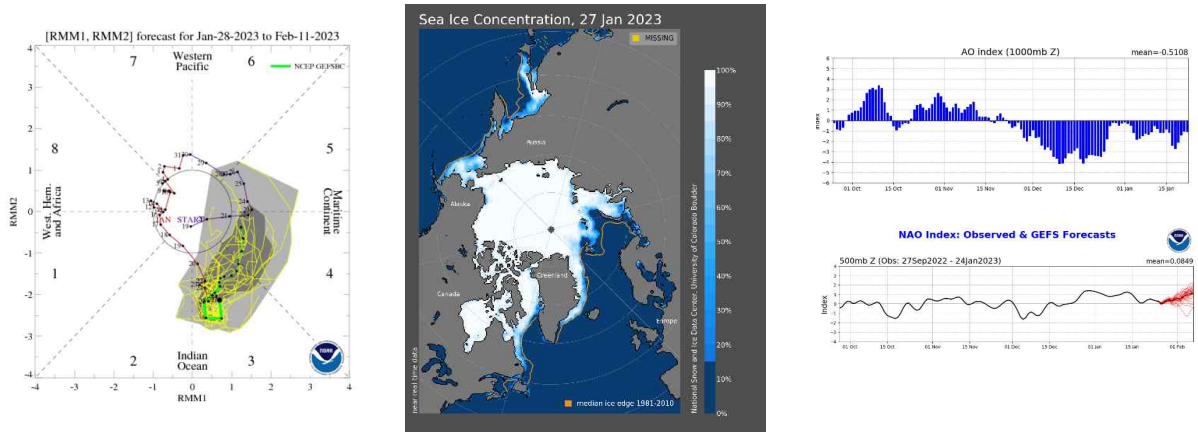
□ 2023년 1월 전지구 순환장 특징

[Fig. 3] 2023년 1월 평균 500hPa 지위고도 편차, 850hPa 바람 편차, OLR 편차, SST 편차 (왼쪽 위부터 시계방향)



- 500hPa 지위고도의 공간분포에 따르면 극지역과 우랄산맥, 캐나다 동부에 고기압성 편차가 나타나고 그린란드~북유럽에 이르는 지역과 러시아 동부~북미 서부 연안에 이르는 지역에는 저기압성 편차가 나타남. 아열대 지역인 중국 남부와 한반도/일본 남부, 하와이 주변에 고기압성 편차가 나타남.
 - 하층 바람 편차의 경우 한반도 동편에 위치한 고기압성 편차에 의한 서해에 남풍이 불었으나 한반도에는 바람 편차가 약했음
 - 열대 태평양 해수면 온도는 라니냐가 지속되는 상황으로 NINO3.4 지수가 1월 8-14일 평균 기준 -0.6°C 의 값을 보이고 있음.
 - 남중국해와 필리핀해에 대류가 활발하고 중태평양 NINO4 지역은 대류가 억제됨.
- 2023년 1월 주요 인자 현황

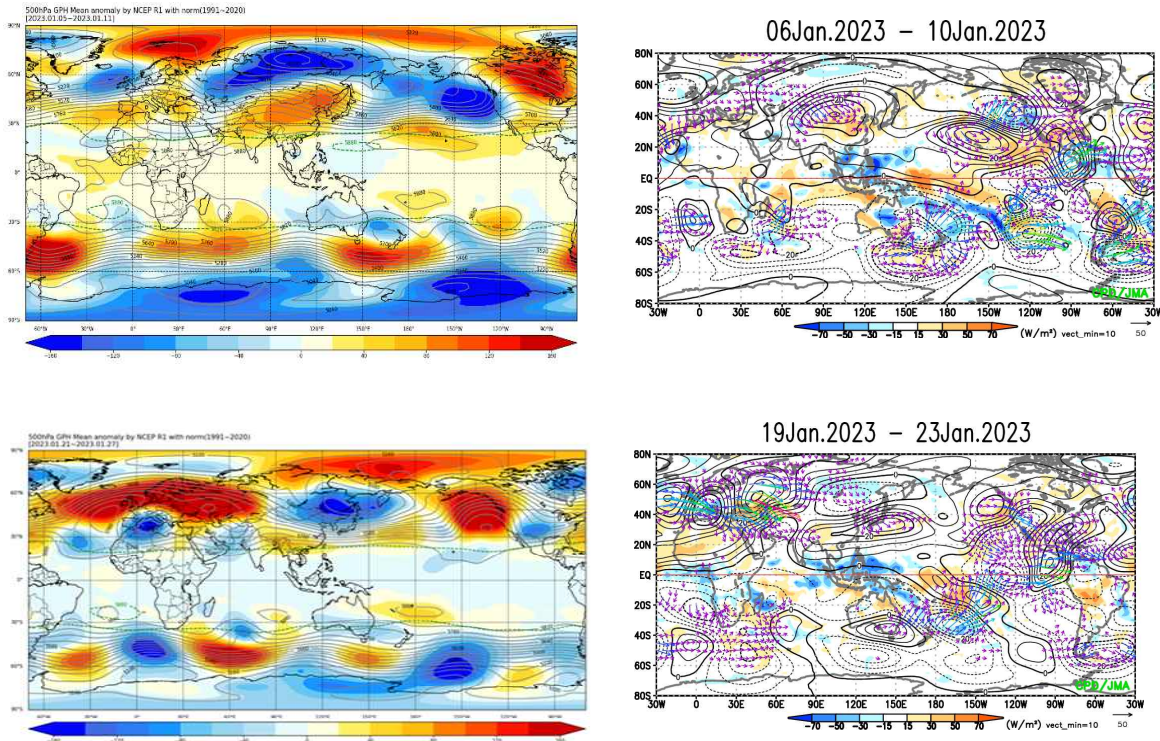
[Fig. 4] 2023년 1월 MJO(좌), 북극 해빙(중), AO/NAO(우) 현황



- MJO는 12월 말 위상 6과 7이 발달한 이후 1월 초반 및 중반에 강도가 약했지만 20일부터 위상 3이 급격하게 발달하였음
- 북극 해빙 전체 면적은 평년보다 적은 수준으로 특히 바렌츠해와 베링해의 해빙 면적 감소가 두드러짐
- AO는 음의 위상을 유지하고 있으나 12월에 비해 강도는 줄었음. NAO의 경우 약한 양의 위상을 보임

□ 2023년 1월 주별 특징

[Fig. 5] (상) 2주차 평균 500hPa 지위고도 편차와 상층 wave activity flux (하) 4주차 평균 500hPa 지위고도 편차와 상층 wave activity flux



(2주차 고온 및 폭우 시기 대기순환)

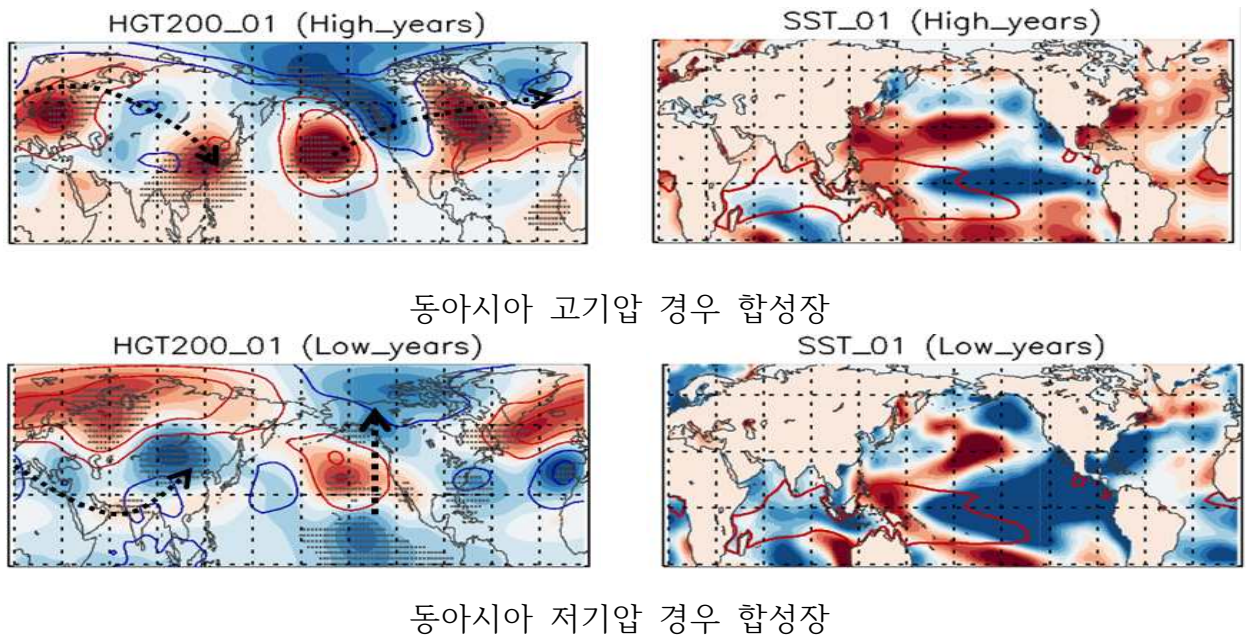
- 중상층에 유라시아 파동전파로 동아시아에 고기압 발달, 하층에는 한반도 동쪽 고기압성 편차 발달로 남풍 기류가 주류를 이루어 한반도에 고온이 나타남
- 하층에 한반도 동쪽 고기압성 편차 발달한 가운데 1/11~15일 사이 이동성저기압이 지나가며 남풍 기류 강화에 따라 13일에 전국적 강수가 발생함

(4주차 한파 시기 대기순환)

- 러시아 북부에서 발달한 저기압이 남동진하며 24~25일에 한반도에 강력한 한파를 발생시킴
- 이후 벵갈만의 대류(MJO 위상 3)가 발달, 북쪽의 저기압 남하를 저지하는 티벳고기압이 강화되어 한파가 약화됨

□ 라니냐 특성에 따른 한반도 영향(전반부 고온 현상 관련)

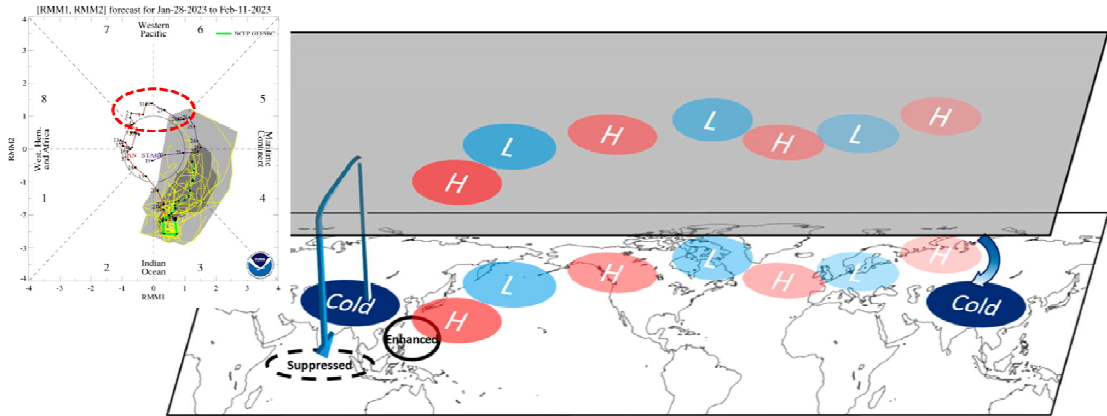
[Fig. 6] 라니냐해 1월 동아시아 고기압 또는 저기압이 발달할 경우 합성장



- 라니냐가 발달한 1월은 동아시아에 저기압성 편차가 발달하여 한반도 저온 또는 중립의 기온 경향을 보임. 한편 올해 전반부처럼 고기압성 편차가 발달하며 한반도 고온이 나타나기도 함(두 경우의 태평양 대류 패턴의 차이는 확연하지 않음)
- 라니냐시 동아시아에 고기압 또는 저기압성 편차가 나타나는 경우를 구분하여 합성장을 비교한 결과 라니냐 패턴(전자는 CP 타입 후자는 EP 타입)의 차이가 두드러졌음. 올해 역시 SST 저온 편차가 중태평양에 집중된 CP 타입 라니냐에 가까움. 이러한 결과는 기존의 연구 결과와도 유사함(Zhang et al. 2019).

□ MJO 위상에 따른 한반도 영향(후반부 한파 현상 관련)

[Fig. 7] 2023년 MJO 현황 및 MJO 6~7 위상에 따른 대기 원격 파동 전파 및 동아시아 저온 발달 모식도(Kim et al. 2020)



- 겨울철 MJO 6 또는 7 위상이 발달할 경우 서태평양 대류 현상이 북미~유라시아~동아시아에 이르는 파동 전파로 30일 후 동아시아에 저기압성 흐름을 발달시켜 저온을 야기할 수 있음(Kim et al. 2020).
- 12월 말에 발달했던 MJO 위상 6과 7이 태평양과 대서양을 파동 전파를 통해 한 달 후 동아시아에 저기압성 흐름을 강화해 한파가 발생한 것으로 추측됨.

□ 요약

평년과 비슷한 기온과 평년보다 많은 강수량을 기록한 1월	
기온	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 기온 변동성이 매우 커 중순까지는 고온 편차가 컸고 24일 이후 저온 편차가 매우 컸음 ✓ 고온 시기: 중위도 파동전파와 필리핀해 대류 활발로 동아시아에 고기압 발달, 하층에는 남풍 기류 발달로 인해 고온 발생 ✓ 저온 시기: 유라시아 대기 파동으로 인해 러시아 북부에 강하게 발달한 저기압이 동아시아로 남동진하며 한파를 발생시킴
강수	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 13일의 많은 강수량으로 평년보다 많은 강수량을 기록 ✓ 저층 한반도 동쪽에 고기압성 편차가 지속되는 가운데 남중국에 이동성 저기압의 동진으로 남풍 기류가 강화되어 폭우 발생

□ 토론

- 한반도 고온관련 고기압성 흐름 발달은 고위도 및 중위도/아열대에서의 파동전파의 영향으로 보임
- 1월 초중반엔 MJO의 위상이 약했는데도 한반도에 고기압성 흐름이 발달한 이유가 불명확함, 차후 12월 말 MJO 위상(6, 7)과의 연관성에 대해 추가 분석하여 30일뒤 한반도 영향을 파악하였고 올해 상황과 매우 유사함을 확인

□ 예측인자 검증

출처	기온	1월
가이던스	10월 유라시아 눈덮임	0
가이던스	라니냐 & 음의 IOD	EC
가이던스	라니냐 지속	/
가이던스	바렌츠 카라 해빙	/
논문	대서양 겨울 몬순(DJF)	F
가이던스	라니냐	0-
	기계적 종합	0-
	정성적 통합	0

출처	강수	1월
가이던스	라니냐 & 음의 IOD	EC
가이던스	라니냐 지속	EC
	라니냐	EC
	기온 강수 상관관계	+cor
	최근 10년 경향(신평년)	4/4/2
	기계적 종합	0
	정성적 통합	0

(기온)

- 라니냐 관련한 지수들은 주로 1월 저온을 주로 예측함. 하지만 가을철 라니냐가 음의 IO와 함께 발달한 경우엔 1월 한반도 고온, 저온, 중립이 골고루 발생하였고 대서양 겨울 몬순 인자역시 겨울 몬순이 강하게 발달하지 않을 가능성을 시사해 기온을 중립으로 예측하였고 적중하였음
- 올해 1월은 라니냐와 음의 AO가 함께 발달하였으나 저온보다 고온이 우세한 경우이므로 예측시에도 주의가 필요함. 라니냐가 발달한 1월, 동아시아에 고기압성 흐름이 발달하여 한반도에 고온이 발생한 경우도 있기에 그에 대한 추가 분석이 필요함(e.g., 라니냐 특성에 따른 차이, MJO 위상에 따른 차이 등)

(강수)

- 특별한 예측인자가 없는 가운데 기온과 강수와의 상관관계에 기반하여 중립을 예측하였으나 많은 강수로 적중하지 못함
- 고온시기 중 13일에 집중된 강수로 평년보다 많은 강수가 나타났기에 예측이 쉽지 않은 1월이었음

□ 참고문헌

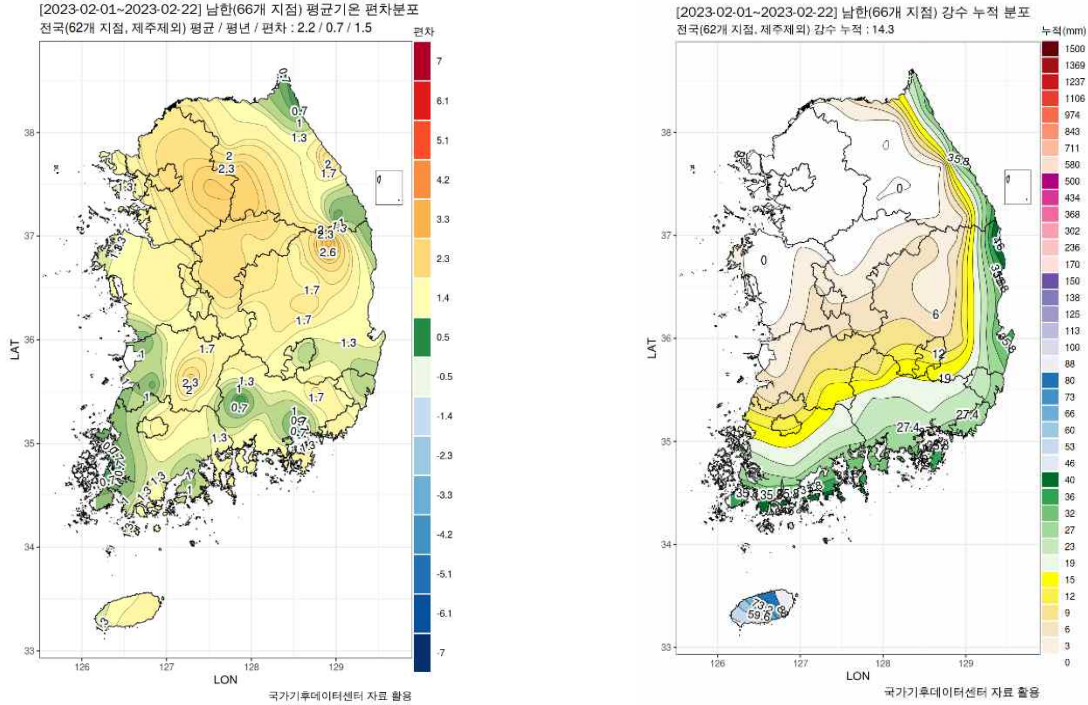
Zhang, W. et al. (2019) Impact of ENSO longitudinal position on teleconnections to the NAO. *Climate Dynamics*, 52, 257-274.

Kim, S., J-S. Kug and K-H. Seo (2020) Impacts of MJO on the intraseasonal temperature variation in East Asia, *Journal of Climate*, 33, 8903-8916.

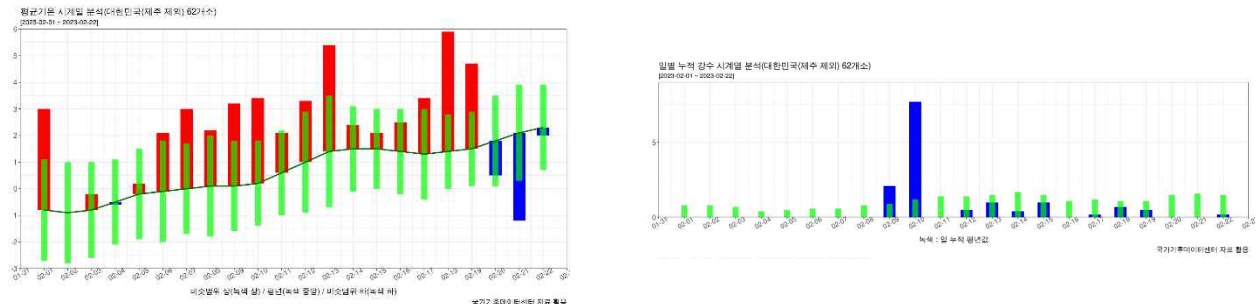
2023년 2월 기후분석 보고서

□ 2023년 2월 우리나라 기온과 강수량 현황과 특징

[Fig.1] 2023년 2월 우리나라 평균 기온 편차와 누적 강수량 분포도(2/1~22)



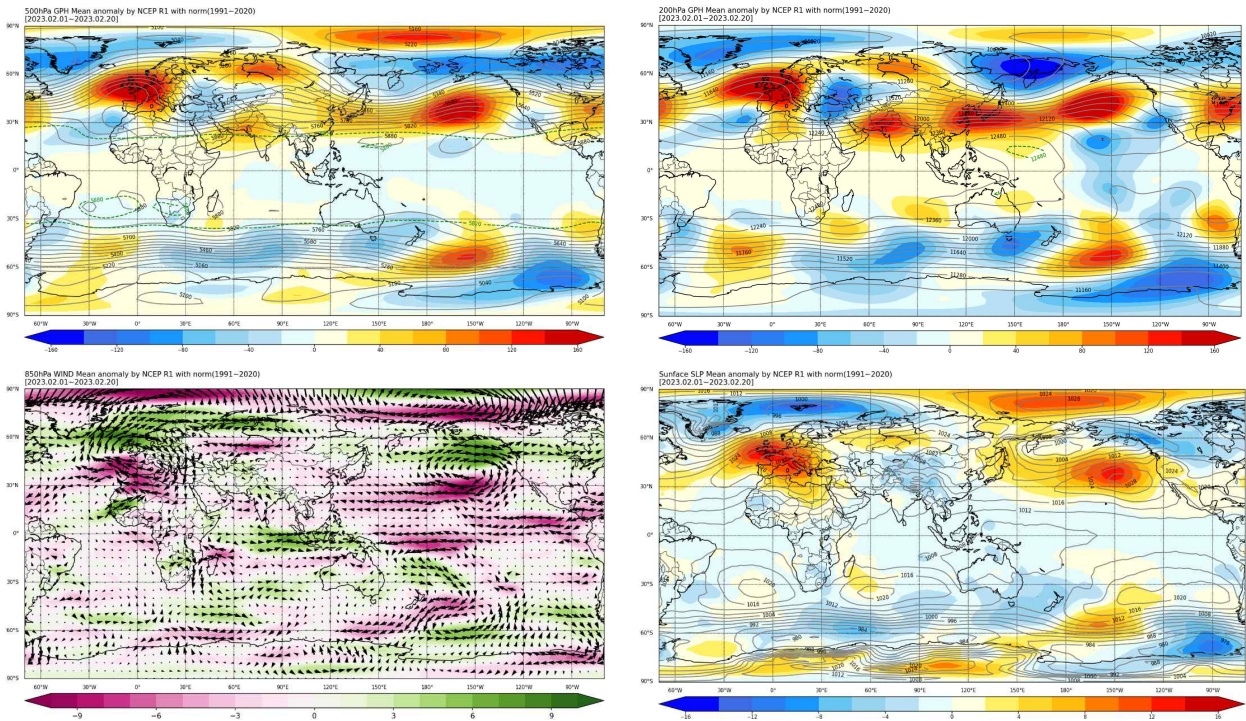
[Fig.2] 2023년 2월 우리나라 기온 편차와 누적 강수량 시계열



- 2월 22일 기준 전국 평균 기온은 2.2°C 로서 평년(0.7°C) 보다 1.5°C 높았으며(평년 비슷 범위는 $\pm 0.6^\circ\text{C}$), 전국 모든 지역에서 평년 보다 높은 기온을 기록함.
- 누적 강수량은 14.3mm(35.1 퍼센타일)으로 평년 비슷범위의 강수 내림(평년 비슷범 위는 13.2-33.4mm). 주로 남해안과 동해안 인접 지역에서 강수 발생함.
- 2월 초반과 후반을 제외하고 평균 기온은 양의 기온 편차를 보였으며, 기온 하강시에 도 평년 비슷범위 기온 아래로 크게 떨어지지 않았음.
- 2월9-10일 평년보다 많은 강수량을 기록하였으며, 이후 평년 비슷범위의 강수가 빈번 하게 내림.

□ 2023년 2월 전지구 순환장 특징

[Fig. 3] 2023년 2월 (1-20일) 평균 500hPa 및 200hPa 지위고도 편차 와 850hPa 바람 편차장, 해면 기압 편차장 (왼쪽 위부터 시계방향)

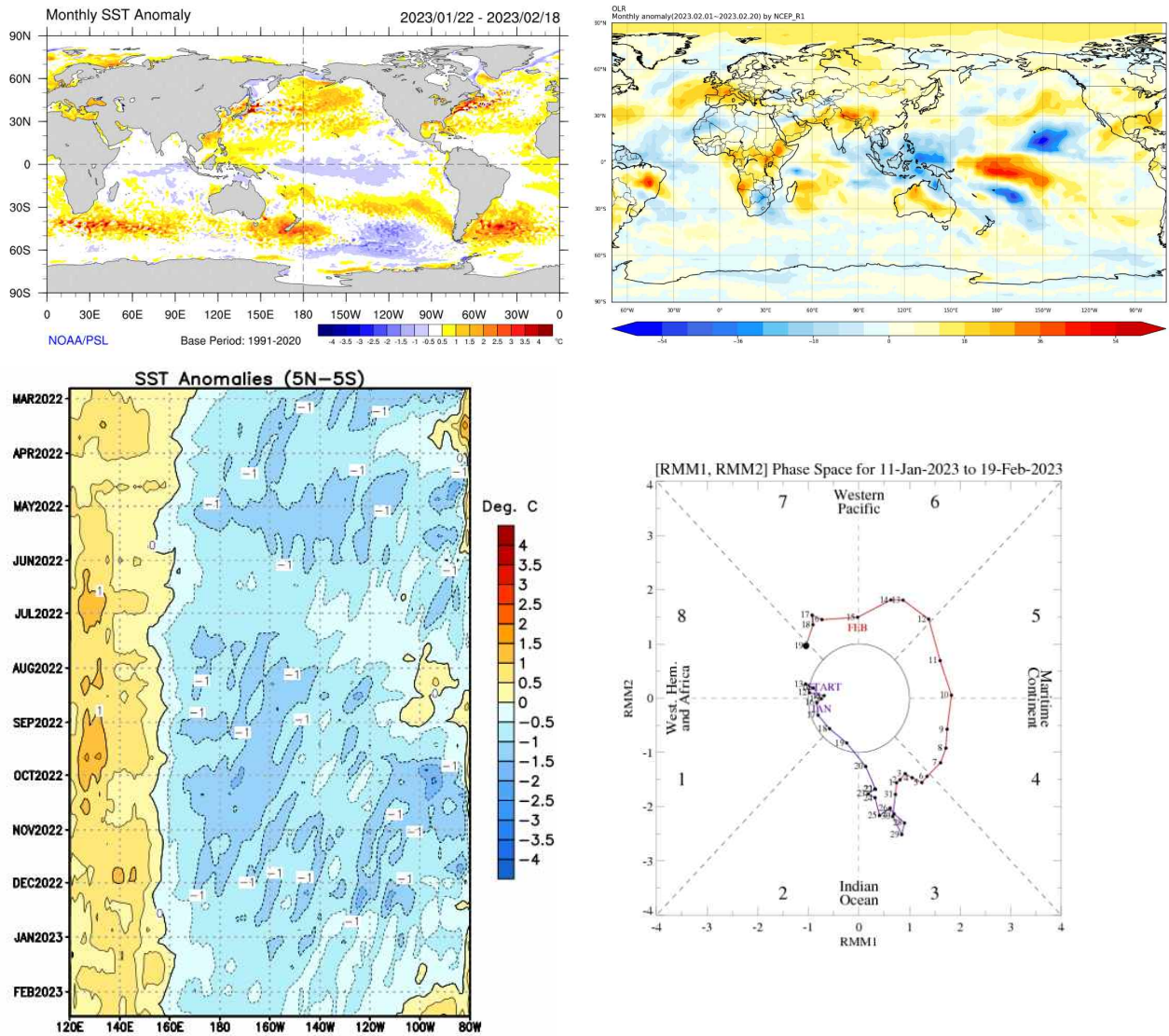


- 상층에서는 북대서양에서 서유럽, 북유라시아를 거쳐서 오는 파동과 서유럽, 남아시아를 거쳐서 오는 파동이 한반도에서 합쳐지는 구조임. 한반도 동편에서 북태평양 동편까지 길게 확장된 고기압성 순환 편차가 위치함. 위와 같은 파동 구조는 2월 내내 유지되어 한반도 기온 상승에 기여함. 위와 같은 한반도 주변 고기압성 편차 발달 때문에 2월 20-22일 제외하고 기압골이 한반도까지 내려오지 못한 것으로 보임.
- 하층에서는 대륙 고기압과 알류시안 저기압(양의 북태평양 고기압성 편차)이 약했음. 이는 약한 겨울 문순 구조이며, 한반도는 주로 고온 다습한 남풍의 영향을 받았음.
- 즉 한반도 주변 고기압성 순환 편차 때문에 2월 한반도 기온은 평년보다 높았으며, 평년 비슷 범위의 강수가 내림.

