

**이상기후 대응을 위한**

**기후 감시·분석 정보 개선 및 통합 시스템 구축**

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

**명복순, 김선태, 여새림, 한정민, 이은정**

**기후사업본부 기후분석과**

**2022.12.**

**APEC기후센터**

## 평문 초록

APCC에서는 우리나라 기온과 강수량에 영향을 미치는 다양한 기후 요소를 분석하는 한편 기온과 강수를 예측할 수 있는 관측기반 인자를 발굴하여 예측에 활용해 왔습니다. 폭염이나 한파 등의 이상기후 현상 빈도 역시 이러한 예측인자와 관련성이 높기 때문에 예측인자들을 발굴하고 예측을 고도화하는 업무를 통해 이상기후의 예측성 향상에 또한 기여해 왔습니다.

한반도 기후에 영향을 미치는 다양한 요소 중 대서양에 기인한 유라시아 대기 파동의 전파가 특정 계절에 한반도 기후에 큰 영향을 주고 있고 인도양의 온난화에 따라 동아시아의 기후 변동성 역시 많은 영향을 받는 것으로 나타나고 있습니다. 따라서 최근 한반도 기후에 영향력이 증가한 상기 요소들에 대한 상세한 기작 및 영향 분석이 필요해짐에 따라 북대서양 변동성과 남아시아 고기압이 한반도 기후에 미치는 기작과 영향에 대해 연구하고 이를 예측에 활용하는 방안을 제시하였습니다. 또한 기후 예측 현업 업무 지원 시 다양한 기후 예측인자 정보의 통합 기반 마련을 위해 인자의 중요도를 정성적으로 판별하여 예측을 시도하였고 그 결과를 검증하였습니다.

다양한 이상기후 현상 중에서도 특히 호수와 홍수는 국민의 생명에 직접적인 위협을 가하고 막대한 경제적 피해를 유발합니다. 기후변화에 따라 이러한 호수 관련 이상기후의 빈도와 강도 역시 변화할 것이고 이에 대한 신뢰성 있는 미래 전망이 이상기후 대비에 필요합니다. 따라서 미래 기후변화가 이상기후의 특성을 어떻게 변화시킬지를 알아보기 위해 기후변화에 따른 한반도 미래 홍수위험도 변화와 태풍 특성 변화에 대해서 분석하였습니다.

이상기후 감시, 분석 및 예측이 원활히 수행되기 위해서는 이러한 과정들을 지원할 효율적이고 신속한 시스템 또한 필수적인 요소입니다. 2021년에 개발한 APCC 기후 감시분석 시스템인 CAS(Climate Analysis System)의 개선 및 고도화를 통해서 주요 기후 요소를 체계적으로 감시할 뿐만 아니라 예측인자를 자동 계산하고 그와 관련한 예측인자 정보를 통합적으로 제공하는 기능을 개발하였습니다.

본 과제에서는 한반도 이상기후 대응을 위한 과학적인 분석과 미래 전망, 그리고 감시·분석 통합 시스템 구축을 통해 APCC가 이상기후에 효율적으로 대응할 수 있는 기반을 마련하였습니다. 이러한 정보와 시스템이 한반도 장기예보 신뢰도 향상에 기여하고 이상기후 감시 및 예측에 실질적인 도움이 될 수 있기를 기대합니다.

# Executive Summary

In the 6th phase of the Asia-Pacific project (2022-2024), we will advance and improve information of climate monitoring and analysis as well as develop optimizing technology to produce the best forecasts using various information in order to contribute to long-term forecasting and to preemptively respond to extreme climate events. To this end, in the first year, an analysis of the atmospheric variability mechanism in the Atlantic and Indian Oceans and the impact on the Korean Peninsula was performed, taking into account the importance in the recent decades. In order to improve climate prediction information and prepare a basis for optimal utilization of prediction information, qualitative integrated predictions of various predictors were produced and the results were verified. In addition, considering impacts of climate change, the future risk of flooding in the Korean Peninsula and changes in typhoon characteristics were predicted. Finally, the analysis and monitoring system was improved and advanced to perform climate monitoring, analysis and forecasting tasks more efficiently.

Considering the importance in the recent decades, the effects of North Atlantic variability and South Asian High variability on the climates of the Korean Peninsula were examined. The impact of North Atlantic Oscillation (NAO) on the Korean peninsula in spring is nonlinear; When the NAO is in a positive phase, high and low temperatures appear in the Korean Peninsula depending on the difference in tropical SST. In the case of high temperatures on the Korean Peninsula, El Niño in the central Pacific appears and the Indian Ocean is warm, while in the case of low temperatures, La Niña appears in the eastern Pacific and the Indian Ocean is cold. When the NAO is in negative phase, the opposite tendency appears in the Arctic region. When there is above-normal Barents sea ice, there is a below-normal temperatures on the Korean Peninsula, and when there is below-normal sea ice, there is a tendency to show a above-normal temperature.

In the expansion mode during summer, which is the first variability mode of the South Asian High, high sea surface temperatures (SSTs) appear in the Indian Ocean in spring, the temperature rises from the lower atmosphere, and as convection becomes active in the Arabian Sea in July, the expansion mode develops further in the upper layer. It was similar to the Indian Ocean capacitance effect that occurs when El Niño in previous winters declines and La Niña develops. In particular, when a positive Pacific North America (PNA) teleconnection appears in July, a anti-cyclonic circulation in the southern part of the Korean Peninsula and a cyclonic circulation in the Korean Peninsula develop, causing below-normal temperature and above-normal precipitation in Korea during July. When the north-south mode, the second variability mode of the South Asian High, moves northward, the Philippine Sea heats up in the spring and convection becomes active in the subtropical Indian Ocean and the western Pacific in summer as weak La Niña continues from the previous winter. It

was found that high pressure developed in mid-latitudes due to wave propagation in the south-to-north direction. At the same time, atmospheric waves in the west-to-east direction develop from the warm mid-latitudes of the North Atlantic inducing high pressure on the Korean Peninsula, and the South Asian High moves north. At this time, due to the overlap of high pressure by the wave propagation of the south-to-north direction and the west-to-east direction wave, a strong positive pressure high is developed on the Korean peninsula, resulting in above-normal temperatures in Korea.

In order to prepare the basis for integrating various predictor information, qualitative integration was performed through prior discussions with experts. As a result of the prediction verification, when the temperature in 2022 was neutral or low temperature (March and October), the predictability was better than that of the simple integration. In addition, it was found that the Korean peninsula was hot in the spring of 2022 due to positive NAO and the warm Indian Ocean, and that, in summer, there were few predictors that predicted both atmospheric circulations and temperatures in Korea.

For evaluating the future flood risk of 26 watersheds in South Korea, we analyze the change in extreme precipitation with a 100-year return period under future global warming . In the case of the high CO<sub>2</sub> emission scenario, the number of watersheds with a 100-year return period precipitation increase of 50% or more compared to the present climate is predicted to increase significantly in the latter half of the year. On the other hand, in the case of the low-CO<sub>2</sub> emission scenario, after the first half of the year, the increase in the extreme precipitation significantly is much less than that of the high-CO<sub>2</sub> emission scenario. The above results imply that the possibility of flooding by extreme precipitation can be reduced in the future when the carbon-neutral policy is successfully achieved. In this study, based on the cluster analysis of precipitation events over South Korea, the characteristics of future changes in precipitation-related atmospheric circulation patterns is also analyzed. The first cluster is characterized by the positive 500 geopotential height (GPH) anomaly to the southeast of the Korean Peninsula and a negative 500 GPH anomaly in the northeast, and the second cluster by the positive 500 GPH anomaly in Okhotsk and the negative 500 GPH anomaly around South Korea. The former tends to gradually move northward with future climate change, while the latter shows a characteristic of moving the entire pattern northwards in the middle of the future and moving back around the Korean Peninsula in the latter half.

As a result of analysis of changes in typhoon characteristics on the Korean Peninsula according to future climate change, the Northwest Pacific typhoon activity index decreased at low latitudes, increased at high latitudes, and the change was stronger in the high-CO<sub>2</sub> emission scenario during distant-future period. In addition, it is predicted to move further north, expand east and west, and decrease in the equatorial region in the future, which implies that more typhoons will occur in the mid-latitude region closer to the Korean

Peninsula. Sea surface temperature also rises steeply, and vertical wind shear, one of the main factors in the occurrence of typhoons, is predicted to weaken in the southern part of the Korean Peninsula. It can affect the Korean Peninsula by acting as a favorable condition for the typhoon to last longer. In addition, using CORDEX-EA, typhoon genesis density, track density, and intensity for 5 regions over the Korean Peninsula and its vicinity are analyzed. Both typhoon genesis and track density are expected to decrease in the Northwest Pacific region and increase in the mid-latitude region close to the Korean Peninsula. Among the 5 regions, the rate of increase in typhoon track density is the largest in regions 3 and 4 in mid-latitudes, where typhoons rarely occurred. In addition, the strength of a typhoon is predicted to become stronger in the high-CO<sub>2</sub> emission scenario compared to the Historical period. The proportion of typhoons that are stronger than the present increases in all regions, but among them, region 1, region 3, and region 4 show a characteristic of greatly increasing, and the ratio of very strong typhoons compared to the present shows the largest increase in region 3.

Due to the frequently occurring abnormal climate around the world, the need to establish a rapid climate monitoring system is further increasing. In an effort to reduce property and human damage through continuous monitoring of extreme weather conditions that are getting stronger around the world, it is necessary to collect the latest observation data and establish a periodic abnormal weather monitoring system. For quick analysis, climate monitoring service and climate analysis service were developed based on observational data provided by NCEP (National Centers for Environmental Prediction) and KMA (Korea Meteorological Administration). The climate monitoring service provides up-to-date information on various climate variables, and the climate analysis service not only composite of data or provides time-series analysis results, but also standardizes the data collection system to respond quickly to abnormal weather. In addition, an automatic predictor production and information provision system was additionally established for the convenience of users to provide rapid monitoring results. In addition, by establishing a dual system for the convenience of users' research and providing simultaneous service on the internal and external networks in APEC Climate Center, users can freely use the climate analysis system from anywhere. Researchers who mainly use the internal network can directly access and use the climate analysis system on the internal network, thereby increasing work efficiency.

## 국문 요약

아태사업 6단계(2022~2024년)에서는 기후 감시·분석 정보를 고도화하고 개선하는 한편 다양한 정보를 활용하여 최적의 예측을 생산하는 기술을 개발하여 장기에보에 기여하고 이상기후 선제 대응 능력을 강화하고자 한다. 이를 위해 1차년에는 최근 중요도를 고려하여 대서양 및 인도양의 대기 변동성 기작 분석과 한반도 영향 분석을 수행하여 기후 예측 정보를 개선하는 한편 예측 정보의 최적 활용 기반을 마련하고자 다양한 예측인자들의 정성적 통합 예측을 생산하고 그 결과를 검증하였다. 또한 기후변화의 영향을 고려하여 미래 한반도 홍수 위험도와 태풍 특성 변화를 전망하였다. 마지막으로 기후 감시, 분석, 예측 업무를 보다 효율적으로 수행하기 위해 기 개발된 기후 감시분석 시스템을 개선하고 고도화하였다.

최근 중요도를 고려하여 북대서양 변동성과 남아시아 고기압 변동성이 한반도 기후에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 봄철 북대서양 변동성(North Atlantic Oscillation)이 한반도에 미치는 영향은 비선형적으로 NAO가 양의 위상일때는 열대 SST의 차이에 따라 한반도에 고온 및 저온이 나타났다. 한반도 고온일 경우 중태평양 엘니뇨가 나타나며 인도양이 따듯한 반면 저온일 경우에는 동태평양에 라니냐가 나타나며 인도양이 차가웠다. NAO가 음의 위상일때는 극지역에서 반대 성향이 나타났는데 바렌츠 해빙이 많은 경우 한반도에 저온 편차가, 해빙이 적을 경우 고온 편차가 나타나는 경향을 보였다.

여름철 남아시아 고기압의 제 1 변동 모드인 확장모드는 봄철 인도양에 고온이 나타날 경우 대기 하층부터 기온이 상승하고 7월이 되어 아라비아해에 대류가 활발해짐에 따라 상층에 확장모드가 더욱 발달하는데 이전 겨울철 엘니뇨가 쇠퇴하고 라니냐가 발달할 때 나타나는 인도양 축전기 효과와 유사하였다. 특히 7월에 양의 Pacific North America 원격상관이 나타날 때 한반도 남쪽에 고기압성 흐름이, 한반도에 저기압성 흐름이 나타나 저온과 다우 경향을 보였다. 제 2 변동 모드인 남북 모드가 북상하는 경우에는 이전 겨울철부터 약한 라니냐가 지속되는 가운데 봄철 필리핀해가 가열되고 여름철에 아열대 인도양과 서태평양에 대류가 활발해져 남북 방향의 파동 전파로 중위도에 고기압이 발달하는 동시에 따듯한 대서양 중위도에서 발달한 동서 방향의 대기 파동(양의 East Atlantic 원격상관 유사 패턴)이 한반도에 고기압을 발달시켜 남아시아 고기압이 북상하는 것으로 나타났다. 이때 한반도에는 남북 방향, 동서 방향 파동 전파로 인한 고기압의 중첩으로 순압성 고기압이 강화되어 고온이 나타나게 된다.

다양한 예측인자 정보의 통합 기반 마련을 위해 APCC 예보토의 회의 전 사전 토의를 통한 정성적 통합을 수행하였다. 예측 검증 결과 2022년 기온이 중립이거나 저온인 경우(2월, 10월) 단순 통합에 비해 정성적 통합의 예측성이 좋았으며 봄철 양의 NAO와 따듯한 인도양의 영향으로 한반도가 고온이었던 반면 여름철에는 기작까지 적중한 예측인자가 적었다.

기후변화에 따른 이상기후 발생에 대한 감시 정보 제공 그리고 탄소 중립 국가 정책 지원 및 기후변화 관련 사회적 이슈의 과학적 정보 산출을 목적으로 한반도 상세 기후변화 시나리오를 활용하여 기상청 26개 대권역별 미래 홍수위험도를 평가하였다. 이를 위해서 현재 기후

대비 100년 재현 빈도 극한 강수량의 변화량으로서 정량화하여 분석하였다. 고탄소 시나리오의 경우 현재 대비 100년 재현 빈도 강수량 변화율이 50% 이상의 권역 수가 후반기로 갈수록 큰 폭으로 증가하는 것으로 전망되었으며, 26개 권역 재현 빈도 극한 강수량 평균은 미래 기후에서 증가 경향을 보였다. 이에 반해 저탄소 시나리오의 경우 전반기 이후에는 고탄소 시나리오의 극한 강수량 증가에 비해 상당히 감소하여, 21세기 후반기 대부분의 권역에서 50% 이하인 것으로 분석되었다. 위와 같은 결과는 탄소 중립 정책의 효과로 지구 온난화를 감소시켜서, 홍수 원인이 되는 극한 강수의 감소로 홍수 발생 가능성을 낮출 수 있다는 것을 암시한다. 또한 이 연구에서는 한반도 강수 이벤트들의 군집 분석을 기반으로 하여 강수 관련 대기순환 패턴의 미래 변화 특성 분석을 수행하였다. 첫 번째 군집은 한반도 남동쪽에 양의 지위고도 편차, 북동쪽에 음의 지위고도 편차가 위치하여, 북쪽의 차갑고 건조한 공기와 남쪽의 고온 다습한 공기가 우리나라에서 수렴하는 특징을 보이고, 두 번째 군집은 오토츠크해 주변에 양의 지위고도 편차가 위치하고 한반도 주변으로 음의 지위고도 편차가 위치하여, 남동풍 편차의 영향을 받는 구조이다. 전자는 미래 기후변화에 따라 점차 북쪽으로 이동하는 경향성을 보이고 후자는 미래 중반기에 전체 패턴이 북쪽으로 이동하고, 후반기에 다시 한반도 주변으로 이동하는 특성을 보였다.

미래 기후변화에 따른 한반도 태풍 특성 변화 분석 결과, 북서태평양 태풍 활동 지수는 저위도에서 감소하고, 고위도에서 증가하며, 고탄소 시나리오 먼미래 기간에 변화가 더욱 강하게 나타났다. 또한 미래에 더욱 북상하며, 동서로 확장하고, 적도 지역에서는 감소하는 것으로 전망되었고, 이는 한반도와 더욱 가까운 중위도 지역에서 태풍이 더욱 많이 생길 것으로 예측할 수 있다. 해수면 온도 또한 가파르게 상승하며, 태풍의 발생에 주요한 요인 중 하나인 연직 바람 시어 또한 한반도 남쪽에서 약해지는 것으로 전망하고 있는데, 북서태평양에서 발생하여 한반도 남쪽까지 올라 온 태풍이 빨리 소멸되지 않고 더욱 오래 지속될 수 있는 호조건으로 작용하여 한반도에 영향을 미칠 수 있다. 또한 동아시아 고해상도 상세 기후 시나리오 자료를 이용하여, 한반도 인근 지역에 영향을 주는 태풍 발생 밀도, 진로 밀도, 강도에 대한 미래 전망을 분석하였다. 태풍 발생 밀도 및 진로 밀도 모두 북서태평양 지역에서 감소하고, 한반도와 가까운 중위도 지역에서 증가하는 것으로 전망하고 있다. 한반도 인근 5개 지역을 선정하여, 상세 분석을 실시하였는데, 5개 지역 중에서 태풍 진로 밀도의 증가율은 태풍 진로 횟수가 적었던 서해 중부와 한반도 중부 지역에서 가장 크게 나타났다. 또한 태풍의 강도를 나타내는 최저 중심 기압 또한 현재 943hPa 대비 고탄소 시나리오에는 933hPa까지 강해지는 것으로 전망하였다. 현재보다 강한 태풍의 비율은 모든 지역에서 증가하지만 그 중에서도 서해 및 중서부 지역에서 크게 증가하는 특징을 보이고, 현재 대비 매우 강한 태풍의 비율은 수도권 주변 서해에서 가장 큰 증가를 보인다. 한반도 5개 지역에 대해 태풍 발생 밀도, 진로 밀도, 중심기압 등을 지역별로 시나리오별로 분석해 본 결과, 태풍이 자주 지나가지 않았던 서해 및 중부 지역의 증가가 매우 크게 나타났으며, 강도 또한 현재보다 더욱 강해지는 특징을 보였다.

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 기후감시 서비스와 기후분석 서비스를 개발하였다. 기후모니터링 서비스는 다

양한 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 자동생산 및 정보 제공 시스템을 추가로 구축하였다. 또한, 사용자들의 편리성 향상을 위해 이중화 시스템을 구축하여 내부망과 외부망에서 동시에 서비스되게 함으로써 사용자는 어느 곳에서 접속하더라도 기후분석시스템을 자유롭게 사용할 수 있도록 하였다. 내부 업무망에서 연구를 주로 하는 사용자들 또한, 내부망에서 기후분석시스템을 바로 접속하거나 기후분석시스템에 업로드 되어 있는 결과물을 외부 인터넷망을 거치지 않고 쉽게 가져옴으로써, 업무 효율을 더욱 높일 수 있게 되었다.

# 목차

평문 초록 .....	i
Executive Summary .....	ii
국문 요약 .....	v
목차 .....	viii
표 차례 .....	xi
그림 차례 .....	xii
1. 서론 .....	1
2. 최근 중요도를 반영한 북반구 주요 변동성의 한반도 영향 분석 및 예측인자의 정성적 통합 .....	4
가. 북대서양 대기 변동성과 관련된 한반도 봄철 기후 특성 .....	4
(1) 연구배경 .....	4
(2) 자료와 방법 .....	4
(3) NAO와 관련된 기초 통계 분석 .....	5
(4) NAO와 우리나라 봄철 기온의 비선형적 관련성 분석 .....	12
(5) 요약 .....	26
나. 남아시아 고기압 변동성과 관련된 한반도 여름철 기후 특성 .....	27
(1) 연구배경 .....	27
(2) 자료와 방법 .....	27
(3) 여름철 남아시아 고기압의 평균적 특성 및 연간 변동성 .....	28
(4) 남아시아 고기압 확장모드(EOF1) .....	34
(5) 남아시아 고기압 남북모드(EOF2) .....	50
(6) 요약 .....	61
다. 예측인자의 정성적 통합 및 검증 .....	62
(1) 연구배경 .....	62
(2) 자료와 방법 .....	62
(3) 정성적 통합 결과 및 검증 .....	62

(4) 요약 .....	63
3. 기후변화에 따른 한반도 이상기후 전망 .....	64
가. 한반도 홍수 위험도 변화 전망 .....	64
(1) 연구배경 .....	64
(2) 자료와 방법 .....	65
(3) 현재 기후에서 남한 하천 대권역별 극한 강수량 특성 .....	69
(4) 미래 기후에서 남한 하천 대권역별 극한 강수량 전망 .....	74
(5) 한반도 남한 강수 변동 특성 분석 .....	81
(6) 한반도 여름철 강수 관련 대기순환 특성 분석 .....	87
(7) 미래 기후변화 시나리오에 따른 한반도 강수 관련 대기순환 특성 분석 .....	93
(8) 요약 .....	98
나. 한반도 태풍 변화 전망 .....	100
(1) 연구배경 .....	100
(2) 자료와 방법 .....	100
(3) 전지구 모형 분석 .....	104
(4) 고해상도 상세기후 시나리오 분석 .....	122
(5) 요약 .....	130
4. 사용자 편의성 향상을 위한 기후 감시분석 시스템 개선 .....	131
가. 예측인자 자동 생산 및 정보 제공 .....	131
(1) 연구 배경 .....	131
(2) 자료와 방법 .....	131
(3) 기후분석 예측인자(원인분석) 서비스 개발 .....	132
(4) 요약 .....	142
나. 시스템 개선 및 보안 강화 .....	143
(1) 연구 배경 .....	142
(2) 서비스 개선 및 확장 .....	146
(3) 시스템 개선 및 보안 강화 .....	155
(4) 요약 .....	160
5. 요약 및 결론 .....	161

사사 .....	165
References .....	166
부록 .....	171

## 표 차례

Table	page
1. Key sub-areas of SAH in the previous studies on SAH interannual variability. ....	30
2. Local Variability and the associated areas. ....	31
3. Correlations of PC1 with the local variability, ALL. ....	31
4. Correlations of PC2 with the local variability, North-South (N-S). ....	31
5. Composite years of positive and negative PC1_Jul ( $\pm 0.75 \sigma$ threshold). ....	35
6. Correlations of PC1 with IOBWn and with OLR in the specific regions of Indian Ocean that are indicated in the parenthesis. ....	35
7. Composite years of positive PC1_Jul ( $>0.8 \sigma$ ) and PNA in Jul( $\pm 0.8 \sigma$ ). Underlined years indicate transition years from El Niño to La Niña. Years in blue (red) indicate below-normal (above-normal) Ts years with $\pm 0.43 \sigma$ threshold. ....	46
8. Transition years from El Niño to La Niña and corresponding values of IOBWn in May, ONI index in Jul, PNA index in Jul, Ts and Pr. Values of IOBWn, ONI, and PNA in blue (red) shade indicate below-zero (above-zero). For Ts, blue (red) shade indicates below-normal (above-normal) temperature with $\pm 0.43 \sigma$ threshold. For Pr, dark yellow (green) shade indicates below-normal (above-normal) precipitation with $\pm 0.43 \sigma$ threshold. ....	47
9. Composite years of positive and negative PC2_Jul ( $\pm 0.75 \sigma$ threshold). ....	50
10. Correlations of PC2_Jul with important variables and Ts in Jul. Significant correlations at the 95% level are indicated in bold. ....	56
11. Correlations of PC2_Jul with important predictors for Ts in Jul. Significant correlations at the 95% level are indicated in bold. ....	57
12. Ts in Jun, Jul and Aug in the negative PE_DJF years ( $<-0.8 \sigma$ ). Blue (red) shade indicates below-normal (above-normal) temperature with the $\pm 0.43 \sigma$ threshold. ....	58
13. Pr in Jun, Jul and Aug in the positive PE_DJF years ( $>0.8 \sigma$ ). Blue (red) shade indicates below-normal (above-normal) temperature with the $\pm 0.43 \sigma$ threshold. ....	58
14. Validation of simple integration and qualitative integration, and observed temperature anomaly, predictors and their validation in terms of the related mechanisms ....	62
15. Model configurations and thresholds for tracking TC of 5RCMs in CORDEX-EA ....	102

## 그림 차례

Figure	page
1. The first mode of monthly 500 hPa geopotential height anomaly from EOF analysis, constituting the NAO pattern and index (shading and bar). .....	6
2. The correlation coefficients between monthly NAO indices and (a) Korean temperature and (b) precipitation for the period of 1979-2021. ....	7
3. Same figure as in Figure 2 but for the period of 2002-2021. ....	7
4. The correlation coefficients between 1 month lead NAO index and (a) Korean temperature and (b) precipitation for the period of 1979-2021. ....	8
5. Same figure as in Figure 4 but for the period of 2002-2021. ....	8
6. The regressed geopotential height at 500 hPa, sea level pressure, 2m air temperature and precipitation anomalies onto CPC based monthly NAO index from January to June. ....	10
7. Same figure as in Figure 6 but for from July to December. ....	11
8. (a) Temporal distributions of the positive NAO (gray dots), positive NAO with positive Korean temperature (red dots), and positive NAO with negative Korean temperature (blue dots). Composite anomalies of the 500 hPa and 200 hPa geopotential heights and stream function at 850 hPa for the (b and d) positive NAO with positive Korean temperature cases and for the (c and e) positive NAO with negative Korean temperature cases. Statistically significant anomalies at 95% confidence level are indicated by diagonal lines. 13	13
9. Composite anomalies of SST, OLR, geopotential height at 500 hPa, and snow cover, and sea ice concentration for the (a~d) positive NAO with positive Korean temperature case and for the (e~h) positive NAO with negative Korean temperature case. ....	15
10. Same figure as in Figure 9 but for the 4 pentad before the (a~d) positive NAO with positive Korean temperature case and the (e~h) positive NAO with negative Korean temperature case. ....	16
11. Composite anomalies of 500 hPa geopotential height and Korean temperature for the (a) positive NAO case, (b) positive Indian Ocean SST case, and (c) positive NAO with positive Indian Ocean SST case. ....	18
12. Same figure as in Figure 11 but for the negative SST anomaly over the Indian Ocean. ....	19
13. Same figure as in Figure 8 but for the negative NAO case. ....	20

14. Same figure as in Figure 9 but for the negative NAO case. ....	22
15. Same figure as in Figure 10 but for the negative NAO case. ....	23
16. Same figure as in Figure 11 but for the negative NAO case and positive sea ice concentration over the Barents Sea. ....	24
17. Same figure as in Figure 12 but for the negative NAO case and negative sea ice concentration over the Barents Sea. ....	25
18. Definitions and areas for computation of Indian Monsoon Index (IMI), South Asia Monsoon Index (SAMI), East Asia Monsoon Index (EAMI), and Western North Pacific Monsoon Index (WNPMI). ....	28
19. 40-year (1981–2020) climatology of Z200 (gray line) from May to Aug with OLR (color). .....	29
20. Monthly variations of SAH index and the three monsoon indices (a). Monthly variations of SAH index and the OLR indices multiplied by (-1.0) (b). ....	29
21. The first (a) and second (b) EOF mode of Z200 in Jun and the numbers in the title are the 40-year (1981–2020) correlations of PC1 with Ts and with Pr in Jun. (c) and (b) are the same but for Jul and (e) and (f) are for Aug. ....	30
22. Time series of PC1 (a) and PC2 (b) of the EOF modes in Jun Ts and with Pr in Jun. (c) and (b) are the same but for Jul and (e) and (f) are for Aug. Dashed lines indicate $\pm 0.43 \sigma$ threshold. ....	31
23. Simultaneous 40-year correlation maps of PC1_Jun with Z200 (a), with OLR and 850 hPa wind (d), with SST (g). ....	34
24. Composite maps of Z200 (a and b) and OLR with winds on 850 hPa (c and d) in the positive and negative composite years of PC1_Jul, respectively, in Jul. In (a) and (b), black line indicates climatological 12480 m and red line does so in the composite years. ....	35
25. Composite maps of SST (a and b), tropospheric (1000–200 hPa) temperature (c and d), Z850 (e and f), and OLR (g and h) in the positive and negative composite years of PC1_Jul, respectively, in May. ....	37
26. Correlation of PC1 with monthly IOBWn for Jun (green), Jul (Orange), and Aug (blue) (a) and correlations after detrending (b). ....	38
27. Correlations of IOBWn in May with atmospheric air temperature at 1000 (blue), 500 (green), and 200 (orange) hPa from Apr to Jul (a). (b) is the same for PC1_Jul instead of IOBWn. ....	40

28. Time series of normalized values of key variables (refer to Figure 24 and 25) in the positive (a) and negative (b) composite years of PC1_Jul. Star indicates statistically significant at the 95% level. ....	41
29. Time series of PC1_Jul, IOBwn in May, and NINO3.4 in the previous winter (a). Scatter plot of PC1_Jul and IOBwn in May (1981-2020) (b). ....	42
30. Correlation of PC1 with monthly NINO3.4 for Jun (green), Jul (Orange), and Aug (blue). ....	43
31. Scatter plots of PC1 and WNPSH in Jun (a), Jul (b), and Aug (c). ....	43
32. PC1-regressed SST (shade), 850 hPa winds (arrow) with climatological U850 that are averaged for 40-100° E. ....	44
33. Scatter plot (1981-2020) of PC1 with Ts in Jun (a), Jul (b) and Aug (c). ....	45
34. Scatter plot (1981-2020) of PC2 with Pr in Jun (a), Jul (b) and Aug (c). ....	46
35. Composite maps of Z500 for positive PC1_Jul and positive PNA(PC1+PNA+) (a) and for positive PC1_Jul and negative PNA(PC1+PNA-). ....	47
36. Schematic diagram of underlying mechanisms of positive PC1 and impacts on Korean temperature and precipitation in Jul. ....	49
37. Simultaneous 40-year correlation maps of PC2_Jun with Z200 (a), with OLR and 850 hPa wind (d), with SST (g). ....	50
38. July composite maps of Z200 (a and b), OLR with winds at 850 hPa (c and d), and SST (e and f) in the positive and negative composite years of PC2_Jul, respectively. ....	52
39. Composite maps of SST in Apr (a and b), OMG (c and d) in Apr, and SST in May (e and f) in the positive and negative composite years of PC2_Jul, respectively. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level. ....	53
40. PC2-regressed SST (color), 850 hPa winds (arrow) with climatological U850 that are averaged for 120-140° E. ....	54
41. PC2-regressed geopotential height (lines) and wind vectors for 60-90° E (a) and for 110-150° E (b). ....	54
42. 40-year correlation maps of PC2_Jul with Z200 in Jan (a) and Jul (b). ....	55
43. Time series of normalized values of key variables (refer to Figure 38 and 39) in the positive (a) and negative (b) composite years of PC2_Jul. ....	56
44. Schematic diagram of underlying mechanisms of positive PC2_Jul and impacts on Korean temperature in Jul. ....	60

45. Schematic diagram of dynamical and statistical downscaling applied to future CO2 scenario .....	66
46. (Left) The “challenges space” to be spanned by SSPs (from <a href="https://climate.go.kr">https://climate.go.kr</a> ) and (Right) Future emissions of CO2 across five illustrative scenarios (from IPCC, 2021). ....	66
47. Lists and maps of 26 watersheds over South Korea .....	67
48. The (left) 20, (middle) 50, (right panels) 100-year return level precipitations (mm) from 615 observational station data. ....	71
49. Examples of the probability density function of observed precipitation data fitted to GEV and Gumbel probabilistic distribution. ....	72
50. The 100-year return level precipitations (mm) estimated from (left panels) ASOS data, (middle panels ) PRISM data, and their difference (right panels). The return level precipitations are estimated over the period of 2000-2019. ....	72
51. Distribution of (Left panels) correlation coefficients and (right panels) root mean squared deviation of ASOS data and PRISM data. ....	73
52. The 20, 50, 100-year return level precipitation in the 26 watersheds estimated over 2000-2019. ....	74
53. Spatial distribution of difference of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. ....	75
54. Color charts of the difference of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. ....	76
55. The whisker-box plots for the increase rate (percent) of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) relative to those estimated over 2000-2019. ....	77
56. The spatial distribution of the increase rate (percentage) of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. ....	78
57. Color charts of the increase rate (percentage) of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. ....	79
58. Color charts of the increase rate (percentage) of the 20-year return level precipitations	

in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. ....	80
59. Color charts of the increase rate (percentage) of the 50-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. ....	80
60. Time series of annual maximum of daily total precipitations averaged over the No 12, 15, 19, 16, 4 watersheds in the future scenarios. ....	81
61. (Upper panel) Charts of the daily climatological mean of precipitations in the 26 watersheds over the 12 calendar months and (lower panel) seasonal cycle of the daily climatological mean of precipitations averaged over south Korea. ....	82
62. Color charts of the total monthly precipitations (June) in the 26 watersheds from 2000 to 2019. ....	83
63. Color charts of the total monthly precipitations (July) in the 26 watersheds from 2000 to 2019. ....	84
64. Color charts of the total monthly precipitations (August) in the 26 watersheds from 2000 to 2019. ....	85
65. Color charts of the total monthly precipitations (September) in the 26 watersheds from 2000 to 2019. ....	86
66. Color charts for the month in which maximum precipitations occurs in the 26 watersheds from 2000 to 2019. ....	87
67. Series of the KL index estimated for 1 to 15 clusters. ....	88
68. Scatter plots of normalized spatial projection coefficients for each event in the first (blue) and second cluster (green). ....	89
69. The spatial patterns of the (upper panel) first and (lower) second cluster of 500 hPa geopotential height and 850 hPa winds anomaly around Korean Peninsula. ....	91
70. The composite patterns of Korean total precipitations for the (upper panels) first and (lower) second clusters. ....	92
71. The composite patterns of global (left panels) SST and (right panel) OLR anomaly for the (upper panels) first and (lower) second clusters ....	93
72. The scatter plots of total precipitations and spatial projection coefficients of 500 hPa geopotential height for the first (blue) and second (green) clusters from June to September. ....	94

73. The spatial patterns of the (upper panel) first and (lower) second cluster of 500 hPa geopotential height and 850 hPa winds anomaly around Korean Peninsula from the historical simulations of UKESM. ....	95
74. Number of the events in which the normalized spatial coefficients are greater than one for the first (black lines) and second (red lines) clusters over the 20-year running periods from 1948 to 2014 from (upper) reanalysis and (lower) historical simulation. The x-axis denotes the start year of the running period. ....	96
75. The spatial patterns of the (upper panel) first and (lower) second cluster of 500 hPa geopotential height and 850 hPa winds anomaly around Korean Peninsula from the SSP5-8.5 scenario simulations of UKESM over (left panels) 2021-2040, (middle) 2041-2060 and (right) 2081-2100. ....	97
76. The spatial patterns of the (upper panel) first and (lower) second cluster of 500 hPa geopotential height and 850 hPa winds anomaly around Korean Peninsula from the SSP1-2.6 scenario simulations of UKESM over (left panels) 2021-2040, (middle) 2041-2060 and (right) 2081-2100. ....	97
77. 5 regions for typhoons affecting the Korean Peninsula. Size of each region is $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ . ....	103
78. Spatial distribution of GPI mean pattern in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025-2054) and (b), (d) distant-Future (2071-2100) in K-ACE model. ....	105
79. Same figure as in Figure 78 but for UKESM model. ....	106
80. GPI difference pattern for JASON in (a) SSP126 and (b) SSP585 scenario in K-ACE model during period of 2065-2100. ....	107
81. Same figure as in Figure 80 but for UKESM model. ....	108
82. Constant 7 line of GPI for JASON in Historical(Black), SSP126(Orange) and SSP585(Red) scenarios in K-ACE model during period of 2065-2100. ....	108
83. Same figure as in Figure 82 but for UKESM model. ....	109
84. GPI change in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025-2054) and (b), (d) distant-Future (2071-2100) in K-ACE model. (shaded : GPI, vector : 850hPa wind) ....	110
85. Same figure as in Figure 4 but for UKESM model. ....	111
86. GPI difference between Period1 and Period2 for (a) SSP126, (b) SSP585 scenario for JASON in K-ACE model. GPI difference between two scenarios during (c) Period1 and (d)	

Period2 for JASON in K-ACE model. (shaded : GPI, vector : 850hPa wind) .....	112
87. Same figure as in Figure 86 but for UKESM model. ....	113
88. Spatial distribution of PI mean pattern in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025-2054) and (b), (d) distant-Future (2071-2100) in K-ACE model. ....	114
89. Same figure as in Figure 88 but for UKESM model. ....	115
90. Spatial distribution of PI difference pattern in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025-2054) and (b), (d) distant-Future (2071-2100) in K-ACE model. ....	116
91. Same figure as in Figure 90 but for UKESM model. ....	117
92. 26.5 line of SST for JASON in Historical(Black), SSP126(Orange) and SSP585(Red) scenarios in K-ACE model during period of 2065-2100. ....	118
93. Same figure as in Figure 92 but for UKESM model. ....	118
94. Vertical Wind Shear change in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025-2054) and (b), (d) distant-Future (2071-2100) in K-ACE model. ....	120
95. Same figure as in Figure 8 but for UKESM model. ....	121
96. Spatial pattern of genesis density of CORDEX-EA RCMs for Historical(upper), SSP126(middle), SSP585(lower panel). ....	122
97. Genesis Density change of CORDEX-EA RCMs for SSP126(upper), SSP585(lower panel). ....	123
98. Track Density of CORDEX-EA RCMs for Historical(upper), SSP126(middle), SSP585(lower panel). ....	124
99. Track Density change of CORDEX-EA RCMs for SSP126(upper), SSP585(lower panel). ....	124
100. Box plot of track density among 5 CORDEX-EA RCMs for 5 regions. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario) .....	125
101. Change range of median value of track density among 5 CORDEX-EA RCMs. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario) .....	126
102. Box plot of minimum central pressure in typhoon among 5 CORDEX-EA RCMs for 5 regions. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario) .....	127
103. Change rate of median value of central pressure in typhoon between historical and 2 SSP scenarios. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario) .....	128
104. Change rate of median value of central pressure in typhoon between historical and 2 SSP scenarios. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario) .....	129
105. In order to calculate predictive factors based on detailed epidemiology and provide	

results, programs for data processing by month, factor, and region were developed. ....	133
106. To provide statistical information and current status of predictors, a user interface was built to provide various information on a single web page. ....	135
107. In the predictor statistical information, you can select the desired month for precipitation and temperature and check it. ....	136
108. Convenience was provided to users by displaying the location information of each predictor on the map. ....	137
109. Detailed information was provided to users by providing a related index and which factors had an effect on a monthly basis. ....	137
110. In order to explain why each factor affects precipitation and temperature, detailed pages are used to explain the cause and reason for the mechanism. ....	139
111. Users want to compare how much correlation each predictor has with the observed data. ....	140
112. The results of each predictor by year are provided as a table. ....	141
113. The legend of the synthetic information provision service of the climate analysis system is provided at a constant rate between the minimum and maximum values. ....	147
114. Analyzed results are provided to users in the format of various files. ....	148
115. Time series analysis service provides analyzed results in various forms. ....	148
116. The analyzed results are provided in the form of an Excel file including coordinate information. ....	149
117. The list of time series analysis services is provided based on the latest information, so it was inconvenient for the user to manually select the period, but the function was modified to automatically select up to the latest 5years. ....	150
118. If the value of the distributed data is missing, text-based information that the data was not distributed was provided(left), but in order to prevent users from misidentifying, an image-based program notifying that the data was not distributed was developed. ....	151
119. If the previous service provided weekly and monthly monitoring cumulative averages weekly(7days) and monthly (first to last day) information including the selected date. ....	152
120. SST and OLR services, which are new climate factors by daily, last 7days, monthly, and yearly, have been added to the global monitoring information service. ....	153
121. Since sea ice in the Arctic region has a great influence on the climate of the Korean Peninsula, many scientists are monitoring changes in Arctic sea ice. ....	154

122. Additional services were provided for one-month prediction information based on artificial intelligence developed by APCC. ....155

123. The climate analysis system provides analysis information using data from NOAA or NCEP, but if the distribution of data is delayed, the service is provided using temporary data, and the analysis information is changed when the data is officially distributed. ....156

124. In 2022, information service web vulnerability security checks and weak points were processed. ....157

125. Previous climate analysis system has been serviced using an external internet network, but synchronization of the system is required for internal internet network service. ....158

126. A dual service was built so that users can the same climate analysis system even when accessing from the internal or external Internet network. ....158

127. Inserting web images from the climate analysis system using Microsoft Visual Basic for Application. ....159

# 1. 서론

지구 온난화 및 기후변화의 영향으로 최근 빈번히 발생하는 폭염, 한파, 가뭄, 집중호우 등 다양한 이상기후 현상은 극심한 사회·경제적 손실을 야기함은 물론 국민의 생명을 위협하고 있다. 이러한 상황에서 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 기여해왔다. 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 사후 분석의 측면에서 매월 말 한반도 월별 기후 특성을 분석하고 이상기후 발생 시 신속히 그 원인을 분석하여 정보를 제공하려는 한편 이러한 업무들이 효율적으로 이루어질 수 있도록 독자적인 기후 감시분석 시스템(Climatic Analysis System, CAS)을 개발하여 내부적으로 운영하고 있다.

이러한 노력을 통해 얻어진 방대한 기후 감시·분석 정보들이 궁극적으로 장기예보 향상과 이상기후 대비에 기여하기 위해서는 중요도 분별 등을 통해 다양한 예측인자 정보를 선별하거나 통합하는 과정이 필요하다. 또한 급변하는 기후변화가 한반도 기후 및 이상기후 현상에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 과제(2022~2024년)에서는 기후 감시·분석 정보를 고도화하고 개선하는 한편 다양한 감시·분석 정보를 활용하여 최적의 예측을 생산하는 기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 1차년에는 기후변화와 최근 중요도를 고려하여 기후 예측 정보를 개선하고 예측 정보의 최적 활용 기반을 마련하고자 하였다. 또한 기후 감시, 분석 및 예측 업무를 보다 효율적으로 수행하기 위해 CAS의 분석 및 모니터링 시스템을 개선하는 방안을 모색하였다.

2장에서는 최근 중요도를 고려하여 북대서양 변동성과 남아시아 고기압 변동성이 한반도 기후에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 한반도 기후에 영향을 미치는 기후 인자와 관련되어 열대 태평양 및 인도양 대류에 관한 연구가 많이 존재하나 봄철 북대서양 변동성의 영향이 한반도에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히 북대서양의 가장 주요한 대기 변동성인 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation, NAO) 신호가 우리나라 봄철 기후에 미치는 역할 및 기후 예측 활용도에 대한 자세한 분석이 이루어지지 않았다. 따라서 봄철 NAO가 우리나라 기후에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고, 예측인자로서의 활용성을 살펴보았다. 남아시아 고기압은 여름철 남아시아 지역의 활발한 대류에 대한 상층 대기의 비단열 가열 반응으로써 남아시아 지역의 기후뿐 아니라 그 풍하측인 동아시아, 북태평양, 북미에까지 큰 영향을 미치는 기압계이다. 특히 남아시아 고기압이 크게 확장하거나 북상할 경우 한반도에 직접적인 영향을 미칠 수 있기에 그에 대한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 여름철 남아시아 고기압의 변동성을 확장모드와 남북모드로 분리하여 그 변동 기작과 한반도 기후에 대한 영향을 분석하고 장기예보에의 활용 방안을 제시하였다. 마지막으로 다양한 예측인자 정보의 통합 기반 마련을 위해 APCC 예보회의 회의 전 사전 팀 토의를 거쳐 인자들의 정성적 통합을 수행하고 예측 결과를 검증하였다.

3장에서는 미래 기후변화에 따른 한반도 홍수 위험도 변화와 태풍 영향 변화에 대해 분석하였다. 지구 온난화로 인한 기후변화로 인하여 기록적인 이상기후가 세계 곳곳에서 발생하고 있다. 특히 이례적인 폭우로 인한 재산 피해와 인명 피해가 증가하고 있다. 우리나라는 지난 106년 동안 우리나라 강수량은 증가 경향성을 보이고 강수일수에는 변화가 없었으며, 특히 강한 강수의 강도와 일수는 증가하였는데(국립기상과학원, 2018), 이는 우리나라에서 집중호우가 증가하는 경향성을 의미하는 것이다. 미래 기후변화 시나리오에 따른 모형 자료의 분석은 미래 기후에서 더욱더 집중호우가 증가할 것으로 전망하고 있다(국립기상과학원, 2020), 짧은 시간에 많이 내리는 집중호우는 수공 구조물의 안정성과 연결이 되는데, 미래 기후변화에 따른 홍수 위험성을 저감하기 위해서, 설계 강수량을 산정할 때 기후변화의 영향을 고려해야 할 필요성이 증가하고 있다. 설계 강수량 산정을 위해서 강수자료를 빈도 해석하는 확률 강수량(즉 재현 빈도 강수량)분석이 필요하다. 이 연구에서는 국립 기상과학원의 고해상도 자료를 이용하여, 현재 기후 대비 미래 기후변화에 따른 재현 빈도 강수량 변화율로서 하천 권역별 홍수위험도를 정량화하여 평가하였다. 아울러 강수 관련 대기 패턴의 미래 변화를 분석하여 홍수 위험도 변화의 미래 기간별, 지역별 차이의 원인에 대한 의견을 제시하였다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 제 5차 특별보고서에 따르면, 열대 지방의 열대 저기압 발생 빈도는 감소하지만, 매우 강한 열대 저기압 수는 증가할 것으로 전망하였다. 최근 10년간(2009~2018) 한반도 영향 태풍의 강도는 매우 강한 태풍(>44m/s)의 발생 빈도가 50%였으며, 초강력 태풍은 25%를 차지하고 있다. 이 연구에서는 SSP 2중 경로 시나리오를 이영하여, 전지구 모델 및 지역기후모델의 미래 전망 자료를 활용하여 미래 기후변화에 따른 북서태평양 및 한반도 영향 태풍의 변화를 분석하였다. 전지구 모형을 이용해서는 태풍의 주요 발생 해역인 북서태평양 지역에 대해 태풍 발생과 관련한 기후 요인들의 분석을 실시하고, 지역기후모델을 이용해서 태풍을 감지하여, 한반도 인근 5개 지역에 대해 미래 태풍의 진로 및 강도 변화를 전망하였다. 한반도에 직간접적인 영향을 주는 지역을 선정하고, 지역별 미래 변화를 전망함으로써, 더욱 예측과 예방이 어려워지는 태풍에 대해 기후변화 적응 대책과 방재 가이드라인 등과 적극 연계가 필요함을 제시하였다.

4장에서는 사용자 편의성 강화를 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 전지구 월별 자료를 이용하여 합성정보와 시계열 정보가 제공되도록 구축하였다. 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 워크의 개발로 웹 취약성을 방지하고 접근성 확보를 통해 안정적인 서비스를 개발하였다. 또한, 동적 웹 기술 등 최신 웹 기술을 적용하여 접근방식의 다양성 확보하고 관측 자료 변경 및 파일로 인한 오류에 즉시 대응할 수 있도록 체계적인 자료관리 시스템 구축을 통해 운영의 편리성을 강화하였다. 서비스 확대를 위해 월별 예측인자 통계 및 기작모식도 제공 서비스를 신규 개발하여 장기예보 분석업무에 활용할 수 있도록 서비스를 제공하였다. 기존에 구축한 모니터링 서비스에 대해 감시기후인자를 확대하고 서

비스 개선을 통해 사용자 친화적인 서비스 개선을 확대하였다. 또한 APCC 홈페이지에서 매월 현업으로 표출되고 있는 동아시아 이상기후 모니터링 시스템의 이상기후 감시 정보에 신 평년 기간을 반영하여, 구 평년과 신 평년의 이상기후 감시 기준 및 발생일수의 변화를 비교 분석하였다. 일 최저 및 최고 기온에 대해 구 평년과 신 평년의 90백분위, 10백분위 값을 비교하여 동아시아 및 한반도 지역에 대해 살펴보았다. 또한 평년 기간 변화에 따른 이상기후 감시 기준 뿐만이 아닌 이상기후 발생일수에도 어떠한 변화가 나타났는지 월별로 비교 분석하였다.

## 2. 최근 중요도를 반영한 북반구 주요 변동성의 한반도 영향 분석 및 예측인자의 정성적 통합

### 가. 북대서양 대기 변동성과 관련된 한반도 봄철 기후 특성

#### (1) 연구배경

북대서양의 해양-대기 변동성이 우리나라 봄철 기후에 미치는 영향을 살펴보았다. 우리나라 기후에 영향을 미치는 기후 인자 중, 열대 태평양 및 인도양에 대한 다양한 연구가 수행되었으나 (APCC 보고서, 2020, 2021) 북대서양에의 영향에 대한 자세한 분석이 이루어지지 않았다. 북대서양의 가장 주요한 해양-대기 변동성은 북대서양 진동 (North Atlantic Oscillation; NAO) (Hurrell et al., 2003)으로서 그린란드 부근과 북미 동안을 중심으로 각각 고·저기압성 순환이 진동하는 형태로 나타난다. 이는 북대서양의 해수면 온도 변동성, 북극 해빙, 그리고 인도양 및 열대 태평양의 해수면 온도 변동성 등 다양한 요소들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (e.g., Huang et al., 1998; Bader and Latif, 2003). NAO는 북대서양에서 발달하지만 다양한 경로를 통해 동아시아 기후에 영향을 미칠 수 있다 (Bollasian and Messori, 2018; Linderholm et al., 2011). 대표적으로는 유라시아 대륙을 가로지르는 파동 구조로서 유럽-중앙아시아-동아시아 지역에 중심이 위치한 순환장의 형성으로서 동아시아 기후에 영향을 미칠 수 있다. 이 때 지중해 부근에서의 수렴 (Li and Sun, 2015), 또는 북인도양, 인도 대륙에서의 대류 강화 신호 (Ding and Wang, 2005) 등이 파동 전파에 영향을 미쳐, NAO가 동아시아에 미치는 영향이 비선형적으로 나타나는데 기여한다.

특히, 우리나라 봄철 기온 시계열에 대해 회귀 분석한 전지구 대기 순환 패턴에서는 양의 NAO 신호가 유의하게 나타나는데 이러한 관련성을 기반으로 유럽지역의 눈덮임 편차 등이 봄철 기후 예측인자로 활용 중이다 (APCC, 2021). 그러나 NAO 신호가 우리나라 봄철 기후에 미치는 자세한 역학 및 기후 예측 활용도에 대한 자세한 역학적 분석이 이루어지지 않았다. 따라서 이 절에서는 봄철 NAO가 우리나라 기후에 어떠한 영향을 미치는지 기작을 분석하고, 예측인자로서의 활용성을 조사하고자 한다.

#### (2) 자료와 방법

우리나라 봄철 기온 변동성을 살펴보기 위해서 기상청에서 제공하는 종관기상관측시스템 (Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 62개 지점을 평균한 1979년부터 2021년 봄철 (2월~5월) 자료를 사용하였다. 월별 자료와 일별 자료를 모두 사용하였으며, 일별 자료는 5일 평균하여(pentad) 살펴보았다.

NAO를 포함한 전 지구 대기 변동성을 살펴보기 위해 National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy (NCEP/DOE) Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) 자료를 사용하였다. NAO와 우리나라 봄철 기후 관련성에 영향을 미치는 해양 변동성에 대한 분석을 위

해 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 상향장파복사 (Outgoing Longwave Radiation; OLR) (Liebmann and Smith, 1996) 자료를 사용하였다. 일별 해수면 온도 Sea Surface Temperature (SST)는 NOAA의 Daily Optimum Interpolation SST version 2 (OISST; Reynolds et al., 2002)를 사용하였다. 또한, NOAA climate data record (CDR)에서 제공하는 위성 기반의 북반구 눈덮임 자료 (Estilow et al., 2015) 및 National Snow and Ice Data Center에서 제공하는 해빙 농도 (Sea ice concentration) (Cavalieri et al. 1996) 자료를 통해 북극 해빙과 유라시아 눈덮임의 역할을 살펴보았다.

NAO를 정의하기 위해 북대서양 영역 (20-80°N, 90W-30°E)의 500 hPa 지위고도장에 대해 주성분 분석 (Empirical Orthogonal Function: EOF)을 적용하고, 그 첫 번째 모드의 시계열을 NAO 지수로 정의하였다. 이는 NOAA의 Climate Prediction Center에서 제공하는 Rotated EOF 분석을 기반으로 하는 NAO 지수와 큰 차이가 나타나지 않는다.

### (3) NAO와 관련된 기초 통계 분석

NAO 모니터링을 위해 주로 사용하는 CPC에서 제공하는 NAO 지수와 연구적으로 많이 사용하는 EOF 첫 번째 모드를 기반으로 하는 NAO 지수의 차이점을 살펴보았다. CPC의 NAO 지수는 base period를 1950-2000 기간으로 하여 Rotated 주성분 분석을 적용한 첫 번째 모드를 NAO 패턴으로 정의하고, 이 패턴에 projection한 계수를 NAO 지수로 정의한다. 이 때 1950-2000 기간을 기준으로 한 대기 패턴이 최근 기후 변화에 의한 대기 패턴의 변화를 반영하는가에 대한 확인이 필요하다. Figure 1은 1979-2021 기간의 북대서양 영역 (20-80N, 90W-30E) EOF 첫 번째 모드의 시계열을 기반으로 하는 월별 NAO 패턴과 지수, 그리고 CPC에서 제공하는 NAO 지수와 이에 대해 회귀 분석한 NAO 패턴을 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 EOF와 CPC 기반의 NAO 정의에 따른 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 4월과 10월을 제외하고 두 NAO 지수의 상관계수는 0.8 이상으로 높게 나타나며 공간 패턴의 차이도 크지 않다.

CPC와 EOF 기반의 NAO 지수와 우리나라 월별 기온 강수와의 상관 계수를 살펴보았다. Figure 2에 나타낸 바와 같이 CPC와 EOF 모두 1979-2021 기간 동안 우리나라 월별 기온, 강수와의 상관 계수가 크게 높지 않다. 통계적으로 유의한 관련성은 우리나라 11월 기온과 CPC 기반 NAO 지수 사이에 양의 상관 관계 이외에는 나타나지 않는다. 즉, 우리나라 월별 기온, 강수와 NAO 사이에 선형적인 관련성이 크지 않음을 의미한다. 한편 최근 20년 기간을 기준으로 살펴보았을 때도 통계적으로 유의한 관련성은 CPC NAO 지수를 기준으로 하였을 때 1월, 11월 기온, 11월 강수에서 나타난다 (Figure 3). 특히, 11월의 경우 전체 기간이나 최근 20년 모두 우리나라 기온과 NAO 지수 사이에 통계적으로 유의한 양의 관련성이 나타나므로 이를 예측에 활용 할 수 있을 것으로 보인다.

기후 예측에서 NAO의 활용도를 높일 수 있는 방안을 좀 더 살펴보기 위해 1개월 선행 NAO 지수와 우리나라 기온, 강수와의 상관 관계를 살펴보았다 (Figure 4). 그 결과 2월, 7월, 11월, 12월 기온이 각각, 1월, 6월, 10월, 11월 NAO와 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 가

지는 것으로 나타났다. 특히 2월의 경우 최근 20년 기간 동안에도 1월 NAO와 유의한 상관관계를 나타내어 예측에 활용도가 높을 것으로 판단된다 (Figure 5).

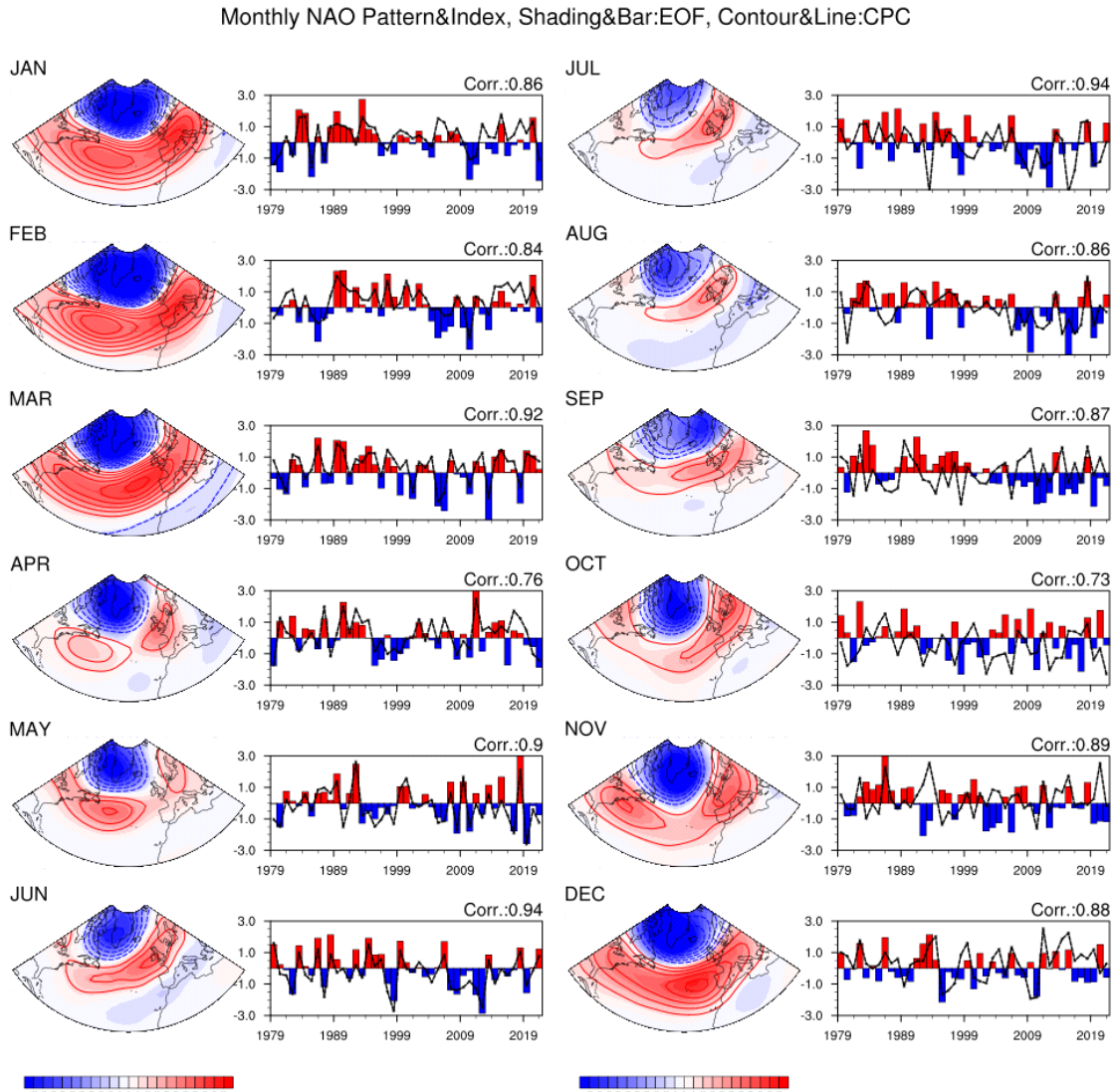


Figure 1. The first mode of monthly 500 hPa geopotential height anomaly from EOF analysis, constituting the NAO pattern and index (shading and bar). The monthly NAO index obtained from CPC (line) and the regressed monthly spatial patterns of 500 hPa geopotential height (contour). The correlation coefficients between EOF and CPC based NAO indices are indicated by the upper-left panel, respectively.

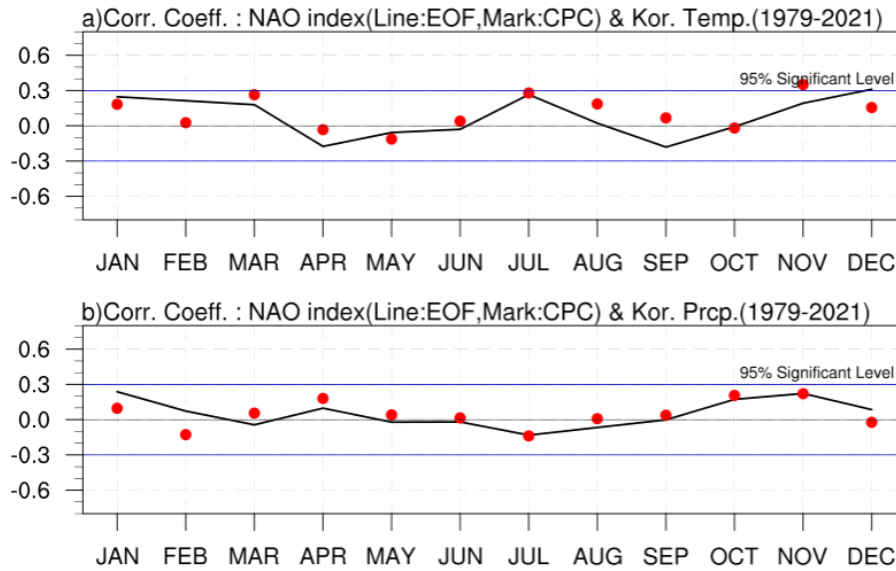


Figure 2. The correlation coefficients between monthly NAO indices and (a) Korean temperature and (b) precipitation for the period of 1979–2021. The marks indicate NAO index based on CPC, while the lines indicate NAO index based on EOF.

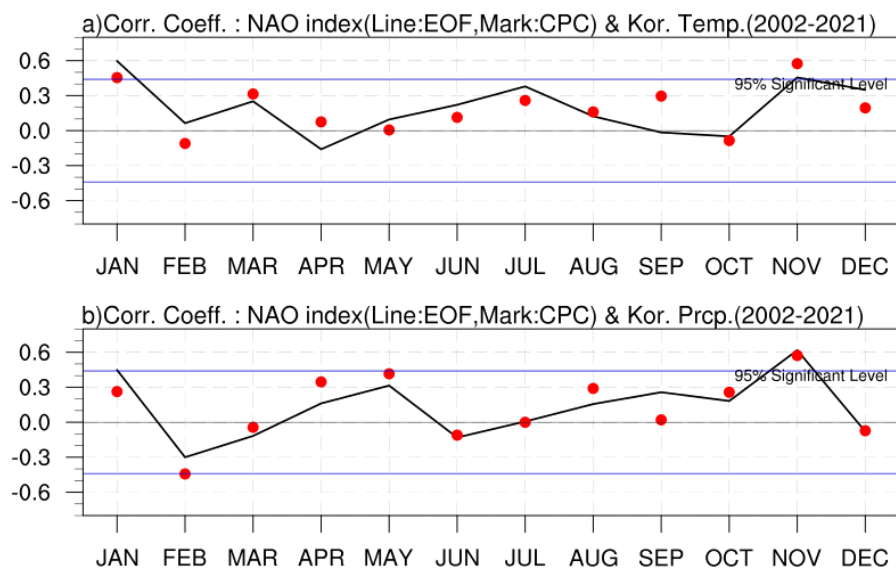


Figure 3. Same figure as in Figure 2 but for the period of 2002–2021.

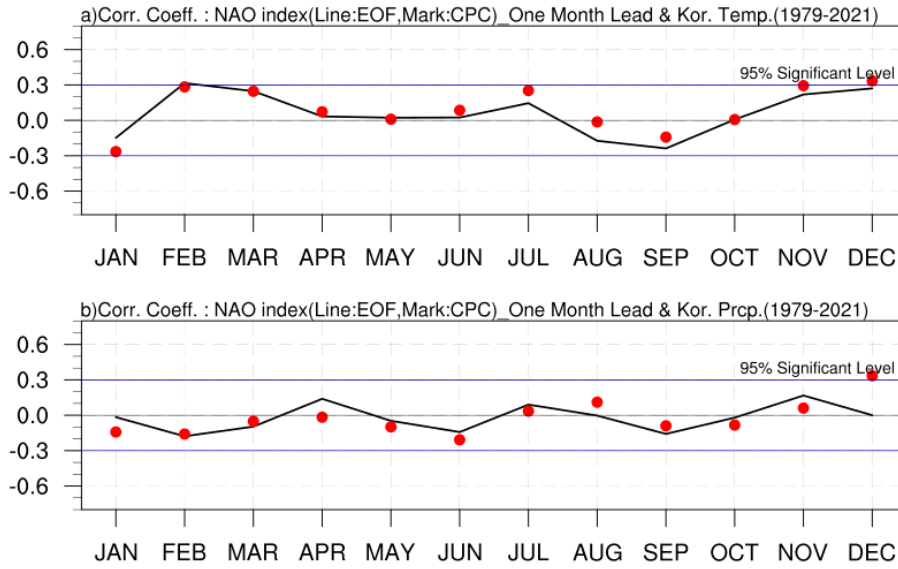


Figure 4. The correlation coefficients between 1 month lead NAO index and (a) Korean temperature and (b) precipitation for the period of 1979-2021.

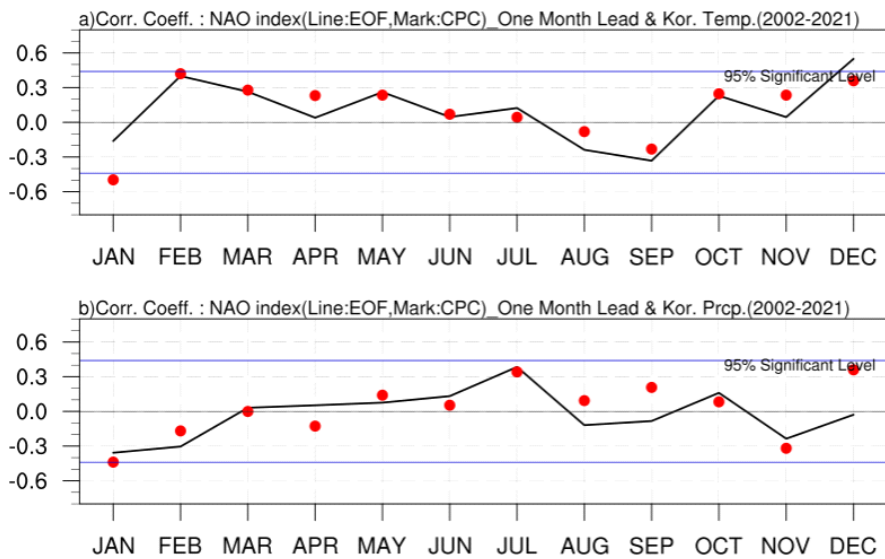


Figure 5. Same figure as in Figure 4 but for the period of 2002-2021.

Figures 2-5에서 살펴본 바와 같이 NAO와 우리나라 월별 기온, 강수 사이에 통계적으로 높은 관련성이 나타나지 않는데, NAO 지수에 회귀 분석한 전지구 대기, 해양 순환장의 특성을 기반으로 역학적 특징을 살펴보았다 (Figures 6-7). 1월부터 3월까지는 주로 양의 NAO로 인한 유럽지역 고기압성 순환, 중앙아시아 저기압성 순환, 그리고 바이칼호 부근 고기압성 순환의 동-서 방향 파동 전파 구조가 나타난다. 이 때, 고기압성 순환의 중심이 우리나라 북쪽에 위치 하면서 우리나라에 직접적인, 또는 통계적으로 유의한 영향을 미치지 못하는 것으로 해석된다. 전반적으로 유라시아 북부에는 고온 편차, 남부에는 저온 편차가 나타나는 남-북 방향의 기온 편차가 형성된다. 4월부터 6월까지는 좀 더 단파 형태의 파동이 발달하는데, 북유럽-카스피해-바이칼호-일본을 중심으로 각각 고-저-고-저기압성 순환이 발달하는 특징을 보인다. 이 시기에 도 역시 우리나라는 고기압성 순환과 저기압성 순환의 가장자리에 위치하여 뚜렷한 기온 편차가 나타나지 않는다. 7월부터 9월까지는 동-서 방향의 뚜렷한 파동 구조가 사라지고 북유럽부터 유라시아 북부까지 고기압성 순환, 그 남쪽으로 길게 발달한 저기압성 순환, 그리고 동아시아 지역으로 약한 고기압성 순환의 구조가 나타난다. 10월과 11월에는 1~3월과 유사하게 유럽-카스피해-동아시아 지역으로 고-저-고기압성 순환의 파동 구조가 나타나는데, 특히 11월에는 동아시아 고기압성 순환의 중심이 우리나라에 위치 하면서 고온 편차에 뚜렷하게 영향을 미칠 수 있다. 12월의 경우 11월과 비슷한 구조이나 동아시아 고기압성 순환 중심이 우리나라 남쪽에 위치하면서 11월과 같이 높은 관련성을 보이지 않는다.

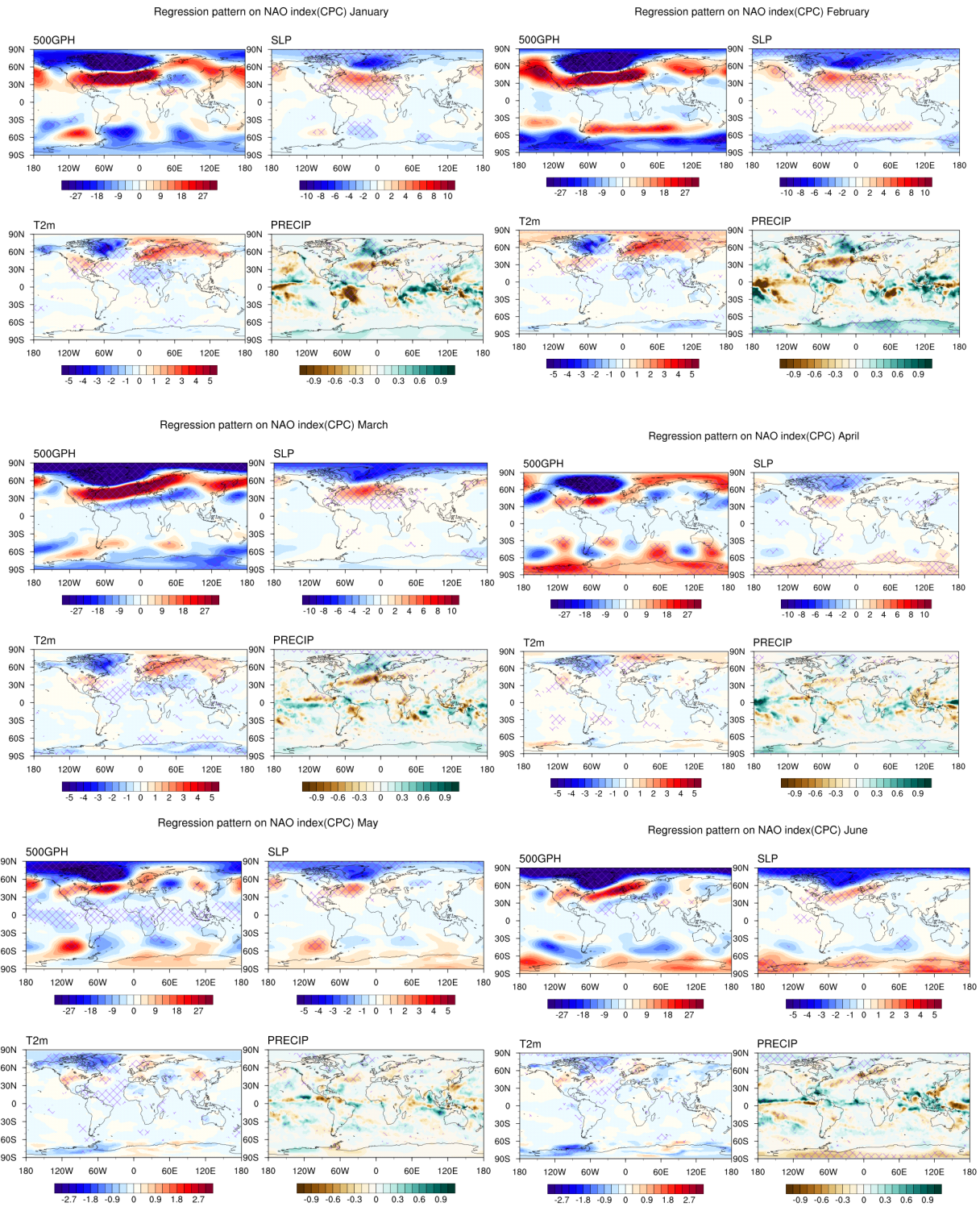


Figure 6. The regressed geopotential height at 500 hPa, sea level pressure, 2m air temperature and precipitation anomalies onto CPC based monthly NAO index from January to June. The statistically significant anomalies at 95% are designated by diagonal lines.

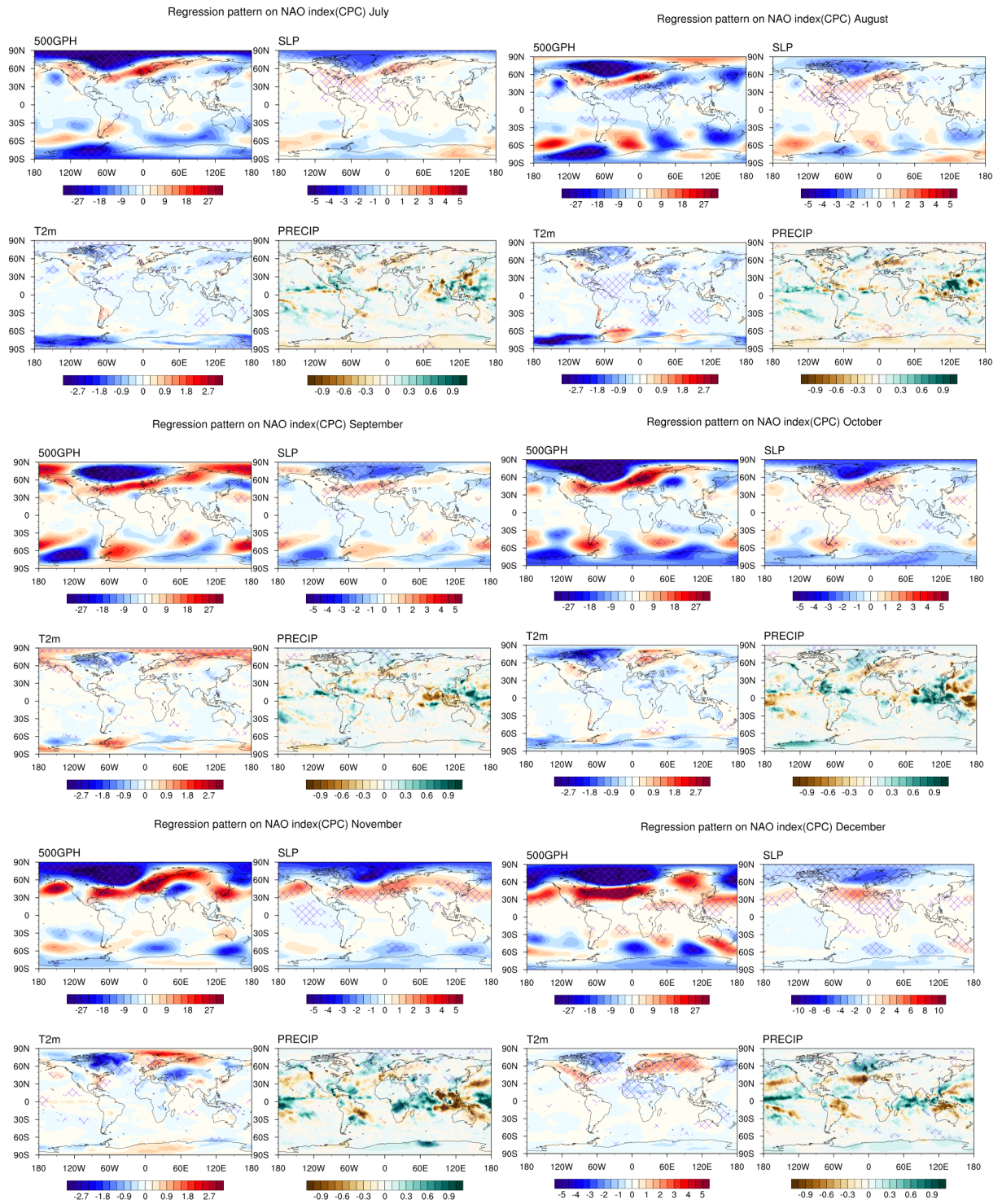


Figure 7. Same figure as in Figure 6 but for from July to December.

#### (4) NAO와 우리나라 봄철 기온의 비선형적 관련성 분석

NAO와 관련된 기초 통계 분석에서 살펴 본 바와 같이 NAO와 우리나라 월별 기온과 강수 사이에 실제 현업 기후 예측에 적용 할 수 있는 수준의 선형적인 상관관계가 나타나지 않는다. 따라서 이 절에서는 NAO와 우리나라 봄철 기온 사이에 물리·역학적으로 의미있는 비선형적인 상관 관계가 나타나는지에 대해 살펴보고 이를 활용한 예측 방안을 제안하고자 한다.

이 절에서의 분석은 1979-2021 기간, 2월부터 4월까지 5일 평균 pentad 자료를 기반으로 수행하였다. 각 pentad 별로 1979-2021 기간의 북대서양 영역(20-80°N, 90°W-30°E)의 500 hPa 지위고도장에 대해 EOF 분석을 수행하여 그 첫 번째 PC 시계열을 NAO 지수로 정의하였다. 이 NAO 지수가 0.5 표준편차 이상인 경우를 양의 NAO 사례로 정의하였다 (Figure 8). 그 중 우리나라 62개 지점을 평균한 기온이 0.5 표준 편차를 기준으로 이상과 이후인 사례로 나누어 보면, 양의 NAO일 때 우리나라 기온이 높은 경우와 양의 NAO 일 때 우리나라 기온이 낮은 경우로 분류할 수 있다. Figure 8a에 각 사례의 시간 분포를 확인할 수 있는데, 총 260 pentad의 양의 NAO 사례 중 우리나라 기온이 높았을 때가 76 pentad, 낮았을 때가 69 pentad로 비선형적인 관련성을 나타낸다. 양의 NAO인 경우 우리나라 기온이 높았을 때와 낮았을 때의 대규모 대기 순환장에 어떠한 차이가 나는지 살펴보기 위해 각 사례에 대해 500 hPa과 200 hPa 지위고도장, 850 hPa 유선함수 편차에 대해 합성도 분석을 수행하였다. 양의 NAO일 때 우리나라 기온이 높은 경우 전 지구 대기 순환 패턴을 살펴보면 전반적으로 양의 AO (Arctic Oscillation) 형태를 나타내며, 유라시아 대륙으로 유럽-카스피해-동아시아를 각각 중심으로 고-저-고기압성 순환 구조를 나타낸다. 이때 우리나라에 고기압성 순환의 중심이 위치하면서 뚜렷한 고온 편차를 유도하게 된다. 반면, 양의 NAO 일 때 우리나라 기온이 낮았던 경우를 살펴보면 바이칼호 북쪽으로 고기압성 순환이 위치하고 동아시아에 저기압성 순환이 위치한다. 특히, 전반적으로 열대 지역에서 상층에 저기압성 순환이 통계적으로 유의하게 나타나는데, 우리나라 기온이 높았을 때에는 전반적으로 고기압성 순환이 나타나는 모습과 반대 구조이다. 이를 통해 열대 지역의 변동성이 양의 NAO 시기에 우리나라 기온의 반응을 서로 다르게 유도하는 요소일 가능성을 유추할 수 있다.