□ 2023년 2월 주요 인자 현황 및 한반도 고온 원인 분석

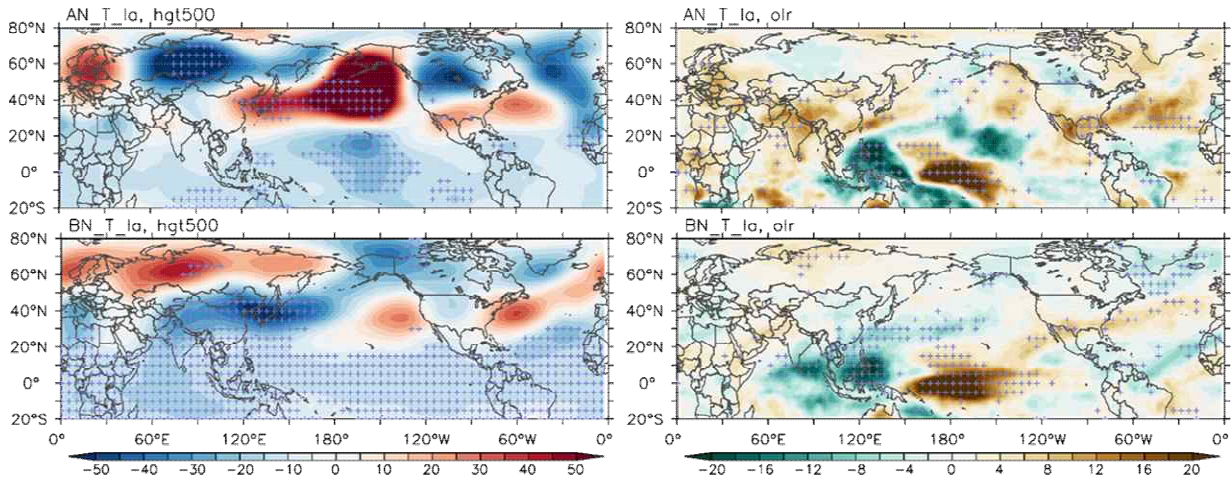
- 2월 한반도 주변 고기압성 순환 편차 발달은 MJO, 티벳 눈덮임, 양의 AO 발달과 관련된 것으로 분석됨

[Fig. 4] (왼쪽 위부터 시계방향으로) 월 평균 해수면온도 편차와 OLR 편차 분포, MJO diagram, 5N-5S 평균 해수면 온도의 경도별 시간별 변화 분포



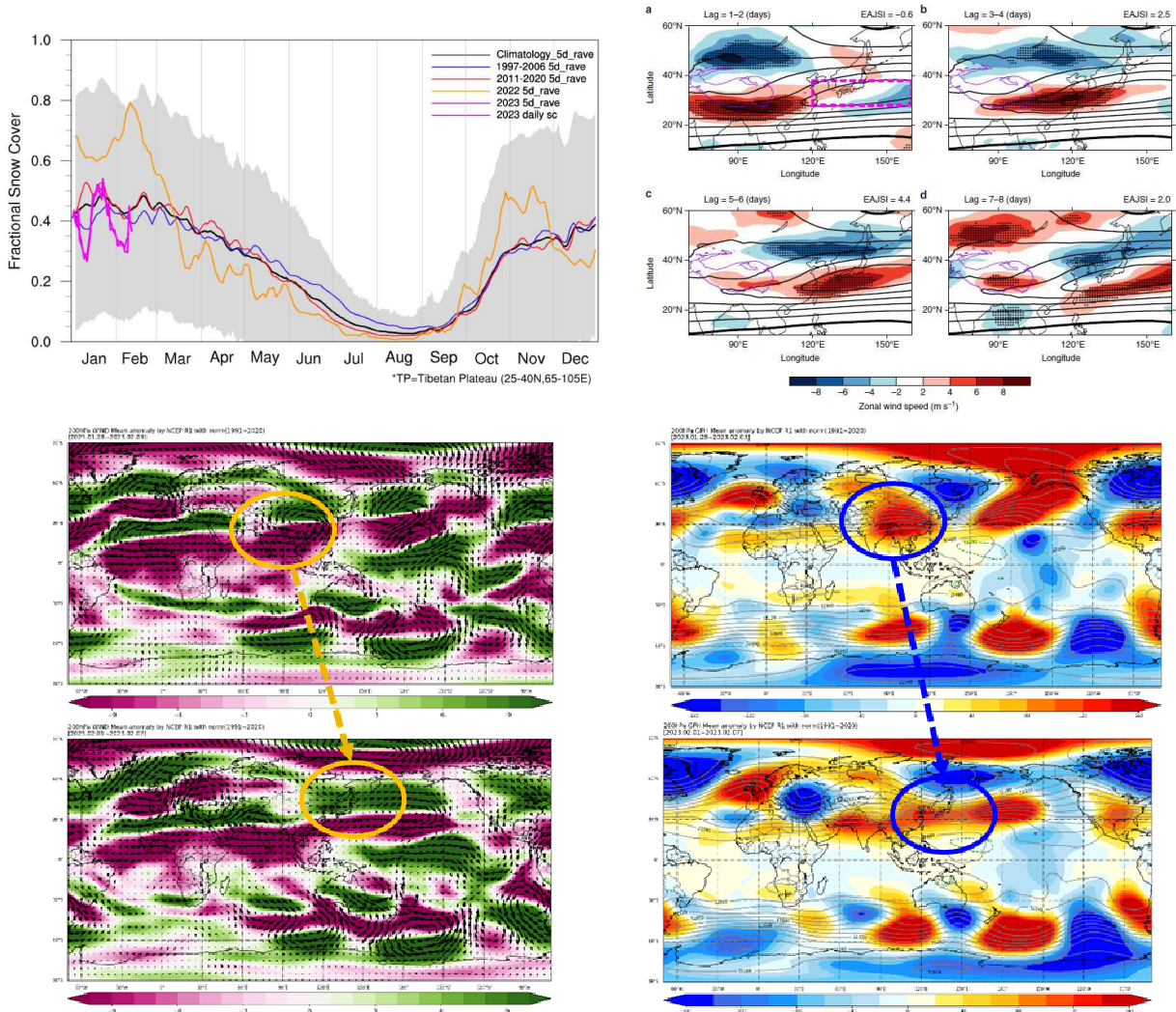
- 열대 태평양에서는 세 번 연속 라니냐 발달 후 쇠퇴하고 있는 상황이며, 2/18까지 주 평균 Nino3.4지수가 -0.5°C 까지 상승함.
- 남 인도양에서는 음의 해수면 온도 편차, 북대서양(특히 북미 동안)에서 강한 양의 해수면 온도 편차 보임.
- 인도양 대류 약화, Maritime Continents 지역과 열대 북서 태평양에서 대류강화 신호가 우세하였으며, 이는 위상 3-7에서 상당히 강한 상태를 유지하면서 인도양에서 태평양으로 동진한 MJO 발달과 관련됨.
- 특히 MJO 위상 6-7일 때 수 일 후 한반도 주변으로 고기압성 순환편차 발달 및 기온이 높은 경향성을 보임(Jeong et al. 2007). 그러므로, 2월 중순 기온 하강 수 일 후 다시 상승이 있었던 것은 MJO의 기여가 있는 것으로 보임.

[Fig. 5] (위) 라니냐 기간동안 평년보다 기온이 높았던 해와 (아래) 낮았던 해의 500hPa 지위고도 및 OLR 편차 합성장 분포



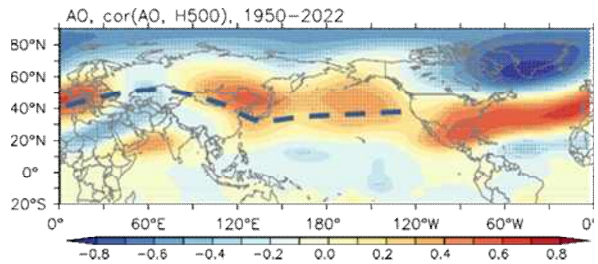
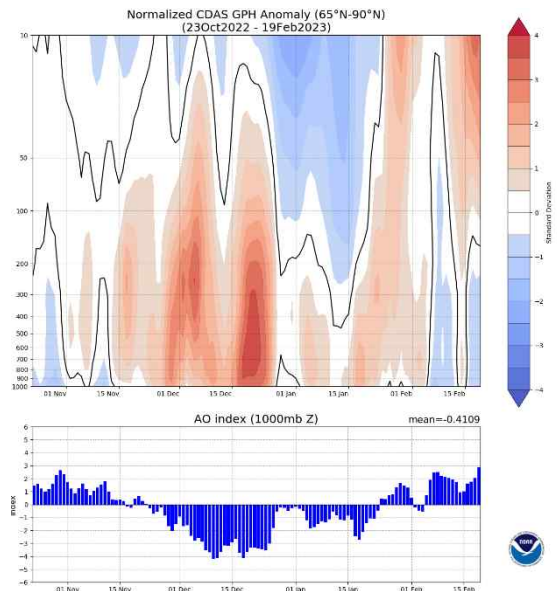
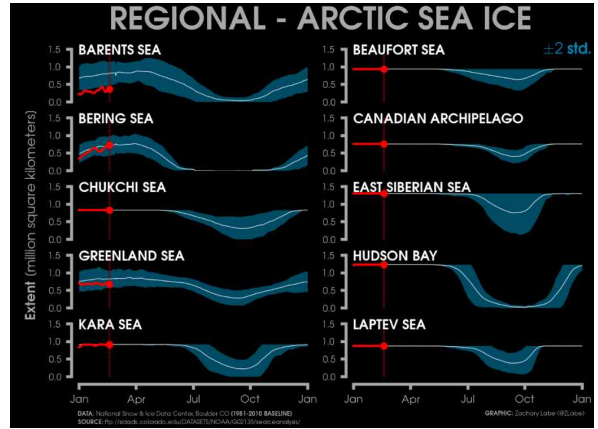
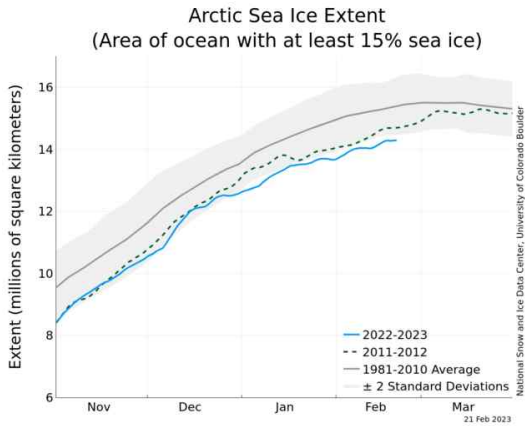
- 라니냐 해의 2월은 기온 낮고, 강수 적은 경향 우세하였으며, 기온 높은 경우는 1973년 이후 4번(1976, 1989, 2009, 2021) 있었음.
- 라니냐가 있고 한반도 기온이 평년보다 낮은 해에서는 인도양에서 서태평양까지 대류 활동 활발, 한반도 주변 저기압성 편차가 우세함.
- 라니냐와 평년보다 기온이 높은 해는 인도양 대류활동 약화, 서태평양 대류강화 신호, 티벳 고원 주변 대류 억제 신호가 나타남.
- 다른 인자들의 영향(즉 한반도 주변 고기압성 순환 편차)으로 라니냐의 영향인 한반도 주변 저기압성 편차는 상쇄된 것으로 보임.
- 특히, 티베 고원 주변 대류 억제 신호는 2022년 12월부터 눈덮임과 관련된 것으로 보임. 즉, 티벳 고원 음의 눈덮임과 한반도 주변 고기압성 순환 편차발달과 연결 지을 수 있을 것으로 판단됨.

[Fig. 6] (오른쪽 위에서 시계방향으로) 티벳 지역 눈덮임 월별 변화, 눈덮임 많을 때 주 시간 규모에서 상층 대기 순환 분포 변화(출처: Li et al. 2018), 상층 지위고도 및 바람장의 1/25-2/3 평균과 2/1-7 평균 편차장 분표



- 2022년 12월부터 현재까지 티벳 눈덮임 평년 보다 적은 상태 우세하였음.
- 일주 시간 규모에서 티벳 눈덮임이 적을 때 이 지역에서 양의 기온 편차와 상층 양의 지위고도 편차 발달과 관련이 있으며, 동쪽으로 전파하여 수 일내 한반도 주변 고기압성 순환 편차 발달을 가져옴(Li et al. 2018).
- 2월 주 평균 상층 대기 순환 편차장을 살펴 보면 티벳고원 상층에서 발달한 고기압성 순환 편차가 동진하여 수 일후 한반도 주변 고기압성 순환 편차 발달에 기여하는 것이 자주 관측됨.

[Fig. 7] 2023년 2월 북극 해빙, AO 현황



- 바렌츠해, 베링해와 그린란드 해를 제외하고 대부분 북극 해역에서 빙하는 다 채워진 상황임. 하지만 바렌츠 해에서 기록적으로 해빙이 적었기 때문에 북극 해빙 전체 면적은 평년보다 상당히 적은 수준임
- 북극 해빙이 상당히 적었음에도 불구하고, 양의 AO가 1월 중순부터 현재까지 이어지고 있음. 2월 양의 AO와 관련된 원격 상관 구조는 2월 유라시아에서 한반도를 거쳐 북태평양까지 확장된 양의 지위고도 편차구조를 특징으로 함.
- 2월 AO 관련 원격상관 구조가 2월 평균 편차장에서 잘 나타나고 있음, 그러므로 한반도 주변 양의 지위고도 편차장 발달에서 양의 AO 기여가 있었던 것으로 판단됨.

□ 요약

평년보다 높은 기온 , 평년 비슷 범위의 강수량을 보인 2월	
기온	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 전국적으로 평년보다 높은 기온 (1.5°C, 22일까지) ✓ 2월20-22일 제외하고 평균기온은 대부분 양의 기온 편차를 보였음. 기온 하강시에도 평년 비슷 범위 아래로 크게 떨어지지 않음 ✓ 주로 한반도 주변 고기압성 편차의 영향을 받음. ✓ 한반도 주변 고기압 발달은 적은 티벳 눈덮임, 양의 AO와 관련이 있음.
강수	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 평년 비슷범위의 강수량 (14.3mm, 22일까지) ✓ 주로 남해안과 동해안을 중심으로 강수 내림. ✓ 2월9, 10일 평년보다 많은 강수량은 한반도 동편으로 발달한 고기압성 순환 편차에 의한 남풍 유입과 관련됨.

□ 토의사항

- 2월 한반도 기온 상승에 기여한 한반도 주변 고기압성 편차 순환 발달에 대하여 티벳 눈덮임과 MJO의 기여가 있었는데, 다른 계절에도 비슷한 관계가 성립하는지 연구가 필요해 보임.
- 2월 파동 구조가 북대서양에서 출발하는 것으로 나타나는데, 2월 중위도에서 대기 흐름을 결정하는 북대서양의 역할 및 강제력에 대한 연구가 필요해 보임.

□ 예측 인자 기반 2월 기온/강수 예측 검증

출처	기온	2월
가이던스	11~12월 바렌츠 카라 해빙	-
	10월 바렌츠 해빙	-
	전년 9~10월 호주 SST	-
	전년 10월 걸프해 SST	-
	라니냐 지속	0/-
	AO & 라니냐	0/-
	최근 10년 경향(신평년)	3/3/4
	기계적 종합	-
	정성적 통합	-

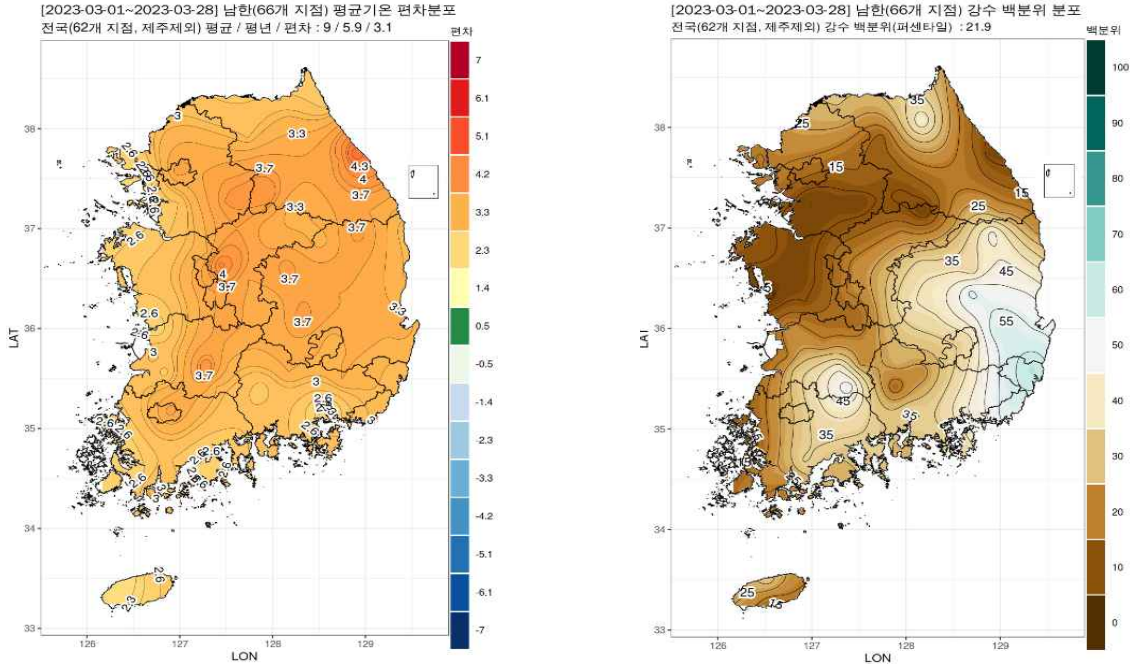
출처	강수	2월
가이던스	라니냐 & 음의 IOD	EC
	라니냐 지속	EC
	라니냐	0/-
	기온 강수 상관관계	+cor
	최근 10년 경향(신평년)	4/3/3
	기계적 종합	0-
	정성적 통합	0-

- 바렌츠 해빙이 상당히 적은 상황과 1월 중순까지 상당한 강한 음의 AO가 발달하고 있어서, 2월에도 음의 AO 유지될 것으로 전망함.
- 또한 일반적으로 과거 라니냐 해에서 2월은 한반도가 기온이 낮은 경향이 우세하기 때문에 관측 인자에 의한 종합적인 판단은 평년보다 낮은 기온으로 예측하였음.
- 바렌츠 해의 해빙이 2월에 상당히 적은 상황임에도 불구하고 양의 AO가 발달하였으며, 한반도 기온 상승에 기여한 한반도 주변 고기압성 순환 편차 발달의 한가지 원인인 평년보다 적은 티벳 눈덮임의 상황을 고려하지 못함. 2월 관측 인자로서 티벳 눈덮임을 포함 시키기 위한 추가적인 연구가 필요해 보임.
- 라니냐 동안 2월에 평년보다 적은 강수량 경향성과 최근 20년 (2000~2020)기간에서는 관계가 약해졌지만, 2월 기온과 강수의 강한 양의 상관관계를 기반으로 평년보다 적은 강수량을 전망함.
- 2월은 한반도 주변 고기압성 순환 편차 발달 관련 남풍 유입에 의한 강수 발달이 주요 원인이었기 때문에 한반도 주변 고기압성 순환 편차 발달에 대한 예측 실패는 강수 예측 실패로 이어짐.

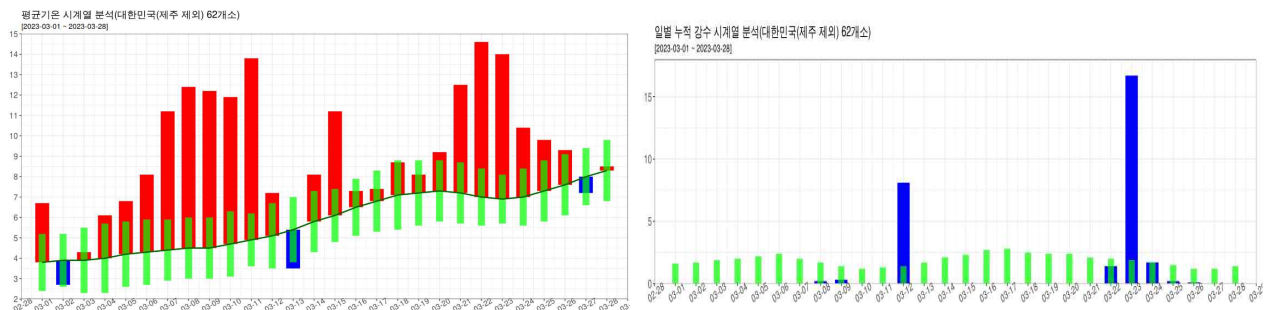
2023년 3월 기후분석 보고서

□ 2023년 3월 우리나라 기온 및 강수량 현황과 특징

[Fig.1] 2023년 3월(1~28일) 우리나라 기온과 강수량 분포도



[Fig.2] 2023년 3월(1~28일) 우리나라 기온과 강수량 시계열

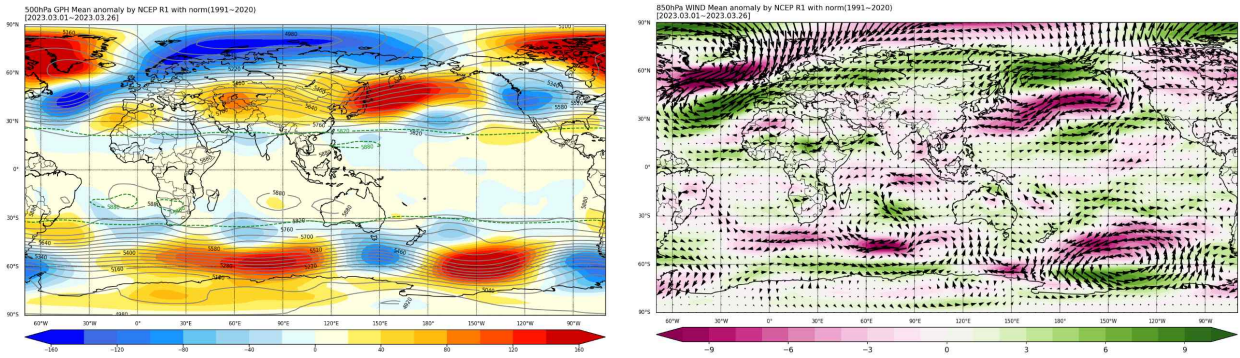


- 3월 전국 평균 기온(1~28일 평균 기준)은 9.0°C로 평년(5.9°C)보다 3.1°C 높았으며, 강수량은 28.7mm로 평년의 21.9%에 해당하는 낮은 값을 기록
(※ 3월 기온의 평년 비슷 범위는 ±0.5°C, 강수의 평년 비슷 범위는 42.7-58.5mm)
- (평균기온) 평년보다 매우 높은 기온으로 28일까지 역대 1위를 기록. 대륙고기압의 세력이 약하였고 대체로 이동성 고기압의 영향을 받아 강한 일사가 발생. 3월 7~11일에 서풍류를 따라 중국 대륙의 더운 공기가 유입되었고, 21~22일에 중국 남부 저기압과 이동성 고기압 사이의 강한 남풍이 우리나라에 유입됨
- (강수량) 평년보다 낮은 강수량으로 28일까지 하위 8위를 기록. 상층은 3월 전반적으로 동서로 폭넓게 형성된 양의 고도 편차역과 기압능이 지배적이고, 하층은 이동성

고기압의 영향권 내에 있으며 저기압은 북쪽과 남쪽으로 치우쳐서 이동. 12일은 저기압의 비활성화로 한랭 이류, 23일은 우리나라 남쪽에 위치한 저기압과 상층 기압골의 빠른 통과로 남동해안 일부 많은 강수 발생

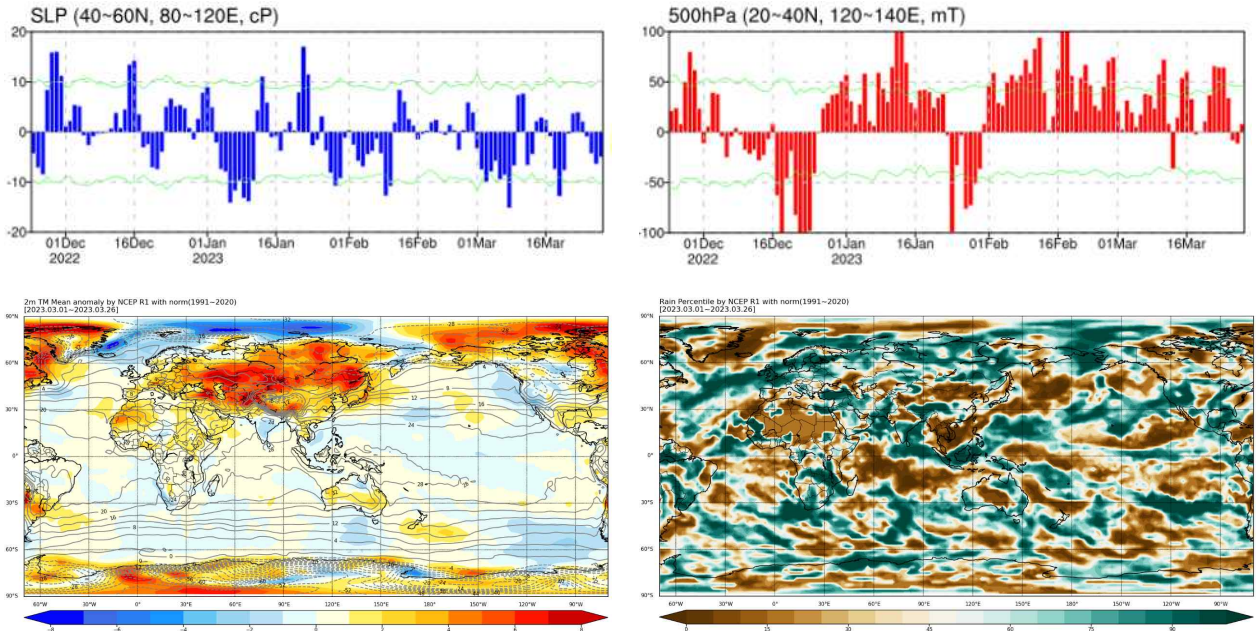
□ 2023년 3월 전지구 순환장 특징

[Fig. 3] 2023년 3월 평균 500hPa 지위고도 편차, 850hPa 바람 편차



- 500hPa 지위고도 편차는 북대서양 음의 NAO 패턴과 유라시아 북부지역에서 음의 편차가 나타나고, 중앙아시아, 동아시아, 북태평양에 걸쳐 양의 편차가 나타남
- 하층 바람 편차의 경우 북태평양에 강한 고기압성 흐름이 위치하여 동아시아 전반적으로 북풍 편차가 약화됨
- 우리나라는 이동성 고기압의 영향으로 고기압성 순환의 서쪽 가장자리에 위치하여 남북 방향 흐름이 약화됨