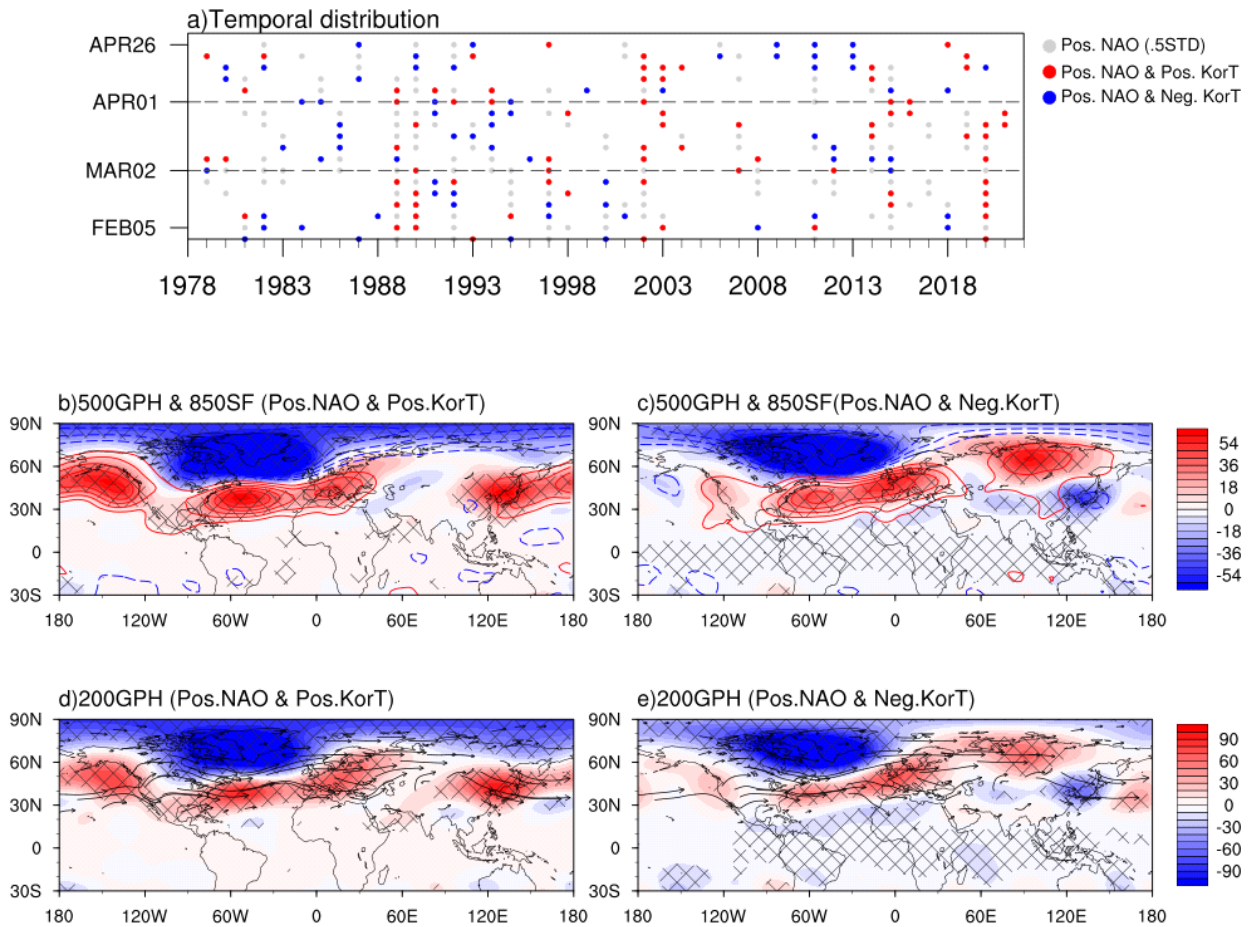


Figure 8. (a) Temporal distributions of the positive NAO (gray dots), positive NAO with positive Korean temperature (red dots), and positive NAO with negative Korean temperature (blue dots). Composite anomalies of the 500 hPa and 200 hPa geopotential heights and stream function at 850 hPa for the (b and d) positive NAO with positive Korean temperature cases and for the (c and e) positive NAO with negative Korean temperature cases. Statistically significant anomalies at 95% confidence level are indicated by diagonal lines.

양의 NAO 배경하에서 우리나라 봄철 기온을 비선형적으로 조절하는 기후적 요인이 무엇인지 살펴보기 위해 SST, OLR, 눈덮임, 해빙 농도 편차에 대한 합성도 분석 결과를 살펴보았다 (Figure 9). 양의 NAO 일 때 우리나라 기온이 높은 경우와 낮은 경우에 나타나는 가장 큰 차이점은 열대 지역에서 나타난다. 즉, 우리나라 기온이 높은 경우 열대 중태평양과 인도양을 중심으로 양의 해수면 온도가 나타나고 그와 관련하여 동인도양-서태평양 지역에 대류 억제 신호가 나타난다. 이로 인해 동아시아까지 고기압성 순환이 확장되어 나타나 고온 편차가 유도되는 것으로 해석된다. 반면 우리나라 기온이 낮은 경우 열대 동태평양과 인도양을 중심으로 저온 편차가 나타난다. 따라서 기온이 높을 때와 반대로 동인도양-서태평양 지역에 대류 강화 신호가 나타나고 동아시아 지역의 저기압성 순환 형성에 영향을 미치는 것으로 보여진다. 한편, 눈덮임 편차의 경우 두 경우 모두 유럽지역에서 눈덮임이 적은 특징이 나타나나, 우리나라 기온이 높은 경우에 더욱 뚜렷한 편차가 나타난다. 이는 양의 NAO로 인한 공통적인 특징으로 유럽지역에 강한 고기압성 순환이 위치하면서 나타나는 현상으로 해석된다. 북극 해빙의 경우 그린란드 동편과 바렌츠해 지역을 중심으로 해빙이 적은 신호가 나타나지만 통계적으로 유의하지 않다.

Figure 9에 살펴본 열대의 영향 및 북극 지역의 영향이 시간 지연(lag)을 가지고 지속적으로 나타나는 현상인지 확인해 보기 위하여 4 pentad 이전 시기에 대한 합성도 분석 결과를 살펴보았다 (Figure 10). 그림에서 확인할 수 있듯이 열대 지역의 해수면 온도 편차는 4 pentad 이전에도 통계적으로 유의한 신호를 나타내고 있는 반면, 유라시아 눈덮임이나 북극 해빙의 경우 4 pentad 이전에는 뚜렷한 신호가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 즉, 양의 NAO인 경우 눈덮임이나 해빙이 아닌 열대 지역의 해수면 온도 및 대류 특성이 우리나라 기온의 반응을 서로 다르게 유도하는데 기여하는 것으로 해석된다.

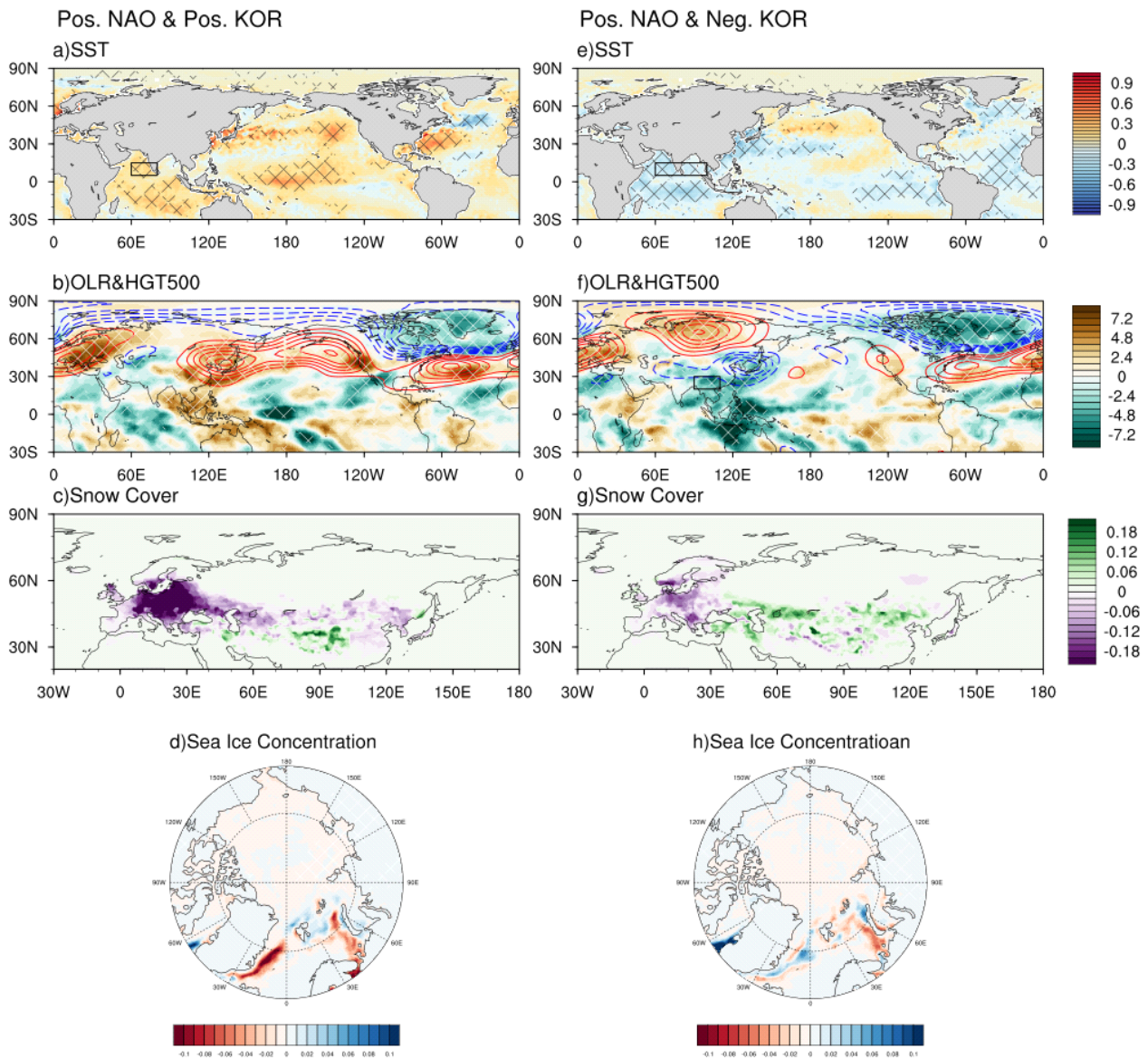


Figure 9. Composite anomalies of SST, OLR, geopotential height at 500 hPa, and snow cover, and sea ice concentration for the (a-d) positive NAO with positive Korean temperature case and for the (e-h) positive NAO with negative Korean temperature case.

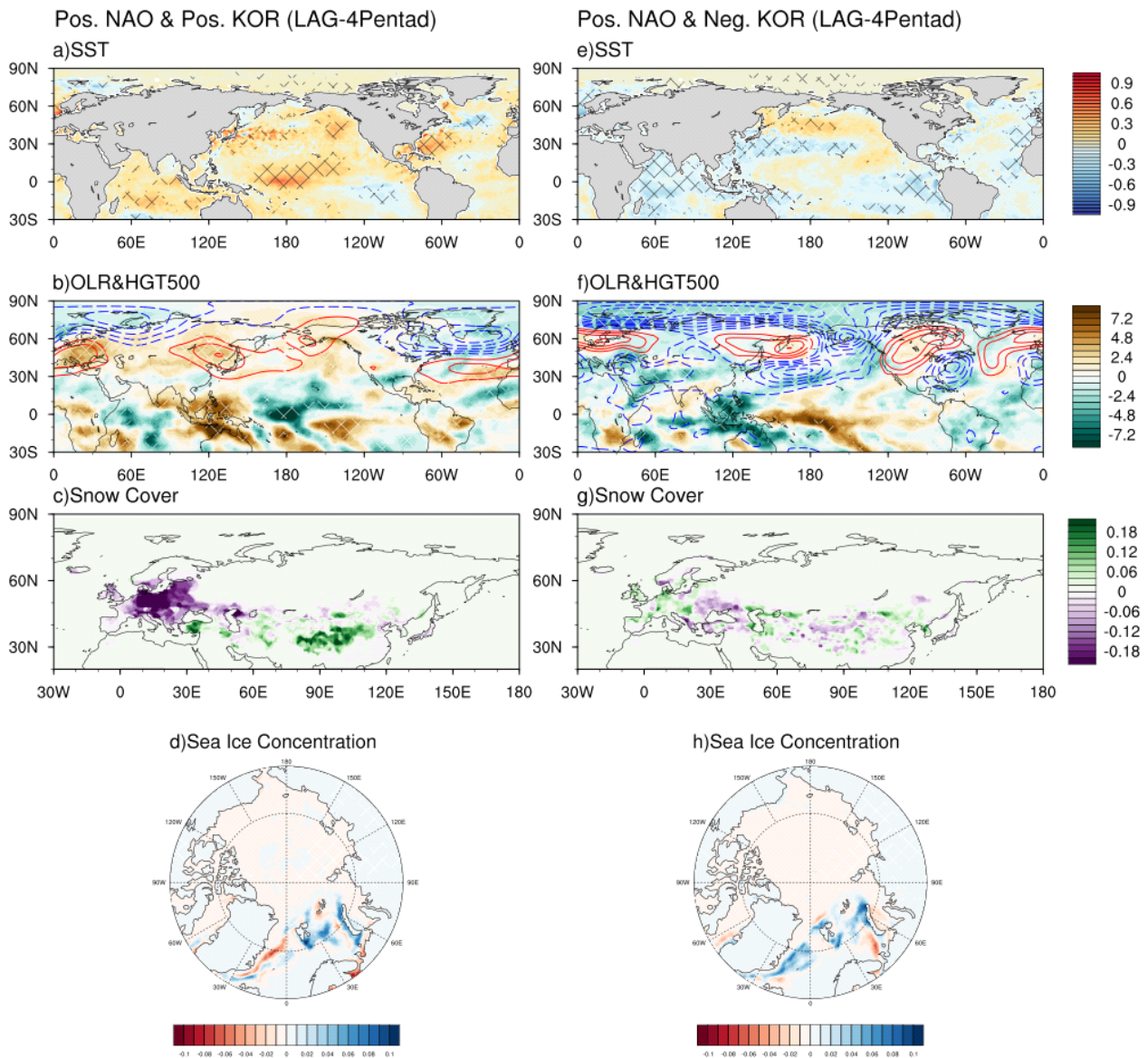


Figure 10. Same figure as in Figure 9 but for the 4 pentad before the (a~d) positive NAO with positive Korean temperature case and the (e~h) positive NAO with negative Korean temperature case.

Figures 9-10의 결과로부터 양의 NAO 위상일 때, 열대 태평양 및 인도양의 해수면 온도에 따라 우리나라 봄철 기온이 조절되는 특징을 확인할 수 있다. 그렇다면, NAO의 위상과는 상관 없이 열대 지역의 상태만으로 우리나라 봄철 기온이 조절 되는 것인지에 대한 판단이 필요하다. 이를 위해 Figure 11과 같이 NAO의 역할과 열대 지역 해수면 온도의 역할을 나누어서 살펴보았다. 먼저 NAO가 positive인 경우의 500 hPa 지위고도장의 합성 분석 결과를 살펴보면, 고기압성 순환의 중심이 바이칼호 부근에 위치하고 우리나라에 뚜렷한 영향을 미치는 기압계의 특징이 나타나지 않는다. 실제로 양의 NAO 일 때 우리나라 기온 편차의 분포를 살펴보면 고온이나 저온 편차의 특징이 나타나지 않는다. 다음으로 열대 지역의 해수면 온도, 특히 인도양(60-80°E, 5-15°N)의 해수면 온도가 높았을 때의 대기 순환장과 우리나라 기온 분포를 살펴보았다. 열대 지역부터 중위도 30도 부근까지 상층 고기압성 순환의 발달이 나타나고 이 고기압성 순환이 우리나라까지 확장되어 나타난다. 따라서 우리나라는 고온 편차가 약간 우세하게 나타난다. 그러나 통계적으로 유의한 고온 편차는 나타나지 않고, 따라서 열대 지역의 영향만으로는 우리나라 봄철의 고온 현상을 설명하기 어렵다. Figure 11c에 positive NAO와 인도양 고온 편차가 동시에 나타난 경우의 500 hPa 지위고도장 합성도와 우리나라 기온 편차 분포를 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 동아시아와 우리나라를 중심으로 하는 고기압성 편차가 뚜렷하게 나타나고, 따라서 우리나라 기온 역시 통계적으로 유의한 고온 편차가 나타난다. 즉, 이 결과로부터 열대 지역, 특히 인도양의 양의 해수면 온도만으로 우리나라 봄철 고온 편차를 설명하기 어려우며, 양의 NAO와 동시에 나타났을 때 우리나라 고온 편차가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

양의 NAO 일 때 우리나라 기온이 낮은 경우도 비슷한 분석을 통해 NAO와 열대 지역 변동성이 우리나라 봄철 기온에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보았다 (Figure 12). 그림에서 확인할 수 있듯이 인도양 (70-110°E, 5-15°N) 해수면 온도가 낮은 경우 열대 지역 전반적으로 상층에 저기압성 순환이 발달하고 우리나라까지 확장된 특징을 보이는데, 우리나라 기온에는 뚜렷한 특징이 나타나지 않는다. 그러나 양의 NAO와 인도양의 해수면 온도가 낮은 현상이 동시에 발달하였을 때 저기압성 순환의 중심이 우리나라에 위치하면서 뚜렷한 저온 편차가 발달하게 된다.

즉, 양의 NAO 만으로는 우리나라 봄철 기온에 뚜렷한 영향을 나타내기 어렵지만, 열대 지역, 특히 인도양의 해수면 온도가 높은 현상이 동반되는 경우 우리나라 기온이 높은 경향을, 반대로 인도양 해수면 온도가 낮은 현상을 동반하는 경우 우리나라 기온이 낮은 경향이 뚜렷하게 나타난다. 이러한 현상은 약 4 pentad, 즉 20 일 전부터 지속적으로 signal이 나타나므로 이를 모니터링 함으로써 봄철 기온 예측에 활용할 수 있다.

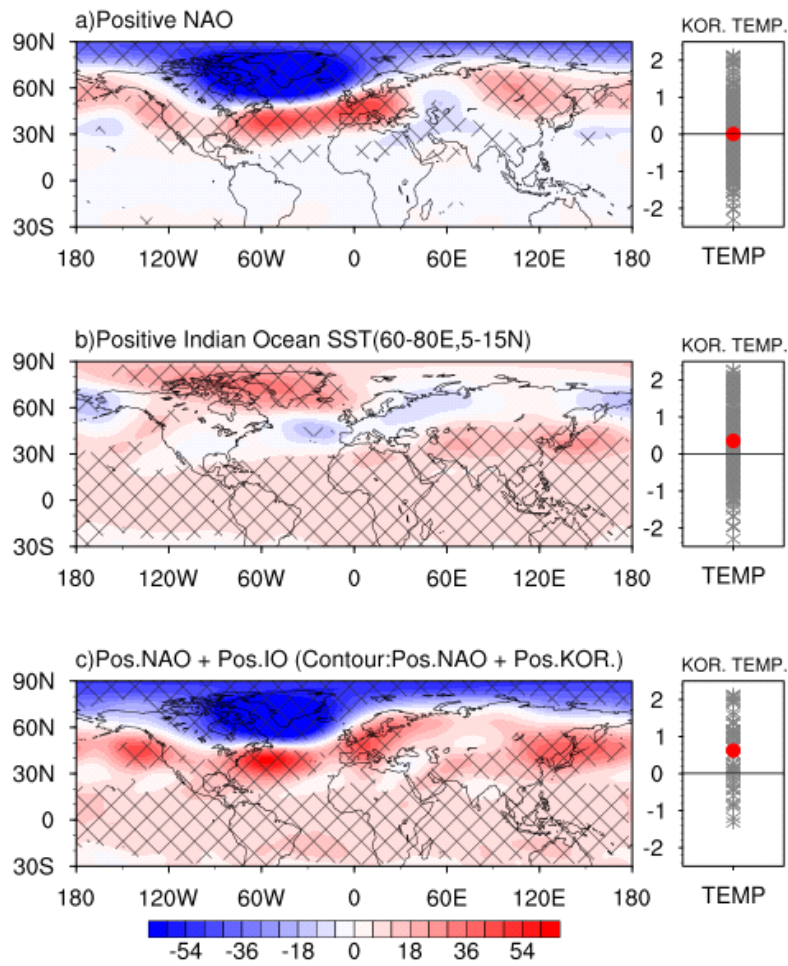


Figure 11. Composite anomalies of 500 hPa geopotential height and Korean temperature for the (a) positive NAO case, (b) positive Indian Ocean SST case, and (c) positive NAO with positive Indian Ocean SST case. The overlaid asterisks on the Korean temperature denote individual cases comprising the composites.

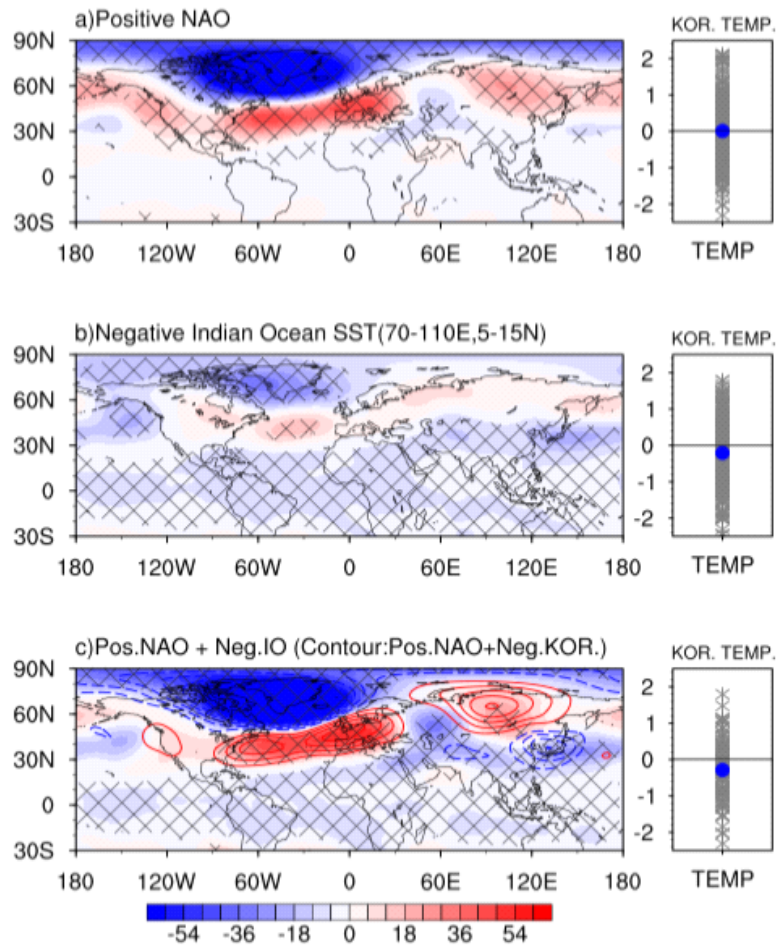


Figure 12. Same figure as in Figure 11 but for the negative SST anomaly over the Indian Ocean.

다음으로 음의 NAO 시기에 우리나라 봄철 기온의 변동 특징을 살펴보았다 (Figure 13). 양의 NAO 시기와 비슷하게 총 242 pentad의 음의 NAO 시기 중 78 pentad는 우리나라 기온이 낮았고, 67 pentad는 기온이 높았다. 특히, 2014년 이후에는 음의 NAO 시기에 대부분 기온이 높게 나타나 최근 온난화 경향을 반영하는 것으로 해석된다. 대기 패턴을 살펴보면, 음의 NAO 시기에 우리나라 기온이 낮은 경우는 유라시아 대륙으로 동-서 방향 파동 구조가 나타나. 동아시아 지역으로 기압골이 위치하여 저온 편차가 나타나는 구조이다. 반면, 음의 NAO 시기에 우리나라에 고온 편차가 나타나는 경우는, 유럽지역부터 유라시아 북부까지 저기압성 순환이 길게 발달되어 나타나고, 그 남쪽으로 고기압성 순환이 위치하여 우리나라에 영향을 주어 고온 편차가 나타난다. 전반적으로 양의 NAO와 우리나라 기온이 높을 때 패턴과 음의 NAO와 우리나라 기온이 낮을 때 패턴이 대칭적으로 나타나고, 양의 NAO와 우리나라 기온이 낮을 때 패턴과 음의 NAO와 우리나라 기온이 높을 때 패턴이 대칭적으로 나타난다.

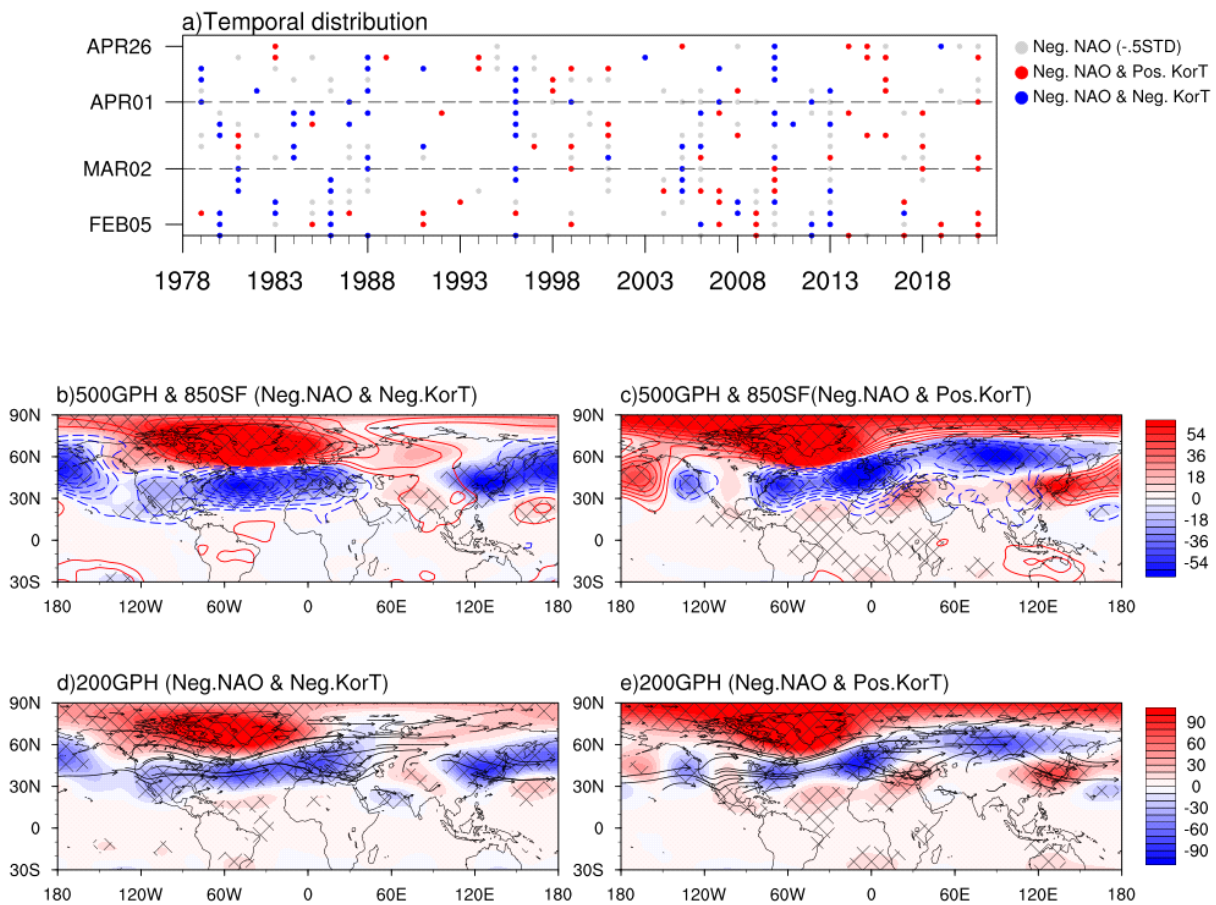


Figure 13. Same figure as in Figure 8 but for the negative NAO case.

음의 NAO 시기에 우리나라 봄철 기온을 조절하는 기후 요소에 대해 살펴보기 위해 Figure 14와 같이 합성도 분석을 수행하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 양의 NAO 시기와는 달리 음의 NAO 시기에는 열대 태평양과 인도양의 해수면 온도에 뚜렷한 대비가 나타나지 않는다. 음의 NAO 시기에 우리나라 기온이 낮은 경우에는 특히 대서양 해수면 온도에 뚜렷한 신호가 나타나는데, 그린란드 남쪽, 북미 동안, 열대 대서양으로 뚜렷한 삼극 구조가 나타난다. 이는 음의 NAO 신호가 해수면 온도 변동성과 coupling이 되어서 나타나는 것으로 보여진다. 반면, 음의 NAO 시기에 우리나라 기온이 높은 경우는 인도양, 북서태평양, 대서양 전반적으로 해수면 온도가 높게 나타나 전체적으로 온난화 신호를 반영하는 것으로 보여진다. 4 pentad 이전의 합성도 패턴을 살펴보아도 북대서양 이외에는 해수면 온도 패턴에 뚜렷한 특징이 나타나지 않는다 (Figure 15). 이는 양의 NAO 시기에 우리나라 기온을 조절하는 요소로서 열대 해수면 온도의 변동성이 중요하게 작용하는 것과 구별되는 특징이다.

한편, 음의 NAO 시기에 우리나라 기온이 높고, 낮은 경우에 나타나는 가장 대비되는 특징은 북극 해빙 편차에 나타난다. 즉, 기온이 낮은 경우 그린란드 동쪽부터 바렌츠해 까지 해빙이 많은 특징이, 반대로 기온이 높은 경우 해빙이 적은 특징이 뚜렷하다. 이러한 특징은 4 pentad 이전에도 매우 뚜렷하게 나타난다 (Figure 15). 이 결과는 음의 NAO 시기에 우리나라 기온을 조절하는 요인이 북극 해빙, 특히 바렌츠해 지역의 해빙임을 제시한다.

음의 NAO와 북극 해빙의 영향이 각각 우리나라 봄철 기온에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. Figure 16에서 확인할 수 있듯이 음의 NAO 만을 고려했을 때는 저기압성 순환의 중심이 우리나라 북쪽에 위치하여 우리나라 기온에 뚜렷한 영향이 나타나지 않는다. 또한 바렌츠해 (30-60°E, 75-80°N) 해빙이 많을 때만 고려했을 때에도 우리나라에 뚜렷한 영향을 미치는 기압계 특징이 나타나지 않고, 기온에도 영향을 미치지 않는다. 그러나 음의 NAO와 바렌츠해 해빙이 적은 사례가 동시에 나타났을 때 저기압성 순환의 중심이 동아시아에 위치하여 우리나라 기온이 낮은 특징이 뚜렷하게 나타나게 된다.

비슷하게 Figure 17에서 바렌츠해 해빙이 적은 경우를 살펴보면, 음의 NAO와 바렌츠해 해빙이 많은 경우를 각각 독립적으로 살펴보면 우리나라 기온에 미치는 영향이 뚜렷하지 않다. 그러나 음의 NAO 시기에 바렌츠해 해빙이 적은 사례가 동시에 나타나면 우리나라 봄철 기온이 뚜렷하게 높아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 최근에는 지구 온난화로 인해 북극의 해빙이 점차 줄어드는 추세를 보여, 음의 NAO가 발달하여도 우리나라 기온이 높은 사례가 빈번하게 발생하는 것으로 보여진다.

정리하면, 양의 NAO 시기에는 열대 지역, 특히 인도양의 해수면 온도가 높고, 낮음에 따라서 우리나라 봄철 기온이 높고, 낮은 경향이 유의하게 나타나며, 음의 NAO 시기에는 북극 해빙, 특히 바렌츠해의 해빙이 적고, 많음에 따라서 우리나라 봄철 기온이 높고, 낮은 경향이 나타난다. 이러한 특징은 약 한달전부터 관련 요소들에 대한 모니터링을 통해 봄철 기온 예측에 활용 가능하다.

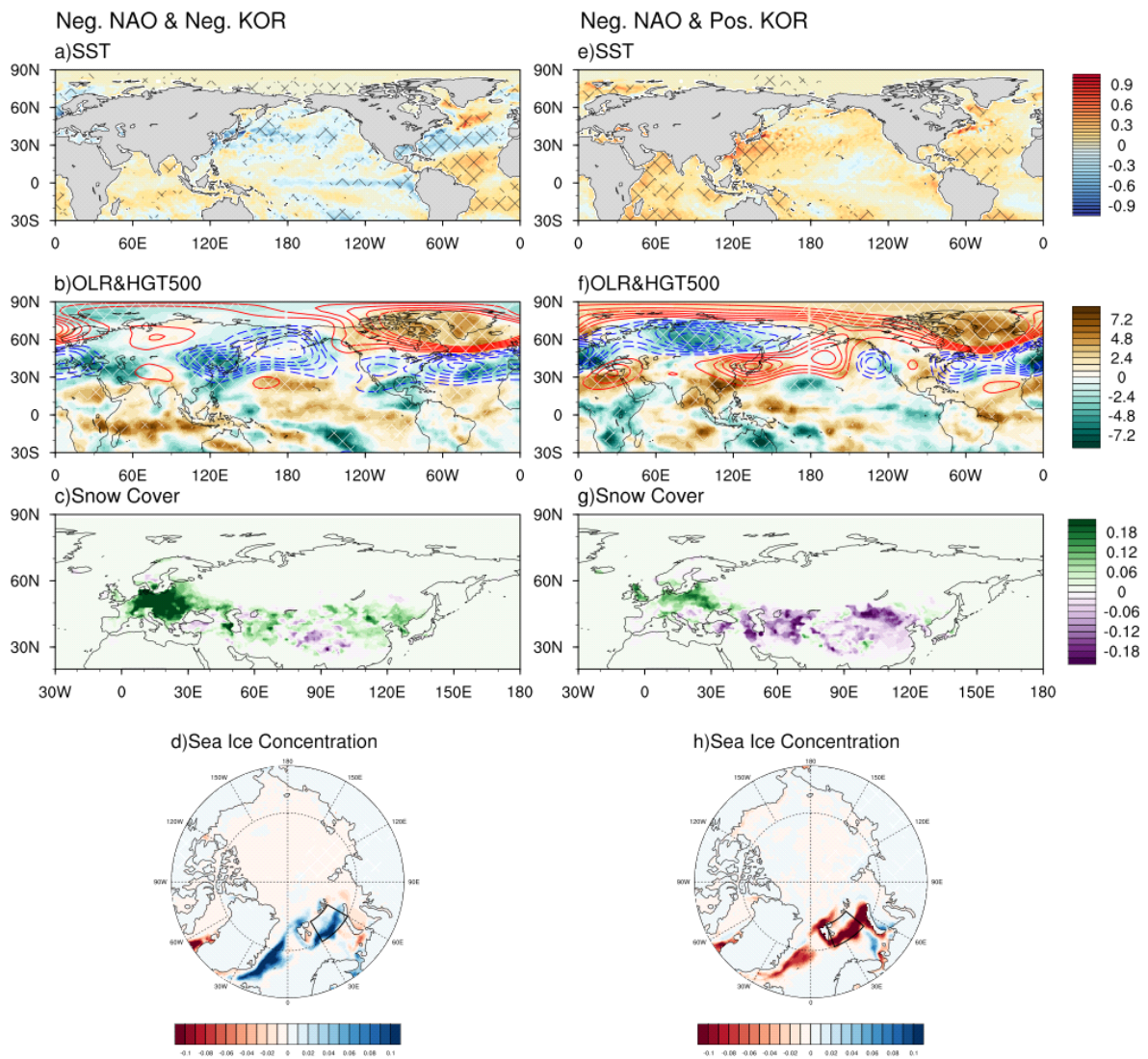


Figure 14. Same figure as in Figure 9 but for the negative NAO case.

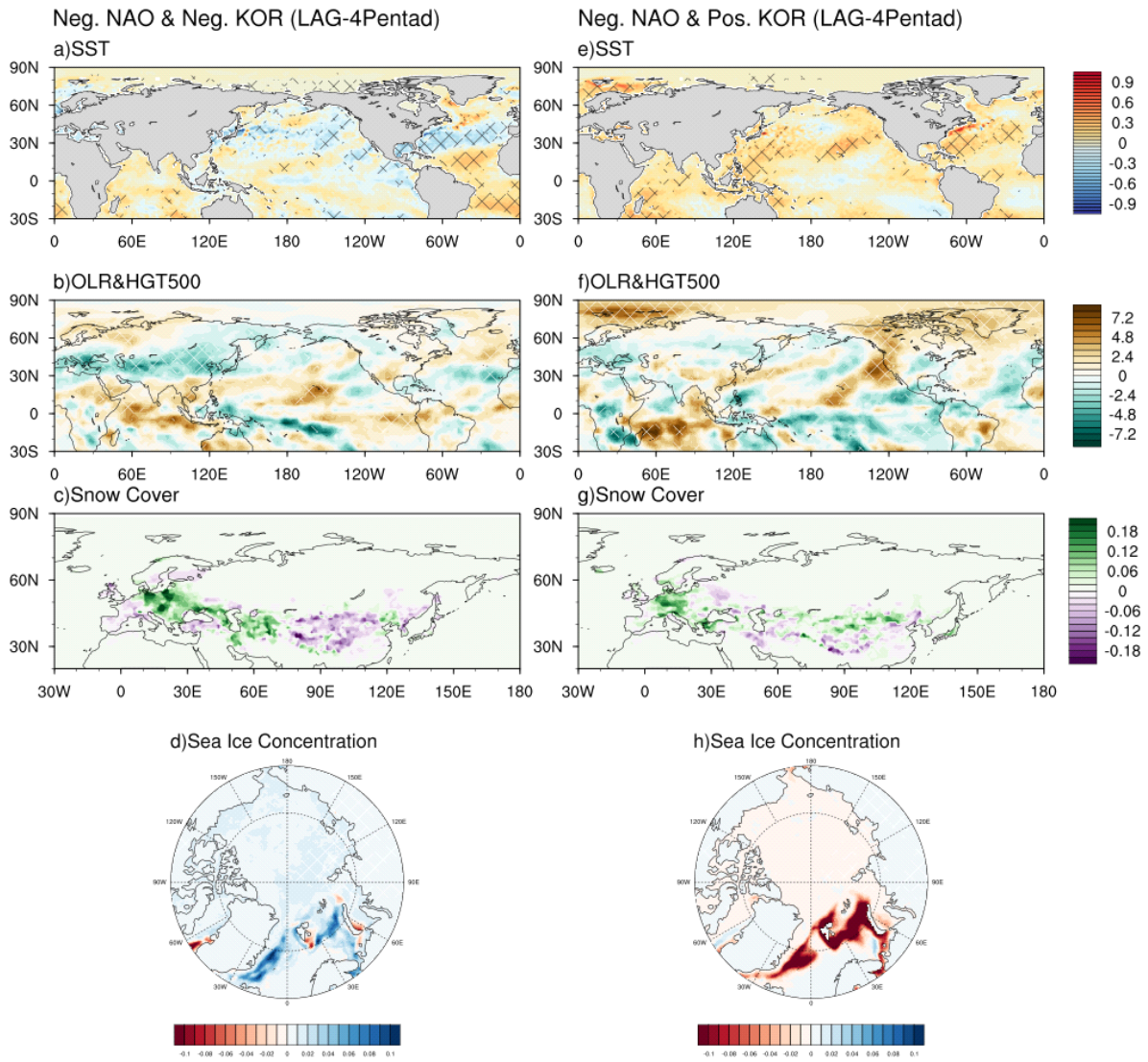


Figure 15. Same figure as in Figure 10 but for the negative NAO case.

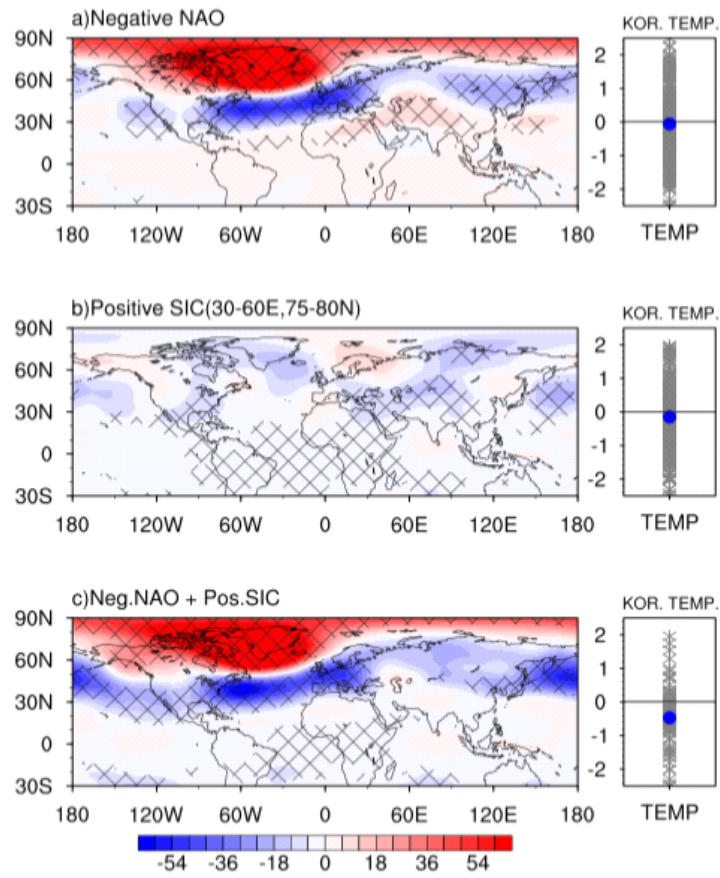


Figure 16. Same figure as in Figure 11 but for the negative NAO case and positive sea ice concentration over the Barents Sea.

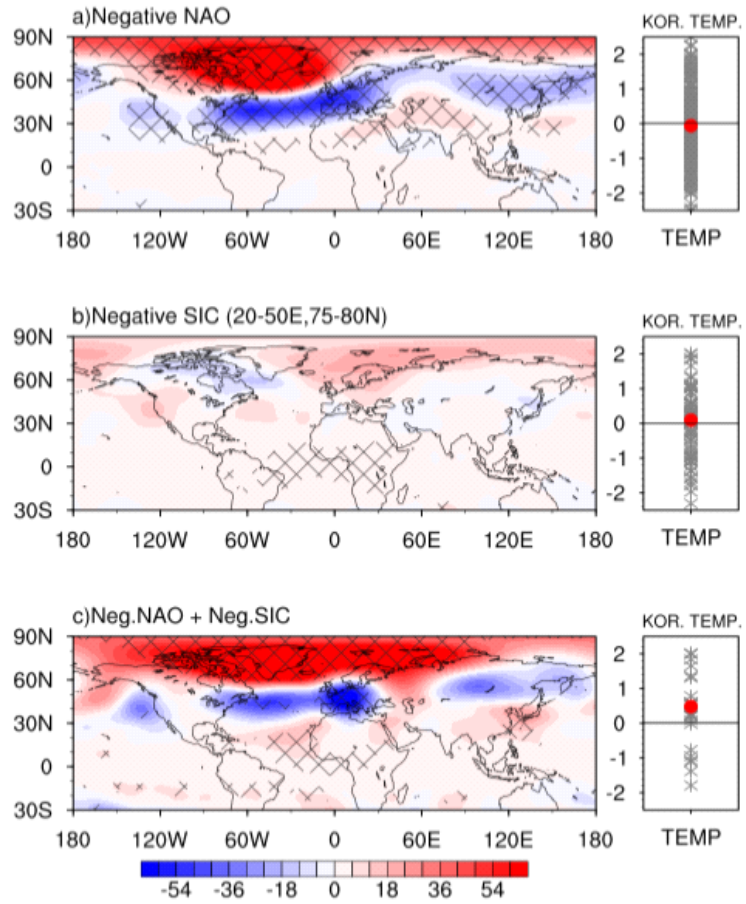


Figure 17. Same figure as in Figure 12 but for the negative NAO case and negative sea ice concentration over the Barents Sea.

## (5) 요약

이 절에서는 봄철 북대서양 진동이 우리나라 기후에 미치는 영향을 살펴보았다. 먼저 NAO의 정의에 따른 차이가 있는지 살펴보기 위해서 CPC에서 제공하는 NAO 지수와 EOF를 통해 추출한 첫 번째 모드로 정의한 NAO 지수의 차이를 분석하였다. 그 결과 월별 NAO 패턴과 지수 사이에 유의할 만한 차이는 나타나지 않았다. 다만 우리나라 기온, 강수와 관련성이 EOF 기반 지수보다 CPC 기반 지수에서 조금 더 높게 나타나는 특징이 있다. 한편 우리나라 봄철 기온, 강수와 NAO와의 선형적인 관련성은 통계적으로 유의한 수준이기는 하지만 0.3에서 0.4 정도의 상관계수로서, 현업 기후 예측에 적용하기에는 부족한 수치이다. 따라서 현업 기후 예측에 NAO의 활용도를 높이기 위해서 우리나라 봄철 기온과의 비선형적인 관련성을 살펴보고 이때 물리·역학적으로 의미 있는 신호가 나타나는지 분석하였다. 그 결과 양의 NAO인 경우에 우리나라 기온이 높을 때에는 중태평양 엘니뇨와 열대 인도양의 온난화 신호가 뚜렷하게 나타났고, 반면 우리나라 기온이 낮을 때에는 반대로 라니아 신호와 인도양의 음의 해수면 온도 편차가 뚜렷하게 나타났다. 즉, 양의 NAO 시기에는 열대 지역 해수면 온도가 높고, 낮음에 따라 우리나라 기온 반응이 조절되는 특징을 확인하였다. 음의 NAO 시기에는 열대 지역 해수면 온도 편차에는 뚜렷한 특징이 나타나지 않고, 그린란드 동쪽부터 바렌츠해까지 해빙 편차가 주요 조절 요인으로 나타났다. 즉, 음의 NAO 시기에 기온이 낮을 때는 바렌츠해 해빙이 많은 경우, 반대로 기온이 높을 때는 바렌츠해 해빙이 적은 경우로 나타났다. 이러한 특징은 한 달 전부터 각각 열대 해수면 온도 및 북극 해빙에서 signal이 지속되므로 위에 제시한 요인들을 감시함으로써 우리나라 봄철 기온 예측에 적용할 수 있다.

## 나. 남아시아 고기압 변동성과 관련된 한반도 여름철 기후 특성

### (1) 연구배경

남아시아 고기압(South Asian Monsoon, SAH)은 인도양의 북쪽인 아라비아 반도에서 티벳 고원까지 동서로 이어지는 지역에 특히 여름철에 강하게 발달하는 안정적이고 강한 상층 고기압으로 남아시아 지역과 중앙 아시아 지역은 물론 동아시아와 북태평양, 북미까지 영향을 미칠 수 있는 주요 대기 요소이다(Flohn, 1960; Krishnamurti et al., 1973; Yang et al., 2007; Zhao et al., 2009). 남아시아 고기압이 동쪽으로 치우치는 경우 티벳모드 서쪽으로 치우치는 경우는 이란모드로 불리기도 한다. 남아시아 고기압은 평균적으로 한반도의 남서쪽에 위치하지만 평년보다 강하게 발달하는 경우 한반도 기후에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 2018년 여름의 경우 남아시아 고기압이 북동쪽으로 장출하여 한반도까지 확장함에 따라 평년보다 강하게 발달하여 북서진한 북태평양 고기압의 영향을 동시에 받으며 한반도에 순압성 고기압이 발달, 그로 인한 강력한 열돔현상으로 한반도에 극심한 폭염이 발생하였다(Lee et al., 2020; Ha et al., 2020). 또한 상층 제트를 따라 남아시아 고기압의 풍하층에 큰 에너지 파동을 유도함에 따라 동아시아 및 태평양, 북미대륙에도 영향을 미칠 수 있다(Zhao et al. 2009). 따라서 남아시아 고기압의 변동 기작에 대한 연구는 그 자체로도 의미가 있지만 한반도 기후에 미치는 영향의 측면에서도 체계적인 연구가 필요하다. 이 연구에서는 여름철 남아시아 고기압의 평균적 특성과 연간 변동성을 살펴보고 연간 변동성의 기작을 분석하였다. 또한 남아시아 고기압의 변동성이 한반도 여름 기후(기온 및 강수)에 미치는 영향을 살펴보았다.

### (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, Pacific North America 패턴)은 NOAA Climate Prediction Center archives로부터 획득하였다(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/>). 우리나라 기온(Ts)과 강수량(Pr) 자료는 기상청에서 제공하는 Automated Synoptic Observing System (ASOS) 자료의 62개 지점 값의 평균값을 사용하였다. 각 월자료에 대하여 1991년에서 2020년을 평년 기간에 대한 편차가 계산되었다.

인도 몬순 지수(Indian Monsoon Index, IMI), 북서태평양 몬순 지수(Western North Pacific Monsoon Index, WNPMI), 남아시아 몬순 지수(South Asia Monsoon Index, SAMI), 동아시아 몬순 지수(East Asia Monsoon Index, EAMI)의 네가지 몬순 지수를 사용하였는데 그 정의와 지역을 Figure 18에 표시하였다.

### Asian Summer Monsoon Indices

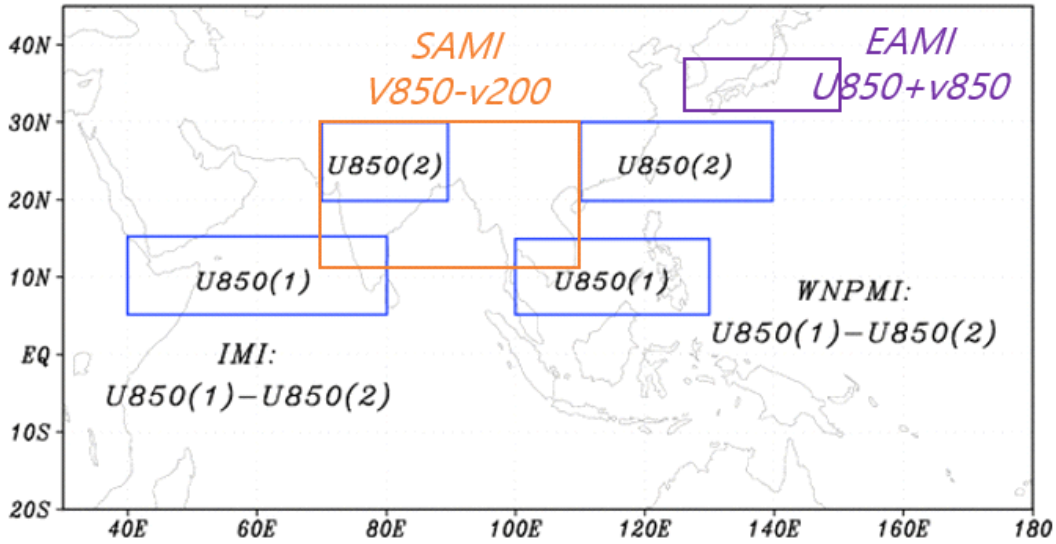


Figure 18. Definitions and areas for computation of Indian Monsoon Index (IMI), South Asia Monsoon Index (SAMI), East Asia Monsoon Index (EAMI), and Western North Pacific Monsoon Index (WNPMI).

경년 변동성을 추출하기 위해 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석을 1973~2021 기간에 대해 월별로 수행하였다. 분석을 위해서 상관분석, 합성장 분석을 사용하였는데 특별한 기간을 명시하지 않은 경우 분석의 대상 기간은 1981~2020에 해당하는 40년이다. 비교를 위해 상기 분석을 장기추세를 제거한 후 적용하여 그 결과를 비교하였다.

### (3) 여름철 남아시아 고기압의 평균적 특성 및 연간 변동성

#### (가) 남아시아 고기압의 평균적 특성

Figure 19에 붉은색으로 표시한 12480 m 지위고도 선으로 SAH의 40년(1981~2020) 월평균 변화를 살펴보면 5월에 인도차이나 반도에서 시작한 후 6월에는 아라비아 반도부터 남중국해까지 발달하고, 7월~8월에 아프리카 북부와 남해까지 동서남북으로 확장하며 최성기를 보인 후에 9월부터는 축소하는 계절변화를 보인다. 남북으로는 최성기에 북위 15도에서 35도까지 확장하는데 남북 방향보다는 동서 방향으로의 확장이 두드러진다. SAH 지수를 Z200의 지역 평균으로 정의하였는데(Table 1) 해당 지역은 Figure 19c에 표시된 A, B, C, D 지역을 포함한다. 월별 OLR 평균장(Figure 19, 채색)을 보면 5월 SAH의 남쪽인 벵갈만의 대류가 점차 발달하며 7~8월에 최성기를 보이는 등 SAH의 강화와 유사한 변동을 보인다. 이를 확인하기 위해 벵갈만을 중심으로 한 남아시아 몬순 지역 OLR 평균(SA), 동아시아 몬순 지역 평균 OLR(EA), 아라비아해 OLR 평균(Ara), 필리핀해 OLR 평균(WNP) 값을 구한 후 월별 변화를 SAH 월별 변화와 살펴보았다(Figure 20b). 필리핀해 대류(WNP)와 아라비아해 대류(Ara)의 월별 변화와도 유사한 계절변

화를 보이지만 남아시아 몬순 지역의 대류(SA)와 SAH 지수가 가장 유사한 계절변화를 보였다. 또한 다양한 몬순 지수(Figure 18)와의 계절변화도 살펴보았는데 인도 몬순 지수(IMI), 서태평양 몬순 지수(WNPMI), 남아시아 몬순 지수(SAMI) 중 남아시아 몬순 지수(SAMI)와 SAH 지수가 가장 유사한 계절변화를 보였다(Figure 20a). 이러한 결과들은 SAH의 평균적 계절변화는 남아시아 몬순의 발달 및 쇠퇴에 민감하다는 사실을 말한다.

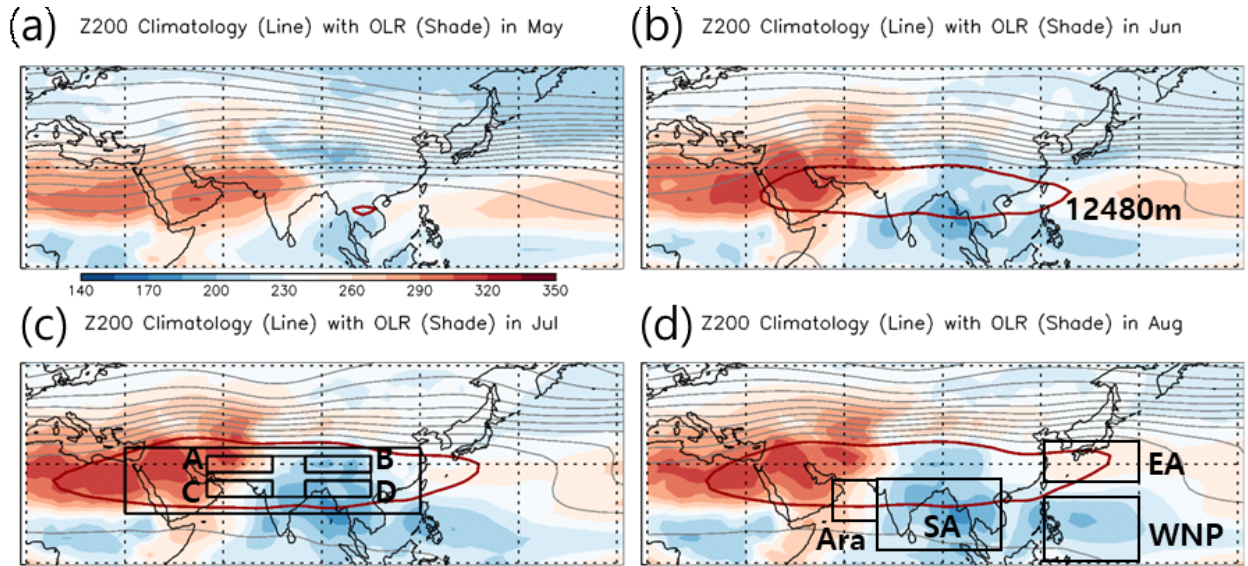


Figure 19. 40-year (1981-2020) climatology of Z200 (gray line) from May to Aug with OLR (color). Red line indicates 12480 m, which represents SAH. Intervals of Z200 are 60m.

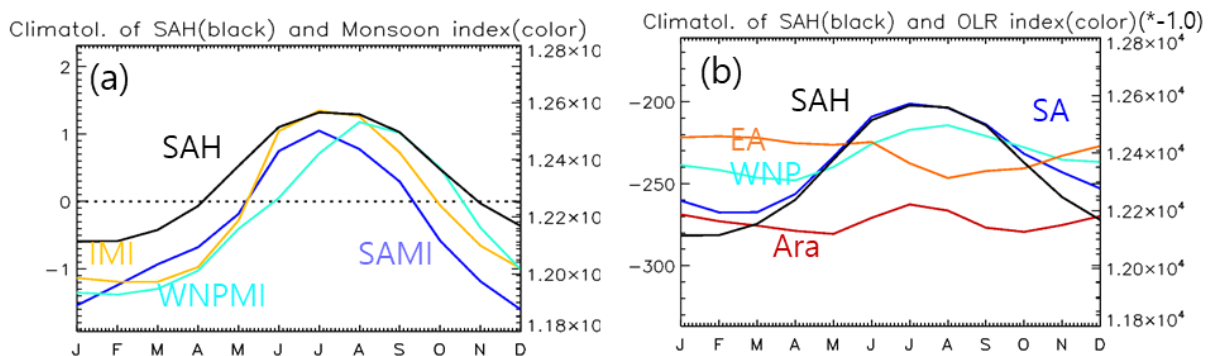
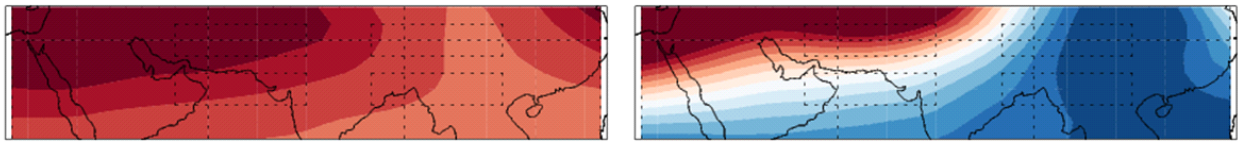


Figure 20. Monthly variations of SAH index and the three monsoon indices (a). Monthly variations of SAH index and the OLR indices multiplied by (-1.0) (b).

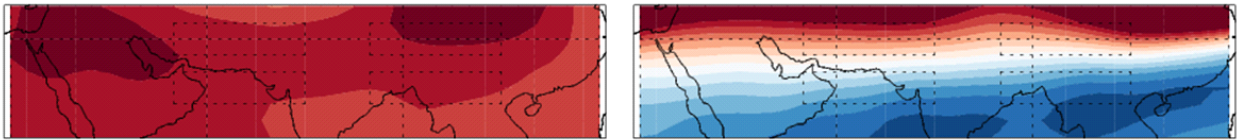
(나) 남아시아 고기압 경년 변동성

기존 SAH 경년 변동성에 대한 연구들은 지역 평균을 이용하는 연구와 주성분 분석을 이용한 연구들이 있다. 지역 평균 연구에서는 A, B, C, D의 지역 평균(Figure 19c and Table 1) 지위고도 값을 주로 이용하였는데(Wei et al., 2014, 2015; Ning et al., 2017) 이 연구에서는 위의 네 지역을 포함하며 동서남북으로 5~25도 확장한 구역(30~120°E, 15~35°N)에 대해 월별 Z200를 이용하여 EOF 분석을 수행하였다. 그 결과 과거 49년(1973-2021) 기간에 대해 2개의 주성분(EOF1, EOF2 in Figure 21)과 그에 해당하는 시계열(Principal Component, PC1, PC2)을 얻었다(Figure 22).

(a) EOF1(56.4%),  $r_{Ts/Pr} = 0.52 / 0.07$       (b) EOF2(19.1%),  $r_{Ts/Pr} = -0.11 / 0.28$



(c) EOF1(73.3%),  $r_{Ts/Pr} = 0.06 / 0.21$       (d) EOF2( 9.7%),  $r_{Ts/Pr} = 0.47 / 0.05$



(e) EOF1(69.6%),  $r_{Ts/Pr} = 0.21 / 0.03$       (f) EOF2(11.4%),  $r_{Ts/Pr} = 0.43 / -0.12$

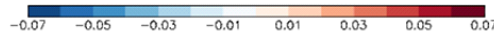
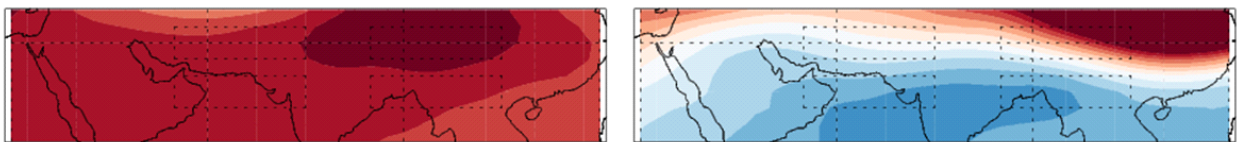


Figure 21. The first (a) and second (b) EOF mode of Z200 in Jun and the numbers in the title are the 40-year (1981-2020) correlations of PC1 with Ts and with Pr in Jun. (c) and (d) are the same but for Jul and (e) and (f) are for Aug.

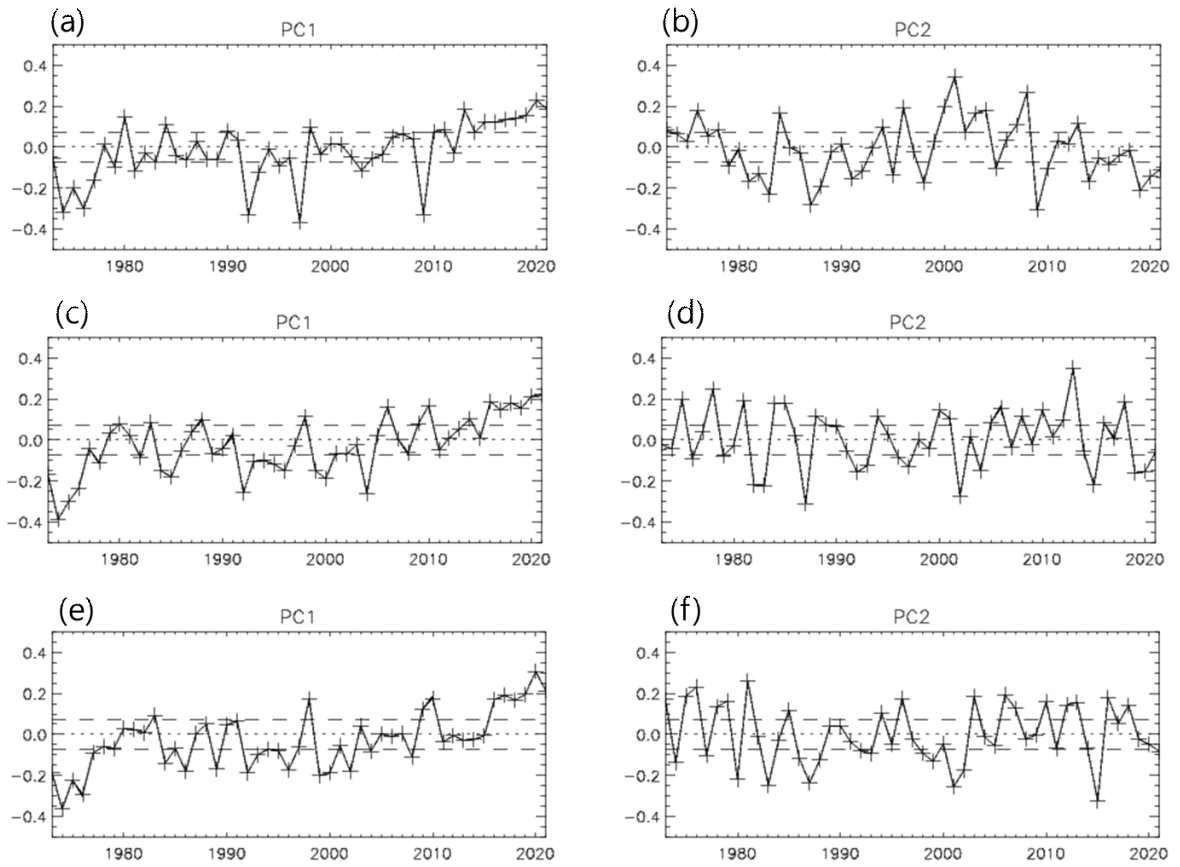


Figure 22. Time series of PC1 (a) and PC2 (b) of the EOF modes in Jun Ts and with Pr in Jun. (c) and (b) are the same but for Jul and (e) and (f) are for Aug. Dashed lines indicate  $\pm 0.43\sigma$  threshold.

Table 1. Key sub-areas of SAH in the previous studies on SAH interannual variability.

Variability	Area
A	55-75° E/27.5-32.5° N
B	85-105° E/27.5-32.5° N
C	55-75° E/20-25° N
D	85-105° E/20-25° N
SAH	55-105° E/20-32.5° N

Table 2. Local Variability and the associated areas.

Variability	Combination
All	A+B+C+D
North-South(N-S)	(A+B)-(C+D)
West-East(W-E)	(A+C)-(B+D)
Northwest-Southeast(NW-SE)	A-D

Table 3. Correlations of PC1 with the local variability, ALL.

	PC1_Jun	PC1_Jul	PC1_Aug
All	0.95	0.99	0.98

Table 4. Correlations of PC2 with the local variability, North-South (N-S).

	PC2_Jun	PC2_Jul	PC2_Aug
N-S	0.66	0.90	0.78

EOF1은 전체 지역에 대한 변동성으로 A, B, C, D 지역의 평균(‘All’ in Table 2)과 높은 상관관계( $r=0.95\sim 0.98$ )를 보이고 있다(Table 2 and Table 3). EOF2는 남북 변동성(‘N-S’ in Table 2)과 특히 7월, 8월에 높은 상관관계를 갖는다(Table 2 and Table 4). 이 같은 결과는 EOF1이 전체 확장 또는 축소를 나타내는 모드이고 EOF2는 남북 변동성을 나타내는 모드임을 의미한다. 따라서 이하에서는 EOF1을 확장모드, EOF2를 남북모드라 명명하였다. 그림에 보이지는 않았지만 EOF3은 동서 변동성과의 상관관계가 높았으며 8월 EOF3은 CGT 패턴과 유사한 형태를 보였다(그림 없음).

확장모드는 6월, 7월, 8월의 경우 모두 2010년 이후에 주로 양의 값을 갖는데(Figure 22) 이는 SAH가 최근 여름철에 특히 확장하고 있음을 말해준다. 확장모드는 Z200의 장기추세를 제거한 후에도 제 1모드로 나타남과 동시에 2010년 이후 양의 값을 보였는데 이는 지구 온난화의 영향 이외에도 확장모드를 주도하는 경년 변동성이 존재함을 의미한다.

#### (4) 남아시아 고기압 확장모드(EOF1)

##### (가) 확장모드 관련 기작 및 예측인자

PC1(PC1\_Jun, PC1\_Jul, PC1\_Aug)과 해당 월의 Z200, OLR, SST와의 상관관계 공간분포 (Figure 23)에 따르면 확장모드는 6월에 주로 인도양의 북쪽 아열대 지역을 중심으로 발달하고 7월과 8월에는 대부분의 열대지역 및 아열대 지역, 특히 인도양과 대서양 지역의 변동성과 함께 발달한다. OLR 상관관계를 보면 6월에는 인도에서 열대 서태평양에 이르는 지역의 대류가 활발할수록 확장모드가 발달하고 7월과 8월에는 아라비아해와 아라비아 반도의 대류활동이 활발할수록 확장모드가 발달하는 경향을 보인다. 아열대 서태평양에서는 한반도 남쪽 아열대 지역에 고기압성 흐름이 6월, 7월에 두드러지게 나타나며 대류가 억제되는 모습을 보인다. SST 상관관계에서는 인도양의 고온과 서태평양의 고온이 나타나며 열대 중태평양에는 약한 음의 SST가 나타난다.

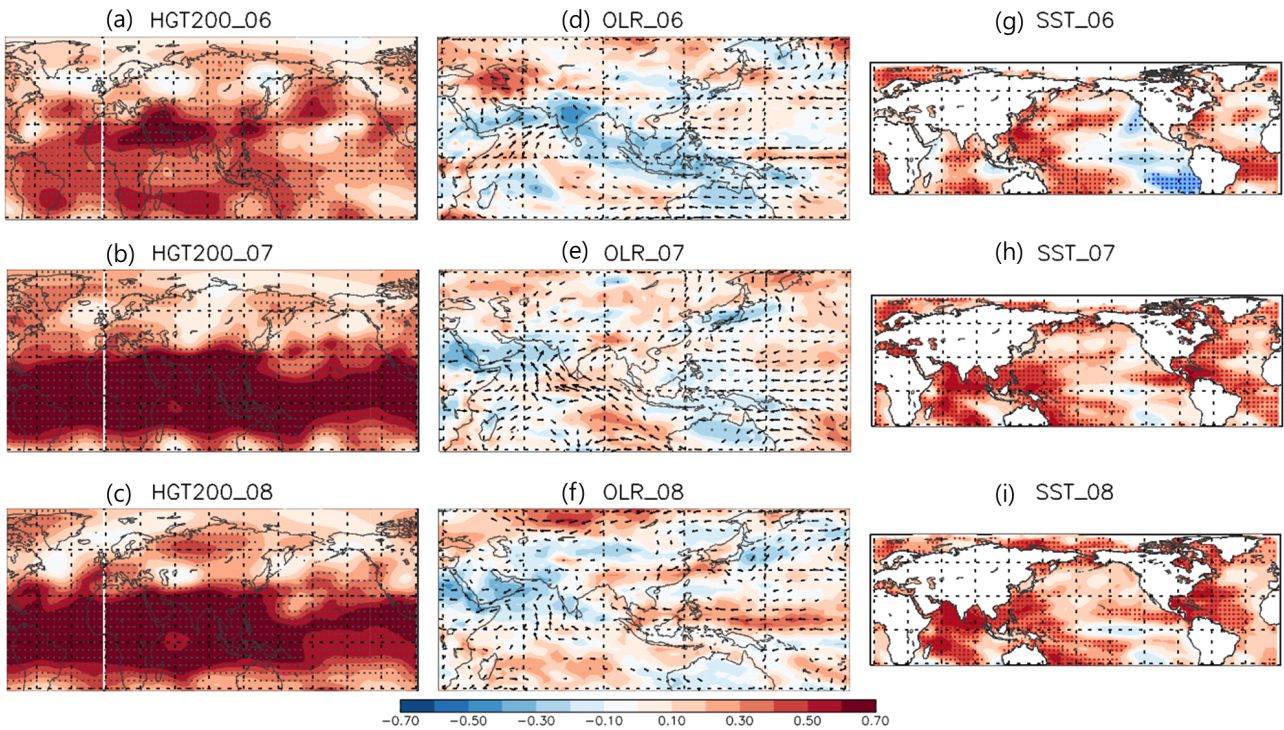


Figure 23. Simultaneous 40-year correlation maps of PC1\_Jun with Z200 (a), with OLR and 850 hPa wind (d), with SST (g). (b), (e) and (h) are for PC1\_Jul. (c), (f), and (i) are for PC1\_Aug. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

7월 PC1이 높았던 경우와 낮았던 경우( $\pm 0.75\sigma$  기준, Table 5)의 합성장을 장기추세를 제거한 후 살펴보면 확장(축소)모드가 발달한 경우 평년에 비해 SAH가 동서 방향, 남북 방향으로 확장(축소)한다(Figure 24). 이때 저층의 흐름을 보면 아라비아 해에서는 대류가 활발한 반면 뱅골만과 남중국해, 필리핀해에서 대류가 억제되는데 고기압성 흐름이 아열대 서태평양에 넓게 위치함에 따라 뱅골만에 몬순 흐름(남서풍)이 발달하지 못하기 때문인것으로 보인다. 한편 동아시아 지역 한반도와 일본에서는 저기압성 흐름이 발달하면서 북쪽의 차가운 공기와 남쪽의 고온 다습한 공기가 한반도 동쪽에 수렴하며 대류가 나타나는 형태를 보이며 축소모드가 발달한 경우에는 이와 반대의 패턴이 나타난다.

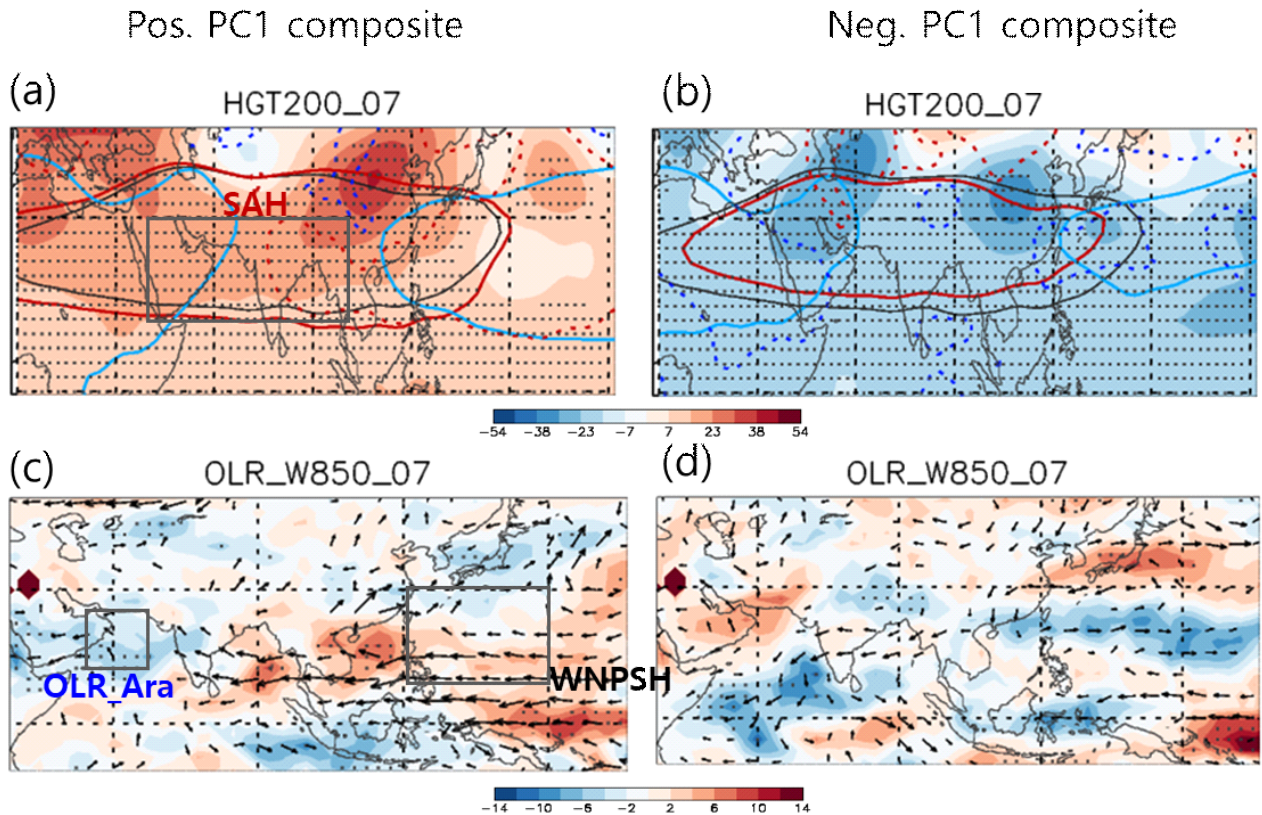


Figure 24. Composite maps of Z200 (a and b) and OLR with winds on 850 hPa (c and d) in the positive and negative composite years of PC1\_Jul, respectively, in Jul. In (a) and (b), black line indicates climatological 12480 m and red line does so in the composite years. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

Table 5. Composite years of positive and negative PC1\_Jul ( $\pm 0.75 \sigma$  threshold).

	Years
+PC1_Jul composite	1981, 1983, 1987, 1988, 1998, 2006, 2010, 2016, 2018, 2020
-PC1_Jul composite	1985, 1992, 1996, 1999, 2000, 2004, 2008, 2011

5월의 해수면온도 편차 합성장(Figure 25a and b)에서는 확장(축소)모드 발달시 인도양 SST 고온(저온) 편차가 나타나고 있는데 이러한 특성은 1월부터 꾸준히 나타나며 5월에 큰 편차를 보인다. IOBW(Indian Ocean Basin Wide Mode) 지수는 인도양 지역(40-100°E, 20S-20°N) SST의 평균값을 나타내는데 이러한 IOBW의 북부 지역(40-100°E, 0-20°N)의 SST 평균값을 IOBWn으로 정의하고 PC1과의 월별 상관관계를 계산하였다(Figure 26). 그 결과 6월, 7월, 8월의 PC1 모두 1월부터 양의 상관관계를 보이며 특히 5월의 상관지수가 0.70, 0.76, 0.78으로 매우 높은 상관지수를 각각 보였다(Figure 26a). 이러한 경향성은 장기추세를 제거한 후에도 유의미하게 나타났다(Figure 26b). PC1과 5월 IOBWn의 15년 이동 상관관계 계산 결과(Figure 26 c and d)를 보면 7월과 8월의 경우 상관관계가 최근들어 특히 높은 반면 6월의 경우에 약간 낮은 경향을 보인다. 6월의 경우 남아시아 몬순으로 인한 대류와의 연관성이 7월과 8월에 비해 높게 나타나는데(Table 6) 이는 남아시아 몬순이 5~6월에 주로 발달하기 때문인 것으로 추측된다.