[Fig. 4] 2023년 3월 일별 대륙성 한대기단(cP), 해양성 열대기단(mT) 편차, 3월 평균 2m 기온편차, 강수량 퍼센타일

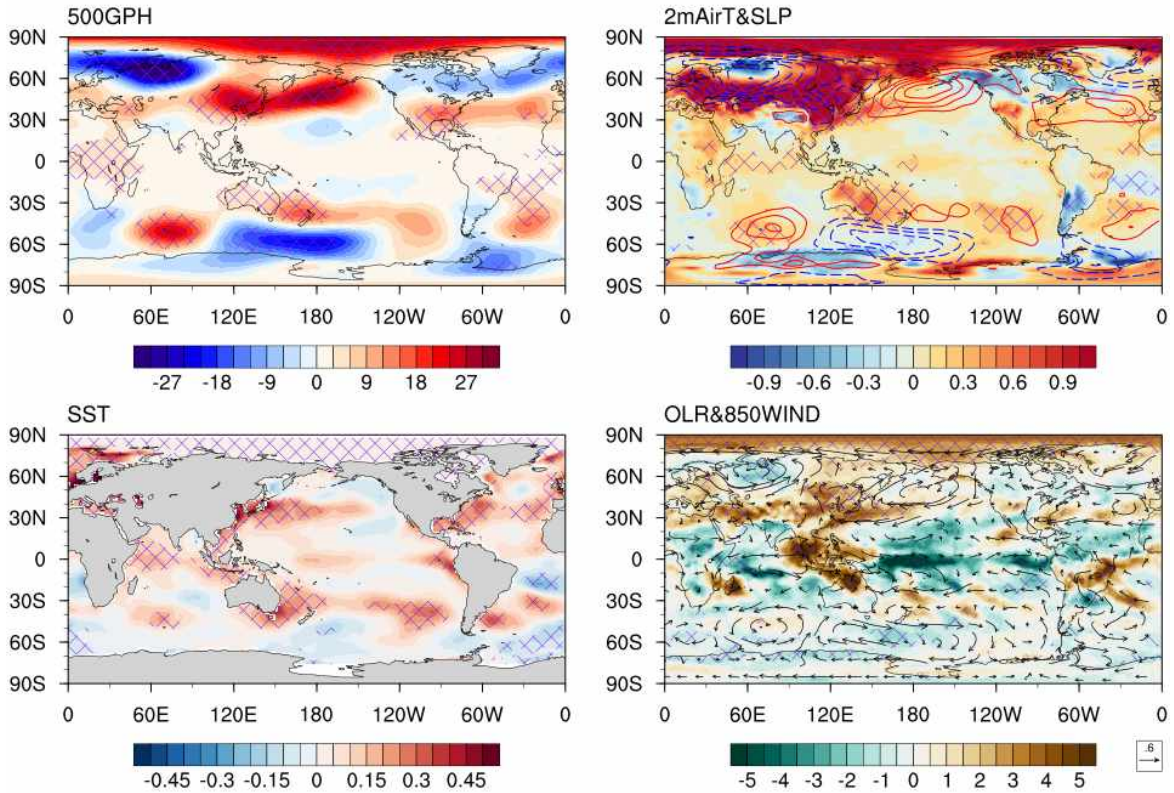


- 1월 말부터 지속적으로 대륙성 한대기단이 약해지고, 2월 초부터 해양성 열대기단이 강해짐. 우리나라는 열대기단의 영향이 커지면서 3월 고온 발생
- 유라시아 대륙 전역에 고온 편차가 나타나고, 우리나라 주변에는 동서 방향으로 평년보다 적은 강수량 발생

□ 3월 우리나라 기온과 전지구 순환장의 상관성

- 500hPa 지위고도의 경우 서시베리아에 저기압, 동아시아-북태평양에 고기압성 순환이 발달하고, 약한 양의 NAO와 관련성이 나타남
- 유라시아 대륙에 위치한 해면 저기압과 북태평양 해면 고기압, 그리고 북극의 전반적인 온난화에 의한 고온 관련성이 나타남
- 인도양, 중위도 북서태평양, 중위도 북대서양에 해수면온도의 상승이 나타나고, ENSO와의 관련성이 뚜렷하지 않지만 일부 Nino1+2 지역에서 유의미한 양의 관련성이 나타남
- 아라비아 해와 인도 지역에서 대류 활동이 활발하고, 열대 서태평양에는 대류 억제, 중위도 유라시아 대륙에는 동서 방향으로 긴 형태의 대류 억제가 나타나는 경향
- 2023년 3월 평균 500hPa 지위고도(그림 3)에서 시베리아 전역에 저기압, 동아시아-북태평양에 고기압이 발생하여 3월 우리나라 기온 관련 대기 순환장과 유사한 패턴이 관측됨. 우리나라는 북태평양 고기압의 서쪽에 위치하여 남풍의 영향을 받음

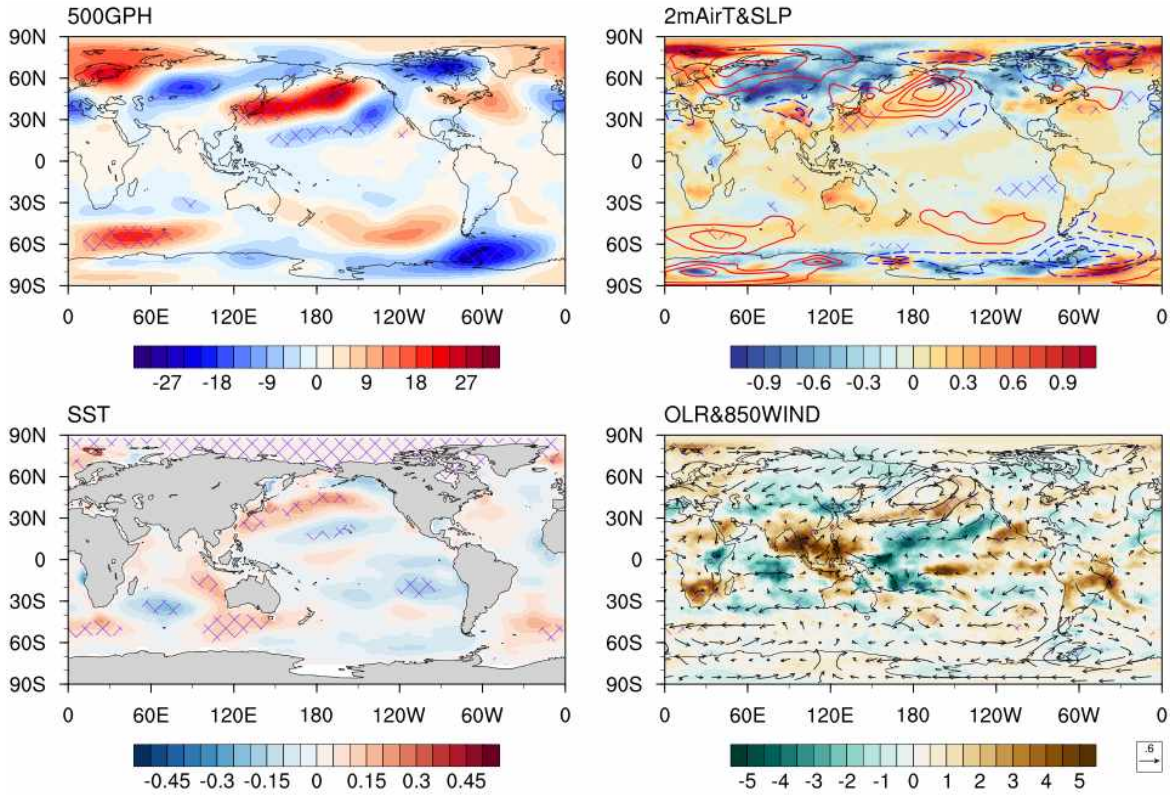
[Fig. 5] 3월 우리나라 기온과 500hPa 지위고도, 2m 온도/해면기압, 해수면온도, OLR/850hPa 바람장의 회귀분석



□ 3월 우리나라 강수와 전지구 순환장의 상관성

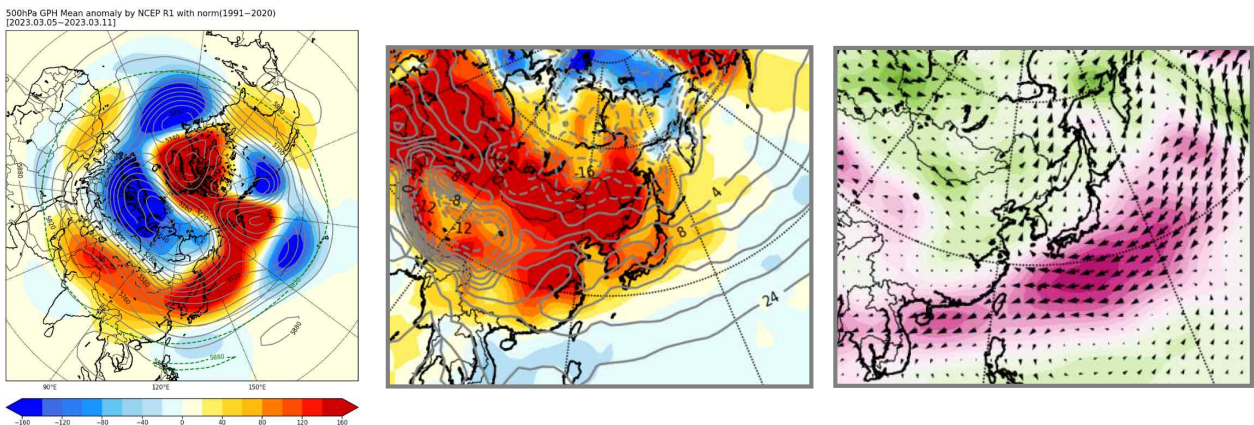
- 3월 우리나라 기온과 관련된 대기 순환장 패턴과 유사하게 500hPa 지위고도의 경우 우리나라의 동쪽에 고기압성 순환이 발달. 북유럽-바이칼 서쪽-동아시아로 파동 전파 형태의 관련성이 나타남
- 유라시아 대륙에 위치한 해면 고기압성 순환에 의한 저온 편차, 북태평양 해면 고기압성 순환에 의한 고온 편차가 나타나 우리나라는 한난 교차역에 위치함
- 중위도 북서태평양에는 양, 아열대 중태평양에서는 음의 해수면온도가 나타나고, 열대 중-동태평양에는 음의 상관성이 나타나지만 유의미하지 않음
- 벵갈 만과 서태평양에 대류 활동이 억제되고, 3월 우리나라 기온과 관련하여 우리나라를 포함한 유라시아 전역에 강수가 억제되는 것과 다르게 유라시아에 폭 넓은 대류 활동이 발생하는 경향이 있음
- 2023년 3월(그림 1)에 우리나라 동쪽에서 고기압이 관측됨. 북서태평양 고기압은 3월 우리나라 기온과 강수 발생에 영향을 주는 것으로 예상됨

[Fig. 6] 3월 우리나라 강수와 500hPa 지위고도, 2m 온도/해면기압, 해수면온도, OLR/850hPa 바람장의 회귀분석



□ 2023년 3월 상순 고온 특성

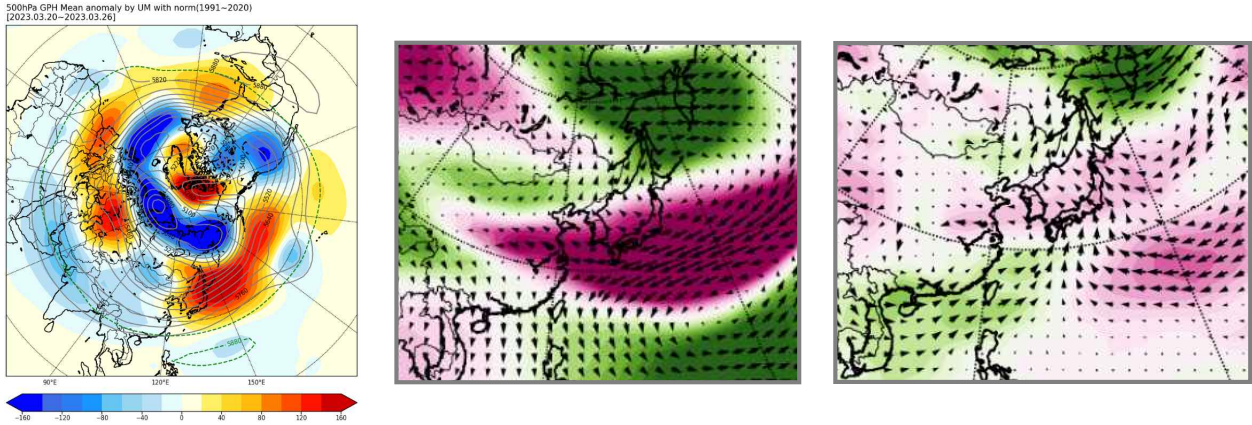
[Fig. 7] 3월 5~11일 평균 500hPa 지위고도, 지상 기온, 850hPa 바람 편차



- 유라시아 대륙에 동서 방향으로 폭 넓게 발달한 기압능의 영향으로 전체적으로 고온이 나타남
- 우리나라는 중국 대륙에서 발달한 더운 공기가 서풍을 통해 유입되고, 이동성 고기압의 영향으로 고온이 발생하였음

2023년 3월 하순 강수 특성

[Fig. 8] 3월 20~26일 평균 500hPa 지위고도, 200hPa 바람, 850hPa 바람 편차



- 우리나라의 남쪽에 지속적으로 정체전선이 위치(3월 21~25일)하였고, 23일 정체전선상 저기압이 북동진하여 상층의 지원이 부족. 동풍 편차 발생
- 기압능이 발달하고 우랄 부근으로 북서진하여 음의 편차 확대. 하층 수렴역이 우리나라의 남~남동쪽에 위치함

□ 요약

평년보다 높은 기온(상위 1위)과 적은 강수량(하위 8위)을 기록한 3월

기온	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 열대의 대류역이 유라시아 고온유도(고위도 정체된 파동과 중위도의 정체된 파동은 별도 위상) ✓ 약한 대륙고기압, 이동성고기압과 우리나라 북동쪽 양의 고도편차 + 강한 일사 ✓ (7~11일) 중국 대륙 고온 + 서풍 → 고온, (21~22일) 중국 남부 저기압 + 이동성고기압 → 남풍
강수	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 이동성고기압 영향 아래, 저기압 북쪽과 남쪽으로 치우쳐 이동 → 적은 강수량 및 강수일수 ✓ 12일 저기압, 23일 남쪽 저기압 모두 상층 커플링 동반되지 않음 → 적은 강수

□ 토의사항

3월 중층 지위고도 패턴이 warm SSW 발생 이후 패턴과 굉장히 유사하고 warm SSW에 의한 파수 1과 우리나라 고온 관련성이 큰 것으로 보이지만, 관련 연구가 부족함. 또한 성층권 돌연승온 발생에 대한 예측이 어려워 감시인자로의 활용에 대한 평가가 필요함

□ 3월 예측인자 검증

기온	3월
북서태평양 해수면온도	+
유럽 눈 덮임	+
기온/강수 상관관계	0
최근 10년 경향(신평년)	0/2/8
종합	+

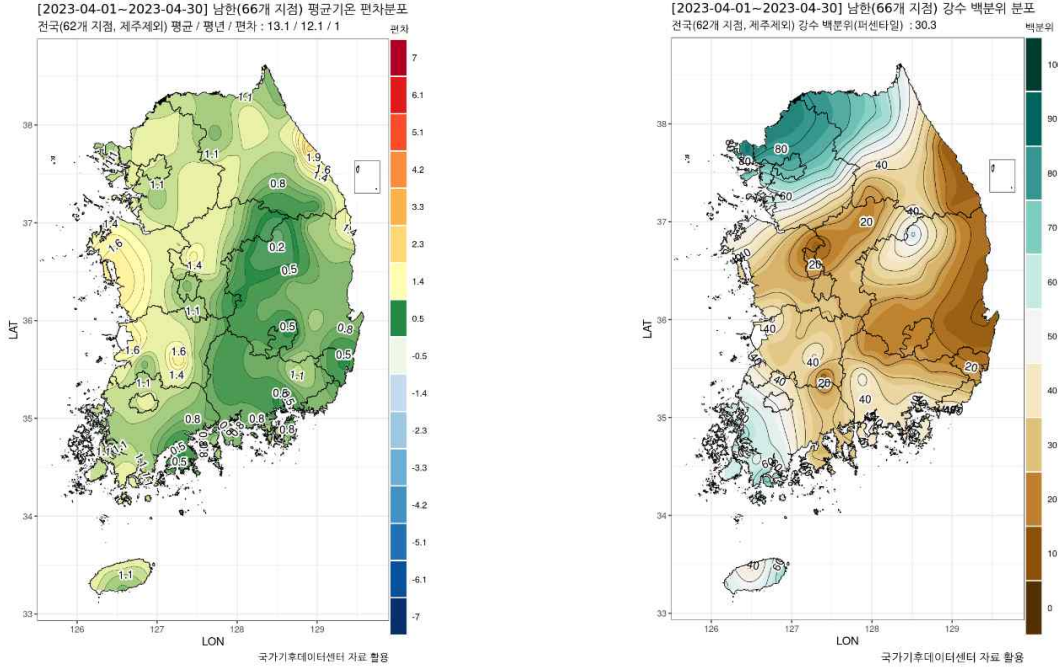
강수	3월
기온/강수 상관관계	0
최근 10년 경향(신평년)	4/1/5
종합	0

- 2월 북서태평양 해수면온도는 2015년부터 지속적으로 양으로 나타나며, 2월 유럽의 눈 덮임은 평년보다 적어 3월 기온 상승에 기여할 것으로 예측하였음. 특히 최근 10년 동안 8번의 고온이 발생하여 고온 경향성이 크게 나타남
- 특별한 강수 예측인자가 없는 가운데 최근 경향을 고려하여 평년 비슷 수준으로 예측하였으나 평년보다 강수가 적었음

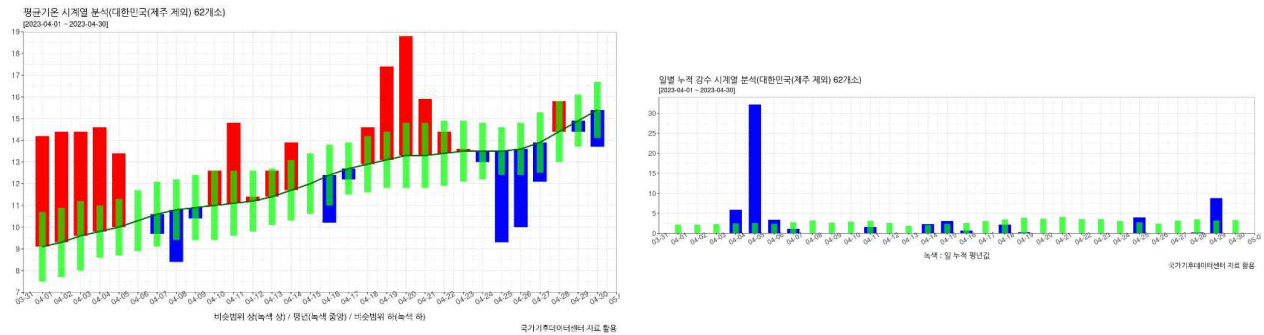
2023년 4월 기후분석 보고서

□ 2023년 4월 우리나라 기온 및 강수량 현황과 특징

[Fig.1] 2023년 4월(1~30일) 우리나라 기온과 강수량 분포도



[Fig.2] 2023년 4월(1~30일) 우리나라 기온과 강수량 시계열

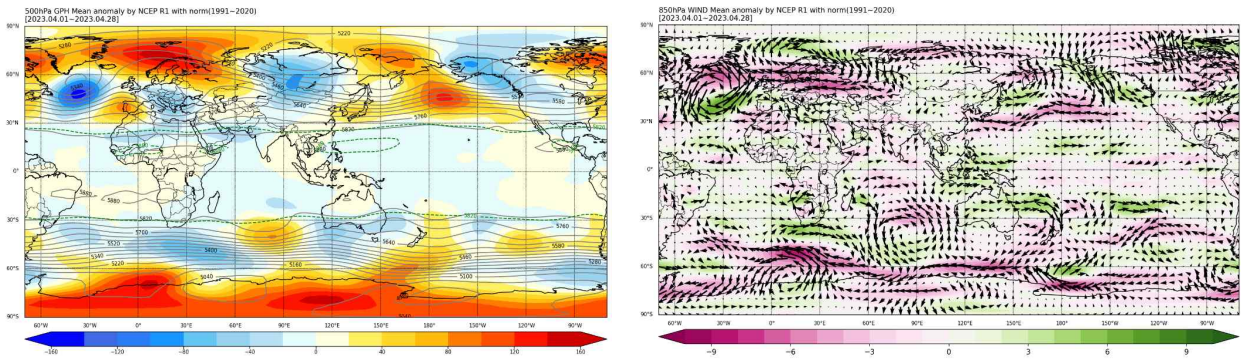


- 4월 전국 평균 기온(1~30일 평균 기준)은 13.1°C로 평년(12.1°C)보다 1.0°C 높았으며, 강수량은 66.3 mm로 평년의 30.3%에 해당하는 낮은 값을 기록 (그림 1)
(※ 4월 기온의 평년 비슷 범위는 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 강수의 평년 비슷 범위는 70.3-99.3 mm)
- (평균기온) 평년보다 높은 기온으로 상위 9위 기록. 고기압성 편차의 발달과 지속에 의한 남풍 편차의 영향 및 대체로 이동성 고기압의 영향을 받아 일사에 의한 고온 발생. 4월 1~5일에 고기압성 편차의 서쪽에 위치한 남풍류를 따라 더운 공기가 유입되었고, 18~22일에 우리나라 북서쪽과 남동쪽에 위치한 고기압 사이의 강한 남풍이 우리나라에 유입됨. 25~27일에 이동성 저기압의 영향으로 기압골이 통과하고 고기압의 가장자리에 발생한 북풍에 의해 저온이 나타남

- (강수량) 평년보다 낮은 강수량으로 하위 18위 기록하였으며 강수일수는 9.6일로 상위 16위. 4월 4~6일에 대부분의 강수가 발생하였으며 이동성 저기압의 통과로 고기압과 저기압성 편차 사이에 위치한 남서풍 편차의 영향을 받음

□ 2023년 4월 전지구 순환장 특징

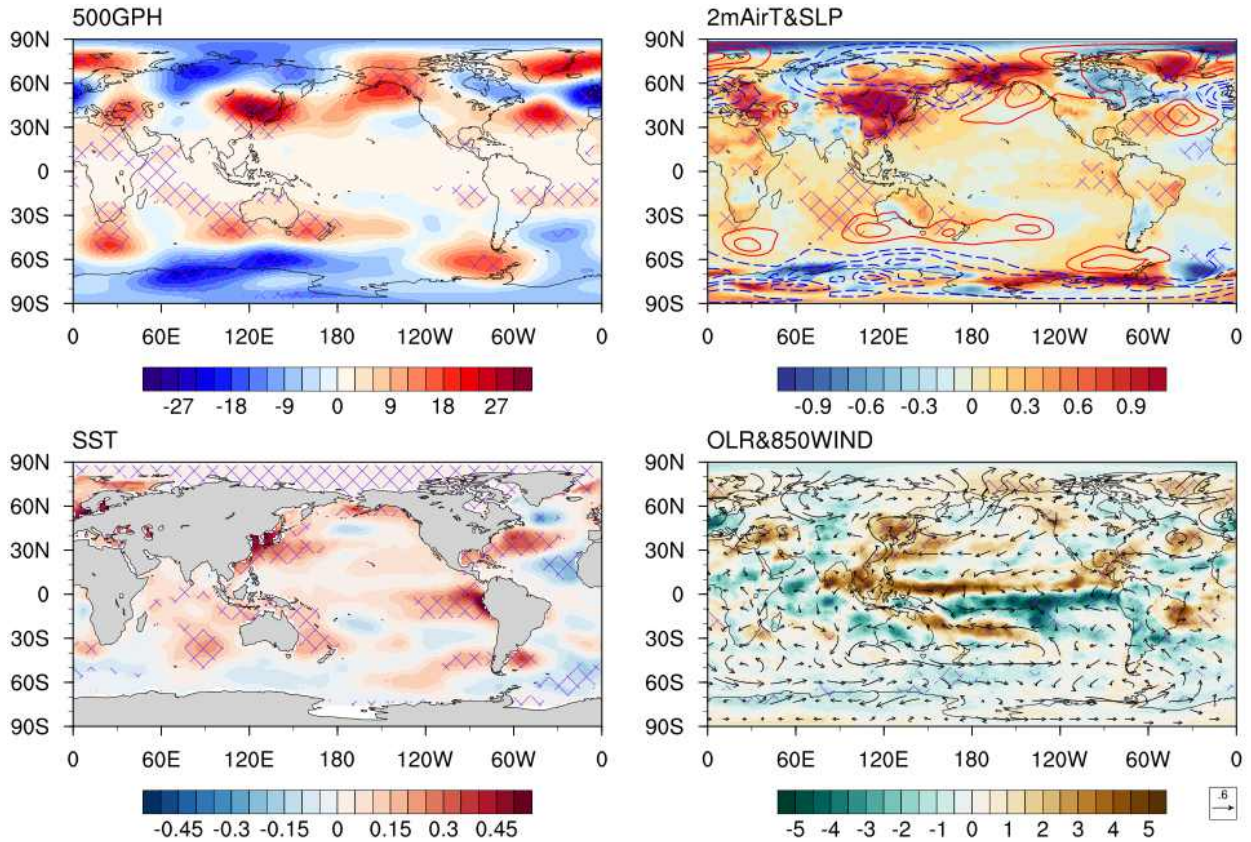
[Fig. 3] 2023년 4월 평균 500hPa 지위고도 편차, 850hPa 바람 편차



- 500hPa 지위고도 편차는 고위도에서 북대서양 음의 NAO 패턴과 유라시아 북부 음의 편차가 나타나고, 중위도에서 동아시아-북태평양에 걸쳐 양의 편차가 나타남
- 하층 바람 편차의 경우 북태평양에 강한 고기압성 흐름이 발생하였고, 우리나라는 고기압성 순환의 서쪽 가장자리에 위치하여 북풍 편차가 약화됨