Table 6. Correlations of PC1 with IOBWn in May and with OLR in Jul in the specific regions of the Indian Ocean that are indicated in the parenthesis.

	5월 IOBWn	인도양 OLR
PC1_Jun	0.70	-0.56 (80-100° E, 10-25° N)
PC2_Jul	0.76	-0.30 (56-78° E, 15-25° N)

대류권 기온(TTave)을 1000 hPa~200 hPa 레벨 기온 평균으로 계산하였다. 확장모드가 발달했을 때는 5월에 북부 인도양의 SST 상승뿐만 아니라 그 지역의 대류권 기온 역시 상승하고(Figure 25a and c) 반대로 SAH가 축소했을 때는 5월에 북부 인도양의 SST 감소와 대류권 기온이 낮은 특징을 보인다(Figure 25b and d). Z850 편차장에서 확장모드 발달시 인도양에 양의 편차와 대류 억제가 뚜렷이 나타나며(Figure 24e, g) 이는 인도양의 고온으로 인한 저기압 발달 및 대류로 인한 상층의 반응 때문이 아님을 의미한다. 오히려 인도양의 고온으로 인한 대기의 가열이 대류권 기온의 상승을 유도하는 것으로 추측된다.

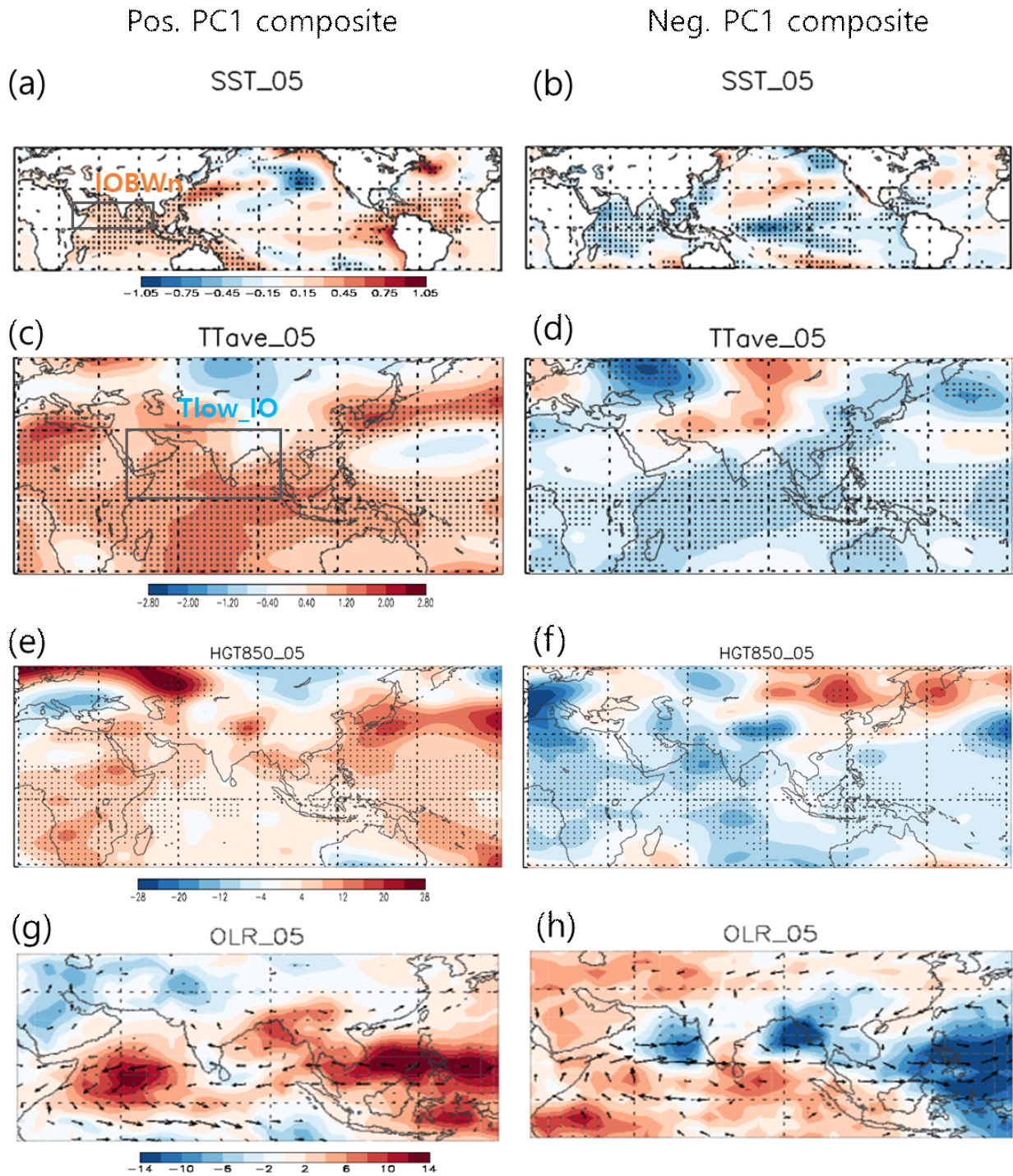


Figure 25. Composite maps of SST (a and b), tropospheric (1000–200 hPa) temperature (c and d), Z850 (e and f), and OLR (g and h) in the positive and negative composite years of PC1\_Jul, respectively, in May. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

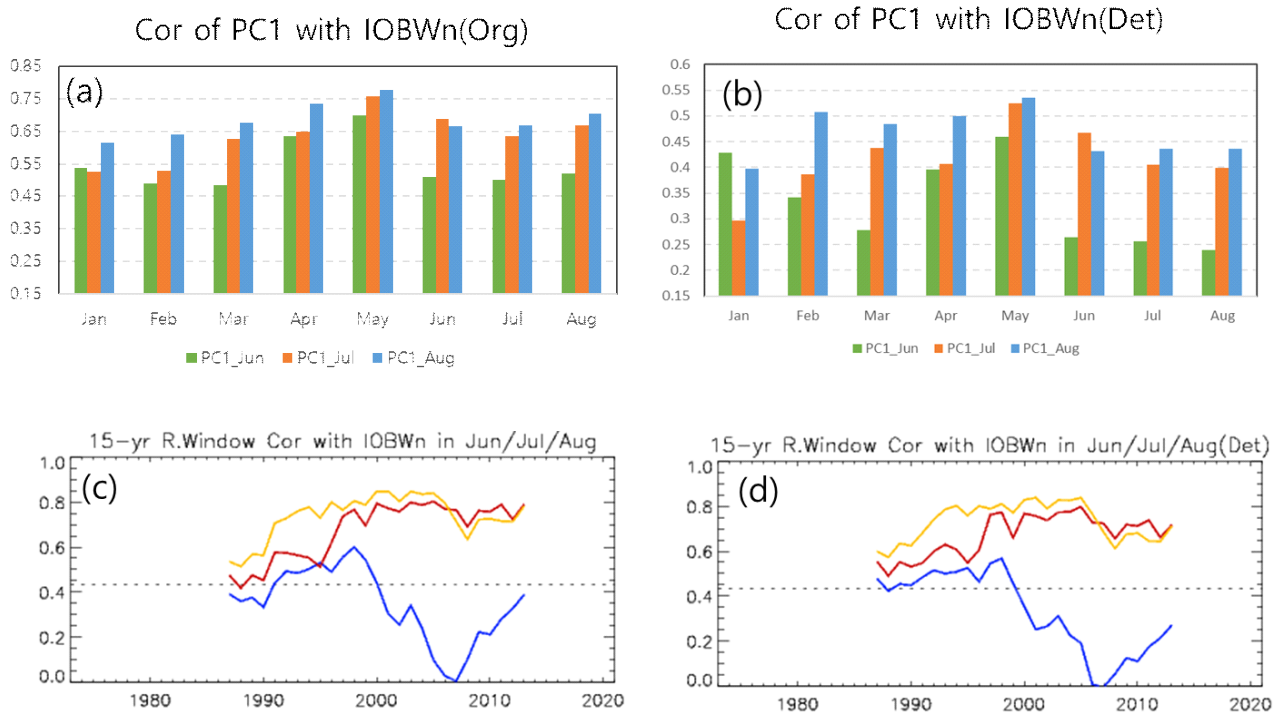
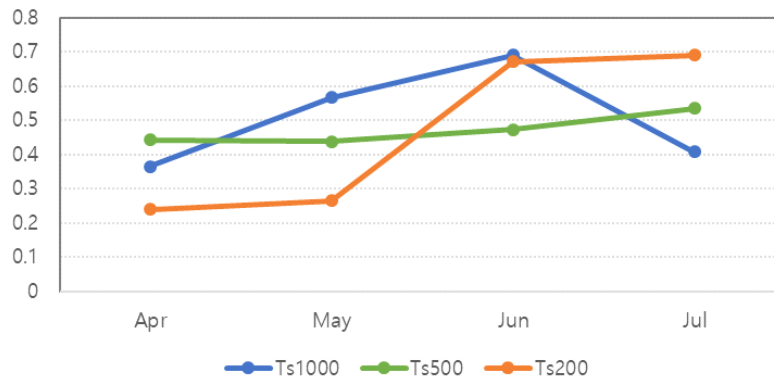


Figure 26. Correlation of PC1 with monthly IOBwn for Jun (green), Jul (Orange), and Aug (blue) (a) and correlations after detrending (b). 21-year sliding correlations of PC1 with IOBwn in May for Jun (blue), Jul (red), and Aug (yellow) (c) and 21-year sliding correlations after detrending (d).

이러한 가설을 확인하기 위해서 IOBWn 지역에 대해 고도별 대기 기온의 월별 평균을 계산한 후 5월 IOBWn과의 상관관계를 Figure 27a에 표시하였다. 유사한 방법으로 고도별 대기 기온과 PC1\_Jul과의 상관관계를 Figure 27b에 표시하였고 비교를 위하여 아라비아해의 월별 평균 OLR(Figure 24c의 박스 지역)과 PC1\_Jul과의 상관관계도 함께 나타내었다. 두 경우 모두 4월과 5월에 대체적으로 하층 기온(1000 hPa)의 상관지수가 중층(500 hPa) 및 상층 기온(200 hPa)의 상관지수보다 높게 나타났는데 이 결과는 인도양의 고온으로 인해 하층 대기가 먼저 가열됨을 의미한다. 기존 연구 결과에 따르면 습한 열대 대기에서 낮은 봄철 고온의 인도양이 대기 하층의 대기 경계면(Atmospheric boundary layer)을 가열시키면 습윤 정적 에너지(moist static energy)에 의해 습윤 단열 프로파일(moist-adiabatic profile)이 형성되어 대류권 전체의 기온이 상승하여(Huang et al. 2011; Qu and Huang 2012) SAH가 평년보다 발달하게 된다. 반면 7월이 되면 상층, 특히 200 hPa의 기온과의 상관관계가 가장 높게 나타난다. 이는 아라비아해에서의 대류 활동으로 인한 상층의 잠열 방출로 인해 상층 고기압이 더욱 발달하기 때문인 것으로 추측되며 Figure 27b에서 5, 6월과는 달리 7월에 아라비아해 OLR과 PC1\_Jul이 유의미한 음의 상관관계를 보이는 결과와 일치한다.

(a) Cor of IOBWn with Tair\_IO



(b) Cor of PC1 with Tair\_IO/OLR\_Ara

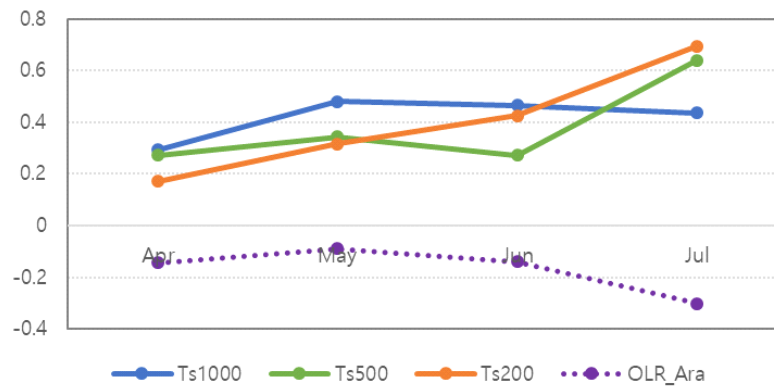


Figure 27. Correlations of IOBWn in May with atmospheric air temperature at 1000 (blue), 500 (green), and 200 (orange) hPa from Apr to Jul (a). (b) is the same for PC1\_Jul instead of IOBWn. Purple with dashed line indicates correlations of PC1\_Jul with OLR\_Ara (refer to Figure 24c).

앞서 언급한 합성장 분석 결과(Figures 24 and 25)를 기반으로 세부 주요 인자를 선정하고  
 지수화하여 정규화한 후 월별 시계열을 Figure 28에 도시하였다. 양의 PC1\_Jul 합성의 경우  
 IOBWn은 봄철부터 평년보다 높은 값으로 7월까지 유지된다(Figure 28a). 인도양의 대류권 저층  
 (1000 hPa ~ 700 hPa) 평균 기온(Tlow\_IO) 역시 고온의 IOBWn으로 인해 높은 값을 지속적으로  
 유지하다 7월에 약간 감소하는 경향을 보인다. 반면 상층 고기압(SAH)은 겨울철에는 양의 편차  
 가 미미하지만 봄철에 상승세를 보이다가 7월에 더욱더 증가하게 되는데 이는 아라비아해의  
 대류(OLR\_Ara)가 7월에 급격히 발달하는 모습과 일치한다.

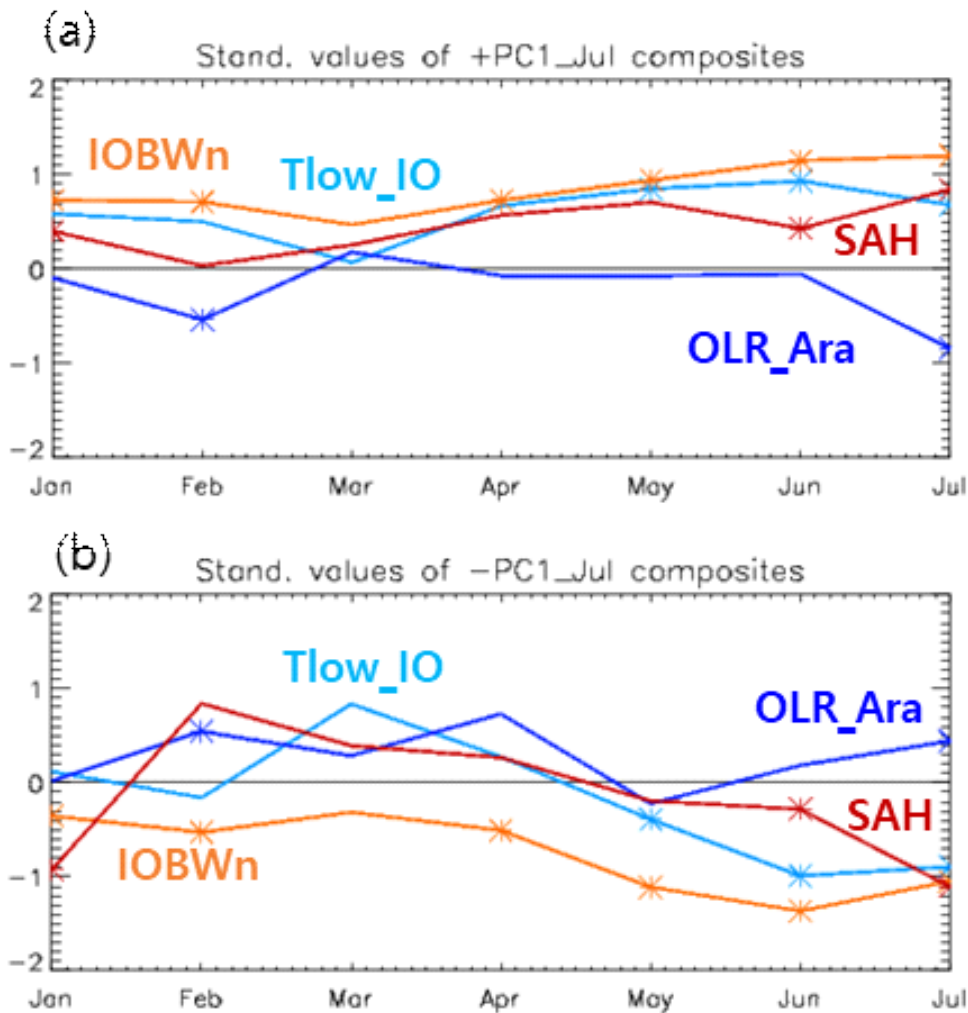


Figure 28. Time series of normalized values of key variables (refer to Figure 24 and 25) in the positive (a) and negative (b) composite years of PC1\_Jul. Star indicates statistically significant at the 95% level.

이러한 결과들은 확장모드에 기여하는 주요 인자가 고온의 인도양으로부터의 하층 대기의  
 가열과 7월 아라비아해의 대류임을 제시한다.

PC1\_Jul 및 IOBWn 지수의 시계열과 산포도(Figure 29)에 따르면 두 변수가 높은 상관성을 보이는데 특히 1998, 2010, 2016, 2020년에 양의 값이 두드러진다. 이러한 해들은 이전 겨울철에 엘니뇨가 강하게 발달했다가 가을 및 겨울철에 라니냐로 전환된 해들이다. 이는 PC1과 월별 NINO34 지수와의 상관관계 변화에서도 확인되는데 둘의 상관관계가 1월의 유의미한 양의 값에서 7월의 음의 값으로 점진적으로 감소하는 특성을 보이는 것으로 보아(Figure 30) 겨울철 엘니뇨가 라니냐로 전환되며 PC1이 강하게 발달함을 의미한다.

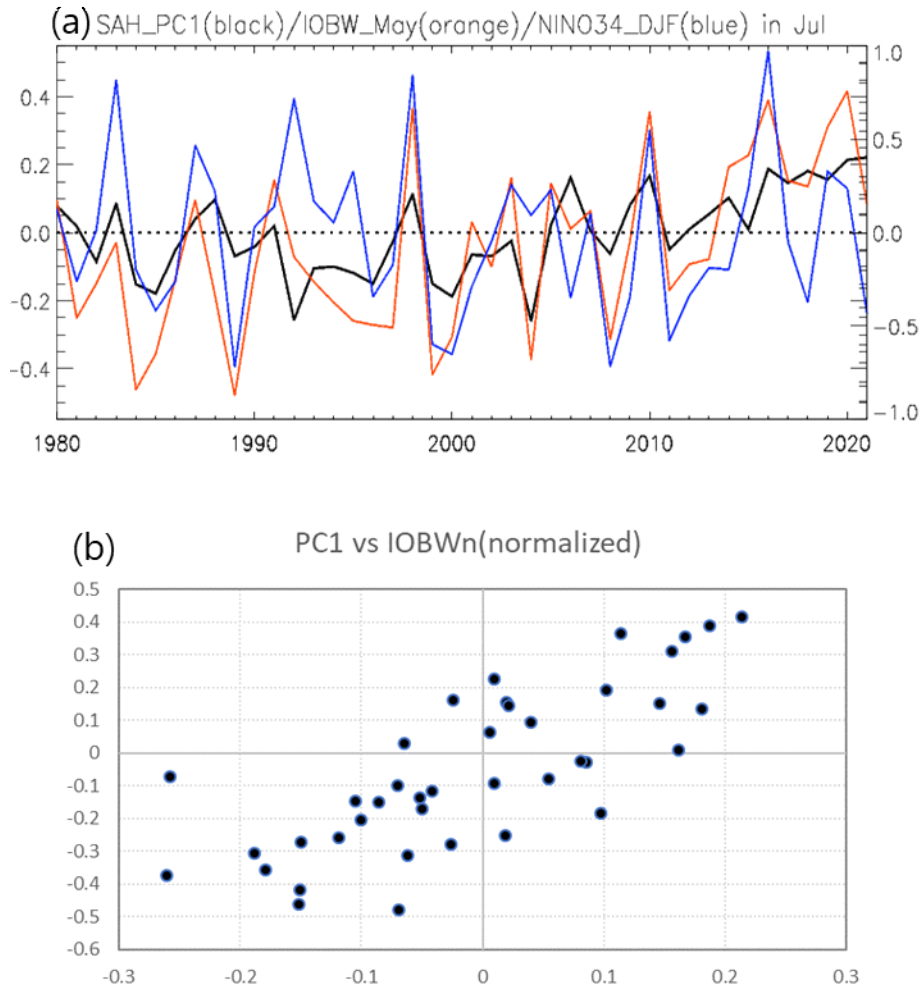


Figure 29. Time series of PC1\_Jul, IOBWn in May, and NINO3.4 in the previous winter (a). Scatter plot of PC1\_Jul and IOBWn in May (1981-2020) (b).

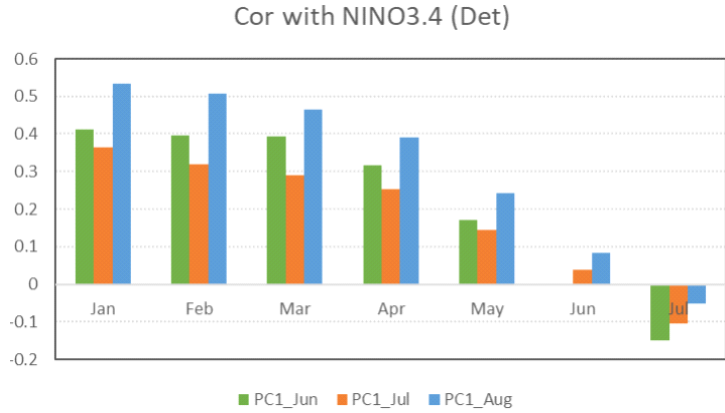


Figure 30. Correlation of PC1 with monthly NINO3.4 for Jun (green), Jul (Orange), and Aug (blue).

Xie et al. (2009)에 따르면 겨울철 엘니뇨가 쇠퇴하는 여름, 아열대 북서태평양에 고기압성 흐름이 겨울철부터 여름철까지 유지되는 기작으로 봄철 인도양 고온의 영향을 제시하였다. Figure 24c에도 유사한 모습이 나타나는데 확장모드 발달시 아열대 북서태평양에 고기압성 흐름이 발달하는 모습을 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해 아열대 지역(120-150°E, 10-30°N)의 Z500 평균을 Western North Pacific Subtropical High(WNPSH)로 정의한 후(Figure 24c 참조) PC1과의 관련성을 살펴본 결과 모든 월에 대하여 PC1과 WNPSH가 강한 양의 상관성( $r=0.58, 0.70, 0.70$ )을 보였다(Figure 31).

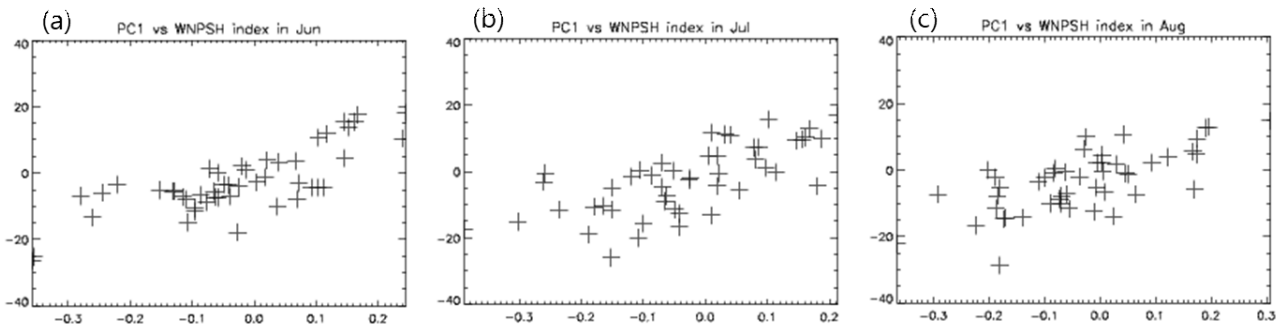


Figure 31. Scatter plots of PC1 and WNPSH in Jun (a), Jul (b), and Aug (c).

겨울철 엘니뇨가 쇠퇴할 때 봄철 인도양의 SST가 상승하는 이유를 알아보기 위해 PC1\_Jul에 회귀된 월별 SST, 바람장, 평년기간 동서방향 바람을 인도양 지역(40-100°E)에 대해 평균하여 Figure 32에 도시하였다. 결과에 따르면 2월과 3월에 남인도양 평년 동풍지역에 고기압성 흐름 발달로 C-type 바람이 발생하고 이로 인한 남인도양 서풍 편차 발달로 바람이 감소함에 따라 대기로의 잠열 방출이 감소하여 남인도양에 고온이 2월부터 지속되게 된다. 이후 태양복사 에너지의 북진에 따라 SST 고온 지역이 북인도로 북상하여 북인도양(0~20°N)의 SST가 증가하는 것으로 보이며 이 결과는 Xie et al. (2009)에서 제시한 기작(인도양 축전기 효과, Indian Capacitor Effect)과 일치하는 결과이다.

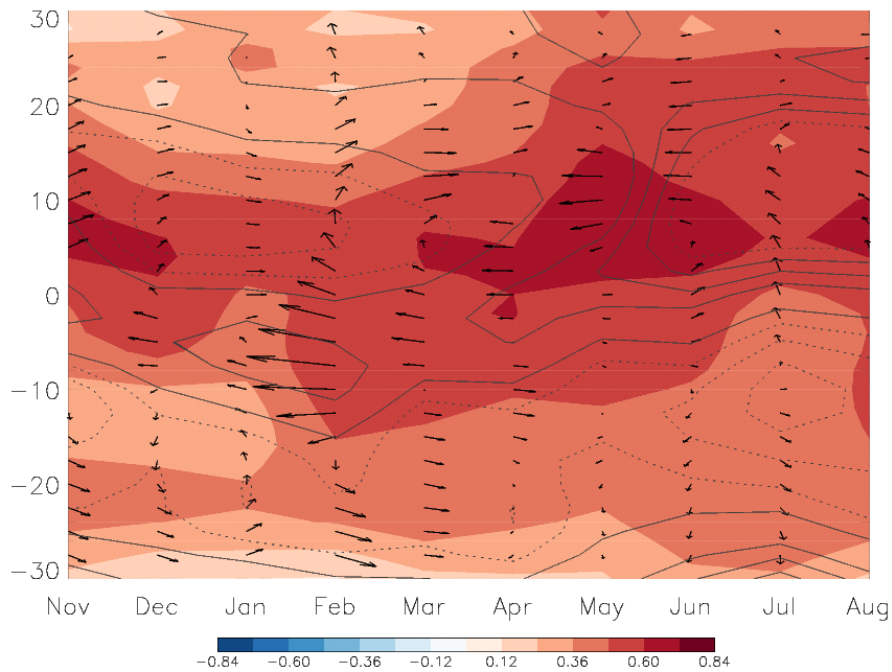


Figure 32. PC1-regressed SST (shade), 850 hPa winds (arrow) with climatological U850 that are averaged for 40-100°E.

(나) 확장모드와 한반도 기후와의 연관성

한반도 여름철 월별 기온과 PC와의 연관성(Figure 33)을 살펴보면 PC1과 여름철 기온과의 연관성이 6월을 제외하고는 상관성이 높지 않다. 강수와의 관련성(Figure 34)도 통계적으로 유의미하지 않은 경향을 보인다. 6월의 기온 경우도 장기추세를 제거할 경우 상관지수가 0.27로 낮아지는 것으로 보아 온난화의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 한편 15년 이동 상관지수를 보면 1980년대 초반과 최근을 제외하면 7월 기온의 경우(Figure 33h) 음의 연관성을, 7월 강수의 경우 양의 연관성을 보인다. 특히 엘니뇨가 라니냐로 전환된 2020년 7월 경우에는 한반도 기온이 평년보다 매우 낮았으며(-2.1도 편차, 역대 최저 4위) 강수는 매우 많았는데(140.1mm 편차, 역대 최고 6위) 이러한 기온 및 강수 특성을 유도하는 인자를 찾기 위해 다양한 대기 원격상관 지수의 영향을 살펴보았다.

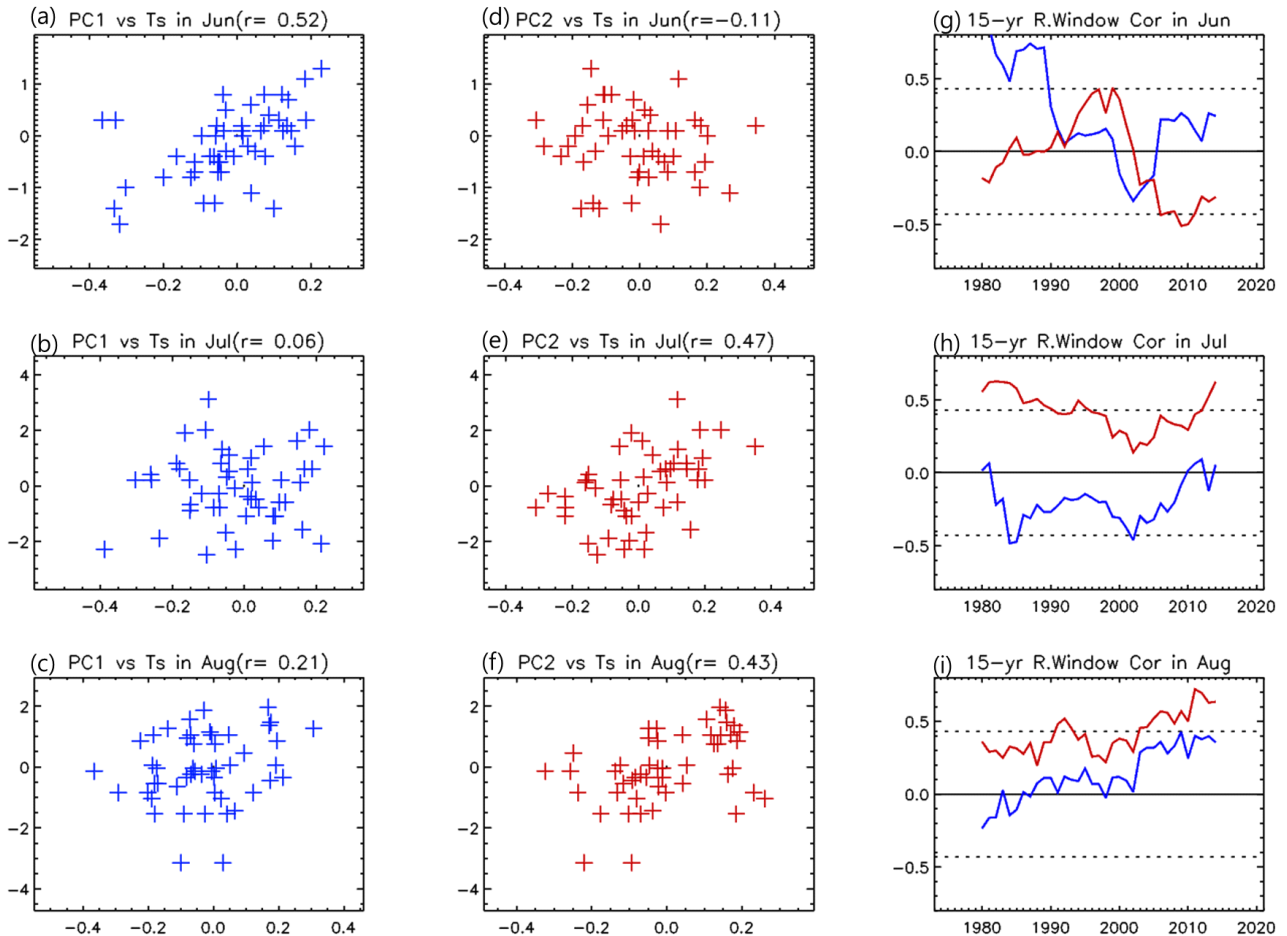


Figure 33. Scatter plot (1981-2020) of PC1 with Ts in Jun (a), Jul (b) and Aug (c). (d), (e), and (f) are for PC2. 15-year running correlations of Ts with PC1 (red) and with PC2 (blue) in Jun (g), Jul (h) and Aug (i).

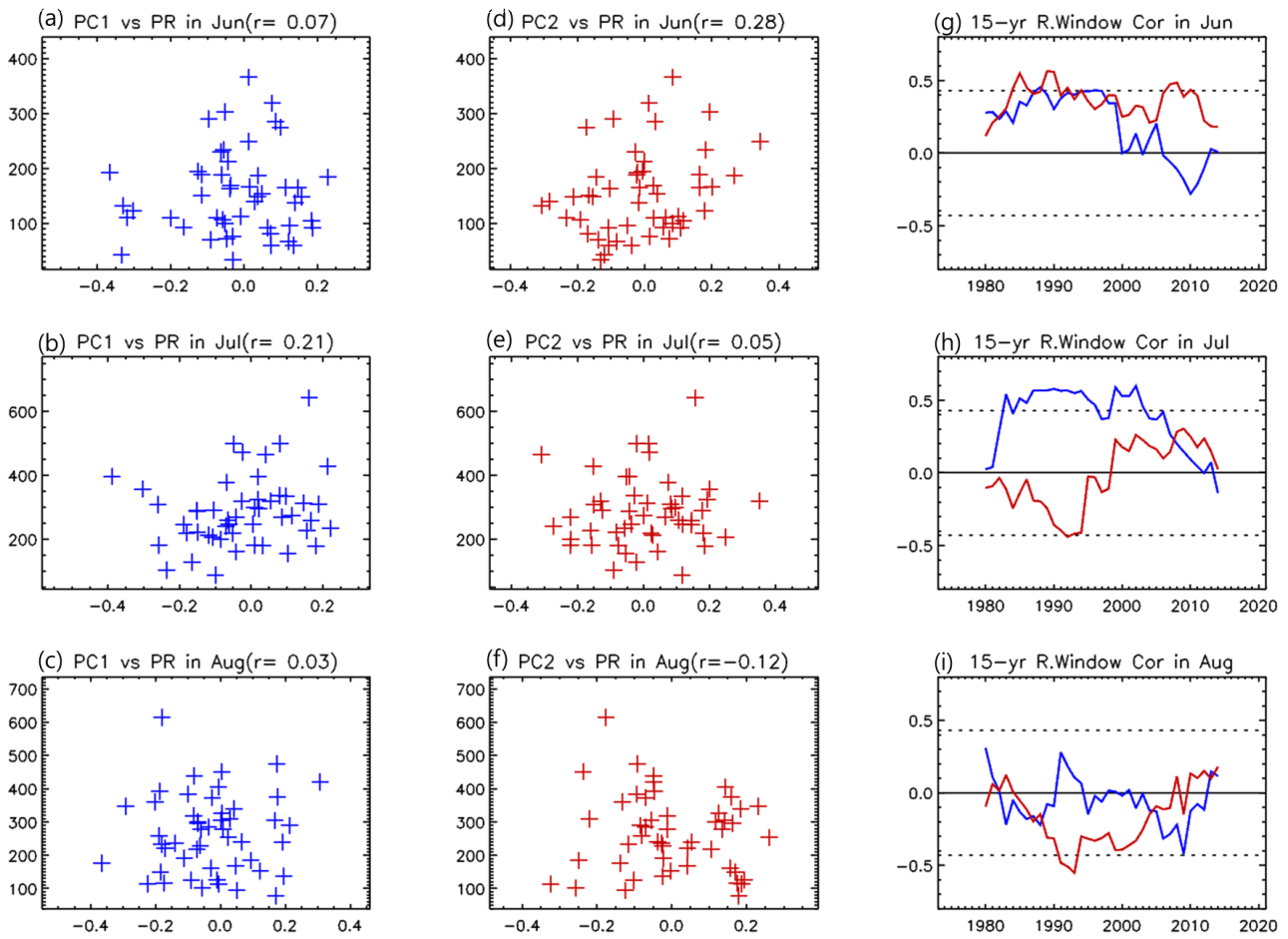


Figure 34. Scatter plot (1981–2020) of PC1 with Pr in Jun (a), Jul (b) and Aug (c). (d), (e), and (f) are for PC2. 15-year running correlations of Pr with PC1 (red) and with PC2 (blue) in Jun (g), Jul (h) and Aug (i).

다양한 대기 원격 상관 지수와의 관련성을 살펴본 결과 PC1이 양일 때 7월 Pacific North America(PNA)의 위상에 따라 동아시아 대기 편차장 차이와 한반도 기온에 차이가 나타났다. 따라서 PC1이  $0.8\sigma$  이상일 경우 PNA의 위상( $\pm 0.8\sigma$ )에 따른 합성해를 분리하여 한반도 기온 (Table 7)과 합성장(Figure 35)을 살펴보았다. PNA가 양인 경우 한반도 남쪽에는 고기압성 흐름이, 동해를 중심으로 한반도와 일본에는 저기압성 흐름이 발달하여 7월 기온이 저온이거나 중립 경향을 보였고, PNA가 낮을 경우 반대의 순환장 패턴이 나타나며 고온 경향을 보였다.

Table 7. Composite years of positive PC1\_Jul ( $>0.8\sigma$ ) and PNA in Jul( $\pm 0.8\sigma$ ). Underlined years indicate transition years from El Niño to La Niña. Years in blue (red) indicate below-normal (above-normal) Ts years with  $\pm 0.43\sigma$  threshold.

	Composite years
PC1+PNA+	<u>1988</u> 1998 <u>2007</u> 2010 2016 <u>2020</u>
	1983 1991 2005 2006 2009 2014 2015 2017 2019
PC1+PNA-	1981 1987 2012 2013 2018

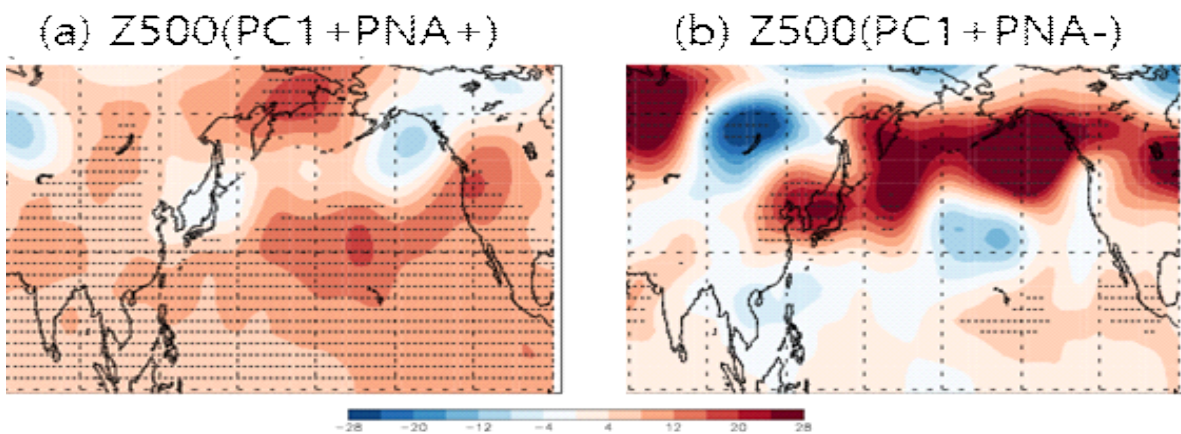


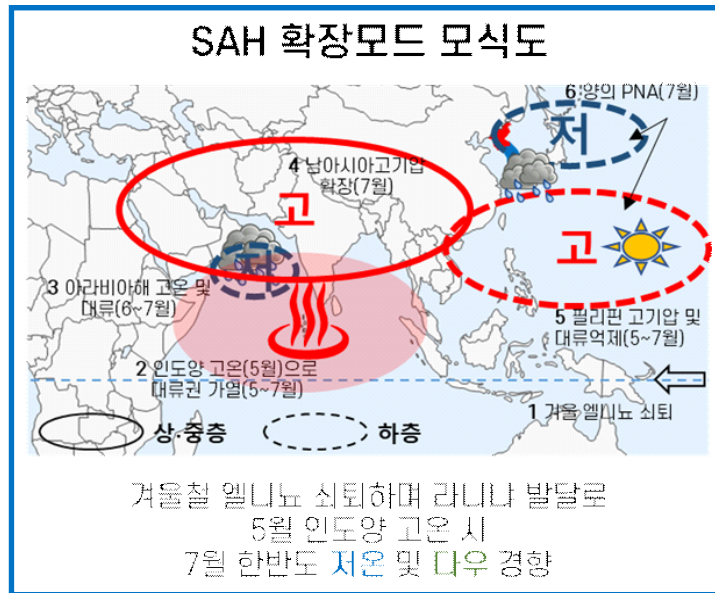
Figure 35. Composite maps of Z500 for positive PC1\_Jul and positive PNA(PC1+PNA+) (a) and for positive PC1\_Jul and negative PNA(PC1+PNA-). Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

PC1+PNA+ 경우 중 Table 7에서 밑줄 친 6개의 해들은 이전 겨울철 엘니뇨가 쇠퇴하며 가을철 라니냐가 나타나는 해였다. 한편 엘니뇨가 쇠퇴하고 가을철 라니냐가 발달하는 해는 총 7 경우였는데 이중 1995년을 제외하고 모든 해에 5월 IOBWn이 양의 값을, 7월 Oceanic Niño Index(ONI) 지수가 음의 값을, 7월 PNA 지수가 양의 값을 보였고 이에 따라 한반도 기온은 중립 또는 저온, 강수는 중립 또는 다우가 나타났다(Table 8). 이러한 결과는 확장모드 자체는 한반도의 기온과 강수에 큰 영향을 미치지 않지만 남아시아 고기압이 확장하고 PNA가 강한 양의 값을 가질 때, 특히 겨울철 엘니뇨가 쇠퇴하고 라니냐가 발달하는 여름에, 인도양 축전기 효과로 인해 북서태평양 고기압이 발달하고 그 북쪽으로 저기압성 흐름이 나타나며 한반도에 저온과 다우를 유발하는 경향이 있음을 의미한다. 하지만 PC1이 음의 값을 가질 경우는 PNA에 따른 경향성의 차이가 나타나지 않았다. 또한 축소모드가 나타나는 경우는 라니냐에서 엘니뇨로 전환하는 경우가 아니라 라니냐가 유지되는 경우로 비전형적인 형태를 보였다.

Table 8. Transition years from El Niño to La Niña and corresponding values of IOBWn in May, ONI index in Jul, PNA index in Jul, Ts and Pr in Jul. Values of IOBWn, ONI, and PNA in blue (red) shade indicate below-zero (above-zero). For Ts, blue (red) shade indicates below-normal (above-normal) temperature with  $\pm 0.43 \sigma$  threshold. For Pr, dark yellow (green) shade indicates below-normal (above-normal) precipitation with  $\pm 0.43 \sigma$  threshold.

Year	IOBW5	ONI7	PNA7	Ts7	Pr7
1988	0.17	-1.3	1.6	-0.6	334.7
1995	-0.26	-0.2	-0.7	-0.3	212.7
1998	0.37	-0.8	1.7	-0.6	274
2007	0.06	-0.6	1.7	-1.1	247.3
2010	0.36	-1.1	0.9	0.6	258
2016	0.39	-0.3	0.5	0.6	309.7
2020	0.42	-0.4	1.2	-2.1	427.7

상기 연구 결과를 바탕으로 모식도를 만들고 관련된 스토리라인을 제시하였다(Figure 36).



- **(인도양)** 이전 겨울철 엘니뇨가 쇠퇴(#1)하며 라니냐가 발달할 때 5월 인도양 해수면 온도가 상승함에 따라(#2) 5월 대류권 저층의 기온 역시 상승하며 남아시아 고기압 발달이 시작됨. 6~7월 고온의 아라비아 해에서 대류가 발달하여(#3) 상층 고기압이 더욱 발달함에 따라 남아시아 고기압이 평년보다 확장함(#4)
- **(서태평양/한반도)** 아열대 서태평양에서는 인도양 축전기 효과에 의해 아열대 고기압이 봄철부터 발달하며(#5) 7월이 되면 양의 PNA 발달(라니냐 발달과 연관)에 따른 저기압성 흐름이 동아시아에 발달함(#6)에 따라 한반도 기온이 평년과 비슷하거나 낮으며 강수가 평년과 비슷하거나 증가하는 경향이 있음

Figure 36. Schematic diagram of underlying mechanisms of positive PC1 and impacts on Korean temperature and precipitation in Jul.

(5) 남아시아 고기압 남북모드(EOF2)

(가) 남북모드 관련 기작 및 예측인자

남북모드인 PC2가 양의 값으로 부상했을 때(북상모드) 해당 월의 Z200, OLR, SST와의 40년(1981-2020) 상관관계 공간분포에 따르면(Figure 37) 상층에서는 아열대에 가까운 중위도에 고기압성 흐름이, 인도양과 서태평양 아열대 지역에는 저기압성 흐름이 발달하는 형태를 보이며 특히 6월과 7월에 이러한 특성이 두드러지게 나타난다. OLR 상관관계를 보면 6월과 7월에 아라비아해에 남서풍이 강하게 발달하며 인도 북부에 대류가 활발한데 인도 몬순 지수(IMI)와 유의미한 상관관계( $r=0.36$ )를 보인다. 서태평양 아열대 지역에는 저기압성 흐름과 함께 대류가 활발하고 그 북쪽인 한반도와 일본 남부에는 고기압성 흐름과 함께 대류가 억제된다. 열대 태평양에서는 음의 상관관계가 유의미하게 나타나며 인도양에서도 역시 음의 상관관계가 6월과 7월에 유의미하게 나타난다.

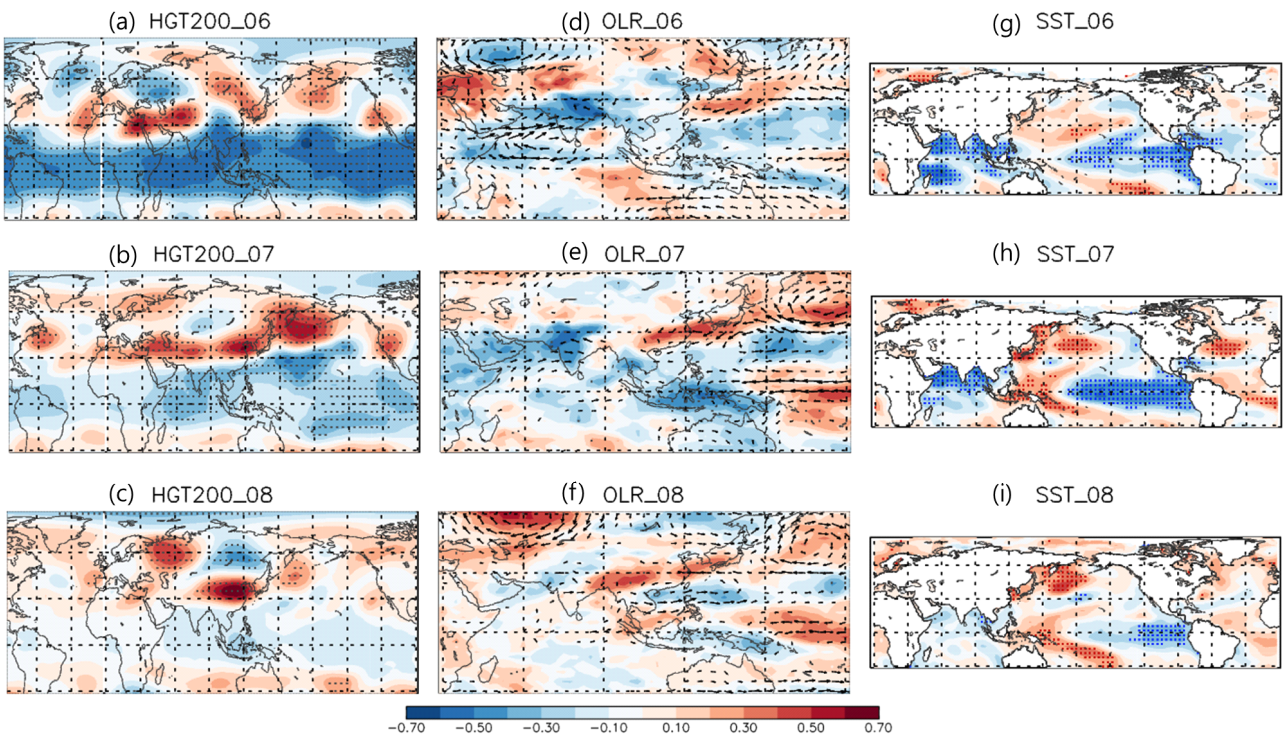


Figure 37. Simultaneous 40-year correlation maps of PC2\_Jun with Z200 (a), with OLR and 850 hPa wind (d), with SST (g). (b), (e) and (h) are for PC2\_Jul. (c), (f), and (i) are for PC2\_Aug. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

7월 PC2가 높았던 경우와 낮았던 경우( $\pm 0.75\sigma$  기준, Table 9)의 합성장을 장기추세를 제거한 후 살펴보면 북상모드가 발달한 경우 평년에 비해 SAH가 북쪽으로 이동한다(Figure 38a). 이때 열대 동태평양은 약한 라니냐로(Figure 38e) 저층의 흐름 및 OLR을 보면(Figure 38c) 인도 대륙의 북서부와 서태평양 열대 및 아열대 지역에서 대류가 활발한 반면 동아시아 몬순 지역에서 대류가 억제된다. 남하모드 발달시(-PC2)에는 반대의 특성을 보인다. 북상모드시 아열대 지역에 저기압성 흐름이 동아시아 지역에 고기압성 흐름이 Pacific-Japan(P-J) 패턴과 유사하게 나타나는데 1개월 전인 6월의 P-J 지수와는 유의미한 상관관계( $r=0.38$ , 1981-2020)를 보이는 반면 7월에는 상관지수가 다소 약화된다( $r=0.23$ , 1981-2020).

Table 9. Composite years of positive and negative PC2\_Jul ( $\pm 0.75\sigma$  threshold).

	Years
+PC2_Jul composite	1994, 2000, 2006, 2008, 2010, 2013, 2018
-PC2_Jul composite	1992, 1993, 1997, 2002, 2004, 2015, 2019, 2020

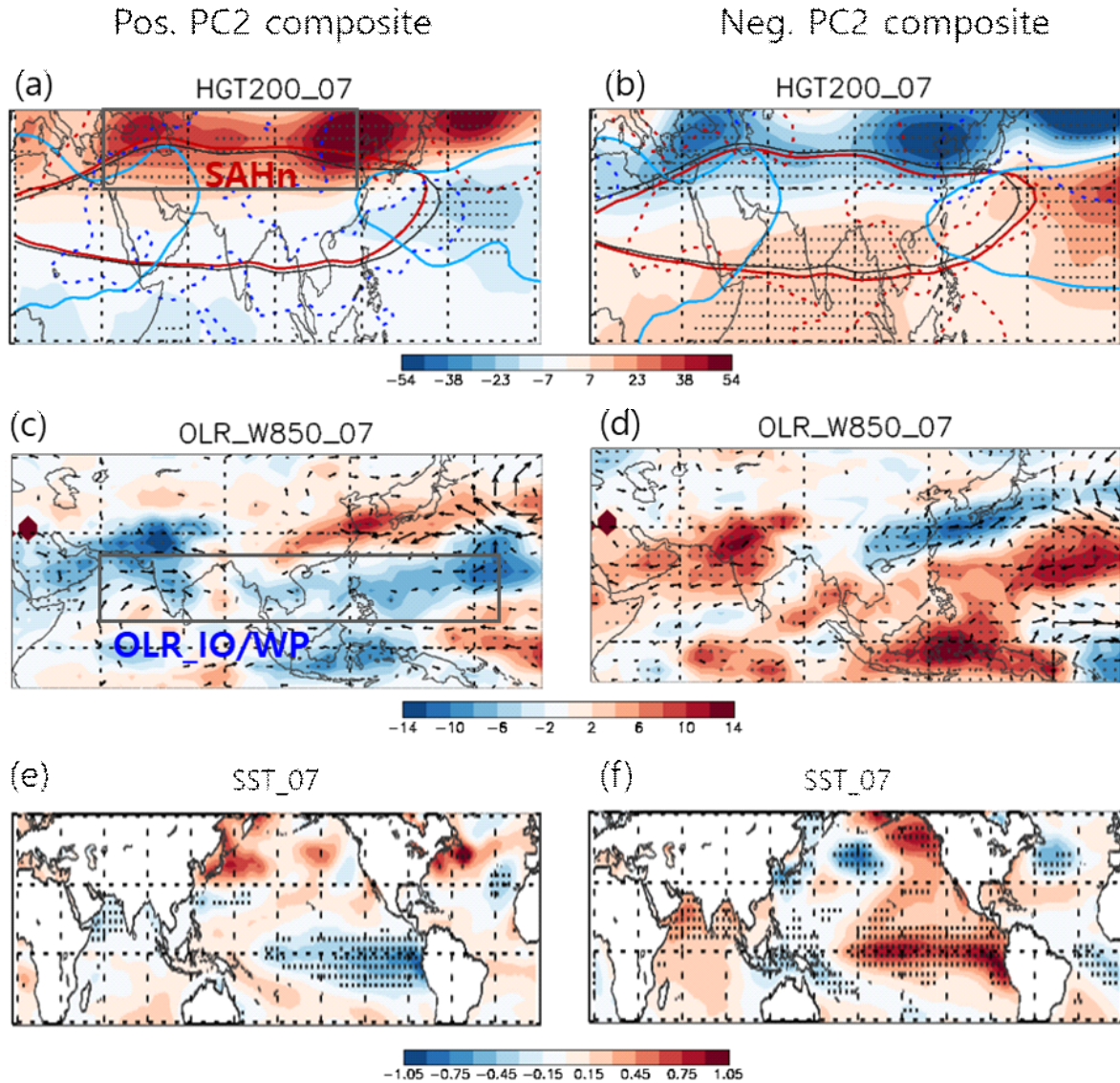


Figure 38. July composite maps of Z200 (a and b), OLR with winds at 850 hPa (c and d), and SST (e and f) in the positive and negative composite years of PC2\_Jul, respectively. In (a) and (b), black line indicates climatological 12480 m and red line does so in the composite years. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

7월 북상모드가 발달한 봄철에는 라니냐의 지속(Figure 39e)과 함께 인도양에 저기압성 흐름이 지속적으로 발달하며(Figure 39a) 열대 인도양에는 서풍 편차가, 열대 서태평양에는 동풍 편차(Figure 39c)가 발달한다. 이로 인해 필리핀해 서쪽에는 남서풍 편차가 발달하는데 평균적으로 동풍이 불던 이 지역에 남서풍이 불면서 바람이 잔잔해지고 그로 인한 대기로의 잠열 방출이 감소하면서 필리핀해의 SST가 증가한다(Figure 40). 여름철이 되면서 따듯해진 필리핀해에서 저기압이 발달하며 대류가 활발해지고 그로 인해 P-J 패턴이 6월에 발달한다. 한편 인도양에서는 봄철 열대 인도양의 서풍편차가 점차 북상하여 인도 몬순이 발달함에 따라 7월에 인도 북부에 강수가 활발해진다(Figure 38c). 이러한 인도 북부 몬순 발달 및 필리핀해 북부의 대류 활발로 인해 남북 방향의 파동 전파가 발달하고 그 북쪽인 중위도 지역에 상층 고기압성 흐름이 발달하여(Figure 41) 결과적으로 남아시아 고기압이 북상하게 된다.

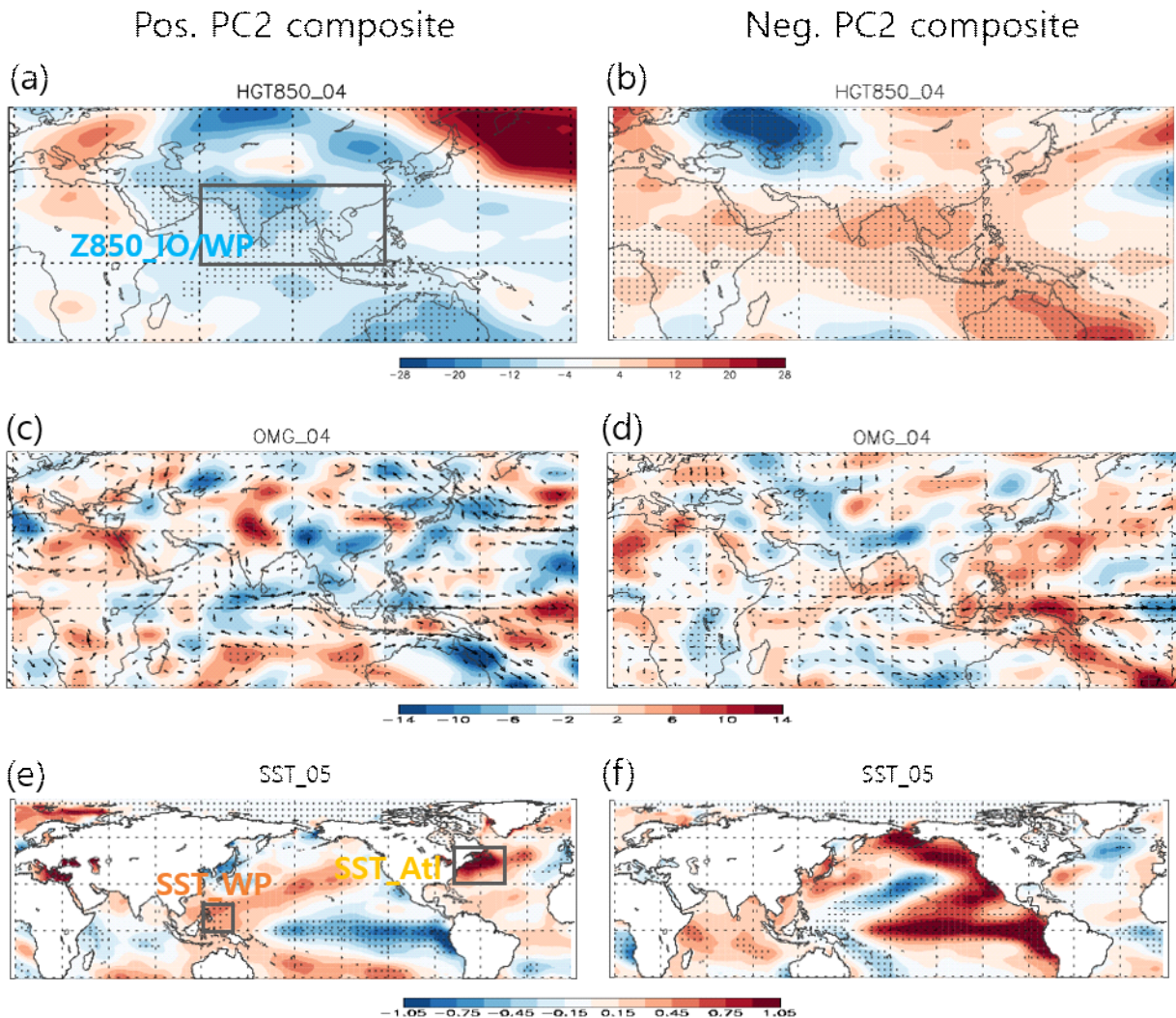


Figure 39. Composite maps of SST in Apr (a and b), OMG (c and d) in Apr, and SST in May (e and f) in the positive and negative composite years of PC2\_Jul, respectively. Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

PC2-regressed SST(color)/Winds in WP(120-140E) with U-wind\_Climatology(line)

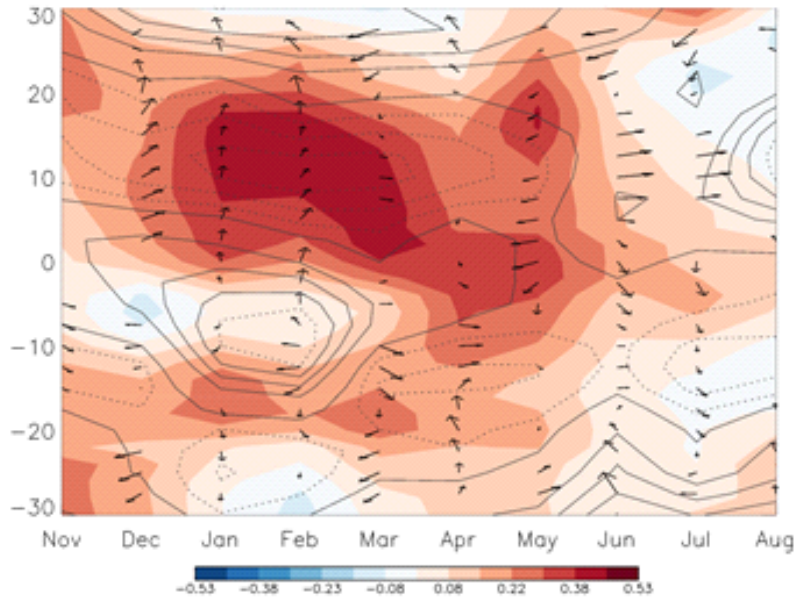


Figure 40. PC2-regressed SST (color), 850 hPa winds (arrow) with climatological U850 that are averaged for 120-140°E.

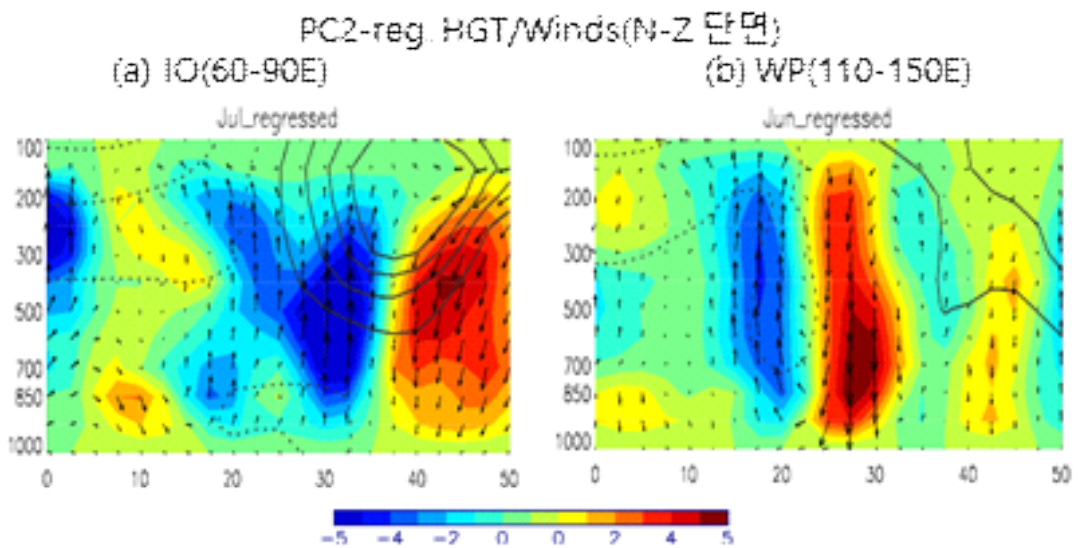


Figure 41. PC2-regressed geopotential height (lines) and wind vectors for 60-90° E (a) and for 110-150° E (b). X-axis represents latitudes and y-axis does vertical levels. Line interval is 3 m. Colors indicate upward motion (blue) and downward motion (red).

이러한 남북 방향의 파동 전파에 더해 동서 방향으로의 파동 전파 또한 활발히 나타나는 데 5월에 대서양 북미 동안에 SST 상승이 두드러진다(Figure 39e). 이후 7월에 대서양에 기인

한 동서 방향의 파동 전파가 나타나는데 PC2와 7월 Z200의 상관관계 공간 분포에서 볼 수 있듯이(Figure 42b) 대서양 지역의 상층과 스칸디나비아 반도 오른쪽 부근에 고기압성 흐름이 발달하고 영국 서쪽 해상과 중앙아시아에 저기압성 흐름이 차례로 발달하며 동아시아에 고기압성 흐름이 강화된다. 이러한 동서 방향 파동 전파 형태는 양의 East Atlantic 원격상관(EA)과 닮아있는데 실제로 PC2와 EA의 40년 상관지수는 0.48로 매우 높게 나타났다.

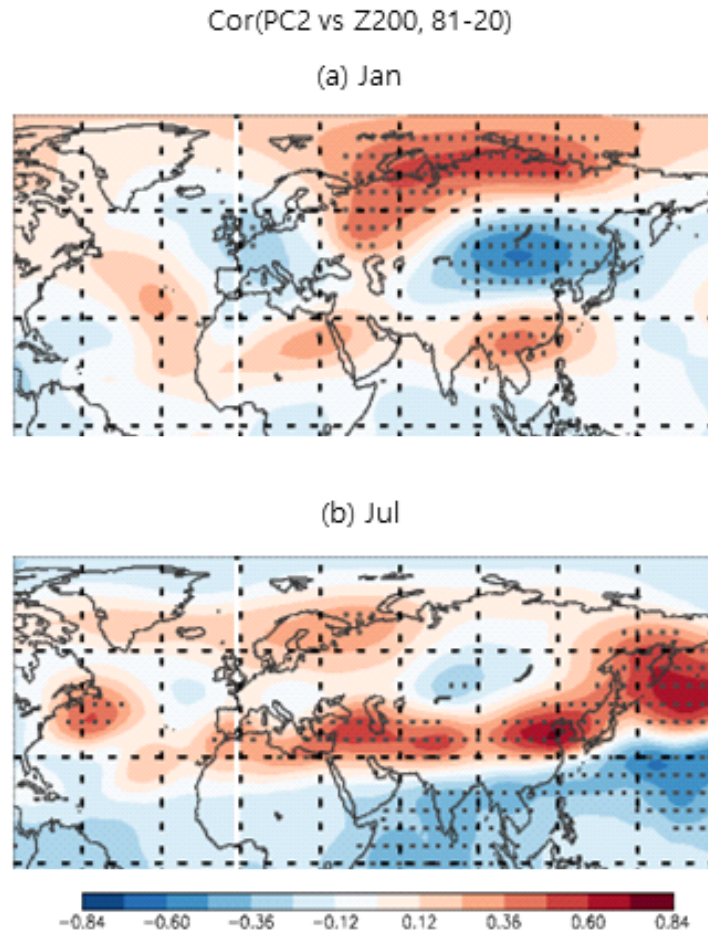


Figure 42. 40-year correlation maps of PC2\_Jul with Z200 in Jan (a) and Jul (b). Dots indicate statistically significant correlations at the 95% level.

앞서 언급한 합성장 분석 결과(Figures 38, 39)를 기반으로 세부 주요 인자를 선정하고 지수화하여 정규화한 후 월별 시계열을 Figure 43에 도시하였다. 양의 PC2\_Jul 합성해의 경우 (Figure 43a) 저층 인도양에서는 겨울철부터 봄철까지 저기압성 흐름이 지속(Z850\_IO/WP)되며 필리핀해 봄철 고온이 발생한다(SST\_WP). 인도-서태평양 아열대 지역에서 대류(OLR\_IO/WP)가 봄철과 여름철(특히 5월과 7월)에 발달한다. 대서양 중위도 고온은 4월부터 증가하는데 6월에 서야 유의미한 차이를 보인다. 남아시아 고기압의 북부인 상층 중위도 지위고도(SAHn)는 6월에 급격히 증가하며 7월까지 이어진다. 음의 PC2\_Jul 합성해에는(Figure 43b) 이와 반대의 특징이 뚜렷이 관찰되었다.

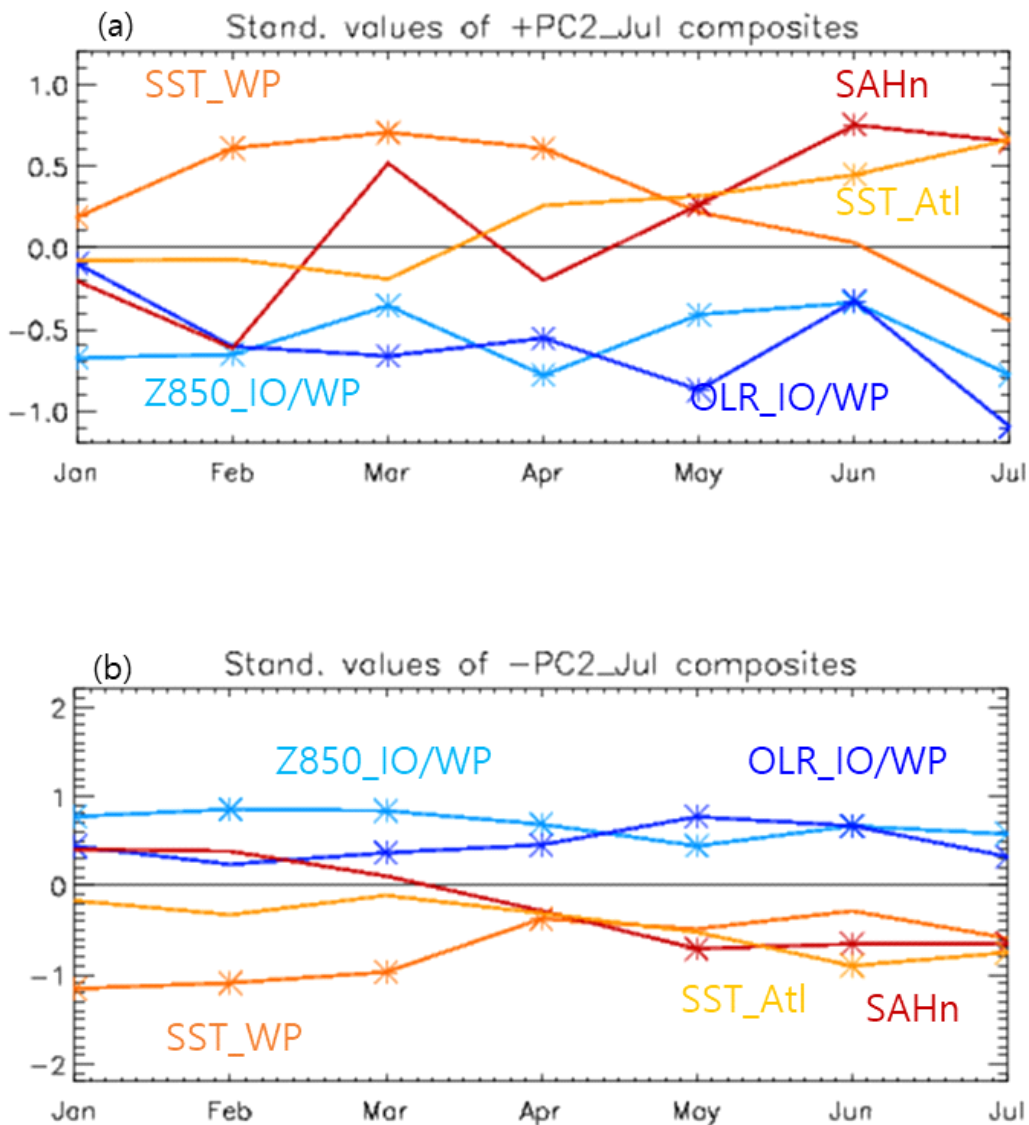


Figure 43. Time series of normalized values of key variables (refer to Figure 38 and 39) in the positive (a) and negative (b) composite years of PC2\_Jul. Star indicates statistically significant at the 95% level.

상기 결과는 남아시아 고기압의 북상모드가 발달할 경우 아열대 지역의 대류 활발로 인한 남북 방향 파동 전파와 대서양에 기인한 동서 방향의 파동 전파가 동아시아에 중첩되면서 고기압이 더욱 강하게 발달함을 의미하며 그때 한반도에는 고온과 폭염이 강하게 발생하게 된다. 이는 여름철 동서 방향 및 남북 방향 파동 중첩으로 한반도에 폭염이 발달하는 기작을 제시한 기존의 연구 결과(Yeo et al. 2019; Myoung 2021)와도 일치하는 결과이다. 그중 Myoung (2021)에서는 겨울철에 음의 Polar/Eurasia(PE\_DJF) 위상이 발달 시 유사한 기작에 의해 한반도에 폭염이 발생할 수 있음을 지적하였는데 PC2와 1월 Z200의 상관관계(Figure 42a)에서 러시아 북쪽에 고기압성 흐름과 한반도 북쪽의 저기압성 흐름이 나타나는 등 음의 PE 위상이 나타나고 있어 PE\_DJF와의 연관성이 있다고 사료된다. 실제로 PC2는 PE\_DJF와 강한 음의 상관관계, 한반도 7월 기온과 강한 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다(Table 10). 또한 4월 SST\_WP, 7월 인도 몬순 지수, 7월 EA 지수와도 유의미한 양의 상관관계를 보였다.

Table 10. Correlations of PC2\_Jul with important variables and Ts in Jul. Significant correlations at the 95% level are indicated in bold.

PC2 Cor	PE_DJF	SST_WP_Apr	IMI_Jul	EA_Jul	Ts_Jul
1973-2020	<b>-0.51</b>	0.26	<b>0.30</b>	<b>0.48</b>	<b>0.49</b>
1991-2020	<b>-0.56</b>	<b>0.43</b>	<b>0.36</b>	<b>0.49</b>	<b>0.47</b>

(나) 남북모드와 한반도 기후와의 연관성

PC2는 앞서 언급했듯이 한반도 기온과 높은 양의 상관관계를 보였다(Table 10, Figure 33e). 장기예보 가이드스에서는 주요 7월 기온 예측인자로, 3월 유라시아 500hPa 지위고도 쌍극자패턴, 4월 남인도양-동인도양-필리핀 해 해수면 온도, 4월 만주지역 눈덮임을 제시하였는데(APCC, 2021) PC2는 이들 인자와도 유의미한 상관관계를 보였다(Table 11). 이러한 결과는 상기 예측인자들이 남아시아 북상모드와 함께 연관되어 있으며 한반도 7월 기온을 상승시킴을 의미한다.

Table 11. Correlations of PC2\_Jul with important predictors for Ts in Jul. Significant correlations at the 95% level are indicated in bold.

	3월 유라시아 500hPa 지위고도 쌍극자패턴	4월 남인도양-동인도양-필리핀 해 해수면 온도	4월 만주지역 눈덮임
1973-2020	<b>0.40</b>	<b>0.48</b>	<b>0.40</b>
1991-2020	<b>0.52</b>	<b>0.35</b>	<b>0.50</b>

PC2와 가장 높은 상관성을 보이며 가장 선행 시간이 긴 PE\_DJF 예측인자의 경우  $-0.8\sigma$ 보다 낮았을 때 한반도 여름 기온이 평년보다 높은 경향성을 보였는데 7월뿐만 아니라 6월과 8월에도 평년보다 높은 기온을 기록했다(Table 12). PE\_DJF가  $0.8\sigma$ 보다 높았을 때 여름철 한반도에는 저온 경향성이 나타났는데 7월뿐만 아니라 6월과 8월에도 평년보다 낮은 기온을 기록했고 고온의 경우보다 그 경향성이 두드러졌다(Table 13). 특히 저온의 경우 6월과 7월의 예측성이 좋았다.

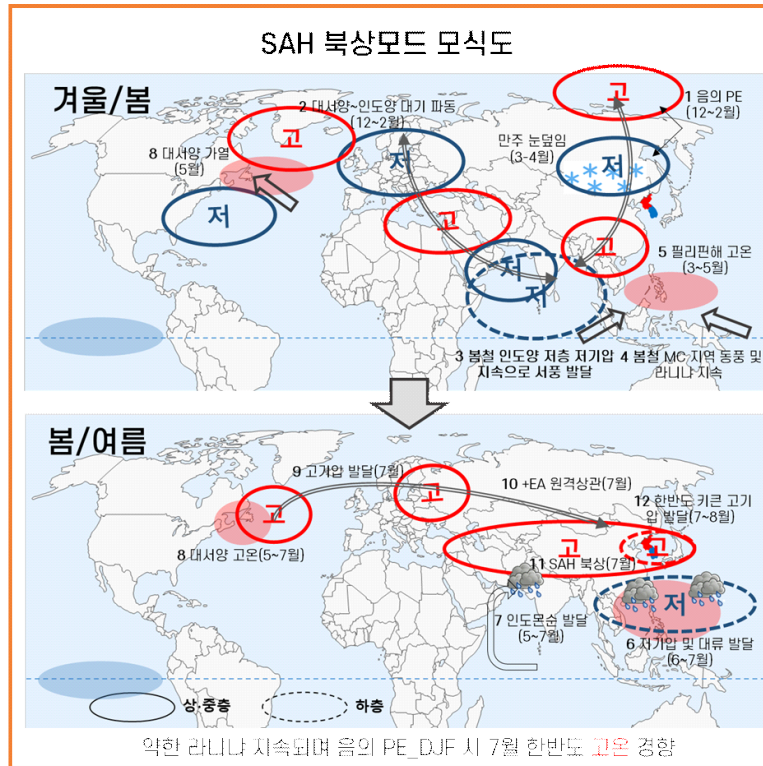
Table 12. Ts in Jun, Jul and Aug in the negative PE\_DJF years ( $<-0.8\sigma$ ). Blue (red) shade indicates below-normal (above-normal) temperature with the  $\pm 0.43\sigma$  threshold.

	6월	7월	8월
1990	-0.4	0.5	1.1
2001	0.2	0.8	-0.1
2010	0.8	0.6	1.5
2014	0.2	0.2	-1.5
2016	0.8	0.6	1.4
2018	0.7	2.0	2.0

Table 13. Pr in Jun, Jul and Aug in the positive PE\_DJF years ( $>0.8\sigma$ ). Blue (red) shade indicates below-normal (above-normal) temperature with the  $\pm 0.43\sigma$  threshold.

	6월	7월	8월
1981	-0.5	1.0	-1.0
1989	-1.3	-0.8	-0.5
1992	-1.4	0.2	-1.0
1993	-0.8	-2.5	-3.1
1995	-1.3	-0.3	1.0
1996	-0.5	-0.7	0.0
2003	-0.7	-2.3	-1.5
2019	-0.2	0.1	0.9

이러한 PC2 북상모드에 대한 연구 결과를 바탕으로 모식도를 만들고 관련 스토리라인을 제시하였다(Figure 44).