□ 4월 우리나라 기온과 전지구 순환장의 상관성

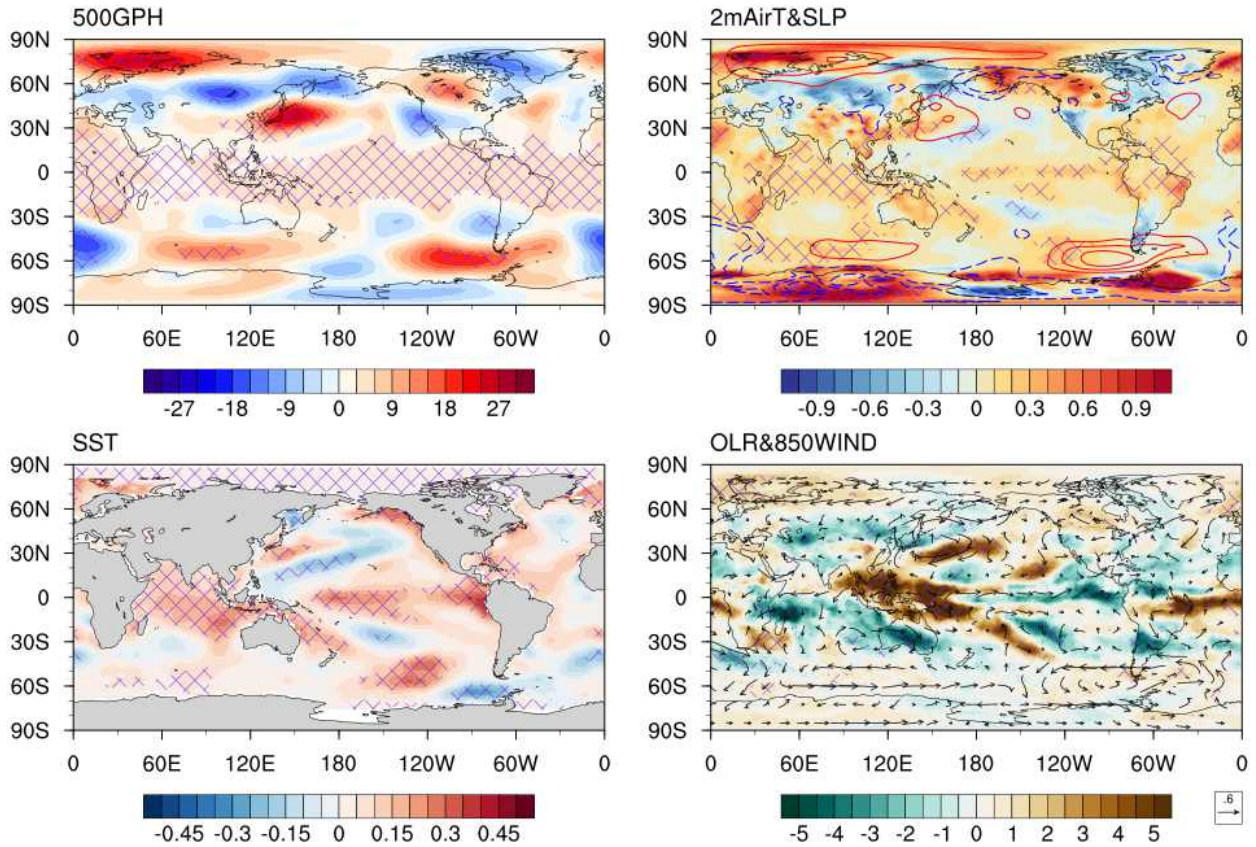
[Fig. 4] 4월 우리나라 기온과 500hPa 지위고도, 2m 온도/해면기압, 해수면온도, OLR/850hPa 바람장의 회귀분석



- 500hPa 지위고도의 경우 서시베리아에 저기압, 동아시아-북태평양에 고기압성 순환 편차 발달. 유라시아 대륙에 해면 저기압 편차가 발달하여 대륙 고기압이 약화되고, 남풍 기류의 유입으로 인해 아시아 일대의 기온이 상승하는 경향
- 우리나라 연근해를 포함한 중위도 북서태평양, 열대 동태평양 해수면온도와 유의미한 양의 관련성이 나타남. 북대서양에는 삼극자 형태의 해수면온도 편차 발생
- 동인도양에서 동태평양에 이르기까지 적도를 따라 음의 강수 편차가 나타나고, 우리나라를 포함한 동아시아 지역에 음의 강수 편차 발생
- 2023년 4월 평균 500hPa 지위고도(그림 3)에서 시베리아 지역에 저기압, 동아시아-북태평양에 고기압이 발생하여 4월 우리나라 기온 관련 대기 순환장과 유사한 패턴이 관측됨. 우리나라는 북태평양 고기압의 서쪽 가장자리에 위치하여 남풍의 영향을 받음

□ 4월 우리나라 강수와 전지구 순환장의 상관성

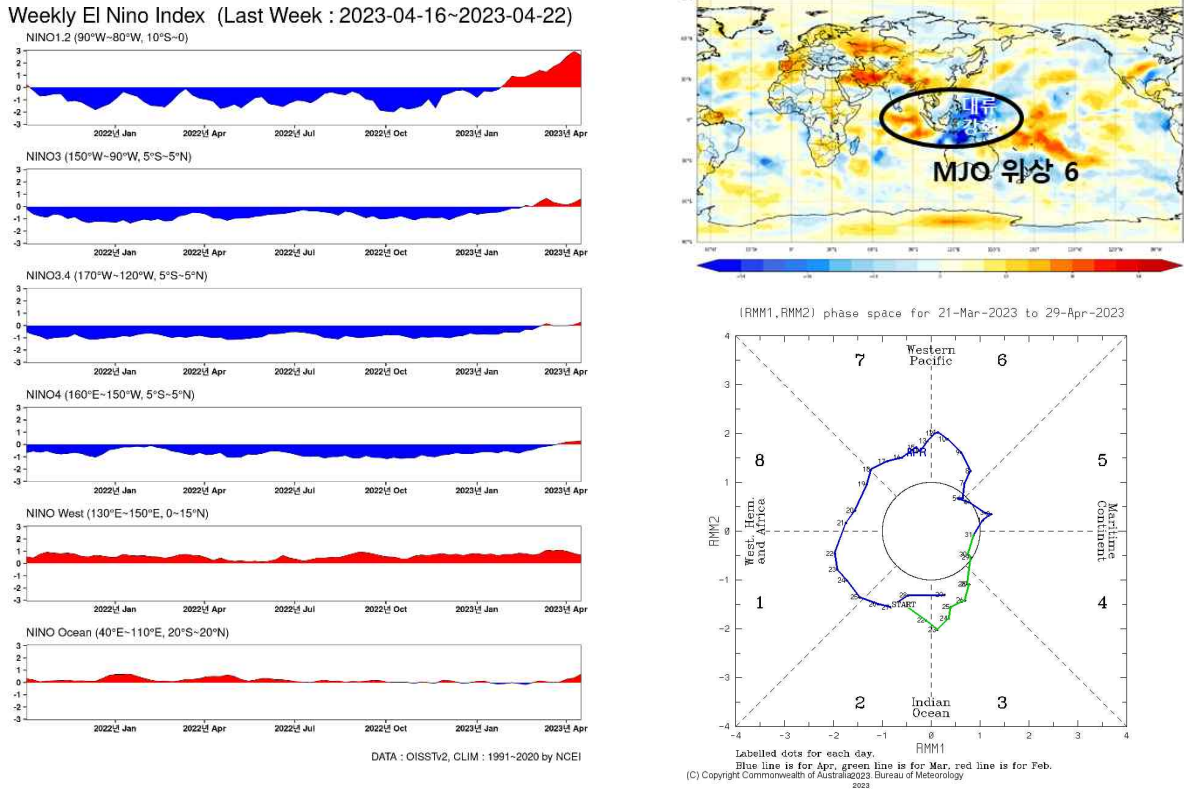
[Fig. 5] 4월 우리나라 강수와 500hPa 지위고도, 2m 온도/해면기압, 해수면온도, OLR/850hPa 바람장의 회귀분석



- 4월 우리나라 기온과 관련된 대기 순환장 패턴과 유사하게 500hPa 지위고도의 경우 우리나라의 서쪽에 저기압, 동쪽에 고기압성 순환이 발달하며 그로 인한 남풍 편차 유입. 북유럽-바이칼 서쪽-동아시아로 파동 전파 형태의 관련성이 나타남. 해면기압의 경우 우리나라 남동쪽에 위치한 고기압과 서쪽의 저기압성 순환이 나타나며 그 사이로 남풍 편차 유입
- 인도양 해수면온도 편차는 유의미한 양의 상관성을 나타내며, 엘니노 패턴과 유사하게 열대 중-동태평양 해수면온도 편차가 상승하는 경향. 북서태평양 지역의 해수면온도 편차는 음의 상관성을 나타냄
- 벵갈 만과 열대 서태평양 지역의 대류 활동이 억제되고, 우리나라를 포함하여 유라시아 전역의 북위 30-50도에는 대류 활동이 발생하는 경향
- 2023년 4월(그림 3)에 우리나라 동쪽에서 고기압이 관측됨. 중위도에 위치한 북서태평양 고기압은 4월 우리나라 기온과 강수 발생에 영향을 주는 것으로 예상됨

□ 2023년 4월 열대 현황

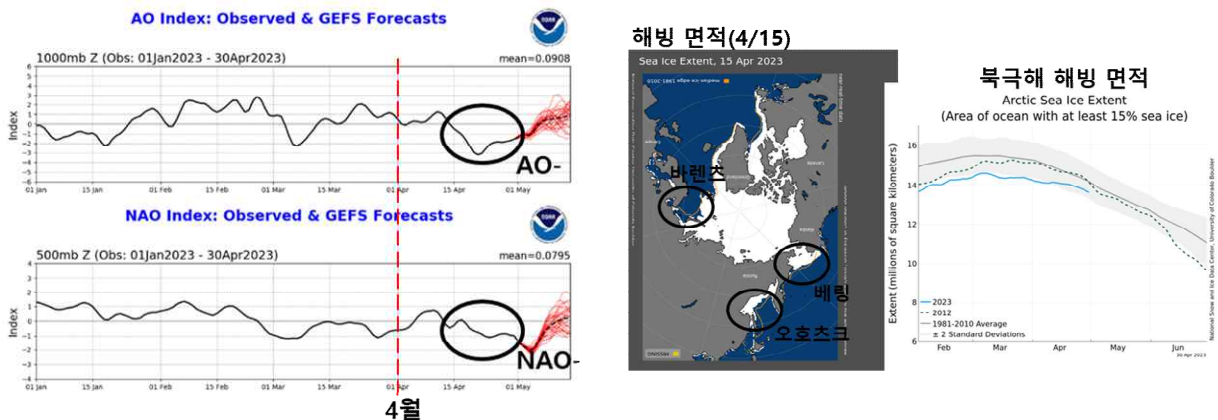
[Fig. 6] 엘니뇨 지수 시계열, 4월 3-9일 평균 OLR 편차 및 MJO 위상 다이어그램



- Nino1+2 지역에서 급격한 해수면온도 상승(2.6°C)이 나타났으며, 엘니뇨·라니냐 감시 구역인 Nino3.4 지역은 0.3°C의 양의 해수면온도 편차를 기록함
- 강한 MJO가 발생하였으며, 특히 4월 1주의 MJO 위상 6과 관련된 열대 서태평양의 대류 강화가 뚜렷함

□ 2023년 4월 북극 진동/해빙 현황

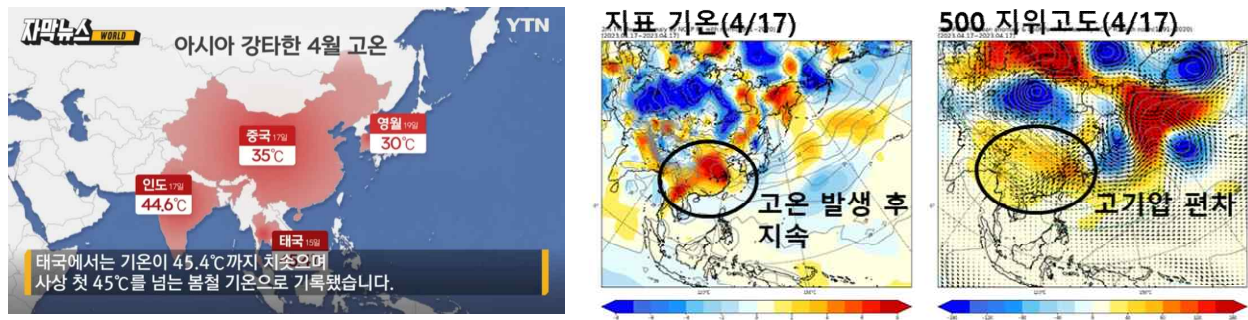
[Fig. 7] AO/NAO 지수 시계열, 북극해 해빙 면적 분포(4월 15일 기준) 및 시계열



- 4월 중순 이후 강한 음의 북극 진동(AO)과 북대서양 진동(NAO) 발생
- 평년보다 적은 북반구 해빙 면적 기록(4월 평균 기준 하위 10위). 특히 오호츠크, 베링, 바렌츠 해에서 적은 해빙 분포를 나타냄

□ 2023년 4월 중순 우리나라/아시아 고온 현상

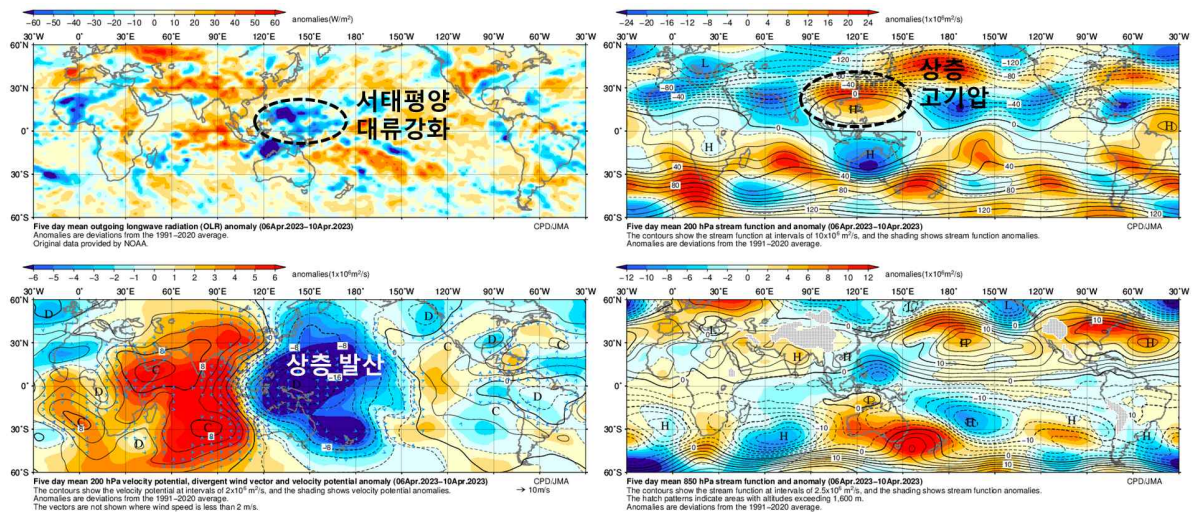
[Fig. 8] 2023년 4월 고온 현황, 지표 기온 및 500 지위고도 편차(4월 17일)



- 2023년 4월 중순에 아시아 전역에서 기록적인 폭염이 발생함. 우리나라도 19일에 강원도 영월의 일 최고기온이 30°C에 육박하는 등 이례적으로 고온이 관측됨
- 4월 초부터 중순까지 인도차이나 반도에서 발생한 고기압성 흐름이 중국 남부지방으로 확장하여 찬 대륙 고기압이 지속되지 못하고 따뜻한 이동성 고기압으로 변질되었으며, 우리나라는 이동성 고기압의 영향을 주로 받는 가운데 남풍 계열의 바람이 자주 불어 고온을 기록함. 고기압성 편차는 MJO의 대류 활동, NAO 원격상관, 아시아 지역의 극심한 가뭄이 영향을 준 것으로 보임

○ MJO 대류 활동 영향

[Fig. 9] 2023년 4월 6-10일 평균 OLR, 200hPa 유선함수, 800hPa 유선함수, 속도포텐셜 편차(왼쪽 위부터 시계방향)

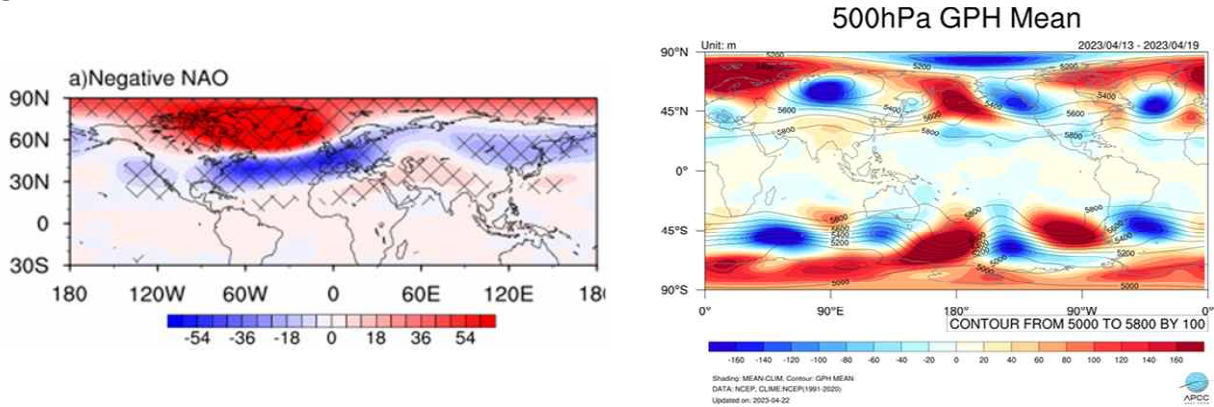


- 4월 초중순에 발생한 MJO 위상 6(인도양 대류 억제 및 서태평양 대류 강화 패턴)에 의해 열

대 서태평양 지역에 강한 대류 발달. Gill-type 반응으로 대기 상층 발산 및 고기압성 순환을 유도하여 아시아 지역에 고기압성 편차의 영향을 증가시키는 역할을 함

○ NAO 원격상관 영향

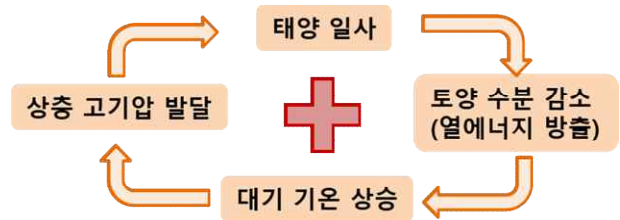
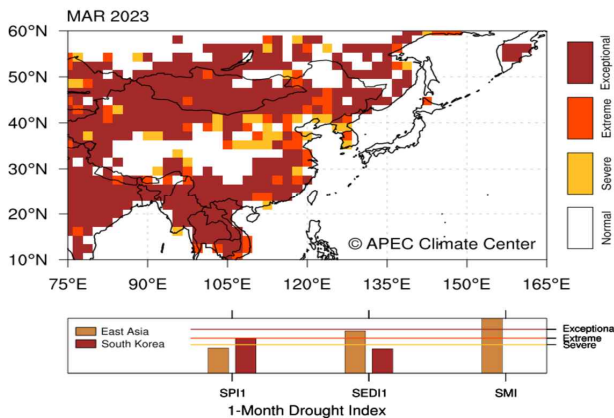
[Fig. 10] 봄철(2-4월) 음의 NAO의 500 지위고도 편차 합성장, 2023년 4월 13-19일 평균 500 지위고도 편차



· 4월 중순 이후 강한 음의 NAO가 발생(그림 7)하였으며, 봄철 음의 NAO 관련 500hPa 지위 고도 편차의 합성장 분포(유라시아 지역 음의 지위고도, 아시아 지역 양의 지위고도 편차 분포)와 2023년 4월 중순 편차의 분포가 상당히 유사함. 음의 NAO 발생에 의한 파동 전파가 아시아 지역의 고기압성 편차를 강화하는 역할을 한 것으로 보임

○ 아시아 지역 가뭄 영향

[Fig. 11] 2023년 3월 가뭄 분포, 지면-대기 상호작용 모식도



· 2022년 가을부터 2023년 봄에 이르기까지 아시아 대부분의 지역에서 극심한 가뭄이 관측됨. 음의 NAO 원격상관 및 MJO의 대류 반응에 의해 발생한 아시아 지역의 상층 고기압성 편차가 가뭄을 강화하는데 영향을 줄 수 있음. 또한 상층에 형성된 고기압은 일사를 더욱 강화하는 양의 되먹임 현상으로 이어져 폭염-가뭄을 지속시키는 역할을 함

※ 지면-대기 상호작용: 태양 일사에 의해 토양 수분이 감소하면 증발에 쓰이지 못한 열

에너지가 방출되어 대기 기온을 상승 시킴. 더워진 대기 하층의 영향으로 상층에는 고기압이 형성되고 이는 일사를 더욱 강화시키는 양의 되먹임 현상으로 이어져 장기간 폭염-가뭄이 지속됨

□ 요약

평년보다 높은 기온(상위 9위)과 적은 강수량(하위 18위) 기록	
기온	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 평년보다 높은 기온 ✓ 고온: 약한 대륙 고기압, 이동성 고기압의 영향 (4월 중순) MJO 대류활동, NAO 원격상관, 봄철 가뭄에 의한 고기압 편차 발생 및 강한 일사 영향 ✓ 저온: 이동성 저기압의 영향
강수	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 평년보다 적은 강수 ✓ 이동성 저기압의 영향으로 강수 발생

□ 토의사항

- MJO, NAO, 가뭄이 비슷한 시기에 발생하여 4월 중순에 발생한 우리나라 및 아시아 지역의 고온에 더 큰 영향을 줄 수 있지만, 이 중 어떤 현상이 중요한지 등 각각의 역할에 대한 추가적인 연구가 필요함
- 4월 우리나라의 기온과 강수는 El Nino 쇠퇴 시에는 관련성이 일부 나타나는데 La Nina 쇠퇴의 경우 뚜렷하지 않음
- MJO 위상 6과 관련된 열대 서태평양의 대류 활동은 상층의 대류 발산으로 고기압 발달에 영향을 줄 수 있으나, PJ(Pacific-Japan) 패턴과 같은 여름에 주로 나타나는 현상으로는 이해하기 어려움
- 스페인 지역을 중심으로 위치한 고기압 편차는 음의 NAO 반응으로 이해할 수 있음
- 4월 중순 이후 강하게 지속된 음의 NAO는 4월 말에 발생한 우리나라의 저온에 영향을 줄 수 있지만 이 시기에는 이동성 저기압 통과에 의한 기압골의 영향이 더 중요한 것으로 보임

□ 4월 예측인자 검증

기온	4월
2월 북미 동안 해수면온도	+
3월 유럽 눈 덮임	+
기온/강수 상관관계	0
최근 10년 경향(신평년)	1/2/7
종합	+

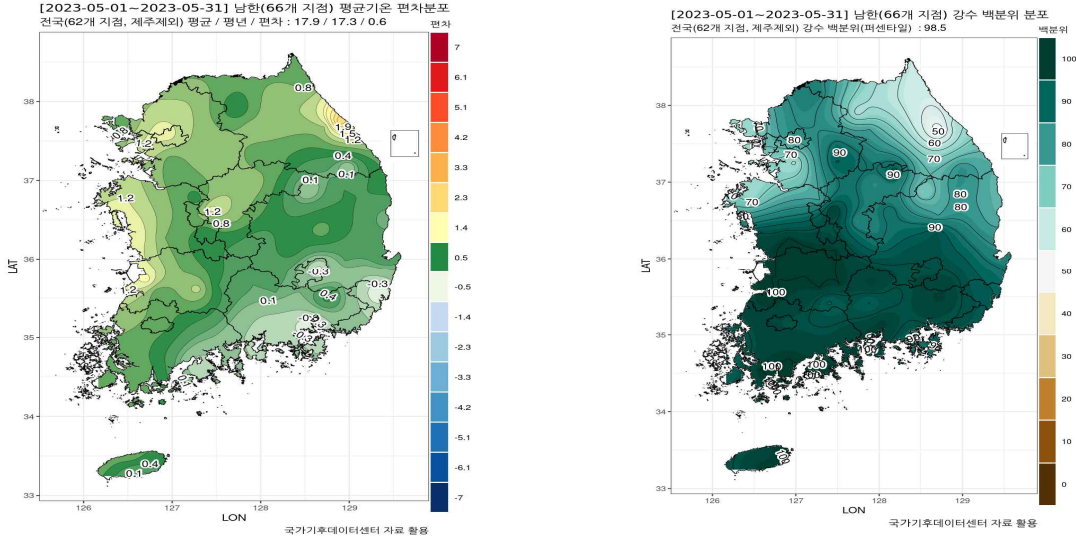
강수	4월
2월 Nino3.4	0
기온/강수 상관관계	0
최근 10년 경향(신평년)	3/4/3
종합	0

- 4월 우리나라의 기온 예측인자인 2월 북미 동안 해수면온도(상관계수 0.42, 정확도 55.6%)가 상승하여 양의 관련성을 보이며, 3월 유럽 눈덮임(상관계수 -0.32, 정확도 55.6%)은 감소하여 양의 관련성을 나타냄. 4월 우리나라 기온과 강수는 양의 상관성을 나타내며 최근 20년을 기준으로 상관관계가 강해졌지만 유의미하지 않음. 최근 10년 동안 4월에는 주로 고온이 발생하는 경향. 기온 예측인자와 최근 10년의 경향을 고려하였을 때 고온 발생이 예측되었으며 실제 고온이 관측됨
- 4월 우리나라 강수 예측인자인 2월 Nino3.4 지수(정확도 60%)는 평년과 비슷한 수준으로 관측되었고, 최근 10년 동안 발생한 강수에서 특별한 경향이 나타나지 않음. 강수 예측인자와 최근 10년의 경향을 고려하였을 때 평년과 비슷한 강수량을 예측하였으나, 실제 평년보다 적은 강수량을 기록하여 예측이 적중하지 않음