- 라니냐가 지속되며 겨울철 Polar/Eurasia 인덱스가 음의 값(#1)일 경우
1. (열대지역 남북 파동) 겨울철 대서양~인도양 대기 파동이 나타나(#2) 봄철 인도양 저층에 저기압이 지속되며 열대 인도양에 서풍 편차(#3)가, 열대 서태평양에 동풍 편차(라니냐 관련)가 지속됨(#4)
    - (필리핀해) 특히 필리핀해 서쪽에 남서풍 편차 발달로 3~5월 SST가 증가하고(#5) 6월부터 고온의 북부 필리핀과 남중국해에 저기압 및 대류 발달(#6)
    - (인도양) 열대 인도양의 서풍이 지속 및 북상하여 5~7월 인도 몬순 발달로 7월 인도 북서부 강수 발달(#7)
    - (중위도 및 한반도) 인도 강수 및 필리핀 북부 대류 활발로 7월 중위도 상층 고기압 발달하며 SAH 북상(#11)
  2. (중위도지역 동서 파동) 5~7월 북미 동안에 SST 고온 지속될 시(#8) 7월 중위도 대서양과 우랄산맥에 고기압 발달하며(#9) 대서양~동아시아 파동 전파(+EA or +SCAND 패턴)로(#10) 동아시아 상층/하층 고기압 발달(#12)
  3. (파동 중첩) 남북 및 동서 방향 파동의 중첩으로 7월 한반도 키 큰 고기압 강화, 고온 및 폭염 발생

Figure 44. Schematic diagram of underlying mechanisms of positive PC2\_Jul and impacts on Korean temperature in Jul.

남북모드와 관련된 인도-서태평양 대류 특성은(Figure 38c) 여름철 한반도 폭염의 원인이 되는 CGT 패턴과 유사하지만 중위도를 따라 나타나는 파동 전파 형태와는 약간 다른 형태를 보인다(Figure 42b, EA 유사패턴). 앞서 기술한 것처럼 남아시아 고기압의 동서 방향의 변동성을 나타내는 EOF3의 경우가 CGT와 더 유사한 형태를 보였는데 남북모드와 동서모드의 차이에 대해 차후에 심도 있는 연구가 필요할 것으로 보인다.

## (6) 요약

여름철 남아시아 고기압은 평균적으로 5~6월 남아시아 몬순 발달 및 대류 활발로 인한 상층 비단열 가열 반응으로 7~8월에 최성기를 보인 후 쇠퇴한다. 경년 변동성을 분석하기 위하여 티벳고원을 포함한 아라비아반도에서 동아시아에 이르는 지역에 대해 주성분 분석을 수행하고 지역 변동성과 비교하여 확장모드(EOF1)와 남북모드(EOF2)로 구분하였다. 확장모드는 봄철 인도양에 고온이 나타날 경우 대기 하층부터 기온이 상승하고 7월이 되어 아라비아해에 대류가 활발해짐에 따라 상층에 확장모드가 더욱 발달하는데 이전 겨울철 엘니뇨가 쇠퇴하고 라니냐가 발달할 때 나타나는 인도양 축전기 효과와 유사하였다. 특히 7월에 양의 PNA 원격상관이 나타날 때 한반도 남쪽에 고기압성 흐름이, 한반도에 저기압성 흐름이 나타나 저온과 다우 경향을 보였는데 PC1 자체는 한반도 기온과 상관관계가 낮았다. 따라서 확장모드는 5월 인도양 SST가 높을 경우 발달하지만 한반도에 기후에 미치기 위해서는 인도양 축전기 효과(봄~여름철 아열대 서태평양 고기압의 지속 발달 및 7월 동아시아 저기압 발달)와 관련된 기작을 잘 모니터링 할 필요가 있다. 특히 인도양 축전기 효과에 의해 한반도에 저온과 다우가 나타나는 경향은 7월에 주로 나타났으며 6월과 8월에는 오히려 고온이 나타나는 경우가 있었다.

여름철 남아시아 고기압의 제 2 변동 모드인 남북 모드가 북상하는 경우에는 이전 겨울철부터 약한 라니냐가 지속됨에 따라 인도양 저층에 저기압성 흐름이 지속되며 열대 인도양에 서풍 편차를 열대 서태평양에는 동풍 편차를 유도한다. 따라서 봄철(3~5월) 필리핀해가 해수면 온도가 상승하고 6~7월이 되면 해수면 고온에 의해 저기압성 흐름 및 대류가 활발해진다. 한편 라니냐의 지속에 따라 열대 인도양의 서풍이 북진을 하며 6~7월 인도 몬순이 활발해져 인도 북서부에 많은 강수를 유발한다. 이러한 과정으로 아열대 인도 서태평양에 대류가 발달함에 따라 남북 방향의 파동 전파가 나타나 중위도에 고기압이 발달하게 된다. 이와 동시에 따듯한 대서양 중위도(5~7월)에서 발달한 동서 방향의 대기 파동(e.g., EA 원격상관)이 7월에 한반도 및 동아시아에 고기압을 더욱 발달시켜 결국 남아시아 고기압이 북상하는 것으로 나타났다. 이때 한반도에는 남북 방향, 동서 방향 고기압의 중첩으로 순압성 고기압이 강하게 발달하여 고온이 나타나게 된다. 7월의 PC2는 한반도 여름철 기온 예측인자인 겨울철 평균 Polar/Eurasia 원격상관 패턴(PE\_DJF)와 상관관계가 높으며 그 기작 또한 유사하기에 SAH의 남북모드와 한반도 기온을 예측할 수 있는 인자로 PE\_DJF 을 제시하였다.

## 다. 예측인자의 정성적 통합 및 검증

### (1) 연구배경

APCC는 관측기반 예측과 모델기반 예측 정보를 기반으로 매월 3개월 장기예보를 생산하고 있는데 이를 위해 매월 기후 감시와 분석 기반 기후 예측 정보를 예보토의에 제공하고 있다. 기존에는 가중치를 고려하지 않고 다양한 인자의 예측을 산술적으로 통합하여 예측을 생산했다. 하지만 다양한 예측인자들이 서로 상반된 예측을 하는 경우 어떤 인자에 가중치를 둘 것인가를 결정하는 일은 예측성에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 예측인자의 중요도를 선별하는 체계를 만들어 예보 객관화에 기여하기 위해 1차년에는 다양한 예측 정보를 정성적으로 통합하고 그 결과를 검증하고 기존의 기계적 단순 통합과 비교하였다. 통합 예측 결과 뿐만 아니라 예측인자 각각의 예측 결과 뿐 아니라 관련 기작에 대한 검증도 함께 수행하였다.

### (2) 자료와 방법

매월 수행되는 APCC 예보토의 회의 전에 팀 회의를 통해 예측인자들의 정성적 통합을 시도하였다. 정성적 통합시에 각각의 예측인자의 과거 예측성, 기작의 적절성, 예측시점 인자의 편차 강도 및 기작의 재현성(또는 유사성) 등을 고려하여 통합 예측을 생산하였다. 검증시 통합 예측의 검증과 개별 예측인자의 예측 뿐 아니라 기작도 함께 검증하였다.

### (3) 정성적 통합 결과 및 검증

2022년 2월부터 10월 기간 동안 기온에 대한 기계적 통합 예측, 정성적 통합 예측, 관측된 기온을 Table 14에 정리하였다. 각 월의 주요 예측인자와 그 기작이 잘 재현되었는지를 정성적으로 평가하고 결과를 함께 나타내었다. 기계적 통합의 경우 대상 기간 동안 대부분 고온을 예측하는 반면 정성적 통합의 경우 2월, 7월, 10월에 평년 수준의 기온을 예측하였다. 2월과 10월에는 라니냐의 영향을 가장 중요하게 여겼고 실제로 2월은 저온, 10월은 평년 기온을 기록하며 기계적 통합 결과보다 더 향상된 결과를 보였다. 7월의 경우 4월 열대 SST 삼극자 인자(4월 남인도양-동인도양-필리핀해 해수면 온도, Table 11)는 고온을, 3월 유라시아 Z500 차이 인자(3월 유라시아 500hPa 지위고도 쌍극자패턴, Table 11)는 역대 최저 3위의 편차를 보이며 저온을 예측하였고 과거에 두 인자가 상반될 경우 중립 또는 저온 경향이 나타나 중립을 예측하였으나 관측에서는 고온 편차가 나타났다.

2022년 봄철에 역대 최고값(+1.3°C)을 기록하였는데 2월~4월에 양의 NAO와 인도양의 고온이 나타났기에 2월, 3월, 4월 고온을 예측하였고 기작까지도 적중하였다. 6월~9월 기간에는 기작까지도 잘 재현된 예측인자는 없었다.

Table 14. Validation of simple integration and qualitative integration, and observed temperature anomaly, predictors and their validation in terms of the related mechanisms

2022	기계적 통합	정성적 통합	관측 기온	주요 예측인자 및 기작 검증
Feb	0/+	0	-1.3	라니냐 영향(-) vs. 인도양 고온(+) $\Rightarrow$ 중립 예측
Mar	0/+	0/+	1.6	2월 양의 NAO(+), 인도양 고온(+), 라니냐 영향(-)
Apr	+	+	1.7	2월 양의 NAO(+), 3월 인도양 대류강화(+)
May	+	+	0.7	북대서양 중위도 고온 및 양의 NAO(+), 온난화신호(+)
Jun	+	+	1.0	1월 열대 서태평양 SST(+), 3월 중국 눈덮임(+), 4월 호주 강수량
Jul	0/+	0	1.3	4월 열대 SST 삼극자(+) vs. 3월 유라시아 Z500 차이(-) $\Rightarrow$ 중립 예측
Aug	+	+	0.2	4월 유라시아 눈덮임(+), 6월 BK 해빙(+)
Sep	0/+	0/+	0.5	라니냐 & 음의 IOD(0/+)
Oct	0	0	-0.3	라니냐 & 인도양 저온(-) vs. 9월 대기 패턴 유사(+) $\Rightarrow$ 중립 예측

#### (4) 요약

다양한 예측인자 정보의 통합 기반 마련을 위해 APCC 예보토의 미팅 전 사전 토의를 통한 정성적 통합을 수행하였다. 예측 검증 결과 2022년 기온이 중립이거나 저온인 경우(2월, 10월) 단순 통합에 비해 예측성이 좋았으며 봄철 양의 NAO와 따듯한 인도양의 영향으로 한반도가 고온이었던 반면 여름철에는 기작까지 적중한 예측인자가 없었다. 이러한 결과는 인자의 중요도를 선별하여 예측을 할 경우 예측성 향상에 기여할 수 있음을 의미한다.

### 3. 기후변화에 따른 한반도 이상기후 전망

#### 가. 한반도 홍수 위험도 변화 전망

##### (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±0.13°C 높았다(WMO, 2022). 이와 같은 지구 온난화로 인한 기후변화로 인하여 기록적인 이상기후가 세계 곳곳에서 발생하고 있다. 특히 이례적인 폭우로 인한 재산 피해와 인명 피해가 증가하고 있다. 2021년 7월 중반 서유럽에는 기록상 가장 심각한 홍수를 겪었는데, 특히 피해가 심했던 독일 서부지역과 벨기에 동부지역에는 7월 14-15일에 100~150mm의 비가 내렸다(WMO, 2022). 2022년 파키스탄은 건기인 3-5월에 폭염을 겪었으며, 뒤에 6월 이후 우기에는 폭우 및 홍수로 수천 명의 인명 피해와 이재민이 발생하였는데, 평년보다 2-3배 많은 강수량을 기록하여, 최근 10년 동안 기록된 폭우 중 가장 심각한 것으로 보고되었다.

우리나라는 2020년 태풍, 호우로 인해 수조 원의 재산 피해 및 수십 명의 인명 피해가 발생하였으며, 이는 최근 10년 대비 약 3배 이상의 피해이며, 최근 2022년에는 8월 상순 후반(8~11일)에 정체전선에 의한 수도권, 서울을 중심으로 100mm가 넘는 기록적인 강수가 내려 저지대 곳곳이 침수되는 등 큰 피해가 발생하였다. 국립기상과학원 “한반도 100년 기후변화” 보고서(국립기상과학원, 2018)에 따르면, 지난 106년 동안 우리나라 강수량은 증가(+16.3mm/10년)하였으나, 강수일수에는 변화가 없었으며, 또한 강한 강수의 강도와 일수는 증가하였는데, 이는 우리나라에서 집중호우가 증가하는 경향성을 의미하는 것이다. 미래 기후변화 시나리오에 따른 모형 자료의 분석은 미래 기후에서 더욱더 집중호우가 증가할 것으로 전망하고 있다(국립기상과학원, 2020),

짧은 시간에 많이 내리는 집중호우는 수공 구조물의 안정성과 연결이 되는데, 예를 들어 2020년 8월 초반에 며칠 내린 집중호우로 섬진강 제방 100m가 붕괴하는 사고가 있었고, 주변 농경지와 마을 수십여 가구가 침수되는 피해가 발생하였다. 섬진강 수문 구조물은 100-200년 설계 강수량이 적용되어 건설되었는데, 기후변화로 인하여 이보다 더 많은 비가 내린 것이다. 그러므로 미래 기후변화에 따른 홍수 위험성을 저감 하기 위해서, 설계 강수량을 산정할 때 기후변화의 영향을 고려해야 할 필요성이 증가하고 있는 것이다.

설계 강수량 산정을 위해서 강수자료를 빈도 해석하는 확률 강수량(즉 재현 빈도 강수량) 분석이 필요하다. 하천 권역별로 재현 빈도 강수량 평가를 위해서 고해상도의 자료가 필요한데, 국립 기상과학원에서 제공하고 있는 현재 기후와 미래 기후에서 1km 해상도의 자료를 활용할 수 있다. 이 연구에서는 고해상도 관측 및 두 종류의 미래 시나리오 자료(SSP, Shared Socio-economic Pathway; O' Neill et al. 2014)를 사용하여 20년, 50년 100년 재현 빈도 강수량을 산정하였으며, 현재 기후 대비 미래 기후변화에 따른 재현 빈도 강수량 변화율로서 하천 권역별 홍수위험도를 정량화하여 평가하였다. 아울러 강수 관련 대기 패턴의 미래 변화를 분석하여 홍수 위험도 변화의 미래 기간별, 지역별 차이의 원인에 대한 의견을 제시하였다.

## (2) 자료와 방법

### (가) 관측자료

관측 해수면 온도 (sea surface temperature, SST) 분석을 위해서 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSST v5; Huang et al. 2017) 월 자료가 사용되었다. ERSST v5는  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  의 수평 해상도를 가지며, 자료 기간은 1854년부터 현재까지 이다. 방출장파복사(outgoing longwave radiation, OLR)는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)가 제공하는 monthly interpolated OLR ( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ )를 이용하였다. 그리고 대기 순환 분석을 위해서 National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) 재분석장 II (Kalnay et al. 1996)으로 부터의 지위고도, 바람 자료가 사용되었다. 이 연구에서는 1979~2022년 기간의 관측 자료들을 분석하였으며, 1991년에서 2020년을 평년 기간으로 하여, 1951년에서 현재까지의 지위고도, SST, 바람, OLR 편차장이 정의되었다.

남한 기온 및 강수를 위해서 45개 종관기상관측 (ASOS; Automated Synoptic Observing System) 지점의 일 기온, 강수 자료를 1979년 1월 1일부터 기상청 자료 포털 (data.kma.go.kr/data/)에서 수집하였으며, 각 ASOS 지점별로 월 자료를 생산 하였다. 각 지점별 월자료에 대하여 1991년에서 2020년을 평년 기간에 대한 편차가 계산되었다.

### (나) 고해상도 남한 상세 관측 및 기후변화 격자 자료

남한 극한 강수 분석을 위해서 우리나라의 지형효과를 고려하는 1km의 고해상도 격자형 관측자료 및 SSP 기반 미래 기후 변화 시나리오 자료를 사용하였다(Kim et al. 2022). 남한상세 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 생산 되었다. MK-PRISM 입력 자료로서 2000-2019 기간 동안 ASOS 97개소, 자동기상관측소(AWS) 508개, 총 605개 관측소에서 관측자료가 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 [Figure 45, 자세한 방법 및 검증 결과는 Kim et al. (2022), 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 (Shared Socioeconomic Pathways) 기반 25km 해상도의 기후변화 시나리오 자료를 Barnes 객관 분석 기법 (Koch et al. 1983) 적용하여 남한 상세 관측자료와 같은 1km 해상도로 내삽한 후, 내삽된 자료의 일별 계절 사이클을 남한 상세 관측자료의 일별 계절 사이클로 교체하여, 기후 모델의 계통오차는 제거하고 기후변화 강

제력에 대한 반응은 유지하는 고해상도 기후변화 시나리오 자료를 생산하였다. 그리고, 계통오차가 비교적 큰 강수량에 대해서는 QDM (Quantile Delta Mapping, Cannon et al. 2015) 방법으로 추가적으로 편차 보정을 수행하였다. 여기서 미래 기후 시나리오에 대한 지역 기후 모델의 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 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 경로를 기반으로 생산되었다(Figure 46). 전자는 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속한 경제성장을 가정하는 저탄소 시나리오이며, 후자는 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정하는 고탄소 시나리오이다.

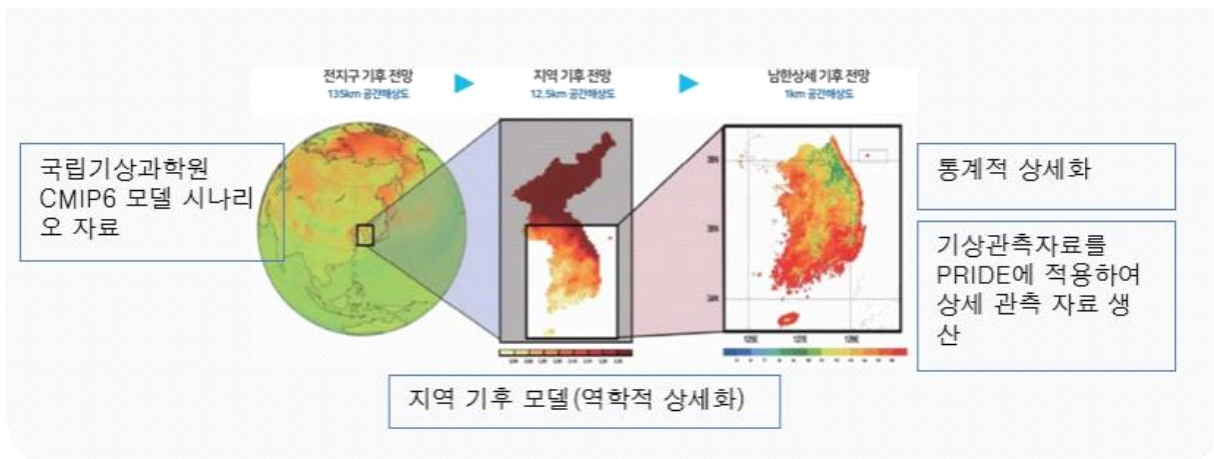


Figure 45. Schematic diagram of dynamical and statistical downscaling applied to future CO<sub>2</sub> scenario

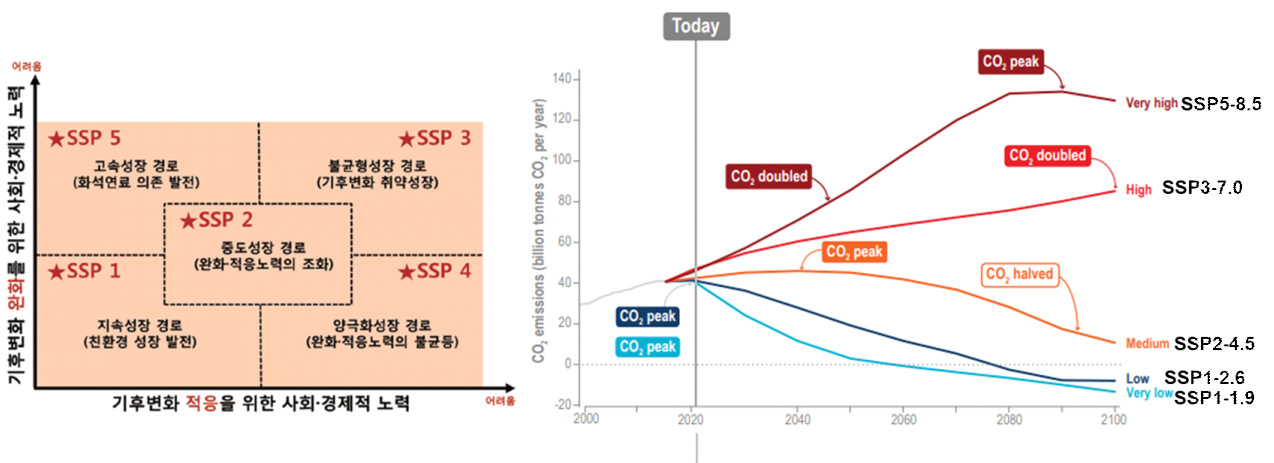


Figure 46. (Left) The “challenges space” to be spanned by SSPs (from <https://climate.go.kr>) and (Right) Future emissions of CO<sub>2</sub> across five illustrative scenarios (from IPCC, 2021).

이 연구에서는 고해상도 남한 상세 관측 및 미래 시나리오 강수량 자료를 사용하였으며, 수자원의 효율적인 개발, 관련 및 기간 간 자료의 공동활용을 위해 유역을 세분화하여 설정한

지도로서 정의되는 수자원 단위지도는 대권역 21개 (Figure 47), 중권역 117개, 표준유역 850개로 분할 되어있다. 대권역은 5대강(한강, 낙동강, 영산강, 금강, 섬진강)과 지형 및 인문사회학적 특성에 따른 수질, 환경오염의 균역경계 등 고려하였고, 중권역은 대권역 내 하천의 분류를 기준 자연하천의 합류점 등 고려하여 구분되었다. 표준유역은 중권역 내 자연하천의 합류점과 수자원의 주요시설물 및 홍수 통제지점 등 고려하여 분할 되었다. 기상청은 환경부 수자원 단위 지도의 21개 대권역 중 가장 면적이 큰 한강 유역(남한강, 북한강, 팔당댐 하류, 임진강)과 낙동강 유역(낙동강상류, 낙동강중류, 낙동강하류)을 세분화한 26개의 하천 대권역으로 구분하여 (Figure 47) 분석을 수행하였다. 하천 대권역별 영역 평균 된 연 최대 일 누적 강수량을 산출하여, 현재 기후 대비 (2000-2019년) 기후 변화 시나리오 별 21세기 전반기 (2021-2040), 중반기 (2041-2060), 후반기 (2081-2100)에 대하여 극한 강수량 변화를 전망하였다. 극한 강수량은 아래에서 설명될 20년, 50년, 100년 재현 빈도 극한 강수량으로서 정의하였다.

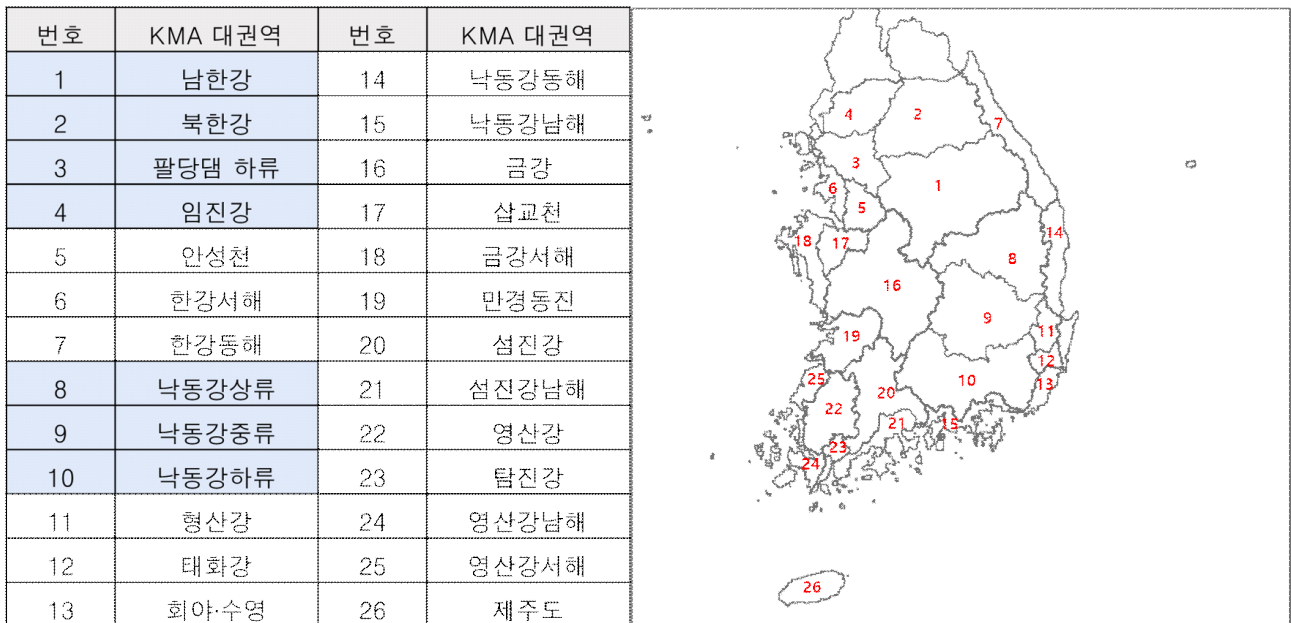


Figure 47. Lists and maps of 26 watersheds over South Korea

#### (다) 재현빈도 극한 강수량 분석

한반도에서 재현 빈도 극한 강수량 분석을 위해서 먼저 확률 분포형을 정의하고, 시계열 자료를 활용하여 정의된 확률 분포형의 매개변수들을 평가하게 된다. 일반적으로 극값이 양으로 왜곡되어있는 강수량 자료에 자주 선정되는 분포형은 Gumbel과 GEV (Generalized Extreme Value) 분포형이며, 전자의 분포형은 후자 분포형의 위치 매개변수가 0인 경우에 해당하는 2변수 확률 분포형이다.

GEV 분포의 누가분포함수와 확률 밀도함수는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \exp\left[-\left(\frac{\beta(x-x_0)}{\alpha}\right)^{(1/\beta)}\right] \\
 f(x) &= \frac{1}{\alpha}\left[1-\frac{\beta(x-x_0)}{\alpha}\right]^{(1/\beta)-1} \cdot F(x)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서  $\alpha$ 는 규모 매개변수,  $\beta$ 는 형상 매개변수,  $x_0$ 는 위치 매개변수이다. 위의 식에서  $\beta=0$ 일 때, Gumbel 분포의 다음과 같은 누가분포함수와 확률 밀도 함수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \exp\left\{-\exp\left[\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]\right\} \\
 f(x) &= \frac{1}{\alpha}\exp\left\{-\frac{(x-x_0)}{\alpha}-\exp\left[-\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]\right\}, -\infty < x < \infty
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

두 확률 분포의 매개변수를 추정하는 방법으로서 모멘트법, 최우도법, 확률 가중 모멘트 법이 있으며, 이 연구에서는 환경부 홍수량 산정 표준지침 (환경부, 2019)에서 추천하고 있는 확률 가중 모멘트 법을 사용하여, 매개변수를 추정하였다. 재현빈도 ( $T$ )에 대한 극한 강수량 ( $x_T$ )은 위에서 GEV 와 Gumbel 분포형의 누가분포함수의 역함수를 사용하여 다음처럼 각각 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_T &= x_0 + \frac{\alpha}{\beta}\left[1 - \left\{-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right\}^\beta\right] \\
 x_T &= x_0 - \alpha \ln - \ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

대한민국 확률 강수량도(건교부, 2000)에서는 한반도 강수 자료에 적합한 확률 분포형으로서 Gumbel 분포형을 채택하고 있다. Gumbel 분포형은 매개변수가 2개이기 때문에 매개변수가 3개인 GEV 분포형에 비해 대상 자료의 분포 양상을 표현하는 데 있어서 다소 성능이 떨어지지만 한두 개의 극값에 지나치게 영향을 받지 않는 장점이 있다. 이 연구에서는 두 개의 확률 분포형을 적용하여 재현빈도 극한 강수량을 비교하였으며(Figure 4), 이 연구의 주요 결론에는 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 그러므로 대부분의 연구결과는 Gumbel 분포형의 분석결과를 중심으로 기술 되었다. 이 연구에서는 20년, 50년, 100년 재현 빈도 강수량을 분석하였다.

## (라) 군집분석

한반도 강수 이벤트 (강수 이벤트 정의는 본문 참조) 관련 대기 순환장을 분류하기 위해서, 한반도 주변(90°E-160°E, 20°N-60°N)에서 500 GPH 편차장을 기반으로하여 군집 분석을 수행하였다. 군집 분석을 위해서 K-means 군집화 알고리즘 (Hartigan and Wong 1979)을 사용하였다. K-means 군집화 방법은 가장 단순하고 빠른 군집화 방법의 하나이며, 다음과 같은 목적 함수 값이 최소화 될 때 까지 군집의 중심 위치와 각 데이터가 소속될 군집을 반복해서 찾는다.

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2
 \tag{4}$$

이 식에서  $K$ 는 군집의 개수이고  $C_k$ 는  $k$  번째 군집에 속하는 데이터의 집합,  $\mu_k$ 는  $k$  번째 군집의 중심위치(centroid),  $\sum_{i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2$ 는 within-cluster sum of squares (WSS) 이다. K-means 군집화 분석은 기후 과학에서 널리 사용되고 있다 (Cassou et al 2004; Straus et al 2007; Fereday et al. 2008; Dawson and Palmer, 2015; Munoz et al, 2017; Yoon et al. 2020; Kim et al. 2021; Yeo et al. 2022).

한편 군집화 분석의 주요 목적은 작은 군집의 수를 사용하여 기후 자료에서 물리적인 통찰력을 얻기 위한 중요한 구조를 효율적으로 잡아내는 것으로서, 이를 위해서 최적의 군집의 개수를 결정하는 것이 중요하다. 군집수가 증가함에 따라 총 WSS가 유의하게 변하지 않는다면, 추가적인 군집수는 필요없을 것이다. 군집수에 따라 총 WSS의 변화를 관측하여 최적의 군집수를 찾는 가장 단순한 방법으로 “elbow 방법”이 있으며, 이 방법은 분석자의 주관에 많이 개입된다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 군집수에 따라 총 WSS 차이를 정량적으로 평가하는 방법이 Krzanowski and Lai (1998)에 의해서 제안되었다. 다음과 같은 방법에 의해서 지수 (KL 지수)를 계산할 수 있으며, KL 지수가 최대가 되는 군집수를 최적의 군집수로 사용될 수 있다.

$$KL_M = \frac{|diff_M|}{|diff_{M+1}|} \tag{5}$$

$$diff_M = (M-1)^{2/D} TWSS_{M-1} - M^{2/D} TWSS_M$$

이 식에서  $D$ 는 강수 이벤트 수,  $M$ 은 군집수,  $TWSS$ 는 각각의 군집수별 계산된 총 WSS를 나타낸다.

### (3) 현재 기후에서 남한 하천 대권역별 극한 강수량 특성

#### (가) 615개 지상 관측소 지점에서 재현 빈도 강수량

이 장에서는 재현 빈도 극한 강수량 계산을 위해 가장 많이 사용되는 GEV 와 Gumbel 확률 분포 함수를 이용한 결과를 비교 분석하였다. 위 두 개의 분포형을 가정하고 615개 지상 관측소 지점에서 PRISM 자료에서 강수 자료를 추출하여, 20, 50, 100년 재현빈도 극한 강수량을 계산하였다(Figure 48). 아울러 PRISM 자료에서 평가된 재현빈도 극한 강수량을 검증하기 위해서, 실제 관측 자료의 결과와 비교하였다. 이 연구에서는 동일 지상 관측소의 관측 자료를 사용하여 환경부에서 평가하여 제공된 재현빈도 강수량 분포와 비교하였다. 먼저 GEV와 Gumbel 분포형으로 계산된 PRISM 자료의 재현빈도 강수량은 Gumbel 분포형이 상대적으로 다소 적게 평가되는 특징을 보이지만 재현빈도 강수량 크기의 지역적인 차이는 전반적으로 비슷한 결과를 보였다. 20년에서 100년 재현 빈도 강수량 크기는 당연히 증가하는 경향을 보였다. 경기도 지역과 전라남도/경상남도 지역에서 다른 지역보다 상대적으로 재현 빈도 강수량이 더 크게 평가 되었다. 경기도 지역에서는 20년 재현빈도 강수량이 260mm 이하였고, 50년 재현빈도 강수량은 360mm 이하로 평가되었다. 100년 재현 빈도 강수량은 480mm 이하로 평가되었다. 충청남

도 지역과 경상남도 지역에서는 상대적으로 재현빈도 강수량이 더 작게 평가되었다. 이들 지역에서는 100년 재현 빈도 강수량이 180mm 이하로 평가되었다. 또한 Figure 49는 특정 관측소 지점 즉, 한강서울, 낙동강 안동, 섬진강 남원 관측소에서 강수량의 히스토그램과 두 개의 확률 분포형에 fit 된 분포의 형태를 보여주는데 왼쪽으로 치우치는 일반적인 극한 강수의 분포 특징이 잘 나타나 있다. 두 개의 분포형이 위 3개의 관측소에서 강수량과 잘 fit 되었음을 확인할 수 있으며, 아울러 두 개의 분포형에 대한 결과가 상당히 유사함을 보여 준다.

위의 재현빈도 강수량 분포는 환경부 제공 재현빈도 강수량 분포와 비교하면, 전반적인 지역적인 차이는 상당히 유사함을 확인할 수 있다. 다만, 환경부 평가보다 다소 과소 평가되었는데 이는 이 연구에서 사용된 24시간 누적 강수량과 환경부에서 평가한 24시간 최대 누적 강수량과 차이가 있으며, ASOS 강수 자료와 PRISM 강수 자료와 상관관계 분석과 Root Mean Squared Deviation (RMSD, Figure 51) 분석을 비교한 결과, 상관계수는 대부분 지역에서 0.9 이상의 값을 보이기는 하였지만, RMSD에 대하여 PRISM 자료가 일부 지역에서 적은 강수량을 보이며(일부 지점에서 40 mm 이상 차이가 나는 지점도 있음), 이들 지역에서 재현 강수량이 과소 평가되었다(Figure 50). 특히 과소 평가가 두드러진 경기도 동쪽 관측소 지점에서 재현빈도 강수량이 PRISM 자료에서 ASOS 자료보다 40mm 정도로 더 작게 평가되었다. PRISM 자료에서 강수량 평가에 대한 산악 효과가 고려되는데 이것이 상세 자료 산출 시 영향을 미친 것으로 사료된다.

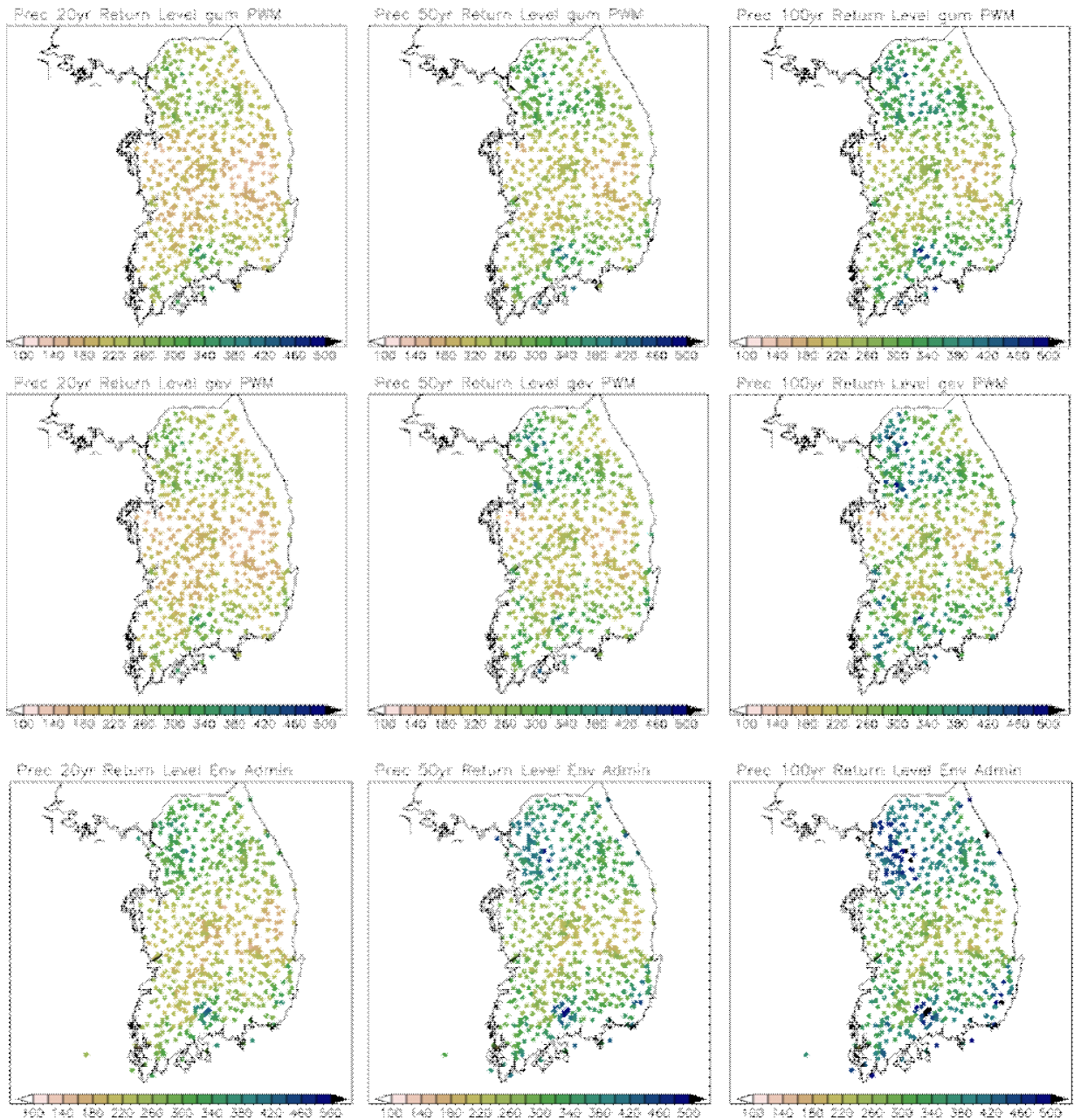


Figure 48. The (left) 20, (middle) 50, (right panels) 100–year return level precipitations (mm) from 615 observational station data. From the top to lower panels, there shown return level precipitations estimated with GEV and Gumbel methods, and obtained from Ministry of Environment. The return level precipitations are estimated over the period of 2000–2019.

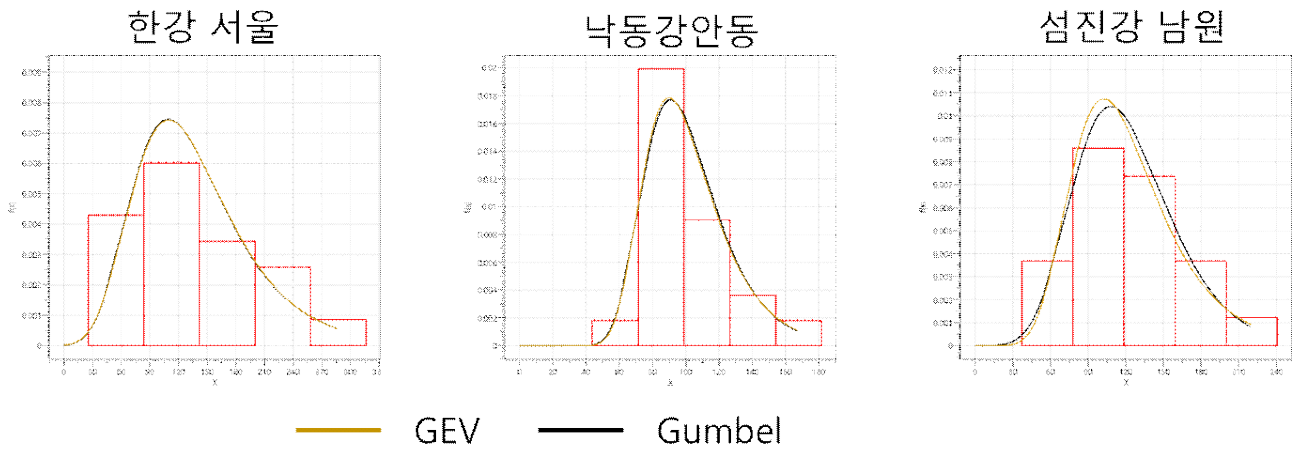


Figure 49. Examples of the probability density function of observed precipitation data fitted to GEV and Gumbel probabilistic distribution.

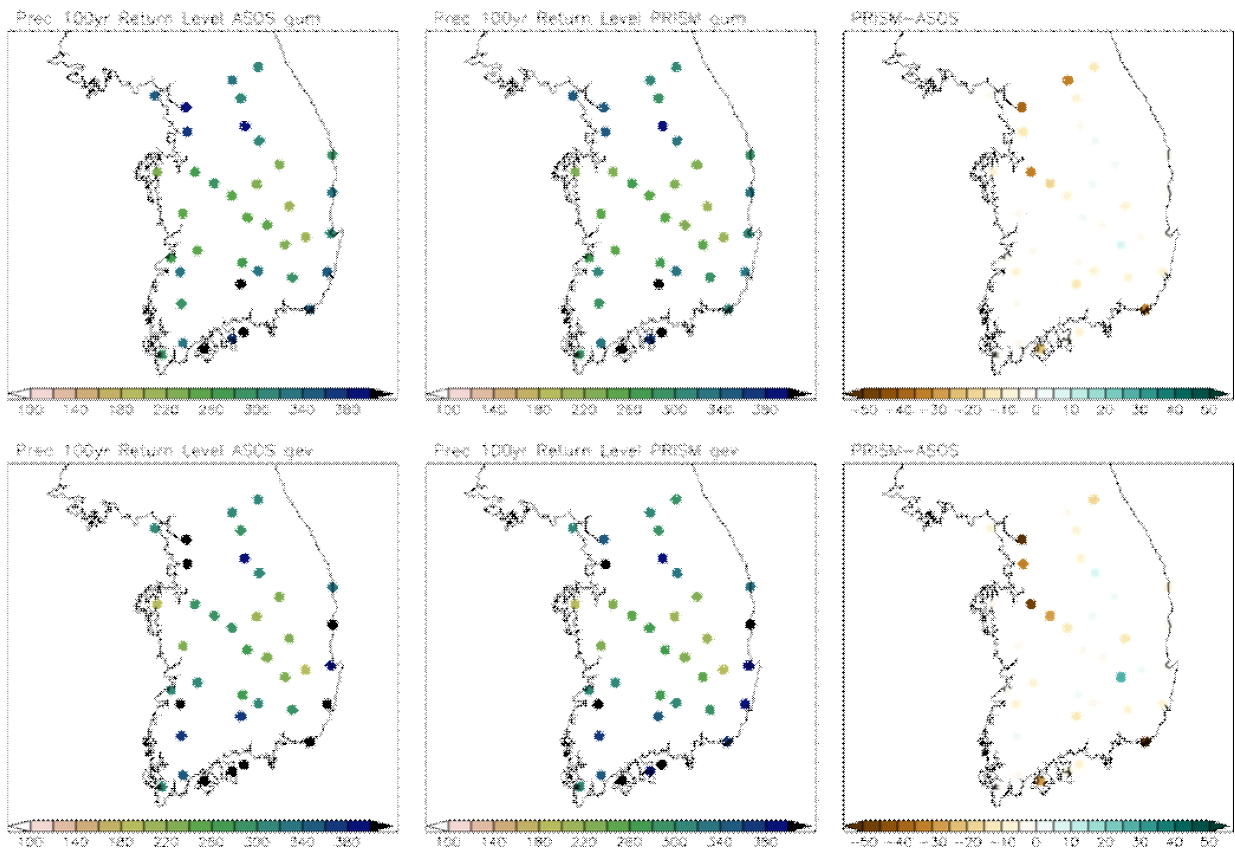


Figure 50. The 100-year return level precipitations (mm) estimated from (left panels) ASOS data, (middle panels ) PRISM data, and their difference (right panels). The return level precipitations are estimated over the period of 2000-2019.

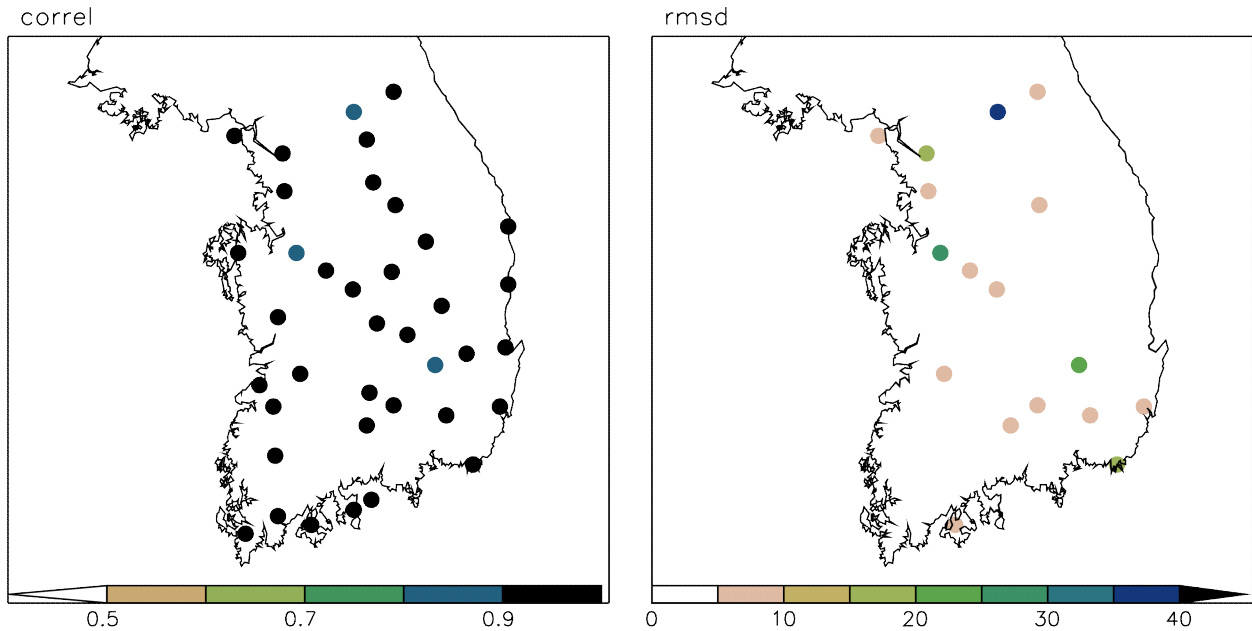


Figure 51. Distribution of (Left panels) correlation coefficients and (right panels) root mean squared deviation of ASOS data and PRISM data.

실제 관측된 강수량과 PRISM 자료의 강수량으로 평가된 재현 빈도 강수량의 비교는 권역별로 재현빈도 극한 강수량 평가와 미래 변화 전망에 평가에 대하여 PRISM 자료를 활용할 수 있음을 보여준다. 아울러 Gumbel 분포형이나 GEV 분포형에 의한 평가 결과가 상당히 유사하므로, 이후 분석 결과는 Gumbel 분포형으로 계산된 결과 위주로 기술하였다.

#### (나) 권역별 재현빈도 강수량 평가

Figure 52은 26개 권역별로 평가된 20, 50, 100년 재현빈도 강수량 분포이다. 권역별 내에 각 grid 지점에서 연 최대 일 강수량들의 영역 평균한 값에 대하여 재현 빈도 강수량이 계산되었다. 안성천, 삼교천 권역은 다른 권역에 비해서 상당히 작은 재현 빈도 강수량이 평가되었으며 (200mm이하), 남한 북부의 권역들 임진강, 팔당댐 하류, 남해에 인접한 권역들 즉 영산강남해, 섬진강남해, 낙동강남해 권역에서 상대적으로 상당히 큰 재현 빈도 강수량이 평가되었다. 이들 권역에서 20년 재현 빈도 강수량이 240mm 이하, 50년 재현 빈도 강수량이 280mm 이하, 100년 재현 빈도 강수량이 300mm 이상으로 평가되었다. 최대로 큰 재현 빈도 강수량이 평가된 권역은 제주도 권역이다. 전반적인 권역 간 재현 빈도 강수량 차이의 분포는 이전 절에서 평가된 관측소 지점에서 평가된 재현빈도 강수량의 지역간 차이와 상당히 유사한데, 이는 권역별로 영역 평균된 값을 권역의 대푯값으로 사용에 대한 정당성을 보여준다.

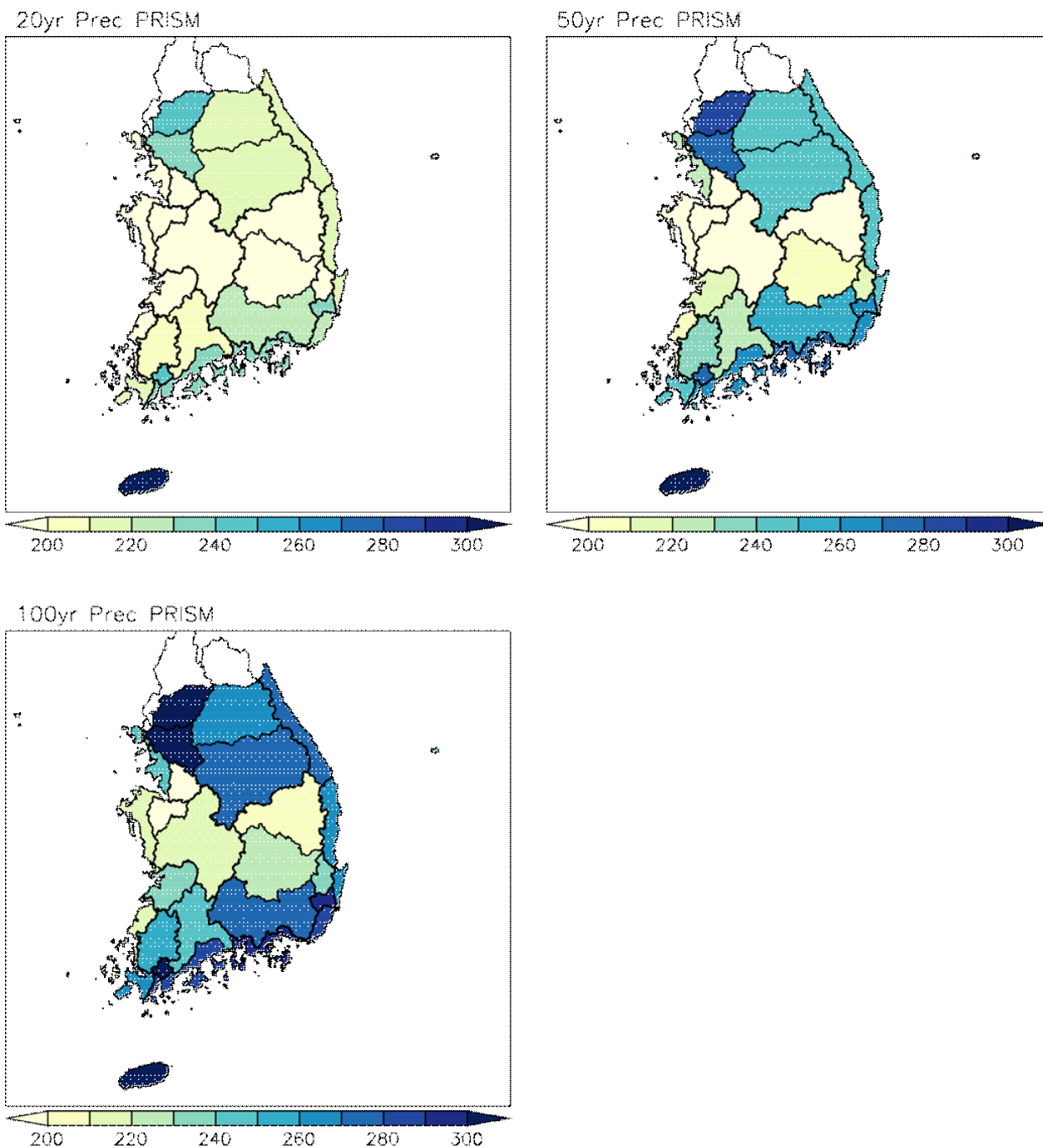


Figure 52. The 20, 50, 100-year return level precipitation in the 26 watersheds estimated over 2000-2019.

#### (4) 미래 기후에서 남한 하천 대권역별 극한 강수량 전망

Figure 53 과 54는 현재 기후대비 (즉, Figure 52) 고탄소/저탄소 시나리오 기반 미래 전반기(2021-2040), 중반기(2041-2060), 후반기(2081-2100)에서 100년 재현빈도 강수량의 차이이다. 고탄소 시나리오에서 미래 우리나라 하천 대권역 강수량(100년 빈도)은 현재 기후(187.1mm~318.4mm) 대비 21세기 전반기에 21.36mm~174.26mm, 중반기에 57.96mm~334.84mm, 후반기에 70.8mm~311.8mm 증가할 것으로 전망된다. 좀 더 자세하게 권역별로 살펴보면, 고탄소 시나리오에 대하여 현재 기후에서 다른 권역에 비해서 상당히 큰 재현 빈도 강수량을 보였

던 임진강에서 전/중/후반기에 86, 107, 178mm, 팔당댐하류에서 94, 109, 142mm 로 증가하는 것으로 전망되었다. 영산강남해, 섬진강남해, 낙동강남해 권역에서 전반기에서부터 상당히 큰 변화폭을 보였는데, 각각 101, 135, 115mm가량 증가하였으며, 중반기에는 201, 174, 175mm로 역시 전반기에 비해 큰 폭으로 증가하는 것으로 전망되었다. 후반기에서는 영산강남해에서 141mm로 중반기보다 그 증가 폭이 오히려 감소하였으며, 낙동강남해, 섬진강남해에서는 179, 191mm로 각각 증가 경향을 보였다. 고탄소 시나리오에 대하여 미래 후반기에 가장 큰 증가를 한 권역은 동해에 접한 권역으로서 낙동강동해와 한강동해에서 전반기 78, 82mm, 중반기에 113, 92mm로 증가 정도가 크지 않았으나, 후반기에 188, 197mm로 2배 정도의 증가율을 보였다. 현재 기후에서 가장 큰 재현 빈도 강수량이 평가된 제주도에서 미래 기후 전/중/후반기에 각각 74, 335, 312mm로 증가하는 것으로 전망되었다.

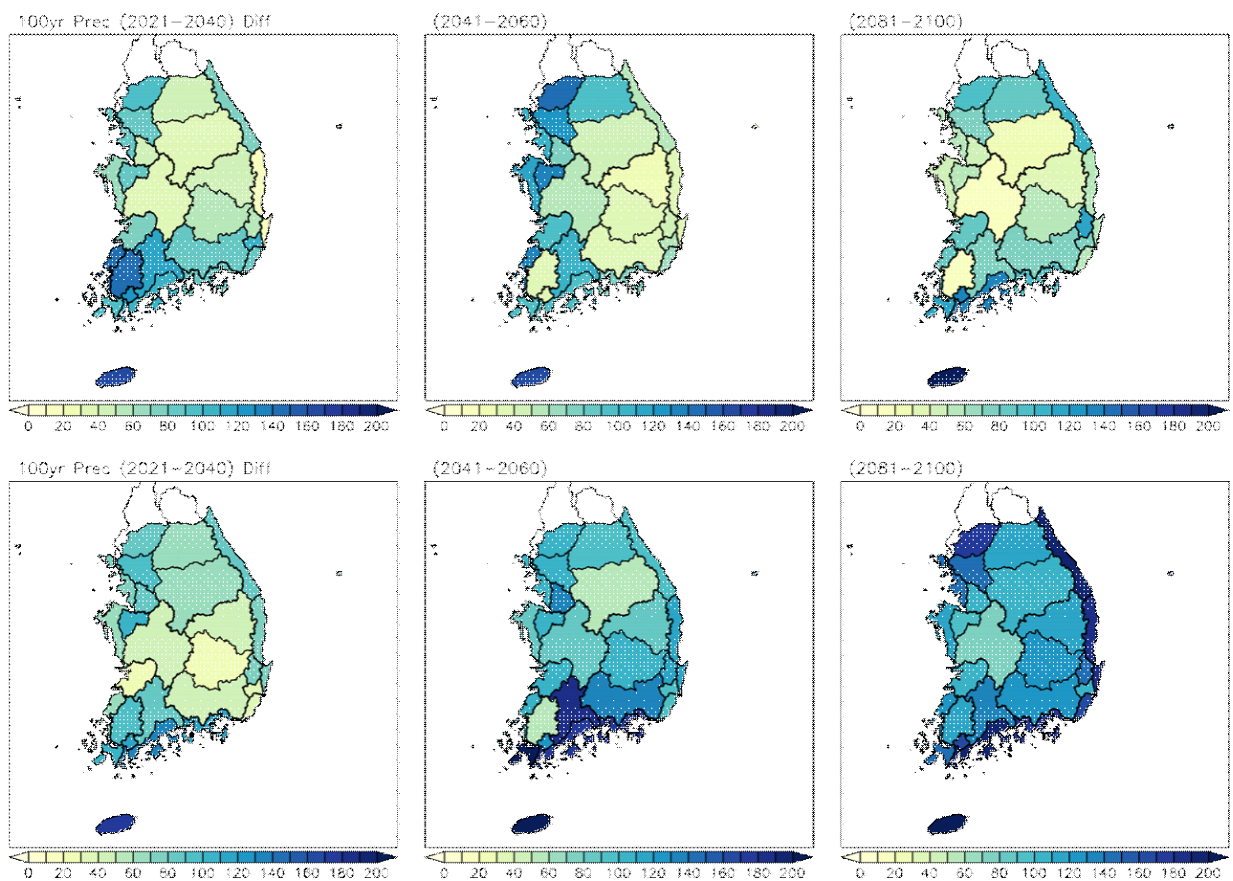


Figure 53. Spatial distribution of difference of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. The upper panels are for the SSP1-2.6 and lower panels for the SSP5-8.5.

이에 반해, 저탄소 시나리오 경우 고탄소 시나리오 경우보다 100년 재현 빈도 강수량 증가가 상당히 감소하였는데, 현재 기후 대비 21세기 전반기에 14.35mm~162.6mm, 중반기에 29.46mm~168.0mm, 후반기 18.94mm~135.98mm 증가할 것으로 예상된다. 즉 저탄소 시나리오의 미래 기후에서 100년 재현 빈도 강수량 증가가 훨씬 더 작은 것으로 전망되었다. 전/중/후반기에 지속해서 증가 양상을 보이던 임진강, 팔당댐하류 권역에서 중반기까지 오히려 고탄소 시나

리오 경우보다 각각 94mm에서 146mm, 83mm에서 128mm로 각각 더 많이 증가하였지만, 후반기에 각각 91, 77mm로 큰 폭으로 증가의 크기가 감소하였다. 미래 고탄소 시나리오에 대하여 전반기부터 큰 폭으로 증가한 권역(즉, 영산강남해, 섬진강남해, 낙동강남해)에서는 그 증가 정도가 상당히 감소하였다. 예를 들면, 낙동강남해에서 전/중/후반기에 100년 재현 빈도 강수량이 85, 78, 98mm 증가하였다.

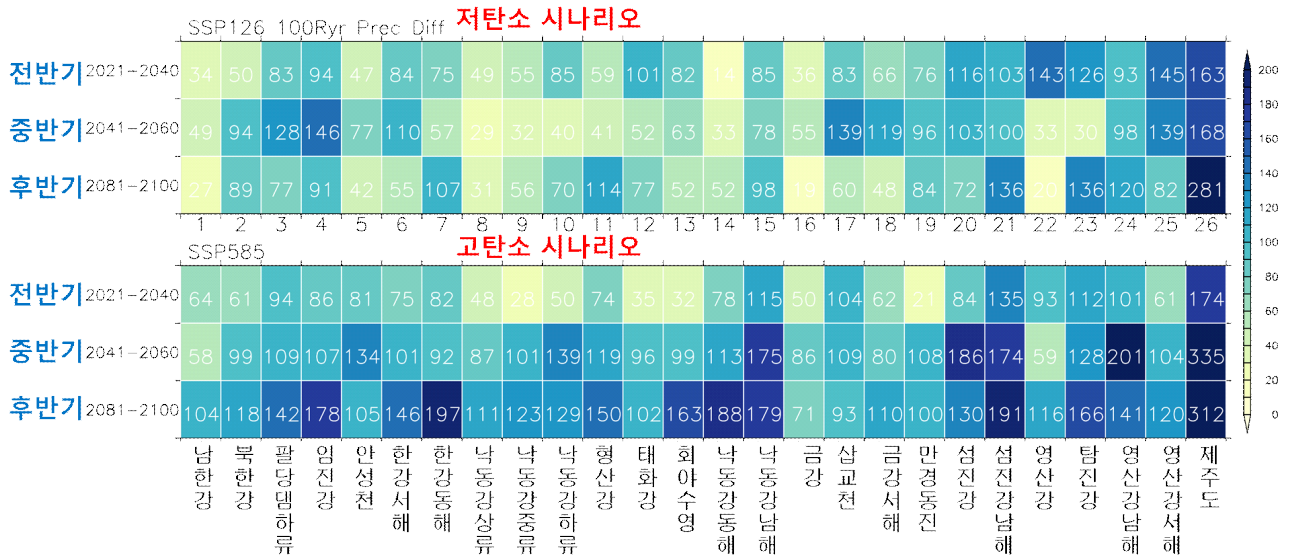
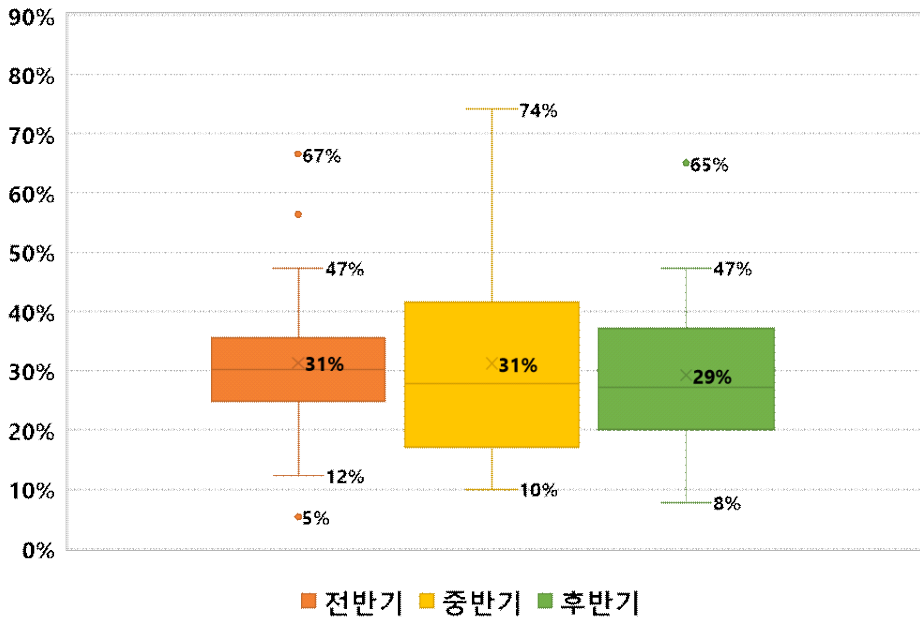


Figure 54. Color charts of the difference of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. The upper panels are for the SSP1-2.6 and lower panels for the SSP5-8.5.

Figure 55는 26개 권역에서 현재 기후 대비 미래 100년 재현 빈도 강수량 변화율에 대한 whisker-box plot을 보여준다. 고탄소 시나리오의 경우, 100년 재현 빈도 극한 강수량 변화율은 현재 대비 21세기 전/중/후반기에 증가하는 경향을 보여주는데, 26개 권역 평균값이 각각 약 29%/46%/53% 증가하는 것으로 전망되었으며, 저탄소 시나리오의 경우에는 현재 대비 21세기 전/중/후반기에 증가 경향성이 나타나지 않았으며, 각각 약 31%/31%/29% 증가하는 것으로 예상되었다.

100년 재현 빈도 강수량 변화율  
저탄소 시나리오



100년 재현 빈도 강수량  
고탄소 시나리오

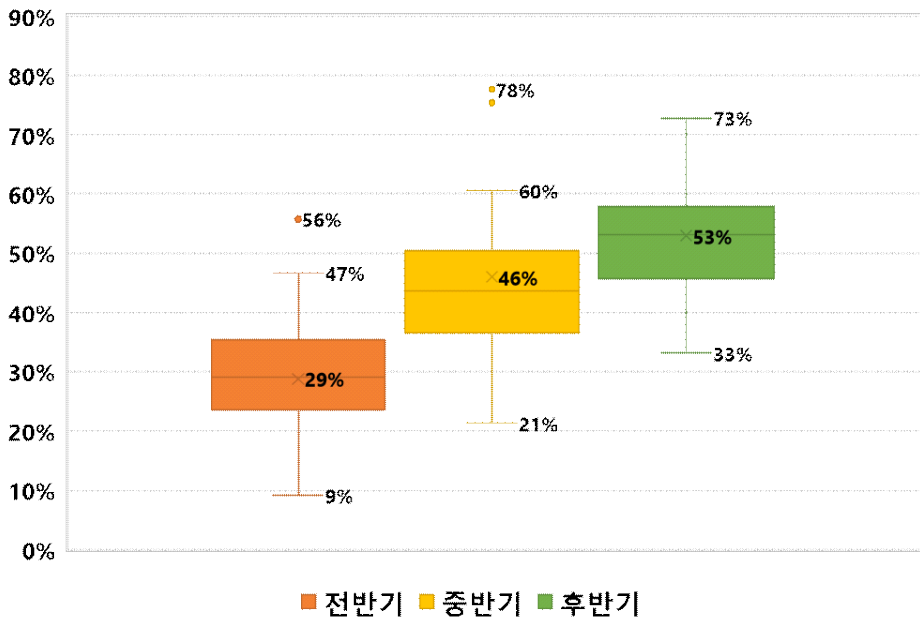


Figure 55. The whisker-box plots for the increase rate (percent) of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) relative to those estimated over 2000-2019. The upper panels are for the SSP1-2.6 and lower panels for the SSP5-8.5.

여기서 현재(2000~2019년) 기후 대비 기후 변화 시나리오에 따른 재현빈도 극한 강수량의 변화량(백분율)을 미래의 홍수위험도를 정량화하였으며(Figs. 56, 57), 4단계로 분류하였다 (0~20% 증가: 관심, 20~40%: 주의, 40~60% 증가: 경계, 60%이상 증가: 심각). 고탄소 시나리오에

서 미래의 홍수위험도(100년 재현 빈도 강수량 기반, Figure 56, 57)는 현재기후 대비 21세기 후반기에는 대부분의 하천 대권역에서 ‘홍수위험 경계 단계’ (53% 증가)를, 지역적으로 심한 경우에는 ‘홍수위험 심각 단계’ (70% 증가)까지 도달하는 것으로 전망되었다. 후반기에 홍수위험도가 심각에 도달하는 한강동해 권역(강원도의 동해안에 있는 양양남대천, 강릉남대천, 삼척 오십천으로 구분)은 20년, 50년 100년 재현 빈도의 극한 강수량 값이 후반기에 각각 65%, 70%, 73% 이상, 낙동강동해 권역(경상북도 지역의 동해에 접한 왕과천과 영덕 오십천으로 구분)은 65%, 68%, 70% 이상 증가, 섬진강 권역은 중반기에 63%, 71%, 76% 이상, 영산강남해 권역(전라남도의 진도와 영암방조제가 있는 지역)은 65%, 72%, 75% 이상 증가할 것으로 전망되었다. 또한 고탄소 시나리오에 따르면, 제주도 권역은 다른 권역에 비해 재현 빈도 강수량의 증가폭이 가장 컸으며, 중반기에 20년, 50년, 100년 빈도의 극한 강수량의 값이 71%, 75%, 78% 각각 증가하여, 전반기에서 홍수위험의 경계 단계에 도달하고, 중반기부터 후반기까지 홍수위험의 심각 단계에 도달하는 것으로 전망되었다.

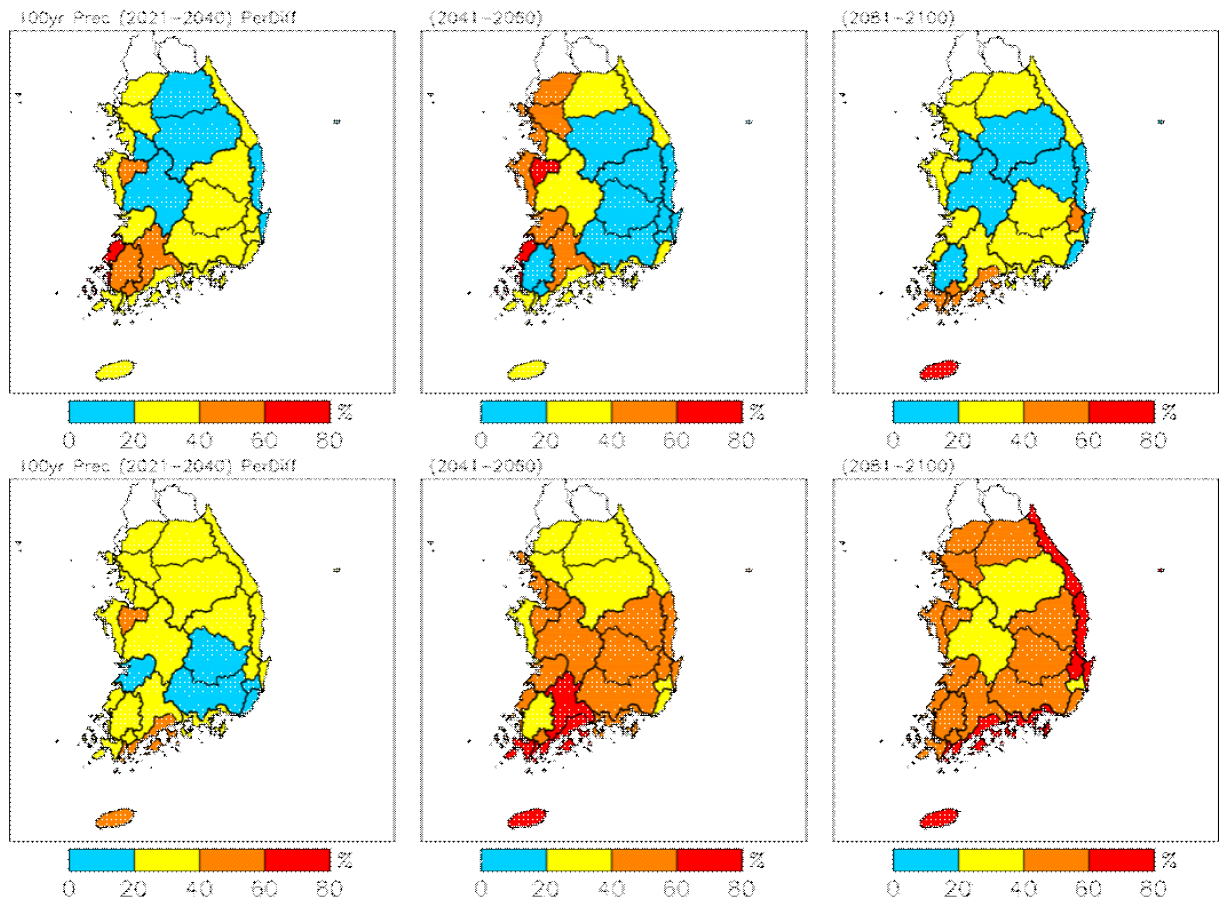


Figure 56. The spatial distribution of the increase rate (percentage) of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. The upper panels are for the SSP1-2.6 and lower panels for the SSP5-8.5.

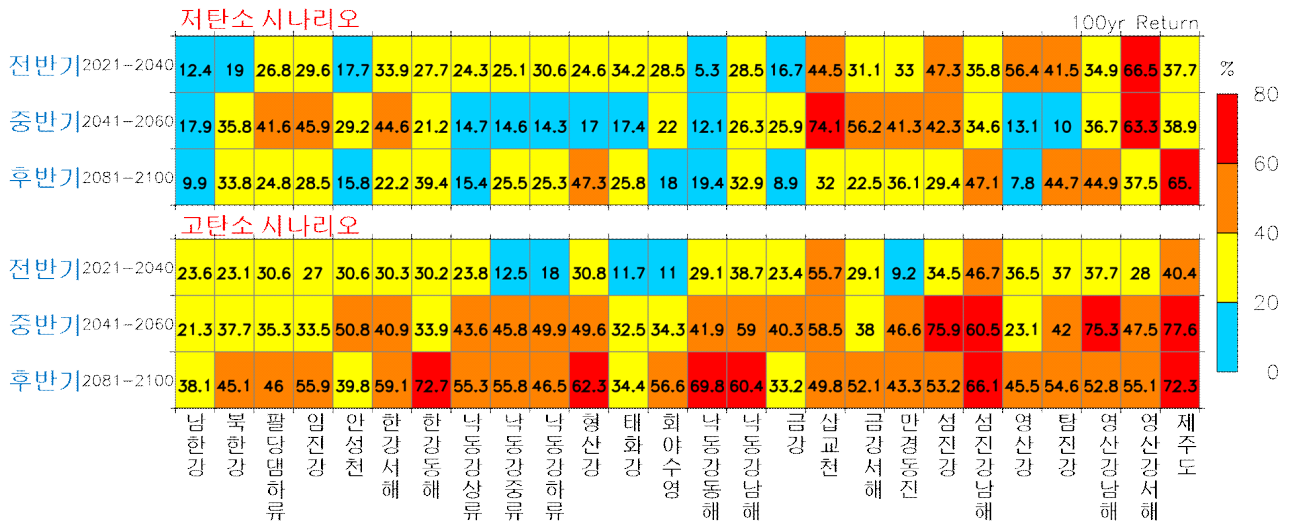


Figure 57. Color charts of the increase rate (percentage) of the 100-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. The upper panels are for the SSP1-2.6 and lower panels for the SSP5-8.5.

그러나 저탄소 시나리오에 따르면, 중반기에는 남한 서쪽의 일부 권역들에서 경계·심각 단계까지 도달하지만, 후반기에는 주의·관심 단계로 홍수위험도가 감소할 것으로 보여주었다. 특히 고탄소 시나리오에서 홍수위험도가 높은 권역에서 재현빈도 극한 강수량의 증가 폭이 50% 이하로 감소할 것으로 전망되었다. 예를 들면 100년 재현빈도 극한 강수량의 값이 고탄소 시나리오에서 70% 이상 증가했던 한강동해와 낙동강동해는 저탄소 시나리오에 따른 후반기에는 각각 39%와 19%로 증가 폭이 크게 감소하는 것으로 전망되었다. 20년과 50년 재현 빈도 강수량 기반 홍수 위험도 평가에서도 유사한 결과를 보였다. 이는 Figure 58과 59에서 확인 가능하다.

결국 위의 주요 결과는 향후에 탄소 중립 정책(저탄소 배출 정책)이 효과를 거두면, 지구 온난화의 진행속도가 줄어들 수 있고, 이로 인해 홍수의 원인이 되는 극한 강수의 감소로 홍수 위험도를 낮출 수 있다는 것을 암시한다. 그러므로 향후 극한강수량 강도의 증가로 홍수 위험도가 높아질 것으로 전망되는 바, 수문구조물의 방재계획 및 미래 극한 홍수 대비 정책 수립에도 이번 미래 전망의 결과가 반영돼야 할 것으로 보인다.

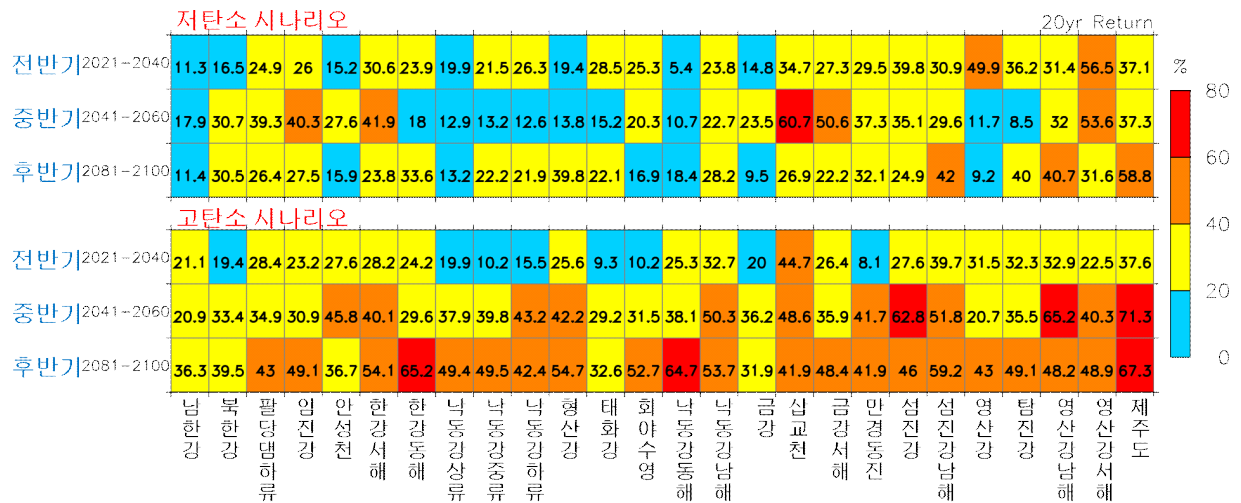


Figure 58. Color charts of the increase rate (percentage) of the 20-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. The upper panels are for the SSP1-2.6 and lower panels for the SSP5-8.5.

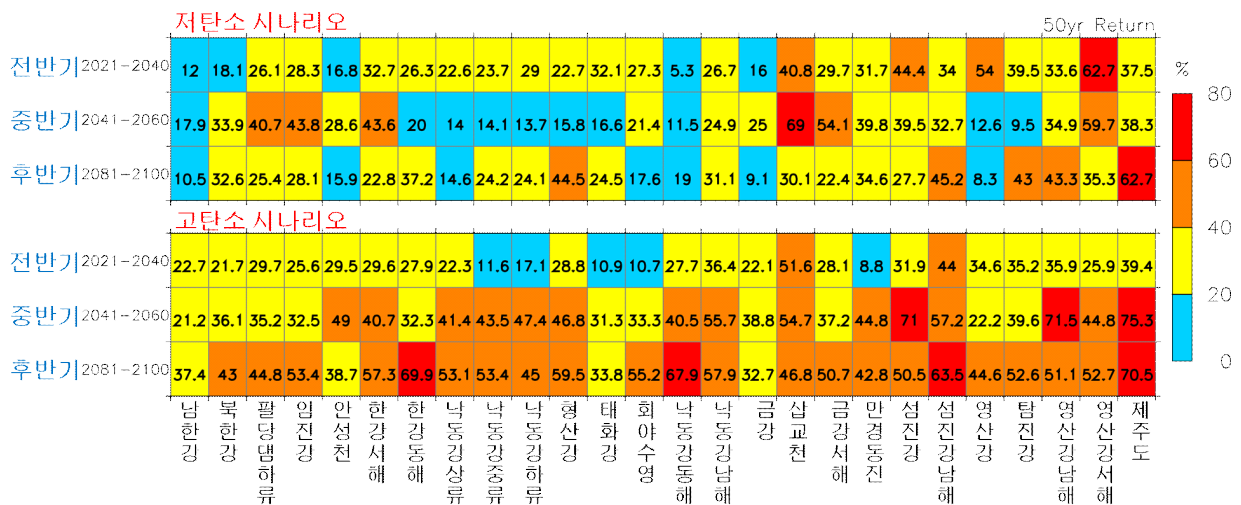


Figure 59. Color charts of the increase rate (percentage) of the 50-year return level precipitations in the 26 watershed regions estimated over future scenario periods (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) from those estimated over 2000-2019. The upper panels are for the SSP1-2.6 and lower panels for the SSP5-8.5.

위의 결과들은 5개 지역 기후모델에서 각각 평가된 재현 빈도 강수량을 평균한 값을 기반으로 한 것이다. 고탄소 시나리오에서 저탄소 시나리오에 비해서 100년 재현 빈도 강수량이 더 크게 평가되는 것이 특정 모델 결과의 기여가 너무 클 가능성에 대한 여부를 확인하기 위해서 각 모델에서 연 최대 강수량의 미래 기후에서 시계열들을 비교하였다 (Figure 60). 대표적으로 미래 기후 중반기에서 증가하다가 후반기에 감소하는 경향을 보이는 삼교천, 섬진강, 영산강남해와 중반기를 거쳐 후반기까지 재현빈도 강수량이 증가 경향을 보이는 섬진강남해, 한강동해 권역을 살펴보았다. 이들 권역에서 다중 모델 평균은 고탄소 시나리오에서 연 최대 일 강수량

이 저탄소 시나리오에서보다 더 큼을 확인할 수 있으며, 고탄소 시나리오에 대한 개별 모델의 시계열이 저탄소 시나리오에 대한 개별 모델의 시계열보다 더 큰 값 쪽으로 향해 있으므로 위의 주요 결론은 특정 모델의 기여 때문에 나온 것이 아님을 확인할 수 있다.

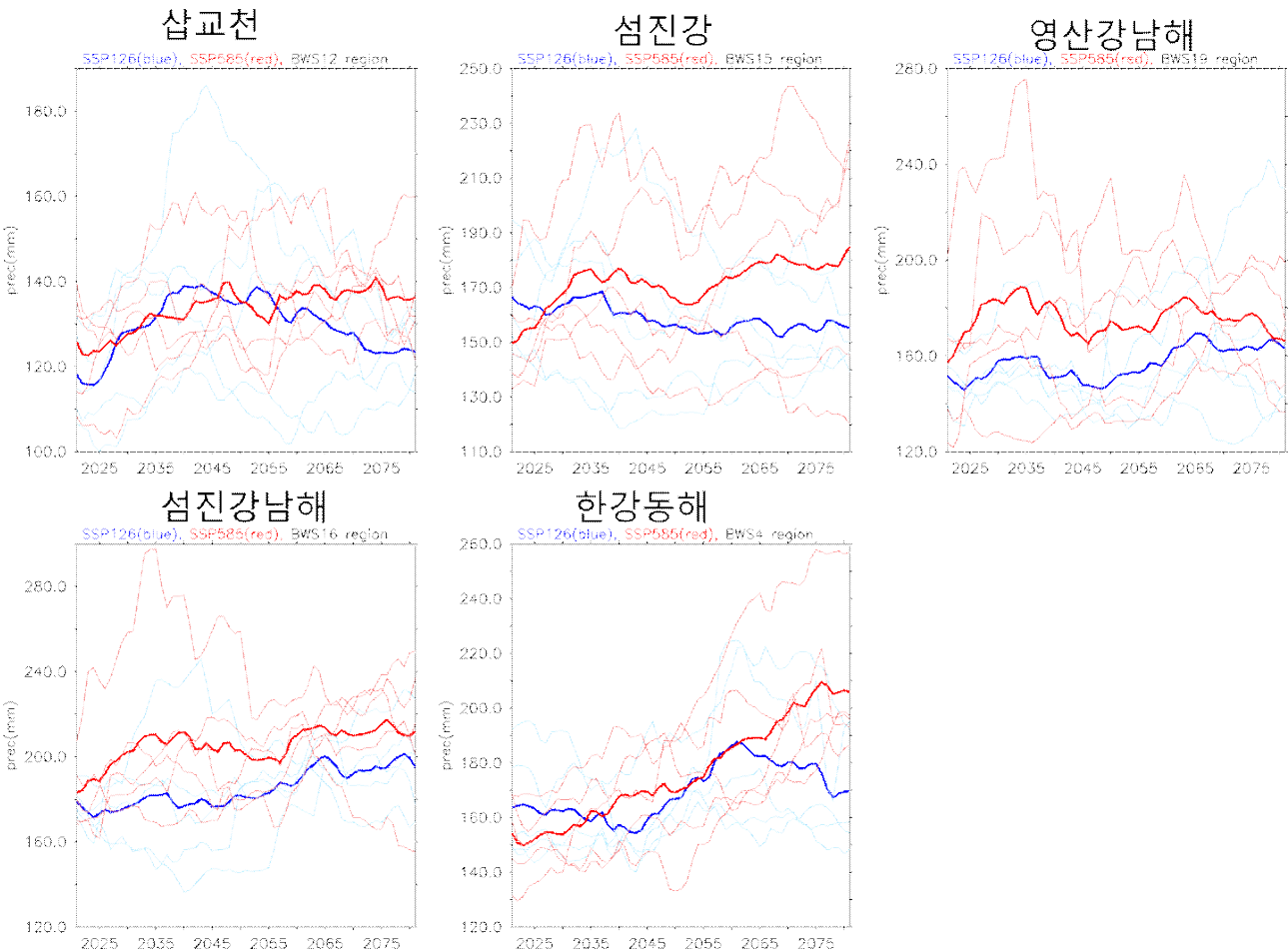


Figure 60. Time series of annual maximum of daily total precipitations averaged over the No 12, 15, 19, 16, 4 watersheds in the future scenarios. The red lines are for the SSP5-8.5 and blue lines for the SSP1-2.6 from five regional models. The thick lines indicate the multi-model ensemble mean.

### (5) 한반도 남한 강수 변동 특성 분석

Figure 61은 26개 대권역별 및 권역 평균 일 누적 강수량의 계절 변동을 보여준다. 강수량 대부분이 북반구 여름철인 6~9월에 집중되어있고, 7월 초와 8월 중/후반, 두 개의 peak이 존재한다. 즉 7월의 장마 강수와 관련된 1차 우기, 장마 이후 소강상태 이후 2차 우기의 특성을 보인다(기상청, 2022). 경기, 수도권, 강원도의 권역에서는 7월 peak이 다른 권역보다 늦게 나타나고(즉, 7월 중순 무렵) 이후 소강상태 없이 강수가 지속해서 발생한다. 4~5월에 여름철 두 개의 peak보다 작지만, 한 개의 작은 peak이 존재하는데, 전라남/북도, 경상남/북도의 권역들에서의 강수가 이 시기에 작은 peak의 발달에 주로 기여한다.

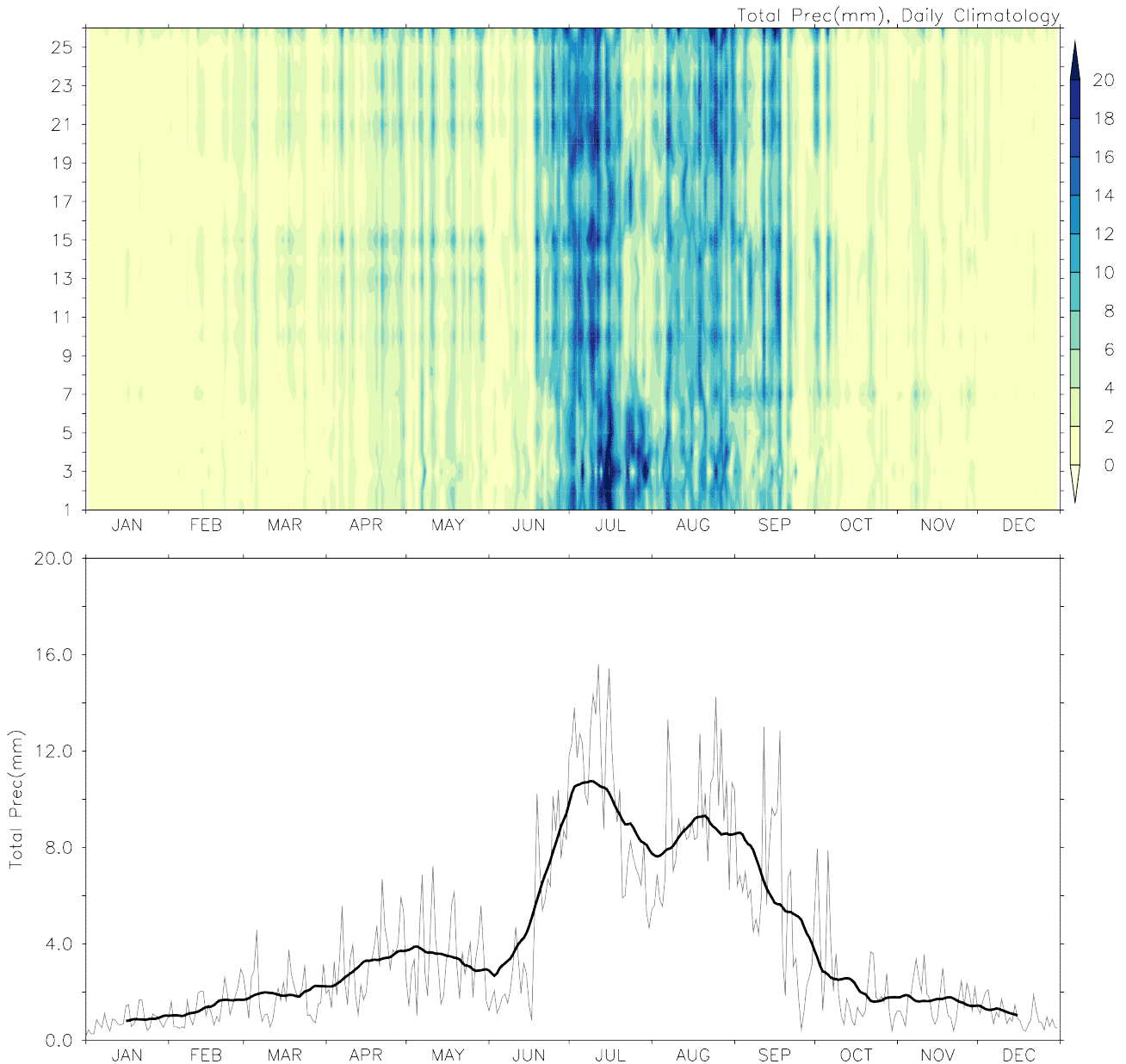


Figure 61. (Upper panel) Charts of the daily climatological mean of precipitations in the 26 watersheds over the 12 calendar months and (lower panel) seasonal cycle of the daily climatological mean of precipitations averaged over south Korea.

우리나라 강수가 집중되어있는 여름철 6~9월 각각의 강수의 년 변동의 특성을 살펴보면 (Figs. 62-65), 권역별로 시기별로 강수의 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다. 먼저 6월(Figure 62)은 경기도/강원도 남쪽의 권역들에서 변동성이 큰 특징을 보이고, 경기도/강원도 권역에서 상대적으로 작은 변동성을 보여준다. 하지만 2011년에 전국적으로 많은 강수가 있었는데, 경기도/강원도의 권역들에서 다른 권역들에 비해서 많은 비가 내렸다. 이후 전 권역에서 이전 시기에 비해 적은 강수의 경향성을 보이다가, 2018년부터 다시 강수 증가의 경향성을 보였다. 1차 우기인 7월(Figure 63)은 6월의 경우와 반대의 지역적인 특징이 나타났는데, 북부의 권역들 (즉, 경기도/강원도에서 권역들)에서 누적 강수량의 더 큰 변동성을 보였다. 그리고 이들 권역에서

2011년 이후 감소 추세 경향이 다른 권역들에 비해서 상당히 작았다.

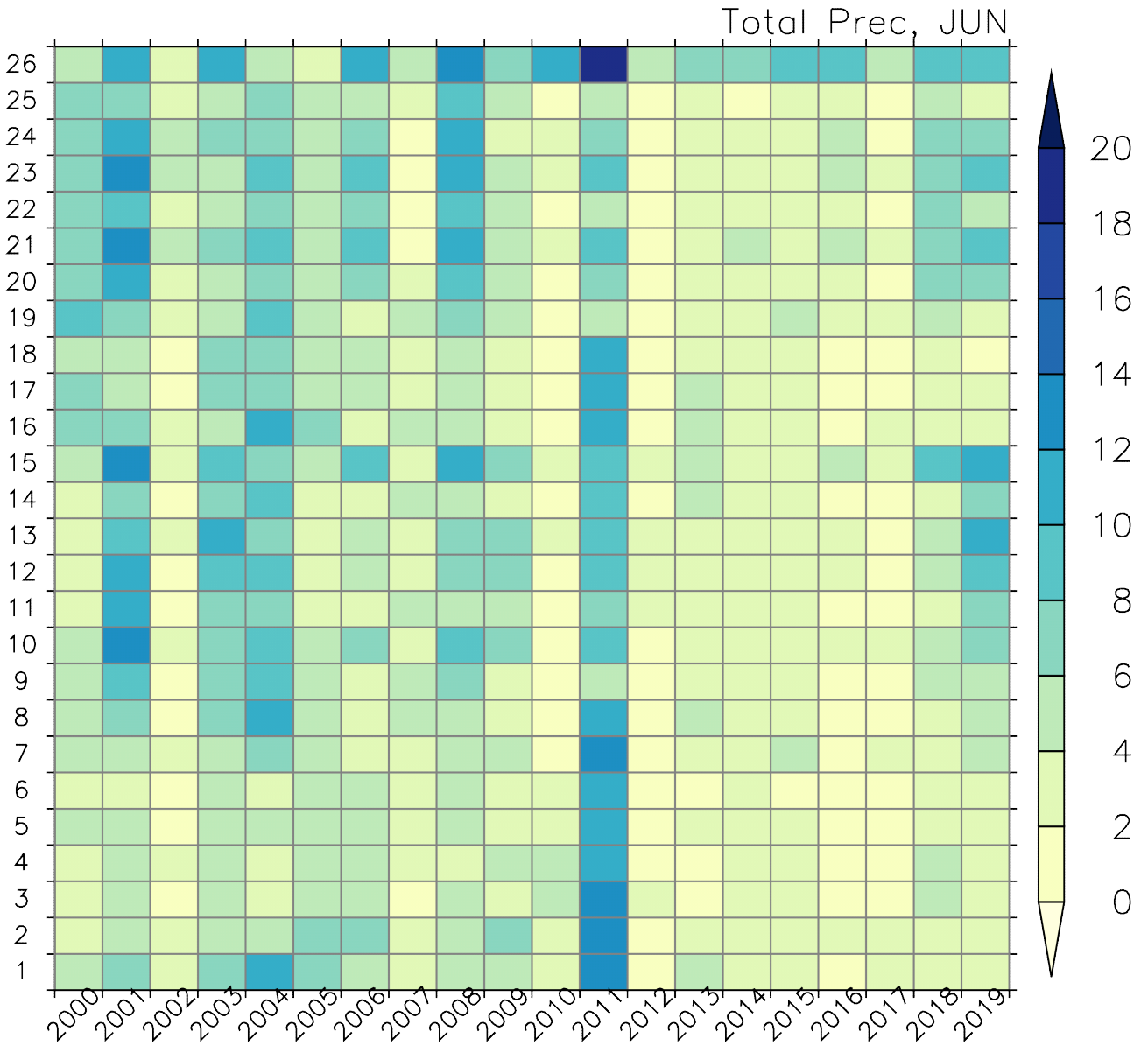


Figure 62. Color charts of the total monthly precipitations (June) in the 26 watersheds from 2000 to 2019.

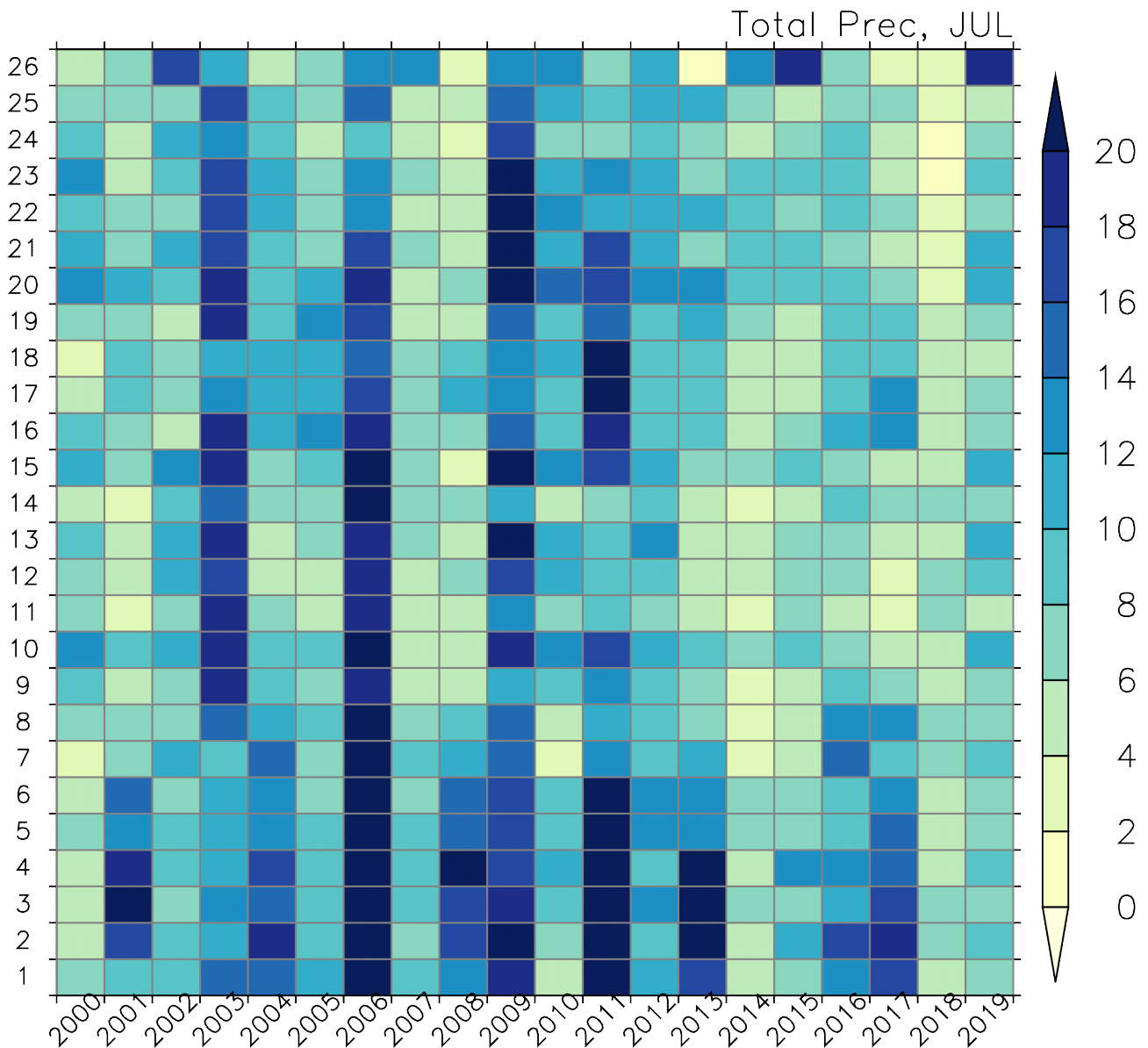


Figure 63. Color charts of the total monthly precipitations (July) in the 26 watersheds from 2000 to 2019.

2차 우기인 8월의 강수(Figure 64)는 전라남/북도 권역에서 다른 권역에 비해서 월 강수량의 큰 변동성을 보였다. 두 번째로 큰 변동성은 경기/강원도의 권역들에서 보였다. 6월과 7월과 달리 감소 경향성은 2014년 이후에 나타났다. 9월의 경우(Figure 65)에는 경상남/북도의 권역에서 변동성이 컸으며, 2011년 이후 감소 경향성을 보이는 다른 권역과 달리 월 강수량의 증가 경향성이 나타났다.

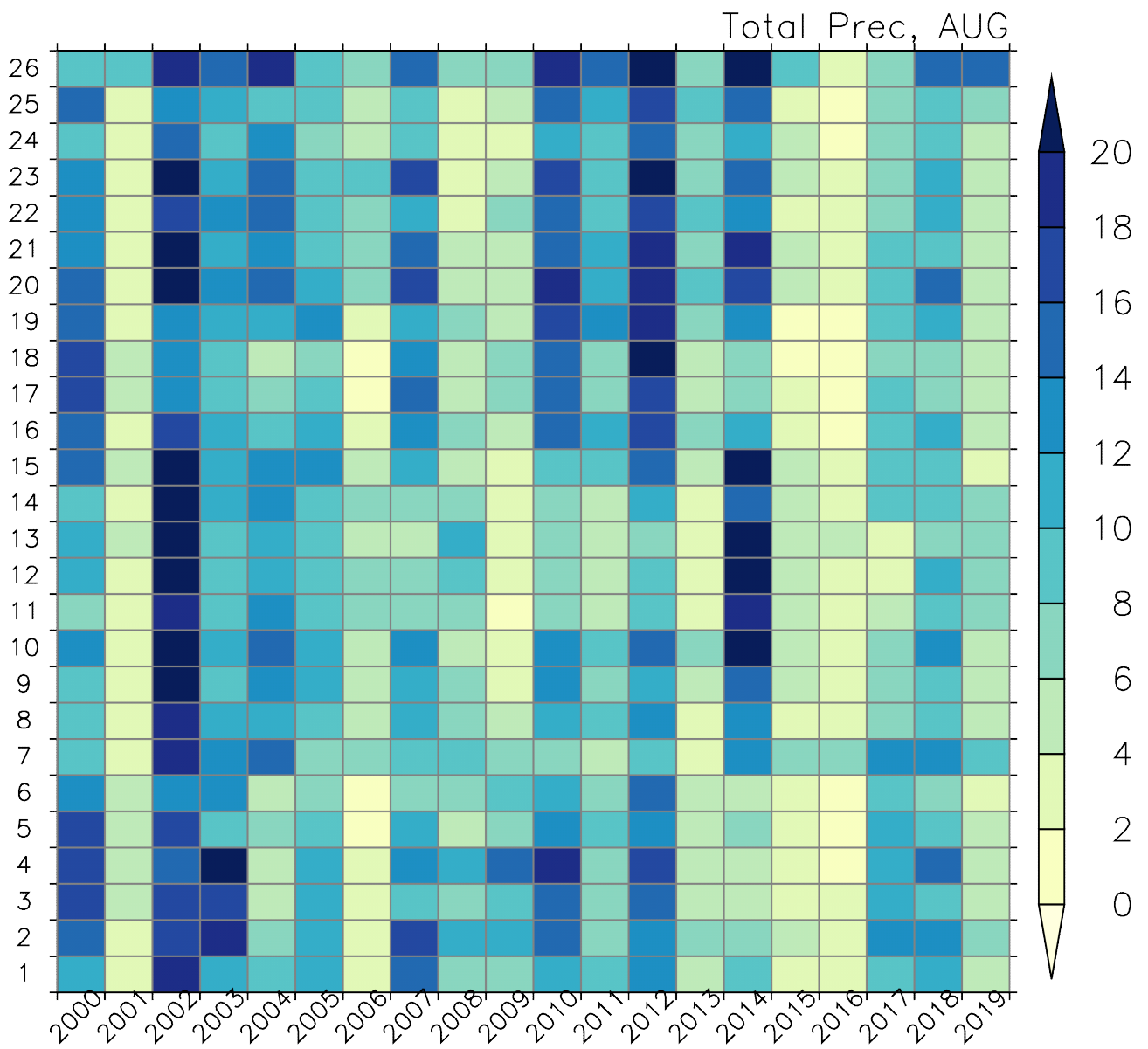


Figure 64. Color charts of the total monthly precipitations (August) in the 26 watersheds from 2000 to 2019.

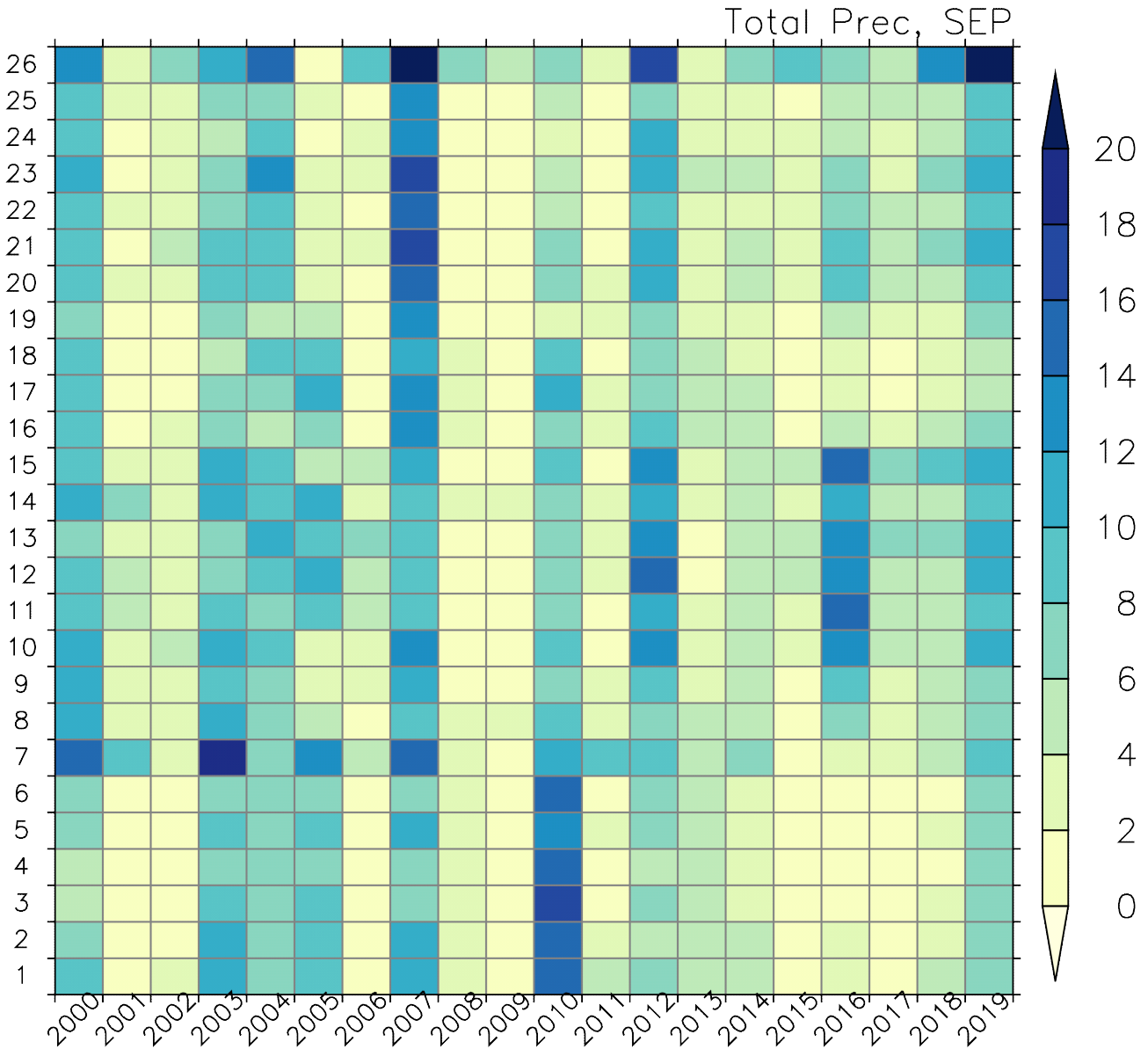


Figure 65. Color charts of the total monthly precipitations (September in the 26 watersheds from 2000 to 2019).

Figure 66는 일 누적 강수량의 연 최댓값이 존재하는 달을 보여준다. 대부분 6~9월에 최댓값이 존재하였으며, 특히 2000년대 후반에는 9월에 최댓값이 나타나는 권역들이 증가하였다. 일부 시기에 가을철 즉 10, 11월에 최대 일 누적 강수량을 기록한 권역이 존재하는데, 2014년에 금강, 삼교천, 금강서해에서 10월에 일 누적 최대 강수량을 기록하였고, 삼교천, 금강서해 권역은 2019년 11월에 최대 강수량을 기록했다. 2008년에는 많은 권역에서 5월에 일 년 중 일 누적 최대 강수를 기록하였는데, 섬진강남해, 영산강, 탐진강, 영산강남해, 영산강서해, 회야/수영, 낙동강남해 권역이 포함된다. 이들 권역 중에 탐진강, 영산강남해, 섬진강남해, 회야/수영, 낙동강남해 권역에서 2013년에는 5월에 일 누적 최대 강수량을 보였다.

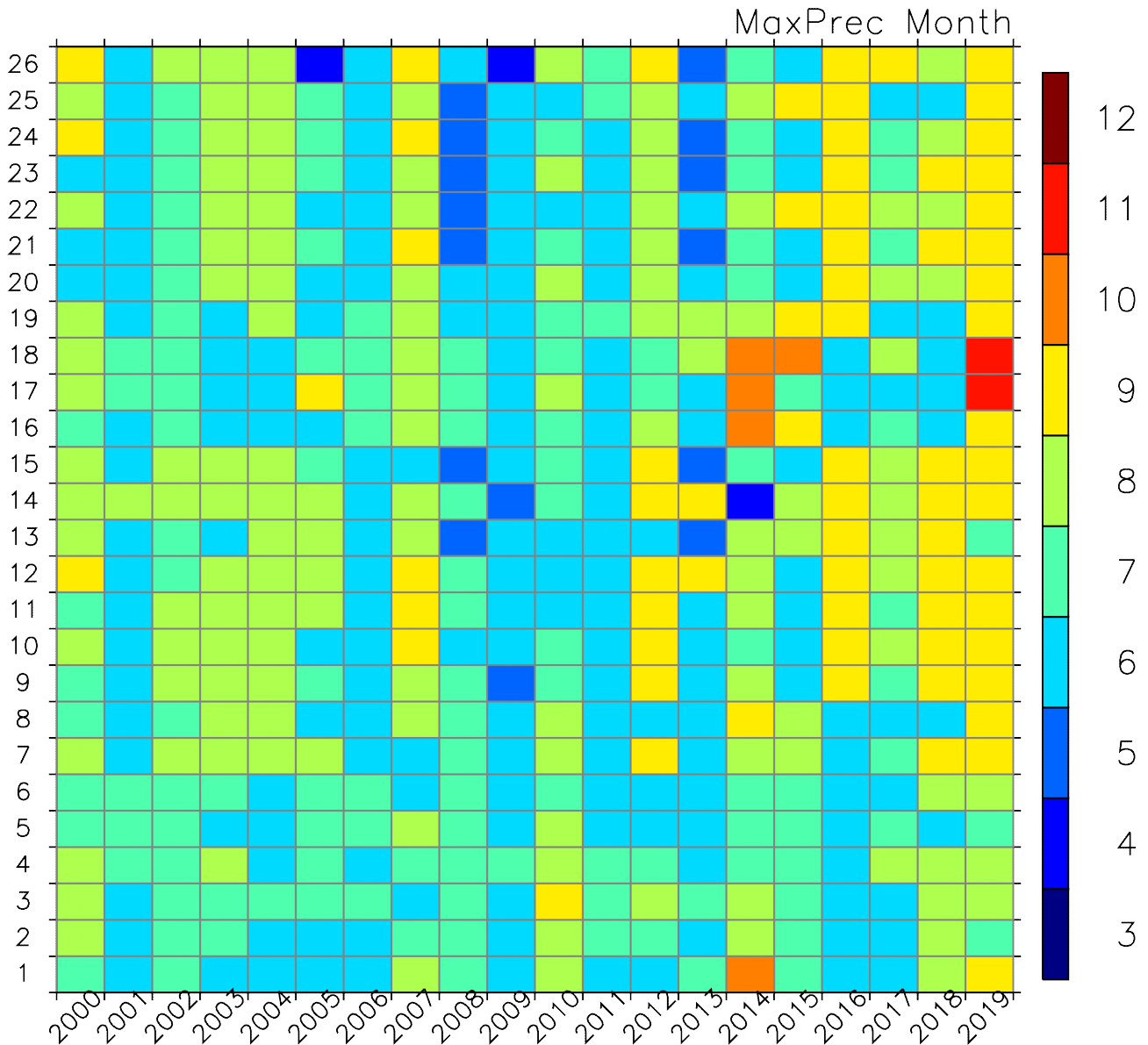


Figure 66. Color charts for the month in which maximum precipitations occurs in the 26 watersheds from 2000 to 2019.

이번 절에서 분석된 남한 권역별 강수 계절 변화 특성은 대부분의 강수가 6~9월에 집중되어 있으며, 일 누적 최대 강수량도 이 시기에 존재한다는 것을 보여주었기 때문에, 다음 절에서 토론이 될 남한 강수 이벤트 관련 대기순환 특성 분석은 6~9월에 발생하는 강수 이벤트를 기반으로 수행되었다.

#### (6) 한반도 여름철 강수 관련 대기순환 특성 분석

이번 절에서는 군집 분석(즉 K-means, 자세한 방법은 3-가-(2)-(라)의 군집분석 절 참조)을 통해 강수 이벤트를 분류하여 관련된 대기/해양 순환장 특성을 분석하였다. 강수 이벤트는 6~9월 각각의 총강수량이 0.5 표준편차 이상 일 때로 정의하였으며, 이 시기의 500hPa 지위고

도 편차장들을 군집 분석을 통해서 분류하였다. 최적의 군집 수를 선택하기 위해서 WSS 기반 KL 지수를 계산하였으며, 2개의 군집 수에서 KL 지수가 최대가 되는 것을 확인하였다(Figure 67). K-means 군집 분석을 통해서 군집 1은 14개 이벤트, 군집 2는 9개의 이벤트가 포함되었다. 군집 1과 군집 2의 500hPa 지위고도 편차장으로 2000-2019년 기간에서 지위고도 편차장과 projection을 하여 지수를 생산하여, 두 개의 군집이 잘 분리가 되었는지 확인하였다. 이를 위해서 위의 계산된 지수들을 사용하여 Figure 68처럼 scatter plot 분석을 수행하였다. 이 Figure에서 군집 1에 속한 이벤트들은 좀 더 오른쪽으로 위치하고, 군집 2에 속한 이벤트들은 좀 더 위쪽으로 위치하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 두 개의 군집으로 여름철 강수 이벤트가 잘 분리되었음을 보여준다.

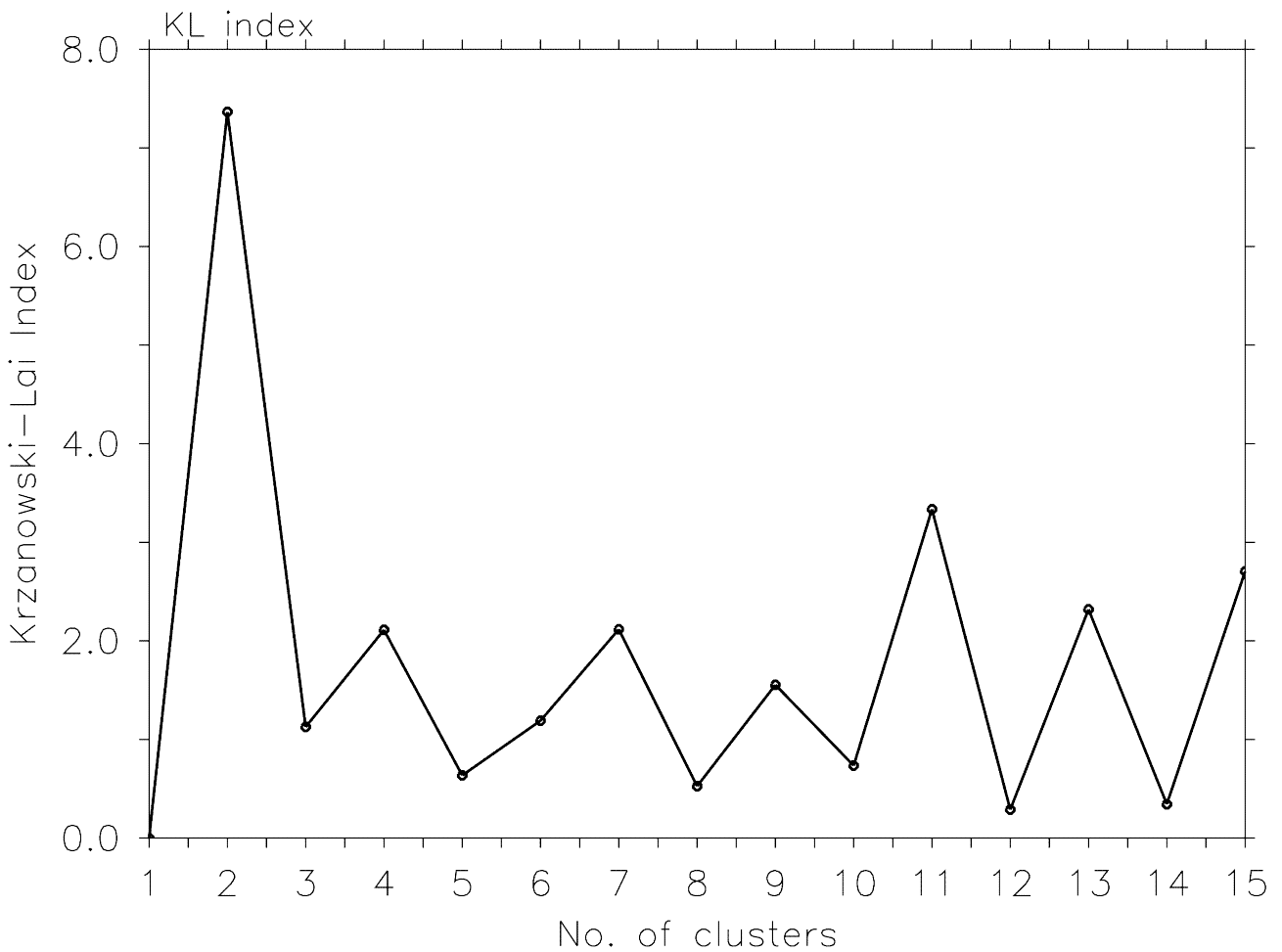


Figure 67. Series of the KL index estimated for 1 to 15 clusters.

Figure 69는 군집 별 500hPa 지위고도 편차장과 850hPa 바람 편차장의 합성장 분포이고, Figure 70은 군집 별 월 누적 강수량 편차에 대한 합성장 분포이다. 군집 1은 남고북저의 대기 패턴으로 한반도 남동쪽에 양의 지위고도 편차, 북동쪽에 음의 지위고도 편차가 위치하며, 이와 관련하여 북쪽의 차갑고 건조한 공기와 남쪽의 고온 다습한 공기가 우리나라에서 수렴하는 특징을 보인다. 위와 같은 대기 패턴과 관련하여 남한 전반적으로 평년보다 많은 강수량을 보이며, 주로 수도권/강원도 (북한강, 남한강, 팔당댐하류, 임진강, 한강동해 권역) 및 남부지방(섬

진강남해, 영산강, 낙동강하류 권역)에 강수가 집중되는 특징을 보인다. 군집 2는 오토츠크해 주변에 양의 지위고도 편차가 위치하고 한반도 주변으로 음의 지위고도 편차가 위치하여, 남동풍 편차의 영향을 받는 구조이며 한반도 남쪽을 중심으로 강수 수렴 지역이 형성되는 특징을 보인다. 이 군집 2는 한반도 남서쪽 권역(즉, 금강, 만경동진, 낙동강하류, 섬진강남해 권역)에 강수가 집중되는 특징을 보인다.

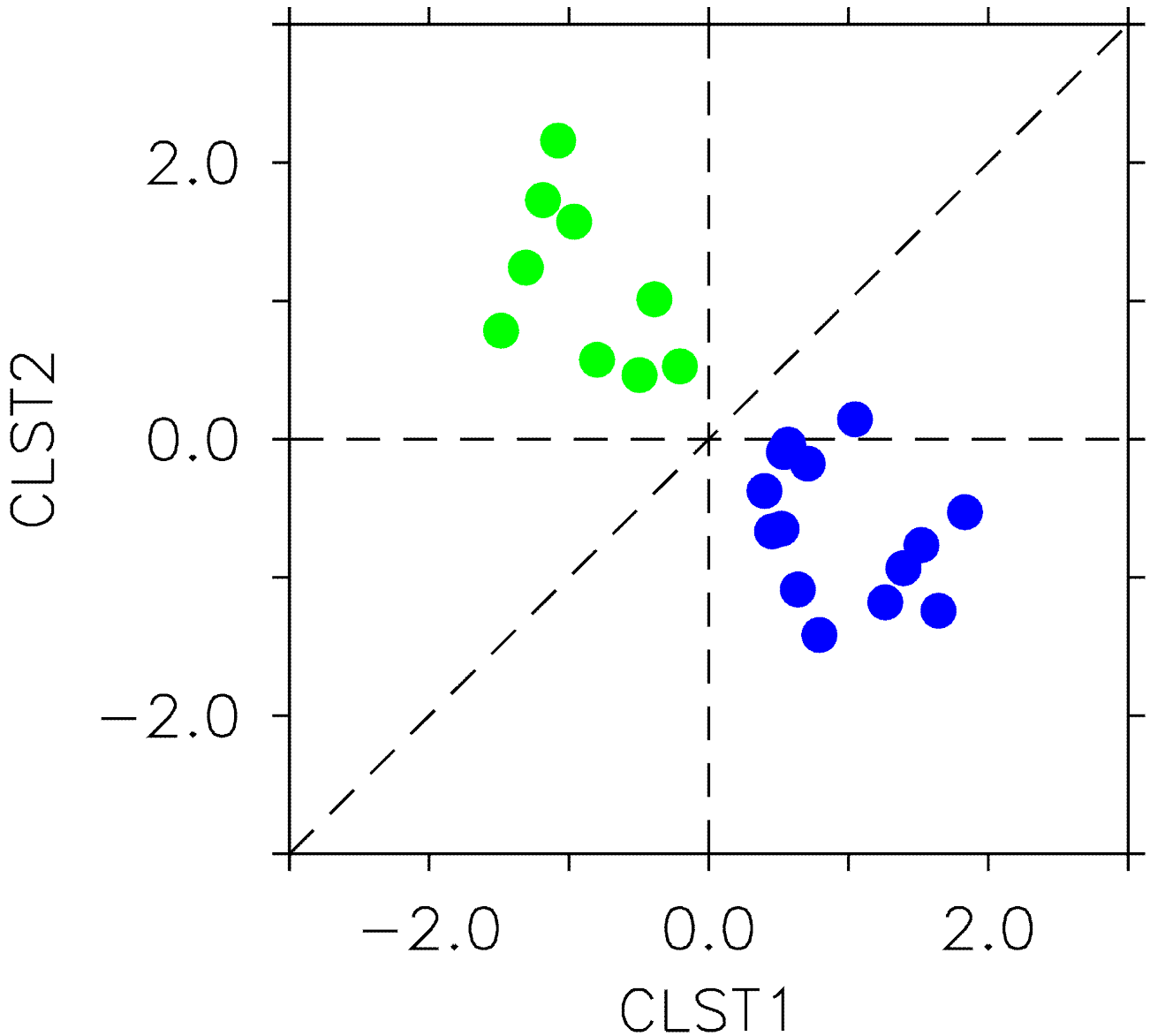


Figure 68. Scatter plots of normalized spatial projection coefficients for each event in the first (blue) and second cluster (green).

군집 1과 2의 한반도 주변 대기순환과 관련 있는 해양 변동성과 열대 강제력(대류 활동)을 분석하기 위해서 해수면 온도 편차장과 OLR 편차장에 대한 합성장 분석을 수행하였다 (Figure 71).

군집 1 대기순환에 대하여 필리핀 해 주변 양의 해수면온도 편차와 대류 활동 강화 신호

와 관련이 있으며, 인도양에서는 양의 해수면 온도 편차가 나타났다. 태평양에서는 음의 라니냐-like 패턴(즉 음의 해수면 온도 편차, 대류억제)과 관련이 있으며 북대서양에서는 음의 NAO-like 관련 남북으로 쌍극자 해수면 온도 편차를 보였다 (500hPa 지위고도 편차장에서 뚜렷한 음의 NAO 패턴이 보임).

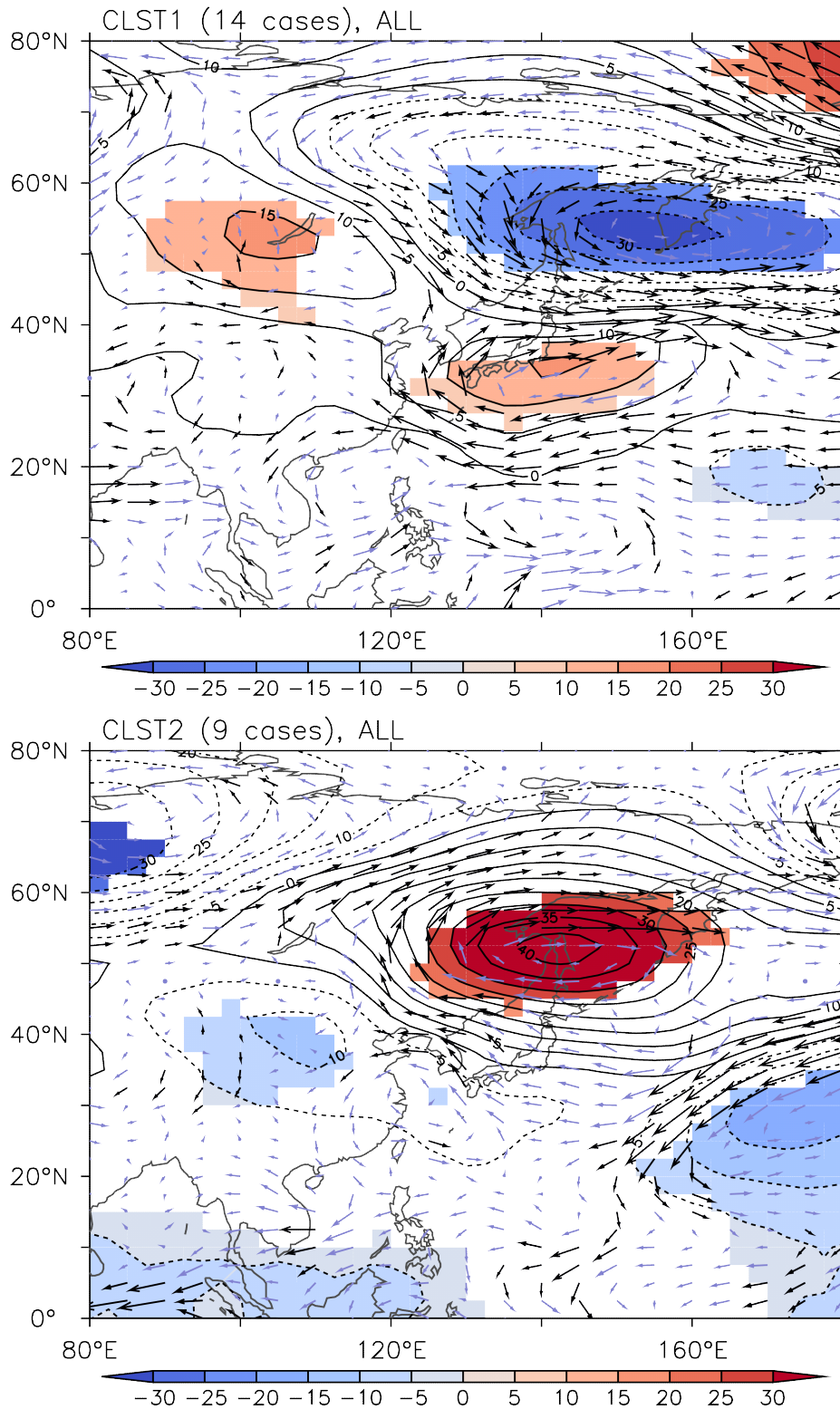


Figure 69. The spatial patterns of the (upper panel) first and (lower) second cluster of 500 hPa geopotential height and 850 hPa winds anomaly around Korean Peninsula.

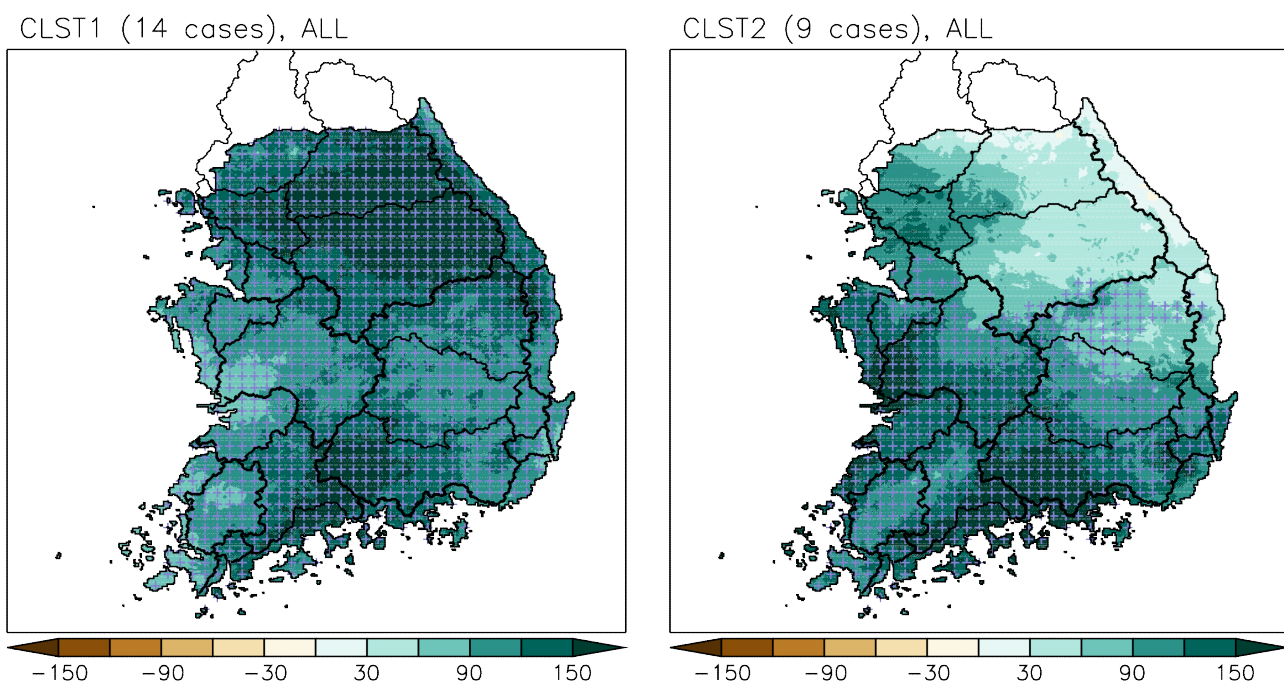


Figure 70. The composite patterns of Korean total precipitations for the (upper panels) first and (lower) second clusters.

군집 2 대기순환에 대하여 인도양에서 양의 IOD 관련 해수면 온도 편차와 OLR 편차와 관련이 있다 (즉, 동인도양에서 음의 해수면 온도 편차, 대류 억제 신호, 서인도양에서 양의 해수면 온도 편차와 대류 강화 신호). 아울러 북태평양 양의 해수면 온도 편차, 북대서양 멕시코 만류지역 양의 해수면 온도 편차와 관련성을 보였다. 열대 서태평양에서 대류 강화 신호와 양의 해수면 온도 편차가 군집 2의 대기순환이 발달할 때 함께 나타나는 결과를 보였다. 위와 같은 분석 결과는 NAO, 인도양 및 필리핀해 해수면 온도 편차, 필리핀해 대류 활동, 열대 서태평양 해수면 온도 편차 및 대류 활동 등이 군집 1, 2 예측에서 활용될 수 있음을 시사한다. 여름철 강수 발생 대기순환을 예측하기 위한 관측 인자로서 활용되기 위하여 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

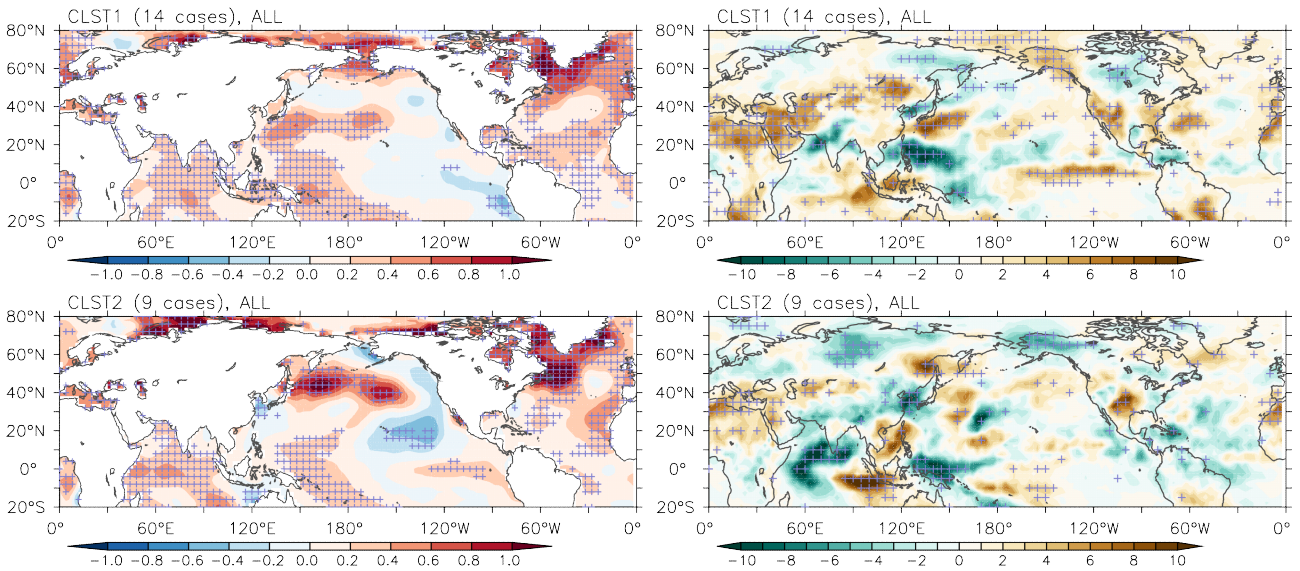


Figure 71. The composite patterns of global (left panels) SST and (right panel) OLR anomaly for the (upper panels) first and (lower) second clusters

## (7) 미래 기후변화 시나리오에 따른 한반도 강수 관련 대기순환 특성 분석

### (가) 한반도 강수관련 대기순환장 지수 정의 및 모형 검증

한반도 강수 관련 대기 순환장의 미래 변화를 분석하기 위해서, 군집 1 과 2 패턴의 활용 가능성을 살펴보기 위해서, 군집 1 과 2의 지위고도 패턴을 1979-2020 기간의 500hPa 지위고도 편차 장에 projection하고 정규화하여 지수를 생산하였다. 이 지수가 1.0 이상일 때 ASOS 자료의 전국 평균 월 누적 강수량에 대한 산포도를 보면(Figure 72), 대부분의 월 누적 강수량이 1.0 혹은 0.5 표준편차 이상임을 확인할 수 있다. 이는 현재 기후에서 평가된 군집 패턴과 미래 기후의 지위고도 편차장과 projection 지수를 계산하여, 현재 기후에서 한반도 강수 관련 대기 순환장의 미래 기후변화 시나리오에 따른 변화에 관한 분석에서 활용할 수 있음을 암시한다.

미래 기후에서 강수 관련 대기 패턴 변화를 분석하기 위해서 미래 기후에서 상세 한반도 강수 자료 생산을 위해서 경계값으로 사용한 UKESM 모형이 관측에서 생산된 군집 1 과 2의 패턴을 유사하게 모의하는지 검증이 필요하다. 이를 위해서 현재 기후(즉 historical 자료)모의 자료의 1995-2014 기간에서 500hPa 지위고도 편차장과 관측에서의 군집 1과 2의 500hPa 지위고도 편차장과 projection 하여 정규화된 지수를 생산하였다. 그리고 이 지수가 1.0 이상인 시기에 500hPa 지위고도장과 850hPa 바람장을 활용하여 합성장 분석을 수행하였다(Figure 73).

관측에서 보였던 한반도 남동쪽에 양의 지위고도 편차, 북동쪽에 음의 지위고도 편차가 위치하는 군집 1과 오호츠크해 주변에 양의 지위고도 편차가 위치하고 한반도 주변으로 음의 지위고도 편차가 위치하는 군집 2 패턴의 전반적인 특징이 모형에서 모의된 패턴에서 잘 나타나 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 모형에서 강도가 관측보다 크며, 모형에서 군집 2 패턴이 관측보다 다소 오른쪽으로 shift 되었고, 이 때문에 관측에서 나타는 남동풍의 영향 보다는 동풍의 영향이 지배되는 오류가 있다. 이와 같은 오류가 한반도 강수 발달에 어떤 영향을 미치

는지 추후 추가적인 분석이 필요하다.

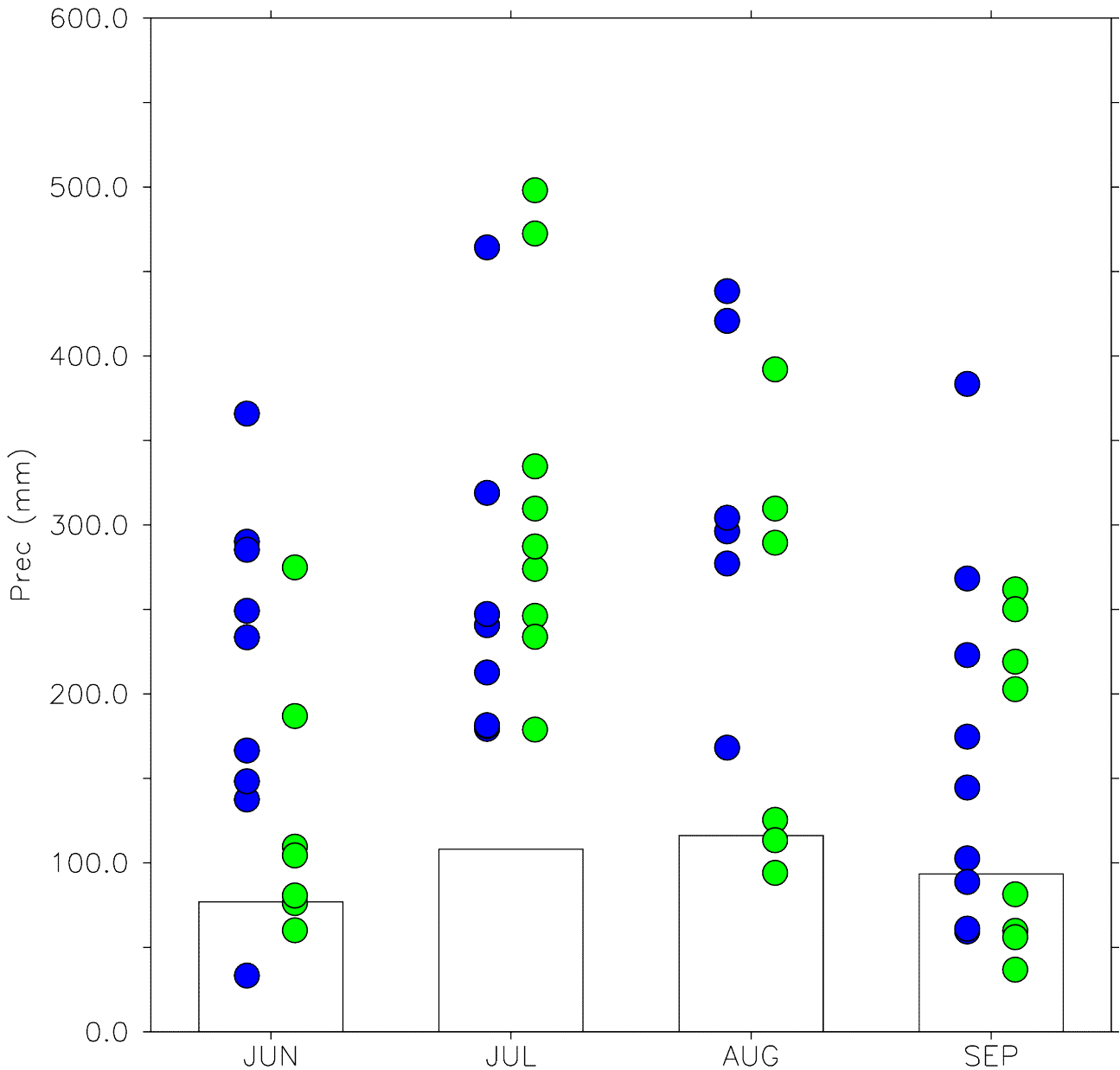


Figure 72. The scatter plots of total precipitations and spatial projection coefficients of 500 hPa geopotential height for the first (blue) and second (green) clusters from June to September. Rectangular boxes indicate the 1.0 standard deviation of the total monthly precipitations.

Figure 74는 1948년 이후 2014년까지 군집 관련 projection 지수가 1.0 이상을 만족하는 이벤트 수를 20년 running period에 대하여 모형과 재분석 자료에서 계산하였다. 1970년 이전에 군집 1과 군집 2의 발생 빈도수에 대한 우열을 반대로 모의하고 있지만, 이후 발생 빈도수가 어떤 군집이 더 많이 발생했는지에 대한 상대적인 발생 빈도 차이는 모형에서 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 최근 1990년 이후 군집2의 발생 빈도수가 군집 1보다 더 컸는데, 이를 모형이 잘 모의하였다.

최종적으로 Figure 73과 74에서 보여주는 결과는 한반도 강수 관련 패턴의 미래 변화 분석을 위해서 UKESM 모형 결과를 활용할 수 있다는 것을 보여준다.

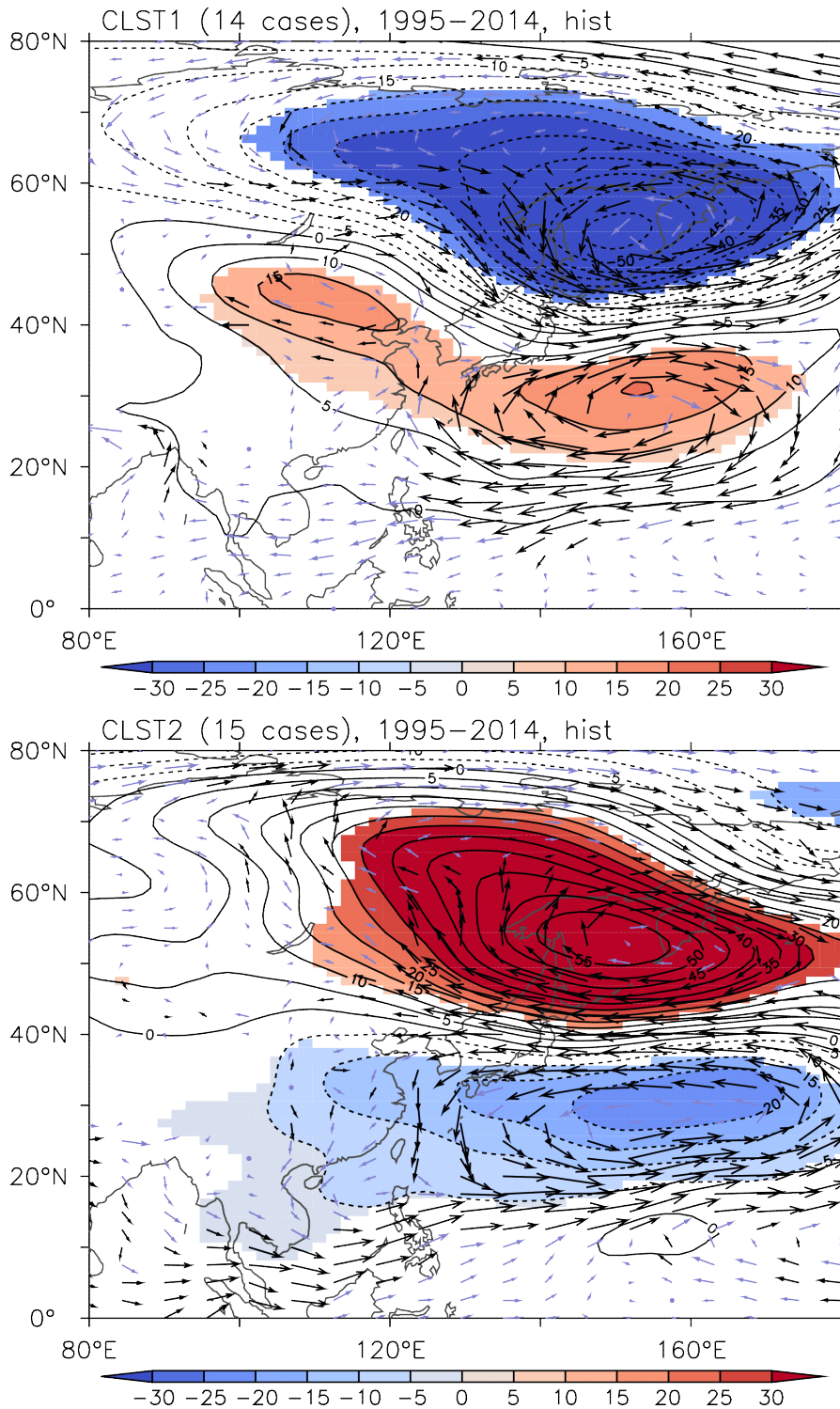


Figure 73. The spatial patterns of the (upper panel) first and (lower) second cluster of 500 hPa geopotential height and 850 hPa winds anomaly around Korean Peninsula from the historical simulations of UKESM.

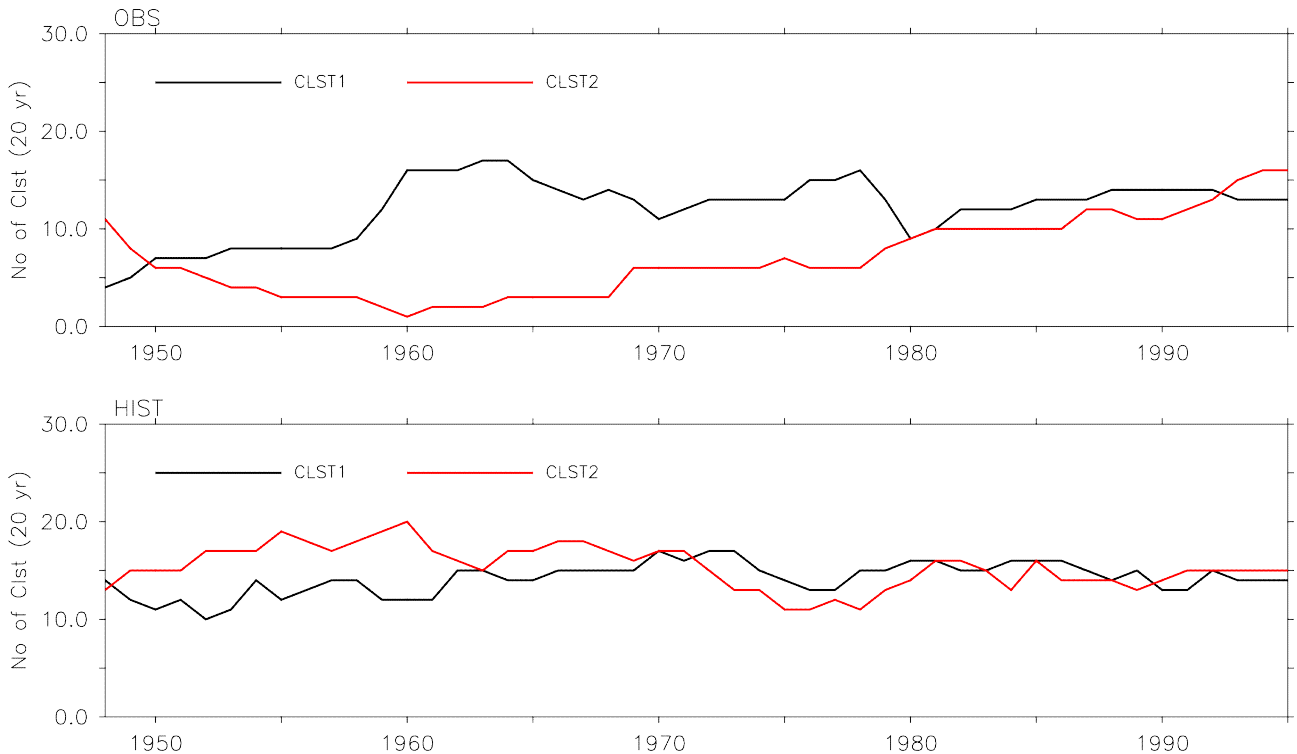


Figure 74. Number of the events in which the normalized spatial coefficients are greater than one for the first (black lines) and second (red lines) clusters over the 20-year running periods from 1948 to 2014 from (upper) reanalysis and (lower) historical simulation. The x-axis denotes the start year of the running period.

#### (나) 한반도 강수 관련 대기순환 패턴 미래 변화

현재 기후 경우에서처럼 저탄소/고탄소 시나리오에 대하여 한반도 강수 관련 대기 순환장의 정규화된 지수를 생산하였다. 그 지수가 1.0 이상일 때 전/중/후반기 20년 기간에서 합성장 분석을 수행하였으며, 그 결과를 고탄소 시나리오에 대하여 Figure 75과 저탄소 시나리오에 대하여 Figure 76에서 보여준다. 전체적인 패턴 변화는 시나리오 종류 관계없이 비슷한 특성을 보였다.

먼저 미래 기후 전반기에서 군집 1 패턴은 현재 기후에서 나타났던 패턴보다 다소 남쪽으로 이동한 형태이며 이 때문에 북풍의 찬공기와 남서풍의 고온 다습공기의 수렴지역이 한반도 남부 지역에서 형성이 되며, 중반기에는 남고북저의 패턴이 북쪽으로 이동이 되어 수렴지역 또한 북쪽으로 이동하는 것으로 전망하고 있으며, 후반기에는 남쪽의 고기압이 북쪽으로 확장되어 수렴 중심 지역이 남한 북부권역까지 이동하였다. 군집 2 패턴은 중반기에 전체적인 패턴이 상당히 북쪽으로 이동하여 (남)동풍이 만주 지역에 형성이 되어 한반도는 동풍의 영향이 적어지게 되며, 후반기에 패턴이 다시 남쪽으로 내려오게 되어 한반도에 다시 동풍의 영향을 받는 것으로 전망 되었다.

위와 같은 미래 기후에서 한반도 강수 관련 대기패턴의 변화는 재현빈도 강수량 변화가 전반기에 남한의 남쪽 권역에서 커지기 시작하여 후반기로 갈수록 북쪽 권역에서 변화량이 커지는 경향, 후반기에 동쪽 권역에서 재현빈도 강수량 변화량이 급속이 커지는 이유를 어느 정

도 설명이 가능하다.

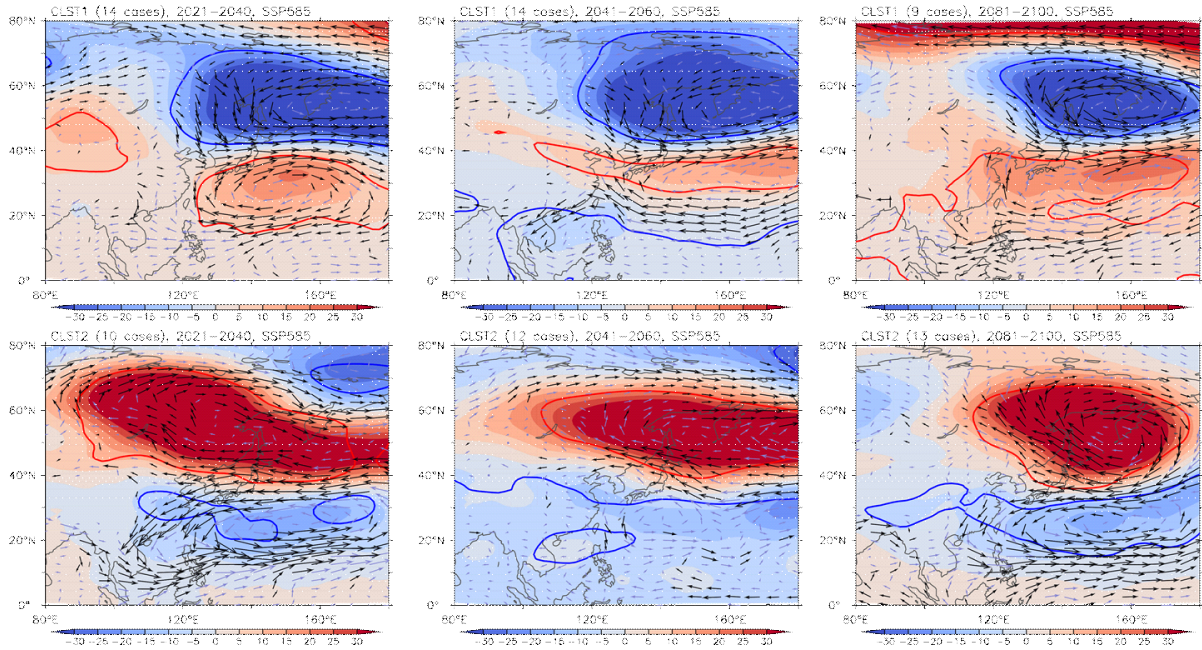


Figure 75. The spatial patterns of the (upper panel) first and (lower) second cluster of 500 hPa geopotential height and 850 hPa winds anomaly around Korean Peninsula from the SSP5-8.5 scenario simulations of UKESM over (left panels) 2021-2040, (middle) 2041-2060 and (right) 2081-2100.

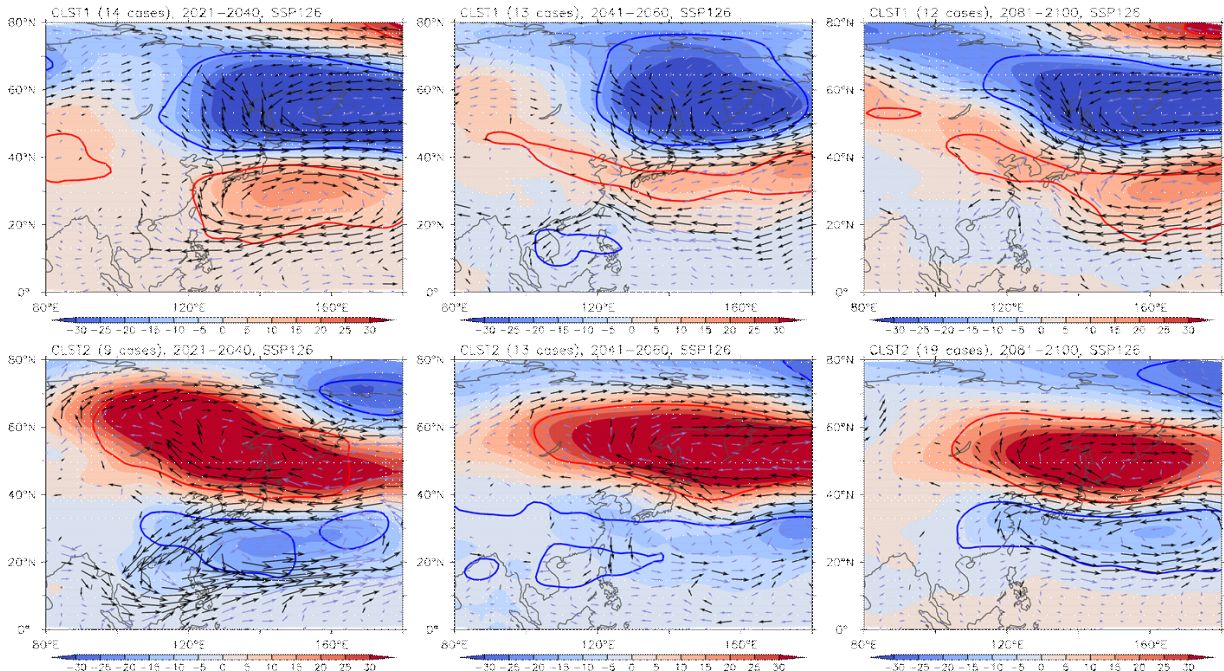


Figure 76. The spatial patterns of the (upper panel) first and (lower) second cluster of 500 hPa geopotential height and 850 hPa winds anomaly around Korean Peninsula from the SSP1-2.6 scenario simulations of UKESM over (left panels) 2021-2040, (middle) 2041-2060 and (right) 2081-2100.

## (8) 요약

이 절에서는 국립 기상과학원 한반도 상세 기후변화 시나리오를 활용하여 기상청 26개 대 권역별 미래 홍수위험도를 현재 기후 대비 재현 빈도 극한 강수량의 변화량으로서 정량화하여 분석하였다. 재현 빈도 극한 강수량은 Gumbel 분포형을 가정하여 계산하였으며, 100년 재현빈도 강수량을 기준으로 분석되었다. 고탄소 시나리오의 경우 고탄소 시나리오에서 미래 우리나라 하천 대권역에서 100년 재현 빈도 강수량은 현재 기후(187.1mm~318.4mm) 대비 21세기 전반기(2021~2040년), 중반기(2041~2160년), 후반기(2061~2100년)에 26개 대권역 평균으로 재현 빈도 극한 강수량이 21세기 전/중/후반기에 29%, 46%, 53% 각각 증가하는 것으로 전망된다. 이에 반해 저탄소 시나리오의 경우 전/중/후반기에 31%, 31%, 29% 증가하는 것으로 전망된다. 결국 저탄소 시나리오에서 전반기 이후에는 고탄소 시나리오의 극한 강수량 증가에 비해 상당히 감소할 것으로 전망되었다. 권역별로 살펴보면, 고탄소 시나리오에서 100년 재현 빈도 강수량 변화율이 50% 이상의 권역 수는 21세기 전/중/후반기에 각각 1개/7개/16개로 점차 증가하는 것으로 전망되었으며, 저탄소 시나리오에서 극한 강수량 변화율이 50% 이상인 권역의 수가 2개/3개/1개로 21세기 후반기 대부분의 권역에서 50% 이하인 것으로 분석되었다. 위와 같은 결과는 탄소 중립 정책의 효과로 지구온난화를 감소시켜서, 홍수 원인이 되는 극한 강수의 감소로 인한 홍수 발생 가능성을 낮출 수 있다는 것을 암시한다.