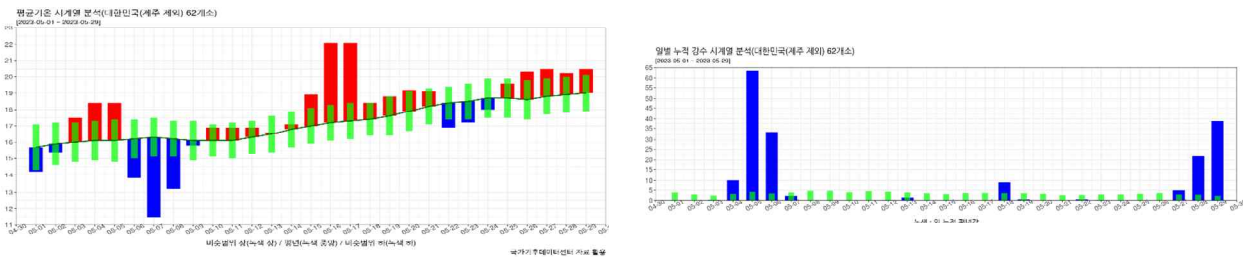
2023년 5월 기후분석 보고서

□ 2023년 5월 우리나라 기온 및 강수량 현황과 특징

[Fig.1] 2023년 5월(1~31일) 우리나라 기온과 강수량 분포도



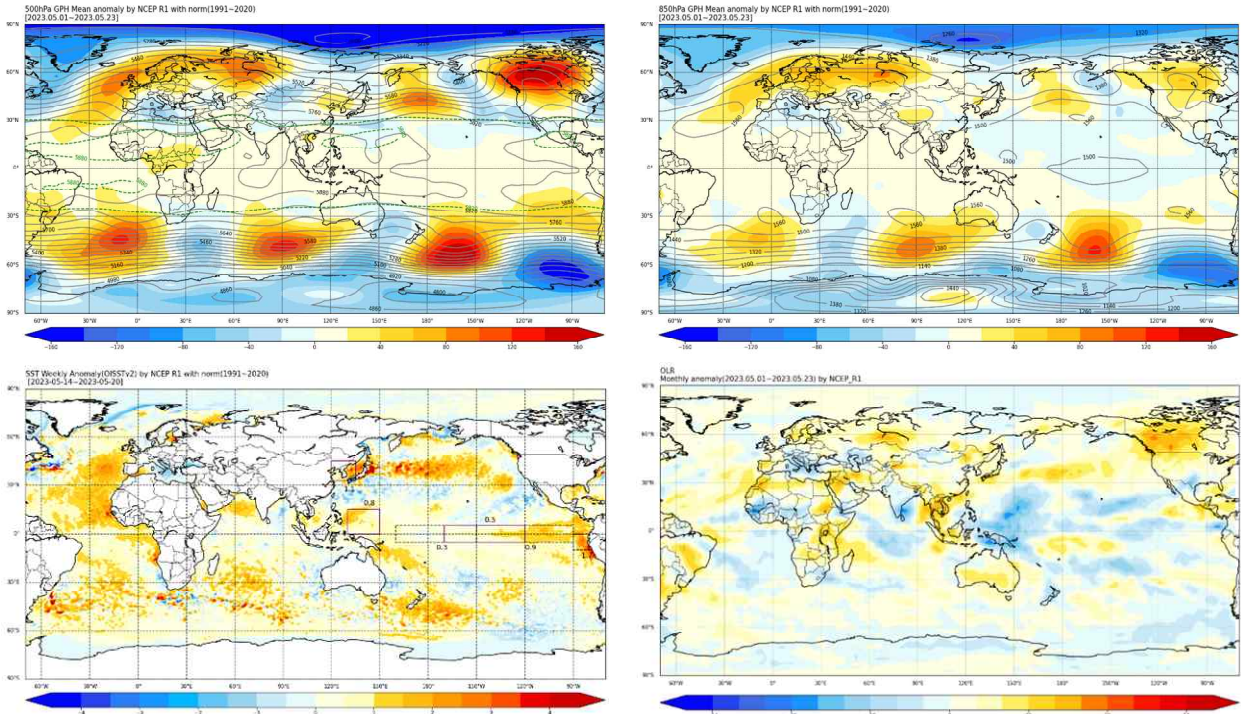
[Fig.2] 2023년 5월 우리나라 기온과 강수량 시계열



- 5월 전국 평균 기온은 17.9°C로 평년(17.3°C)보다 0.6°C 높은 평년 기온을, 강수량은 193.4mm로 평년의 98.5%에 해당하는 높은 값을 기록함
(※ 5월 기온의 평년 비슷 범위는 $\pm 0.3^\circ\text{C}$, 강수의 평년 비슷 범위는 79.3-125.5mm)
- (기온) 강원도 동해안 지방과 호남 해안 지역 등의 기온이 상대적으로 높았음. 충북 일부를 제외한 내륙지방과 전라남도, 경상북도는 많은 강수로 인해 기온이 낮았음. 5월 내 고온과 저온 기간이 자주 교차 발생했으나 7일 저온 및 16-17일 고온을 제외하고는 편차의 강도는 크지 않았음. 16-17일에는 동해안과 경북지역을 중심으로 폭염이 발생함
- (강수) 강원도 동해안을 제외한 전국에서 평년보다 높은 강수량을 기록함. 제주도를 포함한 전라도와 경상도 남부지역의 강수량이 매우 높았음. 5월 초(4-6일)와 말(27-29일)에 강수가 집중되었으며 73년 이래 역대 3위의 강수량을 기록함

□ 2023년 5월 전지구 순환장 특징

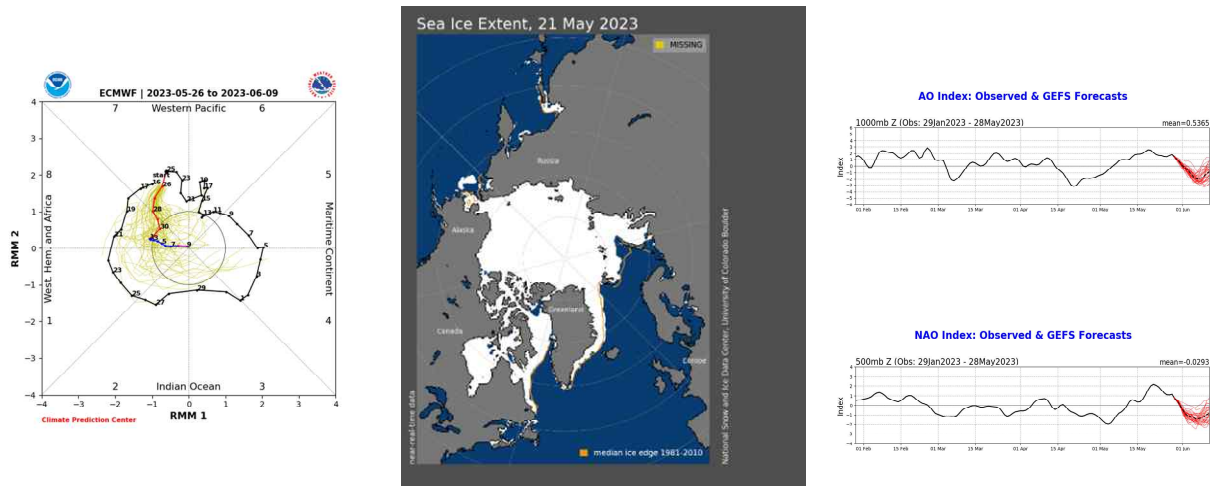
[Fig. 3] 2023년 5월 평균 500hPa 지위고도 편차, 850hPa 지위고도 편차, OLR 편차, SST 편차 (왼쪽 위부터 시계방향)



- 500hPa 지위고도의 공간분포에 따르면 영국/북유럽, 우랄산맥, 북중태평양, 캐나다 중부에 고기압성 편차가 나타나고 지중해, 몽골 서쪽, 일본 동남부, 북미 서안의 지역에는 저기압성 편차가 나타남.
- 850hPa 지위고도의 공간분포에 따르면 중위도와 고위도 지역에는 상층과 같은 순압 대기의 형태를 보이며 아열대와 열대 태평양에는 저기압 편차, 대서양과 인도양에는 고기압 편차가 나타남
- 열대 태평양 해수면 온도는 엘니뇨가 발달하는 상황으로 NINO3.4 지수가 5월 14-20 일 평균 기준 0.5°C 의 값을 보이고 있음.
- 열대 인도양과 태평양에 대류가 활발하며 특히 서태평양 열대와 아열대에 대류가 매우 활발한 반면 인도차이나반도 주변 남아시아에는 대류가 억제됨

□ 2023년 5월 주요 인자 현황

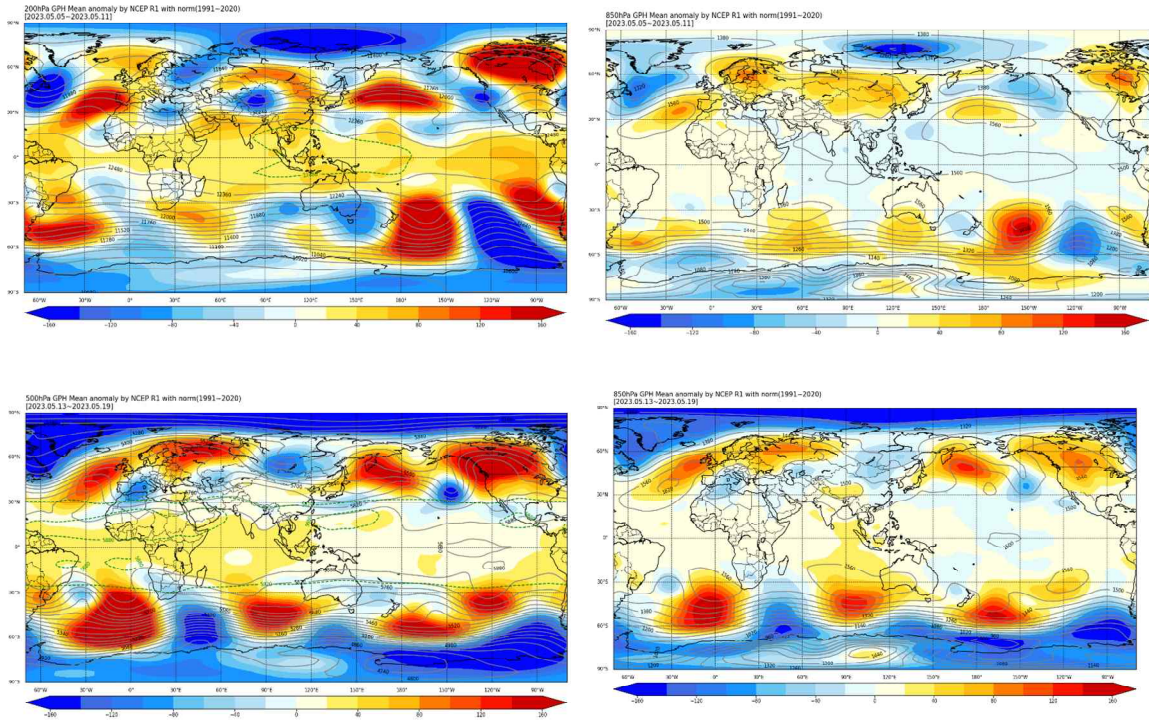
[Fig. 4] 2023년 5월 MJO(좌), 북극 해빙(중), AO/NAO(우) 현황



- MJO는 5월 초 위상 3/4에서 위상 5/6으로 발달하였으나 14일 이후 위상 6/7에서 정체되는 모습을 보임
- 북극 해빙은 바렌츠 해에서 평년보다 해빙 면적 감소가 두드러짐
- AO와 NAO는 5월 초 음의 위상에서 5월 중순 이후 양의 위상으로 변화하였음

□ 2023년 5월 주별 기온 편차 특징

[Fig. 5] (상) 2주차(5-11일) 평균 500hPa/850hPa 지위고도 편차와 (하) 3주차(13-19일) 평균 500hPa/850hPa 지위고도 편차



(2주차 저온 시기 대기순환)

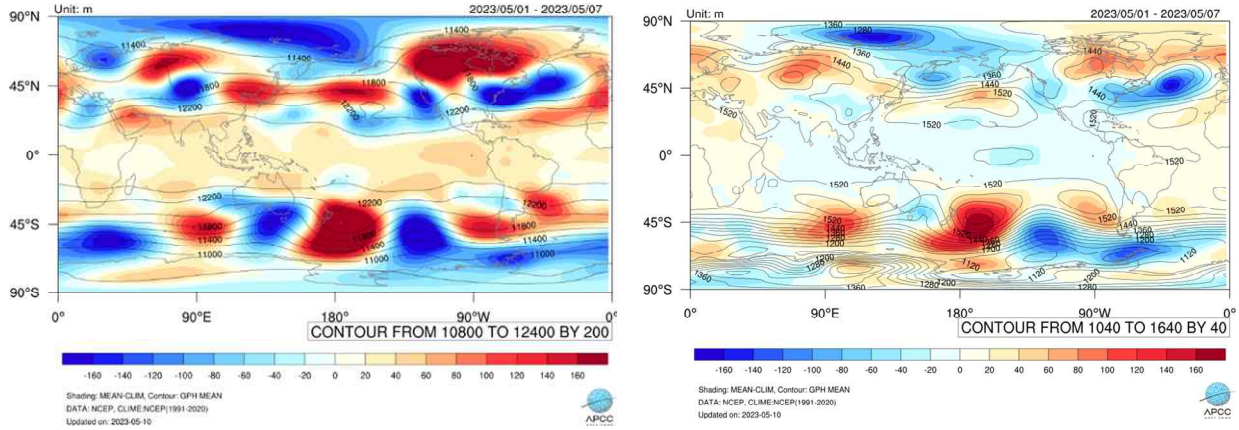
- 850hPa 편차장에서 볼 수 있듯이 남중국으로부터 저기압 통과 후 바이칼호에서 고기압이 접근함에 따라 한반도 북서쪽에 고기압이 위치하고 남동쪽에 저기압이 위치하여 북풍이 발달함에 따라 한반도에 저온 편차가 나타남

(3주차 고온 시기 대기순환)

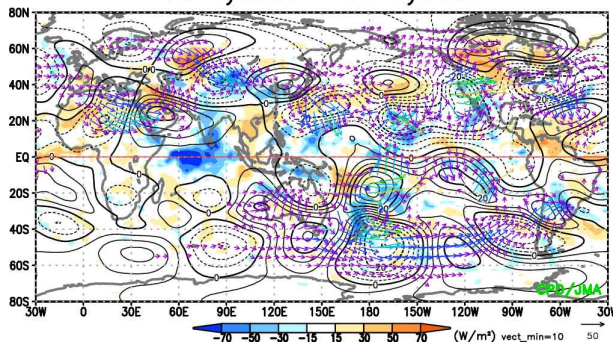
- 상하층에서 공통적으로 볼 수 있듯이 우랄지역 고기압에서의 파동전파와 함께 하와이 북동쪽의 저기압성 흐름이 정체되면서 한반도 상층 고기압이 발달하여 영남지역의 폭염을 동반한 고온이 발생함

□ 2023년 5월 첫주 폭우 분석

[Fig. 6] 5월 1주(1-7일) (상) 평균 200hPa/850hPa 지위고도 편차와 (하) Wave Activity Flux와 OLR 편차
 200hPa GPH Mean 850hPa GPH Mean



02May2023 - 06May2023



- 5월 첫주(1-7일) 강수량이 1973년 이후 역대 1위를 기록하였음
- 그때 저층 남중국해에는 저기압 편차가 발달하였고 한반도 동쪽에는 고기압 편차가 위치함에 따라 강한 남풍 편차가 발달하여 많은 강수를 유발하였음
- 기존 연구에 따르면 5월에 아라비아해 대류 발달시 Gill type-Rossby wave 전파에 의해 남중국해에 저기압성 흐름, 한반도 동쪽에 고기압성 흐름이 발달하여 동고서저의 기압배치로 한반도 5월 강수가 증가한다고 알려져 있음(APCC, 2021)
- 올해도 그와 유사한 패턴으로 상층(200hPa) 기준으로 아라비아해에 고기압 편차, 중앙아시아에 저기압 편차, 한반도에 고기압 편차가 발달하였으며 하층에는 남중국해에 저기압 편차, 한반도 동쪽에 고기압 편차가 관찰됨. 열대 인도양에서의 대류 활발과 함께 Wave Activity Flux에서도 이러한 상층 파동 전파 패턴이 나타남

□ 요약

평년보다 높은 기온과 많은 강수량을 기록한 5월

기온	<ul style="list-style-type: none">✓ 저온 및 고온 편차가 반복되는 가운데 중순에는 일부지역에 폭염을 동반한 고온편차가 발생=>평년보다 0.6도 높은 기온을 기록함✓ 중반 고온 시기: 우랄 고기압으로 부터의 파동전파의 일시적 정체(북태평양 저기압 정체관련)로 인해 한반도에 고기압 발달
강수	<ul style="list-style-type: none">✓ 초반과 후반에 전국적인 많은 강수로 평년대비 98.5%의 강수량을 기록(역대 3위)✓ 초반 폭우시기: 열대 인도양 대류 발달로 인한 로스비파 전파로 하층에 한반도 동쪽(서쪽) 고기압성(저기압성) 흐름 발달로 남풍 기류가 강화되어 폭우 발생✓ 후반 정체전선으로 인한 강수: 유라시아 파동전파로 인한 한반도 서쪽 저기압 흐름과 필리핀해 태풍 마와르로 인한 한반도 동쪽 고기압 흐름의 대치로 정체전선 형성

□ 토론

- 1주차 강수량이 역대 1위를 기록할 정도로 많았던 이유에 대해 대기 편차장 이외의 원인에 대해 향후 분석이 필요함

□ 예측인자 검증

기온	5월
엘니뇨 발달 빠를 때	0
엘니뇨 발달	0
최근 경향	1/2/7
종합	0+

강수	5월
엘니뇨 발달 빠를 때	EC
엘니뇨 발달	0+
최근 경향	5/2/3
종합	0

(기온)

- 엘니뇨 발달이 빠를 때 저온 또는 중립 기온이 우세하나, 최근 온난화 경향을 반영하여 (0/+)으로 전망하였고 예측이 어느정도 적중함.
- 엘니뇨 이른 발달 해에는 한반도 남쪽에 고기압성 흐름이 나타나는 경향을 보였으나 올해는 한반도에 고기압성 흐름이 약하게 나타나 고온을 기록하였으나 평년에 가까운 고온이었음.
- 엘니뇨 인자에 기반한 기온 예측은 적중하지 못했으나 엘니뇨의 빠른 발달시 폭염급 고온 발생 가능성은 많지 않은 것으로 추측할 수 있으며 향후에도 중요한 인자로 고려되어야 함

(강수)

- 엘니뇨 발달시 강수가 증가하는 경향이 있으나 5월 기온과 음의 상관관계를 고려하여 평년 수준으로 전망하였고 예측에 실패함
- 5월 대기 평균장의 관점에서는 한반도 남동쪽에 저기압 편차가 나타나 강수가 많을 수 없는 대기 패턴이었음. 또한 벵갈만과 필리핀해에 발달한 태풍의 영향으로 인해 예측이 어려웠던 측면도 있음

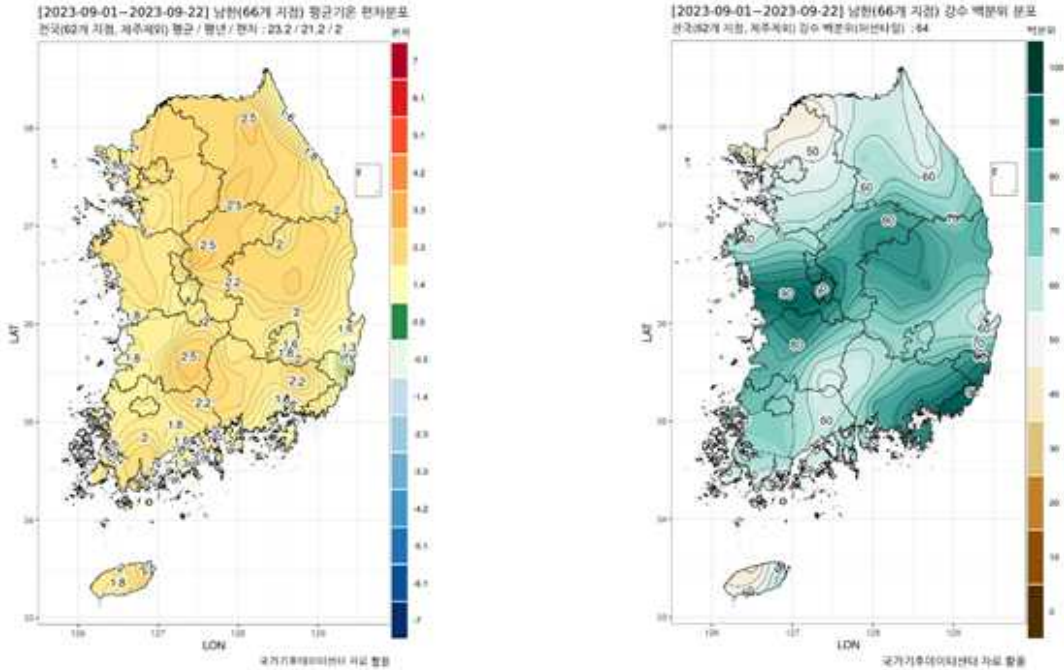
□ 참고문헌

APCC. (2021) 기후 감시 및 분석 체계 구축을 통한 이상 기후 대응 역량 강화

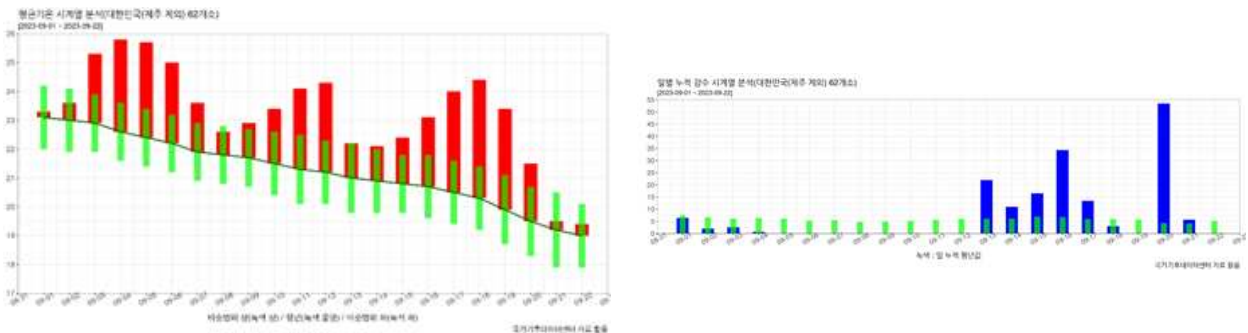
2023년 9월 기후분석 보고서

□ 2023년 9월 우리나라 기온 및 강수량 현황과 특징

[Fig.1] 2023년 9월(1~22일) 우리나라 기온과 강수량 분포도



[Fig.2] 2023년 9월(1~22일) 우리나라 기온과 강수량 시계열

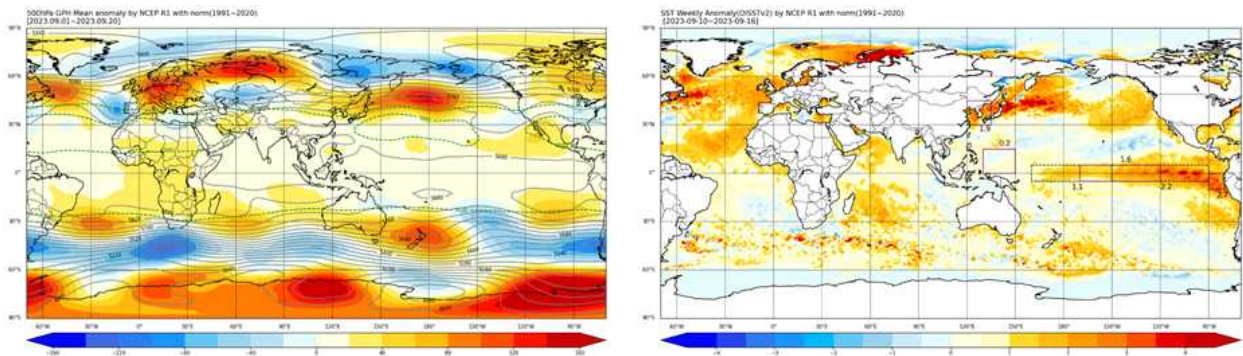


- 9월 전국 평균 기온(1~22일 평균 기준)은 23.2°C로 평년(21.2°C)보다 2.0°C 높았으며, 강수량은 171.5 mm로 평년의 67.0%에 해당하는 값을 기록
(※ 9월 기온의 평년 비슷 범위는 ±0.3°C, 강수의 평년 비슷 범위는 61.5-177.5 mm)
- (평균기온) 평년보다 높은 기온으로 상위 2위 기록. 대체로 이동성 고기압의 영향을 받아 일사에 의한 고온 발생. 9월 5일에 서울과 인천 등에서 이례적으로 9월 열대야가 발생하였으며 특히 서울은 1935년 이후 88년 만에 가장 더운 가을밤을 기록. 우리나라 북서쪽에 위치한 고기압의 북동풍에 지형 효과가 더해지면서 무더운 공기 유입. 또한 8월 24일 발생한 9호 태풍 사올라가 9월 초 일본을 지나면서 덥고 습한 공

- 기 유입. 9월 중순에는 제주 남쪽에 위치한 고기압의 가장자리에 들어 고온 발생
- (강수량) 평년과 비슷한 강수량으로 상위 18위를 기록하였으며 강수일수는 8.6일. 9월 중순에 대부분의 강수가 발생. 9월 13~17일에는 이동성 저기압의 통과와 더불어 차가운 공기를 동반한 상층 기압골의 영향으로 대기가 불안정하여 강수 발생. 9월 20일에는 연속으로 이동성 저기압이 통과면서 돌풍과 천둥·번개를 동반한 강한 강수 발생

□ 2023년 9월 전지구 순환장 특징

[Fig. 3] 2023년 9월 평균 500hPa 지위고도 편차, 해수면온도 편차

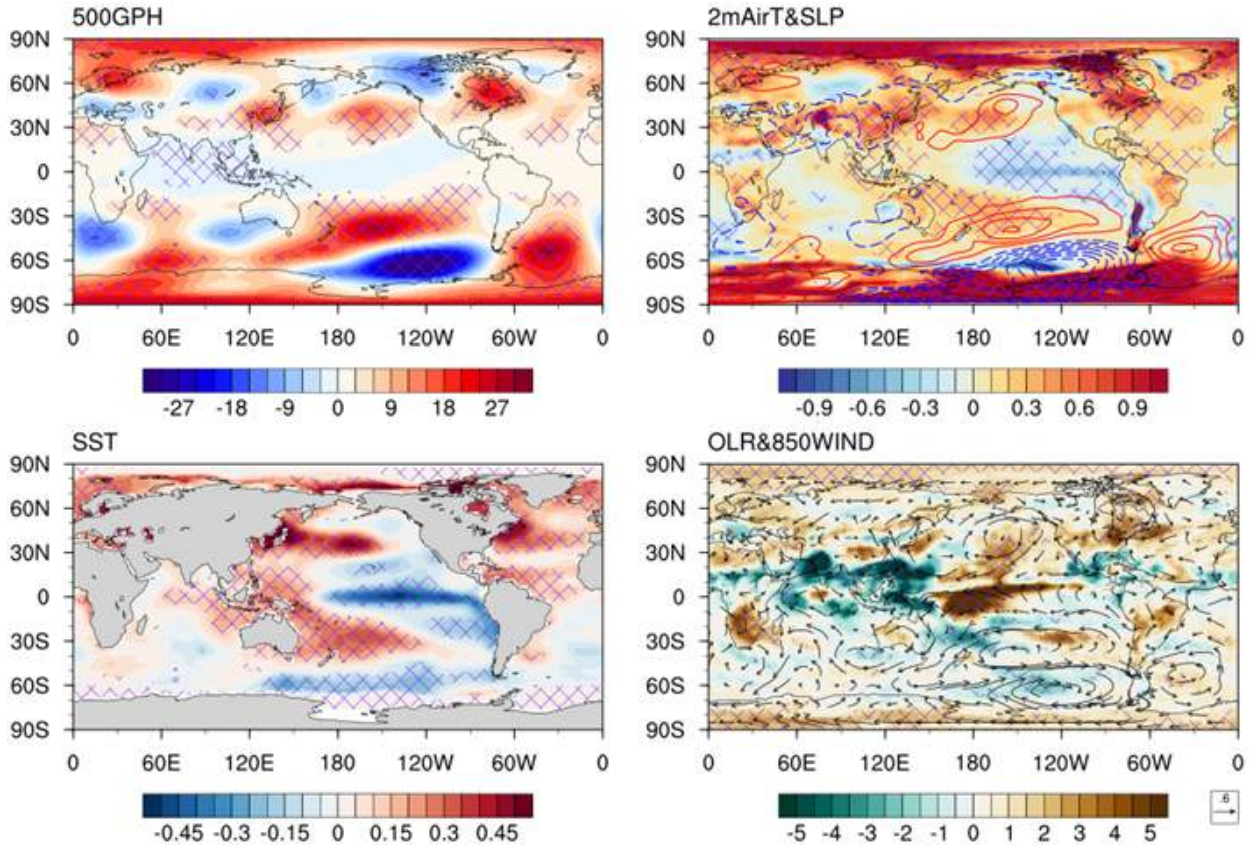


- 중위도 북태평양에 강한 고기압성 편차가 발생하였고, 우리나라는 고기압성 순환의 서쪽 가장자리에 위치하여 남풍 유입으로 인한 고온 발생
- 열대 중·동태평양에 지속적으로 강한 양의 해수면온도 편차가 발생하여 엘니뇨 발달, 우리나라 연근해를 포함한 중위도 북서태평양, 북대서양, 카라-바렌츠 해에 양의 해수면온도 편차, 인도양에 양의 IOD 발생