또한 이 연구에서는 한반도 강수 이벤트들의 군집 분석을 기반으로 하여 강수 관련 대기 순환 패턴의 미래 변화 특성 분석을 수행하였다. 먼저 현재 기후에서 한반도 여름철 강수 관련 대기 패턴 특성을 분석하기 위해서, 남한 강수가 집중되는 6~9월에 월 누적 총강수량이 0.5 표준편차 이상인 강수 이벤트를 정의하여 군집 분석을 수행하였으며, 2개의 군집으로 분류하였다. 첫 번째 군집은 한반도 남동쪽에 양의 지위고도 편차, 북동쪽에 음의 지위고도 편차가 위치하여, 북쪽의 차갑고 건조한 공기와 남쪽의 고온 다습한 공기가 우리나라에서 수렴하는 특징을 보이고, 이와 관련하여 남한 전반적으로 평년보다 많은 강수량을 보이며, 주로 수도권/강원도 및 남부 권역에 강수가 집중되는 특징을 보인다. 두 번째 군집은 오호츠크해 주변에 양의 지위고도 편차가 위치하고 한반도 주변으로 음의 지위고도 편차가 위치하여, 남동풍 편차의 영향을 받는 구조이고, 한반도 남서쪽 권역에 강수가 집중되는 특징을 보인다. 2개의 군집에 대하여 수행된 해수면 온도 편차와 OLR 편차에 대한 합성장 분석은 NAO, 인도양 및 필리핀해 해수면 온도편차, 필리핀해 대류 활동, 열대 서태평양에서 해수면 온도 편차 및 대류 활동 등이 한반도 강수 관련 대기순환을 감시/예측할 수 있는 인자로 활용될 수 있음을 보여주었다.

다음은 현재 기후에서 분류된 강수 관련 대기 패턴을 기반으로 미래 기후에서 변화 특성을 분석하였는데, 먼저 미래 기후 전반기에서 첫 번째 군집 패턴은 현재 기후에서 나타났던 패턴보다 다소 남쪽으로 이동하여, 북풍의 찬공기와 남서풍의 고온 다습공기의 수렴지역이 한반도 남부 지역에서 형성되며, 중반기를 거쳐 후반기로 갈수록 남쪽의 고기압이 북쪽으로 확장되어 수렴 중심 지역이 남한 북부권역까지 이동하였다. 두 번째 군집 패턴은 중반기에 전체적인 패턴이 상당히 북쪽으로 이동하여 한반도는 동풍의 영향이 적어지게 되며, 후반기에 패턴이 다시 남쪽으로 내려오게 되어 한반도에 다시 동풍의 영향을 받는 것으로 전망되었다. 위와 같은 미래 기후에서 한반도 강수 관련 대기 패턴의 변화는 재현 빈도 강수량 변화가 전반기에 남한의 남쪽 권역에서 커지기 시작하여 후반기로 갈수록 북쪽 권역에서 변화량이 커지는 경향, 후

반기에 동쪽 권역에서 재현 빈도 강수량 변화량이 급속이 커지는 이유를 부분적으로 설명할 수 있다.

## 나. 한반도 태풍 변화 전망

### (1) 연구배경

기후변화 시나리오 온실가스 농도 증가에 관한 미래 기후 전망 연구는 다양한 분야에 대해 진행되고 있으며, 그중에서도 재난 피해 규모가 과거에 비해 매우 증가하고 있는 태풍의 미래 전망에 대해 최근 관심이 급증하고 있다. 특히 최근 한반도에 상륙하는 영향 태풍의 빈도가 증가하고 강도 또한 더욱 강해지고 있다. 과거 관측자료 분석 결과에 따르면, 우리나라 영향 태풍은 연평균 약 3개이며, 0.9개/100년의 증가추세를 보이고 있다. 또한 한반도 포함 동아시아에 태풍으로 인한 강수 빈도도 증가하였다. 이러한 결과는 인간 활동에 따른 지구온난화의 영향으로 규명되었다. 태풍은 사회적으로나 경제적으로 매우 큰 영향을 끼칠 뿐만 아니라, 수많은 인명피해까지 초래하기 때문에, 매년 발생하는 태풍의 개수, 강도 및 진로까지 더욱 정확하게 예측할 필요가 있다. 태풍의 미래 전망을 분석하기 위해서는 먼저 이와 관련된 환경 요인을 분석하고, 기후변화 시나리오에서는 이러한 환경 요인들이 어떻게 변하는지 살펴볼 필요가 있다.

태풍은 발생과 발달 과정에서 해수온이나 다양한 변수의 영향을 크게 받으므로, 이러한 각 요소의 변화는 태풍의 발생뿐만 아니라 특성 변화에 큰 영향을 줄 수 있다. 기후변화로 인해 다양한 기상현상의 특성이 변화하고 있으며, 태풍도 마찬가지로 발생 빈도나 강도, 규모 등이 최근에 크게 변화하고 있을 뿐 아니라, 피해 규모 또한 증가하는 경향을 보인다. (박종길 등, 2005)

Bister(2002)는 태풍의 잠재적 강도(Potential Intensity, PI)를 제시하였고, Emanuel(2004)은 태풍과 관련한 잠재 발생 지수(Genesis Potential Index, GPI)를 제시하였다. GPI는 태풍의 잠재적 강도와 850hPa 절대와도, 850-200hPa 연직 바람 시어, 700hPa 상대습도 자료를 이용하여 계산이 가능하고, 태풍 발생을 정량적으로 나타낼 수 있는 예측 지수이다.

이 연구에서는 전지구 모형 자료를 이용하여 북서태평양 지역에서의 태풍 잠재 발생 지수와 태풍 발생에 기여하는 환경 요인들을 분석하였다. 기후변화 시나리오 중 저탄소 및 고탄소 시나리오에서의 미래 변화 전망 분석으로 실시하였다. 또한 동아시아 고해상도 상세기후 모델 5가지를 이용하여 북서태평양 지역에서 발생하는 태풍을 감지 및 트래킹하면서, 한반도 인근 지역 영향권에 들었을 때의 태풍의 특성에 관해 분석을 실시하였다.

### (2) 자료와 방법

#### (가) 전지구 모형

이 연구에 사용된 자료는 CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)에서 제공하는 전지구 모형 중 K-ACE, UKESM 2개 모형의 월자료이다. 각 모형은 위도  $1.25^{\circ} \times$  경도  $1.875^{\circ}$  의 수평 해상도를 가지며, 과거부터 현재까지 모의한 현재기간 Historical period은 2014년까지의 자료를 사용하였고, 미래 기후 전망을 위한 온실가스 경로인 SSP (Shared

Socioeconomic Pathways) 기후변화 시나리오 중 저탄소 시나리오 SSP126(1-2.6), SSP585(5-8.5) 자료는 2015년~2100년까지의 월자료를 사용하였다.

여기서 SSP1-2.6 시나리오는 화석 연료의 사용을 최소화하고, 획기적으로 탄소 배출량을 감축하는 저탄소 시나리오이며, SSP5-8.5 시나리오는 현재와 유사하거나 좀 더 높은 탄소를 지속적으로 배출하는 고탄소 시나리오를 뜻한다.

#### (나) 동아시아 고해상도 상세 기후 모형

CMIP6 온실가스 경로인 SSP를 기반으로 하여, 동아시아 지역에 대한 25km 고해상도 상세 기후 모형인 CORDEX(COordinated Regional climate Downscaling Experiment)-EA(East Asia, 동아시아) 2단계 프로젝트로부터 생산된 5개의 지역 기후 모델들(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs)의 시간 자료를 이용하였다. CORDEX는 세계 기후 연구 프로그램(World Climate Research Programme, WCRP)에서 추진하고 있는 기후변화 영향평가 및 적응에 활용가능한 고해상도 지역 기후변화 전망 자료를 산출하기 위해 만들어진 국제사업이며, 동일한 지역에 대해 각국의 여러 참여기관들이 고유의 지역기후모델을 이용해서 생산하고 있다. CORDEX-EA는 동아시아 영역에 대해 연구하고, 국내의 여러 대학들이 참여하여 동아시아 고해상도 상세 기후 모형을 제공하고 있다. 6시간 자료를 이용함으로써, 태풍의 경로를 추출하고, 추출 결과를 이용하여 태풍 발생 밀도(Genesis density) 및 진로 밀도(Track density)를 계산하였다.

Table 15는 CORDEX-EA의 각 모형의 태풍 모의 특성을 고려하여, 최적의 태풍 개수를 추출하기 위한 임계치를 나타내고 있다. HadGEM3-RA 모형의 임계치는 RegCM, WRF 모형과 동일하다.

Table 15. Model configurations and Thresholds for tracking TCs of 5RCMs in CORDEX-EA.

• Model configuration				
	RegCM	GRIMs	WRF	CCLM
Horizontal Resolution	25km Horizontal Resolution			
Vertical Layers	23 sigma	28 sigma	30 eta	40 hybrid
Microphysics	SUBEX	WSM 1	WSM3	Seifert and Beheng
Cumulus Parameterization	Emanuel	SAS	BMJ	Tiedtke
Radiation	CCM3	Chou et al	CAM	Ritter and Geleyn
Planetary Boundary Layer	Holtslag	YSU	YSU	Davies and Turner
Land Surface	CLM4.5	Noah	Noah	TERRA ML
Spectral Nudging	Yes			
Initial & Boundary data	UKESM			
Simulation Period	Historical : 1979-2014 / Future (SSP126, SSP585) : 2015-2100			
Analysis Period	Historical : 1979-2014 / Near (Far) Future : 2015-2050 (2065-2100)			
• Thresholds for tracking TCs				
	RegCM	GRIMs	WRF	CCLM
Wind speed ( $m s^{-1}$ )	14	17	14	16
Vorticity ( $10^{-6} s^{-1}$ )	6.0	7.0	6.0	7.0
Temperature (K)	1.0	1.6	1.0	2.0

- **Best track data**
  - Regional Specialized Meteorological Center (RSMC)
- **Reanalysis data**
  - ERA-Interim
- **Method**
  - Multi-Model Ensemble

• HadGEM3-RA 모형은 RegCM, WRF와 임계치가 같음.

### (다) 태풍 잠재 발생 지수

$$GPI' = |10^5 \eta|^{\frac{3}{2}} \left(\frac{RH}{50}\right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^3 (1 + 0.1 V_s)^{-2} \left(\frac{-\omega + 0.1}{0.1}\right) \quad (6)$$

태풍을 포함한 열대 저기압이 형성될 가능성을 예측하는 데 사용하는 수치인 태풍 활동 지수 GPI는 해수면 온도, 연직 바람 시어, 대기 불안정성 등 열대성 저기압의 형성과 관련되어 있는 요인들을 이용하여 계산할 수 있다. 일반적으로 정해진 지역 내에서 태풍이 형성될 가능성을 예측하고, 잠재 경로 및 강도에 대해 더욱 정확한 예측을 하기 위해 사용되는 지수이다. 이 연구에서 사용한 수정된 GPI 지수인 GPI' 는 열대 저기압의 형성과 관련하여 수직 운동의 효과를 고려하여 계산되는 지수이다. (Murakami and Wang 2010)

가장 최근에 공개된 CMIP6의 기후모델의 경우, 대부분의 CMIP6 모형들의 수평해상도가 100km 이상의 저해상도 모형이기 때문에, 이 규모보다 더 작은 규모에서 발생하는 열대저기압 소용돌이를 추출하기는 쉽지 않다. 이 연구에서는 CMIP6 전지구 기후모델 자료를 이용하여, 대규모 대기 및 해양 변수의 함수로 이루어져 있는 수정된 GPI 함수인 GPI' (이하 GPI)를 이용하여, GPI 변동성에 대해서 살펴보고 SSP 시나리오별 미래 전망의 변화, 그리고 근미래와 먼미래 기간을 이용하여 기간별 미래 전망의 변화를 살펴보고자 한다.

(라) 한반도 영향 지역 설정

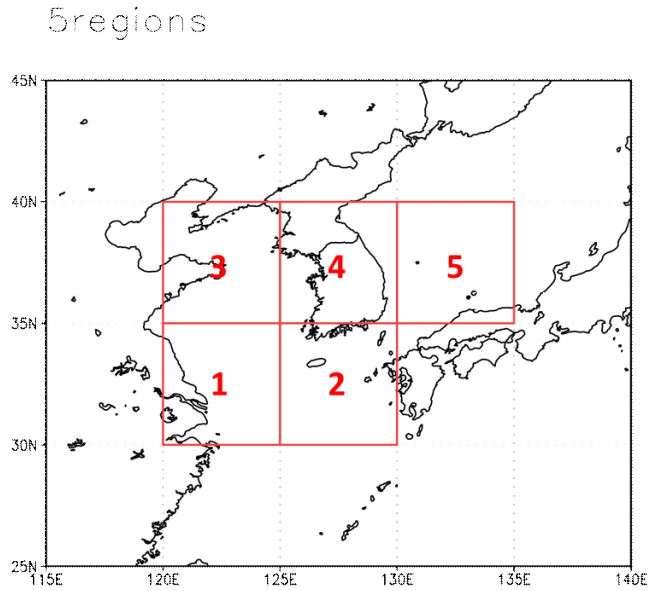


Figure 77 5 regions for typhoons affecting the Korean Peninsula. Size of each region is  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ .

한반도에 영향을 미치는 태풍에 대해서 정의를 하기 위해서 기상청에서는 피해 정도와 영향 범위 등을 고려하고 정하고 있는데, 태풍백서(1986)에서는 적도 전선 부근에서 발생한 태풍이 점차 북상하여 북위 32-40, 동경 120~138 지역 내에 도달하였을 때, 한반도에 영향을 끼친 태풍이라고 정의를 하였다. 하지만 이 영역 내에 태풍이 들어왔더라도, 한반도에 피해 없이 지나가면 영향을 주지 않은 것으로 하며, 영역에 들어오지 않았지만 피해를 준 경우에는 영향을 주었다고 하기 때문에, 더욱 명확한 기준을 마련해야 할 필요가 있다. 이동규 등(1992)는 한반도에 영향을 미친 태풍을 정의할 때, 북위 25를 지나면서 동경 110~140 사이를 통과하는 태풍 중, 7~9월에 한반도에 상륙하거나, 동해, 서해, 남해 지역을 지난 태풍으로 정의하고 있다. 이러한 정의 방법은 명확하고 쉽긴 하지만, 북위 25 이상의 지역에서 발생하는 태풍 또는 이상 진로를 가진 태풍의 경우 영향 태풍으로 분류할 수 없다는 단점이 있으며, 최근에는 10월에도 꾸준히 태풍이 발생하는 경향이 있어, 최신 연구에 적용하는 데에는 큰 어려움이 있어 보인다. 박종길(1992)은 북태평양 서부 해상에서 발생한 태풍이 한반도에 직접 상륙하거나, 중국, 일본을 거쳐 우리나라에 영향을 준 태풍으로 정의를 하고 있는데, 연속적으로 두 달에 걸쳐 영향을 줄 때에는 1개의 태풍으로 간주한다고 정의하고 있다. 이 또한 명확한 기준이 빠져있어 분류하는 데에 어려움이 있어 보인다. 이 외에도 다양한 선행연구들에서 각자의 정의를 사용하고 있으며, Kim et al. (2006)에서는 한반도 중심 지역(동경 128, 북위 36)으로부터 반경 5도 이내를 통과하는 경우를 한반도 영향 태풍으로 정의하였다.

이 연구에서는 그리드 자료를 사용하고 있기 때문에 Kim et al.(2006)에서의 기준을 유사하게 적용하여, 한반도 내륙 지역을 중심으로 하여 한반도 인근 영항 지역 5곳을 선정하였다. 각 지역의 격자 크기는  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  이며, 1 지역과 2 지역은 북위  $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$  에 위치하고, 3~5 지역은 북위  $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$  로 비교적 중위도에 위치해있다. (Figure 77)

먼저 동아시아 고해상도 상세 기후 모형을 이용하여 북서태평양에서 발생하는 태풍을 감지하고, 북서태평양에서 발생하여 감지된 태풍의 트랙을 추적하여, 한반도 인근 지역 1~5지역 내에 들어오는 태풍에 대해 태풍 진로 밀도 및 발생 밀도, 중심 기압 등을 계산하였다.

### (3) 전지구 모형 분석

#### (가) 태풍 활동 지수 (GPI) 변화

먼저 CMIP6 전지구 모형인 K-ACE 모형과 UKESM 모형을 이용하여, 북서태평양 지역에서의 태풍 활동 지수 GPI를 두 가지 SSP 시나리오(SSP126, SSP585)에 대해 계산하여, 현재 기간과 비교를 실시하였다. Figure 78~79는 K-ACE, UKESM을 이용하여 근미래 및 먼미래 기간의 저탄소, 고탄소 시나리오에서의 GPI 공간 분포를 나타낸 것이다. 현재 기간 평균과 비교해 보았을 때, 비교적 공간적인 주요 특징을 미래 기간에도 잘 모의하고 있는 것을 알 수 있다. 계절은 북반구 태풍 계절인 7~11월(JASON)이며, 과거 Historical 기간은 1979년~2014년, 미래 전망을 위해 사용된 미래 전체 기간은 2015년~2100년이며, 근미래는 2025년~2054년, 먼미래는 2071년~2100년으로 설정하였다.

K-ACE 모형과 UKESM 모형에서 모두 저탄소 시나리오 및 고탄소 시나리오에서 모두 현재와 비슷하게 공간적인 특성을 모의하고 있는 것을 알 수 있다.

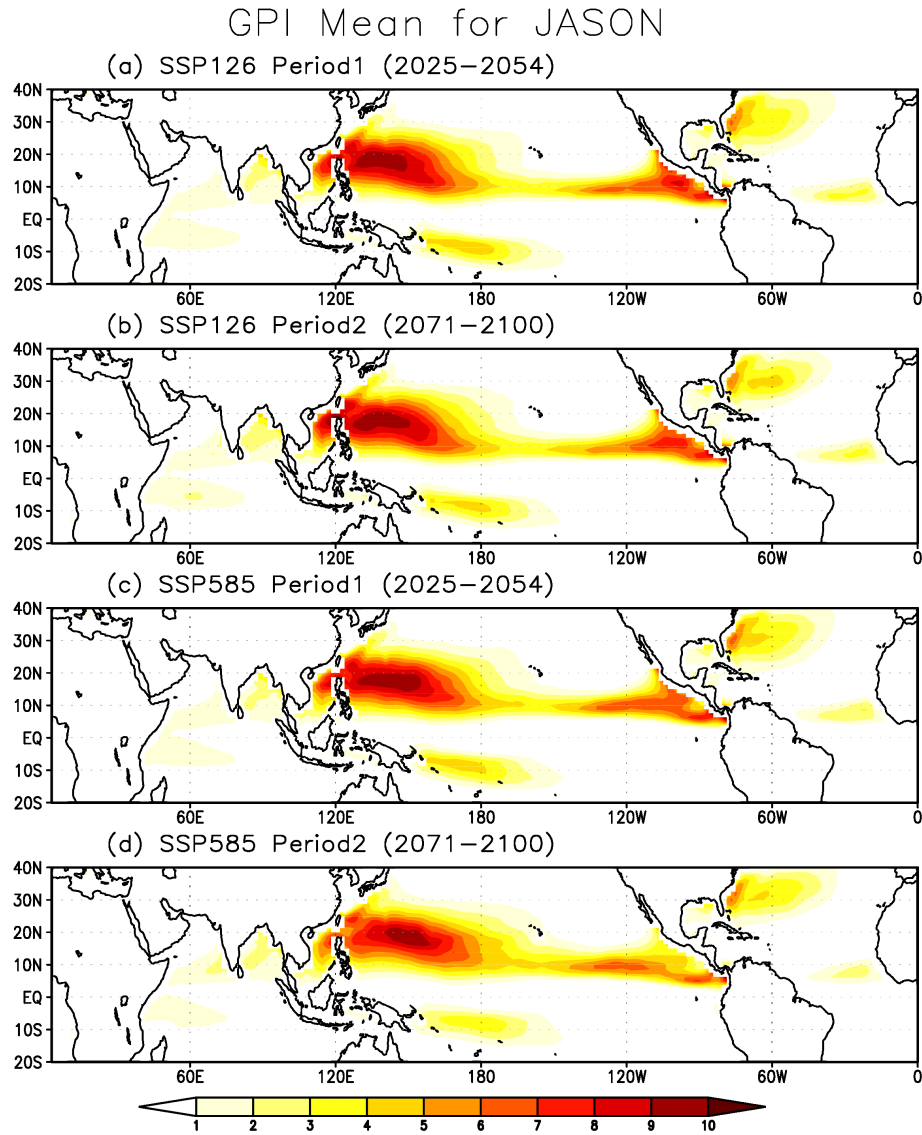


Figure 78. Spatial distribution of GPI mean pattern in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025-2054) and (b), (d) distant-Future (2071-2100) in K-ACE model.

## GPI Mean for JASON

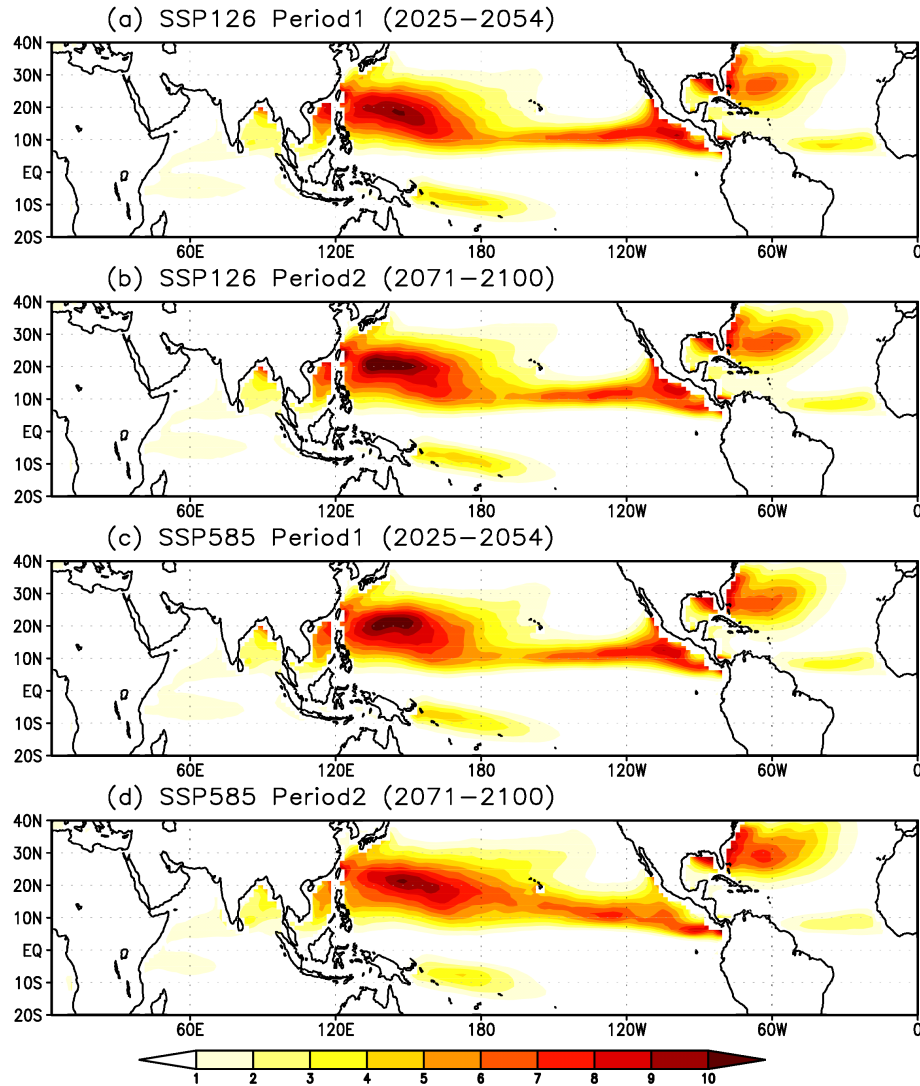


Figure 79. Same figure as in Figure 78 but for UKESM model.

시나리오 별로 편차를 공간적으로 비교 해 보기 위해 현재 모의 값과 미래 기후 전망 결과의 공간 분포를 비교하였다(Figure 80, 81). Historical 기간 동안의 태풍 발생 지수 GPI 평균 값은 실선으로 나타내었다. 또한 과거 기간 대비 미래 전망 편차 값을 색상으로 나타내고 있는데, 저탄소 시나리오 SSP126과 고탄소 시나리오 SSP585에서의 편차를 비교 해 보면, K-ACE 모형(Figure 80)의 저탄소 시나리오에서는 과거 기간과 비교하여 GPI 위치가 비슷하며, 중심을 기준으로 값이 조금 더 높아진 것을 알 수 있다. 반면 UKESM 모형(Figure 81)에서는 K-ACE 모형과 비교했을 때, 저탄소 시나리오에서도 과거 대비 중심값이 더욱 북상해 있으며, 고탄소 시나리오에서는 그 변화가 더욱 뚜렷함을 알 수 있다.

두 가지 시나리오에 따른 태풍 발생 지수 GPI의 공간적 변화를 한눈에 비교하기 위해, 중심 값에 가까운 7을 기준으로 하여, 과거 Historical 기간 대비 어떻게 변하는지 간단히 나타내었다. K-ACE 모형의 경우, 과거 기간에 모의했던 것보다 미래 기간에서 더욱 폭넓게 모의하고

있는 특징을 보인다. 저탄소 시나리오 SSP126의 경우, Historical 기간에 비해 동서남북 모든 방향으로 GPI가 확장하는 특징을 보이고, 고탄소 시나리오 SSP585의 경우 조금 더 북서쪽으로 치우치면서 확장하는 특징을 보이고 있다. 이러한 특징은 UKESM에서도 유사하게 나타나고 있는데, K-ACE에 비해 UKESM 모형에서는 저탄소 시나리오 SSP126과 고탄소 시나리오 SSP585에서 모두 Historical 기간 대비 북서쪽 방향으로 확장하고 이동하는 특징을 보인다. (Figure 82, 83)

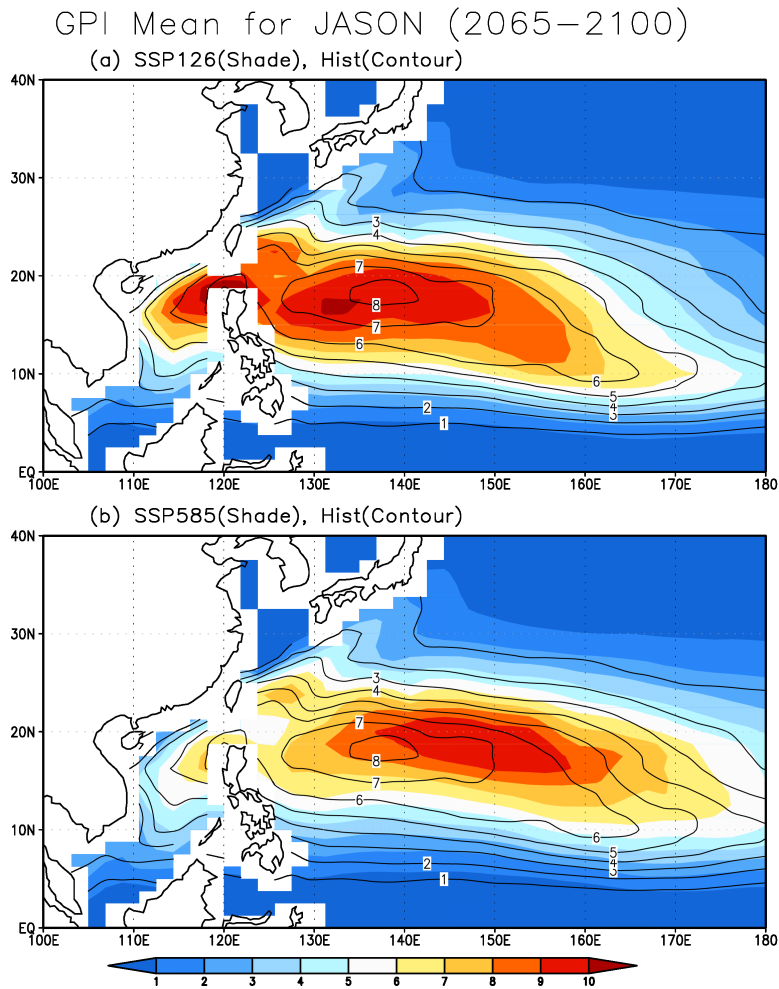


Figure 80. GPI difference pattern for JASON in (a) SSP126 and (b) SSP585 scenario in K-ACE model during period of 2065-2100.

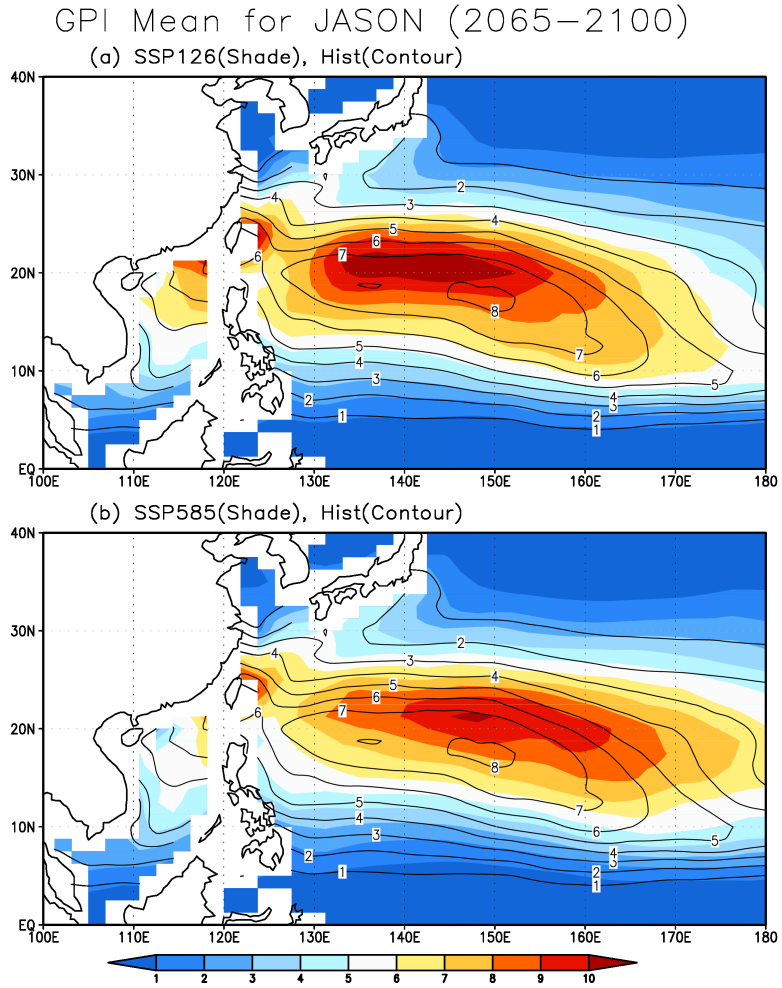


Figure 81. Same figure as in Figure 80 but for UKESM model.

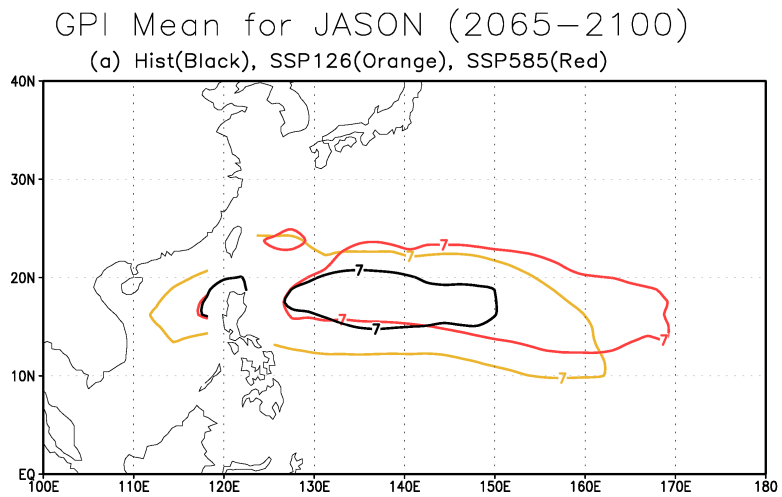


Figure 82. Constant 7 line of GPI for JASON in Historical(Black), SSP126(Orange) and SSP585(Red) scenarios in K-ACE model during period of 2065–2100.

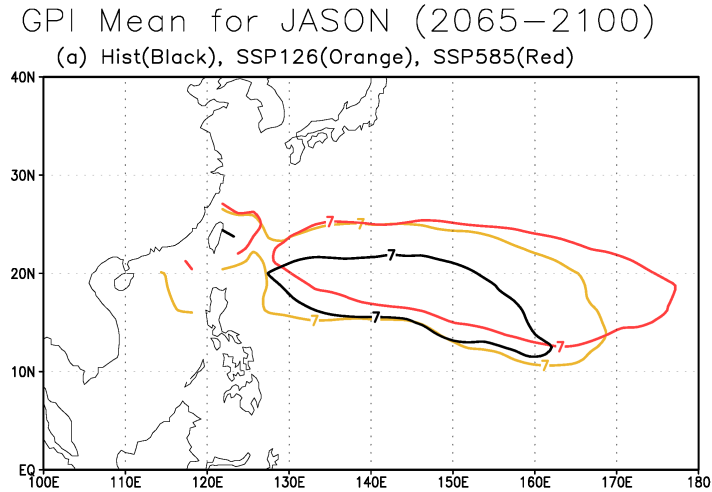


Figure 83. Same figure as in Figure 82 but for UKESM model.

미래 기간 동안의 GPI의 공간적인 특성 변화를 분석하기 위해 근미래(2025~2054)와 먼미래(2071~2100) 기간에 대해서 과거 대비 SSP126과 SSP585 시나리오에서의 편차를 850hPa 동서 바람(u) 및 남북바람(v)과 함께 나타내었다.

근미래와 먼미래 기간, 그리고 두 시나리오에서 모두 과거 기간 대비 북서태평양에서의 GPI가 기존 위치보다 더욱 북쪽에서 증가하는 편차를 보이고 있다. 특히, Figure 4(d), 5(d)에서 K-ACE와 UKESM 두 모형 모두 SSP585 시나리오 먼미래 기간에서는 중위도에서의 GPI가 증가하고, 열대지역에서의 GPI가 감소하는 패턴이 매우 뚜렷하게 나타남으로써, 고탄소 시나리오일수록, 그리고 먼 미래 기간일수록 태풍 발생이 열대지역에서 감소하고, 중위도 지역에서는 증가하는 것을 알 수 있다.

850hPa에서의 하층 바람 패턴을 보면, 과거 기간 보다 더욱 동풍이 우세해지는 특징을 보이며, 특히 그 편차는 SSP585 시나리오 먼미래 기간에서 가장 뚜렷하게 보인다. K-ACE 모형과 UKESM 모형에서 모두 고탄소 시나리오 SSP585의 먼미래 기간에서의 변화가 가장 크게 나타난다. 과거 기간 대비 먼미래 변화는 K-ACE 모형보다는 UKESM에서 더욱 강하게 나타났으며, 북서태평양 뿐만 아니라 북대서양에서의 GPI 증가 또한 강하게 모의하는 특징을 보인다.

# GPI Difference for JASON

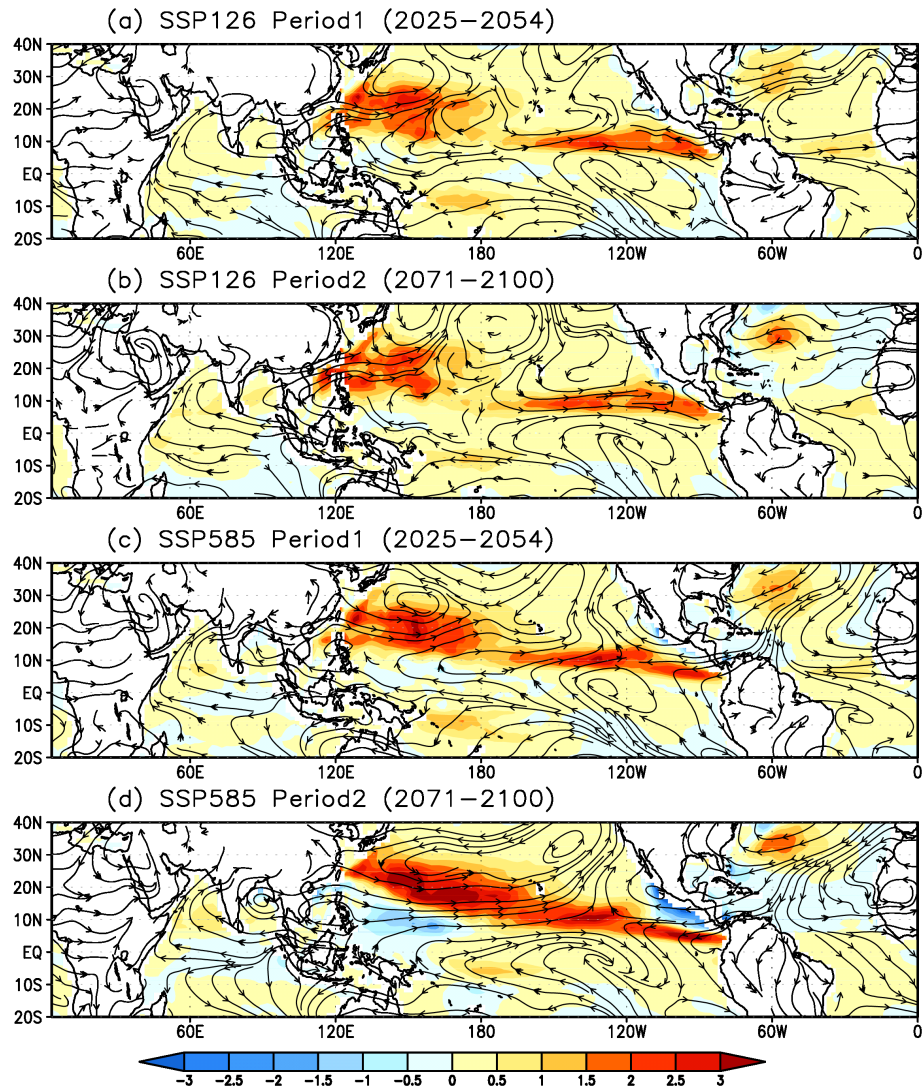


Figure 84. GPI change in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025-2054) and (b), (d) distant-Future (2071-2100) in K-ACE model. (shaded : GPI, vector : 850hPa wind)

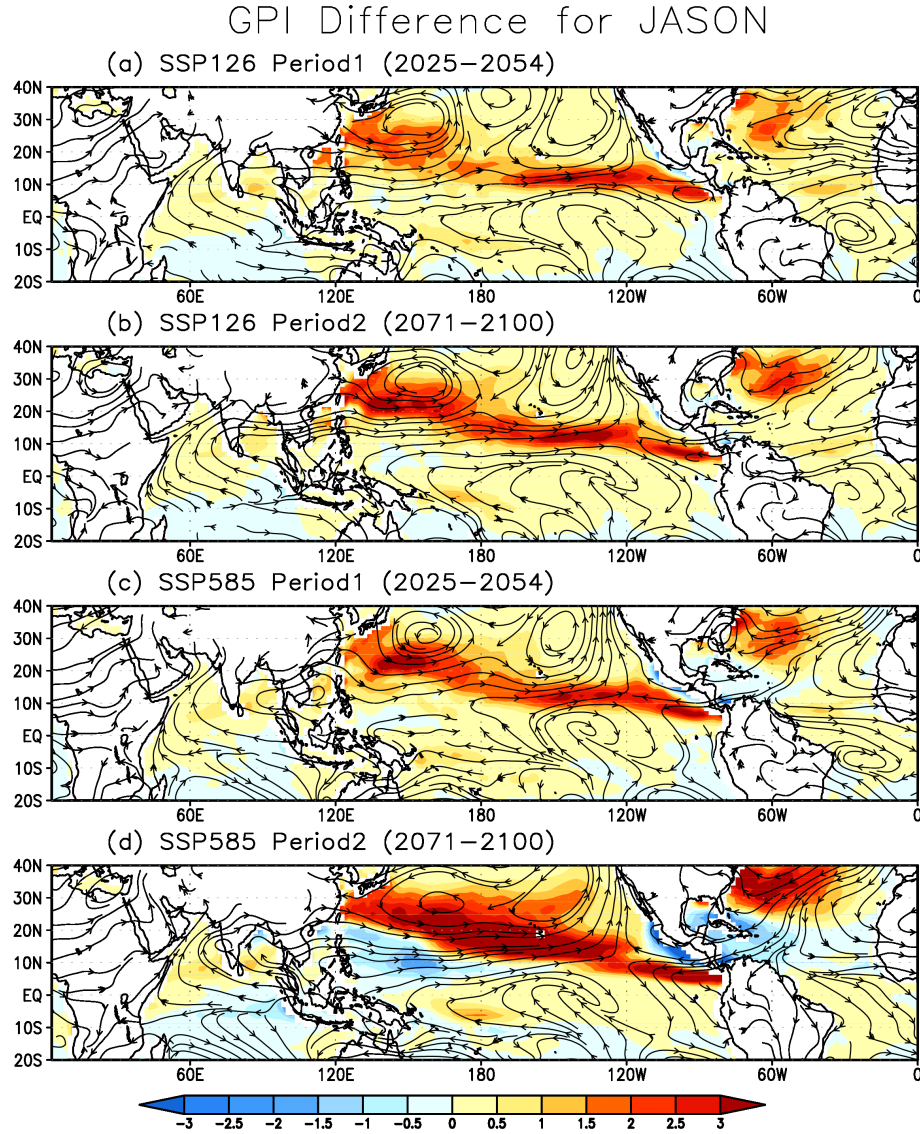


Figure 85. Same figure as in Figure 4 but for UKESM model.

Figure 84와 85에서는 과거 기간 대비 미래 기간에 얼마나 증가하는지 각 모형별 GPI 및 바람장 변화를 볼 수 있다면, Figure 86와 87에서는 근미래와 먼미래 간의 차이, 그리고 저탄소와 고탄소 두 시나리오 간 전망 차이를 살펴볼 수 있다.

Figure 86에서는 K-ACE 모형이 모의하는 GPI 지수 미래 변화의 특징을 나타낸다. 저탄소 시나리오 SSP126에서는 근미래와 먼미래 차이가 뚜렷하지 않고(Figure 86a), 고탄소 시나리오 SS585에서는 근미래보다 먼미래에서 중위도 GPI 증가, 열대 GPI 감소가 뚜렷하게 나타난다. (Figure 86b)

근미래 기간인 Period1(2025-2054) 기간 동안 저탄소와 고탄소 시나리오를 비교 해 보면, 중태평양에서 GPI 변화가 약간 나타나지만, 차이가 미미한 수준이며 (Figure 87c), 먼미래 기간인 Period2(2071-2100) 기간 동안에는 고탄소 SSP585 시나리오에서 저탄소 SSP126 대비 증가가

더욱 뚜렷함을 알 수 있다. (Figure 87d)

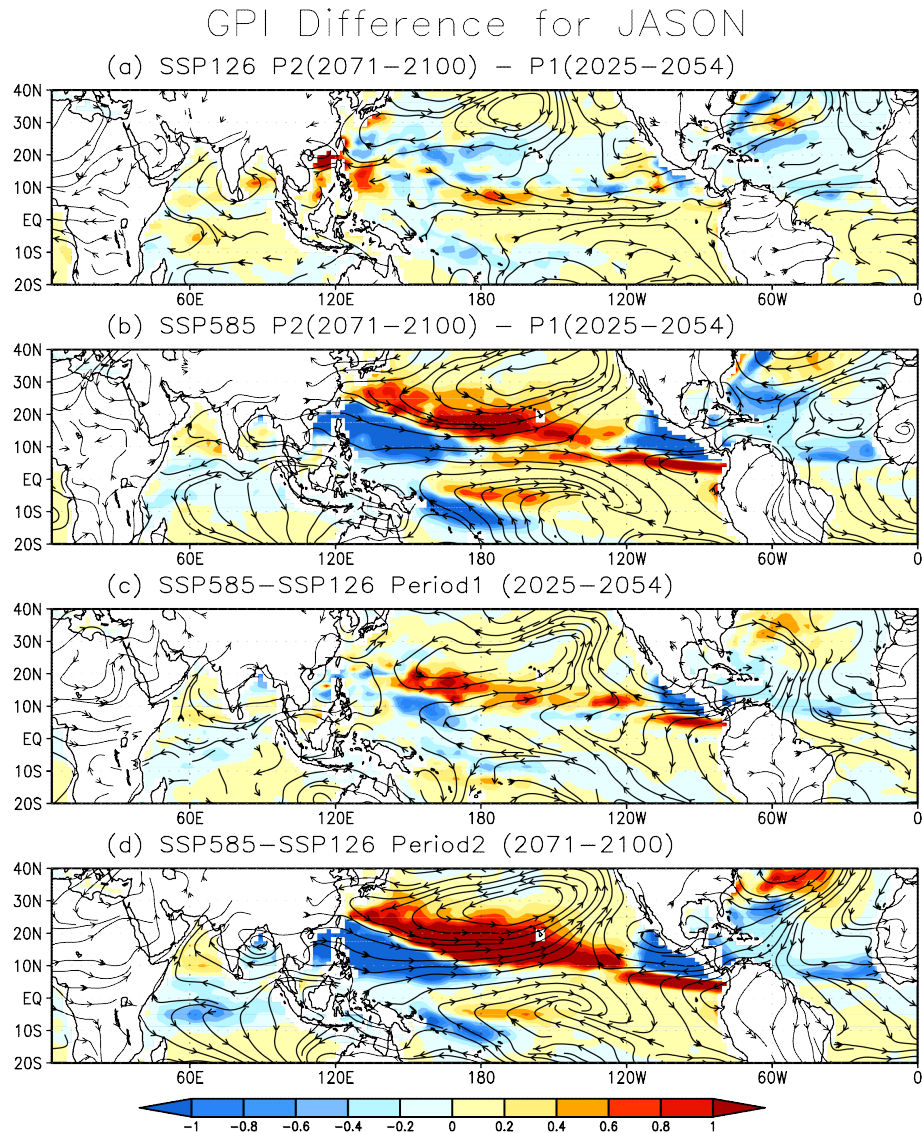


Figure 86. GPI difference between Period1 and Period2 for (a) SSP126, (b) SSP585 scenario for JASON in K-ACE model. GPI difference between two scenarios during (c) Period1 and (d) Period2 for JASON in K-ACE model. (shaded : GPI, vector : 850hPa wind)

모형별로 모의하는 GPI 특성이 다르기 때문에, K-ACE 모형보다 UKESM에서의 편차가 더욱 강한 특징을 Figure 87에서 볼 수 있다. 특히 고탄소 시나리오에서의 미래 변화 (Figure 87b)와 먼미래 기간 동안의 두 시나리오간 차이 (Figure 87d) 모두 K-ACE 모형에 비해 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

특히 양의 편차 패턴을 보면, K-ACE 모형에 비해 UKESM 모형에서 적도 태평양과 서쪽

일부 지역을 제외하고는, 북태평양 전 지역에 대해 강한 증가를 나타낸다. 태평양 지역 뿐만 아니라 대서양에서도 그 변화 시그널이 매우 크게 나타나고 있어, UKESM 모형의 고탄소 시나리오에서는 먼미래 기간에는 전지구적으로 열대저기압의 발생이 크게 달라질 것이라고 전망하고 있음을 알 수 있다.

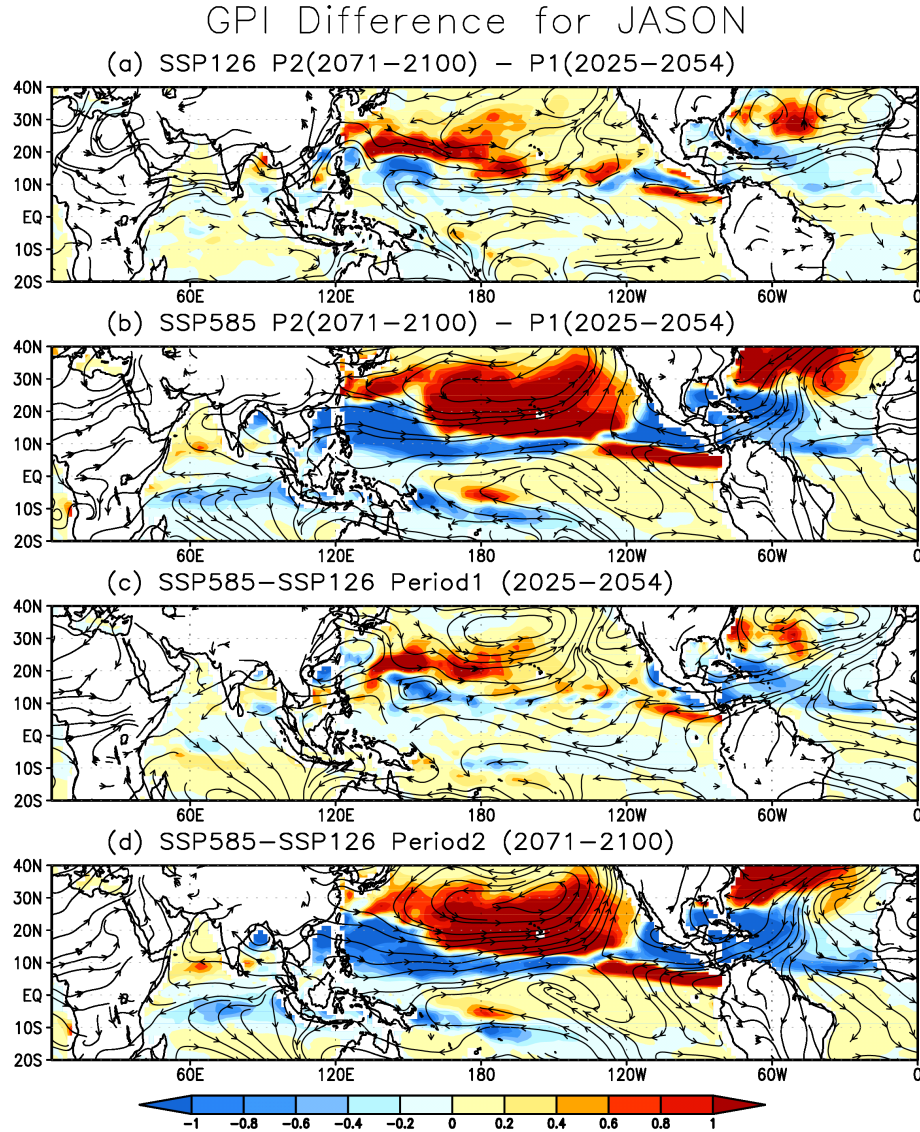


Figure 87. Same figure as in Figure 86 but for UKESM model.

#### (나) PI와 해수면 온도

해수면 온도가 가장 크게 기여하는 PI(Potential Intensity)의 시나리오별, 기간별 모의 패턴을 두 모형에 대해 살펴보았다. 먼저 북반구 태풍 계절인 JASON에 대해서 K-ACE 및 UKESM 모형의 PI 모의 특성을 공간적으로 비교할 수 있다.

Figure 88, 89에서는 K-ACE 모형과 UKESM 모형이 각각 모의하는 북반구 태풍 계절일 때의 PI 평균의 공간적 특징을 보여주고 있다. 잠재 지수인 PI는 두 모형에서 모두 관측과 유사하게 공간장을 모의하고 있는 특징을 알 수 있다. 또한 Figure 90, 91에서는 Historical 기간 대비 변화의 공간적인 특징을 살펴볼 수 있다. 전체적으로 태평양, 인도양, 대서양에서 모두 PI 지수가 증가하는 특징을 볼 수 있으며, SSP585 먼미래에서는 아주 증가가 뚜렷하게 나타났다. K-ACE, UKESM 두 모형 모두 지역별로 약간의 차이는 있지만, 대체적으로 동일한 경과를 보인다.

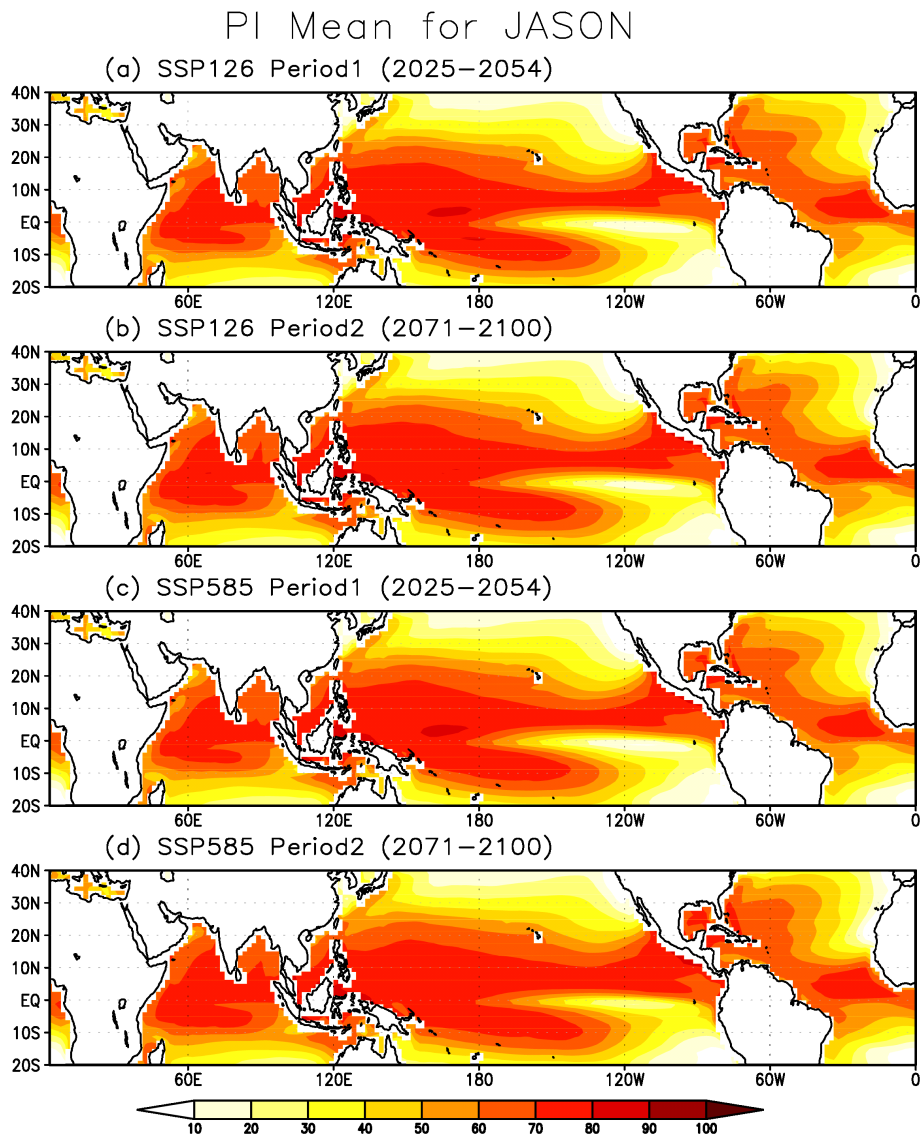


Figure 88. Spatial distribution of PI mean pattern in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025-2054) and (b), (d) distant-Future (2071-2100) in K-ACE model.

# PI Mean for JASON

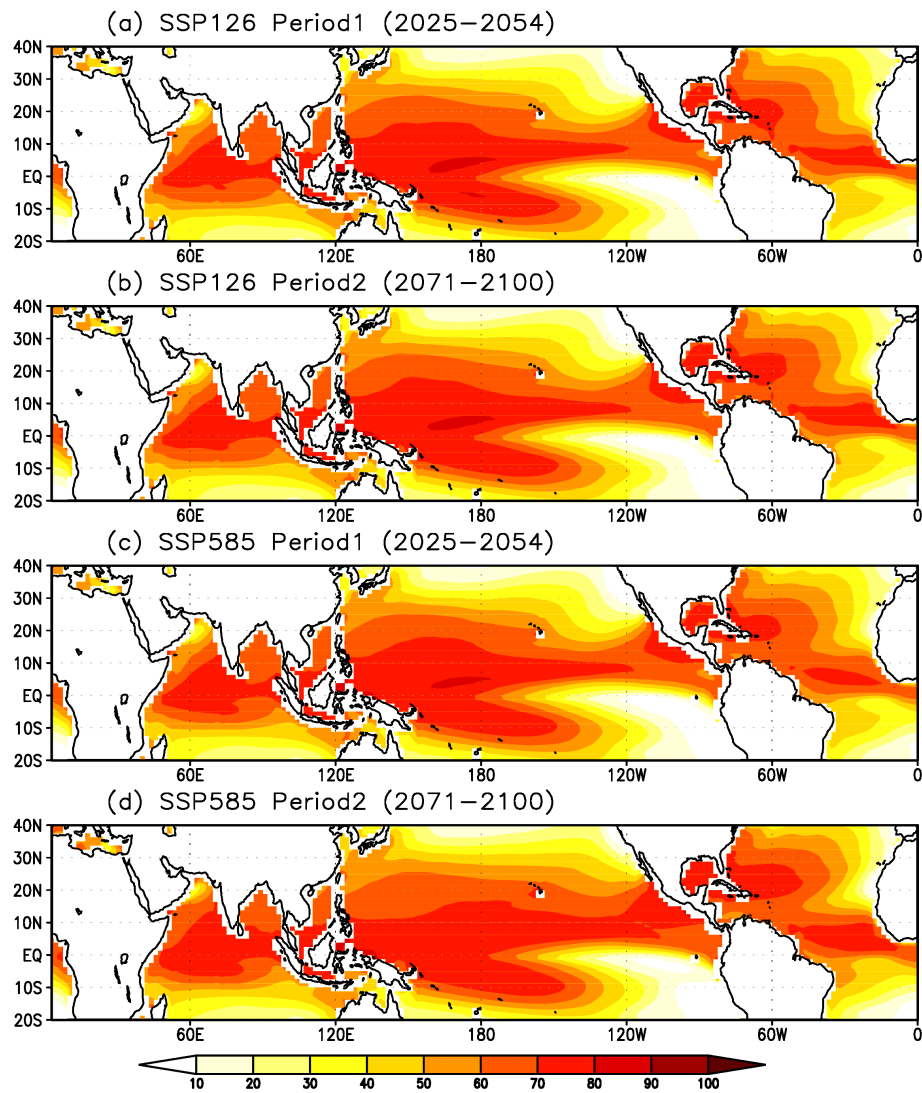


Figure 89. Same figure as in Figure 88 but for UKESM model.

# PI Difference for JASON

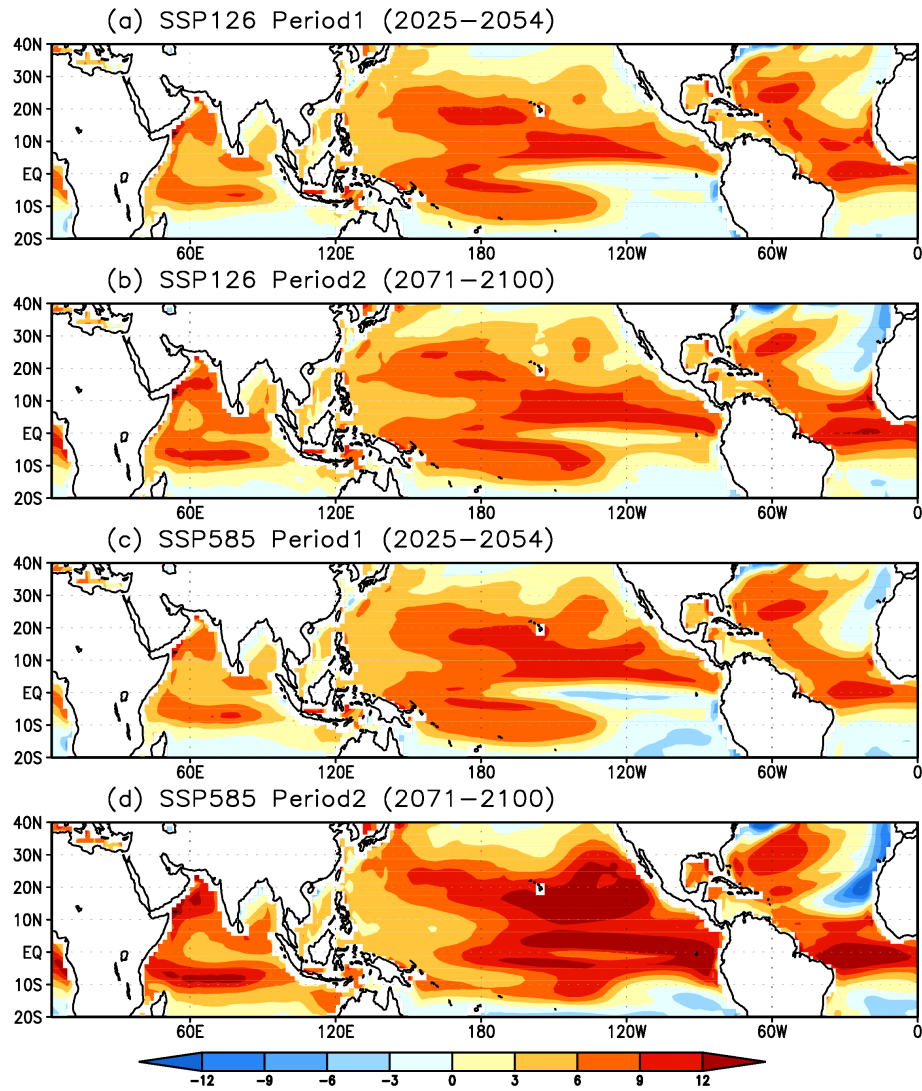


Figure 90. Spatial distribution of PI difference pattern in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025–2054) and (b), (d) distant-Future (2071–2100) in K-ACE model.

## PI Difference for JASON

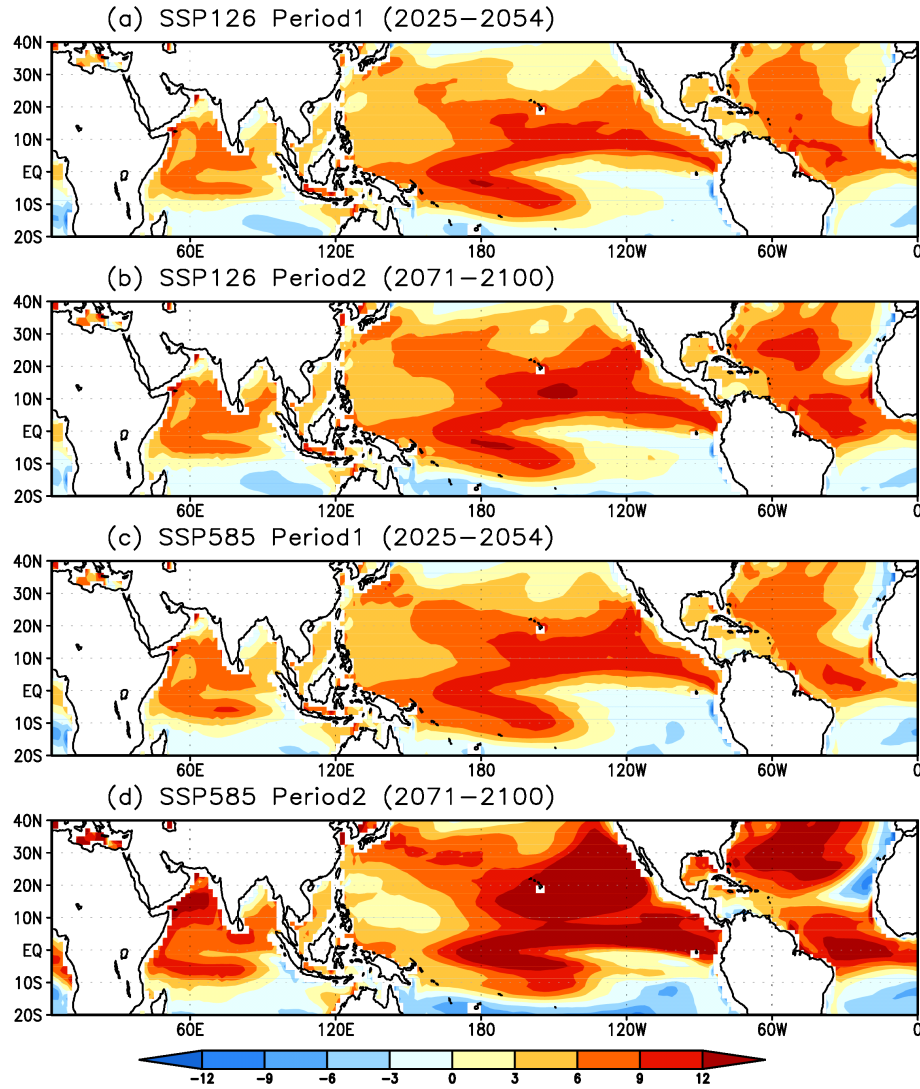


Figure 91. Same figure as in Figure 90 but for UKESM model.

현재 태풍 발생을 정의할 때 사용되는 해수면 온도는 26.5도이다. 지속적으로 상승하고 있는 해수면 온도의 변화를 더욱 한 눈에 쉽게 보기 위해서 해수면 온도 26.5 선을 Historical 기간, SSP126, SSP585 기간에 대해 색상으로 나타내었다. (Figure 92, 93) 현재 기후 대비 SSP126에서는 조금 더 북상하고 있으며, 고탄소 시나리오 SSP585에서는 더욱 높이 북상하고 있다. 특히 UKESM 모형에서는 K-ACE보다도 해수면 온도 상승이 더욱 가파르게 나타나고 있는 특징을 보인다. 특히 SSP585 시나리오에서는 26.5도 선이 한반도보다 더욱 북쪽에 위치하고 있으므로, 한반도 인근해 지역은 모두 해수면 온도가 26.5도가 넘는 것으로 전망하고 있다.

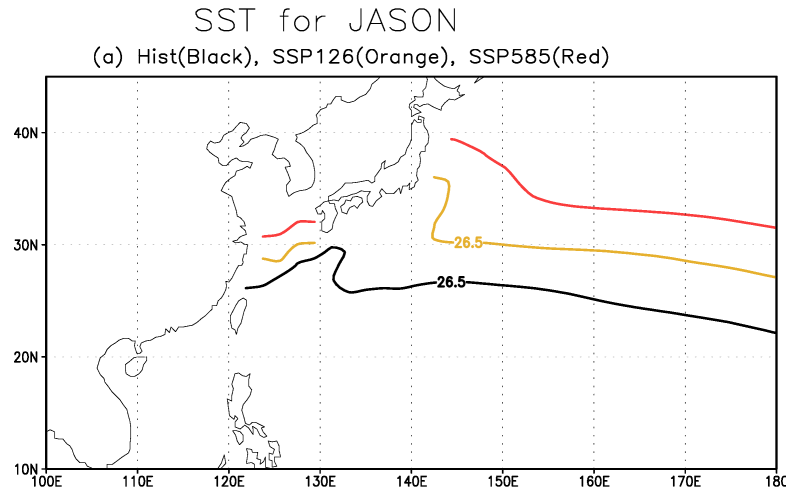


Figure 92. 26.5 line of SST for JASON in Historical(Black), SSP126(Orange) and SSP585(Red) scenarios in K-ACE model during period of 2065–2100.

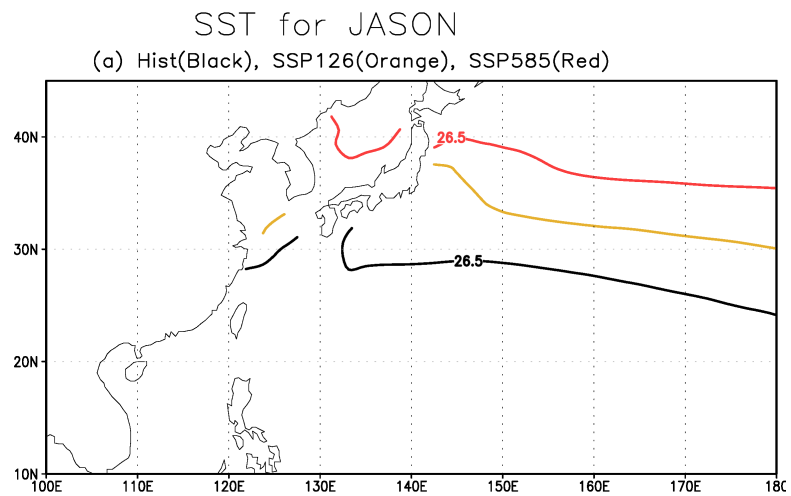


Figure 93. Same figure as in Figure 92 but for UKESM model.

## (다) 연직 바람 시어

태풍 발생을 수치적으로 나타내는 GPI는 태풍의 잠재적 강도와 850hPa 절대와도, 850-200hPa 연직 바람 시어, 700hPa 상대습도 자료를 이용하여 계산이 가능하고, 태풍 발생을 정량적으로 나타낼 수 있는 예측 지수이다. GPI에 사용된 여러 변수 중에서도 미래 변화가 크게 나타나는 변수들에 대해 두 가지 시나리오에서의 근미래 및 먼미래 기간에 대해 살펴보았다.

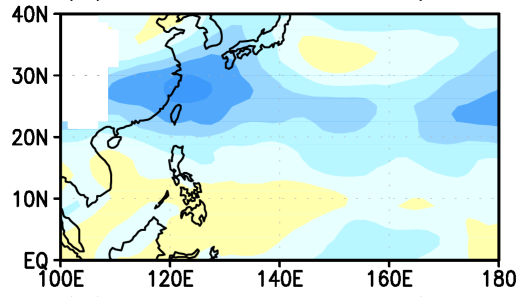
K-ACE 모형의 저탄소 시나리오 SSP126에서는 근미래와 먼미래에서 모두 한반도 남쪽 부근에서 연직 바람 시어가 과거 Historical 기간 대비 감소하고 있는 공간적인 특징을 보이고 있다. (Figure 94a, b) 또한 고탄소 시나리오 SSP585에서도 SSP126에서와 마찬가지로 한반도 남쪽 부근에서 연직 바람 시어가 과거 대비 더욱 크게 감소하는 특징을 보이고 있으며, 먼미래 기간 (2071~2100) 기간 동안에는 북위 0°~20° 열대 지역에서의 연직 바람 시어가 과거 기간 대비 아주 크게 증가하는 특징을 보이고 있다 (Figure 94c,d)

연직 바람 시어는 앞서 살펴보았던 태풍 활동 지수 GPI에 기여하는 한 가지 변수로, 상층 200hPa 바람과 하층 850hPa 바람의 연직적인 차이를 나타내는 변수이다. 열대저기압의 생성에 매우 중요한 요인 중 하나가 바로 연직 바람 시어로, 상하층 간의 바람 시어가 커지면 에너지 원천인 잠열이 연직적으로 올라오지 못하고 분산되기 때문에 태풍의 발생을 방해하는 요인이 된다. 반대로 연직 바람 시어가 작으면 태풍의 발달에 더욱 도움을 주는 호조건이 된다. 고탄소 시나리오 SSP585에서 먼미래 기간에 열대 지역에서의 연직 바람 시어가 증가하고, 한반도 남쪽 지역에서의 연직 바람 시어가 감소하면서, 태풍 활동 지수 GPI 또한 열대 지역에서 크게 감소하는 특징을 보이며, 한반도 남쪽에서는 더욱 태풍이 오래 지속될 수 있는 호조건으로 작동하게 된다.

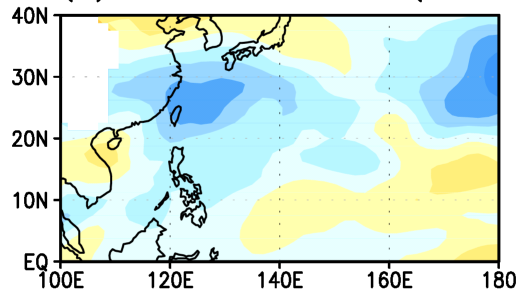
이러한 결과는 K-ACE 모형 뿐만 아니라 UKESM에서 더욱 강하게 나타나고 있다. K-ACE와 비교하면, UKESM 모형에서는 연직 바람 시어의 감소가 한반도 남쪽이 아니라 한반도 상공에서 나타나고 있는 공간적인 특징을 보인다. 또한 저위도에서는 근미래에서부터 연직 바람 시어의 증가가 나타나고, 고탄소 시나리오 SSP585 먼미래 기간에는 그 증가가 매우 강하게 나타나고 있다. K-ACE 모형과 마찬가지로 UKESM 모형에서도 저위도에서는 연직 바람 시어가 강해지고, 중위도에서는 약해짐으로써 북서태평양 지역에서 발생한 태풍이 중위도까지 이동했을 때, 태풍이 빨리 소멸되지 않고 더욱 지속될 수 있는 호조건을 제공해준다.

# vws Difference for JASON

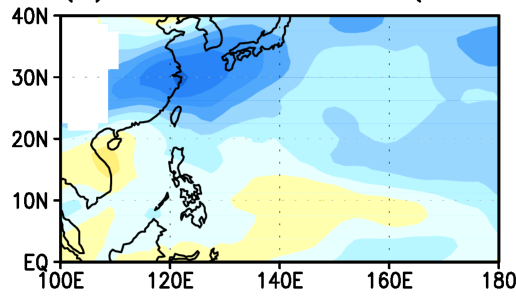
(a) SSP126 Period1 (2025–2054)



(b) SSP126 Period2 (2071–2100)



(c) SSP585 Period1 (2025–2054)



(d) SSP585 Period2 (2071–2100)

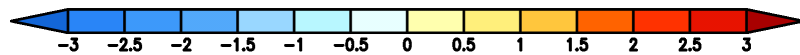
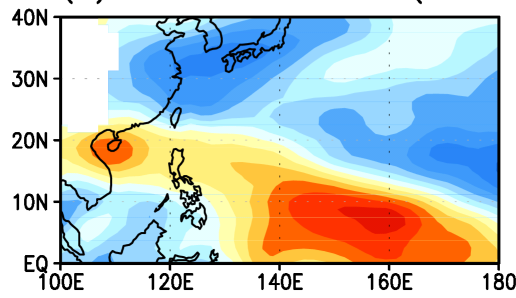
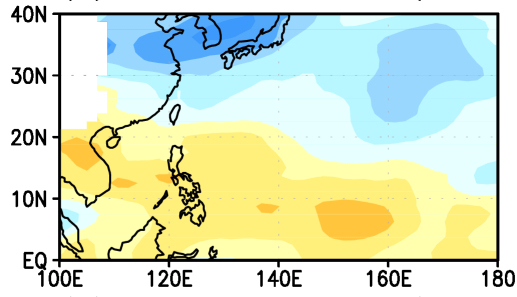


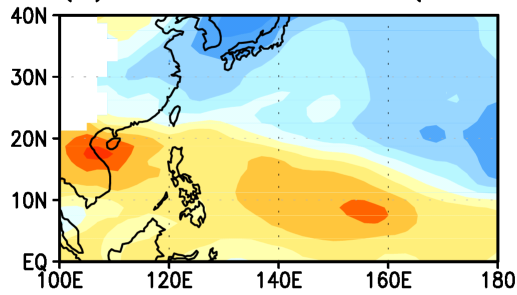
Figure 94. Vertical Wind Shear change in the two SSP scenarios for JASON during (a), (c) near-Future (2025–2054) and (b), (d) distant-Future (2071–2100) in K-ACE model.

# vws Difference for JASON

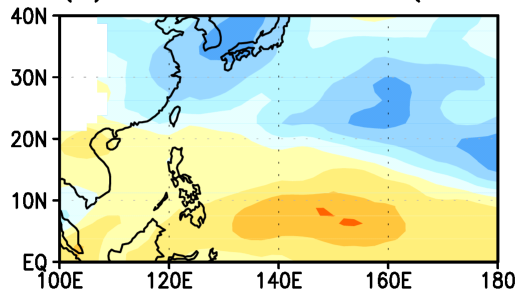
(a) SSP126 Period1 (2025–2054)



(b) SSP126 Period2 (2071–2100)



(c) SSP585 Period1 (2025–2054)



(d) SSP585 Period2 (2071–2100)

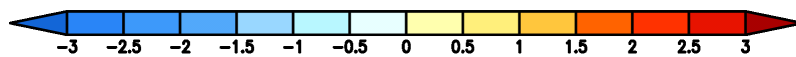
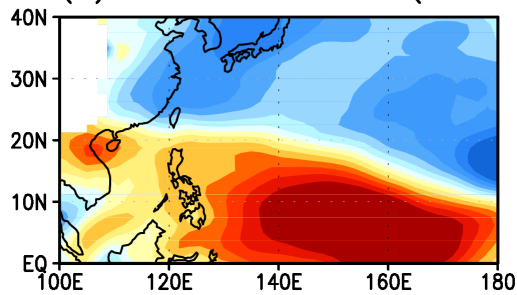


Figure 95. Same figure as in Figure 8 but for UKESM model.

#### (4) 고해상도 상세기후 시나리오 분석

CORDEX-EA 25km 상세기후 모형 5개(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs)의 6시간 자료를 이용하여 약 10 - 48° N, 80 - 155° E 내에서 6-11월 기간 동안 발생하는 태풍을 추출하고 추적하였다. 이렇게 추출된 태풍 경로 자료를 이용하여, 북서태평양 지역에서의 태풍 발생 밀도 및 진로 밀도를 계산 후 모형별로 공간 분포를 비교하였다. 각 모형별 특성에 따라 태풍을 과다 모의하거나 과소 모의 할 수 있기 때문에, 태풍 정의를 위해 사용된 임계치는 각 모형마다 다르게 적용하여 태풍을 감지한 자료를 사용하였다.

#### (가) 태풍 발생 밀도

한 지역에 대해 얼마나 태풍의 발생이 잦은지 계산할 수 있는 태풍 발생 밀도를 공간 분포도로 나타내었다. Historical 대비 SSP126, SSP585에서도 미래 기간에는 태풍 발생 밀도가 증가할 것으로 전망하고 있다. 모형별로 변화율은 다르지만, 북서태평양 지역에서 발생하는 태풍 발생 밀도가 모든 모형에서 증가하는 특징을 볼 수 있다.

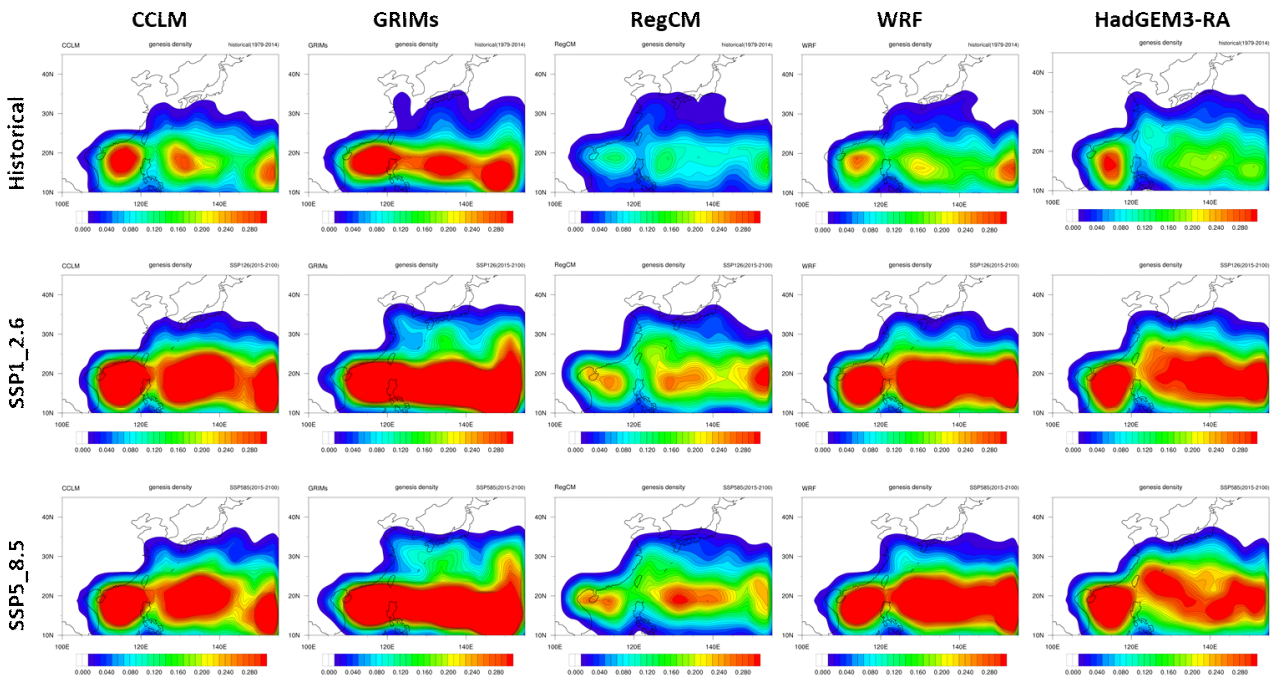


Figure 96. Spatial pattern of genesis density of CORDEX-EA RCMs for Historical(upper), SSP126(middle), SSP585(lower panel).

발생 밀도의 시나리오별 미래 변화 공간 특성을 살펴보기 위해 SSP126, SSP585 시나리오와 Historical 기간의 발생 밀도 공간분포 차이 계산을 시행하였다. Historical 대비 북서태평양 지역보다는 더욱 북쪽에서 발생 밀도가 크게 증가하는 특징이 보이며, 한반도 남쪽 지역에도 증가 변화가 보인다. 전지구모형과도 동일하게 SSP 시나리오에서는 태풍 발생 가능 지역이 더

욱 복잡해지는 것을 볼 수 있다. 하지만 북위 30도 이상에서 발생하는 태풍은 극히 드물기 때문에, 태풍 발생 밀도의 변화율로만 한반도 영향 태풍을 논하기에는 어려움이 있다.

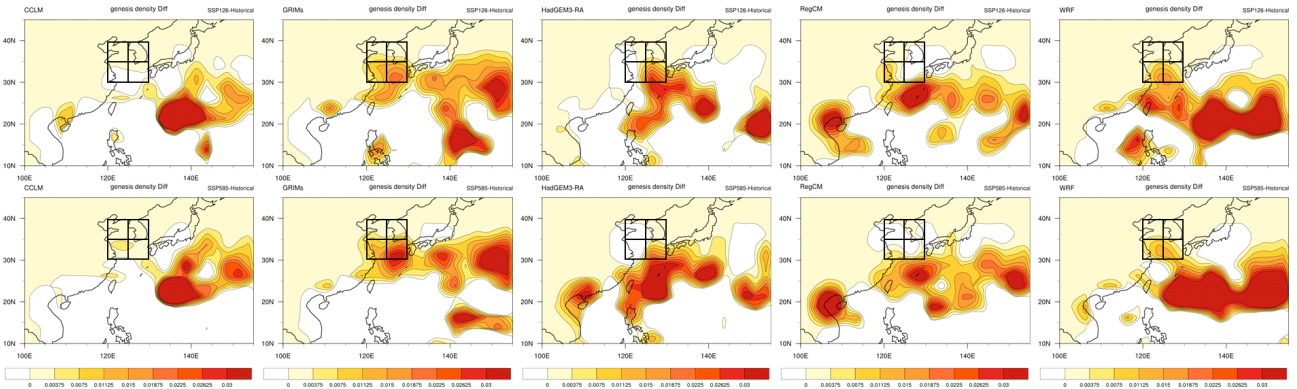


Figure 97. Genesis Density change of CORDEX-EA RCMs for SSP126(upper), SSP585(lower panel).

#### (나) 태풍 진로 밀도

앞서, 북서태평양 지역에서 발생한 태풍의 발생 밀도를 살펴보았다면, 한반도 인근 지역까지 올라오는 태풍 진로 밀도를 계산하여 공간적으로도 그 변화를 볼 수 있다. (Figure 98) 각 모형별로 모의하는 특징이 다르고, 공간적 분포가 다르지만, Historical 기간에 비해서, 5개 RCM 모형에서 모두 강하게 증가하는 특징을 알 수 있다.

5개 모형 중에서 태풍을 가장 많이 모의하는 GRIMs 모형에서 태풍 진로 밀도의 증가도 매우 크고 뚜렷하게 나타났으며, 5개 지역 모두 미래 기후 시나리오에서는 진로 밀도를 매우 강하게 전망하고 있다.

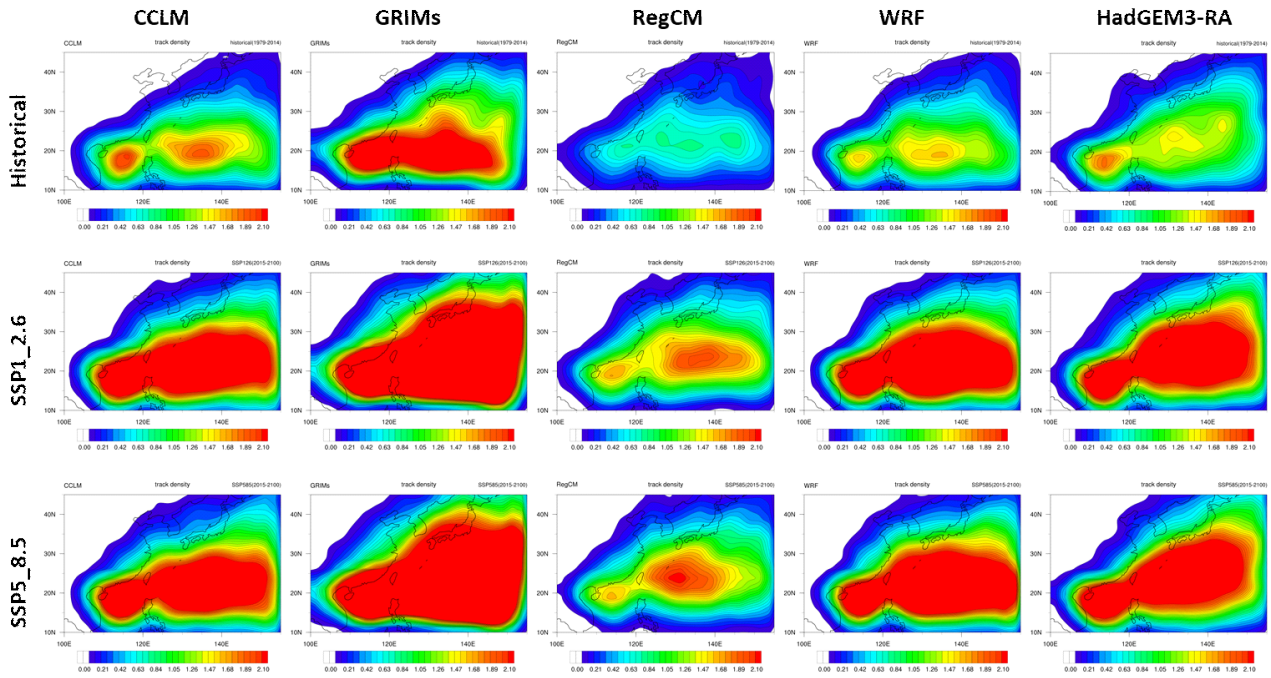


Figure 98. Track Density of CORDEX-EA RCMs for Historical(upper), SSP126(middle), SSP585(lower panel).

5개 모형에서 모두 Historical 대비 북서태평양 지역에서 진로 밀도가 크게 감소하는 특징이 보인다. 전체적으로 북상하면서, 한반도 지역에서는 약한 증가 변화가 보이나, 모형별로 공간 분포 차이가 큰 특징이 있다.

또한 한반도 인근 지역에 대해서 더욱 상세히 살펴보면, RegCM 모형을 제외하고는 4개의 지역 기후 모델들이 한반도 지역에서도 태풍 진로 밀도가 증가하는 특징을 볼 수 있다. 반면 북서태평양에서의 태풍 진로 밀도는 매우 크게 감소하는 특징을 보이고 있고, 이는 앞서 살펴 보았던 전지구모형에서의 GPI 미래 전망 결과와도 일치하는 결과이다.

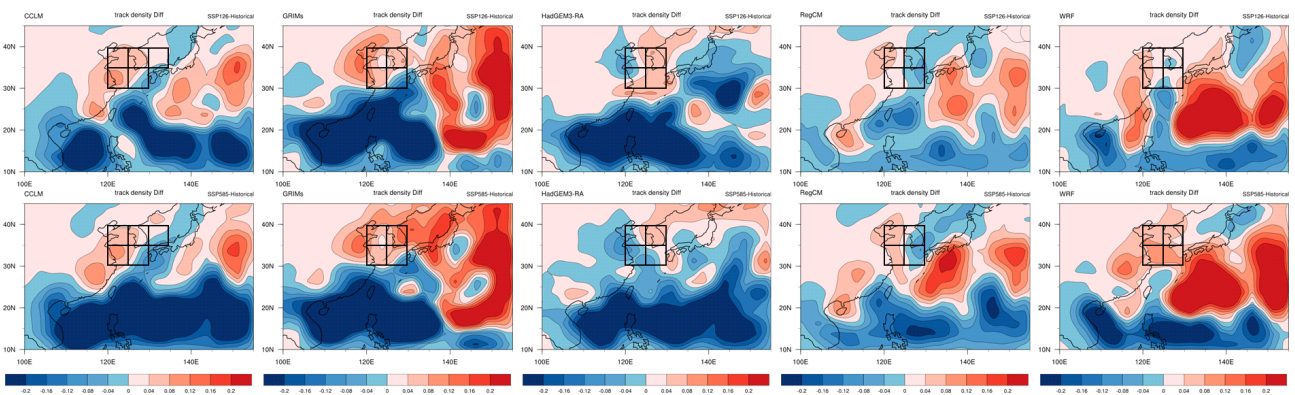


Figure 99. Track Density change of CORDEX-EA RCMs for SSP126(upper), SSP585(lower panel).

한반도 영향 지역 5개를 지나는 태풍 진로 밀도의 미래 변화를 살펴보기 위해, 5개 모형의 값을 Whisker diagram(box plot)으로 나타내었다. 5개 모형을 이용하여 앙상블 평균으로 계산하게 되면, 강한 극값은 표현이 힘들기 때문에 box plot을 이용하여 시각화하였다. Box plot은 5개 모형의 미래 전망 값을 이용하여 최솟값, Lower Quantile, 중앙값, Upper Quantile, 최댓값을 이용하여 그리게 된다. 먼저 한반도 영향 5개 지역에 대한 태풍 진로 밀도의 box plot은 Figure 100에 나타내었다.

1지역부터 5지역까지 모든 지역에서 현재 대비 증가하는 특징을 보이고 있으며, 모형마다 편차가 크지만 중앙값 또한 현재 대비 증가하고 있음을 알 수 있다. 5개 지역 중에서도 비교적 저위도에 위치하고 있는 1지역과 2지역의 경우, 3~5지역에 비해 태풍 진로 밀도가 높은 지역이나, 미래 기후 시나리오에서는 큰 증가율을 보이지 않는다. 반면, 현재 기간 동안 태풍 영향에 거의 들지 않는 비교적 중위도에 위치한 3지역부터 5지역까지는, 절대적인 수치는 저위도 지역인 1, 2지역에 비해 낮지만, 현재 기간 대비 증가율을 가장 크게 나타나는 특징을 보인다.

미래 기간에 대해서만 살펴보면, 한반도 영향 태풍 진로 밀도의 경우 더욱 불확실성이 커지고 있어서, 예측 또한 더욱 어려워지고 있음을 알 수 있다. 5개 지역 중에서 태풍이 지나갈 확률은 저위도에 위치한 1지역과 2지역에서 더욱 크게 나타나지만, 현재 기간에는 거의 지나가지 않던 3~5지역에서도 태풍이 지나갈 확률이 커진다는 것은, 기존에 나타나지 않던 이상 경로를 따라 태풍이 지나갈 수 있음을 의미한다.

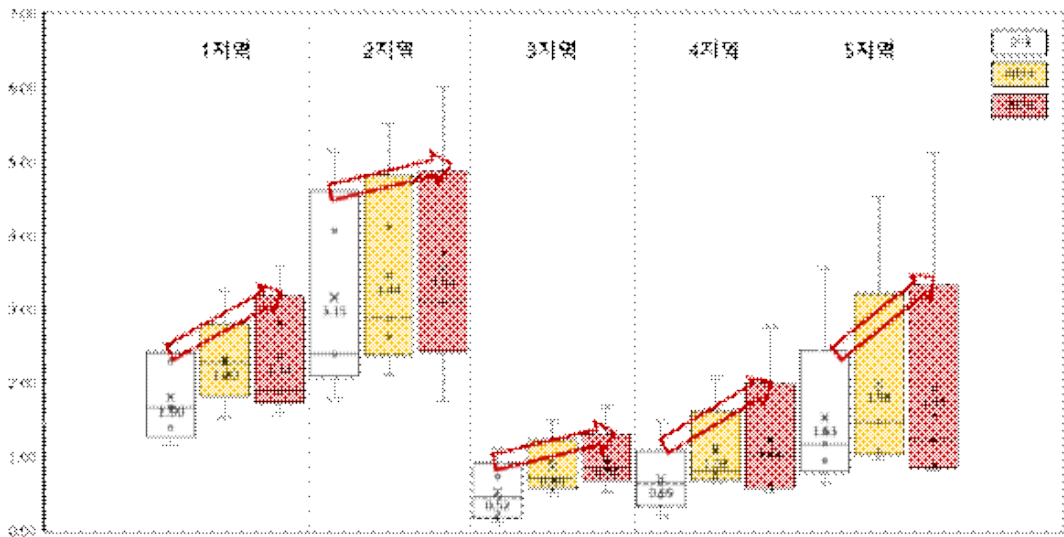


Figure 100. Box plot of track density among 5 CORDEX-EA RCMs for 5 regions. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario)

한반도 영향 5개 지역에 대해 태풍 진로 밀도 중앙값의 미래 변화율을 지역별로 비교 해 보면, 저탄소 시나리오에서는 3지역 서해 (65%) > 4지역 내륙 (57%) > 5지역 동해 (29%) > 1지역 남서해 (27%) > 2지역 남해 (9%) 순으로 상승할 것으로 전망되었다. (Figure 101)

고탄소 시나리오에서는 증가율이 더욱 뚜렷하게 나타나며, 3지역 서해 (85%) > 4지역 내륙 (78%) > 1지역 남서해 (30%) > 5지역 동해 (25%) > 2지역 남해 (12%) 순으로 크게 상승할 것으로 전망되었다.

저탄소 및 고탄소 두 가지 탄소배출 시나리오에서 현재 대비 태풍 진로 밀도의 상승폭은 저위도 지역인 1지역 남서해, 2지역 남해 지역 보다는 더욱 고위도에 위치하고 있는 3지역 서해, 4지역 내륙, 5지역 동해 지역에서 더욱 크게 나타났다. Figure 100에서도 볼 수 있듯이, 북위 35~40도에 위치한 3~5지역의 경우, 현재 기간에는 태풍이 거의 지나가지 않기 때문에 태풍 진로 밀도가 매우 낮은 지역이지만, 증가율이 매우 가파르게 나타남으로써, 과거 기간 동안에 지나가지 않았던 이상 경로를 따를 확률이 더욱 높아진다는 것을 의미한다.

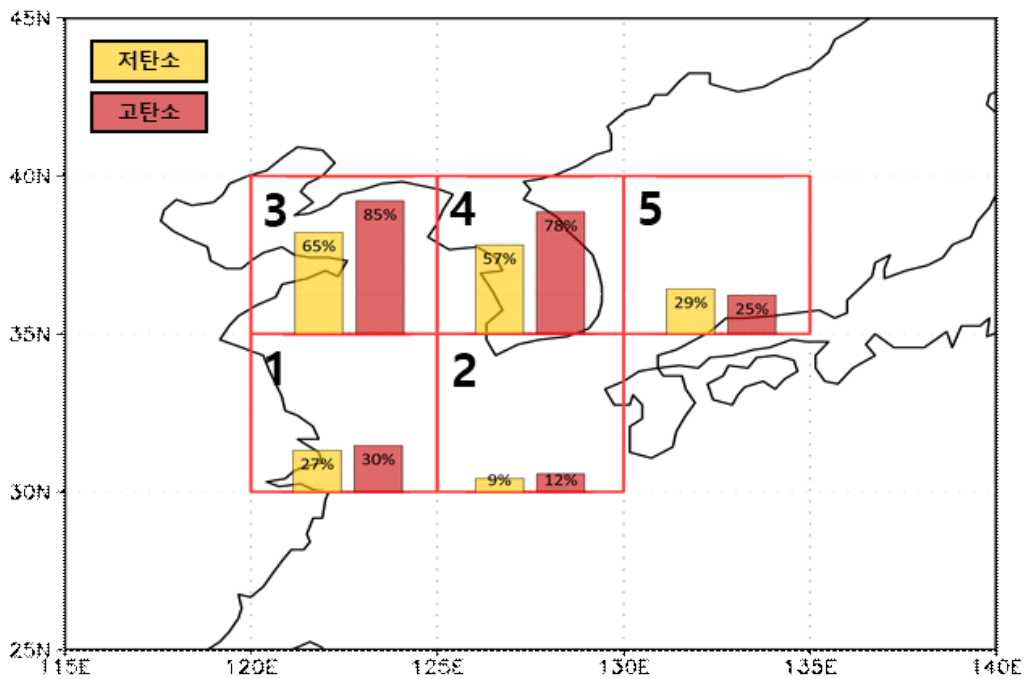


Figure 101. Change rate of median value of track density among 5 CORDEX-EA RCMs. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario)

(다) 태풍 강도 (최저 중심 기압)

태풍의 강도는 최대 풍속이나 중심 기압, 태풍의 크기 등을 이용하여 측정할 수 있는데, 일반적으로는 최대 풍속에 따른 분류를 통해 강도를 구분하고 있다. 태풍 중심에서의 해면기압으로 측정하는 중심기압이 낮을수록 센 태풍을 의미하며, 최대 풍속과는 반비례하는 특징을 가진다. 이렇게 강도를 나타내는 최대 풍속에 따른 분류는 각국의 기상청마다 사용하는 분류 기준이 다르다.

적도 인근 저위도에서 발생하는 태풍의 경우, 중위도로 북상하면서 그 강도가 약해지긴 하지만, 한반도 상륙시 태풍의 강도 또한 매우 중요하므로 1~5지역에서의 중심 기압의 미래 전망도 살펴 볼 필요가 있다. 이 연구에서는 태풍의 강도를 중심 기압을 이용하여 비교하였으며, 북서태평양에서 발생하는 태풍 중에서도 한반도 영향 지역인 1~5지역으로 지나가는 태풍에 대해서만 중심 기압의 미래 전망에 대해 살펴보았다. (Figure 102)

Historical 기간 동안 1~5지역을 지나가는 태풍의 중심 기압 중 가장 강한 최소 중심 기압은 1지역에서 943hPa로 나타났다. 중심 기압의 경우, 모든 지역에서 현재 대비 낮아지고 있어서, 한반도 영향 5개의 지역을 지날 때의 강도가 더욱 강해진다는 것을 의미한다. 고탄소 시나리오 SSP585에서는 최소 중심 기압이 933hPa로 현재 대비 10hPa 강해질 것으로 전망한다.

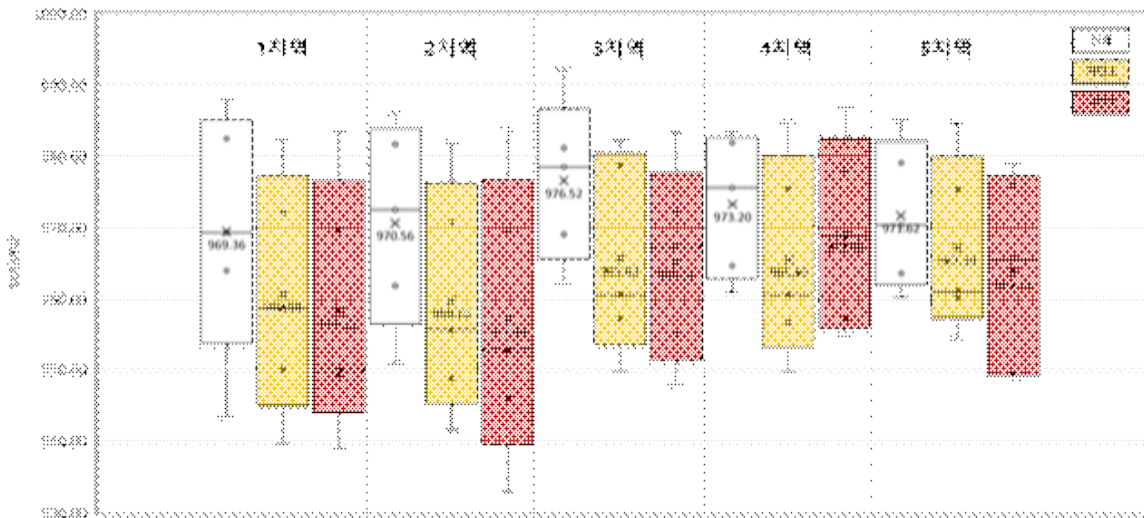


Figure 102. Box plot of minimum central pressure in typhoon among 5 CORDEX-EA RCMs for 5 regions. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario)

현재보다 더욱 강한 태풍의 미래 전망에 대해 살펴보기 위해, 현재 기간에 대한 기준을 Historical 기간에 대해 평균 된 태풍의 중심 기압으로 정하였다. 먼저 현재 기간에 대해 현재 기간 평균 중심 기압보다 더욱 강한 태풍 비율은, 각 지역별로 편차가 있지만 모든 지역에서 40% 이상을 나타낸다. 미래 기간에 대해 시나리오별 전망을 살펴보면, 저탄소 시나리오 SSP126에서는 현재 평균보다 더욱 강한 태풍의 비율이 1지역, 2지역, 4지역에서 급격하게 증가한 것을 알 수 있다. 고탄소 시나리오 SSP585에서는 1지역, 3지역, 4지역에서 증가가 매우 뚜렷하게 나타났으며, 현재보다 더욱 강한 태풍 비율은 최대 70%까지 차지하는 것을 알 수 있다.

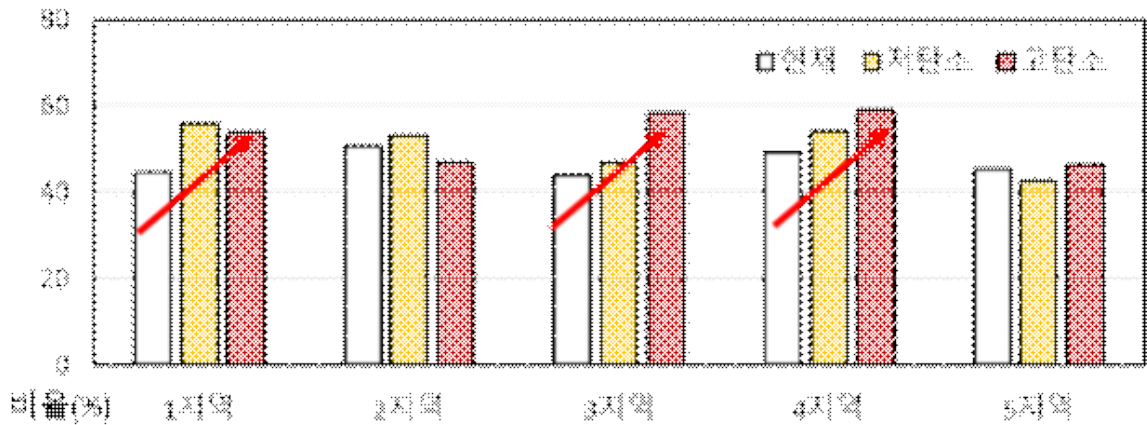


Figure 103. Change rate of median value of central pressure in typhoon between historical and 2 SSP scenarios. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario)

현재 대비 매우 강한 태풍은 현재 기간 동안 평균된 중심 기압이 아닌, 10퍼센타일 값을 사용하고자 한다. 먼저 현재 기간에 대해서 살펴보면, 현재 기간 동안 발생하는 태풍 중 중심 기압이 10퍼센타일보다 낮았던(태풍이 강했던) 태풍의 비율은 10% 남짓이었음을 알 수 있다. 현재 대비 매우 강한 태풍 비율을 시나리오별로 살펴보면, 저탄소 시나리오 SSP126에서는 5지역을 제외하고 20퍼센트로 증가하였습니다. 고탄소 시나리오 SSP585에서는 3지역에서 매우 뚜렷한 증가가 보이며, 현재 대비 매우 강한 태풍의 비율은 2배가 되어, 약 30%를 차지하는 것으로 전망한다.

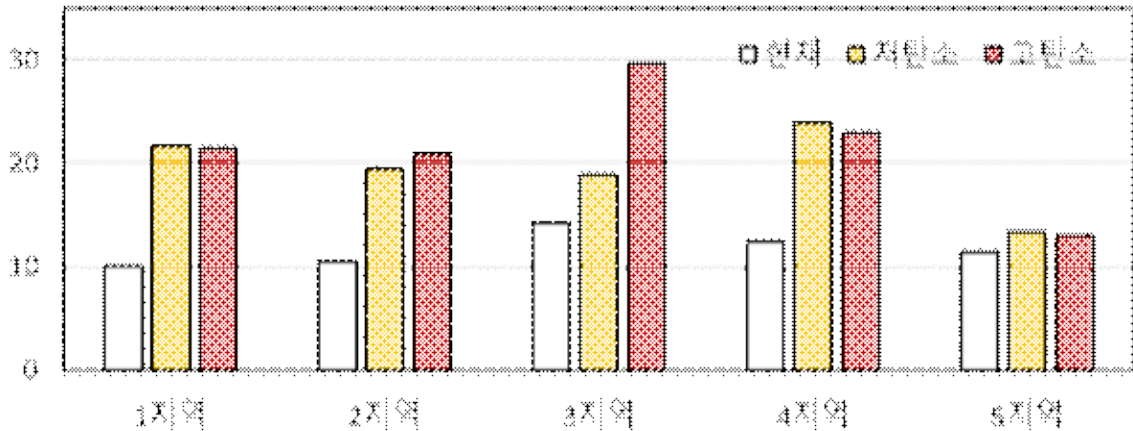


Figure 104. Change rate of median value of central pressure in typhoon between historical and 2 SSP scenarios. (White: Historical, Yellow:SSP126, Red:SSP585 scenario)

### (5) 요약

이 절에서는 전지구 기후변화 시나리오 CMIP6 K-ACE와 UKESM을 이용하여, 북서태평양에서의 태풍 활동 지수 및 태풍 발달에 기여하는 요인들을 분석하였다. 먼저 태풍 잠재 활동 지수인 GPI의 공간 분포를 시나리오별, 근미래 및 먼미래에 대해 분석하였다. 북서태평양에서 가장 큰 값을 보이는 GPI의 미래 전망은 더욱 북상하며, 동서로 확장하는 특징을 보인다. 그리고 적도 지역에서의 GPI는 감소하는 것으로 전망되었다. K-ACE 모형의 경우, 고탄소 시나리오에서 북상이 강하게 나타났으며, UKESM 모형에서는 저탄소 및 고탄소 시나리오에서 모두 GPI 패턴이 북상하며, 한반도와 더욱 가까운 중위도 지역에서 태풍이 더욱 많이 생길 것으로 전망되었다. 고탄소 시나리오일수록, 먼미래일수록 중위도 지역의 GPI 증가, 그리고 적도지역에서의 GPI 감소가 가장 뚜렷하게 나타났다. GPI 계산 수식에 필요한 다양한 인자들의 미래 변화를 분석하여, 해수면 온도에 크게 영향을 받는 PI 지수와 한반도 인근 해역에서의 해수면 온도 또한 가파르게 상승하는 것으로 전망되었다. 태풍의 발생에 주요한 요인 중 하나인 연직 바람 시어 또한 한반도 남쪽에서 약해지는 것으로 전망하고 있는데, 이렇게 연직 바람 시어가 약해지면, 북서태평양에서 발생하여 한반도 남쪽까지 올라 온 태풍이 빨리 소멸되지 않고 더욱 오래 지속될 수 있는 호조건으로 작용하여 한반도에 영향을 미칠 수 있다. 전지구 모형 분석을 통해, 북서태평양에서 발달하는 태풍이 저탄소 및 고탄소 시나리오에는 더욱 북상하여 한반도와 더욱 가까운 중위도에서 발생할 수 있으며, 한반도 남쪽까지 올라 온 태풍의 경우 연직 바람 시어의 약화로 태풍이 오래 지속되면서, 한반도에 영향을 미칠 수 있는 것으로 전망되었다. 이러한 미래 전망을 통해, 한반도와 더욱 가까운 중위도에서의 태풍의 증가가 예상되어 태풍에 대비할 시간이 부족할 수 있음을 시사한다.

태풍 활동 지수를 통해 주요 태풍 발생 해역인 북서태평양에서의 미래 태풍 변화는 알 수 있지만, 한반도에 직간접적 영향을 주는 태풍의 미래 변화에 대해서는 알기 어렵다. 동아시아 고해상도 상세 기후 시나리오 자료를 이용하여, 한반도 인근 지역에 영향을 주는 태풍 발생 밀도, 태풍 진로 밀도, 태풍 강도에 대한 미래 전망을 분석하였다. 25km 고해상도 상세기후 모형

5개를 이용하여 현재 기후와 공간 분포를 비교 해 보면, 태풍 발생 밀도 및 진로 밀도 모두 북서태평양 지역에서 감소하고, 한반도와 가까운 중위도지역에서 증가하는 것으로 전망하고 있다. 한반도에 직간접적인 영향을 주는 태풍에 대한 미래 전망을 분석하기 위해, 한반도 내륙 지역을 포함하여 한반도 인근 5개 지역을 선정하였다. 선정된 5개 지역별로 태풍 진로 밀도를 현재와 미래 기후 시나리오 SSP126, SSP585와 함께 비교 분석을 실시하였다. 5개 지역 중에서 태풍 진로 밀도의 증가율은 태풍이 거의 오지 않던 중위도 3지역과 4지역에서 가장 크게 나타났다. 또한 태풍의 강도를 나타내는 최저 중심 기압 또한 현재 943hPa 대비 고탄소 시나리오에는 933hPa까지 강해지는 것으로 전망하였다. 현재보다 강한 태풍의 비율은 모든 지역에서 증가하지만 그 중에서도 1지역, 3지역, 4지역에서 크게 증가하는 특징을 보이고, 현재 대비 매우 강한 태풍의 비율은 3지역에서 가장 큰 증가를 보인다. 한반도 5개 지역에 대해 태풍 발생 밀도, 진로 밀도, 중심기압 등을 지역별로 시나리오별로 분석해 본 결과, 태풍 진로가 자주 지나가지 않았던 서해, 내륙 지역에서의 증가가 매우 크게 나타났다. 이는 지금까지 겪지 못했던 이상경로를 따르는 태풍이 증가할 수 있고, 한반도 서해 지역에 태풍이 내습할 경우, 한반도 내륙 지방은 태풍의 위험 반원에 들어 더욱 큰 피해를 야기할 것으로 보인다. 또한 태풍의 강도도 더욱 높아질 것으로 전망하고 있으므로, 태풍으로 인한 재해 예측 및 예방에 어려움이 발생할 수 있다. 기후변화 감시·예측·영향 정보가 기후변화 적응 대책, 방재 가이드라인 등과 적극 연계·활용될 필요가 있다.

## 4. 사용자 편의성 향상을 위한 기후 감시분석 시스템 개선

### 가. 예측인자 자동 생산 및 정보 제공

#### (1) 연구 배경

한반도의 월별 기후에 영향을 미치는 요소는 다양하며 계절이나 월에 따라 미치는 영향의 강도 또한 다르다. 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 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. 그리하여 한반도의 월별 예측인자에 대한 빠른 분석과 대처를 위해 표준화된 자료수집 체계 및 신속한 감시 결과 제공하여 시의적절한 원인분석이 가능하도록 월별 예측인자 통계 및 기작 모식도 서비스 제공을 목표로 하였다.

#### (2) 자료와 방법

월별 예측인자 통계 서비스를 위해 NOAA의 CDC (Climate Data Center)에서 제공하는 파일을 정기적으로 수집하여 사용하였다. 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. 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 sec 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 수집하여 최근 7일, 월별 자료로 생산하여 제공하였다.

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  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  의 수평 해상도를 가지며 Level 정보를 갖는 기온(Air Temperature) 정보나 그렇지 않은 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST) 등 다양한 형태로 구성된다.

### (3) 기후분석 예측인자(원인분석) 서비스 개발

사용자들에게 예보의 예측성을 향상을 위해서는 월별로 관련성이 높은 예측인자를 찾는 것이 중요하여 월별 예측성이 높은 지역에 대한 정보를 연구자들에게 제공하는 서비스 구축이 필요하다. 기후 감시분석 시스템의 예측인자 통계 및 현황 서비스는 사용자들에게 강수, 기온에 대해 월별 예측인자의 종류와 위치정보 그리고 상세 역학에 대한 정보를 제공하도록 사용자 인터페이스를 구성하였고, 1981년부터 현재까지 인자별로 관측정보와 비교하여 상관계수가 어떻게 변하는지 시계열 정보를 제공하고 각 값이 표준편차에 따른 높음과 낮음을 색상으로 표시하여 사용자 정보전달을 편리하게 구성하고자 하였다.

#### (가) 월별 기후인자 수집 및 자료처리 프로그램 개발

월별 기후인자에 대해 자료처리 하는 방식이 다르며 각 예측인자별로 제공하는 타임라인 또한 다르다. 상세 역학을 기반으로 예측인자를 처리하고 결과를 제공하기 위해 월별, 인자별, 지역별 자료처리 프로그램을 별도로 개발하여 통합 자료처리 서비스를 구축하고 자료수집 시점별로 자동화 처리 시스템을 구축하였다. 처리된 자료는 테이블 형태의 엑셀파일로 저장하고 월별 예측인자의 특성은 웹문서로 저장하도록 프로그램을 구성하였다. 사용되는 인자의 영역은 지도기반 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 105. In order to calculate predictive factors based on detailed epidemiology and provide results, programs for data processing by month, factor, and region were developed.

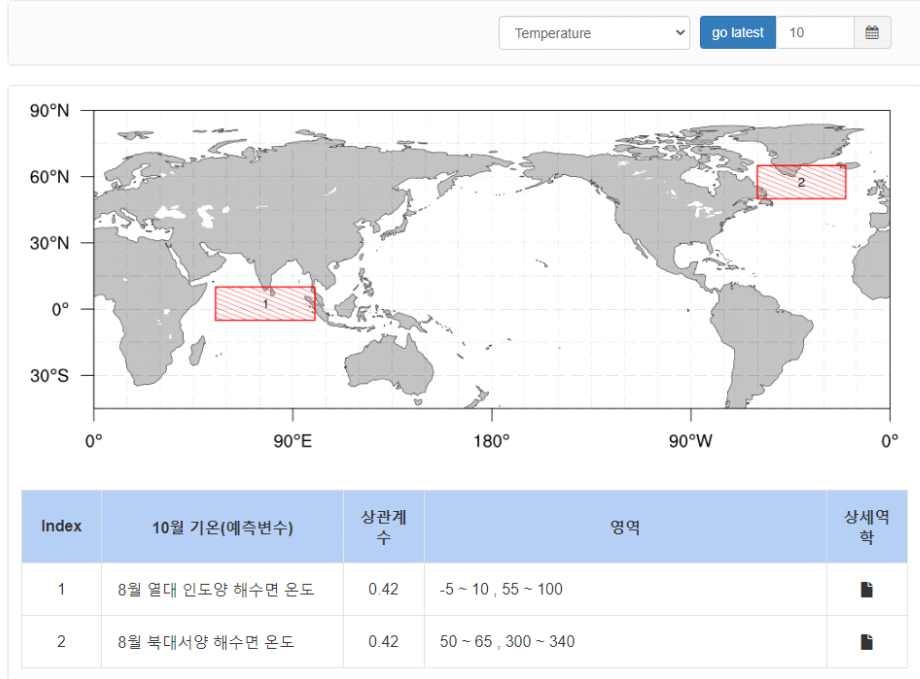
#### (나) 월별 예측인자 분석 서비스용 인터페이스 구성

기후 감시분석 시스템의 월별 예측인자 통계 및 현황 서비스는 사용자들에게 한반도의 기온과 강수에 미치는 주변의 기후인자를 찾고 관련 인자의 정보를 제공할 뿐만 아니라 계산방식 상관계수, 영역 등 다양한 정보를 제공해야 한다. 그리하여 예측인자에 대해 한눈에 파악할 수 있도록 하나의 웹 화면에 전체를 표시하는 방식으로 사용자 인터페이스를 구성하였다. 상단

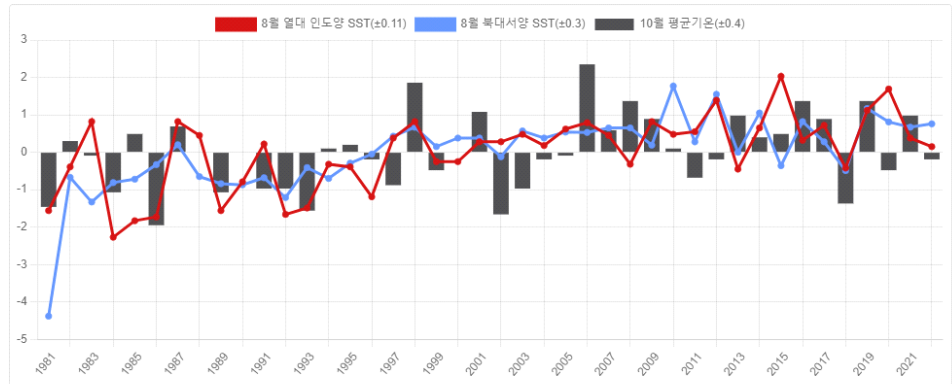
에는 사용자가 확인하고자 하는 변수와 달을 선택할 수 있는 메뉴로 구성하였다.

예측변수는 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 좌표 정보 그리고, 예측인자가 한반도의 강수와 기온에 미치는 상세 역학을 자세히 설명하고 있다. 지도 기반의 위치정보와 표 형식의 예측인자 정보 제공 다음에는 예측인자별로 표준화된 그래프를 통해 1981년부터 현재까지 예측인자의 변화를 시계열로 표출하였다. 여러 인자의 상관성을 쉽게 파악할 수 있도록 그래프 서비스를 제공하고 예측인자별 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.

### 예측인자 통계 및 현황



### 예측인자별 표준화(Normalized) 그래프



### 예측인자별 편차(Anomaly)와 관측값

Year	8월 열대 인도양 SST(±0.11)	8월 북대서양 SST(±0.3)	10월 평균기온(±0.4)
2022	-0.03	0.48	-0.3
2021	0.04	0.39	0.9
2020	0.43	0.53	-0.6
2019	0.26	0.91	1.3
2018	-0.2	-0.82	-1.5
2017	0.14	-0.02	0.8

Figure 106. To provide statistical information and current status of predictors, a user interface was built to provide various information on a single web page.

## 다) 월별 기후분석 예측인자 정보 제공 웹 서비스 개발

월별 기후분석 예측인자 제공 서비스는 월별 자료를 기준으로 하였으나 눈 덮임의 경우, 7일 자료를 활용하여 웹 서비스를 개발하였다. 영역별로 전체 지도를 기반으로 각 인자의 위치 정보와 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.

### ① 예측인자 통계 및 현황 메뉴

예측인자 통계 및 현황 서비스를 이용하기 위해서는 찾고자 하는 예측 정보를 검색해야 한다. 현재 서비스에서는 기온과 강수에 대한 정보를 제공하고 있다. 또한, 월별 기후 예측인자 정보를 제공하고 있어 1월부터 12월까지 달력 정보를 제공하여 사용자들에게 제공하고 있다. 사용자들은 직관적으로 원하는 달을 선택할 수 있다.

#### 예측인자 통계 및 현황

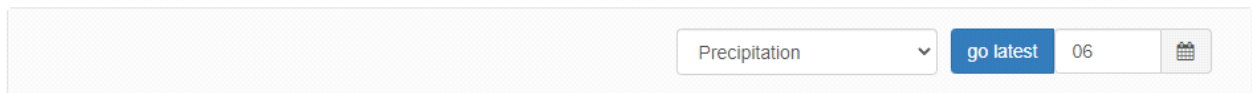


Figure 107. In the predictor statistical information, you can select the desired month for precipitation and temperature and check it.

### ② 지도 기반 예측인자 영역정보

예측인자 통계 및 현황 서비스에는 선택한 기후 변수와 사용자가 선택한 달 기온과 강수에 미치는 예측인자의 지역을 표시하여 제공한다. 여러 예측인자는 그 특성에 따라 해수면 온도일 경우 붉은색, 눈이 덮임 정보일 경우 흰색으로 표시하여 색깔만으로 어떤 예측인자가 사용되고 있는지 알 수 있다. 또한, 예측인자로 사용되는 지역의 면적과 위치를 지도상에서 표기해 줌으로써 직관적인 판단이 가능하다.

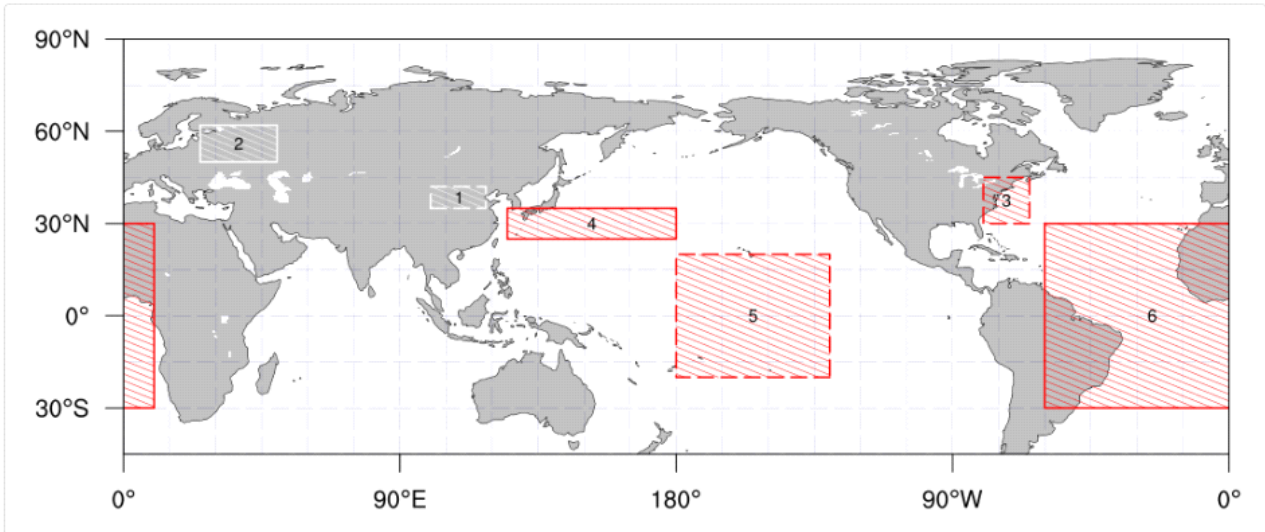


Figure 108. Convenience was provided to users by displaying the location information of each predictor on the map.

### ③ 테이블 기반 기반 예측인자 상세정보

예측인자 통계 및 현황 서비스의 월별 예측인자에 대한 상세정보를 표를 이용하여 제공하고 있다. 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 계산방식을 함께 보여줌으로써 사용자들에게 자세한 정보를 추가로 제공하고 있다.

Index	6월 강수(예측인자)	상관계수	정확도	영역	상세역학
1	3월 중국 눈덮임	-	45%	[100 ~ 118E, 35 ~ 42N]	
2	4월 동유럽 눈덮임	+	45%	[25 ~ 20E, 50 ~ 62N]	
3	1~4월 북대서양 해수면 온도	-	45%	[65 ~ 80W, 30 ~ 45N]	
4	4~5월, 1~2월 북서태평양 해수면 온도 차이	-	50%	[125E ~ 180E, 25 ~ 35]	
5	4월 열대 중태평양 해수면 온도	-	55%	[180E ~ 130W, -20 ~ 20]	
6	4~5월 대서양 해수면 온도	0.42	25%	[60W ~ 10E, 30S ~ 30N]	

Figure 109. 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.

### ④ 예측인자에 대한 상세 기작 정보 제공

월별 기후분석에 필요한 예측인자 제공서비스는 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

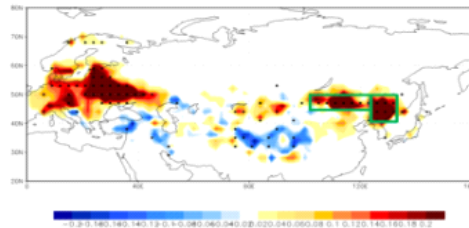
기간	3월
영역	(103~123°E, 45~50°N) + (123~133°E, 40~50°N)

- 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

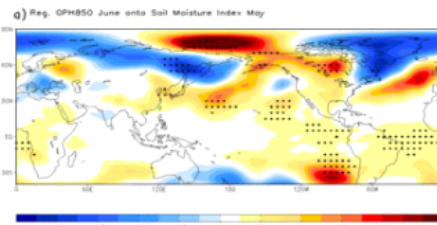
- ▶ 예측성이 비교적 있는 편이었으나 신평년을 적용하면 6월 기온 현황이 평년보다 높음에서 평년과 비슷함으로 다수 바뀌면서 예측성 낮아짐
- ▶ 최근 10년간 (2011~2020년) 예측성은 높지 않음
- ▶ 최근 지면-대기 피드백이 약화 되면서 고기압성 순환 형성 기작 적용에 주의가 필요함

Regressed Snow anomalies during March against Kor. June Temp.

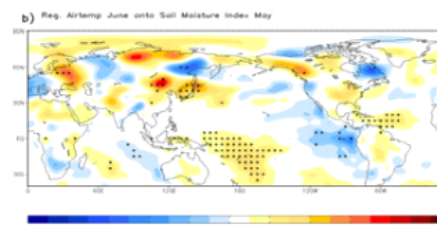


한반도 6월 기온 시계열을 이용하여 계산한 3월 유라시아 대륙 눈덮임의 회귀 패턴

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

### ⑤ 예측인자별 표준화 시계열 그래프 제공

월별 기후분석 예측인자 제공서비스는 선택한 달마다 사용되는 예측인자가 다양하다. 사용자들에게 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 관측변수와 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 서비스를 기술을 이용하여 사용자가 원하는 예측인자만을 선택하여 화면에 표기함으로써 쉽게 이해할 수 있도록 개발하였다.

#### 예측인자별 표준화(Normalized) 그래프

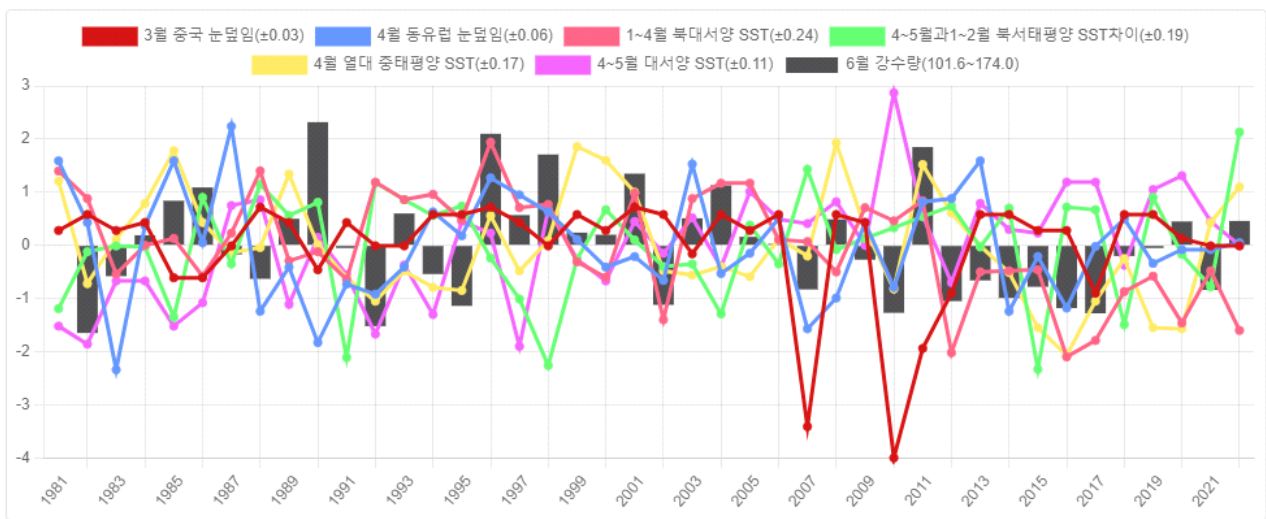


Figure 111. Users want to compare how much correlation each predictor has with the observed data. Therefore, each factor from 1981 to the present was expressed as a time series graph. In addition, it provides a function to compare and view only the parameters that the user wants to see by using the hide function.

### ⑥ 예측인자별 편차 및 관측값 제공

월별 기후분석 예측인자 제공서비스에서 월별 자료를 기준으로 기후 변수에 영향을 미치는 편차 정보를 제공한다. 편차 정보는 정확한 수치정보로 제공하여 기후 변수와의 관련성을 명확히 파악할 수 있도록 하였다. 이는 1981년부터 현재까지 각 변수를 자동으로 계산하여 제공하고 있으며 사용자들의 편리성을 위해 각 예측인자별로 정렬 기능을 제공하여 관심 예측인자에 대한 정렬을 통해 최댓값과 최솟값에 해당하는 연도를 비교할 수 있다.

### 예측인자별 편차(Anomaly)와 관측값

Year	3월 중국 눈덮임 ( $\pm 0.03$ )	4월 동유럽 눈덮임 ( $\pm 0.06$ )	1~4월 북대서 양 SST( $\pm 0.24$ )	4~5월과 1~2 월 북서태평 양 SST차이 ( $\pm 0.19$ )	4월 열대 중태 평양 SST( $\pm 0.17$ )	4~5월 대서양 SST( $\pm 0.11$ )	6월 강수량 (101.6~174.0)
2022	0	0.01	0.82	-0.95	-0.5	-0.06	184.7
2021	0	-0.01	0.24	0.33	-0.24	0.06	91.6
2020	-0.01	-0.01	0.75	0.06	0.53	0.29	184.2
2019	-0.04	-0.05	0.29	-0.41	0.52	0.22	148.3
2018	-0.04	0.08	0.44	0.64	0.02	-0.16	137.5
2017	0.06	0	0.92	-0.31	0.33	0.26	59.7
2016	-0.02	-0.18	1.08	-0.33	0.72	0.26	66.8
2015	-0.02	-0.03	0.23	1.01	0.52	0	96
2014	-0.04	-0.19	0.24	-0.32	0.12	0.02	80.7
2013	-0.04	0.25	0.25	0	-0.07	0.15	104.4
2012	0.06	0.14	1.04	-0.34	-0.31	-0.25	76.2

Figure 112. 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.

#### (4) 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 예측인자 통계 및 기작 모식도 서비스를 구축하였다.

월별 예측인자 통계 및 기작 모식도 서비스 구축을 위해 NOAA의 CDC (Climate Data Center)에서 제공하는 월별 기후자료를 정기적으로 수집하여 사용하였다. 자료생산 기간은 일별 자료를 수집하여 최근 7일, 월별 자료로 생산하여 기본 자료로 활용하였다. 기후감시분석시스템의 예측인자 통계 및 현황 서비스는 사용자들에게 강수, 기온에 대해 월별 예측인자의 종류와 위치정보 그리고 상세 역학에 대한 정보를 제공하도록 사용자 인터페이스를 구성하였고, 1981년부터 현재까지 인자별로 관측정보와 비교하여 상관계수가 어떻게 변하는지 시계열 정보를 제공하고 각 값이 표준편차에 따른 높음과 낮음을 색상으로 표시하여 사용자 정보전달을 편리하게 구성하였다.

## 나. 시스템 개선 및 보안 강화

### (1) 연구배경

APEC 기후센터의 기후정보 서비스는 기상청의 웹 취약성 점검을 주기적으로 받아야 하는 곳으로 기후감시분석시스템 또한, 대상에 포함되어 있다. 또한, APEC 기후센터의 네트워크 서비스는 인터넷망과 업무망으로 구성되어 있어 대부분의 외부 데이터 수집 및 서비스는 인터넷망에서 제공되고 있다. 하지만, 대부분의 연구자는 내부 업무망에서 연구를 수행하고 있어 인터넷망의 서비스는 연구에 매우 불편함을 주고 있다. 그리하여 사용자의 편리성을 위해 외부 인터넷망 서비스를 내부망에서 가능하도록 서비스 이중화 구축이 필요하다. 외부 기관에서 제공되는 기후자료는 외부 시스템에서 처리하고 APEC 기후센터 내부에서 생산되는 내부데이터는 내부 시스템에서 처리하여 두 시스템이 동기화를 통해 동일한 서비스 제공을 구성하고자 하였다. 또한, 기존에 제공되었던 자료의 문제점을 개선하고 추가 서비스를 통해 확장 서비스를 구축하고자 하였다. 이렇게 구성된 서비스는 세계에서 점점 강해지는 이상기후에 대한 빠른 대처를 위해 표준화된 자료수집 체계 및 신속한 감시 결과 제공하여 시의적절한 원인분석이 가능한 기후 감시분석 시스템을 구축하고 연구자에게 실시간 기후 분석정보 제공을 목표로 하였다.

### (가) NCEP 재분석 자료

#### ① 자료

기후 분야에서 공통으로 사용하는 NetCDF (Network common Data form) 파일포맷으로 제공되고 있는 NOAA의 CDC (Climate Data Center)에서 제공하는 파일을 정기적으로 수집하여 사용하였다. 이는 시간과 공간정보를 하나의 파일에 표기할 수 있어 파일 전송에 있어 빠른 전송이가능하다는 장점을 갖고 있다. 또한, 북극지역의 해빙정보와 눈덮임 정보를 제공하기 위해 NSIDC에서 제공하는 해빙면적 정보를 수집하여 사용하였다. 눈덮임 정보는 7일 자료를 제공하고 있어 이를 일별자료로 변환하여 원하는 기간으로 재가공한 정보로 사용하였다. 기후모니터링을 위해 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 sec 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 수집하여 최근 7일, 월별 자료로 생산하여 제공하였다.

#### ② 자료구조

수집되는 자료의 기본 파일 포맷은 NetCDF이다. 변수의 특성에 따라 하나의 파일에 시공

간 정보가 포함된 파일도 있고 그렇지 않은 파일도 있어 여러 파일을 연도를 기준으로 일자별, 공간별 통합 파일구조로 변경하여 사용하였다. 기온에 대한 속성정보는 다음과 같다.

```
netcdf air.2021 {
dimensions:
    level = 17 ;
    lat = 73 ;
    lon = 144 ;
    time = UNLIMITED ; // (288 currently)
    nbnds = 2 ;
variables:
    float level(level) ;
        level:units = "millibar" ;
        level:actual_range = 1000.f, 10.f ;
        level:long_name = "Level" ;
        level:positive = "down" ;
        level:GRIB_id = 100s ;
        level:GRIB_name = "hPa" ;
        level:axis = "Z" ;
    float lat(lat) ;
        lat:units = "degrees_north" ;
        lat:actual_range = 90.f, -90.f ;
        lat:long_name = "Latitude" ;
        lat:standard_name = "latitude" ;
        lat:axis = "Y" ;
    float lon(lon) ;
        lon:units = "degrees_east" ;
        lon:long_name = "Longitude" ;
        lon:actual_range = 0.f, 357.5f ;
        lon:standard_name = "longitude" ;
        lon:axis = "X" ;
    double time(time) ;
        time:long_name = "Time" ;
        time:delta_t = "0000-00-01 00:00:00" ;
        time:standard_name = "time" ;
        time:axis = "T" ;
        time:units = "hours since 1800-01-01 00:00:0.0" ;
        time:avg_period = "0000-00-01 00:00:00" ;
        time:coordinate_defines = "start" ;
        time:actual_range = 1937256., 1944144. ;
    float air(time, level, lat, lon) ;
        air:long_name = "mean Daily Air temperature" ;
        air:units = "degK" ;
        air:precision = 2s ;
```

```

air:least_significant_digit = 1s ;
air:GRIB_id = 11s ;
air:GRIB_name = "TMP" ;
air:var_desc = "Air temperature" ;
air:level_desc = "Multiple levels" ;
air:statistic = "Mean" ;
air:parent_stat = "Individual Obs" ;
air:missing_value = -9.96921e+36f ;
air:valid_range = 150.f, 350.f ;
air:dataset = "NCEP Reanalysis Daily Averages" ;
air:actual_range = 177.525f, 319.075f ;
double time_bnds(time, nbnds) ;

// global attributes:
:Conventions = "COARDS" ;
:title = "mean daily NMC reanalysis (2014)" ;
:history = "created 2013/12 by Hoop (netCDF2.3)" ;
:description = "Data is from NMC initialized reanalysis\n",
               "(4x/day). It consists of most variables interpolated to\n",
               "pressure surfaces from model (sigma) surfaces." ;
:platform = "Model" ;
:dataset_title = "NCEP-NCAR Reanalysis 1" ;
:References =
"http://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html" ;
}

```

## (나) 자료처리

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  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  의 수평 해상도를 가지며 Level 정보를 갖는 기온(Air Temperature) 정보나 그렇지 않은 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST) 등 다양한 형태로 구성된다. 한국 기상청에서 제공하는 종관기상관측자료는 관측 시각은 동경 135도 자오선을 기준으로 한 한국 표준시를 기준으로 하며 기후 평년값 산출지점은 기상청과 경기도청에서 운영하는 자동 기상관측장비 설치지점 중 관측 기간이 10년 이상인 219개 지점으로 선정하였다. 관측장소가 이전된 지점도 이전 전·후 기간 전체에 대해 통계하였으며, 이전된 지점에 대한 정보는 평년값 메뉴 내에 별도로 제공하였다. 기후 평년값의 통계 기간은 1991~2020년(30년)이며, 관측 기간이 30년 미만인 곳은 자료가 있는 기간에 대해 산출하였다. 관측지점별로 관측하는 요소와 관측 요소별 통계 기간이 다를 수 있으며, 요소별 통계 기간은 기상자료 개방 포털 평년값 메뉴 내에 별도로 제공하였다. 평년값은 기본적으로 관측 요소별 일 통계치를 이용하여 기간별(일/주/순/월/계절/연) 평년값을 산출하였다.<sup>1)</sup>

## (2) 서비스 개선 및 확장

### (가) 분석 서비스

기후감시분석시스템(CAS)의 자료합성 서비스는 1948년부터 최근 자료에 대해 월별 합성을 제공하는 서비스로 2021년도에 개발되어 APEC 기후센터 연구자들에게 제공되고 있다. 합성정보 서비스를 위한 사용자 인터페이스는 조건입력 영역과 결과제공 영역, 결과에 대한 파일 제공 영역으로 구성되어 있다. 조건입력 영역은 여러 파일의 평균값이나 편차값을 선택하는 합성 방법 선택과 편차값을 선택할 경우, 사용자가 평년 기간을 자유롭게 선택할 수 있는 기능을 제공한다. 또한, 변수 선택, 변수에 따른 Level 선택, 단일 월 선택, 다중 월 선택, 합성할 연도 선택 및 제거할 연도를 선택하고 합성지역을 선택할 수 있도록 제공한다. 합성된 결과에 대한 색채 테이블을 제공하여 결과 이미지를 변경할 수 있도록 하였다. 합성 결과화면에서는 선택한 지역의 합성 분석 결과를 표출해 주는 영역으로 조건 결과를 지도 기반으로 이미지 정보를 제공한다. 사용자는 분석 결과에 대해 NetCDF파일이나 이미지, 엑셀 파일형태로 제공할 수 있으며 선택영역에 대한 최댓값, 최솟값, 평균값, 중간값, 편차, 분산 등의 인덱스 정보를 제공하도록 구성하였다.

또한, 기후분석시스템의 시계열 분석 서비스는 합성 분석 서비스와 비슷하게 상단에 조건 입력화면과 하단에 결과화면으로 구성되어 있다. 조건 검색화면에서는 변수 선택 및 선택된 변수에 따른 Level 선택, 그리고 평균값이나 편차정보에 대한 조건 선택 메뉴로 구성하였다. 기간은 연도별 월에 대한 시계열 정보나 특정 월에 대한 시계열 정보, 선택된 월에 대한 시계열 정보 등 사용자가 기간을 선택할 수 있도록 구성하였다. 하나의 지역을 선택할 수 있으며 여러 지역을 선택하여 합하거나 뺄 수 있는 기능을 제공하도록 하였다. 결과는 그래프로 제공되고 범례를 클릭하여 그래프를 숨기거나 표시하여 그래프의 범위를 조정할 수 있도록 구성하였다. 또한 다양한 파일형태로 내려받기가 제공된다.

#### ① 합성 결과 범례 자동조정 및 사용자 설정 기능 추가

기후감시분석시스템(CAS)의 합성장 분석 서비스는 다양한 기후 변수를 이용하여 의 합성 결과 범례가 고정되어 있어 자료에 따라 분석 결과를 보기 어려운 문제가 발생하여 각 자료의 특성을 반영하고 분석 방법에 따라 범례가 자동으로 조절될 수 있도록 기능을 추가하였으며 사용자가 수정으로 설정하는 기능을 개발하였다.

---

1) 신기 후 평년값(1991-2020) 통계 방법 안내, KMA, 2021.3.25

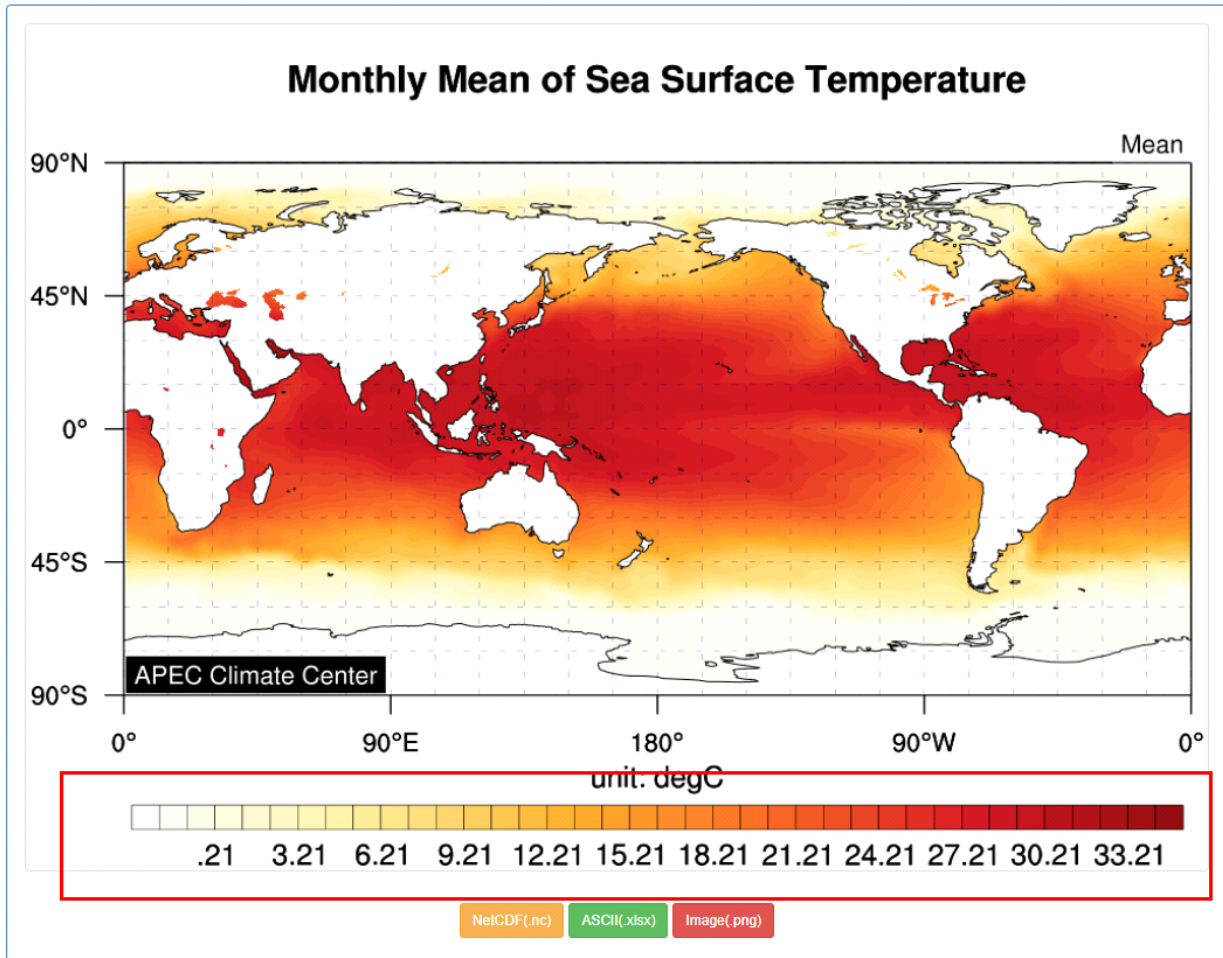


Figure 113. The legend of the synthetic information provision service of the climate analysis system is provided at a constant rate between the minimum and maximum values. This can be inconvenient for users who want to see a specific pattern in detail, so a function was added to allow users to modify the legend.

## ② 시계열 분석 결과 값 제공

분석된 시계열 결과는 아래와 같이 그래프 형태로 제공된다. 사용자가 선택한 지역을 대상으로 제공되며 아래의 결과는 2015년부터 2020년도에 대해 1월부터 12월까지의 추세 변화를 보여주는 결과다. 추세선 그래프의 색상과 모양은 자동으로 지정되고 마우스를 그래프 위에 올리면 해당연도와 값을 텍스트로 볼 수 있다. 또한, 범례의 연도를 클릭하면 해당연도를 숨기거나 보이게 할 수 있어 그래프의 간격을 자동으로 늘리거나 줄일 수 있다. 또한, 상단의 목록 아이콘을 통해 다양한 파일형태로 내려받기가 가능하다. 웹 브라우저에서 프린트를 할 수 있으며 이미지 파일인 PNG파일, JPEG파일, PDF파일, SVG파일로 변환하여 다양한 형태의 파일로 내려받기 기능을 제공한다.

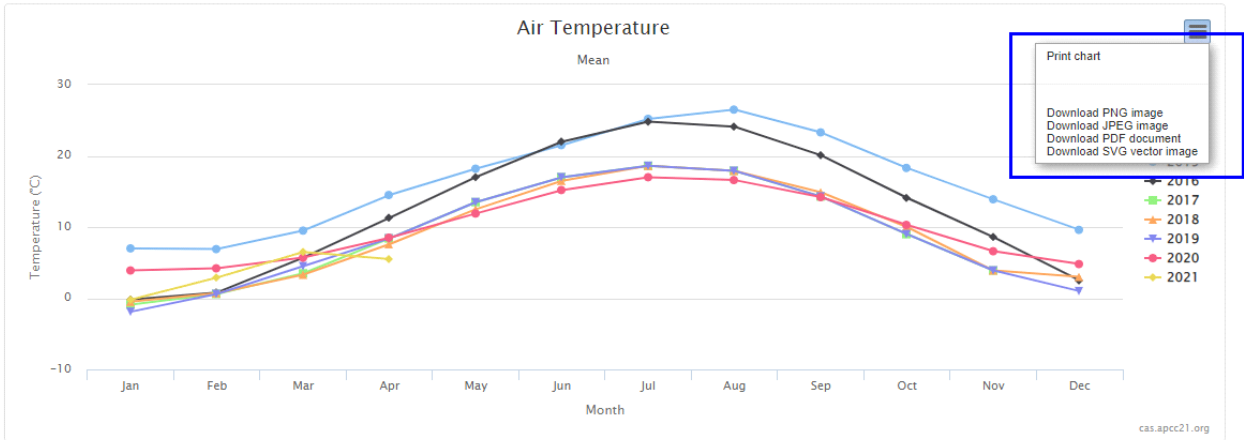


Figure 114. Analyzed results are provided to users in the format of various files.

기존의 시계열 분석 서비스는 분석된 결과는 다양한 형태로 제공되고 있다. 사용자가 원하는 지역이나 기간을 선택하여 값의 변화를 제공하는 서비스로 그래프를 통해 값의 변화를 한눈에 보기에는 편하지만, 결과에 대한 수치정보는 제공하고 있어, 수치정보 제공에 대한 확장 서비스 개발이 필요하였다.

```

2010, 2009, 2008, 2007, 2006, 2005, 2004, 2003, 2002, 2001, 2000, 1999, 1998, 1997, 1996, 1995, 1994, 1993, 1992, 1991, 1990, 1989,
1988, 1987, 1986, 1985, 1984, 1983, 1982, 1981], [0.0, -0.01, -0.03, -0.47, 0.01, 0.11, -0.04, 0.06, -0.02, 0.19, 0.1, 0.14, 0.2, 0.1
2, -0.31, 0.12, 0.02, 0.09, 0.11, 0.02, -0.28, 0.16, 0.03, 0.17, -0.37, 0.02, -0.05, -0.03, 0.03, 0.01, -0.19, 0.08, -0.06, -0.12, 0.
16, 0.23, 0.01, 0.23, 0.13, 0.09, -0.11, 0.05], [1.11, -0.51, 0.19, 0.13, -0.04, -0.22, -0.05, -0.34, -0.03, 0.32, 0.09, 0.09, 0.18,
0.05, -0.08, -0.24, -0.21, 0.08, 0.23, -0.39, 0.28, -0.08, 0.31, 0.34, -0.22, -0.02, -0.09, -0.37, -0.12, 0.17, -0.16, 0.23, -0.09, -
0.62, 0.15, 0.05, -0.28, 0.01, -0.07, 0.03, -0.16, 0.17], [0.23, -0.4, 0.51, 0.28, 0.16, 0.46, 0.02, 0.42, 0.28, 0.14, -0.37, -0.45,
0.09, 0.1, -0.56, 0.32, 0.26, 0.46, 0.32, 0.23, 0.11, 0.03, -0.19, -0.45, -0.62, 0.06, 0.06, -0.3, -0.09, -0.43, -0.61, -0.04, -0.16,
-0.66, 0.01, -0.38, -0.13, -0.45, -0.07, -0.58, -0.12, -0.08], [0.14, 0.32, 0.47, 0.82, 0.16, 0.34, -1.06, -0.92, 1.03, -0.88, 0.48,
0.92, 1.49, 1.12, -1.85, 0.01, 0.53, 1.07, 0.6, -1.16, -0.67, -0.31, 2.03, 0.31, -2.22, 0.34, -1.29, -0.68, -0.68, 0.62, -1.0, 0.6,
-0.9, 0.34, 0.31, -0.35, 1.57, -0.85, 0.67, -1.35, 0.58, 0.44], [0.0, 0.0, -0.02, -0.3, 0.05, 0.07, -0.02, 0.11, 0.01, 0.16, 0.08, 0.
09, 0.2, 0.07, -0.19, 0.11, 0.04, 0.07, 0.03, -0.09, -0.17, 0.12, 0.08, 0.09, -0.23, -0.05, -0.04, -0.03, -0.04, -0.02, -0.17, -0.02,
-0.02, -0.07, 0.0, 0.13, 0.03, 0.17, 0.1, 0.01, -0.19, 0.05], [1.0, 0.3, 1.3, -0.2, 0.7, 0.2, 0.8, 0.1, 0.2, 1.1, 0.5, 0.4, 0.8, 0.3
, -1.1, 0.1, -0.3, 0.8, 0.2, -0.7, -0.5, 0.2, 0.0, 0.1, -1.4, 0.3, -0.5, -1.3, -0.4, -0.8, -1.4, 0.6, -0.4, -1.3, 0.0, -0.2, -0.4, -0
.7, 0.3, -0.4, -0.3, -0.5]], [[1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997,
1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2
020, 2021, 2022], [0.23, -0.8, 0.49, 0.74, 1.39, -0.03, 1.39, 0.94, -0.86, -0.48, 0.42, -1.31, -0.03, 0.1, -0.29, -0.41, 0.04, -2.47,
1.0, 0.1, 0.94, -1.89, 0.04, 0.62, 0.49, 0.04, 0.68, -2.09, 0.68, 1.2, 0.81, 0.55, 1.13, -0.22, 0.29, -0.35, 0.62, -0.03, -3.12, -0.
29, -0.16, -0.09], [0.61, -0.54, 0.12, -0.23, 0.05, -0.96, 0.19, 0.54, -2.15, -0.3, 0.82, -0.54, 0.61, -0.4, -1.28, -0.3, -0.05, -0.7
5, 1.2, 1.1, -0.26, 0.99, -1.35, 0.82, 0.29, -0.72, -0.82, -0.26, 0.19, 0.64, 0.33, 0.33, 1.13, -0.09, -1.17, -0.16, -0.75, -0.12, 0.
47, 0.68, -1.77, 3.9], [-0.05, -0.17, -1.55, -0.02, -1.16, -0.2, -0.95, 0.21, -1.79, -0.29, 0.06, -1.64, -1.1, -0.08, -0.71, 0.36, 0.
36, -1.67, -1.16, -0.38, 0.27, 0.51, 0.87, 1.14, 1.56, 0.96, 1.14, -1.49, 0.48, 0.45, -1.16, -0.92, 0.6, 1.02, 1.44, 0.24, 1.56, 0.66
, 1.02, 1.71, -1.01, 0.87], [0.43, 0.58, -1.44, 0.67, -0.92, 1.62, -0.4, 0.3, 0.33, -0.97, 0.6, -1.08, 0.62, -0.74, -0.74, -1.38, 0.3
3, -2.36, 0.3, 2.1, -0.35, -0.73, -1.24, 0.6, 1.09, 0.53, -0.02, -1.97, 1.15, 1.53, 0.94, 0.47, -0.95, 1.05, -0.99, -1.14, 0.33, 0.14
, 0.83, 0.46, 0.31, 0.12], [0.41, -1.75, 0.05, 0.86, 1.49, 0.23, 1.13, -0.04, -0.67, -0.22, -0.22, -1.57, -0.22, -0.4, -0.31, -0.4, -
0.49, -2.11, 0.77, 0.68, 1.04, -1.57, -0.85, 0.23, 0.59, 0.32, 0.95, -1.75, 0.59, 1.76, 0.77, 0.68, 1.4, 0.05, 0.95, -0.22, 0.59, 0.4
1, -2.74, -0.22, -0.04, -0.04], [-0.64, -0.35, -0.5, 0.52, -0.93, -0.5, -0.2, 0.09, -1.81, -0.5, 0.96, -1.96, -1.08, -0.5, -1.81, -0.
64, 0.52, -1.96, 0.23, 0.09, 0.38, -0.64, -0.93, 0.38, 1.25, -0.35, 0.23, -1.52, 0.52, 1.25, 0.67, 0.82, 1.69, 0.38, 0.23, 1.25, 0.38
, 1.11, -0.2, 1.98, 0.52, 1.55]]]
[22/Nov/2022 05:55:02] "GET /forecast/longguide?target_month=06&target_variable=temp HTTP/1.1" 200 3945
[22/Nov/2022 05:55:02] "GET /static/CAS_PLOT/GUIDANCE_MAP/MAP/06_temp_1.png HTTP/1.1" 200 405755

```

Figure 115. Time series analysis service provides analyzed results in various forms. In order to provide more convenient information, it has been expanded to provide additional results.