□ 9월 우리나라 기온과 전지구 순환장의 상관성

[Fig. 4] 9월 우리나라 기온과 500hPa 지위고도, 2m 온도/해면기압, 해수면온도, OLR/850hPa 바람장의 회귀분석

Regression pattern on September Korea Temperature

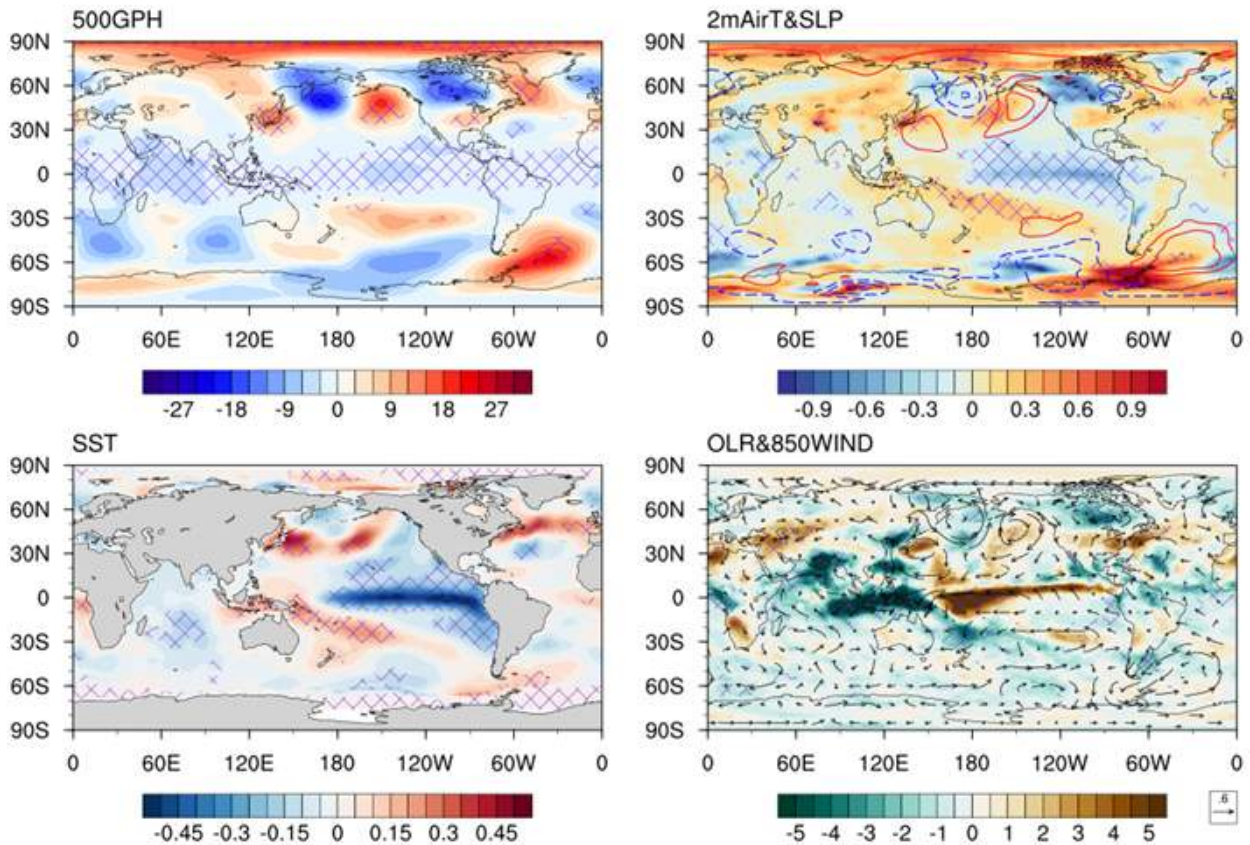


- (기온 높을 때) 500hPa 지위고도의 경우 우리나라를 포함한 중위도 북태평양에 고기압성 편차와 유의미한 상관성. 우리나라는 고기압의 서쪽에 발생한 남풍 기류의 유입으로 기온이 상승하는 경향. CGT 패턴과 유사한 파동 전파 형태가 나타남
- 해면기압의 경우 우리나라 동쪽에 고기압, 서쪽에 저기압성 편차가 발달하여 동고서저의 기압 배치
- 열대 중·동태평양 해수면온도와 유의미한 음의 상관성을 가지며 라니냐 발달기에 9월 우리나라 고온 발생 경향. 우리나라 연근해를 포함한 중위도 북서태평양과 북대서양 해수면온도는 양의 편차
- 동인도양과 서태평양 대류 강화되고, 적도 중태평양 대류 억제됨
- 2023년 9월 평균 500hPa 지위고도(그림 3)에서 동아시아-북태평양에 고기압이 발생하여 9월 우리나라 기온 관련 대기 순환장과 유사한 패턴이 관측됨. 우리나라는 북태평양 고기압의 서쪽 가장자리에 위치하여 남풍의 영향을 받아 기온이 상승한 것으로 보임

□ 9월 우리나라 강수와 전지구 순환장의 상관성

[Fig. 5] 9월 우리나라 강수와 500hPa 지위고도, 2m 온도/해면기압, 해수면온도, OLR/850hPa 바람장의 회귀분석

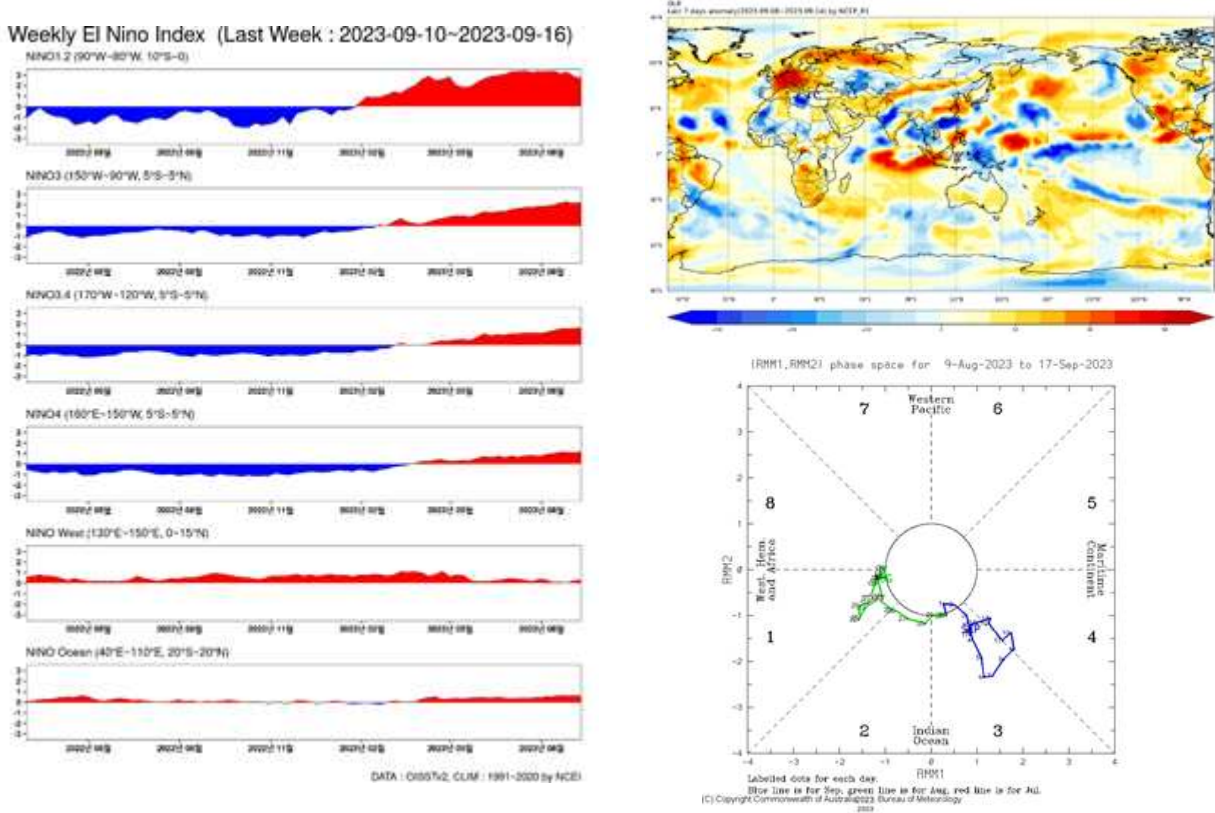
Regression pattern on September Korea Precipitation



- 9월 우리나라 기온과 관련된 대기 순환장 패턴과 유사하게 500hPa 지위고도의 경우 우리나라 주변에 고기압성 편차 발달. 우리나라(고)-캄차카(저)-베링해 동쪽(고)-북미(저)로 파동 전파 형태가 나타남
- 해면기압의 경우 500hPa 지위고도와 유사하게 우리나라 남동쪽(고)-캄차카(저)-베링해 동쪽(고) 패턴이 나타나며 우리나라에는 고기압의 영향으로 남풍 편차 유입에 의한 강수 발생
- 열대 중·동태평양에 음의 해수면온도 편차가 나타나 라니냐 상관성. 중위도 북태평양은 양의 해수면온도 편차, 북대서양은 남북 방향 dipole 패턴 상관성이 나타남
- 동인도양-서태평양 지역의 대류 활동이 강화되고, 열대 중태평양 대류 활동 억제
- 2023년 9월(그림 3)에 우리나라 동쪽에서 고기압이 관측됨. 중위도에 위치한 북서태평양 고기압은 남풍을 유도하여 9월 우리나라 기온 상승과 강수 발생에 영향 줄 수 있음

□ 2023년 9월 열대(ENSO, MJO) 현황

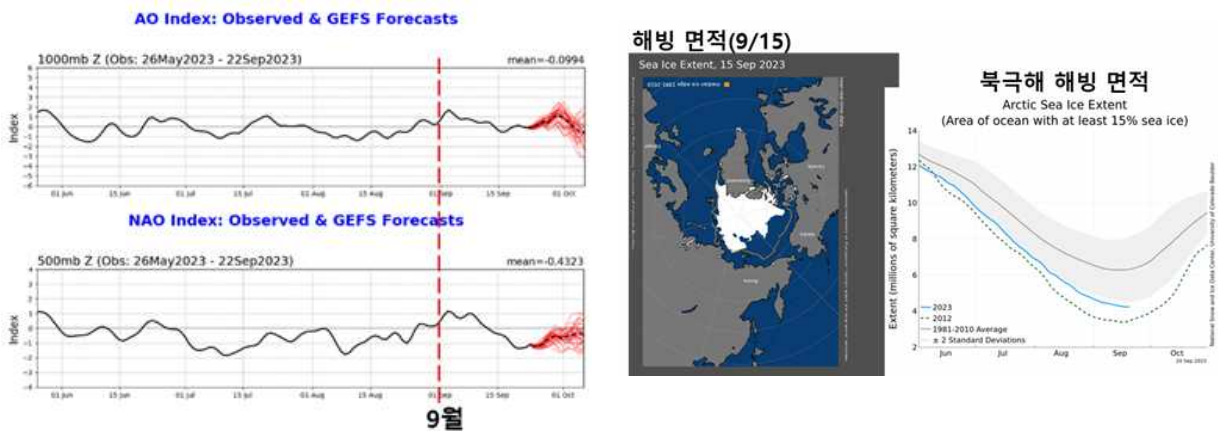
[Fig. 6] Nino 지수 시계열, 9월 8-14일 평균 OLR 편차 및 MJO 위상 다이어그램



- Nino1+2 지역에서 강한 해수면온도 상승(2.7°C)이 나타났으며, 엘니뇨·라니냐 감시 구역인 Nino3.4 지역은 1.6°C의 양의 해수면온도 편차를 기록하여 모든 Nino 지역에서 해수면온도 상승이 지속적으로 관측됨
- MJO 위상 3-4 발생

□ 2023년 9월 북극(AO/NAO, 해빙) 현황

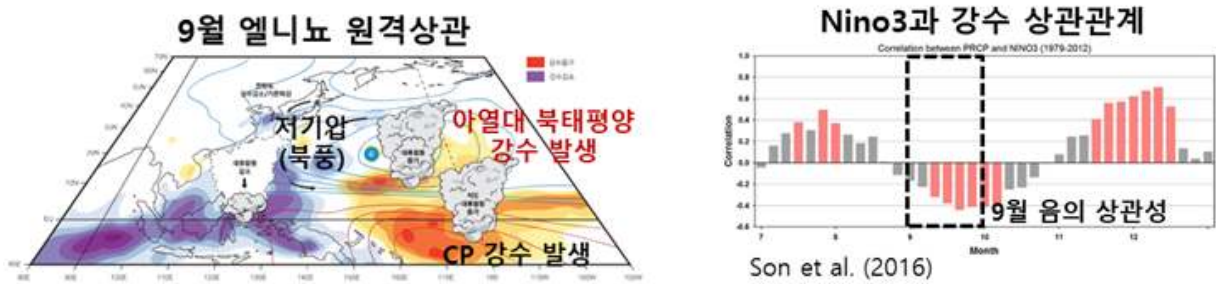
[Fig. 7] AO/NAO 지수 시계열, 북극해 해빙 면적 분포(9월 15일 기준) 및 시계열



- 9월 초-중순 양의 북극 진동(AO)과 북대서양 진동(NAO) 발생. 이후 평년과 비슷한 AO, 음의 NAO 발생
- 평년보다 적은 북반구 해빙 면적 기록(9월 평균 기준 하위 5위). 평년과 비슷한 그린란드, 랍테프 해를 제외한 대부분의 북극 해역에서 적은 해빙 분포가 나타남

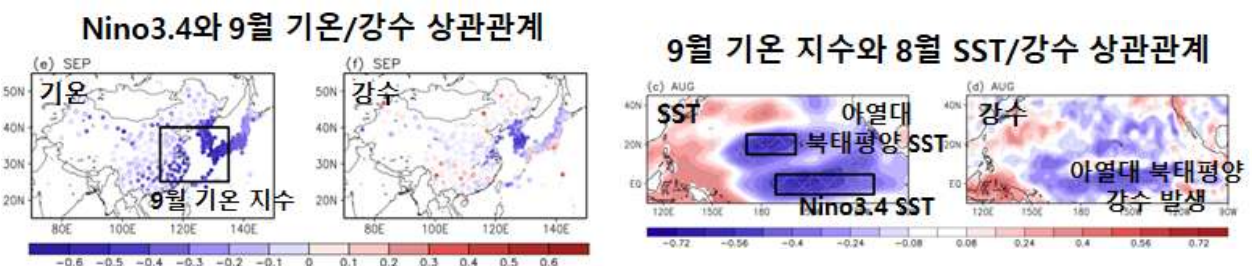
□ ENSO 관련 특성

[Fig. 8] 9월 엘니뇨 원격상관 모식도, Nino3과 우리나라 강수 상관관계



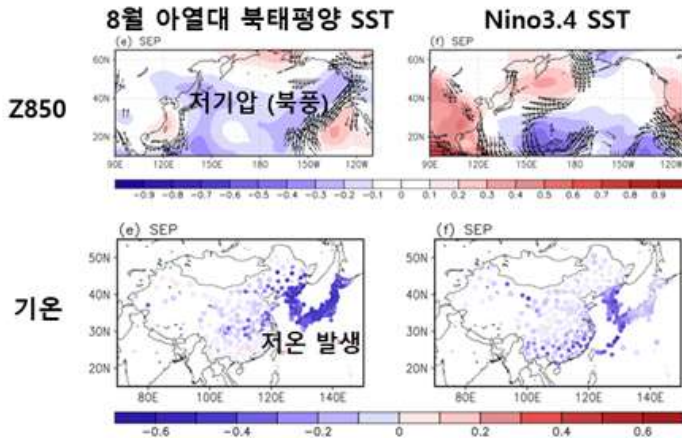
- 우리나라 9월 기온/강수는 열대 중·동태평양 해수면온도와 유의미한 음의 상관성을 가짐 (그림 4, 5). 엘니뇨가 발달하면 열대 중태평양의 대류가 강화되고, 로스비 파 반응으로 북태평양에 저기압성 순환 발생. 저기압의 서쪽에 위치한 북풍의 영향으로 우리나라 9월 저온/강수 감소 발생 경향
- ENSO 지수는 우리나라의 기온/강수와 9월 음, 초겨울(11-12월)에 양의 상관성을 가지며 예측인자로 활용됨

[Fig. 9] 8-10월 Nino3.4 지수와 9월 동아시아 기온/강수 상관관계, 9월 동아시아 기온 지수와 8월 SST/강수 상관관계 (부호 반대)



- 8-10월 Nino3.4 지수는 우리나라, 일본 중국 남동부를 포함한 동아시아 지역의 기온과 음의 상관성, 우리나라 강수와 음의 상관성을 나타냄
- 동아시아의 9월 기온 지수는 8월 열대 중·동태평양, 아열대 북태평양 해수면온도와 음의 상관성을 가짐. 그로 인해 열대 중태평양과 아열대 북태평양의 강수가 감소하여 북태평양에 고기압성 순환을 유도하고, 남풍의 영향으로 우리나라 9월 고온 발생 (동아시아 9월 고온을 기준으로 하여 부호 반대)

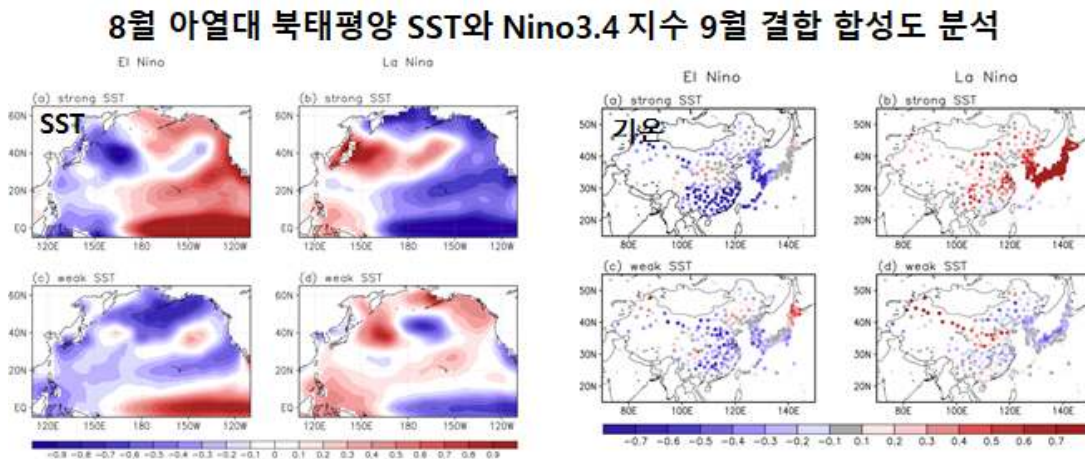
**8월 아열대 북태평양 SST와 Nino3.4 지수
9월 다중회귀 분석 (2015년 제외)**



[Fig. 10] 8월 아열대 북태평양 해수면온도와 8-10월 Nino3.4 지수의 9월 다중회귀 분석 (2015년 제외)

- 다중회귀 분석을 통해 두 지수의 영향을 선형적으로 분리하였으며 2015년에는 아열대 북태평양 해수면온도가 극단적으로 상승하여 제외. 8월 아열대 북태평양 해수면온도 상승은 중위도 북태평양에 저기압을 발생시키지만, Nino3.4 지역의 해수면온도에 의한 대기 반응은 열대와 아열대 지역에 국한됨
- 8월 아열대 북태평양 해수면온도 상승은 엘니뇨 발달과 독립적으로 9월 우리나라의 저온/강수 감소에 영향을 줄 수 있으며 한 달 지연 상관성 제시

[Fig. 11] 8월 아열대 북태평양 해수면온도와 8-10월 Nino3.4 지수의 9월 결합 합성도 분석

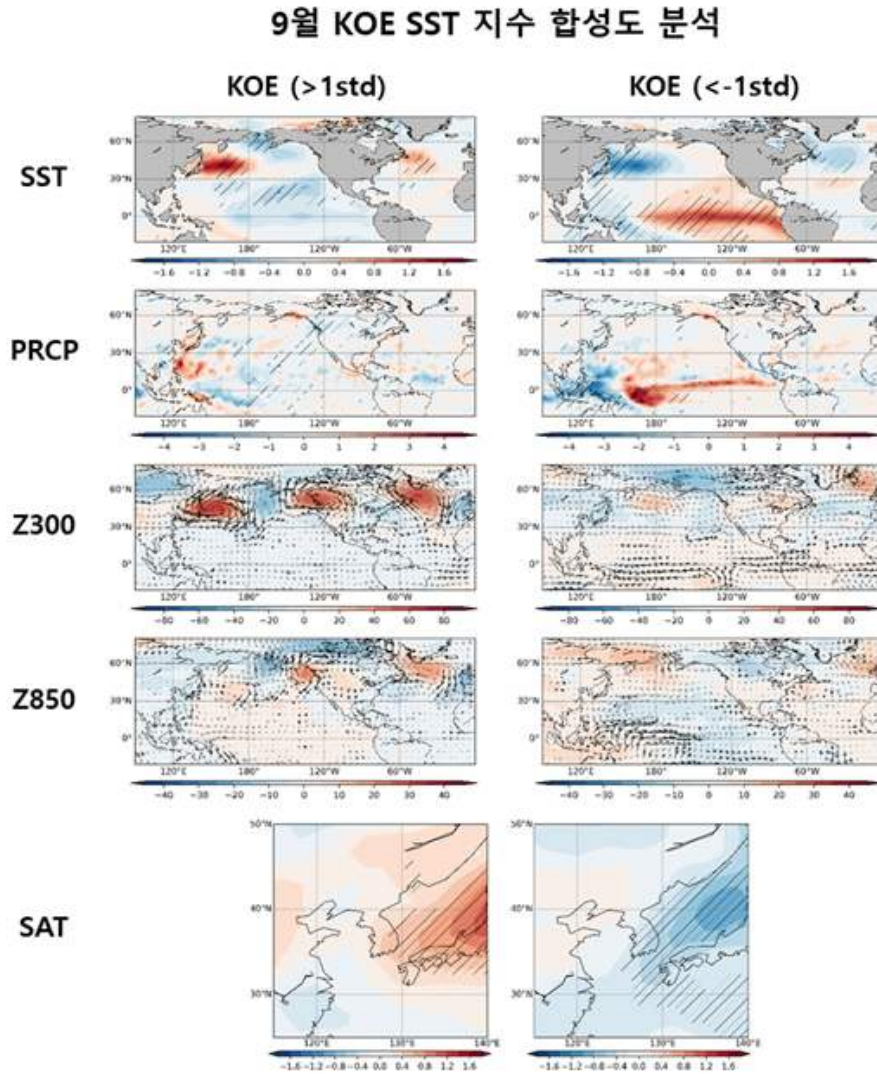


- 8월 아열대 북태평양 해수면온도와 열대 중·동태평양 해수면온도가 동시에 상승하면 9월 동아시아의 기온이 낮아지며, 반대로 두 해수면온도가 동시에 하강할 때 동아시아의 기온이 상승하는 경향을 보임
- Nino3.4 지수와 더불어 8월 아열대 북태평양 해수면온도는 한 달 지연되어 9월 우리나라 기온/강수 예측인자로 활용 가능. 현재 두 지수가 서로 다른 위상을 나타내기 때문에 각각의 영향이 상쇄되어 전형적인 엘니뇨-우리나라 저온 발생 역학이 나타나지 않았을 가능성이

있음. 그러므로 아열대 북태평양 해수면온도의 하강이 고기압(남풍)을 유도하여 엘니뇨에 의한 저기압 발생 역학에 반대 작용을 하였는지에 대한 추가적인 연구가 필요함

□ 쿠로시오-오야시오 확장역(Kuroshio-Oyashio Extension; KOE) 해수면 온도 관련 특성

[Fig. 12] 9월 KOE 해수면온도 지수 ± 1 표준편차 기준 해수면온도, 강수, 300hPa/850hPa 대기순환, 지표온도 합성도 분석



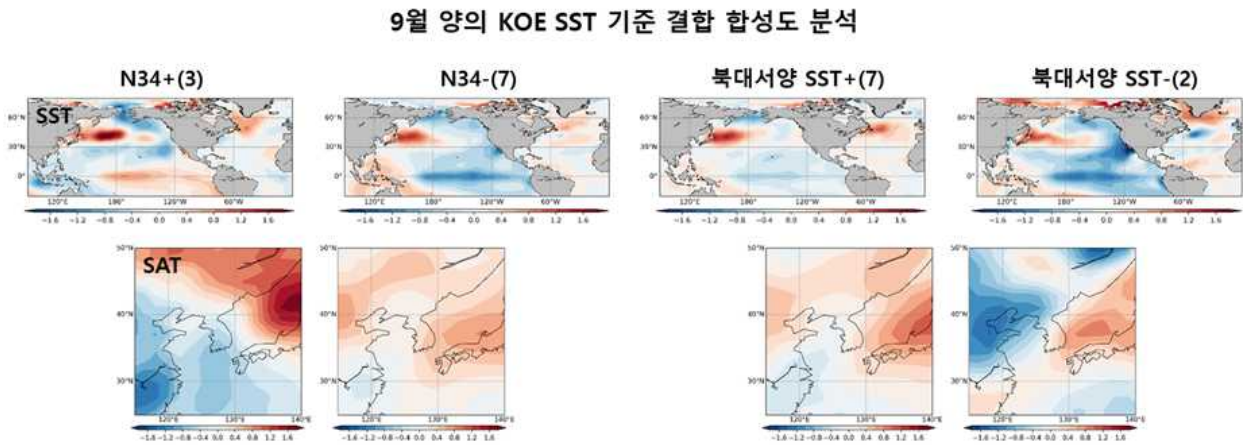
- 우리나라 9월 기온/강수는 중위도 북서태평양에 위치한 KOE 지역 해수면온도와 양의 상관 관계를 나타내며, 최근 우리나라 연근해를 포함한 KOE 지역에서 지속적으로 양의 해수면온도 편차 관측
- 9월 KOE(120E-180, 30-50N) 해수면온도 지수가 1 표준편차 이상일 때, 열대 중·동태평양에 음의 해수면온도 편차가 나타나지만 유의미하지 않음. 우리나라 상층에 고기압 편차가 발달하여 하향 전파되며, 우리나라는 고기압의 서쪽에 위치한 남풍의 영향으로 온도 상승
- 9월 KOE 해수면온도 지수가 -1 표준편차 이하일 때, 강한 엘니뇨가 발생하며, 서태평양 강

수 감소/중태평양 강수 증가와 같은 전형적인 엘니뇨 관련 강수 패턴이 나타남. 로스비 파
반응으로 북태평양에 저기압이 발달하여 북풍의 영향으로 우리나라 온도 하강하는 경향

[Table. 1] 9월 KOE, Nino3.4, 북대서양 해수면온도 지수의 교차 상관관계

상관계수	KOE SST	Nino3.4 SST	북대서양 SST
KOE SST		-0.57	0.54
Nino3.4 SST	-0.57		-0.18
북대서양 SST	0.54	-0.18	

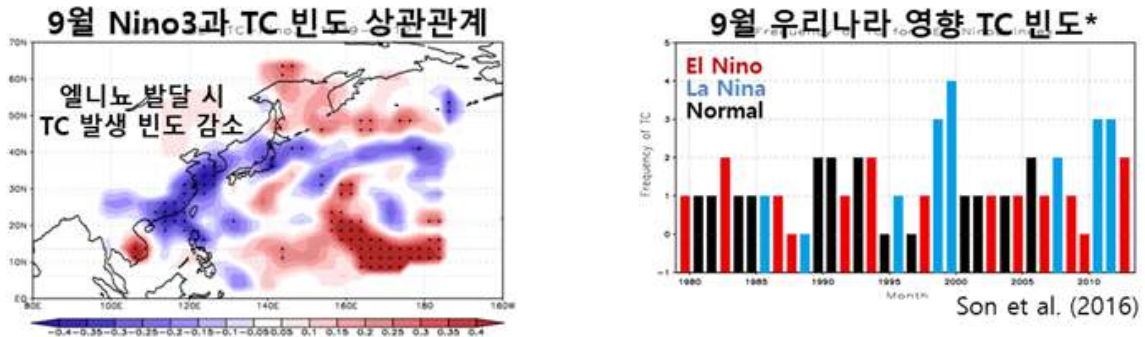
[Fig. 13] 9월 KOE 해수면온도 0.5 표준편차 이상 기준 Nino3.4, 북대서양 SST 지수
결합 합성도 분석



- 우리나라 9월 기온/강수는 KOE(양) 해수면온도 뿐만 아니라 열대 중·동태평양(음), 북대서양(양) 해수면온도와 유의미한 상관성(그림 4, 5)을 나타내기 때문에, 각각의 영향 및 대양 간 상호작용을 고려할 필요가 있음
- 9월 KOE 해수면온도는 Nino3,4 해수면온도와 -0.57 , 북대서양 해수면온도와 0.54 의 상관 계수를 가지며 유의미한 상관성을 나타냄. 반면에 Nino3.4와 북대서양 해수면온도의 상관 계수는 -0.18 로 두 대양 사이의 상관성이 크지 않음
- 9월 KOE 해수면온도 지수가 0.5 표준편차 이상일 때를 기준으로 Nino3.4 지수를 ± 0.5 표준편차로 각각 분류. KOE 지역에 해수면온도 상승과 엘니뇨가 동시에 발생하면 우리나라의 기온이 하강하며, 반대로 라니냐가 발생하면 우리나라의 기온이 상승하는 경향
- 9월 KOE 해수면온도 지수가 0.5 표준편차 이상일 때를 기준으로 북대서양 해수면온도를 ± 0.5 표준편차로 각각 분류. KOE 지역과 북대서양의 해수면온도가 동시에 상승하면 우리나라의 기온이 상승하며, 반대로 북대서양 해수면온도가 하강하여도 우리나라의 기온이 상승하는 경향
- 결합 합성도 분석으로 조건을 세분화할 수 있지만 선정되는 표본이 충분하지 않아 통계적 검증 및 해석에 주의해야 함

ENSO-태풍 발생과 우리나라 강수 관련성

[Fig. 14] 9월 Nino3 지수와 TC 빈도 상관관계, 9월 우리나라에 영향을 주는 TC 빈도



*TC frequency passing the region of TC that influenced the Korean Peninsula, which is determined when the TC's center from the RSMC best track data encounters the box areas of 32-40N and 120-138E by definition of Typhoon white book (Korea Meteorological Administration, 2011)

[Table. 2] 2000년 이후 우리나라 9월 강수, 기온, ENSO 위상, 영향태풍

연도	9월 강수	9월 기온	ENSO	9월 영향태풍
2007	383.5	0.6	라리냐	1
2010	268.3	1.1	라리냐	2
2003	265.9	0.2		1
2000	261.9	1.2		2
2012	250.1	-0.6		1
2019	223.0	1.0		2
2020	219.1	-0.4	라리냐	2
2016	206.2	0.9	라리냐	1
2004	199.9	0.1	엘니뇨	1
2005	199.5	1.0		1
2023(9/24)	171.1	2.0	엘니뇨	0
2022	150.8	0.5	라리냐	2
2021	145.8	0.8	라리냐	1
2018	143.7	-0.3	엘니뇨	1
2013	120.3	0.4		0
2014	119.4	0.1		0
2017	99.3	-0.2	라리냐	1
2001	88.7	-0.1		0
2002	87.6	-0.7	엘니뇨	1
2011	77.3	0.3	라리냐	0
2006	59.8	-1.2	엘니뇨	1
2015	56.0	-0.3	엘니뇨	0
2008	55.8	0.7		0
2009	48.7	0.2	엘니뇨	0

- 엘니뇨 발달 해에 태풍은 150E를 중심으로 필리핀 해~날짜 변경선까지 고루 발생하는 경향. 반면, 라니냐 발달 해에는 태풍이 130E를 중심으로 120-150E 부근에서 집중적으로 발생하는 경향. 엘니뇨 발달 해와 비교하여 서쪽에서 태풍이 발생하는 경향이 있으며, 160E 동쪽에서는 거의 발생하지 않음
- 엘니뇨/라니냐의 서로 다른 공간적 특성은 연관된 해수면온도 분포, 워커순환의 변화와 연관되어 있음. 엘니뇨 발달 해 여름철 서태평양 음의 해수면온도 편차 및 중·동태평양에서 양의 해수면온도 편차가 발달하고, 워커순환의 대류 발생 중심이 평년에 비해 서태평양에서 중·동태평양으로 이동하여 태풍 발생 위치가 중태평양 쪽으로 이동함
- 9월 Nino3 지수와 열대 저기압 발생빈도는 우리나라 부근에서 음의 상관관계를 가지며, 이는 엘니뇨가 발달할 때 우리나라를 지나는 열대 저기압의 발생빈도가 감소하는 것을 의미. 태풍 발생 현황을 살펴보면, 9월에 평균적으로 5.1개의 태풍이 발생하고 0.8개가 우리나라에 영향을 주는데 현재(9/24일 기준) 1개의 태풍이 발생하고 영향 태풍은 없는 것으로 관측됨
- ENSO와 우리나라의 강수는 강한 음의 상관성을 가지기 때문에, 현재와 같이 엘니뇨 발달기에 우리나라를 지나는 태풍이 감소하여 강수 발생에 큰 영향을 주지 못하였을 가능성이 있음

□ 요약

(9/1-9/22) 평년보다 높은 기온과 평년과 비슷한 강수량

기온	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 평년보다 높은 기온 (상위 2위) ✓ 고기압의 영향 및 강한 일사로 고온 발생 ✓ 아열대 북서태평양, KOE, 북대서양 SST가 복합적으로 영향을 주었을 가능성
강수	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 평년과 비슷한 강수 ✓ (중순 많은 강수) 저기압과 상층 기압골의 영향으로 대기 불안정하여 강수 발생

□ 토의사항

- 9월 5일에 발생한 열대야 및 9월 초의 지속적인 고온은 우리나라 북서쪽 고기압의 북동풍에 의한 지형 효과 뿐만 아니라 9호 태풍 사올라가 일본을 지나면서 덥고 습한 공기를 유입한 것이 원인
- 가이던스에 제시된 9월 기온 예측인자인 7월 열대 중태평양과 북태평양 해수면온도 편차의 차이는 8월 아열대 북태평양 해수면온도와 위치 및 발달과정이 다르기 때문에 서로 다른 인자로 고려해야 할 수 있음. 또한 아열대 북태평양 해수면온도는 한 달 지연되어 우리나라 9월 기온/강수와 관련성이 있기 때문에 예측인자로 활용 가능
- 미국 대양해기청(NOAA)은 지난 6월 이미 엘니뇨를 선언하였고 다른 국가들보다 엄격한 기준을 적용하는 호주 기상청(BOM)에서도 최근 엘니뇨를 공식 선언함. 현재 열대 중·동태평양 해수면온도가 강하게 상승하고 있지만, 전형적인 엘니뇨 관련 대기 순환장과 차이가 있고 엘니뇨의 영향이 지연되어 나타날 가능성이 있기 때문에 지속적인 감시가 필요함
- 우리나라 9월 기온/강수와 관련이 큰 KOE, 열대 중·동태평양, 북대서양 해수면온도 상승이 동시에 관측되기 때문에 각각의 독립적인 역할 및 대양간 상호작용의 영향 등 추가적인 연구가 필요함
- 9월 초-중순에 양의 AO와 NAO가 관측되었으며 이후 발생한 음의 NAO가 우리나라에 어떤 영향을 미쳤는지에 대한 연구가 필요함. 북극 해빙이 가장 적은 9월이지만 해빙에 의한 파동 전파 영향을 고려해야 함
- 우리나라 연근해와 일본 동쪽의 중위도 북서태평양 해수면온도 상승이 항상 동반되지 않고 지수 관련 지역 선정 시 민감도가 크기 때문에 어떤 지역이 더 중요한 역할을 하는지에 대한 연구가 필요함

□ 9월 예측인자 검증

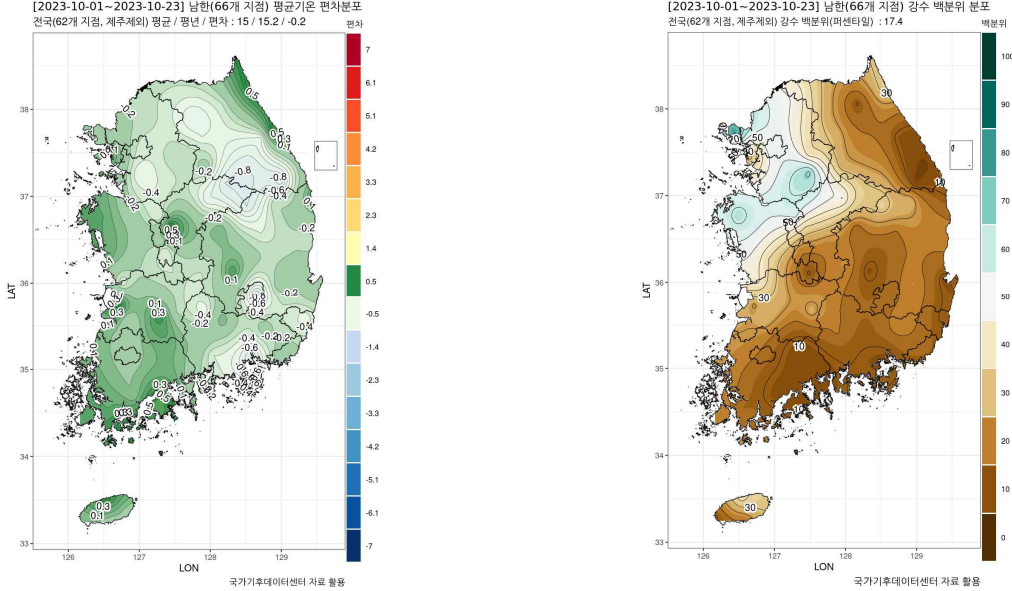
9월 기온		9월 강수	
7월 호주 동안 SST	0	7월 열대 중태평양 SST	-
7월 열대 중태평양 SST - 북태평양 SST	0		
기온/강수 상관관계	+		
최근 10년 경향(신평년)	2/4/4	최근 10년 경향(신평년)	1/6/3
종합	0+	종합	0-

- 9월 우리나라의 기온 예측인자인 7월 호주 동안 해수면온도, 7월 열대 중태평양 해수면온도와 북태평양 해수면온도의 차이는 평년과 비슷하여 우리나라에 큰 영향을 주지 않았을 것으로 보임. 9월 우리나라 기온과 강수는 최근 20년을 기준으로 상관관계가 약해졌지만 전체 기간에 대해 유의미한 양의 상관성을 나타냄. 최근 10년 동안 9월 기온은 주로 평년과 비슷하거나 높은 경향. 기온 예측인자와 최근 10년의 경향을 고려하였을 때 9월 기온은 평년과 비슷하거나 높을 것으로 예측되었으며 실제 기온이 관측됨
- 9월 우리나라 강수 예측인자인 7월 열대 중태평양 해수면온도는 엘니뇨가 발생하면서 양의 편차가 관측되었고, 음의 상관성을 나타냄. 최근 10년 동안 발생한 강수는 평년이 비슷한 경우가 가장 많아 특별한 경향이 나타나지 않음. 강수 예측인자와 최근 10년의 경향을 고려하였을 때 평년과 비슷거나 적은 강수량을 예측하였으나, 실제 평년과 비슷한 강수량을 기록하여 예측이 적중함

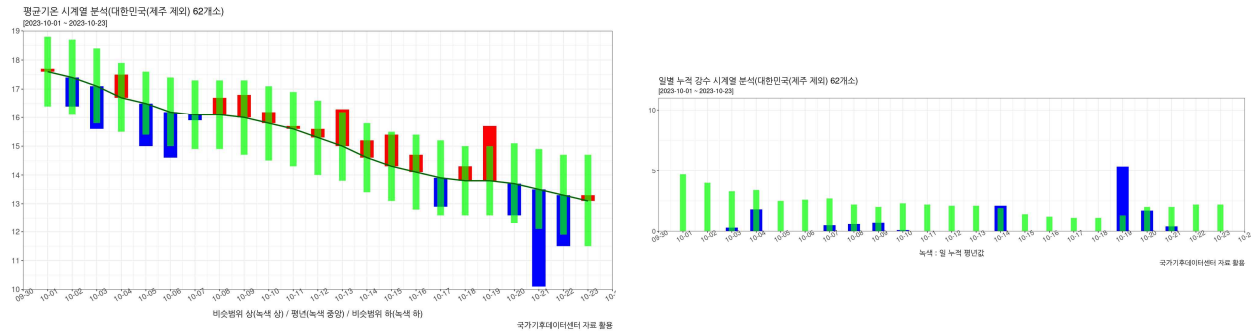
2023년 10월 기후분석 보고서

□ 2023년 10월 우리나라 기온 및 강수량 현황과 특징

[Fig.1] 2023년 10월(1~24일) 우리나라 평균기온 편차와 강수량 백분위 분포도



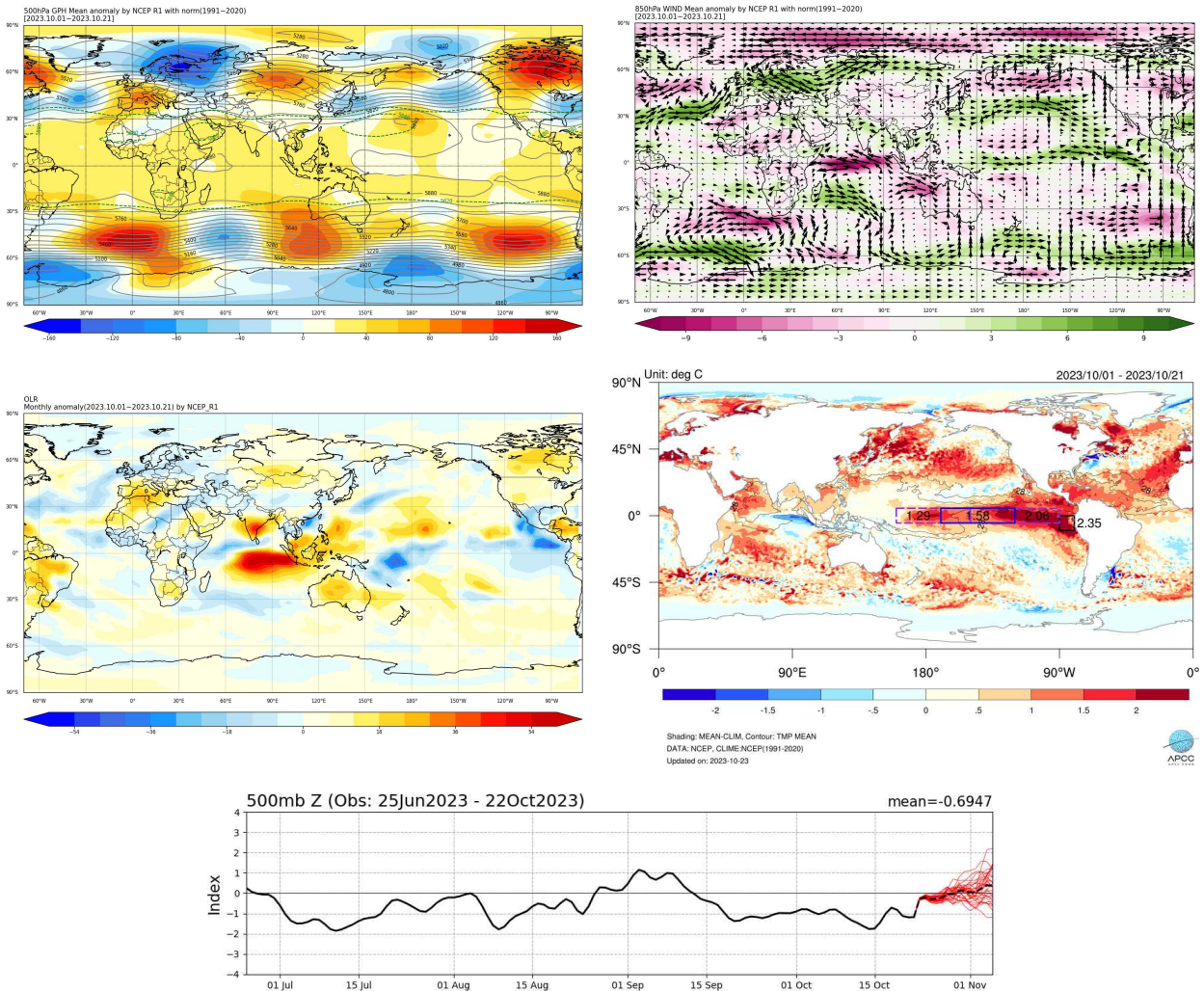
[Fig.2] 2023년 10월(1~24일) 우리나라 기온과 강수량 시계열



- 10월 전국 평균 기온(1~24일 평균 기준)은 15°C로 평년(15.1°C)보다 -0.1°C 낮았으며, 강수량은 13.7 mm로 평년의 17.4 퍼센타일에 해당하는 값을 기록함
(※ 9월 기온의 평년 비슷 범위는 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 강수의 평년 비슷 범위는 37-64.3 mm)
- (평균기온) 평년 비슷범위의 평균기온을 기록함. 평년 평균보다 높아질 때는 평년 범위 내에서 상승하였고, 낮아질 때는 평년 범위보다 더 낮은 날이 많았음. 기온이 평년 평균보다 하강할 때는 평년 범위보다 더 낮아진 최고 기온의 기여가 컸음.
- (강수량) 평년 비슷범위 보다 더 적은 강수량으로 1973년 이후 강수가 적은 순위 10위를 기록. 이벤트성 강수로서 10월19일 제외 대부분 평년 범위 이내의 적은 강수 발달함. 중위도 이동성 저기압 관련 북풍과 북서 태평양 고기압 관련 남풍의 수렴으로 강수 발달함. 특히 10월 19일은 평년 범위보다 많은 비가 내렸으며, 주로 중서부 지역에 집중됨.

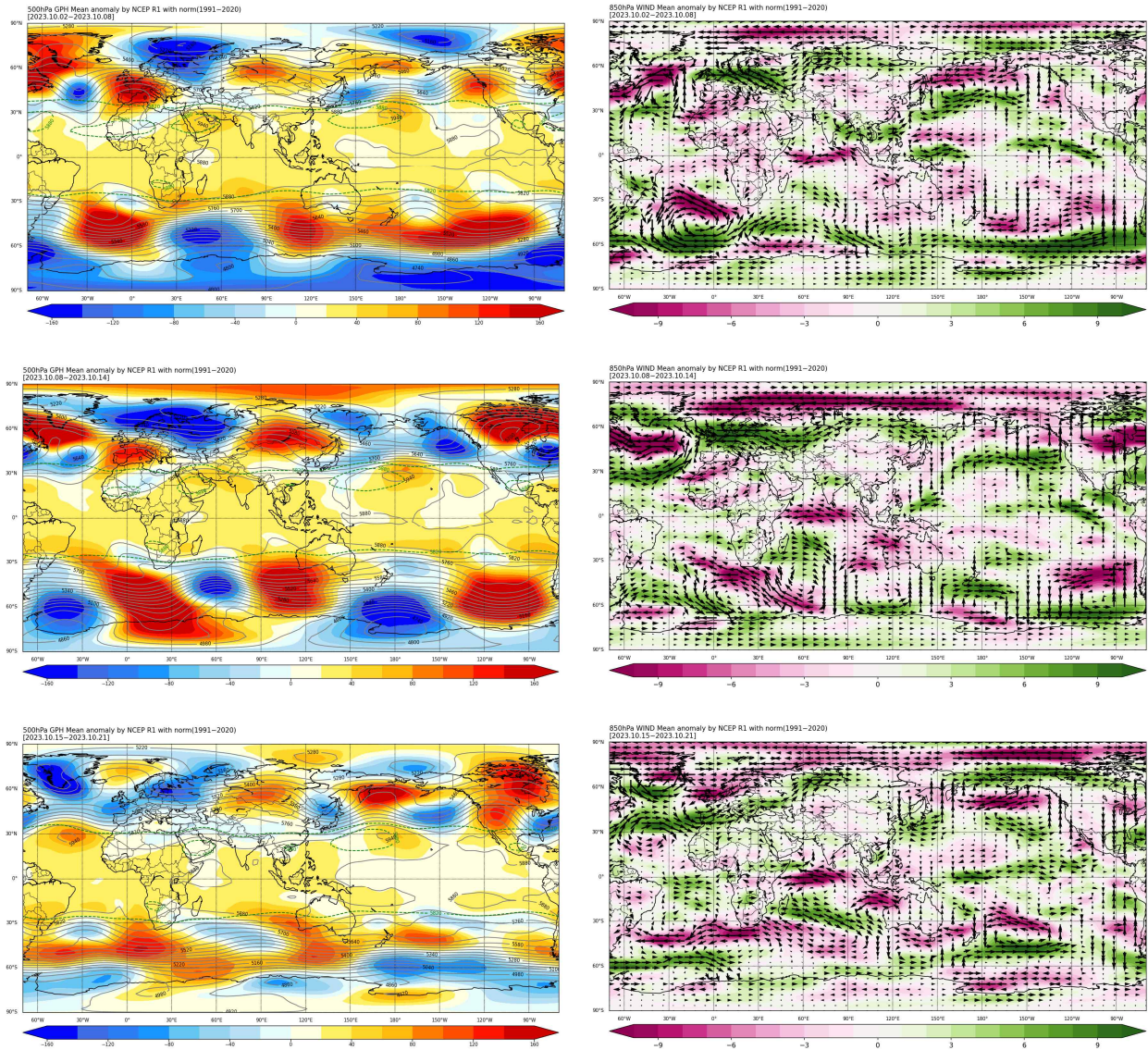
□ 2023년 10월 전지구 순환장 특징

[Fig. 3] 2023년 10월 평균 500hPa 지위고도, 850hPa 바람장, OLR, 해수면온도 편차와 NAO 시계열



- 한반도 서쪽은 유럽 고기압-우랄 저기압-몽골 고기압의 유라시아 파동구조를 보였고, 동쪽으로는 한반도 동쪽에서 북미 서부해안 지역까지 동서 방향으로 길게 발달한 저기압성 순환 편차 나타났으며, 이는 한반도가 일반적으로 기온 낮을 때 보이는 전형적인 패턴임. 한반도는 이 저기압성 순환편차 관련 북풍의 영향을 받음.
- 북대서양에서는 음의 NAO가 발달(9월 중순부터 현재까지 음의 NAO가 유지되고 있음) 하였으며, 열대 북대서양의 해수면 온도는 평년보다 상당히 높았음. 태평양에서는 엘니뇨가 계속해서 발달하고 있으며, 이와 관련하여 적도 중앙/서태평양에서는 대류 강화, meritime continents와 북서태평양에서 대류억제 패턴을 보임. 인도양에서는 양의 IOD가 지속되었으며, 이와 관련하여 동인도양 대류억제, 서인도양 대류 강화 패턴이 나타남.

[Fig. 4] 2023년 10월 전(10/2~8)-중(10/8~14)-후(10/15~21)반기 500hPa 지위고도와 850hPa 바람장 편차

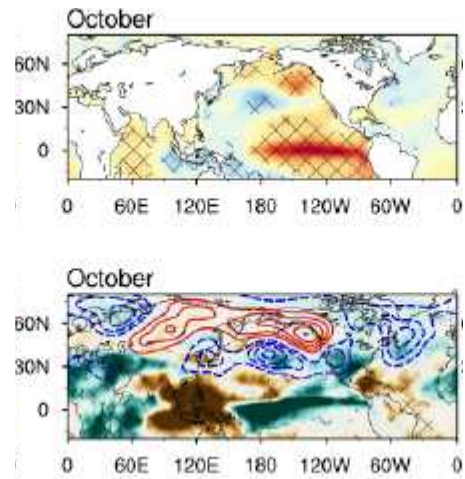


○ 10월 전반적으로 몽골의 고기압, 한반도 주변 저기압의 패턴이 유지됨. 10월 초/후반의 기온 하강은 몽골의 고기압 약화로 한반도 주변 저기압 편차에 의한 북풍의 영향과 관련되며, 10월 중반 기온 상승은 몽골 고기압이 남동쪽으로 확장되어 동풍의 영향을 주로 받은 것과 관련됨.

□ 10월 ENSO 와 IOD 관련 특성

[Fig. 5] 엘니뇨와 양의 IOD 동시 발생할 때 한반도 기온 및 강수 현황(좌) 과 관련 합성장 (해수면온도, 500hPa 지위고도 및 OLR 편차장) 분포(우)

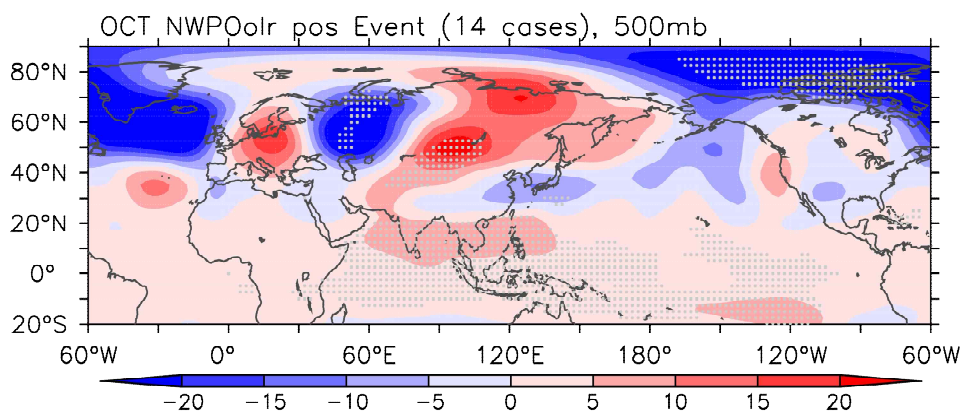
연도	9월	10월	11월	12월	1월	2월
가을철(9~11월) 양의 IOD와 겨울철(12~2월) 엘니뇨						
1982/83	-1.2	0.4	0.9	-0.2	0	-2.1
1986/87	-1.5	-1.9	-1.6	1.8	-0.2	0.1
1991/92	-0.2	-1.1	-1.2	1.7	1.3	-0.3
1994/95	-0.4	-0.1	1.4	0.9	-0.6	-0.4
1997/98	-1.1	-1.1	1	1	0.4	2.0
2002/03	-0.7	-1.8	-3.1	0.8	-1.3	0.9
2006/07	-1.2	2.2	0.9	0.6	1.5	2.6
2015/16	-0.3	0.4	2.2	2.1	-0.4	0.2
2018/19	-0.3	-1.6	0.1	-0.3	0.8	0.9
2019/20	1	1.2	0.8	1.4	3.4	2.2
연도	9월	10월	11월	12월	1월	2월
가을철(9~11월) 양의 IOD와 겨울철(12~2월) 엘니뇨						
1982/83	20.6	37.7	118.5	30.2	19.7	30.4
1986/87	139.5	91.7	21	45.9	52.8	47.9
1991/92	174.7	11	18.6	61.4	25.3	27.8
1994/95	36.8	150	36.4	15.2	23.7	17.8
1997/98	61.1	12.1	156.7	55.4	42.3	46.8
2002/03	87.6	62.4	16.4	46.1	26.3	49.4
2006/07	59.8	44.8	50.1	20.9	9.4	45.2
2015/16	56	67	125.7	40.6	24.6	46.7
2018/19	143.7	157.8	49.8	28.4	8	32.2
2019/20	223	160.5	57.4	26.5	83.7	58.7



- 가을철 양의 IOD와 엘니뇨가 발달할 때 10월 기온은 평년 범위보다 낮은 해가 더 우세함. 강수는 1982년 이후 50%(10개의 년도 중 5개)의 년도에 평년범위보다 많은 강수 내림.
- 가을철 양의 IOD와 엘니뇨가 발달하는 10월에는 유라시아 파동 패턴 관련 몽골지역 고기압성 순환 편차, 한반도 주변 저기압성 순환 편차가 나타남. 그러므로, IOD와 엘니뇨가 현재 10월 한반도 주변 순환장 형성에 기여한 것으로 판단됨.