분석된 결과를 웹 브라우저의 그래프로 표출되기 전에 자료는 리스트 형태의 수치로 자료를 제공하여 이 결과를 다시 테이블 형태로 값을 제공하도록 하였다.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5
2	90	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392	1019.4392
3	87.5	1017.4088	1017.4532	1017.4975	1017.5439	1017.5919	1017.627	1017.6738	1017.7126	1017.7565	1017.798	1017.8379	1017.8775
4	85	1015.1178	1015.0132	1014.8999	1014.7888	1014.6834	1014.5846	1014.4955	1014.4206	1014.362	1014.3233	1014.3069	1014.3029
5	82.5	1013.0774	1012.7823	1012.5129	1012.2794	1012.079	1011.9229	1011.8039	1011.7319	1011.702	1011.7105	1011.7557	1011.8379
6	80	1010.2677	1009.8029	1009.408	1009.1473	1009.0504	1009.1088	1009.2843	1009.5412	1009.8258	1010.0995	1010.3414	1010.5442
7	77.5	1007.1508	1006.4705	1006.1056	1006.0714	1006.3024	1006.698	1007.1436	1007.5613	1007.8999	1008.1366	1008.2766	1008.3456
8	75	1004.7089	1004.2834	1004.102	1004.1085	1004.2101	1004.3466	1004.4597	1004.5121	1004.4967	1004.45	1004.4028	1004.4261
9	72.5	1003.7011	1003.3097	1002.9525	1002.6694	1002.4626	1002.3269	1002.2537	1002.2573	1002.3427	1002.5117	1002.7585	1003.0693
10	70	1003.0081	1002.4161	1001.9608	1001.7516	1001.7436	1001.8802	1002.2282	1002.8742	1003.6517	1004.3188	1004.7799	1005.0891
11	67.5	1002.5376	1001.8818	1001.6891	1001.8646	1002.2032	1002.8976	1004.3278	1006.1013	1007.3271	1007.6484	1007.4479	1007.2394
12	65	1002.3323	1002.1854	1002.3682	1002.6254	1003.1729	1004.4781	1005.9923	1006.8059	1006.8649	1006.6725	1006.5847	1006.6964
13	62.5	1002.771	1003.1868	1003.7105	1004.8214	1006.673	1007.8698	1007.5669	1006.8963	1006.7823	1006.9569	1007.2822	1007.7335
14	60	1004.3661	1004.8145	1005.6948	1007.298	1008.7037	1008.5823	1007.6044	1007.1871	1007.1879	1007.4327	1007.9697	1008.4548
15	57.5	1007.0484	1006.9476	1007.0495	1007.3116	1007.5957	1007.8052	1007.9868	1008.2013	1008.521	1009.073	1009.773	1010.3173
16	55	1009.946	1009.2701	1009.0311	1009.1355	1009.2581	1009.3956	1009.7076	1010.1598	1010.6697	1011.3427	1012.1604	1012.8533
17	52.5	1013.0685	1012.6114	1012.4657	1012.4549	1012.0697	1011.6041	1011.6472	1012.115	1012.5504	1013.0322	1013.6637	1014.2065
18	50	1016.0197	1015.7354	1015.5605	1015.5673	1015.1499	1014.4735	1014.4496	1014.8516	1014.9048	1015.0024	1015.4206	1015.6237
19	47.5	1018.3896	1018.2818	1018.2783	1018.7258	1018.619	1017.569	1016.6242	1016.0911	1015.5439	1015.5112	1016.469	1016.6758
20	45	1020.7404	1020.2177	1018.7162	1017.2173	1016.2794	1015.6738	1015.6739	1016.1807	1016.3718	1016.4729	1016.4895	1016.1016
21	42.5	1021.4271	1018.9746	1016.4855	1014.8864	1014.7045	1014.8484	1014.558	1014.8896	1016.5706	1017.4282	1015.9238	1015.6662
22	40	1020.148	1018.8682	1017.9476	1016.6156	1015.5435	1014.8589	1014.2415	1014.002	1014.5834	1015.2878	1014.8552	1015.1427
23	37.5	1021.0384	1020.2513	1019.4775	1018.5391	1017.269	1016.206	1015.5246	1015.0334	1014.5569	1014.16	1013.8102	1014.0044
24	35	1021.9568	1021.5512	1020.917	1019.9166	1018.9799	1017.971	1016.7658	1015.7162	1015.0738	1014.9081	1014.7968	1014.4847

Figure 116. The analyzed results are provided in the form of an Excel file including coordinate information.

### ③ 서비스 초기 검색목록 자동 반영 기능 적용

기존의 기후분석시스템의 시계열 분석을 위해 변수를 선택하게 되면 자료가 가지고 있는 연도를 기본으로 선택할 수 있도록 제공하고 있어 가장 오래된 해를 기준으로 값을 선택하게 되므로 사용자는 원하는 연도를 선택해야 하는 번거로움이 발생하고 있어 최신의 연도를 기준으로 과거 5년을 기본 옵션으로 제공하도록 프로그램을 개선하고 수정하였다.

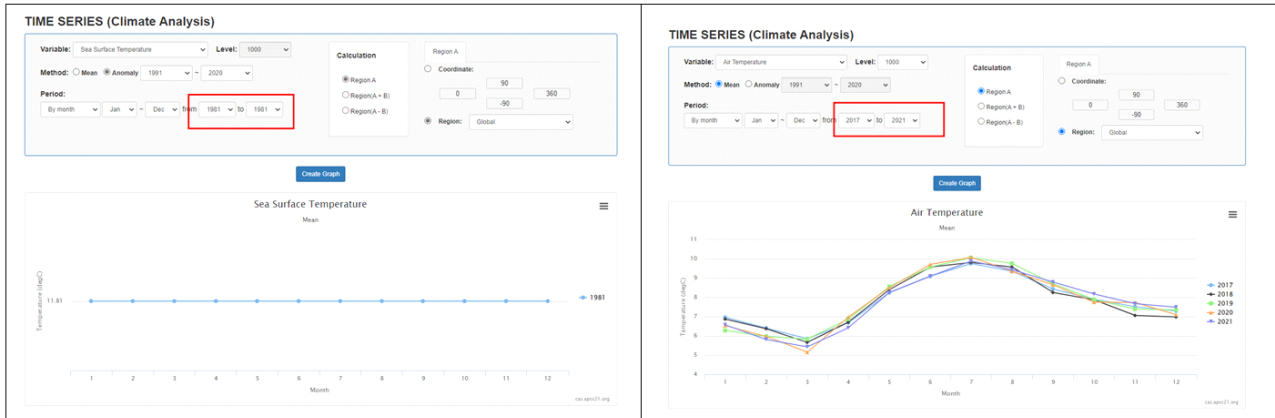


Figure 117. The list of time series analysis services is provided based on the latest information, so it was inconvenient for the user to manually select the period, but the function was modified to automatically select up to the latest 5 years.

## (나) 감시 서비스

APEC 기후센터의 기후 감시 분석 시스템(CAS)은 전지구 모니터링과 한반도 모니터링 정보를 제공한다. 전지구 감시분석 시스템은 수집된 최신자료를 기반으로 다양한 정보를 한 곳에서 보여주기 위해 일별, 최근 7일, 월별 자료를 선택한 날짜를 기준으로 평균 및 편차 정보를 보여주도록 구성하였다. 상단에는 날짜를 선택할 수 있는 달력기능을 제공하고 하단에는 각 변수에 대한 모니터링 정보를 보여준다. 한반도 감시분석 시스템은 수집된 종관 관측 최신자료를 기반으로 일별, 월별, 월별 자료를 선택한 날짜를 기준으로 평균 및 편차 정보를 보여주도록 구성하였다. 상단에는 날짜를 선택할 수 있는 달력기능을 제공하고 하단에는 각 변수에 대한 모니터링 정보를 보여준다.

### ① 일별 수집자료의 누락에 대한 알림 프로그램 개발

ASOS 관측 자료는 공공데이터 포털을 통해 자료를 배포하지만, 값이 빠진 상태로 배포되는 경우가 많아 CAS의 서비스에 영향을 미치고 있어 사용자의 혼선을 덜기 위해 프로그램 수정이 필요성이 제기되었다. 기후감시분석시스템(CAS)은 공공데이터 포털을 통해 자료를 수집하고 가공하여 분석을 통해 서비스 조건에 따라 정보를 제공하고 있으므로 서비스가 제대로 이뤄지지 못했을 경우, 공공 데이터 포털을 통해 제공되는 기상청의 종관 관측 자료의 누락인지, 아니면, 기후감시분석시스템의 자체 결함인지 판단하기 어려울 뿐만 아니라 대부분 사용자가 시스템의 장애로 오인하는 경우가 많아 이를 개선하고자 하였다.

이러한 사용자의 오인을 방지하기 위해 기존의 텍스트 기반 메시지를 이미지로 교체하여 서비스를 적용하고 웹사이트 접속 때 배포된 자료의 값이 누락 되었는지 확인하여 값에 이상이 없으면, 감시자료를 생산하여 제공하지만, 값이 누락 되었을 경우, 자료 배포가 안 되었다는 메시지와 함께 새로운 이미지로 교체되어 제공하도록 프로그램을 개발하여 적용하였다.

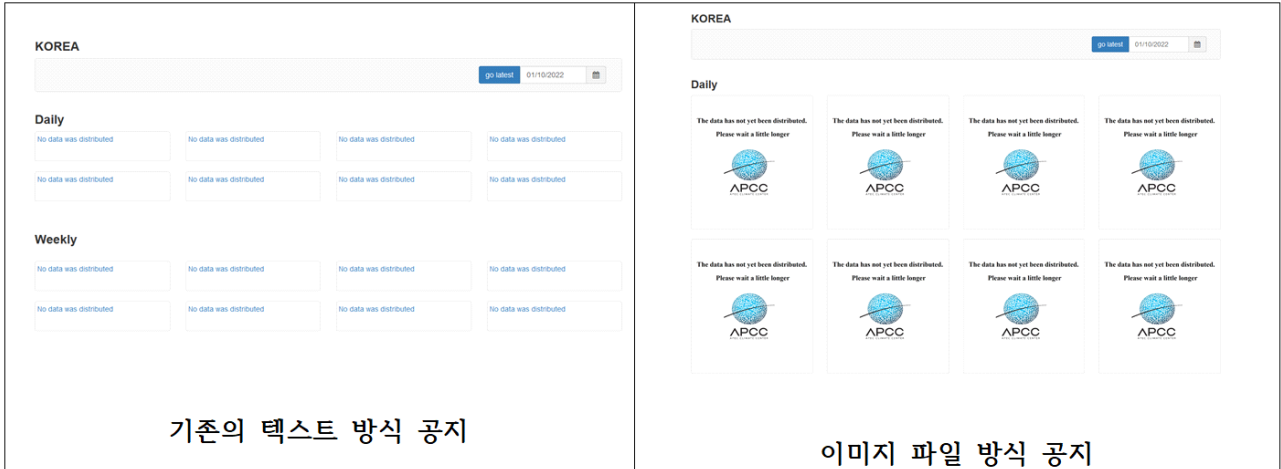


Figure 118. If the value of the distributed data is missing, text-based information that the data was not distributed was provided(left), but in order to prevent users from misidentifying, an image-based program notifying that the data was not distributed was developed.

② 선택한 날짜에 해당하는 전체(주별, 월별) 정보 제공

공공데이터 포털을 통해 제공되는 한반도 관측자료(ASOS)의 일별 관측 자료로 일자를 기준으로 해당하는 주의 누적 결과를 생산한다. 월별 감시정보 또한, 매월 1일부터 해당하는 날짜까지의 누적 정보를 제공하기 때문에 사용자가 전체 주의 감시정보나 월의 감시정보를 보기 위해서는 주의 마지막 날짜나 해당하는 달의 마지막일 자를 선택해야만 확인할 수 있다. 달력 기능을 이용하여 날짜를 선택하게 하는 서비스를 통해 사용자들에게 해당하는 주의 마지막 날짜가 며칠인지 확인할 수 있도록 제공하고 있지만 정확히 선택해야 하는 불편함이 있다. 그래서 감시 결과 서비스에 대해 과거의 일별, 주별, 월별 자료에 대한 서비스 분리가 필요하다.

기존의 기후감시분석시스템(CAS)에서 제공하는 감시정보는 선택한 날짜에 대한 일별, 주별, 월별 누적 평균과 편차 정보를 제공하였으나, 신규 감시분석시스템은 사용자가 선택한 날짜에 해당하는 일별, 전체 주, 전체 월에 대한 감시정보와 선택한 날짜까지의 누적 정보를 함께 제공함으로써 사용자의 선택폭을 넓히고자 프로그램을 개선하였다.

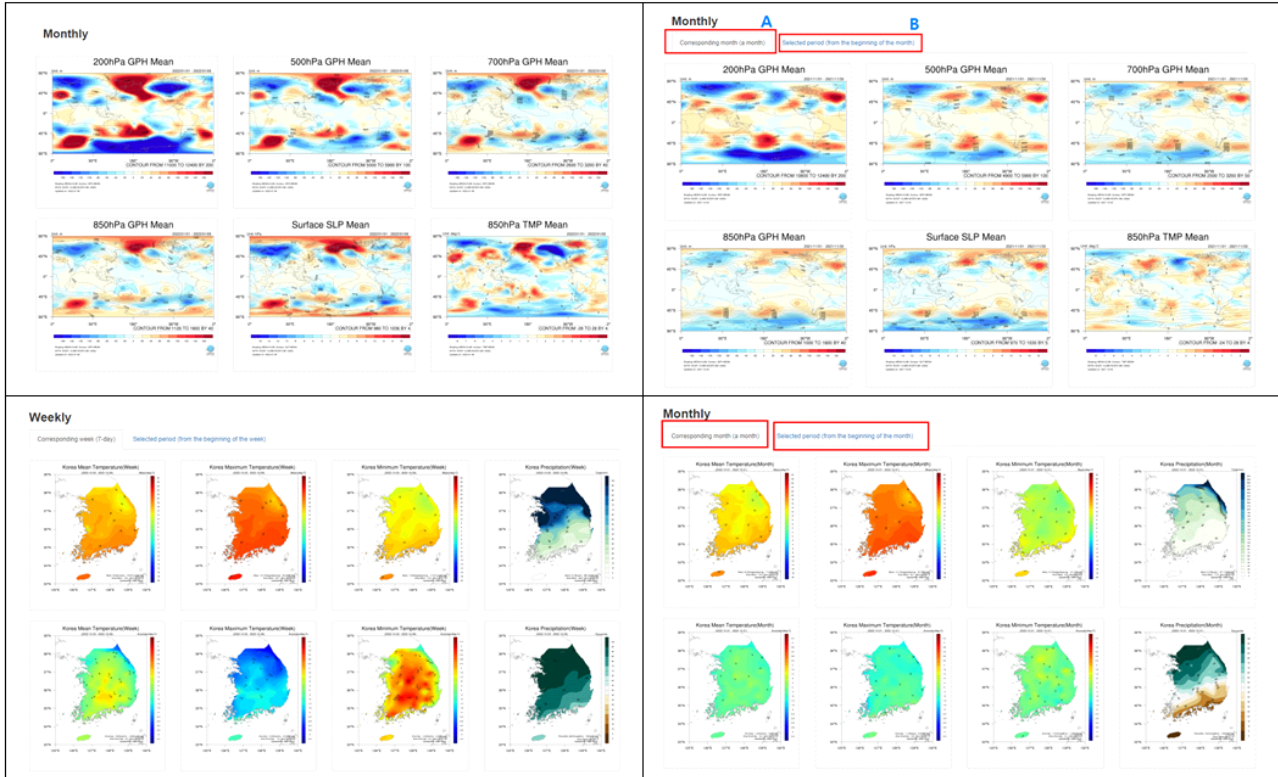


Figure 119. If the previous service provided weekly and monthly monitoring cumulative averages weekly(7days) and monthly (first to last day) information including the selected date.

### ③ SST, OLR 기후인자 추가 서비스 제공

기후모니터링을 위해 수집된 변수는 지표면 기온(surface air temperature), 강수량(precipitation), 해면기압(mean sea level pressure), 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 수집하여 최근 7일, 월별 자료로 생산하여 제공하고 있다. 하지만, 기후 감시에 많이 활용되는 해수면 온도(sea surface temperature), 지구 장파 복사량(Outgoing Long Radiative; OLR) 정보는 제공하고 있지 않아 전 지구 감시 서비스에 대해 신규 기후인자 추가 서비스 제공이 필요했다. 기후 감시 서비스에 SST, OLR을 대상으로 자료를 수집하고 평년값을 생산하여 모니터링을 위한 자료처리 완료하여 서비스를 추가하였으며, 일별, 최근 7일, 월별, 연별도 별로 자료에 대한 평균과 편차 정보를 기후감시분석시스템에 추가 제공하고 다른 변수에 비해 늦게 제공되는 OLR 정보는 자료가 생산될 때까지 사용자들에게 미생산 정보를 제공하도록 구성하였다.

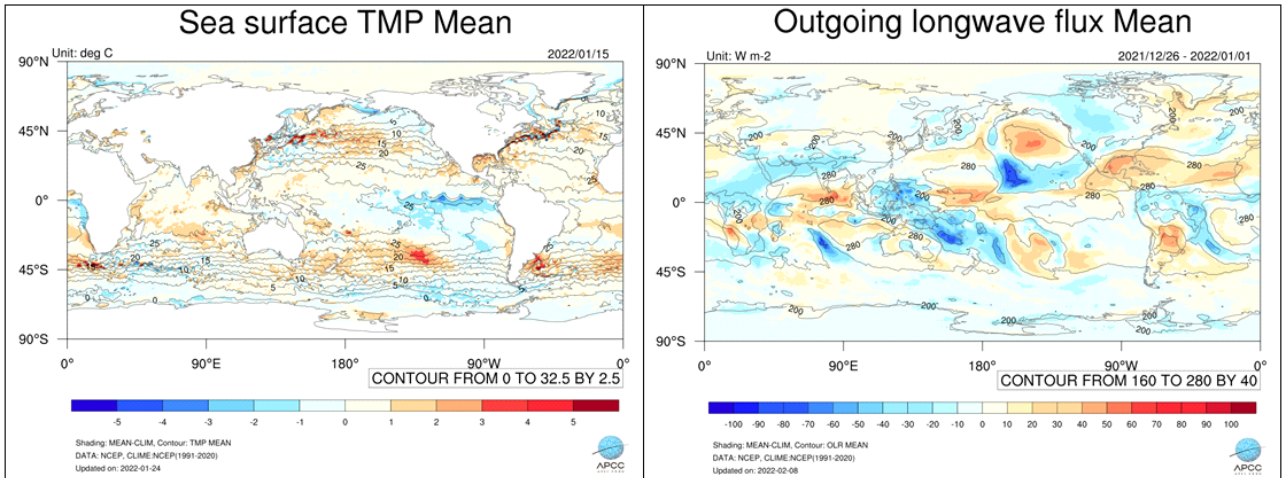


Figure 120. SST and OLR services, which are new climate factors by daily, last 7days, monthly, and yearly, have been added to the global monitoring information service.

### ③ 북극 지역 해빙 정보 서비스 제공

한반도의 기후 예측을 위해 중요한 요소로 작용하는 것은 북극의 해빙 상태를 빠르게 파악하는 것이다. 그리하여, NSIDC (National Snow and Ice Data Center)에서 제공하는 북극 지역의 일별 해빙 정보를 수집하고 현재 해빙 상태와 지난 30년간의 편차 정보를 비교할 수 있도록 지도를 기반으로 제공하는 서비스를 구축하였다. 해빙을 관찰하는 지역을 16개 지역으로 나누고 각 지역의 최근 1개월 해빙 변화를 최근 5년 동안의 변화와 같이 보여주어 해빙의 면적 변화를 쉽게 파악할 수 있도록 서비스를 제공하였다. 지도 기반으로 제공되는 해빙 모니터링 정보는 매일 변화하는 해빙의 면적과 해빙의 강도, 그리고 전년도 같은 달의 변화 방향, 편차를 보여주도록 구성하고 북극 지역의 해빙 면적 시계열 정보는 최근 1달간 해빙 면적 변화를 선택한 날짜를 기준으로 과거 31일까지 보여준다. 또한, 최근 5년간의 같은 날짜(예를 들어 2022년 12월 1일을 선택한 경우, 2018년부터 2022년까지의 11월 2일부터 12월 1일까지의 그래프 제공)에 대한 해빙 면적을 비교할 수 있도록 그래프를 동시에 보여주도록 하였다.

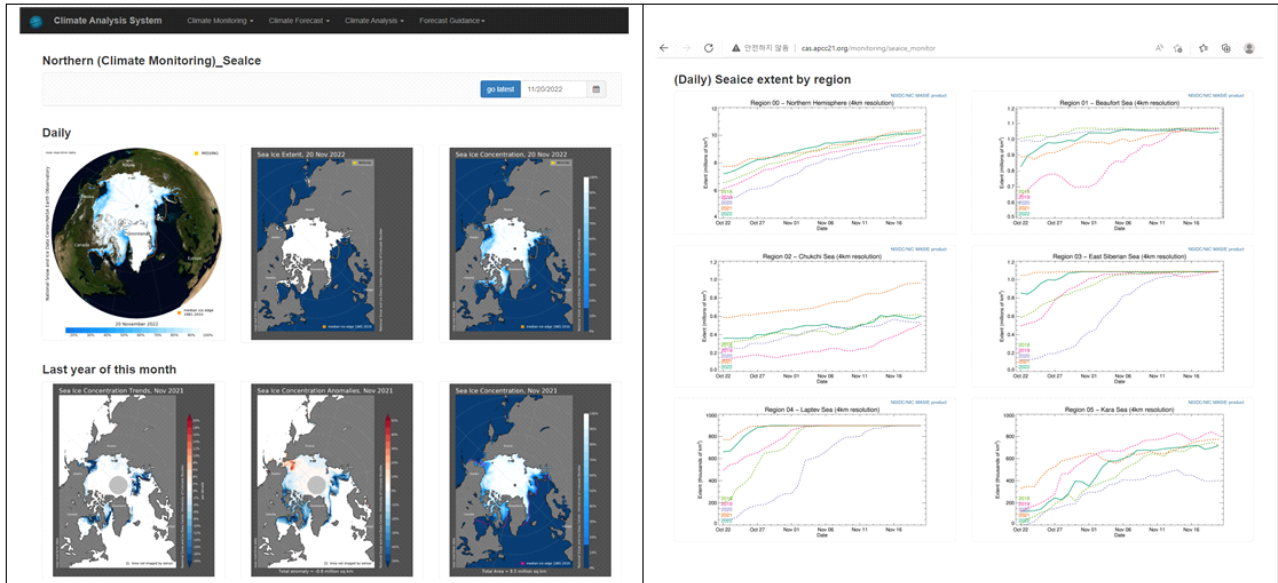


Figure 121. Since sea ice in the Arctic region has a great influence on the climate of the Korean Peninsula, many scientists are monitoring changes in Arctic sea ice. Using the climate analysis system, NSIDC provided additional service of sea ice information and change information in the Arctic region

(다) 예측 서비스

① 인공지능 기반 1개월 예측 정보 서비스 제공

APCC에서 인공지능 기법을 적용한 동아시아 예측 정보를 기후감시분석시스템에 적용하여 사용자에게 서비스가 되도록 구성함. 매주 수요일 신규자료를 제공하고 자료제공 시점을 기준으로 4주 예측 정보를 제공하도록 서비스를 구축하였다.

### East Asia (AI Forecast/APCC)

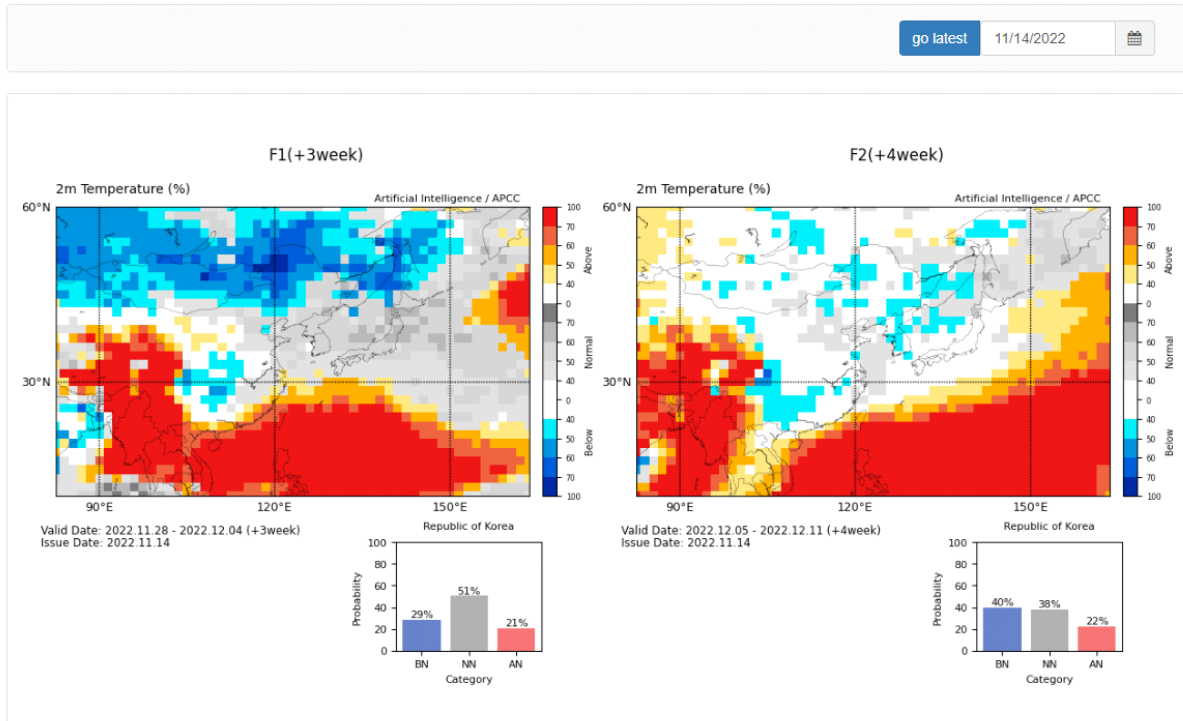


Figure 122. Additional services were provided for one-month prediction information based on artificial intelligence developed by APCC.

### (3) 시스템 개선 및 보안 강화

#### (가) 기후 감시·분석 시스템 운영 및 보안 강화

##### ① 기후분석시스템 운영 및 사용자 요구사항을 반영한 개선

기후 감시분석 시스템에서는 대부분 NOAA나 NCEP의 전지구 감시자료를 활용하고 있다. 하지만, 배포기관의 상황에 따라 평소 배포되는 시간에 비해 3일 정도 지연되는 경우가 발생한다. 이는 자료에 대한 검증이나 오류수정에 필요한 시간으로 배포가 될 때까지 기후감시분석시스템의 전 지구 모니터링은 자료 배포를 기다리게 된다. 사용자들은 정식 배포를 기다리게 되어 그 동안 정확한 모니터링 정보를 확인하기 어렵다. 그리하여 비록 검증되지 않은 자료이지만 원시자료를 이용하여 정규 배포가 되기 전까지 임시적으로 전지구에 대한 폭넓은 정보를 제공하도록 시스템을 개선하였다.

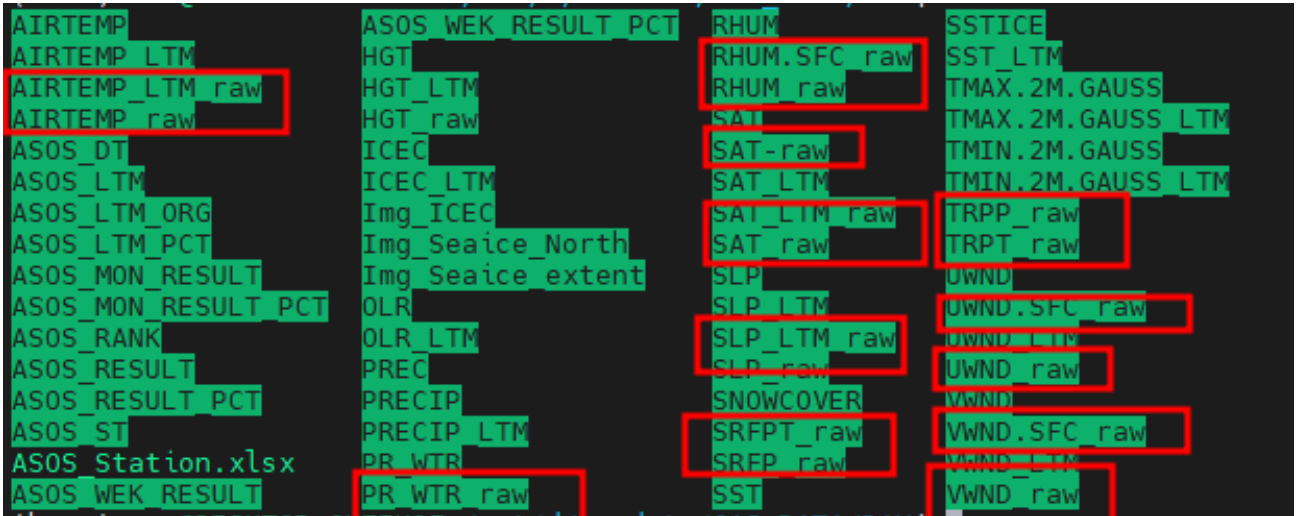


Figure 123. The climate analysis system provides analysis information using data from NOAA or NCEP, but if the distribution of data is delayed, the service is provided using temporary data, and the analysis information is changed when the data is officially distributed.

② 시스템 보안(웹) 취약성 점검 및 취약성 강화 조치

APEC 기후센터는 정기적으로 보안 취약성 점검을 통해 웹 취약을 대비하는 검사를 시행한다. 2022년 정보시스템 보안취약점 점검을 위해 기후감시분석시스템도 정보시스템 현황 조사를 (22/01/24) 실시하였으며 기상청 산하기관에서 운영 중인 홈페이지 및 모바일 앱 현황 파악을 통해 대국민 서비스 및 내부 서비스 모두 포함한 개발환경 서버 정보의 취약한 보안을 강화하였다.



서버	자원 업그레이드 전	자원 업그레이드 완료 후
CAS01	<pre>top - 09:41:57 up 357 days, 15:45, 1 user, load average: 0.00, 0.01, 0.05 Tasks: 320 total, 1 running, 319 sleeping, 0 stopped, 0 zombie %Cpu(s): 0.3 us, 0.0 sy, 0.0 ni, 99.7 id, 0.0 wa, 0.0 hi, 0.0 si, 0.0 st KiB Mem : 65764216 total, 43937904 free, 2489928 used, 19337284 buff/cache KiB Swap: 33554428 total, 33369412 free, 194016 used, 6241564 avail Mem</pre>	<pre>top - 10:07:52 up 5 min, 1 user, load average: 0.33, 0.27, 0.13 Tasks: 304 total, 1 running, 303 sleeping, 0 stopped, 0 zombie %Cpu(s): 0.1 us, 0.0 sy, 0.0 ni, 99.9 id, 0.0 wa, 0.0 hi, 0.0 si, 0.0 st KiB Mem : 13182036+total, 12532707+free, 5349296 used, 1144004 buff/cache KiB Swap: 33554428 total, 33554428 free, 0 used, 12583271+avail Mem</pre>
CAS02	<pre>[root@cas02 ~]# df -h Filesystem      Size  Used Avail Use% Mounted on devtmpfs        63G   0  63G   0% /dev tmpfs           63G   0  63G   0% /dev/shm tmpfs           63G 403M   63G   1% /run tmpfs           63G   0  63G   0% /sys/fs/cgroup tmpfs           100G  33G  68G  33% / /dev/sda2       1014M 170M  845M  17% /boot /dev/sda1       1022M  12M 1011M   2% /boot/efi /dev/mapper/datavg1-casdata 3.3T 881G  2.5T  27% /casdata tmpfs          13G  4.0K  13G   1% /run/user/988 [root@cas02 ~]#</pre>	<pre>[root@cas02 ~]# df -h Filesystem      Size  Used Avail Use% Mounted on devtmpfs        63G   0  63G   0% /dev tmpfs           63G   0  63G   0% /dev/shm tmpfs           63G 35M   63G   1% /run tmpfs           63G   0  63G   0% /sys/fs/cgroup tmpfs           100G  33G  68G  33% / /dev/mapper/rootvg-root 1014M 170M  845M  17% /boot /dev/sda2       1014M 170M  845M  17% /boot /dev/sda1       1022M  12M 1011M   2% /boot/efi /dev/mapper/datavg1-casdata 9.9T 881G  9.0T   9% /casdata tmpfs          13G  4.0K  13G   1% /run/user/988 tmpfs          13G   0  13G   0% /run/user/0</pre>

Figure 125. Previous climate analysis system has been serviced using an external internet network, but synchronization of the system is required for internal internet network service. To this end, the resources that were different from each other were upgraded.

## ② APCC 내·외부망 연계 규약을 통한 이중화 시스템 구축

기후감시분석시스템(CAS)에는 21년 외부망에서 서비스를 개시하였으나, 연구자들의 주요 사용처는 내부망으로 이중화된 내부망 서비스를 위해 자원의 업그레이드, 연계 서비스 설정이 필요하였다. 이를 통해 사용자의 편리성 극대화 추구하였다. 서로 분리된 인터넷망에서 처리된 자료는 상대방의 시스템에 동기화 되어야 하고 동기화 과정에서 발생할 수 있는 오류와 보안 취약성을 강화하기 위해 자료 동기화 작동에 자료전송 프로그램을 암호화하고 복호화하여 안정적인 서비스가 가능하도록 구성하여 외부 인터넷망에서 접속하든, 내부 업무망에서 접속하든 지 같은 정보를 제공할 수 있도록 시스템을 구축하였다.



Figure 126. A dual service was built so that users can the same climate analysis system even when accessing from the internal or external Internet network.

(다) 기후 감시분석 시스템을 이용한 예보토의 모니터링 활용

기존 기후감시분석시스템(CAS)의 경우 외부 인터넷망에서만 접속이 가능했지만, 이중화 시스템을 구축하여 이중화된 내부 업무망에서도 사용이 가능하게 되어, 3개월 예보토의 지원을 위한 관측 기반 기후 예측인자 모니터링 발표 파일을 만드는 데에도 활용할 수 있다. 매월 관측 기반 기후 예측인자를 모니터링하여 Power point로 만드는 Microsoft Visual Basic for Application 프로그램에서, 기후 감시분석 시스템에 업로드되어 있는 관측 정보를 수시로 다운로드 및 발표 자료로 활용이 가능하다.

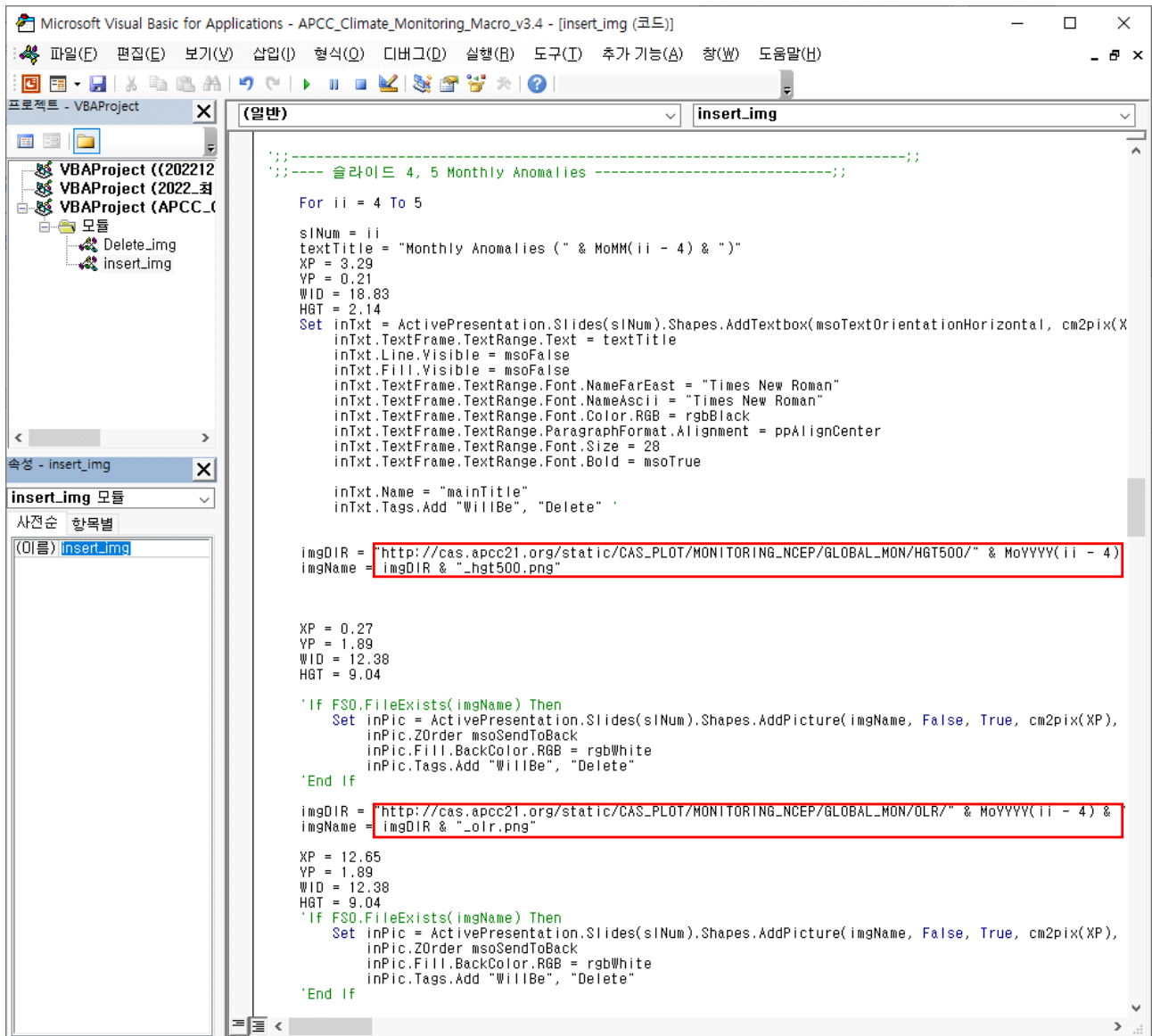


Figure 127. Inserting web images from the climate analysis system using Microsoft Visual Basic for Application.

#### (4) 요약

사용자의 편리성을 강화하기 위해서 달력 기능을 이용하여 선택한 월과 주를 계산하여 감시 결과 서비스에 대해 과거의 일별, 주별, 월별 자료에 대한 서비스 분리를 제공하였다. 또한, 신규 감시분석시스템은 사용자가 선택한 날짜에 해당하는 일별, 전체 주, 전체 월에 대한 감시 정보와 선택한 날짜까지의 누적 정보를 함께 제공함으로써 사용자의 선택폭을 넓히고자 프로그램을 개선하였다. NSIDC (National Snow and Ice Data Center)에서 제공하는 북극 지역의 일별 해빙 정보를 수집하고 현재 해빙 상태와 지난 30년간의 편차 정보를 비교할 수 있도록 지도를 기반으로 제공하는 서비스를 구축하였다. 해빙을 관찰하는 지역을 16개 지역으로 나누고 각 지역의 최근 1개월 해빙 변화를 최근 5년 동안의 변화와 같이 보여주어 해빙의 면적 변화를 쉽게 파악할 수 있도록 서비스를 제공하였다. 지도 기반으로 제공되는 해빙 모니터링 정보는 매일 변화하는 해빙의 면적과 해빙의 강도, 그리고 전년도 같은 달의 변화 방향, 편차를 보여주도록 구성하고 북극 지역의 해빙 면적 시계열 정보는 최근 1달간 해빙 면적 변화를 선택한 날짜를 기준으로 과거 31일까지 보여준다. 또한, 최근 5년간의 같은 날짜(예를 들어 2022년 12월 1일을 선택한 경우, 2018년부터 2022년까지의 11월 2일부터 12월 1일까지의 그래프 제공)에 대한 해빙 면적을 비교할 수 있도록 그래프를 동시에 보여주도록 하였다. 또한, 장비 업그레이드를 통해 외부망과 내부망의 시스템 자원의 규격을 통일시키고 APCC의 보안정책에 어긋나지 않는 범위에서 자료 동기화 통신 규칙을 설정하였다. 서로 분리된 인터넷망에서 처리된 자료는 상대방의 시스템에 동기화 되어야 하고 동기화 과정에서 발생할 수 있는 오류와 보안 취약성을 강화하기 위해 자료 동기화 작동에 자료전송 프로그램을 암호화하고 복호화하여 안정적인 서비스가 가능하도록 구성하여 외부 인터넷망에서 접속하든, 내부 업무망에서 접속하든 지 같은 정보를 제공할 수 있도록 시스템을 구축하였다.

## 5. 요약 및 결론

APCC에서는 우리나라 기온과 강수량에 영향을 미치는 다양한 기후 요소를 분석하는 한편 기온과 강수를 예측할 수 있는 관측기반 인자를 발굴하여 장기에보에 활용해 왔다. 폭염이나 한파 등의 이상기후 현상 빈도 역시 이러한 예측인자와 관련성이 높기 때문에 예측인자들을 발굴하고 예측을 고도화하는 업무를 통해 이상기후의 예측성 향상에 또한 기여해 왔다. 또한 사후 분석의 측면에서 한반도 월별 기후 특성을 분석하고 이상기후 발생 시 신속히 그 원인을 분석하여 정보를 제공해 왔다.

기후변화로 인해 날로 증가하는 이상기후에 대한 대비 능력을 강화하기 위해 APCC에서는 그동안의 노력을 통해 얻어진 기후 감시·분석 정보를 고도화하고 개선하는 한편 다양한 정보를 활용하여 최적의 예측을 생산하는 기술을 개발할 필요가 있다. 이를 위해 1차년에는 최근 중요도를 고려하여 북대서양 및 남아시아 기압계 변동에 다른 한반도 기후 예측 방안을 마련하고 예측 정보의 최적 활용 기반을 마련하고자 예측인자를 정성적으로 통합하여 검증하였다. 또한 기후변화를 고려하여 미래 한반도 홍수 위험도와 태풍 특성 변화에 대해 분석하였다. 마지막으로 기후 감시분석 및 예측 업무들을 보다 효율적으로 수행하기 위해 CAS의 분석 및 모니터링 시스템을 개선하였다.

2장에서는 최근 중요도를 고려하여 북대서양 변동성과 남아시아 고기압 변동성이 한반도 기후에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 봄철 북대서양 변동성과 관련해서는 먼저 NAO의 정의에 따른 차이가 있는지 살펴보기 위해서 CPC에서 제공하는 NAO 지수와 EOF를 통해 추출한 첫 번째 모드로 정의한 NAO 지수의 차이를 분석하였다. 그 결과 월별 NAO 패턴과 지수 사이에 유의할 만한 차이는 나타나지 않았다. 다만 우리나라 기온, 강수와와의 관련성이 EOF 기반 지수보다 CPC 기반 지수에서 조금 더 높게 나타나는 특징이 있다. 한편 우리나라 봄철 기온, 강수와 NAO와의 선형적인 관련성은 통계적으로 유의한 수준이기는 하지만 0.3에서 0.4 정도의 상관계수로서, 현업 기후 예측에 적용하기에는 부족한 수치이다. 따라서 현업 기후 예측에 NAO의 활용도를 높이기 위해서 우리나라 봄철 기온과의 비선형적인 관련성을 살펴보고 이 때 물리·역학적으로 의미 있는 신호가 나타나는지 분석하였다. 그 결과 양의 NAO인 경우에 우리나라 기온이 높을 때에는 중태평양 엘니뇨와 열대 인도양의 온난화 신호가 뚜렷하게 나타났고, 반면 우리나라 기온이 낮을 때에는 반대로 라니냐 신호와 인도양의 음의 해수면 온도 편차가 뚜렷하게 나타났다. 즉, 양의 NAO 시기에는 열대 지역 해수면 온도가 높고, 낮음에 따라 우리나라 기온 반응이 조절되는 특징을 확인하였다. 음의 NAO 시기에는 열대 지역 해수면 온도 편차에는 뚜렷한 특징이 나타나지 않고, 그린란드 동쪽부터 바렌츠해까지 해빙 편차가 주요 조절 요인으로 나타났다. 즉, 음의 NAO 시기에 기온이 낮을 때는 바렌츠해 해빙이 많은 경우, 반대로 기온이 높을 때는 바렌츠해 해빙이 적은 경우로 나타났다. 이러한 특징은 한 달 전부터 각각 열대 해수면 온도 및 북극 해빙에서 편차가 지속되므로 위에 제시한 요인들을 감시함으로써 우리나라 봄철 기온 예측에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

여름철 남아시아 고기압은 평균적으로 5~6월 남아시아 몬순 발달 및 대류 활발로 인한 상층 비단열 가열 반응으로 7~8월에 최성기를 보인 후 쇠퇴한다. 경년 변동성을 분석하기 위하여 티벳고원을 포함한 아라비아반도에서 동아시아에 이르는 지역에 대해 주성분 분석을 수행하고

지역 변동성과 비교하여 확장모드(EOF1)와 남북모드(EOF2)로 구분하였다. 확장모드는 봄철 인도양에 고온이 나타날 경우 대기 하층부터 기온이 상승하고 7월이 되어 아라비아해에 대류가 활발해짐에 따라 상층에 확장모드가 더욱 발달하는데 이전 겨울철 엘니뇨가 쇠퇴하고 라니냐가 발달할 때 나타나는 인도양 축전기 효과와 유사하였다. 특히 7월에 양의 Pacific North America(PNA) 원격상관이 나타날 때 한반도 남쪽에 고기압성 흐름이, 한반도에 저기압성 흐름이 나타나 저온과 다우 경향을 보였는데 PC1 자체는 한반도 기온과 상관관계가 낮았다. 따라서 확장모드는 5월 인도양 SST가 높을 경우 발달하지만 한반도 기후에 영향을 미치기 위해서는 인도양 축전기 효과(봄~여름철 아열대 서태평양 고기압의 지속 발달 및 7월 동아시아 저기압 발달)와 관련된 기작을 잘 모니터할 필요가 있다. 특히 인도양 축전기 효과에 의해 한반도에 저온과 다우가 나타나는 경향은 7월에 주로 나타났으며 6월과 8월에는 오히려 고온이 나타나는 경우가 있었다.

여름철 남아시아 고기압의 제 2 변동 모드인 남북 모드가 북상하는 경우에는 이전 겨울철부터 약한 라니냐가 지속됨에 따라 인도양 저층에 저기압성 흐름이 지속되며 열대 인도양에 서풍 편차를 열대 서태평양에는 동풍 편차를 유도한다. 따라서 봄철(3~5월) 필리핀해가 해수면 온도가 상승하고 6~7월이 되면 해수면 고온에 의해 저기압성 흐름 및 대류가 활발해진다. 한편 라니냐의 지속에 따라 열대 인도양의 서풍이 북진을 하며 6~7월 인도 몬순이 활발해져 인도 북서부에 많은 강수를 유발한다. 이러한 과정으로 아열대 인도 서태평양에 대류가 발달함에 따라 남북 방향의 파동 전파가 나타나 중위도에 고기압이 발달하게 된다. 이와 동시에 따듯한 대서양 중위도(5~7월)에서 발달한 동서 방향의 대기 파동(e.g., East Atlantic 원격상관 유사)이 7월에 한반도 및 동아시아에 고기압을 더욱 발달시켜 결국 남아시아 고기압이 북상하는 것으로 나타났다. 이때 한반도에는 남북 방향, 동서 방향 고기압의 중첩으로 순압성 고기압이 강하게 발달하여 고온이 나타나게 된다. 7월의 PC2는 한반도 여름철 기온 예측인자인 겨울철 평균 Polar/Eurasia 원격상관 패턴(PE\_DJF)와 상관관계가 높으며 그 기작 또한 유사하기에 SAH의 남북모드와 한반도 기온을 예측할 수 있는 인자로 PE\_DJF 을 제시(한반도 기온과 음의 연관성)하였다.

다양한 예측인자 정보의 통합 기반 마련을 위해 APCC 예보토의 미팅 전 사전 토의를 통한 정성적 통합을 수행하였다. 예측 검증 결과 2022년 기온이 중립이거나 저온인 경우(2월, 10월) 단순 통합에 비해 예측성이 좋았으며 봄철 양의 NAO와 따듯한 인도양의 영향으로 한반도가 고온이었던 반면 여름철에는 기작까지 적중한 예측인자가 없었다. 이러한 결과는 인자의 중요도를 선별하여 예측을 할 경우 예측성 향상에 기여할 수 있음을 의미한다.

3장에서는 미래 기후변화에 따른 한반도 홍수위험도 변화와 태풍 영향 변화에 대해 분석하였다. 먼저 미래 기후변화 시나리오에 따른 하천 권역별 강수 관련 홍수위험도를 평가하였다. 이를 위해서 한반도 상세 기후변화 시나리오를 활용하여 기상청 26개 대권역별 미래 홍수위험도를 현재 기후 대비 100년 재현 빈도 극한 강수량의 변화량으로서 정량화하여 분석하였다. 고탄소 시나리오의 경우 대권역 평균 100년 재현 빈도 극한 강수 변화율은 21세기 전반기(2021-2040), 중반기(2041-2060), 후반기(2081-2100)에 현재 기후 대비 계속적으로 증가하는 것으로 전망되었고, 이에 반해 저탄소 시나리오의 경우 전반기 이후에는 고탄소 시나리오의 극한 강수량 증가에 비해 상당히 감소할 것으로 전망되었다. 위와 같은 결과는 탄소 중립 정책의 효

과로 지구 온난화를 감소시켜서, 홍수 원인이 되는 극한 강수의 감소로 인한 홍수 발생 가능성을 낮출 수 있다는 것을 암시한다. 향후 극한 강수량 강도의 증가로 홍수위험도가 높아질 것으로 전망되는바, 수문 구조물의 방재계획 및 미래 극한 홍수 대비 정책 수립에도 이번 미래 전망의 결과가 반영돼야 할 것으로 보인다. 또한 이 연구에서는 한반도 강수 이벤트들의 군집 분석을 기반으로 하여 강수 관련 대기순환 패턴의 미래 변화 특성 분석을 수행하였다. 첫 번째 군집은 한반도 남동쪽에 양의 지위고도 편차, 북동쪽에 음의 지위고도 편차가 위치하는 특징을 보이고, 두 번째 군집은 오호츠크해 주변에 양의 지위고도 편차가 위치하고 한반도 주변으로 음의 지위고도 편차가 위치하는 구조이다. 전자는 미래 기후변화에 따라 점차 북쪽으로 이동하는 경향성을 보이고 후자는 미래 중반기에 전체 패턴이 북쪽으로 이동하고, 후반기에 다시 한반도 주변으로 이동하는 특성을 보였다. 강수 발생은 전지구 순환 (즉, 지위고도 편차장)에 의해서 결정되는 것이 아니라 기온 등 다른 요소들도 중요하다. 그러므로, 한반도 강수에 영향을 미치는 다양한 요소들을 고려하여, 미래에 한반도 강수가 어떤 요인에 의해 변화하는지 더욱 심도 있는 분석이 필요하다.

전지구 모형을 이용하여 미래 기후 시나리오에서 북서태평양 태풍 활동 지수의 변화 및 태풍 발달에 기여하는 요인들을 분석하였다. 태풍 활동 지수는 저위도에서 감소하고, 고위도에서 증가하며, 고탄소 시나리오 먼미래 기간에 변화가 더욱 강하게 나타났다. 또한 미래에 더욱 북상하며, 동서로 확장하고, 적도 지역에서는 감소하는 것으로 전망되었고, 이는 한반도와 더욱 가까운 중위도 지역에서 태풍이 더욱 많이 생길 것으로 예측할 수 있다. 해수면 온도 또한 가파르게 상승하며, 태풍의 발생에 주요한 요인 중 하나인 연직 바람 시어 또한 한반도 남쪽에서 약해질 것으로 전망하고 있는데, 북서태평양에서 발생하여 한반도 남쪽까지 올라 온 태풍이 빨리 소멸되지 않고 더욱 오래 지속될 수 있는 호조건으로 작용하여 한반도에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 미래 전망을 통해, 한반도와 더욱 가까운 중위도에서의 태풍의 증가가 예상되어 태풍에 대비할 시간이 부족할 수 있음을 시사한다. 또한 동아시아 고해상도 상세 기후 시나리오 자료를 이용하여, 한반도 인근 지역에 영향을 주는 태풍 발생 밀도, 진로 밀도, 강도에 대한 미래 전망을 분석하였다. 태풍 발생 밀도 및 진로 밀도 모두 북서태평양 지역에서 감소하고, 한반도와 가까운 중위도 지역에서 증가하는 것으로 전망하고 있다. 한반도에 직·간접적인 영향을 주는 태풍에 대한 미래 전망을 분석하기 위해, 한반도 내륙 지역을 포함하여 한반도 인근 5개 지역을 선정하였다. 5개 지역 중에서 태풍 진로 밀도의 증가율은 태풍이 거의 오지 않던 중위도 3지역과 4지역에서 가장 크게 나타났다. 또한 태풍의 강도를 나타내는 최저 중심 기압 또한 현재 943hPa 대비 고탄소 시나리오에는 933hPa까지 강해지는 것으로 전망하였다. 현재보다 강한 태풍의 비율은 모든 지역에서 증가하지만 그 중에서도 1지역, 3지역, 4지역에서 크게 증가하는 특징을 보이고, 현재 대비 매우 강한 태풍의 비율은 3지역에서 가장 큰 증가를 보인다. 한반도 5개 지역에 대해 태풍 발생 밀도, 진로 밀도, 중심 기압 등을 지역별, 시나리오별로 분석한 결과, 태풍이 비교적 적게 지나갔던 서해와 내륙 지역에서의 증가가 매우 크게 나타났다. 이는 지금까지 겪지 못했던 이상 경로를 따르는 태풍이 증가할 수 있고, 강도도 더욱 강해지며, 한반도 서해 지역에 태풍이 내습할 경우, 한반도 내륙 지방은 태풍의 위험 반원에 들어 더욱 큰 피해를 야기할 수 있기 때문에, 기후변화 감시·예측·영향 정보가 기후변화 적응 대책, 방재 가이드라인 등과 적극 연계되어 활용될 필요가 있다.

4장에서는 사용자 편의성 강화를 위한 기후분석시스템(CAS)의 개선 및 확대에 관한 사항

을 기술하였다. APCC 기후감시분석시스템(CAS)은 이상기후에 대한 빠른 원인분석과 대처를 위해 기후분석 연구자를 보조하는 시스템으로 관측 자료 및 재분석 자료를 통해 다양한 감시와 분석이 가능하도록 구현된 서비스다. 시스템의 확장 서비스와 신규 서비스 개발을 위해 사용자의 요구사항을 수집하고 연구를 지원하는 서비스를 집중하여 개발하였다. 그리하여, 한반도의 기온 및 강수 월별 예측인자에 대해 과거 통계 정보와 예측 시점의 현황 등을 제공하고 기작 모식도 제공을 통해 사용자가 쉽게 이해할 수 있도록 하였다. 또한, 이런 자료처리 과정을 자동화하여 사용자의 편의성을 향상시켰는데 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 다른 수집 방법을 정의하였다. 자료의 위치정보, 생산기관, 생산기간, 및 파일 포맷 등 연구에 활용될 수 있는 자료인지 검증을 통해 자료관리 프로그램을 개발하였다. 생산기관에 따라 배포되는 자료의 시간이 다르고 배포형식도 상이하여서 수집 후 표준화(Climate 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. 기존에 제공하던 기후모니터링 서비스 부분의 개선 및 고도화를 위해 기후 변수를 추가하여 SST, OLR 등 모니터링을 확대하였으며 한반도에 많은 영향을 미치는 북극의 해빙 변화를 감시할 수 있는 정보를 제공하였다. 시스템 운영의 측면에서는 MVC(Model-View-Controller) 기반의 웹 프레임 워크를 구축하여 통신에 따른 지연을 최소화하도록 구성하였다. MVC 구성을 이중화하여 APEC 기후센터의 망 분리에 따른 서비스의 한계를 극복하여 내부 연구망에서도 기후 감시분석 시스템의 사용이 가능해짐에 따라 빠른 분석과 편리한 분석이 가능하게 되었다.

## 사사

이 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.

## References

- 건설교통부, 2000: 한국 확률강우량도 작성.
- 국립기상과학원, 2018: 한반도 100년의 기후변화. 31pp.
- 국립기상과학원, 2020: 한반도 기후변화 전망 보고서: SSP1-2.6/SSP5-8.5에 따른 기후변화 전망. 38 pp.
- 기상청, 2022: 장마 백서 2022. 394pp.
- 환경부, 2019: 홍수량 산정 표준 지침. 52pp.
- APCC, 2020: 현업 장기예보 정확도 향상을 위한 기상청 지원 체계 강화
- APCC, 2021: 기후 감시 및 분석 체계 구축을 통한 이상기후 대응 역량 강화
- APCC, 2021: 기후 감시 및 분석 기반의 장기예보 가이드런스
- Barber, J., and M. Latif, 2003: The impact of decadal-scale Indian Ocean sea surface temperature anomalies on Sahelian rainfall and the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, **30**(22).
- Bister, M., and K. A. Emanuel, 2002: Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity 1. Interannual to interdecadal variability, *Journal of Geophysical Research*, **107**(D24):ACL 26-1- ACL26-15.
- Bollasina, M. A., and G. Messori, 2018: On the link between the subseasonal evolution of the North Atlantic Oscillation and East Asian climate. *Climate Dynamics* **51**(9), 3537-3557.
- Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock, 2015: Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping. how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, **28**, 6938-6959.
- Cassou, C., L. Terray, J. Hurrell, and C. Deser, 2004: North Atlantic winter climate regimes: Spatial asymmetry, stationarity with time, and oceanic forcing. *Journal of Climate*, **17**, 1055-1068.
- Cavalieri, D. J., C. L. Parkinson, P. Gloersen, and H. J. Zwally, 1996: updated yearly, Sea ice concentration from Nimbus-7 SMMR and SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1. Boulder, Colorado, USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
- Dawson, A., and T. N. Palmer, 2015: Simulating weather regimes: Impact of model resolution

- and stochastic parameterization. *Climate Dynamics*, **44**, 2177-2193.
- Ding, Q., and B. Wang, 2005: Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *Journal of Climate*, **18**(17), 3483-3505.
- Emanuel, K. A., and D. S. Nolan, 2004: Tropical cyclone activity and the global climate system, Paper presented at the 26th conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, May 2.
- Estilow, T.W., A. H. Young, and D. A. Robinson, 2015: A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring. *Earth System Science Data*, **7**, 137-142.
- Fereday, D. R., J. R. Knight, A. A. Scife, and C. K. Folland, 2008: Cluster analysis of North Atlantic-European circulation types and links with tropical sea surface temperatures. *Journal of Climate*, **21**, 3687-3703.
- Flohn, H., 1960: Recent investigations on the mechanism of the “Summer Monsoon” of Southern and Eastern Asia. Proc. Symp. Monsoon of the World, New Delhi, Hind Union Press, 75-88.
- Ha, K. J., J. H. Yeo, Y. W. Seo, E. S. Chung, J. Y. Moon, X. Feng, , ... and C. H. Ho, 2020: What caused the extraordinarily hot 2018 summer in Korea?. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II.
- Hartigan, J. A., and M. A. Wong, 1979: Algorithm AS 136: a k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, **28**, 100-108.
- Huang, B., V. F. Banzon, E. Freeman, J. Lawrimore, W. Liu, T. C. Peterson, T. M. Smith, P. W. Thorne, S. D. Woodruff, and H.-M. Zhang, 2014: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 4 (ERSST.v4): Part I. Upgrades and intercomparisons. *Journal of Climate*, **28**, 911-930.
- Huang G, X. Qu, and K. Hu, 2011: The impact of the tropical Indian Ocean on South Asian high in boreal summer. *Adv. Atmos. Sci.*, **28**, 421-432
- Huang, J., Higuchi, K., & Shabbar, A. (1998). The relationship between the North Atlantic Oscillation and El Nino-Southern Oscillation. *Geophysical Research Letters*, **25**(14), 2707-2710.
- Hurrell, J. W., Y. Kushnir, G. Ottersen, and M. Visbeck, 2003: An overview of the North Atlantic oscillation, *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, **134**, 1-36
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.

Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-471.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.K. Yang, J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter 2002: Ncep-doe amip-2 reanalysis (r-2). *Bulletin of American Meteorological Society*, **83**(11), 1631-1643. <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>.

Kim, D.-H., and co-authors, 2021: Future projection of extreme climate over the Korean peninsula using multi-RCM in CORDEX-EA Phase 2 Project, *Atmosphere*, **31**, 607-623 (in Korean with English abstract).

Kim, H. K., B. K. Moon, M. K. Kim, J. Y. Park, and Y. K. Hyun, 2021: Three distinct atmospheric circulation patterns associated with high temperature extremes in South Korea. *Scientific Reports*. **11**, 12911.

Kim, J. H., C. H. Ho, M. H. Lee, J. H. Joeng, and D. Chen, 2006: Large increase in heavy rainfall associated with tropical cyclone landfalls in Korea after the late 1970s. *Geophysical Research Letters*. **33**, L18706.

Kim, J.-U., M.-k. Kim, and Y.-H. Kim, 2013a: Improvement of modified Korean parameter-elevation regressions an independent slopes model based on independent temperature lapse rate. *Journal of Climate Research*, **8**, 203-215 (in Korean with English abstract).

Kim, J.-U., J. Sang, M.-K. Kim, Y.-H. Byun, D.-H. Kim, and T.-J. Kim, 2022: Future climate projection in South Korea using the high-resolution SSP scenarios based on statistical downscaling. *Journal of Climate Research*, **17**, 89-106 (in Korean with English abstract).

Kim, M.-K., M.-S. Han, D.-H. Jang, S.-G. Baek, W. S. Lee, Y.-H. Kim, and S. Kim, 2012: Production technique of observation grid data of 1km resolution. *Journal of Climate Research*, **7**, 55-68 (in Korean with English abstract).

Kim, M.-K., D.-H. Lee, and J.-U. Kim, 2013b: Production and validation of daily grid data with 1km resolution in South Korea. *Journal of Climate Research*, **8**, 12-25 (in Korean with English abstract).

Kim, S., and M.-K. Kim, 2018: Versification of PRIDE model version 2.0. *Journal of Climate Research*, **13**, 71-86 (in Korean with English abstract).

- Koch, S. E., M. DesJardins, and P. J. Kocin, 1983: An interactive Barnes objective map analysis scheme of use with satellite and conventional data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 1487–1503.
- Krzanowski, W. J., and Y. T. Lai, 1988: A criterion for determining the number of groups in a data set using sum-of-squares clustering. *Biometrics*, **44**, 23–34.
- Krishnamurti, T. N., S. M. Daggupati, J. Fein, M. Kanamitsu, and J. D. Lee, 1973: Tibetan high and upper tropospheric tropical circulation during northern summer. *Bulletin of American Meteorological Society*, **54**, 1234–1239.
- Lee, H. D., K. H. Min, J. H. Bae, and D. H. Cha, 2020: Characteristics and comparison of 2016 and 2018 heat wave in Korea. *Atmosphere*, **30**, 1–15.
- Linderholm, H., and coauthors, 2011: Interannual teleconnections between the summer North Atlantic Oscillation and the East Asian summer monsoon. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, **116**(D13).
- Li, C., and J. Sun, 2015: Role of the subtropical westerly jet waveguide in a southern China heavy rainstorm in December 2013. *Advances in Atmospheric Sciences*, **32**(5), 601–612.
- Liebmann, B., and C.A. Smith, 1996: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bulletin of American Meteorological Society*, **77**(6), 1275–1277.
- Munoz, A. G., X. Yang, G. A. Vecchi, A. W. Robertson, and W. F. Cooke, 2017: A weather-type-based cross-time-scale diagnostic framework for coupled circulation models. *Journal of Climate*, **30**, 8951–8972.
- 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>.
- Ning, L., J. Liu, and B. Wang, 2017: How does the South Asian High influence extreme precipitation over eastern China?, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, **122**, 4281–4298, doi:10.1002/2016JD026075.
- O’Neill, B. G., and coauthors, 2014: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, **122**, 387–400.
- Qu, X., and G. Huang, 2012: An enhanced influence of tropical Indian Ocean on the South Asia high after the late 1970s. *Journal of climate*, **25**, 6930–6941.
- Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes, and W. Wang, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, **15**(13), 1609–1625.

[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2).

- Seller, A. A., and coauthors, 2019: UKESM1: Description and evaluation of the U.K. earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**, 4513–4558.
- Straus, D. M., S. Corti, and F. Molteni, 2007: Circulation regimes and SST forcing: Results from large GCM ensembles. *Journal of Climate*, **17**, 1641–1656.
- Wei, W., Zhang, R., Wen, M. et al. 2014: Impact of Indian summer monsoon on the South Asian High and its influence on summer rainfall over China. *Climate Dynamics*, **43**, 1257–1269, <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1938-y>.
- Wei, W., R. Zhang, M. Wen, B. J. Kim, and J. C. Nam, 2015: Interannual variation of the South Asian high and its relation with Indian and East Asian summer monsoon rainfall. *Journal of Climate*, **28**(7), 2623–2634.
- WMO, 2022: United in Science 2022: A multi-organization high-level compilation of the most recent science related to climate change, impacts and responses. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=11308](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11308).
- Xie, S.-P., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang, and T. Sampe, 2009: Indian Ocean Capacitor Effect on Indo–Western Pacific Climate during the Summer following El Niño. *Journal of Climate*, **22**, 730–747.
- Yang, J., Q. Liu, S. P. Xie, Z. Liu, and L. Wu, 2007: Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, **34**, L02708, doi: 10.1029/2006GL028571.
- 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.
- Yeo, S.-R., Y.-Y. Lee, and J.-S. Kug, 2022: Three distinct convective footprints over the Indo–western Pacific that affect high temperature extreme events in Korea during boreal autumn. *Climate dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s00383-022-06278-1>.
- Zhao, P., X. Zhang, Y. Li, and J. Chen, 2009: Remotely modulated tropical–North Pacific ocean–atmosphere interactions by the South Asian high. *Atmospheric Research*, **94**, 45–60.

## 부록 1. “우리나라 영향 태풍 변화분석” 기상청 송부자료

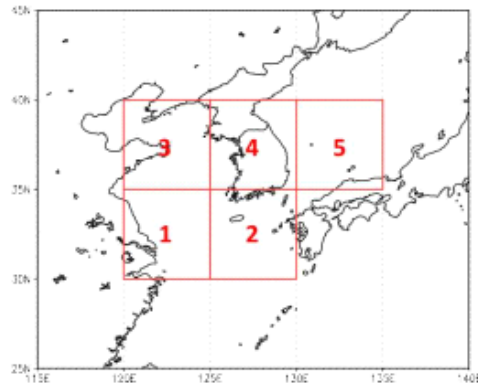
### 우리나라 영향 태풍 변화분석

#### - 고탄소 시나리오에서 우리나라 태풍진로밀도 85 % 증가 -

- 기상청(청장 유희동)과 아시아태평양경제협력체(APEC) 기후센터(원장 신도식)는 우리나라에서 재난 및 인명피해의 주요 원인 중의 하나인 태풍진로 밀도에 대한 미래변화 분석결과를 발표하였다.
- 태풍진로밀도에 대한 미래 전망은 **고해상도(25km) 동아시아 기후변화 시나리오\***자료를 사용하였고, 태풍발생과 연관된 대기순환 패턴의 변화는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 제6차 평가보고서에 사용된 신규 기후변화 시나리오 자료를 활용하였다.
- \* 저탄소 시나리오(SSP1-2.6): 화석연료 사용을 최소화하고 획기적으로 탄소 배출량을 감축  
고탄소 시나리오(SSP5-8.5): 현재와 유사하거나 좀 더 높은 탄소 배출 지속
- 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)의 경우, **미래의 태풍진로밀도는 현재 기후(1979~2014년) 대비 21세기(2015~2100년)에 최대 85%까지 증가할 것**으로 전망된다.
- 우리나라를 포함하여 주변 해역을 5개 지역으로 구분하여, 각 지역을 지나가는 태풍진로밀도에 대한 미래(2015~2100년) 변화를 분석하였다. 한반도 영향 태풍진로밀도는 불확실성이 매우 커지고 있어 더욱 예측이 어려워지고 있지만, 현재 기후 대비 **전 기간에 대해 증가**가 예상된다.
- 고탄소 시나리오에서 한반도 주변 지역을 지나가는 태풍진로밀도는 현재 기후 대비 **적게는 12%, 많게는 85%까지** 영향이 증가할 것으로 보인다.
- 지역별로는 3지역 서해(85%) > 4지역 내륙(78%) > 1지역 남서해(30%) > 5지역 동해(25%) > 2지역 남해(12%)순으로 크게 상승할 것으로 전망되었다.
- 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 경우, **미래의 태풍진로밀도는 현재 대비 21세기에 적게는 9%, 많게는 65%까지** 증가할 것으로 전망된다.
- 지역별로는 3지역 서해(65%) > 4지역 내륙(57%) > 5지역 동해(29%) > 1지

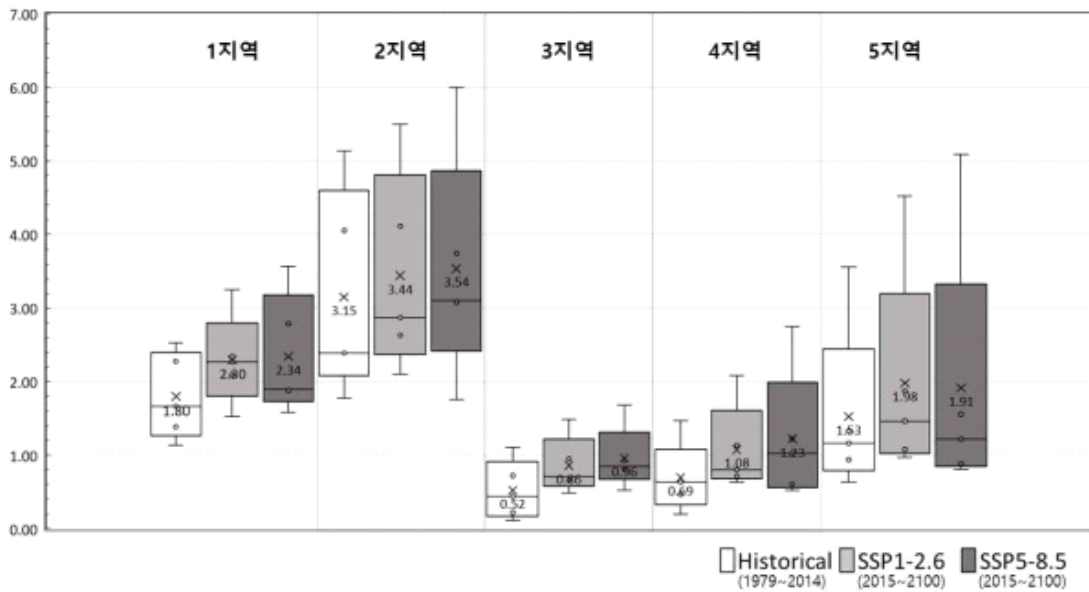
역 남서해(27%) > 2지역 남해(9%)순으로 크게 상승할 것으로 전망되었다.

- 두 가지 탄소배출 시나리오에서 현재 대비 상승폭은 고위도(서해, 내륙, 동해) 지역에서 더 크게 나타났다.



[그림 1] 태풍진로밀도 계산을 위한 한반도 주변 해역 5지역

### 태풍 진로 밀도 미래변화



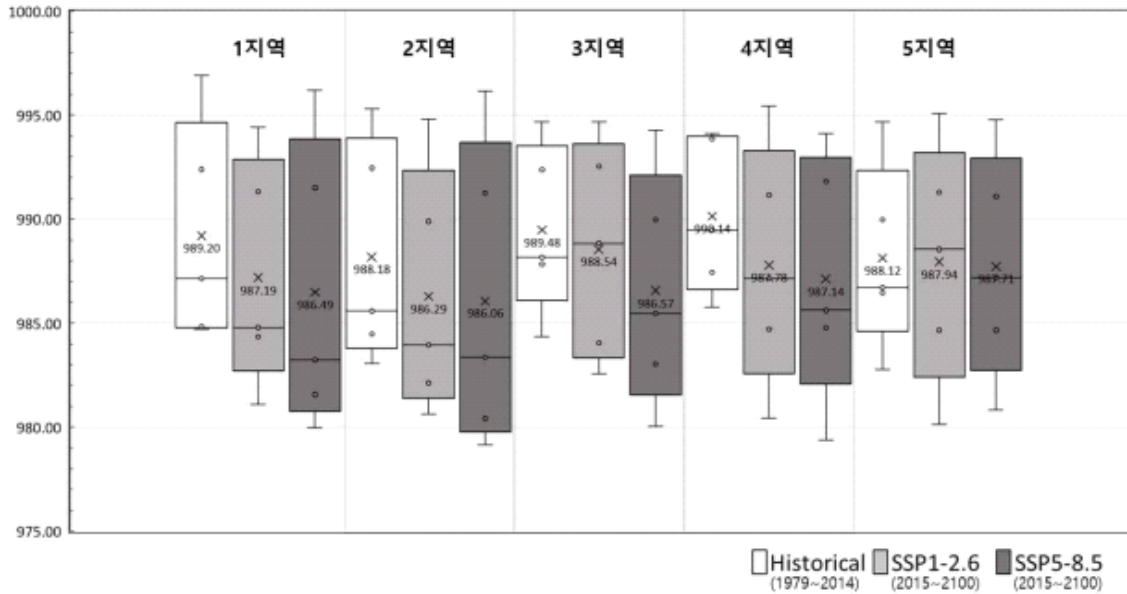
[그림 2] 지역별 현재(1979~2014) 대비 미래 태풍진로밀도 전망

원색:현재 기후, 연회색:저탄소 시나리오, 진회색:고탄소 시나리오

- 고탄소 시나리오에서는 한반도 인근 주변 해역 5개 지역에 대한 태풍의 중심기압을 현재 대비 더욱 낮게 전망하고 있으며, 현재보다 더욱 강한 태풍의 영향을 받을 것으로 전망된다.

- 태풍 중심 기압은 5개 지역에서 모두 현재 대비 적게 예상하고 있으며, 저탄소 시나리오에서보다 탄소 배출이 많은 고탄소 시나리오에서 더욱 감소폭이 크므로, 더욱 태풍이 강한 태풍이 빈번해 질 것으로 전망된다.

### 태풍 강도 미래변화



[그림 3] 지역별 현재(1979~2014) 대비 미래 태풍 강도 전망

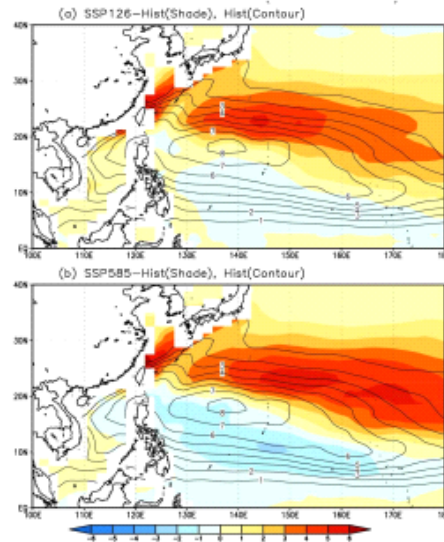
원색:현재 기후, 연회색:저탄소 시나리오, 진회색:고탄소 시나리오

- 고탄소 시나리오에 따르면, 태풍발생 기상조건\*이 호조건을 만들 것으로 전망되고 있으며, 한반도 주변의 태풍진로밀도도 증가할 것으로 전망된다.

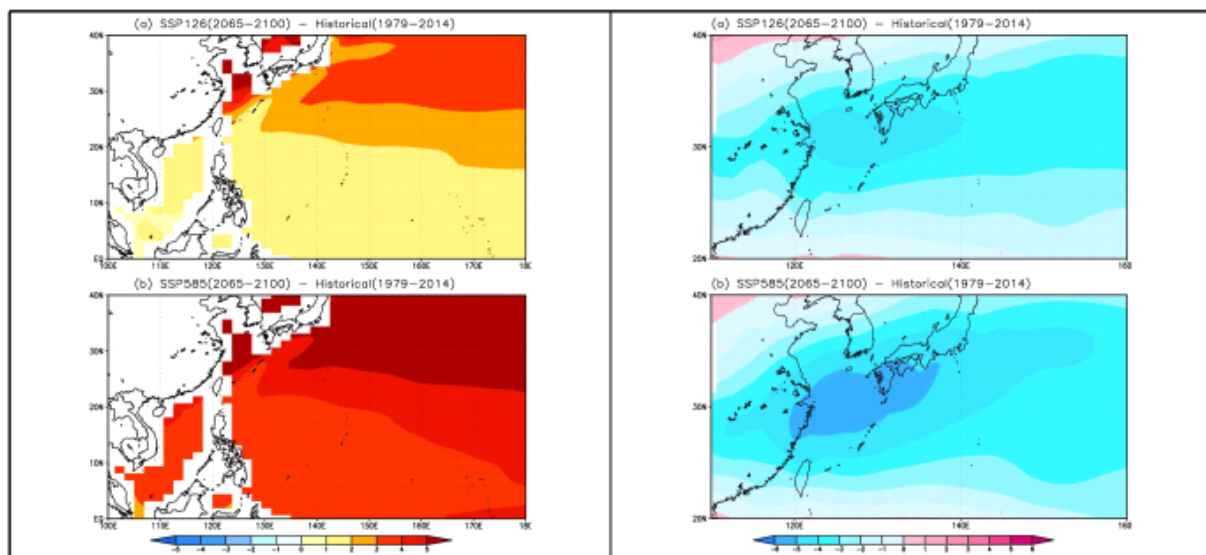
\* 지구온난화로 고위도지역의 해수면온도상승과 연직바람시어의 약화로 태풍발달환경 조성

- 미래 태풍의 발생 위도가 중위도로 확장할 확률이 높아져서, 한반도 태풍에 대한 대비시간이 줄어들 것으로 예상된다.
- 태풍 발생 지역인 북서태평양 해수면 온도의 미래 변화는 저위도보다는 고위도에서, 저탄소보다는 고탄소 시나리오에서 증가가 클 것으로 예상된다.
- 한반도 및 일본 남쪽 해역(북위25~35, 동경120~140)에서의 연직 바람 윈드 시어는 고탄소 시나리오에서는 저탄소 시나리오에서보다 더욱 크게 감소하며 현재 대비 21세기(2015~2100년)에는 16% 감소하며, 저탄소 시나리오에서는 현재 대비

14% 감소하는 것으로 전망된다. 연직 바람 시어는 태풍 잠재 발생 강도를 결정하는 변수 중 하나로 21세기 전반기와 후반기 모두 한반도 주변에서 연직 바람 시어가 약해지며, 태풍이 빨리 소멸되는 것이 아니라 오래 유지할 수 있는 호조건을 만들 것으로 예상된다.



[그림 3] 북반구 태풍 계절(JASON)에 대한 현재 기후 대비 태풍 활동 지수(GPI) 먼미래 변화.  
(위: 저탄소, 아래: 고탄소, 선: 현재 기후, 색:현재 대비 미래 변화)



[그림 4] 북반구 태풍 계절(JASON)에 대한 해수면 온도와 연직 바람 시어의 현재 기후 (1979-2014) 대비 먼미래 (2065-2100) 변화 전망 (위: 저탄소, 아래: 고탄소)