□ 10월 북서태평양(필리핀해) 대류활동 관련 특성

[Fig. 6] 10월 북서태평양 (필리핀해 지역 평균) OLR이 양의 값을 가지는 해들의 500hPa 지위고도 편차의 합성장 분포

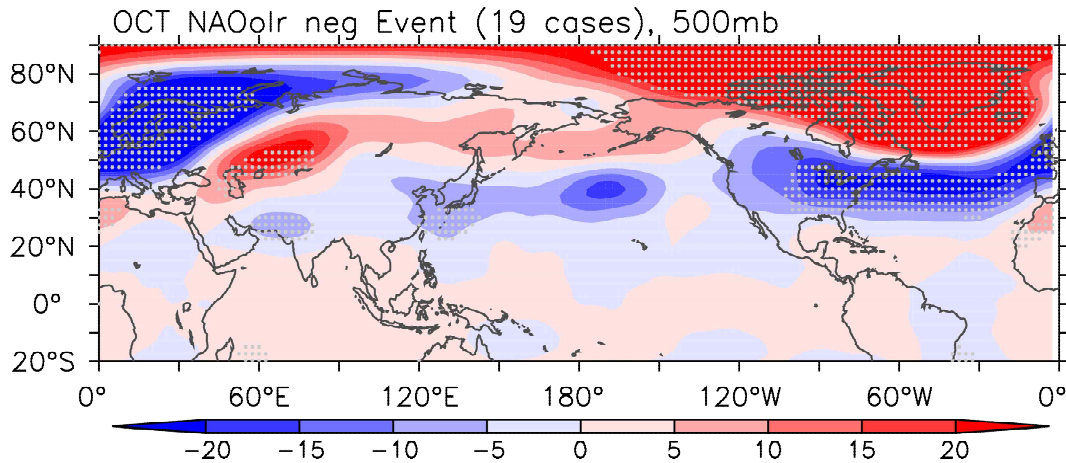


- 10월 북서 태평양(필리핀 해)에서 대류억제(양의 OLR)의 특징을 보였으며(Fig. 3), 이 지역에서 평균된 OLR 편차가 양의 값을 가지는 해들의 500hPa 지위고도 편차의 합성장 분포

는 현재 10월 평균 500hPa 지위고도 편차장과 상당히 유사함. 그러므로 필리핀해 대류활동이 10월 한반도 주변 대기순환장 발달에 기여한 것으로 보임.

□ 북대서양 NAO 관련 특성

[Fig. 7] 10월 NAO 지수가 음의 값을 가지는 해들의 500hPa 지위고도 편차의 합성장 분포



- 10월 음의 NAO 지수를 갖는 년도들의 500hPa 지위고도 편차의 합성장 분포는 현재 10월 발달한 북대서양에서 음의 NAO가 중위도 유라시아 파동 패턴 및 한반도 주변 저기압성 순환 편차 발달에 기여했음을 보여줌.
- 10월 음의 NAO 발달은 열대 북대서양 양의 해수면 온도 편차와 일부 관련이 있는 것으로 보임¹⁾Park et al. (2023).
- 한반도 주변 대기순환장 발달(즉 한반도 주변 저기압성 순환 편차, 몽골지역 고기압성 순환 편차)에 기여를 한 기후 인자들은 모두 연결되어 있음. 즉, 양의 IOD와 엘니뇨는 북서태평양 양의 OLR 발달 기여했으며, 열대 북대서양 양의 해수면 온도는 음의 NAO의 강제력이 되었음.

1) Park, J.-H. et al. (2023) Two regimes of inter-basin interactions between the Atlantic and Pacific Oceans on interannual timescales. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6:13.

□ 요약

평년 비슷 범위의 기온과 평년보다 적은 강수량을 나타낸 10월 (24일까지)	
기온	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 평년 비슷 범위의 기온 (-0.1°C) ✓ 10월 전반적으로 몽골의 고기압, 한반도 주변 저기압의 분포 한반도 기온 변화에 영향. ✓ 몽골의 고기압, 한반도 주변 저기압은 엘니뇨, 양의 IOD, 음의 NAO 발달과 관련됨.
강수	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 평년보다 적은 강수(13.7mm, 17.4%tile) ✓ 한반도 주변 저기압에 따른 이벤트성 강수 현상 관련되며, 특히 평년보다 많이 내린 10/19 강수는 한반도 북동쪽 저기압성 순환 편차에 의한 북풍과 북서태평양 고기압성 순환 편차에 의한 남풍 수렴과 관련

□ 토의사항

- 가을철 한반도 기후에 영향을 미치는 중위도 유라시아 파동 전파와 열대 인도양 및 태평양의 기여를 구분하는 것이 가을철 한반도 기온/강수 예측에 중요한 것으로 보임, 그러므로 두 개의 인자 중 무엇이 우세한가에 대한 정량적으로 판단할 수 있는 연구가 필요.
- 10월 음의 NAO가 몽골 고기압성 순환 편차 한반도 주변 저기압성 순환 편차 형성에 기여하지만, 한반도 기온/강수와 NAO와의 상관성은 작는데 이는 저기압의 정확한 위치에 따라 한반도 기온/강수 변화가 달라지기 때문임. 이 부분은 한반도 가을철 기후 예측을 어렵게 만드는 이유 중 하나임.
- 9월 우리나라 기온/강수 변동에 엘니뇨와 IOD의 역할이 작았던 이유는 영향이 있었지만, 다른 요인에 의해서 영향이 작게 나타난 것으로서, 10월은 열대 및 중위도 대기 파동 전파 모두 서로의 영향을 증가시키는 방향으로 작동했기 때문에, 9월에 비해 10월에 열대 영향이 뚜렷하게 나타난 것으로 보임.
- 9월 예보토의에서 10월 기온, 강수 예측에서 각각 (+) 와 (0+)를 예측함. 즉 MME에서 한반도 남쪽으로 고기압성 순환 편차, 북쪽으로 저기압성 순환 편차가 위치하여 주로 남서풍의 영향을 받아 기온 높고 강수가 적지 않을 것이라고 예측함. 과거 관측에서 엘니뇨와 양의 IOD 발달시 기온 낮고 강수 많은 경향 있었으나, 올해 현황은 엘니뇨가 강하고 빠르게 발달하고, 대기반응이 일반적으로 엘니뇨 발달할 때와 다르게 나타나 MME의 결과를 중요하게 고려함. 하지만 이번 10월은 양의 IOD와 엘니뇨의 전형적인 중위도 원격상관 패턴이 잘 형성되어 기온이 평년 수준이 머물렀음.

□ 10월 예측인자 검증

10월 기온		10월 강수	
8월 열대 인도양 해수면 온도	+		
8월 북대서양 해수면 온도	+		
엘니뇨 + 양의 IOD	-	엘니뇨 + 양의 IOD	0+
엘니뇨 발달	EC	엘니뇨 발달	EC
최근 경향	2/3/5	최근 경향	1/2/7
종합	0-	종합	+

- 10월 기온은 엘니뇨 단일 인자로서는 EC 경향을 보이지만 양의 IOD가 함께 발달하면, 기온은 평년보다 낮은 경향을 보임. 엘니뇨가 발달할 때 8월 열대 인도양과 북대서양 해수면 온도 인자는 10월 기온/강수 경향이 뚜렷하지 않아 고려하지 않음.
- 그러므로 엘니뇨+양의 IOD 인자만으로는 평년보다 낮은 기온을 예측하고 있으나 최근 온난화 영향을 고려해서 10월 기온은 한 단계 올린 평년 수준이거나 낮은 것으로 예측함. 결과적으로 이번 10월은 엘니뇨+양의 IOD 인자 관련 대기 순환이 잘 발달하여 관측 인자 기반으로 하는 10월 기온 예측은 적중함.
- 10월 강수는 엘니뇨+양의 IOD 상황일 때 평년보다 많은 강수가 우세하여 평년보다 많은 강수가 내릴 것으로 예측함. 한반도 주변에서는 저기압성 순환 편차가 형성되어 강수 발달 조건이 만들어졌으나, 강수 발달을 위한 또 다른 조건인 북서태평양의 고기압성 순환 편차가 한반도 쪽으로 확장이 되지 못함 (필리핀 해 주변에서 형성됨). 이 때문에 강수는 적게 내려서, 예측은 적중하지 못함.
- 엘니뇨+양의 IOD 발달시 한반도 주변 대기 순환장 즉 몽골 고기압, 한반도 주변 저기압이 어디에 위치 하느냐에 따라서 기온/강수에 대한 예측 결과가 달라지기 때문에, 10월 기온/강수에 대하여 엘니뇨+양의 IOD 인자 활용할 때 위의 사항을 고려할 필요가 있음

우리나라 가뭄 미래 전망 보도자료

보도자료

다시 대한민국!
새로운 국민의 나라



배 포 일 시 2023년 12월 14일(목)

보 도 시 점

즉시

보 도 자 료
배 포 담 당 자

경영지원실 대외협력과 하만재
(051-745-3947, 01093167299)

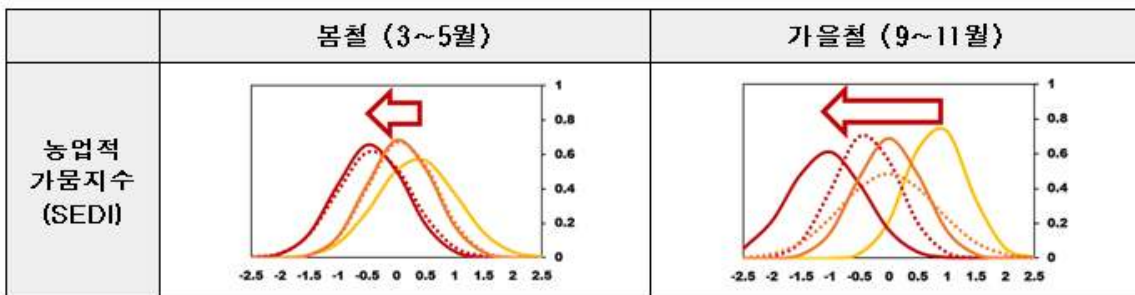
현재추세의 탄소배출, 21세기 말 우리나라 극심한 가뭄 증가

- 5% 확률 수준의 이례적인 극심한 가뭄, 봄철보다는 가을철이 더 심화

아시아태평양경제협력체 (APEC) 기후센터 (원장 신도식)는 사회경제적 피해를 가져오는 우리나라 주요 기후 재난 중 하나인 우리나라 가뭄에 대한 미래 전망 분석 결과를 발표하였다.

이번에 발표한 미래 남한지역 가뭄 전망은 기상청의 국가 기후변화 표준 시나리오 중 동아시아 지역의 고해상도 (25km) 시나리오 (SSP, 지역기후모형 3종 앙상블*)를 이용하여 표준강수지수 (SPI, 누적 강수량만을 이용한 기상가뭄지수), 표준증발산부족량지수 (SEDI, 대기와 토양의 상호작용인 실증발산량을 고려한 표준 증발산부족지수, APEC 기후센터 개발 및 현업 운영 중)와 관련된 대기 순환 패턴의 근미래 (2021~2040년)/먼미래 (2081~2100년) 전망에 대하여 분석한 결과이다.

* IPCC 제6차 평가보고서 기준의 공통 사회경제적 경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)에 따른 3가지 지역기후모형을 이용하여 각각 산출된 결과를 통합한 기후변화 시나리오



〈 봄철 (3~5월), 가을철 (9~11월) 농업적 가뭄지수 분포의 현재 대비 미래 변화 〉

- 노란색 : 현재기후(1985~2014), 주황색 : 근미래(2021~2040), 빨간색 : 먼미래(2081~2100)
- 점선 : 저탄소 시나리오(SSP1-2.6), 실선 : 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)
- 왼쪽(음의 방향)으로 이동하는 경우 가뭄이 심화함을 나타냄
- 저탄소 시나리오(SSP1-2.6): 온실가스를 현저히 감축하여 2070년경 탄소중립에 이르는 시나리오
- 고탄소 시나리오(SSP5-8.5): 현재 수준과 유사하게 온실가스 배출을 지속하는 시나리오

고탄소 시나리오에서는 현재 기후(1985~2014년) 대비 근미래보다 먼미래에 가뭄이 더욱 심화되며, 3개월 누적 가뭄지수를 계절별로 비교 해 본 결과, 봄철(3~5월)보다 가을철(9~11월) 가뭄이 더욱 심화될 것으로 전망되었다(붙임 1 참조).

가뭄 강도	D2 심각한 가뭄 (-1.3~-1.59)	D3 극심한 가뭄 (-1.6~-1.99)	D4 이례적으로 극심한 가뭄(-2.0 이하)	※ SEDI 가뭄지수 강도 분류
봄철 (3~5월)				<ul style="list-style-type: none"> - None : 평년 또는 습한 상태, -0.49 이상 - D0 : 비정상적인 건조 상태, -0.5~-0.79 - D1 : 약한 가뭄, -0.8~-1.29 - D2 : 심각한 가뭄, -1.3~-1.59 - D3 : 극심한 가뭄, -1.6~-1.99 - D4 : 이례적으로 극심한 가뭄, -2.0 이하 (출처 : 미국 가뭄 모니터 U. S Drought Monitor)
가을철 (9~11월)				

〈고탄소 시나리오 21세기(2021~2100년) 봄/가을철 SEDI 가뭄지수 강도별 발생 횟수 분포〉

가뭄지수의 강도는 D0~D4로 분류하며, 고탄소 시나리오에서 봄철에는 D2(심각한 가뭄)가 남부지역에서, D3(극심한 가뭄)는 서울·경기 지역에서 더 빈번하며, 가을철에는 D3(극심한 가뭄)가 남부지역에서 매우 빈번할 것으로 전망되었다. 현재에는 거의 발생하지 않는 D4(이례적으로 극심한 가뭄, 5% 이하 수준의 발생)는 봄/가을철 모두 남부보다는 중·북부지역에서 발생할 것으로 전망되었다.

결론적으로 고탄소 시나리오에서 21세기 후반 농업적 가뭄지수 변화와 관련한 우리나라 주변 대기 순환장 분석 결과, 봄철에는 현재보다 강수량은 더 증가하지만, 가파르게 상승하는 기온에 따라 대기 증발산량보다 요구량의 증가가 더욱 뚜렷해지기 때문에 가뭄이 심화하는 것으로 전망되었다. 가을철에는 지표면 기온이 더 크게 올라가고, 가을철 강수와 연관이 있는 다습한 남풍의 유입이 줄어들며 강수량이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 농업적 가뭄지수와 관련된 변수 모두가 가뭄을 심화시켜 우리나라 전 지역에 대해 봄철보다 가을철 가뭄이 극심해질 것으로 전망되었다(붙임 2 참조).

APEC기후센터 신도식 원장은 “지구온난화로 인한 고온 현상이 극심해질 것이 예상됨에 따라, 우리나라의 지역별 미래 가뭄 정보는 매우 중요해집니다.”라며, “APEC는 향후 가뭄 등 기후변화에 따른 사회적·경제적 피해 대응에 활용할 수 있도록 국가 기후변화 표준 시나리오 기반의 영향분석을 연구하도록 하겠습니다.”라고 밝혔다.

붙임 1

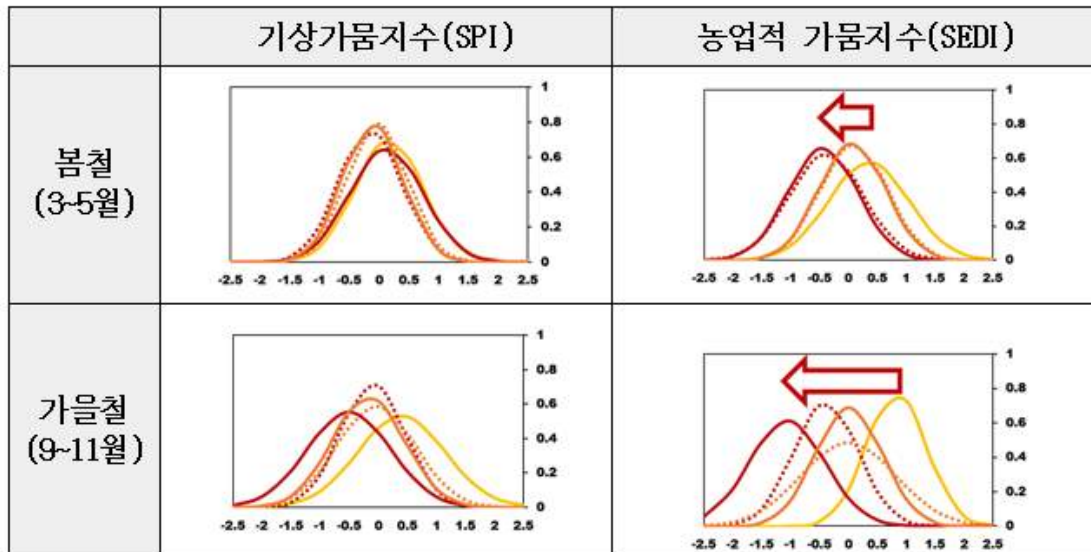
가뭄지수의 현재 대비 미래 변화

□ 표준강수지수 (SPI) 와 표준증발산부족량지수 (SEDI) 의 미래 변화 분포

- 지구온난화로 의한 기온 변화가 반영된 남한지역 가뭄의 미래 변화를 분석하기 위해, 고해상도 (25km) 동아시아 기후변화 시나리오* 지역 기후모형 3개 (HadGEM3-RA, WRF, CCLM) 를 이용하여 표준강수지수 (SPI) 와 실제 증발산량을 이용한 표준증발산부족량지수 (SEDI) 를 산출하고, 모형 앙상블 평균을 통해 미래 변화를 분석함.

* CORDEX-EA Phase 2: 지역 기후 상세화 연합 실험(Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)-동아시아(East Asia) 프로젝트 Phase 2

< 봄철(3~5월), 가을철(9~11월) SPI, SEDI 분포의 현재 대비 미래 변화>



* 노란색 : 현재기후(1985~2014), 주황색 : 근미래(2021~2040), 빨간색 : 먼미래(2081~2100)

* 점선 : 저탄소 시나리오(SSP1-2.6), 실선 : 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)

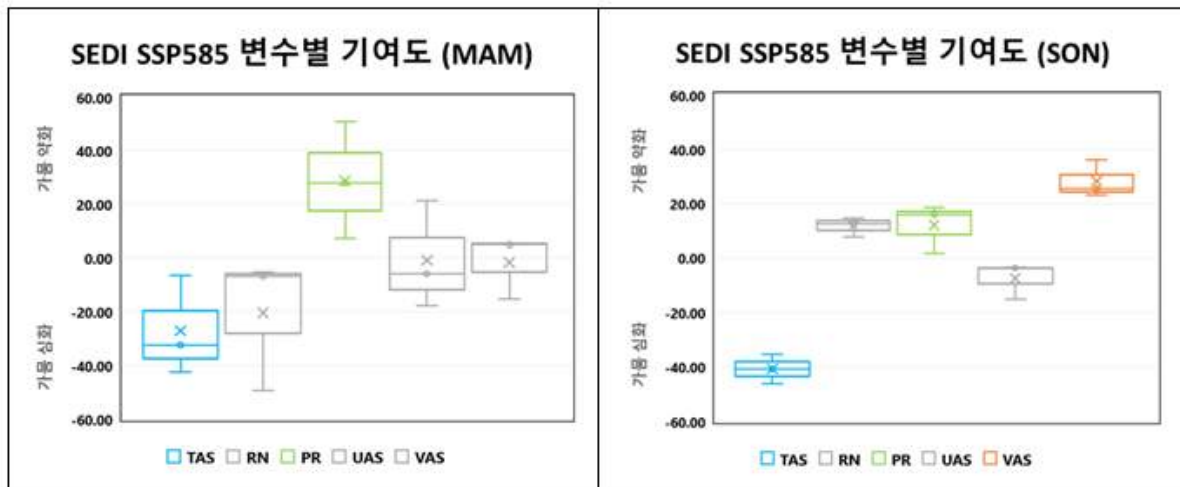
* 왼쪽(음의 방향)으로 이동하는 경우 가뭄이 심화함을 나타냄

- 21세기 후반기에 우리나라의 봄철 평균 SPI는 현재 (0.1)와 비슷한 수준이지만, SEDI는 현재 (0.4) 대비 21세기 후반기에 -0.6까지 감소할 것 (가뭄 심화)으로 전망됨. 가을철 평균 SPI는 현재 (0.4) 대비 가뭄이 약간 심화(-0.5)하는 반면, SEDI는 현재 (0.8) 대비 가뭄이 매우 심화(-1.1)하여, 봄철 (3~5월)보다 가을철 (9~11월)에 가뭄 심화가 더욱 강할 것으로 전망함. 미래 기후변화 시나리오에서는 표준강수지수 (SPI) 보다 실증발산량을 고려한 표준증발산부족량지수 (SEDI) 가 더욱 가뭄이 심화할 것으로 전망됨.

□ 표준증발산부족량지수 (SEDI) 의 변화에 기여하는 변수별 기여도 분석

- 누적강수량 자료만을 사용하는 표준강수지수 (SPI) 보다 표준증발산부족량지수 (SEDI) 에서의 가뭄 심화 미래 전망에 대한 원인분석을 위해 입력 자료로 필요한 변수(지표면 기온 (TAS), 순복사량 (RN), 강수량 (PR), 동서 방향 바람 (UAS), 남북 방향 바람 (VAS))에 대해 변수별 기여도를 분석하였음.
- 가뭄지수에 대한 기여도의 양/음 부호는 변화의 상관성과 관련이 있으며, 기여도가 양의 부호로 값이 클수록 가뭄 약화, 음의 부호로 클수록 가뭄 심화와 관련이 있음.

< 다중회귀분석을 통해 산출한 변수별 SEDI 가뭄지수 기여도의 모형 분포(SSP5-8.5)>

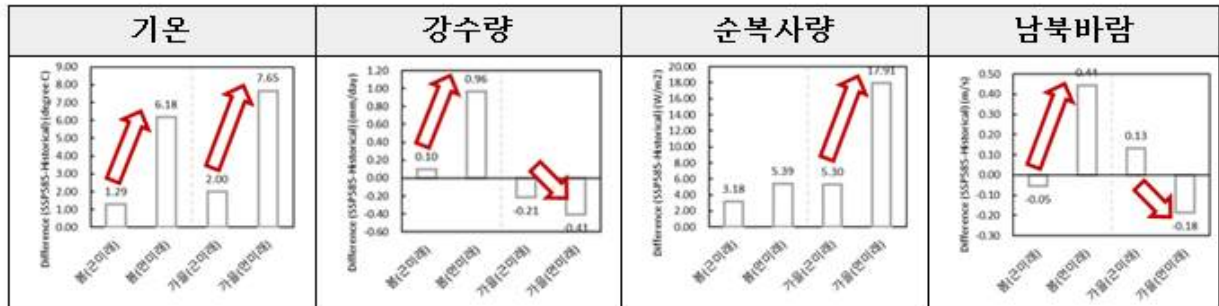


※ 3개의 모형 중 2개 이상의 모형에서 유의한 값을 색으로 표시

- 봄철 (3-5월, MAM) 가뭄지수의 변화에 대한 변수별 기여도는 지표면 기온 (TAS) 이 -27%, 순복사량 (RN) 이 -20%로 음의 기여도를 보이고 있고, 강수 (PR) 는 +28%로 양의 기여도를 보임. 봄철에는 기온과 순복사량이 증가할수록 가뭄 심화에 기여하고, 강수량이 증가할수록 가뭄 약화에 기여함.
- 가을철 (9-11월, SON) 가뭄지수의 변화에 대한 변수별 기여도는 지표면 기온 > 남북 방향 바람 > 강수량 순으로 나타났으며, 가을철이 봄철보다 기온 증가가 매우 뚜렷한 특징을 보임. 지표면 기온이 -41%, 남북 방향 바람이 +28%, 강수량이 +12%의 기여도를 보임. 가을철에는 기온이 증가할수록 가뭄 심화에 기여하며, 강수량과 남북 바람 방향이 증가할수록 가뭄 약화에 기여하는 결과를 보임.

□ 표준증발산부족량지수 (SEDI)의 변화에 기여하는 변수의 미래 변화 분석

<SEDI 가뭄지수에 기여하는 네 변수의 미래 변화 (SSP5-8.5)>



※ 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)의 SEDI 가뭄지수의 미래 변화에 기여도가 높으면서 유의미한 세 가지 변수가 먼미래에 가뭄이 심화하는 방향으로 전망됨.

- 다중 회귀 분석을 통해 실제 증발산량을 고려한 SEDI 가뭄지수의 미래 변화에 기여하는 변수들을 이용하여, 남한지역 주변 기상조건 및 미래 가뭄 변화의 원인을 분석함. 봄철에는 기온(강할수록 가뭄 심화에 기여)이 증가하고 있으며, 강수량(강할수록 가뭄 약화에 기여) 또한 증가하고 있고, 순복사량의 변화는 크게 나타나지 않음. 현재보다 강수량은 더 증가하지만, 가파르게 상승하는 기온에 따라 대기 증발산량보다 요구량의 증가가 더욱 뚜렷해지기 때문에 가뭄이 심화하는 것으로 전망.
- 하지만 가을철에는 남한지역 상층에 고기압이 위치하면서, 다습한 남풍류의 바람이 감소하여, 기온 및 순복사량(강할수록 가뭄 심화에 기여)이 매우 크게 증가하고, 강수량과 남북 바람 방향(강할수록 가뭄 약화에 기여)은 오히려 감소하며, 네 가지 변수가 모두 가뭄이 심화되는 방향으로 전망하고 있음.
- 결론적으로, 고탄소 시나리오 먼미래에 봄철보다 가을철 지표면 기온 증가가 더욱 뚜렷하고, 가을철 강수 증가와 관련이 있는 남북 방향 바람과 강수량은 현재 기간 대비 오히려 감소하고 있어, 봄철보다 가을철 가뭄이 더욱 심해지는 방향으로 변화할 것으로 전망됨.